

論文 定着プレート方式のCFT柱とRC梁との接合部の耐荷性能

佐野 祐一^{*1}・河西 寛^{*2}・藤井 睦^{*3}・松本 信之^{*4}

要旨:定着プレート方式によるCFT柱とRC梁との接合部が所要の耐荷性能を有することを確認するために静的交番載荷試験を実施した。柱部で塑性ヒンジが生じた後に柱鋼管が破断した。接合部および梁部は降伏に至らず、柱部の変形角に比べて接合部のせん断変形角が小さく、所要の耐震性能を有していることを確認した。また、骨組み構造モデルによる検証解析結果より、本方式の接合部は剛結合として取り扱うことができることを確認した。

キーワード:CFT柱とRC梁との接合, 定着プレート, 埋込み方式, 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」は、耐震性の確保とともに工費の縮減・工期の短縮を可能にする合理的な高架橋形式と考える。本形式の鉄道ラーメン高架橋に適用する目的で、図-1に示すような定着プレート方式によるCFT柱とRC梁との接合構造を考案した。これは、CFT柱を梁に埋込み、CFT柱と梁主筋が重なる部分において、CFT柱に溶接し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、CFT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交わすことなく、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、材料運搬および現場での組立作業を容易にすることができる。

鉄道構造物におけるCFT柱を梁に埋込む接合方式の設計は、実験結果に基づいた設計式が示されているCFT柱をフーチングに埋込む接合方式に準じて行われている。¹⁾しかしながら、

定着プレート方式によるCFT柱とRC梁との接合部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、その耐荷性能は設計標準¹⁾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。このため本接合方式が、設計で求められる接合部の耐荷性能(部材の終局耐力を伝達し、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¹⁾)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。

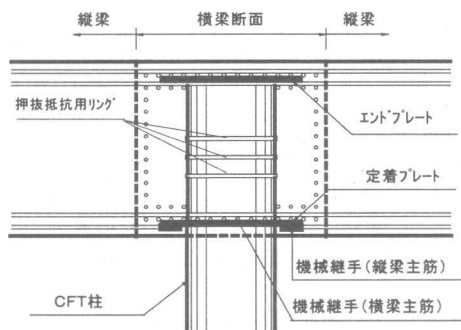


図-1 定着プレート方式によるCFT柱とRC梁との接合部

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験における試験体は図-2に破線以示

*1 (株) 鴻池組 土木本部技術部 工修 (正会員)

*2 (株) 鴻池組 土木本部技術部 課長

*3 (株) 鴻池組 技術研究所 主任研究員

*4 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 主任技師 M.S. (正会員)

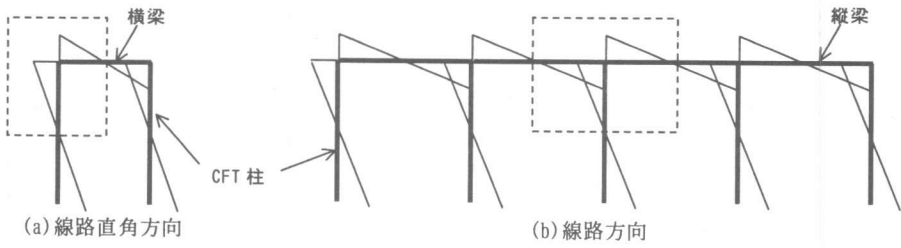


図-2 ラーメン高架橋に発生する地震時曲げモーメント分布の概念図

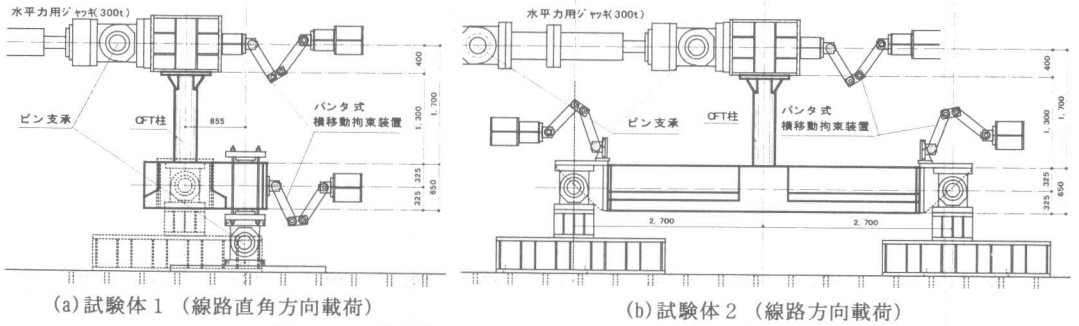
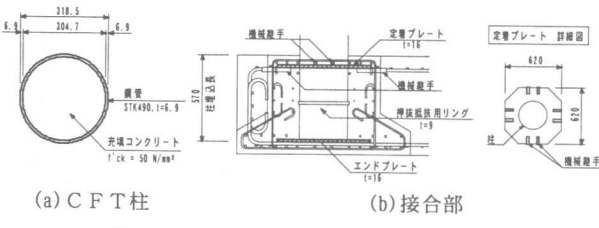


図-3 試験体形状および荷装置 (単位: mm)



(a) CFT柱 (b) 接合部 (c) 縦梁 (d) 横梁

図-4 部材断面諸元 (単位: mm)

したラーメン高架橋における柱と梁との接合部をモデルとしたものであり、地震時曲げモーメントの正負変化点から接合部側を対象とした。試験体は実物の約45%の縮尺とし、実験ケースは線路直角方向(試験体1)および線路方向荷(試験体2)の2種類とした。

試験体形状および荷装置を図-3に示す。試験体1(線路直角方向)が柱と横梁によるL形、そして試験体2(線路方向)が柱と両側の縦梁によるT形の形状であるが、試験体は実構

表-1 使用材料の強度特性 (単位: N/mm²)

コンクリート	圧縮強度	鋼材	規格	降伏点	強度
試験体1 柱	59.8	柱鋼管	STK490	459	593
試験体1 梁	39.6	鉄筋D19	SD345	379	550
試験体2 柱	55.8	鉄筋D16	SD345	359	550
試験体2 梁	37.3	鉄筋D10	SD345	393	568
		定着プレート	SM490	504	574
		エンドプレート	SM490	504	574

表-2 計測項目

計測項目	計測内容	計測項目	計測内容
荷重	載荷荷重	ロードセル	鋼管表面の軸方向および周方向ひずみ
	柱端部変形角	水平変位鉛直変位	梁鉄筋
変形	梁端部回転角	''	
	柱拔出し	''	定着プレート
	梁変形	''	半径方向ひずみ
	柱縮み	''	損傷
		柱鋼管	柱鋼管の変形性状をスケッチ
		梁コンクリート	主なひび割れ幅を適宜測定 コンクリート表面の状況をスケッチ

造物とは上下逆の状態を設置した。なお、試験体1は縦梁を525mmだけ含む。

部材の形状寸法を図-4に、そして使用材料の強度特性を表-1にそれぞれ示す。各部材の断面は、実橋の試設計で定めた各部材の曲げ耐力の比率に一致するように設定した。

2.2 載荷方法および計測

載荷形式は図-3に示すように、試験体1(線路直角方向荷)においては、横梁端部に水平可動の回転支承を、縦梁端部に回転支承をそれ

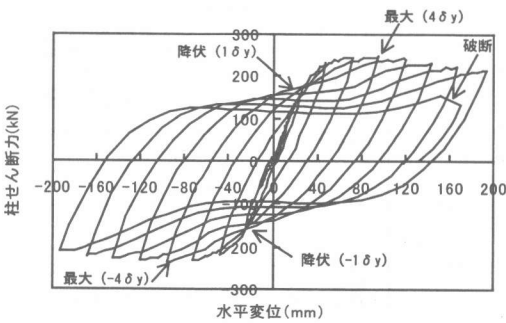
ぞれ設けて、柱上端を油圧ジャッキにて水平方向に加力した。試験体2（線路方向载荷）においては、梁両端部に回転支承を設け、柱上端を油圧ジャッキにて水平方向に加力した。

载荷パターンは柱頭部における降伏変位 δy を基準とし、降伏変位の整数倍を各サイクルの最大変位とした変位制御による正負交番载荷を部材に破断が生じるまで行った。なお、降伏変位 δy は、水平力作用方向に対して 45° の位置におけるCFT柱鋼管の引張りずみが降伏ひずみに達した時点の変位と定義した。²⁾ 本実験における計測項目は表-2に示す通りである。

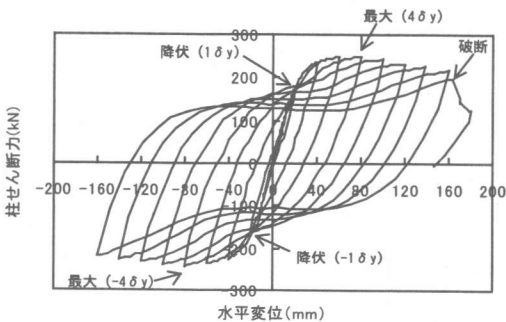
3. 実験結果

3.1 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-5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、水平荷重は降伏変位の4倍（ $\pm 4 \delta y = \pm 96\text{mm}$ ）の载荷サイクルにおいて最大値土約250kNを示した（この



(a) 試験体1（線路直角方向载荷）



(b) 試験体2（線路方向载荷）

図-5 荷重・変位履歴曲線

時点を最大耐力時とする)。以降の载荷サイクルにおいてCFT柱の局部座屈により最大荷重が徐々に減少し、 $+9 \delta y$ の载荷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、同様の载荷履歴となった。

また、 $4 \delta y$ 载荷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、1サイクルあたりのループ面積が増大していることを鑑みても、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。

3.2 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-6に各成分の概念図を示す。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。

表-3 接合部の変形角とその成分(単位: 10^{-3} rad)

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

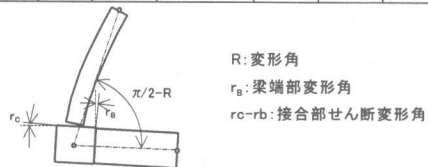


図-6 変形角の概念図(試験体1)

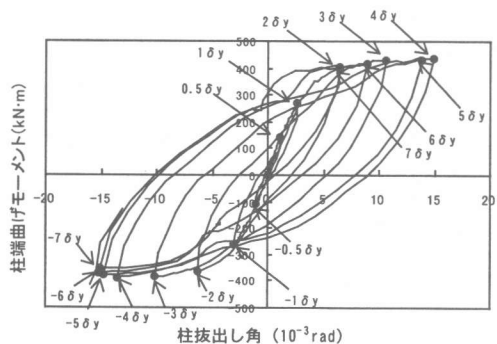


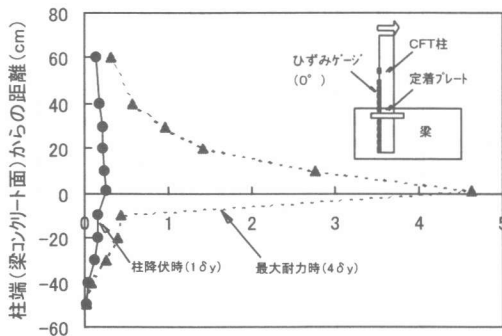
図-7 曲げモーメント・拔出し角関係(試験体1)

3.3 柱の拔出し

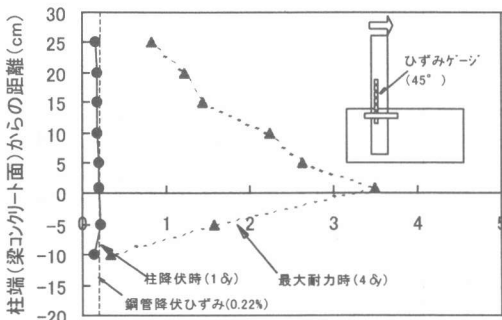
柱端（梁コンクリート面）における曲げモーメントと柱の拔出し角（埋込み部鋼管の伸縮による柱端部の回転角）の関係を図-7に示す。曲げモーメントと柱の拔出し角の関係は柱降伏時（ $\pm 1 \delta y$ ）を境に弾性的な挙動から塑性的な挙動に転じ、最大柱端曲げモーメントが発生する $4 \delta y \sim 5 \delta y$ の荷荷時に拔出し角が最大値に達した。

3.4 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-8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（線路直角方向荷荷）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、柱端（梁コンクリート面）を最大値（約0.25%）とし、ほぼ直線的な分布を呈している。



軸ひずみ(%)
(a) 引張側0度位置



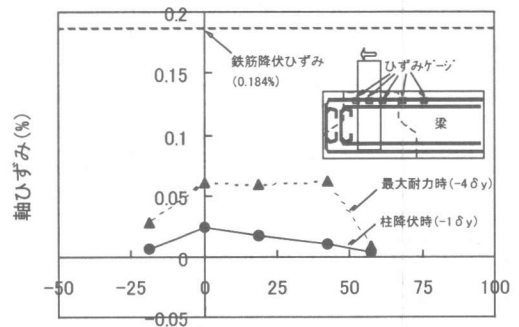
軸ひずみ(%)

図-8 柱鋼管引張側軸ひずみ（試験体1）

一方、最大耐力時には、柱端から約10cm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柱端から約-10cmの位置の間で急激に減少し、-10cm以下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、定着プレートが柱端から-7cmの位置に設置されており、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。

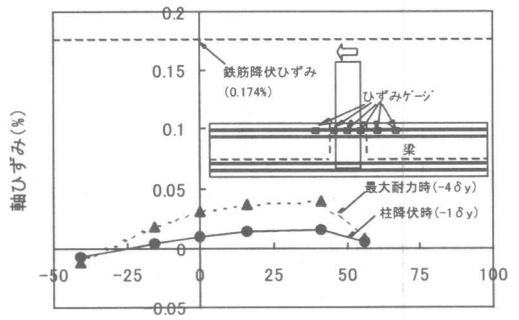
3.5 梁鉄筋および定着プレートのひずみ

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-9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、



計測位置(鋼管中心からの水平位置)(cm)

(a) 試験体1（線路直角方向荷荷）



計測位置(鋼管中心からの水平位置)(cm)

(b) 試験体2（線路方向荷荷）

図-9 主鉄筋の軸ひずみ

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。両载荷ケースにおいて、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。

3.6 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。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。ただし、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。

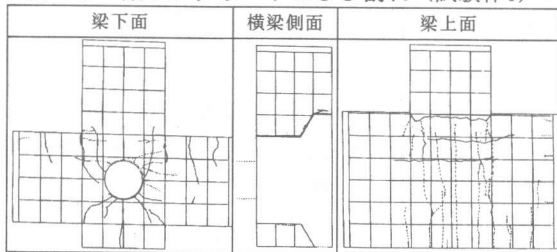
表-4 梁鉄筋および定着プレートのひずみ

	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)



注) 図の上下方向が線路直角方向(载荷方向)に相当する

4. 骨組みモデルによる解析

4.1 解析条件

载荷試験における試験体の諸元および境界条件をモデル化して漸増荷重を作用させた静的非線形解析を行った。ここでは設計標準²⁾に従って、接合部を剛域とし、柱の拔出しを考慮した回転ばねを挿入した骨組みモデルを用いた。本検討に用いた解析モデルを図-10に、各部材の材料特性を表-6にそれぞれ示す。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モデルで、梁は曲げによるひびわれ点と降伏点を折れ点とするトリリニアモデルで表わした。なお、CFT柱の折れ点は設計標準²⁾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、柱の抜け出しを考慮した回転ばねは、図-7に示した計測結果に基づき降伏点を折れ点とするバイリニア型にモデル化した。表-7に部材の非線形特性を示す。

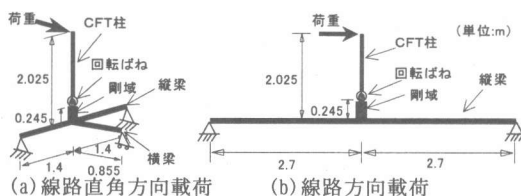


図-10 解析モデル図

表-6 部材の材料特性

	CFT柱	縦梁	横梁
コンクリート圧縮強度(N/mm ²)	59.8	39.6	39.6
鋼材の降伏強度(N/mm ²)	459	359	379
初期軸剛性 EA (kN)	3.91×10^6	1.88×10^7	1.50×10^7
初期曲げ剛性 EI (kN·m ²)	2.07×10^4	7.17×10^5	5.47×10^5

表-7 部材の曲げ非線形特性

	CFT柱	縦梁*1	縦梁*2	横梁	回転ばね	
曲げモーメント(kN·m)	ひびわれ	—	315	389	267	—
	降伏	299	445	698	518	299
	最大	372	542	800	629	390
	終局*3	335	—	—	—	—
曲率(1/m) or 回転角(rad)*4	ひびわれ	—	4.40×10^{-4}	5.43×10^{-4}	4.88×10^{-4}	—
	降伏	1.44×10^{-2}	3.49×10^{-3}	3.89×10^{-3}	4.13×10^{-3}	2.65×10^{-3}
最大	最大	1.57×10^{-1}	7.87×10^{-2}	5.65×10^{-2}	4.69×10^{-2}	1.49×10^{-2}
	終局*3	2.99×10^{-1}	—	—	—	—

*1 梁上面が引張になる場合

*2 梁下面が引張になる場合

*3 最大曲げモーメントの90%を維持できる

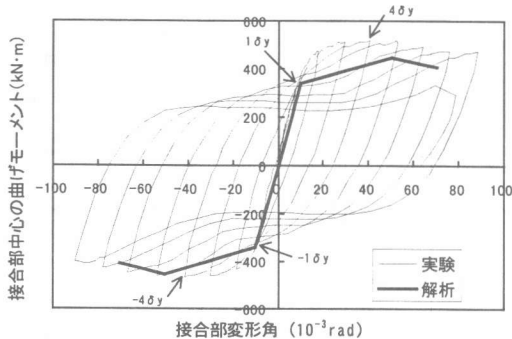
*4 回転ばねの非線形特性のみ回転角による

4.2 解析結果

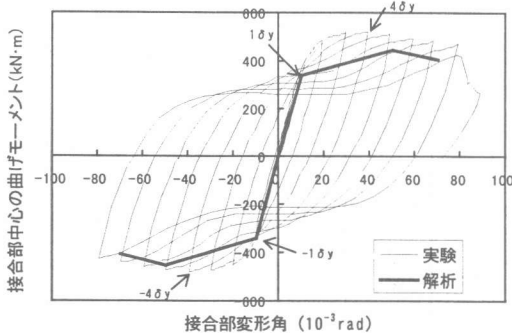
本解析より得られた曲げモーメントと接合部変形角との関係を実験結果と比較したものを図-11に示す。両ケースとも解析結果は最大耐力点における曲げモーメントをやや小さく、変形角をやや大きく評価するものの、载荷試験の最大値包絡を概ね表現している。これより、設計標準²⁾に従う静的非線形解析により、曲げモーメントと変形角との関係をほぼ表現することが可能であり、本接合部の挙動が、設計標準²⁾による設計の仮定を満足していると判断できる。なお、本解析においては、柱部充填コンクリートの鋼管拘束による圧縮強度増加を考慮していないために、最大耐力時の曲げモーメントがやや小さく評価されているものと考えられる。

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



(a) 試験体1 (線路直角方向载荷)



(b) 試験体2 (線路方向载荷)

図-11 接合部中心の曲げモーメントと変形角の関係

ことを確認するために静的交番载荷試験を実施した。試験体は実橋の試設計により得られた部材寸法および断面諸元の約45%の縮尺とし、実験ケースは線路方向および線路直角方向载荷の2種類とした。得られた結果を以下に列挙する。

- ・柱端部で局部座屈が生じ、塑性ヒンジとなったのに対し、接合部および梁部は細かいひび割れが生じるものの降伏に至ることはなかった。
- ・全体の変形角に比して接合部のせん断変形角は無視できるほど小さい。
- ・接合部を剛域とし、柱の抜出しを考慮した回転ばねを挿入した骨組みモデルによる解析結果が、载荷試験の曲げモーメントと変形角との関係を概ね表現した。

これらのことより、本载荷試験では接合部が剛結合を保っており、設計標準²⁾による設計の仮定を満足することを確認した。

なお、定着プレートと機械継手の接合部分を対象に疲労試験および高応力繰り返し試験を別途実施し、設計で求められる継手性能を有していることを確認している。今後、本接合構造を用いたラーメン高架橋の設計に向けて、定着プレートが柱埋込み部分のひずみ分布に及ぼす影響の分析や、柱の抜出し量の定量的評価などが課題と考えている。

謝辞

本実験は、(財)鉄道総合技術研究所、(株)鴻池組、住友金属工業(株)で共同開発中の「CFT柱と軌道支持梁による鉄道ラーメン高架橋」を対象に、同設計施工指針委員会(委員長:埼玉大学町田教授)の指導のもと行われたものである。ここに、実験の計画や結果のまとめにあたって、適切にご指導、貴重なご意見を賜りました委員の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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