

論文 促進形凍結融解試験法の開発に関する基礎的研究

加藤直樹*1・加藤清志*2・河合紘茲*3

要旨：コンクリートの気象作用に対する耐久性評価には、全世界的に“凍結融解試験法”が多用されており、供試体の冷却技術も「塩化カルシウム飽和溶液法」や「ブライン溶液法」から、最近の冷却技術の進歩により「気中凍結・水中融解法」が装置の故障もほとんどなく、保守も容易で安定した装置となっている。しかしながら供試体寸法や形状、また、暴露条件等についての合理性の見直し・検討が行われていない実状にある。本報では、品質管理用円柱供試体および $-5^{\circ}\text{C}\sim+5^{\circ}\text{C}$ の暴露条件の実用促進法を提案している。

キーワード：コンクリート、凍結融解試験機、形状・寸法、動弾性係数、凍結温度

1. まえがき

コンクリートの凍結融解用供試体としては、 $10\times 10\times 40$ (以下、長角柱と呼ぶ)が使用されているが、この長角柱型は縦振動法とたわみ振動法とによる動弾性係数測定を意図している。しかし、現場および研究上の大勢は縦振動法が主体となっており、長角柱端部(小口)の劣化損傷が供試体側面中央部に影響を及ぼさない範囲を考慮したものと考えられるが、実際的には合理性がない。したがって、高さを1/2とした短角柱型や円柱型とすれば、きわめて作製しやすく、また、取扱いが容易となり、装置そのものもコンパクトにできる大きなメリットがある。なお、既往の研究^{1), 2)}もあるが実用性が低い。さらに、暴露温度も表面劣化という現象論的視点からすれば、下限温度を極低温まで下げる必要はなく、コンクリートの凍結が生じる温度範囲での凍結融解の繰り返し作用が劣化を促進させることが考えられ、促進試験法として合理的である。本報では、供試体寸法と形状、さらに、表面劣化のメカニズム、これを考慮した場合の下限温度として極低温法から氷点近傍の低温度までとした促進法の実用性を示す。

2. 実験方法

2.1 供試体形状・寸法の合理化の検討

凍結融解作用による表面劣化は、角柱型(図-1)については、一般に、その隅角部と表面はく離の損傷が顕著に現れる特徴がある。とくに、角柱の8辺のりょう(稜)は劣化を促進させすぎる傾向(促進試験としての意義)もあるので、これを2りょうと1曲面(平面は半無限大の1曲面)をもつ円柱供試体にすれば、強度管理供試体と併用でき、実務上、特別な型枠も必要とせず、きわめて有利である。

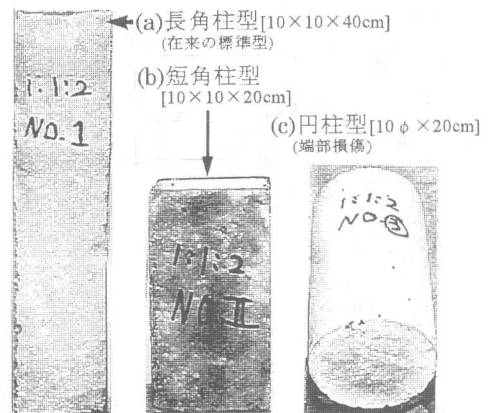


図-1 デンスミックスの表面劣化 (300cycle)

*1 浅野工学専門学校教授 建築工学科 (正会員)

*2 防衛大学校教授 土木工学教室 工博 (正会員)

*3 日本大学教授 生産工学部土木工学科 工博 (正会員)

2.1.1 実験方法

凍結融解試験は ASTM C-666 に準拠し、気中凍結・水中融解方式で行ない、供試体寸法および形状を考慮し、図-1 に示すように、10×10×40cm(長角柱型)、10×10×20cm(短角柱型)、φ10×20cm(円柱型)の3種を採用した。配合は、デンスミックスとリーンミックスとを考慮し、表-1 の示方配合を用いた。温度+5~-18℃の繰り返し300サイクルまで行ない、25サイクルごとに動弾性係数と質量変化を測定した。

2.1.2 実験結果と考察

図-1 はデンスミックス (1:1:2) の場合の300 サイクル暴露後の状況の一例で、いずれも健全であるが、円柱型端部に一部損傷が見られた。図-2 はリーンミックス (1:3:6) の場合の例で、長角柱・短角柱・円柱型の順に損傷が大きくなるのが定性的に判断できる。

表-2、表-3 に、それぞれ、終局サイクルまでのデンスミックスとリーンミックスの質量および動弾性係数の変化率を示す。なお、表面劣

化の程度を検出する目的から、人工 AE 疑似信号により物性評価が可能な AE/ultrasonic システム (USA, AET Co., Model 206Au ; センサー共振周波数 2.25MHz) により、応力波係数 (Stress wave factor) F を式 (1) により求めた。応力波係数の物性的意味としては、構造部材の F が小さくなるとその物性的特性が不良になることを示す³⁾。センサー標点距離は 100mm とした。

$$F = g \cdot r \cdot n \quad (1)$$

ここに、g: 超音波の繰り返し率, r: 自動リセット時間, n: 閾値(threshold)を超えた信号の数。

表-2 から、デンスミックスでは質量は吸水によりやや増大する傾向があるが、円柱型は鈍感である。動弾性係数変化率は角柱より円柱型が鋭敏である。表-3 から、リーンミックスでは質量も動弾性係数とともに、長角柱・短角柱・円柱に特有かつ評価可能な変化率を示している。短角柱と円柱型とを比較すると、前者のほうが質量変化率については約4倍近く、また、動弾性係数変化率については約2倍以上も大きい。

表-1 示方配合 (共通条件: 普通セメント, 粗骨材最大寸法 25mm, エステル系混和剤)

配合比	スランプ (cm)	空気量* (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	減水剤
1:1:2	15 (15.1~17.0)*	1.0~1.5	41.5	33	217	523	523	1046	1.58
1:3:6	15 (15.0~16.8)*	0.0~1.0	87.0	33	188	216	649	1298	-

* 実測の範囲

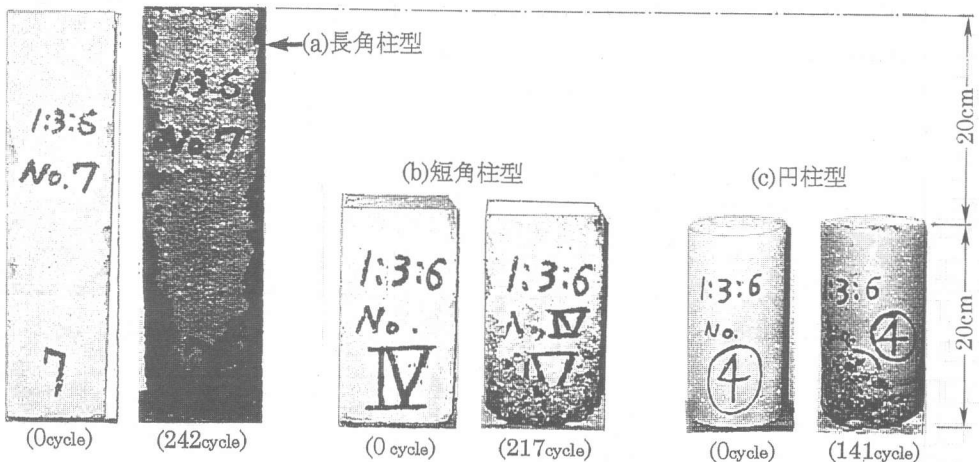


図-2 リーンミックス (1:3:6) の表面劣化の典型的な例

表-2 デンスミックス (1:1:2) の物性変化率 (300 サイクル経過)

供試体		質 量				動弾性係数				応力波係数			
形 状 (cm)	No.	W _o (kg)	W _f (kg)	変化率 (%)	平 均 (%)	E _o (kN/mm ²)	E _f (kN/mm ²)	変化率 (%)	平 均 (%)	F _o	F _f	変化率	平 均
10×10×40	1	10.00	10.04	+0.40	+0.46	35.0	34.9	-0.29	-1.01	504	503	0.998	1.001
	2	9.78	9.84	+0.61		36.5	36.1	-1.10		500	503	1.006	
	3	9.96	9.98	+0.20		39.1	38.7	-1.02		501	502	1.002	
	4	9.50	9.56	+0.63		37.1	36.5	-1.62		499	498	0.998	
10×10×20	I	4.72	4.74	+0.42	+0.42	37.7	37.3	-1.06	-1.06	490	499	1.018	1.012
	II	4.72	4.74	+0.42		38.1	37.7	-1.05		486	486	1.006	
φ 10×20	④	3.66	3.66	±0.00	±0.00	34.8	33.7	-3.16	-3.25	* *			
	⑤	3.66	3.66	±0.00		35.1	33.6	-4.27					
	⑥	3.62	3.62	±0.00		34.5	33.7	-2.32					

表-3 リーンミックス (1:3:6) の物性変化率 (217~116 サイクル経過)

10×10×40	5	9.98	9.86	-1.20	-1.88	36.5	29.8	-18.36	-17.64	504	502	0.996	0.994
	6	9.96	9.84	-1.20		35.6	28.1	-21.07		505	501	0.992	
	7	9.86	9.60	-2.64		36.1	31.6	-12.47		504	502	0.996	
	8	9.64	9.40	-2.49		33.8	27.5	-18.64		503	499	0.992	
10×10×20	III	4.70	4.50	-4.26	-4.25	32.3	27.5	-14.86	-8.84	504	502	0.998	1.002
	IV	4.76	4.64	-2.52		32.0	30.1	-5.94		503	502	0.998	
	V	4.72	4.44	-5.93		36.0	24.7	-4.84		501	501	1.000	
	VI	4.66	4.46	-4.29		30.0	26.9	-9.73		474	479	1.011	
φ 10×20	④	3.64	3.62	-0.55	-1.25	25.9	24.9	-3.86	-4.00	* *			
	⑤	3.72	3.68	-1.08		24.6	23.5	-4.47					
	⑥	3.76	3.68	-2.13		24.5	23.6	-3.67					

(備考) サフィックス O: 暴露前, f: 暴露終了時; *: 測定せず。測定には曲面治具を要する。

共振振動数が不安定になる測定最終サイクルは、短角柱は 190 サイクル程度、円柱型は 116 サイクル程度であり、とくに、後者が早期判定が可能であることに特徴がある。応力波係数については、本実験の範囲では有意な特性値として評価は困難であった。

2.1.3 形状・寸法に関するまとめ

(1) 通常の管理供試体を用い、かつ、迅速評価には円柱型がよい。(2) 短角柱型は作製と手数を要し、かつ、約 10 日間遅れるが、より大きな評価値を求ことができる。(3) いずれにしても、試験槽容量は 1/2 でよく、その合理性は大きい。

2.2 表面劣化を考慮した促進型凍結融解試験法の開発

短角柱型または円柱型供試体は、長角柱型供試体に比べ、さまざまな長所があるが、とくに、円柱には常用管理供試体を活用できるので実用性が高い。本節では表面劣化のメカニズムを示し、この理論的背景に基づき、従来の極低温サイクルからコンクリート内部水の凍結温度近く

の低温サイクルでも、耐久性評価の可能なことを示す。

2.2.1 表面劣化のメカニズム

従来の凍結融解作用によるコンクリートの劣化のメカニズムは、内部崩壊を主因としているが⁴⁾、本報では現象的事実を踏まえ、表面劣化 (Scaling) が内部に進行するものと考え、コンクリート・システムをモデル化し、材粒子がペーストまたはモルタルマトリックスの付着を断ち切り、分子の押し出し力との平衡条件から説明し、また、本基本コンセプトを拡張すると、凍結融解試験法もさらに合理化されうること示すものである。

(1) マトリックスのスケーリング

図-3 に示すように、表面劣化には、① 独立気泡内に浸透した水の結氷圧による場合、② 骨材粒子界面に浸透した水の結氷圧による場合等の二つのプロセスがあるが、基本的には同一のスケーリング現象といえる。①の場合、仮想厚肉球殻が氷圧により弾性破損するものと仮定す

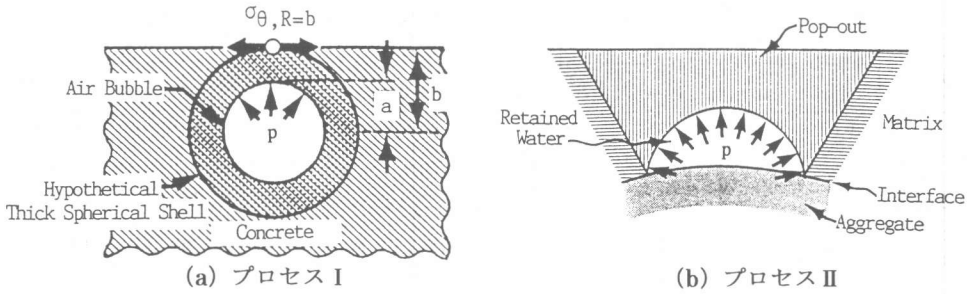


図-3 マトリクスのスケーリングモデル

ると、最大接線方向引張応力 $\sigma_{\theta, \max}$ は、 $\sigma_{\theta, \max} \equiv f_{td}$ より、

$$\lambda \equiv b/a = \{(1+p/f_{td}) / (1-0.5p/f_{td})\}^{1/3} \quad (2)$$

ここに、 p : 内圧、 f_{td} : 設計引張強度、 $a \cdot b$: 球殻の内・外半径

$p=2f_{td}$ で、 $\lambda \rightarrow \infty$; すなわち、弾性破損開始あ

るいは破壊停止限界内圧を意味しており、一種の“臨界状態”といえる。いっぽう、平衡氷点温度 T と圧力 p との関係は、近似的に

$$p = p_0(1 - T/0.0099) \quad (3)$$

ここに、 p_0 : 標準気圧 (760mmHg)

臨界状態での氷結温度を“臨界温度” T_c とする

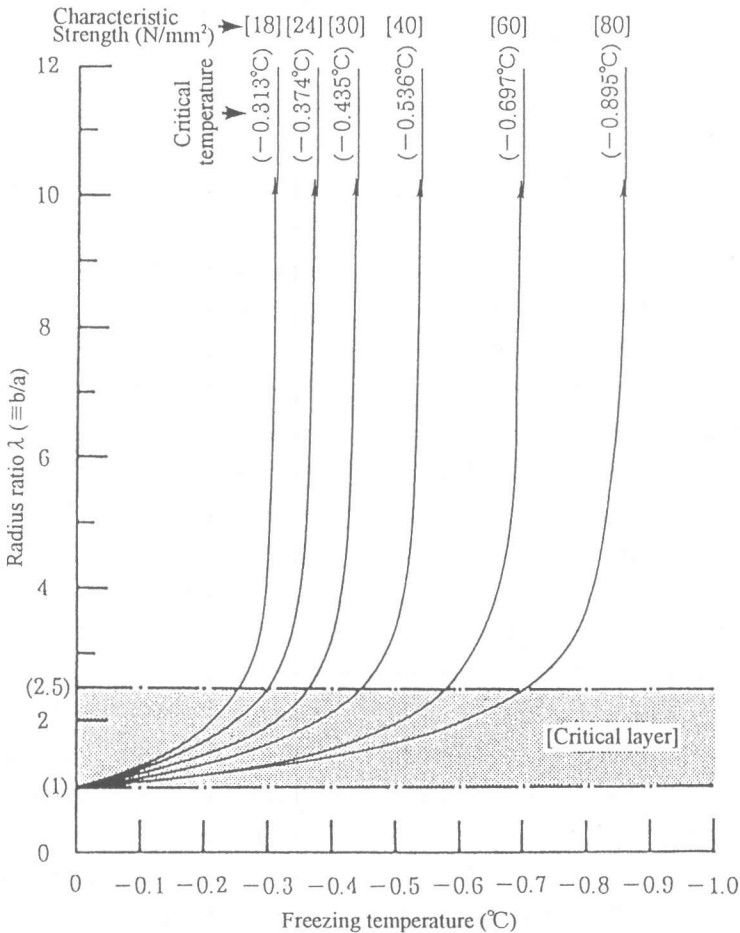


図-4 強度をパラメーターとした半径比と氷点温度との関係

と、

$$T_c = 0.0099(1 - f_{id}/0.5p_c) \quad (4)$$

前述半径比 λ は

$$\lambda = \left[\frac{1 + 0.098(T/0.0099 - 1)/f_{id}}{1 - 0.5 \times 0.098(T/0.0099 - 1)/f_{id}} \right]^{1/3} \quad (5)$$

臨界温度を考慮しつつ、設計引張強度ごとの半径比と氷点温度との関係を図-4 に示す。図から、

- ① 同一半径比であっても、高強度コンクリートほど氷点温度は低下する。
- ② 同一強度コンクリートでも、半径比の増大とともに氷点温度は低下する。
- ③ 半径比-氷点温度関係で、半径比約 2.5 でキックが求まり、この特異点までは半径比増大に対し、コンクリート強度にも氷点温度にも“組織敏感”である。この特異点を超えると、“組織鈍感”となる。
- ④ この“組織敏感”な層を“組織鈍感”な層に体質を改善することが耐久性向上に連係する。この層を凍結融解作用下における“臨界層”(Critical layer)と呼ぶことにする。この臨界層は「乾湿潤作用」下におけるひび割れ開始厚さ“限界絶乾深さ”⁵⁾に相当するともいえる。
- ⑤ EX. $a=250 \mu\text{m}$ とすると、 $b/a=2.5 \therefore b=2.5 \times 0.25 \approx 0.63\text{mm}$ 。すなわち、コンクリート強度に無関係に 1mm 弱、0.7mm が“臨界層”といえる。

なお、本問題を球殻の場合をモデル化して議論したが、半無限体中の圧力球とした場合には、その頂部の応力は前者に比しやや緩和されるが、本例では安全側に評価している。

(2) 骨材粒子のポップアウト

前項のマトリクスへのポップアウトに伴うスケールリングが進行すると、図-5 の模式図に示すように、骨材粒子が露出してくる。粒子下面にある気泡に水が浸透し、これらが氷結すると内圧力(押し出し力) f_p が生じ、これが粒子界面の付着強度 f_{bo} を断ち切るように粒子をポップ

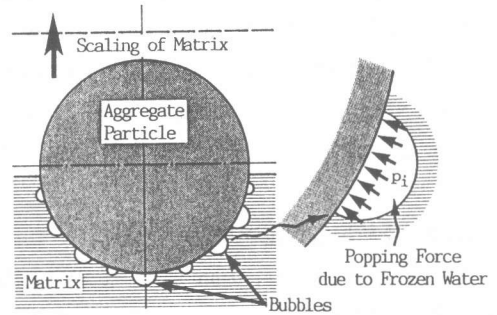


図-5 骨材粒子のポップアウトのモデル化

アウトさせる。いま、粒子界面上の単位面積あたりの平衡条件は、気泡の半球が骨材粒子界面と接するものと仮定すると、式(6)で与えられる。

$$f_{bo} = f_p (\equiv A_a \cdot p = \pi d^2/4 \times n) \quad (6)$$

ここに、 A_a : 気泡付着面積、 d : 気泡の直径、 n : 界面上の単位面積あたりの気泡数

一般に、AE コンクリートに対し、気泡の平均径は $250 \mu\text{m}$ が多く、したがって、単位面積あたりの平均個数 n は、図-6 に示すように気泡分布を仮定すると約 $7 \text{個}/\text{mm}^2$ となる。ペーストマトリクスの付着強度⁶⁾ f_{bo} は

$$f_{bo} = 0.03f'_{cp} \quad (7)$$

ここに、 f'_{cp} : ペーストマトリクスの圧縮強度式(6)は、式(8)のように変形される。

$$f_p = 7(\pi d^2/4)p = 1.75 \pi d^2 p \quad (8)$$

骨材粒子のポップアウトの可能性は、 f_{id} と f_p との比較により判定される。

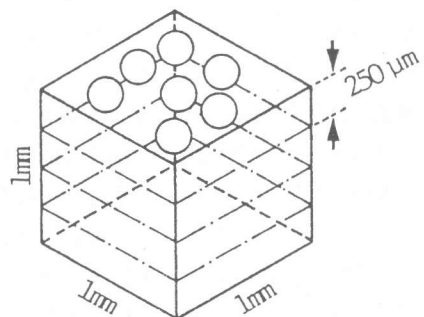


図-6 気泡分布の模式図

[EX.] $d=250\mu\text{m}$, 環境温度 -1°C , ペーストマトリクスの圧縮強度 $40\text{N}/\text{mm}^2$; $p=10.0\text{N}/\text{mm}^2$, $f_p=1.75\pi \times 0.250^2 \times 10.0=3.44\text{N}/\text{mm}^2$, $f_{b0}=0.03 \times 40=1.20\text{N}/\text{mm}^2$. よって, $f_p > f_{b0}$; ポップアウトの可能性はある。

2.2.2 凍結融解促進試験法の検証

前項の“臨界層”は、1mm弱で、しかも、臨界温度は -1°C 弱でスケーリングが発生することが明らかとなった。よって、温度管理の精度を考慮し、促進法として $+5^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$ で、1サイクル45分（標準試験で約4時間）、かつ、供試体も $10\phi \times 20\text{cm}$ の円柱管理試験用とするのが、きわめて合理性が高い。実験的に検証するために、表-1のリーンミックス（1:3:6）の配合を採用した場合の劣化状況を図-7に、また、サイクル数に伴う動弾性係数低下状況を図-8に、それぞれ示す。図-7から、図-2に示す表面劣化状況とよく対抗しており、また、図-8から物性変化をよく示していることがわかる。

3. まとめ

従来の凍結融解試験法に関する見直しに関する研究はきわめて少なく、ややもすれば試験のための試験のおそれがある。このような反省から、供試体寸法・形状は、実用的には通常の品質管理用円柱型は汎用性があり、扱いやすく、試験機そのものも小型・経済的となり、したがって、生コン試験室にも整備されやすく、耐久性に関する関心を高めることができる。また、表面劣化のメカニズムを示し、臨界層の存在を明らかにし、この層にスケーリングを生起させる臨界温度は氷点近くにあるので、従来の $-18 \sim +5^{\circ}\text{C}$ 暴露を $-5 \sim +5^{\circ}\text{C}$ の凍結融解作用の繰り返しでも耐久性評価が可能であることを明らかにした。なお、リーンミックスで $W/C=87\%$ で、迅速かつ顕著な結果を求める手法を採用したが、実用配合コンクリートに関する検証を次の課題としたい。

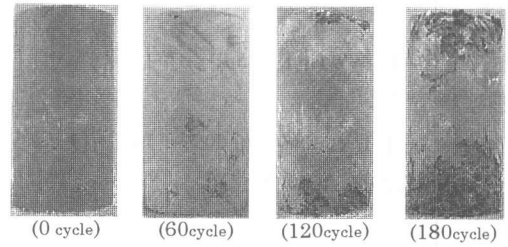


図-7 円柱型供試体の表面劣化状況

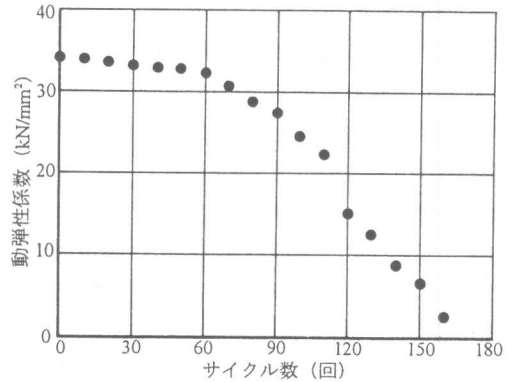


図-8 動弾性係数とサイクル数との関係

参考文献

- 1) 石田 宏: コンクリートの凍結融解促進試験法, 第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.349-352, 1980.5.
- 2) 長谷川寿夫: コンクリートの凍結融解方法が試験結果に及ぼす影響, セメント技術年報, 39, pp.118-121, 1935.
- 3) Kato, K.: Evaluation of Physical Properties of Concrete by AE/Ultrasonic Test, Proc. 29th Jpn. Cong. Mat. Sci. Res., pp.159-166, May 1986.
- 4) Powers, T.C.: A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete, ACI Jour. Vol.41, pp.245-272, 1945.
- 5) Kato, K., Kato, N. and Kawai, T.: Variation of Corrosion Degree and Mechanism of Surface Cracking of RC Structure, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.710-717, 1998.12.
- 6) Hsu, T.C. and Slate, F.O.: Tensile Bond Strength Between Aggregate and Cement Paste or Mortar, ACI Jour., pp.465-486, Apr. 1963.