

横拘束PCケーブルが破断した既設橋の 載荷試験に基づく健全度評価

松本 俊輔¹

¹近畿地方整備局 姫路河川国道事務所 工務第二課 (〒670-0947 兵庫県姫路市北条1-250)
E-mail: matsumoto-s92ri@kkr.mlit.go.jp

国道27号に架橋され供用後53年が経過した2径間単純プレテンT桁橋で、横拘束PCケーブルの破断が確認された。破断による橋全体の剛性低下によって、主桁の一体化が失われているかどうか、主桁まで影響が出るのかが懸念された。

橋梁ドクターに診断を受けた結果、応力頻度測定、載荷試験を実施することとなり、解析を組み合わせた評価手法により、横拘束PCケーブルの破断の影響が大きいことが分かった。

本稿では、載荷試験及び解析を組み合わせた今回の確認手法の有効性及び確認結果について報告する。

キーワード 健全度評価、応力頻度測定、実橋載荷試験

1. はじめに

本橋は、日交通量が20,000台を超える直轄国道に架橋され供用後53年経過する2径間単純プレテンT桁橋である(図-1)。本橋は、定期点検(橋梁の長寿命化修繕計画に基づき実施される概ね5年間隔の点検)の際に、横桁の断面欠損及び横拘束PCケーブルの破断が確認された(写真-1)。この損傷によって横拘束PCケーブルによる拘束効果が期待できず橋梁の健全性に懸念が生じた。対策の実施にあたっては高度な判断や専門的な知見が必要と判断されたため、学識経験者(以下「橋梁ドクター」という。)による緊急診断及び指導を受け調査を実施するとともに対策案を策定した。

本稿では、橋梁ドクターの診断結果及び対策立案のために実施した応力頻度測定及び載荷試験並びにこれら実測値と解析とを組み合わせた健全性評価等について報告する。

2. 橋梁ドクター診断

橋梁ドクターによる緊急診断の結果、横拘束PCケーブルの破断については、本橋の主桁には顕著な損傷は見られず比較的健全であるとともに、主桁は床板によって一体化されており横拘束PCケーブルの破断による影響が小さいことから緊急的な措置の実施は見送ることとなった。一方、本橋は道路橋示方書のB活荷重に対応しておらず、今後の補強補修の対策立案のため、応力頻度測

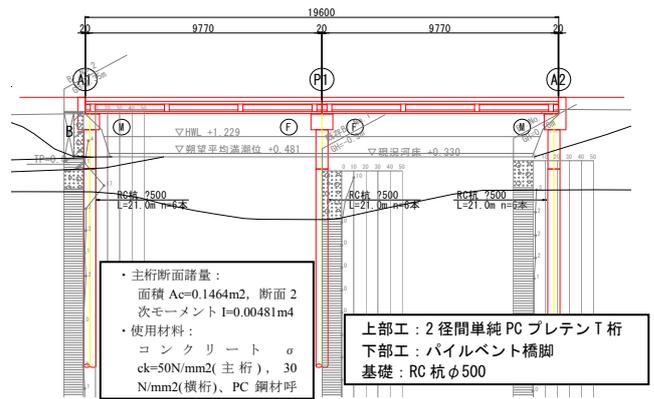


図-1 対象橋梁概要



写真-1 横桁及びPCケーブルの破断状況

定及び載荷試験を実施するとともに、これら実測値による評価に加えて、実測値と解析値とを組み合わせる手法を用いて、橋梁の健全性の評価を実施することとなった。

3. 載荷試験概要及び計測方法

既設橋梁の実応力度計測は、供用中の道路橋であっても通過交通に全く影響を与えることなく計測できる応力頻度測定と、一般交通を一時的に止めて計測する実載荷

応力測定がある。前者は、通常の使用状態において発生する応力の繰り返しをそのピーク値や振れ幅の分布として捉えようとするものである。これにより、現供用荷重下において、活荷重に伴い主桁に発生する引張応力度が部材の許容応力度に対して余裕があるか否かを判断することができる。

応力頻度測定では発生応力が計測されるのみであり、それに対応する車両重量は不明である。そこで、本調査では25t吊ラフタークレーンを用いた実載荷応力測定も合わせて実施する。これにより、既知荷重による発生応力の状態を把握することが可能で設計計算による応力度と実応力度を対比することができる。なお、応力頻度測定要領¹⁾に準じて実載荷応力測定は、静的及び動的載荷試験を実施する。写真-2に静的載荷試験状況を示す。

図-2に計測箇所を示す。計測箇所は、本橋が単純桁であることから支間中央部とする。また、既存プレテンT桁にマイクロクラック等の発生も考えられる。そのため、通常用いられるコンクリート用ひずみゲージ(以下「通常ひずみゲージ」という。)では、その影響を含めた計測が困難となる可能性がある。そこで、通常ひずみゲージに加えて、計測ストロークが大きくマクロ的なひずみ計測が可能である計測器(以下「ひずみ計測器」という。)の両者を用いて計測を行う。図-3にひずみ計測器の概要を、写真-3に設置状況を示す。



写真-2 静的載荷試験状況

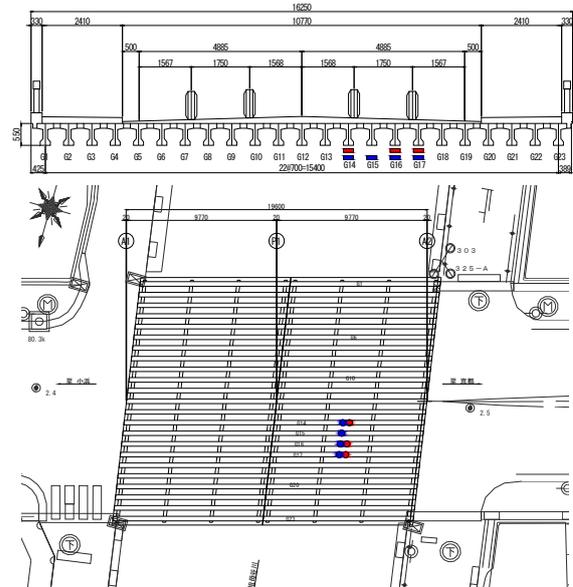


図-2 計測箇所図

4. 載荷試験結果

(1) 静的及び動的載荷試験結果

表-1には、静的及び動的載荷試験計測結果一覧を、図-4及び図-5にひずみ時刻歴を示す。なお、これらの値は、計測結果に対しローパスフィルター処理を行い計測時の高周波成分を除去したデータから算出している。ひずみ計測器は、図-3に示したとおり、主桁下フランジより下方(50mm)に設置している。そのため、実際、主桁下縁に発生しているひずみは、この距離分を主桁中立軸からの補正を行い算出している。表-1より、ひずみ計測器及び通常ひずみゲージにより計測された値は、1.25倍程度の相違はあるが大きなばらつきはない。また、静的載荷試験結果による最大ひずみと、動的載荷試験結果の最大ひずみの割合は、1.3~1.9程度であり、設計で想定する衝撃係数 $i=1.3$ よりも大きくなっている。これは、本橋前後の道路縦断勾配の影響により、橋梁進入時に必要以上の衝撃が作用しているものと考えられる。

さらに、ひずみ計測器とひずみゲージによる計測値のばらつきは、動的載荷では若干見受けられるが、静的載荷では概ね同様の値となっている。よって、当初懸念されたマイクロクラック等の影響は少ないと判断した。

(2) 応力頻度測定結果

図-6に計測期間中に通行車両により発生する最大ひず

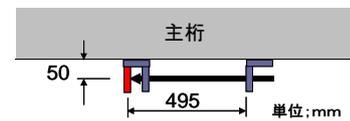


図-3 ひずみ計測器概要



写真-3 計測器の設置状況

表-1 静的及び動的載荷試験計測結果一覧

車輛静的載荷試験測定結果一覧表(動的/静的)					
使用ゲージ	径間	測点	動的載荷 最大値 ϵ_{dyna} (μ)	静的載荷 最大値 ϵ_{sta} (μ)	$\epsilon_{dyna} / \epsilon_{sta}$
ひずみ計測器	P1-A2径間	G14	47.8	32	1.49
		G16	67.0	34	1.97
		G17	67.0	43	1.56
G14		42.0	31	1.35	
G15		38.3	27	1.42	
G16		53.0	27	1.96	
通常ひずみゲージ		G17	54.0	34	1.59

み発生前後のひずみ時刻歴を示す。なお、応力頻度測定は、72時間連続で実施しており計測結果には温度変化に伴う影響が含まれる。このため、計測結果は、計測期間中の温度変化の影響を除外し、活荷重による既設主桁の応力度のみとして整理を行う。表-2に各測定結果のうちひずみ量が最も大きい応力頻度測定結果に対する現況主桁応力度の照査結果を示す。表-2左部のとおり、B活荷重の載荷時は、死荷重応力 σ_D と活荷重応力 σ_L の合成応力度が許容応力度の範囲を超えていることがわかる。一方、表-2右部のとおり、活荷重応力を応力頻度測定結果（発生最大応力度 σ_{max} ）に置き換えた場合には、合成応力度が許容応力度の範囲に収まることが確認でき、現況交通の実応力レベルでは許容値以下に収まることが確認できる。

5. 上部構造の健全性評価方法

実橋載荷試験の結果、本橋の通行車両により発生する応力度は、設計許容値内に収まっていることが確認された。しかし、端横桁の損傷及びPC鋼棒の破断により、主桁への分配効果が低下していることが懸念される。

そこで、既存上部構造に対して格子解析を実施し、横桁の損傷度合が主桁発生応力度に及ぼす影響を評価することを試みる。なお、解析では載荷試験をもとに横桁剛性をパラメータとし、現況の横桁損傷度合と主桁発生応力を比較することで分配効果が本橋構造にどの程度影響しているかを確認する。

6. 解析方法及び条件

再現解析は、静的載荷試験及び動的載荷試験に基づき実施し、試験結果と再現解析結果を対比することで健全性を評価する。図-7に、再現解析における荷重入力位置を示す。荷重位置は、静的載荷試験時及び動的載荷試験で実際に25tラフタークレーンを載荷した位置とする。

7. 再現解析による評価結果

表-3に、静的載荷試験及び動的より得られた最大ひずみによる発生応力度と解析により算出した設計応力度を示す。表より、設計応力度と発生応力度には大きな相違がなく、概ね値が合致していることがわかる。また、静的載荷試験結果と設計計算結果（衝撃なし）との比較においても、動的載荷試験結果と設計計算結果（衝撃係数 $i=1.3$ ）との比較においても同様に大きな相違がなく、再現解析が概ね正しく実施されていることが確認できる。

ここで、現橋の損傷状況として主桁はひび割れ等の損傷がない一方で、横桁は、写真-1に示すように、多くの箇所断面欠損や鋼材の腐食が生じている。横桁の断面欠損や鋼材の腐食は、構造上、横方向の剛性低下につながることから、損傷度が大きいほど主桁がたわみ易くな

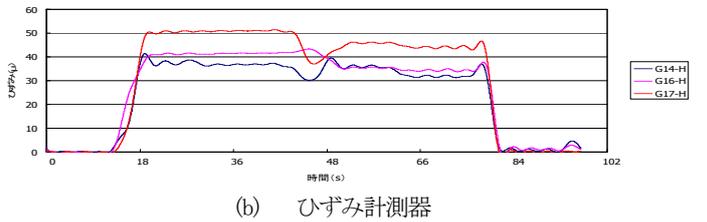
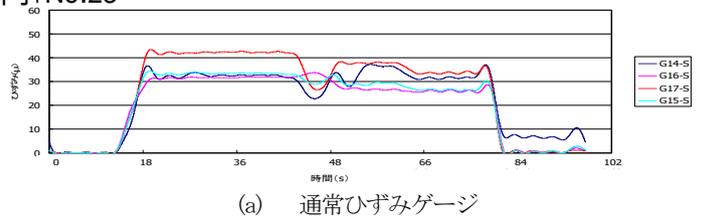


図-4 静的載荷試験ひずみ時刻歴

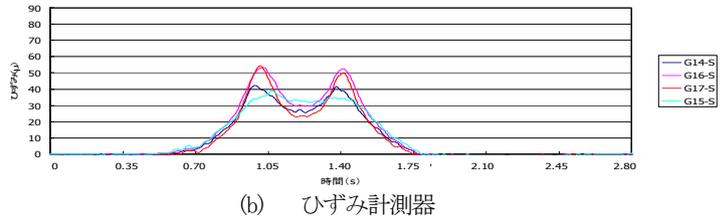
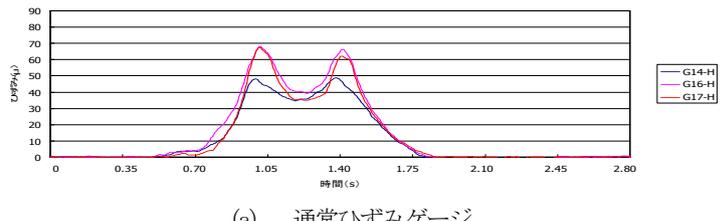


図-5 動的載荷試験ひずみ時刻歴

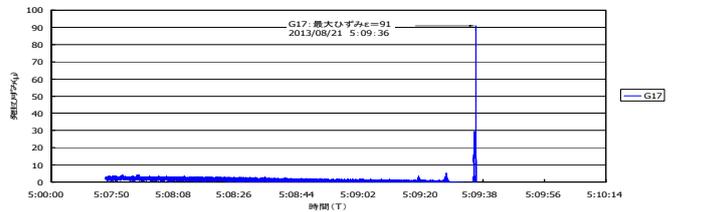


図-6 最大ひずみ発生前後のひずみ時刻歴(ひずみ計測器)

表-2 現況主桁応力度の照査結果(応力頻度測定)

適用ゲージ	対象桁	B活荷重による設計計算結果に基づく応力度照査					載荷試験結果に基づく応力度照査			発生活荷重 応力と設計 活荷重応力 の比率 %	
		許容引張 応力度 (N/mm ²) σ_s	許容圧縮 応力度 (N/mm ²) σ_c	設計死荷重 応力度 (N/mm ²) σ_D	設計活荷重 応力度 (N/mm ²) σ_L	設計合成応力 度 (N/mm ²) $\sigma = \sigma_D + \sigma_L$	設計活荷 重に対す る判定	発生最大引 張応力度 (N/mm ²) σ_{max}	発生合成応力 度(N/mm ²) $\sigma = \sigma_D + \sigma_{max}$		発生活荷 重に対す る判定
ひずみ計測器	G14	-1.8	16.0	6.11	-10.07	-3.96	NG	-6.6	-0.49	OK	65.5
	G15	-1.8	16.0	6.08	-10.13	-4.05	NG	-	-	-	-
	G16	-1.8	16.0	6.02	-9.94	-3.92	NG	-7.0	-0.9	OK	70.1
通常ひずみ ゲージ	G17	-1.8	16.0	5.94	-9.63	-3.69	NG	-7.0	-1.1	OK	72.8
	G14	-1.8	16.0	6.11	-10.07	-3.96	NG	-3.6	2.5	OK	35.7
	G15	-1.8	16.0	6.08	-10.13	-4.05	NG	-3.9	2.2	OK	38.1
	G16	-1.8	16.0	6.02	-9.94	-3.92	NG	-4.2	1.9	OK	41.8
G17	-1.8	16.0	5.94	-9.63	-3.69	NG	-4.1	1.8	OK	42.8	



図-7 再現解析における荷重入力位置

表-3 静的載荷試験及び動的載荷試験による発生応力度と解析により算出した設計応力度

25t吊ラフタークレーン(静的載荷(衝撃なし))による設計計算結果に基づく応力度調査							載荷試験結果に基づく応力度調査			25t吊ラフタークレーン(動的載荷(衝撃係数=1.3))による設計計算結果に基づく応力度調査							載荷試験結果に基づく応力度調査				
適用ゲージ	対象桁	許容引張応力度(N/mm ²) σ_a	許容圧縮応力度(N/mm ²) σ_c	設計死荷重応力度(N/mm ²) σ_d	設計活荷重応力度(N/mm ²) σ_l	設計合成応力度(N/mm ²) $\sigma = \sigma_d + \sigma_l$	設計活荷重に対する判定	発生最大引張応力度(N/mm ²) σ_{max}	発生合成応力度(N/mm ²) $\sigma = \sigma D + \sigma_{max}$	発生活荷重に対する判定	適用ゲージ	対象桁	許容引張応力度(N/mm ²) σ_a	許容圧縮応力度(N/mm ²) σ_c	設計死荷重応力度(N/mm ²) σ_d	設計活荷重応力度(N/mm ²) σ_l	設計合成応力度(N/mm ²) $\sigma = \sigma_d + \sigma_l$	設計活荷重に対する判定	発生最大引張応力度(N/mm ²) σ_{max}	発生合成応力度(N/mm ²) $\sigma = \sigma D + \sigma_{max}$	発生活荷重に対する判定
ひずみ計測器	G14	-1.8	16.0	6.11	-1.17	4.94	OK	-1.06	5.05	OK	G14	-1.8	16.0	6.11	-1.52	4.59	OK	-1.58	4.83	OK	
	G15	-1.8	16.0	6.08	-1.18	4.90	OK	-	-	-	G15	-1.8	16.0	6.08	-1.53	4.55	OK	-	-	-	
	G16	-1.8	16.0	6.02	-1.21	4.81	OK	-1.12	4.90	OK	G16	-1.8	16.0	6.02	-1.57	4.45	OK	-2.21	3.81	OK	
	G17	-1.8	16.0	5.94	-1.23	4.71	OK	-1.42	4.52	OK	G17	-1.8	16.0	5.94	-1.60	4.34	OK	-2.21	3.73	OK	
通常ひずみゲージ	G14	-1.8	16.0	6.11	-1.17	4.94	OK	-0.86	5.25	OK	G14	-1.8	16.0	6.11	-1.52	4.59	OK	-1.39	4.72	OK	
	G15	-1.8	16.0	6.08	-1.18	4.90	OK	-0.89	5.19	OK	G15	-1.8	16.0	6.08	-1.53	4.55	OK	-1.26	4.82	OK	
	G16	-1.8	16.0	6.02	-1.21	4.81	OK	-0.89	5.19	OK	G16	-1.8	16.0	6.02	-1.57	4.45	OK	-1.75	4.27	OK	
	G17	-1.8	16.0	5.94	-1.23	4.71	OK	-1.12	4.82	OK	G17	-1.8	16.0	5.94	-1.60	4.34	OK	-1.78	4.10	OK	

ると考えられる。

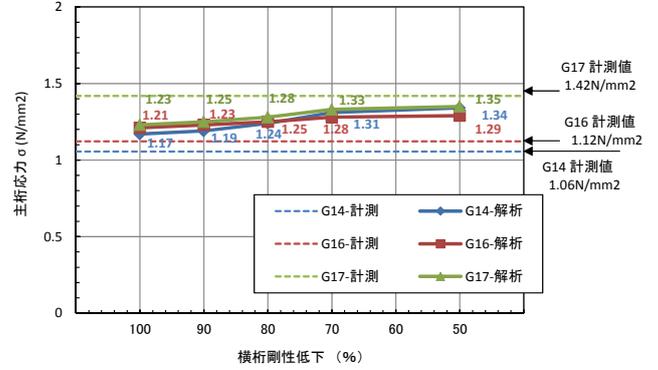
そこで、横桁剛性をパラメータとして、剛性低下させたとき、主桁に発生する応力度の変化を確認する。図-8に解析結果を示す。これより、横桁剛性を低下させるほど、主桁に生じる応力が大きくなることが確認できるが、その影響は極めて小さい。なお、G17においては、横桁剛性に係らず解析値を上回った応力度が発生している。しかし、その値は小さく15%程度の相違である。仮に、横桁損傷が橋梁全体の安全性に大きく影響を与えているのであれば、計測結果は、解析結果よりも全体的に応力度が大きくなる傾向を示すが、各桁ともに概ね同等の結果となっている。この要因は、本橋の構造的特徴によるものが大きいと考えられる。本橋は橋長に比べ、幅員方向の幅が大きく荷重の伝達方向が橋軸方向に卓越することから、横桁分配効果が小さくなっていることが考えられる。また、本橋の桁高は $h=0.55m$ と低く版構造に極めて近い構造であり、横桁による荷重分配によらず主桁自体の剛性による抵抗が卓越しているものと考えられる。そこで、本橋の桁高を $h=1.3m$ (BG-24の桁高相当)とするケースにて同様に横桁剛性を変化させた場合の解析を実施する。図-9に結果を示す。この結果からも確認できるように、桁高がある程度高くなれば横桁の荷重分配効果は顕著となること分かる。

以上のことから、本橋に生じている横桁の損傷は、橋梁全体の安定性を欠く要因となっていないと判断できる。

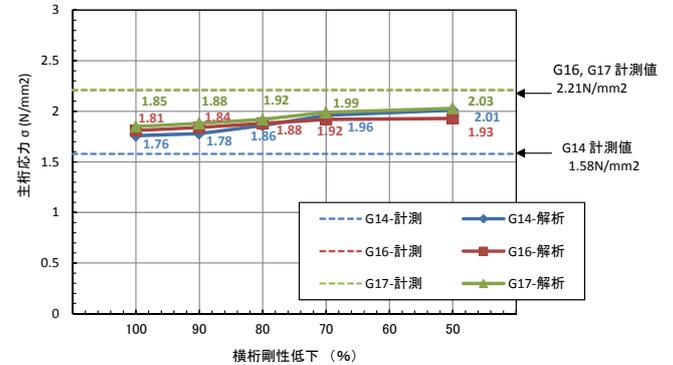
8. おわりに

本稿では、横拘束PCケーブルが破断した2径間単純プレテンT桁橋に対して、実橋載荷試験を実施した。この結果、通行車両にともない発生する応力度は、設計許容値内であることが確認できた。また、健全度評価として、横桁の損傷に伴う応力分配効果への影響を実橋載荷試験及び解析をもとに実施した。その結果、本橋の場合、横拘束PCケーブル破断及び横桁損傷の影響は主桁発生応力度に顕著な影響を及ぼしておらず、主桁補強等の必要性が低いことが確認できた。今回実施した健全度評価手法を活用することにより、既設橋の損傷程度の評価精度の向上が期待できる。

謝辞：本検討にあたり、橋梁ドクターの松井繁之大阪大学名誉教授には、現地診断等を通じて、橋梁の健全度評価、載荷試験手法、計測結果処理方法、解析結果評価手

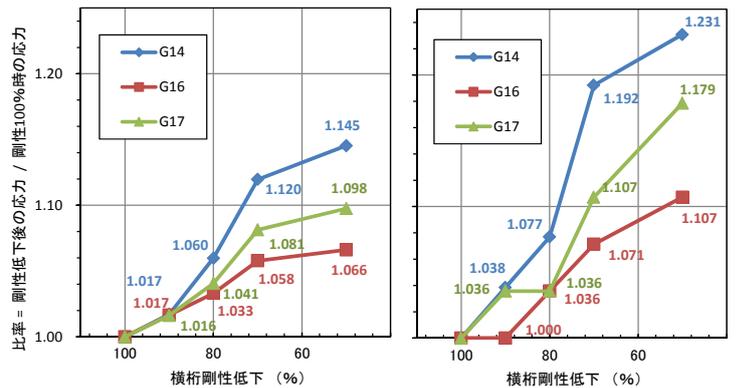


(a) 静的試験の再現解析結果



(b) 動的試験の再現解析結果

図-8 横桁剛性と主桁応力の関係



(a) 桁高 550mm

(b) 桁高 1300mm

図-9 横桁剛性低下の影響評価

法等についてご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

*本稿は、筆者が福知山河川国道事務所在職時に携った業務に関するものである。

参考文献

- 1) 応力頻度測定要領(案) 財)道路保全センター H8.3