



Title	凍土・海水・池氷の曲げ強度及び圧縮強度の測定について
Author(s)	大浦, 浩文; OURA, Hirobumi; 木下, 誠一 他
Citation	低温科学. 物理篇, 15, 137-147
Issue Date	1956-11-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17918
Type	departmental bulletin paper
File Information	15_p137-147.pdf



凍土・海水・池氷の曲げ強度及び 圧縮強度の測定について*

大浦浩文 木下誠一

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和31年8月受理)

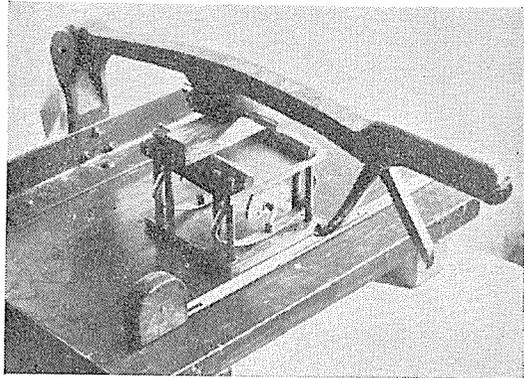
I. ま え が き

釧路市の電話線用マンホールが凍上で破壊したので、その調査を北海道電気通信局から依頼された。その際、我々はマンホールのまわりの上の断面を作つて地中温度の分布や、氷層の状況を調べると共に、凍土の破壊強度も調べることにした。そこで、持ち運びのできる簡単な測定器を作つて、天然の凍土の破壊強度を測定した。

丁度その頃、当研究所の海洋部門の人達が紋別市で海水の研究をしていた。見学のためそこに立寄つた際、海洋部門の人達の好意によつて用意された海水、池氷の破壊強度を上述の器械で測定することができた。

II. 測定装置及び測定方法

測定装置は第1図に示してある。2個の握力計を倒れないように平行に並べ、その上に厚さ1cmの鉄板が置いてある。この鉄板が受ける力は2個の握力計で受持たれ、それぞれの示す力の和としてあらわされる。握力計は倒れないで上からの圧力を受けることができるように、下の鉄板に植え込まれた全部で8本のドリルロットで支えられている。握力計の上に乗せられた鉄板には、ドリルロットよりも少し太目の穴が明けてあつて、ドリルロットに沿うて鉄板が自由に上下できるようになつている。



第1図 簡易圧縮・曲げ試験器。現在曲げ試験の用意がなされている。

圧縮強度を測るには、鉄板の上に試料

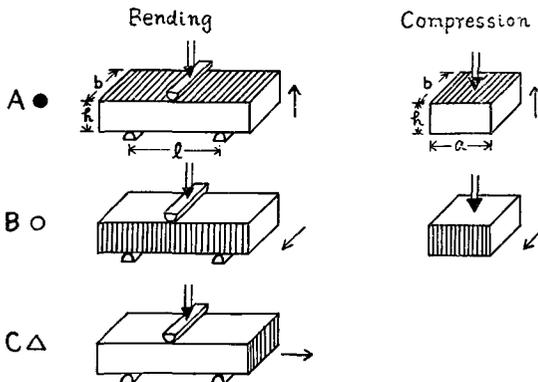
* 北海道大学低温科学研究所業績 第344号

を乗せ、その上に薄い鉄板を乗せ、それをハンドルで下に押えつけていく。こうして試料が破壊したときの握力計の読みから強度が算出される。

曲げ強度を測るには、第1図に示すように、2本の丸棒(断面をかまぼこ型にして転がらないようにしてある)の上に試料を乗せ、その上に1本の丸棒(この断面もかまぼこ型であるが、円壱面が試料に当るように平面部分は上側の鉄板に接するようになっている)を乗せ、この丸棒を薄い鉄板を介してハンドルによつて押し下げる。こうして試料が破壊したときの握力計の読みから曲げ強度が算出される。

この方法で測り得る最大の力は90 kgである。したがつて試料の断面も2 cm×2 cm程度の小さなものにしなければならない。

尚、凍土については釧路市の工業高校のアムスラー試験器を借用して、大きな試料につい



第2図 力の方向と試料の方向との関係による分類。

細い矢印は試料が採集される前の自然の状態に於ける上下の方向をあらわし、影を付けた面はその時に水平であつた。太い矢印は力の方向を示す。

ての曲げ試験、圧縮試験も行なつた。

凍土、海水、池水には、何れもその構造に方向性があるので、試料の作り方、力を掛ける方向によつて、いろいろな場合ができるが、我々は第2図に示してあるような3つの型式、すなわちA型式、B型式、C型式によつて測定した。以下、A、B、C型式による測定結果は、それぞれ黒円、白円、三角形の異なる記号で表わすことにする。

我々の試験器による荷重速度は約10 kg/sec程度で、応力の増加速度にすると2~3 kg/cm²·sec程度である。

III. 測定結果

a) 凍土

凍土の破壊強度は、第1表と第3図に示してある。

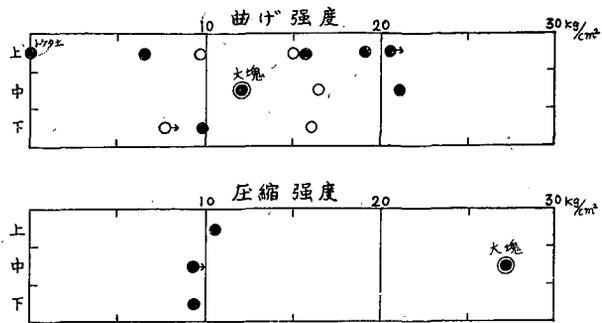
第2図に示すような曲げ試験の場合に、最大の引張応力を示すのは試料の下面の中央であるから、試料が破壊したときのこの最大応力の値を以て曲げ強度とする。

凍土の圧縮強度は試料の1部が欠けるか、ひび割れができるかしたときの圧縮応力の値を採つた。温度が0°Cに近く、粘性が大きいので、破碎しなかつた。したがつて破壊強度として破碎するときの値を使うことができなかつたのである。

試料は2つのマンホール鳥取8号、局前幹1号のまわりの土で、何れも埋立地であるため、粘土、泥炭質の土の他に、砂、石、木片、釘、其の他の夾雑物が混つていた。試料のうちで特

に強度に影響のありそうな夾雑物があるものは、表の備考欄にことわつておいた。

凍結はいわゆる霜降り状で、厚さ1 mm 程度、面積 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 乃至 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 程度の凸レンズを押しつぶしたような形のほぼ水平な氷の薄層が多数入っていた。霜柱状の凍結は唯1箇所だけで観察され、厚さ約3~4 mm、長さ5 cm 程度であった。試料 No. 1, No. 4 の氷層は路上の表面氷である。



第3図 凍土の曲げ強度と圧縮強度

第1表 凍土の破壊強度
圧縮強度

試料番号	大きさ $a \times b \times h$ 単位 cm^3	破壊力 kg	圧縮強度 kg/cm^2	試料採集地	密度	含水比	備考
1	$3 \times 2.8 \times 4.2$	83	10.7	鳥取 8上層			泥炭、表面に5~7 mmの厚さの氷層あり。
7'	$4.8 \times 1.9 \times 5.0$	96	9.3	" 下層			
10	$3.2 \times 3.0 \times 8.0$	scale out	>9.3	" 中層	1.8	0.69	
12	$7.5 \times 10.0 \times 8.0$	2000	27	局前幹-1 中層	1.8	0.44	加圧速度は10秒で1トン程度。

曲げ強度

試料番号	大きさ $l \times b \times h$ 単位 cm^3	型式	破壊力 kg	曲げ強度 kg/cm^2	試料採集地	密度	含水比	備考
2	$4.0 \times 3.1 \times 2.0$	B	31	15.0	鳥取-8上層			
3	$7.3 \times 3.7 \times 3.0$	A	56	19.3	"		0.50	
4	$6.0 \times 5.0 \times 3.0$	B	49	9.8	"		0.56	No. 1と同じく、6~8 mmの厚さの氷層あり。
5	$7.3 \times 3.5 \times 3.3$	A	54	15.6	"			径5 mm程度の石が混つている。
6	$7.3 \times 4.9 \times 5.2$	B	>93	>7.8	鳥取-8下層			
6'	$7.3 \times 4.8 \times 3.3$	B	76	16.0	"			
7	$7.3 \times 5.6 \times 3.0$	A	45	9.8	"	1.4	0.81	厚さ1 mm程度の氷層が霜降状に入る。
8	$7.3 \times 4.5 \times 2.5$	B	42	16.5	鳥取-8中層			
9	$7.3 \times 5.8 \times 3.3$	A	scale out		"			
9'	$7.3 \times 5.0 \times 3.0$	A	86	21.0	"			
11	$7.3 \times 5.4 \times 3.0$	A	>93	>20.6	局前幹-1 上層			
11'	$7.3 \times 4.5 \times 2.7$	A	43	6.4	"			No. 11'はNo. 11を削り、中の釘等を抜いたもの。気温+0.8°C。
13	$25 \times 20 \times 19$	A	2300	12.0	鳥取-8中層			加圧速度は1分間に1トン程度。

鳥取-8の凍土採集時の気温 -0.4°C 、地中温度は 上層 $-1^\circ \sim -2^\circ\text{C}$ 、中層 $-2^\circ \sim -3^\circ\text{C}$ 、下層 $-0.5^\circ \sim -1.5^\circ\text{C}$ 、凍結深度 62 cm.

気温はほとんど 0°C に近く、又地中温度も最低で -2.9°C であつたから、掘り出した土塊から試料を作るまでの時間を考慮すると、土の温度は 0°C 乃至 -2°C の範囲にあつたと思われる。

試料の含水比は、はじめの重量を W とし、それを 110°C で乾燥させた後の重量を W_0 とすると、 $(W-W_0)/W_0$ であらわされる。



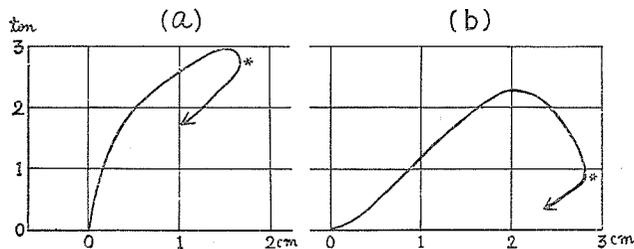
第4図 アムスラー試験機により曲げ試験を行なっているところ

試料 No. 12, No. 13 はアムスラー試験器によつて、それぞれ圧縮試験、曲げ試験を行つた大塊の試料である(第4図参照)。第5図(a)は圧縮試験における加圧板の降下距離と荷重との関係を、第5図(b)は曲げ試験の場合に上から押えた棒の降下距離と荷重との関係を示している。降下距離が大きくなるにつれて、はじめは荷重も増していき、ある程度まで降下すると、試料に割れ目ができて、降下距離に対する荷重

の増し方が小さくなり、遂に減少にむかう。この荷重の極大値を破壊荷重と考えることができる。但し、最初の破壊音はこれよりずつと前に聞かれ、試料 No. 13 (b 図参照) では、荷重が 1.5 ton のときに、めりめりと音がした。又、試料 No. 12 (a 図参照) では 2 ton のとき縦に割れ目ができた。尚、No. 12 は一旦荷重を取り除いたあとで再び荷重をかけていつた(加圧板を下げていつた)が、荷重は 2 ton を超えなかつた。それで、小さな試料の場合と同様に、圧縮の場合の破壊荷重としては最初にひび割れのできた荷重 2 ton を採用した。曲げ破壊の場合には破壊荷重として最大値 2.3 ton を採用した。

図の*印から先の曲線は、いままで降下させていた棒、或は板を上昇させたために得られたものである。

我々の試験器による小さな試料の試験の際にも、荷重の増加と歪の増加との関係は似たも



第5図 荷重と変形との関係

(a) 圧縮試験の場合。試料 No. 12. (b) 曲げ試験の場合。試料 No. 13.
縦軸：板 [(a) のばあい] 或は棒 [(b) のばあい] によつて試料に上から加えた荷重。
横軸：板或は棒の降下距離。

のであつたと想像できる。

試料 No. 12 では荷重をかけてから割れ目ができるまで 20 秒程もかかっているから、圧縮応力の増加速度は約 $1.5 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 程度で、小さな試料の場合と同程度であるが、得られた強度は 27 kg/cm^2 で約 3 倍である。

試料 No. 13 では荷重をかけはじめてから破壊荷重に達するまで約 2 分かかつたから、最大引張応力の増加速度は約 $0.1 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ である。得られた曲げ強度は 12 kg/cm^2 で小さな試料から得られた結果と同程度の大きさである。

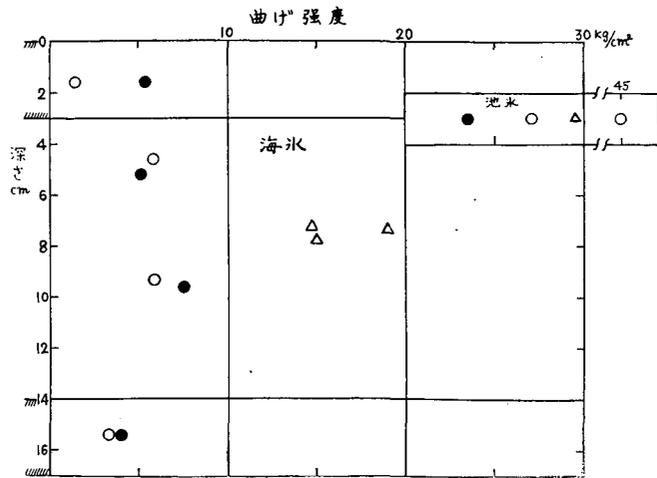
第 3 図の曲げ強度をみると、特に日射や温度の影響を受けたと思われる No. 11' や釘の影響のある No. 11 を除けば、力の加え方が A 型式の場合の方が、B 型式の場合よりも大きな強度を示すようである。

マンホール局前幹 -1 号の近くの土中には砂の部分混っていた。その砂の部分は鉛筆の先で簡単に掘ることができる程、強度の小さいものであつた。凍土の圧縮強度や凍着力 (露語で *sila smerzania*; 地中の木材、コンクリート等と凍土との附着力で、木材、コンクリート等の柱を地中から引き抜くために要する力で測る¹⁾ の文献によると²⁾、同じ含水率の砂土質土壤の強度は、沈泥質或は粘土質土壤の強度よりも大きい事になつている。しかし、温度が 0°C 乃至 -1°C 程度では、温度上昇 1°C 当りの強度の減少は砂土質土壤の方がずっと大きい。したがつて、この観測のように、砂の部分と、粘土質、砂土質粘土等と一緒に地中にあるときは、砂の部分の含水率は非常に小さいこと、又、観測時に於ける温度が高かつた事などからみて、砂の強度が非常に弱い事を説明できる。

(b) 海 氷

測定を試料を採取した海水は厚さ約 17 cm のものであつた。その上層約 3 cm は積雪にブラインが浸み込んで凍つたもので気泡も多く、結晶粒子も小さいものであつたが、それより深い層は海水特有の構造を示していた。すなわち、幅 5 mm、厚さ 1 mm 程度の深さの方向に長い短冊状の氷の板 (この板状結晶は c 軸に垂直な面から成つているから、自然の状態では c 軸は水平である) が 5~6 枚ずつ重なつたものが 1 組になつて、そういう組が集まつて海水の層を作つていた。そのうち深さが 14 cm よりも深い層は出来たばかりの新しい層で、短冊状の氷の厚さは薄く、短冊同士の間隔が広い、構造の粗いものであつたが、深さ 3 cm から 14 cm までのものはかなり構造の密なものであつた。この中層の塩分量は 1.64% であつた。尚この日の気温は 0°C であつたから、海水については融点以上の気温における実験であつた。

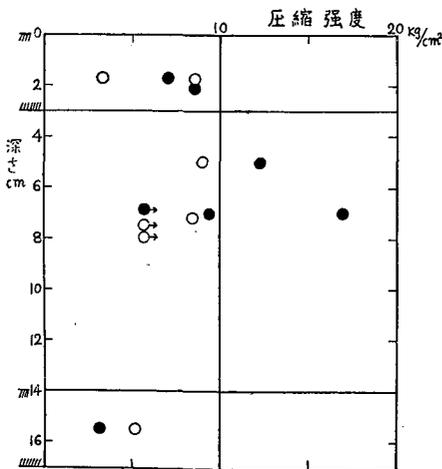
この様な海水に対して測定した結果を第 6 図、第 7 図に示してある。曲げ強度の意味は凍土について述べたものと同じである。また黒円、白円、三角形の記号はそれぞれ A 型式、B 型式、C 型式の測定結果を表わす。第 6 図でみると、曲げ強度について、A 型式と B 型式とのちがいは明かでないが、C 型式の強度は特に大きいことがわかる。これは海水の構造から云つても当然である。すなわち、最大引張応力の働く試料の下面の中央に於いて、A 型式と B 型式で



第6図 海水及び池氷の曲げ強度

は、引張応力の方向は短冊状の氷板に垂直な面内にあり、氷板をお互に引き離すように働くのに、C型式では引張応力の方向は氷板に平行で、氷板の1枚1枚を引きちぎる様に働く。したがって、前者の場合よりも、後者の場合が強度が大きいということは、氷板と氷板との結合力よりも、1枚の氷板内における分子間の結合力が、ずっと強いということから、当然出て来る結果である。

圧縮の場合は、A型式の力のかけ方では、1枚1枚の短冊氷はすべて鉛直に立っているのので、短冊氷の面の方向に働くりり力はない。また、短冊氷の集団同士のあいだの境界面にもりり力は働かない。しかし、B型式の力のかけ方では、短冊氷の面は特別のものを除いては、鉛直方向から傾いているので、その面内にりり力が働き、また短冊氷の集団の境界面に沿つてもりり力が現われる。このりり力のために、結合の弱い短冊氷間、短冊氷の集団間にりりが起り



第7図 海水の圧縮強度

やすくなるはずである。したがってB型式の力のかけ方の場合は、A型式の場合に比べて破壊強度が小さくなることが予想される。

事実、第7図をみると、中層の海水については黒丸(A型式)の平均値は約13 kg/cm²であるが、白丸(B型式)の平均値は約8 kg/cm²で、上に述べた議論の正しい事を裏づけている。

尚、第7図の圧縮強度は、前の凍土の場合とはちがつて、氷塊が破碎した場合における圧力から算出したものである。実は、破碎がおこるはるか以前から破壊音がきかれるのであつて、早いときには加えた力が破碎力の35%位のときに既に

聞かれた場合もあった。しかし、破砕するまで破壊音を聞くことができなかつた場合もある。しかし、破壊音がきこえても、氷の状態に著しい変化はみとめられないので、そのときに氷が破壊したとするのは不適當と考へた。それで氷が破砕したときを破壊のときとしたわけである。

Barns²⁾は河氷の圧縮の場合、破砕力の約半分の値で最初の破壊音を聞いたと報告しているが、我々の場合には、実験回数が少ないけれど、特に50%附近で多いというよりは、むしろ35%から100%まで一様に分布していると考へたほうがよさそうな結果になつた。

c) 池 氷

海氷の実験と同じときに、池氷についても測定を行なつた。池の氷については曲げ破壊のみが行なわれた。氷は透明であつたが、多少気泡がみられた。その結果は第5図に海氷と同じ図上に示してある。1例だけ特に大きな強度を持つていたが、後に述べるように、それでも、これまでの他の研究者達が得た結果の最大値よりは小さい。

IV. 他の研究者の結果との比較

a) 曲げ強度

1) 凍土 凍土の曲げ強度についての文献は見ることができなかつた。

2) 海氷 Veynberg⁴⁾の表(すべての値は -3°C における値にひき直してある)から、我々の用いた海氷の塩分量に近いものを拾うと、塩分2.0%, 力の方向C型式で 9.2 kg/cm^2 (36測定); 塩分1.0%, C型式で 12.3 kg/cm^2 (13測定), A型式又はB型式で 9.1 kg/cm^2 (27測定); 塩分1.6%, A型式又はB型式で 5.4 kg/cm^2 (15測定)である。Zubov⁵⁾はArnol'd-Alyab'evの仕事を紹介しているが、それによると2.2%程度の塩分量、 $-0.3^{\circ}\sim -1.7^{\circ}\text{C}$ で最小値 $3\sim 4\text{ kg/cm}^2$, 最大値 $7\sim 8\text{ kg/cm}^2$ である。又おなじくZubovの著書にあるBrunsとDeryuginとの結果によると、塩分の記載は無いが、非常に塩分の少ないと思われる海水について、気温 $-2^{\circ}\sim -22^{\circ}\text{C}$ で、曲げ強度は平均 20.4 kg/cm^2 である。BrunsとDeryuginとは曲げ強度は温度に無関係だと云つてゐるが、Veynberg其他の人達は温度との関係をはつきりと数量的に表現している。

これ等の結果と、我々の結果とを比較すると、C型式については我々の値がやや大きく、A型式、B型式については我々の値がやや小さい。

3) 純氷 温度が 0°C 附近の氷について曲げ強度を測定したものとして、Brown⁶⁾がセント・ローレンス河の氷について測つた値(24測定)があるが、 28°F (-2.2°C)で 171 lb/in^2 (12 kg/cm^2)であつた。彼は、この値は荷重速度にあまりよらないと云つてゐる。

Veynberg⁷⁾は -3°C における純氷の曲げ強度を、Brownの測定値も含めて、26例集めて表にしている。この表では、氷の種類として表面層の氷、深い層の氷、層が不明のものとして3つに大きく分け、各々について、力の方向がA型式のもの(純氷の場合には力の方向と結晶のc軸と平行)、B型式のもの(c軸は力の方向にも、試料の長さの方向にも垂直)、C型式のもの

c軸は試料の長さの方向に平行), 及び不明のものと4つに分けてある。全測定数は871回で, その平均値は $16.2 \pm 4.4 \text{ kg/cm}^2$ である。最大値はC型式によるHessの 59.6 kg/cm^2 (4測定)で, 最小値はA型式によるMaklashinの 1.4 kg/cm^2 (深い層の濁つた氷; この人が表層のきれいな氷について測定した値は 9.6 kg/cm^2 である。但し, 力の方向は不明)である。荷重速度のちがいでどうなるかはKorzhasinが速度の小さい場合 3.5 kg/cm^2 (15測定), 大きい場合 9.1 kg/cm^2 (25測定)を出している。

Hess⁹⁾のC型式による4つの測定のうち, 最大値は -3.6°C における 77^* kg/cm^2 で, 破壊するまで荷重をかけていた時間は3時間半である。

Dorsey⁹⁾は曲げ試験から算出した引張強度(我々がこの報告で曲げ強度と定義しているものと同じものであると思われる)の最大値として 69 kg/cm^2 という値を集録している。

最近, 1953年, 1954年の春先にオビ河の氷についてButyagin¹⁰⁾が行なつた測定によれば, A型式(幅0.7m, 長さ3mで厚さ0.4~1.0mの片持梁の曲げ試験)の曲げ強度は $1.9 \sim 4.8 \text{ kg/cm}^2$ であつた。

我々が得た結果はVeynbergの示した平均値 16 kg/cm^2 より大分大きい, 我々の得た $23 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ 程度の値はVeynbergの表にも普通にみられる。又, 我々は1つだけ特に大きい値 45 kg/cm^2 を得たが, これ以上の値も文献に見られるので, 測定上の欠陥によるものとは思われない。

これまでの文献には力の方向と結晶軸の方向との関係を示したものはあつても, そこで力をかけていた時間, 或は力を増していく速さ等に関する記述のあるものが少ないので, お互の結果を比較するのに不便である。

b) 圧縮強度

圧縮強度の文献は純氷についてのものが多いが, 我々は純氷については圧縮試験を行ななかつた。それで, 凍土と海氷についての文献だけを挙げる。

1) 凍土 凍土についてはMuller¹¹⁾がTsytoichとSumginとが測定した結果を紹介している。温度 $-0.3^\circ \sim -1.7^\circ\text{C}$, 含水率34~70%の場合, 沈泥, 粘土, 砂質粘土, 粘土質砂と粒が大きい程圧縮強度は大きく, $5 \sim 24 \text{ kg/cm}^2$ で, 温度が低い程強度は強い。凍結した砂の強度はこれ等よりずつと大きく, 30 kg/cm^2 を超えるものすらある。我々の結果は一応これ等の値の範囲に入っている。

2) 海氷 Veynberg¹²⁾の本には塩分1.6%, -3°C でA型式の圧縮強度として 17.5 kg/cm^2 (20測定)という値が出ている。この値は, 我々が, 海氷の中層からとつた試料について得た平均強度の約2倍の大きさである。

尚, 曲げ強度, 圧縮強度に共通なことであるが, 凍土にしても, 海氷にしても構造の単位

* 著者がHessの表より算出したもの。

がかなり大きいものであるから、試料の大きさによつて強度がちがってくる可能性がある。今後この点についての研究と、破壊に要した時間と強度との関係についての研究とがなされることによつて、お互の測定結果を比較する事ができるようになるであろう。

V. あとがき

1. 曲げ強度 凍土、海水、池水から $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 程度の大きさの試料を切り出して $2 \sim 3\text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 程度の応力増加速度 (最大引張応力の増加速度) で曲げ強度の測定を行なつた。

凍土は泥炭質、粘土質の土壤に石ころの混つたもので、凍結の様子は霜降り状の凍結と呼ばれるものであつた。得られた結果は $6 \sim 22\text{ kg/cm}^2$ であつた。土の温度は $0^\circ \sim -2^\circ\text{C}$ 。

海水は厚さ 1 mm 、幅 5 mm 程度の深さの方向に長い短冊状の氷板の集りであつた。海水の中層からとつた試料では、海の深さの方向に長い試料の曲げ強度は平均 16 kg/cm^2 で、水平方向に長い試料の強度の平均 6 kg/cm^2 よりはつきり大きな値を示している。(気温 0°C)。

雪と海水とが混つて凍つた海水上層部の強度 (水平に長い試料)、凍結後間もない海水下層の強度 (水平に長い試料) は何れも小さく、約 4 kg/cm^2 程度であつた。

池水の強度は、特に大きな値のもの 45 kg/cm^2 を除くと、平均 27 kg/cm^2 であつた。

2. 圧縮強度 凍土、海水から $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 程度の大きさの試料を切り出して、上と同程度の加重速度で圧縮強度を測定した。

凍土の平均強度は約 10 kg/cm^2 であつた。

中層の海水については、力の方向が海水面に垂直 (深さの方向に平行) な場合の平均強度は約 13 kg/cm^2 であるが、海水面に平行な力を掛けたときには、平均強度約 8 kg/cm^2 であつた。上層の平均強度は約 7 kg/cm^2 、下層の平均強度は 4 kg/cm^2 であつた。

3. 大きな試料についての試験 凍土については少し大きな試料について、アムスラー試験器を使つて強度を測定した。曲げ試験 (試料の大きさ $20\text{ cm} \times 19\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ 、加応力速度約 $0.1\text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$) で得られた結果と小さな試料についての結果とのあいだにはほとんど差が出なかつた。圧縮試験 (試料の大きさ: $7.5\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ 、加応力速度 $1.5\text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 程度) では強度として 27 kg/cm^2 という結果がでた。

おわりに、この仕事の上で大変お世話になつた北海道電気通信局施設部調査課の鈴木義彦課長、遠藤玄一郎技師に厚くお礼を申し上げる。又、海水、池水の研究については、いろいろ便宜を計つて下さつた当研究所海洋部門の楠宏助教授、田畑忠司講師、鈴木義男助手の諸氏に厚くお礼を申し上げる。最後に、この研究を終始御指導下さつた吉田順五教授に深く感謝する。

文 献

- 1) Veynberg, B. P. 1940 Lyéd (氷). 484. (Moskva, Leningrad).
- 2) 原田千三 1945 雪・氷・凍土. 203. (東京).
- 3) Barnes, H. T. 1928 Ice Engineering. 218. (Montreal).
- 4) 文献(1)に同じ. 214.
- 5) Zubov, N. N. 1945 L'dy arktiki (北氷洋の氷). 142-144. (Moskva). (低温科学研究所訳 67-70).
- 6) 文献(3)に同じ. 224.
- 7) 文献(1)に同じ. 210.
- 8) Hess, H. 1902 Elasticität und innere Reibung des Eises. Ann. der Phys. 8, 405.
- 9) Dorsey, N. E. 1940 Properties of ordinary Water-Substance. 448. (New York).
- 10) Butyagin, I. P. 1955 Issledovanie prochnosti ledyanogo pokrova r. Obi v vesenniy period (春季におけるオビ河水層の強度の研究). Meteorologiya i gidrologiya. No. 3, 42.
- 11) Muller, S. W. 1947 Permafrost or Permanently Frozen Ground and Related Engineering Problems. 39. (Ann Arbor).
- 12) 文献(4)に同じ.

Résumé

1. *Bending strength.* From the frozen ground, sea ice and pond ice, beams of the size about $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ were quarried out. The beam was laid horizontally upon two half-round steel bars placed parallel to each other on an iron base 7.3 cm apart and was pressed downwards at the centre of the span by the third steel bar which was placed on the top surface of the beam parallel to the above the other two. The largest tensile stress appeared on the bottom surface of the beam just under the third bar. The bending strength of the beam was defined as this largest tensile stress at the moment of its rupture. The rate of loading was about 10 kg/sec and the increasing rate of the largest tensile stress was about $2\sim 3\text{ kg/cm}^2\cdot\text{sec}$.

The soil was composed of silt and clay and sometimes contained small stones. A number of thin and nearly horizontal layers of ice whose area was from about $5 \times 5\text{ mm}^2$ to about $10 \times 10\text{ mm}^2$ and whose thickness was about 1 mm were embedded throughout the frozen soil. The bending strength of the frozen soil was found to be $6\sim 20\text{ kg/cm}^2$.

The sea ice was of such a structure that it was composed of small blocks of ice each of which was an assemblage of vertical strips of ice sheet about 1 mm thick and about 5 mm wide. The sample of ice taken from the middle layer of the sea ice showed the mean bending strength of 16 kg/cm^2 when it was cut out of the sea ice vertically and 6 kg/cm^2 when cut out horizontally. The upper layer of sea ice was composed of snow cemented by the frozen soaked brine while the lower layer was being young, composed of weakly cemented strips of ice sheet. The beam of ice taken horizontally from such layers showed a small value 4 kg/cm^2 of the mean bending strength.

As a strength of the pond ice, a particularly large value 45 kg/cm^2 was found in one case, but the mean value of the other cases was 27 kg/cm^2 .

2. *Compressive strength.* Cubic samples of the size about $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ were quarried out from the frozen ground and sea ice and were compressed with the same

rate of loading as in the case of bending test.

The mean strength of the frozen soil was about 10 kg/cm^2 .

Middle layer of sea ice showed the mean strength 13 kg/cm^2 when it was compressed perpendicular to the original horizontal surface and 8 kg/cm^2 when it was compressed parallel to it. The mean strength of upper layer and lower layer was 7 kg/cm^2 and 4 kg/cm^2 respectively.

3. *The tests by the use of large samples.* In the case of frozen soil, two large samples were put to the test by an Amsler's type testing machine in addition to the above described tests. The one of which the height was 19 cm, the breadth was 20 cm and the span was 25 cm was put to the bending test. The increasing rate of the largest tensile stress was about $0.1 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$. The bending strength obtained was of about the same value as that obtained with the small samples. The other sample of which the height was 8 cm and the section $7.5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ was compressed with the increasing rate of compressive stress about $1.5 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$. The compressive strength obtained was 27 kg/cm^2 which was three times as large as that obtained with the small samples.

The soil temperature was about $0^\circ\text{C} \sim -2^\circ\text{C}$. The sea ice and the pond ice were tested when air temperature was 0°C .