

# 東北地方におけるコンクリート構造物の凍害の実状と 防止に関する調査研究

月 永 洋 一\*・庄 谷 征 美\*\*・阿 波 稔\*\*\*

## Preventions and Actual state of Frost Damages of Concrete Structure in Tohoku Districts

Yoichi TSUKINAGA\*, Masami SHOYA\*\* and Minoru ABA\*\*\*

### Abstract

In Tohoku district, the scaling deterioration was detected most seriously recognized among frost damage of concrete. Mechanisms of frost damage have been explained by several researchers, in this study, the deterioration mechanisms based on the pore structure of the aggregate and the thermal shock by the endoergic reaction of chloride, were introduced. Specific testing methods to assess the strength and permeability of concrete were proposed, and their methods were also examined to evaluate the degree and the depth of deterioration caused by frost damage. Measures for the prevention of the frost damage were proposed from the aspect of the design of structure, the mixing of concrete and the execution of work.

**Keywords:** Concrete, Frost damage, Scaling, Mechanism of deterioration, Diagnosis of deterioration, Maintenance

### 1. はじめに

寒冷地のコンクリート構造物に生ずる特有な劣化として、古くから凍害が知られており、これまでに多くの研究が行われてきた。しかし、凍害による劣化事例の報告はあとを絶たず、最近では、凍結防止剤の影響によって凍害が促進されるスケーリング劣化も問題化している。

このような背景から、本研究では、東北地方におけるコンクリート構造物の凍害の実態を調査・把握するとともに、凍害発生の原因・機構、防止・抑制策、および補修方法などを検討し、コンクリート構造物の凍害に関する耐久性向上技術および維持保全技術を体系的に考察すること

を目的とした。

### 2. 東北地方におけるコンクリート構造物の凍害発生状況

表1は東北地方におけるコンクリート構造物

表1 東北地方で観察される凍害による劣化症状

劣化症状	土木構造物 (n=249)	建築構造物 (n=79)
Dひび割れ	15%	19%
地図状ひび割れ	9%	19%
長手方向ひび割れ	4%	10%
スケーリング	35%	22%
剝落・崩壊	18%	8%
浮き	6%	18%
ポップアウト	7%	5%

平成15年12月19日受理

\* 建築工学科・教授

\*\* 環境建設工学科・教授

\*\*\* 環境建設工学科・講師

の凍害による劣化症状を示したもので、アンケート調査によって得られた結果である。調査は、東北地方を管轄する旧建設省と日本道路公団、および東北電力、東北地方の各県市町村を対象とした計409機関であり、これらの出先機関を含めた調査対象件数は計1,130機関となる。回答率は各機関の出先機関を含め、旧建設省、道路公団、東北電力においては100%であるが、県63%、市26%、町・村17%と市町村における回答率が低い結果となっている。

表1からは、東北地方において凍害による劣化症状のすべてが顕在化していることが分かるが、注目すべき点は、ひび割れや剝落・崩壊などよりもスケーリングが最も多く、特に土木構造物に顕著であるという点である。

これまで、凍害による劣化症状は、主に組織の膨張によるひび割れや剝落として顕在化していた。これは、組織の膨張による凍害がより進行した段階でコンクリートを完全に崩壊し、表層部の損傷にとどまるスケーリングなどよりは構造物の機能損傷としてより深刻であることから、膨張による凍害に関心が集中していたことが一因として考えられる。しかし、表1が示すように、組織の膨張による凍害は減少しており、膨張による圧力を緩和させることが可能なAEコンクリートの普及が効果をもたらした結果と考えられる。

一方、表層劣化であるスケーリングは、塩化物の作用によって著しく促進され、最近において凍結防止剤の散布量が増加したことから、道路に付帯するコンクリートなどにスケーリングの発生が急増し、これまで目立たなかった凍害の形態として注目される。表1にみられるように、スケーリングは土木構造物に多いという点は、まさしく凍結防止剤の影響が大きいことを示唆している。

また、アンケート調査では、コンクリート製品にスケーリングが多く観察され、その原因として、「製品の品質管理に起因した品質のばらつき」および「製品の美観を重視した過度な振動

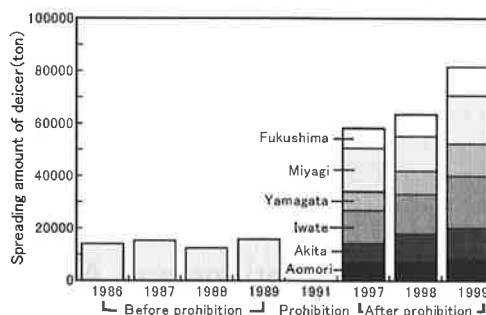


図1 東北地方における凍結防止剤の散布量

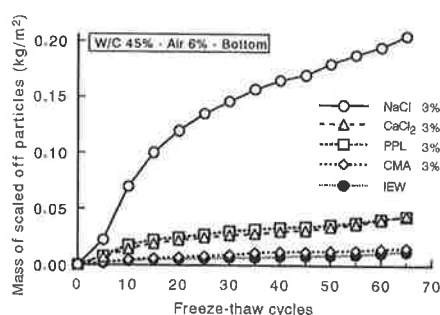


図2 塩化物の種類によるスケーリング量

締固め」などの意見が多く、技術者から指摘され、その実態や実験的な検討が必要である。

図1は、東北地方における凍結防止剤の散布量を示したもので、前述の調査の一部結果である。凍結防止剤の散布量は、1991年のスパイクタイヤ使用規制により著しく増加しており、東北地方全体での年間散布量は、アンケート調査の回答率や民間での散布量を考慮すると、少なくとも10万トン以上はあるものと推定される。また、凍結防止剤の種類としてNaClの散布比率が83~87%と高いことも明らかとなっている。塩化物が作用したコンクリートの凍害によるスケーリングは、図2に示すように、CaCl<sub>2</sub>などのほかの塩化物よりNaClが作用したときに最も著しくなり、NaClを主成分とする凍結防止剤の散布に起因するコンクリートのスケーリング対策を講じる必要がある。

### 3. 凍害の発生原因・機構の考察

コンクリートの凍害の発生機構については水圧説と浸透圧説で説明されることが多い。しかし、この2つの説だけでは説明しきれない劣化形態がみられる場合があり、水圧説と浸透圧説を基本とするいくつかの拡大解釈が提案されている。

本研究では、新たな機構として骨材の細孔構造に着目した劣化について考察を加えた。図3は、骨材の品質がJIS規格値を満足し、吸水率と密度が同等な3種類の骨材を用いた時の骨材自身の凍結融解抵抗性を示したものである。また、図4は骨材の最大寸法によるコンクリート

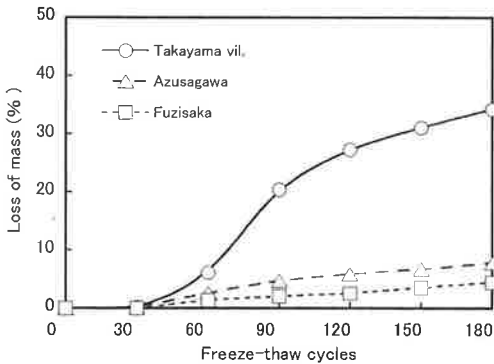


図3 骨材の種類による骨材の凍結融解抵抗性 (JIS規格値を満足し、吸水率と密度が同等の骨材3種)

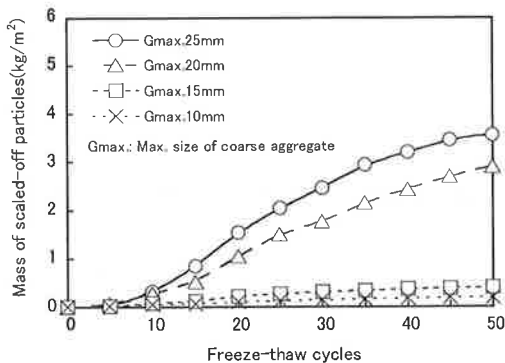


図4 骨材の最大寸法によるスケールング量

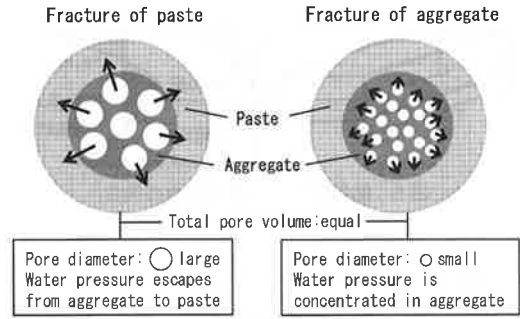


図5 骨材の細孔構造による劣化機構模式図

のスケールング量を示したものである。図にみられるように、骨材の品質がJIS規格値を満足し、吸水率と密度が同等であっても耐凍害性が劣る場合があり、また、骨材の最大寸法が大きくなると耐凍害性が低下する場合があることが分かる。

この理由は骨材の細孔構造の違いから説明することが可能である。図5は、骨材の細孔構造による劣化機構を模式的に示したもので、骨材の吸水率や密度が同等であっても、換言すれば骨材の細孔容積が同等であっても、細孔径が大きい場合と小さい場合があり、細孔径が大きい場合はペースト部が破壊され、細孔径が小さい場合は骨材自身が破壊されることを示している。細孔径が大きい場合は、凍結によって押し出される未凍結水がペースト部まで容易に移動することができ、ペースト部はその移動圧で破壊されるが、ペースト部に空気が連行されていれば、移動に伴う圧力は緩和されることになる。細孔径が小さい場合は、細孔で生じる毛管張力が骨材を水で飽和しやすくさせ、その結果、凍結水が多くなるため大きな圧力を生じるが、この圧力は細孔が水で飽和されていると解放の場を失って、圧力増加の限界に達し骨材自身が破壊されることになる。

この考察は、骨材の吸水率が同程度であっても、その細孔構造によって凍結による損傷のメカニズムと程度が異なることを説明し、骨材の細孔構造特性に着目した耐凍害性の評価が重要

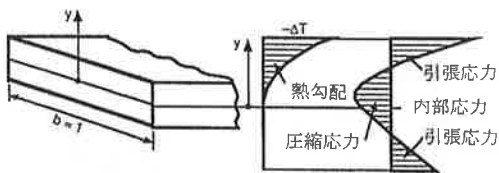


図6 熱勾配による温度応力の発生

であることを示している。

このほか、凍結融解作用と塩化物の作用が複合したときに生じるコンクリートのスケーリング発生機構についても考察を加えた。凍結防止剤などの塩化物がコンクリート表面に形成された薄氷面に散布されると、コンクリート表面の温度は急速に低下するが、図6に示すように、表層の急激な温度低下により発生した応力がコンクリートの引張強度を上回ると、微細ひび割れを生じる可能性があり、これがスケーリングを助長する原因の一つになると考えられる。

図7は、コンクリートの表面に氷を形成させた後に塩化物を  $3\text{ kg/m}^2$  散布した場合の断面内の温度変化を示したものである。散布直後の温度変化は、NaCl の場合は低下し、CaCl<sub>2</sub> の場

合は上昇するという異なる傾向を示しているが、散布直後の数分間で生じるごく表層の急激な温度変化は、コンクリートに温度応力を発生させることを示している。このような急激な温度変化は、NaCl の場合、水溶時には  $-20.7\text{ cal/g}$  の吸熱反応を示して周辺から熱を吸収するため周囲の物体の温度は低下するが、CaCl<sub>2</sub> の場合、水溶時には  $+68.0\text{ cal/g}$  の発熱反応を示して周囲の物体に熱を供給することによって考えられる。

#### 4. 凍害の劣化診断手法の検討

筆者らは、これまでの研究において、コンクリートの劣化度を現場で簡便に評価するための試験法を開発してきた。試験法は、図8、図9および図10に示すように、コンクリートの品質を代表する強度を評価するための改良プルオフ法、およびコンクリートへの水分や塩化物など外的劣化因子の透過性の程度を評価する簡易透気試験、簡易吸水試験、簡易透水試験の計4試験である。

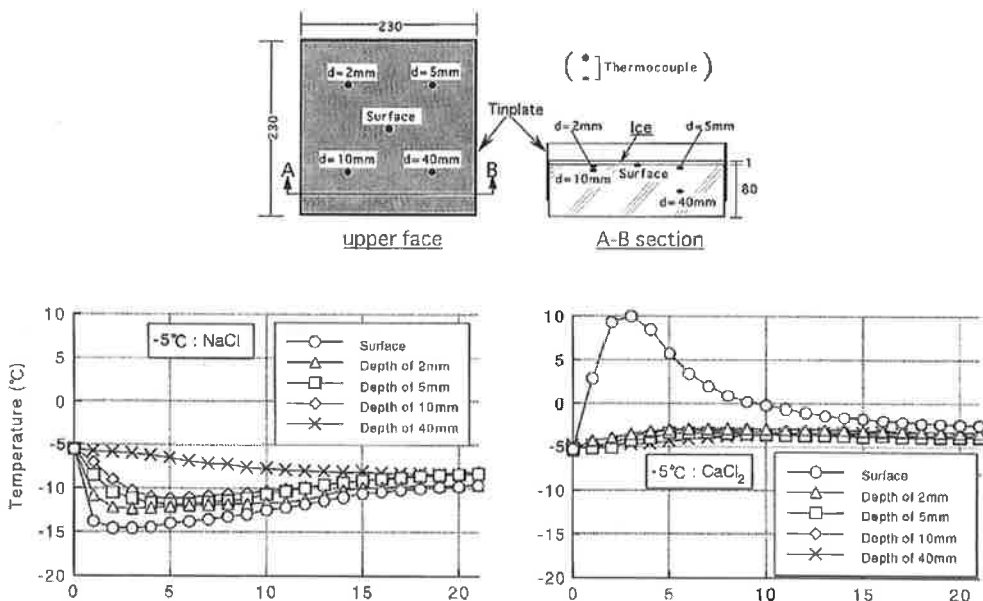


図7 塩化物散布後のコンクリート表層の温度変化

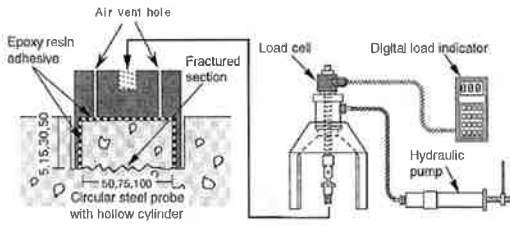


図8 プルオ改良法の概要

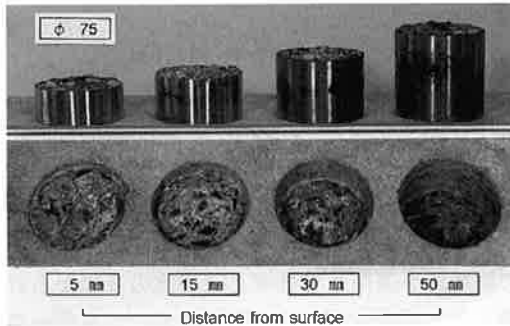


写真1 改良プルオフ法によるコンクリート表面の引張破断状況

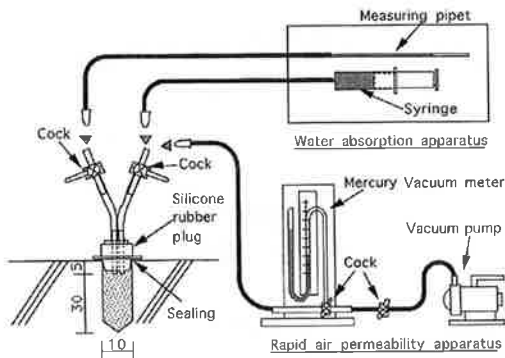


図9 簡易透気試験および簡易吸水試験の概要

図11は、凍結融解サイクル数とプルオフ強度の関係を示したもので、凍結融解サイクル数の増加に伴い、プルオフ強度は低下し、表面からの深さ5mmの位置で最も低下が大きいことが示されている。両者の関係は、指数関数的に表すことができ、凍結融解作用による強度低下を深さごとに評価することが可能であることが分かる。

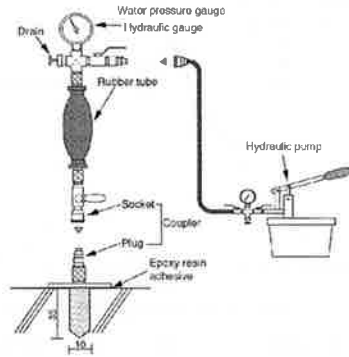


図10 簡易透水試験の概要

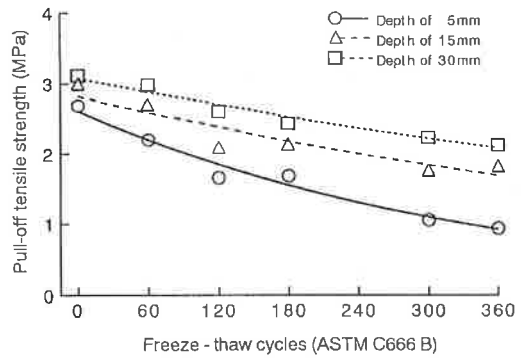


図11 凍結融解サイクル数とプルオフ強度の関係

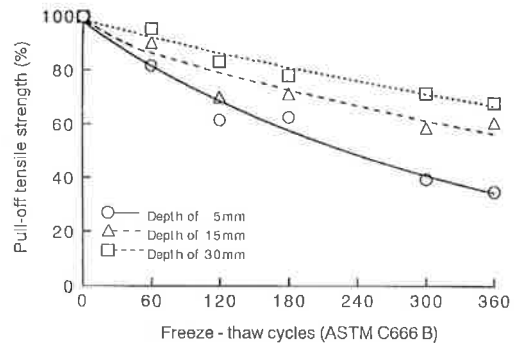


図12 凍結融解サイクル数とプルオフ強度低下率の関係

図14は、凍結融解50サイクル時の簡易透気速度を示したもので、簡易透気速度は、封緘養生 (sealed curing) の場合でイオン交換水 (IEW) を用いたときに増大し、また、塩化物溶

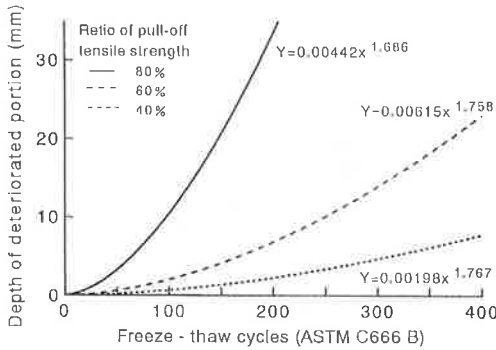


図13 凍結融解サイクル数とプルオフ強度から推定される劣化深さの関係

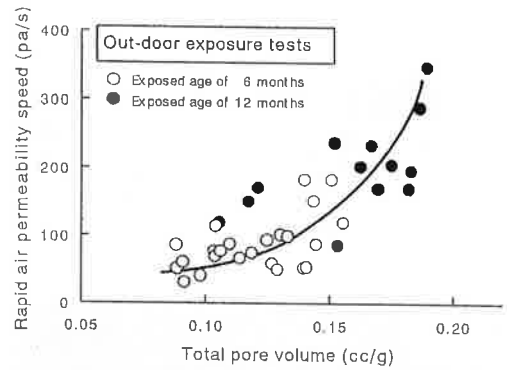


図15 簡易透気速度と総細孔容積の関係

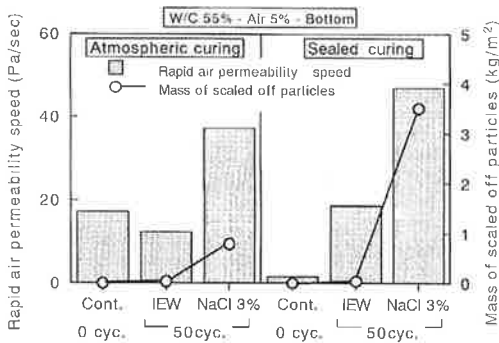


図14 凍結融解50サイクル時の簡易透気速度

液 (NaCl 3%) を用いたときは著しい増大が認められる。これは、凍結融解作用によってコンクリート組織が破壊され、脆弱化したことを示すものである。組織の破壊・脆弱化の程度はコンクリートの総細孔容積の変化から判断することが可能であり、図15に示すように、簡易透気

速度と総細孔容積との関係から、間接的に組織の破壊・脆弱化を評価しようとするものである。

コンクリートの凍害による劣化度は、これらの試験法を適用して強度と透過性の2面から評価できる可能性があり、現在においてもデータを収集しているところであり、凍害による劣化診断法の確立を目指している。

### 5. 凍害の補修方法の検討

凍害はコンクリート表層部から内部に向かって徐々に脆弱化が進行する現象である。したがって、図16に示すように表面からの脆弱化の深さによって補修方法は異なる。表層部の脆弱化が著しくない場合は、凍害発生の一因となる水の浸入を防止したり、表層部の強度を向上させたりするために塗装を施す表面塗布工法が採用される。脆弱化が著しい場合は、脆弱化した

凍害深さが小さい	鉄筋腐食が始まる	スケーリングやポップアウトが多く生じている	鉄筋の腐食に伴う断面欠損が生じている
<p>表面被覆</p>	<p>表面被覆 注入</p>	<p>劣化コンクリートの除去 増打ち</p>	<p>補強筋 劣化コンクリートの除去</p>
表面被覆し、水分の浸入を防ぐ	ひびの補修と表面被覆を行う	浮きを生じたコンクリートの除去と増打ち	劣化コンクリートの除去と構造補強

図16 凍害によるコンクリートの補修工法

部分をはつり取り、その部分に新しいコンクリートを打設する断面修復工法が採用される。しかし、脆弱化の深さは、表層部をはつる時のはつり力などから判定されるなど、極めて定性的に決定されることが多く、現場での経験や感に頼るところが大きい。

前節で検討した改良プルーフ法は表面からの任意深さ位置の強度評価が可能な方法であることから、断面修復工法の採用にあたっては、改良プルーフ法を採用し、凍害による表層部の脆弱化深さを強度低下から評価して、はつり深さを決定することができる。前掲の図11は、凍結融解の繰返しによってプルーフ強度が低下し、表面からの深さが浅いほど強度低下が大きくなること示したものであり、図12は、0サイクル時のプルーフ強度を100%とした時のプルーフ強度変化率と凍結融解サイクル数の関係を示したものである。図13は、図12に示した関係より、プルーフ強度の変化率が80%、60%、40%と低下するときの劣化深さを凍結融解サイクル数との関係から推定した図である。劣化深さと凍結融解サイクル数の関係は増殖型のべき乗式によって表示できることが認められ、所定の凍結融解サイクル数における劣化深さをプルーフ強度から推定できることを示している。

なお、前節で検討した簡易透過性試験については、凍害による透過性の低下を評価できる試験であることが確認されたが、コンクリートの透過性と凍害による劣化程度との関係を定量的に示す必要があり、また、透過性試験はコンクリートの含水状態にも大きく影響されることが確認されたことから、今後はこれらの点について検討を加える必要がある。

## 6. 凍害防止・抑制対策の提案

コンクリートの凍害を防止・抑制するためには、設計・調合・施工の各面から対策を講じることが必要となる。本研究では、既往の文献および本研究成果を総括して凍害の防止・抑制の

ための基本的対策について考察した。

設計については、凍害発生の外的原因となる水の供給を断つことが基本的対策となり、コンクリート部分に水が停滞しない設計にすることや防水・排水処理を十分考慮した設計を必要とする。とくに部材断面が薄い場合では、部材の冷却される速度が増し凍害を生じやすくなることから、水処理は重要となる。また、海塩や凍結防止剤などの塩化物が作用すると凍害は促進されるため、防水処理と同時に塩化物を浸透させないための表面処理を必要とする。

調合については、建築学会および土木学会から耐凍害性を確保するための基準が示されている。しかし、海塩や凍結防止剤などの塩化物が複合して作用するときの耐凍害性を確保する調合については明示されていない。本研究では、塩

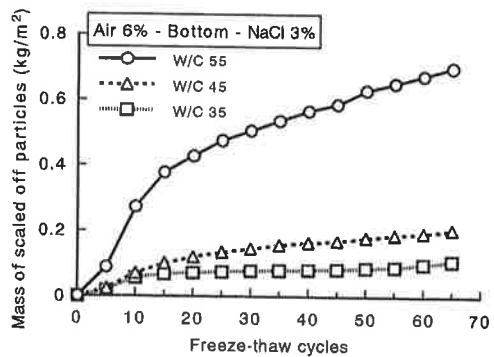


図17 水セメント比によるスケーリング量

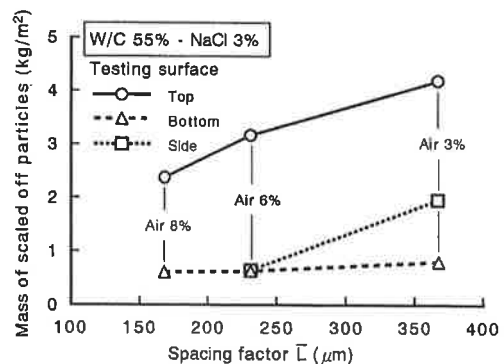


図18 空気量によるスケーリング量

化物が作用するコンクリートの耐凍害性を確保する基本調査として、図17および図18に示すように、水セメント比は45%以下とし、空気量は6%とすべきであることが確認された。

また、建築学会および土木学会とも、耐凍害性を確保する所要の性能の確認は、コンクリート供試体の相対動弾性係数を指標とすることが示されている。しかし、供試体と実際の構造物に打設されたコンクリートは、打設方法、締固め条件、ブリーディングなどに起因する非均質性などの影響によって品質は異なり、供試体の耐凍害性から実構造物に打設されたコンクリートの耐凍害性を精度よく評価することは困難な場合がある。本研究では、耐凍害性を確保する性能の確認を、「4. 凍害の劣化診断手法の検討」で示した改良プルーフ法および簡易透過性試験を実構造物に適用して、強度と透過性の2面から性能評価を行うことを提案するものである。両試験はコンクリートの強度と透過性を精度よく評価できるが、透過性についてはコンクリートの性能値として位置づけるための検討が必要であり、今後のデータの集積によるところが大きい。

施工については、これまでに指摘されている事項以外に、振動締固めに対して十分に考慮する必要があることが指摘できる。図19は、振動締固め時間によるスケーリング量を示したもので、締固め時間が長くなるほどスケーリング量が増加することを示している。コンクリートの耐凍害性を確保するためには、凍結膨張を緩和するための連行空気を必要とするが、調査段階で所要の空気量を確保しても、施工段階で振動締固め時間を長くすると連行空気は消失してしまい、耐凍害性が低下する。これは、発注者がコンクリート表面の美観を要求するため、施工者が振動時間を長くして気泡消失による表面美観を確保しようとするなど原因があるもので、耐凍害性の面からは、連行空気が消失するような振動締固めは避けるべきである。

このほか、コンクリートの水和反応が十分進

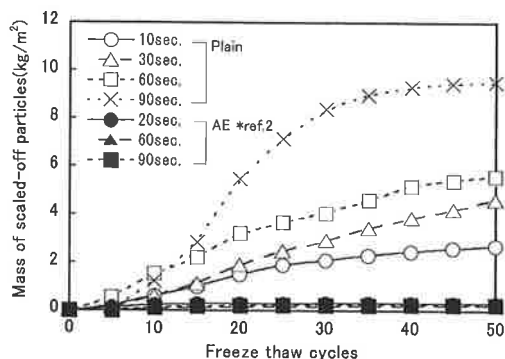


図19 振動締固め時間によるスケーリング量

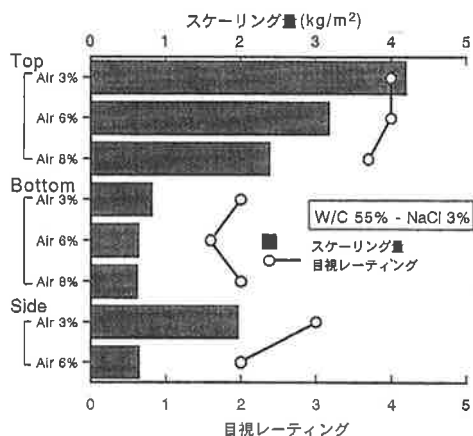


図20 試験面によるスケーリング量

行した後では、コンクリートは乾燥していると耐凍害性は確保されること、ブリーディングに起因したコンクリートの非均質性に注意すること、表面コーティングや透水性型枠工法などの表面処理は有効であることなどが指摘できる。図20は、コンクリートの試験面によるスケーリング量を示したものであり、コンクリート部材の底面、側面、上面の順にスケーリング量が多くなることを示している。これはコンクリート断面の上部ほど品質が低下するというコンクリートの非均質性が影響した結果を示すもので、非均質性を小さくするような調査と締固めに配慮することが必要である。



## 7. むすび

本研究では、コンクリートの凍害を対象とした耐久性と維持保全に関する技術向上を目的とし、種々の検討を加えた。コンクリートの凍害に関しては未検討な部分が多く、今後も多くの研究の余地を残しているが、本研究では凍害に関する課題を体系的に整理し、各課題についてある程度の考察ができたものと考えている。

## 謝 辞

本研究は本学の平成12年度～平成14年度特別研究助成（プロジェクト研究）によって遂行されたものであり、関係各位に対して深く謝意を表する次第です。

## 参考文献

- 1) 庄谷征美, 月永洋一, 阿波 稔, 原 忠勝: 塩化物の影響を受けるコンクリートのスケーリング発生過程における歪み挙動に関する2, 3の検討, セメント・コンクリート論文集, No. 54, pp. 370-375, 2001.2
- 2) 原 忠勝, 子田康弘, 板橋洋房, 月永洋一: 凍結防止剤によるコンクリートのスケーリング劣化の評価に関する基礎的検討, セメント・コンクリート論文集, No. 54, pp. 398-403, 2001.2
- 3) M. ABA, M. SHOYA, Y. TSUKINAGA and S. SUGITA: Frost Susceptibility of Concrete Containing Low-Quality Coarse Aggregates, Transactions of the JCI, Vol. 22, pp. 203-210, 2001.2
- 4) 月永洋一, 庄谷征美, 石飛征造, 王 偉: 凍結防止剤の影響を受けるコンクリート製品のスケーリング抵抗性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 55, pp. 438-443, 2002.2
- 5) 徳橋一樹, 阿波 稔, 庄谷征美: スラグ細骨材を用いた粉体系高流動コンクリートの気泡組織と凍結融解抵抗性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 55, pp. 507-512, 2002.2
- 6) 阿波 稔, 庄谷征美, 月永洋一: 簡易引張強度試験によるコンクリート構造物の凍害劣化度評価, 土木学会水辺のコンクリート構造物に関するシンポジウム論文集, コンクリート技術シリーズ45, pp. II-55-60, 2002.7
- 7) 阿波 稔, 庄谷征美, 月永洋一: 細孔構造特性に着目した粗骨材の品質とコンクリートの凍結融解抵抗性, 土木学会コンクリートの耐久性データベースフォーマットに関するシンポジウム論文集, コンクリート技術シリーズ46, pp. 41-46, 2002.12
- 8) 月永洋一, 庄谷征美, 三町令子, 王 偉: 凍結防止剤の影響を受けるコンクリート製品のスケーリング抵抗性に及ぼす製造条件の影響, セメント・コンクリート論文集, No.56, pp. 431-436, 2003.2
- 9) M. SHOYA, M. ABA and Y. TSUKINAGA: Frost Resistance and Air Void System of Self-Compacting Concrete with Slag Fine Aggregates, American Concrete Institute Special Publication, 印刷中, 2003.6
- 10) 月永洋一, 庄谷征美, 阿波 稔, 王 偉: コンクリート製品の製造工法によるスケーリング抵抗性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 57, 印刷中, 2004.2