論文　透水性型枠を使用したコンクリートのスケーリング特性について

遠藤　裕丈[*1]・田口　史雄[*2]・嶋田　久俊[*3]

要旨：透水性型枠を用いたコンクリートのスケーリング特性について検討した。余剰水の排出効果で表面にち密層は形成されるものの，スケーリングは，完全に排出されず残存した気泡及び余剰水が形成する脆弱組織の影響を受ける傾向が示された。その一方，脆弱組織のち密化を図ることでスケーリング抵抗性が向上する結果も得られ，湿気養生による細孔構造のち密化がスケーリングの抑制に極めて効果的であることを確認した。

キーワード：コンクリート，凍結防止剤，スケーリング，透水性型枠，細孔構造

1. はじめに

積雪寒冷地のコンクリート構造物は，凍結防止剤（塩化物）を含む融雪水と凍結融解の複合作用を受けることが多く，スケーリングの発生が懸念される。スケーリングは構造物の美観損失，断面欠損による鉄筋かぶり厚の減少及び耐荷力への影響等が懸念される。

これまで筆者らは，塩水を用いてスケーリング試験を行い，(1)W/Cの低減はスケーリング抑制に効果的だが，W/Cが著しく小さくなるとモルタル粗塊の剥落が発生し，健全な表面が一気に崩壊する場合がある[1)]，(2)表面の飽水度が著しく高まると部分的に損傷を受けやすく，長期の乾燥を受けると表面が広範にスケーリングしやすい[2)]，等の知見を得た。

このことから，表面に滞留する余剰水の排出及び表面組織の適度なち密化が，適切なスケーリング抑制対策と考える。本研究では，抑制の一対策として透水性型枠を用いた場合のスケーリング挙動に関する検討を行った。

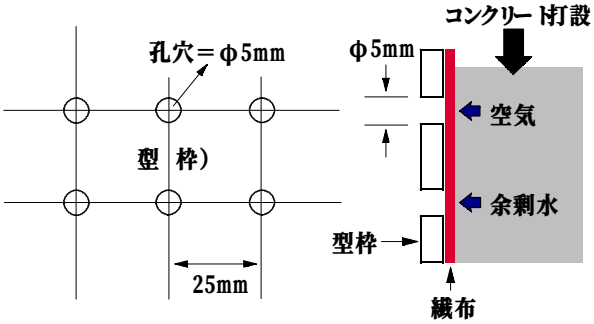


図-1 透水性型枠（孔穴の配置）

写真-1 透水性型枠内部（孔穴が透けて見える）

2. 概要

2.1 透水性型枠

図-1，写真-1に透水性型枠を示す。寸法は□220×1500mmで，鋼製の型枠にφ5mmの孔穴を25mm間隔で設け，フィルター機能を有する市販の繊布を内側に貼り，余剰水及び気泡を排出して表層のち密化を図った。比較のため，孔穴がない通常の普通鋼製型枠も用いた。

2.2 配合・材料

表-1に配合を示す。材料は一般にスケーリング抵抗性に劣るとされる[3)]高炉B種，除塩処理された海砂（密度2.70g/cm^2，吸水率0.97%），

*1 独立行政法人　北海道開発土木研究所　材料研究室　研究員（正会員）
*2 独立行政法人　北海道開発土木研究所　材料研究室長（正会員）
*3 独立行政法人　北海道開発土木研究所　材料研究室　副室長（正会員）

表-1 コンクリートの配合

W/C	s/a	単位量 (kg/m³)				混和剤 (ml/m³)	
(%)	(%)	W	C	S	G	AE減水	空気連行
50	44	140	280	859	1085	700	17.5

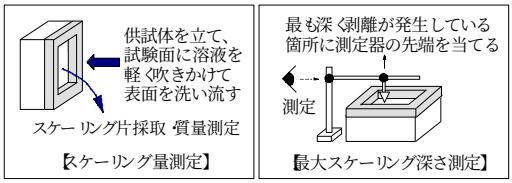


図-4 測定方法

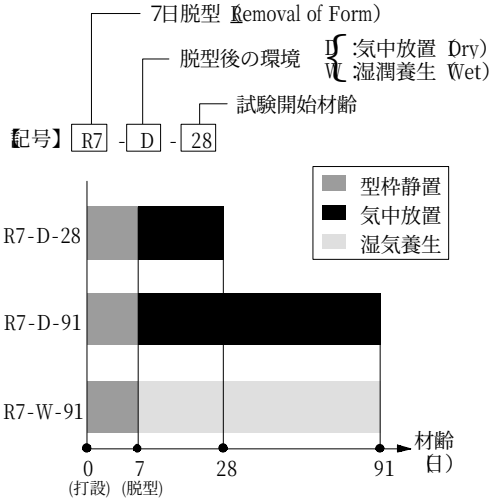


図-2 養生条件

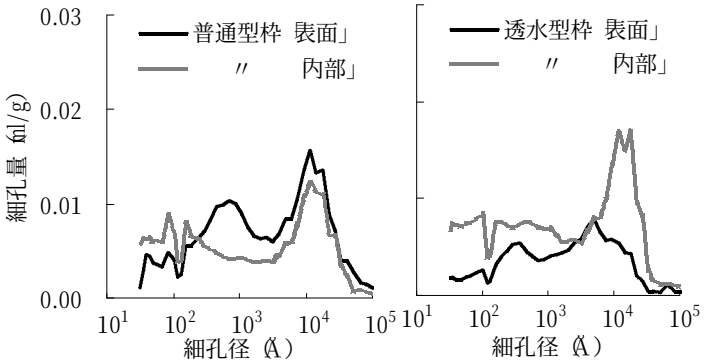


図-5 細孔構造（R7-D-28）

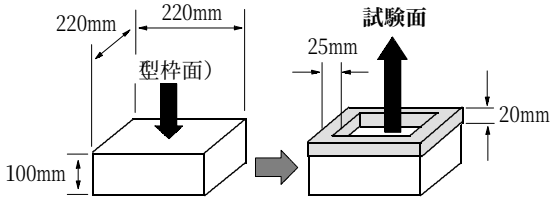


図-3 供試体

砕石（密度2.67g/cm²，吸水率1.58%，最大寸法25mm）を用いた。W/Cは50%，スランプは8±2.5cm，空気量は4.5±1%とした。

2.3 養生

図-2に養生条件を示す。打設後，温度20℃の練混ぜ室に型枠ごと静置し，材齢7日に脱型した。その後，試験開始材齢まで気中放置もしくは湿気養生を施した。気中放置では，温度20℃，湿度60%の恒温室に供試体を静置した。湿気養生では，湿った麻布で試験面を覆い，20℃の湿気養生室に静置した。

2.4 細孔構造・気泡分布

これまでの実験[1),2)]で，無対策の場合は1cm前後のスケーリング深さが予測されたことから，型枠面から深さ0～1cm（以下「表面」）及び深さ1～2cm（以下「内部」）の2箇所の細孔構造を水銀圧入法により分析した。また，型枠面の表層と型枠面から深さ2cmの2面の気泡分布をリニアトラバース法により分析した。

2.5 凍結融解試験（スケーリング試験）

試験は，コンクリートの1面に対して凍結融解作用を与えて剥離抵抗性を評価するASTM-C-672に準拠した。型枠面から□220×100mm寸法でコンクリートを切り出し，型枠面が試験面になるよう供試体を作製した（図-3）。試験水を湛水させる目的で幅25mm，高さ20mmの土手を取り付け，試験水の浸透を試験面に限定するため試験面以外をエポキシ樹脂でコーティングした。試験水は，濃度3%塩化ナトリウム水溶液（以下「NaCl」）と淡水を用いた。試験水を深さ6mm程度張り，-18℃で16時間凍結，23℃で8時間融解の1日1サイクルで凍結融解作用を与え，5，10，15，30…（以降15サイクルおき）サイクル目にスケーリング量と最大スケーリング深さを測定した。図-4に測定方法を示す。最大スケーリング深さは5箇所選定して測定し，このうち最大値を測定値とした。

3. 結果・考察

3.1 細孔構造

図-5にR7-D-28における表面と内部の細孔構造を示す。全体的に普通型枠では内部に比

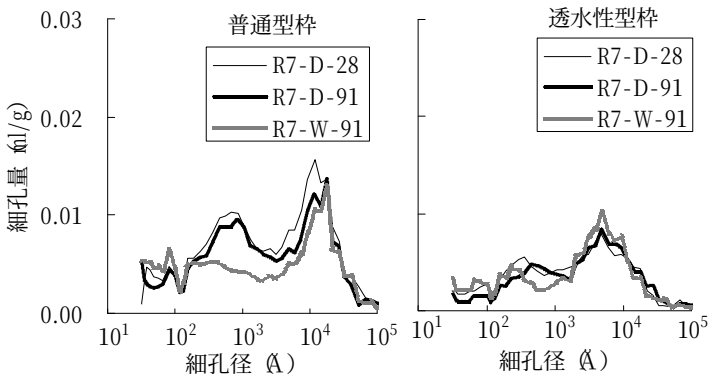


図-6 細孔に及ぼす材齢および養生の影響

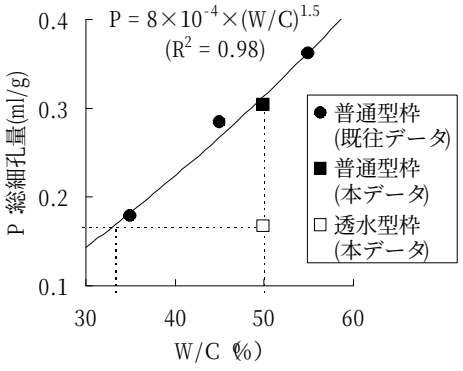


図-7 W/Cと表面細孔量の関係(R7-D-28)

べて表面の方が粗であるのに対し，透水性型枠では逆に表面の方が密になる傾向が示された。これは，コンクリートがフレッシュな時に側圧が生じて余剰水が型枠近傍へ移動したこと，更に透水性型枠では余剰水の排出が行われたことで表面が密になったと考えられる。

図-6に表面の細孔構造に及ぼす材齢，養生の影響を示す。一般に，細孔径が10^2～10^4Åの領域はスケーリングの主因である水圧を引き起こす毛細管空隙に相当する[4]。普通型枠では，R7-D-91からR7-W-91にかけて，この領域の細孔量が小さくなる方向へグラフがシフトしており，湿気養生は毛細管空隙の減少に効果的と言える。一方，透水性型枠では，細孔量に大きな変化はあまりみられなかった。これは，養生効果より脱水効果が卓越したために，深さ0～1cm領域では，普通型枠ほどの明確な傾向が表れなかったものと思われる。

図-7にR7-D-28におけるW/Cと表面細孔量の関係を示す。脱水効果を確認する目的で，筆者が以前行った普通型枠の細孔量データ[1]も参考値として載せた。W/C=50%で透水性型枠に打設したコンクリートの総細孔量は，W/C=33%で普通型枠に打設したコンクリートの総細孔量に相当している。このことは，透水性型枠を使用するとコンクリート表面のW/Cが減少する効果が得られることを示す。

3.2 気泡分布

表-2に気泡分布の結果を示す。透水性型枠の方が気泡数は多く，気泡間隔係数も減少した。これは，フレッシュ時の側圧によって余剰水と共に気泡も移動したものと思われる。

表-2 気泡分布測定結果

項目(単位)		普通型枠		透水性型枠	
		表層面	深さ2cm	表層面	深さ2cm
気泡個数	個	812	519	926	676
空気量	%	3.9	2.2	3.9	3.1
気泡間隔係数	mm	0.159	0.184	0.140	0.168

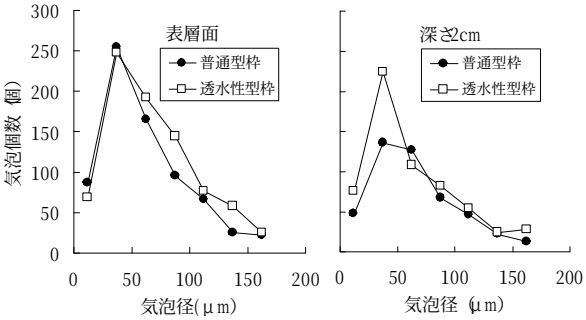
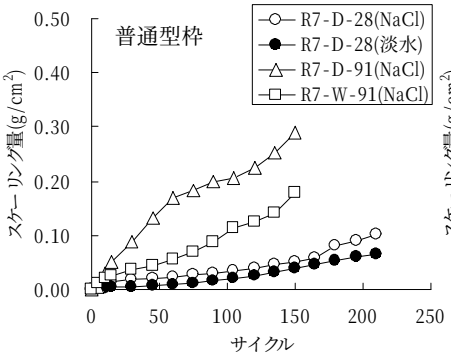


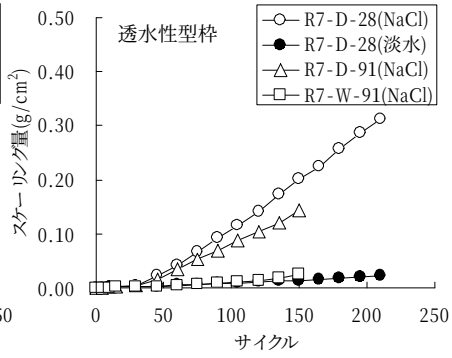
図-8 気泡径と気泡分布の関係

図-8に気泡径と気泡数との関係を示す。50μm以下の気泡数に着目すると，普通型枠では表層面の方が多いが，透水性型枠では表層面と深さ2cmで殆ど差がみられない。一方，透水性型枠では50μm以上の気泡数が普通型枠よりも多くなっている。これは，50μm以下の気泡が完全に抜けきれず，表層付近で気泡同士が合体した[5]可能性が考えられる。

3.3 凍結融解試験（スケーリング試験）

図-9，10に普通型枠及び透水性型枠におけるスケーリング量の測定結果及びスケーリング量と最大スケーリング深さの関係を示す。





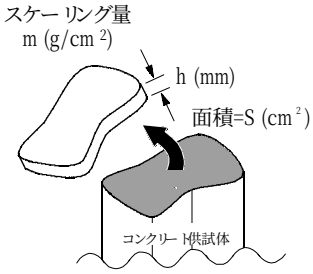


図-11 面的均等スケーリングイメージ

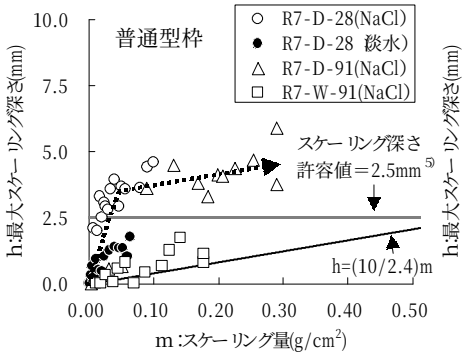


図-9 スケーリング試験結果(1)

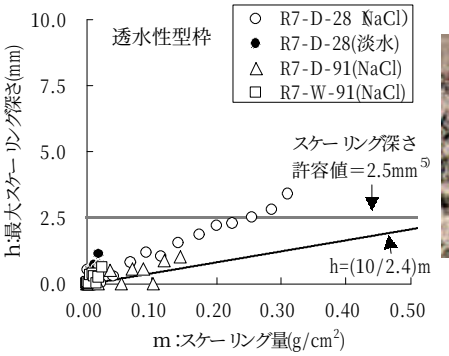


図-10 スケーリング試験結果(2)

写真-2 普通型枠 R7-W-91の状況 (45サイクル)

図-11に示すように，コンクリート表面が面的一様にスケーリングした場合，面積を$S(cm^2)$，コンクリート密度を$\rho(g/cm^3)$とすると，スケーリング量$m(g/cm^2)$と最大スケーリング深さh(mm)の関係は(1)式のようになる。

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

本論では，**表-1**より$\rho=2.4$とした。また，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)では，粗骨材の剥落が生じない最小粗骨材寸法(5mm)の1/2にあたる2.5mmを凍害欠損深さの判定基準としている[6]。本論ではこれに準じ，最大スケーリング深さの許容値を2.5mmとした。

3.3.1 普通型枠のスケーリング挙動

NaClを用いたケースでは，R7-D-91，R7-W-91，R7-D-28の順にスケーリング量が大きい。**図-6**では，細孔量はR7-D-28，R7-D-91，R7-W-91の順に大きい傾向が得られており，スケーリング量と細孔量に相関はみられない。

スケーリング量と最大スケーリング深さとの関係をみると，R7-D-28とR7-D-91ではスケーリング量が概ね$0.05g/cm^2$に達した時点で最大スケーリング深さが許容値を超えて劣化が進行しているのに対し，R7-W-91は，スケーリング量はR7-D-28より多いものの，データはほぼ(1)式に沿ってプロットされ，最大スケーリング深さは許容値以内に収まっていることがわかる。

このことから，R7-W-91のスケーリングは，深さ方向への顕著な進行というより，表面の薄層（以下「表層」）が部分的に剥がれる様に進行していると解釈できる。**写真-2**は45サイクルのR7-W-91であるが，骨材の表面が露出するように部分的にスケーリングが生じている。これは，湿気養生で表面，特に骨材周辺の界面が高含水状態となり，この箇所が局地的にスケーリングしたものと思われる。

R7-D-91は，深さが3mm程度に達した後，最大スケーリング深さの変動が少ない状態でスケーリング量が増加している。これは，深さ方向へは殆ど劣化が進行せず，面的にスケーリングが発生していることを示す。また，スケーリング量はR7-D-28よりも多く，冒頭で述べた「長期の乾燥を受けると表面が広範

にスケーリングしやすい[2]」に概ね一致する。

これらから，試験前の環境条件（湿潤や乾燥など）は劣化に影響を及ぼすと言える。

3.3.2　透水性型枠のスケーリング挙動

NaClを用いた場合，普通型枠では試験開始直後からスケーリングが発生したのに対し，透水性型枠では，30サイクルまではスケーリングが殆どみられず，脱水作用の効果が示された。しかし，R7-D-28とR7-D-91において30サイクル以降にスケーリングが発生し，その後，スケーリング量が持続的に増加する特異な傾向が示された。この傾向は，R7-W-91及び淡水のR7-D-28ではみられなかった。

写真-3は試験前及びR7-D-28とR7-D-91の45サイクル目の状況である。試験前の表面にみられる○印の痕は，脱水作用の際についたと思われる孔穴の痕である。これをみると，スケーリングはまず孔穴の箇所を避けるように発生しているのがわかる。その後，スケーリングは概ね面的一様に発生したものの，表面に粗骨材は殆ど露出しなかった。

3.3.3　透水性型枠における結果の考察

透水性型枠のスケーリング試験結果(**図-10**)および**写真-3**に示した劣化状況を踏まえ，ここではR7-D-28を例にとり，コンクリートカッターを用いて表面（深さ0～1cm）を孔穴箇所と非孔穴箇所に切り分け，細孔構造の分析を行い，細孔量の比較を試みた。結果を**図-12**に示す。総細孔量は微量ながら脱水作用が大きい孔穴箇所の方が少ない傾向はみられるが，マクロ的にみると細孔量の差は僅かと言える。

ここで，**図-10**に示したスケーリング量と最大スケーリング深さの関係をみると，いずれも概ね(1)式に沿ってプロットされている。これは，スケーリングが深さ方向へは顕著に進行せず，表層が剥がれる程度に収まったことを示唆している。また，最大スケーリング深さが概ね2.5mm以内と普通型枠に比べて浅いことから，表面から極めて浅い領域の品質がスケーリングに影響していると思われる。

そこで，表面から深さ2.5mm以内の領域に

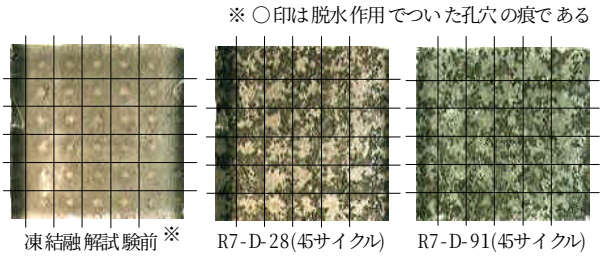


写真-3 透水性型枠のスケーリング状況（NaCl）

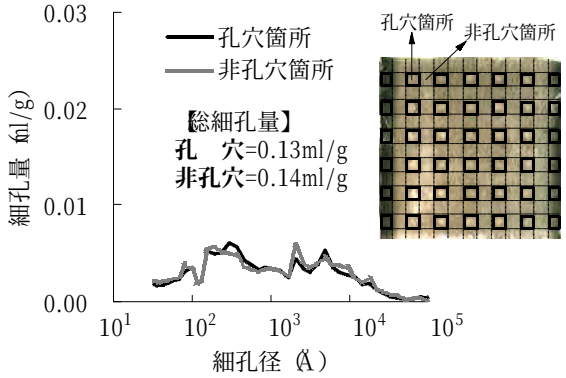


図-12 孔穴と非孔穴の細孔比較（R7-D-28）

着目し，深さ0.0～2.5mm，2.5～5.0mmから試料を採取し，細孔量を調べた。試料は，表面から深さ1cm層を切り出し，分析に要しない層を研磨機で除去し，作製した。結果を**図-13**に示す。細孔径10^3～10^4Åの領域に着目すると，R7-D-28とR7-D-91では，0.0～2.5mmの方がやや密になっている傾向がみられた。

これらの結果を包括すると，以下のことが推測される。透水性型枠を使用すると，組織のち密化はコンクリート表面から始まる。しかし，非孔穴領域もしくは表層に形成されたち密層が障害となり，気泡と余剰水の一部が完全に排出されず表層直下付近に滞留し，ち密層の近傍に脆弱組織が形成される。30サイクルまでは，ち密なコンクリート表層の効果でスケーリングは発生しなかったものの，後に脆弱組織によるマイナス作用が卓越し，スケーリングに影響を及ぼしたと考えられる。この脆弱組織は表面から極めて浅い領域に形成されたために，表面から1cm厚さの試料を一単位として扱った細孔分析では傾向をつかむことができなかったものと思われる。湿気養生を施したR7-W-91でスケーリング量が少

なかった結果は，養生によって脆弱組織のち密化が促進されたことを意味する。しかし，既往の研究[2]では「通常のコンクリートで乾燥を与えずに養生を継続すると表面が部分的に損傷する」傾向がみられたが，透水性型枠のR7-W-91においてはこの傾向が殆ど示されなかった。既往の文献[7]を踏まえると，これは，透水性型枠を用いたことで表面の組織がち密化して吸水しにくい状態となり，飽水度の上昇が抑制されたことが一因であろう。

以上のことから，透水性型枠を用いると，余剰水の排出で表面にち密な層が形成されるものの，スケーリング劣化は，完全に排出されずに表面付近で滞留する余剰水によって形成される脆弱組織の影響を受けるものと考えられる。その一方で，脆弱組織のち密化を図ることでスケーリング抵抗性が向上する結果も得られ，湿気養生はスケーリング抑制に極めて効果的であることが明らかになった。

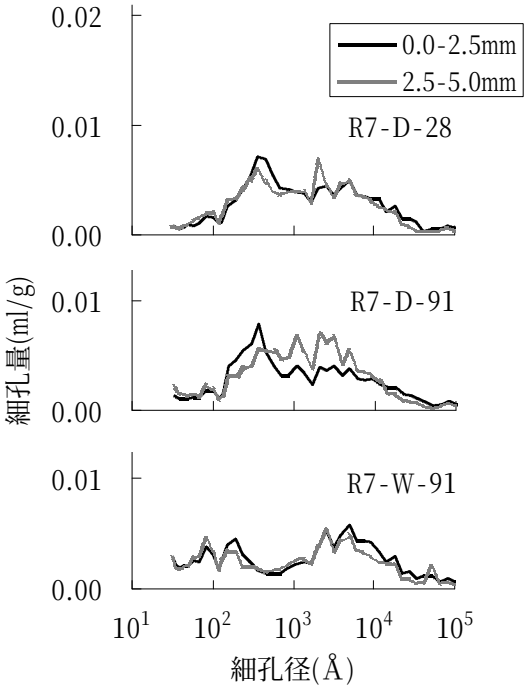


図-13 表面から深さ2.5mm及び5.0mmの細孔量

4. まとめ

(1)透水性型枠を用いると，普通型枠に比べて組織はち密化し，気泡間隔係数も減少する。

(2)透水性型枠を用いたときのスケーリング挙動は，完全に排出されずに表面付近で滞留する余剰水によって形成される脆弱組織の影響を大きく受ける傾向にある。

(3)透水性型枠の使用の際に行う湿気養生は，スケーリング抑制に極めて効果的である。

5. おわりに

本論では，組織のち密性とスケーリングの関係を主眼としたため，養生日数を長期に設定した。今後は，一般的な養生日数の下で検討を行いたい。また，細孔構造以外の観点からも劣化要因を検証し，透水性型枠の効果的な使用法について提言できればと考えている。

参考文献

1)遠藤裕丈，田口史雄，嶋田久俊：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，土木学会論文集，No.725，V-58，pp.227-244，2003.2

2)遠藤裕丈，田口史雄，嶋田久俊：養生と乾燥日数が異なるコンクリートの凍害と塩害の複合劣化特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.741-746，2002.6

3)Jochen Stark and Bernd Wicht(太田利隆，佐伯昇翻訳)：Dauerhastigkeit Von Beton,pp.187,pp.202-209,Weimar,20.Novenber 1995

4)羽原俊祐：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

5)月永洋一，庄谷征美，杉田修一，原忠勝：コンクリートのスケーリング抵抗性改善に関する一検討，第49回セメント技術大会講演集，pp.834-839,1995

6)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

7)W.F.Price：Enhancements in surface quality of concrete through use of controlled permeability formwork liners,Magazine of Concrete Research,Vol.52,No.1,pp.69-71,2000.2