

## ひび割れ進展に着目したフーチング縁端部の損傷評価

佐藤崇<sup>1</sup>・幸左賢二<sup>2</sup>・白戸真大<sup>3</sup>・木下和香<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 (株)長大 福岡構造技術部 (〒810-0014 福岡市中央区渡辺通1-1-1 サンセルコビル6F)

<sup>2</sup>正会員 Ph.D 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

<sup>4</sup>正会員 工修 熊本県県央広域本部 (〒861-3512 熊本県上益城郡山都町下馬尾265)

### 1. はじめに

場所打ち杭の杭の配列は、昭和48年の道路橋示方書(場所打ちぐいの設計施工編)<sup>1)</sup>から平成14年度版道路橋示方書下部構造編<sup>2)</sup>まで規定の内容に主だった変更はなく、そこでは、縁端距離は杭径の0.5倍を確保すると規定されている。一方、首都高速道路公団(当時)では、都市内高架橋の建設コストの削減のため、縁端距離を250mmに縮小することを目的とした模型実験<sup>3)</sup>が行われている。この実験は、場所打ち杭を対象としたフーチング端部に杭からの水平力のみを載荷させ破壊形態を確認したものである。このときの破壊形式は、杭からの作用水平力による水平押し抜きせん断破壊であった。この破壊では、図-1 (b)～(d)に示すような四角錐状に押し抜かれる破壊面となり、破壊面内の鉄筋(フーチング下面、側面)が全て降伏する。

しかし、実際の杭頭接合部においては、図-1 (a)に示すように、水平力に加えて曲げモーメントも作用し、しかも一般的な杭基礎は複数の杭を有する組杭基礎であることから、軸力が変動する。これに対し、土木研究所ではフーチング縁端部を縮小した組杭<sup>4)</sup>(フーチング接合部に軸力、曲げモーメント、水平力が作用する状態)の正負交番載荷実験を実施した。その結果、フーチング部では、変位の進展とともにフーチング下面鉄筋のひずみが増大し、ひび割れ進展状況より推定した破壊面と45°破壊面が類似していることから、水平押し抜きせん断損傷の発生を確認したものの、杭の破壊が支配的となった。

土木研究所が行った実験では、杭が先に破壊したため、水平押し抜きせん断破壊が発生しなかったと

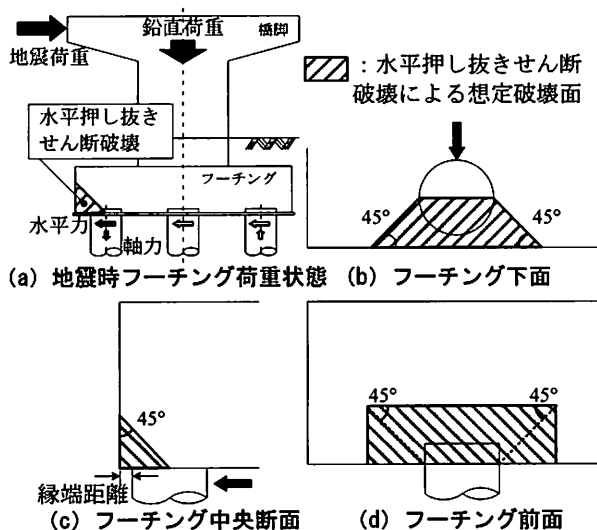


図-1 水平押し抜きせん断照査

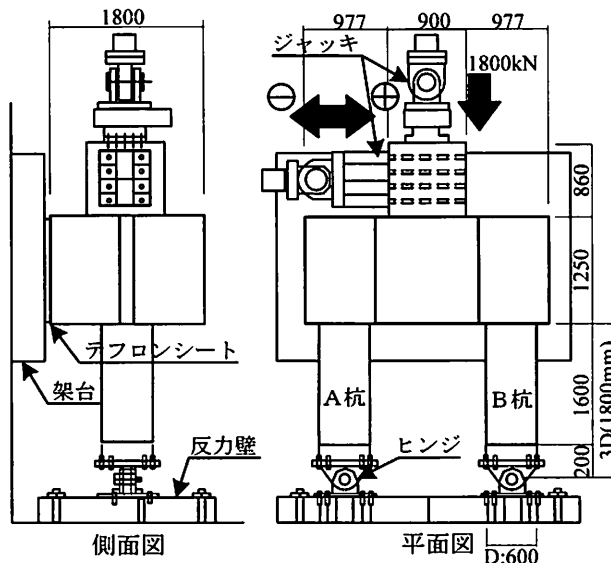


図-2 供試体形状

考えられる。そこで、本研究では、土木研究所が行った実験を基にFEM解析を実施し、杭に曲げ圧縮損傷が発生しない場合、水平押し抜きせん断破壊が発生するか検討を行い、実験結果では十分な評価ができない損傷の進展状況を解析結果から評価を行った。

## 2. 解析モデル

図-2に実験供試体形状を示す。供試体は実際の道路橋橋脚の場所打ち杭基礎（2×2本組杭）の橋脚柱から杭体までを模擬したもので、縮尺を1/2スケールで想定し、水平力に対するフーチングのコンクリート抵抗面積が最も小さくすると想定される対角方向に荷重を行った。縁端距離は、必要最低長の75mmとしている。杭長は1800mmであり杭先端にはヒンジを設けている。荷重は、橋脚部に一定の鉛直軸力1800kNを与えた上で正負交番の水平変位を与えている。

材料試験結果を表-1に示す。杭体の軸方向鉄筋にはD25を12本、帯鉄筋にはD19を150mm間隔で配置し、軸方向鉄筋比は2.2%である。フーチング部の下側主鉄筋にはD22を125mm間隔の格子状、上側主鉄筋にはD22を250mm間隔の格子状に配置し、上側主鉄筋比は0.14%、下側主鉄筋比は0.28%であった。

図-3に解析モデルを示す。モデル形状、配筋状況は実験供試体と同様としている。拘束条件は実験供試体を再現しており、フーチング側面をY方向固定とし、杭両端の中心点をヒンジ固定とした。荷重条件は橋脚部上面に実験と同様の1800kN相当の等分布荷重を荷重した状態で、水平荷重を変位制御で一方方向に荷重している。一方方向荷重としたのは、フーチングの主な損傷が正荷重時に進展していること、履歴モデルを使用した正負交番荷重は収束性が極めて悪いためである。各構造の要素のモデル化は、コンクリートには8節点ソリッド要素、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。なお、ヒンジ部及び橋脚部は弾性体としてモデル化している。収束計算は線形剛性法を用い、ひずみエネルギー基準で判定誤差を0.1%としている。

図-4 (a) にコンクリートの一軸状態での応力-ひずみモデルを示す。圧縮域では圧縮強度までを2次放物線とし、その後応力が低下するモデルを用いた。引張域では、引張強度までは直線的に応力が増加すると仮定し、引張強度到達後は軟化特性として破壊エネルギーを考慮した1/4モデルを用いた。ここで、コンクリートの引張エネルギー $G_F$ はコンクリ

表-1 材料試験結果

| コンクリート | 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) | ポアソン比                     | 引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )  |
|--------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 杭部     | 42.0                      | 27.9                       | 0.23                      | 2.93                       |
| フーチング部 | 23.8                      | 23.0                       | 0.19                      | 2.39                       |
| 鉄筋     | 降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> ) | 降伏ひずみ ( $\mu$ )            | 最大応力 (N/mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) |
| D25    | 369.1                     | 1892                       | 544.2                     | 195.1                      |
| D19    | 370.0                     | 1927                       | 560.1                     | 192.0                      |
| D22    | 377.6                     | 1963                       | 577.1                     | 192.3                      |
| D16    | 392.2                     | 2018                       | 601.1                     | 194.4                      |

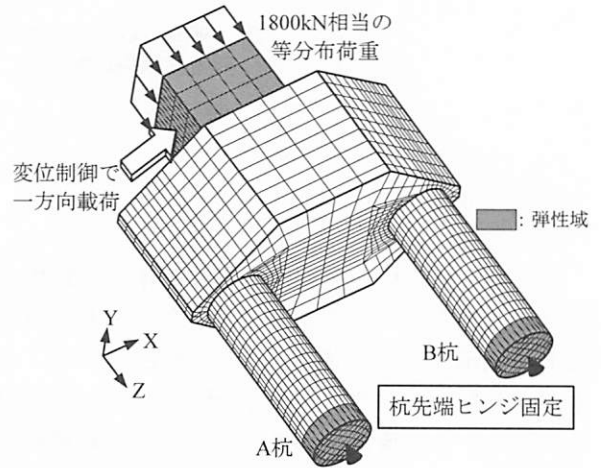


図-3 解析モデル

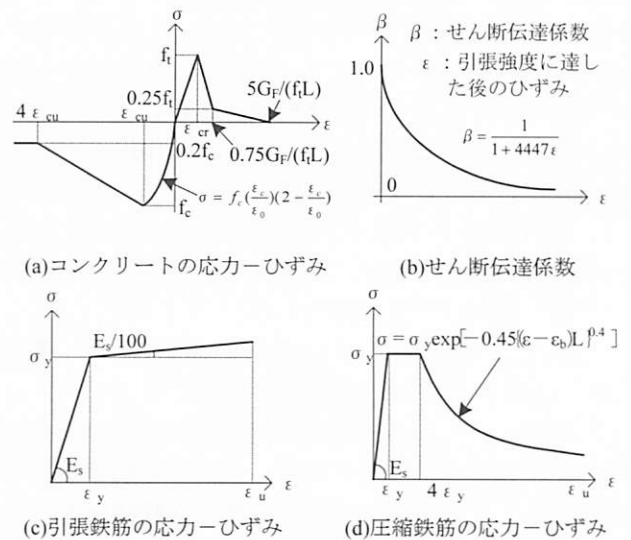


図-4 材料モデル

ート標準示方書構造性能照査編より0.08N/mm<sup>2</sup>としている。なお、等価長さ $L$ は $\sqrt{A}$  ( $A$ : XZ平面上の要素面積)とした。また、コンクリート圧縮側の構成則には、二軸圧縮強度を $1.16f_c$  ( $f_c$ : 一軸圧縮強度)、内部摩擦角を $\varphi=10^\circ$ 、粘着力を $C = 0.42f_c$ と設定したDrucker-Pragerの条件を用いた。コンクリート引張側でのひび割れ発生には、最大主応力基準を用い、ひび割れ発生モデルは固定多方向モデルとした。

図-4 (b) にひび割れ発生後のコンクリートのせん断伝達係数 $\beta$ と、せん断ひずみの関係を示す。せん断ひずみは、各荷重ステップにおける最大主ひずみに直交する方向のせん断弾性係数 $G$ を、せん断伝達係数 $\beta$ を乗じることにより低減させている<sup>5)</sup>。図-4 (c), (d) に鉄筋の応力-ひずみモデルを示す。引張側では鉄筋降伏後の2次勾配を1/100弾性係数としたbi-linearモデルとした。圧縮側では座屈開始ひずみに達すると応力が低下する中村ら<sup>6)</sup>の座屈モデルを用いた。ここで、座屈開始ひずみは畑中ら<sup>7)</sup>の式を用い8000 $\mu$ と仮定した。なお、各種の材料定数は実験と同様の表-1を用いた。

### 3. FEM解析による実験の再現

#### (1) 実験結果

ここでは、FEM解析を実施する前に、実験における正載荷時のフーチング損傷について分析を行う。正載荷時について分析を行う理由は、フーチングに発生したひび割れの78%が正載荷時に発生しており、損傷が正載荷時に集中したためである。図-5に水平荷重載荷位置における荷重変位関係を示す。荷重変位関係については、次節に解析結果と合わせて考察をする。図-6にフーチングの損傷進展状況を示す。図に示すフーチングは、正載荷時では外向きに水平力が作用するA杭側のフーチングである。図内には、フーチング前面変位の進展過程と、ひび割れの進展過程をあわせて示す。フーチング前面変位は、サイクル毎の残留変位を示している。ひび割れは正載荷時に発生したひび割れのみを抽出した。

まず、フーチング前面変位に着目する。フーチング下面から200mm位置の変位は $2\delta_y$ では0.10mmであり、 $4\delta_y$ になると0.44mmとなり、 $2\delta_y \sim 4\delta_y$ にかけて急激に変位が進展したことが確認できる。一方、フーチング下面から500mm位置の変位は、 $2\delta_y$ で0.01mm、 $4\delta_y$ で0.01mmとなり、変位は全く進展していないことから、このフーチング下面から500mmと200mmの間で、損傷が進展していると考えられる。

次に、コンクリートのひび割れに着目すると、フーチング下面の杭側方位位置に水平荷重と直交する方向に、早期にひび割れが発生し側面まで達した。その側面まで進展したひび割れが、 $2\delta_y$ では更に大きく開口した(図中 [1])。  $4\delta_y$ になると、フーチング下面の杭後方位位置に新たなひび割れが発生し、フーチング下面から側面に進展したひび割れの幅はさらに大きくなった(図中 [2])。フーチング側面では、隅角部位置に鉛直方向にひび割れが進展して

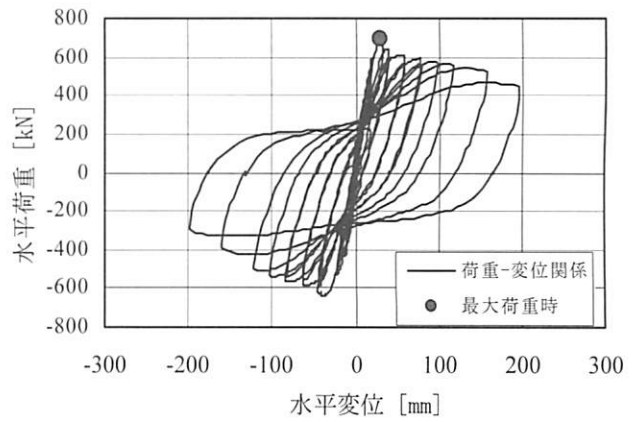


図-5 荷重-変位関係

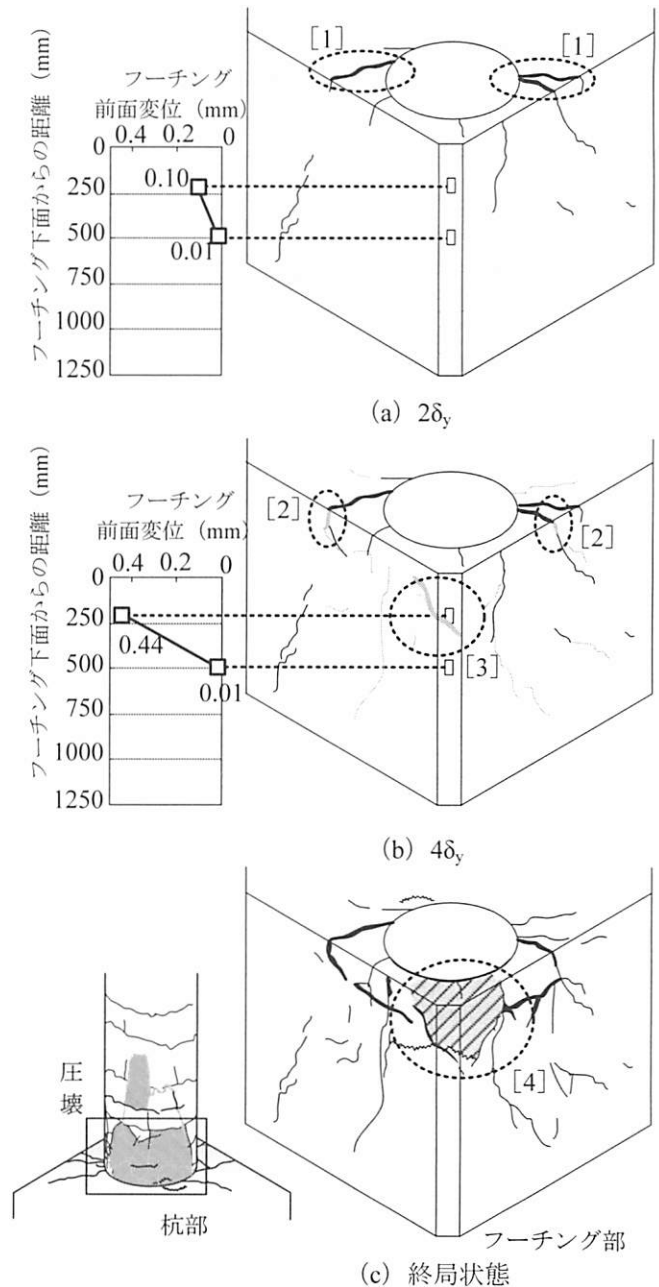


図-6 フーチングの損傷進展状況

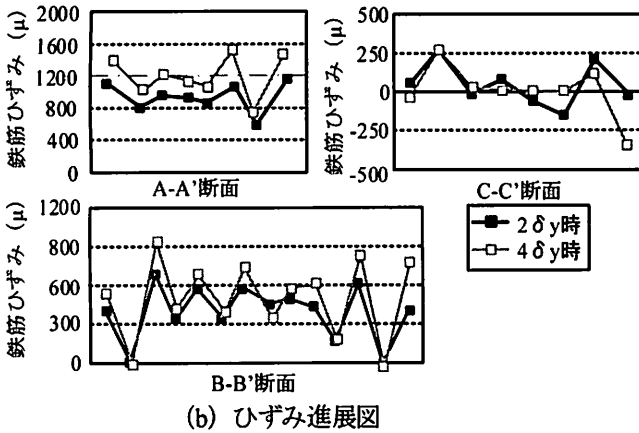
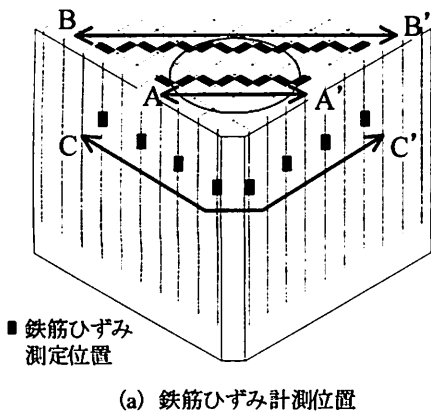


図-7 フーチング鉄筋ひずみの進展状況

いるとともに、斜め方向にも大きなひび割れが開いた(図中 [3])。終局状態では、フーチング側面のひび割れ幅も拡大し、隅角部の被りコンクリートが剥離し(図中 [4])、フーチング下面鉄筋が露出した。

最後に、フーチングの鉄筋に着目する。図-7にフーチングの鉄筋ひずみの進展状況を示す。フーチング下面鉄筋、側面鉄筋ひずみは、水平荷重ピーク時のひずみから水平荷重0kN時のひずみを引いた各サイクルのひずみ進展量である。鉄筋ひずみ計測位置は、図中に示すように、フーチング下面杭中央部(図中A-A'断面)、杭後方部(図中B-B'断面)、フーチング側面である。なお、下面鉄筋、側面鉄筋の降伏ひずみは1927 $\mu$ である。A-A'断面では、断面のひずみは均一に進展しており、4 $\delta y$ になると2 $\delta y$ に比べ、200 $\mu$ 程度微増した。終局状態になると、下面鉄筋は、杭中央断面で6本降伏に達した。B-B'断面でも、A-A'断面と同様でひずみは均一に進展し、4 $\delta y$ になると2 $\delta y$ に比べ100 $\mu$ 程度微増したが、ひずみの進展量はA-A'断面に比べ少なかった。B-B'断面では終局状態で、3本(14本中)の鉄筋が降伏した。C-C'断面をみると、2 $\delta y$ から4 $\delta y$ にかけて隅角部で近傍では、大きなひずみの進展は見られないが、

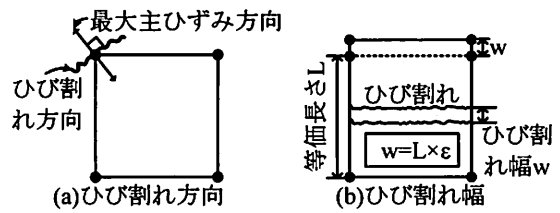
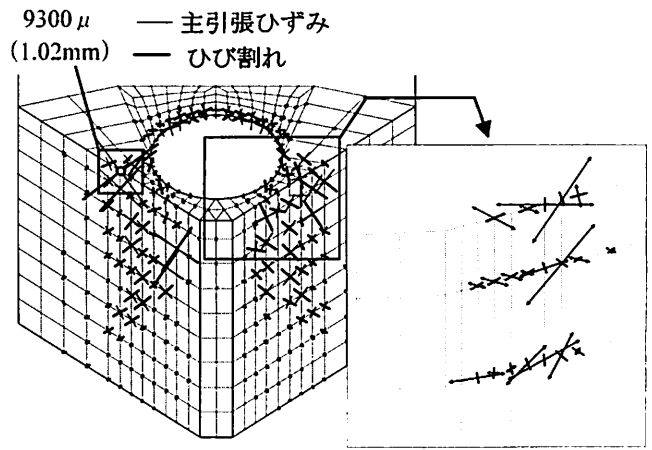


図-8 ひび割れの定義(解析2 $\delta y$ 時)

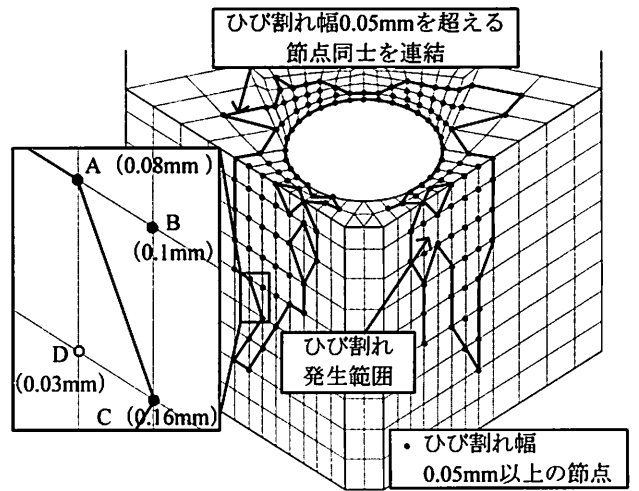


図-9 解析のひび割れ発生範囲の設定方法

杭後方部では圧縮ひずみが発生した。

以上の結果より、フーチング前面変位の増加、フーチング下面の鉄筋ひずみの増加、ひび割れの発生等、杭が外向きに変位しているような兆候がうかがえる。また、ひび割れ状況から、ひび割れの進展により破壊面が形成されると推測できる。

## (2) 解析結果の評価方法

まず、解析結果の評価方法について述べる。

図-8に、例として2 $\delta y$ の最大主ひずみ分布と、最大主ひずみを基にした解析のひび割れの推定法を示す。本検討では節点におけるひずみで評価を行う。

節点におけるひずみを用いる意味は、通常、ひずみの値が大きいのは要素表面であることや、隣接する要素間で連続的にひずみの値を評価したいからである。図-8 (a) に示すように、解析のひび割れは、最大主ひずみがひび割れ発生ひずみ ( $f_t/E=104\mu$ ) に達したとき、最大主ひずみと直交方向に発生すると考えられる。また、ひび割れ幅は、図-8 (b) に示すように最大主ひずみに等価長さを乗じることで換算できると仮定した。なお、等価長さは、コンクリートの応力ひずみ関係で設定した値である。以上の手法で、解析のひび割れの方向、幅を設定すると、 $2\delta y$ では図中に示すように最大で最大主ひずみが $9300\mu$ 、ひび割れ幅が $1.02\text{mm}$ となった。

図-9に、ひび割れ発生範囲の定義を示す。図に示すひび割れ発生範囲は $2\delta y$ のものである。図内の点は、上記の方法で推定した $0.05\text{mm}$ 以上のひび割れ幅となる節点である。色塗り部はひび割れ発生範囲であり、ひび割れ幅が $0.05\text{mm}$ 以上の節点が含まれる範囲と仮定した。解析のひび割れ幅を $0.05\text{mm}$ 以上に設定した理由は、実験で計測したひび割れは $0.05\text{mm}$ 以上を対象としたためである。図から分かるように、ひび割れ発生範囲は、解析のひび割れ発生範囲が最大になるよう、A、B、C、Dで表される要素の場合、ひび割れ幅が $0.05\text{mm}$ を超えている節

点A、Cを直線で結んだ範囲とした。

解析結果の鉄筋ひずみは、実験のひずみゲージの設置位置に最も近い節点で出力している。

### (3) 実験結果と解析結果の比較

図-10に実験結果と解析結果の載荷点位置における荷重-変位関係を示す。実験結果には正方向載荷の包絡線を用いている。杭主鉄筋降伏時に着目すると、実験は変位 $17\text{mm}$ 、荷重 $592\text{kN}$ 、解析は変位 $15\text{mm}$ 、荷重 $611\text{kN}$ となり、荷重、変位共にほぼ一

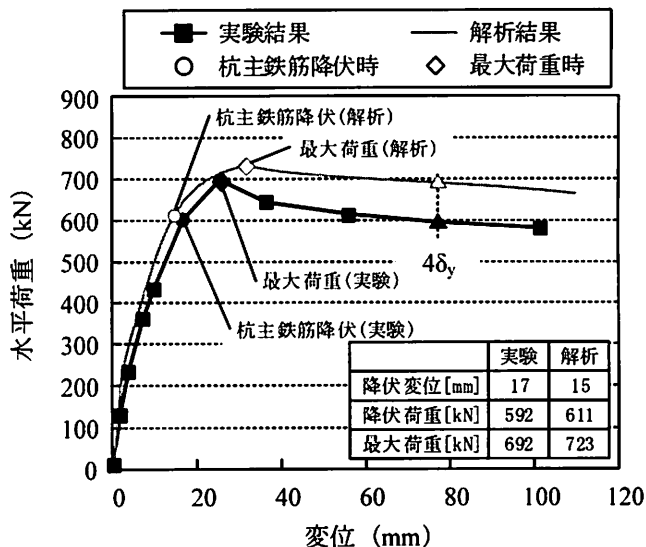


図-10 載荷点位置の荷重変位関係

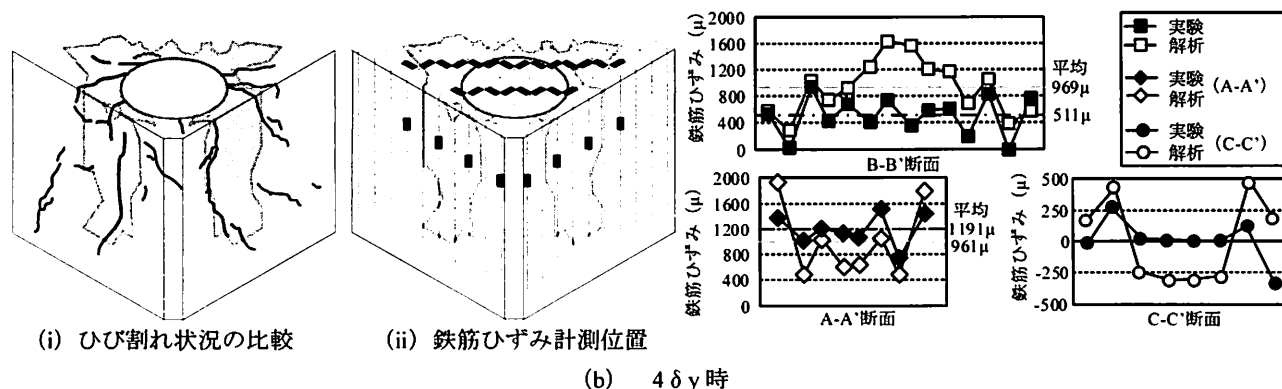
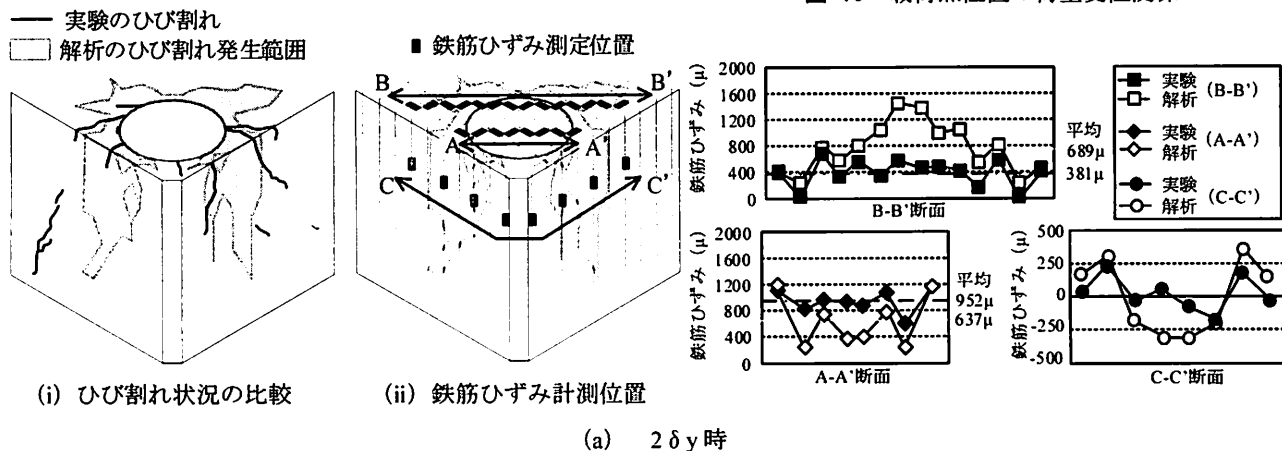


図-11 フーチング損傷と鉄筋ひずみ分布図

致した。ここで、主鉄筋降伏（ $1\delta_y$ ）以降の荷重－変位関係に着目する。実験では杭主鉄筋降伏後も変位が進展し、 $1.6\delta_y$ になると荷重はピークを迎え、B杭の圧縮縁かぶりコンクリートが剥離し抵抗力が減少したため、その後荷重は低下し、 $4\delta_y$ 時に降伏荷重まで低下した。一方、解析では、 $1.6\delta_y$ にB杭側圧縮縁コンクリートが圧壊レベルの $3500\mu$ を超え、かつ圧縮鉄筋も座屈開始ひずみ $8000\mu$ に達したため、荷重ピークを迎え、変位の進展とともに荷重が微減した。実験と解析を比較すると $1.6\delta_y$ までは一致したものの、それ以降実験と解析で荷重に差が生じた。 $1.6\delta_y$ 以降実験と解析で差が生じたのは、実験のかぶりコンクリートの剥落を解析では再現しておらず、解析ではかぶりコンクリートの圧縮軟化後も荷重を負担しているためであると考えられる。本検討では、同一変位時に着目し、実験の降伏変位を基準に解析と実験を比較する。

図-11 (a), (b) にそれぞれ $2\delta_y$ と $4\delta_y$ のひび割れ進展状況と鉄筋ひずみ分布を示す。まず、ひび割れ進展状況に着目する。 $2\delta_y \sim 4\delta_y$ にかけて、フーチング下面、側面ともにひび割れ発生範囲は拡大した。解析のひび割れ発生範囲と、実験のひび割れ位置を比較すると、実験結果でフーチング前面側にみられる、フーチング下面から側面まで進展したひび割れと、解析のひび割れ発生範囲が拡大した位置はほぼ一致している。また、そのひび割れがフーチング側面中央部付近から、フーチング後面に進展している傾向も、解析結果では捉えている。次に、鉄筋ひずみに着目すると、A-A'断面では、解析では両端のひずみが進展する傾向が得られたが、平均鉄筋ひずみは $2\delta_y$ で、実験値 $952\mu$ 、解析値 $637\mu$ 、 $4\delta_y$ で実験値 $1191\mu$ 、解析値 $961\mu$ となり、ほぼ同様の傾向を示す。一方、B-B'断面では、解析では中央部のひずみが進展するような傾向がみられ、実験と解析の平均鉄筋ひずみは、 $2\delta_y$ で、実験値 $381\mu$ 、解析値 $689\mu$ 、 $4\delta_y$

で、実験値 $511\mu$ 、解析値 $969\mu$ となり、異なる傾向が確認された。これは、解析ではフーチングと杭は完全付着モデルであるため、実験と比べると杭からの作用力が伝達しやすいのに加えて、杭頭部界面の要素がフーチングA-A'断面の変位を拘束することによって、要素変位の拘束の影響を受けないB-B'断面でひずみが進展したためと考えられる。C-C'断面では、解析では杭の前方位で圧縮ひずみが発生し、側方から後方にかけて引張ひずみが作用していることから実験のひずみ分布をほぼ再現できたと考えられる。以上の結果より、今回の解析モデルを用いて実験と同様のフーチング損傷状況を再現できたと考えられる。

#### 4. 曲げ圧縮破壊が発生しない場合の解析結果

##### (1) フーチング損傷状況の比較

実験では、杭が先に破壊に至ったため水平押し抜きせん断破壊が発生しなかったと考えられる。そこで、杭とフーチングの破壊の関係を明らかにすることを目的に、杭の曲げ圧縮破壊の発生の有無をパラメータとした解析を実施する。なお、杭に曲げ圧縮

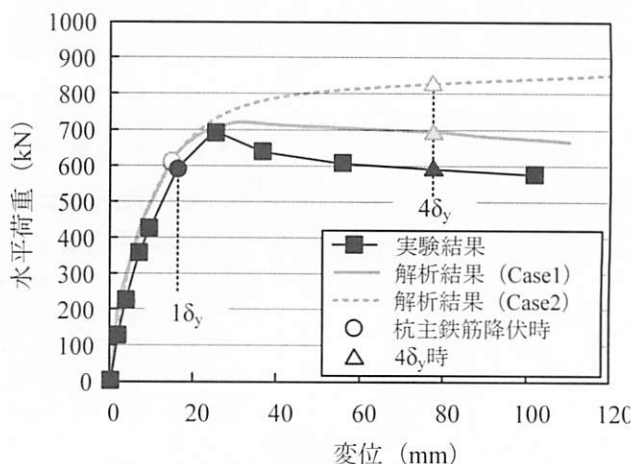


図-12 荷重－変位関係

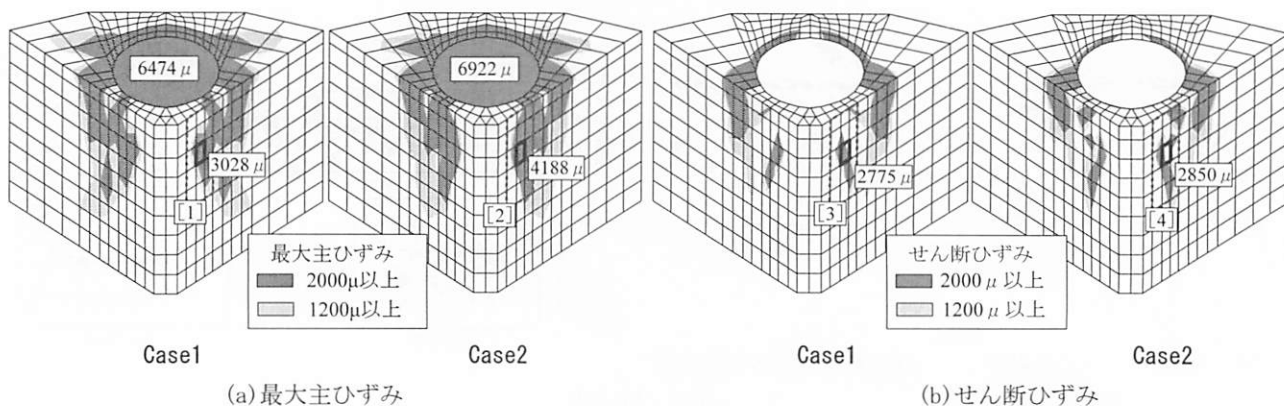


図-13 損傷状態の比較

破壊が発生しないようにするため、コンクリート圧縮側応力-ひずみモデルでは、圧縮強度以降、応力が一定となるモデルを用い、鉄筋の座屈による応力低下は考慮しなかった。ここで、曲げ圧縮破壊が発生するケースをCase1、曲げ圧縮破壊が発生しないケースをCase2とする。

図-12にCase1, 2の荷重点位置における荷重-変位関係を示す。杭主鉄筋降伏時における変位は、Case1, 2共に15mm、荷重はCase1で611kN、Case2で628kNとなり、ほぼ一致した。1 $\delta_y$ 以降、Case2は変位の進展とともに荷重が増加しており、Case1と異なる傾向を示した。以降、実験の降伏変位を基準にCase1, 2の比較を行う。

図-13に4 $\delta_y$ 時のA杭側フーチング最大主ひずみ、せん断ひずみ分布図を示す。せん断ひずみは、各要素において、各節点の変形による角度変化、つまり斜め方向の変形量から算出される。図-13 (a), (b)全体を見ると、最大主ひずみ、せん断ひずみの発生範囲、ひずみ値はCase1, 2で同程度である。しかし、図-13 (a)の杭とフーチング接合部における最大主ひずみの平均値は、Case1が6474 $\mu$ 、Case2が6922 $\mu$ とCase2の方が大きく、図-13 (a)の図中 [1], [2], 図-13 (b)の図中 [3], [4]に示すような局所的な範囲に着目すると、Case1に比べてCase2の方が、隅角部位置に発生する最大主ひずみ、せん断ひずみの値が大きい傾向となった。

## (2) フーチング損傷状況の検討

本節では、フーチング損傷状況について検討する。図-14に2 $\delta_y$ , 4 $\delta_y$ 時の断面の最大主ひずみベクトル図を示す。図に示す矢印は節点における最大主ひずみの方向を示している。図に示すように、Case1, 2ともに2 $\delta_y$ ~4 $\delta_y$ にかけて、最大主ひずみの大きさが増加しており、かつ発生範囲も拡大している。よって、変位の進展に伴い、内部においても損傷が進展していくことが明らかとなった。

図-15に4 $\delta_y$ 時の解析結果により推定したCase1, 2の水平押し抜きせん断に対する抵抗面と45°破壊面を示す。図に示す推定抵抗面は2730 $\mu$ を超える最大主ひずみが発生した節点を連結し、設定した。最大主ひずみ2730 $\mu$ とは、コンクリートの引張側材料モデルにおいて、軟化後、引張応力がほぼ0N/mm<sup>2</sup>となるときのひずみであり、このひずみが前面まで貫通したとき破壊面が形成すると仮定した。解析による抵抗面は、フーチング下面の杭側方から、フーチング上面に向かって形成していることがわかる。4 $\delta_y$ 時では、抵抗面がフーチング表面まで達してお

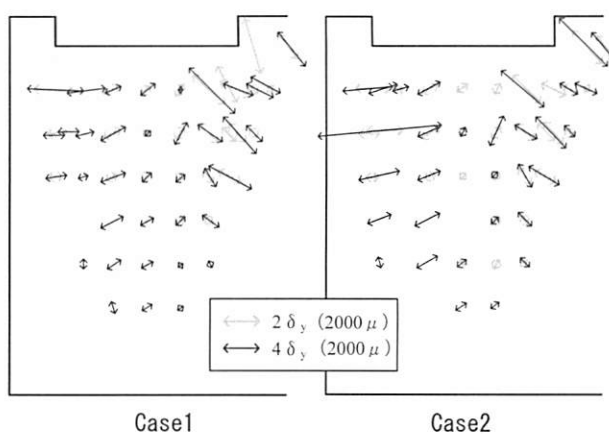


図-14 フーチング中央断面損傷進展状況 (最大主ひずみベクトル図)

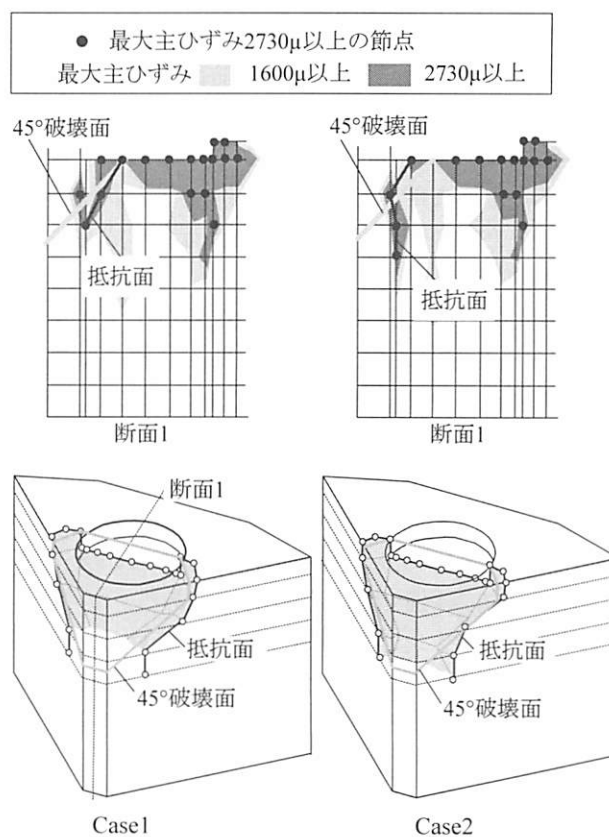


図-15 解析による水平押し抜きせん断抵抗面

らず、水平押し抜きせん断破壊の終局には至っていないものの、Case1, 2双方の推定抵抗面は45°破壊面と比較するとほぼ一致することがわかる。

図-16に抵抗面に跨る鉄筋のひずみ進展量を示す。図に示すひずみは、フーチング下面鉄筋ではA-A'断面 (合計6箇所)、フーチング側面はB-B' (合計2箇所)、C-C'断面 (合計2箇所)の平均値である。図からわかるように、フーチング下面鉄筋 (A-A'断面)は、変位が進展するに伴い、Case1, 2ともにひずみ量が増加している。一方、側面鉄筋 (B-B', C-C'断面)は変位20mm程度まで急激にひずみは進展

しているものの、以降ほぼ一定となった。

以上の結果より、Case1, 2ともに推定抵抗面は45°破壊面に類似しており、かつフーチング下面鉄筋が抵抗していることから、フーチング部では、従来の水平押し抜きせん断損傷が発生したと考えられるが、破壊に至らなかった。しかしながら、引抜き軸力の増加が小さい場合、水平押し抜きせん断破壊が発生する可能性があるため、今後さらなる検討が必要である。

## 5. まとめ

土木研究所によるフーチング縁端距離を縮小した組杭の載荷実験を基にFEM解析を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 実験結果より、フーチング前面変位の増加、フーチング下面の鉄筋ひずみの増加、ひび割れの発生等、杭が外向きに変位しているような兆候が伺え、また、ひび割れの進展状況から、フーチング隅角部近傍に破壊面が形成されると推測できる。
- (2) 実験供試体を詳細に模擬した解析モデルを用いたFEM解析による再現解析から、得られたコンクリートのひび割れ状況、および鉄筋のひずみを実験結果と比較した結果、フーチング下面から側面まで進展したひび割れの範囲はほぼ一致し、フーチング下面鉄筋のひずみ進展も概ね傾向を捉えており、実験では得られないデータを解析的に評価することが可能である。
- (3) 杭とフーチングの損傷の関係に着目し、杭の圧壊を考慮したCase1と考慮しないCase2を比較した結果、両ケースともに、杭の損傷の有無に関わらずフーチング部では、下面鉄筋のひずみが進展し、さらに最大主ひずみ分布から推定した推定抵抗面が45°破壊面に類似していることから、変位の増大とともに、従来の水平押し抜きせん断損傷が発生したと考えられる。

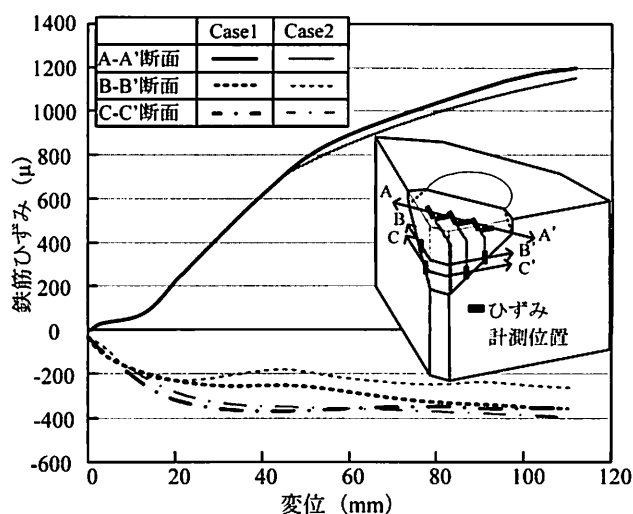


図-16 破壊面と鉄筋ひずみ進展

## 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋下部構造設計指針場所打ちぐい的设计施工編，1973.
- 2) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，pp. 231-232，pp. 351-352，2002.
- 3) 首都高速道路公団：場所打ち杭とフーチングの縁端距離に関する技術資料，1989.
- 4) 独立行政法人土木研究所：杭基礎の大変形挙動後における支持力特性に関する共同研究報告書，2012. 3.
- 5) Rots J.G. : Computational modeling of concrete fracture, Dissertaion Delft Univ. of TechCaselogy, 1998.
- 6) 中村光，二羽淳一郎，田辺忠顕：鉄筋の座屈がRC構造のポストピーク挙動に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14，No. 2，pp. 337-342，1992.
- 7) 徳田徳雄，畑中重光，上田英明：RC柱・梁部材の圧縮筋の座屈開始時ひずみについて，コンクリート工学年次論文集，Vol. 14，No. 2，pp 331-336，1992.