

## 多列杭を有する既設フーチングの耐震性評価実験に関する 解析的検討

安藤 高士<sup>1</sup>・服部 匡洋<sup>2</sup>・大八木 亮<sup>1</sup>  
篠原 聖二<sup>3</sup>・高田 佳彦<sup>3</sup>・幸左 賢二<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 修士（工学） 一般財団法人阪神高速道路技術センター 調査研究部  
（〒541-0054 大阪市中央区南本町4-5-7）

<sup>2</sup>正会員 博士（工学） 一般財団法人阪神高速道路技術センター 調査研究部  
（〒541-0054 大阪市中央区南本町4-5-7）

<sup>3</sup>正会員 博士（工学） 阪神高速道路株式会社 技術部（〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3）

<sup>4</sup>正会員 Ph.D 九州工業大学名誉教授（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

### 1. はじめに

地震によるフーチングの損傷事例は少なく1995年の兵庫県南部地震による阪神高速道路の下部構造物の損傷発生状況を見ても、阪神高速3号神戸線の100基近くのRC橋脚にAランクの損傷が発生したものの、フーチングは損傷度の高いA、Bランク（鉄筋破断や部材の変形を伴う損傷）の損傷はなく比較的軽微なCランク（ひび割れの発生や局部的なかぶりコンクリートの剥離）の損傷が数基に発生したのみであった。また、Cランクの損傷が確認されたフーチングはせん断スパン比 $a/d$ （ $a$ ：柱前面より最外縁杭までの距離、 $d$ ：フーチング有効高）が1.0程度と小さく、主なひび割れはフーチングの上面に集中して発生するという特徴を有していた<sup>1),2)</sup>。

フーチングの耐震性は、上記を含む地震時の損傷事例などを基に実験及び解析的検討による評価がされている<sup>2),3),4),5),6),7),8)</sup>が、フーチングは柱又は壁を支え地盤又は基礎へ荷重を伝える版状の構造であることから単柱式橋脚などと比べ複雑な構造で損傷メカニズム評価が難しいことや、比較的せん断スパン比の小さなフーチングに損傷が生じていたことなどから、既往の研究はせん断スパン比が1.0前後と小さいフーチングや杭列数の少ないフーチング（橋軸方向又は橋軸直角方向の杭列数が1列又は2列）を対象としたものが多く、杭列数の多い（橋軸方向又は橋軸直角方向の杭列数が3列以上）多列杭を有するフーチングの耐震性については不明な部分がある。

また、近年では2016年での熊本地震においてもフーチングの被災事例が報告<sup>9)</sup>されている。

そこで、本研究では多列杭を有する既設フーチングの耐震性を評価するため、橋脚、フーチング、杭頭部を一体とした1/10スケールの縮小模型試験体を用いた水平荷重載荷実験を実施<sup>10)</sup>し、その損傷メカニズム及び荷重抵抗機構を明らかにするため3次元弾塑性有限要素法を用いた実験再現解析を行った。

### 2. 水平荷重載荷実験

#### (1) 多列杭を有する実験対象フーチングの選定

実験対象フーチングは、阪神高速道路の既設フーチングの中から下記を条件に選定した。選定した実験対象下部構造一般図を図-1に示す。

- ①杭基礎を有すること
- ②設計基準が古い（昭和55より前）こと
- ③曲げ耐力、せん断耐力ともに平成24年道路橋示方書（以下、「道示」という）が規定する耐力を超過すること
- ④実験事例の少ない多列杭を有すること
- ⑤フーチングの平面寸法が大きく最外縁杭位置におけるせん断スパン比が大きいこと

実験対象フーチングは昭和49年に竣工した下部構造物で、フーチングは高さ3.5m（テーパー部0.5m）、橋軸方向長さ19.5m、橋軸直角方向長さ14.5mの形状である。橋脚構造は高さ16.9m、直径4.6mの円形断面のコンクリート橋脚であり、杭構造は直径1.0mの場所打ち杭（44本）である。また、杭配置は橋軸方向に8列、橋軸直角方向に6列の多列配置であるが橋脚直下には杭配置のない構造となっている。

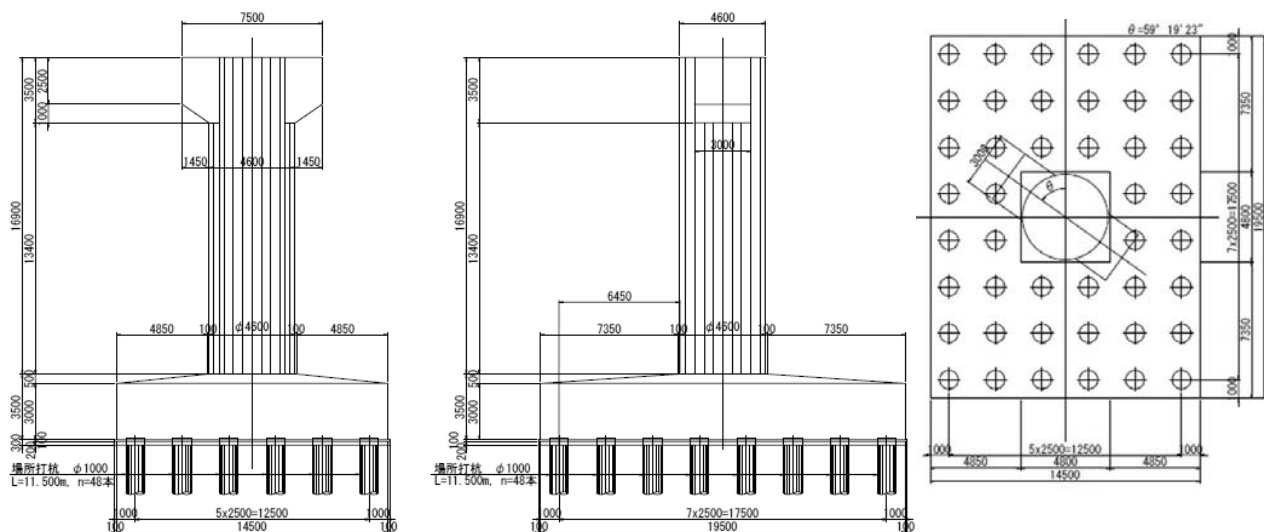


図-1 実験対象下部構造一般図 正面図（左）側面図（中央）平面図（右）（単位：mm）

表-1 実験対象下部構造及び実験試験体の諸元

|       |                               | 実験対象下部構造    | 実験試験体                            |
|-------|-------------------------------|-------------|----------------------------------|
| 柱     | 柱高                            | 16,900mm    | 1690mm                           |
|       | 柱断面                           | φ 4,600mm   | 400mm×400mm                      |
|       | 鉄筋                            | 軸方向鉄筋       | D35@100mm                        |
| フーチング | 幅×奥                           |             | 19,500mm×14,500mm                |
|       | 全高                            |             | 3,500mm（柱前面）<br>3,000mm（フーチング端部） |
|       | テーパ（フーチング上面）                  |             | 500mm                            |
|       | 有効高                           |             | 3,375mm（柱前面）<br>2,850mm（フーチング端部） |
|       | せん断スパン比<br>a/d<br>（最外縁杭～柱近傍杭） | 下側引張        | 2.0(6,910mm/3,350mm)             |
|       |                               |             | 1.3(4,410mm/3,350mm)             |
|       |                               |             | 0.6(1,910mm/3,350mm)             |
|       |                               | 上側引張        | 2.7(8,980mm/3,375mm)             |
|       |                               |             | 1.9(6,480mm/3,375mm)             |
|       |                               |             | 1.2(3,980mm/3,375mm)             |
|       | 鉄筋                            | 上面鉄筋        | 橋軸D25@150mm                      |
|       |                               | 橋直D22@300mm | 橋軸D10@220mm                      |
|       |                               | 上面引張鉄筋比     | 0.09%（橋軸）                        |
|       |                               | 下面鉄筋        | 橋軸D32@150mm                      |
|       |                               | 橋直D29@150mm | 橋軸D13@110mm                      |
|       |                               | 下面引張鉄筋比     | 0.30%（橋軸）                        |
| 杭     | 杭径                            | 44本φ1,000   | 44本φ100mm                        |
|       | 杭間隔                           | 2,500mm     | 250mm                            |
|       | 鉄筋量                           | D13@150mm   | 8本D13                            |
| 使用材料  | コンクリート                        | 柱           | 27N/mm <sup>2</sup>              |
|       |                               | フーチング・杭     | 24N/mm <sup>2</sup>              |
|       | 鉄筋                            | SD30        | SD345                            |

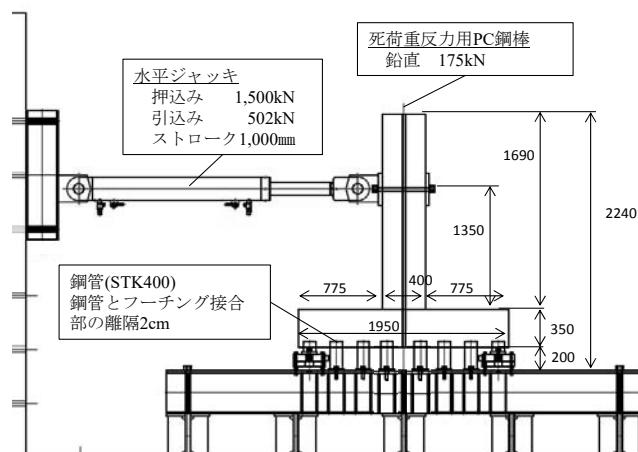


図-2 実験セットアップ（単位：mm）

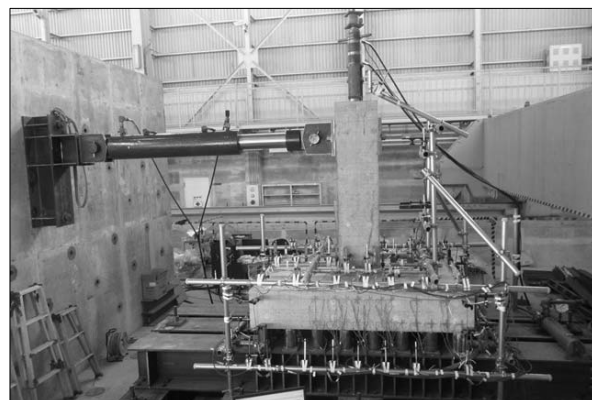


図-3 片側繰返し水平荷重載荷実験状況

## (2) 実験試験体諸元及び実験セットアップ

実験対象下部構造及び実験試験体の諸元を表-1に示す。また、実験セットアップ状況を図-2に、実験状況写真を図-3に、実験試験体のフーチング及び杭の配筋図を図-4に示す。実験試験体は実験対象下部構造物の1/10スケールとし、橋脚（柱）、フーチング、杭頭部を一体として製作した。実験試験体の水平荷重載荷方向のせん断スパン比（下側引張時）は、2.4（最外縁杭位置）、1.5（外側から2列目杭位置）、0.6（柱近傍杭位置）となっている。フーチングの

鉄筋量は下側主鉄筋比が0.25%であり、上側主鉄筋比は下側主鉄筋比の1/2程度で0.14%とかなり少ない配筋となっている。せん断方向鉄筋は、建設当時の設計基準ではフーチングのスターラップに関する規定がなかったため組立筋のみの配筋となっている。

今回の実験ではフーチングの損傷を確実に先行させるため、柱基部及び杭頭部の耐力が設計の2倍となるように鉄筋を配筋し杭全周は鋼管で補強した。また、対象フーチングは上面に0.5mのテーパを有していたが実験の簡便化のためテーパは省略した。

柱主鉄筋の定着は、実験対象構造物の建設年次が昭和49年と古く柱主鉄筋の折り曲げ部が10D ( $D=\phi 35\text{mm}$ ) 程度で抜け出しが懸念され、折り曲げ部を延長し定着長を確保した場合はフーチング下面鉄筋と同様の効果を発揮し耐震性評価に影響を与えることが懸念されるため、フーチング底部に鋼板を設置し柱主鉄筋を鋼板に直接固定する定着構造<sup>8)</sup>とした。

### (3) 実験方法

実験試験体は杭下端をH鋼の架台に固定し、架台は反力床にPC鋼棒により緊張し固定した。

載荷方法は、上部構造反力に相当する鉛直荷重と地震力に相当する水平荷重の2軸載荷とした。

鉛直荷重は、柱天端に上部構造物の死荷重反力に相当する荷重 (175kN) を実験試験体中心に配置したPC鋼棒により一定荷重として載荷した。

水平荷重は、既往の実験<sup>2)</sup>に倣い、所定の鉛直荷重を保持した状態で柱基部から高さ1,350mmの位置に水平ジャッキによる片側繰返し載荷により載荷した。水平荷重の載荷ステップは、フーチング主鉄筋が初降伏するまでは50kNステップとし、降伏以降はフーチング主鉄筋の降伏変位を基準変位  $\delta_0$  (本実験13mm) として変位量が  $4\delta_0$  に達するまでは  $0.5\delta_0$  ステップ、それ以降は  $1\delta_0$  ステップとした。また、ステップ毎に0kNまで除荷を行うこととした。

計測項目は、載荷荷重、各部材の変位及び鉄筋ひずみに加え、多列杭の杭反力発生状況を確認するため載荷方向中心列の4杭の鉛直反力とした。

### (4) 実験結果

#### a) フーチングの損傷状況

フーチング上面のひび割れ状況を図-5 に、水平荷重載荷位置における水平荷重－水平変位関係を図-6 に示す。図-6 に示す設計上の曲げ耐力及びせん断耐力は、実験試験体の2次元骨組みモデルを用いたプッシュオーバー解析により算出した作用力に対する道示での耐力照査結果を示している。その結果、水平荷重約 150kN で押込側の柱フーチング接合部付近でせん断耐力に達し、水平荷重約 220kN で引張側の柱フーチング接合部付近でせん断耐力に達する。また、水平荷重約 240kN でフーチング上面主鉄筋が曲げ降伏に至ることから、設計上はせん断破壊先行の破壊形態であることを確認している。

実験試験体の主な載荷ステップにおけるフーチングの損傷過程を以下に示す。

- 1) 水平荷重130kNで、引張側フーチング上面柱フーチング接合部隅角近傍より斜め方向に進展するひび割れ①が発生し250kNまでの間にフーチング側面まで達した。また、柱フーチング接合部より放射状のひび割れ②が発生した。
- 2) 水平荷重250kNで、フーチング上面主鉄筋が降伏ひずみ ( $1,845\mu$ ) に達したため初降伏とし基準変位 ( $\delta_0$ =水平変位13mm) とした。
- 3)  $2\delta_0$  (329kN) でフーチング下面主鉄筋が降伏し、 $2.5\delta_0$  (347kN) でフーチングせん断方

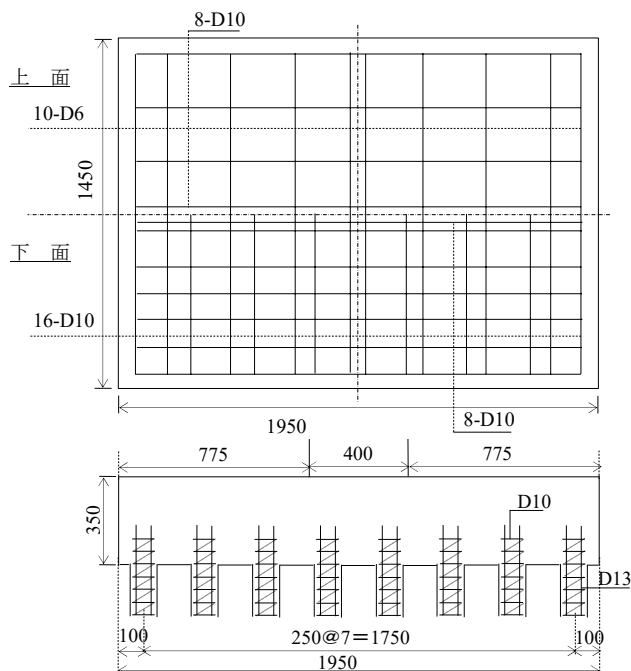


図-4 実験試験体配筋図 (フーチング・杭 単位: mm)

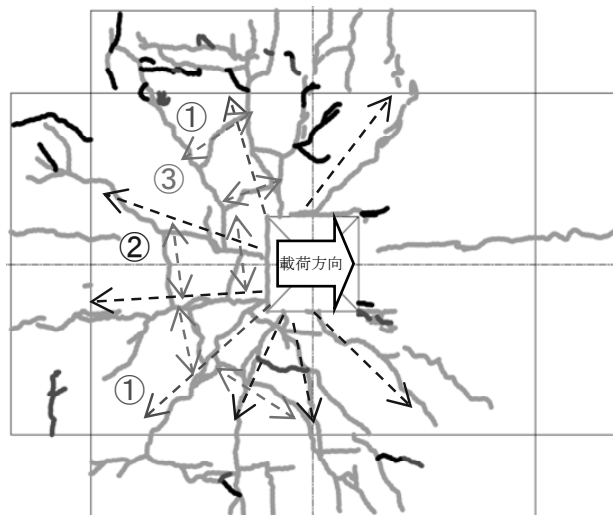


図-5 フーチング上面のひび割れ状況 (実験終了時)

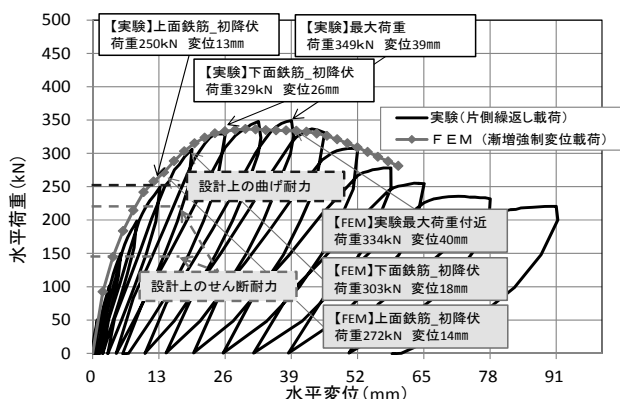


図-6 水平荷重－水平変位関係 (水平荷重載荷位置)

向鉄筋が降伏した。

- 4)  $3\delta_0$  (349kN) で水平荷重が最大荷重に達し、その後は変位の増加に伴い荷重低下が見られた。
- 5)  $7\delta_0$  までの間にフーチング上面の放射状のひび割れ①②を繋ぐ横方向のひび割れ③が発生し、

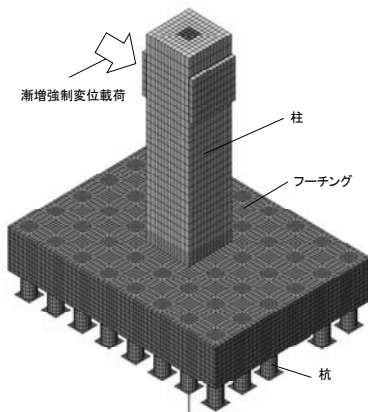


図-8 実験再現解析モデル

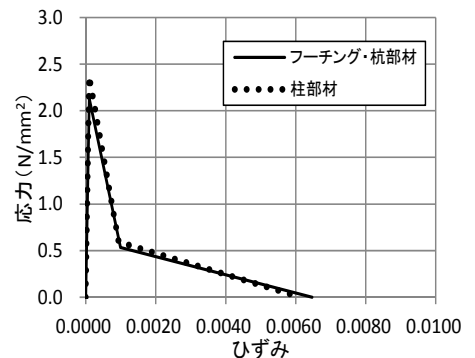
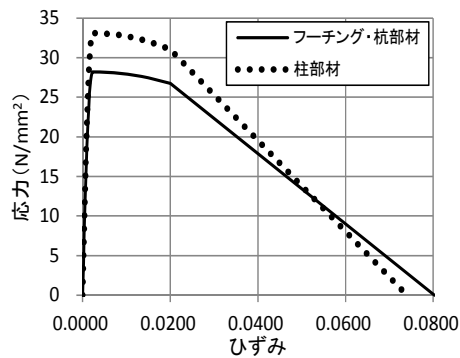


図-9 コンクリートの応力 - ひずみ関係（左：圧縮側 右：引張側）

フーチング上面コンクリートの一部に浮上りが見られた。7 $\delta_0$  (220kN) で水平荷重が最大荷重の6割まで低下したため実験を終了した。

今回の実験では、引張側のフーチング上面にひび割れが多く発生した。また、フーチング下面にも上面と同様に柱フーチング接合部からの放射状のひび割れが確認された。設計上の曲げ降伏に至る水平荷重は約240kNであったが、実験では250kNでフーチング上面鉄筋が降伏ひずみに達し、その後349kNまで荷重が増加した。設計上のせん断耐力は引張側で約150kN、押込側で約220kNであったが、実験では3 $\delta_0$ で最大水平荷重349kNを計測した。また、最大水平荷重以降は水平荷重がなだらかに低下するものの最終変位7 $\delta_0$ までせん断破壊を示すような荷重の急落を伴う脆性的な破壊は生じなかった。

#### b) フーチング内部のひび割れ発生状況

実験試験体を切断しフーチング内部損傷状況の確認を行った。切断位置はフーチング中央断面と中央断面から杭一列分離した2断面の合計3断面とした。図-7にフーチング内部ひび割れ発生状況を示す。

フーチング内部には図-7に示すA～Dの4種類のひび割れが確認された。全ての切断面においてフーチング下面柱フーチング接合部から引張側のフーチング上面に向かう斜め方向のひび割れD（引張側内部斜め方向ひび割れ）が確認された。このひび割れDはひび割れ幅が非常に大きくフーチングの上下主鉄筋の間を進展しフーチングの側面まで達していた。中央断面から離れた2断面では、押込側のフーチング上面柱フーチング接合部から引張側のフーチング下面柱フーチング接合部に向かう円弧状のひび割れC（接合部内部斜め方向ひび割れ）が確認された。このひび割れCは、引張側のフーチング下面柱フーチング接合部付近において引張側のフーチング内部に進展するひび割れDと繋がるように発生していた。

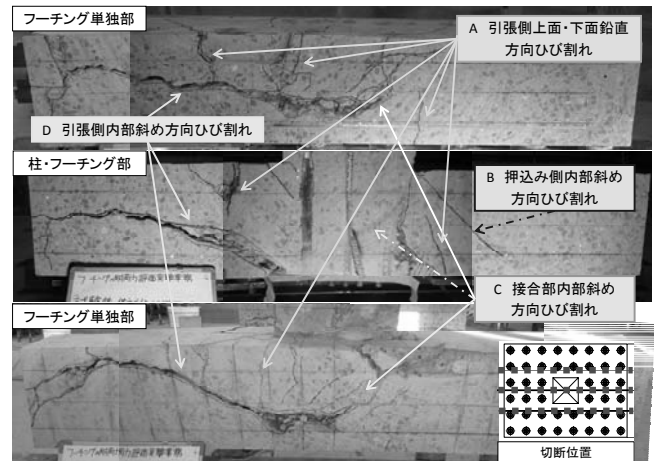


図-7 フーチング切断面での内部ひび割れ状況

点から評価するため、3次元弾塑性有限要素法による実験再現解析を行った。

- ①設計上のせん断耐力を超えてもせん断破壊が生じない理由
- ②フーチング鉄筋が降伏した以降においても水平荷重が増加する理由
- ③水平荷重が最大荷重に達した後に、荷重がじつ性的に低下している理由

#### (1) 解析手法

解析手法は、汎用解析プログラムDIANAによる3次元弾塑性有限要素解析（以下、「FEM」という）とした。図-8に実験再現解析モデルを示す。

解析に用いた要素特性はコンクリートにはソリッド要素、鉄筋には埋め込み鉄筋要素を使用しコンクリートと鉄筋は完全付着モデルとした。材料特性はコンクリート及び鉄筋ともに材料試験から弾塑性モデルを設定した。表-2及び表-3にコンクリート及び鉄筋の材料特性を、図-9にコンクリートの応力-ひずみ関係を示す。コンクリートの弾塑性モデルは引張側は引張破壊エネルギーを考慮できる引張軟化モデル、圧縮側は圧縮破壊エネルギーを考慮できる放物線モデルとした。また、コンクリートのひび割れモデルは回転モデルとした。載荷条件は、柱天端に上部構造死荷重相当の鉛直荷重をPC鋼棒を再現したモデルで与え、水平荷重は強制変位により与えた。境界条件は、杭下端を実験と同様に完全固定とした。

### 3. 解析的検討及び実験結果との比較

多列杭を有する既設フーチングの水平荷重載荷実験により、フーチングは脆性的な破壊系形態ではなく一定の変形能を有することが示された。そこで、実験で確認されたフーチングの破壊形態を以下の観

表-2 コンクリートの材料特性

| 項目        |      | 単位                | フーチング  | 杭      | 柱      |
|-----------|------|-------------------|--------|--------|--------|
| 圧縮強度      | fc   | N/mm <sup>2</sup> | 28.2   | 28.2   | 33.1   |
| ヤング率      | Ec   | N/mm <sup>2</sup> | 20,640 | 20,640 | 24,190 |
| ポアソン比     | ν c  | -                 | 0.2    | 0.2    | 0.2    |
| 引張強度      | ft   | N/mm <sup>2</sup> | 2.1    | 2.1    | 2.4    |
| 粗骨材の最大寸法  | dmax | mm                | 20.0   | 20.0   | 20.0   |
| 引張破壊エネルギー | Gf   | N/mm              | 0.083  | 0.083  | 0.087  |
| 圧縮破壊エネルギー | Gc   | N/mm              | 46.6   | 46.6   | 50.5   |

表-3 鉄筋の材料特性

| 項目    | 単位                | フーチングおよび柱 |         |         |         |
|-------|-------------------|-----------|---------|---------|---------|
| 種類    | -                 | SD345     |         |         |         |
| 径     | -                 | D6        | D10     | D13     | D32     |
| 断面積   | mm <sup>2</sup>   | 31.7      | 71.3    | 126.7   | 794.2   |
| ヤング率  | N/mm <sup>2</sup> | 202,400   | 199,400 | 197,960 | 207,930 |
| ポアソン比 | -                 | 0.3       |         |         |         |
| 材料構成則 | -                 | VonMises  |         |         |         |
| 降伏応力  | N/mm <sup>2</sup> | 373.4     | 367.1   | 418.6   | 387.8   |
| 硬化係数  | -                 | 0.001     |         |         |         |

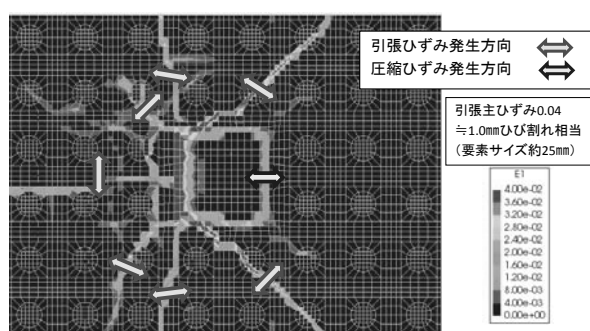


図-10 フーチング上面引張ひずみ発生状況（最大荷重付近）

## (2) 解析結果及び実験との比較

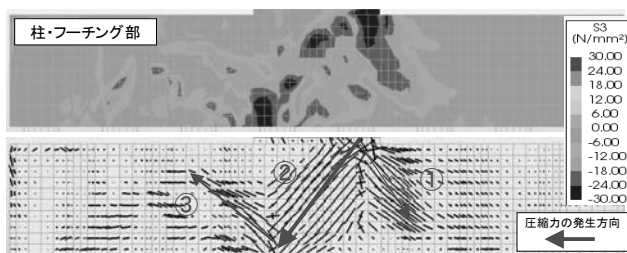
図-6に実験及びFEMにおける水平荷重位置の水平荷重—水平変位関係を示す。FEMにおいても実験と同様の荷重変位関係が得られた。フーチング上面鉄筋の降伏荷重272kN及び下面鉄筋降伏荷重303kNともに実験と同様の降伏状況であったことから、FEMにより実験での破壊形態を再現できたと考えられる。

### a) フーチングの応力・ひずみ発生状況

図-10にFEMでの実験最大荷重付近におけるフーチング上面の引張ひずみ（最大主ひずみ）発生状況を示す。FEMにおいても実験で確認されたひび割れ発生箇所にて引張ひずみの発生が確認された。

図-11に実験最大荷重付近での柱・フーチング接合部断面における圧縮応力（最小主応力）の発生状況を示す。押し込み側では①に示す圧縮ストラットの形成が確認された。また、②③に示す方向においても大きな圧縮応力が確認された。

図-12に引張ひずみ（最大主ひずみ）の発生状況を示す。圧縮応力が発生していない④⑤⑥においても引張ひずみが確認された。④⑤は曲げひび割れと考えられるが、⑥は柱の回転挙動と杭の拘束に伴う引張力により生じる引張ひずみであると考えられる。また、図-13に実験で切断した3断面を含む5断面の引張ひずみ発生状況を示す。図-14に示す実験で確認された柱の回転挙動と柱・杭の引張力による円弧状の破壊面と同様の引張ひずみが面的に生じ、最大荷重時にはほぼ全幅に広がって発生していた。



※最大荷重付近 上：コンタ図、下：矢示図（図-12も同じ）

図-11 圧縮応力（最小主応力）発生状況

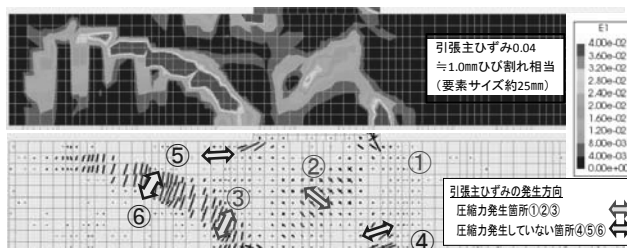


図-12 引張ひずみ（最大主ひずみ）発生状況

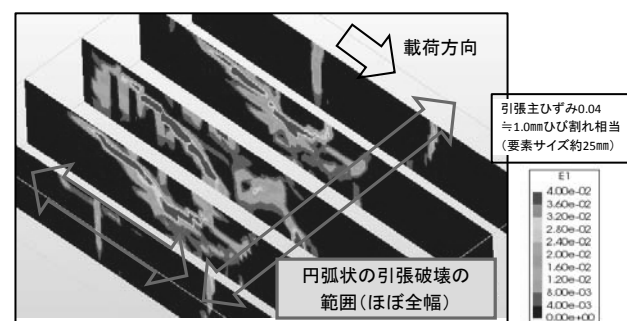


図-13 引張ひずみ発生状況（最大荷重付近：5断面）

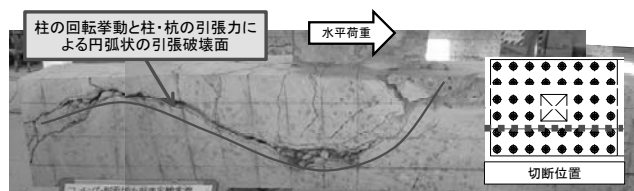


図-14 フーチングの円弧状の引張破壊面

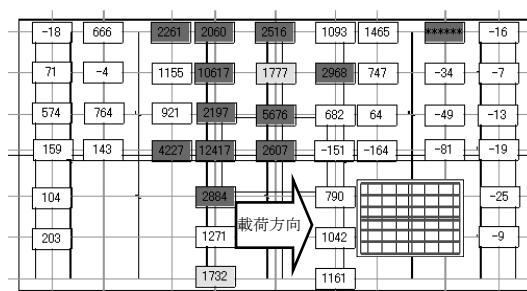


図-15 実験フーチング上面主鉄筋ひずみ（最大荷重付近）  
（降伏ひずみ（1,845 $\mu$ ）以上を赤着色）

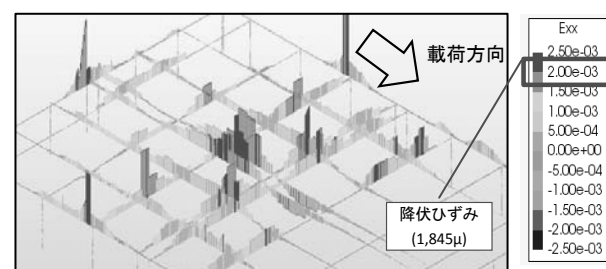


図-16 FEMフーチング上面鉄筋ひずみ（最大荷重付近）

## b) 鉄筋ひずみの発生状況発生状況

図-15、図-16に実験及びFEMにおける実験最大荷重付近でのフーチング上面鉄筋降伏ひずみ(1,845 $\mu$ )発生状況を示す。実験、FEMともに鉄筋降伏の範囲は軸方向に加え直角方向にも面的に広がっていることが確認された。これは下面鉄筋も同様であった。

## c) 杭の鉛直反力発生状況

図-17 に実験におけるフーチング中央部の杭 4 本の杭反力を示す。押込側杭で最大約 75kN の圧縮力、引張側杭で最大約 90kN の引張力の発生が確認された。一方で、最外縁杭では押込側、引張側ともに大きな反力は計測されなかった。図-18 に FEM における杭列毎の杭反力の合計値(杭 6 本分の合計(中央部は 4 本の合計))を示す。実験と同様の杭反力が確認され、フーチング鉄筋降伏時(14 mm)には引張力の範囲が押込側柱部まで生じていることが確認された。これらの杭反力の発生状況から地震時におけるフーチングの挙動は剛体挙動ではなく非線形挙動となると考えられた。また、引張側杭反力は最大荷重以降増加が見られなかったことから、水平荷重の低下は引張側の損傷により生じたものと考えられた。

## (3) フーチングの破壊形態の要因

実験及びFEMにより確認された多列杭を有する既設フーチングの破壊形態の要因を以下に示す。

### a) 設計上のせん断耐力を超えてもせん断破壊が生じない理由

押込側の柱基部と杭の間に圧縮ストラットが形成され、せん断耐力が上昇したと考えられる。

### b) フーチング鉄筋が降伏した以降においても水平荷重が増加する理由

上面鉄筋降伏後の鉄筋の抵抗(降伏)範囲が上面、下面鉄筋ともに面的に広がることにより水平荷重が増加したと考えられる。

### c) 水平荷重が最大荷重に達した後に、荷重がじん性的に低下している理由

図-14に示す柱の回転挙動と柱・杭の引張力による円弧状の引張破壊により荷重の低下が生じるが、この破壊に対し引張側フーチングの全幅で面的に抵抗するため、面的な荷重分配を伴いながら変形能を有するじん性的な破壊が生じたと考えられる。

## 4. 今後の検討課題

今回の実験及びFEMにより確認された既設フーチングの保有耐力及びじん性性能について他の実験結果を踏まえた分析・評価を行い、既設フーチングの補強の要否、優先順位を判定するための耐震性評価手法の検討を引き続き行う必要がある。

**謝辞：**本実験は、国立研究開発法人土木研究所の実験施設を借用して実施した。ここに記して関係各位に感謝の意を表する。

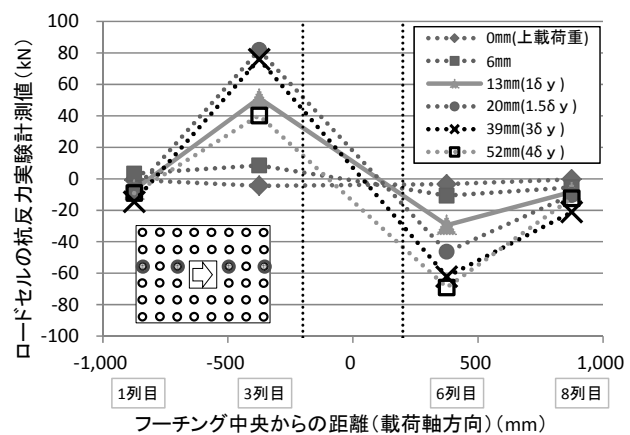


図-17 実験杭の鉛直反力発生状況

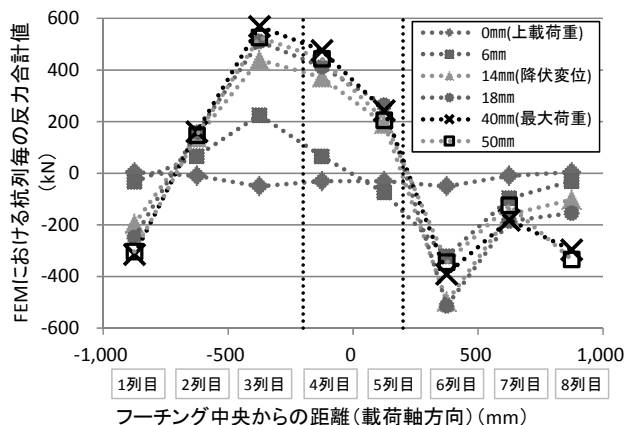


図-18 FEM 杭の鉛直反力発生状況

## 参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：大震災を乗り越えて－震災復旧工事誌－，1997.
- 2) 阪神高速道路公団：フーチングの地震時挙動に関する基礎的研究報告書，1999.3
- 3) 幸左ら：地震時における柱・フーチング接合部の損傷メカニズムに関する研究，土木学会論文集，No. 746/V-61, pp. 41-55, 2003.11
- 4) 白戸ら：上面側が引張りになる場合のフーチングのせん断耐力算定式，構造工学論文集，Vol.48A, pp. 1211-1220, 2002.3
- 5) 幸左ら：フーチングの終局挙動に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.45AⅢ, pp. 1369-1376, 1999.3
- 6) 幸左ら：地震時のフーチング損傷メカニズムに関する研究，土木学会論文集，No. 655/V-48, pp. 63-74, 2000.8
- 7) M.J.N.Priestleyら(川島一彦監訳)：橋梁の耐震設計と耐震補強，技報堂出版，1998.4
- 8) 国立研究開発法人土木研究所：アルカリシリカ反応による損傷を受けたフーチングに対する損傷度評価および補修・補強方法に関する研究，土木研究所資料第4304号, 2015.3
- 9) 国土交通省国土技術政策総合研究所，国立研究開発法人土木研究所：平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告(国総研資料第967号，土研資料第4359号)，2017.3
- 10) 安藤ら：多列杭を有する既設フーチングの耐震性に関する実験的検討，第20回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2017.7