

# CFT柱 - RCはり接合部の耐震性能試験とFEM解析

岡野 素之 大内 一

## Seismic Loading Test and FEM Analysis of CFT Column - RC Beam Joint

Motoyuki Okano Hajime Ohuchi

### Abstract

Focusing on a column - beam joint of underground railway station, seismic loading test and non-linear FEM analysis were carried out using one-third-scale cross-shaped specimen. The column is was a concrete filled steel tube, and the joint with an RC beam was composed of two diaphragm plates welded to the tube at the junction of beam re-bars and vertical reinforcing plate between them. Most of the beam re-bars were welded to the diaphragm plate, but some of the outer re-bars passed though the joint. In the loading test, the ultimate strength was lower than the calculated value because bond failure occurred in the outer re-bars, so the whole section wasn't work effective. Therefore three dimensional non-linear FEM analysis was executed. As a result, the load-displacement relationship and bond behavior were precisely simulated by considering the decreased re-bar bond according to a existent proposal.

### 概要

鉄道地下駅の柱はり接合部に着目し、1/3縮尺の十字型試験体で正負交番載荷試験を実施し、非線形三次元FEM解析により実験結果を検証した。柱はCFTで、RCはりとの接合部はCFTに溶接された2枚のダイアフラムを鉛直方向の鋼板で補強した構造である。はり主筋は、基本的にダイアフラムに溶接されているが、はり外側の鉄筋は溶接されずに接合部を貫通している。実験では接合部でこの貫通したはり主筋に付着割裂破壊が発生し、はりの全断面が有効とならずに荷重が低い結果であった。そこで、鉄筋の付着性状を既往のモデルにしたがって考慮し、三次元FEM解析を実施した結果、荷重変位関係と主筋の付着劣化挙動を精度よく評価できた。

### 1. まえがき

鋼・コンクリート複合構造は合成効果により両者の短所を互いに補い、高強度・高じん性など良好な構造性能を発揮することが知られている。一方、地下構造物の施工では掘削土量の軽減、竣工後の地下空間確保のため、特に柱部材で高強度部材が必要とされ、また工期縮減のため、施工時における支保工への適用が期待される。

このような背景の下、某鉄道地下駅工事では営業線直下の施工のため、中柱部材に地上からの施工が可能であるCFTが計画された。はり部材には経済性の面からRCを用いるため、これらの接合部は混合構造となる。本接合部は、CFT柱に2枚の水平ダイアフラムを介してはりの主筋を溶接した構造である。CFT柱とはりの接合部に関しては、建築分野でははりにS部材やSRC部材が多く用いられているが、土木分野でははりにRCを用いる場合が多い。この種の混合構造の接合部における地震時の応力伝達機構は複雑で、実験・解析的研究は少なく現状では十分に解明されていない。加えて、本工事ではその耐震設計の妥当性を実証する必要がある。そこで、計画されている接合部の1/3縮尺模型を用い、正負

交番載荷試験を実施し、その破壊挙動とともに耐震性能を検討した。また、実験で観察された主筋の付着割裂破壊や接合部の応力伝達機構に着目し、鉄筋の付着劣化モデルを考慮した三次元非線形FEM解析を実施した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体

試験体の形状・寸法をFig. 1に示す。試験体は1/3縮小模型の十字型とし、はりと柱のせん断スパン比は実物に一致させた。はりの曲げ耐力がCFT柱のその1/3程度であり、CFT柱は降伏せずにはりが破壊して終局に至ることが想定されたため、柱軸力は構造性能に影響を与えないと判断し省略した。構造の詳細は実物を参考に決めた。接合部鉄部の詳細をFig. 2に、使用材料をTable 1にそれぞれ示す。

接合部は上下のダイアフラム間を鉛直方向の鋼板で補強した構造である。はりの主筋は、断面の片面当たり中央の10本がダイアフラムに溶接されるが、外縁部左右各2本は接合部を貫通している。せん断補強筋はRCはり部分だけに配置され、ダイアフラムの周囲にはない。コ

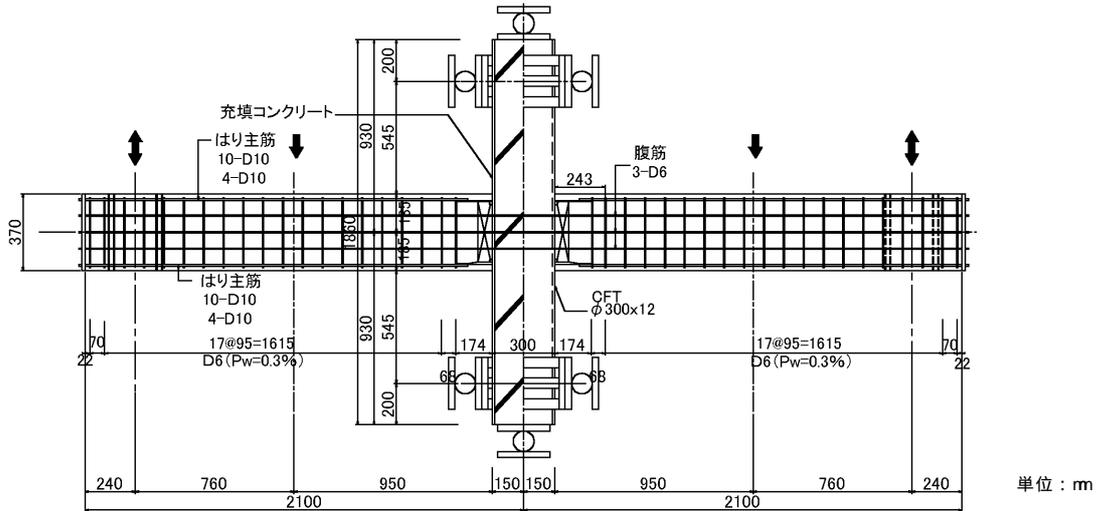


Fig. 1 試験体の形状・寸法  
Test Specimen

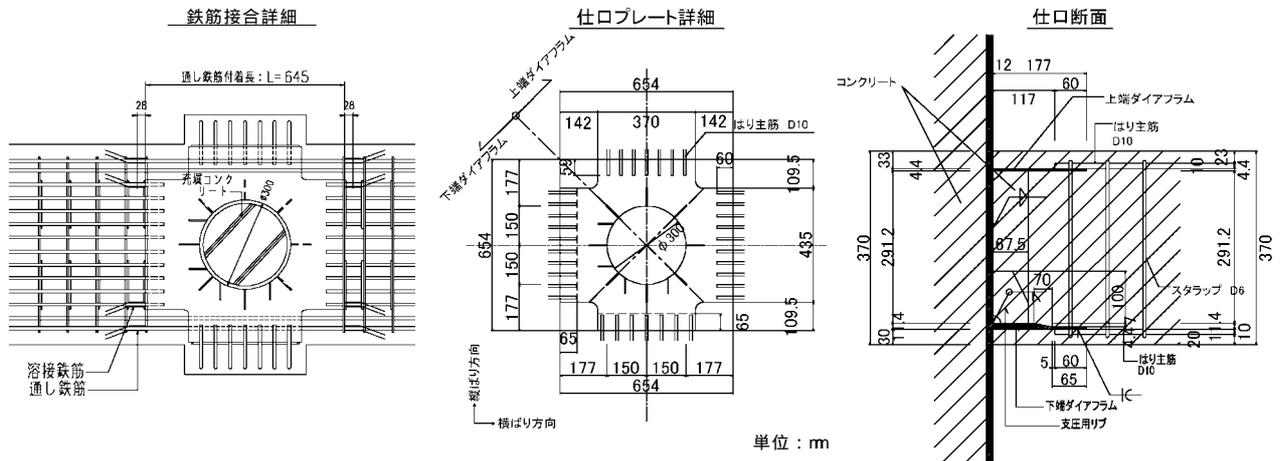


Fig. 2 接合部の詳細  
Details of Joint

Table 1 使用材料  
Materials

コンクリート								
コンクリートの種類	呼び強度	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (E+04 N/mm <sup>2</sup> )	使用	
普通コンクリート	21	12	64.8	13	2.74	2.55	はり及	
鋼材								
材料	サイズ	仕様	断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び率 (%)	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> ×10 <sup>5</sup> )	使用
鉄筋	D6	SD345相当	31.7	341	460	29.2	2.06	はりせん
	D10	SD346相当	71.3	361	503	25.8	1.93	はり
鋼材	t=12	SM490相当	463.9	346	547	26.0	2.08	鋼管およ

ンクリートには呼び強度21，スランプ12cm，粗骨材最大寸法13mmのレディーミクストコンクリート（普通）を用いた。ダイアフラムと補強板は削り出し加工で製作し，コンクリートとの付着を考慮し表面に発錆剤を塗布した。

## 2.2 載荷方法

載荷サイクルをFig. 3に示す。設計荷重載荷は常時荷重を意味し左右均等で載荷した。せん断スパン比は設計荷重時の曲げモーメントとせん断力の比で決めた。正負交番載荷は地震時を意図し，降伏変位の整数倍で各3回繰り返した。降伏変位は左右・正負ともほぼ同だった。

2.2 実験結果

2.2.1 破壊形態と荷重変位関係 ひび割れ発生状況をFig. 4に、荷重とはり変位の関係をFig. 5(設計荷重載荷), Fig. 6(正負交番載荷)にそれぞれ示す。変位はそれぞれ載荷点で測定した。荷重 - 変位関係図には、はりをファイバーモデルで評価した解析結果を併記した。ここではダイアフラムの区間を剛域と仮定した。図中DF範囲断面解析値とは、通し鉄筋部分の断面を除外してはり断面を考えた場合である。

設計荷重載荷では、柱はり接合部周辺の柱からの放射状のひび割れと共に、はりの曲げひび割れが確認された。主鉄筋の最大ひずみは1200 $\mu$ 程度であった。

正負交番載荷におけるはりの降伏変位はダイアフラムに溶接された主鉄筋(以下溶接鉄筋と称す)が降伏に至る変位( $y=11.6\text{mm} = 1/143$ )とした。降伏荷重は載荷位置正側で84.8kN, 負側で80.9kNであり、溶接主鉄筋は降伏に達したが、はり断面のコーナーでダイアフラム天端を貫通する主鉄筋(以下通し鉄筋と称す)は降伏しなかった。その後、正側載荷では左側はりが3  $y$ (92.1kN)で、右側はりは2  $y$ (91.7kN)で最大荷重に達した。負側載荷では、左側はりが2  $y$ (90.2kN), 右側はりも2  $y$ (88.7kN)で最大値を示した。この後3  $y$ にかけて通し鉄

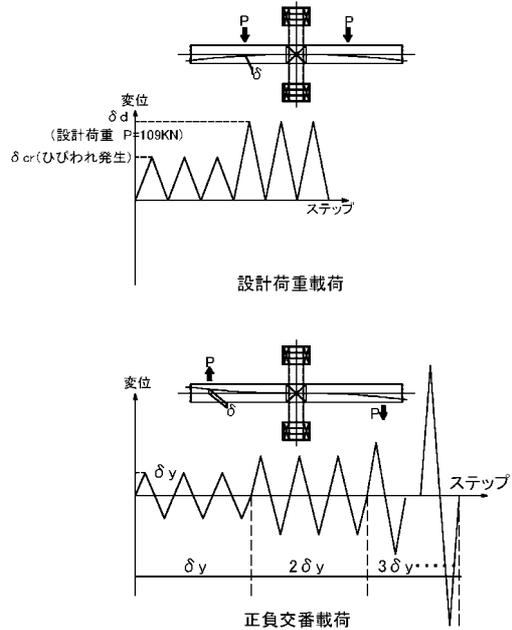


Fig. 3 載荷サイクル Loading Cycle

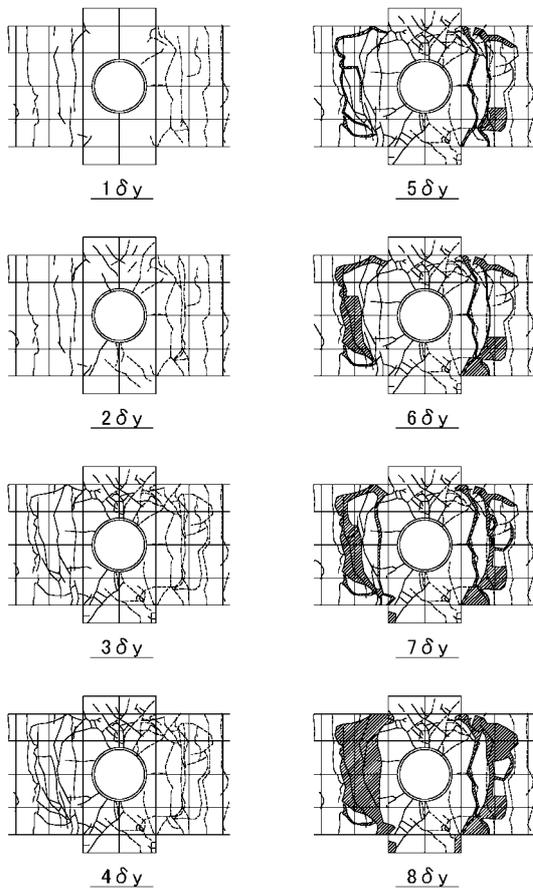


Fig. 4 ひび割れ発生状況 Crack Pattern

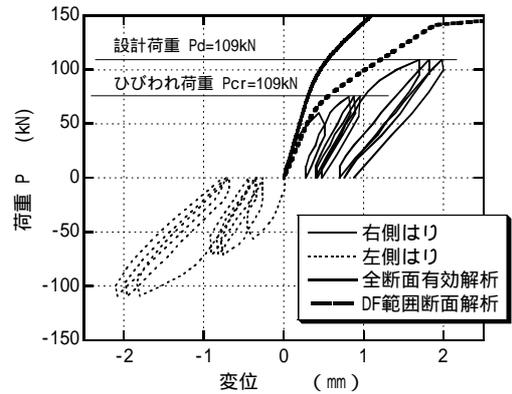


Fig. 5 荷重 - 変位関係 (設計荷重載荷) Load-Displacement Relationship(Design Load)

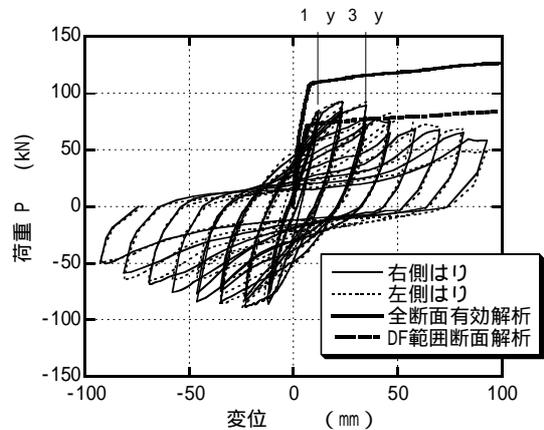


Fig. 6 荷重 - 変位関係 (正負交番載荷) Load-Displacement Relationship(Seismic Load)

筋付近で付着ひび割れが観察されるのが図より確認できる。さらに4 yでダイアフラムのかぶり剥離・落下し主鉄筋の座屈が観察された。これ以降、はりの耐力は低下し、やがて主鉄筋の破断音が確認され実験を終了した。通し鉄筋は最終まで降伏しなかった。C F T 鋼管の軸方向ひずみは最大500 μ程度であった。

荷重 - 変位関係は3 yまで安定した紡錘型であるが、その後、逆S型に近づく傾向である。

全断面有効のファイバーモデル解析値と比較すると、初期剛性、耐力とも明らかに実験値が低い。また断面を低減して評価した場合でも整合しない。これは、降伏しない通し鉄筋が適切に評価されていないことなどに起因すると考えられる。

2.2.2 通し鉄筋の付着挙動 通し鉄筋には、曲げ圧縮側のはりから圧縮力が、また曲げ引張側のはりからは引張力が同時に作用し、圧縮側から引張側へ引き抜き力が発生する。そこで通し鉄筋の圧縮側・引張側各はりのダイアフラム端部位置のひずみ測定値の差から引き抜き力を算定し、鉄筋の付着面積で除して付着応力度( )として、通し鉄筋の - ( はりの変位 ) 関係の一例を示した ( Fig. 7 )。2 y ~ 3 y を境に付着応力度が大幅に低下しているのがわかる。これは前述した付着ひび割れの発生を裏付けている。

### 3. 非線形三次元 F E M 解析

前項での検討から実験結果を解析で再現するためには、はり幅方向における主筋の降伏性状の違いと通し鉄筋の付着劣化を考慮する必要があると考え、非線形三次元 F E M 解析<sup>1)</sup> ( 使用プログラム：大林組開発、F I N A L ) により検討した。

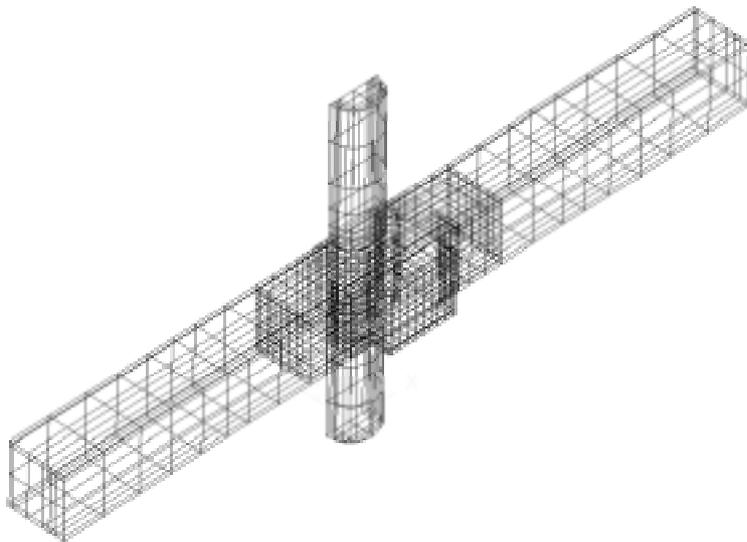


Fig. 8 構造モデル  
Structure Model

### 3.1 解析モデル

構造モデルと要素モデルをFig. 8,9にそれぞれ示す。解析モデルは試験体を縦半分にしたモデルで、それぞれ、コンクリートは8節点立体要素、鋼板は4節点平面要素、鉄筋は2節点線材要素とした。

鋼材はFig. 10に示すようにトリリニアでモデル化した。コンクリートの材料モデル<sup>2),3)</sup>をTable 2に示す。入力に用いた鉄筋の付着特性は、実験結果を参考に、

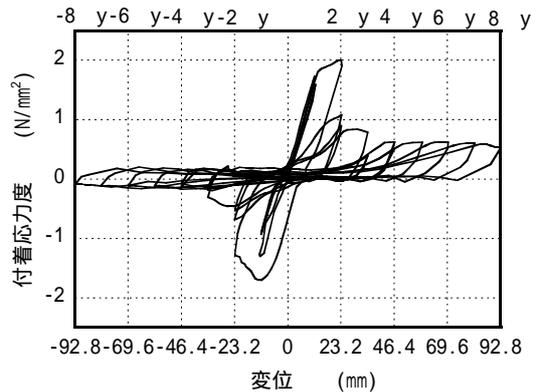


Fig. 7 通し鉄筋の付着性状  
Bond Behavior of Re-bar

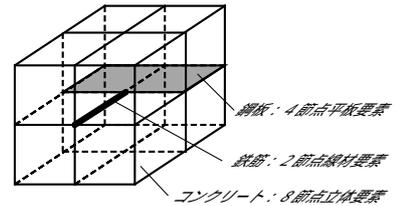


Fig. 9 使用要素  
Elements

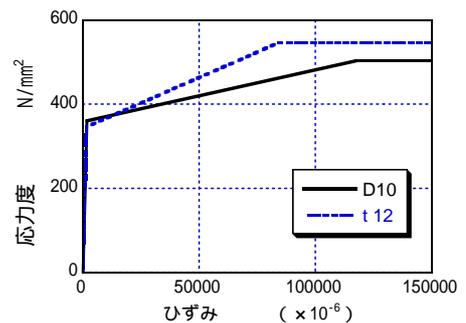


Fig. 10 鋼材の材料モデル  
Property of Steel

Table 2 コンクリートの材料モデル  
Material Models of Concrete

項目	モデル
圧縮	修正Ahmad モデル <sup>2)</sup>
引張 一般部	出雲モデル(C=0.6) <sup>3)</sup>
通し鉄筋かぶり部	引張強度後はゼロ
ひび割れ後のせん断伝達	ゼロ

Fig. 11に示す市之瀬のモデル<sup>4)</sup>とした。これは、変位2mm、 $\sigma=2\text{N/mm}^2$ でゼロに低下するモデルである。コンクリートと鋼板の応力伝達は圧縮のみ考慮した。

### 3.2 解析結果

3.2.1 荷重と変位の関係 荷重 - 変位関係の実験と解析の比較を、Fig. 12(設計荷重載荷, 正負交番載荷)に示す。

設計荷重載荷では、解析においても設計荷重から漸減で除荷した。実験値は残留変位で繰り返しによる差がでるが、設計荷重時においてほぼ一致しており、大筋で整合したといえよう。

正負交番載荷では一方向解析とし、実験値は包絡線と比較した。初期から最大荷重付近(24mm程度)まで、強度・剛性とも良く整合する結果である。

3.2.2 主筋のひずみ性状 主筋のひずみ性状の実験と解析の比較をFig. 13(設計荷重載荷, 正負交番載荷)に示す。

設計荷重載荷では、各鉄筋とも全般に解析値の方が実験値より低い傾向である。また実験、解析ともに通し鉄

筋のほうがひずみの発生値は小さい。

正負交番載荷では、各鉄筋とも実験値と解析値は一部を除きよく整合している。通し鉄筋は溶接鉄筋に比較してひずみが低く降伏しないことなど両者の違いが明らかで、本解析の妥当性を示している。

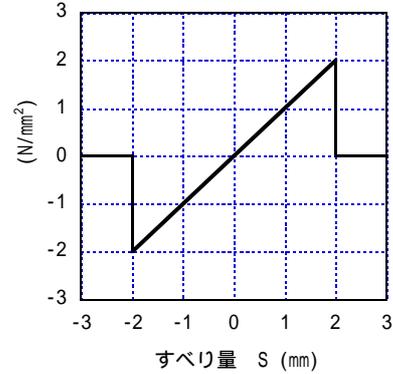


Fig. 11 付着特性のモデル<sup>4)</sup>  
Bond Characteristic

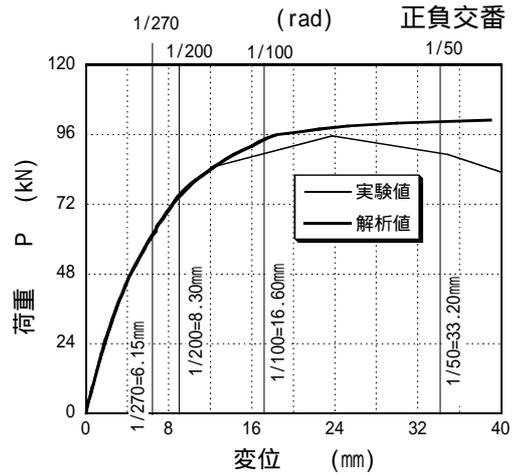
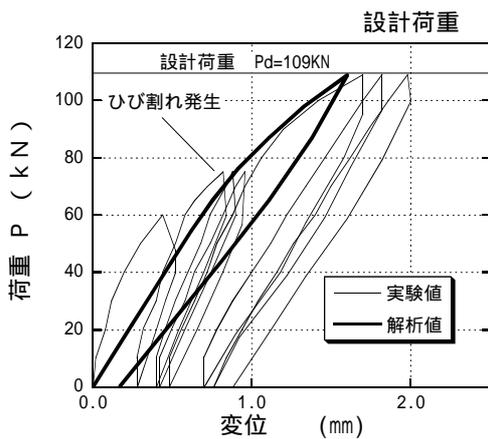


Fig. 12 荷重 - 変位関係の比較  
Comparisons of Load-Displacement Relationship

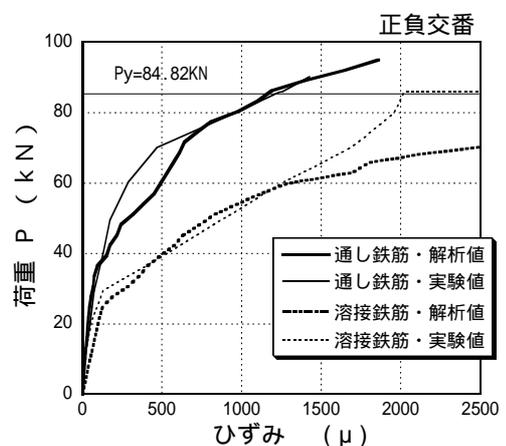
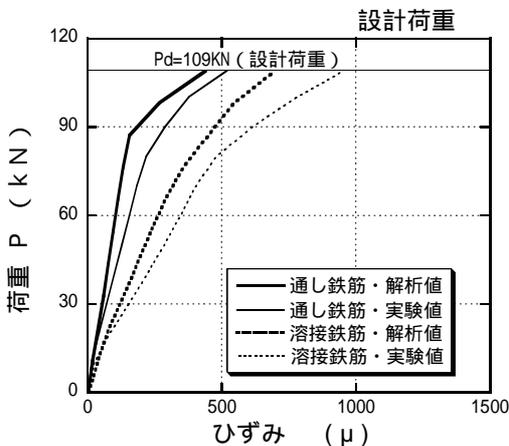


Fig. 13 主筋ひずみの比較  
Comparisons of Re-bar Strain

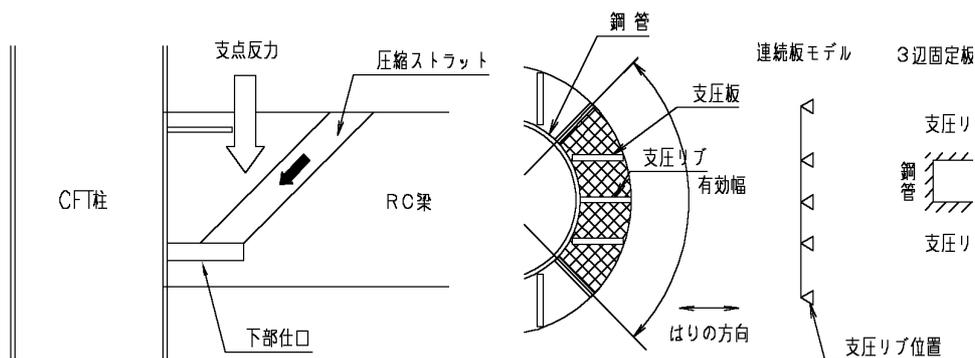


Fig. 14 ダイアフラムの設計モデル  
Design Model of Diaphragm

### 3.3 ダイアフラム設計方法の妥当性の検討

ダイアフラムの設計モデルをFig. 13に示す。ここでははりの圧縮ストラットを想定し、はりから伝達されるせん断力を支圧リブ（鉛直補強版）で囲まれる全周の1/4区間のダイアフラムで受けることとし、支圧リブで支持された3辺固定された板として設計している。この妥当性を検討する。

設計荷重載荷時において、ダイアフラム表面に発生したはり幅方向の曲げ応力度分布をFig. 15に示す。はり中央付近で解析値は実験値を高めめに評価している。しかしながら、上記設計モデルでは、鋼管の円周方向の曲げ応力度は許容応力度付近の189N/mm<sup>2</sup>であり、これに比較し解析や実験で発生した応力度は相当小さく、この設計方法は安全側の値を与えていると評価できる。

### 4. まとめ

CFT柱 - RCはり接合部の正負交番載荷試験を実施し三次元FEM解析よりその性能を評価した。その結果以下の知見を得た。

- (1) 接合部の通し鉄筋は、帯筋がない場合、付着割裂破壊するため降伏せず、はりの耐力は全断面有効の計算値より低い。
- (2) 付着特性をを既往の研究成果にしたがいモデル化した非線形三次元FEM解析において上記現象を模擬することができ、荷重と変位関係を精度よく再現できる。
- (3) ダイアフラムの設計方法の妥当性を検証した。

### 謝辞

本実験ならびに解析は、東日本旅客鉄道株式会社からの委託で実施しました。関係各位に深謝いたします。

### 参考文献

- 1) 米澤健次，他：三次元有限要素法を用いたCFT柱・鉄

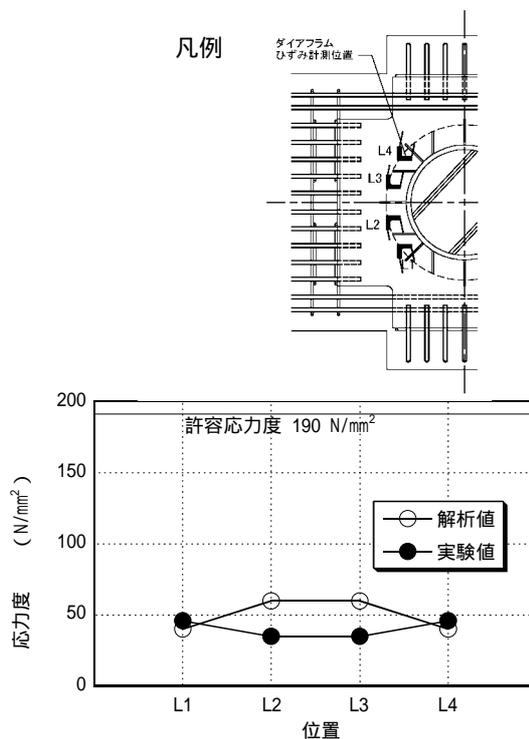


Fig. 15 ダイアフラムはり幅方向の曲げ応力度分布  
Bending Stress Distribution of Diaphragm

骨梁接合部の復元力特性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集Vol.21, No.3, 1027-1032, 1999

2) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第474号，pp.163-170, 1995.8

3) 出雲淳一，他：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル，コンクリート工学論文，NO. 87. 9-1, pp. 107-120, 1987.9

4) 市之瀬敏勝：鉄筋コンクリート短柱における付着破壊のメカニズム，日本建築学会論文報告集，第333号，pp.73-83, 1983.11