

火災により大きく変形した端横桁の 矯正方法の提案

えとう よしき はまなかみのる はせ がわりゆういち くりたみのる
○江藤良樹¹・濱中 実¹・長谷川 隆一¹・栗田 稔¹

¹セントラルコンサルタント株式会社中部支社（〒460-0003 名古屋市中区錦一丁目18番22号）

近年、国内外でトンネルや橋梁といった土木構造物の火災による被害が報告されている。トンネルの場合、国内でも年間20件程度の火災事故の発生が報告されており、火災後の応急対策や補修対策等を示した指針の整備が進んでいる。

橋梁においてもガイドライン²⁾が整備されたが、火災事例は数例が報告されているにすぎず、これまで統計的には十分に整理されていない。対象橋梁においても、桁下からの出火が要因となり、端横桁の大きな変形が生じていたが、ガイドラインで示されている補修方法や既往実績の踏襲では要求性能を満足できない可能性があった。そこで、本業務では、変形の生じた端横桁に対し、機械的部材矯正と局部加熱矯正との併用工法の採用や管理値の設定といった提案を行い、補修詳細設計を実施した。また、その補修方法の妥当性については、施工前の試験施工を通して確認を実施した。本稿は、火災により損傷を受けた端横桁の補修設計の考え方や試験施工の内容・結果について報告するものである。

Key Words：橋梁，端横桁，火災，補修，機械的部材矯正，局部加熱矯正

1. 橋梁概要

対象は、一般国道419号（側道部）に架かる橋梁である（図-1）。本橋の橋梁諸元を、表-1に示す。一般国道419号は第1次緊急輸送路に指定されており、上下線13,348台／日（H27センサス）と比較的交通量の多い道路である。一般国道419号が一部有料区間となっていることや、本橋周辺で、一般国道1号、一般国道23号に接続していることから、本側道部の利用者も比較的多い。また、本橋は片側1車線の道路であり、近くに代替路もなく、通行止めを行った場合、道路利用者は大きな迂回が必要となる。

表-1 橋梁諸元

項目	諸元
路線名	一般国道419号(側道部)【第3種2級】
橋長	51.0m
支間長	49.8m
幅員構成	5.000m+3.500m(車道+歩道)
上部工形式	単純非合成鋼板桁
下部工形式	逆T式橋台(斜角A1:56° 55' 08"、A2:62° 57' 45")
竣工年	1999年(平成11年)
示方書	平成6年2月
設計活荷重	B活荷重
交差条件	河川

2. 損傷状況

本橋は、交差河川左岸にあたるA1橋台部からの出火により被災し、鎮火後、出火元は、G2-G3桁間の橋座面と特定された。出火時の熱影響により本箇所を中心に、橋梁の各部材に損傷が生じていた。被災直後には通行止めの要否判断のため、緊急点検が実施され、その後、詳細調査が行われた。

主な調査は、被災直後の近接目視点検、詳細調査時に実施した変形量調査、磁粉探傷試験、引張試験、コンクリート強度・中性化試験である。



図-1 位置図

被災箇所を図-2に、主な被災状況を写真-1,2に示す。また、主な損傷・調査結果を表-2に示す。

鋼道路橋の受熱温度推定に関する調査²⁾等の文献から判断し受熱温度は最高でも700℃以下であり、鋼部材、コンクリート部材ともに強度低下が生じていないと推察されたため、詳細調査時には「通行止めはせず、供用再開後に補修を実施」と判断され供用が再開された。被災した端横桁は、材質がSM490、高さ1000mm・厚さ9mmのウェブと幅200mm・厚さ10mmのフランジで構成されている。本部材については、ウェブの変形量が最大で36mm（平面度で最大17mm）、下フランジの変形量が最大で37mm（通りで最大30mm）生じていた（図-3,4）。ウェブの面外変形は大きく、地震動等による座屈が懸念された。また、下フランジは局部変形が生じており、大型車の繰返し荷重によって、疲労亀裂の発生が懸念された。そのため、恒久的な補修対策が必要であった。

3. 補修方針

損傷状況より、端横桁に対して、耐座屈性や疲労耐久性の向上を目的とした補修対策を計画することとした。補修対策における課題や課題への対応策について後述する。

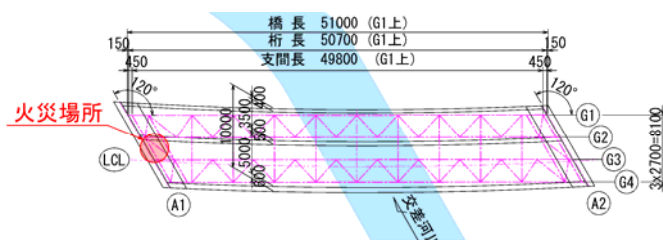


図-2 被災箇所（平面図）

表-2 被災箇所（平面図）

損傷箇所	損傷状況	主な調査結果
端横桁 (G2-G3間)	・変形 ・塗膜焼失	【近接目視】 塗膜の白色化または消失 →受熱温度500～700℃と推定 【変形量調査】 ウェブ:最大36mm(平面度17mm) 下フランジ:最大37mm(通り30mm) 【磁粉探傷試験】 亀裂無し 【引張試験】 耐力・降伏点 317N/mm ² >245N/mm ² 引張強さ 447N/mm ² >400～540N/mm ² 伸び 29%>17% →強度低下無し。
主桁 (G2)	・変形 ・塗膜焼失	端横桁と同様の傾向。
下横構 ガゼットプレート	・変形	母材の強度低下なし。 ボルトの強度低下あり。
床版	・コンクリート剥離	【近接目視】 うき・剥離、 すずの付着・一部ピンク色 →受熱温度400～600℃と推定 【強度・中性化試験】 シュミットハンマー試験: 健全部43.8N/mm ² 、被災部:44.1N/mm ² ドリル法(中性化深さ): 健全部2.0mm、被災部0.7mm →強度低下・中性化進行なし。
バラベツ	・コンクリート剥離	床版と同様の傾向
PCケーブル(落防)	・被覆管の溶融	-
緩衝ゴム(変位制限)	・ゴム板の溶融	-

(1) 制約条件

これまでの火災復旧事例¹⁾では、数mm～十数mmの小さな変形は、小型の油圧ジャッキや高力ボルト締め付けによる部材矯正（機械的方法）を用い、20～40mm程度の大きな変形は部材取替が実施されていた。

数mm程度の変形であれば部材矯正により、耐座屈性を向上させる対応が可能であるが、本橋の場合変形量が大きかったため、詳細調査時に取替えが必要と判断されていた。ただし、次に挙げる事項が設計上の問題であった。

- ・一般的に、部材取替時には健全部に補強材を設置し、応力を受け変えた上で、変形部を撤去し、新規部材を再設置するといった方法をとる。これにより、供用下での取替えが可能である。しかし、本橋の端横桁はウェブ上段まで大きく変形しており、補強材の設置スペースの確保が困難であった。そのため、部材取替にあたっては床版部の撤去が生じ、幅員確保が難しいことから通行止めが必要であった。

利用者の多さ等、本橋の特性から社会的損失を鑑み、通行止めをできる限り実施しないことが条件となっていたため、通行止めを行わない別の補修方法を立案する必要があった。



写真-1 端横桁 (G2-G3)



写真-2 床版

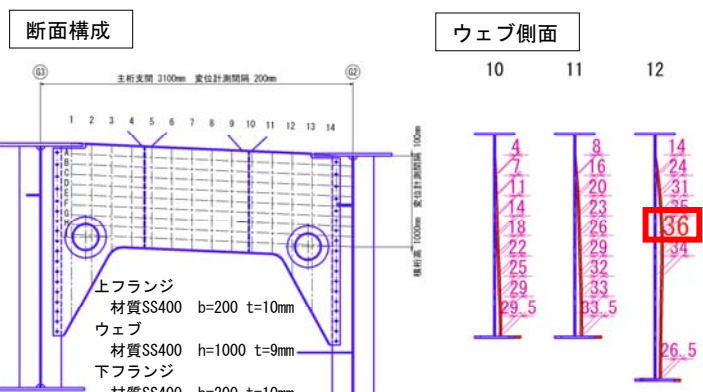


図-3 ウェブ変形量

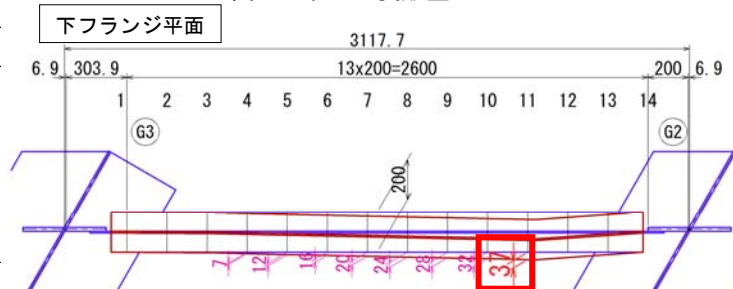


図-4 下フランジ変形量

(2) 補修方針と課題に対する対応

交通開放しながらの補修方法として、前述した部材矯正（機械的方法）が挙げられるが、本方法のみでは、本橋端横桁部のように変形量が大きい場合には対応が困難である。

そこで、今回、兵庫県南部地震の復旧工事にて鋼製橋脚補強を対象に実施された事例のある局部加熱矯正を併用することで、大変形の矯正に対応可能ではないかと考え、部材矯正（機械的方法）＋局部的加熱矯正の併用工法を提案した。

これまでの事例における局部加熱矯正は、過去の実績を踏まえた上で施工法が定められているに過ぎず、鋼材の機械的な性質と橋梁全体系の耐荷力への影響が不明確であった。特に、本橋端横桁部のような大きな変形量に対し、局部加熱矯正を行った場合、加熱温度を高く設定しなければならず、機械的性質の著しい低下を招く可能性があった。特に、面外方向に大きく変形しているウェブはその傾向が顕著となる可能性があった。そこで、今回、以下に挙げる2つの管理目標値を設定した上で、補修対策を講じることが提案した。

- ・矯正後の目標変位量の設定（ウェブ）
- ・局部加熱温度の設定

上記については、4. に具体的内容を示す。

(3) 矯正方法の計画

油圧ジャッキの反力を受けられる場所・部材がないため、部材矯正（機械的方法）として高力ボルト締め付けによる矯正を採用することとした。過去の事例では、矯正材の配置をトラス状に配置した矯正方法が多く作用されていたが、これは、矯正力を採用したものというよりは、斜場力場の考え方にて、補剛材代わりに設置してあるという考え方であった。

今回は、矯正力を期待した矯正材配置と局部加熱法に使用するガスバーナーの大きさ等を考えた部材配置、施工順序を計画した。

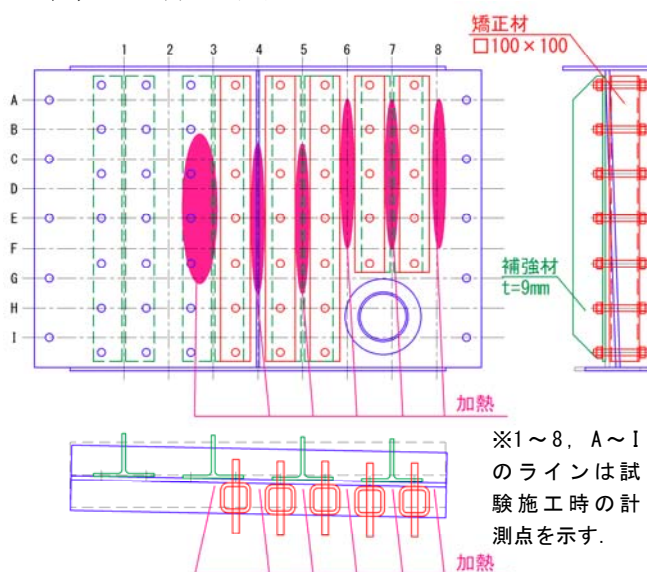


図-5 矯正方法

図-5に矯正方法の模式図を示す。剛性の高い角パイプ（100×100）を矯正材として使用することに加え、矯正材の間隔をガスバーナーが使用に配慮した上で、できる限り小さくし150mmと設定した。矯正材は最大変形量周辺に設置し、その両側を加熱、最大変形量に一番近いボルトから締め付けを行っていくこととした。

4. 技術的工夫

(1) 矯正後の目標変位量の設定（ウェブ）

道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編³⁾（以下、道示という）の製作時のウェブ平面度 δ では、ウェブ高の250分の1の値を管理目標値として設定している。ウェブ高 $h=1000\text{mm}$ の本橋端横桁部においては、 $\delta=1000/250=4\text{mm}$ 以内を矯正後の目標変位量として設定する必要があった。ウェブの変形量が最大で36mmであるため、矯正量としては、32mmと大きな矯正力が必要となる。

そのため、機械的方法の矯正规模増加や局部加熱矯正の温度増加による鋼材の機械的な性質と橋梁全体系の耐荷力への影響が大きくなり、経済性や既設部材の強度低下が生じる可能性があり現実的ではないと判断した。

道示³⁾の値があくまで架設時の許容値であることや、過去の補修設計等の管理目標値を勘案し、今回は、火災被災橋梁の点検要領⁴⁾に準拠することとした。火災被災橋梁の点検要領⁴⁾は、道示³⁾の値を1.7倍した150分の1の値を緩和値として設けている。本値まで矯正を行えば、座屈照査を満足することを確認の上、 $\delta=1000/150=7\text{mm}$ 以内を本橋端横桁部の矯正後の目標変位量（1つ目の管理目標値）とした。

(2) 局部加熱温度の設定

既往のガイドライン¹⁾では、局部加熱温度は一般的に、局部加熱矯正では鋼材表面温度900℃以下とし施工されていると記載がある。一方で、鋼構造論文集⁵⁾では490Y材を900℃で加熱した場合、降伏強度が17%、引張強度が6%減少するといった報告もある。よって、局部加熱矯正にあたっては、母材の機械的性質を損なわない局部加熱温度の設定が必要である。局部加熱温度を設定するにあたっては、本橋が火災により耐力低下していないことに着目した。つまり、火災による受熱温度を局部加熱温度として設定すれば、機械的性質を損なわない可能性が高いのではないかと考えた。

前述したように、本橋端横桁部の受熱温度は最高で700℃と推定された。また、国総研資料²⁾によれば、鋼部材は受熱温度700℃を超えると著しく機械的性質が損なわれることが実験等により分かっており、700℃を超える温度での局部加熱矯正は危険と判断し、700℃以下を局部加熱温度（2つ目の管理値）として設定した。

5. 試験施工

(1) 試験施工概要

前述した矯正方法の計画内容や技術的工夫点についてはこれまでに前例がないものであった。そのため、施工に際し、事前に試験施工を行い、妥当性の確認を行うこととした。

試験施工には、写真-3, 4に示すように実橋の端横桁を模した供試体を用い、事前に加熱と油圧ジャッキにより矯正的に変形を与えた。実橋の変形量と多少の差異があるため、矯正量にて管理を行った。実橋においては、最大変形量36mm、矯正後の管理変位量は7mmであるため、矯正量は29mm必要である。供試体においては最大変位量が48mmであり、矯正後の変位量17mmとする必要がある。試験施工の手順は、フランジの通りを矯正後、前述した矯正方法にてウェブを矯正した。まずは、部材矯正（機械的方法）のみで矯正を図り、その後、局部加熱矯正温度を併用し、500℃以下の場合と、700℃以下の場合で矯正を実施した。局部加熱温度については、サーモグラフィーにより管理した。

(2) 試験施工結果（ウェブ）

試験施工結果は、表-3に示す通りである。部材矯正（機械的方法）の場合、500℃以下で局部加熱矯正を併用した場合については、十分な矯正が行えない結果となった。700℃以下で局部加熱矯正を実施した場合については、矯正量34mmと管理目標値を満足する結果となった。また、試験施工後に実施した供試体の引張強度試験の結果、母材引張強度の低下は確認されなかった。この結果から、詳細設計で立案した対策及び技術的工夫点は妥当と判断し、試験施工と同様の手順で、本施工を実施することとした。

高い温度での加熱が必要な理由は下フランジが腹板面外方向に変形している影響が大きいと考えられる。また、施工直後にスプリングバックが生じていたが、矯正時に設置した補強材を再設置することにより解消されたため、本施工時にも再設置を行うこととした。

表-3 試験施工結果（ライン6）

計測点	①	②	③	④	⑤	⑥
	矯正前	機械的 —	機械的 局部加熱 (500℃)	機械的 局部加熱 (700℃)	矯正材 撤去	補強材 再設置
F	40 mm	23 mm	15 mm	12 mm	18 mm	10 mm
G	43 mm	27 mm	17 mm	14 mm	20 mm	14 mm
H	46 mm	31 mm	19 mm	16 mm	20 mm	16 mm
I	48 mm	32 mm	22 mm	16 mm	18 mm	16 mm

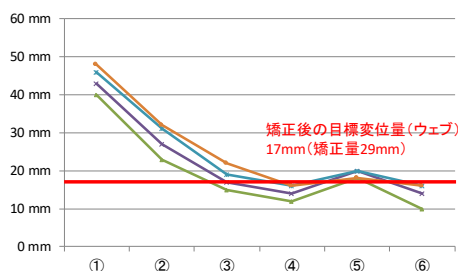


図-5 試験施工結果（ライン6）

6. おわりに

試験施工にて確認した矯正方法により、本施工でも変形量を管理目標値以内に収めることができたことと報告を受けた（写真-5, 6）。

本稿の成果は、700℃以下での局部加熱において鋼材の機械的性質の低下がないことを実証し、部材矯正（機械的方法）＋局部的加熱矯正の併用工法により、橋面交通に影響を与えることなく、大きな変形の矯正に対応できたことであると考えられる。また、本技術は火災を受けた橋梁のみならず、車両衝突や地震等で変形した鋼桁の矯正にも適用できるものと考えられる。

今後は、局部加熱温度をできる限り低くするために、部材矯正（機械的方法）について、より矯正力の高い矯正方法の確立が必要と考える。また、FEMを用いた応力・温度解析等の設計手法を確立することで、試験施工を行わずに施工を実施できるようにすることも必要と考える。

火災を受けた橋梁の補修事例はまだ多くない。本稿の設計方針や提案内容が同様の事例において一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼構造シリーズ24，火災を受けた鋼橋の診断補修ガイドライン，2015。
- 2) 玉越 隆史，大久保 雅憲，石尾 真理，横井 芳輝：鋼道路橋の受熱温度推定に関する調査，国土技術政策総合研究所，第710号，2012。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2019。
- 4) 国道交通省中部地方整備局名古屋国道事務所：火災被災橋の点検要領，1998。
- 5) 廣畑 幹人，北根 安雄，伊藤 義人：鋼橋の火災を想定した加熱および冷却過程が構造用鋼の溶接継手特性に及ぼす影響，鋼構造論文集，第21巻第84号，2014。

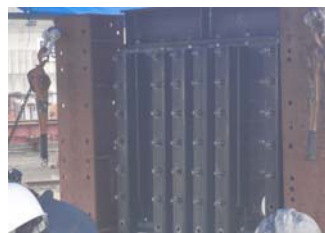


写真-3 供試体



写真-4 試験施工状況



写真-5 供試体



写真-6 本施工完了