

1. 概要

1. 1 目的

(1) 背景

道路橋において、車両事故による火災、桁下の不法占有者による失火や資材置場などからの不審火による被災を受けることがある。表 1. 1. 1 に、比較的被害の大きい事例を対象として報告されているものを示す。小被害の桁下での失火や不審火による被災事例の場合を含めると、ここに示す件数以上の火災が発生しているものと考えられる。

落橋といった大きな被害を受けた事例としては、2008 年に発生した首都高速 5 号線^{1,1)}において熱影響を受けた主桁ウェブの大変形によって架け替えが行われた事例や、2007 年にアメリカにおけるオークランドベイブリッジ付近の高架橋の事例など^{1,2)}がある。これらの事例は、主にタンクローリーの事故に起因し、ガソリンやその他の車載物(有毒ガスを出すものが多い。)などの炎上により急激な温度上昇が伴う火災であり、落橋をはじめ、部材が座屈するなど矯正が困難な顕著な変形が生じたものであり、大規模な修繕が必要である。

一方、写真 1. 1. 1 から写真 1. 1. 12 に示すような、桁下の不法占有者による失火や資材置場などからの不審火などでは、前述のような大被害に至らないまでも、高温加熱により塗装の変色や部分的なはがれによる防錆機能の劣化が生じるとともに、場合によっては主桁や添接部等の強度低下に至る場合がある。しかし、これらの場合は、桁に大きな変形を伴うことがないため、鋼材が強度低下をしているか否かについて、外観性状から判別することはできない。

表 1. 1. 1 主な橋梁の火災事例一覧^{1,2)}

橋梁名	構造形式	被災年月	被災原因
首都高速 神田橋ランプ	単純合成 I 桁橋	1966 年 1 月	桁下の小屋からの出火
国領川橋梁	PC 箱桁橋	1975 年 7 月	沿線家屋からの延焼
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
西浦和駅構内の高架橋	RC ラーメン橋	1980 年 8 月	古タイヤからの出火
首都高速 汐留出入口	鋼単純合成鉄桁橋	1980 年 12 月	工事中の失火
A 橋	2 径間連続 I 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 I 桁橋	1992 年	桁下での車両事故
首都高速 芝公園入路	単純 I 桁橋	1994 年	桁下での不審火
毛穴大橋	単純合成 I 桁橋	2000 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 I 桁橋	2001 年 12 月	不法占拠者の失火
新左山跨線橋	単純箱桁橋	2002 年 4 月	桁下での車両事故
C 橋	2 径間連続 I 桁橋	2004 年 2 月	野焼きの延焼
BAB 2 高架橋 (ドイツ)	PC 連続 T 桁橋	2004 年 7 月	タンクローリーの横転・炎上
JR 宗谷線旭川第 8 橋梁	3 径間張出し式ラーメン橋	2004 年 8 月	古タイヤなどからの出火
ヴィールタール橋 (ドイツ)	鋼床版 2 主 I 桁橋	2004 年 8 月	タンクローリーの落下・炎上
阪神高速 波除出口	鋼箱桁橋	不明	桁下での不審火
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
首都高速 6 号向島線高架	単純合成鉄桁橋	不明	塵芥集積場からの出火
大阪環状線淀川橋梁	単線式上路プレートガタ橋	2007 年 2 月	桁下の資材置場から出火
オークランドベイブリッジ付近の高架橋 (アメリカ)	連続合成鉄桁橋	2007 年 4 月	タンクローリーの横転・炎上
首都高速 5 号 北池袋 IC 付近の高架橋	鋼単純 I 桁橋	2008 年 8 月	タンクローリーの横転・炎上
宇佐美大橋		2010 年	失火



写真 1.1.1 被災事例 1 橋脚の被災



写真 1.1.2 被災事例 1 主桁・横桁の被災



写真 1.1.3 被災事例 2 不審火



写真 1.1.4 被災事例 2 主桁の被災



写真 1.1.5 被災事例 2 主桁・床版の被災



写真 1.1.6 被災事例 2 主桁・床版の被災



写真 1.1.7 被災事例 3 主桁・床版の被災



写真 1.1.8 被災事例 3 床版の被災



写真 1.1.9 被災事例 3 横桁の被災



写真 1.1.10 被災事例 3 横桁炭化の状況

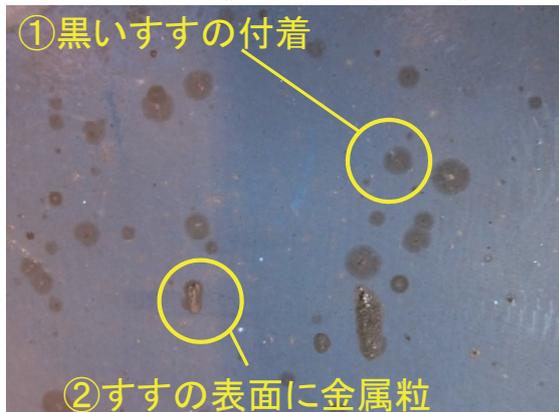


写真 1.1.11 被災事例 3 主桁すずの付着状況



写真 1.1.12 被災事例 3 横桁塗膜のはがれ状況

(2) 火災時の温度と被災した鋼材の力学特性

1) 火災温度と継続時間

橋梁火災においては出火原因や出火状況が様々であり、燃焼物や燃焼環境、構造物との距離や位置関係に応じて鋼板の最高受熱温度や上昇速度、継続時間が異なる。例えば、首都高 5 号池袋線でタンクローリーが横転し炎上したことによる火災では、最高到達温度 1200℃、火災継続時間は 5 時間と推定されている^{1.1)}。一方、国道 23 号新左山跨道橋^{1.10)}の直下で起こったトラックと自動車の衝突事故による火災においては、最高到達温度 450℃と報告されており、火災継続時間も発生後 1 時間後には復旧作業が開始されている。また、文献 1.9) で被災した橋梁は、桁下を不法占用していた者の石油ストーブの失火が古タイヤや廃材等に引火したもので、最高到達温度は 600℃前後と推定されている。

2) 鋼材の性質と製造

鋼材の製造においては、合金元素の添加や、合熱処理によって結晶構造や性質が変わる鋼材の特性を用いて、溶接性、加工性、切欠き靱性その他の特性に配慮して製造される。

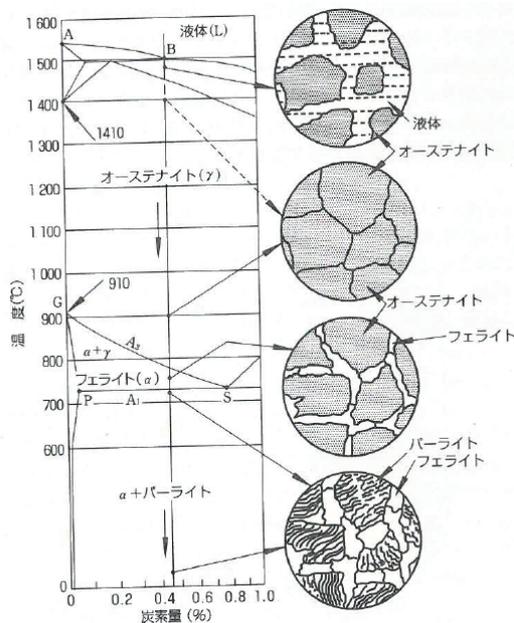
表 1.1.2 に純鉄の場合の温度変化とその特性を、図 1.1.1 に温度組成と結晶構造の関係を表す鉄-炭素系の状態図を示す。910~1410℃間ではオーステナイト (γ 鉄) という面心立体構造をしており、910℃以下の温度ではフェライト (α 鉄) という体心立方構造をしている。また、炭素は鉄原子で作っている格子の隙間に浸透固溶する。オーステナイトよりフェライトの方が隙間の形が細長く炭素原子が入り込めないのに対し、オーステナイトでは 3 方向同じ隙間で炭素原子が入り込めるため、固溶できる炭素量が多い。

また、図 1.1.2 に示すように、冷却速度の違いによっても形態の組織変化が生じる。炭素を固溶したオーステナイトをゆっくり冷やすと、オーステナイトがフェライト組織になるとき、炭素を追い出して炭素は鉄組織の外で鉄との化合物 Fe_3C として析出する。急冷した場合は、炭素を追い出す間もなく炭素を固溶したままで鉄原子は体心立方となる。本来炭素を固溶できないのに無理やり炭素を固溶するため体心立方格子はひずんでおり、このひずんだ結晶格子をマルテンサイトという。できるだけゆっくり冷やすことで、靱性の優れた機械的性質となる特性を利用しているのが焼入れである。

細かく熱処理工程を管理制御して、靱性などに優れた性質を付与した鋼材として TMCP 鋼が実用化されている。この場合、火災による熱によって、付与された性質が損失することがあるので、受熱の影響の見極めが特に重要である。TMCP 鋼については文献 1.20) が参考となる。

表 1.1.2 温度変化と結晶構造 (純鉄の場合)

温度	結晶構造	結晶構造の形	固溶できる炭素量
1410°C以上	δ フェライト (δ 鉄)	体心立方格子	-
911°C以上	オーステナイト (γ 鉄)	面心立方格子	約 2%
常温	フェライト (α 鉄)	体心立方格子	約 0.02%



温度と組成と結晶構造の徐冷時の組織例

図 1.1.1 鉄-0.45%炭素系の状態図^{1.20)}

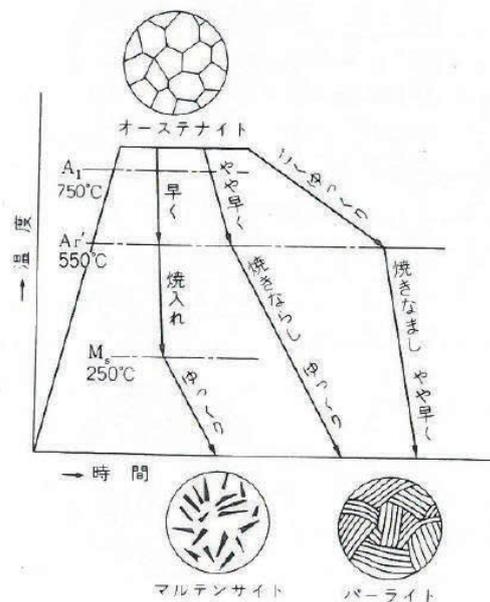


図 1.1.2 熱処理の概要^{1.20)}

3) 鋼材の力学的特性

図 1.1.3 は、SS400 材における高温時の応力-ひずみ曲線^{1.21)}である。加熱温度の違いにより応力ひずみ曲線が異なっていることがわかる。加熱温度 300°C まででは降伏点が明確に現れ、400°C 以上では降伏点が現れないまま最大応力を経て破断している。さらに 500°C を超えると降伏点及び引張強さが著しく低下し、ひずみが大きくなっても応力度は上がらない。

図 1.1.4 及び図 1.1.6(a) は、構造用鋼材及び高力ボルトの高温時の強度を加熱温度ごとに示している。降伏点が明確でない場合は、最大応力度の 0.2% を降伏強度としている。SS400 では、加熱温度が高くなるとともに降伏強度が低下し、500°C 程度で常温の半分程度となっている。SM490 及び SM490Y 材も同様の結果で、600°C 以上ではさらに降伏強度が低下する。高力ボルトでは、300°C 以上で急激に引張強度が低下することがわかる。

図 1.1.5 及び図 1.1.6(b) は、構造用鋼材及び高力ボルトの加熱冷却後の強度を加熱時の温度ごとに示している。いずれの構造用鋼材においても加熱時の温度が 600°C を超えると、強度が下がる。高力ボルトについては、400 度を超えると強度低下がみられる^{1.21, 1.22)}。

以上のことから、構造用鋼材では 600°C、高力ボルトでは 400°C を超える火害を受けたかどうかを判定することが、重要となる。

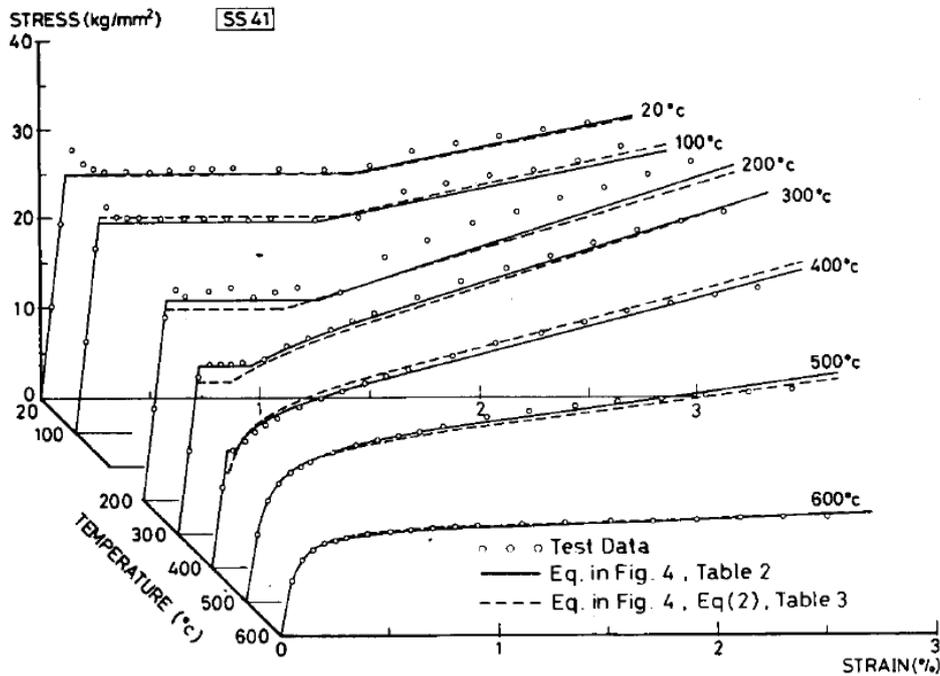
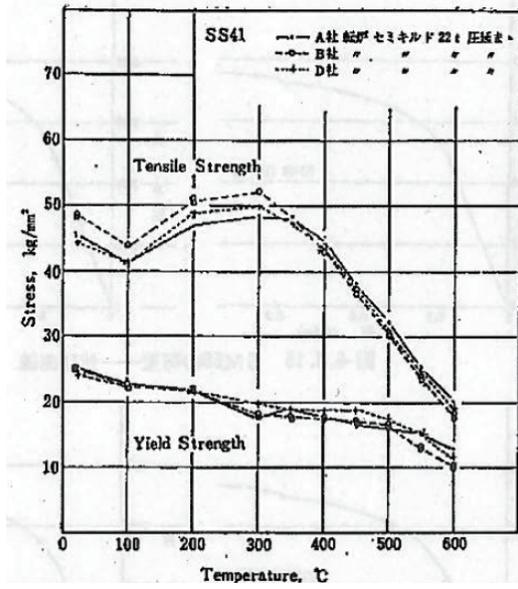
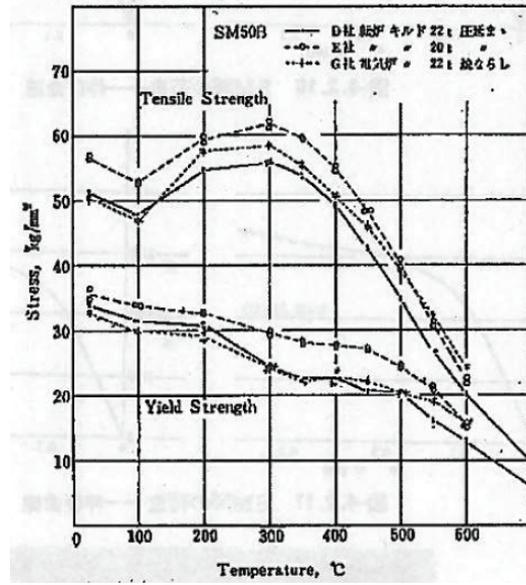


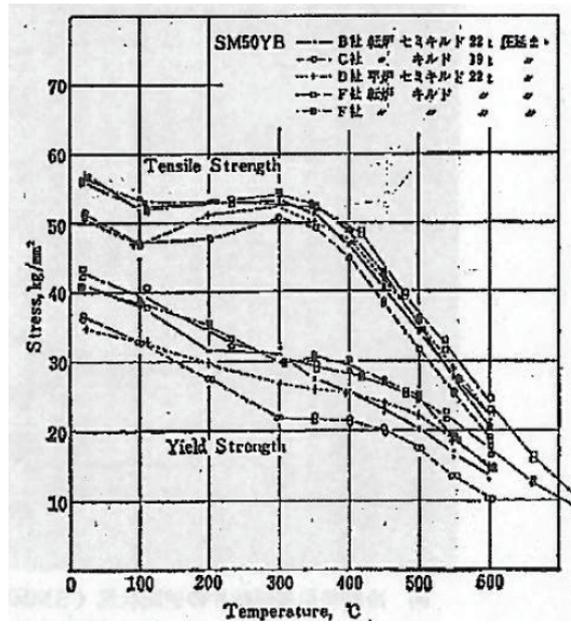
図1.1.3 高温時における応力-ひずみ曲線 (SS400)^{1.21)}



(a) SS400

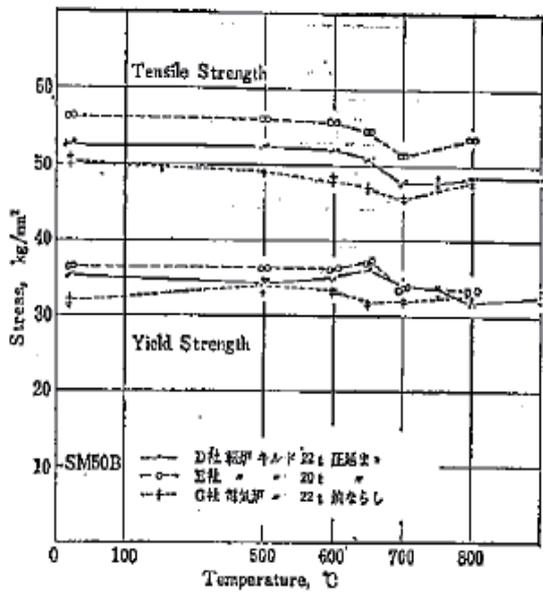


(b) SM490

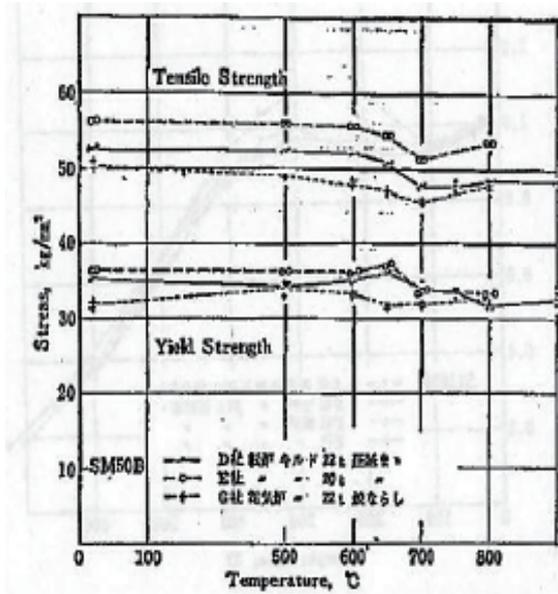


(c) SM490Y

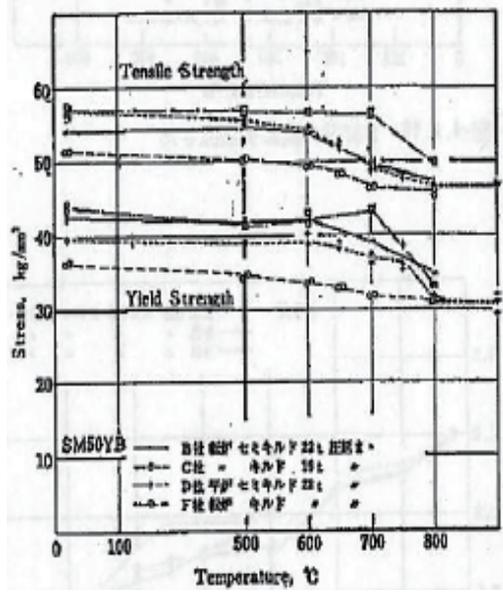
図1.1.4 高温強度^{1,22)}



(a) SS400

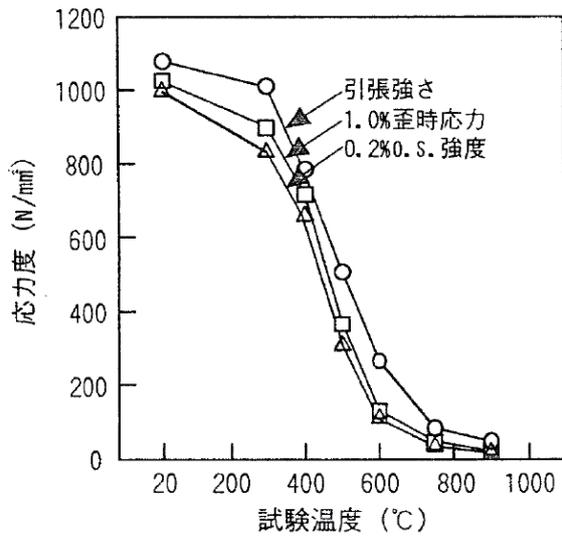


(b) SM490

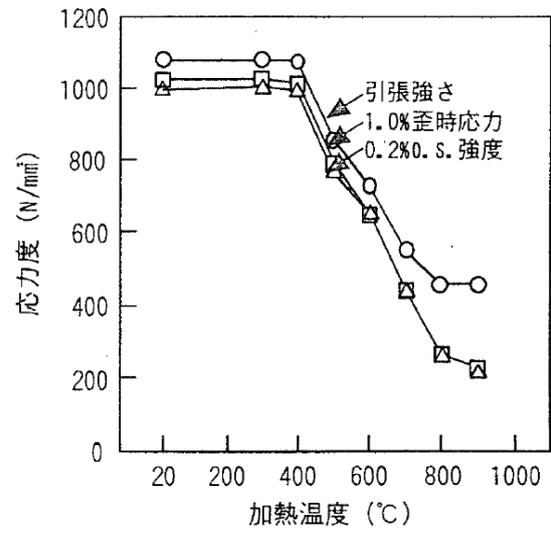


(c) SM490Y

図1.1.5 加熱後の強度^{1,22)}



(a) 高温時引張試験結果



(b) 加熱冷却後引張試験結果

図1.1.6 F10T(M20×90)高力ボルト^{1.23)}

(3) 火災を受けた鋼橋の診断に関する既往の研究

過去の橋梁火災における調査では、塗装鋼板供試体を加熱する再現試験を実施し、外観性状から受熱温度の判定を行った事例が報告されている^{1.2~1.17)}。

これらの再現試験は加熱方法が異なっており、また、鋼橋に用いる塗装系を統一した手法で加熱試験をした事例は見当たらない。更に、燃焼状態の違いによる塗膜損傷状況に関する研究も見当たらない。参考に、火災を受けた橋梁で実施される試験の例を表 1.1.3 に示す。

表 1.1.3 試験方法の例

試験方法	目的	照査方法、項目	備考
変形量	座屈の有無の確認	設計基準との比較	
トルク値	ボルトの緩み		
磁粉探傷試験 超音波探傷試験	溶接部の健全性評価	割れ、亀裂の有無	
引張試験	鋼材の健全性	降伏点、引張強さの確認設計基準との比較	被災した橋梁から試料を採取する必要がある。
曲げ試験			
シャルピー衝撃試験		吸収エネルギーの確認	
硬さ試験 (ビッカース硬度)		連結部の硬化を確認	
マイクロ試験 (金属組織写真)	金属組織の健全性	結晶粒の粗大化、針状化等の確認(試料断面のフェライト結晶粒度)	
加熱試験	被災温度の推定	被災を受けた橋梁と同様の鋼材を、温度を変えて加熱する。被災橋梁と実験鋼材を比較する。	道路橋において統一された方法はない。
塗膜の品質試験 (クロスカット試験等)	塗装の健全性評価		

(4) 研究の概要

桁に変形や座屈が生じる大被害に至った場合には、耐荷力に影響を及ぼしていることは明らかである。一方、大きな変形や座屈が生じていない場合には、鋼材の材料特性に異常を生じていないかなど火災により損傷した鋼橋の健全度を正確に見積もり、供用可否の判断や補修の必要性・規模の検討を現場で速やかに行うことは、現在のところ困難である。そのため、塗膜の外観変状、付着力及び残存膜厚(カット式膜厚計および電磁式膜厚計)などの非破壊による方法により、迅速に受熱温度の推定が行えることは、重要な判断基準となる。

本研究では、桁に大きな変形や座屈が生じない受熱温度の範囲で、加熱試験による塗膜の変状状態から受熱温度を確定する方法について検討することとした。具体的には、鋼道路橋で代表的な塗装系5種類の鋼板を作製し、2種類の加熱方法により鋼材を加熱し、加熱方法の妥当性について検証するとともに、加熱温度及び加熱方法と塗膜変状との関係を明らかにする。また、試験後の鋼板の力学特性を確認することを目的として、JISの標準試験片を採取して、加熱冷却後の鋼材の引張試験を実施した。上記鋼板は、各種の塗装系の乾燥条件を統一するため、上塗り完了後1ヶ月の屋外暴露とした。また、撤去橋梁から切り出した鋼板を用いて、経年劣化や現場条件等により異なる塗膜状態での加熱実験の実施結果についてとりまとめた。

1. 2 語句の定義

本研究において使用する語句は、表 1.2.1 の定義とした。

表 1.2.1 語句の定義

1	開放型ガス炉加熱試験	ガスバーナーを熱源とし、供試体を水平に設置して片面から加熱する試験
2	開放型ガス炉接炎試験	開放型ガス炉加熱試験と同様の装置を使用し、ガスバーナーから噴出する火炎が直接接するように、供試体の位置をガスバーナーに近づけた状態で実施する試験
3	電気炉加熱試験	電気炉を使用し、供試体を水平に設置して両面から加熱する試験
4	鋼板供試体	鋼道路橋塗装便覧などの仕様に準拠して新規に作成する供試体
5	実橋供試体	撤去された道路橋から切り取った供試体
6	加熱面 (熱源側)	開放型ガス炉加熱試験および開放型ガス炉接炎試験においてガスバーナーからの熱を受ける側の面（鋼板下面を指す）
7	非加熱面 (熱源裏側)	開放型ガス炉加熱試験および開放型ガス炉接炎試験においてガスバーナーからの熱を直接受けない面（鋼板上面を指す）
8	加熱温度	開放型ガス炉加熱試験及び開放型ガス炉接炎試験における加熱面から熱源側に10mmの位置の雰囲気温度 電気炉加熱試験における電気炉の炉内温度
9	基準温度	各試験における温度パラメータの基準とする温度 開放型ガス炉加熱試験及び開放型ガス炉接炎試験：加熱面中央部の受熱温度 電気炉加熱試験：加熱温度（炉内温度）
10	保持時間	基準温度に達した後、その温度を保持する時間
11	自然冷却	各試験終了後、炉外に放置して室温まで徐冷する方法

1. 3 研究の流れ

本報告書の構成は、次のとおりである。構成の概念を図 1.3.1 に示す。

「2章 試験方法」において、まず、本研究で対象とした鋼道路橋の受熱条件を考慮した試験の設定方法について、予備供試体を用いて検討した結果を示している。火災を受ける鋼板供試体については、様々な塗装の仕様ごとに損傷状態が異なることから、現在一般的に橋梁にて塗装されている5種類の塗装系の鋼板供試体を作製した。また、加熱については、想定される燃焼物、空気の供給状況を踏まえ、既存基準類の火災曲線を参考にして検討した。なお、被災した橋梁の受熱影響の評価として、被災状況写真及び付着性状が有用と考え、予め加熱前の供試体について撮影、計測した結果を示している。さらに、実際の橋梁における適用性については、撤去橋供試体を用いて検証することとした。

「3章 作製した鋼板供試体に対する各種加熱試験の結果」では、2章で設定した3つの加熱方法により実施した鋼板供試体について、塗装仕様と塗膜の状況について説明するとともに、加熱方法の違いの影響について考察する。

「4章 撤去された橋梁から切り取った供試体に対する各種加熱試験の結果」では、3章と同様に2章で設定した加熱方法により実施した撤去橋から切り取った供試体の被災状況について説明する。また、鋼板供試体との比較について述べる。

「5章 加熱試験後の鋼板の引張試験結果」では、3章で実施した加熱試験後の鋼板試験体について、力学的特性の変化を把握するために実施した、引張試験結果と目標被災温度との関係を考察する。

「6章 総括」において、本研究により得られた知見をまとめる。

最後に、本研究で得られた結果を、「鋼部材の被災温度推定標本作製方法（案）」、「鋼部材の被災温度推定標本撮影方法（案）」及び「鋼部材の被災温度推定用塗膜損傷見本集（案）」にとりまとめた。

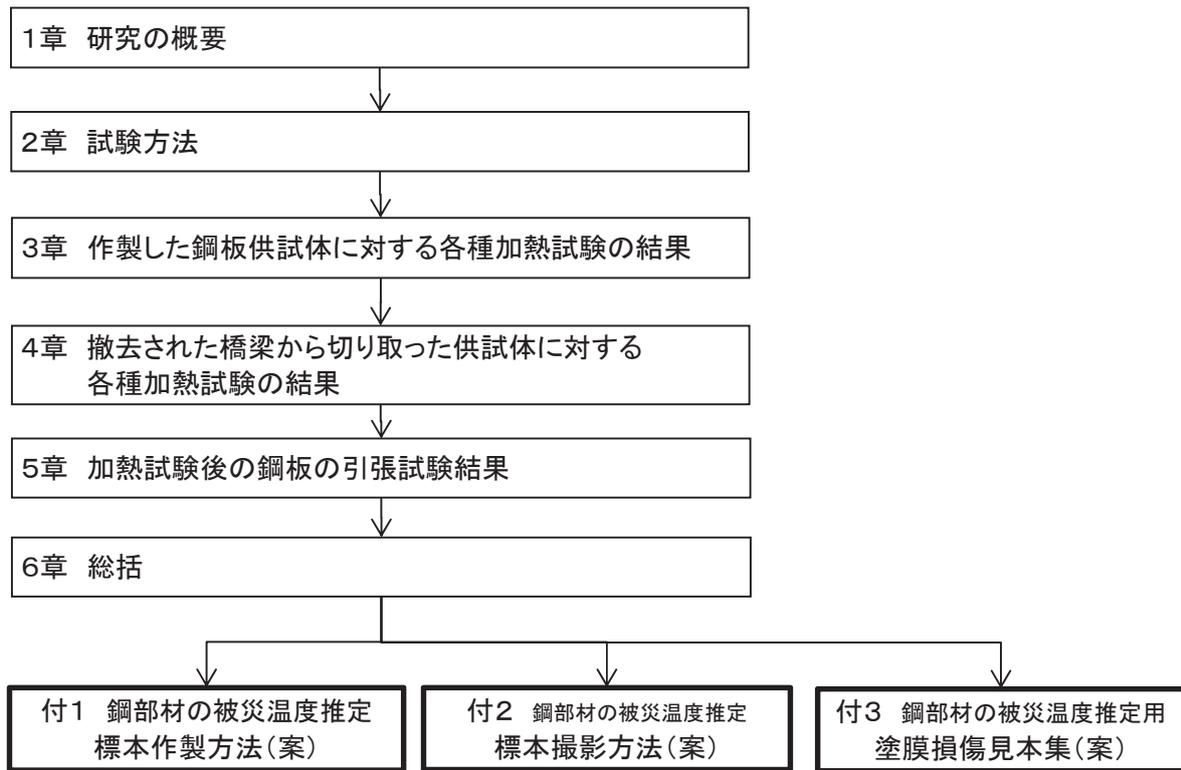


図 1.3.1 検討フロー

【参考文献】

- 1.1) 桑野忠生ら：タンクローリー火災事故により損傷を受けた橋梁の復旧 ―首都高速 5 号池袋線 復旧の設計と施工―，橋梁と基礎,pp.13-18, 2010.4.
- 1.2) 大山 理ら：火災による橋梁の損傷事例，橋梁と基礎 2008 vol.42,pp.35-39, 2008.10.
- 1.3) 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
- 1.4) 是松晃男ら：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.
- 1.5) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.63 コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集,pp.203-226,2004.10.
- 1.6) 清宮 理：耐火技術とコンクリート―土木―，コンクリート工学 Vol.45, No.9, pp.8-13, 2007.9.
- 1.7) 関 淳ら：首都高速道路 4 号線 神田橋ランプの被火災事故，橋梁と基礎 vol.2, p.39,1968.3.
- 1.8) 石橋忠良ら：火災を受けた RC 高架橋の補修・補強,橋梁と基礎, pp.100-103, 1983. 8.
- 1.9) 細井義弘ら：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.
- 1.10) 酒井利忠ら：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, 2003.4.
- 1.11) 大山 理ら：火災を受けた橋梁の調査・補修,片山技報 24 号,pp.56-62,2004.
- 1.12) 小川直仁：火災により被災した RC 高架橋の火害診断及び補修,日本鉄道施設協会誌,pp.608-610,2005.8.
- 1.13) 吉沢 勝ら：火災により損傷を受けた橋梁の健全度調査，土木学会第 61 回年次学術講演会 6-138,pp.275-276,2006.9.
- 1.14) 小山 堯ら：鉄道高架下火災事例,コンクリート工学 Vol.45, No.9,pp.25-29,2007.9.
- 1.15) 吉田雅彦ら：火災を受けた鋼鉄道橋の運転再開，土木学会第 62 回年次学術講演会 4-347, pp.693-694,2007.9.
- 1.16) 丹波寛夫ら：火災を受けた鋼箱桁橋の安全性評価，土木学会第 62 回年次学術講演会 6-343, pp.685-686,2007.9.
- 1.17) 田崎祥二：一般国道 1 号守口高架橋火災被災復旧の取り組みについて ～供用中の PCT 桁橋における復旧工法の検討事例～,平成 19 年度 近畿地方整備局研究発表会 論文集 防災・保全部門,pp.1-4, 2007.7.
- 1.18) Falk Herschelmann, Frank Schmidt-Döhl, Ekkehard Richter und Wulf Schwick : Wie heiß wurde der Spannstahl der Brücke über die BAB 2 während des Brandes am 16.07.2004, Beton- und Stahlbetonbau 99, pp.865-869, 2004.11.
- 1.19) Hans Eisel, Norbert Palm, Wolfgang Prehn und Gerhard Sedlacek : Brandschaden und Instandsetzung der Wiehltalbrücke im Zuge der A4, Köln-Olpe, Stahlbau 76(2007), pp.94-104, 2007.2.
- 1.20) 大田孝二,深沢誠：橋と鋼,(株)建設図書,2002.2.25
- 1.21) Fukujiro FURUMURA, Takeo AVE, Takeshi OKABE and Wha Jung KIM:A Uniaxial Stress-Strain Formula of Structure Steel at High Temperature and its Application to Thermal Deformation Analysis of Steel Frames, Report of the Resarch Laboratory of Engineering Materials of Tokyo Institute of Technology,

No.11, 1986.

- 1.22) 構造用鋼材の高温時ならびに加熱後の機械的性質,日本校構造協会委員会耐久性分科会,JSSC Vol.4 No.33, 1968.
- 1.23) 古平ら：高力ボルトの高温時及び加熱冷却後の強度,日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 2000.9.