

## [1147] コンクリートの凍結融解作用による表面劣化機構と耐久性向上法に関する研究

加藤 直樹<sup>\*1</sup>・加藤 清志<sup>\*2</sup>・河合糸茲<sup>\*3</sup>

### 1. まえがき

コンクリート構造物の全世界的な課題のひとつに、耐久性の早期劣化があげられる。とくに、日本列島の地域的特性から、極寒から極暑にさらされ、かつ、海国という環境条件を考えると、この設計思想はきわめて厳しい条件を設定しなければならない。加藤ら[1]は、すでに、基本的にはコンクリートへの水の浸透遮断が耐久性向上に最重要であるというコンセプトに基づき、乾湿潤作用について実験検証したが、さらに、本報においては、一般に耐久性試験方法のうちで、もっとも厳しい条件とされている「凍結融解試験」により、コンクリートの表面保護剤あるいは浸透型防水剤を使用し、耐久性向上の効果を検証し、その劣化基本メカニズムを考察し、透水遮断の重要性を明らかにするものである。

### 2. 乾湿潤作用と凍結融解作用との集合論的位置づけ

コンクリート構造物への水の浸透の影響は、物理的には乾燥収縮・湿潤膨張応力を卓越させ、また、化学的には中性化や化学物へのイオン化を促進させ、コンクリートの変質劣化現象の元凶となっている。一方、凍結融解作用を受けた場合、水の物性変化とコンクリート内部応力変化に対応する。両者に関し、「乾燥」と「凍結」とは「水の存在」下における両極端の現象であり、「温度軸」と「繰り返し経過時間軸」上で同一線上の現象であることを集合論的にできることを示した[1]。

### 3. 実験方法

#### 3.1 コンクリート供試体と配合条件

供試体は、JIS A 6204 付属書2に準拠し、100×100×400mmの角柱で、型わくへ打込み1日湿空後脱型し、6日間水中(20°C)の標準養生を行い、2日間室内で気乾状態とし、その後1日1回、2度にわたり表面保護剤を塗布したのち、凍結融解作用に暴露した。コンクリートの示方配合を表-1に示す。同表中、配合比はC:S:Gを示し、質量比である。強度的には100~500kgf/cm<sup>2</sup>をカバーするものである。

#### 3.2 凍結融解試験装置

本装置は1槽式、気中凍結・水中融解方法を採用しており、その特性は前記JISに準拠し、+5°C~-18°C(±2°C)を3~4hr/cで繰り返されるが、温度管理状況を図-1に示す。

#### 3.3 コンクリート表面保護剤

表面保護剤には、発水系で多用される高級脂肪酸を主成分とするもの(PFと略記。従来のシリコーン系やアクリル系と違い、効果が大きく持続する。)と、遮断系で多用される変性ポリエ

\*1浅野工学専門学校助教授 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日本大学助教授 生産工学部土木工学科、工博（正会員）

表-1 コンクリートの示方配合(8種)

配合比	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kgf/m <sup>3</sup> )			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
1:1:2	3(2.8-3.8)*	1.0-2.2	37.4	33	200	541	541	1082
	15(15.1-17.0)	1.0-1.5	41.5	33	217	523	523	1046
1:1.5:3	3(1.5-1.8)	1.0-1.3	42.0	33	168	401	600	1202
	15(14.1-15.7)	0.8-1.4	49.0	33	191	391	586	1172
1:2:4	3(3.5-4.3)	0.3-0.7	55.0	33	174	316	632	1262
	15(14.0-16.0)	0.5-1.5	59.0	33	182	309	618	1236
1:3:6	3(1.3-3.8)	0.1-0.8	77.7	33	171	221	662	1323
	15(15.0-16.8)	0-1.0	87.7	33	188	216	649	1298

(最大骨材寸法20mm、\*カッコ内は実測値の範囲)

ステルの共重合体を主成分とする油性浸透タイプ(PSと略記。すぐれた耐摩耗性がある。)の2種を採用した。

#### 3.4 試験項目および方法

試験項目およびその方法は次項のとおりである。(1)スランプ試験 JIS A 1101-1975 (2)空気量試験 JIS A 1118-1975 (3)圧縮強度試験 JIS A 1108-1976 (4)凍結融解試験 前述3.1, 3.2参照 (5)動弾性係数試験 JIS A 1127-1976 (6)質量減少率測定 凍結融解作用を与える前の質量を基準とし、所定サイクル数ごとの質量減少量との比率。

### 4. 実験結果

#### 4.1 強度特性

図-2に、スランプ15cmの場合の圧縮強度と材齢との関係を示すが、通常の増進率を示している。

#### 4.2 凍結融解作用に伴う質量減少率

配合比1:1:2, 1:1.5:3, 1:2:4, 1:3:6の順に質量減少が顕著となるが、ティピカルな例として、

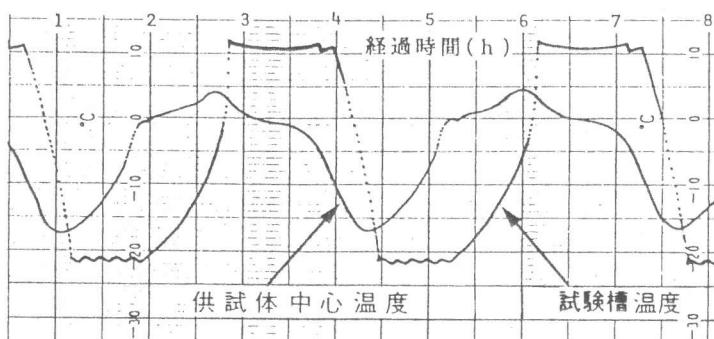


図-1 凍結融解装置温度管理図

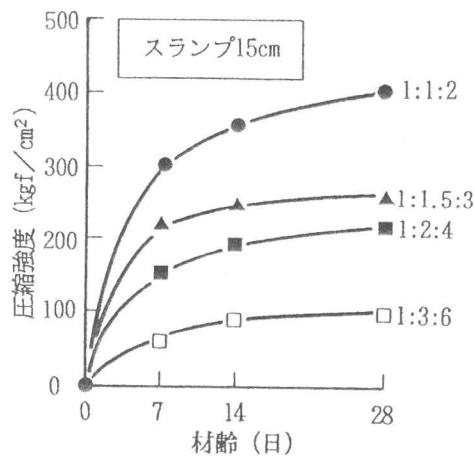


図-2 圧縮強度と材齢との関係

1:2:4、スランプ3cmの凍結融解315サイクルまでの供試体質量減少の状況例を図-3に、また、面劣化の状況を富配合の1:1:2(スランプ15cm)、貧配合の1:3:6(スランプ3cm)について

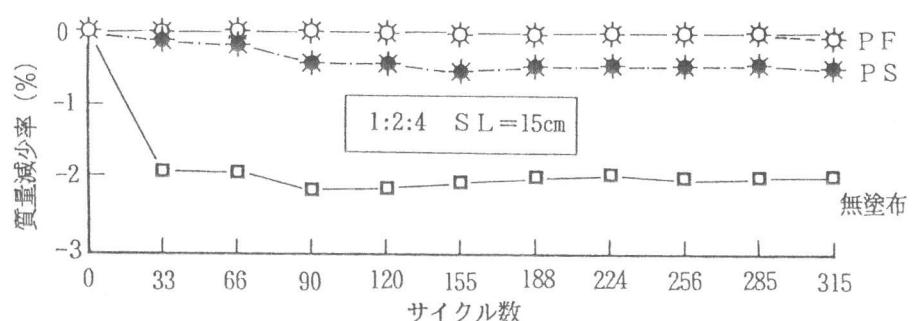


図-3 凍結融解サイクル数と質量減少率との関係

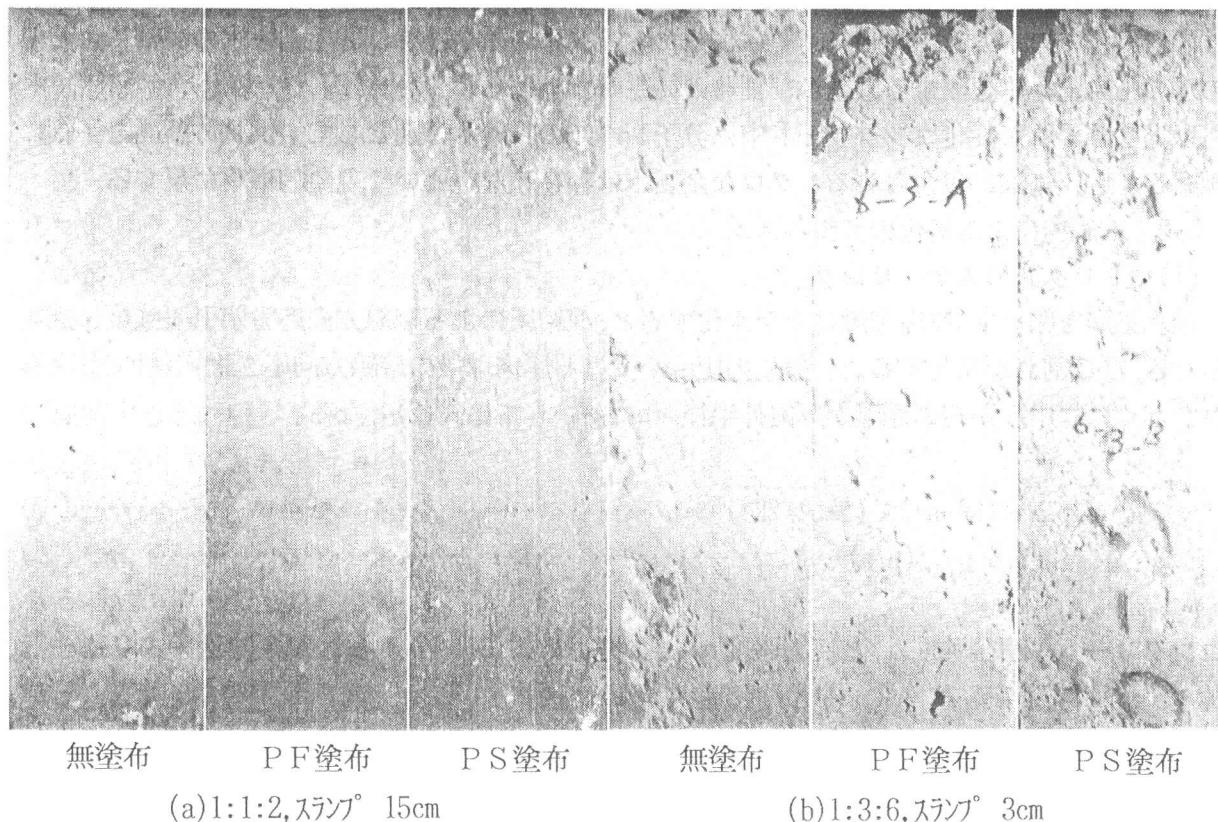


図-4 凍結融解作用による表面劣化状況

図-4に示す。富配合でスランプ15cm軟練りであっても劣化が激しくなく、一方、貧配合で硬練りであっても劣化が激しい。この現象的事実は単位セメント量の多寡に伴うペーストマトリクスの量とその濃度に強く依存していることがわかる。また、表面保護剤の使用は有効で、その成分にも依存し、とくに、高級脂肪酸型(PF)が効果が大きい。

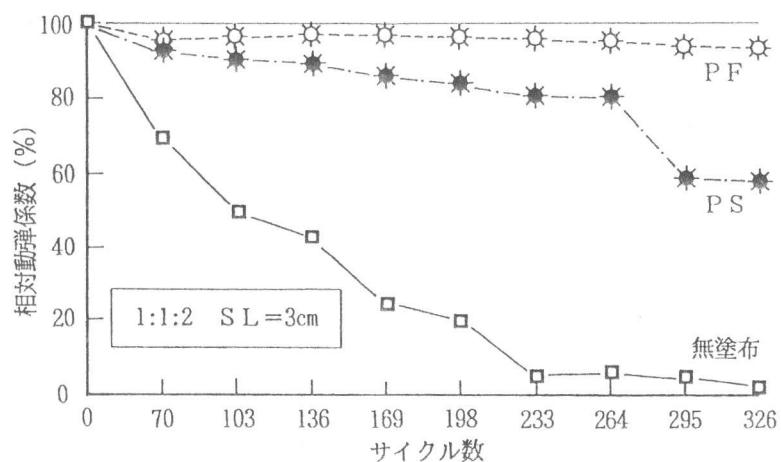


図-5 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数との関係

### 4.3 相對動彈性係數

図-5は、凍結融解サイクル数と相対動弾性係数との関係の一例を示す。無塗布は単調に動弾性係数が低下するが、PF、PS塗布とも耐久性向上に効果があり、とくに、PF塗布がすぐれていることがわかる。

## 5. 考察

以上の凍結融解作用によるコンクリートの表面劣化は環境からの水の補給に起因していることが明かで、この解明が必要である。

## 5.1 既往の研究による劣化のメカニズム

①粗大孔中の水の凍結膨張(+9%)によるマトリクスの引き裂き、②毛細管水の凍結による他の水の圧力上昇に起因する微細ひび割れの発生等があげられている[2]。

以上はいずれも硬化コンクリート中に分子レベルの吸着水は別として、供試体断面を仔細に観察しても、気泡に包含されるマクロな余剰水は存在しないという現象的事実に反する。

## 5.2 本研究による劣化のメカニズム

### (1) マトリクスのスケーリング

透水気泡を図-6の厚肉球殻にモデル化すると、凍結圧による接線方向応力が引張強度に達するとき、ひび割れが発生する。一般に内圧 $p_1$ を受ける厚肉球殻の接線方向応力は式(1)で与えられ、とくに、中心からの距離が厚肉外半径 $R=b$ にたいしては式(2)となる。

コンクリートの引張強度  $\sigma_t$  と圧縮強度  $\sigma_c$  との関係は式(3)で与えられる[3]。

図-7の厚肉球殻の破損条件は式(2)・(3)とから、

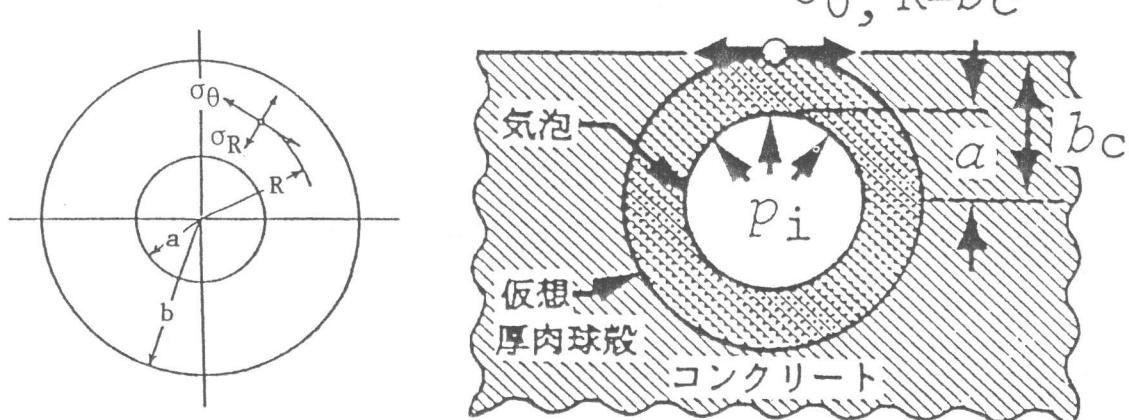


図-6 厚肉球殻の断面

図-7 内圧を受ける気泡殻

$b_c$ は”限界遮水厚さ”で、気泡内半径 $a$ をパラメーターとし、限界遮水厚さとコンクリート強度との関係を図-8(内圧、 $p_i=1800\text{kgf/cm}^2$ の場合)に示す。

いま、 $a=0.25\text{mm}$ ,  $p_i=1800\text{kgf/cm}^2$ [4],  $\sigma_c=300\text{kgf/cm}^2$ のとき、 $b_c=1.21\text{mm}$ となり、これ以下ではボップアウトし、表面劣化の核になる。

図-8から、高強度コンクリートほど限界遮水厚さが小さくなり、セメント量の多いほど有利であること、径の大きな気泡ほど強度に大きく依存するので、十分な締固めにより大きな気泡の除去をはかるべきことの重要性がわかる。また、連行空気のような $25\sim50\mu\text{m}$ といった微小な空気泡は強度の増減には鈍感で、ごく小さな限界遮水厚さでよいことは興味深い。

## (2) 骨材粒子のポップアウト

図-9に示すように、前述のマトリックスの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、これらが凍結すると内圧力（押し出し力 $f_p$ ）が生じ、これが粒子界面の付着強度 $\sigma_b$ を断ち切るように粒子をポップアウトさせる。いま、粒子面上の単位面積あたりの平衡条件は式(6)で与えられる。

$$\sigma_{bo} = f_p (= A_a \cdot p_i = 1.75 \pi d^2 p_i) \dots \dots \dots \quad (6)$$

ここに、 $A_a$ :気泡付着面積、 $d$ :気泡の直径いま、 $d=250\text{ }\mu\text{m}$ ,  $p_i=1,800\text{kgf/cm}^2(-18^\circ\text{C})$ とする  
と、押し出し力 $F_p=6.2\text{kgf/cm}^2.$

ペーストマトリクスの圧縮強度、 $300, 200 \text{kgf/cm}^2$  とする  
と、付着強度  $\sigma_{\text{bo}} = 9.0, 6.0 \text{kgf/cm}^2$  となり、前者はポップアウトしないが、後者ではその可能性が生じる。

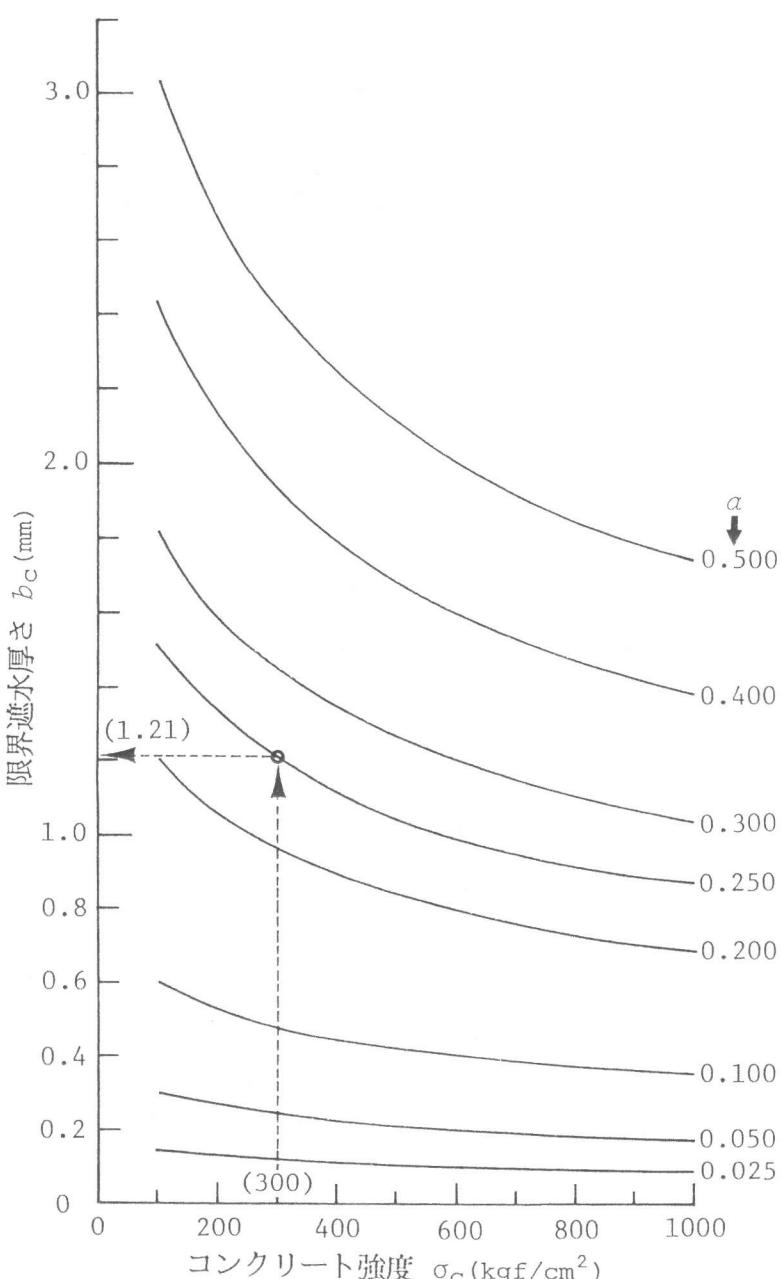


図-8 コンクリートの限界遮水厚さと強度との関係

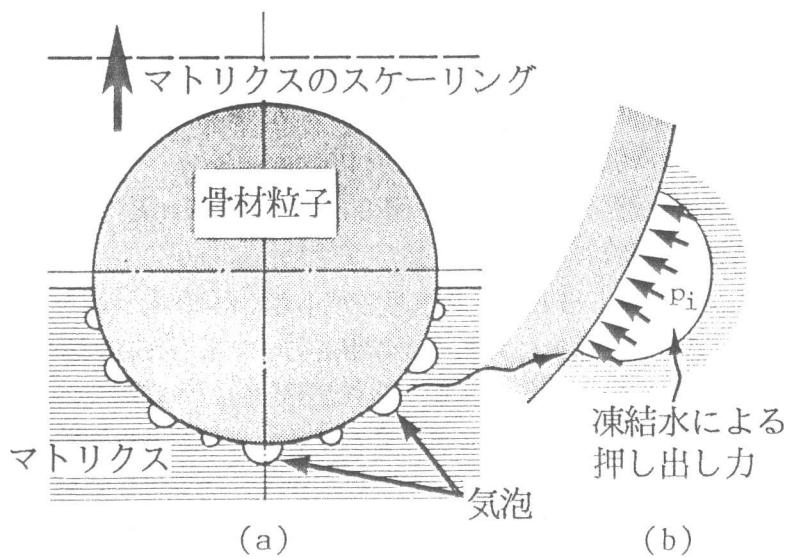


図-9 骨材粒子のポップアウトのモデル化

### 5.3 表面保護による透水遮断のメカニズム

一般に表面保護剤は、コンクリートからのエフロレッセンスの折出・中性化・塩害等の防止、また、防水剤としても機能することがわかっているが、高級脂肪酸型については細孔に浸透したのち、溶剤が発散し溶質のコーポリマーが充てんされるものであり、変性ポリエステル型は強固な接着力と安定被膜の形成が透水遮断に寄与するものである。

## 6. 結論

コンクリート構造物の耐久性向上には、表面保護剤は有効で、とくに、本研究の範囲では、高級脂肪酸型がよく、図-4の表面劣化の状況からわかるように、基本的には、配合比1:1:2単位セメント量の増大を含む透水遮断効果に依存する。また、構造物表面劣化の観点から、気泡限界遮水厚さの存在を明らかにした。

### [謝辞]

実験には防衛施設庁 長嶺 正勝技官および浅野工学専門学校卒業生に、また、ワープロは防衛大学校 治郎丸 良英 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) 加藤 清志・加藤 直樹: コンクリートの乾・湿潤作用による耐久劣化とその対策、セ技年報 41, 1987, pp.359-362
- 2) 村田・長滝・菊川: 土木材料・コンクリート, 共立, p. 130, 1993
- 3) Price, W.H.: Factors Influencing Concrete Strength, ACI Jour. V.47, No.6, Feb. 1951, pp.417-432.
- 4) 山宗化学: AE剤ビィンソルについて、1978