

論文

[1123] 凍結融解を受けるコンクリートの変形挙動に関する研究

正会員○坂本 守 (間組技術研究所)
 正会員 村上 祐治 (間組技術研究所)
 正会員 山下 英俊 (間組技術研究所)
 正会員 喜多 達夫 (間組技術研究所)

1. まえがき

コンクリートの凍害に関する研究は、現在までに多くの要因についてさまざまな角度からの検討がなされ、多くの成果が挙げられている。なかでも凍結融解抵抗性に対する配合、空気量、飽和度、気泡間隔係数などの影響についてはかなりの研究成果が蓄積されてきている。一方で、科学技術の発展と共にコンクリートが低温下に供せられる頻度も多くなってきている。例えば、LNGタンクや寒冷地開発に関連した構造物等が低温下にさらされることは明らかであるし、超伝導が実用化されれば、その周囲のコンクリートは同様に凍結作用を被ることになる。

このような状況を考慮すれば、コンクリートの凍結融解抵抗性を定量的かつ客観的に評価する手法を確立する必要性があり、その為には各要因が凍結時にコンクリートの挙動にどのように影響しているのかを定量的に把握する必要がある。また各要因によってコンクリートの挙動を表現できれば、コンクリートの耐凍害性の定量的な評価に大きく貢献するものとなり得る。本研究は、基本的な配合のコンクリートによる凍結融解試験結果を基に、温度降下時における凍結メカニズムを考案するとともに、各種要因を用いてひずみの変化を表現することを目的としている。

2. 実験概要

表-1 使用材料

	種類	仕 様
セメント	普通ポルトランド	比重 3.16 比表面積 3300cm ² /g
	高炉 B 種	比重 3.04 比表面積 3830cm ² /g
細骨材	大井川産川砂	比重 2.65 F.M. 2.70 吸水率 1.41%
粗骨材	硬質砂岩(Gmax13mm)	比重 2.65 F.M. 6.44 吸水率 0.60%
混和剤	A E 剤	天然樹脂酸塩

実験概要として使用材料、及び実験条件を表-1、表-2に示す。AEコンクリートでは、空気泡による凍害の緩和作用が明確に表れる様に、目標値を5%とする。最低温度については2水準を用意し、-18℃のケースはASTM C 666に準じ行った水中凍結水中融解試験である。-70℃については恒温恒湿槽を使用

表-2 実験条件

実験要因	実験水準		
	普通ポルトランド	高炉 B 種	
セメントの種類	普通ポルトランド	高炉 B 種	
空気量	1%	5%	
最低温度	-18℃	-70℃	
水セメント比	50%	65%	80%

表-3 各供試体の温度変化速度(℃/h)

最低温度		最大速度	平均速度
-18℃	凍結時	-20.4	-13.8
	融解時	30.0	14.4
-70℃	凍結時	-10.8	-6.6
	融解時	22.8	17.4

した気中凍結気中融解で、試験中の供試体の乾燥を防ぐためにエポキシ系のコーティング剤を使用した。また、試験での凍結速度、融解速度は表-3に示す通りである。表-4に測定項目を示す。内部温度測定のための熱電対および内部ひずみ計は10cm×10cm×40cmの供試体の中央部に埋設した。また計測したデータから各温度でのひずみ計自身の補正を行いコンクリートとしてのひずみ量を求めた。

表-4 測定項目

測定項目	測定頻度
<ul style="list-style-type: none"> ・ 圧縮強度 ・ 静弾性係数 ・ 気泡間隔係数 ・ 細孔径分布 	試験開始時
<ul style="list-style-type: none"> ・ 内部ひずみ ・ 温度 	経時変化
<ul style="list-style-type: none"> ・ 動弾性係数 ・ 重量 	所定サイクル終了時

3. 実験結果

以上の内容に従って凍結融解試験を実施し、表-5にその主な試験結果を示す。

表-5 試験結果

最低温度 (°C)	セメント	空気量 (%)	W/C (%)	耐久性指数 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	気泡間隔係数 (mm)	長さ変化勾配 (μ/μ)
-18	普通ポルト	5	5.0	9.7	4.50	0.1816	0.230
			6.5	8.5	3.10	0.2690	0.125
			8.0	7.6	2.23	0.3243	0.229
	高炉	1	6.5	1	3.95	1.0529	202.000
			5	9.6	2.94	0.2634	2.218
			6.5	5	3.56	1.0846	30.878
-70	普通ポルト	5	5.0	10.3*	4.50	0.1816	0.709
			6.5	9.8*	3.10	0.2690	0.636
			8.0	8.3*	2.23	0.3243	0.903
		1	6.5	2.*	3.95	1.0529	207.964

*は100サイクルで計算したもの

図-1に圧縮強度と耐久性指数の関係を示す。この図からは、概して耐久性指数は強度によって大きく影響されることは少なく、空気量の多少によって、耐久性が支配されることを示唆している。

図-2は気泡間隔係数との関係であるが、従来から認められているように気泡間隔係数が耐凍害性を適確に評価する値であることが、今回の結果からもうかがえる。

図-3は練り上がりの空気量から算出した各配合のモルタル中の気泡容積と耐久性指数との関係であるが、この図から水の凍結による膨張を緩和する気泡容積 (V_a) も耐凍害性に大き

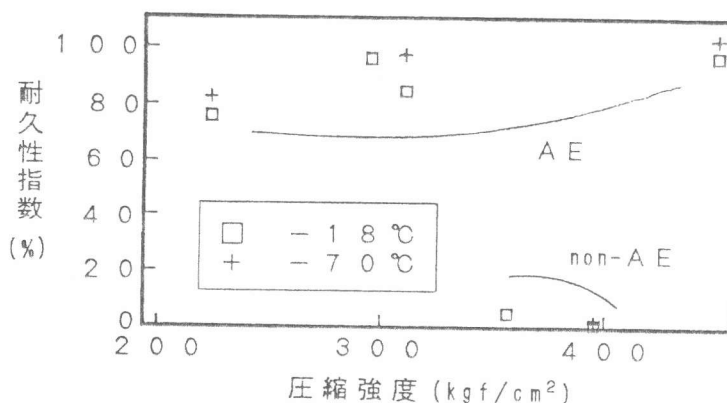


図-1 圧縮強度と耐久性指数の関係

く関与していることが認められる。以上から、本実験で用いた配合の範囲内では、コンクリートの耐凍害性には、水の凍結という現象に対し、水の逃げ場（気泡容積）の存在と、逃げやすさ（気泡間隔係数）の2つの要因がコンクリートの耐凍害性を大きく支配していると考えられる。

次に、最低温度 -70°C 、 $W/C=65\%$ および普通セメント供試体の凍結融解時の挙動を図-4に示す。non-AEの供試体は凍結開始と共に急激な膨張を示し、サイクル終了時には内部組織の劣化を示す残留ひずみを生じさせている。

一方、AEの供試体ではサイクルの増加に関係なく、温度降下に伴う熱変形を呈するのみである。また、凍結開始と共に膨張ではなく収縮傾向を示していることが特徴である。また、両配合において共通して述べられることは、 -40°C 前後において膨張傾向が増加し、その後収縮に転じている。 -40°C 前後の挙動変化については、主にAEコンクリートでは、気泡中に生成された氷が周囲から水を吸収する作用が支配的な要因であるが、この付近の温度では数 10°C 以上の細孔径までが凍結し、容易に移動可能なキャピラリー水が凍結する水量に比べ小さくなるために膨張要因が強く現れたと考えられる。また、残りの未凍結水はゲルポア中にあるため、その後の温度変化によっても凍結せず、その後は温度降下による収縮のみが生じていると推察される。

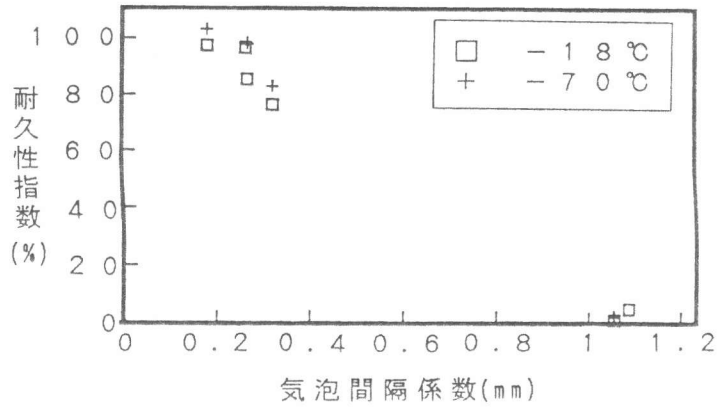


図-2 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

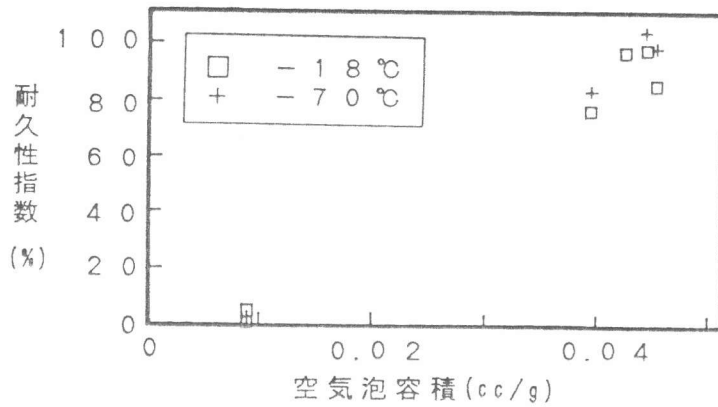


図-3 空気泡容積と耐久性指数の関係

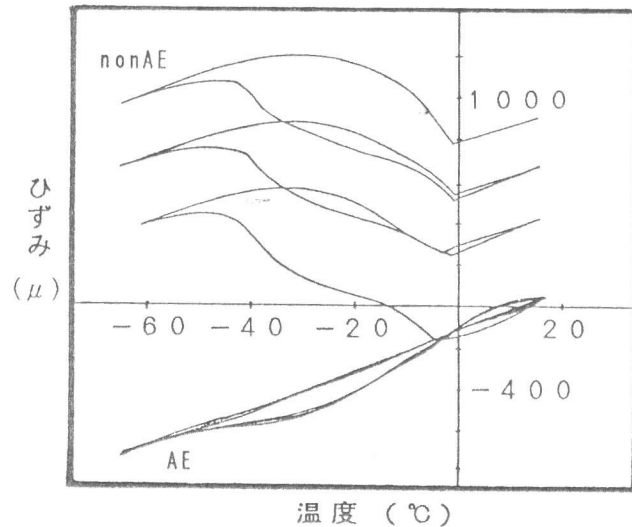


図-4 温度とひずみの関係

4. 各種要因によるひずみ挙動の予測

一般に凍害のメカニズムとして知られるものに水圧説がある [1]。これは、水が氷へと相変化の際に生じる体積膨張分に相当する水が、空気泡へ移動する際にキャピラリー空隙内で粘性抵抗による静水圧を生じ、それによってコンクリートの組織が破壊に至るといものである。しかし、AEコンクリートが凍結する際に観察される収縮は水圧説では説明できず、生成された氷晶が周囲から水を吸収するという浸透圧説 [2] が用いられる。浸透圧説によればキャピラリー中の氷晶が水を吸収する場合は、飽水領域に未凍結水が移動するために膨張要因となるし、空気泡中の氷晶が周囲の組織から水を吸収する場合には、空気泡が水で満たされるまでは吸収する水の量だけ収縮することになる。

筆者らは、コンクリートが凍結する際には上記の2つの現象が同時に作用しており、空気量や気泡間隔係数などの緩和機構の度合によってこれらの現象による影響の比率が異なってくると考える。そこで0℃以下でのひずみ量の成分のうち、凍結作用のみによって発生したひずみ ε の挙動を次のように設定した。

$$\varepsilon = \varepsilon_{hyd} - \varepsilon_{osm} + \alpha T \quad (1)$$

すなわち、第1項 ε_{hyd} は水圧説に基づくひずみ、第2項 ε_{osm} は浸透圧説による主として収縮ひずみを表し、第3項は温度降下にとまなう熱変形を意味する。そして第1項、および第2項はそれぞれ次式を仮定する。

$$\varepsilon_{hyd} = p \left\{ \frac{M \cdot 0.09 V_f \cdot F(L)}{3 \cdot V_c} \right\} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{osm} = q \left\{ \frac{M \cdot (V_0 - V_f) \cdot 0.09 V_f \cdot (1 - F(L))}{3 \cdot V_c \cdot V_a} \right\} \quad (3)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon_{hyd} - \varepsilon_{osm} \quad (4)$$

ここで、コンクリートのひずみ ε' はコンクリートの線膨張係数によるひずみ量を除去したものであり、凍結作用のみのひずみ挙動としている。また、式(2)の右辺は凍結水量 V_f [3]による膨張体積に、気泡間隔係数 L の大小によるキャピラリー内に残留する水(空気泡に排出されない水量)の割合を示す関数 $F(L)$ を乗じ、膨張に寄与する水量を求める。ここで V_f はモルタル1g当たりの凍結水量であるため、コンクリート中のモルタルの体積比率 M を乗じてコンクリートの単位重量当りの体積 V_c で除して体積ひずみとし、さらに3で除して近似的に線ひずみとしたものであり、ひずみ挙動のうち膨張を示す項である。また式(3)は収縮を示す項であり、空気泡中に排出された水量 $0.09 V_f \cdot (1 - F(L))$ の全気泡容積 V_a に対する割合に、全細孔容積 V_0 から V_f を減じた未凍結水量を乗じて吸収される水量を求め、第1項と同様に線ひずみに変換したものである。これは、空気泡中の排出された水が直ちに凍結し周囲から水を吸収すると仮定しており、 $0.09 V_f$ が V_a に対してかなり大きい場合には、 $0.09 V_f \cdot (1 - F(L))$ が V_a より大きくなった

時点で膨張側の要因となる。また p , q はひずみに及ぼすそれぞれの影響度合いを示す値である。

式(1)を実測値に適用するためには気泡間隔係数の影響関数 $F(L)$ を決定する必要があるが、これは気泡間隔係数と凍結融解サイクル終了時の残留ひずみの変化勾配との関係から導くこととし、 $F(L)$ を次式のように設定した。

$$F(L) = K [1 - (1 + \alpha(L - 0.2)) * \text{EXP}(-\alpha(L - 0.2))] \quad (5)$$

ここで K は $L \rightarrow \infty$ の時の $F(L)$ が集束する値でありここでは 210 と仮定している。式(2)を用いて最小二乗法によって $\alpha = 2.61$ を算出し、その結果を図-5 に示す。ここで式(1)に適用する際に $L < 0.2$ mm 以下の場合は $F(L) = 0$ とする。

式(5)に $\alpha = 2.61$, $K = 1$ を代入して算出される値を用いて式(4)を図-4 で示した普通セメント、 $W/C 65\%$ の供試体のひずみから線膨張によるひずみを除いたものに適用し、最小二乗法によって p , q , r を求め、その結果を表-6 に示し、その値を用いて凍結時のひずみ挙動を算出した結果を実測値と比較し図-6 にしめす。

今回設定したひずみ予測式を適用することによって、気泡間隔係数や空気量の影響が加味され、配合間の大まかな傾向は表現されていると思われるが、それぞれの曲線の形状を表現するにはいたらず、特に実用面で重視されるであろう $0 \sim 20^\circ\text{C}$ 付近までの区間での差が大きくなっている。

この点に関しては、凍結時の過冷却現象によって、コンクリートの実際の凍結温度が細孔径に依存する凝固点降下以上に大きくなっているためであると考えられる。従って予測式に過冷却が考慮されれば、予測値の初期の立ち上がり部分はやや低温側に圧縮されていくことは容易に理解される。また -40°C 前後での急激な膨張と続いて起こる凍結

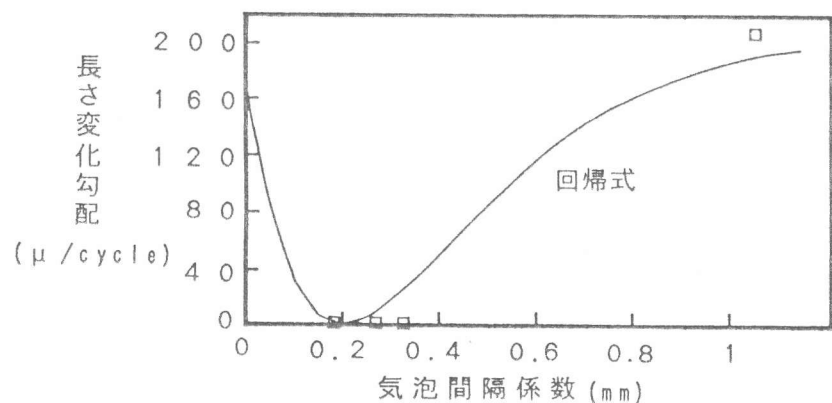


図-5 残留ひずみに対する気泡間隔係数の影響

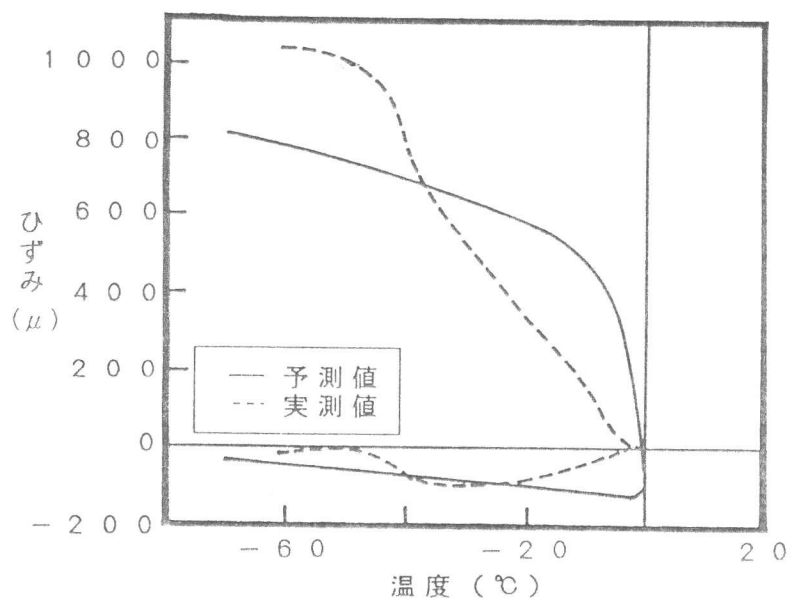


図-6 予測値と実測値の比較

ひずみ増加量の減少の理由が本当にゲルポアによるものであれば、凍結水量の算定に用いる細孔径と凝固点降下度との関係式は実験結果を基に修正されるべきである。

さらに表-3からわかるように供試体の冷却速度は常に一定ではなく、温度の低下とともに通常は冷却速度は小さくなっていく。冷却速度もコンクリートの凍害に大きく影響する因子であり、凍結速度による劣化度の差異は気泡間隔係数の影響と見かけ上はほぼ同様なものであり、凍結速度が速いほど V_f の影響が大きくなるはずであり、凍結速度を考慮しその影響を補償することができれば計算値はよりなだらかな曲線となるであろう。

表-6 回帰結果

	偏回帰係数	標準回帰係数	重相関係数
第1項	247537(=p)	0.868	寄与率 $r=0.907$
第2項	28111(=q)	-0.052	
定数項	72.765(=r)		$r^2=0.822$

5. まとめ

今回提案したひずみ予測式によって空気量や気泡間隔係数の異なるコンクリートのひずみ挙動を概略再現できることがわかったが、現段階ではデータ数も少なく、予測式の改良やそのほかの要因を加える必要がある。しかし、今回の予測式に関する基本概念の方向性は、従来議論されてきた凍結融解のメカニズムに忠実に従うものであり、さらに検討を重ねることによってその予測精度をあげ、また普遍的に適用できる予測式が形成されていくと思われる。

コンクリートの凍害に関連するとされている因子は予測式で用いたもの以外にも凍結速度、飽水度、骨材の品質等多岐多彩にわたっており、それらを全て用いて評価することは現実には非常に困難な場合が多いが、現在までに多くの研究者によって蓄積されてきたデータからそれらの要因の中でコンクリートの耐凍害性を大きく支配するであろう要因とその影響についてはかなり明かなものになっている。従って、それらを合理的に組み合わせることによってコンクリートの凍結融解抵抗性をその材料特性や環境要因から推測することは近い将来可能になると考えられる。そのためには今後も体系的な実験を重ね、そのデータベースをもとにコンクリートひずみ挙動の追跡方法や、耐凍害性の予測手法を確立させることが望まれる。

参考文献

- 1) Powers, T. C. and R. A. Helmuth. : Theory of Volume Changes in Hardened Cement Paste During Freezing. Proceedings, Highway Research Board, v. 32, 1953, pp. 285-297
- 2) Powers, T. C. : Resistance of Concrete to Frost at Early Ages. Proceedings, RILEM Symposium on Winter Concreting, (Copenhagen, 1956), Danish National Institute of Building Research, Copenhagen, 1956, pp. C1-C47.
- 3) 吉川 弘道ほか : 凍結過程におけるセメントペースト中の凍結水量に関する研究、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第5部、V-127、pp. 280-281、1990.9