

実物大群杭基礎繰返し水平載荷試験の数値シミュレーション

名古屋工業大学 学生会員 近藤祥光・陳英芝・包小華
 名古屋工業大学 国際会員 張鋒

1. はじめに

軟弱地盤に建設される構造物は直接基礎ではすべり破壊や沈下を起こす危険性が高いことから、群杭基礎により支持されることが多い。また、地震による杭基礎の被害は上部構造物とは異なり地中で発生することから被害状況を瞬時・的確に判断することは難しいため、地震時の杭基礎の力学挙動を正確に把握することは重要である。本研究では、実物大9本群杭基礎水平載荷試験¹⁾を対象として有限要素解析を行った。その際、土・水連成を考慮した解析プログラム「DBLEABES」²⁾を用いて、密度や拘束応力の影響を考慮できる等方硬化型の弾塑性構成式 *Subloading t_{ij} model*³⁾ および杭の軸力変動による曲げ剛性への影響を考慮できる AFD モデル⁴⁾を用いて全応力と有効応力解析を行い、実験結果と比較することにより解析手法の適用性を検証した。

2. 実物大9本群杭基礎水平載荷試験

本研究では、阪神高速道路公団湾岸線岸和田大橋における架設ベントに用いられた9本群杭基礎の繰返し水平載荷試験を対象とする。本試験は、実構造物に大きな水平変位が生じた際、各杭における終局挙動を把握することを目的として実施されたものである。図-1に載荷試験の概要を示す。試験杭は杭径 1.2m、杭長 30.4m の場所打ちコンクリート群杭である。3 基の群杭フーチングのうち試験杭以外の 2 基を連結して反力杭とした。図-2に試験杭と周辺地盤の概略図を示す。試験が実施された場所は載荷試験のおよそ3年前に施工された若齢埋立地であり、表層を構成する埋立層は約 13m の層厚を有し、最大礫径が 30cm 程度の巨礫を含む砂礫層である。N 値は 2~23 を示し、かなりばらついているが、全体的には $N \approx 10$ 程度である。載荷荷重については、地盤工学会基準⁵⁾に従い、片方向多サイクル繰返し載荷方式により 7MN 油圧ジャッキ 6 台を用い、載荷・除荷速度は 1MN/分程度とし、処女荷重時については 15 分間、0 荷重時は 15 分間、履歴荷重段階時は 3 分間一定荷重を保持させるものとし、図-3に示すように最大 20.5MN まで9サイクルの繰返し載荷を実施した。

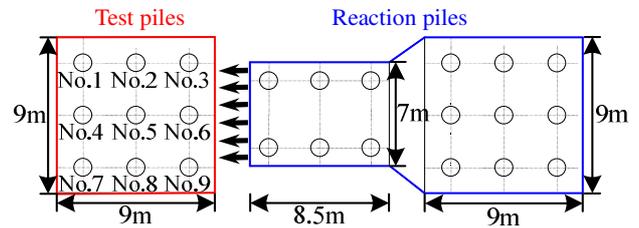


図-1 載荷試験の概要

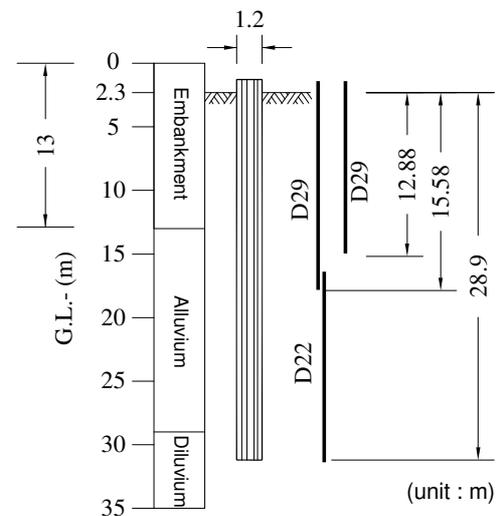


図-2 試験杭と周辺地盤の概略図

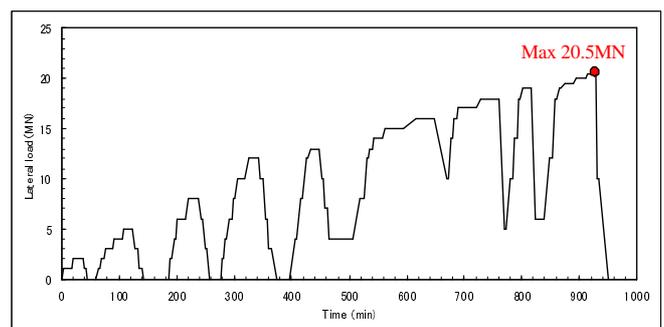


図-3 載荷荷重—時間関係

3. 材料パラメータの決定

現場から採取された試料を用いて行った排水三軸圧縮試験を基に要素シミュレーションを行い、地盤材料パラメータを設定した。試験では粒径 50mm 以上の礫を除去した粒度調整再構成試料を用いた。図-4に要素シミュレーションの結果を示す。偏差応力—軸ひずみ関係は概

ね実験結果を再現しており、体積ひずみ-軸ひずみ関係においては、低い拘束圧の下では体積ひずみが多少過大評価されているが、全体的に実験結果を概ね再現している。計算に用いる破壊応力比 R_f については、**図-5** に示す Mohr-Coulomb の破壊基準より求めた内部摩擦角度 36° を用いて決定した。B 層, As1 層, Ac1 層については *Subloading t_{ij} model*, Dc 層は弾性体 (弾性係数: 100MPa) としてモデル化した。要素シミュレーションおよび物理試験より設定した地盤材料パラメータを**表-1** に示す。

杭については、AFD モデルを用いたハイブリッド要素⁶⁾としてモデル化した。杭のハイブリッド要素は杭体自体の体積を再現するための一手法であり、**図-6** に示すように杭全体の剛性の 9 割をビーム要素に 1 割をその周辺のソリッド要素に持たせている。杭のヤング率は地盤に比べて 3 オーダー程度大きいことから、ビーム要素周辺のソリッド要素のヤング率は地盤のそれより 2 オーダー程度大きくなる。これによって、ビーム要素周辺のソリッド要素は杭の曲げ変形にさほど影響を与えないと同時に、杭体積を表現することが可能となる。

杭の中の鉄筋は地表面から深さ約 15m 付近で D29-24 から D22-12 に変わっているため、本解析でも同様にモデル化した。杭のパラメータを**表-2** に示す。

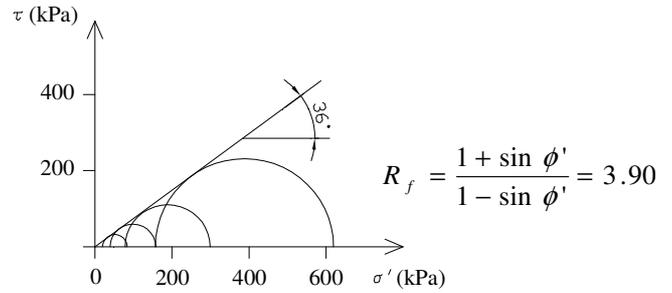


図-5 Mohr-Coulomb の破壊基準

表-1 地盤材料パラメータ

Soil	ν	λ	κ	N	R_f	a	β	OCR	ρ (tf/m ³)	k (cm/s)
B1	0.3	0.089	0.002	0.9	3.9	500	1.5	3	1.97	6.56E-01
B2	0.3	0.089	0.002	0.9	3.9	500	1.5	3	1.97	3.61E-02
B3	0.3	0.089	0.002	0.9	3.9	500	1.5	3	1.97	1.09E-01
As1	0.3	0.23	0.046	0.8	3.69	500	1.5	10	1.80	1.00E-02
Ac1	0.38	0.23	0.046	0.7	4	500	1.5	2	1.70	1.00E-06
Dc	0.3	-	-	-	-	-	-	-	1.80	1.00E-07

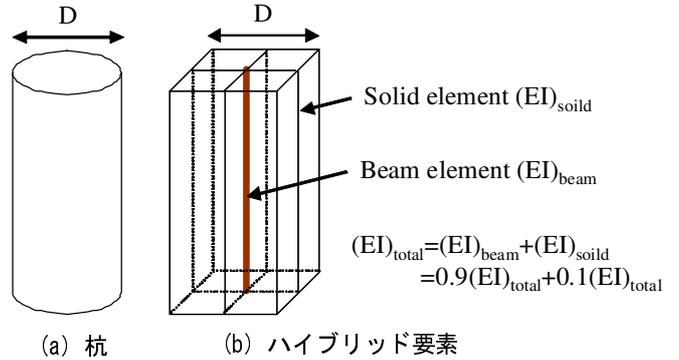


図-6 ハイブリッド要素の概要

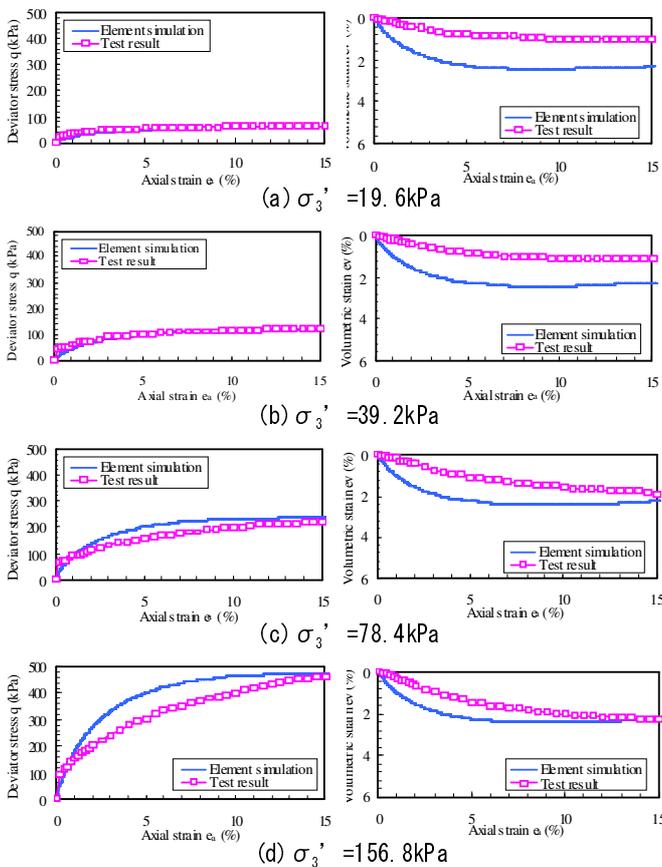


図-4 要素シミュレーション結果

表-2 杭のパラメータ

- Physical properties of RC
 Compressive strength of concrete : $\sigma_c = 3.8 \times 10^4$ kPa
 Young's modulus of concrete : $E_c = 2.5 \times 10^7$ kPa
 Young's modulus of steel : $E_s = 2.1 \times 10^8$ kPa
 Yield stress of steel : $\sigma_y = 3.8 \times 10^5$ kPa
- Arrangement of the reinforcement :
 D29-24 (upper part : 14.5m from the surface of the ground)
 D22-12 (lower part: 15.9m)
 Overburden of the reinforcement : 15cm

4. 解析条件

解析メッシュは土性図を基に地層を 6 層に分け、3D の半断面で作成した。**図-7** に本研究で用いた解析メッシュを示す(要素数 4688, 節点数 5652)。地盤の解析領域は x 方向に 50m, y 方向に 25m, z 方向に 32m とした。地層は地表面から埋立層(B1~B3: 厚さ 10m), 砂質土層(As1: 厚さ 11m), 粘性土層(Ac1: 厚さ 5m), 洪積粘土層(Dc: 厚さ 6m)で構成される。杭の断面は一辺が 1.2m の正方形断面とし、実験と同様に杭長 30.4m, 杭中心間隔 3.0m の

9 本群杭とした。解析メッシュの底面の全節点を完全固定とし、左右側面を x 方向、前後側面を y 方向固定とした。杭頭は回転のみ固定とし、フーチングは弾性体としてモデル化した。

図-8 に水平荷重方法を示す。反力杭はモデル化しておらず、荷重については実験と同様にフーチングの右側面における地表面から高さ 0.9m に位置する全節点を x, y, z 方向に等変位境界を設け剛体として、真ん中の一点に水平方向に図-3 に示す荷重を荷重した。地盤の初期応力については、杭の影響を考慮しない正層地盤の初期応力分布より求めた。また、有効応力解析においては地表面以深 1m を排水境界条件とした。

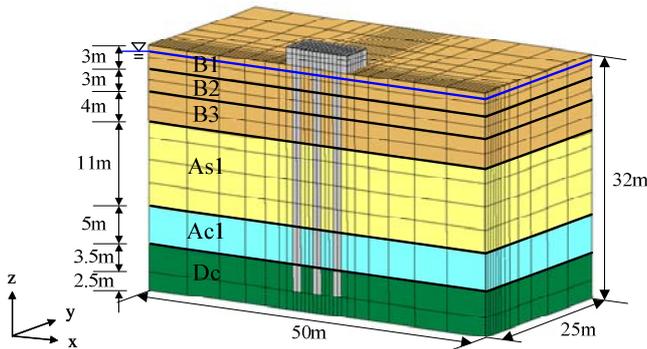


図-7 解析メッシュ

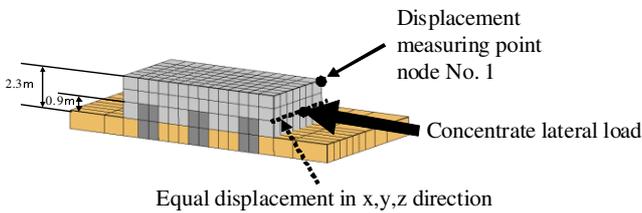
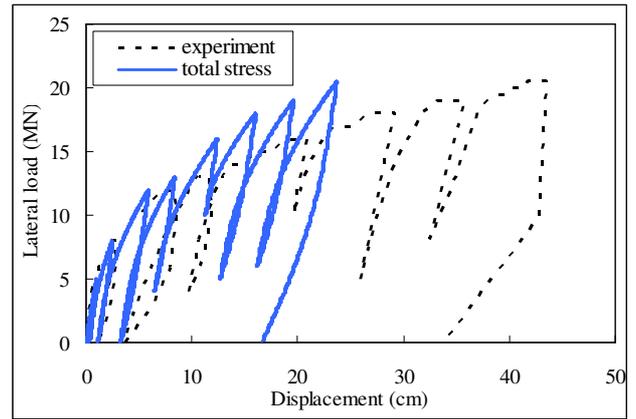


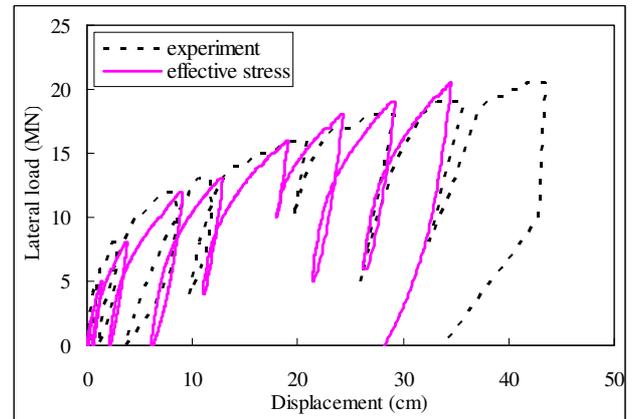
図-8 水平荷重方法

5. 解析結果

図-9 に全応力と有効応力解析から得られた水平荷重—水平変位関係を示す。水平変位は図-8 に示す節点番号 1 において測定したものである。図-9(a) に示す全応力解析の結果、8MN 荷重時の 3 サイクルまでの荷重・除荷においては解析結果が実験結果に近い挙動を示すが、繰返し回数が増えるに連れ、最大変位(23.7cm)および残留変位(16.6cm)が実験結果(最大変位:43.5cm, 残留変位 33.6cm)を大きく下回ることがわかる。これに対して、図-9(b) に示す有効応力解析の結果を見ると、最大変位(34.6cm)および残留変位(28.2cm)が実験結果に近い結果が得られた。特に、6 サイクル目までは実験結果にかなり近い水平変位を示している。しかし、それ以後の水平変位が過小評価されたことについては、実験では 6 サイクル荷重(P=15MN)頃から周辺地盤にクラックが多く発生しているが、本解析では地表面のクラックは再現できないため、多少の差が生じたと考えられる。

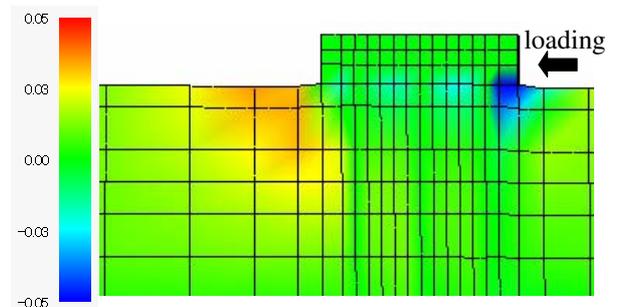


(a) 全応力

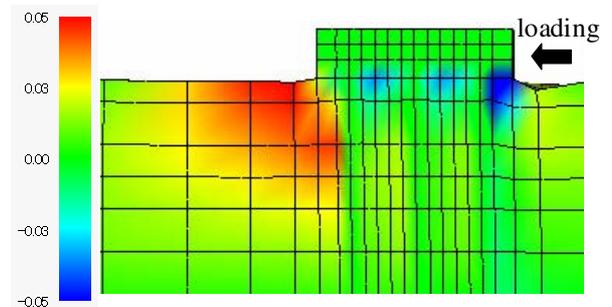


(b) 有効応力

図-9 荷重荷重—水平変位関係



(a) 全応力

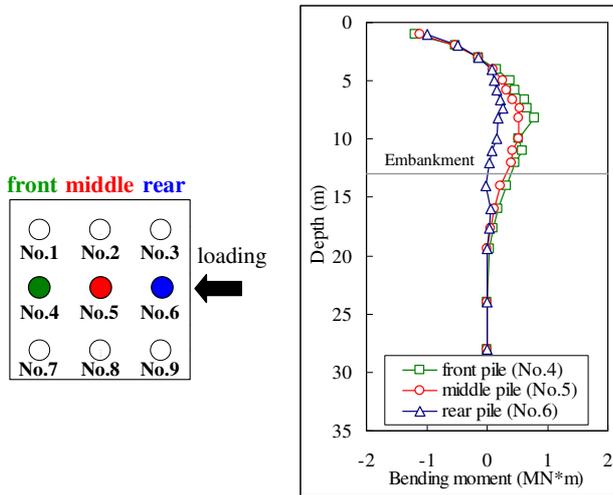


(b) 有効応力

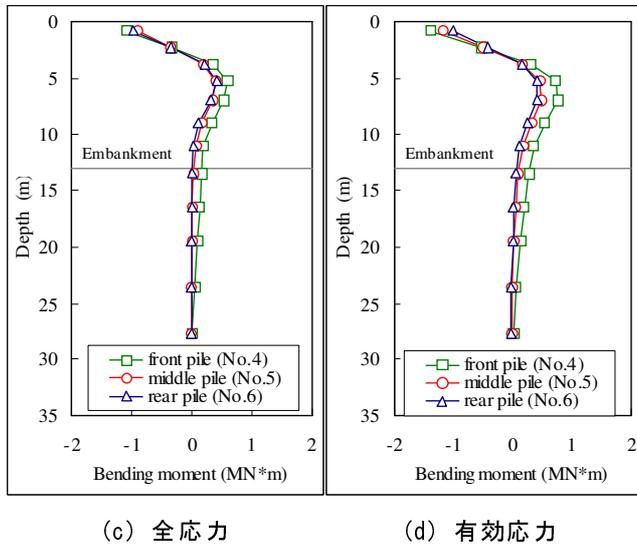
図-10 荷重荷重 20.5MN 時の体積ひずみ分布

図-10 に最大荷重荷重時(P=20.5MN)の群杭周辺に発生した体積ひずみ分布を示す。全応力・有効応力どちら

の解析においても群杭のフーチング前面側では比較的広い範囲で圧縮傾向、背面側では狭い範囲で大きな膨張傾向が見られる。また、フーチング前面側で試験後の地表面ではクラックが多く観察されており、本解析においてクラックを表現することはできないが、大きい圧縮体積ひずみが生じていることから実験と同じ現象を再現できていると考えられる。



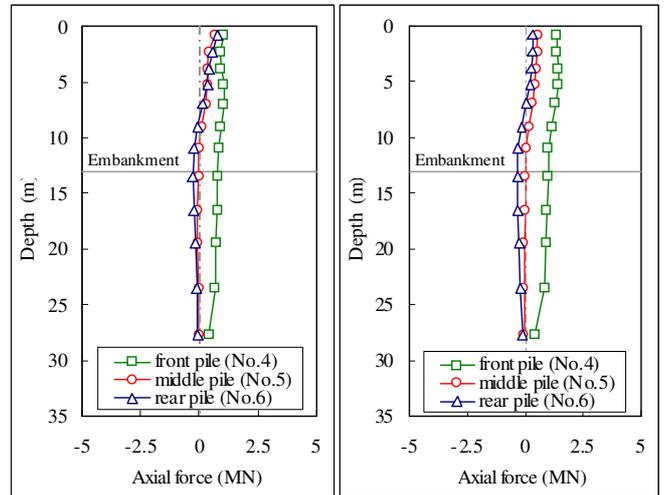
(a) 試験杭の配置図 (b) 実験結果



(c) 全応力 (d) 有効応力

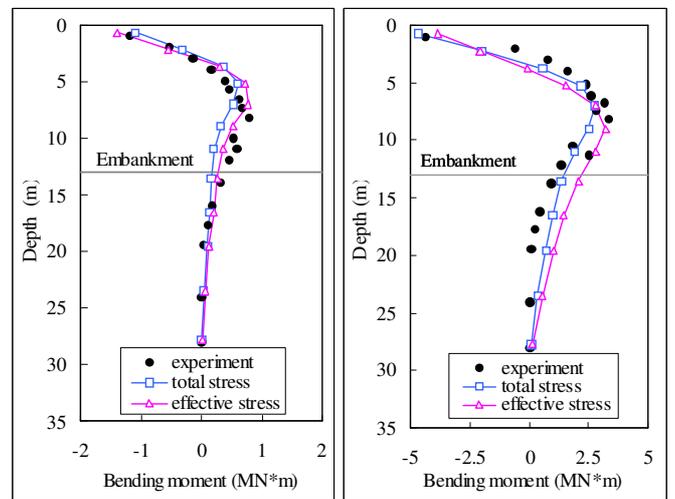
試験杭の配置を図-11(a)に示す。図-11(b)~(d)に3サイクル目である載荷荷重 8MN 時の杭の曲げモーメント分布を示す。グラフ中には埋立層の境界(深さ 13m)を示してある。全応力・有効応力どちらの解析においても、地中部に発生する曲げモーメントの最大値が前>中>後方杭の順に減少している。これは軸力を受ける場所打ち杭の特性とし、前方杭では圧縮軸力方向の増加により曲げ耐力が増大し、逆に後方杭では引っ張り軸力方向の増加により曲げ耐力が相対的に低下するものと考えられ、AFD モデルを用いることにより、部材に発生する断面力

を精度良く再現でき実験結果と同じ傾向を示している。また、すべての結果において地中部最大曲げモーメントは埋立層内で発生し、杭頭部最大曲げモーメントも近い値を示す。しかし、地中部最大曲げモーメントの値や発生位置から見ると、有効応力解析結果がより試験結果に近いことがわかる。



(a) 全応力 (b) 有効応力

図-12 載荷荷重 8MN 時の杭の軸力分布



(a) 8MN (b) 20.5MN

図-13 杭の曲げモーメント分布の比較

図-12に載荷荷重 8MN 時の杭の軸力分布を示す。軸力の実験結果はないが、全応力・有効応力どちらの解析においても、軸力の大きさが前>中>後方杭の順に曲げモーメントと同様に分布しており、部材に発生する断面力を精度良く表現していると考えられる。特に有効応力の解析結果、4 番杭と 5 番杭の軸力の差がはっきりと分かる。

図-13に 8MN と 20.5MN 載荷時の中央前方杭(No.4)における曲げモーメント分布を示す。全応力・有効応力の

どちらの解析においても概ね実験と同じ挙動を示しているが、有効応力解析の曲げモーメントの発生深度および最大値が実験結果により近いことが確認できる。

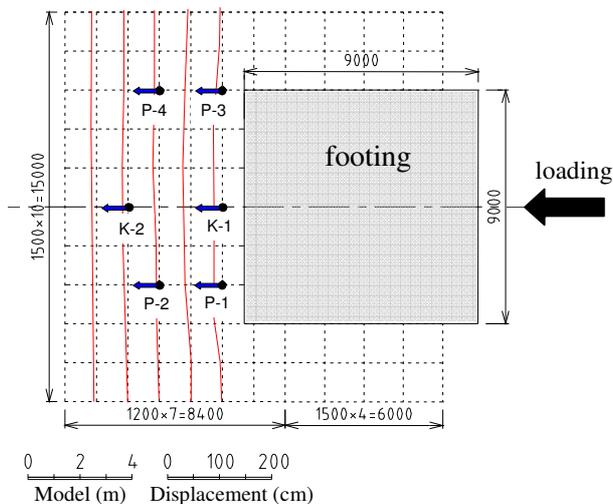


図-14 試験終了後の地表面での水平変位

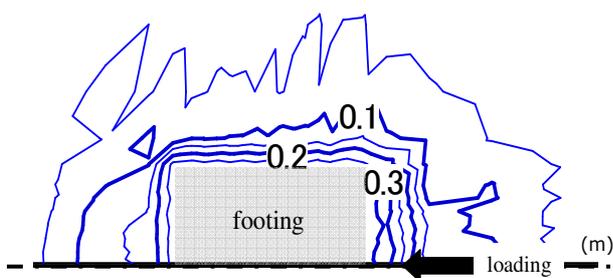


図-15 繰返し载荷終了後の地表面の変位
(有効応力解析)

表-3 測定点での水平変位値

Measuring point	Test result (m)	Total stress (m)	Effective stress (m)
K-1	0.13	0.12	0.15
K-2	0.07	0.03	0.05
P-1	0.11	0.12	0.15
P-2	0.07	0.07	0.11
P-3	0.12	0.1	0.1
P-4	0.08	0.05	0.09

図-14 は試験終了後のフーチング周辺に生じた地表面の水平変位を示す。フーチング前面の赤い線を見ると、フーチングに近い程地表面の変位が大きいことがわかる。図-15 に有効応力解析から得られた繰返し载荷終了後の地表面の変位コンターを示す。等変位線の分布もフーチング前面に生じる地表面の変位を再現している。また、図-14 に示す 6 つの変位測定点における载荷終了時の水平変位を表-3 に示す。全応力および有効応力どちらの解析においてもそれぞれの変位測定点における実験結果の

傾向を再現することができた。

図-16 に応力履歴を出力する要素の位置を示す。図-17 には全応力解析の結果、図-18 には有効応力解析の結果を示す。 J_2 は偏差応力の第 2 不変量を意味する。杭前方に位置する要素 1 では繰返し载荷の間に平均応力とせん断応力ともに大きく増加と減少を繰り返すが、内部および背面の要素においては平均応力とせん断応力ともに繰返し载荷とともに減少する挙動を示す。また、全応力と有効応力の解析結果が同じ挙動を示していることから、解析手法による影響は差ほど大きくないことが分かった。

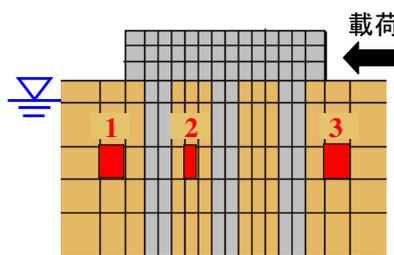


図-16 要素番号

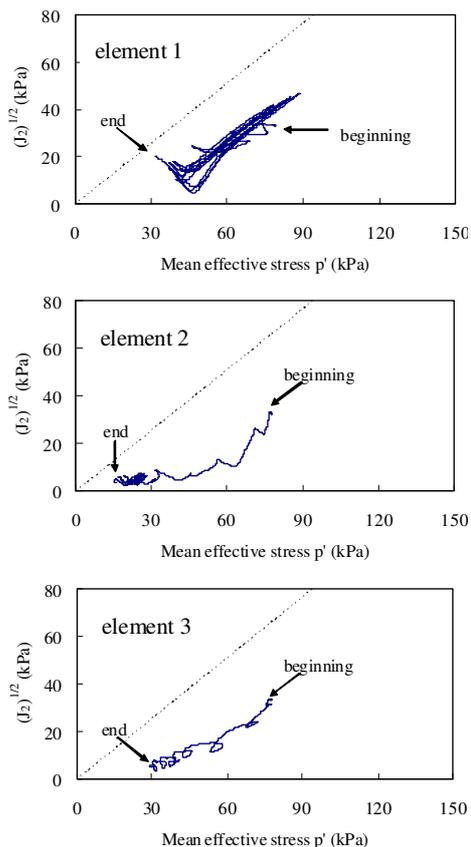


図-17 杭周辺地盤要素の応力経路 (全応力)

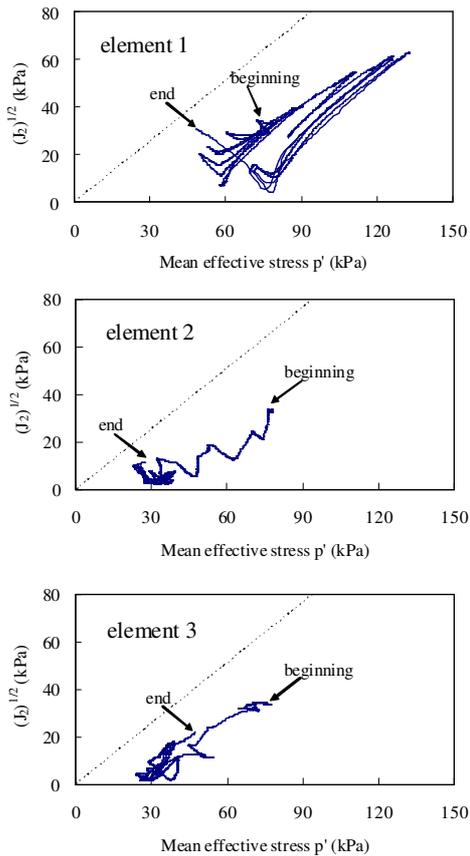


図-18 杭周辺地盤要素の応力経路（有効応力）

6. まとめ

土・水連成解析プログラム「DBLEABES」を用いて実物大9本群杭基礎繰返し水平載荷試験の全応力・有効応力解析を行い試験結果と比較することにより、解析手法の適用性を検証した。その結果、水平変位、杭の曲げモーメントおよび地表面の変形より、全応力の解析結果も試験結果をある程度再現しているが、有効応力解析結果の方がかなりの精度で試験結果を再現していることが分かった。また、杭の軸力および曲げモーメントの分布から杭の軸力変動の影響を適切に表現できる AFD モデルを用いることにより、部材に発生する断面力を精度良く再現できることを確認した。以上により、本解析手法による土・水連成解析が実地盤と構造物の挙動をより正確に表現し、かなりの精度で実物大繰返し水平載荷試験を再現できることが検証された。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団(1994): 岸和田旧港実杭水平載荷試験・実験報告書
- 2) Ye, B., Ye, G. L., Zhang, F. and Yashima, A. (2007): Experiment and Numerical Simulation of Repeated Liquefaction-Consolidation of Sand, Soils and Foundations, Vol.47, No.3, 547-558.

- 3) Nakai, T. and Hinokio, M. (2004): A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, Soils and Foundations, Vol.44, No.2, 53-70
- 4) Zhang, F. and Kimura, M. (2002): Numerical prediction of the dynamic behaviors of an RC group-pile foundation, Soils and Foundations, Vol.42, No.3, 77-92.
- 5) 地盤工学会(1983):杭の水平載荷試験方法・同解説
- 6) Zhang, F., Kimura, M., Nakai, T. and Hoshikawa, T. (2000): Mechanical behavior of pile foundations subjected to cyclic lateral loading up to the ultimate state, Soils and Foundations, Vol.40, No.5, 1-17.