

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月15日現在

機関番号：31103

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20560434

研究課題名（和文）寒冷地コンクリート構造物の劣化過程（進展期・加速期・劣化期）と構造性能の評価

研究課題名（英文）Evaluation of deterioration progress (propagation stage, acceleration stage, deterioration stage) and load bearing capacity of RC member in cold climate

研究代表者

阿波 稔（ABA MINORU）

八戸工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10295959

研究成果の概要（和文）：本研究は、寒冷地における鉄筋コンクリート（以下、RC）部材を対象とし、その劣化過程（進展期・加速期・劣化期）と構造性能との関係性を評価するものである。研究の結果、凍結融解作用はコンクリート中への塩化物イオンの侵入速度を増大させることを確認した。また、曲げを受ける RC はりにおいて、凍結融解作用による引張側コンクリートの劣化および鉄筋の腐食は、耐荷力と剛性を低下させることを明らかにした。そして、凍結融解作用と鉄筋腐食の複合劣化を受けた RC はりの曲げ耐荷力の低下曲線を示した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to evaluate the deterioration progress (propagation stage, acceleration stage, deterioration stage) and the load bearing capacity of RC member in cold climate. In this study, it is confirmed that the influence of freezing and thawing action on chloride penetration into concrete. The degradation curve of flexural capacity for RC member under composite deterioration as frost attack and steel corrosion induced by chloride attack is indicated with experimental studies.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート

## 1. 研究開始当初の背景

寒冷地におけるコンクリート構造物は凍結融解作用により、特有の凍害劣化を受けやすい環境にある。また、近年、凍結防止剤などの塩化物が存在する環境下では凍結融解との複合作用により劣化が促進され、表層劣化（スケールング）が顕在化してきている。さ

らに劣化が進行した段階では、外部劣化因子からの保護層としてのかぶり（表層部）コンクリートの機能が完全に低下し、内部鉄筋の腐食による複合劣化が多数報告されている。

一方、土木学会コンクリート標準示方書「維持管理編」が新たに制定され、構造物の維持管理の原則や具体的な管理手順が示された。

一般に、凍害劣化の過程は、凍結融解作用により凍害が発生するまでの潜伏期、コンクリート表面の劣化は進行するが鋼材腐食まで至らない進展期、表層部の劣化が大きくなり鋼材腐食が増大する加速期、凍害深さが鋼材位置より大きくなり安全性に影響を及ぼす劣化期に区分される(図-1)。しかし、「維持管理編」において凍害の劣化過程と部材性能の低下を検討するためのガイドラインとなる「構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下」では、半定量的(概念的)な記述となっており、構造物に対する適切な残存耐力の算定プロセスや合理的な対策については示されていない。そのような現状のもと、凍結融解作用による表層劣化と、それに伴う鉄筋腐食を段階的に生じたコンクリート構造物の性能低下について、より定量的な知見の蓄積が望まれている。

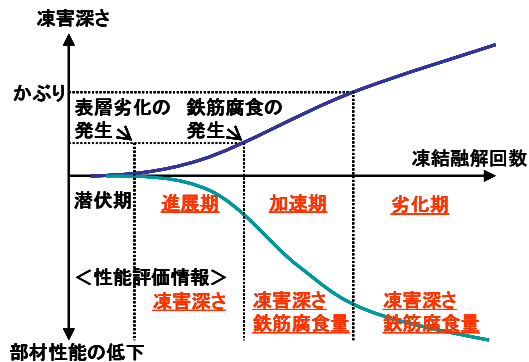


図-1 凍害劣化過程の概念図

## 2. 研究の目的

本研究は、寒冷地における鉄筋コンクリート(以下、RC)構造物を対象とし、その劣化過程(進展期、加速期、劣化期)の材料劣化レベルと構造性能との関係を明らかにするものである。

具体的な研究の目的を以下に示す。

- (1) 凍結融解環境下におけるコンクリート中の塩化物イオンの移動抵抗性を検討する。
- (2) 寒冷地におけるコンクリート構造物の劣化過程(進展期・加速期・劣化期)と構造性能を評価する。

## 3. 研究の方法

(1) 凍結融解環境下におけるコンクリート中の塩化物イオンの移動抵抗性

①凍結融解環境：凍結融解作用(温度 20℃と -20℃の繰返し)と温度 20℃一定の条件下においてコンクリート中への塩化物イオン浸透試験を実施した。

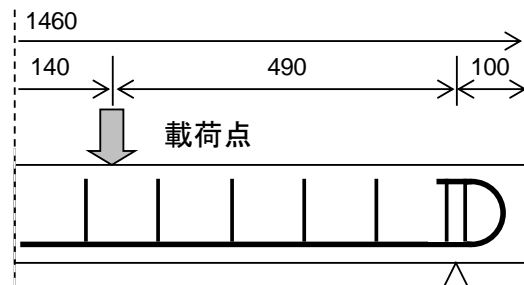
②試験体：コンクリートの水セメント比は、45%、55%および 65%の 3 水準とした。試験開始材齢は、とした。供試体寸法は、100×100×100mm の要素供試体とし、試験面を一面

(底面)とした。なお、使用した試験溶液は NaCl 3%水溶液である。

③塩化物イオン濃度の測定：コンクリート中の塩化物イオン濃度は、JCI-SC5「硬化コンクリートに含まれる全塩分の簡易分析法」に従って測定した。そして、表面の塩化物イオン濃度および見掛けの塩化物イオン拡散係数を算出した。

(2) 寒冷地におけるコンクリート構造物の劣化過程(進展期・加速期・劣化期)と構造性能

①RC 供試体：実験に用いる RC 供試体の諸元(形状寸法)は、現在、土木学会コンクリート委員会「材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能研究小委員会」で考案されているベンチマークテストと同一とした(図-2)。なお、コンクリートの設計圧縮強度は(W/C:0.60)とし、AE 剤は使用していない。



断面寸法: 140×80mm, かぶり: 30mm  
引張鉄筋: 1本×D13-SD345  
スターラップ: D6-SD295A@100mm

図-2 RC 供試体の概要(寸法: mm)

②凍結融解条件: RC 供試体を大型低温室内に設置し、ASTM C 672 に準じた温度サイクルで凍結融解を実施する。低温室内では引張鉄筋側の上縁(上面)に、水分を供給するための堤を設置した。そして、引張鉄筋位置のかぶりコンクリートを劣化させた。

③引張鉄筋位置のかぶりコンクリートのスケール量が約 1kg/m<sup>3</sup>および約 10kg/m<sup>3</sup>に達した時点で曲げ荷重試験を実施した。

④引張鉄筋位置で凍害の劣化程度(スケール)の異なる RC 供試体を作成した。そして、RC 供試体を NaCl3%水溶液の中に浸漬させ、電食により引張鉄筋の腐食量を制御した劣化を生じさせた。

⑤所定の劣化レベル(表-2)に達した時点で曲げ荷重試験を実施した。

表-2 材料劣化レベル

劣化項目	劣化レベル
凍害(スケール量)	0 kg/m <sup>3</sup> , 1kg/m <sup>3</sup> , 10kg/m <sup>3</sup>
塩害(鉄筋腐食量)	0%, 10%, 30%

#### 4. 研究成果

(1) 凍結融解環境下におけるコンクリート中の塩化物イオンの移動抵抗性

①凍結融解作用を受けるコンクリート表層部の全塩化物イオン濃度は、温度 20℃一定条件下におけるそれと比較して、高い値を示す傾向にあることが分かった(図-3)。これより、凍結融解作用を受けるコンクリート中への塩化物イオンの移動現象は、濃度勾配による拡散に加えて、溶媒の移動も考慮する必要があることを明らかにした。

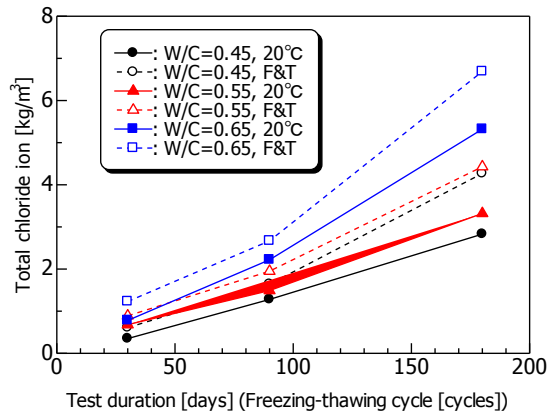


図-3 試験期間と全塩化物イオン濃度（表面からの深さ 10~20mm）

②凍結融解作用を受けた試験体および温度 20℃一定の試験体ともに、コンクリート表面の塩化物イオン濃度には大きな差は認められなかった。しかし、凍結融解作用を受けた試験体の見掛けの塩化物イオン拡散係数は、水セメント比が高いものほど、増加する傾向にあった(図-4)。これは、凍結融解環境下におけるコンクリート中での塩化物イオンの移動は、凍結水量の増加に起因した未凍結水の移動や塩化物イオンの濃縮の影響を受けることを示唆するものである。

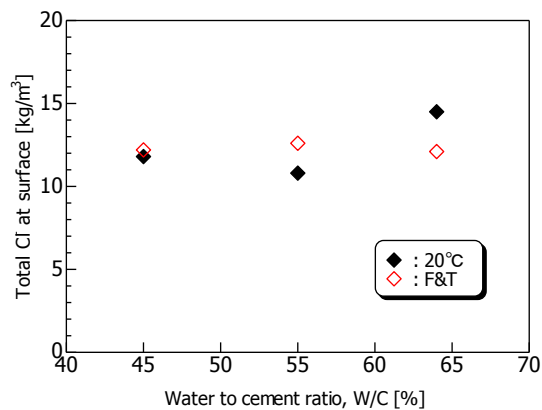


図-4 表面の塩化物イオン濃度と W/C

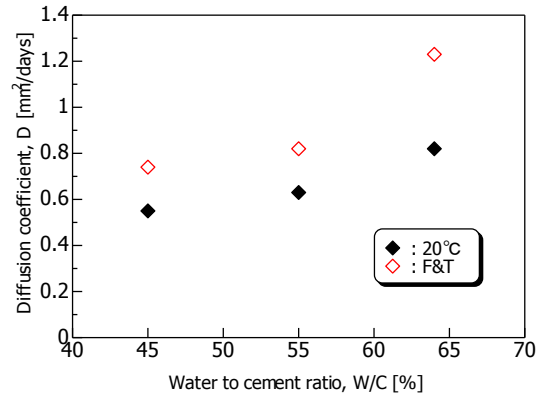


図-5 見掛けの塩化物イオン拡散係数と W/C

③材齢初期に乾燥を受けた表層部コンクリート、さらに表面含浸材を使用した表層部コンクリートの凍結融解環境下における塩化物イオンの移動現象について考察を加えた。

(2) 寒冷地におけるコンクリート構造物の劣化過程（進展期・加速期・劣化期）と構造性能を評価する。

①鉄筋腐食（電食）の有無にかかわらず、引張側におけるスケーリング量の増加に伴い、最大荷重が低下することが確認された(図-6)。電食を実施していないものにおいて、スケーリングが 1kg/m² 程度では約 10%、10kg/m² 程度以上で約 30~50%程度最大荷重が低下することが確認された。

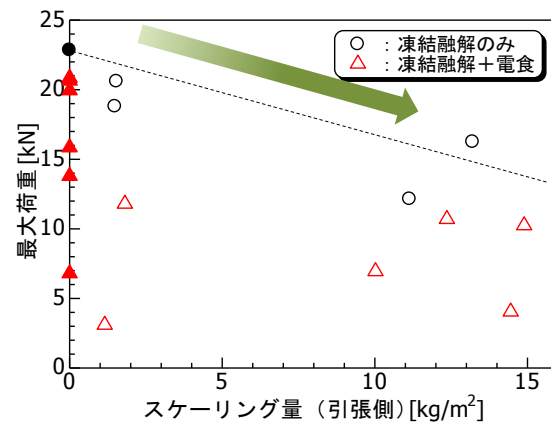


図-6 最大荷重とスケーリング量

②スケーリング量の違いによらず、腐食減少率の増加に伴い、最大荷重が低下することが把握された(図-7)。スケーリングが生じていない RC はりにおいて、腐食減少率が 10% 程度で約 10%の低下を、腐食減少率 40% 程度以上で約 30%程度最大荷重が低下することが確認された。

また、凍結融解作用によるコンクリートの劣化（スケーリング量）が大きいものほど、

最大荷重の低下が大きいことが分かった。

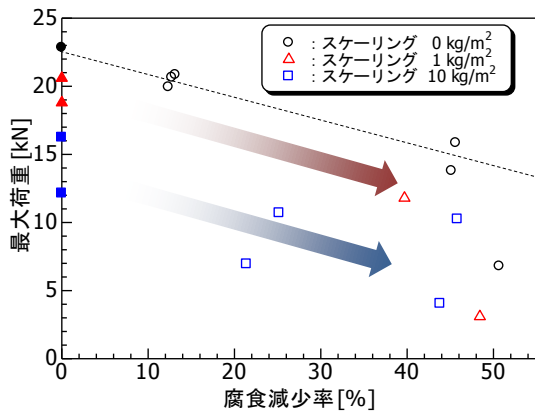


図-7 最大荷重と腐食減少率

③図-8 に最大荷重の 1/3 から算出される曲げ剛性と引張側スケーリング量の関係を示す。これより、スケーリング量が  $1\text{kg/m}^2$  程度の際の曲げ剛性は、スケーリングが発生していないものと同様であるものの、スケーリングが  $10\text{kg/m}^2$  程度以上生じたものは、55~70%程度曲げ剛性が低下することが把握された。これは、凍結融解作用によりコンクリートと鉄筋の付着強度が低下したことや圧縮側コンクリートの劣化に起因する有効な部材断面の減少によるものと考えられる。

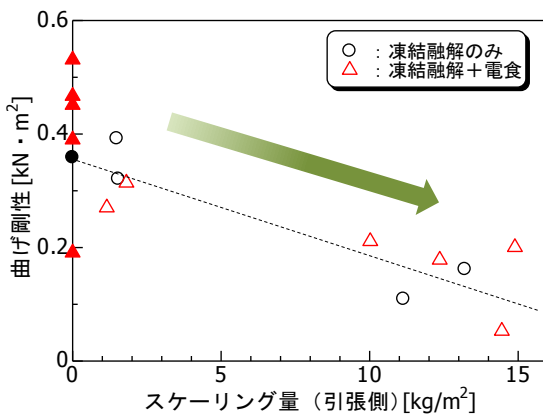


図-8 曲げ剛性とスケーリング量

④曲げ剛性と鉄筋質量減少率の関係を図-9 に示す。これより、鉄筋の質量減少率の増加に伴う明確な曲げ剛性の低下は認められない。しかし、凍結融解作用によるコンクリートの劣化を受けた供試体は、鉄筋腐食の増大に伴い、曲げ剛性も低下する傾向を示すことが把握された。ただし、その変化は最大荷重の低下ほど明確には現れていない。

以上より、コンクリートの凍結融解作用による劣化は、鉄筋腐食による RC はりの曲げ耐荷性能の低下を助長させる一因になることを明らかにした。

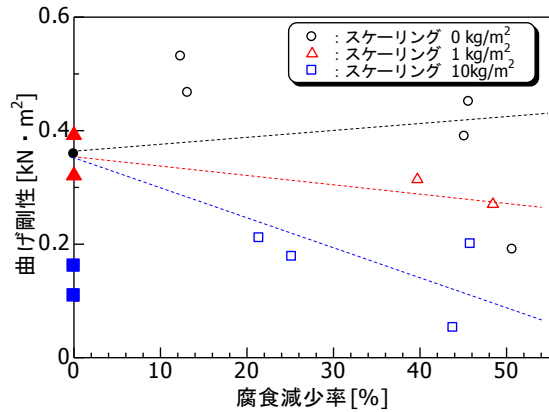


図-9 曲げ剛性と腐食減少率

⑤厳しい凍害環境下において 56 年経過した RC 橋の静的載荷試験および詳細調査(コア採取による圧縮強度試験、塩化物イオン濃度の測定、スケーリング試験など)を実施し、本研究の成果を検証した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

①渡邊浩平, 太田晃博, 佐藤宇泰, 阿波 稔, 迫井裕樹, けい酸塩系表面含浸材を用いたコンクリートのスケーリング抵抗性の評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 査読有, 第 11 巻, pp. 337-342, 2011

②迫井裕樹, 阿波 稔, 月永洋一, 菅原 隆, 凍結融解環境下におけるコンクリートの塩化物イオン浸透性, 第 38 回 セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, 査読無, pp. 99-102, 2011

③緑川猛彦, 武田三弘, 小山田哲也, 阿波 稔, 長期暴露試験による表面含浸材を塗布したコンクリートの塩化物イオン浸透性状, 土木学会論文集 E2, 査読有, Vol. 67, No. 3, pp. 451-461, 2011

④権代由範, 月永洋一, 庄谷征美, 阿波 稔, 塩化物環境化におけるコンクリートのスケーリング抵抗性評価試験の簡素化に関する研究, コンクリート工学論文集, 査読有, Vol. 21, No. 2, pp. 45-56, 2010

⑤Y. Sakoi, M. Aba, M. Shoya, Y. Tsukinaga, T. Sugawara, INFLUENCE OF FREEZING-THAWING ACTION ON CHLORIDE PENETRATION INTO CONCRETE, 2nd International Conference on Durability of Concrete Structures, 査読無, pp. 269-274, 2010

⑥権代由範, 月永洋一, 庄谷征美, 阿波 稔, 表面含浸材によるコンクリートのひび割れ閉塞効果に関する実験的検討, セメント・コ

ンクリート論文集，査読有，No. 62，pp. 485-492，2009

⑦迫井裕樹，阿波 稔，月永洋一，庄谷征美，凍結融解作用を受けるコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性，日本コンクリート工学協会，コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法シンポジウム論文集，査読有，pp. 263-268，2008

⑧月永洋一，庄谷征美，阿波 稔，迫井裕樹，権代由範，東北地方におけるコンクリート構造物の凍害の実態とスケーリング試験法に関する一考察，日本コンクリート工学協会，コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法シンポジウム論文集，査読有，pp. 279-286，2008

〔学会発表〕（計 12 件）

①渡邊浩平，迫井裕樹，阿波 稔，月永洋一，凍結融解作用下におけるコンクリートと鉄筋の付着特性，セメント技術大会，2012 年 5 月 29 日，ホテルメトロポリタン

②市川達朗，渡邊浩平，迫井裕樹，阿波 稔，萬世橋の耐久性調査，土木学会東北支部技術研究発表会，2012 年 3 月 3 日，秋田大学

③渡邊浩平，佐藤宇泰，太田晃博，迫井裕樹，阿波 稔，複合劣化を受けた RC の付着強度特性，土木学会東北支部技術研究発表会，2012 年 3 月 3 日，秋田大学

④迫井裕樹，阿波 稔，太田晃博，渡邊浩平，スケーリングを生じたコンクリートの塩化物イオン浸透性，土木学会東北支部技術研究発表会，2012 年 3 月 3 日，秋田大学

⑤太田晃博，佐藤宇泰，渡邊浩平，迫井裕樹，阿波 稔，各種けい酸塩系表面含浸材によるスケーリング抵抗性，土木学会東北支部技術研究発表会，2012 年 3 月 3 日，秋田大学

⑥太田晃博，佐藤宇泰，渡邊浩平，迫井裕樹，阿波 稔，コンクリートの塩化物イオン移動性に及ぼす凍結融解作用の影響，土木学会年次学術講演会，2011 年 9 月 8 日，愛媛大学

⑦迫井裕樹，阿波 稔，上原子晶久，佐藤宇泰，渡邊浩平，複合劣化を受けた RC はりの曲げ耐荷性能に関する研究，土木学会年次学術講演会，2011 年 9 月 8 日，愛媛大学

⑧渡邊浩平，太田晃博，佐藤宇泰，迫井裕樹，阿波 稔，ケイ酸塩系表面含浸材を用いたコンクリートのスケーリング抵抗性に関する研究，土木学会次学術講演会，2011 年 9 月 7 日，愛媛大学

⑨福田有淑，阿波 稔，上原子晶久，迫井裕樹，土木学会東北支部技術研究発表，2011 年 3 月 5 日，東北工業大学

⑩祐川真也，太田晃博，迫井裕樹，阿波 稔，庄谷征美，表面含浸材によるコンクリートの物質移動抵抗性の改善，土木学会年次学術講演会，2010 年 9 月 1 日，北海道大学

⑪福田有淑，迫井裕樹，阿波 稔，庄谷征美，

凍結融解作用がコンクリートの塩化物イオン浸透に及ぼす影響，土木学会東北支部技術研究発表会，2010 年 3 月 6 日，日本大学工学部

⑫祐川真也，太田晃博，佐野寛宗，迫井裕樹，阿波 稔，庄谷征美，表面含浸材によるコンクリートの耐久性改善，土木学会東北支部技術研究発表会，2010 年 3 月 6 日，日本大学工学部

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

阿波 稔 (ABA MINORU)

八戸工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10295959

### (2) 研究分担者

庄谷征美 (SHOYA MASAMI)

八戸工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80006684

月永洋一 (TSUKINAGA YOICHI)

八戸工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60124898

陳 沛山 (CHEN PEISHAN)

八戸工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90438432

迫井裕樹 (YUKI SAKOI)

八戸工業大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：30453294