

論文 フーチング縁端部水平押し抜きせん断の解析的検討

木下 和香*1・幸左 賢二*2・佐々木 達生*3・白戸 真大*4

要旨: 本論文は、L2地震時のフーチング縁端部の損傷形状に着目し、押し抜きせん断損傷の発生の有無を明らかにする事を目的に、場所打ち杭の組杭供試体実験を基にFEM解析を実施した。実験では、フーチング部で水平押し抜きせん断損傷を確認したものの、杭部コンクリートの圧壊が支配的となった。そこで、パラメータ解析を実施した結果、杭の曲げ圧縮損傷が発生しない場合、変位が進展すると、杭体で引抜き軸力が大きくなるため、杭体の損傷が支配的となり、フーチング縁端部では水平押し抜きせん断損傷を確認したが、終局には至らなかった。しかし、引抜き軸力の増加が小さい場合、水平押し抜きせん断損傷が発生する可能性がある。

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

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)¹⁾から平成14年度版道路橋示方書IV下部構造編²⁾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のコスト削減のため、縁端距離を250mmに縮小することを目的とした模型実験³⁾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⁴⁾(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、フーチング下面鉄筋ひずみが進展し、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を確認したものの、杭の損傷が支配的となった。

土木研究所が行った実験では、杭が先に損傷したため、水平押し抜きせん断損傷が発生しなかったと考えられる。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

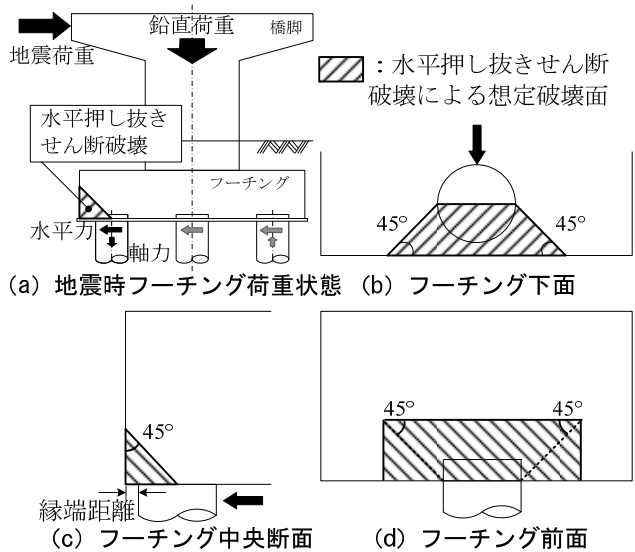


図-1 水平押し抜きせん断照査

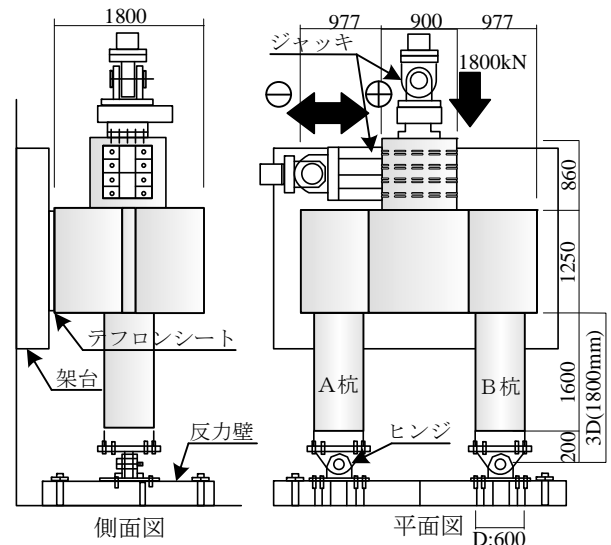


図-2 供試体形状

*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) 技術統括部 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

合、水平押し抜きせん断損傷が発生するか検討を行った。

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な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。杭体には、軸方向鉄筋は D25 を 12 本、帯鉄筋は D19 を 150mm 間隔で配置し、軸方向鉄筋比は 2.2% である。フーチング部には、下側主鉄筋は D22 を 125mm 間隔の格子状、上側主鉄筋は 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。コンクリートは 8 節点ブロック要素、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向に荷重している。一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と、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

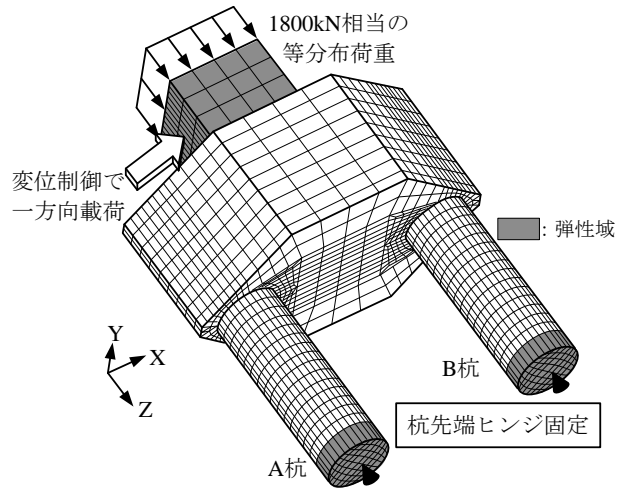


図-3 解析モデル

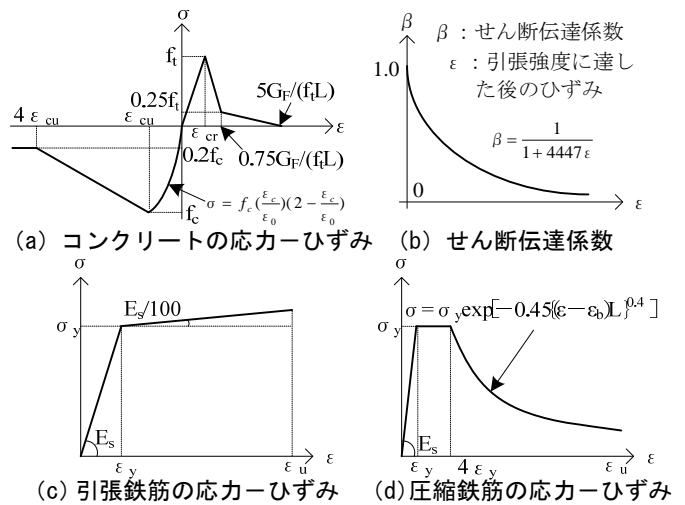


図-4 材料モデル

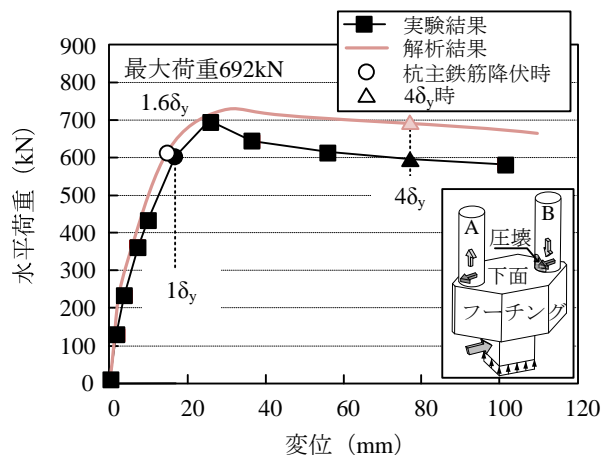


図-5 荷重点位置荷重-変位関係

張エネルギー G_F はコンクリート標準示方書構造性能照査編より $0.08N/mm$ 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 $\phi=10^\circ$ 、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交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⁵⁾。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⁶⁾の座屈モデルを用いた。ここで、座屈開始ひずみは畑中ら⁷⁾の式を用い $4\delta_y$ 時となる 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. FEM 解析による実験の再現

図-5 に実験と解析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17mm、荷重592kN、解析は変位15mm、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 ($1\delta_y$) 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 3500μ を超え、かつ圧縮鉄筋も座屈開始ひずみ 8000μ 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。今回、せん断損傷について分析するため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-6 に $4\delta_y$ 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、正載荷時に発生したものである。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 1927μ 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、図中の後面部のひび割れは解析では確認できなかったが、前面部と中央部の範囲では、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

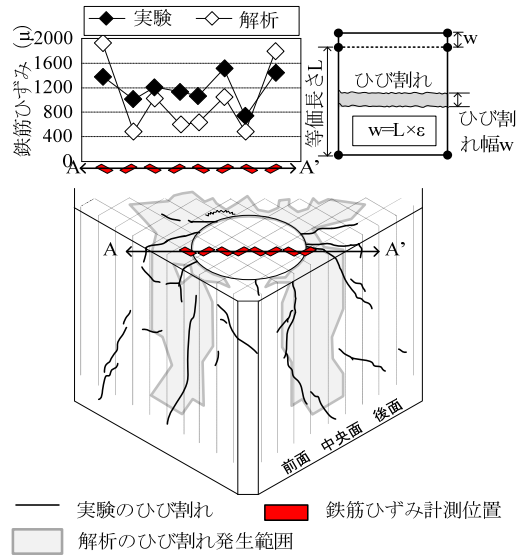


図-6 フーチング損傷と鉄筋ひずみ分布図 ($4\delta_y$)

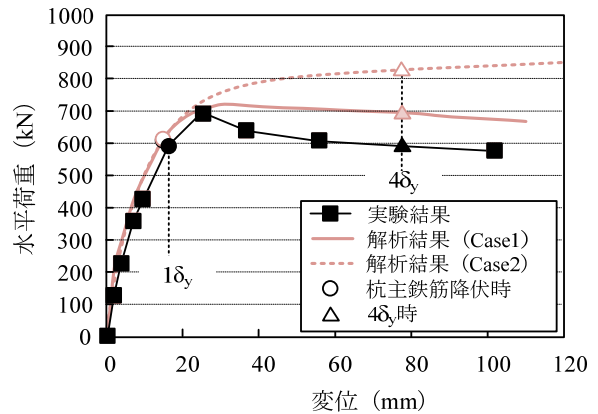


図-7 荷重-変位関係

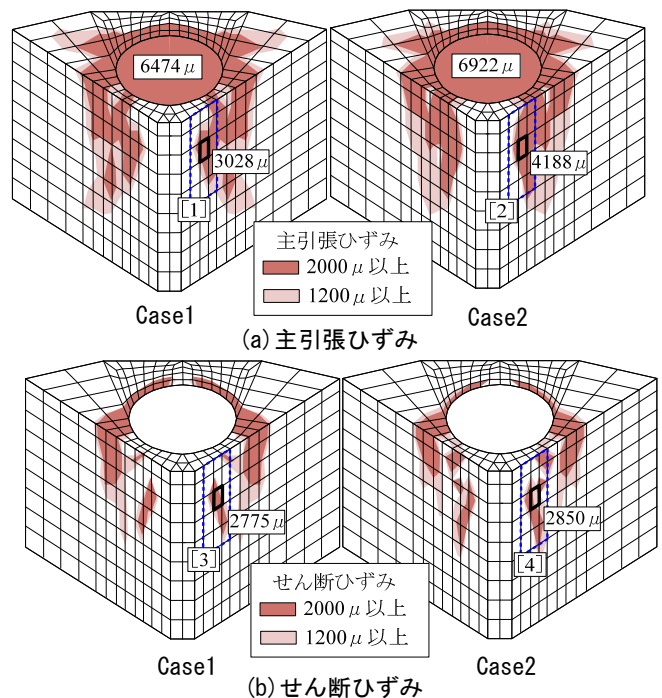


図-8 損傷状態の比較

位置はほぼ一致している。また、A-A' 断面の鉄筋ひずみは、実験で 700~1600 μ 、解析で 400~1900 μ となり、実験結果と解析結果の、杭中央断面のフーチング下面鉄筋のひずみ分布の進展傾向は類似している。

以上の結果より、今回の解析では実験と同様のフーチング損傷状況を概ね再現できたと考えられる。

4. 曲げ圧縮損傷が発生しない場合の解析結果

4.1 フーチング損傷状況の比較

実験では、杭が先に損傷に至ったため水平押し抜きせん断損傷が発生しなかったと考えられる。そこで、ここではフーチングの損傷状況に着目し、杭に曲げ圧縮損傷が発生しない場合におけるフーチング縁端部での水平押し抜きせん断損傷の程度を検討する。なお、杭に曲げ圧縮損傷が発生しないようにするため、コンクリート圧縮側応力カーヒズミモデルでは、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、曲げ圧縮損傷が生じるケースを Case1、曲げ圧縮損傷が生じないケースを Case2 とする。

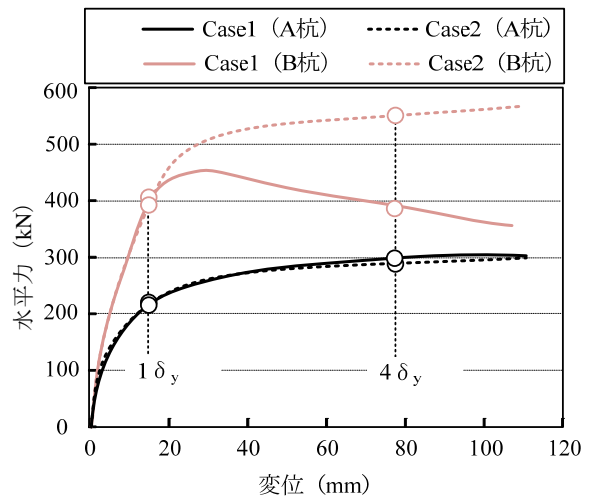
図-7 に Case1, 2 の載荷点位置における荷重-変位関係を示す。杭主鉄筋降伏時における変位は、Case1, 2 共に 15mm、荷重は Case1 で 611kN、Case2 で 628kN となり、ほぼ一致した。1 δ_y 以降、Case2 は変位の進展とともに荷重が増加しており、Case1 と異なる傾向を示した。以降、実験の降伏変位を基準に Case1, 2 の比較を行う。

図-8 に 4 δ_y 時の A 杭側フーチング主引張りひずみ、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-8 (a), (b) 全体を見ると、主引張りひずみ、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-8 (a) の杭とフーチング接合部における主引張りひずみの平均値は、Case1 が 6474 μ 、Case2 が 6922 μ と Case2 の方が大きく、図-8 (a) の図中 [1], [2]、図-8 (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主引張りひずみ、せん断ひずみの値が大きい傾向となった。

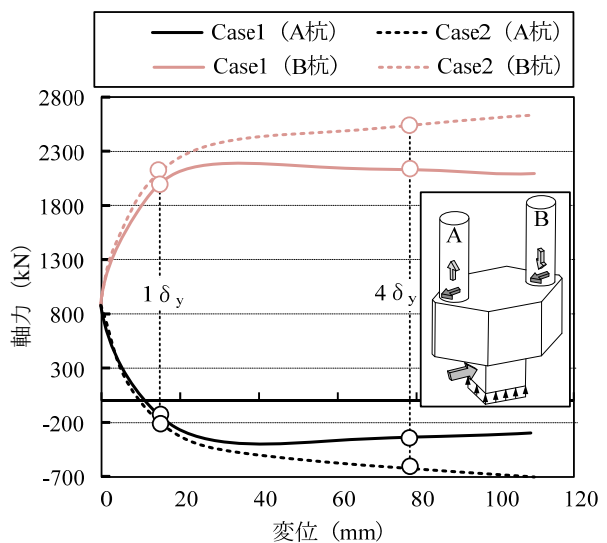
そこで、次節ではフーチング損傷に差が生じた原因について考察する。

4.2 フーチング損傷状態と作用荷重の関係

図-9(a) に杭頭に作用する水平力、(b) に杭頭に作用する鉛直力を、図-10 に変形に伴う解析の軸応力と水平応力の変化 (A 杭側) を示す。図に示す水平力、鉛直力はともに図-3 に示す杭先端ヒンジ部における水平反力、鉛直反力である。また、軸応力は軸力を杭の断面積で除して、水平応力は水平力を杭径 \times 杭の埋め込み長で除して応力に変換した。図-9 (a) に示すように、A 杭では、



(a) 杭頭に作用する水平力



(b) 杭頭に作用する鉛直力

図-9 杭頭に作用する力

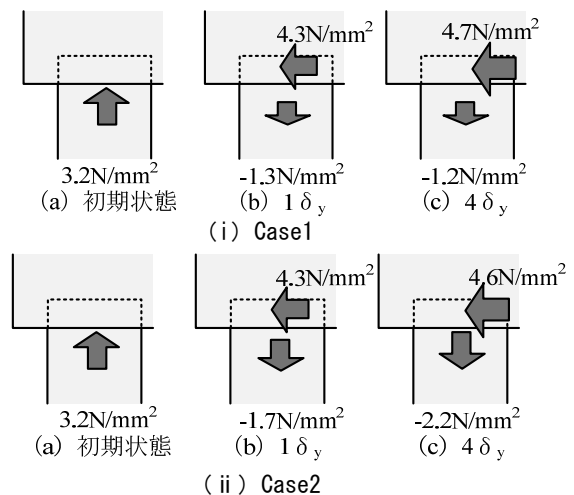


図-10 杭頭作用力の違い

Case1, 2ともに1 δ_y までに急激に水平力が増加し、以降一定となり同様の挙動を示した。杭が圧壊したB杭の水平力は1 δ_y まではほぼ一致するが、1 δ_y 以降Case2の水平力は増加しており、4 δ_y 時になると、水平力はCase1で395kN、Case2で552kNとなり、変位が進展すると差異が拡大し

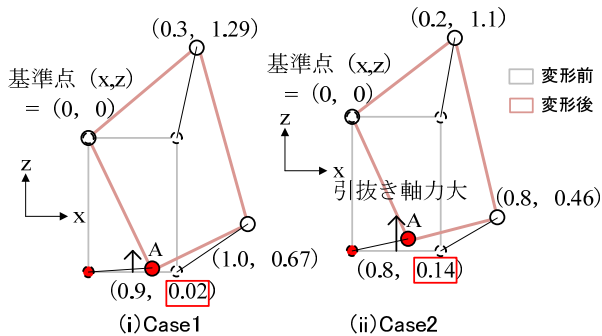
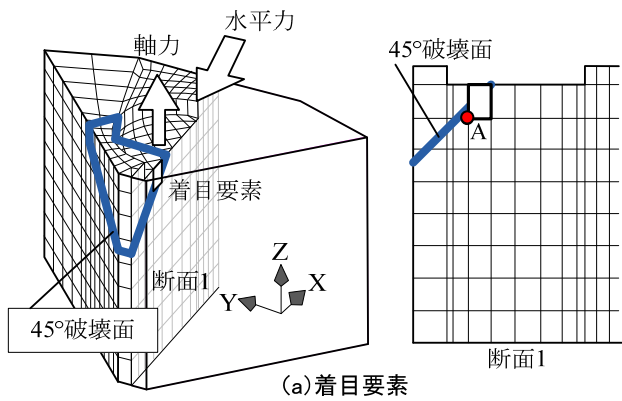


図-11 要素の変形状況

た。ここで、鉛直力に着目する。図-9 (b) に示すように、A 杭引抜き軸力は、 $1\delta_y$ 時において、Case1 で-194kN、Case2 で-169kN とほぼ一致し、 $4\delta_y$ 時になると、Case1 で-344kN、Case2 で-614kN となり、変位が進展するとともに差異が生じた。差異が生じたのは、Case2 では B 杭側の剛性が低下しないためであると考えられる。

図-10 の水平応力、軸応力に着目すると、図に示すように初期状態 (変位 0mm) では、Case1, 2 とともに押込み軸応力 3.2N/mm^2 のみが作用している (図 (a))。 $1\delta_y$ の引抜き軸応力は Case1, 2 でそれぞれ -1.3N/mm^2 、 -1.7N/mm^2 、水平応力は Case1, 2 とともに 4.3N/mm^2 (図 (b)) となり、引き抜き軸応力にやや差が生じた。 $4\delta_y$ の引き抜き軸応力は Case1, 2 でそれぞれ -1.2N/mm^2 、 -2.2N/mm^2 、水平応力は Case1, 2 でそれぞれ 4.7N/mm^2 、 4.6N/mm^2 となり、引き抜き軸応力はさらに差が生じた。

以上の結果より、A 杭側では、水平応力は、Case1, 2 で同様の挙動を示したが、引き抜き軸応力は、Case2 では変位の進展に伴い、増加し続けており、Case1 と異なる挙動を示した。したがって、Case2 の方がフーチングと杭の接合部では、引張ひずみが大きく、 6920μ 以上 (応力で 0N/mm^2 相当) のひずみが発生していることから、変位が進展すると、Case2 では、A 杭の軸引張損傷が発生すると考えられる。ただし、杭主鉄筋の応力低下を考慮していないため、杭の損傷には至らないと考えられる。

図-11 に $4\delta_y$ 時の着目要素と要素変位量を示す。着目する要素は推定破壊面上に存在する。また、図中に示す変位量は、図中の基準点からの相対的な変位量である。

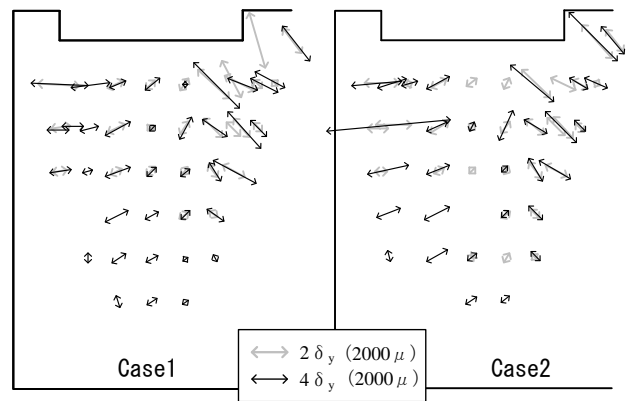


図-12 フーチング中央断面損傷進展状況 (主引張ひずみ)

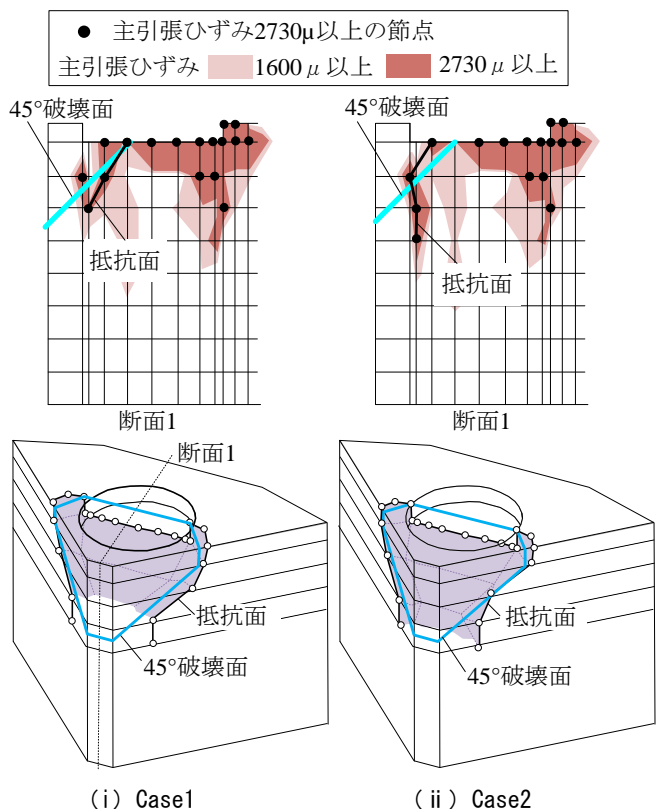


図-13 解析による水平押し抜きせん断抵抗面

図に示すように、XZ 断面において、Case1 の要素では、X 方向に最大 1.0mm、Z 方向に最大 1.29mm、Case2 の要素では、X 方向に最大 0.8mm、Z 方向に最大 1.1mm 移動しており、Case1, 2 とともに要素が引張軸力と水平力により要素がせん断変形していることがわかる。次に、Case1, 2 の節点 A の Z 方向変位量を比較すると、Case1, 2 はそれぞれ 0.02mm、0.14mm となり、Case2 の方が内部まで Z 方向の変位量が大きく、引き抜き軸力の影響を受けていることがわかる。

以上の結果より、実験で生じた B 杭の曲げ損傷を再現しない Case2 の場合、水平力の増大と共に杭が軸力を負担することにより引張軸力も増大し、Case1 に比べ Case2 の方が引抜き軸力大きくなるため、Case2 で杭との

接合部であるフーチング下面のコンクリートに主引張ひずみが大きく発生したと推測される。

4. 3 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-12 に 2, $4\delta_y$ の断面の主引張ひずみ分布を示す。図に示す矢印は節点における主引張ひずみの方向を示している。図に示すように、Case1, 2 ともに $2\sim 4\delta_y$ にかけて、主引張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-13 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 2730μ を超える主引張ひずみが発生した節点を連結し、設定した。主引張ひずみ 2730μ 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 $0N/mm^2$ 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-14 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損傷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、杭部では杭の曲げ圧縮損傷を確認した。一方、フーチング部ではフーチング下面鉄筋ひずみが進展し、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従来の水

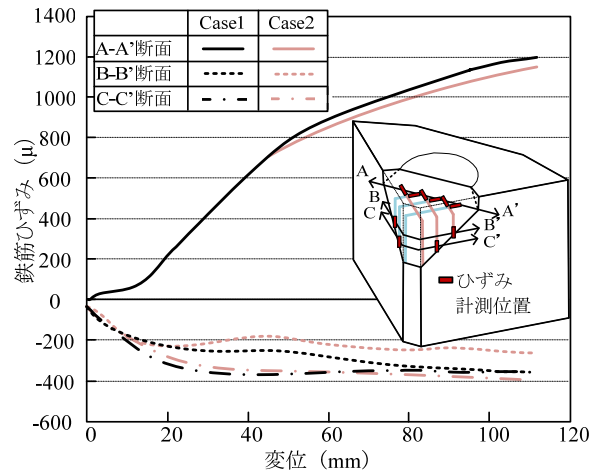


図-14 破壊面と鉄筋ひずみ進展の関係

平押し抜きせん断損傷を確認した。

- (2) Case1 では、実験と同様に、B 杭での曲げ圧縮損傷により荷重が低下した。一方フーチング部では、下面鉄筋ひずみが進展し、かつ推定抵抗面が 45° 破壊面が類似していることから実験と同様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。
- (3) Case2 では、引き抜き軸力が増加し続けることにより、A 杭の軸引張損傷が発生するが、解析上終局に達していないと考えられる。一方、フーチング部では、下面鉄筋ひずみが進展し、かつ推定抵抗面が 45° 破壊面に類似していることから従来の水平押し抜きせん断損傷が発生したが、破壊に至らなかった。
- (4) Case1よりCase2の方が、引抜き軸力が大きくなるが、フーチングにおける推定抵抗面とフーチング下面鉄筋ひずみの進展量より、水平押し抜きせん断損傷は同程度であると考えられる。

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の設計施工編，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, 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.