

V-16

凍結融解作用を受けるコンクリートの耐久性予測について

北海道大学工学部 ○学生員 中村 剛司
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 大沼 博志
 北海道大学大学院工学研究科 正会員 名和 豊春
 (財) 電力中央研究所 広永 道彦

1. はじめに

コンクリートの凍害は、寒冷地あるいは高地に建設された構造物に生じる代表的な劣化現象の1つであり、コンクリート中の水分が夜間に凍結して水の膨張が生じ、日中に融解するという繰返しの作用を受けることがその主原因である。ASTM や JIS に規定されているコンクリートの凍結融解試験方法は、繰り返し回数が 300 サイクルに達するまで、あるいは相対動弾性係数が 60% に低下するまで試験を実施するもので、配合、使用材料、混和剤などが異なる場合の相対的な耐凍害性を評価するために用いられてきた。本研究は、耐凍害性に優れた AE コンクリートについて、その耐用期間の予測をするために、この凍結融解試験法が適用できないか検討したものである。

2. 凍結融解試験の概要

実験に使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、細骨材は山砂、粗骨材は陸砂利である。混和剤には AE 減水剤を用いた。コンクリートの配合表を表 1 に示す。また、 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の円柱供試体で得られたコンクリートの力学的性質を表 2 に示す。材齢 91 日の圧縮強度は 29.2N/mm^2 であった。

AE コンクリートの凍結融解作用に対する耐久性を評価するために、気中および水中凍結融解試験を行った。まず、気中凍結融解試験の方法は、雰囲気温度と湿度を所定の値に制御することのできる試験室の中にコンクリート供試体を置き、温度および湿度サイクルを与えた。40℃から-20℃の温度履歴を、1 日 2 サイクルで 1500 サイクルまで賦与した。このときの供試体中心の温度は、最低温時が約-10℃で、最高温時は 29℃であった。また、湿度は試験室の温度が 20℃以上のときのみ、相対湿度を 80% に制御した。

表 1 コンクリートの示方配合

粗骨材最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	粗骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
					水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (C+F)× 0.25 (%)
25	12±2.5	4±1	53	41	138	208	52	775	1138	0.605

表 2 コンクリートの物性値

材齢 \ 項目	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ³ N/mm ²)	ポアソン比	比重
7	13.1	1.52	23.5	0.15	2.27
28	22.6	2.19	26.5	0.20	2.29
91	29.8	2.21	30.0	0.19	2.30

Durability of AE Concrete subjected to Freezing and Thawing Action

By T.Nakamura, H.Ohnuma, T.Nawa and M.Hironaga

次に、水中凍結融解試験の方法は、ASTM および JIS の規定に準拠したものである。ゴム製の容器内に水を満たした状態でコンクリート供試体を入れ、これを試験槽内のブライン液に漬けた。供試体の温度履歴が5℃から-18℃となるようにブライン液温度を制御し、1日6サイクルで2500サイクルまで賦与した。

供試体は全て 10×10×40 cmの角柱であり、気中および水中凍結融解試験の供試体数はそれぞれ 33 本および 27 本であった。

3. 凍結融解試験の結果および考察

凍結融解試験では、質量変化、共振法と超音波法によってコンクリートの動弾性係数、また水中凍結融解試験においてはさらに曲げ強度を測定した。

共振法の相対動弾性係数と動弾性係数は、それぞれ次の (1) 式と (2) 式によって算定した。

$$P_C = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100 \cdots (1) \quad E_D = C \cdot W \cdot f^2 \cdots (2)$$

ここで、 P_C は 測定サイクルにおける相対動弾性係数(%), f_0 は試験開始時におけるたわみ振動の一次共鳴振動数(サイクル/sec), f_n は測定サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数(サイクル/sec), E_D は動弾性係数, C は供試体の形状係数, W は測定時における質量, f は測定時におけるたわみ振動の一次共鳴振動数である。

また、超音波法の相対動弾性係数と動弾性係数は、それぞれ次の (3) 式と (4) 式によって算定した。

$$P_V = \frac{v_n^2}{v_0^2} \times 100 \cdots (3) \quad E_V = \frac{v^2 \cdot \rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}{g \cdot (1 + \mu)} \cdots (4)$$

ここで、 P_V は測定サイクルにおける相対動弾性係数(%), v_0 は試験開始時における超音波伝播速度(m/sec), v_n は測定サイクルにおける超音波伝播速度(m/sec), E_V は動弾性係数(kg/cm²), v は超音波伝播速度(m/sec), ρ は供試体密度(kg/cm³), μ はポアソン比, g は重力加速度である。

水中ならびに気中凍結融解試験で得られた相対動弾性係数と動弾性係数を、図 1 から図 8 に示す。水中凍結融解試験の共振法による相対動弾性係数は、1300 サイクルで試験開始時の 60% に減少して、その後 1400 サイクル頃から不安定となり、2500 サイクルでは 26% になった。気中の場合には、サイクル数の増加に伴ってほぼ直線的に減少し、1500 サイクルでは試験開始時の約 80% になった。

水中凍結融解試験の超音波法による相対動弾性係数は、1400 サイクルを経過した頃から減少割合が大きくなり始めて、2500 サイクルでは試験開始時の 45% に減少した。また、最終サイクル時の質量変化率は 41% の減少であった。気中の場合には、共振法よりも減少率が小さく、1500 サイクルで試験開始時の 90% となった。また、質量の変化はほとんど生ぜず、最終サイクルで 3% 減であった。

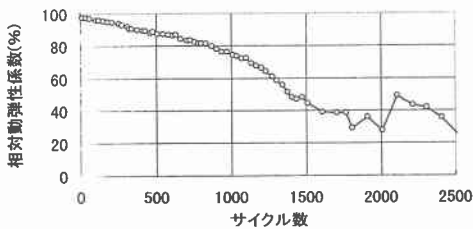


図1 共振法による水中凍結融解試験の相対動弾性係数(P_C)

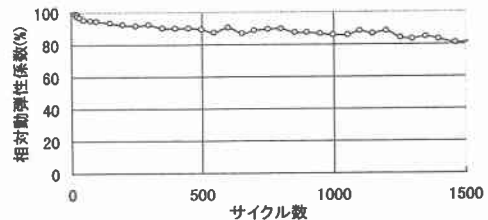


図2 共振法による気中凍結融解試験の相対動弾性係数(P_C)

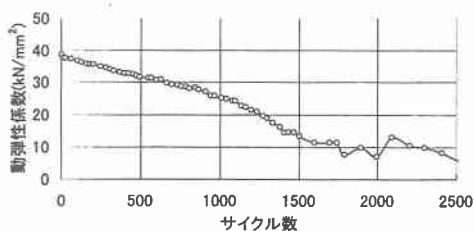


図3 共振法による水中凍結融解試験の動弾性係数 (E_d)

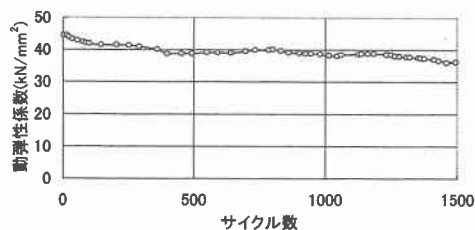


図4 共振法による気中凍結融解試験の動弾性係数 (E_d)

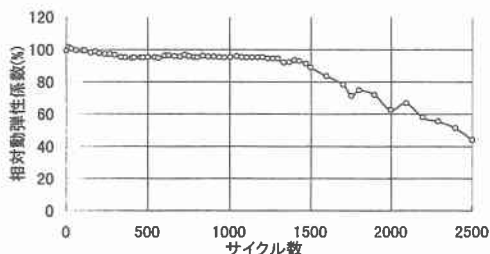


図5 超音波法による水中凍結融解試験の相対動弾性係数 (P_v)

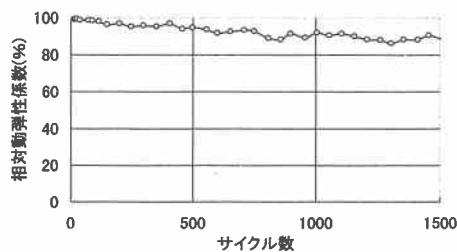


図6 超音波法による気中凍結融解試験の相対動弾性係数 (P_v)

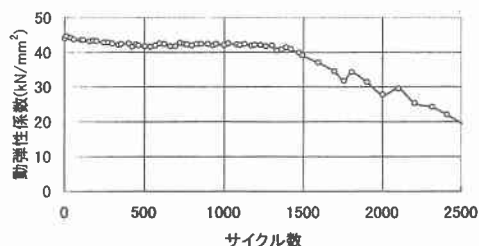


図7 超音波法による水中凍結融解試験の動弾性係数 (E_v)

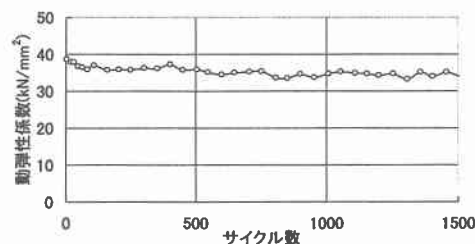


図8 超音波法による気中凍結融解試験の動弾性係数 (E_v)

以上の水中ならびに気中凍結融解試験の結果から、共振法は超音波法よりも相対動弾性係数を小さめに評価することが示された。これは、凍結融解作用によるコンクリートの劣化は試験体の表面から生じるので、試験体中心の超音波伝播速度を測定する超音波法は試験体全体の劣化を測定する共振法よりも動弾性係数を大きく評価するためであると考えられる。

また、水中凍結融解試験と気中凍結融解試験を比較すると、前者の方が同一のサイクル数でも相当に劣化が大きいことがわかる。これは、既往の研究においてコンクリートが湿潤なほど凍害は大きいと指摘されているように、水分の供給が十分な水中凍結融解試験は劣化の程度が大きく、したがって相当の促進試験となっている。

水中凍結融解試験で得られた共振法による相対動弾性係数と曲げ強度との関係を図9に示す。相対動弾性係

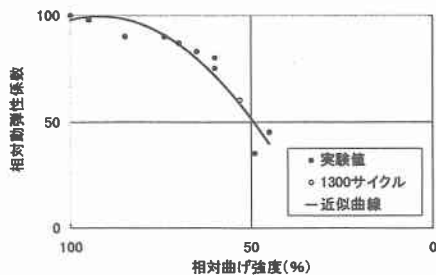


図9 P_c と相対曲げ強度の関係

数の減少とともに曲げ強度も減少しており、相対動弾性係数が試験開始時の 60%に減少する 1300 サイクルにおいて、コンクリート供試体の曲げ強度は 50%以上残存することがわかる。

図 1 に見られるように、共振法による相対動弾性係数が 60%となる 1300 サイクル以後、表面に発生したひび割れが内部へ向かって急激に成長する傾向があること、その場合でも残存曲げ強度は 50%以上であることを勘案して、水中凍結融解試験において耐久性が損なわれたのは 1300 サイクルであると判断した。

4. コンクリートの耐久性の予測

自然環境に対する水中凍結融解試験の促進率に関しては田畑の評価式¹⁾がある。コンクリートの凍結融解作用を支配する要因は、凍結融解時の温度、周囲の表面水の状態、さらに凍結開始時の含水状態であると想定して、水中凍結融解試験の自然環境下における凍結融解作用の促進率を次の (5) 式によって表示している。

$$D=T \times S \times W \cdots \cdots (5)$$

ここで、D：劣化影響係数（凍結融解試験法の自然環境下に対する促進率）、T：凍結融解の温度条件に起因する評価係数、S：凍結融解時の周囲の表面水に関する評価係数（部材の状態によって 0～1 に変化、水中で 1.0）、W：凍結融解開始時の含水状態に関する評価係数（主として夏期の影響によって変化、水中養生で 1.0）である。

$$T=T_1 \times T_2 \times T_3 \cdots \cdots (6)$$

ここで、T₁：最低温度（t）に関する重み係数であり、耐凍害性に優れたコンクリートの場合には、 $T_1=0.0625 \times (-t) - 0.125$ から与えられる。また、T₂：温度勾配に関する重み係数、T₃：最低温度の持続に関する重み係数である。

これらの式に、コンクリート構造物が建設された地域の気象データを代入すると劣化影響係数、すなわち水中凍結融解試験の促進率を得ることができる。たとえば、札幌市の場合には、気象データから年間の凍結融解回数は 94 回、劣化影響係数は 4.9 であるので、今回試験したコンクリートは 68 年間に亘って凍結融解作用を受けても健全性を保持すると評価することができる。

水中および気中凍結融解試験における相対動弾性係数の低下率の比は、図 1 と図 2 に示すように、1500 サイクルにおいて約 2.25 倍であった。当初、気中凍結融解試験は自然条件下におけるものと同等と想定していたが、試験の凍結速度や凍結最低温度の違い、自然環境下での降雪の影響などから札幌市の気象条件でさえも促進試験となっている。

5. まとめ

耐凍害性に優れた AE コンクリートについて、気中凍結融解試験と ASTM や JIS に規定された水中凍結融解試験を行い、凍結融解作用に対する耐久性の予測を試みた。

水中凍結融解試験で相対動弾性係数が 60%に低下した時の繰返し回数と構造物が建設された地域の気象データから、その耐久性を予測できることが示された。気中凍結融解試験は促進試験となっており、また相対動弾性係数が 60%になるまで試験していないのでその繰返し回数から直接耐久性を予測できないが、水中凍結融解試験との関係から予測の可能性が示唆された。

参考文献

- (1) 田畑雅幸：コンクリートの凍害における環境条件の影響に関する研究、北海道大学学位論文