

# 論文 上側引張を受ける杭基礎フーチングにおける杭および橋脚の軸方向鉄筋の定着長がせん断耐力に及ぼす影響

角野 拓真\*1・轟 俊太郎\*2・田所 敏弥\*3

**要旨：**上側引張を受ける杭基礎フーチングを模擬した2次元FEMモデルを用いて、杭あるいは橋脚の軸方向鉄筋の定着長が破壊性状や耐力に及ぼす影響の把握を目的に、それらをパラメータとした解析を行った。必要定着長が十分に確保され、かつフーチングの上下側軸方向鉄筋まで定着している場合はせん断破壊となり、必要定着長が比較的小さい場合は、杭あるいは橋脚がコーン状に抜け出す破壊となる。いずれの破壊もフック先端から進展する斜めひび割れを跨ぐ補強鉄筋が降伏することで最大荷重に至ることから、上側引張を受ける杭基礎フーチングの耐力は、杭あるいは橋脚の軸方向鉄筋の定着長に依存することがわかった。

**キーワード：**間接支持、杭基礎フーチング、定着長、せん断耐力、FEM

## 1. はじめに

杭基礎フーチングの設計においては、一般に地震時のせん断力に対する照査によって部材諸元が決定される。現行の設計法では、地震時に下側引張となるスパンに対しては直接支持部材として設計せん断圧縮破壊耐力により照査を行い、上側引張となるスパンに対しては間接支持部材としてせん断耐力の照査を行う<sup>1)</sup> (図-1)。

上側引張を受ける場合のせん断耐力について、筆者らは、せん断補強鉄筋が配置される場合、杭あるいは橋脚の軸方向鉄筋先端からフーチングの軸方向鉄筋がなす斜めひび割れ面を跨ぐように配置されたせん断スパン内のせん断補強鉄筋が受け持つせん断力 (以降、 $V_s$ ) により、せん断耐力を評価する方法を提案してきた<sup>2)</sup>。しかし、杭あるいは橋脚の軸方向鉄筋の定着長に着目した検討事例は少なく、せん断耐力に及ぼす影響は不明確である。

そこで、杭基礎フーチングを模擬した有限要素解析 (以降、FEM) により、筆者らが過年度に実施した杭基礎フーチングの単位幅を想定した鉄筋コンクリート (以降、RC) 梁を用いた載荷実験<sup>3)</sup>との比較を行い解析モデルの検証を行うとともに、杭および橋脚の軸方向鉄筋の定着長をパラメータとしたFEM解析により、それらの定着長が上側引張を受ける杭基礎フーチングの破壊性状や耐力に及ぼす影響について検討を行った。

## 2. 解析概要

本研究では、汎用有限要素解析プログラム DIANA (Ver. 10.2) を用いて2次元FEM解析を行った。本研究に用いる解析モデルは、筆者らが過年度に実施した載荷実験<sup>3)</sup>に用いた試験体の形状を基本として、その試験体の1/2を対象とした2次元モデルとした。図-2に解析モデル、

表-1に解析対象とした試験体の諸元、図-3にNo.1試験体の形状、図-4にNo.1試験体の載荷状況を示す。解析モデルは、要素寸法を概ね25mmとし、モデル内に橋脚、杭およびフーチングの軸方向鉄筋、鉄筋の曲げ加工部であるフックならびにせん断補強鉄筋を埋込み鉄筋要素としてモデル化した。また、杭の軸方向鉄筋の下部に

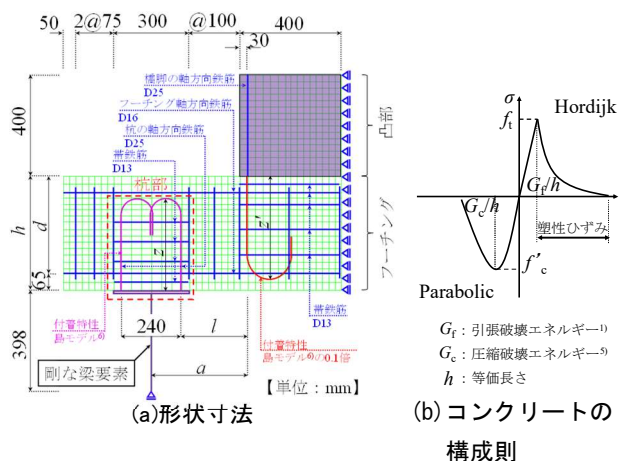
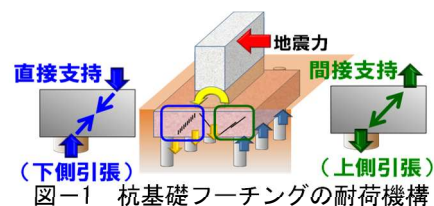


図-2 解析モデル

\*1 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造研究室 研究員 (正会員)

\*2 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造研究室 副主任研究員 工修 (正会員)

\*3 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造研究室 室長 博士 (工学) (正会員)

表-1 解析対象とした試験体の諸元

| 試験体<br>No. | $l$<br>(mm) | $h$<br>(mm) | $z$<br>(mm) | $z'$<br>(mm) | $l/h$ | $f'_c$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $f_t$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $E_c$<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | せん断補強鉄筋 |                                  |                                |              | $V_{exp}$<br>(kN) |
|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|----------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------------|
|            |             |             |             |              |       |                                |                               |                                | 呼び名     | $f_{sy}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $E_s$<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | $p_w$<br>(%) |                   |
| 1          | 260         | 450         | 377         | 420          | 0.6   | 26.6                           | 2.77                          | 28.2                           | D10     | 390                              | 174                            | 0.48         | 260               |
| 2          | 460         | 450         | 377         | 420          | 1.0   | 23.7                           | 2.40                          | 27.4                           | D10     | 390                              | 175                            | 0.48         | 232               |
| 3          | 660         | 450         | 377         | 420          | 1.5   | 24.5                           | 2.27                          | 27.5                           | D10     | 390                              | 175                            | 0.48         | 249               |

ここに、 $l$ : 橋脚の軸方向鉄筋から杭の軸方向鉄筋までの距離、 $h$ : 部材高さ、 $z$ : 杭の軸方向鉄筋の定着長、 $z'$ : 橋脚の軸方向鉄筋の定着長、 $f_c$ : コンクリートの圧縮強度、 $f_t$ : コンクリートの引張強度、 $E_c$ : コンクリートの弾性係数、 $f_{sy}$ : セン断補強鉄筋の降伏強度、 $E_s$ : セン断補強鉄筋の弾性係数、 $p_w$ : セン断スパン内のセン断補強鉄筋比、 $V_{exp}$ : 実験により得られた最大せん断力

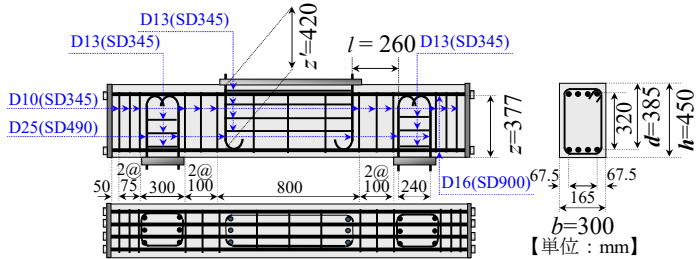


図-3 試験体の形状 (No. 1 試験体)

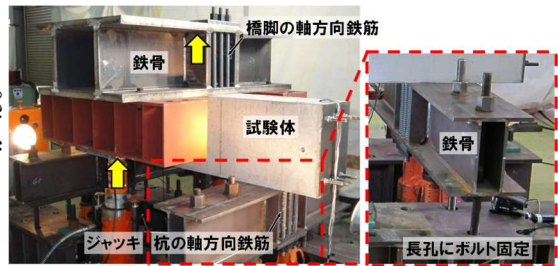


図-4 載荷状況 (No. 1 試験体)

は剛な梁要素を水平方向に設け、フーチングとの間に接線および法線方向に剛なインターフェースを挿入した。さらに、その下方には剛な梁要素を鉛直方向に設け、その下端を鉛直方向に拘束することで杭支点部の回転を許容し、載荷試験時の支点条件を再現した。試験体への載荷は、杭の軸方向鉄筋を固定し、橋脚の軸方向鉄筋を接続した鉄骨に鉛直力を作用させることにより行った。そこで、解析では橋脚の軸方向鉄筋の上端部に鉛直上向きの強制変位として与えた。コンクリートの圧縮特性は **Parabolic** を用いて、要素の拘束状態に応じた圧縮強度<sup>3)</sup>とひび割れ発生後の圧縮強度の低減<sup>4)</sup>を表現するモデルを用いた。なお、等価長さ  $h$  は、要素面積の 2 倍の平方根を用いた。ひび割れモデルは、全ひずみ固定ひび割れモデルを用いた。解析対象とした実験結果を再現できるように、せん断伝達剛性は、要素が引張強度に達した場合に、初期せん断伝達剛性の  $1 \times 10^{-4}$  倍となるよう設定した。材料の特性値は、表-1、表-2 および表-3 に示す値を用いた。ただし、引張破壊エネルギー  $G_f$  は、鉄道構造物等設計標準・解説（コンクリート構造物）<sup>1)</sup>を参考に算定し、圧縮破壊エネルギー  $G_c$  は、Nakamura ら<sup>5)</sup>の提案する式を参考に算定した。試験体の断面寸法は、幅 300mm、高さ 450mm、有効高さ 385mm であるが、No.2 および No.3 試験体は曲げ破壊しないようさらに等曲げ区間断面を 400mm 増厚している。その増厚部の範囲の軸方向鉄筋は、節がなくなるまで **VM** テープを巻き、コンクリートと鉄筋の付着を取り除いている。そのため、フーチングのコンクリートは材料非線形性を考慮するが、等曲げ区間の増厚部を再現した凸部は弾性体とし、その部分の鉄筋の付着は考慮しないこととした。フーチングの軸方向鉄筋とせん断補強鉄筋は、完全付着とした。

杭および橋脚の軸方向鉄筋とコンクリートとの付着

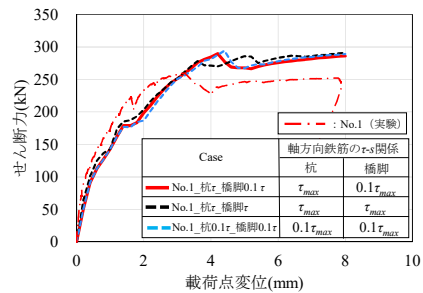


図-5 せん断力-載荷点変位関係 (No.1 試験体)

特性は島モデル<sup>9)</sup>を用いて、付着特性を変動させた解析を行い、それぞれの付着特性を設定することとした。図-5に、No.1 試験体の杭あるいは橋脚の軸方向鉄筋の  $\tau$ - $s$  関係を変動させ得られたせん断力-載荷点変位関係を示す。剛性および最大荷重に大きな変動は見られず、杭あるいは橋脚の軸方向鉄筋の付着特性が解析結果に与える影響は小さいと考えられる。載荷実験では、載荷初期において橋脚の軸方向鉄筋に沿うひび割れが発生し、かつ断面方向に貫通していたのに対して、杭の軸方向鉄筋に沿うひび割れの発生は確認できなかった。このことから、実験時の杭の軸方向鉄筋とコンクリートの付着力と比較して、橋脚の軸方向鉄筋とコンクリートの付着力は大きく低下していると考えられる。そのため、本研究では杭の軸方向鉄筋の付着特性に島モデル<sup>9)</sup>を用い、それに対して十分に小さい値として橋脚の軸方向鉄筋の付着特性に島モデル<sup>9)</sup>を 0.1 倍したものをを用いることとした。

いずれの試験体も、杭および橋脚の軸方向鉄筋には D25 (SD490) を用い、杭の軸方向鉄筋のフック先端までの定着長は 377mm、橋脚の軸方向鉄筋の定着長は 420mm である。せん断スパン内のせん断補強鉄筋は、D10 (SD345) を 100mm 間隔で配置し、せん断補強鉄筋比は 0.48% である。なお、曲げ破壊防止のため、フーチングの

軸方向鉄筋には熱処理し高強度化した降伏強度1000N/mm<sup>2</sup>相当の鉄筋を用いている。粗骨材の最大寸法は13mmである。なお、杭の軸方向鉄筋を模擬した支点部は、軸方向鉄筋を接続した鉄骨を長孔によりボルト止めし、回転を許容する構造としている。

### 3.実験結果との比較

図-6に解析対象とした試験体のせん断力-荷重点鉛直変位関係を示す。図中には併せてせん断補強鉄筋が降伏した点を示す。凡例の鉄筋番号は、図-7および図-8に示すものである。No.1試験体に着目すると、最大荷重後の一時的な荷重低下およびそれ以降にせん断補強鉄筋が荷重を負担することによるせん断力の向上を概ね再現していることが分かる。また、No.3試験体に着目すると、実験と比べて剛性が小さいが、最大荷重は実験と概ね同等となること分かる。

図-7にNo.1、図-8にNo.3試験体の最大荷重時のひび割れひずみと実験時のひび割れ状況を示す。ひび割れひずみとは、要素が引張強度に達した後に増加する塑性ひずみ(図-2(b))であり、ここでは、その発生方向に対して法線方向に表示したものを示す。

No.1試験体実験時は、図-7(b)に示すように荷重初期に橋脚の軸方向鉄筋付近に曲げひび割れが発生し(図-7(b)(1))、その後橋脚の軸方向鉄筋のフック先端に向かい斜めひび割れが進展する(図-7(b)(2))。最終的には橋脚の軸方向鉄筋のフック先端から45度にひび割れが進展し最大荷重に至る(図-7(b)(3))。図-7(a)に着目すると、橋脚の軸方向鉄筋のフック先端から45度に進展するひび割れひずみが卓越し、それを跨ぐせん断補強鉄筋が降伏し、最大荷重に至ることを確認した。

No.2およびNo.3試験体実験時は、荷重初期に橋脚軸方向鉄筋付近に曲げひび割れが生じ(図-8(b)(1))、徐々に杭側方向に向かい複数の曲げひび割れが発生する(図-8(b)(2))。それらの曲げひび割れは橋脚の軸方向鉄筋のフック先端に向かい斜めひび割れに進展し、最終的には橋脚の軸方向鉄筋のフック先端から45度で発生する斜めひび割れがフーチングの引張鉄筋に沿うひび割れに進展し最大荷重に至る(図-8(b)(3))。図-8(a)に着目すると、橋脚の軸方向鉄筋のフック先端から45度方向に進展するひび割れひずみが卓越し、そのひび割れひずみを跨ぐせん断補強鉄筋が降伏するとともに、フーチングの引張鉄筋に沿ってひび割れひずみが進展することで最大荷重に至ることを確認した。なお、No.2およびNo.3試験体は、最大荷重後の明確な荷重低下が確認できなかったため、図-7および図-8中の鉄筋番号1,2および3のひび割れひずみを跨ぐせん断補強鉄筋が降伏した点を最大荷重とした。また、図-8(a)に示すように橋脚の軸

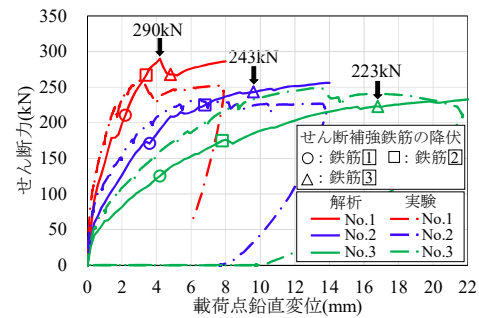


図-6 せん断力-荷重点変位関係

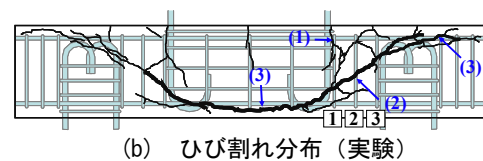
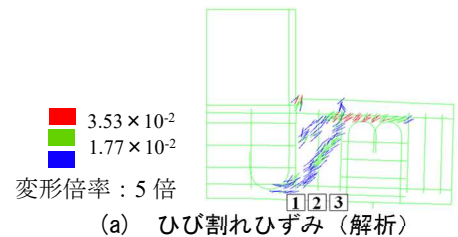


図-7 ひび割れひずみとひび割れの分布 (No.1)

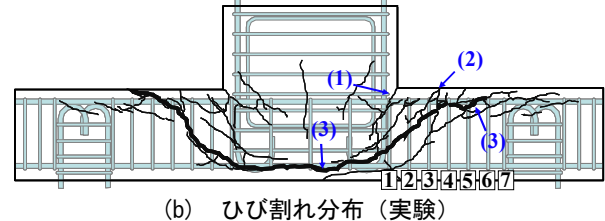
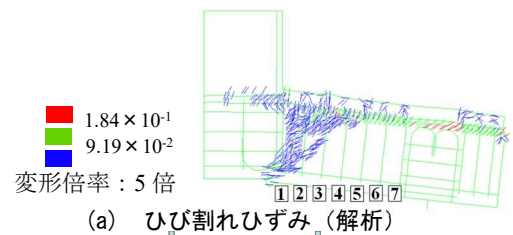


図-8 ひび割れひずみとひび割れの分布 (No.3)

方向鉄筋のフック先端付近のひび割れひずみは、下側のコンクリート縁端部にまで達しており、その45度に進展するひび割れひずみ面が破壊に対して支配的な要因となっていると考えられる。

これらのことから、本研究で用いた解析モデルは変形の定量的な評価は困難であるが、最大荷重の相対的な評価および破壊性状は十分な精度で確認することが可能であると考えられる。

### 4. 上側引張を受ける杭基礎フーチングの破壊性状および耐荷機構

#### (1) 杭の軸方向鉄筋の定着長を変動させた場合

表-2に解析ケースを示す。Case1からCase6の断面諸元は荷重実験の試験体と同じとし、Case7からCase15は、

表-2 解析ケース一覧（杭の軸方向鉄筋の定着長を変動させた場合）

| Case   | $l$<br>(mm) | $h$<br>(mm) | $d$<br>(mm) | $b$<br>(mm) | $a$<br>(mm) | $z$<br>(mm) | $z'$<br>(mm) | $a/d$ | $a/z$ | $f_c'$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | せん断補強鉄筋 |                                  |                                |              | $V_{max}$<br>(kN) |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------|-------|--------------------------------|---------|----------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------------|
|        |             |             |             |             |             |             |              |       |       |                                | 呼び名     | $f_{sy}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $E_s$<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | $\rho_s$ (%) |                   |
| Case1  | 260         | 450         | 385         | 300         | 380         | 377         | 420          | 1.0   | 1.0   | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48         | 283               |
| Case2  | 260         | 450         | 385         | 300         | 380         | 225         | 420          | 1.0   | 1.7   | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48         | 237               |
| Case3  | 460         | 450         | 385         | 300         | 580         | 377         | 420          | 1.5   | 1.5   | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48         | 258               |
| Case4  | 460         | 450         | 385         | 300         | 580         | 225         | 420          | 1.5   | 2.6   | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48         | 246               |
| Case5  | 660         | 450         | 385         | 300         | 780         | 377         | 420          | 2.0   | 2.1   | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48         | 234               |
| Case6  | 660         | 450         | 385         | 300         | 780         | 225         | 420          | 2.0   | 3.5   | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48         | 230               |
| Case7  | 560         | 900         | 835         | 300         | 680         | 827         | 870          | 0.8   | 0.8   | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48         | 544               |
| Case8  | 560         | 900         | 835         | 300         | 680         | 377         | 870          | 0.8   | 1.8   | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48         | 350               |
| Case9  | 560         | 900         | 835         | 300         | 680         | 225         | 870          | 0.8   | 3.0   | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48         | 308               |
| Case10 | 960         | 900         | 835         | 300         | 1080        | 827         | 870          | 1.3   | 1.3   | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48         | 525               |
| Case11 | 960         | 900         | 835         | 300         | 1080        | 377         | 870          | 1.3   | 2.9   | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48         | 345               |
| Case12 | 960         | 900         | 835         | 300         | 1080        | 225         | 870          | 1.3   | 4.8   | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48         | 301               |
| Case13 | 1360        | 900         | 835         | 300         | 1480        | 827         | 870          | 1.8   | 1.8   | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48         | 404               |
| Case14 | 1360        | 900         | 835         | 300         | 1480        | 377         | 870          | 1.8   | 3.9   | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48         | 345               |
| Case15 | 1360        | 900         | 835         | 300         | 1480        | 225         | 870          | 1.8   | 6.6   | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48         | 304               |

ここに、 $b$ ：想定部材幅， $a$ ：せん断スパン（ $=l+120$  mm）， $V_{max}$ ：解析により得られた最大せん断力

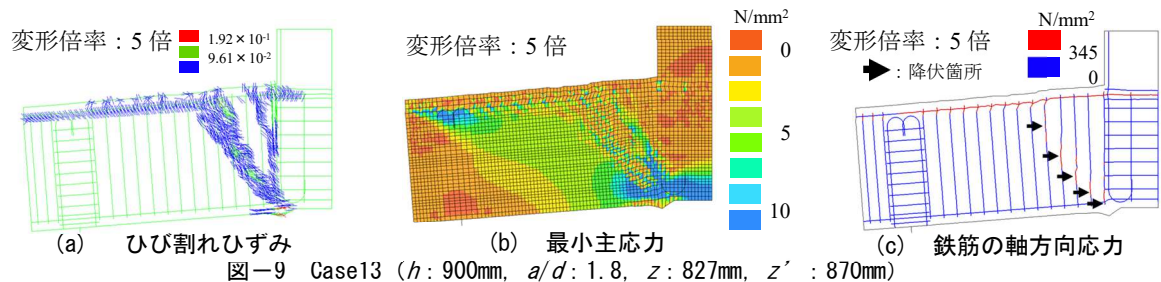


図-9 Case13 ( $h$ : 900mm,  $a/d$ : 1.8,  $z$ : 827mm,  $z'$ : 870mm)

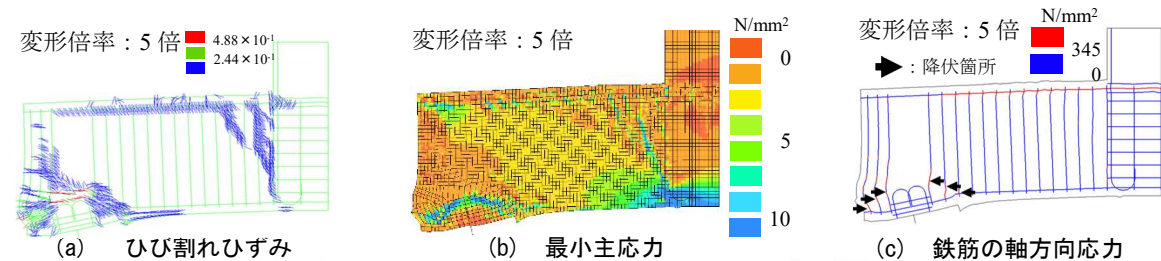


図-10 Case15 ( $h$ : 900mm,  $a/d$ : 1.8,  $z$ : 225mm,  $z'$ : 870mm)

その断面形状を基本として  $h$  を 900mm に拡張し、載荷実験と同程度の  $l/h$  となるよう  $l$  を設定した。橋脚の軸方向鉄筋を圧縮鉄筋付近まで十分に定着させ、杭の軸方向鉄筋の定着長  $z$  をパラメータとして解析を行った。なお、本研究においては、定着長が短くなることによる破壊性状の違いを確認するため、 $z=827$ mm のケースを除き、杭の軸方向鉄筋が必要とする定着長<sup>1)</sup>に満たない極端に短い定着長の場合を想定した。なお、必要とする定着長は、フックの先端も含め 575mm である。また、コンクリートの圧縮強度  $f'_c$  は 24N/mm<sup>2</sup>、最大粗骨材寸法は 13mm を用いた。図-9 に Case13、図-10 に Case15 の最大荷重時のひび割れひずみ、最小主応力および鉄筋の軸方向応力のコンター図を示す。

Case13 は、曲げひび割れと考えられるひび割れひずみが橋脚の軸方向鉄筋付近に初期段階で発生し、徐々に杭側方向に向かい複数のひび割れひずみが発生した。この曲げひび割れと考えられるひび割れひずみは、橋脚の軸方向鉄筋のフック先端に向かい進展し、最終的には橋脚の軸方向鉄筋のフック先端から 45 度にひび割れひずみが著しく進展し、その後引張鉄筋に沿うひび割れひずみ

となり最大荷重に至った。図-9(b)に着目すると、圧縮ストラットは、橋脚軸方向鉄筋のフックのせん断スパン側から杭の軸方向鉄筋の中心に向けて形成されているものの、応力は広範囲に分散しており、最も圧縮力が卓越する圧縮域においても圧縮強度以下であった。図-9(c)に着目すると、橋脚の軸方向鉄筋のフック先端から 45 度に進展するひび割れひずみを跨ぐせん断補強鉄筋が降伏していることが分かる。これらのことから、実験結果と同様に橋脚の軸方向鉄筋のフック先端から 45 度に発生するひび割れひずみが進展し、それを跨ぐせん断補強鉄筋が降伏することによりせん断破壊に至ることが分かる。

Case15 は、Case13 と同様に引張鉄筋から橋脚の軸方向鉄筋に向かって斜めひび割れが進展するものの、最終的に杭の軸方向鉄筋のフック先端からハの字に斜めひび割れが生じ、コーン状に破壊する。図-10(c)に着目すると、せん断スパン内のせん断補強鉄筋だけでなく、杭よりも外側に配置された補強鉄筋も降伏していることが分かる。これらのことから、杭の定着長が短くなる場合 (Case2, 4, 6, 8, 9, 11, 12 および 14 も同様)、杭の軸方向鉄筋に生じる引張力により、杭本体が抜け出して破壊に至る。

表-3 解析ケース一覧（橋脚の軸方向鉄筋の定着長を変動させた場合）

| Case   | $l$<br>(mm) | $h$<br>(mm) | $d$<br>(mm) | $b$<br>(mm) | $a$<br>(mm) | $z$<br>(mm) | $z'$<br>(mm) | $a/d$ | $a/z'$ | $f'_c$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | せん断補強鉄筋 |                                  |                                |           | $V_{max}$<br>(kN) |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------|--------|--------------------------------|---------|----------------------------------|--------------------------------|-----------|-------------------|
|        |             |             |             |             |             |             |              |       |        |                                | 呼び名     | $f_{sy}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $E_s$<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | $p_w(\%)$ |                   |
| Case16 | 260         | 450         | 385         | 300         | 380         | 377         | 225          | 1.0   | 1.7    | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48      | 195               |
| Case17 | 460         | 450         | 385         | 300         | 580         | 377         | 225          | 1.5   | 2.6    | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48      | 183               |
| Case18 | 660         | 450         | 385         | 300         | 780         | 377         | 225          | 2.0   | 3.5    | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48      | 170               |
| Case19 | 560         | 900         | 835         | 300         | 680         | 827         | 377          | 0.8   | 1.8    | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48      | 276               |
| Case20 | 560         | 900         | 835         | 300         | 680         | 827         | 225          | 0.8   | 3.0    | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48      | 187               |
| Case21 | 960         | 900         | 835         | 300         | 1080        | 827         | 377          | 1.3   | 2.9    | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48      | 258               |
| Case22 | 960         | 900         | 835         | 300         | 1080        | 827         | 225          | 1.3   | 4.8    | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48      | 164               |
| Case23 | 1360        | 900         | 835         | 300         | 1480        | 827         | 377          | 1.8   | 3.9    | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48      | 233               |
| Case24 | 1360        | 900         | 835         | 300         | 1480        | 827         | 225          | 1.8   | 6.6    | 24                             | D10     | 345                              | 200                            | 0.48      | 176               |

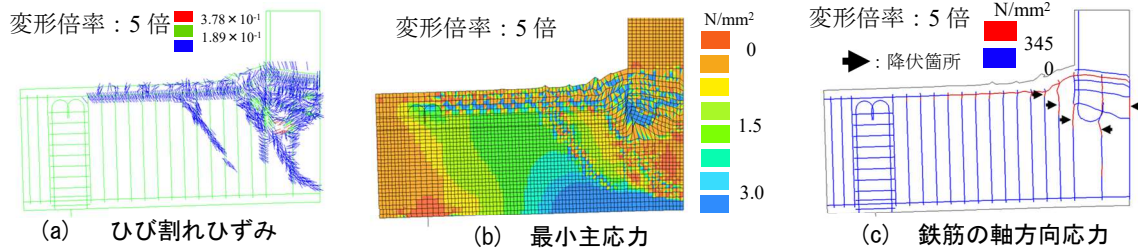


図-11 Case23 ( $h$ : 900mm,  $a/d$ : 1.8,  $z$ : 827mm,  $z'$ : 377mm)

## (2) 橋脚の軸方向鉄筋の定着長を変動させた場合

表-3 に解析ケースを示す。Case16 から Case18 の断面諸元は、載荷実験の試験体と同じとし、Case19 から Case24 は、その断面形状を 4. (1) 節と同様に設定した。杭の軸方向鉄筋を引張鉄筋付近まで十分に定着させ、橋脚の軸方向鉄筋の定着長  $z'$  をパラメータとして解析を行った。なお、4. (1) 節と同様に、橋脚の軸方向鉄筋が必要とする定着長<sup>1)</sup>に満たない極端に短い定着長の場合を想定した。必要とする定着長も 4. (1) 節と同じである。図-11 に定着長の短い Case23 の最大荷重時のひび割れひずみ、最小主応力および鉄筋の軸方向応力のコンター図を示す。

Case23 は、曲げひび割れと考えられるひび割れひずみが橋脚の軸方向鉄筋付近に初期段階で発生し、徐々に杭側方向に向かい複数のひび割れひずみが発生した。次に、徐々に杭側方向に向かい発生したひび割れひずみが橋脚の軸方向鉄筋のフック先端方向あるいは、橋脚の軸方向鉄筋直下の圧縮鉄筋付近に向けて斜め方向に進展した。最終的には橋脚の軸方向鉄筋のフック先端からハの字に発生するひび割れひずみが著しく進展し最大荷重に至った。このように、橋脚の軸方向鉄筋の定着長を短くした場合においても、杭の軸方向鉄筋の定着長を短くした場合（図-10、Case15）と同様に、軸方向鉄筋に生じる引張力により、フック先端からハの字に斜めひび割れが生じ、橋脚本体が抜け出して破壊に至ることがわかる。

## 5. 杭あるいは橋脚の軸方向鉄筋の定着長がせん断耐力に及ぼす影響

図-12 および図-13 に 4. 章により得られた  $V_{max}$  と杭あるいは橋脚の軸方向鉄筋の定着長との関係をそれぞれ示す。なお、図中には  $h$  を 900 mm の場合の結果を示した。

$V_{max}$  はいずれの場合も定着長が長くなることで大きくなり、線形に増加する傾向にあることが分かる。

本研究における解析では、せん断破壊と杭あるいは橋脚本体が抜け出す破壊が確認されたが、ここでは筆者らが既往の研究<sup>2)</sup>から提案している式(1)により求まるせん断スパン内に配置されたせん断補強鉄筋が受け持つせん断耐力  $V_s$  と  $V_{max}$  の比較を行うこととした。

$$V_s = p_w \cdot f_{wy} \cdot z \cdot \cot \theta \cdot b \quad (1)$$

ここに、 $p_w$ ：せん断補強鉄筋比、 $f_{wy}$ ：せん断補強鉄筋の降伏強度、 $z$ ：杭あるいは橋脚の軸方向鉄筋の定着長、 $\theta$ ：斜めひび割れ角度（=45度）、 $b$ ：部材幅

図-14 に、 $h$  を 900mm の場合の杭の軸方向鉄筋の定着長をパラメータとした解析により得られた  $V_{max}$  と  $a/z$  の関係を示す。図-15 に、 $h$  を 900mm の場合の橋脚の軸方向鉄筋の定着長をパラメータとした解析により得られた  $V_{max}$  と  $a/z'$  の関係を示す。なお、図中には式(1)により得られる  $V_s$  を併記した。杭あるいは橋脚の軸方向鉄筋の定着長が比較的長い場合（ $z=827$  および  $z'=870$ mm）、 $V_{max}/V_s$  は 0.94～1.32 となり、 $V_{max}$  と  $V_s$  は、概ね同程度であった。一方で、杭あるいは橋脚の軸方向鉄筋の定着長が比較的短い場合（ $z$  もしくは  $z'=225$ mm, 377mm）、 $V_{max}/V_s$  は 1.08～2.70 となり、 $V_{max}$  と  $V_s$  の差が大きくなる傾向であった。この差が生じる要因は、せん断スパン外に配置された補強鉄筋が負担する引張力を評価できていないためであると考えられる。

$z$  および  $z'$  の  $V_{max}/V_s$  を比較すると、 $z'$  を短くした場合の  $V_{max}/V_s$  が 1.08～1.67 であるのに対し、 $z$  を短くした場合の  $V_{max}/V_s$  が 1.84～2.70 であり、 $z$  を短くした場合の方が  $V_s$  との差が大きい傾向であった。これは、杭側のせん断スパン外の補強鉄筋が橋脚側に比べて密に配置されていることから、せん断スパンの内外に進展するひび割れ

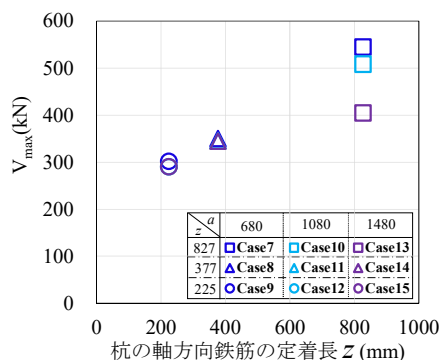


図-12  $V_{\max}$  と  $z$  の関係 (4. (1) 節,  $h$ : 900mm)

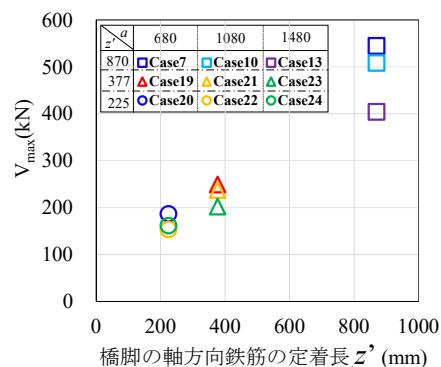


図-13  $V_{\max}$  と  $z'$  の関係 (4. (2) 節,  $h$ : 900mm)

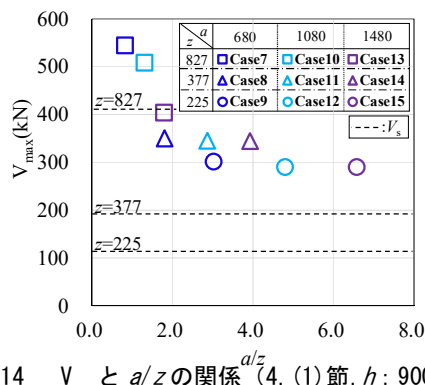


図-14  $V_{\max}$  と  $a/z$  の関係 (4. (1) 節,  $h$ : 900mm)

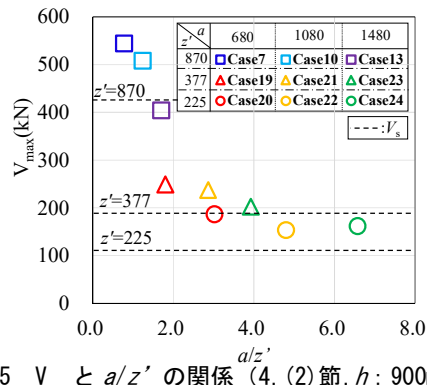


図-15  $V_{\max}$  と  $a/z'$  の関係 (4. (2) 節,  $h$ : 900mm)

ひずみを跨ぐ補強鉄筋の総数が、 $z'$ を短くした場合と比較して増加したことによるものであると考えられる。

これらのことから、定着長が比較的長い場合はせん断破壊し、定着長が比較的短い場合に杭あるいは橋脚の軸方向鉄筋に生じる引張力により抜け出す破壊となると考えられる。ただし、いずれの破壊であっても杭あるいは橋脚の軸方向鉄筋は生じる引張力により降伏せず、それらのフック先端から進展する斜めひび割れを跨ぐ補強鉄筋が降伏し最大荷重に至るため、最大荷重は杭あるいは橋脚の軸方向鉄筋の定着長に依存すると考えられる。

## 6. 結論

本研究では、杭と橋脚の軸方向鉄筋を必要定着長以上で、かつフーチングの上下側の軸方向鉄筋まで定着した場合、ならびに必要定着長よりも極端に短くして定着した場合の解析を行った。以下に、本研究の結論を示す。

- (1) 杭あるいは橋脚の軸方向鉄筋の定着長が短くなる場合、それらの軸方向鉄筋に生じる引張力により、杭あるいは橋脚が抜け出す破壊となることで最大荷重に至る可能性があることが分かった。
- (2) 杭あるいは橋脚本体が抜け出す破壊となる場合は、せん断スパン外に配置された補強鉄筋も生じる引張力を負担する可能性があることが分かった。
- (3) 上側引張を受ける杭基礎フーチングにおいて、いずれの破壊であっても、斜めひび割れを跨ぐ補強鉄筋

が降伏し最大荷重に至るため、最大荷重は杭あるいは橋脚の軸方向鉄筋の定着長に依存すると考えられる。

## 参考文献

- 1) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），2002.4
- 2) 轟俊太郎，田所敏弥，谷村幸裕，進藤良則：上側引張を受ける RC 梁のせん断耐力に及ぼすせん断補強鉄筋の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.739-744，2011.7
- 3) SELBY, R.G., AND VECCHIO, F.J. : Three-dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete. Tech. Rep. 93-02, Univ. Toronto, dept. Civil Eng., Toronto, Canada, 1993
- 4) VECCHIO, F. j., AND COLLINS, M. P. : Compression of cracked reinforced concrete. J. Str. Eng., ASCE 119, pp.3590-3610, Dec.1993
- 5) Hikaru NAKAMURA, Tekeshi HIGAI : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487,2001
- 6) 島弘，周礼良，岡村甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力すべりひずみ関係，土木学会論文集，No.378/V-6，pp.165-174，1987.2