

曲げせん断力を受ける超高強度鋼 CFT 柱部材の角溶接部強度が拘束効果に与える影響

岩元 丈仁

1. 序

本研究はアンダーマッチング(以下 UM) 溶接により組み立てられた超高強度 CFT 柱材の構造性能の把握を研究目的としている。既往の研究 1)~3)では CFT 柱部材の一定軸力下での曲げせん断実験および有限要素法(以下 FEM)による解析が行われているが、実験を十分に模擬できているとは言えない。そこで本研究では FEM 解析による実験のモデル化、UM 溶接した CFT 柱部材の解析モデルの再検討、角溶接部強度の違いが鋼管による充填コンクリートの拘束効果に与える影響についての考察を行った。

2. 中空鋼管の曲げせん断実験

2.1 実験概要

本実験の目的は FEM 解析におけるモデルの妥当性の検証である。既往の研究 1)の柱せいが 250mm の CFT 柱部材の曲げせん断実験の試験体(No.1, No.2)と同様の形状の中空鋼管を用いて、鋼管の角溶接部強度のみ変えた計 2 体の実験を行った。荷重は試験体柱頭部に水平力を 300kN 程度で 1 回正負に荷重した後、水平力を単調方向に部材角 $R=10(\times 10^{-2}\text{rad})$ まで荷重を行った。試験体の柱脚部は固定支持とした。

2.2 測定方法

変位計の測定箇所とひずみゲージの貼付箇所は図 1 の通りである。部材角は算定式(1)(2)で算出した。

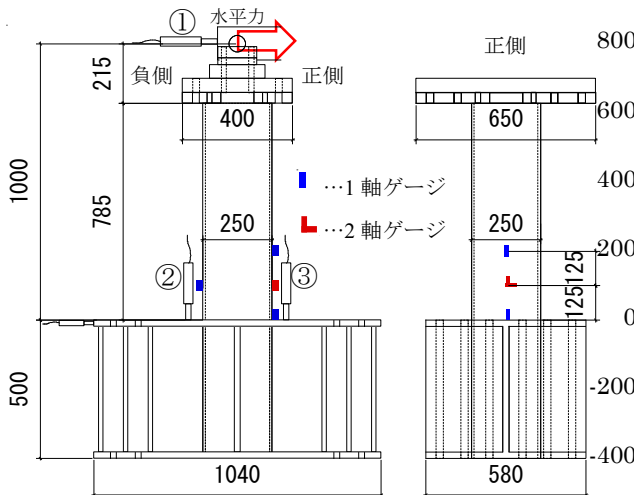


図 1 試験体および計測位置

$$\delta = \left\{ (\delta_1 - \frac{\delta_2 - \delta_3}{b}) \right\} \cdot h \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$R = \frac{\delta}{h} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 δ : 補正後の水平力荷重点変位、 δ_0 : 〇番変位計計測値、 h : 基礎スタブ上面から水平力荷重点までの距離、 b : 変位計③、④の中心間距離

実験装置の孔の位置の関係から、荷重前の状態で 1.41° ジャッキが傾いた状態で荷重しているため、水平力はその傾きを考慮し補正している。

2.3 実験結果

図 2 に柱脚曲げモーメント-部材角関係、図 3 に部材角 $9.0(\times 10^{-2}\text{rad})$ の時の曲げ圧縮側の柱脚部の写真、表 1 に試験体の初期剛性実験値および各種耐力の実験値を示している。ただし図 2 の降伏および終局曲げモーメントは鋼管の溶接部も母材と同様の強度を持つものとして算出している。荷重時の挙動については、どちらの試験体も部材角 $3.0(\times 10^{-2}\text{rad})$ を超えたあたりで正側

表 1 耐力および剛性(中空鋼管実験)

試験体		初期剛性	降伏耐力	終局耐力	最大耐力
No.	溶接条件	kN/mm	kNm	kNm	kNm
11	UM	36.7	661	685	702
12	OM	37.4	693	713	734
No.11/No.12		0.98	0.95	0.96	0.96

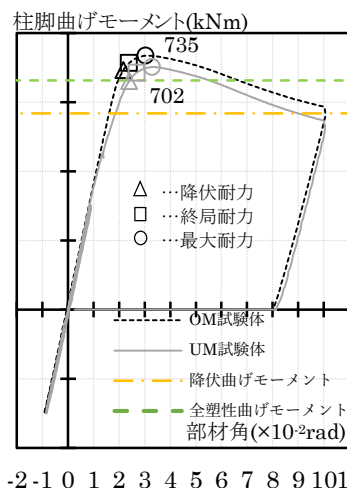


図 2 柱脚曲げモーメント-部材角

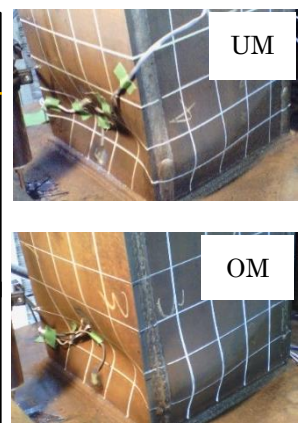


図 3 曲げ圧縮側柱脚 (R=9.0(\times 10^{-2}\text{rad}))

(曲げ圧縮側)のフランジの基礎スタブ上面から $h=0.25D$ の高さで局部座屈による鋼管の凹方向の変形を確認した。それと同時に両側のウェブでも同様な高さで鋼管の凸方向の変形を確認した。初期剛性は、UM試験体がオーバーマッチング(以下 OM)試験体と比べて2%低かった。また、降伏耐力は5%、終局耐力及び最大耐力は4%UM試験体がOM試験体と比べて低い結果となった。また、各耐力到達時の部材角の値はUM試験体がOM試験体と比べて大きかった。

3. 有限要素法解析(中空鋼管)

3.1 解析概要

3.1.1 解析方法および解析対象

解析はすべて汎用非線形構造解析ソルバー MSC.Marc2017⁴⁾を用いた FEM 解析により行った。

本解析は2章の実験をモデル化したものである。加力方法実験と同様で、実験の際の加力点の位置にリンク要素を用いて Y 方向に強制変位を与える。

3.1.2 解析モデル

表2に試験体一覧を示す。試験体は2章の実験の試

表2 試験体一覧(中空鋼管解析)

試験体 No.	断面 D mm	板厚 t mm	幅厚比 B/t	鋼種	高さ h_0 mm	径長比 L_k/D	溶接条件
S11	250	9.6	26.0	H-SA	1000	8.0	UM
S12				700B	1000	8.0	OM

表3 鋼材の機械的性質

鋼種	使用箇所	ヤング率 N/mm^2	降伏点 N/mm^2	引張強さ N/mm^2
H-SA700B	母材	199,386	801	826
SN490B	スタブ エンドプレート	205,740	389	512
YGW11	UM	206,224	448	590
G78A	OM	206,066	724	931

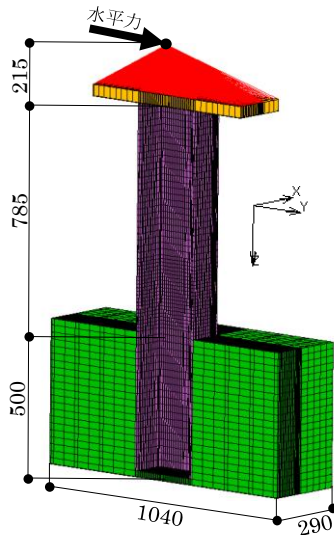


図5 解析モデル

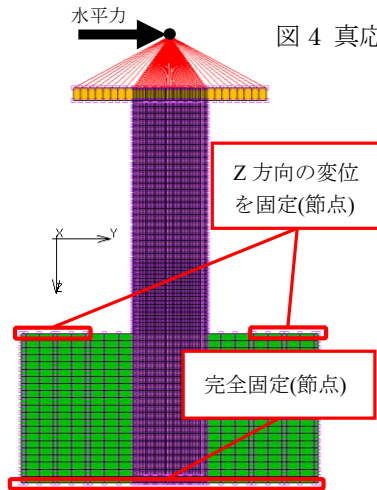


図7 境界条件 (中空鋼管)

験体の板厚 $t=9.6mm$ 、幅厚比 $B/t=26.0$ としたもので他は同様である。この値は材料試験結果より得られた板厚である。図5に解析モデルを示す。図6に鋼管角溶接部の詳細図を示す。モデル化にあたって、すべて8節点ソリッド要素を用いる。対称性を考慮して1/2モデルとする。境界条件は、対称面 YZ では X 方向変位を拘束する。また、加力点は Y 方向の変位と X 方向と Z 方向の回転を拘束する。また、図7に示すように実験を模擬するために試験体の固定は基礎スタブの下面の節点すべてを完全固定にし、基礎スタブ上面の実験の際に枕材を PC 鋼棒で挟んで固定していた部分の節点を Z 方向の変位のみ固定とした。加力方法は Y 方向の単調載荷とし、載荷点の水平変位が 100mm となるまで載荷を行う。

3.2.3 材料特性モデル

表3に材料の機械的性質を示す。ただし SN460B の材料試験片はスタブおよびエンドプレートとは異なる板厚(9mm)であるが機械的性質に大きな差はないと考え、この実験値を用いた。鋼材は引張試験から得られた公称応力-公称歪関係を真応力-等価塑性歪関係に換算した後、多直線近似したものをを用いる。図4に真応力-等価塑性歪関係を示す。塑性域における構成則は、von Mises の降伏条件、連合流れ則、等方硬化則に基づいている。

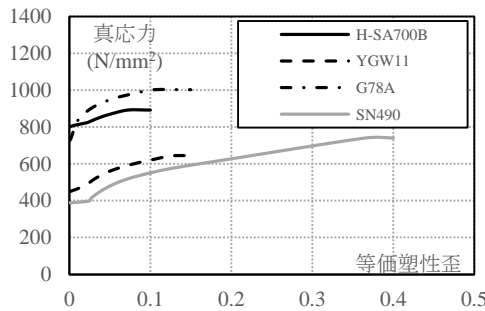


図4 真応力-等価塑性歪関係

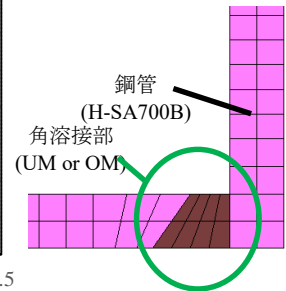


図6 角溶接部詳細

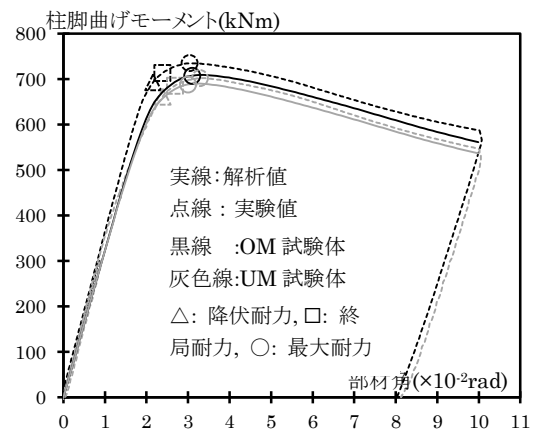


図8 中空鋼管試験体の柱脚曲げモーメント-部材角関係(解析値と実験値)

3.3.4 解析結果

図 8 に柱脚曲げモーメント-部材角関係を示す。図 8 から解析は精度よく実験を追跡できているといえる。剛性については UM 試験体の方が実験を精度良く追跡できた。解析値の UM 試験体と OM 試験体の耐力差については、最大耐力においては実験値の差 4%と近い差 3%がみられる。断面耐力の計算値では UM 試験体と OM 試験体で耐力差が 2%であるので、解析値および実験値のどちらもそれ以上の耐力差がみられるが大きな差はなかった。

4. 有限要素法解析 (CFT)

4.1 解析概要

4.1.1 解析対象

本解析は既往の実験 1)2)をモデル化したものである。加力方法は実験での加力点の位置に Z 方向に一定軸力を作用させた状態で Y 方向に強制変位を与える。

4.1.2 解析モデル

鋼管のモデルは 3 章と同様である。図 11 に鋼管角溶接部の詳細図を示す。拘束条件については図 9 に示しており、基礎スタブ上面の Z 方向の変位の拘束についてのみ変更しており、実験で試験体を固定するために PC 鋼棒を用いて張力を導入した際に、試験体と直接接している板座金の部分の基礎スタブ上面の節点の Z 方向の変位を拘束する。加力方法は Z 方向に一定軸力 ($N/N_0=0.4$)を加力した状態で Y 方向に載荷点の水平変位が 40mm となるまで載荷する一定軸力下での水平力の単調載荷を行う。

4.1.3 材料特性モデル

鋼材については 3 章と同様である。コンクリートの機械的性質を表 4 に示す。本解析では、コンクリート要素に歪弾性体モデルを用いている。歪弾性体とは応力限界点までは弾性挙動を示すが、応力限界点到達以降は応力およびひずみが増加しない材料である。また、圧縮強度に新都市指針⁵⁾の充填コンクリートの圧縮強度 f_c (算定式 (3) より)を圧縮応力限界点に用いることで鋼管に拘束されたコンクリートの強度上昇を表現している。引張応力限界点については材料試験から得

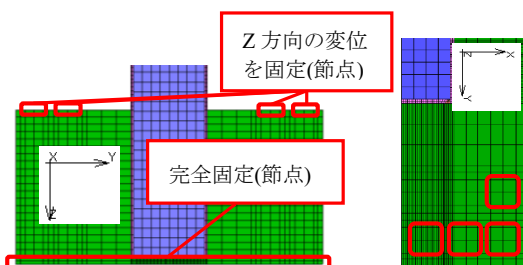


図 9 拘束条件(CFT)

られた圧縮強度の値の 1/10 としている。

$$f_c = F_c + K_R (t/B)^2 \sigma_y \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 F_c : コンクリート材料試験強度 ($F_c \leq 90$ (N/mm²)), K_R : 21(角形断面の拘束係数), t : 鋼管の板厚, B : 角形鋼管の幅, σ_y : 鋼管の降伏応力度, ($t/B > 1/21$ の場合 $t/B=21$ とする)

4.1.4 接触条件

図 10 に接触要素を示す。コンクリートと接触する鋼管、エンドプレートおよび基礎スタブの鋼材の要素とコンクリート要素全体を接触体として設定した。また、鋼材とコンクリートの接触条件は摩擦を考慮せず摩擦係数を 0 として、コンクリート同士の接触条件は滑り防止のため摩擦係数を非常に大きくしている。

4.2 解析結果

図 12 に柱脚曲げモーメント-部材角関係を示す。図 13 には解析と実験値の各部材角 1 サイクル目の最大曲げ耐力をプロットしたものととの比較を示す。なお、部材角の補正については実験および中空鋼管の解析と同様の方法で算出した。解析値は実験値の最大耐力まで精度よく追跡できているが、それ以降は耐力が実験のように急激に低下しなかった。また、UM 試験体と OM 試験体の耐力差については、実験では最大耐力で 6.9%の耐力差があるのに対し、解析では、2.5%の耐力差しか見られなかった。

4.3 UM 試験体の解析の再検討

上記の解析において UM 試験体と OM 試験体で実験よりも耐力差が小さい要因として鋼管角溶接部を UM 溶接にすることで、鋼管の拘束効果が弱まるため、式 (3) の拘束係数 K_R が低減されると考え、拘束係数 K_R をパラメータとし、どの程度低減すれば実験値と同様の耐力差が生じるかを検討した。結果を表 5 に示す。実験での最大耐力差は 6.9%であるので、本パラメータ

表 4 コンクリートの機械的性質

試験体	ヤング率 N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	$f_c (K_R=21)$	$f_c (K_R=10)$
			N/mm ²	N/mm ²
Fc70	No.1,2	39,512	74.8	86.6
	No.3,4	37,848	65.0	97.8
Fc150	No.5,6	53,096	163.5	196.3
	No.7,8	52,985	152.2	185.0

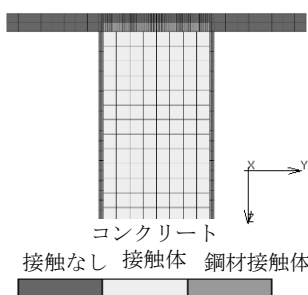
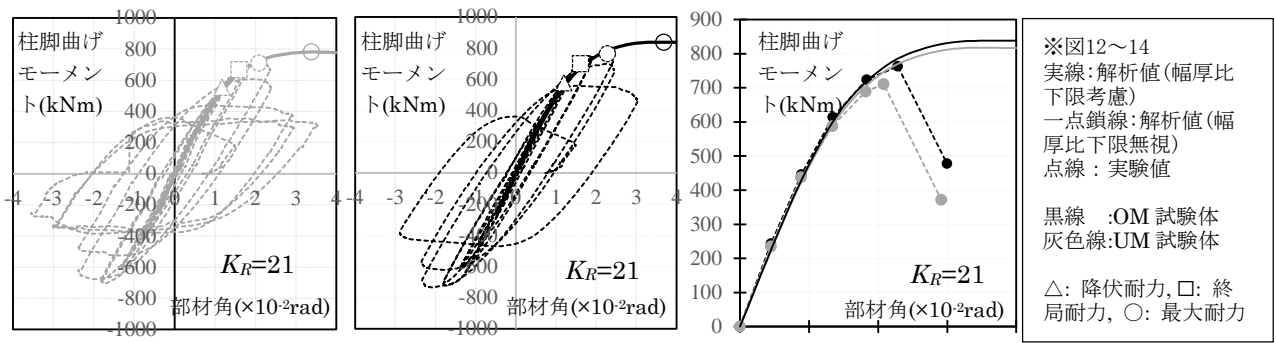


図 10 接触要素



図 11 角溶接部詳細



UM 試験体 (No.1) OM 試験体 (No.2)
 図 12 柱脚曲げモーメント-部材角関係 (250 角)

図 13 柱脚曲げモーメント-部材角関係
 (実験:各部材角ごとの最大耐力点) (No.1,2)

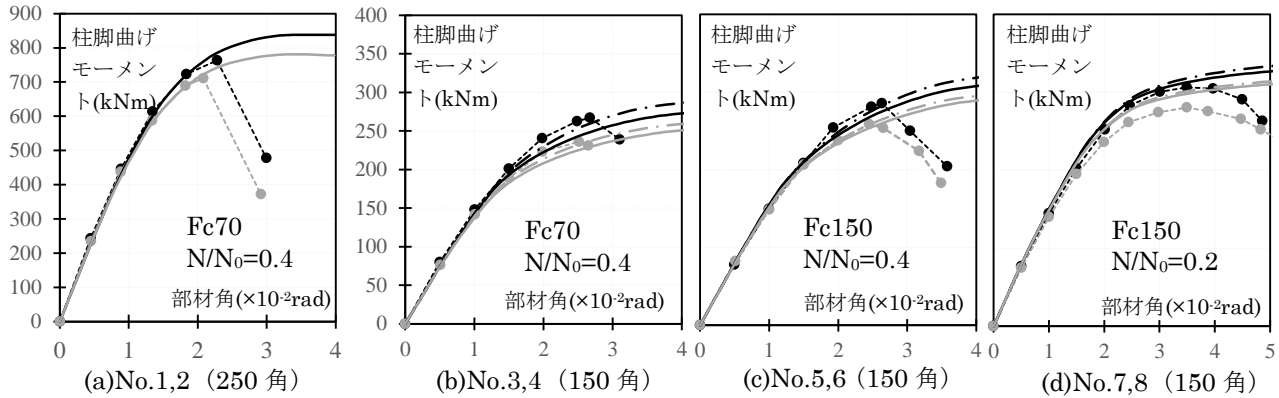


図 14 柱脚曲げモーメント-部材角関係(解析:UM:KR=10, OM:KR=21, 実験:各部材角ごとの最大耐力点)

表 5 拘束係数 K_R と耐力差 (No.1,2)

拘束係数 K_R	0	9	10	11	21
cF_c (N/mm ²)	74.8	85.4	86.6	87.8	99.6
曲げ耐力(OM)(kNm)	838				
曲げ耐力(UM)(kNm)	742	777	781	785	817
曲げ耐力差(%)	11.5	7.2	6.8	6.4	2.5

解析において UM 試験体は $K_R=10$ とするのが最も適当であるといえる。UM 試験体を $K_R=10$ とした時の結果を図 14(a)に示す。

4.4 せいが 150 角の CFT 柱部材の解析

F_c150 については式(3)の適用範囲外ではあるが、拘束係数 $K_R=10$ を UM 試験体に適用し、せいが 150mm の CFT 柱材を用いた既往の実験 2)の解析モデルを上記の解析と同じ条件で作成し解析結果と比較をした。その結果を図 14(b)~(d)に示す。ただし解析値は式(3)の幅厚比の下限を考慮しているものとしていないものを示している。いずれの試験体も弾性域は精度よく実験を追跡できているが、幅厚比の下限値を考慮した試験体については、低軸力試験体である No.7,8 を除き、OM 試験体では実験を過小評価し UM 試験体でも若干その傾向は見られた。幅厚比の考慮を無視することで低軸力試験体を除き解析の精度は向上した。図 15 に実験で最大曲げ耐力に到達した部材角での UM 試験体と OM 試験体の耐力差を示している。低軸力試験体を除き解析の耐力差は概ね実験と同程度であった。

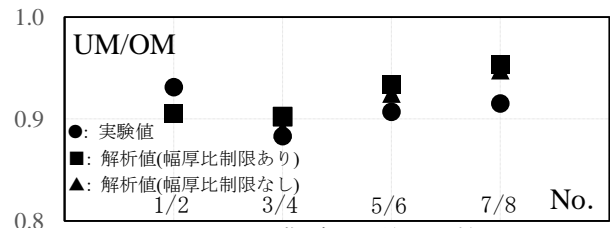


図 15 曲げ耐力差の比較

5. まとめ

中空鋼管の曲げせん断解析においては角溶接部強度による耐力差も含めて実験を精度良く追跡できる。

柱せいが 250mm の解析モデルにおいて拘束係数 $K_R=10$ (5 割程度低減)を UM 試験体に適用することで実験値と同等の耐力差が得られた。

拘束係数 $K_R=10$ を UM 試験体に適用した、せいが 150mm の試験体での解析は弾性範囲では実験を精度良く追跡できたが、それ以降は解析が実験を過小評価した。ただし、充填コンクリートの圧縮強度 cF_c の幅厚比の下限の条件を無視した場合は低軸力試験体を除いて解析と実験の対応は良好だった。

【参考文献】

- 1) 内野他:アンダーマッピング溶接により組み立てられた超高強度鋼 CFT 部材の構造性能に関する研究(その 4, その 5), 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp. 1419-1422, 2017. 8.
- 2) 岩元他:アンダーマッピング溶接により組み立てられた超高強度鋼 CFT 部材の構造性能に関する研究 その 12, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) pp1421-1422, 2018. 9
- 3) 黒川 勇斗:溶接部強度を考慮した超高強度 CFT 柱の耐力算定用モデルの考察, 九州大学修士論文集, 2018. 3
- 4) MSC. Software : Marc 2017 Volume A : Theory and User Information
- 5) 新都市ハウジング協会:コンクリート充填鋼管(CFT) 造技術基準・同解説の運用及び計算例等 2014. 3