

凍害を受けた RC 床版の力学特性および劣化損傷評価

日本大学[院]○鈴木浩行 日大生産工 木田哲量, 阿部忠, 水口和彦
太平洋コンサルタント 大竹淳一郎, 小川洋二

1. はじめに

積雪寒冷地域における道路橋 RC 床版は, 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, RC 床版の劣化が深刻な問題となっており, 塩化物イオンにより床版上面コンクリートのスケーリングや土砂化, 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。このようなことから, 橋梁架設地点の塩分環境に応じた適切な塩害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。特に, RC 床版のひび割れ発生後には, そのひび割れ部に凍結防止剤・融雪剤散布による塩水が浸透して凍結することから, 塩害と凍害が同時に発生している。

そこで本研究では, RC 床版の凍結防止剤の散布による塩害と凍結融解作用による劣化現象に着目し, これらの作用を受けた RC 床版の耐力力の低下率を実験解析するとともに, 変形状態および破壊メカニズム, 鉄筋の腐食劣化損傷について検証した。

2. 供試体概要

2.1 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, 鉄筋には SD345A, D10 を使用した。ここで, コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表-1 に示す。

路面凍結防止剤には, 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, 本供試体には融氷効果に速効性がある塩化カルシウムを用いることとした。ここで, 塩化カルシウムの成分を表-2 に示す。

2.2 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路橋示方書・同解説Ⅱ¹⁾ (以下, 道示Ⅱと称す) に規定する T

表-1 材料特性値

供試体	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋 (SD345A, D10)		
		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
V20, V30	30.0	370	511	200

表-2 凍結防止剤の成分

CaCl ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	水不溶解成分 (%)	PH (20°Be°)
72.0以上	0.005 以下	0.04 以下	9~10

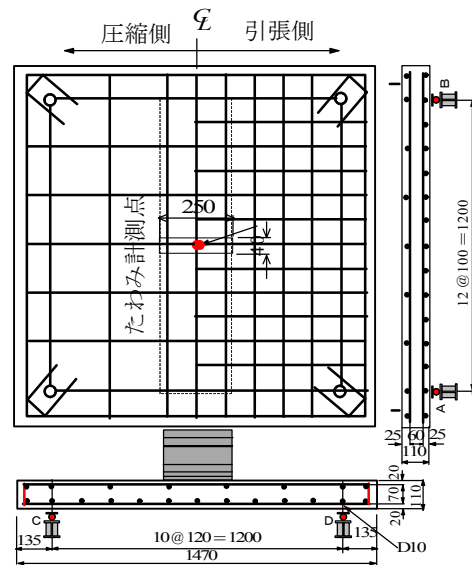


図-1 供試体寸法

荷重の 1/2 であることから, 道示Ⅱの規定に基づいて RC 床版の設計を行うこととし, その寸法の 1/2 モデルとした。なお, 最小床版厚の算出においては, 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 台未満と設定した。

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, 軸直角方向および軸方向にそれぞれ有効高さはそれぞれ 85mm, 75mm とした。また, 圧縮鉄筋量は引張鉄筋量の 1/2 を配置した。供試体

Mechanical properties and Deterioration damage estimation of RC slab act on frost damage

by Hiroyuki Suzuki,

Tetsukazu Kida, Tadashi Abe, Kazuhiko Minakuchi, jyunichiro Otake and Youji Ogawa



(1) 氷点下30度で凍結



(2) 自然融解

図-2 凍結融解

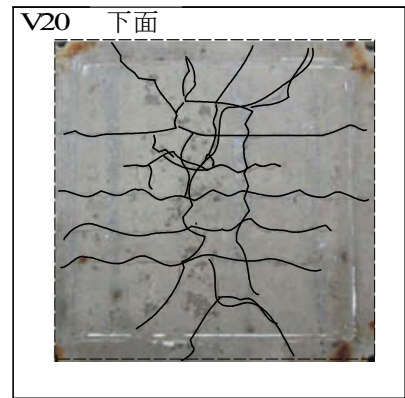
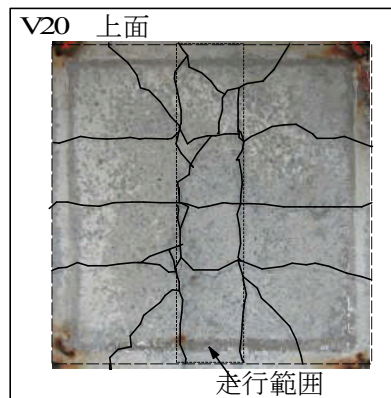


図-3 凍害を受けた RC 床版の応力履歴

寸法および鉄筋の配置を図-1 に示す。

3. 実験方法

3.1 走行振動荷重による応力履歴 RC 床版

本実験では、実橋 RC 床版に作用する大型自動車の変動荷重を想定した走行振動荷重実験を行い、応力履歴を与える。走行振動荷重実験は、左支点 A に輪荷重を載荷し、左支点 A から右支点 B を 1 往復するものである。本実験の荷重振幅は、基準荷重に対して $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ とし、周期 1.8Hz の片振り荷重とする。なお、走行速度は 1 往復 2.4mm を 13.0sec で走行する 0.18m/sec とした。荷重は 1 走行ごとに 5.0 kN ずつ増加する段階状荷重とし、応力履歴の場合は荷重 60kN までとする。よって、荷重振幅 $\pm 20\%$ の最大荷重は 72kN、最小荷重は 48kN であり、荷重振幅 $\pm 30\%$ は最大荷重 84kN、最小荷重 42kN である。供試体名は、荷重振幅 ± 20 の供試体を V20、荷重振幅 ± 30 の供試体を V30 とする。

3.2 凍結融解作用

走行振動荷重実験によって応力履歴を受けた RC 床版の上面にエンビ管で 110cm $\times$ 110cm の枠を製作し、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 年間散布した。その後は海水を散布し、氷点下温度 (-30°C) の冷凍庫で夜間 12 時間凍結させ、凍結後は自然融解して再び海水の散布を行う。この作業を 300 回繰り返した。凍結および融解を行った RC 床版供試体の状況を図-2 に示す。また、塩害・凍害を受けた RC 床版供試体の一例を図-3 に示す。

図-3 より、塩害・凍害を受けた RC 床版は、コンクリートの表面が約 5 $\sim$ 7mm 程度土砂化

している。また、塩害・凍害を受けたことにより応力履歴を与えた際には確認出来なかった貫通ひび割れが目視で確認された。なお、塩害・凍害を受けた RC 床版の供試体名は、S・F-RC とする。

3.3 走行振動荷重による耐荷力実験

本供試体は塩害と凍害を受けたことで、走行面が 5 $\sim$ 7mm 程度土砂化していることから、走行面をプライマーで表面処理をし、走行振動実験を行った。実験方法は、応力履歴を与えた時の実験方法と同様である。なお、荷重は一往復走行ごとに 0kN から 5kN ずつ供試体が破壊に至るまで増加させる段階荷重とした。また、本実験における最大耐荷力とは、一往復走行を維持した最大荷重とする。

3.4 EPMA による塩化物イオンの浸透分析

塩化物イオンの分析には、EPMA を用いた。コア試験体を縦半分切断し、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。RC 床版供試体の EPMA 解析による面分析の結果を図-4 に示す。面分析より得た供試体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図-5 に示す。ここで、図中の発錆限界濃度³⁾とは、鋼材位置における塩化物イオンは、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/m³を限界値としたコンクリート単位容積当りの量として 0.3 $\sim$ 2.4 kg/m³程度であるなお、この値は構造物の設置環境や鋼材腐食許容量などの条件によって異なる。

図-5 より、凍結防止剤である塩化ナトリウムを 1 年間散布し、その後凍結と融解を 300 回繰り返した結果、塩化物イオンは供試体表面より 55mm

まで浸透した。よって、圧縮鉄筋の配置位置が供試体表面から 20mm の位置であるため、圧縮鉄筋は塩害および凍害の影響を受けていると考えられる。

4. 実験結果および考察

4.1 押抜きせん断耐力

本実験における最大耐力および破壊モードを表-3 に示す。表-3 より、荷重振幅 $\pm 20\%$ の場合は、健全な RC 床版供試体 RC-V20-1, 2 の最大耐力の平均は141.6kN、塩害・凍害を受けた RC 版供試体 S・F-RC-V20 は 120.2kN であり、耐力力比が 0.85 であることから、塩害・凍害を受けた RC 床版供試体は 15%耐力力が低下した。また、荷重振幅 $\pm 30\%$ の場合は、健全な RC 床版供試体 S・F-RC-V30-1, 2 の平均耐力力は 140.5kN、塩害・凍害を受けた RC 床版供試体 S・F-RC-V30 は 123.5kN であり、耐力力比は 0.88 であることから、塩害・凍害を受けた RC 床版供試体は 12%耐力力が低下している。

以上より、塩害と凍害を受けた RC 床版は約 15%程度耐力力が低下する結果となった。

4.2 破壊状況

健全な RC 床版および塩害・凍害を受けた RC 床版供試体の破壊状況の一例を図-6 に示す。健全な RC 床版の下面は、RC-V20, V30 とともに軸直角方向に 10cm 間隔、軸方向に 10cm~12cm 間隔でひび割れが発生し、格子状を形成している。このひび割れ間隔は、軸直角方向および軸方向に配置した鉄筋間隔とほぼ同じ寸法である。また、最終的な破壊形状は押抜きせん断破壊である。次に、塩害・凍害を与えた RC 床版供試体の場合、S・F-RC-V20, V30 とともに健全な RC 床版供試体と同様、ひび割れ間隔は、軸直角方向・軸方向に配置した鉄筋間隔とほぼ同じ寸法で発生し、格子状を形成している。最終的には押抜きせん断破壊に至った。なお、塩害・凍害を与えた RC 床版供試体においては、健全な RC 床版に比して破壊時のコンクリートのはく離が著しい。これは、塩害・凍害の繰り返しによるセメントの流出によって、セメント・骨材・鉄筋間の付着性能が低下したことに起因したものと考えられる。

4.3 荷重とたわみの関係

図-7 より、たわみは健全な供試体 RC-V20, V30 とともに荷重 80kN 付近まで線形的に増加し、その

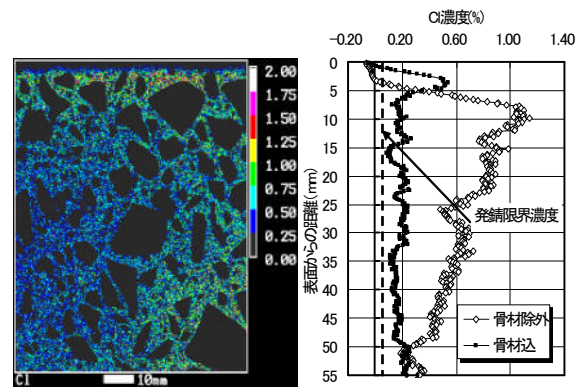


図-4 EPMA による
分析結果

図-5 Cl 濃度と浸
透深さ

表-3 最大耐力および破壊モード

供試体	実験最大耐力 力 (kN)	平均耐力 力 (kN)	耐力力比	破壊モード
RC-V20-1	137.9	141.6	—	押抜きせん断破壊
RC-V20-2	145.3			押抜きせん断破壊
S・F-RC-V20	120.2	120.2	0.85	押抜きせん断破壊
RC-V30-1	143.8	140.5	—	押抜きせん断破壊
RC-V30-2	137.1			押抜きせん断破壊
S・F-RC-V30	123.5	123.5	0.88	押抜きせん断破壊

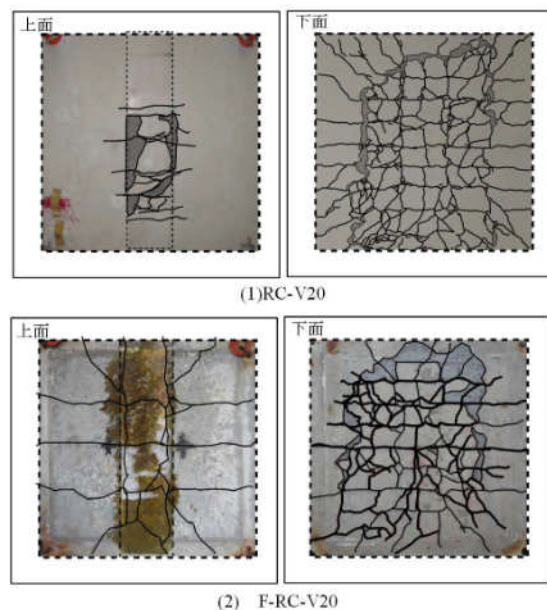


図-6 破壊状況

後の荷重の増加でたわみの増加が大きくなる。これに対して塩害・凍害を受けた RC 床版供試体は、荷重 60kN 付近までは線形的に増加し、その後の荷重の増加でたわみの増加は大きくなっている。また、健全な RC 床版供試体と塩害・凍害を受けた床版供試体のたわみを比較すると、健全な RC 床版供試体に比して、塩害・凍害を受けた RC 床版供試体の方がたわみの増加量が大きくなっている。なお、塩害・凍害を受けた RC 床版供試体は、応力を履歴させた際に生じた残留たわみを初期値とし

た。

4.4 鉄筋の腐食状況

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²⁾では表-4のように規定されており、この基準をもとに鉄筋の劣化度を評価することとする。なお、塩害作用を受けたRC床版の鉄筋腐食に関するコア抜きコンクリートの状況を図-8(1)、鉄筋の腐食状況を図-8(2)に示す。

図-8(2)より、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わたって錆が発生し、V30-4の主鉄筋でも全周および全長にわた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、積雪寒冷地域におけるRC床版は、早期に表面処理やひび割れ補修を施す必要があるものと考えられる。

5. まとめ

- ①EPMA解析より、塩害・凍害を与えたRC床版の塩化物イオンは供試体上面から約55mmの位置まで浸透しており、発生限界濃度を超過していることが明らかとなった。
- ②押抜きせん断耐力は、塩害・凍害によって最大で15%程度低下する。これは、凍結融解によるひび割れの拡大および断面欠損によるものであると考えられる。
- ③全ての供試体で格子状のひび割れが発生した後、押抜きせん断破壊に至った。また、塩害・凍害を受けたRC床版は健全なRC床版に比して破壊時のコンクリートのはく離が著しい。

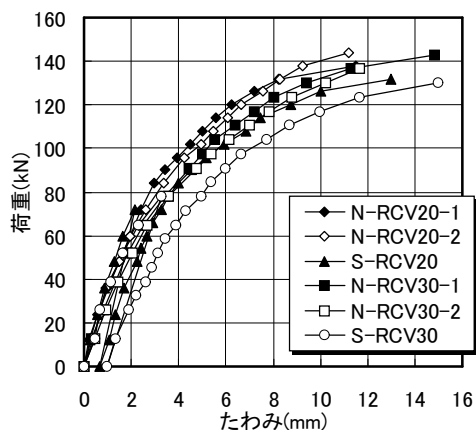
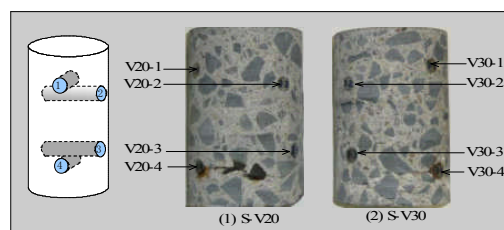
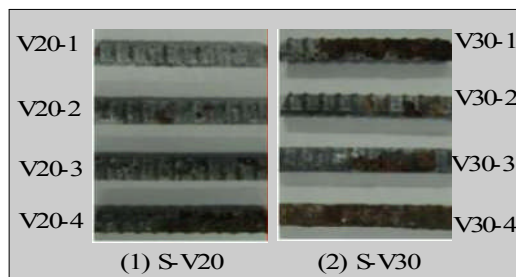


図-7 荷重とたわみの関係



(1) RC床版のコア・コンクリート



(2) 鉄筋の腐食状況

図-8 鉄筋の腐食状況

表-4 鉄筋の腐食グレード

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。

- ④荷重とたわみの関係より、健全なRC床版供試体に比して塩害・凍害を受けたRC床版供試体の方がたわみの増加量大きい。
- ⑤塩害・凍害作用による鉄筋の腐食は土木学会の基準によると腐食グレードⅡ～Ⅲに相当する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ,Ⅱ (2002)
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書（維持管理編）(2002)