超高強度鋼 CFT 柱梁接合部パネルの繰返し性状に与える角溶接部強度の影響

栗田　舞人

1. 序論

建築物の大型化，高層化，大地震時無損傷建物への要求から，780N/mm^2 級以上の超高強度鋼の適用事例が増えている．超高強度鋼を用いた溶接組立材には，一般に母材強度と同等以上の強度を溶接部に与えるオーバーマッチング溶接が適用されるが，これには高度な溶接施工管理技術が要求され，コストも増大する．それに対して，鋼構造分野では溶接施工の簡略化を目的として，溶接部に母材よりも低強度の溶接材料を用いるアンダーマッチング溶接に関する研究が進められている．

既往の研究[1)2)]では，アンダーマッチング溶接を用いた超高強度鋼コンクリート充填鋼管（以下，CFT）接合部パネルのせん断実験を行っており，柱角溶接部強度および，幅厚比，コンクリート強度，載荷角度，辺長比の各因子が接合部パネルに与える影響について述べている．そこで本研究では，CFT 接合部パネルの繰返し性状に与える角溶接部強度の影響を確認するとともに，耐力評価法との対応について検討する．

2. 実験概要

2.1　試験体概要

図 1 に試験体形状，表 1 に試験体一覧を示す．柱高さは H=1852.5mm，梁スパンは L=3000mm とする．柱は SA440B 材による溶接組立箱形断面 B □ -220 × 220 × 19，梁は H-SA700B 材による溶接組立 H 形鋼 BH-279 × 150 × 9 × 19，柱梁接合部パネル（以下，パネル）は H-SA700B による溶接組立箱形断面 B □ -200 × 200 × 9 としている．なお，梁フランジと通しダイアフラムを一体形式とし，柱と通しダイアフラム間を完全溶込み溶接により接合している．

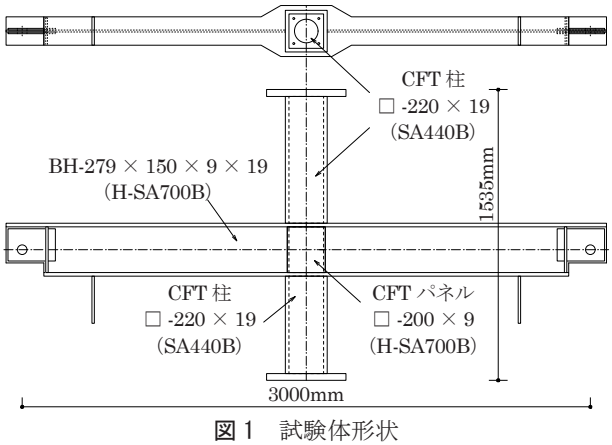


図 1　試験体形状

試験体は全 2 体であり，パネル □ -200×200×9(H-SA700B) の角溶接部に使用する溶接材料強度のみが異なる．溶接材料はアンダーマッチング溶接とする試験体 (以下，P-200U) に YGW11，オーバーマッチング溶接とする試験体 (以下, P-200O) に G78A を用いている．柱，梁部材の仕様はパネルが先行してせん断降伏するように設計されている．角溶接は裏当金を用いた完全溶込み溶接であり，柱ウェブ側に開先加工を施している．

表 2 に鋼材と溶接金属の機械的性質を示す．後述する耐力算定に用いたコンクリート強度は各試験体の載荷日前日に行ったシリンダー試験の平均値 107.2N/mm^2 とした．

2.2　載荷および計測概要

図 2 に載荷装置，図 3 に載荷プログラムを示す．載荷方法は図 2 に示すように柱端をピン支持とし，梁端逆対称載荷とした．載荷は層間変形角制御とし各振幅で 2 サイクルずつの正負交番漸増振幅繰返し載荷を実施した．アンダーマッチング試験体は最終振幅 R=0.03rad で終了したが，オーバーマッチング試験体はアクチュエーターの性能限界に達したため最終振幅 R=0.0285rad で載荷を終了した．

パネル変位計測方法を図 4 に示す．パネルのせん断変形角 ${}_p\gamma$ を (1) 式，パネルせん断力 ${}_pQ$ を (2) 式で求めた．

表 1　試験体一覧

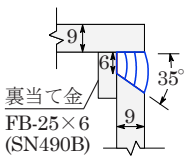
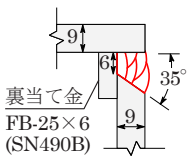
試験体	P-200U	P-200O
鋼種	H-SA700B	
試験体寸法	パネル幅：200mm　板厚：9mm	
幅厚比	22.2	
パネル高さ	260mm	
コンクリート強度	108.5N/mm^2	105.9N/mm^2
角溶接部詳細		
溶接材料	YGW11	G78A
予熱温度	200℃以上	50℃以上
入熱	30kJ/cm 以下	12kJ/cm 以下
パス間温度	300℃	50℃
パス数	3	5

表 2　使用材料の機械的性質

鋼種	板厚 [mm]	降伏点 [N/mm^2]	引張強さ [N/mm^2]	ヤング係数 [×10^{5}N/mm^2]	降伏比 [%]
H-SA700B	9.36	843.1	880.9	2.09	95.7
	19.50	769.6	827.4	2.13	93.0
SN490B	6.32	400.8	525.8	2.10	76.2
SA440B	19.33	511.7	646.4	2.08	79.2
YGW11	—	431.5	569.1	2.11	75.8
G78A	—	699.4	898.6	2.09	77.9

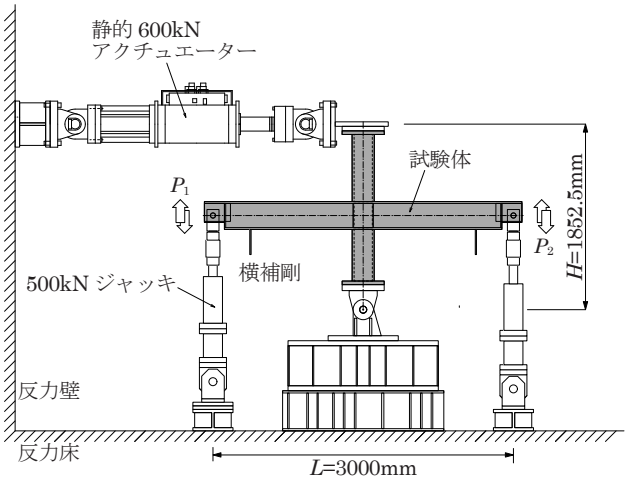


図 2　試験装置

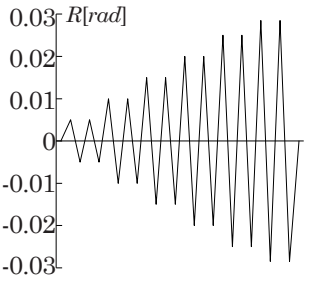


図 3　載荷履歴

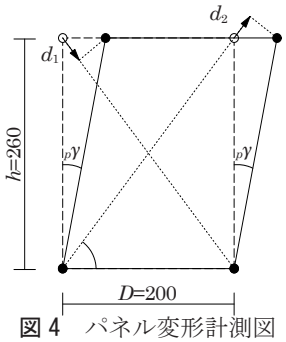


図 4　パネル変形計測図

$$ {}_p\gamma = \frac{d_1 - d_2}{2} \cdot \frac{\sqrt{h^2 + D^2}}{h \cdot D} \tag{1} $$

$$ {}_pQ = \left(\frac{L - B}{h} - \frac{L}{H} \right) \cdot \frac{P_1 + P_2}{2} \tag{2} $$

ただし，d_1，d_1：対角変位，h：パネル高さ，D：パネル幅，
B：CFT 柱幅，L：両梁のピンーピン間距離，
H：アクチュエーターの芯ー柱下端のピン芯間距離
P_1，P_2：500kN ジャッキの載荷荷重

3. 実験結果

3.1　履歴性状

図 5 にパネルせん断力 $_pQ$ ーせん断変形角 $_p\gamma$ 関係，表 3 に実験値一覧を示す．図中の〇印は降伏耐力実験値 $_pQ_y^e$，□印は終局耐力実験値 $_pQ_u^e$ を示す．$_pQ_y^e$ は $_pQ$ ー $_p\gamma$ 関係における接線剛性が初期剛性 $_pK_0^e$ の 1/3 となるときの耐力（slope factor 法）と定義し，$_pK_0^e$ はおおよそ線形とみなせる $_p\gamma$=-0.002rad と 0.002rad の 2 点の割線剛性とした．$_pQ_u^e$ は$_p\gamma$=0.01rad 時のせん断力とした．

両試験体ともに急激な耐力低下は見られず，安定した紡錘形の履歴性状を示した．耐力差を除き大きな差は確認されず，両試験体とも降伏耐力，終局耐力は振幅 R=0.02rad の 1 サイクル目で到達した．

降伏耐力，終局耐力ともに P-200U が P-200O に比べて 2 ～ 3% 程度小さいことがわかるが，これは角溶接部強度の違いがパネル耐力に影響を与えたためであると考えられる．文献 1)，2）では，鋼管幅 250mm，150mm の CFT 柱梁接合部パネルを対象としたせん断単調載荷実験においてアンダーマッチング溶接を用いた場合，数 % 程度の耐力低下を確認している．本実験を通して，繰返し載荷実験でも同様に溶接材料強度の違いが耐力に数 % 程度の影響を与えた．

3.2　骨格曲線

図 6 に両試験体の正側の骨格曲線を示す（R=0.0285rad まで）．図中の〇印は降伏耐力実験値 $_pQ_y^e$，□印は終局耐力実験値 $_pQ_u^e$ を示す．初期剛性の範囲（0 ～ 0.002rad）では概ね一致しているが，降伏耐力に到達する前の変形角，0.004rad 付近から耐力に差が生じ始め，溶接部強度の違いによる影響が現れていると考えられる．

表 3　せん断耐力実験値一覧

試験体	降伏耐力 [kN]		終局耐力 [kN]	
	実験値 $_pQ_y^e$	U/O	実験値 $_pQ_u^e$	U/O
P-200U	2711	0.98	2762	0.97
P-200O	2779		2837	

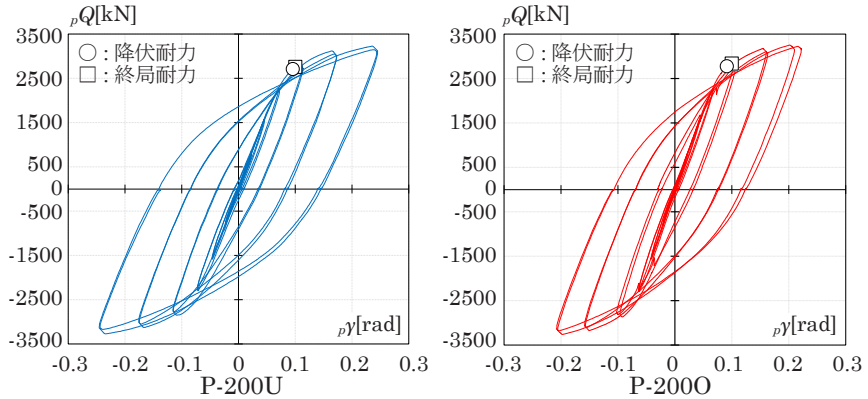


図 5　パネルせん断力ーせん断変形角関係

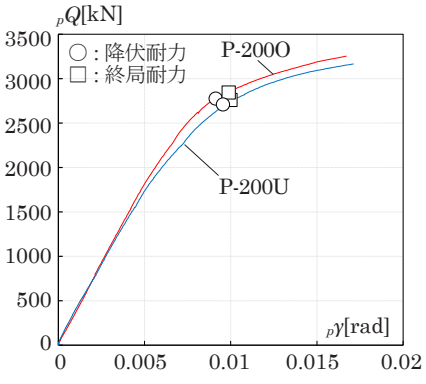


図 6　骨格曲線

3.3 パネルウェブのせん断歪性状

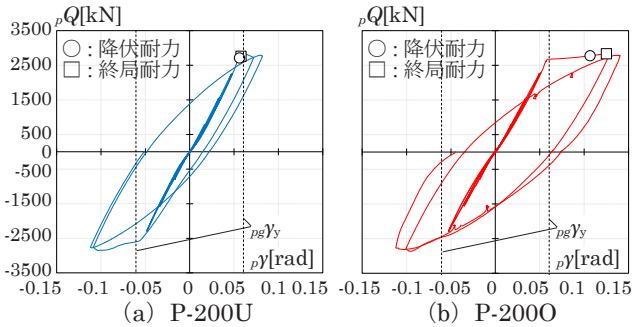
図 7 にパネルウェブの中央に貼付した 3 軸歪ゲージより算出したパネルせん断歪 ${}_{pg}\gamma$ ーパネルせん断力 ${}_{p}Q$ 関係を振幅 R=0.02rad の 2 サイクル目までを示す．${}_{pg}\gamma$ の算出方法は，(3) 式の通りである．パネル中央の ${}_{pg}\gamma$ は両面において大きな差異はなかったため，片面のみの結果を示している．図 7 中の破線は材料試験より得られた降伏歪を用いて算出した降伏せん断歪 ${}_{pg}\gamma_y$ である．${}_{pg}\gamma_y$ は (4) 式より求めた．図中の○印は降伏耐力実験値 ${}_{p}Q_y^e$，□印は終局耐力実験値 ${}_{p}Q_u^e$ を示す．

$$ {}_{pg}\gamma = 2\cdot {}_{p}\varepsilon_{45} - \left({}_{p}\varepsilon_{V} + {}_{p}\varepsilon_{H} \right) \tag{3} $$

$$ {}_{pg}\gamma_y = \frac{2\,{}_{pg}\varepsilon_y (1+\upsilon)}{\sqrt{3}} \tag{4} $$

ただし，${}_{pg}\varepsilon_{45}$：柱の材軸に対して 45° 方向のひずみ，
${}_{pg}\varepsilon_{H}$：柱の材軸に対して 90° 方向のひずみ，
${}_{pg}\varepsilon_{V}$：柱の材軸方向のひずみ，
${}_{pg}\varepsilon_y$：H-SA700B 材の降伏歪実験値，υ：ポアソン比 (υ=0.3)

図 7 において，降伏せん断歪に到達後，グラフの勾配が急変し，パネル中央の鋼管が降伏している．アンダーマッチング試験体はパネル中央の鋼管が降伏するよりも前に降伏点に達しているがオーバーマッチング試験体は鋼管の降伏以後，降伏耐力に達しており，溶接部強度の違いが表れている．



(a) P-200U　(b) P-200O

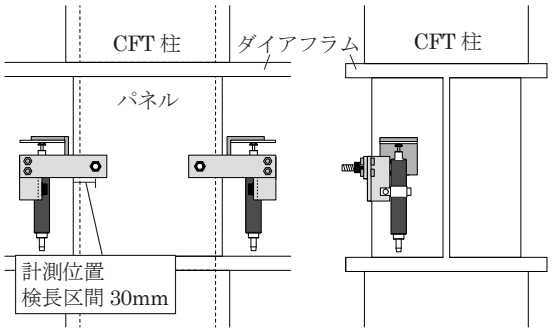
図 7　パネルせん断歪ーパネルせん断力関係

3.4 柱角溶接のせん断挙動

図 8 に溶接部変位計測図を示す．片面のパネル高さ中央の上下 2 箇所で角溶接部をまたぐようにパネルフランジ側とウェブ側にナットを溶接した．パネルウェブ面に溶接したナットから変位計を伸ばし，パネルフランジ面に溶接したナットに取り付けたアングルに変位計を当て両側の相対変位を計測する．

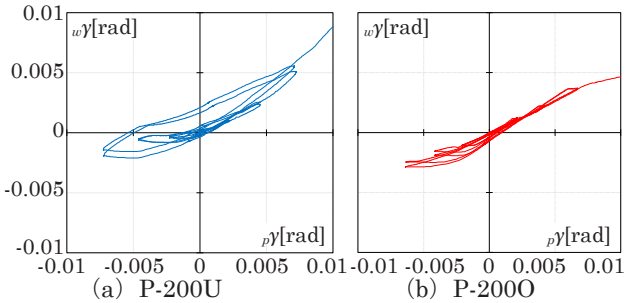
図 9 に角溶接せん断変形 ${}_{w}\gamma$ ー ${}_{p}\gamma$ 関係を示す．載荷中，ボルトの緩みによりアングルの回転が生じたため，${}_{w}\gamma$ にはアングルの回転成分が含まれている．そのため，2 箇所で計測したうちの回転成分がより少なかった ${}_{w}\gamma$ の値を用いている．${}_{w}\gamma$ ー ${}_{p}\gamma$ 関係より，P-200U では P-200O に比べてグラフの勾配が大きく角溶接部のせん断変形が大きいことが分かる．これは母材よりも強度が小さい角溶接部が局所的にせん断降伏し始めた影響によるものと考えられる．文献 1)，2) において，グラフの勾配が急変することを確認しており，繰返し性状でも同様な挙動が現れている．

3.5 CFT 指針に基づく計算値と実験値との比較



(a) パネルウェブ面　(b) パネルフランジ面

図 8　角溶接部せん断変形角ーパネルせん断変形角



(a) P-200U　(b) P-200O

図 9　角溶接部せん断変形角ーパネルせん断変形角関係

表 4 にパネルせん断耐力の計算値と実験値との比較を，表 5 に剛性の計算値と実験値の比較を示す．CFT 指針[3] では (a) 累加モデルと (b) 簡易モデルの 2 通りの耐力評価法が提案されており，(a) では鋼管およびコンクリートの復元力特性を tri-linear 型にモデル化し，それらを累加する．(b) ではそれらの主要点をとった tri-linear 型の復元力特性としている．図 10 にそれぞれの復元力モデルを骨格曲線と合わせて示す．

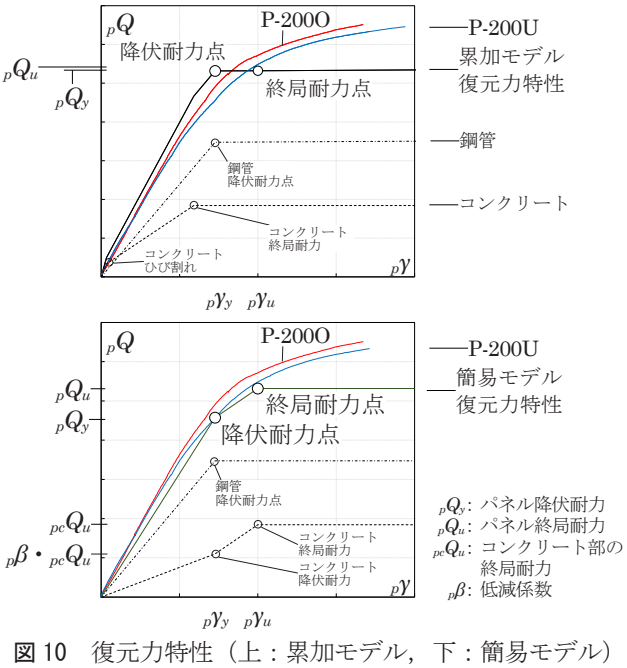


図 10　復元力特性（上：累加モデル，下：簡易モデル）

表 4　耐力の計算値と実験値の比較

試験体名	降伏耐力					終局耐力				
	実験値	計算値 (a)	計算値 (b)	実 / 計 (a)	実 / 計 (b)	実験値	計算値 (a)	計算値 (b)	実 / 計 (a)	実 / 計 (b)
	${}_pQ_y^e$	${}_pQ_y^{c(a)}$	${}_pQ_y^{c(b)}$	${}_pQ_y^e/{}_pQ_y^{c(a)}$	${}_pQ_y^e/{}_pQ_y^{c(b)}$	${}_pQ_u^e$	${}_pQ_u^{c(a)}$	${}_pQ_u^{c(b)}$	${}_pQ_u^e/{}_pQ_u^{c(a)}$	${}_pQ_u^e/{}_pQ_u^{c(b)}$
	[kN]					[kN]				
P-200U	2711	2657	2287	1.02	1.19	2762	2735	2657	1.01	1.04
P-200O	2779			1.05	1.21	2837			1.04	1.07

表 5　剛性の計算値と実験値の比較

試験体	剛性 [kN/rad]				
	実験値	計算値 (a)	計算値 (b)	実 / 計 (a)	実 / 計 (b)
	${}_pK^e$	${}_pK^{c(a)}$	${}_pK^{c(b)}$	${}_pK^e/{}_pK^{c(a)}$	${}_pK^e/{}_pK^{c(b)}$
P-200U	360971	365734	314746	0.99	1.15
P-200O	376401			1.03	1.20

※実験値 ${}_pK^e$：初期剛性（-0.02rad と 0.02rad の二点の割線剛性）
計算値 ${}_pK^{c(a,b)}$：降伏耐力計算値 ${}_pQ_y^{c(a,b)}$/ 降伏せん断変形角計算値 ${}_p\gamma_y^{c(a,b)}$

表 4 に示すように (a) 簡易モデルの降伏耐力を除き，計算値が実験値を降伏耐力において 2 ～ 5% 程度，終局耐力において 1 ～ 7% 程度下回る過小評価となっているものの安全側の評価となり，精度は概ね良好である．

累加モデルは降伏耐力にコンクリートの終局耐力を用いているのに対して，簡易モデルはコンクリートの終局耐力に低減係数を乗じた値を用いている．降伏耐力実験値の評価について累加モデルの精度がよく簡易モデルで差が生じていることからパネルの降伏耐力時にコンクリートは終局耐力に達していたと考えられる．

4.　柱角溶接部強度を考慮した計算値と実験値との比較

CFT の溶接組立箱形断面柱において，文献 3) では溶接部強度を考慮したパネルせん断耐力は扱われていな

【箱形断面柱の崩壊荷重】

$$ {}_sQ_p^{(i)} = 2{}_s\tau_y \cdot t_p \left\{ d_c - \frac{d_b}{2\sqrt{3}} \left(1 - \frac{{}_w\tau_y}{{}_s\tau_y} \right)^2 \right\} \tag{5} $$

【パネル降伏せん断耐力】

$$ {}_pQ_y^{(i)} = {}_sQ_y^{(i)} + {}_cQ_y \tag{6} $$

$$ {}_sQ_y^{(i)} = {}_sQ_p^{(i)} \tag{7} $$

【パネル終局せん断耐力】

$$ {}_pQ_u^{(i)} = {}_sQ_u^{(i)} + {}_cQ_u \tag{8} $$

$$ {}_sQ_u^{(i)} = {}_sQ_y^{(i)} \tag{9} $$

ただし，
${}_s\tau_y$：鋼管の降伏せん断応力
t_p：鋼管の板厚
d_c：梁フランジ中心間距離
d_b：パネル高さ
${}_w\tau_y$：角溶接部に使用する溶接金属の降伏せん断応力
${}_s\tau_y$：鋼管の降伏せん断応力
θ_s：箱形断面コンクリート部分のアーチ機構角度
${}_cD$：コンクリート幅
${}_sQ_p^{(i)}$：溶接部強度を考慮した箱形断面柱のパネル全塑性耐力
${}_pQ_y^{(i)}$：溶接部強度を考慮したパネル降伏耐力
${}_sQ_y^{(i)}$：溶接部強度を考慮した鋼管降伏耐力
${}_cQ_y$：充填コンクリート降伏耐力
${}_pQ_u^{(i)}$：溶接部強度を考慮したパネル終局耐力
${}_sQ_u^{(i)}$：溶接部強度を考慮した鋼管終局耐力
${}_cQ_u$：充填コンクリートの終局耐力

い．そこで，溶接部強度を考慮したパネル耐力評価を CFT に適用した場合の検討をする．

CFT 接合部パネルにおいて，鋼管は文献 4) で提案されている崩壊機構による算定値 ${}_sQ_p^{(i)}$（(5) 式），コンクリートは文献 1) による主アーチとフランジの拘束によるアーチに関連付けた耐荷機構を用いた算定値 ${}_cQ_{y(u)}$ とすると，CFT 接合部パネルのせん断耐力の降伏耐力 ${}_pQ_y^{(i)}$，終局耐力 ${}_pQ_u^{(i)}$ は式 (6)，(8) のようになる．これらを P-200U に適用し，算定した結果を表 6 に示す．耐力評価において精度が低くなるものの，溶接部強度によるパネル耐力低下を良く再現できている．

表 6　耐力一覧

試験体名	降伏耐力			終局耐力		
	実験値	計算値	実 / 計	実験値	計算値	実 / 計
	${}_pQ_y^e$	${}_pQ_y^{(i)}$	${}_pQ_y^e/{}_pQ_y^{(i)}$	${}_pQ_u^e$	${}_pQ_u^{(i)}$	${}_pQ_u^e/{}_pQ_u^{(i)}$
	[kN]			[kN]		
P-200U	2711	2209	1.22	2762	2579	1.07
P-200O	2779	2287	1.21	2837	2657	1.07

5.　結論

本論では，柱梁接合部パネルの繰返し性状に与える角溶接部強度の影響について，以下の知見を得た．

- 接合部パネルにおいて，両試験体とも急激な耐力低下は起こらず，安定した履歴性状を示した
- P-200U は P-200O に比べ，角溶接部に大きな変形が生じており，早期に角溶接部が塑性域に達していると考えられる．
- CFT 指針で提案されている簡易モデルでは終局耐力を精度よく評価できているものの，降伏耐力では実験値を 20%程度過小評価した．一方で，累加モデルでは降伏耐力，終局耐力をいずれも高い精度で評価した．
- 溶接部強度を考慮したパネル耐力評価法により，溶接部強度の低下に伴うパネル耐力の低下の傾向を捉えられることを確認した．

参考文献

1) 渕上他：アンダーマッチング溶接により組み立てられた超高強度鋼 CFT 部材の構造性能と設計法（その 5），日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.489-492，2017.3
2) 伊藤他：アンダーマッチング溶接により組み立てられた超高強度鋼 CFT 部材の構造性能と設計法（その 8），日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.669-672，2018.3
3) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，2008
4) 建築構造用高強度 780N/mm^2 鋼材 (H-SA700) 利用技術指針，2017.3