【土木構造・材料論文集 第 27 号 2011 年 12 月】

48 年供用されたポストテンションＰＣＴ桁橋の実橋載荷試験と現有作用応力測定

Field Loading Test and Existing Action Stress Measurement in post tension PCT girder bridge used for 48 years

出水 享*、松田 浩**、高橋 洋一***、伊藤 幸広****、甲斐 靖志*****
Akira DEMIZU, Hiroshi MATSUDA, Yoichi TAKAHASHI, Yukihiro ITO and Yasushi KAI

*正会員　工修　長崎大学大学院生産科学研究科博士後期課程　（〒852-8521　長崎市文教町 1-14）
**正会員　工博　長崎大学大学院工学研究科　（〒852-8521　長崎市文教町 1-14）
***正会員　(株)計測リサーチコンサルタント　九州事業部　（〒812-0007　福岡市博多区東比恵 2-2-25）
****正会員　博(工)　佐賀大学大学院工学系研究科　（〒840-8502　佐賀県佐賀市本庄 1）
*****非会員　国土交通省九州地方整備局長崎河川国道事務所　（〒851-0121　長崎県長崎市宿町 316 番地 1）

道路橋は、劣化損傷・変状の要因が多岐にわたることから、それらが耐荷性能や耐久性能に与える影響は、道路橋により千差万別である。そのため、出来る限り実橋での劣化損傷・変状や実挙動に関する各種計測や解析データを蓄積していくことが望まれる。特に耐荷力は、実際の耐荷性能を供用中の構造物では確認することができないため、貴重な情報源となる。

筆者らは、昨年度に 48 年間供用され撤去に至った PC 橋を用いて、復元設計・耐荷力評価を目的とした各種調査 [1]、実橋載荷試験、現有作用応力測定を行った。ここでは、実橋載荷試験および現有作用応力測定について述べる。

１．まえがき

我が国には、橋梁 15m以上の道路橋が約 15 万橋存在し、これらの橋梁に対する将来の維持管理、更新に要する費用の抑制は喫緊の課題となっている。また、現在供用されている橋梁は、1950 年代半ばから高度経済長期以降に集中的に建設されたものが大半を占めている。

道路橋のように多数の部材から構成される構造物では、劣化損傷・変状の要因が多岐にわたるだけでなく、それらが橋の耐荷性能や耐久性能に与える影響は、設計・構造条件のみならず橋梁を取り巻く環境、交通状況等によっても大きく異なるものである。このため損傷・変状が生じている橋の構造安全性の評価は極めて難しくなる場合が多い。したがって、出来る限り実橋での劣化損傷・変状や実挙動に関する各種計測や解析データを蓄積していくことが望まれる。特に耐荷力などの構造物の安全性に関しては、供用中の構造物では確認することが容易でないため、供用終了した構造物を用いて実橋実験などを実施し、データを収集することが極めて重要である。

一方、既存 PC 橋のプレストレス量の管理は、維持管理のためには欠かせない項目である。PC 橋においてプレストレスの減少は、直接耐荷力に大きく影響し、安全性の低下に繋がるため PC 橋を適切に維持するためには、現有作用応力を正確に把握する必要がある。現状ではプレストレス量の定期的な管理は行われておらず、施工時の PC 鋼材の緊張力管理が実施されているのみである。また、施工後、長年月経過した橋梁に関しては、既存資料等が存在しないため、プレストレス量に関する情報を得ることは極めて困難である。そのような中、筆者らは、光学的計測法を用いて、PC 橋の現有作用応力を精度よく測定する手法の開発 [2]を行ってきた。

筆者らは、昨年度に 48 年間供用され撤去に至った既存図面等が存在しない PC 橋を用いて、復元設計および耐荷力評価を目的とした各種調査 [1]、実橋載荷試験、現有作用応力測定を行った。ここでは、実橋載荷試験および現有作用応力測定について述べる。

２．橋梁概要

橋梁概要を表-1 に橋梁の外観を写真-1 にそれぞれ示

表-1　橋梁概要

建設年	S38 年 11 月
橋　　長	18.7m
径間数	1 径間
桁　　長	18.6m
幅　　員（有効）	3.6m
幅　　員（全）	4.2m
荷　　重	TL-20
斜　　角	63°
桁　　高	900mm
上　　幅	1100mm
下　　幅	350mm



(a)　側面



(b)　桁下

写真-1　橋梁外観

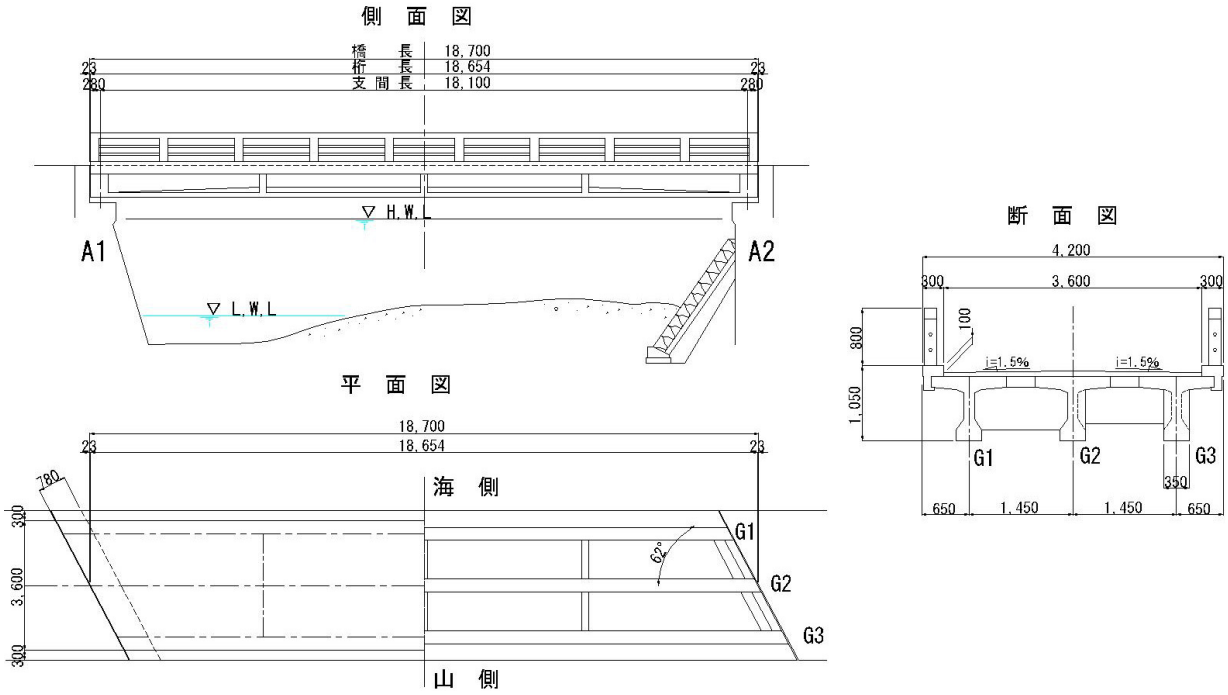


図-1　一般図(mm)



(a)鉄筋露出



(b)支承部の腐食



(c)遊離石灰

写真-2　変状写真

す。また、図-1 に一般図を示す。対象橋梁は、長崎県北松浦郡佐々町にある斜角を有する 1 径間単純ポストテンション方式 PCT 桁橋であり、橋名は富田橋である。交差物件は河川であり、海岸線から約 1.2km に位置し、潮の干満がある。本橋は、市道として使用されていたが、西九州自動車道建設に伴い、河川改修で平成 22 年 11 月に解体された。本橋梁の適用示方書は、昭和 36 年度改訂 PC 設計施工指針、昭和 31 年鋼道路橋設計示方書/鋼道路橋製作示方書で設計荷重は、TL-20 である。本橋梁の特徴としては、斜角を有しているが、横桁は橋軸方向に対して直角方向に配置されている。また、コンクリート舗装が施工されている。

主な変状としては、張出床版水切り部と上フランジの界面付近に鉄筋露出や床版横締め PC 定着具のアンカープレート下端の露出（写真-2(a)）が海側・山側全面に確認された。また、鋼製支承の腐食（写真-2(b)）と横桁 PC 定着部の跡埋めモルタルの浮きが全箇所で確認された。その他の変状としては、主桁下フランジに鉄筋露出が 1 ヶ所、A1、A2 橋台付近の G2－G3 間間詰め床版部と主桁上フランジ界面に遊離石灰（写真-2(c)）がそれぞれ 1 ヶ所確認された。なお、主桁と間詰め床版部に関してはひび割れや浮きは確認されなかった。コンクリート舗装、地覆、高欄、排水舛、排水パイプについては、変状は確認されなかった。

３．実橋載荷試験

3.1 変位・ひずみ測定

載荷試験状況を写真-3 に載荷位置図を図-2、3 にそれぞれ示す。載荷方法は、鉄板（約 9 kN）をラフタークレーンにより、1 枚ずつ積み上げていき、最終的に合計 35 枚（315kN）を載荷させた。G2 桁に集中的に載荷させるために、スパン中央部 G2 桁直上の舗装面に角木を 2 本設置し、その上に鉄板を積み上げた。

計測器設置状況を写真-4 に計測器設置位置図の断面図と平面図を図-4、5 にそれぞれ示す。変位計は、全主桁の中央と 1/4 点に設置し、ひずみゲージは、中央部のみに設置した。G2 桁に関しては、中央と 1/4 点に横桁が存在するため、横桁から A1 橋台方向に約 765mm の位置に設置した。変位計は、桁下の架設足場から下フランジ付近まで延長させた単管に固定したマグネットスタンドに設置した。ひずみゲージは、ゲージ長 60mm のものを使用し、1 ゲージ 3 線方式を採用した。これらのひずみゲージ・変位計の信号線を桁下中央部付近に設置したデータロガーに集めて測定を行った。

載荷試験時は、橋梁上（担当者 A）と桁下（担当者 B）に人員を配置させた。担当者 A は、クレーン車の運転手への載荷板の誘導と全体の指示を行い、担当者 B は、データ記録を行った。初期値計測として、担当者 A が橋の揺れが残っていないことを確認し、そのことを担当 B に



写真-3　載荷状況

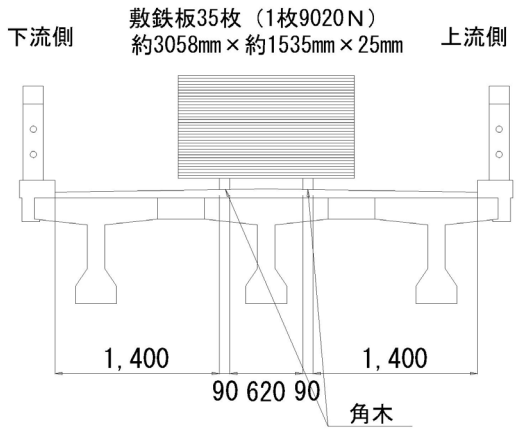


図-2　載荷位置（mm）

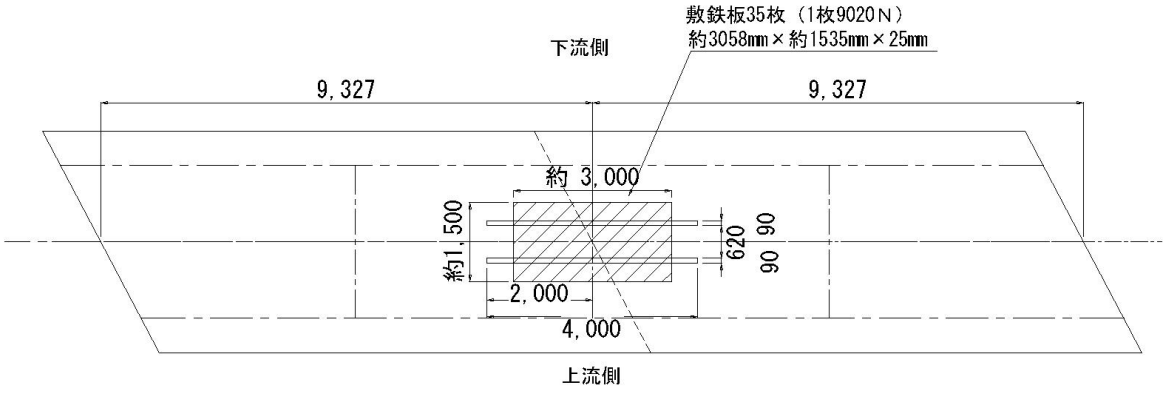


図-3　載荷位置（mm）

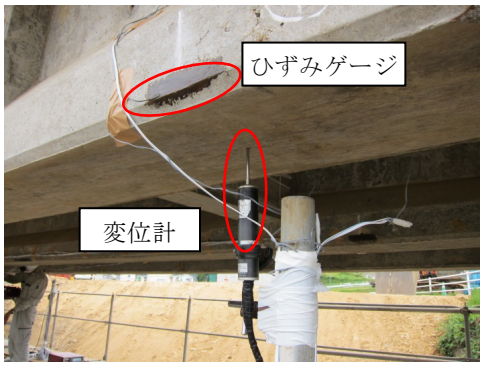


写真-4　変位計設置状況

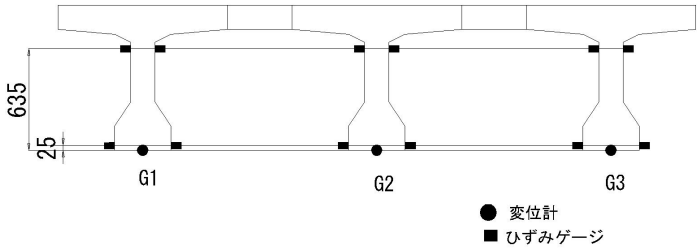


図-4　断面図 (mm)

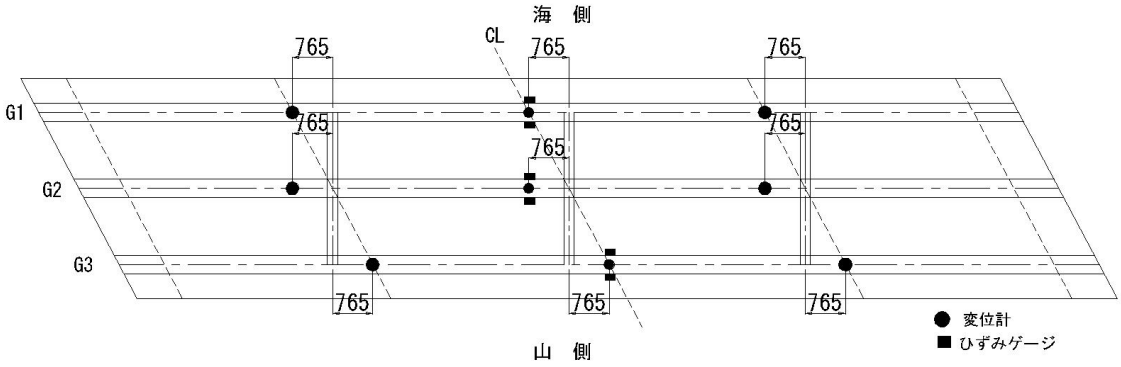


図-5　平面図 (mm)



写真-5　トラック



写真-6　振動測定状況

連絡する。そして担当者 B は、初期値の計測を 3 回行い、その値にバラツキがなければ、この値の平均値を初期値とした。

載荷後の計測は、担当者 A がクレーン車を誘導し載荷位置に鉄板を上載し、担当者 A が橋の揺れが残っていないことを確認し、そのことを担当者 B に連絡する。そして、担当者 B は計測を 3 回行い計測値にバラツキがなければ、この値の平均値を載荷後の計測値とした。この作業を載荷枚数 5 枚、10 枚、15 枚、20 枚、25 枚、30 枚、35 枚毎に繰り返して行った。35 枚載荷させるのに約 70 分要した。

3. 2 振動測定

主桁の固有振動数を把握するために、全主桁中央部下面にサーボ型速度計（(株) 東京測振 VSE-15D）を設置し、たわみ方向（鉛直方向）の振動計測を行った。速度計は、桁下面と速度計の間を強力な接着剤で固定し、さらにガムテープで速度計を包みこむようにして、主桁下フランジに固定した。その速度計で得られた応答を測定器に集めてノートパソコンでデータを記録した。

計測パターンは、振動を検出しやすくするために、人が橋面中央部で飛び跳ねて振動させる人力加振とトラックを通過させて振動させる車両加振の 2 パターンを行った。加振に使用したトラックを写真-5 に振動測定状況を写真-6 にそれぞれ示す。

４．現有作用応力測定

4. 1 概要

開発した現有作用応力測定法（以下スリット応力解放法と呼ぶ）は、従来の手法に比べ精度を向上させるために、光学的計測法の高精度、非接触、全視野計測が可能というメリットに注目し、光学的全視野ひずみ計測法の

一つであるデジタル画像相関法[3]と現有作用応力測定法の一つである応力解放法を用いて PC 橋梁の現有作用応力を測定するところに特徴がある。

スリット応力解放法は、応力作用方向（プレストレス作用方向）に対して直角に深さ約20mm～30mmのスリットをコンクリートカッター（写真-7）で切削し、解放ひずみを発生させる。そして、スリット切削前後のコンクリート表面をラインセンサタイプ全視野ひずみ測定装置[4]（以下スキャナ装置）で撮影し、その画像を用いてデジタル画像相関法により解析し、スリット周辺の解放ひずみを算出する。計測精度を向上させるために、測定範囲全域において、一直線上の解放ひずみをスリット切削方向に約100測線平均化し、解放ひずみ分布を取得する。

次に、応力解放を再現したFEM解析を行う。解析では、モデルの作用応力を変化させて、計測値に最も近似する解放ひずみ分布を逆解析で求める。つまり、計測値に最も近似した作用応力が求める現有作用応力となる。手順を以下に示す。

a) 鉄筋探査を行い、鉄筋を切断しないスリット切削位置・深さおよびスキャナ測定位置を特定する。
b) 測定面をアセトン等で清掃した後、スプレーを用いてランダムパターンを設ける。
c) 測定面にスキャナ装置の固定金具を取り付ける。
d) 固定金具にスキャナ装置を設置し、応力解放前のコンクリート表面の計測を行う（初期画像）。
e) スキャナ装置を取り外して、応力作用方向に対して直角方向にコンクリートカッター（写真-7）で深さ約 20mm～30mm のスリットを切削する。
f) 再度、固定金具にスキャナ装置を設置し、解放後のコンクリート表面の計測を行う（変形画像）。
g) 初期画像と変形画像によりデジタル画像相関法で解析し、解放ひずみ分布を得る。
h) FEM解析により現有作用応力を推定する。

4. 2 スキャナ装置

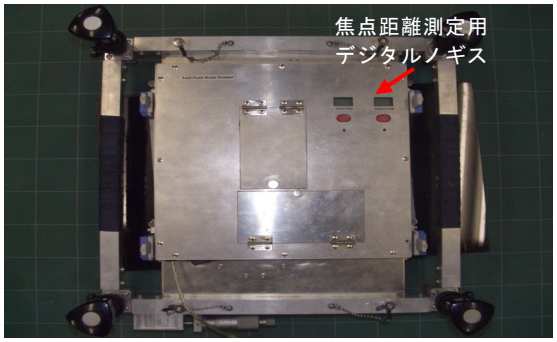
スリット応力解放法に使用したスキャナ装置の仕様を表-2に外観を写真-8にそれぞれ示す。本装置は、ラインセンサを平行に走査し、2次元画像を取得するものであり、撮影走査や画像の保存等は、ノートパソコンにより行われる。本装置の特徴としては、ラインセンサの横に光源を配置することによって、構造物に装置を密着させてスキャンすることができ、屋外においても外乱光の影響をうけることなく撮影できる。また、焦点距離を常に一定とする機構を採用し画像再現性が高い。すなわち本装置ではCCDカメラで屋外計測する際の諸問題がなく、撮影に関する特別な技能・知識を要さず、簡易な走査で高精細な画像が取得できる。装置を設置する際には、本体の外側にマイクロメーター、焦点調節ネジとデジタルノギスを配置しているため、より正確かつ安易に焦点を合わせることができる。この装置を用いることによりスリット近傍の微小領域の多点のひずみを高精度に計測を行うことができる。なお、スキャナ装置の主走査方向のひずみ計測精度は、ゲージ長30mmのひずみゲージと比較した場合、500μのひずみに対して2%である。



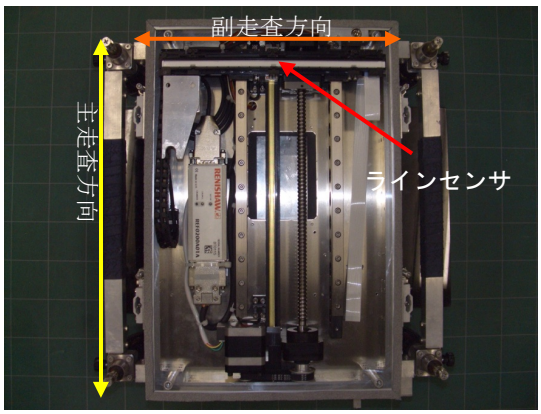
写真-7　スリット切削状況

表-2　スキャナ装置の仕様

センサタイプ	CIS
最大原稿サイズ	210×210mm
光学解像度（主走査×副走査）	1200dpi×1200dpi (約 0.021mm/pixel)
光源	LED
寸法（幅×奥行き×高さ）	374×384 ×182 mm
重さ	約 8000g



(a)前面



(b)後面

写真-8　スキャナ装置の外観

５．載荷試験結果

5.1 変位・ひずみ測定

載荷枚数と荷重の関係を表-3 に載荷枚数と G1、G2、G3 桁の変位の関係を図-6 に示す。また、G1、G2、G3 桁における載荷枚数毎における主桁全体の橋軸方向の変位分布を図-7、8、9 に示す。

荷重の増加とともに変位が線形的に増加していることが確認できる。中央部の変位は、G3 主桁が若干小さい値を示したがすべての桁でほぼ同じ挙動を示しているのが確認できた。35 枚載荷時（315kN）には、G1：-3.8mm、G2：-3.8mm、G3：-3.6mm の変位が発生していることが確認できた。

載荷枚数とひずみの関係を図-10 に示す。また、G1、G2、G3 桁における載荷枚数毎における主桁断面の高さ方向のひずみ分布を図-11、12、13 に示す。なお、計測値は、同じ高さの 2 つのひずみゲージ値を平均してプロットしている。

図より変位と同様、荷重の増加とともにひずみが線形的に増加しているのが確認できた。35 枚載荷時（315kN）に下フランジ側面で G1：100μ、G2：107μ、G3：78μ の引張ひずみが確認できた。G3 に関しては、G1、G2 と比較して約 30μ ほど小さい値を示した。変位計測ですべての主桁でほぼ同じ変位値を示したのにもかかわらず G3 主桁のひずみ値が小さいのは、ひずみゲージ近傍のコンクリート品質の影響だと考えられる。また、主桁の中立軸は、下フランジ下面から約 660mm の位置であることが確認できた。

今回、計測結果および目視結果から載荷試験時において、主桁の挙動は線形的に推移し、ひび割れを発生させるに至らなかった。また、横桁の荷重分配効果が確認できた。

表-3　載荷枚数と荷重の関係

鉄板(枚)	5	10	15	20	25	30	35
荷重(kN)	45	90	135	180	225	270	315

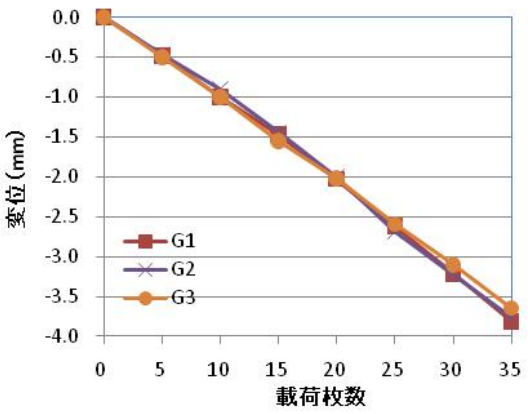


図-6　載荷枚数と変位の関係

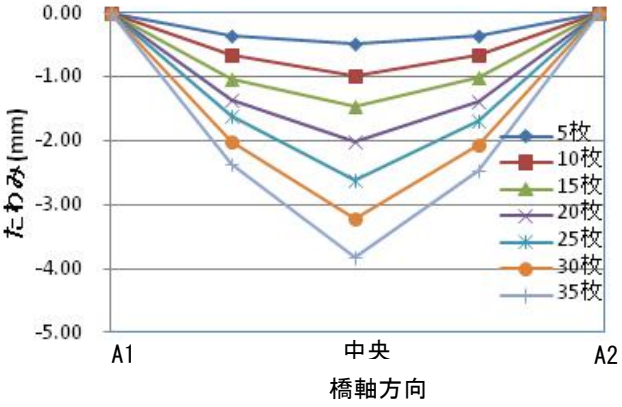


図-7　G1 主桁の変位分布

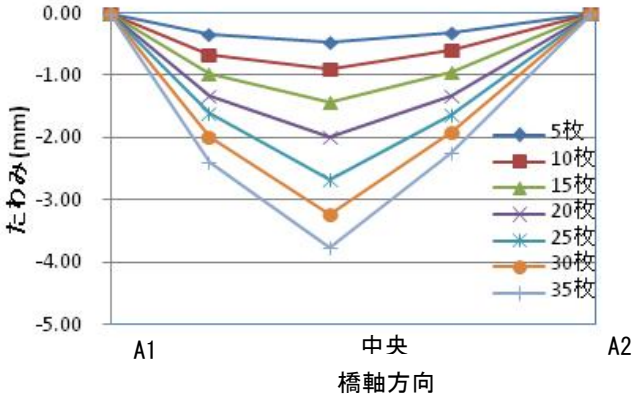


図-8　G2 主桁の変位分布

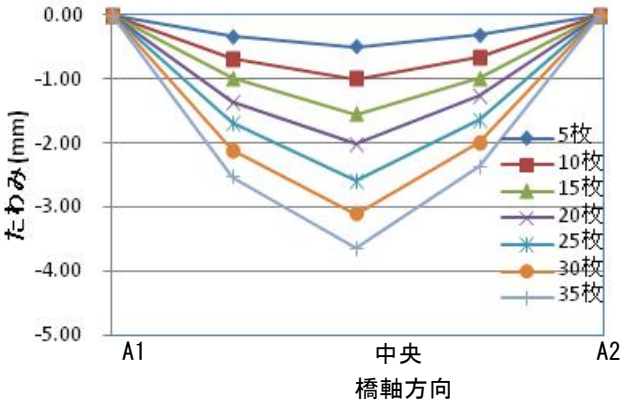


図-9　G3 主桁の変位分布

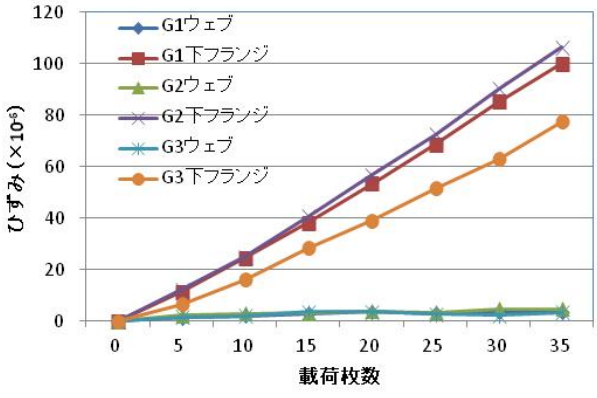


図-10　載荷枚数とひずみの関係

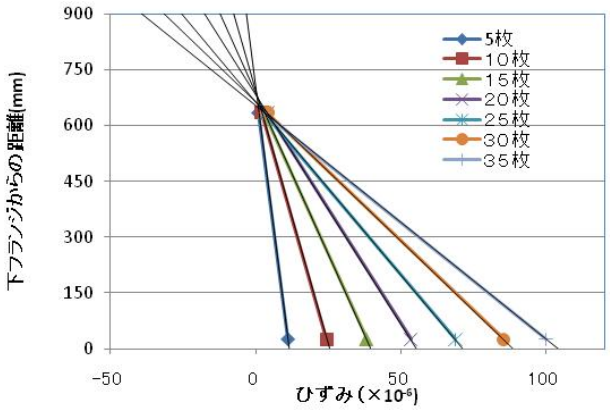


図-11　G1 主桁のひずみ分布

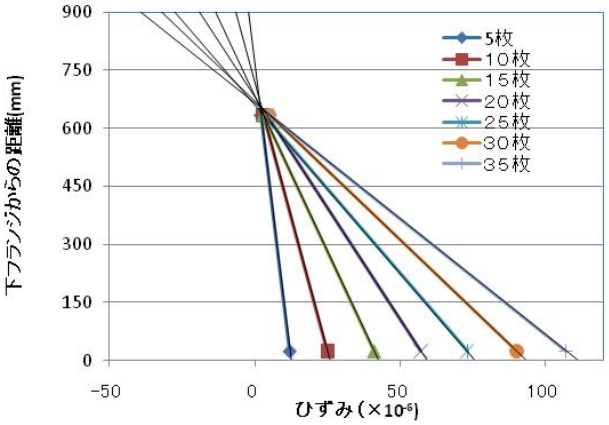


図-12　G2 主桁のひずみ分布

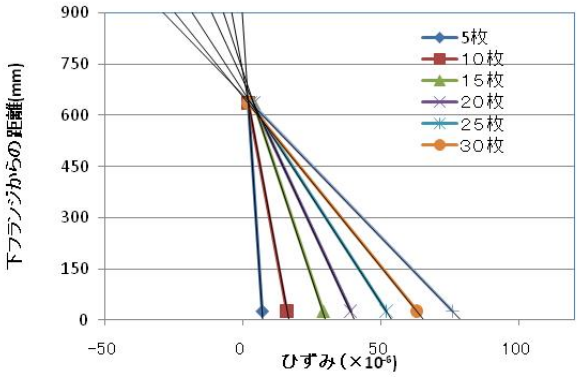


図-13　G3 主桁のひずみ分布

5.2 振動測定

速度計から得た速度波形に FFT 処理を行い、振動数を算出した結果を表-4 に代表として G2 主桁（車両）のフーリエスペクトル図を図-14 に示す。全主桁で同じ振動数が確認された。また、人的および車両過振による測定結果も同じ値を得た。

表-4　振動測定結果（Hz）

次数	G1		G2		G3	
	人	車両	人	車両	人	車両
1	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
2	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7
3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3
4	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6

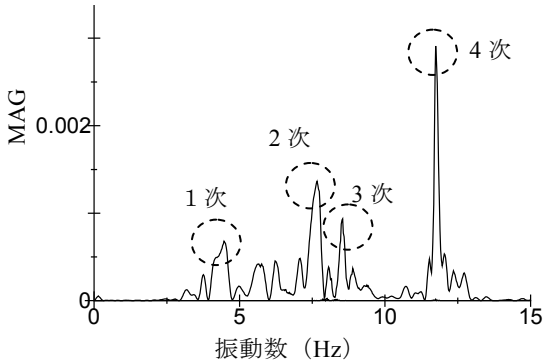


図-14　フーリエスペクトル図（G2 主桁車両）

6．現有作用応力測定結果

スキャナ装置の計測状況を写真-9、計測したスリット切削後のコンクリート表面の画像を写真-10 にそれぞれ示す。写真-10 の白色の斑点は、計測前にスプレーで塗布したランダムパターンを表している。

スリット周辺部の解放ひずみ分布を把握するために汎用解析ソフト DIANA を用いて 2 次元線形 FEM 解析を行った。解析条件を表-5 に解析モデル概要図を図-15 にメッシュ分割図を図-16 にそれぞれ示す。解析は、応力解放の影響を受ける範囲のみを対象とした簡易モデルとした。なお、事前解析により簡易モデルの解析精度の確認を行っている。

解析で使用したコンクリートの静弾性係数は、採取したコアによる材料試験値の平均値である 30,009N/mm^2 とした [1)]。スリット切削幅および深さは、切削後にノギスで計測した値を用い、それぞれ 3.0mm と 30mm とした。

スリット切削前後の計測画像からデジタル画像相関法で解析した対象点間距離変化率分布を図-16 に示す。対象点間距離変化率とは、写真-10 に示すようにスリットを中心とした 2 点間の距離変化率を意味する。また、図-17 には 7.96N/mm^2 の応力を作用させた場合の FEM 解析の結果を合わせて示す。解析値と計測値は一致しており、標準偏差が 2.85%となった。よって、主桁下面に作用する現有作用応力は、7.96N/mm^2 と推定される。



写真-9 計測状況

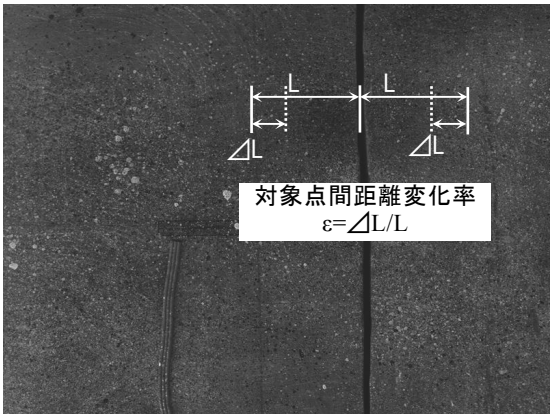


写真-10 スリット切削後

表-5　解析条件

解析タイプ	2 次元線形解析
要素タイプ	8 節点四角形平面ひずみ要素
材料定数	静弾性係数　E = 30,009 N/mm^2 ポアソン比　ν= 0.2
幾何学条件	厚さ　　t = 1mm
固定条件	下面中央部：x、y 方向変位を固定 下面：y 方向変位を固定（図-15 参照）

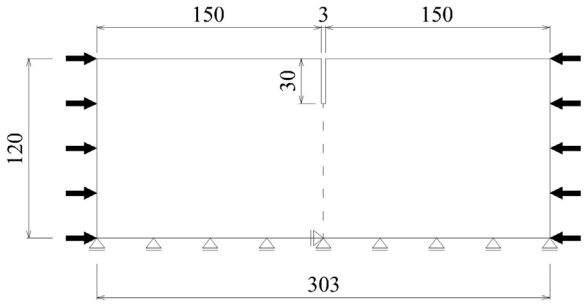


図-15 モデル概要　(mm)

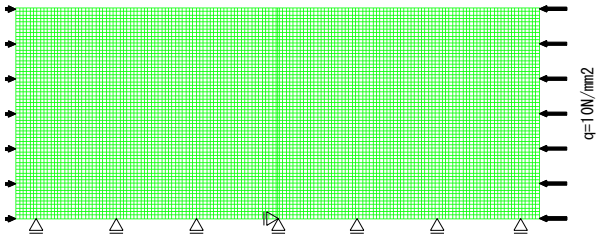


図-16　メッシュ分割

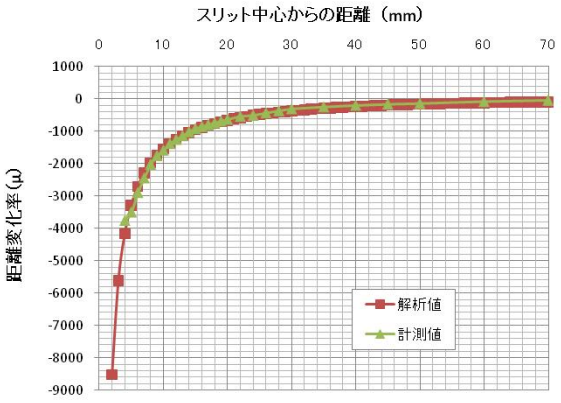
7．結論

今回の試験で以下の結果を得た。

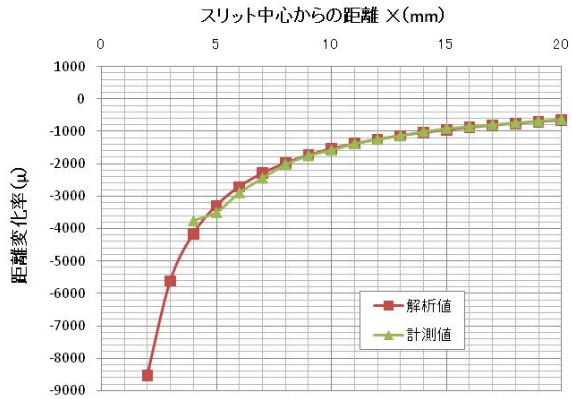
・35 枚載荷時（315kN）に G1：-3.8mm、G2：-3.8mm、G3：-3.6mm の変位が発生している。また、下フランジ側面で G1：100μ、G2：107μ、G3：78μ の引張ひずみが発生している。これらから、荷重増加とともに主桁は、線形的に同様の挙動を示し、横桁の荷重分配効果を確認できた。

・主桁の中立軸は、下フランジ下面から約 660mm の位置である。

・全主桁で同じ振動数が確認された。また、人的および車両加振による測定結果も同じ値を得た。



(a)0mm～70mm 区間



(b)0mm～20mm 区間

図-17　解放ひずみ分布

・スリット応力解放法により G2 主桁下面に作用する現有作用応力は、7.96N/mm^2 と推定された。

8．謝辞

調査では、竹下建設工業(株)にご協力して頂きました。ここに記して、深甚の謝意を表します。また、本調査は、平成 22 年度九州建設弘済会研究助成事業で行いました。

参考文献

1)　出水享,松田浩,伊藤幸広,甲斐靖志: 48 年経過したポストテンション PCT 桁橋の各種調査,コンクリート工学年次論文集,Vol.33,No.2,pp1483-1488,2011

2)　出水享，肥田研一，伊藤幸広，松田浩：解放法による PC 構造物の現有作用応力の推定方法の開発，プレストレストコンクリート技術協会,第 19 回シンポジウム論文集，pp241-246，2010.

3)　内野正和：デジタル画像相関法によるひずみ解析法の検討，日本実験力学会講演論文集合同ワークショップ 2006，No.6-1，pp.36-39，2006

4)　本山慎一郎,伊藤幸広,深町卓也,谷本健太,出水享：ラインセンサスキャナタイプ全視野ひずみ計測装置を用いた表面ひずみ計測に関する基礎的研究,日本実験力学会講演論文集，No.10GS5-5,278-279, 2010

(2011.6.30　受付)