

フーチング縁端部耐力に着目した実験の評価

木下和香¹・幸左賢二²・白戸真大³・清水英樹⁴

¹学生会員 九州工業大学大学院 建設社会工学専攻（〒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 工修 大日本コンサルタント（株）九州支社（〒812-0013 福岡市博多区博多駅東2-5-19）

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の地震動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おり、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。しかし、縁端距離を縮小することによりフーチングでは押抜きせん断破壊の発生が懸念される。これに対し、縁端距離を縮小させたフーチングの結合部において、様々な荷重状態での実験が行なわれている^{2), 3)}。

そこで、本研究では土木研究所が行った、縁端距離縮小に関する載荷実験を基に、フーチング縁端部において、水平押し抜きせん断破壊の発生状況について検討した。

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

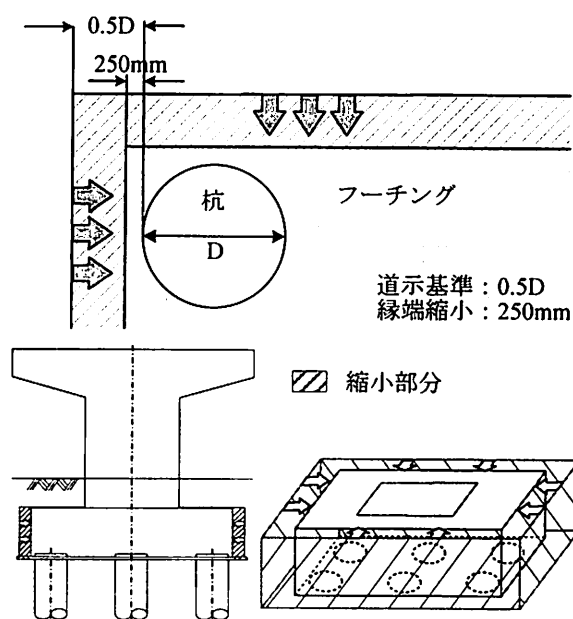


図-1 杭とフーチングの縁端距離

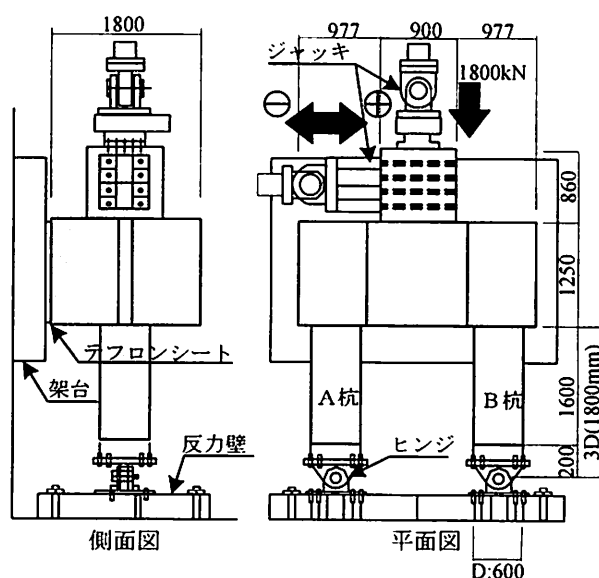


図-2 供試体形状

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。

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(1800mm)の位置で、曲げモーメントがゼロになるようにしている。载荷にはジャッキ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に示した。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間隔の格子状に、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%である。また、コンクリートの実強度は 42.0N/mm^2 、フーチングが 23.8N/mm^2 であった。

表-1 供試体諸元、材料強度

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

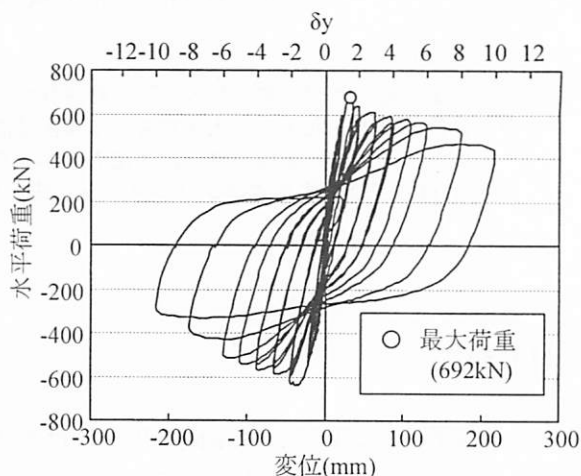


図-3 荷重-変位関係

(2) 荷重-変位関係と杭体損傷

水平荷重載荷位置における荷重と変位の関係を図-3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、 $1 \sim 2\delta_y$ 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 $3\delta_y$ 以降強度を保持し、靱性的な変形挙動を示す。 $6\delta_y$ 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-4に载荷ステップ毎のB杭の損傷状況を示す。実験では、図-4(a)に示すように、 $0.2\delta_y$ 、水平荷重130kNあたりでフーチング下面から150mm位置で杭体引張り側に曲げひび割れが生じた。最外縁の杭主鉄筋は、ひび割れ発生位置で、ひび割れ発生レベルの 200μ を超えており、内部までひび割れが進展していると考えられる。図-4(b)に示すように、 $1\delta_y$ 時では、初期ひび割れ発生位置で杭主鉄筋が降伏しており、杭体に生じたひび割れは進展し、ひび割れ発生範囲もフーチング下面から900mmの位置まで拡大した。荷重ピーク時では曲げ圧縮縁で杭基部のかぶりコンクリートが圧壊し、直後の $2\delta_y$ 時では図-4(c)に示すように圧壊したかぶりコンクリートが剥落した。

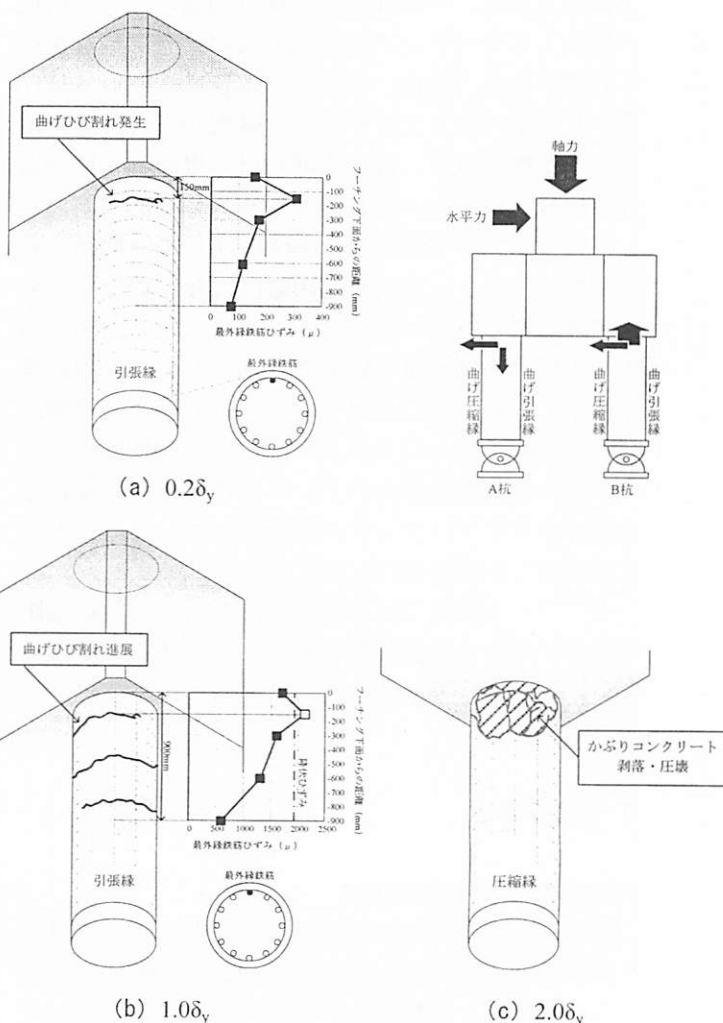


図-4 ひび割れ進展状況と鉄筋ひずみ分布 (B 杭)

以上の結果より、B 杭では杭の曲げ圧縮破壊が確認された。

3. フーチングの損傷状況の評価

(1) 正載荷時の損傷状況

縁端距離を縮小することにより、フーチングの水平押し抜きせん断破壊が懸念される。そこで、フーチングの損傷状況について検討を行う。

図-5、6に正載荷において各ステップのひび割れ図と鉄筋ひずみ分布を示す。ここで、図に示す鉄筋ひずみは、荷重0kN時の残留ひずみを補正して、サイクル毎に進展したひずみ量とした。

図-5 (a) に示すように、 $0.5\delta_y$ 時では、フーチング下面に、杭の側方から水平荷重と直角方向にひび割れが発生した(図中①)。また、フーチング下面鉄筋に着目すると、杭中央断面において、ひび割れ発生位置でひび割れ発生レベルの 200μ の鉄筋ひずみが確認された。杭後方断面位置では、杭とフーチングの接合部位置で 200μ 以上の鉄筋ひずみが発生した。なお、側面鉄筋は、隅角部位置で 150μ 程度の圧縮ひずみが発生し、杭側方ではほとんどひずみは発生しなかった。

以上の結果より、載荷初期では、杭とフーチングの接合部において、杭の側方・後方位置からひび割れが発生すると考えられる。

図-5 (b) に示すように、 $1\delta_y$ 時では、フーチング下面に、杭の後方からも水平荷重と直角方向にひび割れが発生し(図中②)、フーチング下面から発生したひび割れが側面まで進展した(図中③)。また、下面鉄筋に着目すると、杭中央断面では、ひび割れ発生位置において 700μ を超える鉄筋ひずみが発生し、その他の鉄筋でも、ひび割れ発生レベルの 200μ を超えるひずみを確認した。杭後方断面では、杭とフーチングの接合部位置において、 700μ 以上の鉄筋ひずみが発生し接合部において鉄筋ひずみの進展量が卓越した。側面鉄筋は、隅角部位置で 250μ 程度の圧縮ひずみが発生し、杭側方ではほとんどひずみは発生しておらず、 $0.5\delta_y$ 時に比べ、ほとんど鉄筋ひずみは進展しなかった。

以上の結果より、杭とフーチングの接合部において、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。

図-5 (c) に示すように、 $2\delta_y$ 時では、フーチング下面、側面に $1\delta_y$ 時に比べ、短いひび割れが多数発生した(図中④)。また、隅角部においても鉛直方向にひび割れが発生した(図中⑤)。下面鉄筋に着目すると、杭中央断面では、初期ひび割れ発生位

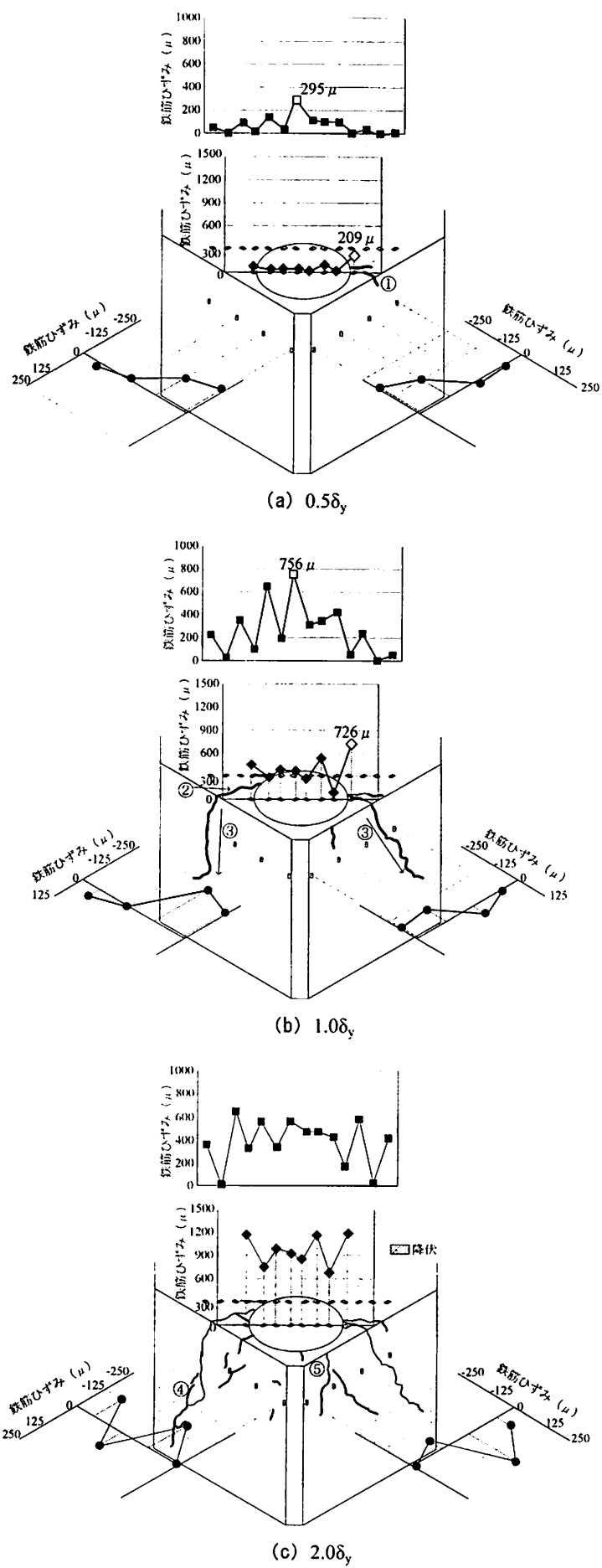


図-5 ひび割れ進展状況と鉄筋ひずみ分布 (0.5～ $2\delta_y$)

置の鉄筋が降伏ひずみに達した。1 δ_y に比べ、断面のひずみの進展が均一になり、平均鉄筋ひずみは952 μ となった。同様に、杭後方断面でも、ひずみの進展が均一になり、平均鉄筋ひずみは400 μ 程度となった。側面鉄筋では、ひずみの増加量は200 μ 程度と小さいものの、隅角部位置で発生していた圧縮ひずみが減少し、杭側方では引張ひずみが、杭後方では圧縮ひずみが発生するようになった。

以上の結果より、フーチング下面鉄筋ひずみは1 δ_y 時に比べ増加しており、1 δ_y 時では杭とフーチング接合部にひずみが集中して発生していたが、2 δ_y 時では断面全体でひずみの進展が確認されるようになった。

図-6 (a) に示すように、4 δ_y 時では、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(図中⑥)。フーチング側面では、隅角部位置で鉛直方向にひび割れが進展しており(図中⑦)、そのひび割れが上面に達した(図中⑧)。下面鉄筋に着目すると、杭中央断面では、新たに1本、計2本(8本中)の鉄筋が降伏した。鉄筋ひずみの平均は1190 μ 程度となり、2 δ_y 時に比べ、やや増加したもののほとんど変わらなかった。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 δ_y 時と比べ、やや増加したもののほとんど変わらなかった。側面鉄筋では、隅角部位置ではほとんどひずみが進展しておらず、杭側方では引張ひずみが、杭後方では圧縮ひずみが発生するようになった。

以上の結果より、下面鉄筋ひずみは杭中央断面、杭後方断面で200 μ 程度増加したが、0.5~2 δ_y と比べてひずみの進展は緩やかとなった。

図-6 (b) に示すように、6 δ_y では、フーチング下面、上面に、新たなひび割れは発生せず、フーチング側面に、短いひび割れが水平方向に発生した。また、下面鉄筋に着目すると、杭中央断面では、新たに3本、計5本(8本中)の鉄筋が降伏した。ひずみの履歴曲線よりひずみが正しく測定できていないと判断した鉄筋除外し、他の鉄筋のひずみで平均を求めると、1390 μ 程度となり、4 δ_y 時と比べるとやや増加しているが、ほとんど変化しなかった。杭後方断面では、3本の鉄筋が降伏した。他の鉄筋のひずみの平均は600 μ 程度となり、4 δ_y 時と比べるとやや増加しているが、ほぼ一定となった。側面鉄筋は、4 δ_y と比べ、ひずみ量、ひずみの発生位置にほとんど差が生じなかった。

以上の結果より、フーチング下面ではひび割れは発生せず、側面で細かいひび割れが発生するようになり、下面鉄筋ひずみは緩やかに進展し、200 μ 程度増加した。

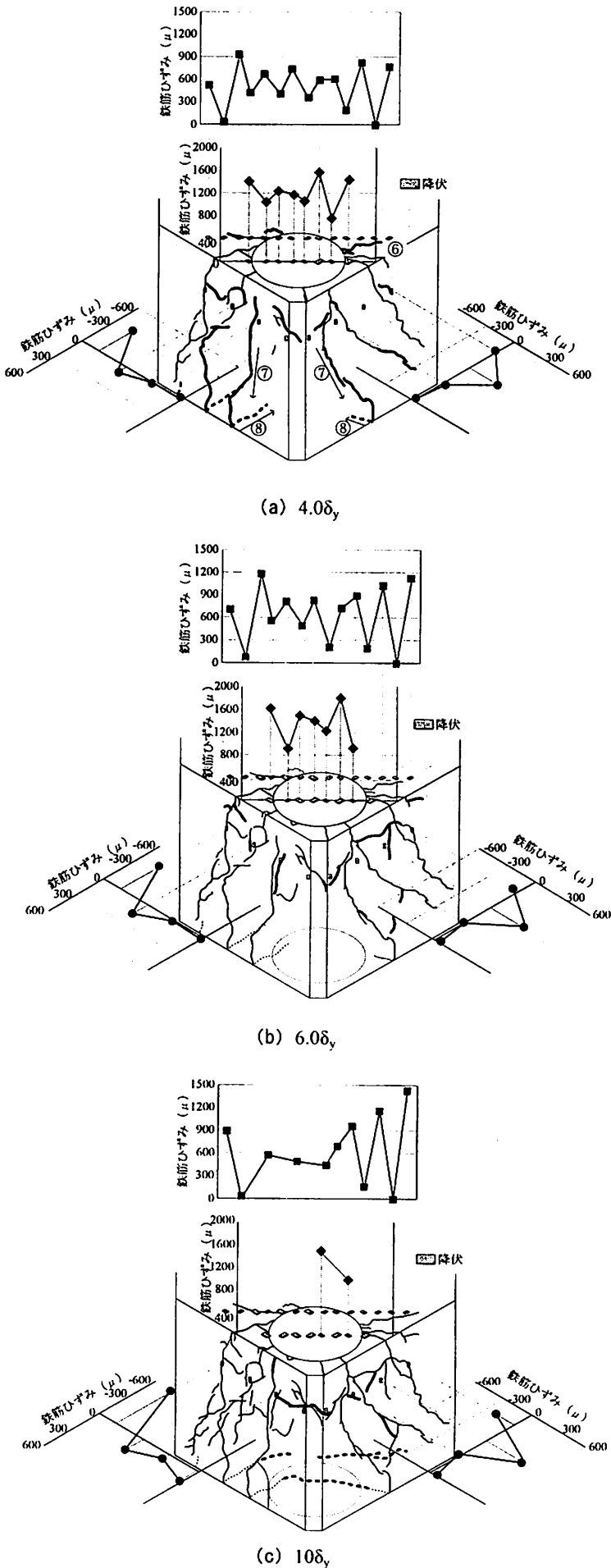


図-6 ひび割れ進展状況と鉄筋ひずみ分布(4~10 δ_y)

図-6 (c) に示すように、 $10\delta_y$ 時では、フーチング下面に新たなひび割れは発生しなかった。フーチング側面では、特に隅角部位置で水平方向にひび割れが発生しており、フーチング下面、側面、上面に一周するようなひび割れが発生した。下面鉄筋に着目すると、杭中央断面では、新たに1本、計6本(8本中)の鉄筋が降伏した。他の鉄筋のひずみの平均は 1250μ となり、 $6\delta_y$ 時と比べるとほとんど変化しなかった。同様に、杭後方断面では、鉄筋のひずみの平均は 600μ 程度となり、 $6\delta_y$ 時と比べるとやや増加しているが、ほぼ一定となった。側面鉄筋は、ひずみの大きさ、分布はほとんど $6\delta_y$ と差がない。

以上の結果より、正載荷の水平力に対して、杭結合部に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の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、フーチング下面鉄筋が抵抗している。したがって、今回の実験では水平押し抜きせん断の損傷進展過程が確認されたと考えられる。

(2) 負載荷時の損傷状況

次に負最荷時の損傷状況について検討する。

図-7に $-1\delta_y$ 時のひび割れ図進展状況と鉄筋ひずみ分布を示す。 $1\delta_y$ 時は、正載荷時において、ひび割れ発生後急激な鉄筋ひずみの進展が確認されたサイクルである。

フーチング下面、側面では隅角部位置に鉛直方向にひび割れが発生したが、 $-1\delta_y$ 時に発生したひび割れ長さ $\pm 1\delta_y$ 時に発生したひび割れ長さで除して割合を求めると、2割程度となり、ほとんどひび割れは発生しなかった。また、フーチング下面鉄筋、側面鉄筋では最大でも 50μ 程度しかひずみは進展しなかった。

以上の結果より、負載荷時において、ひび割れ、鉄筋の損傷は小さくなっており、水平押し抜きせん断破壊は発生しないと考えられる。

4. 水平押し抜きせん断破壊の検討

(1) 破壊形態の検討

前章より、水平押し抜きせん断の損傷進展過程が確認された。そこで、首都高速道路公団⁴⁾が実施した場所打ち杭とフーチング縁端距離に関する実験を基に、今回の実験の破壊レベルについて検討を行う。

図-8に、首都高実験(標準ケース)の荷重-フーチング前面変位関係を示す。載荷重約200～

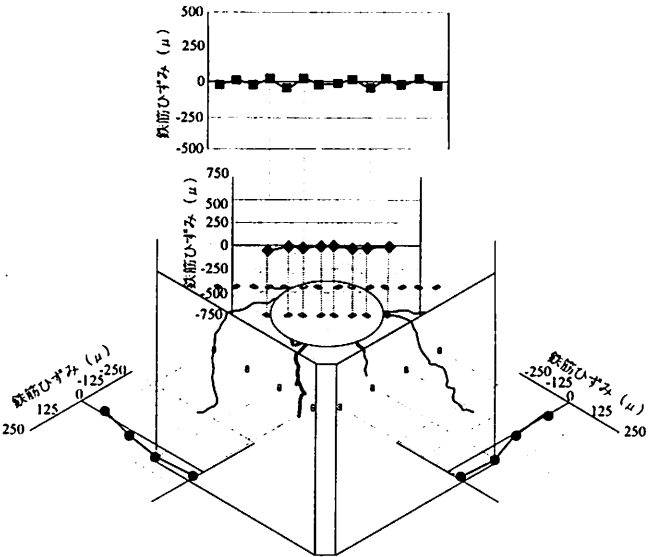


図-7 ひび割れ進展状況と鉄筋ひずみ分布 ($-1\delta_y$)

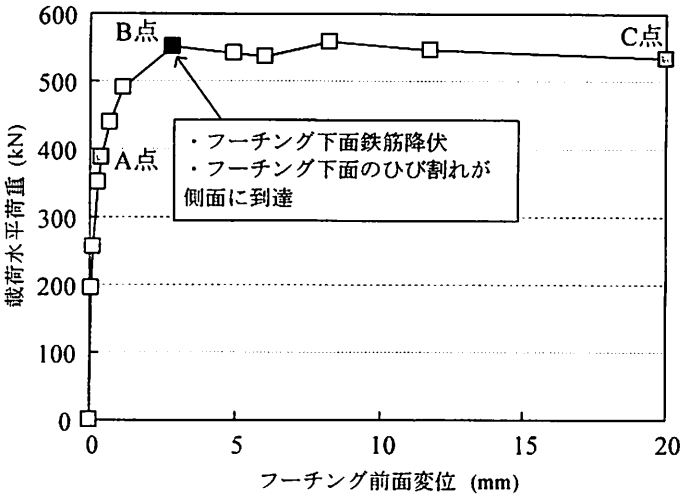
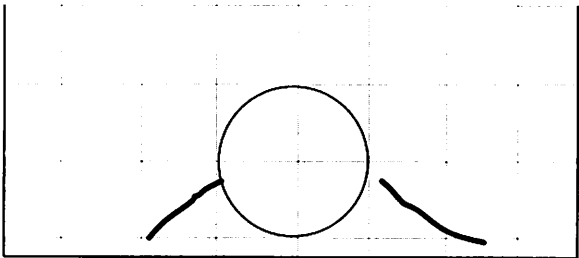
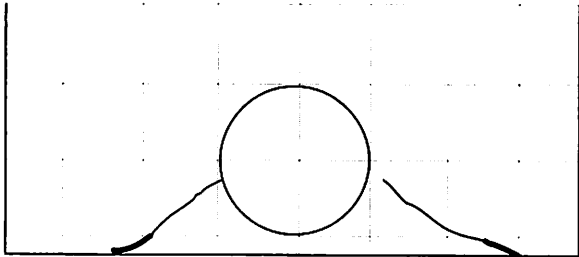


図-8 荷重-変位関係



(a) A 点



(b) B 点

図-9 フーチング下面のひび割れ進展状況

300kNで変位が生じ始め、変位4mm程度で最大荷重540kNに達する。その後の荷重はほとんど変化せず、変形性能に富んだ挙動を示す。

図-9に図-8中のA点とB点のフーチング下面におけるひび割れ進展状況を、図-10にC点の最終破壊面を示す。図-8に示すように、水平押し抜きせん断破壊では、杭中央側面からひび割れが発生し（A点）、進展したひび割れが側面に達した際（B点）に最大荷重に達する。同時に、フーチング下面鉄筋も降伏に至る。その後、荷重は一定となるものの、ひび割れ本数が増加しC点で図-10に示す破壊面が形成する。破壊面については、フーチング下面からひび割れがほぼ45°方向に伸びた後、フーチング端部に達することで三角形に押し抜かれる。また、杭中央の断面図を見ると、ひび割れは杭中心よりやや後方から鉛直方向に対して約20°方向に伸びた後、フーチング上面に達する。

図-11に土木研究所実験の最終ひび割れ図と、首都高速道路実験結果から想定される破壊面を示す。フーチングを一周するひび割れは想定破壊面内位置で発生した。また、フーチングを一周するひび割れの一部（隅角部位置）でコンクリートが剥落した。これは、本来フーチングを一周するひび割れが水平押し抜きせん断の破壊面になるが、変形量が小さいため、破壊面の一部である隅角部コンクリートのみ剥落したと考えられる。

以上の結果から、今回の実験では、フーチング側面にひび割れが発生していること、フーチング下面鉄筋が降伏に至っていることから、耐力のピーク（図-8のA点）に達していると考えられる。しかし、想定破壊面に対し、破壊面の一部であるコンクリートが剥落しているため、図-8におけるB点からC点の移行段階であり、水平押し抜きせん断の終局には達していないと考えられる。

(2) 作用荷重の検討

フーチング結合部の作用荷重の分析を行う。

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。その算出方法を図-12に示す。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と考えられる。以上の鉄筋ひずみを用い、図中に示す式[1]で軸力を、式[2]で水平力を求めた。また、断面のひずみ分布は、最外縁鉄筋のひずみを直線で結ぶことで仮定している。

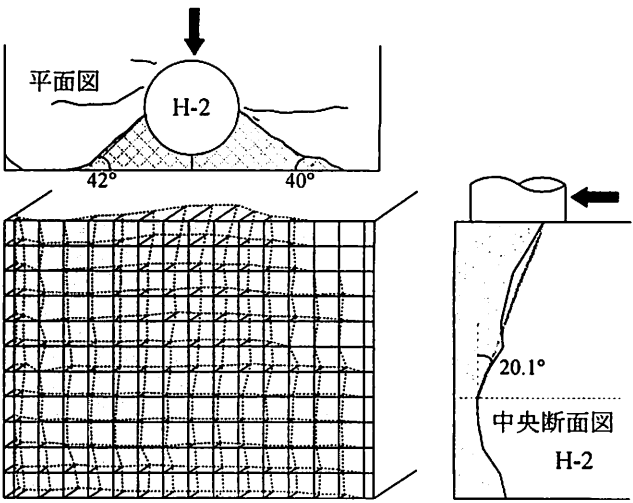


図-10 水平押し抜きせん断破壊（C点）

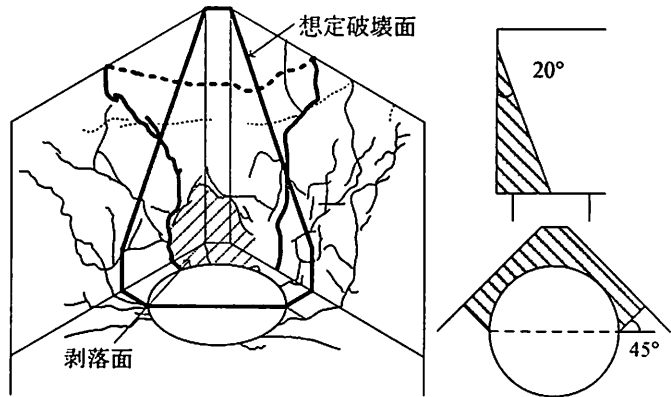


図-11 想定破壊面

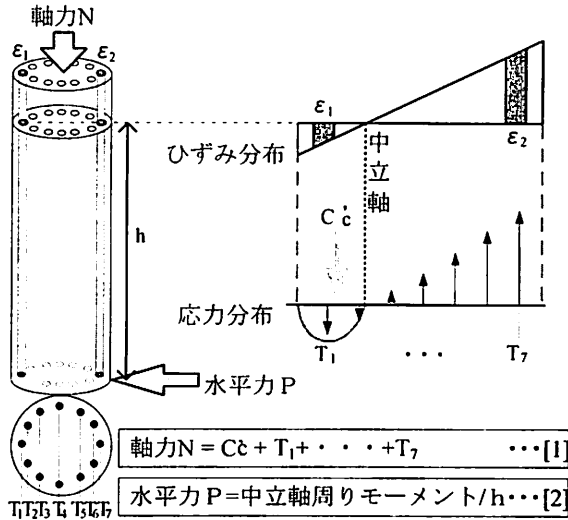


図-12 作用力算出手法

図-13 に $1\delta_y$ 時における A 杭の断面のひずみ分布を示す。図-13 (a) は杭断面に生じる鉄筋ひずみ分布である。図中の実験値は実験供試体の測定ひずみであり、圧縮縁で -295μ 、引張縁で 1143μ となる。この値を用い、軸力 N を算出した。

ここで、図-13 (a) に示す断面ひずみは軸力と曲げモーメントが生じているため、図-13 (b)、(c) に示すように軸力分のひずみと純曲げ分のひずみに分配する。なお、ひずみを分配する仮定として、軸力分ひずみは図-11 (b) に示すように一様に分布すると設定した。軸力分のひずみは実験で 5μ となった。

また、図-13 (c) に示すように純曲げ分のひずみは断面に作用するひずみの差分とした。純曲げ分のひずみは、実験は圧縮縁で -300μ 、引張縁で 1138μ となり、の水平力は図-13 (c) に示す純曲げ分のひずみ分布を用いて算出した。以上の方法で算出した水平力を以下にまとめる。

図-14 にフーチング接合部に作用する水平力を示す。図に示す水平力は水平押し抜きせん断モードが確認された A 杭側である。水平力①は、上記の方法で算出した作用水平力、水平力②は、2本の杭が均等に載荷重を負担すると仮定し、載荷重を2で除して求めた水平力とした。水平力①は、 $1\delta_y$ までに急激に水平力が増加し、 $1\delta_y$ 時では 223kN 、 $2\delta_y$ 時では 317kN となった。以降、 $5\delta_y$ で 365kN となるものの、水平力の範囲は $300\sim 370\text{kN}$ でほぼ一定となった。水平力②は、杭が圧壊する $1.6\delta_y$ 時までに急激に水平力が増加し、 $1.6\delta_y$ 時では荷重ピークの 345kN 、 $2\delta_y$ 時では 314kN となり、 $3\delta_y$ まで荷重が低下し、以降ほぼ一定となった。水平力①と②を比較すると、各サイクルの水平力の比は $0.7\sim 1.3$ となり、概ね一致するが、水平力①では $2\delta_y$ 以降荷重がほぼ一定となり、水平力②では $1.6\delta_y$ で杭の圧壊後、荷重が低下し、荷重増加過程に異なる傾向が確認された。これは、水平力①では、 $2\delta_y$ 時でフーチング下面鉄筋が降伏し、荷重は増加せず、変位が進展したためであると考えられる。

以上の結果より、水平押し抜きせん断モードが確認された A 杭側作用水平力①に着目すると、フーチング下面鉄筋の降伏が確認された $2\delta_y$ 以降荷重が一定であることから、水平押し抜きせん断が支配的な挙動を示していると考えられる。

(2) 抵抗荷重の検討

水平押し抜きせん断に対する抵抗荷重について検討する。

水平押し抜きせん断に対する抵抗荷重は、コンク

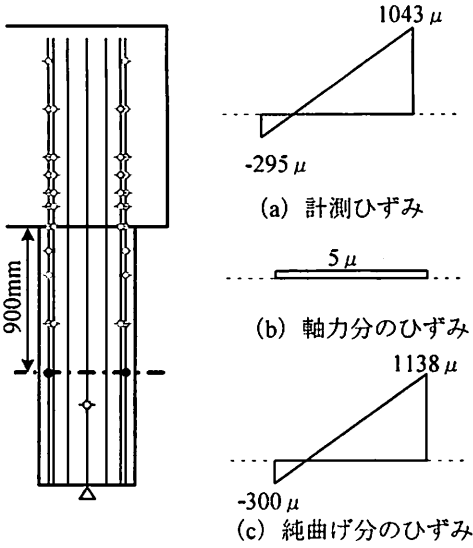


図-13 断面ひずみ分布 ($1\delta_y$)

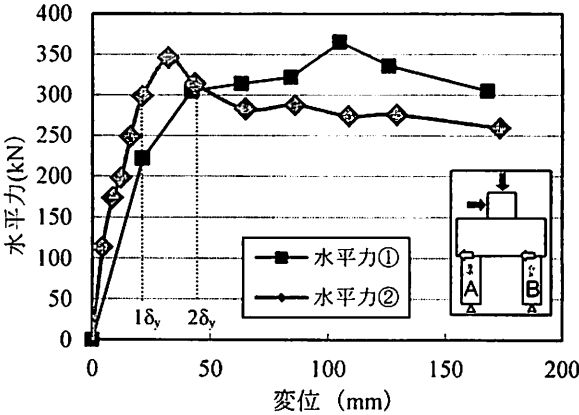


図-14 フーチング接合部に作用する水平力

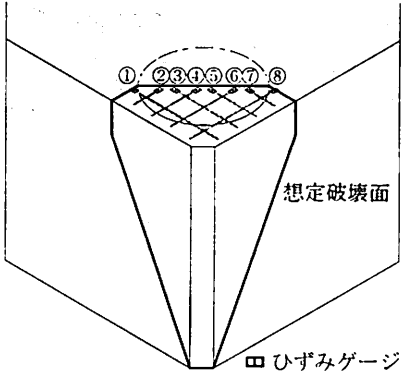


図-15 想定破壊面とひずみ計測位置

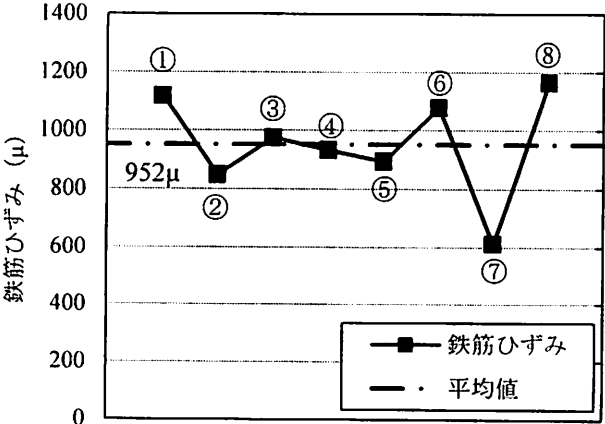


図-16 鉄筋ひずみ分布 ($2\delta_y$)

リートによる抵抗荷重と鉄筋による抵抗荷重の和で考えられる。コンクリートによる抵抗荷重は、ひび割れ発生荷重から、そのサイクル時の鉄筋抵抗荷重を除いた値とした。ここで、ひび割れ発生荷重は、目視でひび割れ発生を確認した荷重とし、載荷重を2で除した180kNとした。これは、ひび割れ発生時までは、両杭の剛性は一致し、均等に荷重を受け持つと考えられるためである。次に、鉄筋抵抗荷重の算出手法について述べる。

図—15に水平押し抜きせん断破壊の想定破壊面と破壊面内のひずみ計測位置を示す。図に示すように想定破壊面内に含まれる8本の鉄筋ひずみから、鉄筋に作用している応力を算出し、荷重に変換した。

代表例として、図—16に $2\delta_y$ 時の鉄筋ひずみ分布を示す。図に示す鉄筋ひずみは、荷重0kN時の残留ひずみを補正してサイクル毎に進展したひずみとした。また、平均値は、鉄筋ひずみの履歴曲線より、ひずみが測定できていないと判断した鉄筋を除外して算出した。 $2\delta_y$ では、平均ひずみは 952μ となり、これに鉄筋の弾性係数(192.0N/mm^2)を乗じて、鉄筋に発生している平均応力として 183N/mm^2 が算出される。ただし、今回の実験では鉄筋はせん断変形に対して抵抗すると考えられるため、Von-Misesの降伏条件より、 $\sqrt{3}$ で除して、せん断応力 106N/mm^2 とし、載荷方向に対し、 45° 方向に配筋しているので、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、鉄筋抵抗荷重は171kNとなる。

以上の方法で鉄筋抵抗荷重を算出すると、ひび割れ発生時の抵抗負担荷重は11kNとなり、コンクリート抵抗荷重は169kNとなった。

図—17に上記の方法で算出した抵抗荷重と、前節で算出した作用荷重を示した。 $6\delta_y$ 以降、ひずみを測定できた鉄筋本数が少なくデータの信頼性が低いため、除外している。 $2\delta_y$ 時までは抵抗荷重と作用荷重は概ね一致しており、 $2\delta_y$ 時では抵抗荷重は340kN、作用荷重は314kNとなり、抵抗荷重は、 $2\delta_y$ 以降も増加する傾向となった。これは、変位が増加することにより、鉄筋ひずみが進展するためであると考えられる。また、鉄筋の降伏ひずみから、 $4\delta_y$ 時の残留ひずみを引いて、全鉄筋が降伏に達するまでの増加分を算出すると、 1427μ となり、終局状態の抵抗荷重は425kNとなる。

以上の結果より、抵抗荷重は、 $4\delta_y$ で383kN、終局状態で425kNとなり、11%程度余裕があるが、ほぼ終局状態に達しており、このまま変形が進展すると鉄筋ひずみが進展し、水平押し抜きせん断の終局に達すると推定される。

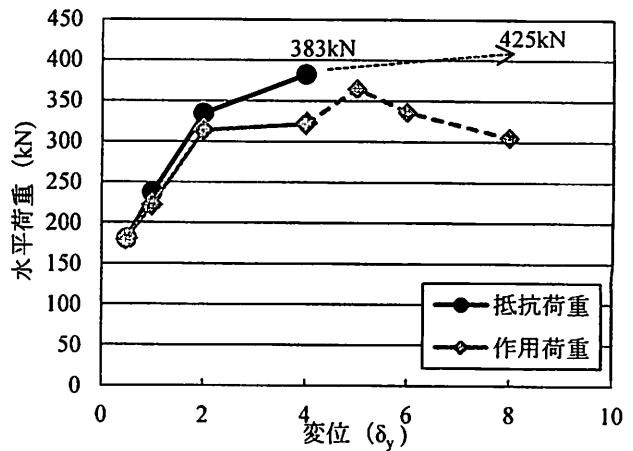


図-17 作用荷重、抵抗荷重の関係

5. 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) 実験結果より、フーチング下面に水平力の直角方向にひび割れ発生後、鉄筋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進展過程を確認した。
- (2) 今回の実験では、フーチング側面にひび割れが達し、下面鉄筋も降伏に至っていることから、荷重ピークレベルには達している。しかし、想定破壊面に対し、一部のコンクリートが剥落していることから、水平押し抜きせん断の終局には至っていないと考えられる。
- (3) 水平押し抜きせん断モードが確認されたA杭側の作用水平力と変位の関係を求めると、水平押し抜きせん断が支配的な挙動を示した。
- (4) 抵抗荷重を算出すると、 $4\delta_y$ 時で383kNとなり、終局状態に対し11%余裕があるが、変位が進展すると押し抜きせん断の終局に達すると推定される。

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，2002，pp. 351-352
- 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，2008.1
- 4) 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