

氏 名	ひら い かず のぶ 平 井 和 喜
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭 和 36 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 建設工学専攻

学位論文題目	建築物外装材料の凍害に関する基礎的研究 —おもに鉄筋コンクリート造の場合—
--------	--

指 導 教 官	東北大学教授	栗 山 寛
論 文 審 査 委 員	東北大学教授	栗 山 寛
	東北大学教授	藤 田 金 一 郎
	東北大学教授	亀 井 勇

## 1. 緒 論

### 建築物と凍害

凍害は材料内部に含まれる水分の凍結により生ずる材料の物理的性質の劣化および外観的崩壊であると一般に云うことができる。さらにその対象を建築物に限定すると1日を周期とする繰り返し応力の作用による疲労現象とみることができ、また材料中の水分は外気に面した表面から内部に向って凍結融解作用の進むものと解釈される。この2点が建築物の受ける凍結融解作用の特徴である。したがってその地域も限定され、G.T.Trewarthaの気候図からみると、北部アメリカ、ヨーロッパからソヴィエト連邦にかけて、日本の東北、北陸地方から北海道にかけての三大気候帯に分けられる。

### 凍害に関する研究史

過去30余年間にわたる国内および国外の諸文献はその研究的流れを大きく3つに分けることができる。第1は凍害の基本的諸性状、機構を解明しようとするもので、主としてT.C.Powers<sup>1)</sup>により展開されて来ており、凍結機構のモデルについては「コンクリートの早期凍結に対する抵抗」と題して1956年2月コペンハーゲンで開催されたRILEMの「寒中コンクリートの理論と実際に関するシンポジウム」<sup>2)</sup>において報告している。第2は凍結融解試験方法の相異による凍害の比較を行ったもので、促進試験方法が或地域で受ける凍害をあらかじめ予想することのできる様な気象条件との関連性のもとに定められるとき、はじめてその意義の生ずるものである。「コンクリートの凍結融解試験に関するシンポジウム」の内容が1960年M.O.Withey教授<sup>3)</sup>により紹介されており、促進試験の結果を正しく評価するために気象条件との関連性を見出す方向に研究を進めるべきことを示してから10数年経過しているが、この方向にそつた基礎的研究は少く、依然としてASTMの試験方法やUSBRの方法等にもとづいた比較研究の段階にとどまっている様に思われる。第3は自然ばくろ、建築物外装材料の凍害についてのもので、促進試験と自然ばくろとの比較をとりあつかつたものにT.B.KennedyとKatharine Mather<sup>4)</sup>による1953年の報告がある。両者の比較の基準として凍結温度の凍害に対する影響を認め、Degree-cyclesの標示法をとっていることは注目に値しよう。しかし自然ばくろの放置条件のむづかしいことはW.J.McCoyの論文<sup>5)</sup>にもみられる。さらに各種外装材料の施工後の凍害に関する論文として吉田亨二<sup>6)</sup>、西忠雄<sup>8)9)</sup>の発表されたものがありこれらは完成した建築物の受ける凍害あるいは凍害を考慮した設計、施工につながる重要な凍害研究の応用分野である。

### 本研究の目的

水の挙動を主体として、自然の気象条件に関連する凍害の基本要素を検討し、さらに外装仕上の表層から内部へ凍害現象の移行を調べるのが本研究の目的である。

### 凍害研究に関する今後の問題点

本研究で取りあげた内容に関する範囲で将来に残された課題を示したが、そのうち特に次の2点が重要である。第1に自然の気象条件と促進試験との関連性を確立すること。第2にコンクリートの凍害の中性化への影響を明らかにすること。1960年10月22日日本建築学会材料施工部門で取りあげられた「鉄筋コンクリート造建物の耐久性に関するシンポジウム」は主として一般地域でのコンクリートの中性化による発錆を検討したが、後者は凍害を受ける地域での実際に関連した課題として重要な研究の一つであろう。

## 1. 建築物外装の凍害実状とその地域的考察

### 2. 建築物外装の外観的な凍害実状

東北地方主要都市から152件を選んで凍害をBuilding elements別に考察した。この主体をな

すものは東北大学工学部建築材料研究室が1955年8月から10月にかけて行った被害調査資料<sup>10)</sup>である。

一般に被害箇所は建物の突出部であるパラペット、樋、軒蛇腹あるいは屋上スラブなどに集中している。外壁にみられる凍害は比較的上層部に多く壁面の方向によって差があり、特に北面、西面に被害が認められることから季節風が大きく影響しているものと思われる。いずれもその材料の相異、材料の使い方、構造詳細の違いにより被害の受け方も複雑であるが仕上材料自体さらに下地材との関係等表面層から内部へ向って変化する状態を観察することができる。凍害の一例を示す図-1は昭和3年竣工の岩手医大基礎医学教室の横樋付近で、図-2は昭和8年竣工の会津若松市役所パラペット凍害である。



図-1 横樋の凍害で鉄筋の露出がみられる



図-2 南面パラペットタイルの凍害

### 3. 凍害の地域性

建築物の受ける凍害は火災や風水害による建物の消失、崩壊あるいは流出などちがってその被害を個数単位として示すことが難しいので、凍害の地域性を認めながらもこれを数値的に示すところまでに至っていない。地域を異にする建築物の被害も火災や風水害の危険度の様に凍害危険度といったものによって示すことは建築物の耐久性の地域的要素として促進試験との関連性から重要なことである。この様な点から凍害危険度の算出を試みるわけであるがその前に定義を示す。

凍害危険度の定義：使用する材料の凍結融解1サイクル当りの耐久性減少率とその材料を使用する地域における凍害地域係数との積をもってその地域に使用する材料の凍害危険度とする。

凍害の受ける条件は材料が吸水状態にありさらにこれが凍結融解をくり返すことの2つで要素としては概して明確である。これの資料として積雪量別日数、月別日最高および最低気温平均値を用い、次の仮定のもとに算出する。(1) 同じ材料は凍結すれば同じ物理的劣化を受け氷点下の温度差により変化しない。(2)  $-1^{\circ}\text{C}$  で凍結し、 $0^{\circ}\text{C}$  以上で融解する。(3) 日最高気温が  $0^{\circ}\text{C}$  以下の場合には直射日光による影響を検討する。(4) 積雪量 10cm 以下の日数はその 1/2 を吸水可能日数とする。(5) 主として算出は気象資料により行う。月別に各要素を示せば

	1 月	2 月……………
全積雪日数	$S_1$	$S_2$ ……………
10cm 以下積雪日数	${}_{10}S_1$	${}_{10}S_2$ ……………
$-1^{\circ}\text{C}$ 以下日数	$T_1$	$T_2$ ……………
S.T の小さい方の値	$F_1$	$F_2$ …… $\sum_{i=1}^{12} F_i$
${}_{10}S.T$ の " "	${}_{10}F_1$	${}_{10}F_2$ …… $\sum_{i=1}^{12} {}_{10}F_i$

となり、1年を通じての凍結融解繰り返し可能日数は  $\sum_{i=1}^{12} F_i - 1/2 \sum_{i=1}^{12} {}_{10}F_i$  であるから、凍害地域係数は凍結融解繰り返し最高可能日数に等しい 365 で割った値  $\left( \sum_{i=1}^{12} F_i - 1/2 \sum_{i=1}^{12} {}_{10}F_i \right) \times 1/365$  となる。

したがって凍害危険度  $D_F$ 、材料係数  $\alpha$  とすれば  $D_F = \alpha \left( \sum_{i=1}^{12} F_i - 1/2 \sum_{i=1}^{12} {}_{10}F_i \right) \times 1/365$  ……………(1) で示すことができる。次に (1) 式により東北地方各都市の  $D_F$  を求めその結果のみを示せば表-1 の様になる。

表-1 東北地方主要都市の凍害危険度

	$\sum F_i$	$\sum {}_{10}F_i$	$(\sum F_i - 1/2 \sum {}_{10}F_i)$	$(\sum F_i - 1/2 \sum {}_{10}F_i) \times 1/365$	$D_F$
青 森 市	113	11	107	0.29	$0.29\alpha$
盛 岡 市	99	31	83	0.23	$0.23\alpha$
秋 田 市	87	37	68	0.19	$0.19\alpha$
山 形 市	94	26	81	0.22	$0.22\alpha$
仙 台 市	44	39	24	0.07	$0.07\alpha$
福 島 市	58	35	40	0.11	$0.11\alpha$

以上の結果は多くの仮定にもとづいて成立するものであるから 実験的方法によって今後明らかにされなければならないし、もし低温差による影響が実証されれば当然修正されなければならないものとする。

次に日最高気温  $\theta_{\max}$  が  $0^{\circ}\text{C}$  以下の場合に対する検討は日射量による等価外気時温度を用いることができ

$$\theta_e = \theta_{e0} + \theta_{e1}$$

$$\theta_{e0} = R_{s0R} \cdot K \cdot J_1$$

$$\theta_{e1} = R_{s0} \cdot K \cdot (J - J_1)$$

で示される。ここに

$\theta_{e0}$ ：凍結材に対する等価外気時温度

$\theta_{e1}$ ：融解材 " "

$R_{s0R}$ ：外気側表面熱伝達抵抗（凍結時）( $\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}/\text{kcal}$ )

$R_{s0}$ ：同 上 （融解時）( " )

$J$ ：壁に当る日射量 ( $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$ )

$K$ : 壁表面の日射吸水率

$\theta_{e1} > 0$  であれば融解を生ずるための条件が,  $\theta_{max} > 0^\circ\text{C}$  の場合と同じく満されるだろう.  $J$  は任意方向壁面, 水平面に対して

$$J_v = J_0 P \cos \epsilon \cos \alpha$$

$$J_h = J_0 P \sin \epsilon$$

で日射量を求めることができる.

以上の方法により  $\theta_e$  が  $0^\circ\text{C}$  以上になり融解条件側に入るか  $0^\circ\text{C}$  以下で凍結が経続されるかが検討されるものと思う.

## II 凍害現象の機構に関する実験的研究

凍結による影響の過程を水分が凍結するまでと凍結してからとの2つの部分にわけ, まず水分移動の現象を実験的にたしかめてその存在することを示し, 次に凍結持続時間の変化がどの様に凍害に対して影響するか検討した.

### 4. 凍結融解過程に生ずる水分移動の現象

材料中の水分がもとの位置をたもって凍結するものとするれば氷の膨張係数と材料の歪との相互関係から経験する以上の凍害が生ずるはずであるが, 実際にはそうではない. この様なことから T.C.Powers は圧力を緩和する方向に水が逃げるといふ仮説をたて研究を進めているが実際の材料について实际的に確認するところまでに至っていない. そこで著者はガラス細管, 模型図による考察を経てレンガを用いその体積抵抗を測定することにより水分移動の現象の存在することを実証した. 測定装置は図-3 に示すように凍結融解過程の体積抵抗を試料の下面で電極により測定した.

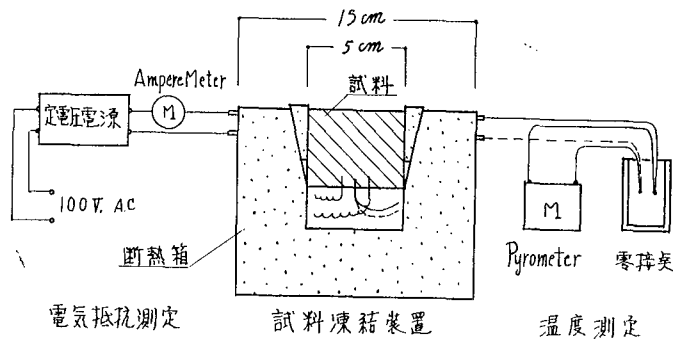


図-3 電気抵抗測定装置

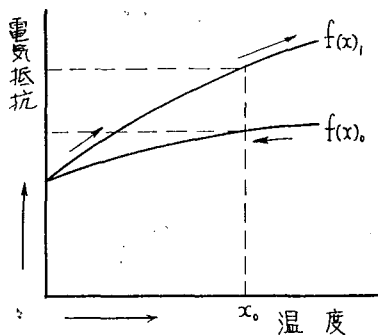


図-4 温度抵抗曲線

図-4 の曲線  $f(x)_0$  は温度降下時,  $f(x)_1$  は上昇時を示すから

$$f(x)_0 - f(x)_1 < 0 \quad \text{上方への移動}$$

$$f(x)_0 - f(x)_1 = 0 \quad \text{移動なし}$$

$$f(x)_0 - f(x)_1 > 0 \quad \text{下方への移動}$$

の様を示すことが出来る. 以上の関係にしたがって測定値図をみると,  $f(x)_0 - f(x)_1 > 0$  となり明らかに下部の抵抗の減少していることが認められ, 水分が凍結によって移動したことを示すものである. 次にこの現象をもとにして Kreuger 凍害判定法に検討を加えた.

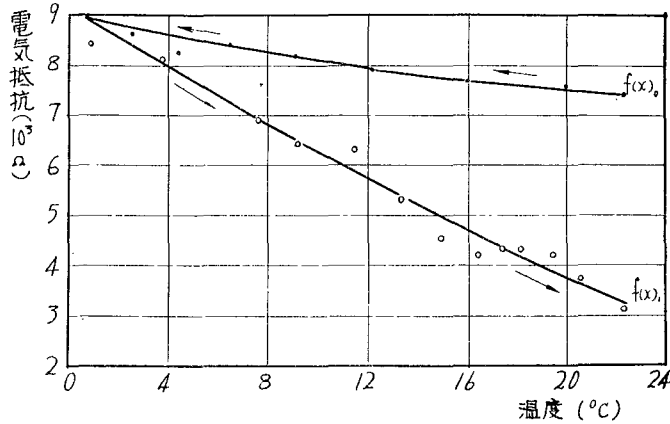


図-5 レンガによる温度抵抗曲線

### 5. 凍結持続時間の凍害におよぼす影響

凍結時間を3時間(Aグループ)6時間(Bグループ),12時間(Cグループ),の3種類とし融解はすべて1時間とする. 形状は4×4×16cmで川砂モルタル1種(重量調合1:2 w/c 50%)標準砂モルタル2種(重量調合1:2 w/c 55%, 65%)計3種類を用いる. 各グループ別の試料内部温度の凍結融解により変化は図-6の通りである.

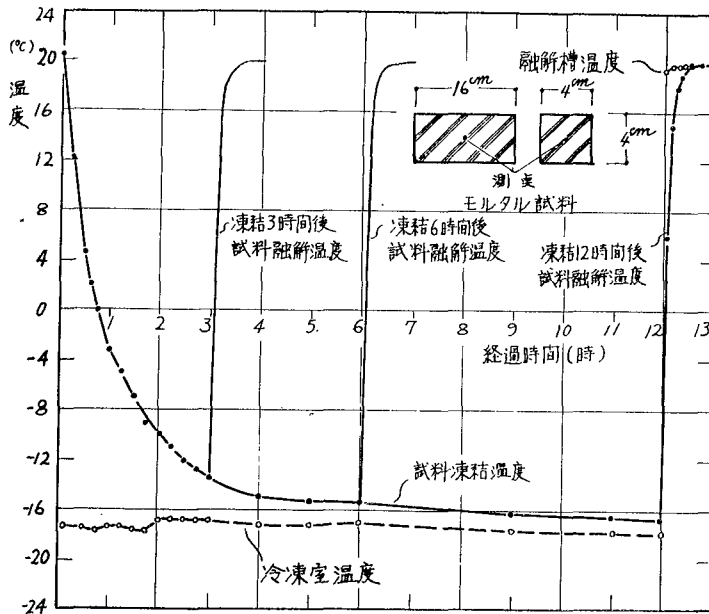


図-6 ABC各グループ別試料内部温度

結果の判定はタワミ振動による1次共鳴振動数から動弾性係数をもとめ試験前の値と比較し, 動弾性係数減少率として示す方法をとる. 川砂を使用する場合一般に砂自体の凍害が影響するので, 予め実験用宮城県名取川産の砂利について比重と吸水率の分布状態を示すと図-7, 図-8の様になる.

骨材自体の凍害は D.W.Lewis 等の論文<sup>1)</sup>で J.M.Rice の指摘しているように吸水状態により一元的にきまるものではなく強度や内部の有孔性状等の影響もあるからそれのみで砂壊を受け易

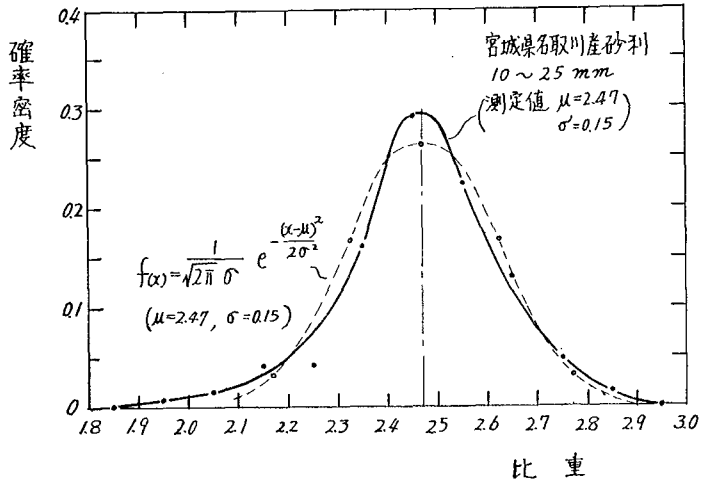


図-7 10~25mm 砂利の比重確率密度

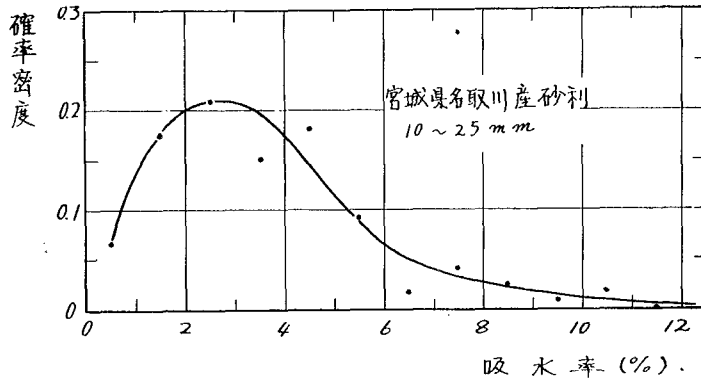


図-8 10~25mm 砂利の吸水率確率密度

いか否かを論ずることはできないが耐凍害性を示す要素として示したものである。

凍結融解繰り返しによる動弾性係数減少率の変化を川砂モルタルについて示すと 図-9 のようになり、各グループの直線変化部分をとって凍結持続時間との関係を川砂モルタル、標準砂モル

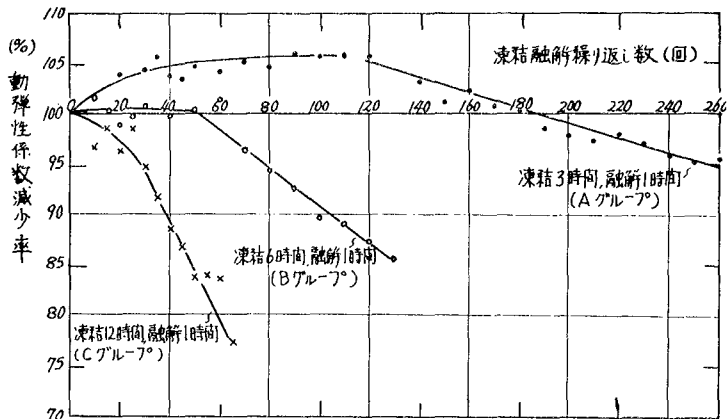
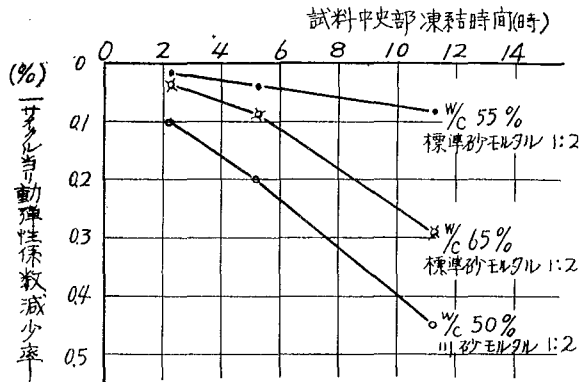


図-9 グループ別動弾性係数減少率(川砂モルタル)

タルについて示せば図—10のようになる。



図—10 凍結持続時間と凍害との関係曲線

以上の結果から明らかなように凍結持続時間の長いほど被害程度が大きく、しかもそれがほぼ比例し川砂モルタルでは  $\alpha = 0.04T_f$  が成立する。ここに

$\alpha$ : 1 サイクル当りの動弾性係数減少率 (%)

$T_f$ : 凍結持続時間 (時間)

また凍害は吸水水分の凍結する時に生ずる急激な破壊作用による影響が少く、その後の持続する応力によるものが大部分を占め、さらに凍害の促進試験方法に関連させてみると、サイクル数を増すことだけが促進試験ではなく、凍結持続時間を増すことによっても凍害は促進されることを示している。

### Ⅲ 凍結融解作用が表層におよぼす影響の実験的研究

各種外装仕上げ材料について凍害が表面から内部に向ってどのような変化をするか実験的に検討したもので、モルタル (川砂モルタル, 標準砂モルタル, 防水剤塗布モルタル) については表面的な scaling と動弾性係数との関係, 内層と外層との凍害差, 表面にある水の凍結が水分の吸水過程にあたる影響などを取り上げ、タイル (内外装仕上げ用を含めて 6 種) についてはタイル自体の凍害 (ひら, やくもの), タイルと下地モルタルの附着強さの減少等を取り扱い, おわりに研出し, テラゾー, 洗出しの仕上げ試料につきその凍凍害状況と隅角部の処理効果等を取り扱った。

#### 6. 凍結融解作用がモルタルの表層におよぼす影響

川砂モルタルの scaling は比較的吸水性の大きい砂のあることが主な原因で凍結融解繰り返し数のみによってきまる 1 次 scaling とその後の変化によって影響を受ける 2 次 scaling よりなっている。 (図—11) 標準砂モルタルの場合は等温線にそった隅角部の破損で明瞭に区別することが出来る。

次に凍結融解作用が表面から内部に向って繰り返される場合表面に近い部分と内部との間に差の生ずるものか否か検討する。試料として標準砂モルタルを使用し、凍結融解繰り返し後上下 2 層に切断して各々の動弾性係数を測定し変化を比較する。図—12 に示す様に下層動弾性係数は上層より大きい値を保ち上層が特に大きい減少をみるということはない。したがって吸水状態が一樣であれば scaling の生ずる表面を除いて内部は均一に近い状態で凍害が進行するものと解釈される。

次に乾燥状態の試料が吸水過程で凍結融解をうける場合の水量とその浸透深さについてみる



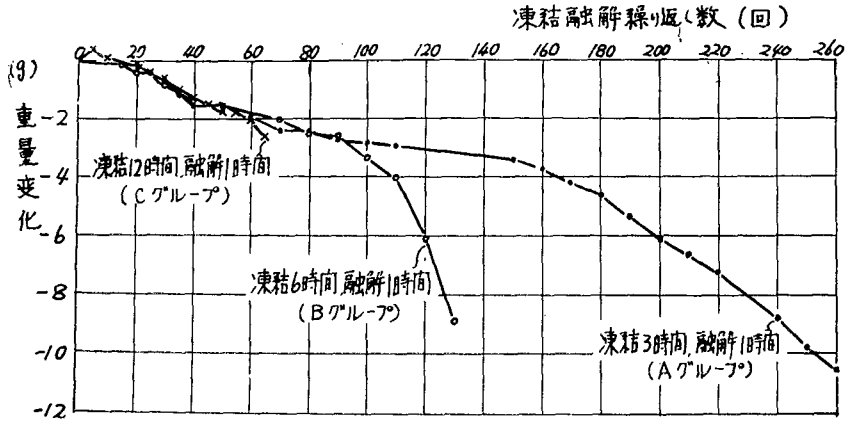


図-11 凍結融解繰り返しによる重量変化 (川砂モルタル)

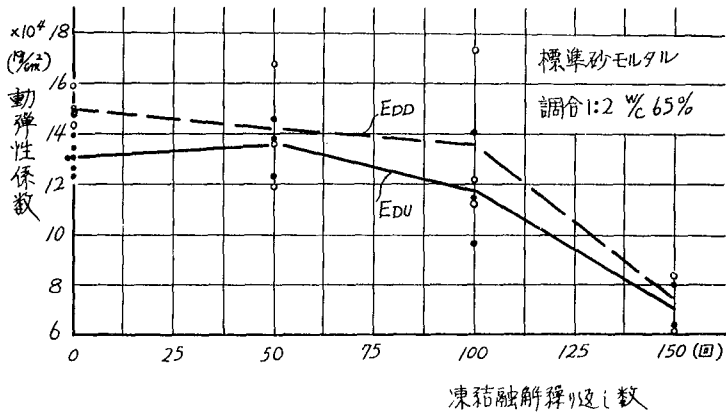


図-12 凍結融解作用による EDD, EDU の変化

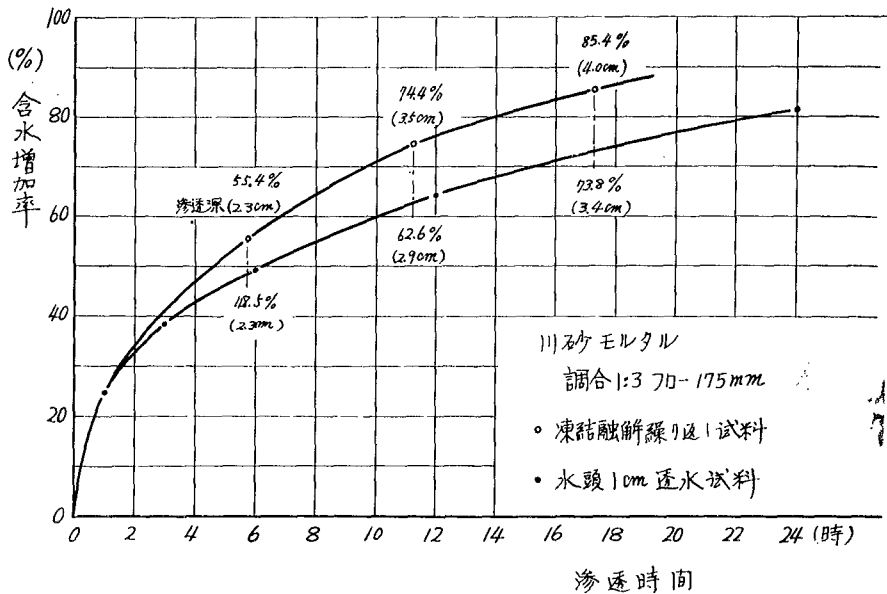


図-13 透過時間一含水増加率曲線

と、一般に凍結融解作用によって滲透深さの増加を示し、単位体積当りの含水量の増加を認められるものもある。特に後者については重量割合 1:2, 1:3 の場合、フロー値の小さいものほど凍結融解による影響が明瞭にあらわれ、フロー値 220mm になると一般の滲透による含水量とほとんど同じになる。実験結果の一例として割合 1:3, フロー値 175mm の場合を示すと図-13 のようになる。

この様な試料に防水処理をして寒冷多雪地に使用する場合、長期間にわたって水の浸漬を受けることになるから、塗布防水剤の防水性能として長期にわたる浸水試験に充分耐えられるものでなければならないことが実験で明らかにされている。

### 7. 凍結融解作用がタイル貼り試料におよぼす影響

タイル貼り試料の凍結融解繰り返し試験を行い、タイル自体の外観的な凍害現象とタイルの附着性の減少につき考察し、さらにこれらの検討の結果として生じた層状剝離の現象と附着強さ減少の定量的標示を目的とした実験を行った。

使用タイルは吸水率を異にする6種類で図-14に示す様な試料形状のものについて自然吸水後凍結(-16±2°C)融解(+20±2°C)繰り返しを行う。実験週期は予備実験より凍結10時間融解2時間とし1日2サイクル行う。

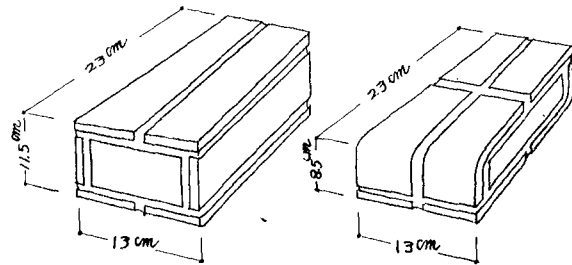


図-14 二丁掛タイル(ひら、やくもの)仕上げ型状

その結果吸水率の大きいもの(18.2%)と吸水率の小さいもの(0.9%)は温度変化による影響として亀裂の発生が著しく、層状剝離は吸水率の最も少ない試料(0.9%)をのぞいてすべて生じている。この層状剝離は釉薬面に対して直角な方向と平行な方向から凍結融解を繰り返した場合いづれも釉薬面に平行した層状亀裂の生じることから、タイルの成型法による材質的なものであることが実験的に明らかになった。またタイルの凍害に関してはタイルの吸水性と凍害危険繰り返し数に凍害率を加えることによって被害状況がより明らかになる。ここに云う凍害率とはある凍結融解繰り返し数で全試料のうち何枚

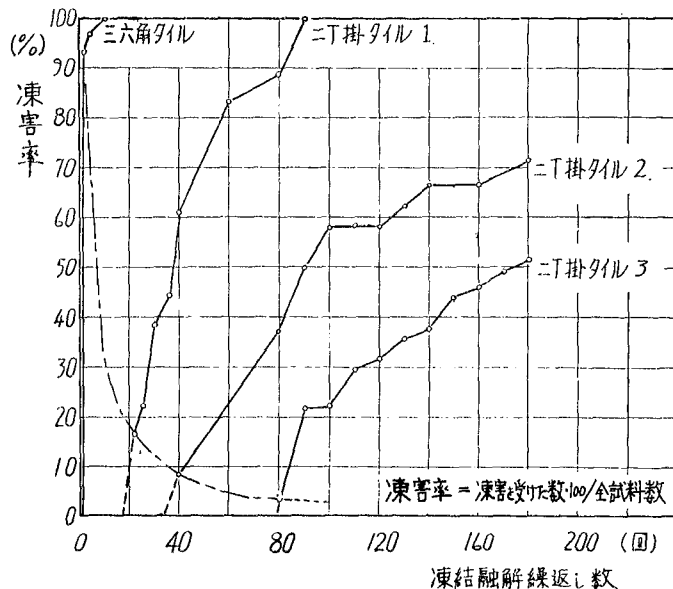


図-15 凍害率—凍結融解繰り返し数曲線

が凍害を受けたかを示すものでその百分率をもってあらわしている。図—15に示す様に曲線が右に移るにしたがって勾配がゆるくなり、この変化はタイルの吸水率の減少と一致している。また一点鎖線ははじめて凍害を受けた時の各タイルの凍害率を示す点をむすんだもので、吸水率10%以上のタイルでは凍害危険繰り返し回数に対する凍害率が急激に増加している。

タイルの吸水率と凍害については、北海道大学西教授の強制吸水によるものと本実験による自然吸水によるものとを比較し、吸水率の大きいタイルはその差は少いが、吸水率が小さくなるにしたがって差が大きくなり吸水条件の影響の著しいことを示している。次にタイルと下地モルタルとの附着強さは重量調合 1:1 から 1:4、フロー値 150mm で行った実験によると、富調合ほど早期材令で一定値に近づき、貧調合の 1:4 では強さ上昇がゆるい。4週材令で 1:1 から 1:4 で 6.0 kg/cm<sup>2</sup> から 4.5 kg/cm<sup>2</sup> 程度の附着強さをもち、これが凍結融解繰り返しにより次第にその附着性を減じ次の様な実験式を得た。

$$F_D = 875/n \quad (\%)$$

ただし  $n \geq 15$

ここに

$F_D$ : 附着強さ減少率 (%)

$n$ : 凍結融解繰り返し回数 (サイクル)

この様な附着性の消失によるタイルの剝落は完全な目地施工により防止され、目地のもつ役割りは大きい。

## 8. 凍結融解作用が研出し、テラゾーおよび洗出し試料の表層におよぼす影響

特殊外装仕上げ材料として研出し、テラゾー、洗出しの3種を選び外観的凍害現象、材質的変化と相互比較、隅角部の処理効果等を検討したものである。

各試料とも4cm角の心材に3cm厚さの仕上げをしたもので10×10×20cmの型状と10×10cm断面の半分が半円状のもの2種類である。気中凍結、水中融解により繰り返しを行った結果は耐凍害性の大きいものから研出し、テラゾー、洗出しの順になる。280サイクルでの動弾性係数減少率は次の様になっている。ただし洗出し試料は280サイクルで崩壊しているからこれを100%として示してある。

研出し試料	テラゾー試料	洗出し試料
3 %	34 %	100 %

これは試料の吸水性の順序と一致している。また外観的凍害は研出し、テラゾー試料については種石のみの部分的凍害にとどまっているが洗出し試料は表面的な凍害よりもむしろ全体として容積を増し大きい崩壊を示している。隅角部の処理効果は比較的耐凍害性の小さい洗出し試料に認められた。

## 9. 結 論

本論文は大別して次の2つの部分からなっている。

- (1) 自然の気象条件に関連する凍害要素の検討
- (2) 建築物外装仕上げの表層から内部への凍害現象

凍結融解試験における結果は実験要素により影響を受けるものであるから、自然の気象条件との関連性を無視して正しい評価をすることは困難である。著者の明らかにした凍結持続時間による影響はその1つを示すもので、実験に複雑な要素の入る可能性のある自然ばくろと促進試験との関係を検討する前に、気象資料との関連性のもとに基礎となる実験要素についてその影響をしらべることが必要である。

この課題の達成によってはじめて寒冷多雪地帯の鉄筋コンクリート造建築物のもつ耐久性が明らかになり、一般地域のもと同じ様な条件を保つための設計指針を得ることにもなると思われる。

## 文 献

- 1) T.C.Powers (1945) "A working hypothesis of further studies of frost resistance of concrete," ACI vol. 16, No. 4, P. 245
- 2) T.C. Powers (1955) "Basic considerations pertaining to freezing and thawing tests," ASTM proc. vol. 55
- 3) 近藤泰夫 (1957) 寒中コンクリートの理論と実際に関する RILEM のシンポジウムの報告, セメントコンクリート No.131~No.142 P.27~31
- 4) M.O.Withey (1946) "Symposium on freezing and thawing tests of concrete considerations involved in the making of freezing and thawing tests on concrete," ASTM proc. vol. 46 P. 1198
- 5) T.B.Kennedy, and Katharine Mather (1953) "Correlation between laboratory accelerated freezing and thawing and weathering at Treat Isband, Maine," ACI vol. 25 Oct. No. 2
- 6) W.J.Mccoy, and S.B.Helms (1952) "Performance of concrete specimens during 10 years exposure to severe natural weathering," ASTM proc, vol. 52
- 7) 吉田亨二 (1936) 建築物の耐久性 誠文堂新光社発行 再版
- 8) 西 忠雄 (1954) 外装タイルの凍害に関する実験と考察, 日本建築学会研究報告 第30号.
- 9) 西 忠雄 (1956) 各種セメント防水剤入モルタルのコンクリートへの附着に及ぼす凍結融解作用の影響. 日本建築学会研究報告 第38号.
- 10) 東北大学工学部建築学科材料研究室 (1956) 寒冷多雪地帯鉄筋コンクリート造陸屋根被害調査報告. 東北大学建築学報 第4号.
- 11) D.W.Lewis, W.I.Dolch, and K.B.Woods (1956) "Porosity determinations and the significance of pore characteristics of aggregate," ASTM proc, vol. 53

## 審査結果要旨

RC 造建築物の外装材料は吸水分の凍結融解の繰返しにより凍害をうけることがある。これが雨もり、鉄筋の腐食などの被害の原因になり、建築物の耐久性を徐々にそこなうにいたる。建築材料の凍害に関する研究は、凍害機構の解明、自然曝露材料の凍害と凍害促進試験との関連性の確立などにあるが、いずれもまだ解明されない分野が多い。

本論文は、外装材料の凍害実状とその地域的考察、凍害現象の機構に関する実験的研究および凍結融解作用が材料の表層におよぼす影響に関する実験的研究の3編よりなる。

緒論では従来の凍害に関する研究を展望して、本研究の目的と範囲を明らかにしている。

第1編では、東北地方の主要都市における RC 造建築物の凍害実状を調査し、これを Building elements 別に考察し、外装材料の凍害に地域差のあること、外装材料の凍害は材料単体のみでなく下地材をも含めた複合材として考慮する必要のあることなどを指摘している。また、凍害の地域差に関して凍害地域係数を含む「凍害危険度」を指摘して、今まで行なわれなかった地域性の定量的標示を試みている。

第2編は凍害機構に関する実験的研究である。まず、T.C. Powers が示した凍結時の水分移動の仮説をモルタルおよび煉瓦を用いての実験で証明した。これをもとにして H.Kreuger の示した凍害判定法に修正の必要のあることを指摘し、ついで最低温度一定の場合凍害持続時間が影響することを実験から見出した。これは T.B. Kennedy 等の示した Degree-Cycles 標示法を Degree-Cycles-Continued freezing time と改めるのが妥当であることを示すもので、凍害の促進試験方法と自然の気象条件との関連性を求める際考慮されねばならない要素ともなるものである。

第3編は以上の研究をもとにした RC 造建築物外装材料の凍害に関する応用的研究であり、セメントモルタル、陶磁器タイル、テラゾー、モルタル研出しおよびモルタル洗出し仕上げの試料を用いて凍結融解繰返し実験を行いそれぞれの材料について表面から内部への凍害の移行状態、表面の剝離、材質の変化、コンクリート面への付着性などの性状を明らかにしたものである。

以上要するに本論文は建築材料の凍害に関する基礎的研究に新しい知見を加えたのみならず、建築工学上にも寄与するところが少なくない。

よって本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。