

## 積雪寒冷地における RC 床版の損傷事例

Damage example of the RC slab in cold snowy regions

中村 敏雄\*, 清水 巧\*\*, 桐原 進彌\*\*\*, 中野 聡\*\*\*\*

Toshio Nakamura, Takumi Shimizu, Shinya Kirihaara, Satoshi Nakano

\* (株) 福山コンサルタント (〒112-0004 東京都文京区後楽 2-3-21)

\*\* 国土交通省関東地方整備局 長野国道事務所 (〒380-0902 長野県長野市鶴賀字中堰 145)

\*\*\* (財) 海洋架橋・橋梁調査会 (〒112-0013 東京都文京区音羽 2-10-2)

\*\*\*\* 博士 (工学), (株) 福山コンサルタント (〒112-0004 東京都文京区後楽 2-3-21)

In cold, snowy regions, this is report of survey results of a bridge damaged in the upper surface of the RC slab. For a survey, it is a compressive strength test of slab concrete, test for carbonation of concrete, the chloride ion concentration test by the EPMA method, the stress measurement, a impact vibration test. As a result of survey, the penetration of the chloride ion to the RC slab was confirmed. It was confirmed that a bridge girder after the repair was safe from stress result of a measurement. By repair of upper surface of the RC slab, it confirmed the natural frequency of RC slab had risen from the impact vibration test result.

*Key Words: sab damaged, de-icing salt, stress measurement, ipact vibration test.*

### 1. はじめに

本論文は、積雪寒冷地の RC 床版を有するコンクリート橋において、床版の土砂化に対する補修工事の前後に行った一調査事例について報告するものである。

対象橋梁は、1958 年 (昭和 33 年) に完成した橋長 19.75 m の 3 径間連続 RCT 桁橋 (1 等橋) である。直近前方が交差点であり、橋上に停止線のある上り線側では特に舗装のひび割れやポットホールが顕在化し、大型車両による制動・始動荷重の影響が大きいと推察された。交通量は 17825 台/24h (大型車混入率 14.5%) である。関東でありながらコンクリートの凍害危険度は秋田や青森と同等<sup>1)</sup>であり、冬季に凍結防止剤を散布する積雪寒冷地に属する橋梁である。図-1 に橋梁一般図を示す。

2007 年の橋梁定期点検において、主桁、横桁の剥離・鉄筋露出が顕著であった他、床版は漏水・遊離石灰を伴うひび割れが確認され、2011 年に補修工事が実施された。補修工事は主桁・横桁の断面修復、伸縮装置の交換、橋面防水工が計画され、これに伴う舗装撤去の際に床版の土砂化が確認された。この土砂化に対しては、新たな補修工事として、既往アスファルト舗装厚 10 cm の内、下方 5 cm をコンクリートに置き換える床版上面増厚工を実施した。

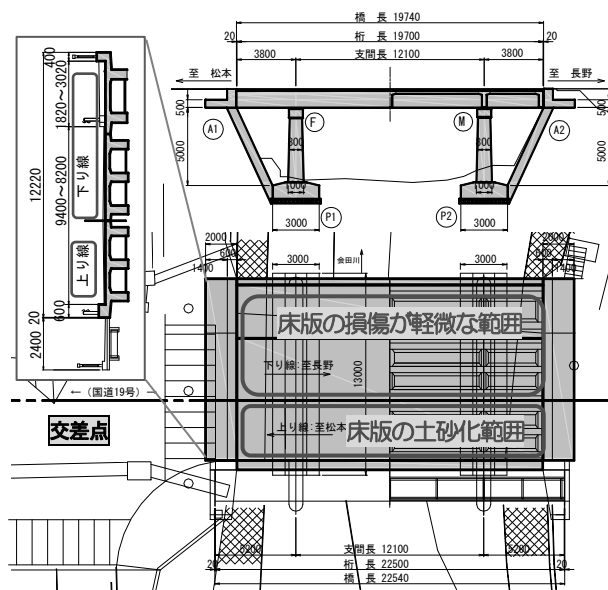


図-1 橋梁一般図

そこで本論文は、土砂化の損傷が発生した RC 床版に対する一調査事例として、各種材料試験と、補修後の応力頻度測定、補修前後の主桁と床版の衝撃振動試験<sup>2), 3)</sup>等の各種試験の結果を報告するものである。

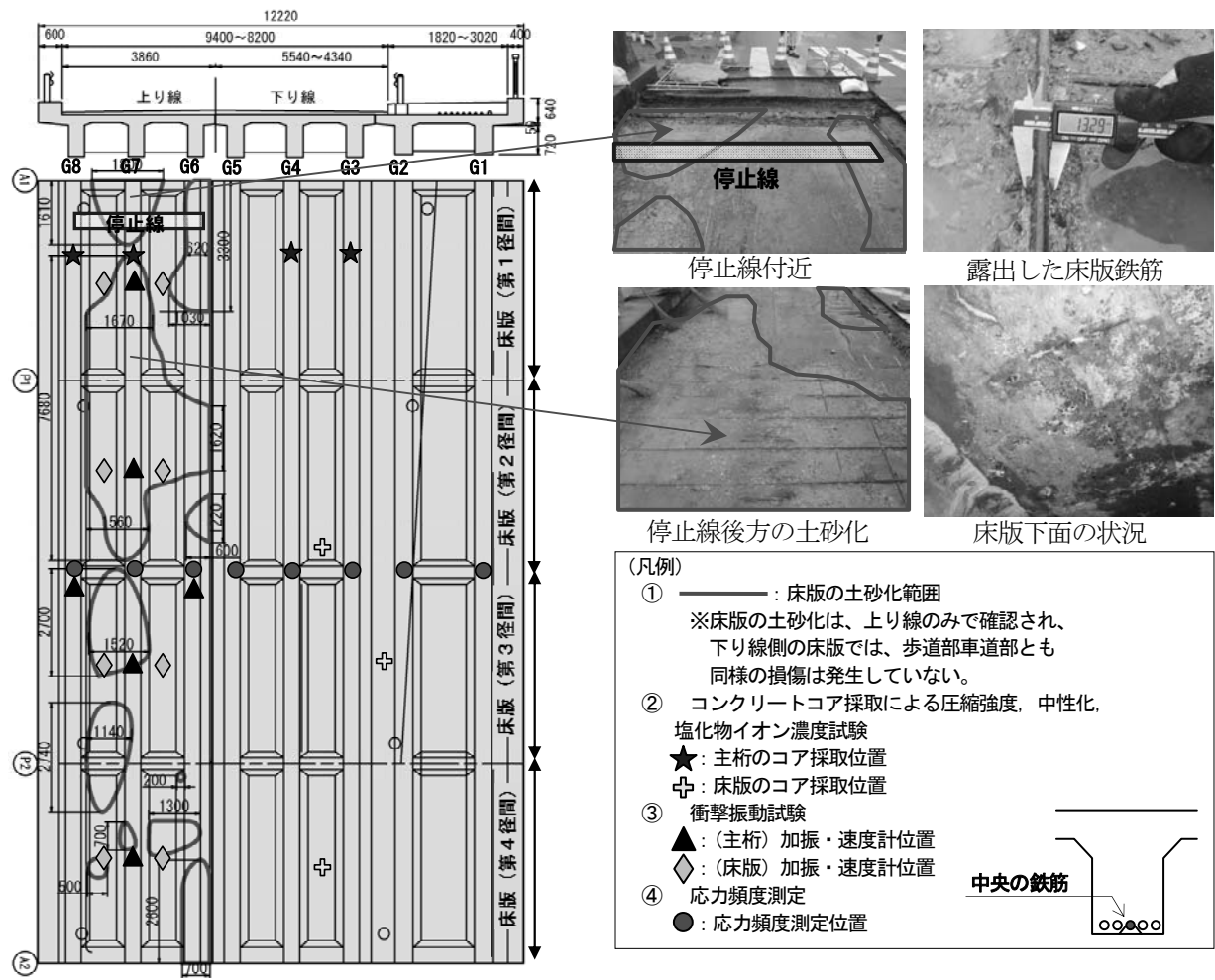


図-2 上り線側損傷状況および調査位置図

## 2. 損傷および調査の概要

### 2.1 損傷の概要

損傷状況を図-2に示す。床版の土砂化は、停止線を有する上り線側のみで確認されており、床版上面の鉄筋位置よりさらに内部まで土砂化が進行していた。露出した床版上面の鉄筋は、全体に褐色を呈しているものの腐食程度は軽く、減肉も見られないことから、本橋の床版の土砂化は鉄筋の腐食膨張によるものでないと推察した。土砂化が顕著であった停止線後方位置の床版下面では、遊離石灰を伴うひび割れの発生が確認された。

### 2.2 調査の概要

調査は、床版コンクリートの耐久性能評価のための圧縮強度試験、中性化試験、EPMA法による塩化物イオン濃度試験等の各種材料試験と、補修後の主桁の耐荷力性能評価のための応力頻度測定、補修前後の主桁と床版の剛性評価の指標とする固有振動数の把握のための衝撃振動試験等の各種試験を実施した。調査計測の実施箇所を、図-2、調査実施フローを図-3に示す。

#### (1) 衝撃振動試験

##### 1) 試験概要

重錘加振により補修前後の主桁、床版の固有振動数と

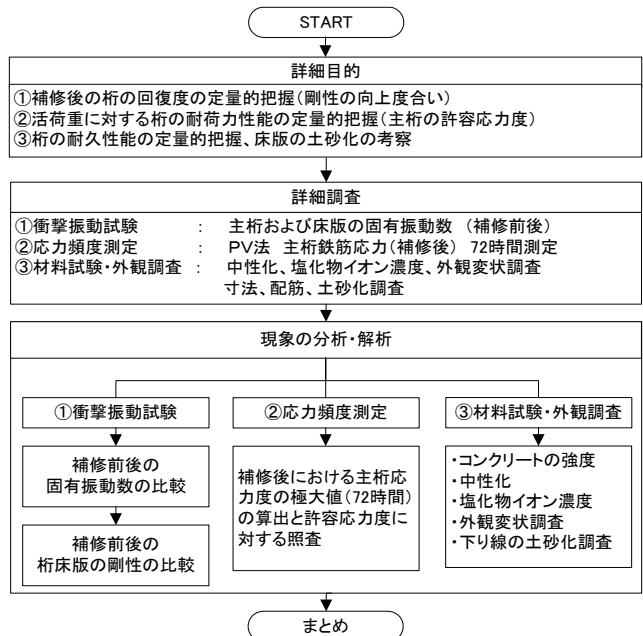


図-3 実施フロー

固有振動モードを測定した。

#### 2) 測定機器および測定方法

測定に用いた速度計センサの性能を表-1に示す。速度計センサは図-4に示す方法で床版に固定した。

上部工に対する加振は、写真-1に示すように硬質ゴム

表-1 速度計センサ

| 形式      | 測定成分          | 測定範囲                    | 感度                      |                            | 分解能                                           | 最大出力 | 許容<br>最大加速度       |
|---------|---------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------|------|-------------------|
|         |               |                         | (H)                     | (L)                        |                                               |      |                   |
| VSE-15E | 0.2～<br>100Hz | ±0.1 m/s<br>(±10V/kine) | 0.1 V/m/s<br>(10V/kine) | 100 V/m/s<br>(1000mV/kine) | $15 \times 10^{-7}$ m/s<br>(150 $\mu$ V/kine) | ±11V | 30G<br>(0.1sec以下) |

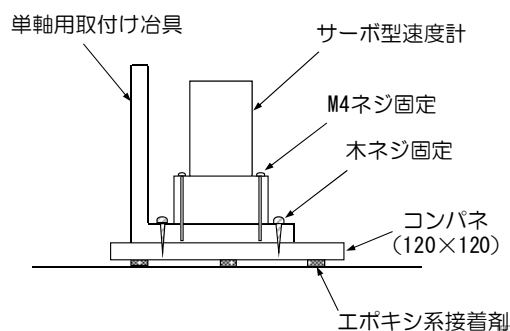


図-4 センサの固定方法



写真-1 加振状況

写真-2 主桁へのひずみ  
ゲージ添付状況

表-2 コア採取と試験項目

| 部材 | 供試体<br>名称 | 直径<br>(mm) | コア長さ<br>(mm) | 試験項目                          |
|----|-----------|------------|--------------|-------------------------------|
| 床版 | ①         | φ 103      | 73           | EPMA分析                        |
|    | ②         | φ 59       | 35           |                               |
|    | ③         | φ 59       | 73           |                               |
| 主桁 | G3        | φ 84       | 168          | 圧縮強度試験<br>静弾性係数試験<br>中性化深さの測定 |
|    | G4        |            | 153          |                               |
|    | G7        |            | 168          |                               |
|    | G8        |            | 156          |                               |

で保護した約 120N の重錘を手動で引き上げた後に落下させて衝撃力を与える方法を用いた。なお、重錘の衝撃力の面的な分散による床版の保護と、载荷時間の調整を目的として、硬質ゴムパッドを床版に敷設し、重錘はリバウンドしないように引き留めた。

## (2) 応力頻度測定

### 1) 測定概要

補修後の主桁の鉄筋ひずみを測定し、耐荷力性能を照査した。

### 2) 測定機器および測定方法

応力頻度測定状況として、主桁へのひずみゲージ添付状況を写真-2 に示す。

### 3) 耐荷重評価

耐荷重評価は、PV 法とし、72 時間連続測定の最大発生応力度を用いて、設計許容応力度との比較によって耐荷力の評価を行った。

### (3) 材料試験

各部材の採取コアに対する試験項目を表-2 に示す。床版のコア採取は床版上面側からとし、床版をできるだけ傷めないよう、小径のφ59mmで採取した。なお、舗装部はφ100mmとし、床版上面の損傷状態を目視確認した。

#### 1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1107:2002「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に準拠した。

#### 2) 静弾性係数試験

静弾性係数試験は、JIS A 1149:2001「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠し、圧縮強度試験と同時に実施した。なお、ひずみの測定はひずみゲージを用いて測定した。

#### 3) 中性化深さの測定

中性化深さの測定は、圧縮強度試験および静弾性係数試験後のコンクリートコアを表面に直行する方向に割裂した後、JIS A 1152:2002「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠し、実施した。

#### 4) EPMA 法による塩化物イオン濃度分析

EPMA 法は、コンクリートコアの表面部のアスファルトを取り除いた後、コンクリート部最表面を含む 25mm (幅) × コア長 (長さ) × 約 15mm (厚さ) の試験片を切り出し、樹脂により補強し、観察面を研磨した後、導電性を持たせる目的で観察面に炭素を蒸着したものを測定用試料とし、塩化物イオンについて、個々のピクセル毎に定量し、それらを集積して面分析結果として表示した。このうち塩化物イオンについて、同一深さにおける横方向の平均濃度 (mass%) を算出し、深さ方向のプロファイルを求めた。なお平均濃度の算出は、横方向の全てのピクセルを対象として行う方法と、骨材や空隙の占める割合が大きいピクセルを除外したセメントペースト部分のピクセルのみで行う方法の二通りで実施した。さらに、骨材込みの濃度プロファイル (mass%) に、コンクリートの単位容積質量を乗じることにより、塩化物イオン量のプロファイルを算出した。その際、コンクリートの単位容積質量は、仮定値 2200kg/m<sup>3</sup>を用いた。

## 3. 調査結果

### 3.1 衝撃振動試験結果

衝撃振動試験の結果一覧を表-3 に示す。衝撃振動試験によって得られた主桁の固有振動モードと周波数分析結果を図-7、図-8、床版の固有振動モードと周波数分析結果を図-9～図-14 に示す。主桁の1次固有振動数は、補修前後で 13.5Hz から 15.2Hz と約 13% 上昇し、床版の固有振動数は補修前後で第1径間、第4径間では約 40% 上昇し、第2径間、第3径間では約 5% 上昇した。

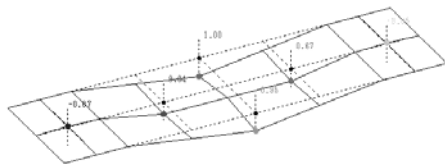


図-7 主桁の固有振動モード

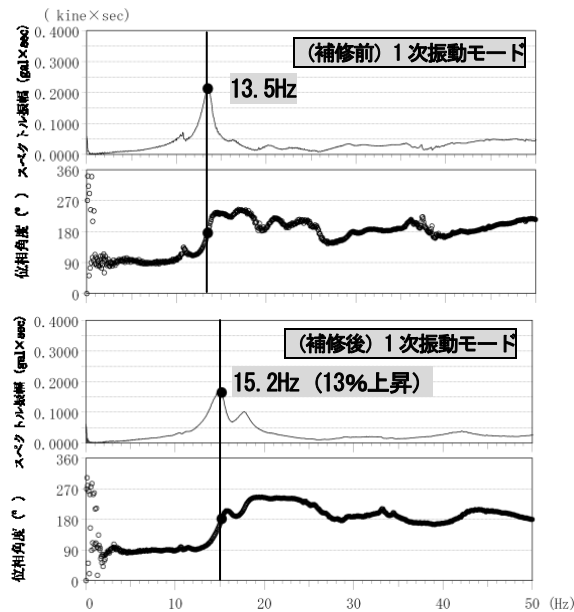


図-8 主桁の固有振動数

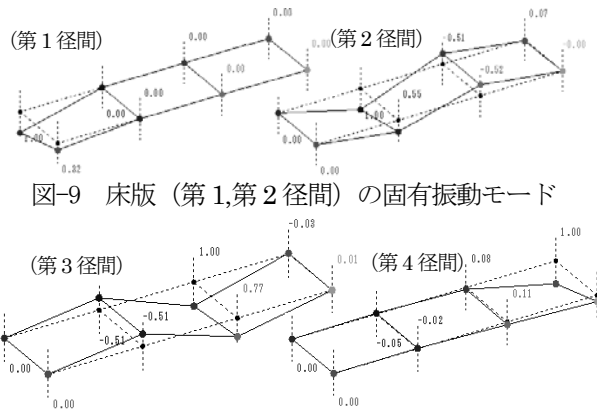


図-9 床版（第1,第2径間）の固有振動モード

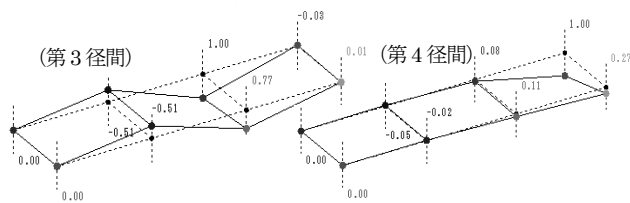


図-10 床版（第3,第4径間）の固有振動モード

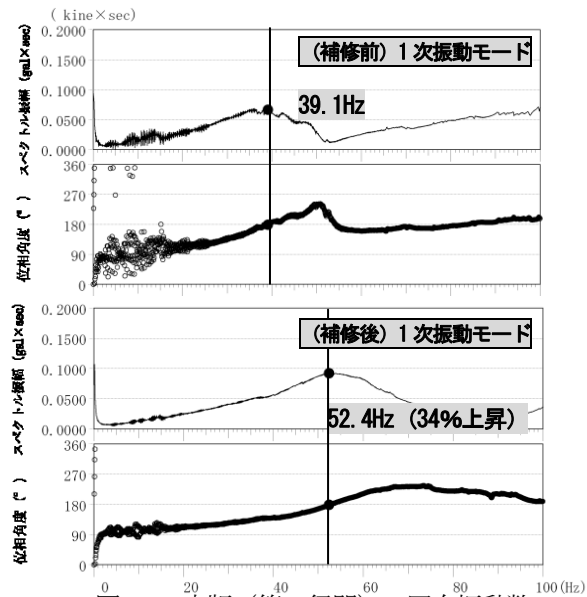


図-11 床版（第1径間）の固有振動数

表-3 衝撃振動試験の結果一覧 振動数 (Hz)

|      | 補修前<br>の実測値 | 補修後<br>の実測値 | 補修前後<br>の比率 | 設計断面<br>の解析値 |
|------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 主桁   | 13.5        | 15.2        | 113%        | 15.6         |
| 床版   |             |             |             |              |
| 第1径間 | 39.1        | 52.4        | 134%        | 48.7         |
| 第2径間 | 40.5        | 42.4        | 105%        | 48.7         |
| 第3径間 | 39.8        | 42.7        | 107%        | 48.7         |
| 第4径間 | 50.7        | 72.0        | 142%        | 48.7         |

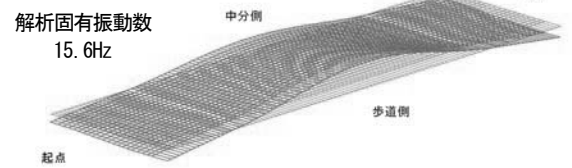


図-5 設計断面の解析値（主桁の固有振動モード）

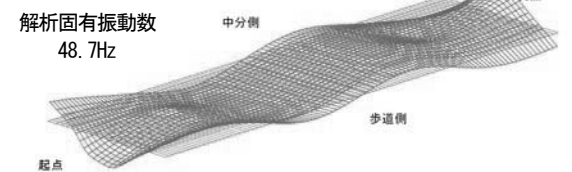


図-6 設計断面の解析値（床版の固有振動モード）

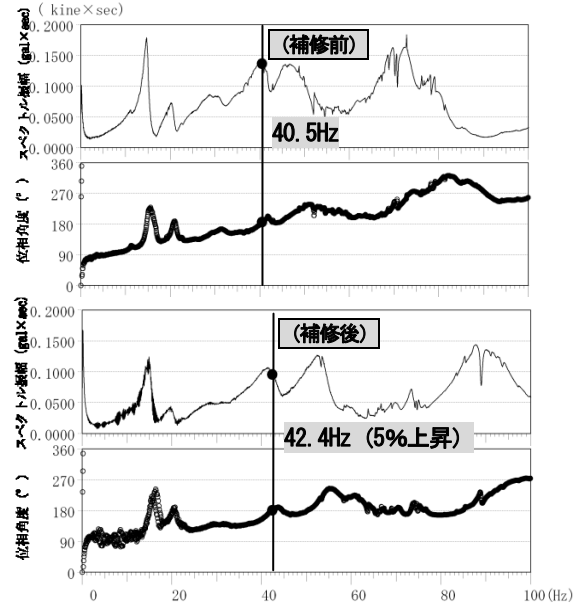


図-12 床版（第2径間）の固有振動数

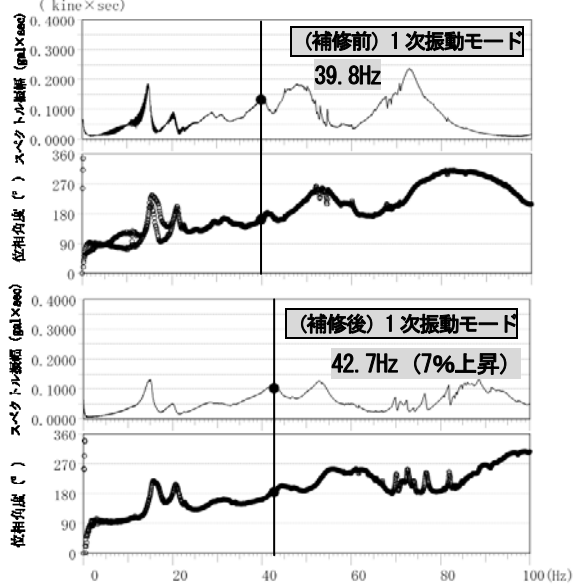


図-13 床版（第3径間）の固有振動数

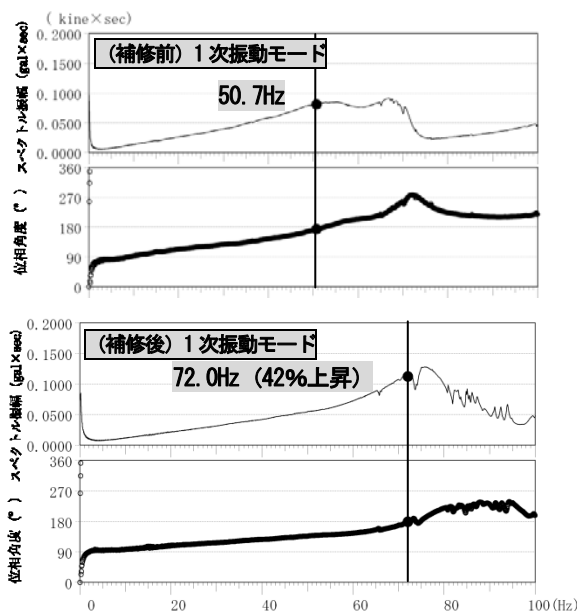


図-14 床版（第4径間）の固有振動数

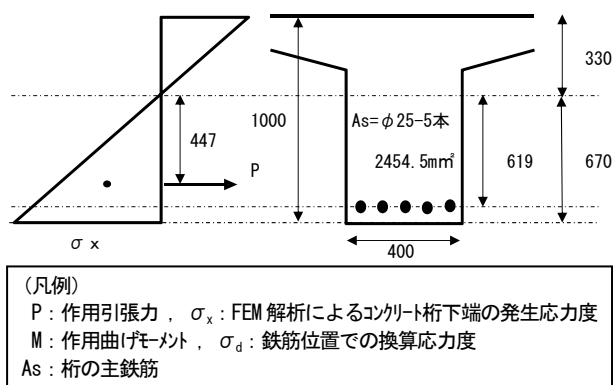


図-15 FEM解析によるコンクリート桁下縁側発生応力 $\sigma_x$ を鉄筋位置の応力度 $\sigma_d$ へ換算する方法

当初設計断面における固有振動数の推定として、床版と主桁と横桁をシェル要素とした3次元FEM解析モデルを用いて固有値解析を実施した。衝撃振動試験は微小ひずみ帯域における試験であるため、固有値解析における主桁および床版コンクリートの初期剛性は、動弾性係数を用いた。動弾性係数は実測の試験結果からCEB-FIP国際指針により算出した。算出式を式(1)に示す。

$$Ec = 20665 \cdot \sqrt{fc} \quad (1)$$

$Ec$ : コンクリートの動弾性係数 ( $\text{kg/cm}^2$ )

$fc$ : コンクリートの実圧縮強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )

固有値解析の結果を図-5、図-6と表-3の解析値として示している。なお、解析モデルでは床版上面の損傷程度、および、既設新設の床版コンクリートの剛性の違いを再現できるモデルとした。舗装の剛性は解析モデルに考慮していない。

固有振動数の上昇は剛性の回復と考えられる。設計断

表-4 応力頻度測定による各主桁の鉄筋応力度の極大値

|                               | 下り線 |    |    | 上り線 |    |    |
|-------------------------------|-----|----|----|-----|----|----|
|                               | G3  | G4 | G5 | G6  | G7 | G8 |
| 鉄筋応力度の極大値 ( $\text{N/mm}^2$ ) | 28  | 26 | 24 | 32  | 22 | 20 |

表-5 応力評価結果

| 桁No | 死荷重応力度                         |                               | 応力頻度測定結果<br>(活荷重応力度)<br>$\sigma_L$ | 死+活<br>応力度<br>$\sigma_{d+L}$ | 鉄筋の<br>許容応力度<br>$\sigma_{sa}$ | 判定 |
|-----|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----|
|     | 下縁側発生<br>応力度<br>$\sigma_x$ (注) | 鉄筋位置での<br>換算応力度<br>$\sigma_d$ |                                    |                              |                               |    |
|     | ( $\text{N/mm}^2$ )            | ( $\text{N/mm}^2$ )           | ( $\text{N/mm}^2$ )                | ( $\text{N/mm}^2$ )          | ( $\text{N/mm}^2$ )           |    |
| G-3 | 1.64                           | 64.7                          | 28.0                               | 92.7                         | 140.0                         | OK |
| G-4 | 1.66                           | 65.5                          | 26.0                               | 91.5                         | 140.0                         | OK |
| G-5 | 1.59                           | 62.5                          | 24.0                               | 86.5                         | 140.0                         | OK |
| G-6 | 1.91                           | 75.3                          | 32.0                               | 107.3                        | 140.0                         | OK |
| G-7 | 1.68                           | 66.3                          | 22.0                               | 88.3                         | 140.0                         | OK |
| G-8 | 1.67                           | 65.6                          | 20.0                               | 85.6                         | 140.0                         | OK |

注) 下縁側発生応力度 $\sigma_x$ は、FEM解析によるコンクリート桁下縁の応力度(コンクリート換算値)である。

表-6 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

| 供試体名称                       |     | G3   | G4   | G7   | G8   |
|-----------------------------|-----|------|------|------|------|
| 圧縮強度<br>( $\text{N/mm}^2$ ) | 補正前 | 21.8 | 26.5 | 33.6 | 33.5 |
|                             | 補正後 | -    | 26.2 | -    | 33.2 |
| 静弾性係数 ( $\text{N/mm}^2$ )   |     | 21.1 | 24.3 | 34.6 | 31.7 |

表-7 中性化深さの測定結果

| 供試体名称 | かぶり | 中性化深さ(mm) |      |
|-------|-----|-----------|------|
|       |     | 平均        | 最大   |
| G3    | 30  | 39.9      | 44.0 |
| G4    |     | 34.6      | 49.0 |
| G7    |     | 23.4      | 27.5 |
| G8    |     | 24.1      | 30.5 |

面における固有振動数の推定値との比較から、床版の第1径間、第4径間は当初の設計断面剛性を上回ることが確認できた。

### 3.2 応力頻度測定結果

応力頻度測定の結果総括として、72時間連続測定時の各主桁の鉄筋応力度の極大値を表-4に示す。応力度は床版と主桁と横桁をシェル要素とした3次元FEM解析モデルによる解析結果から主桁下縁側の発生応力度( $\sigma_x$ )を抽出し、この値を鉄筋位置へ換算して照査した。鉄筋位置の応力度換算方法を図-15に示す。鉄筋位置における応力の照査結果を表-5に示す。

主鉄筋許容応力度は、鉄筋コンクリート標準示方書(昭和31年)/土木学会124頁よりSS39, SS41, SSD39を適用し、 $1400\text{kg/cm}^2$  ( $140\text{N/mm}^2$ )に設定した。耐荷力性能は、72時間連続測定にて想定した現行の交通条件の範囲では、下り線、上り線とも鉄筋の許容応力度に対して、十分に余裕があることがわかった。

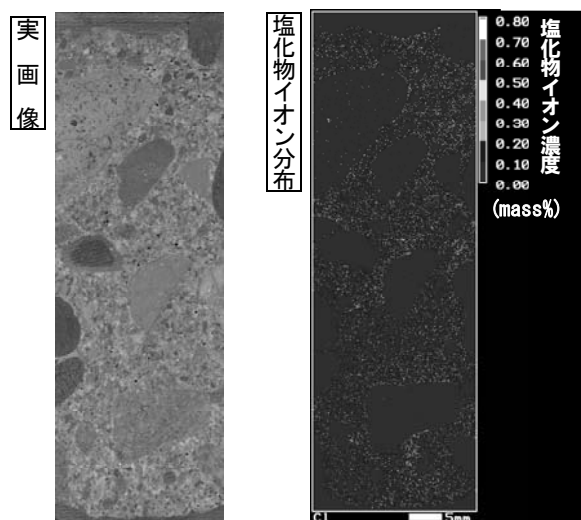


図-16 供試体③の面分析結果

### 3.3 材料試験結果

材料試験の結果を以降に示す。

#### (1) 圧縮強度試験および静弾性係数試験の結果

圧縮強度試験と静弾性係数試験の結果を表-6に示す。下りの G3, G4 主桁に比べ、上りの G7, G8 主桁の圧縮強度と静弾性係数が若干大きい結果となった。主桁の圧縮強度は、いずれも当時における標準的な設計基準値 ( $21\text{N/mm}^2$ ) 以上であった。

#### (2) 中性化試験結果

中性化深さの測定結果を表-7に示す。下り線 G3, G4 主桁、上り線 G8 主桁の中性化深さは最大で鉄筋かぶり 30mm を超えており、今後鉄筋腐食が生じる可能性があることがわかった。

#### (3) EPMA 法による塩化物イオン濃度

表-2 に示した供試体①～③はいずれも土砂化のない下り線側の供試体であるが、EPMA 法による塩化物イオン濃度試験の結果、床版上面から深さ 7cm 程度まで塩化物イオンを含有し、その濃度は鉄筋腐食限界  $1.2\text{ kg/m}^3$  を超えていた。

EPMA 法による面分析結果の例として供試体③の結果を図-16 に示す。図の上側がコンクリートコア表面側となっている。濃度分布は色分けにより表示した。それぞれの色に相当する濃度を、カラーバーで表示している。さらに、供試体③の塩化物イオン量 ( $\text{kg/m}^3$ ) を図-17 に示すが、床版表面から全体的に塩化物イオンが浸透し、濃度は鉄筋腐食限界  $1.2\text{ kg/m}^3$  を超えていることがわかった。

### 4. まとめ

床版上面に発生した土砂化損傷に対して、各種材料試験と、補修後の応力頻度測定、補修前後の主桁と床版の衝撃振動試験を実施し、床版コンクリートの耐久性能の評価、補修後の耐荷力性能の評価、補修前後の主桁と床版の剛性評価に寄与する固有振動数の変化について確認を行った結果、以下のことが明らかとなった。

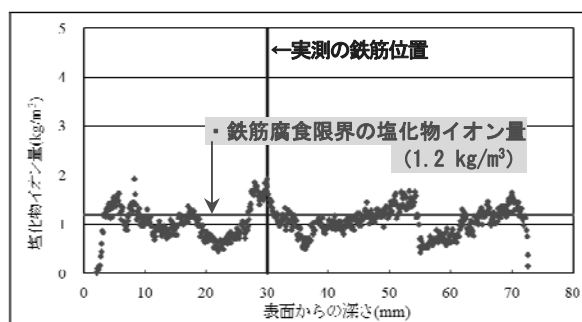


図-17 コア供試体③の塩化物イオン濃度

(1) 主桁の圧縮強度は、当時の標準的な設計基準値 ( $21\text{N/mm}^2$ ) 以上であった。中性化試験結果では、主桁の中性化深さは鉄筋かぶり 30mm を上回るものがあり、今後鉄筋腐食が生じる可能性があることがわかった。EPMA 法による塩化物イオン濃度試験の結果では、土砂化のない下り線側の供試体で、床版上面から深さ 7cm 程度まで塩化物イオンを含有し、濃度は鉄筋腐食限界  $1.2\text{ kg/m}^3$  を超えていた。

(2) 補修後の 72 時間連続の応力頻度測定によって得られた各主桁の鉄筋応力度の極大値は、鉄筋の許容応力度から死荷重による応力度を差し引いて算出した活荷重に対する鉄筋の許容応力度に対して、十分に余裕があることがわかった。

(3) 衝撃振動試験によって得られた主桁の固有振動数は、補修前後で 1 次固有振動数が 13.5Hz から 15.2Hz と約 13% 上昇し、床版の固有振動数は補修前後で第 1 径間、第 4 径間では約 40% 上昇し、第 2 径間、第 3 径間では約 5% 上昇した。この固有振動数の上昇は剛性の回復と考えられる。設計断面における固有振動数の推定値との比較から、補修後、床版の第 1 径間、第 4 径間は当初の設計断面剛性を上回ることが確認できた。

以上、土砂化の損傷が発生した RC 床版に対する調査方法の事例を示した。床版の耐久性能に関しては各種試験が存在するものの、床版の耐荷力性能に関する調査方法は少ない。このような中、本調査で実施した衝撃振動試験は、非破壊で、既設の構造性能を評価できる手法であり、床版の健全度を評価する上で有効と考える。本稿を踏まえ、床版土砂化と凍結防止剤や凍害、車両の輪荷重との因果関係等、今後検討していきたい。

### 参考文献

- 1) コンクリート診断技術 '11 [基礎編], 52 頁, 2011.2 社) 日本コンクリート工学協会
- 2) 宮村正樹, 子田康弘, 内藤英樹, 岩城一郎, 鈴木基行: 振動特性に着目した RC 床版の疲労損傷度評価手法に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 57A, pp. 1251-1262, 2011.3
- 3) 宮村正樹, 岩崎正二, 出戸秀明, 加藤哲, 早坂洋平: 衝撃振動試験および動たわみ測定による実橋 RC 床版の劣化度評価, 鋼構造年次論文報告集, Vol19, 2011.11