

論文 コンクリート製品の表面劣化に及ぼす振動締固め時間の影響

細川吉晴^{*1}・庄谷征美^{*2}・高橋 秀^{*3}

要旨：振動締固め時間がコンクリート製品の内部性状と表面劣化に及ぼす影響を検討した。振動締固めによる縦詰め製品の下部では上部よりも粗骨材が多めになり単位容積質量を増加させ圧縮強度を高める傾向があり、この傾向は締固め時間が長いほど顕著であった。最低温度が -3.5°C 前後の凍結融解を300サイクル繰り返した製品の底部に最大2.2%の表面剥離が生じたが、締固め時間が長いほどその剥離個数が多く発生し剥離の深さが浅くなる傾向を示した。この表面剥離現象は現場で発生するものと同様であった。

キーワード：振動締固め時間、コンクリート製品、表面剥離、凍結融解試験

1. はじめに

積雪寒冷地におけるコンクリート製品の中でも道路用製品は、寒冷環境で凍結融解の繰り返しや路上に散布される凍結防止剤の塩害^{1, 2, 3)}の相乗的作用を受けて、製品表面にモルタル剥離に伴う劣化が発生する場合がある。融雪剤のコンクリート構造物に及ぼす影響に関する調査結果⁴⁾が報告されてはいるが、製品劣化への対策については述べられていない。一般に製品工場では製造工程の最終で防水剤等を表面に散布もしくは塗布する対策をとっている。ただ、防水剤等の効果がある期間は良いとしても、その後表面劣化が出ないという保証もない。一方で外観もチェックされるので外表面の気泡を少なくするため振動締固めが過剰に行われている点も、表面劣化に影響するとも言われている。

また、製品の表面剥離では、代表的なスクーリングのほか、やや楕円形を呈した、軟石によるポップアウトに似たモルタル剥離が指摘されている⁵⁾。後者は、表層モルタルが薄くはじけその内部にやや水平な碎石が確認できるが、良質碎石使用の製品でも発生し、これが目立つと張替え等補修する場合もある。この要因には、外的に凍結融解作用が主であり、内的に振動締固めによって粗骨材が型枠近くまで沈降するこ

とが考えられる。

ここでは、振動締固め時間の違いがコンクリート製品の内部性状と表面剥離にどのように影響するかを実験的に検討した。

2 実験概要

2.1 コンクリートの材料・配合と試験体

コンクリートに用いた骨材の物理的性質を表-1に示す。セメントには普通ポルトランドセメント(密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$)を用い、細骨材と粗骨材には輝緑岩を主体とする砕砂および10~5mmの碎石を用いた。また、コンクリート配合を表-2に示す。この配合は一般的な振動締固め製品を対象としたものであり、目標とするスランプと空気量はそれぞれ5.0cm, 5.0%である。

試験体はJIS工場で製造することとし、その種類はJIS A 5345に準拠する道路用鉄筋コンクリート側溝蓋1種300(縦500mm×横350mm×厚さ95mm)とした。その型枠は1型枠で6枚同時に製造できる縦詰めタイプであり、供試体等を作成する関係から鉄筋を入れなかった。

2.2 振動締固め後のコンクリート特性試験

テーブル振動機で締固められたコンクリートの特性を把握するために、バッチャープラントからホッパーに落とされたフレッシュコンクリ

*1 北里大学 獣医畜産学部生物生産環境学科助教授 農博 (正会員)

*2 八戸工業大学 環境建設工学科教授 工博 (正会員)

*3 (株)青森前田コンクリート工業 工場長

表－1 使用骨材の物理的特性

| 骨 材 | 表乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | 粗粒率 | 単位容積質量 (kg/m ³) | 実績率 (%) | 微粒分量 (%) | 粘土塊量 (%) |
|----------|------------------------------|------------|------|--------------------------------|------------|-------------|-------------|
| 細骨材 (砕砂) | 2.89 | 1.02 | 2.88 | 1750 | 61.7 | 2.77 | 0.80 |
| 粗骨材 (砕石) | 2.91 | 2.11 | 5.90 | 1640 | 57.5 | 0.80 | 0.19 |

表－2 コンクリートの配合

| 粗骨材の 最大寸法 (mm) | スランプ (cm) | 水セメ ント比 (%) | 空気量 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|----------------------|--------------|-------------------|------------|-------------|--------------------------|-----------|----------|----------|----------|
| | | | | | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | 混和剤 A |
| 10 | 5.0±1.5 | 44.5 | 5.0±1.5 | 55.3 | 160 | 360 | 1074 | 876 | * |

*：高性能減水剤および空気量調整剤はC量に対しておのおの0.5%、0.06%とした。

ートをワシントン型エアメーターに詰めて、振動締固め時間 0, 10, 20, 30 秒経過ごとに単位容積質量と空気量を測定した。この 0 秒とは手詰めによる方法で測定した。両者の測定方法は、事前にエアメーターにその容積の約 3 割のフレッシュコンクリートを投入し、実機のテーブル振動機の上に蓋をしないでエアメーターを手で押さえたまま振動させ、10, 20, 30 秒経過するまでにコンクリートを継ぎ足しながら満杯にした。振動機の振幅はテーブル上で測定し、全振幅の最大値と最小値の差の平均とした。なお、この試験は正確を期するために 2 回おこなった。

2.3 試験体の製造と試験片・コアなどの作成

フレッシュコンクリートのスランプが 4.5cm、空気量が 5.5%で目標の範囲に入ることを確認した。そして無筋の縦詰め型枠が製造ラインに回ってきた際に、振動締固め時間 10, 20, 30 秒ごとに試験体を 3 枚ずつ打設し、その後蒸気養生を行なった。その養生方法は、前置き時間の工程が温度 28℃で約 3 時間、昇温勾配が約 20℃/時、最高温度が約 60℃を 2 時間程度とし、その後蒸気を止めて 10 時間後に脱型した。脱型した試験体は試験室に搬入後、温度が約 20℃、湿度が約 60%の雰囲気において所定の材齢まで気中養生した。

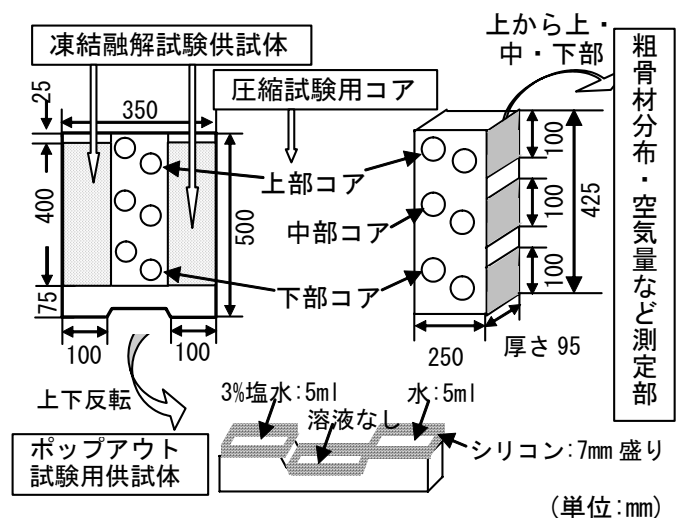
また、振動締固め時間の影響を比較するために各種試験用の試験片および圧縮試験用コアを、材齢 7 日に図－1 に示すように

切断あるいは採取した。凍結融解試験用供試体は 1 試験製品から断面 100×95mm、長さ 400mm を切断し、その切断面にエポキシ樹脂をコーティングして作成した。凍結融解試験用供試体の残りの部分から、高さ 425mm のうち上から 100mm ずつ上・中・下に区分して直径 50mm のコアを 2 本ずつ抜いた。さらに、その切断面において、コア採取と同様に上・中・下に区分した箇所の粗骨材分布と硬化コンクリートの空気量などの測定に回した。次に、残りの型枠底部に接する部分は、反転して表面剥離試験に使用した。

2.4 硬化コンクリートの試験について

(1) 切断面における粗骨材の分布とその傾き

図－1 に示す上・中・下の切断面をデジタルカメラで撮影した画像において、短軸が 5mm 以上の粗骨材すべての断面積をプランメーターで



図－1 試験体からの試験片・コアなどの作成方法

求めた。その合計面積を切断面積で除して高さ別の粗骨材分布割合を求めた。なお、ここでいう粗骨材は、本来の粗骨材そのものではなく、切断面画像に認められる粗骨材を示している。

(2) 硬化コンクリートの空気量などの測定

図-1に示す上・中・下の切断面を研磨し、振動締固め時間ごとの高さ別に、硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数を ASTM C 457-90 に準じて測定した。

(3) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、振動締固め時間ごとの上・中・下の高さ別に採取したコアについて、材齢14日で寸法と質量を計測した後、JIS A 1108 に準じておこなった。コアの圧縮強度は高さ補正をして求め、同時に単位容積質量も算出した。

(4) 凍結融解試験

材齢14日から凍結融解試験を開始したが、その開始前に約24時間を水に浸漬してから用いた。その方法は、1サイクルごとに供試体中心温度を -18°C ～ $+5^{\circ}\text{C}$ と変化させる気中凍結・気中融解方式として5サイクルごとに供試体の質量と動弾性係数を測定し、その後、1日間を溶液中に浸漬させて吸水させ、そしてまた5サイクルの気中凍結・気中融解を繰り返す方式とし、これを150サイクルまで実施した。この方法は、JIS法の水中凍結・水中融解方式では供試体にとって過酷過ぎるので、振動締固め時間の影響をみるためにコンクリートの劣化過程をゆっくり把握する必要があると考えて採用した。

また、1日間浸漬する溶液は、水と3%塩水(塩の化学成分： $\text{NaCl}=57.0\%$ 、 $\text{MgCl}_2=40.4\%$ 、 $\text{Ca}\cdot\text{K}\cdot$ その他 $=2.6\%$ 、中国から輸入されていて青森県内で使用中)の2種類とした。なお、比較のために溶液浸漬しないものもおこなった。

(5) 表面剥離試験

試験体の底部の表面は、図-1に示すように、三つに区切り、そのうちの二つはシリコンで約7mmの土手盛りをした中に水と3%塩水を5サイクルごとに5mlずつ入れ替え、残りの一つには溶液を入れなかった。これらの底部を入れた

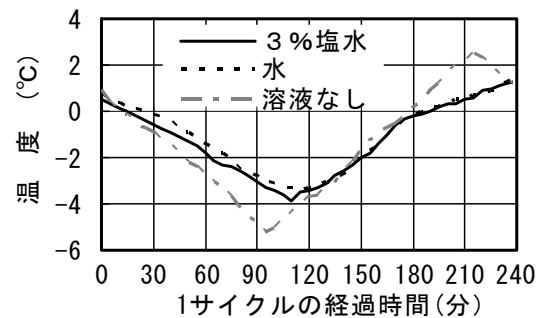


図-2 表面剥離試験の溶液温度の変化

は溶液を入れなかった。これらの底部を入れた容器を、凍結融解試験機の供試体用槽内と上ブタとの隙間に水平に設置し、熱伝対で温度測定しながら、(4)と同様に、5サイクルごとに底部表面の観察と溶液交換をおこない300サイクルまで継続した。試験1サイクルの温度変化(図-2)は、溶液なしが試験槽内スペースの温度と同一で -5.2 ～ $+2.5^{\circ}\text{C}$ 、水が -3.4 ～ $+1.4^{\circ}\text{C}$ 、3%塩水が -3.9 ～ $+1.3^{\circ}\text{C}$ の範囲にあり、塩水の方が水よりも温度勾配がややきつくと、その温度は早く低めになり、かつ、 0.5°C ほど低めに推移した。

発生した表面剥離の個数、その1個ずつの長軸、短軸および深さを測定し、その面積を楕円形として求めた。なお、個数と面積は、1供試体の測定面積が 68cm^2 と小さかったので3供試体の合計値として比較に用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートについて

テーブル振動機の振幅は、測定位置でばらついたが平均 2.0mm であった。フレッシュコンクリートの単位容積質量と空気量はそれぞれ $2520\text{kg}/\text{m}^3$ 、 5.5% であり、温度は 28°C であった。図-3に振動締固めに伴う単位容積質量と空気量減少率の変化を示す。振動締固め時間が長いほど単位容積質量は有意に増加し(0.1% の有意水準あり、以下 $p<0.001$ と記す)、空気量の減少率は振動締固め時間10、20、30秒後に5.5、14.6、43.3%となり、振動締固め時間が長いほど空気量は有意に減少した($p<0.001$)。

振動締固めに伴う空気量の減少は、テーブル

振動機の広さや振幅の大小で異なるが、40 秒後には 20~45%も減少することがある⁵⁾。今回の実験でも 30 秒間の振動締固めで平均 45%も減少したことから、硬化したコンクリート中の空気量が少なくなっているものと思われる。

3.2 硬化コンクリートについて

(1) 振動締固め時間・高さ別の粗骨材の分布

切断面における粗骨材分布の特性を表-3に示した。粗骨材分布割合をみると、振動締固め時間 10 秒の下部が 33.2%でもっとも大きく、次に 30 秒の下部の 31.1%, 20 秒の下部の 27.8%となり、すべての振動締固め時間において下部ほど粗骨材が多い傾向となった。また、粗骨材の個数は 10 秒と 30 秒においては下部ほど増加したが、20 秒の下部だけは 63 個でその上部・中部より 20 個程度少なかった。粗骨材 1 個あたりの面積は粗骨材分布割合との相関が高く ($p<0.01$)、高さ別では下部ほど粗骨材分布割合が大であるので、大きめの粗骨材が下方に沈降する傾向が強いといえる。

スランプが 5cm の硬練りコンクリートではあっても、振動締固めに伴って粗骨材が下方に沈降しがちであることが明らかとなった。ただ、現場において表面剥離するコンクリート表層は型枠と接する部分であるから、テーブル振動機やフレッシュコンクリートなどの特性との関係で、型枠内で粗骨材がどのような状態で下方に沈降しているかについて、表面剥離した箇所断面などから今後検討する必要がある。

(2) 硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数

表-3 に硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数を示した。硬化後の空気量は、フレッシュコンクリートの当初の空気量が 5.5%であっても、振動締固め時

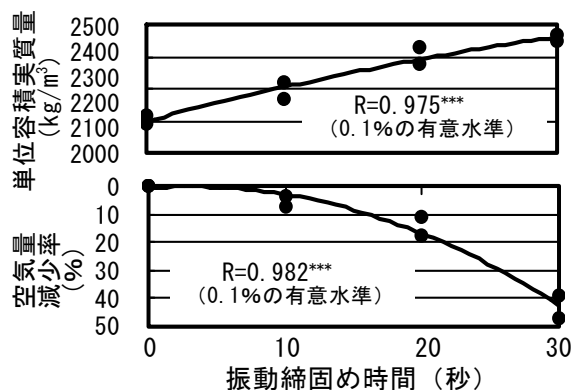


図-3 振動締固めに伴う単位容積質量と空気量減少率の変化

時間 30 秒が平均 1.7%となり、同様に 20 秒が平均 2.2%, 10 秒が平均 2.5%となり、振動締固め時間が長いほど顕著に減少した。高さ別の空気量ではこれといった特徴を見出せなかった。

また、気泡間隔係数は 178~217 μm の範囲にあって、耐凍害性を得るといわれている 250 μm 以下の中にすべてが入っている。コンクリートの凍結融解に対する耐久性は、気泡間隔係数が小さいので期待できると思われるが、振動締固めに伴う硬化後の空気量はフレッシュコンクリートのそれよりも減少するので製造工程で留意する必要がある。

(3) コアの圧縮強度と単位容積質量

コアの圧縮強度と単位容積質量を振動締固め時間および高さ別に図-4に示した。コアの圧縮強度は、すべての振動締固め時間において高さが下方になるほど高くなり、この傾向はその時間が長いほど強かった。また、単位容積質量

表-3 粗骨材分布特性、硬化コンクリート空気量および気泡間隔係数

| 振動締固め時間 (秒) | 切断面の高さ | 切断面の粗骨材分布の特性 | | | 硬化コンクリート | |
|-------------|--------|--------------|-------------|------------------------------|----------|--------------------------|
| | | 粗骨材の個数 (個) | 粗骨材分布割合 (%) | 粗骨材 1 個の面積 (mm^2) | 空気量 (%) | 気泡間隔係数 (μm) |
| 10 | 上 | 59 | 20.1 | 21.6 | 2.41 | 178 |
| | 中 | 75 | 26.4 | 28.4 | 1.83 | 189 |
| | 下 | 79 | 33.2 | 37.3 | 3.28 | 190 |
| 20 | 上 | 82 | 26.7 | 26.3 | 1.96 | 217 |
| | 中 | 84 | 27.7 | 23.4 | 2.77 | 197 |
| | 下 | 63 | 27.8 | 25.4 | 1.80 | 197 |
| 30 | 上 | 48 | 19.5 | 17.4 | 1.72 | 210 |
| | 中 | 65 | 23.6 | 19.8 | 2.05 | 182 |
| | 下 | 90 | 31.1 | 28.1 | 1.36 | 203 |

は振動締固め時間 10 秒と 20 秒では後者がやや大きいですが、それが 30 秒では下部ほど大きくなった。さらに、単位容積質量が大きくなるほど圧縮強度も有意に高くなる傾向があった ($p<0.05$)。

前述した粗骨材分布割合から、振動締固め時間が長いほど下層へ粗骨材が多めに沈降する傾向があったので、このことが、下部の方の圧縮強度や単位容積質量の増加に顕著に影響したものと見える。このように振動締固め時間は、コンクリート中の粗骨材の沈降に大きく関わり、下部ほど粗骨材の詰まりが良くなり、圧縮強度や単位容積質量を大きく発現させることが明らかとなった。

(4) 凍結融解に対する耐久性

150 サイクルの凍結融解試験の結果、耐久性指数 (DF) は浸漬なしが振動締固め時間の長短に関わらず 96.3~96.4, 水浸漬が 93~95, 3%塩水浸漬が 91~93 で、いずれも 90 以上を示した。3%塩水の DF を振動締固め時間別にみると 10, 20, 30 秒の順に 93.0, 92.5, 91.4 と徐々に小さくなる傾向があった。また、質量減少率は、振動締固め時間の長短に関わらず、浸漬なしが 1.0~1.2%, 水浸漬が 0.8~1.0%, 3%塩水浸漬が 1.1~1.2% で、いずれも小さかった。

以上のことから、本凍結融解試験は水中に浸漬したままでおこなったものではなく、穏やかな凍結融解負荷による試験のため凍結融解耐久性に極端な差異が生じるほどではなかった。ただ、表面の小さなスケーリングは 85 サイクル時点で 3%塩水浸漬の振動締固め 20 秒のものに、また 100 サイクル時点で水浸漬のすべてに発生した。板垣ら¹⁾の成果と同様に、3%塩水環境は供試体の表面劣化を促進しやすいことがいえる。また、供試体を 5 サイクルごとに 1 日間だけ溶液浸漬する際に製品表面を洗っているが、このときにわずかながら洗い落とされることもスケーリングを助長する一因と思われる。

(5) 表面剥離試験結果

表面剥離は 180 サイクル以降徐々に発生し、その個数は 300 サイクル終了時点で振動締固め

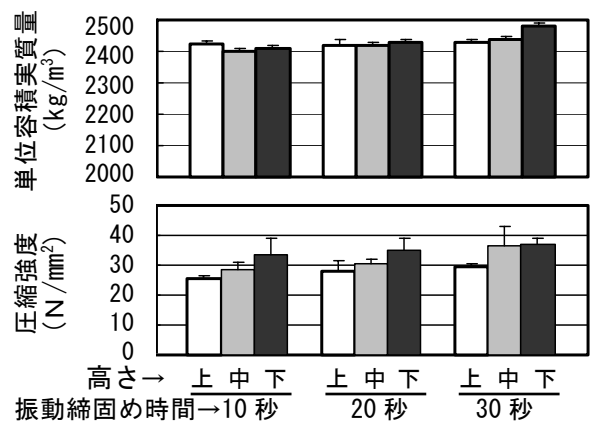


図-4 コアの圧縮強度と単位容積質量

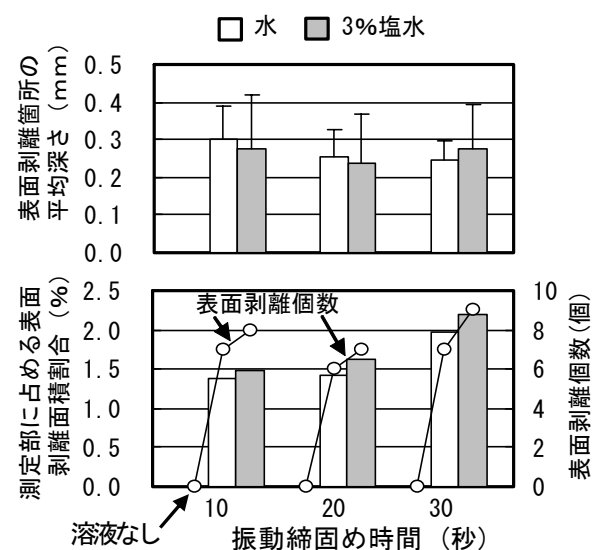


図-5 振動締固めに伴う表面剥離の個数、測定部に占める面積割合および平均深さ

時間 10, 20, 30 秒の順に水浸漬が 7, 6, 7 個、3%塩水浸漬が 8, 7, 9 個で、溶液がないと表面剥離は生じなかった。また、1 個の表面剥離面積は最小 5.0mm², 最大 36.0mm² の範囲にあった。

測定部に占める表面剥離面積の割合を図-5 に示す。条件別にみた最大割合は振動締固め時間 30 秒で 3%塩水の 2.2%であった。この剥離面積割合は、振動締固め時間が長いほど大きくなり ($p<0.05$), 3%塩水の方が水よりもやや多く発生した。さらに、剥離箇所の平均深さは、0.1mm 前後のばらつきがあるものの 0.24~0.30mm にあり、極めて表層に発生していることが判明した。その平均深さは、振動締固め時間が長いほど浅くなる傾向が認められた。

また、この試験における表面剥離現象は、現場で見られる表面剥離現象⁶⁾と同様のものであった。さらに、3%塩水環境では水よりも環境温度がやや早くかつ低く下がるために表面剥離がやや多めに発生したが、最低温度 $-3.4\sim-3.9^{\circ}\text{C}$ の凍結融解条件では顕著に発生しなかったことが考えられる。

このように振動締固め時間の長短は、製品の内部性状（単位容積質量や強度）と表面剥離に影響していることが明らかとなったが、これら両者の関係は明らかにできなかった。ただ、製造時とは逆に反転して現地に設置される製品の表層では、ブリーディング発生に伴って生ずる粗骨材界面（特に下面）の空隙等に水が浸入し凍結することによって表面剥離が発生すると想定されるので、今後、コンクリート製品の内部性状と表面剥離の関係や表層部での表面剥離機構を解明する必要がある。また、振動締固め時間の影響をみるために60秒以上の場合についても検討すべきであるほか、表面剥離を防止するための技術的検討も必要である。

4. まとめ

本研究では、振動締固め時間の違いがコンクリート製品の内部性状と表面剥離にどのように影響するかを把握するために実験的に検討した。本実験の範囲内で得られた結果をまとめると、以下ようになる。

- (1) 振幅 2mm 前後のテーブル振動機で振動締固めを 10, 20, 30 秒間おこなった結果、フレッシュコンクリートの単位容積質量は時間とともに増加したが、当初 5.5%の空気量は徐々に減少し 30 秒後には 45%も減少した。
- (2) 縦詰め試験体（高さ 425mm）で上・中・下に区分した切断面に表れた粗骨材は下部ほど多く分布する傾向が強かったが、振動締固め時間との関連性はよく分からなかった。また、コアの単位容積質量と圧縮強度はいずれも下部ほど大きい傾向を示し、これは

振動締固め時間が長いほど顕著であった。

- (3) 最低温度が $-3.4\sim-3.9^{\circ}\text{C}$ で凍結融解を 300 サイクル繰り返した製品表面における表面剥離は最大 2.2%生じたが、振動締固め時間が長いほど多くなる傾向があった。この剥離は3%塩水の方が水よりもやや多く発生したが、溶液がないと発生しなかった。その剥離深さは 0.24~0.30mm で、ごく表層に発現した。この表面剥離現象は現場で見られるものと同様のものであった。

謝 辞 本研究の試験体の製造では（株）青森前田コンクリート工業の職員のご援助を賜り、また、実験および成果の取りまとめでは北里大学の米川智子さんら専攻生多数のご協力をいただいた。ここに記して、心から感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 板垣洋房, 三浦 尚: 凍結防止剤の影響を受けたコンクリートの劣化に関する実験的検討, セメント・コンクリート論文集, No.47, pp.456-461, 1993.2
- 2) コンクリート委員会凍結防止剤 WG: 我が国のコンクリート構造物における凍結防止剤の影響, 土木学会論文集, No.490, V-23, pp.15-19, 1994.5
- 3) 三浦 尚: 融雪剤による鉄筋コンクリート構造物の劣化, コンクリート工学, Vol.38, No.6, pp.3-8, 2000.6
- 4) 日本コンクリート工学協会: 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.1-129, 1999.11
- 5) Hosokawa, Y.: Properties of concrete product using recycled coarse aggregate from waste flume, Trans. of JSIDRE, No.227, pp.49-56, Oct. 2003.
- 6) 庄谷征美, 月永洋一: 東北地方のコンクリート構造物の凍害について, コンクリート工学, Vol.42, No.12, pp.3-8, 2004.12