

火災を受けた橋梁の安全性評価と補修

阪神高速道路(株)大阪管理部保全工事グループ 丹波 寛夫
阪神高速道路(株)技術部技術開発グループ 西岡 勉
阪神高速道路(株)大阪管理部保全計画グループ 宮本 実信

要 旨

路下の火災により、阪神高速道路構造物が被災した事例が過去に何件か報告されている。そのうち、大きな被災としては、森小路出路における被災（平成 9 年 12 月発生）、天王寺出路における被災（平成 16 年 10 月）、及び波除出路における被災（平成 18 年 2 月発生）があげられる。森小路出路及び波除出路における被災は、いずれも主に鋼桁が被災損傷した。一方、天王寺出路における被災は、主に鋼桁及び鋼板巻き立て橋脚が被災損傷した。森小路出路の被災に対しては、道路構造物への熱影響を評価するために、影響のなかった類似構造の隣接径間と比較しながら、外観調査及び構成部材の物性試験を実施するとともに、試験車による現地載荷試験により橋梁全体としての健全性及び耐荷力を評価し、火災損傷に対する補修を行っている。また、天王寺出路及び波除出路の被災に対しては、道路構造物への熱影響を評価するために、外観調査及び構成部材の物性試験を実施し、火災損傷に対する補修を行っている。本稿では、それら一連の調査と補修施工について報告するものである。

キーワード: 橋梁, 火災, 安全性評価, 補修

はじめに

阪神高速道路構造物は、経年劣化等による損傷の他、交通事故や路上における車両火災または路下における火災といった外的要因により、損傷することがある。

交通事故では、主として車両の衝突に伴い高欄、遮音壁等が損傷するほか、オイル漏れにより舗装が損傷することが多い。また、路上における車両火災は、車両を一時停車させた非常駐車帯部で発生することが多く、損傷構造物は、主として舗装、伸縮装置、高欄、プラスチック板等である。これらの被災に対しては、必要な規制を行い適宜補修しているところである。また、交通事故多発箇所には、高欄側面にガラスクロスを貼付する等の落

下防止対策を順次実施している。

一方、路下における火災では、火災場所となる路下から構造物への距離が短いランプ部分において大きな損傷を受けることが多く、桁本体及び床版等が損傷する事例が多い。これらの被災に対しては、橋梁本体構造物の損傷という点から、仮受け等の応急処置が必要か否かを早急に判断する必要がある。また、ランプという性質上、車線数が 1 車線の場合が多く、車線規制 = 通行止めとなるが、通行止めは高速道路利用者に対する広報が必要になる等、その影響範囲が広大である。

本稿では、路下の火災により被災した橋梁に対して実施した一連の調査と補修施工について、報告するものである。

1. 森小路出路の被災

平成9年12月に発生した路下の火災により、森小路出路S-5（RC床版曲線鋼桁）の主桁、横構及び床版補強鋼板に熱による変形が見られた¹⁾。主な被災状況を図-1に示す。

そこで、熱による影響のなかった類似構造である隣接径間S-4と比較して、外観調査及び構造部材の物性試験等を実施した。

S-5で最大39mmの倒れ（S-4で34mm）、S-5で最大23mmのはらみ（S-4で20mm）を測定した。直線性と同様にS-5が少し大きな値であるが、S-4に比較して特別大きいわけではない。

(3) RC床版

S-5は昭和54年度に鋼板接着が施工されており、床版補強鋼板のたたき点検を実施した結果、燃焼によって加熱された大部分の床版パネルにおいて鋼板の浮きと変形を確認した。

1-1 外観調査結果

(1) 主桁ウェブの直線性（橋軸方向桁中心線に対するはらみ）

対傾構間での凹凸は最大でS-5で30mm（S-4で20mm）のはらみを測定した。はらみの変形量はS-5で若干大きい値ではあるが、S-4と比較して特に大きな差ではない。

(2) 主桁ウェブの鉛直性（鉛直方向に対する倒れ、はらみ）

1-2 物性試験結果

(1) RC床版

S-5の燃焼部と非燃焼部の床版コンクリートからコアを各3体採取し、単位体積重量、圧縮強度、中性化試験及び超音波伝播速度測定を実施した。表-1に結果を平均値のみ示す。圧縮強度は燃焼部で設計値を満足しなかったが、中性化試験の結果はいずれも2mm以下であった。火災の局所的要因で燃焼部コアは径間中央付近、非燃焼部コアは

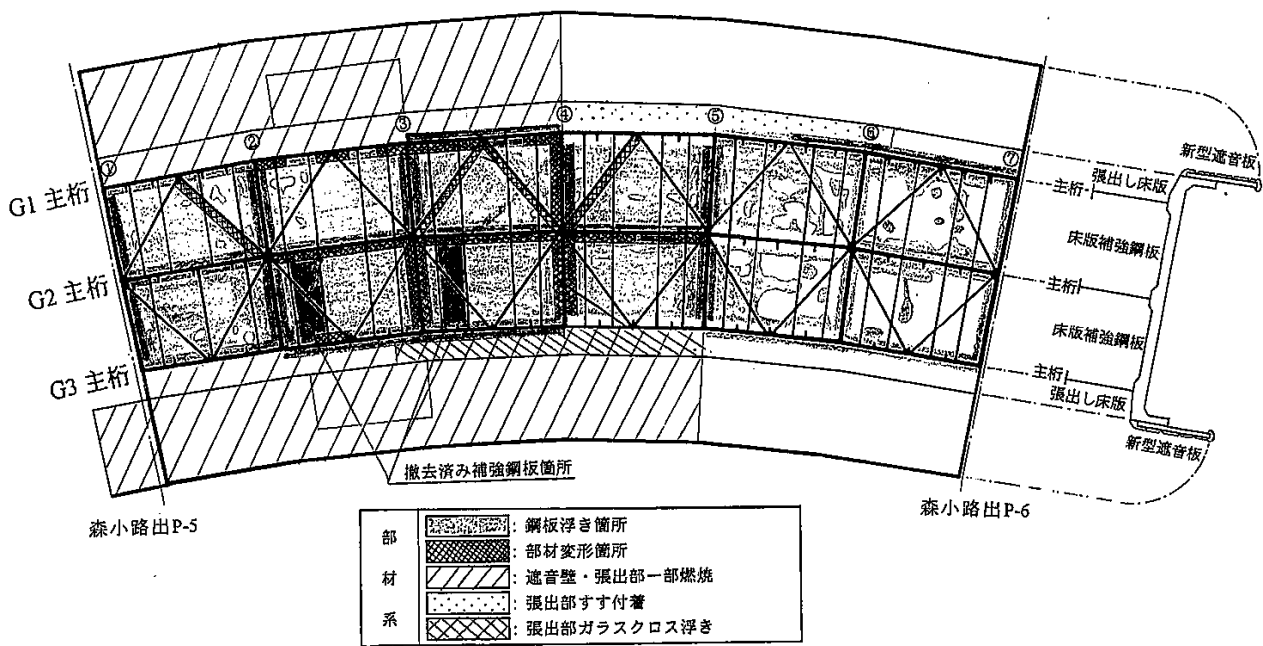


図-1 S-5の火災による被災状況

表-1 RC床版物性試験一覧表

	単位体積重量(kN/m ³)	圧縮強度(N/mm ²)	中性化深さ(mm)	超音波伝播速度(m/sec)
非燃焼部(平均)	21.5	27.6	1.6	4,087
燃焼部(平均)	21.8	20.5	1.5	4,013
設計基準	23~23.5	27	-	3,400~4,000

支点付近で採取されている。中性化深さから判断すると RC 床版に燃焼の直接の影響はなく、床版補強前に発生していたと推察される床版クラック損傷の程度の差が圧縮強度に表れたと考えられる。

(2) 鋼桁

1) スンプ試験

鋼桁の熱による変質の有無を調べるために、スンプ試験を行った。調査対象は SS400, SM490 材から、燃焼の程度で激しい箇所、中間的な箇所、影響の少ない箇所の計 6 箇所を対象とした。スンプ法によるミクロ組織の観察結果では 6 箇所すべてで顕著な組織変化または再結晶はみられず、圧延鋼板の正常なミクロ組織であるフェライト+パーライト組織が確認された。

2) 現地採取鋼板引張試験

現地採取した横桁及び横構の鋼材の降伏点、引張強さ、のびはともに規格値を満足していた。

3) 現地採取 H.T.B. 機械試験

ボルトの最小引張荷重、ボルト・ナット・ワッシャーのロックウェル硬さを試験したところ、試験結果からは熱影響は見られない。

4) テストピース燃焼試験（引張試験）

熱処理条件と鋼材質による降伏点、引っ張り強さ、伸びの変化を確認した。熱処理温度では、650 まではほぼ素材と同様の強度を示すが、800 以上になると水冷で降伏点、引張強さとも大きくなり、伸びについては小さくなる傾向があり、鋼材の組織変化温度は 700~800 と考えられる。燃焼時間（15, 30 分）による差はほとんどみられない。SS400, SM490Y 材とも同様の傾向を示す。

5) ビッカース硬度試験

現地採取鋼板、燃焼試験テストピース、現位置のそれぞれのビッカース硬さを比較した。現地採取鋼板の硬さは SS400 素材に比較して少し軟化がみられるが、550 加熱材より高い値を示している。現位置燃焼部の測定結果は数値にばらつきがあるが、測定器規定の板厚が不足していたのが一因と考えられる。

1-3 載荷試験結果

S-5 と S-4 において 20t 試験車を静的に載荷し、主桁及び床版に発生する変位と応力を比較することにより火災の影響を確認した。

主桁載荷試験の結果、鉛直たわみ、主桁下フランジの応力ともに S-4 と S-5 に大きな差はみられなかった。また、高欄剛性を無視した曲線桁の格子解析による計算値と比較しても顕著な差はみられなかったことから、火災による顕著な相違はないと考えられる。

床版直上に試験車を載荷した結果、鉛直たわみは S-5 の燃焼部床版パネルの方が非燃焼部より大きい。文献 2) に基づき算出した計算値（たわみ量）の 80% 程度であり、たわみ量に問題はない。

1-4 RC 床版ひび割れ深さ測定結果

S-5 の RC 床版には鋼板接着が施工されていたが、火災の影響で鋼板のほとんどが剥離しており、鋼板と RC 床版間に注入されていたエポキシ樹脂が燃焼していたと考えられる。RC 床版のひび割れに注入されていた樹脂についても熱影響が予測され、S-5 の各パネルにおいても最も大きなひび割れ幅が確認できる箇所を対象に超音波表面法によりひび割れの測定を行った。確認されたひび割れ深さは、最大で 47mm、平均で 31mm であった。このことから樹脂の燃焼の範囲はコンクリート表面から 30mm 程度であると考えられる。

1-5 調査結果のまとめと補修

火災により損傷を受けた森小路出路 S-5 について、外観調査、構成部材の物性試験、現地載荷試験により熱影響を確認した。火災の影響を受けなかった類似構造の S-4 と比較しても主桁変形にも顕著な差がなく、物性試験でも火災の影響による耐荷力低下はなかった。

そこで、主桁そのものへの火災の影響は小さく、補強の必要はないと判断し、変形の大きな横桁及び上下横構の取替、たたき点検により剥離が確認された床版補強鋼板の取替、並びに塗装塗替等の補修工事を実施した。

2．天王寺出路の被災

平成 16 年 10 月に発生した路下の火災により、天王寺出路 P-3（鋼板巻き立て RC 単柱橋脚）及びその前後の S-2（鋼箱桁）並びに S-3（鋼 1 桁）が損傷した³⁾。被災状況を写真-1 に示す。

2-1 外観調査結果

(1) RC 床版

S-2、S-3 とともに、昭和 55 年度に鋼板接着が施工されている。床版補強鋼板に火災の影響による大きな変形は見受けられなかったが、たたき点検を実施した結果、火災によって加熱された床版パネルにおいて鋼板の浮きが確認された。

(2) 鋼桁

主桁、横桁、端横桁、縦桁部に面外変形は見られなかったが、塗装塗膜は剥離・変色していた。

(3) RC 橋脚

P-3 は、平成 9 年度に鋼板巻き立て補強（無収縮モルタル充填）が施工されている。柱部の補強鋼板は部分的に変形（最大 15mm）し、それに伴う浮きが発生していた。なお、コンクリート梁部については、火災に伴うひび割れや変色等の損傷は見受けられず、さすが付着した程度であった。

(4) 付属構造物

付属構造物の損傷としては、排水管の焼失・融解、落下防止ネットの焼損等があった。

2-2 サンプル調査結果

(1) 鋼板接着 RC 床版

被害の大きかった S-2 から 3 箇所において、鋼板及び注入されたエポキシ樹脂のサンプル調査を行った。なお、3 箇所は、最も被害が大きくパネルが全面的に浮いている「第 1 パネル」、大部分は浮いているが部分的に付着している箇所がある、いわゆる中間的な被害の「第 2 パネル」、及び浮きが見られず健全と思われる「第 3 パネル」を選定した。

調査の結果、第 1 パネルについては、鋼板とエポキシ樹脂の間に 1mm 以下の間隙が見られたが、



写真-1 天王寺出路 P-3 の被災状況

第 2,3 パネルは間隙が見られなかった。いずれのパネルもエポキシ樹脂の変色はなく、コンクリートとの付着も健全であった。しかし、鋼板側の界面は熱影響を受け、剥離が生じていた。

(2) 鋼板巻き立て RC 橋脚

鋼板を 6 箇所サンプリングし、内部の注入モルタルを観察した結果、鋼板とモルタルは最大で 13mm の間隙があった。ただし、モルタル表面は欠けや劣化は見られず、比較的良好に見えた。

2-3 調査結果のまとめと補修

鋼板接着 RC 床版については、鋼板とエポキシ樹脂の界面で劣化が見受けられたが、全体としては大きなものではなかった。ここで、空隙部にエポキシ樹脂を再注入しても、劣化部分は残ったままであることから健全な付着力が回復するかどうかは不明であることから、当面は補強鋼板の塗装のみとした。

次に、鋼板巻き立て RC 橋脚については、鋼板内部の注入モルタルが比較的健全で、躯体コンクリートに付着していることから、RC 橋脚本体への被害は少ないものと考えた。また、補強鋼板は変形はしているものの放水によるところが大きいと考えられ、塗膜の劣化状況から鋼板の性能低下は微少と判断した。ただし、鋼板と躯体の一体化を図るとともに、鋼板裏面の防錆対策を目的として、モルタルと鋼板の間隙に、幅 0.05mm の微細なひび割れにも注入可能な超微粒子セメント系注入材を注入した。

3. 波除出路の被災

平成 18 年 2 月に発生した路下の火災により、波除出路 S-5 (RC 床版 2 径間連続非合成鋼箱桁) の主桁が被災損傷した⁴⁾⁵⁾。S-5 は逆台形型の箱桁橋 (図-2 参照) であり、被災範囲は主に下フランジとウェブであった。下フランジの被災状況を写真-2 に示す。

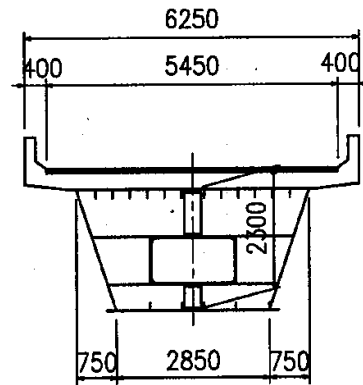


図-2 波除出路 S-5 の橋梁断面図

3-1 外観調査結果

(1) 塗膜の劣化状況と受熱温度の推定

箱桁下フランジ内側塗膜の劣化状況及び文献 6) より、受熱温度は 400 ~ 800 と推定された。この高温による鋼板の強度低下が懸念されるが、鋼種が SM50YA であり、道路橋示方書・同解説⁷⁾ (以下、道示という。) に示すガス炎加熱法によるひずみ矯正最大表面温度 900 を参考にし、強度的な問題は少ないと考えられる。

(2) 鋼材の局部変形

箱桁下フランジと縦リブに局部変形がみられたが、下フランジの常時の作用応力度は引張りであり、耐力への影響は少ないと考えられる。また、消火後の現状でこの局部変形の進行はないと考えられる。

(3) 高力ボルト

材質が S10T であり調質鋼のため強度低下が懸念されるが、熱影響を受けている高力ボルトは箱桁下フランジの縦とじ継手であり、作用応力度は極めて小さいため、耐力への影響は少ないと考えられる。

以上により、通行止めや主桁の仮受けといった緊急的応急措置は必要性は無いと判断した。

3-2 詳細調査

(1) 高力ボルトの機械試験

一般鋼材は、900 程度の熱履歴を受けても常温に戻ると、ほぼ元の機械的性質に戻るが、高力ボルトは焼き入れなどの熱処理が施されているため、焼戻し温度 (約 400 ~ 500) 以上の熱履歴を受けると降伏点や引張り強さが低下し、またボ



写真-2 波除出路 S-5 の被災状況

表-2 硬さ試験結果

	被災部 (HRC)	健全部 (HRC)	規格値
ボルト	31.7	32.0	27 ~ 38HRC
ナット	28.7	28.2	95HRB(16HRC) ~ 35HRC
座金	41.7	42.4	35 ~ 45HRC

ルト・ナット・座金の硬度も低下する⁸⁾。本試験では、被災部 (5 本) と健全部 (3 本) を実橋から取り出し、その差異を検証する。

1) ボルトの引張試験 (JIS Z 2241)

耐力・引張り強度を確認した結果、被災部と健全部でほとんど差異がなかった。

2) ボルト・ナット・座金の硬さ試験 (JIS Z 2245)

それぞれの硬さ試験結果を表-2 に示す。この結果より、被災部と健全部でほとんど差異がなかったため、継手部の受熱温度は最高でも 500 程度か、それ以上の受熱温度になったが放水と閉断

面桁桁ゆえに焼き戻しと同様状態となり、機械的性質の変化が微小であったと考えられる。

(2) 構造物の変形・損傷による耐荷力の低下

1) 主桁の変形

変形している下フランジとウェブを対象として、変形量を実測して健全性を評価した。なお、平坦度は、道示 -17.3.2 部材精度の規定値（板の平面度 w/150）を満足していれば健全と評価することとした。測定の結果、変形量は最大 15mm であり、規定値 8mm を超過していた。

2) 主桁すみ肉溶接部の非破壊試験

被災による構造物の変形に伴い主桁下フランジとウェブや縦リブとのすみ肉溶接部に割れなどの損傷が発生していないかを確認し、健全性の評価を行った。確認方法は目視試験と浸透探傷試験（PT）とし、試験箇所は損傷の可能性が高い塗膜が剥離している箇所とした。試験の結果、溶接部に損傷はなく、健全性が確保されていることが確認された。

(3) 鋼材の変質に伴う耐荷力の低下

火災による鋼材の変質は、目視試験での確認は困難である。また、実鋼材を抜き取り機械試験などにより確認することは通常困難なため、鋼材の健全性は、部材の受熱温度を推定し間接的に評価することが一般的である。しかし本橋梁は、火災による損傷が大きいと思われる箇所に下フランジの縦とじ継手があり、この連結板は主桁の母材と同一鋼種（SM50YA）であり、しかも応力的に問題も少ないことから、連結板実物の抜き取り試験を行い、鋼材の変質を確認することとした。なお試験は以下の項目について実施した。

1) 鋼材の引張試験（JIS Z 2241）

鋼材の引張試験結果を表-3 に示す。降伏点、引張強さ及び伸びともに、被災部と健全部でほとんど差異がなく、ともに SM490YA 材の JIS 規定値を満足していた。

2) シャルピー衝撃試験（JIS Z 2242）

シャルピー衝撃試験結果を表-4 に示す。被災部は健全部と比較して吸収エネルギーの低下が認められるものの、SM490YA には規格値がないこと、

表-3 鋼材引張試験結果

採取場所	試験片形状	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
被災部	JIS Z 2201 5号	404	564	34
健全部	JIS Z 2201 5号	388	550	35
規格値(SM490YA)		365以上	490 ~ 610	15以上

表-4 シャルピー衝撃試験結果

採取場所	番号	試験温度 ()	吸収エネルギー(J)	脆性破面率(%)
被災部	1	0	104	99
	2		109	100
	3		111	99
	平均値		108	99
健全部	1	0	221	99
	2		301	99
	3		228	99
	平均値		250	99
参考値(SM490YBの規格値)			27以上	-

及び参考とした SM490YB の規格値を満足していることから特に問題ないものと考えられる。

3) 硬さ試験（JIS Z 2244）

ビッカース硬度を確認したところ、被災部と健全部でほとんど差異がなく、ともに JIS 規定値を満足していた。

4) ミクロ組成観察試験（JIS G 0551）

フェライト結晶粒度を観察したところ、被災部と健全部でほとんど差異がなく、結晶粒度の変質がないことを確認した。

以上より、受熱温度の推定による間接的評価、及び機械試験による直接的評価から、被災部の鋼材は若干健全部より低下している項目はあるものの、健全性は確保されていると判断した。

(4) コンクリート床版の強度調査

箱桁張り出し部のコンクリート床版について、すずが付いた程度で剥離等の大きな損傷は目視では確認できなかったが、念のためテストハンマーによる強度試験を行った。試験の結果、すずが付いた被災部と健全部に差異はなく、被災部も設計基準強度を満足していることが確認された。

3-3 補修施工

(1) 桁矯正

箱桁下フランジとウェブの変形量が道示の規定値を満足していないため桁矯正を行うこととした。なお、鋼材の機械的性質は満足していること、波除出路を供用しながらの桁矯正であること、及び既往の補修事例⁹⁾等から、基本的に常温でジャッキにより加圧矯正を行うこととした。なお、矯正が不可能な場合は、温度管理のもと加熱矯正を併用することとし、加熱箇所は変形部付近の縦リブと補剛材位置を基本とした。

実施工では、概ね常温状態で、一部加熱矯正した箇所でもバーナーにより高々150 程度の加熱で矯正することができた。

(2) 桁矯正に伴う主桁すみ肉溶接部の照査

箱桁下フランジとウェブや縦リブとのすみ肉溶接部について、桁矯正に伴う割れなどの損傷が発生していないかを目視試験と浸透探傷試験（PT）により確認した。試験の結果、溶接部の健全性は確保されていることが確認された。

(3) 高力ボルト取替え

被災損傷部分の高力ボルトの機械的性質の変化は微小であるが、検証以外の不確定要素も考えられること、また既往被災橋梁の実例なども参考に、より一層の安全性を確保するため新規ボルトに取替えた。

(4) 塗装の塗替え

現行基準¹⁰⁾に基づき、箱桁外面は a-3 仕様、高力ボルト添接部は f-3 仕様、及び箱桁内面は c-2 仕様にて、損傷範囲の塗替えを行った。

4．火災時対応マニュアル(案)

火災により構造物が被災した場合の、火災発生から補修施工までの流れを図-3 に示す。

4-1 外観調査

橋梁が火災で被災損傷した場合、通行止めや仮受け等の応急処置が必要か否かは、外観調査のみで判断する必要がある。一方で、被災状況も火災

の規模によりその都度異なり、また損傷構造物の種別・形式もさまざまであることから、即座に対応するには高度な技術的判断が要求される。

鋼構造物の被災状況を外観調査のみで判断するには、被災鋼材の損傷が火災鎮火後も進行しているか、その部材が主要部材なのか否かを確認する必要がある。また、文献⁶⁾等を参考として塗装の損傷状況から受熱温度を推定し、鋼材の強度低下の可能性を推定することが重要である。

4-2 詳細調査

外観調査に続いて行う詳細調査は、構造物の安全性・健全性を評価する目的で行うものである。外観調査はあくまでも目視調査が主であるに対し、詳細調査では実構造物から供試体をサンプリングし、部材等の強度を定量的に把握する必要がある。

高力ボルトや調質鋼は、焼き入れ、焼き戻し処理が施されているため、一般鋼材より低い温度で強度が低下する。また、高力ボルトは比較的抜き取りが可能な部材であることから、かなりの高温になったと推定される場合には、高力ボルトの抜き取り試験を実施し、受熱温度を推定するとともに、主構成部材の損傷把握の資料とするのがよい。また、橋梁全体にわたる損傷の場合は、試験車を用いた載荷試験の実施を検討するのがよい。

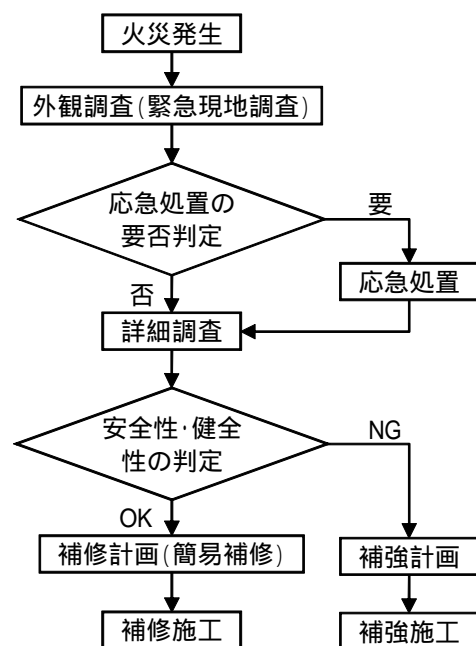


図-3 火災発生から補修施工までの流れ

おわりに

本稿は、火災により被災した橋梁に対して実施した一連の調査と補修の概要を紹介した。いずれの橋梁においても、被災状況及び補修内容を把握した上で、今後は定期的に点検を行い損傷が進行していないか確認する必要がある。

また、本稿においては、主に鋼構造物の被災事例とその対応を紹介したが、今後は、コンクリート構造物に対する対応もとりまとめ、「火災時対応マニュアル」が作成されることを期待する。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団大阪管理部：森小路出路桁・床版調査点検業務（9-森），平成 10 年 3 月
- 2) 土木学会関西支部：既存橋梁の耐荷力と耐久性，昭和 60 年 7 月
- 3) 阪神高速道路公団大阪管理部：維持工事（16-2-大管），平成 17 年 6 月
- 4) 阪神高速道路株式会社大阪管理部：波除出路原因者復旧検討等業務，平成 18 年 5 月
- 5) 阪神高速道路株式会社大阪管理部：波除出路原因者復旧工事，平成 18 年 6 月
- 6) 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)，平成 7 年 3 月
- 7) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，平成 14 年 3 月
- 8) 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 高力ボルト座金の硬さによる方法 - ，日本建築学会論文報告集，PP.32-42，昭和 56 年 12 月
- 9) 酒井利忠，三輪浩二，本間順，原田康弘，高良人：火災を受けた橋梁の健全度評価と補修，橋梁と基礎，PP.41-48，平成 15 年 4 月
- 10) 阪神高速道路株式会社：道路構造物の補修要領，第 3 部第 3 編塗装補修要領，平成 17 年 4 月

SAFETY ASSESSMENT AND RETROFIT STRATEGY OF BRIDGE STRUCTURE SUFFERED BY A FIRE

Yoshio TAMBA, Tsutomu NISHIOKA and Minobu MIYAMOTO

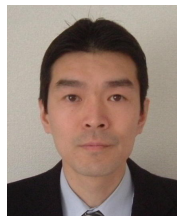
It has been reported that some bridge structures in Hanshin expressway suffered from a fire. Among them, structural damage in Morishoji, Tennoji and Namiyoke exit ramp were severe. Mainly the steel girders were suffered damage in Morishoji and Namiyoke exit ramp and steel girder and steel plate covering concrete pier for seismic retrofit in Tennoji exit ramp. This paper mentions the strategy of safety assessment of bridge structure suffered by fire and its retrofit method.

丹波 寛夫



阪神高速道路株式会社
大阪管理部 保全工事グループ
Yoshio Tamba

西岡 勉



阪神高速道路株式会社
技術部 技術開発グループ
Tsutomu Nishioka

宮本 実信



阪神高速道路株式会社
大阪管理部 保全計画グループ
Minobu Miyamoto