

論文 凍結融解作用によるコンクリート開水路の表面変状の発生形態

森田 匡隆^{*1}・周藤 将司^{*2}・緒方 英彦^{*3}・高田 龍一^{*4}

要旨：寒冷地における耐凍害性の低下したコンクリート開水路の側壁では、凍害による変状が表面と内部で異なった形態で発生している。また、側壁の表面変状は、最多頻度水位の上部である気中部と下部である水中部において異なる。本研究では、既存のコンクリート開水路における特徴的な凍害劣化の発生形態に着目し、側壁の位置で異なる表面変状の発生要因について実験的に検討した。また、既存のコンクリート開水路では、側壁天端において表面からの層状ひび割れが見られることから、その発生形態の考察を行った。

キーワード：凍結融解作用, 最多頻度水位, 乾湿繰返し, 表面変状, 層状ひび割れ

1. はじめに

冬期、凍結環境下にあるコンクリート開水路の側壁では、外気温の変化に伴う凍結融解作用により、側壁の耐凍害性が低下し、スケーリングやひび割れなどの劣化を生じる。凍害劣化による側壁の変状は、ひび割れの発生形態をもとに表面変状または内部変状として判断される。写真-1 に示すように、側壁における表面変状は、灌漑期における最多頻度水位の上部である気中部において側壁の長手方向へのひび割れの発生が特徴である。また、写真-2 に示すように、天端においては表面からの層状のひび割れが発生する。このひび割れの発生は、非凍結期（灌漑期）に乾湿繰返しを受ける供用環境が気中部の耐凍害性を低下させるためと考えられる¹⁾。一方、側壁における内部変状は、写真-3 に示すように、側壁の内部において部材厚方向への層状ひび割れの発生が特徴である²⁾。このひび割れの発生は、地形条件として側壁背面側から地下水供給されるために側壁内部の飽水度が高く、凍結時の膨張圧が高まる供用環境が側壁内部における耐凍害性を低下させるためと考えられる²⁾。コンクリート開水路の側壁における凍害劣化は、このように供用環境や地形条件が影響することで、同一側壁であるにもかかわらず、表面と内部におけるひび割れの発生形態が異なる。

本研究では、既存のコンクリート開水路における特徴的な凍害劣化の発生形態に着目し、最多頻度水位の上部である気中部と下部である水中部における表面変状の発生要因について実験的に検討する。また、既存のコンクリート開水路では、側壁天端において表面からの層状ひび割れが見られることから、その発生形態についても考察を行う。

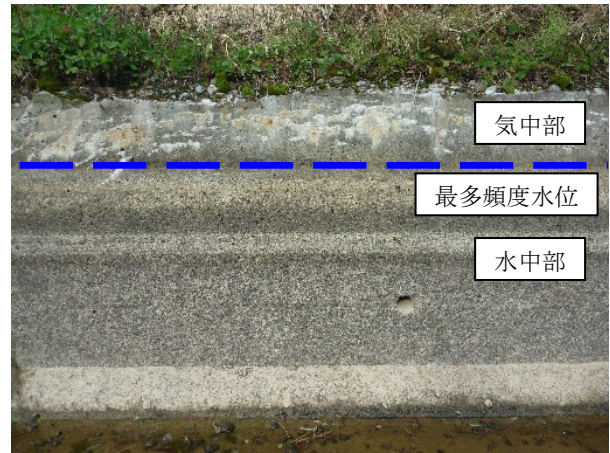


写真-1 コンクリート開水路側壁の表面変状



写真-2 天端における層状ひび割れ

2. 凍結融解試験

2.1 供試体

日本における AE 剤の導入は、1978 年 JIS A 5308 の規

*1 ジーアイシー（株） 技術部測量課技師（正会員）

*2 鳥取大学大学院 連合農学研究科生物環境科学専攻（正会員）

*3 鳥取大学 農学部生物資源環境学科准教授 博士（農学）（正会員）

*4 松江工業高等専門学校 環境・建設工学科教授 農学博士（正会員）

格改正によるものであり、「レディーミクストコンクリートの標準品は AE 剤、または AE 減水剤を用いた AE コンクリートとすること。」と示されている。現在、凍害の発生が確認される耐凍害性の低下したコンクリート開水路は、AE 剤の導入以前に築造され、供用開始から 30 年以上経過しているものがほとんどである。本研究では、既存のコンクリート開水路における凍害劣化の発生形態の検討を目的とすることから、凍結融解試験に用いるコンクリート供試体は、比較的水セメントの高い non-AE コンクリートを使用した。表-1 に non-AE コンクリートの示方配合を示す。セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³）を使用し、細骨材（密度 2.59g/cm³，吸水率 1.59%，F.M.1.83）ならびに粗骨材（密度 2.59g/cm³，吸水率 1.62%，F.M.6.68）は鳥取県産を使用した。

コンクリート供試体は、鋼製型枠を使用し、10×10×40cm の角柱供試体を作製した。打設翌日に脱型を行い、脱型後は速やかに水温 20℃の恒温水槽内にて 1 年間の標準水中養生を行った。水中養生期間については、著者らの既往の研究結果において、凍結融解試験途中にコンクリート中未水合物の水和進行によるものと思われる相対動弾性係数の回復が確認されたことから¹⁾、これを未然に防ぐためには、概ね水和反応が進行した供試体を使用する必要があると考え、1 年間の水中養生期間を設けた。一方、本研究では、non-AE コンクリートに加えて表-2 に基づく AE コンクリートも作製した。

2.2 試験条件

本研究では、既存のコンクリート開水路における凍害劣化の発生形態に注目し、最多頻度水位の上部である気中部と下部である水中部における表面変状の発生要因について実験的に検討するため、Case 1～Case 3 までの 3 つの試験条件を設けた。表-3 に各試験条件を示す。

乾湿繰り返しは、米田ら³⁾が提案している条件をもとに、湿潤（水中 20℃）6 時間、乾燥（炉乾燥 40℃）48 時間の 7 サイクルを 1 シーズンとし、1 シーズン目は凍結融解サイクル数 50 の後、2 シーズン目はサイクル数 170 の後、3 シーズン目はサイクル数 290 の後に行った。

水中浸漬は、水温 20℃の 378 時間（乾湿繰り返しと同時間）とし、同様に凍結融解サイクル数 50・170・290 の後に 3 シーズン行った。

2.3 測定項目

凍結融解試験は JIS A 1148 に準拠した気中凍結水中融解試験方法（B 法）であり、20 サイクルまたは 30 サイクル毎に水中質量、気中質量、超音波伝播時間、たわみ振動の一次共鳴振動数について測定を行った。超音波伝播時間は周波数 50kHz の超音波試験器を使用して、供試



写真-3 側壁部材厚方向への層状ひび割れ

表-1 non-AE コンクリートの示方配合

Gmax (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)
20	8	60	2.0	41.6
単位量 (kg/m ³)				
水	セメント	細骨材	粗骨材	
191	318	746	1033	

表-2 AE コンクリートの示方配合

Gmax (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)
20	8	55	6.0	40.2
単位量 (kg/m ³)				(g/m ³)
水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
165	300	710	1058	2700

表-3 各ケースの試験条件

Case 1	連続凍結融解試験
Case 2	凍結融解試験途中に乾湿繰り返しを実施 最多頻度水位の上部（気中部）を想定
Case 3	凍結融解試験途中に水中浸漬を実施 最多頻度水位の下部（水中部）を想定

体の長さ方向を伝播距離とする直接法によって測定し、一次共鳴振動数は JIS A 1127 に準じて測定を行った。一次共鳴振動数による相対動弾性係数は式 (1) で求め、超音波伝播速度による相対動弾性係数は緒方ら⁴⁾の提案する式 (2), (3) で求めた。

$$P_n = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100 \quad (1)$$

$$P_n = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \times 100 \quad (2)$$

$$E_d = 4.0387V^2 - 14.438V + 20.708 \quad (3)$$

P_n : 凍結融解 n サイクルの相対動弾性係数 (%), f_n : 凍結融解 n サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数 (Hz), f_0 : 凍結融解 0 サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz), E_{dn} : 凍結融解 n サイクルにおける動弾性係数 (GPa), E_{d0} : 凍結融解 0 サイクルにおける動弾性係数 (GPa), E_d : コンクリートの動弾性係数 (GPa), V : コンクリートの超音波伝播速度 (km/s)

3. AE コンクリートの結果および考察

AE コンクリートにおける質量変化率の結果を図-1, 一次共鳴振動数による相対動弾性係数の結果を図-2 に示す。AE コンクリートでは, 質量変化率に大きな変化は見られず, スケーリングはほとんど発生しなかった。一次共鳴振動数による相対動弾性係数は, 乾湿繰返しを行った Case 2 において, 乾湿繰返し後に低下する傾向が見られ, 水中浸漬を行った Case 1 と異なる結果が得られた。この結果からは, AE コンクリートにおいても乾湿繰返しが耐凍害性に影響を及ぼすことがわかる。

4. non-AE コンクリートの結果および考察

4.1 質量変化率

図-3 に質量変化率の結果を示す。図中の 50, 170, 290 サイクル後に示す縦軸は, Case 2, Case 3 における乾湿繰返し, または水中浸漬を行ったサイクル数を表している。

Case 1 および Case 3 においては, 質量変化率に大きな変化は見られない。凍結融解試験途中に水中浸漬を行った Case 3 では, 水中浸漬を行った前後で質量の変化は見られず, 連続凍結融解試験を行った Case 1 と同様な結果になることがわかる。凍結融解試験途中に乾湿繰返しを行った Case 2 においては, 2 シーズン目の乾湿繰返し後である 200 サイクル以降から, コンクリート供試体の表面部に生じるひび割れの数および長さの増加が確認された。供試体の表面部に生じたひび割れは, 凍結融解サイクルを重ねる度に増加し, 供試体の隅角部から先行する厚さ 1.5 から 2.0mm 程度の表層の剥離が起こることが確認された (写真-4, 5, 6 を参照)。質量変化率は, ひび割れの増加に伴い大きくなり, 410 サイクルにおいて 14% に達した。

4.2 一次共鳴振動数による相対動弾性係数

図-4 に一次共鳴振動数による相対動弾性係数の結果を示す。Case 3 では, 水中浸漬前後における相対動弾性

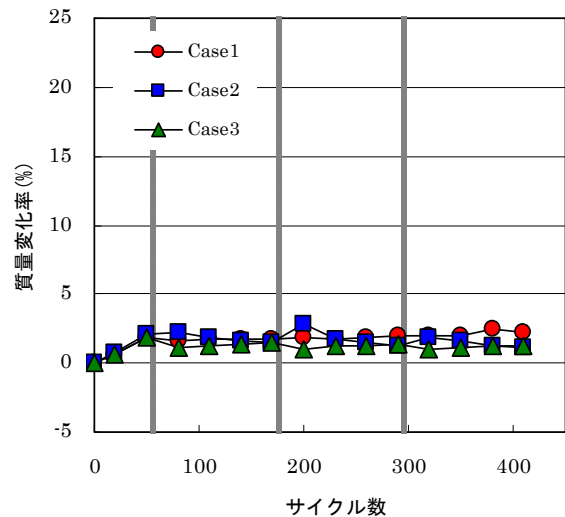


図-1 質量変化率

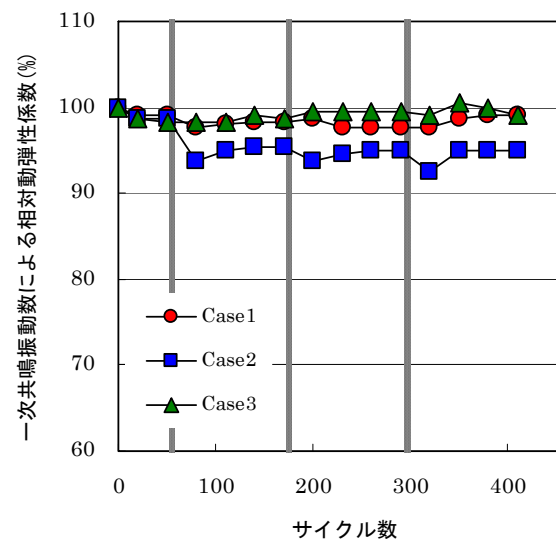


図-2 一次共鳴振動数による相対動弾性係数

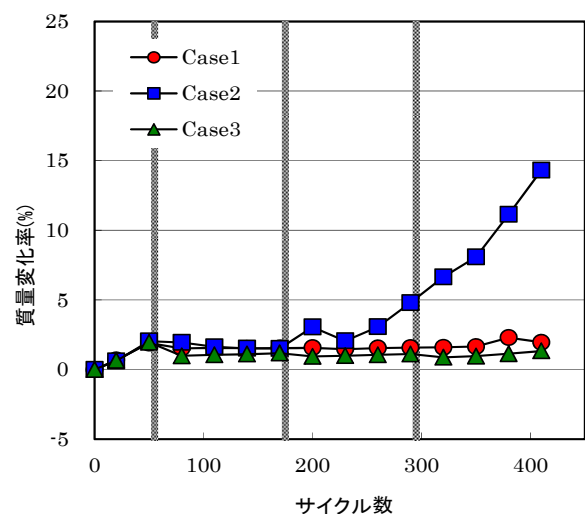


図-3 質量変化率

係数の低下が見られず、連続凍結融解試験を行った Case 1 と同様な結果になることがわかる。Case 2 では、乾湿繰返しの全てのシーズンにおいて相対動弾性係数の低下が確認され、最大で 5.3% (1 シーズン目) 低下した。相対動弾性係数は乾湿繰返し後に低下するものの、次の乾湿繰返しまでは平衡または徐々に増加する傾向を示し、410 サイクルにおける相対動弾性係数は 95% であった。

4.3 超音波伝播速度による相対動弾性係数

図-5 に超音波伝播速度による相対動弾性係数の結果を示す。Case 1 および Case 3 の超音波伝播速度による相対動弾性係数は、一次共鳴振動数による相対動弾性係数よりも値が小さくなるものの、著しい低下は見られなかった。Case 3 では、水中浸漬を行った後に相対動弾性係数の低下は見られず、410 サイクルにおいて 89% であった。Case 2 では、乾湿繰返しを行った後に相対動弾性係数の低下が見られ、1 シーズン目では 8.7%、2 シーズン目では 8.0%、3 シーズン目では 7.3% 低下した。Case 2 における乾湿繰返し後の相対動弾性係数の低下は、青野ら⁵⁾ が明らかにしているように、乾湿繰返しまたは乾燥によって空隙構造が粗大化し、硬化セメントペースト中の C-S-H のシリケートアニオン鎖が乾燥により脱水縮重合したためであると考えられる。

図-6 は、Case 2 の質量変化率と超音波伝播速度による相対動弾性係数の結果を示している。超音波伝播速度による相対動弾性係数の結果において 200~290 サイクルに生じた相対動弾性係数の増減は、乾湿繰返しによるコンクリート表面の脆弱化と表層の剥離が影響していると考えられる。このことは、200 サイクル以降の質量変化率が徐々に増加しており、表層の剥離によるスケーリングが進行していることから、そのように考えられる。コンクリート表層の剥離が進行する過程では、剥離の状態によって超音波端子の接着および超音波パルスの伝播が定まらず、そのために 200~290 サイクルのように相対動弾性係数の増減が生じるものと考えられる。

4.4 表面変状の発生過程

写真-4 は、410 サイクル終了時における Case 1~Case 3 の状況である。凍結融解試験途中に乾湿繰返しを行った Case 2 の表面変状は、Case 1 や Case 3 よりも著しいことがわかる。ここで、Case 2 の表面変状は、打設面だけでなく、供試体の全面においてほぼ同様に生じている。Case 2 における表面変状は、隅角部にて粗骨材が露出する程度にスケーリングが進行し、中央部では層状のひび割れが生じている。Case 2 は最多頻度水位の上部である気中部、Case 3 は最多頻度水位の下部である水中部を想定していることから、本研究により、側壁の気中部と水中部における表面変状の発生状況が異なることを

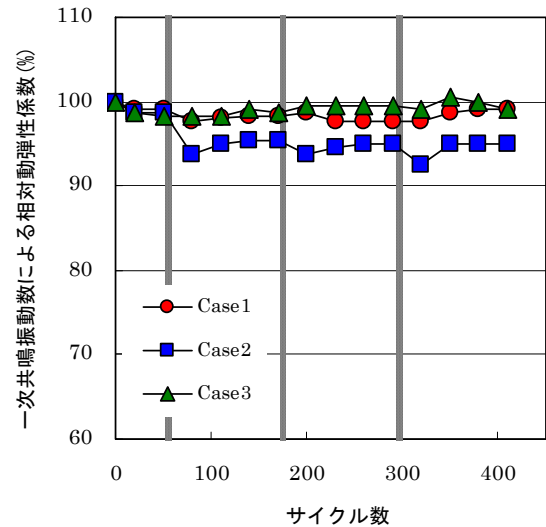


図-4 一次共鳴振動数による相対動弾性係数

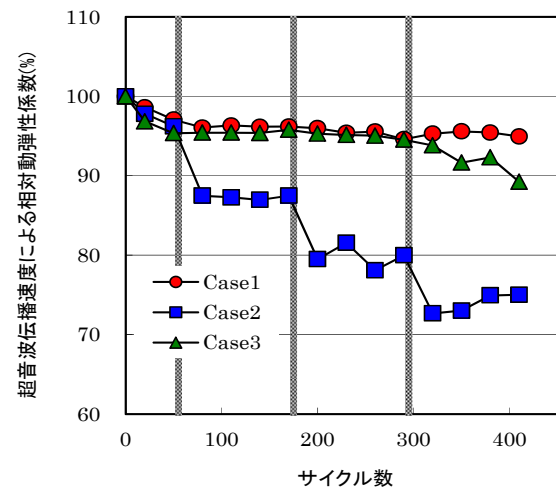


図-5 超音波伝播速度による相対動弾性係数

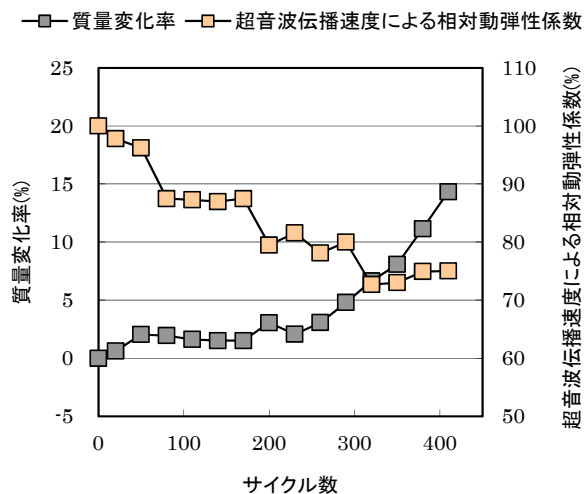


図-6 質量変化率と超音波伝播速度による相対動弾性係数の関係



写真-4 410 サイクル終了時における供試体の状況

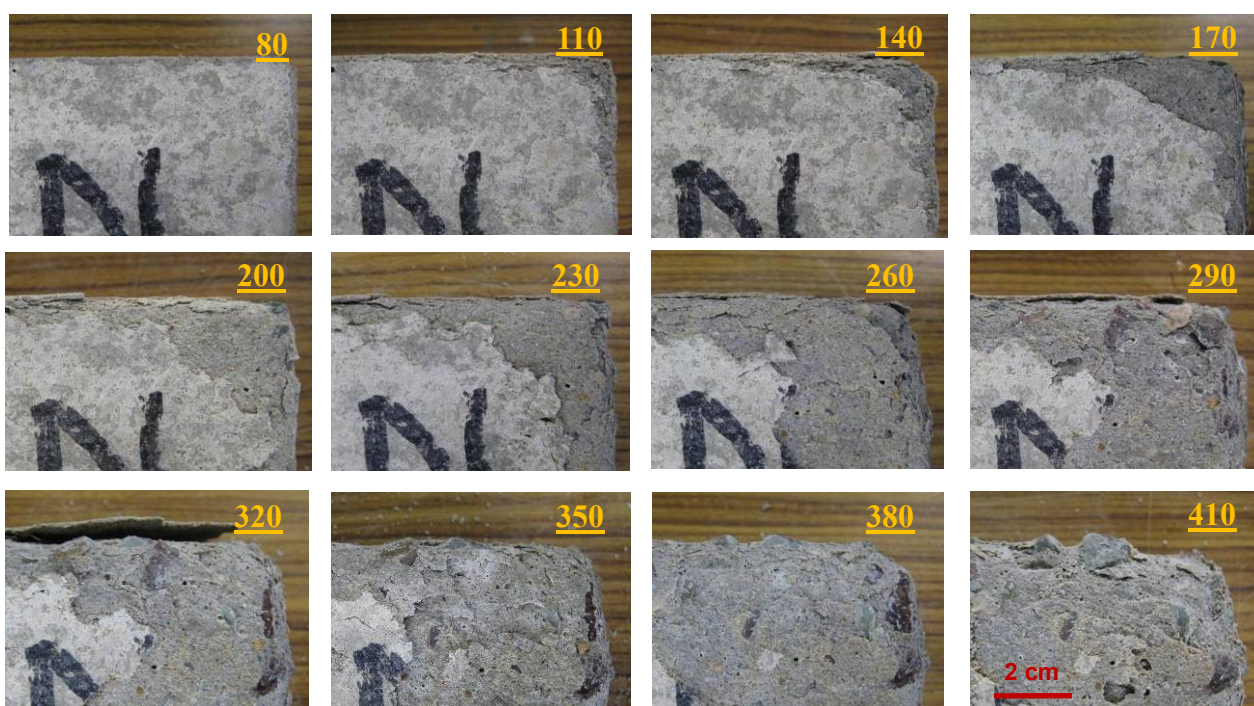


写真-5 Case 2 の隅角部における表面変状の発生過程

実験的に確認することができた。

写真-5 は、Case 2 の隅角部における表面変状の発生過程を 80 から 410 サイクルにかけて 30 サイクル毎に撮影したものである。環境温度がコンクリートの内部温度に及ぼす影響が最も大きい隅角部では、まず隅角からひび割れが生じ、そのひび割れに沿って厚さ 1.5~2.0mm 程度の表層の剥離がはじまる。さらに、供試体の縁に沿って層状のひび割れの数が増加し、凍結融解サイクルを重ねることで表層の剥離が進行する。表層の剥離が進行した後は、粗骨材間のモルタルが失われ、粗骨材が表面に露出する。

写真-6 は、Case 2 の中央部における表面変状の発生過程を 80 から 410 サイクルにかけて 30 サイクル毎に撮

影したものである。凍結融解サイクルを重ねる毎に、供試体の縁から層状のひび割れが徐々に発生していることが確認できる。この層状のひび割れの厚さは、1.5~2.0mm 程度である。凍結融解サイクルを重ねることで供試体の縁に沿った層状のひび割れの数は増加し、表層の剥離が隅角部と同様に進行する。このことから、写真-2 に示す側壁天端における層状ひび割れもコンクリート表面から発生し、内部に徐々に進展していることが室内実験から示唆される。

写真-4、写真-5、写真-6 より、凍結融解試験途中の乾湿繰返しは、凍結融解抵抗性を低下させ、コンクリートに表面変状を生じさせる要因となることが明らかになった。角柱供試体における表面変状は、隅角部にお

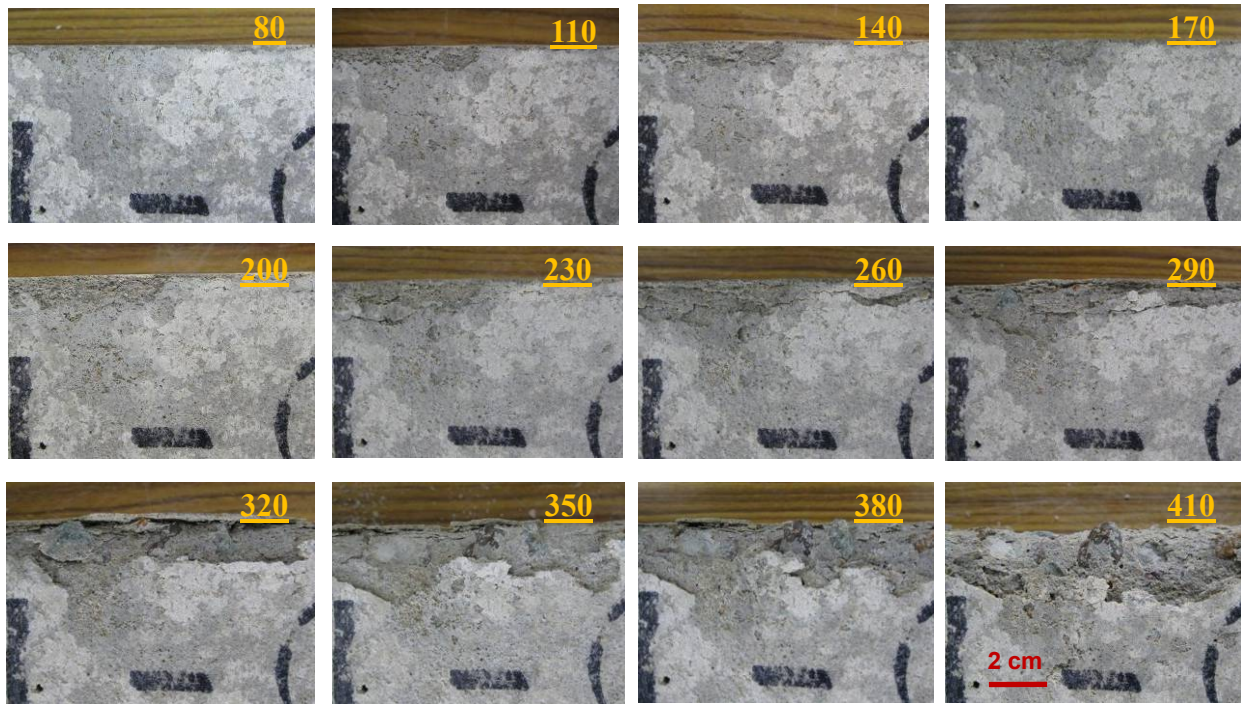


写真-6 Case 2 の中央部における表面変状の発生過程

いて先行し、供試体中央部においても縁からの層状ひび割れを生じながら、やがて表層の剥離につながる。また、写真-1 に示すような最多頻度水位の上部において生じている側壁の長手方向へのひび割れは、コンクリート表面の層状ひび割れによる薄肉コンクリート層が側壁の高さ方向に体積変化したために生じたものであると考えられる。

5. まとめ

- (1) 最多頻度水位の上部である気中部の供用環境に該当する凍結融解試験途中に乾湿繰返しを行ったコンクリートは、相対動弾性係数が低下する。
- (2) 最多頻度水位の下部である水中部の供用環境に該当する凍結融解試験途中に水中浸漬を行ったコンクリートは、相対動弾性係数が低下しない。
- (3) 最多頻度水位の上部である気中部の表面変状は、灌漑期（非凍結期）に乾湿繰返しを受ける供用環境が影響して発生する。
- (4) 凍結融解作用によるコンクリートの表面変状は、隅角部において先行し、コンクリートの縁からの層状ひび割れを生じながら、やがて表層の剥離につながる。

参考文献

- 1) 緒方英彦, 高田龍一, 服部九二雄: コンクリート製開水路の非凍結期の供用環境が及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, pp.1159-1164, 2009
- 2) 緒方英彦, 高田龍一, 鈴木哲也, 山崎大輔, 佐藤周之: RC 開水路の側壁内部における凍害ひび割れの発生形態, 農業農村工学会誌, Vol.78, No.5, pp.405-409, 2010
- 3) 米田恭子, 千歩修, 長谷川拓哉, 相川葉月: 乾湿繰返しを加えた凍結融解試験による各種コンクリートの耐凍害性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1131-1136, 2007
- 4) 緒方英彦, 服部九二雄, 高田龍一, 野中資博: 超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1563-1568, 2002
- 5) 青野義道, 松下文明, 柴田純夫, 濱 幸雄: 乾燥および乾湿繰返しによる硬化セメントペーストの微細構造変化と耐凍害性への評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.921-926, 2008