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

Inspection and evaluation of bridge damaged by fire for full recovery

(株)構研エンジニアリング 〇正	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 建設局土木部工事課		鈴木	雅之 (Masayuki Suzuki)

1. 火災および損傷の概要

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,およ び図-1に火災状況の概要を示す.火災は第3径間の吊 足場R側で発生し,L側及び第4径間の一部の吊足場ま で延焼した.その後,消防隊の放水により鎮火した.

火災により,図-2 に示す箇所に損傷が生じた.足場 板が焼失したほか,写真-1 に示す主桁腹板や下フラン ジ等の変形,床版コンクリートへの煤の付着,写真-2 に示す A-2 橋台の可動支承部におけるソールプレート突 起の破断が発生した.

本橋は終点側の住宅街と市街地を結ぶ数少ない幹線道路の一部を構成しており,住民の交通路確保のため早急な復旧を行う必要があった.このため,火災発生の翌日より近接目視点検を行い,更に20tダンプトラック4台を用いた載荷試験を実施することで当面の構造安全性を確認し,火災発生の3週間後には幅員規制および監視を併用した暫定供用を開始した.

一方で、長時間の火災により橋体の受熱が推定された ことから、恒久復旧工法の検討を行うためには、まず鋼 材や床版コンクリートの損傷の状態を明らかにする必要 があった.このため、鋼材及び床版コンクリートに対す る詳細調査を実施し、健全度評価を行った.

表-1 			
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		
橋体材料	SM53B, SM50YB, SM41YB 等		
床版材料	鉄筋コンクリート σck=24 [N/mm ²]		
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) 橋長 107.0 [単位:m] 02 析長 106.6 02 05 26.5 26.5 26.5 05 3.00%			









写真-1 主桁腹板及び下フランジ変形状況(第3径間)



写真-2 支承部ソールプレート突起の破断(A-2橋台)

2. 損傷詳細調査

2.1 損傷詳細調査項目の概要

本橋は火災により受熱していること、また消火活動に よる放水で急冷を受けていることから、鋼材組織の変態 による強度低下が懸念された.このため、鋼材強度の確 認を目的としてビッカース硬さ試験を実施した.また、 換算強度を求めるビッカース硬さ試験を補完することを 目的として、小片試験片を用いた鋼材引張試験を実施し た.併せて、急冷による鋼材組織の変態を確認するため、 スンプ試験を実施した.これら試験の詳細を2.2から2.4 に示す.また、主桁の構造安全性を評価するため、2.5 に示す主桁溶接部の磁粉探傷試験を実施した.更に、受 熱による主桁等の変形状況を把握するため、2.6 に示す 3D レーザスキャンを実施した.

一方,床版コンクリートも受熱による強度低下が懸念 されたため,強度及び材質を確認するためコンクリート 物性試験を実施した.物性試験の詳細は2.7に示す.

2.2 ビッカース硬さ試験

鋼材の機械的性質を把握するためには、一般的に実橋 から供試体を切り出す必要がある.しかし、供試体の寸 法は JIS Z2241に規定される寸法¹⁾を考慮すると、40× 300mm 程度の鋼材の採取が必要になるため、主桁から の供試体の採取は困難であった.このため、母材への影 響を最小限に抑えた上で機械的性質を把握することを目 的として、ビッカース硬さ試験を行った.試験箇所は、 火元で受熱の影響が大きいと推定される第3径間の各主 桁及び受熱の影響がない第2径間の1箇所で実施した.

表-2 に、ビッカース硬さ試験結果を示す.本試験で 得られた鋼材の換算強度は 514~640N/mm² となり、使 用鋼材の引張強度を概ね満足する結果となった.なお、 主桁の使用材質は竣工図で「SM50Y or SM53B」と表記 され板厚により使い分けられているとも推察できるが ²⁾、特定は困難である.このため、両鋼材の最小の引張 強度である 490N/mm²の確保を確認することで評価を OK とした.

2.3 小片試験片を用いた鋼材引張試験

鋼材の強度を把握するためには,試験片を用いた引張 試験が最も直接的で信頼性が高い.一方で,2.2 に示す ように主桁から供試体を切り出すことは困難である.ま た,ビッカース硬さ試験で求めた引張強度は,硬度から 換算した間接的な値である.このため,橋体への負担が 小さい小片試験片を用いた鋼材引張試験³⁾を実施し, ビッカース硬さ試験を補完することで鋼材の引張強度を 信頼性高く把握することを試みた.試験片はビッカース 硬さ試験と同様の箇所で2箇所(G1桁,G4桁)採取し た.写真-3に,試験片の採取状況を示す.試験片の採 取箇所は,母材の強度低下や防錆を考慮して高力ボルト で封孔した.

表-3 に、本試験で得られた鋼材引張試験結果とビッ カース硬さ試験で得られた引張強度の比較を示す.小片 試験片を用いた鋼材引張試験では、ビッカース硬さ試験 結果と同程度以上の引張強度を確認した.小片試験片を

表-2 ビッカース硬さ試験結果

調査	郭位	換算強度	引張強度 (使用材質)	証価
箇所	고리리	[N/mm ²]	[N/mm ²]	рт шц
G1	上フランジ	578		OK
主桁	腹板(上)	538		OK
	腹板(中)	528		OK
	腹板(下)	560		OK
	下フランジ	514		OK
G2	上フランジ	608		OK
主桁	腹板(上)	615		OK
	腹板(中)	640		OK
	腹板(下)	633	530~650 (SM53B)	OK
	下フランジ	615	または 490~610 (SM50Y) ※竣工図には	OK
G3	上フランジ	595		OK
主桁	腹板(上)	646		OK
	腹板 (中)	600		OK
	腹板(下)	574	「514501 01 51455日」	OK
	下フランジ	593	特定け困難	OK
G4	上フランジ	581		OK
主桁	腹板(上)	623		OK
	腹板 (中)	590		OK
	腹板(下)	598		OK
	下フランジ	640		OK
健全部	上フランジ	593		OK
	腹板(中)	590		OK
	下フランジ	619		OK



表-3 各試験による引張強度の比較

調査 箇所	部位	小片試験片 引張強度(A) [N/mm ²]	ビッカース 換算強度(B) [N/mm ²]	A/B
G1 主桁	腹板(中)	591	528	1.119
G4 主桁	腹板(中)	607	590	1.029

用いた鋼材引張試験とビッカース硬さ試験の結果は近似 していること,またビッカース硬さ試験の結果はやや小 さな値となることから,ビッカース硬さ試験で求めた換 算強度を用いた健全性の評価に問題ないと考えられる.

2.4 スンプ試験

火災により鋼材が受熱すると、受熱温度によっては金 属組織の変態が生じる可能性がある⁴⁾. 金属組織が変 態すると強度が変化する他, 脆性破壊への抵抗性が変化 する. 一方でサンプルを採取し金属組織を直接観察する ことは困難であるため, 間接的に金属組織を観察できる スンプ試験を実施した. スンプ試験は, 鋼材表面を研磨 し鏡面仕上げを行った後, 腐食液(塩酸, 酢酸メチル等) で腐食させることで表面に凹凸を作り、その凹凸をレプ リカフィルムに転写し透過型光学顕微鏡で観察すること で金属組織の変化を確認する試験である.スンプ試験は、 ビッカース硬さ試験と同箇所で実施した.なお、小片を コア削孔等で切り出し金属組織を観察することも可能で はあるが、切り出し時に熱影響を受ける懸念があったた め、本試験を採用している.

図-3 に、スンプ試験で得られた鋼材組織の転写像を 示す.鋼材の一般的な組織である初析フェライトとパー ライトを呈しており、炭化物の分散や金属組織の粗大化 等の異常は認められなかった.また、予備的に 2.3 で切 り出した小片試験片の組織界面を電界放出型電子顕微鏡

(SEM) で確認したところ,同様に受熱による変態は 認められなかった.このため,金属組織を変態するよう な受熱はなかったと推定される.

2.5 磁粉探傷試験

本橋は受熱の影響で写真-1のように腹板の面外変形 が生じており、付近の溶接部では通常と異なる方向の応 力を受けたと考えられる.このため、磁粉探傷試験 (MT)を用いた溶接部の亀裂の有無を確認した.

磁粉探傷試験の結果,火災を原因とした溶接部の亀裂 は確認されなかった.

2. 63D レーザスキャン

主桁の各部材の面外変形は第3径間を中心に広範囲に 発生した.また出火源から離れたA2支承のソールプレ ート突起に主桁の熱膨張に伴う破断が生じたことから, 火災の影響は広範囲にわたると考えられた.恒久復旧に 向けては橋梁全体の変形状況の把握が必要である一方, 計測対象範囲が大きく振り子等による目視計測は時間を 要し,更に変形の見逃しの懸念があるため,作業性や確 実性を考慮して3Dレーザスキャンを行った.計測には 長距離計測に対応し作業性の高い Scan Station P50 (Leica 社)を使用した.

図-4 に 3D レーザスキャンによる主桁腹板の形状計 測結果の一例を示す. 黄色または水色に示す範囲は, 腹 板の基準面から逸脱している範囲を示しており, 腹板で は最大で 31.0mm の面外変形が確認された. また, 一部 の対傾構および横構に変形が生じていることを確認した.

2.7 床版コンクリート物性試験

床版コンクリートの受熱による影響を把握するため, 表-4 に示すコンクリート物性試験を行った. コンクリ ートが加熱されると骨材の膨張,セメント水和物の収縮 によって生じる応力によってコンクリート内部に微細な ひび割れが生じ,コンクリートの力学特性が低下する ⁵⁾.このため,圧縮強度,静弾性係数に関する試験を行 った.また,高温の受熱によりコンクリート中のアルカ リ分である水酸化カルシウムが熱分解すると,中性化が 促進される.このとき床版の耐久性能に影響を与えるた め,中性化試験を行った.

図-5 に圧縮強度試験結果を示す.全ての調査箇所で 設計基準強度(*o*ck=24N/mm²)を上回る圧縮強度が確認



図-3 スンプ試験による転写像(400倍画像)



表-4	コンク	IJ —	ト物性試験項目	
1X T	- v /	/	1 12711.111000八1只日	

試験項目	供試体採取位置	
圧縮強度試験	第3径間:C-1(L側張出部),	
静弹性試験	C-2(G1~G2間), C-3(G2~G3間)	
中性化試験	C-4(G3~G4間), C-5(R側張出部)	
	第4径間:C-6(G2~G3間)	



された.健全部の圧縮強度(50.7N/mm²)と受熱部の圧 縮強度を比較すると C-5 供試体で約 40%強度が小さい. 一方,過年度調査と受熱部の圧縮強度を比較すると,受 熱部の圧縮強度が過年度調査を上回る.よって,受熱部 の圧縮強度が火災により低下したとは断言できない.

また,図-6 に,静弾性係数試験結果を示す.床版張 出し部となる C-1 及び C-5 供試体では,実構造物におけ る標準的な静弾性係数 E_cの範囲⁶の値となり,健全と 判断できる.一方,床版支間部となる C-2, C-3 及び C-4 供試体では,同範囲の下限を下回る値となった.火災 による受熱の影響とも考えられるが,床版支間部は車道 直下で損傷が進行しやすいことや,圧縮強度が比較的良 好な値であることから,静弾性係数の低下は床版コンク リートの経年劣化によるものと推察する.

次に,図-7 に中性化深さ試験結果を示す.受熱部の 中性化深さの平均は15.2mm であり,火災前のH29 年度 に実施した調査の平均は23.4mm であった.受熱部の中 性化深さは火災前と比較して小さく,受熱の影響による 中性化深さの増加は小さいものと考えられる.

3. 健全度評価

3.1 鋼材に関する健全度評価

損傷詳細調査で得られた結果を表-5 にまとめる. 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 損傷は確認されなかったため,材質は健全であると判断 した.一方,主桁の腹板に最大 31.0mm の面外変形を確 認した.本橋の製作時は腹板の平坦度に関する規定が無 かったため今回の火災による面外変形とは断定できない が,腹板の面外変形が h/100[mm](h:腹板高)を超えると 主桁座屈耐荷力が低下するという報告もある^{¬)}.このた め,本橋では 1400/100=14mm を超える面外変形に対し て腹板の矯正を含めた恒久復旧工法の検討を行うととも に,載荷試験で橋の耐荷性能を確認することを提案した.

3.2 床版コンクリートに関する健全度評価

表-5 に示すように、床版コンクリートの圧縮強度、 静弾性係数、中性化深さに受熱に起因すると認められる 損傷は確認されなかった.このため、床版コンクリート は供用に問題ないものと判断した.

4. まとめ

本稿では、火災を受けた鋼橋の受熱の影響を明らかに するために実施した詳細調査および健全度評価結果を示 した.本橋では受熱による材質や強度の変化は認められ ず、鋼材の変形が主な損傷であることが明らかとなった. これらの結果および別に実施した載荷試験結果を受け、 本橋では変形した部材の補修を実施し、恒久復旧した.

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) 日本工業規格: JIS Z2241:2011, 2011.
- 2) 白戸真大,河野晴彦,大西諒,高山文郷,鈴木克弥



d [mm]



表-5 損傷詳細調査結果一覧

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

: 塑性変形した鋼橋の部材矯正に用いる熱間加工に 関する研究,国土技術政策総合研究所資料 No.1108, p.20, 2020.

- 3) 土木学会:火災を受けた鋼橋の診断補修ガイドライン,鋼構造シリーズ24, pp.48-49, 2015.
- 廣畑幹人,根津海都,中山太士,松井繁之:火災を 想定した加熱冷却履歴が経年橋梁鋼材の機械的性質 に及ぼす影響:鋼構造論文集,第24巻第95号, pp.49-57,2017.
- 5) 日本コンクリート工学会:コンクリート診断技 術'19[基礎編], pp.57-61, 2019.
- 中村充,仲野孝洋,大住圭太:熱影響を受けた鋼桁の座屈耐荷力評価,土木学会第70回年次学術講演 会,I-614,2015.