

火災を受けた鋼橋の補修および載荷試験

Reinforcement and loading test of bridge damaged by fire

(株)構研エンジニアリング ○正員 岩渕 直 (Sunao Iwabuchi)
 (株)構研エンジニアリング 竹原 智久 (Tomohisa Takehara)
 (株)構研エンジニアリング 今泉 宜人 (Yoshihito Imaizumi)
 札幌市 建設局土木部工事課 和田 俊行 (Toshiyuki Wada)
 札幌市 財政局管財部工事管理室 鈴木 雅之 (Masayuki Suzuki)

1. 損傷の概要

令和元年8月、札幌市内で供用中のA橋で火災が発生した。塗装塗替え作業中の吊足場内に防護柵の撤去で生じた火種が到達し、吊足場上に堆積していたアルコール系塗膜剥離剤に引火したことが火災の原因と推定され、2時間程度燃え続けた。表-1にA橋の橋梁諸元、図-1に火災状況の概要を示す。また、図-2および写真-1に火災による鋼材の変形箇所を示す。

本橋では長時間の火災により橋体の受熱が推定されたことから、恒久復旧工法を選定するために各種の材料試験や形状計測が実施した¹⁾。この結果、表-2に示すように鋼材の引張強度、金属組織および溶接部に受熱に起因する性能の低下は認められず、材質は健全であると判断された。一方、主桁の一部の腹板や下フランジに受熱が原因と考えられる面外変形が確認された。

本稿では、火災によって生じた腹板や下フランジの面外変形に対する補修方法を紹介するとともに、これら補修を実施した橋体に対する載荷試験の結果について報告する。なお、本報告での補修とは、建設時に構造物が保有していた耐荷性能まで機能を回復させる事を指す。

2. 面外変形した鋼材の補修

2.1 恒久復旧工法の選定

面外変形を生じた主桁の耐荷性能を回復するため、以下に示す3案から恒久復旧工法を選定した。

- 【第1案】 上部構造の架替えによる復旧
 - 【第2案】 変形部材の断面交換による復旧
 - 【第3案】 変形部材に対する補強材の設置による復旧
- 第1案は、火災による損傷部材を最も確実に除去でき

表-1 橋梁諸元

橋長	107.0 [m]
幅員	1.5 (歩道) + 9.0 (車道) + 1.5 (歩道) [m]
構造形式	4 径間連続鋼非合成桁
交差物件	河川
適用示方書	昭和 39 年鋼示
架設年	昭和 46 (1971) 年
姿図 (側面図)	

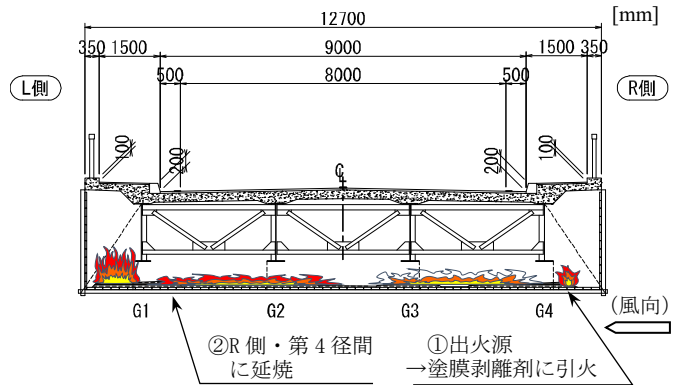


図-1 火災状況の概要 (第3径間断面図)

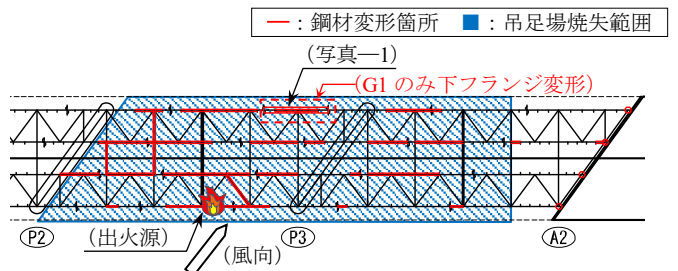


図-2 火災による損傷 (鋼材変形) 箇所



写真-1 主桁腹板および下フランジ変形状況 (第3径間)

表-2 損傷詳細調査結果一覧

調査項目		確認項目	評価
鋼材	ビッカース硬さ試験	引張強度	OK
	小片試験片を用いた鋼材引張試験		
	スンプ試験	金属組織	
	磁粉探傷試験	溶接部の割れ	
	3D レーザスキャン	変形	
床版コンクリート物性試験		圧縮強度 静弾性係数 中性化深さ	OK

確実な耐荷性能の回復が見込まれる。一方、供用までの期間が大きくなることが懸念された。第2案では、ベント工による仮支持が必要になる上、比較的大きな費用を要することが分かった。第3案では、維持管理上で塗装面積やエッジ部が増加するものの、比較的低コストかつ早期の供用が可能であった。本橋の終点側には住宅地が広がり、住民生活への影響を最小限とする必要があるため、総合的に勘案して第3案を恒久復旧工法に選定した。

2.2 腹板の補修工法概要

面外変形が生じた腹板に対してT型断面の剛な補強材（以降、腹板補強材）を配置し、高力ボルトの締付力によって腹板の面外変形を矯正する工法を採用した。腹板補強材の設置状況を写真-2に示す。腹板補強材の板厚は $t=22\text{mm}$ 以上とし、腹板の面外方向への矯正に必要な力に対して耐力を確保する断面とした。腹板補強材の腹板パネル内の設置方向は活荷重載荷に対して圧縮方向²⁾とし、景観性を考慮して主桁の内側に配置した。

2.3 下フランジの補修工法概要

面外変形が確認された第3径間のG1主桁の下フランジに対する補修工法の概要を図-3に示す。補修対象の下フランジは面外変形により「波打つ」ように変形しており、更に板厚は $t=19\text{mm}$ と厚く加熱矯正による平坦化は過度な入熱や、圧縮力の解放のためベント等による仮支持が必要であるため困難と判断した。また面外変形量が 23mm と大きく、鋼板による当て板も肌すきが懸念されるため適用は困難であった。

これらの条件から、本橋では、下フランジの変形に対する矯正が不要な工法として炭素繊維（CFRP）シート（以降、下フランジ補強材）を用いた補修³⁾を行った。本工法は不陸修正を行った下フランジに含浸・接着樹脂を用いてCFRPシートを複数層接着するものであり、鋼材の孔明や溶接による熱影響を与えない利点を有する。

3. 載荷試験

3.1 載荷試験の概要

前章に示した腹板補強材および下フランジ補強材の補修効果、および橋全体の耐荷性能を確認するため、ダンブトラックを用いた載荷試験を実施した。

3.2 計測項目

(1) ひずみ

本橋では、被災直後に暫定供用を実施するため緊急的に載荷試験（以降、前回試験）を実施している。今回の載荷試験（以降、今回試験）では、火災による損傷を受けた状態と、補修後の主桁の応力状態の比較を行うため、前回試験でひずみを計測した位置を基本に単軸ひずみゲージを配置した。図-4にひずみゲージの設置位置を示す。併せて、2.2、2.3に示した補強材の効果を確認するため、腹板補強材に単軸ひずみゲージ、腹板補強材の周辺の腹板に3軸ひずみゲージ、下フランジ補強材およびその周辺部に単軸ひずみゲージを配置した。

(2) 鉛直変位（主桁たわみ）

主桁に損傷が生じると上部構造の剛性が低下し、設計上の解析値と比較して鉛直変位が増加する。このため、上部構造の鉛直変位を計測し、設計値と比較することで上部構造の剛性すなわち損傷を推定した。鉛直変位の計



写真-2 腹板補強材の設置状況

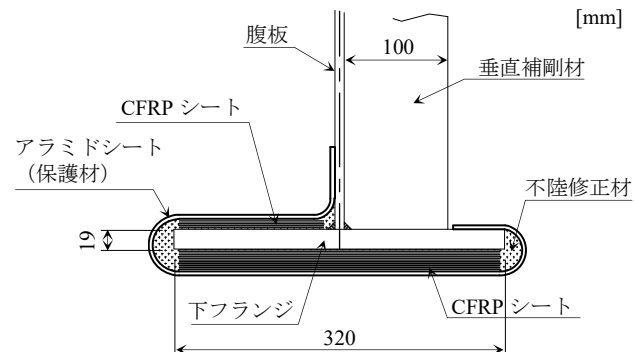


図-3 下フランジの補修工法の概要

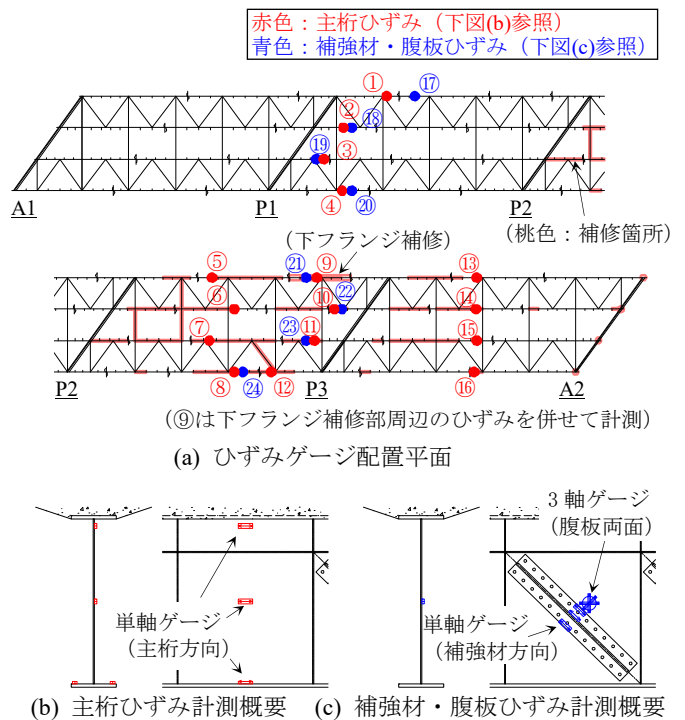


図-4 ひずみゲージの設置位置

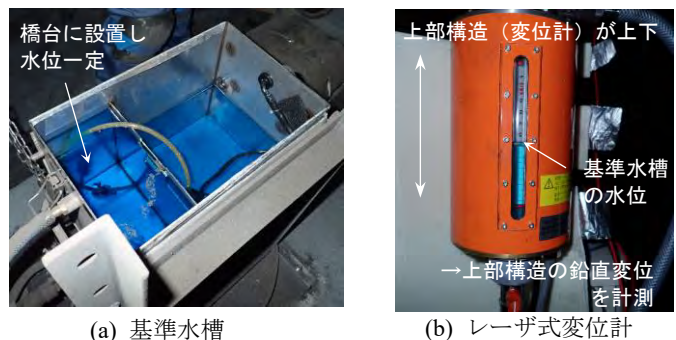


図-5 連通管式鉛直変位計

測には、図-5 に示す暫定供用のためのモニタリングに使用した連通管式鉛直変位計を用いた。鉛直変位の計測箇所は G1 主桁と G4 主桁の各支間中央とした

3. 3 荷重条件

荷重荷重ケースの一覧を表-3 に示す。全てのケースでダンプトラック（重量 20ton）×4 台を荷重した。前回試験との比較から補修の効果を確認するための Case1 と Case2、最も主桁の変形が大きい第 3 径間の曲げ最大ケースである Case3、同じくせん断最大ケースである Case4、比較的主桁の変形箇所が多い第 4 径間の曲げ最大ケースである Case5 を設定した。更に、Case3 から Case5 の健全部との比較を行うため、平面的に点対称となる Case6 から Case8 を実施した。

3. 4 主桁ひずみ計測結果

(1) 主桁全体のひずみ分布

図-6 に、一例として Case1 における第 3 径間中央の主桁のひずみ分布を示す。併せて、補修実施前の状態を示す前回試験における主桁のひずみ分布を示す。

前回試験におけるひずみ（青線）は、主桁腹板の面外変形が原因と考えられる非線形性を示していた。一方、主桁補修を行った今回試験のひずみ（赤線）は、非線形性が改善されほぼ直線のひずみ分布を示した。これは腹板補強材が機能し、腹板の面外変形を拘束しているためと考えられる。一方、G4 主桁のみやや腹板中央のひずみが小さくなったが、ひずみ量は全体的に減少した。G-1 主桁から G-3 主桁ではひずみ量が大きくなったことから、腹板補強材が設置されたことで G4 主桁以外が機能し、G-4 主桁の負担が減少したためと考えられる。

(2) 腹板表裏の主ひずみ

面外変形が生じた主桁の腹板では、荷重荷重時の断面の平面保持が困難になる。本橋では腹板補強材を設置することで腹板の面外変形を拘束し、主桁断面の平面保持を図った。その効果を確認するため、図-7 に Case3 における 3 軸ひずみゲージから算出した最小主ひずみ量と最小主ひずみ方向を示す。

主桁腹板の L 側面と R 側面の最小主ひずみは各主桁で方向を含め概ね一致した。よって、腹板のはらみ出しは生じていないと考えられる。したがって、腹板補強材により主桁の面外変形は拘束され、主桁断面は平面保持されていると考えられる。

3. 5 鉛直変位計測結果

(1) 計測値と解析結果の比較

鉛直変位量の計測結果の一例として、図-8 に Case3 の G-1 主桁および G-4 主桁の鉛直変位量の計測結果および格子解析値を示す。また、被災していない健全な主桁と比較するため、Case6 の計測結果を平面的に 180° 回転させた結果を重ねて示す。

Case3 で計測された鉛直変位量は、G-1 主桁および G-4 主桁ともに格子解析より小さい。また、Case6 と比較すると同程度の鉛直変位量であった。このため、被災による上部構造の剛性の低下はなく、健全な状態と同等であると考えられる。

(2) 荷重前後の鉛直変位量差

本荷重試験は、Case1 から順に Case8 まで一連で実施した。このため Case1 実施前と Case8 実施後の鉛直変位

表-3 荷重荷重ケース一覧

名称	荷重位置	備考
Case1	第 3 径間中央(R 寄り)	前回試験との比較用
Case2	P3 橋脚上(R 寄り)	前回試験との比較用
Case3	第 3 径間中央(L 寄り)	損傷部曲げ最大
Case4	P3 橋脚上(L 寄り)	損傷部せん断最大
Case5	第 4 径間中央(L 寄り)	損傷部曲げ最大
Case6	第 2 径間中央(R 寄り)	Case3 の比較ケース
Case7	P1 橋脚上(R 寄り)	Case4 の比較ケース
Case8	第 1 径間中央(R 寄り)	Case5 の比較ケース

(例)Case3 のダンプトラック配置

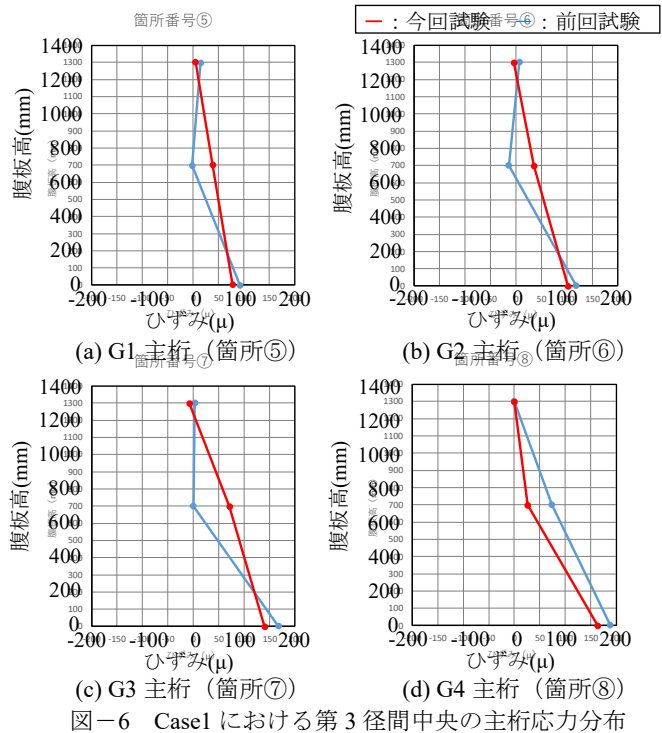


図-6 Case1 における第 3 径間中央の主桁応力分布

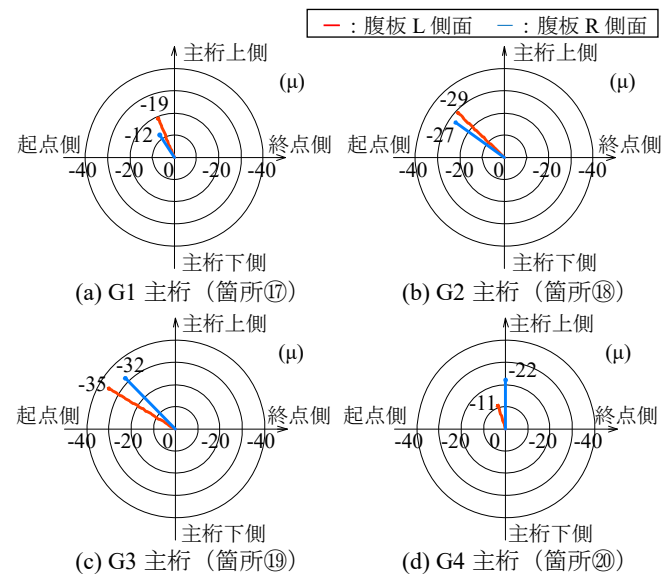


図-7 Case3 における主桁腹板の最小主ひずみベクトル

量を比較することで、重交通（総重量 80ton×8 ケース）に対する耐荷性能を確認した。図-9 に、一例として最も主桁の変形が大きい第3径間L側の荷重試験の実施前から実施後までの鉛直変位量の推移を示す。

試験荷重前の鉛直変位を0mmとすると、Case8終了後の鉛直変位は、下向きに0.20mmの変位であった。ダンブトラックの総重量は80tonであり、最も軸重が大きい後輪軸を突き合わせた配置としたため一般的には再現されない荷重状態ではあるが、上部構造はほぼ弾性状態で挙動していることが確認された。

3.6 腹板補強材のひずみ

腹板補強材に発生するひずみを確認するため、損傷部のせん断最大ケースとなるCase4における箇所⑨の腹板補強材方向のひずみを図-10に示す。

主桁腹板に近いひずみゲージで比較的大きな圧縮ひずみが発生した一方、主桁腹板から92mm離れたひずみゲージではやや小さな圧縮ひずみとなった。腹板補強材は活荷重荷重に対して圧縮方向に配置しているため、想定された挙動となった。また、腹板補強材は正常に機能していることが確認された。

3.7 下フランジ補強材のひずみ

図-11に、下フランジ補強材および周辺の下フランジ方向のひずみを示す。主桁曲げモーメントにより下フランジのひずみ量は変化し、CFRPシートには引張ひずみが確認できる。CFRPシートの引張ひずみは、同じ断面の鋼材の引張ひずみよりも小さいが、これはCFRPシートの接着に用いる接着樹脂のせん断弾性により、CFRPシートの層間にせん断ひずみが生じることで、CFRPシート表面の発生ひずみが小さくなったものと考えられる。下フランジ補強材には引張ひずみが生じており、補修は正常に機能していることが確認された。

4. まとめ

本稿では、火災により受熱した鋼橋に対する補修および耐荷性能を確認するため実施した荷重試験について示した。本橋では面外変形した鋼材に対して鋼製補強材およびCFRPシートを用いた補修を実施した。荷重試験の結果、これらの補修は機能しており、上部構造の安全性が確認され、健全部と比較しても問題がない事が明らかになった。

火災による鋼橋の被災事例は北海道内でも少なく、調査・対策事例は限られることから、本稿が今後の同様事例の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 岩渕直, 竹原智久, 今泉宜人, 和田俊行, 鈴木雅之: 火災を受けた鋼橋の恒久復旧に向けた詳細調査および健全度評価, 土木学会北海道支部論文報告集, A-07, 2022.
- 2) 北根安雄, 小野健太, 廣畑幹人, 杉浦邦征: 火災加熱を模擬した加熱冷却仮定を受けた鋼桁のせん断耐荷力実験, 土木学会全国大会第74回年次学術講演会, I-167, 2019.
- 3) 服部雅史, 広瀬剛, 大垣賀津雄, 宮下剛, 奥山雄介, 小林朗, 秀熊佑哉: 2軸対称鋼桁のCFRPによる曲げ耐荷力補強に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 第25巻第99号, pp31-39, 2018.

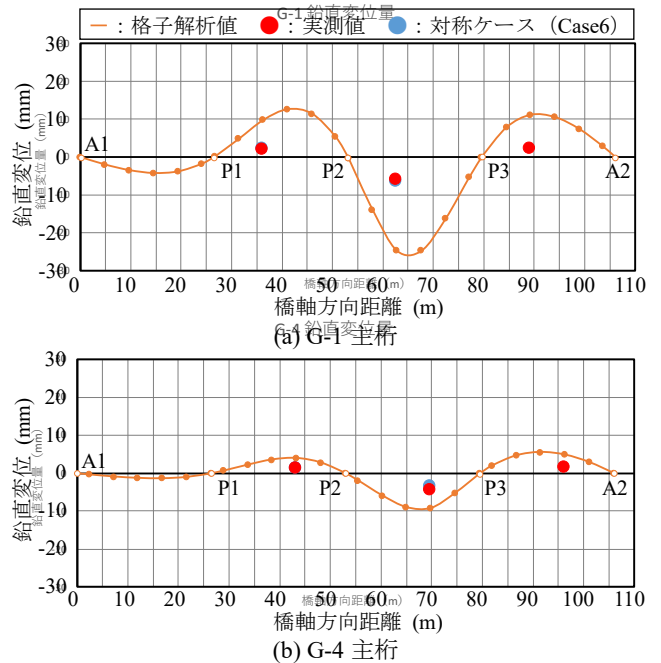


図-8 Case3における主桁鉛直変位量

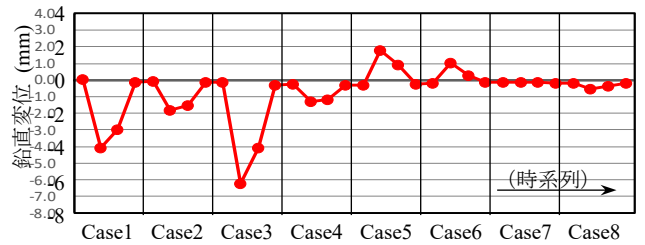


図-9 第3径間L側の鉛直変位量の推移

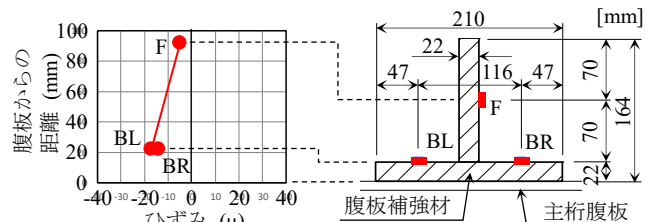


図-10 Case3における腹板補強材のひずみ (箇所⑨)

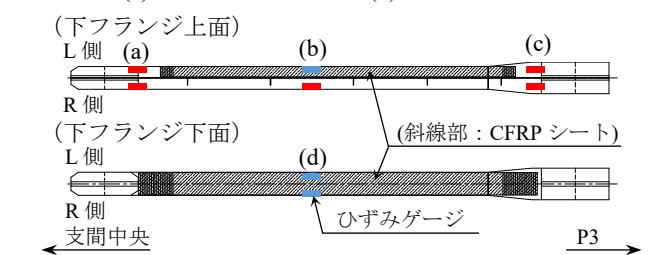
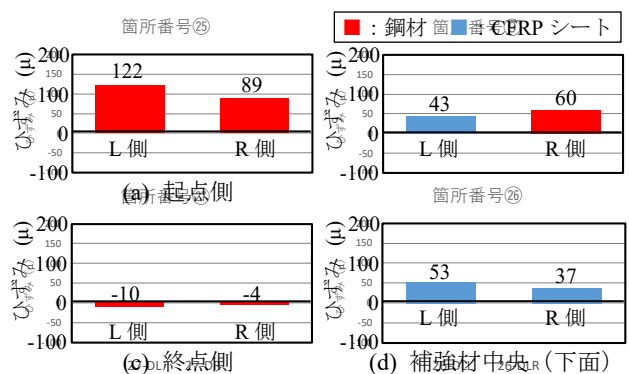


図-11 Case3における下フランジ補強材周辺のひずみ分布