

III-B1 水平力を受けるコンクリート模型群杭の3次元FEM解析

J R 東海 正会員 石田 浩章
 京都大学工学部 正会員 木村 亮・足立 紀尚

1. はじめに

筆者らは、水平力を受けるコンクリート杭の終局状態を把握するために、遠心載荷装置を用いた模型実験を行ってきた¹⁾。本報告では、3次元弾塑性有限要素法(GPILE-3D)²⁾を用いて、模型実験の解析を行い、実験結果と比較するとともにその適用性を検討した。

2. 実験概要

実験概要は文献 1) に詳しいが概略を以下に示す。模型杭は鉄筋コンクリート杭を想定した直径 $d=2.4\text{cm}$ のビームモデル杭である。遠心加速度は $50g$ とした。地盤材料には乾燥した豊浦標準砂を用い、相対密度 $D_r=90\%$ 以上の模型地盤を作成した。

実験は単杭及びフーチングで連結された直列2本杭、直列3本杭について行った。杭先端は固定、杭頭条件は単杭に関しては自由、直列2本杭、直列3本杭はフーチングによる連結である。群杭の杭中心間隔は $2.5d$ である。載荷は変位制御で行い、載荷速度 2.5mm/min で杭頭変位が杭径の 100% となるまで変位させた。

3. GPILE-3Dの概要

連立方程式の解法にはLDLT法を用い、地盤の降伏規準はDrucker-Pragerの破壊規準とし、Associated Flow Ruleを適用した。杭周辺地盤には大きな引張応力を発生させないNo-tension解析を行った。

水平力を受ける鉄筋コンクリート杭は、大変形領域では強い非線形性を示し、本解析では杭体の非線形性を曲げモーメント(M)と曲率(Φ)の関係で表現した。一般に、M- Φ 関係はクラック(C)、降伏(Y)、極限(U)のトリニティとして表現できる。これらの3点を求めるためにコンクリートの応力~ひずみ関係には道路橋示方書³⁾の設計基準、鉄筋には終局状態を考慮したPark-Pauley⁴⁾を用いてM- Φ 関係を決定した。ただし、クラック(C)点の決定に関しては、模型杭を単純ばりとして支点中心に静的載荷して曲げ試験を行い、曲げ試験より得られた結果をもとに決定した。単杭の解析では、Fig.1 a) に示すように、これら3点をハイパーボリック関数で近似したM- Φ 関係を用いた。群杭の場合には、単杭と異なり載荷荷重に応じて前列杭と後列杭で異なった軸力が発生するため、軸力に応じたM- Φ 関係を設定した。Fig.1 b) に軸力 $N=100\text{tf}$ 、

0tf, 100tfの時のM- Φ 関係を示す。解析に用いた直列2本杭の有限要素メッシュをFig.2 に示す。杭のモデル化に際し、ビーム要素とコマ要素の集合体として表現し、ビーム要素に杭のヤング率の9割、コマ要素に1割を負担させた。また、対称性を考慮して半断面として解析を行った。解析に用いた地盤定数をTable 1 に示す。

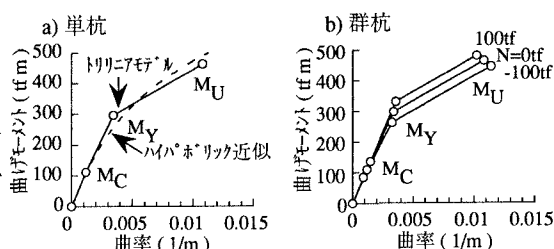


Fig.1 解析に用いたM- Φ 関係

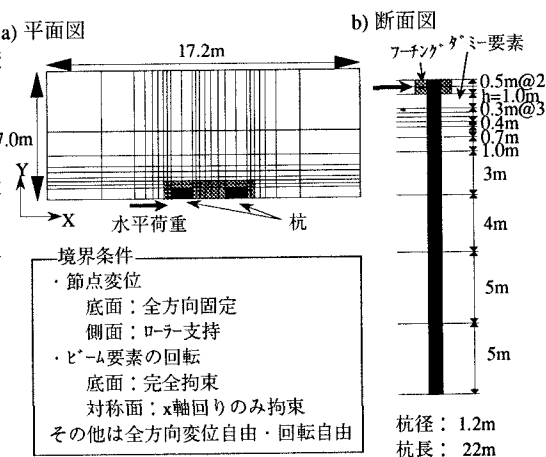


Fig.2 解析に用いた有限要素メッシュ (直列2本杭)

Table 1 解析に用いた地盤定数

弾性係数 $\Delta E_z/\Delta z$	250 (tf/m^3)
単位体積重量 γ	1.611 (tf/m^3)
ポアソン比 ν	0.33
静止土圧係数 K_0	0.5
粘着力 c	0 (tf/m^2)
内部摩擦角 ϕ	30 ($^\circ$)

4. 解析結果

Fig.3 に単杭及び群杭の載荷点での荷重～変位関係を実験結果とともに示す。横軸は杭径で規準化した変位を示す。杭頭自由の単杭の場合には杭頭変位が杭径の20%付近までは実験値と大きな差異は見られないが、それ以降では解析値が実験値を下回っている。一方、直列2本杭、直列3本杭では変位レベルが小さい時には解析値が実験値を若干過大評価しているが、終局状態では実験値とほぼ一致しており、挙動を表現できている。

次に、Fig.4 に杭頭変位が杭径の20%毎の直列2本杭の曲げモーメント分布を示す。最大曲げモーメント及び杭頭曲げモーメントの値は前列杭が後列杭よりも大きく、さらに杭頭付近では負の値を示しており、フーチングで連結したことにより、杭頭の回転が拘束されていることが理解できる。また、前方杭では杭先端まで曲げモーメントの影響が及んでいる。これは、実験では杭体にクラックが発生した後、クラックが開き塑性ヒンジが形成されて、地中深くまで曲げモーメントの影響が及ばないが、解析では杭を連続体として扱うため、杭頭変位が増加するに従い、曲げモーメントの影響が杭先端にまで及ぶためと考えられる。

次に、杭体のビーム要素の各節点に働く曲げモーメントの値が $M-\Phi$ 関係の M_c 、 M_y 、 M_u に達する範囲が、杭頭変位の増加とともに深さ方向に広がっていく様子を直列

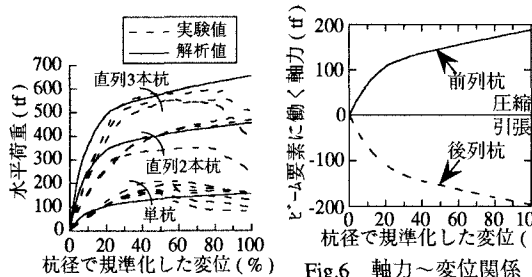


Fig.3 荷重～変位関係

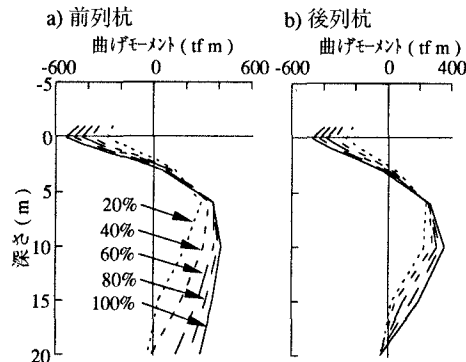


Fig.4 曲げモーメント分布（直列2本杭）

2本杭についてFig.5 に示す。図中には実験終了後に取り出した杭に生じているクラックの発生位置をスケッチした図もあわせて表示している。フーチング直下の杭前面で曲げモーメントの値が M_c に達しており、実験で観察されたクラックの発生を表現できている。また、地中部では実験においてクラックの発生が観察される位置よりも若干深い範囲まで M_c に達しているが、後方杭では前方杭よりもやや遅れて、深い位置まで M_c に達している範囲が広がっている。また、前列杭では曲げモーメントの値の M_y 、 M_u に達している範囲が広く見られ、実験で観察されたクラックの開口幅との間に相関関係が見られる。また、Fig.6 にフーチング直下のビーム要素の軸力～杭頭変位関係を示す。前列杭では圧縮、後列杭では引張の軸力が発生し、杭の曲げ剛性がそれぞれ増加、減少していることがわかる。

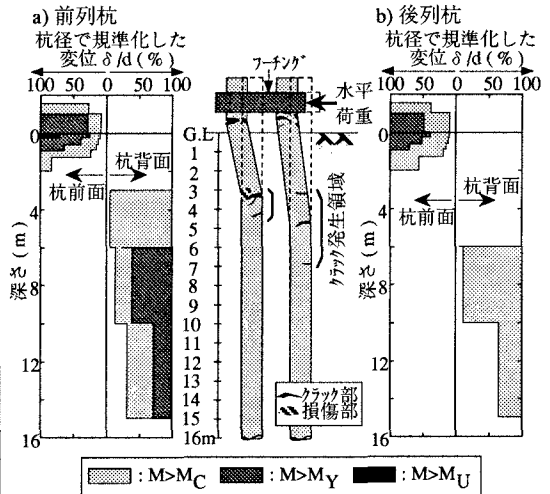


Fig.5 曲げモーメント～杭頭変位関係（直列2本杭）

5. おわりに

- 1) 群杭の場合に変位レベルが小さい時には解析値が実験値を若干過大評価しているが、終局状態においては挙動を表現できている。
- 2) 最大曲げモーメント及び杭頭曲げモーメントの値は前列杭が後列杭よりも大きく、前方杭では杭先端まで曲げモーメントの影響が及んでいる。
- 3) 杭に発生しているクラックの位置、状態について、杭の位置による挙動の違いが表現されている。

* 参考文献

- 1) 足立ほか：第30回土質工学会講演集，1995，pp.1495-1498.
- 2) 足立ほか：第30回土質工学会講演集，1995，pp.1491-1494.
- 3) 道路橋示方書（V耐震設計編），1990，pp.71-79.
- 4) 古田：橋梁構造物の総合健全性評価に関する調査研究，1990，pp.170-171.