

# 論文 CFT柱RCはり接合部の載荷試験と三次元FEM解析

山田 正人<sup>\*1</sup>・西澤 政晃<sup>\*2</sup>・岡野 素之<sup>\*3</sup>

要旨：鉄道地下駅の柱はり接合部に關し，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，はりはRCで，接合部は上下のダイアフラムを鉛直方向の鋼版で補強した構造である．はり主筋は，一部の接合部を貫通する鉄筋を除き，ダイアフラムに溶接されている．実験では接合部のはり主筋に付着割裂破壊が発生し荷重が低い結果であったが，鉄筋の付着性状を既往のモデルにしたがって考慮した三次元FEM解析により，荷重変位の関係及び付着劣化挙動を精度よく評価できた．

キーワード：柱はり接合部，CFT，地下駅，三次元FEM解析

## 1. まえがき

鉄道地下駅工事で，地下駅中柱部材にCFTを，はり部材にRCを用い，はり主筋を2枚の水平ダイアフラムに溶接した接合構造が計画である．これは本工事のように営業線近接工事の場合，中柱の地上からの施工や，内空を侵さないことなどの制約による．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あり，現状では十分に解明されていない．加えて，その耐震設計の妥当性を実証する必要がある．そこで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，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・寸法を図-1に示す．CFT中柱とRCはりの接合部を意図し，試験体は1/3縮小模型の十字型とした．はりの曲げ耐力がCFT柱の1/3程度で，はりの破壊が想定されるため

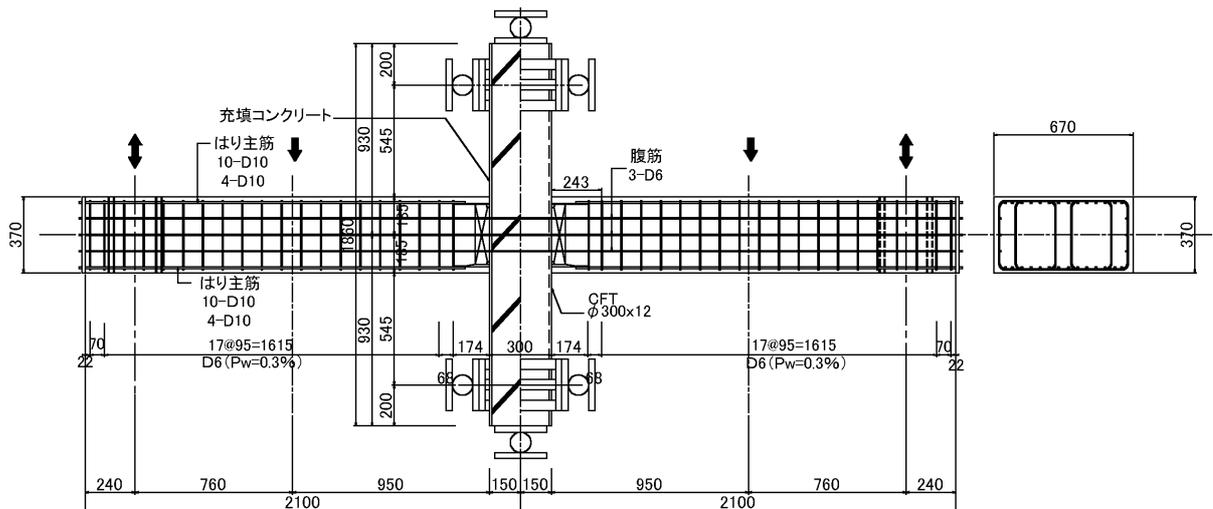


図 - 1 試験体の形状・寸法

\*1 東日本旅客鉄道（株）研究開発センター 工修（正会員）  
 \*2 東日本旅客鉄道（株）東京工事事務所横浜担当課  
 \*3（株）大林組技術研究所 土木耐震構造研究室 主任研究員（正会員）

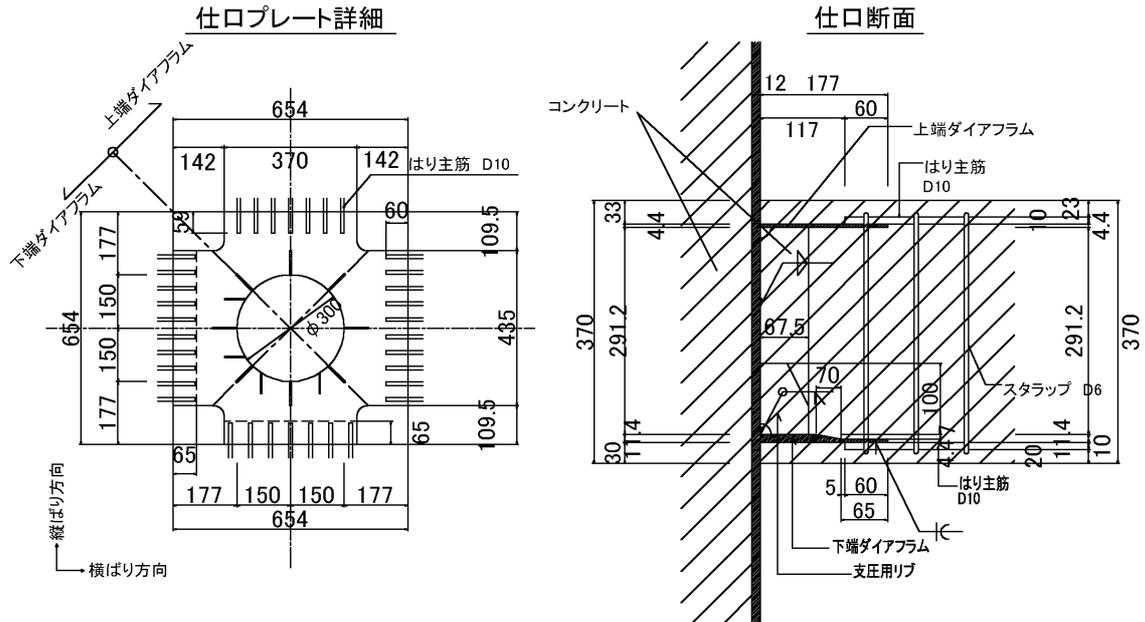


図 - 2 接合部鉄部の詳細

表 - 1 使用材料

コンクリート							
コンクリートの種類	呼び強度 ( $N/mm^2$ )	スラブ (cm)	水セメント比 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	引張強度 ( $N/mm^2$ )	ヤング係数 ( $E+04 N/mm^2$ )	使用箇所
普通コンクリート	21	12	64.8	13	2.74	2.553	はり及び鋼管内
鋼材							
材料	サイズ	仕様	断面積 $mm^2$	降伏点 $N/mm^2$	引張強度 $N/mm^2$	伸び率 %	ヤング係数 $N/mm^2 \times 10^5$
鉄筋	D6	SD345相当	31.7	341	460	29.2	2.06
	D10	SD346相当	71.3	361	503	25.8	1.93
鋼材	t=12	SM490相当	463.9	346	547	26.0	2.08

柱軸力は省略した．構造の詳細は実物を参考に決めた．接合部鉄部の詳細を図 - 2 に，使用材料を表 - 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．はりの主筋は，はり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 はり部分だけで，ダイアフラムの周囲には配置していない．使用材料はコンクリート，鋼材とも一般的なものを用いた．

## 2.2 荷重方法

荷重方法を図 - 3 に示す．設計荷重荷重は常時荷重を意味し左右均等で荷重した．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．正負交番荷重は地震時を意図し，降伏変位の整数倍で各 3 回繰り返した．降伏変位は左右・正負とも同程度で，統一して管理した．

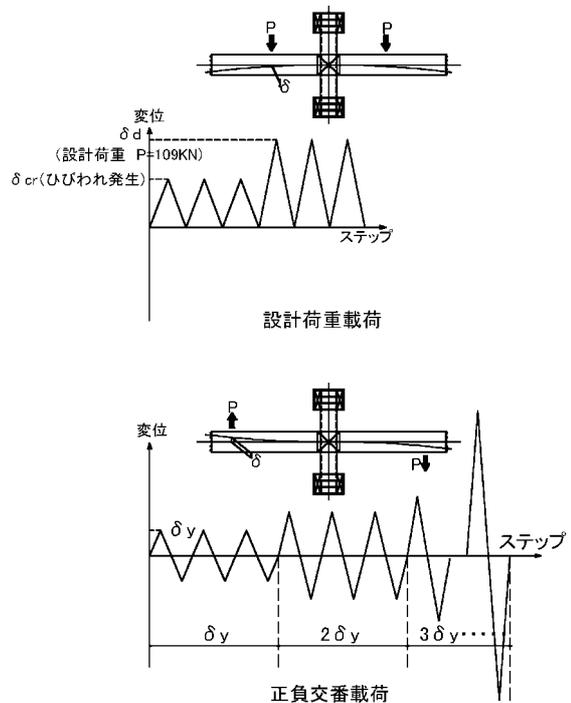


図 - 3 荷重方法

### 2.3 実験結果

#### (1) 破壊形態と荷重変位関係

ひび割れの発生と破壊性状を図 - 4 に，荷重とはり変位の関係を図 - 5（設計荷重載荷），図 - 6（正負交番載荷）にそれぞれ示す．

設計荷重載荷では，柱はり接合部周辺の柱に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  $84.8\text{kN}$ ，負側で  $80.9\text{kN}$  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  $3y$ （ $92.1\text{kN}$ ）で，右側はりは  $2y$ （ $91.7\text{kN}$ ）で最大荷重に達した．負側載荷では，左側はりが  $2y$ （ $90.2\text{kN}$ ），右側はりも  $2y$ （ $88.7\text{kN}$ ）で最大値を示した．この後  $3y$  にかけて通し鉄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  $4y$  でダイアフラムのかぶりが剥離・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．CFT の軸方向ひずみは最大  $500\mu$  程度であった．

荷重変位関係は  $3y$  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．

荷重変位関係の図には，はりをファイバーモデルで評価した解析の結果を併記した．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はり断面を貫通鉄筋のある部分を除外して断面を考えた場合である．全断面有効の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．

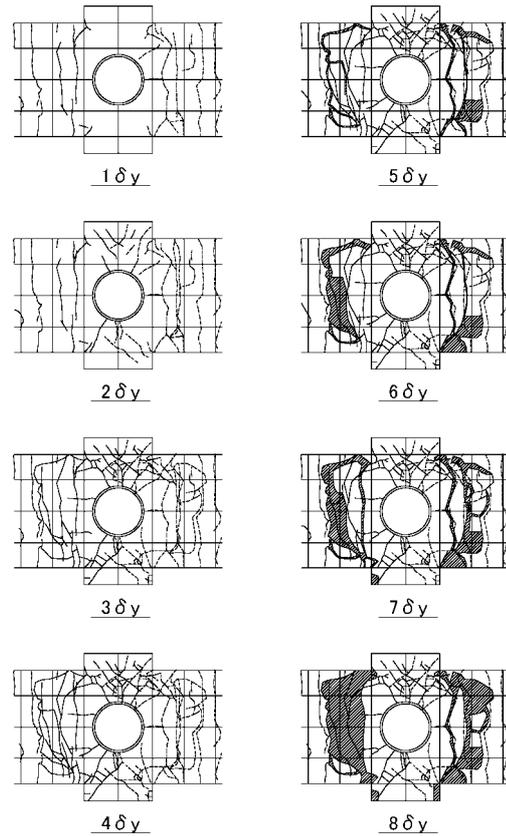


図 - 4 ひび割れ発生と破壊性状

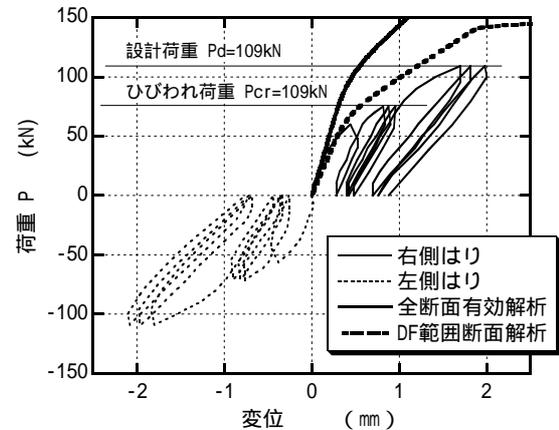


図 - 5 荷重変位関係（設計荷重）

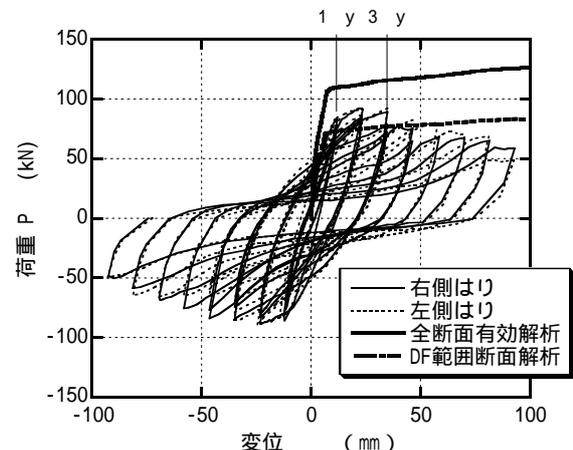


図 - 6 荷重変位関係（正負交番）

## (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 (変位) 関係を示した(図 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追うためには、はり横断方向における主筋の降伏性状の違いと通し鉄筋の付着モデルを考慮する必要があると考え、三次元 FEM 解析<sup>1)</sup>で検討した。

### 3.1 入力モデル

解析モデルと要素モデルを図 - 8,9 にそれぞれ示す。解析モデルは試験体を縦半分に割ったモデルで、各要素は、コンクリートは 8 節点立体(6 面体)モデル、鋼板は 4 節点平面(シェル)モデル、鉄筋は 2 節点線材(トラス)モデルとした。

鋼材はトリリニアでモデル化した。コンクリートの構成則<sup>2),3)</sup>を表 - 2 に示す。各材料とも

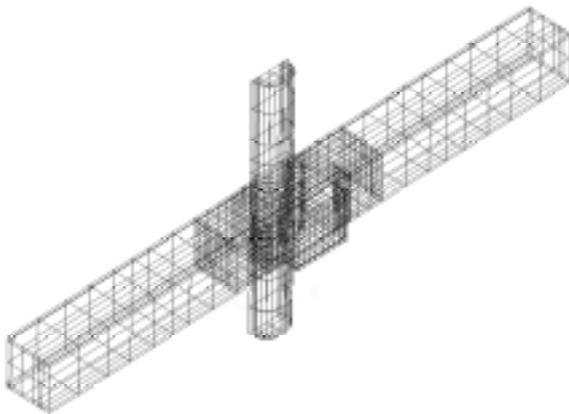


図 - 8 解析モデル

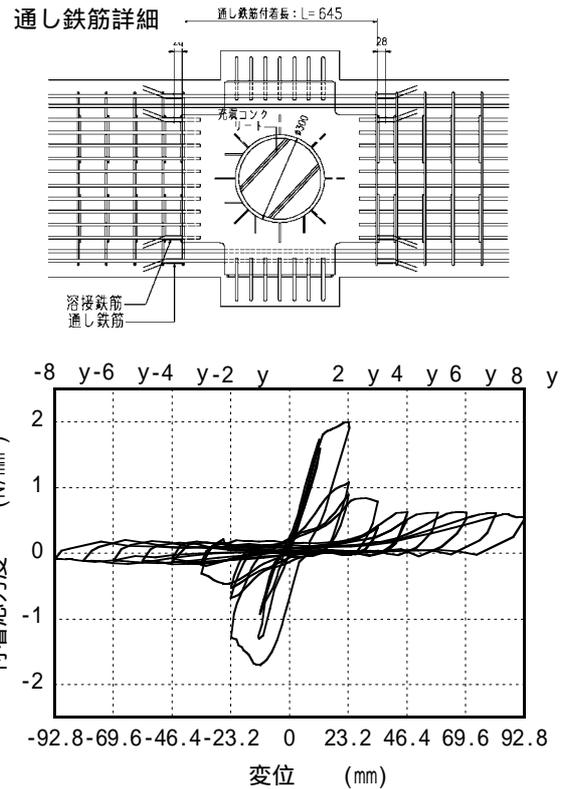


図 - 7 通し鉄筋の付着性状

表 - 2 コンクリートの構成則

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
非線形ポアソン効果	弾性ポアソン比保持

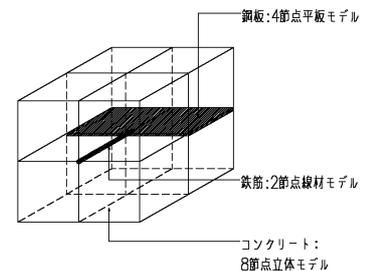


図 - 9 要素モデル

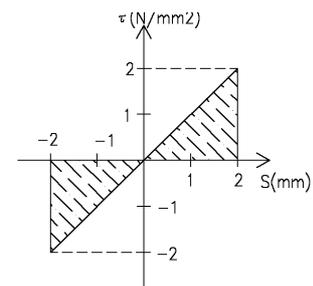


図 - 10 付着特性のモデル<sup>4)</sup>

材料試験結果を用いた．入力に用いた鉄筋の附着特性は実験結果を参考に，図 - 10 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

#### (1) 荷重変位関係

荷重変位関係の実験と解析の比較を，図 - 11 (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，実験値は包絡線で比較した．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．

#### (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図 - 12 (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．また通し鉄筋のほうがひずみ発生は低い．

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．

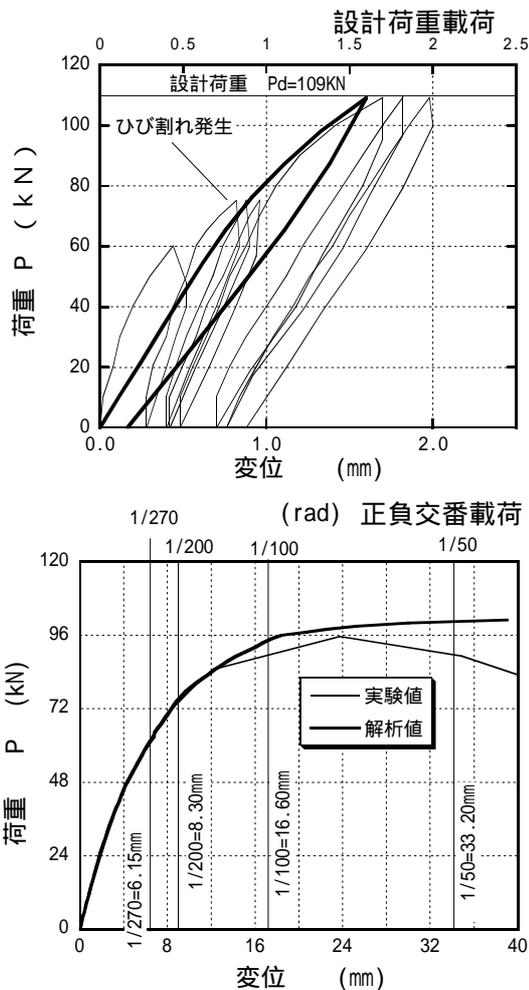


図 - 11 荷重変位関係の比較

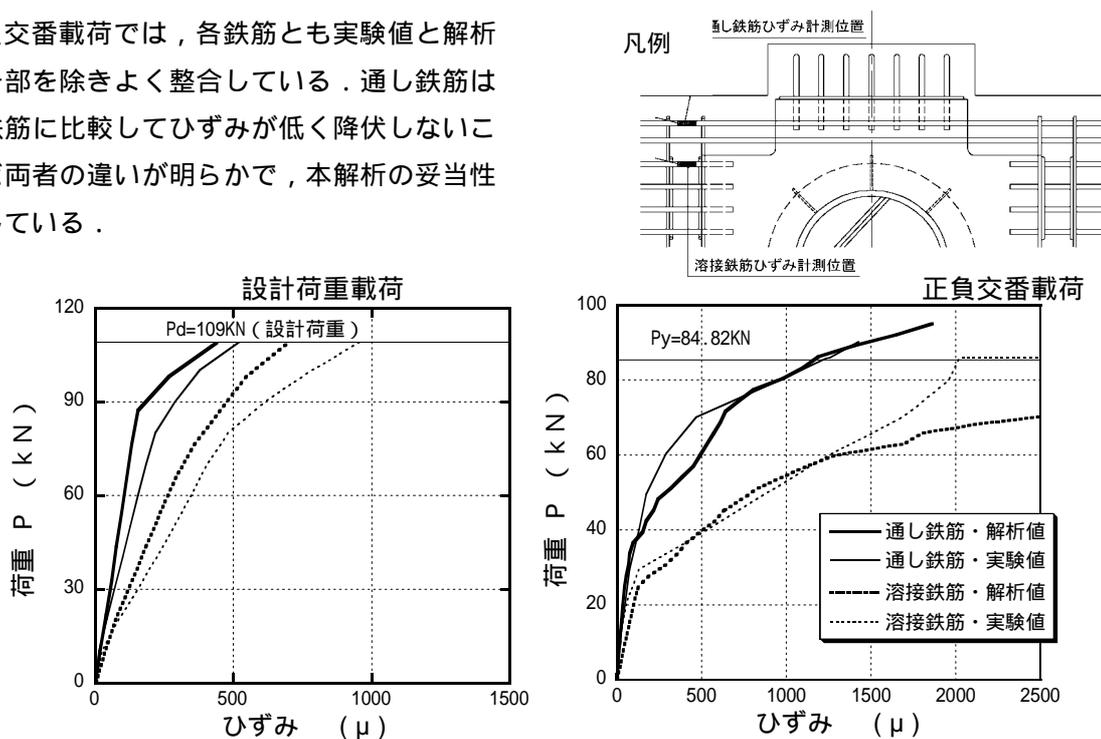


図 - 12 主筋のひずみの比較

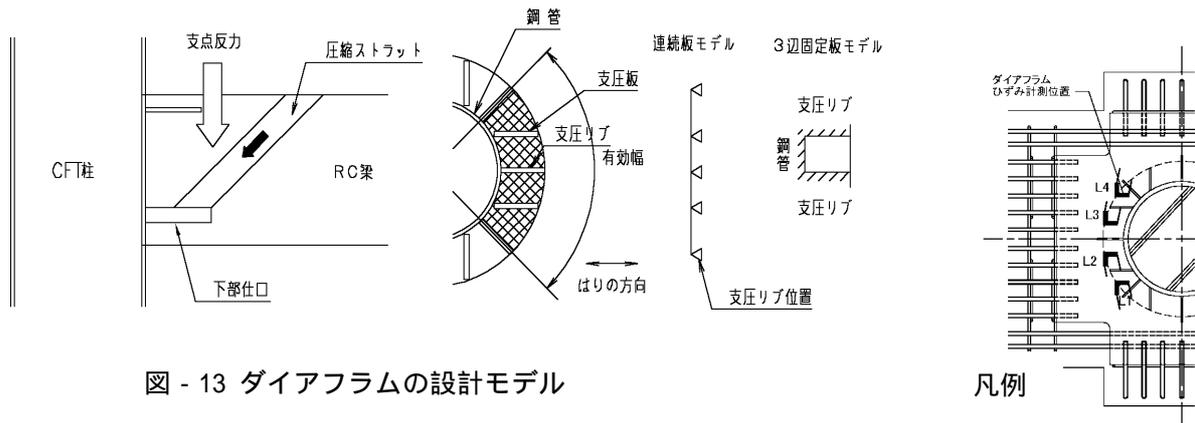


図 - 13 ダイアフラムの設計モデル

### 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図 - 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。

設計荷重載荷時のダイアフラムのはり横断方向の曲げ応力度分布を図 - 14 に示す。はり中央付近で解析値は実験値を高めに評価している。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  $189\text{kN/mm}^2$  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付着割裂破壊するため降伏せず、はりの耐力は低い。
- (2) 付着モデルを既往の研究成果にしたがい評価した三次元 FEM モデルにおいて上記現象を評価することができ、荷重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。

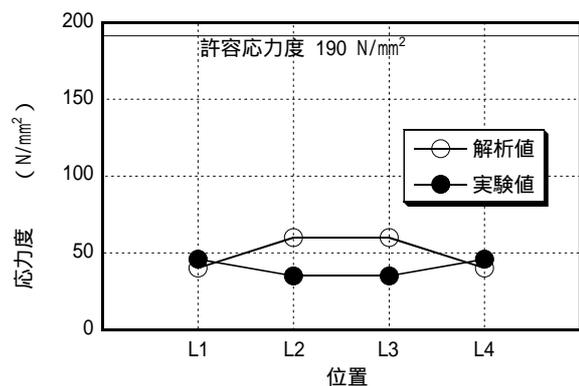


図 - 14 ダイアフラムの応力分布

### 謝辞

協力を得ました大林組技術研究所、長沼一洋博士、ならびに全般に建設企画コンサルタント樋口喜光氏に深謝します。

### 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) 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.
- 3) 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.
- 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.