## 論文 接合部条件が異なるプレキャストプレストレストコンクリート柱 の耐震性状に関する解析的検討

服部 滉也\*1·三木 朋広\*2·生田 麻実\*3

要旨:本研究では、コンクリートの接合、軸方向鉄筋の連続等の接合部条件が異なる PCaPC 柱の耐震性 状を把握するため、解析的検討を行った。解析では、PCaPC 柱の接合部に面インターフェイス要素を用 いた。本解析によって、荷重-変位関係、残留変位などの耐震性状とともに、コンクリートのひずみ分 布、接合部の開口を把握し、水平荷重を受ける PCaPC 柱の接合部の影響を評価した。解析結果から、軸 方向鉄筋が不連続な供試体では残留変位が小さくなること、また、軸方向鉄筋が連続した場合と比較し て、接合部でのコンクリートひずみ、ひび割れ幅が大きくなる傾向を解析的に把握することができた。 キーワード:プレキャスト、プレストレストコンクリート柱、接合部、耐震性状、非線形解析

#### 1. はじめに

プレストレストコンクリート(以下, PC)構造では, RC 構造と比較して耐力の上昇や除荷した際に残留する変位 が小さくなる原点指向性が期待できる。さらに, プレキ ャスト(以下, PCa)工法と併用する PCaPC 構造は, コン クリート構造物の効率的な設計・施工に有効である。し かし, PCaPC 構造の設計について, 橋脚を対象としたガ イドライン<sup>1)</sup>や各種実験検討<sup>2)</sup>はあるものの, 上部構造 と比較して橋脚などの下部構造では適用事例も少なく, 設計手法の一般化には至っていないのが現状である。

生田らの既往研究<sup>3)</sup>では,正負交番載荷を受ける PCaPC 柱を対象として,柱基部での接合部の有無,接合 部での軸方向鉄筋の連続性,断面内での PC 鋼材配置等 の構造条件により耐力や吸収エネルギー等の耐荷性状が 変化することを明かにしている。この検討では,軸方向 鉄筋が連続の場合,不連続の場合と比較して累積吸収エ ネルギーが大きいこと,軸方向鉄筋が不連続であり引張 縁近傍でのプレストレス力による復元性が大きい場合, PCaPC 柱の残留変位が小さくなることが実験的に示さ れた。そこで本研究では,これらの構造条件が異なる供 試体の挙動を解析により定量的に把握することを目指し, その基礎検討として,正負交番載荷を受ける PCaPC 柱を 対象とした非線形有限要素法解析を行い,PCaPC 柱基部 における接合部のせん断挙動に関する解析手法の検証お よび実験の評価を行った。

#### 2. 解析方法

#### 2.1 解析対象の概要

解析対象は,既往研究における PCaPC 柱供試体 <sup>3)</sup>とした。解析対象の供試体条件一覧を表-1 に,材料特性値

\*1 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻 (学生会員)

\*2 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 明石工業高等専門学校 都市システム工学科 助教 博士(工学) (正会員)

部が 250 mm×250 mm の正方形断面であり、下部にフー チング部を有する。主筋本数は4本とし、柱部のせん断 補強鉄筋には SD295 を 35mm 間隔で配筋している。また せん断補強鉄筋は、軸方向鉄筋の外周を1周し始点と終 点を135°フックで定着されている。このうち M-C-S4 は 柱部とフーチングを連続して打設した一体打ち供試体で あり, 一方, J-C-S4, J-DC-S4, はフーチングとの接続部 である柱基部から 50 mm 上方に接合部を有する供試体 である。PC 鋼材は M-C-S4, J-C-S4, J-DC-S4 では断面の 各隅に4本の $\phi$ 15.2 鋼材を配置した。また, M-C-S4, J-C-S4, は軸方向鉄筋が柱とフーチング下部まで連続する よう配置し、一方、J-DC-S4 供試体では同種同形の鉄筋 を配置しているが、接合部では軸方向鉄筋は連続してい ない。実験では、ポストテンション方式のプレストレス 力による圧着によって接合部でせん断力を伝達させ, 300kN 油圧アクチュエータを用いて,正負交番の水平力 をフーチングから 750 mm 上方の位置に作用させた。部 材角 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2(%rad)まで各 2 サイクル 正負交番載荷を行い、その後 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 6, 7, 8(%rad)まで各1サイクルずつ載荷を行った。

ならびに鋼材詳細を表-2 にそれぞれ示す。供試体は柱

#### 2.2 解析モデル

解析ソフトは汎用プログラムの DIANA(version10.4)を

表-1 解析対象の供試体条件一覧 3)

供試体	基部+50mm 高 さでのコンク リートの状態	基部+50mm 高さでの 軸方向鉄筋 条件	PC 鋼材の配置
M-C-S4	一体打ち	連続	$4 \times$ SWPR7B $\phi$ 15.2
J-C-S4	接合部有	連続	$4 \times$ SWPR7B $\phi$ 15.2
J-DC-S4	接合部有	不連続	$4 \times$ SWPR7B $\phi$ 15.2

供試体	コンクリート (早強ポルドランドセメント)		グラウト SWPR7B \$15.2		軸方向鉄筋 SD345 D10	せん断補強鉄筋 SD295 D6	
	圧縮強度 (N/mm²)	弹性係数 (N/mm²)	圧縮強度 (N/mm²)	0.2%耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	弹性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	0.2%耐力 (N/mm²)
M-C-S4	69.0	39200	71.5	1846	196000	379	344
J-C-S4	62.6	37100	71.5	1846	196000	379	344
J-DC-S4	55.8	36500	76.6	1846	196000	379	344

表-2 材料特性値と鋼材詳細<sup>3)</sup>





図-1 解析に使用した要素 (コンクリート)

図-2 解析に使用した要素 (赤: PC 鋼材,青:鉄筋)

用い,三次元解析を行った。解析モデルは図-1 に示す 要素分割とし,拘束位置を赤点で示している。コンクリ ートは8節点ソリッド要素であり,鉄筋とPC 鋼材は埋 込み鉄筋要素を用いた。また,接合部を有する供試体で は,柱基部から50mm上方位置における接合面に面イン ターフェイス要素を用いた。ただし,一体打ちでは面イ ンターフェイス要素を設けていない。なお荷重ステップ としては,まず所定のプレストレス力としてPC 鋼材1 本あたり64kNを導入し,その後,柱基部から750mm 上方の位置に水平荷重を載荷した。境界条件として,供 試体の底面とフーチング部の上面の柱基部から100mm 離れた位置からフーチング部の左右の端までのX,Y,Z 軸方向を完全変位拘束とし,載荷方向のX軸方向を拘束 した。収束計算にはNewton-Raphson法を用い,収束条件 としてエネルギーノルム(許容値0.01)を採用した。

### 2.3 材料モデル

#### (1) コンクリート

コンクリートの材料モデルを図-3 に示す。圧縮側は 圧縮破壊エネルギーを考慮した放物線モデルとした。引 張側はコンクリート標準示方書 <sup>4)</sup>を参照した引張軟化モ デルとした。なお、引張破壊エネルギーは 0.1 N/mm とし た。ひび割れ後のせん断伝達特性は、接触密度関数モデ ルとした。また、グラウトや目地モルタルはコンクリー トと同強度を仮定した。

#### (2) 鉄筋と PC 鋼材

鉄筋は降伏強度に達するまで弾性挙動とし,降伏後は 降伏強度一定のバイリニアモデルとした。一方, PC 鋼材 は図-4 に示すトリリニアモデルを使用した。いずれも



図-6 初期剛性の比較





降伏条件は Von Mises の降伏基準に従うものとした。なお,鉄筋, PC 鋼材とも埋込み鉄筋要素を用いて,コンク リートと鉄筋, PC 鋼材の付着は完全付着を仮定した。

#### (3) 接合要素

柱基部における接合面における接合要素として、図-5 に示す面インターフェイス要素を用いた。インターフ ェイス要素の剛性は既往研究 <sup>5)</sup>を参考にして、法線方向 の剛性を供試体のコンクリート弾性係数 39 kN/mm<sup>2</sup>より 若干大きな値とするよう 50 kN/mm<sup>3</sup> とした。なお、この 剛性の単位系は、応力ー相対変位関係の傾きであるため、 kN/mm<sup>3</sup> となっている。

一方, せん断方向の剛性は, ひび割れの影響を考慮し て法線方向の剛性より小さく設定した。また, 対象供試 体では接合面の付着が切れるような加工をしていること



図-8 残留変位に関する実験結果と解析結果の比較

から、基準の値の 1/10 の 5 kN/mm<sup>3</sup> とせん断方向の剛性 を極めて小さく設定した 0.01 kN/mm<sup>3</sup> の場合で解析を行 った。解析値と実験値の初期剛性を比較した結果を図ー 6 に示す。このとき、せん断方向の剛性以外の値は同じ 値を用いた。その結果より、J-C-S4 供試体の実験値の初 期剛性に近い 0.01 kN/mm<sup>3</sup> を用いたモデルを採用した。 また、面インターフェイス要素の非線形性を考慮するこ とによって実験における挙動、特に初期剛性を再現する ため、剛性低下開始時の相対変位を 1.0×10<sup>-5</sup> mm に設定 した。なお、せん断方向については、剛性を小さく設定 して線形挙動を仮定した。

実験供試体と同じ位置に PC 鋼材,鉄筋を配置してお り,そのため PC 鋼材,鉄筋がインターフェイス要素を 貫通するように配置している。埋め込み鉄筋要素には, ばねモデルを用いた。ここで、自由長さとヤング係数で 法線方向とせん断方向の軸剛性を設定する必要がある。 自由長さとは、ばねの軸剛性を面インターフェイス要素 の剛性として考慮するために用いる仮想の長さである。 また、せん断方向の剛性は接合面を通る PC 鋼材、鉄筋 のダウエル効果を考慮し、法線方向の軸剛性の 0.5 倍と 仮定した。

#### 3. 解析結果と考察

#### 3.1 供試体接合面の接合要素モデル化

前述の2.3 (3)のように供試体接合面の接合要素のパラ メータは既往研究<sup>5)</sup>を参考にして仮定し,J-C-S4,J-DC-S4の接合面に適用した。また,コンクリートや鉄筋,PC 鋼材の物性値は材料試験結果に基づき設定した。

#### 3.2 PCaPC 柱の載荷実験の再現解析

解析と実験の荷重-変位関係を図-7 に示す。解析では、一体打ち供試体 M-C-S4 は最大荷重 134 kN、接合部のある J-C-S4 は約 120kN を示し、いずれも変位約 60 mm時に最大荷重を示した。一方、J-DC-S4 では、変位 60 mmまで載荷を行っても各サイクルの荷重最大点が低下せず、部材角の増加に伴い緩やかに荷重最大点が増加し続けた。

図-7 における M-C-S4 の荷重-変位関係を見ると, 最大荷重は実験値 124.6 kN に対して解析値は 134.3 kN となった。また,変位が約 20 mm までの荷重は実験値よ り解析値のほうが小さい結果となった。一方 J-C-S4 と J-DC-S4 では,解析値の最大荷重は実験値より若干大きい ものの,残留変位,初期剛性の履歴がおおよそ一致して おり,接合面におけるモデル化は概ね妥当であったもの と推測できる。

#### 3.3 残留変位

各部材角の1サイクル後に載荷荷重を0kNまで除荷 した際の載荷点高さにおける水平変位を残留変位とし, 最大経験部材角との関係について各モデルにおける解析 値との比較を図-8に示す。この図に示すとおり,経験 最大部材角の増加に伴い残留変位も増加しており,M-C-S4,J-C-S4,は部材角6%radまでほぼ同じように増加し ていることがわかる。M-C-S4,J-C-S4はJ-DC-S4と比較 して比較して残留変位が大きく,降伏後の軸方向鉄筋の 引張塑性変形により,導入プレストレスによる復元性・ 原点指向性の作用が阻害されている挙動が解析によって 再現できていることがわかる。

# 4. 非線形解析による PCaPC 柱の耐震性状の評価 4.1 プレストレスカの影響

実験では検証されていない PCaPC 柱の耐荷力におけ るプレストレス力の影響について解析的に調べるため, 各供試体に 0 MPa, 4 MPa, 8 MPa, 12 MPa のプレストレ



表-3 部材角 2, 4(%rad)のときの最大圧縮ひずみ

供封体	最大圧縮ひずみ			
医时降	2%rad	4%rad		
M-C-S4	-1.31E-02	-5.39E-02		
J-C-S4	-1.33E-02	-4.02E-02		
J-DC-S4	-1.55E-02	-4.61E-02		

ス力を導入した解析を行った。結果の比較を図-9 に示 す。ここでは各供試体プレストレス力の導入が大きいと, 最大荷重が大きくなるといった結果になった。また,各 供試体プレストレスの大小にかかわらず,ある一定の荷 重に収束していることもわかる。0 MPaのプレストレス 力を導入した場合の挙動を比較してみると,一体打ち供 試体では約変位25 mm で最大荷重を示した後荷重120kN に収束しているのに対し,接合部のある供試体 J-C-S4, J-DC-S4 では変位が大きいと荷重が大きくなり,荷重の 低減が見られなかった。また,供試体 M-C-S4, J-C-S4 は



約 120kN に至っているのに対し, J-DC-S4 は約 100kN と 他 2 つの供試体に比べて小さな荷重を示したことがわか る。これは, M-C-S4, J-C-S4 は鉄筋が連続しているもの の, J-DC-S4 は鉄筋が連続していないため,鉄筋が水平 荷重に抵抗していなかったためだと考えている。

#### 4.2 コンクリートのひずみ分布

各供試体の部材角 0.25, 0.5, 1, 2, 4%rad での引張側 のコンクリートの最大主ひずみ分布を図-10 に示す。ま た,各供試体のコンクリートの最大圧縮ひずみを表-3 に示す。各供試体共に部材角 1%rad まではひずみが分布 しているものの,1%rad 以降,一体打ち供試体の M-C-S4 は柱基部にひずみが集中し,接合部のある供試体 J-C-S4, J-DC-S4 は接合部に圧縮ひずみが集中した。表-3 から 部材角 2,4%rad 時において供試体 J-C-S4, J-DC-S4 を比 較すると,J-DC-S4 の方が大きい最大圧縮ひずみが分布 したことがわかる。これは鉄筋が不連続であるため,鉄



筋が圧縮を負担できないため鉄筋が連続している J-C-S4 に比べ大きくなったと考える。また,一体打ちの供試体 M-C-S4 は,接合部のある供試体 J-C-S4, J-DC-S4 に比べ て部材角 4%rad では最大圧縮ひずみが大きい値となった。

#### 4.3 接合部の開口挙動

接合部のある供試体 J-C-S4, J-DC-S4 は柱基部から 50mm 上部に面インターフェイス要素を設けている。水 平荷重を与えると面インターフェイス要素が Z 軸方向に 開口していく挙動をする。その面インターフェイス要素 における柱底面とフーチング部上面の Z 軸方向の相対変 位を接合部のひび割れの開口幅として図-11示す。接合 部のある供試体は変形が接合部に集中していることから, 面インターフェイスの Z 軸の相対変位分布を接合部のひ び割れ幅として扱うことにした。図-12に実験と解析に おける J-C-S4, J-DC-S4 の最大部材角時の接合部ひび割 れ幅の比較を示す。実験では図-11の赤い矢印の位置(接 合部の水平方向に供試体縁から 30 mm 内側)で接合部に おけるひび割れ幅を計測した。実験値、解析値ともに各 供試体、部材角が大きくなるに伴いひび割れ幅も大きく なった。ただし、実験では部材角 1.5%rad 以降のひび割 れ幅について計測されていないが、初期の挙動を比較し た結果、接合部のひび割れ幅は一致し、実験での接合部 の挙動を再現していることから、面インターフェイスの Z 軸の相対開口変位を接合部のひび割れ幅として扱うこ とができる可能性が示唆された。

#### 5. まとめ

本研究では,正負交番載荷実験における3種類の供試 体を対象に非線形解析を実施し,接合部条件の異なる PCaPC 柱の荷重-変位関係,残留変位などの耐震性状を 把握した。さらに、コンクリートひずみ分布や接合部の 開口幅について検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 接合部に面インターフェイス要素を設定し、適切な パラメータを設定することによって、実験結果の荷 重-変位関係や残留変位などの耐震性状を再現が可 能であることがわかった。
- (2) 導入プレストレス力を変化させた解析から、プレストレス力が大きいと最大荷重が大きくなり、供試体やプレストレス力の大小にかかわらず水平変位の増加に伴いある一定の荷重に収束することがわかった。 接合部のある供試体 J-C-S4, J-DC-S4 ではプレストレスをゼロとした場合、変位が大きくなるほど荷重が大きくなり、荷重の低減が見られなかった。
- (3) コンクリートのひずみ分布は一体打ち供試体 M-C-S4 は柱基部にひずみが集中したのに対し, 接合部の ある供試体 J-C-S4, J-DC-S4 は接合部にひずみが集 中することがわかった。
- (4) J-DC-S4は J-C-S4の接合部のひび割れ幅を実験値と 比較した結果,接合部のひび割れ幅は一致し,実験 での接合部の挙動を再現しており,面インターフェ イスの相対開口変位を接合部のひび割れ幅として扱 うことができる可能性が示唆された。

#### 参考文献

- 1) プレストレストコンクリート技術協会: プレストレス トコンクリート橋脚の耐震設計ガイドライン, 1999.11
- 2)池田尚治,森拓也,吉岡民夫:プレストレストコンク リート橋脚の耐震性に関する研究,プレストレストコ ンクリート, Vol.40, No.5, pp.40-47, 1998.9
- 3)生田麻実、三木朋広:正負交番荷重を受けるプレキャストプレストレストコンクリート柱の接合部条件が耐震性状に与える影響に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.42、No.2、pp.433-438、2020
- 4) 土木学会:コンクリート標準示方書 設計編, pp.489-491, 2017
- 5) 喜多俊介, 三木朋広, 松尾真紀, 二羽淳一郎: 形状の異 なる打継ぎ面を有する鉄筋コンクリート部材の非線形 解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.709-714, 2001.6