

大阪工業大学大学院 学生員 ○高橋 佑介
大阪工業大学 正会員 大山 理

1. はじめに

近年、橋梁において大規模な火災が多発している中¹⁾、火災鎮火後の通行可否の判断に時間を要しており、それに伴う通行止め、通行規制などによる社会的損失は甚大となっている。そこで、今後、火災による熱履歴を受けた橋梁の劣化状態が構造性能に及ぼす影響を把握する際、鋼材の温度変化による力学特性を把握することが重要となってくる。熱履歴を受けた鋼材の降伏強度や引張強度などの力学特性について、現在、日本鋼構造協会によって、最高加熱温度は 800°C、一部 900°C まで定められているが²⁾、近年の橋梁火災では 1000°C を超えるものも発生している。そこで、著者らは、1000°C 以上における温度と強度の関係を把握するために熱履歴を受けた鋼材の力学特性に関する実験を実施している³⁾。本文は、SM490 材および SM490Y 材を対象に、データ蓄積を目的に、加熱温度および時間をパラメータに引張試験を実施するとともに、その結果に基づき、力学特性(降伏強度、引張強度)の低減係数を推定する提案式について報告する。

2. 試験概要

本試験では、各引張試験片に対して加熱試験を行い、炉内で自然冷却後、引張試験を実施した。供試体は JIS Z 2241 に規定されている 1A 号試験片とした(図-1)。各鋼材の化学成分を表-1、実験条件を表-2 にそれぞれ示す。

加熱試験は、ガスバーナーを熱源とするガス炉を用い、Eurocode の火災曲線⁴⁾を参考に実施した。本試験で用いる火災曲線は、野焼きや不審火などの比較的規模は小さいが発生確率の高い火災を対象とした EX 曲線(最高加熱温度 680°C)、タンクローリーの横転・炎上などの比較的規模は大きいが発生確率が低い火災を想定した HC 曲線(最高加熱温度 1100°C)、HC 曲線と同様の加熱時間－温度関係で、最高加熱温度を 900°C とした 3 種類とし、加熱時間は過去の火災事例を参考に決定した¹⁾。引張試験は、2000kN 万能試験機を用いて JIS Z 2241 に準拠して供試体が破断するまで単調に載荷した。

3. 試験結果

(1) 加熱試験

加熱試験結果の一例として、HC 曲線(加熱時間 60 分間)における加熱時間－温度関係を図-2 に示す。破線は設定温度(HC 曲線)を示しており、実線は炉内温度(赤色)および鋼材温度(青色)を示している。炉内温度は炉内に設置されている 8 本の熱電対の平均値とし、鋼材の受熱温度は熱電対を鋼材両面に貼付し、計測結果の平均値を鋼材温度とした。同図より、炉内温度は想定した設定温度と相違ない温度となっていることがわかる。また、鋼材温度は炉内温度より遅れて上昇するが、加熱開始 10 分後に炉内温度に追いつきその後、炉内温度と相違ない温度を示している。

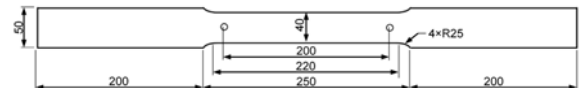


図-1 引張試験片の形状寸法 [単位: mm]

表-1 化学成分

鋼種	化学成分 [%]					
	C	Si	Mn	P	S	Ceq
SM490	16 (16)	35 (41)	143 (141)	14 (13)	4 (5)	41 (41)
SM490Y	15	19	113	17	4	35

※ () 内は2016年3月実施分

表-2 実験条件

常温実験: SM490, 計6体. SM490Y, 計3体.								
加熱冷却後実験: SM490, 計27体. SM490Y, 計18体.								
加熱温度 [°C]	680			900			1100	
加熱時間 [min]	30	45	60	30	45	60	30	60
SM490	▲▲▲	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	▲▲▲
SM490Y	●●●	-	●●●	-	●●●	●●●	●●●	●●●
火災曲線	EX			HC			HC	

※ ▲: 2016年3月実施, ●: 2016年12月実施

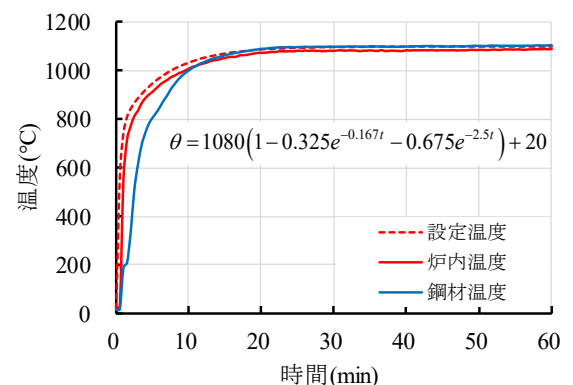


図-2 加熱時間－温度関係の一例

(2) 引張試験

引張試験結果として、各鋼材の降伏強度および引張強度の低減係数を、既往の研究結果と併せて図-3～図-6 にそれぞれ示す²⁾³⁾。また、文献5)より、加熱冷却後の鋼材の力学特性は550℃までは変化しないことを参考に、各図に550℃の位置を破線で示す。これより、本試験結果は、既往の研究結果の延長線上に位置しており、力学特性の低減開始温度は600～700℃付近であることがわかる。

SM490 材に着目すると、図-3 より降伏強度は1100℃で加熱時間30分間および60分間において、常温時の同強度よりも平均28.4%および38.1%低下、図-4 より引張強度は平均10.3%および14.6%低下することがわかる。また、900℃における降伏強度および引張強度は加熱時間によらず強度の回復がみられ、さらに、引張強度については、加熱時間による差異はほとんどみられなかった。

一方、SM490Y 材は図-5 および図-6 より加熱温度に比例してほぼ直線的に強度は低下する傾向がみられる。降伏強度は図-5 より1100℃で加熱時間30分間および60分間において、常温時の同強度よりも平均39.5%および41.4%低下、引張強度は図-6 より平均19.4%および23.5%低下することがわかる。なお、SM490 材については、降伏、引張強度ともに加熱時間による差異はみられなかった。

(3) 力学特性の低減係数推定式

試験結果をもとに、温度変化による鋼材の力学特性の低下傾向を把握する推定式を提案する。推定式の形式は温度を変数とした一次関数とする。併せて、下限値として平均値より求めた式から $-3\sigma(\sigma$:同一鋼材温度における取得データ全体の標準偏差)した式を図-3～図-6 に示す。推定式作成に使用したデータは加熱時間60分間のものとし、文献5)を参考に550℃から低減が始まるとして単回帰分析を行った。推定式の適用範囲は $550 \leq \theta \leq 1100$ ℃である。結果、推定式の精度を示す指標である決定係数はSM490 材で0.5以上、SM490Y 材で0.8以上であり、提案した推定式で力学特性を推定できると考えられる。なお、SM490Y 材に比べSM490 材の精度が低い理由として900℃における強度の回復が考えられる。

4. まとめ

本研究では、熱履歴を受けた鋼材の力学特性の変化を把握するために、既往の研究以上の温度における加熱、そして、自然冷却後の引張試験を行った。また、試験結果をもとに力学特性の低減係数を推定する式の提案を行った。今後、耐候性鋼材なども対象に同様の実験を行うとともに、火災による熱履歴を受けた橋梁の供用再開を数値的に判断するための耐荷力評価を行う予定である。

謝辞 本研究の実施にはJSPS 科研費(16K06478)の助成を受けたものです。ここに記し謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 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, (株)建設図書, 2008 年 10 月。
- 2) 日本鋼構造協会 技術委員会 安全性分科会 耐火小委員会 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, pp.28～71, 1968 年。
- 3) 高橋佑介、小林裕介、細見直史、大山 理：鋼の加熱自然冷却後の常温時強度に関する研究, 土木学会全国大会 第 71 回年次学術講演会, pp.19～20, 2016 年 9 月。
- 4) CEN : Eurocode1-Actions on structures Part 1.2 : General actions-Actions on structures exposed to fire, prEN1991-1-2, 2002.11.
- 5) 村越 順、澤田 守：火災を受けた橋梁の健全性評価に関する試験調査, 土木研究所, 2012 年 3 月。

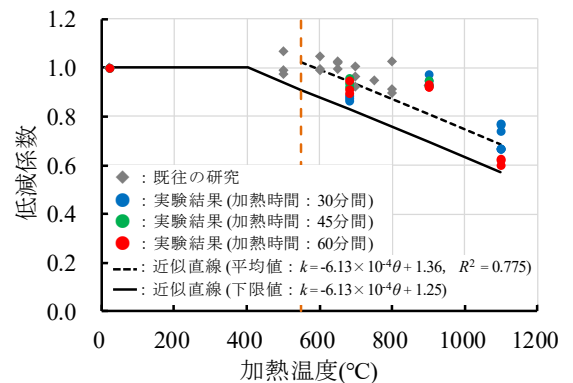


図-3 降伏強度の低減係数 (SM490 材)

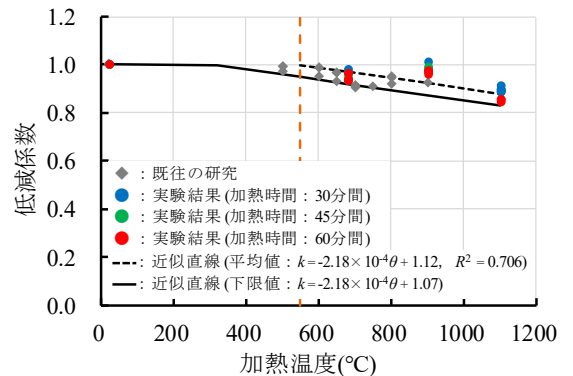


図-4 引張強度の低減係数 (SM490 材)

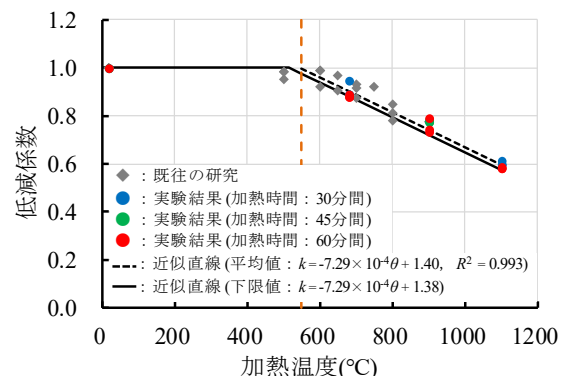


図-5 降伏強度の低減係数 (SM490Y 材)

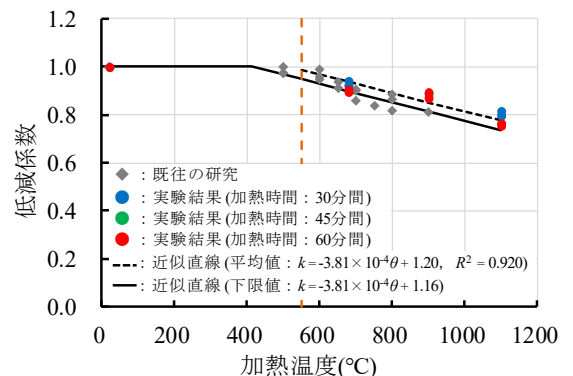


図-6 引張強度の低減係数 (SM490Y 材)