

# 論文 長期凍結融解による表面剝離に及ぼす凍結防止剤の影響

遠藤 裕丈\*1・熊谷 守晃\*2・嶋田 久俊\*3

**要旨:** コンクリートの打設面と型枠面において、濃度3%の塩化ナトリウム水溶液を使用してASTM-C-672に準拠した凍結融解試験を600サイクル行い、長期の凍結融解による表面剝離劣化の挙動を調べた。その結果、打設面の劣化挙動は長期的にスケール劣化であった。一方、型枠面は、早期は全体的に軽度な劣化だが、あるサイクル以降で剝離量が急増し、試験面が一気に崩壊した供試体があった。

**キーワード:** 凍結防止剤, コンクリート, 凍結融解, 表面剝離, 最大剝離深さ

## 1. はじめに

スパイクタイヤの使用禁止に伴って、冬期間、北海道などの積雪寒冷地では、塩化物系の凍結防止剤が多量に散布されている。コンクリートが塩化物による凍結融解作用を受けた場合、塩分の影響で表層の細孔変化、毛細管挙動変化が増加し、通常の凍害劣化と異なり、表面がフレーク状に剥げ落ちる表面剝離が発生する。一般に劣化調査では、早期の剝離の程度を目視観察するのみで、組織の緩みによって内部に蓄積される塩分、その他の劣化因子が将来にわたって及ぼす影響は軽視される傾向にあり<sup>1)</sup>、塩化物

による長期凍結融解作用による劣化挙動に関するデータは少ない。しかし、長期耐久性を考慮すると、長期凍結融解作用によるコンクリートの表面剝離挙動を把握することは重要である。

本論文では、塩化ナトリウム水溶液を使用して、打設面および型枠面に凍結融解作用を600サイクルの長期にわたり与え、表面剝離の劣化挙動を調べた結果を報告する。

## 2. 試験概要

### 2.1 使用材料、配合

配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトラ

表-1 コンクリートの配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤使用量			スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)
			W	C	S	G	AE減水剤 C×(%)	高性能AE C×(%)	空気連行剤		
NP35	35	41	133	380	780	1111	—	0.60	2.00A <sup>*</sup> )	8.8	5.4
NP55	55	45	143	260	890	1076	2.50	—	1.50A	7.4	4.6
BB35	35	41	143	409	753	1072	—	0.50	2.30A	7.0	4.5
BB55	55	45	145	264	882	1065	2.50	—	2.60A	9.0	5.3

<記号説明>NP:普通ポルトランドセメント, BB:高炉セメントB種, W:水, C:セメント, s/a:細骨材率, S:細骨材, G:粗骨材  
 <主成分>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, 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 \*) A=2.5ml/C(1kg)

\*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 北海道開発局 技術管理課 防災対策室長 (前 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)

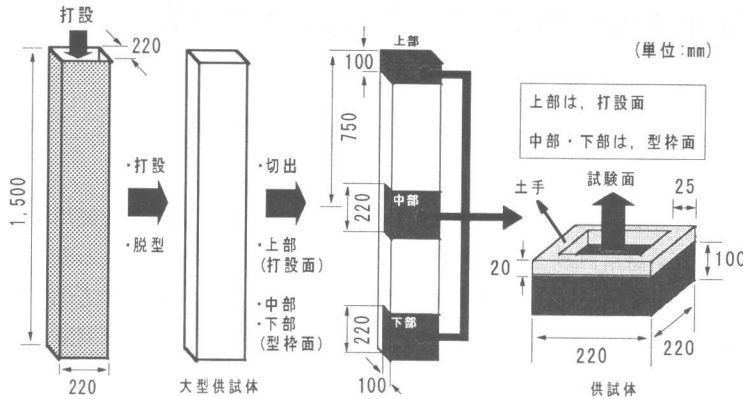


図-1 供試体作製手順

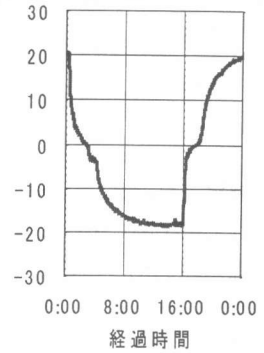


図-2 試験温度

ンドセメント（以下NP）と高炉セメントB種（以下BB）を使用した。スランブは $8 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は $4.5 \pm 1\%$ を目標値とした。細骨材は苫小牧市樽前産の海砂（密度 $2.70\text{g/cm}^3$ 、吸水率 $0.97\%$ 、粗粒率 $2.86$ ）、粗骨材は小樽市見晴産砕石（密度 $2.67\text{g/cm}^3$ 、吸水率 $1.58\%$ ）を使用、粗骨材の最大寸法は $25\text{mm}$ とした。混和剤は、水セメント比 $35\%$ は高性能AE減水剤と空気連行剤を、 $55\%$ はAE減水剤と空気連行剤を用いた。混和剤の主成分は表-1に示す。

## 2.2 供試体

図-1に示すように、 $220 \times 1500\text{mm}$ 供試体を作製し、3日間の湿気養生（ $20^\circ\text{C}$ ）後、材齢3日で上部、中部、下部から $220 \times 100\text{mm}$ 寸法で試験用供試体を切り出した。切り出した供試体は、試験開始材齢28日まで $20^\circ\text{C}$ 、湿度 $60\%$ の恒温室に安置した。なお、試験では供試体の試験面に試験水を湛水させるため、幅 $25\text{mm}$ 、高さ $20\text{mm}$ のモルタル製の土手を作製し、これを材齢21日供試体の試験面にシリコーンで取り付けた。試験面は、上部は打設面、中部及び下部は型枠面とした。試験面以外の面はエポキシ樹脂でコーティングした。

## 2.3 凍結融解試験

凍結防止剤の散布が起因となる凍害劣化は表面剥離が特徴的である。一般の凍結融解試験（ASTM-C-666）は、コンクリート自体の耐久性の評価には適するが、表面剥離の評価は難しい。本研究ではコンクリート表面に着

表-2 目視評価

点	試験面の劣化状況
0	剥離なし。
1	粗骨材の露出なし、深さ $3\text{mm}$ 以下の剥離。
2	評価1と評価3の中間程度の劣化性能。
3	粗骨材がいくつか露出する程度の剥離。
4	評価3と評価5の中間程度の劣化性能。
5	粗骨材が全面露出する程の激しい剥離。

目し、コンクリートの1面に対してのみ凍結融解作用を与え、剥離量および目視観察から表面剥離抵抗性を評価する試験法であるASTM-C-672に準拠して凍結融解試験を行った。試験環境は水中凍結水中融解とし、試験水には濃度 $3\%$ の塩化ナトリウム水溶液を用いた。試験面に試験水を深さ $6\text{mm}$ 程度張り、 $-18^\circ\text{C}$ で16時間凍結、 $23^\circ\text{C}$ で8時間融解の24時間1サイクルの凍結融解作用（図-2）を与え、5、10、15、25、35、50、75、…（25サイクルおき）…、600サイクル目に剥離量の測定、目視評価（表-2）を行った。

ASTM-C-672に準拠した試験では、この2つの評価法が広く用いられている。本研究ではこれらに加え、経時的な劣化挙動をより詳細に把握するため、最大剥離深さの測定を実施した。測定は、深く剥離が発生している箇所を任意で5点選定し、選定箇所細棒をあて、剥離深さをメジャーを用いて測定し、このうち最大値を最大剥離深さとした。

### 3. 試験結果と考察

#### 3.1 剥離量

試験面に発生した剥離片の質量 (g) を試験面の面積 (cm<sup>2</sup>) で除し、試験面1cm<sup>2</sup>当りの剥離量 (g/cm<sup>2</sup>) を求めた。図-3に結果を示す。

上部において、NP35、NP55、BB35は長期的に剥離量の増加傾向が安定した。BB55の剥離量は初期で多く、それ以降は300サイクルまで増加傾向は安定、300サイクル以降で再び多くなった。セメント別で比較すると水セメント比が大きい55%が、同一の水セメント比で比較するとBBの方が剥離量は多かった。

中部において、100サイクル程度までをみると、剥離量は上部とほぼ同じ傾向が示されたが、NP35は225サイクル以降、BB35は150サイクル以降、BB55は250サイクル以降で剥離量が急増した。NP35、BB35は、ほとんど剥離が発生していない状態から、BB55は、ある程度剥離が発生した状態から剥離量が急増した。NP55は剥離量の増加傾向が安定した。下部も中部同様、NP35とBB35で剥離量の急増がみられ、上部すなわち打設面とは異なる剥離量の増加傾向が示された。

#### 3.2 目視評価と剥離量の関係

100、300、500サイクルにおける目視評価と剥離量の関係を図-4に示す。上部において、NP35は試験面が薄く剥離した程度のため長期的に1点となった。BB55は300サイクル以降で剥離量が増加したが、粗骨材がほとんど露出しなかったため評価は2点であった。

中部、下部について、BB55は粗骨材が早期に露出し、100サイクルで4点および5点となった。凍結融解作用を長期に与えたところ、ほぼ全面に粗骨材が露出し、下部のNP35以外は5点と、上部より点数が大きい傾向が示された。粗骨材が全面露出するまでのサイクルは、BB55が短く、NP35が長かった。BB35とNP55は中部はほぼ同じで、下部はNP55が長かった。

#### 3.3 各試験面の劣化挙動について

上部 (打設面) の劣化形態は長期的にスクーリングで、剥離量の多少に関わらず、粗骨

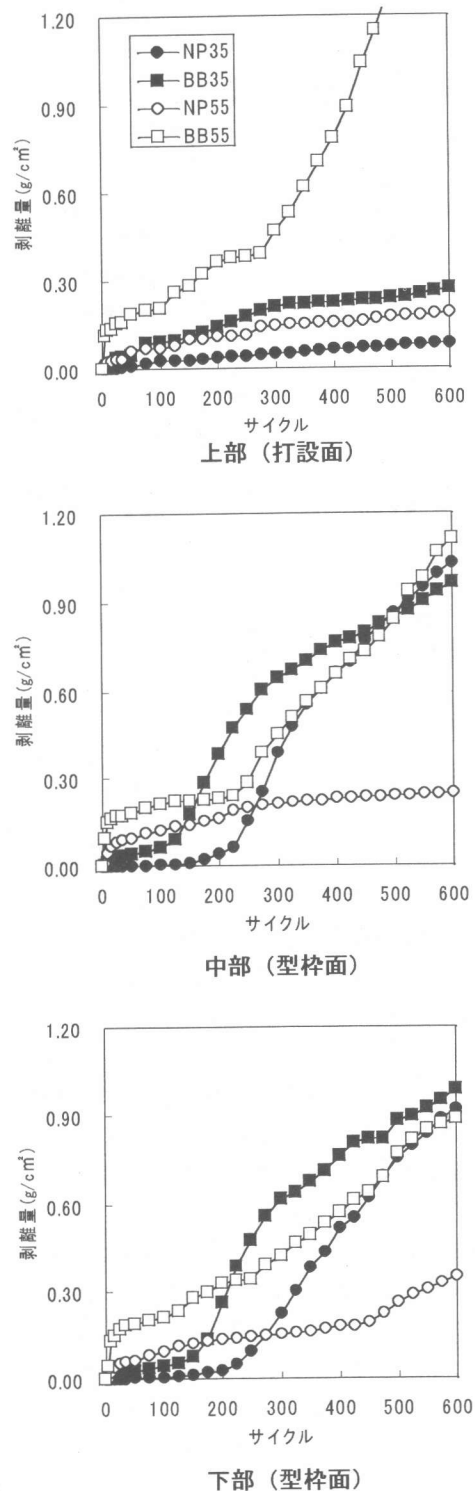


図-3 剥離量の計測結果

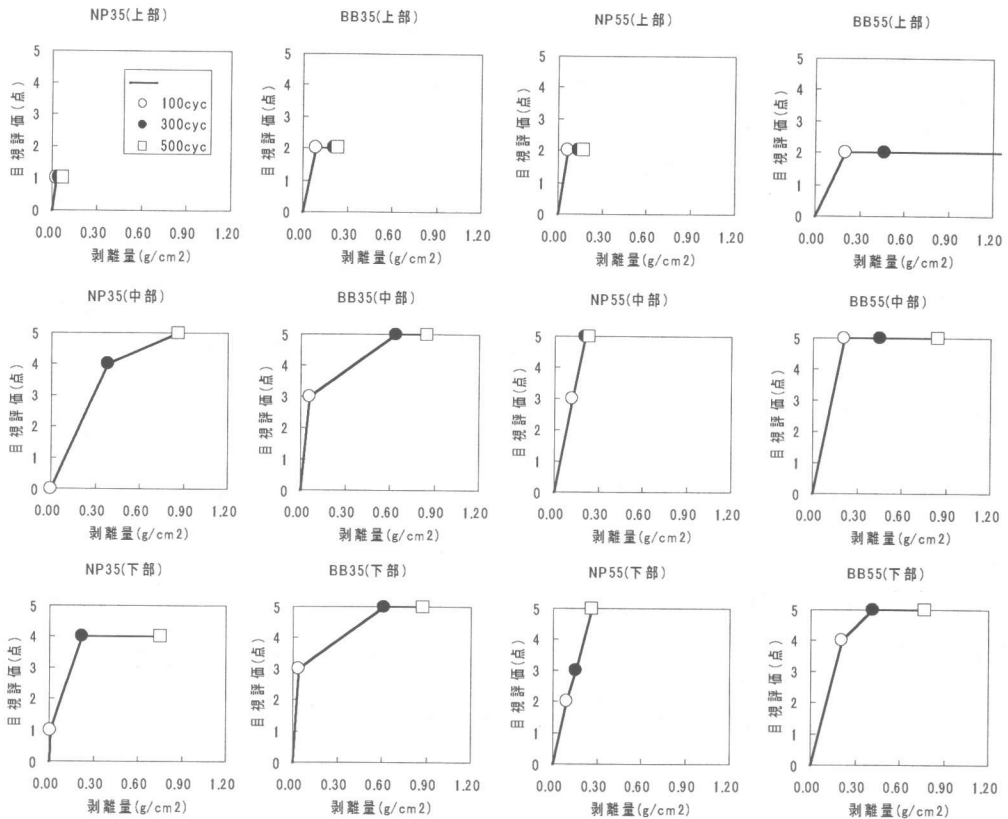


図-4 目視評価と剥離量の関係

材の露出は少なかった。これは打設後のブリーディングおよびコテ均しの影響で粗骨材量が減少し、モルタルが多くなるためと思われる。使用セメント別でみると、水セメント比が小さい35%が長期にわたり剥離量は少なかった。これは水セメント比が小さくなると、セメントペーストおよびモルタルの組織構造が緻密化するためと考えられる。

中部、下部（型枠面）の劣化形態は、BB55を除き、早期は軽度のスケーリングおよびあばた<sup>2)</sup>で、見た目上、試験面は健全であった。早期の剥離量は水セメント比が小さいNP35、BB35の方が少なかった。しかしNP35、BB35は100～200サイクル経過後、突然、粗骨材のまわりのモルタルの剥離および粗骨材の剥落の発生で剥離量が急増、試験面が一気に崩壊した。NP55は劣化の進行がみられなかった。

BB55はモルタルが多く剥離したが、NP35、BB35のように試験面が一気に崩壊する激しい劣化挙動はみられなかった。

既往の研究成果<sup>3)</sup>において、濃度3%の塩化カルシウム水溶液を用いて同様の試験を行った場合、水セメント比が小さいコンクリートでは、健全な状態にある型枠面が300サイクル経過後に一気に崩壊したとの結果が報告されている。塩化物水溶液は、凍結融解作用によって発生した試験面の微細なひびわれ箇所からコンクリート内部へ浸透し、気泡や細孔などに蓄積されると考えられる。特に、ブリーディングの影響で粗骨材が多く存在する型枠面では、骨材とペーストとの界面に形成される遷移帯にも蓄積されることが考えられる。

水セメント比が大きい場合、ペーストの組織構造がやや粗くなる傾向にあり、蓄積され

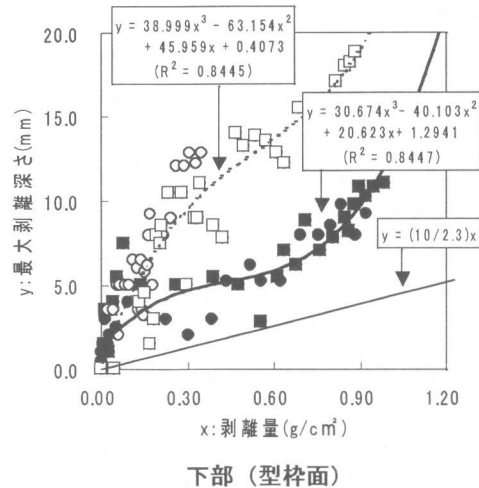
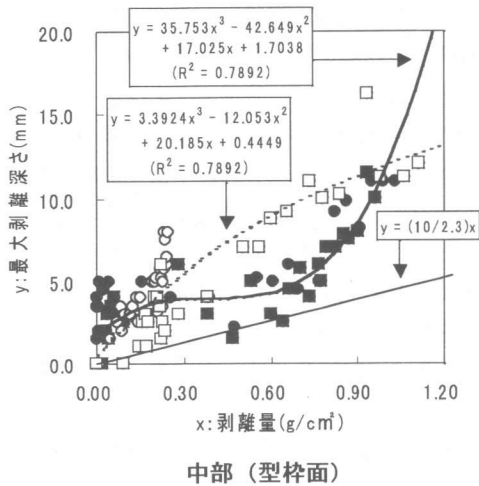
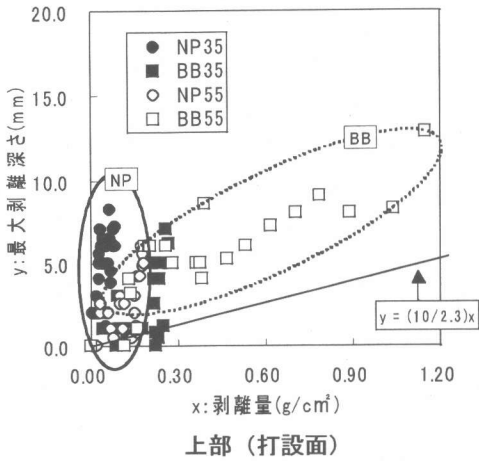
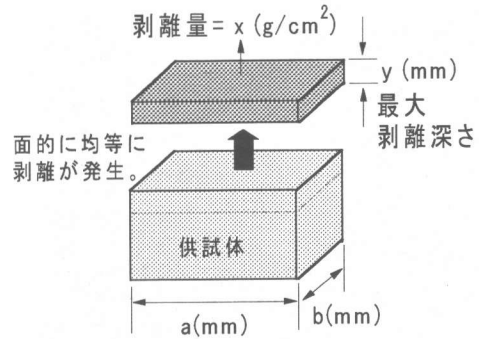


図-5 最大剥離深さと剥離量の関係



$$\text{コンクリート単位容積重量} = \frac{x \cdot \left(\frac{a}{10^1}\right) \cdot \left(\frac{b}{10^1}\right) \cdot \left(\frac{1}{10^6}\right) [t]}{\left(\frac{a}{10^3}\right) \cdot \left(\frac{b}{10^3}\right) \cdot \left(\frac{y}{10^3}\right) [m^3]} = 2.3$$

図-6  $y=(10/2.3)x$ の算出

た水溶液の氷結によって生じる膨張圧をスケールリングの発生によって緩和させることが比較的容易なため、試験面が一気に崩壊するような劣化挙動を示さなかったと考えられる。

水セメント比が小さい場合、ペーストの組織構造が緻密化するためスケールリングの発生は抑制される一方、蓄積された水溶液の氷結による膨張圧の緩和が、緻密なペースト組織によって阻害されることが考えられる。よって、膨張圧の緩和のため気泡および遷移帯部分から突然大きく剥離し、試験面が一気に崩壊したと推測される。

### 3.4 劣化挙動の把握及び評価

剥離量からは質量変化が把握できるが、試験面の劣化挙動について把握することは難しい。また、目視評価からは粗骨材の露出状況が把握できるが、図-4に示したように目視が同じでも剥離量に差がある場合や、BB35とNP55の中部のように、あるサイクルにおける目視評価が同じでも剥離量に差がある場合は劣化挙動が異なると思われる、試験面の深さおよび面方向における劣化挙動の違いを把握することは難しいと思われる。

#### 3.4.1 最大剥離深さによる評価

最大剥離深さ (mm) と剥離量の関係を図-5に示す。x軸に剥離量を、y軸に最大剥離深さ

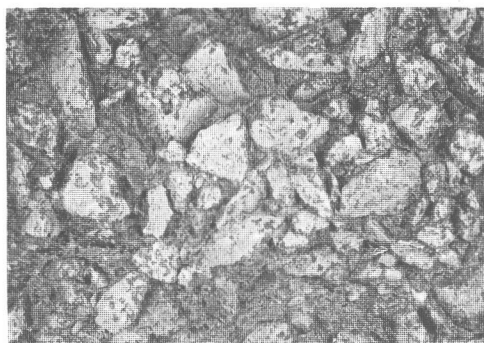


写真-1 NP35中部の試験面 (500サイクル目)

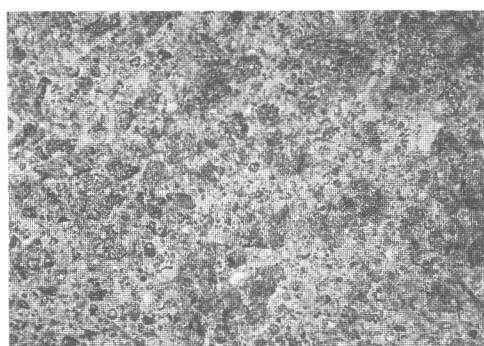


写真-2 NP55中部の試験面 (500サイクル目)

をプロットした。図中の $y=(10/2.3)x$ は、図-6に示すように、コンクリートの単位容積重量を $2.3t/m^3$ と仮定したとき、試験面が面的に均等に表面剥離した場合の式である。

上部（打設面）をみると、BBの方が直線 $y=(10/2.3)x$ にほぼ平行である。これは剥離挙動がNPとBBで異なること、BBの試験面の方が面的に様に剥離していることを示しており、BBの塩化物による表面剥離抵抗性がNPより劣ると評価される<sup>4)</sup>ことと合致する。

中部、下部（型枠面）をみると、ある深さまで剥離が発生した後、NP35、BB35では剥離量は増加するが最大剥離深さの増加は一時的に鈍化した。これは試験面広範で一様に剥離が発生し粗骨材が露出したものの、NP35、BB35の組織構造が緻密なため、深さ方向へは劣化がそれ程進行しなかったことを示している。また、剥離量がある値に達した時点で再び最大剥離深さが増加した。これは写真-1に示す

ように露出した粗骨材のまわりに付着するモルタルの剥離および粗骨材の剥落が発生したためである。NP55はNP35、BB35より剥離量は少ないが最大剥離深さが増加が鈍化する傾向はみられなかった。これはNP35、BB35に比べてペーストの組織構造が粗いため、写真-2のようにスケーリングが主に発生し、深さ方向へも穏やかに劣化が進行したためと思われる。

以上のことから、剥離量および目視評価に加え、最大剥離深さも表面剥離劣化の挙動形態の把握において有効な指標になると言える。

#### 4. まとめ

- (1) 打設面の劣化は長期的にスケーリングで、粗骨材の露出が少ない。剥離量は水セメント比が大きい方が、普通ポルトランドセメントより高炉セメントB種の方が多い。
- (2) 型枠面は、早期は部分的に小さく剥離する程度である。しかし凍結融解作用を長期にわたって与えると、あるサイクル経過後、剥離量が突然急増し、試験面が一気に崩壊するケースもある。
- (3) ASTM-C-672試験では、剥離量、目視評価に加え、最大剥離深さも考慮することにより、表面剥離劣化挙動を詳細に把握できる。

#### 参考文献

- 1) 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、pp.42,1999
- 2) 岸谷孝一、西澤紀昭;コンクリート構造物の耐久性シリーズ「凍害」、技報堂、pp.5,1988
- 3) 遠藤裕丈、熊谷守晃、嶋田久俊;塩化物水溶液によるコンクリートの長期スケーリングに及ぼすコンクリート表面の品質の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、日本コンクリート工学協会、pp.147-152,1999.11
- 4) Jochen Stark and Bernd Wicht(太田利隆、佐伯昇翻訳):コンクリートの耐久性、セメント協会、pp.201,1999.