

火災を受けた橋梁の健全性評価に関する試験調査

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 23

担当チーム：橋梁構造研究 G

研究担当者：村越 潤，澤田 守

【要旨】

本研究は、火災により損傷を受けた橋梁を対象に、被災直後の車両通行制限やベント設置等の応急措置の必要性や、復旧段階での補修補強、部材交換の範囲・程度（場合によっては架け替え）の判断など、各段階で得られる情報に応じた適切な調査・診断方法について検討を行うものである。被災直後の緊急的な点検においては、目視調査が基本となるため、加熱温度と鋼材表面に塗装された塗膜の外観変化、鋼材やボルト接合部の強度特性変化の関係について検討を行った。火災を受けた橋梁の損傷・対策事例の情報収集分析等を行い、火災を受けた橋梁の健全性評価の方法について検討を行った。

キーワード：火災，既設橋，健全性評価，塗膜，高力ボルト，強度特性

1. はじめに

橋梁が火災により被災した事例として、最近ではタンクローリー火災により米国のオークランドベイブリッジ高架橋での落橋(2007年)¹⁾、首都高速での鋼桁の取替え(2008年)²⁾が報告されている。このほかにも橋梁が火災の影響を受けた事例³⁾はこれまで数多いが、診断のための標準的な調査方法が確立していない状況であり、個々の橋梁の被災状況を踏まえつつ、過去の損傷事例や調査研究事例を参照しながら対応しているのが実情である。

このため、本研究では、被災直後の車両通行制限やベント設置等の応急措置の必要性や、復旧段階での補修補強、部材交換の範囲・程度（場合によっては架け替え）の判断など、各段階における適切な調査・診断方法について検討を行った。

被災直後の緊急的な点検においては、目視調査が基本となるため、加熱温度と鋼材表面に塗装された塗膜の外観変化について検討するとともに、鋼材やボルト接合部の強度特性変化について検討を行った。

また、火災を受けた橋梁の損傷・対策事例の情報収集分析等を行い、火災を受けた橋梁の健全性評価の方法について検討を行った。

2. 被災した鋼材料の外観的特徴と強度特性変化の検討

2.1 検討概要

被災直後の緊急的な点検においては、目視調査が基本となる。これまでに加熱温度と塗膜の外観変化

について検討された研究として、文献4)～6)等があるが、いずれも鋼道路橋塗装便覧（平成2年）⁷⁾以前の塗装系又はこれに近い塗装系を対象としており、現在、鋼道路橋の新設時又は塗装の塗り替え時に主に用いられる鋼道路橋塗装・防食便覧（平成17年）⁸⁾に示されている塗装系に対する研究事例は少ない。

鋼橋において火災で耐力の低下が懸念される部位として、高力ボルト摩擦接合継手が挙げられる。これまでに、加熱温度と高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力の変化の関係について検討された研究として、文献9)～12)等がある。現在、鋼道路橋で使用されている高力ボルト摩擦接合継手の接合面には、無機ジンクリッチペイント（以下、無機ジンクと示す）が塗装されることが多いが、このような継手を対象としているのは、文献12)のみであり、研究事例は少ない。

また、これまでに、加熱温度と鋼材の強度特性変化について検討された研究として、文献13)等があるが、主に建築分野を対象に検討されたものであり、橋梁分野で用いられる耐候性鋼材に対する検討はされていない。

以上を踏まえ、現在、鋼道路橋において用いられることの多い塗装系を対象に、加熱温度と塗膜の外観変化の関係について検討する。また、接合面に無機ジンクを塗装した高力ボルト摩擦接合継手を対象に加熱温度とすべり耐力の変化について検討を行う。また、加熱に伴い高力ボルトの硬さに変化が生じる

火災を受けた橋梁の健全性評価に関する試験調査

表-1 試験体一覧 (ボルト継手)

試験体名称	試験温度	用途	接合面処理	添接板外面塗装系
T-RT-1	室温	引張試験用	無機ジンク	C-5
T-RT-2				Rc-I
T-RT-3				Rc-III
K-RT-0	200℃ ⇒空冷	硬さ試験用		-
T-200-1				C-5
T-200-2				Rc-I
T-200-3	300℃ ⇒空冷	引張試験用		Rc-III
K-200-0				-
T-300-1				C-5
T-300-2	350℃ ⇒空冷	引張試験用		Rc-I
T-300-3				Rc-III
K-300-0				-
T-350-1	450℃ ⇒空冷	引張試験用	C-5	
T-350-2			Rc-I	
T-350-3			Rc-III	
K-350-0	200℃ ⇒空冷	硬さ試験用	-	
T-450-1			C-5	
T-450-2			Rc-I	
T-450-3	300℃ ⇒空冷	引張試験用	Rc-III	
K-450-0			-	

ことが文献14), 15) 等で報告されている。これら文献では、ビッカース硬さ試験(室内試験)により、硬さの測定を行っているが、近年では、可搬式の硬さ計が開発されており、一般的に用いられている。火災現場での部材の加熱温度の推定方法として、塗膜の外観変化の他に、可搬式の硬さ計を火災現場に持ち込み、継手部の加熱温度を推定する方法が考えられる。このようなことから、高力ボルトの硬さについて、ビッカース硬さ試験とともに、可搬式の超音波硬さ計による計測を行い、可搬式計測機器の適用性について検討する。

さらに、加熱温度と鋼材の強度特性の関係について、これまでに報告事例がほとんどない耐候性鋼材 SMA490 と鋼道路橋で一般的に使用される溶接構造用鋼材 SM490Y を対象に検討する。また、橋梁の火災では、自動車荷重が載っていないくとも、自重によってそれなりに荷重が加わった状態で加熱されることになる。このため、これらの検討においては、死荷重によって部材に生じる応力状態を想定し、実橋火災に近い条件で試験を行うものとした。

2.2 加熱冷却による塗膜の外観変化及び高力ボルト摩擦接合継手の強度特性の変化

2.2.1 試験方法

(1) 試験概要

試験体一覧を表-1 に、試験体寸法を図-1 に示す。試験体の加熱温度は、文献12) において、すべり耐力が低下しはじめる温度が 350℃付近であることを参考に、室温、200℃、300℃、350℃、450℃の5温度とした。各試験温度について、加熱冷却後の引張試験(すべり試験)を3体、ボルト及び座金の硬さ試験を1体実施した。また、試験体の連結板表面には、鋼道路橋塗装・防食便覧⁸⁾ において新設塗装仕様のうち一般外面用として示されている「C-5系塗装」と、塗り替え塗装仕様として示されている「Rc-I系塗装」及び「Rc-III系塗装」を1体ずつ塗装し、加熱冷却後の外観変化を観察するものとした。塗装領域は、図-1 中に示す連結板の中央部の領域とし、試験体1体につき、連結板上下2枚の表面(2面)とした。接合面については全試験体に対し無機ジンクリッチペイントを塗装した。塗膜の管理値について道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編¹⁶⁾、道示Ⅱと示す)を満足することを基本とし、表-2とした。また、連結板外面塗装の仕様を表-3に示す。それぞれの塗料の塗装後には膜厚測定を行った。膜厚測定位置及び

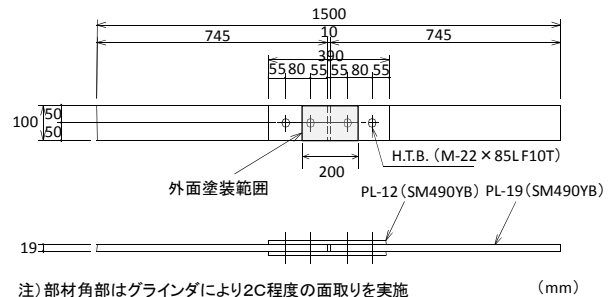


図-1 試験体寸法 (ボルト継手)

表-2 無機ジンクリッチペイントの管理値

項目	条件
素地調整	ブラスト処理 ISO Sa2.5
接触面片面あたりの最小乾燥塗膜厚	52.5 μm以上
接触面の合計乾燥塗膜厚	90~200 μm以上
乾燥塗膜中の亜鉛含有量	80%以上
亜鉛末の粒系(50%平均粒系)	10 μm程度以上

表-3 C-5系塗装の仕様(高力ボルト連結部の塗装仕様)

手順	施工内容
①	素地調整 電動工具処理 ISO St3(錆、埃、油、水分、粉化物などの異物は除去)
②	ミストコート 変性エポキシ樹脂塗料下塗 160g/m ² (スプレー)
③	下塗 超厚膜型エポキシ樹脂塗料 1100g/m ² (スプレー) 300 μ
④	中塗 ふっ素樹脂塗料用中塗 170g/m ² (スプレー) 30 μ
⑤	上塗 ふっ素樹脂塗料用上塗 140g/m ² (スプレー) 25 μ

注1) 添接板外側はブラスト処理後、無機ジンクリッチペイント 600g/m² 75 μを塗布

表-4 Rc-I系塗装の仕様 (スプレー)

手順	施工内容
①	素地調整 1種(ブラスト処理 ISO 2 1/2)
②	下塗 有機ジンクリッチペイント 600g/m ²
③	下塗 弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m ²
④	下塗 弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 240g/m ²
⑤	中塗 弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗 170g/m ²
⑥	上塗 弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用上塗 140g/m ²

注1) 有機ジンクリッチペイントは、添接板外側、ブラスト処理後4時間以内に施工
注2) 変性エポキシ樹脂塗料の塗布は、有機ジンクリッチペイント塗布後1~10日の間とする

表-5 Rc-III系塗装の仕様 (刷毛, ローラー)

手順	施工内容
①	素地調整 3種(活膜は残すが、錆、割れ、ふくれは除去)
②	下塗 弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 200g/m ²
③	下塗 弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 200g/m ²
④	下塗 弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 200g/m ²
⑤	中塗 弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗 140g/m ²
⑥	上塗 弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用上塗 120g/m ²

注1) 添接板外側はブラスト処理後、無機ジンクリッチペイント 600g/m² 75 μを塗布

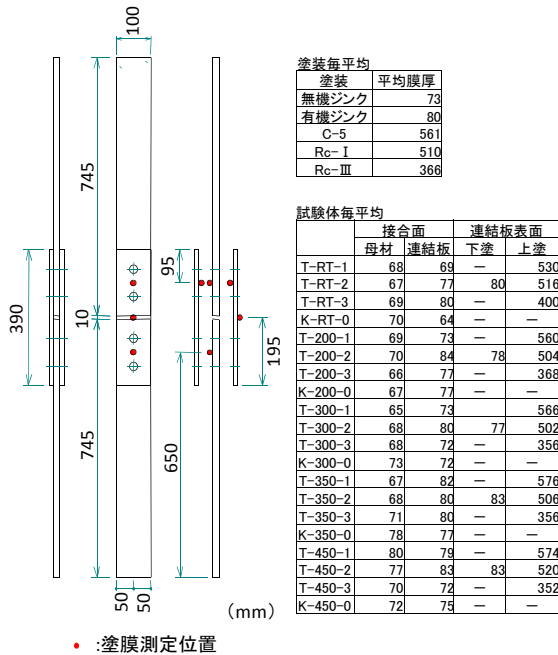


図-2 塗膜測定位置及び計測結果

塗膜厚測定結果を図-2に示す。なお、塗装から加熱試験実施までに約1ヵ月間の乾燥期間を設けた。

試験体接合部の鋼材角部は面取りを行い、試験体ごとの初期不整によるすべり耐力の影響をできるだけ排除するものとした。ボルトは、摩擦接合用高力六角ボルト（等級：F10T）を使用した。なお、用いたボルトの焼き戻し温度は、435℃であった。

(2) ボルト軸力の計測及び導入方法

試験温度が室温、300℃、450℃の硬さ試験用試験体について、ひずみゲージを貼付したボルト2本の締付けを行い、道示に規定される締付け軸力（設計ボルト軸力 205kN）を導入するために必要な締付けトルクを把握した。なお、ボルト軸力とひずみゲージ出力の関係は事前に校正試験により求めておくこととし、その際の最大軸力は 205kN とした。ボルトの締付けは、トルク管理により行い、二次締め終了後、試験体の側面にすべり確認用のけがき線を入れた。なお、試験体には、すべり側と非すべり側を設定し、非すべり側は、すべり側の 1.2 倍の軸力を導入した。

(3) 試験体の加熱冷却の方法

試験体加熱冷却時のセット状況を図-3に示す。試験体は 1000kN 構造物試験機（JFE テクノリサーチ所有）により、道示Ⅱに規定されている許容力の 50%を負荷した状態で、電気炉により均一に加熱し、所定の温度に到達してから 15 分間均熱した後、加熱

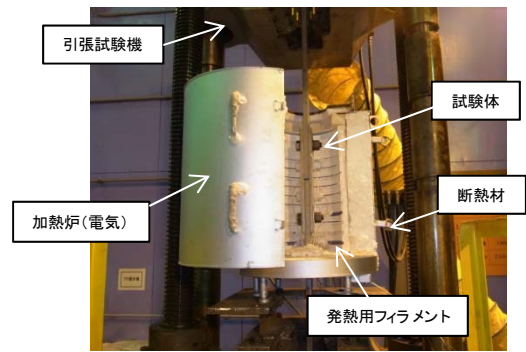


図-4 試験体加熱冷却時のセット状況

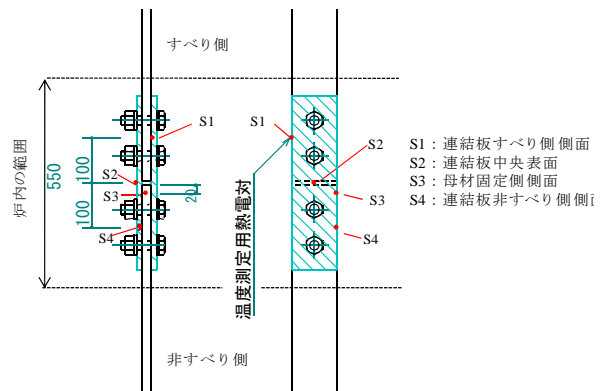


図-4 温度測定位置



図-5 硬さ測定位置（ハンドグラインダー研磨後）

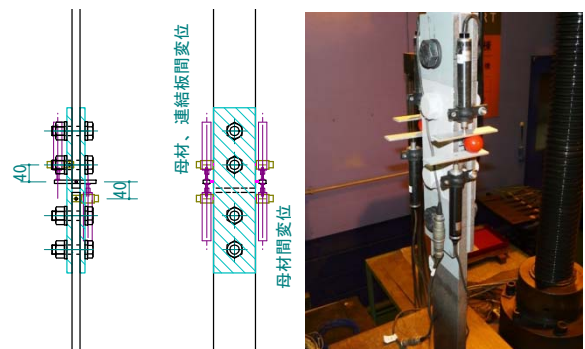


図-6 変位計位置と設置状況

を終了し電気炉を開放して自然冷却した。加熱によって、ボルトの機械的性質の変化とボルトのリラク

セーションによる軸力低下等が生じ、すべり耐力が低下することが既往の文献(17)で指摘されている。また、ボルトのリラクセーションによる軸力低下量は、厳密には加熱温度の他に加熱時間の影響を受け、同文献では、リラクセーション曲線が報告されている。ここで設定した加熱時間は、文献(17)のボルト(F10T)のリラクセーション曲線において軸力低下傾向がある程度明確にみられる加熱時間を基に設定したものである。また、荷重は、試験体の温度が70℃以下になるまで継続して負荷した。

試験体温度は線径0.65mmのK熱電対(JIS C 1602クラス2)により、図4に示す位置で計測する。昇温速度は10℃/min.以下とする。

加熱時の負荷力 P は下式による。

$$P = 0.5 \cdot n \cdot m \cdot q_a = 0.5 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 48 = 96 \text{ kN}$$

ここに、

n : ボルト本数

m : 摩擦面の数

q_a : 摩擦接合用高力ボルトの許容力 (1ボルト1摩擦面あたり)

(4) 硬さ試験

各温度の硬さ試験用試験体は、加熱冷却後分解し、ボルト頭部及び座金表面のビッカース硬さ試験(JIS Z 2244に準拠)を実施した。試験数はボルト及び座金の各々に対して3点ずつとした。また、現場での硬さ計測を想定し、可搬型の超音波硬さ計による計測も行うものとし、可搬型の超音波硬さ計による計測はボルトに対してのみ行った。また、計測前にハンドグラインダー表面研磨を行い、研磨材の粗さを、9 μ m、6 μ m、3 μ m、1 μ mの順に変えて行った。

(5) 引張試験

引張試験は、摩擦接合部にすべりが生じるまで単調に載荷した。引張速度は試験機のチャック間変位で1.0mm/min.以下とした。変位の計測方法を図5に示す。試験により得られたすべり荷重から、下式によりすべり係数を算定する。

$$\mu = P_0 / (n \cdot m \cdot N)$$

ここに、

μ : すべり係数

P_0 : すべり荷重

n : ボルト本数

m : ボルト1本あたりの摩擦面の数

N : ボルト軸力

2.2.3 試験結果

(1) 塗膜の外観変化

加熱冷却後の試験体塗装面を図7に示す。いずれの塗装についても、加熱温度200℃のものは、常温からの色変化が少なく表面にひび割れが生じる程度であり、300℃および350℃のものは塗料が燃焼途中で黒色に変化している。さらに、加熱温度が450℃になると、塗料はほぼ完全に燃焼し、表面の残留物は白色の灰状で、剥離や脱落も顕著であった。

(2) 加熱冷却時の温度及び挙動計測

加熱冷却時の計測結果のうち、試験体T-450-2の結果を図8に示す。図8(a)は、温度-時間関係を示している。試験体温度は、炉内温度よりも低めの温度となっているが、試験体の計測温度(4箇所)はほぼ同じ値となっており、均一に昇降していることがわかる。また、図8(b)は、荷重-チャック間変位関係を示している。試験体T-450-2は、昇温中に摩擦接合部にすべりを生じ、荷重が低下した。試験体T-450-2は、すべり発生後、加熱は継続しつつ荷重を所定値まで戻し、加熱冷却を継続した。加熱後、試験体のけがき線のずれを確認するとともに、接合面の観察を行い、すべり跡を確認した(図9)。T-450-2以外の試験体は、加熱時にすべりは生じなかった。試験体T-450-2は、新規ボルトに取替え、接合面については補修を想定してそのまま接合面処理を行わず、軸力については同じように導入してからすべり耐力試験を行った。

(3) すべり耐力試験結果

試験により得られたすべり荷重からすべり係数を求め、加熱温度とすべり係数の関係を整理したものを図10に示す。ここで、すべり係数算定時の軸力は締付け時の設計値である205kNとしている。図中には、室温時のすべり係数の平均値に対する各温度のすべり係数の平均値を括弧で示している。すべり係数は、350℃から若干下がり始め、450℃では室温時と比較して半分程度となり、道示の設計すべり係数0.40以下となっている。なお、外面塗装Rc-I系の試験体のすべり係数は、他に比べ低い傾向が見られた。Rc-I系の試験体は、製造過程において、ボルト締付け前に連結板表面に有機ジンクリッチペイントを塗装していること、また、下地処理として連結板両面にショットブラスト処理を施していることの2点が他の試験体と異なっており、これらが影響を及ぼした可能性が考えられる。

一方、試験体T-450-2は、加熱冷却時に接合部に















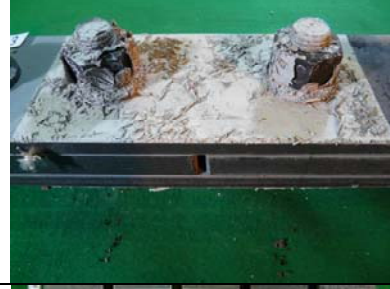



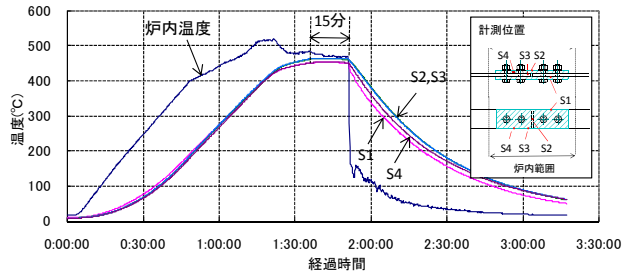
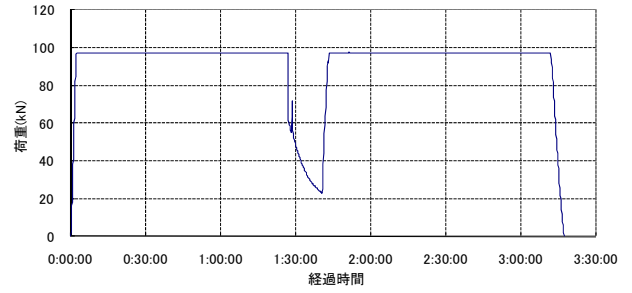
	C-5系塗装	Rc-I系塗装	Rc-III系塗装
加熱無し			
200℃			
300℃			
350℃			
450℃			
塗膜外観のまとめ			

図-7 加熱冷却後の塗膜の外観変化

火災を受けた橋梁の健全性評価に関する試験調査



(a) 加熱冷却時の温度-時間関係



(b) 加熱冷却時の荷重-チャック間変位関係

図-8 加熱冷却時の計測結果 (T-450-2)

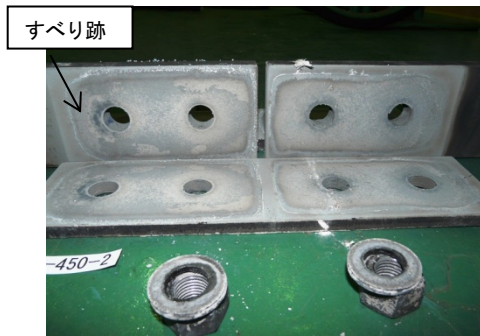


図-9 試験体 T-450-2 の加熱冷却後の接合面の状況

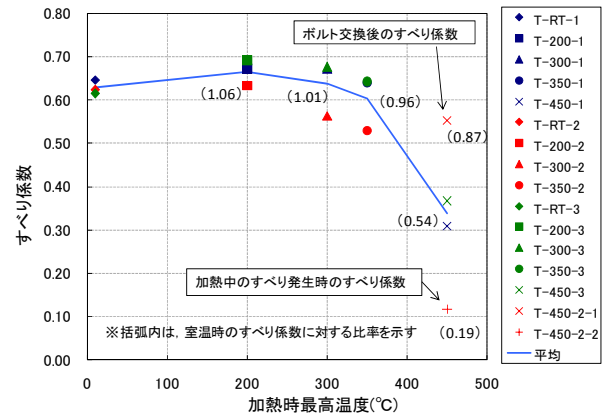


図-10 加熱冷却後のすべり係数の変化

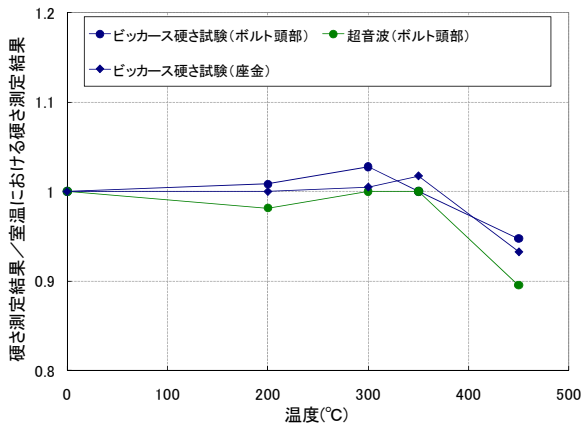


図-11 加熱冷却後の硬さの変化

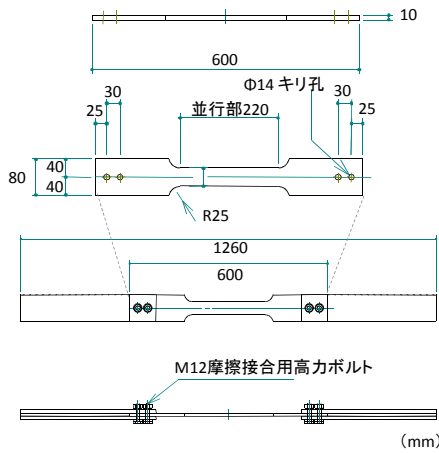
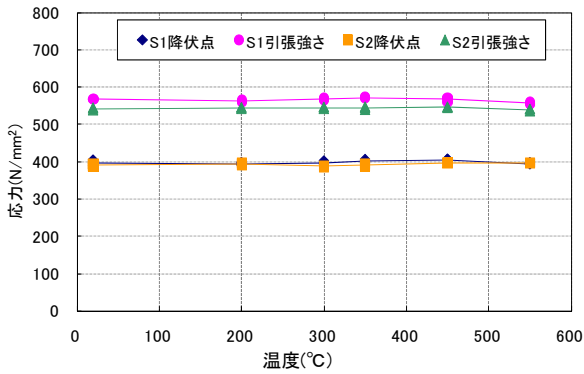


図-12 試験体の寸法形状 (鋼材)

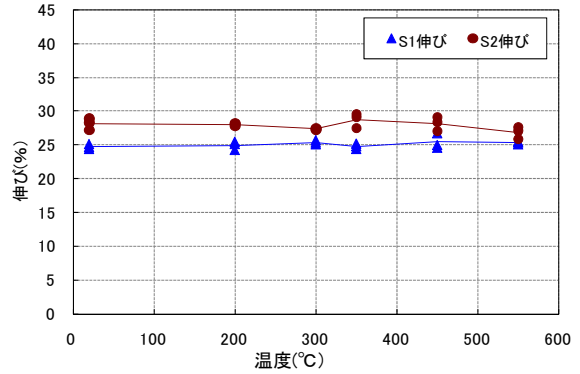
表-6 試験体一覧 (鋼材)

試験体名称	鋼材	試験温度	試験体名称	鋼材	試験温度
S1-RT-1	SM490YB	室温	S2-RT-1	SM4A90AW	室温
S1-RT-2			S2-RT-2		
S1-RT-3			S2-RT-3		
S1-200-1		200°C ⇒空冷	S2-200-1		200°C ⇒空冷
S1-200-2			S2-200-2		
S1-200-3			S2-200-3		
S1-300-1		300°C ⇒空冷	S2-300-1		300°C ⇒空冷
S1-300-2			S2-300-2		
S1-300-3			S2-300-3		
S1-350-1	350°C ⇒空冷	S2-350-1	350°C ⇒空冷		
S1-350-2		S2-350-2			
S1-350-3		S2-350-3			
S1-450-1	450°C ⇒空冷	S2-450-1	450°C ⇒空冷		
S1-450-2		S2-450-2			
S1-450-3		S2-450-3			
S1-550-1	550°C ⇒空冷	S2-550-1	550°C ⇒空冷		
S1-550-2		S2-550-2			
S1-550-3		S2-550-3			

すべりが生じたため、引張試験前に全ボルトを交換し、組立時と同様のトルクで締付けた後に、引張試験を行った。これにより試験体 T-450-2 はすべり係数の回復 (0.12→0.55) が認められたが、室温時のすべり係数と比べ 0.87 であり、約 1 割程度低い値であった。一度すべりが生じたために接合面が一部乱され、このような低下が生じているものと考えられる。

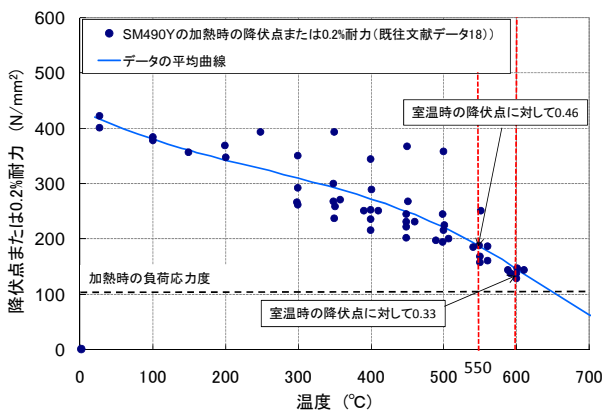


(a) 降伏点, 引張強さ

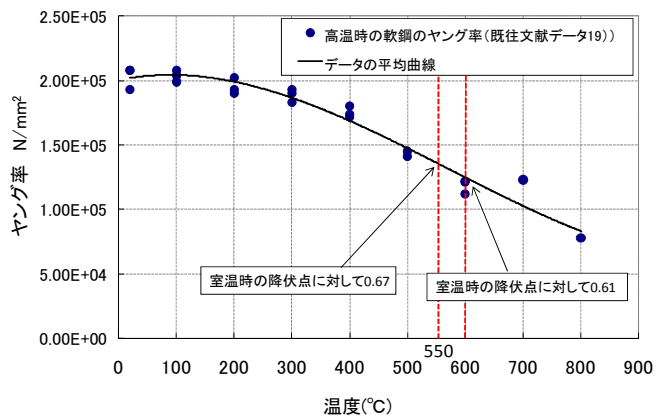


(b) 伸び

図-13 加熱冷却後の鋼材の強度特性変化



(a) 高温時の降伏点または0.2%耐力 (SM490Y)



(b) 高温時の軟鋼のヤング率

図-14 高温時の鋼材の強度特性変化

(4) 硬さ試験結果

硬さ試験の結果を加熱温度と硬さの関係として整理したものを図-11 に示す。図中の縦軸は、室温時の硬さに対する比率としている。450°C付近で若干下がり、室温時の約1割低下している。ビッカース硬さ試験と可搬式の超音波硬さ計の相対比較をすると、可搬式の硬さ計の結果も硬さの変化をとらえていることを確認した。

2.3 加熱冷却による鋼材の強度特性の変化

2.3.1 試験方法

(1) 試験概要

試験体一覧を表-6 に、試験体の寸法形状を図-12 に示す。対象鋼材は、SM490Y, SM490AW 材とした。また、試験体の加熱温度は、室温, 200°C, 300°C, 350°C, 450°C, 550°Cの6温度とした。室温以外の試験体については、加熱冷却時に道示Ⅱに規定される許容応力度の50%の応力度を生じる荷重を負荷するものとした。

試験体は JIS Z 2241 に規定される 1A 号試験片とし、電気炉で加熱するために加熱・冷却時にはつかみ治具により全長を 1260mm とする。引張試験時には、つかみ治具を取り外し、全長を 600mm とした。

(2) 試験体の加熱冷却方法

試験体は道示Ⅱに規定される許容応力度の50%に相当する 42kN の引張力を負荷した状態で、所定の温度まで加熱し、ボルト継手と同様、約 15 分間均熱した後に、電気炉を開放して空冷した。なお、荷重は試験体の温度が 70°C以下になるまで、継続的に負荷した。

(3) 引張試験

引張試験は、試験は JIS Z 2241 に準拠して試験体が破断するまで単調に載荷した。引張試験時には、変位、試験片中央部表裏に貼り付けたひずみゲージの値等を計測した。

2.3.2 試験結果

荷重負荷の状態で行ったが、全ての試

表-7 橋梁の火災事例

橋梁名	構造形式	被災年月	火災原因・概要	被災最高温度 (文献中の推定温度)
首都高速・神田橋ランプ	単純合成1桁橋	1966年1月	桁下の小屋から出火	
国領川橋梁	PC箱桁橋	1975年7月	沿線家屋からの延焼	500~600℃
東海道本線・元町高架橋	RCラーメン橋	1978年3月	高架下の店舗からの出火	
西浦和駅構内的高架橋	RCラーメン橋	1980年8月	古タイヤからの出火	1000℃以上
首都高速・汐留出入路	鋼単純合成板桁橋	1980年12月	工事中の失火	
A橋	2径間連続1桁橋	1990年11月	不法占拠者の失火	
首都高速葛西高架橋	単純1桁橋	1992年	桁下での車両事故	
首都高速・芝公園入路	単純1桁橋	1994年	桁下での不審火	
毛穴大橋	単純合成1桁橋	2004年4月	不法占拠者の失火	
B橋	PC3径間連続中空床版橋	2001年11月	工事中の事故	
新熱田橋	単純合成1桁橋	2001年12月	不法占拠者の失火	
新佐山跨線橋	単純箱桁橋	2002年4月	桁下での車両事故	100~450℃
C橋(愛知県)	2径間連続1桁橋	2004年2月	野焼きの延焼	
JR宗谷線旭川第8橋梁	3径間張出し式ラーメン橋(RC)	2004年8月	古タイヤなどからの出火	
Wiehltal橋(ドイツ)	鋼床版2主1桁橋	2004年8月	タンクローリー車の横転・炎上	1200℃
阪神高速道路16号大阪港線波除出路	2径間連続非合成箱桁(逆台形)	2006年2月	波除出路下での火災	400℃以上
守口高架橋	単純PCプレテンション桁橋	2006年12月	沿線資材置場から出火	300~600℃
大阪環状線淀川橋梁	単純式上路プレートガーダー橋	2007年2月	不明	400℃以上
オークランドベイブリッジ高架橋	連続合成板桁橋	2007年4月	タンクローリー車の横転・炎上	800℃以上
地蔵川高架橋	鋼桁橋	2008年10月	桁下(桁端部)における出火	400~600℃
首都高速5号池袋線	単純合成鋼1桁	2008年8月	タンクローリー車の横転・炎上	約1200℃
宇美川大橋	単純合成桁、3径間連続非合成桁	2010年2月	桁下の河川敷での出火	約560℃

験体で荷重は一定値を確保しており、挙動の変化は特段見られなかった。また、引張試験の結果について、図-13に示す。今回実施した550℃までの加熱条件では、降伏点、引張強さ、伸びについて、明確な変化は認められなかった。

2.4 まとめ及び考察

加熱温度と鋼材表面に塗装された塗膜の外観変化について検討した。いずれの塗装についても、加熱温度200℃のものは、常温からの色変化が少なく表面にひび割れが生じる程度であり、300℃及び350℃のものは塗料が燃焼途中で黒色に変化し、さらに、加熱温度が450℃になると、塗料はほぼ完全に燃焼し、表面の残留物は白色の灰状で、剥離や脱落も顕著であった。また、加熱温度と高力ボルトの硬さの変化についても検討を行った。硬さは、450℃まで加熱された試験体において、室温時と比べ約1割低下することが分かった。ビッカース硬さ試験と可搬型の超音波硬さ計の両方で測定を行い、可搬式の硬さ計の結果も硬さの変化をとらえていることを確認した。ここでの検討では、加熱温度と塗膜の外観変化及び硬さの変化がみられたが、実際の火災では、出火源が炭化物系である場合には、煤が塗膜に付着し、塗膜の黒色化との区別が難しい場合も想定される。このため、現場の状況等に応じて、塗膜外観調査と高力ボルトの硬さ調査の両方を行い、被災温度の推定を行うことが望ましいと考えられる。

鋼材(SM490Y, SMA490AW)については、最大550℃まで加熱した中で、強度特性の変化は特段みられなかった。一般に、鋼材の降伏点やヤング率は、

高温時に低下する。図-14に、高温時の鋼材の降伏点、ヤング率について、既往の文献データ^{18) 19)}を整理した結果を示す。結果によれば、降伏点は、550℃において、室温時の0.46倍、600℃で0.33倍に低下している。また、ヤング率は、550℃で室温時の0.67倍、600℃で0.61倍に低下している。今回実施した550℃までの加熱条件の範囲では、強度特性の変化は見られず、文献13)の無負荷状態で加熱冷却後の強度特性の結果と同様の傾向であり、加熱時の負荷条件が鋼材特性に与える影響は見られなかった。一方で、高温加熱時には、降伏点やヤング率が低下し、構造物の死荷重により変形や破断等が生じる可能性がある。このため、その程度に応じて、補修の判断が必要となるものと考えられるが、さらに、鋼部材に変形の有無や程度を目視調査する際、ここで整理した高温時の鋼材特性のデータを参考にすることで、おおよその被災温度を推定することも可能と考えられる。

3. 火災を受けた橋梁の損傷事例に関する調査

表-7に国内外の主な橋梁の火災事例を示す。本橋は文献³⁾を参考に、その他に文献調査を行い一部追加したものである。また、表中には、各橋梁の火災による損傷や調査・診断・補修について報告されている文献を基に、被災最高温度火災(推定)についても記載している。タンクローリー車の横転による大規模な火災の場合には、被災温度は1000℃を超える場合もあるが、多くは、桁下での不法占拠者の失火や、車両事故等によるものであり、事例数が少な

火災を受けた橋梁の健全性評価に関する試験調査

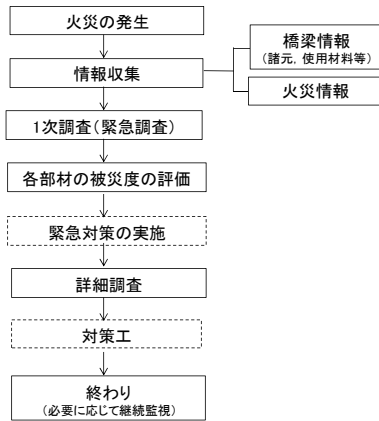


図-15 健全性評価のフロー

い中ではあるが、被災温度については600℃以下のケースのほうが割合としては多い。

4. 火災を受けた橋梁の健全性評価方法の検討

2章で述べた検討結果と、3章で述べた火災を受けた橋梁に対する健全性評価に係る文献等を参考に、火災を受けた橋梁の健全性評価の方法について検討を行った。ここでは、健全性評価の主たる部分について記載する。

図-15に健全性評価のフローを示す。基本的に調査は、火災発生直後の調査(1次調査)と、その後の詳細調査・診断に分けられる。

被災直後の1次調査は、火災の規模や火災による損傷について橋梁構造の安全性の観点から緊急対応の必要性を評価するものである。また、1次調査の方法としては外観目視や適宜変形計測等による調査が考えられ、以下の項目について調査を行う。

- 1) 主桁、横桁、床組、支承部等の変形、亀裂、破断の有無
- 2) 舗装、高欄、伸縮装置等の損傷の有無
- 3) 塗膜外観
- 4) RC床版の爆裂、剥離等の有無(必要に応じて、叩き調査、シュミットハンマーでコンクリートによる強度推定)
- 5) 鋼部材接合部について、溶接部の亀裂等の有無、ボルト接合部の連結部材間のずれ、ボルトの抜け落ち等の有無(必要に応じて、可搬式硬さ計測機器を用いた硬さの変化の調査)

また、これらの調査結果を基に、各部材の被災度評価を行う。

A(大被害): 耐力に著しい影響のある損傷が生じている。

被災温度(℃)	塗装外観		高力ボルトの硬さ(ボルト頭部)	高力ボルトの軸力 ¹⁾	加熱冷却後の高力ボルト継手のすべり耐力	被災度の目安
	塗料(主にC-5系、Re-I、Re-III)	亜鉛メッキ ²⁾				
1000						
900						
800						
600	塗膜の白色化又は塗膜の剥離又は消失	溶融又は消失	硬さの低下	ボルト軸力の低下	すべり耐力の低下、又は、すべりの発生	A又はB
500						
400						
300	塗膜の黒色化(炭化)	剥離	硬さの低下開始	ボルト軸力低下の開始	すべり耐力低下の開始	B又はC
200						
100						
0						D

図-16 ボルト接合部の調査項目と被災度の目安

被災温度(℃)	塗装外観		変形 ^{注1)}	破断・き裂 ^{注2)}	加熱冷却後の鋼材の強度特性		被災度の目安
	塗料(主にC-5系、Re-I、Re-III)	亜鉛メッキ ²⁾			調質鋼(SM570 ¹³⁾)	非調質鋼(SS400、SM490、SM530、SM490Y、SMA400、SMA490 ¹³⁾)	
1000							
900							
800	塗膜の白色化又は塗膜の剥離又は消失	溶融又は消失	主桁の変形の可能性あり	破断・き裂の可能性あり	強度の低下	強度の若干の低下	A(調質鋼)
700							
600					強度低下の開始		B(調質鋼) C(非調質鋼)
500							
400	塗膜の黒色化(炭化)	剥離					D(調質鋼、非調質鋼)
300							
200							
100							
0							

注1) 主桁の変形の可能性のある温度は、ヤング率が室温時に對して(1/1.7)となる温度を図-14(b)から求め概略推定したものである。
注2) 破断・き裂の可能性のある温度は、図-14(a)から許容応力度の半分の荷重が作用した際に鋼材が降伏する温度を求め概略推定したものである。

図-17 鋼部材の調査項目と被災度の目安

被災温度(℃)	外観 ^{注1)}	ひび割れ ²⁾	剥離状況 ²⁾	中性化 ²⁾	加熱冷却後のコンクリートの圧縮強度 ²⁾	加熱冷却後のコンクリートのヤング率 ²⁾	被災度の目安
900							
800							
700	灰白色	数mm幅	浮き・剥離大(損傷が鉄筋位置に及ぶ)		強度の低下	ヤング率の低下	A又はB
600							
500				中性化の発生			
400	ピンク色	微細	浮き・剥離小(損傷が鉄筋位置に及ばず)				
300					強度低下の開始	強度低下の開始	B又はC
200							
100	黒(すす付着)	微細又は浮き割れ	損傷なし				
0							D

注) 図中のコンクリートの圧縮強度及びヤング率は、全体が均熱された場合の結果のため、表面のみ加熱された場合は必ずしも一致しない。

図-18 鉄筋コンクリート床版の調査項目と被災度の目安

B(中被害): 耐力に影響のある損傷である。

C(小被害): 損傷はあるが、耐力の低下に影響は少ない。

D(被害なし): 耐力に関して特に異常が認められない。

火災を受けた鋼道路橋の健全性評価マニュアル(案) 目次案	
1章 総則	2.4.3 受熱温度の推定
1.1 適用の範囲	2.5 各部材の被災度評価
1.2 目的	
1.3 本マニュアル(案)の流れ	3章 詳細調査
	3.1 目的
2章 被災直後の調査(1次調査)	3.2 詳細調査
2.1 目的	3.2.1 一般
2.3 情報収集	3.2.2 資料調査
2.3.1 資料調査	3.3 各部材の健全性の評価
2.3.2 火災情報の収集	
2.4 1次調査	4章 追跡調査
2.4.1 一般	4.1 追跡調査の必要性
2.4.2 調査項目及び方法	4.2 調査項目及び方法
参考資料 1 鋼部材の加熱冷却後の強度特性と塗膜の外観変化	
2 応急対策及び対策工の事例	

図-19 火災を受けた鋼道路橋の健全性評価マニュアル(案)の目次

また、評価区分の目安について、高力ボルト継手は図-16に、鋼材は図-17に、鉄筋コンクリート床版は図-18に示す。なお、ここでは、詳細調査については省略する。

火災を受けた橋梁の健全性評価のマニュアル(案)の目次案を図-19に示す。マニュアルの主要な内容については、前述の通りである。橋梁構造や使用材料によっては、適宜、個別の検討が必要となる場合もあるが、火災による橋損傷時の参考になるものと考えられる。

5. まとめ

火災によって損傷した鋼橋の健全性評価のための基礎データ取得を目的として各種の試験を行った。

これまでに検討事例のない、鋼道路橋塗装・防食便覧(平成17年)⁸⁾に示されている塗装系を対象に、加熱温度と鋼材表面に塗装された塗膜の外観変化について検討した。いずれの塗装についても、加熱温度200℃のものは、常温からの色変化が少なく表面にひび割れが生じる程度であり、300℃および350℃のものは塗料が燃焼途中で黒色に変化し、さらに、加熱温度が450℃になると、塗料はほぼ完全に燃焼し、表面の残留物は白色の灰状で、剥離や脱落も顕著であった。

また、鋼橋において火災により耐力の低下が懸念される高力ボルト摩擦接合継手を対象に、加熱温度とすべり耐力の変化について検討を行った。すべり係数は、350℃から若干下がり始め、450℃では室温時と比較して半分程度となり、道示の設計すべり係

数0.40以下となった。また、加熱温度と高力ボルトの硬さの変化について、ビッカース硬さ試験とともに、現場での調査を想定して、可搬式の超音波硬さ計による計測を行い両者の結果を比較した。硬さは、450℃まで加熱された試験体において、室温時と比べ約1割低下し、可搬式の硬さ計の結果も硬さの変化をとらえていることを確認した。

さらに、これまでに報告事例がほとんどない耐候性鋼材SMA490と鋼道路橋で一般的に使用される溶接構造用鋼材SM490Yを対象に、加熱温度と鋼材の強度特性変化の関係について検討した。SM490Y、SMA490AWとともに、最大550℃まで加熱した中で、強度特性の変化は特段みられなかった。文献¹³⁾では、SM490Yに対し、無負荷状態で加熱冷却後の強度特性の結果を報告しているが、死荷重相当の荷重を負荷した状態で加熱冷却を行った今回の試験結果と同様の傾向であった。

上述の検討結果と、橋梁の火災による被災調査対応事例及び材料・部材等の特性変化に係る既往の研究を参考に、外観変状等による調査項目、受熱温度の推定、構造安全性への影響の判定の目安をとりまとめ、健全性の調査・評価手法の骨子案を作成した。

参考文献

- 1) 藤野陽三, 阿部雅人: 米国での高架橋火災の復旧対応, 高速道路と自動車, 第52巻, 第4号, pp.33-36, 2009.4.
- 2) 桑野忠生, 増井隆, 鈴木寛久, 依田勝雄: 首都高速5号池袋線タンクローリー火災事故の復旧工事 - 首都高史上最大規模の構造物損傷を73日間で復旧 -, 土木学会誌, Vol.93, No.12, pp.30-33, 2008.12.
- 3) 例えば, 大山理, 今川雄亮, 栗田章光: 火災による橋梁の損傷事例, 橋梁と基礎, Vol.42, No.10, pp.35-39, 2008.10.
- 4) 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) 中山太士, 吉田雅彦, 大都亮, 松本健太郎, 松井繁之: 火災を受けた鋼鉄道橋の受熱温度推定, 土木学会第63回年次学術講演会概要集, 4-157, 2008.9.
- 7) (社)日本道路協会: 鋼道路橋塗装便覧, 1990.6.
- 8) (社)日本道路協会: 鋼道路橋塗装・防食便覧,

2005.12.

- 9) 斉藤光, 前川修二, 安藤三郎: ボルト接合継手の耐火性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.891-892, 1968.10.
- 10) 北後寿, 木村栄一, 松下一郎: 高力ボルト摩擦接合工法の耐火性能に関する実験(その1)(その2), 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.893-896, 1968.10.
- 11) 高温加熱を受けた高力ボルト摩擦接合部の性状について, 日本建築学会構造系論文集, 第 252号, pp.45-56, 1977.2.
- 12) 阿部武雄, 古村福次郎, 金和中: ジンクリッチペイント塗装摩擦面を有する高力ボルト接合部のすべり耐力に及ぼす高温熱影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 530号, pp.199-206, 2000.4.
- 13) 日本鋼構造協会技術委員会耐久性分科会耐火性小委員会高温強度班: 構造用鋼材の高温時ならびに加熱後の機械的性質, JSSC, Vol.4, NO.33, 1968.
- 14) 脇山広三, 巽昭夫: 火災を受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, 第 310号, pp.32-42, 1981.12.
- 15) 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, 1991.1.
- 16) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 2002.3.
- 17) 脇山広三, 巽昭夫, 園田学: 熱履歴後の高力ボルト残留軸力低下に関する一考察(その2), 日本建築学会学術講演概要集 pp.1245-1246, 1978.9.
- 18) 日本鉄鋼協会: データシートシリーズ: 高温引張試験, 第 3 巻, 1973.
- 19) (社)日本建築学会: 建造物の耐火性ガイドブック 2009, 2009.3.
- 20) 是松晃男, 池田武志, 山口栄輝, 牧角龍憲, 亀尾順一郎, 林裕也: 火災を受けた鋼桁橋の損傷調査と強度評価, 橋梁と基礎, pp.50-55, 2011.10.
- 21) 三方康弘, 志村敦, 本間英世, 井上晋: 火災を受けたコンクリート橋における健全性の評価手法, 橋梁と基礎, pp.32-37, 2012.1.
- 22) (社)日本建築学会: 建物の火害診断および補修・補強方法指針(案)・同解説, 2010.2.

STUDY ON EVALUATION OF BRIDGE DAMAGED BY FIRE

Budget: Grants for operating expenses

General account

Research Period: FY2009-2011

Research Team: Bridge and Structural Technology

Research Group

Author: Jun MURAKOSHI

Mamoru SAWADA

Abstract: Recently, the replacement of steel girder damaged by fire was reported in the urban expressways. There are many cases that bridges were affected by the fire till now, but the investigation method against fire had not been established. The aim of the study is to propose the guideline for soundness assessments of bridges damaged by fire. In this study, the slip-resistance tests for high-strength bolted connections and the tensile material test for SM490Y and SMA490 steel under high temperature were carried out to find the influence of heating condition on the slip coefficients and the mechanical property. Also, investigation was carried out about a change of the paint film by the heat. Additionally, literature reviews on reports of soundness assessments of fire damaged bridges were conducted.

Key word: fire, existing bridge, evaluation, paint film, high-strength bolted connection, mechanical property