論文　コンクリート表層におけるモルタル領域の炭酸化がスケーリング抵抗性に及ぼす影響

武美　伸宗[*1]・緒方　英彦[*2]・兵頭　正浩[*3]・橋本　学[*4]

要旨：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。一方，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。

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

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。凍害の劣化形態の一つであるスケーリングは，コンクリートの表面が徐々に剥離する現象である。スケーリングは，コンクリート構造物における部材断面を欠損させ，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。加えてスケーリングが生じた箇所では，凍結融解の繰返し作用によりコンクリート組織が緩んでいるために，内部に水が浸透しやすくなり，部材内部の劣化を早める恐れがある。したがって，スケーリング抵抗性の向上は，コンクリート表層だけでなく，内部劣化に対する耐久性を確保するためにも必要である。

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。中性化の一種である炭酸化は，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。

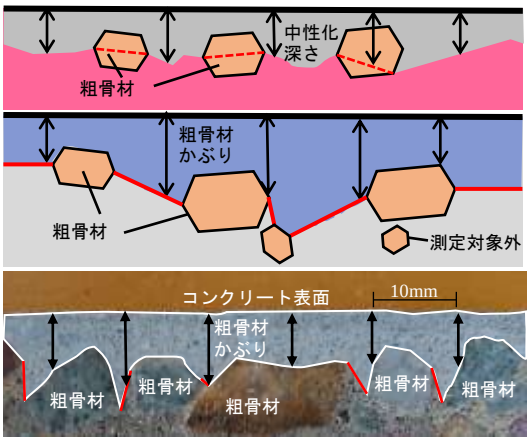
本研究では，コンクリート表層におけるモルタル領域を新たに粗骨材かぶりと定義し，中性化深さの異なるコンクリートを対象に中性化深さと粗骨材かぶりの関係がスケーリング抵抗性に及ぼす影響を実験的に検討した。

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。

かぶりは，コンクリート標準示方書「設計編」[1)]において，「鉄筋あるいは緊張材やシースの表面とコンクリート表面の最短距離」と定義されている。これを踏まえ，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。しかし，コンクリート内部に配置された鉄筋がコンクリート表面から概ね一定の距離であるのに対し，粗骨材は，表面から均一の距離で分布していない。したがって，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：



図－1　粗骨材かぶりの測定方法

*1 鳥取大学大学院　持続性社会創生科学研究科　学士（農学）　（学生会員）
*2 鳥取大学教授　農学部生命環境農学科　博士（農学）（正会員）
*3 鳥取大学准教授　農学部生命環境農学科　博士（農学）（正会員）
*4 鹿島建設(株)　技術研究所主任研究員　土木材料グループ　博士（工学）（正会員）

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（鳥取市産陸砂）	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 (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	air (%)	s/a (%)
20	8±2	55	3.0	37.5

単位量（kg/m³）			
W	C	S	G
171	311	689	1136

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。粗骨材は，「5mm ふるいに重量で 85%とどまるもの」と定義されることから，本研究で対象とする粗骨材の寸法は，コンクリートの表面近くに位置する粒径 5mm 以上のものとした。**図－1** より，中性化深さの測定では，粗骨材が測定対象となる場合，粗骨材の両端における中性化位置を結んだ直線上で測定すると定められている。この考え方を粗骨材かぶりの測定に適用すると，コンクリート表面近くに位置する粗骨材と粗骨材の間のモルタル領域は直線で結ぶことができる。そのため，粗骨材かぶりの測定においても，モルタル領域が測定対象となる場合には，測定対象の粗骨材間を結んだ直線上で測定すると定めた。各測定箇所における粗骨材かぶりは，測定値の合計を測定箇所数で除して，小数第二位を四捨五入して算出する。

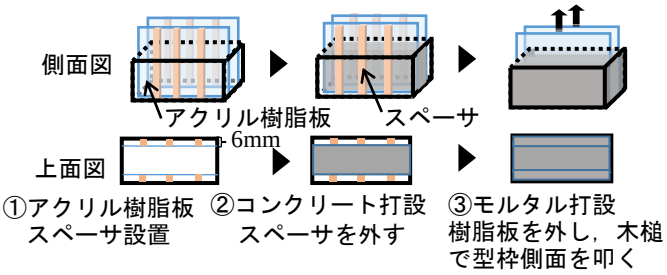
3. 試験の概要

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（10×10×40cm）である。また，強度試験用に円柱供試体（φ10×20cm）を 3 本作製した。

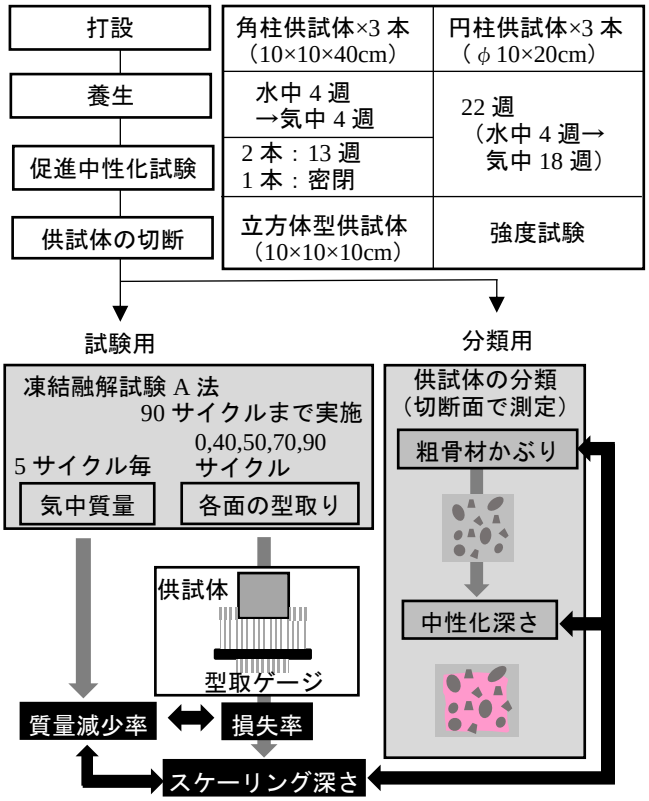
角柱供試体の作製手順を**図－2** に示す。一般的な角柱供試体の表層のモルタルの厚さは，平均 6mm とされている [2]が，粗骨材が表面付近に存在する場合もある。本研究では，粗骨材が表面近くに位置することなく 6mm 以上の粗骨材かぶりを確保するよう，型枠側面にアクリル樹脂版で仕切りを設け，内側にはコンクリートを，外側にはモルタルをコンクリートがフレッシュ状態の間に打設した。外側に打設したモルタルは，内側に打設したコンクリートと同じ配合とするためにコンクリートの配合から粗骨材を除いた配合とした。モルタルの空気量は 1.9%，フロー値は 235×230mm であった。

試験の概要を**図－3** 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：



図－2　角柱供試体の作製手順



図－3　試験概要

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，試験開始時における含水率の違いをなくすため，試験用の供試体は，20℃±1℃の養生水槽内で吸水させ，飽水状態にした後に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で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**表－3** に示す。各供試体は，実環境下で炭酸化が進行する順序を考慮し，促進中性化試験を実施していないものをパターン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を越えていないものをパターンⅡ，中性化深さが粗骨材かぶりを越えているものをパターンⅢとして分類した。ここで，実構造物における底面に相当する箇所は，一般的に中性化は進行しないため，特に打設面や側面に着目して分類した。

分類した 3 パターンの供試体における粗骨材かぶりと中性化深さの関係性について各面ごとの傾向を**図－4** に示す。ダイヤグラムの外側は，供試体の表面に相当する。各パターンの側面の粗骨材かぶりは，概ね 6mm 以上となったが，6mm 以下となる場合には，打設時に木槌で型枠を叩く際に一部の粗骨材がモルタル層へ侵入したと考えられる。パターンⅢの側面 1 では，**表－3** における供試体の全体的な粗骨材かぶりと中性化深さの大小関係とは異なっていたため，パターンごとの検討に加えて，同一供試体の各面における粗骨材かぶりと中性化深さとの関係の違いについても検討を行うこととした。

一方で，試験用の供試体には，JIS A 1148：2010「コンクリートの凍結融解試験方法」に準じ，水中凍結融解試験（A 法）を実施した。供試体は，115×115×500mm のゴム枠内に切断面がゴム枠の上面と下面となるように納め，供試体の間にはスペーサを配置した。試験は，促進中性化試験終了後の材齢 22 週に開始し，90 サイクルまで実施した。供試体は 5 サイクル毎に金ブラシで剥離部を除去後，表面に付着した水分を拭き取って気中質量を測定し，サイクルの進行に伴う供試体全体の質量減少率を求めた。加えて，**図－5** に示す型取ゲージを用いて供試体の各面の型を取り，初期値と試験終了時の 90 サイクル目の測定より損失率を求め，0，40，50，70，90 サイクルにおける測定よりスケーリング深さを求めた。

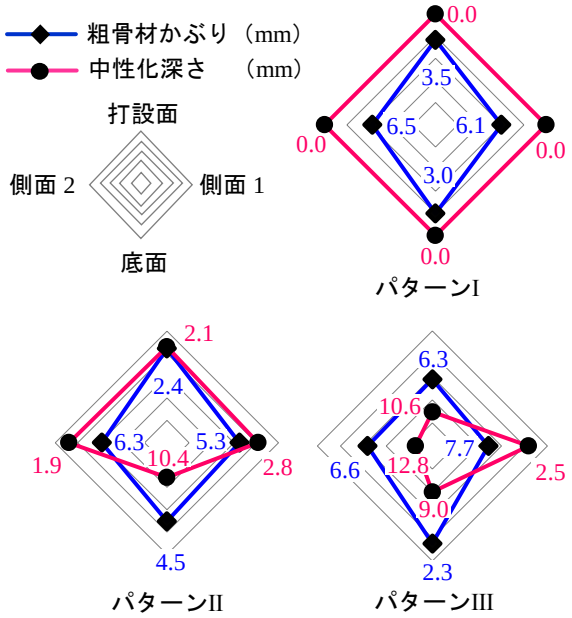
4. 評価方法の概要

質量減少率は，スケーリング抵抗性を評価する指標である。しかし，質量減少率は，供試体そのものの質量の変化によるスケーリング抵抗性を評価するに留まるため，供試体の各面でのスケーリング抵抗性の違いを評価することができない。本研究では，供試体の各面におけるスケーリングの差異を評価する指標として損失率を用いた。加えて，各面の粗骨材かぶりと中性化深さとの関係性を踏まえたスケーリングによる経時的な劣化形状の変化は，スケーリング深さを指標として評価した。

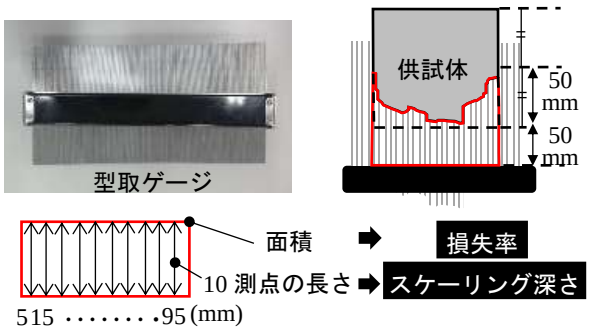
表－3　供試体の分類

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－4　各面の粗骨材かぶりと中性化深さの関係



図－5　型取ゲージによる測定

4.1 質量減少率

凍結融解試験において，供試体全体のスケーリング抵抗性は，測定した気中質量から求めた質量減少率により評価される。質量減少率は，次式から求めた。

$$質量減少率(\%) = \frac{w_0 - w_n}{w_0} \times 100 \qquad (1)$$

w_n：凍結融解 n サイクル後の供試体の質量(g)，w_0：凍結融解 0 サイクルの供試体の質量(g)

4.2 損失率およびスケーリング深さ

本研究において，損失率およびスケーリング深さは，**図－5** に示す型取ゲージを用いて算出した。型取ゲージは，水路壁面の表面粗さの測定に使用される計測器[3]であり，スケーリング深さの評価に適用した。使用した型取ゲージは，水平幅 300mm 間に長さ 150mm，直径 1.0mm のステンレス針が 280 本並んで構成されている。型取ゲージによる測定箇所は，打設面，側面 2 面，底面の各面における中心位置とした。また，凍結融解試験開始前の供試体の中心から型取ゲージ本体までの距離は 100mm に固定した。供試体が一辺 100mm の立方体であることから，初期値における測定面から型取ゲージまでの距離は 50mm である。所定のサイクル毎に測定したゲージ型を撮影した画像からは，画像処理ソフト AreaQ を用いて損失率とスケーリング深さを求めた。AreaQ は，JPEG またはビットマップ形式の画像ファイルを画像解析することができるソフトで，画像上の長さや面積の測定が可能である。画像処理の対象となるのは，**図－5** の赤枠で示した領域である。赤枠内の面積は，初期値で最も小さく，スケーリングの進行により対象となる面が欠損すると大きくなる。赤枠内の面積からは，サイクル終了時の損失率を算出して質量減少率と対比した。また，両端部 5mm を除いて 10mm 間隔で測定した 10 点（5，15，25，35，45，55，65，75，85，95mm）でスケーリング深さを測定した。なお，スケーリング深さは，粗骨材かぶりや中性化深さの測定箇所と同じ位置で測定した。以下に損失率とスケーリング深さの導出式を示す。

$$\text{損失率}(\%) = \frac{A_{90}-A_0}{A_0} \times 100 \qquad (2)$$

A_{90}：凍結融解 90 サイクルの型取ゲージの面積(mm^2)，
A_0：凍結融解 0 サイクルの型取ゲージの面積(mm^2)

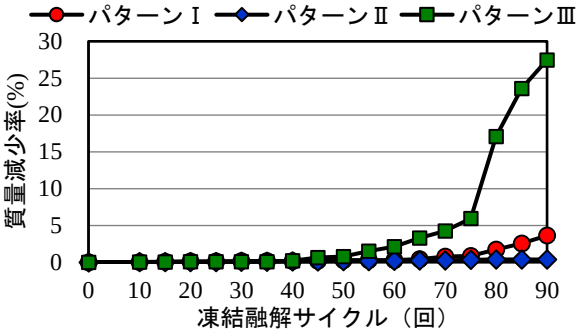
$$\text{スケーリング深さ}(\text{mm}) = L_n - L_0 \qquad (3)$$

L_n：凍結融解 n サイクル後の任意の箇所における型取ゲージの長さ(mm)，L_0：凍結融解 0 サイクルの任意の箇所における型取ゲージの長さ(mm)

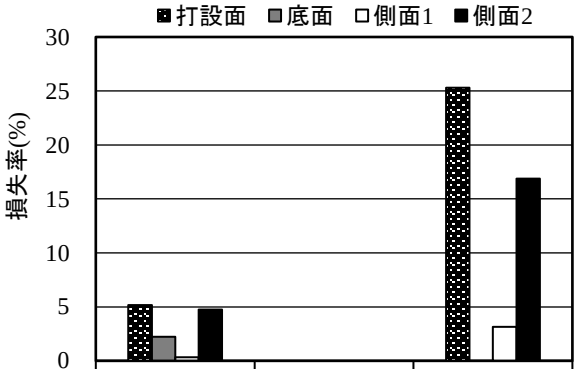
5. スケーリング抵抗性の評価

5.1 質量減少率

図－6 は，各パターンの質量減少率を示している。パターンⅠでは，70 サイクル目から質量が減少し，スケーリングが生じていた。パターンⅡでは質量減少率に変化がほぼ見られなかった。一方で，パターンⅢでは 50 サイクル目からスケーリングが進行し始め，70 サイクル目を過ぎると質量減少率の傾きが急激に増大した。このことから，質量減少率は，凍結融解サイクルの初期に緩やかな線形を示すが，スケーリングが進行すると非線形を示すと言える。



図－6　質量減少率



	パターンI	パターンII	パターンIII
打設面	5.2	0.0	25.3
底面	2.2	0.0	0.0
側面1	0.3	0.0	3.2
側面2	4.8	0.0	16.9

図－7　損失率

5.2 損失率

図－7 は，各パターンにおける各面の損失率を示している。パターンⅠにおける打設面や側面 2 は，著しいスケーリングが生じていた。パターンⅡでは，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。一方で，**図－6** のパターンⅡにおける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。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越えたため，打設面の損失率は 70 サイクル目に相当する。**図－7** より，パターンⅢの質量減少率の上昇には，打設面と側面 2 での欠損の影響が大きいと考えられる。

5.3 スケーリング深さ

スケーリング深さは，各面の粗骨材かぶりと中性化深さの実測値と共に示す。

5.3.1 パターンⅠのスケーリング深さ

図－7 でスケーリングが特に顕著であった打設面及び

側面 2 のスケーリング深さの推移を**図－8** に示す。スケーリングは，打設面や側面の端部から生じ，サイクルの進行に伴って端部の表面から徐々に剥離している。90 サイクル目には，スケーリング深さが粗骨材かぶりを越えているため，端部のモルタルだけでなく，粗骨材の剥落も生じていることになる。したがって，**図－6** のパターンⅠにおける 70 サイクル目からの質量減少率の増加は，端部で粗骨材を含むスケーリングが生じたためである。

5.3.2 パターンⅢのスケーリング深さ

図－9 は打設面と側面 2 のスケーリング深さを示している。スケーリングは端部から進行しているが，パターンⅠのように緩やかなスケーリングではなく，急激に炭酸化領域までスケーリングされた著しい欠損である。

5.4 中性化深さと粗骨材かぶりの関係性の違い

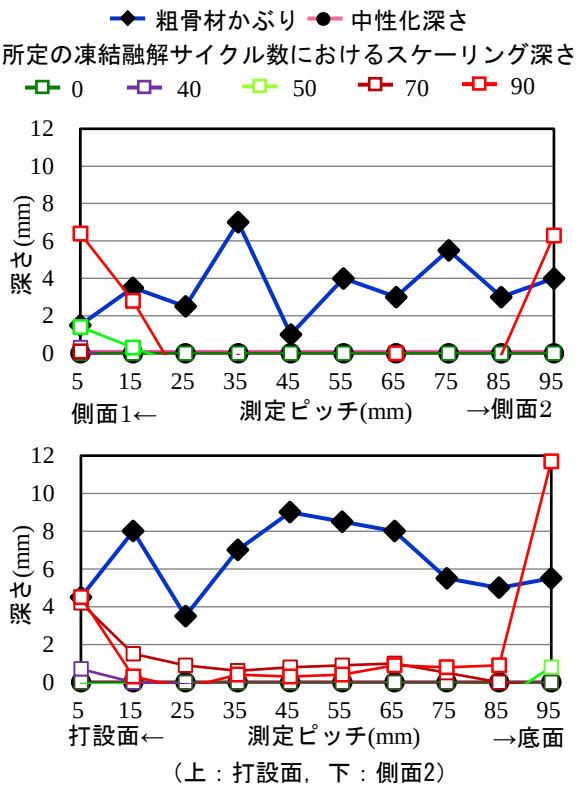
図－4 より，パターンⅡの各面は，底面を除いて粗骨材かぶりが中性化深さよりも大きい関係にある。スケーリングが生じたパターンⅠに対して，パターンⅡでスケーリングが生じなかった理由は，炭酸化により打設面や側面の表層における強度が上昇 [4]し，凍結時の膨張圧力を抑制したために，表面から徐々に剥離する一般的なスケーリングが生じなかったと考えられる。このことから，中性化深さが粗骨材かぶりを越えない範囲では，炭酸化の進行により，コンクリート表面からのスケーリングを抑制することが示された。

一方で，パターンⅢでは，**図－4** に示すように，スケーリングが顕著となった打設面と側面 2 において，中性化深さが粗骨材かぶりを越えてコンクリート領域まで進行している。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越えると，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。

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。

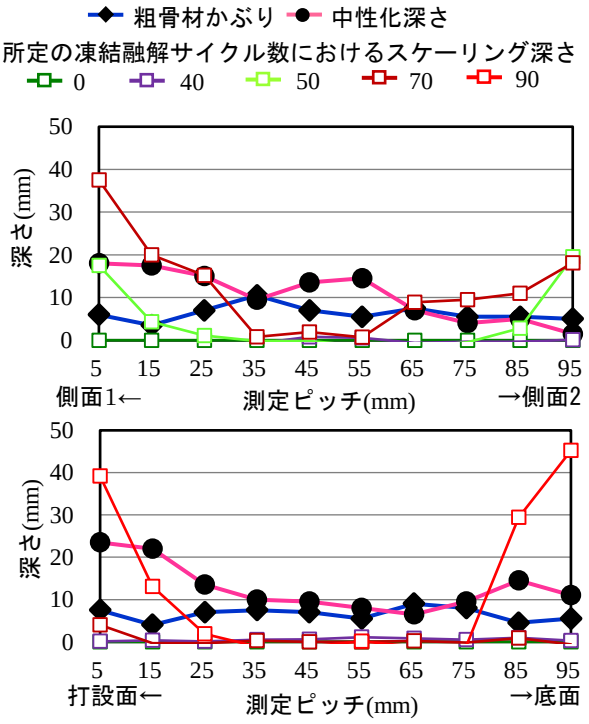
炭酸化により緻密化したコンクリート表層では透水性が低下 [5]するとされている。さらにコンクリートが飽水状態にある場合，炭酸化領域では未凍結水の集中 [6]が促され，未炭酸化領域との界面が凍結圧により緩みやすくなると考えられる。また，凍結融解時には，粗骨材周囲の組織が緩み，ひび割れが発生しやすくなる [7]とされている。以上のことを踏まえてパターンⅢにおける著しいスケーリングが生じた原因を次のように推察した。

本研究では，水中凍結融解試験である A 法を採択して



（上：打設面，下：側面2）

図－8　パターンⅠのスケーリング深さ



（上：打設面　下：側面2）

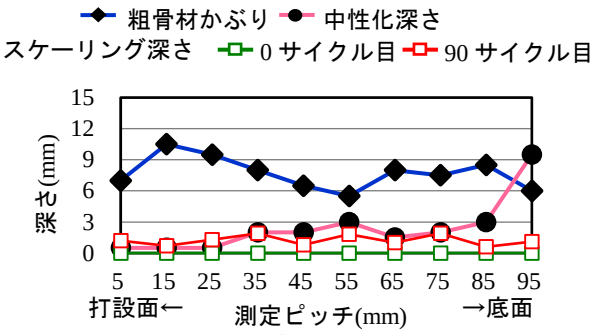
図－9　パターンⅢのスケーリング深さ

いるため，試験中の供試体は常に飽水状態であるとみなされる。このことから，コンクリート表層が炭酸化しているパターンⅡ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，粗骨材かぶりを越えて炭酸化しているパターン

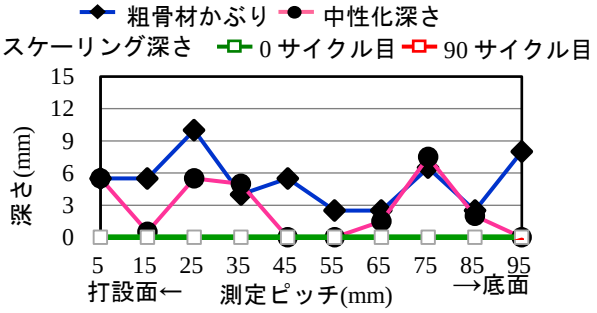
Ⅲでは，炭酸化領域と未炭酸化領域の界面には，粗骨材が存在している。したがって，パターンⅢにおいて凍結融解の繰返し作用を受ける際には，緩みが生じやすい炭酸化領域と未炭酸化領域の界面に重なって粗骨材が存在したため，緩みが顕在化して著しいスケーリングが生じたと考えられる。一方で，スケーリングしなかったパターンⅡのようにモルタル領域のみ炭酸化される場合には，炭酸化領域と未炭酸化領域の界面に粗骨材が存在しないため，スケーリングに至るほどのコンクリート組織の緩みが顕在化しなかったと考えられる。

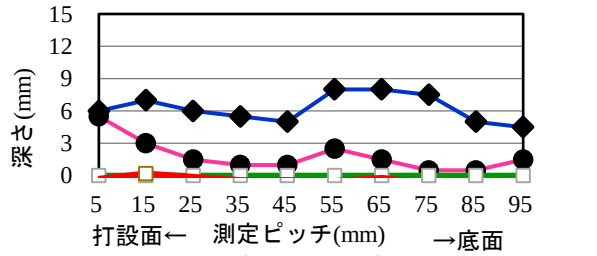
5.5 同一供試体の側面におけるスケーリング

パターンⅢの打設面や側面 2 は，中性化深さが粗骨材かぶりを越えており，著しいスケーリングが確認された。一方，パターンⅢの側面 1 は，**図－7** より打設面や側面 2 と比べてスケーリングがほとんど生じておらず，**図－4** に示すようにパターンⅡの打設面や側面と同じく粗骨材かぶりが中性化深さよりも大きい面である。**図－10** にパターンⅢにおける側面 1 のスケーリング深さを示す。側面 1 ではスケーリングがわずかに確認される程度であり，**図－9** のような端部のスケーリングも生じていない。これは，**図－11** のスケーリングがほとんど生じていないパターンⅡと同様の結果であるとわかる。したがって，同一供試体の側面同士であっても，粗骨材かぶりと中性化深さの大小関係が異なれば，スケーリング抵抗性も異なることが示された。



図－10　スケーリング深さ（パターンⅢ－側面1）





（上：側面1，下：側面2）

図－11　スケーリング深さ（パターンⅡ）

6 まとめ

本研究により，粗骨材かぶりを越えて炭酸化が進行すると，打設面や側面において，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た。

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

(1) コンクリートの表面から内部の粗骨材までのモルタル領域を粗骨材かぶりとして定義し，測定方法を提案した。

(2) 表面が炭酸化されていないコンクリートと比べて，粗骨材かぶりが中性化深さより大きいコンクリートでは，スケーリング抵抗性が向上した。

(3) 粗骨材かぶりが中性化深さよりも小さいコンクリートでは，スケーリング抵抗性が著しく低下した。

本研究の結果および考察は，普通ポルトランドセメントを用いた non-AE コンクリートのものであり，水中凍結融解試験において凍結水に塩水を用いた場合や AE コンクリートの場合のスケーリング抵抗性の違いについては今後の研究から明らかにする必要がある。

参考文献

1) 社団法人土木学会：2012 年制定　コンクリート標準示方書［設計編］，社団法人土木学会，p.7，2013.3

2) 佐藤周之ら：コンクリート水路における骨材露出の評価に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.699-704，2008.7

3) 本間新哉ら：農業用鉄筋コンクリート製開水路壁面の凹凸評価手法，農工研技報，Vol.209，pp.17-27，2009.11

4) 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

5) 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

6) 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

7) 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.128-137，2008.8