

定着プレートを用いたCFT柱-RC梁接合構造の耐荷力特性と変形性能

Study on Seismic Performance of CFT Column-RC Beam Joint using Anchor Plate

佐野祐一*, 河西 寛*, 松本信之**

Yuichi Sano, Hiroshi Kasai, Nobuyuki Matsumoto

*(株)鴻池組, 土木本部技術部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町3丁目)

** (財)鉄道総合技術研究所, 鉄道力学研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2丁目)

A beam-column joint, in which an anchor plate is installed around the column tube for reinforcing bar connection in the beams, was invented for the rigid frame viaduct with CFT columns and longitudinal beams. Cyclic loading tests and analytical simulation were conducted to clarify its seismic performance. It was experimentally probed that the beam-column joint is stable against the cyclic loading to the extension that the column collapsed. 2D FE analysis simulated the experimental results well and it was found that the anchor plate reduces the deformation angle and pullout of the column from the joint. In addition, the pullout angle was formulated and the load-displacement relationship from the rigid frame analysis with the rotation spring which takes the pullout angle into account agreed well with that from the experiment.

Key Words: beam-column joint, anchor plate, CFT, cyclic loading test

キーワード: 柱-梁接合, 定着プレート, CFT構造, 交番載荷試験

1. はじめに

柱部材にCFTを用い, 縦梁を軌道直下に配置した「CFT柱と軌道支持梁による鉄道ラーメン高架橋」¹⁾に適用する目的で, 図-1に示すような定着プレートを用いたCFT柱-RC梁接合構造を考案した。これは, 柱を梁に埋込み, 柱と梁主筋が重なる部分において, 鋼管に取付けた定着プレートを介して梁主筋を連結させることを特徴とする接合構造である。

この定着プレートの採用により, 柱に梁主筋を貫通させる, あるいは梁主筋を曲げて柱部をかわすことなく, 梁主筋の軸力を伝達することができる。さらに, 梁主筋と定着プレートとの接合部分に機械継手を採用することにより, 運搬および組立作業を容易にすることができる。

本接合構造は, 柱を梁に埋め込む形式であるため, 埋込み接合方式とその耐荷力特性や変形性能が似通っていると考えられる。埋込み接合方式の耐荷力については, 柱をフーチングに埋め込んだ試験体の交番載荷試験結果に基づいて提案した算定モデル²⁾が複合標準³⁾に盛り込まれている。また, 埋込み接合方式の変形性能に関しては, 柱埋込み部分の抜け出しの影響を柱端部の部材角として評価する手法^{4),5)}が耐震標準⁶⁾に盛り込まれている。しかしながら定着プレートを用いた柱-梁接合構造はフーチングの場合よりも埋込み部から梁端面までの距離が

短いことや定着プレートの影響が考えられ, その耐荷力特性や変形性能は設計標準^{3),6)}に示されている埋込み方式のものとは異なる可能性がある。

そこで, 本接合方式が設計で求められる性能(部材の終局耐力時まで断面力を伝達し, 部材に十分な塑性変形が生じるまで破壊および大きな損傷を生じない³⁾)を満たすことを確認するために静的交番載荷試験を実施した。さらに, 2次元FEM解析により実験のシミュレーションを行い, 定着プレートが接合部の性能へ及ぼす影響を明らかにするとともに, 骨組みモデルによる解析を実施し, 本接合構造を用いた構造物の設計において骨組みモデルによる計算手法が適用できるかどうか確認した。

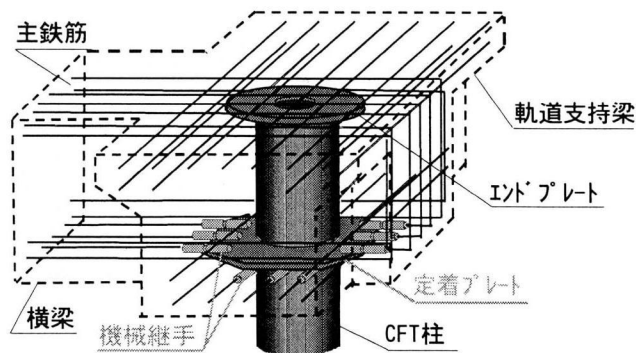


図-1 定着プレートを用いたCFT柱-RC梁接合構造

2.2 実験結果

(1) 荷重－変位関係

水平荷重と柱上端における水平変位との関係を図－4に示す。試験体1（線路直角方向）ではCFT柱は水平変位24mmで降伏し、最大荷重は降伏変位の4倍（ $\pm 4\delta y = \pm 96\text{mm}$ ）の荷重サイクルにおいて生じ、 $\pm 250\text{kN}$ を示した（この時点を超えて最大耐力時とする）。以降の荷重サイクルにおいてCFT柱の局部座屈により最大荷重が徐々に減少し、 $+9\delta y$ の荷重時に局部座屈箇所にて柱鋼管部が破断し、実験を終了した。試験体2（線路方向）においても、降伏変位がやや小さくなるものの、同様の荷重履歴となった。

また、 $4\delta y$ 荷重時を境として紡錘型の履歴ループから逆S字型の履歴ループに移行した。これは柱鋼管の局部座屈に起因するものであり、荷重の極性が変化する近傍で顕著な剛性低下が見られないことを鑑みても、梁や接合部におけるスリップ現象はほとんど生じていないものと推察される。

(2) 接合部の変形角

柱降伏時および最大耐力時における接合部全体の変形角とその成分を表－3に示す。また、図－5に変形角の成分と計測値との関係を示す。表に示すように、両ケースとも柱降伏時および最大耐力時において、変形角と比較して梁端部の変形角、接合部のせん断変形角が小さく、接合部分にはほぼ剛体的な挙動を呈していると考えられる。

(3) 柱の抜出し

柱端（梁コンクリート面）における曲げモーメントと柱の抜出し角（埋込み部鋼管の伸縮による柱端部の回転角）の関係を図－6に示す。曲げモーメントと柱の抜出し角の関係は、柱降伏時（ $\pm 1\delta y$ ）を境に弾性的な挙動から塑性的な挙動に転じ、最大柱端曲げモーメントが発生する $4\sim 5\delta y$ の荷重時に抜出し角が最大値に達した。

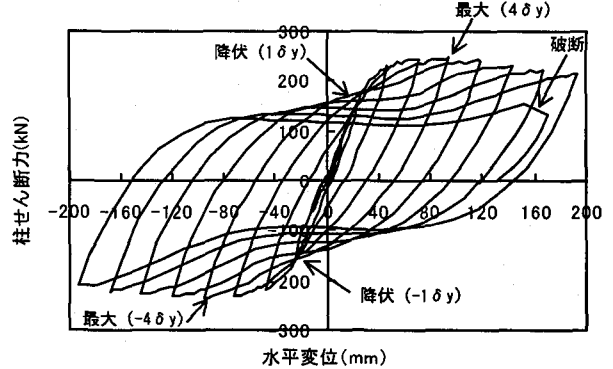
(4) 柱のひずみ分布

柱降伏時および最大耐力時において柱鋼管に発生した軸ひずみの鉛直方向分布を図－7に示す。試験体1および2ともに同様の結果となっており、ここでは試験体1（線路直角方向荷重）について、柱断面内の引張側0度と45度位置における計測結果を示す。鋼管に生じた軸ひずみは、柱降伏時においては、柱部および埋込み部とも、梁コンクリート面の位置において最大値（約0.25%）を示し、ほぼ直線的な分布を呈している。

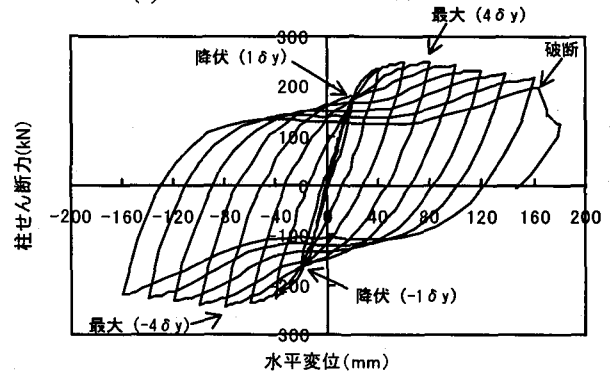
一方、最大耐力時には、梁コンクリート面から約10cm上方にわたって2%を超える軸ひずみが生じており、塑性ヒンジの形成を示唆している。埋込み部のひずみは梁コンクリート面から約10cmの位置の間で急激に減少し、10cm以深における発生ひずみは、柱降伏時におけるひずみの2倍程度の大きさに収まっている。なお、定着プレートが梁コンクリート面から7cmの深さに設置されており、以深の鋼管の発生ひずみを抑えている可能性が考えられる。

(5) 梁鉄筋および定着プレートのひずみ

柱降伏時および最大耐力時における接合部近傍の梁軸方向鉄筋（最外縁）の軸ひずみ分布を図－8に示す。試験体1では、最大耐力時において、梁コンクリートのひ

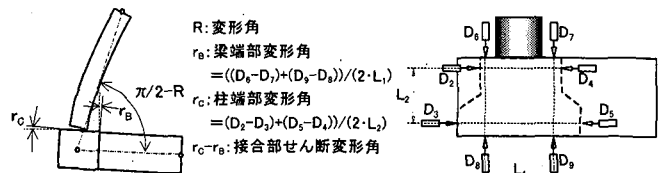


(a)試験体1（線路直角方向）

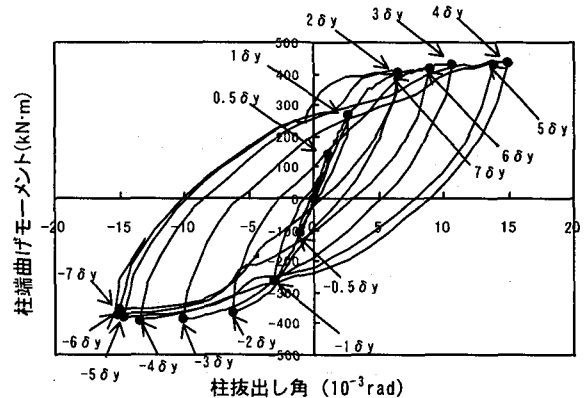


表－3 接合部の変形角とその成分(単位: 10^{-3}rad)

	試験体1(線路直角方向)			試験体2(線路方向)		
	変形角 R	梁端部 変形角 r_b	接合部せん断 変形角 $r_c - r_b$	変形角 R	梁端部 変形角 r_b	接合部せん断 変形角 $r_c - r_b$
柱降伏時	9.8	0.2	0.0	7.9	0.0	-0.1
最大耐力時	40.5	2.5	-2.2	39.6	0.6	-0.1



図－5 変形角の成分と計測値との関係（試験体1）



図－6 曲げモーメント－抜出し角関係（試験体1）

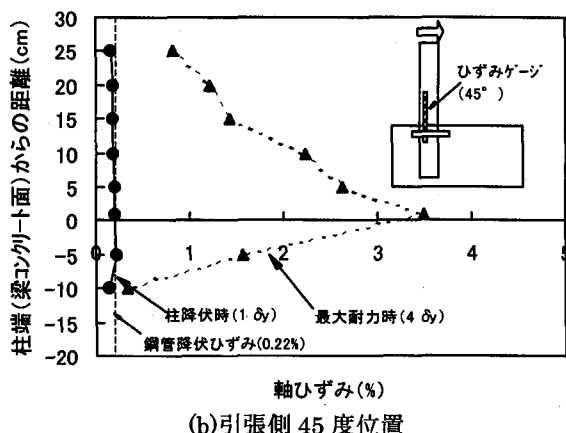
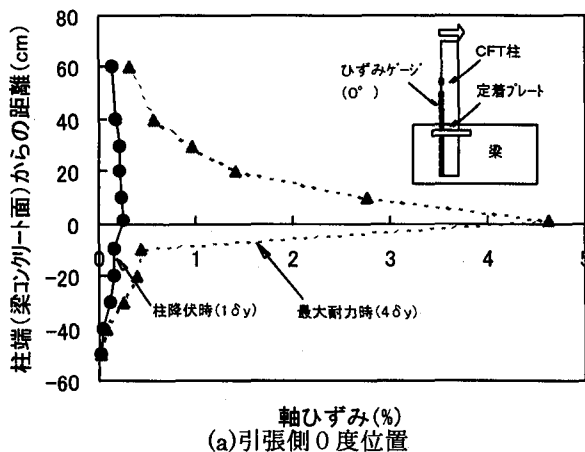


図-7 柱鋼管引張側軸ひずみ (試験体1)

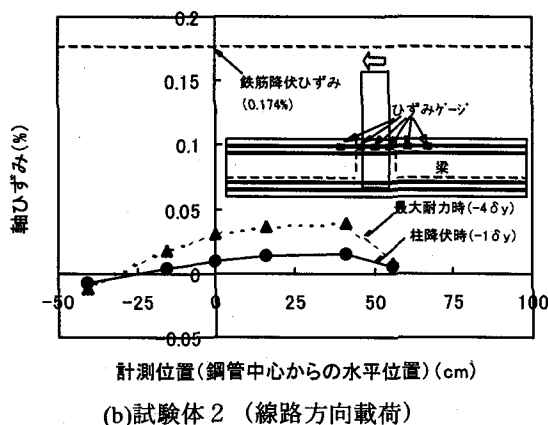
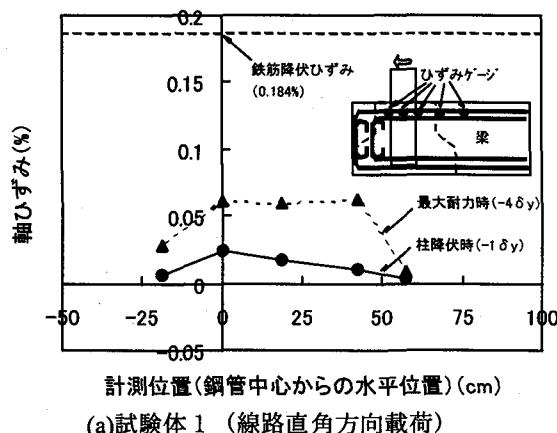


図-8 主筋の軸ひずみ分布

びわれが発生した縦梁との交差部近傍(図中右から2番目の測点)以外で、ほぼ柱降伏時の2倍程度の発生ひずみとなっている。しかし、ひずみ値は小さく、最大でも鉄筋降伏ひずみの1/3程度に収まっている。試験体2においても、同様の傾向にあり、最大発生ひずみは鉄筋降伏ひずみの1/4程度となっている。

表-4に梁鉄筋および定着プレートに発生した最大ひずみと計測位置についてまとめて示す。表には比較のため、それぞれの鋼材の降伏ひずみも併せて示している。両載荷ケースにおいて、プレートに機械継手を介して定着された主筋には、鋼管と交差しない主筋よりも大きなひずみが生じているものの、いずれの発生ひずみも降伏ひずみ以下に収まっている。

(6) 梁コンクリートのひび割れ状況

表-5に梁コンクリート面の最終ひび割れ状況をひび割れがより顕著であった試験体1(線路直角方向)について示す。実線および破線はそれぞれ正方向および負方向載荷時に発生したひび割れを表す。梁側面に縦梁との境界にそってほぼ貫通するひび割れが生じるなど、曲げひび割れが主であり、また、梁下面には柱埋込み部を中心とする放射状のひび割れも生じた。ひび割れの幅は、最大のもので0.2mmといずれも軽微なものであった。

これらのことより、本載荷試験では接合部が柱の終局耐力を伝達し、柱に十分な塑性変形が生じるまで大きな損傷を生じないことを確認した。

表-4 梁鉄筋および定着プレートのひずみ

	鋼材	最大発生ひずみ	降伏ひずみ	位置	ゲージ位置図
試験体1	最上段主筋(非交差)*	0.062%	0.184%	①	
	最上段主筋(定着)**	0.148%	0.184%	②	
	せん断補強筋	0.102%	0.190%	③	
	定着プレート	0.084%	0.244%	④	
試験体2	最上段主筋(非交差)*	0.060%	0.174%	⑤	
	最上段主筋(定着)**	0.123%	0.174%	⑥	
	せん断補強筋	0.002%	0.190%	⑦	
	定着プレート	0.063%	0.244%	⑧	

*主筋(非交差): 鋼管と交差しない主筋

**主筋(定着): プレートに機械継手を介して定着された主筋

表-5 梁コンクリートのひび割れ (試験体1)

梁下面	横梁側面	梁上面

注1 図の上下方向が線路直角方向(載荷方向、上が正)に相当する

注2 実線および破線は正方向および負方向載荷時に生じたひび割れを示す

3. 2次元 FEM 解析

本実験における接合部近傍の応力状態および定着プレートが接合部の耐荷・変形性能に及ぼす影響を評価するため、非線形解析プログラム WCOMD を用いたシミュレーション解析を行った。

3.1 解析条件

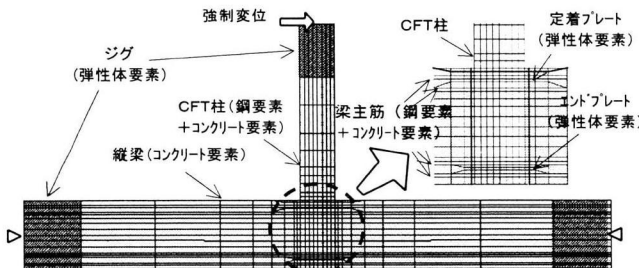
(1) 解析ケース

解析の対象は、定着プレートに逆対称の力が加わる試験体 2（線路方向）とし、定着プレートがある場合とない場合の 2 ケースとした。

(2)解析モデル

本検討に用いた解析モデルを図－9 に示す。モデルの総節点数は 1765、要素数は 702 である。柱部材は RC 要素で、梁部材の主筋位置については RC 要素（コンクリート要素＋鋼要素）で、梁部材の主筋位置以外はコンクリート要素で、定着プレートとエンドプレートは弾性体でそれぞれモデル化した。各要素の奥行き方向の厚さおよび RC 要素の鉄筋比は、試験体の厚さと鉄筋比にそれぞれ一致させた。解析モデルの柱埋込み部分には、梁をモデル化した要素を重ねることにより、梁の連続性を表現した。梁両端は弾性体にモデル化したジグを介して、回転支承に接続した。

各要素の材料特性を表－6～表－8 に示す。柱充填コンクリートの圧縮強度は、CFT 構造技術指針⁸⁾に準じ、コンファインド効果を考慮した強度を用いた。本解析で用いたコンクリート要素および鋼要素の非線形特性は文献⁹⁾に従い、表-6～表-8 に掲載されていないパラメータについては解析プログラム WCOMD の推奨値を用いた。



図－9 2次元 FEM モデル

表－6 コンクリート要素の材料特性

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ピーク ひずみ*	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
梁	37.3	2.86	0.273%	0.18	23.0
柱	80.2**	3.47	0.400%	0.18	23.0

*ピークひずみ $\epsilon'_{peak} = 447.2 \text{ (f'c)}^{0.5} \times 10^{-6}$ **コンファインド効果を考慮した圧縮強度⁸⁾

表－7 鋼要素の材料特性

	降伏強度	弾性係数	単位体積重量
柱鋼管	458.6 N/mm ²	205.8 kN/mm ²	77.0 kN/m ³
梁主筋	358.7 N/mm ²	205.8 kN/mm ²	77.0 kN/m ³

表－8 弾性体要素の材料特性

	弾性係数	ポアソン比	単位体積重量
定着プレート	205.8 kN/mm ²	0.3	77.0 kN/m ³
エンドプレート	205.8 kN/mm ²	0.3	77.0 kN/m ³
ジグ	205.8 kN/mm ²	0.3	77.0 kN/m ³

(3)荷重条件

解析は、自重解析の後、柱頂部に漸増強制変位（増分 2.0mm）を静的に載荷する条件で行った。

3.2 解析結果

(1)曲げモーメントと変形角の関係

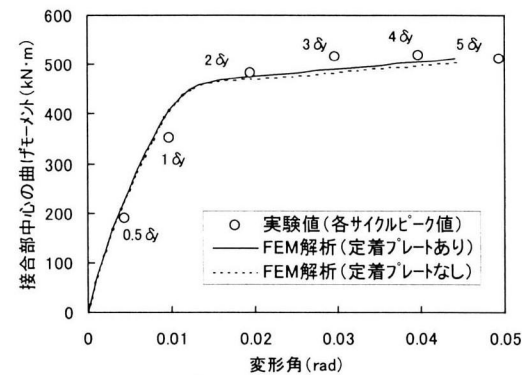
図－10 に本解析より得られた接合部中心に関する曲げモーメント・変形角関係を実験結果と比較して示す。ここでは曲げモーメントおよび変形角の中心を接合部中心とし、変形角には、柱、梁および接合部の変形を含んでいる。定着プレートのある場合の解析結果は載荷実験の 4 δ_y （柱降伏変位の 4 倍）のサイクルまでの最大値包絡を概ね表現していることがわかる。また、定着プレートがないケースと比較すると、柱降伏以降において定着プレートがあるケースはやや小さな変形角となっている。

(2)柱の曲率分布

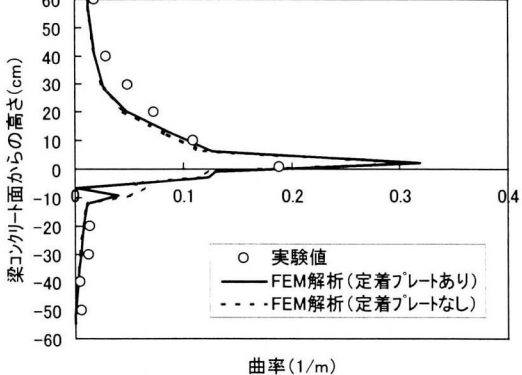
最大耐力時（4 δ_y ）における柱の曲率分布を実験結果と比較したものを図－11 に示す。解析より得られた曲率分布は載荷実験より得られた曲率分布と概ね一致していることがわかる。また、定着プレートがない場合と比較すると、定着プレートがあるケースは定着プレート位置近傍において小さい曲率に抑えられている。

(3)柱拔出し角

図－12 に柱端部曲げモーメント－柱拔出し角関係を定着プレートがあるケースと定着プレートがないケースと比較して示す。定着プレートがある場合の拔出し角は、同じ曲げモーメントで比較すると、定着プレートがない場合に比べてやや小さい値となっており、最大耐力時において 2 割程度の違いとなっている。



図－10 曲げモーメント－変形角関係



図－11 柱の曲率分布

(4) 接合部の支圧応力およびせん断応力分布

図-13 および図-14 に最大耐力時における柱埋込み部分に隣接する梁コンクリート要素の柱接触面に垂直な方向の直応力（以下、柱埋込み部の支圧応力と呼ぶ）と柱接触面に沿ったせん断応力（以下、柱埋込み部のせん断応力と呼ぶ）の分布を定着プレートがあるケースとなしケースを比較して示す。

図に示されるように、柱基部右側や埋込み部中央左側には圧縮の支圧応力が卓越して発生しており、主としてこれらにより柱と梁間の曲げモーメントやせん断力が伝達されているものと推察される。ただし、支圧応力が卓越して発生している柱基部右側面には、大きなせん断応力も発生しており、これらの応力も柱梁間の曲げモーメント伝達の一部を分担しているものと考えられる。

また、柱埋込み部の支圧応力とせん断応力の分布は全般的には定着プレートがある場合およびない場合でほぼ同様の分布となっている。ただし、詳細にみると、定着プレートがある場合はない場合に比べて、埋込み部中央左側の-20～30cm 付近および柱基部右側の-10cm 付近の支圧応力が小さくなるなどの違いが認められる。

なお、ここで得られた応力分布は、接合部が健全であることを確認した試験体をモデル化した解析により得られたものである。よって、接合部が破壊に至る場合や破壊に近い場合には、コンクリートの圧壊やせん断破壊が進行するため、応力分布が大きく異なり、定着プレートの有無による違いが顕著に現れる可能性がある。

以上より、定着プレートがある場合の解析結果と実験結果とを比較したところ、解析結果は載荷実験で得られた最大耐力点付近までの耐力および変形特性をほぼ定量的に表現していると判断できた。また、定着プレートがある場合とない場合の解析結果を比較したところ、定着プレートのある場合は定着プレートがない場合に比べて柱の拔出し角や接合部の変形角が小さくなる傾向があることが得られた。

4. 骨組モデルによる解析

耐震標準⁶⁾に基づくラーメン高架橋の設計計算では、柱と梁接合部を剛域とし、柱の拔出しの影響を考慮した骨組構造解析が推奨されている。ここでは、定着プレート方式によるCFT柱とRC梁との接合構造を用いたラーメン高架橋に対しても同様の解析が適用可能かどうか確認するため、柱の拔出しの影響を表す回転ばねを挿入した骨組構造モデルによる静的非線形解析を行った。

4.1 解析条件

本検討に用いた解析モデルを図-15に示す。解析モデルは、載荷実験で接合部のせん断変形角が柱の変形角に比べてきわめて小さいことが明らかになったため、図に示すように梁部を固定端とした片持ち梁に単純化し、柱

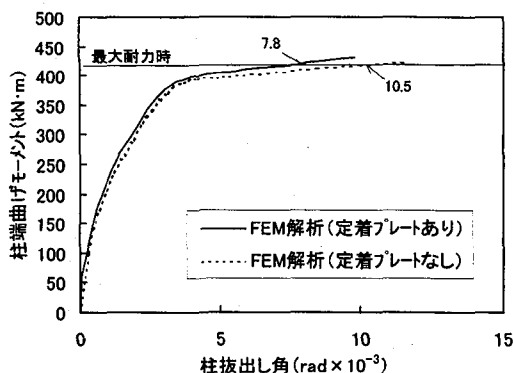


図-12 曲げモーメント-柱拔出し角関係

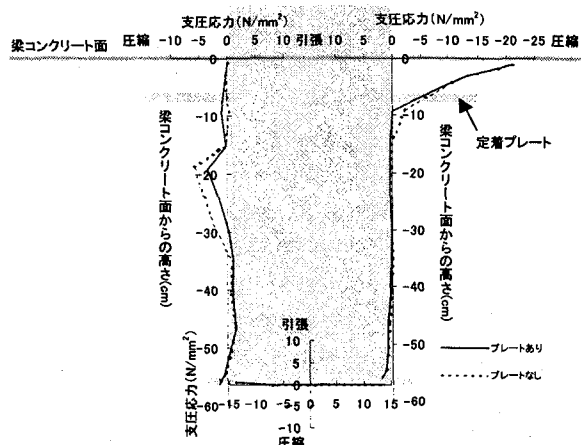


図-13 柱埋込み部の支圧応力分布 (4δy)

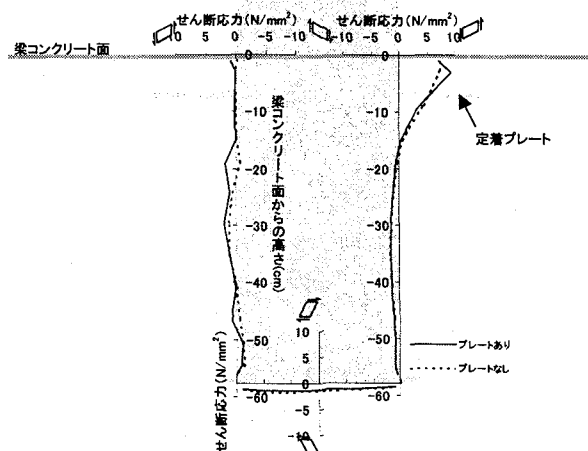


図-14 柱埋込み部のせん断応力分布 (4δy)

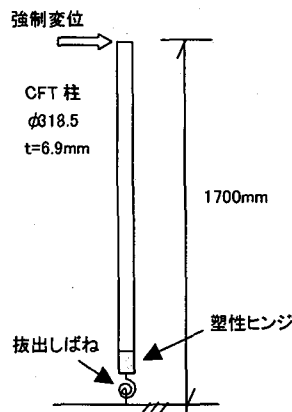


図-15 骨組解析モデル

の抜出しの影響を表す回転ばねを柱部材端と固定端の間に挿入することとした。柱部材は曲げによる降伏点と最大曲げ耐力点を折れ点とするトリリニア型にモデル化し、折れ点は耐震標準⁶⁾に従い、CFT柱断面をファイバー要素に分割し、軸方向力と曲げモーメントの釣り合い条件から算定した。また、柱の抜け出しの影響を表す回転ばねは柱の降伏点および最大点を折れ点とするトリリニア型にモデル化した。本検討では、柱抜け出し角を次節に示した方法で算定し、回転ばねの非線形特性に反映させた。

解析は表-9に示したように、CFT柱の曲げ非線形特性の算定に際して、コンファインド効果を耐震標準⁶⁾に従って充填コンクリートの限界ひずみに反映させた場合と、CFT構造技術指針⁸⁾に従って鋼管と充填コンクリートの強度に反映させた場合の2ケース行った。各部

表-9 解析ケース

	CFT柱のコンファインド効果の考慮の仕方
ケース1	充填コンクリートの限界ひずみに反映(耐震標準 ⁶⁾ に準拠)
ケース2	充填コンクリートおよび鋼管の強度に反映(CFT技術指針 ⁸⁾ に準拠)

表-10 CFT柱部材の材料強度 (単位: N/mm²)

材料	ケース1 ^{*1}	ケース2 ^{*2}
コンクリート圧縮強度	55.8	80.2
鋼材の降伏強度	459	512
鋼材の圧縮強度	459	374

*1 コンファインド効果を考慮しない *2 コンファインド効果を考慮⁸⁾

表-11 CFT柱部材と回転ばねの特性値

指標	折れ点	ケース1		ケース2	
		CFT柱1	回転ばね	CFT柱2	回転ばね
曲げモーメント (kN・m)	降伏	299	299	320	320
	最大	372	390	404	423
	終局 ^{*3}	335	351	363	381
曲率(1/m) or 回転角(rad) ^{*4}	降伏	1.46×10^{-2}	1.38×10^{-3}	1.40×10^{-2}	1.34×10^{-3}
	最大	1.52×10^{-1}	1.50×10^{-2}	1.54×10^{-1}	1.47×10^{-2}
	終局 ^{*3}	2.94×10^{-1}	1.50×10^{-2}	2.96×10^{-1}	1.47×10^{-2}

*3 最大耐力の90%を維持できる *4 回転ばねに対する指標に回転角を用いる

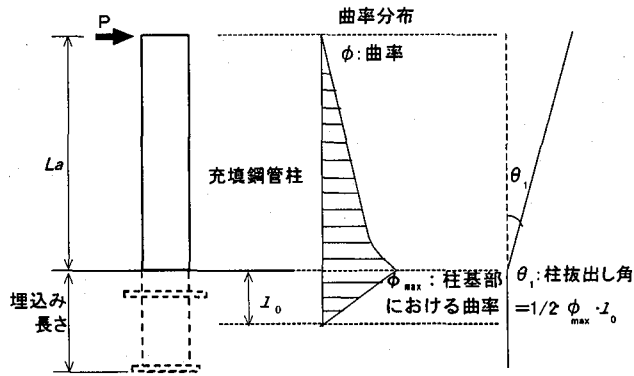


図-16 柱埋込み部分の曲率分布の仮定

材の材料強度および非線形特性を表-10 および表-11にそれぞれ示す。

荷重は、自重解析の後、柱頂部に漸増強制変位(増分0.2mm)を水平方向に静的载荷した。

4.2 柱抜け出し角の算定方法

耐震標準⁶⁾において埋込み方式による接合部の柱抜け出し角は、柱埋込み部の曲率分布を柱埋込み先端部で0となる逆三角形分布と仮定して算定する方法が提案されている。しかし、この仮定は今回の耐荷性能確認実験で得られた埋込み部分の曲率分布と異なっており、また、2次元FEM解析により定着プレートが柱の抜け出しを減少させることも判明した。そこで、本実験と2次元FEMによるシミュレーション解析結果に基づいて柱抜け出し角の算定式を検討し、以下の式を得た。

theta_1 = 1/2 phi_max * l_0

ここに、theta_1は柱抜け出し角、phi_maxは柱基部における曲率、l_0は柱外径の0.6倍(=0.6D)をそれぞれ表す。

なお、今回の実験は柱埋め込み深さを57cm(=1.79D、D:鋼管外径)とした試験体のみの条件であるが、上式は埋込み深さ1.5D以上の場合に適用できるものと考え

る。図-16に提案方法による柱埋込み部分の曲率分布の仮定を、図-17に実験結果、埋込み方式の近似法⁶⁾および提案近似法による最大耐力時の曲率分布を比較して示す。また、表-12に柱抜け出し角の算定値と実験値を比較して示す。提案方法は柱降伏時における抜け出し角を小さく評価するものの、最大耐力時の抜け出し角を精度よく近似していることがわかる。

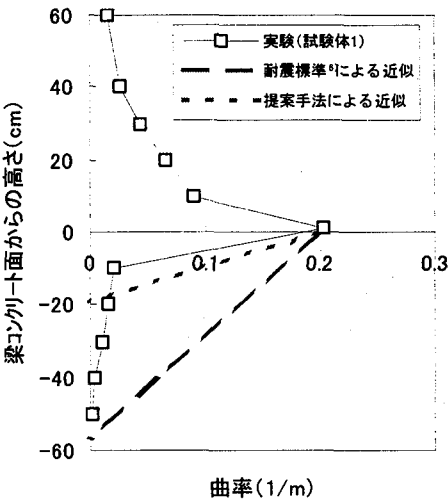


図-17 曲率分布近似方法の比較

表-12 柱抜け出し角の算定値と実験結果の比較

	提案方法(ケース2)	実験結果(試験体1)
柱降伏時	1.37×10^{-3} rad	2.68×10^{-3} rad
最大耐力時	15.0×10^{-3} rad	14.9×10^{-3} rad

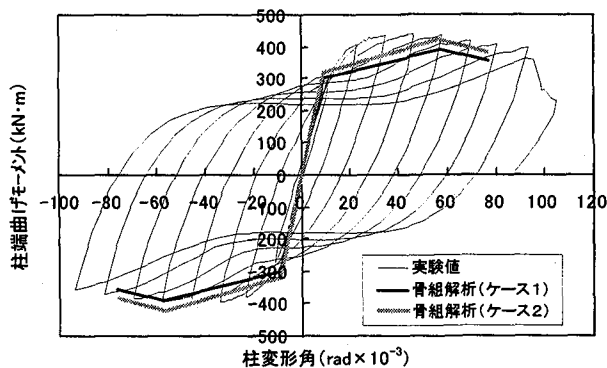


図-18 曲げモーメント-変形角関係

4.3 解析結果

本解析より得られた柱端部における曲げモーメントと拔出しを含んだ柱変形角との関係を図-18に実験結果と比較して示す。提案式により算定した拔出し角に基づく回転ばねを用いた解析結果は、ケース1の場合に最大耐力時の曲げモーメントがやや小さめの評価となるものの、降伏時および最大耐力時の曲げモーメントおよび変形角の値はほぼ実験値と等しく、載荷実験の最大値包絡を概ね再現していることがわかる。

よって、本接合構造を用いた部材の設計において、接合部を剛体とし、柱の拔出しの影響を考慮した回転ばねを挿入した骨組みモデルによる計算手法が適用できることが判明した。

5. まとめ

定着プレートを用いたCFT柱とRC梁との接合構造が設計で求められる耐荷性能を満たすことを確認するために静的交番載荷試験を実施した。また、2次元FEMによる実験シミュレーション解析を行い、接合部周辺の応力状態を明らかにするとともに、定着プレートが接合部の応力状態や変形性能に及ぼす影響を検討した。さらに、設計で用いられている解析方法が本接合構造を用いた高架橋にも適用できることを確認するため、接合部を剛域とし、柱の拔出しの影響を表す回転ばねを挿入した骨組み構造モデルを用いた静的非線形解析を行った。以下に得られた結論を列挙する。

- 1) 載荷試験では柱端部に局部座屈が生じ、塑性ヒンジを形成したが、設定した断面諸元においては梁鉄筋や定着プレートが降伏に至ることなく、また、接合部のせん断変形も非常に小さかった。これより、本構造による接合部は柱の終局耐力を伝達し、柱に十分な塑性変形が生じるまで大きな損傷を生じないことを確認した。
- 2) 2次元FEMを用いたシミュレーション解析により、最大荷重付近までの実験結果をよく再現することができ、これにより接合部が健全である場合の接合部近傍の応力状態を予測することができた。
- 3) 接合部が健全である場合において、定着プレートは接合部の応力状態や変形性能に与える影響は比較的小さ

いものの、柱-梁間の曲げモーメント伝達の一部を受け持ち、柱の拔出し角や接合部の変形角を小さくする働きがあることが得られた。

- 4) 埋め込み深さ 1.5D 以上の場合に適用できる柱拔出し角の算定式を提案した。
- 5) 提案式により算定した柱拔出し角に基づく回転ばねを挿入した骨組み構造モデルによる解析結果が、載荷試験の曲げモーメントと変形角の関係を概ね再現した。これにより、拔出しの影響を適切に表現した骨組モデルによる計算手法が本接合構造を用いた構造物の設計において適用可能であることを確認した。

なお、本報告中の実験結果は文献 10) に、FEM 解析結果の概要は文献 11) においてそれぞれ報告を行っている。

謝辞

本検討を行うにあたり埼玉大学町田篤彦教授、長岡技術科学大学丸山久一教授、名古屋大学館石和雄助教授よりご指導を頂きました。ここに深甚に謝意を表します。

参考文献

- 1) 山田富夫、先森昭博、涌井 一、高田啓一：CFT 柱と軌道支持梁による鉄道ラーメン高架橋構造とその柱梁接合部の交番載荷試験、第 55 回土木学会年次学術講演概要集、CS-60、2000.9。
- 2) 村田清満、安原真人、木下雅敬、葛 拓造：混合構造物接合部の耐力の評価、鉄道総研報告、Vol.11、No.12、pp29～34、1997.12。
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説、鋼とコンクリートの複合構造物、pp.497-509、1998.7。
- 4) 村田清満、安原真人、渡邊忠明、木下雅敬：コンクリート充填円形鋼管柱の耐力と変形性能の評価、構造工学論文集、Vol.44A、pp.1555～1564、1998.3。
- 5) 山田正人、村田清満、池田 学、瀧口将志、渡邊忠明、木下雅敬：CFT 部材の変形性能と復元力特性、鉄道総研報告、Vol.13、No.4、pp.35～40、1999.4。
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説、耐震設計、pp.167-175、1999.10。
- 7) 鉄道総合技術研究所：CFT 柱と軌道支持梁による鉄道ラーメン高架橋の設計・施工指針、2000、6。
- 8) 新都市ハウジング協会：CFT 構造技術指針、p.38、1999。
- 9) 岡村 甫、前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版、1991.5。
- 10) 佐野祐一、河西 寛、松本信之：定着プレート方式の CFT 柱と RC 梁との接合部の耐荷性能、コンクリート工学会年次学術論文報告集、Vol.22、No.3、pp1153-1158、2000.6。
- 11) 佐野祐一、河西 寛、松本信之、阿部幸夫：定着プレート方式による CFT 柱・RC 梁接合構造とその変形性能に関する一考察、第 55 回土木学会年次学術講演概要集、CS-55、2000.9。

(2000 年 9 月 14 日受付)