

## 載荷方法が異なるフーチングの耐荷特性に関する 実験的検討

江口 康平<sup>1</sup>・有馬 俊<sup>2</sup>・大住 道生<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 国立研究開発法人 土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

<sup>2</sup>正会員 国立研究開発法人 土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

<sup>2</sup>正会員 修士 国立研究開発法人 土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

### 1. はじめに

杭基礎を接合するフーチングは、現在の設計では十分な厚さを設定して剛体とみなせるよう設計するため、地震動が作用しても大きな損傷は生じないと考えられる。しかし、過去の基準を適用した既設フーチングにおいては、兵庫県南部地震等で大きな損傷が生じた事例が報告されており、既設フーチングの耐荷力評価方法の提案が求められている。既設フーチングの地震時の耐荷特性についてはいくつかの検討がされているが<sup>1),2)</sup>、一方向からの単調増加あるいは繰返し回数1回の漸増載荷での検討である。実際の地震の影響を考慮する場合、フーチングには複数方向の繰返し作用が生じ、それにより損傷が発生・進展することで、耐荷特性が変化する可能性が考えられ、既設フーチングの耐荷特性を評価する標準的な方法が求められている。

そこで本検討では、載荷方法が異なる場合のフーチングの耐荷特性の基礎データを収集することを目的に、従来行われてきた一方向載荷に加えて正負交番での載荷を行った。また、各載荷試験では所定の変位毎に3回の繰返し載荷を行う事で、繰返し作用が耐荷性能に与える影響についても検討した。

### 2. 実験概要

載荷試験を行ったフーチング供試体は、実際の橋脚の1/5程度の縮尺としたもので、鋼管杭の基礎を有するものである。実験ケースは載荷条件が異なる2種類で、載荷方向以外は同等の諸元とした。実験条件を表-1に示す。載荷方法は、ジャッキを用い

て柱上部に水平力を加えるものとし、フーチング上面の鉄筋いずれかが降伏した時の変位を基準変位とした。載荷ステップは、一方向載荷の場合、所定の変位まで載荷した後、荷重を2～3kN程度まで除荷し、再度所定の変位になるまで載荷を行う繰返し載荷とした。正負交番載荷については、所定の変位まで正方向に載荷し後、負方向にも基準変位となるまで載荷を行い、2～3kN程度まで荷重を除荷することを1ステップとした。いずれの載荷方法でも、繰返し回数は3回とし、3回終了後、次の設定変位まで載荷を行うものである。

実験の対象としたフーチング供試体の外観形状を図-1に、載荷試験の概要を図-2に示す。載荷はフーチング上面から高さ2mの柱部に水平力を加えるものとし、柱内部に鋼管を配し、固定治具を取付けた上で水平に配置したジャッキにより載荷した。また、支持条件は、杭頭補強鉄筋を配置してフーチングに接合した4本の鋼管杭を鋼製の台座にボルトで固定し、更に反力床にPC鋼棒を用いて台座が移動し

表-1 実験ケースおよび材料特性

| 項目                                                   | CASE1     | CASE2  |
|------------------------------------------------------|-----------|--------|
| 載荷方向                                                 | 一方向載荷     | 正負交番載荷 |
| 各変位の繰返し回数                                            | 3回        |        |
| 計画破壊モード                                              | 曲げ破壊      |        |
| 杭条件                                                  | 鋼管杭 2列×2本 |        |
| コンクリートの設計基準強度(N/mm <sup>2</sup> )                    | 24.0      |        |
| コンクリート強度 $\sigma_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )(材料試験)    | 34.0      |        |
| フーチング主鉄筋降伏点 $\sigma_{sy}$ (N/mm <sup>2</sup> )(材料試験) | 365.0     |        |

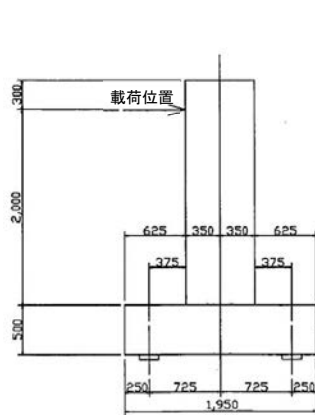


図-1 フーチング供試体形状

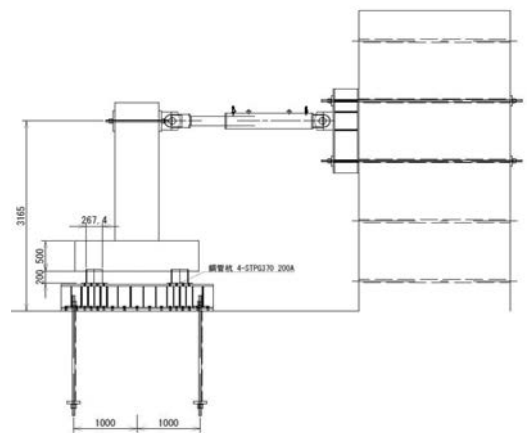


図-2 荷重試験概要

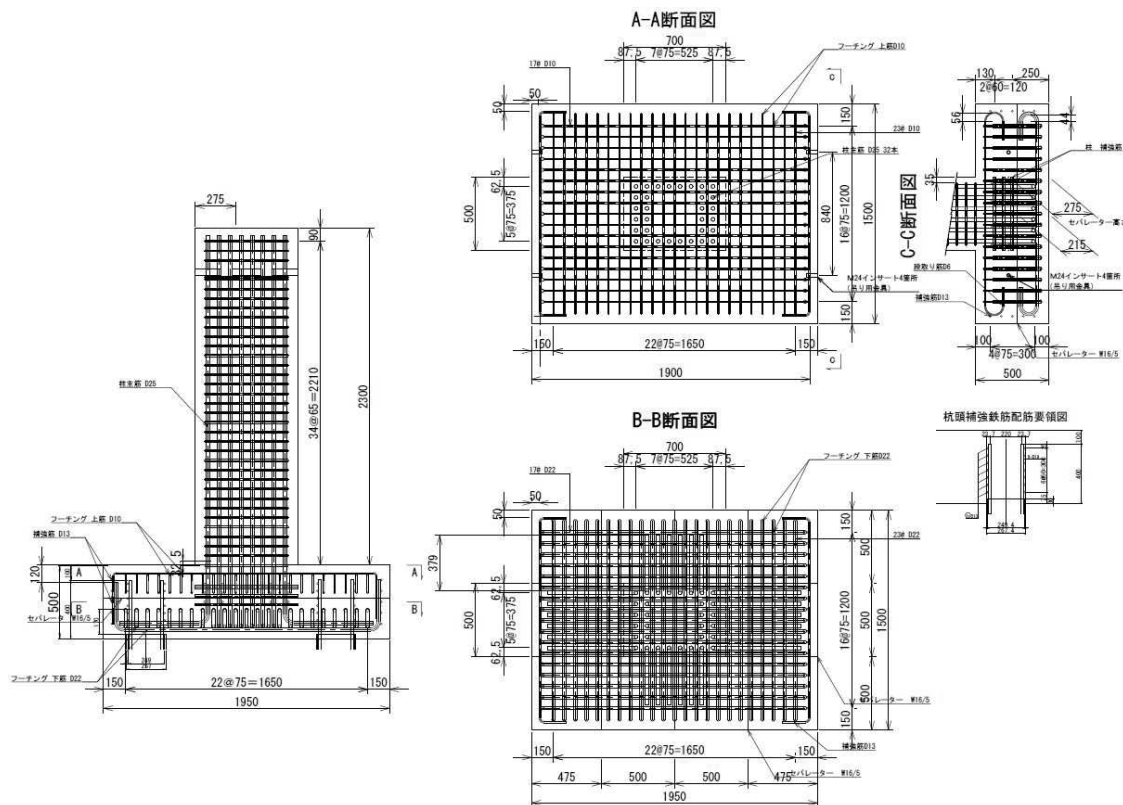


図-3 フーチングの配筋状況

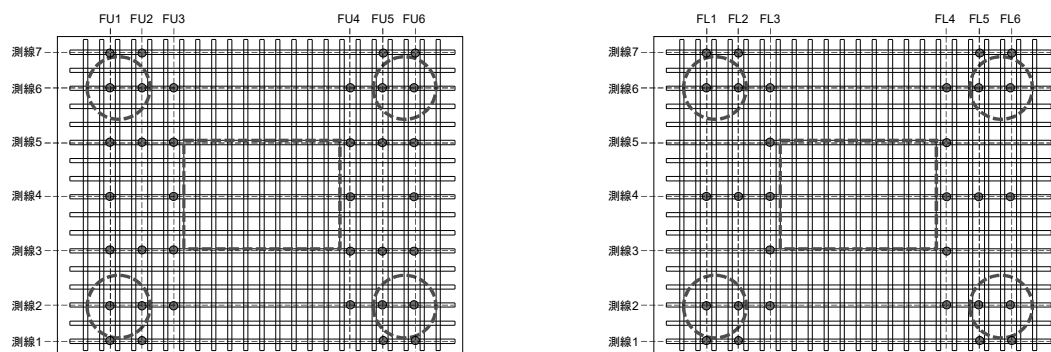


図-4 ひずみゲージ貼付け位置(図中●:ひずみゲージ, 図の左から右方向が正の荷重方向)

左図:フーチング上面鉄筋, 右図:フーチング下面鉄筋

ないよう固定した。鋼管杭に関しては、フーチング下面から台座までの長さが20cmと短いため、大きな変形は生じないとみなしている。

図-3には配筋状況を示す。鋼管杭については、杭の抜け出しを防ぐため、補強鉄筋を設置している。計測項目は、ジャッキ部の荷重、柱部の荷重位置の

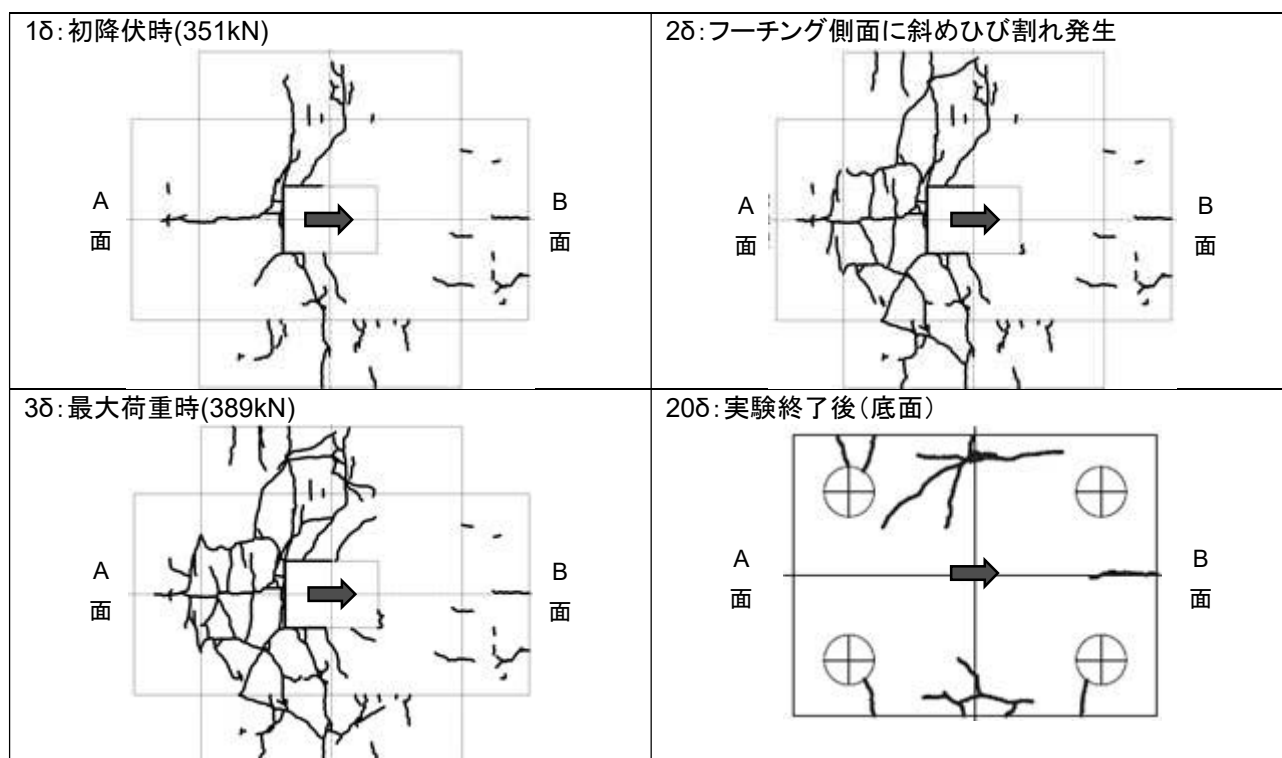


図-5 ひび割れ分布図(一方向載荷試験)

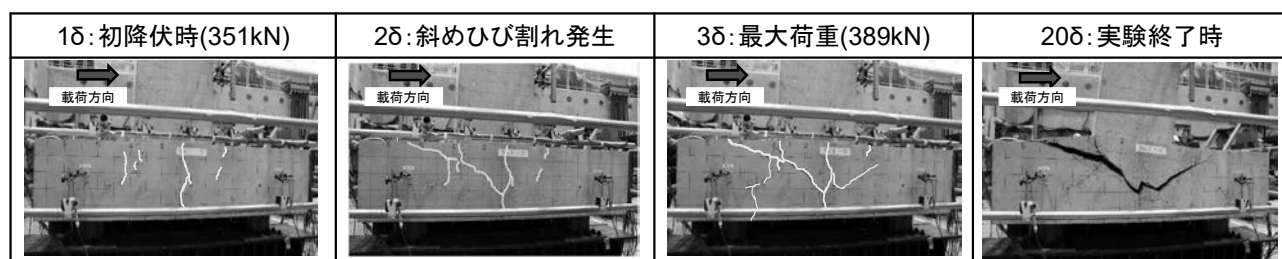


図-6 フーチング右側面の外観(一方向載荷)

変位および、フーチング部の鉄筋ひずみとした。図-4には、フーチング上面および下面鉄筋に貼付けたひずみゲージ設置位置を示す。ひずみゲージの貼付け面は、上面鉄筋は上面に、下面鉄筋は下面に貼付けている。また、載荷試験中には、所定の変位まで3回の繰返し載荷終了時のひび割れ発生状況をスケッチした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 一方向載荷試験

フーチングの展開図に載荷試験時の表面のひび割れ発生状況をスケッチしたものを図-5に、試験中のフーチング側面の外観写真を図-6に、荷重-変位関係を図-7に示す。フーチング上面鉄筋が初めて降伏した荷重は351kN、変位は10mm（以降10mmを1δ）であった。その時のひび割れ分布状況は、フーチング上面のA面側にひび割れが発生し、フーチング側面にも鉛直方向のひび割れが発生しており、柱から水平力が作用することでフーチングに曲げが

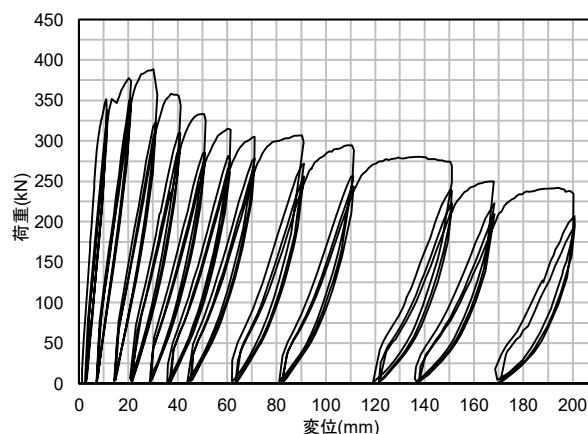


図-7 荷重-変位関係(一方向載荷)

発生していることが推測出来る。2δ時では、フーチング上面のひび割れが進展、増加すると共に、側面には載荷方向からフーチング下縁に向けて斜め方向のひび割れが発生していた。3δ（最大荷重：389kN）は、B面側のフーチング側面にも斜め方向にひび割れが発生している。これは、水平力増加によりA面側が浮き上がりながら、B面側が押し込まれてせん断破壊が生じたと考えられる。それ以降はひび割れ

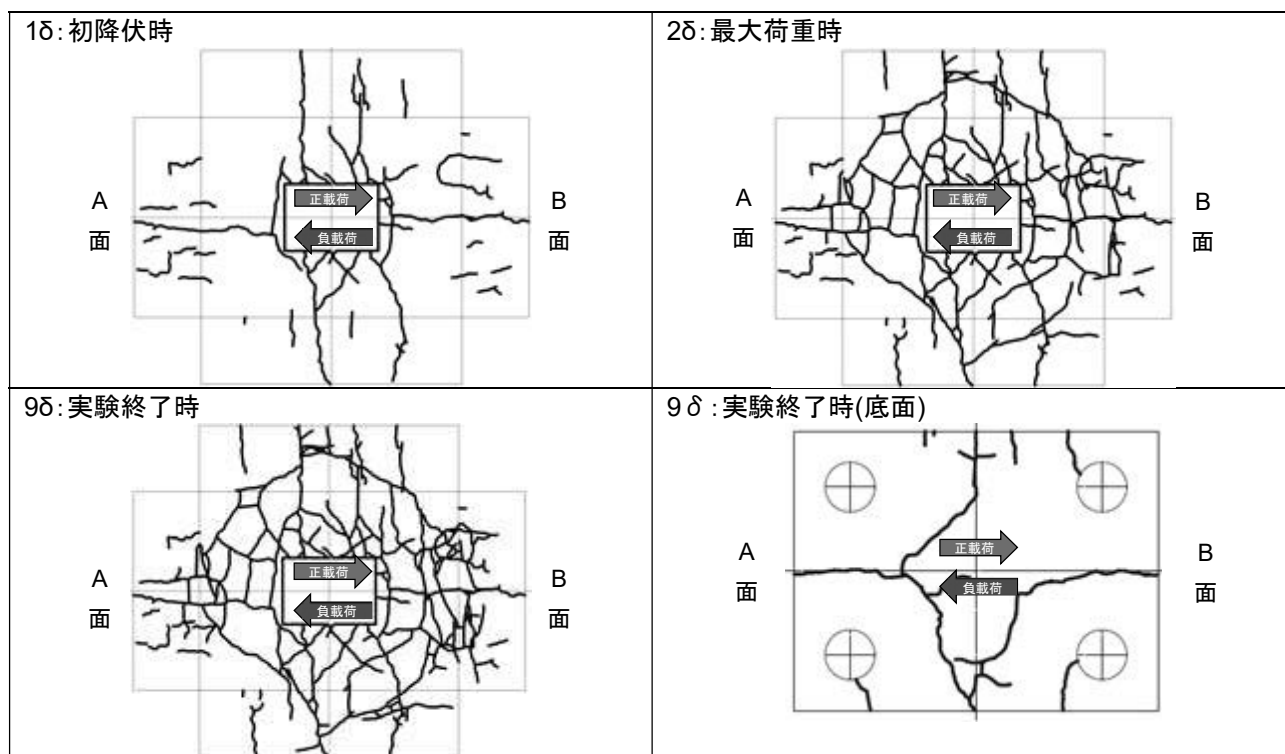


図-8 ひび割れ分布図(正負交番試験)

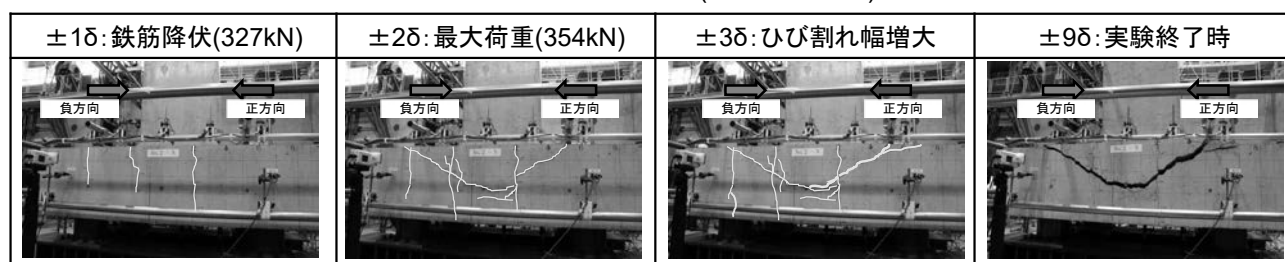


図-9 フーチング左側面の外観(正負交番載荷)

本数の増加は僅かで有り、斜めひび割れのひび割れ幅の増大が支配的になった。最終的には図-6に示す様に、柱が後方に傾斜しながら、斜めひび割れが結合し、円弧状を形成したひび割れを滑るように変位していた。また、実験終了後に供試体底面のひび割れ状況を確認したところ、柱直下にはひび割れは確認されず、フーチング側面付近に載荷方向に平行なひび割れが確認された。荷重-変位関係を見ると鉄筋初降伏(1δ)以降も3δまで荷重は増加し続け、斜めひび割れが発生したした以降も緩やかに荷重が減少し、20δまで載荷しても、脆性的な破壊は確認されなかった。また、3回繰り返した場合でも履歴は安定した形状となっていた。

### 3.2 正負交番載荷試験

正負交番載荷試験時のフーチング表面のひび割れ発生状況を図-8に、外観写真を図-9に、試験中の荷重-変位関係を図-10に示す。

正負交番載荷を行った際に鉄筋が降伏した荷重は327kN、変位は一方向載荷と同等の10mm（以降

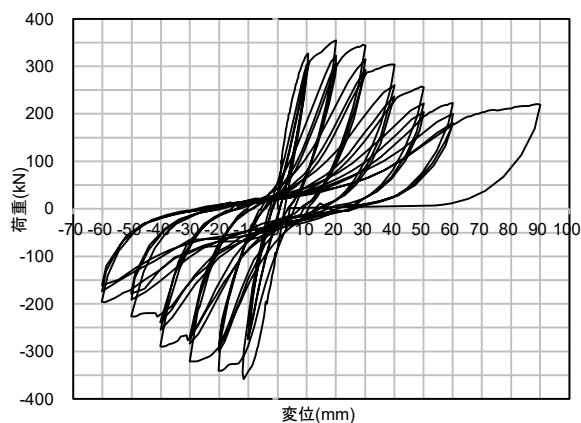


図-10 荷重-変位関係(正負交番)

10mmを1δ)であった。1δ時のひび割れ状況は、一方向載荷の場合と同様にフーチング側面には鉛直ひび割れが発生していた。また、その発生位置は柱を中心としてA面側およびB面側に線対称に発生していた。最大荷重である+2δ時は、フーチング上面には柱を中心放射状のひび割れが発生しており、フーチング側面には斜め方向のひび割れがA面側、B面側ともに発生し、フーチング側面中央付近で連結

する状況となっていた。それ以降は、変位を増加させても側面の斜めひび割れが開閉して、柱が傾斜する事で変位を吸収するようになっていた。実験終了時(9δ)のひび割れ分布状況は、フーチング上面のひび割れ数が増えたものの、傾向は28時と大きく変化はない。側面に関しては、図-9で示す様に、28時点で発生した斜めひび割れの内側の柱部およびその周辺が鉛直方向に浮き上がるような破壊形態となっていた。9δ終了時の底面のひび割れ分布状況は、一方向荷重の場合と異なり、柱底面付近からフーチング端部に向かってひび割れが発生していたが、フーチング上面のひび割れ状況との関係は不明である。

図-10に示す荷重変位関係を見ると、斜めひび割れが発生した3δ以降は荷重が減少している。但し、図-9に示した様に非常に大きなひび割れが発生していたにもかかわらず、荷重の急激な低下は確認されなかった。これは、橋脚等と異なり、フーチングは版部材であるため、荷重を支持していた箇所が損傷しても他の箇所でも荷重を支持することが出来るためと考えられる。繰返しに対しては、一方向荷重に比べて履歴の傾きが小さくなっているものの、2サイクル目以降も安定した履歴が得られており、繰返しの影響は小さいと考えられる。

### 3.3 荷重方法の比較

一方向荷重試験を行った場合と、正負交番荷重を行った場合の各サイクルのピークを抽出した包絡線を図-11、図-12にそれぞれ示す。なお、正負交番荷重に関しては、正方向荷重の結果のみを示す。まず一方向荷重の結果を見ると、1サイクル目と比べて2サイクル目で50kN程度荷重が低下しているが、3サイクル目に着目すると1サイクル目から2サイクル目に移行する際のような荷重の低下は見られなかった。また、いずれのサイクルも最大荷重以降は緩やかに荷重が低下していた。

正負交番荷重を見ると、いずれの変位でも1サイクル目と2サイクル目の荷重低下は50kN程度と一方向荷重と同程度であり、3サイクル目も一方向荷重と同様の傾向であった。しかし、最大荷重以降の荷重低下は一方向荷重よりも大きい。これは、繰返しに加え、負方向の荷重により、正方向荷重の際に圧縮力を負担するコンクリートが損傷したことや、A面およびB面の柱付近のフーチング上面鉄筋が座屈した影響が考えられる。ここで、荷重方法が異なることで荷重の低下傾向が変化した原因を考察する為に、フーチング上面鉄筋のひずみ発生状況を分布図で表したものを図-13に示す。正負交番荷重については、正方向荷重と負方向荷重それぞれ終了時のひ

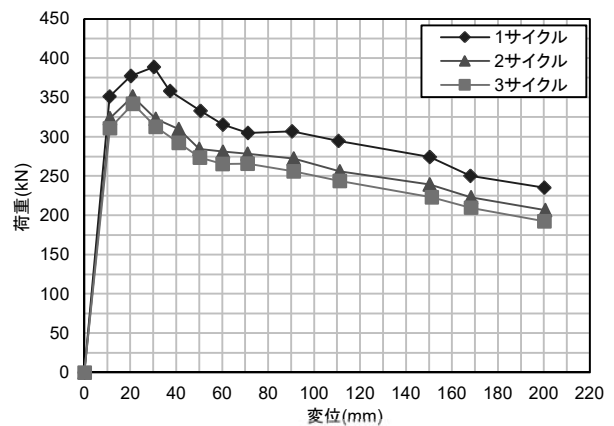


図-11 包絡線(一方向荷重)

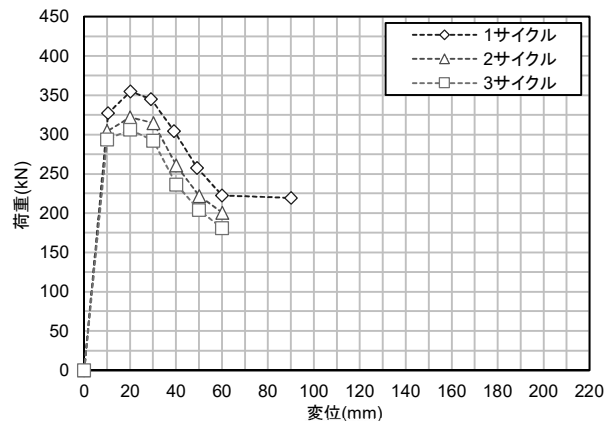


図-12 包絡線(正負交番荷重)

ずみ分布状況を示す。本検討で使用した鉄筋の降伏ひずみは $1920\mu$ であった。図中の凡例については鉄筋に生じたひずみ程度に応じて塗りつぶしのパターンを変えて示している。まず、一方向荷重の場合、A面側の曲げ照査断面上(FU3)の鉄筋が最初に降伏しており、B面側の鉄筋には圧縮ひずみが発生している。28時点では、FU3の引張ひずみが増加しながら、鋼管杭がある箇所に向けて引張ひずみが発生しており、FU2線上の鉄筋にも降伏ひずみに相当する引張ひずみが発生している。また、B面側も鋼管杭が設置されている箇所に向けて圧縮ひずみが発生している状況が確認できる。最大荷重時に相当する38時は、A面側のFU3線上の全鉄筋が概ね降伏しており、またA面側最外縁のFU1線上鉄筋にも降伏ひずみを上回るひずみが計測された。B面側については、28時点と同様の傾向が確認された。また、杭中心位置より外縁側のFU6線上には数十 $\mu$ 程度の圧縮ひずみしか確認されていない。以上のことより一方向荷重の場合、フーチング上面鉄筋に引張力が発生するA面側の全面で引張力を支持し、圧縮力についてはFU4およびFU5までの範囲で支持していると考えられる。

正負交番荷重の場合、1δでは正荷重時はFU3、負荷重時はFU4にて鉄筋の降伏が確認され、柱を挟んで反対側では圧縮ひずみが確認された。斜めひび割れが発生した28目について、まず正荷重に着目する

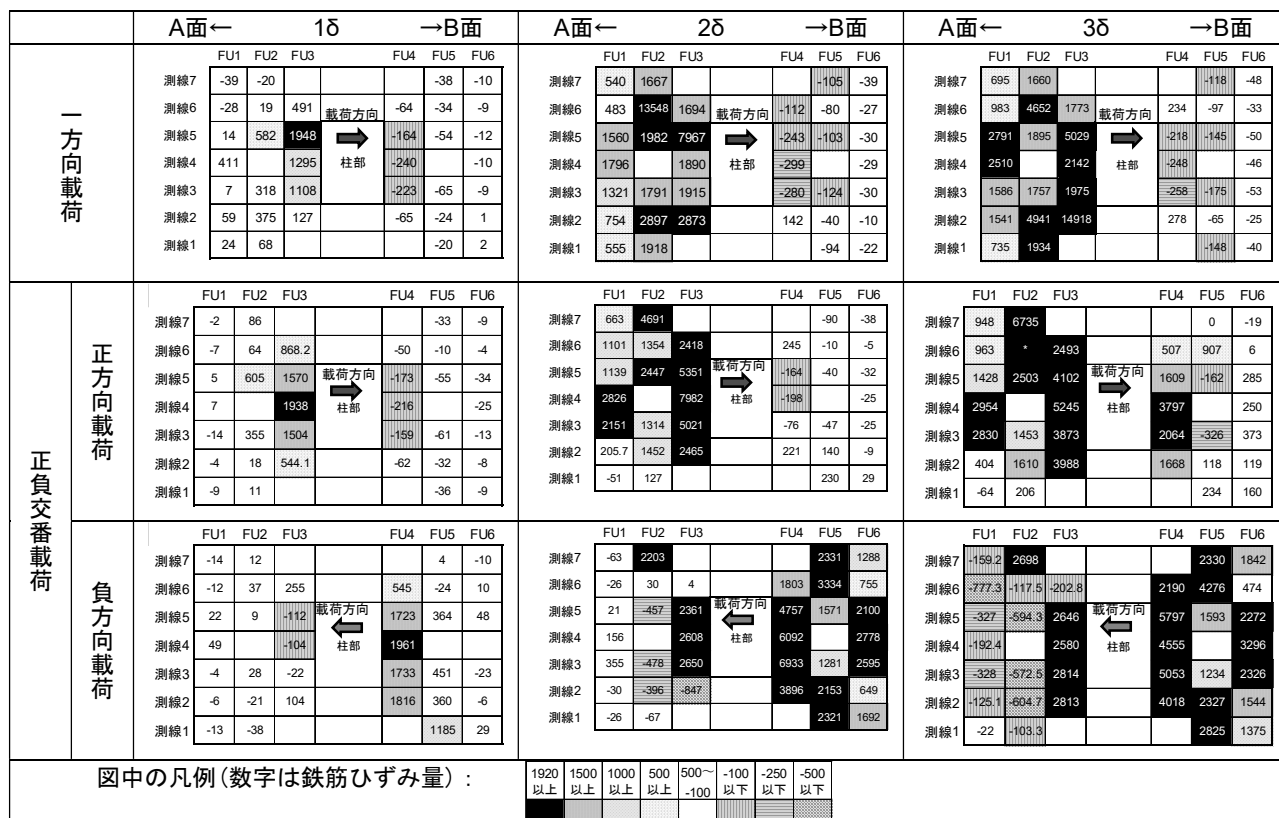


図-13 鉄筋ひずみの分布状況

と、FU3線上の鉄筋が全て降伏ひずみを上回り、それよりも外側のFU1、FU2線上の鉄筋も複数箇所降伏ひずみを上回っていた。また、B面側の鉄筋に生じていた圧縮ひずみは同変位の一方向載荷よりも小さい傾向であった。負載荷についてはFU4~FU6線上の鉄筋が複数箇所降伏ひずみを上回るひずみが発生していたが、圧縮ひずみが発生すると考えられるFU3線上には降伏ひずみを上回る引張ひずみが残留していた。3δ時は、正載荷時のFU1、負載荷時のFU6の位置で一方向載荷と同様に引張ひずみが確認された。一方、負載荷時の載荷方向の奥側(FU1)を見ると測線2~測線7の範囲で100μ以上の圧縮ひずみが発生しており、一方向載荷時の載荷方向奥側(FU6)とひずみ分布の傾向が異なっていた。

この原因について考察する。正負交番載荷の場合、正載荷により鉄筋が引張り降伏した後、反対方向の載荷により鉄筋の座屈が生じると考えられるが、更に、正載荷を受けると、かぶりコンクリートの剥離を伴いながら鉄筋が浮き上がり、コンクリートの付着が消失する。その状態で負載荷を受けると、鉄筋が押し曲げられてたわんだ状態となり、荷重を支持する能力が低下したと考えられる。それにより、載荷変位が増加するほどより外側の損傷のない部位で荷重を受け持つようになり、一方向載荷の場合と比べて、同変位でも荷重が小さくなったと考えられる。但し、今回の結果はひずみゲージで得られた局所的

な結果であり、本実験の結果を踏まえ、解析的手法なども用いてフーチングの耐荷特性を適切に評価する方法を引き続き検討する必要がある。

#### 4.まとめ

フーチングに対して、3回繰返しの一方向載荷及び正負交番載荷を行い、得られた知見を次に示す。

- (1) 正負交番載荷を行った場合、一方向載荷に比べて荷重の低下は顕著になるが、いずれの載荷方法でも急激な崩壊は確認されず、じん性的な破壊であった。
- (2) 正負交番載荷では柱周辺の鉄筋が降伏後、逆方向の力を受けることで座屈したことで、より外側の部位で荷重を支持した可能性が考えられる。

#### 参考文献

- 1) 幸左賢二，古池正宏，森田修二，水田崇志：フーチングの損傷メカニズムに関する実験的検討，第2回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.75-82,1998.
- 2) 安藤高士，服部匡洋，篠原聖二：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，pp.501-506,2017.