

機関番号：32665

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360205

研究課題名 (和文) 大型環境試験装置により塩害と凍害を与えたRC床版の構造性能評価

研究課題名 (英文) Evaluation on structural performance of RC bridge deck subjected to chloride-induced deterioration and frost damage by large-scale chamber controlling temperature and humidity

研究代表者

岩城 一郎 (IWAKI ICHIRO)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：20282113

研究成果の概要 (和文)：大型環境試験装置を用いて、実物大道路橋 RC 床版供試体に塩害と凍害を与える促進試験方法を考案した。本試験方法により塩害、凍害、両者の複合劣化を与えた供試体を輪荷重走行試験に供し、これらの疲労耐久性を評価した。その結果、RC 床版の疲労耐久性は融雪剤による塩害や複合劣化により顕著に低下すること、RC 部材の静的な構造性能は下側鉄筋の腐食量に依存するのに対し、疲労耐久性は上側鉄筋の腐食量に依存することを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：Using a large-scale chamber makes it possible to control temperature and humidity, the accelerated testing methods for giving RC bridge deck specimens chloride induced deterioration and frost damage were developed. Then, the fatigue durability for the specimens subjected to chloride induced deterioration, frost damage, and these combined deterioration were evaluated by wheel tracking load test. The experimental results revealed that the fatigue durability of RC bridge deck was remarkably reduced by chloride induced deterioration. Further, it was recognized that the fatigue durability of RC bridge deck depends on the corrosion of the upper reinforcement while the static load carrying capacity of RC members depends on that of the lower reinforcement.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
総計	8,200,000	2,460,000	10,660,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：塩害、凍害、複合劣化、疲労、RC 床版、構造性能、大型環境試験装置、輪荷重走行試験

## 1. 研究開始当初の背景

我が国の積雪寒冷地の道路構造物では冬期に融雪剤 (NaCl) を大量に散布するため、コンクリート部材の塩害、凍害が促進する。このうち道路橋鉄筋コンクリート製床版 (以下、RC 床版) ではさらに交通作用の繰返し (疲労) が加わるため、これらの複合劣化が

顕在化し、大きな社会問題になろうとしている。研究代表者は、研究分担者とともに2006年度から2カ年間、科学研究費補助金 (基盤研究 (C)) を受け、試作の塩害促進試験装置と輪荷重走行試験装置により、「融雪剤による塩害劣化を受けた道路橋 RC 床版の疲労耐久性に関する研究」を行った。

## 2. 研究の目的

以上の背景から、本研究では大型環境試験装置を用いて実物大 RC 床版供試体に塩害および凍害を与え、その構造性能について評価することを目的とし、以下の点を明らかにすることとした。(1) 凍害、塩害、およびこれらの複合劣化（以下、凍害&塩害）が RC 床版中の材料特性に及ぼす影響、(2) 凍害、塩害、および凍害&塩害といった材料劣化が RC 部材の静的な構造性能に及ぼす影響、(3) 凍害、塩害、および塩害&凍害が実物大 RC 床版供試体の疲労耐久性に及ぼす影響。

## 3. 研究の方法

### (1) RC 床版供試体の概要

図-1 に曲げ試験で使用した供試体の形状を示す。図より、供試体の寸法は、2000mm×300mm×160mm であり、主鉄筋には D16(SD295 A)を 2 本使用し、有効高さを 130mm とした。なお、スパン長は 1800mm である。次に、図-2 に押抜きせん断試験で使用した供試体の形状を示す。図より、供試体は、辺長 1200mm×1200mm とする正方形床版で、床版の厚さを 160mm としている。なお、スパン長は 1000mm である。図-3 に、輪荷重試験で使用した供試体の形状を示す。図より、供試体の長さを 3000mm、幅を 2000mm、床版の厚さを 160mm としている。スパン長は 1800mm である。

### (2) 大型環境試験装置の概要

本装置は、内装耐塩害仕様の恒温恒湿室であり、制御プログラムにより温度が $-30^{\circ}\text{C}\sim +80^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度が 40%~90%RH の範囲で可変運転が可能な装置である。従って、塩害および凍害の促進試験が可能である。

### (3) 塩害促進試験方法の考案

本実験における塩害促進試験では、供試体への塩分供給条件として、4 条件を設定した。具体的には、①床版に内在塩分が含まれている条件：コンクリート練混ぜ時に塩分を混入（内在供試体）、②床版全面が塩分供給を受ける条件：塩水への供試体の全面浸漬と乾燥の繰返し（浸漬供試体）、③実際の融雪剤散布状況を模擬した床版上面のみから塩分供給を受ける条件：供試体上面への塩水散布（散布供試体）、そして、④大型環境試験装置内における床版上面からの塩分供給条件（環境試験供試体）である。①から③の条件に対する供試体は屋外環境に暴露し、①は、内在塩分としてコンクリート  $1\text{m}^3$  に対して NaCl を 10kg 添加した供試体を作製した。②、③では塩水として濃度 10% の NaCl 水溶液を使用し、②では 3.5 日毎の乾湿の繰返し（ポンプによる給排水）、③では週 1 回の頻度で塩水散布を行った。また、④は、大型環境試験装置内を室温  $40^{\circ}\text{C}$  に保ち、3.5 日毎の頻度で塩水散布を行った。

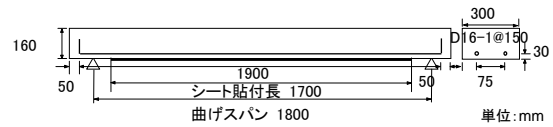


図-1 曲げ供試体の形状

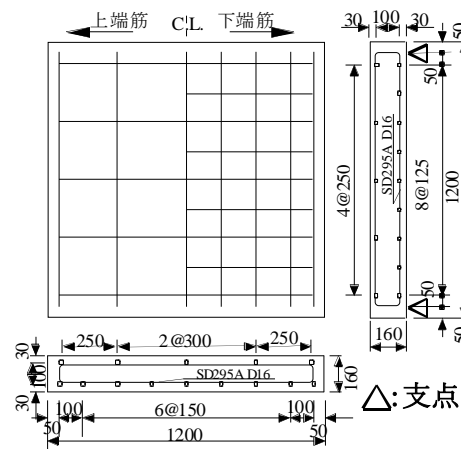


図-2 押抜きせん断供試体の形状

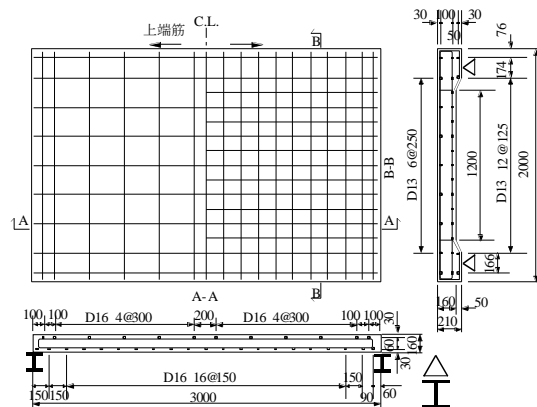


図-3 RC 床版供試体の形状

### (4) 凍害促進試験方法の考案

凍害促進試験は、RILEM CDF-19982<sup>1)</sup>に準じた凍結融解サイクルと ASTM C6722<sup>2)</sup>に準じた塩水供給方法を組み合わせている。凍結融解サイクルは、1 日 2 サイクルであり、大型環境試験装置内の室温を約  $+20^{\circ}\text{C}\sim -20^{\circ}\text{C}$  のプログラム制御した状態で 120 サイクルまで行った。本実験の試験溶液は、水溶液濃度 3.0mass% の NaCl 溶液であり、試験面の周囲に土手を作製し、試験溶液を 5mm 程度の深さで湛水させた。

### (5) スケーリング深さ測定方法

スケーリング深さは、試験面の凹凸を変位として測定する方法である。スケーリングによる凹凸は、図-4 に示すように、本研究のために開発した装置を用いて測定した。具体的には、Z 方向（鉛直）の変位をレール上のレーザ変位計（精度  $1/1000\text{mm}$ ）で、移動量を X 方向（水平）の変位計（精度  $1/100\text{mm}$ ）により測

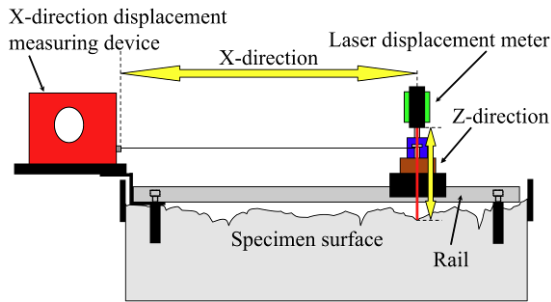


図-4 スケーリング深さ計測システム

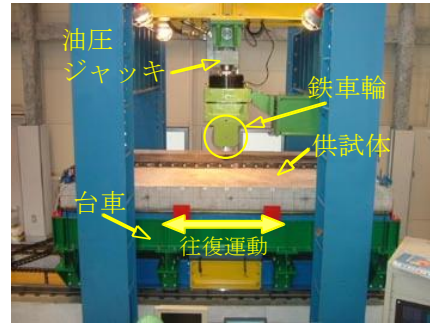


図-5 輪荷重試験装置

定する方法を採用した。

(6) 静的荷重試験の概要

静的荷重試験の方法は、容量 1000 kN の静的荷重試験装置を使用し、曲げ荷重試験が荷重を 1 点集中荷重荷方式とした。また、押抜きせん断荷重試験は 2 辺支持による 100mm×100mm の荷重板を用いた 1 点集中荷重荷方式とした。

計測は、作用荷重と供試体中央の変位をそれぞれロードセル(容量 1000kN)と高感度変位計(感度 1/100mm)により測定した。

(7) 輪荷重走行試験の概要

図-5 に輪荷重試験装置を示す。図より、この装置の仕組みは、鋼製フレームに鉄車輪を取り付けた油圧ジャッキを据え付け、回転速度 8.97rpm のモータ及びクランクアームで供試体を載せた台車を前後に 1m 往復運動させること輪荷重を供試体に作用させるものである。輪荷重の荷重プログラムは、段階荷重であり、走行回数 20 万回までが 98kN で、次の 40 万回まで 127kN とする設定で実施した。供試体の支持条件は、走行方向の 2 辺(3000mm)を単純支持、他の 2 辺を弾性支持とした。なお、弾性支持 (I 形鋼) の断面諸元は幅 150 mm×高さ 150 mm×厚さ 8 mm、材質は SS400 である。計測項目は、目標走行回数終了時点で作用荷重 98kN を供試体中央に静的荷重した際の床版に発生する活荷重たわみ(弾性変形成分のたわみ)の計測と供試体下面のひび割れ観察である。

4. 研究成果

(1) 塩害と凍害を受けた RC 部材のモニタリングと材料劣化の特性

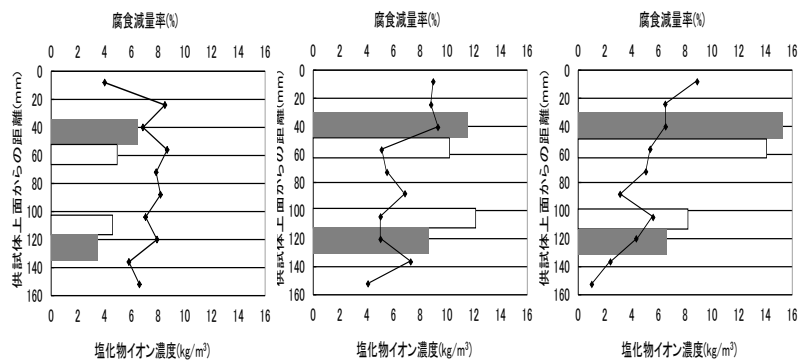
1) 自然電位の測定による RC 床版の鋼材腐食モニタリング

自然電位測定は、供試体上面で行い、鉄筋腐食の判定基準は ASTM C 876 に従った。電極には鉛照合電極を使用し、上面主鉄筋上を 300mm 間隔で測定した。本実験における塩害促進の全体的な傾向は、塩害促進開始してから 80 日程度と早い段階で -350mV 以下という 90% 以上の確率で供試体全域において腐食の可能性のある判定結果となり、電食による鋼材腐食の促進までは早くはないが自然暴露状態よりも塩分が鉄筋位置まで浸透し鋼材の腐食を誘発することが示唆された。

2) 塩化物イオン濃度分布と鋼材腐食減量率

塩化物イオン濃度の測定は、供試体から採取したコアより試料を作製し、JIS A 1154 に準拠した電位差滴定法とイオンクロマトグラフ法により行った。また、鋼材の腐食減量率の測定は、腐食している部分の鉄筋を採取し、10% のクエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬、除錆させ、質量を求めることで行った。

図-6 に、内在供試体、浸漬供試体、散布供試体の鋼材の腐食減量率と塩化物イオン濃度分布を示す。図より、塩化物イオン濃度は、いずれの供試体も鋼材位置において鋼材の腐食発錆限界濃度 1.2kg/m<sup>3</sup> を大きく上回っており、塩分の浸透が鋼材腐食を促進させたこ



(a) 内在供試体 (b) 浸漬供試体 (c) 散布供試体

図-6 塩害促進試験による塩化物イオン濃度と鋼材腐食減量率

とがわかる。塩化物イオン濃度分布は、内在供試体の場合、供試体上面から下面まで、 $6\text{--}9\text{kg/m}^3$ の塩化物イオンが均等に含まれている結果となった。また、浸漬供試体では、供試体上下面より塩分が浸透するが、供試体上面から40mmまでの方が下面に比べ塩分濃度が高く $9\text{kg/m}^3$ 程度の高い濃度を示し、供試体上面40mmから供試体下面の間が $4\text{--}8\text{kg/m}^3$ の濃度であった。これに対して、散布供試体は、供試体上面付近で $9\text{kg/m}^3$ 程度の高い濃度を示し、そこから供試体下面までは徐々に濃度が減少する傾向を示し、供試体下面になると $1\text{kg/m}^3$ となり、上面のみからの塩分浸透で下面に行くほど濃度が減少する傾向がわかる。なお、塩害促進供試体も、散布供試体と同様に下面へかけて濃度が減少する傾向を示した。このように、鋼材位置における塩分濃度は、鋼材の腐食発錆限界濃度 $1.2\text{kg/m}^3$ を大きく上回っていたが、一方で、塩害促進試験方法や、試験期間の違いにより、鋼材の腐食減量率は各供試体で異なる結果となった。内在供試体と浸漬供試体を比較すると塩化物イオン濃度分布に大きな違いはないが、腐食減量率は、内在供試体が上側主筋6.56%、下側主筋3.45%であり、浸漬供試体が上側主筋11.52%、下側主筋8.62%と浸漬供試体の方が腐食減量率は大きい。これは促進期間の違いに起因するもので、内在供試体の促進期間が268日間であるのに対し、浸漬供試体は、730日間であり、この違いが直接鋼材の腐食期間の違いとなり腐食減量率に差が生じたものと考えられる。散布供試体に関しては、上側主筋で15.22%、下側主筋で6.61%であり、塩分濃度の高い上側の腐食減量率が下側に比べ明らかに高く、加えて塩害促進期間も930日と長いので、総じて腐食減量率が高くなったと考えられる。

### 3) 凍害を受けたRC床版供試体のスケーリング劣化評価

本研究室で考案したRC部材のスケーリング評価手法を用いて実物大のRC床版のスケーリング劣化状態とその抵抗性をスケーリング深さに基づき評価を行った。本実験では、凍害促進試験を始めるにあたり、試験開始時の供試体の状態を2種類設定した。具体的には、凍害促進試験のみを行った凍害供試体(以下、FDと記す)を1体と、あらかじめ大型環境試験装置内で80日間の塩害促進試験を行い、その後FDと共に凍害促進試験を行った複合劣化供試体(以下、CSFと記す)を1体とする2種類である。以下には、凍害促進試験結果を示す。

図-7に凍害促進試験120サイクル時の凍害供試体と複合供試体の測定結果の一例(CFS, 一測線)を示す。図より、考案した測定方法によれば、スケーリングはほとんど進行していない箇所と4mm程度進行している箇所があ

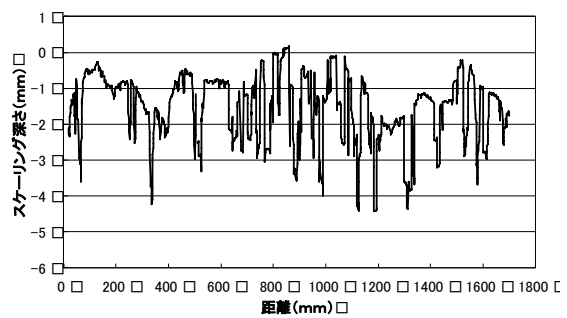


図-7 スケーリング深さ測定結果 (CFS, 120 サイクル)

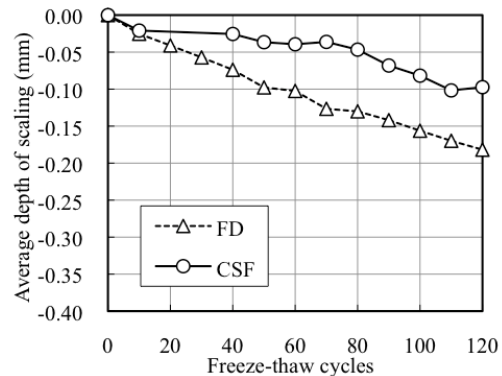


図-8 平均スケーリング深さと凍結融解サイクルの関係

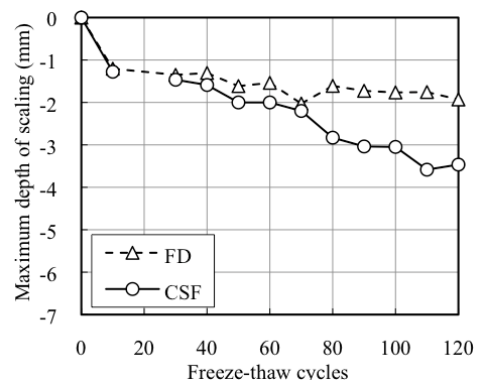


図-9 最大スケーリング深さと凍結融解サイクルの関係

り、非常に細かい凹凸を伴い進行していることが確認された。

図-8と図-9は、RC床版供試体の平均スケーリング深さと凍結融解サイクル数の関係、および最大スケーリング深さと凍結融解サイクル数の関係を示している。図-8より、120サイクルの平均スケーリング深さは、凍害供試体(FD)の方が大きく、図-9より、最大スケーリング深さは複合供試体(CSF)の方が反対に大きいという結果を得た。このような結果を得た理由として、FDでは表面全体が一様にスケーリングを起こすような形態であったのに対し、CSFでは塩害促進試験に



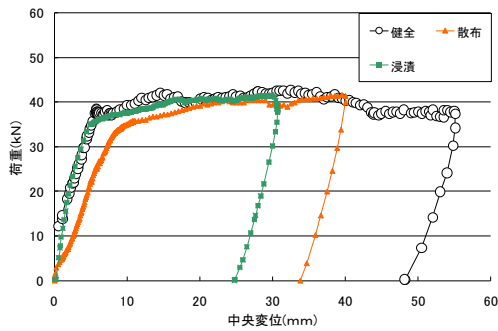


図-10 曲げ載荷試験の荷重-変位関係

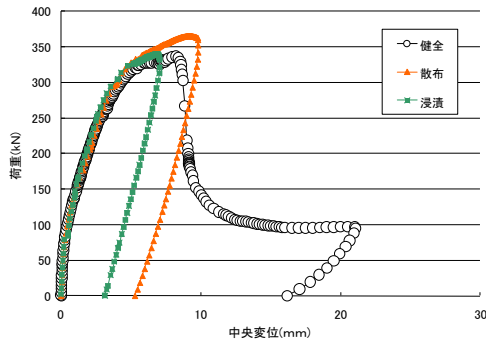


図-11 押抜きせん断載荷試験の荷重-変位関係

に伴い発生した腐食ひび割れの箇所ですケーリングが顕在化したためであると考えられる。

(2) 塩害を受けた RC 部材の静的耐荷性能

図-10 に、曲げ載荷試験における健全時と塩害促進後の荷重-変位関係を示す。図より、散布供試体は、変位 20mm 程度まで同一変位における荷重は小さい傾向にあったが、それ以降は健全供試体と同様な挙動であることが確認された。一方、浸漬供試体は、載荷当初は健全と同様な挙動であったが、変位 30mm(荷重 40.4kN)で荷重が低下したため除荷した。浸漬供試体は、健全供試体や散布供試体とは異なり、変形性能が大きく低下するという結果であった。

図-11 に、押抜きせん断載荷試験における健全時と塩害促進後の荷重-変位関係を示す。図より、散布供試体は、健全供試体( $P_{max}$  336.8kN)と比較し、 $P_{max}$ (366.0kN)と  $P_{max}$  時の変位量(9.21mm)で以下、 $\delta$ が大きく、浸漬供試体の場合は、 $P_{max}$  が 340.0kN で  $P_{max}$  時の  $\delta$  も 6.90mm と健全、散布の両供試体よりも低下している。これら荷重-変位関係の差異は、上下段鉄筋の腐食量の違いに起因し生じたと考えられた。

(3) 塩害を受けた RC 床版の耐疲労性能

図-12 に、塩害 RC 床版供試体の活荷重たわみと等価繰返し走行回数との関係を示す。なお、図中には比較のため健全供試体の結果も示した。図より、健全供試体の破壊時の等価

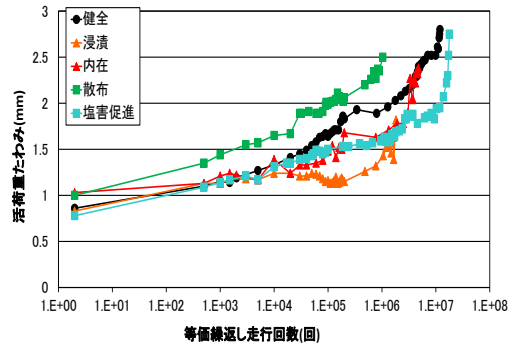


図-12 活荷重たわみ-等価繰返し走行回数関係

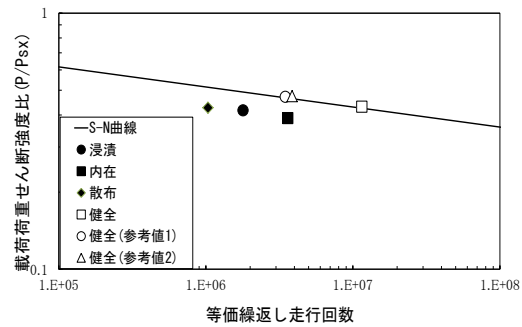


図-13 S-N 関係

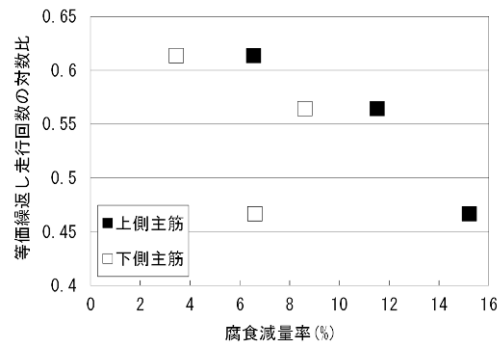


図-14 等価繰返し走行回数の対数比と腐食減量率

繰返し走行回数 1000 万回に対して、散布供試体 89 万回、浸漬供試体 165 万回、内在供試体 300 万回となり、塩害により早期に疲労限界に達する傾向であった。各活荷重たわみの増加傾向は、塩害促進方法で異なり、散布供試体は走行回数の増加と共に徐々に活荷重たわみが大きくなる傾向を示す一方で、その他の供試体は、散布供試体より活荷重たわみの増加が小さい傾向であった。図-13 は、S-N 曲線の推定式<sup>3)</sup>と本年度までの輪荷重走行試験結果を比較した図である。図より、既往の推定式は、健全な供試体の疲労寿命を精度良く予測し得ることがわかる。これに対して、塩害を与えた RC 床版供試体は、いずれも S-N 曲線の下に位置し、塩害により疲労寿命が明らかに低下していた。図-14 に、図-13 の S-N 曲線から求まる健全供試体の等価繰返し

し走行回数に対する浸漬供試体、内在供試体、散布供試体の各値の対数比と、上下主筋の腐食減量率の関係を示す。図より、上側主筋の腐食減量率が増加すると対数比は減少傾向にある。一方、下側主筋の腐食減量率と疲労耐久性との間には顕著な相関が認められない。つまり、上側主筋の腐食は、一般に静的載荷試験による RC 床版の耐荷力に与える影響は小さいが、RC 床版の疲労耐久性に対しては支配的要因となることが示された。

#### (4)まとめ

以上をまとめると以下の通りである。

- ・ 大型環境試験装置により塩水による乾湿繰返し試験を行った供試体の自然電位分布は、試験開始後 80 日程度で供試体全域が-350mV 以下という 90%以上の確率で腐食の可能性がある状態に達したことから、本試験方法の促進性が示唆された。
- ・ 大型環境試験装置を用いた凍害促進試験を考案し、その際のスケーリングによって生じた試験面の凹凸を X 方向と Z 方向の変位として測定することで、実物大の RC 部材に対しスケーリング深さが測定可能なことを示した。
- ・ 塩害を受けた RC 部材に対し、静的載荷試験を行った結果、耐荷力、変形性能共に低下する傾向を示した。これは下側主筋の顕著な腐食によるものと考えられる。
- ・ 輪荷重走行試験の結果、各種塩害促進試験により塩害の生じた RC 床版の疲労耐久性は顕著に低下することが確認された。また、塩害を受けた RC 床版の疲労耐久性は上側主筋の腐食量が支配的要因となることが明らかになり、前述の静的な耐荷性能が下側主筋の腐食量に依存する傾向とは異なる結果を得た。

#### 【参考文献】

- 1) M. J. Setzer and R. Auberg : Capillary Suction-Internal damage and Freeze thaw Test, Betonwerk+Fertigteile Technik, BFT 4, pp.94-105 (1998)
- 2) American Society for Testing and Materials : Standard test method for scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals, ASTM Standard C672, Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02, pp.344-346 (1998)
- 3) 松井繁之：道路橋床版－設計・施工と維持管理－，森北出版，2007

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- ・ 子田康弘，齋藤卓也，岩城一郎：塩害により劣化した RC 床版の疲労耐久性に関する検討，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，Vol.8，pp.399-404，2008。

- ・ 子田康弘，齋藤卓也，岩城一郎：輪荷重走行試験による材料劣化を受けた道路橋 RC 床版の疲労耐久性評価，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，Vol.9，pp.145-150，2009。
- ・ 宮村正樹，子田康弘，内藤英樹，岩城一郎，鈴木基行：振動特性に着目した RC 床版の疲労損傷度評価手法に関する研究，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1251-1262，2010。

〔学会発表〕(計 4 件)

- ・ 小野真，子田康弘，岩城一郎：大型環境試験装置を用いた RC 部材の凍害促進試験方法に関する検討，平成 20 年度土木学会東北支部技術研究発表会，CD-ROM，2009。
- ・ 園部祐樹，子田康弘，岩城一郎：輪荷重走行試験による RC 床版の疲労損傷度評価に関する検討，平成 21 年度土木学会東北支部技術研究発表会，CD-ROM，2010。
- ・ 三代昌幸，子田康弘，岩城一郎：輪荷重走行試験による RC 床版の計測・モニタリングに関する検討，平成 21 年度土木学会東北支部技術研究発表会，CD-ROM，2010。
- ・ 前島拓，有賀和弥，原田敬，子田康弘，岩城一郎：融雪剤散布により塩害を受けた道路橋 RC 床版の疲労耐久性評価，平成 22 年度土木学会東北支部技術研究発表会，CD-ROM，2011。

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

岩城 一郎 (IWAKI ICHIRO)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：20282113

##### (2)研究分担者

子田 康弘 (KODA YASUHIRO)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：40328696

##### (3)連携研究者

上原子 晶久 (KAMIHARAKO AKIHISA)

弘前大学・理工学研究科・助教

研究者番号：70333713

内藤 英樹 (NAITO HIDEKI)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：50361142