

アンダーマッチング溶接による高強度鋼組立柱と従来鋼梁接合部の性能評価実験

正会員○新才直紀*¹ 同 吹田啓一郎*²

2. 構造 -10. 鉄骨構造

高強度鋼, アンダーマッチング溶接, 隅肉溶接, 柱梁接合部, 溶接強度

1. 序

本研究は建築構造用に開発された高強度鋼 H-SA700¹⁾を対象とする. この鋼材は従来の鋼材の 2 倍程の強度をもち, 降伏比は 98% 以下と規定され, 弾性範囲での使用が前提となる. また, 隅肉程度の溶接が可能な A 材と完全溶込み溶接に適した B 材がある.

前報²⁾では, A 材を対象に, 既往の鋼材に使用する溶接材料 G59JA1UC3M1T (以下 G59J と称す) を用いたアンダーマッチング溶接による接合を検討した. 隅肉溶接のサイズを調節することにより, 溶接継目に過大な応力が作用しないように設計して, 必要な強度の溶接組立部材や接合部を実現する方法を示した.

本報では, アンダーマッチング溶接による高強度鋼組立部材を活かす骨組の一つとして, 柱にこの高強度鋼組立部材を用いて, 従来鋼による梁を完全溶込み溶接によって接合することを考える. その柱梁接合部において, 柱は弾性のまま梁のみが塑性化することで十分な変形性能を確保し, 溶接継目が期待される耐力を上回るかを確認するために性能評価実験を行った.

2. 高強度鋼と溶接材料の要素試験

2.1 使用する鋼材と溶接材料

この節では, 本研究で行う実験で使用する鋼材と溶接材料について説明する. まず鋼材は高強度鋼には H-SA700B を, 従来鋼には SN490B を使用し, 表 1 にそれぞれの降伏点, 引張強さの公称値 (規格下限値) と, 材料試験により求められた実測値を示す. H-SA700B は板厚 16mm の 1 種類, SN490B は板厚が 9, 12, 16, 25mm の 4 種類に関して材料試験を行った. 一方, 溶接材料は高強度鋼同士の接合には G59J を用い, 高強度鋼と従来鋼の接合には YGW18 を用いる. G59J 及び YGW18 の機械的性質及び溶接条件を表 2 に示す. また G59J は通常使用される鋼材である SA440 の溶接施工指針に基づく溶接条件³⁾で溶接し, YGW18 は JIS

Z3312 の解説に示される引張強さ 490N/mm² 級の溶接条件で溶接した.

2.2 溶接金属引張試験 WCH, WCN

溶接金属の強度の確認のため, 隅肉溶接から丸棒を削りだし引張試験を行った. 試験は板厚 16mm の H-SA700B を G59J により両面隅肉溶接した T 字継手を WCH, 板厚 19mm の SN490B と板厚 16mm の H-SA700B を YGW18 により両面隅肉溶接した T 字継手を WCN とし, 隅肉溶接はサイズ s により入熱や冷却時間などの溶接条件が変わるため, s をパラメータとして 4, 7, 10, 13mm のものからそれぞれ 2 本ずつ削りだし実験を行った. 試験片は s が 4, 7mm の場合は $\phi 3$ mm の丸棒 (JIS Z2201 14A 号に準ずる), s が 10, 13mm の場合は $\phi 6$ mm の丸棒 (JIS Z3111 A2 号) とし, 両端つかみ部はネジ加工してアタッチメントを取り付け製作する (図 1 参照).

実験結果から得られた降伏点と引張強さを $\sqrt{3}$ で除して, 降伏せん断応力 τ_y と最大せん断応力 τ_u が求められる. また隅肉溶接のサイズは設計値よりも実際は大きな値で製作され, 場所によってサイズが異なる.

表 1 H-SA700B, SN490B の機械的性質

鋼種	板厚 [mm]	降伏点 [N/mm ²]		引張強さ [N/mm ²]	
		公称値	実測値	公称値	実測値
H-SA700B	16	700	777	780	832
SN490B	9	325	381	490	535
	12		352		522
	16		334		517
	25		327		513

表 2 G59J, YGW18 の規格値及び溶接条件

溶接材料	降伏点 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	溶接条件		
			予熱 [°C]	入熱 [kJ/cm]	パス間温度 [°C]
G59J	500 以上	590 ~ 790	≥ 60	≤ 30 ≤ 40	≤ 350 ≤ 250
YGW18	460 以上	550 ~ 740	なし	≤ 40	≤ 350

Loading Test of H-SA700B Column and SN490B Beam Welded Moment Connection

SHINSAI Naoki and SUITA Keiichiro

WCH, WCN のそれぞれに関して隅肉溶接のサイズの実測値 s [mm] を横軸, せん断応力 τ [N/mm²] を縦軸に各試験体における τ_y, τ_u をプロットし, 回帰分析を行った結果を図 2, 3 に示す。グラフには τ_y, τ_u の公称値も示してある。図 2, 3 より実験結果から得られた τ_y, τ_u はどれも規格下限値を十分に上回っており, その上で隅肉溶接のサイズと強度の実測値に関して次式の関係が得られた。

$$\text{G59J: } \tau_y = 518 - 10.9s \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1)$$

$$\tau_u = 555 - 10.4s \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2)$$

$$\text{YGW18: } \tau_y = 523 - 11.4s \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3)$$

$$\tau_u = 551 - 10.6s \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4)$$

2.3 側面隅肉溶接引張試験 WS

G59J で H-SA700B に側面隅肉溶接したときの溶接部の強度を確認するため, 溶接線に対し平行な応力が作用する図 4 のような側面隅肉溶接試験体を製作し, 試験側のサイズ s を 4, 7, 10, 13mm の 4 種類, 各 2 体ずつ引張試験を行った。

実験結果より τ_y, τ_u を算出し, WC と同様に s [mm] を横軸, τ [N/mm²] を縦軸にそれぞれの試験体における τ_y, τ_u をプロットし, 回帰分析を行った結果を図 4 に示す。なお τ_y は最大荷重時の変形の 1/2 の変形時の接線と初期剛性の交点により求めた⁴⁾。図 5 のグラフには τ_y, τ_u の公称値及び式 (1), (2) も示す。

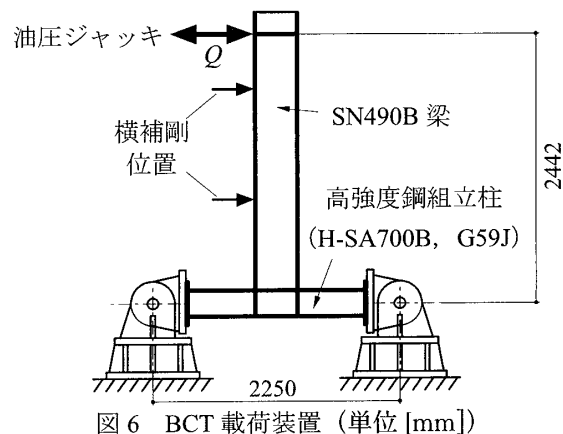
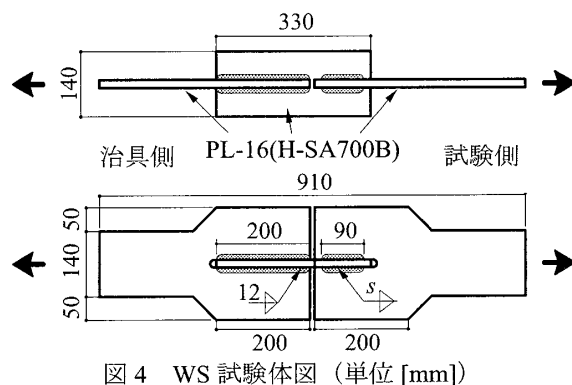
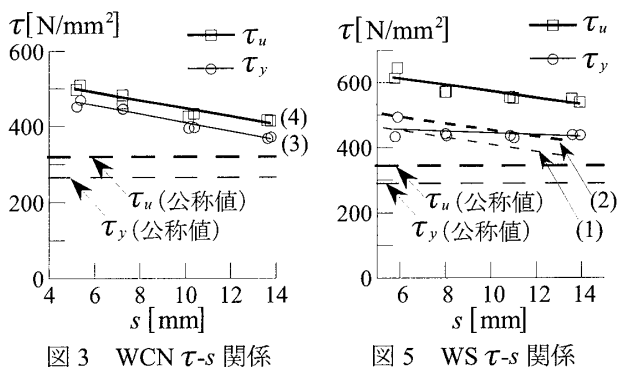
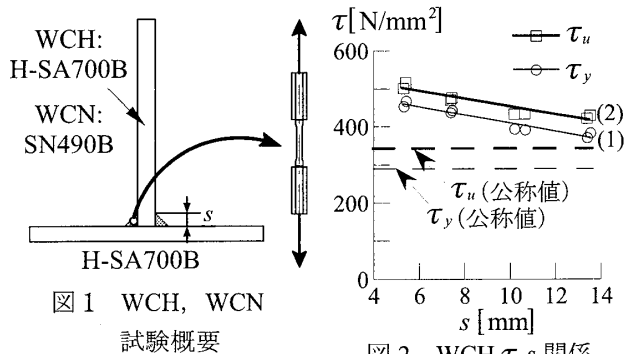
WS から算出された τ_y は規格下限値を十分に上回っているが, 式 (1) とグラフの傾きが一致していない。これは隅肉サイズが小さいほどグラフの勾配から上述の方法で読み取る精度が低くなったことによる。また τ_u は式 (2) や規格下限値を十分に上回っており, 式 (2) とグラフの傾きとも一致している。

3. 高強度鋼柱と従来鋼梁の接合部実験 BCT

3.1 実験概要

柱に高強度鋼 (H-SA700B) を梁に従来鋼 (SN490B) を使用した柱梁接合部に繰返し載荷実験を行った。試験体は柱 (H-SA700B) をアンダーマッピング溶接 (G59J を使用) による溶接組立 H 形鋼で製作し, 柱フランジに梁 (SN490B) を完全溶込み溶接 (YGW18 を使用) で接合し, 梁フランジの延長線上に水平スチフナ (SN490B) を配置することで製作する。梁端はノンスカラップとする。水平スチフナと柱フランジの溶接は梁がある側を完全溶込み溶接とし, 梁がない側と

柱ウェブとの接合は両面隅肉溶接とした。載荷は図 6 のように T 字形骨組とし, 90° 回転させ柱を水平方向に配し, 梁の端部に載荷荷重 Q を作用させる。載荷プログラムは骨組の層間変形角で制御し, 0.01rad を 1 回, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05rad を 2 回ずつ正負交番繰返し



载荷を行い、その後は様子を見ながら 0.07, 0.1rad に増大し、最後に正方向に単調载荷した。また、溶接継目に最も大きなせん断力が作用すると考えられる接合部パネルの溶接に関して、水平スチフナと柱ウェブの隅肉溶接を W1、接合部パネルと柱フランジの隅肉溶接を W2 とし (図 7 参照)、その必要サイズも検討した。試験体は 4 体用意し、それぞれ次の目的を満たすように設計し、実験を行った。

- ① BCT1 柱、接合部パネル、溶接はどれも降伏せずに、梁が全塑性モーメントに達することで崩壊する。パネルと梁の耐力比を 1.5 程度とし、接合部が損傷せずに十分な変形能力を有することを確認する。
- ② BCT2 ①と試験体の形状は同じだが、W1, W2 のサイズを小さくし、梁が降伏する前に溶接部が破断することで崩壊する。溶接部の耐力を確認する。
- ③ BCT3 柱梁耐力比を 1.5 程度にし、梁せいを①②より大きくすることでパネルの作用モーメントは大きくなり、梁とパネルが同程度の荷重で全塑性モーメントに達し、柱、溶接はどれも降伏しない。パネルの塑性化に溶接が追従できるかを確認する。
- ④ BCT4 ③と梁の寸法は同じで、柱を溶接組立箱形断面とする。4 枚の鋼板をアンダーマッチング溶接 (G59J を用いる) による角溶接で接合し、梁フランジの延長線上には内ダイアフラム (SN490B) を配置する。接合部パネルの強度は H 形鋼より上昇するので、柱、接合部パネル、溶接はどれも降伏せずに、

梁崩壊型となる。目的は①と同じである。

3.2 耐力予想

実験を行う前に、各材料試験より求められた強度の実測値 (表 1 及び式 (1) ~ (4) 参照) を用いて各試験体の耐力を求めた。表 3 に各試験体の柱、梁の断面形状、柱、梁、パネルがそれぞれ降伏モーメント、全塑性モーメントに達するときの载荷荷重 (柱: cQ_y, cQ_p , 梁: bQ_y, bQ_p , パネル: pQ_y, pQ_p) を示す。また柱が H 形鋼の試験体に関して、表 4 に W1, W2 の隅肉サイズ (それぞれ S_1, S_2 とする) と降伏、破断するときの载荷荷重 (W1: w_1Q_y, w_1Q_u , W2: w_2Q_y, w_2Q_u) を示す。表 3, 4 より BCT2 に関して、 $bQ_p < w_1Q_y$ であり、前節の②の目的に合致していない部分がある。これは隅肉サイズが設計値より実際は大きくなっていることと、溶接継目の τ_y の実測値が公称値を大きく上回っているため、設計よりかなり大きな耐力が予想されるためである。

3.3 実験結果

各試験体の荷重 Q - 層間変形角 R 関係を図 8 ~ 11 に示す。また、表 3 に各実験における最大荷重 $Q_{\max}$ を示す。

BCT1 は bQ_y に達した辺りから剛性が低下し、その

表 4 BCT1~3 試験体溶接継目のサイズと耐力予想

試験体名	隅肉サイズ [mm]		耐力予想 [kN]			
	S_1	S_2	w_1Q_y	w_1Q_u	w_2Q_y	w_2Q_u
BCT1	8	12	482	524	338	377
BCT2	4	4	319	341	194	211
BCT3	14	16	822	918	620	706

表 3 BCT 試験体断面形状及び母材耐力予想と実験結果 (単位 [kN])

試験体名	断面形状		柱耐力予想		梁耐力予想		パネル耐力予想		実験結果
	柱	梁	cQ_y	cQ_p	bQ_y	bQ_p	pQ_y	pQ_p	
BCT1	H-250×250×16×16	H-400×200×9×16	768	877	197	227	319	339	338
BCT2	H-250×250×16×16	H-400×200×9×16	768	877	197	227	319	339	335
BCT3	H-250×250×16×16	H-600×200×12×25	855	976	469	545	535	569	840
BCT4	□-250×250×16	H-600×200×12×25	942	1130	472	550	1023	1139	890

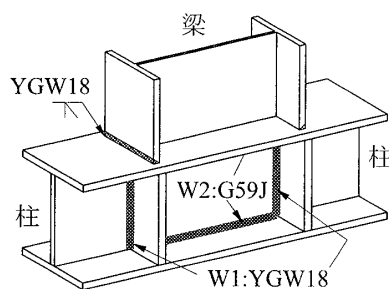


図 7 BCT 接合部詳細

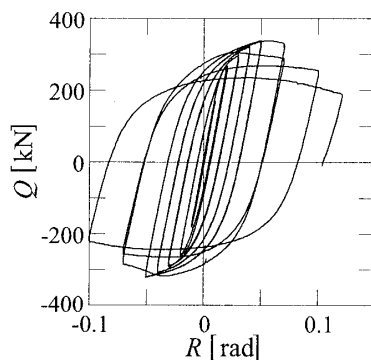


図 8 BCT1 Q-R 関係

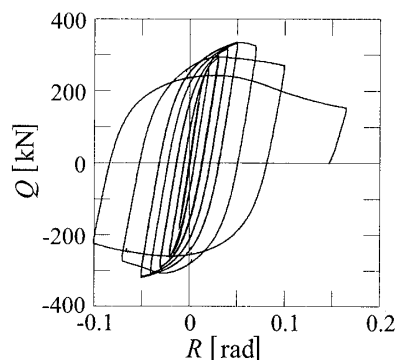


図 9 BCT2 Q-R 関係

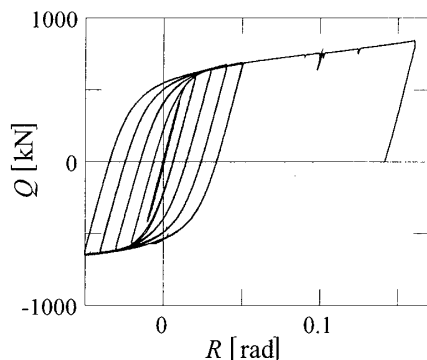


図10 BCT3 Q-R 関係

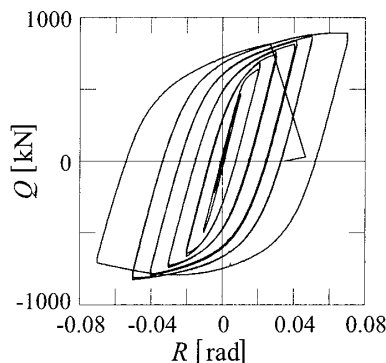


図11 BCT4 Q-R 関係

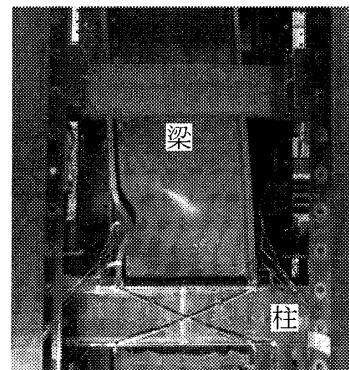


図12 BCT4 写真

後は R が 0.05rad まで安定した紡錘形の挙動を描いた。その後 0.07rad の载荷中梁が局部座屈を起こすことで耐力が低下した。W1 や W2 には最後まで損傷が見られなかった。接合部に損傷がないまま、十分な変形能力を確認できた。

BCT2 は ${}_wQ_u$ ($=211\text{kN}$) を超えても W1 や W2 は損傷せず、BCT1 と同様に R が 0.05rad まで安定した紡錘形の挙動を描いた。その後も BCT1 と同様に 0.07rad の载荷中梁が局部座屈を起こすことで耐力が低下し、W1 や W2 には最後まで損傷が見られなかった。BCT1, BCT2 において、接合部パネルは全塑性に達し、せん断ひずみは 1.5% 程度見られた。

BCT3 は ${}_bQ_y$ に達した辺りから、剛性が低下し、 R が 0.05rad まで安定した紡錘形の挙動を描いた。その後正側への単調载荷を行ったが、 ${}_wQ_u$ ($=706\text{kN}$) を超えても W1 や W2 は損傷せずに、耐力が低下しないまま試験機の限界を迎え実験を終了した。耐力が低下しなかったのは接合部パネルが大きく変形し（せん断ひずみは最大 17% まで至った）、梁が局部座屈に至るほど変形しなかったためと考えられる。この実験より、溶接継目は損傷せずにパネルの塑性化に追従できることが確認された。

BCT4 は ${}_bQ_y$ に達した辺りから剛性が低下し、その後は R が 0.05rad まで安定した紡錘形の挙動を描いた。その後 0.07rad の载荷中、梁が局部座屈することで耐力が低下し、柱フランジと梁フランジの完全溶込み溶接が脆性破断することで実験を終了した。他の試験体より早期に崩壊したように思われるが、 R が 0.05rad の時点で梁の塑性率は 9 に達しており、十分な変形能

力を確認できた。また、接合部パネルは弾性のままであり、せん断ひずみは 0.6% 程度であった。図12に R が 0.07rad 時の試験体の写真を示す。

4. 結論

柱をアンダーマッチング溶接 (G59J) による高強度鋼 (H-SA700B) 溶接組立部材とし、梁を従来鋼 SN490B で製作し、YGW18 による従来鋼対応の溶接法で梁に対してオーバーマッチングになるように柱と完全溶込み溶接によって接合された柱梁接合部に関して、実験により次のことがわかった。

①従来の柱梁接合部と同様に、梁が大きく塑性変形することで、期待される変形能力が確保されていることが確認された。

②各溶接箇所において、溶接継目が母材の崩壊荷重においても降伏しないように設計することで、大変形時においても溶接継目は損傷しないことが確認された。

謝辞

本研究は、社団法人日本鉄鋼連盟「鋼構造研究・教育助成事業」の助成金を受けて実施しました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼連盟, 日本鋼構造協会: 平成19年度「革新的構造材料を用いた新構造システム建築物研究開発」報告書, 2008.3.
- 2) 新才直紀, 吹田啓一郎, 佐藤篤司: アンダーマッチング溶接による高強度鋼組立部材の性能評価実験 (その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), C-1, 構造Ⅲ, pp.673-676, 2010.9.
- 3) 日本鉄鋼連盟 高性能鋼利用技術小委員会: 建築構造用高性能 590N/mm^2 (SA440) 設計・施工指針, 2004.8.
- 4) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 2006.

* 1 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程

Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ.

* 2 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士 (工)

Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.