

論文 梁貫通形式角形 CFT 柱梁接合部における貫通梁直交方向の接合部性能に関する実験的研究

藤永 隆*1

要旨：CFT 柱梁接合部はダイアフラムを用いた形式が一般的に採用されるが、ダイアフラムにコンクリートの充填孔が必要であり、設計式が煩雑になる傾向がある。ダイアフラムを用いない新たな接合部形式として、柱鋼管に鋼梁を貫通させた梁貫通形式接合部が提案されている。梁貫通形式接合部は、梁降伏型の崩壊メカニズムを容易に実現でき、接合部の設計を簡素化することができる。しかし、貫通梁と直交する方向では鋼梁を貫通させることができないため、梁端の固定方法が問題となるが、貫通梁と直交する方向の接合部性能の検討例は皆無である。本論ではト字形の部分架構実験を行い、接合部の力学的挙動の検討を行った。

キーワード：コンクリート充填鋼管、柱梁接合部、正負交番載荷実験、隅肉溶接、直交方向

1. はじめに

コンクリート充填鋼管(以下 CFT)構造は、その優れた構造性能より広く建築構造物に用いられている。CFT 構造において柱梁接合部は、ダイアフラムを用いる形式が一般的に採用され、通しダイアフラム形式、外ダイアフラム形式、内ダイアフラム形式の 3 つの形式の柱梁接合部の設計法が確立されている¹⁾。中でも通しダイアフラム形式が多く採用されているが、通しダイアフラム形式の接合部は柱鋼管を切断しなければならない。柱鋼管を切断しダイアフラムを配したのちに完全溶け込み溶接により再接合する必要がある。加えて、CFT 造の場合にはダイアフラムにコンクリート充填用の孔を設ける必要があり、孔の存在によりダイアフラムの設計式は比較的煩雑になる傾向にある。

新たな CFT 構造の柱梁接合部形式として、柱鋼管に鋼梁を貫通させる方法が提案されており^{2),3)}、円形 CFT 柱の柱梁接合部に関しては応力伝達メカニズムや設計式の検討がなされている⁴⁾。梁貫通形式による CFT 柱梁接合部は、梁降伏型の崩壊メカニズムを容易に実現でき、柱梁接合部の設計を簡素化できることが期待される。また、隅肉溶接だけで組み立てが可能のため高度な溶接技術が必要とせず、施工の簡素化も期待される。著者らはこれまで検討例の非常に少ない角形 CFT 柱の柱梁接合部に関して十字形部分架構の実験を行い、充填コンクリートが曲げ圧縮領域で有効に寄与することを示している⁵⁾。しかし、貫通する梁と直交する方向では、貫通梁が存在することにより直交方向の梁は貫通させることができないため、梁端の固定方法が問題となるが、これまで貫通梁と直交する方向の接合部性能について検討した例は皆無である。

本論では、ト字形部分架構試験体により梁貫通形式の

角形 CFT 柱梁接合部の実験を行い、基本的な接合部性能を検討することに加えて、貫通梁と直交する方向の新しい接合方法を考案し、実験によりその挙動を把握することを目的とする。

2. ト字形骨組実験

2.1 試験体

図-1 に試験体の形状および寸法を、表-1 に試験体概要一覧、表-2 に試験体に用いた鋼材の材料特性を示す。試験体は角形 CFT 柱と鋼梁の柱梁接合部を模擬したト字形部分架構で、梁貫通形式と、貫通梁と直交する方向の接合部を模擬した試験体の 2 体である。柱鋼管は断面寸法 250x250x9 の BCR295 で、鋼梁は SN400B 材を用いて断面寸法は H-300x150x6.5x9 である。梁貫通形式試験体において梁降伏が先行するよう設計されている。

鋼梁の貫通方法は文献 5 の十字形部分架構試験体と同様で、鋼梁の断面寸法を計測した後に 1mm のクリアランスで柱鋼管に鋼梁の断面形状のプラズマカットを施し、鋼梁を貫通させた後に、鋼梁の外周に沿って柱鋼管の外側から隅肉溶接で接合している。鋼梁の載荷点と反対方向は 20mm 余長を設けており、余長側も鋼梁外周に沿って隅肉溶接している。外周の隅肉溶接には、フランジ部分ではある程度の引張応力伝達に、ウェブ部分ではせん断応力の伝達を期待している。隅肉溶接サイズは通常の隅肉溶接と同様で板厚の 0.7 倍とクリアランスの 1mm 以上となるようにしており、試験体の実溶接サイズはおよそ 8~9mm であった。貫通梁と直交する方向を想定した試験体は、貫通梁を模擬した短い梁を直交方向に設け、載荷方向の鋼梁は柱鋼管のフランジ 1 枚のみ貫通させている。貫通梁試験体と同様に鋼梁の周囲を柱鋼管の外側から隅肉溶接している。図-2 に貫通梁と直交する方向

*1 神戸大学 都市安全研究センター 准教授 博士(工学) (正会員)

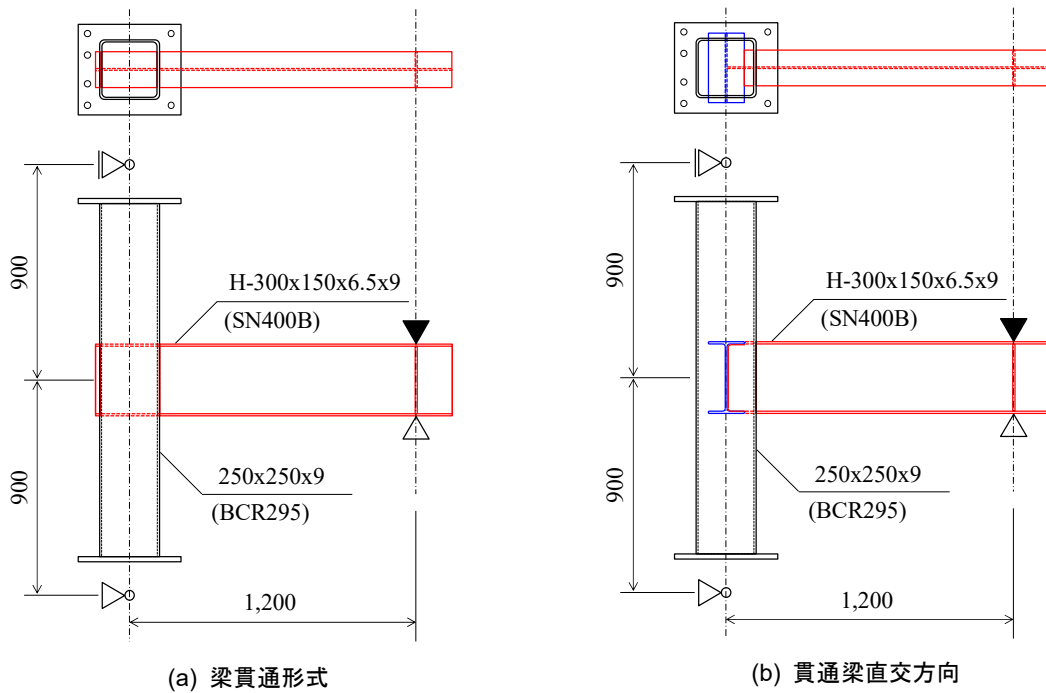


図-1 試験体の形状寸法

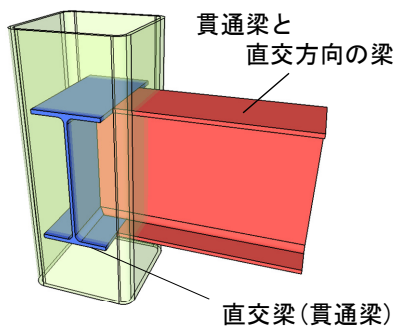


図-2 貫通梁直交方向の接合部詳細

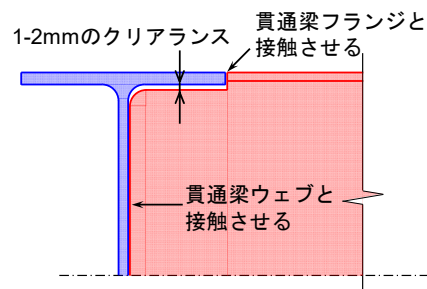


図-3 梁取合い部詳細

の接合部詳細を示す。荷重方向の鋼梁フランジは直交梁(貫通梁)のフランジに接触させており、荷重方向の鋼梁ウェブは直交方向の貫通梁のウェブに当たるまで埋め込ませて接触させている。なお、貫通直交梁と荷重方向の梁の接触具合はフランジを優先しており、荷重方向の鋼梁ウェブの上下と直交方向の貫通梁のフランジ間は1~2mmのクリアランスを設けている(図-3参照)。本論で考案する貫通梁直交方向の接合部は、貫通梁の存在により剛接合とすることは難しく、半剛接性を示すものと推察される。実構造で用いる際には純ラーメンではなく、ブレース付きラーメンとして用いることとなるが、基本的な接合部性能を把握しておくことは重要であり、本実

験で確認する。

充填コンクリートの設計基準強度は60MPaで、最大粗骨材粒径は20mmである。スランプフローの実測値は550×535mmであった。実験材齢時の強度は表-1に示すとおりで80MPa程度であった。

2.2 荷重方法

図-4に荷重装置図を示す。試験体の柱上端をピンローラー治具、柱下端をピン治具で固定し、梁端に取り付けた油圧ジャッキにより鋼梁にせん断力を加えた。柱頭および梁端に面外方向の補剛装置を設置している。最終的な破壊メカニズムは梁降伏型を想定しており、柱軸力の影響は小さいものと考えられるため、柱に軸力は導入

表-1 試験体概要

接合部形式	柱	梁	コンクリート強度 (MPa)
梁貫通形式	250x250x9 (BCR295)	H-300x150x6.5x9 (SN400B)	80.5
貫通梁直交方向			80.7

表-2 鋼材の材料特性

	ヤング係数 sE (GPa)	降伏点応力 f_y (MPa)	引張強さ f_u (MPa)	破断伸び (%)	
梁	H形鋼フランジ	178	322	482	40.4
	H形鋼ウェブ	190	362	486	24.8
柱	鋼管	182	349	423	26.5

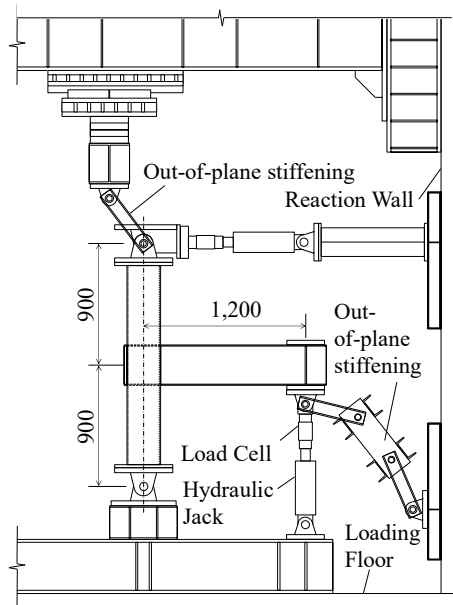
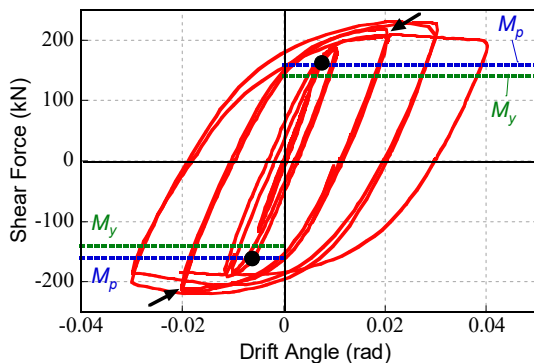
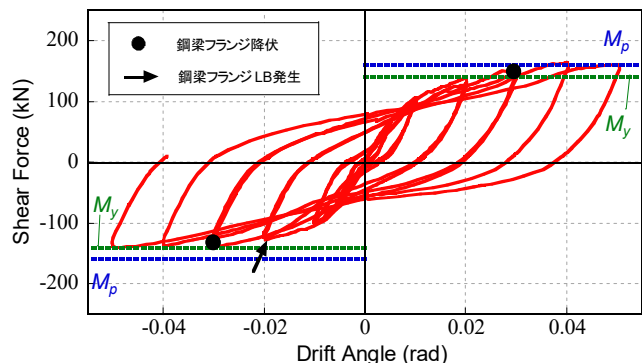


図-4 荷装置置図

していない。荷重は変形角 R による変位制御で行い、変形角 $R=0.005\text{rad}$ で2回繰り返して荷重を行った後、 0.01rad から 0.03rad まで 0.01rad 間隔で2回ずつ、正負交番繰り返して漸増荷重を行った。変形角 R は梁端荷重点の鉛直方向変位を柱芯から荷重点までの距離(1200mm)で除して求めた。



(a) 梁貫通形式



(b) 貫通梁直交方向

図-5 せん断力-変形角関係



(a) 梁フランジの局部座屈 (梁貫通形式)



(b) 梁端隅肉溶接部の亀裂 (貫通梁直交方向)

写真-1 試験体の破壊性状

3. 実験結果の検討

3.1 せん断力-変形角関係

図-5 にせん断力 Q と変形角 R の関係を示す。図中の赤実線が実験値であり、●印は鋼梁フランジに貼付したひずみゲージで計測したひずみが材料試験の結果より求めた降伏ひずみに最初に到達した点、矢印は目視によって鋼梁フランジに局部座屈が最初に確認された点を表している。図中の緑色および青色の破線は、それぞれ鋼梁断面の降伏曲げ耐力 M_y および全塑性曲げ耐力 M_p より求められたせん断力値を示している。

梁貫通形式の試験体では、エネルギー吸収性能の高い紡錘形の安定した履歴性状を示しており、変形角 $R=0.01\text{rad}$ のサイクルで梁フランジが降伏した後も耐力は上昇した。変形角 $R=0.02\text{rad}$ のサイクルで鋼梁フランジに局部座屈が観察された。変形角 $R=0.03\text{rad}$ のサイクルで最大耐力を迎えた後、鋼梁端部のフランジで局部座屈が大きくなり耐力が低下しはじめた。変形角 $R=0.04\text{rad}$ のサイクルで荷装置置が限界に達したため荷重を終了した。荷重終了後の梁フランジの局部座屈の様子を写真-1(a)に示す。鋼梁端部の降伏で耐力が決定され、最大耐力は計算耐力を大きく上回った。荷重終了後も柱鋼管に局部座屈は確認されず、隅肉溶接部にも明らかな損傷は観察されなかった。

貫通梁直交方向の試験体は、変形角 $R=0.01\text{rad}$ のサイ

表-3 実験値と計算値の比較

試験体		降伏耐力 (kN)			最大耐力 (kN)		
		計算値	実験値	実験/計算	計算値	実験値	実験/計算
梁貫通形式	正側	144	162	1.13	162	231	1.42
	負側		-161	-1.12		-219	-1.35
貫通梁 直交方向	正側		150	1.04		164	1.01
	負側		-137	-0.95		-139	-0.86

クルまではわずかにスリップを伴う履歴性状であったが、それ以降はエネルギー吸収に富んだループ形状となり、変形角 $R=+0.04\text{rad}$ まで耐力が上昇し続けた。初期のスリップを伴う履歴性状は、荷重初期段階の抵抗機構が、埋め込まれた鋼梁フランジと充填コンクリート間の支圧抵抗によるものであるからと推察される。耐力上昇の正確な理由は実験観察事象のみでは断定はできないが、荷重方向の梁のウェブは直交する貫通梁のウェブ部まで埋め込まれており、埋め込まれたウェブ部分が貫通梁のフランジに接触したことで耐力が上昇する可能性が考えられる。また、局部座屈発生より前に変形角 $R=0.01\text{rad}$ サイクル時に鋼梁梁端下側の隅肉溶接部で溶接ビード方向の亀裂が発生し、その後溶接部の亀裂が進むとともに、鋼梁フランジに引っ張られて柱鋼管フランジも大きく変

形した。荷重終了後の梁端隅肉溶接部の亀裂と柱フランジの局部座屈の様子を写真-1(b)に示す。

表-3 に耐力の実験値と計算値の比較を示す。降伏耐力と最大耐力の計算値は鋼梁断面の降伏曲げ耐力 M_y と全塑性曲げ耐力 M_p より求めたせん断力である。なお、計算耐力は鋼梁断面の実測値を用いて求め、ウェブフレット分は考慮していない。

梁貫通形式試験体では、降伏耐力で10%程度、最大耐力で30~40%程度実験値が計算値を上回った。貫通梁直交方向の試験体は、溶接部に亀裂が発生し柱鋼管壁が鋼梁に引っ張られて変形する破壊であったため、鋼梁の曲げ耐力より求められた計算耐力との比較にあまり意味はないが、鋼梁の降伏曲げ耐力程度の耐力は確保できていた。

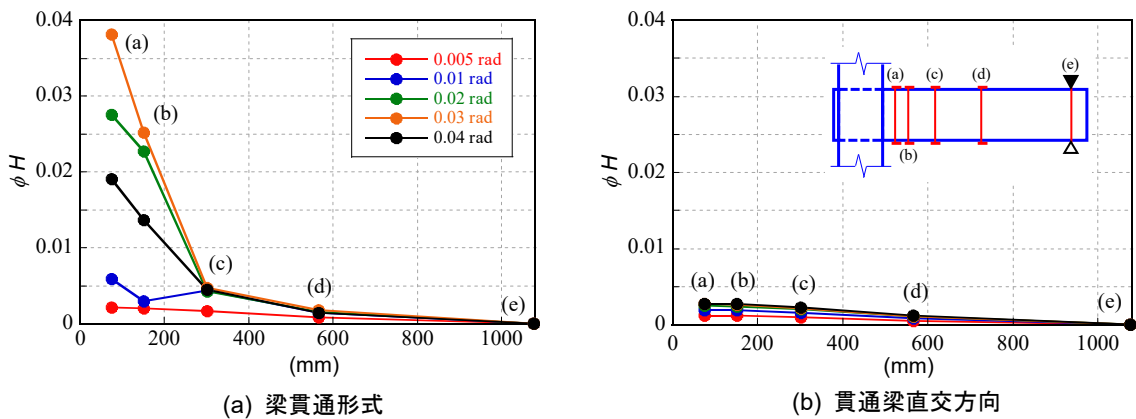


図-6 鋼梁の曲率分布

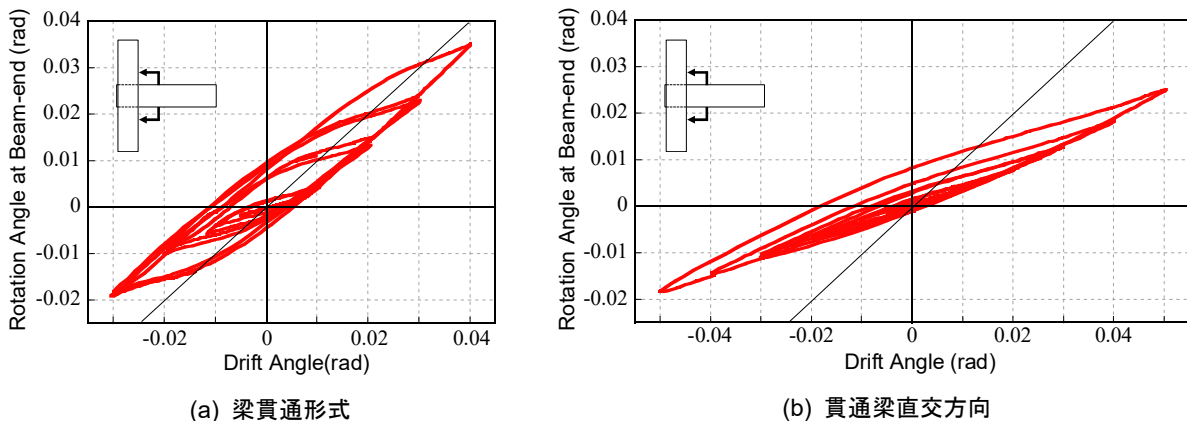


図-7 梁端回転角-変形角関係

3.2 鋼管梁の変形性状

図-6 に各変形角における鋼梁の曲率分布を示す。曲率は鋼梁の上下フランジ中央に貼付したひずみゲージの測定値より算出し、鋼梁せいを乗じて無次元化している。横軸は柱鋼管表面からの距離である。また、図-7 に梁端回転角と変形角の関係を示す。梁端回転角は柱鋼管表面から 150mm の位置で鋼梁の上下に設置した変位計より求めている。ここでの梁端回転角は、パネル内部での鋼梁の回転や梁端部の塑性変形をすべて含んだものであり、梁端部の回転量の参考データとして示す。

梁貫通形式の試験体は、鋼梁フランジのひずみが降伏ひずみに達した変形角 $R=0.01\text{rad}$ のサイクル以降で変形角の増加に伴い、柱鋼管の近くの断面で曲率が増加している。全体変形角のほとんどが梁端の回転角によるものであり、梁降伏型の崩壊機構を示している。

貫通梁直交方向の試験体は、変形角が大きくなっても鋼梁の曲率は非常に小さい値にとどまっていることがわかる。また、図-7(b)より梁端回転角は変形角の 50%程度あるが、鋼梁の曲げ変形の寄与分は非常に小さい。貫通梁直交方向の試験体では、変形角 $R=0.01\text{rad}$ に梁端部の隅肉溶接部に亀裂が発生したことにより、鋼梁フランジに応力が伝達されにくくなったと考えられる。架構全体の变形は主として鋼梁の引き抜けと柱鋼管フランジの局部変形によるものであり、鋼梁フランジで観察された

局部座屈も梁貫通形式の試験体と比較して非常に小さいものであった。

3.3 鋼管のひずみ

図-8 に、接合部に最も近い位置(梁フランジ表面から 25mm)に貼付したひずみゲージで計測された、鋼梁の直上と直下の柱鋼管フランジのひずみ分布の一例を示す。図中の値は正側載荷時の各最大変位振幅点における値である。

梁貫通形式の試験体では、変形角 $R=0.01\text{rad}$ の載荷サイクルで曲げ引張側の鋼梁直上で降伏ひずみに到達し、その後もひずみが増大した。一方、曲げ圧縮側である鋼梁の下側ではひずみの増大は観察されず、負側載荷でも同様の傾向が見られた。また、実験終了時まで柱鋼管表面に局部座屈は目視で観察されなかった。梁貫通形式の接合部では、鋼梁の近傍で曲げ引張に起因する鋼管の局部変形(引張ひずみ)が大きいことが分かる。しかし、曲げ圧縮側ではひずみの集中が無く、充填コンクリートが曲げ圧縮側の圧縮抵抗に寄与していることがわかる。

貫通梁直交方向の試験体においても、曲げ引張側では鋼梁直上で鋼管中央のひずみが増大する傾向が見られた。変形角 $R=0.02\text{rad}$ 以降のひずみの増加量が梁貫通形式の試験体と比較して大きい、これは鋼梁フランジの引張により柱鋼管のフランジが面外に変形しており、それに伴うものであると言える。曲げ圧縮側である鋼梁の下側

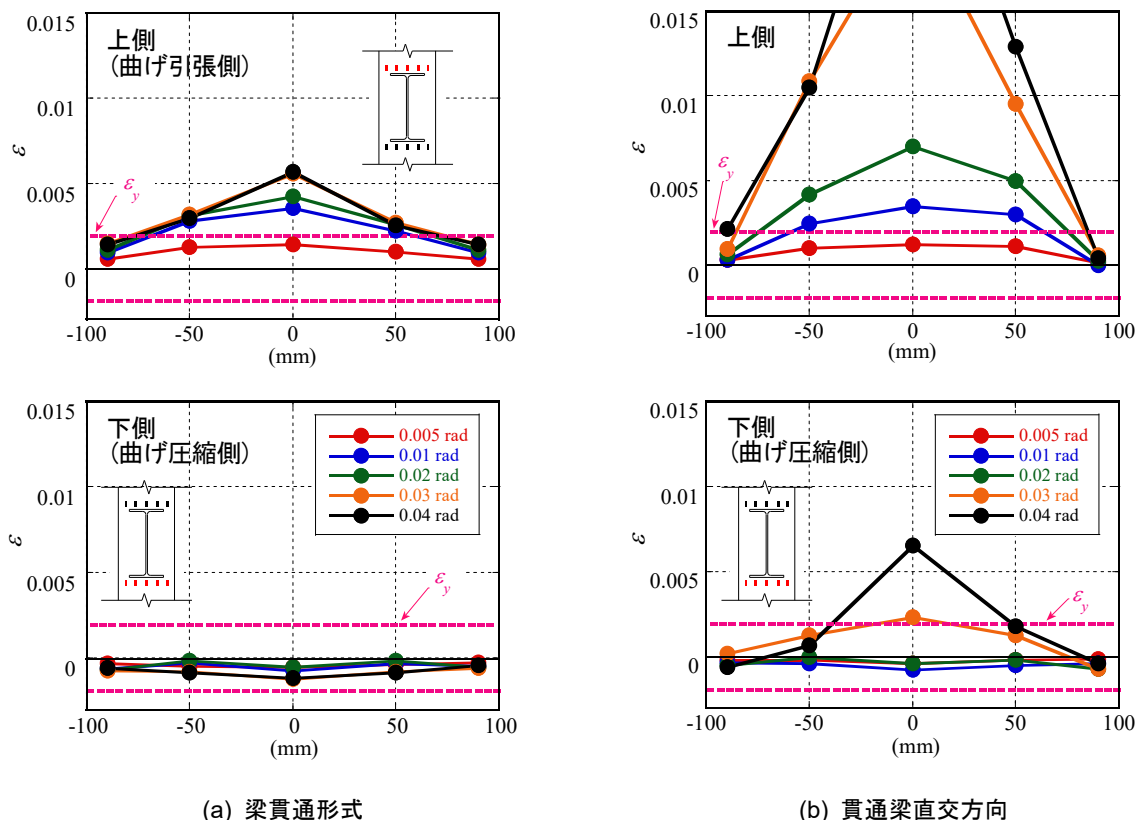


図-8 鋼管フランジのひずみ分布 (正側)

では、変形角 $R=0.03\text{rad}$ を超える大変形域では曲げ引張側載荷時の引張塑性変形の残留ひずみが見られるが、基本的には貫通梁直交方向においてもひずみの増大や集中は観察されず、圧縮側の降伏ひずみに到達することはなかった。貫通梁直交方向においても充填コンクリートの圧縮抵抗の寄与が伺える。

4. まとめ

本論では、梁貫通形式角形 CFT 柱梁接合部の構造性能を明らかにすることを目的として、ト字形の部分架構実験を行い、梁貫通形式接合部の構造性能の検討、および貫通梁と直交する方向の接合方向の検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 梁貫通形式試験体は、安定した履歴挙動を示し、最大耐力は鋼梁断面の全塑性曲げ耐力より求まるせん断力を上回った。
- (2) 梁貫通形式試験体では、変形角の増加に伴って鋼梁近傍の鋼管フランジひずみが引張側で増大する傾向が見られたが、圧縮側ではひずみの集中は観察されず、充填コンクリートが曲げ圧縮側の圧縮抵抗に寄与していることがわかった。
- (3) 梁貫通直交方向の試験体では、本論で提案した接合方法で急激な耐力低下等が観察されることはなく、鋼梁断面の降伏曲げ耐力より求まるせん断力を上回った。

謝辞

本研究を行うにあたり University of Auckland の A/Prof. Charles G. Clifton より貴重なご助言を頂きました。村田

瑞穂氏(神戸大学大学院)には実験にご協力頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，2008年10月
- 2) A. Azizinamini & B. Prakash: A Tentative Design Guideline for a New Steel Beam Connection Detail to Composite Tube Columns, *Engineering Journal*, AISC, Vol.30, pp.108-115, 1993
- 3) S.P. Schneider and Y.M. Alostaz: Experimental Behavior of Connections to Concrete-Filled Steel Tubes, *Journal of Construction Steel Research*, Vol.45, No.3, pp.321-352, 1998
- 4) A. Azizinamini and S. P. Schneider: Moment Connections to Circular Concrete-Filled Steel Tube Columns, *J. Struct. Eng.*, 130(2), pp.213-222, 2004
- 5) T. Fujinaga and C. G. Clifton: Experimental Study on Continuous Beam Type Square CFST Beam-to-Column Connection, *Interdependence between Structural Engineering and Construction Management*, Proc. of ISEC-10, May 2019
- 6) 藤永隆, 村田瑞穂：梁貫通形式角形 CFT 柱梁接合部に関する実験的研究(その2) 貫通梁直交方向の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(構造 III), pp.1351-1352, 2019年9月