

# 火災を受けた橋梁の補修

本間 順\* 高 良人\*\* 三輪 浩二\*\*\*

第二東名高速道路の大脇高架橋（鋼上部工）東工事内の新左山跨道橋（以下；跨道橋）の路下で車両事故が起きた。この事故により火災が発生し跨道橋が被災した。橋梁が火災を受けた事例は多くなく損傷調査方法や補修方法に関して体系化されているものは建築構造物に比べて少ない。本稿は火災を受けた橋梁の被災調査，対策検討，および補修工事の報告である。

キーワード：補修補強，火災，復旧，調査

## まえがき

本橋は愛知県の重要幹線道路であり 1 日約 9 万台の交通量がある国道 23 号線（以下「23 号」）を跨ぐ市道である。豊明市の桜ヶ丘と沓掛町を結ぶ市道で第二東名高速道路の建設に伴い 23 号を跨ぐ橋梁部を日本道路公団が受託して建設した工事である。平成 14 年 4 月 28 日に、この橋梁の直下で発生したトラックと自家用車の追突事故による車両火事により被災し損傷した。落橋や路下（国道 23 号）への飛来落下物による二次災害などがないか、緊急調査を行った。その後部分規制により足場を設置して順次調査，判定，補修設計および補修を行った。

## 1. 損傷概要

### （1）橋梁諸元

火災にあった跨道橋の橋梁諸元を下記に示す。

橋梁位置：愛知県豊明市栄町

構造形式：単純 RC（グレーチング）床版箱桁橋

長：37.900m

有効幅員：16.000m

路下条件：国道 23 号（離隔距離 5.7～6.2m）

### （2）出火原因

目撃者や関係者からの証言により想定した事故状況と出火原因を下記に示す(図-1，写真-1)。

火災原因：トラックと乗用車の追突事故による火災

日時：H14.4.28 AM2:50 頃

場所：23 号（跨道橋直下）下り線

- ①追突により乗用車のガソリンが流出
- ②トラックのヘッドライトがショートしてガソリンが発火
- ③トラックの運転席に引火し炎上
- ④運転席から積荷に引火，荷台炎上
- ⑤爆発音を伴う火災に発展し，主桁まで炎が達した

事故の情報を受け，JH 職員，JV 職員が AM 4:00 より復旧作業にあたり，二次災害防止と 23 号の早期供用再開に努めた。応急復旧として飛来落下の恐れがある排水管や添加物などを撤去した。また，落橋や二次災害が無いことを確認し，AM11:30 に 23 号を開通させた。



写真-1 事故状況

\* 工事計画部東京計画課係長 \*\* 工事部大阪工事二課 \*\*\* 工事部大阪工事一課

事故状況想定図

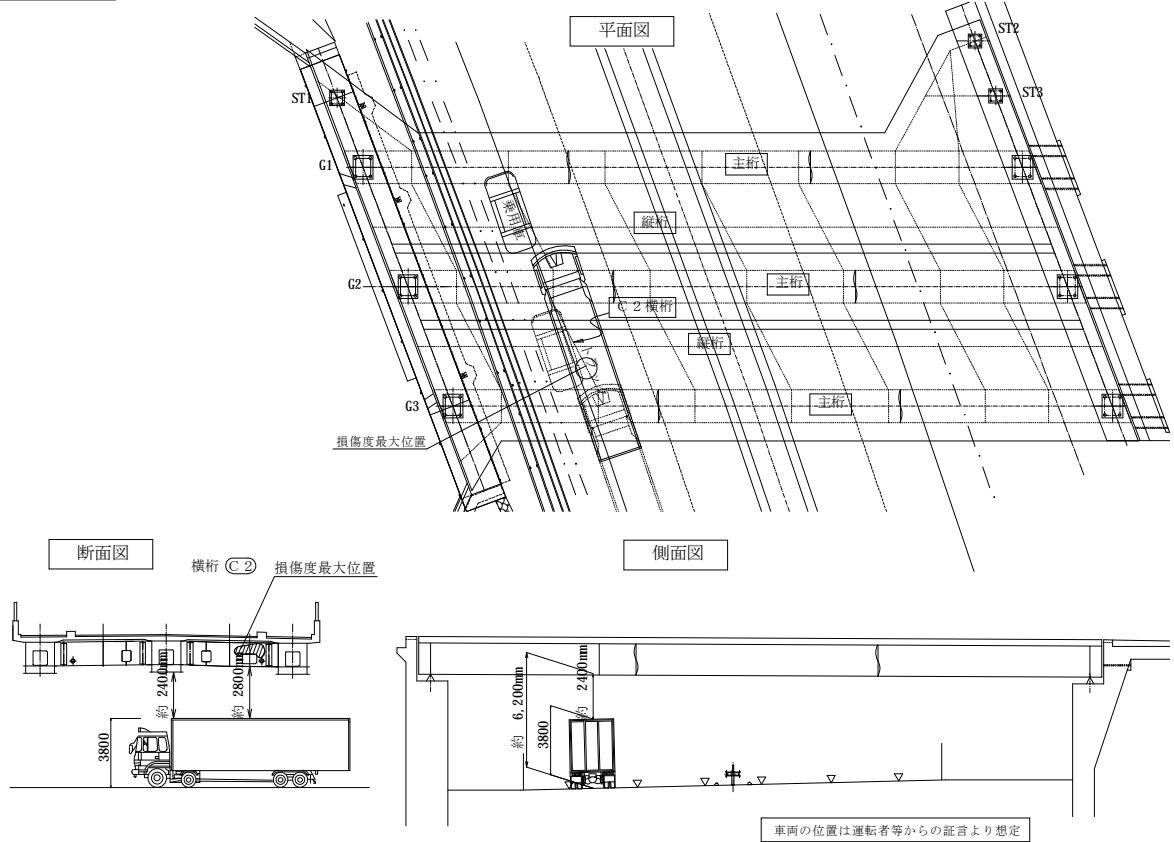


図-1 事故状況図

(3) 調査補修方法の基本方針

一般的な橋梁の災害復旧作業は早期な交通開放を重点に進める。しかし、本橋の場合は供用前であるためその制約は無かった。しかし問題点や制約条件として以下のものが挙げられた。

- ①本橋は完成状態にあり、一度も供用されていない新橋である。
- ②路下が交通量の多い国道であるため、調査・補修などの作業が自由に行えない（第二東名建設のための通行止めは2～3ヶ月に1度）。
- ③復旧や補修補強に必要な費用は事故者による支払いとなる。

このため、橋を構成する各部材の要求性能を事前に明白にし、それに応じた調査や補修を行う必要があった。そのため、名古屋大学の山田教授（環境学研究科）、辻本教授（同）や日本橋梁建設協会などの有識者からなる技術検討会で適宜審議し復旧作業を進めることとした。調査は図-2のフローチャートにしたがって進めることとした。

火災による劣化は変形など目視で劣化が分かるもの以外は、その部材の受熱温度と耐熱温度の比較が劣化判定の基本となる。しかし、火災時の温

度を直接測定することは出来ないので受熱温度を推定する必要があった。

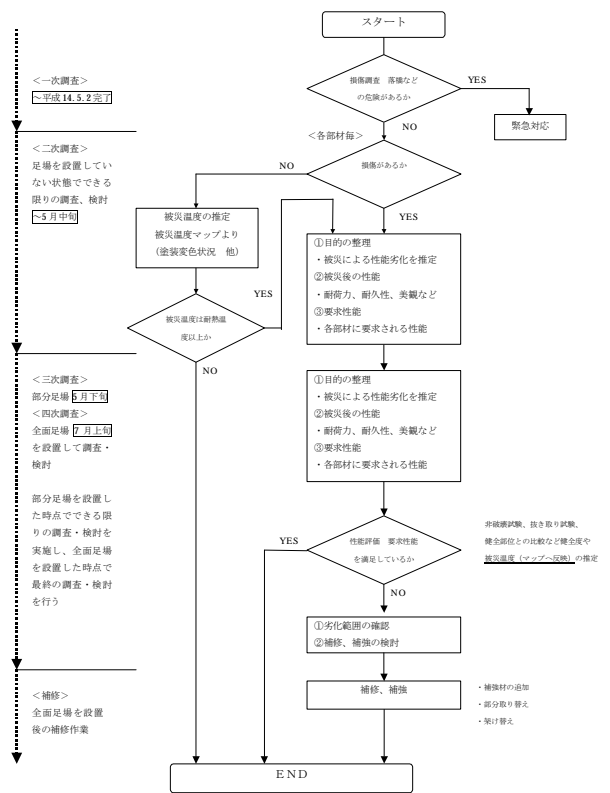


図-2 調査フローチャート

受熱温度を推定できるのは塗装や高力ボルトなどの数部材しかなく、その他の部材は受熱温度を推定できるものから温度マップ図を作成して受熱温度を推定した。各部材の推定出来る温度範囲を表-1に示す。

各部材毎にフローチャート（1例として図-3参照）を作成し、調査補修の目的、処置方法、および判定方法（基準）を決定してから調査を行った。

表-1 推定温度範囲表

各部材の受熱温度における変状					
温度履歴	高力ボルト	コンクリート	塗 装	亜鉛メッキ	排 水 管
7.0					
6.0	600℃を超える とボルトの硬度 (HRC)が低下	600~950℃でコ ンクリート表面 が灰白色に変色			
5.0					
4.0	400℃を超える と亜鉛の硬度 (HRC)が低下	300~600℃でコ ンクリート表面 が灰白色に変色	400℃で塗膜が 剥離	450℃で亜鉛溶解	
3.0			300℃以上 表面の濃い変色		
2.0			200℃以上 表面の淡い変色		
1.0			120℃以上 表面の変色開始		88℃で塩化亜鉛 溶解



写真-2 鋼部材の面外変形

主桁の平坦度は基準値（仮組時基準値）を満足していたが、横桁と縦桁の腹板とフランジは最大 30mm の面外変形を生じていた。

②連結部

ボルトの緩みは生じていなかったが、①の変形に伴って連結部が1箇所滑っていた。

③グレーチング床版（写真-3）

メッキを施した裏面鋼板（1mm）が設置されていたため、コンクリートには変色やひび割れは生じていなかった。ただし裏面鋼板は変形し、部分的にメッキが溶解して付着量が減少している箇所が見受けられた。

(4) 損傷状況

損傷状況の一覧を図-4に示す。主な損傷を以下に示す。

①鋼部材の面外変形（写真-2）

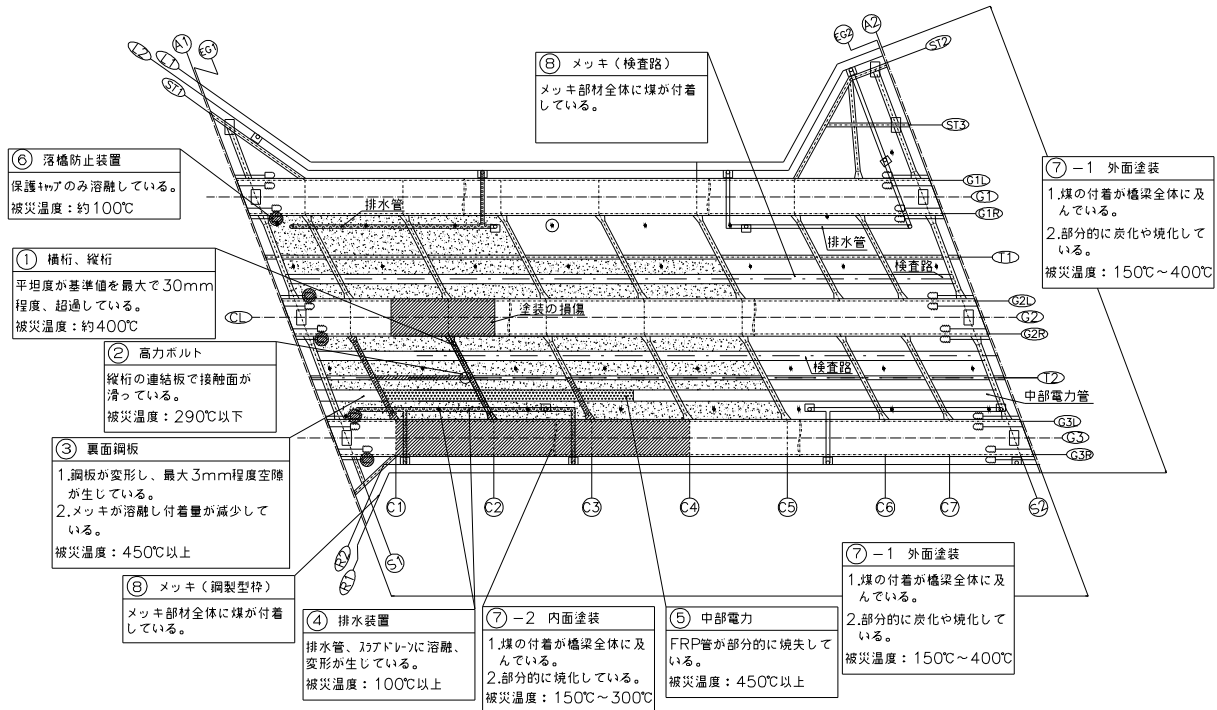


図-4 損傷一般図

<p>主構造 (1)</p>	<p>主桁 横桁/縦桁</p>	
<p>調査補修の目的</p>	<p>局部変形および大変形が規格値内であるかの確認を行う。 鋼材の機械試験を行い機械的性能の劣化がないかどうかを確認する。 ※2</p>	
<p>処置方法</p>	<pre> graph TD     Start([スタート]) --&gt; A[局部変形の調査※1]     Start --&gt; B[大変形の測定]     Start --&gt; C[鋼材の機械試験※2]     Start --&gt; D[溶接部の調査]          A --&gt; A1{部材精度の規格値内であるか※3}     B --&gt; B1{仮組検査時の規格値内であるか※3}     C --&gt; C1{JIS規格値内に収まっているか※5}     D --&gt; D1{溶接止端部に割れが発生していないか※7}          A1 -- YES --&gt; End([END])     A1 -- NO --&gt; A2[矯正、補強※4]     B1 -- YES --&gt; End([END])     B1 -- NO --&gt; B2[規格値からの逸脱の度合いにより架け替え]     C1 -- YES --&gt; End([END])     C1 -- NO --&gt; C2[損傷範囲を確定する※6]     C2 --&gt; C3[部分的取り換え(範囲に応じて架替え)]     D1 -- YES --&gt; End([END])     D1 -- NO --&gt; D2[欠陥部の補修を行なう]          A2 --&gt; End([END])     B2 --&gt; End([END])     C3 --&gt; End([END])     D2 --&gt; End([END])     </pre>	
<p>&lt;判定方法、備考&gt;</p> <p>※1;面外変形の調査</p> <p>※2;最も被災していると思われるC 2横桁のG 2 - G 3間より試験片を採取し、降伏点、引張強さ、曲げ、衝撃、ビッカース硬度、マクロ試験、ミクロ試験を行う</p> <p>※3;鋼構造物施工管理要領 2-3-5 仮組立検査</p> <p>※4;治具による矯正を基本とし、必要に応じて加熱矯正、補剛材・高力ボルトによる補強</p> <p>※5;JIS G 3106 により判定を行う (引張強さ 400~510 N/mm<sup>2</sup>, 降伏点の下限 SM245N/mm<sup>2</sup>, 伸び 18%以上ただし, SM400A 材、t=9mm)</p> <p>※6;最も被災している部分から段階的に離れたところの鋼材で各種試験を行い範囲を確定する</p> <p>※7;磁粉探傷試験(MT)により行う</p>		

図-3 調査補修フローチャート



写真-3 グレーチング床版下面

④塗装（写真-4）

火災地点の直上は延焼し炭化していた。また、火災地点から離れるにしたがい、濃い変色、淡い変色、ススの付着となっていた。スス付着部はウェス等による拭き取りではススの完全除去は不可能であった。これは塗装してから被災するまでの時間が短く、塗装自体がまだやわらかいため焼付け塗装のようになり、ススが塗料内部まで浸透した結果と推測された。クロスカット試験を行い付着力の試験を行ったがススが付着している箇所では所定の付着力が得られた。

⑤排水管，添架物管（写真-5）

焼失や溶融を生じていた。



写真-4 塗装焼化状況



写真-5 排水管（VP管）溶融状況

2. 被災状況に対する各種試験

受熱温度が耐熱温度を超過したと判定された部材に対しては各種の試験を行い健全性の確認を行った。主な試験方法は以下とした。

(1) 鋼材

鋼材は受熱により機械的性質の劣化，面外変形により座屈耐力の低下が懸念された。よって，機械的性質の劣化に関しては火災地点直上の部材から試験片を抜き取り，JISの規格値が満足されているか機械試験を行った。試験片は横桁開口部の補剛材と横桁下フランジに取り付いている検査路受け台部とした。

面外変形量に関しては変形が大きいパネルを10 cm 間隔で変形量の測定を行った。補修の要否の判定は仮組立検査時の規格値である板の平面度 ( $h/250$ ) とした。

これらの結果は機械的性質の劣化はなかったが，面外変形が基準値を超えていた。

(2) 連結部

連結部はボルトの機械的性質の劣化，ボルトの緩み，および接触面のすべり係数の低下が懸念された。よって，鋼材同様に受熱温度が高い箇所のボルトを抜き取り，機械試験を行った。機械試験は健全性の確認のほかに受熱温度を推定できる。これは，座金の硬度が受熱した温度履歴により変化することが分かっているためである<sup>6)</sup>。

ボルトの緩みはトルク値を測定し緩んでいないことを確認した。

縦桁の下フランジの連結部が一部滑っている箇所が確認された。これは，縦桁の面外変形によるものと推定されたが，接触面の無機ジンクリッチペイントが熱影響により劣化し，すべり係数が低下していることも考えられた。よって，本橋と同様の試験片を作成し塗装などから推定された温度に試験片を加熱し，すべりが発生するまで徐々に载荷させ，すべりが生じた荷重を読み取り，すべり係数を算出した。すべり係数が0.4以上あることを確認しすべり面は健全であると判断した。

(3) 床版部

コンクリートは異種材料の混合物であり，それ

ぞれの熱膨張収縮率が異なる。このため、火熱を受けると異なる収縮挙動によりコンクリート内部の拘束力が弱まり、ひび割れなどが生じこれが劣化現象となる。一般的に受熱温度が 500℃以内であればある期間を経て再使用に耐えうるまで復元する<sup>1), 2)</sup>。このため、受熱温度はコンクリート表面の変状(表-1)と中性化深さを測ることで推定した<sup>1), 2), 3)</sup>。また、強度試験を行い、健全部と比較することで被災部の健全性を調査することとした。

本橋の床版はグレーチング床版が採用されていて、床版下面には型枠用の 1 mm の裏面鋼板が設置されている。裏面鋼板は熱影響により最大約 3 mm 程度に面外変形してコンクリートと空隙が生じていた。また、メッキ付着量を膜厚計で測定すると部分的に 1/3 程度まで減少していた。

コンクリートの健全性調査は裏面鋼板を部分的に撤去した 160×400mm の小窓から、目視、シュミットハンマーによる強度試験、およびフェノールフタレイン法による中性化深さ試験を行った。これらの結果からコンクリートの健全性が確認できた。

#### (4) 支承部

火災を受けたゴム支承の健全性を判断することは難しい。しかし、クロロブレンゴムと異なり天然ゴムはある温度である時間保持すると硬度が柔らかくなる性質があるため<sup>10)</sup>、50 度ごとに加熱したゴムの試験片の硬度と被災した支承の被覆ゴムの硬度を比較することで受熱温度を推定した。この受熱温度が耐熱温度以下であることを確認し健全であると判断した。

#### (5) 塗装

塗装系は外面がポリウレタン系、内面が変性エポキシ塗料であった。塗料の種類によって違いは有るが、一般的に受熱温度により下記の変状となる<sup>8)</sup>。

- ～150℃ →変状なし(問題なし)
- 200℃～ →目視で変色が認識できる
- 400℃ →塗料中の亜鉛が溶け、ガス(塗膜に泡)が発生
- 400℃～ →黒く炭化

受熱温度 150℃を超えると徐々に変色をはじめ。また、塗料が硬化し伸び率の低下が始まる。これは、実験データなどないが耐久性の低下と考

えられる。健全度(補修の要否)の判定は変色の有無で判断することとした。また、他の部材の受熱温度を測定するために 150 度から 50 度ごとに加熱して変色させた試験片と、実橋の変色度を比較して受熱温度を判断した。

### 3. 補修補強対策

#### (1) 補修の基本方針

技術検討会において、下記に示す補修基本方針を決定した。

- ①桁の大変形、大撓みがないことや、各種の試験結果から、今までの火災による被災橋梁と比較して損傷程度も低いと判断した。よって補修は取替等の大規模な施工でなく、局所的な補修を基本とする。
- ②各部材の要求性能を事前に明らかにし、それに応じた適切な補修補強を行うこととする。
- ③23 号直上での施工であるため、通常交通に支障のない施工方法を採用する。
- ④第二東名建設に伴う 23 号夜間通行止めの最終日(平成 15 年 1 月 31 日及び 2 月 1 日)までに全作業を終了させる。

#### (2) 各部補修方法の選定理由と特徴

各部の調査結果や補修基本方針を考慮して、補修方法を選定した結果を下記に示す。

##### ①鋼部材の面外変形

鋼部材の機械的性質は JIS の規格値を満足していたが、面外変形による耐荷力の低下が懸念された。よって、平坦度が仮組時規格値(h/250)を越えている横桁、縦桁のフランジとウェブについて補修補強を行うこととした。補修方法選定に際しては表-2 に示す 3 案の中から、B 案を採用した。対象部位の活荷重分の応力に抵抗できる斜材をプラットラスとして補強した。また、同時に補強した L 型材をボルトで締め付けることで変形の矯正も期待した。また、火災により損傷部は加熱されているため、補修は基本的には L 型鋼による矯正と油圧ジャッキによる矯正を基本とし、加熱矯正は最小限に抑えることとした。また、補強材は高力六角ボルトによる摩擦接合としたため、接合面のすべり係数確保が求められたが、動力工具による 2 種ケレンではすべり係数 0.4 が確保できない。し

表-2 鋼部材の補修比較表

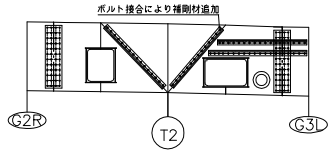
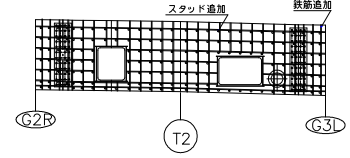
	A案	B案	C案
施工方法	FEM等の解析を行い、面外変形した状態での耐荷力を確認する。 耐荷力等が十分な場合は補修をしない。	補剛材の追加やジャッキ等により矯正を行い、必要に応じて加熱矯正を行う。	変形箇所はすべてコンクリートにより巻立てを行う。
概略図		ボルト接合により補剛材追加 	スタッド追加 鉄筋追加 
長所	①解析結果が問題なければ現場施工がない。 ②母材への施工がなく、母材への影響がない。	①総費用がA案、C案の中で一番安い。	①矯正の必要がない。
短所	①FEM解析後に問題があれば施工となり、2重に費用が発生する。 ②補修しない場合、変形が残ったままで見栄えが悪い。 ③解析にある程度時間を要する。	①再加熱による鋼材の材質変化のないよう施工しなければいけない。 ②ある程度の変形は残る。	①施工性が悪く、工種が多い。 ②B案より費用がかかる。
評価	△	○	×



写真-6 錆促進剤塗布状況

たがって、補強材取付部は動力工具により塗装を完全剥離させた上で、接合面に建築で使用実績の多い錆促進剤を塗布し錆を発生させ、すべり係数の確保を行った（写真-6）。

②裏面鋼板の変形

裏面鋼板は火災の熱影響により、床版コンクリートとの間に最大3mm程度の空隙が生じ、結露による鋼板の腐食やコンクリートの中酸化促進等が懸念された。

そのため、空隙部に樹脂充填による空隙部間詰を行うこととした。注入材料は無機系、アクリル系、エポキシ系の3種類から、以下の理由によりアクリル樹脂を採用した。①空隙部の状態が結露により湿潤状態の可能性があるため接着性が良好なこと。②鋼板が1mmという非常に薄板なため注入圧力が大きいと鋼板が変形する恐れがあるため、低圧注入が可能なこと。③コンクリート面に水分を吸収されドライアウト

しないこと。以上によりアクリル樹脂を採用した。また、現場注入作業時においては、作業が真夏で樹脂可使用時間が短い事が予想された。よって、二液性の樹脂の混合をノズル先端で行うことにより可使用時間の延長が可能で、特殊な注入機械を用いて施工した

③裏面鋼板のメッキ量の減少

裏面鋼板のメッキ量の減少には、熔融亜鉛メッキと同等な防錆力を期待し常温亜鉛アルミ溶



写真-7 試験片

表-3 付着力試験結果

番号	テストピース	試験結果			平均値
		1	2	3	
A-1	ウェスによりスス拭取り	0.54	0.61	0.29	0.44
A-2	(採取鋼板スス付着量大)	0.51	0.54	0.16	
B-1	3種ケレンにより素地調整	2.52	2.23	2.39	2.31
B-2	(採取鋼板スス付着量大)	2.28	2.29	2.17	
C-1	ウェスによりスス拭取り	2.93	2.39	2.77	2.71
C-2	(採取鋼板スス付着量小)	—	2.74	—	

注) —は接着面での付着切れのため、測定結果無し

射を採用した。亜鉛アルミ溶射は鋼構造物の重防食技術として近年多く採用されている工法で、鋼橋においても比較的多くの採用実績がある。しかし、今回は火災時のススが付着しているため、亜鉛アルミの付着力の低下が懸念された。よって、コンクリート試験用に切り出した小窓部の鋼板（写真-6）を試験片として、付着力確認試験を行った結果（表-3）、ススの付着量が多い箇所にも溶射しても所定の付着力が得られないことが判明した（標準付着力 2.3N/mm<sup>2</sup> 以上）。よって、ススの付着量が多い箇所は2種ケレンによりススを完全除去した後に溶射することとした。

④塗装

本橋は一度も供用されていない新橋であるため美観を考慮する必要があった。また、路下が23号で今後の塗装補修工事では大規模な交通規制を必要とするためライフサイクルコストを考慮する必要もあった。検討の結果、以下の塗装仕様を採用した。外面塗装は炭化部と変色部について動力工具により塗装を完全剥離し下塗りより塗替えを行い、スス付着部は上塗り除去し中塗りより塗直しとした。また、内面塗装は今後の補修塗装が比較的容易に行えるため、変色部のみを塗替えとした。

(3) 施工工程

施工工程表を表-4に示す。

調査は緊急度や施工性（路下条件）を考慮し、一次調査～三次調査と位置付けた。一次調査は事故直後から交通開放までの調査で、落橋や二次災害が無いことを確認した。二次調査は損傷度が高い事故地点直上の調査を目的とした。このため、1車線規制にて足場を設置し、その足場の範囲での調査とした。三次調査は本線架設用の23号全面通行止め時に全面足場を設置し、橋梁全体の調査を行った。足場の設置解体は路下の全面通行止め時にしか行うことが出来ない。このため、各々の部材の調査、清掃、調査計画、詳細調査、補修設計および補修の輻輳した作業を狭隘な場所でもかつ限られた日数で施工せざるを得ないため工程管理に苦慮した。また、作業場所が完全防護により密閉されたことで、ススや剥離塗膜等により作業環境が非常に劣悪であった。そのため足場上は常に送風機により換気を行い、防護マスク、防護メガネの装着を徹底する必要があった。

施工工程表

表-4 工程表

	4月		5月			6月			7月			8月			9月			10月		
	25	30	10	20	31	10	20	30	10	20	31	10	20	31	10	20	30	10	20	
火災発生・鎮火 (4月28日 2:50~3:20)		▼																		
検討会			▼第一回検討会				▼第三回検討会					▼最終検討会								▼完了検査
一次調査 (緊急調査点検)	●	●																		
調査準備			●	●	●															
二次調査 (部分調査)					●	●	●	●	●											
三次調査 (全体調査)										●	●	●	●	●						
足場設置・解体					●	●	●	●	●	●	●	●	●	●						●
外面塗装					●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
内面塗装					●	●	●	●	●	●	●	●	●	●						●
裏面鋼板補修										●	●	●	●	●						
樹脂注入										●	●	●	●	●						
桁補修補強														●	●	●	●	●	●	●
付属物工																				●
片付け																				●



## あとがき

建築構造物等は火災に関して建築基準法をはじめとする各種の基準や研究成果により耐火設計が体系化されている。しかし、土木構造物の橋梁に耐火対策が施されている場合はほとんど無い。これは、土木構造物と建築構造物では火災発生率に差があると考えられる。被災した橋梁数は少ないが、その中の火災原因は①不法占拠者などによる失火 ②通行者の煙草や不審火による被災 ③橋梁路下の車両事故による被災などであった。これらなどにより被災した橋梁は調査や補修補強などのために供用を一時中止せざる得ない状況が考えられる。このような場合、道路ネットワークとしてのサービスレベルを早期復旧することが第一に望まれる。本報告が今後同様な事態の効率的な損傷橋梁の調査、判定、および補修の方法の参考となれば幸いである。

最後に名古屋大学の山田教授、辻本教授をはじめ検討委員会の方々に多大な協力をいただきました。この紙面を借りて心より感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 ‘02, 2002.1.
- 2) 小山 堯：耐久性診断事例—火災—, コンクリート工学 Vol.26, No.7, pp.84-87, 1988.7.
- 3) 岡田 清：コンクリートの耐久性, 朝倉書店, pp.111-115.
- 4) 建設省名古屋国道工事事務所 管理第二課：火災被災橋梁の点検マニュアル(案), 1999.3.
- 5) 首都高速道路公団 東京保全部：鋼橋の火災時点検マニュアル(案), 1995.3.
- 6) 脇山広三・巽 昭夫：火災をうけた鋼構造物の熱履歴温度の推定法に関する研究—その1 高力ボルト座金硬さによる方法—, 日本建築学会論文報告集, Vol.310, pp.32-42, 1981.12.
- 7) 細井義弘：火災を受けた橋梁の補修について, 横河橋梁技報, No.20, pp.57-72, 1991.1.
- 8) 橋梁技術者のための塗装ガイドブック” 日本建設協会, 2000.3.
- 9) 日本橋梁建設協会：鋼材の知識, 1993.12.
- 10) 日本ゴム協会：設計者のための免震積層ゴムハンドブック, pp.49-50, 2000.1.