

塩化物水溶液によるコンクリートの長期スケーリング抑制に関する一考察

Study on long-term scaling prevention of concrete due to deicing salt and sea water

北海道開発土木研究所 ○正 員 遠藤 裕丈 (Hirotake ENDOH)
北海道開発土木研究所 正 員 田口 史雄 (Fumio TAGUCHI)
北海道開発土木研究所 正 員 嶋田 久俊 (Hisatoshi SHIMADA)

1. はじめに

北海道内のコンクリート構造物は、凍結防止剤を含む融雪水や海水の塩化物水溶液と凍結融解との複合作用を受ける環境下に設置される場合が多く、スケーリングの発生が懸念される。スケーリングは、構造物の美観損失に加え、劣化が著しく進行した場合、コンクリート断面の減少によって鉄筋腐食や耐荷重に影響を与える可能性もある。また、近年は、性能照査型設計法への流れを受け、コンクリートの長期耐久性に関する研究が各方面で活発に行われている。

本論文は、この背景を踏まえ、コンクリート表層の細孔構造に着目し、長期スケーリング抵抗性について考察したものである。

2. 概要

2.1 材料・配合

表-1に配合を示す。使用材料は、普通ポルトランドセメント(以下:普通ポルト)、高炉セメントB種(以下:高炉B種)、苫小牧市樽前産の海砂(密度:2.70g/cm³、吸水率:0.97%)、小樽市見晴産の砕石(密度:2.67g/cm³、吸水率:1.58%、最大寸法:25mm)である。W/Cは25%、35%、45%、55%、65%の5ケース、スランブは8±2.5cm、空気量は4.5±1%もしくは6.5±1%に設定した。

2.2 スケーリング試験

スケーリング試験はASTM-C-672に準じ、コンクリート供試体の打設面、底面、型枠面、各々の面のスケーリング特性を調べた。図-1に示すように、供試体は□220×220×100mmと□220×220×1500mmの2ケースとし、打設面の試験は両者を、底面の試験は前者を、型枠面の試験は後者の中央部から切り出したものを用いた。

供試体は、養生マットに見立てた湿った麻布で各々の面を覆って湿気養生を施した後、試験開始材齢の28日まで温度20℃、湿度60%の恒温室に安置させた。湿気養生の日数は0日、3日、7日の3ケースとした。

試験では、試験面に深さ6mmほど試験水を張り、-18℃で16時間凍結、23℃で8時間融解の1日1サイクルの凍結融解作用を与え、5、10、15、25、35、50…(以降15サイクルおき)にスケーリング量と最大スケーリング深さを測定した。試験水は、濃度3%のCaCl₂水溶液とNaCl水溶液および人工海水を用いた。試験水を張るため、図-1に示すように幅25mm、高さ20mmのモルタル製の土手を試験面に取り付けた。試験水の浸透を試験面に限定するため、試験面以外の面はエポキシ樹脂でコーティングした。

表-1 コンクリートの配合

セメント	水セメント比 W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 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	
普通ポルトランドセメント	25	8±2.5	4.5±1	39	128	512	703	1,087	97.0
	35			41	133	380	780	1,111	60.6
	45			43	140	311	835	1,095	40.3
	55			45	143	260	890	1,076	39.0
	65			47	147	226	937	1,045	28.7
高炉セメントB種	25		6.5±1	39	139	556	670	1,037	93.1
	35			41	143	409	753	1,072	54.2
	45			43	144	320	823	1,078	40.6
	55			45	145	264	882	1,065	33.8
	65			47	138	251	872	1,054	25.4
			4.5±1	47	145	223	939	1,047	21.9

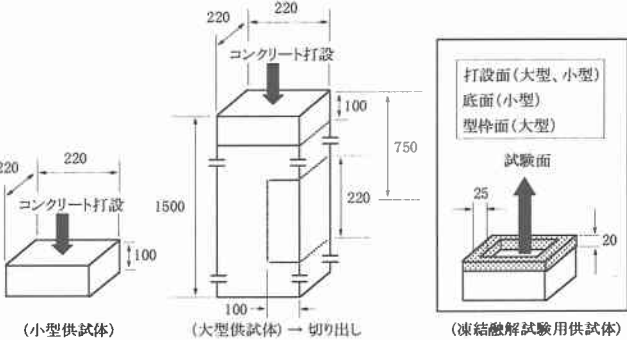


図-1 供試体

最大スケーリング深さの測定は、最も深く剥離が生じている箇所を任意で5点選定し、細棒を当ててメジャーで深さを測定し、このうち最大値を測定値とした。

2.3 細孔構造測定

細孔構造は、スケーリング試験開始時点のコンクリートについて調べた。所定の養生が終了した後、材齢28日で試験面から深さ0~1cmの表層部を採取し、水銀圧入式ポロシメーターによって細孔構造を測定した。

3. 結果・考察

3.1 スケーリング挙動に関する考察

図-2にスケーリング量と最大スケーリング深さの関係を示す。この図では、全ての配合および全ての試験水のデータをまとめてプロットしている。本論文では、セメントの種類に加え、試験面も「打設面」と「底面・型枠面」に分けて結果を整理した。試験面を区分した理由は、

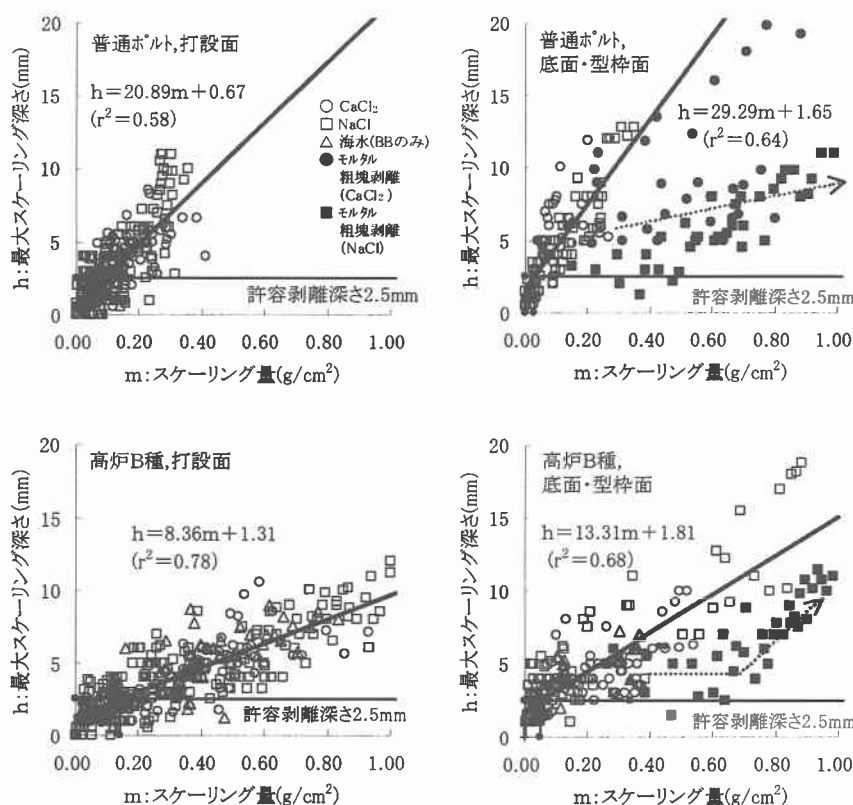


図-2 スケーリング量と最大スケーリング深さの関係

打設面はブリーディングに加え、コテ均し等で試験面の品質が一定でないため、品質のパラツキが比較的小さいと思われる底面・型枠面とは分けて整理した方が望ましいと考えたためである。

(1) 打設面

打設面をみると、普通ボルトに比べて高炉B種の方が、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が小さい。これは、図-3に示すように、普通ボルトに比べて高炉B種の方が比較的広範かつ均一にスケーリングしやすいことを示し、使用するセメントの種類によってスケーリング特性が異なることがわかった。この一因としては、高炉B種はスラグ混入の影響で溶出性の高い不安定な炭酸塩層が表層に生成される¹⁾特性に起因し、スケーリングが発生しやすいことが考えられる。

(2) 底面・型枠面

底面・型枠面でも、打設面と同様の傾向はみられるが、写真-1のスケーリングに加え、写真-2のように健全な状態の試験面で突然モルタルの粗塊が剥落する挙動も示された。この挙動は、打設面ではみられなかった。図-2をみると、粗塊の剥落が発生したケースは、スケーリング量は急増するものの、最大スケーリング深さの変化は小さい。これは、粗塊の剥落がまず部分的に発生し、その後、劣化(粗塊の剥落)が面的広範に発生したためである。

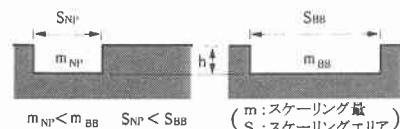


図-3 スケーリング劣化のイメージ図

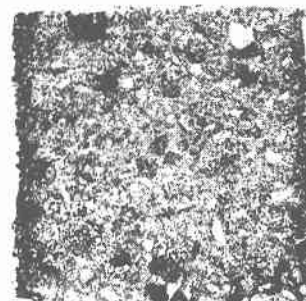


写真-1 スケーリング

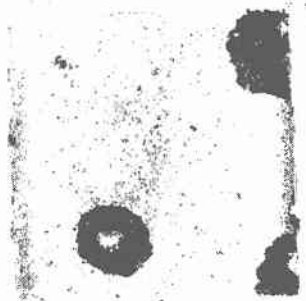


写真-2 モルタル粗塊の剥落

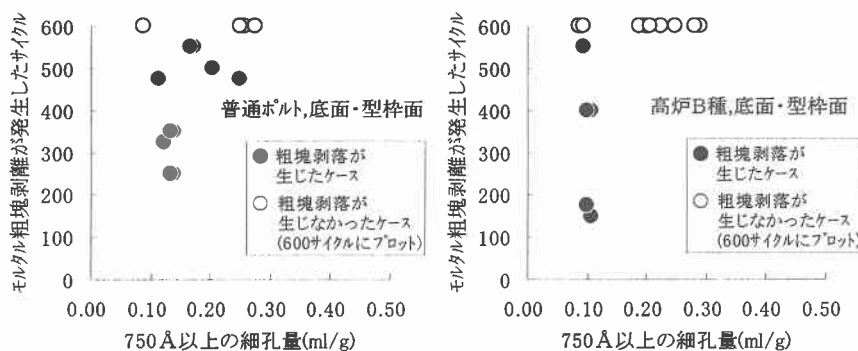


図-4 モルタル粗塊の剥落が発生したコンクリートの細孔量

図-4にモルタル粗塊の剥落が生じたコンクリートの細孔量と剥落が発生したサイクル数を示す。スケーリングは、凍結時にコンクリートの毛細管中で水の移動が生じ、その際の移動水圧が要因の一つと言われ²⁾、この毛細管に相当する細孔径は概ね $10^2 \sim 10^5 \text{ Å}$ とされる³⁾。さらに、鎌田⁴⁾は、淡水による通常の凍結融解試験を行い、750～7500 Å領域の細孔が耐凍害性に大きく影響する結果を報告している。このことから、本論文では水銀圧入法測定で得た $10^1 \sim 10^5 \text{ Å}$ 範囲のうち、750 Å以上の領域の細孔量について着目し、スケーリング抵抗性の検討を行った。

図-4をみると、粗塊の剥落がみられたコンクリートの細孔量は、高炉B種では概ね0.10ml/g前後に集中している。一方、普通ボルトでは細孔量が概ね0.10～0.20ml/g範囲のコンクリートで粗塊の剥落がみられ、0.10ml/gまで減少すると粗塊剥落が早期に生じる傾向がみられる。

組織の緻密性と凍害劣化に関して、桂ら⁵⁾は組織の透水性が低いほど凍結点に大きな圧力が生じ、凍害が発生することを指摘している。写真-2をみると、粗塊の剥落は、粗骨材とモルタルの付着が失われるように界面から発生している。粗塊の剥落は、この界面に水溶液が蓄積され、組織の緻密性に起因して過大な水圧が界面で生じ、粗塊の剥落が発生したのではないかと推測される。

打設面は、ブリーディングの影響でモルタル分が多く、粗骨材が少ない組織が形成されたため、粗塊の剥落がみられなかったものと思われる。

3.2 スケーリング量と細孔量

図-5に750Å以上の細孔量(試験開始時点)と100サイクルのスケーリング量の関係を示す。ここではスケーリングに着目し、モルタル粗塊の剥落のデータを除外している。打設面のグラフみると、細孔量とスケーリング量には良い相関がみられ、スケーリング量は細孔量の影響を受けることがわかる。

一方、底面・型枠面では、細孔量が0.20ml/g以内ではスケーリング量が全体的に少なく、0.20ml/gを越えると突然スケーリング量が増大に転じ、近似線が0.20~0.30ml/g間で変曲しL字型で表示される特異な傾向が示された。底面・型枠面は、打設時にコンクリートの圧密および側圧の作用を受けるため、硬性が高く、スケーリングが発生しにくい高品質な表面(試験面)が形成されたことが要因として考えられる。また、底面より型枠面の方がスケーリング量が多い傾向が示されている。これは、側圧で型枠面に集まった空気泡や余剰水⁶⁾が品質を低下させたためと考えられる。高炉B種では、底面でも細孔量が0.20ml/g以上のコンクリートでスケーリングの増大がみられた。これは、圧密作用による硬性の影響より、前述したスラグによる影響⁷⁾が卓越したためと思われる。

3.3 長期スケーリング抑制に関する考察

品質を確保するためには、スケーリング量の許容値に関する検討が必要である。「美観」重視ならスケーリング量、「有効断面確保」重視なら最大スケーリング深さに重点が置かれる。しかし、ASTM-C-672では、スケーリング量および試験サイクルに関する明確な基準は確立されていない。一方、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)⁷⁾では、凍害による欠損深さの判定基準として、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を判定基準としている。

そこで、この基準に準じ、図-2からスケーリングの許容値を求めると、普通ポルトでは打設面が0.09g/cm²、底面・型枠面が0.03g/cm²、高炉B種では打設面が0.14g/cm²、

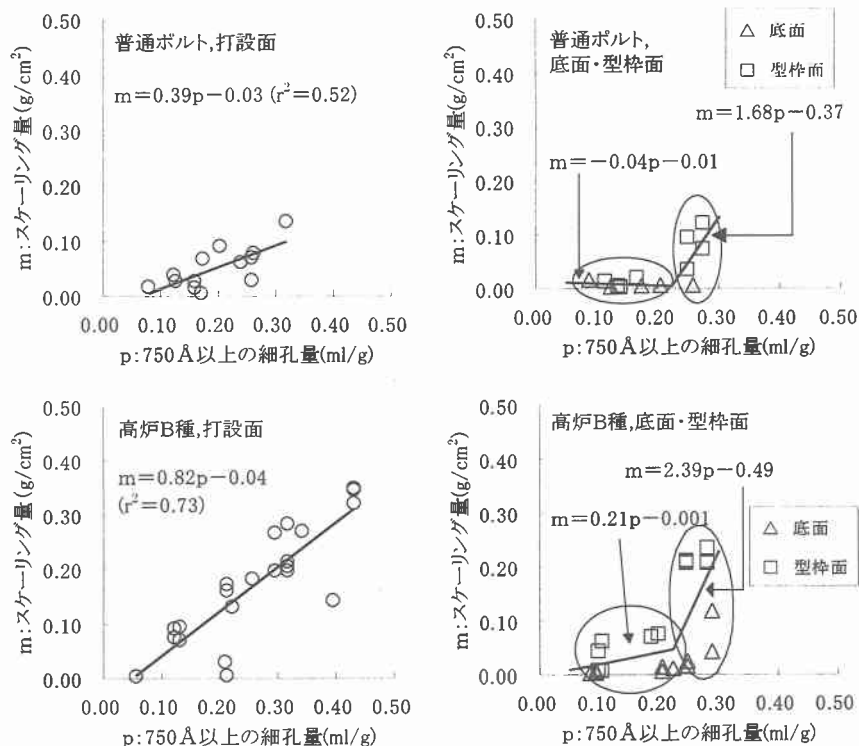


図-5 750Å以上の細孔量とスケーリング量の関係(100サイクル)

cm²、底面・型枠面が0.05g/cm²となった。許容スケーリング量が各々異なるのは、スケーリング挙動が試験面によって異なることに起因する。

図-5では、細孔量と100サイクルのスケーリング量の関係を示した。ここでは、細孔量と100サイクルに加えて200、300、400、500、600サイクルのスケーリング量との関係についても調べ、これらの結果をもとに、細孔量とスケーリング量と凍結融解サイクルの関係を3次元グラフに表示することを試みた。その結果を図-6に示す。打設面では、細孔量が多いほど凍結融解の繰り返しによって発生するスケーリング量が多くなる傾向が、底面・型枠面では、細孔量が概ね0.20ml/g以下になると凍結融解の繰り返しによるスケーリングの発生が大きく抑制される傾向が示された。

ここで、図-6の立体図を、前述した許容スケーリング量の値のところで「切断」し、その際に得られる「断面」を図-7に示す。図-6において色が塗られている領域は、スケーリング量が許容スケーリング量以内に収まった領域である。

図-7の打設面をみると、普通ポルトでは細孔量の減少によって許容スケーリング量に到達するまでの期間(サイクル)を延ばせる効果が得られると同時に、0.20ml/g以下になるとその効果は飛躍的に向上し、概ね0.15ml/gまで減少すると極めて高い効果が期待できると思われる。高炉B種でも同様の傾向がみられ、0.10ml/gまで減少すると大きな効果が得られる傾向が示された。

一方、底面・型枠面は、①図-5で示したように細孔量が0.20ml/g以下ではスケーリング量が全体的に少なく、細孔量による差が明確に現れなかったこと、②型枠面に比べて、余剰水の影響が少なく硬性に優る底面の方がス

ケーリング量が少なかったこと、③図-4で示したように概ね0.10ml/gになるとモルタル粗塊の剥落が発生する危険性が高まることを考慮すると、細孔量は概ね0.20ml/g前後が望ましく、かつコンクリート表面の硬性を向上させることで大きな効果が得られると思われる。

本論文では、養生後、気中に3~4週放置させた飽水度の比較的低いコンクリートについて検討した。コンクリートの飽水度が高まると、塩水によるスケーリング抵抗性は低下する⁸⁾ことから、より精度の高い考察を行うには、さらに図-6のグラフに飽水度の要素も盛り込んで検討すべきところだが、この点については今後の課題としたい。

4. まとめ

- (1) 打設面では750Å以下の細孔量が0.20 ml/g以下になるとスケーリング抵抗性は大きく向上し、普通ポルトでは概ね0.15ml/g、高炉B種では概ね0.10 ml/gまで細孔量が減少すると、極めて大きなスケーリング抑制効果が得られる。
- (2) 底面・型枠面では750Å以下の細孔量が0.20ml/g以下になるとスケーリング量は大きく減少する。しかし、概ね0.10ml/gまで細孔量が減少するとモルタル粗塊が剥落する可能性が高まるため、概ね0.20ml/gを目標値とし、かつ、表面に優れた硬性を持たせることがスケーリング抑制に最も適した条件であると思われる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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, pp.24-31, 日本コンクリート工学協会, 1999
- 3) 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.34, 1992.11
- 4) 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
- 5) 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
- 6) コンクリート技術の要点'99, pp.160, 日本コンクリート工学

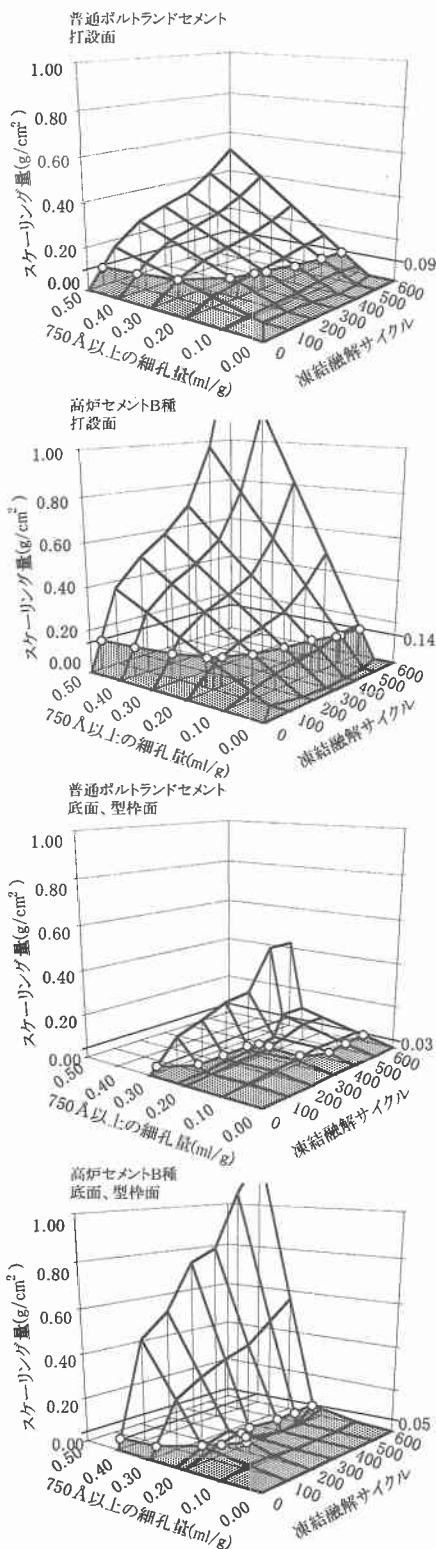


図-6 スケーリング発生量変化に及ぼす750Å以上の細孔量

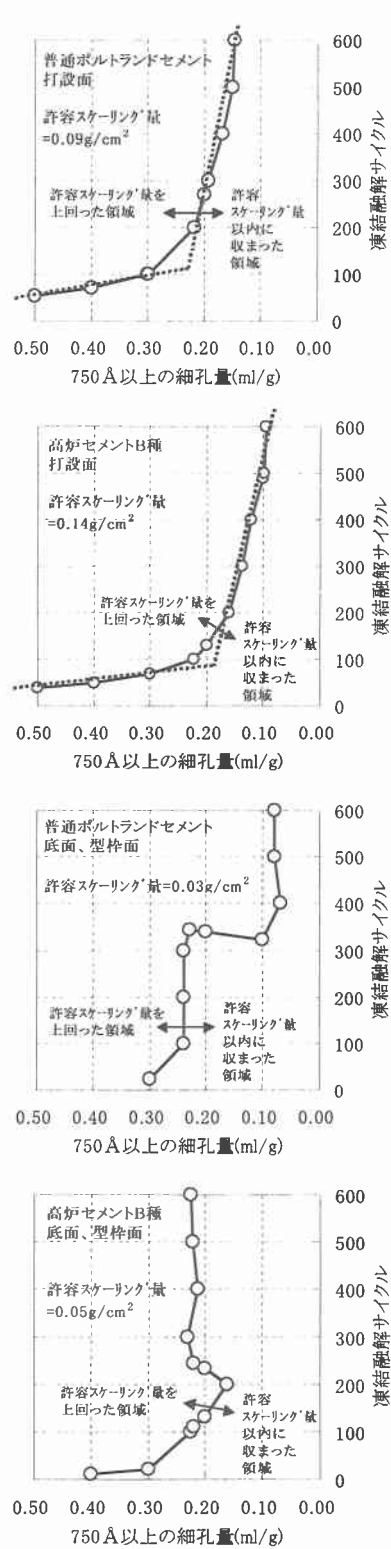


図-7 許容スケーリング量における750Å以上細孔量とサイクル

協会, 1999

- 7) 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
- 8) 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リングに及ぼす養生・乾燥の影響, 第58回土木学会北海道支部論文報告集, pp.818-821, 2002.1