

# 論文 塩害を受けた RC 床版の劣化性状と耐荷性状に関する実験的検討

子田 康弘<sup>\*1</sup>・古山 幸永<sup>\*2</sup>・岩城 一郎<sup>\*3</sup>

**要旨**：寒冷地の道路橋 RC 床版は、融雪剤の大量散布による塩害と交通荷重による疲労を受け、早期劣化が顕在化しつつある。しかし、塩害が RC 床版の耐荷性状に及ぼす影響を究明した研究例は数少ない。本研究では、RC 床版を模擬した供試体に対し、塩分供給条件を考慮した種々の塩害促進試験を実施し、自然電位と目視による劣化状況の確認、コンクリートの塩化物イオン濃度分布、および鋼材腐食状況の調査を行った。さらに劣化が確認された一部の供試体に対し、押抜きせん断試験と輪荷重走行試験を行い、劣化の度合いが供試体の押抜きせん断耐力および疲労荷重作用下における部材の変形性に及ぼす影響を検討した。

**キーワード**：塩害, RC 床版, 塩化物イオン濃度, 押抜きせん断試験, 輪荷重試験, 活荷重たわみ

## 1. はじめに

近年、寒冷地の道路橋鉄筋コンクリート(以下 RC)床版は、融雪剤(NaCl)の大量散布による塩害の促進と、交通荷重の繰返しによる疲労の影響を受け、早期劣化が顕在化<sup>1)</sup>しつつある。

塩害を受けた RC 部材では、実際の鉄筋腐食の状態を考慮した耐荷性状の評価が必要との指摘がなされている<sup>2)</sup>。しかし、塩害による RC 床版の材料劣化と荷重の作用がその構造性能に及ぼす影響を究明した研究例は少なく、端緒についたばかりと言える。また当該分野の既往の研究の多くは、電食により塩害促進試験を行っているが、その劣化状態は実際の構造物の状態とは異なる可能性が指摘されている<sup>2)</sup>。

そこで本研究では、はじめに RC 床版を模擬した供試体を作製し、実際の RC 床版に想定される塩分供給条件を考慮した 3 種類の塩害促進試験を実施した。次いで、これらの試験方法が塩害の進行に及ぼす影響について、自然電位による非破壊試験、目視による劣化状況の確認、コンクリートの塩化物イオン濃度分布、および鉄筋の腐食減量の測定により検討した。さらに、これらの試験結果より塩害の進行が認められた一部の供試体を用いて、押抜きせん断試験および輪荷重走行試験(以下、輪荷重試験)を実施し、押抜きせん断耐力および疲労荷重作用下における部材の変形性について、健全な供試体との比較により検討を行った。

## 2. 実験の概要

はじめに、本実験で作製した押抜きせん断試験用と輪荷重試験用の供試体形状について述べる。次に、塩害促進試験の実験水準と試験方法、および劣化調査の概要を示し、最後に載荷試験方法について述べる。

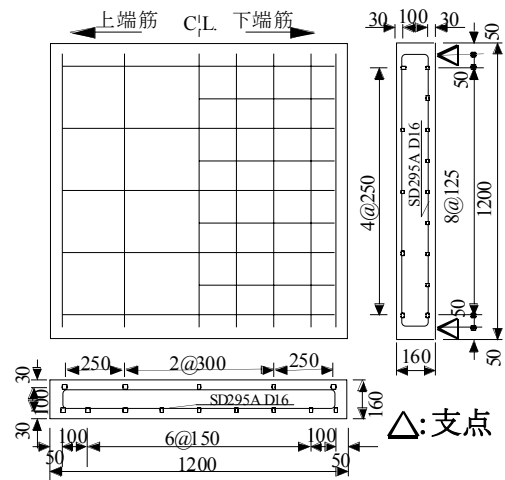


図-1 押抜きせん断試験の供試体形状

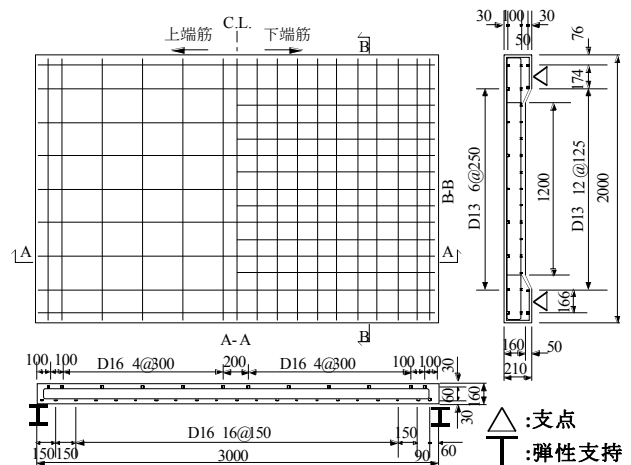


図-2 輪荷重試験の供試体形状

### 2.1 本実験の供試体形状

図-1 は、押抜きせん断試験で使用した供試体の形状を示した図である。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

\*1 日本大学 工学部土木工学科専任講師 修士(工) (正会員)

\*2 株式会社 復建技術コンサルタント

\*3 日本大学 工学部土木工学科准教授 博士(工) (正会員)

ている。なお、スパン長は1000mmである。配筋は、既往のRC床版を参考に引張側の主鉄筋比を1.34%に設定した。図-2は、輪荷重試験で使用した供試体の形状を示した図である。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。なお、スパン長は1800mmである。引張側の主鉄筋と配力筋の配置間隔は、それぞれ150mmと125mmである。

表-1は、使用したコンクリートの配合表である。水セメント比は、押抜きせん断試験用供試体(記号:PSとする)が53.9%、輪荷重試験用供試体(記号:WLとする)が66.0%である。標準養生を行った材齢28日の圧縮強度はそれぞれ、33.3MPa、29.0MPaである。

## 2.2 塩害促進試験と塩害調査方法

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、表-2に示す3水準を設定した。すなわち、(1)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(供試体PS1とWL1)、(2)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(供試体WL2)、および(3)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(供試体WL3)である。具体的な方法は、写真-1、写真-2に示すように、全ての供試体を屋外環境に曝露し、(1)、(2)では塩水として濃度10%のNaCl水溶液を使用し、(1)では3.5日毎の乾湿の繰返し(ポンプによる給排水)、(2)では週1回の頻度で塩水散布を行った。(3)は、内在塩分としてコンクリート1m<sup>3</sup>に対してNaClを10kg添加した供試体を作製した。図-3は上記の実験工程である。供試体は、湿布養生が材齢7日までで、その後、気中養生とした。PS1とWL1、WL2の塩害促進試験とその調査は、PS1が材齢143日、WL1、WL2が材齢78日から行った。

塩害の調査項目は、非破壊試験である自然電位の測定、目視による鉄筋腐食状況の確認(錆汁、腐食ひび割れ)、コンクリートの塩化物イオン濃度分布、および鉄筋腐食減量の測定である。まず、自然電位および目視観察を行い、その結果より、塩化物イオン濃度測定のための試料を採取した。試料採取時期は、PS1が促進試験207日目と335日目(材齢350日と478日)、WL1とWL2の供試体が促進試験136日目(材齢214日)、WL3が材齢199日である。なお、自然電位測定は、供試体上面の配力筋の位置で行い、鉄筋腐食の判定基準は表-3(ASTM C 876)に従った。一方、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により行った。

## 2.3 押抜きせん断試験および輪荷重試験の概要

今回の実験では、塩化物イオン濃度測定を行った全ての供試体の鉄筋位置で鋼材の腐食発生限界濃度に達し、錆汁の発生も認められた。このうちPS1については、塩

表-1 コンクリートの示方配合

供試体	G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	AE 減水剤
PS	20	53.9	46.0	4.5	172	320	815	1005	3.20
WL		66.0	47.6		174	264	857	996	2.64

表-2 塩害促進試験の実験水準

PS1 WL1	塩水*浸漬と乾燥の繰返し 乾湿のサイクル:3.5日毎
WL2	供試体上面からの塩水*散布 散布の頻度:週1回
WL3	コンクリート練混ぜ時に塩分混入 10kg/m <sup>3</sup> のNaCl外割添加

※塩水:濃度10%のNaCl水溶液

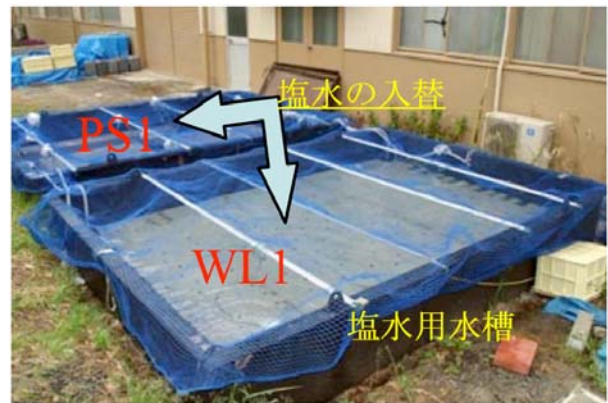


写真-1 塩害促進試験状況(PS1とWL1)



写真-2 塩害促進試験状況(WL2とWL3)

PS1	打込み	養生	塩害促進期間:材齢478日	載荷試験
		材齢143日	濃度測定:促進207日目 促進335日目	
WL1	打込み	養生	塩害促進:材齢214日	塩害促進継続中
WL2		材齢78日	濃度測定:促進136日目	
WL3	打込み	塩害促進期間:材齢278日	載荷試験	
		濃度測定:材齢199日目		

図-3 本実験の工程

表-3 鉄筋腐食判定基準(ASTM C 876)

自然電位E (mV CSE)	鉄筋腐食の可能性
-200<E	90%以上の確率で腐食なし
-350<E≤-200	不確定
E≤-350	90%以上の確率で腐食あり

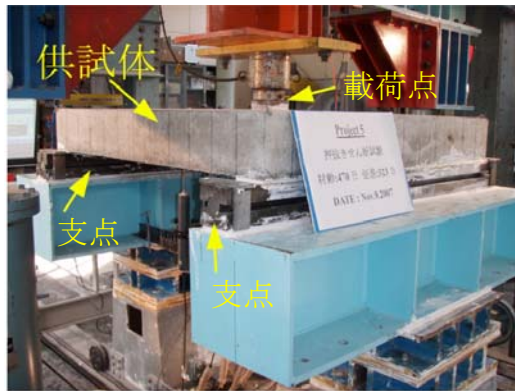


写真-3 押抜きせん断試験状況

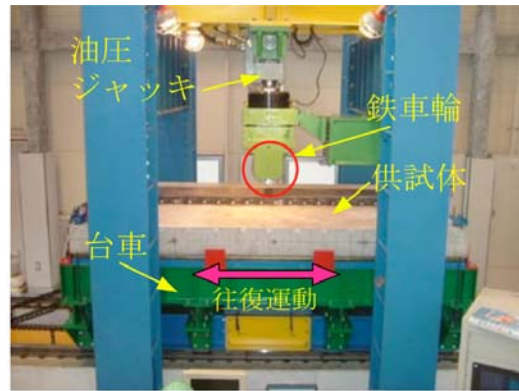


写真-4 輪荷重試験状況

害の進展期に達したと判断し、押抜きせん断試験を行った。一方、WL3については顕著な腐食ひび割れの発達が認められ、加速期から劣化期相当と判断し、輪荷重試験を実施した。以下にこれらの載荷試験方法を述べる。

まず、押抜きせん断試験は、既往の研究<sup>3)</sup>を参考に100mm×100mmの鋼板を用いた1点集中荷重(2辺支持、図-1参照)とした。計測項目は、作用荷重と供試体の変位である。

次に、輪荷重試験は、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、供試体を載せた台車を水平方向に往復運動させることで荷重の走行状態を再現したものである。そして、輪荷重試験は、荷重を98kNに設定し実施した。なお、供試体の支持条件は、既往の研究を参照し<sup>4)</sup>、走行方向の2辺(3000mm)を単純支持、他の2辺を弾性支持(図-2参照)とした。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載荷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。なお、写真-3、写真-4に載荷試験の状況を示した。

### 3. 塩害促進試験による劣化性状

#### 3.1 自然電位の測定結果と鉄筋の腐食状況

ここでは、各供試体の自然電位の測定結果と、PS1、WL3の鉄筋の腐食状況、および明らかな腐食ひび割れが観察されたWL3のひび割れ状況について述べる。なお、本節の観察状況は、PS1が押抜きせん断試験後に鉄筋を採取したもので、WL3が輪荷重試験前の状況を述べている。

##### (1) 自然電位の測定結果

自然電位測定による鉄筋腐食判定結果より、WL1は、促進試験31日目(初回測定時)には供試体全面で腐食確率90%以上の電位( $E \leq -350\text{mv}$ )を示した。WL2では、促進試験31日目に供試体のほぼ全面で不確定の判定となる電位( $-350 < E \leq -200\text{mv}$ )を示し、促進試験80日目(測定2回目)に供試体全面で腐食確率90%以上を示す電位とな



写真-5 鉄筋の腐食状況(WL3,材齢61日)

った。そして、WL3は、材齢61日には既に供試体全面で腐食確率90%以上を示す電位となり、写真-5に示すように、顕著な鉄筋腐食を確認した。

##### (2) 目視による鉄筋腐食状況

まず、PS1は後述の通り、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度を大きく超える値を示しているものの、腐食は部分的に観察される程度であった。また、供試体側面からの錆汁の発生を確認しているが、その部分も錆びが鉄筋表面に付着している程度であり、明らかな鋼材断面の減少は見られなかった。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させ除錆させることで鋼材の腐食減量を測定したところ、その値は0.2%程度であった。

次に、WL3の打込み面と底面のひび割れ状況を図-4に示す。図-4(a)に示すように、打込み面(上面)における腐食ひび割れの進行は、材齢64日にヘアークラック程度のひび割れが主筋方向に発生し、その後、材齢81日には供試体全面で主筋方向でひび割れの進展を確認した。そして、材齢114日に配力筋方向のひび割れの発生も確認し、最終的には、配力筋方向のひび割れも顕著となり(材齢170日)、ひび割れ幅は大きい箇所では0.20~0.30mmであった。底面(下面)に関しては、図-4(b)に示すように、輪荷重試験直前(材齢276日)には、既にひび割れが主筋方向に沿って多数発生していることを確認した。また、ひび割れは図の供試体左半分に集中していたが、この腐食ひび割れが供試体片側に集中した原因は現時点では不明であり、輪荷重試験終了後、鉄筋の腐食状況やかぶりを調査する予定である。

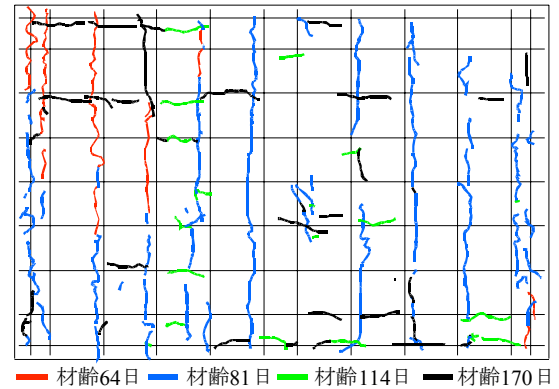


### 3.2 塩化物イオン濃度分布

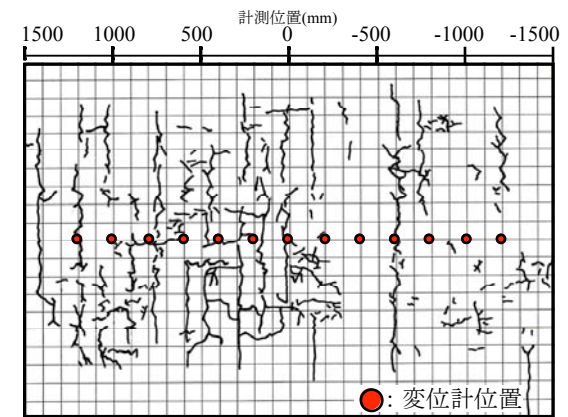
図-5 から図-8 は、供試体から抜き出したコアの塩化物イオン濃度分布を示したものである。図-5 と図-6 は、PS1 と WL1 の測定結果である。図より、拡散作用によって端部に比べ内部で塩化物イオン濃度が低く、図-5 から促進試験日数の増加に伴い内部に塩化物イオンが浸透していることがわかる。また、若干、打込み面では底面に比べ塩化物イオン濃度が高くなる傾向であった。これは、浸透時の重力の影響や、コンクリート打込み時の振動により上面側にブリーディングが卓越し、底面側に粗骨材が沈降した影響と考えられる。鉄筋位置(かぶり30mm)の塩化物イオン濃度は、PS1(促進試験 335 日目)が打込み面で  $4\text{kg/m}^3$ 、WL1 が打込み面と底面の両面で約  $6\sim 7\text{kg/m}^3$  と、一般に言われている鋼材の腐食発生限界濃度  $1.2\text{kg/m}^3$  を大きく超える結果となった。

図-7 は、WL2 の塩化物イオン濃度分布を示している。図より、WL2 は、散布面(打込み面)からの深さが 90mm 付近ではほぼ  $0\text{kg/m}^3$  となる濃度分布であった。鉄筋位置の塩化物イオン濃度に着目すると WL1 ほどではないが、約  $3.0\text{kg/m}^3$  と、鋼材の腐食発生限界濃度の 2 倍を超える塩化物イオン濃度を示した。

図-8 は、WL3 の測定結果を示している。図中には、材齢初期の塩化物イオン濃度も併せて示している。図より、初期の塩化物イオン濃度は約  $6\text{kg/m}^3$  と推察され、材



(a) 打込み面



(b) 底面(材齢 267 日)

図-4 腐食ひび割れの発生状況(WL3)

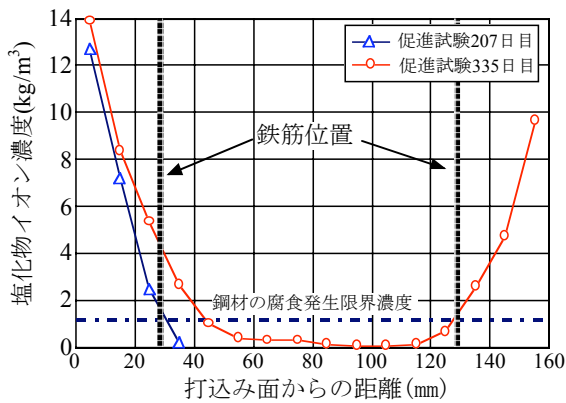


図-5 塩化物イオン濃度分布(PS1,浸漬)

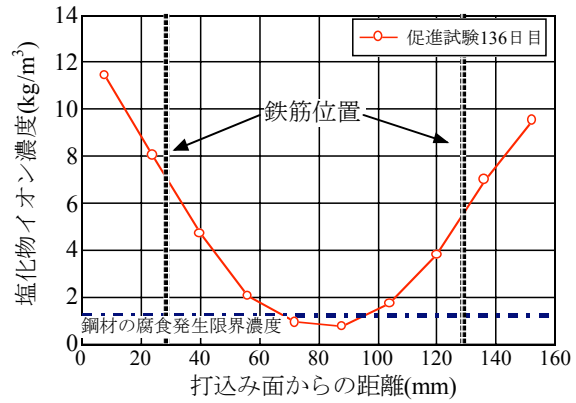


図-6 塩化物イオン濃度分布(WL1,浸漬)

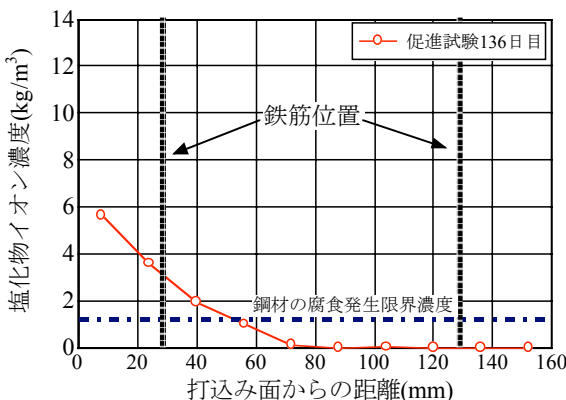


図-7 塩化物イオン濃度分布(WL2,散布)

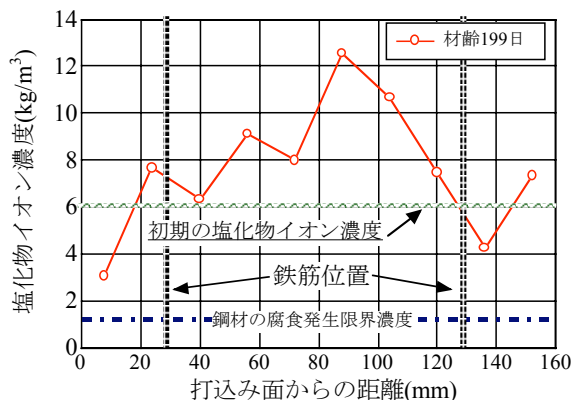


図-8 塩化物イオン濃度分布(WL3,内在塩分)

齡の経過に伴って、塩化物イオン濃度分布は、外側(特に打込み面)で低く、外側から断面内部に向って濃度分布が高くなる傾向が認められた。この外側付近の濃度が低い傾向は、打込み面側を上面に曝露しているため、雨水の表面部の洗い流しや浸透の影響や、中性化(本供試体の場合約5.0mm)による塩分の濃縮現象<sup>5)</sup>などが原因と考えられる。しかし、これらの影響を受けにくい断面内部で大きな変化を示した原因の特定には至っていない。

### 3.3 見かけの拡散係数

前節で示した塩化物イオン濃度分布を基に見かけの拡散係数を算出し、これより RC 床版供試体の塩分浸透性について検討した。なお、見かけの拡散係数は、フィックの拡散方程式を近似して求めたものである。

図-9は、PS1、WL1、およびWL2の見かけの拡散係数を示したものである。図より、まず、PS1では、打込み面で促進試験207日目から335日目にかけて夏場を経験したことになり、気温の上昇に伴い塩分の拡散作用が促進し、見かけの拡散係数が大きくなったためと考えられる。次に、PS1とWL1について、同一試験方法(浸漬)で比較すると、WL1の値が明らかに大きくなった。これは、WL1に比べPS1の水セメント比が明らかに低く、組織が緻密なため、塩分の拡散が抑制されたためと考えられる。一方、試験方法の異なるWL1、WL2では、WL1の値がWL2を多少上回る程度であった。これは、WL1とWL2が同一配合であり、浸漬試験と散布試験で用いた塩水濃度が同じためであり、浸漬試験では乾湿の影響がより顕著に現れた結果であると考えられる。以上の結果より、本試験の範囲では、供試体の配合(水セメント比)と曝露環境(外気温)により塩分浸透性が大きく変化する結果となった。

## 4. 塩害を受けた RC 床版の耐荷性状

### 4.1 押抜きせん断耐荷性状

図-10には、押抜きせん断試験で得られた載荷荷重と供試体中央変位(以下、単に変位)の関係を示す。なお、図中には、PS1と同じ形状の健全な供試体の実験結果を併せて示してある。図より、ひび割れが発生した100kN付近より最大荷重までの荷重は、同一変位で比較するとPS1の方が若干大きくなり、最大荷重はPS1が361kN、健全が337kNであった。このようにPS1の押抜きせん断耐力が健全な供試体よりも若干大きくなった理由として、腐食減量が1%から3%程度の範囲では、鉄筋の付着強度は健全鉄筋と比較して高い場合があり<sup>2)</sup>、本実験では多少このことが影響したと思われる。一方、最大荷重

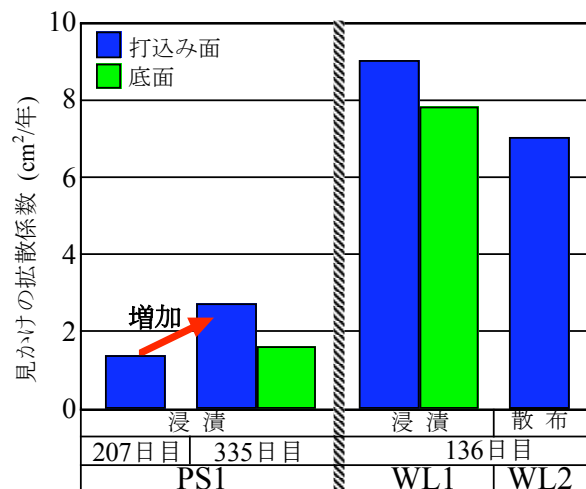


図-9 見かけの拡散係数

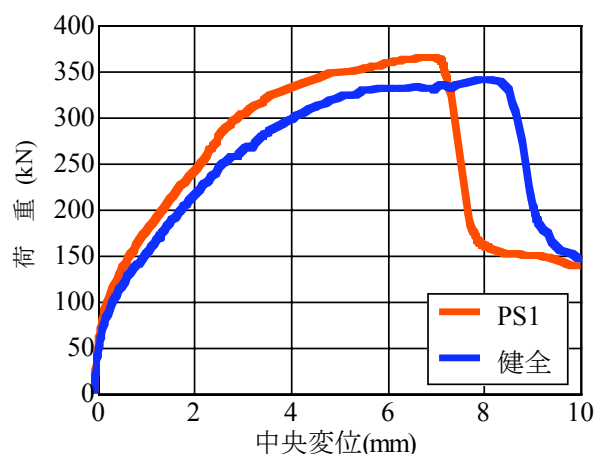


図-10 荷重-変位関係

時の変位は健全な供試体と比較し、多少低下する傾向を示した。

破壊形態は、両者とも押抜きせん断破壊であり、まず、初期ひび割れが供試体中央の支持辺と平行方向に発生し、その後、荷重の増加に伴い、供試体中央より外側に向かい格子状のひび割れが形成されるように進展した。

以上のことから、塩害による軽微な腐食が発生したRC床版供試体の押抜きせん断耐力は健全なものと比較し、顕著な低下を示さないことが確認された。

### 4.2 輪荷重試験による初期の疲労性状

図-11には、輪荷重試験の各走行回数時における活荷重たわみ分布を示す。図より、走行回数の初期段階から、局所的にたわみが大きくなる箇所(計測位置400mm)が確認された。この位置は、図-4(b)のひび割れ状況図において、供試体左半分の腐食ひび割れが顕在化している位置に対応している。つまり、ひび割れが多く発生しているため、供試体中央に輪荷重が加わったとき変形がより大きく生じる傾向を示した。これより、腐食ひび割れが多く見られる場所では、床版の剛性が低下し、活荷重たわみが卓越する可能性が示唆された。

図-12は、走行回数1万回までの疲労荷重の載荷初期における活荷重たわみと走行回数との関係を示した図である。なお、図中には、比較のため健全な供試体の実験結果を示してある。図より、供試体中央位置(凡例0mm)では、健全な供試体の方が、WL3よりむしろ活荷重たわみが大きい。図-4(b)に示す腐食ひび割れが卓越している箇所(凡例400mm)では逆にWL3の活荷重たわみが大きい傾向であった。また、活荷重たわみは、供試体を問わず、1000回程度までは漸増し、その後1万回までほぼ一定に推移する傾向を示した。これは繰返し荷重によるひび割れの進展とこれが落ち着く時期にほぼ対応している。これより、本実験の範囲内では、腐食ひび割れの有無に関係なく、走行回数に応じた活荷重たわみの増加傾向は同様であるが、塩害により活荷重たわみの卓越する箇所が生じ、これが疲労耐久性に影響を及ぼす可能性がある。なお、WL3に関しては、現在1万回以降の輪荷重試験を実施しており、今後、塩害がRC床版の疲労耐久性に及ぼす影響を究明する予定である。

### 5. まとめ

以下に、本研究で得られた結果を要約する。

- (1) 本研究で実施した浸漬試験および散布試験の結果より、配合が同じであれば、両者の見かけの拡散係数に大きな違いは認められず、配合(水セメント比)あるいは曝露環境(外気温)により見かけの拡散係数が大きく変化することが確認された。
- (2) 浸漬試験、散布試験とも、塩分浸透性については十分な促進性が認められたものの、本試験期間内では劣化期に相当する腐食を与えるまでには至らなかった。一方、内在供試体では早い段階から塩害が促進し、腐食ひび割れが顕著に現れる結果となった。
- (3) 載荷試験の結果、腐食減量0.2%という軽微な腐食であれば押抜きせん断耐力に顕著な影響を及ぼすことはないことが確認された。
- (4) 輪荷重走行試験より、腐食ひび割れが床版の剛性に及ぼす影響を評価した結果、腐食ひび割れの顕在化している箇所では、活荷重たわみが卓越する傾向が示された。つまり、床版に疲労によるひび割れの他に腐食ひび割れが発生するとその剛性低下を加速させる可能性が示唆された。

疲労今後は、疲労破壊時まで輪荷重試験を継続することにより、塩害の有無やその程度が疲労耐久性に及ぼす影響を究明する予定である。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究(C)(18560455)を受けて行なったものであり、一部は文部科学省学術フロンティア推進事業(日本大学工

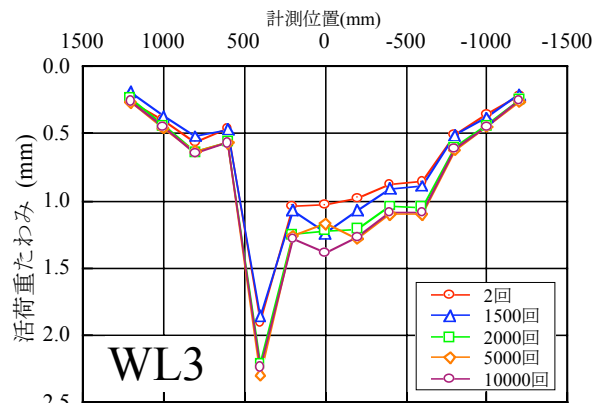


図-11 活荷重たわみ分布

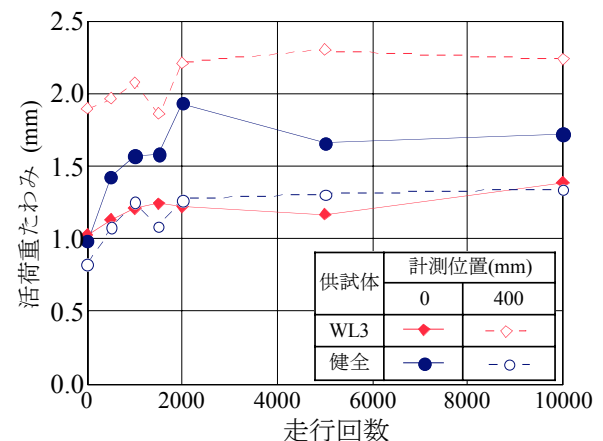


図-12 活荷重たわみ-走行回数

学部)：「地域における社会環境基盤の保全と防災力向上を目指した戦略的マネジメント手法の提言(研究代表：小野沢元久)」の一環として実施した。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 関口武一, 笹井幸男, 石塚喬康：塩害を受けたRC床版の劣化度調査と保全工事, コンクリート工学, Vol.32, No.5, pp.41-49, 1994.5
- 2) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.71 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, 2006.9
- 3) 古内仁, 高橋義裕, 角田與史雄：RCスラブの自由縁附近載荷に対する実用せん断設計法の研究, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.141-149, 1996.2
- 4) 庄中憲, 大西弘志, 横山広, 関口幹夫, 堀川都志雄：道路橋RC床版の疲労耐久性を評価するための試験方法について, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.17-24, 2003.6
- 5) 小林一輔：コンクリートの炭酸化に関する研究, 土木学会論文集, No.433/V-15, pp.1-14, 1991.