

論文 縁端部を縮小した組杭の損傷メカニズム

木下 和香*1・幸左 賢二*2・清水 英樹*3・白戸 真大*4

要旨: フーチング縁端部の破壊形態を調査する目的で、場所打ち杭の組杭供試体実験を基に FEM 解析を実施した。その結果、実験において、押込み杭でコンクリートの圧壊、引抜き杭側フーチング部で水平押し抜きせん断と考えられる損傷を確認した。また、解析でも、引抜き杭側では杭からの水平作用力に対し、フーチング下面鉄筋が抵抗し、フーチングコンクリートの損傷範囲が想定破壊面近傍で進展することが認められた。
キーワード: 場所打ち杭, 押し抜きせん断, 弾塑性FEM解析, 杭縁端距離

1. はじめに

近年、フーチング寸法の縮小や土留め・掘削量の低減を目的として、縁端距離を道路橋示方書の規定値より縮小して施工される場合がある。

レベル2地震時における、フーチング結合部の荷重状態は図-1(a)に示すように、杭からの軸力、水平力、曲げモーメントが作用しており、縁端距離を縮小した場合、フーチング縁端部において、水平方向の押し抜きせん断破壊の発生が懸念される。ここで、水平方向の押し抜きせん断破壊は、杭からの作用水平力により、図-1(b)~(d)に示すように、水平面方向では杭中心より45°、断面で45°の三角形形状に押し抜かれる破壊形式となると推測される。

そこで、本研究では、土木研究所が行ったフーチング接合部の損傷に着目した載荷実験を基に、3次元弾塑性FEM解析を実施し、水平押し抜きせん断破壊の発生状況について検討を行った。

2. 実験概要および解析概要

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(2x2本群杭)の橋脚から杭体までを模擬したもので、諸元を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なると想定される対角方向に載荷を行った。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。載荷は、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。

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。コンクリートは8節ブロック要素、鉄筋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。拘束条件は実験供試体を再現しており、フーチング一側面をY方向固

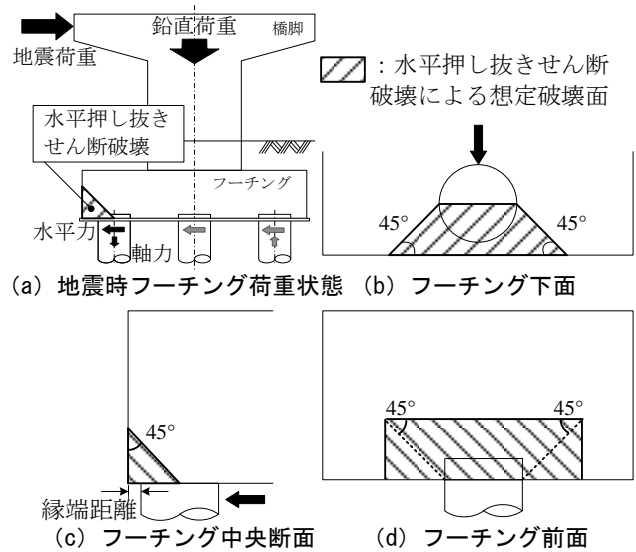


図-1 水平押し抜きせん断照査

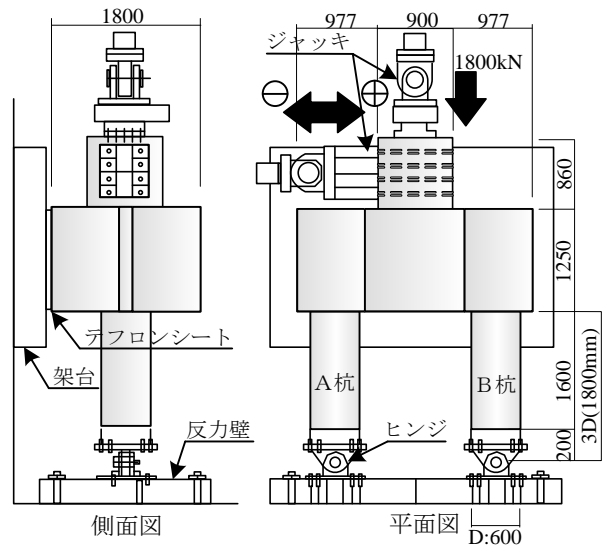


図-2 供試体形状

定とし、杭両端の中心点をヒンジ固定とした。載荷条件は橋脚部上面に実験と同様の1800kN相当の等分布荷重

*1 九州工業大学院 工学府 建設社会工学専攻 (正会員)

*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科教授 Ph.D (正会員)

*3 大日本コンサルタント株式会社 九州支社 技術部 (正会員)

*4 独立行政法人土木研究所 工博

表-1 材料試験結果

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	引張強度 (N/mm ²)
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 ²)	降伏ひずみ (μ)	最大応力 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
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

を載荷した状態で、水平荷重を変位制御で一方方向に載荷している。一方方向載荷としたのは、後述するように、フーチングの主な損傷が正載荷時に進展しており、履歴モデルを使用すると収束性が極めて悪いためである。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 はコンクリート標準示方書構造型態照査編より0.08N/mmとしている。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 $\phi=10^\circ$ 、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 β 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角する方向のせん断弾性係数 G を、せん断伝達係数 β を乗じることにより低減させている¹⁾。図-5 (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²⁾の座屈モデルを用いた。ここで、座屈開始ひずみは畑中ら³⁾の式を用い8000μ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. フーチング損傷状況の評価

3.1 実験結果

(1) 荷重-変位関係

実験における水平荷重載荷位置の荷重-変位関係を図-5に示す。両杭の最外縁の軸方向鉄筋が降伏に達したときを杭基礎の降伏とし、そのときの変位を降伏変位

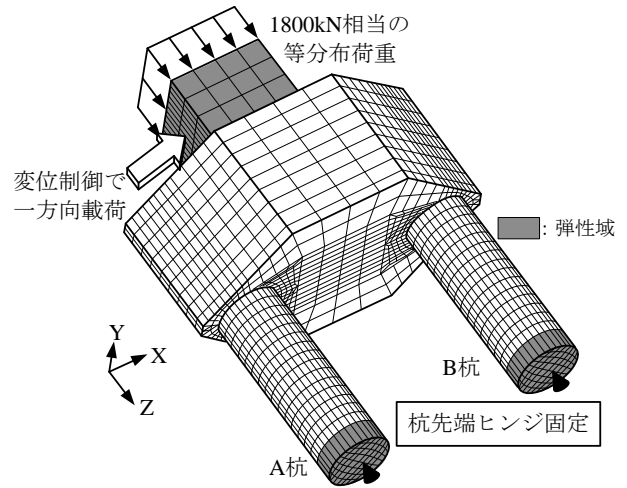


図-3 解析モデル

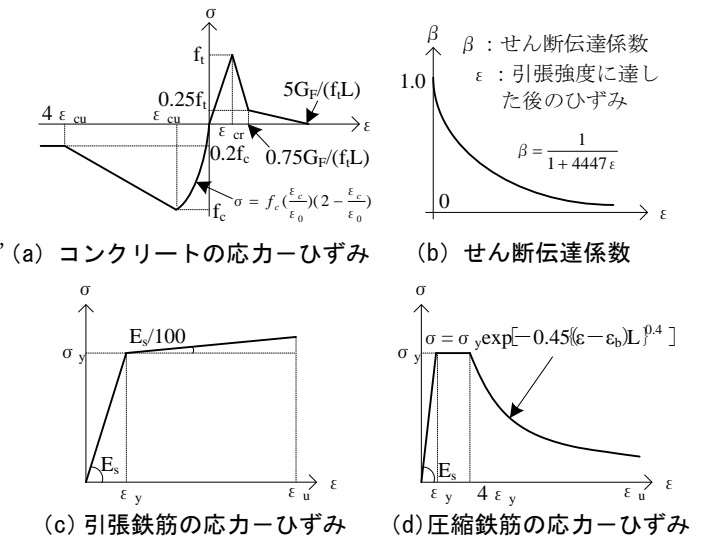


図-4 材料モデル

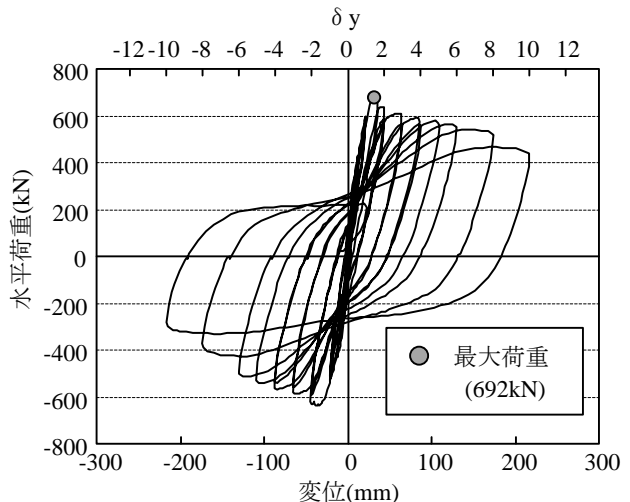


図-5 荷重-変位関係

δ_y (21.5mm) とする。以降の荷重は降伏変位を基準とし、地震動と同様の特性を持つ正負交番繰り返し載荷を行っている。図に示すように、 $1\sim 2\delta_y$ の間で押し込み杭の圧壊により水平荷重がピーク (692kN) を迎え、その後荷重が低下するが、 $3\delta_y$ 以降荷重を保持し、靱性的な変形挙

動を示す。6 δ_y 以降から荷重の低下が顕著となり、8 δ_y では軸方向鉄筋の座屈、10 δ_y では軸方向鉄筋の破断が確認され実験を終了している。

(2) フーチング損傷状況

図-6に2, 10 δ_y 時のA杭側フーチング損傷状況を示す。図に示すひび割れは、黒線が正載荷（外向きの水平力作用時）、灰色線が負載荷時に発生しており、太線が新たに進展したものである。鉄筋ひずみは、2, 10 δ_y 時において各サイクルの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ひずみ増加量である。なお、下面鉄筋にはD19を使用しており、降伏ひずみは1927 μ である。ひび割れに着目すると、2 δ_y までに発生したひび割れは杭後方に向かって進展しているが、3~10 δ_y に発生したひび割れは隅角部近傍で進展した。また、図-6(b)からわかるように、負載荷に比べ正載荷時に多数のひび割れが発生している。フーチング下面鉄筋に着目すると、2~10 δ_y 間では均一にひずみが進展していることがわかる。

図-7に想定破壊面とひび割れ幅が大きい3 δ_y 以降の正載荷時に発生したひび割れ、ひび割れ発生後から10 δ_y までの鉄筋ひずみの増分を示す。図に示すように、想定破壊面近傍で幅が大きいひび割れが発生しており、水平押し抜きせん断による破壊面形成途中であると考えられる。鉄筋に着目すると、フーチング下面では、B-B'断面より想定破壊面内A-A'断面のひずみが特に大きな値を示しており過半数の鉄筋が降伏ひずみ1927 μ を超えた。また、C-C'断面であるフーチング側面では想定破壊面近傍で最大1000 μ を超えるひずみが発生した。

以上の結果より、想定破壊面近傍でひび割れが発生し、想定破壊面内の鉄筋ひずみが進展したことから、フーチング部では水平押し抜きせん断による損傷が発生したと考えられる。

3. 2 解析結果

(1) 荷重-変位関係

図-8に実験、解析の荷重-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21mm、荷重592kN、解析は変位19mm、荷重611kNとなり、荷重、変位共にほぼ一致した。ここで、主鉄筋降伏(1 δ_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 δ_y 時ではB杭の圧縮縁コンクリートの表面が圧壊したため、荷重はピークを迎えその後急激に低下し、以降550kN程度で一定になった。一方、解析では、1.8 δ_y 時にB杭側圧縮縁コンクリートが圧壊レベルの3500 μ を超え、かつ圧縮鉄筋も座屈開始ひずみ8000 μ 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、実験とほぼ同様の傾向となった。以降、実験、解

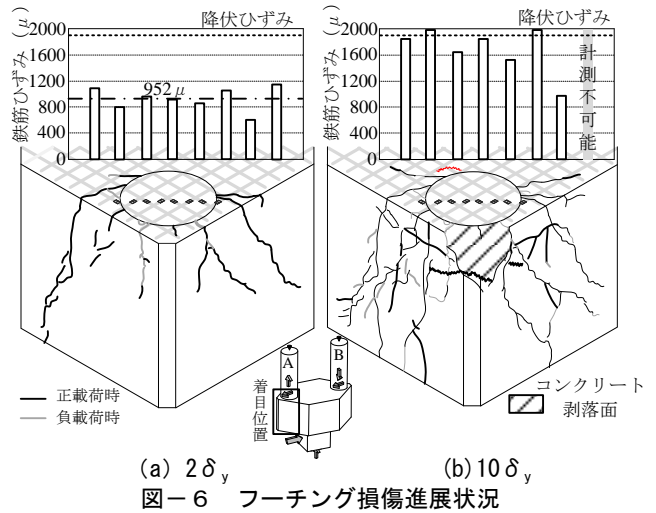


図-6 フーチング損傷進展状況

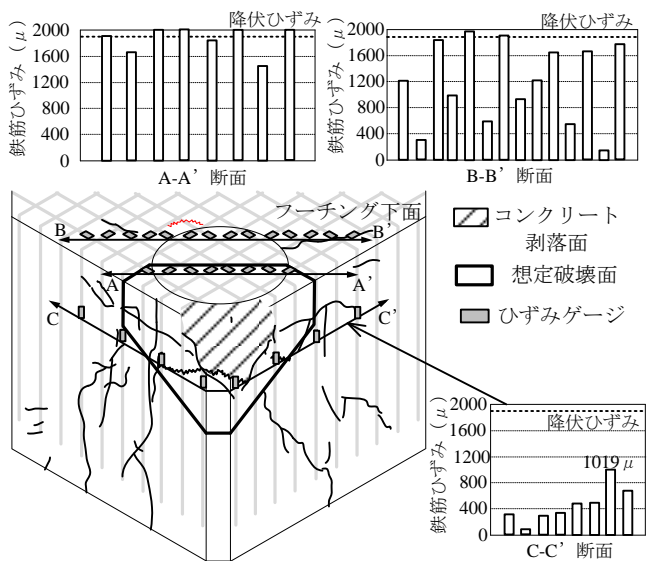


図-7 フーチング最終損傷状況と想定破壊

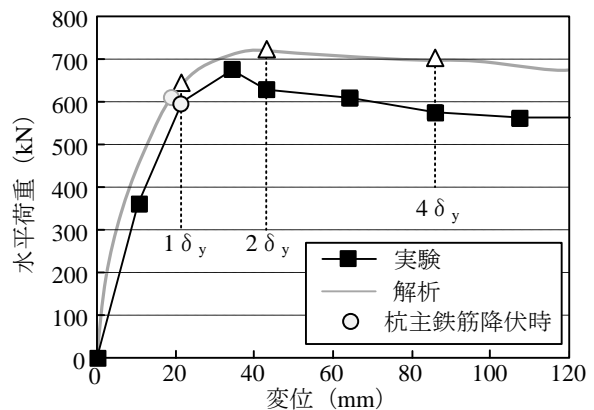


図-8 荷重-変位関係

析が比較的一致している変位状態に着目し、実験の降伏変位を基準に解析と実験を比較する。

(2) フーチング損傷状況

図-9に4 δ_y のひび割れ図と鉄筋ひずみ分布を示す。図に示すフーチングは、A杭側のフーチングである。実験のひび割れは、各サイクル終了時の正負ひび割れから

負荷時に発生したひび割れを除いたものである。解析では、ひび割れ幅（主引張ひずみ×等価長さ）が0.05mm以上の範囲をひび割れ発生範囲と仮定した。実験の鉄筋ひずみは、 $4\delta_y$ のサイクルにおいて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ひずみ増加量である。なお、下面鉄筋にはD19を使用しており、降伏ひずみは1927 μ である。図より、解析のひび割れ発生範囲と、実験のひび割れを比較すると、実験でフーチング側面から上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（図中[1]）はほぼ一致している。また、A-A'断面の鉄筋では、平均鉄筋ひずみは実験値1191 μ 、解析値902 μ となり、ほぼ同様の傾向を示す。

ここで、今回の水平押し抜きせん断の損傷と図-10の想定破壊面の適合性について検討を行う。図-10に $2\delta_y$ 、 $4\delta_y$ 時のA杭側フーチングの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。 $2\delta_y$ 時では杭中央断面位置において2000 μ を超えるせん断ひずみが発生した。 $4\delta_y$ になると、隅角部で想定破壊面に沿ってせん断ひずみが進展していることがわかる。

以上の結果より、変位の進展に伴いせん断ひずみが進展しているため、変位が進展すると図-11に示すような水平押し抜きせん断による破壊面が形成されると推測できる。

4. フーチング水平押し抜きせん断損傷の評価

4.1 作用荷重の算出

実験、解析結果双方より、A杭側フーチング部で水平押し抜きせん断による損傷が確認された。そこで、作用力に伴うフーチングの水平押し抜きせん断損傷の挙動を検討するため、本節ではフーチングの作用荷重の分析を実施した。

今回、分析対象としている土研実験では、杭先端部に作用する軸力及び水平力を測定していないため、杭主鉄筋ひずみを用い、断面計算を行った。断面計算に用いたひずみ分布と、応力分布の仮定を図-11に示す。断面のひずみ分布は、杭基部から900mm位置の最外縁鉄筋ひずみを直線で結ぶことで仮定した。なお、この位置では、鉄筋は降伏に至っていないため、ひずみ分布の信頼性は高いと考えられる。このひずみ分布を図中に示す式で応力分布図に変換し、以下に示す式(1)で軸力を、式(2)、(3)で水平力を求めた。

$$N = C'_c + \sum T_i \quad (1)$$

$$M = \sum T_i \cdot y_i + \int_0^D \sigma'_c \cdot b \cdot y \cdot dy \quad (2)$$

$$P = M / h \quad (3)$$

N : 軸力 (N), C'_c : コンクリート合力 (N), T_i : 鉄筋引張力 (N), M : 中立軸周りのモーメント (N・mm),

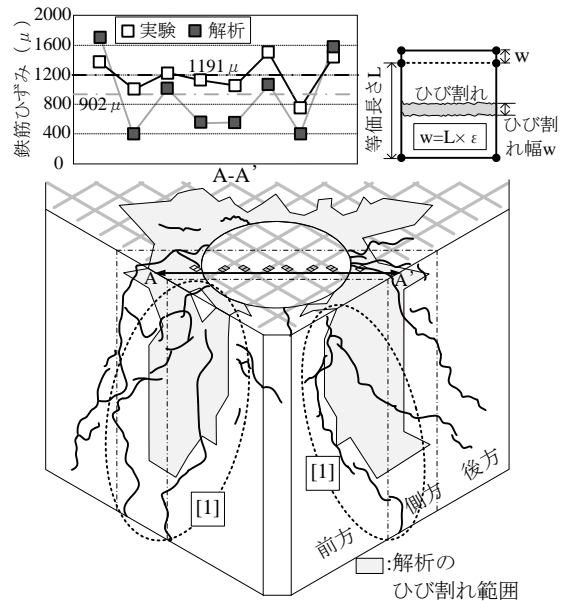


図-9 フーチング損傷図 ($4\delta_y$)

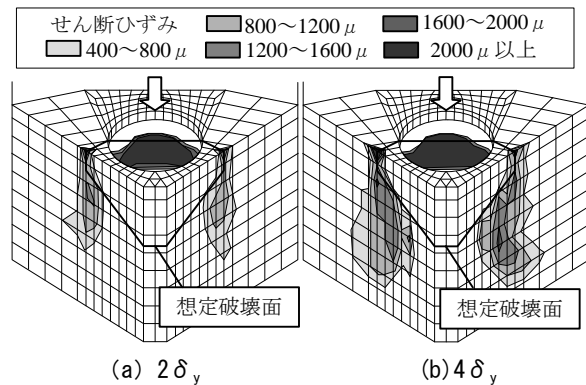


図-10 せん断ひずみ分布図

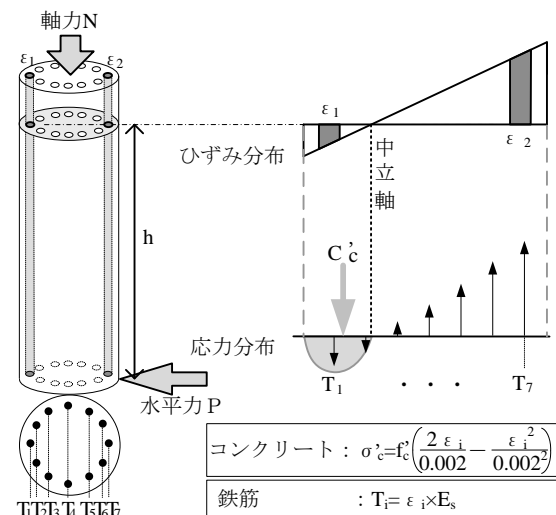


図-11 作用力算出手法

y_i : 中立軸からの距離 (mm), D : 杭径 (mm), σ'_c : コンクリート応力 (N/mm²), b : 断面幅 (mm), P : 水平力 (N), h : アーム長 (mm)

また、今回の実験では、断面に軸力と曲げモーメント

が生じているので、計測ひずみが軸力分のひずみと曲げモーメント分のひずみの和になるよう分配し、曲げモーメント分のひずみから式 (2), (3) で水平力 P を算出した。また、解析の水平力は図-3 に示す杭先端ヒンジ部の水平反力とした。

図-12 に接合部における実験、解析の作用水平力-変位関係を示す。水平押し抜きせん断側の A 杭に着目すると実験、解析両方で $2\delta_y$ までに急激に水平力が増加し、水平力は実験で 335kN、解析で 270kN となった。水平力は実験の方が大きくなる傾向であったが、実験結果と解析結果は、 $2\delta_y$ 以降作用力がほぼ一定となり、同様の傾向を示す。一方、B 杭は、 $1\delta_y$ までに急激に水平力が増加し、水平力は実験で 373kN、解析で 414kN となった。 $1\sim 2\delta_y$ 間では水平力の差異が拡大したものの、 $2\delta_y$ 以降作用力が低下する傾向は一致した。実験と解析で差異が生じたのは、解析では B 杭のコンクリート圧壊に伴うかぶり部の剥落を十分には再現しておらず、滑らかに荷重が低下したためであると考えられる。

4.2 作用水平力と水平押し抜きせん断挙動

水平押し抜きせん断損傷の挙動を評価するため、A 杭側において杭からの作用力と水平押し抜きせん断破壊に対するフーチング抵抗力を比較する。ここで、今回の実験では図-7 に示すように、コンクリートひび割れ発生後、フーチング下面鉄筋ひずみの進展が確認された。また、押し抜きせん断破壊に対する抵抗力は、一般的にコンクリート抵抗力と破壊面内鉄筋抵抗力の和で表される。そこで、今回のケースでも式 (4) で表す水平押しせん断抵抗力と作用力と比較し、作用力の増加にともなうフーチング損傷を検討する。

$$P_h = V_c + V_s \quad (4)$$

P_h : 水平押し抜きせん断破壊に対する抵抗力 (N), V_c : コンクリート抵抗力 (ひび割れ発生荷重-ひび割れ発生時の鉄筋抵抗力) (N), V_s : 鉄筋抵抗力 (N)

ここで、ひび割れ発生荷重は、フーチング下面鉄筋ひずみがひび割れ発生ひずみの 104μ (f_t/E) に達したときの荷重とした。鉄筋抵抗力 V_s は図-13 に示す想定破壊面内の 8 本のフーチング下面鉄筋ひずみから、鉄筋に作用している応力を算出した。代表例として $2\delta_y$ 時の実験結果を用い、抵抗力算出方法を以下に示す。

図-13 に $2\delta_y$ 時における実験、解析の A 杭側フーチング下面時鉄筋ひずみ分布を示す。図に示す鉄筋ひずみは、各サイクルの水平荷重ピーク時から水平荷重 0kN 時のひずみを引いてサイクル毎に進展したひずみとした。 $2\delta_y$ では、想定破壊面内の 8 本の平均鉄筋ひずみ 952μ に鉄筋弾性係数 (192.0kN/mm^2) を乗じて、鉄筋に発生している応力を算出すると、 183N/mm^2 となる。ただし、鉄筋はせん断変形に対して抵抗すると考えられるため、

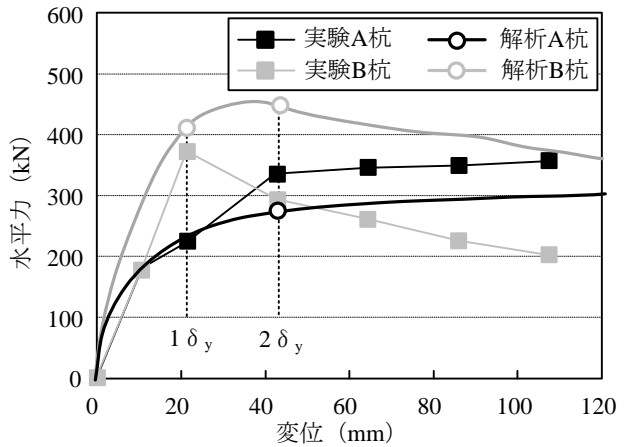


図-12 水平作用力

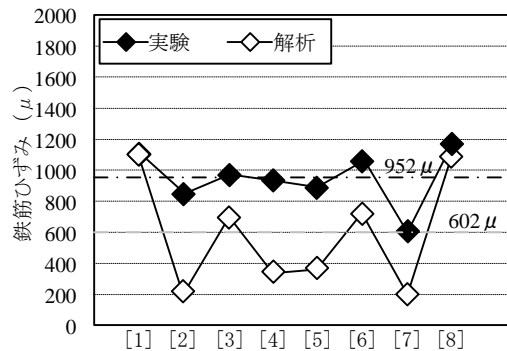
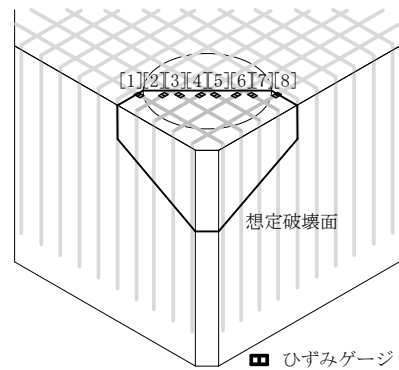


図-13 鉄筋抵抗力算出手法

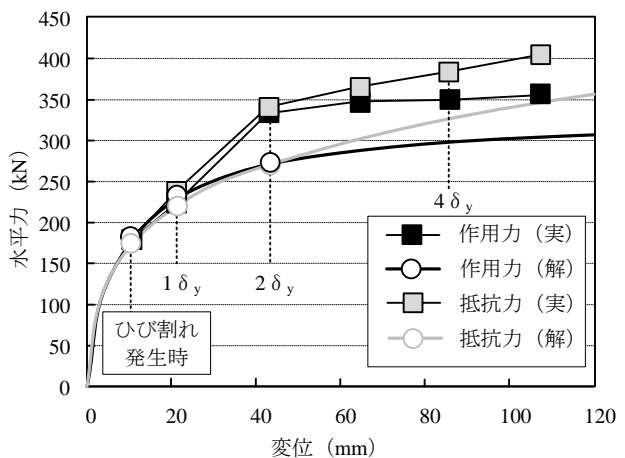


図-14 作用力と抵抗力

Von-Misesの降伏条件より、 $\sqrt{3}$ で除して、せん断応力に換算すると 106N/mm^2 となった。また載荷方向に対し、 45°

方向に配筋しているのので、せん断応力を $\sqrt{2}$ で除して、 75N/mm^2 とした。この値に総断面積 2292mm^2 を乗ずると、鉄筋抵抗力は 171kN となった。なお、解析も実験と同様の方法で鉄筋抵抗力を算出した。 $2\delta_y$ では実験に比べひずみの進展が小さく、解析の鉄筋抵抗力は 108kN となりやや小さい傾向となった。

図-14にA杭側フーチングにおける実験、解析の抵抗力と作用力を示す。フーチング下面鉄筋がひび割れ発生ひずみの 104μ (f_t/E)に達したひび割れ発生荷重は実験で 180kN 、解析で 182kN 、この時の鉄筋抵抗力 V_s は実験で 11kN 、解析で 22kN となった。したがって、コンクリート抵抗力は実験で 169kN 、解析で 160kN となりほぼ一致した。 $2\delta_y$ になると、解析に比べ実験の抵抗力が大きくなる傾向が得られたが、実験、解析共に $2\delta_y$ 以降も抵抗力は微増し、同様の傾向を示す。実験に比べ、解析の抵抗力が小さいのは、図-13に示すように[2]から[8]の鉄筋ひずみの進展が小さいためであると考えられる。作用力と抵抗力を比較すると、実験では、 $2\delta_y$ 時までは抵抗力 340kN 、作用力 335kN となり概ね一致しているが、抵抗力は $2\delta_y$ 以降も増加しており、やや差異が生じる傾向となった。解析でも同様の傾向が確認された。 $2\delta_y$ 以降作用力に比べ抵抗力が大きくなるのは、変位の進展に伴いフーチング下面鉄筋ひずみが進展しており、コンクリート抵抗力 V_{cl} は変位の進展とともに低下したためであると考えられる。しかし、実験においてコンクリートのひび割れ幅は小さいため、コンクリート抵抗力を一定と仮定した場合でも、コンクリート抵抗力と鉄筋抵抗力の和が作用力とほぼ一致している。よって、コンクリート抵抗力と鉄筋抵抗力が累加できると考えられる。

ここで、 $2\delta_y$ 、 $4\delta_y$ の水平押し抜きせん断の損傷エリアを図-15に示す。図-15に示す損傷エリアはせん断変形によるフーチング下面鉄筋降伏レベルの 1200μ を超えるせん断ひずみ発生範囲である。図に示すせん断ひずみ分布はA-A'断面、B-B'断面、C-C'断面である。図-10、15からわかるように損傷エリアは $2\delta_y$ から $4\delta_y$ にかけて鉛直方向に拡大している。また、 $4\delta_y$ の損傷エリアより、図-1に示す 45° 想定破壊面周辺で想定破壊面よりも鉛直方向に破壊面が形成すると推測される。

以上の結果より、A杭側では杭からの水平作用力に対して、フーチング下面鉄筋が抵抗し、 $2\delta_y$ から $4\delta_y$ にかけて図-1の想定破壊面近傍でせん断ひずみが急激に進展していることから水平押し抜きせん断の損傷が進展すると考えられる。

5. まとめ

土木研究所による荷重実験結果及び、FEM解析を実施した結果以下の知見が得られた。

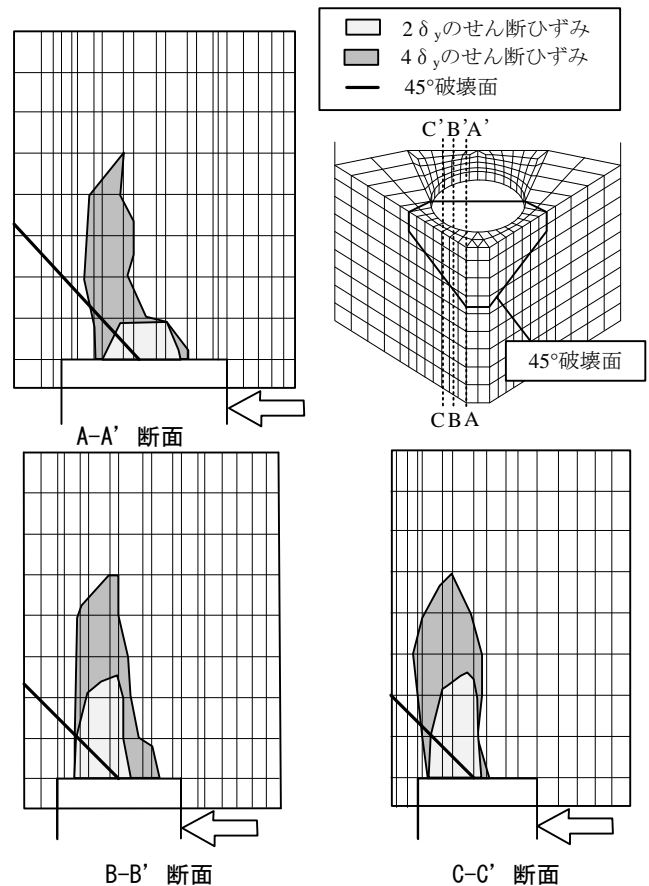


図-15 解析の推定破壊面

- 1) 実験結果より、フーチングでは、想定する破壊面近傍に多数のひび割れが発生しており、かつ破壊面内のフーチング下面鉄筋では降伏ひずみ 1927μ に達するひずみの進展が確認された。よって、想定した破壊形状の水平押し抜きせん断損傷が発生したと考えられる。
- 2) 実験、解析において各杭の水平作用力を定量的に評価した。押し込み杭側フーチング部では、水平力に対し、想定破壊面内のフーチング下面鉄筋が抵抗し、 $2\delta_y$ から $4\delta_y$ にかけて想定破壊面近傍でせん断ひずみの進展を確認した。したがって、押し込み杭側では水平押し抜きせん断の損傷は進展すると考えられる。

参考文献

- 1) Rots J.G : Computational modeling of concrete fracture, Dissertation Delft Univ. of Technology, 1988
- 2) 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
- 3) 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