

凍害劣化した床版補修工法の耐疲労特性に関する実験的研究

Experimental Study on Fatigue Resistance of Partial Repair Work on Frost-damaged Slabs

表真也*, 三田村浩**, 赤代恵司***, 松井繁之****
Shinya Omote, Hiroshi Mitamura, Keiji Syakushiro, Shigeyuki Matsui,

*土木研究所 寒地土木研究所, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

**博 (工), 土木研究所 寒地土木研究所, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

***修 (工), 室蘭工業大学大学院, 博士後期課程 (〒050-8585 室蘭市水元 27-1)

****工博, 大阪工業大学教授, 八幡工学実験場構造実験センター (〒614-8289 京都府八幡市美濃山一ノ谷 4)

This study is to find out suitable materials for repairing the deteriorated slab surface. The first step was to evaluate load-bearing capacity and fatigue resistance in general environments, and the second was to clarify the durability of the repair work under the combined conditions of freeze-thaw action simulating frost damage and repeated wheel loading. This paper reports the results of fatigue durability tests performed on RC slab samples repaired with three different materials in the first step.

Key Words: frost damage, top-surface repair, wheel running test, fatigue resistance

キーワード: 凍害, 上面補修, 輪荷重走行試験, 疲労耐久性

1. はじめに

積雪寒冷地域のRC床版上面では, 水の影響や凍害劣化によるスケーリングおよび砂利化の進行に伴い有効床版厚が減少し耐久性が著しく低下することが確認されている¹⁾²⁾. そのため, 近年橋梁の損傷部位において補修工事が増加する傾向にあり, 積雪寒冷地に適用できる低コスト, および長寿命化を目指した予防保全型となる床版上面補修工法の確立が行政側からのニーズとして高まってきた。

このような背景から本研究では一般環境下と寒冷地特有の気象・環境条件下による輪荷重走行試験を実施し, 補修可能な材料を選定し補修した床版の耐荷性・疲労耐久性を評価することとした. 第一段階として一般環境下での耐荷性と疲労耐久性の評価, 第二段階として凍害を模擬した凍結融解と輪荷重の繰り返しによって生じる複合劣化について検証することとした³⁾.

本報告では, 第一段階の3種類の材料を用いて補修したRC床版供試体の疲労耐久性試験の結果について報告する。

2. 供試体の使用材料および寸法

2.1 供試体の概要

本実験の試験体は1956年改訂の道路橋示方書(II 鋼橋編)・同解説⁴⁾(以下, 鋼道示)に準拠して, 実寸大のRC床版を製作し, 異種の補修材により上面を補修したRC床版の耐荷性と疲労耐久性を評価する. その補修効果を比較するため圧縮強度に差異があるが, 無補修試験体(以下, C0)を上記鋼道示に基づいて製作し過年度に実施した疲労載荷試験データを用いて比較することとした. また, 床版上面を補修することで, その補修効果を確認するため, 過年度に実施した床版上面を1cm, 3cmと研削した場合のデータも用いて比較することとした. 研削は床版上面をグラインダで実施したことから, 目視調査では研削によるマイクロクラックは確認できなかった。

表-1には実験試験体一覧, 図-1に試験体配筋図を示す. 補修材料の選定には, 本来の交通量や交通機能を早期に回復するため24時間で既設床版と一体化し, 疲労耐久性が得られるものとした。

2.2 使用材料

試験体のコンクリート材料には, 普通ポルトランドセメントと5mm以下の細骨材, 最大粒径20mmの粗骨材を使用し, 主鉄筋にはφ16mm, 配力筋にはφ13mmのSR235の丸鋼を鋼道示に基づいて使用した. コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表-2に, コンクリートの配

合を表-3に、各補修材の概要と試験実施時の材令における材料特性を表-4に示す。

3. 試験体の補修方法と試験体の製作

C2~C4 試験体の上面補修位置を図-2に示す。補修部は、1000mm×1100mmの範囲を1試験体に対して2箇所施工した。補修部の厚さは、現況調査による平均的な劣化深さより、A側で10mm、B側で30mmとした。A側およびB側の補修部詳細形状を図-3に示す。なお、B側には10mm~30mmのテーパを設け、深さ方向の変化に関する適用性を評価することも考慮した。

床版上面の補修箇所は、①試験体製作時に型枠を用いて箱抜きし、②脱型後低圧のウォータージェットを用い

て補修部を表面処理することで、実際の補修時の状況を再現した。また、各補修材料間の養生期間を統一するため、③各試験体ともに輪荷重走行試験開始の1週間前に補修材の施工を行った。

4. 輪荷重走行試験概要

実験には、クランク式の輪荷重走行試験機を用い、床版中央から走行方向前後1000mm(2000mm)の範囲に輪荷重(載荷幅=500mm)を連続走行させた。試験体の走行直角方向端部は、支持桁上に丸鋼を介して回転のみを許容する2辺単純支持とし、走行方向の端部は床版の連続性を考慮し、横梁H鋼による2辺弾性支持とした。

輪荷重の荷重強度は、図-4に示すように、漸増階段状の載荷プログラムとした。C0試験体に対してC2~C4試

表-1 実験供試体一覧

| 供試体名 | 供試体 概要 | |
|------|---------------|---------------------------|
| C0 | 無 補 修 (基準供試体) | |
| C2 | 上面補修 | 短繊維混入PAE系 ポリマーセメントモルタル |
| C3 | 上面補修 | アクリル系樹脂モルタル |
| C4 | 上面補修 | エポキシ樹脂モルタル |

表-2 RC床版のコンクリートおよび鉄筋の材料特性

| 供試体名 | コンクリート | | 鉄筋 (SR235) | | |
|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 圧縮強度 (N/mm ²) | 弾性係数 (N/mm ²) | 降伏強度 (N/mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) | 弾性係数 (N/mm ²) |
| C0 | 43.2 | 25,442 | 341 | 461 | 200,000 |
| C2 | 35.3 | 27,173 | 342 | 462 | 200,000 |
| C3 | 33.6 | 26,741 | 342 | 462 | 200,000 |
| C4 | 35.9 | 21,761 | 342 | 462 | 200,000 |
| 上面補修1cm | 35.5 | 23,500 | 342 | 462 | 200,000 |
| 上面補修3cm | 36.8 | 24,800 | 342 | 462 | 200,000 |

表-3 RC床版コンクリートの配合

| 供試体名 | スランプ (cm) | W/C (%) | S/a | 単位容積重量(kg/m ³) | | | | 混和剤 AE減水剤 |
|------|-----------|---------|------|----------------------------|-----|-----|------|-----------|
| | | | | セメント | 水 | 細骨材 | 粗骨材 | |
| C0 | 8 | 42.1 | 41.3 | 364 | 153 | 740 | 1058 | 393 |
| C2~4 | 8 | 43.5 | 39.7 | 350 | 152 | 726 | 1097 | 350 |

表-4 補修材の概要と材料特性

| 補修材料名 | 補修材料の構成 | 適用可能温度 | 材料特性 | | | | | | |
|-------|------------------------|-----------|------|-----|------|------|------|---------|--------|
| | | | 材令 | 比重 | 圧縮強度 | 付着強度 | 曲げ強度 | 引張せん断強度 | 弾性係数 |
| | | | | | | | | | |
| C2 | 2材型ポリマーセメントモルタル+アラミド繊維 | +5℃~+35℃ | 7 | 2.1 | 31.0 | 3.06 | 10.5 | 8.0 | 14,900 |
| | 霧吹きにより水を噴霧 | 24時間(+5℃) | | | | | | | |
| C3 | アクリル樹脂+混合骨材(最大骨材:4号砂) | -10℃~+35℃ | 7 | 2.0 | 67.5 | 2.60 | 25.0 | 16.5 | 4,623 |
| | アクリル樹脂プライマー | 3時間(0℃) | | | | | | | |
| C4 | 2液型エポキシ樹脂+5号砂+7号砂 | +5℃~+50℃ | 7 | 2.0 | 78.8 | 3.30 | 38.1 | 79.7 | 5,790 |
| | 2液型樹脂エポキシ樹脂プライマー | 5時間(+5℃) | | | | | | | |

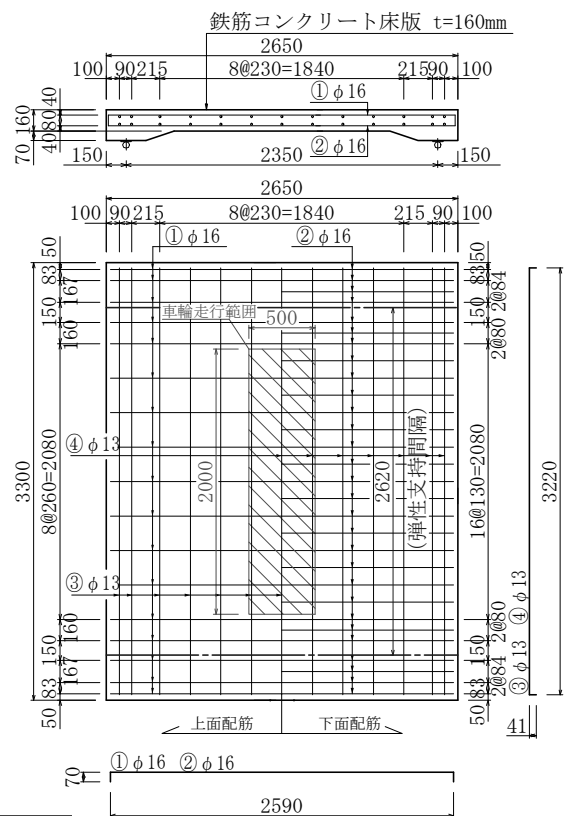


図-1 供試体配筋図

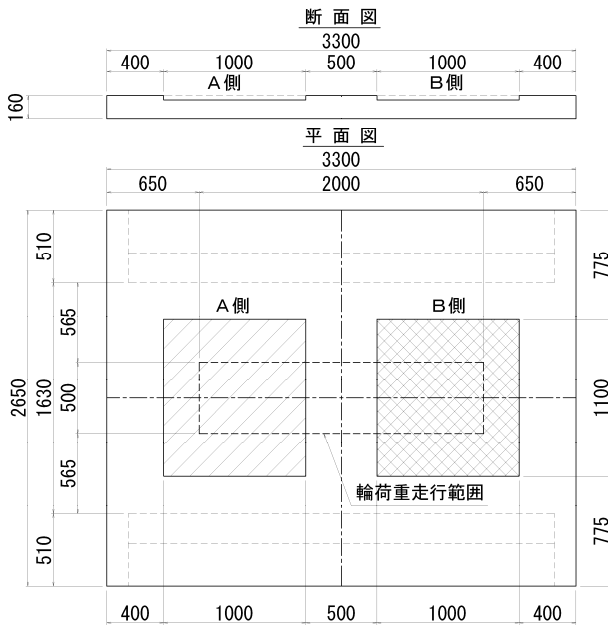
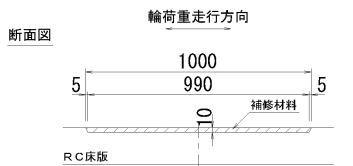
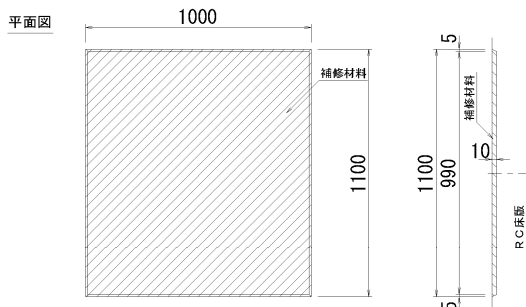
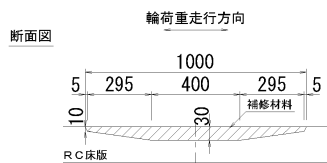
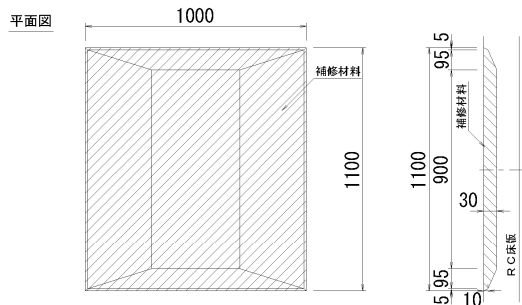


図-2 上面補修位置図



A側補修部詳細図



B側補修部詳細図

図-3 補修部詳細図

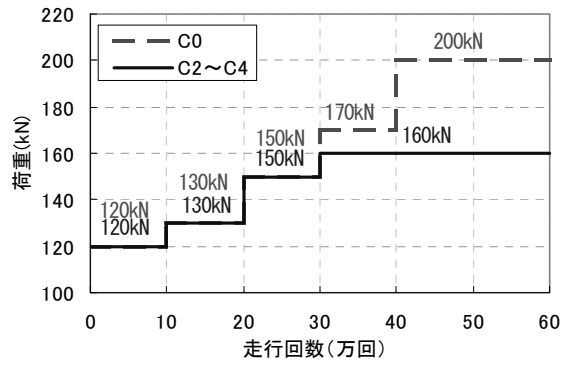


図-4 載荷プログラム

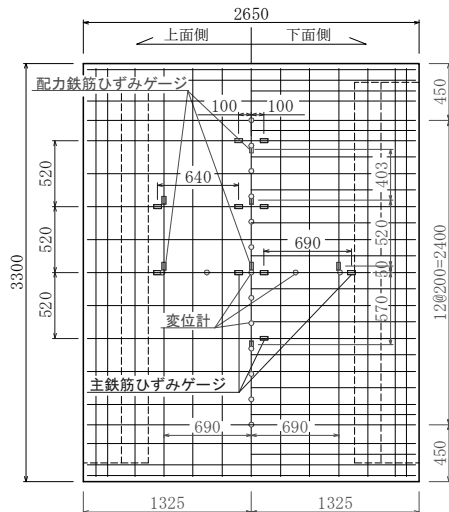


図-5 変位・鉄筋ひずみ計測位置

験体の載荷パターンの一部を変更して 150kN 以降から 160kN 一定載荷としているのは、上面補修部の剥離の進展等について損傷状況を詳細に確認することを目的としたためである。なお、実験時には、適時輪荷重走行を停止し、床版中央位置で輪荷重の静的載荷による床版下面のたわみ、ひび割れ状況、鉄筋ひずみなどの耐荷性を確認した。図-5に、変位、および鉄筋ひずみの計測位置を示す。

5. 実験結果と考察

5.1 走行回数とたわみの関係

各試験体の床版中央におけるたわみと走行回数、及び等価走行回数との関係を図-6、図-7に示す。

本研究では、床版中央のたわみが急激に立ち上がる開始点を破壊と定義し、図中に矢印で示した。いずれの試験体も荷重と走行回数の増加に伴いたわみが増加し、たわみの急増によって破壊に至っている。

図-6より、C0試験体においては一定荷重状態におけるたわみの増加はほとんど見られないが、C2、C3試験体では160kN-10万回以降、C4試験体では150kN載荷時、及び160kN載荷時において一定荷重時におけるたわみの

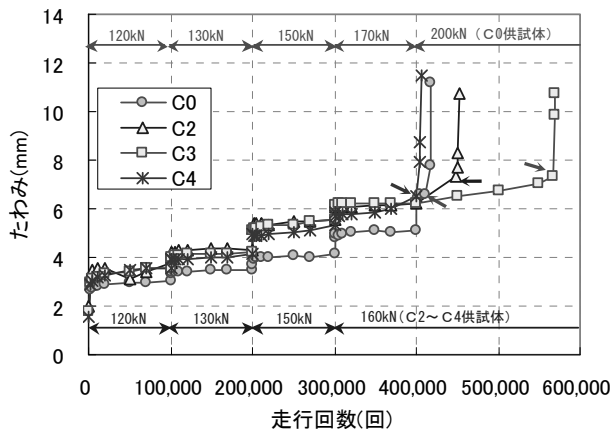


図-6 走行回数とたわみの関係

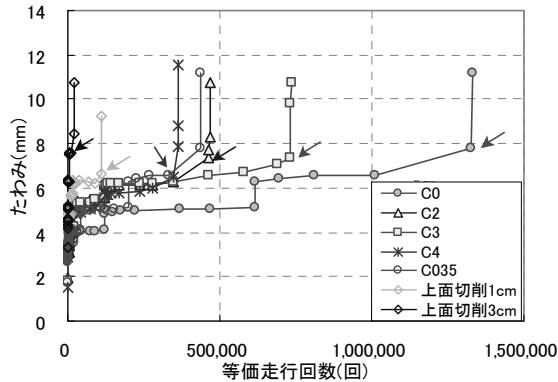


図-7 等価走行回数とたわみの関係

表-5 床版下面破壊領域

| | 破壊領域の幅(mm) | | C0との比 | |
|----|------------|--------|-------|--------|
| | 走行方向 | 走行直角方向 | 走行方向 | 走行直角方向 |
| C0 | 900 | 1200 | - | - |
| C2 | 1580 | 1280 | 1.76 | 1.07 |
| C3 | 1470 | 1240 | 1.63 | 1.03 |
| C4 | 1670 | 1250 | 1.86 | 1.04 |

表-6 床版下面ひび割れ密度

| 供試体名 | ひび割れ密度 (m/m ²) | C0との比 |
|------|----------------------------|-------|
| C0 | 14 | - |
| C2 | 17.9 | 1.28 |
| C3 | 20.4 | 1.45 |
| C4 | 20.5 | 1.46 |

表-7 破壊時の走行回数および等価走行回数とたわみ

| 供試体名 | 破壊時走行回数(回) | 等価走行回数(回) | |
|------------------|------------|-----------|----------------------|
| | | | C0 ₃₅ との比 |
| C0 | 418,100 | 1,326,811 | - |
| C0 ₃₅ | | 434,589 | 1.00 |
| C2 | 449,000 | 461,401 | 1.06 |
| C3 | 567,000 | 730,262 | 1.68 |
| C4 | 400,000 | 349,755 | 0.80 |
| 上面切削1cm | 212,000 | 110,050 | 0.25 |
| 上面切削3cm | 170,000 | 19,450 | 0.04 |

の増加がみられた。補修材表面の損傷は輪荷重走行部に設置した治具により確認できない範囲を除き、損傷はみられなかった。このため輪荷重直下の補修材と床版の界面で剥離が進行し、一体性が保てず剛性が低下し、たわみが増加したと推察される。

C3 試験体については、C2、C4 試験体と比較して、160kN-10万回程度まではほぼ同じたわみ値を示すが、それ以降のたわみは、緩やかに増加を示し破壊に至るまでの走行回数が最も多い結果となった。C4 試験体については、たわみの増加が早期に見られ、破壊時のたわみ比が小さいが他の試験体と比べて寿命が短くなる傾向が見られた。

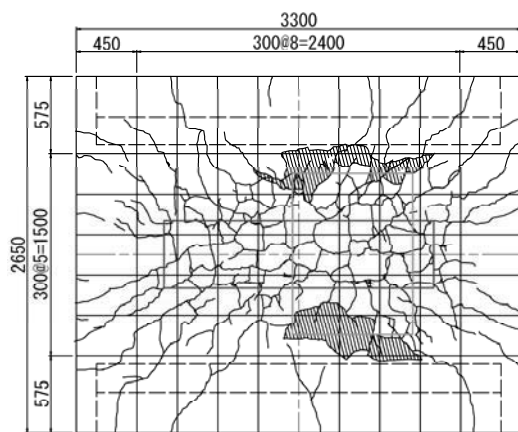
5.2 床版の破壊性状

図-8には、実験終了時における各供試体の床版下面の損傷状況を示す。なお、図中の赤線は輪荷重の走行範囲を、青線は上面補修の範囲を、緑線は実験終了時における破壊領域を示す。破壊状況は、各供試体ともに黒色斜線部が下方に落ち込むコンクリートの押し抜きせん断破壊の状況を呈する。同図に示す走行方向破壊領域は、上面補修したC2~C4供試体において、基準のC0供試体の約1.6~1.9倍であった(表-5)。図-9には実験終了時における各供試体の床版上面の損傷状況を示す。なお、図中の斜線部は剥離範囲を、赤線は輪荷重の走行範囲を、青線は上面補修の範囲を示す。床版上面側の損傷は、無補修のC0供試体では、概ね走行範囲内に生じている。

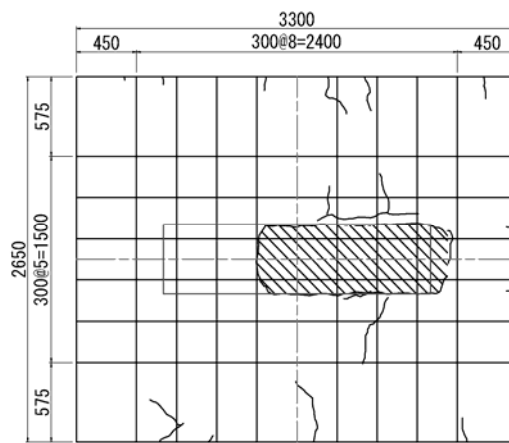
上面を補修したC2~C4供試体では、上面の補修材自体の損傷は軽微なものであったが、図-9に示す範囲で補修材の剥離が見られた。結果として実験終了時のひび割れ密度は、無補修のC0供試体に比べて、上面補修したC2~C4供試体は、約1.3~1.5倍であった(表-6)。これは、補修材が剥離した後、下床版で全荷重を分担したものと推察される。また、図-9からC2、C3供試体は上側鉄筋に沿って520mm幅の走行直角方向にひび割れが発生しているが、図-8の床版下面では同様のひび割れが見られないことから梁状化は見られなかった。

5.3 破壊回数とその等価走行回数

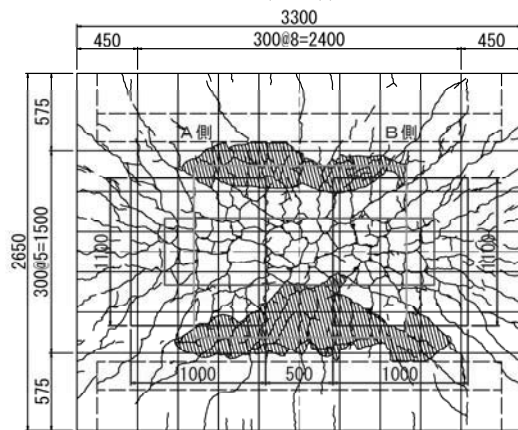
試験体C0は最後の200kNの時18,100回で、C2~C4は160kN時の149,000回、267,000回、及び100,000回でそれぞれ破壊に至った。ただし、本実験においては、輪荷重走行試験における載荷荷重を漸増段状載荷としたことから、載荷回数がある一定荷重の等価走行回数に換算して疲労耐久性を評価することとした。等価走行回数は、マイナー則に従うと仮定すると式(1)で与えられる。なお、式(1)における基準荷重Pは、2004年改訂道示の活荷重100kNに衝撃係数と安全率を考慮した150kNとする。本研究はRC床版の疲労寿命と実用性を検証することから、松井らが提案するS-N曲線の傾きの逆数mには12.7(1/0.07835)を適用する⁵⁾。



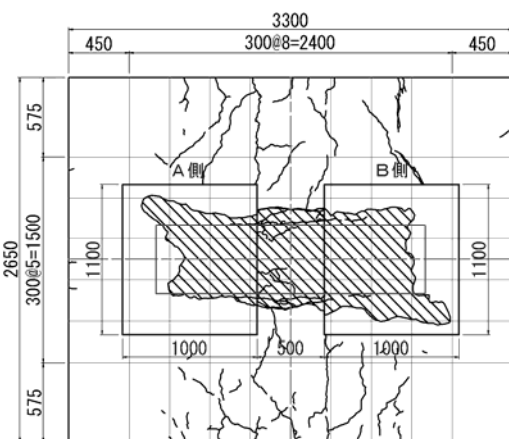
C0 供試体



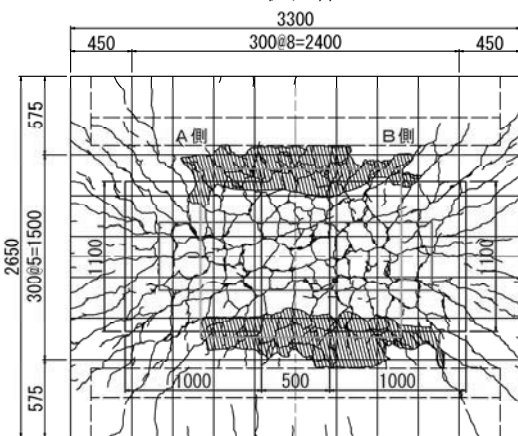
C0 供試体



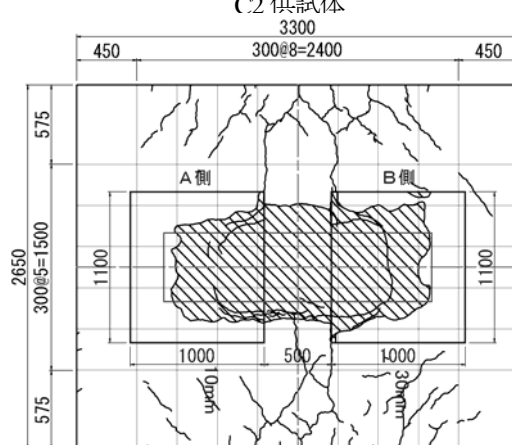
C2 供試体



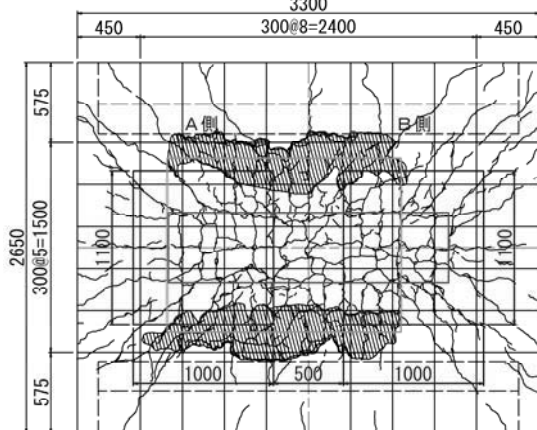
C2 供試体



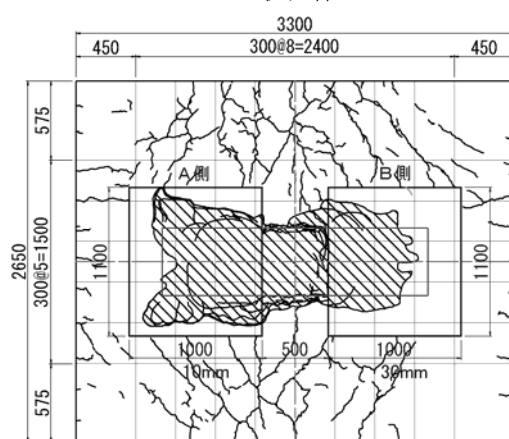
C3 供試体



C3 供試体



C4 供試体



C4 供試体

図一8 床版下面の損傷状況 (実験終了時)

図一9 床版上面の損傷状況 (実験終了時)

$$D_{II} = \sum \left(\frac{P_i}{P} \right)^m \cdot ni_1 \quad (1)$$

ここに、 D_{II} ：等価走行回数（回）

P_i ：荷重（kN）

P ：基準荷重（ $P=150\text{kN}$ ）

m ：S-N 線図の傾きの逆数（ $m=12.76$ ）

ni_1 ：荷重 P_i の走行回数（回）

以上より、150kN と一定荷重による等価走行回数に換算すると、C0 1,326,811 回、C2 461,401 回、C3 730,262 回、C4 349,755 回で破壊したことになる。しかしながら、この走行回数の結果では C0 試験体と C2～C4 試験体にコンクリートの圧縮強度に差が生じていることから補強効果について議論できない。

本実験における C0 試験体のコンクリートの圧縮強度は、過年度に実施したため、 43.2N/mm^2 となっていたが、今回実施した C2～C4 試験体が概ね 35N/mm^2 である。疲労強度は等価走行回数の P_{sx} に影響することから、C0 試験体の圧縮強度を 35N/mm^2 （以下、 $C0_{35}$ 試験体）と仮定した等価走行回数（式(2)）により算定し、C2～C4 試験体と比較する必要がある。

$$D_{I2} = \sum \left(\frac{P_{sx_{35}}}{P_{sx_{43.2}}} \right)^m \cdot ni_2 \quad (2)$$

ここに、

D_{I2} ：等価走行回数（回）

$P_{sx_{35}}$ ：コンクリートの圧縮強度 35N/mm^2 の場合の

P_{sx} （ $=289.9\text{kN}$ ）

$P_{sx_{43.2}}$ ：コンクリートの圧縮強度 43.2N/mm^2 の場合の

P_{sx} （ $=316.4\text{kN}$ ）

P_{sx} ：梁状化した RC 床版の押抜きせん断耐力（kN）

m ：S-N 線図の傾きの逆数（ $m=12.76$ ）

ni_2 ： $P_{sx_{35}}$ の走行回数（回）

この C0 試験体に対する補正結果は表-7 の $C0_{35}$ 試験体の欄に示す値になった。 $C0_{35}$ 試験体の等価走行回数を 1.0 として C2～C4 の破壊寿命結果の比率が計算でき C2, C3, は共に 1.0 を超える値となった。また、床版上面が凍害劣化した時、使用するとして床版厚 160mm の床版上面を 1 cm, 3 cm と切削した場合の試験体に対して輪荷重走行試験の結果を表-7 にも併記した。この両者の等価走行回数は大変短いものであり、これを比較すると C4 では 3～18 倍も破壊寿命が長くなっていることが明らかとなった。このような結果から、本実験で採用した部分補修工の効果は十分に大きいことが判明した。

破壊時の等価走行回数については、無補修の C0 試験体と上面補修した C2～C4 試験体を比較すると、C2 試験体で 1.06 倍、C3 試験体で 1.68 倍、C4 試験体で 0.80 倍であった。

表-7、図-7 より、上面切削試験体と無補修試験体 $C0_{35}$ を等価走行回数で比較すると、上面が 1cm 欠損することで 1/3 程度となり、3cm 欠損した場合には、 $1/3 \times 1/3 \times 1/3 = 1/27$ 程度になる。これより、最も早期に破壊した C4 においても上面補修をすることで 3～18 倍の疲労耐久性が向上することが確認できた。

6. まとめ

本検討は、積雪寒冷地域における凍害等による RC 床版上面の劣化が比較的浅い場合の、予防保全を目的とした補修工法の確立を目的として、3 タイプの補修材を用いた上面補修供試体を作成し、一般環境下における輪荷重走行試験を実施し疲労耐久性を評価した。

その結果から得られた知見を以下に示す。

- 1) 補修供試体は、上面補修の有無に関係なく、破壊形態は押抜きせん断によるものであった。また、補修供試体では、補修材の板構造の影響により荷重の分散効果が働き、破壊領域、及びひび割れ密度が、無補修供試体のそれぞれ 1.6～1.9 倍、1.3～1.5 倍となった。
- 2) 凍害劣化を模擬した試験体と上面補修を行った試験体の等価走行回数を比較すると、最も早期に破壊した C4 においても上面補修を行うことで 3～18 倍の疲労耐久性が向上することが確認できた。

参考文献

- 1) 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, 2009.3
- 2) 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 6 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.75-80, 2008.6
- 3) 三田村浩, 佐藤京, 西弘明: 積雪寒冷地における既設 RC 床版の延命手法について, 寒地土木研究所, 月報 No.676, pp.10-18, 2009.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書(II 鋼橋編)・同解説, pp.167-188, 1956
- 5) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版株式会社, pp.47-61, 2007.
- 6) 三田村浩, 坂口淳一, 西弘明, 松井繁之: 凍害劣化を模擬した RC 床版の輪荷重走行試験による検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会, 2010.9