高温加熱を受けた高力ボルトセットのロックウェル硬さに基づく 受熱温度推定方法

THE METHOD TO ESTIMATE HEATED TEMPERATURE BASED ON ROCKWELL HARDNESS OF HIGH-STRENGTH BOLT SETS SUBJECTED TO HIGH TEMPERATURE

阪口明弘*, 豊田康二**, 門岡直也***, 田坂茂樹*

*Akihiro SAKAGUCHI, Koji TOYODA, Naoya KADOOKA
and Shigeki TASAKA*

The Rockwell hardness of high-strength bolt sets subjected to high temperature was measured. According to these data, the equation that Rockwell hardness decreased at 7HRC per 100°C above the tempering temperature was proposed as a conservative simple estimation method for fire-damaged investigation. The temperature of high-strength bolt sets was decided by averaging three temperatures, which estimated by applying the proposed equation to bolt, nut and washer. The proposed method was applied to the fire resistance test on full-scale beam and the measured temperatures of bolt sets could be estimated with adequate accuracy.

Keywords : Fire-damaged investigation, High-strength bolts, Rockwell hardness, Estimation of heated temperature

火害調査, 高力ボルト, ロックウェル硬さ, 受熱温度推定

1. はじめに

火災を受けた建物の再使用の可否および補修・補強の要否の判断を行うために実施される火害調査・診断は通常「建物の火害診断および補修・補強方法 指針(案)・同解説」¹⁾ (以下「指針(案)」と呼ぶ)に基づいて実施される。一般に鋼材が 500°C以上の高温に曝されると機械的性質の低下が懸念される。鉄骨造の火害調査・診断においては、指針(案)では目視観察によって鋼材の受熱温度を推定し、推定受熱温度が 500°C以上である鋼材については、梁など構造部材から切り出した板状試験片の引張試験などによって機械的性質を確認することとしている。目視観察によって受熱温度が 500°C以上であると推定する判断基準は主に鋼材表面の塗料の状態による。しかし、塗料が塗られていない鋼材を対象にする場合など、正確な目視観察が難しい場合がある。また、指針(案)によれば、「汎用塗料が黒変し、脱落」している状況での受熱温度は、「300~600°C」という推定結果の範囲が示され、引張試験が必要な 500°C以上とは断定できない。目視観察以外の適切な受熱温度推定方法があれば、鋼材を切り出して行う引張試験の要否判断も含め、部材が受けた火害の程度がより正確に推定できる。

目視観察以外で鋼材の受熱温度を推定する方法として、脇山ら²⁾は座金のロックウェル硬さを用いた熱履歴温度の推定法を提案した。高力ボルトセット(ボルト・ナット・座金)は焼入れ、焼戻しの熱処理を経た調質鋼であり、非調質鋼に比べて低い温度で機械的性質の変化が起こる。脇山らの熱履歴を受けた高力ボルトセットの引張試験やロックウェル硬さの試験結果によると、焼戻し温度を超える

温度履歴を受けると降伏点、引張強さおよび硬さが低下することが示されている。その中でも焼戻し温度の低い座金のロックウェル硬さを受熱温度の指標とすることが最適であると結論づけた上で、熱履歴温度の推定式が示されている。

高力ボルトセットの抜き取りは鋼材の切り出しより容易であることおよびロックウェル硬さ試験は切り出した鋼材の引張試験に比べて短時間で実施できることから、高力ボルトセットのロックウェル硬さによる受熱温度推定は火害調査・診断に適している。しかし、火害調査・診断においてこの方法はほとんど用いられておらず、受熱温度推定は未だに目視観察に頼っているのが現状である。この原因としては、脇山らの電気炉を用いた定温加熱実験の後に実火災を模擬した標準加熱による実験や実大試験体を用いた検証実験が行われず、この方法の有用性が認知されてこなかったためと考えられる。

そこで本研究では、まず脇山らが実施した「電気炉」を用いた定温加熱実験(実験 A)を行い、現在最も一般的に入手できる高力六角ボルトセット F10T のロックウェル硬さデータを蓄積した。次に、ガスバーナーを熱源とした「ガス炉」を用いた ISO834 標準加熱実験(実験 B)を行い、実火災を模擬した加熱に対するボルトセットのロックウェル硬さの低下傾向を把握した。その上で高力ボルト・ナット・座金のロックウェル硬さの低下を用いた火害調査・診断の実務で用いる簡便な受熱温度推定方法の提案を行った。さらに、耐火被覆を施した実大梁に取り付けた高力ボルトセットを対象にした ISO834 標準加熱実験(実験 C)により、提案した受熱温度推定方法の有効性を検証した。

本論文は、参考文献 4)~7)の内容に新たな実験結果と考察を加えて加筆し、まとめたものである。

* 一般財団法人日本建築総合試験所環境部耐火防火試験室

Fire Engineering Lab., Environmental Engineering Dept., General Building Research Corporation

** 一般財団法人日本建築総合試験所環境部耐火防火試験室
博士(工学)

Fire Engineering Lab., Environmental Engineering Dept., General Building Research Corporation, Dr. Eng.

*** 一般財団法人日本建築総合試験所建築確認評定部
性能評定課

Evaluation & Approval Div., Confirmation & Evaluation Dept., General Building Research Corporation

2. 電気炉による定温加熱実験（実験 A）

2.1 実験概要

脇山ら²⁾と同様の電気炉を用いた定温加熱実験（実験 A）を行い、今回実験対象とした高力六角ボルトセットについて 30 年以上前の実験と同じ傾向が得られることを確認した。

脇山らの実験と異なる主な点は、実火災の状況を想定して高温に曝される時間（均熱時間）を短くしたこと、および高力ボルトセットを鋼材に締め付けた状態で試験したことである。

2.2 試験体

高力ボルトセットは、ボルト・ナット・座金からなる。ボルトは低炭素鋼（炭素含有量約 0.3%以下）、ナットは中炭素鋼（同約 0.3～0.7%）で作られ、メーカーによる化学成分の違いは小さく、焼戻し温度の範囲も狭い。一方座金は、低炭素ボロン系（低炭素鋼にボロン（ホウ素）を添加した鋼、焼戻し温度 290℃～300℃程度）と S45C（炭素含有量 0.45%の機械構造用炭素鋼、焼戻し温度 420℃程度）の焼戻し温度の異なる 2 種類が主流となっており、それぞれの化学成分は異なる。高力六角ボルトセットの JIS 規格（JIS B 1186「摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット」）が制定された 1964 年当時は中炭素鋼のみであったが、1972 年頃より低炭素ボロン系座金が開発され現在に至っている。中炭素鋼は焼入れの際油を使う必要があるのに対して、低炭素ボロン系は水焼入れが可能であり、製造上の理由でメーカーによって両者が使い分けられている（高力ボルトメーカーからの情報による）。

脇山ら²⁾が加熱に供した試験体は、ボルト・ナット・座金それぞれの単体であった。実験 A に供して、鋼板（SS400、250 mm×150 mm、厚さ 9 mm を 3 枚組み合わせ）にボルト・ナット・座金 2 枚を組み合わせた 3 本のボルトセット（F10T、M22、長さ 70 mm）を間隔 80 mm で差し込み、締め付けたものとした（1 参照）。

図 1 実験状況（実験 A）

表 1 実験 A, B で使用したボルトセットの化学成分、焼戻し温度と加熱前 HRC

ボルトセット		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Ti	Al	Sol Al	B	焼戻し温度 (°C)	加熱前 HRC
		×100			×1000			×100	×1000			ppm			
①	ボルト	21	12	81	16	3	—	—	376	24	29	—	2000	416	32
	ナット	29	29	69	18	18	—	—	—	—	—	—	—	570	22
	座金 低炭素ボロン系	20	26	100	15	5	—	—	—	23	—	—	20	290	41
②	ボルト	21	12	81	16	3	—	—	376	24	29	—	2000	416	32
	ナット	29	29	69	18	18	—	—	—	—	—	—	—	570	22
	座金 S45C	45	22	78	16	5	2	3	6	—	—	5	—	420	38
③	ボルト	22	19	73	13	4	—	—	54	16	—	—	20	435	34
	ナット	30	28	72	17	21	—	—	—	—	—	—	—	570	27
	座金 S45C	45	21	76	12	3	2	2	2	—	—	—	—	430	39

使用した高力六角ボルトセット（F10T）の化学成分（ミルシートによる）、焼戻し温度および加熱前のロックウェル硬さ（HRC）を表 1 に示す。①～③の 3 種の高力ボルトセットは、主要なボルトメーカー 2 社製である。ボルトセット①と②のボルト、ナットは同じで、座金異なる。①の座金は低炭素ボロン系であり、②と③は化学成分、焼戻し温度が異なる S45C である。なお、焼戻し温度は製造メーカーから聞き取った情報による。

2.3 実験方法

2.3.1 加熱方法

加熱は小型電気炉（㈱東洋製作所製 型番：FUW252PA）を用いて実施した。脇山ら²⁾は、目標温度を 8 時間または 1 時間保持している（均熱時間は 8 時間または 1 時間）が、実験 A では、JIS G 0567:1998「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」の試験方法を参考に均熱時間を 15 分間とした。電気炉内における雰囲気温度の昇温速度は 1 分あたり 6℃とし、目標温度に達した時点でその温度を維持するように設定した。予備実験において目標温度に関わらず加熱開始 155 分後には試験体の温度が目標温度の±10℃以内に収まることを確認したので、実験 A では加熱開始後 170 分（155 分+均熱 15 分）まで加熱を継続し、170 分以後は炉内で徐冷した。目標温度を 600℃とし、加熱を 180 分まで継続した予備実験における炉内温度とボルト・座金温度を図 2 に示す。

目標温度は火害調査の受熱温度推定で用いられると想定される温度範囲である 200～800℃の中で、ボルトセット①と②では 100℃毎の 7 種類と、各座金の焼戻し温度に近い温度（ボルトセット①では 350℃と 450℃、ボルトセット②では 420℃と 450℃）の計 9 種類とした。ボルトセット③では、焼戻し温度以下の 200℃、300℃を省略し、400℃以上の計 6 種類とした。目標温度毎の試験体数の一覧を表 2 に示す。

2.3.2 ロックウェル硬さ測定方法

ロックウェル硬さはロックウェル硬さ試験機（㈱明石製作所製型番：ARK-B）を用いて計測した。測定は JIS Z 2245:2005「ロックウェル硬さ試験—試験方法」に基づいて加熱前後に行い、C スケールを用いた。測定点数は JIS B 1186:1995 に基づいて 1 試験体あたり

図 2 実験 A での炉内温度とボルト・座金温度（目標温度 600℃）

表 2 目標温度毎の試験体数一覧（実験 A）

目標温度 (°C)	200	300	350	400	420	450	500	600	700	800
ボルトセット①	3	3	3	3	—	3	3	3	3	3
ボルトセット②	3	3	—	3	3	3	3	3	3	3
ボルトセット③	—	—	—	3	—	3	3	3	3	3

3箇所とし、それらの平均値で結果を表示した。計測面は、ボルトは頭部側面、ナットおよび座金は座面とし(図3参照)、加熱後の計測は計測面を紙やすりで研磨した後、硬さ試験に供した。

図3 ボルト・ナット・座金のロックウェル硬さ計測点

2.4 実験結果

受熱温度の定義は、文献1)に「火災の熱により上昇した部材または材料の最高温度」と記されている。実験Aではボルトと座金の温度は目標温度の $\pm 10^\circ\text{C}$ 以内に収まっていたため、受熱温度は目標温度の値とした。実験Aの受熱温度とロックウェル硬さの関係を図4に示す。一点鎖線はそれぞれの焼戻し温度を表している。ボルト、ナットについては、ボルトセット①と②は同じものであるため一つの図にまとめて示した。

図4からわかるように、焼戻し温度以下の受熱ではロックウェル硬さに変化は現れないが、焼戻し温度以上の熱を受けるとロックウェル硬さは温度に比例してほぼ直線的に低下した。ただし、いずれの試験体であっても受熱温度 800°C付近では測定値がかなり小さくなった。これは、ロックウェル硬さ試験(Cスケール)(JIS Z 2245)の保証値^{注1)}が10HRC~77HRCであることから、保証値外の低すぎる値が測定されたことを意味する。しかし逆に、10HRC未満の値が計測された場合は、受熱温度が800°C程度の高温になったと推定できる。図中、ロックウェル硬さ(Cスケール)保証値範囲外の計測値(10HRC未満のデータ)は、網掛け記号で区別して表示した。

実験Aの定温加熱実験の結果(図4)が、焼戻し温度以上の熱を受けるとロックウェル硬さは温度に比例して直線的に低下したこと

図4 受熱温度とロックウェル硬さの関係(実験A)

表 3 実験 A の近似直線

ボルトセット			近似直線			
実験	項目	番号	傾き ($\times 10^{-2}$)	切片	重相関係数	標準誤差 ($^{\circ}\text{C}$)
実験 A	ボルト	①②	-6.1	54.7	0.868	25.6
		③	-8.2	68.9	0.974	14.6
	ナット	①②	-7.3	61.5	0.964	10.4
		③	-8.0	71.3	0.966	11.2
	座金	①	-8.0	65.2	0.981	14.0
		②	-9.3	77.2	0.990	10.8
		③	-9.5	78.0	0.989	10.6

から、今回実験対象とした高力六角ボルトセットでも、脇山ら²⁾の実験結果の傾向と同じであることが確認できた。

受熱温度とロックウェル硬さ値の関係を定量的に表すために、両者間の近似直線を求めた。これは焼戻し温度以上の熱を受けた高力ボルトセットのロックウェル硬さ値のうち、ロックウェル硬さ (C スケール) 保証値範囲外の計測値 (10HRC 未満のデータ) を除いた値 (図 4 内に白抜きの記号で示されているデータ) を対象として求めたものである。表 3 に各実験結果から得られた近似直線の傾き、切片、重相関係数、標準誤差を示す。近似直線の傾きはボルトで $-6.1 \sim -8.2 \times 10^{-2}$ 、ナットで $-7.3 \sim -8.0 \times 10^{-2}$ 、座金で $-8.0 \sim -9.5 \times 10^{-2}$ となった。

3. ガス炉を用いた IS0834 標準加熱実験 (実験 B)

3.1 実験概要

実験 A の電気炉では徐々に炉内温度を上げ目標温度に到達した時点で炉内温度を維持したが、実際の火災では実験 A での加熱より急激な温度変化が生じる場合が多い。そこで実験 B では加熱手段として耐火試験に一般に用いられるガスバーナーを熱源とするガス炉を用い、盛期火災を模擬した IS0834 の標準加熱温度曲線に従って加熱し、電気炉よりも急激な温度変化を高力ボルトセットに与えた場合のロックウェル硬さの変化を調べた。

3.2 実験方法

実験 B に使用したガス炉は、都市ガス (46,090kJ/m) を熱源としたバーナー 1 基を持つ一辺 (内寸) が 700 mm の立方体の炉である。実験 B で使用したガス炉の水平断面図を図 5 に示す。

ガス炉内中央に試験体を立てた状態で設置し、両端を耐火レンガで固定して加熱した。試験体がバーナーの火炎に直接曝されると試

図 5 実験 B で用いたガス炉の水平断面図 (寸法単位: mm)

表 4 目標温度毎の試験体数一覧 (実験 B)

目標温度 ($^{\circ}\text{C}$)	250	400	450	500	550	600	700	800
ボルトセット①	3	3	3	3	-	3	3	3
ボルトセット②	3	-	-	3	3	3	3	3

図 6 実験 B での炉内温度と座金温度 (目標温度 600 $^{\circ}\text{C}$)

験体温度にばらつきが発生しやすいため、試験体とバーナーの間は遮蔽板 (セラミックファイバーボード) を設置した。また、試験体表裏面以外からの熱の流入を防ぐため、試験体端面はセラミックで被覆した。

ボルトセットの温度は座金の温度で代表し、熱電対の先端を座金の鋼板側に設置し、1 ボルトセットあたり 2 点 (ボルト側座金 1 点、ナット側座金 1 点) で計測した。炉内温度は試験体ナット側中央から 10 cm の位置 1 点で計測した。

炉内温度が IS0834 標準加熱温度に従うように加熱し、6 点の座金温度のうち最高値が目標温度となった時点で加熱を終了した。その後炉内で徐冷し、加熱開始後 120 分時までその状態を維持した。実験 B ではボルトセット①と②のみを対象とした。目標温度毎の試験体数の一覧を表 4 に示す。

目標温度を 600 $^{\circ}\text{C}$ とした場合の、炉内温度と座金温度を図 6 に示す。一回の加熱で 6 点計測した座金温度は、加熱終了後、最高温度が高いものから順に低下に転じ、加熱終了 3 分後には全ての座金温度が低下し始めた。各座金の最高温度の差は最大で 57 $^{\circ}\text{C}$ であった。加熱終了後 15 分以降は各座金温度のばらつきが小さくなった。他の目標温度の加熱における座金温度も上記と同じ傾向であった。電気炉での温度 (図 2) と比較すると、座金の温度上昇および低下が急激になっており、最高温度に曝されている時間も短くなっていることがわかる。

実験 B では 10 秒間隔で計測した各座金の最高温度を受熱温度とした。ボルト及びナットの受熱温度は、それぞれボルト側座金及びナット側座金の受熱温度と同じ値とした。

3.3 実験結果

実験 B の受熱温度とロックウェル硬さの関係を図 7 に示す。実験 A の結果と同様に、焼戻し温度以上の熱を受けるとロックウェル硬さは温度に比例して直線的に低下した。このことから急激な温度上昇および降下が起こった場合でもこの傾向は同じであると考えられる。また、ボルトセット①と②でこの傾向に違いが見られなかったことから、低炭素ボロン系と S45C の化学成分の違いによる差はないことも確認できた。ただし、実験 B の結果は実験 A に比べると硬さ値のばらつきが大きくなった。これは、高温に曝された状態が実験 A ほど安定した状態でなかったことが原因と考えられる。

受熱温度とロックウェル硬さ値の関係を定量的に表すために、実験 A と同様両者間の近似直線を求めた。対象としたデータは図 7 内に白抜ききの記号で示されているもので、得られた近似直線の傾き、切片、重相関係数、標準誤差を示す。近似直線の傾きは、ボルト -5.5×10^{-2} 、ナット -3.3×10^{-2} 、座金 -6.1

図 7 受熱温度とロックウェル硬さの関係(実験 B)

～ 6.7×10^{-2} であり、実験 A より実験 B の方が傾きの絶対値が小さくなる傾向があった。これは高力ボルトセットの温度履歴の差が原因と考えられる。実験 A では高力ボルトセットは 15 分以上安定した温度状態に置かれたのに対し、実験 B では温度上昇後すぐに下降に転ずる温度履歴を受け、最高温度に達している時間が短かったため、同じ受熱温度に対して実験 A より硬さの変化が小さくなったと考えられる。これらのことから、ガス炉を用いた ISO834 標準加熱実験(実験 B) で以下のことがわかった。

- 1) 盛期火災を模擬した標準加熱による場合でも、焼戻し温度以上の熱を受けるとロックウェル硬さは温度に比例してほぼ直線的に低下する。
- 2) ロックウェル硬さの低下の勾配は、定温加熱に比べ標準加熱による場合の方が少し緩くなる。

4 受熱温度の推定

実験 A および B によって、今回実験対象とした高力六角ボルトセット F10T でも、過去の実験結果と同様に焼戻し温度以上の熱を受けるとロックウェル硬さは温度に比例してほぼ直線的に低下することが確認できた。高力ボルトセットの化学成分や加熱条件の違いに関わらずこの傾向が得られたことから、火災調査においてロックウェル硬さを用いた受熱温度の推定が可能である。

受熱温度の推定には脇山ら²⁾に倣いロックウェル硬さの低下に沿った近似直線を用いることにした。高力ボルトセットの焼戻し温度の情報は、使用された高力ボルトセットのロット番号がわかれば、ボルトメーカーに問い合わせて入手可能である。また、熱を受けていない高力ボルトセットのロックウェル硬さの値は火災現場から健全部の高力ボルトセットを採取して計測すれば得られる。推定に用いる直線は温度－硬さグラフ上で焼戻し温度と初期硬さ値の座標を通る直線とするとわかりやすい。

表 6 に焼戻し温度を通る近似直線として表示したのは、図 4 および図 7 で焼戻し温度以上の熱を受けたもののうち、ロックウェル硬さ (C スケール) 保証値範囲外の計測値 (10HRC 未満のデータ) を除いた値 (白抜ききの記号で示されているデータ) を対象に、座標 (焼戻し温度、初期硬さ値) を通り、最も重相関係数が大きくなる直線の傾きを求めたものであり、その時の重相関係数、標準誤差も表示している。近似直線の傾きは、実験 A のボルトで $-8.8 \sim -8.9 \times 10^{-2}$ 、ナットで $-9.2 \sim -9.3 \times 10^{-2}$ 、座金で $-7.6 \sim -10.4 \times 10^{-2}$ となった。実験 B では、ボルト -6.4×10^{-2} 、ナット -8.4×10^{-2} 、座金 $-6.7 \sim -7.7 \times 10^{-2}$ であり、ここでも実験 B の方が傾きの絶対値が小さくなる傾向があった。図 4 および図 7 には、この近似直線を点線で表示している。

脇山ら²⁾は、ボルト・ナット・座金の硬さの傾向を調べた上で、最も焼戻し温度が低い座金を受熱温度推定に使うのが良いとして、

表 5 実験 B の近似直線

ボルトセット			近似直線			
実験	項目	番号	傾き ($\times 10^{-2}$)	切片	重相関係数	標準誤差 (°C)
実験 B	ボルト	①②	-5.5	53.3	0.863	30.4
	ナット	①②	-3.3	37.0	0.551	36.0
	座金	①	-6.7	61.2	0.900	39.3
		②	-6.1	62.2	0.746	41.5

表 6 実験 A、B の結果を用いた受熱温度推定直線

ボルトセット			焼戻し温度を通る近似直線			傾き -7.0×10^{-2} の直線		Case I における脇山式			Case II における脇山式			Case III における脇山式		
実験	項目	番号	傾き ($\times 10^{-2}$)	重相 関係 数	標準 誤差 ($^{\circ}\text{C}$)	重相 関係 数	標準 誤差 ($^{\circ}\text{C}$)	傾き ($\times 10^{-2}$)	重相 関係 数	標準 誤差 ($^{\circ}\text{C}$)	傾き ($\times 10^{-2}$)	重相 関係 数	標準 誤差 ($^{\circ}\text{C}$)	傾き ($\times 10^{-2}$)	重相 関係 数	標準 誤差 ($^{\circ}\text{C}$)
実験 A	ボルト	①②	-8.8	0.826	29.3	0.665	40.7									
		③	-8.9	0.971	15.5	0.795	40.9									
	ナット	①②	-9.2	0.921	15.4	0.618	33.8									
		③	-9.3	0.952	13.4	0.586	39.4									
	座金	①	-7.6	0.973	16.8	0.950	22.6	-8.5	0.977	15.5	-8.2	0.980	15.5	-8.7	0.705	55.1
		②	-9.7	0.988	11.6	0.669	61.3	-8.0	0.882	24.5	-8.9	0.982	9.5	-8.7	0.878	24.9
		③	-10.4	0.981	14.0	0.317	82.9	-8.0	0.796	29.9	-8.9	0.984	8.3	-8.7	0.902	20.8
実験 B	ボルト	①②	-6.4	0.863	30.4	0.817	35.2									
	ナット	①②	-8.4	0.495	38.2	0.408	41.4									
	座金	①	-6.7	0.881	42.8	0.873	44.3	-8.5	0.567	62.6	-8.2	0.665	55.0	-8.7	0.758	46.8
		②	-7.7	0.742	41.8	0.686	46.1	-8.0	0.812	40.3	-8.9	0.710	49.9	-8.7	0.388	68.9

座金のロックウェル硬さから受熱温度を推定する方法を 3 つのパターンに分け、直線の傾きと切片を与える形で提案している。Case I は座金の化学成分がわかった場合、Case II は座金が低炭素系か中炭素系かがわかった場合、Case III は座金の化学成分に関する情報が得られなかった場合である。今回の実験 A および実験 B の結果に脇山らの提案式（以下「脇山式」と呼ぶ）を当てはめた。Case I については、今回の座金の化学成分は脇山らが調査した当時の化学成分とは異なり、完全に一致するものはなかったため、化学成分が最も近い座金の推定式を用いた。Case I ～ III の推定直線を図 4 および図 7 の座金のグラフ内に、推定直線の傾き、重相関係数、標準誤差の値を表 6 に示す。実験 A では座金①～③全てにおいて Case II の推定精度が高かった。実験 B では、座金①で Case III が、座金②で Case I の推定精度が良かったが、600 $^{\circ}\text{C}$ 以上の高温域でどの推定直線も実測値を下回り、推定精度の良いケースはなかった。

脇山らの提案式のうち Case II は実験 A に対し十分良い推定精度を有していると言えるが、実験 B に対しては高温域で推定値が実測値より小さくなる傾向がある。火災の加熱は定温加熱の実験 A よりも盛期火災を模擬した実験 B に近いと考えられ、推定直線は実験 B での推定精度が良い方が望ましい。また、脇山らは座金の硬さのみによる受熱温度推定を提案しているが、通常火害調査でボルトセットを採取するとボルト・ナット・座金の全てが採取できる。採取したボルト・ナット・座金それぞれのロックウェル硬さが常温時より低下しているか否かで受熱温度が焼戻し温度を超えたか否かが明確に判断でき、ボルト・ナット・座金はそれぞれ焼戻し温度が異なるため、それぞれの焼戻し温度を使うことで、受熱温度の範囲を限定することができる。さらに、焼戻し温度以上で直線的に低下する推定直線をボルト・ナット・座金に対し 3 本作成し、それらを組み合わせで受熱温度を推定するとさらに推定精度が良くなると考えられる。

そこでここでは、火害調査・診断の実務で用いる簡便な受熱温度推定方法として、ボルト・ナット・座金全てに対して焼戻し温度までは硬さが低下せず、焼戻し温度以上では一律に 100 $^{\circ}\text{C}$ あたり 7HRC 低下する直線（以下「H-T 関係式」と呼ぶ）の使用を提案する。この直線は、座標（焼戻し温度、初期硬さ値）で折れ曲がるバイリニアな形状となる。

推定直線は HRC 低下勾配が小さめで、実験 B での推定精度が良い方が望ましいと考えたのは以下の理由による。推定直線の低下勾配を小さく設定すると火害調査時に安全側（推定受熱温度が高めにな

る）の評価となる。一方、均熱時間が長く穏やかな冷却となる電気炉加熱の場合、同じ受熱温度でも HRC が小さくなり、電気炉加熱の実験結果（脇山ら²⁾ および本論の実験 A）に基づく、低下勾配が大きく設定されてしまう。脇山ら²⁾ の表 13・座金では-7.93～-9.31 $\times 10^{-2}$ HRC/ $^{\circ}\text{C}$ 、本論表 6・実験 A 座金では-7.6～-10.4 $\times 10^{-2}$ HRC/ $^{\circ}\text{C}$ であるが、ガス炉を用いた実験 B 座金では-6.7 $\times 10^{-2}$ および-7.7 $\times 10^{-2}$ HRC/ $^{\circ}\text{C}$ である。実火災時、均熱時間が短く急な冷却に曝された場合は受熱温度に対して HRC の計測値が大きく出る傾向があるため、その際の推定直線の低下勾配を大きくすると受熱温度を低めに見積もる可能性が高くなる。したがって、実火災を受けた建物の火害診断に用いる評価方法としては、実験 B の結果に基づいて HRC 低下勾配を小さめに設定すべきである。

H-T 関係式を用いた推定手順を表 7 および図 8 に示す。今回の実験では水冷を受けたボルトセットについては確認できていないため、水冷を受けた場合は本推定手順の対象外とする。また、手順 9 で、ボルト、ナット、座金それぞれから得られた推定受熱温度の範囲が矛盾する場合（例：ボルトからは図 8 のエリア A または B、ナット、座金でエリア D のような推定結果が得られたような場合）は、基本的には推定を行わないこととした。ただし、3 種の結果のうち推定受熱温度が低く他の結果と矛盾を生じている結果を無視しそれ以外の結果のみを利用して受熱温度を推定する場合は、受熱温度が高めで安全側の評価となるため推定を継続することも可能とした。

実験 B の結果の内、硬さ値とボルト・ナット・座金の焼戻し温度が得られたと仮定して、H-T 関係式および脇山式 Case II を用いて推定した受熱温度と実際の受熱温度を比較した。H-T 関係式による推定では、ボルト側座金の温度に対してボルトと座金の硬さを、ナット側座金の温度に対してナットと座金の硬さを対応させ、その結果を表 8 に示す。H-T 関係式による推定は脇山式 Case II による推定に比べて重決定係数が大きく標準誤差が小さくなる場合が多かった。また、推定値と実測値の差（推定値－実測値）の平均はプラス側に移動し、危険側予測となる割合が大幅に低下した。これらのことから、H-T 関係式による推定では推定精度が向上し受熱温度の推定が安全側となる割合が高くなることがわかり、火害調査の実務に用いる簡便な受熱温度推定方法となる可能性が示された。

脇山式による場合の標準誤差は 46.8～68.7 $^{\circ}\text{C}$ 、H-T 関係式による場合は 38.8～58.8 $^{\circ}\text{C}$ であり、H-T 関係式による場合の方が標準誤差は小さくなったが、受熱温度を厳密に推定できているとは言い難い。

表7 H-T 関係式を使った受熱温度推定手順

手順	内容
1	対象とするボルトセットが水冷されていないことを確認する
2	健全部のボルト・ナット・座金のロックウェル硬さを計測する
3	ボルト・ナット・座金の焼戻し温度情報の入手する (ボルトメーカーへの問い合わせによる)
4	H-T 関係式を作成する(ボルト・ナット・座金の3本)
5	火害部のボルト・ナット・座金のロックウェル硬さを計測する
6	火害部の硬さが健全部の±1 の範囲である場合 ⇒受熱温度は焼戻し温度以下であると推定する
7	火害部の硬さがロックウェル硬さの保証値範囲外まで低下している場合(図8 エリアE) ⇒受熱温度は700℃以上と推定する
8	火害部の硬さが健全部の±1 の範囲より低下している場合(保証値範囲内) ⇒受熱温度はH-T 関係式を用いて推定する
9	手順 6～8 で得られたボルト・ナット・座金の結果に矛盾がないことを確認する ⇒矛盾があれば、受熱温度推定は行わない ただし、3 種の結果のうち推定受熱温度が低く他の結果と矛盾を生じている結果を無視し、それ以外の結果のみを利用して受熱温度推定を継続することは可能。
10	ボルト・ナット・座金すべての受熱温度が焼戻し温度以下であった場合(図8 エリアA) ⇒受熱温度は座金の焼戻し温度以下であると推定する
11	手順8 で1 個の推定受熱温度が得られた場合(図8 エリアB) ⇒得られた値をそのまま推定受熱温度とする
12	手順8 で2 個の推定受熱温度が得られた場合(図8 エリアC) ⇒得られた2 個の値を平均して推定受熱温度とする
13	手順8 で3 個の推定受熱温度が得られた場合(図8 エリアD) ⇒得られた3 個の値を平均して推定受熱温度とする

図8 受熱温度推定図

しかし、H-T 関係式による推定では受熱温度がボルト、座金のいずれかの焼戻し温度以下の場合には、機械的性質の低下が懸念される500℃には達していないとほぼ断定できる(図8 参照)。したがってH-T 関係式による推定は鋼材の引張試験の要否判断に対して十分有用であると考えられる。

なお、接合部では継ぎ手板が用いられるため、母材より熱容量が大きく温度が上昇しにくい傾向にある。また、ボルトセットの抜き取りが可能な接合部は必ずしも受熱温度の最も高い部分に存在する

とは限らない。すなわち、接合部のボルトセットを用いた推定受熱温度より高い受熱温度の部材が存在する可能性がある。本研究で提案した受熱温度推定を火害調査の実務で使用する場合は受熱温度推定指標の一つと位置付け、母材の受熱温度が高い場合もあることを理解した上で総合的に判断する必要がある。

5. 実大梁試験体(実験C)による推定方法の有効性の検証

5.1 実験概要

耐火被覆を施した実大梁に取り付けた高力ボルトセットを対象にしたIS0834 標準加熱実験³⁾(実験C) 結果に対して、前章で提案したH-T 関係式による受熱温度推定方法を適用し、推定方法の有効性を検証した。

5.2 試験体

実験C で用いた試験体はH形鋼梁(H-350×175×7×11、L7000、SM400B) であり、両端から1850 mmの位置に高力ボルト継手部を設けたものである。実験C の载荷加熱試験は、試験体No.1～5 の5 体行ったが、試験体No.1 は継手のない試験体であったため、試験体No.1 以外の4 体で使われたボルトセットを対象とした。

耐火被覆は試験体No.1～4 とNo.5 で異なる仕様としたが、継手部に関しては1 時間程度の耐火性能を有するセラミックファイバーブランケット(密度130kg/m³、厚さ12.5 mm) で被覆した。使用したボルトセットは、F10T、M16、長さ55 mm(ウェブ)、60 mm(フランジ) であり、実験A、B で用いたボルトセットとは化学成分が異なるものである。長さが異なるボルトセットはボルトと座金それぞれの化学成分が異なるが、ナットは両者に共通のものを使用している。ボルトセットのミルシートによる化学成分および焼戻し温度を表9 に示す。なお、焼戻し温度は製造メーカーから聞き取った情報による。

5.3 実験方法

実大梁に対する载荷加熱実験は、(一財)日本建築総合試験所の床梁炉を用いて実施した。ボルトセットの温度は、各接合部で上フランジ2 本、ウェブ2 本、下フランジ2 本の6 本のボルト頭に熱電対を取り付けて計測した。加熱は炉内温度が標準加熱曲線となるように加熱し、試験体が崩壊するまで加熱を継続した。各試験体の加熱時間および継手部平均温度の最高値を表10 に示す。また、継手部の平均温度(12 点の温度の平均) 測定結果を図9 に示す。ボルトセットの温度上昇は約7℃/分であり、実験B(約30℃/分) より緩慢であった。

実験C では30 秒間隔で計測した各ボルトの最高温度をそのボルトの受熱温度とした。ナット及び座金の受熱温度はボルトの受熱温度と同じ値とした。なお、上フランジのボルトセットについては、フ

表8 H-T 関係式とCase IIにおける脇山式による推定精度

ボルトセット			推定に使用した硬さ値	推定法	推定値と実測値の絶対値の平均(℃)	推定値と実測値の差の絶対値の最大(℃)	差(推定値－実測値)の平均(℃)	重決定係数	標準誤差(℃)	危険側予測となる割合(%)
実験B	①	ボルト側座金	座金+ボルト	H-T 関係式による推定	31.8	55.4	-29.2	0.925	38.8	73.3
			座金のみ	Case IIにおける脇山式による推定	58.2	77.6	-58.2	0.418	68.7	100.0
		ナット側座金	座金+ナット	H-T 関係式による推定	38.7	150.3	3.5	0.785	58.8	60.0
			座金のみ	Case IIにおける脇山式による推定	35.6	84.9	-4.8	0.795	46.8	66.7
	②	ボルト側座金	座金+ボルト	H-T 関係式による推定	29.6	78.7	14.5	0.873	39.3	25.0
			座金のみ	Case IIにおける脇山式による推定	31.8	84.1	-17.4	0.839	47.6	75.0
		ナット側座金	座金+ナット	H-T 関係式による推定	31.7	85.6	21.1	0.876	41.6	33.3
			座金のみ	Case IIにおける脇山式による推定	44.9	101.6	-35.8	0.747	56.7	91.7

表9 実験C ボルトセットの化学成分と焼き戻し温度

ボルト セット		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Ti	Al	Sol Al	B	焼戻し 温度(℃)
		×100			×1000		×100			×1000		ppm		
ボ ル ト	L55 mm	19	6	93	12	6	1	2	120	—	0.03	—	13	430
	L60 mm	19	3	99	6	13	1	2	140	—	0.03	—	16	430
ナット		32	29	69	19	24	—	—	—	—	—	—	—	600
座 金	L55 mm	24	2	145	14	4	1	1	2	—	—	—	—	270
	L60 mm	23	3	150	11	5	1	1	2	—	—	—	—	270

表10 各試験体の加熱時間と継手部平均温度の最高値(実験C)³⁾

試験体	No.2	No.3	No.4	No.5
加熱時間(分)	88	103	131.5	83
継手部平均温度の最高値(℃)	595	601	704	511

図9 継手部の平均温度計測結果³⁾

ランジ下面に露出していたボルトとボルト側座金のみを分析対象とし、ALCパネルで被覆されていたフランジ上面のナット及びナット側座金は分析対象から除外した。

5.4 実験結果

加熱実験に供しなかった同じロットのボルト・ナット・座金の硬さを計測し、健全部の値とした。実験Cのボルト・ナット・座金の受熱温度とロックウェル硬さの関係を図10に示す。図10では試験体No.2～5のどの試験体で用いられたボルトセットかについては特に区別していない。

ボルト、座金では焼き戻し温度以下の計測例がなかったので、焼き戻し温度を境界としてそれ以上の熱を受けるとロックウェル硬さが低下し始めるかの確認はできなかった。焼き戻し温度以上の範囲では硬さの低下は温度に比例して直線的になった。ナットでは焼き戻し温度以上の熱を受けるとロックウェル硬さが低下し始め、硬さが温度に比例して直線的に低下することが確認された。

受熱温度とロックウェル硬さ値の関係を定量的に表すために、実験A,Bと同様に受熱温度とロックウェル硬さ値の近似直線を求めた。対象としたデータは図10内に白抜きの記号で示されているものである。表11に各実験結果から得られた近似直線の傾き、切片、重相関係数、標準誤差を示す。実験Cでは近似直線の傾きは、ボルト -6.6×10^{-2} 、ナット -5.8×10^{-2} 、座金 -6.5×10^{-2} であった。

また、表11に焼き戻し温度を通る近似直線として表示したのは、実験A,Bと同様に、座標(焼き戻し温度, 初期硬さ値)を通る直線の傾きを0.001ピッチで変化させ最も重相関係数が大きくなる時の傾きを求めたものであり、その時の重相関係数、標準誤差も表示している。近似直線の傾きはボルト -8.7×10^{-2} 、ナット -6.5×10^{-2} 、座金

-6.5×10^{-2} であった。図10にはこの近似直線を点線で表示している。

実験Cの結果の内、硬さ値とボルト・ナット・座金の焼き戻し温度が得られたと仮定してH-T関係式および脇山式CaseⅡを用いて推定した受熱温度と実際の受熱温度とを比較し、表12に示す。H-T関係式についてはボルト・ナット・座金全てを用いて推定した場合と、座金のみを用いて推定した場合の両方を示している。H-T関係式による推定は、座金のみによる推定の場合でも脇山式CaseⅡによる推定に比べて重決定係数が大きく標準誤差が小さくなる場合が多かった。また、推定値と実測値の差(推定値－実測値)の平均はプラス側に移動し、危険側予測となる割合が大幅に低下した。さらに、ボルト・ナット・座金全てを用いて推定した場合は、上記の傾向がさらに明確になった。

脇山式による場合の標準誤差は28.1℃、ボルト・ナット・座金を用いたH-T関係式による場合は24.4℃であり、H-T関係式による場

図10 受熱温度とロックウェル硬さの関係(実験C)

表 11 各データの近似直線と推定用近似直線

項目	近似直線				焼戻し温度を通る 近似直線				傾き -7.0×10^{-2} の直線				Case I における脇山式			Case II における脇山式			Case III における脇山式		
	傾き ($\times 10^{-3}$)	切片	重相関 係数	標準誤 差(℃)	傾き ($\times 10^{-3}$)	重相関 係数	標準誤 差(℃)	重相関 係数	標準誤 差(℃)	傾き ($\times 10^{-3}$)	重相関 係数	標準誤 差(℃)	傾き ($\times 10^{-3}$)	重相関 係数	標準誤 差(℃)	傾き ($\times 10^{-3}$)	重相関 係数	標準誤 差(℃)			
ボルト	-6.6	58.3	0.844	22.9	-8.7	0.835	23.6	0.352	46.7												
ナット	-5.8	60.7	0.895	16.1	-6.5	0.895	16.1	0.883	17.0												
座金	-6.5	56.3	0.788	24.0	-6.8	0.750	26.0	0.727	27.2	-8.5	0.755	25.8	-8.2	0.784	24.2	-8.7	0.388	51.2			

表 12 H-T 関係式と Case II における脇山式による推定精度

推定に使用した硬さ値	推定法	推定値と実測値の差の絶対値の平均(°C)	推定値と実測値の差の絶対値の最大(°C)	差(推定値－実測値)の平均(°C)	重決定係数	標準誤差(°C)	危険側予測となる割合(%)
座金+ボルト+ナット	H-T 関係式による推定	19.5	60.7	7.4	0.880	24.4	44.4
座金のみ	H-T 関係式による推定	20.0	63.6	-8.7	0.810	25.7	55.6
座金のみ	Case II における脇山式による推定	23.5	53.7	-15.6	0.722	28.1	75.6

合の方が標準誤差は小さくなった。耐火被覆のある実験 C の標準誤差は耐火被覆のない実験 B に比べて小さくなり、受熱温度の推定精度が良くなった。耐火被覆がなく温度上昇が急激な場合（実験 B）でも実務上は十分な推定精度を有していたが、耐火被覆がある場合（実験 C）はボルトセットの温度上昇が緩やかになり、さらに推定精度は向上する。実務の火害調査では耐火被覆がある場合とない場合の両方があり、H-T 関係式による推定は耐火被覆がある場合で標準誤差 38.8～58.8°C、ない場合で標準誤差 24.4°C 程度の推定精度を有することが確認できた。

これらのことから、H-T 関係式による推定は、耐火被覆の有無に関わらず、火害調査の実務に使用できる推定精度を有していることが確認できた。

なお、実験 C で計測された母材と継手部の温度差は、No.3 の 60 分時の平均値で 148°C（母材 515°C、継手部 367°C）と大きい。本研究で提案した受熱温度推定は受熱温度推定指標の一つであり、母材の受熱温度が高い場合もあることを理解した上で総合的に判断する必要がある。

6. まとめ

火害調査・診断の実務で用いる簡便な受熱温度推定方法を提案するために、高温加熱を受けた高力ボルトセットのロックウェル硬さに関する実験を行った。まず実験 A（電気炉を用いた定温加熱実験）を行い、脇山ら²⁾の研究と同様に、高力ボルトセットが焼戻し温度以上の熱を受けるとロックウェル硬さは温度に比例してほぼ直線的に低下すること、ならびに受熱温度を推定する方法として一次関数式が利用可能であることを確認した。さらに、実験 B（ガス炉を用いた ISO834 標準加熱実験）を行い、以下のことを明らかにした。

- 1) 実験 A と同様に、実験 B でも高力ボルトセットが焼戻し温度以上の熱を受けるとロックウェル硬さは温度に比例してほぼ直線的に低下する。
- 2) ロックウェル硬さの低下の勾配は、実験 A に比べ実験 B の方が少し緩くなる。

実験 B の結果より、火害調査・診断の実務で用いる簡便な受熱温度推定方法として、高力ボルト・ナット・座金全てに対して、焼戻し温度まではロックウェル硬さが低下せず、焼戻し温度以上では 100°C あたり 7HRC 低下するという直線（H-T 関係式）を提案した。

これは、脇山らの座金のロックウェル硬さのみを使った受熱温度推定一次関数式に対し、高力ボルト・ナット・座金全ての硬さの変化を用いた上で、実火災に近い加熱履歴を受けた場合でも安全側の評価となるよう低下勾配を小さめに設定したものである。

さらに、実験 C（耐火被覆を施した実大梁に取り付けた高力ボルトセットを対象にした ISO834 標準加熱実験）の結果に対して、H-T 関係式による受熱温度推定方法を適用し、推定方法の有効性を検証した。提案した推定方法では従来の推定方法より推定精度が向上し、受熱温度の推定が安全側となる割合が高くなった。H-T 関係式による推定は、耐火被覆の有無に関わらず火害調査の実務に使用できる推定精度を有していることが確認できた。

謝辞

本研究で使用したボルトセットの提供をいただいた㈱NS ボルテン畑中清氏、日本ファスナー㈱影山和文氏に、ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建物の火害診断および補修・補強方法指針（案）・同解説，2010. 2
- 2) 脇山広三，巽昭夫：火災を受けた鋼構造物の熱履歴温度の推定法に関する研究（その 1）高力ボルトの座金の硬さによる方法，日本建築学会論文報告集第 310 号，pp32-42，1981. 12
- 3) 平島岳夫，豊田康二，谷田貝敦，江崎佑，田坂茂樹，吉田正友，増田秀昭，原田和典：高力ボルト継手を有する H 形鋼梁の耐火性に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集第 75 巻，第 658 号，pp2257-2265，2010. 12
- 4) 阪口明弘他：火災加熱を受けた高力ボルト座金のロックウェル C 硬さ：その 1 電気炉を用いた加熱実験概要，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp221-222，2009. 8
- 5) 門岡直也他：火災加熱を受けた高力ボルト座金のロックウェル C 硬さ：その 2 電気炉を用いた加熱実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp223-224，2009. 8
- 6) 阪口明弘他：火災加熱を受けた高力ボルト座金のロックウェル C 硬さ：その 3 ガス炉での加熱実験，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp101-104，2010. 9
- 7) 高山真吾他：火災加熱を受けた高力ボルトセットのロックウェル C 硬さによる受熱温度推定，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-2，pp75-76，2011. 8

注

注1) JIS Z 2245「ロックウェル硬さ試験—試験方法」は 2011 年 9 月 20 に改正され、C スケールの保証値は 20～70HRC に変更されたが、本報では 2005 年版の JIS に基づき、10～77HRC を保証値として評価した。

（2013 年 1 月 9 日原稿受理，2013 年 6 月 11 日採用決定）