

# 論文 塩害により撤去した PCT 桁の載荷試験と維持管理手法に関する検討

有馬 直秀<sup>\*1</sup>・深田 宰史<sup>\*2</sup>・玉田 和也<sup>\*3</sup>・森山 守<sup>\*4</sup>

**要旨：**本研究は、塩害により劣化し撤去した PCT 桁を用いて、残存耐力の評価および載荷試験による変状形態と振動特性の関係を明らかにすることを主な目的としている。たわみ 1 次の固有振動数は、PCT 桁が降伏するまでは、低下率は 6%程度以内と小さかった。一方、ほぼ終局状態になった時点では、載荷試験前に比べ、低下率は 31%と大きな変化が見られた。減衰定数は、固有振動数に比べ変状形態に対し一定の変化が見られた。外観上に損傷が見られるが PC 鋼材が健全であれば十分な耐力が確認でき、PC 橋に対する維持管理では、残存プレストレス推定やグラウト充填を確認する非破壊試験が有効であることを明らかにした。

**キーワード：**載荷試験、耐力、プレストレス、固有振動数、減衰定数

## 1. はじめに

NEXCO 中日本金沢支社（以下、金沢支社）が管理する北陸自動車道は、1970 年代に建設ピークを迎え、2030 年には供用年数が平均 50 年を超え橋梁の高齢化が進んでいる。金沢支社が管理する橋梁は、鋼橋が約 4 割に対し、コンクリート橋が約 6 割と多く、コンクリート橋の主たる劣化要因は、飛来塩分や凍結防止剤による塩害およびアルカリシリカ反応による劣化が多く<sup>1)</sup>、効率的な維持管理が求められ、さらに科学的・合理的に説明できる保全を目指す必要がある。金沢支社における点検は、目視や打音点検を主体とした手法であり、橋梁の健全性を定量的かつ簡易的に評価できるモニタリング技術を導入できていないのが現状である。橋梁の健全性を把握するための調査には、様々な方法があり、その一つに橋梁の固有振動特性、減衰特性など橋梁振動に着目した振動モニタリングがある<sup>2)</sup>。また、橋梁の振動特性の変化から橋梁の健全性を評価する研究が多数行われている。供試体および実橋梁を対象に静的載荷試験を行い、損傷に伴う振動特性の影響を把握する研究<sup>3)~6)</sup>や実橋梁を対象に段階的に損傷を与え、損傷と振動特性の影響を把握する研究<sup>7)</sup>および PC 鋼材を破断させた場合の減衰特性の影響を把握した研究<sup>8)</sup>などが挙げられる。

本研究では、塩害により劣化した PCT 桁を対象に、残存耐力の評価および載荷試験による変状形態と振動特性の関係を明らかにすることを主な目的とした。そのために、劣化状況を把握するため各種調査を行い、載荷試験により PCT 桁が破壊に至るまでの載荷試験を実施した。また、荷重除荷後の各段階で振動特性を把握し、今後の点検に活用できる維持管理方法について検討した。

## 2. 劣化状況調査

### 2.1 試験体の諸元

試験体の橋梁諸元および形状は、表-1、図-1 に示すように桁長 17.9m で 12φ7mm の PC 鋼線を 5 本配置したポストテンション単純 T 桁である。試験体は、飛来塩分や凍結防止剤による塩害を受け、塩害補修を実施した後、車両大型化対策や今後の維持管理費の増大を考慮し、架替えされた 10 本主桁の海側にある外桁である。撤去後 2014 年まで供用付近の高速道路下に屋外曝露していた。

表-1 試験体の橋梁諸元

|              |                                                                                            |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 供用場所         | 北陸自動車道                                                                                     |
| 桁 長          | 17.9 m (支間長 17.2m)                                                                         |
| 竣工／撤去        | 1972 年／1997 年 (供用期間 25 年)                                                                  |
| 構造形式         | ポストテンション単純 T 桁橋                                                                            |
| 適用示方書        | 道示 昭和 43 年                                                                                 |
| 定着工法         | フレシネー工法                                                                                    |
| 使用材料         | $\sigma_{ck}$ :400kg/cm <sup>2</sup> PC 鋼材：12φ7mm×5 本<br>鉄筋：SD30(D13)                      |
| 主な補修履歴 (上部工) | 1) 1982 年 断面修復工, 防水ライニング工,<br>2) 1987 年 断面修復工, 防水ライニング工,<br>3) 1992 年 防錆剤注入工, 4) 1997 年架替え |
| その他          | 撤去後～2014 年 10 月の期間：屋外曝露<br>載荷試験、各種調査：2014 年 10 月に実施                                        |

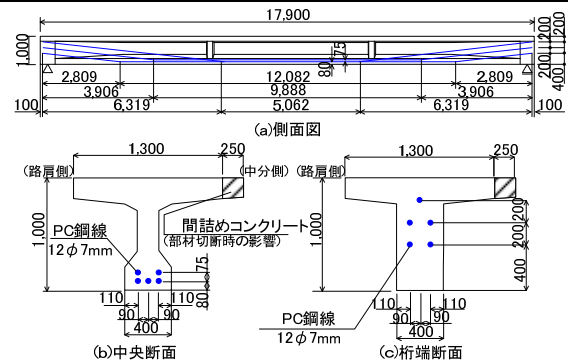


図-1 試験体の形状

\*1 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 (株) 金沢支店 道路技術部 構造技術課 係長 (正会員)

\*2 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 准教授 博 (工)

\*3 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科 教授 博 (工)

\*4 中日本高速道路 (株) 金沢支社 保全サービス事業部保全チーム 担当リーダー 博 (工)

## 2.2 調査方法

### (1) 外観調査

載荷試験前に現状の劣化状況を把握するため、主桁の底面および両側側面を目視および点検ハンマによる打音調査を行い、浮き・剥離およびひび割れ状況を調査した。

### (2) 圧縮・静弾性係数試験

載荷試験後に塩害による劣化状況を把握するため、圧縮強度および静弾性係数試験を JIS A 1108 および JSCE-G502 に準じて実施した。コア採取は、図-2 に示すひび割れが発生していない比較的健全な主桁ウェブから貫通コア (φ55 mm×160 mm 程度) 3 本を採取した。

### (3) 含有塩化物量調査

圧縮強度および静弾性係数試験後に、同じ貫通コアを用いて、コアの両端部から 20mm ピッチでスライスカットを行い、JIS A 1154 に準じて全塩化物イオン（以下、塩分）量を電位差滴定法によって求め、表面からの塩分濃度分布を求めた。

### (4) 残存プレストレスの推定

塩害により劣化した試験体の残存プレストレスを推定するため、載荷試験前に桁の応力方向と直角方向にコンクリート表面ひずみゲージを貼りつけ、φ50mm のコンクリートコアカッターによって 18mm 程度の切込みを入れ、応力解放後のひずみを測定し、文献<sup>9)</sup>に提案されている推定手法を用いて所定の応力を算定した。計測位置は、ひび割れや浮きがない同一断面位置の 2 断面で主桁ウェブ、下フランジ側面と底面の 3 ヶ所とした。

### (5) グラウト充填調査

載荷試験後にグラウトの充填性を確認するため、試験体をワイヤーソーにより切断し、グラウトの充填性を観察した。切断位置は、グラウトの充填性を載荷試験前に衝撃弾性波による非破壊試験を行い、充填不良の可能性があるとして推定された試験体の両端部と併せて桁搬送の作業性を考慮し、8 分割する合計 7 断面とした。

## 2.3 調査結果

### (1) 外観調査

外観調査の結果を表-2 および図-2 に示す。塩害による損傷は、底面が最も広く、浮き・剥離が 35.6%あり、底面および主桁ウェブの一部で鉄筋露出も確認された。主桁ウェブは、供用中に海側であった路肩側より中分側の損傷が大きく、これは付着した飛来塩分が雨風によって洗い流された影響によるものと推察された。

### (2) 圧縮・静弾性係数試験

試験結果を表-3 に示す。採取したコアは、設計基準強度 40N/mm<sup>2</sup> をすべて満足する値を示した。また、静弾性係数の値は、設計値である 31kN/mm<sup>2</sup> を概ね満足する結果となり塩害による劣化の影響は少なく、概ねコンクリートは健全であったと判断できた。

### (3) 含有塩化物量調査

貫通コア 3 本から海側と山側の塩分濃度分布の結果を図-3 に示す。両側のかぶり 30mm 位置では、コンクリート標準示方書による提案式<sup>10)</sup>から推定した鋼材腐食発生限界値 1.7kg/m<sup>3</sup>を上回る数値を示し、鉄筋が腐食する環境にあった。なお、W/C は建設時の記録 39%を用いた。

表-2 外観調査の結果

| 部位   | 調査面積<br>: A (m <sup>2</sup> ) | ひび割れ<br>: B (m) | 浮き・剥離<br>: C (m <sup>2</sup> ) | C/A<br>(%) |
|------|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|------------|
| 路肩側面 | 15.18                         | 2.48            | 0.34                           | 2.2        |
| 底面   | 6.68                          | 0.20            | 2.51                           | 35.6       |
| 中分側面 | 14.27                         | 1.48            | 3.12                           | 21.9       |
| 合計   | 36.13                         | 4.16            | 5.97                           | 18.6       |

※断面修復箇所では浮きが確認されない箇所は計上していない。

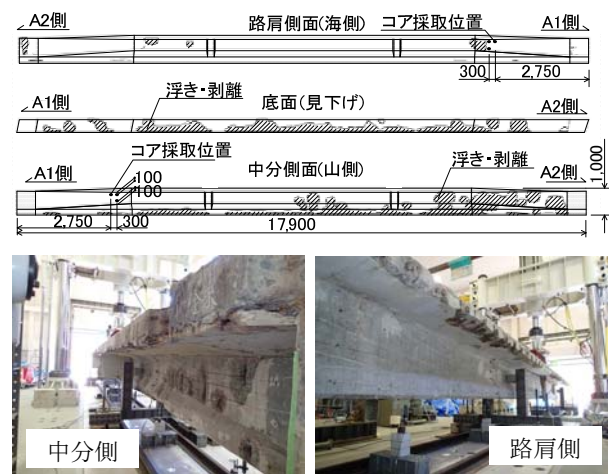


図-2 外観調査の結果

表-3 圧縮強度・静弾性係数試験の結果

| No   | 圧縮強度σ<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 静弾性係数E<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | 採取位置                                      |
|------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|
| No.1 | 59.7                          | 31.9                            | A1 から 2750mm,<br>3,050mm 離れのウェブ<br>でコアを採取 |
| No.2 | 57.0                          | 31.0                            |                                           |
| No.3 | 56.2                          | 32.5                            |                                           |
| 平均   | 57.6                          | 31.8                            |                                           |

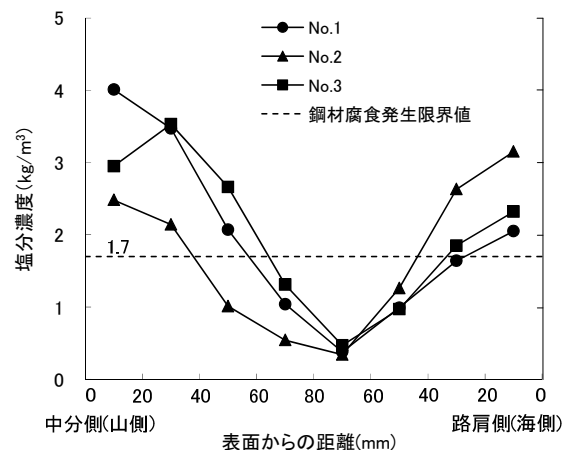


図-3 塩分濃度分布の結果

#### (4) 残存プレストレスの推定

測定位置は、No.1～No.3 がスパン中央から 1,350mm、No.4～No.6 がスパン中央から 3,550mm の位置とした。残存プレストレスの推定に用いた設計諸元は、コンクリートのヤング係数  $35\text{kN/mm}^2$ 、鋼材  $200\text{kN/mm}^2$  を用いた。測定の結果を表-4 に示す。推定したプレストレスは、ばらつきは見られるが、概ね設計のプレストレスに近い値が算出されたことより、PC 鋼材の損傷はあまりなく、ほぼ健全な状態にあると推察された<sup>9)</sup>。

#### (5) グラウト充填調査

試験体の切断面観察によるグラウト充填調査の結果を表-5 に示す。PC 鋼線が曲げ上げられる断面 1、断面 7 の一部で PC 鋼線とシース管の間でごく小さな空隙が見られるものの、それ以外の断面は、確実にグラウトが充填されていた。このことより、PC 鋼材は腐食環境になりにくい状況にあり、ほぼ健全な状態であると推察された。

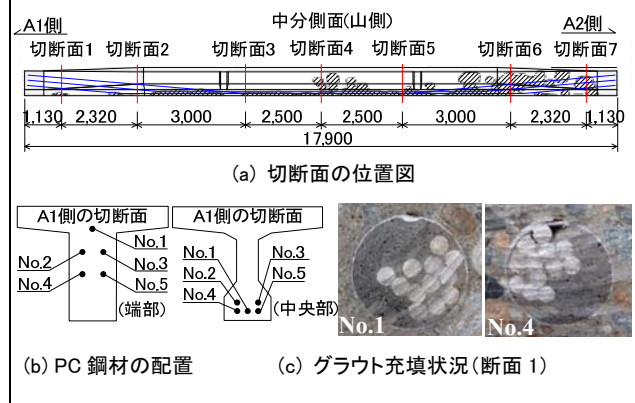
表-4 残存プレストレスの推定結果

| No   | ひずみ $\mu$  | 応力度 $\text{N/mm}^2$ |          |      |
|------|------------|---------------------|----------|------|
|      | 有効応力成分のひずみ | 推定プレストレス            | 設計プレストレス | 差    |
| No.1 | -190       | 13.5                | 15.5     | -2.0 |
| No.2 | -250       | 14.7                | 13.6     | 1.1  |
| No.3 | -118       | 6.1                 | 6.3      | -0.2 |
| No.4 | -253       | 14.9                | 15.5     | -0.6 |
| No.5 | -168       | 11.0                | 13.6     | -2.6 |
| No.6 | -71        | 4.2                 | 6.3      | -2.0 |

採取したコア No は、以下とする。No.1, No.4 : 主桁の底面, No.2, No.5 : 下フランジ側面, No.3, No.6 : 主桁ウェブ

表-5 グラウトの充填調査 (A1 側断面) の結果

|      | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 | No.5 |
|------|------|------|------|------|------|
| 断面 1 | 充填   | 充填   | 充填   | 空隙有  | 充填   |
| 断面 2 | 充填   | 充填   | 充填   | 充填   | 充填   |
| 断面 3 | 充填   | 充填   | 充填   | 充填   | 充填   |
| 断面 4 | 充填   | 充填   | 充填   | 充填   | 充填   |
| 断面 5 | 充填   | 充填   | 充填   | 充填   | 充填   |
| 断面 6 | 充填   | 充填   | 充填   | 充填   | 充填   |
| 断面 7 | 充填   | 充填   | 充填   | 空隙有  | 空隙有  |



### 3. 載荷試験による損傷状況と耐荷性能

#### 3.1 載荷試験の概要

##### (1) 載荷位置と載荷方法

載荷位置は、図-4 に示すようにスパン長 17.2m、等曲区間 2.0m、せん断スパン長 7.6m の 2 点支持 2 点載荷とした。載荷試験は、静的載荷および振動計測のため試験体に大きな変状が確認された時点で一旦荷重を除荷し、振動計測を行い、再度載荷する繰り返し載荷を行った。

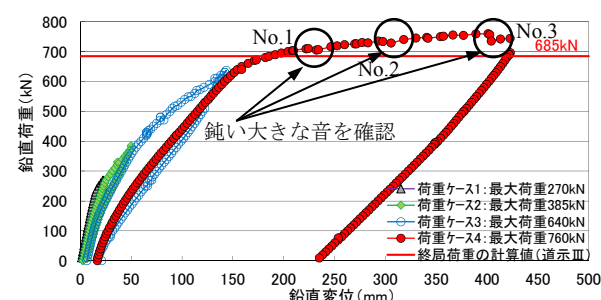
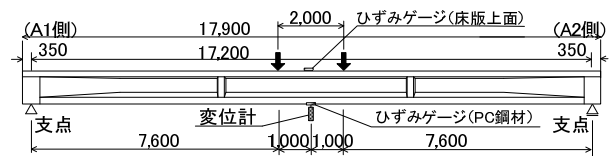
##### (2) 計測項目

変位計を図-4 に示すスパン中央に配置し、荷重と変位の関係およびひび割れの発生状況を確認した。スパン中央の床版上面のコンクリート表面および部分的にシースが剥き出しになった箇所には手はつりでグラウトを取り除き、PC 鋼材にひずみゲージを貼り付け、発生応力を確認した。

#### 3.2 載荷試験の結果

##### (1) 荷重と変位およびひび割れの発生状況

荷重とスパン中央の変位の関係を図-5 に示す。また、図中に道路橋示方書に従って算出した終局荷重の計算値を示す。PCT 桁の降伏荷重は、約  $650\text{kN}$  と推定され、最大荷重約  $760\text{kN}$  でほぼ終局状態に至ったと判断された。この値は、終局荷重の計算値  $685\text{kN}$  の約 1.1 倍に相当し、一定の耐荷力があったと評価できた。図-5 に示す○印箇所では、鈍い大きな音を確認し、PC 鋼線が数本破断したものと推察された。なお、No.1 では、上フランジでコンクリートの部分圧壊と下フランジの劣化部で一部剥離が確認された。No.3 では、中分側上フランジでコンクリートの部分圧壊、下フランジ劣化部で大きなひび割れが発生した。中分側のひび割れの発生状況を図-6 に示す。荷重が  $270\text{kN}$  付近でスパン中央付近に曲げによる縦方向のひび割れが発生し、荷重が  $385\text{kN}$  以上では、斜め方向にひび割れが確認された。路肩側についても概ね同様のひび割れ発生形態であった。



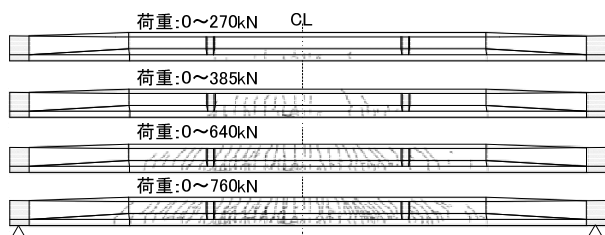


図-6 ひび割れの発生状況（中分側）

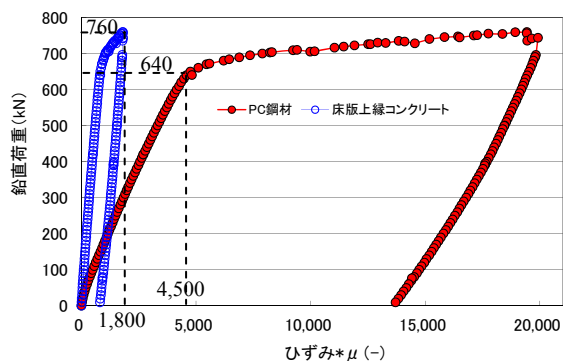


図-7 荷重とPC鋼材、床版コンクリートのひずみの関係

## (2) 荷重とひずみの関係

荷重とPC鋼材のひずみの関係を図-7に示す。PC鋼材が概ね降伏したと判断される荷重640kNでは、PC鋼材のひずみは約4,500 $\mu$ であり、設計上のPC鋼線の有効引張応力度790N/mm<sup>2</sup>による弾性ひずみを加えると、約8,450 $\mu$ となる。この値は、PC鋼材の降伏点である1,300N/mm<sup>2</sup>に対する弾性ひずみに0.2%永久ひずみを加えたひずみとほぼ一致することから、PC鋼材のひずみからも降伏荷重に達していると推定された。また、床版上縁のコンクリートの圧縮ひずみは、最大荷重760kNで約1,800 $\mu$ であるので、ほぼ終局状態に至ったと判断された。

## 4. 振動試験に基づく振動特性の評価

### 4.1 振動試験の概要

加速度計を図-8に示すように、2点支持のスパン(L)に対して、L/8ピッチの7個×2列の合計14箇所に設置し振動試験を行った。振動試験の方法は、常時微動、人力による衝撃加振および起振器による共振加振の3パターンで行い各試験による固有振動数の違い、および振動モードおよび減衰定数を確認した。なお、本試験では、サンプリング周波数200Hzにて計測を行った。

常時微動試験は、外力を与えず5分間計測を行った。衝撃加振試験は、写真-1の左に示すようにスパン中央付近でパイプ椅子から人が跳び降りることによって衝撃加振し、自由減衰波形を記録し、減衰定数および固有振動数を算出した。起振器による共振加振試験は、写真-1の右に示すように起振器をスパン中央付近に配置し、衝撃加振によって算出された卓越振動数を用いて、PCT桁を強制的

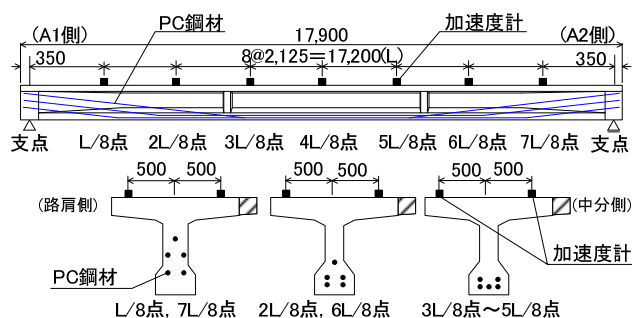


図-8 加速度センサの配置

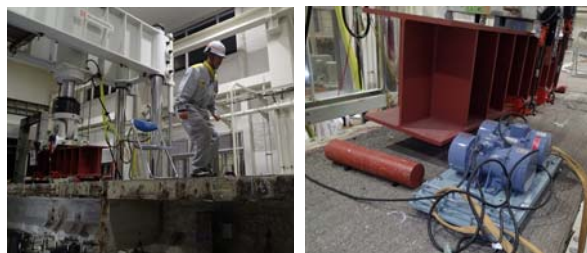


写真-1 計測状況(左：衝撃加振、右：共振加振)

に加振させた後、起振を停止させた後の自由減衰波形を計測し減衰定数を算出した。各試験回数は、載荷試験前および載荷荷重270kN、385kN、640kN、760kN除荷後の合計5回行った。

### 4.2 振動計測の結果

#### (1) 固有振動数と振動モード

まず、載荷試験前にPCT桁がどのような振動特性を有しているのか調べた。衝撃加振試験における結果の一例として、スパン中央で衝撃加振した時の2L/8点位置で得られた加速度波形とスペクトルを図-9に示す。これより、水平1次3.26Hz、たわみ1次6.19Hz、ねじれ1次11.35Hz、たわみ2次22.00Hz、およびねじれ2次29.55Hzの卓越が見られた。得られた加速度波形を用いてERA解析<sup>1)</sup>により分析した結果を図-10に示す。得られた振動モード図から節の位置および左右の振幅に差が見られた。これは、試験体が外桁を用いており片側のみ横桁があることや桁切断の際の非対称断面による影響と推察された。

#### (2) 荷重ケースごとの固有振動数の変化

荷重ケースごとのたわみ1次振動数の変化を表-6に示す。これより固有振動数は、常時微動、衝撃加振、共振加振の順番で振動数が小さくなっていった。これは、加振振幅に伴う支点条件の変化が影響したものと考えられる。また、荷重ケースごとのたわみ1次振動数の変化として、載荷試験前の振動数で正規化した結果を図-11に示す。各試験では大きな違いは確認できず、PCT桁が降伏するまでは、概ね一定の割合で低下が見られた。降伏前までの低下率は6%程度以内と小さかった。一方、PCT桁がほぼ終局状態になった時点での固有振動数は、載荷試験

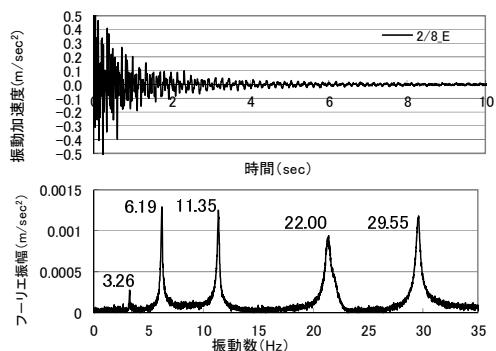


図-9 衝撃加振試験の結果（測定点：2L/8）

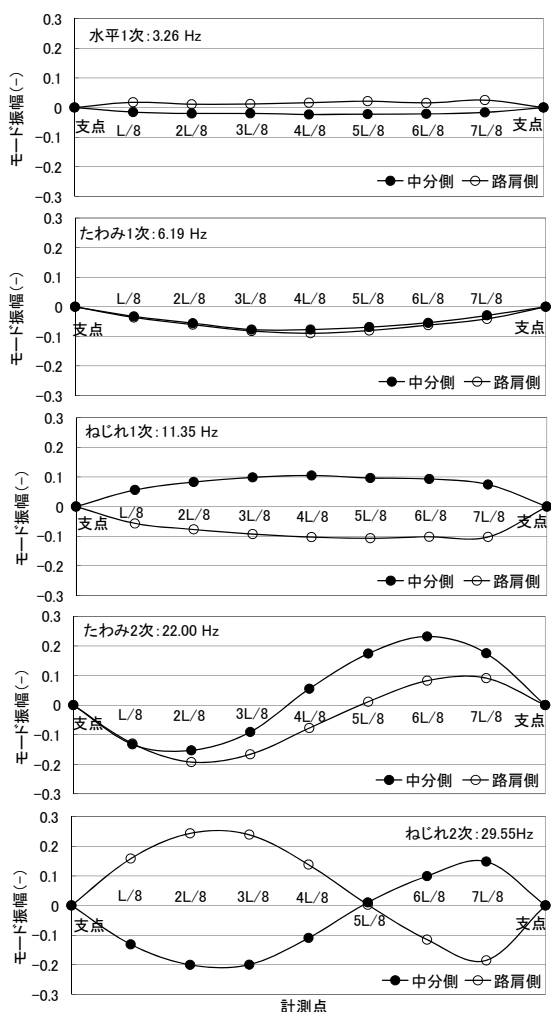


図-10 振動モード（载荷試験前）

表-6 固有振動数および減衰定数の計測結果

| 荷重<br>(kN) | 固有振動数 (Hz) |      |      | 減衰定数   |
|------------|------------|------|------|--------|
|            | 常時微動       | 衝撃加振 | 共振加振 | 共振加振   |
| 0          | 6.41       | 6.19 | 6.12 | 0.0070 |
| 270        | 6.26       | 6.15 | 6.09 | 0.0074 |
| 385        | 6.20       | 6.04 | 5.99 | 0.0082 |
| 640        | 6.03       | 5.80 | 5.74 | 0.0088 |
| 760        | 4.37       | 4.30 | 4.23 | 0.0094 |

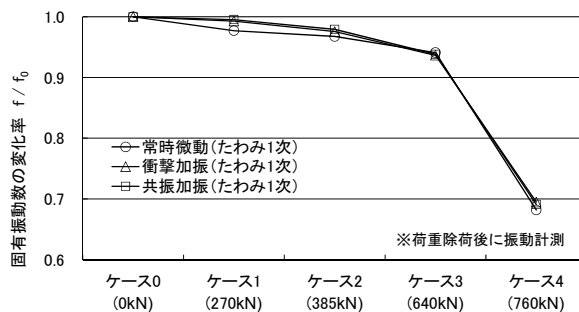


図-11 荷重ケースと固有振動数の低下率の関係

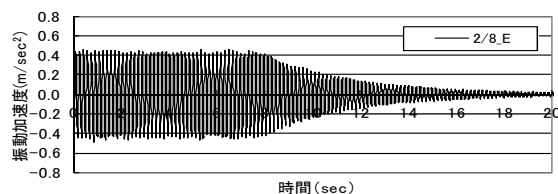


図-12 共振試験の結果（測定点 2L/8）

前に比べ、低下率は31%と大きな変化が見られた。

このことから、実務上の点検において、固有振動数の変化量が小さく、また固有振動数は、実際には温度、風および一般車等の外乱による影響を受けることを考慮すると、たわみ1次振動数による耐荷性能に関する健全度評価を行うことは、困難であると考えられる。

### (3) 減衰特性

共振試験における結果の一例として、2L/8点位置で得られた载荷試験前の自由減衰波形を図-12に示す。また、荷重ケースごとのたわみ1次振動のモード減衰定数を表-6に付記し、荷重ケースごとの変化を図-13に示す。载荷試験前の減衰定数は、文献<sup>8)</sup>の減衰定数と同程度の値となり、終局後では载荷試験前に比べ1.3倍となった。これより減衰定数の変化は、固有振動数の変化とは違い、荷重ケースごとで概ね増加していることが確認でき、損傷に対して敏感であると考えられる。

### (4) モード性信頼性評価基準（MAC）

荷重ケースごとの振動モードの変化に着目した式(1)で算出されるモード性信頼性評価基準（Modal Assurance Criterion, 以下、MAC）を用いた検討を行った。

$$MAC = \frac{\left( \sum_{j=1}^n \phi_{Tj} \phi_{Ej} \right)^2}{\sum_{j=1}^n \phi_{Tj}^2 \sum_{j=1}^n \phi_{Ej}^2} \quad (1)$$

ここに、 $\phi_T$ は理論値による振動モード、 $\phi_E$ は計測値の振動モードを示し、 $n$ は振動モードの観測点の数を示している。荷重ケースごとのたわみ1次振動のMACの変化を図-14に示す。固有振動数の変化と同様にPCT桁が終局状態にならないと大きな変化が確認できなかった。

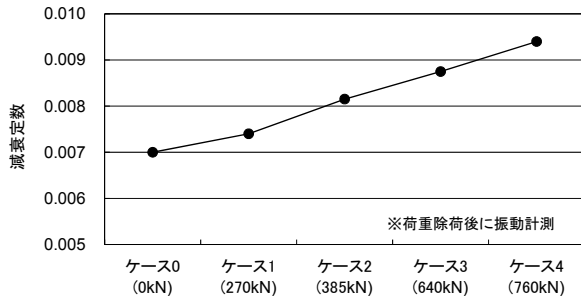


図-13 荷重ケースと減衰定数の関係

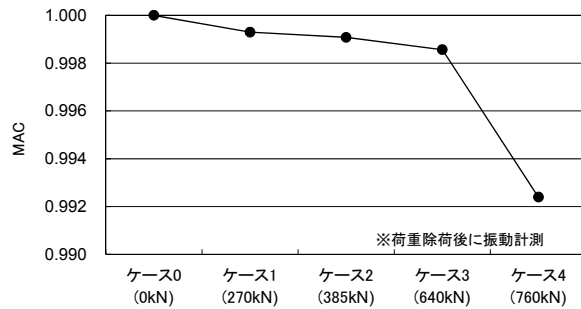


図-14 荷重ケースと MAC の関係

## 5. まとめ

塩害により劣化した PCT 桁を対象に、損傷状況を把握するため各種調査、載荷試験による残存耐力の評価および振動計測を行った結果をまとめると次のようになる。

- (1) 外観調査の結果、底面の損傷が最も大きく 35.6%の浮き・剥離が見られ、一部に鉄筋露出も見られた。圧縮強度は、設計基準強度  $40\text{N/mm}^2$  を満足した。
- (2) 載荷試験前の残存プレストレス推定の結果、概ね設計値に近い値が算出され、PC 鋼材はほぼ健全であると推察された。切断面観察によるグラウト充填調査から、概ねグラウトが充填されており、PC 鋼材は、ほぼ健全な状態であると推察された。
- (3) PCT 桁の降伏荷重は約 650kN と推定され、最大荷重約 760kN でほぼ終局状態に至ったと判断された。この値は、終局荷重の計算値の約 1.1 倍に相当した。
- (4) 固有振動数は、降伏前までの低下率は 6%程度以内と小さかった。実務上の点検において、たわみ 1 次振動数による耐荷性能に関する健全度評価を行うことは、困難と考えられた。減衰定数は、固有振動数に比べ損傷形態に対し一定の変化が見られた。
- (5) PC 鋼材が健全であれば、一定の耐力が確認されることから、今後の PC 橋に対する維持管理において残存プレストレス推定やグラウト充填を確認する非破壊試験が有効であると考えられた。

## 謝辞

本研究は、独立行政法人科学技術振興機構 SIP プログラム「コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構

造性能評価に基づくトータルマネジメントシステムの開発」により進められたものである。本研究の振動計測では、長岡技術科学大学の宮下剛准教授に多大なるご協力を頂きました。また、残存プレストレス推定の計測では、オリエンタル白石（株）の角本周氏、二井谷教治氏、渡瀬博氏に多大なるご協力を頂きました。非破壊検査では、立命館大学の内田慎哉講師および iTECS 技術協会の方々にもご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 森山守，石川裕一，宮里心一：北陸地域の特性を考慮したコンクリート橋の維持管理マネジメントの取組み，土木学会第 30 回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集，pp. 21-24，2012.12
- 2) 土木学会：構造工学シリーズ 10 橋梁振動モニタリングのガイドライン，pp. 1-70，2001.2.
- 3) 渡辺孝和，長谷川俊，内藤英樹，鈴木基行：固有振動数の低下に着目した RC 部材の地震時損傷評価に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，pp. 901-906，2012.7.
- 4) 北野勇一，中西昌洋，櫻井義之，木村嘉富，本間英貴：振動計測振動測定によるプレストレスコンクリート橋の異状検知～撤去橋梁（PC 橋）を用いた臨床研究の事例紹介～，第 1 回北陸橋梁保全会議，H-1 pp. 329-332，2013.11.
- 5) 加藤雅史，高木保志，島田静雄：PC 橋梁の破壊に伴う振動性状の変化に関する実験的研究，土木学会論文報告書，第 341 号，pp. 113-118，1984.1.
- 6) 西村昭，藤井学，宮本文穂，加賀山泰一：橋梁の損傷評価における力学的挙動の有効性，土木学会論文報告書，第 380 号，pp. 355-364，1987.4.
- 7) 玉田和也，宮下剛，劉翠平，岩崎英徳，長井正嗣：段階的に損傷を与えた鋼鉄桁橋の振動計測と有限要素解析橋梁の損傷評価における力学的挙動の有効性，橋梁振動コロキウム論文集，pp. 68-75，2011.
- 8) 宮永憲一，青木圭一，野島昭二：PC 橋の振動特性と PC 鋼材破断のモニタリング，プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp. 353-358，2013.10.
- 9) 二井谷教治，渡瀬博，阪田憲次，綾野克紀：コンクリート部材の有効応力の推定手法に関する研究，コンクリート工学論文集，第 20 巻，pp. 27-37，2009.5.
- 10) 土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，pp.173-175，2013.10
- 11) 山口宏樹他：多々羅大橋にみる長大斜張橋のケーブル振動連成とその減衰性能への影響，土木学会論文集，No. 766，pp. 309-323，2004. 7.