

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760355

研究課題名（和文）

火災時における鋼製橋梁の耐火性能に関する基礎的研究

研究課題名（英文）

Fundamental study on performance of steel bridges under fire

研究代表者

北根 安雄 (KITANE YASUO)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：10444415

研究成果の概要（和文）：本研究は、耐火性能は要求されていない鋼製橋梁構造物に着目し、火災発生時の鋼製橋梁の挙動の特徴を明らかにすることを目的とした。初年度は、国内外における過去の鋼製高架橋の被災事例および損傷事例の収集、およびタンクローリーの事故による火災での発熱量および中心軸火炎温度を推定し、大型のタンクローリーの場合、鋼橋は 1000°C 以上にもなる火災に 1 時間程度曝される場合があることが分かった。2 年目は、近年開発された橋梁用高張力鋼である SBHS500 および SBHS700 の高温引張試験を行い、高温時の機械的特性を従来鋼の SM490Y と SM570TMC と比較して明らかにした。

研究成果の概要（英文）：This study focuses on steel bridges that are not required to have fire resistance and aims to investigate structural performance of steel bridges exposed to fire. In the first year, information on actual fire events that damaged steel bridges in the past, and size and temperature of fire caused by a gasoline tanker truck accident was estimated by a hand calculation. As a result, steel bridges may be subjected to fire whose temperature can be over 1000°C for more than 1 hour. In the second year, by conducting tensile coupon tests at elevated temperature on recently developed bridge high performance steels, their mechanical properties at elevated temperature were examined in comparison to conventional structural steels.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：構造工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：鋼構造, 鋼橋, 火災, 耐火性能, 橋梁用高張力鋼, 高温時機械的特性

1. 研究開始当初の背景

鋼製橋梁が火災を受ける原因には、走行中の車両事故、野焼きの延焼、野積みタイヤの自然発火、工事中の事故による火災などが挙げられる。橋梁下を船舶が航行する場合、オイルタンカーの火災が考えられる。日本では、2008 年 8 月に起きた首都高速道路 5 号線でのタンクローリー火災事故が記憶に新しい。また米国では、2007 年以降だけでもタンク

ローリー事故が橋梁の大きな被害につながった例が数例ある。さらに、都市圏の高架橋では、高架下が商業施設として利用されたり、高架橋が高層ビルを貫通している例も存在する。このような場合には、商業施設またはビルの火災が、橋梁に直接熱荷重を与えることになる。

建築物は、建築基準法で耐火性能が要求されており、これまでに建築鋼構造物の耐火性

能に関する研究は数多く行われてきた。一方、橋梁では、一般に耐火性能は要求されておらず、これまでの被災事例も多くないため、鋼製橋梁の耐火性能に関する研究例は非常に少ない。しかし、前述したようにタンクローリーの火災事故例が近年いくつか報告されており、橋梁が崩壊に至らない場合でも、橋梁の閉鎖による経済的損失は甚大となることが首都高速道路の例からも明らかである。また、今後、スペースの有効利用・用地確保の困難さなどの理由から、高架橋が建築物と隣接または一体化されることが増えると予想され、そのような高架橋では火災時の耐火性能を評価することが必要になると考える。

2. 研究の目的

上記のような背景の中、鋼製橋梁の耐火性能を明らかにし、必要であれば被害を最小限に抑えるべく対策を講じておかなければならない。そこで本研究では、都市圏の鋼製高架橋を対象とし、高架下で発生した火災が橋梁に与える影響を検討することを目的とする。

3. 研究の方法

(1)H21 年度

H21 年度は、まず、国内外における過去の鋼製高架橋の被災事例および損傷事例の収集を行い、火災が橋梁に与える損傷の程度の把握を行った。

次に鋼製高架橋下で、大型のタンクローリーが事故を起こし、火災が発生した場合を想定し、タンクローリーの火災から発生する熱量および鋼橋の受熱温度について検討した。具体的には、大型のタンクローリー（積載量 20k ℓ , 15ton）が事故を起こし、流出したガソリンによって火災が起きた場合に、その発熱量、火災の継続時間、鋼橋の受熱温度などについて推定を行った。

また、過去の研究成果の調査から、有限要素解析（熱伝導解析および熱応力解析）に使用できる、鋼材の高温時の機械的特性（比熱、弾性率、降伏応力、クリープ特性）のデータを収集し、解析用の材料特性ライブラリを作成した。

(2)H22 年度

H22 年度は、当初、鋼製 I 桁の火災実験を行い、橋梁に使用されるような薄肉部材の火災時の挙動を把握し、その解析的検討を行う予定であったが、H21 年度の検討から、火災時の挙動は、温度分布や材料の機械的特性によって大きく変化することが明らかとなり、I 桁の火災実験を少数行うより、橋梁に使用される鋼材の高温材料試験を行い高温時の機械的特性を把握することが、本研究の最終目標である鋼橋の耐火性能を把握する上で、重要であると判断し、研究計画を変更し、そ

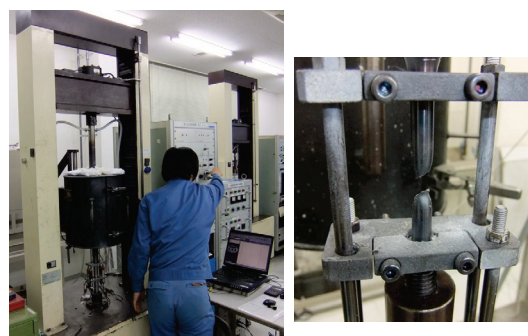
の結果、H23 年度にかけて鋼材の高温引張試験を行った。

鋼種として、橋梁で頻繁に使用される SM490Y と高張力鋼である SM570TMC に加え、近年開発された橋梁用高張力鋼である SBHS500 および SBHS700 を選択し、試験温度には、室温 23 $^{\circ}$ C, 100 $^{\circ}$ C, 200 $^{\circ}$ C, 300 $^{\circ}$ C, 400 $^{\circ}$ C, 500 $^{\circ}$ C, 600 $^{\circ}$ C, 700 $^{\circ}$ C, 800 $^{\circ}$ C の合計 9 温度について、材料試験を行い、各温度での降伏応力、引張強度、ヤング率を同定し、温度が機械的特性に与える影響について検討した。

高温引張試験は、JIS G0567 に従い、円形断面を持つ比例試験片を使用し、つば付きの II 形試験片で並行部の径が 8mm を採用した。図-1 に高温引張試験状況を示す。

高温ヤング率の測定では、JIS Z2280 に従い、幅 10mm、長さ 60mm、厚さ 2mm の直方体の試験片を使用して、共振法により動的ヤング率を測定した。

試験片を切り出した鋼材の板厚は、SM490YA が 12mm、SM570TMC が 16mm、SBHS500 が 13mm、SBHS700 が 16mm であった。



(a) 載荷試験装置 (b) 破断後の試験片

図-1 高温引張試験状況

4. 研究成果

(1)過去の被災事例

ここ数年の火災による橋梁の被災事例を表-1 に示す。代表的な損傷形態は、コンクリート床版の亀裂、コンクリート部材でかぶりの剥落、鋼桁の変形、鋼部材の塗装の損傷、標識柱の変形、防護柵の変形などがある。崩壊にまで至った I-580 overpass の写真を図-2 に示す。写真から鋼桁の大変形が確認できる。また、首都高速の例でも鋼主桁の変形や塗膜剥離が著しく、特に事故発生箇所直上では、桁高 1200mm の桁が約 600mm に変形していた。

I-580overpass の例³⁾では、塗膜の変状や鋼のマイクロ組織の観察などから、鋼橋の受熱温度は 850 $^{\circ}$ C から 1,000 $^{\circ}$ C と推定されている。

表-1 火災による橋梁の損傷事例^{1)~5)}

発生年月	場所	概要
2005/7/12	リッジフィールド・コネチカット	U. S. Route 7 bridge PC ボックス桁橋 30kℓガソリン・タンクローリー
2006/7/28	パーカー・アリゾナ	Bill Williams River Bridge PC 桁橋 28.8kℓディーゼル・タンクローリー
2007/4/29	オークランド・カリフォルニア	I-580 overpass 鋼 I 桁橋 32.5kℓガソリン・タンクローリー
2007/11/27	ジェファーソン・ミズーリ	US Highway 54, Jefferson St. overpass コンクリート橋 32kℓガソリン/ディーゼル+3.8kℓエタノール・タンクローリー
2008/8/3	首都高速 5号線	首都高速 5号線 単純合成鋼 I 桁+RC ラーメン橋脚 ガソリン 16kℓ・軽油 4kℓタンクローリー
2011/3/28	フォートワース・テキサス	I-30 bridge 合成鋼 I 桁橋 28.4kℓディーゼル・タンクローリー



(source: San Francisco Chronicle)



(source: 文献3))

図-2 I-580 overpass の損傷状況

(2)火災による熱荷重の推定

ガソリンを満載した大型のタンクローリーが事故を起こし、火災が発生した場合に、火災から発生する熱量、火災の継続時間、および鋼橋の受熱温度について検討した。具体的には、ガソリン積載量 20kℓ/15ton のタンクローリーから流出したガソリンによって火災が起きた場合を想定した。

燃料プールの火災での発熱速度 \dot{Q} は以下の式で計算される⁶⁾。

$$\dot{Q} = \dot{m}'' A \Delta H_c \quad (1)$$

ここで、 \dot{m}'' は単位面積あたりの最大燃焼速度の値、 A は気化に伴う面積、 ΔH_c は有効燃焼熱である。ガソリンの場合、 $\dot{m}'' = 55$ (g/m²s)、 $\Delta H_c = 43.7$ (kJ/g)であるので、式(1)は以下のように書ける。

$$\dot{Q} = 2,404 A \quad (\text{kW}) \quad (1)'$$

また、最大火炎高さ L_f は、以下の式でおおよそ推定できる。

$$L_f = 0.23 \dot{Q}^{2/5} - 1.02 D \quad (2)$$

ここで、 D は燃料液体プールの直径である。また、燃料液体プールの直径 D を用いると、 $A = \pi D^2 / 4$ と表すことができ、発熱速度 \dot{Q} が計算できる。最後に、ガソリンの量と単位面積あたりの最大燃焼速度 \dot{m}'' および気化に伴う面積 A から燃焼時間を推定することができる。

表-2 に、ガソリン 20kℓ に対して、いくつかの燃料プールの直径 D に対する、最大火炎高さ L_f および燃焼時間 t_b を示す。表より、燃料プール直径 5m のとき最大火炎高さ 12m、直径 10m のとき最大火炎高さ 19m にもなり、都市部の高架橋下でタンクローリーの火災が起きた時、火炎は橋桁まで到達し、高温の火炎に曝されることになることが分かった。また、燃料プール直径 10m の場合でも、燃焼継続時間は約 1 時間と計算され、高温に曝される時間も短くないことが分かる。

文献 6) や 7) によると、火炎の最高温度は約 1200°C と推定されるが、文献 6) にあるように、炭化水素燃料の中心軸火炎最大温度の時間平均はおおよそ 800°C となる。したがって、乱流火炎に曝されている鋼橋の受熱温度も時間平均では、約 800°C 程度と推定できる。この値は、文献 3) の報告とも一致する。

表-2 最大火炎高さと燃焼時間の推定

プールの直径 (m)	最大火炎高さ (m)	燃焼時間 (時間)
1	3.7	96
3	8.3	11
5	12	3.9
10	19	1.0

これらの結果から、高温に長時間さらされる大型タンクローリーの火災での鋼橋の挙動を明らかにするためには、鋼材の高温時の機械的特性を十分に把握するとともに、高温が長時間継続する場合もあることからクリープによる変形も考慮することが重要であることが分かる。

(3) 橋梁用高張力鋼の高温時機械的特性

本研究の試験で得られた温度によるヤング率、降伏応力、引張強度の低減率を図-3～図-5にまとめる。図の縦軸は、各材料特性のある温度での値を、室温での値で除したものである。各温度のデータは、2体の試験片の平均値を示している。また、それぞれの図には、文献8) : WTC, 文献9) : Furumura, 文献10) : AIJ, 文献11) : Eurocodeで示されている材料特性の低減率も合わせて示している。

温度がヤング率、降伏応力、引張強度に与える影響に関して、SBHS500は、SM570TMCとほとんど差のない結果となり、SBHS700は高温時のヤング率の低下率がSBHS500とSM570TMCと比べ数%低下する傾向を示したが、全体的には、SBHS500とSM570TMCと大差のない結果となった。したがって、橋梁用抗張力鋼SBHS500およびSBHS700の高温時のヤング率、降伏応力、引張強度の低減率は、従来の高張力鋼での知見を適用できることが明らかとなった。

また、今回の試験結果は、ヤング率、降伏応力、引張強度のどれを見ても、文献8)で提案されている材料特性の低減率に非常に近い値となっていることがわかる。

以上のことから、橋梁用高張力鋼を使用した橋梁の火災時の挙動を解明するために、熱応力解析を行う場合、従来の高張力鋼で得られている高温時の機械的特性を使用することができる。

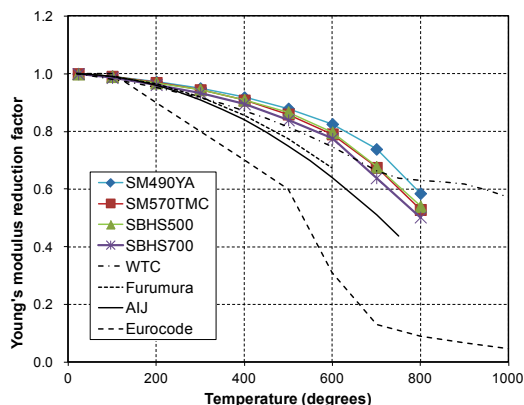


図-3 温度によるヤング率の低減率

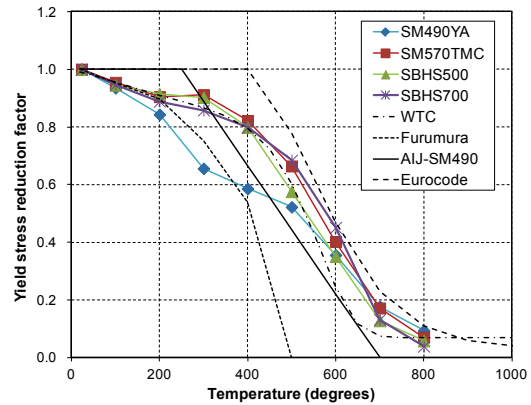


図-4 温度による降伏応力の低減率

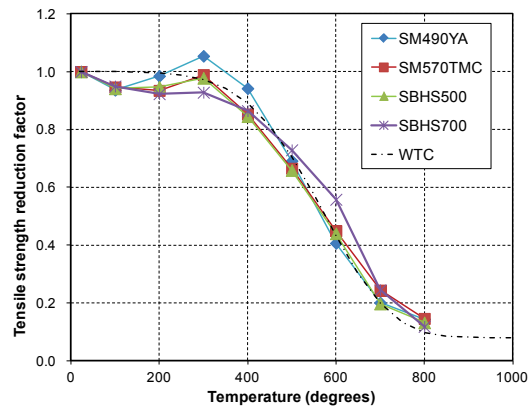


図-5 温度による引張強度の低減率

(4) まとめ

以上の検討から、都市内鋼製高架橋梁の耐火性能を検討する際に考慮すべき火災の規模および橋梁の受熱温度を明らかにし、火災時の挙動を検討するための熱伝導解析に使用すべき橋梁用高張力鋼の高温時の機械的特性を明らかにした。得られた知見は、個別の橋梁の耐火性能を評価する際に基礎となるデータであり、今後、鋼製橋梁の耐火性能を明らかにする研究に役立てられることが大いに期待される。

参考文献

- 1) Benjamin A. Graybeal (2007): Flexural Capacity of Fire-Damaged Prestressed Concrete Box Beams, FHWA-HRT-07-024, Federal Highway Administration.
- 2) Martha Davis and Paul Tremel (2007): Bill Williams River Bridge Fire Damage Assessment & Repair, ftp://ftp.wsdot.wa.gov/public/Bridge/WBES2007/assets/tuesday/8A/Martha_Davis_8A.pdf.
- 3) Christopher S. Bajwa, Earl. P. Easton, and Darrell S. Dunn (2009): "The MacArthur Maze Fire: How Hot Was It?," Proc. WM2009

- Conference, Phoenix, AZ.
- 4) Roger Schwartze (2009): Jefferson Street Bridge Incident,
<http://www.modot.org/tsc/2009documents/Roger%20Schwartze.pdf>.
 - 5) 桑野, 増井, 鈴木, 依田 (2008): 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.
 - 6) James G. Quintiere(著), 大宮喜文, 若月薫(訳) (2009): 基礎・火災現象原論, 共立出版.
 - 7) 若松孝旺 (1979): 直下火災に対する鋼製橋梁の完全性, 災害の研究, 第10巻, pp. 236-245.
 - 8) Luecke W.E., McColskey, J.D., McCowan, C.N., Banovic, S.W., Fields, R.J. Foecke, T., Siewert, T.A. and Gayle, F.W. (2005): Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster: Mechanical Properties of Structural Steels, NIST NCSTAR 1-3D, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.
 - 9) 古村, 安部, 岡部, 金 (1986): 火災温度域を考慮した鋼材の単軸応力-ひずみ関係式とその鋼構造骨組み熱変形解析への適用, 日本建築学会構造系論文報告集, Vol. 363, pp. 110-117.
 - 10) 日本建築学会 (2008): 鋼構造耐火設計指針.
 - 11) EN 1993-1-2:2005, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北根 安雄 (KITANE YASUO)
名古屋大学・工学研究科・助教
研究者番号: 10444415

(2) 研究分担者なし

(3) 連携研究者なし