

(V-18) 凍結融解作用によるコンクリートの劣化メカニズムに関する研究

浅野工専 正会員 加藤直樹

防衛大 正会員 加藤清志 日大生産工 フェロー会員 河合紘茲

1. ま え が き

従来の凍結融解によるコンクリートの劣化メカニズムは、内部崩壊を主因としているが、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、骨材粒子がペーストまたはモルタルマトリクスの付着を断ち切り、水分子の押し出し力との平衡条件から説明できることを明らかにした。さらに、さらに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。

2. 表面劣化の理論メカニズム

2.1 マトリクスのスケーリング

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 (図 1) 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、球殻が氷圧により弾性破損するものと仮定すると、

$$\sigma_{\theta, \max} \equiv f_{td} \text{ より、} \lambda \equiv b/a = \{(1+p/f_{td})/(1-0.5p/f_{td})\}^{1/3}$$

ここに、 p : 内圧、 f_{td} : 設計引張強度

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

$p=p_0(1-T/0.0099)$ 。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 とすると、

$T_c=0.0099(1-f_{td}/0.5p_0)$ 。結局、前述入は

$\lambda = \{[1+0.098(T/0.0099-1)/f_{td}]/[1-0.5 \times 0.098(T/0.0099-1)/f_{td}]\}^{1/3}$ 。図 1 マトリクスのスケーリングのモデル

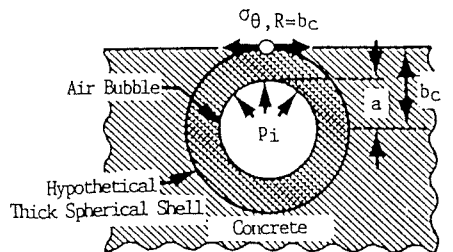
- ① 同一半径比であっても、高強度コンクリートほど氷点温度は低下する。
- ② 同一強度コンクリートでも、半径比の増大とともに氷点温度も増大する。
- ③ 半径比-氷点温度関係で半径比約 2.5 でキックが求まり、この特異点までは半径比増大に対し、コンクリート強度にも氷点温度にも“組織敏感”である。この特異点以上では、“組織鈍感”となる。
- ④ この“組織敏感”な層を“組織鈍感”な層に体質を改善することが耐久性向上に連係する。この層を凍結融解作用下における“臨界層”(critical layer)と呼ぶことにする。この臨界層は「乾湿潤作用」下におけるひび割れ開始厚さ“限界絶乾深さ”に相当するともいえる。
- ⑤ EX. $a=250\mu m$ とすると、 $b/a=2.5 \therefore b=2.5 \times 0.25 \approx 0.63mm$ 。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ことがわかっているが^{6,18)}、本例では安全側に評価している。

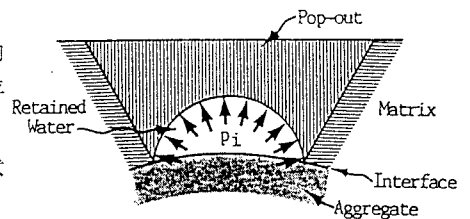
2.2 骨材粒子のポップアウト

図 3 に模式図を示す。前項のマトリクスのポップアウトに伴うスケーリングが進行すると、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、こら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アウトさせる。

キーワード: 凍結融解作用、氷結膨張、表面劣化; 〒221-0012 横浜市神奈川区子安台 1-3-1、浅工専 加藤直樹



プロセス I (a)



プロセス I (b)

いま、粒子面上の単位面積当たりの平均設計基準強度(N/mm²)→[18][24][30][40][60][80]
 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、次式で与えられる。

$f_{bo}=f_p(\equiv A_a \cdot p_i = p_i \pi d^2/4 \times n)$
 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 $250 \mu m$ が多く、したがって、単位面積当たりの平均個数 n は、図4に示すように気泡分布を仮定すると、約 7 個/mm^2 となる。ペーストマトリクスの付着強度 f_{bo} は $f_{bo}=0.03f'_{cp}$ 。ここに、 f'_{cp} : ペーストマトリクスの圧縮強度¹⁾

上式は次のように変形される。

$$f_p = 7(\pi d^2/4)p_i = 1.75 \pi d^2 p_i$$

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

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

3. 凍結融解促進試験法の提案

以上の「臨界層」は、強度に無関係に 1 mm 弱で、しかも、臨界温度は $-1^\circ C$ 弱でスケーリングが発生するのである。よって、温度管理の精度を考慮し、促進法として $+5^\circ C \sim -5^\circ C$ で、かつ、供試体も $10 \phi \times 20 \text{ cm}$ の円柱管理試験用²⁾ とするのが、きわめて合理性が高い。

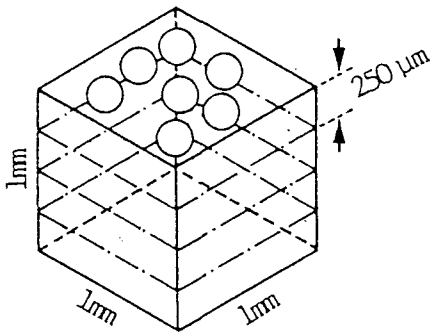


図4 気泡分布の模式図

〔謝 辞〕ワープロは防大 青木友彦事務官の尽力によった。付記して謝意を表する。

〔参考文献〕1) Hsu, T.C. and Slate, F.O.: Tensile Bond Strength Between Aggregate and Cement Paste or Mortar, ACI Jour., Apr. 1963, pp.465-486. 2) 加藤直樹ら：凍結融解供試体の形状および寸法の合理化に関する研究、土木学会 53 回年講、5、平成 10 年 10 月、pp.632-633。

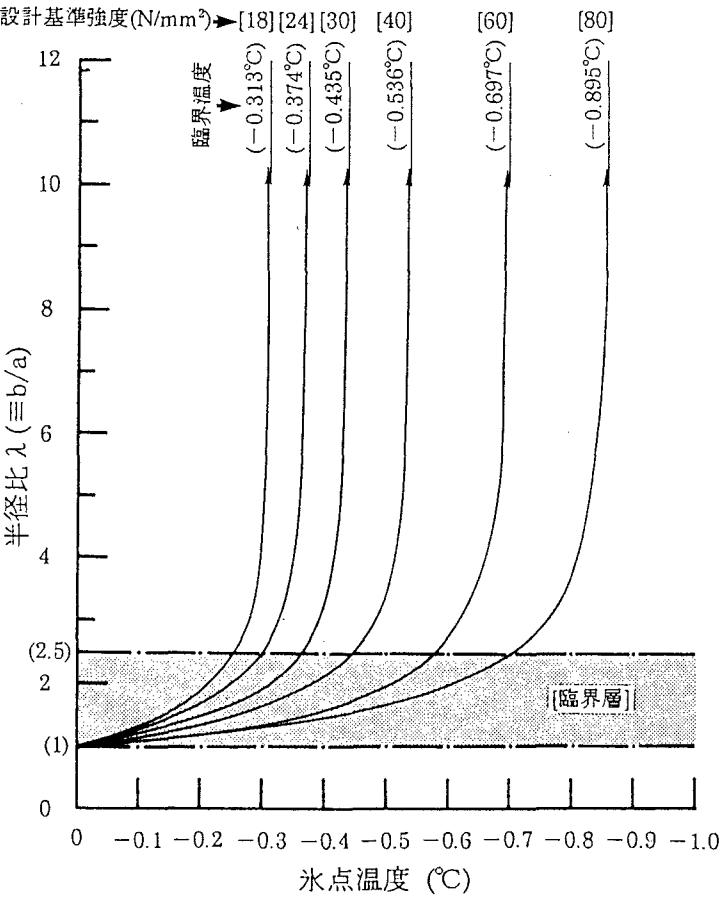


図2 強度をパラメーターとした半径比と氷点温度との関係

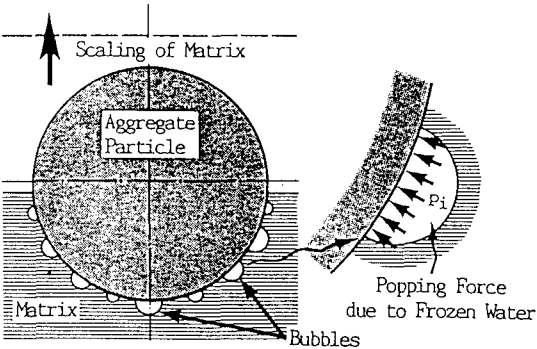


図3 骨材粒子のポップアウトモデル