コンクリートの凍害に非凍結期の環境条件が 及ぼす影響の解明

緒方 英彦1

1鳥取大学 農学部 生命環境農学科

凍害劣化の一つであるスケーリングは、積雪寒冷地で供用されるコンクリート構造物の表層で生じる。また、自然環境下で供用されるコンクリート構造物の表層は、炭酸化により緻密化する。これらの現象が生じるコンクリート構造物の表層には、一般に粗骨材を含まないモルタル領域が存在する。本研究では、このモルタル領域を粗骨材かぶりと定義し、中性化深さの異なるコンクリートを対象に中性化深さと粗骨材かぶりの関係を踏まえたスケーリング抵抗性に関する検討を行った。その結果、粗骨材かぶりと中性化深さの大小関係によりスケーリング抵抗性が異なることが示唆された。一方、長期暴露試験を開始した。

キーワード:積雪寒冷地,凍害,粗骨材かぶり,中性化深さ,質量減少率,スケーリング深さ

1. はじめに

コンクリート構造物の凍害は,北海道や東北地方 だけでなく, 凍害危険度マップにおいてごく軽微だ と分類されている中国地方の山間部においても実 際に発生している。凍害の直接的要因となるのは、 コンクリート中の水分と凍結融解の繰返し作用を 生じさせる温度変化であることから,水が供給され, 凍結と融解の温度変化が作用する部材に凍害が発 生しやすい。ただし、近年の研究により、凍結融解 の繰返し作用を受ける凍結期・融雪期だけではなく、 非凍結期の供用環境が凍害の発生に大きな影響を 及ぼしていることが明らかになっている。それは、 乾湿の繰返しによるコンクリート中の細孔構造の 粗大化であり、コンクリート表層部の中性化である。 一般に山間部のコンクリート構造物の凍害は, 凍結 防止剤による塩害との複合劣化として多くの研究 が行われているが, 実際には非凍結期の乾湿繰返し および中性化による影響も考慮する必要がある。

積雪寒冷地で供用されるコンクリート構造物の表層では、凍結融解など外部環境の影響を受けることで、スケーリングが発生することがある。スケーリングは、コンクリート構造物における部材断面の欠損を生じさせ、安全性や耐久性を低下させる。特に鉄筋コンクリート構造物では、かぶりを減少させてしまう。

ここで, コンクリート表層には, 粗骨材を含まないモルタル領域が存在する。 スケーリングは, コン

クリート表面から進行するため、コンクリート表層にあるモルタル領域のスケーリングに対する抵抗性の違いが、スケーリングの挙動に影響を及ぼすと考えられる。一方、積雪寒冷地に限らず、自然環境下で供用されるコンクリート構造物の表層では、大気中の二酸化炭素が侵入することで炭酸化が生じる。炭酸化は、炭酸カルシウムが生成することでコンクリート組織を緻密化させるため、スケーリング抵抗性を評価する上では炭酸化による影響も考慮することが望ましい。

本研究では、コンクリート表層におけるモルタル 領域を新たに粗骨材かぶりと定義し、中性化深さの 異なるコンクリートを対象に中性化深さと粗骨材 かぶりの関係がスケーリング抵抗性に及ぼす影響 を実験的に検討した。また、スケーリングの直接的 な要因である冬季の凍結融解作用と間接的な要因 である夏季の乾湿繰返しおよび乾燥は、季節の移り 変わりにより、交互にコンクリートへ作用する。本 研究では、凍結融解試験途中に乾湿繰返しまたは乾 燥を作用させ、コンクリート中の水分量の変化がス ケーリング抵抗性に及ぼす影響についても実験的 に検討を行った。

一方,本研究では,室内での促進試験に加えて, 実環境での暴露試験も実施する。そこで,暴露試験 を恒久的に実施するための暴露試験場の整備を行 い,長期暴露試験を開始した。

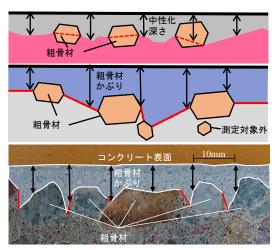


図-1 粗骨材かぶりの測定方法

表-1 材料の物性値

材料	密度(g/cm³)	吸水率(%)	F.M.
セメント (普通ポルトランドセメント)	3.15	_	
細骨材(鳥取市陸砂)	2.62	1.60	1.80
粗骨材 (鳥取市産砕石)	2.60	1.16	6.69

表-2 コンクリートの配合

Gmax	Slump	W/C	air	s/a		単位量	(kg/m³)	
(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	W	C	S	G
20	8±2	55	3.0	37.5	171	311	689	1136

2. 粗骨材かぶり

本研究では、コンクリート表層のモルタル領域を 粗骨材かぶりと定義し、測定方法を独自に定めた。 狭義の意味としての粗骨材かぶりは「コンクリート 中の粗骨材とコンクリート表面の最短距離」と定義 できる。また、広義の意味としての粗骨材かぶりと は、「各測定箇所におけるコンクリート中の粗骨材 とコンクリート表面との平均距離」と定義される。

図-1 には、中性化深さと粗骨材かぶりの測定対象となる領域を示す。粗骨材かぶりの測定方法は、JIS A1152:2011「コンクリートの中性化深さの測定方法」を参考に定めた。粗骨材かぶりは、ノギスを用いて 0.5mm 単位で測定し、測定箇所は、切断面を測定面とする場合に10mm間隔ごとに1箇所とした。対象とする粗骨材は、コンクリート表面の最も近くに位置する大きさが5mm以上のものとした。

3. 粗骨材かぶりとスケーリング抵抗性の評価試験の概要

供試体の作製に使用した材料の物性値を表-1に, コンクリートの配合を表-2に示す。実測の空気量

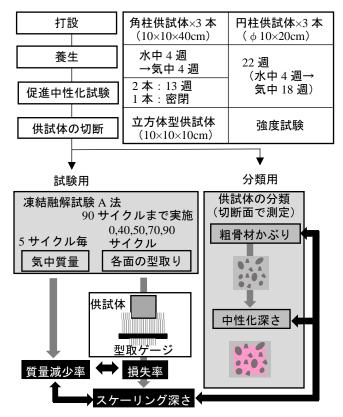


図-2 試験概要

は 1.7%, スランプは 6.0cm であった。作製した供 試体は, 3 本の角柱供試体 $(10 \times 10 \times 40$ cm) である。

表-3 供試体の分類

供試体番号	1	2	3
粗骨材かぶり (mm)	4.8	4.6	5.7
中性化深さ(mm)	0	4.3	8.7

	粗骨材かぶりと中性化深さの関係	分類
1	粗骨材かぶり>中性化深さ=0	パターンI
2	粗骨材かぶり>中性化深さ	パターンⅡ
3	粗骨材かぶり<中性化深さ	パターンIII

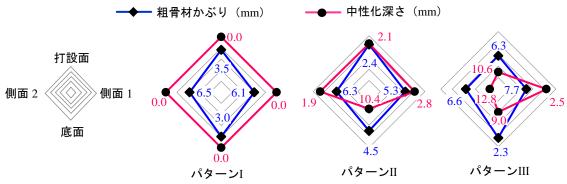


図-3 各面の粗骨材かぶりと中性化深さの関係

また、強度試験用に円柱供試体 (ϕ 10×20cm) を 3 本作製した。

試験の概要を図-2 に示す。供試体は打設の翌日に脱型し、材齢 4 週まで水温 20±1℃で水中養生を行った後、材齢 8 週まで室温約 20℃の室内で気中養生を実施した。

気中養生後、3本の角柱供試体のうち2本は促進中性化試験を13週実施した。促進中性化試験は、JIS A 1153:2012「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠して温度を20±2℃、相対湿度を60±5%、二酸化炭素濃度を5±0.2%とした条件下で実施した。促進中性化試験に使用しなかった残り1本の供試体は、試験終了まで空気に触れないようストレッチフィルムで梱包して約20℃の室内で保管した。また、円柱供試体は、材齢8週以降も凍結融解開始材齢まで気中養生を行った。円柱供試体は、促進中性化試験が終了する材齢22週目にJIS A 1108:2018「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して強度試験を実施し、3本の平均値は、37.1N/mm²であった。

促進中性化試験終了後に角柱供試体を 10×10× 10cm の立方体型に切り出し,分類用と試験用とに 分けた。分類用の供試体では粗骨材かぶりと中性化 深さを測定し,試験用の供試体では凍結融解試験を 実施した。

分類用の供試体では、切断面の打設面、側面2面、 底面に相当する各面において、粗骨材かぶりと中性 化深さをそれぞれ10点ずつ測定した。粗骨材かぶ りは前章で示した方法で、中性化深さは粗骨材かぶりと同じ箇所で測定した。各面における粗骨材かぶりと中性化深さを平均した結果を \mathbf{z} に示す。粗骨材かぶりと中性化深さの関係がそれぞれ異なることを踏まえ、各供試体は、促進中性化試験を実施していないものをパターン \mathbf{I} 、促進中性化試験を実施した2本の供試体のうち、中性化深さが粗骨材かぶり内に留まっているものをパターン \mathbf{I} 、中性化深さが粗骨材かぶりを超えているものをパターン \mathbf{I} として分類した。分類した3パターンの各面における粗骨材かぶりと中性化深さの関係を図-3に示す。ダイヤグラムの外側は、各面の表面に相当する。

4. スケーリング抵抗性の評価

(1) パターン I の質量減少率と損失率

図-4 は、パターン I における質量減少率と各面の損失率を示している。スケーリングは、打設面や側面 2 で著しく生じている。

(2) パターンⅡの質量減少率と損失率

図-5 に示すようにパターンⅡにおいて、スケーリングによる損失が著しい面は殆ど確認されなかった。質量減少率はわずかに増加しているが、これは打設面、側面、底面以外の面である切断面で生じた欠損と考えられる。図-3 より、パターンⅡの各面は、底面を除いて粗骨材かぶりが中性化深さよりも大きい関係にある。スケーリングが生じたパターンⅠに対して、パターンⅢでスケーリングが生じなかった理由は、炭酸化により打設面や側面の表層に

おける強度が上昇りし、凍結時の膨張圧力を抑制したために、表面から徐々に剥離する一般的なスケーリングが生じなかったと考えられる。このことから、炭酸化の進行により、コンクリート表面からのスケーリングを抑制することが示された。

(3) パターンⅢの質量減少率と損失率

図-6 にパターンⅢの質量減少率と各面の損失率を示す。パターンⅢの打設面は、90 サイクル目に型取ゲージによる測定可能範囲を超えたため、打設面の損失率は70 サイクル目である。質量減少率の急激な上昇に影響を及ぼしているのは、打設面と側面2で顕著である。図-3 に示すように、パターンⅢの打設面と側面2の粗骨材かぶりは中性化深さより小さい傾向にある。このことから、炭酸化が進行し、中性化深さが粗骨材かぶりを超えた場合には、スケーリング抵抗性が著しく低下することが確認された。

(4) 各パターンにおけるスケーリングの相違

パターンⅡ、パターンⅢでは、炭酸化が進行しているため、コンクリート表面におけるスケーリング抵抗性は向上していると考えられるが、スケーリングの挙動は異なるものであった。パターンⅡとパターンⅢの違いは、粗骨材かぶりと中性化深さの関係の大小である。このことから、パターンⅡとパターンⅢのそれぞれにおける炭酸化領域と未炭酸化領域の界面の状態の違いが両者でスケーリングの挙動が異なる要因となったと考えられる。

炭酸化により緻密化したコンクリート表層では透水性が低下²⁾するとされている。さらにコンクリートが飽水状態にある場合,炭酸化した領域では未凍結水の集中³⁾が促され,炭酸化していない層との界面には凍結圧力により緩みが生じやすくなると考えられる。また,凍結融解時には,粗骨材周囲の組織が緩み,ひび割れが発生しやすくなる⁴⁾とされている。以上のことを踏まえてパターンⅢにおける著しいスケーリングが生じた原因を以下のように推察した。

本研究では、水中凍結融解試験である A 法を採択しているため、試験中の供試体は常に飽水状態であるとみなすことができる。このことから、炭酸化によってコンクリート表層が炭酸化しているパターンIIIおよびパターンIIIでは、炭酸化領域と未炭酸化領域の界面が緩みやすくなっていたと考えられる。ここで、粗骨材かぶりを超えて炭酸化しているパターンIIIでは、炭酸化領域と未炭酸化領域の界面には、粗骨材が存在している。したがって、パターンIIIにおいて凍結融解の繰返し作用を受ける際に

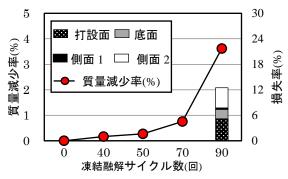


図-4 質量減少率と損失率(パターン I)

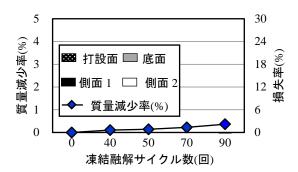


図-5 質量減少率と損失率(パターンⅡ)

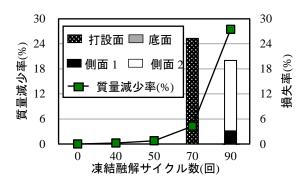


図-6 質量減少率と損失率(パターンⅢ)

は、緩みが生じやすくなっている炭酸化領域と未炭酸化領域の界面に重なって粗骨材が存在していたために、緩みが顕在化して著しいスケーリングが生じたと考えられる。一方で、スケーリングしなかったパターンIIのようにモルタル領域のみが炭酸化されている場合には、炭酸化領域および未炭酸化領域の界面に粗骨材が存在しないため、スケーリングに至るほどのコンクリート組織の緩みが顕在化しなかったと考えられる。

5. 乾湿繰返しおよび乾燥による含水量の変化

表-4 は、表-1、表-2 の材料と配合で作製した立 方体供試体(10×10×10cm)における凍結融解試 験の試験条件である。

図-7は、Case2の乾湿繰返し工程および Case3の 乾燥工程における質量減少率の挙動を示しており、

表-4 凍結融解試験条件

分類	試験内容	
Case1	凍結融解試験を継続	
Case2	凍結融解試験途中に乾湿繰返し(凍結融解 40, 50, 70 サイクル目終了後に実施) 乾燥炉中 40℃・48 時間と水中 20℃・6 時間を 1 サイクルとして 7 サイクル	
Case3	凍結融解試験途中に乾燥(乾燥炉中 40℃)(乾湿繰返しの工程と同じ期間である 378 時間)	

黒色マーカーは, 乾湿繰返しおよび乾燥の工程が終了した際の質量減少率をそれぞれ示している。

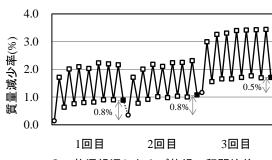
3回の乾湿繰返し終了時における Case2 の供試体の質量減少率の値は、3回とも乾湿繰返し開始前まで戻らなかった。 Case2 は、乾燥による表層の水分の逸散と湿潤による表面からの水の供給を繰り返し、7回目の湿潤工程の終了後に凍結融解試験を再開する試験条件である。よって、乾湿繰返しが終了し、凍結融解試験を再開する際には、供試体中に水分で満たされていない領域が存在していたと考えられる。

一方で、Case3 は、供試体を乾燥させた後に凍結融解試験を再開する条件である。したがって、乾燥工程の終了時における Case3 の供試体の表層の水分は、長時間の乾燥により失われたと考えられる。よって、凍結融解試験を再開する前の Case3 の供試体は、Case2 の供試体よりも水に満たされていない領域が多く存在していたことになる。

Case2,3では、乾燥により、スケーリングが徐々に進行していく。Case2では、コンクリートの内部に水で満たされていない領域が存在するため、凍結融解時に未凍結水が浸透する余地がある。そのため、Case2の供試体は、Case1のように飽水状態にならず、著しいスケーリングが生じなかったと考えられる。Case3では、乾燥によって表層の水が逸散し、水で満たされていない領域が Case2よりも多かった。そのため、Case3の供試体では、凍結融解試験が開始された後に表面から水が浸入することになる。したがって、Case3の供試体は、Case2よりも未凍結水が浸透できる領域が存在したため、Case2と比べて質量の減少が緩やかになったと考えられる。

6. まとめ

本研究により、粗骨材かぶりを超えて炭酸化が進行すると、スケーリング抵抗性が著しく低下することが示された。自然環境下で供用されるコンクリート構造物の炭酸化を避けることは困難であるが、粗骨材かぶりに対する炭酸化の進行度合いによって、スケーリングの生じやすさが異なることが示され



〇:乾湿繰返しおよび乾燥工程開始前

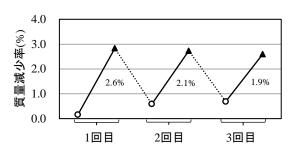


図-7 含水量の変化(上:乾湿繰返し,下:乾燥) *破線は凍結融解試験中を示す

た。また、乾燥の影響によりコンクリートの耐凍害性は低下するとされており、本研究においても同様の傾向が確認された。しかし、試験体の水分状態に着目すると、かなりスケーリングが進行した段階では、全般的に水分が含まれている条件の方がスケーリングしやすい結果となった。一方で乾湿繰返しおよび乾燥により、含水量が低下した条件では、徐々にスケーリングが進行した。よって、冬季にコンクリートが凍結融解の繰返しを受ける際の含水状態が、スケーリング抵抗性に及ぼす影響は大きいことが示された。本研究の結果を踏まえると、冬季に含水量が上昇する供用環境では、コンクリートが飽水状態となることを避けるための遮水あるいは排水の重要性について、改めて認識することが必要である。

一方,自然環境下における凍害劣化の実際を解明するために暴露試験を開始した。長期間に渡る観察および測定を実施することになる暴露試験は、初期段階における設定が重要となる。本研究においては、暴露試験場の整備を始めとして、供試体の作製、初期値の測定を実施し、今後数十年に渡って本試験が円滑に遂行できるよう整備した。

謝辞: 本研究は中国建設弘済会技術開発支援事業の 助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 佐伯竜彦ら: 中性化によるモルタルの強度変化, 土木学会論文集, Vol.17, No.451, pp.69-78, 1992.8
- 2) 水野博貴ら:炭酸化した高炉セメント硬化帯の 空隙構造変化が水分浸透性に与える影響, コン クリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.665-670, 2019.7
- 3) 遠藤裕丈ら: スケーリング進行性に及ぼす凍結 融解を受けるまでの期間の暴露環境の影響, 土 木学会論文集 E, Vol.66, No.3, pp.348-365, 2010.9
- 4) 社団法人コンクリート工学協会:コンクリート の凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員 会報告書,pp.128-137,2008