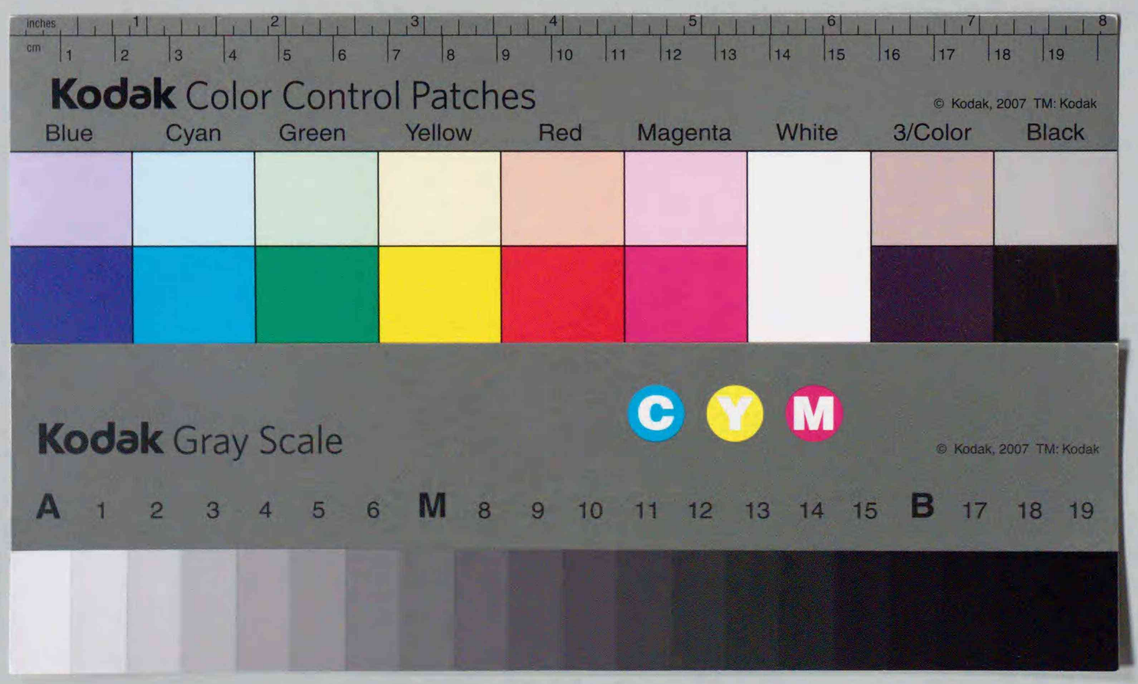
HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	結氷河川に建設される橋脚の設計法に関する研究
Author(s)	原, 文宏
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第4084号
Issue Date	1997-03-25
DOI	https://doi.org/10.11501/3122242
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/51408
Type	doctoral thesis
File Information	000000307433.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

結氷河川に建設される橋脚の設計法に関する研究

原　文宏



①

結氷河川に建設される橋脚の設計法に関する研究

原　文宏

目　次

第１章　序　論……1
１．１　研究の目的と構成……1
　１．１．１　研究目的
　１．１．２　研究の構成
１．２　結氷河川と諸問題……5
　１．２．１　結氷河川の水理特性
　１．２．２　北方圏諸国における結氷河川問題
　１．２．３　我が国における結氷河川問題
　１．２．４　橋脚の設計に当たり氷に関して考慮すべき事項
１．３　各国の橋梁設計基準における氷関連項目……25
１．４　結氷河川に建設される橋脚の設計法に関する既存研究……29
　１．４．１　氷力
　１．４．２　摩耗
　１．４．３　アイスジャム
　１．４．４　振動
１．５　要約……39
１．６参考文献……41

第２章　氷盤による橋脚の摩耗……44
２．１　概説……44
２．２　摩耗した橋脚等の現地測定……44
　２．２．１　北海道の道路橋
　２．２．２　海洋構造物
　２．２．３　氷盤移動による構造物の摩耗量
２．３　摩耗試験装置の評価……52
　２．３．１　氷盤移動による摩耗試験の考え方
　２．３．２　各種摩耗試験装置の摩耗メカニズムと特徴
　２．３．３　各種摩耗試験装置の評価
２．４　各種材料の摩耗特性……59
　２．４．１　コンクリート
　２．４．２　鋼板
　２．４．３　合成材料
　２．４．４　石材
　２．４．５　各種材料の比較

２．５　氷盤と橋脚表面の接触圧力の影響……75
２．５．１　接触圧力と摩耗速度
２．５．２　接触圧力と氷盤の貫入速度
２．５．３　橋脚 Nose の傾斜角と氷力
２．５．４　橋脚の断面形状と接触圧力
２．５．５　接触圧力と氷盤の一軸圧縮強度
２．６　淡水氷の強度の影響……92
２．６．１　氷盤の採取位置と試験方法
２．６．２　天塩川の氷盤強度試験(1992 年)
２．６．３　天塩川の氷盤強度試験(1993 年)
２．６．４　桂沢湖の氷強度
２．６．５　道内の河川氷や湖沼氷の強度特性
２．７　氷盤中の固形成分の影響……107
２．７．１　固形成分濃度と摩耗速度
２．７．２　固形成分の中央粒径と摩耗速度
２．７．３　氷盤中の固形成分に関する調査結果
２．７．４　道内の河川や湖沼氷中の固形成分含量
２．８　コンクリート製橋脚の摩耗量の推定と対策……128
２．８．１　摩耗量の推定方法
２．８．２　氷盤の移動距離
２．８．３　旧羽幌線天塩川橋梁橋脚でのケーススタディー
２．９　コンクリート製橋脚の摩耗対策……134
２．９．１　摩耗対策が必要な地域
２．９．２　橋脚の摩耗防止対策
２．９．３　被覆工法
２．９．４　かぶり厚増加工法
２．９．５　接触圧力低減工法
２．１０　結論……146
２．１１　参考文献……150

第３章　橋脚位置でのアイスジャムの形成……156
３．１　概説……156
３．２　アイスジャム発生河川の現地調査……157
３．２．１　天塩川でのブレークアップの観測
３．２．２　発寒川でのアイスジャムの発生
３．２．３　アイスジャムの発生形態
３．３　定着氷先端部でのアイスジャム発生に関する基礎実験 176
３．３．１　定着氷先端部での氷盤の運動
３．３．２　浮氷盤の流体抵抗
３．３．３　定着氷下面での氷と氷の摩擦係数
３．４　橋脚位置での氷盤によるアーチ形成条件に関する実験‥208
３．４．１　実験方法
３．４．２　フルードの相似則の検証
３．５　氷盤の大きさが均一な場合のアーチ形成条件……217
３．５．１　実験条件
３．５．２　橋脚 Nose が直立の場合
３．５．３　橋脚 Nose が傾斜の場合
３．５．４　アーチの形状
３．６　氷盤の大きさが不均一な場合のアーチ形成条件……225
３．６．１　実験条件
３．６．２　橋脚 Nose が直立の場合
３．６．３　橋脚 Nose が傾斜の場合
３．７　橋脚位置での氷盤によるアーチ形成と氷盤形状の関係‥233
３．７．１　円形の氷盤の場合
３．７．２　円形と矩形の氷盤が混在した場合
３．８　発寒川でのアイスジャム発生に関する模型実験……236
３．８．１　実験条件
３．８．２　実験結果
３．９　氷盤によるアーチ形成を考慮した橋脚間隔の決定法‥‥239
３．１０　結論……241
３．１１　参考文献……247

第４章　結　論……251
４．１　第１章の要約……251
４．２　第２章の結論……253
４．３　第３章の結論……258
４．４　今後の課題……264

第１章　序論

１．１　研究の目的と構成

１．１．１　研究目的

（１）研究の背景

地球上で１月の平均気温が０℃以下となる地域に住む人口は、約10億人といわれており、寒冷地という厳しい気象条件の中で生活や産業活動を営んでいる。そこには、移動のための交通手段が必要であり、自動車や鉄道による陸上交通網が整備され、河川や海峡を横断する橋梁が多数建設されている。

また、極地、亜極地に石油・天然ガス等のエネルギー資源の埋蔵が確認され、その一部がシベリアやアラスカで採掘されるにいたり、資材輸送や採掘した資源輸送のための陸上交通路の整備が必要となり、極地の大河川にも橋梁が建設されるにいたった。

このような、寒冷地域の河川のほとんどは冬期間結氷し、建設される水理構造物や橋脚は氷盤による影響をうける。特に橋脚は、氷盤の影響を直接受ける位置に建設されることからその影響は無視できない。

事実、カナダやアメリカ合衆国の北部、北欧、シベリア等では氷盤によって橋脚に著しい被害を受けた事例や橋脚位置で発生したアイスジャムによる洪水で、近隣の市街地や道路が氷盤や雪泥で埋め尽くされるといった災害が発生している。

我が国では、北欧、シベリア、北米等と比較して冬期間の気象条件がそれほど厳しくないことと、大河川も少ないことから、氷盤によってコンクリート製橋脚が倒壊したり、滑動するような事態は発生していない。しかし、我が国の最北に位置し、南から北に向かって流れる寒地河川である天塩川や流氷の来襲するオホーツク海沿岸の河口部にある橋脚で、氷盤の接触が原因の摩耗被害が比較的広い範囲に発生し、摩耗の進行と凍結融解作用によって補修を余儀なくされている橋脚も少なくない。

このような河川結氷に起因して発生する橋脚と氷盤の諸問題について、北米や旧ソ連の橋梁設計基準の中で一部取り込まれているものの、体系的に整理された設計法はないのが現状である。

（２）研究目的

本研究では、このような結氷河川に建設される橋脚の氷盤に関わる設計法について体系的に整備することを目的としている。
結氷河川における氷盤による橋梁の被害状況についてカナダにおける調査結果や北海道において著者等が行った調査をもとに、設計上検討が必要な項目について整理を行った。その結果は以下のとおりである。

①橋脚へ作用する水平方向氷力
②橋脚へ作用する鉛直方向氷力
③橋脚の氷盤移動による摩耗
④アイスジャムによる氷力及び局所洗掘
⑤アイスジャムによる河道閉塞(洪水)
⑥氷盤の連続的な破壊による橋脚の振動

水平方向氷力については、各国の橋梁設計基準に具体的な規定があるほか、数々の氷力式が提案されており、各提案式の評価が行われ佐伯等の式が妥当とされている（中澤等 1986）。また、鉛直方向氷力についても構造物と氷盤の凍着形態ごとに算定式が確立されいる上、我が国の氷象条件からみて、コンクリート製橋脚が鉛直氷力で被害を受けることはほとんどないといえる。ただし、ダムの取水塔や桟橋の支柱などスレンダーな水理構造物については、充分に考慮する必要がある。

橋脚の氷盤移動による摩耗は、各国の設計基準のなかでも対策の必要性についての記述はあるものの、具体的な設計法や対策工法について述べられているものはない。摩耗メカニズムについては、海氷と海洋構造物の問題として佐伯等(1985)や浅井等(1986)によって明らかにされている。また、淡水氷については、著者(原等 1990)や高橋等(1991)の研究があるものの、コンクリート以外の材料の摩耗特性、摩耗対策の設計法、設計定数等については確立されていない。

橋脚位置で発生するアイスジャムは、氷力として橋脚や上部構造に作用する場合と河道を狭くすることによる橋脚周辺の局所洗掘、完全な河道閉塞による洪水等がある。設計上は、アイスジャムを発生させない方法とアイスジャムが発生しても充分な強度や橋脚根入れ、河道空間を確保する等の方法があるが、その発生メカニズムや形態等に未知な部分が多く、ほとんど確立されていないのが現状である。

橋脚位置での氷盤の連続的な破壊による橋脚の振動は、振動が橋脚を拘束した状態で発生するため、変形量の大きい、構造物の破壊に結びつくような共振現象が発生する確率はほとんどない。どちらかといえば、振動による疲労破壊に注意すべきである。しかし、氷盤による

橋梁の被害事例をみても、振動で破壊したり、損傷があった報告はなく、一般的なコンクリート製橋脚では考慮する必要はないと考えられる。ただし、スレンダーな橋脚の場合や極地のような氷象条件の厳しい大河川に高橋脚を建設する場合などには検討をする必要がある。

以上のことから、結氷河川の橋脚の設計法において確立すべき主要な項目は、以下の３点と考えられる。

①橋脚に作用する水平方向氷力に対する設計法
②橋脚の氷盤移動による摩耗対策の設計法
③橋脚位置でのアイスジャム対策の設計法

①については、水平方向氷力の算定法がほぼ確立しており、それらの水平力に関する橋脚の安定計算や断面計算の手法は確立されているので、本研究では、序論において既存文献から概要をまとめるだけにとどめる。

本研究では②の摩耗対策の設計法と③のアイスジャム対策に主眼をおいて結氷河川に建設される橋脚の設計法について研究を行う。

なお、橋脚周辺で発生するアイスジャムについては、著者等の調査によれば大きく２通りのパターンがある。一つは、橋脚周辺は開氷状態の時、橋脚位置で浮氷盤によるアーチが形成され、後続の浮氷盤をトラップして発達しアイスジャムにいたる場合。もう一つは、橋脚周辺に定着氷がある状態で定着氷先端で浮氷盤のアンダーターニングによる潜り込みが連続的に発生し、アイスジャムを形成する。

前者については、橋脚による氷盤のアーチ形成条件を明かにし、アーチを形成しない橋脚間隔の決定法の確立することを目的とし、後者については、定着氷先端部でのアイスジャム形成に関する基礎的な研究によりその発生メカニズムを把握することを目的とした。

１．１．２　研究の構成

第１章序論では、結氷河川の水理特性を整理するとともに北方圏諸国や我が国における氷盤移動による橋梁の被害状況を把握し、設計上考慮すべき事項をまとめた。また、米国、カナダ、旧ソ連の橋梁設計基準から氷に関する部分を抽出し、どの程度考慮されているのかを把握するとともに、設計上考慮されるべき事項について既存研究の現状を整理し、本研究において取り組むべき項目を示した。

第２章では、氷盤による橋脚の摩耗対策について摩耗試験装置の評価、各種材料の摩耗特性、摩耗メカニズム、設計定数としての淡水氷の強度、氷盤中の固形成分濃度等を室内試験及び野外調査から明らかにした。また、それらを基に橋脚の摩耗量の推定方法を確立し、現地調査による年間摩耗量と良い一致見た。最後に摩耗対策の提案を行い、設計法について解説した。

第３章では、橋脚位置でのアイスジャム対策について、天塩川及び発寒川での野外調査結果から、アイスジャムの発生形態を分類し定着氷先端部でのアイスジャムの発生メカニズムの把握と橋脚位置での浮氷盤によるアーチ形成条件を明確にした。定着氷先端部でのアイスジャムの発生メカニズムとして、定着氷の先端形状と浮氷盤の運動形態の関係、浮氷盤の形態と流体抵抗、定着氷下面での氷と氷の摩擦係数について実際の河川氷を使った室内試験と野外試験によって把握した。

橋脚位置でのアーチ形成条件ついては、実験縮尺を変えてフルードの相似則が成り立つことを検証し、橋脚のNose形状、断面形状、流速、氷盤の大きさ、混合率、形状などを変化させた実験を行い、アーチ形成条件を明らかにした。それらを使って、半円形の直立Nose橋脚の流速ごとのアーチ形成限界線を作成し、アーチを形成しない橋脚スパンの決定法を導いた。また、琴似発寒川のアイスジャム発生が長栄橋の橋脚位置での氷盤によるアーチ形成であることを検証するための実験を行い、その可能性が極め高いことを検証するとともに、アーチを形成しない橋脚間隔について検証を行った。

第４章では、本研究の結論であって、各章で述べた事項を本章においてまとめた。

１．２　結氷河川と諸問題

１．２．１　結氷河川の水理特性

(１)河川結氷の現状

気温が０℃以下になると、河川湖水も凍る。世界的には、河川湖水を交通運輸の手段として利用しているところも多いので、冬期間の結氷は人間生活に大きな影響を与える。図 1.1 に北半球での河川や湖沼の結氷状況を大まかに示す。

年間 180 日以上も凍ったままの地域がアラスカ・カナダ・北欧・ソ連に広く分布する。この図では日本が 100 日間以上凍る範囲に入るか入らないかはっきりしていない。わが国でも、北海道や東北などの寒冷地の河川においては中流から上流域にかけて冬期結氷 100 日を越える地域が多い。北海道は 12 月には道南の一部と日本海側の一部を除いて、月平均気温はマイナスとなり、１月～２月は全域がマイナスとなり、河川や湖沼が凍結する。

北海道の個々の河川の結氷状況についての最近の調査結果は、山下等(1993)のものがある。この調査結果によると、河口部まで全面結氷する河川が道南を除いてかなり多くあることがわかる。山下等(1993)の河川結氷図を図 1.2 に示す。かなり古い調査であるが山辺(1968)の結果と比較しても完全結氷している箇所はほぼ一致している。また、都市や工場の温排水が原因と思われる石狩川中流部や十勝川中流部の部分結氷箇所も一致している。以上のことから、北海道の河川で結氷しない地域は日高山脈、大雪山を中心とする道央山系と道南地方である。他の地域は何らかの形で河川は結氷する。

また、山下等(1993)による北海道の主要水系別の完全結氷率によると、天塩川、留萌川等の道北の河川や渚滑川、湧別川、常呂川などのオホーツク海沿岸に流れこむ河川で結氷率が高く、氷盤による被害橋梁の分布と似ている。

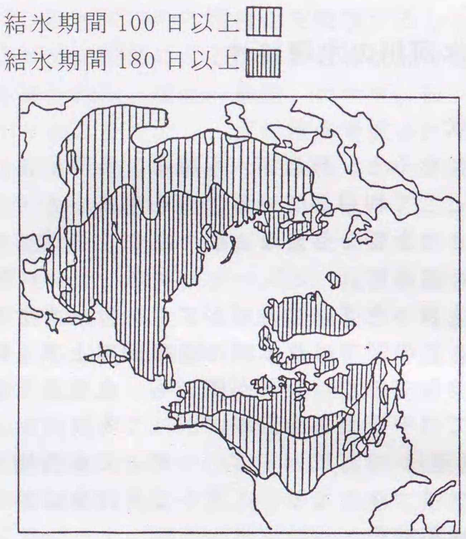


図 1.1　北半球における河川湖沼の結氷期間が 100 日を越える地域
(R. E. Bates, M. A. Billelo 1966)

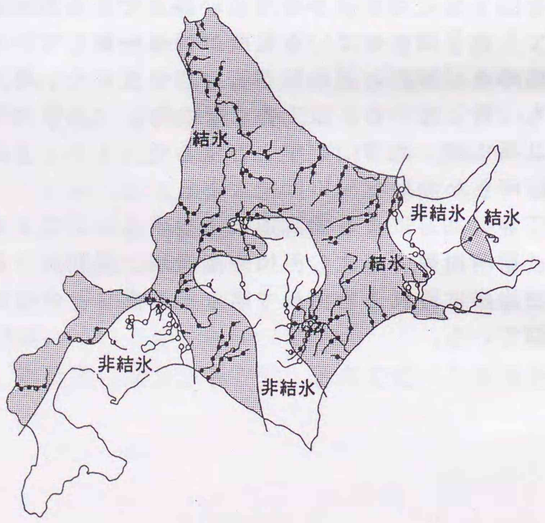


図 1.2　北海道の河川結氷図（山下等 1993）

(2)結氷過程

北海道における河川結氷は、水温の低下とともに、場所によっては12月上旬に結氷をはじめる。河川の結氷過程を簡単に述べると以下のようになる。

①河川の結氷は、過冷却した河川水から大量のフラジルアイス(晶氷)が発生し、それらが凝集して形成される泥状晶氷、或いは降雪による雪泥、さらにこれらの付着、結氷が進んだ蓮葉氷の流下からはじまる。

②その後、結氷板が形成されるが、結氷の仕方には２種類ある。河床勾配が急で流速が速く晶氷が滞留出来ない時、結氷が流速の小さい両岸より流心に向かって徐々に成長する「岸氷」の場合と大量に流下する晶氷や蓮葉氷等が暖流部で滞留し、河川全幅にわたって、短時間に凍結する「滞留氷」の場合がある。

③結氷後の氷厚の増加は、一般に日平均気温の積算寒度（℃・day)の平方根に比例するというStefanの法則があてはまるとされているが、降雪の多いわが国では、気温の他に、降雪量の影響も大きい。

④解氷は、流量の増加と日射量の増加による氷盤の強度低下によって突発的に発生する場合が多く、氷の劣化についての調査が不十分であり、解氷を予測するのは現状では難しいが、３月末から４月の初めにかけておこる。ここで、①の状態を図 1.3 に表す。フラジルアイス(晶氷)は流氷中のシルトや粘土等を核として発生し発生中の水温は 100 分の数度程度の過冷却の状態にある。その後、晶氷同志がフロック状に凝集して大きさを増し水面に浮上して流下する。これは、河川の一般的な結氷過程であるが、その時の降雪等の気象条件、水理条件の違いによって、様々な結氷過程がある。図 1.4 は、気象及び水理条件から、氷の発生から成長にいたる過程を系統的に分類した図である。

また、山口(1990)は北海道の流量観測地点について結氷パターンを分類し、12月の平均気温と河川勾配をパラメーターに両パターンの発生領域を示している（図 1.5）。この図によれば、気温が低いほど、勾配が緩いほど、結氷は発生しやすく、急流河川では流下する氷が滞留することが出来ないため岸氷のみが発生する。また、図の点線より右では滞留したフラジルアイスにより結氷し、左側では岸氷によって結氷する。

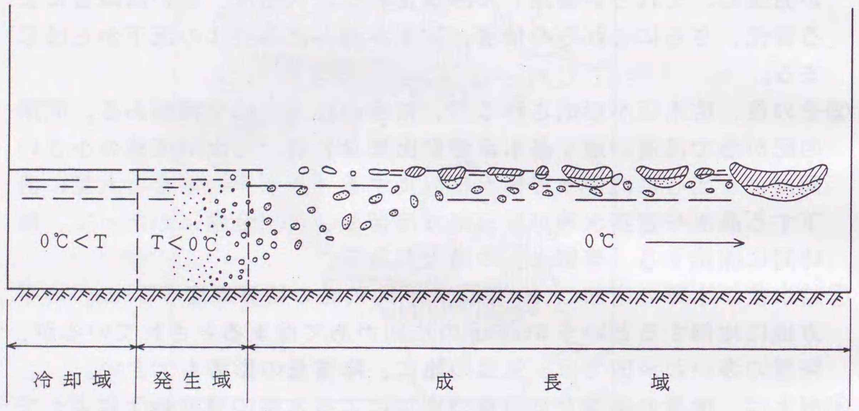


図 1.3　晶氷の発生・成長

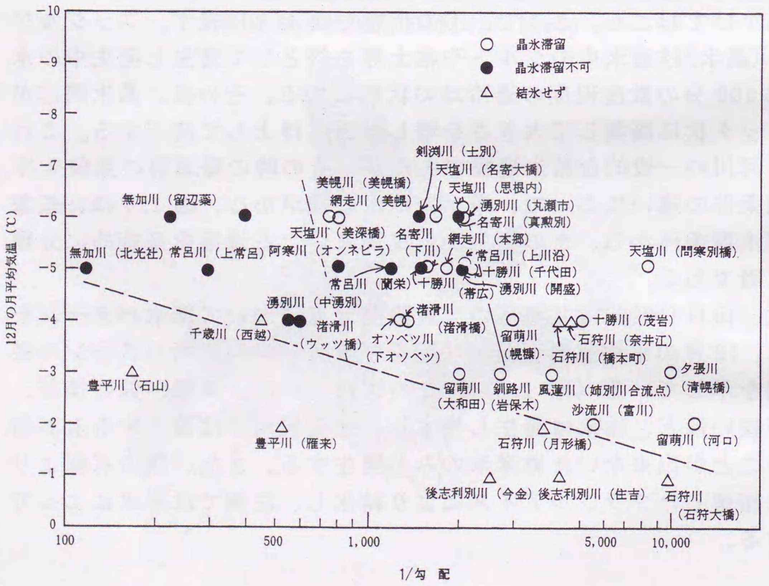


図 1.5　北海道の河川結氷条件図（山口等 1990）

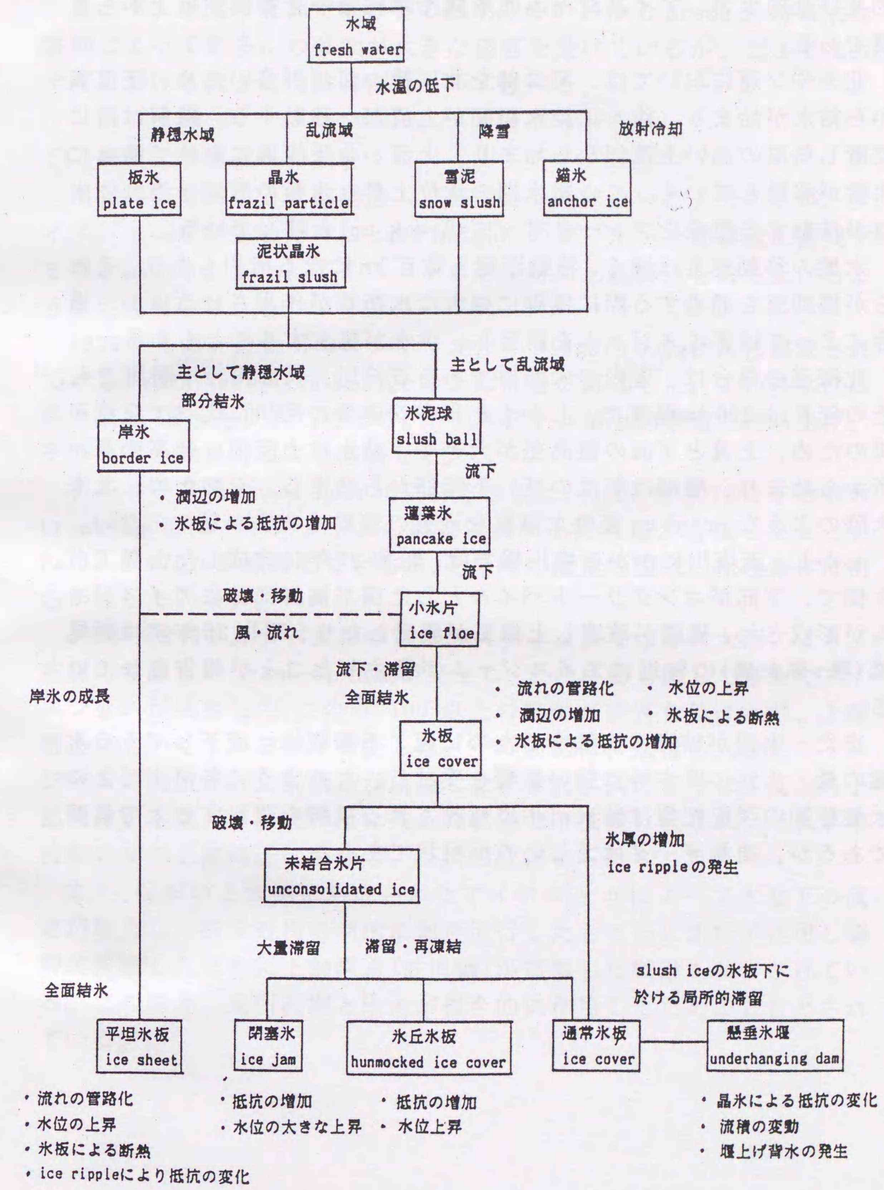


図 1.4　河川氷の分類　（小林等 1991）

(3)氷盤の移動

解氷期の氷盤の移動量やその形態を知ることは、橋脚に作用する静的及び動的氷力、アイスジャムの形成や摩耗量等を推測する上から重要である。

北米やソ連においては、河口部を北に持つ河川が多いため、下流部から結氷が始まり、徐々に結氷範囲が上流部へ移動する。融解は南に位置し気温の高い上流部から始まり、上流から下流部にかけて徐々に氷盤が移動していく。この融氷期の水位上昇と氷盤の破壊、それに氷盤が移動する現象をブレークアップ(Break up)と呼んでいる。

氷盤の移動速度は速く、移動距離も数百kmになる河川もあり、それらが橋脚部を通過する際に橋脚に強大な氷荷重が作用させるほか、場合によってはアイスジャムを誘発し、洪水が発生することもある。

北海道の場合は、道内の大河川である石狩川、天塩川、十勝川でも、その延長は200km程度で、しかも北米やソ連等の河川に比べて急流河川のため、上流と下流の標高差が大きく、結氷は上流部の標高の高い所から始まり、融解は気温の高い下流部から始まる。そのため、北米大陸のようなBreak up後の大規模な氷盤の移動はあまり起こらない。

しかし、天塩川にかかる中川橋では、昭和27年に完成した上部工が木橋で、下部がコンクリートパイルとした橋が橋脚部分にアイスジャムが形成され、橋脚が破壊し上部工が流出したり、昭和36年には瀬尾橋(現:誉大橋)の付近にアイスジャムが発生したことが報告されている。

また、氷盤が橋脚に接触するために起こる摩耗は、流下してくる氷盤の量、氷盤の厚さ等に強い影響を受ける。このように各河川ごとの氷盤移動の現況把握は結氷河川に建設される橋脚を設計する上で重要であるが、観測データは乏しいのが現状である。

1．2．2　北方圏諸国における結氷河川問題

カナダ、米国の北部では、春の融氷期のいわゆるBreak up時の氷の移動によって数多くの橋梁が大きな被害を受けているが、ここではカナダにおける代表的な被害例について述べる。

(1)橋梁上部構造への被害

氷盤の移動による上部構造の被害はめったにないことであるが、アイスジャムが発生した時にsail heightの高い氷が上部構造に衝突することがある。また、アイスジャム形成時に上部構造を持ち上げるような現象もみられる。

1938年1月、カナダのオンタリオ州のNiagara Gorge川に建設されているFalls View Arch Bridgeの上部構造が落橋した。この時水位は平水位上15mも上昇したため、アイスジャムが上部構造を持ち上げ、その上向きの氷力により落橋した。

アルバータ州のRed Deer川にある橋梁は、1928年と1952年の春のBreak-up時にアイスジャムの衝突により上部構造が落橋したことをNeill (1976) が報告しているが、その時の橋梁の型式、水理条件は明らかにしていない。

1970年2月、カナダ東岸のブランズウィックでは春に大雨により、各河川で激しいBreak-up現象が発生し、氷の移動も激しく各地でアイスジャムが発生した。この時100以上の橋梁が被害を受けたが、上部構造にもいくつか被害が発生した。一つの例は、規模の大きなアイスジャムの発生で、上部構造が落橋した。また、別の橋では上流側の上部構造が落橋し、氷盤の上に乗った状態で下流側に流され、それが下流側の橋の上部構造に衝突し、二次的被害をもたらした。

また、橋脚の上流側に形成されたアイスジャムによって氷盤下の流速が増大し、橋脚近傍の局所洗掘が進行したところに氷圧が作用し橋脚が活動したために上部構造(鉄道橋)が落橋した橋梁も報告されている。この場合、局所洗掘と氷力が複合的に作用したための被害とされている。



写真 1.1　氷の衝突による上部構造の落橋
(New Brunswick Department of Transportation)

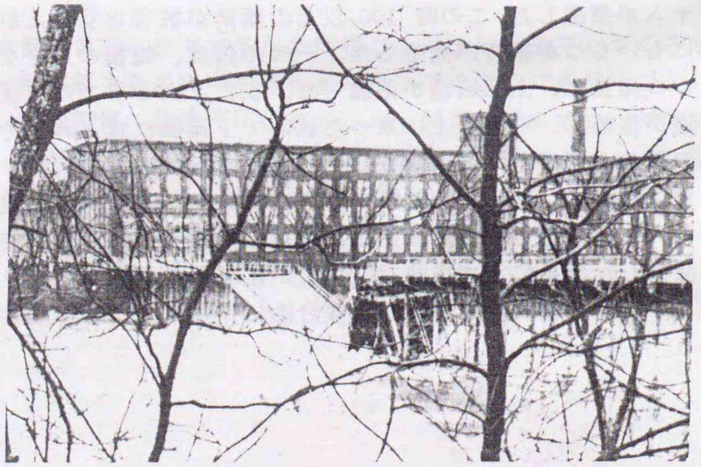


写真 1.2　局所洗掘と氷力の複合による上部構造の落橋
(New Brunswick Department of Transportation)



写真 1.3　橋梁部でのアイスジャムの発生



写真 1.4　アイスジャムによる洪水

(2)橋脚の被害

WattsとPidolny(1976)は、橋脚の被害や破壊を原因とする橋梁の被害の資料を調査した結果、橋脚の被害は主に移動する氷盤による氷荷重によるものと橋脚の摩耗である。また稀にはアイスジャムを起因とする局所洗掘による倒壊が報告されている。

Neill(1976)の報告によるとPembina河には1917年以来、16の道路橋が建設されたがそのうち7つの橋梁が破壊した。それらの橋梁の橋脚は、3列の木杭の間に石を充填した構造となっている。そのため、正確な耐氷力は計算できないが、氷荷重による橋脚の被害というよりも、充填した石が時間の経過とともに1つずつ抜け出したために耐氷力を失ったものとNeill(1976)は結論づけている。

1976年4月24日、Driftwood River Bridgeが氷によって一部破壊した。この橋の橋脚は、2.4m間隔に打ち込まれた木杭の橋脚であった。18の橋脚のうち10の橋脚が上部構造とともに持ち上げられ破壊した。アラスカのユーコン河のホワイトホースに建設されている3スパン(1スパン 30 m)のポニートラス橋のコンクリート製橋脚が被害を受けた。この橋梁は河岸の橋台とその次の橋脚の間に、流された氷盤がつまった状態となっていた。その氷盤の集合体が日中は一部融解、夜間は凍結をくり返すうち、大きな氷魂となり、氷の水平移動による氷力が作用して、橋脚の一部がづれる被害を受けた。

この他、Danys(1977)の報告によると、1958年から1959年に五大湖と大西洋間を流れるSt.Lawrence川に建設された12の燈台のうち2つが氷荷重により倒壊したことを報告している。

多くの橋梁の上部構造や橋脚が氷による被害を受けている。また、ほとんどの橋梁において氷盤の移動による橋脚の上流側 NOSE の摩耗が起こっている。その一例として、アルバータ州にあるRed Deer河に建設されているContent Bridgeの橋梁の摩耗の様子を写真1.5に示す。

また、河川に設置された桟橋の支柱に氷盤が凍着した状態で水位が変化すると、支柱に鉛直上下方向の氷力が作用するために、支柱が座屈したり、引き抜かれる被害が発生する。

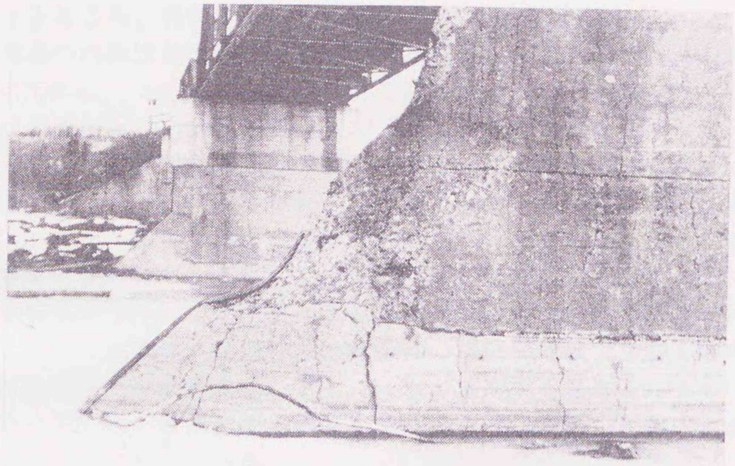


写真 1.5　Content Bridge の橋梁の摩耗の状況
(Sanden and Neill 1968)

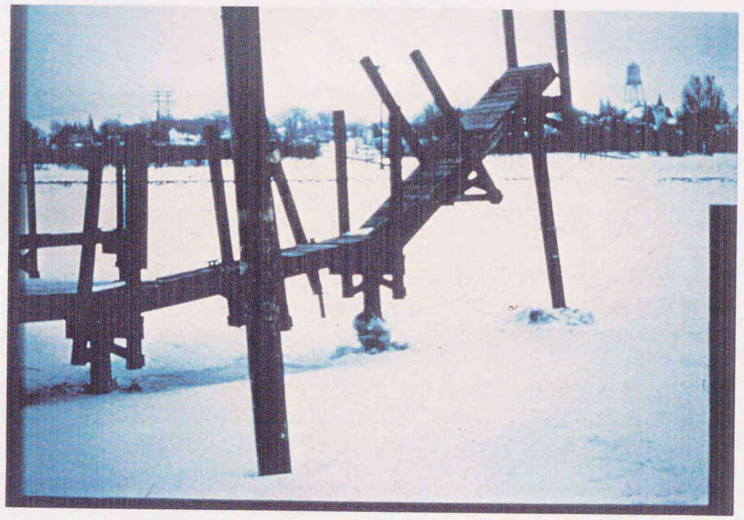


写真 1.6　水位変化によって桟橋支柱の引き抜き

１．２．３　我が国における結氷河川問題

（１）北海道内の橋脚の磨耗被害調査

北海道の河川は長いものでも200km程度で、北米大陸やソ連の河川に比べて短い。そのうえ、ほとんどの河川は上流から結氷が始まり、融解は下流からはじまる。そのためアラスカやカナダ北部の河川のように上流から融解が始まり、アイスジャムが発生するような現象は起こらない。しかし、著者等が行った国道に架かる道路橋の氷盤による被害アンケート調査では、10橋梁について被害の報告があった。それらの橋梁位置を図1.6に示し、各橋梁の諸元を表1.1に示す。

被害橋梁の多くはオホーツク海沿岸の河口付近に位置する橋梁が多い。これらの地域は、道内でも氷象条件の厳しい地域であるため冬期間の河川は完全に結氷する。また、流氷が接岸するとさらに厳しい気象条件となる上、常に干満の影響を受けるなど、橋脚が氷盤による影響を受けやすい地域である。



図1.6　被害報告のあった橋梁位置

被害のあった10橋のうち５橋はすでに補修工事が行われていた。橋脚の形式は鉄筋コンクリート製の小判型が７橋あり、一般的である。このうち、別当賀橋と声問橋の上流側Noseは傾斜した構造となっている。この他、芦別大橋は鉄筋コンクリート製で矩形断面をしており、幌別橋と網走橋は円形の断面となっている。

また、補修した橋梁の補修に至るまでの年数は、補修年がはっきりしている４橋のうち３橋は20年～30年経過している。網走橋は経過年数が最も長く、建設してから補修するまでに55年が経過している。被害橋梁位置の最大氷厚は、その橋梁の維持管理に携わる職員の経験からの推定の値ではあるが、おおむね30～50cm程度の範囲であった。主な橋梁の損傷箇所の写真を写真1.7～1.10に示す。

芦別大橋の橋脚は上流側の結氷する高さ付近で摩耗が激しく、一部は凍結融解によってコンクリートが劣化している。赤平橋も上流側の冬期間結氷する高さの部分が摩耗している。

別当賀橋は、橋脚の全周にわたり、氷盤移動による摩耗が進行している。そのため設計断面の欠損やかぶりの減少が起こっている。別当賀橋の架橋地点は、下流に風連湖があり冬期間結氷する。満潮時には風連湖からの逆流が起こり下流側も氷盤移動による摩耗の影響を強く受ける位置にある。

開盛橋の橋脚は、上流側の側面に摩耗と網目状のひび割れがある。氷盤移動による摩耗と凍結融解が複合的に作用してこのような結果になったと推定される。

網走橋は、建設されてから50年以上を経過した橋で、架橋位置も河口に近い。そのため凍結融解現象及び潮による干満、風や波による氷盤の移動によるコンクリートの摩耗の影響が出ている。

幌別橋は、円形の断面を持った橋脚であり、損傷箇所は沓座部分が欠損し、側面には亀甲状のクラックが発生している。しかし、氷盤による影響とはいいがたい点が多い。

富士見橋は橋脚上流側の冬期間結氷する付近で摩耗が激しく、骨材が浮き出ている部分もある。ただし、現在の架橋地点は、河川が切替られ小河川の一部が流入する程度で流量は少ない。冬期間結氷するものの流速はなく氷盤による摩耗は、ほとんどないといえる。したがって、現橋梁の摩耗は河川切替以前のものと思われる。

新富士見橋も同様に橋脚上流側に摩耗があり骨材が浮き出ている。本橋の上流には大きな沼があり、冬期間は完全に結氷する。融氷期には、この氷が氷盤となって橋脚と接触するために、摩耗が激しくなると考えられる。竣工時からの摩耗深度は２cm程度と報告されている。

声問橋は、声問川の河口に架かる橋で、海の干満の影響を受ける位置にある。

橋脚上流側の結氷レベルのコンクリートの摩耗が激しく、部分的には鉄筋が表面に出ている箇所がある。浜鬼志別橋も橋脚上流側の摩耗が激しく、建設されてからの摩耗深度は３cm程度と推定される。

表1.1　被害橋梁の緒元

橋梁名	河川名	路線名	竣工年月	補修歴	橋脚式	最大氷厚（推定）	摩耗（概略）
芦別橋	芦別川	国道38号	1954年	有	RC構造（矩型）	50cm程度	
赤平橋	空知川	〃	1952年		〃（小判型）	30cm程度	
別当賀橋	別当賀川	国道44号	1967年	有	〃（〃）	50～60cm程度	1.5cm
開盛橋	湧別川	国道242号	1959年	有	〃（〃）	20～30cm程度	
網走橋	網走川	国道39号	1934年	有	〃（円型２柱式）	40cm程度	15.0cm
幌別橋	幌別川	国道238号	1964年	有	〃（円型）	30～50cm程度	
富士見橋	猿払川	〃	1965年		〃（小判型）	50～60cm程度	
新富士見橋	〃	〃	1983年		〃（〃）	50cm程度	1.0cm
声問橋	声問川	〃	1958年		〃（〃）	30～40cm程度	
浜鬼志別橋	鬼志別川	〃	1972年		〃（〃）	40cm程度	3.0cm

橋脚の損傷原因が氷盤移動による被害かどうかの判定は、現在明確な判定法を見いだすにはいたっていない。したがって、現状では以下のような点に注意しながら、現地の状況を見て判断する以外に方法がない。

・冬期間結氷する河川であるかどうか。
・海氷等の影響を受ける位置にあるかどうか。
・橋脚の上流側Noseが、下流側に比較して著しい損傷を受けている。
・摩耗した表面が明らかに凍結融解によるものではない。
・コンクリートにＡＥ剤を使用しており、凍結融解の影響が受けずらい。



写真 1.7　一般国道 238 号　富士見橋(猿払川)



写真 1.8　一般国道 44 号　別当賀橋(別当賀川)

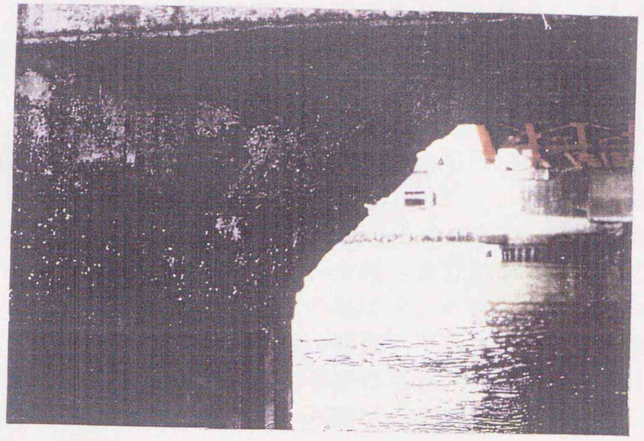


写真 1.9　一般国道 39 号　網走橋(網走川)



写真 1.10　一般国道 238 号　浜鬼志別橋(鬼志別川)

（2）北海道内でのアイスジャム発生履歴

我が国は、北方圏において比較的南に位置するため、氷象条件もそれ程厳しくないことから、大規模なアイスジャムによってコンクリート橋脚が転倒するような被害は少ない。しかし、天塩川では南が上流で北上する寒地河川である故に、冬期間は結氷し春先は上流から融け始める。この現象は天塩川特有のものであり、氷詰りによる異常水位は大きな水害をもたらしてきた。

以下にはアイスジャムが原因と考えられる天塩川での洪水について簡単に述べる。

①明治42年3月水害[中川町史の川端由次郎(大富)の手記]

私がこの地に入地したのは明治41年11月1日でしたが、翌年の42年3月25日の水害は、私の一生忘れ難いものでした。何分入地してから僅か半年も経っていませんから、食糧も余分にあるはずはなく、衣料もその通り、家はもちろん掘立小屋です。それにまだ雪が3尺もある時の水ですから皆さんその難儀は想像してみて下さい。大富の下流に流氷が詰まって天塩川の水が塞ぎ止められ、その水が逆流して忽ち大富近辺の氾濫となったのですから逃げる暇もありませんでした。

②昭和36年4月水害

昭和36年4月4日から5日にかけて発達した低気圧が本道の北部を通過した。これに伴った異常高温と集中降雨により、各地に融雪出水と雪崩による被害が発生した。4日の日最高気温は稚内8.6℃、留萌13.5℃、紋別13.0℃、雄武12.0℃、枝幸8.1℃となっており、5日の最大風速は留萌12.3m/s、稚内8.2m/sが記録された。また、降雨状況を見ると4日9時から5日9時までに稚内40mm、上音威子府は45mmと記録されている。

こうした異常な暖気に降水が加わった時、天塩川の上流から融雪が始まり下流に氷詰りが発生する。昨今はショートカットも進み、河道も拡幅されてこのような現象は少なくなったが、この流氷の破壊力は橋はもちろん、護岸や水制も根こそぎ流失させる。

この時の中川村の被害は、床上、床下浸水34戸170人の人たちが被災した。畑の被害はなかったものの457haが冠水し、農業用施設と農作物を含む肥料などの被害が1,256千円と記されている。

この他にも道内のいくつかの河川で融雪期にアイスジャムが原因と思われる洪水が発生しているが、その内容については不明な点が多い。



写真 1.11　天塩川の河道内にできたアイスリッジ(氷丘)



写真 1.12　瀬尾橋(現:誉大橋)で発生したアイスジャム
(天塩川治水史)

１．２．４　結氷河川に建設される橋脚の設計に当たって考慮すべき事項

北海道やカナダにおける橋梁橋脚の被害状況をまとめると以下のようになる。

１）北海道の道路橋の橋脚 Nose 形状は、半円形のものが大部分で、損傷位置は氷盤移動時の水位に相当する部分である。

２）損傷状態は半円形で Nose の上流側の先端部摩耗が最も激しく、次に流れに平行な側壁部分である。

３）最大摩耗量は、おおよそ 1.0～5.0mm/年であり、氷盤の移動距離が大きく、氷圧力の大きい所ほど摩耗速度は大きいと推定される。(摩耗速度 mm/km：氷盤１ kmの移動に対する平均摩耗量)

４）骨材が浮き出たものや、部分的に鉄筋が露出している橋脚もある。

５）損傷部分のコンクリート強度の低下は著しく、損傷していない部分の 30%の強度しかない橋脚があった。

６）河口付近の橋脚に損傷している橋脚が大きいことから海面の干満の差による上下方向の氷力が作用しており、被害を大きくしている。

７）カナダでは、アイスジャムによって上部工が落橋したり、洪水を誘発した事例がある。

８）カナダにおける橋脚の被害として、氷による摩耗、局所洗掘と氷力による転倒や滑動が報告されている。

以上のようなまとめから、考察すると以下のような項目が、結氷河川での橋脚の設計施工において考慮すべき項目として上げられる。

（１）橋脚へ作用する水平方向氷力
（２）橋脚へ作用する鉛直方向氷力
（３）橋脚の氷盤移動による摩耗
（４）アイスジャムによる氷力及び局所洗掘
（５）アイスジャムによる河道閉塞(洪水)
（６）氷盤の連続的な破壊による橋脚の振動

この他、当然ではあるが、結氷河川の特性を把握することも、大きなテーマである。特に、設計に必要な定数、つまり氷盤の大きさや厚さ、強度、水温等のデータは重要である。また、アイスジャムの発生要因や発生箇所、発生したときの形状や発達過程についても考慮する必要がある。以上のような項目について、検討すべき項目も含め、図1.7にまとめた。

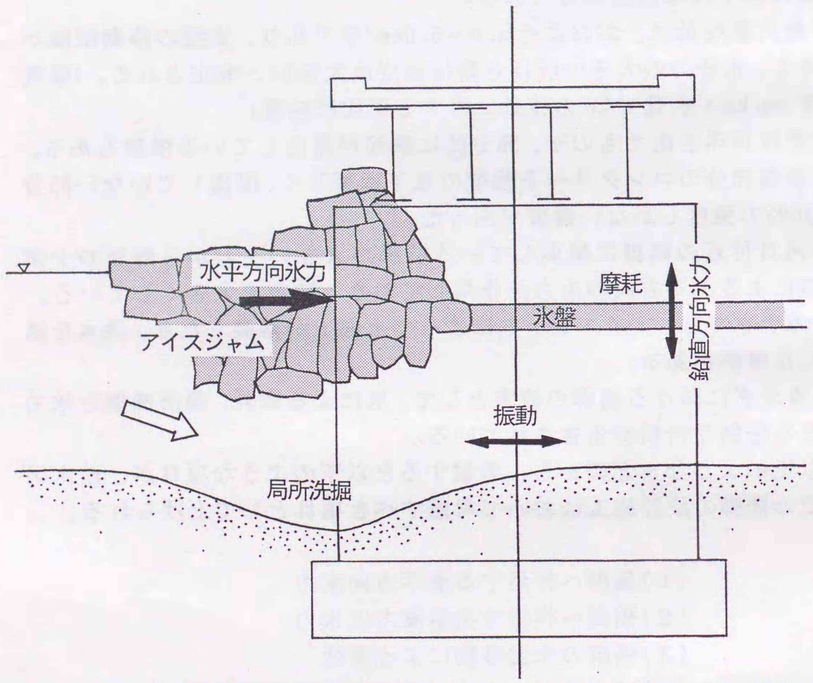


図1.7　結氷河川での橋脚の設計施工において考慮すべき事項

1．3　各国の橋梁設計基準における氷関連項目

(1)ＡＡＳＨＴＯ(米国)及びＣＡＳ(カナダ)の基準

1974年以前は、ＡＡＳＨＴＯは橋脚に作用する氷力については次式を採用していた。

$$F = W \cdot h \cdot \sigma_c \qquad (1.1)$$

Ｆ：氷力(kg)
Ｗ：橋脚の幅(cm)
ｈ：氷盤厚(cm)
σ_c：氷の強度(28kg/cm^2)

この(1.1)式は、橋脚の断面形状や橋脚のNoseの勾配に無関係に用いていたし、氷の強度も氷温等に依存する事は分かっていたが一定値の28kg/cm^{2}を用いていた。1974年に、(1.1)式で求められる氷力がヨーロッパやソ連で用いられている氷力式より大き過ぎることと、カナダやアラスカでの試験結果からＡＡＳＨＴＯでは(1.1)式を次のように変更した。

$$F = C_n \cdot W \cdot h \cdot \sigma_c \qquad (1.2)$$

式中の氷の強度σ_cについては、σ_c＝7～28kg/cm^{2}を採用し、現場の氷象条件を考慮して決定することと、橋脚のNoseの角度θが、θ＜75°ではC_n(Nose傾斜による係数)は1.0より小さくとって良いとしている。また、橋脚に作用する軸に直角方向の氷力は、橋脚の軸方向の氷力の15%程度としている。

この他、スレンダーで可撓性のある橋脚の場合には、動的氷力による振動特性の考慮、橋脚の設置方向は流れに平行を基本とし、浮遊物や氷盤に対してスパン長を大きくとる。摩耗被害が予想される場合は、花崗岩や硬化レンガ、木材等で表面を被覆する等があるが、その内容について具体的な記述はない。

次にカナダの基準(ＣＡＳ code)は、1978年以前はＡＡＳＨＴＯと同一であったが、1978年に改定され、σ_cは7～28kg/cm^2、橋脚のNoseの勾配θがθ＜60°に対しては、氷の曲げ強度を導入し、曲げ破壊時

の氷力を用いることとしている。

カナダ及び米国の氷力式はNoseが鉛直であれ、傾斜しているものであれ、全て(1.2)式で氷力が計算される。Nose の傾斜によって氷盤の破壊モードが変わるため自然氷力式も異なるべきであるが、曲げ強度σ_fを大きくとることと、Noseの傾斜の効果を取り入れることにより一本の式で表している。

(1.2)式中のC_nは傾斜の効果である。佐伯等(1981)は、同一の径の杭で同じ氷を用いて直立した場合($\theta=90°$)の氷力Fと傾斜している場合の水平方向氷力の比F_H/Fと傾斜角θの関係を実験的に求めた結果と比較するとC_nは安全側で決定されているが、傾斜角θが小さくなるにつれて過大な氷力になる。

ただし、佐伯等(1981)の実験では傾斜構造物の材料(鋼)と氷盤間の動摩擦係数が0.1であるので、摩擦係数が大きくなると基準の値に近づくことになる。

次に(1.1)式に用いられる氷の有効強度は、与えられている7～28kgf/cm^{2}の強度に Indentation Coefficient = C_iを乗じたものを用いるべきである。C_iはアスペクト比(w/h)のみの関係であり、Afanas'ev(1972)の得た結果から次式で計算される。

$$C_i = 5\frac{h}{w} + 1 \qquad (1.3)$$

(2)旧ソビエト連邦の基準

旧ソ連の1966、1967年に示されている基準(ＵＳＳＲ－ＳＮ－76/66 code)は、北米諸国の基準に比べて詳細である。氷力としては浮氷盤による衝突力、Ice Jam による衝突力、熱膨張や風や流れによる静的氷力及び氷盤凍着に伴う鉛直方向氷力を考慮することとしている。橋脚に作用する水平氷力としては次式を用いることを義務づけている。

$$F = m \cdot A \cdot W \cdot h \cdot \sigma_c \qquad (1.4)$$

A：地域の気候による係数(0.75～2.25)
m：構造物の形による係数（構造物頂角45°は0.54、180°は1.0、半円形は0.9)
σ_c：7.65kg/cm^{2}としている

Noseが傾斜した場合は、以下の式を用いる。
水平方向成分の氷力は次式に示される。

$$P_H = A \cdot \sigma_f \cdot h^2 \cdot \tan\theta \qquad (1.5)$$

また、鉛直方向成分は次式で示される。

$$P_v = \frac{P_H}{\tan\theta} \qquad (1.6)$$

(1.5)、(1.6)式において、σ_fは氷の曲げ強度でCrushing strength σ_cの50%とする。また、θは橋脚前面の水平面とのなす角である。

また、傾斜角θが$\theta>75°$の場合は、直立面と見なされ(1.4)式を用いる。また、(1.5)式で計算される氷力が(1.4)式で計算される氷力を超える場合には、(1.5)式で計算される氷力を採用する。このようにソ連の式は Nose が直立の場合と傾斜している場合で氷力式を使い分けていて、より合理的であるといえる。

直立の橋脚の場合は(1.4)式で示されるが、断面形状の効果は矩形断面で1.0、半円断面で0.9なので、米国等の式における形状係数を1.0と見なすと非常に近い値となっている。

次に気候係数Ａについてであるが、Ａは地域によって0.75～2.25の範囲で変化する。これは、基本的には強度に最も相関の強い氷温を示すパラメーターとも見なすことができる。ソ連の基準における氷の強度は4.5kgf/cm^{2}あるいは7.5kgf/cm^{2}と決められているので、最も厳しい2.25に7.5kgf/cm^{2}を乗ずると-30℃の値に近くなる。(1.1)式における$C_n \times \sigma_c$が(1.4)式のｍ×Ａ×σ_cに相当することになる。よって、直立構造物で半円断面の場合は、米国等の式においては(7～28kgf/cm^2)×(0.8～1.8)となり、(5.6～50.4)kgf/cm^2、ソ連の場合では0.9×(4.5～7.5kgf/cm^2)×(0.75～2.25)となり(3.1～15.1)kgf/cm^{2}となる。

氷圧力については、米国及びカナダの式の方が一般に大きくなるが、これは規定している強度σ_cがソ連のσ_cより大きいことと、Indentation factor の効果が強く出ているためと考えることができる。次に傾斜した橋脚の場合の比較をしてみる。ｈ＝1.0 ｍ、ｗ＝３ｍとし、傾斜角を70°とすると、米国・カナダの式ではＰ＝0.75×100×300×0.9×σ_c kgf/cm^{2}となる。これに対してソ連の式ではP_H＝1/2

×A×σ_c×10^4×1.73(kgf)となる。よって米国・カナダの式ではP＝2.03×10×(7～28)kgf、ソ連の場合は(3.0～19.8)×10^4kgfとなり、米国・カナダの氷力の方が大きい値を示す。

1．4　結氷河川に建設される橋脚の設計法に関する既存研究

1．4．1　氷力

(1)水平方向氷力

水平氷力に関しては、多くの氷力式が提案されている。中沢等(1986)は、構造物の径W＝2m、10m、σ_c＝28.2kgf/cm^2、h＝1mの条件で約20種類の氷力式の試算を行った。試算結果ではW＝2mの時に最大値は最小値のおよそ14倍、W＝10mでは約30倍の差があることが判った。このような計算値の違いは氷盤の一軸圧縮強度σ_cの決定法に原因がある。この点で経験式、実験式においてはσ_cの決め方が明確に示され、σ_cの決定法が妥当である必要がある。次に、理論式においてσ_cは仮定した破壊が発生するような歪速度εで試験して決定される必要がある。中澤等（1986）では以上のような項目を各氷力式について評価し、佐伯式、Hirayama & Schwarz式が最もこの条件を満たす結果を得ている。したがって、結氷河川での橋脚の設計氷力式としては、この両式のいずれかを使用することが望ましい。ここでは、佐伯式を紹介する。

$$F = K \cdot C \cdot \sqrt{W \cdot h} \cdot \sigma_c \qquad (1.7)$$

F＝水平方向氷力
K＝ε（歪み速度）の関数
C＝氷盤の特性長
W＝構造物の径
h＝氷厚
σ_c＝氷盤の一軸圧縮強度

表 1.2　直立構造物に作用する氷力の試算(中沢等 1986)

	直立構造物に作用する氷力の提案式	W＝2 m	W＝10 m
経験	1)A.P.I	395	1920
	2)U.S.S.R	310	1550
	3)AASHO CSA	564	2820
	4)MAATTANEN	950	3108
	5)Neill	1055	3454
実験	6)Saeki	199	446
	7)Hirayama	226	505
	8)N.K.K.	557	1249
	9)N.H.I.	182 min	273 min
	10)I.H.I.model(max)insitu	2458 max	8047 max
	11)Borcha & Danys	744	1417
	12)Afanasev	373	1861
	13)Korzhavin	950	3108
		938	1607
理論	14)Reinicke	1063	4221
	15)Morgenstern & nuttall	650	2906
	16)Tryde	790	2594
	17)Croasdale	520	2468

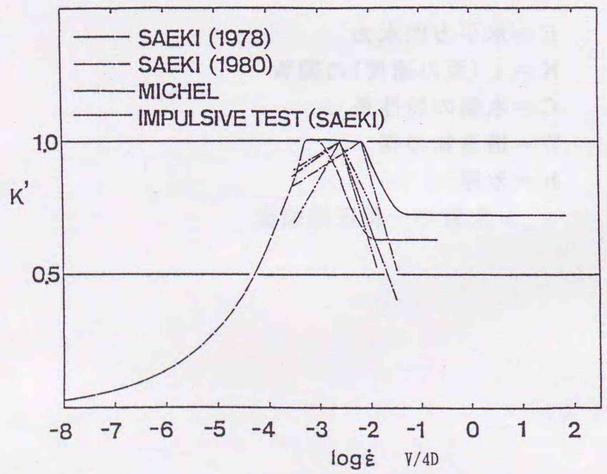


図 1.8　無次元氷力Kと歪み速度の関係（佐伯等 1983）

(2)鉛直方向氷力

1)鉛直方向氷力の算定式

氷盤が橋脚に凍着した状態で水位が上昇すると、橋脚に鉛直方向の氷力が作用する。一般に河川は春期の融雪により水位が上昇する。この時、構造物に鉛直上向きの氷力が作用する。

この鉛直方向氷力の理論と計算方法については、Saeki 等 (1983)や中澤等 (1985)の研究がある。計算のためには、氷厚、氷の曲げ強度、曲げ弾性率、ポアソン比、構造物の代表径、凍着強度が与えられなければならない。鉛直方向氷力の計算は図 1.10 のフローチャートに従って行う。氷盤と橋脚の凍着状態から氷盤の破壊形態ごとに、鉛直方向氷力を算定する。各算定式及び判定式を以下に述べる。

P：鉛直方向氷力
a：杭の半径
h：氷厚
τ_H：橋脚と氷盤の凍着強度
a：橋脚断面を円断面半径に換算した時の半径(cm)
△：水位変化量(cm)
D：平板剛度　$E \cdot h^3/(12\text{-}12\ \upsilon^2)$
E：氷の弾性係数(kgf/cm^2)
h：氷厚(cm)
υ：ポアソン比
σ_H：氷の曲げ強度(kgf/cm^2)
λ：$(W_0/D)^{1/4}$
w_0：水の単位体積重量(kgf/cm^2)
K_1：kei($\lambda \cdot a$)·ker'($\lambda \cdot a$)-kei'($\lambda \cdot a$)·ker($\lambda \cdot a$)
K_2：kei'($\lambda \cdot a$)·kei($\lambda \cdot a$)+ker'($\lambda \cdot a$)·ker($\lambda \cdot a$)
kei, ker'：ケルビン係数

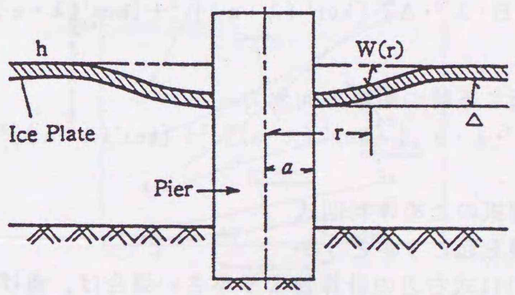


図 1.9　鉛直方向氷力作用概念図

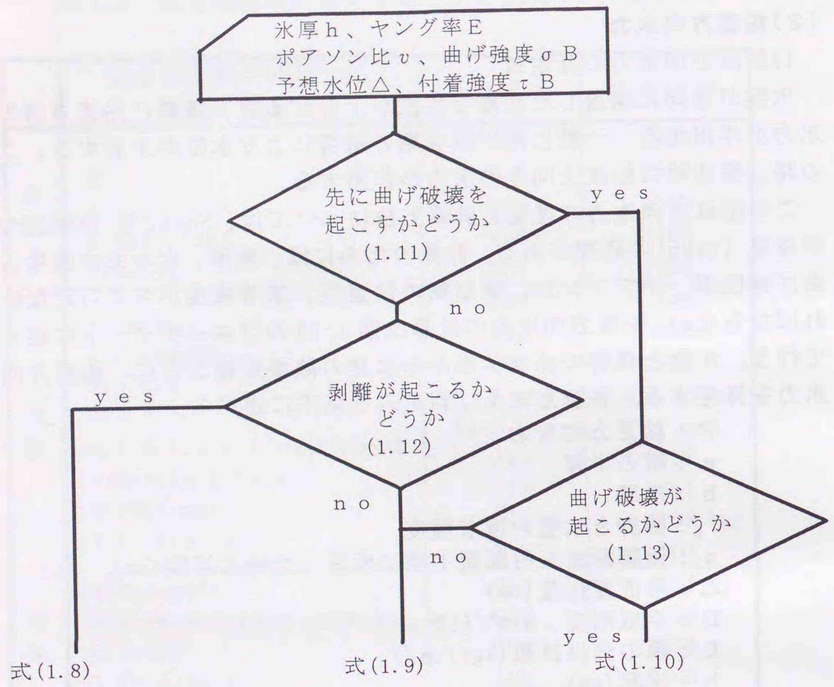


図 1.10　鉛直方向氷力の計算フロー

①氷盤と橋脚の間に剥離が起こる時

$$P = 2\pi \cdot a \cdot h \cdot \tau_B \tag{1.8}$$

②氷盤と橋脚の間に剥離が起こらない時

$$P = 2\pi \cdot a \cdot D \cdot \lambda^3 \cdot \Delta \{ [ker'(\lambda \cdot a)]^2 + [kei'(\lambda \cdot a)\}^2 / k_1 \tag{1.9}$$

③曲げ破壊が起こる時の鉛直方向氷力

$$P = \pi \cdot a \cdot h^2 \cdot \lambda \cdot \sigma_B \{ [ker'(\lambda \cdot a)]^2 + [kei'(\lambda \cdot a)]^2 \} / 3\, k_2 \tag{1.10}$$

2)氷力算定式の選択のための判別式

①先に曲げ破壊を起こすかどうか

σ_B / τ_B が(1.11)式右辺の計算値より小さい場合は、曲げ破壊が先に起こる。また、逆に大きい場合は剥離破壊が先に起こる。

$$\frac{\sigma_B}{\tau_B} = \frac{b}{h \cdot \lambda} \cdot \frac{K_2}{\{ker'(\lambda \cdot a)\}^2 + \{kei'(\lambda \cdot a)\}^2} \tag{1.11}$$

②剥離破壊が発生するかどうか

(1.12)式で計算される τ_B より実際の τ_B が小さい場合には剥離破壊が発生することになる。

$$\tau_B = \frac{\Delta \cdot D \cdot \lambda^3 \cdot \{[ker'(\lambda \cdot a)]^2 + [kei'(\lambda \cdot a)]^2\}}{h \cdot K_1} \tag{1.12}$$

③曲げ破壊が起こるかどうか

(1.13)式で計算される曲げ強度 σ_B より実際の曲げ強度が小さい場合は曲げ破壊が発生する。

$$\sigma_B = \frac{\sigma_f \Delta \cdot D \cdot \lambda^2 \cdot K^2}{h \cdot K_1} \tag{1.13}$$

鉛直方向氷力の低減には凍着強度の大きさが強く影響する。各種材料と淡水氷の凍着強度の関する加藤等(1989)による研究結果を図1.11に示す。実験結果によると、T＝－5℃の条件で鋼との凍着強度はコンクリートの半分、ポリウレタンやポリエチレンでは1/10となる。

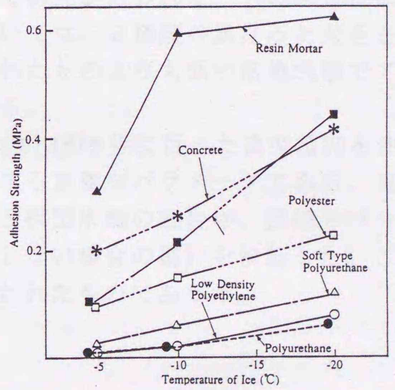


図 1.11　各種材料と淡水氷の凍着強度　(加藤等 1989)

１．４．２　摩耗

海水の影響を受ける海洋構造物や結氷する河川、湖沼それに貯水池に建設される橋梁の橋脚や水理構造物の設計においては、氷盤移動による構造物表面の摩耗について充分な配慮が必要である。移動する氷盤による諸材料表面の摩耗に関する過去の研究では、海氷に対しては、佐伯等(1985)、浅井等(1986)の成果が、また淡水氷に対しては高橋(1990)等、著者等（原 1989、1990）の成果が発表されている。それらの研究成果によると、各材料に対する摩耗速度(氷盤の移動距離１kmによる材料表面の平均的な摩耗深さ、単位mm/km)が与えられれば氷盤の累加移動距離と氷盤移動時の水位変動のデータを用いて構造物表面の摩耗量(深さ)の分布が求められることになる。摩耗量の推定には、構造物表面材料の摩耗速度の決定が非常に重要となる。

著者等の研究成果によると摩耗速度は、材料の種類、氷盤と構造物表面間の接触圧力、氷温、それに氷盤中に含まれる微粒砂等の中央粒径と濃度に強く依存する。摩耗が進行する時期の氷温は融雪期であるため、３月以降の氷温を推定すると０℃～－５℃の範囲で考えれば十分である。また、氷盤中の微粒砂の中央粒径や濃度については、海氷、湖沼氷に関して橘等（1995）の調査結果が報告されている。このような研究成果から淡水氷に対する構造物表面の摩耗メカニズムについてはほぼ明らかになってきている。この他、橋脚等の設計に活用するためには、各種材料の摩耗速度や設計定数としての淡水氷の強度・固形成分含量・移動距離等のデータが必要である。

１．４．３　アイスジャム

(1)アイスジャムの形成

Ice Jam は、河川の蛇行部、狭窄部、合流部、分流部、水面を厚く結氷している所や氷塊が地盤と接触し座礁するような箇所、水路断面が縮小したり、水深が深くなる箇所、及び橋脚の設置されている位置でよく発生する。これら以外の箇所での発生は稀である。橋脚位置でのIce Jam形成の原因として、氷盤によるアーチ形成がある。

氷盤のアーチ形成に関する最近の研究では、防水柵の様な表層防氷構造の開口部でのアーチ形成に関して Calkins/Ashton(1975 年及び 1976 年）、Tatinclaux 他(1977 年)などの研究がある。また、船舶の水路に関連した防氷壁の開口部での氷のアーチ形成について模型を使った研究が Boulanger 他(1975 年)、Cowley 他(1977 年)によって行われている。

以上の研究の内 1977 年の Tatinclaux 等が行った研究以外は、１個１個の独立した氷塊が１個の状態を保つ、限界流速以下で行われたものである。Tatinclaux 等が行った実験は、以下の２つの点について詳細に調査したものである。1)アンダーターニングを起こす限界流速以上におけるアーチ形成の状態。2)ポリエチレンの模型を使った場合に比べて本物の氷を使用した場合に見られる差異。

こうした全ての研究では、模型の浮氷盤は均一な形、すなわち正方形又は非常に正方形に近い形であった。1976 年に Calkins と Ashton が行った研究では、２つの異なった大きさの模型氷を混ぜ合わせた場合の影響について研究が行われた。その研究によると、設定された同一の開口部においては、２種類の異なった大きさの模型氷盤は、一様の大きさで作られたものよりも低い密集状態でアーチを形成することが立証されている。

また、Calkins が 1978 年に行った模型橋脚を使った実験は、アーチングの形成に関する重要なパラメータである。流速、模型氷盤の大きさ、大きさの違う模型氷盤の混合率、橋脚スパンを変化させてアーチ形成する場合としない場合の違いを検証した。この実験は１スパンだけに注目して行われたものであった。

（2）アイスジャムによる橋脚周辺の局所洗掘

融氷時に橋脚位置でIce Jamが発生すると河積を狭め、流速を増加させる。そのため、橋脚周辺で急激な局所洗掘がおこり、橋脚が不安定化し氷力によって滑動したり、転倒する事故が北アメリカやロシア等で報告されている。

一般に局所洗掘は、橋脚周辺での橋脚の左右の流れと、橋脚前面の鉛直下向きの流れの２つの方向に流れがある。橋脚前面の鉛直下向きの流れは、河床に衝突し河床の砂礫を巻き上げる回転渦を発生する。巻き上げられた砂や砂礫は橋脚の左右の流れによって運ばれ橋脚の後方へ流される。この現象が連続的に起こることによって、橋脚基部の土砂が減少する。これが局所洗掘である。

局所洗掘の位置や深さ、洗掘量は、橋脚の位置や形状、流量や流速、河床材料などによって規定される。一般に同じ流量や流速であれば、橋脚幅が厚いほど橋脚前面から側面にかけて砂や砂礫等の河床材料を掃流する。また、橋脚下流が洗掘されることは稀である。

局所洗掘の分類が行う。流出土砂量をQ_{si}、流入土砂量をQ_{so}とし、Q_{si}とQ_{so}の関係から局所洗掘を次の３つに分類できる。

①$Q_{si}=Q_{so}=0$：局所洗掘は発生しない（固定床）

②$Q_{si}>Q_{so}=0$：限界掃流力以下での局所洗掘（静的平衡洗掘）

③$Q_{si}>Q_{so}>0$：限界掃流力以上での局所洗掘（動的平衡洗掘）

静的平衡洗掘状態では、最終洗掘深さに達するのに長時間を要するが、動的平衡状態では短時間に平衡洗掘深さに達し、河床波の影響を受けて洗掘深は変動する。

このような、局所洗掘に関する研究は、わが国においても海外においても比較的古くから行われており、洗掘深さの推定法を中心に多くの式が提案されている。この推定式は、最大洗掘深に関する式と、与えられた水理条件、河床条件に関する式に分類することができる。

しかし、Ice Jamによる河積阻害を考慮した局所洗掘に関する研究はほとんど見られず、今後の研究が必要な分野である。

１．４．４　振動

移動する氷盤と橋脚の相互作用のうちでも、特に氷盤の断続的破壊による不規則に変動する氷力によって振動が激しくなることにより、材料の疲労が進み、最終的には水平方向氷荷重あるいは波力にて倒壊に到ることも考えられる。

Bjork(1981)はスウェーデンとフィンランドに囲まれているボスニヤ湾に建設されている海中燈台の海氷盤移動による破壊例を詳細に調べており、予想以上の氷力が作用したために倒壊した事例もあるものの移動する氷盤の破壊による構造物の振動が影響しているものがかなりあることを報告している。

Tsuchiya等(1985)は氷の進行方向のみに変形できる円断面を有する片持梁方式の試験装置により、氷盤移動による構造物の振動実験を行った。この実験では、構造物の固有振動数を18.2と29.3(rad/s)の二種類に変えて実験を行っている。図1.12に固有振動数2.89Hzの場合の二種類の歪速度εの場合を示す。両方とも比較的速い貫入速度であるが、$\varepsilon \fallingdotseq 2.5\times10^{-2}\mathrm{sec}^{-1}$の場合は断続的な大きな破壊の後に小さな振動がある状態で、$\varepsilon=1.3\times10^{-1}\mathrm{sec}^{-1}$の場合にはより高速で貫入するため、ある一定の変形状態のままで小さな破壊が連続して発生していることを示している。

また、同様の実験を佐伯等もサロマ湖の無限氷盤を利用して行い、ほぼ同様な結果を得ている。

Sodhi 等(1986)は尿素氷を用いて杭径、氷厚それに貫入速度を変化させて、振動周期の実験を行った。その結果を図1.13に示す。縦軸のｆは氷力の変動周波数、ｈは氷厚、ｄは杭径である。この結果によると、（Ｖ／ｆ・ｈ）は（ｄ／ｈ）＝0.6～9.5の範囲ではアスペクト比にはほとんど依存しないような結果となっていて、（Ｖ／ｆ・ｈ）＝0.2～0.5の範囲となると報告している。

実際の橋脚の応答計算に当たっては、卓越周期と同時に作用氷力の時間変化が与えられねばならない。そのモデルとしてはMatlack Model、それを改良したTsuchiya 等(1985)のモデル及び異なった氷力変化になっているToyama 等(1983)のモデルが提案されているので実際の応答計算を行うに当たっては、それらを参照すべきである。しかし、それらの計算方法による応答計算の結果では海氷盤の作用により共振現象が、特には極端な形では発生しない。これは氷盤そのものが構造物の変位を拘束するためである。しかし、この氷盤移動による構造物の

振動は、応力レベルが高いため、構造物材料の疲労を引き起こし、これが破壊につながる可能性は大である。

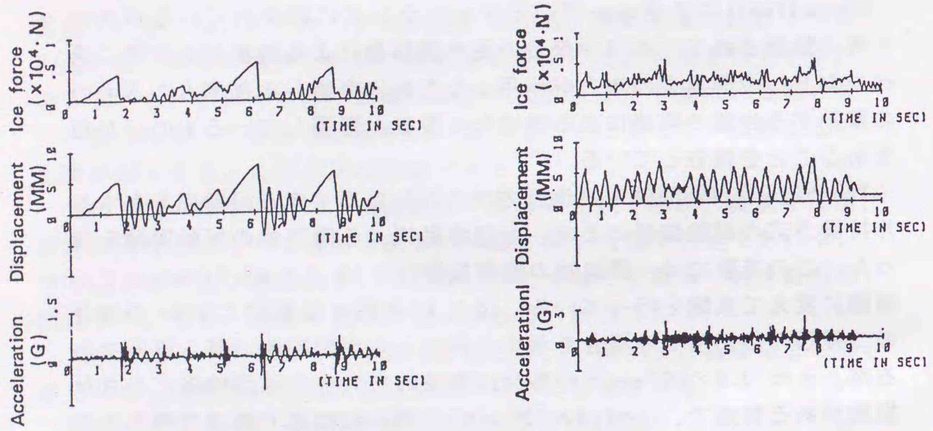


図 1.12　氷盤移動による構造物の振動実験(Tsuchiya 等 1985)

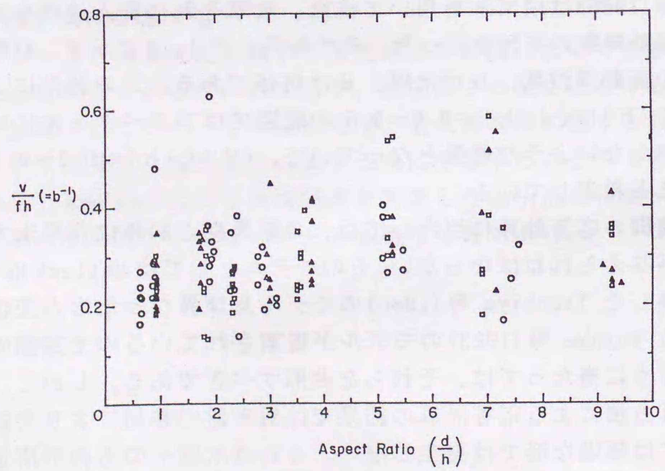


図 1.13　杭径、氷厚それに貫入速度と振動周期(Sodhi 等 1986)

1．5　要　約

結氷河川の水理特性を整理するとともに北方圏諸国や我が国における氷盤移動による橋梁の被害状況を把握し、設計上考慮すべき事項を以下にまとめた。また、米国、カナダ、旧ソ連の橋梁設計基準から氷に関する部分を抽出し、どの程度考慮されているのかを把握するとともに、設計上考慮されるべき事項について既存研究の現状を整理し、本研究において取り組むべき項目を示した。

結氷河川における氷盤による橋梁の被害状況についてカナダにおける調査結果や北海道において著者等が行った調査をもとに、設計上検討が必要な項目について整理を行い以下のような項目を抽出した。

①橋脚へ作用する水平方向氷力
②橋脚へ作用する鉛直方向氷力
③橋脚の氷盤移動による摩耗
④アイスジャムによる氷力及び局所洗掘
⑤アイスジャムによる河道閉塞(洪水)
⑥氷盤の連続的な破壊による橋脚の振動

水平方向氷力については、各国の橋梁設計基準に具体的な規定があるほか、数々の氷力式が提案されており、各提案式の評価が行われ佐伯等、Hirayama & Schwarz 式が妥当とされている。また、鉛直方向氷力につても構造物と氷盤の凍着形態ごとに算定式が確立されいる上、我が国の氷象条件からみて、コンクリート製橋脚が鉛直氷力で被害を受けることはほとんどないといえる。ただし、ダムの取水塔や桟橋の支柱などスレンダーな水理構造物については、充分に考慮する必要がある。

橋脚の氷盤移動による摩耗は、各国の設計基準のなかでも対策の必要性についての記述はあるものの、具体的な設計法や対策工法について述べられているものはない。摩耗メカニズムについては、海氷と海洋構造物の問題として佐伯等や伊藤等によって明らかにされている。また、淡水氷については、著者等や高橋等の研究があるものの、コンクリート以外の材料への摩耗特性、摩耗対策の設計法、設計定数等については確立されていない。

橋脚位置で発生するアイスジャムは、氷力として橋脚や上部構造に作用する場合と河道を狭くすることによる橋脚周辺の局所洗掘、完全な河道閉塞による洪水等がある。設計上は、アイスジャムを発生させ

ない方法とアイスジャムが発生しても充分な強度や橋脚根入れ、河道空間を確保する等の方法があるが、その発生メカニズムや形態等に未知な部分が多く、ほとんど確立されていないのが現状である。

橋脚位置での氷盤の連続的な破壊による橋脚の振動は、振動が橋脚を拘束した状態で発生するため、変形量の大きい、構造物の破壊に結びつくような共振現象が発生する確率は低い。どちらかといえば、振動による疲労破壊に注意すべきである。しかし、氷盤による橋梁の被害事例をみても、振動で破壊したり、損傷があった報告はなく、一般的なコンクリート製橋脚で考慮する必要はない。ただし、スレンダーな橋脚の場合や極地のような氷象条件の厳しい大河川に高橋脚を建設する場合などには検討をする必要がある。

1．6　参考文献

1）低温とくらし(1985)：北海道大学放送教育委員会、北海道大学図書刊行会、

2）雪氷調査法(1991)：日本雪氷学会北海道支部

3）山辺功二(1968)：北海道の河川結氷、水温の研究、第12巻1号

4）小林正隆、佐々木秀成、笹本誠、堺茂樹、平山健一（1991）：水域の結氷条件に関する考察、第7回寒地技術シンポジウム、pp567-572

5）山下彰司、小林正隆、宮昭彦、平山健一（1993）：北海道における河川結氷について、第9回寒地技術シンポジウム、pp640-645

6）山口甲(1990)：沖積河川における河道計画に関する研究

7）天塩川治水史編集委員会（1991）：天塩川治水史、（財）北海道開発協会発行

8）Ice Effects on Bridges(1981)：Roads and Transportation Association of Canada

9）Neill, C.R., (1976):Dynamic Ice Forces on Piles and Piers-An Assessment of Design Guidelines in the Light of Recent Research, Canadian Journal of Civil Engineering, V.3, No.2, pp305-341

10）Watts, F.J., and Podolny, W., (1976):Ice Loads on Bridge Piers, Structual Engineering Series No.1, Federal Highway Administration, Washington

11）Danys, J.V., (1977):Ice Forces on Old and New Offshore Lighthouses in the St. Lawrence Waterway, Proceedings of the 4th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, pp115-138

12）佐伯浩、小野敏行、山田満、尾崎晃（1981）：直立杭構造物に作用する海氷の力に関する研究、第28回海岸工学講演会論文集、pp396-400

13）佐伯浩、田中裕人、小野敏行、酒井雅史、尾崎晃（1983）：直立杭構造物に作用する氷圧力分布と氷盤の破壊周期について、第30回海岸工学講演会論文集、pp653-657

14）中澤直樹、竹内貴弘、小野敏行、佐伯浩（1986）：海洋構造物に作用する氷力式の評価、海洋開発論文集Vol.2、pp115-120

15) Afanas'yev, V.P. (1972): Ice pressure on separate supporting structures in the sea, Tran. Arctic and Antarctic Institute (Leningrad), CRREL TL346
16) DESIGN FOR ICE FORCES (1983): American Society of Civil Engineers
17) 中澤直樹、山田満、浜中健一郎、佐伯浩（1985）：直立円断面構造物に作用する鉛直方向氷力について、第１回寒地技術シンポジウム論文集、pp150-155
18) H. Saeki, T. Ono, N. Nakazawa, M. Yamada (1983): Ice Forces due to Changes in Water Level and Adhesion Strength between Fresh water Ice and Various Pile Materials, 20th IAHR Congress, Vol. 2, pp5-9
19) 佐伯浩、浅井有一郎、泉列、竹内貴弘（1985）：海氷によるコンクリートの摩耗に関する研究、第10回海洋開発シンポジウム論文集、pp68-73
20) 浅井有一郎、吉田明、竹内貴弘、佐伯浩(1986)：海氷によるコンクリートの摩耗について、第６回寒地技術シンポジウム論文集、pp564-569
21) 原文宏、佐伯浩(1989)：結氷河川における橋梁の設計に関する一考察（４）、第５回寒地技術シンポジウム論文集、pp394-403
22) 原文宏、後藤克人、折谷徳弘、佐伯浩（1990）：結氷河川における橋梁の摩耗に関する研究、第45回土木学会年次学術講演会講演会、pp642-643
23) 高橋陽一、原文宏、寺島貴志、榎国夫(1990)：結氷河川における橋脚の設計法、第６回寒地技術シンポジウム講演論文集、pp360-366
24) 高橋陽一、原文宏、佐伯浩、新山惇(1991)：道内結氷河川における橋梁橋脚の被害状況について、第７回寒地技術シンポジウム講演論文集、pp664-669
25) H. Saeki, Y. Takahashi, M. Niiyama, F. Hara (1991): THE STUDY ON ABRATIVED AMAGES TO CONCRETE BRIDGE PIER BY RIVER ICE MOVEMENT AND PREVENTIVE METHODS OF THEM, 土木学会北海道支部論文報告集, pp125-130
26) WORKING GROUP ON ROVER ICE JAM, FIELD STUDIES AND RESEARCH NEEDS (1990): NHRI Science Report No2, National Hydrology Research Institute, Environment Canada
27) Standard Specifications of Highway Brigdes, 13thEd. (1983): AASHTO,

28) Design of Highway Bridges (1978): Canadian Standard Association
29) Instruction for Determining Ice Loads on river Structure (1973) (SN76-66) State Committee of the Council of Ministers (USSR) for Construction, NRC, TT-1663
30) 橘治国、原文宏、佐伯浩、水野克彦(1995)：河川氷の物理・化学的性状、土木学会北海道支部論文報告集、第51号（Ｂ）、pp102-107
31) Calkins, D. J. and Ashton (1975): Arching of fragmented ice covers, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 2, No. 4, pp392-399
32) Calkins, D. J. and Ashton (1976): Arching of model ice floes-Effect of mixture variation on two block sizes, CRREL Report76-42
33) Tatinclaux, J. C. et al (1977): A laboratory investigation of mechanics and hydraulics of river ice jams, CRREL Report77-9
34) Boulanger, F., E. Dumalo, D. Levan and L. Racicot (1975): Ice control study, lake St. Francis-Beauharnois Canal, Proceedings 3rd IAHR Congress, pp39-48
35) Cowley, J. E, G. D. Hayden and W. W. Willis (1977): A model study of St. Marys River ice navigation. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 4, No. 3, pp380-391
36) Sodhi, D. S. and C. E. Morris (1986): Characteristic frequency of force variations in continuous crushing of sheet ice against rigid cylndrical structures, Jurnal of cold regions science and Technology, 12, pp1-12
37) S. Tuchiya, S. Kanie, K. Ikejiri, A. Yoshida and H. Saeki (1985): An Experimental Study on Ice-Structure Interaction, Proc. of Offshore Technology conference , OTC 5055, pp321-327
38) Y. Toyama, T. Sensu, M. Minami, and N. Yoshima (1983): Model Tests on Ice-Induced Self-excited Vibration of Cylindrical Structures, Proc. of 7th international conference on port and ocean engineering under arctic conditions, Vol. 2, pp834-844
39) Bo Bhork (1981): Ice-Induced Vibration of Fixed Offshore structures, Park 2 Experience with Baltic Lighthouse, Marine structures and ships in Ice, Report No. 81-0612

第２章　氷盤による橋脚の摩耗

２．１　概　説

氷盤移動によるコンクリート構造物表面の摩耗現象は、鉄筋コンクリート構造物のかぶりの減少による鉄筋露出によって、鉄筋の腐食を促進し、構造物耐力を低下させる。また、氷力低減を目的に構造物を傾斜させる場合があるが、激しい摩耗により氷盤接触部が直立に近い状態となり、傾斜による氷力減少効果を失うこともある。

このような氷盤移動によるコンクリート表面の摩耗メカニズムについては、佐伯等、高橋等、著者等の研究によってほぼ明らかとなっているが、摩耗対策に関する設計法については確立されていない。また、設計定数は、わかっていないのが現状である。本章では摩耗メカニズムに関する研究と設計定数を得るために行った種々の現地調査結果に基づいて、氷盤移動による橋脚の耐摩耗設計法を確立する。

２．２　摩耗した橋脚等の現地測定

氷盤移動による橋脚等の摩耗被害予測や対策工法の選定には、摩耗量の把握が重要となる。道内の橋梁橋脚で行った摩耗量調査とボスニア湾の海中灯台について行われた調査結果を整理し、１年間の摩耗量について考察する。図2.１は、道内で調査を行った３橋梁の位置である。別当賀橋は、横田(1988)の調査による。



図2.1　摩耗量の調査橋脚位置

２．２．１　北海道の鉄道橋及び道路橋

（１）旧羽幌線天塩川橋梁（天塩川）

天塩川橋梁は旧羽幌線にあるが、今は廃線となって使われていない。橋梁自体は昭和９年３月に竣工しているが、橋脚は氷盤移動による摩耗が激しいため、その内の２本の橋脚は補修され、氷の影響を受ける範囲は約30cm厚でコンクリートが巻かれている。調査した橋脚は1980年に補修されたもので、調査時点で10年が経過している。橋脚の断面形状は図2.2に示すように楕円形で長径が960cm、短径が490cmで周長が24mである。摩耗量測定位置は図に示すように①②③それに④の４点で、①は氷盤が衝突する橋脚のNoseの位置、③は側面、④は氷の影響をそれほど受けない位置である。橋脚のNose（①点）は東向きで④は、西向きとなっている。摩耗測定は以下のような順序で実施した。

(1)橋脚に凍着している氷盤の一部を破壊して取り去る。橋脚表面には氷が残らないように河川水を用いてタワシで橋脚表面から完全に氷を取り去る。

(2)スチールテープ（最小目盛１mm）を張り付けたステンレス角パイプを鉛直に橋脚に沿わせて固定する。

(3)ステンレスパイプの表面から橋脚表面までの距離を測定する。測定精度は１mmで鉛直下方に１cm毎に測定すると同時に橋脚表面が凍結融解作用による劣化がないかどうかを詳細に観測した。

各測定点の摩耗深さの鉛直分布を図2.3に示す。４測線の平均摩耗量は①、②、③、④それぞれ10.4mm、10.6mm、0.85mm、3.5mmであった。上流側の氷盤が衝突、貫入する部分である。①、②は下流側の④の約３倍の摩耗量となっている。

この天塩川橋梁の建設位置は、潮汐の影響を受けるので、氷盤の鉛直上下方向の移動があるため、下流側でも摩耗が起こってもおかしくない。図2.3からも明らかなように、摩耗の範囲は、調査当時の水面上約１mの範囲である。また調査時の水面より下は摩耗が起こっていないことから、通常の冬期の水位はほぼ調査時の水位であると思われる。このコンクリート製橋脚表面状態の観察から、コンクリートの摩耗試験を行った後の表面状態と良く似ており、凍結融解作用も起こっていないので、氷盤移動によるコンクリート製橋脚の摩耗と判定した。

調査時は、この橋脚の補修後10年を経ていることから年平均 1.0mmの摩耗があったものと推定している。

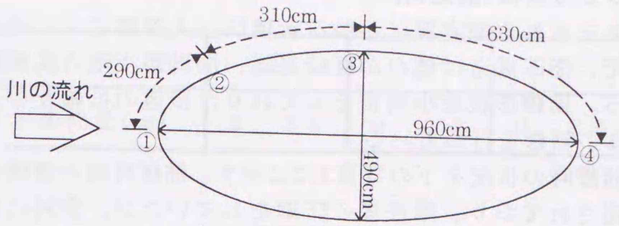


図2.2　調査橋脚の断面図

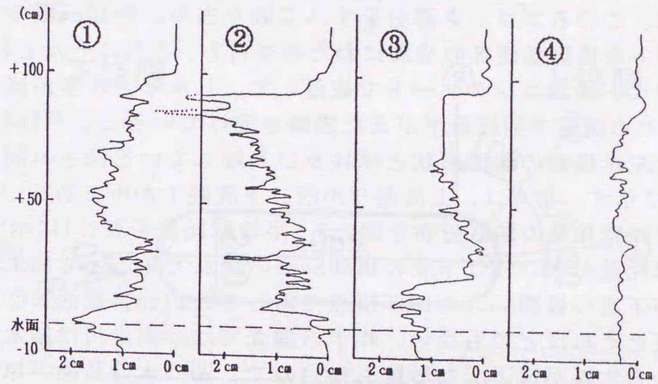


図2.3　摩耗量測定結果

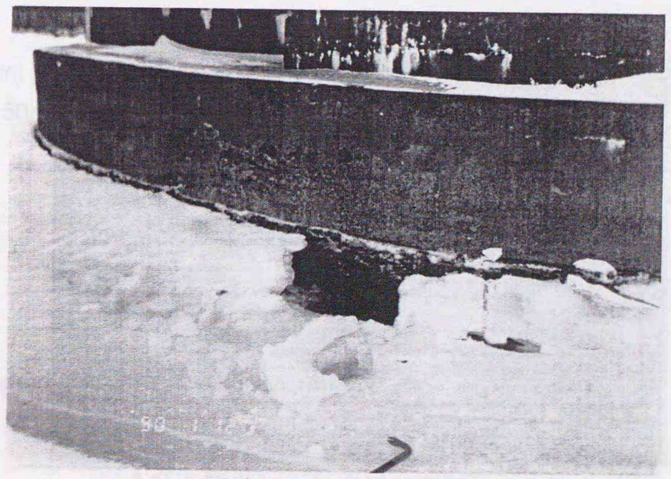


写真2.1　調査橋脚

（2）一般国道３９号新橋（網走川）

網走市の中央を流れる網走川にかかる新橋は、上部構造が３径間連続ＰＣ箱桁橋で、下部構造は橋台が直接基礎、橋脚が半重力式橋脚で井筒基礎である。橋脚形状を小判型をしており、歩道の拡幅及び、昭和60年には橋脚の補修を行っている。

昭和60年の補修時の状況を下の写真2.2に示す。補修時前の橋脚は基礎部が石で被覆されており、摩耗等の防御をしていたが、全周にわたって被覆した石ブロックが剥離し、摩耗や凍結融解で鉄筋がでている部分もあった。損傷箇所は下流部の方が著しい。

補修は、この石ブロック部分をすべて取り去り、約45cm厚の無筋コンクリートを橋脚基礎部の全周にわたって打ち、さらにその上を7cmのプレパックド樹脂コンクリートで被覆した。しかし、８年が経過した今回、我々の調査で補修箇所がまた損傷を受けていることがわかった。調査した左岸橋脚の断面形状と摩耗及び剥離している深さの測定箇所を図2.4に示す。測点は、上流側３か所、下流側１か所である。それぞれの位置の摩耗量の鉛直分布を図2.5、平均摩耗量を表2.1に示す。

最も摩耗量が多いのは下流の橋脚Noseの頂点である④でおよそ3.27cm、次が下流の橋脚Noseのほぼ頂点であるで2.24cm、側面の②、③は２mm程度とそれほどでもない。昨年の調査では、網走川は結氷せず、網走湖から氷盤が流下した形跡もないので、湖の氷盤移動が原因かどうかについては明瞭ではないが、流氷の接岸時には新橋付近までよく組上することから、下流側橋脚Noseの損傷は、それが原因と思われる。

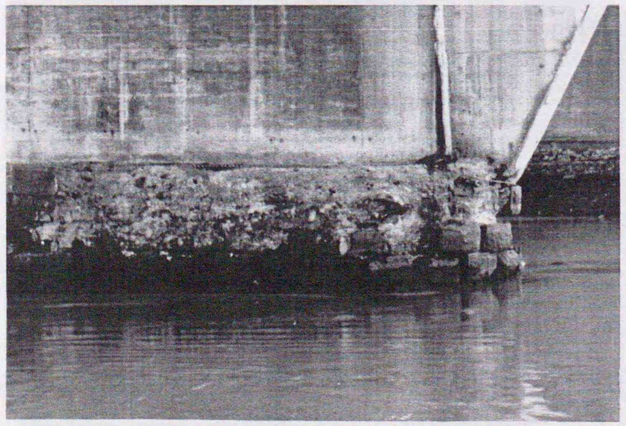


写真2.2　新橋（網走川）補修前の状況

表2.1 各測定位置の平均摩耗量

測　定　位　置	①	②	③	④
平均摩耗量(cm)	２．２４	０．１５	０．２６	３．２７

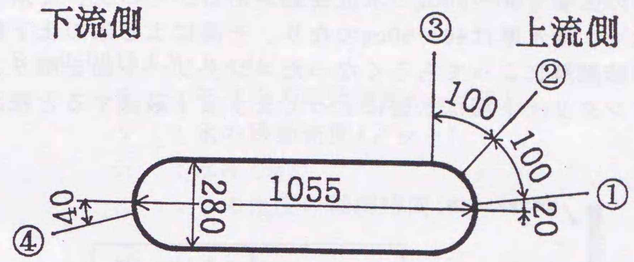


図2.4　橋脚の断面形状と摩耗量測定位置

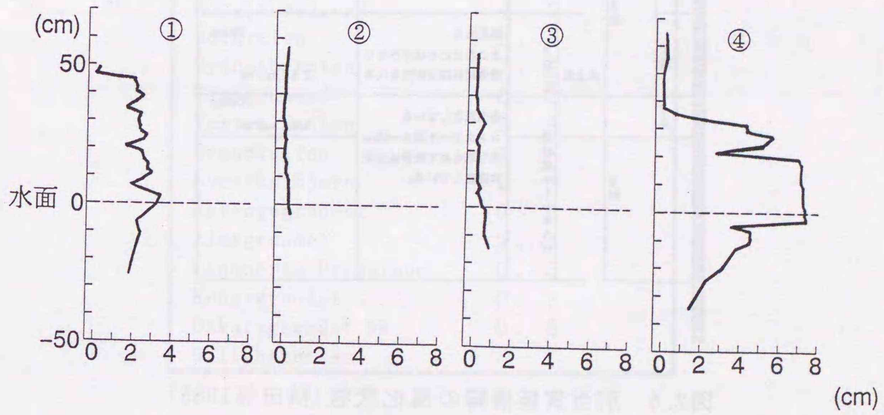


図2.5　各測定点での摩耗量

（3）一般国道４４号別当賀橋（別当賀川）

横田（1988）によれば、別当賀橋は昭和41年（1966）に施工され、その後平成元年（1988）に補修されている。調査は釧路開発建設部によって補修前に行われた。橋脚は満潮時氷面下80cmの範囲で風化し、５～15mmの深さでコンクリート面が削られ粗骨材が露出している。

シュミットテストハンマーによって、氷面下20cmから氷面上90cm間についてコンクリート強度を測定した。その結果、氷面下20cm間では、コンクリート強度が157kg／cm²（平均値）で無影響部分の30％程度となっており、氷面上60cm位は強度の低下が認められた。

調査結果では、この原因について架橋位置が、河川勾配が小さく、干潮、満潮の影響で50～60cmの水位変動がある。その上、冬期間の平均気温も低く、結氷厚は40～50cmのなり、干満による氷の上下動が水面付近で凍結融解によってもろくなったコンクリート面を削り、粗面となったコンクリート面は氷盤によってますます破壊すると推測している。

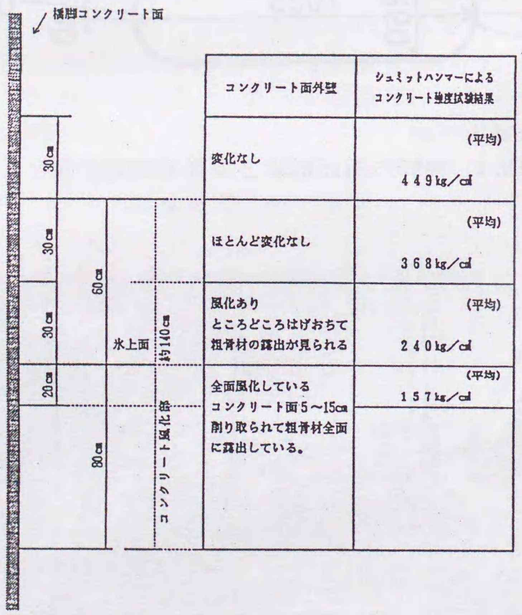


図2.6　別当賀橋橋脚の風化状態（横田等1985）

２．２．２　海洋構造物

ボスニア湾は、島、岩礁それに浅瀬が多いため数多くのコンクリート製海中燈台が古くから建設されている。Janson（1989）はこれらコンクリート製海中燈台表面の海氷移動による摩耗量調査を行っている。

24の燈台の調査結果から、表2.2に示す15の燈台に摩耗が見られた。これらの燈台は建設された時期、設置位置と水深それにコンクリートの配合はもちろん強度も違っているし、大きさも異る。表2.2に示されているように、年平均の摩耗速度は 0.2～７mm/年で、調査時の最大の摩耗深は140mmに達しているものもあった。Jansonは、表2.2の結果と種々の自然条件との相関を調べ、(2.1)式のような結果を得ている。

$$S = 0.0015 \int V \cdot h \cdot dt \qquad (2.1)$$

S　：年平均の摩耗速度（mm／年）
V　：氷の移動速度（ノット）
h　：氷厚（cm）
t　：Vの速度の継続時間（日）

表2.2　ボスニア湾に建設された海中灯台の摩耗量

Lighthouse	Abrasion rate
Larsgrundet	０．２mm/year
Bjornklack	１．４
Borussiagrund	１．１
Norstromsgrund	４．２
Nordvalen	５．５
Sydostbrotten	７．０
Finngrundet	３．６
Vastra Banken	３．３
Grundkallen	１．３
Svenska Bjorn	２．０
Revengegrundet	０．５
Almagrundet	２．１
Landsorts Bredgrund	０．５
Kungsgrundet	０．７
Oskarsgrundet NE	０．５
9 lighthouses	—

２．２．３　氷盤移動による構造物の摩耗量

天塩川橋梁(鉄道橋)及び網走川に架かる新橋(道路橋)で行った調査結果と横田(1988)、Jansan(1989)の結果を整理したものが表2.3である。北海道の調査結果に比較してボスニア湾の海中灯台の摩耗量が大きいのは、北海道に比べ氷象条件が厳しく、氷盤の運動も活発で、１冬期に海中灯台周辺を移動する距離が長く、氷盤と灯台表面との接触圧力も高いことが推定される。

一方、北海道内の橋梁橋脚では網走橋の年間摩耗量が大きい。ただし、網走橋の橋脚の摩耗している面は、摩耗だけではなく凍結融解や流氷の衝突が原因と思われる剥離部が観察され、その部分の摩耗量が特に大きくなっていることから、氷盤との接触だけによる摩耗量ではない。天塩川橋梁では、そのような箇所は観察されなかったことから、別当賀橋等の調査結果も考慮すると、北海道内の橋梁橋脚では、最大の年間摩耗量は１㎜程度と推定される。

また、流氷が河川を遡上するようなオホーツク海沿岸の河口付近にかかる橋梁橋脚においては、流氷による橋脚の下流側の摩耗や流氷の衝突に対する対策なども考慮する必要がある。

表2.3　現地計測によるコンクリートの摩耗量

橋　　梁　　名	年摩耗量(mm/年)	経過年数(年)
天塩川橋梁(鉄道橋・天塩川)	0.09～1.06	10年
新橋(道路橋・網走川)	1.88～4.09	８年
別当賀橋(横田等1985)	0.22～0.68	22年
ﾎﾞｽﾆｱ湾海中灯台(Janson1989)	0.20～7.00	不明

２．３　摩耗試験装置の評価

氷盤移動によるコンクリート表面の摩耗に関する研究は、佐伯等(1985)、浅井等(1985)の研究に端を発し、その後、Nawwar(1986)、Itoh etal(1987、1988)、Huovinen etal(1988)、Hoff(1989)等の研究結果が相次いで発表された。

しかし、氷と諸材料の摩耗試験方法に関する基準がなかったため、氷と構造物間の相互作用や摩擦特性、氷の力学特性に関する知識がなく開発されたものや他の材料試験方法を準用したため、氷と材料の摩耗現象を再現したとは言いがたいものもある。ここでは現在まで行われた氷とコンクリート表面の摩耗試験方法について評価を行う。

２．３．１　氷盤移動による摩耗試験の考え方

構造物に氷盤が作用する時、構造物材料の摩耗の点から見るならば、氷盤と構造物間の摩擦力に焦点をあてて観察するべきである。この摩擦力は、接触圧力に氷盤と構造物間の摩擦係数を乗じたものである。

また、構造物に作用する氷力は、氷盤貫入に伴う歪速度及びaspect比を充分考慮に入れねばならない。氷力の経時変化は歪速度に応じて３つに分類することができる。貫入に伴う歪速度はMichel他(1977)によると(2.2)式で表すことができる。

$$\varepsilon p = \frac{V}{4 \cdot W} \qquad (2.2)$$

ここで、Ｖは氷盤の貫入速度、Ｗは構造物の幅である。図2.7（Ａ）は、εｐが小さい場合で、氷盤は延性的な性質を示して破壊し、εｐが大きい場合は、氷盤が脆性的な破壊を示す。また、その遷移領域のεｐ＝$10^{-3}sec^{-1}$程度では氷力も大きく、大きな破壊周期である。図2.7からεｐ＞$10^{-3}sec^{-1}$では、構造物と氷盤の接触面では、相対速度が零となる時がある。即ち、氷盤と構造物表面間には動摩擦力と静摩擦力が交互に作用する。Saeki etal(1984)の研究によると静止摩擦係数は動摩擦係数の約２倍の値となっており、摩擦力も大きい。さらに、摩擦応力に関係する因子は、接触圧力、氷強度それに相対速度が挙げられる。淡水氷の強度は、主として氷温に依存し、海氷の場合は氷温と密度それに塩分量に依存する。以上より、摩耗試験装置は接触圧力、

相対速度それに氷温が変化できることが望ましい。また、コンクリート表面の摩耗量は非常に少ないので、摩耗量の測定が簡単で精度よく行える供試体が望ましい。以上のように、コンクリート表面の氷盤移動による摩耗試験装置としては次の条件を満足すべきである。

a)接触圧力、氷温それに相対速度が変化できること。
b)試験には静、動摩擦力が作用すること。
c)摩耗量の測定が精度よく簡単に行えること。
d)試験材料は、一定圧力で長時間氷に押しつけられた状態で摩擦力を受けるため、摩擦熱により氷が融解してはならない。
e)接触面では氷やコンクリートの削りくずが発生するが、それが排除されること。
f)材料と氷盤間の摩擦係数は水中であれ、空中であれ変化はない。
g)得られた結果は、実際の摩耗量の予測、摩耗対策に役立つこと。

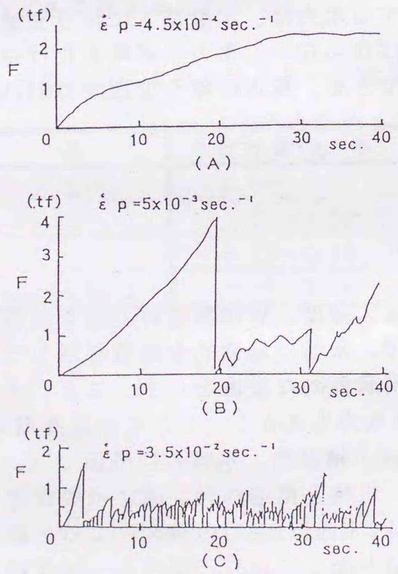


図2.7　氷力と歪速度の関係

2．3．2　各種摩耗試験装置の摩耗メカニズムと特徴

(1)相対摩耗試験

二本の円筒形コンクリート供試体を同時に試験し、基準になる試験材料と他の材料を同時に試験して摩耗に対する相対的強さを調べるものである。試験装置は、回転するコンクリートの円筒を二つの直方体の氷塊で押しつけることによって材料の摩耗を調べるものである。

この試験方法の欠点は、一方向に一定速度で回転するために動摩擦力しか作用しない。相対速度が、実際の氷盤の移動速度に較べて速すぎるため摩擦熱が氷を融解させコンクリート表面に氷のフィルムを形成している。接触圧力を一定に保つことができない等がある。

(2)回転盤試験

ABAMプロジェクトで用いられた装置、フィンランドVTTのHuovinen等の研究、ASTMC-779の３つの方法がある。ABAMとVTTの方式は基本的には同じであり、回転する円盤に中空円筒のコンクリート供試体を固定して回転させる方法である。

この試験方法の欠点は中空円筒供試体の肉圧が厚く、内側と外側では相対速度が異なる。コンクリートおよび氷の削りくずが、接触面にたまる危険がある。摩擦熱が氷盤内にこもる。一方向のみの連続回転なので、動摩擦力しか作用しない等がある。

ASTMC-779は、コンクリート板の摩耗耐久性を調べるための装置を利用したものであるが、あくまでも耐摩耗性の相対評価の指標となるもので、氷盤移動による摩耗と直接的な関係はない。

(3)タンブラー摩耗試験(ABAM)

本試験は、樽形の容器の中に淡水氷を入れて容器全体を回転させる方法である。この試験では接触圧力等が不明確な上、コンクリート板には摩擦力と衝突力が同時に作用する。また、粗骨材や酸化アルミを入れることになっているが目的が不明確であり、実際の構造物の氷盤移動による摩耗量の推定等には不向きである。

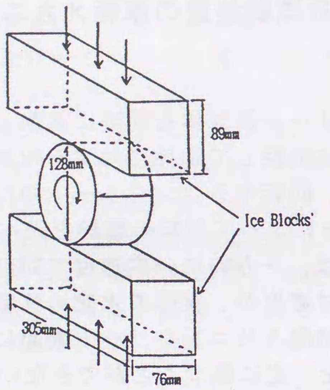


図2.8　相対摩耗試験機の原理

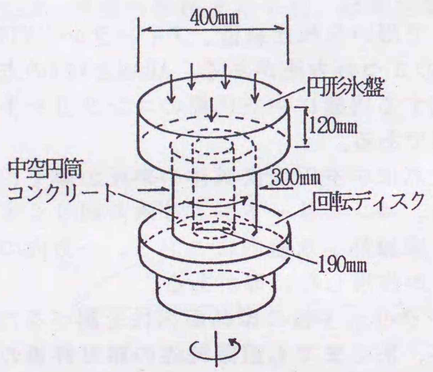


図2.9　回転盤試験機の原理

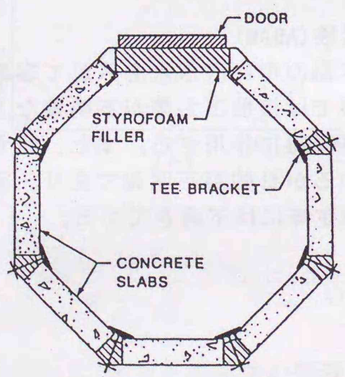


図2.10　タンブラー試験機

（4）滑動摩耗試験機

本試験方法はABAMのプロジェクトと佐伯等によって開発された方式がある。前者は円筒形のコンクリート供試体に鉛直応力をかけた状態で円弧状に20°の角度で往復運動させる機構となっている。佐伯等は、8～12cm厚さの氷柱が水平往復運動し、それに台形のコンクリート供試体を押しつけて摩耗試験を行なう。前者の欠点としては、接触圧力が大きく、接触面での摩擦力だけではなく、氷を削り取るbulldozing forceも作用する。また、供試体は円弧運動をするため、回転の中心に近いところと外側では相対速度に差がでる。佐伯等の方法は欠点が少ないが、高接触圧(1.5MPa以上)になると、氷に疲労破壊が起こるため、氷を頻繁に取り替える必要があることである。

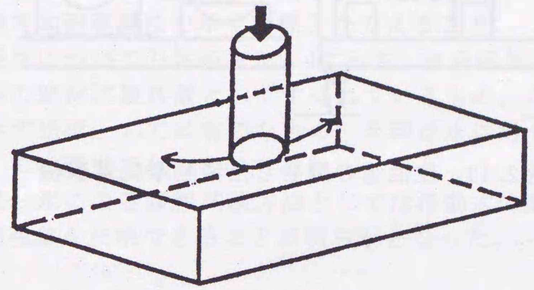


図2.11　滑動摩耗試験機の原理(ABAM)

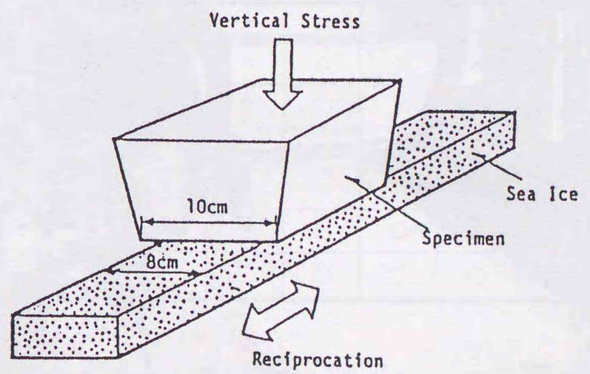


図2.12　滑動摩耗試験機の原理(佐伯等)

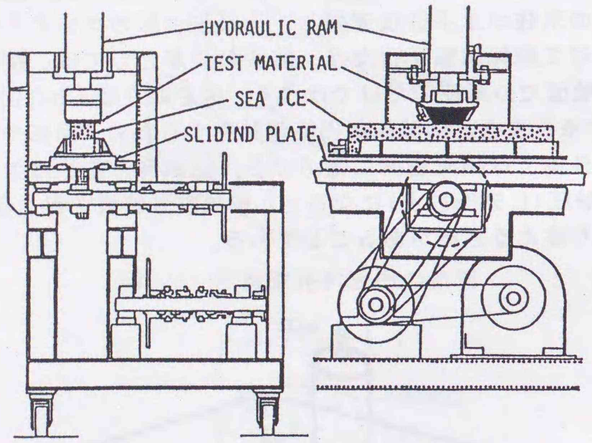


図2.13　佐伯等の開発した滑動摩耗試験機

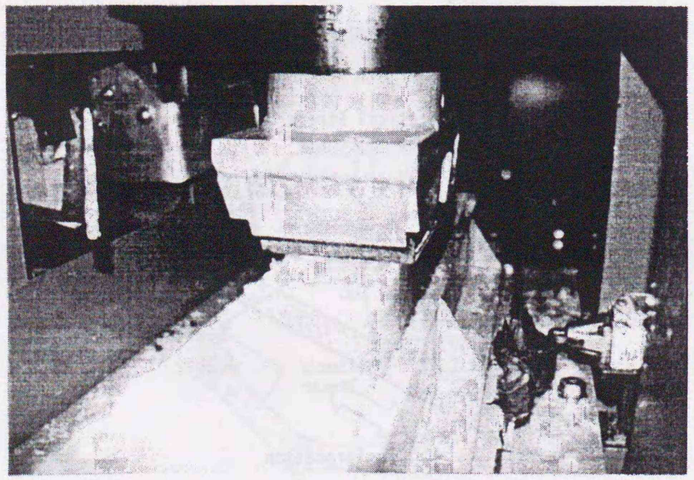


写真2.3　滑動摩耗試験機(佐伯等)による摩耗試験

2．3．3　摩耗試験装置の評価

摩耗試験の基本的な考え方でも述べたように、摩耗試験の具備すべき条件ごとに各試験機の性能比較を行い評価した。評価項目は下記に示すａ～ｉである。

ａ．氷温変化に対応している。
ｂ．接触圧力の変化が可能で、一定に保つことができる。
ｃ．相対速度の変化が可能で、適切な範囲であること。
ｄ．試験中、静止、動摩擦力が交互に作用すること。
ｅ．測定の精度が良く、簡単であること。
ｆ．摩擦熱対策、氷の融解防止対策が考えられている。
ｇ．コンクリート及び氷の削りくず対策ができている。
ｈ．実際の摩耗量等の予測に役立つこと。
ｉ．材料の相対的耐摩耗性を示す指標となりえること。

前述の各項目についての評価を表2.4に示す。総合評価の○印は、氷盤による材料の摩耗試験装置としてすぐれているもの、△は相対的な耐摩耗性を示す指標としては有効なもの、×印は氷に対する耐摩耗性試験装置としては適当でないものである。

評価の結果、氷による摩耗試験方法としては滑動式の摩耗試験装置が最も良く実現象を反映できることが明らかとなった。

表2.4　各摩耗試験装置の評価

		a	b	c	d	e	f	g	h	i	総合評価
相対摩耗試験機		○	×	○	×	△	×	○	△	○	△
回転盤試験	1	○	△	△	×	△	×	×	△	○	△
	2	○	?	?	×	○	×	△	△	○	△
	3	○	×	×	×	△	×	×	×	△	×
タンプラー試験		○	×	×	△	×	×	×	×	○	×
滑動摩擦試験	1	○	△	△	○	○	○	△	○	○	○
	2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

２．４　各種材料の摩耗特性

摩耗対策を実施するにあたって諸材料の摩耗特性を知る必要がある。本節では、コンクリート、鋼板、合成材料、石材等の摩耗特性について実験的に把握した結果について述べる。

摩耗試験機は佐伯等の開発した滑動摩耗試験機を使用した。供試体は、５本の測線を設定し、実験前後の差から摩耗量を測定する。測定精度は１/1000mmである。測定結果では、５本の測線が一様に摩耗することはなく、同一の測線上では中央部の摩耗量が大きかった。これは、供試体の厚さが正確には一定になっていないためと、氷の両側面の変形量が中央部より大きいためだど思われる。そのため、摩耗量は５測線を平均した平均摩耗量で表わす。図2.14に供試体形状と測線の位置を示す。

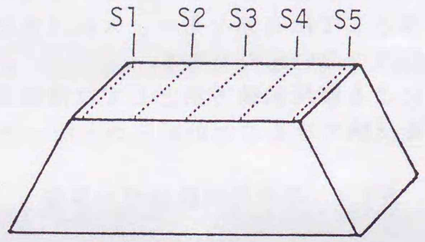


図2.14　供試体の形状と測線の位置

２．４．１　コンクリート

（１）摩耗速度

淡水氷について３種類のコンクリート供試体を使って摩耗試験を行った。１つは粗骨材､細骨材ともに通常の川砂を用いたコンクリート(N.C.)で、一軸圧縮強度が350kgf/cm^{2}と568kgf/cm^{2}のもの、もう１つは粗骨材が軽量骨材、細骨材は通常の骨材を用いたもので、一軸圧縮強度が570kgf/cm^{2}の軽量高強度コンクリート(L.W.C.)である。実験は佐伯等が開発した往復運動タイプの摩耗試験機を用いて行われた。上述した３種類のコンクリートの摩耗性状の比較をするためと、均質な材料(低密度ポリエチレL.D.P.E.)とコンクリートを比較するために基礎

実験を行ったが、その結果が図2.15である。縦軸が平均摩耗量Ｓで横軸が氷盤の移動距離Ｌ(摩耗距離)である。実験は氷盤の移動速度Ｖが5.0cm/sec、接触圧σｖが10kgf/cm^2、氷温Ｔが－10℃で氷は淡水氷で中に砂などは含まれない(Ｗ＝０)場合である。

この図から明らかなように、コンクリートの強度や骨材の違いに関係なく、３種類のコンクリートは摩耗距離の増加とともに、平均摩耗量は同じ変化をする。結論として、コンクリートの一軸圧縮強度が350kgf/cm^{2}程度以上であれば､骨材の違いや強度の違いに関係なく同じ摩耗速度(氷盤１km移動に対する平均摩耗量mm)を示すことが明らかとなった。これは佐伯等やItoh等の海氷での結果と一致する。

また、コンクリート表面の摩耗は、摩耗の進行に伴って３段階に分けられることが明らかになった。コンクリートの表面から0.25mmの深さの範囲では摩耗速度Ｓは大きく、約0.085mm/kmである。コンクリート表面の凹凸及び表層のセメントペースト部分が摩耗しているためと思われる。摩耗試験後のコンクリート供試体表面には、ほとんど骨材がみられない。海氷による摩擦実験を行っているItoh等は、この範囲をSurface Regionと呼んでいる。平均摩耗深さが0.25mm＜Ｓ＜0.60mmの範囲では、Surface Regionに比べると摩耗速度は小さくなり、平均して0.044mm/kmである。この間は平均摩耗量(深さ)は摩耗距離の増加に伴ってゆるやかな曲線を描き増加し、コンクリート表面には骨材の一部が露出している状態で、Transition Regionと名付けられている。摩耗深さが0.6mmを越えると摩耗速度はさらに遅くなり0.012mmとなる。この時、コンクリート供試体の表面は粗骨材の露出面積も大きくなり、この領域はStable Regionと名付けられている。

また、図2.15に示すStable Regionが、その後も一定の摩耗速度で継続するかどうかも明確ではない。そこで、３種類のコンクリート供試体の表面約１cmをコンクリート・カッターで切断して、表面に粗骨材が完全に露出する条件で摩耗試験を行った。その結果を図2.16に示す。完全に粗骨材が露出した条件でも、図2.15のStable Regionの場合と同様に、平均摩耗量Ｓと摩耗距離Ｌには直線の関係があり、その勾配(摩耗速度)も0.012mm/kmで一致した。図2.15のStable Regionは摩耗距離が20kmを越えても維持されることが確認された。

以上のような結果から、淡水氷によるコンクリートの摩耗速度をまとめたものが表2.5である。

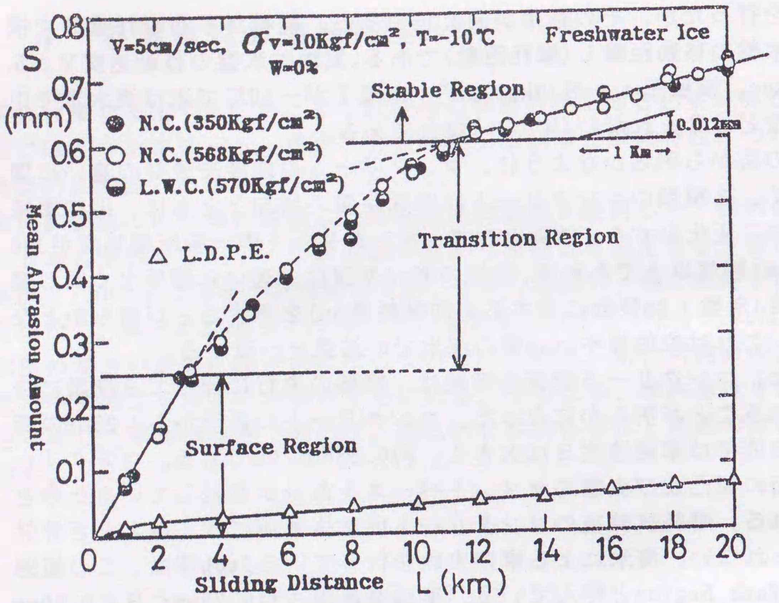


図2.15　淡水氷による摩耗量と氷盤移動距離の関係

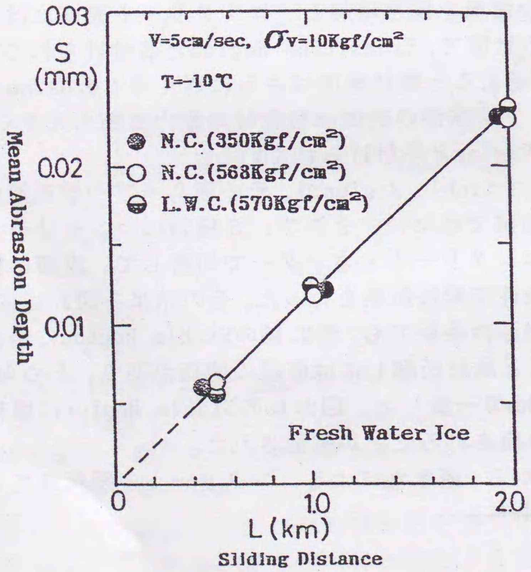


図2.16　表面を切断したコンクリートの摩耗距離と摩耗量の関係

表2.5　淡水氷によるコンクリート表面の摩耗速度

T＝－10℃　　σ_v＝10kgf/cm²　　V＝5.0cm/sec

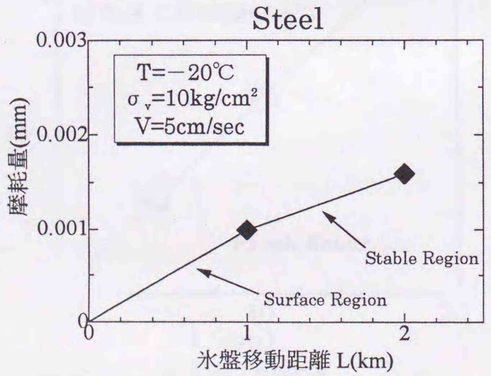
Region	Surface	Transiton	Stable
摩耗深さ(mm)	0～0.25	0.25～0.60	0.60～
平均摩耗速度(mm/km)	0．085	0．044	0．012
コンクリート表面の骨材占有率(%)	0	0～10	10～
コンクリート表面の状態	表面の凹凸，表層セメントペースト部分の摩耗	表面の粗骨材，細骨材の一部が露出	粗骨材の完全露出

2．4．2　鋼　板

鋼板の摩耗特性を図2.17に示す。実験条件としては氷温－20℃、鉛直応力10kg/cm²、相対速度５cm/secである。

鋼板の摩耗特性は、コンクリートの場合と異なりSurface Region とStable Regionの２領域に分けられる。Surface Regionでは、材料表面の凸凹が削られ急激に摩耗するが、Stable Regionでは摩耗速度が緩やかとなり摩耗量は直線的に増加する。Stable Regionにおける鋼の摩耗速度は、0.0027mm/kmであった。

また、図2.18は、砂を含む海氷の摩耗距離と摩耗量の関係であり、砂の濃度w=0.4%、中央粒径d=0.14mmの条件である。鋼は淡水氷の場合と同様に摩耗距離が１km以下の所で急激に摩耗量が増加した後は、ほぼ直線で増加する。この時の摩耗速度は0.0137mm/kmで、淡水氷の場合の約５倍の速度となっている。ZEBRONやL.D.P.E等の合成材料の摩耗量の推移は、ほぼ鋼と同様であるが、摩耗速度がやや鋼より早くなっている。図2.19は、砂分を含まない海氷で行った各種材料の摩耗試験結果である。コンクリートの場合、氷温－８℃～－10℃付近から急激に摩耗速度が増加するのに比べ、鋼や合成材料は、氷温の低下にともなって直線的な増加傾向を示すものの、その増加量はごくわずかであり、コンクリートとは異なる。このことから、鋼や合成材料の場合、摩耗速度はあまり氷温に依存しない。



2.17　鋼の摩耗速度と氷盤移動距離の関係

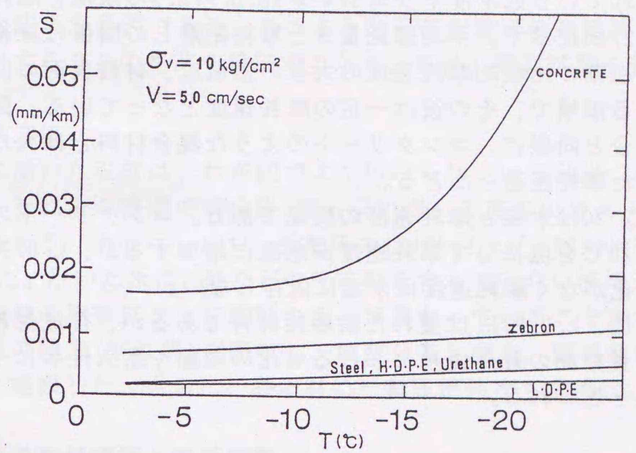
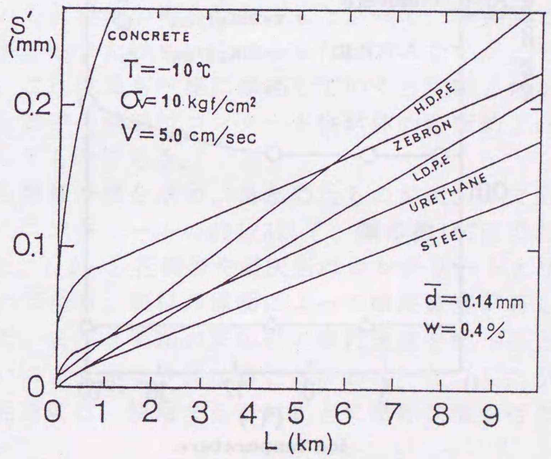


図2.18　各種材料の摩耗量と摩耗距離の関係（海氷）



2.19　各種材料の氷温と摩耗距離の関係（海氷）

２．４．３　合成材料

淡水氷による合成材料の摩耗特性について、重防触鋼管の被覆材として用いられている低密度ポリエチレン(L.D.P.E.)の氷温と摩耗速度の関係を図2.15に示す。平均摩耗量Ｓと摩耗距離Ｌの関係は直線で近似できる。初期の比較的摩耗速度の大きい領域は、材料表面の凹凸が摩耗している領域で、その後は一定の摩耗速度となっている。図2.19の海氷の場合と同様に、コンクリートのような混合材料とは異なり、鋼と類似した摩耗経過をたどる。

また、図2.20は氷温と摩耗速度の関係である。コンクリートの場合は、氷温－10℃を境にして摩耗速度が急激に増加するが、L.D.P.E.はほとんど変化がなく摩耗速度は氷温に依存しない。

このように、L.D.P.E.は優れた耐摩耗材料であるが、合成材料であることから長期間の野外使用における劣化の問題や耐久性等に十分な検討が必要と思われる。

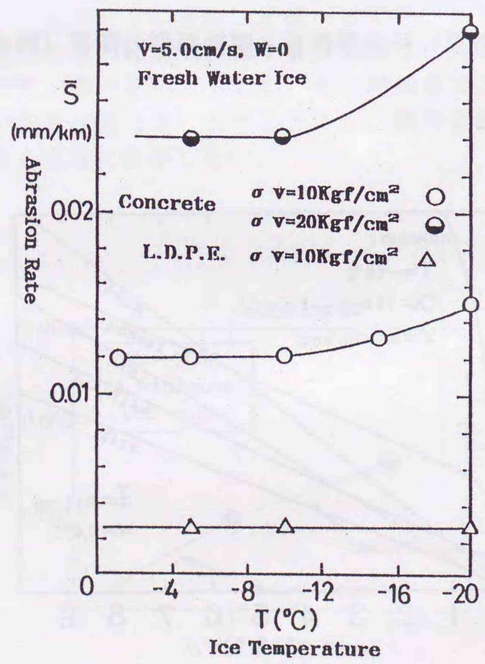


図2.20　合成材料の摩耗速度と氷温の関係

２．４．４　石材

石材は、橋脚等の被覆材料としてわが国だけでなく北欧や北米でも広く使用されている。石材による被覆は、土木構造物の景観向上と表面の劣化防止が目的である。このような石材を橋脚の摩耗防止材料として使用することの是非を検証するため、石材の摩耗試験を行った。

(１)実験方法

実験に用いた石材は、わが国でよく用いられている砂岩、凝灰岩、花崗岩、それに３種類の安山岩(輝石安山岩、石英安山岩Ａ・Ｂ)の計６種類である。氷温は -10℃、接触圧力は10kgf/cm²、相対速度は5cm/secとした。用いた氷は、砂などの不純物を含んでいない淡水氷である。また、石材の種類によって摩耗の仕方が異なっていることから、摩耗した石材の粉末(削り屑)を回収し、粒度分布を求め、顕微鏡によりその形状を観察した。さらに、各石材の一軸圧縮強度も求めた。

(２)石材の摩耗機構と摩耗速度

各石材の淡水氷による摩耗量と摩耗距離(氷の移動距離)の関係を示したのが図2.21である。供試体は、岩石の状態からカッターで成形され、すでにStable Regionの状態にあると考えられる。事実、砂岩を７kmまで摩耗させたときの摩耗量増加の様子を図2.21に示してあるが、最初から一様に摩耗していき、Surface Regionにみられた初期の凹凸の影響はないことが確かめられた。したがって、本実験では各石材とも摩耗距離が２kmまたは１kmまでしか行っていないが、それは上記の理由により、これ以降も一様に摩耗していくと判断したからである。ここで、図2.21中の破線はコンクート供試体の表面約１cmをカッターで切り落としたものである。

図2.21から摩耗速度を求め、まとめたものが表2.６であるが、砂岩が最も小さくコンクリートの約1/3以下、鋼の約1.7倍であることが明らかになった。しか し花崗岩や凝灰岩はコンクリートより大きくなることも明らかになり、石材の種類によって摩耗速度が著しく異なることがわかった。また３種類の安山岩の摩耗速度を比べると、組成や採石場所の違いによりかなり異なることがわかった。したがって、正確な石材の摩耗速度は、使用する石材ごとに摩耗試験を行なう必要がある。

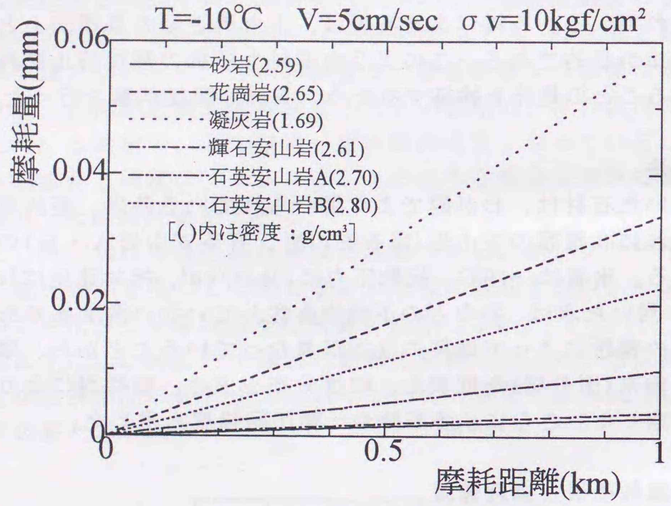


図2.21　石材の摩耗速度と氷盤移動距離の関係

表2.6　各石材の摩耗速度

材　料 (密度(g/cm³)	一軸圧縮強度 (kgf/cm²)	平均摩耗速度(mm/km) (σ_v=10kgf/cm²・T=-10℃)	
		海氷による実験	淡水氷による実験
砂岩 (2.59)	―――	0.0050	0.0029
花崗岩 (2.65)	2550	0.0216	0.0339
擬灰岩 (1.69)	210	0.0251	0.0589
輝石安山岩 (2.61)	1340	0.0084	0.0037
石英安山岩A (2.70)	1550	0.0065	0.0100
石英安山岩B (2.80)	1500	0.0177	0.0227

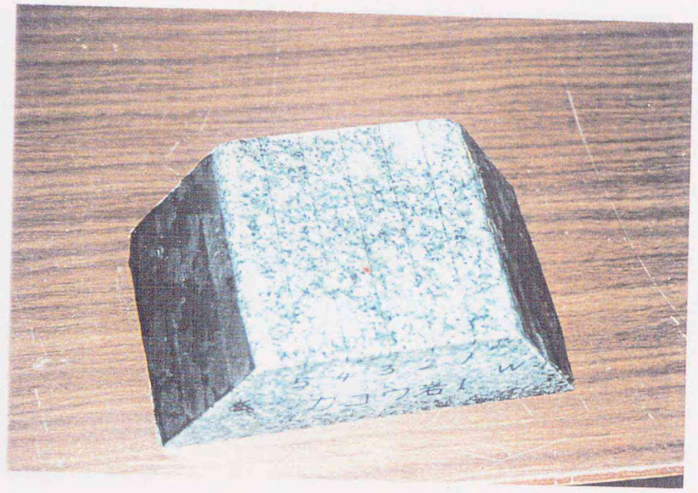


写真2.4　供試体(花崗岩)

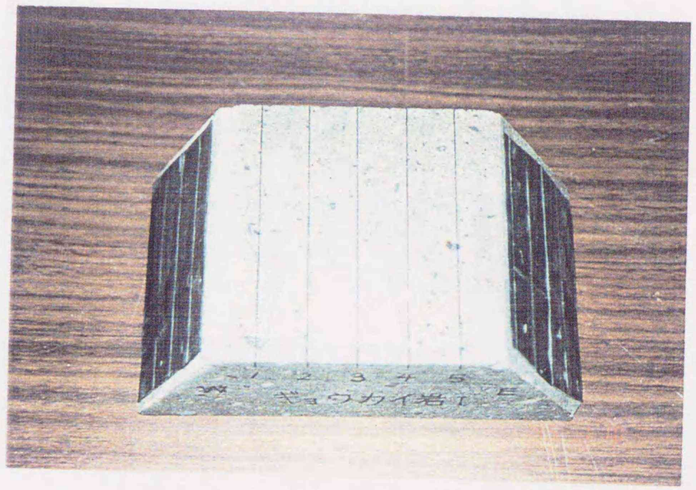


写真2.5　供試体(凝灰岩)

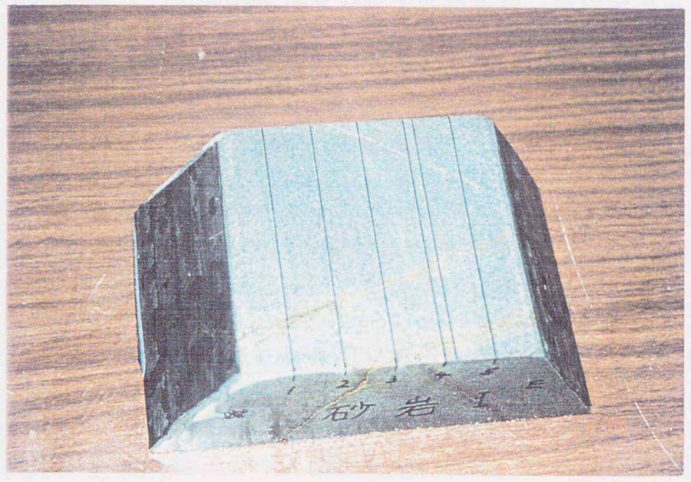


写真2.6　供試体(砂　岩)

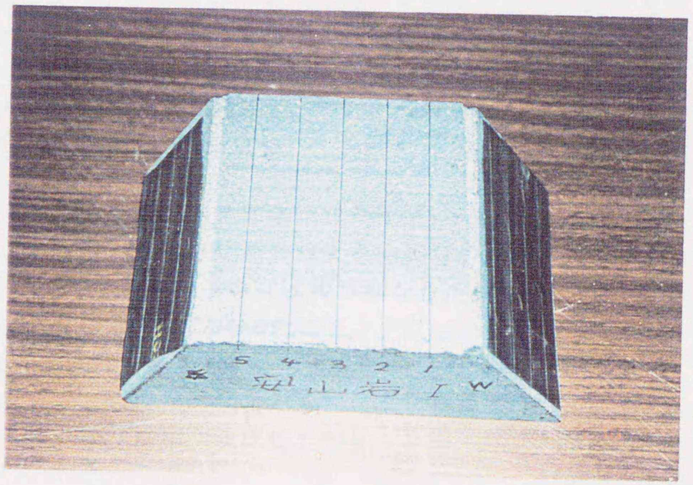


写真2.7　供試体(輝石安山岩)

(3)各石材の特性

過去の実験において、コンクリートの摩耗速度は一軸圧縮強度や骨材の違いには無関係という結果が得られているが、各石材の摩耗速度は大きく異なり、その大小は岩石の生成の仕方や結晶構造、成分、強度等の違いによるものと考えられる。そこで石材の一軸圧縮試験を行った。ただし、砂岩は供試体をとることができなかった。供試体の大きさは、石英安山岩が直径40mm、その他が直径50mmの円柱形で、高さはそれぞれ直径の２倍である。変位速度は１mm/min。試験の結果(圧縮強度、破壊時の歪、密度)を表2.7に示す。また、この一軸圧縮強度と摩耗速度の関係を図2.22に示す。これを見ると、一軸圧縮強度が大きいほど摩耗速度は小さくなっている。したがって、石材の摩耗速度は、コンクリートの場合と異なり、石材の強度に依存していることが明らかになった。

次に摩耗試験中にでる石材の削り屑を集めて顕微鏡による観察を行った。安山岩の粒径は比較的一様で、摩耗試験後の供試体表面の凹凸は少なめで、割と均一に摩耗した。花崗岩は、細かい粒が多いが粗い粒も目立ち、摩耗後表面の凹凸が激しかった。砂岩の粒径はかなり小さく一様な大きさであり、大きめの粒子も丸みを帯び、摩耗試験後の表面状態は最も滑らかであった。凝灰岩粒子は、割と大きめで、最も角張っていた。以上より、凝灰岩の粒子が一番大きく、砂岩の粒子が一番小さかった。

次にレーザー回折法を基本原理とする粒度分布測定器を使って粒子の大きさとその分布を調べた。試験結果では、凝灰岩の粒径だけが明らかに大きく、他の石材は、あまり差はなかった。中央粒径では、安山岩が最も小さく、花崗岩、砂岩、凝灰岩と大きくなっている。中央粒径と摩耗速度の関係において相関は見られなかった。以下に試験結果をまとめる。

１)石材の摩耗量は摩耗距離に比例する。
２)各種石材により摩耗速度は大きく異なる。また同じ安山岩でも、成分や採石場所により摩耗速度が異なる。
３)砂岩や安山岩の摩耗速度はコンクリートの約1/3であり、耐摩耗材として優れているし、石材を用いれば美観上も良い。
４)石材の一軸圧縮強度が大きいほど、摩耗速度は小さい。
５)石材の粒径は摩耗速度にそれほど影響を及ぼさない。

表2.7　各石材の一軸圧縮強度

材　　料	密　　度 g/cm²	一軸圧縮強度 kgf/cm²	一般的な一軸圧縮強度 kgf/cm²
砂岩	2．59		969
擬灰岩	1．69	210	342
輝石安山岩	2．61	1340	1413
石英安山岩A	2．70	1550	
石英安山岩B	2．80	482	
花崗岩	2．65	725	1662

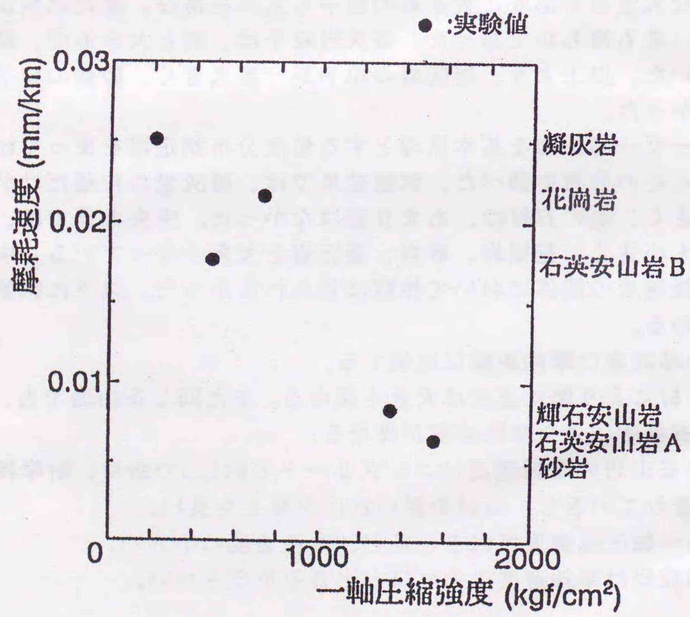


図2.22　各石材の一軸圧縮強度と摩耗速度の関係

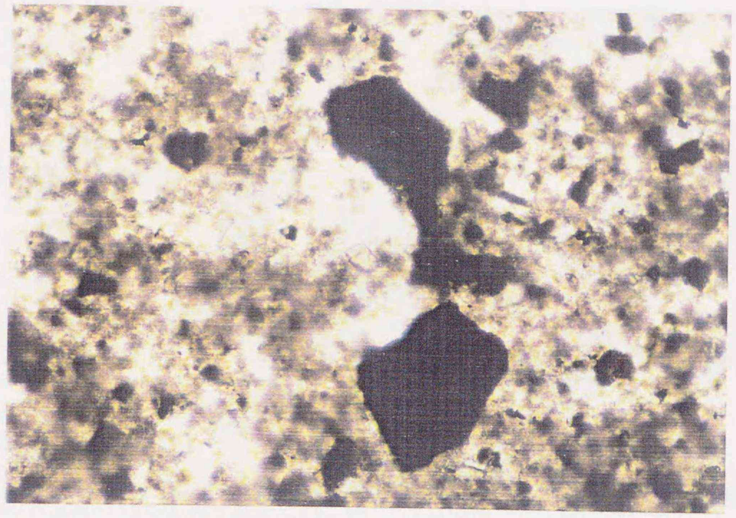


写真2.8　砂岩の削り屑の顕微鏡写真

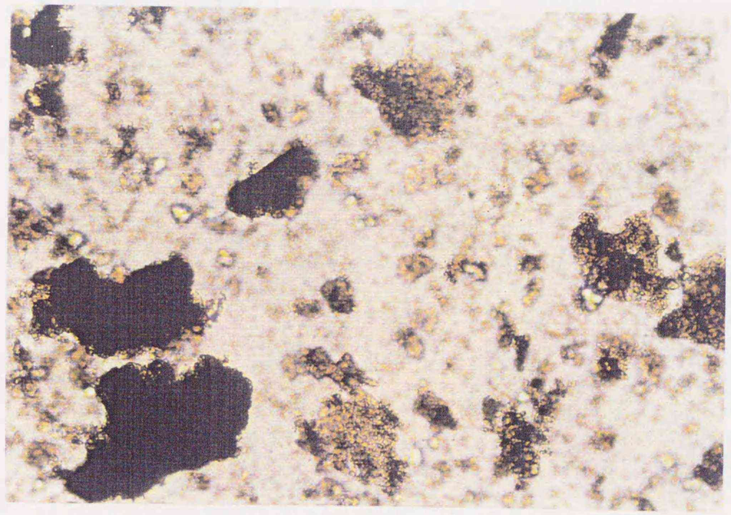


写真2.9　花崗岩の削り屑の顕微鏡写真

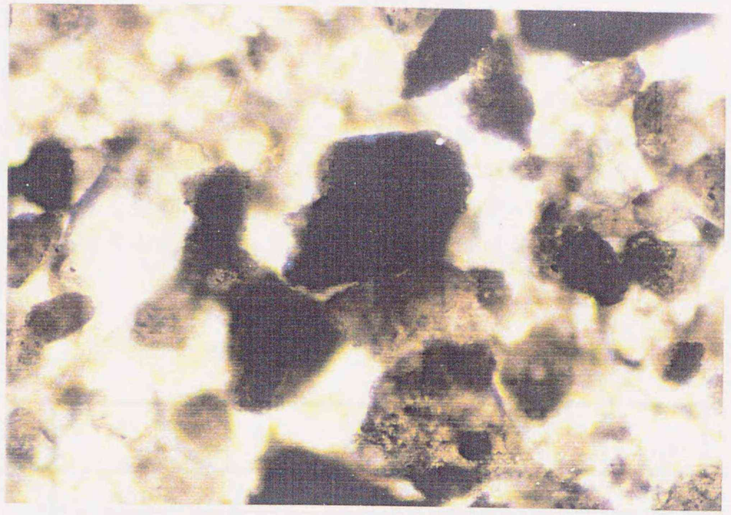


写真2.10　凝灰岩の削り屑の顕微鏡写真

写真2.10　凝灰岩の削り屑の顕微鏡写真

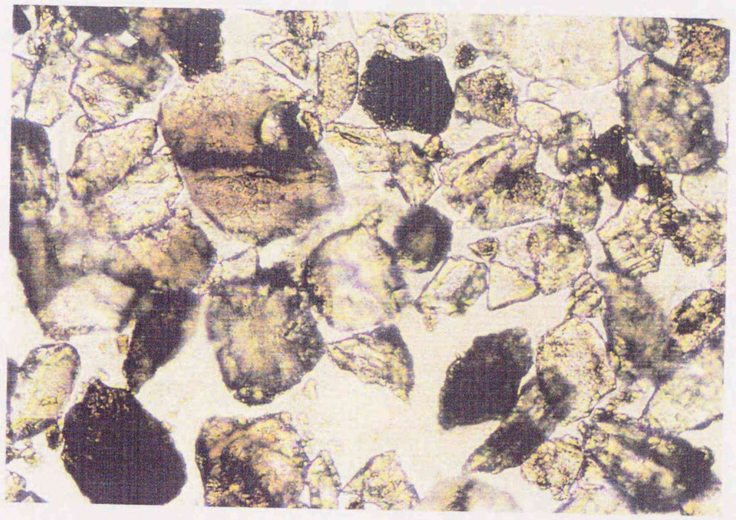


写真2.11　輝石安山岩の削り屑の顕微鏡写真

２．４．５　各種材料の比較

図－３の直線の傾きから摩耗速度を求め、もとめたものが表－１であるが、砂岩が最も小さくコンクリートの約1/3以下、鋼の約1.7倍であることが明らかになった。しかし花崗岩や擬灰岩はコンクリートより大きくなることも明らかになり、石材の種類によって摩耗速度が著しく異なることがわかった。また３種類の安山岩の摩耗速度を比べると、組成や採石場所の違いによりかなり異なることがわかった。このことは、各種石材の摩耗速度をはっきりと断定することは難しく、現場で使う石材ごとに実験してみないと正確にはわからないことを示している。

表2.8　各材料の摩耗速度

材　　料		平均摩耗量 σ_v=10kgf/cm²・T=-10℃
コンクリート		０．０１２
合成材料	ＬＤＰＥ	０．００２５
	ＨＤＰＥ	０．００２６
	Urethane elastomer	０．００２７
鋼		０．００２７
石材	砂岩	０．００２９
	花崗岩	０．０３３９
	擬灰岩	０．０５８９
	輝石安山岩	０．００３７
	石英安山岩Ａ	０．０１００
	石英安山岩Ｂ	０．０２２７

２．５　氷盤と橋脚表面の接触圧力の影響

２．５．１　接触圧力と摩耗速度

接触圧力σｖと氷温、それに摩耗速度の関係が図2.23である。材料は軽量高強度コンクリートで相対速度Ｖは5.0cm/secである。図からも明らかなように、摩耗速度は接触圧σｖの増加とともに直線的に大きくなる。また、氷温－５℃と－10℃の実験結果に差はみられなかったが、－20℃に氷温が低下し、氷の強度が強くなると摩耗速度が若干大きくなる傾向がみられる。図中の破線の範囲は、それ以上接触圧σｖを大きくすると氷がすぐ破壊するため、実験が不可能であったので外挿したものである。

また、図2.24からも明らかなように、摩耗速度への氷温の影響は、氷温が－10℃以上では摩耗速度は氷温の影響を受けないが、－10℃以下では、氷温の低下とともに摩耗速度は大きくなる。これは氷温低下による氷強度が強くなったためと思われる。氷強度が高まると、接触圧力も増加する。また、佐伯等やItoh等の結果より摩耗速度は氷の成長方向と摩擦力の作用方向の関係はなく、氷盤の移動速度にも強くは影響を受けないことが明らかとなっている。

したがって、淡水氷によるコンクリートの摩耗速度は接触圧σｖのみで決定される。

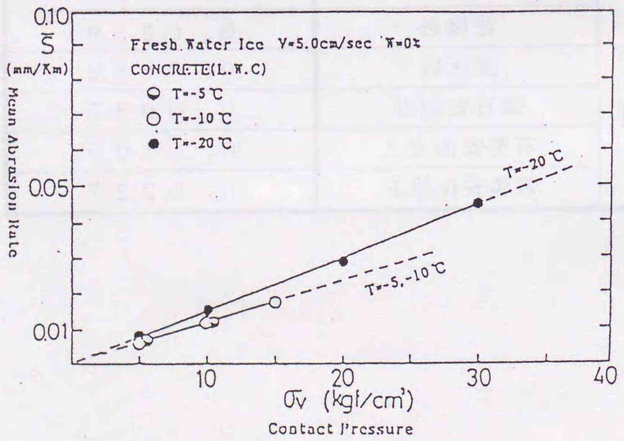


図2.23　接触圧力と摩耗速度の関係

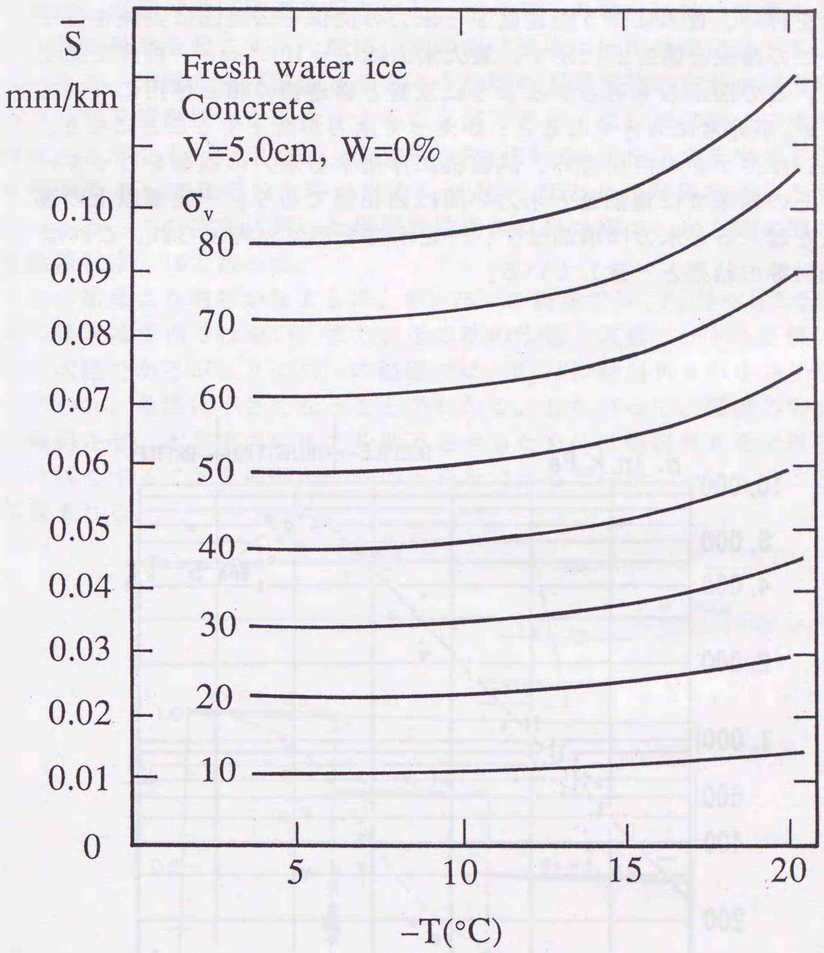


図2.24　各接触圧力ごとの氷温と摩耗速度の関係

２．５．２　氷力と氷盤の貫入速度

氷は粘弾性体のため、氷盤の橋脚への貫入速度は氷力(接触圧力)に影響を及ぼす。Michel＆Tousant(1977)は淡水氷を用いてIndentation Testを行い、貫入に伴う歪速度εと氷力の関係を広範囲に実験を行った。この結果を図2.25に示す。最大氷力は$\varepsilon = 10^{-3}\,sec^{-1}$程度で発生する。この図からも明らかなように氷盤と構造物の相互作用については、ε_pが非常に大きくなると、かえって氷力が低下することになる。

Neilはカナダの河川での、試験杭に作用する氷力の観測を行っている。その結果では運動量と氷力の間は無相関であり、一定値以上の運動量を越えると氷力は増加せず、一定氷力を示すと考えられ、これはMichel等の結果と一致している。

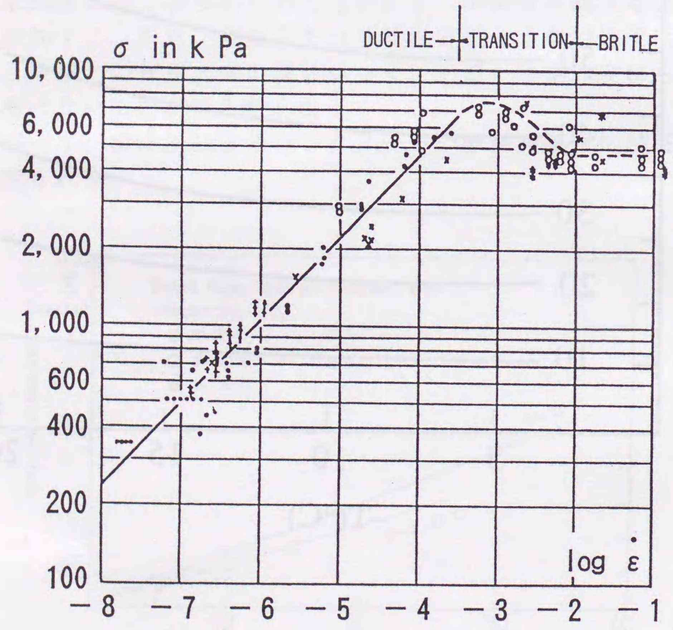


図2.25　氷盤の貫入に伴う歪み速度と氷力の関係(Michel等1977)

２．５．３　橋脚Noseの傾斜角と氷力

橋脚の基本形式は氷力(接触圧力)の立場からみると図2.26に示すようにθの角度によって直立型と傾斜型に分けられる。傾斜角θがゆるい場合、氷盤は曲げ破壊を起こすし、θ＝90°の場合には、圧壊あるいは挫掘破壊を起こす。一般に、氷の曲げ強度は圧縮強度に比べると弱いため、氷盤を曲げ破壊させるような傾斜型構造物の方が水平方向氷力つまり接触圧力を小さくすることができる。図2.26は同一の氷の強度と氷厚をもった氷盤が、直立構造物(円断面)に作用する氷力Fと角度θをもって傾斜した時の氷力F_hの比F_h/Fとθの関係を示したものである。この実験に用いた模型構造物の材料は鋼で、氷と鋼の間の摩擦係数は0.10であった。

この結果より明らかなように、θ＞75°の範囲では、$F_h/F = 1.0$で傾斜の効果は明白ではない。また、その時の氷盤の破壊モードも圧壊に近い状態であるが、θ＜75°の範囲では、F_h/Fは傾斜角θが小さくなるにつれ、急激に小さくなることがわかる。したがって、橋脚のNoseを傾斜させ、水平方向の氷力を低下させるためには傾斜角θをできるだけ緩くすることと橋脚のNoseの表面をできるだけ滑らかにすることが望まれる。

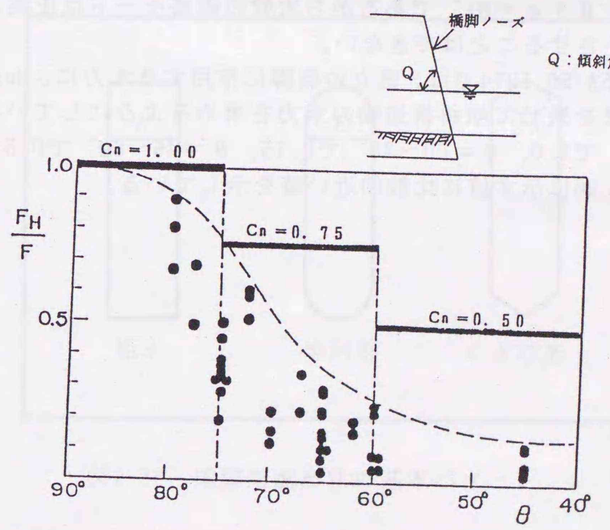


図2.26　傾斜による氷力の変化

氷盤が傾斜構造物に貫入する時の水平方向氷力式（氷盤破壊時に発生する場合）は、一般に次式で示される。

$$F = A \cdot f(l_c, D) \cdot \tan(\theta + \phi) \cdot h^2 \cdot \sigma_f \quad \cdots\cdots\cdots (2.3)$$

A：定数
l_c：氷盤の特性長
h：氷厚
σ_f：氷盤の曲げ強度
θ：傾斜角
ϕ：摩擦角

$$\phi = \tan^{-1}\mu \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.4)$$

μ：氷盤と橋脚Nose表面との摩擦係数

橋脚Noseの角度を$\theta = 60^\circ$としても、通常の表面の滑らかなコンクリートであると$\mu = 0.2$程度であるから$\phi = 11^\circ$、$\theta + \phi = 71^\circ$で氷盤も曲げ破壊に近くなり氷力の低下も期待できる。しかし、橋脚表面が凍結融解作用により粗くなり、摩擦係数が$\mu = 0.4$程度になると、$\phi = 21^\circ$となり、$\theta + \phi = 81^\circ$であるから氷盤の破壊モードは圧壊タイプで氷力を低下させることはできない。

カナダのCSA S6 1974では、直立の橋脚に作用する氷力に、Noseの傾斜角θの効果を乗じて傾斜構造物の氷力を求めるようにしているが、$\theta = 75 \sim 90^\circ$で1.0、$\theta = 60 \sim 75^\circ$で0.75、$\theta = 45 \sim 60^\circ$で0.5となっていて、図2.26に示す値に比較的近い値を示している。

２．５．４　橋脚の断面形状と接触圧力

氷力（接触圧力）は、橋梁上流側のNoseの断面形状が問題となる。断面形状は図2.27に示すように３つの形式に分類される。矩形断面、円断面及びくさび形である。

直立構造物に対しては、USSR－SN－76/66 codeにおいて、矩形断面を1.0とする時、半円形では0.9倍、$2\alpha = 90^\circ$の場合0.54倍としている。佐伯等の場合は、矩形断面の場合を1.0とする時、円断面では0.74倍、$2\alpha = 90^\circ$の場合のくさび形においては0.66倍となっている。これに対してAfanasev(1972)の場合には、矩形断面の場合を1.0とする時、円断面を0.9としている。Korzhavin(1962)の式においては、矩形で1.0、円断面で0.95、くさび形の場合は$0.85\sin\alpha$（$30^\circ < \alpha < 60^\circ$）、$2\alpha = 90^\circ$の場合0.60となる。これらをまとめたものが表2.9である。

また、傾斜構造物に対して、Korzhavin(1962)は、傾斜角と2αを組み合わせた係数として表2.10に示す値を得ている。円断面は$2\alpha = 80^\circ$に相当するものとしている。この他Tryde(1976)も傾斜角θと2αの効果を考慮した氷力式を提案している。

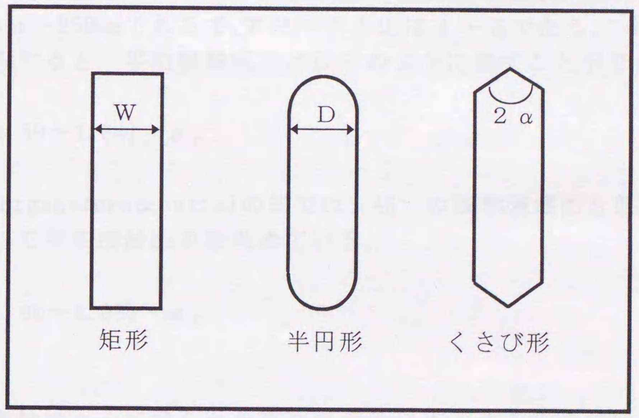


図2.27　橋脚断面形状の基本パターン

表2.9　直立構造物の接触圧力に対する形状効果

基本形式	USSR-SN 76/66code	佐伯等	Afanasev	korzhavin	lsnard
矩形断面	1．00	1．00	1．00	1．00	1．00
円断面	0．90	0．74	0．90	0．95	
くさび形	0．54	0．66	—	0．60	

表2.10　傾斜構造物の接触圧力に対する形状効果
(Korzhvin　1971)

β	2α				
	45°	60°	75°	90°	120°
45	0．2	0．17	0．16	0．16	0．15
60	0．24	0．20	0．19	0．18	0．17
70	0．38	0．27	0．23	0．21	0．19
75	0．79	0．38	0．29	0．26	0．22

2．5．5　接触圧力と一軸圧縮強度の関係

(1)直立型橋脚に作用する接触圧力と一軸圧縮強度の関係

1)橋脚Noseが矩形断面

①理論式

橋脚に作用する全氷力を接触面積で除することによって平均接触圧力を求めることができる。矩形断面に作用する理論氷力は、ReinickeはHill型の破壊を仮定することによって限界塑性理論を用い、平面ひずみ条件より次式を得ている。

$$F = (1.4+0.97\cdot w/h)\cdot w\cdot h\cdot \sigma_c \qquad (2.4)$$

ここで、F：氷力、h：氷厚、w：橋脚幅、σ_c：一軸圧縮強度である。(2.4)式を平均化した平均接触圧力(σ_v)は次式で示される。これは、最大氷力時の平均接触圧力である。

$$\sigma_v = F/wh = (1.4+0.97\times w/h)\cdot \sigma_c \qquad (2.5)$$

氷厚と構造物の幅の比をアスペクト比というが我が国の場合、結氷下河川の氷厚は、天塩川等での調査結果でもわかるように約50cm、橋脚幅は200cm～250cmであるで、アスペクト比は４～５である。これを(2.5)式に代入すると、平均接触圧力は以下のように表すことができる。

$$\sigma_v = (1.59\sim 1.64)\cdot \sigma_c \qquad (2.6)$$

また、Morgenstern&Nuttalの式では、45°の楔形破壊面を仮定して次式によって平均接触圧力を求めている。

$$\sigma_v = (1.06\sim 1.08)\cdot \sigma_c \qquad (2.7)$$

②実験式

次に、実験によって得られた直立構造物に作用する氷力式は、一般に次式のように表される。

$$F = k\cdot C\cdot w^{n1}\cdot h^{n2}\cdot \sigma_c \qquad (2.8)$$

ここで、k：氷盤貫入時の歪み速度に依存し、Cは橋脚Noseの断面形により決定される係数である。佐伯等、NKKｸﾞﾙｰﾌﾟの実験式では、n1＝0.5、n2＝1.0である。また、Hirayama et.al.、三菱重工ｸﾞﾙｰﾌﾟの研究では、n1＝0.5、n2＝1.1と、大きな違いはない。佐伯等の実験式を用いると矩形断面でC＝6.8、貫入にともなう歪速度を$10^{-3}sec^{-1}$のオーダーとするとk＝1.0となり(2.8)式は次式となる。

$$F=6.8\sqrt{w}\,h\cdot\sigma_c \tag{2.9}$$

$$\sigma_v=F/wh=(6.8/\sqrt{w})\cdot\sigma_c \tag{2.10}$$

w＝200～250cmとすると

$$\sigma_v=(0.43\sim0.48)\cdot\sigma_c \tag{2.11}$$

③現地計測

佐伯等や田中等は矩形断面構造物に作用する氷圧力の実験を行っている。これは、Indenterの氷との接触面に10～15個の圧力計及び荷重計を設置して貫入試験を行った。実験時のアスペクト比は1.10～4.41である。この時の接触圧力の最大値$\sigma_v$maxと一軸圧縮強度σ_cを表2.11にしめす。一軸圧縮強度試験に使用した供試体の寸法は直径10cm、高さ20cmの円筒形、歪み速度は(1～3)×$10^{-3}sec^{-1}$で、約20本破壊した時の平均値である。

表2.11から最大の局部氷圧力(σ_c)は一軸圧縮強度(σ_v)の2.6～6.5倍となっている。しかし、佐伯等によって最大の接触圧力は氷の三軸圧縮強度を越えないことが実験的に明らかになっており、それは一軸圧縮強度の4.5倍程度と報告している。このことから、局部接触圧の最大値は一軸圧縮強度の4.5倍程度と考えてよい。

④σ_v/σ_cの最大値

矩形の場合の接触圧力と一軸圧縮強度の関係をまとめる。

理論氷力式	σ_v/σ_c＝1.06～1.64
実験氷力式	σ_v/σ_c＝0.43～0.48
現地計測値	σ_v/σ_c＝2.60～4.50

以上のような結果から、接触圧力は安全側に考慮して氷の一軸圧縮強度の4.5倍と見積もることが適当と考えられる。

2)橋脚Noseが半円形断面

①実験式

Noseが半円形断面の構造物に作用する全氷力は基本的には(2.8)式である。佐伯等の場合は、貫入に伴う歪み速度が$10^{-3}sec^{-1}$の時の半円形に作用する全氷力及び接触圧力は、次式で表される。

$$F=5.0\sqrt{w}\cdot h\cdot\sigma_c \tag{2.12}$$

$$\sigma_v=(5.0/\sqrt{w})\cdot\sigma_c \tag{2.13}$$

w＝200～250cmとすると

$$\sigma_v=(0.32\sim0.35)\cdot\sigma_c \tag{2.14}$$

(11)式は、直線の半無限のedgeを持つ氷盤が貫入した場合であるが、氷盤が半円のNoseに完全に密着した場合は次式でしめされる。

$$\sigma_v=(0.83\sim0.91)\cdot\sigma_c \tag{2.15}$$

②現地計測

佐伯等や田中等は、アスペクト比が4.5～5.8の円断面構造物に作用する氷圧力分布を測定し、表2.12のような結果を得ている。表から明らかなようにσ_v/σ_cは1.84～6.28の範囲となっている。これに対して、構造物に作用する全氷力が最大になる時(氷盤が破壊する時)の各歪速度に対する無次元接触圧力(σ_v/σ_c)の分布を図2.28(a)(b)(c)に示す。図中のθ＝0はNose先端位置であり、Z＝0は氷厚の中心線である。氷厚は、10～14cmであるから、氷盤の表面近くのZ＝40cm位置でのσ_v/σ_cが最も小さく、氷厚中心部の接触圧力が大きい。各ケースの最大のσ_v/σ_cは2.0～2.4である。

③σ_v/σ_cの最大値

矩形の場合の接触圧力と一軸圧縮強度の関係をまとめる。

実験氷力式	σ_v/σ_c＝0.83～0.91
現地計測値	σ_v/σ_c＝2.00～2.40

半円形断面も矩形断面と同様に安全側に考慮して、氷の一軸圧縮強度の4.5倍と見積もることが適当と考えられる。

表2.11　矩形断面構造物に作用する最大局所氷圧力
（佐伯等1981）

	Aspect Ratio (w/h)	Strain Ratio V/4W (sec^{-1})	σv/σcの最大値	T℃	σc
1981	1.1	$7.9\times10^{-5}sec^{-1}$	2.75	-2～-2.3℃	24kgf/cm^2
	1.1	$6.6\times10^{-4}sec^{-1}$	6.50	〃	〃
	1.1	$4.1\times10^{-3}sec^{-1}$	4.50	〃	〃
1983	1.7	$8.2\times10^{-4}sec^{-1}$	2.6	-2.0℃	20kgf/cm^2
	2.76	$6.7\times10^{-4}sec^{-1}$	3.0	-2.0℃	〃
	4.14	$6.1\times10^{-4}sec^{-1}$	4.4	-2.0℃	〃

ここで一軸圧縮強度は、Φ10cm120cmの円筒供試体を用いて、歪速度
$1\sim3\times10^{-3}sec^{-1}$で破壊するときの強度

表2.12　円断面構造物に作用する最大氷圧力
（佐伯等1987）

Run	h(cm)	Vcm/s	Σsec^{-1} $\times10^{-3}$	T	σv·max	θ
A1	12.0	0.565	2.59	-2.4	6.28	0°
2	12.0	0.019	0.087	-2.2	6.12	30°
3	12.0	0.021	0.096	-2.5	1.84	0°
4	12.0	1.38	0.631	-2.7	3.87	0°
5	14.0	1.45	6.65	-4.5	2.48	30°
6	17.0	0.415	2.07	-2.0	2.07	45°
7	10.0	0.318	1.46	-2.0	3.33	15°
8	9.8	0.678	3.11	-2.0	2.18	15°
9	9.3	0.023	0.106	-2.0	2.07	0°

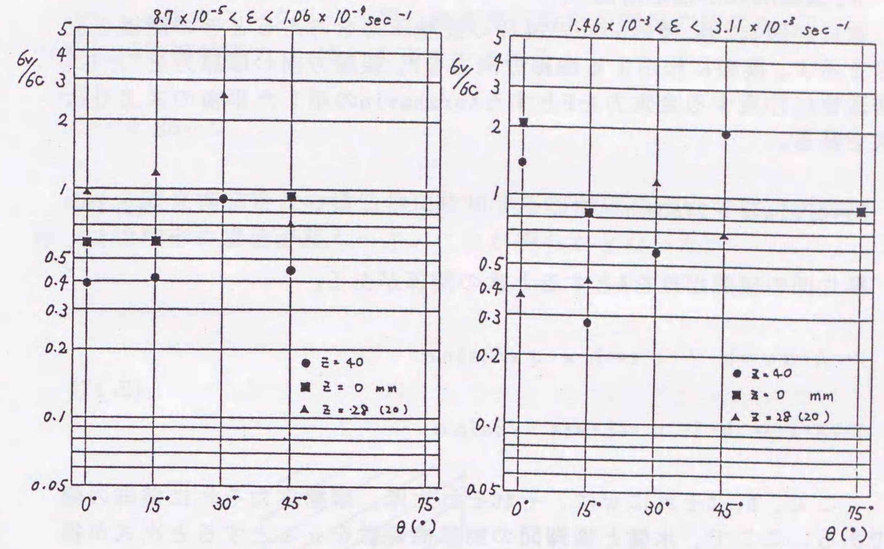


図2.28　歪速度に対する無次元接触圧力（σ_v/σ_c）の分布

3）橋脚Noseが楔形断面

次に、図2.29に楔形Noseの場合の接触圧力を考えるときの座標と記号を示す。楔面に作用する法線方向力をP、接線方向の摩擦力をTとし、構造物に作用する全氷力をFとするKorzhavinの示した平衡の式より次式を得る。

$$F=2P\sin\alpha+2T\cos\alpha \tag{2.16}$$

楔片面の接触面結をAとすると次の関係がある。

$$P=A\cdot\sigma v=h\cdot l\cdot\sigma v=h\cdot w\cdot\sigma v/2\sin\alpha$$

$$T=A\cdot t=h\cdot l\cdot t=h\cdot w\cdot t/2\sin\alpha \tag{2.17}$$

ここで、h、tそれにwは、それぞれ氷厚、摩擦応力それに橋脚の幅である。ここで、氷盤と橋脚間の動摩擦係数をμkとすると次式が得られる。

$$T=\mu k\cdot\sigma v \tag{2.18}$$

(2.17)(2.18)式を(2.16)式に代入して整理すると、平均の接触圧σvは次式で示される。

$$\sigma v=F/h\cdot w\cdot(1+\mu k/\tan\alpha) \tag{2.19}$$

楔形Noseを有する構造物に作用する全氷力は、佐伯等によると次式で示される。

$$F=C\cdot\sqrt{w}\cdot h\cdot\sigma v \tag{2.20}$$

Cは楔の交角によって異なり、$2\alpha=90^\circ$で4.5となっている。
(2.20)式と(2.19)式より、平均接触圧σVは次式で計算される。

$$\sigma V=C\cdot\sigma v/\sqrt{w}(1+\mu k/\tan\alpha) \tag{2.21}$$

ここで単位はcm、kgfとする。標準的な橋脚断面を仮定してB＝200cm、$\alpha=45^\circ$、氷とコンクリート間の動摩擦係数を中澤等の結果から0.3とすると平均接触圧力σvは、次式で示される。

$$\sigma v=0.25\sigma C \tag{2.22}$$

以上の直立構造形式の構造物に作用する接触圧については、平均接触圧では楔形の場合が最も小さいことが明らかとなった。

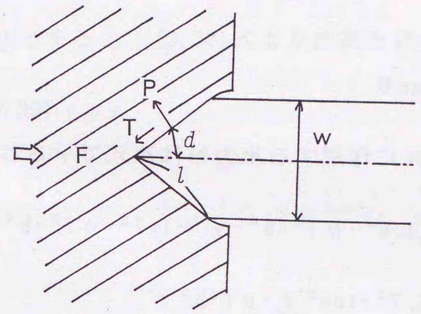


図2.29　座標と記号

(2)傾斜型橋脚に作用する接触圧力と氷の一軸圧縮強度の関係

傾斜している半円形断面の構造物に氷盤が貫入する場合の接触圧力(局部氷圧力)を直接測定した結果は未だ報告されていない。平山等の実験結果によると傾斜したNoseに作用する水平方向氷力Hは次式で示される。

$$H = 1.6 \cdot \sigma f \cdot h^2 \cdot \gamma \qquad (2.23)$$
$$\gamma = \tan(\theta + \phi)$$
$$\phi = \tan^{-1} \mu k$$

ここでσf、θはそれぞれ氷盤の曲げ強度とNoseの傾斜角である。また、μkは氷盤とNose材料間の動摩擦係数である。また鉛直氷力Vは次式で示される。

$$V = 1.7 \cdot \sigma f \cdot h^2 \cdot \tan\theta \qquad (2.24)$$

よってNoseの法線方向に作用する氷力Nは次式で示される。

$$N = \sqrt{H^2 + V^2} = \sqrt{1.6^2 \cdot \sigma f^2 \cdot h^4 \cdot \gamma^2 \cdot 1.7^2 \cdot \sigma f^2 \cdot h^4 \cdot \tan^2\theta}$$

$$= \sqrt{1.6^2 \cdot \gamma^2 \cdot 1.7^2 \cdot \tan^2\theta \cdot \sigma f \cdot h^2} \qquad (2.25)$$

また、氷盤接触部の径をDとするとき、完全に氷盤がD/2まで貫入する時の氷力をFとし、氷盤のedge部はNoseと同じ傾斜角を持っているとすると、図2･30に示すように貫入深さδとする時、氷力Fδは次式で表されるものと仮定する。

$$F\delta = F \cdot \sin\phi \qquad (2.26)$$

$$F = C\sqrt{D \cdot h'} \cdot \sigma c$$
$$h' = h/\sin\theta \qquad C = 5.0$$

ここで(2.25)と(2.26)式により平衡状態でのθを求める。

$$\sqrt{1.6^2 \cdot \gamma^2 + 1.7^2 \cdot \tan^2\theta \cdot \sigma f \cdot h^2} = 5.0\sqrt{D \cdot h/\sin\theta} \cdot \sigma c \cdot \sin\phi \qquad (2.27)$$

これを整理すると

$$\sin\phi = \sqrt{1.6^2 \cdot \gamma^2 \cdot 1.7^2 \cdot \tan^2\theta \cdot \sigma f \cdot h \cdot \sin\theta / 5.0 \cdot \sqrt{D} \cdot \sigma c} \qquad (2.28)$$

単位はcm、kgfである。接触投影幅はD･sinϕ、接触高さはh/sinθであるからNoseの法線方向からの接触投影面積Aは次式で示される。

$$A = \sqrt{1.6^2 \cdot \gamma^2 + 1.7^2 \cdot \tan^2\theta \cdot \sigma f \cdot \sqrt{D \cdot H^2 / 5.0 \cdot \sigma c}} \qquad (2.29)$$

よって平均の接触圧力σvは(2.25)(2.29)式より次式で求められる。

$$\sigma v = N/A = 5.0 \cdot \sigma c/\sqrt{D} \qquad (2.30)$$

D＝200～250cmとすると、(2.30)式より次式を得る。

$$\sigma v = (0.31 \sim 0.35) \cdot \sigma c \qquad (2.31)$$

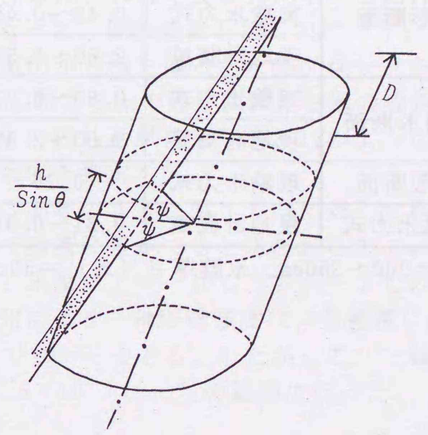


図2.30　半円形の傾斜Noseの座標

(3)氷盤の接触圧力と一軸圧縮強度

直立型の橋脚は矩形Noseの場合、平均接触圧力は、理論氷力式からは(1.06～1.64)・σcとなり、実験式からは(0.43～0.48)・σcとなるが、局部氷力(局部接触圧)の現地計測結果から判断すると、安全側を考えて、4.5σcを採用することが望まれる。また、半円断面形の場合は、氷力式から求められる平均接触圧は、edgeが直線の場合(0.32～0.35)・σc、edgeがNoseに密着状態の場合は(0.83～0.91)・σcとなり、円断面に作用する局部氷圧力に関する実験から判断すると、最大接触圧力は6.28・σcとなるが、氷の三軸圧縮強度を考慮して4.5σcを採用すれば安全と考えられる。

また、Noseが楔形の場合はKorzhavinの平衡式と佐伯等の実験氷力式から、平均接触圧力は0.25σcとなる。次に、傾斜型橋脚で、半円断面を有する場合の接触圧力は未だ実験は行われていないが、平山等の氷力式と若干の測定を用いると平均の接触部分は(0.31～0.35)・σcとなることが明らかとなった。

表2.13　Nose傾斜や断面形状とσ_v/σ_cの関係

	Nose形状	氷力算定法	σ_v/σ_c	備　考
直立型橋脚	矩形断面	理論氷力式	1.06～1.64	
		実験氷力式	0.43～0.48	
		現地計測値	2.60～6.50	
	半円形断面	実験氷力式	0.83～0.91	$2\alpha=90°$
		現地計測値	2.00～2.40	
	楔形断面	理論氷力式	0.25	
傾斜型橋脚	実験氷力式	現地計測値	0.31～0.35	

※橋脚幅（D）＝200～250cm、氷盤厚さ（h）＝50cm

2．6　淡水氷の強度の影響

氷盤による橋脚の摩耗は、橋脚表面と氷盤との接触圧力に依存し、接触圧力は、氷盤の一軸圧縮強度から算定することができる。したがって、河川氷盤の一軸圧縮強度を明らかにすることは、設計上重要である。そのため、北海道の河川や湖沼の氷盤について一軸圧縮強度の測定行った。

北海道の天塩川で実際の河川氷盤から氷を採取し、圧縮試験を行って氷盤の一軸圧縮強度及び圧縮弾性率を測定した。積雪の多い日本海側の実際の河川氷盤は、柱状氷、雪氷、フラジルアイス(氷晶)からなり、その成長過程が複雑であるため、氷盤の状態も非常に複雑である場合が多い。そのため、水理構造物に作用する水平方向氷力や橋脚との接触圧力を推定する場合に必要な、氷盤の一軸圧縮強度の推定は非常に難しい。

天塩川で採取した氷盤から氷の成長方向に対して水平方向の供試体を作成し、圧縮試験を行って氷盤の平均的な一軸圧縮強度を算定するとともに過去に行った桂沢ダム湖の氷盤の圧縮試験の結果等と比較し、実際の淡水氷の強度を推定する。

2．6．1　氷盤の採取位置と試験方法

天塩川での氷盤採取は、1992年及び1993年の２回行い、それぞれ氷の一軸圧縮試験を行った。採取位置を図2.31に示す。

試験方法は、天塩川から持ち帰った氷盤ブロックを電動コアドリルを用いて直径4.5cm、高さ９cmの円柱供試体を氷の成長方向に対して垂直に抜き取った。この円柱供試体を写真2.12のような一軸圧縮試験機を用いて破壊し、強度を測定した。

氷のブロックは、前述のように厚さ方向に対して層状になっているため、各層によって強度に差がでると思われるので、層ごとに供試体を採取した。また、氷温はＴ＝－10℃、Ｔ＝－２℃の２種類の温度、また、佐伯等の研究により一軸圧縮強度は、歪速度に依存し$\varepsilon=10^{-3}(sec^{-1})$のオーダーでピークをとる。したがって、一軸圧縮強度試験は$\varepsilon=0.7\times10^{-3}\sim1.5\times10^{-3}(sec^{-1})$の範囲で行った。

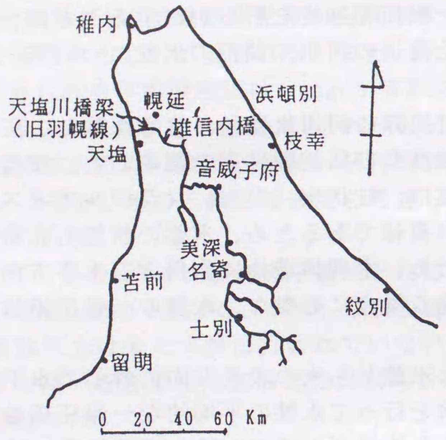


図2.31　氷盤の採取位置

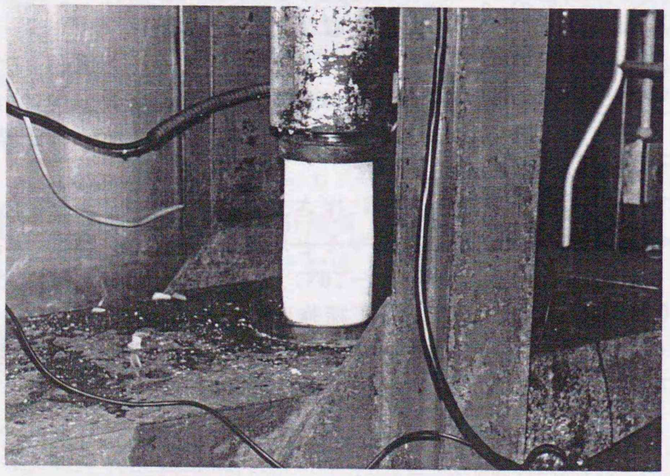


写真2.12　一軸圧縮試験機

また、動弾性係数の測定も行い、動弾性係数、強度、密度、圧縮弾性率の関係を調べた。

動弾性係数の測定では、動弾性係数測定装置を用いて供試体の一次共振周波数を求め、この値から動弾性係数を算定した。円柱供試体を弾性体と仮定すると次式が成り立つ。

$$E_D = C_1 \times W \times f^2 \qquad (2.32)$$

$$C_1 = 408 \times 10^{-5} \times L / A$$

E_D：動弾性係数
C_1：
W：供試体の質量
f：一次共振周波数
L：供試体の長さ
A：供試体の断面積

過去の佐伯等の研究によると共振周波数の測定は１本の供試体につき５～10回で充分であるとされているので計６回の測定結果の平均をその供試体の一次共振周波数とした。

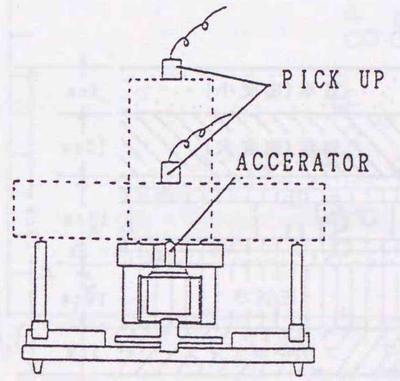


図2.32　動弾性係数測定装置

２．６．２　天塩川の氷盤強度試験（１９９２年）

（１）氷盤の性状

1992年に天塩川で採取した氷盤は、図2.33に示すように雪氷と真氷が幾層にもなっており、複雑な構造となっている。上層④は、雪が固まってできた雪氷(ゆきこおり)であり約９cmの層となっている。また、密度も0.7(g/cm^3)程度と小さい。第２層③は、雪が固まって圧縮された雪氷であるが、密度は柱状氷に近い0.8～0.9(g/cm^3)程度で約12cmの層であった。第３層②は、２～３cm程度の雪と氷の互層が17cm続き、第４層①は約12cmの柱状氷で、最下層に約９cmのフラジルアイス(氷晶)となっていた。

この氷盤の成長過程を推測する。まず、①の層の柱状氷が形成された後、降雪があり、その重みで氷盤にはいったクラックから、しみ出した河川水によって雪の上に再び氷を形成する。これが繰り返されて②層がつくられた。その後、比較的多量の雪が降り、その積雪が長時間かけて圧縮され、密度の高い雪氷を形成したのが③層である。ほぼ同時に④の密度の小さい雪氷も形成されたと推測される。また、氷盤下に堆積したフラジルアイスが一部凍結して、氷盤最下層を形成した。

このような層状になった複雑な構造の氷盤は、降雪の多いところによくみられ、過去に行った北海道三笠市の桂沢ダム湖、北海道石狩郡新篠津村の篠津湖でも同様の傾向が見られた。

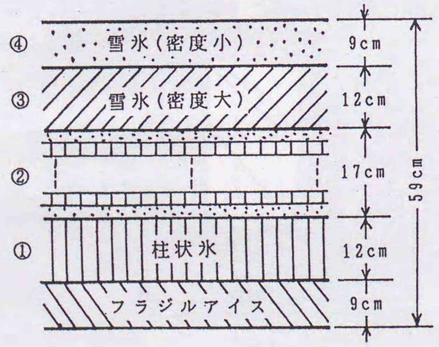


図2.33　天塩川(1992)の氷盤断面

（２）試験結果

試験に用いた円柱供試体は、上層、中層、下層の３層に分けて、１層について11～14本程度、合計で74本で試験を行った。

図2.34は氷温Ｔ＝－２℃の密度と一軸圧縮強度の関係である。密度が0.6～0.75(g/cm^3)程度の雪氷部分は密度の増加に伴い、一軸圧縮強度も増加している。密度が0.8～0.9(g/cm^3)の柱状氷の部分は密度による差はほとんど見られない。

図2.35は、氷温Ｔ＝－10℃の場合の密度と一軸圧縮強度の関係である。この場合も密度が0.8～0.9（g/cm^3）の範囲では密度と一軸圧縮強度の間に際だった関係は見られないが、密度の増加に伴い一軸圧縮強度も増加する傾向が見られる。

図2.36は、一軸圧縮強度と圧縮弾性率の関係である。一軸圧縮強度の増加にともない圧縮弾性率も増加する傾向が見られる。またこの図中の△印は密度がお0.6～0.7（g/cm^3）の雪氷であるためにばらついていると思われる。

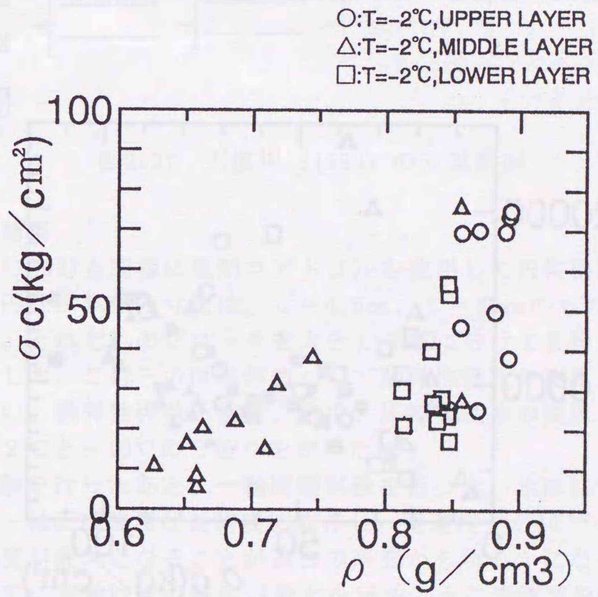


図2.34　密度と一軸圧縮強度の関係（Ｔ＝－２℃）

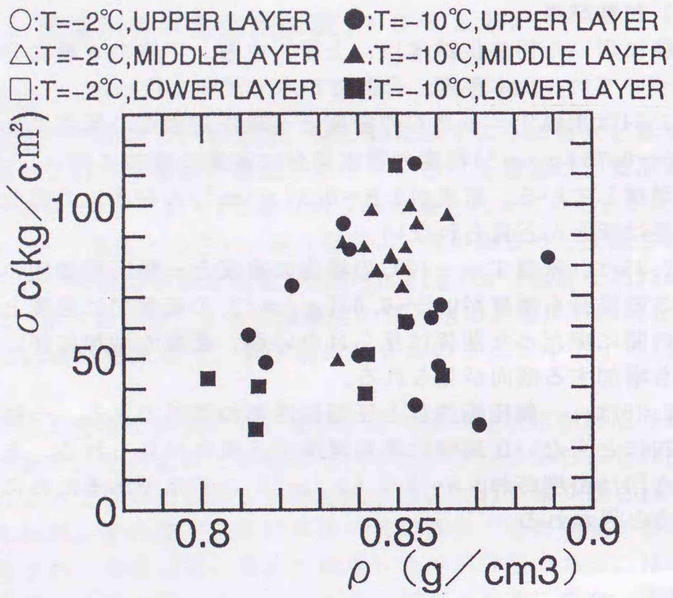


図2.35　密度と一軸圧縮強度の関係（T＝－10℃）

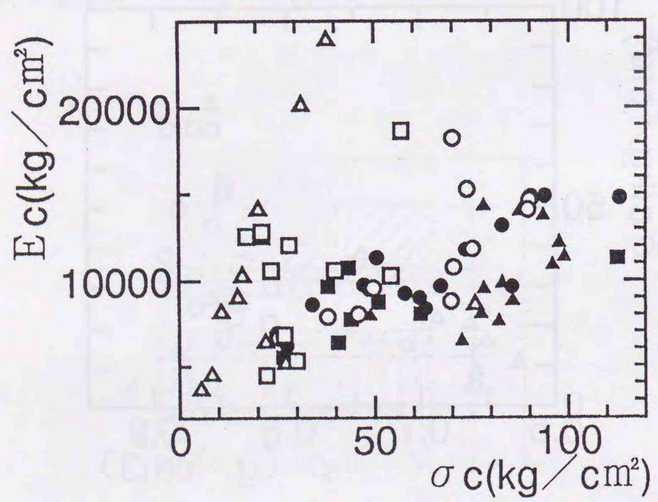


図2.36　一軸圧縮強度と圧縮弾性率の関係

2．6．3　天塩川の氷盤強度試験（1993年）

(1)氷盤の性状

1993年3月7日に北海道天塩郡天塩町に天塩川の雄信内橋付近において氷の採取を行った。氷盤の大きさは幅約30cm、長さ約1m、厚さ約40cmで、合計7個のブロックを採取した。

各ブロックの氷盤の断面構造を図2.37に示す。氷盤の断面は、おおよそ7層からなっており、雪氷と柱状氷の互層を形成している。また、柱状氷の一部も雪や気泡が含まれた不均一な構造となっていた。

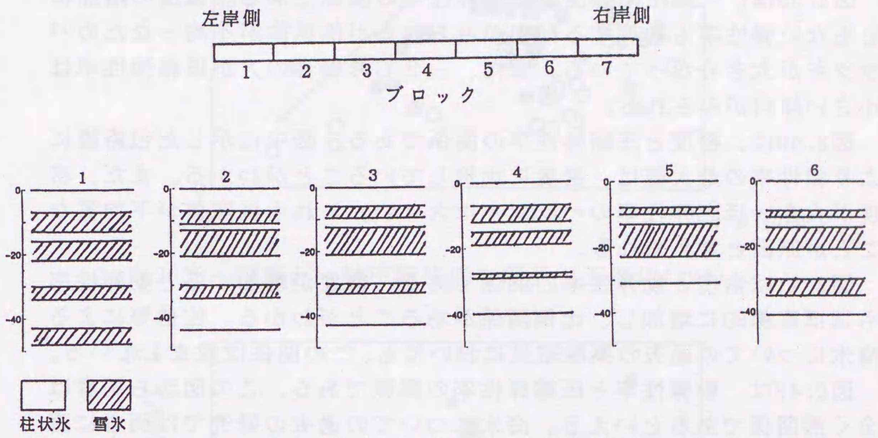


図2.37　天塩川（1993）の氷盤断面

(2)試験結果

天塩川(1992)と同様に電動コアドリルを使用して円柱供試体を抜き取った。円柱供試体の寸法は、d＝4.5cm、l＝10cmのものを約100本作成した。それぞれのブロックを大きく3層に分けて各層ごとに供試体を分類した。これらの供試体について動弾性係数の測定と一軸圧縮試験を行い、動弾性係数、強度、密度、圧縮弾性率の関係を調べた。氷温も－2℃と－10℃の2通りを用いた。

弾性試験を行ったあと、一軸圧縮試験を行った。氷は粘弾性的性質のため、一軸圧縮強度は歪速度に依存し、歪速度εが10^{-3}のオーダーの時、強度が最大となることが過去の研究から明らかになっている。したがって、実験は氷の強度が最大を示すように歪速度を$0.7\times10^{-3}<\varepsilon<4.5\times^{-3}$（$sec^{-1}$）の範囲で一軸圧縮試験を行った。

図2.38は密度と一軸圧縮強度の関係である。温度による違いを見ると－10℃のほうが－２℃より強度が高くなる。図中の包絡線によって強度の最大値は密度に比例することがわかる。供試体は柱状氷、雪氷、気泡等からなるが、密度が高いほど強度も高くなることから、供試体中の柱状氷の部分によって荷重の大部分が受け持たれていると考えられる。また、同じ密度でも強度に幅があるのは、供試体内が雪氷や柱状氷の層に分かれている場合があるため、その境界面で破壊がおこったためか、荷重を支える実質的な断面積が小さいためであると思われる。

図2.39は、一軸圧縮強度と圧縮弾性率の関係である。強度の増加にともない弾性率も増加する傾向がみられるが供試体が不均一なためバラツキが大きくなっている。また、－２℃の場合の方が圧縮弾性率は小さい傾向がみられる。

図2.40は、密度と圧縮弾性率の関係である。図中に示した包絡線により弾性率の最大値は、密度に比例していることがわかる。また、密度が大きいほど弾性率のバラツキは大きい。これも供試体が不均質なことが原因と考えられる。

図2.41は密度と動弾性率の関係である。密度が増加すると動弾性率もほぼ直線的に増加し、比例関係があることがわかる。佐伯等による海氷についての過去の実験結果においても、この関係は成立している。

図2.42は、動弾性率と圧縮弾性率の関係である。この図から両者は全く無関係であるといえる。海氷についての過去の研究では両者に直線的な関係がわかっているが、天塩川の氷盤では、そのような関係は見られず、氷が不均質なことに起因すると思われる。

このように天塩川(1993)では、各層ごとの違いは見られず、天塩川(1992)が比較的層ごとの差が明瞭であったのと比較してバラツキの多い結果となった。

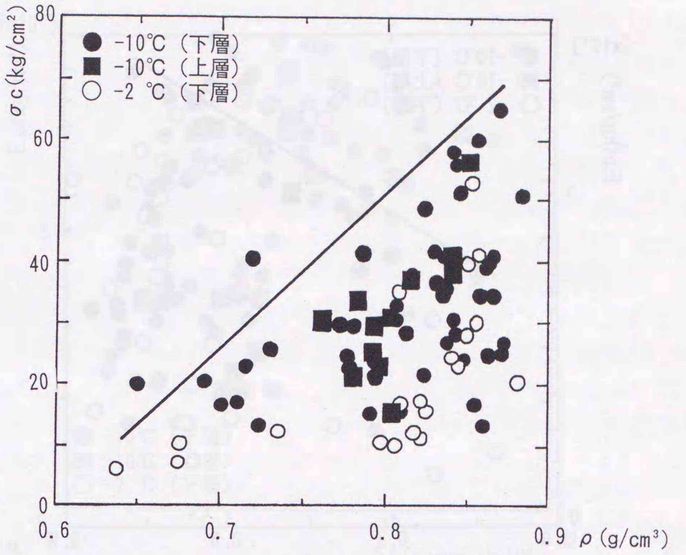


図2.38　密度と一軸圧縮強度の関係（天塩川1993）

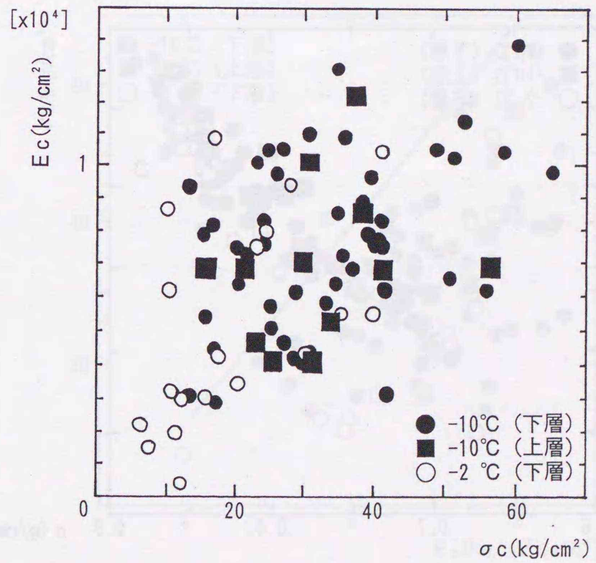


図2.39　一軸圧縮強度と圧縮弾性率の関係（天塩川1993）

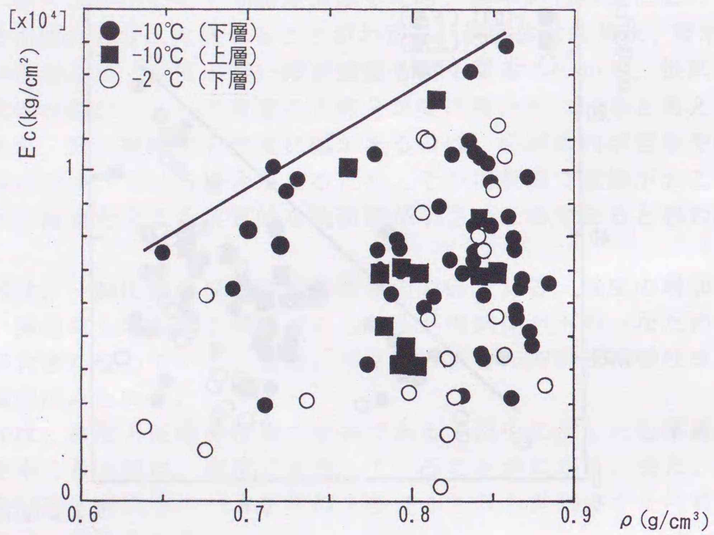


図2.40　密度と圧縮弾性率の関係（天塩川1993）

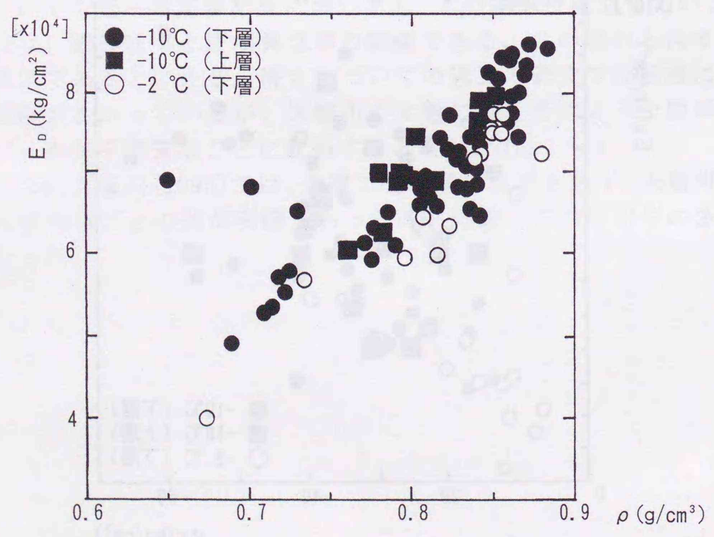


図2.41　密度と動弾性率の関係（天塩川1993）

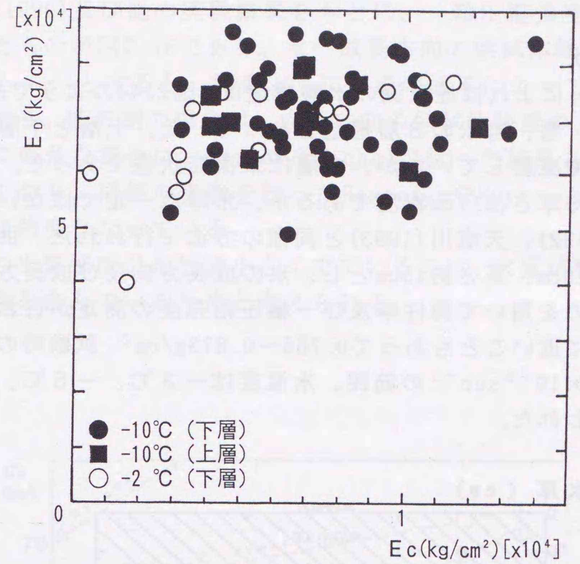


図2.42　動弾性率と圧縮弾性率の関係（天塩川1993）

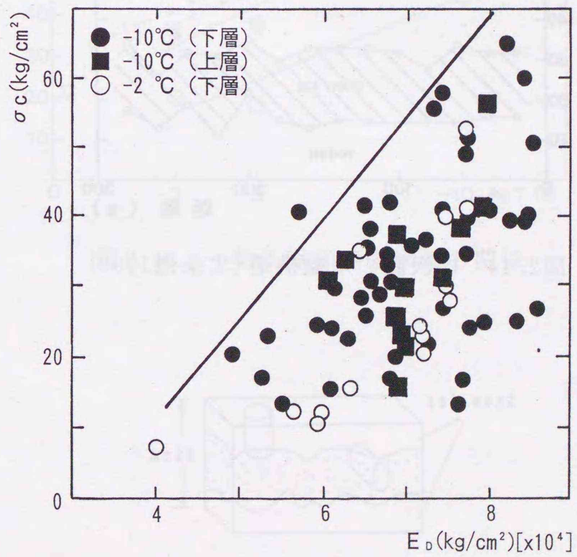


図2.43　動弾性率と一軸圧縮強度の関係（天塩川1993）

２．６．４　桂沢湖の氷盤強度

（１）氷盤の性状

北条他(1990)によれば桂沢湖の氷盤構造は、図2.44のようであった。上層から雪氷、雪、雪氷の３層構造となっていた。上層と下層は、雪を含んだ状態で凍結していたが、中層は未凍結状態であった。表層、下層ともに平均厚さは17cm程度であるが、氷厚は一定ではない。実験は、天塩川(1992)、天塩川(1993)と同様の方法で行われた。供試体寸法は、直径約10cm、高さ約15cmとし、氷の成長方向及び成長方向に直角にとったものを用いて弾性率及び一軸圧縮強度の測定が行われた。氷密度は雪氷に近いこともあって0.755～0.873g/cm^3、試験時の歪速度は0.22～1.06×10^{-3}sec^{-1}の範囲、氷温度は－３℃、－５℃、－10℃の３段階で行われた。

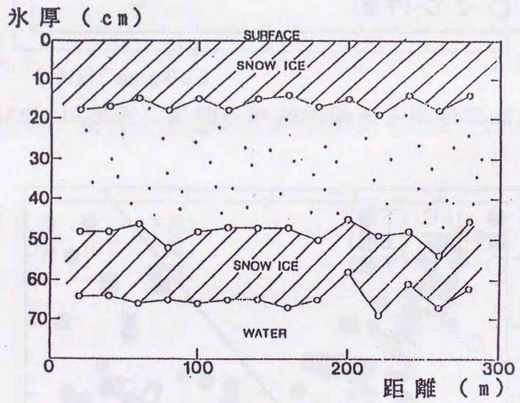


図2.44　桂沢湖の氷盤構造(北条他1990)

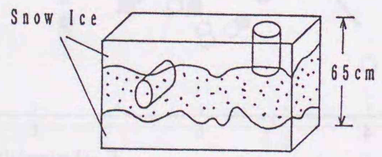


図2.45　氷の結晶方向に対する供試体の方向

（２）試験結果

北條等(1990)及び他の実験結果をもとに、一軸圧縮強度と氷温の関係を示したものが図2.46である。氷の成長方向の供試体強度をσ_{VC}、直角方向をσ_{HC}とすると、両者ともに氷温の低下によって直線的に強度が増加する。桂沢湖の場合は、成長方向の供試体強度の方が小さい。成長方向に直角な場合は、Carter&Michelが行った結果と比較的良い一致をみており、同様の実験を行ったRamseierやHaynesの結果と比べると小さな強度となっている。

桂沢湖の氷盤強度が比較的小さくでているのは、氷質が雪氷であり、多くの気泡を含んでいるためと考えられる。

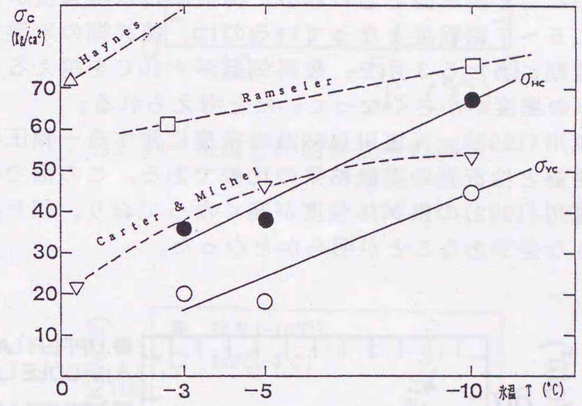


図2.46　一軸圧縮強度と氷温の関係

２．６．５　道内の河川氷や湖沼氷の強度特性

天塩川(1992)では、供試体の寸法がｄ＝4.5cm、ｌ＝９cmであるため桂沢湖の実験結果と比較するために一軸圧縮強度を補正した。天塩川(1992)と桂沢湖の一軸圧縮強度と氷温の関係を図2.47に示す。中層のＴ＝－２℃（▲）は雪氷であるため強度が小さくなっているが、上層（●）、下層（■）の場合は氷温の低下にともない強度が大きくなっていることがわかる。また、桂沢湖（○）の氷盤の一軸圧縮強度であるが、天塩川（1992）氷盤とほぼ同様な傾向を示している。

図2.48は氷温と圧縮弾性率の関係である。通常は一軸圧縮強度と同様に氷温の低下にともない圧縮弾性率は大きくなるはずであるが、天塩川（1992）では逆に氷温の低下にともない同程度かやや減少の傾向にある。これも天塩川の氷盤構造が複雑であるため、均質な供試体が採取できなかったことが原因と思われる。桂沢湖の氷盤強度が、天塩川の氷に比べて５～７割程度となっているのは、桂沢湖の氷盤を採取した時期が融雪期に当たる３月で、最高気温が＋10℃を越える日もあったことから氷の密度が小さくなっていたと考えられる。

図2.49に天塩川(1993)、天塩川(1992)の密度に対する一軸圧縮強度の最大値の包絡線と桂沢湖の実験結果の比較である。この図で明らかなように、天塩川(1992)の供試体強度が高くなっており、同じ淡水氷でも強度に大きな差があることが明らかとなった。

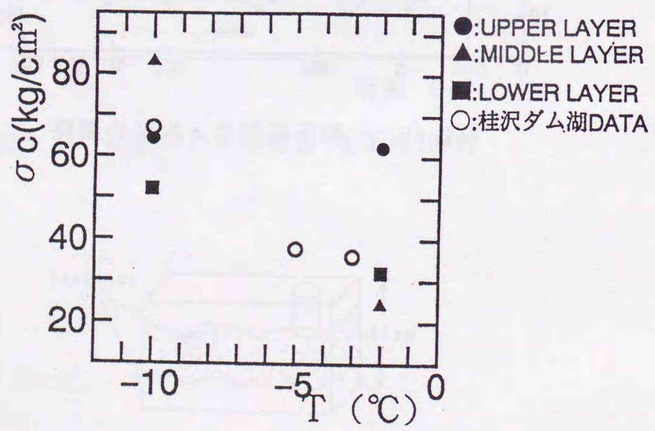


図2.47　天塩川(1992)と桂沢湖の一軸圧縮強度と氷温の関係

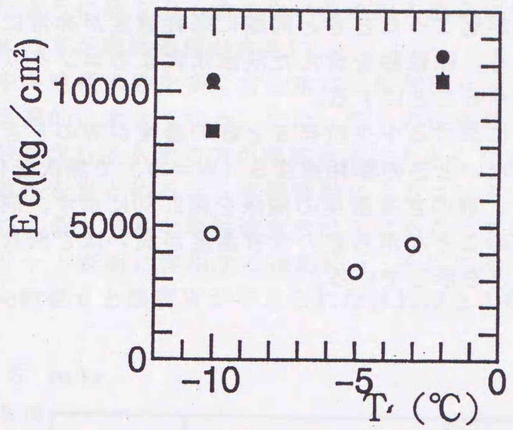


図2.48　氷温と圧縮弾性率の関係

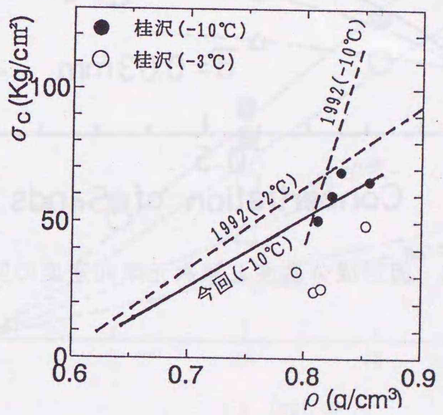


図2.49　天塩川(1993)、天塩川(1992)、桂沢湖の密度と一軸圧縮強度の関係

２．７　氷盤中の固形成分の影響

２．７．１　固形成分濃度と摩耗速度

氷中に固形分が含まれると、海氷の－８℃以下になった時のブライン中の塩類の析出が起こったときと同様に摩耗速度が非常に大きくなることが予測される。微粒砂を含んだ淡水氷によるコンクリートの摩耗特性について述べることにする。

氷温Ｔが－10℃における中央粒径ｄと砂の濃度がＷのときの摩耗速度S_wを、砂を含まないときの摩耗速度Ｓ（Ｗ＝０）で無次元化した値S_w/S（Ｗ＝０）と、砂の含有濃度の関係を図2.50に示す。同一の中央粒径の場合、当然のことながら砂の含有濃度が高いほど無次元摩耗速度が大きくなることを示している。

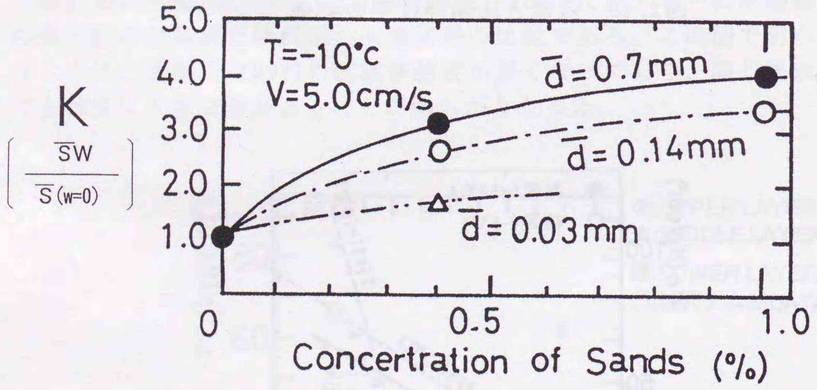


図2.50　固形成分濃度と無次元摩耗速度の関係

２．７．２　固形成分の中央粒径と摩耗速度

砂粒子の濃度Ｗを0.4%、氷温－10℃、氷の移動速度Ｖを５cm/secとした時の各中央粒径ｄごとの摩耗速度Ｓと接触圧σ_vの関係が図2.51である。用いた砂の中央粒径は0.03，0.14，0.7mmの３種類。同図からも明らかなように砂を全く含まない淡水氷の場合に比べると、砂を含んだ淡水氷の方が摩耗速度が大きい。

同一の中央粒径の砂を多く含む氷は、接触圧σｖの増加とともに摩耗速度は直線的に大きくなる。また、同一の接触圧の場合、中央粒径の大きな砂を含む淡水氷の方が摩擦速度は大きくなる。

以上の結果をまとめると、氷盤移動によるコンクリートの摩耗量を推定するのに最も重要な摩耗速度の決定にあたっては、氷温、氷によるコンクリート表面に作用する接触圧σ_vそれに氷中に含有される微粒砂の中央粒径ｄと濃度Ｗが与えられなければならない。

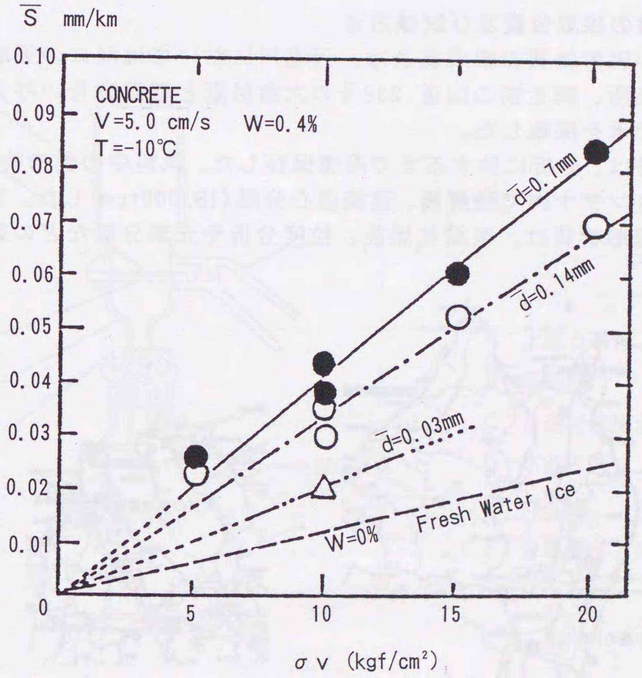


図2.51　摩耗速度と接触圧力、中央粒径の関係

２．７．３　氷盤中の固形成分に関する調査結果

固形成分が混入した氷盤によるコンクリート製橋脚の摩耗量は、純粋な氷に比べて大きく、固形成分の濃度が高く、固形成分の中央粒径が大きいほど激しいことが、著者等や佐伯等の研究によって明らかになっている。したがって、河川氷中に含まれる固形成分の濃度と中央粒径を知る事は、構造物の氷盤移動による摩耗量を予測するために重要である。

そのため、道内の河川や湖沼氷盤に含まれるている固形物質の濃度と粒度分布の測定を行った。調査は、天塩川の河口部と網走湖で氷を採取し分析を行った。採取にあたっては、氷盤中の固形物質の多くが道路周辺から発生したものと考え、氷盤の道路からの距離を考慮して採取した。また、他の調査結果を加え、道内の氷盤中に含まれる固形成分について考察した。

（１）　氷盤の採取位置及び試験方法

氷盤中の固形物質の組成調査は、天塩川においては河口の天塩大橋上流で数箇所、網走湖の国道 238号の大曲付近と国道39号の呼人付近の２箇所で氷を採取した。

氷盤試料は、分析に供するまで冷凍保存した。試料中の固形物質は、氷試料をコンテナ内で融解後、連続遠心分離(18,000rpm)した。分離された含水固形物質は、凍結乾燥後、粒度分析や元素分析などの試料とした。

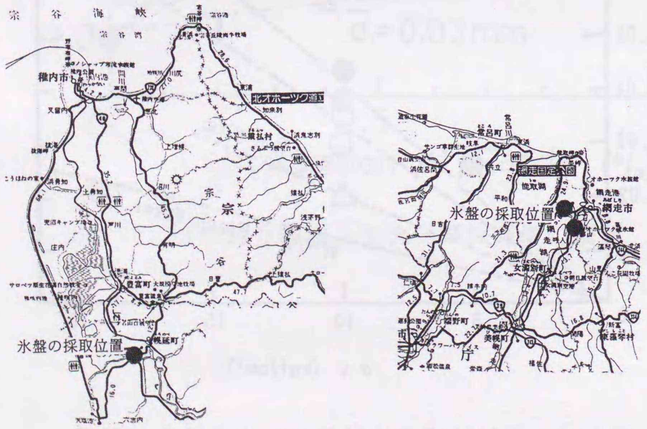


図2.52　氷盤試料の採取位置図

1)固形物質含量の測定

融解した氷盤試料の一定量についてフィルター法（JIS K0101-1991に準拠）によって固形物質含量を測定した。用いたフィルターは、孔径0.45μｍのメンブランフィルターである。

試料水を、図2.53に示すろ過器を用い、ろ過材上の残留物質を105℃で乾燥して測定する。今回使用したろ過材は、あらかじめ105℃で乾燥して重量を測定してある孔径が0.45μのニトロセルロース製のメンブランフィルター（東洋科学産業）を用いた。

固形物質含量（mg/１）＝（ａ－ｂ）×1000/Ｖ　　(2.32)

ａ：固形物質を含んだフィルターの重量（mg）
ｂ：フィルターの重量（mg）
Ｖ：試料水（ml）

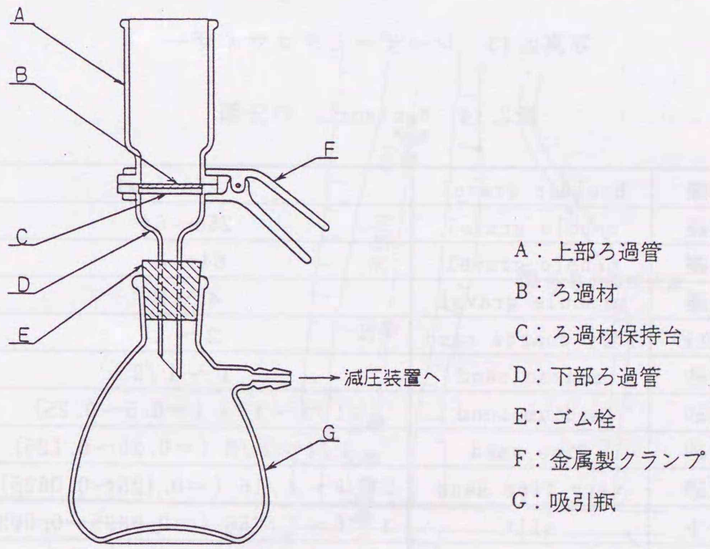


図2.53　フィルター法よる固形物質含量を測定用ろか器

2)粒度分析

固形物質の粒径は、Wentworthの分類に基づき250μmあるいは125μm以上については篩いを用い、それ以下はレーザーミクロサイザー（ｾｲｼﾝSK－7000、北海道東海大学）によって測定した。これらの結果から粒度累積曲線を作成し、その中央値を試料の代表径とした。

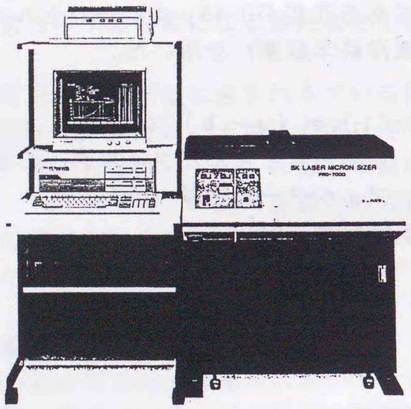


写真2.13　レーザーミクロサイザー

表2.14　Wentworth の分類

巨　礫	boulder gravel	＞ 256 (mm)
大　礫	cobble gravel	256～64
中　礫	pebble gravel	64～4
細　礫	granule gravel	4 ～ 2
極粗粒砂	very coarse sand	2 ～ 1
粗粒砂	coarse sand	1 ～ 1/2
中粒砂	medium sand	1/2～1/4 (＝0.5～0.25)
細粒砂	fine sand	1/4～1/8 (＝0.25～0.125)
微粒砂	very fine sand	1/8～1/16 (＝0.125～0.0625)
シルト	silt	1/16～1/256 (＝0.0625～0.0039)
粘　土	clay	＜1／256 (＝＜0.0039)

(2)天塩川の氷盤試料

氷盤試料は1993年３月６日15時35分から18時に採取した。天候は曇、気温-0.2℃、水温 0.0℃であった。採取地点は、発生する道路粉塵の飛散距離を考慮して、天塩大橋（国道40号線）直下及び直下から上流方向に400 m位置まで７箇所を選定し、計35個の氷盤試料を採取した。採取した氷盤試料の一部は重複して採取したため総試料数は61となった。氷盤は、チェーンソウと大型鋸等によって、30～50cmの矩形に下層まで切り抜き、取り出して試料とした。この柱状試料は、氷質によって分離し、形状を測定したのち氷の状態で実験室に持ち帰った。

調査地点の氷盤の状態は、視界には開氷箇所は認められず、３月といえども冬の様相であった。氷盤の厚さは40～70cmで、表層を除くと４～20cmの層状構造が観察され、一つの氷盤は３～８層で構成されていた。表層は数センチの新雪で、中間層のほとんどは雪氷、一部で雪が挟まれている例があった。柱状氷は天塩大橋から200m及び400mの下層でのみ存在した。表中の密度の値は、体積の測定精度が悪く信頼度は落ちるが、氷盤を密度の低い雪、密度の高い柱状氷、中間の雪氷と区分ができる。表2.15に、採取した氷盤の性状を整理した。

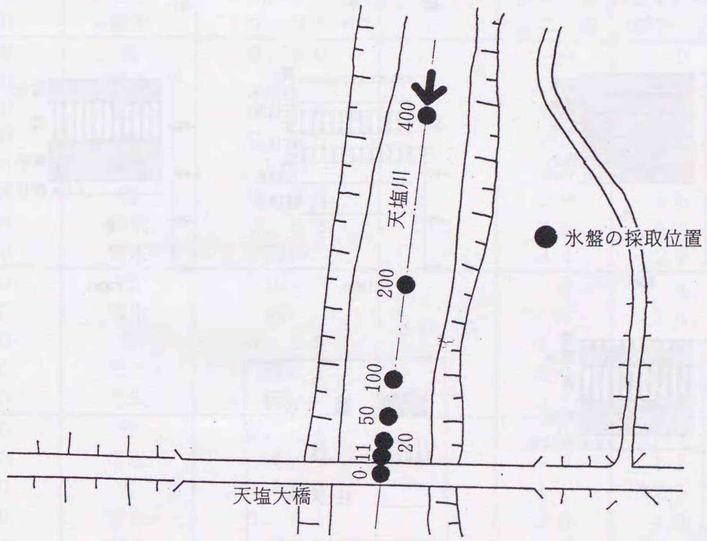
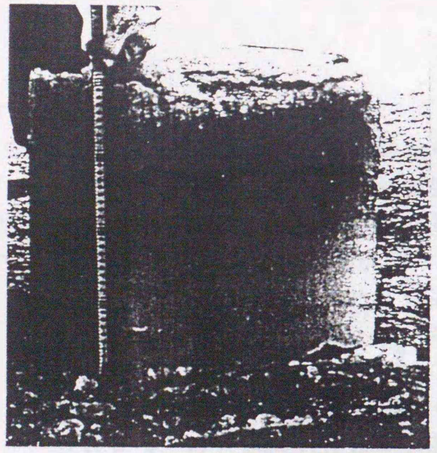
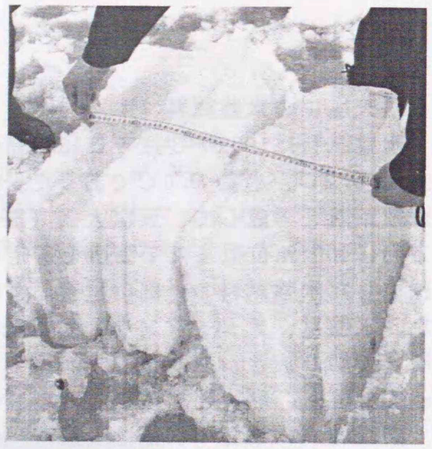


図2.54　試料採取位置（天塩川）



天塩大橋直下



天塩大橋上流400m

写真2.14　氷盤試料（天塩川）

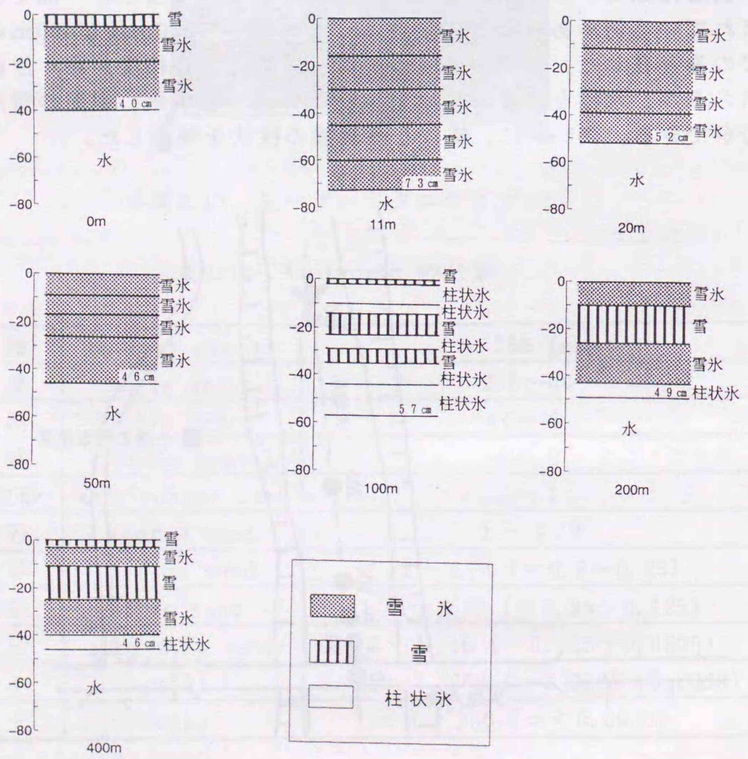


図2.55　天塩川の氷盤試料の断面構造

表2.15　氷盤の性状（天塩川）

橋からの距離	性状	密度（目安）固い＝1に近い	氷厚 cm	上 cm	下 cm	層厚 cm
0	水					
0	雪	0．41		0	5	5．0
0	雪氷	0．83	40	5	20	15．0
0	雪氷	0．83		20	40	20．0
11	雪氷	0．79		0	16	16．0
11	雪氷	0．76		16	30	14．0
11	雪氷	0．67	73	30	45	15．0
11	雪氷	0．30		45	60	15．0
11	雪氷	0．57		60	73	13．0
20	雪	0．80		0	1．5	1．5
20	雪氷	0．68		1．5	13．5	12．0
20	雪氷	0．36	53．5	13．5	31．5	18．0
20	雪氷	0．34		31．5	40．5	9．0
20	雪氷	0．79		40．5	53．5	13．0
50	雪	0．60		0	1．5	1．5
50	雪氷	固い		1．5	10．5	9．0
50	雪氷	0．73	47．5	10．5	18．5	8．0
50	雪氷	0．83		18．5	27．5	9．0
50	雪氷	0．86		27．5	47．5	20．0
100	雪	0．90		0	2	2．0
100	雪氷	固い		2	10	8．0
100	雪氷	0．60		10	14	4．0
100	雪	0．36	57	14	23	9．0
100	雪氷	固い		23	29	6．0
100	雪	0．40		29	35	6．0
100	雪氷	0．63		35	44	9．0
100	雪氷	固い		44	57	13．0
200	雪	固い		0	4	4．0
200	雪氷	固い		4	14	10．0
200	雪	0．58	50．5 49	14	30	16．0
200	雪氷	固い		30	47	17．0
200	雪氷	固い		47	53	6．0
400	雪	0．74		0	3	3．0
400	雪氷	固い		3	11	8．0
400	雪	0．60	46	11	25	14．0
400	雪氷	0．84		25	40	15．0
400	真氷	固い		40	46	6．0

（3）網走湖の氷盤試料

網走湖の氷盤試料採取場所は、国道238号の大曲付近の国道が網走湖岸にほぼ平行に位置する場所で２箇所と国道39号の呼人付近で１箇所採取した。採取日時は1993年４月10日９時30分から12時で、天候は晴れであった。国道 238号の大曲付近の網走湖岸で採取した氷は、気温の上昇によって非常にもろい状態となっていたため、手で容易に採取できた。採取地点は、岸から５ｍ、10ｍ、20ｍの位置で採取した。

一方、国道39号の呼人付近では、まだ40㎝の氷盤があり、チェーンソウと大型鋸等によって、30～50㎝の矩形に下層まで切り抜き試料とした。この柱状試料も天塩川と同様に、氷質ごとに分離し、氷の状態で実験室に持ち帰った。

国道238号の大曲付近の網走湖岸で採取した氷は、気温の上昇によって融解が進んでおり、非常に弱く、水を大量に含んだ雪氷が約５㎝の厚さであった。道路の近傍から岸までの距離は約30ｍであり、天塩川の例から考えると道路の影響が未だ残っている地点である。

国道39号の呼人付近では、まだ約40㎝の氷盤があり、氷盤の上には水を含んだ雪が13㎝堆積していた。氷は５層になっており中間に雪の層があり、これより上を上層、下を下層としてそれぞれ分析を行った。採取位置は国道から約130ｍで、ホテル網走湖荘の近傍であり、あまり道路の影響は受けないと考えられる。

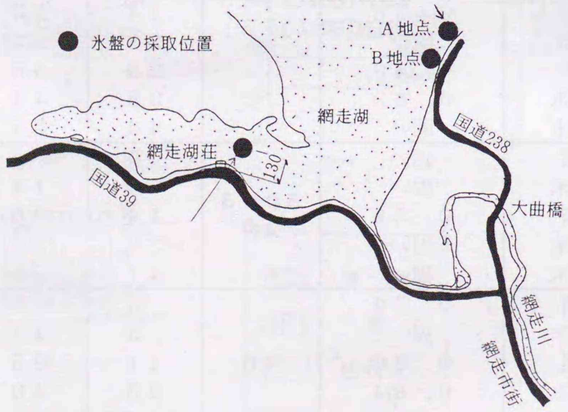


図2.56　氷盤試料の採取位置（網走湖）



写真2.15　氷盤試料（網走湖・呼人）

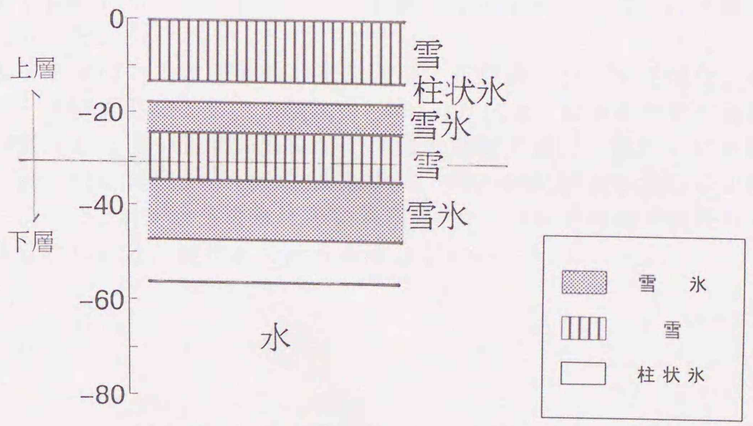


図2.57　氷盤の断面構造（網走湖・呼人）

（4）天塩川における氷盤中の固形成分含量

氷盤中の固形物質含量を、溶解した水中での含量（mg/l）として整理した結果を表2.16に示した。図2.58は天塩大橋直下から採取地点までの距離と表層（雪）の固形物質含量との関係を示したものである。表層の固形物質含量は、天塩大橋直下で 342.1mg/l、橋から離れるに従って減少し、400m上流では 3.5mg/lとなった。この傾向は、車の通行に伴って発生する道路粉塵の飛散の影響といえる。

図2.59は表層から10～20cm層（雪氷）についての両者の関係を示したものである。天塩大橋直下では 353.4mg/lの固形物質が存在するが、11m離れると6.4mg/lと低含量になり、道路粉塵の影響が小さくなる。氷盤中で比較的高い含量を示したのは、天塩大橋から100 m地点の表層14～23cm層（雪）での42.8mg/lだけである。

３月以前の氷盤中への固形物質の侵入量は少ないと考えられる。1991年（平成３年）３月24日のデータ（天塩大橋直下　表層 620mg/l、50m下層 246mg/l）と比較すると、固形物質含量はかなり少なく、道路粉塵の発生量が減少したように受け取れる。スタッドレスタイヤの普及が原因の一つと推測される。

なお、下層にある柱状氷の固形物質含量が1.9及び2.9mg/lと少ないことがわかった。したがって、河川水からの氷盤への固形物質の移入量は少ないといえる。また、氷盤中の固形物質の平均含量は、含量の高い試料を除くと5.66mg/l（n=22）となった。

表2.16に代表試料についての固形物質の中央粒径値を示した。天塩大橋20m上流地点1.5 ～13.5cm層（試料 No.11）の中央粒径値は268.2μmで細砂に分類されたが、多くの試料は63μm以下でシルト質の範囲に入った。

天塩川での中央粒径値の分布範囲は、茨戸湖やウトナイ湖などの観測例とほぼ同じである。氷盤試料（No.11）には、粒径の大きい道路粉塵が混入したといえる。図2.60に天塩大橋直下試料、図2.61に表層試料、図2.61に表層から10～20cm層試料、図2.62に柱状氷試料の粒度分布を示した。固形成分含量の多い試料No.11では粒度分布が粒径の大きいほうに広がる。柱状氷では分布幅が小さいことがわかる。

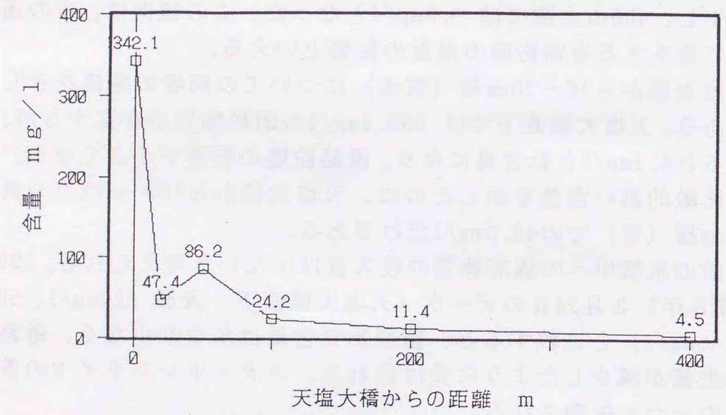


図2.58 氷盤中の固形物質含量と道路からの距離（表層の氷）

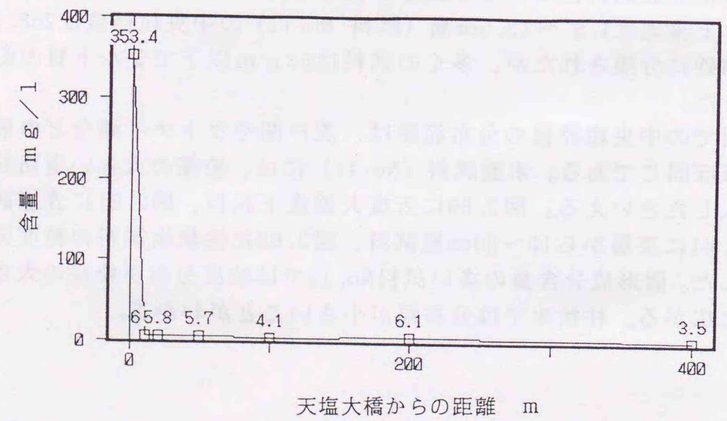


図2.59 氷盤中の固形物質含量と道路からの距離
（表層から10～20cm層（雪氷））

表2.16 氷盤中の固形物質の中央粒径値

試料No.	天塩大橋からの距離		SS mg/l	中央粒径値 μm
1	0	水	3.2	41.4
2	0	雪	342.1	23.0
3	0	雪氷	353.4	29.0
4	0	雪氷	24.1	18.6
5	11	雪氷	6.4	
6	11	雪氷	9.3	72.2
7	11	雪氷	8.7	44.4
8	11	雪氷	3.7	55.8
9	11	雪氷	10.4	18.3
10	20	雪	47.4	14.8
11	20	雪氷	5.8	268.2
12	20	雪氷	3.9	46.6
13	20	雪氷	3.8	
14	20	雪氷	6.9	63.3
15	50	雪	86.2	
16	50	雪氷	5.7	
17	50	雪氷	3.5	
18	50	雪氷	2.6	
19	50	雪氷	4.4	
20	100	雪	24.2	66.3
21	100	雪氷	4.1	21.5
22	100	雪氷	6.2	
23	100	雪	42.8	13.6
24	100	雪氷	5.3	
25	100	雪	6.3	
26	100	雪氷	2.8	
27	100	雪氷	6.2	16.1
28	200	雪	11.4	
29	200	雪氷	6.1	27.6
30	200	雪	6.1	
31	200	雪氷	5.6	
32	200	雪氷	2.9	17.8
33	400	雪	4.5	14.0
34	400	雪氷	3.5	18.9
35	400	雪	1.7	
36	400	雪氷	7.0	
37	400	真氷	1.9	16.7

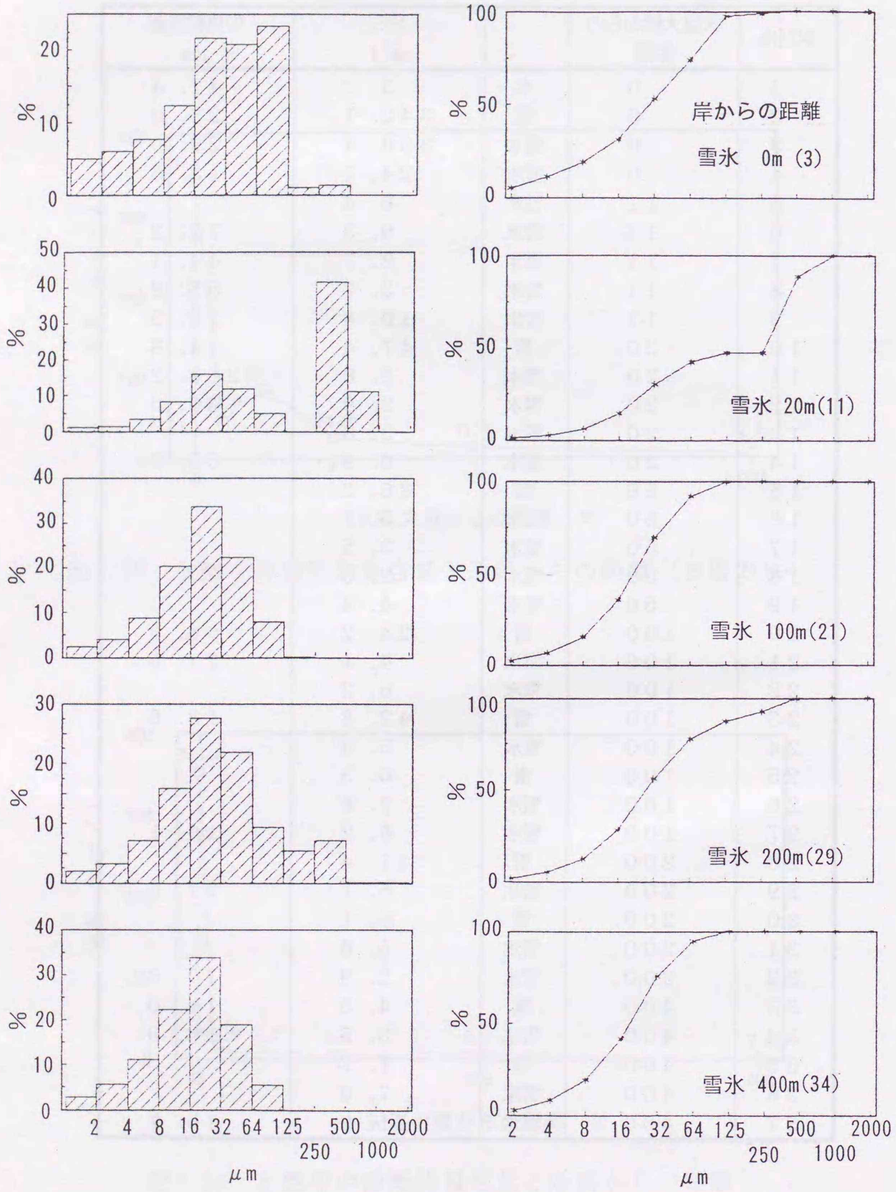


図2.60 天塩大橋直下試料の粒度分布

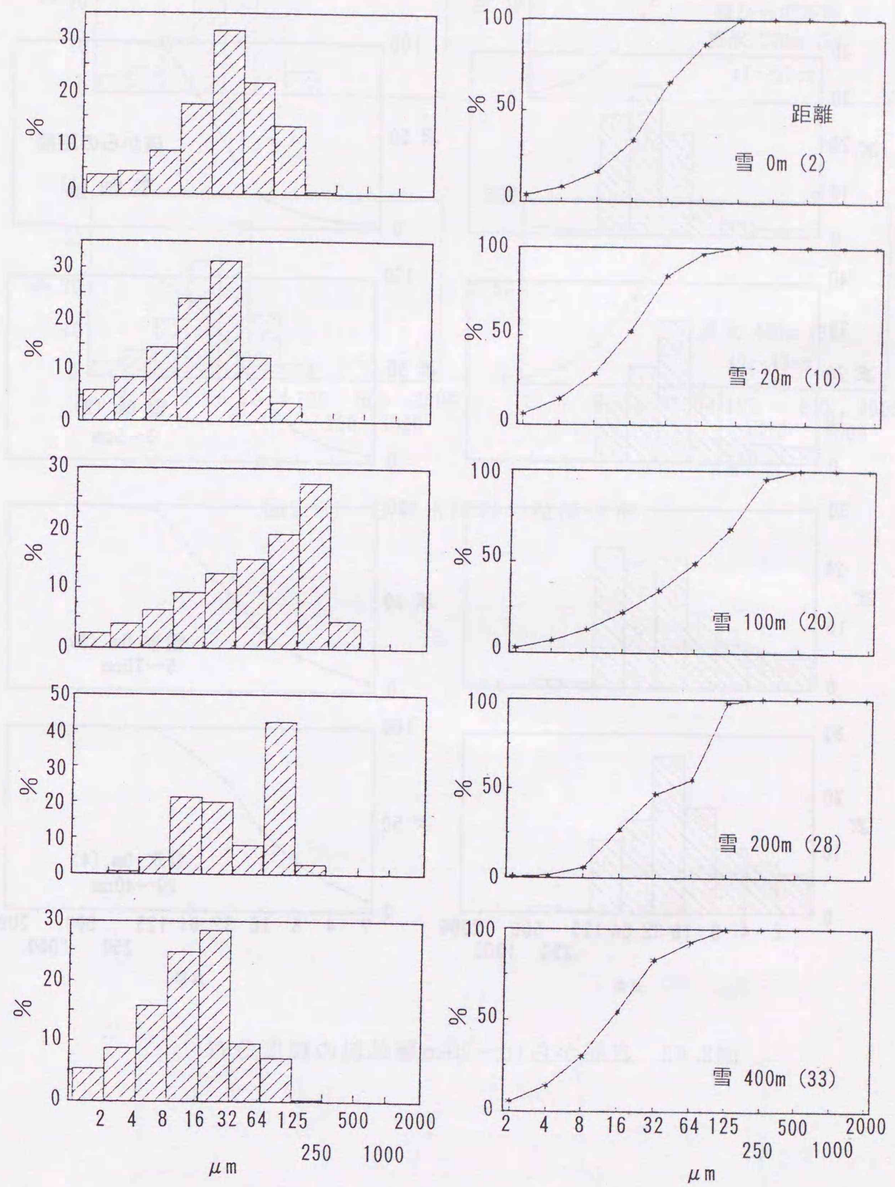


図2.61 表層試料の粒度分布

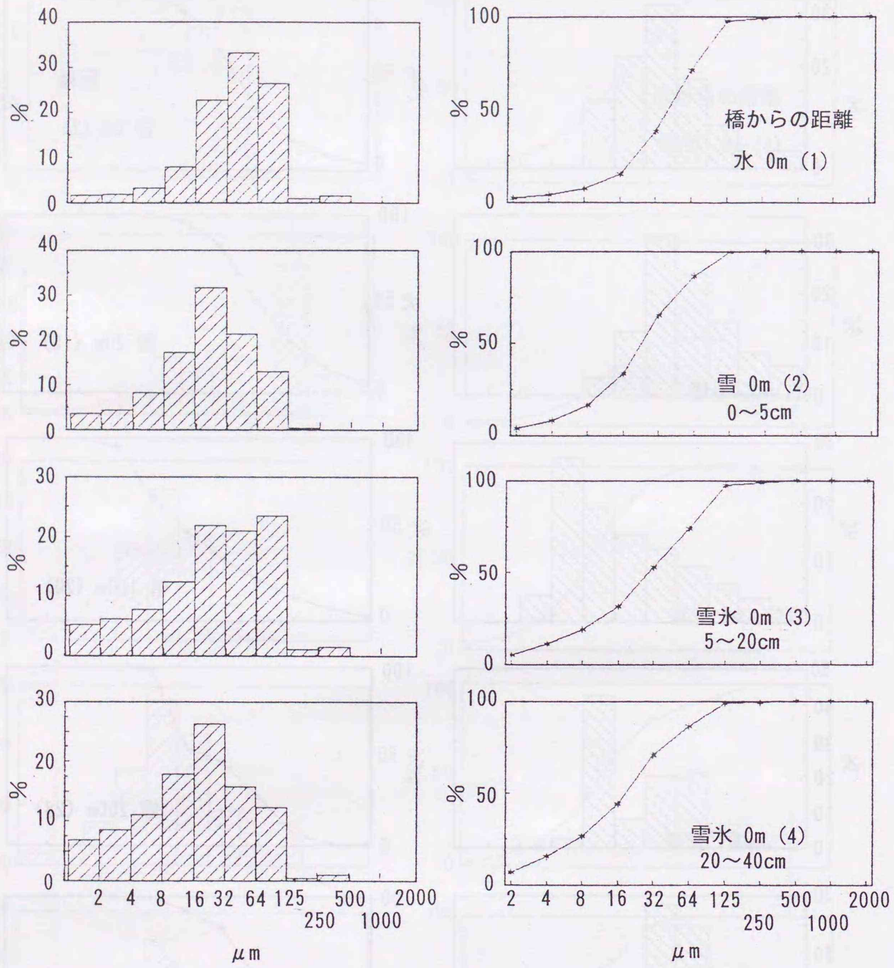


図2.62　表層から10～20cm層試料の粒度分布

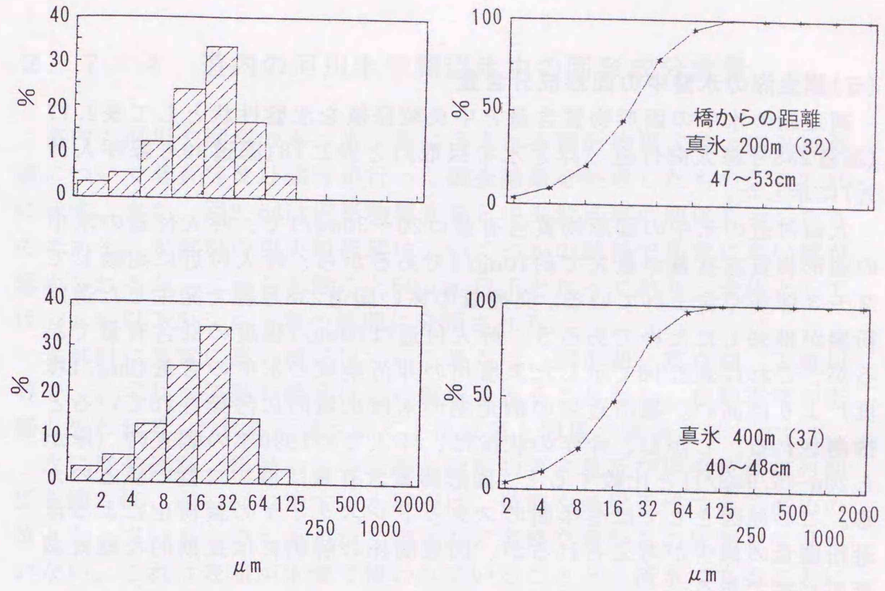


図2.63　柱状氷試料の粒度分布

(5)網走湖の氷盤中の固形成分含量

網走湖の氷中の固形物質含量と中央粒径値を氷盤性状として表2.17(国道238号線大曲付近（浮き氷を採取))と表2.18(国道39号線呼人付近)に示した。

大曲付近の氷中の固形物質含有量は20～30mg/lで、呼人付近の氷中の固形物質含有量が最大で約10mg/lであるから、呼人付近に比較して２～３倍多く含まれている。交通量の多い国道238号線で発生した道路粉塵が飛来したためであろう。呼人付近は10mg/l程度の低含有量であるが、これは表2.16で示した天塩川の非汚染域の氷中の含量(5mg/l程度）よりは高い。都市近郊の網走湖の氷は広域的に汚染されていると推測される。しかし、今年の状況は、呼人での1990年の調査時（岸から20m-75.9mg/l)と比較すると、固形物質含有量は極めて低い値といえる。この原因としては冬季間のスタッドレスタイヤの義務化による浮遊粉塵量の減少が考えられるが、因果関係の解明には長期的な継続調査が必要である。

表2.17　網走湖の氷盤の性状
国道238号線　大曲付近（浮き氷を採取）

地　点	岸からの距離	固形物質含量	中央粒径
A	5　m	21.8　mg/l	24.6μm
	10　m	33.2　mg/l	24.1μm
	20　m	21.1　mg/l	24.1μm
B	5　m	10.4　mg/l	
	10　m	29.3　mg/l	
	20　m	22.6　mg/l	

表2.18　網走湖の氷盤性状
国道39号線　呼人付近

岸からの距離	採取位置	固形物質含量
130　m	表層（13cm）	6.2　mg/l
	上層（0～23cm）	10.6　mg/l
	下層（23～43.5cm）	12.2　mg/l
	水	10.4　mg/l

２．７．４　道内の河川氷や湖沼氷中の固形成分含量

道内の河川や湖沼の水、氷、雪に含まれる固形物質含量と中央粒径値について著者等及び橘等が行った調査結果を整理したものを表2.19に示す。また、図2.64は固形物質含量と中央粒径値の関係を示したものである。氷試料の中央粒径値は、いくつかの試料で異常に高い値が認められるが、これらを除くと50μm 以下となっており、全体としては63μm 以下のシルト質の範囲に分類される。

氷試料に異常に高い値が出ている地点は、網走湖、茨戸湖、天塩川等で、いずれも道路や橋梁に近い箇所であることから、自動車等の影響と思われる。これらの値を除くとほぼ雪と同様の傾向を示している。

次に岸や道路、橋梁からの距離と固形物質含量及び中央粒径値の関係を図2.65、図2.66に示す。水試料は、道路や橋梁近傍で若干高めの値となっているものもあるが、ほとんど道路交通からの影響を受けていない。これは表面が氷盤で覆われていることと、流水であることに他ならない。雪試料と氷試料は、ほぼ同様の傾向であるが、中央粒径については、雪の場合、距離による大きな変化はない。氷は道路近傍で固形物質含量及び中央粒径値ともに急激に高くなり、道路交通の影響をうける。この傾向は、橋梁直下のような場合に顕著であった。概ね道路や橋梁から100m離れると道路交通の影響はほとんどなくなる。

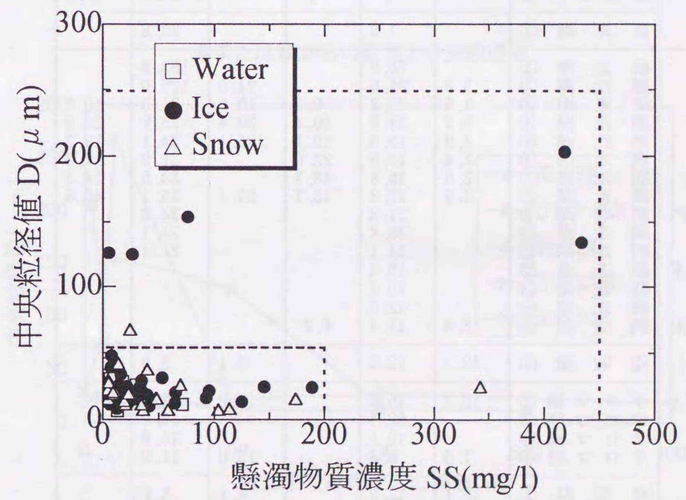


図2.64　河川及び湖沼氷盤中の固形物質濃度と中央粒径値の関係

表2.19　道内の河川及び湖沼氷盤中の固形物質濃度と中央粒径値

水域	水質	氷試料採取位置	懸濁物質濃度 SS (mg/l)			中央粒径値 (μm)		
			水	氷	雪	水	氷	雪
河川	淡水	天塩川 ①	8.5	433.9	103.7	20.0	134.3	6.0
		天塩川 ②		4.4	10.5		20.6	20.0
		天塩川 ③	3.2	188.8	342.1	41.4	23.8	23.0
		天塩川 ④		7.7			47.7	
		天塩川 ⑤		5.1	47.4		126.0	14.8
		天塩川 ⑥		4.1	86.2			
		天塩川 ⑦		10.1	24.2		17.1	66.3
		天塩川 ⑧		5.2	11.4		22.7	
		天塩川 ⑨		3.5	4.5		17.8	14.0
		歴舟川 ①	1.1	17.6	39.7	30.2	20.9	36.1
湖沼	淡水湖	ウトナイ湖①		65.2			20.0	
		ウトナイ湖②		124.8			13.0	
		ウトナイ湖③		145.0			24.0	
		ウトナイ湖④	1.8	41.5		19.0	10.0	
		ウトナイ湖⑤		20.1	173.8		13.0	14.0
		ウトナイ湖⑥		22.7	113.7		12.0	6.5
		ウトナイ湖⑦	8.2	26.5		16.6	19.4	
		ウトナイ湖⑧	25.0	39.9	9.3		18.1	17.4
		ウトナイ湖⑨	14.1	36.2	4.1	31.3	19.6	20.9
		ウトナイ湖⑩	29.9	26.9	4.8	25.5	17.8	27.9
		ウトナイ湖⑪	17.9	30.3	5.1	27.9	17.0	26.1
		ウトナイ湖⑫	17.8	27.5	4.9		20.6	
		茨戸湖 ①	71.5	418.0		11.0	203.1	
		茨戸湖 ②		14.2	58.3		18.0	5.8
		茨戸湖 ③	5.0	17.1	36.0	15.0	16.0	5.8
		シュウパロ湖①	10.7	64.6	20.0	24.0	12.0	10.0
		生花苗沼 ①		27.7	34.4		15.0	10.0
		篠津湖 ③		7.3			38.8	
	汽水湖	網走湖 ①		75.9			153.9	
		網走湖 ②	3.3	26.5		24.0	125.0	
		網走湖 ③	1.5	53.2	9.0	19.0	31.0	19.0
		網走湖 ④	6.5	34.6	69.4	30.4	28.8	24.5
		網走湖 ⑤	4.9	15.6	19.1	23.1	24.1	12.3
		網走湖 ⑥	2.4	10.5	22.9		21.9	17.8
		網走湖 ⑦	2.8	15.8	48.3		33.5	14.3
		網走湖 ⑧	4.6	13.8	13.7	20.4	25.1	40.6
		網走湖 ⑨		21.8			24.6	
		網走湖 ⑩		33.2			24.1	
		網走湖 ⑪		21.1			24.1	
		網走湖 ⑫		10.4				
		網走湖 ⑬		29.3				
		網走湖 ⑭		22.6				
		網走湖 ⑮	2.6	11.4	6.2			
		能取湖 ①	13.1	12.5		6.1	8.0	
		サロマ湖 ①	15.7	95.5		13.0	21.0	
		サロマ湖 ②		92.7			16.0	
		サロマ湖 ③		10.1			13.0	
		サロマ湖 ④	7.0	6.3		15.0	11.0	
		春採湖 ①	13.1	12.5		6.1	8.0	

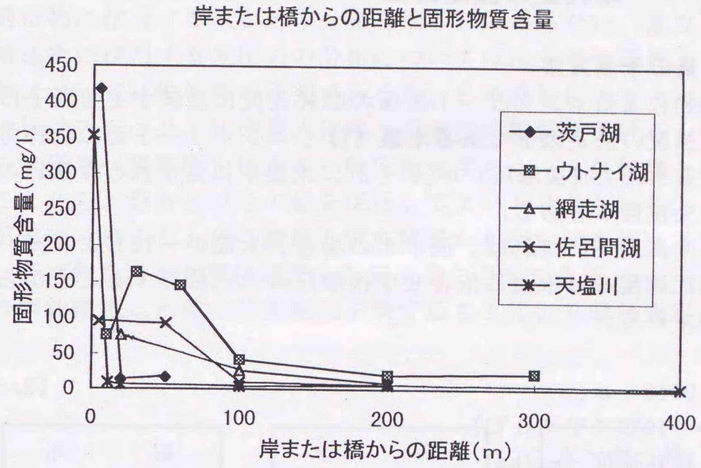


図2.65　道路、橋梁、岸からの距離と固形物質濃度

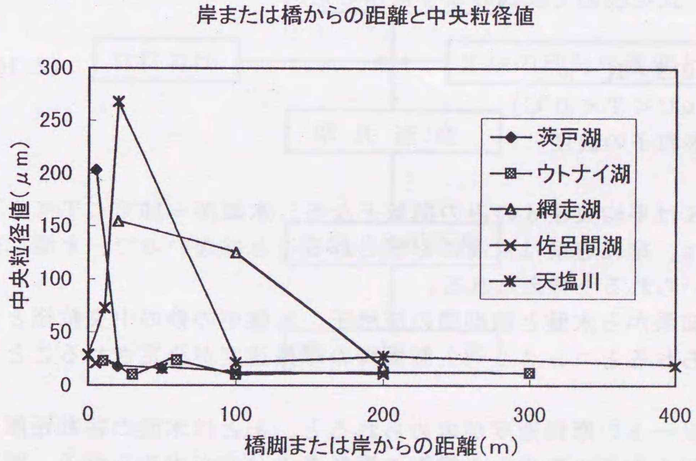


図2.66　道路、橋梁、岸からの距離と中央粒径値

2．8　コンクリート製橋脚の摩耗量の推定

2．8．1　摩耗量の推定方法

(1)摩耗量の予測方法

氷盤移動によるコンクリート表面の摩耗速度に及ぼす主要因子は、淡水氷の強度の決定因子である氷温（T）、コンクリート面の法線方向に作用する氷圧力（接触圧）σ_v、それに氷盤中に含まれる微粒砂の濃度Wと中央粒径dである。

著者等や高橋等によれば、淡水氷の場合、氷温が－10℃より高い範囲では摩耗速度Sは氷温に依存せず接触圧のみに依存することから次式を導いている。

$$S = 0.0012 \cdot \sigma_v \qquad (2.33)$$

（－10℃＜T＜0℃）

S：摩耗速度（mm/km）

σ_v：接触圧（kgf/cm^2）

次に、砂粒子の濃度（W）の影響を考慮するために、濃度が一定の場合の中央粒径dとその粒径における摩耗速度を砂を含まない場合の摩耗速度で無次元化したものをKとし、一定の砂含有氷による摩耗速度を（2.33）式を改めて次式のように示した。

$$S = 0.0012 \cdot K \cdot \sigma_v \qquad (2.34)$$

（－10℃＜T＜0℃）

W：砂粒子の濃度

ここでKは平均粒径dのみの関数となる。氷温が－10℃＜T＜0℃の範囲では、摩耗速度は氷温に影響されることはないので、氷温に関係なく用いられると考えられる。

以上の結果から氷盤と橋脚間の接触圧、氷盤中の砂の中央粒径と濃度が与えられるとコンクリート製橋脚の摩耗速度が決定されることになる。

コンクリートの摩耗速度が求められると、あとは氷盤の移動距離や氷盤移動時の水位の変化から橋脚の摩耗量の分布が求められる。摩耗量推定のためのフローを図2.67に示す。

前述したように、コンクリートの摩耗速度Sへの影響因子は氷温、接触圧、氷中の砂の濃度と中央粒径である。氷温については、氷盤の移動時期の－10℃≦T≦0℃の範囲を考えればよい。また接触圧σ_vは、構造物に作用する氷圧力の分布を知らねばならない。直立の矩形断面構造物に作用する氷圧力の分布については田中等の研究、円断面構造物については佐伯等の研究があるが、その結果によると氷圧力の分布形状はアスペクト比や貫入に伴う歪速度の影響を受けるものの、最大の氷圧力（接触圧）は氷の一軸圧縮強度の４～５倍程度となっていることから、設計上はその値を採用してよいと考えられる。この接触圧が求められると、砂の濃度と中央粒径から図2.50を使ってKを決定し、不純物を含んだ摩耗速度を計算することができる。

この摩耗速度に氷盤の移動距離を乗ずることにより摩耗量が推定される。

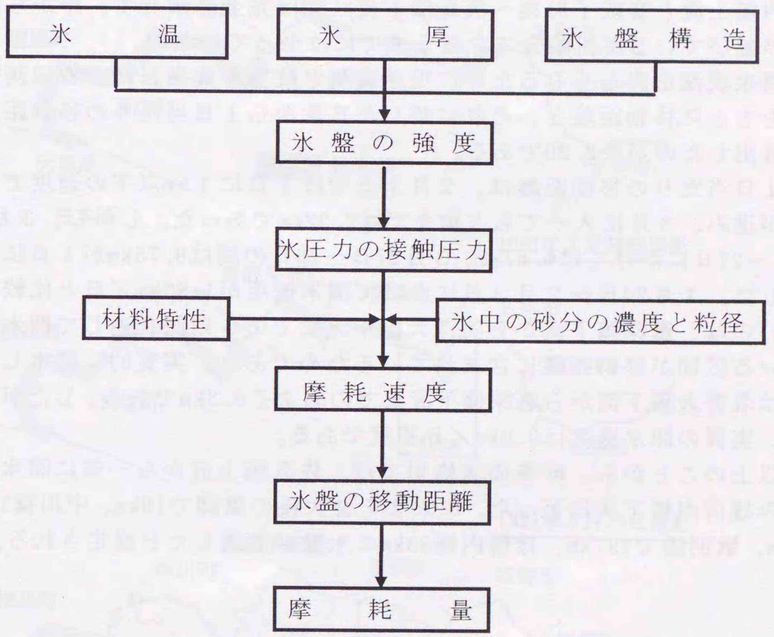


図2.67　摩耗量の推定フロー図

２．８．２　氷盤の移動距離

著者等は、北海道の北部を南から北に向けて流れる天塩川の結氷と氷盤移動についての現地観測を行っている。

わが国の最北の地を流れるこの川は、南が上流で北上する寒地河川である。故に、冬期に全面結氷した河川は、春先に上流から融け始め、まだ結氷している下流へ流氷となって流れ下る。天塩川の結氷状況調査は、1993年１月～３月末の期間で現地観測６回、航空写真による観測を３回行った。現地観測の観測地点は橋梁位置とし、名寄市～天塩川河口に至るまでを調査区間とした。航空写真撮影から判定した結氷状況を図2.68に示す。

１月24日に撮影した航空写真によると、名寄市より上流側の天塩川本流では、結氷した箇所は見られず、名寄大橋の下流約10数kmの地点が結氷の最上流となっている。この位置より下流の恵深橋下流から恩根内橋上流と音威子府橋～筬島橋下流区間は完全結氷せず、岸から氷盤が延びているが河幅全てを覆うまでには至っていない。

開氷状況を詳しくみるために現地観測と航空写真撮影による観測結果をもとに移動距離と、それに要した日数から１日当たりの移動距離を算出したのが表2.20である。

１日当たりの移動距離は、２月末までは１日に１km以下の速度で開氷が進み、３月に入っても下旬までは2.32kmであった。しかし、３月24日～27日にかけては6.57km、３月27日～29日の間は9.75kmが１日に開氷した。１月24日～２月３日にかけて開氷速度が1.83km／日と比較的早いのは、恵深橋下流から美深大橋下流までの冬期間を通じて開氷している区間が移動距離に含まれているためであり、実質的に開氷したのは名寄大橋下流から恵深橋下流までのおよそ6.3kmである。したがって、実質の開氷速度は0.6km／日程度である。

以上のことから、昨冬の天塩川では、佐久橋上流から一気に開氷が進み雄信内橋下流に至った。おおよそ誉大橋の橋脚で10km、中川橋11.5km、歌別橋で197km、雄信内橋33kmの氷盤が通過したと推定される。

表2.20　開氷速度（km/日）

調査月日	移動距離km	移動時間日	日当距離km/日
１月24日			
	１８．３	１０	１．８３
２月３日			
	３．５	２５	０．１４
２月28日			
	５．２	６	０．８７
３月６日			
	４１．８	１８	２．３２
３月24日			
	１９．７	３	６．５７
３月27日			
	１９．５	２	９．７５
３月29日			

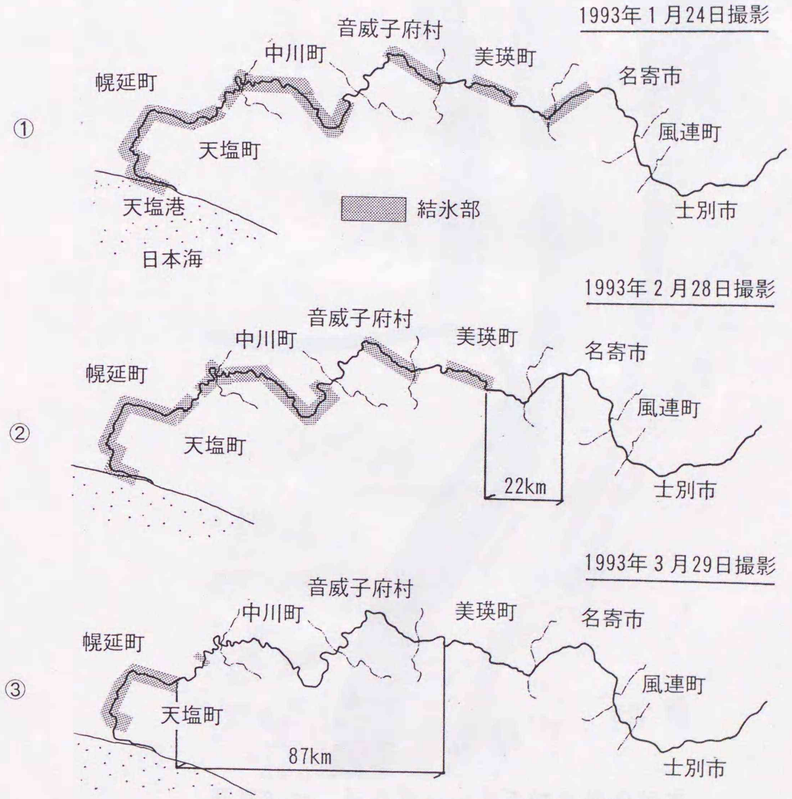


図2.68　天塩川の開氷状況の推移



写真2.16　航空写真による結氷状況調査

２．８．３　旧羽幌線天塩川橋梁橋脚でのケーススタディー

以上のような摩耗量の推定フローにしたがって、旧羽幌線天塩川橋梁の橋脚についてケーススタディーを行い、推定値と実測値の比較を行った。

調査結果から天塩川の氷中の固形成分濃度は、最大値0.04%、最大中央粒径0.134mmであった。中央粒径ごとに固形成分濃度が０%の摩耗速度で無次元化した値と固形成分濃度の関係を示した図2.50から、この条件で、固形成分がない場合に比較しての摩耗速度増加は、1.2倍と見積もることができる。

天塩川下流部の氷盤の移動が活発になるのは３月下旬～４月の上旬であることから、その時の平均氷温は０℃程度である。著者等の行った天塩川の氷の一軸圧縮強試験結果では、-2℃～-3℃の氷温で一軸圧縮強度の平均値が30～40kgf/cm^{2}の範囲であった。しかし、氷の強度は０℃に近づくにつれて急激に低下することから、実際にはさらに低く10～20kgf/cm^{2}程度と推測される。したがって、試算上は氷の一軸圧縮強度は10～20kgf/cm^{2}とする。また、氷盤移動による円断面構造物に作用する局部氷圧力（構造物の法線方向氷圧力）は、佐伯等や田中等の実験結果より、アスペクト比（構造物の氷盤移動方向から見た投影幅÷氷厚）が5.0の場合、一軸圧縮強度の約4.5倍を越えないことから、接触圧は45～90kgf/cm^{2}となることが予想される。

このような条件下での摩耗速度は0.06～0.13mm/kmとなる。１年の氷盤の移動距離を20kmとすると、以下の計算によって１年間の平均摩耗量は1.2～2.6mmとなる。

$$S = 0.0012 \times \sigma_v \times K \times L$$
$$= 0.0012 \times (45 \sim 90) \times 1.2 \times 20$$
$$= 1.2 \sim 2.6\text{mm}$$

著者等の現地計測結果によれば天塩川橋梁の橋脚の年平均摩耗量は約1.0mm程度であり、推定値より小さい。これは橋脚への氷盤の作用位置が水位によって変化するためであって、現地測定による摩耗の範囲が約１ｍ、この地点の氷厚が約50cmから考えて、実際の平均摩耗深さは推定値の半分程度と考えてよい。そのように仮定すると年平均摩耗量の推定値は、移動距離20kmで0.6～1.3mmとなり、実測結果と良い一致を示した。

２．９　コンクリート製橋脚の摩耗対策

２．９．１　摩耗対策が必要な地域

山下等(1993)が作成した北海道内の河川結氷図に著者等の橋脚被害調査で、氷盤移動による被害があった橋脚の位置を図2.69に示す。結氷率の高い道北の天塩川、留萌川や諸骨川、湧別川、常呂川等のオホーツク沿岸の河川と被害のあった橋脚位置に相関が見られる。

また、積算寒度（度・日）の分布図に被害橋脚をプロットしたのが、図2.70である。被害橋脚は、積算寒度700（度・日）以上の地域にありそれ以外の地域では被害が発生していない。気温が低く結氷率の高い河川で被害が発生していることは、橋脚が氷盤によって損傷を受けていることの定性的な裏付けともなる。

氷盤移動による橋脚の損傷が発生している位置と河川の結氷域と積算寒度700（度・日）以上の地域を重ね合わせたのが図2.71である。図中の斜線の地域が氷盤移動が活発で橋脚の摩耗対策が必要な地域である。ただし、対象地域においても結氷しない箇所や氷盤がそれほど動かないことが現地調査や経験的に明らかな場合には、その必要はない。

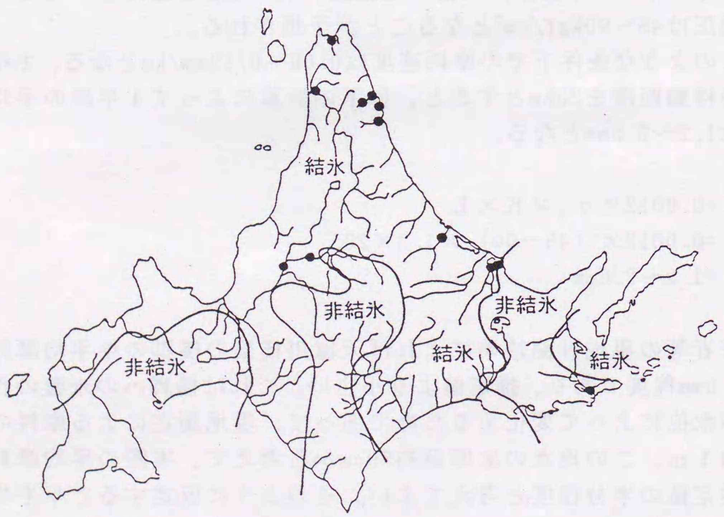


図2.69　河川結氷と被害橋脚の位置図

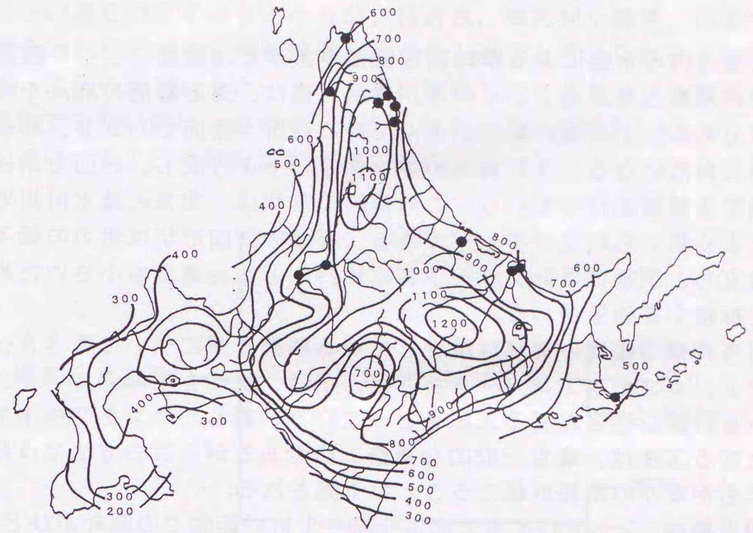


図2.70　積算寒度と被害橋脚の位置図

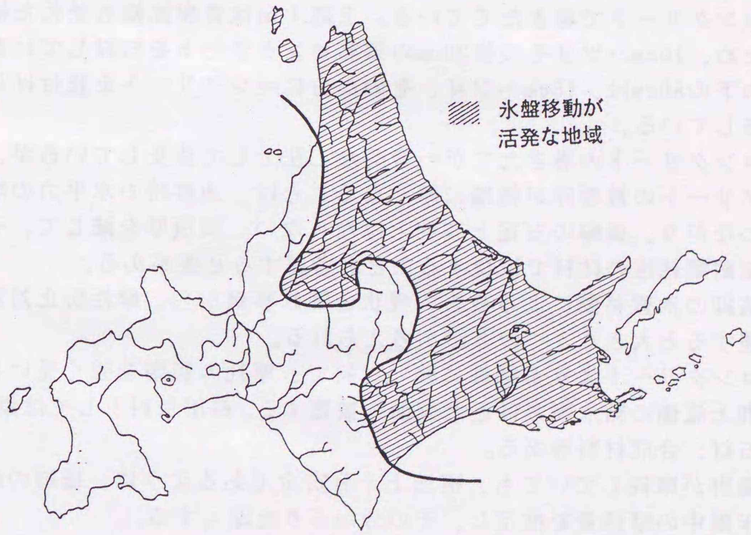


図2.71　摩耗対策の検討が必要な地域

２．９．２　橋脚の摩耗防止対策

北海道内の氷盤による摩耗被害報告のあった10橋梁のうち５橋梁は、すでに補修工事が完了している。芦別大橋は、矩形断面のNoseを持つ橋脚である。上流側の摩耗が進んでいる箇所の表面をハツリ、Nose形状が三角形になるように新しいコンクリートを打設し、表面を鋼板で被覆する補修を行っている。この橋脚の形状は、北米の結氷河川の橋脚によく用いられているものである。楔形の断面形状は氷力の低下にも役立ち、鋼板はコンクリート等に比べると摩耗速度も小さいため摩耗を抑制する効果がある。

別当賀橋の橋脚の補修は摩耗している橋脚全周について厚さ３cmにハツリ、カプセルアンカーを打ち込んだ後、鉄筋を組み立てコンクリートを打設し巻きたてる工法をとっている。新しいコンクリートで巻きたてる工法は、最も一般的な補修工法であるが、この方法では将来的にもかなりの摩耗が起こることが予測される。

網走橋は、シートパイル上部より高さ１ｍの範囲での摩耗がひどく、浸食深度の最大が15cmに達している。そのため、既設コンクリートを10cmハツリ、その後25cmの厚さの鉄筋コンクリートで巻きたてている。

幌別橋の補修工法は、橋脚全周を厚さ10cm～15cmハツリ、その後鉄筋コンクリートで巻きたてている。上部１ｍは沓座拡幅も兼ねた補修のため、10cmハツリその後30cmの鉄筋コンクリートを打設している。その下の80cmは、15cmハツリ、その部分にコンクリートを腹付けして復旧している。

コンクリートの巻きたてが一般的な工法として普及しているが、コンクリートの被覆厚が極端に厚くなることは、地震時の水平力の増加につながり、橋脚の安定上有利とはならない。被覆厚を減じて、その表面耐摩耗性の材料で被覆することも考慮する必要がある。

橋脚の氷盤移動による被害の現状と補修事例から、摩耗防止対策を整理すると大きく３つの方法が考えられる。

①コンクリートよりも摩耗に強い材料で、摩耗の影響を強く受ける橋脚上流側の結氷高さ付近と側面を被覆する。被服材料としては鋼板、石材、合成材料等ある。

②橋脚が摩耗していても、構造上十分安全であるように、橋脚の耐用年限中の摩耗量を推定し、その分かぶりを厚くする。

③橋脚のNose形状や傾斜を工夫することによって氷力を低減し、摩耗量を低減することができる。

これらの３種類の工法の選定は、橋脚の立地する位置や周辺環境、経済性等が選定のポイントとなるが、経済性、摩耗抑止効果、作業性等を総合的に判断すると鋼板被覆工法が最も適当と考えられる。したがって、工法の選定にあたっては、鋼板被覆工法を基本とし、被覆工法が採用できない時に、他の２工法を検討することが望ましい。

以下には、各工法の設計法について述べる。

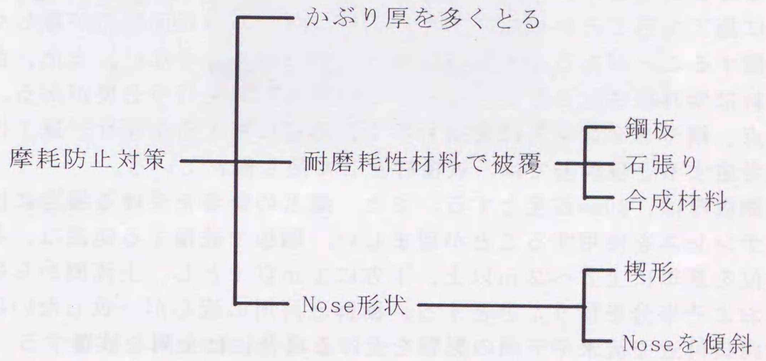


図2.71　コンクリート製橋脚の摩耗対策

２．９．３　被覆工法

摩耗の影響を強く受ける橋脚上流側の結氷高さ付近と側面を耐摩耗材料で被覆する工法である。淡水氷と諸材料の摩耗速度に関する実験から、鋼や合成材料の摩耗速度はコンクリートの1/4.5となっている。合成材料のうちポリエチレン、鋼板等に接着後コンクリートに取り付ける必要がある。ウレタンは直接コンクリートに接着でき、厚さも任意に施工することが可能である。ポリエステルは表面加工が難しく、剥離することがあるので被覆材料としては好ましくない。また、合成材料は紫外線劣化の影響もあるので耐候性試験を行う必要がある。その点、鋼やステンレスは実績も多く、品質に対する信頼性、施工性等も考慮すると現段階では、被覆材として最も優れている。

鋼板厚は、20㎜程度とする。また、海水の影響を受ける場合には、ステンレスを使用することが望ましい。鋼板で被覆する範囲は、冬季水位を基準に上方へ２ｍ以上、下方に１ｍ以上とし、上流側から橋脚のおよそ半分を覆うこととする。橋脚と河川の流心が一致しない場合や河口付近で流氷や干潮の影響を受ける場合には全周を被覆する。

橋脚を鋼板被覆すると、コンクリートとは色が異なることから、景観的な配慮を必要とする場合には、別な工法を選択するか、石材による被覆を行う。ただし、石材については、同じ種類の石材であっても産地によって、耐摩耗性が大きく異なることから、使用前に摩耗試験を行い、その耐摩耗性を検証しておく必要がある。

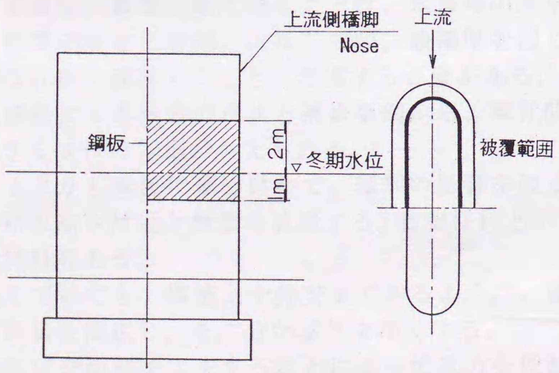


図2.71　鋼板による橋脚の被覆範囲

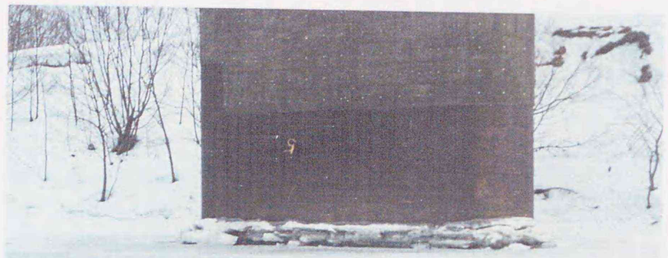


写真2.17　鋼板による橋脚の被覆事例（雄信内橋・天塩川）



写真2.18　コンクリートブロックによる橋脚の被覆

２．９．４　かぶり厚増加工法

橋脚が摩耗しても、耐用年限中の摩耗量を推定し、その分をあらかじめ厚くすることによって構造上の安全を保つ工法である。摩耗被害を受けた橋脚の補修も類似工法で実施されているケースが多く、補修時の新たなコンクリート厚の設計においても、摩耗量の予測が重要となる。

ただし、この工法は、橋脚の断面を大きくし、橋脚重量を増すことから、鉛直力や地震時水平力及び氷力の増加につながり、橋脚の安定に不利になることも多いので、検討にあたってはこれらのことも考慮する必要がある。

コンクリート製橋脚の摩耗量の推定は、以下の式とする。

$$S = 0.0012 \cdot K \cdot \sigma_V \cdot L \cdot N \qquad (2.35)$$

S：橋脚耐用期間内の摩耗量（mm）
σ_V：氷盤の接触圧力
K：無次元摩耗速度
L：氷盤の移動距離（km／１冬当たり）
N：橋脚の耐用年数（年）

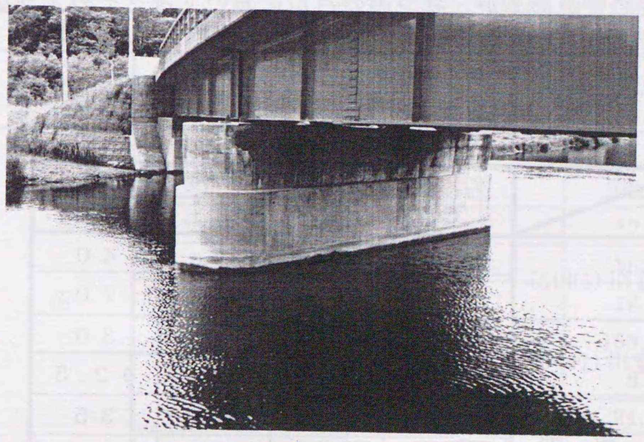


写真2.19　新しいコンクリートで巻きたてて補修した事例
（別当賀橋）

（1）氷盤の接触圧力（σ_v）

氷盤移動により構造物に作用する局部氷圧力（構造物の法線方向氷圧力）は、アスペクト比（構造物の氷盤移動方向から見た投影幅÷氷厚）が4.0～5.0程度であれば、最大氷力は氷の一軸圧縮強度の4.5倍を越えない。一般に我国の橋脚は2.0m程度の幅が多く、天塩川での氷厚調査では、おおむね50cm程度であることから、アスペクト比は5.0程度と推定され、この関係が成り立つ。したがって、架橋地点氷盤の一軸圧縮強度がわかれば最大の接触圧力を得ることができる。

氷盤の一軸圧縮強度は、基本的には、それぞれの架橋地点で氷盤の調査や氷盤を採取して一軸圧縮強度試験により求め接触圧力を導くことが基本であるが、調査や試験に時間がかかり、設計に不便である。したがって、天塩川及び桂沢湖の氷盤を使用して行った一軸圧縮強度試験結果から、設計定数の目安となる値を整理したのが表2.20である。

実験結果の平均値を整理すると、氷温が－２～－３℃では、一軸圧縮強度が30～40kg/cm^2、氷温が－10℃では40～70kg/cm^{2}の範囲となった。北海道においては、一般に氷盤移動が活発となる融氷期の氷温は０℃に近く、氷盤の強度も極端に低下することから、実際の氷盤の一軸圧縮強度は10～20kg/cm^{2}である。したがって、設計上は、一軸圧縮強度は10～20kg/cm^{2}程度を考慮すれば安全側であり、最大でも30kg/cm^{2}を見積もれば充分安全である。また、厳冬期においても氷盤移動の発生する河川においては、氷温が－10℃の時の一軸圧縮強度を考慮して設計する必要があるが、我が国の河川においては、そのような状況は極めて稀である。

表2.20　氷盤の一軸圧縮強度（最大値）

	氷　温 ℃	一軸圧縮強度(kg/cm^2)		
		Ｍａｘ	Ｍｉｎ	平　均
天塩川(1992)	－２	７５	５	４０
	－１０	１１５	２５	７０
天塩川(1993)	－２	５５	５	３０
	－１０	７０	１５	４２.５
桂　沢　湖	－３	５０	２０	３５
	－１０	７０	４５	５７.５

（2）無次元摩耗速度（Ｋ）

通常の河川の氷盤中には固形成分が含まれている。この固形成分濃度と中央粒径の大きさに摩耗速度は強く影響を受けるため、摩耗速度を決定する際に、架橋地点の氷盤中の固形成分の分布状況を把握しておく必要がある。しかし、固形成分含量は、周辺土地利用の変化、風等の自然条件によって毎年異なることが予想され、架橋位置の固形成分分布の傾向を把握するには、かなりの期間が必要となる。そのため、２．７節で調査した結果を用いて、設計の目安となる値を設定し、調査を行わなくともある程度設計を可能にする。

表2.10は、道内の各河川や湖沼における固形成分濃度と中央粒径の調査結果の中から最大値を整理したものである。（分析結果が一つしかないものについては、その値を記載している。）この結果で、最も固形成分含量が高かったのは天塩川の橋梁直下で433.9mg/l、中央粒径値は、交通量の多い道路が隣接している茨戸湖の203.1μmであった。

この結果から最大の固形成分濃度は0.04%、最大の中央粒径値は0.2mmとなった。そのほかの、道路の影響をあまり受けない氷盤は、固形成分濃度が0.01%以下、中央粒径値も0.05mm以下であった。

以上の結果と図2.50や図2.73から河川に添って道路があるような、道路粉塵の影響を強く受ける地域においてはＫ＝1.5、道路からの影響を受けない地域ではＫ＝1.0程度として問題はない。

表2.10　氷盤中の固形物質濃度と中央粒径値（最大値）

水　域	河川・湖沼名	固形物質含量	中央粒径値
河　川	天塩川	433.9 mg/l	134.3 μm
	歴舟川	17.6 mg/l	20.9 μm
湖　沼	ウトナイ湖	145.0 mg/l	24.0 μm
	茨戸湖	418.0 mg/l	203.1 μm
	シュウパロ湖	64.6 mg/l	12.0 μm
	生花苗沼	27.7 mg/l	15.0 μm
	篠津湖	7.3 mg/l	38.8 μm
	網走湖	75.9 mg/l	153.9 μm
	能取湖	12.5 mg/l	8.0 μm
	サロマ湖	95.5 mg/l	21.0 μm
	春採湖	12.5 mg/l	8.0 μm

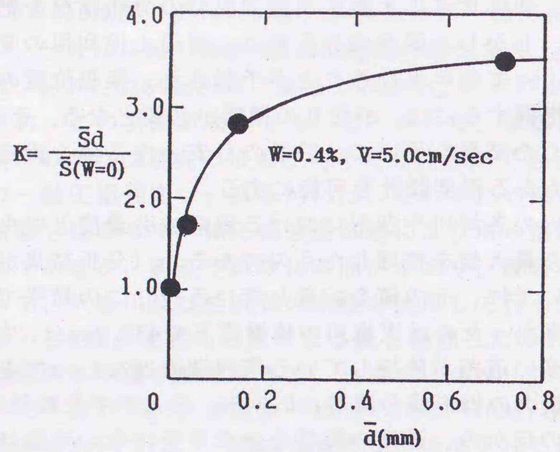


図2.73　無次元摩耗速度と中央粒径の関係（固形成分濃度0.4%）

（3）氷盤の移動距離（L）

天塩川での開氷状況調査から開氷が一気に進んだ時の最大延長は33kmであった。また、天塩大橋付近で沿線の方にヒアリングした結果、天塩川下流でおよそ20km前後は流下していることがわかった。天塩川は、我が国の最も北を流れる大河川であり、天塩川以上の氷盤流下が我が国でおこるとは考えにくい。したがって、我が国においては、氷盤移動に関する調査結果がない場合には、前後の河川形状等を考慮して、氷盤の移動距離を20～30kmで設計してもよい。

ただし、氷盤移動が活発で、氷盤による摩耗対策が橋脚の設計に大きなウエイトを持つ場合には、架橋位置前後の流下状況を観測して決定すべきである。

2．9．5　接触圧力低減工法

橋脚の形状によって氷力を低減し摩耗量を減少させる方法である。直立橋脚の断面形状の違いによる氷力変化はKorzhavinやIsnard、佐伯等の研究があり、矩形断面の氷力を1.0とすると半円形断面は0.7～0.9、楔形断面では0.5～0.7の値となる。このような、係数を架橋地点の氷盤の一軸圧縮強度から求めた接触圧力に乗ずることによって、低減された接触圧力を求めることができる。摩耗量の推定は、低減された接触圧力を用いて、前述した摩耗量の推定フローにもとづいて行なえばよい。

以上のように橋脚Noseを傾斜させ、楔形断面が氷力に対しては有利となり、しいては氷盤と橋脚表面の接触圧力の低減にもつながる。したがって、橋脚形状によって氷力を低減させることによって摩耗量を小さくすることができる。そのような視点から図2.74のような橋脚形状を提案する。

橋脚Noseの傾斜角は75°以下でなければ氷力の効果はなく、コンクリート表面の摩擦なども考慮すると実際には60°以下にする必要がある。また、橋脚断面の増加は、地震時の水平方向力の増加や経済性でマイナスの要因となることから、冬期水位より下方に１ｍ、上方に２ｍ（Break-up時の最高水位）の範囲で行うことが望ましい。

ただし、楔形断面は、氷力の低減に効果がある反面、楔の先端に対して直角方向から衝撃的な荷重がかかった場合、断面欠損をおこす可能性がある。すでに、空知川にかかる芦別大橋では、そのような原因と思われる損傷の報告がある。断面が欠損すると、氷力が大きくなるばかりでなく、摩耗速度も早くなる。したがって、確実に氷力低下が長期間期待できるように鋼材等で被覆することが望ましい。

また、このような橋脚の採用にあたっては、流心の方向や流下する氷盤の方向について充分に検討する必要がある。

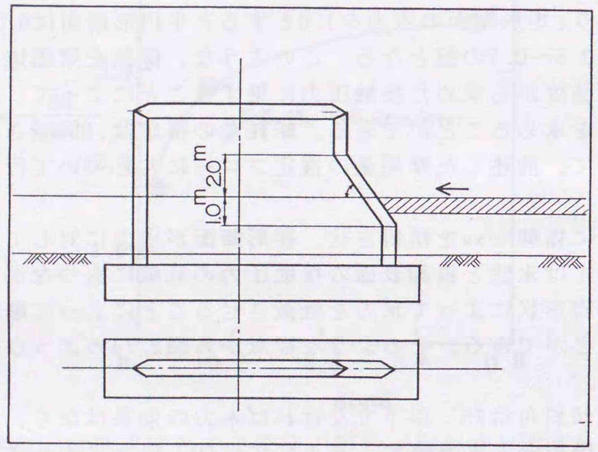


図2.74　接触圧力の低減に有利な橋脚断面

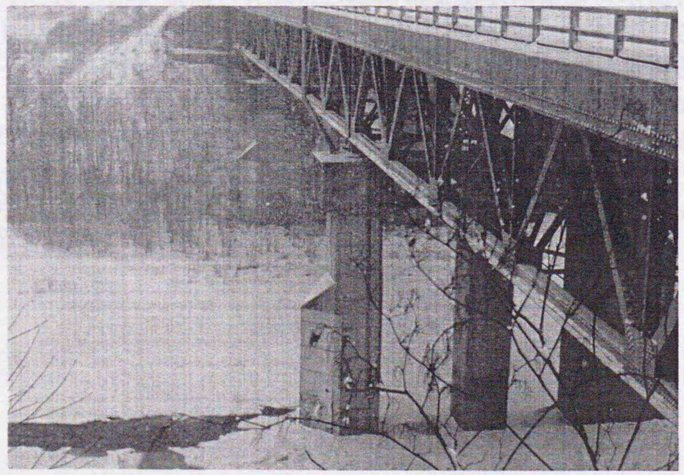


写真2.19　上流側Noseを楔形とした橋脚の事例(芦別大橋：空知川)

2．10　結論

(1)摩耗した橋脚の現地測定

①年間の摩耗速度(mm/年)は、ボスニア湾の海中灯台で0.7～7mm/年、北海道の橋梁橋脚で1.06～4.09mm/年であった。そのうち、新橋(網走川)は摩耗以外の影響も強いことから、それを除くと0.68～1.06mm/年である。

②以上のことから判断して北海道内の橋梁橋脚の氷盤移動による摩耗量は、1mm/年が最大値であることを明確にした。

③網走川にかかる新橋では、下流川も摩耗が起こっており、流氷の遡上による影響と考えられることから、オホーツク海沿岸の河口部にある橋脚は、上流側だけでなく下流側にも対策が必要である。

(2)摩耗試験装置の評価

①氷盤移動によるコンクリート表面の摩耗試験装置の具備すべき条件を構造物と氷盤間の相互作用や諸材料と氷間の摩擦あるいは、氷そのものの力学特性等の研究成果に基づき明らかにした。

②7種類の摩耗試験装置の摩耗の基本原理を明らかにするとともに、その特徴と欠点を明らかにした。

③各試験装置について、氷とコンクリート間の摩耗試験としての9つの具備すべき点ついて評価を行い、氷による摩耗現象の再現性からみて滑動摩耗試験装置が適当であることを明らかにした。

(3)各種材料の摩耗特性

①コンクリートの摩耗は、摩耗距離の増加とともに平均摩耗量は増加する。また、その傾向はコンクリートの強度や骨材の違いに関係なく同じであることを実験によって明らかにした。

②コンクリートの摩耗は、摩耗の進行にともなって3段階に分けられる。コンクリートの表面から0.25mmの深さの範囲(Surface Region)では摩耗速度S＝0.005mm/km、摩耗深さ0.25mm<S<0.60mmの範囲(Transition Region)では、0.044mm/km、摩耗深さが0.60mmを越えると(Stable Region)0.012mm/kmとなり、その後は一定の摩耗速度で継続する。

③コンクリート供試体を表面から1cm切断して行った実験では、Stable Regionの場合と同じ摩耗速度となることが確認された。

④コンクリートの摩耗速度は、氷温が－10℃以下となると急激に増加し、－10℃以上ではほぼ一定の値をとる。

⑤鋼はコンクリートとは異なり、Surface RegionとStable Regionの２領域で摩耗が進行する。
⑥鋼の摩耗速度は0.0027mm/kmで、コンクリートの1/4～1/5である。
⑦鋼は氷温の低下とともに摩耗速度も直線的に増加するが、その増加量はわずかであり、コンクリートのように－10℃以下で急激に増加することもない。
⑧合成材料は、鋼と摩耗形態、摩耗速度ともに同様の傾向を示した。しいてあげれば、ＬＤＰＥの耐摩耗性能が優れているが、その差はわずかである。
⑨石材の摩耗量は摩耗距離に比例するが、各種石材により摩耗速度は大きく異なる。また、同じ安山岩でも成分や採石場所による違いが顕著である。
⑩砂岩や安山岩の摩耗速度はコンクリートの約1/3であり、耐摩耗材として優れており、石材を用いれば美観上も良い。
⑪石材に含まれる粒子の大きさが小さければ石材の摩耗速度は小さく、石材の一軸圧縮強度が大きいほど摩耗速度は小さい。

（４）氷盤と橋脚表面の接触圧力

①直立型の橋脚は矩形Noseの場合、平均接触圧力σ_vは理論氷力式からは(1.06～1.64)・σ_cとなり、実験式からは(0.43～0.48)・σ_c、局部氷力(局部接触圧)の現地計測結果からは(2.60～6.50)・σ_cとなった。
②半円断面形の場合は、氷力式から求められる平均接触圧は、edgeが直線の場合(0.32～0.35)・σ_c、edgeがNoseに密着状態の場合は(0.83～0.91)・σ_c、現地計測された最大接触圧力は6.28・σ_cであった。
③Noseが楔形の場合はKorzhavinの平衡式と佐伯等の実験氷力式から、平均接触圧力は0.25・σ_cなる。橋脚形態としては、くさび形で傾斜Noseが接触圧力の低減効果が高い。
④傾斜型橋脚で、半円断面を有する場合の接触圧力は未だ実験は行われていないが、平山等の氷力式と若干の測定を用いると平均の接触部分は(0.31～0.35)・σ_cとなることが明らかとなった。
⑤氷の三軸圧縮強度試験から一軸圧縮強度の4.5倍を超えないことが確認されており、設計上は4.5・σ_cで安全側である。

（５）淡水氷の強度の影響

①多雪地帯の河川や湖沼における氷盤は柱状氷と雪氷とが層をなしており、きわめて不均質な氷となっている。
②多雪地帯の不均質な氷の一軸圧縮強度、圧縮弾性率は同じ密度の氷に比べてバラツキが大きい。
③過去の研究では、海氷の場合、動弾性率を求めることにより強度を推定することができるとされているが、天塩川のような多雪地帯の氷盤は不均一なため、そのような関係は明確ではない。しかし、最大の強度について直線的な比例関係を示した。
④多雪地帯の河川氷盤は、強度、弾性率、密度、動弾性率に層による違いはみられない。
⑤設計氷強度の決定は目的によって使い分けをしなければならない。橋脚の摩耗や橋脚に作用する氷力等構造物の設計にあたっては、安全側にみて純氷に近い氷強度が重要となる。しかし、支持地盤や交通路として氷盤を利用するためには氷盤の耐荷力が問題となる。この場合には雪氷の混じった不均一な氷盤の強度を設計定数とする必要がある。

（６）氷盤中の固形成分の影響

①天塩川の河川氷盤は、上から雪、雪氷(ゆきごおり)、真氷の順に層状構造をなしており、各層は数cm～数10cmの範囲で厚さが変化しており、複雑な構造となっていることがわかった。
②氷盤内の固形物質は、車両などによる汚染が見られ、橋梁下で高い含有量を示し、橋梁から離れるにしたがって減少する。含有量は、２層目の雪氷(ゆきごおり)で５mg/l程度、３層目の真氷が１～２mg/lと氷盤部分は低い値を示したが、氷層に堆積している雪は氷盤に比較して高い含有量を示した。
③固形物質の中央粒径値は、シルト質以下の大きさで、橋から離れるにしたがって小さくなる。橋梁下では砂質分が多かった。
④網走湖の氷盤は、河川の場合と同様に固形物質含有量は岸から離れるにしたがって減少しており、湖岸を走る道路からの粉塵飛散の影響が明瞭に見られた。
⑤氷盤上の積雪に含まれる固形成分は、ほとんどの地点で氷盤中の含有量の２倍以上となったことから、積雪中の固形成分の氷盤中への移動も考えられる。
⑥氷盤下の水体中の固形成分濃度は、雪や氷盤に比べて低濃度である。

（7） コンクリート製橋脚の摩耗量の推定

①コンクリート製橋脚の摩耗量推定式を導き、推定方法のフローを明らかにした。淡水氷による摩耗量は、$S=0.0012\cdot K\cdot \sigma_v$であたえられる。ここで、Kは氷盤中の固形成分濃度が一定の場合のある中央粒径値における摩耗速度を固形成分を含まない場合の摩耗速度で無次元かした値であり、σ_vは接触圧力である。

②１年あたりの摩耗量の算定には、摩耗速度に架橋地点での年当り氷盤移動距離を乗ずる必要がある。そのため、天塩川において航空写真撮影と現地調査を行い、最大の氷盤移動量が約30kmであることを明らかにした。天塩川が我が国最北の大河川で、唯一、南から北に流れる寒地河川という状況から考えて、我が国においては、天塩川以上の氷盤移動が発生する可能性はほとんどない。

③著者等の提案した摩耗量の推定式及び推定フローにしたがって、旧羽幌線天塩川橋梁において、摩耗量の推定を行った結果、水位変動による接触位置の変化を考慮することによって、実測値とほぼ一致した。

（8） コンクリート製橋脚の摩耗対策

①北海道内の河川結氷図及び積算寒度の分布と被害橋梁の位置から、被害橋脚が結氷率が高い道北やオホーツク沿岸の河川に集中していること、被害橋脚が積算寒度700（度・日）以上の地域に分布していることが判った。これらを基に摩耗対策が必要な地域を明らかにした。

②コンクリート製橋脚の補修事例と氷盤と橋脚の摩耗メカニズムから、橋脚の摩耗防止対策として、被覆工法、かぶり厚増加工法、接触圧力低減工法の３つを提案し、それぞれの設計法を明らかにした。

③被覆工法は、コンクリートより耐摩耗性能が優れている鋼板、合成材料、石材等でコンクリート表面を被覆する工法で、被覆範囲及び各材料の耐摩耗性能を明らかにした。

④かぶり厚増加工法は、摩耗量の推定式にもとづいて耐用期間内の摩耗量を推定し、その分を予め見積もって構造形態を決定する工法である。摩耗量の推定のための設計定数である、氷盤の一軸圧縮強度及び接触圧力、氷盤中の固形物質濃度と中央粒径から決まる無次元摩耗速度の決め方について明らかにした。

⑤接触圧力低減工法は、橋脚Noseを傾斜させ、楔形断面とすることによって接触圧力を軽減し、摩耗量を減少させる効果が高いことから、接触圧力を低減させるために効果的な橋脚形状の提案を行った。

２．１１　参考文献

1）原文宏，佐伯浩(1989)：結氷河川における橋梁設計に関する一考察，平成元年度日本雪氷学会全国大会講演予講集，pp193

2）Y.Tanaka,F.Hara,H.Saeki(1991): Abrasion of Bridge Piers due to Ice Movement,Japan, Extended Abstracts of 3rd Symposium on Cold Region Development,pp92

3）Y.Takahashi,M.Niiyama,F.Hara,H.Saeki(1991):Damage to Bridge Piers due to River Ice Movement and thier Maintenance and Repair, Extended Abstracts of 3rd International Symposium on old Region Development, pp93

4）高橋陽一，原文宏，橘治国，佐伯浩(1991)：氷盤移動によるコンクリート製橋脚の摩耗に関する研究，土木学会第46回年次学術講演会，pp676-677,

5）新山惇，高橋陽一，原文宏，佐伯浩(1991)：氷盤移動による橋脚の被害と補修対策の現状について，土木学会第46回年次学術講演会，pp678-679

6）原文宏，後藤克人・折谷徳弘・佐伯浩(1990)：結氷河川における橋梁の摩耗に関する研究,土木学会第45回年次学術講演会，pp642-643

7）伊藤喜栄、浅井有一郎、佐藤英安、後藤克人、佐伯浩(1990):砂を含んだ海氷盤の移動による種々の建設材料の摩耗に関する研究、海洋開発論文集,Vol.6, pp74-79

8）Janson(1989): Long Term Resistance of Concrete offshore Structures in Ice Environment, Proc.of 7th Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions, pp225-230

9）H.Katoh, K.Suzuki, Y.Kariyazono, F.Ohtsuki, K.Sato, H.Saeki (1989): Dura bility of Coated Steel in Sea Ice Regions,Proc. of 7th Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions, pp213-220

10）高橋陽一、原文宏、後藤克人、折谷徳弘、佐伯浩(1990)：氷盤移動による橋脚の摩耗量の調査と予測、第６回寒地技術シンポジウム講演論文集、pp367-373

11）高橋陽一，原文宏，佐伯浩，新山惇（1991）：道内結氷河川における橋梁橋脚の被害状況について，第７回寒地技術シンポジウム論講演論文集，pp664-669 ，

12）原文宏，高橋良正，佐伯浩，佐藤浩，渡辺将人，折谷徳弘(1993)：

氷盤移動によるコンクリート表面の摩耗試験方法の評価，寒地技術シンポジウム'93 論文集，pp157-164
13)原文宏，花田真州，伊藤慎一，佐伯浩:(1995) 氷盤移動によるコンクリート表面の摩耗試験方法について，第９回オホーツク海と流氷に関するシンポジウム講演要旨集，pp115-119
14)佐伯浩、浅井有一郎、泉列、竹内貴弘(1985)：海氷によるコンクリートの摩耗に関する研究、第10回海洋開発シンポジウム論文集、pp65～73
15)浅井有一郎、泉列、竹内貴弘、佐伯浩（1985）：海氷によるコンクリートの摩耗について、寒地技術シンポジウム論文集、pp564～571
16)Nawwar,A.M.and Malhotra,V.M.(1986): Development of Test Method to Determine the Resistance of Concrete to Ice Abrasion and Impact, Proc. of the International Workshop on Concrete for Offshore Structure, pp1-25, 1986
17) Itoh,Y., Yoshida,A., Asai,Y., Saeki,H.(1987): Testing Methods on Sea Ice Concrete Sliding Abrasion, Proc. of Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions,pp89～96
18) Itoh,Y., Yoshida,A., Tuchiya,M., Katoh,K.,Saeki,H.,(1988): An Experimental Study on Abrasion on Concrete Due to Sea Ice, Proc. of Offshore Technology Conference, pp61～68
19)Huovinen,S., Kuosa,H., Vesikari,E.(1988):The Abrasion of Concrete in Arctic Offshore Structures, Proc. of The 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.3, pp233～240, 1988
20) Hoff,G.C.(1989):Evaluation of Ice Abrasion of High-strength Light weight Concrete for Arctic Applications, Proc. of the 8th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering,Vol.3, pp583～590
21) Michel,B., Toussaint,N.(1977): Mechanics and Theory Indentation of Ice Plates, Journal of Glaciology, Vol.19, No.81, P285～300, 1977
22) Saeki,H.,Ono, T.,Nakazawa,N., Sakai,M., Tanaka,S. (1984): The Coefficient of Friction Between Sea Ice and Various Materials Used in Offshore Structure, Proc. of Offshore technology Conference, pp375～382,

23)American Society for Testing and Materials (ASTM) Standard C779,(1979): “Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces ”,Concrete and Mineral Aggregates,Part14
24)Afanas'yev,V.P., Yu.V.Dologopolov and Z.I.Shvayshteyn(1971): Ice pressure on separate supporting structures in the sea, Trans. Arctic and Antarctic Inst.(Leningrad),CRREL TL346
25)高橋陽一、原文宏、寺島貴志、榎国夫(1990)：結氷河川における橋脚の設計法、第６回寒地技術シンポジウム講演論文集、pp360～366
26)Takahashi.Y、F.Hara and H.Saeki (1991):Estimate Method of Abrasion of Concrete Bridge piers Due to Ice Movement,Proc. of Inter.Symp. on Cold Regions Development,P9～10
27)Itoh.Y、A.Yoshida、M.Tsuchiya and H.Saeki (1988):An Experimental Study On Abrasion of Concrete Due to Sea Ice,Proc. of OTC,P61～68,
28)高橋陽一，後藤克人，原文宏，折谷徳弘，小浜等（1991）：淡水氷の移動による橋脚の摩耗について，寒地技術シンポジウム'91 論文集，pp664-669 ，
29)F.Hara,H.Saeki,C.Ishii,Y.Itoh,Y.Asai (1993) : Experimennts of the Abrasion of Concrete Surface Due to the Movement of Ice Sheets, Proceedings of the International Conference held by RILEM-Technical Committee 104-DCC (Damage Classification of Concrete Structures), pp351-352
30)花田真州・原文宏・伊藤喜栄・佐伯浩（1995）：海氷盤の移動による自然石の摩耗に関する研究、海洋開発論文集，Vol.11,pp229-233
31)佐伯浩、小野敏行、山田満、尾崎晃（1981）：直立構造物に使用する海氷の力に関する研究、第28回海岸工論文集、P396～400
32)Tanaka.S、T.Ono and H.Saeki (1987) :The Distribution of Ice Pressure Acting on Offshore Pile Structure and Failure Mechanics of Ice Sheet,Jour of Offshore Mechanics and Arctic Engineering,ASME,Vol.1,P76～83
33)佐伯浩、田中俊幸、佐々木広輝、小野敏行、山下俊彦（1987）：円断面直立海岸構造物に作用する氷力に関する研究、第34回海岸工学論文集P566～570
34)K.N.Korzhavin (1971) :Acting of Ice on Engineering Structures, U,S,S,R. Academy of Science, Siberian Branch, Draft Translation By USA CRREL

35)山内敏夫，小野裕二，原文宏，佐藤昌志（1994）：結氷河川に建設される橋脚の設計荷重について，開発土木研究所月報，No494，pp2-10
36)原文宏，高橋陽一，佐伯浩，佐藤浩（1993）：氷盤と橋脚表面間の接触圧力について，土木学会第48回年次学術講演会，pp1070-1071
37)前田智治、笹本誠、堺茂樹、石田宏、平山健一(1989)：試験条件をパラメータとした氷圧縮及び曲げ強度の表示法について、第５回寒地技術シンポジウム講演論文集、pp364-369
38)北条紘次、小浜等、折谷徳弘、佐伯浩、渡辺一男(1990)：貯水池の結氷に関する研究－桂沢ダム貯水池－、第６回寒地技術シンポジウム講演論文集、pp374-385
39)高橋陽一、寺島貴志、折谷徳弘、中沢直樹、佐伯浩(1991)：淡水氷の強度について、第７回寒地技術シンポジウム講演論文集、pp579-585
40)F.Hara・Y.Okubo・H.Saeki(1994):The Strength of River Ice in the Hight Snow Accumulation Region of Hookkaido, Japan, Proceedings of the 12th Internatioanal Symposium on Ice, Vol.1, pp436-441,
41)岡本智，小浜等，原文宏，国松靖，佐伯浩，折谷徳弘(1992)：天塩川の結氷状況と氷の強度，第８回寒地技術シンポジウム論文集，pp441-444
42)原文宏，国松靖，大久保周一郎，佐伯浩，岡本智(1993)：天塩川の氷の強度に関する実験的研究，第９回寒地技術シンポジウム論文集，pp660-664
43)北条紘次，中沢直樹，小浜等，原文宏，佐伯浩(1992)：ダム貯水池の水位低下による氷盤の破壊について，平成４年度日本雪氷学会全国大会講演予講集，pp63
44)高橋陽一，原文宏，佐伯浩，岡本智(1993)：橋脚表面の摩耗量推定のための淡水氷強度について，土木学会第48回年次学術講演会，pp1072-1073
45)水野篤行(1968)：水質底質調査入門、丸善
46)橘治国、永礼英明、水野克彦、佐伯浩、竹本広幸(1992)：結氷期における湖沼・河川の汚染、第８回寒地技術シンポジウム講演論文集、pp177-180

47)橘治国、水野克彦、竹本広幸、佐伯浩、石井次郎(1991)：氷雪中の固形物質と環境影響、第７回寒地技術シンポジウム講演論文集、pp448-453
48)橘治国、石井次郎、佐伯浩、山下俊彦(1991)：自然氷中の固形成分について、第６回オホーツク海と流氷に関する国際シンポジウム講演要旨集、pp102～106
49)H.Harukuni, M.Nameki, F.Hara, H.Seki(1994)：Pollution of Fallen Snow in Urban Areas, Proceedings of International Conference on Development and Commercial Utilization of Technologies in Polar Region, pp487-497,
50)橘治国，水野克彦，佐伯浩，山下俊彦，石井次郎(1991)：自然氷中の固形物質について，第６回オホーツク海と流氷に関する国際シンポジウム講演要旨集，pp.102-106
51)橘治国，永礼英明，水野克彦，佐伯浩，竹本広幸(1992)：結氷期における湖沼・河川の汚染，第８回寒地技術シンポジウム講演論文集，pp.177-180
52)阿部正明，原文宏，橘治国，新麻里子(1991)：都市における除・排雪と環境保全，第７回寒地技術シンポジウム論文集，pp435-439
53)原文宏，橘治国，阿部正明(1994)：積雪汚染と除雪に伴う環境影響について，水文・水資源学会誌，Vol.8，No.2，pp240-249，
54)橘治国，原文宏，佐伯浩，水野克彦(1995)：河川氷の物理・化学的性状，平成６年度土木学会北海道支部論文報告集，第51号(B)
55)行木美弥，水野克彦，橘治国，丹保憲仁，佐伯浩，原文宏・阿部正明(1993)：積雪汚染と水環境への影響について，北海道大学衛生工学シンポジウム論文集，pp379-381
56)橘治国，新麻理子，原文宏(1991)：都市域における積雪汚染と水域汚染防止，日本陸水学会第56回大会講演要旨集,pp145
57)F.Hara, M.Niiyama, Y.Takahashi, H.Saeki(1993): Damage of Bridge Pier due to Movement of Ice Sheets and Estimation of Abrasion Depth, Proceedings of the International Conference held by RILEM-Technical Committee 104-DCC (Damage Classification of Concrete Structures), pp379-383,
57) F.Hara, H.Saeki(1994): On abrasion of Hydraulic Structures Cause by Movement of Ice, Proceedings of the 12th International Symposium on Ice, Vol.2, pp857-866

58)高橋陽一，原文宏，寺島貴志，榎国夫（1990）：結氷河川における橋脚の設計法，第６回寒地技術シンポジウム論文集，pp360-366
59)高橋陽一，原文宏，後藤克人，折谷徳弘，佐伯浩（1990）：氷盤移動による橋脚の摩耗量の調査と予測，第６回寒地技術シンポジウム論文集，pp360-366
60)H.Saeki，Y.Takahashi，M.Niiyama，F.Hara （1991）:The Study on Abrative Damages to Concrete Bridge Pier by River Ice Movement and Preventive Methods of Them，平成３年度土木学会北海道支部論文報告集，pp125-130
61)佐藤昌志，山内敏夫，原文宏，佐伯浩，阿部正明（1993）:天塩川の氷の移動に関する研究,第９回寒地技術シンポジウム論文集，pp646-653
62)山内敏夫，佐藤昌志，原文宏，佐伯浩(1994)：北海道における結氷河川の現状と橋脚の設計について,第10回寒地技術シンポジウム論文集，pp712-722

第３章　橋脚位置でのアイスジャムの形成

３．１　概説

アイスジャムは、河川の蛇行部、狭窄部、合流部、分流部、水面を厚く結氷している所や氷塊が地盤と接触し座礁するような箇所、水路断面が縮小したり水深が深くなる箇所、及び橋脚の設置されている位置で良く発生する。これら以外の箇所での発生は稀である。しかし、たとえ発生する場所がある程度特定できたとしても、毎年の発生時期や規模を知ることは難しく、橋脚や水理構造物の設計に反映することができないのが現状である。

著者等は、北海道の北部を流れる天塩川で３冬期にわたってブレークアップといわれる開氷現象について観測を行った。また、札幌市内を流れる琴似発寒川で発生した異常出水についても現地調査を行い、橋梁部で氷盤が詰まったことが原因であることを明確にした。このような現地調査に基づいて橋脚周辺で発生するアイスジャムの発生形態を以下の２つに分類した。

①定着氷を橋脚が支持した状態で定着氷先端部でのアイスジャム
②橋脚位置での浮氷盤のアーチ形成によるアイスジャム

①については、定着氷先端部での浮氷盤の運動について、ポリプロピレン板による模型実験を行い、先端部の形状が浮氷盤の潜り込みに与える影響や浮氷盤に加わる流体抵抗について明らかにした。また、定着氷下に潜り込んだ浮氷盤が、そこに留まるかどうかは、氷盤相互の摩擦抵抗と流体力によって決まることから、実際の河川氷を使って氷盤相互の摩擦係数を測定する室内試験と野外試験を実施した。以上のような定着氷先端部でのアイスジャム形成に関する基礎研究によって発生メカニズムの概略を把握することができた。

②は、模型氷盤と模型橋脚を使った実験によって、浮氷盤が橋脚位置でアーチを形成する条件を明らかにし、橋脚間隔、流速、氷盤の厚さと辺長からアーチを形成しない橋脚間隔を導くことを可能とした。また、琴似発寒川での調査結果に基づいて、アーチを形成しない橋脚間隔を求めた結果、現状の約３倍の間隔が必要であることが判った。以下には、これらの詳細を述べる。

３．２　アイスジャム発生河川の現地調査

３．２．１　天塩川でのブレークアップの観測

（１）天塩川の河川環境

天塩川は、日本の最北を流れる大河川で、南東から北西に向いて流れている。源流は、天塩岳（標高1,557.6ｍ）から発し、流域面積5,590km²、幹線流路延長256kmに及ぶ。

天塩川が流れる上川北部地方は亜寒帯気候に属し、特に地理的に内陸部に位置するため、当地方の気候は寒暑の変化が激しいことが特徴である。平地における年平均気温は６～７℃程度だが、冬の最低気温は－30℃にもなる。

天塩川の上流部は天塩岳から名寄盆地に入るまでを指し、流域内で最も標高差のある地域である。中流部は名寄盆地から音威子府までを指す。中流部から下流部にかけては、川沿いに泥炭地の分布する天塩川低地帯を形成している。下流部は、音威子府村から河口までを指す。中、下流部では狭さく部がいくつも連なっていることが地形的な特徴である。主な狭さく部は中流部の名寄盆地から美深町の間の〝智東の狭さく部〟、下流部の音威子府から中川町の間の〝神路の狭さく部〟などがある。

Break-upの発生を観測した地点は、過去にアイスジャムの発生記録が多く、1993年の調査でも水位に顕著な変化が現れていた中川町の中川橋上流である。

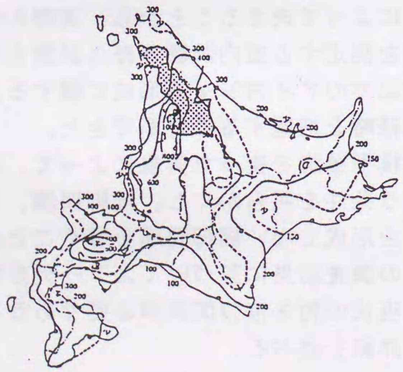


図3.1　天塩川の流域と積雪深分布

（２）Break-upの観測結果

３月の末から、中川橋の上流にある天塩川誉平流量観測所と河川情報センターを経由して電話回線で結ばれている北大工学部の端末を使って、この地点の水位変化を記録していた所、1994年４月３日から水位が上昇しはじめた事から４月５日午後９時より現地観測を開始した。観測開始時点では、水面は全面的に結氷していた。変化が現はじめたのは、翌1994年４月６日の午前５時を過ぎから７時までの間にBreak-upが生し中川橋上流の氷盤は全て流下した。

観測は、発電機と投光器及びビデオカメラを用いて行った。観測は夜間から早朝にかけて行ったのは、天塩川のこの時期の１日の水位のピークが深夜から早朝にかけて現れることによる。

天塩川の Break-up の開始から終了までの主な点を時系列で簡単にまとめると以下のようになる。

①５日午後10時55分

中川橋の２基の橋脚間のほぼ中央部の氷盤に突然穴があき、多くの氷片を含んだ河川水が吹き出し、橋梁下流側の定着氷の上を流下した。その後、この穴は徐々に大きくなり直径が10ｍを越えた。

橋梁下流側の氷盤が、かなり大きく流下しても上流側の氷盤に変化がないことから、中川橋上流の約1.5ｍの氷盤は、両橋脚によって移動が止められていたことが判明した。

②６日午前５時14分～５時30分

橋梁より上流250m付近で、その位置より上流の氷盤が下流に流下したが、下流側の氷盤が動かないために、流下部と定着部の境界部分で氷の強度の弱い所を中心に破壊し、氷丘（Ice ridge）を形成した。そして流下してゆく氷片がほとんど無くなった。（図3.2）

③６日午前５時30分～６時00分

橋梁のすぐ上流側の河道中央部に直径 60 cm程度のふくらみのある開口部（Ice hump）が形成されると、次々と上流に向かって10～40ｍ間隔で最終的には６個程度が河道中央に一直線に並んだ。（図3.2）

④６日午前６時00分～６時30分

上流側のIce humpから河川水が吹き出し開口部が徐々に拡大した。その後、下流側のIce humpからも水が吹き出し、開口部が拡大し、となりあう開口部が連結して、全面結氷していた河川氷盤の中央に幅36ｍで、長さ180mの開水面が形成された。その開水面を多量の氷片や氷盤が流下した。（図3.2）

⑤６日午前６時30分～６時55分

左岸側の岸近くの氷盤が、岸に平行に亀裂が入るとともに、流れに直角方向にも大きな亀裂が入り全面結氷していた氷盤が細分化された。細分化された氷盤の大きさは１個がおよそ幅 30×長さ 50～100m 程度であった。（図 3.2）

⑥６日午前６時 55 分～７時 10 分

細分化された氷盤は、最も下流側で橋脚に接している氷盤から、橋脚を支点として流心側に回転しながら流下し、次々と上流側の氷盤が続いた。最終的には、幅 100m で延長 1.5 kmの河道内にあった氷盤が全て流下した。その氷盤の流下速度は、2.1m/sec であった。橋脚に衝突した氷盤は Crashing 破壊をおこしたが、氷盤の流下速度に変化はなかった。（図 3.2）

以上のような天塩川の Break-up は、大きく４つの段階に分かれて進行したと考えることができる。

〔第１段階〕定着氷下に氷片や小さな氷盤が溜まり通水を阻害する。

上流の開氷部から流れ出る氷盤・氷片及び雪やフラジル等が水深の浅い箇所の定着氷の下に溜まり通水を阻害する。そのため、通水が阻害された箇所では必然的に水位の上昇を招く。

〔第２段階〕水位上昇による流下圧力の増加。

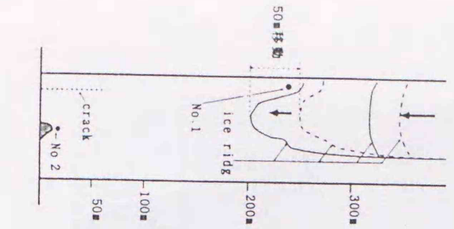
水位の上昇によって、定着氷に揚力がかかるほか、今まで河床に接していた定着氷下にある氷片や小さい氷盤が、水深の増加によって河床を離れ浮かんだ状態となる。その上、流体抵抗も増加しているため、全体として下流へ流下しようとする圧力が増大する。

〔第３段階〕２基の橋脚が支点となって、氷盤の流下に抵抗する。

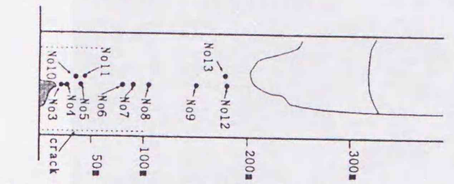
氷盤全体が浮き上がることによって、２基の橋脚が氷盤を支えるような構造となる。つまり２基の橋脚が支点となった梁のような状態となり、センターに大きな曲げモーメントが作用して氷盤中央にクラックが発生し、上流側へ進行する。

〔第４段階〕岸との定着部に亀裂がはいるとともに横断方向にも亀裂が入り、大氷盤が細分化し流下する。

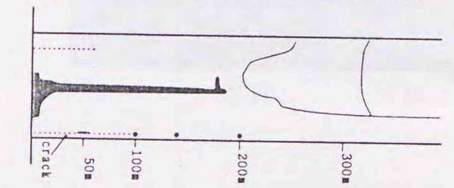
水位の上昇によって、氷盤全体が持ち上げられるが、岸との定着部は定着力が強い場合は、岸近くの氷盤が曲げ破壊し、弱い場合にはそのまま持ち上げられてフリーな状態となる。同時に水面勾配や流体力の影響で横断方向にも亀裂が入り細分化された所で、下流の橋脚を支点にして流心側に回転しながら、橋脚と接している氷盤から下流に流下する。



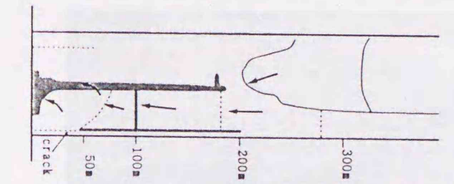
①上流側の氷盤が流下し、下流の定着氷との境界部にIce ridge を形成した。



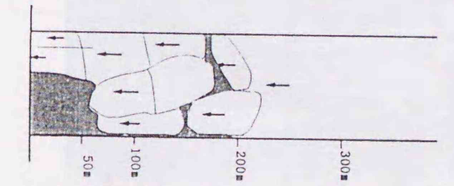
②河道の中心にそって、橋梁から上流に向かって盛り上がった開孔部（Ice hump）が形成された。



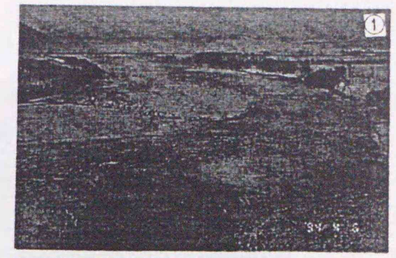
③河道の中心に幅３～６ｍ開水面が形成される。



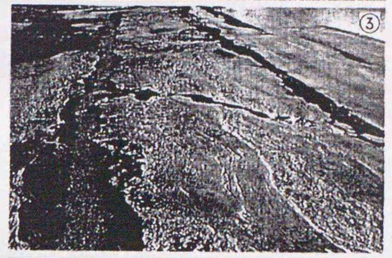
④左岸に岸にそったクラックと横断方向のクラックが発生し、氷盤が細分化。



⑤長さ50m 幅30m程度の氷盤が流下、10分程度で上流の氷盤は全て流下する







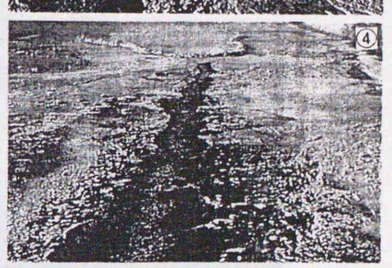




図 3.2　Break-up 時の河川状況



写真 3.1　上流側にできた Ice hump



写真 3.2　橋脚による氷盤の Crashing 破壊

（３）Break-up時の水位と流量

中川橋上流の誉平流量観測所の水位データによれば、４月２日までは10.6～10.9ｍの範囲で水位が推移していたが、３日には11ｍ台となり、その後も上昇を続けた。４月５日の午後５時には12ｍ台の水位となり、６日午前７時に最高水位12.86mを記録し、８時には急激に低下して９時には10.74mとなり４月２日時点での水位まで戻った。この水位の急激な変化とBreak-upが発生時刻は一致する。

したがって、定着氷下への氷片や小さな氷盤の蓄積が顕著になったのは、４月３日当たりからと考えられる。その頃には、上流域の開氷も進み、場所によってはBreak-up現象も発生した箇所があると考えられる。

図3.3は、上流から誉平観測所、新問寒別橋観測所、天塩大橋観測所の４月５日正午～４月７日正午までの水位変化である。誉平観測所で６日午前７時に最高水位を記録したのを皮切りに、新問寒別橋では午前９時に8.14m 、天塩大橋では午後９時に2.72m を観測しており、中川橋付近で発生したの Break-up がその日の内に河口付近まで波及しているのがわかる。ただし、水位変化が顕著なのは誉平観測所で、下流側の２観測所の変化はそれほどでもない。特に異なるのは、水位のピークをむえてから水位が低下するまでの時間である。誉平観測所では、ピーク水位から約２ｍ低下するのにわずか１時間であるが、新問寒別橋では、１ｍ低下し安定するの３時間、天塩大橋ではおよそ２ｍ低下するのに12時間をようしている。下流へいくほど水位低下が緩やかにおこる傾向を示している。この理由については、結氷状態と河川断面、河川勾配、水深などの違い及び干満の影響等に起因すると考えられる。

図3.4は、√Ｑ（Ｑ：流量）と水位の関係を示したものである。Ｑは誉平で平成５年～６年にかけて行われた流量観測結果に基づき○は結氷時期、□は開氷期の関係を表している。この関係から誉平での、最高水位の時の流量を推定すると約204 m^3/sec であり４月２日時点の水位がおよそ100 m^3/sec であることから、約２倍の流量が流れたことになる。

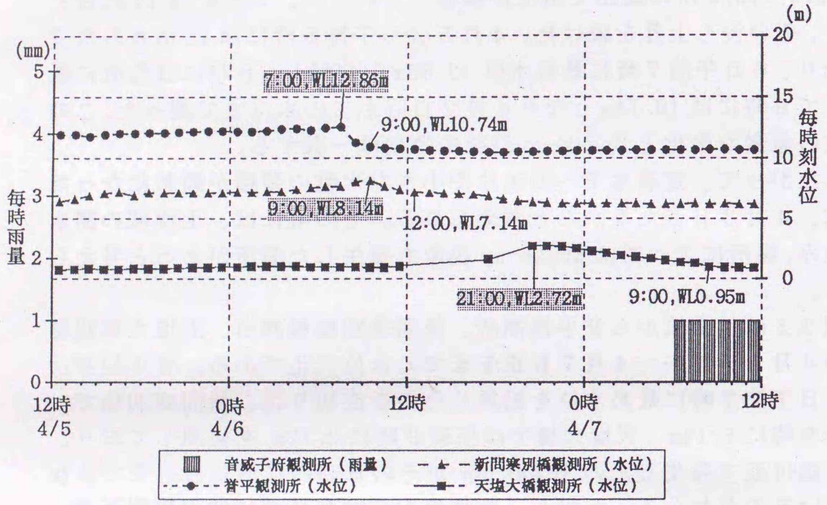


図 3.3　Break-up 時の水位変化（誉平）

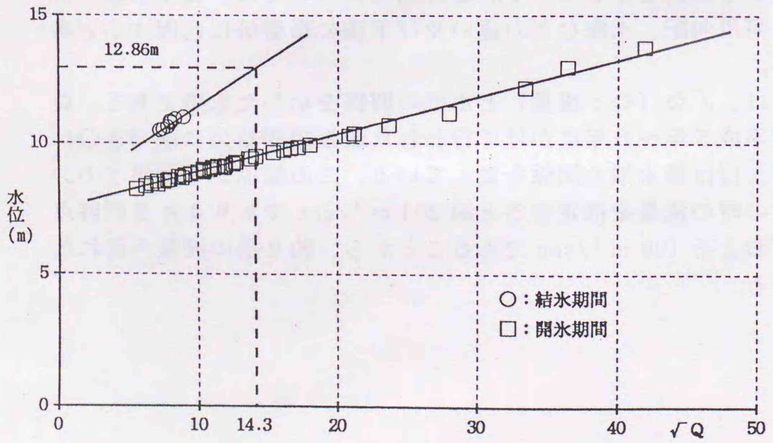


図 3.4　√Q と水位の関係（誉平）

3．2．2　発寒川でのアイスジャムの発生

1994年２月に札幌市内の琴似発寒川において急激な増水によって、河道内で魚道工事をしていた作業員がショベルドーザーごと流される事故が発生した。著者等は事故直後から現地調査を行なった。現場で工事作業員からの聞き取り調査によれば、急激な出水は極めて短時間の内に発生し、出水前には河道内の水は全く流れていなかったことが判った。本河川上流にはダム等は設置されていないことから、放流等による増水は考えられず、何らかの理由で水がせき止められ、その後決壊して異常な出水に至ったと考えられた。

事故直後の調査から工事現場上流にある長栄橋付近に大量の氷盤や雪塊が堆積しておりアイスジャムが発生した可能性が高いことが判った。事故当日の琴似発寒川は、前日からの雨で冬期としてはかなりの水量があった。そのため、河床に有った氷盤が水位上昇とともに流下をはじめ、長栄橋の橋脚部でアーチを形成し流下氷盤をせき止め、アイスジャムを形成し、その後、流下圧力によってアイスジャムが崩壊し、急激な出水となったと類推できることから、詳細な現地調査及びアーチ形成の有無に関する模型実験及びアーチを形成しない橋脚間隔のケーススタディーを行った。

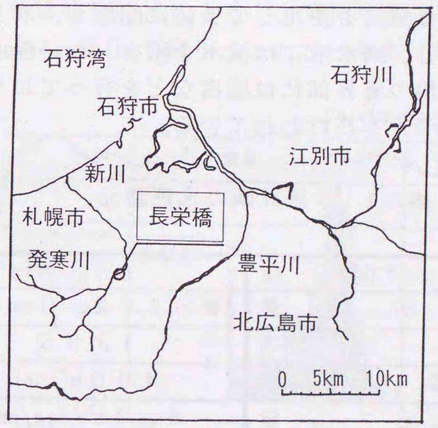


図3.5　琴似発寒川の位置図

（１）琴似発寒川の河川環境

琴似発寒川は、手稲山の南面を源として幾つもの支流が合流し、西区の平和、西野、琴似を貫流して人口河川である新川に注ぐ。公式には「２級河川新川水系琴似発寒川」という。

琴似発寒川は、出水時と渇水時の流量の差が非常に大きな荒れ川で、しばしば水害を発生させていた。また、新川との合流点付近での流路勾配が1/300に対して、新川は1/3000であるため、合流点付近に土砂が著しく堆積し河積を狭められるために、その上流一帯で洪水が頻発した。このため、治水の必要性から、昭和29年の平和ダム建設にはじまる琴似発寒川の砂防事業が行われた。

改修計画の水理諸元を表3.1に示す。流域面積の最下流は事故が発生した魚道工事現場のすぐ下流にある鉄道橋である。砂防事業は、本流に２つのダムを設置し、山からの土砂流出を抑止するとともに流路工整備が行われた。流路工とは、河道内を流路が変化し蛇行して流下する原始河川の河道を固定して、安全に大きな流量を流下できるようにすることをいう。具体的には、落差工によって急勾配を緩和し土砂の流出を抑えるとともに、帯工や床固工などで河床洗掘を防止し、両岸は護岸によって浸食を防ぐ。

このような工事の結果、現在の琴似発寒川では土砂流出もほとんどなく、新川との合流点での土砂堆積もない。

また、治水事業と平行して、昭和50年度からは砂防環境整備事業が新たに加わり、低水護岸を設けて水量が少ないときの蛇行、乱流を防ぐとともに護岸には自然石を使用して景観に配慮し、水と親しめるような工夫がされている。高水敷には流水を阻害しない程度に公園の整備を推奨し、河川敷地の境界部には植樹などを行っており、地域住民から親しまれる河川づくりが行われている。

表3.1　改修計画の水理諸元

流域面積	６７．８km^3
計画日雨量	１７２．０mm
同上確率	１／３５
計画降水流量	４００m^3/sec
比流量	６．３m^3/sec/km^2
平均河床勾配	１／１００～１／３２
計画河床勾配	１／１６０～１／５０

（２）気象状況

当時の気象状況を札幌管区気象台の地上気象観測原簿をもとに再現する。天気概況は、２月20日はほぼ快晴で、21日の昼は雨、夜半から大雨となり、22日には夕方から雪となった。気温は、20日の午前９時を境にプラスに転じ、その後は22日の午後５時まで昼夜を通じで０℃以上で推移した。

21日の正午あたりから雨が降りはじめ夜半からは大雨となって、翌22日の午前10時頃まで降り続いた。その間の降水量の合計は45mmに達した。

また、積雪は気温がプラスに転じた20日の午前10時の段階では96cmであった。その後、気温が上昇する昼間の時間帯に融雪が進み、特に雨が降り始めてからは気温が＋５℃以上で推移したことと、雨による密度増加が重なって、急速に積雪深が減少した。そのため、異常出水による事故のあった時刻の少し前、22日９時の観測では積雪深は78cmになっており、気温がプラスに転じてからの積雪深の減少は18cmに達した。

したがって、異常出水にいたるまでに琴似発寒川流域には、雨による降水と融雪量に相当する融雪水が存在し、そのほとんどが琴似発寒川に流れ込んだものと考えられる。

積雪深は気温が０℃以上になってから減少しはじめ、降雨とともに著しく減少した。しかし、この減少は融雪だけでなく降雨による密度増加による減少が大きいと考えられる。事実、北大低温科学研究所での秋田谷による積雪観測結果によると、降雨の前と後では雪の密度が2.7g/cm^{3}へと急激に上昇しており、このことを裏付けている。

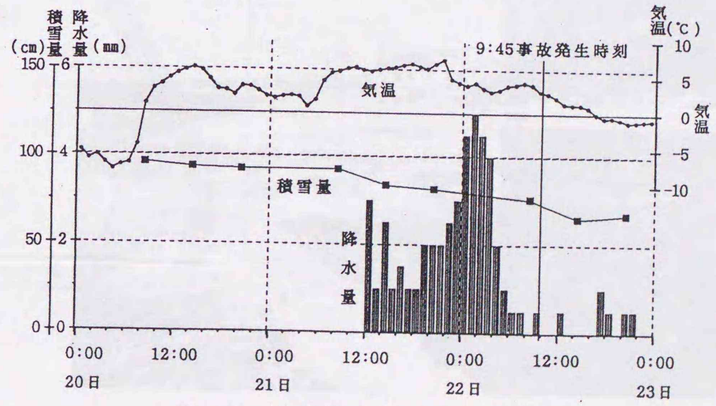


図3.6　異常出水前後の気象状況

（３）異常出水時の状況

図3.6は異常出水による事故が発生したときの琴似発寒川の現況を示している。魚道工事の現場は清水橋と鉄道橋に挟まれた箇所（図3.7③）で、鉄道橋のすぐ上流である。作業は河道の中に雪でマウンドを造りショベルドーザ等の建設機械を使って行われていた。工事関係者によると事故発生直前の河道内にはほとんど水がなく、この出水が極めて短時間に急激に発生したことを物語っている。流された建設機械は約600m下流の歩道橋の橋脚に衝突して止まった（図3.7④）。その下流100mからおよそ１kmに渡って雪や氷盤が入り交じった雪泥状態のものが厚く滞留し川面を覆っていた（図3.7⑤）。事故現場より上流では、雪泥上の流氷が低水路部に添って、低水路及びその周辺の雪や氷を巻き込んで流下したことがその痕跡からわかる。上流およそ600mの位置に長栄橋（図3.7④）他３橋が架かっており、上流から長栄新橋（図3.7⑤）、歩道橋、そして長栄橋の順である。

長栄新橋及び歩道橋は、河道に橋脚を持たない構造となっているため、流水に対する影響はないが、長栄橋はパイルベント式橋脚が約７m間隔に５基設置されており、流水の円滑性を阻害する要因となる。その上、河川中央から左岸側は２m以上に高さで雪が河道内に排雪されており、河幅の半分以上は常時閉塞された状況になっていて、流水は主に右岸の低水護岸部を流下していたと思われる。



写真3.3　異常出水直後の魚道工事現場

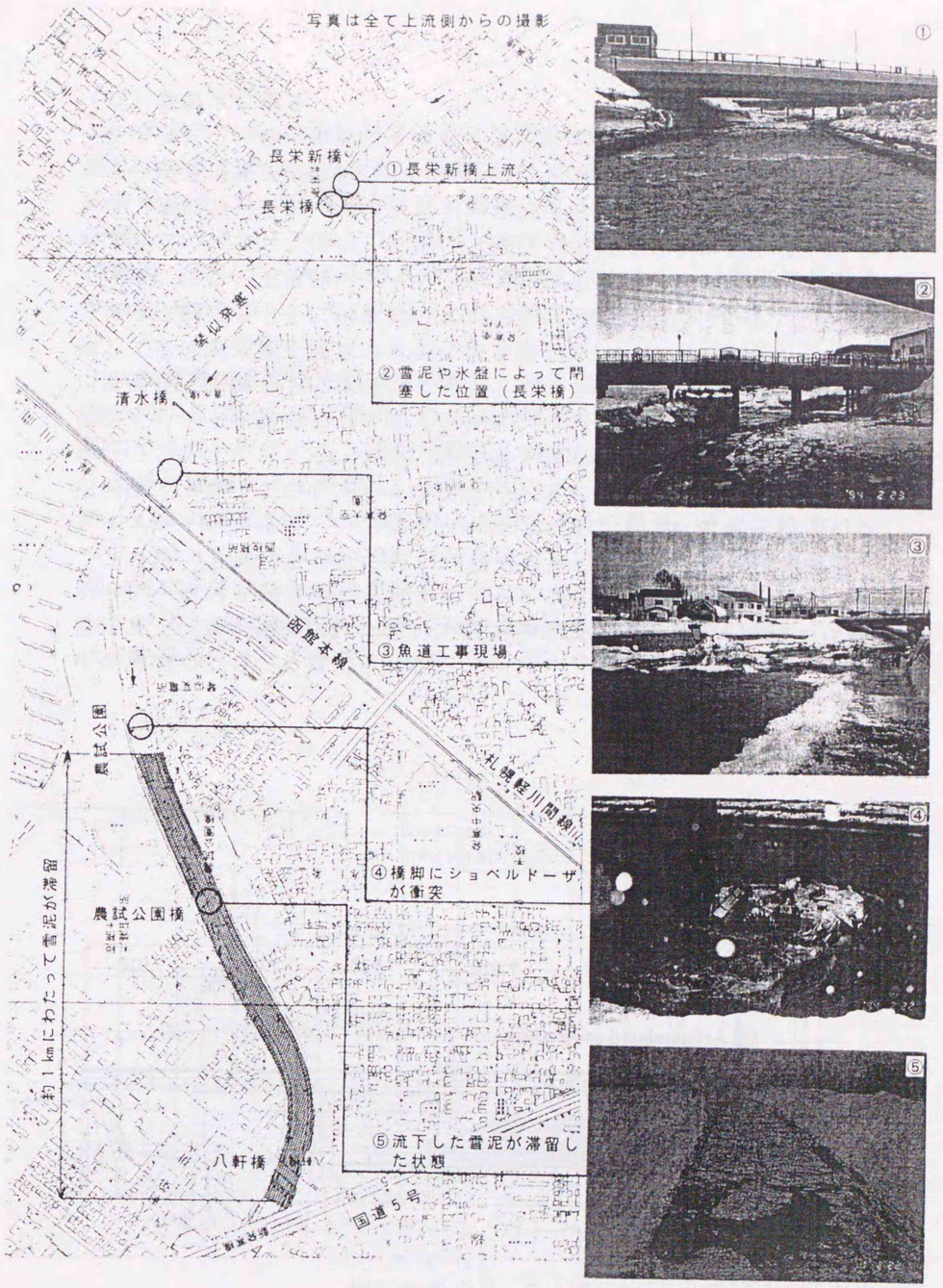


図3.7　異常出水時の河川状況

（４）橋梁周辺の状況

工事現場から上流約600ｍ位置にある長栄橋付近は、両岸に約２ｍ近い積雪が刃物で切り取られたように垂直な面を出して残っていた。長栄橋は、橋長が44.12ｍで５基の橋脚を有する橋梁である。長栄橋構造図を図3.8に示す。橋脚はパイルベンド方式で３本のコンクリート製杭を枕梁で連結し、その上に上部構造がのる形式となっていた。橋脚間隔は１スパン当たり7.02ｍであるが、左岸の１スパンだけは9.02ｍである。

低水路部は親水護岸が施され、河道内を蛇行するように設置されていた。長栄橋位置での低水路部は右岸の２径間目と３径間目の間を通過しており４～６径間の部分は、大量の積雪によってダムのように閉塞した状況となっていた。この大量の雪は、橋梁上から排雪されたことは明白であり、近隣の住宅地等から運び込まれたと思われる。そのために事故当時の長栄橋付近は低水路部分だけが通水断面となっていた。冬期は一般に渇水期であるため、通常であればこのような狭い断面でも支障ないが、今回は大量の雨が降り、河川断面が狭くなっているところに、大量の氷盤が流下したために、アイスジャムが発生したと考えられる。

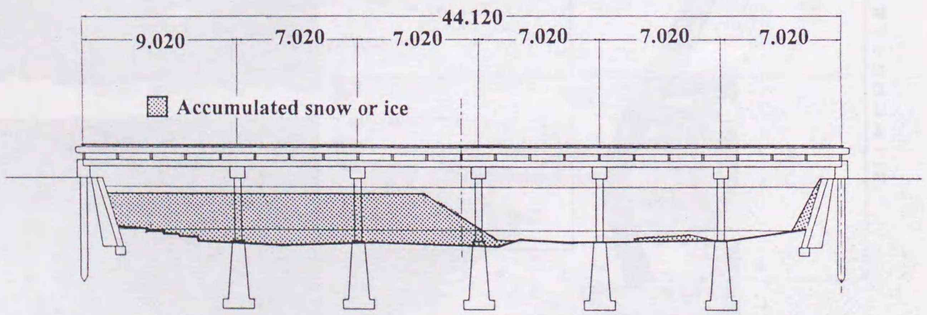


図3.8　長栄橋構造図

（５）最高水位高さ

長栄橋周辺の護岸部に残る痕跡からアイスジャム発生時の最高水位高さの調査結果を図3.9に示す。長栄橋より上流の左右岸の最高水位高さは、標高21.5～22.0ｍの間にありほぼ一定で水深が約2.5～3.0ｍ程度であるのに対し、橋梁下流部の水深は２ｍ程度と１ｍも少なくなっている。また、上流部のアイスジャム等が起こった痕跡のない落差工で行った調査をもとに越流量の式から求めた越流水深はH=0.73ｍと比較しても、長栄橋上流部の水深は約４倍も高い。以上のことから、河川断面が上下流ともにほぼ同じであることを考えれば、橋脚位置で氷盤がいわゆる氷詰まり（アイスジャム）の現象を起こし、せき止められたことがうかがえる。また、長栄橋下流の落差工周辺の痕跡が急激な勾配で下がっており、単なる越流の水面形状と異なることからも、アイスジャムが崩壊し、急激な出水があったことが推測される。

この時、上流20ｍ付近で行った積雪密度の調査では、0.57g/cm^{3}であり、一般的な融雪期の密度が0.40～0.45g/cm^{3}であるのに比べて非常に高く、せき止められた雪が上流からの流下圧力によってさらに密度が増加したものと考えられる。

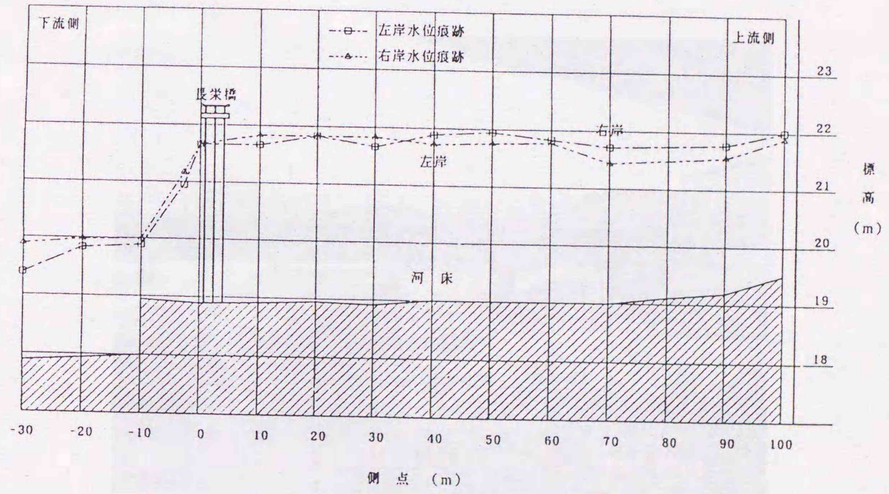


図3.9　最高水位痕跡調査結果

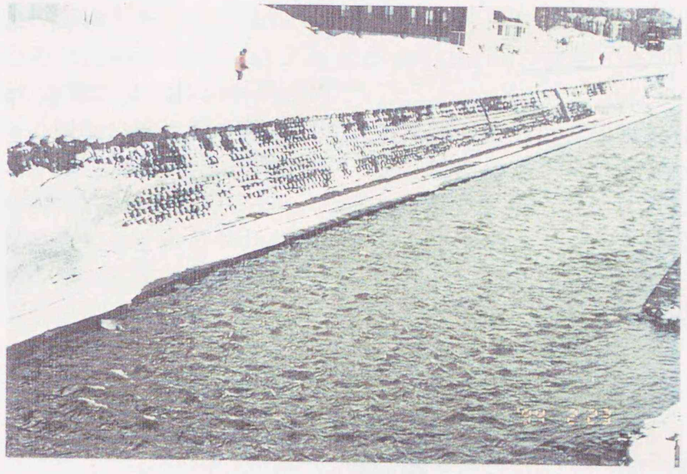


写真3.4　ブロックに残る最高水位の痕跡（長栄橋上流）



写真3.5　異常出水直後の長栄橋（上流より）

（６）氷盤の形状

橋梁周辺に残された氷盤について、その大きさと厚さを計測した結果を図3.10、図3.11に示す。氷盤形状は４角形や五角形が多く、円形などはなかった。調査した氷盤は71個である。図3.10は、現地計測した氷盤の面積を正方形換算したときの一辺の長さについて20cmごとの頻度をみたものである。ほとんどが80～180cmの範囲であり、120～160cmの氷盤が全体の40%を占めていた。

また、図3.11は氷盤の厚さと辺長の関係であるが、辺長が長くなるにしたがって氷盤厚も増加している。頻度の多かった一辺が120～160cmの氷盤では、氷厚が20～25cmの範囲であり、全体としては10～30cmの範囲にほとんどが分布した。したがって、大まかな平均としては氷厚は20cm程度と考えられる。

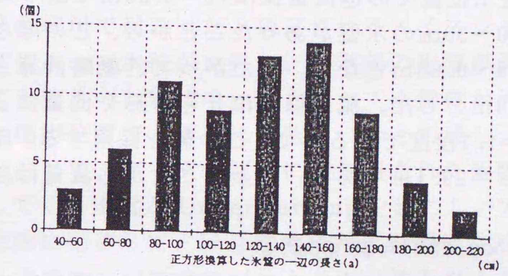


図3.10　正方形換算したときの現地氷盤の一辺の長さ

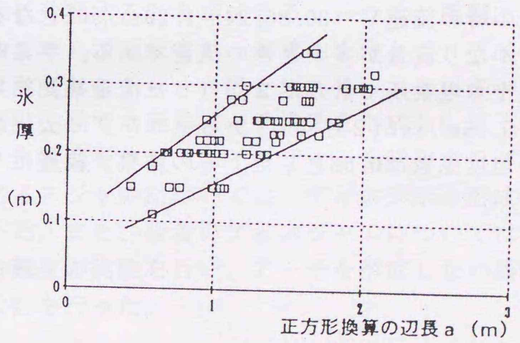


図3.11　氷盤の氷厚と辺長の関係

（7）流速

当時の流量や流速を正確に導くことはそのときの観測データがない以上、極めて難しい。ここでは、河道が閉塞した長栄橋から上流約850mある落差工で、河川断面と当時の最高水位を両岸に残された痕跡を測定し、越流量の式から流量を推定する。越流量は一般に以下の式で表される。

$$Q = K B H^{3/2} \qquad (3.1)$$

Q：流量(m^3/sec)
K：流量係数
H：越流水深(m)
B：落差工の幅(m)

調査では、落差工位置での越流量深はH＝0.98mであった。しかし、当時河川には、20～30cmの氷盤があったことから、この厚さ分を控除すると、H＝0.78～0.68mとなる。したがって、概略計算上は平均値をとってH＝0.73mとした。流量係数はせきの形や流量によって異なるが、およそK＝1.7程度であるので、この値を採用する。落差工の幅は測定の結果、B＝29.1mである。以上のことから流量は以下のように推定される。

$Q = 1.7 \times 29.1 \times 0.73^{3/2} = 30.86 m^3/sec$

この流量から当時の流速を推定する。河川断面は、閉塞した長栄橋上流の河川横断図から閉塞による影響をあまり受けていないと思われる上流90mの流下断面とし、A(河川の断面積)＝$24m^2$であった。したがって、水位が最大の時の流速V＝30.86/24＝1.29m/secとなる。

以上の結果は、かなり流量が多いときの流速である。平常時の流速については、札幌土木現業所で2月に2回行った流量観測結果の小さい方の値を使って$0.25m^3/sec$(2月4日)からマニングの公式から推定する。このときの粗度係数は0.03とした。その結果、流速はV＝0.43m/secとなった。

3．2．3　アイスジャムの発生形態

天塩川のブレークアップの観察及び琴似発寒川の河川状況調査結果をもとにして、アイスジャムの発生形態について考察する。

天塩川のブレークアップは、中川橋上流の定着氷の先端で、流下する氷盤がSlidingやUnder-turningを起こし、定着氷下にアイスジャムを形成したために、流体抵抗の増加によって、定着氷先端部を破壊しながら流下を始めた。この時、下流にある橋脚は水位上昇によって浮き上がった定着氷の流下を妨げており、アイスジャム及び定着氷の受ける流体力をすべて支持する構造となっている。支点となった橋脚上流部と定着氷の接点では、アイスジャムの発達による流体抵抗の増加で徐々に接触圧力が高まり、氷盤の破壊強度を越えた時、定着氷盤に亀裂が入り、ブレークアップが始まった。流下してくるアイスジャムは、橋脚に対して、氷力として作用するほか、高い接触圧力によって摩耗を促進する。

次に、琴似発寒川で起こったと想定されるアイスジャムは、降雨による水量増加によって水位が上昇し、河道部の氷盤が流下を始め、落差工によって氷盤片（1.5～2.0 m）となって氷盤群が流下する。それら氷盤群が、橋脚位置で水面上に氷盤アーチを形成し、流下してくる氷盤をトラップして、アーチ上流部に作り出された氷盤面の最上流部では、流下してくる氷盤がUnder-turningを起こし、アイスジャムが形成され、急激に発達して、ほぼ完全に河道を閉塞させた。その後は、徐々に高まる流下圧力がアイスジャム全体の強度以上となった時に、一気に決壊して、下流部に急激な増水をもたらした。

以上のように、著者等の現地観測をもとにアイスジャムは、大きく2つの形態に分類することができる。一つは、橋脚上流部の定着氷先端でアイスジャムが形成され、定着氷を介して、アイスジャムの氷力が橋脚に伝えられ、ブレークアップが発生するパターン。もう一つは、氷盤片が橋脚位置で水面にアーチ構造を形成し、流下する氷盤をトラップして、氷盤面を作り、アイスジャムを誘発するパターンである。

前者のアイスジャムについては、アイスジャム形成の基礎的な実験研究を行った。また、後者のアイスジャムについては、アーチ形成条件に関する種々の実験を行い、アーチを形成しない橋脚間隔の決定法について検討を行った。

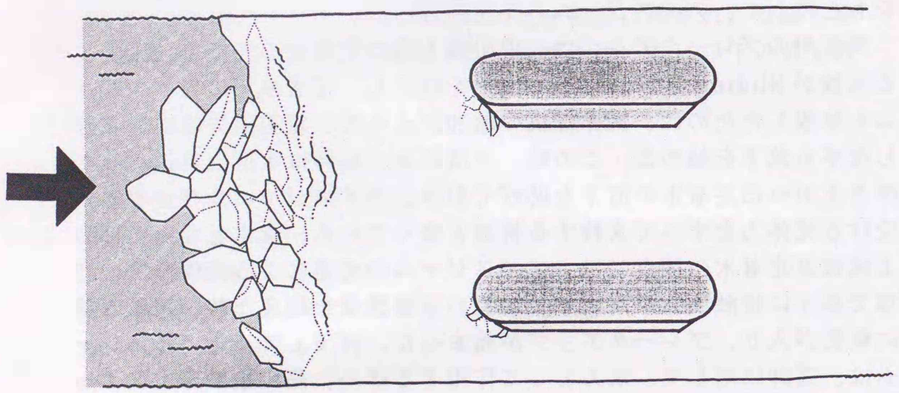


図 3.12　定着氷を橋脚が支持した状態でのアイスジャムの発生

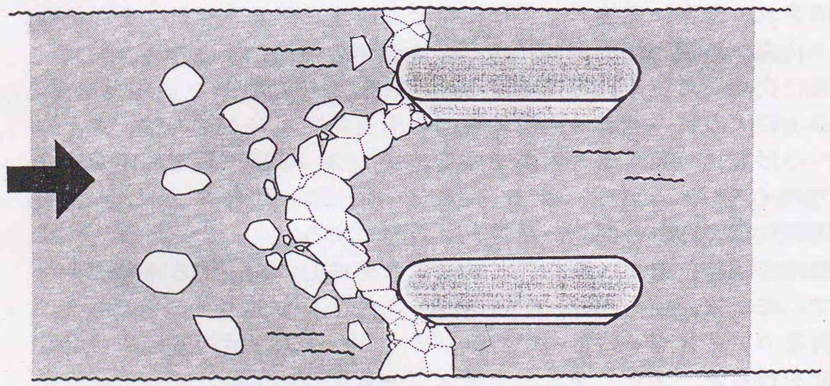


図 3.13　氷盤による橋脚位置でのアーチ形成が起因となるアイスジャムの発生

3．3　定着氷先端部でのアイスジャム発生に関する基礎実験

3．3．1　定着氷先端部での氷盤の運動

アイスジャムの発生は、主に橋脚位置における氷盤のアーチ形成、及び河川下流部定着氷における流下氷盤の潜り込みや乗り上げが原因と考えられる。前者については、橋脚位置におけるアーチ形成条件に関する実験的研究がいくつか行われており、おおよそ把握されているが、後者については未だその発生過程は不明な部分が多い。

ここでは、後者の発生形態について、定着氷先端部における氷盤の運動に関する模型氷盤を用いた室内実験を行い、その結果について述べる。

（1）模型実験

実験は図 3.14 に示すような水路を用いて行った。水路に図に示すような 2m×1m×0.01m の模型定着氷を設置し、その上流より模型氷を 1 枚ずつ流下させ定着氷先端部における氷盤の運動を観察した。模型定着氷及び流下させる模型氷には氷と同程度の比重を持つポリプロピレン板を使用した。ポリプロピレン板相互の動摩擦係数は氷盤相互の動摩擦係数(0.1～0.2)であることを確認している。模型氷先端部の形状には、まず融氷初期に氷盤が垂直に割れた状態を想定した矩形状、そしてそれが徐々に削られた状態を想定した半円形状、及び上向き 45° にカットした形状、また水温と外気温の相違を考慮した下向き 45° にカットした形状の 4 種類とした（図 3.15）。流下させる模型氷は、実際の流氷が現地調査により 4 角形や 5 角形のものが多いと報告されていることから今回は正方形のものを用いた。辺長 L は 10cm とし、氷厚は 1cm、2cm、3cm、4cm の 4 種類とした。流速は、ポンプの流量を調節することにより、5cm/sec～20cm/sec の範囲で変化させた。実験流速は、定着氷より上流に設置した流速計により測定し、流下氷盤 1 枚につき、その都度記録した。

定着氷先端部における、氷盤の運動形態を分類すると、図 3.16 に示す 5 形態が考えられる。A は、定着氷先端部において全く運動しない状態、B は回転しながら潜り込む Under-turning、C は回転せずに滑

り込むSliding、Dは途中まで回転しそのまま潜り込むHalf-turning、Eは定着氷に乗り上げるPile upである。

定着氷先端部における流下氷盤に働くモーメントの釣り合い式は次のようになる。

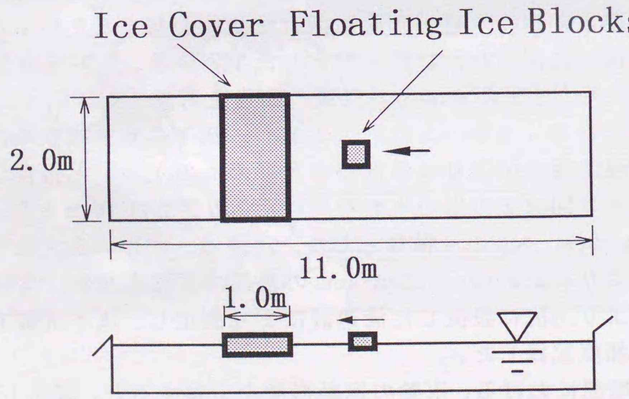
$$\frac{1}{2}C_D\rho_W V^2 hL\cdot\frac{h}{2}+\frac{1}{2}C_f\rho_W V^2L^2\cdot h-(\rho_W-\rho_i)gL^2h\cdot\frac{L}{2}=0$$

$$\therefore\ \frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_W}gh}}=\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2}C_D\left(\frac{h}{L}\right)^2+C_f\left(\frac{h}{L}\right)}}$$

$$\therefore\ F_e=\frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_W}gh}}=f\left(\frac{h}{L}\right)\qquad(3.2)$$

ここで、C_Dは水の形状抵抗係数、C_fは水の剪断係数、ρ_wは水の密度、ρ_iは氷の密度、$\Delta\rho=\rho_w-\rho_i$、Lは模型氷盤の辺長、hは氷厚、Vは流速である。

以上に示す通り、比重を考慮したフルード数Feが氷厚と辺長の比h/Lの関数として表すことができるため、実験結果はFeとh/Lの関係で整理する。



3.14　実験水路

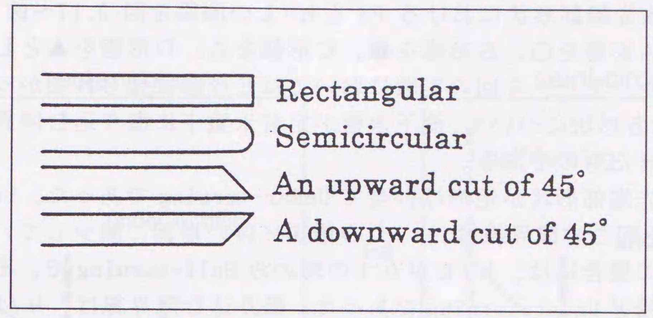


図 3.15　定着氷先端部形状

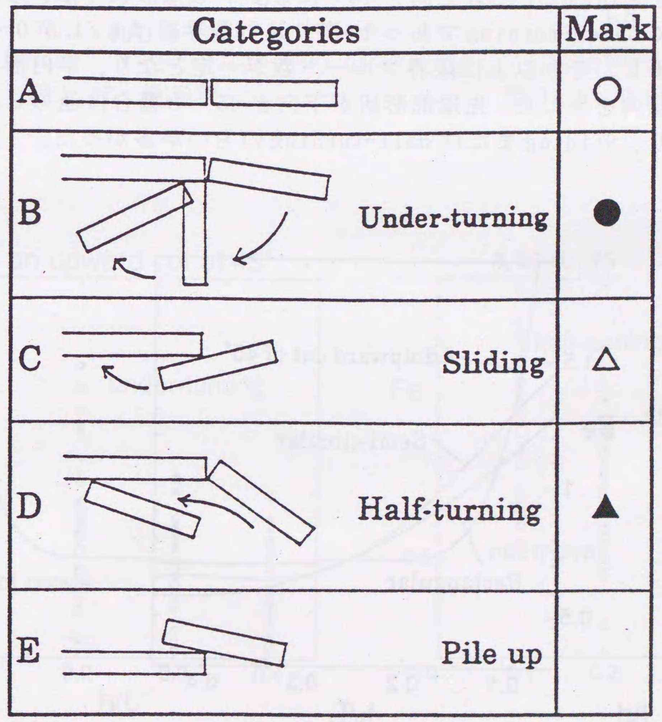


図 3.16　氷盤の運動形態

（３）実験結果

各定着氷先端部形状における Fe と h/L の関係を図 3.17～図 3.20 に示す。A形態を○、B形態を●、C形態を△、D形態を▲としてプロットした。また、今回の実験においてはE形態は見られなかった。図 3.21 は各形状について、流下氷盤が定着氷盤下に潜り込む限界線を重ね合わせたものである。

定着氷先端部形状が矩形は、全て Under-turning であった。Under-turning を起こす限界線は、h/L の増加に伴い単調に減少している。半円形状の場合には、h/L が 0.1 の時のみ Half-turning で、その他の場合は殆ど Under-turning であった。潜り込む限界線は、h/L が 0～0.3 までは矩形状と同様単調に減少しているが、h/L がそれ以上になると殆ど変化しなくなる。フルード数 Fe の分母に氷厚 h が含まれていることから h/L が増加しても限界フルード数に変化が見られないということは、氷厚が厚くなるほど氷盤は定着氷盤下に潜り込みずらくなることを示している。上向き 45° にカットした形状では、矩形状と同様全て Under-turning であった。潜り込む限界線は h/L が 0～0.2 までは減少し、それ以上は限界フルード数が一定となり、半円形の時と同様の傾向を示した。先端部形状が下向き 45° の場合は他の３種類とは異なり、Sliding または Half-turning のものが多かった。

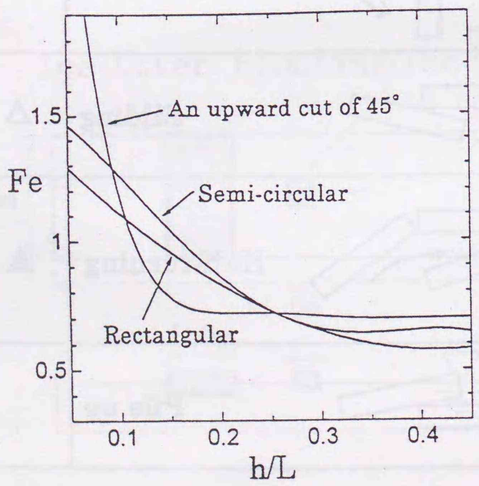


図 3.21　各形状の限界線の比較

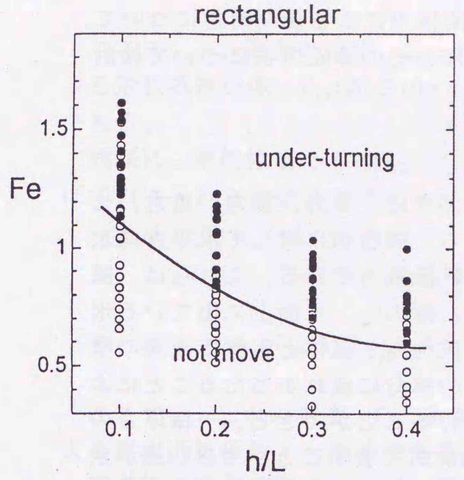


図 3.17　矩形状

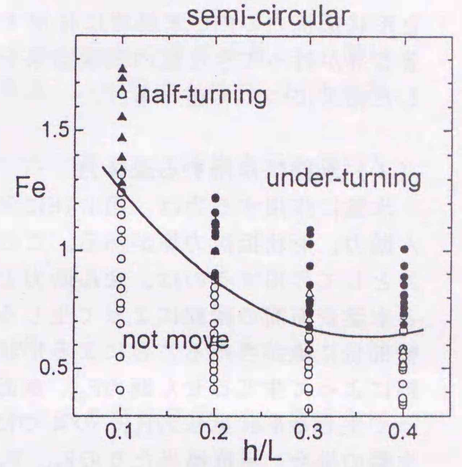


図 3.18　半円形状

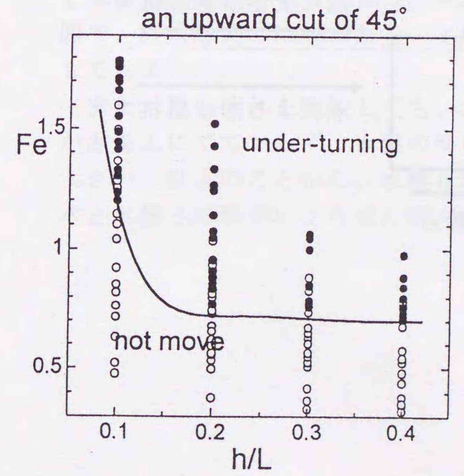


図 3.19　上向き 45° 形状

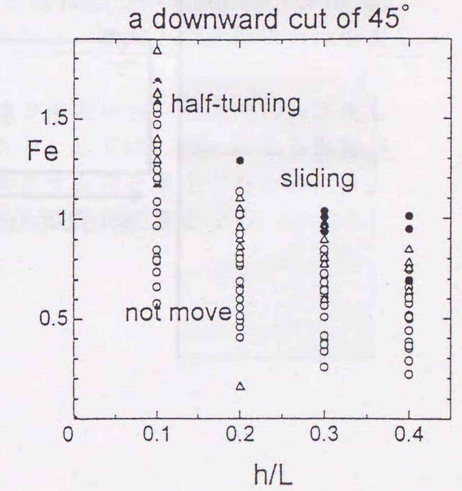


図 3.20　下向き 45° 形状

３．２．２　浮氷盤の流体抵抗

ここでは、このように環境力としての風や水の流れによるせん断力と形状抵抗力の内、氷盤群に作用する流体力によるせん断力について、著者等が行ってきた室内実験結果を基に、その算定方法について検討した結果について述べる。

（１）氷盤に作用する流体力

氷盤に作用する力は、図3.16に示すように、浮力、揚力、重力、せん断力、形状抵抗力等がある。このうち、構造物に対して水平方向氷力として作用するのは、せん断力と形状抵抗力である。これらは、風と氷盤表面間の摩擦によって生じるせん断力F_{SA}、水面上に出ている氷盤部分に風が当たることによる形状抵抗力F_{DA}、流体と氷盤下面間の摩擦によって生じるせん断力F_{SW}、水面下の部分に流れが当たることによって生じる形状抵抗力F_{DW}、の４つに分けることができる。一様厚さの氷盤の場合、単位幅当たりのF_{SA}、F_{DA}は次式で表すことができ、風が氷盤に及ぼす力F_Aはそれらの合力と考えることができる。

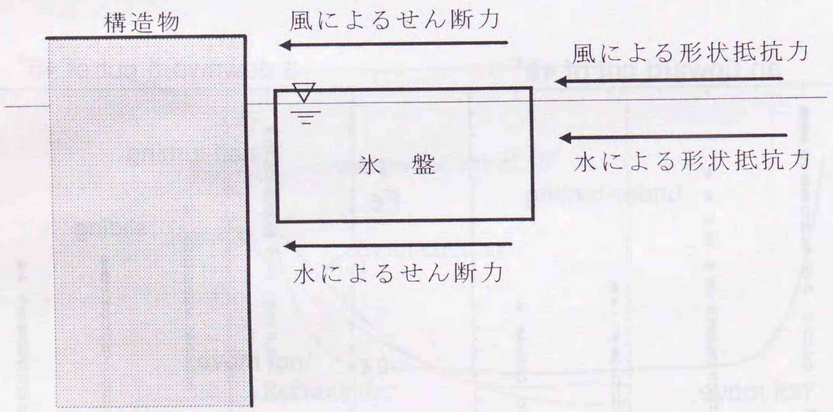


図3.22　氷盤に作用する流体力

$$F_{SA}=1/2\,\rho_A C_{SA} U10^2 L \qquad (3.3)$$

$$F_{DA}=1/2\,\rho_A C_{DA} U10^2 (0.1H) \qquad (3.4)$$

ここで、ρ_A:空気の密度、C_{SA}:氷盤表面と空気の摩擦係数、C_{DA}:風による形状抵抗係数、U_{10}:高さ10mでの風速、L:氷盤の有効長、H:氷盤厚、である。

同様に、単位幅当たりのF_{SW}、F_{DW}は次式で表され、流体力が氷盤に及ぼす力はそれらの合力と考えられる。

$$F_{SW}=1/2\,\rho_W C_{SW} V^2 L \qquad (3.5)$$

$$F_{DW}=1/2\,\rho_W C_{DW} V^2 (0.9H) \qquad (3.6)$$

ここで、ρ_W:水の密度、C_{SW}:氷盤下面と水の摩擦係数、C_{DW}:流体力による形状抵抗係数、V:流速である。

著者等の模型実験によれば、風による氷盤の形状抵抗係数は、摩擦係数の約1000倍、水の場合は約100倍となっている。しかし、一般的には、氷厚に比べて氷盤の表面積が非常に大きくなっていることから、氷盤にかかる力としては摩擦によるせん断力が卓越する。そのため、氷盤の表面積をA_S、風や流れが抗力として作用する氷盤の投影面積をAとすると、風については$(A/A_S)>10^5$、流れについては$(A/A_S)>10^4$範囲で、形状抵抗力はせん断力の１％となり、事実上形状抵抗力は無視してもよい。

また、風と流れを比較しても、氷盤の比重から、全体の10％程度しか水面上にでておらず、氷盤の受ける力としては、流れによる影響が大きい。以上のことから、氷盤を移動させる力を算定するためには、水と氷盤との摩擦によるせん断力が最も重要な要素となる。

（２）平坦な氷盤が流れから受けるせん断力

著者等は水面上の模型氷盤を一定速度で引き、そのときに生じる抵抗力を測定した。長さ24m、幅80cmの水路上に取り付けられたレール上を、モーターを取り付け自走できるようにした台車を一定速度で移動させ、これに取り付けたパラフィン盤を強制的に動かし、そのときの水の抵抗をひずみゲージ式荷重計で測定した。測定の結果、浮体の受ける力は浮体の速度の二乗にほぼ比例した。単位幅当たりの浮体の受ける力F_Wを浮体の速度の二乗で除した値F_W/V^2を求め、浮体の速度方向の長さLとの関係を示したのが図3.23である。これによると、F_W/V^2はLに対しほぼ直線的に増加している。図3.23において、最小二乗法により回帰直線を求め、直線の傾きからC_{SW}を算出すると、

C_{SW}=0.0075(H=2cm), 0.0070(H=4cm)

となり、ほぼ一致した。

また、個々のデータに対しC_{SW}を求め、浮体の速度ごとに整理したのが図3.24である。Mcpheeは、夏期北極海の氷の運動を観察し、氷盤と水の流れとの相対密度、10m上空の風速C_{10}値から、力の釣り合いにより、水の流れによる流体力を計算し、τ_W=0.011と計算され、本実験の結果よりやや大きくなることになるが、氷厚の面的測定は行われていないため、平坦氷かどうか明確ではない。

また、図3.23中における▲は、氷製の氷盤を用いて実験を行ったものである。実験中の氷厚はおおむね4cmであった。
実験結果は、パラフィン盤における厚さ4cmのものとほぼ一致しており、パラフィン盤を用いた模型実験の妥当性が実証された。

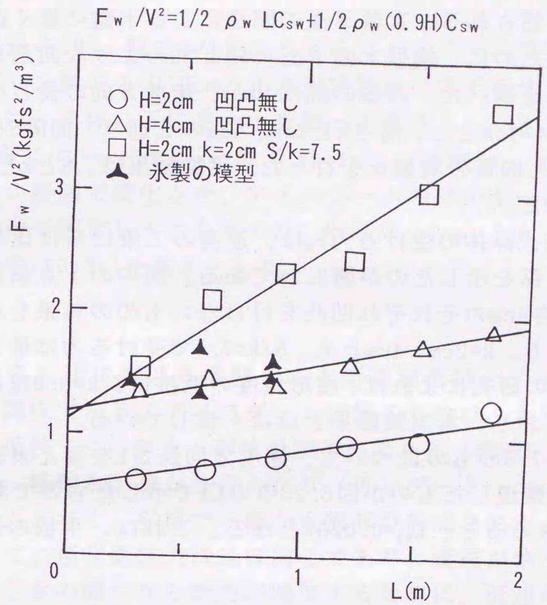


図3.23 F_W/V^2とLとの関係

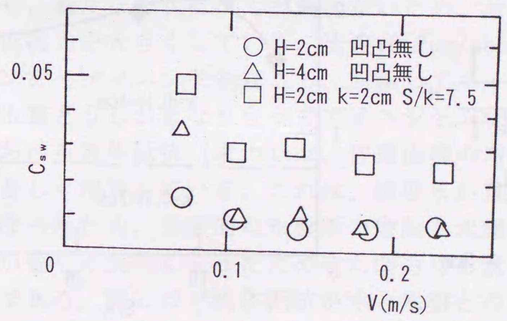


図3.24 各速度におけるC_{SW}の値

（３）凹凸のついた氷盤が流れから受けるせん断力

氷盤に働く流体力を考える時、通常氷盤は平板と仮定される場合が多いが、実際の氷盤には凹凸があり、平板の場合より大きな流体力を受けることが予想される。氷盤下面の凹凸による氷盤に働く流体力への影響を調べるために、模型氷盤下面に図3.25のような凹凸を付け、これによる効果を調べた。浮体の幅は40cm、速度方向の長さは60cmとした。凸部は幅t=4cmとし、高さkを2cm、4cmの２通り、間隔Sを４通りに変え、（２）と同様の実験をを行った。実験結果は、SとkとのS/kによって整理した。

（２）と同様、浮体の受ける力F_wは、速度の二乗にほぼ比例した。F_w/V^2とS/kの関係を示したのが図3.26である。図中の１点鎖線は厚さ2cm、破線は厚さ4cmのそれぞれ凹凸を付けないものの結果を示したものである。図より、k=2cm、4cmとも、S/k=7.5で受ける力は最大となっている。足立等の研究によれば、桟形粗度の抵抗はS/k=8.0程度で最大値をとるとしており、本実験結果とほぼ一致している。

さらに、S/k=7.5のものについて、速度方向長さLを変え実験を行い、（２）と同様に整理したものが図3.23中の□で示したものである。３．と同様にC_{sw}を求めると、C_{sw}=0.0257となる。これは、平板の約３倍の値となった。

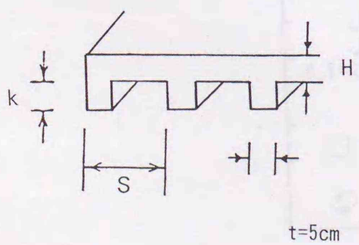


図3.25　氷盤の凹凸形状

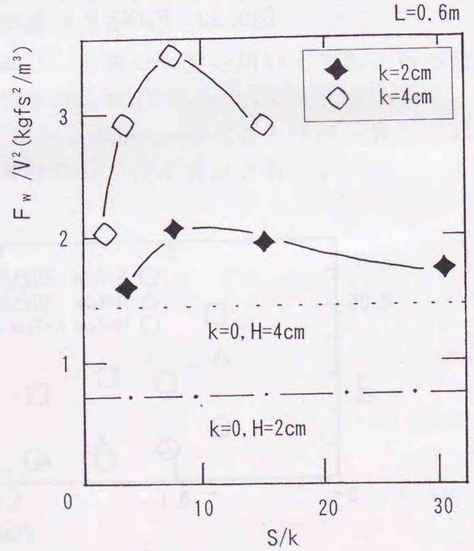


図3.26　F_w/V^2とS/kの関係

（４）氷盤群が流れから受けるせん断力

アイスブームに関する模型実験より、アイスブームに作用する氷盤群の氷力と被覆面積からせん断力及びせん断係数を求めた。

1)実験方法

実験は、長さ20m、幅２mの平面水路にアイスブーム模型を設置し、ポリプロピレン製の１辺10cmの正方形模型氷を流下させて行った。アイスブームは、浮体の下にネットを張った構造とし、氷力を測定するために両端にロードセルを取り付けた。実験は、流速を9.5～22.8cm/secの範囲で変化させ、アイスブームのワイヤーにかかる張力を左右に分けて測定し氷力を求めた。氷厚は、1cm、2cm、4cmの３種類とし、混合率は5:3:1を基本とした。

2)実験結果

図3.27は各流速における模型氷の水面被覆面積とアイスブームに働く氷力の関係である。アイスブームに働く氷力は、氷盤が受ける水による流体抵抗（せん断力＋形状抵抗力）である。流速9.5～13.6cm/sの範囲では、模型氷が重なり合ったり、アンダーターニングを起こすことはほとんどなく、平坦で一様な氷盤群が形成された。

したがって、形状抵抗力はほぼ同じであり、流速が増加するにしたがって氷盤と水の間のせん断力が増加するために、流速が速いほど流体抵抗は大きくなっている。次に、流速が14.2～16.2cm/secの範囲では、流下させた模型氷が少ない段階で氷盤が重なり合う状況が見られ、アンダーターニングを起こしてネットに垂直に張り付く氷盤も若干見られた。そのため、被覆面積が10000cm^{2}までの流体抵抗の増加は著しく、形状抵抗力が流速9.5～13.6cm/secの範囲に比べて大きいものと考えられる。しかし、被覆面積が10000cm^{2}以上では、重なり合うこともほとんどなく、新たな形状抵抗力が働かないため、せん断力だけが増加し、流体抵抗力を大きくしている。流速18.7cm/secでは、多数の模型氷盤がアンダーターニングを起こし、回転してネットに垂直に張り付いたり、氷盤どうしが重なり合ってアイスジャム状になった。

この流速における流体抵抗（氷力）は、被覆面積の増加が若干でも、流体抵抗は著しく増加している。これは、模型氷が重なり合ってアイスジャムとなったため、実質的な氷盤厚の増加と氷盤下面の凹凸がひどく、粗度が著しく大きくなったためせん断力や形状抵抗力が大きくなったためである。図3.27で流体抵抗が水と氷盤との間のせん断力の増加に依存していると考えられる部分から各流速(10～17cm/sec)にお

けるせん断力を求め、流速とせん断力の関係を示したのが図3.28である。この図からせん断力は、おおむね流速の２乗に比例していると見ることができる。

次に、各流速におけるせん断係数（C_{SW}）を計算し、流速の関係で整理すると図3.29のようになる。流速が17cm/sec以下では、流速への顕著な依存は見られず、C_{SW}はおよそ2.1×10^{-2}なった。しかし、流速が18.7cm/secで、模型氷がアイスジャム状態の時には、C_{SW}=0.1～0.2となり、大きな違いが見られた。したがって、氷盤による流体抵抗は、氷盤下面と水の間の摩擦によるせん断力に依存し、せん断係数は氷盤下面の粗度によって大きく影響される。

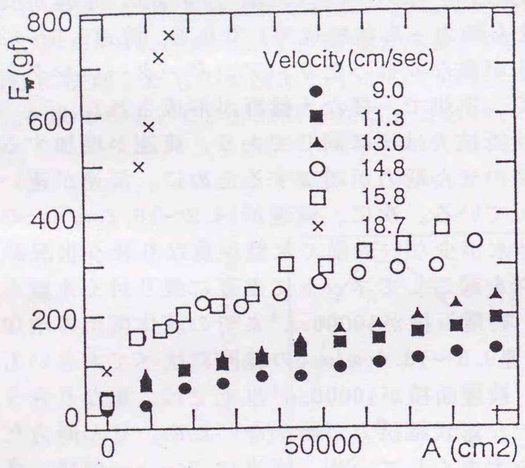


図3.27　模型氷の被覆面積とアイスブームに働く氷力の関係

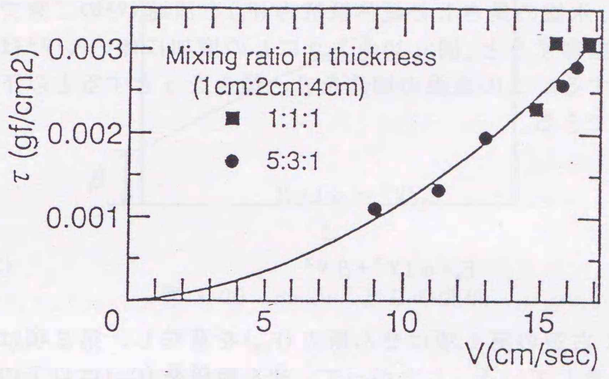


図3.28　流速と剪断力の関係

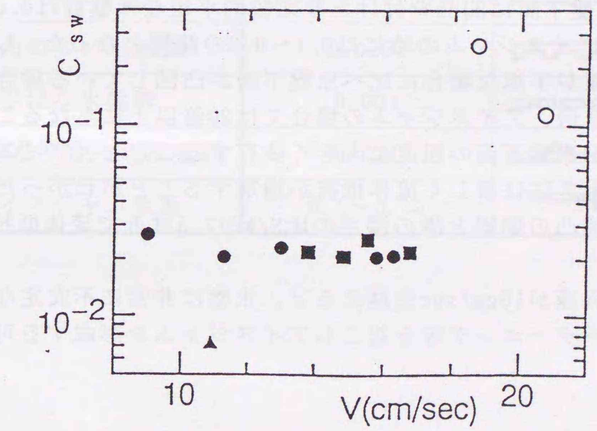


図3.29　各流速における剪断係数

以上のことから、氷盤に働く流体抵抗力(F_W)は、氷盤下面と水の摩擦によるせん断力(F_{SW})と水面下の氷盤が受ける形状抵抗力(F_{DW})の合力として以下の式で表すことができる。

$$F_W=F_{SW}+F_{DW} \qquad (3.7)$$

実験結果を、氷盤の長さＬと流体抵抗力(F_W)を流速(V)の二乗で除した値の関係で整理すると、図3.30のようにＬの増加に伴いF_W/V^2はほぼ直線的に増加する。この直線の切片をβ、傾きをαとすると以下の式で表すことができる。

$$F_W/V^2 = \alpha L+\beta$$

$$F_W=\alpha LV^2+\beta V^2 \qquad (3.8)$$

(3.8)において右辺の第１項はせん断力(F_{SW})を意味し、第２項は形状抵抗力(F_{DW})を表している。したがって、せん断係数(C_{SW})は以下の値となる。

$$C_{SW}=2\alpha/\rho_W=2w\alpha/g \qquad (3.9)$$

氷盤の条件が異なる模型実験結果を基に(3.9)式によりせん断係数C_{SW}を求め表3.2に整理した。なめらかな氷盤の場合のせん断係数は0.007程度、氷盤下面に凹凸を付けたり比較的平坦な氷盤群は0.020～0.025の範囲、アイスジャムの時には0.1～0.3の範囲となった。したがって、氷盤下面が平坦な場合に比べ氷盤下面が凸凹している場合のせん断係数は約３倍、アイスジャムの場合では20倍以上にもなることから、流体抵抗が氷盤下面の粗度に大きく依存することと、アイスジャムが発生したときには著しく流体抵抗が増加することがわかった。

氷盤下面の凹凸の間隔と溝の深さの比S/kが7.5付近で流体抵抗力F_Wは最大となる。

また、実験流速が15cm/secを越えると、氷盤は非常に不安定な状態となりアンダーターニング等を起こしアイスジャムを形成する可能性が高い。

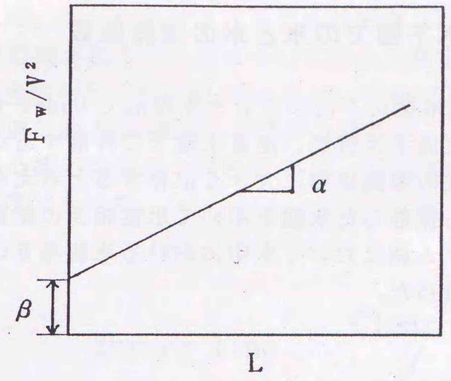


図 3.30　Fw/Ｖ²とＬの関係

表 3.2　諸条件における剪断係数

氷盤の状態	C_{SW}	氷　象
平坦な氷盤	0.0070～0.0075	
凹凸のついた氷盤	0.0257	
平坦な氷盤群	0.021	
やや重なり合った氷盤群	0.021	
アイスジャム状態	0.1～0.30	

３．３．３　定着氷下面での氷と氷の摩擦係数

結氷河川において融氷期に下流の定着氷先端部で Under-turning 等を起こして潜り込んだ流下氷盤が、定着氷盤下で停滞するかどうかということは、氷盤相互の摩擦係数に大きく依存すると考えられる。そこで、実際の河川から採取した氷盤を用いて氷盤相互の摩擦係数に関する室内実験、及びダム湖において水中における氷盤相互の摩擦係数に関する現地実験を行った。

（１）室内実験

1)採取した河川氷の性状

実験に使用する氷盤は、北海道北部を流れる天塩川の下流部付近で採取した。採取位置を図 3.31 に示す。採取場所は天塩川下流にある手塩大橋の上流約 1 kmの地点で、採取時には河川全幅にわたって結氷していた。試料とした氷盤は、河川のほぼ中央から採取した。氷盤は流れ方向に約 1m、流れと直角方向に約 30cm で採取し、氷厚は約 23cm であった。氷盤の上層約 10cm は雪氷、下層約 13cm は柱状氷密度はそれぞれ 0.67g/cm^3、0.88g/cm^3 であった。

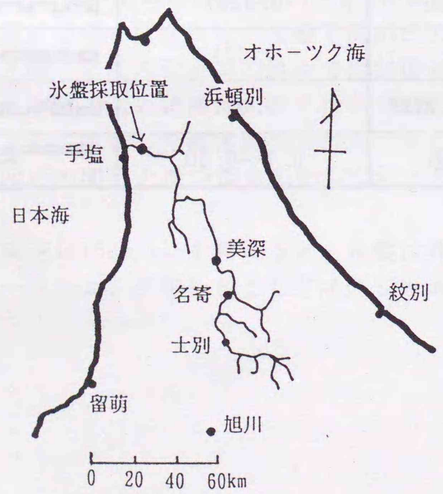


図 3.31　氷盤採取位置

氷盤下面には、小さなアイスリップルが形成されていた。そのアイスリップルが形成されている面について凹凸を測定した。測定は流れ方向に、摩擦実験を行う範囲約 50cm について行った。測定個所は、中央線とその両側に約 10cm 離れた位置の３測線とした。採取した河川氷盤の形状と凹凸測定結果の一例を図 3.32、図 3.33 に示す。最大の凹凸は約 1cm 程度であった。

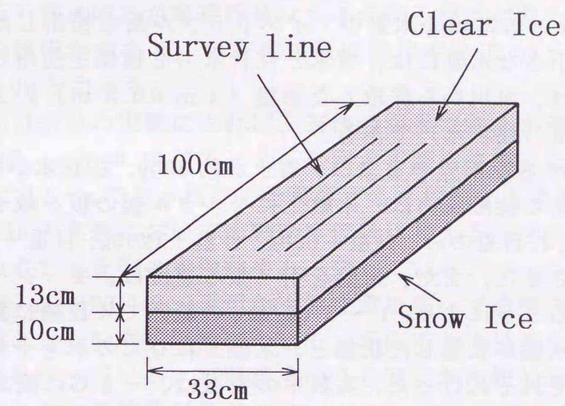


図 3.32　採取した河川氷の形状

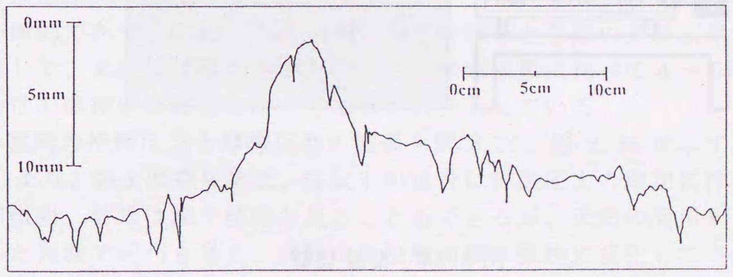


図 3.33　氷盤の凹凸測定結果

2)実験方法

摩擦に関する実験は、図3.34のような装置を用いて行った。採取した1.0m×0.3m×0.23mの氷盤上で0.15m×0.15m×0.05mの小さな氷盤を引っ張り、その時の剪断力（摩擦力）をロードセルによって測定した。実験装置には、モーターが回転することによって一定速度で水平に動く台座が取り付けられている。台座には2 kgfまで測定可能なロードセルがボルトにより固定されており、氷盤に針金を巻き付け、直径2mm、長さ1mの木製の棒によりロードセルと接続した。

実験には、１ｍ×0.3 ｍの氷盤のアイスリップル面を使用した。その上を引っ張る小さな氷盤には、雪氷と柱状氷の２種類を使用した。この小さな氷盤は、河川から採取した氷盤（１ｍ×0.3 ｍ）の上層氷（雪氷）と下層氷（柱状氷）である。

0.15×0.15の小さな氷盤の重量は、雪氷が約800g、柱状氷が約1kgであった。氷盤間の接触圧力は、氷盤上にモルタル製の板を載せることにより、それぞれ自重のみ、自重＋600g、自重＋1200g、自重＋1800gの４段階に変化させた。また、氷盤を引っ張る速度は、モーターの回転数を変化させることにより、１～５ cm/secの範囲で４段階に変化させた。実験は、氷盤が乾燥した状態と、氷盤上に０℃の水を十分にまいた湿潤状態でそれぞれ行った。実験中の室温は、－１℃に設定した。

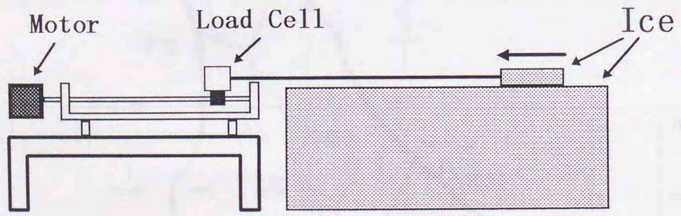


図 3.34　実験装置

3)実験結果及び考察

①氷盤接触部が乾燥状態の場合の摩擦係数

摩擦係数と速度の関係を図3.35、図3.36に示す。静止摩擦係数μ_sは、移動速度が速くなるにつれて減少する傾向が見られる。速度が2 cm/sec以下においては、μ_sはおよそ0.08～0.18の範囲であり、4 cm/sec以上においては、およそ0.05～0.12の範囲にあった。柱状氷と雪氷の違いによる静止摩擦係数への影響は殆ど見られない。

動摩擦係数μ_kは、速度に関係なく、ほぼ一定の値となった。全体として若干雪氷の方が摩擦係数は大きくなる傾向は見られるものの、その違いは僅かである。動摩擦係数は柱状氷で0.02～0.08、雪氷で0.04～0.09となった。

Ryvlin(1973)の実験によれば、天然の海氷で表面が滑らかな場合はμ_s=0.15、μ_d=0.11であった。今回の実験で使用した河川氷盤の凹凸が最大で１ cmであったことを考慮すると類似した結果といえる。また、Ryvlinの実験においても動摩擦係数に与える速度の影響は殆どなく、その点でも今回の実験結果と一致している。

Gino et.al (1991)は、平坦な氷盤や雪を使って速度の速い場合の氷と氷、雪と氷の動摩擦係数について、垂直抗力や温度を変化させて詳細な実験を行っている。実験結果のうち速度が比較的遅い範囲においては、雪と氷の動摩擦係数が0.03～0.04、氷と氷で0.01～0.02となっており、今回の実験結果の動摩擦係数の比較的小さい方の値に近い。今回の実験では、天然の河川氷を使用したことから、凹凸も多く一定ではない。そのため、ロードセルには単なる摩擦力のみならず、ブルドージングフォースも作用し、また、計測値も動摩擦部分のピーク値を取って平均していることから、摩擦係数も若干高めにでているものと思われる。自然河川の定着氷下面に潜り込んだ氷盤に作用する力としては摩擦力のみならず、ブルドージングフォース等が作用することが一般的であり、Gino et.al (1991)の実験結果と今回の実験結果から類推して、実際には摩擦力のみの場合の摩擦係数に比べて４～５倍のみかけの摩擦係数になる場合もあることを示している。

氷盤間の接触圧力と摩擦係数の関係を図3.37、図3.38に示す。図3.37より、静止摩擦係数は、柱状氷の場合に接触圧力の増加に伴って増加傾向、雪氷は減少傾向と見ることもできるが、天然の河川氷を使用した実験で凹凸も多く、実験中に接触面積が微妙に変化していることを考慮すれば、ほぼ一定と見る方が妥当と考えられる。また、動摩擦係数は接触圧力に関わらず、ほぼ一定であった。

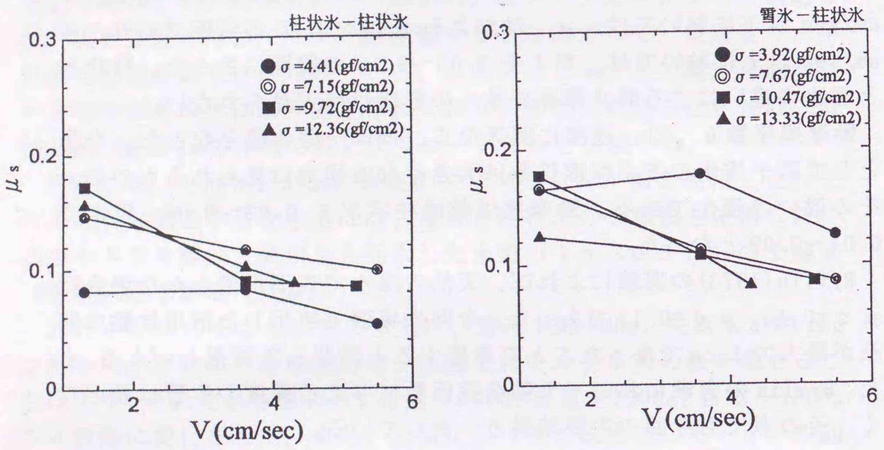


図 3.35　氷盤接触部乾燥状態における静止摩擦係数と速度の関係

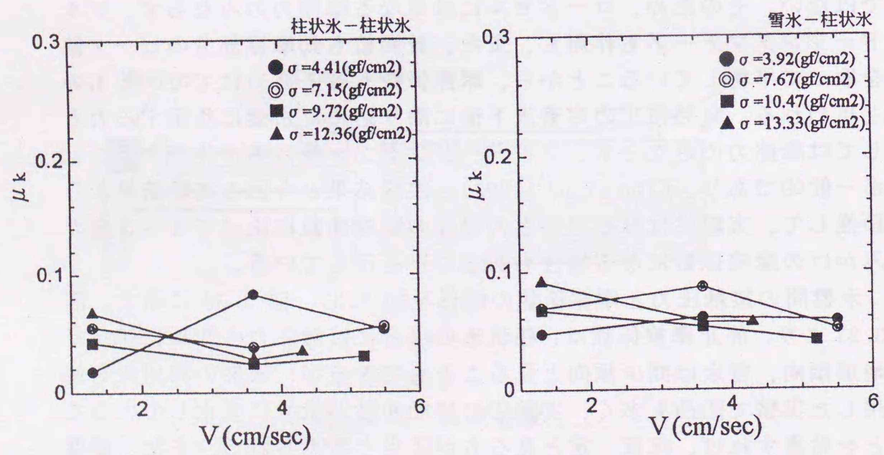


図 3.36　氷盤接触部乾燥状態における動摩擦係数と速度の関係

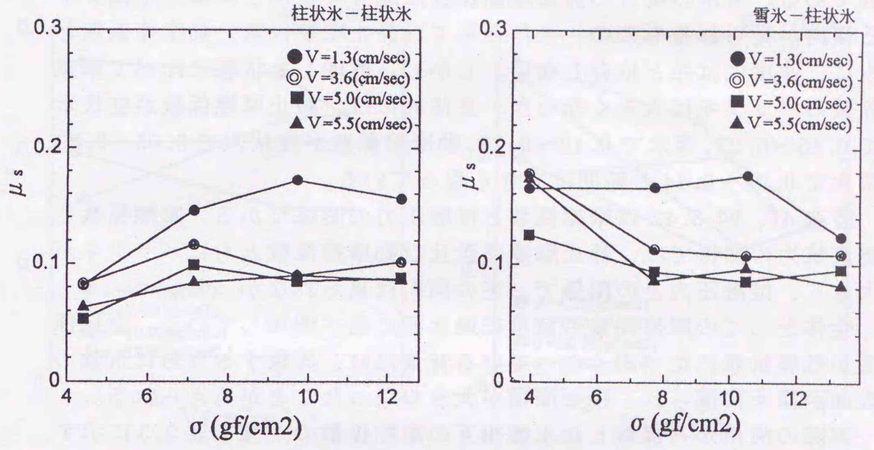


図 3.37　氷盤接触部乾燥状態の静止摩擦係数と接触圧力の関係

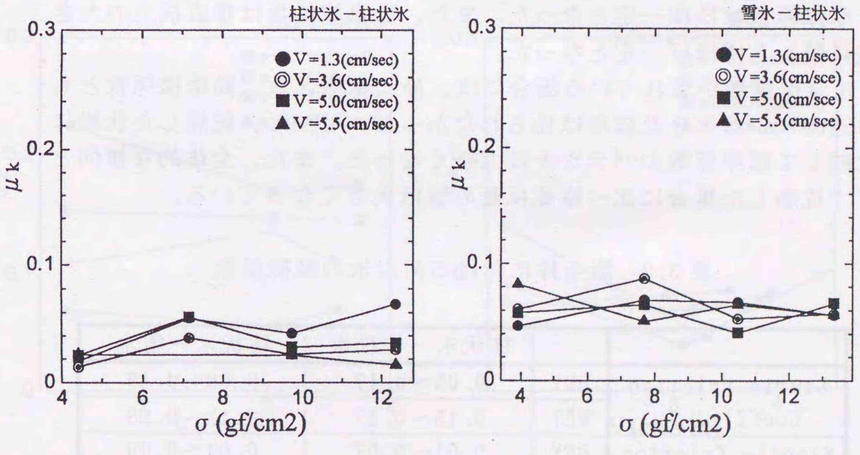


図 3.38　氷盤接触部乾燥状態における動摩擦係数と接触圧力の関係

②氷盤接触部が湿潤状態の場合の摩擦係数

氷盤上に０℃の水を充分にまいた状態で同様の実験を行った。図3.39、図3.40はそれぞれ、静止摩擦係数、及び動摩擦係数と速度の関係である。雪氷の場合の静止摩擦係数は速度の増加と共にやや減少する傾向が見られるものの、全体としては静止摩擦係数、動摩擦係数ともに、速度には殆ど依存しない。しかし、乾燥した状態に比べて摩擦係数のバラツキは大きくなった。具体的には、静止摩擦係数が柱状氷で0.15～0.27、雪氷で0.12～0.28、動摩擦係数が柱状氷で0.05～0.23、雪氷で0.04～0.14と範囲は大きくなっている。

図3.41、図3.42は摩擦係数と接触圧力の関係である。摩擦係数と垂直抗力の関係では、静止摩擦係数及び動摩擦係数ともにバラツキが大きく、接触圧力との関係で一定の傾向は見られなかった。

全体としての摩擦係数の値は乾燥状態に比べ増加している。摩擦係数が乾燥状態に比べ高くなっている背景には、実験するうちに氷盤の表面が徐々に削られ、接触面積が大きくなったことが考えられる。

実際の河川から採取した氷盤相互の摩擦係数の一覧を表3.3に示す。氷盤接触部が乾燥した状態での静止摩擦係数μ_sは、速度が速くなるとやや減少する傾向が見られたが、柱状氷と雪氷の違いによる摩擦係数への影響は殆ど見られなかった。動摩擦係数μ_kは、速度に関係なくほぼ一定の値となった。また、定着氷下面と潜り込んだ氷盤の摩擦係数は、摩擦力だけの摩擦係数に比べて４～５倍の見かけの摩擦係数になることがあると推測される。垂直抗力との関係では、以上では静止摩擦係数はほぼ一定となった。また、動摩擦係数は垂直抗力の大きさに関わらずほぼ一定となった。

氷盤接触部が濡れている場合には、静止摩擦係数、動摩擦係数ともの速度による大きな依存は見られなかった。しかし、乾燥した状態に比較して摩擦係数のバラツキは大きくなった。また、全体的な傾向として乾燥した場合に比べ摩擦係数の値は大きくなっている。

表3.3　諸条件における河川氷の摩擦係数

		柱状氷－柱状氷	柱状氷－雪氷
Static friction Coefficient	DRY	0.05～0.17	0.08～0.18
	WET	0.15～0.27	0.12～0.28
Kinetic friction Coefficient	DRY	0.01～0.07	0.04～0.09
	WET	0.05～0.23	0.04～0.14

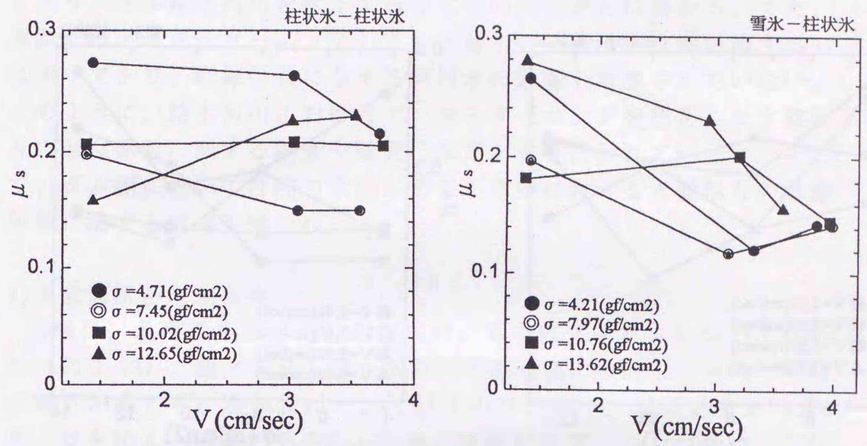


図3.39　氷盤接触部湿潤状態における静止摩擦係数と速度の関係

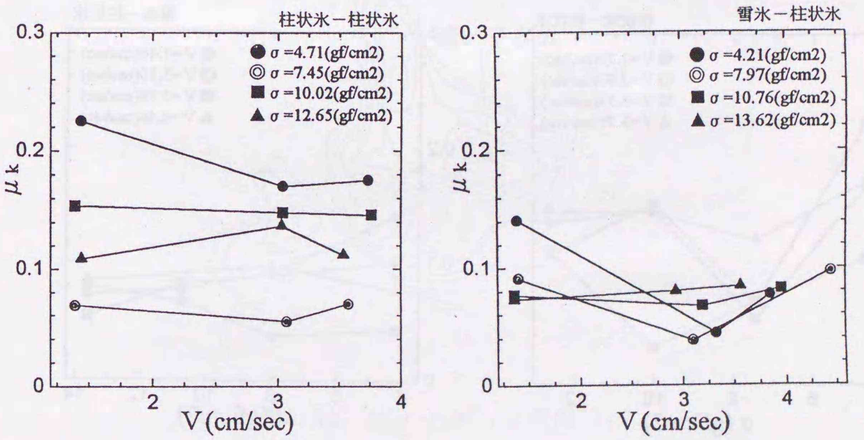


図3.40　氷盤接触部湿潤状態における動摩擦係数と速度の関係

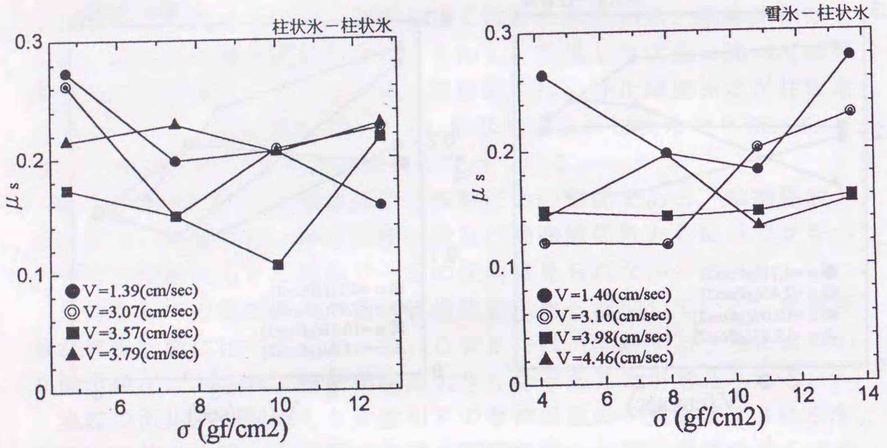


図 3.41　氷盤接触部湿潤状態の静止摩擦係数と接触圧力の関係

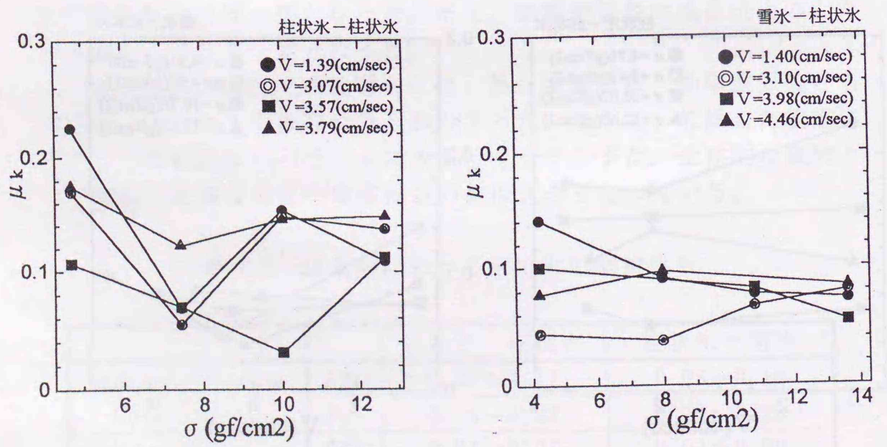


図 3.42　氷盤接触部湿潤状態における動摩擦係数と接触圧力の関係

（２）水中における摩擦係数に関する現地実験

氷盤相互の摩擦係数については、Gino et.al.(1991)、Ryvlin(1973)等の研究があるが、いずれも実験室内での小さな試料による実験結果であり、冬季結氷河川を流下する浮氷盤の大きさとは異なる。また、実際にはアンダーターニングして、定着氷盤下面に浮氷盤が接するのは水中であり、摩擦係数に与える河川水の影響も考慮されていない。このように、結氷河川におけるアンダーターニングを想定した氷盤相互の摩擦係数に関する調査や研究は未だあまり行われていない。そこで、ダム湖において自然の氷盤を使って水中における氷盤相互の摩擦係数に関する現地実験を行った。

1)実験箇所と氷象条件

実験は、北海道東部の常呂郡置戸町にある鹿ノ子ダムにおいて行った（図 3.43）。鹿ノ子ダムは、常呂川の源流部に位置し、道内でも特に寒さが厳しく、冬季には－20℃以下の日が続き、積算寒度が 1300 度・日を超える地域である。しかも、比較的降雪が少ないために例年は氷厚も 50cm 以上になるが、実験を行った 1996 年 1 月は降雪が多かったせいか、それほど氷厚は発達していなかった。

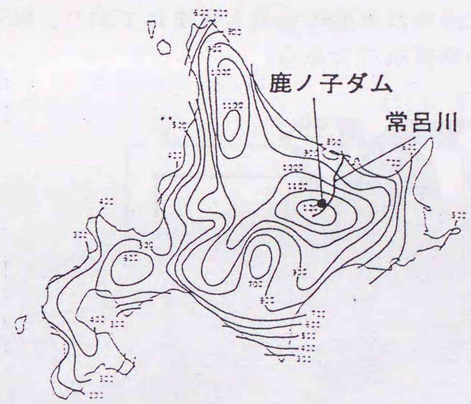


図 3.43　鹿ノ子ダム位置図

鹿ノ子ダムは、堤高 55.5m、総貯水量 39,800,000m³で、冬期間は完全に結氷する。実験は、1996 年 1 月 23、24 日に行った。

現地の氷盤は、写真 3.6 のように 2 層氷であり、その上に積雪が 6 cm 載った状態であった。氷盤の下層は湖水が冷やされて凍った柱状氷であり、その氷厚は約 13cm。上層は積雪が凍結した雪氷（ゆきごおり）であり、その氷厚は約 20cm であった。

2)実験方法及び実験条件

実験は図 3.40 のような装置を用いて行った。湖面の氷盤をチェーンソーで切断し、５ｍ程度離れた位置に 2 カ所の開口部をつくり、一方の開口部から、氷盤を定着氷盤の下に押し込み、もう一方の開口部側から手動式ウィンチで引っ張り、その時の力をロードセルによって測定した。

定着氷盤下面を動く氷盤には、ベルトを巻き付けワイヤーでロードセル及び手動式ウィンチに接続している。ロードセルには、自重で沈下するのを防ぐために、浮体を取り付けた。浮体からのロードセル取り付け位置は、ワイヤーがほぼ直線となるように調節した。

実験結果から摩擦係数を算出する際に、氷盤相互の接触圧力が必要となることから、浮力の測定も行った。浮力の測定には、図 3.45 のような装置を用いた。先端にロードセルを取り付けたオイルジャッキで氷盤を水中に沈め、ロードセルにかかる力を測定し浮力を求めた。このようにして求めた浮力は氷盤の自重も含まれており、厳密には浮力ではなく、氷盤間の垂直抗力である。

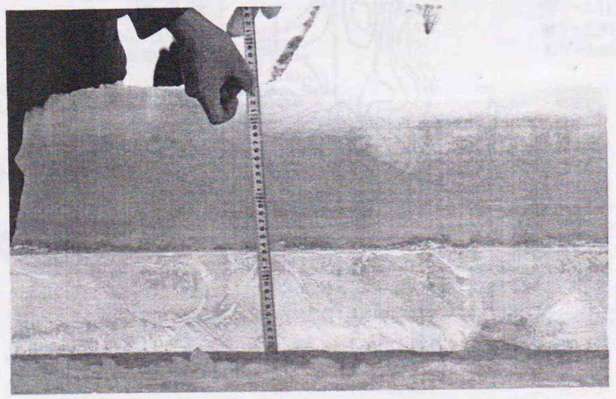


写真 3.6　採取した氷盤の断面

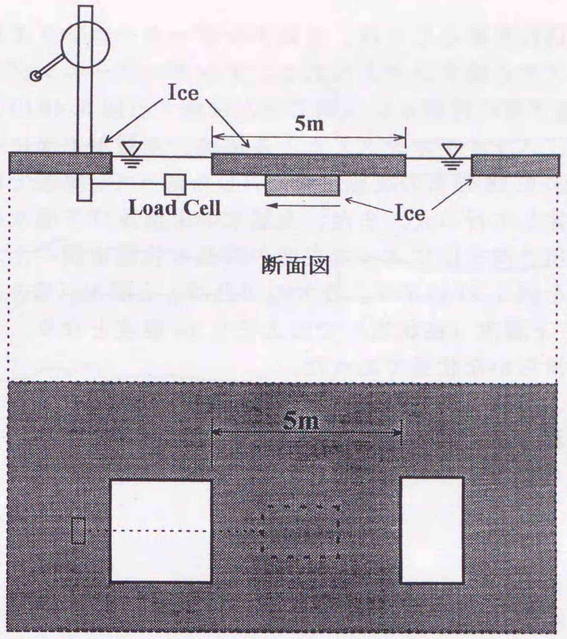


図 3.44　実験装置

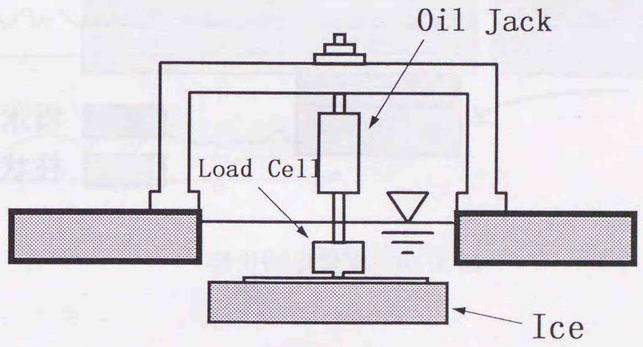


図 3.45　浮力測定概略図

氷盤が潜り込む形態としては、主にアンダーターニングする場合とスライディングする場合が考えられる。アンダーターニングするときには、定着氷盤下面の柱状氷には同じ面が接触する図3.46のAの状態となる。また、スライディングしたときには、下層氷下面に上層氷上面が接触する図3.46のBの状態となる。したがって、実験ではこの2つの状態を想定して行った。また、上層氷の上面及び下層氷の下面について、表面粗さ測定器によって表面の凹凸の状態を調べた。表面の凹凸測定結果を図3.47に示す。最大の凹凸は、上層氷（雪氷）でおよそ1 cm程度、下層氷（柱状氷）でおよそ2 mm程度となり、下層の柱状氷はかなり滑らかな状態であった。

河川氷では、流れがあるために氷盤下面にアイスリップルと呼ばれる凹凸が見られるが、ダム湖にはほとんど流れがないために、そのような凹凸は見られなかった。

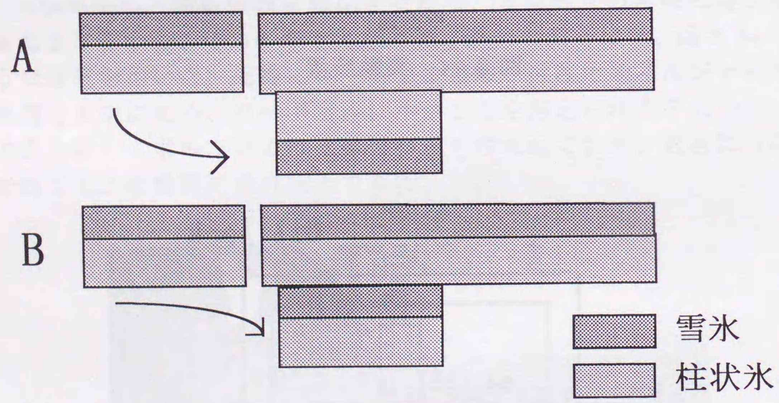
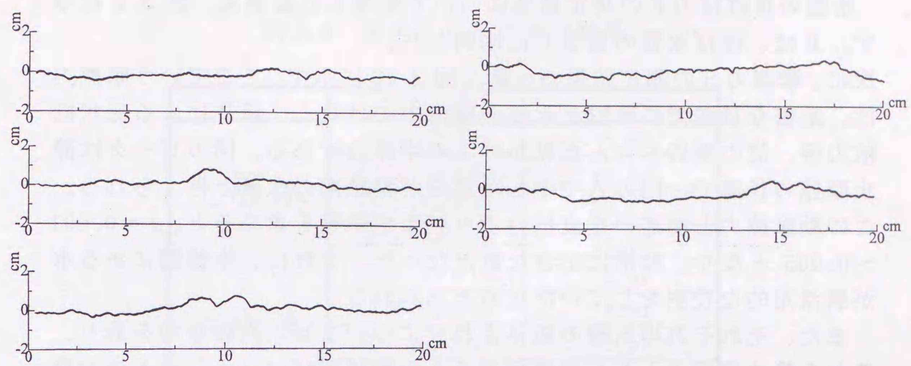
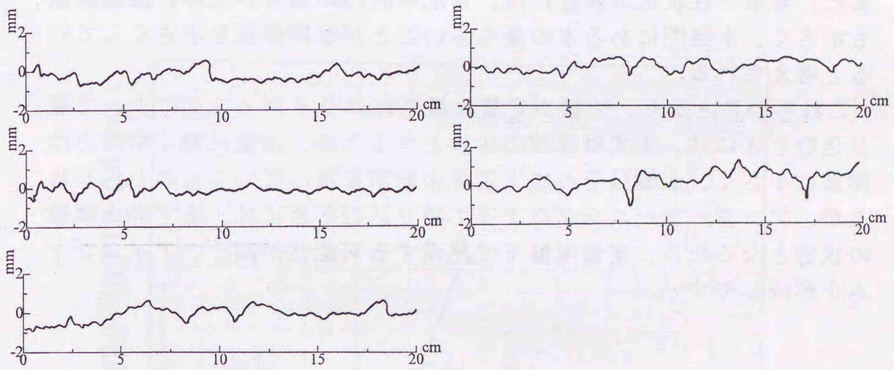


図3.46　氷盤接触状態



(a)上層氷(雪氷)



(b)下層氷(柱状氷)

図3.47　氷盤の表面凹凸測定結果

3)実験結果及び考察

氷盤の垂直抗力Ｆの測定結果について整理した結果を、表 3.4 に示す。Ｆは、ほぼ氷盤の長さＬに比例した。

次に、摩擦力Ｓの測定結果の一例を図 3.48 に示す。ここでいう摩擦力は、厳密な意味での氷盤と氷盤の摩擦力ではなく、流体による形状抵抗力等、他の要因も含んだ見かけ上の摩擦力である。図のピークは静止摩擦の状態で、図のＡで示した部分が動摩擦の状態と考えられる。この動摩擦力と前述の垂直抗力より動摩擦係数を求めると、μ＝0.001～0.005 となり、非常に小さな値となった。これは、氷盤間にある水が潤滑剤的な役割をしていたためと思われる。

また、それぞれの氷盤の組み合わせについてピークの平均を取り、それを静止摩擦力とし、垂直抗力Ｆとの関係でプロットしたものを図 3.49 に示す。柱状氷―雪氷を●、柱状氷―柱状氷を■で示した。それぞれについて、最小二乗法により回帰直線を求め、静止摩擦係数を求めると、柱状氷―雪氷でμ＝0.62、柱状氷―柱状氷でμ＝1.06 となり、動摩擦係数に比べかなり大きな値となり、表面の滑らかな柱状氷の方が、大きな値となった。これは、氷盤が柱状氷同士の場合には非常に密着した状態となったため、接触面積が大きくなったと考えられる。また、雪氷―柱状氷の場合には、雪氷の凹凸が大きいために接触面積も小さく、氷盤間にある水の量も多いことが摩擦係数を小さくしていると考えられる。

これらのことから、氷盤が定着氷盤下にスライディングによって潜り込むときには、まず動摩擦の状態となるため、氷盤に働く摩擦力は非常に小さく、氷盤はそのまま定着氷盤下を滑っていくものと思われるが、アンダーターニングによって潜り込むときには、まず静止摩擦の状態となるため、定着氷盤下で停滞する可能性が高く、アイスジャムを形成しやすい。

表 3.4　垂直抗力Ｆの測定結果

	寸法(cm)	F (kgf)
上層氷	50× 50×20	6.46
	50×100×20	12.13
	50×150×20	20.15
	50×200×20	27.35
下層氷	50× 50×13	3.42
	50×100×13	4.31
	50×150×13	6.62
	50×200×13	9.80

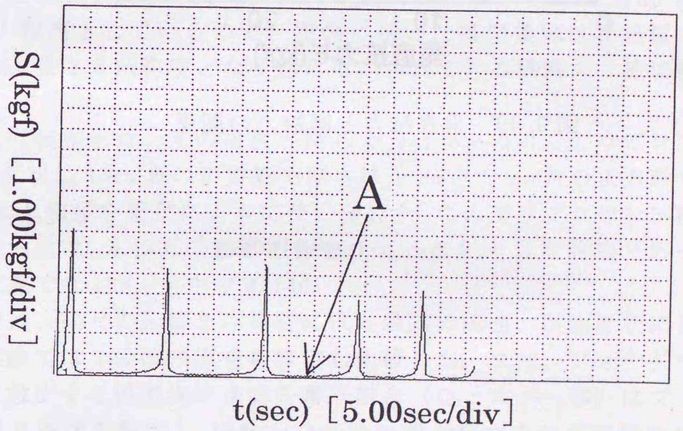


図 3.48　摩擦力Ｓの測定結果の一例

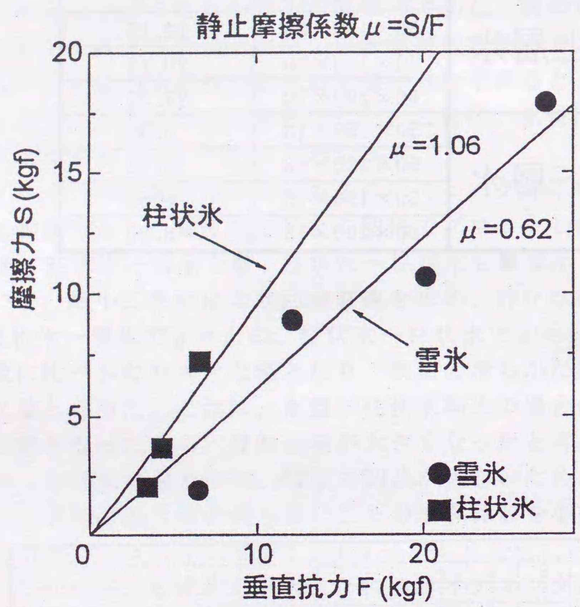


図 3.49　垂直抗力と摩擦力の関係

3．4　橋脚位置での氷盤によるアーチ形成条件に関する実験

3．4．1　実験方法

実験は図 3.50 に示すように長さ 20.0 m、深さ 0.5 m、幅 2.0 m可変勾配水路を用いた。縮尺 1/50（模型氷 10cm）の時は、2 m全幅を使い縮尺 1/150(模型氷 3 cm) の時は、水路中央に仕切板をたて、幅 60cm の水路として実験を行った。上部端より 6.3 mの水路上部にこの実験に使用した模型氷を供給するフィーダーを設置した。1,600 枚の模型氷を 0 ～30cm/sec の速度範囲で自由に送り出すことが出来るようになっている。

このフィーダーの先端より 6 m下流の位置に模型橋脚を設置した。この模型橋脚は厚さ 5 mmの鋼鉄板で幅 4 cmと 2 cm、長さ 10cm、高さ 50cmの鋼鉄の箱の上流側に直径 4 cmと 2 cm、高さ 50cmの円柱の縦割りにした形の物をモルタルで作りこれと鋼鉄箱をシリコンシーラントで接着した。これにより、模型橋脚を流体中に設置した時の橋脚の粗度や、流体から受ける抵抗がより実物の橋脚に近づかせることができた。

また、この実験においてはフルード則にしたがって縮尺 1/50 程度と 1/150 程度としているので、実験に用いた模型橋脚は実規模では幅 2.5 m、長さ 5 m程度となり通常用いられている橋脚の寸法に相当する。

使用した模型氷は、氷の密度と同じ 0.9gf/cm³ のポリプロピレンを用いた。形状は 10cm角の正方形で厚さは 1 cmと 3 cm角の正方形で厚さ 3 mmの 2 種類を縮尺によって使い分けた。このポリプロピレン板同士の摩擦係数は、氷相互の動摩擦係数 0.1 ～0.2 とほぼ同じであった。（乾燥状態で 0.188、水中で 0.146）

実験では、縮尺の影響をみる時には 4 段階の流速、断面形状による影響の実験では 2 段階の流速を設定し比較した。また、フィーダーから水路に放出する模型氷の水面を覆う割合（Q：カバー率）はフィーダーの送り速度を調整し 10%～ 100%の間で変化させて実験を行った。橋脚の心間距離（b_2）は 1/50 の縮尺の時 25, 30, 40, 50cm の 4 種類、1/ 150 の縮尺では 7.5, 10, 15, 20cm の 4 種類で行った。

実験は、表面流速を設定し、模型氷が最初に橋脚に達した時間を観

測開始とし０，30，60，120,180，240，300 の時間に、真上から写真撮影を行った。

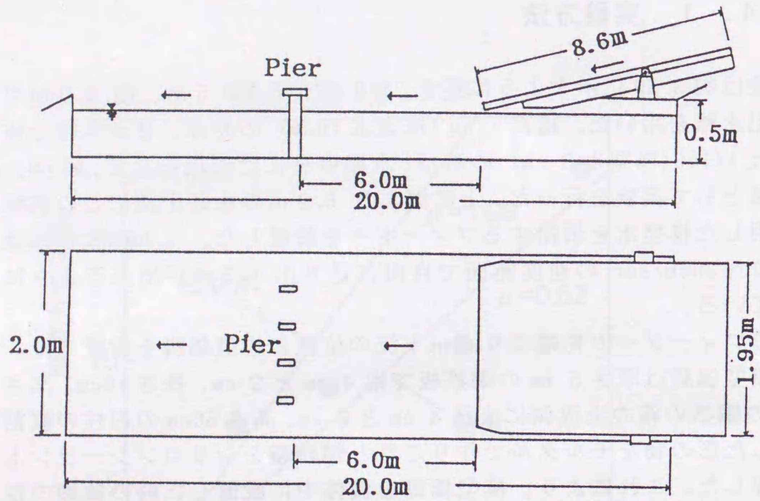


図 3.50　実験水路

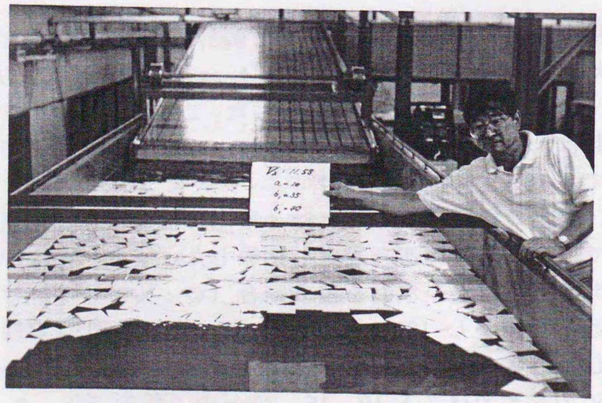
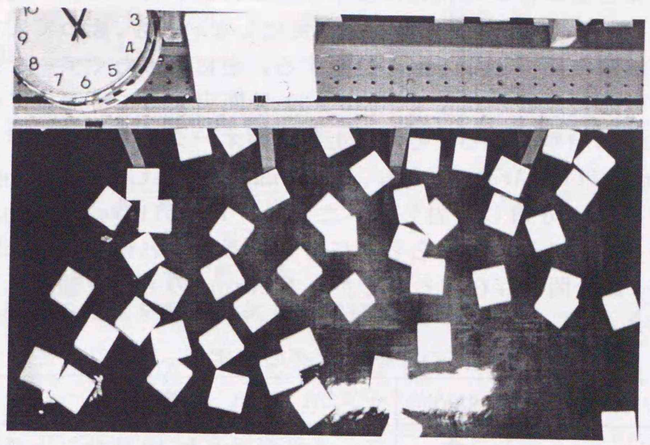


写真 3.7　実験水路と模型氷盤を恐竜するフィーダー



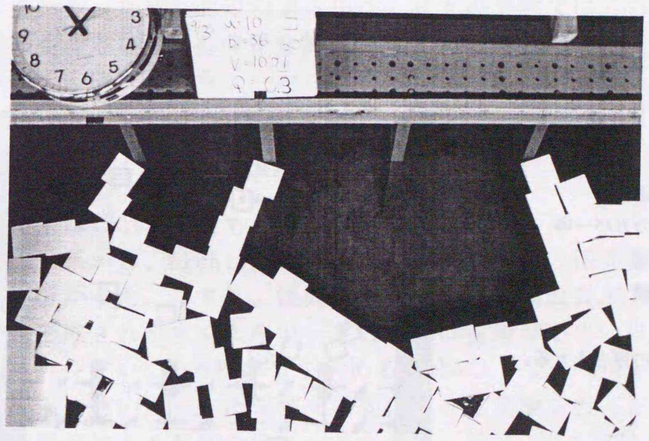


写真 3.8　アーチ形成過程

3．4．2　フルードの相似則の検証

アーチができるか否かの判定は以下の基準により行った。一度形成されたアーチが10数分以上もほとんど変化しない場合、極めて安定したアーチが出来た例でArchingと分類する。逆にまったくアーチが出来ないか、ほんの数秒か長くても20～30秒間出来るごく弱いアーチはNo Archingに分類される。それ以上数分のオーダーでアーチができる状態をTransitive Archingとし、Arching, Transitive Arching, No Arching の３つに分類し検討した。ただし、Transitive Arching をArching か No Arching のどちらかに分類するとすれば弱い Arching ではあるが、数分間は存在することからArching の方に分類されるべきものと考える。

表3.5　アーチングの判定

分類	MARK	判定基準
Arching	●	アーチが形成され10数分以上変化なし
Transitive Arching	▲	数分のオーダーでアーチが形成される
No Arching	○	全くアーチを形成しないか、形成しても20～30秒程度の弱いアーチ

V：表面流速、
Q：模型氷のカバー率
b_1:径間距離
b_2:心間距離
B：水路幅
h：模型氷の厚さとする。

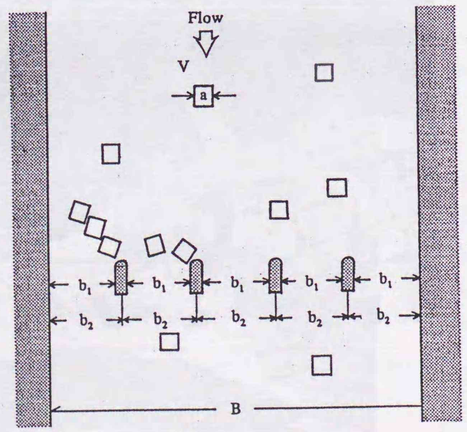


図3.51　実験の諸元

Archingあるいは No Archingを識別する諸元として、Calkins の成果に基づいて次のように考える。

$$A = f\ (Q_i,\ a,\ b_1,\ b_2,\ B,\ V,\ H,\ h,\ g,\ \rho_w,\ \rho_i) \quad (3.10)$$

ここで、A：識別関数　　Q_i：模型氷の供給率
H：水深　　ρ_w：水の密度
h：模型氷の厚さ　　ρ_i：氷の密度
g：重力加速度
μ：セン断係数

これらの諸元を無次元化した形に書き換えると、

$$A = f\left(\frac{Qi}{VB}, \frac{a}{b_1}, \frac{b_1}{B}, \frac{\rho_w}{\rho_i}, \frac{h}{H}, \frac{\rho a^2 g}{V^2 h}, \frac{V^2}{gh}\right) \quad (3.11)$$

ここで定数となる項を考慮すると、(3.10)式は

$$\frac{a}{b_1} = F\left(\frac{Q_i}{VB}, \frac{b_1}{B}, \frac{\rho a^2 g}{V^2 h}, \frac{V^2}{gh}\right) \quad (3.12)$$

で表される。ただし右辺の第３項は、我々の実験ではさらに検討の余地があることから、この項を無視するとa/b_1は(3.13)式で示される３つの因子の関数となる。

$$\frac{a}{b_1} = F\left(\frac{Q_i}{VB}, \frac{b_1}{B}, \frac{V^2}{gh}\right) \quad (3.13)$$

実験結果は(3.13)式をもとに整理し考察を行う。

実験結果から、Arching は V^2/gh に比例してその限界値が上昇することが分かった。つまり、径間に比べて氷盤の代表長が大きいほどアーチは形成されやすく氷厚が一定の場合は流速が小さいほどアーチは形成されやすい。この限界値を求めるために、一辺が10cm(厚さ１cm)の模型氷を使いカバー率を種々に変化させて実験を行った。

実験縮尺による影響を検証するために、縮尺1/50では一辺が10cm（厚さ1cm）の模型氷を使いカバー率を種々に変化させた実験と縮尺1/150で一辺が3cm(厚さ3mm)の模型氷を使った同様の実験を行ない、縮尺の影響を検証した。

縮尺 1/50 の時は、幅 2 mの水槽全幅を使用し模型橋脚は幅 4cm、長さ 10cm、高さ 50cmを使った。縮尺 1/150 では、幅 2mの水路の中央部を仕切板で幅 60cm の水路とし、模型橋脚は幅 2cm、長さ 10cm、高さ 50cmにより実験を行った。

橋脚 NOSE は、それぞれ幅 4cmと幅 2cmの半円形のモルタル製である。流速はそれぞれの縮尺での実験のフルード数がほぼ一致するように設定している。図3.52にその結果を示す。比較のために縮尺1/50と1/150の両方のアーチング限界曲線を示した。この図は模型氷のカバー率Qを縦軸に模型氷の幅を径間距離で除した a/b_1 を横軸にとり、それぞれの流速について径間とカバー率を変えて Arching の有無をプロットしたものである。

流速の遅い場合にはやや違いがでており、縮尺 1/150 (3cmの模型氷盤) の実験氷盤の方が若干 Arching が出来やすい傾向になっているが、流速が早い場合にはおおよそ Arching 限界線は、模型氷が 10cm の場合も 3cmの場合もほぼ同じような曲線となる。このことから、概ねフルード相似則が成立すると考えられ、実験結果の現地への適用が可能なことを証明している。

また、図 3.53 (a) (b) は流速別のそれぞれの縮尺のアーチング限界曲線をまとめたものである。図から明らかなように、氷盤による水面カバー率と氷盤の大きさが一定であれば V^2/gh が大きくなるほど Arching を起こす径間長は短くなる。径間長と氷盤が一定であれば V^2/gh が大きいほど Arching を起こすカバー率は大きい値となる。つまり、流速が速いほど Arching は起こしづらく、径間も短くて良い。逆に流速が遅いほど広い径間でも Arching が発生する可能性が高まる。

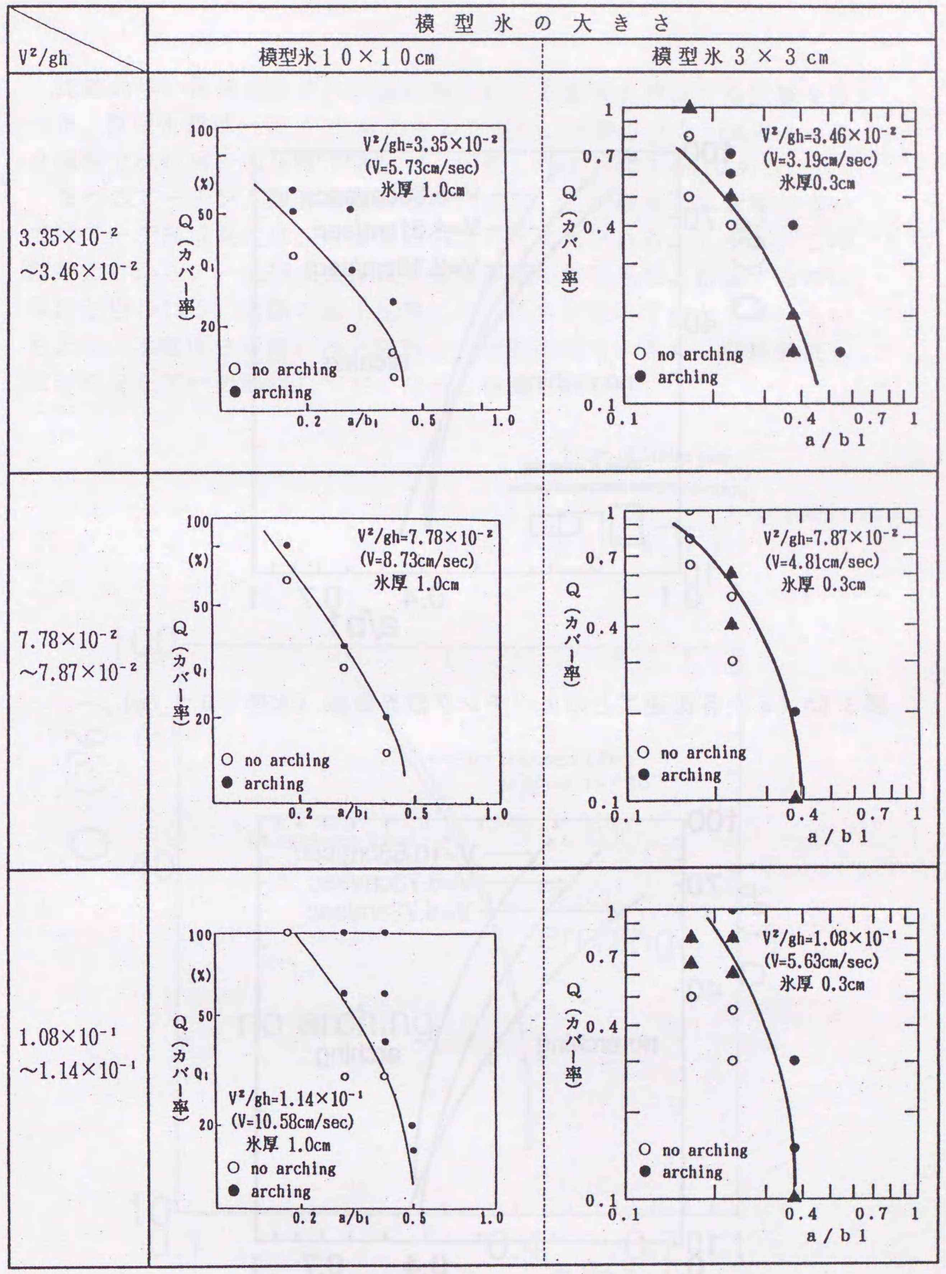


図 3.52 実験縮尺の違いとアーチング限界曲線

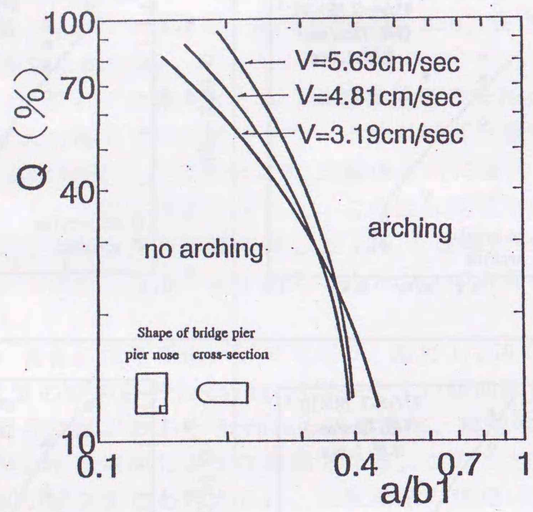


図 3.53（ａ）各流速ごとのアーチング限界曲線（氷厚＝0.3 cm）

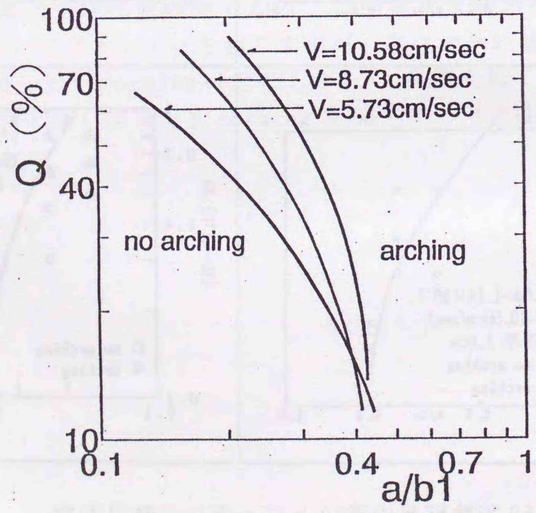


図 3.53（ｂ）各流速ごとのアーチング限界曲線（氷厚＝1.0 cm）

比較的早い流速条件で、氷盤の厚さによる影響を検証する実験を行った。模型氷盤は一辺が 10cm のものを使い、氷盤厚さを 1cm と 2cm の２種類でほぼ同一の条件で実験し、比較したのが図 3.54 である。

２つのアーチング限界曲線はほぼ一致し、この程度の氷盤厚の違いではアーチ形成条件は、ほぼ変わらないと考えられる。しかし、この結果だけからアーチ形成条件に氷盤厚が全く無関係だと結論するのは早計と思われる。実際の流下氷盤には、長さに比べてかなり厚いものもあり、氷盤厚さが厚いほど橋脚との接触面積も大きく、摩擦抵抗も大きくなりアーチ形成しやすくなると推測される。

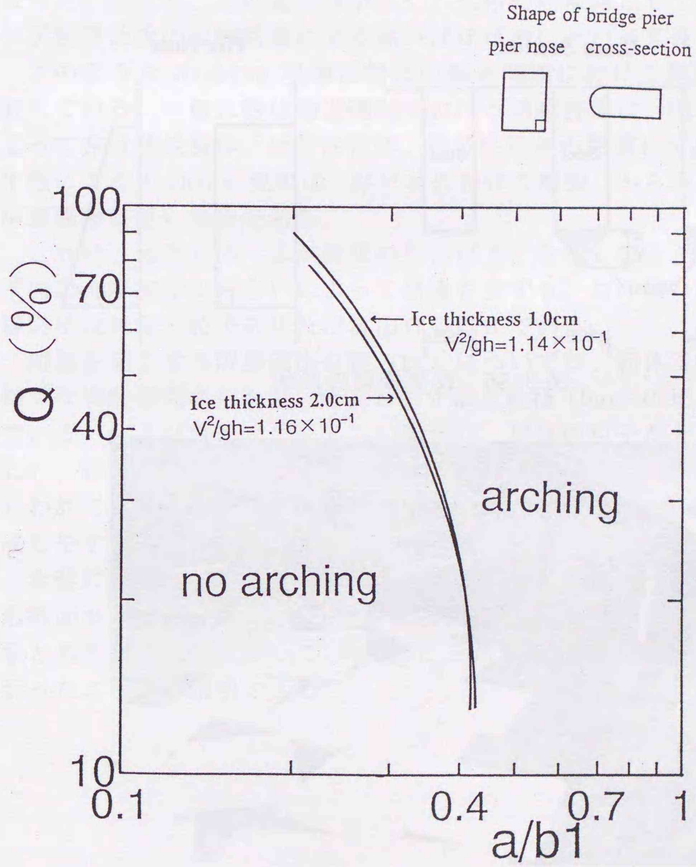


図 3.54　氷盤厚さの違いがアーチ形成条件に与える影響

３．５　氷盤の大きさが均一な場合のアーチ形成条件

３．５．１　実験条件

橋脚の形状が Arching の発生にどのような影響を与えるかを検討するために、橋脚の Nose 形状が 90° の場合と 60° に傾いている場合について、それぞれ半円形、三角形、矩形の３種類の断面を取りつけ実験を行った。実験縮尺は 1/50 で流速は 10cm/sec 程度と 5cm/sec 程度の２種類で径間は主に 26，36，46cm の３種類で行った。

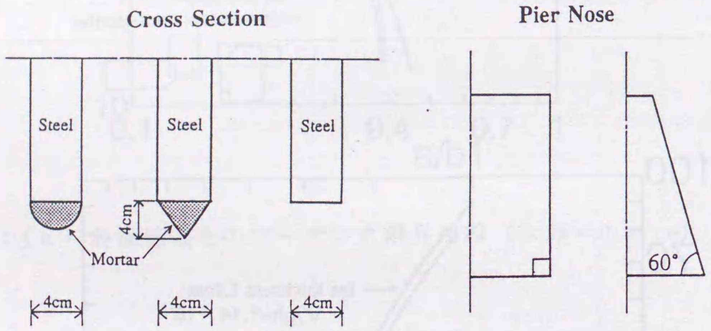


図 3.55　模型橋脚の形状

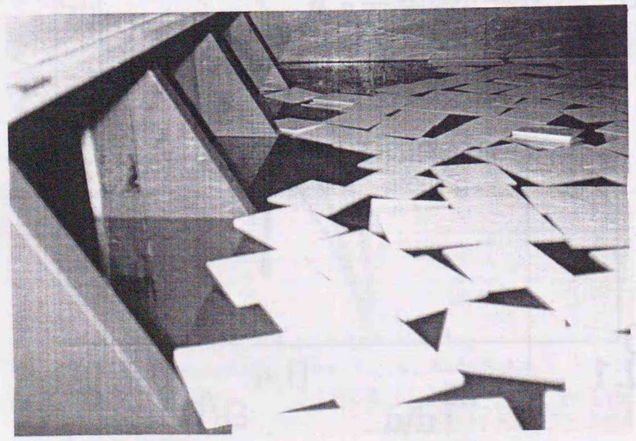


写真 3.8　傾斜型の模型橋脚

３．５．２　橋脚 Nose が直立の場合

橋脚 Nose は 90° で断面形状が異なる場合の実験結果を図 3.56、図 3.57 に示す。図 3.56 は、流速が 5cm/sec 程度で半円形、三角形、矩形の３種類の断面のアーチング限界曲線はほぼ一致し断面形状の違いによる影響は見られない。

図 3.57 は流速が 10cm/sec 程度の場合であるが、三角形と矩形はほぼ同じであり、5 cm/sec 程度の場合とも一致している。半円形は橋脚スパンが広い時には、三角形、矩形に比べ Arching が出来づらいが、狭い時には逆に三角形、矩形に比べ Arching が起こり易くなる結果となった。ただし、その違いは小さく、全体的な傾向としては、アーチング限界曲線の橋脚断面による違いはほぼ無いといって良い。

このような Arching 現象は粉体の輸送問題における閉塞現象に類似している。一般に粉体輸送問題における閉塞現象は、粉体の性質によって非付着性粉体、付着性粉体、固結性粉体の閉塞に分類されるが、氷盤による Arching 現象は、非付着性粉体の摩擦、からみ合いによる閉塞現象に近い現象である。

これは、流出口の寸法が流径の数倍以下になると粒子と壁面及び粒子同志の摩擦やかみ合いによって閉塞を生ずる。この場合の主要な影響因子は粒径、粒子形状及び流出口の口径である。

閉塞を発生する限界流出口径（Dc）については、粉体工学の分野で様々な実験研究が行われ、流出口の寸法と粒径（Dps）の比で提案されている。例えば円形オリフィスの場合は、球状の粒子だと(Dc/Dps)＝4.1 、粉砕された凸凹したような形状の場合は(Dc/Dps)＝6.8 程度といわれており、形状が凸凹したような粒子の方が閉塞つまり Arch を形成しやすい。

氷盤による Arching 実験において三角形、矩形に比べいくぶん半円形断面が Arch を形成しずらいのは、前述した粉体の輸送問題と逆の現象と考えれることによって、角張った三角形や矩形が Arch を形成し易かったこととが説明できる。

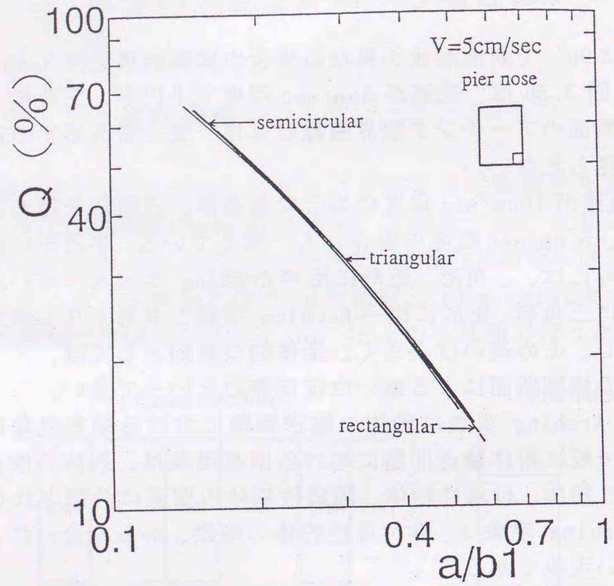


図 3.56 橋脚 Nose90° のアーチング限界曲線（V＝5 cm/sec 程度）

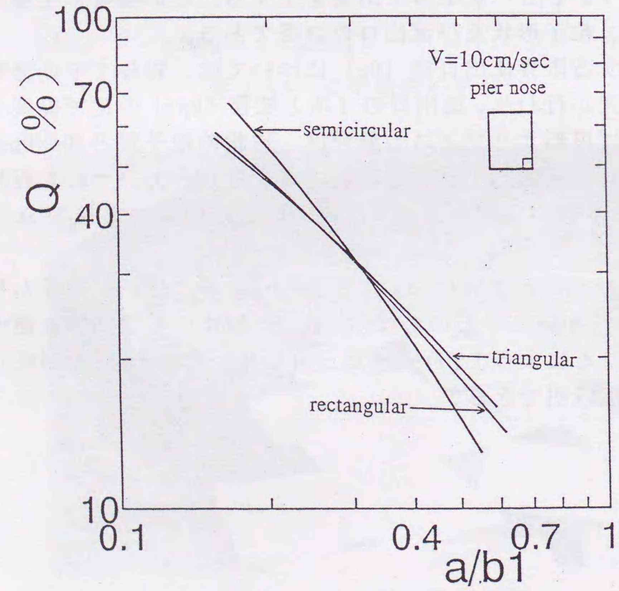


図 3.57 橋脚 Nose90° のアーチング限界曲線　（V＝10cm/sec 程度）

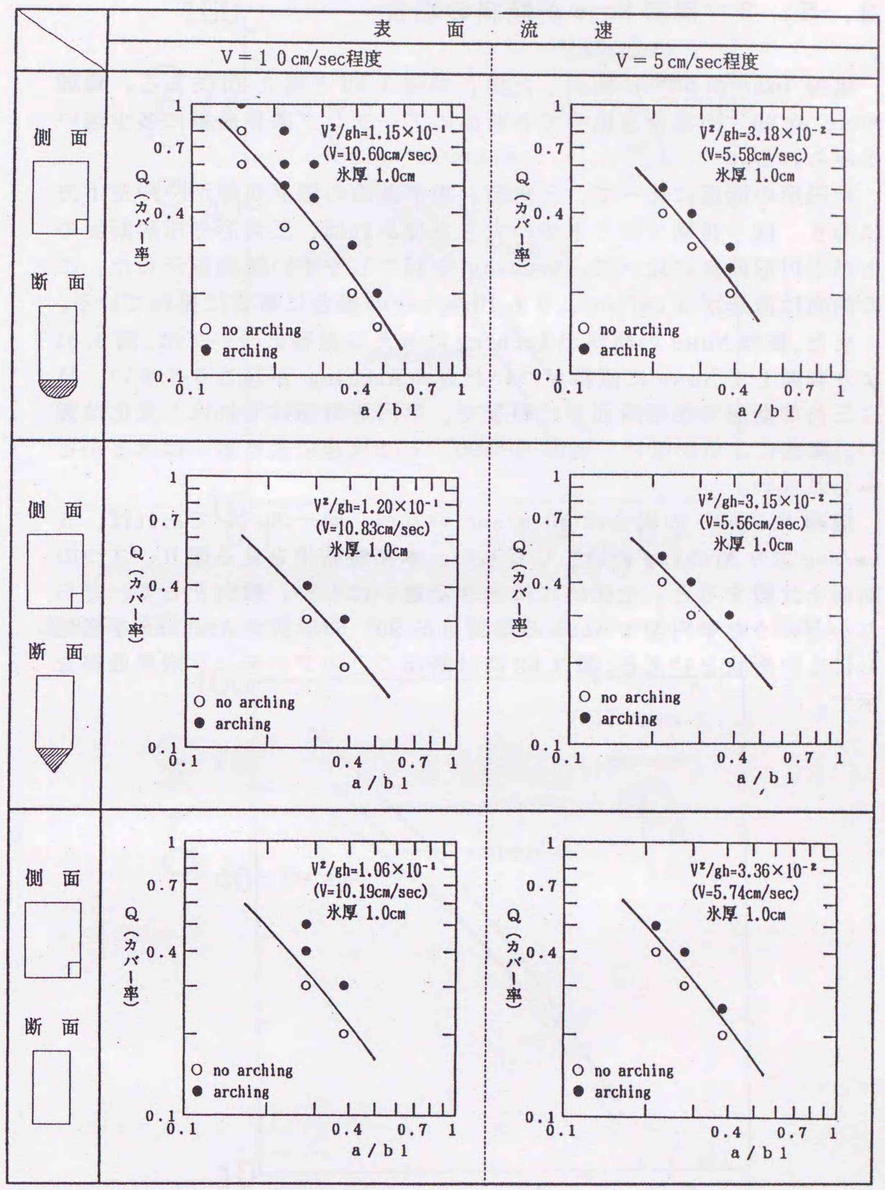


図 3.58　橋脚が Nose90° の時の各断面のアーチング限界曲線

３．５．３　橋脚 Nose が傾斜の場合

橋脚 Nose が 60° に傾斜した場合が図 3.59 と図 3.60 である。橋脚 Nose が 90° の場合と比べて各断面のアーチング限界曲線に多少違いがみられる。

半円形の断面に比べて、三角形、矩形断面の限界曲線がやや左下方にあり、同一径間で同じ氷盤の大きさであれば、三角形や矩形断面の方が半円形断面に比べて、Arching を起こしやすい傾向を示した。この傾向は流速が 5 cm/secよりも10cm/secの場合に顕著に現れている。

また、橋脚 Nose の傾斜が Arching に与える影響については、図 3.61 より判断して Nose に傾斜がついた方が Arching が起こりやすい。特に三角形断面や矩形断面では顕著で、半円形断面はそれほど変化は無い。流速による影響は、橋脚 Nose90° では流速による違いはほとんどみられない。

橋脚 Nose60° の場合は 10cm/sec の方が、同一スパンであれば、5 cm/sec より Arching を起こしづらい。本実験結果を見る限り、３つの断面を比較すると、全体的には大きな違いはない。傾向として、どちらかというと半円型で Nose の傾斜角が 90° の形状が Arching を発生しにくい形状といえる。図 3.62 には断面ごとのアーチング限界曲線を示す。

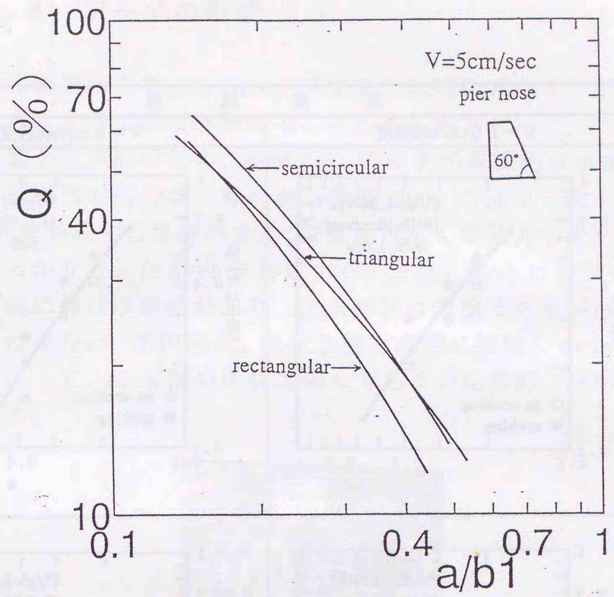


図 3.59 橋脚 Nose60° のアーチング限界曲線（V＝5 cm/sec 程度）

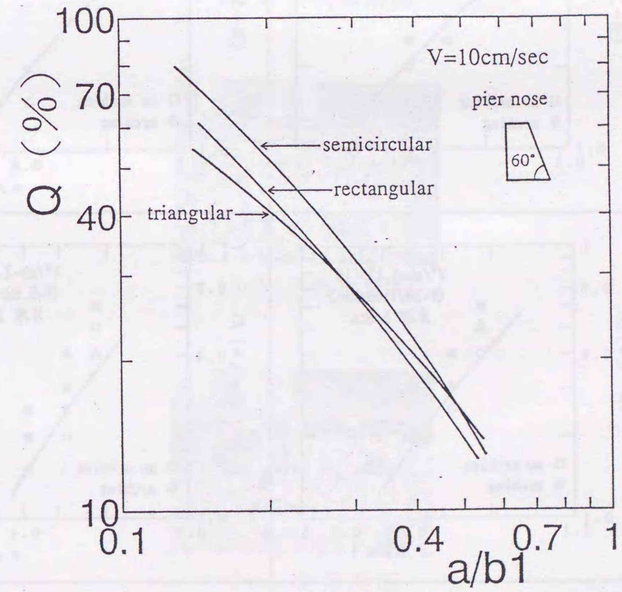


図 3.60 橋脚 NOSE60° のアーチング限界曲線（V＝10cm/sec 程度）

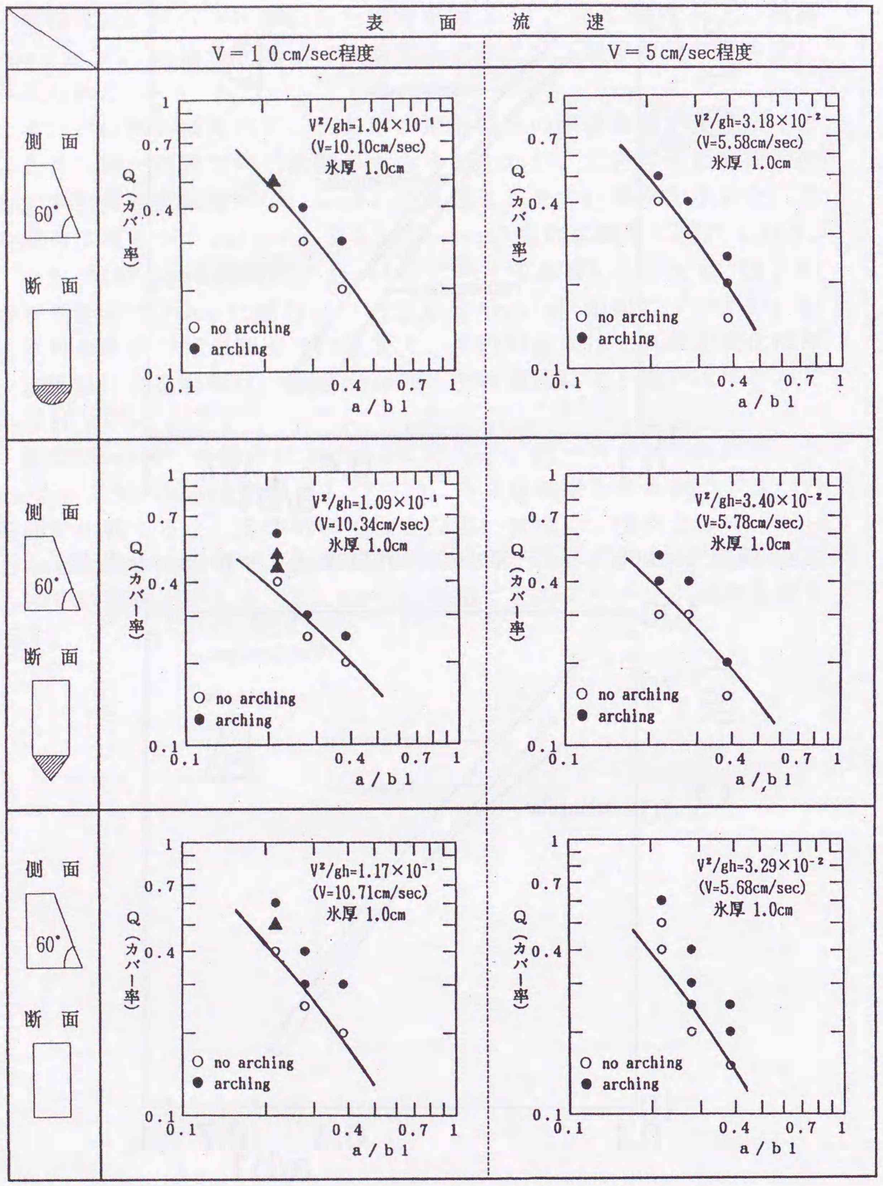
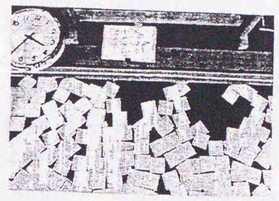


図 3.61　橋脚 Nose60° の各断面のアーチング限界曲線

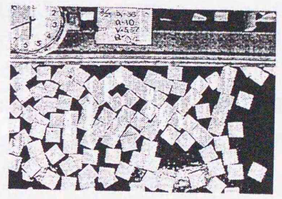
3．5．4　アーチの形状

実験中の観察の中で、Arching が発生した時にアーチの形状が、橋脚断面の形によってかなり異なることが明らかとなった。

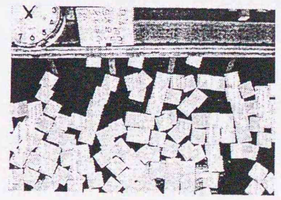
模型氷盤が正方形のため、橋脚 Nose の形状が直線的な面を持つ、三角形や矩形断面の場合は氷盤の面と橋脚 Nose の面が一致するような形で Arch を形成する場合が多く、設置幅が広く摩擦力も大きくなるために、しっかりとした Arch を形成する。また、Arch は橋脚 Nose の面に直角方向に伸びる傾向があり、Arch 形状は角張った形が多く円形を描くことは少ない。半円形は、模型氷盤と点的に接触し Arch を形成する。したがって、Arch 部の形状は様々であるが比較的、円形のアーチ形状を示す。



（a）半円形断面



（b）三角形断面



（c）矩形断面

写真 3.9　断面ごとの氷盤アーチの形状

３．６　氷盤の大きさが不均一な場合のアーチ形成条件

３．６．１　実験条件

橋脚は矩形断面、半円形断面の２種類を用意した。サイズは幅４cm、長さ10cm、高さ50cmで、矩形断面は鋼鉄製、半円形断面には半円形のモルタル製のNoseを取り付けた。Nose傾斜は、矩形断面は直立と60°の２種類、半円形断面は直立のみを用意した。実験は、すべて模型橋脚上にセットされたビデオカメラで撮影するとともに、目視による観察を行った。水路上に設置したフィーダーは、0～30cm/secの速度範囲で模型氷盤を供給することが出来る。模型氷盤が水面を覆う割合（氷盤の水面カバー率Q）は、フィーダーからの供給速度を調節することにより変化させた。しかし、氷盤移動速度が遅くなるにつれて、実際の水面カバー率との誤差が大きくなる傾向が見られたので、実験結果の整理に当たっては、すべて撮影したビデオから再計算した。使用した模型氷盤は一辺が10cmと5cmの正方形で、厚さは共に１cmである。１回の実験に使用した氷盤は10cmの氷盤に換算して800枚である。模型氷盤は密度0.9g/cm^{3}のポリプロピレン板で、模型氷盤同士の摩擦係数は自然氷盤相互の動摩擦係数0.1～0.2とほぼ同じであることを確認している。氷盤の移動速度は、10～12cm/secの範囲とし、橋脚間隔は30cm、40cm、50cmの３種類とした。

３．６．２　橋脚Noseが直立の場合

（１）混合率による影響

氷盤の混合率がアーチ形成条件に与える影響を見るため、橋脚スパンを30cmの固定し、混合率を100％:0％、75％:25％、50％:50％、25％:75％、0％:100％の５段階に設定した。混合率についても撮影したビデオにより再計算した。また、それぞれについて水面カバー率を変化させアーチ形成の有無を見た。使用した橋脚は断面形状が矩形及び半円形で、Noseは直立とした。

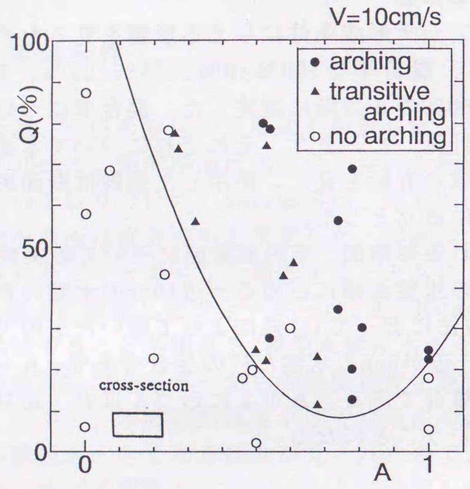
図3.62はそれぞれ矩形断面、半円形断面についての実験結果である。横軸のＡは水面上の氷盤面積に占める一辺10cmの氷盤の割合であり、Calkins(1978)の方法に習って(1)式によって導いたものである。したがって、Ａ＝０は一辺が5cmの氷盤だけの場合であり、Ａ＝１は一辺が10cmの氷盤だけの場合である。Ａが１に近づくほど一辺10cmの氷盤の面積が広くなるということになる。

$$A=\frac{n_1A_1}{n_1A_1+n_2A_2} \tag{3.14}$$

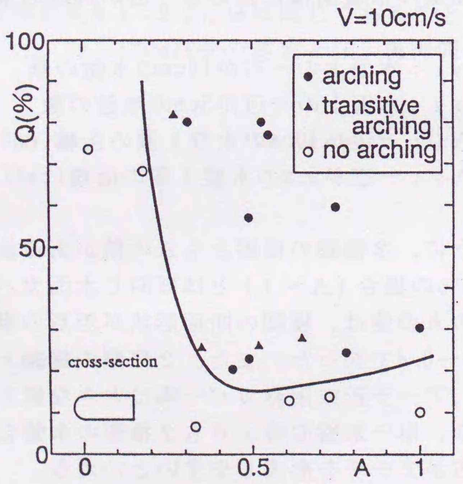
ここに、Ａ：水面上の氷盤面積に占める一辺が10cmの氷盤面積の割合

n_1：水面上の一辺が10cmの氷盤の数
n_2：水面上の一辺が5cmの氷盤の数
A_1：一辺が10cmの氷盤１個の面積(cm^2)
A_2：一辺が5cmの氷盤１個の面積(cm^2)

図から分かるように、２種類の橋脚ともＡの値がある値以上になると10cmの氷盤が100％の場合（Ａ＝１）とほぼ同じ水面カバー率でアーチを形成した。そのＡの値は、橋脚の断面形状が矩形の場合、半円形の場合ともに約0.3～0.4であった。また、２種類の橋脚ともＡの値が1.0に近づくに連れ、アーチ形成限界カバー率は大きな値を示す傾向があった。この事より、単一氷盤の時よりも２種類の氷盤をある割合で混合させたときの方がアーチを形成しやすいといえる。



(a)矩形断面



(b)半円形断面

図3.62　氷盤の混合率と水面カバー率の関係

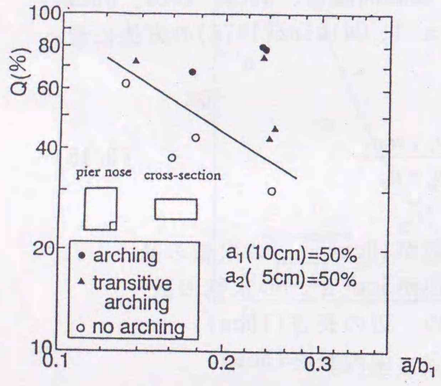
（２）橋脚間隔による影響

次に、混合率を一定とし、橋脚間隔を変化させ実験を行った。（１）の結果より、一辺が10cmの氷盤が半分以上混合されると極端にアーチを形成しやすくなることから、混合率には10cm:5cm=50:50、75:25、100:0の３段階を設定した。しかし、実験においてこの割合を完全に維持することは非常に困難であり、それぞれの割合には若干の幅がある。橋脚は矩形断面のものを使用した。橋脚間隔は、30cm、40cm、50cmの３段階に変化させた。氷盤の平均長ａは、Calkins(1978)の方法に習って、(2)式によって算出した。

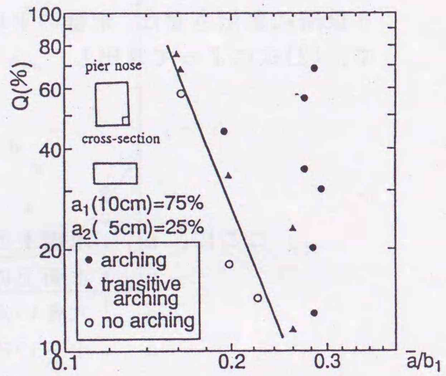
$$\bar{a} = \frac{n_1 a_1 + n_2 a_2}{n_1 + n_2} \qquad (3.15)$$

ここに、n_1：水面上の一辺が10cm(a_1)の氷盤の数
n_2：水面上の一辺が5cm(a_2)の氷盤の数
a_1：大きい氷盤の一辺の長さ(10cm)
a_2：小さい氷盤の一辺の長さ(5cm)

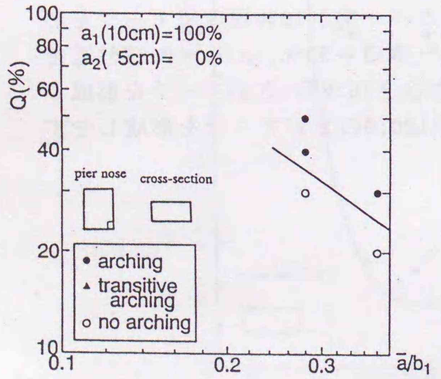
実験結果を図3.63に示す。実験結果によると、10cm:5cm＝100:0と50:0はほぼ同じ傾向を示しており、100:0の方が若干アーチを形成しずらい。また、75:25では他の混合率に比べ、大きく傾向が異なった。この場合、橋脚間隔が小さくなるに従って急激にアーチが形成しやすくなり、橋脚間隔30cmでは氷盤の水面カバー率が10%程度でアーチを形成することになる。氷盤の水面カバー率Q＝50%、a/b_1＝0.17付近を境界として、a/b_1がそれより大きくなると75:25の方がアーチを形成しやすく、a/b_1が小さくなると50:50や100:0の方がアーチを形成しやすい。



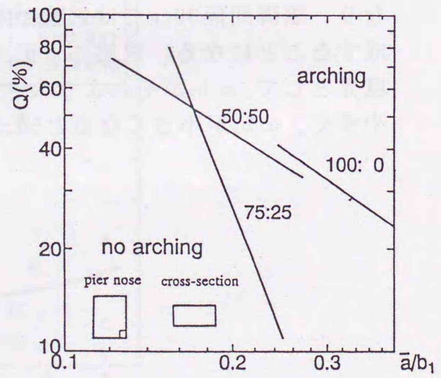
(a)$a_1:a_2$=50:50



(b)$a_1:a_2$=75:25



(c)$a_1:a_2$=100:0



(d)混合率とアーチ形成限界の関係

図3.63　アーチ形成における橋脚間隔と混合率の関係

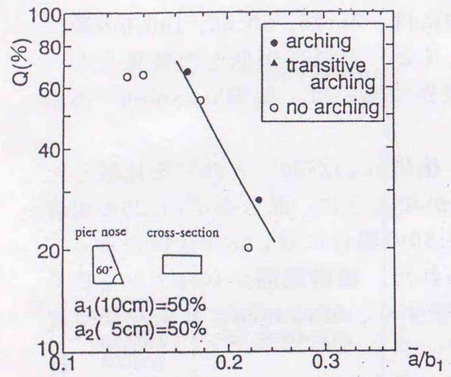
３．６．３　橋脚Noseが傾斜の場合

橋脚Noseを60°に傾斜させた模型橋脚による実験を行った。橋脚断面は矩形断面とし、２種類の氷盤の混合率は（１）と同様10cm:5cm＝50:50、75:25、100:0とした。

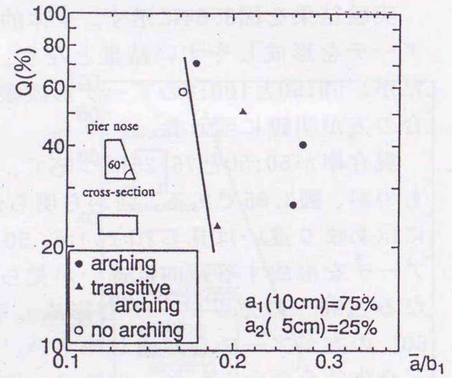
実験結果を図3.64に示す。全体的には、75:25、50:50、100:0の順にアーチを形成しやすい結果となり、（２）とほぼ類似した結果となったが、50:50と100:0のアーチ形成限界の違いは、橋脚Noseが60°の場合の方が明瞭に現れた。

混合率が50:50と75:25について、橋脚Noseが90°と60°を比較したものが、図3.65である。図から明らかなように、混合率が75:25の場合にはあまり違いは見られないが、50:50の場合には、Nose傾斜によってアーチを形成する傾向に違いが見られた。橋脚間隔が40cmよりも広くなると90°の方がアーチを形成しやすく、逆に40cmより狭くなると60°の方がアーチを形成しやすい。

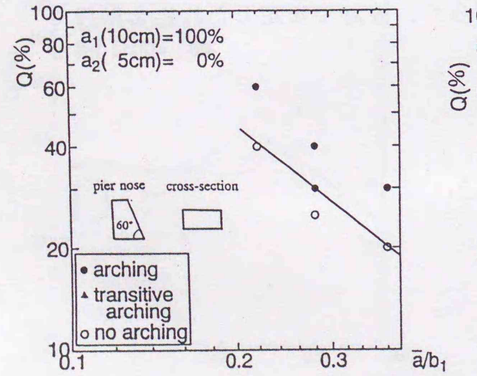
全体的な傾向として、氷盤が一様な場合に比べて、大小の氷盤が混合された場合の方がアーチを形成しやすい。これは、一様な氷盤だけの場合は氷盤間に空隙があるのに比べ、混合した場合には小さな氷盤がその空隙を埋め氷盤相互の連結を強固にするものと思われる。橋脚Noseによる影響は、小さな氷盤が多い場合に顕著に現れた。アーチ基部において氷盤と橋脚が接点を持つ際に、橋脚が傾斜している方が氷盤と橋脚の接触が面的になるため安定する上、氷盤が小さい方が水面の微妙な波や振動の影響を受けずらく、接点で安定した状態を保持できるためと思われる。



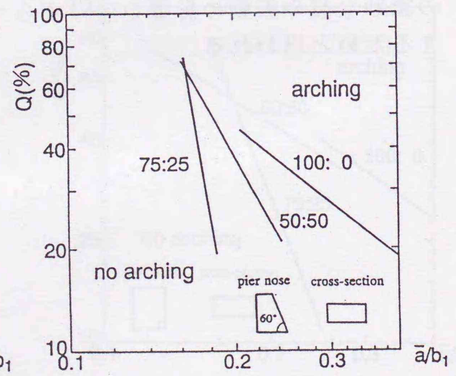
(a)$a_1:a_2$=50:50



(b)$a_1:a_2$=75:25

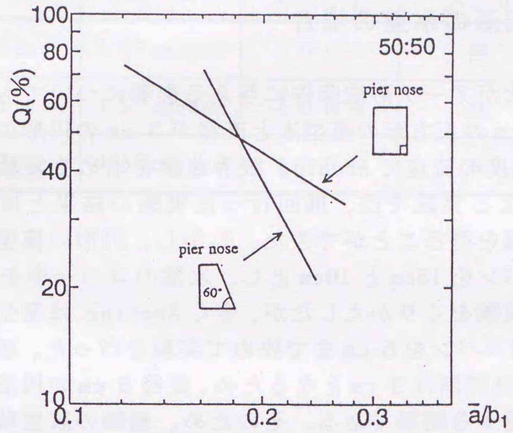


(c)$a_1:a_2$=100:0

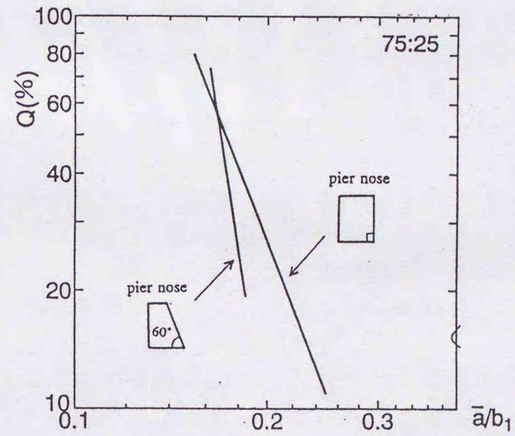


(d)混合率とアーチ形成限界の関係

図3.64　アーチ形成におけるNoseが傾斜した時の混合率の割合



(a)$a_1:a_2$=50:50



(b)$a_1:a_2$=75:25

図3.65　Nose傾斜60°と90°のアーチ形成限界の比較

３．７　橋脚位置での氷盤によるアーチ形成と氷盤形状の関係

３．７．１　円形の氷盤の場合

模型氷盤の形状がアーチ形成条件に与える影響についても検討を行った。一辺が３ cmの正方形の模型氷と直径が３ cmの円形の模型氷を使い、ほぼ同じ程度の流速でArching 限界曲線を求める実験を行った。正方形の氷盤による実験では、前回行った実験の結果とほぼ同様のArching 限界曲線を得ることができた。しかし、円形の模型氷の実験では、橋脚のスパンを15cmと10cmとし、氷盤のカバー率を100 %でおのおの３回の実験をくりかえしたが、全くArching は発生しなかった。そこで、橋脚スパンを５ cmまで狭めて実験を行った。橋脚スパンが５ cmになると純間隔は３ cmとなるため、直径３ cmの円形模型氷１個がぎりぎり通過する間隔である。そのため、橋脚の設置時点でそれぞれのスパンが円形模型氷を通過することを確認し実験を行った。この間隔で、氷盤は水路全幅に対し閉塞状態となり、氷盤によるアーチが形成され閉塞状態となったが、橋脚側面と模型氷の間の微妙な力の関係氷盤が橋脚側面に留まるような現象もみられ、Arching による閉塞とはいいがたいスパンもあった。また、正方形の氷盤の場合、橋脚の純間隔と氷盤の大きさの比a/b_1が１の状態では、対角線の長さが4.2 cmとなり、橋脚スパンを上回るため、氷盤が通過できずほとんど全てが橋脚位置に留まる結果となった。

前述した粉体の輸送問題では、粒子形状が球状より、凸凹したような粒子の方が閉塞しやすいことから、模型氷が正方形のような角張ったものより、円形の方がArching をおこさないことと一致する。

以上のことから円形の模型氷では、特殊な場合を除いてアーチングは発生しないといえる。これは氷と氷の接合点が一箇所のため、氷相互の結束力が弱く、力が加わると容易にアーチが崩壊するためと推定される。

ただし、著者等の観測では自然状態で四角形や五角形の氷盤がほとんどだったことから、実際の河川で円形氷盤が流下することは極めて稀と考えられる。

表3.6　円形氷盤のアーチング

橋脚スパン	流　速	水面の氷盤カバー率	アーチングの有無
１５cm	4.57 cm/sec	１００%	無
１０cm	4.57 cm/sec	１００%	無
５cm	4.57 cm/sec	１００%	有



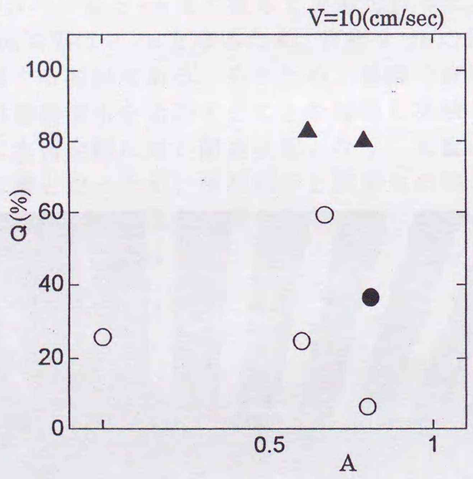
写真3.10　円形氷盤を使ったArch形成実験

3．7．2　円形と矩形の氷盤が混在した場合

一辺が 10cm(厚さ 1cm)の正方形氷盤と直径 10cm(厚さ 1cm)の氷盤を混合し、アーチ形成に関する実験を行った結果を図 3.65 に示す。

混合率A＝0は、円形氷盤が 100％であり、混合率A＝1は、正方形氷盤が 100％であることを示している。

正方形氷盤が面積比でおよそ 75％以上になると、アーチを形成するが、それ以下ではアーチを形成しない。したがって、円形氷盤が多いときには、氷盤の水面カバー率が 100％であっても、ほとんどアーチを形成しない。



ここで　$A=\dfrac{n_1A_1}{n_1A_1+n_2A_2}$

A：水面上の氷盤面積に占める一辺が10cmの氷盤面積の割合

n１：水面上の直径が10cmの円形氷盤の数

n２：水面上の一辺が5cmの矩形氷盤の数

A１：直径が10cmの円形氷盤１個の面積(cm^2)

A２：一辺が5cmの矩形氷盤１個の面積(cm^2)

図 3.65　円形と矩形が混在した時の Arching 限界線

3．8　発寒川でのアイスジャム発生に関する模型実験

琴似発寒川のアイスジャム発生に関する現地調査に基づいて、模型水路を使用した実験を行った。実験には長さ20.0m、深さ0.5m、幅2.0mの平面水路を用いた。

3．8．1　実験条件

実験縮尺は使用したポリプロピレン板の厚さが1cmで、現地の氷盤のおおよその平均厚が20cmであったことから1/20とした。

次に、使用可能な模型氷のサイズは、一辺が5cm, 7cm, 10cm, 13cmの４種類であったので、現地調査から以下のように４つに区分した。

表3.7　模型氷盤のサイズと混合率

現地氷盤サイズ	現地混合率	実験混合率	模型氷盤サイズ
40～ 80cm	１２％	１０％	５cm
80～120cm	２８％	３０％	７cm
120～160cm	３６％	４０％	１０cm
160～220cm	２４％	２０％	１３cm

フィーダー上に４種類の模型氷を１列当たり1:3:4:2の割合で並べ水面に供給する。縮尺を1/20としたため、模型氷は現地調査結果よりやや大きめとなった。橋脚は幅4cm、長さ10cm, 高さ50cmで上流側に半円形のモルタル製Noseを取り付けたものを使用した。Noseは垂直である。

氷盤の移動速度は、水中ポンプの能力から4cm/sec、8cm/sec、12cm/secの３段階とした。したがって、実流速は、フルードの相似則から、18cm/sec、36cm/sec、54cm/secとなり、平常時の流速が43cm/secであることから、実験での氷盤移動速度8cm/secと12cm/secの中間的な値となる。

橋脚の間隔は30cm、40cm、50cmの３種類で行い、アーチの限界線を求め、長栄橋の橋脚間隔35cm（702cmの1/20）の時のアーチ形成の有無を検証し、アイスジャム形成の可能性を考察する。

3．8．2　実験結果

図3.66～図3.68は、流速ごとのa/b_1とカバー率Qの関係を示したものである。氷盤の移動速度が最も遅いV＝4cm/sec（図3.66）の場合は、アーチを形成しても氷盤相互の結びつきが弱く、不安定なアーチが多かった。結果としてTransitive Archingと分類されたケースが多い。全体としては、この程度の移動速度の違いでは、アーチ形成の限界線に大きな違いは見られなかった。

V＝8cm/secの時の実際の橋脚間隔b＝7.02mに対応するアーチを形成するカバー率Qは22%、V＝12cm/secでも26%でアーチを形成することが図3.78、図3.79からわかる。

平常時の流速を実験時の氷盤移動速度に換算するとV＝9.62cm/secとなり、V＝8cm/secとV＝12cm/secのほぼ中間に位置することから、アーチを形成するQも22～26%の範囲にあると思われる。以上のことから、平常時の流量で現地氷盤は動いていないものの、流量の増加に伴って、流下する氷盤も増加し、水面をカバーする氷盤の割合が低い段階で、橋脚位置に氷盤アーチが形成されていた可能性が極めて高いことが裏づけられた。

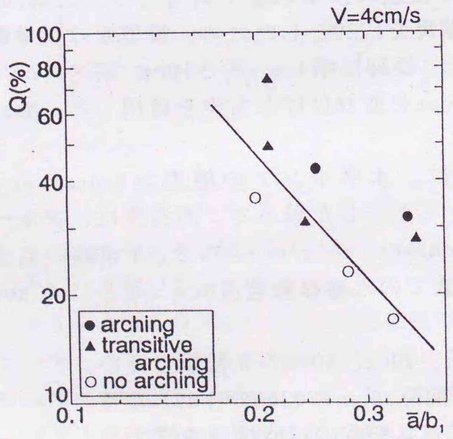


図3.66　V＝4 cm/sの時のアーチ形成限界線

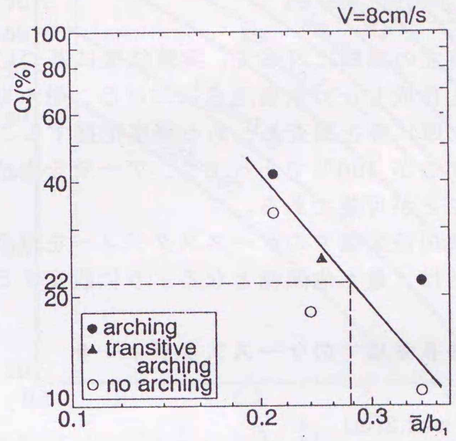


図3.67　V＝8 cm/sの時のアーチ形成限界線

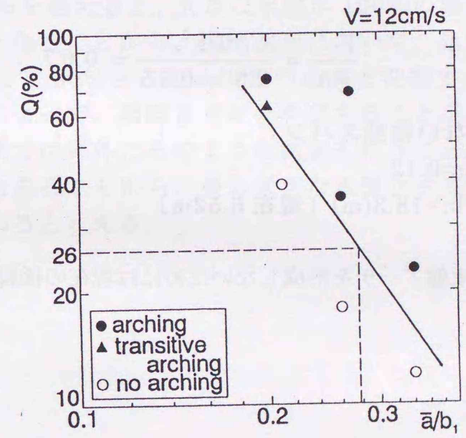


図3.68　V＝12cm/sの時のアーチ形成限界線

3．9　氷盤によるアーチ形成を考慮した橋脚間隔の決定法

半円形断面で、直立の橋脚に対して、実験結果に基づいて、図 3.69 のようなチャートを作成した。架橋地点における、融氷期の流速、氷盤の形状（辺長、氷厚）等を調査し、ある程度把握することによって、水面の氷盤カバー率Qが 100%であっても、アーチを形成しない橋脚スパンを設定することが可能である。

例えば、琴似発寒川長栄橋でのケーススタディーを行うと以下のようになる。設計条件は、最も危険側となるように設定する。

◆長栄橋でのケーススタディー◆

■氷盤の大きさ

氷盤の辺長　a=2.2(m)

氷厚　h=0.35(m)

■氷盤の水面カバー率

Q=100(%)

■流速（平常時程度）

V=0.5(m/sec)　　$\dfrac{V^2}{gh} = \dfrac{0.5^2}{9.8 \times 0.35} = 0.07$

■アーチを形成しない橋脚スパン

の図より、a/b_1=0.12

b_1=18.3(m)（現在 6.52m）

b_1=18.3.m となり、氷盤アーチを形成しないためには現在の橋脚間隔の３倍の間隔が必要である。

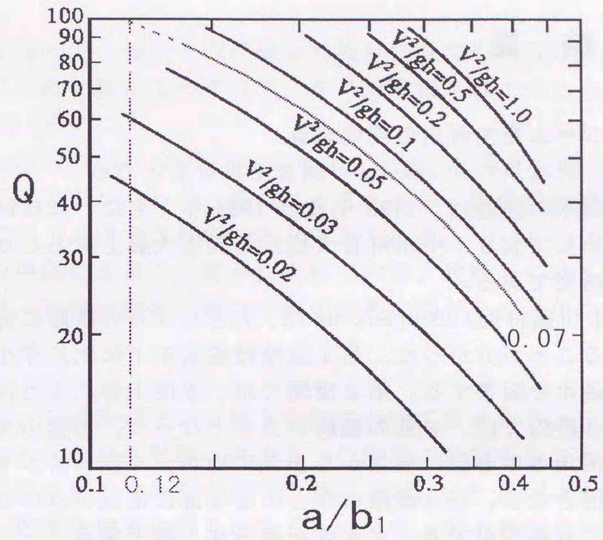


図 3.69　流速ごとのアーチ形成限界線

また、一般の河川を流下する氷盤は、異なった大きさの氷盤が混合して流れる場合が一般的である。実験によれば、大きな氷盤の混合率が面積比で 30%を越えると、大きな氷盤が 100%の場合とほぼ同じアーチ形成条件となることから、現地調査において、氷盤サイズが大きな方から面積比で 30%を占める氷盤の辺長を把握することができれば、その辺長によって、橋脚スパンを決定することが可能となる。

しかし、現状では野外でそのような調査を行うことは困難な上に、年による変動もあることから、最も大きな氷盤サイズで設計を行うことが現実的であるといえる。

3．10 結　論

(1)アイスジャム発生河川の現地調査

以下には、天塩川のBreak-upの調査結果をまとめる。

①天塩川の開氷の経過は、1993年及び1994年ともに、ほぼ同じような傾向をしめしており、中川町誉大橋から天塩大橋上流あたりまでの氷盤移動が活発である。

②天塩川（中川橋付近）のBreak-upは、大きく４つの段階に分かれて進行していることが分かった。第１段階は定着氷下に氷片や小さな氷盤が溜まり通水を阻害する。第２段階では、水位上昇による流下圧力の増加。第３段階では、２基の橋脚が支点となって、氷盤の流下に抵抗するが、河川の中心部に橋梁から上流に向かって割れ目ができ、やがては開水面となる。第４段階は岸との定着部に亀裂がはいるとともに横断方向にも亀裂ができ、大氷盤が細分化し流下する。

③細分化された氷盤の大きさは１個がおよそ幅30×長さ50～100m程度、流下速度は、2.1m/secであった。

④橋脚に衝突した氷盤は激しくCrashing破壊をおこしており、コンクリート橋脚の摩耗にかなりの影響がある。

⑤中川橋付近でのBreak-upの発生によって、極めて短時間の内に河口付近まで開氷が進むことがわかった。

⑥誉平観測所での水位低下は約２ｍ（１時間）、新問寒別橋１ｍ（３時間）、天塩大橋２ｍ（12時間）をようしており、下流ほど水位低下が緩やかにおこる傾向を示している。

⑦誉平での、最高水位時の流量は約 204 m^3/secであり、水位上昇前の約２倍の流量が流れた。

以下には、発寒川のアイスジャム発生について調査結果をまとめる。

①聞き取り調査によれば事故直前の河道内には、ほとんど水が流れておらず、出水は急激に起きた。

②上流の長栄橋はパイルベント式橋脚で約７ｍ間隔に５基設置されており、流水の流れを阻害する要因となっていた。

③長栄橋の下流側の河道には、大量の雪が排雪されており、河幅の半分以上が常時閉塞された状況になっていた。

④この大量の雪がダムのような役割をし、流下物を右岸側へ押しやるように作用していたため、狭い河川断面に大量の雪や氷が一度に送り

込まれた。

⑤長栄橋上流の流下部分と残存部分の境界位置での積雪深さが長栄橋に近づくにつれて高くなっており、流下が阻害されていたことを証明している。

⑥上流20ｍ付近の雪の密度はおよそ0.57g/cm^3と非常に高く、かなり大きな流下圧力がかかったと思われることから、橋脚部分では閉塞に近い状態で流下が阻害されていたと考えられる。

⑦流下物の中には大量の氷盤が含まれており、残存している部分の観察から見て、氷盤が橋脚位置での河道閉塞に関与していたことが推測される。

以下には、アイスジャムの発生形態についてまとめる。

アイスジャムの発生形態は次の２つの形態に分類することが出来る。

①橋脚上流部の定着氷先端で流下氷盤がSlidingやUnder-turning等を起こし、定着氷盤下に潜り込むことにより、アイスジャムが形成される。この際、定着氷を介して、アイスジャムの氷力が橋脚に伝えられ、ブレークアップが発生する。

②流下氷盤が橋脚位置でアーチを形成し、その後から流下する氷盤をトラップして、アイスジャムが形成される。その後、徐々に流下圧力が増加し、アイスジャムの強度を上回るとアイスジャムは崩壊し急激な増水をもたらす。

(2)定着氷先端部でのアイスジャム発生に関する基礎実験

以下には定着氷先端部での氷盤の運動についてまとめる。

①流下氷盤が定着氷盤下に潜り込む形態として、Under-turning、Sliding、Half-turningの３種類に分類することができる。また、今回の実験ではPile upの形態は見られなかった。

②定着氷盤の先端部形状の違いにより、流下氷盤の運動形態に相違が見られた。矩形や上向きにカットした形状では、流下氷盤はUnder-turningで定着氷盤下に潜り込むが、下向きにカットした形状ではSlidingにより潜り込むものが比較的多く見られた。半円形では、氷厚が１ cmの時のみHalf-turningが見られ、その他は殆どUnder-turningの形態であった。

③無次元量ｈ/Ｌを調べることにより、流下氷盤が定着氷盤下に潜り込む限界はフルード数Feによっておおよそ把握できる。また、これにより限界流速も計算することができる。

④先端部形状が矩形の時は、h/Lの増加に伴い限界フルード数は単調に減少しているが、半円形状や上向き45°にカットした形状では、ある氷厚を超えると限界フルード数はほぼ一定となる。

以下には浮氷盤の流体抵抗についてまとめる。
①氷盤に働く流体抵抗力(F_W)は、氷盤下面と水の摩擦によるせん断力(F_{SW})と水面下の氷盤が受ける形状抵抗力(F_{DW})の合力として表すことができる。
②実験結果を氷盤の長さLと流体抵抗力(F_W)を流速(V)の二乗で除した値の関係で整理すると、Lの増加に伴い、F_W/V^2はほぼ直線的に増加する。この直線の切片をβ、傾きをαとすると、αはせん断力(F_{SW})を意味し、βは形状抵抗力(F_{DW})を表している。したがって、せん断係数(C_{SW})は以下の値となる。
$C_{SW}=2\alpha/\rho_W=2_W/g\alpha$
③氷盤の条件が異なる模型実験結果を基にせん断係数C_{SW}を求めた結果、なめらかな氷盤の場合のせん断係数は0.007程度、氷盤下面には凹凸を付けたり比較的平坦な氷盤群は0.020～0.025の範囲、アイスジャムの時には0.1～0.3の範囲となった。したがって、氷盤下面が平坦な場合に比べ、アイスジャムの場合ではおよそ15～40倍にもなることから、流体抵抗が氷盤下面の粗度に大きく依存することと、アイスジャムが発生したときには極端に流体抵抗が増加する。
④氷盤下面の凹凸の間隔と溝の深さの比S/kが7.5付近で流体抵抗力F_Wは最大となる。
⑤実験流速が15 cm/secを越えると、氷盤は非常に不安定な状態となり、アンダーターニング等を起こしアイスジャムを形成する可能性が高い。

以下には実際の河川から採取した氷盤相互の摩擦係数の実験結果をまとめる。
①氷盤接触部が乾燥した状態での静止摩擦係数μ_Sは、速度が速くなるとやや減少する傾向が見られたが、柱状氷と雪氷の違いによる摩擦係数への影響は殆ど見られなかった。動摩擦係数μ_Kは、速度に関係なくほぼ一定の値となった。
②定着氷下面と潜り込んだ氷盤の摩擦係数は、摩擦力だけの摩擦係数に比べて4～5倍の見かけの摩擦係数になることがあると推測される。
③垂直抗力との関係では　以上では静止摩擦係数はほぼ一定となった。

また、動摩擦係数は垂直抗力の大きさに関わらずほぼ一定となった。
④氷盤接触部が濡れている場合には、静止摩擦係数、動摩擦係数とも速度による大きな依存は見られなかった。しかし、乾燥した状態に比較して摩擦係数のバラツキは大きくなった。
⑤全体的な傾向として乾燥した場合に比べ、摩擦係数の値は大きくなっている。

以下には実際の湖氷を用いた摩擦係数に関する実験についてにまとめる。
①氷盤の垂直抗力Fは、ほぼ氷盤の長さLに比例した。
②摩擦力は、厳密な意味での氷盤と氷盤の摩擦力ではなく、流体による形状抵抗力等、他の要因も含んだ見かけ上の摩擦力である。
③動摩擦係数は$\mu=0.001$～0.005となり、非常に小さな値となった。これは、氷盤間にある水が潤滑剤的な役割をしていたためと思われる。
④静止摩擦係数は、柱上氷－雪氷で$\mu=0.62$、柱状氷－柱状氷で$\mu=1.06$となり、動摩擦係数に比べかなり大きな値となり、表面の滑らかな柱状氷の方が大きな値となった。
⑤雪氷－柱状氷の場合には、雪氷の凹凸が大きいために接触面積も小さく、氷盤間にある水の量も多いことが摩擦係数を小さくしていると考えられる。
⑥氷盤が定着氷盤下にスライディングによって潜り込むときには、まず動摩擦の状態となるため、氷盤に働く摩擦力は非常に小さく、氷盤はそのまま定着氷盤下を滑っていくものと思われるが、アンダーターニングによって潜り込むときには、まず静止摩擦の状態となるため、定着氷盤下で停滞する可能性が高く、アイスジャムを形成しやすい。

(3)橋脚位置での氷盤によるアーチ形成条件に関する実験

以下にはフルードの相似則についての実験結果をまとめる。
①10 cmの模型氷と3 cmの模型氷のArchingの限界曲線は、ほぼ一致することから、フルード相似則が成り立つことがわかった。ただし、今回の実験では比較的ゆっくりとした表面流速についての結果であり、流速を早くした時の検証が必要である。

(4)以下には氷盤の大きさが均一な場合のアーチ形成条件に関する実験結果についてまとめる。

①橋脚の断面形状が半円形に比べて、くさび形や矩形の方がArching

を起こしやすい傾向が見られた。ただし、使用した模型氷が正方形であることから、くさび形や矩形の方が組合せが良かったことが考えられる。
②また、橋脚Noseが傾斜した場合、90°の場合と比べて全般的にArchingが出来やすい傾向がある。この傾向は、半円形断面ではそれほど顕著ではないが、くさび形や矩形でやや顕著となり、流速が遅いほどこの傾向は強くあらわれた。

(5)氷盤の大きさが不均一な場合のアーチ形成条件

以下には氷盤の大きさが不均一な場合のアーチ形成条件についてにまとめる。
①矩形断面橋脚、半円形断面橋脚ともに全氷盤面積にしめる10㎝氷盤の面積割合(A)が一定以上になると10㎝氷盤が100%の場合とほぼ同じ氷盤の水面カバー率(Q)でアーチを形成した。
②Aの値が矩形断面では0.70、半円形断面では0.40付近から10㎝氷盤だけの場合とほぼ同様のQでアーチが形成されることから、半円形断面の橋脚の方がアーチを形成する際に大きな氷盤の影響を強く受ける。
③2種類の模型氷盤を使った今回の実験では、10㎝氷盤が100%の場合よりも5㎝氷盤が一定割合で混合された場合の方がアーチは形成しやすい結果となった。最もアーチを形成しやすい氷盤の混合率の時のAの値が矩形断面、半円形断面ともに0.30～0.40である。
④橋脚Noseの傾斜と混合率の関係は、橋脚Noseの傾きに関係なく、いずれの橋脚間隔の場合も75:25の混合率が最もアーチを形成しやすい。2番目は多くの場合100:0の混合率であるが、橋脚Noseが傾斜した時のb_1=26㎝の時だけは50:50の混合率の方がアーチを形成しやすい。
⑤橋脚Noseの傾斜の影響は、混合率が75:25の時はあまり違いはないが、混合率が50:50の場合はNoseの傾斜によってアーチ形成の傾向にやや違いがある。

(6)氷盤によるアーチ形成と氷盤形状の関係

以下には氷盤によるアーチ形成と氷盤形状の関係についてまとめる。
①円形の模型氷では、特殊な場合を除いてArchingは発生しない。ただし、一般的河川においては、円形の浮氷盤の流下は極めて稀である。

(7)発寒川でのアイスジャム発生に関する模型実験

以下には発寒川でのアイスジャム発生に関する模型実験についてまとめる。
①現地調査結果から、長栄橋上下流での水深の大きな違い、落差工部での水面形状、上流部の積雪密度等から、長栄橋位置でアイスジャムによる河道閉塞が発生したことはほぼ間違いない。
②現地調査に基づいて行った模型氷盤による室内実験結果から、流量が徐々に増加する初期の段階で、長栄橋の橋脚位置には、氷盤によるアーチが形成されていた可能性が極めて高いことがわかった。
③以上のことから、今回の急激な出水は、長栄橋の橋脚位置に出来た氷盤アーチが、後から流下する氷盤や氷片をトラップしアイスジャムに成長した。流下圧力がアイスジャムの強度を上回ったために崩壊が起こり、急激な出水となったと結論される。この時、アイスジャムの骨格をなす氷盤の間は雪が詰まり、ほぼ完全に流水の通過がストップしたと思われる。

(8)氷盤によるアーチ形成を考慮した橋脚間隔の決定法

以下には、氷盤によるアーチ形成を考慮した橋脚間隔の決定法についてまとめる。
①架橋地点における、融氷期の流速、氷盤の形状（辺長、氷厚）等を、ある程度把握することによって、アーチを形成しない橋脚スパンを設定することが可能である。
②大きな氷盤の混合率が面積比で30%を越えると、大きな氷盤が100%の場合とほぼ同じアーチ形成条件となることから、現地調査において、氷盤サイズが大きな方から面積比で30%を占める氷盤の辺長を把握することができれば、その辺長によって、橋脚スパンを決定することが可能である。
③しかし、現状では野外でそのような調査を行うことは困難であり、最も大きな氷盤サイズで設計を行うことが現実的であるといえる。

3．11　参考文献

1）山口甲、西村豊(1973)：河川の水温と結氷に関する研究、土木試験所月報、No.238
2）財団法人北海道開発協会(1991)：天塩川治水史
3）上田俊也、山下俊彦、榎国夫、原文宏、佐伯浩、折谷徳弘(1992)：氷盤の移動速度と流体抵抗、第８回寒地技術シンポジウム論文集、pp.28-431
4）榎国夫、上田俊也、北条紘次、村木義男、原文宏、佐伯浩(1992)：氷盤に作用する流体力と氷盤の移動速度に関する研究、平成４年度日本雪氷学会全国大会講演予講集、p.62
5）佐藤昌志、山内敏夫、原文宏、佐伯浩、阿部正明(1993)：天塩川の氷の移動に関する研究、第９回寒地技術シンポジウム論文集、pp.646-653
6）山下彰司、小林正隆、宮昭彦、平山健一(1993)：北海道における河川結氷について、第９回寒地技術シンポジウム論文集、pp.640-645
7）原文宏、佐伯浩、今泉彰、大久保周一郎(1994)：アイスジャム発生による流量の急変、第10回寒地技術シンポジウム論文・報告集、pp.462-470
8）原文宏、高橋良正、佐伯浩、山口甲(1994)：天塩川の Break-up 現象の現地観測、第10回寒地技シンポジウム論文集、pp.456-461
9）Ryvlin, A. Ya(1973): Experimental Investigation of Friction of Ice, Trudy AANII, Vol.309, pp.186-199
10）Mehmet Secil Uzuner(1975): Stability of Ice Blocks Beneath an Ice Cover, Proceedings of Third International Symposium on Ice Problems, pp.179-185
11）Gino Casassa, Hideki Narita and Norikazu Maeno(1991): Shear Cell Experiments of Snow and Ice Friction, Journal of Applied Physics, Vol.69, No.6, pp.3745-3756
12）榎国夫、国松靖、原文宏、藤井綱男、佐伯浩(1993)：サロマ湖における流氷侵入防止に関する模型実験、海岸工学論文集、第40巻、pp.712-722

13）「Marine, Offshore and Ice Technology」Fumihiro Hara（分担執筆）：Ice Control using a newly developed ice boom, Computational Mechanics Publications, 1994
14）Fumihiro Hara, Takaharu Kawai, Masakuni Hanada, Akifumi Nishihata, Hiroshi Saeki(1996): Movement of Ice Blocks under an Ice Cover, Proceedings of The 13th International Symposium on Ice, Vol.2, pp.769-778
15）原文宏、河合孝治、花田真州、佐伯浩(1996)：結氷河川における定着氷先端部での氷盤の運動に関する研究、第12回寒地技術シンポジウム論文・報告集、pp.480-483
16）河合孝治、原文宏、西畑昭史、佐伯浩(1996)：氷盤相互の摩擦係数に関する研究、第12回寒地技術シンポジウム論文・報告集、pp.484-490
17）原文宏、河合孝治、正木智、佐伯浩、山口甲(1996)：ダム湖の氷盤を用いた摩擦係数に関する現地実験、第12回寒地技術シンポジウム論文・報告集、pp.1025-1028
18）F. G. Bercha and Associates(1987): Northumberland Strait Crossing Ice Climate Study (Final Report), Public works Canada, 1987
19）神保元二編著(1985)：粉体ー理論と応用、丸善
20）三輪茂雄著(1981)：粉体工学通論、日刊工業新聞社
21）榎国夫、原文宏、国松靖、大下史、大平正治(1991)：氷盤のアーチ形成に及ぼす橋脚の影響、第７回寒地技術シンポジウム、pp.632-637
22）榎国夫、国松靖、大平正治、村木義男、佐伯浩(1991)：新型 Ice Boom の開発、第７回寒地技術シンポジウム論文・報告集、pp.638-643
23）榎国夫、国松靖、佐伯浩(1992)：橋脚による氷盤の arch 形成条件に関する実験的研究、水理講演会論文集
24）Calkins, D. J.(1988): Arching of Model Ice Floes at Bridge Piers Proceeding of IAHR International Symposium on ice, Vol.2, pp.495-507
25）原文宏、国松靖、藤井綱男、畠山典晴、榎国夫、佐伯浩(1992)：橋脚による移動する氷盤のアーチ形成条件に関する研究、第８回寒地技術シンポジウム論文集、pp.379-387

26) 国松靖、秋原真哉、榎国夫、高木雄一郎、原文宏，佐伯浩(1992)：氷盤の大きさに関する研究、第８回寒地技術シンポジウム論文集、pp.417-422
27) Hara F., Kunimatu S., Saeki H. and Enoki K.(1993): Study on Drift Ice Control Utilizing Arch Formation of Ice Floes, Proceeding of International Offshore and Polar Engineering Conferences, Vol.2, pp736～741
28) 国松靖、原文宏、高橋良正、佐伯浩、榎国夫、今泉章(1993)：オホーツク海沿岸部の流氷盤の大きさに関する研究、海洋開発論文集、Vol.9、pp.95-100
29) K. Enoki, S. Kunimatu, F. Hara, T. Fuji and H. Saeki(1993): Model Tests on Controlling Ice Floes Movement at the Inlet of the SAROMA Lagoon, Proceedings of The 12th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Vol.2, pp.651-660
30) F. Hara, S. Kunimatu, Y. Muraki, K. Enoki and H. Saeki(1993): Arch Formation of Ice Floes at Bridge Structures, Proceedings of The 12th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Vol.2, pp.497-506
31) F. Hara, S. Kunimatu, H. Saeki, K. Enoki and Y. Muraki(1993): Study on Drift Ice Control Utilizing Arch Formation, Proceedings of the Third international Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.2, pp.736-741
32) 原文宏、国松靖、大久保周一郎、大久保泰弘、佐伯浩(1993)：氷盤のアーチ形成条件におよぼす橋脚形状及び氷盤形状の効果、第９回寒地技シンポジウム論文集、pp.654-659
33) 原文宏、国松靖、藤井綱男、広神孝俊、畠山典晴(1993)：構造物による浮氷盤群のアーチ形成条件、第８回オホーツク海と流氷に関するシンポジウム講演要旨集、pp.127-134
34) 原文宏、榎国夫、佐伯浩(1995)：橋脚形状が氷盤のアーチ形成に及ぼす効果に関する研究、水工学論文集第３９巻、pp495～507
35) 榎国夫、国松靖、広神孝俊、藤井綱男、原文宏、佐伯浩(1992)：大規模構造物による流氷のアーチ形成条件に関する実験的研究、第８回寒地技術シンポジウム論文集、pp.281-284

36) 榎国夫、原文宏、国松靖、藤井綱男、神山勝博、佐伯浩(1992)：サロマ湖口における浮氷盤の移動制御模型実験、第８回寒地技術シンポジウム論文集、pp.388-393
37) 笹島隆彦、安田修、榎国夫、国松靖、原文宏、佐伯浩(1992)：湖沼へ流入する流氷の制御法について、第８回寒地技術シンポジウム論文集、pp.394-399
38) F. Hara, S. Kunimatu, H. Saeki(1994): Condition of Arch Formation by Ice Floes at Bridge Piers, Proceedings of the 12th International Symposium on Ice, Vol.2, pp.867-873
39) 原文宏、榎国夫、佐伯浩(1995)：橋脚形状がアーチ形成条件に及ぼす効果、水工学論文集、第39巻、pp.607-612
40) Smith, C. D.(1981): Model Study of Ice Movement at Idylwyd Traffic Bridge, Proceeding of IAHR International Symposium on Ice, Vol.1, pp.436-447
41) Babic, M., Shen, H. T. and Bjedov, G.(1990): Discrete Element Simulation of River Ice Transport, Proceeding of IAHR International Symposium on Ice, Vol.1, pp.564-574
42) Melanie Schachter and Don Spenser(1994): Parameters Influencing Ice Arch Formation, Proceeding of IAHR International Symposium on Ice, Vol.2, pp.847-856

第４章　結　論

４．１　第１章の要約

結氷河川の水理特性を整理するとともに北方圏諸国や我が国における氷盤移動による橋梁の被害状況を把握し、設計上考慮すべき事項をまとめた。また、米国、カナダ、旧ソ連の橋梁設計基準から氷に関する部分を抽出し、どの程度考慮されているのかを把握するとともに、設計上考慮されるべき事項について既存研究の現状を整理し、本研究において取り組むべき項目を示した。

結氷河川における氷盤による橋梁の被害状況についてカナダにおける調査結果や北海道において著者等が行った調査をもとに、設計上検討が必要な項目について整理を行い以下のような項目を抽出した。

①橋脚へ作用する水平方向氷力
②橋脚へ作用する鉛直方向氷力
③橋脚の氷盤移動による摩耗
④アイスジャムによる氷力及び局所洗掘
⑤アイスジャムによる河道閉塞(洪水)
⑥氷盤の連続的な破壊による橋脚の振動

水平方向氷力については、各国の橋梁設計基準に具体的な規定があるほか、数々の氷力式が提案されており、各提案式の評価が行われ佐伯等の式が妥当とされている。また、鉛直方向氷力につても構造物と氷盤の凍着形態ごとに算定式が確立されいる上、我が国の氷象条件からみて、コンクリート製橋脚が鉛直氷力で被害を受けることはほとんどないといえる。ただし、ダムの取水塔や桟橋の支柱などスレンダーな水理構造物については、充分に考慮する必要がある。

橋脚の氷盤移動による摩耗は、各国の設計基準のなかでも対策の必要性についての記述はあるものの、具体的な設計法や対策工法について述べられているものはない。摩耗メカニズムについては、海氷と海洋構造物の問題として佐伯等や伊藤等によって明らかにされている。また、淡水氷については、著者等や高橋等の研究があるものの、コンクリート以外の材料への摩耗特性、摩耗対策の設計法、設計定数等については確立されていない。

橋脚位置で発生するアイスジャムは、氷力として橋脚や上部構造に作用する場合と河道を狭くすることによる橋脚周辺の局所洗掘、完全

な河道閉塞による洪水等がある。設計上は、アイスジャムを発生させない方法とアイスジャムが発生しても充分な強度や橋脚根入れ、河道空間を確保する等の方法があるが、その発生メカニズムや形態等に未知な部分が多く、ほとんど確立されていないのが現状である。

橋脚位置での氷盤の連続的な破壊による橋脚の振動は、振動が橋脚を拘束した状態で発生するため、変形量の大きい、構造物の破壊に結びつくような共振現象が発生する確立はほとんどない。どちらかといえば、振動による疲労破壊に注意すべきである。しかし、氷盤による橋梁の被害事例をみても、振動で破壊したり、損傷があった報告はなく、一般的なコンクリート製橋脚では考慮する必要はない。ただし、スレンダーな橋脚の場合や極地のような氷象条件の厳しい大河川に高橋脚を建設する場合などには検討をする必要がある。

４．２　第２章の結論

氷盤による橋脚の摩耗について結論を以下に列記する。

（１）摩耗した橋脚の現地測定

①年間の摩耗量(㎜/年)は、ボスニア湾の海中灯台で 0.7～７㎜/年、北海道の橋梁橋脚で 1.06～4.09 ㎜/年であった。そのうち、新橋(網走川)は摩耗以外の影響も強いことから、それを除くと 0.68～1.06 ㎜/年である。

②以上のことから判断して北海道内の橋梁橋脚の氷盤移動による摩耗量は、１㎜/年が最大値であることを明確にした。

③網走川にかかる新橋では、下流川も摩耗が起こっており、流氷の遡上による影響と考えられることから、オホーツク海沿岸の河口部にある橋脚は、上流側だけでなく下流側にも対策が必要である。

（２）摩耗試験装置の評価

①氷盤移動によるコンクリート表面の摩耗試験装置の具備すべき条件を構造物と氷盤間の相互作用や諸材料と氷間の摩擦あるいは、氷そのものの力学特性等の研究成果に基づき明らかにした。

②すでに開発されている７種類の摩耗試験装置の摩耗の基本原理を明らかにするとともに、その特徴と欠点を明らかにした。

③各試験装置について、氷とコンクリート間の摩耗試験としての９つの具備すべき点ついて評価を行い、氷による摩耗現象の再現性からみて滑動摩耗試験装置が適当であることを明らかにした。

（３）各種材料の摩耗特性

①コンクリートの摩耗は、摩耗距離の増加とともに平均摩耗量は増加する。また、その傾向はコンクリートの強度や骨材の違いに関係なく同じである。

②コンクリートの摩耗は、摩耗の進行にともなって３段階に分けられる。コンクリートの表面から 0.25 ㎜の深さの範囲(Surface Region)では摩耗速度Ｓ＝0.005 ㎜/㎞、摩耗深さ 0.25 ㎜＜Ｓ＜0.60 ㎜の範囲(Transition Region)では、0.044 ㎜/㎞、摩耗深さが 0.60 ㎜を越えると(Stable Region)0.012 ㎜/㎞となり、その後は一定の摩耗速度で継続する。

③コンクリート供試体を表面から １㎝切断して行った実験では、Stable Region の場合と同じ摩耗速度となることが確認された。

④コンクリートの摩耗速度は、氷温が－10℃以下となると急激に増加し、－10℃以上ではほぼ一定の値をとる。

⑤鋼はコンクリートとは異なり、Surface Region と Stable Region の２領域で摩耗が進行する。

⑥鋼の摩耗速度は 0.0027 ㎜/㎞で、コンクリートの 1/4～1/5 である。

⑦鋼は氷温の低下とともに摩耗速度も直線的に増加するが、その増加量はわずかであり、コンクリートのように－10℃以下で急激に増加することもない。

⑧合成材料は、鋼と摩耗形態、摩耗速度ともに同様の傾向を示した。しいてあげれば、ＬＤＰＥの耐摩耗性能が優れているが、その差はわずかである。

⑨石材の摩耗量は摩耗距離に比例するが、各種石材により摩耗速度は大きく異なる。また、同じ安山岩でも成分や採石場所による違いが顕著である。

⑩砂岩や安山岩の摩耗速度はコンクリートの約 1/3 であり、耐摩耗材として優れており、石材を用いれば美観上も良い。

⑪石材に含まれる粒子の大きさが小さければ石材の摩耗速度は小さく、石材の一軸圧縮強度が大きいほど摩耗速度は小さい。

（４）氷盤と橋脚表面の接触圧力

①直立型の橋脚は矩形 Nose の場合、平均接触圧力は理論氷力式からは(1.06～1.64)・σｃとなり、実験式からは(0.43～0.48)・σｃとなるが、局部氷力(局部接触圧)の現地計測結果からは(2.60～6.50)・σｃとなった。安全側を考えて 4.5 σｃを採用することが望まれる。

②半円断面形の場合は、氷力式から求められる平均接触圧は、edge が直線の場合(0.32～0.35)・σｃ、edge が Nose に密着状態の場合は(0.83～0.91)・σｃ、現地計測された最大接触圧力は 6.28・σｃであった。

③ Nose が楔形の場合は Korzhavin の平衡式と佐伯等の実験氷力式から、平均接触圧力は 0.25 σｃとなる。

④傾斜型橋脚で、半円断面を有する場合の接触圧力は未だ実験は行われていないが、平山等の氷力式と若干の測定を用いると平均の接触部分は(0.31～0.35)・σｃとなることが明らかとなった。

⑤氷の一軸圧縮強度は三軸圧縮強度を超えないころが確認されており、その値は 4.5 σｃであることから、設計上は 4.5 σｃで安全側である。

⑥橋脚形態としては、くさび形で傾斜 Nose が接触圧力の低減効果が高い。

(5)淡水氷の強度の影響

①多雪地帯の河川や湖沼における氷盤は柱状氷と雪氷とが層をなしており、きわめて不均質な氷となっている。

②多雪地帯の不均質な氷の一軸圧縮強度、圧縮弾性率は同じ密度の氷に比べてバラツキが大きい。

③過去の研究では、海氷の場合、動弾性率を求めることにより強度を推定することができるとされているが、天塩川のような多雪地帯の氷盤は不均一なため、そのような関係は明確ではない。しかし、最大の強度について直線的な比例関係を示した。

④多雪地帯の河川氷盤は、強度、弾性率、密度、動弾性率に層による違いはみられない。

⑤設計氷強度の決定は目的によって使い分けをしなければならない。橋脚の摩耗や橋脚に作用する氷力等構造物の設計にあたっては、安全側にみて純氷に近い氷強度が重要となる。しかし、支持地盤や交通路として氷盤を利用するためには氷盤の耐荷力が問題となる。この場合には雪氷の混じった不均一な氷盤の強度を設計定数とする必要がある。

(6)氷盤中の固形成分の影響

①天塩川の河川氷盤は、上から雪、雪氷(ゆきごおり)、真氷の順に層状構造をなしており、各層は数cm～数 10 cmの範囲で厚さが変化しており、複雑な構造となっていることがわかった。

②氷盤内の固形物質は、車両などによる汚染が見られ、橋梁下で高い含有量を示し、橋梁から離れるにしたがって減少する。含有量は、2層目の雪氷(ゆきごおり)で5 mg/l 程度、3層目の真氷が1～2 mg/l と氷盤部分は低い値を示したが、氷層に堆積している雪は氷盤に比較して高い含有量を示した。

③固形物質の中央粒径値は、シルト質以下の大きさで、橋から離れるにしたがって小さくなる。橋梁下では砂質分が多かった。

④網走湖の氷盤は、河川の場合と同様に固形物質含有量は岸から離れるにしたがって減少しており、湖岸を走る道路からの粉塵飛散の影響が明瞭に見られた。

⑤氷盤上の積雪に含まれる固形成分は、ほとんどの地点で氷盤中の含有量の2倍以上となったことから、積雪中の固形成分の氷盤中への移

動も考えられる。

⑥氷盤下の水体中の固形成分濃度は、雪や氷盤に比べて低濃度である。

(7) コンクリート製橋脚の摩耗量の推定

①コンクリート製橋脚の摩耗量推定式を導き、推定方法のフローを明らかにした。淡水氷による摩耗量は、$S = 0.0012 \cdot K \cdot \sigma_v$であたえられる。ここで、Kは氷盤中の固形成分濃度が一定の場合のある中央粒径値における摩耗速度を固形成分を含まない場合の摩耗速度で無次元かした値であり、σ_vは接触圧力である。

②1年あたりの摩耗量の算定には、摩耗速度に架橋地点での年当り氷盤移動距離を乗ずる必要がある。そのため、天塩川において航空写真撮影と現地調査を行い、最大の氷盤移動量が約 30 kmであることを明らかにした。天塩川が我が国最北の大河川で、唯一、南から北に流れる寒地河川という状況から考えて、我が国においては、天塩川以上の氷盤移動が発生する可能性はほとんどない。

③著者等の提案した摩耗量の推定式及び推定フローにしたがって、旧羽幌線天塩川橋梁において、摩耗量の推定を行った結果、水位変動による接触位置の変化を考慮することによって、実測値とほぼ一致した。

(8) コンクリート製橋脚の摩耗対策

①北海道内の河川結氷図及び積算寒度の分布と被害橋梁の位置から、被害橋脚の全てが結氷地域にあり、特に結氷率が高い道北やオホーツク沿岸の河川に被害橋脚が集中していること、被害橋脚が積算寒度700（度・日）以上の地域に分布していることが判った。これらを基に摩耗対策が必要な地域を明らかにした。

②コンクリート製橋脚の補修事例と氷盤と橋脚の摩耗メカニズムから、橋脚の摩耗防止対策として、被覆工法、かぶり厚増加工法、接触圧力低減工法の3つを提案し、それぞれの設計法を明らかにした。

③被覆工法は、コンクリートより耐摩耗性能が優れている鋼板、合成材料、石材等でコンクリート表面を被覆する工法で、被覆範囲及び各材料の耐摩耗性能を明らかにした。

④かぶり厚増加工法は、摩耗量の推定式にもとづいて耐用期間内の摩耗量を推定し、その分を予め見積もって構造形態を決定する工法である。摩耗量の推定のための設計定数である、氷盤の一軸圧縮強度及び接触圧力、氷盤中の固形物質濃度と中央粒径からの決まる無次元摩耗速度の決め方について明らかにした。

⑤接触圧力低減工法は、橋脚 Nose を傾斜させ、楔形断面とすることによって接触圧力を軽減し、摩耗量を減少させる効果が高いことから、接触圧力を低減させるために効果的な橋脚形状の提案を行った。

4．3　第３章の結論

橋脚位置でのアイスジャムの形成について結論を以下に列記する。

（1）アイスジャム発生河川の現地調査

以下には天塩川の Break-up の調査結果をまとめる。
①天塩川の開氷の経過は、1993 年及び 1994 年ともに、ほぼ同じような傾向をしめしており、中川町誉大橋から天塩大橋上流あたりまでの氷盤移動が活発である。
②天塩川（中川橋付近）の Break-up は、大きく４つの段階に分かれて進行していることが分かった。第１段階は定着氷下に氷片や小さな氷盤が溜まり通水を阻害する。第２段階では、水位上昇による流下圧力の増加。第３段階では、２基の橋脚が支点となって、氷盤の流下に抵抗するが、河川の中心部に橋梁から上流に向かって割れ目ができ、やがては開水面となる。第４段階は岸との定着部に亀裂がはいるとともに横断方向にも亀裂ができ、大氷盤が細分化し流下する。
③細分化された氷盤の大きさは１個がおよそ幅 30×長さ 50～100m 程度、流下速度は、2.1m/sec であった。
④橋脚に衝突した氷盤は激しく Crashing 破壊をおこしており、コンクリート橋脚の摩耗にかなりの影響がある。
⑤中川橋付近での Break-up の発生によって、極めて短時間の内に河口付近まで開氷が進むことがわかった。
⑥誉平観測所での水位低下は約２m（１時間）、新問寒別橋１m（３時間）、天塩大橋２m（12時間）をようしており、下流へいくほど水位低下が緩やかにおこる傾向を示している。
⑦誉平での、最高水位時の流量は約 204 m^3/sec であり、水位上昇前の約２倍の流量が流れた。

以下には、発寒川のアイスジャム発生について調査結果をまとめる。
①聞き取り調査によれば事故直前の河道内には、ほとんど水が流れておらず、出水は急激に起きた。
②上流の長栄橋はパイルベント式橋脚で約７m間隔に５基設置されており、流水の流れを阻害する要因となっていた。
③長栄橋の下流側の河道には、大量の雪が排雪されており、河幅の半分以上が常時閉塞された状況になっていた。

④この大量の雪がダムのような役割をし、流下物を右岸側へ押しやるように作用していたため、狭い河川断面に大量の雪や氷が一度に送り込まれた。
⑤長栄橋上流の流下部分と残存部分の境界位置での積雪深さが長栄橋に近づくにつれて高くなっており、流下が阻害されていたことを証明している。
⑥上流20m付近の雪の密度はおよそ0.57g/cm^{3}と非常に高く、かなり大きな流下圧力がかかったと思われることから、橋脚部分では閉塞に近い状態で流下が阻害されていたと考えられる。
⑦流下物の中には大量の氷盤が含まれており、残存している部分の観察から見て、氷盤が橋脚位置での河道閉塞に関与していたことが推測される。

以下には、アイスジャムの発生形態についてまとめる。
アイスジャムの発生形態は次の2つの形態に分類することが出来る。
①橋脚上流部の定着氷先端で流下氷盤がSlidingやUnder-turning等を起こし、定着氷盤下に潜り込むことにより、アイスジャムが形成される。この際、定着氷を介して、アイスジャムの氷力が橋脚に伝えられ、ブレークアップが発生する。
②流下氷盤が橋脚位置でアーチを形成し、その後から流下する氷盤をトラップして、アイスジャムが形成される。その後、徐々に流下圧力が増加し、アイスジャムの強度を上回るとアイスジャムは崩壊し急激な増水をもたらす。

(2)定着氷先端部でのアイスジャム発生に関する基礎実験
以下には定着氷先端部での氷盤の運動についてまとめる。
①流下氷盤が定着氷盤下に潜り込む形態として、Under-turning、Sliding、Half-turningの3種類に分類することができる。また、今回の実験ではPile upの形態は見られなかった。
②定着氷盤の先端部形状の違いにより、流下氷盤の運動形態に相違が見られた。矩形や上向きにカットした形状では、流下氷盤はUnder-turningで定着氷盤下に潜り込むが、下向きにカットした形状ではSlidingにより潜り込むものが比較的多く見られた。半円形では、氷厚が1 cmの時のみHalf-turningが見られ、その他は殆どUnder-turningの形態であった。
③無次元量h/Lを調べることにより、流下氷盤が定着氷盤下に潜り込む限界はフルード数Feによっておおよそ把握できる。また、これにより限界流速も計算することができる。
④先端部形状が矩形の時は、h/Lの増加に伴い限界フルード数は単調に減少しているが、半円形状や上向き45°にカットした形状では、ある氷厚を超えると限界フルード数はほぼ一定となる。

以下には浮氷盤の流体抵抗についてまとめる。
①氷盤に働く流体抵抗力(F_W)は、氷盤下面と水の摩擦によるせん断力(F_{SW})と水面下の氷盤が受ける形状抵抗力(F_{DW})の合力として表すことができる。
②実験結果を氷盤の長さLと流体抵抗力(F_W)を流速(V)の二乗で除した値の関係で整理すると、Lの増加に伴い、F_W/V^2はほぼ直線的に増加する。この直線の切片をβ、傾きをαとすると、αはせん断力(F_{SW})を意味し、βは形状抵抗力(F_{DW})を表している。したがって、せん断係数(C_{SW})は以下の値となる。
$C_{SW}=2\alpha/\rho_W=2_W/g\alpha$
③氷盤の条件が異なる模型実験結果を基にせん断係数C_{SW}を求めた結果、なめらかな氷盤の場合のせん断係数は0.007程度、氷盤下面には凹凸を付けたり比較的平坦な氷盤群は0.020～0.025の範囲、アイスジャムの時には0.1～0.3の範囲となった。したがって、氷盤下面が平坦な場合に比べ、アイスジャムの場合ではおよそ15～40倍にもなることから、流体抵抗が氷盤下面の粗度に大きく依存することと、アイスジャムが発生したときには極端に流体抵抗が増加する。
④氷盤下面の凹凸の間隔と溝の深さの比S/kが7.5付近で流体抵抗力F_Wは最大となる。
⑤実験流速が15 cm/secを越えると、氷盤は非常に不安定な状態となり、アンダーターニング等を起こしアイスジャムを形成する可能性が高い。

以下には実際の河川氷を使用した氷盤相互の摩擦係数についてまとめる。
①氷盤接触部が乾燥した状態での静止摩擦係数μ_Sは、速度が速くなるとやや減少する傾向が見られたが、柱状氷と雪氷の違いによる摩擦係数への影響は殆ど見られなかった。動摩擦係数μ_Kは、速度に関係なくほぼ一定の値となった。
②定着氷下面と潜り込んだ氷盤の摩擦係数は、摩擦力だけの摩擦係数

に比べて４～５倍の見かけの摩擦係数になることがあると推測される。
③垂直抗力との関係では　以上では静止摩擦係数はほぼ一定となった。また、動摩擦係数は垂直抗力の大きさに関わらずほぼ一定となった。
④氷盤接触部が濡れている場合には、静止摩擦係数、動摩擦係数とも速度による大きな依存は見られなかった。しかし、乾燥した状態に比較して摩擦係数のバラツキは大きくなった。
⑤全体的な傾向として乾燥した場合に比べ、摩擦係数の値は大きくなっている。

以下には実際の湖氷を用いた摩擦係数に関する実験についてにまとめる。
①氷盤の垂直抗力Ｆは、ほぼ氷盤の長さＬに比例した。
②摩擦力は、厳密な意味での氷盤と氷盤の摩擦力ではなく、流体による形状抵抗力等、他の要因も含んだ見かけ上の摩擦力である。
③動摩擦係数はμ＝0.001～0.005となり、非常に小さな値となった。これは、氷盤間にある水が潤滑剤的な役割をしていたためと思われる。
④静止摩擦係数は、柱上氷－雪氷でμ＝0.62、柱状氷－柱状氷でμ＝1.06となり、動摩擦係数に比べかなり大きな値となり、表面の滑らかな柱状氷の方が大きな値となった。
⑤雪氷－柱状氷の場合には、雪氷の凹凸が大きいために接触面積も小さく、氷盤間にある水の量も多いことが摩擦係数を小さくしていると考えられる。
⑥氷盤が定着氷盤下にスライディングによって潜り込むときには、まず動摩擦の状態となるため、氷盤に働く摩擦力は非常に小さく、氷盤はそのまま定着氷盤下を滑っていくものと思われるが、アンダーターニングによって潜り込むときには、まず静止摩擦の状態となるため、定着氷盤下で停滞する可能性が高く、アイスジャムを形成しやすい。

（３）橋脚位置での氷盤によるアーチ形成条件に関する実験

以下にはフルードの相似則についての実験結果をまとめる。
① 10 cmの模型氷と３cmの模型氷のArchingの限界曲線は、ほぼ一致することから、フルード相似則が成り立つことがわかった。ただし、今回の実験では比較的ゆっくりとした表面流速についての結果であり、流速を早くした時の検証が必要である。

（４）氷盤の大きさが均一な場合のアーチ形成条件

以下には氷盤の大きさが均一な場合のアーチ形成条件に関する実験結果についてまとめる。
①橋脚の断面形状が半円形に比べて、くさび形や矩形の方がArchingを起こしやすい傾向が見られた。ただし、使用した模型氷が正方形であることから、くさび形や矩形の方が組合せが良かったことが考えられる。
②また、橋脚Noseが傾斜した場合、90°の場合と比べて全般的にArchingが出来やすい傾向がある。この傾向は、半円形断面ではそれほど顕著ではないが、くさび形や矩形でやや顕著となり、流速が遅いほどこの傾向は強くあらわれた。

（５）氷盤の大きさが不均一な場合のアーチ形成条件

以下には氷盤の大きさが不均一な場合のアーチ形成条件についてにまとめる。
①矩形断面橋脚、半円形断面橋脚ともに全氷盤面積にしめる10 cm氷盤の面積割合（Ａ）が一定以上になると10 cm氷盤が100％の場合とほぼ同じ氷盤の水面カバー率（Ｑ）でアーチを形成した。
②Ａの値が矩形断面では0.70、半円形断面では0.40付近から10 cm氷盤だけの場合とほぼ同様のＱでアーチが形成されることから、半円形断面の橋脚の方がアーチを形成する際に大きな氷盤の影響を強く受ける。
③２種類の模型氷盤を使った今回の実験では、10 cm氷盤が100％の場合よりも５cm氷盤が一定割合で混合された場合の方がアーチは形成しやすい結果となった。最もアーチを形成しやすい氷盤の混合率の時のＡの値が矩形断面、半円形断面ともに0.30～0.40である。
④橋脚Noseの傾斜と混合率の関係は、橋脚Noseの傾きに関係なく、いずれの橋脚間隔の場合も75:25の混合率が最もアーチを形成しやすい。２番目は多くの場合100:0の混合率であるが、橋脚Noseが傾斜した時のb_1=26 cmの時だけは50:50の混合率の方がアーチを形成しやすい。
⑤橋脚Noseの傾斜の影響は、混合率が75:25の時はあまり違いはないが、混合率が50:50の場合はNoseの傾斜によってアーチ形成の傾向にやや違いがある。

(6)氷盤によるアーチ形成と氷盤形状の関係

以下には氷盤によるアーチ形成と氷盤形状の関係についてまとめる。

①円形の模型氷では、特殊な場合を除いてArchingは発生しない。ただし、一般的河川においては、円形の浮氷盤の流下は極めて稀である。

(7)発寒川でのアイスジャム発生に関する模型実験

以下には発寒川でのアイスジャム発生に関する模型実験についてまとめる。

①現地調査結果から、長栄橋上下流での水深の大きな違い、落差工部での水面形状、上流部の積雪密度等から、長栄橋位置でアイスジャムによる河道閉塞が発生したことはほぼ間違いない。

②現地調査に基づいて行った模型氷盤による室内実験結果から、流量が徐々に増加する初期の段階で、長栄橋の橋脚位置には、氷盤によるアーチが形成されていた可能性が極めて高いことがわかった。

③以上のことから、今回の急激な出水は、長栄橋の橋脚位置に出来た氷盤アーチが、後から流下する氷盤や氷片をトラップしアイスジャムに成長した。流下圧力がアイスジャムの強度を上回ったために崩壊が起こり、急激な出水となったと結論される。この時、アイスジャムの骨格をなす氷盤の間は雪が詰まり、ほぼ完全に流水の通過がストップしたと思われる。

(8)氷盤によるアーチ形成を考慮した橋脚間隔の決定法

以下には、氷盤によるアーチ形成を考慮した橋脚間隔の決定法についてまとめる。

①架橋地点における、融氷期の流速、氷盤の形状（辺長、氷厚）等を、ある程度把握することによって、アーチを形成しない橋脚スパンを設定することが可能である。

②大きな氷盤の混合率が面積比で30%を越えると、大きな氷盤が100%の場合とほぼ同じアーチ形成条件となることから、現地調査において、氷盤サイズが大きな方から面積比で30%を占める氷盤の辺長を把握することができれば、その辺長によって、橋脚スパンを決定することが可能である。

③しかし、現状では野外でそのような調査を行うことは困難であり、最も大きな氷盤サイズで設計を行うことが現実的であるといえる。

4．4　今後の課題

結氷河川に建設される橋脚の設計法としては、前述したように水平方向氷力については、すでにかなりの研究成果が上がっており、氷力の算定から橋脚の安定計算及び断面計算は技術的に確立されている。

また、本研究によって氷盤移動による橋脚の摩耗対策の設計法については、設計定数まで含めてほぼ確立することができた。この分野の今後の課題としては、稀にではあるが流氷などの衝突による橋脚表面の剥離がおこっている橋脚が見られれることから、オホーツクの河口で波の影響を受ける位置に建設されている橋脚については、そのような点も検討する必要がある。

次に氷盤による橋脚位置でのアーチ形成条件について、アーチを起こさない橋脚スパンの決定法を明らかにしたが、設計定数として実際の河川を流下する氷盤の大きさや分布については、まだ調査資料が少なく、架橋位置ごとに観測する必要がある。したがって、観測手法の開発を含めて、この種の基礎的な情報を野外調査によって収集する必要がある。

また、定着氷先端部にできるアイスジャムについては、そのメカニズムに関する基礎的な研究段階である。本問題の難しさは、Break-up時のアイスジャムの形状や密度、氷盤下面での氷の運動等が不明であることが大きい。現地調査を行うにも比較的短時間に急激におこることと、氷盤下でおこっているため肉眼での観察が難しい、融氷期であるために観測に危険を伴う等の理由でその詳細がわからないのが現状である。調査・観測手法や実験手法に関する技術開発が必要である。

本研究では、主に北海道の冬期河川調査から設計定数を決定し、設計法の検討を行ったが、基本的な設計手法は、どの地域においても適用可能である。したがって、北方圏での活用を考え北米、シベリア、北欧などの河川の氷象情報の収集により、それらの地域でも利用できる設計法に拡大していきたいと考えている。

謝　辞

私は橋梁の設計技師として社会人のスタートをきりました。その後、（社）北海道開発技術センターにおいて寒冷地における雪氷問題の調査研究に従事するにいたり、結氷河川と橋梁の問題に興味を持ったのが本研究の出発点でした。

北海道大学工学部佐伯浩教授には、研究当初からご指導を頂き、研究の視点、実験や調査方法、論文作成にいたる全ての面で、暖かいご助言、ご教示を頂きました。また、大学院在籍中に、海外で多くの論文発表の機会を与えて頂き、たくさんの研究者と知り会えましたことは、研究者としての視野の広がりと国際的な情報交換のネットワークとして私の大きな財産となりました。約10年間の研究成果をまとめ論文を完成することができました。ここに厚く御礼申しあげます。

北海道大学工学部の板倉忠興教授、藤田陸博教授、角田與史雄教授、城攻教授、山下俊彦助教授には本論文の審査を賜るとともに、貴重なご意見、ご教示を頂きました。北海道大学工学部橘治国助手、岩手大学平山健一教授、北海学園大学山口甲教授、秋田工業高等専門学校榎国夫教授には、結氷河川の水理や水質について数々のアドバイスを頂きました。北海道開発局　新山惇建設部長、中野修情報管理室長、開発土木研究所　佐藤昌志構造研究室長、札幌市　川端隆豊平土木事業所長、三井道路北海道支社　高橋陽一支社長には、調査や実験においてご支援、ご協力を頂きました。ここに厚く御礼申しあげます。

また、北海学園大学の坂上孝幸教授には、北海学園大学工学部卒業後も公私にわたり暖かい励ましを頂き、北海道大学大学院進学にあたっても多大なご助力を賜りましたことに感謝申しあげます。（社）北海道開発技術センター　佐々木晴美副会長、寺内祥作常務理事、袖野啓孝調査研究部長には、北海道大学大学院に進学する機会を与えて頂いたことに御礼申しあげるとともに、（社）北海道開発技術センター職員の皆さまのご支援に心から感謝申しあげます。

本講座の卒業生である折谷徳弘氏（北海道）、国松靖氏（運輸省）、高橋良正氏（運輸省）、大久保泰弘氏（五洋建設）、木岡信治氏（日立造船）ならびに花田真州氏（北海道大学大学院）、河合孝治氏（北海道大学大学院）をはじめとする本講座の学生の皆さまには、実験や論文作成に多大なご助力を得ました。ここに御礼申しあげます。

最後に、私の大学院での研究生活を応援してくれた妻　鈴恵、娘　宏江、文恵、父　二郎、母　光子に感謝いたします。