

## 走行振動応力履歴RC床版の塩害・凍害作用による 劣化状態と耐荷力低下に関する研究

Deterioration State and Decreasing in the Punching Shear Load-Carrying Capacity for the Salt and Frost Damages of RC Slab subjected to Stress-Hysteresis under Running Vibration Loads

木田哲量\*, 阿部忠\*\*, 水口和彦\*\*\*, 大塚裕太\*\*\*\*, 小川洋二\*\*\*\*\*  
Tetsukazu Kida, Tadashi Abe, Kazuhiko Minakuchi, Yuta Otsuka and Yoji Ogawa

\*工博, 日本大学教授, 生産工学部土木工学科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)  
\*\*博(工), 日本大学教授, 生産工学部土木工学科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)  
\*\*\*博(工), 日本大学助教, 生産工学部土木工学科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)  
\*\*\*\*修(工), (株)太平洋コンサルタント, コンクリート技術部 (〒 285-0802 千葉県佐倉市大作 2-4-2)  
\*\*\*\*\*博(工), (株)太平洋コンサルタント, コンクリート技術部 (〒 285-0802 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

This study experimentally analyzed a decrease in the punching shear load-carrying capacity of the deteriorated RC slabs subjected to the salt and frost damages from anti-freezing agent sprayed on the slabs. The results of a surface analysis using the EPMA indicate that the effect of chloride ion concentrations on the corrosion of re-bar far exceeded the critical chloride ion concentration of re-bar, or 1.2 kg/m<sup>3</sup>. In addition, the results of deterioration diagnosis of re-bar obtained from the core sampling show that the deterioration levels of compression and tension re-bars were in the early and partly in the late acceleration phase, respectively. Further, the results of the test under running vibration loads express that the maximum load-bearing capacity of the RC slabs that sustained the damage decreased by 15% at the maximum as compared with that of the undamaged RC slabs.

*Key Words: RC slab, Salt damage, Frost damage, Running vibration load,*

*Punching shear load-carrying capacity*

キーワード: RC 床版, 塩害, 凍害, 走行振動荷重, 押抜せん断耐荷力

### 1. はじめに

鋼道路橋鉄筋コンクリート(RC)床版の損傷の多くは、大型車両による輪荷重の繰り返し作用に起因した疲労損傷であるとされている。一方、積雪寒冷地域では、大型車両の繰り返し走行に加え、冬期の路面凍結防止剤・融雪剤(塩化カルシウム)の散布による塩害や夜間の凍結や日中の融解などの凍結・融解作用による RC 床版上面コンクリートの土砂化や圧縮鉄筋の腐食進行などの劣化事例が多数報告<sup>1), 2)</sup>されている。RC 床版上面が劣化すると、曲げおよびせん断に抵抗する有効断面が減少するために、疲労耐久性が低下することから、橋梁架設地域の環境に応じた適切な対策が橋梁床版の長寿命化を図る上で重要な課題となっている。

RC 床版の塩害劣化に関する既往の研究では、既存 RC 床版からコンクリート・コアを採集し、塩化物イオン量の分析や、海岸からの塩分飛来範囲の調査、管理供試体

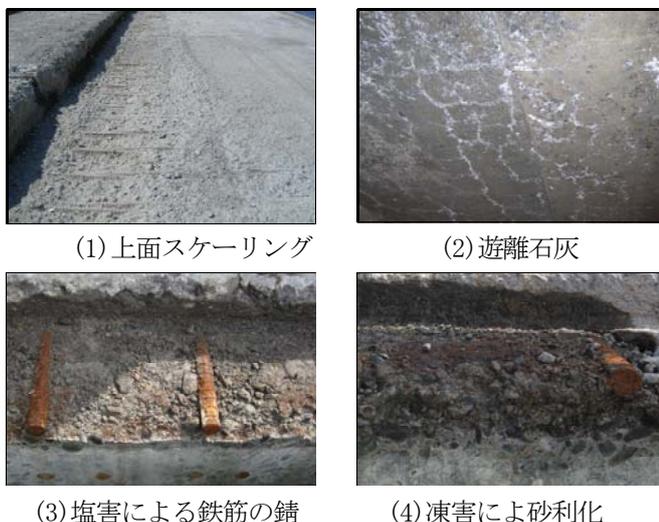
レベルによる塩分濃度試験等が行われている<sup>3), 4), 5)</sup>。また、塩害と凍害を受けた RC 床版に関しては、土木研究所寒地土木研究所<sup>6)</sup>や岩手大学<sup>7)</sup>などで損傷状況に関する調査や道路橋 RC 床版をモデル化した実験研究が行われている。これらによると RC 床版の損傷は、凍結融解作用により路面のコンクリートがスケーリングし、さらに活荷重の繰り返し作用によってコンクリートが砂利化となるなどの劣化が生じている。また、凍害を受けた RC 床版は、通常の RC 床版に比して損傷が著しく、耐久性が低下しているとの報告もなされている<sup>1), 2)</sup>。しかし、実際に塩害もしくは塩害・凍害を受けた RC 床版に対して、大型車両を想定した走行荷重実験などはあまり行われておらず、塩害や凍害作用が RC 床版に及ぼす影響に関しては十分な解明がなされていないのが現状である。

そこで本研究は、積雪寒冷地域の RC 床版が融雪剤の散布による塩害および塩害と凍害を受けた RC 床版の劣化損傷および耐荷力性能の評価を目的とした実験研究で

ある。実験供試体には、RC 床版供試体に走行振動荷重実験を行い応力履歴した後、塩害作用および塩害と凍結融解作用を与えた2タイプを製作した。タイプⅠは、RC 床版上面に融雪剤を1年10ヶ月間の散布と暴露を併用して塩害を作用させた供試体（以下、塩害 RC 床版とする）である。タイプⅡは、1年間融雪剤の散布と暴露を併用した後、10ヶ月間海水の散布・凍結・自然融解を300サイクル行い、塩害と凍害を作用させた供試体（以下、塩害・凍害 RC 床版とする）である。この劣化作用を受けた2タイプのRC 床版供試体を用いて、塩化物イオン濃度、鉄筋の腐食状況を診断、および走行振動荷重実験を行い、塩害 RC 床版および塩害・凍害による複合劣化した RC 床版の耐荷力性能を明らかにし、積雪寒冷地域に建設された橋梁 RC 床版の劣化診断および耐荷力性能評価の一助とするものである。

## 2. 積雪寒冷地域の実橋 RC 床版の損傷状況

積雪寒冷地域に建設された RC 床版は、大型車両の走行による疲労劣化に加え、路面上から供給される塩化物イオンにより鉄筋の発錆や、凍結・融解作用による複合劣化が生じ、コンクリートのスケーリングや砂利化が生じるなど、積雪寒冷地特有の劣化損傷が生じている<sup>5),6),7)</sup>。ここで、積雪寒冷地域における道路橋 RC 床版の劣化状態を写真-1に示す。写真-1(1)は、融雪剤の散布による塩害と凍害作用により、地覆付近の路面がスケーリングし、鉄筋が露出している。また、図-1(2)は、走行疲労による格子状のひび割れと塩害・凍害作用により RC 床版底面には遊離石灰が沈着し、一部ははく離している。次に、写真-1(3)、(4)は橋軸方向の切断面である。写真-1(3)は圧縮鉄筋が塩化物イオンにより錆が発生し、その付近のコンクリートは圧縮鉄筋下まで砂利化している。また、写真-1(4)は鉄筋には発錆と床版厚の1/2付近まで砂利化している。この RC 床版は、1973年の道路



(1) 上面スケーリング

(2) 遊離石灰

(3) 塩害による鉄筋の錆

(4) 凍害による砂利化

写真-1 RC 床版の損傷事例

橋示方書・同解説<sup>8)</sup>（以下、道示とする）に基づいて設計され、1977年から2009年までの35年間供用された後、2009年に取り替えとなったRC 床版である。

以上のように、積雪寒冷地域ではスパイクタイヤの全面禁止（1981年）に伴い、凍結防止剤や融雪剤の散布が日常的となった。これ以降、積雪寒冷地域の道路橋 RC 床版では、凍結防止剤や融雪剤の蓄積により塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生濃度  $1.2\text{kg/m}^3$  を超える床版が急増するものと考えられる。さらに、塩害・凍害作用により RC 床版の鉄筋には発錆やかぶりコンクリートの砂利化など、RC 床版の耐荷力低下に影響を及ぼす劣化損傷が生じる場合が多い。よって、塩害作用および塩害・凍害作用を受けた RC 床版の劣化診断を適切に行い、劣化状態による耐荷力の低下について明らかにする必要がある。

## 3. 使用材料および寸法

### 3.1 使用材料

供試体のコンクリートには普通ポルトランドセメント、粗骨材には最大寸法20mmの骨材を使用した。また、鉄筋はSD295A、D10を使用した。ここで、コンクリートの配合を表-1に示す。また、コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表-2に示す。なお、コンクリートの圧縮強度は、応力履歴に関する実験時の結果である。一方、路面凍結防止剤および融雪剤には、塩化ナトリウム、塩化カルシウム、塩化マグネシウム等が使用されているが、本実験は凍結防止や融雪効果についての実験ではなく、塩化物イオン濃度についての実験であることから、一般的に販売されている、塩化カルシウムを散布した。ここで、塩化カルシウムの成分を表-3に示す。

### 3.2 供試体寸法および鉄筋の配置

供試体は、実験装置の車輪幅が道示Ⅱに規定するT荷重の1/2モデルであることから、道示Ⅱの規定に基づい

表-1 コンクリートの配合表

スラブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単体量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤	
				セメント (C)	水 (W)	細骨材	粗骨材	レオネード 8000S	マイクロア 202
12.0	4.0	53.1	47.0	305	162	859	978	2.29	11ml
±2.5	±1.0								

表-2 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

供試体	コンクリート 圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	鉄筋 (SD295A)		
		降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 kN/mm <sup>2</sup>
RC床版	30.0	365	510	200

表-3 塩化カルシウムの成分

CaCl <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	水不溶解分 (%)	PH (20'Be')
72.0以上	0.005以下	0.04以下	9~10

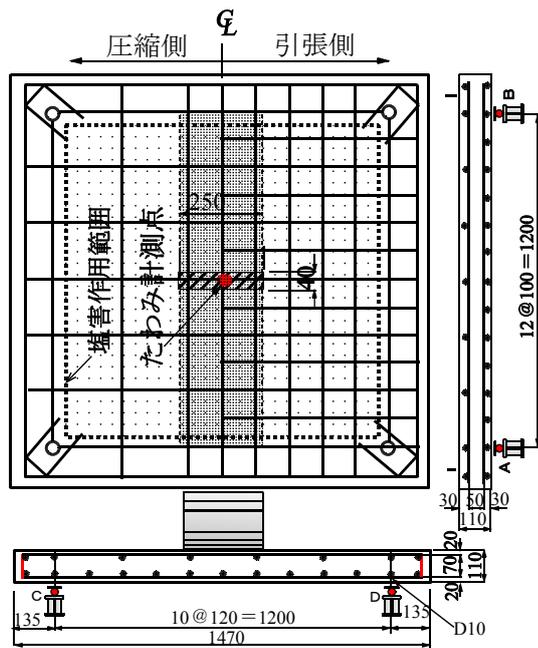


図-1 供試体寸法および鉄筋配置

て RC 床版を設計し、その寸法の 1/2 モデルとした。なお、最小床版厚の算出は、道示Ⅱに規定する 1 日 1 方向の大型車両の計画交通量を 500 台未満とした。よって、供試体寸法は、全長 1470mm、支間 1200mm、厚さ 110mm の等方性版である。鉄筋は複鉄筋配置とし、引張側主鉄筋は 100mm、配力筋は 120mm 間隔で配置し、有効高さはそれぞれ 90mm、80mm とした。また、圧縮鉄筋量は引張鉄筋量の 1/2 を配置した。ここで、供試体寸法および鉄筋の配置を図-1に示す。

#### 4. 実験方法

##### 4.1 実験概要

本実験は、走行振動荷重実験を行い、RC 床版供試体に応力履歴を与える。次に、融雪剤散布による塩害作用および塩害・凍害作用を与える。その後、塩害および塩害・凍害作用を受けた RC 床版供試体に走行振動荷重実験を行い、耐荷力を評価する。なお、耐荷力を比較するために未損傷の RC 床版を用いて静荷重実験および走行振動荷重実験を行い、それぞれの最大耐荷力を評価し、これを基準耐荷力とする。

##### 4.2 応力履歴に関する実験方法

###### (1) 大型自動車の荷重変動

(独) 土木研究所では、大型車両が伸縮継手の段差部を走行する際に発生する荷重変動および衝撃力に関する実験を行い、大型車両の荷重変動を図-2のように示している<sup>9)</sup>。実験に用いた大型車両は、総質量 205.8kN のタンデム式ダンプトラックであり、荷重分担は中軸左動荷重 (以下、軸荷重とする) が 37.73kN、後軸左動荷重が

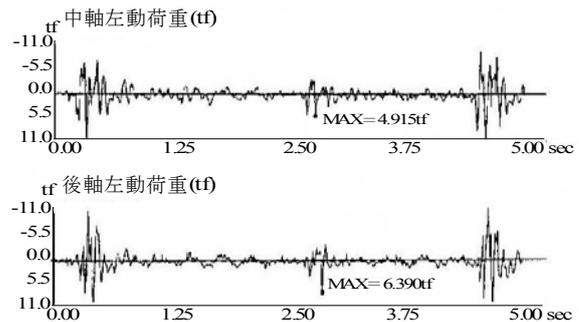


図-2 中軸・後軸の動荷重変動<sup>9)</sup>

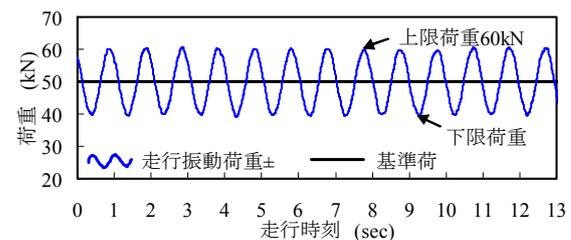


図-3 走行振動荷重±20%の一例

37.14kN である。この軸荷重に対して、橋梁両支点付近では約 2.77 ~ 2.85 倍 (基準荷重に対して ±41 ~ ±48 %) の荷重変動が発生している。また、この時の振動数は中軸で 13Hz、後軸で 18Hz 程度となっている。したがって、実橋の伸縮継手を輪荷重が通過することにより、大型車両の中軸および後軸には荷重変動が発生することになる。これらのことから、RC 床版に応力履歴を与える荷重および耐荷力を評価する実験には、大型自動車の荷重変動を想定した走行振動荷重実験を行う必要がある<sup>10)</sup>。

###### (2) 走行振動荷重実験による応力履歴

本実験における走行振動荷重実験は、基準荷重に対して ±20 % および ±30 % の振動荷重とする。なお、本実験における振動荷重は図-2に示す 2.7sec 付近の荷重振幅を想定した。ここで、基準荷重 60kN における走行振動荷重 ±20 % の荷重波形の一例を図-3に示す。走行振動荷重実験は、基準荷重に対して荷重振幅 ±20 %、±30 % の正弦波形で 1 走行し、1 走行ごとに荷重を増加させる段階荷重とする。荷重は、10kN から 1 走行ごとに基準荷重を 10.0kN ずつ増加させ、破壊するまで走行と基準荷重の増加を行う。走行範囲は支点 A から支点 B を折り返す 1 往復 2400mm (片側 1200mm) とする。また、走行時間は一往復 13sec で走行し、振動数 1.0Hz の片振り荷重とする。本実験での振動数は図-2に示した中軸および後軸が交互に作用するものとした。次に、応力履歴に関する荷重条件は、本供試体は道示Ⅱの規定に基づいて設計し、その 1/2 モデルとしたことから、道示Ⅱに規定する T 荷重 100kN の 1/2 とした 50kN とし、安全率 1.2 を考慮して基準荷重 60kN までとする。応力履歴時の荷重は、基準荷重 60kN までとすると走行振動荷重 ±20 % の上限荷重は 72kN、下限荷重は 48kN となる。また、

走行振動荷重  $\pm 30\%$  場合は、上限荷重が 78kN、下限荷重は 42kN となる。なお、基準荷重に対して  $\pm 20\%$  の振動荷重を走行振動荷重 V20、基準荷重に対して  $\pm 30\%$  の振動荷重を走行振動荷重 V30 と称する。

### 4.3 塩害および塩害・凍害作用方法

積雪寒冷地域における融雪剤および凍結防止剤の散布量は、道路管理者や散布車両によっても異なるが、一般的に 1.0m<sup>2</sup> あたり 40～80g 散布されている。そこで本実験の塩害作用は、応力履歴した RC 床版供試体上面に  $\phi 16\text{mm}$  のエンピ管で 1100mm $\times$ 1100mm (約 1.16m<sup>2</sup>) の枠を製作し、接着剤で密着 (図-1) した。この枠内に水を満載 (約 18.5 l) し、塩化カルシウム (表-2) 40g を 3 日間隔で 1 年 10 ヶ月間 (223 回) 散布した。次に、塩害と凍害作用を与える供試体は、塩害供試体と同様にエンピ管枠内に水を満載した状態で、塩化カルシウム 40g を 3 日間隔で、1 年間 (122 回) 散布した後、塩害作用として RC 床版の枠内に海水を散布し、氷点下 30℃で 12 時間凍結させ、凍結後は 12 時間自然融解して再び海水を散布する。よって、海水の散布と凍結融解作用を 10 ヶ月間で 300 サイクル<sup>11)</sup> 実施した。なお、海水の PH の平均値は 8.2 であり、本実験に用いた塩化カルシウムと近似している。また、供試体は雨水や乾燥を防止するためにブルーシートで被覆した。なお、塩害および塩害・凍害 RC 床版の劣化診断は、塩化物イオン濃度の分析および鉄筋の腐食状態とする。

### 4.4 RC床版、塩害および塩害・凍害RC床版の耐荷力に関する実験方法

#### (1) RC床版

RC 床版に関する実験は、静荷重実験および走行振動荷重実験を行う。

##### 1) 静荷重実験

RC 床版の静荷重実験は、図-1に示すように輪荷重 (幅 250mm、直径 400mm、破壊時の接地面 250 $\times$ 40mm) を最大応力が生じる支間中央に載荷して行う実験である。荷重の大きさは 5.0kN ずつ増加する段階荷重とした。また、支持条件はたわみの変形を拘束しない 4 辺支持とする。なお、静荷重実験における RC 床版の供試体名称は N-S とする。

##### 2) 走行振動荷重実験

RC 床版供試体に走行振動荷重実験を行い、一往復した最大荷重を走行振動荷重実験における RC 床版の最大耐荷力とする。この最大耐荷力を基準に塩害および塩害・凍害 RC 床版の耐荷力と比較し、塩害作用および塩害・凍害作用を受けた RC 床版の耐荷力低下率を評価する。よって、RC 床版に対する走行振動荷重は、4.2(2)項に示した走行荷重実験 V20、V30 と同様に、基準荷重に対して荷重振幅  $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$  の正弦波形とする。RC 床版供試体の名称は走行荷重実験 V20 の場合を S-V20、走

行荷重実験 V30 の場合を S-V30 とする。

#### (2) 塩害および塩害・凍害RC床版

塩害および塩害・凍害 RC 床版の耐荷力に関する実験は、RC 床版供試体の走行振動荷重実験と同様な実験を行う。塩害 RC 床版供試体の名称は走行振動荷重 V20、V30 で、それぞれ S-V20、S-V30 とし、塩害・凍害 RC 床版供試体の名称は走行振動荷重 V20、V30 で、それぞれ S.F-V20、S.F-V30 とする。なお、塩害・凍害 RC 床版は、塩害と凍結融解作用を繰り返すことにより、供試体表面に 3mm～5mm 程度のスケーリングが生じたことから、走行面をプライマー樹脂で平滑仕上げした。

### 5. 応力履歴および塩害・凍害作用に関する実験結果および考察

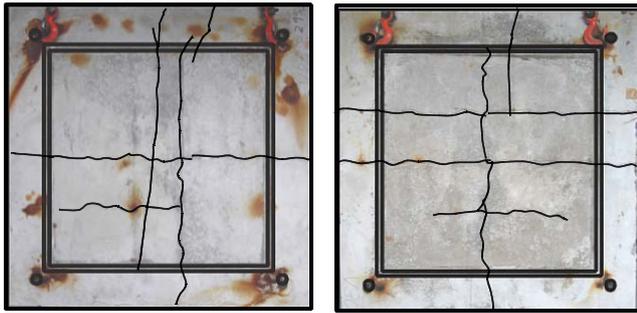
#### 5.1 応力履歴RC床版のひび割れ状況

走行振動荷重実験における基準荷重 60kN までの応力履歴後に塩化カルシウムの散布と暴露を 1 年 10 ヶ月行った塩害 RC 床版供試体の上面、下面のひび割れ状況を図-4に示す。また、1 年間の塩害作用と塩害、凍結、融解を 300 サイクルを行った塩害・凍害 RC 床版供試体の上面、下面のひび割れ状況を図-5に示す。次に、土木学会コンクリート標準示方書 (維持管理編)<sup>12)</sup> による構造物外観上のグレードを表-4に示す。

##### (1) 塩害RC床版供試体

走行振動荷重実験を行い、応力履歴を与えた供試体 S-V20 における応力履歴時のひび割れ状況は、下面のひび割れは目視で確認できるものの上面のひび割れは目視では確認出来なかった。しかし、塩害作用後の上面のひび割れは軸直角方向および軸方向ともに 0.1mm～0.2mm 程度の発生が確認された。このひび割れの発生位置は、床版に配置した圧縮鉄筋位置とほぼ一致している。また、下面のひび割れは応力履歴時に発生したひび割れと同位置で、軸直角方向および軸方向ともに引張鉄筋配置位置に発生し、鉄筋の錆汁が部分的に沈着している。発生箇所は供試体上面、下面ともにひび割れ発生位置、すなわち鉄筋の配置位置付近に部分的に沈着している。次に、走行振動荷重 V30 で応力履歴後の供試体 S-V30 は、供試体 S-V20 とほぼ同様のひび割れが発生している。錆汁は、上面に発生し、下面においても錆汁はひび割れ発生位置に多く沈着している。なお、4 角の錆汁は、床版供試体の積み卸し用の鉄筋フックのものであり、劣化損傷に影響を及ぼすものではない。

したがって、塩害作用を与えた供試体は塩化カルシウム 40g を 1 年 10 ヶ月間散布して塩害作用と暴露試験を行ったことにより、塩化物イオンが蓄積されたための塩害作用による劣化損傷が目視でも確認された。土木学会の基準<sup>12)</sup> による構造物外観上のグレードは、塩害作用によりひび割れ幅の拡大が見られ、表面には錆汁の発生が確認されたことから、構造物外観上のグレードと劣化の



1) 上面

1) 上面

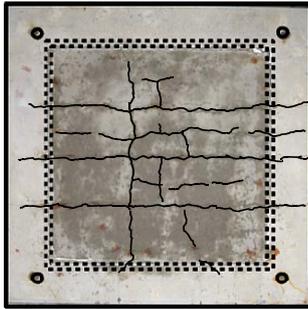
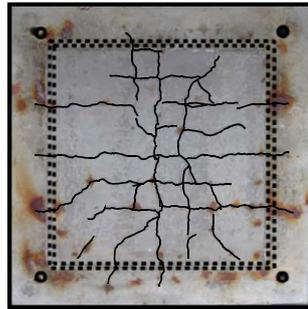
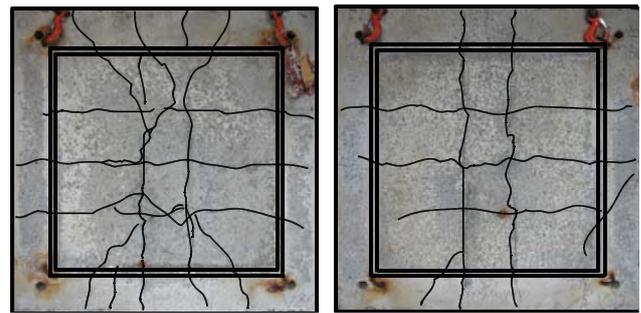
2) 下面  
(1) S-V202) 下面  
(2) S-V30

図-4 塩害作用 RC 床版



1) 上面

1) 上面

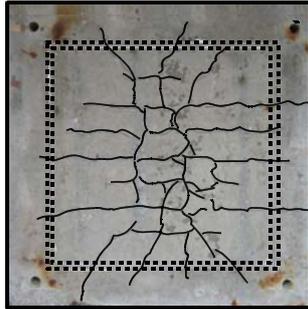
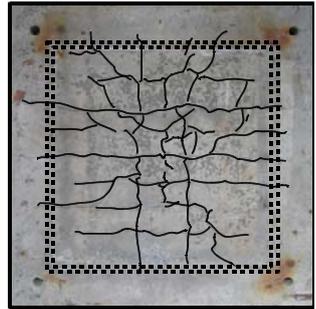
2) 下面  
(1) S.F-V202) 下面  
(2) S.F-V30

図-5 塩害・凍害作用 RC 床版

表-4 構造物の外観上のグレードと劣化の状態<sup>12)</sup>

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態Ⅰ-1 (潜伏期)	外観上の変状が見られない, 腐食発生限界塩化物イオン濃度以下
状態Ⅰ-2 (進展期)	外観上の変状が見られない, 腐食発生限界塩化物イオン濃度以上, 腐食が開始
状態Ⅱ-1 (加速期前期)	腐食のひび割れが発生, 錆汁が見られる
状態Ⅱ-2 (加速期後期)	腐食ひび割れが多数発生, 錆汁がみられる, 部分はく離・はく落が見られる, 腐食量の増大
状態Ⅲ (劣化期)	腐食ひび割れが多数発生, ひび割れ幅が大きい, 錆汁がみられる, 部分はく離・はく落が見られる, 変位・たわみが大きい

状態を診断すると, 供試体 S-V20, S-V30 とともに状態Ⅱ-1, 加速期前期に相当するものと考えられる。

#### (2) 塩害・凍害作用を受けた供試体

走行振動荷重 V20 により応力履歴を与えた直後の供試体 S.F-V20 のひび割れ状況は, 塩害作用供試体と同様に下面のひび割れは目視で確認できるものの上面のひび割れは目視では確認出来なかった。しかし, 塩害・凍害作用後の上面のひび割れは, 軸直角方向, 軸方向に 0.1mm ~ 0.2mm 程度のひび割れ発生がみられた。このひび割れの発生位置は, 床版に配置した圧縮鉄筋位置付近と一致している。また, 下面は応力履歴時に発生したひび割れと同位置であり, 軸直角方向および軸方向ともに引張鉄筋配置位置に発生している。

走行振動荷重 V30 で応力履歴を与えた供試体 S.F-V30 の場合のひび割れ状況は, 供試体 S.F-V20 とほぼ同様のひび割れが発生している。しかし, 塩害・凍害作用後は上面, 下面ともに軸直角方向, 軸方向に配置した鉄筋位

置にひび割れが発生しており, 供試体 S.F-V20 に比してひび割れが多数見られた。

次に, 塩害・凍害作用によるかぶりコンクリート部の劣化は, 供試体 S.F-V20, S.F-V30 とともに, 塩化カルシウムが常に蓄積されることから, 塩害による床版上面の表面損傷が目視でも確認でき, さらに凍結融解作用によりスケーリングが生じ, 表面の損傷は塩害 RC 床版供試体と比較して著しい。なお, 鉄筋の錆汁は塩害作用後に確認されたひび割れ発生位置, すなわち鉄筋配置付近において部分的に錆汁の沈着が目視で確認できたが, 凍害作用後は表面の損傷が著しく錆汁は確認できなかった。これは, 300 回の海水散布により表面の錆汁が流出されたものと考えられる。

土木学会基準<sup>12)</sup>による構造物外観上のグレードは表-4より, 塩害・凍害作用によって, ひび割れ数およびひび割れ幅の増大が見られ, さらにスケーリングが確認されたがはく離やはく落が見られないことから, 供試体 S.F-V20, S.F-V30 とともに, 状態Ⅱ-2 の加速期後期に相当するものと考えられる。

#### 5.2 塩害, 塩害・凍害 RC 床版の劣化診断

塩害および塩害・凍害 RC 床版の劣化診断は, 塩化物イオン濃度と鉄筋の腐食状況について行う。

##### (1) 塩化物イオン濃度の分析

###### 1) 試料採取

塩化物イオン濃度の分析は, 塩害 RC 床版供試体および塩害・凍害 RC 床版供試体ともに, 応力履歴時に発生し

表-5 EPMA 測定条件

加速電圧 (kV)	試料電流 (A)	プローブ径(μm)	分光結晶	計数時間 (msec)	ピクセルサイズ (μm)	標準試料
15	$1 \times 10^{-7}$	100	Cl	50	200	Cl(Halite, Cl=60.66%)

た目視によるひび割れが著しく、塩化物イオンが深い位置まで浸透していると思われる供試体 S-V30, S.F-V30 について行う。試料は、走行振動荷重実験終了後の供試体で、ひび割れ損傷が比較的少ない位置からφ60mmのコアを採取した。

2) EPMA による分析方法<sup>13)</sup>

塩化物イオン濃度の分析には、電子プローブマイクロアナライザ (Electron Probe Micro Analyzer (以下, EPMA とする)) を用いた。試料は、採取したコアを縦半分に切断し、樹脂で表面補強した後、観測面となる切断面を研磨し、その後導電性を持たせるために観測面に炭素を蒸着して測定用試料を製作した。なお、EPMA による試料は、RC 床版厚の 1/2, すなわち 55mm までとする。ここで、EPMA による塩化物イオン濃度の測定条件を表-5に示す。表-5に示した測定条件で、塩化物イオン(Cl)をピクセルごとに定量化し、それらを集積して面分析結果とした。

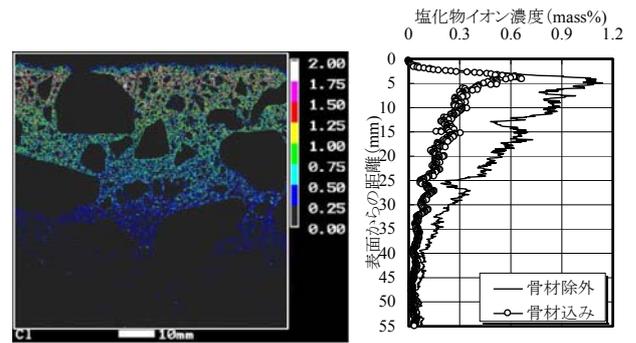
(2) EPMA面分析および塩化物イオン濃度

塩害および塩害・凍害 RC 床版供試体 S-V30, S.F-V30 の EPMA 面分析結果を図-6, 1), および表面からの塩化物イオン濃度 (mass %) を粗骨材除外 (以下, 骨材除外とする) と骨材込みの場合を図-6, 2)に示す。次に、骨材込みの塩化物イオン濃度分布 (mass %) に、コンクリートの単位容積質量  $2,200\text{kg/m}^3$  を乗じて<sup>14)</sup>、コンクリート単位容積あたりの塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ ) を表面からの距離と塩化物イオン濃度との関係として図-7に示す。

1) 塩害 RC 床版供試体

塩害 RC 床版供試体 S-V30 における骨材除外した場合の塩化物イオン濃度 (mass %) は図-6(1), 2)に示すように、表面から 5mm 付近が最大で 1.1 %であり、圧縮鉄筋が配置されている 24mm の位置の塩化物イオン濃度 (mass) は 0.5 %と大幅に減少している。表面から 55mm の位置では 0.04 %となった。また、骨材込みの塩化物イオン濃度 (mass) は表面から 4mm 付近が最大で 0.7 %, 鉄筋配置位置の表面から 24mm の位置では 0.18 %程度と減少している。表面から 55mm の位置では 0.03 %となった。

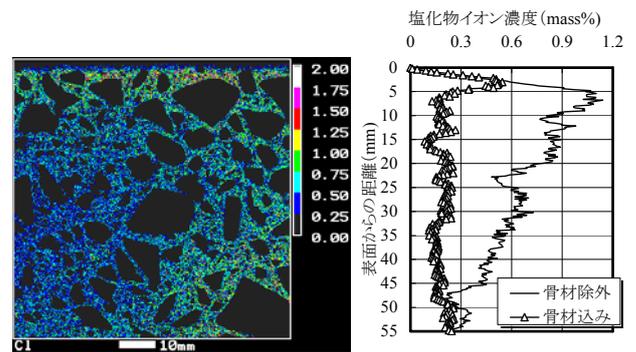
次に、骨材込みのコンクリート中の単位容積あたりの塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ ) は図-7(1)に示すように、表面から 4mm の位置で  $14.7\text{kg/m}^3$ 、圧縮鉄筋位置の表から 24mm の位置では  $3.3\text{kg/m}^3$  であり、塩化物イオンによる鋼材腐食発錆限界濃度  $1.2\text{kg/m}^3$  を超えている。表面から 55mm の位置では  $0.3\text{kg/m}^3$  と減少している。したがって、表面から 30mm 付近までは鋼材腐食発錆限界濃度  $1.2\text{kg/m}^3$  を上回っていることから圧縮鉄筋は塩害の影響



1) EPMA 面分析

2) 塩化物イオン濃度 (mass %)

(1) 塩害 RC 床版供試体(供試体 S-V30)

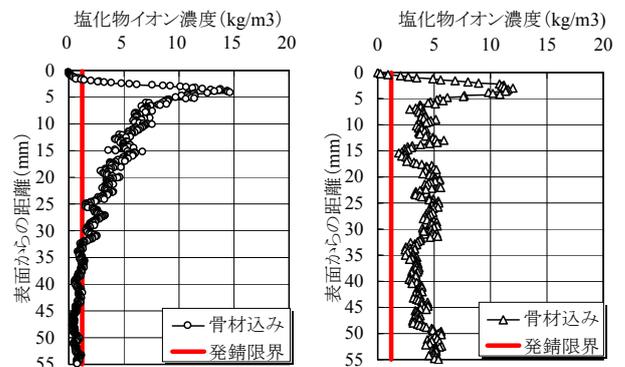


1) EPMA 面分析

2) 塩化物イオン濃度 (mass %)

(2) 塩害・凍害 RC 床版(供試体 S.F-V30)

図-6 EPMA 面分析および浸透性評価



(1) 塩害 RC 床版供試体 (供試体 S-V30)

(2) 塩害・凍害 RC 床版 (供試体 S.F-V30)

図-7 コンクリート中の塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )

を受け鉄筋腐食しているものと考えられる。

2) 塩害・凍害 RC 床版供試体

塩害・凍害 RC 床版供試体 S.F-V30 における骨材除外した場合の塩化物イオン濃度 (mass %) は、図-6(2), 1)に示すように、表面から 6.8mm 付近が最も濃度が高く 1.14 %であり、24mm 付近で 0.55 %である。浸透深さは、上面側より RC 床版厚の 1/2 約 55mm においても 0.24 %と塩害作用を受けた RC 床版の 6.7 倍となり、表

面から 55mm の位置でも塩化物イオン濃度が高い。また、骨材込みの場合は表面から 3mm 付近が最大で 0.54 %、鉄筋配置位置の表面から 24mm の位置では 0.24 % と減少している。表面から 55mm の位置でも 0.24 % となり、床版表面から距離 7mm ~ 55mm までの区間では塩化物イオン濃度 (mass) の大幅な減少はみられない。

次に、塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ ) は図-7(2)に示すように、コンクリート表面から 3mm 位置がピークとなり  $12\text{kg/m}^3$  に達し、その後、急激に減少するが、圧縮鉄筋の配置付近である上面から 24mm の位置では  $4.0\text{kg/m}^3$  であり、塩害作用のみを受けた RC 床版供試体 S-V30 と比較すると約 2 倍の塩化物イオン濃度である。RC 床版厚 55mm 付近の塩化物イオン濃度は  $5.3\text{kg/m}^3$  であり、塩害 RC 床版の 6.6 倍となり、また床版上面から距離 7mm ~ 55mm 付近までは塩化物イオン濃度の減少は見られない。これは、塩害作用後、300 回の凍結・融解を繰り返すことにより、塩分は濃度拡散のほか凍結・融解作用の繰り返しによる浸透圧、さらに圧縮鉄筋かぶり内に発生した微細なひび割れに塩水が浸透し、凍結融解作用を繰り返すことによりセメントが遊離する、すなわちコンクリートの微細構造組織の劣化により、塩分の浸透を促進した要因が考えられる。したがって、塩害・凍害 RC 床版供試体 S-V30 はほとんどの領域で鋼材腐食発錆限界濃度  $1.2\text{kg/m}^3$  を超え、圧縮鉄筋および引張鉄筋に発錆が生じている状態である。

### (3) 鉄筋の腐食診断

鉄筋の腐食の評価は、塩害および塩害・凍害 RC 床版全ての供試体について行い、試料は、塩化物イオン分析と同様にひび割れ損傷が比較的少ない位置から、 $\phi 70\text{mm}$  のコアを採取した。塩害や凍害の作用による鉄筋の腐食グレードは、土木学会コンクリート標準示方書(施工編)<sup>15)</sup>では、表-6のように規定されている。本研究ではこの土木学会基準を基に鉄筋の劣化度を評価することとする。

#### 1) 塩害 RC 床版供試体

各供試体の鉄筋番号およびコアから採取した鉄筋の状態を図-8に示す。また、供試体の RC 床版上面から鉄筋位置までの距離および鉄筋の腐食グレードを表-7に示す。

塩害 RC 床版供試体の腐食グレードについて土木学会基準<sup>15)</sup>より評価すると、供試体 S-V20 の圧縮鉄筋 No.1, No.2 および引張側配力筋 No.3 は、わずかに発錆がみられることから腐食グレードは II に相当する。また、引張側主鉄筋 No.4 は全面に発錆が確認できることから腐食グレードは III に相当する。次に、供試体 S-V30 の場合は塩化物イオンの浸透深さが圧縮鉄筋位置を超えているにもかかわらず、圧縮鉄筋 No.1, No.2 の腐食グレードは II 程度である。また、引張側配力筋 No.3, No.4 は全周に渡って発錆がみられることから、腐食グレードは III に相当する。なお、供試体 S-V20, S-V30 とともに圧縮鉄筋に比

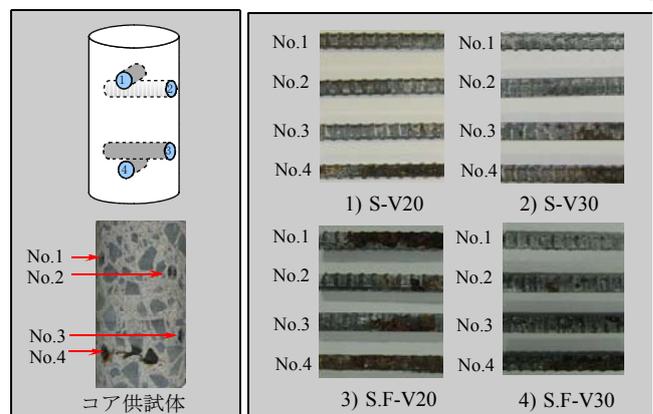
して引張鉄筋の腐食が大きい傾向を示している。この要因としては、走行振動荷重により応力履歴させた際に、RC 床版供試体には貫通ひび割れが発生するとともに鉄筋には曲げ引張応力を受けている。したがって、鉄筋は応力履歴時の引張応力と塩害作用による腐食環境の相互作用により腐食が促進される現象、すなわち応力腐食によるもと考えられる。

#### 2) 塩害・凍害 RC 床版供試体

塩害・凍害 RC 床版供試体の腐食グレードを表-6に示す土木学会基準より評価すると、供試体 S.F-V20 の圧縮鉄筋 No.1 には、広範囲にわたり鉄筋の発錆が見られることから腐食グレードは IV である。また、圧縮側配力筋 No.2 の腐食グレードは II、引張配力筋 No.3 は発錆がみられることから腐食グレードは III に相当する。引張側主鉄筋 No.4 は、全面に発錆が確認できることから腐食グレードは IV に相当する。次に、供試体 S.F-V30 では、塩

表-6 鉄筋の腐食グレード<sup>15)</sup>

腐食グレード	鋼材の状態
I	黒皮の状態、またはさびは生じているが全体的に薄い緻密なさびであり、コンクリート面にさびが付着していることはない
II	部分的に浮きさびがあるが、小面積の斑点状である
III	断面欠損は目視観察では認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている
IV	断面欠損が生じている



(1) 鉄筋配置位置 (2) 鉄筋の腐食状況  
図-8 塩害・凍害作用による鉄筋の腐食状況

表-7 床版上面からの距離と腐食グレード

供試体	鉄筋番号	表面からの距離(mm)	腐食度
S-V20	V20-1	27	II
	V20-2	36	II
	V20-3	75	II
	V20-4	85	III
S-V30	V30-1	24	II
	V30-2	34	II
	V30-3	76	III
	V30-4	87	III
S.F-V20	V20-1	27	IV
	V20-2	36	II
	V20-3	75	III
	V20-4	85	IV
S.F-V30	V30-1	28	I
	V30-2	34	II
	V30-3	80	II
	V30-4	92	IV

化物イオンの浸透深さが圧縮鉄筋位置を超えているにも関わらず、圧縮鉄筋 No.1, No.2, および引張側配力鉄筋 No.3 は鉄筋に部分的な錆が発生していることから腐食グレードはⅡ程度である。引張主鉄筋 No.4 は全周に渡って発錆がみられことから腐食グレードはⅣに相当する。なお、供試体 S.F-V20, 30 供試体ともに圧縮鉄筋に比して引張鉄筋の腐食が大きい傾向を示している。

塩害 RC 床版供試体と塩害・凍害 RC 床版供試体とを比較するといずれも引張鉄筋の腐食が著しくなっている。また、土木学会基準<sup>15)</sup>による腐食グレードは、塩害・凍害 RC 床版供試体の場合が高位になっている。これは、鉄筋の応力腐食や上面から浸透した塩化物イオンが応力履歴時に発生した底面のひび割れの開閉により腐食が促進されたものと考えられる。これらのことから、本実験における塩害および塩害・凍害作用を受けた RC 床版は、構造物外観上および鉄筋の腐食グレードから、加速期前期から後期に相当するものと考えられ、早期の表面処理やひび割れの補修を施すとともに、RC 床版上面には防水層を設けることが重要と考えられる。さらに、現行の土木学会コンクリート標準示方書（維持管理編）<sup>12)</sup>には、RC 床版の劣化過程を、疲労による劣化、塩害による劣化および凍害による劣化と、それぞれ別々に劣化基準が設けられているが、積雪寒冷地域における RC 床版の損傷報告などを考慮した場合、これらを相互的に評価できる劣化基準の構築が必要であるとする。

## 6. 塩害および塩害・凍害RC床版の走行振動荷重実験に関する結果および考察

### 6.1 最大耐荷力および破壊モード

RC 床版および塩害および塩害・凍害 RC 床版の実験最大耐荷力を表-8に示す。なお、走行振動荷重実験における最大耐荷力は、本実験の走行範囲を1走行維持した最大荷重とする。

#### (1) RC床版供試体

静荷重実験における供試体 N-S の最大耐荷力の平均は 167.8kN である。また、走行振動荷重 V20 の供試体 N-V20 の平均耐荷力は 141.6kN であり、走行振動荷重 V30 の供試体 N-V30 の平均耐荷力は 140.5kN である。静荷重実験における供試体 N-S と走行振動荷重実験の供試体 N-V20, N-V30 の耐荷力比は、いずれも 0.84 となり、走行振動荷重が及ぼすことにより耐荷力が 16 %低下する結果となった。これは、走行振動荷重による動的影響が及ぼすことにより耐荷力が低下したものである。なお、本実験の範囲内では、荷重振幅の影響による耐荷力の低下はほとんどみられない。

#### (2) 塩害RC床版供試体

塩害作用を受けた RC 床版の走行振動荷重実験における最大耐荷力は、走行振動荷重 V20 で走行した供試体 S-V20 の最大耐荷力は 131.8kN であり、走行振動荷重

表-8 最大耐荷力および破壊モード

供試体	実験最大耐荷力 (kN)	平均耐荷力 (kN)	耐荷力比	破壊モード
N-S-1	165.3	167.8	—	押抜きせん断破壊
N-S-2	170.2			押抜きせん断破壊
N-V20-1	137.9	141.6	0.84 (=N-V/N-S)	押抜きせん断破壊
N-V20-2	145.3			押抜きせん断破壊
N-V30-1	143.8	140.5	0.84 (=N-V/N-S)	押抜きせん断破壊
N-V30-2	137.1			押抜きせん断破壊
S-V20	131.8	131.8	0.93 (=S/N-V)	押抜きせん断破壊
S-V30	126.6	126.6	0.90 (=S/N-V)	押抜きせん断破壊
S.F-V20	120.2	120.2	0.85 (=S.F/N-V) 0.91 (=S.F/S-V)	押抜きせん断破壊
S.F-V30	123.5	123.5	0.88 (=S.F/N-V) 0.98 (=S.F/S-V)	押抜きせん断破壊

V30 の供試体 S-V30 の最大耐荷力は 126.6kN である。RC 床版供試体 N-V20 の最大耐荷力と比較すると、供試体 S-V20 の耐荷力比は 0.93 となり塩害を受けることにより 7 %の耐荷力が低下した。また、供試体 S-V30 の場合は 0.90 となり、10 %の耐荷力が低下した。したがって、RC 床版は塩害作用を受けることにより鉄筋の腐食グレードがⅡ～Ⅲになると、通常の RC 床版に比して 7 %～10 %の耐荷力が低下する結果となった。さらに、RC 床版の静的耐荷力と比較すると塩害作用を受けた走行振動荷重 V20, V30 の供試体と比較すると供試体 S-V20, S-V30 で、それぞれ 22 %, 25 %の耐荷力が低下している。

#### (3) 塩害・凍害RC床版供試体

塩害・凍害作用を与えた RC 床版の走行振動荷重実験における最大耐荷力は、走行振動荷重 V20 で走行した供試体 S.F-V20 の最大耐荷力は 120.2kN であり、走行振動荷重 V30 の供試体 S.F-V30 の最大耐荷力は 123.5kN である。RC 床版供試体 N-V20 の最大耐荷力と比較すると、供試体 S.F-V20 の耐荷力比は 0.85 となり塩害と凍害の複合劣化を受けることにより 15 %の耐荷力が低下した。また、供試体 S.F-V30 の場合は 0.88 となり、12 %の耐荷力の低下がみられた。次に、塩害・凍害 RC 床版供試体と塩害 RC 床版供試体との耐荷力比は、塩害と凍害を受けることにより、供試体 S.F-V20, S.F-V30 で、それぞれ 9 %, 2 %の耐荷力の低下がみられた。静荷重実験の耐荷力と比較すると走行振動荷重 V20, V30 の供試体 S.F-V20, S.F-V30 は、それぞれ 28 %, 26 %の耐荷力が低下している。

よって、塩害と凍害を受けることにより、通常の RC 床版に比して走行振動荷重を受けることによる耐荷力の低下は 12 %～15 %であり、塩害作用を与えた供試体に対しても最大で 9 %耐荷力が低下している。なお、塩害・凍害作用を受けた RC 床版供試体は、輪荷重が走行する範囲に 3～5mm 程度のスクレーリングが生じていたことから、耐荷力に影響を及ぼさない程度に走行面にグラマーを塗布して平滑仕上げして走行振動荷重実験を行った。

以上より、塩害・凍害を受けた RC 床版の耐荷力は通常の RC 床版に比して荷重性能の低下が認められることから、構造物外見上および鉄筋腐食グレードから推察される劣化の状態、すなわち状態Ⅱ-1の加速期前期であっても、構造物の安全上の観点からは安全性に影響を及ぼすことから早期の点検および補修・補強対策を講じる必要であると考えられる。

## 6.2 荷重とたわみの関係

RC 床版の中央で計測した静荷重実験 N-S、走行振動荷重 V20 の供試体 N-V20、塩害および塩害・凍害 RC 床版供試体 S-V20、S.F-V20 のそれぞれの荷重とたわみの関係を図-9(1)示す。同様に、静荷重実験と走行振動荷重 V30 の供試体 N-S、N-V30、塩害および塩害・凍害 RC 床版供試体 S-V30、S.F-V30 のそれぞれの荷重とたわみの関係を図-9(2)に示す。なお、塩害および塩害・凍害作用を与えた供試体は、走行振動荷重による応力履歴を与えた場合の荷重とたわみおよび荷重除荷時の残留たわみを初期値とした。

### (1) 静荷重実験

静荷重実験における荷重とたわみの関係は、RC 床版供試体 N-S-1、N-S-2 ともに、荷重 130kN 付近までは線形的に増加している。その後、荷重 150kN 付近からたわみの増加が著しい。供試体 N-S-1 の最大たわみは荷重 165.3kN で 14.1mm である。また、供試体 N-S-2 の場合の最大たわみは荷重 170.2kN で 11.6mm である。

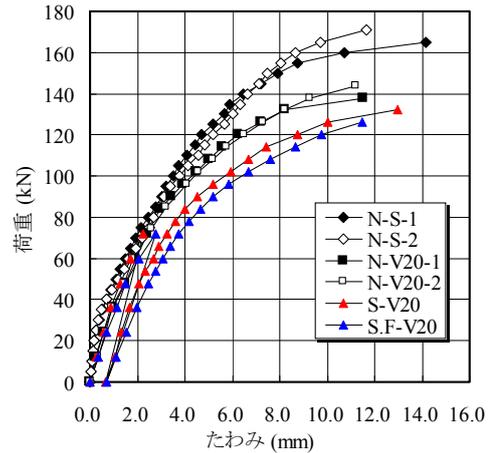
### (2) 走行振動荷重実験 (V20)

#### 1) RC 床版供試体

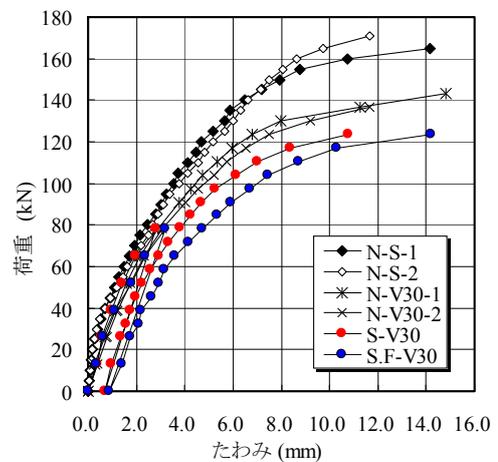
走行荷重実験 V20 の場合は、供試体 N-V20-1、2 ともに荷重 80kN 付近まで線形的に増加し、その後の荷重増加でたわみの増加も大きくなっている。最大たわみは、供試体 N-V20-1 が荷重 137.9kN で 11.5mm、供試体 N-V20-2 が荷重 145.3kN で 11.2mm である。また、静荷重実験と走行振動荷重 V20 の場合について荷重 100kN で比較すると、約 1.24 倍のたわみ差が生じており、走行振動荷重を受けることによりたわみが増大する傾向にあることが分かる。

#### 2) 塩害 RC 床版供試体

塩害作用を与えた供試体の応力履歴は、走行振動荷重 V20 で基準荷重 60kN まで行った。この時点での供試体 S-V20 のたわみは 2.24mm であり、荷重除荷時の残留たわみは 0.65mm であった。そこで、塩害作用後のたわみの計測は残留たわみ 0.65mm を初期値とした。全体的なたわみの変化は、供試体 N-V20 と同様な増加傾向を示しているが、荷重 90kN 付近からたわみの増加が著しくなっている。最大たわみは荷重 131.8kN で 12.9mm である。次に、供試体 N-V20 と供試体 S-V20 とのたわみを荷重 80kN で比較すると、供試体 S-V20 のほうが 1.3 倍程度大きくなっている。



(1) 静荷重実験および走行振動荷重 V20



(2) 静荷重実験および走行振動荷重 V30

図-9 荷重とたわみの関係

### 3) 塩害・凍害 RC 床版供試体

塩害・凍害作用を与えた供試体の応力履歴は、走行振動荷重 V20 で基準荷重 60kN まで行った。この時点の供試体 S.F-V20 のたわみは 2.24mm であり、荷重除荷時の残留たわみが 0.65mm である。荷重とたわみの関係は、供試体 N-V20 と同様な増加傾向を示しているが、荷重 84kN 付近からたわみの増加が著しくなっている。最大たわみは、荷重 120.2kN で 11.3mm である。荷重 80kN で比較すると、塩害・凍害作用を受けた供試体 S.F-V20 が供試体 N-V20 の 1.38 倍となっている。

### (3) 走行振動荷重実験 (V30)

#### 1) RC 床版供試体

走行振動荷重 V30 の場合の供試体 N-V30 の荷重とたわみの関係では、荷重 78kN まではほぼ線形的に増加しているが、その後の荷重増加からたわみの増加が大きい。最大たわみは荷重 143.8kN で 14.8mm である。また、静荷重実験 N-S と走行振動荷重 V30 の場合のたわみを荷重 100kN で比較すると、約 1.2 倍のたわみが生じており、走行振動荷重を受けることによりたわみが大きくなる傾向にある。

## 2) 塩害 RC 床版供試体

塩害作用を与えた供試体 S-V30 の応力履歴は、基準荷重 60kN まで段階的に荷重を増加させた走行振動で行った。その荷重とたわみの関係は供試体 N-V30 と同様な増加傾向を示している。応力履歴時のたわみは荷重 78kN で 2.8mm、残留たわみは 0.7mm である。塩害作用後の走行振動荷重による供試体 S-V30 のたわみは、荷重 60kN まで線形的に増加し、その後の荷重増加ではたわみの増加が著しくなった。また、最大たわみは荷重 126.6kN で 14.2mm である。次に、供試体 N-V30 と供試体 S-V30 とのたわみを荷重 80kN で比較すると、塩害作用を受けた供試体 S-V30 が約 1.15 倍になっている。

## 3) 塩害・凍害 RC 床版供試体

塩害・凍害作用を与えた供試体の応力履歴は、基準荷重 60kN まで荷重振幅  $\pm 30\%$  で走行させて行った。応力履歴時の荷重とたわみの関係は、供試体 N-V30 と比較的類似した増加傾向を示している。応力履歴時のたわみは荷重 78kN で 3.2mm、残留たわみは 0.8mm である。塩害・凍害 RC 床版供試体 S.F-V30 のたわみは、荷重 60kN まで線形的に増加し、その後の荷重の増加に対してたわみの増加が著しくなった。また、最大荷重時のたわみは上限荷重 123.5kN で 14.1mm である。基準荷重 80kN で比較すると、塩害・凍害作用を受けた供試体 S.F-V30 が供試体 N-V30 の 1.81 倍となっている。

塩害および塩害・凍害 RC 床版供試体の荷重とたわみの関係を比較すると、走行振動荷重 V20 では両供試体ともに比較的類似したたわみ増加を示しているが、走行振動荷重 V30 では塩害・凍害 RC 床版供試体が初期段階より若干たわみの増加傾向が大きい。これは、応力履歴作用時および塩害・凍害作用時のひび割れおよびコンクリートの表面劣化などの影響が考えられる。また、走行振動荷重 V30 の方が初期段階よりたわみの増加が大きくなっている。しかしながら、通常的环境下におかれた

RC 床版供試体に比して、塩害および塩害・凍害作用を受けた供試体は、早い荷重レベルでたわみの増大が見られるものの、応力履歴させた際の残留たわみを考慮すると、荷重たわみの関係には顕著な差異は見られなかった。

## 6.3 破壊状況

本実験における RC 床版、塩害および塩害・凍害 RC 床版の破壊時の状況を図-10に示す。また、塩害 RC 床版供試体 S-V20 および塩害・凍害 RC 床版供試体 S.F-V20 の軸直角方向の切断面を図-11に示す。

### (1) RC床版供試体

#### 1) 静荷重実験

静荷重実験における供試体 N-S-1 の破壊時のひび割れ状況は図-10(1)に示すように、上面は荷重載荷位置で輪荷重接地面は 25cm×4cm であるが 25cm×25cm の範囲が著しく破壊している。下面は、軸方向および軸直角方向に配置した鉄筋位置にひび割れが発生するとともに、降伏線方向にひび割れが発生している。また、輪荷重の載荷位置から 45 度底面はダウエル作用により引張鉄筋かぶりコンクリートがはく離している。供試体 N-S-2 も同様な破壊状況を示し、破壊モードは押抜きせん断破壊となった。

#### 2) 走行振動荷重実験

RC 床版における走行振動荷重 V20 の場合の供試体 N-V20-1 の破壊時の下面のひび割れ状況は図-10(2)に示すように、床版上面は輪荷重走行面に軸直角方向に貫通ひび割れが発生している。また、下面は、鉄筋の配置位置に格子状のひび割れが発生している。輪荷重走行位置から 45 度の底面はダウエル作用の影響により引張鉄筋かぶりコンクリートのはく離が見られる。供試体 N-V20-2 および走行振動荷重 V30 の場合の供試体 N-V30-1, 2 においても同様な破壊状況を示し、輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。

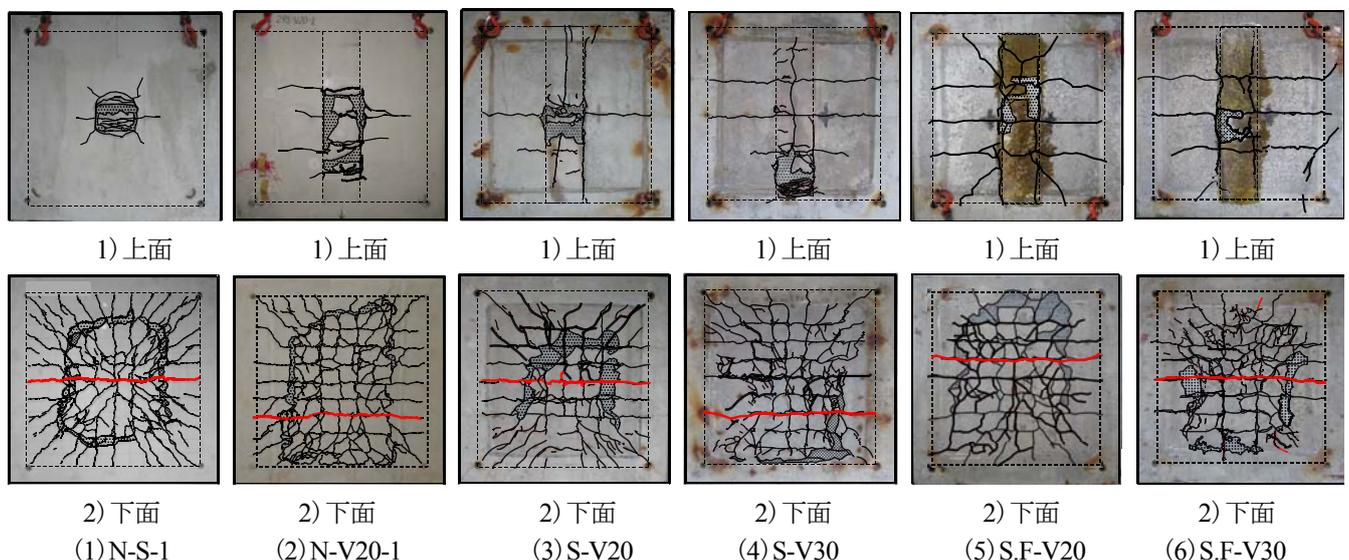


図-10 破壊状況

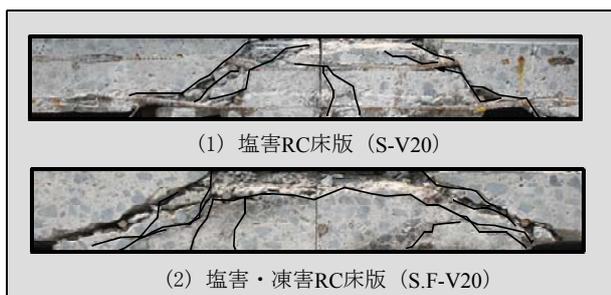


図-11 軸直角方向の破壊状況

## (2) 塩害RC床版供試体

走行振動荷重 V20 の供試体 S-V20 の上面は図-10(3)に示すように、応力履歴と塩害作用により発生したひび割れが、塩害作用後の走行振動荷重によって軸直角方向および軸方向にわずかであるが進展している。また、下面は応力履歴時に発生したひび割れが進展し、破壊時のひび割れは、軸直角方向および軸方向に配置した鉄筋の位置である。また、引張鉄筋下面はダウエル作用の影響によりはく離が生じている。破壊モードは、輪荷重が中央付近を走行中に押抜きせん断破壊となった。この破壊位置は、応力履歴時に発生した貫通ひび割れの発生位置であり、鉄筋の発錆により錆汁が表面に沈着している位置でもある。

次に、軸直角方向の切断面は図-11(1)に示すように、輪荷重載荷位置から 45 度で押抜きせん断破壊となり、45 度底面はダウエル作用により引張鉄筋かぶりコンクリートがはく離している。

走行振動荷重 V30 の供試体 S-V30 の上面は図-10(4)に示すように、応力履歴時と塩害作用によって発生したひび割れが、走行振動荷重実験によって進展している。また、下面は応力履歴時に発生したひび割れの進展と、新たなひび割れが発生し、図-5(2)に示す錆汁の沈着が著しい位置で破壊に至っている。ひび割れ間隔は、鉄筋の配置間隔程度である。また、引張鉄筋のかぶりにはダウエル作用の影響によりはく離が生じている。破壊モードは、輪荷重が走行中に支点 A から 30cm 付近で押抜きせん断破壊となった。

## (3) 塩害・凍害 RC 床版供試体

走行振動荷重 V20 の供試体 S.F-V20 の上面は図-10(5)に示すように、応力履歴後の塩害・凍害作用により発生したひび割れが走行振動荷重時の段階載荷によってわずかであるが進展している。しかし、塩害・凍害作用により走行面には 3～5mm 程度のスケールリングが生じ、プライマー樹脂で表面保護して実験を開始したが、破壊時には圧縮鉄筋かぶりコンクリートが砂利化により著しく損傷を受けている。次に、下面は応力履歴時に発生したひび割れが進展して最終的に押抜きせん断破壊となり、ひび割れ間隔は鉄筋の配置間隔と同様である。また、引張鉄筋下面にはダウエル作用の影響によるはく離が生じている。最終的には、輪荷重が走行中に床版中央で押

抜きせん断破壊となった。

次に、軸直角方向の切断面は図-11(2)に示すように、輪荷重載荷位置から 45 度で押抜きせん断破壊となり、45 度底面はダウエル作用により引張鉄筋かぶりコンクリートがはく離している。塩害 RC 床版供試体 S-V20 の切断面と比較すると、塩害 RC 床版の輪荷重走行面のコンクリートに損傷は見られないが、塩害・凍害 RC 床版供試体 S.F-V20 は圧縮鉄筋かぶりコンクリートが著しく破壊している。これは、応力履歴時に発生した微細のひび割れに塩水が浸透し、凍結融解作用により、コンクリートの微細構造組織が劣化し、砂利化したためである。

走行振動荷重 V30 の供試体 S.F-V30 の上面は図-10(6)に示すように、応力履歴時と塩害・凍害作用によって発生したひび割れが走行振動荷重実験の段階載荷によってわずかであるが進展が見られた。最終的には輪荷重が走行中に支間中央から 20cm 走行した位置で押抜きせん断破壊となった。また、供試体下面は、応力履歴時に発生したひび割れが進展して破壊に至った。ひび割れ間隔は鉄筋の配置間隔と同様である。また、引張鉄筋下面はダウエル作用の影響によるはく離が生じている。

塩害 RC 床版供試体と塩害・凍害 RC 床版供試体の耐力比は、塩害 RC 床版に比して塩害・凍害 RC 床版は 0.91～0.98 とわずかに低下しているにも関わらず、破壊時のひび割れ状況を比較すると、塩害・凍害 RC 床版供試体の底面のひび割れは著しく発生している。これは、図-11に示すように塩害・凍害作用を繰り返すことにより、走行荷重を受け上面がコンクリートの微細構造組織の劣化により、かぶりコンクリートが砂利化したことによるものと考えられる。今後は、顕微鏡使用による微細なクラックについても検証したい。

## 7. まとめ

応力履歴 RC 床版供試体に、凍結防止剤や融雪剤である塩化カルシウムを 1 年 10 ヶ月間散布して塩害作用を与えた供試体と、この供試体に氷点下 30 度での凍結融解作用を 300 サイクル行った供試体に関する劣化状態の評価と耐力低下に関する実験を行った結果、次のことが明らかになった。

- (1) 走行振動荷重による応力履歴後の塩害および塩害・凍害作用は、構造物外観上の劣化グレードから診断すると、塩害床版の劣化グレードは状態Ⅱ-1 の加速期前期に相当し、塩害・凍害作用を受けた場合は状態Ⅱ-2 の加速期後期に相当する結果となった。
- (2) 走行振動荷重による応力履歴作用後に塩害および塩害・凍害作用を与えた場合、両供試体ともに目視で確認できるひび割れの進展がみられた。また、ひび割れ部からは部分的な鉄筋の錆汁も確認され、塩害・凍害作用を与えた供試体においては表面のスケールリングや砂利化が著しい。

- (3) 鉄筋の腐食グレードは、塩害を与えた供試体で圧縮鉄筋側がグレードⅡ，引張鉄筋側がグレードⅢ程度となり，塩害・凍害を与えた供試体では走行振動荷重 V20，V30 供試体ともに引張側がグレードⅣであった。したがって，外観上の劣化グレード以上に塩害および塩害・凍害作用の影響を受けているものと考えられる。
- (4) 塩害および塩害・凍害作用を与えた RC 床版と通常の RC 床版との耐荷力を比較すると，塩害を与えた場合で最大 10%，塩害・凍害を与えた場合で最大 15%の耐荷力の低下がみられた。したがって，コンクリート中の鉄筋が塩化物イオンにより腐食する前に予防保全的な補修を行う必要がある。
- (5) 走行振動荷重実験により，応力履歴した塩害・凍害 RC 床版は，コンクリート表面からの塩化物イオンにより鉄筋の発錆やコンクリートの微細構造組織の劣化が著しくなり，砂利化へと進行する。したがって，EPMA の面分析において塩化物イオン濃度が最大となる上面はスケールリングが発生した時点で，修繕計画を施す必要がある。
- (6) 塩害および塩害・凍害作用を受けた RC 床版の上面は，軸直角方向および軸方向に貫通ひび割れが発生している。またその下面は，軸直角方向および軸方向に鉄筋間隔と同じ間隔でひび割れが発生し，格子状を形成している。破壊形態は，全ての供試体で輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。
- 3) 毛利幸一，宮里心一：石川県における鉄筋コンクリートの塩害に関する実態調査，土木学会第 60 回年次学術講演会，5-041，pp. 81-82, 2005.
- 4) 小尾稔，田口史雄：寒冷地海岸コンクリート構造物の塩分量調査，土木学会第 58 回年次学術講演会，pp. 401-402, 2003.
- 5) 三田村浩，佐藤京，本田幸一，松井繁之：道路橋 RC 床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響，構造工学論文集 Vol.55A，pp.1420-1431, 2009
- 6) 三田村浩，安達優，石川博之：積雪寒冷地における既設道路，橋床版の余寿命予測式の検討，寒地土木研究所月報，2007.
- 7) 新銀武，鈴木大輔，出戸秀明，岩崎正二：積雪寒冷地の塩化物供給を考慮した床版寿命診断に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第 13 巻，pp. 347-354, 2005.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ，Ⅱ，2002.
- 9) 土木研究所構造研究室：橋の衝撃荷重に関する試験調査報告書(Ⅰ-1987)，土木研究所資料，No.2426，1987.
- 10) 阿部忠，木田哲量，澤野利章，星埜正明，加藤清志：走行荷重および変動荷重を受ける RC はりの耐荷力と動的影響，構造工学論文集，Vol.47A，pp. 313-320, 2001.
- 11) 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法に関する研究委員会報告書，2006.
- 12) 土木学会：コンクリート標準示方書（維持管理編），2002.
- 13) 河野広隆，渡辺博志，田中良樹：コンクリートのひび割れ部における塩分浸透，土木研究所資料第 3950 号，2004.
- 14) 橋梁塩害対策検討委員会：塩害橋梁維持管理マニュアル(案)，2008
- 15) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編），2002.

(2009 年 9 月 24 日受付)

#### 参考文献

- 1) 小野貴之，三田村浩，林川俊郎，松井繁之：積雪寒冷地における RC 床版の疲労耐久性に関する研究，第六回道路橋床版シンポジウム論文報告書，pp.75-80, 2008.
- 2) 山下英俊，堺幸司，熊谷政行，喜多達夫：北海道におけるコンクリート構造物の複合劣化に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，pp. 543-548, 1994.