

杭作用によるフーチング押し抜きせん断の詳細評価

木下和香¹・幸左賢二²・白戸真大³・佐々木達生⁴

¹学生会員 九州工業大学大学院 建設社会学専攻（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）
²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）
³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）
⁴正会員 大日本コンサルタント（株）技術統括部（〒170-0003 東京都豊島区駒込3-23-1）

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、フーチングの縁端距離を縮小して施工される場合がある。

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。

現在、杭基礎設計便覧では、レベル1地震時において、水平方向の押し抜きせん断照査を行うよう規定されている。水平方向の押し抜きせん断は、杭からの水平力により、図-1 (b) に示すように、杭前方に45°、図-1 (c) の断面で杭頭部から45° に押し抜かれる破壊形式である。

しかし、フーチング部損傷状況に関する研究例が少なく、レベル2地震時において縁端距離を縮小した場合のフーチング結合部の破壊形態や耐力は明らかとなっておらず、破壊形態に基づいた設計方法は確立していない。

そこで、本研究では土木研究所の行ったフーチング縁端部を縮小した組杭の正負交番載荷実験を基に、フーチング損傷状態について分析を行った。

2. 実験概要

(1) 供試体形状と載荷方法

図-2 に実験供試体形状、図-3 にフーチング部の配筋図を示す。供試体は実際の道路橋橋脚の場所打ち杭基礎（2×2 本群杭）の橋脚から杭体までを

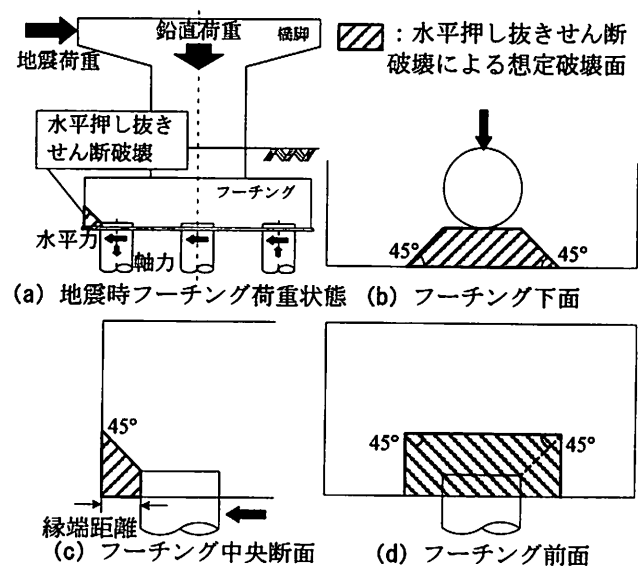


図-1 杭とフーチングの縁端距離

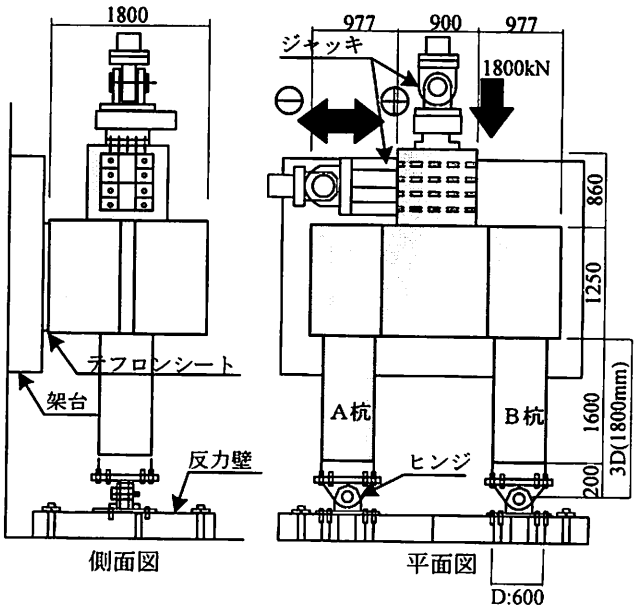


図-2 供試体形状

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载荷を行った。図-3 に示すように縁端距離は、かぶりやフーチング鉄筋径、鉄筋のあきを考慮した必要最低長の 75mm としている。また、本実験の供試体は摩擦が軽減するようにテフロンシートを敷いた架台の上に横向きに設置している。杭の先端にはヒンジを設け、フーチング下面から杭径 D の 3 倍 (1800mm) の位置で、曲げモーメントがゼロとなるようにしている。载荷はジャッキ 2 基を用いており、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。鉛直軸力による各杭の圧縮応力は 3.18N/mm^2 となり、使用したコンクリートの圧縮強度の 7.6% に相当する。

材料試験結果を表-1 に示す。各材料強度はそれぞれ 3 本の材料試験結果の平均値である。コンクリートの実強度は杭が 42.0N/mm^2 、フーチングが 23.8N/mm^2 であった。また、鉄筋は SD345 を使用しており、杭体には、軸方向鉄筋 D25 を 12 本、帯鉄筋 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 D19 を 125mm 間隔の格子状に、上側主鉄筋 D19 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% である。

(2) 荷重－変位関係

水平荷重載荷位置における荷重と変位の関係を図-4 に示す。両側の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 δ_y (21.5mm) とする。このときの変位を基準とし、以降载荷を行っている。図に示すように、1～2 δ_y の間で水平荷重がピーク (692kN) をむかえ、その後荷重が低下するものの 3 δ_y 以降強度を保持し、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。

図-5 に正荷重の载荷によって生じる結合部の反力の作用方向を示す。図中、A 杭が引抜き杭となり、B 杭が押込み杭となる。A 杭では、水平力はフーチングの内側から縁端側に向かって外向きに作用しており、杭基礎設計便覧で規定されている水平押し抜きせん断照査時と同じ荷重状態となる。

図-6 に載荷ステップ毎の A 杭 (正方向载荷時に引き抜き側となる杭) 側の損傷状況を示す。図中の①、②は図-5 に示す①、②視点の供試体の様子である。まず、水平荷重 130kN あたりで杭体の引張り

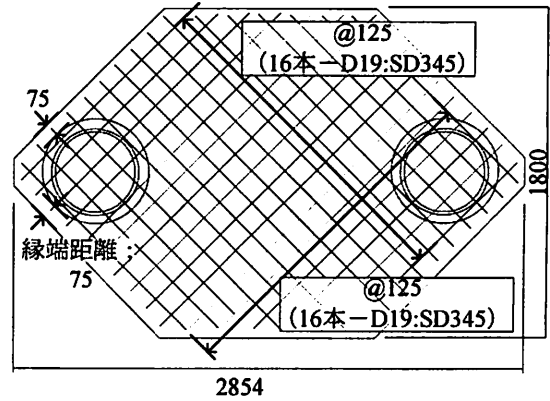


図-3 配筋図 (フーチング下面)

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

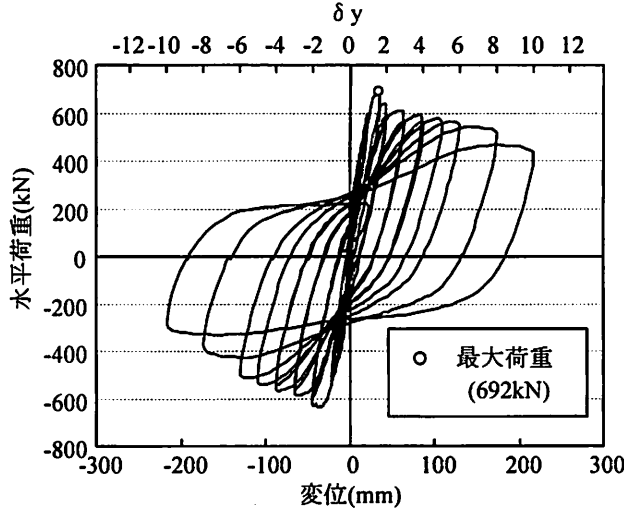


図-4 荷重－変位関係

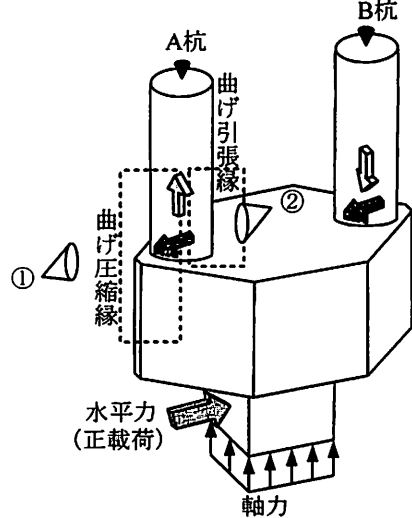


図-5 接合部荷重状態

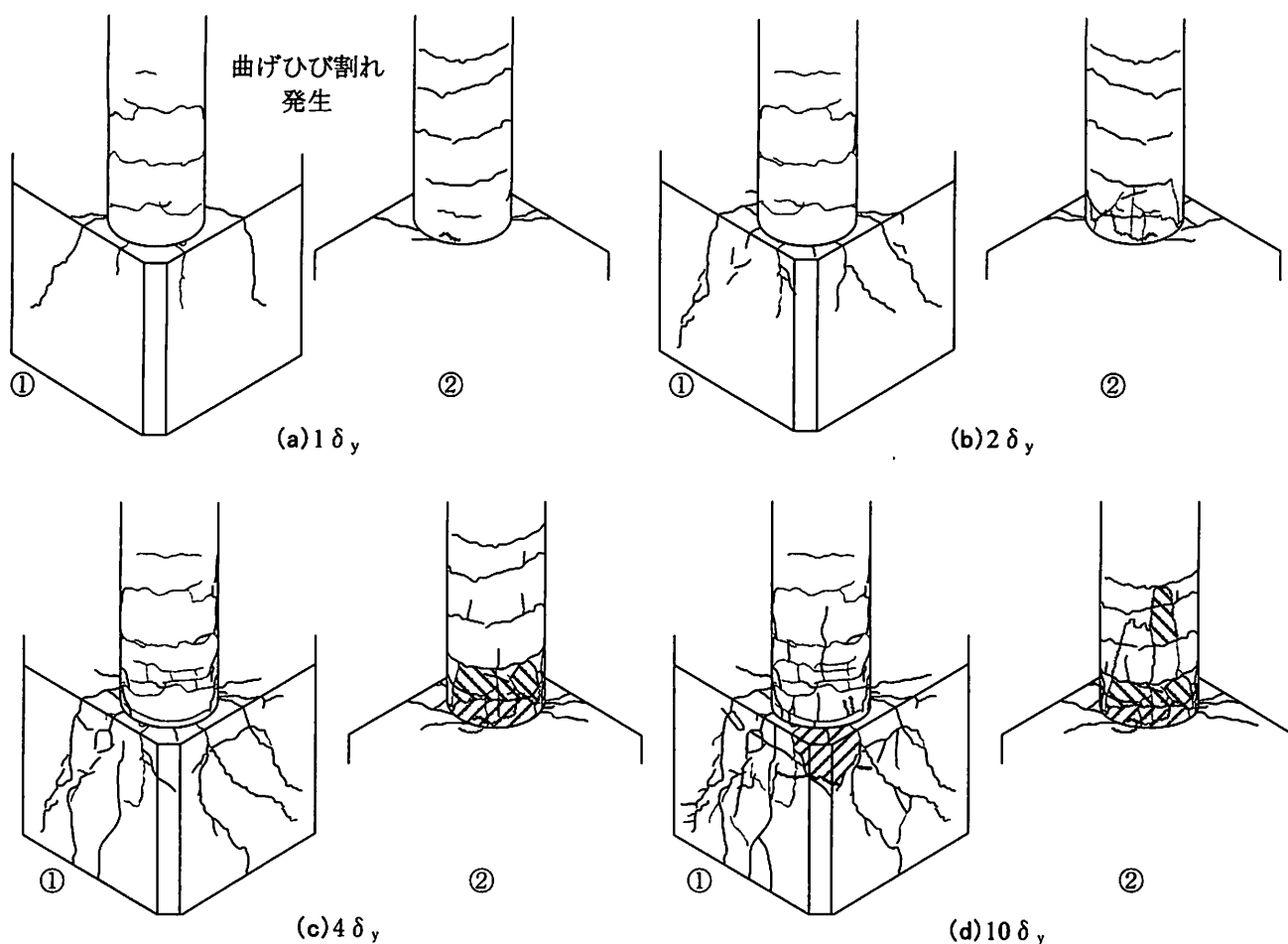


図-6 供試体損傷図

側に曲げひび割れが生じ、 $1\delta_y$ 終了時では曲げひび割れが進展している。フーチングでは $0.5\delta_y$ 時に杭結合部で発生したひび割れが外向きに水平反力を受ける載荷側で進展し、フーチングの側面に達している。ここで、荷重ピーク時には押し込み側である B 杭の圧縮縁でかぶりコンクリートが圧壊しており、 $3\delta_y$ では杭基部のかぶりコンクリートが剥落している。また、負荷荷時における A 杭も B 杭と同様にコンクリートの圧壊、剥落が確認された。フーチングのひび割れは上面に向けて進展し続け、 $4\delta_y$ になるとフーチング下面から側面、上面と一周繋がるようなひび割れとなった。最終的な破壊状況を見ると、A 杭 B 杭双方の杭体内側のかぶりコンクリートが剥落し、杭軸方向鉄筋の座屈、破断が発生している。フーチングでは隅角部のかぶりコンクリートが剥落しフーチング下面主鉄筋が露出した。

実験の主な破壊形態は杭体の曲げ圧縮破壊であるが、フーチングの最終的な損傷を見ると、隅角部かぶりコンクリートの剥落に加え、外向きに水平反力を受ける載荷方向において隅角部付近のフーチング下面主鉄筋が半数以上降伏していることから、水平

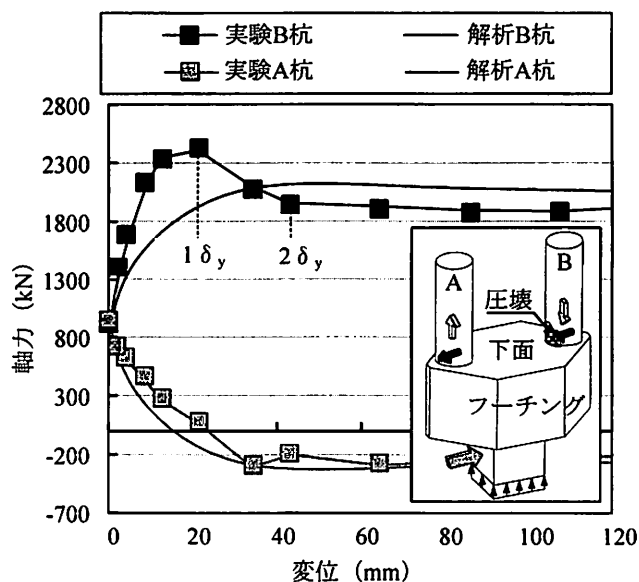


図-7 杭に作用する軸力

押し抜きせん断の様な傾向が見られる。

3. 杭体損傷状況

実験での主要な破壊は杭基部におけるコンクリートの圧壊であった。コンクリートが圧壊するとき、杭は押し込み杭となる。そこで本章では押し込み杭の破壊状況を定量的に評価する。

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、鉄筋ひずみを用い、軸力及び水平力を算定した。作用力の算定には、杭基部から 900mm の位置の最外縁鉄筋ひずみを用いた。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。また、算出した作用力の信頼性を確認するため、FEM 解析による、杭ヒンジ部の鉛直反力（軸力）と水平反力（水平力）を図-7、8 に併記する。

図-7 に杭に作用する軸力を示す。押し込み杭である B 杭において、 $1\delta_y$ まで急激に圧縮軸力が増加し、実験で 2428kN、解析で 2050kN となった。 $2\delta_y$ 時では実験で 1940kN、解析で 2190kN となり、以降圧縮軸力は一定となった。図に示すように、実験結果は解析結果に比べ $1\delta_y$ までは、軸圧縮力が大きくなり $2\delta_y$ 以降軸圧縮力は小さくなる傾向が見られる。なお、初期軸力は 900kN であり、 $2\delta_y$ までの軸力の変化量は、実験で 1040kN、解析で 1290kN となり、概ね一致した。

また、実験、解析双方で杭の軸力が $1\delta_y$ 以降一定となったのは、杭基部において鉄筋が降伏し、杭頭部がヒンジになり、水平荷重が増加しなくなったためであると考えられる。

以上の結果より B 杭の実験と解析の軸力の変化量がほぼ一致しており、実験と解析は同様の挙動を示すことが確認された。

図-8 に杭に作用する水平力を示す。ここで、実験の B 杭の水平力は実験時の載荷水平荷重から引抜き杭である A 杭の水平力を引いた値とした。これは、B 杭で過大な圧縮軸力が作用しており、ひずみ分布が大きく変動するためである。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。

図-9 に断面計算ソフトサクセスを用いて算出した M-N 相関関係と図-7、8 より算出した各変位に

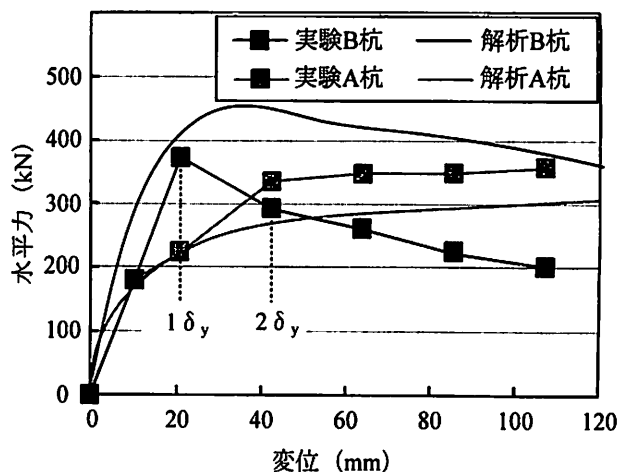


図-8 杭に作用する水平力

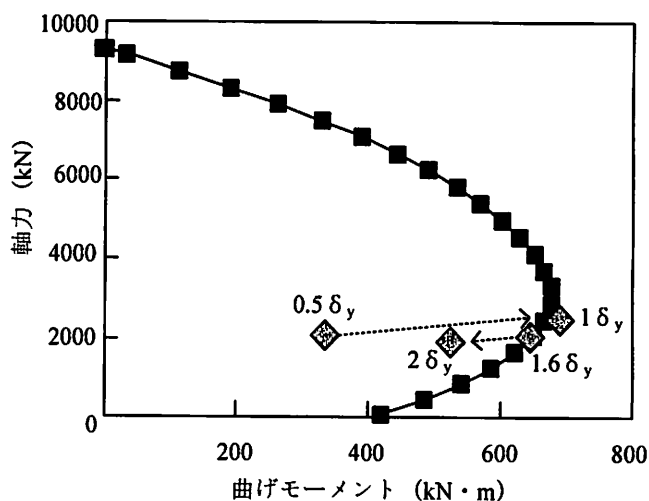


図-9 M-N 相関関係

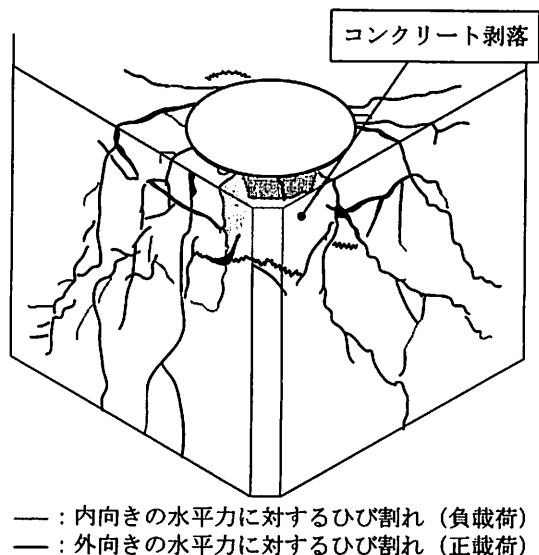


図-10 A 杭側フーチング最終損傷状況

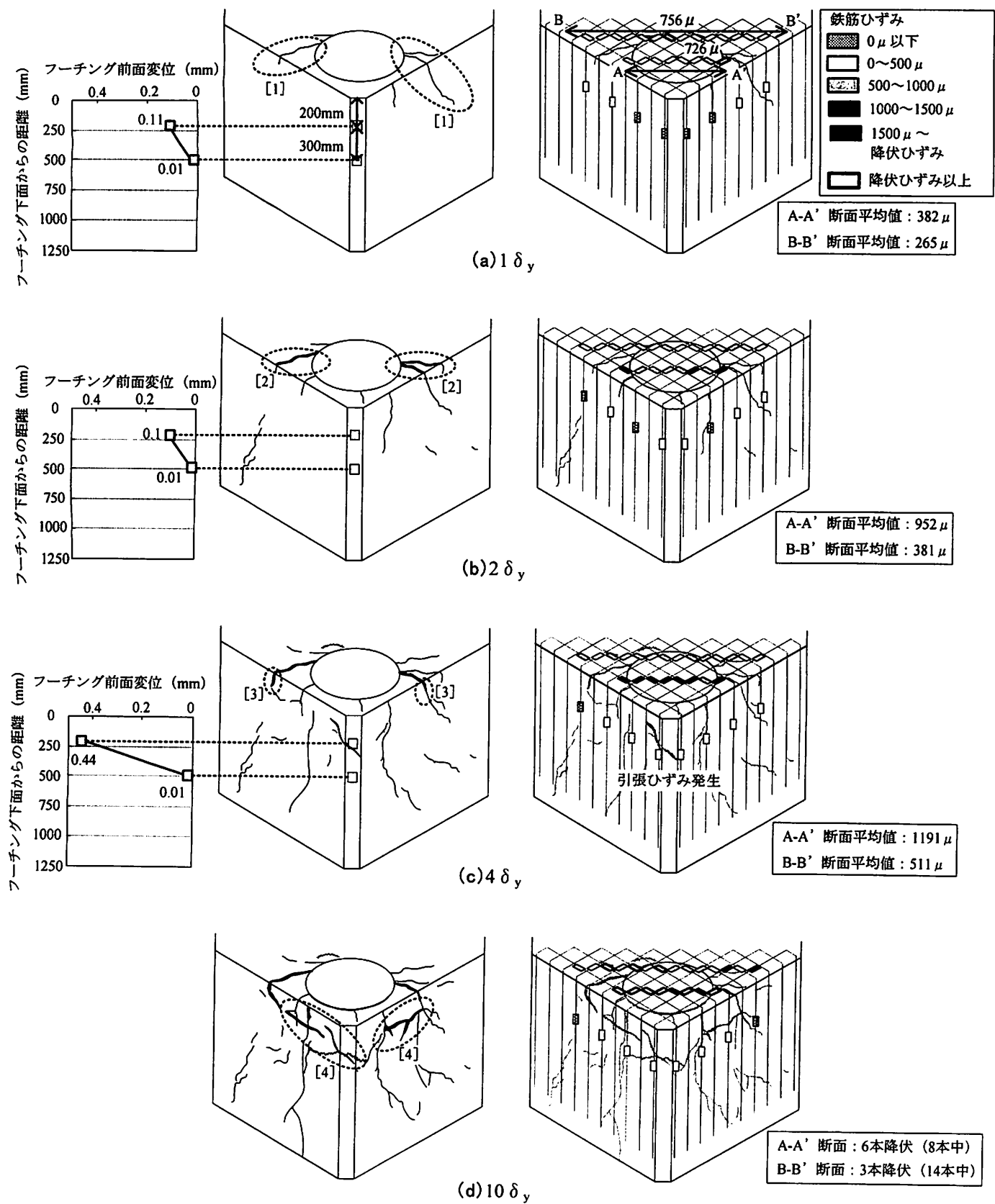


図-11 フーチング水平押し抜きせん断損傷進展状況

おける軸力と曲げモーメント（＝水平力×アーム長 1800mm）を示す。図より、 $0.5\delta_y$ から $1\delta_y$ にかけて水平力が増加し、 $1\delta_y$ で杭の曲げ破壊の終局に達し、 $1.6\delta_y$ から $2\delta_y$ にかけて杭の圧壊により、水平力が低下したことがわかる。以上の結果より、杭部は、水平力が増加することにより、杭の曲げ破壊が発生した。

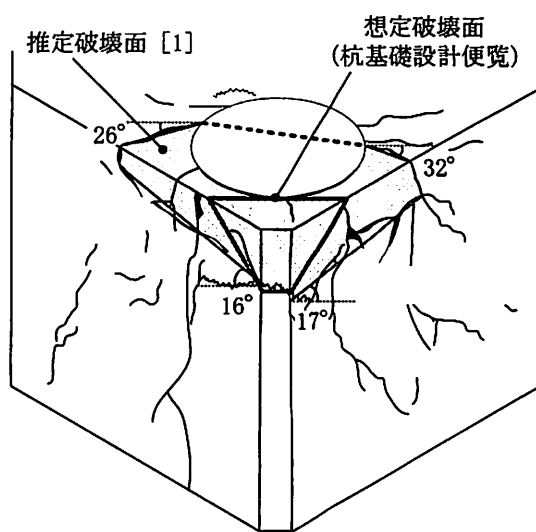
4. フーチング損傷状況

実験では、杭圧壊後、フーチング損傷進展が確認された。そこで、このフーチング損傷が水平押し抜きせん断によるものか検討を行う。

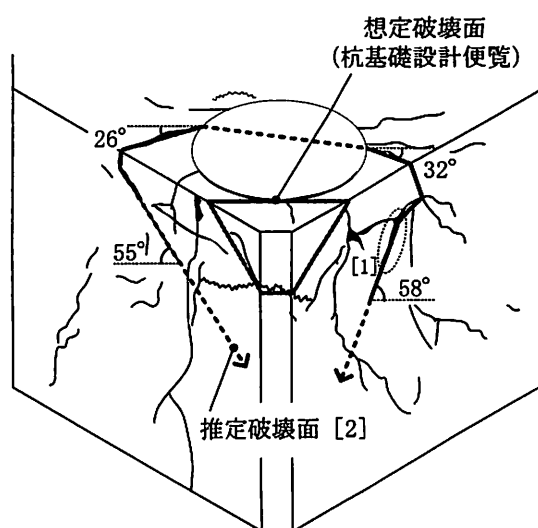
図-10 に A 杭側フーチングの最終損傷状況を示す。黒色のひび割れは正載荷時（外向きの水平力作用時）に、灰色のひび割れは負載荷時（内向きの水平力作用時）に発生したひび割れを示している。今回、杭基礎設計便覧と同様の荷重状態になる正載荷時において発生するひび割れを水平押し抜きせん断によるひび割れと定義した。また、隅角部位置のコンクリート剥落は、負載荷時に進展したひび割れが連結して破壊面が形成されて剥落に至ったため、水平押し抜きせん断による損傷ではないと考えた。

図-11 にフーチングの水平押し抜きせん断損傷進展過程を示す。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。左段に示す図は、フーチング前面変位の進展過程、中央段に示す図は、水平押し抜きせん断ひび割れの進展過程、右段に示す図はフーチング下面、側面鉄筋のひずみ分布図である。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。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増加量である。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 1927μ である。ひび割れは図-10 で定義したひび割れのみを抽出した。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 $1\delta_y$ 時で 0.11mm、 $2\delta_y$ 時で 0.1mm となり、ほとんど進展が見られなかったが、 $4\delta_y$ 時になると 0.44mm となり、 $2\sim 4\delta_y$ にかけて急激に変位が進展したことが確認された。また、フーチング下面から 500mm 位置の変位は、 $1\delta_y$ 時で 0.01mm、 $2\delta_y$ 時で 0.01mm、 $4\delta_y$ 時で 0.01mm となり、変位は全く進展しなかった。

フーチング下面鉄筋に着目すると、杭中央断面で



(a) 推定破壊面[1]



(b) 推定破壊面[2]

図-12 ひび割れによる推定破壊面

は、 $0.5\delta_y$ で、初期ひび割れ発生位置にひび割れ発生レベルの 209μ のひずみが発生し、 $2\delta_y$ 時になると初期ひび割れ発生位置の鉄筋が降伏ひずみに達した。また、断面のひずみは均一に進展しており、 $2\delta_y$ の平均鉄筋ひずみは 952μ となり、急激なひずみの進展が確認された。杭後方断面でも、ひずみは均一に進展し、 $2\delta_y$ 時の平均鉄筋ひずみは 381μ となった。側面鉄筋では、ひずみの増加量は最大でも 200 μ 程度と小さいものの、隅角部位置では圧縮ひずみが発生し、杭側方では引張ひずみが、杭後方では圧縮ひずみが確認できた。 $4\delta_y$ になると、下面鉄筋は、杭中央断面では、新たに 1 本、計 2 本（8 本中）の鉄

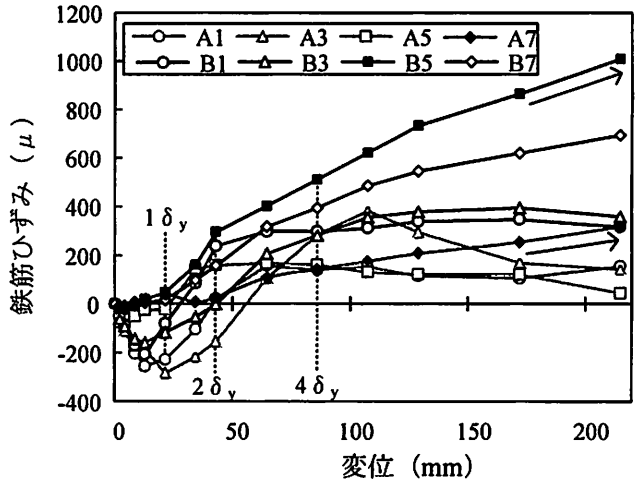
筋が降伏（1927 μ ）に達した。鉄筋ひずみの平均は1190 μ 程度となり、 $2\delta_y$ 時に比べ、200 μ 程度微増した。同様に、杭後方断面でも、鉄筋のひずみの平均は500 μ 程度となっており、 $2\delta_y$ 時と比べ、100 μ 程度微増した。杭側方断面の側面鉄筋は、隅角部位置ではほとんどひずみが発生しておらず、後方よりの側方位置では圧縮ひずみが、前方よりの側方位置では引張ひずみが発生した。 $10\delta_y$ になると、下面鉄筋は、杭中央断面で6本降伏に達した。

ひび割れに着目する。杭側方位置に水平荷重の直交方向にひび割れが発生し、 $0.75\delta_y$ 時にはフーチング下面のひび割れは側面まで進展した（図中 [1]）。 $2\delta_y$ になると、フーチング下面に発生したひび割れ幅は拡大し（図中 [2]），フーチング側面に発生したひび割れがフーチング上面に向かってさらに進展する。また、隅角部では鉛直方向にひび割れが発生した。 $4\delta_y$ になると、フーチング下面の杭後方位置に新たなひび割れが発生した。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 [3]）。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いる。 $10\delta_y$ になると、フーチング側面のひび割れ幅も拡大し（図中 [4]），一部コンクリートの剥離も確認された。

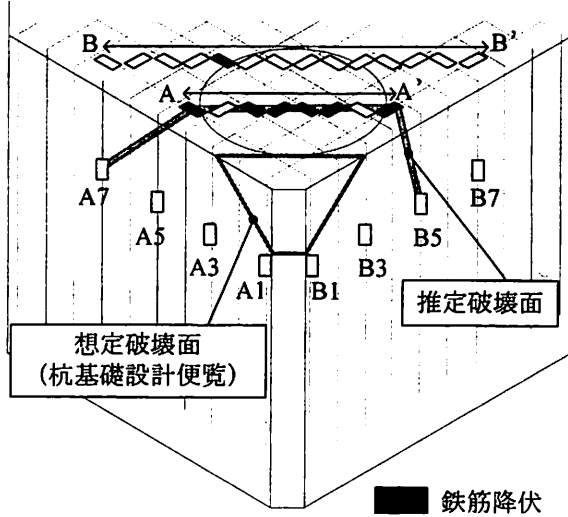
実験結果より、正載荷の水平力に対して、杭結合部は水平力直角方向のひび割れが発生し、側面、上面に進展したことから、後述するような水平押し抜きせん断によるひび割れが発生したと考えられる。また、ひび割れ発生後、フーチング下面鉄筋はひずみが急激に増加し、 $2\delta_y$ 以降も微増することから、水平力に対し、抵抗していると考えられる。特に $4\delta_y$ では、フーチング前面変位の増加、フーチング下面の鉄筋ひずみの増加、ひび割れの発生等、杭が外向きに変位しているような兆候がうかがえる。したがって、今回の実験では正載荷の水平力による水平押し抜きせん断の損傷過程が支配的であると考える。

図-12 にひび割れによる水平押し抜きせん断の想定破壊面を示す。ここで図-12 (a) に示す幅の大きいひび割れが変位の進展に伴い破壊面を形成すると推測される。このときの推定破壊面は、フーチング下面からおよそ 26° , 32° となり、断面方向では、 16° と 17° となる。推定破壊面 [1] は、杭基礎設計便覧による想定破壊面より、大きな破壊面になると考えられる。

また、もう一つの推定破壊面を図-12 (b) に示す。図-11 より、ひび割れは、フーチング下面から側面に進展していくことが確認されている。した



(a) 側面鉄筋ひずみ進展状況



(b) 鉄筋ひずみ計測位置

図-13 鉄筋ひずみによる推定破壊面

がって、図-12 (b) の[1]に示すひび割れは $10\delta_y$ に発生しており、変位の進展とともにこのひび割れは進展して、破壊面が形成すると推測される。この推定破壊面は、フーチング下面では、杭中央からおよそ 26° , 32° となり、断面方向では 56° と 58° となる。推定破壊面 [2] は、推定破壊面[1]と同様に、杭基礎設計便覧による想定破壊面より、大きな破壊面になると考えられる。

次に、鉄筋ひずみから水平押し抜きせん断の破壊面を推定する。鉄筋ひずみの進展が著しい位置において、変位が進展すると破壊面が形成すると推測される。

フーチング下面では、図-11 に示すように、B-

B'断面より A-A'断面の方が、ひずみの進展量が大きく、降伏に至っている鉄筋本数も多いため、A-A'断面を破壊面とした。フーチング側面における鉄筋ひずみ進展状況を確認すると、図-13 に示すように、B5 位置と A7 位置の鉄筋ひずみが進展していくことがわかる。

以上の結果から、推定される破壊面を図-13 に示す。この推定破壊面は、ひび割れによる推定破壊面と同様に、杭基礎設計便覧による想定破壊面より一層かなり大きな破壊面になっていることが明らかとなった。

図-14 にひび割れ、鉄筋ひずみによる推定破壊面を示す。ひび割れ幅が大きいひび割れを連結した推定破壊面 [1]、ひび割れ進展状況による推定破壊面 [2]、鉄筋ひずみ進展が確認される位置を連結した破壊面を定義するとほぼ 45° 破壊面となる。

以上の結果より、縁端距離を縮小した場合、レベル 2 地震時では、フーチング下面中央から 45° 方向、フーチング断面から 45° 方向の水平押し抜きせん断破壊面が形成すると推測される。

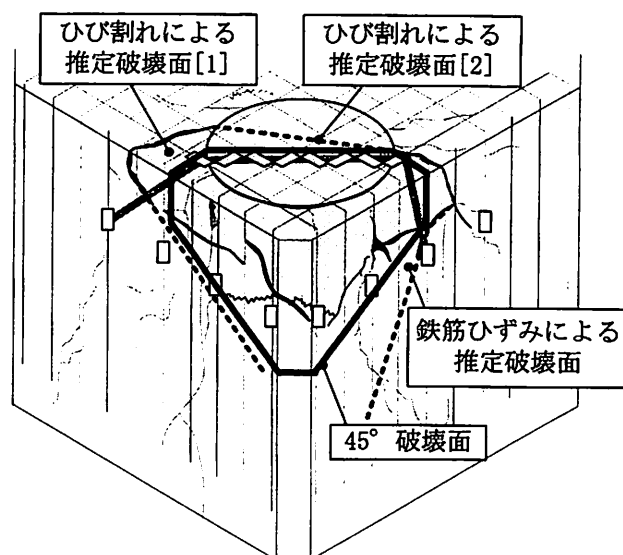


図-14 水平押し抜きせん断破壊形態

6. まとめ

H19 年度土木研究所による載荷実験を基に、水平押し抜きせん断破壊の発生状況を検討した結果、以下の知見を得られた。

- (1) 杭で圧縮破壊が発生した後も、フーチングではひび割れが発生しており、損傷が進展したことが確認された。
- (2) フーチングでは、外向きの水平作用に対して、ひび割れの進展、フーチング前面変位の増加、フーチング下面鉄筋の降伏が確認されたことから、水平押し抜きせん断損傷が進展したと考えられる。
- (3) 実験結果から、縁端距離を縮小した場合、レベル 2 地震時では、フーチング下面中央から 45° 方向、フーチング断面から 45° 方向の水平押し抜きせん断破壊面が形成すると推測される。

参考文献

- 1) 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. 351-352，2002.
- 2) 野々村佳哲，白戸真大，中谷昌一：杭とフーチングの縁端距離の縮小化に関する実験，日本道路会議，Vol. 27，2007.
- 3) 野々村佳哲，白戸真大，中谷昌一：杭とフーチング結合部の強度に関する正負交番載荷実験，第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 169-174，2008. 1.
- 4) 井上敦雄，幸左賢二，清水英樹，白戸真大：場所打ち杭縁端部の水平押し抜きせん断耐力評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31，No. 2，pp. 721-726，2009. 7.