

塩化物水溶液による長期凍結融解作用を受けた コンクリートのスケーリング特性

遠藤 裕丈¹・田口 史雄¹・嶋田 久俊¹

¹ 正会員 独立行政法人 北海道開発土木研究所 構造部 材料研究室
(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

コンクリート表面品質に着目し、塩化物水溶液によるASTM-C-672に準拠した凍結融解作用を比較的長期にわたって受けた時のスケーリング特性を調べ、高いスケーリング抵抗性を得るために必要な品質条件について検討した。その結果、配合や試験面の部位によってスケーリング挙動は異なることが明らかとなった。最適な水セメント比の範囲を凍害による欠損深さの判定基準²⁶⁾をもとに考察すると、普通ポルトランドセメントは概ね35~50%、高炉セメントB種は概ね35~40%であった。さらに、水セメント比が極めて小さくなる場合は粗大モルタル塊の剥落による表面崩壊に対する照査が必要となる等、新たな知見も得られた。

Key Words : concrete, deicing salt, sea-water, long-term freeze and thaw, scaling deterioration

1. まえがき

コンクリートが塩化物水溶液による凍結融解作用を受けると、表面がフレーク状に激しく剥げ落ちるスケーリングが発生し、劣化が著しく促進される。近年、この問題がクローズアップされつつある。

わが国では、北海道など寒冷地で海洋コンクリート(写真-1)の被害が報告されている^{1), 2)}。一方、北米では、凍結防止剤によるスケーリング劣化および鉄筋腐食の被害が報告されている^{3), 4)}。わが国では、スパイクタイヤの使用禁止が法制化され、凍結防止剤が大量に散布されて10年程度しか経過しておらず、凍結防止剤による劣化は、現在のところ大きく顕在化していない。しかし、今後も継続される凍結防止剤の大量散布によって構造物の劣化が大きな社会問題になることが将来的に危惧される⁵⁾。近年、塩化物に代わる凍結防止剤も開発されているが、①凍結路面対策としてのランニングコストが最も経済的であること、②最終地点である海洋に入った場合も海洋汚染の心配が比較的小さいと考えられていることから、塩化物の凍結防止剤が当面主流として散布されていくと考えられる。

我が国の社会資本整備は、建設ピークの時代から保全を中心としたストック・マネジメントの時代へと移行しつつある。今後、少子高齢化による労働力

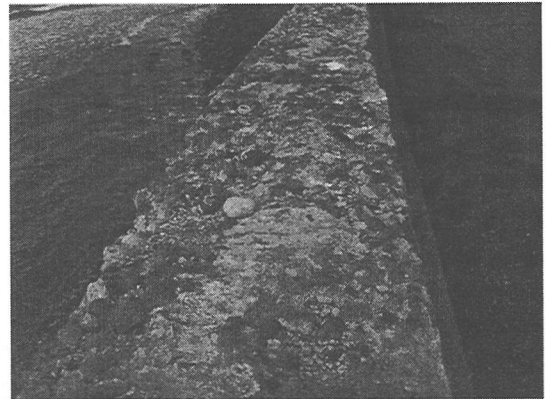


写真-1 沿岸地域のコンクリート構造物のスケーリング

の低下、財政難や投資余力の低減が予測される中、コスト縮減に努め、コンクリート構造物を効率よく良い状態で長期的に維持し、大切に使う視点が必要になる。

この情勢をふまえ、2002年版のコンクリート標準示方書⁶⁾では大幅な改訂がなされ、コンクリート構造物が従来の「仕様規定型」から「性能照査型」へ移行し、設計段階から塩害や凍害などの照査を行うこととされた。厳しい気象条件を受ける寒冷地に建設されたコンクリート構造物において耐久性の照査は特に重要だが、コンクリートの劣化挙動は非常に

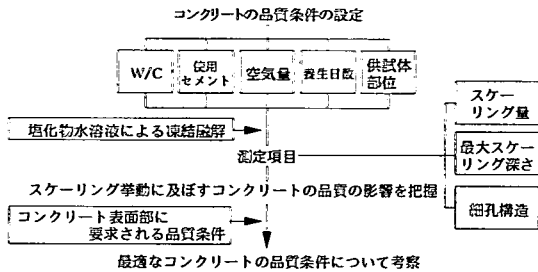


図-1 本研究のフローチャート

複雑で、今日に至っても劣化メカニズムが十分に解明されていないものも多く、今後、適切な性能照査を行うためには、さらに研究を進める必要がある。

凍結防止剤によるコンクリート構造物の劣化メカニズムおよび抑制対策に関しては、日本コンクリート工学協会の「融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会⁷⁾」による報告がなされているが、長期のスケーリング劣化挙動に関しては、組織の緩みによって内部に蓄積する塩分、その他の劣化因子が将来にわたって及ぼす影響の予測を困難なものとしている。性能照査型へ移行する21世紀は、まさに維持管理・保全の時代であり、コンクリートの長期耐久性、構造物の長寿命化に関する技術開発が大切な課題である。

コンクリートの耐凍害性は、一般にJIS-A-1148の凍結融解試験⁸⁾から検討がなされる。この試験は、供試体を水中浸漬させて供試体全面に凍結融解作用を与え、質量減少率（スケーリング）と耐久性指数から評価が行われる。しかし、質量減少率の指標値が設定されておらず、耐久性指数から評価されるのが一般的⁹⁾で、コンクリート「自体」の品質に重点を置いた試験と言える。このため、スケーリング量が極めて多いコンクリートでも耐凍害性は良好と評価される恐れもある。写真-1のように、通常コンクリート構造物は1面から凍結融解作用を受け、表面が剥げ落ちるスケーリングの形で劣化が現れることが多い。スケーリングは美観、景観上の問題はもちろん、コンクリート表面の組織破壊によって水や空気の浸透を容易にし、凍害とかぶり厚さの減少による塩害の複合劣化を招き、第三者被害そして将来的には構造物の安全性能に影響を与える恐れもある。実構造物の劣化挙動に即した評価を行うには、コンクリート表面に着目した試験が望ましいと考える。

本研究では、寒冷地における沿岸環境下および凍結防止剤散布下のコンクリート構造物を対象とし、コンクリート表面の品質に着目し、塩化物水溶液によるコンクリートのスケーリング挙動特性に及ぼす

表-1 コンクリート配合

セメント	水セメント比 W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	細骨材 ^a s/a (%)	単位量(kg/m ³)				圧縮強度 σ_{28} (N/mm ²)	
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
普通ポ ルセ トメン ト	25	8±2.5	4.5±1	39	128	512	703	1,087	97.0	
	35				133	380	780	1,111	60.6	
	45				140	311	835	1,095	40.3	
	55				143	260	890	1,076	39.0	
	65				147	226	937	1,045	28.7	
高炉セ メント B種	25			6.5±1	45	139	556	670	1,037	93.1
	35					143	409	753	1,072	54.2
	45					144	320	823	1,078	40.6
	55					145	264	882	1,065	33.8
	65					138	251	872	1,054	25.4
	4.5±1	47	145	223	939	1,047	21.9			

コンクリートの品質の影響について検討したので報告する。図-1に本研究のフローチャートを示す。

2. 実験概要

(1) 配合・使用材料

配合を表-1に示す。細骨材に苫小牧樽前産海砂(密度2.70g/cm³, 吸水率0.97%, 粗粒率2.86), 粗骨材に小樽見晴産砕石(密度2.67g/cm³, 吸水率1.58%, 粗粒率6.97, 最大寸法25mm)を使用した。混和剤は、W/Cが25%, 35%は高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル複合体), 空気連行剤(変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤), 空気調整剤(ポリアルキレングリコール誘導体)を、W/Cが45%, 55%, 65%はAE減水剤(リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体), 空気連行剤を用いた。

(2) 練混ぜ

練混ぜには容量100リットルのパン型強制練りミキサーを使用した。目標スランブは8±2.5cmとした。W/Cが45%, 55%, 65%は、細骨材とセメントを10秒間空練りした後、水の1/2を入れて10秒間、粗骨材を入れて10秒間、その後残りの水および混和剤を入れて3分間練混ぜた。一方、W/Cが小さい25%, 35%は、練り混ぜ時間を長く設定⁹⁾し、細骨材とセメントを30秒間空練りした後、水、混和剤を入れて4分間、粗骨材を入れて1分30秒間練混ぜた。練り混ぜ温度は20℃とした。

(3) 供試体

図-2に供試体を示す。供試体は、220×220×100mmの小型供試体とした。また、実際の橋脚を想定

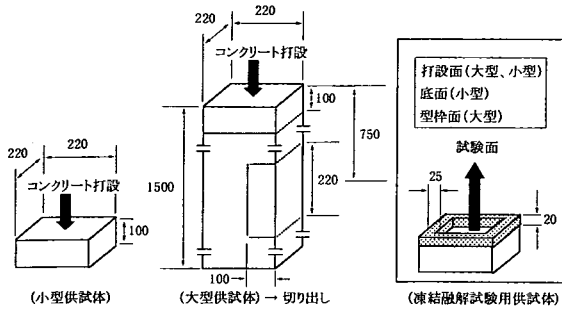


図-2 供試体 (単位: mm)

した実験も行うこととし、220×220×1500mm寸法で作製した大型供試体の型枠面から220×220×100mm寸法で切り出したコンクリートも供試体とした。試験面は、小型供試体の打設面と底面および大型供試体の打設面と型枠面とし、試験水を張るため、幅25mm、高さ20mmのモルタル製の土手を試験面に築いた。試験水の浸透および凍結融解を受ける面を試験面の1面に限定するため、材齢21日に試験面以外の5面をエポキシ樹脂でコーティングした。

(4) 養生条件

図-3に養生条件を示す。試験開始材齢は28日に統一した。ASTM-C-672規定⁹⁾では、打設面に滞留するブリーディング水とレイタンスを除去する目的で、打設面を拭取る作業が行われるが、現場でこの作業が行われる例は稀である。そこで、拭取り作業を行わない図-3の(1)~(9)に示す条件も合わせて検討した。品質に影響を及ぼす因子に養生の日数があるが、本研究では0日、3日、7日とした。養生方法は、硬化前は20℃の湿気養生層に安置し、硬化後は養生マットを想定した湿った布で試験面を覆った。養生方法の切替え時期は、打設面は打設24時間後、底面と大型供試体は脱型後(打設3日後)とした。スケーリングに及ぼす海水養生の影響を調べる目的で、布を人工海水で湿らせたケースについても行った。また、構造物の立地条件によっては風や直射日光でコンクリート表面が極度に乾燥し、品質に影響を及ぼす状況も想定される。そこで、養生0日の供試体打設面に約2m/sの風を当て、極度に乾燥させたケースも行った。

(5) 凍結融解試験

凍結融解試験はASTM-C-672⁹⁾に準じた。図-4にフローを示す。試験水にCaCl₂3%溶液、NaCl3%溶液、人工海水を用い、-18℃で16時間、23℃で8時間の1日1サイクルの凍結融解作用を試験面に与え、ス

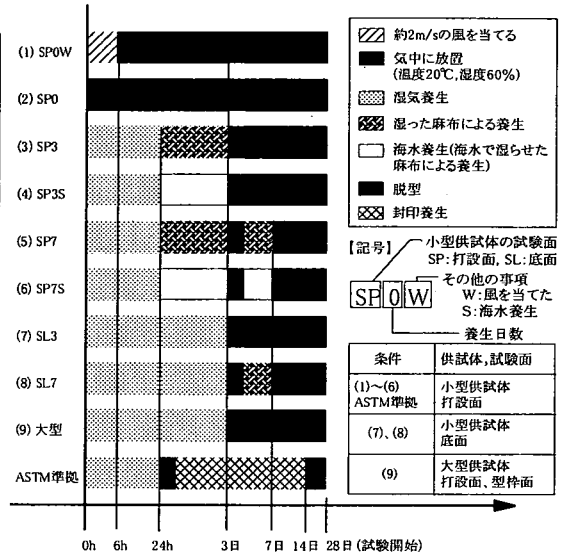


図-3 養生条件(ASTM準拠では打設4時間後に表面処理)

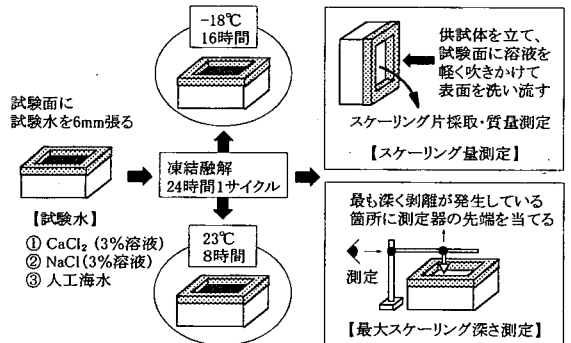


図-4 試験フロー図

ケーリング量と最大スケール深さを測定した。最大スケール深さは、深く剥離している箇所を任意に5点選定して測定し、最大値を測定値とした。

この試験にはサイクル数に規定がなく、1日1サイクルと時間を要することもあり、50サイクル程度までしか行われていないのが一般的である。北海道では年間100回程度凍結融解を受けること¹⁰⁾や、構造物の寿命を考慮するとサイクル数は少なすぎると思われる。されど、寿命に相当するサイクル数を予測することは極めて困難でもある。本研究では一例として、400~600サイクルの凍結融解作用を与えてスケーリングの挙動を調べることにした。

(6) 細孔分布の測定

スケーリング挙動に及ぼす細孔の影響を調べた。材齢28日供試体の試験面から深さ5mmおよび50mmから試料を採取し、水銀圧入法で測定した。また、

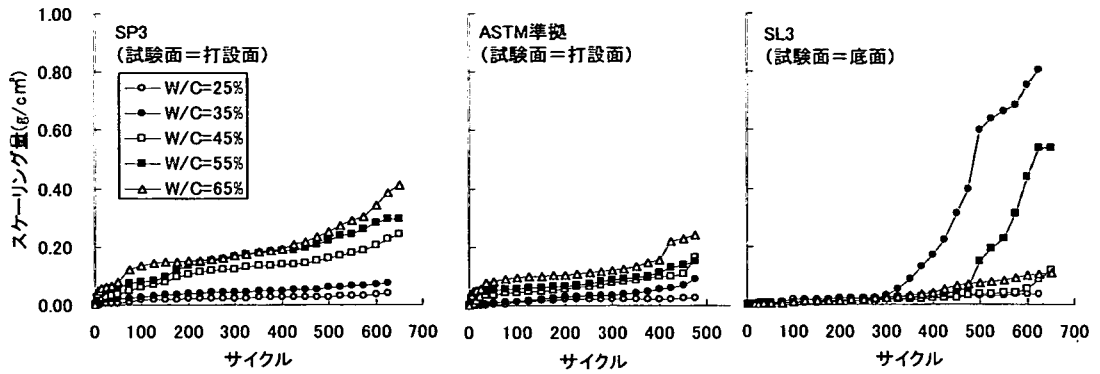


図-5 スケーリング量に及ぼすW/Cの影響(普通ポルトランドセメント, 小型供試体, CaCl₂)

凍結融解による細孔の変化についても調べてみた。ここでは、北海道の寒冷地で年間に受ける概ねの凍結融解回数100サイクル¹⁰⁾および本研究の最大サイクル600サイクルを選定して測定してみた。

3. 実験結果および考察

(1) W/Cの影響

図-5に普通ポルトランドセメントを用いた小型供試体のスケーリング試験 (CaCl₂) 結果を示す。試験面が打設面 (SP3) の場合, W/Cが大きいほどスケーリング量は多い。同じ打設面でASTM準拠したケースはSP3に比べるとスケーリング量が少ない。これは、拭取り作業で試験面の品質が向上したためと思われる。この結果は、ブリーディングがスケーリングに影響することを説明している。

底面 (SL3) の場合, 300サイクルまでスケーリング量は極めて少ないが, 300サイクル以降にW/C=35%, 475サイクル以降にW/C=55%でスケーリング量が急増する傾向が示された。この考察については後述する。

図-6に普通ポルトランドセメントを用いた小型供試体の細孔分布を示す。打設面では, W/Cの減少に伴って細孔容積が減少し, 細孔構造が緻密化している。図-5の打設面では, W/Cの減少によってスケーリング量が減少する傾向が示されており, 細孔構造とスケーリング量には相関があるように思われる。W/Cによる細孔の差は, 細孔径が概ね $10^3 \sim 10^5$ Åの領域で顕著に表れており, この領域の細孔量の差がスケーリングに影響した可能性が考えられる。この領域の径は, セメントとの水和反応で使用されなかった余剰水により生成される水隙部すなわち毛

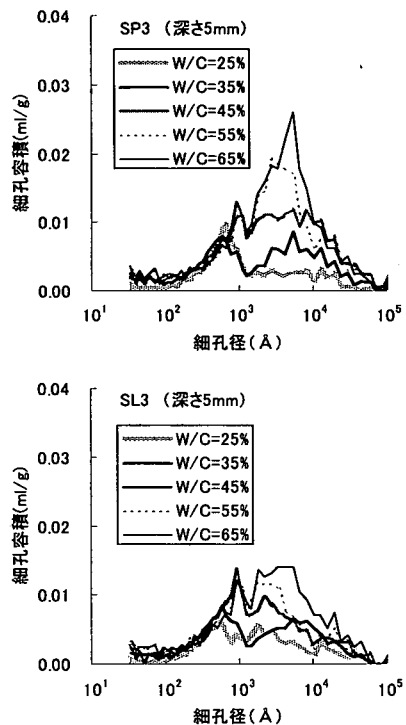


図-6 細孔分布(普通ポルトランドセメント, 小型供試体)

細管空隙の大きさに相当¹¹⁾し, 凍結時に凍害の要因である破壊的な水の移動圧をペースト周辺にもたらす¹²⁾。一般に, 完全に水和が行われる場合, セメント体積の25%の練り混ぜ水が化学的 (水和物生成), 15%が物理的 (ゲル空隙に吸着) に結合する¹³⁾が, これ以外の水は余剰水として存在することになる。よって, スケーリングを抑制するにはW/Cの減少, 特に $10^3 \sim 10^5$ Å領域の細孔量を減少させる対策が必要と思われる。

底面も, W/C増加に伴い細孔容積が増加する傾

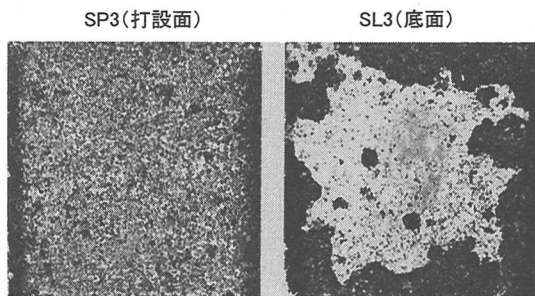


写真-2 400サイクルの状況(普通ポルトランドセメント, 小型供試体, W/C=35%, CaCl₂)

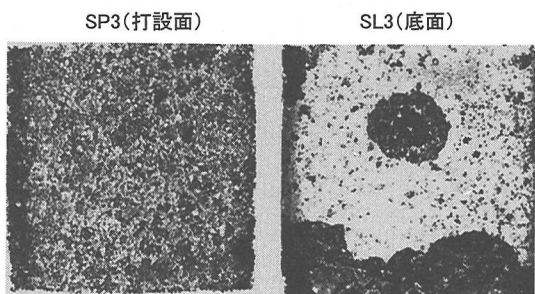


写真-3 500サイクルの状況(普通ポルトランドセメント, 小型供試体, W/C=55%, CaCl₂)

向はみられるが、打設面に比べると小さい。この要因には、底面に作用するコンクリート自重の圧密作用やブリーディングによる水の減少が考えられる。

写真-2に、普通ポルトランドセメントを用いた小型供試体のW/C=35%のSP3とSL3の400サイクルの状況を示す。SP3は面的にスケーリングが発生しているのに対し、SL3はモルタルの粗塊が剥離した痕がみられる。図-4と写真を照合すると、W/C=35%のSL3は300サイクルあたりまで良好な表面状態が維持され、その後、モルタル塊の剥離が局部的に発生し、やがて劣化が全面に広がり損傷に至ったと推察される。写真-3はW/C=55%の500サイクルの状況だが、劣化挙動がW/C=35%と酷似している。

写真-4はW/C=45%と65%の経時的な推移である。同様の劣化が部分的にみられるが、サイクル数を考慮するとW/C=35%、55%に比べると劣化度合は小さいと言える。W/Cと劣化度合に関係はみられないが、底面では健全な状態から突然崩壊する特異な挙動が示される場合があることが確認された。

写真をみると、モルタル塊の剥離が発生していない箇所にスケーリング痕が殆ど認められない。これは、底面では「スケーリング」が進行しにくいことを示唆し、前述した打設面に比べて細孔容積が小さ

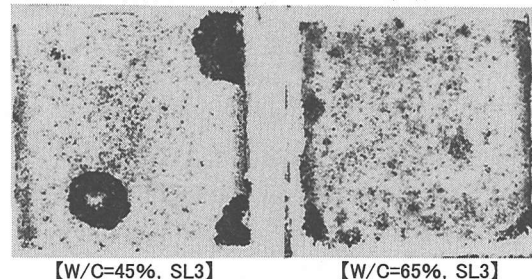
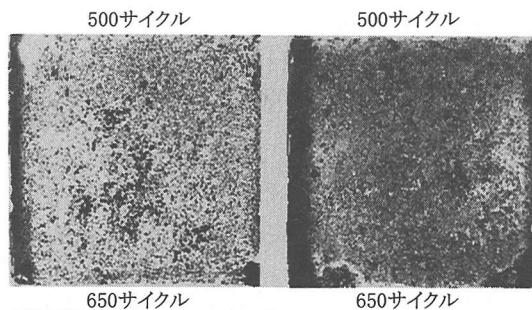


写真-4 劣化状況の経時的推移(普通ポルトランドセメント, 小型供試体, W/C=45%, 65%, CaCl₂)500,650サイクル

くなる結果に合致する。モルタル塊の剥離は、モルタルと粗骨材の界面との付着性が失われる様に発生している。しかし、打設面でこの挙動が全くみられないことから、粗骨材の凍結膨張に起因して生じるポップアウト¹⁴⁾である可能性は低い。一般に、骨材とペーストの界面には材料的に不連続でポーラスな領域が形成される¹⁵⁾ことから、浸透した水溶液はこの界面に滞留すると考えられる。また、桂ら¹⁶⁾は、気泡へつながる組織の透水性が低いほど凍結点に大きな圧力が発生し、凍害が発生することを指摘している。凍結融解が作用すると、浸透した水溶液による不凍水圧が生じる。本研究では、試験面以外の5面はエポキシ樹脂でコーティングしており、浸透した水溶液は供試体外へ漏れないため、水溶液の蓄積量は増加し、水圧も経時的に増大すると推測される。底面に比べて組織が粗である打設面は、スケーリングの発生で水圧を緩和させることが可能だが、底面は組織構造は極めて密で強い傾向にあるため水溶液の移動が難易となり、低温部の水分が移動する際に大きな圧力が生じ、水圧緩和のため相対的に組織が弱い界面からモルタル塊が剥離したと推察される。

このことから、組織の緻密化はスケーリングの抑制に必要な対策ではあるものの、過剰な緻密化は粗大なモルタル塊の剥離を発生させる場合もあることを考慮するべきと考える。しかし、本研究では、モルタル塊の剥離が発生する時期の規則性に関しては

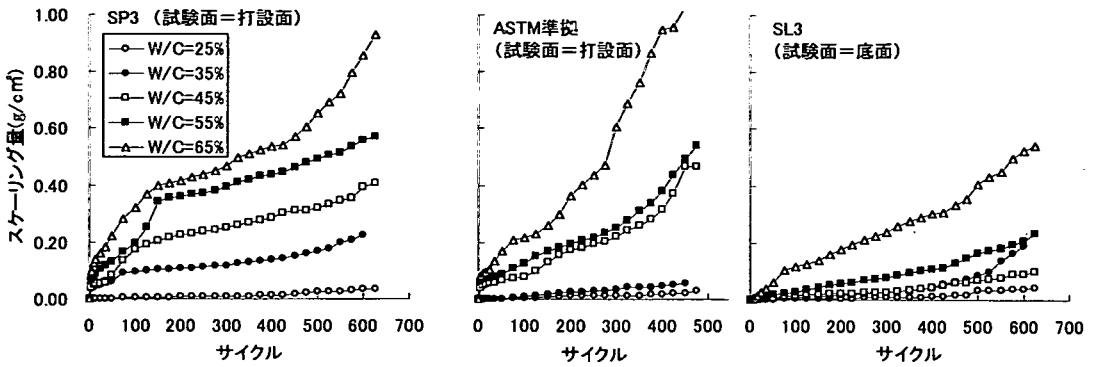


図-7 スケーリング量に及ぼすW/Cの影響(高炉セメントB種, 小型供試体, CaCl₂)

明らかにできなかった。剥離の発生時期の予測については、今後更に研究を進めていく必要がある。

(2) 使用セメントの影響

図-7に高炉セメントB種を用いた小型供試体のスケーリング試験 (CaCl₂) の結果, 図-8に細孔分布を示す。SP3の場合, W/Cが大きいかほどスケーリング量は多く, 細孔容積も大きくなっており, 両者はよく対応している。スケーリング量は普通ポルトランドセメントの場合に比べてやや多い傾向がみられる。ASTM準拠は, SP3に比べて全体的にスケーリング量は少ないが, 普通ポルトランドセメントの場合と異なりW/C=45%以上では着実にスケーリングが進行している。SL3は, SP3に比べるとスケーリング量は著しく少ないが, W/C=65%ではスケーリング量が比較的多い結果となった。

写真-5にW/C=65%のSP3とW/C=35%のSL3の経時的な劣化推移を示す。W/C=65%のSP3は激しいスケーリングがみられ, 600サイクルで粗骨材が露出する程スケーリングしているのがわかる。一方, W/C=35%のSL3は, 図-7をみると500サイクル以降でスケーリングがやや多く発生し続ける傾向がみられる。写真をみると, 600サイクルでは健全なペーストの残存は確認できるが, モルタル塊の剥離による粗骨材の露出もみられ, 劣化挙動が普通ポルトランドセメントに類似している。しかし, 300サイクルの写真をみると, スケーリングの痕が普通ポルトランドセメントより多くみられ, スケーリングとモルタル塊の剥離が複合的に発生している様子が伺える。このことは, 高炉セメントB種の場合はスケーリングが発生しやすいことを示唆する。

Stark¹³⁾は, 高炉セメントB種を用いたコンクリートが普通ポルトランドセメントに比べて多くスケ

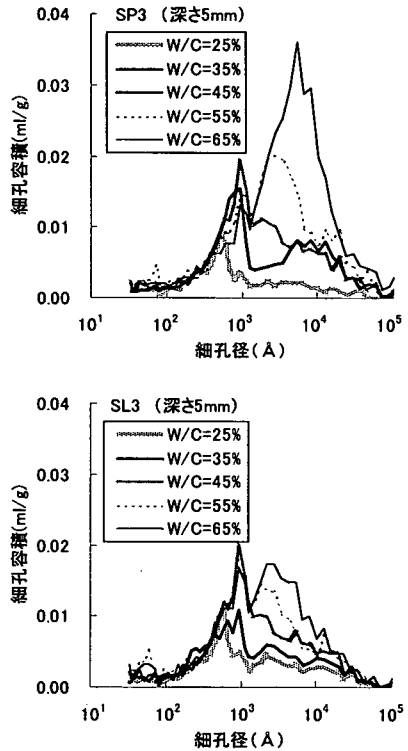


図-8 細孔分布(高炉セメントB種, 小型供試体)

ーリングしやすい事実は, スラグ混入の影響で溶出性の高い不安定な炭酸塩相が表層部に生成されることに起因すると報告し, 表層の緻密化を図って炭酸塩相の生成を抑制する対策が必要と指摘している。既に示した図-5と図-7を比較すると, スケーリング量が普通ポルトランドセメントを用いた場合とほぼ同程度となったW/Cは, SP3はW/C=25%, ASTM準拠はW/C=35%以下, SL3はW/C=45%以下と各々異なり, W/CはSL3, ASTM準拠, SP3の順に高いよう

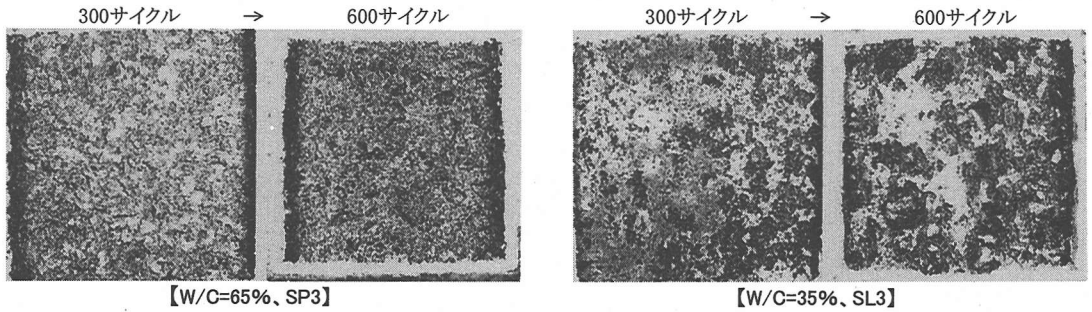


写真-5 劣化状況の経時的推移(高炉セメントB種, 小型供試体, W/C=65%SP3, W/C=35%SL3, CaCl₂300, 600サイクル)

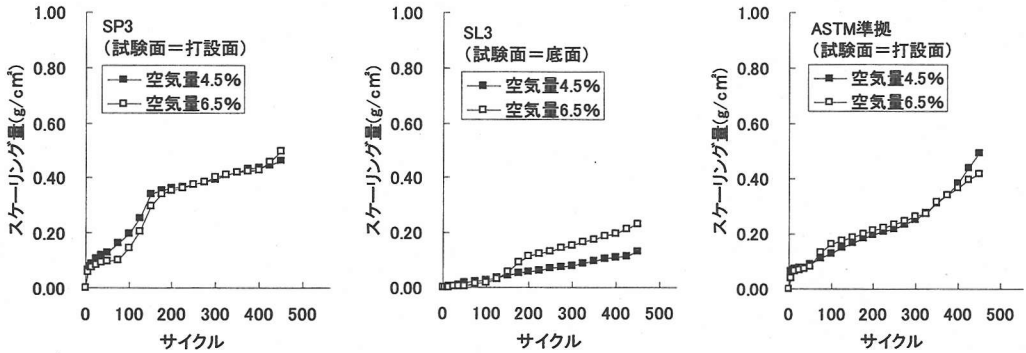


図-9 スケールリング量に及ぼす空気量の影響(高炉セメントB種, 小型供試体, W/C=55%, CaCl₂)

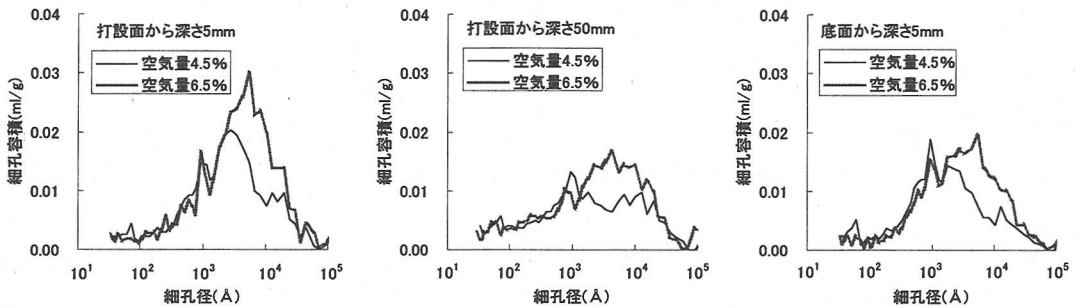


図-10 細孔分布に及ぼす空気量の影響(高炉セメントB種, 小型供試体, W/C=55%)

である。この理由は、ASTM準拠は拭取り作業が効果的であったこと、SL3は圧密作用が表層の緻密化に極めて効果的であったことによると思われる。

総合的に判断すると、高炉セメントB種のスケールリング抵抗性を高めるには、W/Cの低減を図り、表層組織を緻密化させることが重要と言える。

(3) 空気量の影響

図-9にスケールリング量に及ぼす空気量の影響を示す。SP3の場合、175サイクルまでは空気量4.5%の方が多くスケールリングしたが、175サイクル以降でほぼ同程度となった。ASTM準拠とSL3では、100サ

イクル以降で6.5%の方が多くスケールリングしているが、ASTM準拠は300サイクル以降で再び4.5%の方が多くスケールリングした。

空気量を増加させたコンクリートを用いてJIS-A-1148⁸⁾に準拠した凍結融解試験を行うと、一般に耐凍害性は向上する傾向が示される。これは、連行気泡を含めた空気量の増加によって凍結水圧の緩和が促進されるためである¹⁴⁾。つまり、組織が損傷を受けにくくなるため弾性係数の低下が小さく、結果的に高い耐久性指数が得られる。しかし、本研究では空気量の増加がスケールリング抑制に寄与する傾向は示されなかった。

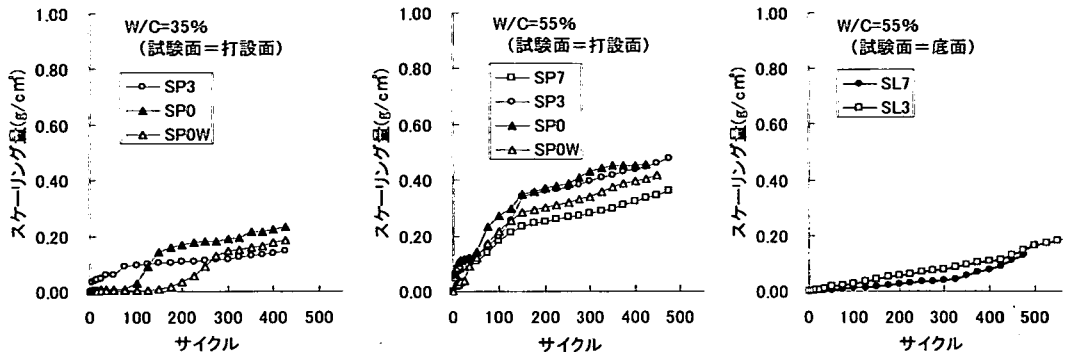


図-11 スケーリング量に及ぼす養生の影響(高炉セメントB種, 小型供試体, CaCl₂)

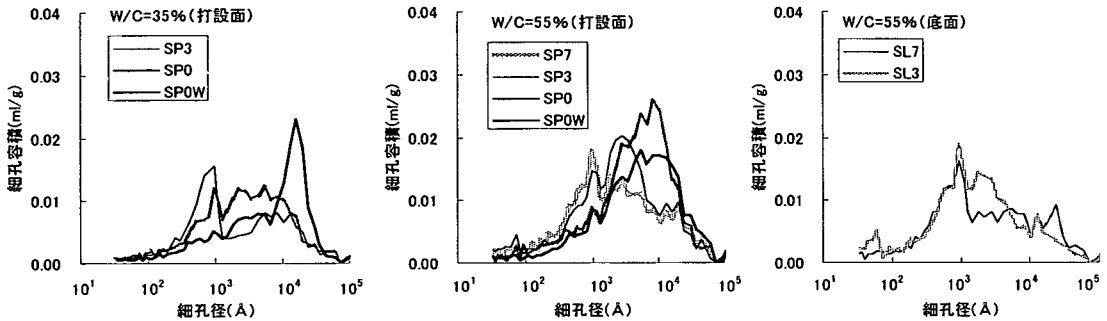


図-12 細孔構造に及ぼす養生の影響(高炉セメントB種, 小型供試体)

図-10に細孔分布に及ぼす空気量の影響を示す。いずれも4.5%に比べて6.5%の細孔容積が大きく、 $10^3 \sim 10^5 \text{ \AA}$ 特に数千 \AA の領域で傾向が顕著である。三浦ら¹⁷⁾も、空気量の増加によって数千 \AA 以上の細孔が増加する結果を得ているが、この数千 \AA の領域の細孔は耐凍結融解性を改善するのに役立つ可能性があるとして報告している。連行気泡の径は概ね 10^6 \AA 前後¹¹⁾といわれ、 $10^3 \sim 10^5 \text{ \AA}$ 径の領域がペーストに破壊的な水圧を与える恐れのある毛細管空隙に相当することを考えると、両者は矛盾しているように思える。三浦はJIS-A-1148⁷⁾試験の耐久性指数から考察しており、スケーリングに着目した本研究と一概に比較はできないが、空気量の増加は、凍結水圧を緩和させるプラスの効果と細孔構造を粗にするマイナスの影響をペーストに複合的に与えると考えられる。つまり、空気量6.5%は、初期サイクルは凍結水圧の緩和効果で少ないスケーリング量で推移し、後に組織の粗さの影響が表れたものと推定される。

空気量の増加は、組織の損傷を抑える効果は有するものの、細孔構造にも影響を与えるため、結果的にスケーリングの抑制効果はそれ程大きくはならないと思われる。

(4) 養生の影響

図-11にスケーリング量に及ぼす養生の影響を示す。W/C=35%の打設面をみると、SP3は早いサイクルでスケーリングが発生したものの、75サイクル以降はスケーリング量はほとんど増加しなかった。一方、打設後に気中放置したSP0は、初期サイクルでスケーリングはほとんど発生しなかったが、75サイクルから200サイクルにかけてスケーリング量が著しく増加した。打設後に風を当てたSP0Wは、150サイクルまでスケーリング量は極めて少なかったが、150サイクルから300サイクルにかけては、SP0同様、スケーリング量が増加した。

W/C=55%の打設面をみると、スケーリング量は、SP0Wを除くと、多い方からSP0、SP3、SP7と湿潤養生期間の順になっている。SP0Wは25サイクルまでスケーリング量が少なく、W/C=35%同様、乾燥の影響を受けていることがわかる。SP0も乾燥を受けているが、W/C=35%とは対照的に初期サイクルから多くスケーリングしている。

図-12に細孔構造を示す。打設面ではSP7 (W/C=55%のみ)、SP3、SP0、SP0Wの順に細孔容積が小さく、湿潤養生日数に対応している。これは、打設

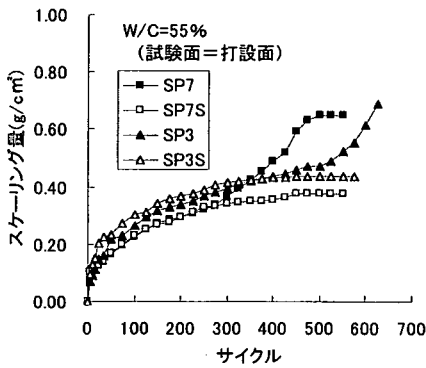


図-13 スケーリングに及ぼす淡水養生, 海水養生の影響 (高炉セメントB種, 小型供試体, 海水)

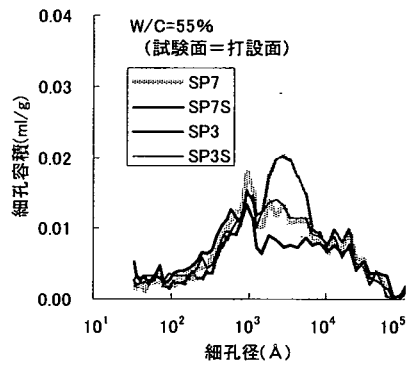


図-14 細孔構造に及ぼす淡水養生, 海水養生の影響 (高炉セメントB種小型供試体, 打設面)

後, 早期に乾燥を開始すると, 水和が早期に停止するとともに, その時点で空隙構造の骨格が決定され, 総細孔量が多く, 最大細孔径が大きくなるため¹⁹⁾と考えられる. 特にW/C=35%のSP0Wは, $10^4 \text{Å} \sim 10^5 \text{Å}$ 領域の細孔量が極端に大きい. これは, 風の影響で乾燥度が著しく高まり, マトリックスに微細な収縮クラックが多く発生した可能性が考えられる.

W/C=35%のSP0とSP0Wのスケーリング量をみると, 初期サイクルではほとんど発生しなかったが, 後に増加しており, 細孔構造がスケーリングに影響を及ぼすことが実証された. これは, W/Cが小さいことに加え, 乾燥の影響で表層の飽水度が減少したことで初期はスケーリングが発生しにくかったものと思われるが, 後に細孔構造の影響が卓越し, スケーリング量が多くなったと推察される. W/C=55%のSP0も乾燥を受けているが, W/C=35%とは対照的に試験開始直後からスケーリングしている. これは, 乾燥よりもW/C増加による組織緻密性低下の影響が卓越したためと思われる.

これらから, 養生は細孔構造およびスケーリングに効果的と考えられる. これは, 底面の結果からわかるように, 試験面部位に限らず言える.

図-13にスケーリング量(海水)に及ぼす淡水養生および海水養生の影響を示す. 300サイクルまでのスケーリング量をみると, 海水養生を3日間行ったSP3Sと淡水養生を3日間行ったSP3ではSP3Sがやや多い. 一方, 淡水養生を7日間行ったSP7と海水養生を7日間行ったSP7Sではほぼ一致した.

図-14に細孔構造を示す. 海水養生の方が細孔径が小さな領域へシフトしており, 海水養生によってコンクリート表面が緻密化していることがわかる. しかし, 初期サイクルのスケーリング量は海水養生が多くなっている. コンクリート表面に海水が作用

すると, 海水中の MgCl_2 が表面の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応し, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶出で組織が多孔化する反面, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ が生成されるため緻密な層が形成されることが藤井ら¹⁹⁾や王ら²⁰⁾によって報告されている. このことから, 表層には緻密な層が形成される反面, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶出の影響で多孔化した組織も部分的に形成され, この多孔化した組織が原因でスケーリング量が多くなったと推定される.

その後, 300サイクル以降では淡水養生のスケーリング量は多くなっている. 海水養生によって形成された緻密な層がプラスの効果を発揮したことによるのか, 凍結融解による劣化の進行具合にばらつきが生じたためかは不明である.

しかし, 養生水については, 初期サイクルのスケーリング量, 組織の多孔化は緻密性の観点から好ましいものではないことを考えると淡水養生が望ましく, 養生日数を確保し, 組織の緻密性を高めることが重要な対策と思われる.

(5) 大型供試体の部位の影響

図-15に大型供試体のスケーリング試験(CaCl_2 および NaCl)結果を示す. なお, CaCl_2 の高炉セメントB種のW/C=55%の打設面は, 組織分析試験を行うため100サイクルで試験を終了している. 打設面では, スケーリング量は概ねW/Cに対応した. 一方, 型枠面は, W/C=35%でスケーリング量が極めて少ない状態から, 突然急増する傾向を示した.

写真-6に普通ポルトランドセメントの型枠面におけるW/C=35%と55%の500サイクルの状況を示す. W/C=35%は, 写真-2で示した小型供試体の底面と状況がほぼ一致している. 小型供試体の底面では, 図-4で示したようにW/C=55%でも同じ挙動がみられたが, 大型供試体の型枠面では, 初期サイクルか

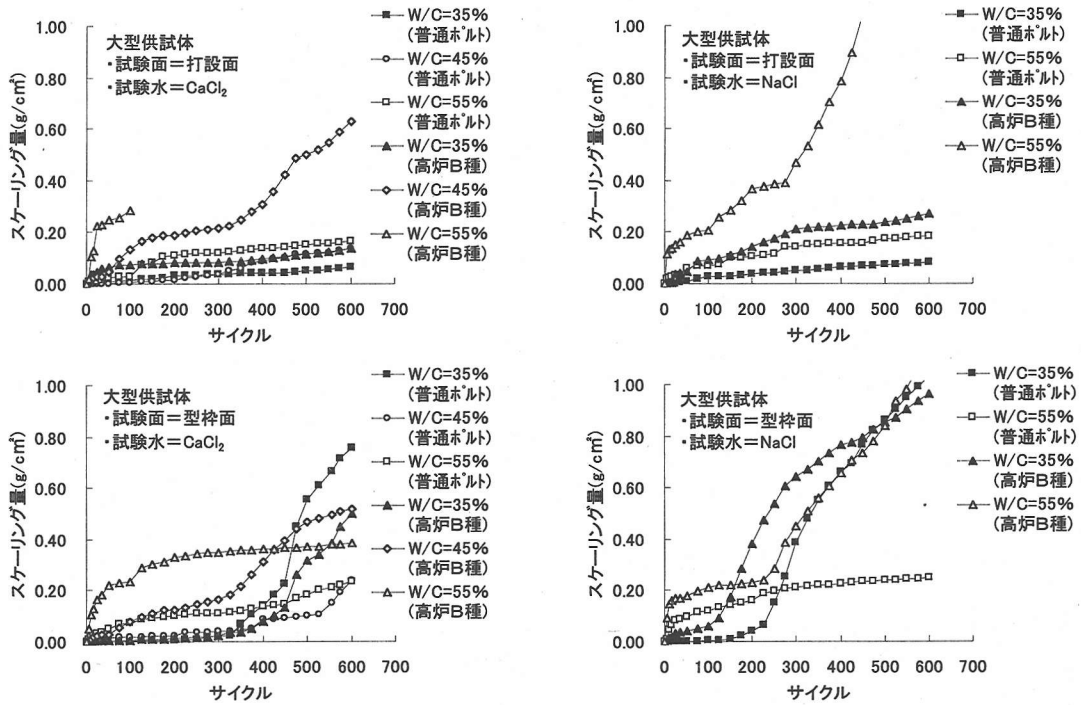


図-15 大型供試体各部位のスケールリング量

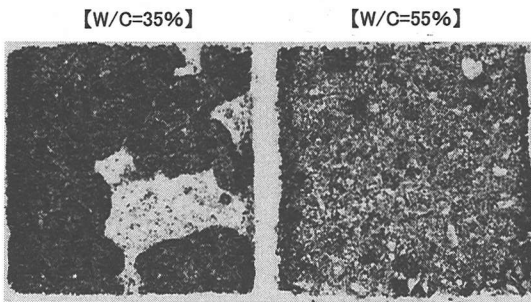


写真-6 大型供試体型枠面の500サイクル目の劣化状況 (普通ポルトランドセメント, CaCl₂)

らスケールリングがみられるなど、底面とは異なる劣化挙動が示された。

図-16に大型供試体の細孔構造を示す。打設面と型枠面を比較すると、型枠面の方が細孔径が小さい領域へシフトする傾向はみられるものの、シフトの度合は図-6、8で示した小型供試体の打設面と底面に比べると小さい。型枠面付近は、小型供試体の底面同様、コンクリートの自重作用は受けるが、側圧も作用するため余剰水が集まりやすい²¹⁾とされる。このことから、W/C=35%の型枠面では、ブリーディングの低減によって余剰水の影響が減少し、その結果、小型供試体の底面と類似した品質が形成され、

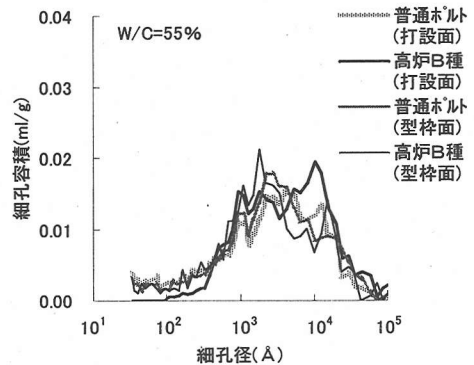
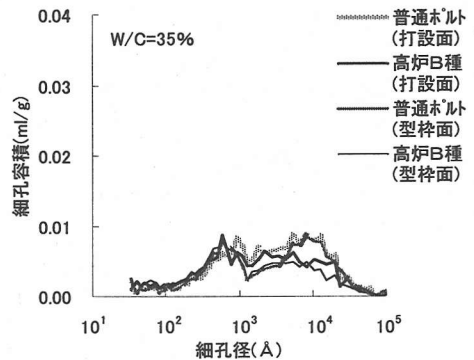


図-16 大型供試体各部位の細孔構造

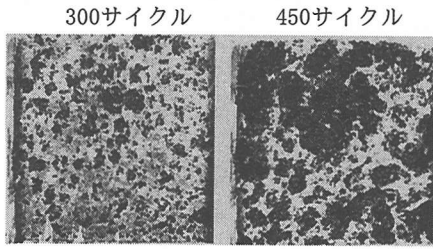


写真-7 型枠面の劣化推移(高炉セメントB種, W/C=35%,300→450サイクル,CaCl₂)

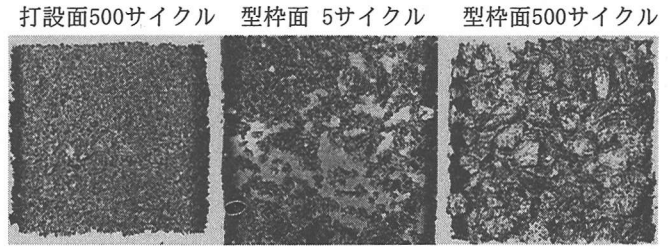


写真-8 打設面の劣化状況および型枠面の劣化推移(高炉セメントB種,W/C=55%,NaCl)

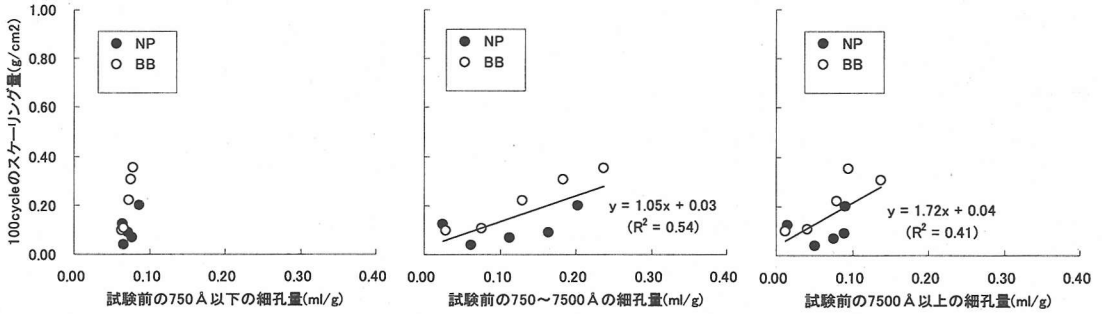


図-17 細孔量(細孔径別)と100サイクル目のスケーリング量の関係(NaCl, 打設面)

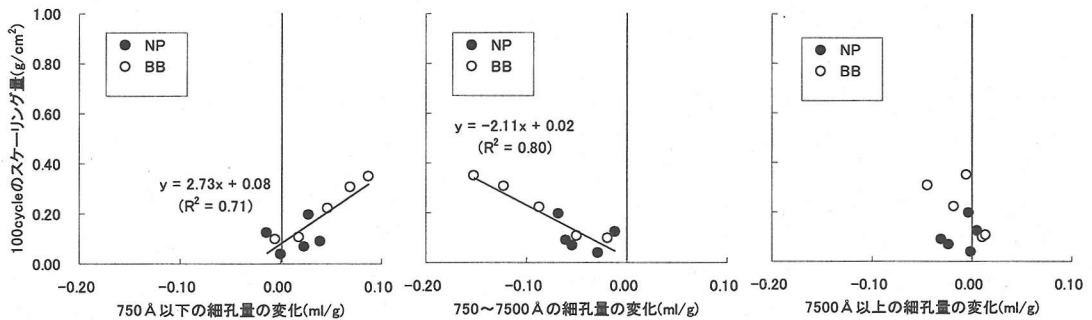


図-18 凍結融解を100サイクルを受けたコンクリートの細孔変化量とスケーリング量の関係(NaCl, 打設面)

底面と類似した劣化挙動を示したと考えられる。

写真-7に同様にスケーリングの急増がみられた高炉セメントB種のW/C=35% (CaCl₂)の型枠面の経時的な劣化推移を示す。普通ポルトランドセメントとは異なり、ペーストが残存する健全な箇所でもスケーリングが発生し、後にモルタル塊の剥離によって粗骨材が露出する劣化挙動がみられる。これは、写真-5で示したケースと同様の挙動であることから、高炉セメントB種ではモルタル塊の剥落とスケーリングは複合的に発生する傾向にあると言える。

写真-8にNaClにおける高炉セメントB種のW/C=55%の打設面と型枠面の状況を示す。打設面はモルタルがフレーク状に剥離しているのに対し、型枠面は初期サイクルで部分的にスケーリングし、その後、

粗骨材の周りのモルタルが剥離し、最終的に粗骨材が広範に露出する挙動を示している。

以上のことから、スケーリング挙動は大型供試体の部位によって異なることが明らかになった。特に、型枠面のスケーリング挙動は細孔構造に強く支配されると言える。

(6) 凍結融解作用による細孔構造の変化

鎌田²²⁾は、淡水を用いた通常の凍結融解試験を行い、セメント硬化体の耐凍害性は全細孔量より細孔径が750~7500 Å間の細孔量に相関を示すことを報告している。そこで細孔径を750 Å以下、750~7500 Å、7500 Å以上の3領域に区分し、NaClを用いた小型供試体の打設面の結果をもとに、細孔量(細孔径

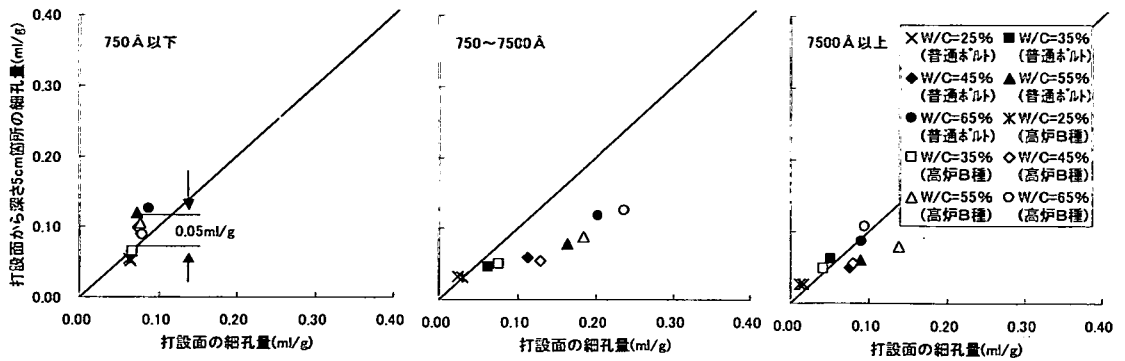


図-19 打設面と打設面から深さ5cm箇所における各々の細孔径の細孔量の比較

別に表示)とスケーリング量との関係を整理した。結果を図-17に示す。スケーリング量は750~7500Åおよび7500Å以上、換言すると750Å以上の細孔量に概ね対応していることがわかった。

次に、凍結融解を100サイクル受けた時の打設面の細孔変化量とスケーリング量との関係を図-18に示す。変化量の数値記号がマイナスのものは減少を示す。100サイクル後の細孔は、スケーリング片を取り除いた後の表面について分析したものである。スケーリング量が多いコンクリートは、750Å以下の細孔量が増加、750~7500Åの細孔量が減少する傾向が示された。

図-19は打設面と深さ5cm箇所の細孔量を細孔径別に比較したものである。750~7500Å領域の細孔は、打設面に多く分布している。前述したが、100サイクル後の細孔試料は、スケーリング片を除去した後に採取している。このことから、図-18に示した750~7500Åの細孔減少は、打設面に分布する750~7500Åの細孔を含む組織が、スケーリングによって破壊・損失したことに起因すると推察される。

コンクリート表面にNaClが作用すると、Ca(OH)₂が溶出し、細孔は増加すると言われている²³⁾。このことを考慮すると、増加した細孔組織がスケーリングで損失したメカニズムが推測され、NaClによるスケーリング劣化でも、750~7500Åの細孔量とスケーリング劣化に関係があるように思われる。

次に、750Å以下の細孔に着目すると、図-18に示したように100サイクル後は細孔量が増加している。図-19から、この領域の細孔は打設面から深さ方向に多く存在すると推察される。スケーリングにより深さ方向の組織が露出することを勘案すると、750Å以下の細孔を多く含む組織が露出したことに起因し、細孔が増加した結果が示された可能性がある。しかし、図-19をみると、打設面と深さ5cmにおけ

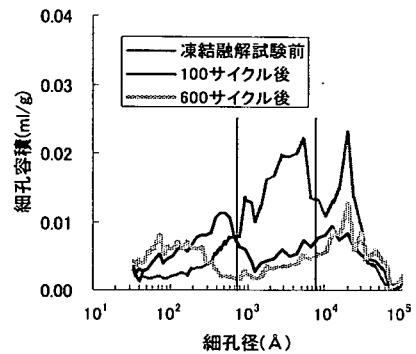


図-20 試験前と凍結融解100および600サイクル後(NaCl)の細孔分布(高炉セメントB種、小型打設面、W/C=55%)

る750Å以下の細孔量の差は最大0.05ml/g程度であるのに対し、図-18の細孔増加量は最大0.10ml/gである。このことから、細孔量の増加の原因は、深さ方向の組織の露出以外にも存在すると推定される。

山下²⁴⁾は、凍結融解前後の細孔変化は凍結融解による組織破壊に伴う影響と、材齢増加に伴う細孔減少の影響を考慮する必要があると指摘している。著者らは既往の実験²⁵⁾で、水和の進行に伴って750Å以下の細孔が増加する結果を得ている。これらから、750Å以下の細孔が増加した原因に、材齢進行に伴う水和の進行が考えられる。図-18をみると、細孔の増加はスケーリング量が多いほど顕著である。これは、スケーリングの発生が少ないコンクリートは試験開始の時点で十分に緻密化されているため、その後の水和は細孔構造を大きく変える程ではなかったものと思われる。

一方、7500Å以上の細孔に着目すると、100サイクル後の細孔量に大きな変化はみられなかった。図-20は、高炉セメントB種を用いたW/C=55%の小型供試体打設面の凍結融解前と凍結融解100、600サ

イクル後の細孔を調べたものである。750~7500Å領域ではサイクルの進行に伴い、細孔量が全体的に減少している。しかし、7500Å以上では減少傾向が弱まり、 $10^4 \sim 10^5$ Å領域では細孔量が逆に増加する傾向も示されている。この領域の細孔は、凍結融解によって生じた微細なクラックである可能性が考えられる。

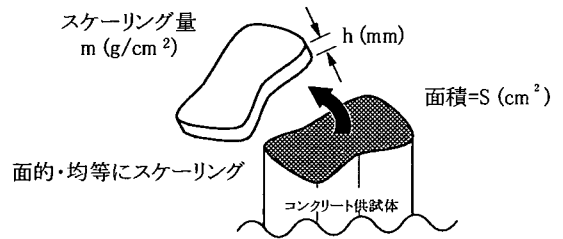


図-21 コンクリート面が均等にスケーリングしたモデル図

(7) スケーリング量と最大スケーリング深さの関係

図-21に示すように、面積 $S(\text{cm}^2)$ のコンクリート面がムラなく面的均等にスケーリングした場合、コンクリートの密度を $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$ とすると、スケーリング量 $m(\text{g}/\text{cm}^2)$ と最大スケーリング深さ $h(\text{mm})$ の関係は式(1)で表される。

$$\frac{m \cdot S}{S \cdot h \cdot 10^{-1}} = \rho \quad \therefore h = \frac{10}{\rho} \cdot m \quad (1)$$

図-22にスケーリング量と最大スケーリング深さとの関係を使用セメント別に示す。この図には、全ての試験水 (CaCl₂, NaCl, 海水), 養生条件, 供試体 (小型, 大型) のデータが用いられている。表-1

の配合表からコンクリートの密度を求めると、概ね $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ であることから、本研究では $\rho=2.4$ として図に式(1)を示した。

打設面をみると、コンクリートの品質、試験水が一定ではないためデータにばらつきはあるが、概ね相関が認められる。普通ポルトランドセメントの回帰式は、 $h=(10/2.4)m$ に比べてスケーリング量に対する最大スケーリング深さの増加量は大きい。これは、スケーリングが面的よりむしろ部分的に発生していることを示す。一方、高炉セメントB種の回帰式は、普通ポルトランドセメントに比べてスケーリング量に対する最大スケーリング深さの増加量は小さい。これは、普通ポルトランドセメントに比

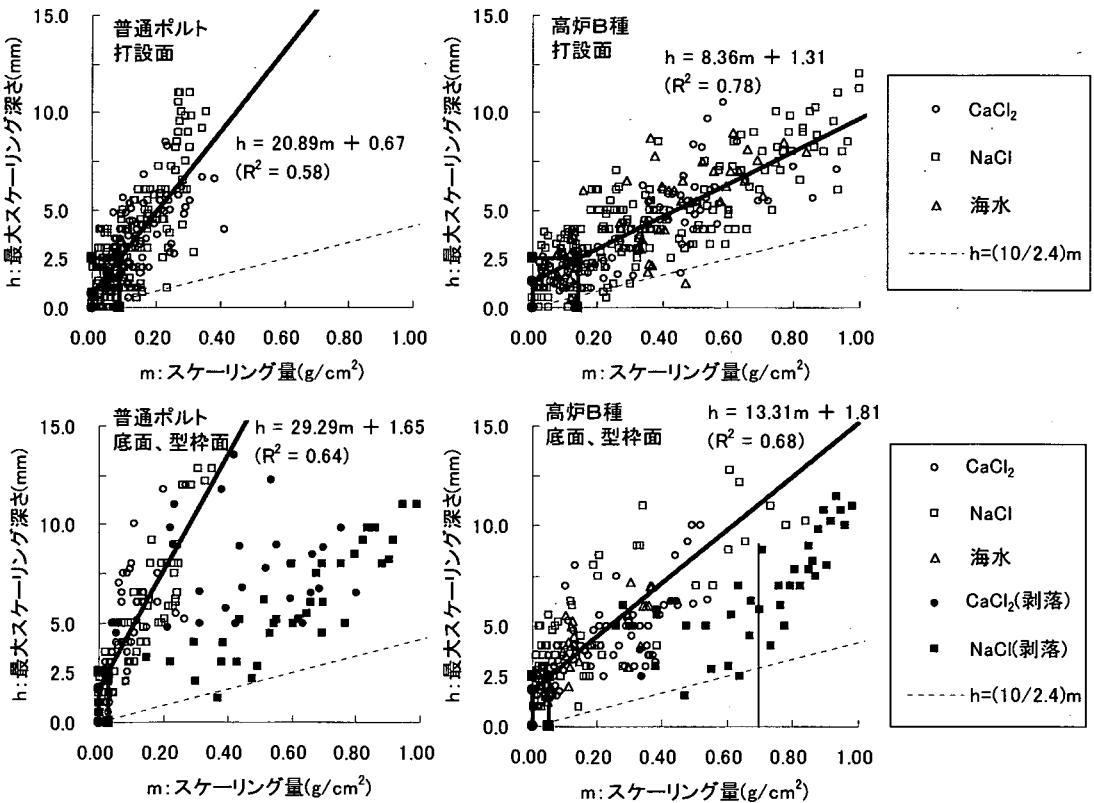


図-22 スケーリング量と最大スケーリング深さの関係(打設面, 大型供試体型枠面・小型供試体底面)

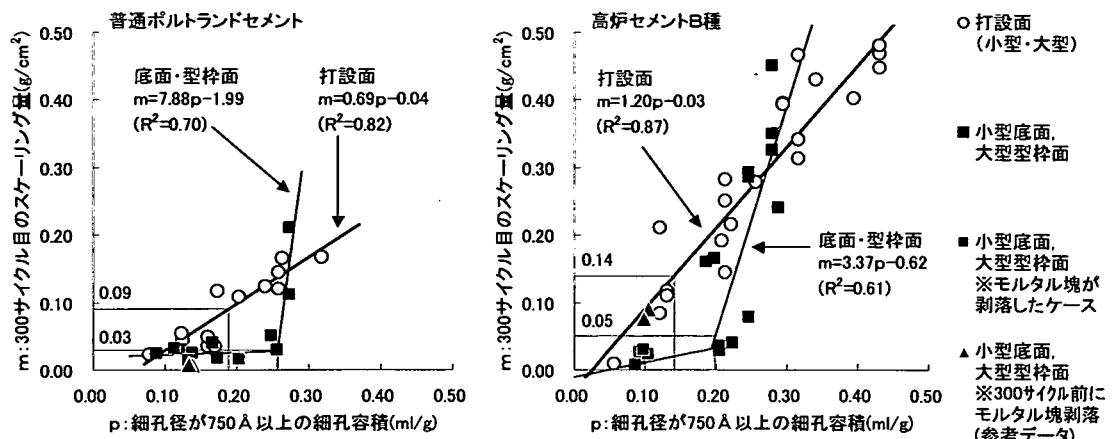


図-23 細孔径が750Å以上の領域における細孔容積と300サイクル目のスケールリング量の関係 (CaCl₂・NaCl・海水)

と比較的面的にスケールリングが発生していることを示し、セメントの種類によってスケールリング挙動の特性に違いがみられることがわかった。

小型供試体の底面と大型供試体の型枠面では、コンクリートの品質や試験水が異なることに加え、モルタルの粗塊の剥離など、スケールリングとは異なる挙動も観察され、打設面に比べるとデータのばらつきは大きい。ここでは、モルタル塊の剥離によるデータは無視し、スケールリングによるデータのみ抽出して回帰線を求めた。底面・型枠面の回帰式は、打設面に比べて $h=(10/2.4)m$ との距離が長い。このことは、打設面に比べて面的にスケールリングは発生しにくいことを示唆する。これは、底面・型枠面は、打設面に比べてブリーディングによる表面組織の脆弱化の影響が小さいためと思われる。

土木学会の自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計・施工指針(案)²⁶⁾では、粗骨材のはく落が生じない最小粗骨材寸法の1/2にあたる2.5mmを欠損深さの判定基準としている。この基準に準じ、2.5mmを許容最大スケールリング深さとして、回帰線から許容スケールリング量を求めると、普通ポルトランドセメントでは打設面が0.09g/cm²、型枠面が0.03g/cm²、高炉セメントB種では打設面が0.14g/cm²、型枠面が0.05g/cm²となり、セメントでは面的にスケールリングする特性を有する高炉セメントB種が、試験面ではブリーディングの影響を受ける打設面が多く算出された。

底面・型枠面でモルタルが塊状に剥離したデータを見ると、スケールリング量に対する最大スケールリング深さの増加傾向が小さい。これは、モルタル塊の剥離が面的広範には発生するものの、深さ方向へは殆ど進行しなかったためである。しかし、高炉セメ

ントB種ではスケールリング量が約0.70g/cm²を越えると最大スケールリング深さが増大する傾向が示された。これは、露出した粗骨材のまわりに付着するモルタルの剥離が始まり、欠損深さが増加したため、底面・型枠面の劣化挙動は極めて複雑と言える。

(8) 劣化抑制に効果的な配合に関する考察

ASTM-C-672のように、コンクリートの1面に凍結融解を与える試験法にRILEMのCDF試験²⁷⁾がある。これは、供試体底面にNaClを5mm浸漬させて1日2サイクルの凍結融解作用を28サイクル与えてスケールリング量を測定し、1500g/m²=0.15g/cm²以内を許容値とする試験である。ASTM-C-672はスケールリング量に関する基準はなく、表面の劣化状態は目視で評価することになっている⁹⁾。月永ら²⁸⁾は、目視評価は大きな個人差が生じる危険性があり、定量的評価法としてスケールリング量の測定を加える必要があることを指摘している。筆者ら²⁹⁾も、目視とスケールリング量による評価では差が生じる場合があることを報告している。

これまで、ASTM-C-672に準拠した成果は発表されている^{30), 31)}が、サイクルおよびスケールリング量に規定がないために、スケールリング「しやすい」、「しにくい」と言った評価が行われており、定量的な評価がなされているとは言い難い。そこで、ここでは一例としてJIS-A-1148の凍結融解試験⁸⁾に規定される「300」サイクルを準用して、海岸、凍結防止剤散布域に建設されたコンクリート構造物が高いスケールリング抵抗性を維持するために必要な品質条件、効果的な配合に関する考察を展開する。細孔量は、図-17でスケールリング量が750Å以上の細孔量に対応する傾向がみられることから、750Å以上の領域を

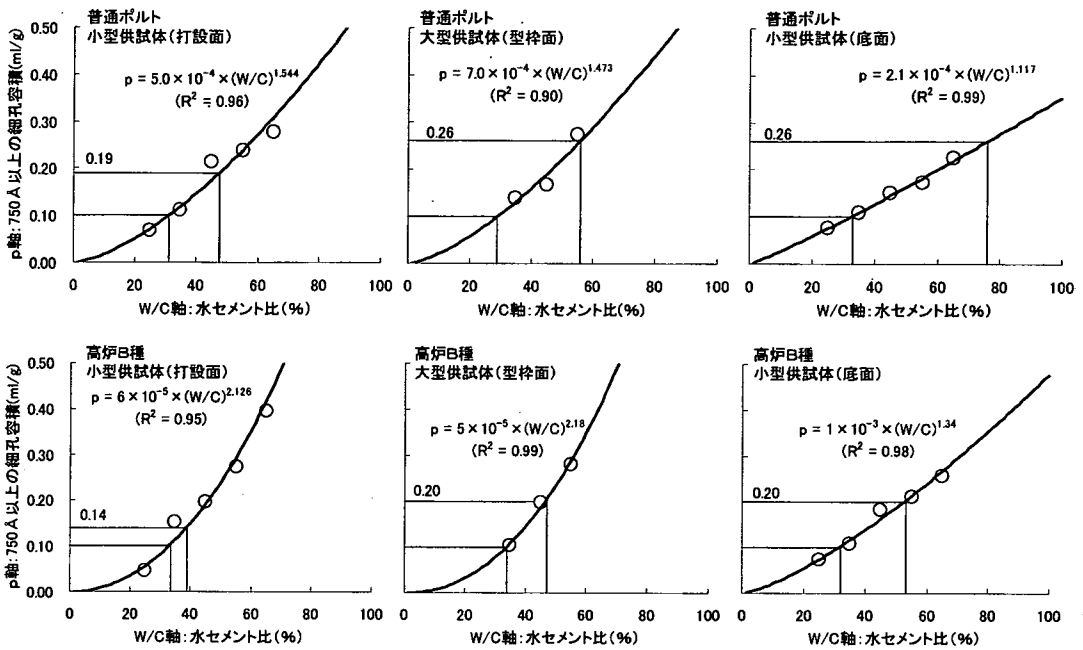


図-24 水セメント比と750 Å以上の領域の細孔容積の関係

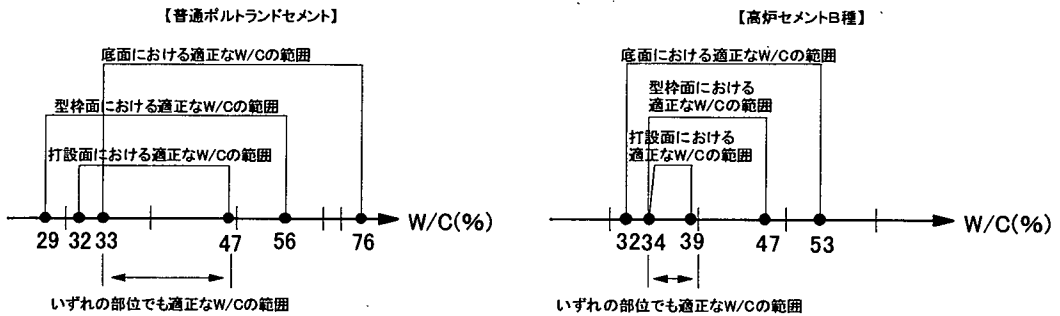


図-25 本研究の範囲において適正と推定されるW/Cの領域

扱うことにする。

図-23に750 Å以上の細孔容積と300サイクルのスケーリング量の関係をセメント別に示す。なお、底面・型枠面の一部で300サイクル到達前に粗大なモルタル塊の剥離が発生し、試験面が崩壊したケースがある。これらをスケーリングと判定するのは困難なことに加え、剥離片質量の測定値が著しく大きくなるため評価が難しくなる。ここでは、モルタル塊の剥離が生じる直前のスケーリング量を「参考値」として示した。細孔容積とスケーリング量には相関がみられ、750 Å以上の領域の細孔量をスケーリング劣化の指標として用いることができるとと思われる。打設面では、高炉セメントB種の方が回帰線の傾きは大きい。これは、高炉セメントB種のスケーリングを抑制するには普通ポルトランドセメント以

上に細孔量を厳しく抑える必要があることを示す。

この図から、300サイクルまでの範囲でスケーリング量を許容量以下に抑えるために要求される750 Å以上の細孔容積を調べると、普通ポルトランドセメントの場合は打設面が0.19ml/g、底面・型枠面が0.26ml/g、高炉セメントB種の場合は打設面が0.14 ml/g、底面・型枠面が0.20ml/gであった。打設面の方が要求される細孔容積が小さいのは、ブリーディング等で脆弱な組織が形成されやすいため、底面・型枠面より厳しく算定されたものと考えられる。

一方、■、▲印に着目すると、細孔容積が約0.10 ml/gまで減少すると粗大なモルタル塊の剥離が発生する確率が高くなることが伺える。このことから、細孔容積が著しく小さくなる場合は粗大モルタル塊の剥離挙動に注意する必要があると言える。

図-24に、W/Cと750Å以上の細孔容積の関係を示す。750Å以上の細孔容積を許容値に抑えるためのW/Cの最大値をグラフから求めると、普通ポルトランドセメントは打設面が47%、型枠面が56%、底面が76%、高炉セメントB種では打設面が39%、型枠面は47%、底面は53%であった。底面が大きく算定された理由は、効果的な過大圧密作用が作用するためと思われる。

また、細孔容積が0.10ml/gとなるW/Cは、普通ポルトランドセメントは打設面が32%、型枠面が29%、底面が33%となり、高炉セメントB種では打設面が34%、型枠面が34%、底面が32%であった。

図-25にこれらの結果ををまとめる。普通ポルトランドセメントの場合、W/Cは概ね35~50%、高炉セメントB種ではW/Cは概ね35~40%が適当な範囲と言える。ただ、前述したように細孔の緻密化により750Å以上の細孔容積が0.10ml/gに限りなく近くなるとモルタル塊の剥離が発生する確率が高くなるため、挙動については十分注意する必要がある。

4. 結論

本研究では、塩化物系凍結防止剤の散布地域や沿岸地域など過酷な環境下に建設され、さらに凍結融解作用を受けるコンクリートのスケーリング被害を長期的に抑制する対策を見出すため、ASTM-C-672準拠の凍結融解試験を行い、塩化物水溶液による基礎的なスケーリング挙動の特性を調べた。本研究で得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) 打設面はブリーディングによる品質の脆弱化の影響が大きく、W/Cの減少で細孔を緻密にすることでスケーリングが抑制できる。一方、型枠面および底面は、打設面に比べると細孔がさらに緻密化する傾向にあるためスケーリング量が少なくなるが、突然、粗大なモルタル塊の剥離によって、コンクリート面を一気に崩壊させる場合もある。
- (2) 空気量の増加は、凍結水圧を緩和する効果はあるものの、細孔構造を粗くさせる作用を複合的にペーストに与えるため、結果的にスケーリング抑制効果はそれ程大きくはならない。
- (3) 湿潤養生は、細孔構造およびスケーリングの抑制に効果的である。養生水については、海水養生と淡水養生について検討したが、総合的に判断すると淡水養生が望ましい。

- (4) スケーリング量と細孔径750Å以上の細孔容積には相関がみられる。スケーリングが発生すると、表面の750~7500Åの領域の細孔は減少する。これは主に、凍結融解によって細孔が破壊されるとともに、スケーリングで損失したことによる。一方、750Å以下の細孔は増加する。これは、材齢進行に伴う水和の進行による。
- (5) スケーリング量と最大スケーリング深さには、概ね相関が認められる。高炉セメントB種はスケーリングが面的一様に発生しやすいため、普通ポルトランドセメントの場合に対し、スケーリング量に対する最大スケーリング深さの増加量は小さくなる傾向にある。
- (6) 最大スケーリング深さの基準を2.5mmとして許容スケーリング量を試算すると、普通ポルトランドセメントの場合打設面が0.09g/cm²、型枠面が0.03g/cm²である。一方、高炉セメントB種を用いた場合は打設面が0.14g/cm²、型枠面が0.05g/cm²である。
- (7) 本研究の範囲内において、スケーリングの抑制に適正と推定されるW/Cの範囲を検討した結果、普通ポルトランドセメントは35~50%、高炉セメントB種は35~40%となった。しかし、W/Cが極めて小さくなると、粗大なモルタル塊の剥離が発生する危険性があるので、スケーリング挙動を十分観察し、注意する必要がある。

謝辞：本論文は、北海道開発土木研究所（旧開発土木研究所）において平成7年から平成11年までの5年間の長期にわたって行った実験の成果をとりまとめたものである。この間、平成7年から平成8年までの2年間は香川大学堺孝司教授（元開発土木研究所構造部長）と網走開発建設部阿部勝彦氏（元開発土木研究所材料研究室研究員）が担当しました。また、今井卓氏と渡辺一司氏（上山試錐工業株式会社）には、長期にわたる実験とデータ取得の面でご協力頂きました。末尾ながら、謝意を表します。

参考文献

- 1) 林正道:寒冷地におけるコンクリート構造物,土木学会論文集,第402号/V-10,pp.1-13,1989.2.
- 2) 佐伯昇,藤田嘉夫:混合セメントを用いた沿岸コンクリートの耐凍害性,セメント・コンクリート,No.432,pp.2-6,1983.2.

- 3) Dunker,K.F. and Rabbat,B.G.:Why America's Bridges are Crumbling,Scientific American,pp.66-72,1993.
- 4) Bickely,J.A.,Neale,K.W. and Fabbuzzo,G.:Market Potential and Identification of Suppliers of Advanced Industrial Materials for Construction of Bridges and Other Structures,Industry Science and Technology Canada.
- 5) 池田憲二:積雪寒冷地における橋梁維持管理,橋梁と基礎,pp.77,2001.8.
- 6) 2002年制定 コンクリート標準示方書[施工編],土木学会.
- 7) 融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書,日本コンクリート工学協会,1999.
- 8) 2002年制定 コンクリート標準示方書[規準編](JIS等関連規準),pp.323,土木学会.
- 9) American Society for Testing and Materials:Standard test method for scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals, ASTM Standard C 672, Annual Book of ASTM Standards,Vol.04.02,pp.341-343.
- 10) 北海道開発局港湾部港湾建設課,寒地港湾技術研究センター:海洋環境下におけるコンクリートの耐久性向上技術検討業務報告書,資1-10,資1-11,2000年3月.
- 11) 羽原俊祐:わかりやすいセメント科学No.9・1,コンクリートの構造とその物性,セメント・コンクリート,No.549,pp.31-43,1992.11.
- 12) 鎌田英治:凍害のメカニズムと耐凍害性試験,セメント・コンクリート化学とその応用,No.4,セメント協会,pp.20-27,1987.8.
- 13) Jochen Stark and Bernd Wicht(太田利隆,佐伯昇翻訳): Dauerhaftigkeit Von Beton,pp.187,pp.202-209,Weimar, 20.November 1995.
- 14) 長谷川寿夫,藤原忠司:コンクリート構造物の耐久性シリーズ「凍害」,pp.5-7,pp.65-67,技報堂,1988.
- 15) 加藤佳孝:骨材-ペースト界面に形成される遷移帯の形成メカニズムとそのモデル化に関する研究,コンクリート工学,Vol37,No.5,pp.53-56,1999.5.
- 16) 桂修,吉野利幸,鎌田英治:過冷却水の凍結を考慮したセメント硬化体の凍害機構,コンクリート工学論文集,第10巻第2号,pp.51-63,1999.
- 17) 三浦律彦,芳賀孝成,中根淳:空気量,気泡分布,細孔分布が高強度コンクリートの耐凍結融解性に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.12,No.1,pp.679-684,1990.
- 18) 伊代田岳史,魚本健人:若材齢時に連続乾燥を受けるセメント硬化体の水和反応と内部水分量,セメント・コンクリート論文集,No.54,pp.167-173,2000.
- 19) 藤井卓,藤田嘉夫:硬化セメントペーストの凍結融解劣化に及ぼす塩化物の影響,土木学会論文報告集第343号,pp.209-217,1984.
- 20) 王欣,鮎田耕一,沢田正剛:海水の作用を受けるコンクリートの凍結水量と細孔構造,第52回セメント技術大会講演要旨,pp.296-297,1998.
- 21) コンクリート技術の要点'99,pp.160,日本コンクリート工学協会,1999.
- 22) 鎌田英治:セメント硬化体の微細構造とコンクリートの凍害,コンクリート工学,Vol.19,No.11,pp.16~22,1981.
- 23) 文献7),pp.29.
- 24) 山下英俊:コンクリート構造物の凍害の劣化評価と予測に関する研究,北海道大学学位論文,pp.66-67,1999.3.
- 25) 遠藤裕丈,田口史雄,嶋田久俊:凍結防止剤によるコンクリートのスケールングに及ぼす養生・乾燥の影響,土木学会北海道支部論文報告集第58号,pp.820,2002.1.
- 26) 土木学会:自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計・施工指針(案)-新世代交通システム用構造物への試み-,pp.332-333,コンクリートライブラリー105,2001.
- 27) Setzer,M.J. and Auberg,R.:Freeze-thaw and deicing salt resistance of concrete testing by CDF method, CDF resistance limit and evaluation of precision , Materials and Structure Vol28, pp.16-31, 1995.
- 28) 月永洋一,庄谷征美,笠井芳夫:凍結防止剤によるコンクリートのスケールング性状とその評価に関する基礎的研究,コンクリート工学論文集,第8巻第1号,1997.1.
- 29) 遠藤裕丈,熊谷守晃,嶋田久俊:長期凍結融解による表面剥離に及ぼす凍結防止剤の影響,コンクリート工学年次論文集,Vol23,No.2,pp.612-618,2001.7.
- 30) 原忠勝,月永洋一,庄谷征美:凍結防止剤の種類がコンクリート中の温度変化とスケールング量に及ぼす影響に関する実験的研究,融雪剤によるコンクリート構造物の劣化に関するシンポジウム論文集,pp.177-182,日本コンクリート工学協会,1999.11.
- 31) Sakai,K.,Kumagai,M.,Abe,K. and Endoh,H.:Effect of pore structure on scaling deterioration of concrete,concrete under severe conditions,CONSEC'01,Vol.1,pp396-403.

(2002.6.14 受付)

SCALING BEHAVIOR OF CONCRETE ON LONG-TERM FREEZE AND THAW BY SALT WATER

Hirotake ENDOH, Fumio TAGUCHI and Hisatoshi SHIMADA

Focusing on concrete surface quality, examination of the scaling property of concrete was conducted after the surface had been exposed to long-term freeze and thaw action of a chloride solution in compliance with ASTM-C-672, and quality requirements for obtaining high scaling resistance were studied. As a result, it was clarified that scaling behavior varied by mix proportion and location of the test surface. The optimum W/C(water-cement ratio) was found to range from approximately 35 to 50% for normal portland cement and 35 to 40% for blast-furnace slag cement (Type B). There were also some new findings, including the necessity of further examination concerning surface collapse due to flaking of large masses of mortar in cases with extremely small W/C.