

杭とフーチングの結合部の強度に関する正負交番载荷実験

野々村佳哲¹・白戸真大²・中谷昌一³

¹(独)土木研究所 構造物研究グループ基礎チーム 研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²(独)土木研究所 構造物研究グループ基礎チーム 主任研究員

³(独)土木研究所 構造物研究グループ基礎チーム 上席研究員

1. はじめに

フーチング結合部の荷重状態は杭からの軸力、水平力、曲げモーメントが作用し、複雑である。そのため、破壊に対する照査方法が確立されておらず、過去には、杭からの水平力のみ作用する場合、水平力と曲げモーメントが作用する場合の破壊形態が実験により調べられているが^{1),2),3)}、実際と同様に杭からの軸力、水平力、曲げモーメントが同時に作用する状況での载荷試験例は少なく、縁端部における結合部の破壊形態が不明である。そこで、2本組杭模型を作成し、橋脚部に一定軸力を与えた上で正負交番の水平载荷を行ったので、報告する。

2. 実験方法

実験に用いた供試体は、図-1に示すように、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スケールで想定した。特徴は、杭からフーチング縁端までの距離をかぶりや鉄筋径から決まる構造上の必要最小限の長さまで縮めたフーチング縁端部に作用する杭からの押抜き水平せん断力に対して、縁端部の抵抗領域が最も小さくなると想定される2×2本群杭の対角方向に载荷を行ったことである。

杭体諸元は、杭径 $D=600$ mmで、コンクリートの設計基準強度は 30 N/mm^2 、軸方向鉄筋はD25を12本、帯鉄筋はD19を150 mm間隔で配置し、かぶりは60 mmとした。フーチング部は、設計基準強度 21 N/mm^2 のコンクリートを用い、下側主鉄筋はD22を125 mm間隔の格子状に、上側主鉄筋はD22を250 mm間隔の格子状に配置した。これらの鉄筋量は、標準的な道路橋橋脚の場所打ち杭およびフーチングにおいて、杭体では鉄筋量が多めの部類になるように、フーチング部では鉄筋量が少なめの部類になるよう配置したものである。

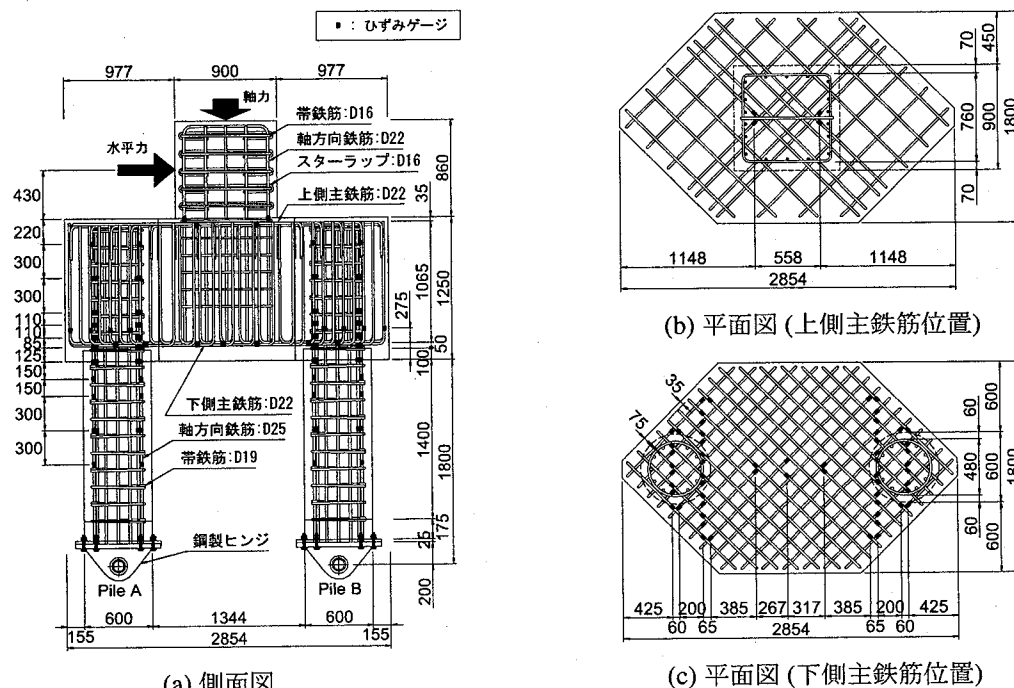


図-1 実験供試体

表-1 コンクリートの材料試験結果

	スラブ (cm)	空気量 (%)	28日強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	引張強度	試験時材令 (日)
杭	13.5	5.5	35.8	42.02	27.9	0.233	2.931	61
フーチング	18	5.3	18.6	23.77	23.0	0.193	2.387	41

表-2 杭とフーチングの鉄筋比と、鉄筋の材料試験結果

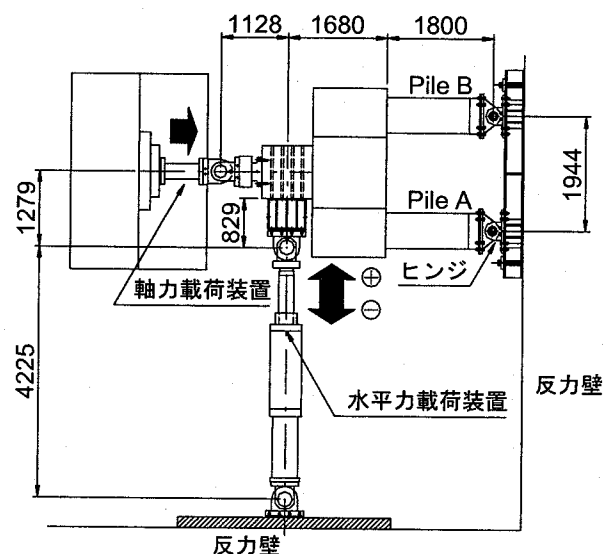
		径	鉄筋比 p	降伏応力 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	最大応力 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
杭	軸方向鉄筋	D25	0.0215	369.12	1892	544.24	195.14
	帯鉄筋	D16	—	392.16	2018	601.12	194.36
フーチング	下側主鉄筋	D22	0.00282	377.59	1963	577.11	192.32
	上側主鉄筋	D22	0.00141				

また、フーチングのスターラップや、側面鉄筋と呼ぶ、図-1 平面図においてフーチング全体を取り囲む鉄筋は配置していない。表-1, 2 に材料試験結果を示す。コンクリートの材料試験は荷重試験翌日に行った。使用した鉄筋は全て SD345 で、同径ごとに同一ロットの鉄筋を用いている。

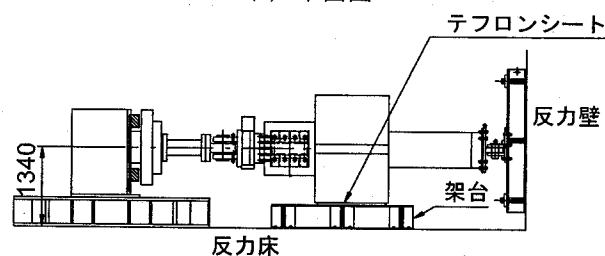
橋脚部には、軸方向鉄筋は D22 を片側 6 本、帯鉄筋は D16 を 150 mm 間隔、せん断補強筋は D16 を 6 本配置した。コンクリートはフーチングコンクリートと一体打設しており、設計基準強度は 21 N/mm² である。橋脚部については軸方向鉄筋の降伏が生じないように鉄筋量を定めた。実験中、軸方向鉄筋は軸力の影響が大きく常に圧縮状態で、実験終了後に橋脚部のひび割れは見られなかった。

杭とフーチングの縁端距離は、かぶりやフーチング鉄筋径、鉄筋のあきを考慮した必要長である 150 mm の 1/2 スケールとし、75 mm である。杭中心間隔は、標準的な杭中心間隔である 2.5D の場合を考えたとき、対角の杭同士の杭中心間隔は約 3.5D となるが、供試体の運搬時の制約から 1944 mm (杭径 D の 3.2 倍) としている。フーチングの厚さは、フーチングの剛体判定を満足するように設定し、1250 mm である。杭の軸方向鉄筋の定着長は 1010 mm で、鉄筋径の 40.4 倍である。道路橋示方書では、必要定着長 L_0 に加えて、杭が繰返し曲げ荷重を受けるときの定着に付着切れ分の余裕として軸方向鉄筋径の 10 倍の長さを確保することとされているが、ここでは余裕分は考慮しなかった。なお、道路橋示方書で必要とされている余裕分を満足するようにした場合、定着長は 1154 mm となる。

荷重時のセットアップ図を図-2 に示す。本実験では実験供試体を横向きに設置した。供試体はテフロンシートを敷いた架台の上に載せている。また、架台に面するフーチング面にもテフロンシートを貼付け、さらに両テフロン間に潤滑材のモリブデンを施すことで、極力摩擦が軽減するように努めた。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



(a) 平面図



(b) 側面図

図-2 セットアップ図

ジャッキ 2 基を用いており、橋脚部に、一定の鉛直軸力を与えた上で正負交番の水平変位を与えている。鉛直軸力を与える荷重ジャッキは、供試体の水平移動に追随し、常に橋脚の中心位置に鉛直方向の荷重を与える構造になっている。また、水平荷重を与える荷重ジャッキは、鉛直方向の位置は固定で、ジャッキ伸縮部の両端がヒンジ構造になっている。そのため、供試体の変位に応じて水平荷重ジャッキ自身が回転することになるが、実験を通してのジャッキの最大回転角は ± 0.0025 rad 程度であり、荷重はほとんど分散することなく水平に与えられていたと考えられる。与えた鉛直軸力は 1800 kN で、杭体に用いたコンクリート強度の 7.6% に相当する。水平荷重のパターンを図-3 に示す。正負交番荷重で、繰

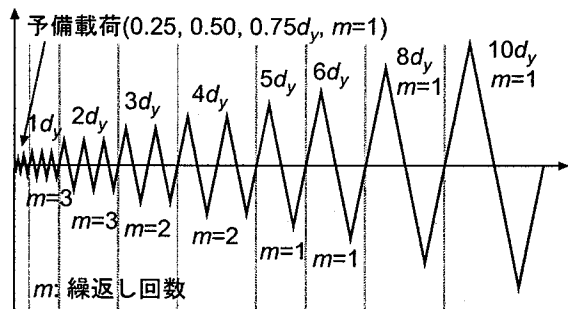


図-3 载荷パターン

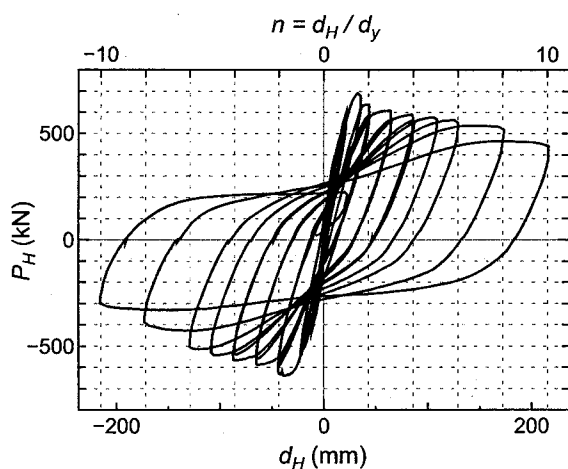


図-4 荷重-変位関係

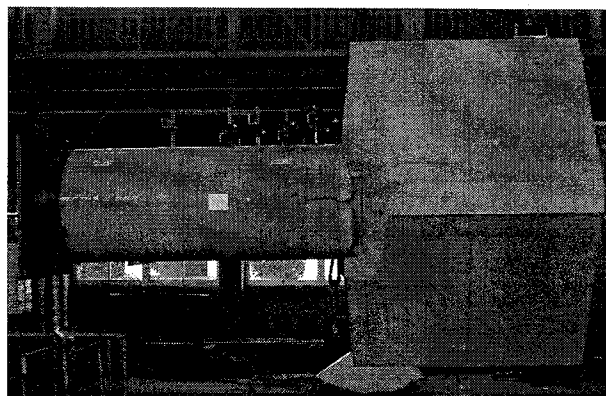
返し回数はタイプⅡ(内陸直下型)の地震動と同様の繰返し特性を持つとされる载荷パターン⁴⁾である。

なお、実験供試体の製作において、コンクリートの打設は杭体とフーチング部とを別々に行っている。杭体を先行して打設しており、打設方向は、通常の場合打ち杭と同様の鉛直の姿勢である。そして杭体コンクリートが固化した後に、杭体を水平に保持し、载荷時と同姿勢の状態でフーチング部と橋脚部の打設を一度に行った。

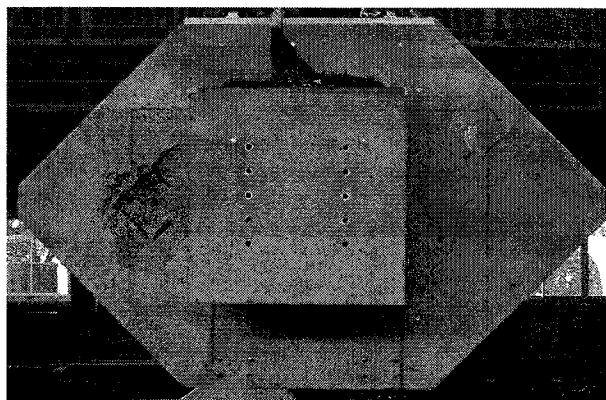
3. 実験結果

(1) 水平荷重-水平変位関係

水平载荷位置における荷重 P_H と変位 d_H の関係を図-4に示す。载荷において、図-2に示す Pile B が先に押し込み杭となる水平荷重を正側の载荷荷重、载荷変位としている。正側もしくは負側の载荷中に1本目の杭の軸方向鉄筋が降伏したのち、2本目の杭においても、最外縁の鉄筋が降伏ひずみに達したときを杭基礎の降伏(全杭降伏)と呼ぶことにする。正荷重の载荷では押し込み杭、引抜き杭が 597 kN で同時に引張鉄筋が降伏ひずみに達し、負荷重の载荷では押し込み杭が 529 kN、引抜き杭 535 kN でほぼ同時に引張鉄筋が降伏ひずみに達した。全杭降伏時の変位は正荷重の载荷で 21.0 mm、負荷重の载荷で 22.2 mm であったことから、平均値に近い



(a) Pile B 側



(b) フーチング上面側

写真-1 実験終了後の供試体

21.5 mm を降伏変位 d_y とし、 $2d_y$ ステップ以降の载荷を行った。1~ $2d_y$ の間でピーク強度が発揮され、その後若干強度低下するものの、その後は強度が保持され、じん性的な挙動を示す。そして、 $6d_y$ 以降から荷重低下が顕著になった。写真-1には実験終了後の供試体写真を示す。

(2) 損傷の進展

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、Pile B が押し込み杭となり、Pile A が引抜き杭となる。このとき引抜き側の杭の Pile A では、杭頭せん断力は、フーチングの内側から縁端側に向かって外向きに、水平引抜きせん断のように作用することになる。

表-3に損傷進行の一覧表を示す。

杭体では、水平荷重で 130 kN を過ぎたところから、载荷中に両杭の引張縁で曲げひび割れが生じていた。そして、全杭降伏 ($1d_y$) を迎えた後、次の载荷ステップである $2d_y$ に向かう最中に、押し込み杭の圧縮縁コンクリートがの表面が圧壊し、荷重のピークを迎えた。その後、押し込み杭の圧縮縁のみでかぶりコンクリートの剥離・剥落が進行し、 $5d_y$ のときにはフーチング下面から 200 mm の範囲で杭体軸方向鉄筋が露出した。 $8d_y$ 時には露出した鉄筋にて座屈が見られ、最終ステップである $10d_y$ 後

表-3 供試体の損傷進行表

d_y	荷重 kN	杭	フーチング		
			下面	側面	上面
0.5	359		①引抜き側で杭断面の中心軸付近にひび割れ発生		
0.75	428	押込み側・引抜き側の両者にて引張縁で曲げひび割れ発生		②引抜き側でひび割れが発生	
1	597	押込み側・引抜き側の両者で引張縁の軸方向鉄筋降伏			
2	675	押込み側で圧縮縁のかぶりコンクリートが圧壊	①のひび割れ付近で下側主鉄筋が降伏		
3	608				
4	575		④引抜き側でフーチング縁端部のかぶりコンクリートが剥落 (Pile B のみ)		⑥せん断ひび割れがフーチング上面に至る
5	560	押込み側で、圧縮縁の鉄筋露出	引抜き側でフーチング下側主鉄筋の半数以上が降伏	⑤引抜き側で水平押抜きせん断状のひび割れ	
6	551				
8	519	押込み側で圧縮縁の鉄筋座屈			⑨鉛直押抜きせん断によるかぶりコンクリートの剥離
10	384	鉄筋の破断 (Pile A のみ)	⑦引抜き側で隅角部が剥落し、フーチング下側主鉄筋が露出		

※丸囲み数字は図-6, 7 での参照番号

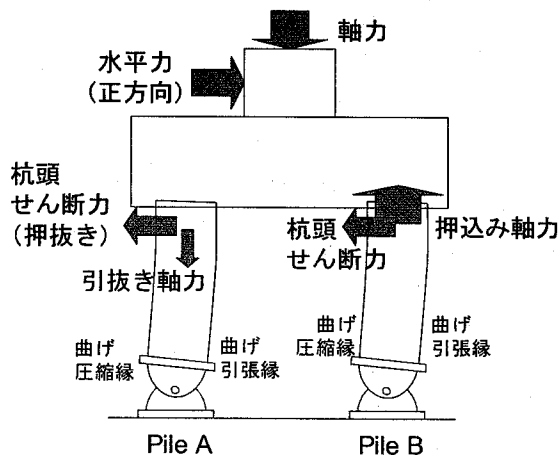


図-5 正載荷時における供試体の荷重状態

において、軸方向鉄筋の破断が確認された。

次に、図-6(a)~(f)にフーチング下面側の主要な荷重状態でのひび割れ発生状況を示す。フーチング下面では、まず $0.5d_y$ のステップ終了後に、引抜き杭の側方に水平荷重と直角方向に進展するひび割れが確認された(①)。 $0.75d_y$ ではひび割れがフーチング側面へと進展し(②)、その後、軸力作用位置方向へと進展(③)していった。 $2d_y$ においては杭側面から伸びたひび割れ(①)近傍のフーチング下面鉄筋が降伏した。 $4d_y$ 時には Pile B 側でのみフーチングかぶりコンクリートの小片が欠け落ちた(④)。その後は最終ステップの $10d_y$ まで剥落は見られなかった。 $5d_y$ の載荷時には引抜き杭側において、杭体の直下を通るフーチング下面鉄筋のうち、半数以上が降伏ひずみに達していた。フーチング下面鉄筋の多くが降伏に達した $5d_y$ 以降では、フーチング側面に水平方向に広がる押抜きせん断状のひび割れが進展し

ていった(⑤)。また、 $4d_y$ から $6d_y$ にかけてフーチングの上端から下へと進展するひび割れ(⑥)があった。最終ステップでのフーチングかぶりコンクリートの剥落(⑦)は載荷の最大変位に向かう途中で発生し、剥落後はフーチング下側主鉄筋が露出した。

フーチング下面の中央部では実験終了後もひび割れが生じていなかった。図-1(c)に示したフーチング下面の中央部付近の主鉄筋に取り付けたひずみゲージの計測値も最大で $20\sim 50\mu$ 程度の小さい値であった。

ひび割れ観察は nd_y の載荷ステップにおいて、正側載荷第1サイクル終了時、負側載荷第1サイクル終了時、全サイクル終了時に行っていた。そこで、図-6(f+)として各載荷ステップ正側載荷第1サイクル終了後に観察されたひび割れを重ね描きした図を、図-6(f-)として負側載荷第1サイクル終了後に観察されたひび割れを重ね描きした図を示す。負載荷時には、杭が引抜き軸力と外向きせん断力とを同時に受けていたため、より多くのひび割れが生じている。

図-7にフーチング上面側におけるひび割れ発生状況を示す。フーチング上面でも変状が見られ、杭が押込みになる載荷時に押抜きせん断状のひび割れが生じていた(⑧)。特に最初に押込み杭となる Pile B 側では、 $8d_y$ を過ぎてからフーチング上面かぶりコンクリートの剥離が見られた(⑨)。 $10d_y$ の最大変位へ向かう載荷中に浮き上がりが増大していき、変位ゼロ点に戻る最中にかぶりコンクリートが剥落し(⑩)、フーチング上面鉄筋と杭の軸方向主鉄筋が露出した。

図-8には、Pile A 側のフーチングでの最終載荷ステップ後のひび割れ図を示す。Pile A でも Pile B とほぼ同様の破壊状況であった。

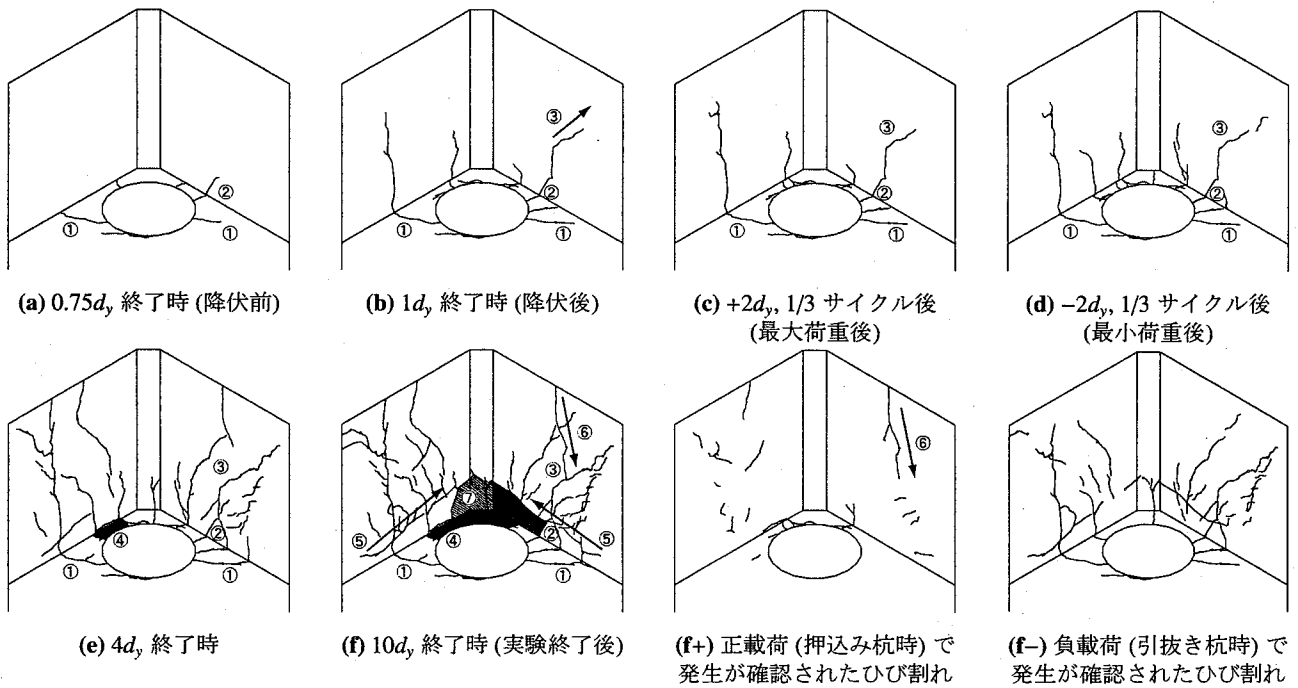


図-6 フーチング下面側のひび割れ進展状況 (Pile B)

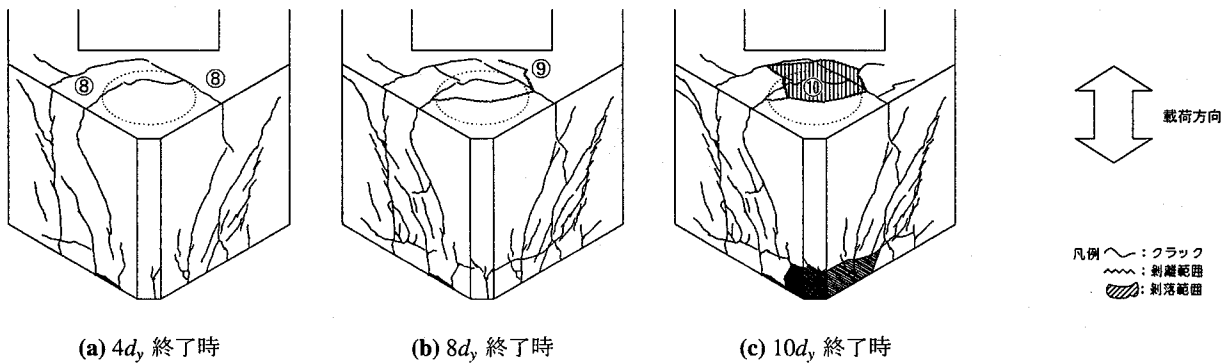


図-7 フーチング上面側のひび割れ進展状況 (Pile B)

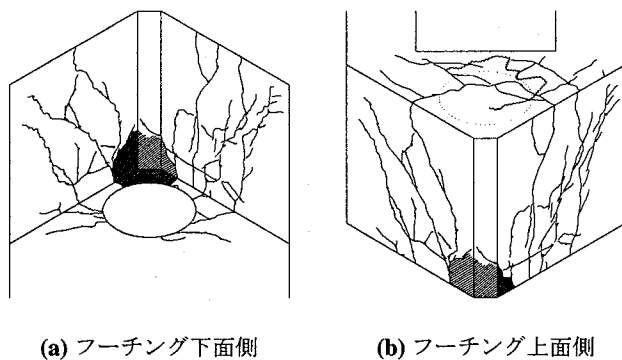


図-8 フーチングの最終ひび割れ状況図 (Pile A)

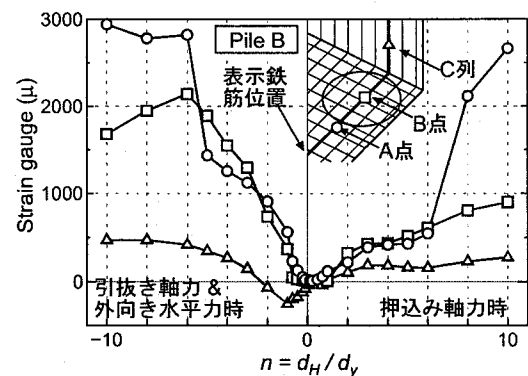


図-9 フーチング下側主鉄筋のひずみ分布 (Pile B)

4. フーチング鉄筋に発生したひずみ

図-9 に杭の中心位置を通るフーチング下側主鉄筋での計測ひずみと載荷ステップの関係を示す。縦軸の計測ひずみは A 点, B 点, C 点で計測されたもので, 各ステップの 1 サイクル目の最大 (または最小) 変位時における値である。実験供試体では, $0.5d_y$ 時に A 点付近のフーチングコンクリートにひび割れが発生した。そ

れにあわせて, 図-9 に示すように, A 点, B 点位置の計測箇所では $0.5d_y$ 時よりひずみが增大している。これは, 杭頭せん断力に対してフーチング下側主鉄筋が抵抗したことを示している。また, フーチング側面の曲げ上げ部での C 点の計測結果を見ると, 載荷変位が大きくなってほとんどひずみが生じていない。こ

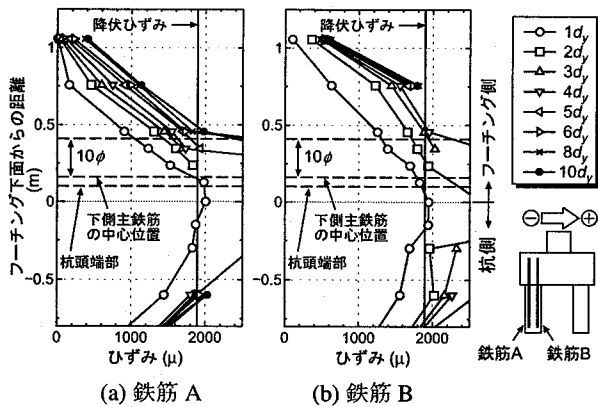


図-10 最外縁の軸方向鉄筋のひずみ分布

これらの傾向は計測を行っていた他の下側主鉄筋でも同様であった。以上のようにフーチング下面に生じるひび割れに対しては、既往の実験^{1),2)}と同様に、下側主鉄筋が抵抗に寄与していた。

5. 杭定着鉄筋の有効定着長

杭の最外縁に配置した軸方向鉄筋のひずみ分布を図-10に示す。縦軸は各載荷ステップで最大(または最小)変位となったときの計測ひずみ、横軸はフーチング下面からの距離である。また、図-10(a), (b)の両グラフとも鉄筋に引張力が生じる載荷方向での計測値であり、鉄筋Aは負載荷時、鉄筋Bは正載荷時での計測値である。

鉄筋のひずみが降伏ひずみに達した区間は、 $1d_y$ では杭とフーチングの境界面付近のみであるが、載荷が進むにつれて鉄筋の降伏箇所がフーチング内部へと拡大しており、鉄筋Aでは $8d_y$ 時、鉄筋Bでは $3d_y$ 時に道路橋示方書で見込まれる定着長の余裕分である 10ϕ を超えた。鉄筋Aと鉄筋Bでの降伏範囲に差が見られ、鉄筋Bで降伏範囲がより広がっているが、これは鉄筋Bが引張状態になるときは引抜き軸力と曲げ引張を同時に受け、定着部にとってより厳しい荷重が作用したためと考えられる。また、最終的な降伏範囲は、鉄筋Aではフーチング下側鉄筋の中心位置から 13ϕ (325 mm)程度、鉄筋Bでは 23ϕ (580 mm)程度であった。一方、既往の実験³⁾では、鉄筋が降伏する区間は $5\sim 7\phi$ 程度であった。今回の実験で軸方向鉄筋の降伏範囲が過去の実験に比べて大きくなった要因としては、繰返し回数の違いや、軸力変動の影響が考えられる。

図-10のフーチング内部の鉄筋定着部のひずみ分布に着目すると、載荷が進んでも一定勾配を保ったままでひずみが増加している。このときの勾配は鉄筋とコンクリートの付着強度に依存するものと考えられ、鉄筋Aの $4\sim 10d_y$ 載荷時の勾配より逆算した付着強度は約 3.2 N/mm^2 であった。鉄筋Bに着目すると、 $3d_y$ までは、フーチング下面から $+0.75 \text{ m}$ 位置で勾配の変化が見られるが、 $4d_y$ になると一定勾配になる。また、鉄

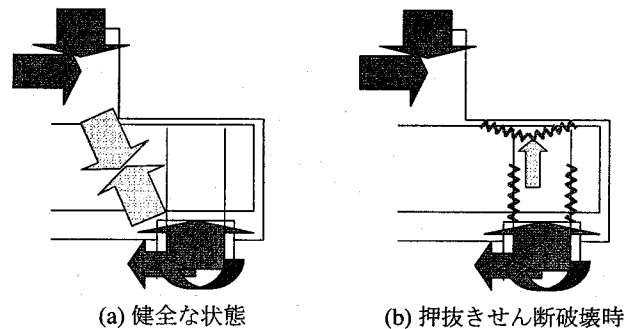


図-11 鉛直押抜きせん断時の荷重状態

筋のひずみが降伏ひずみを超える範囲も $4d_y$ 以後、急増するように見える。このことから、載荷試験の終盤では杭の結合部は曲げ引張力の作用時に鉄筋かごと引抜かれるように動いていたと考えられる。今回の実験では、 $8d_y$ 以降にフーチング上面側において鉛直の押抜きせん断状の剥離が見られた。これは図-11に示す模式図のように、結合部鉄筋が引張降伏して付着切れになったことで杭の結合鉄筋に沿ってフーチングが剥り抜かれたようになり、健全時のように押込み軸力がフーチングコンクリートへと分散・伝達されなかったため、鉛直の押抜きせん断破壊に至ったと考えられる。

6. まとめ

2本組杭模型を作成し、一定軸力を与えた上で正負交番の水平載荷を行った。実験の結果、次のことが確認できた。

- 実験供試体の最終的な破壊はフーチング内の杭結合部の抜け出し及び鉛直押抜きせん断であった。
- 水平の押抜きせん断に対して、フーチング下面にひび割れが生じるまではフーチングコンクリートが抵抗に寄与し、ひび割れ発生以降は杭体の直下を通るフーチング下側主鉄筋も抵抗に寄与する。
- 杭基礎が塑性域で繰返し載荷を受けるにつれ、杭の結合部鉄筋は、従来の実験で見られるよりも深い位置まで降伏した。鉄筋の定着長のみならず、杭基礎としての塑性率の制限値の設定など、今後設計での取扱いを検討する必要がある。

参考文献

- 1) 池内武文, 甘利憲一, 松村廣: 場所打ち杭とフーチングの縁端距離に関する実験, 土木学会年次学術講演会, Vol. 43, pp. 532-533, 1988.
- 2) 小笠原政文, 石塚番康, 吉田靖: 場所打ち杭とフーチングの縁端距離に関する実験 (その2), 土木学会年次学術講演会, Vol. 44, pp. 392-393, 1989.
- 3) 福井次郎, 木村嘉富, 大越盛幸, 阪野彰: 杭とフーチングの結合部の耐力・変形性能に関する載荷試験, 土木研究所資料第3551号, 1998.
- 4) 運上茂樹, 星隅順一, 西田秀明: 橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン(案)(橋脚の正負交番載荷実験方法及び振動台実験方法), 土木研究所資料第4023号, 2006.