

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760379
 研究課題名(和文) CFT柱-H形鋼梁接合部におけるスラブの合成効果を考慮した梁の塑性変形能力評価法
 研究課題名(英文) Evaluation method of plastic deformation capacity of a beam web considering the composite effect in a CFT column-H shaped beam connection
 研究代表者
 城戸 将江 (KIDO MASAE)
 北九州市立大学・国際環境工学部・講師
 研究者番号：10453226

研究成果の概要(和文): 耐震設計において重要な梁の塑性変形能力を, 中空円形鋼管柱およびコンクリート充填円形鋼管柱(以後円形 CFT 柱)に取り付く場合について計算し, CFT 柱に取り付く場合のほうが大きいことを示した。また, 角形 CFT 柱-H 形鋼梁ウェブ接合部の構造実験を行った。梁端部の耐力だけに着目すると, 柱の寸法(板厚), 充填コンクリートの有無, 溶接のために設けられる梁端部のスカラップの有無の顕著な影響は見られないことを示した。

研究成果の概要(英文): The plastic deformation capacity of a beam is an important for seismic design. The plastic deformation capacity of a beam connected to the CFT column is greater than that of the beam connected to the hollow steel column by analysis. Experimental studies of square CFT column-H-shaped beam connection were carried out. It is shows that maximum strength was about the same and the influence of size of columns (plate thickness), infilled concrete an scallop for welding on the maximum strength was not observed.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：鋼構造, 耐震設計, 柱梁接合部, 鋼・コンクリート合成構造

1. 研究開始当初の背景

梁崩壊型の設計を行なう場合は, 梁が十分な塑性変形能力を有していることが重要であり, 梁端部の早期破断・亀裂は, 避けなければならない現象である。1995年の兵庫県南

部地震において観察された, 鋼構造骨組における柱梁接合部の通しダイアフラムと梁フランジの完全溶込溶接部近傍に脆性破断・亀裂の被害を受け, これらの破断防止に関する研究が進められてきた。

「鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説」¹⁾(以後破断防止ガイドライン)には、接合形式が通しダイヤフラムの角形鋼管柱・H形鋼梁接合部を対象とし、梁端溶接接合部の脆性的破断を防止することを目的とし、必要変形性能(地震時の最大塑性回転角)が保有変形性能(破断に至るまでの梁の塑性変形性能)を上回ることを基本とした設計法や保有変形性能(最大塑性回転角)の算定式などが提示されている。

「鋼構造接合部設計指針」²⁾(以後、接合部設計指針)には、梁端部が降伏した後、粘り強い変形能力を発揮するために、最大曲げ耐力が全塑性モーメントに接合部係数をかけた値よりも大きくなければならないとする保有耐力接合の設計式が示されている。すなわち、梁の塑性変形能力を評価するには、梁端接合部の曲げ耐力について適切に評価する必要がある。

梁端接合部の最大曲げ耐力は、梁フランジ接合部の最大曲げ耐力と梁ウェブ接合部の最大曲げ耐力の総和で算定できる。しかしながら、中空鋼管柱に取り付くH形鋼梁ウェブ接合部では、柱鋼管壁に面外変形が生ずると梁ウェブ部分が最大限に耐力を発揮できなくなるため、曲げ耐力を算定する場合には、面外変形の影響を考慮する必要がある。梁ウェブ接合部の曲げ耐力は大きいもので梁全断面の曲げ耐力の40%程度あり、梁ウェブ部分の負担を適切に評価することが重要になる。角形および円形鋼管柱・H形鋼梁における、梁ウェブ接合部の曲げ耐力に関する研究はすでにあり、塑性解析に基づく設計式が接合部設計指針に採用されている。また、その設計式は実験値、数値解析解との対応がよいことが示されている。

また、実際の建築物では梁の上端に床スラブがあり、中立軸が材軸から梁の上端側に移動し、スラブがない場合と比較して小さな変形で梁端下フランジより破断が生じると考えられる。ゆえに、床スラブの効果について適切に把握する必要がある。

以上、中空鋼管柱・H形鋼梁の既往の研究について述べたが、柱がコンクリート充填鋼管(以後CFT)の場合も、同様な検討が必要であると考えられる。特に、CFT柱では柱鋼管の幅厚比制限が中空鋼管の1.5倍に緩和されていることから、鋼管壁の面外変形の影響が大きくなる場合があると考えられる。

城戸はこれまでに、角形CFT柱および円形CFT柱に取り付く梁ウェブ接合部の曲げ耐力を塑性解析により算定し、曲げ耐力評価式を提案している。しかしながら、角形CFT柱に取り付く梁ウェブ接合部の曲げ耐力に関する実験的研究がまったく行なわれていないため、実験値との比較ができない状況にある。解析結果によれば、梁ウェブ接合部の曲げ耐

力に影響を及ぼす因子は、柱幅厚比、梁幅厚比、柱鋼管および梁の降伏応力度、柱幅、梁せいであることが明らかになっている。しかし、解析結果は精解値ではなく、実験値との比較を行い解析値の精度を確認することは必須である。

また、破断防止ガイドラインに示されている、保有変形性能の式に解析により得られた値を適用し、角形CFT柱に取り付く梁の塑性変形能力を算定し、必要変形性能を満たすための条件を例示している。しかしながら、これは中空鋼管柱の場合の式を準用している状況であり、CFT柱の場合の保有変形性能の評価式を新たに提示する必要がある。

床スラブの付いたCFT柱・H形鋼梁接合部の実験的研究は数が少なく、梁ウェブ曲げ耐力、梁の塑性変形能力に対する床スラブの影響について定量的に把握できる状況ではなく、スラブ付きの柱梁接合部の実験的研究を行ない、床スラブの影響を検討し、実験資料の蓄積を行う必要がある。また、角形断面だけでなく円形断面についても同様の検討を行う必要があると考えられる。

2. 研究の目的

耐震設計において梁崩壊型の設計を行なう場合、梁が十分な塑性変形能力を有していることが重要である。梁の塑性変形能力には、梁端接合部の曲げ耐力が影響しているが、中空鋼管柱とH形鋼梁からなる柱梁接合部では、曲げモーメントが生じたとき、柱鋼管に面外変形が生じ、梁ウェブ部分が最大限に曲げ耐力を発揮できない場合がある。梁の塑性変形能力を適切に評価するには、梁ウェブ接合部の曲げ耐力を適切に評価しなければならない。これはコンクリート充填鋼管柱(CFT柱)・H形鋼梁接合部に関しても同様にいえることである。

本研究は、まず、円形CFT柱に取り付く梁ウェブ接合部の無次元化曲げ耐力を算定し、その結果を用いて、最大相対塑性回転角を文献1)に示されている式を用いて計算する。中空鋼管柱の場合とCFT柱の場合とを比較し、充填コンクリートの効果について検討を行う。また、角形CFT柱・H形鋼梁接合部の構造実験を行い、パネルアスペクト比、柱鋼管の幅厚比、コンクリート充填の有無、スカラップの有無、といった、各パラメータの影響について、主として耐力に着目して明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 円形CFT柱・H形鋼梁ウェブ接合部の塑性変形能力 解析方法

梁の保有している塑性変形能力は、文献1)に示されている最大相対塑性回転角を計算

することで評価できる。この最大相対塑性回転角は、梁ウェブ接合部の曲げ耐力を計算し、その値を用いることで計算できる。

ここでは、文献5)に示されている方法と同様に、まずは、文献3)および4)に示されている梁ウェブの無次元化曲げ耐力 m_c を計算する。次に、その値を用いて最大相対塑性回転角 ${}_a\theta_{bpm}$ を以下のパラメータにより算定し、中空円形鋼管柱の場合と円形CFT柱の場合とで比較を行うこととする。

- 1) 梁の降伏比 YR : 0.60, 0.70, 0.80
- 2) アスペクト比 h : 1.0, 1.5, 2.0
- 3) 材料強度

(梁): SN400, SN490

(柱): STKN400, STKN490

算定に用いた柱、梁は以下の通りである。

柱: $400 \times t_c$ (t_c : 柱鋼管板厚)

梁: H $400 \times 200 \times 8 \times 13$

H $600 \times 200 \times 11 \times 17$

H $800 \times 300 \times 14 \times 26$

解析結果

図1に最大相対塑性回転角 ${}_a\theta_{bpm}$ 径厚比 D_m/t_c 関係の例を示す。図(a)~図(c)は、降伏比 YR が0.6で、それぞれパネルアスペクト比 h が1, 1.5, 2の場合を示す。また、太い実線はCFT柱の場合、細い実線は中空鋼管柱の場合の回転角である。CFT柱、中空鋼管柱に取り付く場合について比較を行うと、最大相対塑性回転角の値は常にCFT柱に取り付く場合のほうが大きい。

図(a) 図(b)より、アスペクト比 h が $h=1.0$ から $h=1.5$ に変化すると、回転角 ${}_a\theta_{bpm}$ は小さくなる。

図2に最大相対塑性回転角の上昇率 p 径厚比 D_m/t_c 関係を示す(上昇率 p はCFTから中空を引いた値を中空で割って求めた)。図より、降伏比 YR が大きくなるにつれて、回転角の上昇率は大きくなる。 $YR=0.60$ のときでは約0~10%程度だが、 $YR=0.80$ のときでは数10%上昇している。

降伏比 YR , アスペクト比 h が大きくなると、中空鋼管柱の場合と比較して、CFT柱の場合では、回転角の上昇率は大きくなる。

(2) 角形CFT柱-H形鋼梁接合部の構造実験 実験計画

試験体は、 $300 \times 300 \times t$ (t : 柱鋼管板厚)の角形鋼管柱とH形鋼の梁からなる柱梁接合部である。荷重条件は単純梁形式で、単調載荷とする。実験変数の範囲は以下の通りである。

- 1) パネルアスペクト比 h : 1, 1.3, 1.5
- 2) 鋼管の幅厚比(公称値) D/t : 25, 33, 50
- 3) スクラップの有無: 有, 無
- 4) コンクリート充填: 有, 無

表1に試験体一覧を示す。

試験体

代表的な試験体の形状及び寸法を図3に示す。柱鋼管はBCR295の角形鋼管を使用し、梁はSN400B, ダイアフラムはSN490Cを使用した。

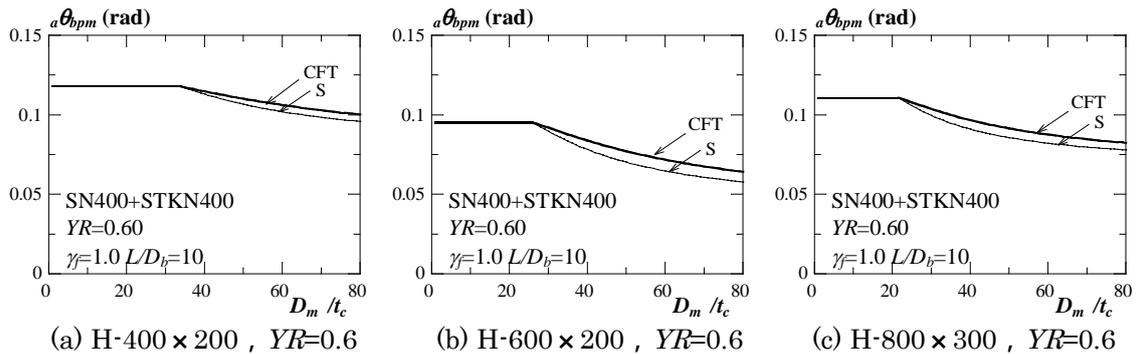


図1 最大相対塑性回転角 ${}_a\theta_{bpm}$ 径厚比 D_m/t_c 関係

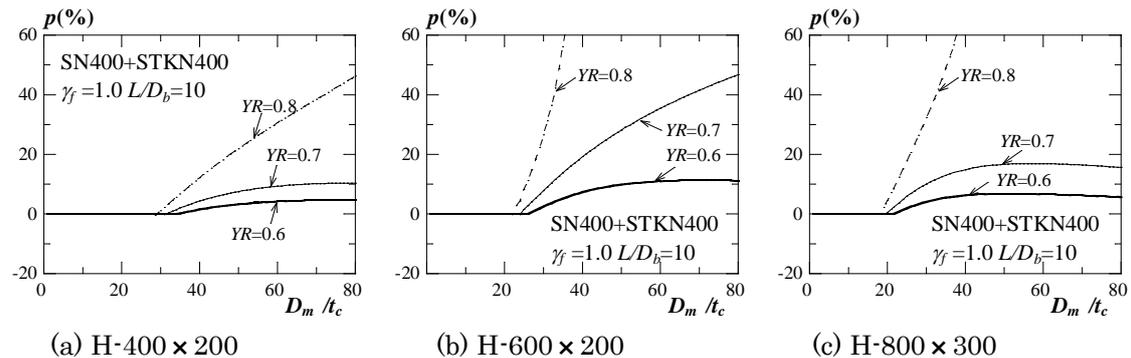


図2 最大相対塑性回転角 ${}_a\theta_{bpm}$ の上昇率 p - D_m/t_c 関係

鋼材の材料特性を調べるため、引張試験を行った。引張試験は、鋼管、H形鋼、ダイアフラム板、より切り出した JIS1 号 B 試験片によって、梁フランジ、梁ウェブ、柱鋼管（幅厚比ごと）、ダイアフラム、に対し 3 片ずつ行った。引張試験の結果を表 2 に示す。なお、柱鋼管については、0.2% オフセット法により降伏応力度 σ_y を求めた。また、H-400 の梁フランジについては、降伏応力度、引張強さの

表 1 試験体一覧

	柱板厚 (充填の有無) [mm]	梁寸法	スカラップ	コンクリート強度 [N/mm ²]
1	12 (充填)	H-400×200×8×13	無	39.67*
2	6 (充填)		無	36.04
3	9 (充填)	H-300×150×6.5×9	無	39.67*
4		H-400×200×8×13	無	38.25
5		H-450×200×9×14	無	39.67
6		H-400×200×8×13	有	37.09
7	9 (中空)	H-400×200×8×13	無	なし
8			有	なし

表 2 鋼材の材料特性

部位		σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_y/σ_u (%)	ϵ_{st} (%)	EL (%)
梁フランジ	H-400	325	438	74.2	2.63	26.8
	H-450	301				
	H-300	288	391	73.6	2.9	23.5
梁ウェブ	H-400	359	455	78.9	2.77	26.2
	H-450	336	444	75.7	2.7	27.3
	H-300	316	425	74.3	3.1	28.0
柱鋼管	6mm	363	448	81.1	—	25.3
	9mm	328	405	81	—	28
ダイアフラム	t=19	383	528	72.6	1.91	27
	t=16	378	528	71.5	2.0	26.8

σ_y , σ_u : 降伏応力度および引張強さ, σ_y/σ_u : 降伏比 ϵ_{st} , EL: ひずみ硬化開始時ひずみ度および破断伸び

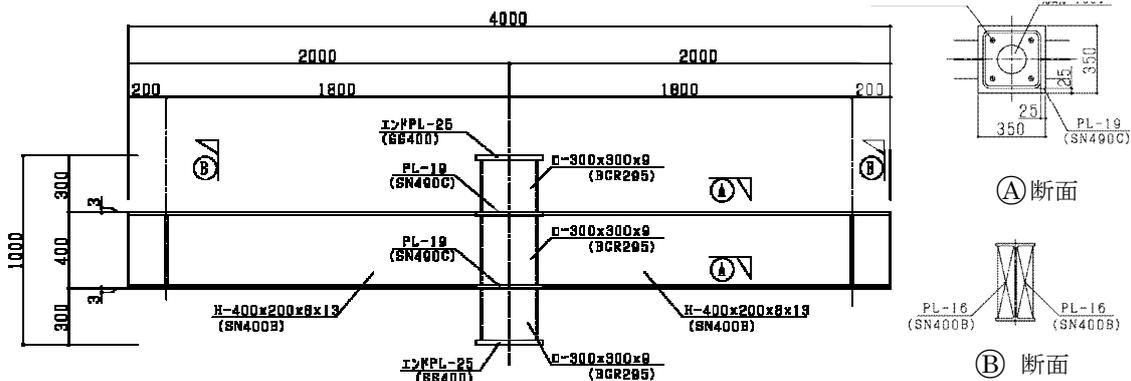


図 3 試験体の形状寸法

ばらつきが見られたため、さらに 5 本追加して試験を行い、それらすべての平均値を採用した。

実験に使用したコンクリートの調合を表 3 に示す。コンクリートは、レディーミクストコンクリート呼び強度 30N/mm² を用いた。シリンダー強度（コンクリート強度）を表 1 に示す。

③ 実験方法

加力装置を図 4 に示す。6000kN 大型載荷試験装置に付属している曲げ治具（支点）に試験体を設置し、柱型中央部分に鉛直荷重を加えた。

測定方法を図 5 に示す。部材角 θ は、時計回りを正とし、変位の正負は図中の座標に従うものとする。鉛直変位は、下ダイアフラムの 3 点、南側で 2 点 (v_1, v_2)、北側で 1 点 (v_3) を計測した（図 4 参照）。南側の鉛直変位 δ_s は、 v_1, v_2 の変位を平均して求め、北側の鉛直

表 3 コンクリート調合表

水セメント比 (%)	セメント (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	混和材 (kg/m ³)	スランブ (cm)
46	368	169	819	980	2.46	18

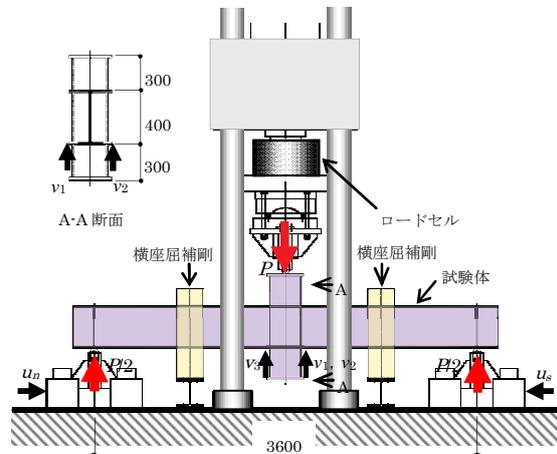


図 4 加力装置

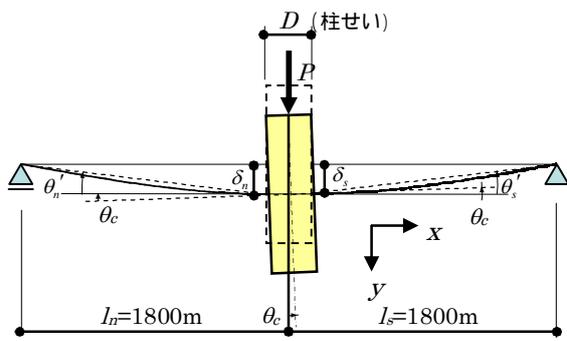


図5 測定方法

変位 δ_n は、東西方向の傾きは材軸方向に一定であると仮定し、南側の東西方向の傾きを用いて計算した。

実験結果

表4に実験による最大荷重 P_{max} およびそのときのモーメント、部材角を示している。表4によれば、最大荷重は、実験変数に関わらずほぼ同じ値を示している。これは、すべての試験体の破壊モードが梁フランジの局部座屈であり、ほぼ同じ値となったものと考えられる。

図6に各試験体の荷重 P (kN)と部材角 θ の関係を示す。部材角は、柱両側の梁のうち、局部座屈が発生したほうの梁の部材角を示している。

図6(a)にスカラップがない場合の充填試験体と中空試験体の比較を示す。図によれば、

荷重 - 部材角関係には大きな違いは見られない。

図6(b)にスカラップがある場合の充填試験体と中空試験体の比較を示す。No.6試験体は、実験途中で試験機が急に停止したため途中で載荷を中止した。この場合も、やや充填試験体のほうが荷重が大きい、顕著な差ではなくおおむね同じ値を示しているといえる。

図6(c)に柱幅厚比による比較を示す。図によれば、3つの試験体のうち、板厚が最も大きいNo.1試験体の最大荷重が最も大きい、その次に最大耐力が大きいのは板厚が最も小さいNo.2試験体となっており、板厚による違いもあまりみられなかった。

図6(d)に充填試験体で、スカラップのない場合とある場合の比較を示す。スカラップのないNo.6試験体のほうが、最大荷重時の部材角が大きく、最大荷重もやや大きい、顕著な差ではない。

これらを総合すると、梁端の耐力だけに着目すると、コンクリート充填の有無、柱幅厚比、スカラップの有無、などが及ぼす影響は顕著ではないことがわかる。

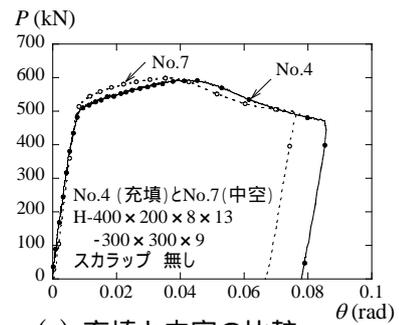
4. 研究成果

(1) 円形CFT柱-H形鋼梁ウェブ接合部の塑性変形能力

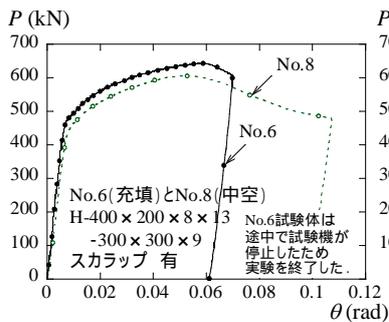
中空円形鋼管柱および円形CFT柱に取り付く場合の梁ウェブの無次元化曲げ耐力を算定し、その結果を用いて、最大相対塑性回転

表4 実験結果

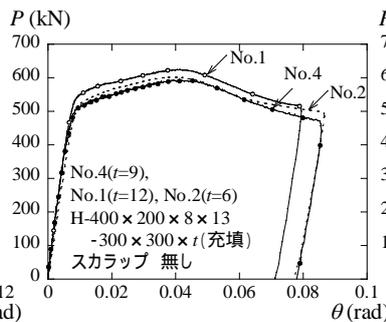
試験体No.	最大荷重 P_{max} (kN)	モーメント (kN·m)	部材角 (rad)
1	625	516	0.0427
2	602	497	0.0394
3	255	211	0.0483
4	593	489	0.0414
5	800	660	0.0498
6	645	532	0.0590
7	599	494	0.0369
8	606	500	0.0521



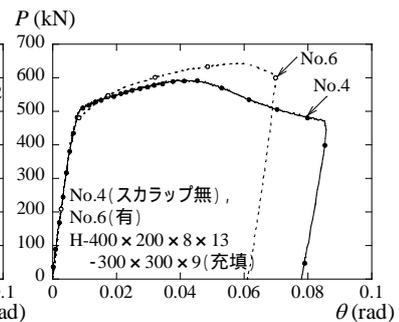
(a) 充填と中空の比較
スカラップ無し



(b) 充填と中空の比較
スカラップ有



(c) 幅厚比による比較



(d) スカラップの有無による比較

図6 荷重 - 部材角関係

角（塑性変形能力）の算定を行った。

中空円形鋼管に取り付く場合、円形 CFT 柱に取り付く場合の比較を行うと、最大相対塑性回転角の値は常に CFT 柱に取り付く場合のほうが大きいことがわかった。また、中空鋼管の場合に対する CFT の場合の、無次元化曲げ耐力の上昇率、最大相対塑性回転角の上昇率について、検討した結果、降伏比 YR 、アスペクト比 h が大きくなると、中空鋼管柱の場合と比較して、CFT 柱の場合では、回転角の上昇率は大きくなることがわかった。

今後は実験を行い、まずは解析のみによって示されている、円形 CFT 柱に取り付く梁ウェブ接合部の曲げ耐力について精度の検証を行い、今回得られた結果との比較も行う必要があると考えられる。

(2) 角形 CFT 柱-H 形鋼梁接合部の構造実験

角形 CFT 柱-H 形鋼梁ウェブ接合部の構造実験をパネルアスペクト比、鋼管の幅厚比、スカラップの有無、コンクリート充填の有無をパラメータとして行った。荷重条件は単純梁形式で、単調載荷である。試験体の総数は 8 体で、すべて梁の局部座屈によって最大耐力が決まっていた。最大荷重について見てみると、すべての試験体において顕著な差は見受けられなかった。

スカラップがない場合の充填試験体と中空試験体を比較すると、耐力には大きな違いは見られない。スカラップがある場合の充填試験体と中空試験体を比較すると、やや充填試験体のほうが耐力が大きいが、顕著な差ではなくおおむね同じ値を示しているといえる。

柱鋼管板厚により比較すると、板厚が最も大きい試験体の最大荷重が最も大きいが、その次に最大荷重が大きいのは板厚が最も小さい試験体となっており、板厚による違いもあまりみられなかった。充填試験体で、スカラップのない場合とある場合について比較すると、スカラップのない試験体のほうが、最大耐力時の部材角が大きく、最大耐力もやや大きかった。

このように、梁端の曲げ耐力に及ぼす、パネルアスペクト比、鋼管の幅厚比、スカラップの有無、コンクリート充填の有無の影響について実験結果の検討を行い、耐力だけに着目すると、これらの要因による顕著な影響は見られないことがわかった。したがって、今後はひずみについても詳細に検討を重ねる必要がある。また、スラブのついた試験体についてもひきつづき実験を進める予定である。

角形 CFT 柱に接合される梁の曲げ耐力、特に梁ウェブの曲げ耐力に着目し、系統的に行われた実験はこれまでなく、得られた実験結果は貴重な資料となる。

参考文献

- 1) 日本建築センター：鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説，2003.12
- 2) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2006.3.
- 3) 田中剛，田淵基嗣，村上裕通：円形鋼管柱梁仕口における梁ウェブ接合部の曲げ耐力評価，鋼構造年次論文報告集，9，pp.457-464，2001.11
- 4) 鮫島由佳，城戸將江，津田恵吾：コンクリート充填円形鋼管柱に取り付く H 形鋼梁ウェブ接合部の曲げ耐力 その 1，その 2，日本建築学会 2008 年度大会(中国) 学術講演梗概集，構造 III，pp.1147-1150，2008.9
- 5) 藤田昂文，城戸將江，津田恵吾：コンクリート充填角形鋼管に取り付く H 形鋼梁の塑性変形能力，鋼構造年次論文報告集，15， pp. 513-518，2007.11

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

城戸將江，末吉洋平：コンクリート充填円形鋼管柱に取り付く H 形鋼梁の塑性変形能力，第 8 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，2009，pp.25-1-25-5

引野怜史，金石達弥，城戸將江：コンクリート充填角形鋼管柱に取り付く H 形鋼梁ウェブ接合部の曲げ耐力に関する実験的研究，-パイロットテスト-，日本建築学会研究報告九州支部，第 49 号，2010，pp.273-276

城戸將江：コンクリート充填角形鋼管柱に取り付く H 形鋼梁ウェブ接合部の曲げ耐力に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-III，2010，投稿済み，掲載予定

6. 研究組織

(1) 研究代表者

城戸 將江 (MASAE KIDO)

北九州市立大学・国際環境工学部・講師

研究者番号：10453226