# 火災を受けた鋼橋部材の健全性評価手法の構築

大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 准教授 廣畑幹人

1. はじめに

近年,国内外において橋梁の火災事例が報告されている<sup>1-3)</sup>.火災の原因によらず,損傷の程度によっては被災した橋梁の供用が長期的に停止されることになるため,橋梁が火災により損傷した場合,迅速に 供用再開することが重要である.

火災による損傷を受けた橋梁の供用再開を迅速かつ安全に行うため、2015 年に土木学会から「火災を 受けた鋼橋の補修診断ガイドライン」<sup>4)</sup>が発行された.このガイドラインによると、鋼橋の場合、目視に よる被災度判定,塗膜の外観などから部材の受熱温度の推定を行い、詳細調査を必要とせず供用再開可能 と判断する受熱温度の基準を 400 ℃と定めている.受熱温度が 400 ℃を超えている場合、あるいは 400 ℃未満であっても、鋼材の板厚が薄い場合は部材の変形が生じる可能性があるため、供用を停止し詳 細調査が必要となることがある.詳細調査において、被災した鋼部材の耐荷性能を評価するうえで、鋼材 の機械的性質が評価指標の一つとなる.一方、機械的性質の他の因子として、熱変形、残留応力の変化が 挙げられるが、これらの因子が部材の耐荷性能に及ぼす影響については不明な点が多いのが現状である.

本研究では、火災加熱による鋼材の機械的性質、熱変形および残留応力の変化が鋼橋部材の耐荷性能に 及ぼす影響を明らかにするとともに、火災を受けた鋼橋部材の健全性評価手法を構築することを目的に、 一連の検討を実施した.鋼橋の火災において、河川敷における出火や不法投棄物からの失火などの原因に より桁端部が損傷する事例が多く報告されている.鋼桁(プレートガーダー)の端部はウェブと支点上補 剛材 2 枚で構成される十字断面柱として鉛直圧縮荷重に抵抗するように設計されている<sup>5</sup>.死活荷重に対 して支点反力が作用する構造部位である桁端部を想定した十字断面柱を対象に、加熱実験および圧縮実験 を実施した.

#### 2. 加熱実験

2.1 実験供試体および実験方法

本研究で使用した供試体を図-1 に示す. プレートガーダーの端部におけるフランジ,ウェブ,補剛材 の交差部を想定したものであり,形状および寸法は道路橋示方書に規定される種々の項目を満足するよう に設定した<sup>5</sup>. フランジ,ウェブおよび補剛材の鋼種は全て SM400B であり,溶接材料(ワイヤ)は JIS YGW12 を用いた.各部材に用いた材料の化学組成および機械的性質(ミルシート値)を表-1 に示す.

加熱しないもの2体(健全供試体と称す),後述の方法で600℃まで加熱するもの1体(600℃加熱供 試体と称す),900℃まで加熱するもの1体(900℃加熱供試体と称す)を作製した.

鋼桁端部の支点近傍が加熱を受ける状態の火災を模擬するため,電気抵抗ヒーター<sup>0</sup>を用いて供試体の 高さ 1/4 程度の領域を無拘束状態で加熱した.その後,消火活動を想定し,供試体下部を常温の水を満た した容器に浸漬させることで冷却した.ヒーターの設置方法および実験状況を図-2 に示す.加熱温度は, 鋼橋の各種火災事例において鋼部材の受熱温度の上限として報告が多い 600 ℃と,大規模火災の場合の 鋼部材の受熱温度を想定した 900 ℃とした <sup>1-3</sup>.これらはそれぞれ,鋼材の組織変化が生じる A<sub>1</sub> 変態温 度(約 727 ℃)よりも低い温度および高い温度という意味も有している.加熱領域が目標温度に達して いることを確認するため,供試体に熱電対を取り付け,モニタリングしながら温度管理を行った.

### 近畿建設協会研究助成報告書



図-1 供試体の形状および寸法

表-1 鋼板および溶接ワイヤの化学組成と機械的性質

	鋼種	化学組成(質量%)					機械的性質		
		С	Si	Mn	Р	S	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び(%)
フランジ	SM400B	0.13	0.20	1.00	0.018	0.005	315	442	34
ウェブ		0.10	0.21	0.95	0.014	0.004	353	446	33
補剛材		0.14	0.20	0.82	0.018	0.004	280	446	32
溶接ワイヤ	JIS YGW12	0.09	0.44	0.96	0.012	0.012	460	540	28

### 2.3 温度履歴

熱電対配置および加熱領域を網掛け部分で図-3 に示す. ウェブ1に熱電対 TC1~TC5, ウェブ2 に TC6~TC10, 補 剛材1に TC11~TC15, 補剛材2に TC16~TC20を取り付け た. なお,加熱後は各熱電対における温度が約 60 ℃とな るまで冷却した.加熱冷却実験時の温度履歴を図-4 に示 す.加熱領域の TC5, TC10, TC15, TC20 の温度が, そ れぞれ 600 ℃あるいは 900 ℃に到達した.

# 2.4 リーブ硬さ

加熱による鋼材の機械的性質の変状を推定する方法とし て、本研究ではリーブ硬さ試験 <sup>¬</sup>を実施した. 鋼材の硬さ と降伏応力あるいは引張強度の間には相関関係があること が実験的に知られており、専用の小型装置でハンマーを鋼 材表面に打ち出し、ハンマー衝突前後の速度比によってリ ーブ硬さを算出した.

既往の研究では、同一部材に対して実施したリーブ硬さ 試験の結果には 10 %程度のばらつきが生じることが報告



(c) 断熱除去



(b) 断熱・加熱



(b) 冷却

図-2 加熱実験の状況

### 近畿建設協会研究助成報告書

TC11,16

60

されている<sup>8)</sup>. リーブ硬さの計測位置を図-5 に示す. 600 ℃加熱供試体および 900 ℃加熱供試体における 加熱領域外の箇所では,加熱前後のリーブ硬さの変化率は 10 %未満であった. したがって,これらの領 域を材料強度の変化がない健全部とし,そこで得られたリーブ硬さの平均値を基準として加熱領域のリー ブ硬さと比較した. 600 ℃加熱供試体において,加熱領域の硬さの上昇率は健全部に対し平均 1.8 %であ り,機械的性質の変化は小さいと推定できる. 900 ℃加熱供試体のリーブ硬さ計測結果を図-6 に示す. に おいて,加熱領域の硬さの上昇率は健全部に対しウェブで平均 21.5 %であった.

2.5 面外変形

1200

ダイヤルゲージを用いて,加熱前後の供試体のウェブおよび補剛材の自由端における面外変形を測定した.測定結果を図-7 に示す.加熱による補剛材の面外変形の変化はほとんどなかったため,ここではウェブの面外変形のみ示す.健全供試体および加熱前の供試体におけるウェブ,補剛材の面外変形の最大値

60

TC1,6

はそれぞれ 1.29 mm, 0.84 mm であった 600 ℃加熱 供試体のウェブ,補剛材各パネルの最大面外変形量 の平均値は 0.65 mm, 0.18 mm,最大値は 0.80 mm, 0.26 mm であった.900 ℃加熱供試体のウェブ,補 剛材各パネルの最大面外変形量の平均値は 0.56 mm, 0.16 mm,最大値は 0.6 mm, 0.18 mm であった. 2.6 残留応力

X線回折法を用いて残留応力の測定を実施した. 各供試体のウェブにおける残留応力の測定結果を図 -8 に示す.健全供試体では溶接により自由端側に 圧縮残留応力が分布していた.また,高さ方向の溶 接の始終端に近い供試体下部分で,より大きな圧縮 残留応力が生じていた.加熱供試体では,加熱領域 で引張残留応力が生じた.健全供試体のY=0~150





図-4 温度履歴

TC1

mm の箇所で 100~180 MPa の圧縮残留応力が生じた のに対し,600 ℃加熱供試体では 50~200 MPa, 900 ℃加熱供試体では 200~400 MPa の引張残留応力が 生じた.これは,加熱後の冷却過程で加熱領域が収縮 し,非加熱領域により拘束されたことによるものと考 えられる.非加熱領域である Y=150~300 mm の箇所 では圧縮残留応力が増加する傾向が確認された.この 領域では,加熱領域の急冷後において温度が高い状態 が続き,残留する熱による膨張が既に冷却された加熱 領域により拘束されたものと考えられる.また,この 膨張によって供試体中央部付近の残留応力がやや引張 方向に生じたと考えられる.

近畿建設協会研究助成報告書



図-5 リーブ硬さの計測位置







図-7 面外変形

### 3. 圧縮実験

3.1 実験方法

健全供試体,600 ℃加熱供試体および900 ℃加熱 供試体の圧縮挙動を明らかにするため、単調載荷静 的圧縮実験を実施した.圧縮実験の状況を図-9 に 示す.2000 kN 万能試験機を用いて,供試体鉛直方 向に単調圧縮荷重を静的に負荷した.上フランジの 下面に2つの鉛直変位計を対角線上に設置し,鉛直 変位の平均値を求めた.

3.2 実験結果

健全供試体2体,600℃加熱供試体および900℃ 加熱供試体それぞれの圧縮荷重一鉛直変位関係を図 -10 に示す. 最大荷重時の面外変形を図-11 に示す. 健全供試体、加熱供試体ともに柱高さ方向中央であ る Y=300 mm で面外変形が最大となった. 弾性挙 動を呈する荷重 200~400 kN の範囲で圧縮荷重一鉛 直変位関係の傾きとして弾性剛性を求めた. 健全供 試体2体の挙動はほぼ同じであったため, 弾性剛性 および最大荷重の結果は2体の平均値としている. 健全供試体における弾性剛性は 1181 kN/mm, 最大 荷重は 809.5 kN であった. 600 ℃加熱供試体および 900 ℃加熱供試体における弾性剛性はそれぞれ 1188 kN/mm, 1085 kN/mm であり, 健全供試体と比べて それぞれ 0.6% 増加, 8.1% 減少した. これは、加熱 領域を中心とした加熱後の変形量の増加が理由とし て考えられる.

加熱供試体の最大荷重はそれぞれ 830.6 kN, 844.5 kN であり, 健全供試体と比べてそれぞれ

近畿建設協会研究助成報告書



2.6%, 4.3%増加した. 圧縮荷重を受ける自由突出板では,面外変形が最も大きくなるパネル中央部(柱高さ方向の中央部)が早期に降伏し,部材の強度を決定する.本実験においては,加熱後のパネル中央部におけるリーブ硬さは加熱前と比較してほとんど変化がなかった.パネル中央部では加熱による降伏応力の上昇がなかったため,加熱供試体の最大圧縮荷重は健全供試体の最大圧縮荷重と比べて大きく変わらなかったと考えられる.最大圧縮荷重がやや上昇した理由については,加熱領域の降伏応力の上昇が挙げられる.900℃加熱供試体が600℃加熱供試体より最大圧縮荷重が大きくなったことも,硬さの上昇度合いの違いが理由として挙げられる.

また,加熱領域付近における残留応力の変化が最大圧縮荷重に及ぼす影響は小さいと考えられる.パネ ル中央部における圧縮残留応力が大きいほど最大荷重は減少するが,本実験においては,主に残留応力が 大きく変化したのは供試体下部の加熱領域であり,供試体中央部の残留応力は大きく変化していないこと が理由として挙げられる.健全供試体ではパネル中央部に圧縮残留応力が分布しており,加熱供試体では パネル中央部で残留応力がやや引張方向に変化したため,加熱供試体の最大圧縮荷重が健全供試体の最大 圧縮荷重よりわずかに増加したと考えられる. 様式 7-2

4. まとめ

本研究では、火災を受けた鋼橋部材の健全性評価手法 を構築することを目的に、鋼桁端部を想定した十字断面 柱を対象に一連の検討を実施した.死活荷重に対して支 点反力が作用する構造部位である桁端部を想定した十字 断面柱を対象に、加熱実験および圧縮実験を実施した. 得られた主な知見を以下に示す.

- (1) 高さ 600 mm の鋼十字断面柱に対し,高さの 1/4 程度の領域を 600 ℃あるいは 900 ℃まで加熱し,水冷した.600 ℃加熱の場合,加熱領域における硬さの上昇は約 1.8 %程度であり,機械的性質の変化は小さいと推定した.900 ℃加熱の場合,ウェブでは健全部に比べ加熱領域の硬さの上昇が 10 %以上であり,焼入れによる降伏応力および引張強度の上昇が示唆された.
- (2) 加熱過程におけるパネルの熱膨張がフランジに拘 束されたことで生じた圧縮応力の作用により、加 熱領域周辺でウェブの変形量が大きくなった.加 熱領域で最大 0.8 mmの面外変形量が確認された.
- (3) 健全供試体では、溶接により自由端側に圧縮残留 応力が分布していた.加熱供試体では、加熱から の急冷により収縮し、非加熱領域により拘束され たことから、加熱領域で引張残留応力が生じた. また、非加熱領域では、加熱領域の急冷後におい て高温温の状態が続き、残留する熱による膨張が 既に冷却された加熱領域により拘束されたことに より、圧縮残留応力が増加する傾向が確認された.
- (4) 静的単調圧縮載荷実験において、健全供試体に比べて 600 ℃加熱供試体の弾性剛性は 0.6 %増加し、900 ℃加熱供試体の弾性剛性は 8.1 %減少した.
  900 ℃加熱供試体は健全供試体と比較して加熱により生じた変形が大きかったことから、900 ℃加熱供試体の弾性剛性が大きく低下したと考えられる.
- (5) 各パネルの柱高さ方向中央部において、加熱供試体は健全供試体と比較して硬さ、残留応力に大きな差がなかった。鋼十字断面柱の最大圧縮荷重は柱高さ方向中央部の機械的性質および残留応力の影響を強く受けることから、加熱領域における機械的性質および残留応力の変化が最大圧縮荷重に及ぼす影響は小さいと推察した。

## 近畿建設協会研究助成報告書



図-9 圧縮実験の状況



火災を受けた鋼橋部材の健全性を評価するためには、まず、部材内の受熱温度を推定することが不可欠 である.受熱温度に応じて鋼材の機械的性質の変化の度合いは異なるが、一般の構造用鋼材の場合、降伏 応力および引張強度が低下する可能性は低いと言える.また、残留応力の分布が変化しても、圧縮荷重下 下における耐荷力に及ぼす残留応力の影響は小さい.加熱により生じる変形を計測し、有限要素解析など を利用して変形が部材の剛性に及ぼす影響を確認する必要がある.



参考文献

- 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, 土木学会誌, Vol. 93, No. 12, pp. 30-33, 2008.
- 2) 是松晃男,池田武志,山口栄輝,牧角龍憲,亀尾順一郎,林裕也:火災を受けた鋼鈑桁橋の損傷調 査と強度評価,橋梁と基礎, Vol. 10, pp. 50-55, 2011.
- Bruno F. Godart, Jacques Berthellemy, Jean Pierre Lucas: Diagnosis, Assessment and Repair of the Mathilda Bridge Close to Collapse during a Fire, Structural Engineering International, pp. 331-338, 2015.
- 4) 土木学会鋼構造委員会 火災を受けた鋼橋の診断補修技術に関する研究委員会:火災を受けた鋼橋の診断補修ガイドライン、土木学会鋼構造シリーズ24,2015.
- 5) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 2012.
- 6) 廣畑幹人,伊藤義人: 簡易熱源を用いた熱処理によるすみ肉まわし溶接継手の残留応力緩和に関す る研究,土木学会論文集 A1(構造・地震工学),第71巻2号,pp.208-220,2015.
- 7) 伊藤隼,廣畑幹人:反発硬度による火災を想定した熱履歴付与鋼材の機械的性質推定,鋼構造論文集,第27巻107号, pp. 77-86, 2020.
- 北原敏希,中込忠男,藤田哲也,笠原基弘,服部和徳,市川祐一,井上朋子:反発式高度計による 建築鉄骨溶接部の引張強さ推定に関する実験的研究,日本建築学会大会学術講演梗概集(関東),pp. 999-1000,2006.