



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	コンクリートの凍害に及ぼす外的要因の影響とわが国の凍害危険度
Author(s)	長谷川, 寿夫; Hasegawa, Toshio; 洪, 悦郎 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 92, 59-67
Issue Date	1979-01-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41538
Type	departmental bulletin paper
File Information	92_59-68.pdf



コンクリートの凍害に及ぼす外的要因 の影響とわが国の凍害危険度

長谷川 寿夫* 洪 悦郎*
(昭和53年7月10日受理)

Influence of the External Weathering Factors on the Frost Damage of Concrete as a Reference for the Degree of Frost Damage of Concrete in Japan

Toshio HASEGAWA, Yoshiro KOH
(Received July 10, 1978)

Abstract

External factors due to weathering action are one of the main factors which cause the frost damage of concrete, and gives rise to and accelerates the frost damage of concrete. Several experiments were performed regarding the temperature conditions, such as freezing temperature, thawing temperature, freezing speed, frozen period and temperature change of freezing time, and the degree of saturation of concrete related to the weathering action.

On the basis of the experimental results related to the external factors, the value of risk of frost damage (V_F) was calculated and defined by using weather data during a typical winter of Japan. The degree of risk of frost damage (D_F) was determined by classifying the value of V_F into 6 grades considering the actual frost damage of concrete found in various districts in Japan.

1. はじめに

コンクリートの耐凍害性に影響を及ぼす要因は極めて多く、かつ複雑であるが、大別すれば、内的要因、外的要因、構造体要因および施工要因の4つに分けて考えることができる。これらの中で、外的要因は地域差の大きい気象作用によるコンクリートへの影響要因であり、凍結融解の温度条件と湿潤条件など、凍害の発生および促進の主原因となる冬季の凍結融解作用に関するものと、温暖期を含めた乾湿繰返し作用や温度変化作用など、凍害の誘因または自癒作用となる副次原因に関するものがある。この外的要因の影響に関する既往の研究は少なく断片的であり、筆者は、外的要因の中で凍害に支配的な影響をもち、特に凍害の発生と促進作用に最も影響力の大きい凍結融解作用に重点をおいた研究を進めた。この実験結果と屋外曝露試験体の挙動、ならびに日本の主要な凍害発生地域の実態調査とを勘案して、各地域の気象データより凍害危険度を算出し、グレード分けして凍害危険度として表示した。以下、これらの詳細について報告する。

2. 外的要因の影響

外的要因の中では、凍害の発生・促進要因が最も大きく影響する。これは地域の気象条件による凍結融解作用によるものであり、これをさらに凍結融解時の温度条件に関する温度要因と、そのときの内部の含水量に関する湿潤要因の2つに分けることができる。

2. 1 温度要因に関する実験的検討

凍害に対する影響を検討する必要がある凍結融解時の温度条件は、次の(1)~(5)の5つである。これらについて、硬化セメントペースト、コンクリート中のモルタル構成部分およびコンクリートによってその影響を調べた結果は、次のようにまとめられる。なお、供試体の凍結融解後の残留膨張は、凍害の指標として適用できるので、凍伸度と名付け²⁾、コンクリートでは 1000×10^{-6} を凍害破壊限界値として判断している。

(1) 凍結温度の影響 水セメント比60%の硬化セメントペースト（分離しないように回転させながら硬化させた）を封かんし、気中凍結融解試験を行なった結果を、図1に示す。また、水セメント比70%の各種骨材を使用したプレーン、AEコンクリートの水中凍結融解試験結果を、図2に示す。これによると、骨材の品質やAE剤の使用によってその影響量は異なるが、いずれも凍結温度の違いによって凍害に大きな差が生じ、凍結温度が低いほど凍害は大きくなる。良質骨材またはAE剤を使用したコンクリートの場合には、凍結温度 $-10 \sim -18^{\circ}\text{C}$ で凍害に大きな差を生ずる。一方、品質の悪い骨材を使用したAE剤を用いないコンクリートの場合には、凍結温度 -10°C までに大きな凍害を生ずることが明らかになった。

(2) 融解温度の影響 硬化セメントペーストの(1)と同様の実験による結果を、図3に示す。融解温度が低い方が凍害は大きくなり、AE剤を使用しても同傾向であるが、融解温度 $+5^{\circ}\text{C}$ と 20°C の違いであっても、いずれも大きな差ではない。

(3) 凍結速度の影響 水セメント比およびAE剤使用の条件を変えたモルタルによる実験結果を図4に、また、水セメント比70%の各種コンク

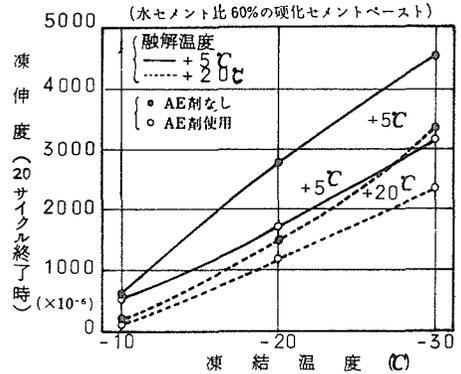


図1 凍結最低温度の影響

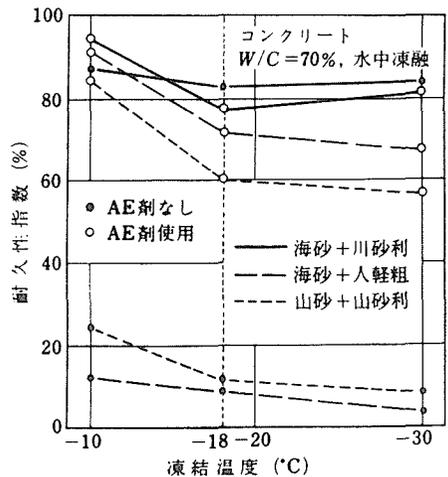


図2 凍結温度の影響

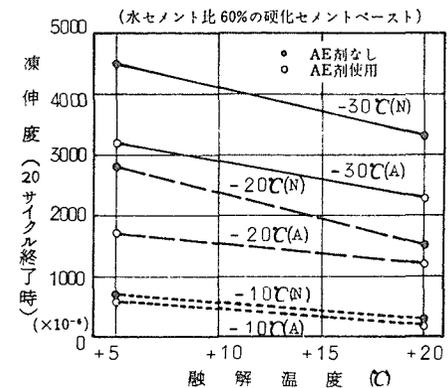


図3 融解温度の影響

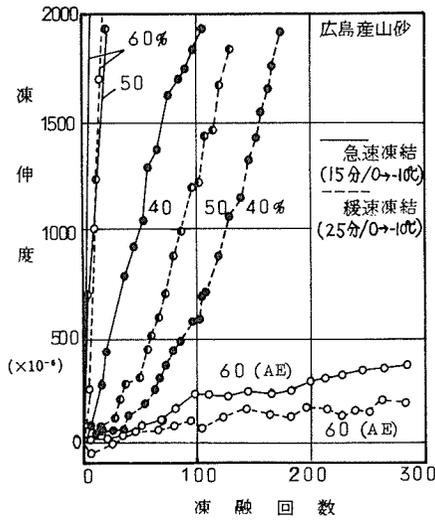


図4 凍結速度の影響（モルタル）

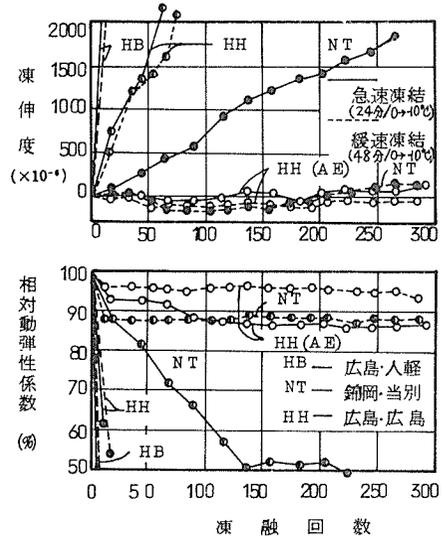


図5 凍結速度の影響（コンクリート）

リートによる実験結果を、図5に示す。これらによると、水セメント比、骨材およびAE剤の使用条件によって影響量は異なるが、いずれも凍結速度が速い方が凍害は大きい。水セメント比が大きい場合と骨材の品質が悪い場合には耐凍害性が小さく、凍結速度による差は小さい。また、AE剤を使用した場合にもその差は比較的小さい。自然界で起る凍結速度は、この実験条件よりも遅く、特にコンクリートの場合には、凍結速度の影響は小さいと考えられる。

(4) 凍結持続時間の影響 1日以内の凍結持続時間では、長い方が凍害は大きくなる。しかし、1日以上では大差なくなる。これらの傾向は、凍結温度が極めて低い場合（-30°C位まで）でも同様の傾向を示した。

(5) 凍結中の温度変化の影響 水セメント比60%の硬化セメントペーストによる実験の結果を、図6に示す。これによると、凍結中に融解には至らない温度変化があった場合にも、凍害はわずかに進行する。しかし、特にコンクリートの場合には、ほとんど無視できる。残留膨張は融解後に起こる傾向が明瞭であり、凍害は凍結だけで差が出るのではなく、それに続く融解が大きな意味を持つことが確認された。従って、凍結温度が低くても凍結したままの状態ならば、凍害を受ける可能性は少ない。

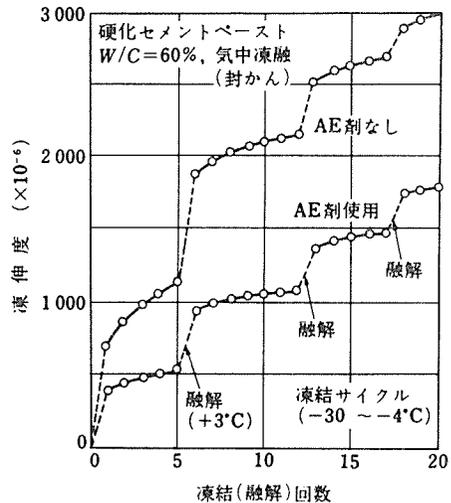


図6 凍結中の温度変化および融解の影響

以上の実験結果より、温度要因に関しては、凍結と融解の交互作用が凍害の主要原因であることが明らかになり、特にその温度条件が卓越することが確認された。実際の気象作用のもとでは、凍結融解繰返し数と凍結温度の差による影響が最も大きく支配的であり、凍害に地域差がでる大きな要因と考えられる。

2. 2 湿潤要因に関する実験的検討

普通骨材を使用した水セメント比70%のコンクリートの内部湿潤程度(含水程度)を変えて凍結融解試験を行なった結果を、図7に示す。これによると、凍害は内部湿潤程度のおおきな差によって著しく左右され、湿潤程度が大きいほど凍害は激しくなる。この実験では、コンクリート内部の全空隙量に対する湿潤空隙量の比で示される湿潤係数が約80%、すなわち容積含水率では16.5~17%volより大きくなると凍害現象が大きく現われている。一方、湿潤係数が約70%、容積含水率では14.5~15%volより小さければ凍害はほとんど起こらない。これらの現象は、ブレン、AEコンクリートともに認められる。このように、凍害の発生は湿潤程度のおおきな差で大きく左右され、このときのコンクリートの材令や強度の大小には、ほとんど関係しないことに着目する必要がある。

また、この実験と同一のコンクリートにより、札幌における冬季の屋外コンクリートの湿潤状態を測定した結果によれば、湿潤状態は主として融雪水によってもたらされるものであり、降雨によるものは少ない。融雪水に接する部位のコンクリートは、前述の湿潤程度を変えた凍結融解試験結果との対応により、凍害が発生し得る湿潤程度になっていることが明らかにされ、しかも一冬を通じて湿潤程度に大きな変化がないことも確認された。

3. 凍害危険度の表示法

各地域の凍害危険度の表示法は、既に平井により試案⁴⁾が出されているが、考慮すべき要因が欠けている。これに対して、外的要因についてのこれまでの実験結果より、筆者の表示法の基本的な考え方を反映させる改善案を考慮し、次の4点から表示することとて算出式にまとめた。

- i) 算出は主として気象資料より行なう
- ii) 各地域の年間凍結融解繰返し可能日数を求める。

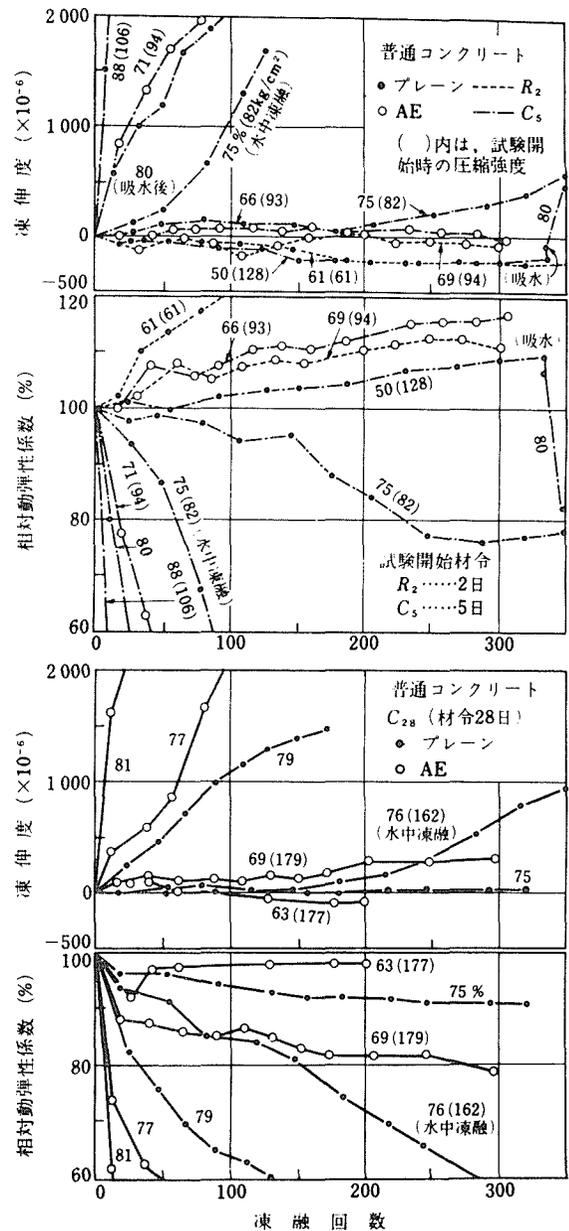


図7 湿潤係数と耐凍害性の関係

筆者の表示法の基本的な考え方を反映させる改善案を考慮し、次の4点から表示することとて算出式にまとめた。

- i) 算出は主として気象資料より行なう
- ii) 各地域の年間凍結融解繰返し可能日数を求める。

- iii) 凍結融解時の氷点下の温度差による凍害の差を考慮する。
- iv) 凍結融解時の湿潤程度を考慮する。

$$V_F = \{ \sum \{ (FT + F \times u) \times t \} + I \} \times c$$

- 記号 V_F : 凍害危険値
 FT : 外気温上の凍結融解日数
 F : 外気温上の凍結日数
 u : 日射による融解率
 t : 氷点下の温度差による凍害重み係数
 I : 凍結日の最低気温を考慮した算出上の補正值
 c : 湿潤程度による凍害軽減係数

(u, t, c は対象材料の凍害を考慮して定められる)

凍害危険値 V_F の算出式は、外的要因である温度・湿潤要因を一括して表現しており、 V_F の単位は係数を乗じているため無名数である。しかしこれは、各地域の一冬の凍害量を数値で示したものであり、仮に凍結温度条件を一定としてそのときの t の値で割ると、凍害軽減係数 $c = 1$ (十分な湿潤程度を示す)のときの年間凍結融解日数を示している。このように、凍害危険値は、各地の一冬の凍害の危険性を数値で示しているため、比較が可能である。

凍害危険度(D_F)は、各地の凍害の実状と曝露試験のこれまでの結果を考慮して、凍害危険値を0～5度の6段階に分けて定めることとする。

4. わが国におけるコンクリートの凍害危険度

気象資料より凍害危険度の実際の算出過程を、図8に示す。外気温のほかに、日射、風速、積雪、降雨などの気象因子も凍害危険値の算出に関係している。

4.1 外気温上の年凍結融解日数と凍結したままの日数

毎日の最高・最低気温より求め、温度範囲別に5年間平均値を算出した。凍結点温度は、外気温で -1.0°C として求めた。外気温を整理した凍結融解の基本資料の一例を、表1に示す。

4.2 日射による凍結融解の増加日数

外気温上の凍結日に対しては、日射による融解を検討する必要がある。日射による凍結融解の増加日数は、凍結日数に融解率 u

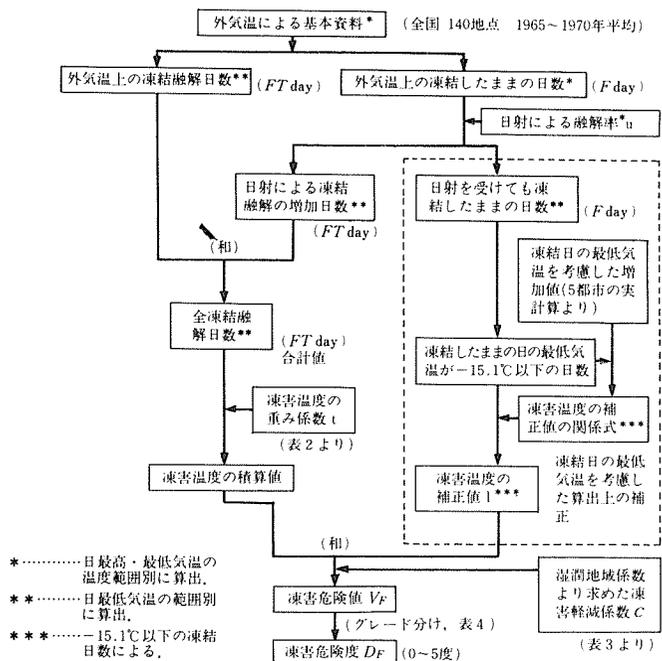


図8 凍害危険度の算出過程

を乗じて求めることとする。日射による融解率の算出過程を、図9に示す。日射による温度上昇

表1 外気温による凍結融解の基本資料(日) [帯広]

日最高 日最低(°C)	-10.1 }	- 5.1 }	- 1.0 }	- 0.1 }	5.0 }	10.0 }	10.1 }	合 計
- 0.1~- 0.9					1.4	3.0	5.4	9.8
- 1.0~- 5.0			0.2	0.6	14.8	16.2	13.8	45.6
- 5.1~-10.0			4.8	3.0	19.2	6.4	0.4	33.8
-10.1~-15.0			12.8	3.8	13.8	1.0		32.6
-15.1~-20.0	(凍結日数)	1.2	4.6	15.6	3.8	4.6	0.4	29.0
-20.1~-25.0		5.0	7.0	0.2	1.0			13.2
-25.1~-30.0	0.2	0.8				(凍結融解日数)		1.0
合 計	0.2	11.6	40.4	11.4	54.8	27.0	19.6	165.0

FT=103.0日(全凍結融解日数), (-5.1) FT=57.6日(日最低気温が-5.1℃以下の凍融日数)
 (-10.1) FT=28.6日(日最低気温が-10.1℃以下の凍融日数), F=52.2日(日最高気温が-1.0℃以下の日数)

の実際の計算を行う都市の凍結日の気象データより、図10の算出過程により融解するか否かを検討する。これには、普通コンクリートで湿潤状態にある水平スラブ面を想定して行ない、表面・内部温度の計算には、凍結から融解に移行する場合を対象としているので、水の潜熱の影響を考慮した。このようにして、年間の外気温上の凍結日に対する日射による融解日を温度範囲別に融解率として求め、同グループのほかの地点の融解日数の算出に用いた。

図11は、日射による融解を加えた全凍結融解日数である。

4.3 融雪・降雨量と湿潤地域係数

湿潤地域係数は、融雪からの水分供給の影響を重視して求めることにし、凍結融解日が現われる月の積雪量の差から求めた融雪量積算値の月平均値に凍害への影響を考慮して2倍の重みをつけた値を基に、これに降雨量の月平均値を加えた値であり、凍結融解時のコンクリートの湿潤程度を表わしている。算出結果の一部を、表5の中に示す。

4.4 凍害危険度の決定

氷点下の気温差による凍害重み係数tは、前述の実験結果を考慮し、骨材種類、AE剤使用の有無によって、表2のように定めた。また、算出上の補正值Iは、日射を受けても凍結したままの日の最低気温が、次の凍結融解日の最低気温よりも低い場合に補正の必要が生じるものであり、融解率を乗じて融解日数を求めている地点においては、個々に求めることはできない。よって、実際に求めることができる5都市の補正值より算出式を求めた。

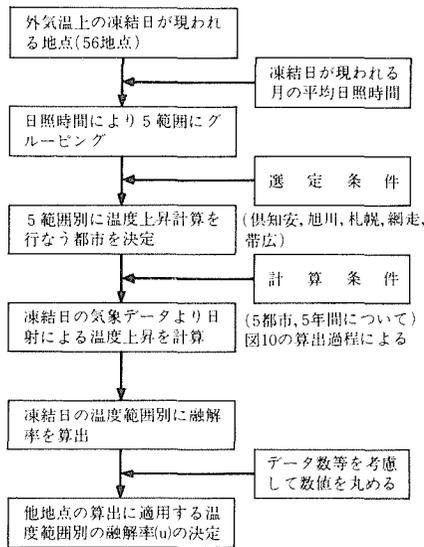


図9 日射による融解率(u)の算出過程

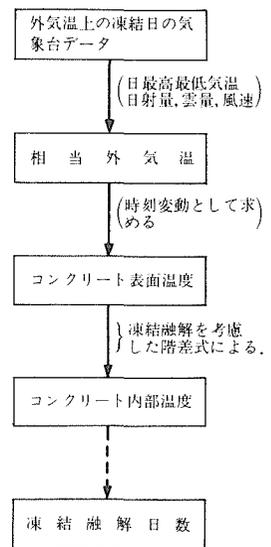


図10 凍結日に対する日射による融解の検討過程

$$I = 6.5 \times D + 20$$

D：日最低気温が-15.1℃以下の凍結日数

補正率は、一般に数%と小さい。

湿潤地域係数より求める凍害軽減係数cは、前述の実験結果ならびに札幌における冬季の湿潤程度と凍害の実状を考慮して、表3のように定めた。

これらを用いて凍害危険値V_Fを求め、各地域の凍害の実状、曝露試験の現在までの結果³⁾を

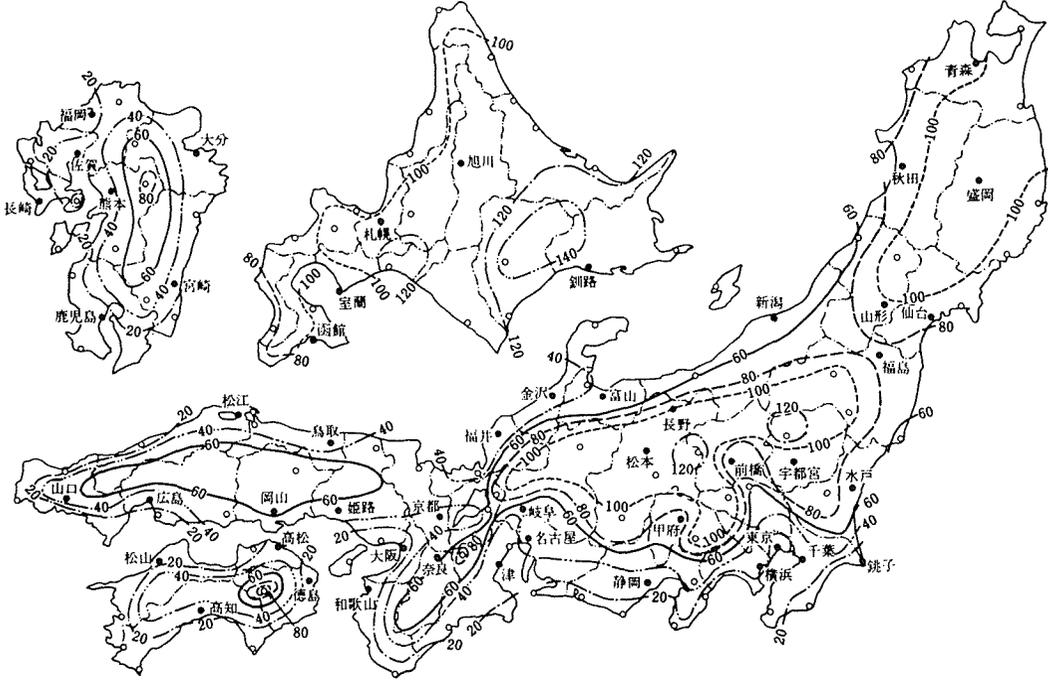


図11 日射による融解を加えた全凍結融解日数

表2 凍結温度の影響を考慮した凍害重み係数t

凍結温度 (℃)	-1.0	-5.1	-10.1	-15.1	-20.1	-25.1
	-5.0	-10.0	-15.0	-20.0	-25.0	以下
t _(A) 良質骨材またはAE剤を使用したコンクリート	2	10	19	30	36	40
t _(P) 品質の悪い骨材を使用したプレーンコンクリート	30	70	78	84	88	90

表3 湿潤地域係数と凍害軽減係数cの関係

湿潤地域係数	0~50	51~100	101~150	151~200	201~250	251~300	301~
凍害軽減係数	0.30	0.50	0.70	0.80	0.90	0.95	1.00

表4 凍害危険値と凍害危険度の関係

凍害危険値 (t _(A) の場合)	0~200	201~500	501~800	801~1,100	1,101~1,400	1,401~2,000
凍害危険度	0	1	2	3	4	5度

表 5 主要都市の凍害危険度の算出 ($t_{(a)}$ の場合)

	外気温上の		日射に よる融 解日数 (日)	全凍結 日数 (日)	凍融日の 最低気温 の範囲 ($^{\circ}$ C)	凍害温 度の 積算値	凍害温 の補正 値 I	湿潤 地域 係 数	凍害 危険値 V_F	凍害 危険度 D_F
	凍融日数 (日)	凍結日数 (日)								
旭川	77	71	25	102	~-30	1,164	*	285	1,106	4
札幌	87	45	29	116	~-20	1,038	*	295	986	3
帯広	103	52	39	142	~-30	2,139	*	212	1,925	5
釧路	103	40	32	135	~-25	1,680	42	140	1,205	4
函館	88	35	23	111	~-20	885	27	168	730	2
盛岡	100	14	10	110	~-20	780	20	161	640	2
仙台	79	2	1	80	~-15	304	0	98	152	0
日光	97	41	33	130	~-20	1,122	22	174	915	3
東京	18	0	-	18	~-5	36	0	88	18	0
長野	98	5	3	101	~-15	565	10	136	403	1
軽井沢	124	19	15	139	~-20	1,371	22	133	975	3
松本	114	3	2	116	~-20	881	20	113	631	2
福井	38	0	-	38	~-10	93	0	406	93	0
岡山	63	0	-	63	~-10	201	0	53	101	0

(注) *実計算を行い、凍融日数を補正している。

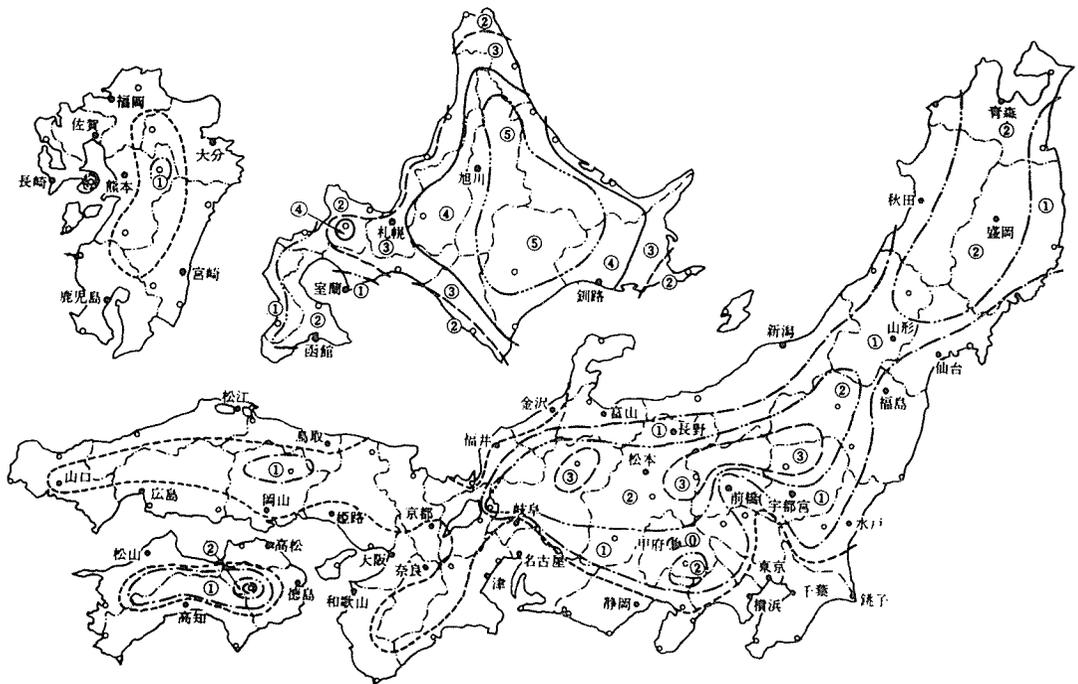


図 12 凍害危険度の分布図 (凍害重み係数 $t_{(a)}$; 良質骨材または AE 剤を使用したコンクリートの場合)
内は品質の悪い骨材を用いプレーンコンクリートとした場合の凍害発生危険地域

考慮して、表4のようにグレード分けし、凍害危険度 D_f を0～5度に定めた。主要都市の凍害危険度とその算出関連値を表5にまた、全国140地点の気象資料より求めた凍害危険度分布図を、図12に示す。これは、凍害の対策をたてる場合などに便利であろう。

5. お わ り に

コンクリートの凍害の発生・促進作用に影響する外的要因についての温度・湿潤条件に関する実験を行ない、この結果を考慮し、これに関連する気象要素を整理して凍害危険度の算出方法を導き、全国各地域のコンクリートの凍害危険度を算出した。これに対応する実用上の凍害防止のための水セメント比最大値も提案⁶⁾したが、設計・施工上の一指針となることを願うものである。

最後に、本研究に適切な御助言をいただきました本学工学部荒谷登教授に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 平井和喜：モルタルの凍害に及ぼす凍結持続時間の影響，日本建築学会論文報告集，第70号（1962），第89号（1963）。
- 2) 鎌田英治：コンクリートの耐凍害性に関する研究——凍伸度を指標とする耐凍害性の判定について——，日本建築学会論文報告集，第166号（1969）。
- 3) 洪，長谷川，後藤，横平：気象条件の異なる北海道内四都市における各種コンクリートの曝露実験，セメント技術年報 XXVII（1973）。
- 4) 平井和喜：凍害の地域性を示す凍害危険度の試案，日本建築学会研究報告，第54号（1960）。
- 5) J. Vuorinen：“On use of Dilation Factors and Degree of Saturation in Testing Concrete for Frost Resistance.” NORDISK BETONG（1970）
- 6) 長谷川：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案，セメント技術年報 XXIX（1975）。