

塩害作用を受けた RC 床版の劣化診断

木田 哲量 (日大生産工・教授), 阿部 忠・澤野利章 (日大生産工・教授)
 小川 洋二 ((株)太平洋コンクリート・コンクリートコンサルタント事業部第3グループリーダー)

1. はじめに

鋼道路橋 RC 床版のひび割れ損傷は、大型自動車の繰返し走行に起因した広義の疲労損傷であることが明らかにされている。一方、積雪寒冷地方では路面凍結防止剤・融雪剤 (塩化カルシウム) の散布による塩害を受け、劣化損傷が深刻な問題となっており、塩化物イオンによる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されている^{1,2,3)}。しかし、塩害が作用した RC 床版に走行荷重が作用した場合の破壊メカニズム、耐荷力等に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。そこで本研究では、大型自動車の荷重変動を想定した走行振動荷重を作用させて応力履歴させた RC 床版に、1年10ヶ月間凍結防止剤の散布を行い、塩害を与えた RC 床版の劣化状態について評価するとともに、再度走行振動荷重実験を行い、通常 RC 床版に対する耐荷力の低下率を明らかにすることで、塩害作用を受けた RC 床版の性能評価および合理的な維持管理法の確立の一助とする。

2. 供試体概要

2.1 使用材料

コンクリートには、普通ポルトランドセメントと最大寸法 20mm の粗骨材料を使用し、鉄筋には SD295A, D10 を用いた。本実験に用いた材料学特性値を Table 1 に示す。また、凍結防止剤には塩化ナトリウムを用い、その成分を Table 2 に示す。

2.2 供試体寸法および鉄筋の配置

供試体寸法は、道路橋示方書・同解説⁴⁾ (以下、現行示方書) の規定に基づいて、大型車両の 1 日 1 方向あたりの計画交通量を 500 台未満と想定して寸法および鉄筋配置をし、その 1/2 モデルとした。よって、供試体の全長は 147cm、支間 120cm 床版厚 11cm の等方性版とした。鉄筋は複鉄筋配置とし、軸直角方向および軸方向にそれぞれ 10cm, 12cm 間隔で配置した。また、圧縮鉄筋量は引張鉄筋量の 1/2 とした。供試体寸法および鉄筋配置を Fig. 1 に示す。

3. 実験方法

3.1 通常の RC 床版による静荷重実験

Table 1 Physical properties of concrete and reinforcements.

Specimen	Concrete compressive strength (N/mm ²)	Reinforcing bar (SD295A, D10)		
		Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Young's modulus (N/mm ²)
V20,V30	35.0	370	511	200

Table 2 Component of calcium chloride.

CaCl ₂ (%)	Fe ₂ O ₃	Water Precipitation ratio (%)	PH (20 'Be')
72.0 Above	0.005 Below	0.04 Below	9~10

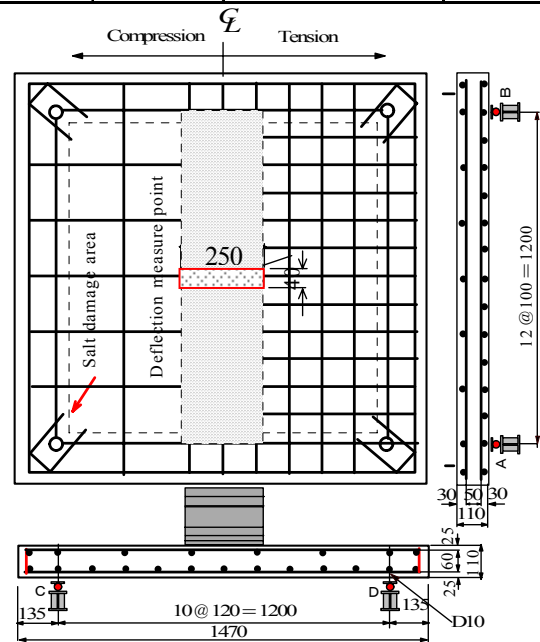


Fig.1 Specimen size.

RC 床版の静荷重実験は、Fig. 1 に示すように輪荷重を最大応力の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。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。

3.2 走行振動荷重による応力履歴 RC 床版の実験

応力履歴は大型自動車の走行振動による荷重変動を想定した走行振動荷重実験⁵⁾で与える。まず、左支点 A に輪荷重を載荷し、支点 A から支点 B を 1 往復するものである。荷重振幅は、基準荷重に対し

て±20%, ±30%を条件とし, 周期 1.8Hz の正弦波形で走行する。また, 走行速度は 1 往復 2.4mm を 13sec で走行する 0.18m/sec とし, 荷重は 1 走行ごとに 5.0kN ずつ増加する段階状荷重とした。応力履歴の荷重は, 供試体寸法を実橋床版の 1/2 モデルとしたことから, 設計活荷重は 50kN であり, これに安全率 1.2 を乗じた 60kN までとする。よって, 走行振動荷重±20%の場合, 最大荷重は 72kN, 最小荷重は 48kN であり, 走行振動荷重±30%の場合は最大荷重 84kN, 最小荷重 42kN とした。

3.3 塩害作用を与えた RC 床版の作製方法

応力履歴を与えた RC 床版の上面にエンピ管で 110cm×110cm の枠を製作し, 融雪剤, 凍結防止剤である塩化ナトリウム 40g を週 3 回の間隔で 1 年 10 ヶ月間散布し, 暴露試験を行った。

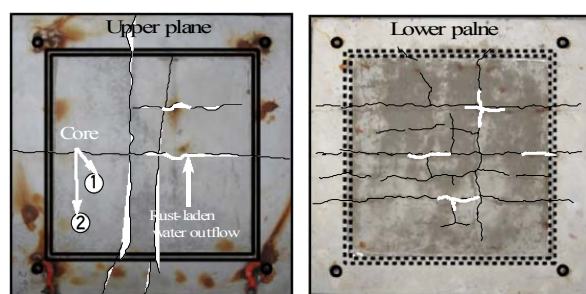
3.4 塩害作用後の走行振動荷重実験

RC 床版および塩害作用を与えた RC 床版の耐荷力実験は, 3.2 項で示した走行振動荷重実験を行う。走行振動荷重実験における荷重の条件は, 1 走行ごとに 5.0kN ずつ増加する段階荷重とし, 破壊するまで荷重の増加と走行を繰り返し行う。耐荷力は一走行を維持した最大荷重とする。走行範囲を Fig. 1 に併記した。塩害作用を与えた RC 床版供試体の名称は荷重振幅±20%を S-V20, 荷重振幅±20%を S-V30 とする。

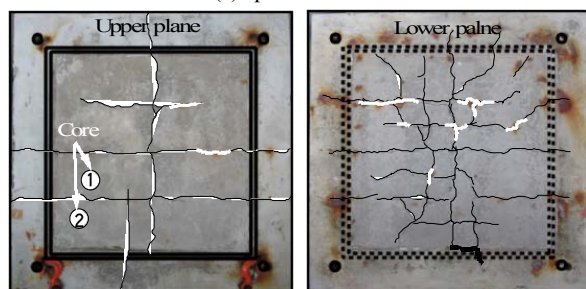
4. 実験結果および考察

4.1 応力履歴 RC 床版のひび割れ状況

走行振動荷重 V20 および V30 で基準荷重 60kN まで載荷し, その後, 塩害作用として塩化カルシウム 40g を週 3 回の間隔で 1 年 10 ヶ月間散布して暴露試験を行った後の供試体上面, 下面のひび割れ状況お

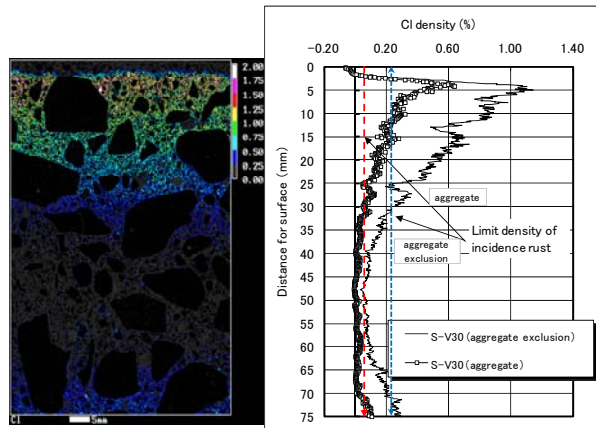


(1) Specimen S-V20



(2) Specimen S-V30

Fig. 2 RC specimen after salt damage



(1) EPMA plane analysis graphics

(2) Evaluation of Percolation graphics

Fig. 3 Result of salt percolation for EPMA plane analysis

Table 3 Determination condition of EPMA

Acceleration Voltage (kV)	Sample current (A)	Diameter (μm)	Spectral crystal	Measure time (msec)	Pixel size (μm)	Standard sample
15	1×10 ⁻⁷	100	C, S(PET), Si, Ca(TAP)	50	200	Cl(Halite, Cl=60.66%), Si, Ca(Wollastonite, SiO ₂ =51.73%, CaO=48.27%), S(Anhydrite, SO ₃ =58.81%)

および錆汁の発生状況を Fig. 2 に示す。

走行振動荷重実験により応力履歴させた供試体 S-V20 には, 応力履歴時のひび割れ状況は, 下面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, 軸方向に 0.04mm 程度みられた。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鉄筋配置位置に発生している。次に, 鉄筋の錆汁も部分的に発生していることが確認できる。発生位置は供試体上面, 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。

走行振動荷重 V30 で応力履歴させた供試体 S-V30 も走行振動荷重 V20 で応力履歴させた供試体とほぼ同様のひび割れが発生している。錆汁は, 上面では僅かに発生しているのが確認できるのに対し, 下面ではひび割れ発生位置に多く沈着が見られる。

両供試体ともに塩化カルシウム 40g を 1 年 10 ヶ月間散布することによる塩害作用と暴露試験を行ったが, 塩化カルシウムは常に蓄積されることから塩害による劣化が目視でも確認できる。

4.2 塩害作用を受けた RC 床版の塩害分析位置

(1) 塩化物イオンの分析

塩化物イオン分析では, 塩害作用時のひび割れ損傷位置および塩害作用後の走行振動荷重実験における破壊後に, ひび割れ損傷が比較的少ない位置でコア採集を行う。ここで, 本供試体のコア採集位置を Fig.

2 に示す。塩化物イオンの分析用のコアはφ60mm (Fig. 2, Core ①), 鉄筋の腐食状況用のコアはφ70mm (Fig. 3, Core ②) を採集し, 分析するものとする。

(2) EPMA による分析方法⁶⁾

塩化物イオンの分析には, 電子プローブマイクロアナライザ (Electron Probe Micro Analyzer); (以下, EPMA と称す) を用いた。コア試験体を縦半分に分断し, メタクリル樹脂により補強した後, 切断面を観察面として研磨した。

ここで, EPMA による測定条件を Table 3 に示す。導電性を持たせるために観察面に炭素を蒸着し, 測定用試料とした。Cl (塩化物イオン), Ca (カルシウム), Si (けい素), および S (硫黄) について, Table 4 に示した測定条件で, 個々のピクセルごとに定量し, それらを集積して面分析結果として表示した。

(3) EPMA 面測定結果

塩害作用を受けた RC 床版の EPMA による面分析より得た供試体 S-V30 表面からの塩化物イオン濃度分析を一次元化し, 浸透性を評価した結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より, 供試体 S-V30 の塩化物イオンの浸透深さは, 構造物として問題となるレベルの鉄筋腐食発生という観点から 1.2 kg/m^3 を限界値⁷⁾とした場合, 骨材込み, 骨材を除外した場合のいずれも表面から約 30mm となっている。圧縮鉄筋位置における塩化物イオンの鋼材腐食発生限界値濃度は, コンクリート単位容積当りの量として $0.3 \sim 2.4 \text{ kg/m}^3$ 程度である。本実験における EPMA 試験はコンクリート表面から 75mm のコア採集の結果であり, 75mm 付近においても塩化物イオンの浸透が見られ, 1.2 kg/m^3 の限界値を超えていることから, 下縁の引張鉄筋にも腐食が発生しているものと考えられる。したがって, 圧縮鉄筋の配置位置が床版上面から 25mm の位置, 引張主鉄筋は上面から 85mm の位置であることから, 圧縮鉄筋および引張鉄筋ともに塩害の影響を受けて腐食が伸展しているものと考えられる。

(4) 鉄筋の腐食

塩害作用による鉄筋の腐食グレードは, 土木学会標準示方書⁸⁾では Table 4 のように規定されている。この基準をもとに鉄筋の劣化度を評価することとする。塩害作用を受けた RC 床版の鉄筋腐食に関するコア抜きは, Fig. 3 に示す②の位置である。コア採集の鉄筋番号およびコアから採集した鉄筋を Fig. 4 に示す。

本供試体の腐食グレードは土木学会の基準によると, 供試体 S-V20 の圧縮鉄筋 (V20-1, 2) は腐食グレードの II に相当する。引張鉄筋の V20-3 の配力鉄筋は錆がわずかにみられることから腐食グレードは II, V20-4 の主鉄筋は全面に錆が確認できることから腐

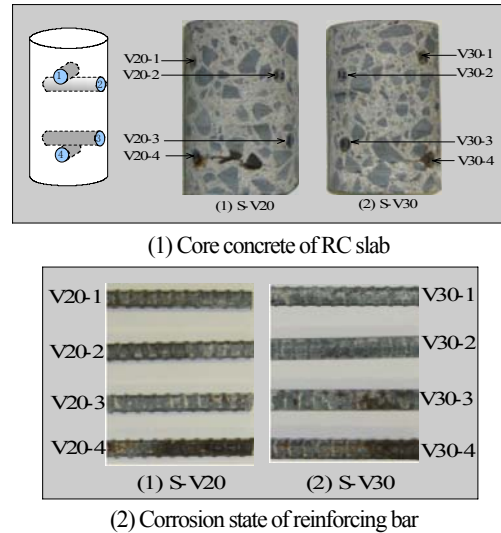


Fig. 4 Reinforcing bar corrosion for salinity seepage

Table 4 Corrosion grade of re-bar

Corrosion grade	State of reinforcing bar
I	In mill scale condition, a thin layer of rust has been developed finely all over the place. The concrete surface has no rust adhered.
II	The floatage rust has been found partially. The macula has appeared in small areas.
III	The floatage rust is generated all over the surroundings or alone the reinforcing bar. The section damage can't be confirmed by eyes.
IV	Section damage has occurred.

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を超えているにもかかわらず, 圧縮鉄筋 (V30-1, 2) の腐食グレードは II 程度である。また, V30-3 の配力筋には鉄筋が全周に渡って錆が発生し, V30-4 の主鉄筋でも全周および全長に渡って錆が発生していることから, 腐食グレードは III に相当する。なお, 供試体 S-V20, 30 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が, この要因としては応力履歴させた際に, 供試体下面から上面に向かって貫通ひび割れを呈していることから, 上面から散布した塩化カルシウムがひび割れを通じて下面方向に流れ込み, 供試体下面に塩化カルシウムが沈着したために, 引張側の鉄筋のほうが腐食の進行が進んだものと考えられる。

以上の結果より, 本実験による塩害作用を受けた RC 床版は, 構造物外観上および鉄筋の腐食グレードからも, 加速期前期から後期に相当するものと考えられる。この結果は構造物としての機能上, 安全性, 使用性には特に問題は無いものと判断されるが, 外観上第三者への影響を及ぼすものと考えられる。したがって, 道路橋 RC 床版の場合は, 早期の表面処理やひび割れの補修を施す必要がある。また, RC 床版上面には防水層の義務化が重要となるものと考え

えられる。

4.3 実験耐荷力

通常の RC 床版および塩害作用を与えた RC 床版の最大耐荷力を Table 5 に示す。

1) 通常の RC 床版

静荷重実験における最大耐荷力の平均は 167.8kN である。また、走行振動荷重 V20 の平均耐荷力は 141.6kN であり、走行振動荷重 V30 の平均耐荷力は 140.5kN である。したがって、走行振動荷重 V20、V30 の耐荷力は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。次に、静荷重実験の最大耐荷力の平均と走行振動荷重実験の最大耐荷力の平均とを比較すると、走行振動荷重 V20、V30 とともに約 16% の耐荷力の低下が見られる。これは、振動荷重で床版に衝撃力を与えることにより耐荷力が低下したものと考えられる。

2) 塩害作用を与えた RC 床版

塩害作用を与えた供試体 S-V20 の最大耐荷力は 131.8kN である。塩害作用を受けない供試体 N-V20 の最大耐荷力と比較すると、塩害作用を受けた供試体 S-V20 との耐荷力比は 0.93 となり、塩害を受けることにより 7% 耐荷力が低下した。同様に、走行振動荷重 V30 の場合は、塩害作用を受けた供試体 S-V30 の最大耐荷力は 123.5kN であり、塩害作用を受けない供試体 N-V30 と比較すると 0.88 となり、塩害を受けることにより 12% 耐荷力が低下した。また、塩害作用を受けた供試体 S-V20 と S-V30 との耐荷力を比較すると走行振動荷重 V30 の場合で 5% 耐荷力が低下しており、荷重振幅の違いにより耐荷力に差異が生じる結果となった。

以上の結果より、塩害作用を受けた RC 床版においては荷重振幅の違いにより耐荷力に差異が生じることから、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 である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しているものと判断される。

5. まとめ

応力履歴を受けた RC 床版供試体に凍結防止剤である塩化カルシウムを 1 年 10 ヶ月間散布して、塩害作用を与えた場合の劣化状態の確認および耐荷力低下の解明のための実験研究を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 応力履歴を与えた RC 床版に塩害作用を与えた結果、鉄筋の錆汁の発生が確認され、その発生位置は供試体上面、下面ともに鉄筋の配置位置付近に部分的に沈着している。
- (2) EPMA 試験の結果、RC 床版の面分析より得られた塩化物イオン濃度は、コンクリート表面から浸透深さは約 30mm まで影響を及ぼしており、本供

Table 5 Maximum load-carrying capacity and deflection

Specimen	Experimental maximum load-carrying capacity (kN)	Average load-carrying capacity (kN)	load-carrying capacity ratio	Maximum deflection (mm)
N-S-1	165.3	167.8	—	14.1
N-S-2	170.2			11.6
N-V20-1	137.9	141.6	0.84 (=V/S)	11.5
N-V20-2	145.3			11.2
S-V20	131.8	131.8	0.93 (=N/V)	13.0
N-V30-1	143.8	140.5	0.84 (=V/S)	14.8
N-V30-2	137.1			11.7
S-V30	123.5	123.5	0.88 (=N/V)	14.9

試体の圧縮鉄筋は発錆限界濃度を上回っている。

- (3) コアから採集した鉄筋の腐食グレードは圧縮鉄筋側がグレード II、引張鉄筋側がグレード III 程度であることが明らかとなった。
- (4) RC 床版の塩害損傷は、構造物外観上および鉄筋の腐食グレードからすると加速期前期から後期に相当するものと考えられる。したがって、道路橋 RC 床版においては、早期の表面処理やひび割れの補修を施す必要がある。また、RC 床版上面には防水層の義務化が重要となるものと考えられる。
- (5) 塩害作用を受けた RC 床版と通常の RC 床版の耐荷力を比較すると、塩害を受けることにより耐荷力が最大 12% 程度低下している。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と考えられる。

参考文献:

- 1) 新銀武：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)
- 2) 藤田弘昭，津村浩三，山本昇：青森県日本海沿岸の RC 橋梁において塩分浸透がひび割れと鉄筋腐食に及ぼす影響についての調査，構造工学論文集，Vol.53A，pp.666-673 (2007)
- 3) 竹田俊明ほか：寒冷地における橋梁の劣化環境と RC 床版の劣化予測に関する研究，構造工学論文集，Vol.53A，pp.674-685 (2007)
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，II (2002)
- 5) 阿部忠ほか：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)
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書（維持管理編）(2002)
- 7) 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)
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編）(2002)