

火災を受けた鋼橋の損傷調査と その対応について

井上 卓¹・鈴木 時彦²

¹ 近畿地方整備局 京都国道事務所 京都第二維持出張所 (〒604-8416 京都市中京区西ノ京星池町 17-1)

² 近畿地方整備局 京都国道事務所 管理第二課 (〒600-8234 京都市下京区西洞院通塩小路下る南不動堂町808)

災害発生時に、安全を最優先で確保しながら可能な限り交通も確保していくためには、早急に構造物の健全度を評価する簡易な調査手法を確立することが必要である。しかし、橋梁をはじめとする土木構造物は耐火対策を基準化している事例が少なく、復旧に対しての指針類も範囲が限定されており、迅速な対応が可能とは言い難い状況である。

このような中、2012年2月2日に、一般国道9号に架かる西大橋において桁下の不法投棄物が燃える火災が発生し、桁部分が被災した。橋梁が火災損傷を受けた場合の対策方針やマニュアル等の作成及び維持管理上の参考に資するため、損傷調査とその対応について紹介する。

キーワード 鋼橋, 火災, 損傷調査, 補修, 維持管理

1. はじめに

2012年2月2日に国道9号西大橋で橋梁下の不法投棄物の廃タイヤが燃え、橋脚、桁、床版が火災にあった。この火災に対し、損傷調査を行い、橋梁への影響を調査し、対策工法を検討した。2012年6月現在、対策工法の施工中であるが、本論文では、不測の火災への対応事例として、一連の対応と調査について報告する。

2. 状況概要

ここでは、国道9号西大橋の橋梁の概要と、火災の状況を説明する。

(1) 国道9号西大橋の概要

西大橋は京都市西京区、国道9号の桂川の渡河部に位置し、1964年3月に供用(供用後47年)された3径間鋼連続合成鉄桁(5本主桁)2連+単純鋼合成鉄桁橋(5本主桁)3連の合計9径間延長L=325.9mの橋梁である。24時間あたり48,462台(2010年度道路交通センサス)の交通量を有し、文字通り京都市西部の交通の大動脈となっている。

(2) 火災と消火活動の内容

2012年2月2日にP5~P6間の桁下において火災が発生し、橋梁の各部材に損傷が発生した。

2月7日に被災状況の詳細を確認するため、京都市消防局西京消防署へのヒアリングを行った結果、得られた情報を、表-1に示す。

表-1 消火の状況

項目	回答概要
燃焼範囲	幅約13m・延長約45m(煤の拡散分含む最大範囲)であり、高さは高欄まで届いていない。特に燃焼が酷かった箇所は大まかに分けて2点。ウエブに歪みのあった箇所周辺及び、P5橋脚の最も外側の沓座周辺(図-1参照)。
燃焼温度	700度以上と推測。ただし塗装面下地が残っているため、桁自体は700に達していないと推測される。炎も舞っていたため、温度は一定ではない。
放水時間	22:40頃より放水し、23:11に鎮火(約33分間放水)したが、熱が燻るため地面への放水は0:20頃まで行っている。全て河川敷からの放水で、橋上からは行っていない。今回の火災全体で26,000ℓ。燃焼の酷い上述の箇所中心に、ウエブに歪みのあった箇所周辺をより強めに、放水を行っている(図-2)。不法投棄された可燃物が存置されていたため、桁自体にも放水は行っている。(時間にして5~10分程)
気象条件	南方への風が強かった印象。(気象庁データによると、当日23時京都市内の風速は、平均2.3m/s、最大瞬間7.3m/s(北西))。当日は低温注意報が出されており、参考に同時刻の老ノ坂峠の気温が-5、市内が-3であり、西大橋近傍では-4程度であったものと推察される。

さらに、燃焼範囲を図-1に、重点放水箇所を図-2に示す。

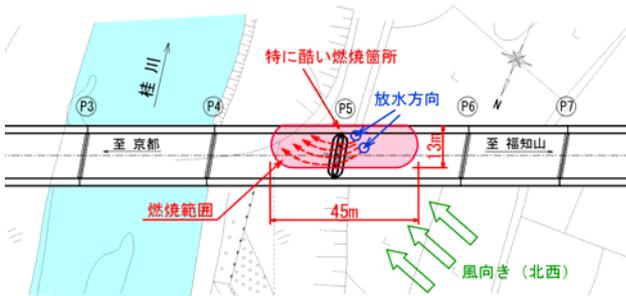


図-1 火災の状況 (2012年2月2日)



図-2 重点放水箇所



図-3 下横桁の変形部分

歩道橋横桁ブラケット部の高力ボルトについては、塗膜の劣化はあまり見られないが、周辺部材で塗膜が損傷している箇所があり、温度の影響（軸力の低下など）が懸念される。

b) コンクリートの損傷

床版については、煤が付着している程度であり、火災の影響は小さいと考えられる。

P5橋脚梁部にコンクリートの剥離が確認されたが、2008年の定期点検では、損傷が計上されていない。鉄筋腐食によるものでも無いため、火災による爆裂の可能性はある。

(2) 燃焼温度の推定

塗装被膜の損傷状態から被災橋の燃焼温度を推定すると共に、主桁や腹板などの部材変形の調査箇所及び鋼材機械試験片の採取箇所設定のための基礎データとすることが目的である。

a) 調査日時と調査範囲

調査日時 : 2012年2月17日 (金) 13時30分~15時

調査範囲 : 図-4に示す

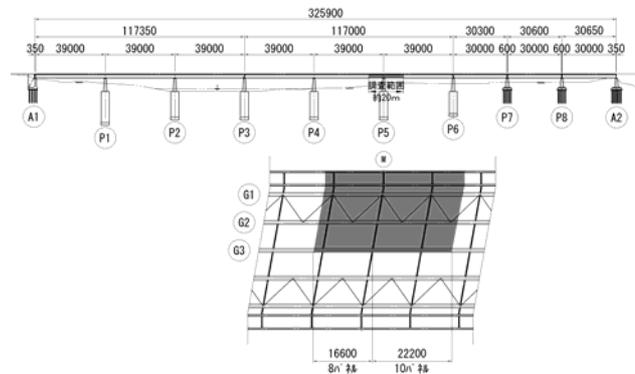


図-4 燃焼温度の調査範囲

2. 調査のステップ

火災被害を受けた橋梁については、建築構造物の場合を参考にして調査診断、補修補強の手法が提案されている¹⁾。本ケースではその他の被災事例とその対応例を参考に翌日の緊急現場点検の状況を総合的に考えて次のようなステップで調査を行った。

3. 一次調査内容

(1) 現地踏査

詳細調査計画立案のために、被災箇所の現地踏査(2月9日(木))を実施し、被災範囲、損傷状況を確認した。以下に概要を示す。

a) 鋼部材の損傷

塗膜の損傷、主桁ウェブの変形を確認、記録した。

下横構の変形(図-3)については、2008年の定期点検では、損傷が計上されていない。変形が今回の火災によるものか、点検以後に発生したものは現時点で判断できない。

b) 推定方法・対象部材・推定依頼先

目視により、塗装塗膜の燃焼状態、および燃焼色により、推定を行う。

対象とする部材は、主桁、横桁、下横構、連結ボルト、

支承とする。

e) 燃焼温度の区分

燃焼温度は、おおよその目安として、表-1のと通りの5区分とした。ただし、この温度は桁及びフランジの表面の温度であり、鋼材内部の温度ではないことに注意を要する。

表-1 燃焼温度の区分

推定温度	状態
600 以上	下塗も、ほとんど無くなった状態 / 鉛系の顔料が酸化し、赤茶けた状態
500 ~ 600 以下	600 以上の場合と比較して、燃焼温度が多少は低いと判断される状態
400 ~ 500 以下	300 ~ 400 と比較して、燃焼温度が多少は高いと判断される状態
300 ~ 400 以下	上塗りが、部分的に無くなった状態
300 以下	上塗りが、多少、無くなった状態 / 煤が付着した状態

d) 推定結果

上記の分類にしたがって、推定した結果を部位ごとに整理すると表-2のような結果が得られた。

表-2 燃焼温度の推定結果

部位	所見
主桁	G2桁のP5支点からP6に向かった3パネルの範囲が最も高温で、燃焼温度は、600 以上
横桁	P5支点のG1～G2間の横桁であり、赤茶色の部分の燃焼温度は800 に達した
下横構	G1～G2間のP5支点からP6に向かった1パネル目の下横構。一部は800 に達したと予想される。
連結ボルト	主桁はリベット接合のため、燃焼の影響は無い。歩道拡幅のためのブラケット部は、ハイテンションボルトによるため、軸力低下が懸念される。燃焼により軸力が低下しているのは400 程度の燃焼温度により軸力が、塗膜が残っている5段目を除く、1段目から4段目であると予測できる。
支承	P5支点上のG1～G3桁の支承に関しては、いずれも300 以下。

支承はコンクリートの沓座面に設置されていることから、熱はコンクリートに拡散し、支承本体は高熱に達しなかったと考えられる。

一般に鋼材は600 以上になると強度が低下し始め、800 に近づくにつれて急激に強度が低下する。このため、表-2より、主桁、横桁及び下横構について強度に何らかの影響が出ている可能性がある。ボルトについてもブラケット部においては400 以上の部分があり、軸力の低下が懸念される。

したがって、本ケースでは鋼材は燃焼の影響を受けているといえ、強度の推定の必要性が確認された。

(3) 強度の推定

燃焼温度の推定の次は、橋梁の強度における燃焼の影響を推定する必要がある。強度の推定に当たっては近接目視・打音検査、主桁変形量測定、簡易引張試験、コンクリート強度試験の4つの試験を行った。

a) 近接目視・打音検査

P5橋脚周辺の被災箇所について、梯子・脚立を使用した近接目視、コンクリート部材の打音検査を実施した。

その結果、火災による塗膜の損傷は、第 5、6 径間とも、G1～G3 桁の P5 橋脚から 3 つ目の横桁までの範囲である。結果については表-3 のとおりであった。

表-3 近接目視・打音検査結果

部位	所見
P5橋脚付近	下横構で変形が確認された。2008年の定期点検時には確認されていない。
P5橋脚の縁端拡幅部 (P6側)	剥離、うきが確認された。剥離は、受熱により爆裂したものと考えられる。剥離・うきの範囲は、煤のついていない灰白色～淡黄色の部分であり、煤がついている箇所では、損傷は確認されなかった。
G1-G2間の床版	ひびわれが確認された。ひびわれ幅は、0.05mm以下で、微細なヘアークラックである。受熱により発生したものと考えられる。
第6径間の床版	剥離、うきが確認された。コンクリート表面のみが剥離していることから、受熱による爆裂によるものと考えられる。
下り側歩道部ブラケット	塗膜が損傷している。塗膜の状況から取付ボルトも受熱していると考えられ、軸力の低下が懸念される。
G2、G3主桁	水平補剛材の変形 については、2月9日の現地踏査で既に発見されていた事項

b) 主桁変形量測定

光波レーザにより主桁ウェブのはらみ出し量を測定する。対象範囲は、すでに変形が確認されている箇所だけでなく、第 5、6 径間の G1～G3 主桁の必要箇所とした。その結果、主桁のたわみ量について、最大23mmの変形量が確認できた(図-5)。

また、主桁は垂直補剛材を節として、波打つように変形していることが確認できた。



図-5 主桁(G2桁)の変形量

c) 鋼材簡易引張強度試験

鋼部材の強度推定試験として、反発式硬さ計(図-6)により、鋼材の引張強度の推定を行った。簡易引張強度試験であり、強度そのものより熱影響の程度を把握することを目的とした試験である。

調査箇所については、被災範囲と健全部とし、受熱温度マップ・目視調査結果を勘案して、実施箇所を選定す

る(計7箇所を実施)。



図-6 反発式硬さ計

対象箇所は、G2桁のウェブで塗膜の受熱温度区分ごとの5箇所と被災範囲外の計6箇所(図-7)と、G5桁の健全部で実施した。試験は、塗膜を剥がした上で、各箇所3点の計測を行った。表-4、表-5に試験結果を示す。

表-5 鋼材引張試験結果(G5桁)

測定箇所	G5-	
受熱温度	健全部塗膜有	健全部塗膜無
材質	SM50(SM490)	SM50(SM490)
板厚(mm)	11	11
平均値(N/mm ²)	958.3	510.0

G5の健全部では、塗装を除去する前後で測定を行い、塗膜の有無による影響を検証した。塗膜が有る場合、実際の強度より極端に大きな値が測定される結果となった。試験結果は若干のばらつきはあるが、表-5の塗膜無し510.0N/mm²と比較して受熱温度が高い箇所でも著しく強度が低下している箇所はなかったといえる。

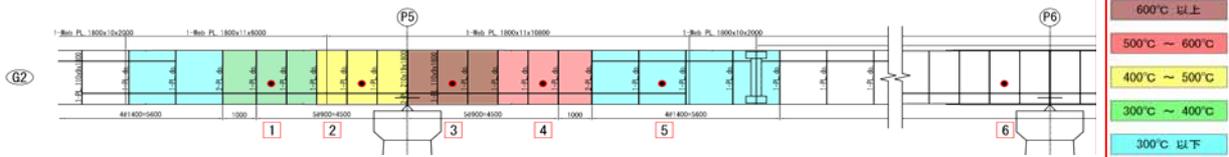


図-7 鋼材強度測定箇所図

表-4 鋼材引張試験結果(G2桁)

測定箇所	G2-	G2-	G2-	G2-	G2-	G2-
受熱温度	300~400	400~500	600以上	500~600	300以下	受熱無し
材質	SM50(SM490)	SM50(SM490)	SM50(SM490)	SM50(SM490)	SM50(SM490)	SM50(SM490)
板厚(mm)	11	11	11	11	11	
平均値(N/mm ²)	488.3	476.7	465.0	546.7	601.7	533.3

表-6 コンクリート強度推定試験結果

測定箇所	橋脚	沓座	沓座	沓座	床版	床版	床版	床版						
外観状況	健全	健全	うき	うき	健全			ひびわれ 健全						
打撃方向	水平	-90°	-90°	-90°	+90°	+90°	+90°	+90°						
推定圧縮強度(N/mm ²)	36.08	26.60	23.58	18.92	29.63	33.10	33.54	33.13	30.29	29.88	55.99	53.76	57.09	45.75 48.58

d) コンクリート強度推定試験

コンクリートは、火災により500以上に加熱されると強度が低減することから、シュミットハンマーにより強度推定試験を実施した。

調査箇所は、うき、剥離のみられたP5橋脚の縁端拡幅部(側面、沓座面)と、床版の計15箇所(図-8参照)とした。

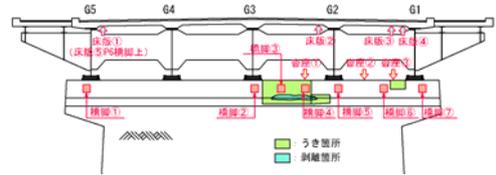


図-8 コンクリート強度試験箇所

結果を表-6に示す。各部材の許容値は、縁端拡幅部が21N/mm²、床版が35N/mm²である。

橋脚は、火元からも遠く、火災の影響を受けていない箇所である。試験結果からも十分な強度を有していることが確認された。

縁端拡幅部では、橋脚18.92(N/mm²)で強度が低い結果となった。橋脚は、うきが確認され、受熱温度が高かったと想定される箇所であり、強度が低下している可能性が高いと考えられる(健全と比較すると、は約52%に低減している)。

床版については、微細なクラックが発生した箇所でも十分な強度45.75(N/mm²)を有しており、強度の低下は無いといえる。

4. 二次調査内容

燃焼温度と強度の推定により橋梁本体に著しい強度低下が起きていないことが分かった。そこで、次に、補強対策を検討して行くに当たって必要な詳細調査を行った。

(1) 疲労耐久性評価と応力頻度分布計測

橋梁に強度低下は起きていなかったが、高温に熱せられた後に急激に冷却されたため、靱性が低下している可能性がある。また、対策工法でアングル補修に伴う穿孔が考えられるため参考文献²⁾をもとに、応力頻度分布計測を行い、鋼材の疲労耐久性評価を評価した。

72時間の連続応力頻度測定結果より得られたデータを解析すると、被災した桁、アングル補修に伴う穿孔部も疲労寿命はいずれも10,000年以上となっており、疲労損傷の可能性の低いひとつの目安である100年³⁾以上なので、疲労による破壊は無いと考えられる。

(2) 鋼の材料試験

a) 試験内容

強度及び鋼材のじん性の評価、受熱による鋼材成分の変化の判断、ハイテンションボルトの受熱による軸力低下の状況確認、鋼材変形箇所の亀裂の有無等を確認するため、主桁ウェブから試験片を採取し、表-7のとおり材料試験を行った。

表-7 鋼材試験項目・数量表

試験項目	調査箇所	試験内容	数量
鋼材引張試験	G2、G3主桁	引張強度 降伏強度 ヤング率 伸び率	6箇所×2本 計12試料 (50mmから2本分加工)
シャルピー衝撃試験	G2、G3主桁	シャルピー 吸収エネルギー 値	6箇所×4試料 計24試料 (24.5mm)
マイクロ組成試験	G2、G3主桁	破断面撮影	4試料 計24試料 (24.5mm)
ボルト軸力測定	下り線歩道ブラケット 第6径間支点部と2本目	残存軸力	2箇所×30本 計60本
浸透探傷試験 (PT)	水平補剛材変形箇所 G2、G3主桁	亀裂確認	3箇所

b) 鋼材引張試験結果

表-8に示す結果より、健全部に比べ火害部は耐力、引張強さ共に10~20N/mm²と若干高く、伸びは55%前後で差は認められない。

表-8 引張試験結果

部位	試料No.	耐力(N/mm2)	引張強さ(N/mm2)	降伏比	伸び(GL=10mm)
健全部	G4-	350.5	542.0	65%	56%
	G2-	357.5	562.5	64%	56%
	G2-	355.5	561.5	63%	55%
火害部	G2-	368.5	559.5	66%	56%
	G2-	358.0	554.5	65%	55%
	G2-	359.5	558.0	64%	57%
JIS規格(SM490YA)	325N/mm2以上	490~610N/mm2	-	-	22%以上

数値は2つの試験片の平均値

なお、いずれの特性値も現行のJIS規格を満足しており、強度上の問題が無いことが確認できた。

c) シャルピー衝撃試験結果

表-9に示す結果から、健全部に比べ火害部は全体的に吸収エネルギーで約10J程度低下しており、靱性が低下していると推測されるが、当時のB材(SM50B)のJIS規格である27J以上を上回っており、問題ないことが確認できた。

表-9 シャルピー試験結果

部位	試料No.	試験温度(°C)	吸収エネルギー(J)	脆性破面率(%)
健全部	G4-	0	48	70
	G2-	0	32	85
	G2-	0	31	85
火害部	G2-	0	41	80
	G2-	0	43	75
	G2-	0	32	80

数値は試験片の平均値

d) ボルトの軸力測定結果

表-10に示した結果から、健全部と被災部の平均値を比較した結果、健全部に比べて被災部の軸力が85%程度に低下しており、火災による熱影響を受けたことが確認できた。

表-10 ボルト軸力測定結果

部位	状況	ボルト導入軸力(kN)		
		85%	100%	115%
B2-U	健全部	177	208.2	239.4
B-2	被災部	-	175.6	-
B-1	被災部	-	176.6	-

数値は各箇所平均値

e) 浸透探傷試験結果

G2-、G3- において計測したが、ビードの凹凸が見られた他、一部でアンダーカットも確認されたが、傷・焼割れ・熱変形割れなどの損傷は確認されず、試験箇所はすべて合格となった。

(3) コンクリートの材料試験

シュミットハンマーによる強度推定試験の結果から、P5 橋脚のうき、剥離箇所において、コンクリートの強度が低下している可能性が高いことが確認された。精度良く強度を確認することを目的として、表-11 のとおり、コア採取によるコンクリートの圧縮強度、静弾性係数、中性化深さ試験を実施した。床版については、強度低下の可能性が低いいため、中性化深さのみを確認する。

表-11 コンクリート試験項目・数量表

試験項目	調査箇所	試験内容	数量
コンクリート部材	コンクリートコア試験	圧縮強度 静弾性係数 中性化深さ	4試料
	中性化深さ測定(ドリル法)	第6径間P5上の床版	中性化深さ
	鉄筋探査	コア採取 ドリル法実施箇所	鉄筋位置 かぶり厚さ
			7箇所

コア採取箇所は、P5 橋脚の損傷部と健全部とし、計4

本(図-9参照)とする。

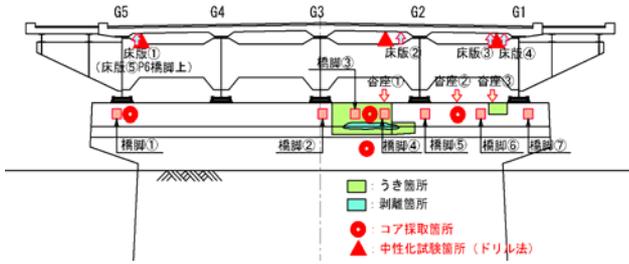


図-9 コンクリート試験箇所図

外観目視の結果、橋脚の健全部は特に外観に異常は見られなかったが、橋脚およびの被災部(煤が焼失し、表面に広範囲の浮き有り)については採取コア・採取孔壁ともに深さ20~100mmの位置で斜めに割れていた。また、コアの側面外観から表面5mm程度の範囲は少しピンクがかっていることも確認された。

コンクリートコアの室内試験(圧縮強度・静弾性係数・中性化試験)を実施した結果を表-12に示す。

表-12 コンクリート試験結果

部位	中性化深さ (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
橋脚	24.5	22.8	18.3
橋脚	28.9	20.5	15.3
橋脚	27.7	20.0	12.7
橋脚	5.7	43.0	31.1

橋脚 ~ のコンクリートの中性化深さの平均は24.5~28.9mmであり、橋脚、の被害部は橋脚の健全部と比べ、最大+4.4mm程度と被災部との大きな差異は見られなかったが、被害部では、橋脚の健全部に比べわずかではあるが圧縮強度および静弾性係数の低下が確認された。

橋脚については表面に煤の付着が見られたが、コアの外観は特に異常は無く、中性化の程度も平均5.7mmとわずかであり、圧縮強度および静弾性係数の数値からも健全と判断できる。

床版の中性化については測定の結果、床版の健全部で17mm、床版、の被災部でそれぞれ18、19mmであり、特に火災の影響による中性化の進行の差異は確認できなかった。

5. 応急対策工の設計の方針

これらの結果を踏まえて、応急対策工は下記の内容とした。

ウェブの撓み矯正とL型鋼(ボルト添接)による補強を行う。

歩道橋横桁ブラケット部の高力ボルトについては、受熱温度が350~400°以上と推察されるボルトは、軸力が低下している可能性があり、取替える。

変形している横構などは取り替え。塗装は影響範囲を塗り替え(支承など含む)。

コンクリートにおける断面欠損部においては強度確認のうえ、断面修復する。

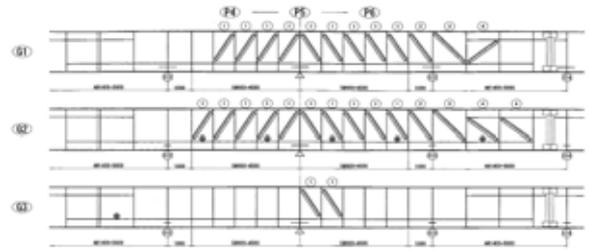


図-10 応急対策工

6. 今後の課題と方針

今回の事例より、橋梁が塗装されている場合、塗膜の状況から燃焼温度の推定が可能であり、簡易な試験である程度の推測できることが分かった。また、火災により鋼材部は影響を受けているものの、当面の交通の使用には問題無いことが分かった。しかし、被災から対策工の施工に至るまで実に4ヶ月を要した。今後は対策工の施工を進め、施工の結果を含めた検証を行う予定である。

今回のような不測の事態への対応では、被災直後にいかに効率よく情報を収集するかが課題となる。したがって、参考文献¹⁾にあるような既に提案されている手法を基にあらかじめ対応を想定してマニュアルを整備していくことが重要である。

場合によっては、橋梁点検の折に橋梁毎に火災被災リスクの高い橋梁をリストアップして被災時の対応を想定しておくことも対応のスピードアップに有効と考えられる。

また、被災リスクを把握しておくことは、日々の維持管理に関しても、今回のように不法投棄物が燃えることによる被災を防ぐ意味でも重点的に巡視及び撤去を行うなどの対策を徹底するうえで有効な情報となる。

謝辞: 本事例の対応に当たっては、京都大学大学院工学研究科宇都宮智昭准教授に多大なるご協力、ご意見を賜りましたことを、ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 細井義弘: 火災を受けた橋梁の調査診断、補修補強—通行可否の迅速な判定を目指して—, 土木施工 44 巻 8 号, pp.47-54, 2003.08.
- 2) 古市, 小寺, 佐光, 村上, 橋本, 前田, 新藤: 実橋における応力頻度測定手法, 土木学会第 44 回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.61-66, 2004.11.
- 3) 社団法人 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.03.