

# フーチングの終局挙動に関する弾塑性 FEM 解析

九州工業大学大学院 学生員 安藤高士 九州工業大学 正会員 幸左賢二  
 阪神高速道路公団 正会員 足立幸郎 新構造技術(株)正会員 水田和之

## 1. はじめに

兵庫県南部地震は阪神地方に甚大な被害を与えたが、損傷したフーチングの特徴としてはせん断スパン比が小さく上面にひびわれが集中していたことが挙げられ、通常の曲げやせん断損傷とは異なる損傷形態であった。そこで、本研究ではフーチング損傷形態の支配的要因と考えられるせん断スパン比および鉄筋量をパラメータとした地震時挙動再現実験を対象として2次元弾塑性FEM解析を行い、その破壊メカニズムおよび終局挙動を最大耐力、変形状況、鉄筋のひずみ分布およびコンクリートのひずみ分布などにより検討した。

## 2. 解析手法

図-1に試験体構造図を、表-1に試験体構造諸元一覧を示す。本解析では解析手法としてFEM(有限要素法)による2次元静的弾塑性解析を試みた。載荷条件としては柱天端に上部工死荷重相当の等分布荷重を載荷した状態で柱上部に変位増分による単調載荷を与え、境界条件として杭下端を完全固定としている。表-2にコンクリートおよび鉄筋の材料特性を示す。材料の破壊基準は、コンクリートの圧縮側では圧縮による体積変化を考慮したDrucker-Pragerの破壊基準を用い、引張側でのひび割れ発生は最大主応力基準を用いた。コンクリートの応力-ひずみモデルを図-2に示す。圧縮上昇域では圧縮強度までを2次放物線とし、その後は応力が直線的に減少するモデルを用いた。また引張域については、ひび割れを考慮した分布ひび割れモデルとし、引張強度に達した後、 $t$ まで直線的に応力が減少するモデルとした。また、鉄筋の応力-ひずみモデルとしては、図-3に示すように鉄筋降伏強度に達した後のひずみ硬化を考慮したトリリニアモデルを用いた。

## 3. 実験結果および解析結果

図-4に各試験体における水平荷重載荷位置での荷重-水平変位関係を示す。ここでは、白抜きが解析結果、黒塗りが実験結果である。各試験体において最大荷重付近までは、実

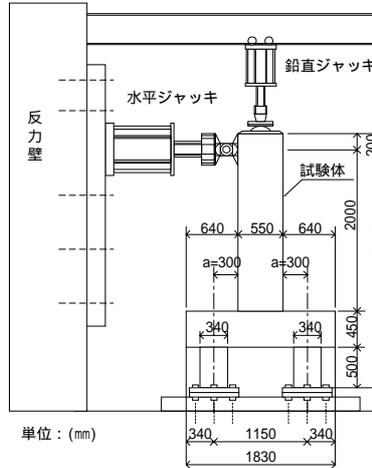


図-1 実験試験体構造図

表-1 構造諸元一覧表

|       |         | 試験体 1   | 試験体 2       | 試験体 3       |
|-------|---------|---|-------------|-------------|
| 柱     | 柱高さ     | 2200mm  |             |             |
|       | 水平荷重載荷高 | 2000mm  |             |             |
|       | 柱断面     | 550mm × 550mm   |             |             |
|       | 柱鉄筋量    | 28本 × D22 (As=108.388cm <sup>2</sup> )                          |             |             |
| フーチング | a/d     | 0.75  | 1.00        | 0.75        |
|       | 全幅      | 1830mm  | 2030mm      | 1830mm      |
|       | 全高      | 450mm   |             |             |
|       | 有効高     | 390mm   |             |             |
| 鉄筋    | 上面      | D10 ctc 240   | D10 ctc 200 | D10 ctc 154 |
|       | 下面      | D13 ctc 120   | D13 ctc 100 | D13 ctc 77  |
| 杭     | 杭径      | 340   |             |             |
|       | 杭間隔     | 1150mm  | 1350mm      | 1150mm      |
|       | 杭鉄筋量    | 10本 × D25 (As=50.67cm <sup>2</sup> )                            |             |             |
| 使用材料  | コンクリート  | 柱 設計基準強度 = 27N/mm <sup>2</sup><br>フーチング・杭 = 24N/mm <sup>2</sup> |             |             |
|       | 鉄筋      | SD345   |             |             |

表-2 コンクリート・鉄筋の材料特性

|          | 弾性係数<br>Ec(N/mm <sup>2</sup> ) | 圧縮強度<br>fc(N/mm <sup>2</sup> )                | 引張強度<br>ft(N/mm <sup>2</sup> ) | ポアソン比  |
|----------|--------------------------------|---|--------------------------------|--|
| 柱部       | 22000                          | 28.03   | 2.11                           | 0.2  |
| フーチング・杭部 | 22000                          | 25.28   | 1.64                           | 0.2  |
|          | 弾性係数<br>Es(N/mm <sup>2</sup> ) | 降伏点強度<br>σ <sub>sy</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) | 降伏ひずみ<br>(μ)                   | 引張強度<br>σ <sub>su</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) |
| 鉄筋       | 200000                         | 350   | 1750                           | 508  |

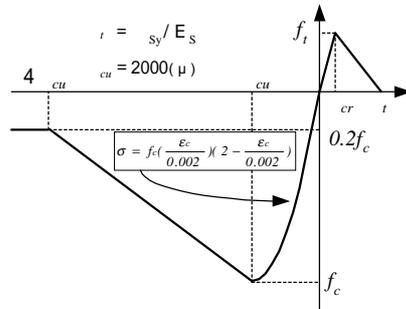


図-2 コンクリートの応力-ひずみ

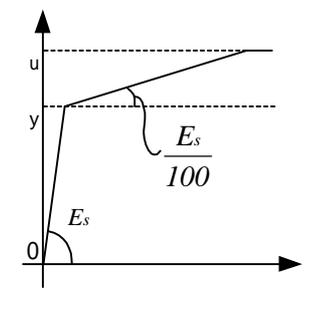


図-3 鉄筋の応力-ひずみ

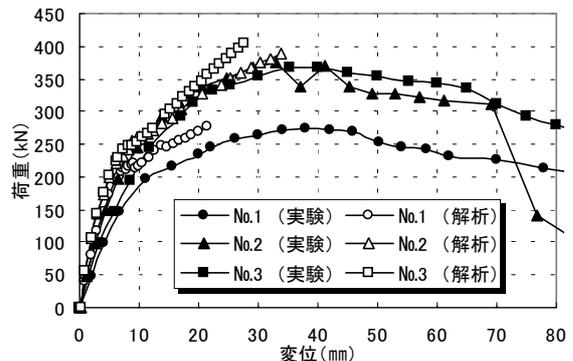


図-4 各試験体の柱天端での水平変位-荷重の関係

キーワード：フーチング・破壊メカニズム・接合部・FEM 解析

連絡先：九州工業大学 〒804-8551 北九州市戸畑区仙水町 1-1

093-884-3123

FAX093-884-3123

験・解析とも同じような挙動が得られていることがわかる。しかし、実験での最大耐力付近で解が収束不能になったため、塑性変形が大きくなる下降域までの挙動を再現することはできなかった。

図 - 5 に 1 試験体におけるフーチング上面鉄筋のひずみ分布を示している。荷重の増加に伴い載荷側の柱外縁部に大きなひずみを生じる点や分布状況は一致し、フーチング上面のひずみは載荷側の広い範囲に広がっていることが分かる。また、実験・解析結果においてフーチング中央部は荷重の進行に伴い載荷方向に傾くとともに浮き上がりが生じていた。

図 - 6 に 1 試験体における最大荷重付近(荷重 271kN, 変位 20 mm)の最大主ひずみ分布を示す。実験では支配的なひび割れはフーチング上面載荷側に生じ、最終的には載荷側にコーン状の引き抜き破壊を生じた。解析においても載荷側のフーチング上面に大きな引張ひずみがフーチングを左右に広げる方向に発生していることから、この位置で大きなひび割れが生じると考えられる。

これらのことからフーチング破壊メカニズムは、柱部の回転により柱・フーチング接合部上面載荷側に引張力が作用し、損傷は柱・フーチング接合部の載荷側近傍から生じると考えられる。引き抜き側フーチング断面における水平方向ひずみ分布を図 - 7 に示す。フーチング上面鉄筋降伏荷重以降、コンクリートに大きな引張ひずみが発生し、最大荷重時におけるひずみ分布状況ではフーチングの深さ方向 2/3 までが引張状態となっている。このため、終局状態はコンクリートの引張応力によって支配されていると考えられる。

図 - 8, 9 に 2, 3 での引き抜き側フーチング断面における水平方向ひずみ分布を示す。各試験体で変位 20 mm 時のひずみを比較すると、荷重がそれぞれ 271kN, 325kN, 343kN と異なるにも関わらず分布状況や大きさに違いがみられずフーチング上面に大きなひずみが発生している。よって、フーチング耐力の増加は鉄筋量の増加による効果であると考えられる。このことは、2 でも同様でせん断スパン比を大きくしたことにより設計上の鉄筋量が増加したためと考えられる。

4. 結論

フーチングの地震時挙動実験を FEM による 2 次元弾塑性解析により検討し得られた結果をまとめると以下のようなものである。

フーチングの破壊形態は、柱・フーチング接合部における挙動が支配的で、通常の場合、損傷はフーチング上面に生じると考えられる。

フーチングの破壊面を柱前面としたとき、その断面の応力分布は簡易的には上側 2/3 が引張応力となり、その区間におけるコンクリート引張力および鉄筋量が支配的な抵抗力となる。

フーチング上面鉄筋は接合部の損傷に対して有効である。

参考文献：

- 1) David I. Mclean, M. Lee March : Seismic Retrofitting of Bridge Foundations, ACI structural Journal pp.175-182, March-April. 1999
- 2) 建設省土木研究所構造橋梁部基礎研究室：フーチングの設計および補強方法に関する実験的研究，土木研究所資料第 3550 号，1998.3

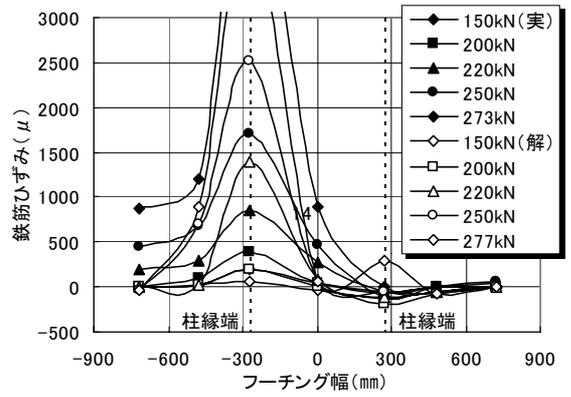


図 - 5 フーチング上面鉄筋ひずみ分布

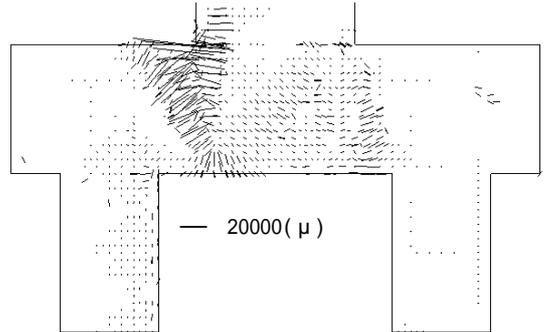


図 - 6 最大主ひずみ分布( 1: 271kN, 20 mm)

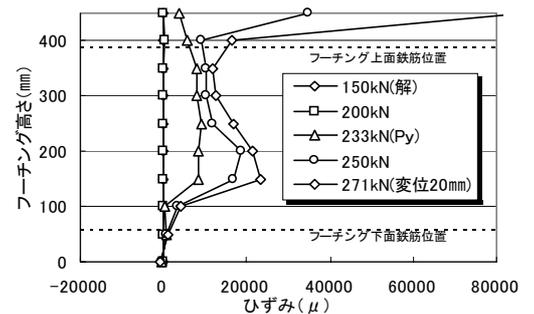


図 - 7 1 フーチング断面水平方向ひずみ分布

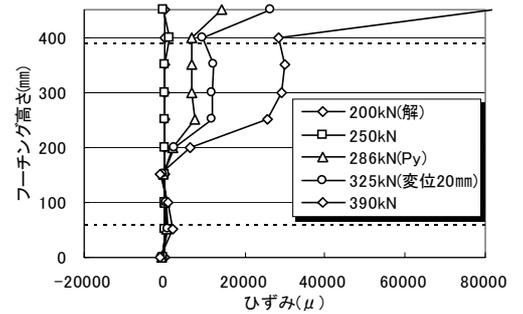


図 - 8 2 フーチング断面水平方向ひずみ分布

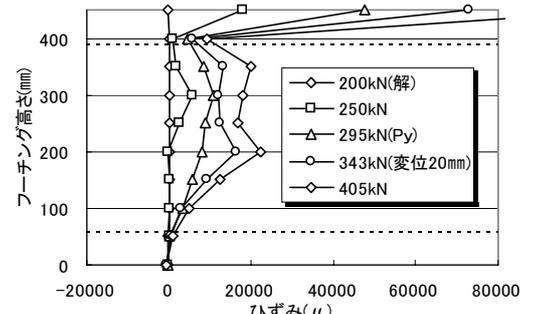


図 - 9 3 フーチング断面水平方向ひずみ分布