

論文 FEM 解析を用いた場所打ち杭の正負交番載荷実験の評価

瀬良 洋夢*1・幸左 賢二*2・清水 英樹*3・白戸 真大*4

要旨: 杭基礎におけるフーチング縁端部の破壊形態を調べるため、場所打ち杭の組杭供試体実験を実施した。その結果、主な破壊形態は押込み軸力と曲げ圧縮力による杭基部の圧壊であった。この実験を基に FEM 解析を実施したところ、水平押抜きせん断に関してはフーチング下面鉄筋の抵抗とフーチング下面隅角部に作用するせん断応力が確認されたが、明確な水平押抜きせん断のモードは発生せず実験と同様に杭体での破壊となった。

キーワード: 場所打ち杭, 押抜きせん断, FEM解析, 杭縁端距離

1. はじめに

橋梁の下部構造において、杭基礎の場合には躯体各部からの荷重はフーチングを介して杭から地盤へと伝達される。それゆえ杭本体は勿論のこと、杭反力に対してフーチングも破壊しないように設計を行う必要がある。現在、道路橋示方書¹⁾においては、図-1に示すようにフーチング縁端から最外周の杭までの距離（以下、縁端距離）は、場所打ち杭の場合、杭径（D）の0.5倍以上を確保する必要がある。しかしながら、通常の常時荷重、L1レベルの地震時に対して照査すると、必要縁端距離は25cm程度で十分の結果が得られている²⁾。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、縁端距離を縮小して施工される場合もある。図-2に示す様に、一般的な橋梁において縁端距離を道路橋示方書規定値¹⁾（杭径の0.5倍、60cm程度）から25cmへと縮小させることができれば、1フーチングあたり15~20%程度コンクリートの体積、鉄筋量を削減することができる。これに伴い、掘削土量、土留工も20%程度削減することが可能となる。しかし、縁端部は極めて複雑な応力状態になる。そこで、実験により破壊形態を確認することが重要であると考えられ、様々な荷重状態での実験が行なわれている^{2), 3)}。

土木研究所においては実構造物と同様に杭からの軸力、水平力、モーメントが同時に作用する状況における縁端部の破壊形態を調べるために、2本組杭模型による載荷実験を行っている。本検討ではこの実験結果を基にFEM解析による数値シミュレーションを実施した。

2. 実験概要

(1) 供試体形状と載荷方法

図-3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本群杭）の隅角部を模擬

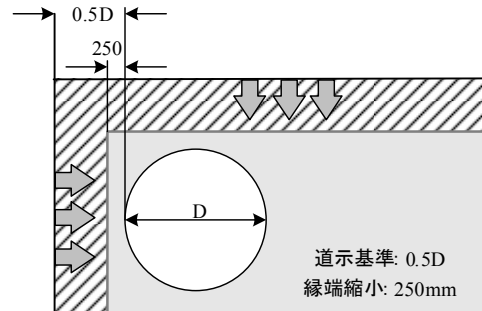


図-1 杭とフーチングの縁端距離

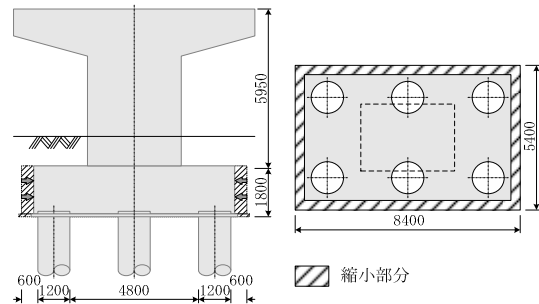


図-2 縁端距離の縮小

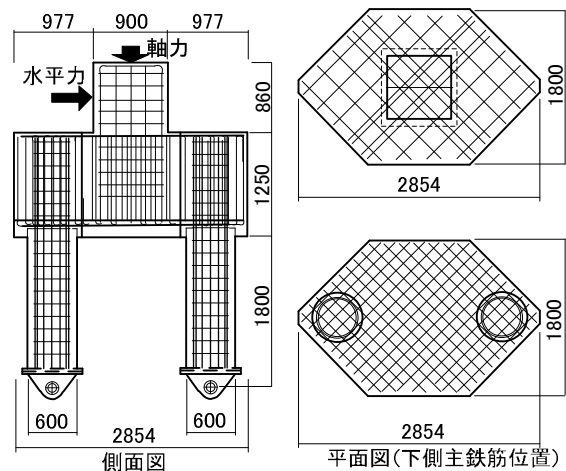


図-3 供試体形状

*1 九州工業大学 工学部建設社会工学科 (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 九州工業大学大学院 工学研究科 建設社会工学専攻 (正会員)
 *4 独立行政法人土木研究所 工博

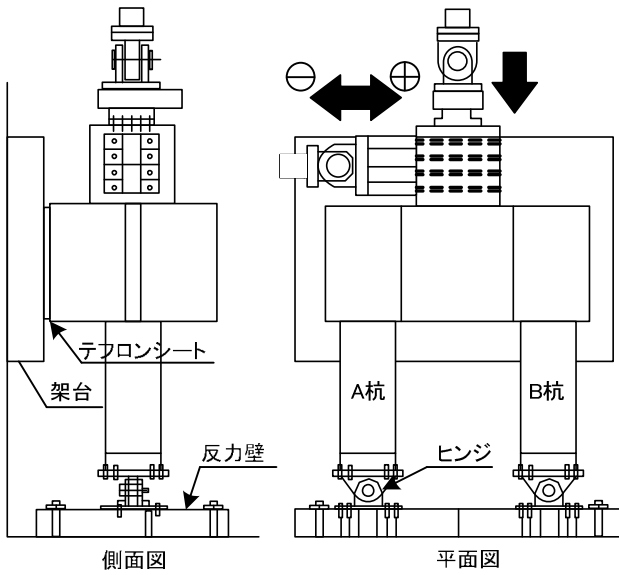


図-4 荷重状況

表-1 材料定数

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	42.02	27.9	0.233	2.931	
フーチング部	23.77	23	0.193	2.387	
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	369.12	1892	544.24	195.14
	D19	369.98	1927	560.09	192.02
	D22	377.59	1963	577.11	192.32
	D16	392.16	2018	601.12	194.36

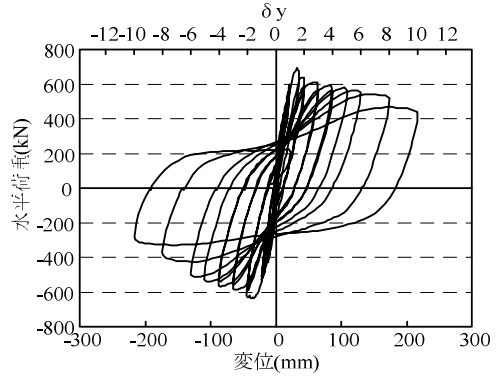


図-5 荷重-変位関係

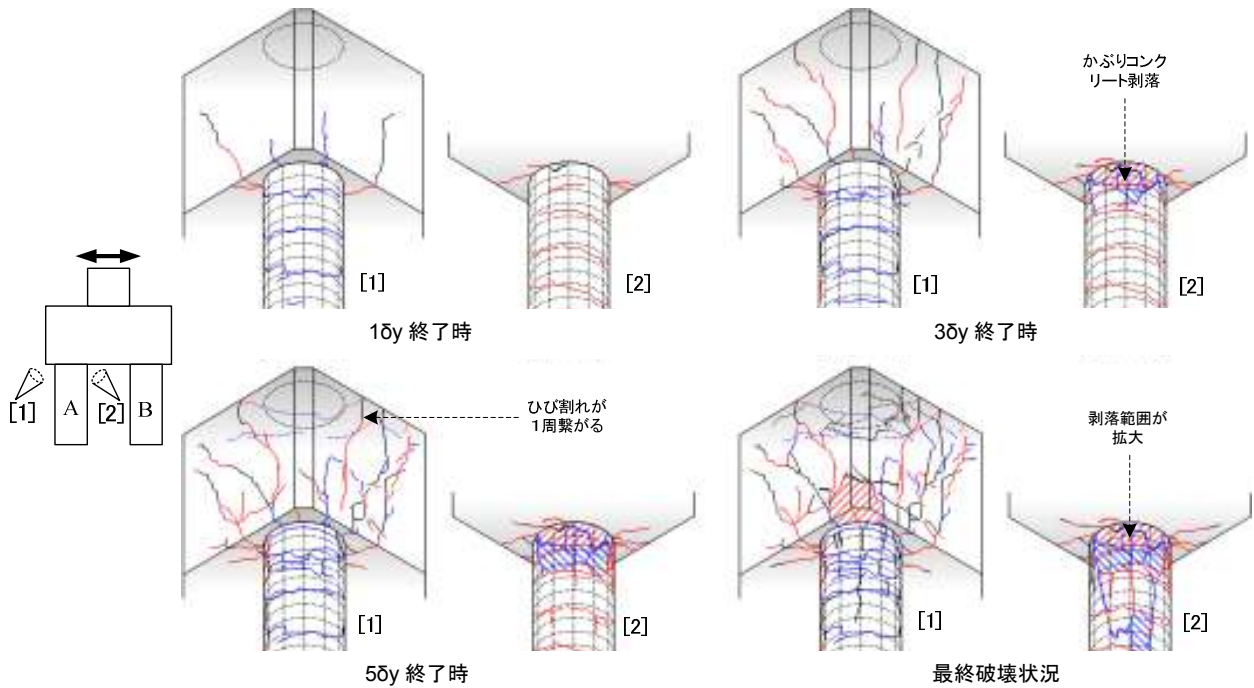


図-6 A 杭のひび割れ進展状況

したもので実際の杭径 1200mm, 縁端距離 250mm の構造物の 1/2 のスケールとしている。杭径 $D=600\text{mm}$, 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 75mm としている。材料試験結果は表-1 の通りで、コンクリート強度はフーチングより杭体の強度が高く設定されている。鉄筋は SD345 を使用しており、杭体よりフーチングの損傷を先行させる狙いから、標準的な道路橋橋脚の場所打ち杭及びフーチングに対して、杭体では鉄筋量が多目の部類, フーチング部では鉄筋量が少なめの部類になるように配置している。

図-4 に荷重状況を示す。本実験では供試体を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 倍の位置で曲げモーメントがゼロになるようにしている。荷重にはジャッキ 2 基を用いており、橋脚部に一定の鉛直力 1800kN を与えた上で正負交番の水平変位を与えている。与えた軸力は各杭に $3.18 \text{ N}/\text{mm}^2$ となりこれは用いたコンクリート圧縮強度の 7.6% に相当する。

(2) 実験結果

図-5 に水平荷重載荷位置における荷重-変位関係を示す。荷重時に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、その時の変位を降伏変位 δy (21.5mm) とし、 $2\delta y$ 以降の荷重を行っている。1~ $2\delta y$ の間で水平荷重がピーク (692kN) をむかえ、

その後若干荷重が低下するものの $3\delta y$ 以降強度を保持する挙動を示す。 $6\delta y$ 以降から荷重の低下が顕著となり、 $8\delta y$ では杭軸方向鉄筋の座屈、 $10\delta y$ 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-6 に荷重ステップ毎の A 杭（正方向荷重時に引抜き側となる杭）側の損傷状況を示す。実験では水平荷重 130kN あたりで杭体引張側に最初の曲げひび割れが確認され、 $1\delta y$ 終了時には基部から 900mm の範囲で曲げひび割れが発生している。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進展し、フーチングの側面に達している。荷重ピーク時には押し込み側の杭圧縮縁でかぶりコンクリートが圧壊している。 $3\delta y$ では杭基部のかぶりコンクリートが剥落している。フーチングのひび割れは上面に向けて進展し、 $5\delta y$ ではフーチング下面から側面、上面と一周繋がるひび割れとなった。最終的な破壊状況を見ると、杭体では押し込み杭の曲げ圧縮側で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。

図-7 に実験における引抜き杭（外向きに水平反力を受ける杭）のフーチング下面鉄筋ひずみを示す。測定位置は図中の A-A'、B-B'断面である。下面鉄筋には D22 を使用しており、降伏ひずみは 1963μ である。ひずみは荷重水平荷重 480kN で平均 300μ を超え、 $1\delta y$ (596kN) で平均 430μ 、 $3\delta y$ (565kN) で平均 1120μ と増加しており、 $5\delta y$ (548kN) 時点で 1373μ となっている。

実験の主な破壊形態は杭体の圧縮破壊であるが、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荷重方向でフーチング下面主鉄筋のひずみが進展していた。このことから、縁端距離を縮小したことによる水平押抜きせん断の傾向が見られるが全ての鉄筋が降伏するには至っていないため、鉄筋の抵抗分は結局に対し余裕があると考えられる。

3. FEM 解析

(1) 解析モデル

図-8 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。拘束条件はフーチング底部を Y 方向固定し、両杭の先端部の中心点の並進 3 方向の変位を固定することで、杭先端が回転できるようにした。水平押し抜きせん断破壊面は一方荷重の影響が大きいため、解析では正負交番ではなく一方荷重とした。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荷重している。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。

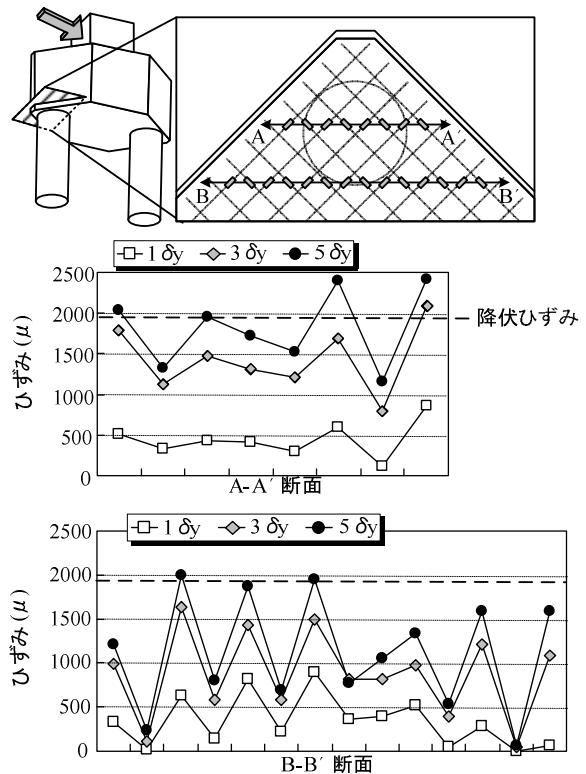


図-7 フーチング鉄筋ひずみ分布

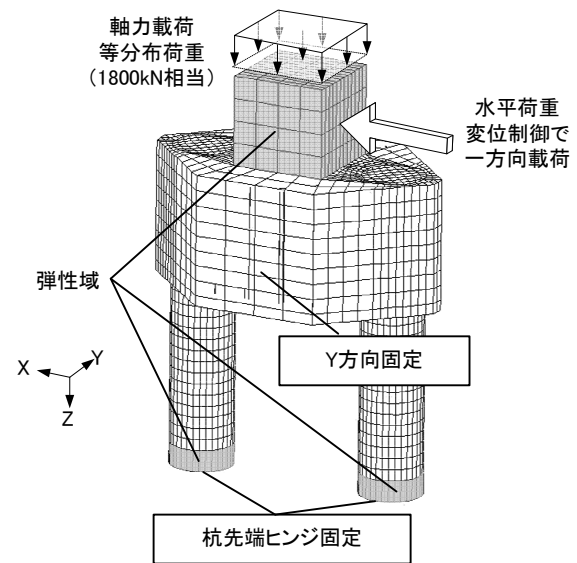


図-8 解析モデル

図-9(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。コンクリートには 8 節点ブロック要素を使用し、ひび割れモデルは固定多方向ひび割れモデルである。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た。図-9(b) に鉄筋の応力-ひずみ関係を示す。鉄筋降伏後の弾性係数は、 $1/100$ 弾性係数を二次勾配として bi-linear モデルとした。鉄筋には埋込み鉄筋要素を用い、要素軸方向のみに抵抗し、鉄筋とコ

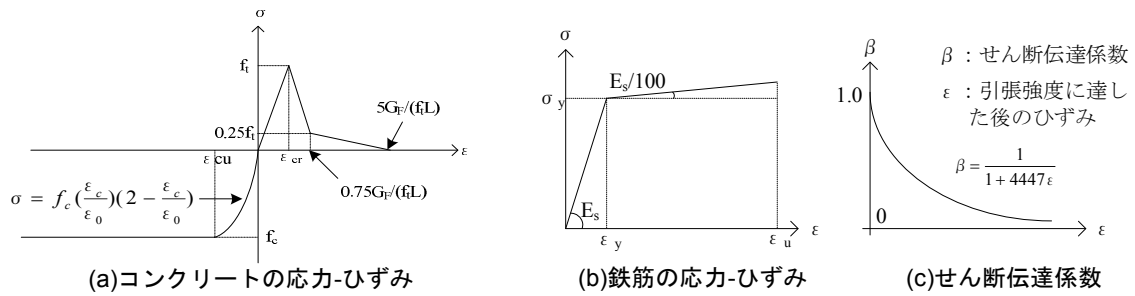


図-9 材料モデル

ンクリートは完全付着とした。図-9(c)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。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⁴⁾。また、解析に用いる各種の材料定数は実験供試体のものと同様とし表-1に示すとおりとした。なお、解析計算には接線剛性法を用い収束の判定にはひずみエネルギー基準を用い、判定誤差を0.1%以下とした。

(2) 解析結果

図-10に実験と解析の荷重-変位関係を示す。実験結果には正方向荷重の包括線を用いている。図より、解析の降伏変位は13mmと実験の21mmに比べて小さく、杭主鉄筋降伏時の荷重は解析で585kN、実験で592kNとなっており大きな差は見られなかったが、解析はその後も荷重が増加し続ける結果となり、実験は $2\delta y$ 以降550kN程度で一定となった。そこで、以降解析と実験の比較は実験での変位と同一変位時のものを用いることとした。

実験での主要な破壊は押し込み側杭基部におけるコンクリートの圧壊であった。実験では橋脚部に軸力として1800kNを載荷している。これは各杭あたり900kN(3.18N/mm²)の軸力となる。さらに押し込みによる軸力が加わる側では過大な軸圧縮力が作用していたと考えられる。そこで杭端のヒンジ部における鉛直反力を用いて各杭に作用する軸力を算出した。図-11に算出結果を示す。押し込み側となるB杭では変位の進展に伴い軸力が増加して行き、実験での最大荷重となった変位32mmでの軸圧縮力は2360kN(8.35N/mm²)であった。これは常時の2.6倍の軸圧縮力である。一方、引抜き側となるA杭では軸力は減少して行き、変位12mm以降は鉛直力が引張となる。実験で最大荷重となる変位32mmでは-417kN(1.47N/mm²)となっていた。

図-12に変位32mmでの杭中央断面における最小主ひずみコンター図を示す。押し込み杭となるB杭では曲げ圧縮を受ける側で基部から400mmの範囲で-2000 μ 、基部から200mmの範囲では-6000 μ を越える圧縮ひずみが発生しており、実験結果と同様に、この部分でコンクリートの圧壊が発生すると考えられる。一方、引抜き側のA

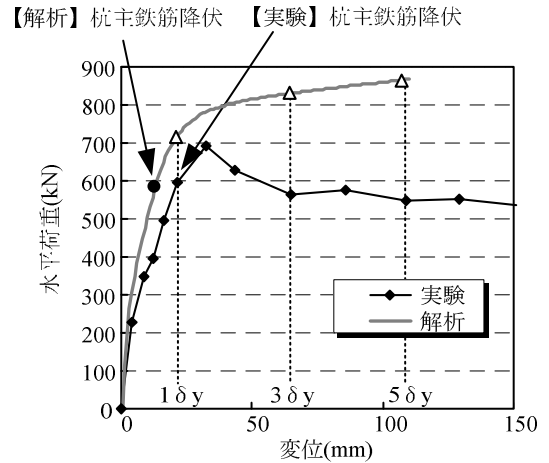


図-10 荷重-変位関係

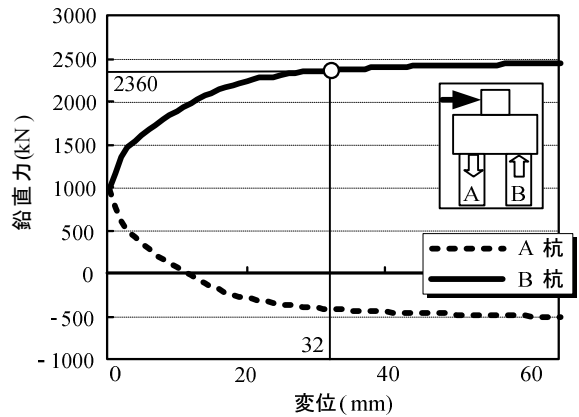


図-11 杭に作用する軸力

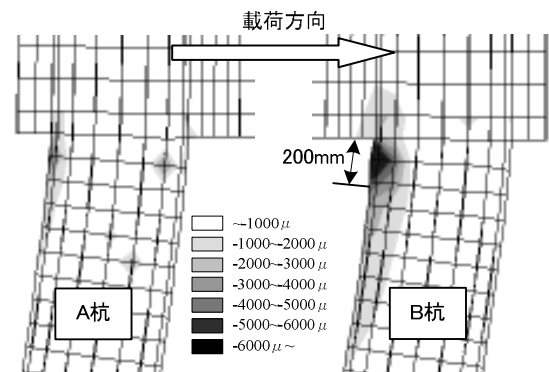


図-12 杭断面最小主ひずみ(変位32mm)

杭では引抜き力の影響で圧縮ひずみの量及び発生範囲はB杭に比べ少なくなっている。このことからコンクリートの圧壊は押込み杭の圧縮側でのみ発生すると考えられる。なお今回の解析ではコンクリート圧縮側の構成則を降伏後応力一定としているため、かぶりコンクリート圧壊後の載荷荷重の低下は再現できていない。

4. 水平押し抜きせん断破壊に関する検討

縁端距離を縮小することにより発生が懸念される破壊形態としては、フーチングの水平押し抜きせん断破壊がある。実験では押込み軸力と曲げ圧縮による杭体の圧壊が主であったが、フーチングの損傷から押し抜きせん断破壊の傾向が見られることから式(1)を用いて水平押し抜きせん断耐力を照査した⁵⁾。

$$P_h = \tau_c A_c + n A_s \tau_{xy} \quad (1)$$

ここで

- P_h : 水平押し抜きせん断耐力 [N]
- τ_c : コンクリートの平均せん断応力度 [N/mm²]
- A_c : フーチングコンクリートの抵抗面積 [mm²]
- n : 破壊面内に含まれる作用鉄筋本数
- A_s : 破壊面内の鉄筋1本あたりの断面積 [mm²]
- τ_{xy} : 鉄筋のせん断応力度 ($\tau_{xy} = f_y d / \sqrt{3}$) [N/mm²]

フーチングコンクリートの抵抗面積 A_c は首都高速道路が行った水平押し抜きせん断に関する実験より得られた平均的な抵抗面として図-13に示す様に平面方向では杭中心より45°、断面方向では20°とした抵抗面を用いた。抵抗面積は779342mm²となる。実験のフーチングコンクリート強度23.77 N/mm²より τ_c を0.34 N/mm²とすると、式により求められるコンクリートの抵抗分 $\tau_c A_c$ は265kN、鉄筋の抵抗分 $n A_s \tau_{xy}$ は245kNとなる。

解析結果より水平押し抜きせん断について検討する。図-14に解析5δyの引抜き杭(外向きに水平反力を受ける)側フーチング内部のA-A'断面における最小主ひずみ分布を示す。図中の破線は照査式の抵抗面である。図よりA'側で-900μ程度のひずみが発生しているが杭縁端は反対側であり水平押し抜きせん断には関係がないと考えられるのでここでは無視している。A側(隅角部に近い側)では-1500μ以上の圧縮ひずみが集中しており、20mm程度大きな範囲で-900~-1500μ、さらに-300~-900μのひずみが照査抵抗面とほぼ同形状の三角形形状に分布している。よって、照査式と同様にこの三角形部分で水平押し抜きせん断に抵抗していると考えられるが発生ひずみの大部分は-300~-900μであり、ひび割れは発生するがコンクリート圧壊には達しないレベルである。図-15に解析5δyにおけるフーチングコンクリート抵抗面の模式図を示す。ここでは図中の断面位置1~5に示す各断面で-300~-1500μのひずみが発生した範囲を並べ、3次元的に

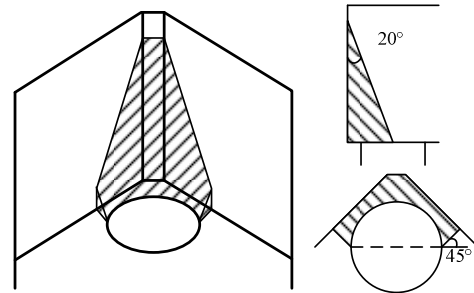


図-13 照査式コンクリート抵抗面積

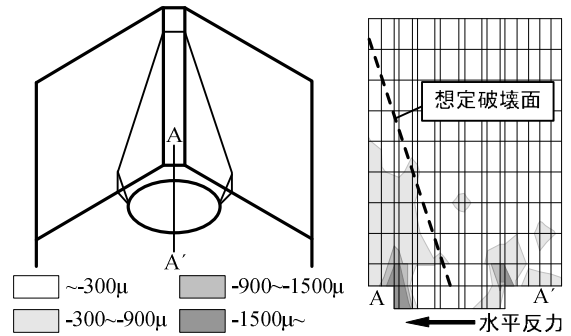


図-14 フーチング内最小主ひずみ分布

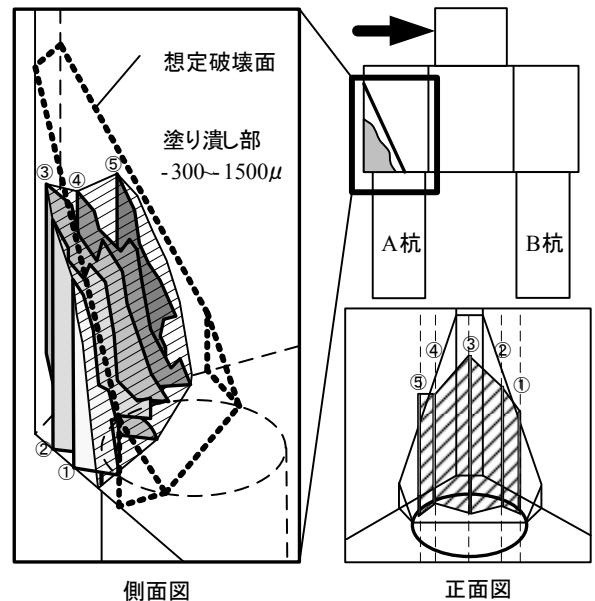


図-15 解析における抵抗面模式図

示している。側面図より、各断面はいずれも隅角部および側面から20°~30°の角度でフーチング下面の杭中心よりもやや隅角部よりの部分でひずみが発生している。また正面図より、各断面でひずみの発生範囲はほぼ想定破壊面内に収まっていた。よって解析での3次元的なひずみ分布は、想定破壊面によって形成される立体部分と比較して、ややスケールが小さいがほぼ同様の傾向を示していると考えられる。そこで、解析におけるフーチングコンクリート抵抗面積を算出した。算出方法を図-16に示す。各断面のフーチング内部に位置する線上で4点を選び、図中の斜線部に示す隣接する点によって形成される四角形の面積の和を抵抗面積としている。各断面の

4 点は、図中の点の取り方に示す様に、A 点は隅角部の最上部に位置する点、D 点はフーチング下面の最も内部に位置する点、B、C 点はひずみ分布面を包括する線の最も外側に位置する点としている。抵抗面積を算出したところ解析では 482750mm^2 となり、照査式の抵抗面積の 779342mm^2 と比較すると 62% とかなり小さい値となっているが圧縮ひずみが隅角部に集中する傾向は捉えている。

図-17 に解析における引抜き杭のフーチング下面鉄筋ひずみを示す。計測位置は実験と同様に図中の A-A'、B-B' 断面とした。杭断面中央を通る A-A' 断面では両端のひずみの進展が著しく、 $5\delta y$ では降伏ひずみを超えている。実験ではこの位置でひび割れが発生しており同様の傾向といえる。一方、杭断面内ではひずみの発生が少ない。杭後方を通る B-B' 断面では断面中央部でひずみが進展している。 $5\delta y$ において大半が 1000μ を越えるひずみとなっており、外向きの水平力に対し抵抗していると考えられるが鉄筋が降伏することはなかった。また、実験と比較すると両断面ともひずみの発生量は小さくなる結果となった。

以上より、フーチングコンクリートでは照査式と同様の抵抗面を有しており、実験と同様にフーチングで押し抜きせん断によるひび割れが発生すると考えられる。また、鉄筋についても載荷の進展と共に鉄筋ひずみが増大しており、コンクリート、鉄筋共に水平押し抜きせん断に抵抗していると考えられる。しかし、本解析では杭の圧壊が先行したため、コンクリート、鉄筋とも水平押し抜きせん断破壊に至るには余裕があり、最終的に水平押し抜きせん断破壊は起こらなかったと考えられる。

5. まとめ

水平力、軸力、モーメントが作用する杭縁部の破壊形態を確認するため、土木研究所が実施した実験を基に FEM 解析を用いて検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1)縁端距離を 75mm に縮小した隅角部を対象として、水平載荷試験を実施したところ、ひび割れ状況およびフーチング下面の鉄筋の発生ひずみより、水平押し抜きせん断タイプの損傷が実験および解析で確認されたものの、水平押し抜きせん断の終局破壊には至らなかった。
- (2)実験での破壊は杭基部での曲げ圧縮破壊であるが、解析においても杭基部にコンクリート圧壊レベルである -6000μ を越える圧縮ひずみが発生していた。
- (3)解析結果より、フーチングコンクリートには水平押し抜きせん断照査式と同様の損傷面が発生するが、その抵抗面積は照査式の抵抗面よりも小さく、また発生ひずみも $-300\sim-900\mu$ でありコンクリート圧壊の -3500μ には達しないレベルであった。

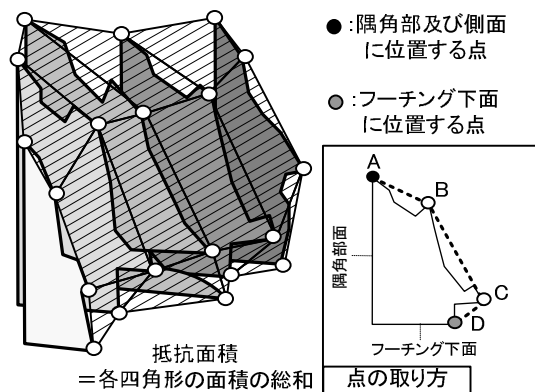


図-16 解析の抵抗面積算出方法

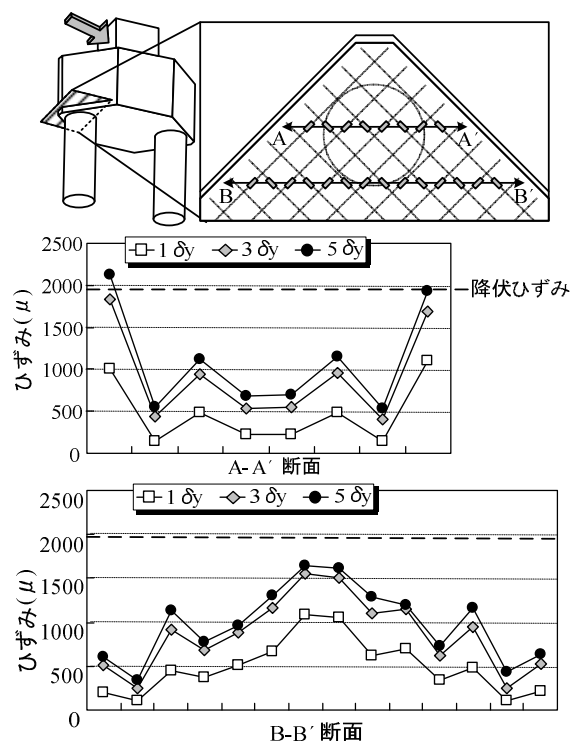


図-17 フーチング下面鉄筋ひずみ（解析）

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書IV下部構造編・同解説，2002
- 2) 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
- 3) 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
- 4) Rots J.G：Computational modeling of concrete fracture, Dissertation Delft Univ. of Technology, 1988
- 5) 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