土-水連成弾塑性有限要素解析による群杭基礎の長期沈下挙動の検証
－杭の間隔による群杭効果について－

京都大学大学院　学生会員○段野孝一郎　正会員　木村　亮
中日本高速道路　非会員　広瀬　剛
東日本高速道路　非会員　鈴木　雄吾

1. はじめに

中条 IC から朝日 IC（仮称）に至る日本海東北自動車道の建設事業においては，江戸時代には岩船潟と呼ばれた潟湖を干拓した箇所を高架橋にて横架する計画がなされている．現地の地盤は，N 値が 10 前後の軟弱な粘性土層と砂・砂礫層が互層状に堆積している軟弱地盤地帯であり，支持層として期待できる十分な強度を持つ砂礫層は 80 m～100 m 以深でないと発現しない．そこで図 1 に示すように，深度 32 m ～ 43 m に堆積する粘土層（Dc1-3 層，OCR = 2 ～ 3）を支持層とする設計案が採用された．そのため，建設される杭基礎は摩擦杭としての検討が必要であるが，基礎の長期的な安定性をあらかじめ検討することを前提に，支持杭としての安全率を用い，かつ杭先端粘土層の支持力を考慮した不完全支持杭とすることで合理的な基礎形式とすることができる（以下ではこのように設計される不完全支持杭のことを合理化杭と呼称する）．我々は一連の研究[1), 2)]を通して，合理化杭を用いた群杭基礎の長期沈下挙動を明らかにし，合理化杭の設計法を確立することを目標としている．

施工に先立って実施した単杭を対象とした実物大試験とその解析[3)]では，その長期安定性が確認されたが，沈下量は群杭基礎として予測される値よりはるかに小さく，単杭と群杭で沈下挙動が大きく異なるという結果になった．従来の杭基礎の設計では，鉛直支持力及び沈下量に対する群杭効果は検証されてこなかったため，我々はこの沈下量の差異を群杭効果によるものと仮説を立て，その影響を検証することとした．本稿では，土-水連成三次元弾塑性有限要素解析により，群杭基礎における杭の間隔が基礎の鉛直支持力及び沈下量に及ぼす影響を数値実験から明らかにする．

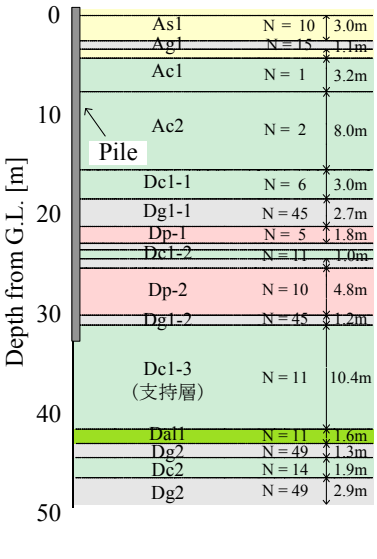


図 1　地盤構成と N 値分布

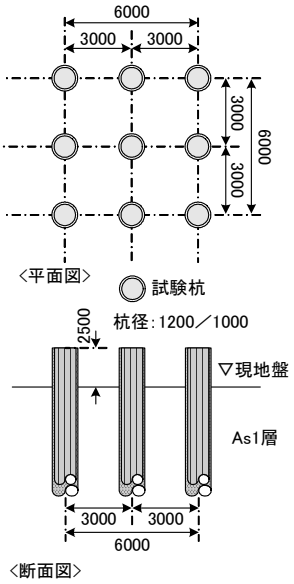


図 2　杭の配置
（杭間隔 = 2.5D）

表 1　粘土層のパラメータ

破壊時の主応力比 R_f	3.69
圧密指数 λ	0.221
膨潤指数 κ	0.0314
パラメータ α	0.70
ポアソン比 ν	0.30
初期間隙比 e_0	1.20
透水係数 k (m/s)	3.42×10^{-10}

表 2　砂礫層のパラメータ

破壊時の主応力比 R_f	4.60
破壊時のダイレタンシー勾配 D_f	-0.60
圧密指数 C_t	0.0042
膨潤指数 C_e	0.0032
ポアソン比 ν	0.30
初期間隙比 e_0	0.65
透水係数 k (m/s)	1.0×10^{-4}

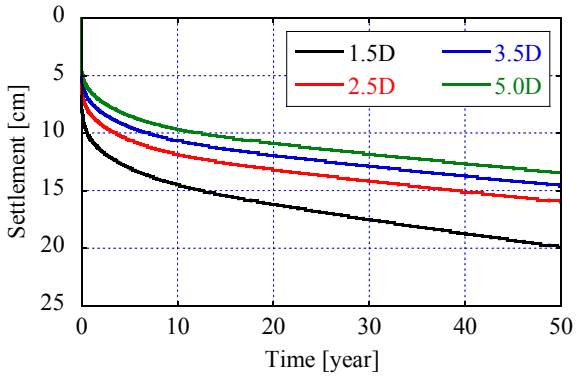


図 3　沈下量～経過時間

キーワード　杭基礎，沈下，群杭効果，数値解析，有限要素法
連絡先　〒606-8501　京都市左京区吉田本町　京都大学大学院工学研究科　TEL 075-753-5106

2. 数値解析の概要

杭は鋼管杭（杭径 1.0 m）とソイルセメント（厚さ 0.1 m）による合成鋼管杭であり，基礎形状は**図 2** に示すように 9 本群杭とした．実施工では深度 3.0 m までの地盤を掘削しラフトを打設するが，解析ではラフトの存在を考慮せず，深度 3.0 m までの地盤の影響は自重解析でのみ考慮した．杭本体は beam 要素でモデル化し，杭周囲の要素に column 要素を用いることにより杭体積を表現している．杭及び杭周囲の column 要素は不透水条件とした．

数値解析は解析コード DGPILE-3D[4]を用いて実施した．解析対象地盤は，砂・砂礫層を t_{ij} sand model[5]で，粘土層を subloading t_{ij} model[6]でモデル化した．本モデルを用いることにより，杭先端粘土層（Dc1-3 層）の OCR を考慮している．粘土のパラメータは圧密試験結果から決定し，内部摩擦角 ϕ' は 35°と仮定している．粘土のパラメータの一例を**表 1** に示す．砂礫層については，Drucker-Prager model で c' = 0，$\phi' = 15+\sqrt{15N}$ とした場合の応力～ひずみ関係と比較して，初期勾配と破壊時の応力比が一致するようにパラメータを決定した．決定した砂礫のパラメータの一例を**表 2** に示す．

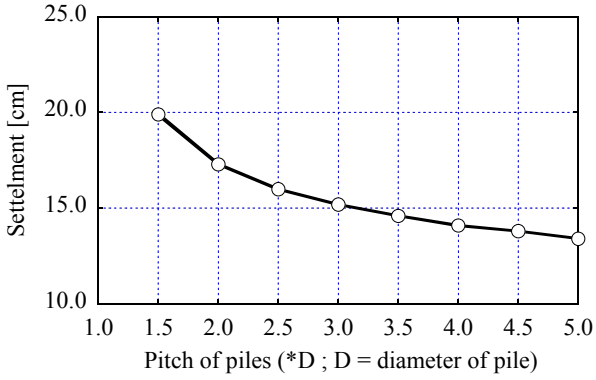
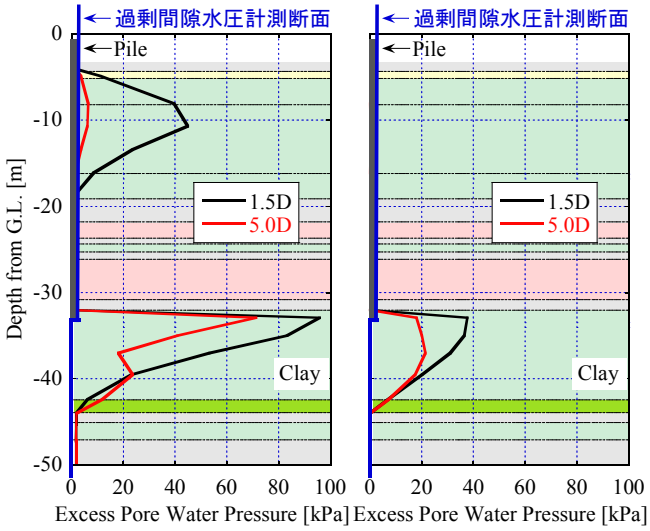


図 4　杭の間隔と沈下量



（a）　載荷終了時　　（b）　3 ヵ月後

図 5　過剰間隙水圧の分布

3. 解析結果

解析は杭間隔を 1.5 D から 5.0 D まで 0.5 D（= 0.6 m）ずつ増加させ，計 8 ケース実施した．**図 3** に沈下量～経過時間関係を示す．**図 3** より杭間隔を大きくすると早期に沈下が収束に向かい，沈下量も小さくなることが判る．**図 4** に 50 年後における各ケースの沈下量の比較を示す．この結果から，杭の間隔を大きくすると沈下量は小さくなるが，その影響は 1.5 D～2.5 D 間で大きく，間隔 4.5 D 以上でも一定値に収束しない傾向であることが判る．**図 5** に中央の杭近傍及び杭先端直下（図中に青線で示した断面）に生じた過剰間隙水圧の分布を示す．**図 5** より，杭間隔が小さいとより大きな過剰間隙水圧が生じていることが判る．また杭先端層の過剰間隙水圧は消散が遅く，支持層における過剰間隙水圧の消散の仕方が沈下挙動に影響を与えていることが判る．

4. まとめと今後の展望

本稿では杭の間隔が沈下量に与える影響について整理した．1) 杭間隔の影響は過剰間隙水圧の差に顕著に現れ，その影響から沈下量にも差が生じること，2) 本ケースにおいて群杭効果の影響は杭間隔 1.5 D ～ 2.5D で顕著で，4.5D 以上でも収束しないこと，が明らかになった．今後は，1) 支持層の強度と群杭効果の影響の相関性，2) 杭本数による影響，3) ラフトを設けることによる影響，を検討し，沈下量という観点から捉えた場合の群杭効果を詳細に検証する予定である．

【参考文献】

1) 玉谷ら：第 40 回地盤工学研究発表会 E-04, pp.1541-1542, 2005.　2) 広瀬ら :基礎工, Vol.33, No.12, pp.45-48, 2005.　3) 段野ら：第 41 回地盤工学研究発表会（投稿中）.　4) M. Kimura & Zhang. F : S & F, Vol.40, No.5, pp. 113-132, 2000.　5) T. Nakai & H. Matsuoka : S & F, Vol.29, No.1, pp.119-137, 1989.　6) T. Nakai & M. Hinokio : S & F, Vol.44, No.2, pp.53–70, 2004