

地盤-杭の相互作用に関する水平断面内挙動

井合 進・飛田哲男・Matthew DONAHUE*・中道正人**・金子英久**

* 米国オレゴン州立大学

** 国土交通省近畿地方整備局

要 旨

杭-地盤相互作用に伴って生じる水平断面内での杭周辺地盤の変位・変形状を詳細にとらえることを目的として模型実験を行った。実験した断面について、数値シミュレーションも実施し、模型実験から得られた結果の一般化を図った。数値シミュレーションにおいて用いた砂の力学モデルは、多重せん断機構に基づくモデルである。乾燥排水条件では、杭周辺の地盤変位ベクトルは杭前面では杭変位と同じ方向に、また、杭の側面では杭表面からの距離に応じて急速に変位が小さくなる傾向を示した。飽和非排水条件では、杭側面で渦状の変位形態が見られ、杭の前後では、それぞれ押出し、引込みの変位形態を示した。杭間の変位は、杭表面付近にひずみが集中する傾向が見られた。

キーワード： 地盤-構造物系の相互作用，杭基礎，基礎，地震

1. はじめに

杭基礎をはじめとする杭構造物の設計において、1995年の兵庫県南部地震のように著しく激しい地震動に対して合理的な耐震設計を行うためには、杭構造物に発生する地震後の残留変形とこれに伴う終局状態の適切な評価が必要とされる。このため、本研究グループでは、これまで、多重せん断機構に基づく2次元有効応力解析法（FLIP）（Iai et al, 1992）を用いた地盤-杭構造物系の一体解析により、地盤からの変位によって杭地中部に加わる新たな外力の評価やこれによる杭基礎の残留変位解析などを行ってきた。このような2次元解析により、例えば図-1に示すとおり、大地震時における杭構造物の被害状況を、杭構造物の変形形態および変形程度のいずれについてもシミュレーション可能なことがわかってきている。この例では、同図に示すとおり、栈橋の床版直下の斜面地盤が全体的に1.5mほど海側へ変位し、これにより杭-床版での接合部および杭地中部に挫屈が発生している（Iai, 1998）。

地盤の変位がこのように構造物に被害を与える大きなレベルに達すると、杭-地盤構造物の相互作用には、地盤の著しい非線形性が発生する。このため、このような地盤-構造物の相互作用解析には、検討すべき課題が数多く残されているのが現状である。

この課題に対して、図-2に示すような水平面内での杭間での土のすり抜けや杭の周囲の土の回り込みの影響を、2次元有効応力解析法を水平面内に準用する形で数値解析的に評価する。なお、同図には事前比較解析ケースとして杭1列の場合を表示しているが、群杭としての解析では解析対象とする3列の群杭をモデル化して解析する。これにより、地盤-杭地中部の3次元的な非線形性の強い相互作用の影響を評価し、通常の2次元解析に組み込むための適切な地盤バネ（非線形履歴型地盤バネ）の評価解析法を開発する。その結果を既に開発済みの2次元有効応力解析法（FLIP）に組込むことにより、実用性を備えた地盤-杭基礎系の2次元還元型動的相互作用解析法を開発することとする。

このような目的を念頭に、杭-地盤相互作用に伴

って生じる水平断面内での杭周辺地盤の変位・変形状に注目して、杭―地盤相互作用の適切なモデル化について実験的ならびに解析的検討を行うこととした。特に、(1)杭周辺地盤の変形挙動の可視化、(2) FLIPによる解析との比較を行い、さらに、(3) 杭周面摩擦の効果について検討した。以下では、まずはじめに単杭を中心に報告し、引続き、群杭の場合の変形挙動について報告する。

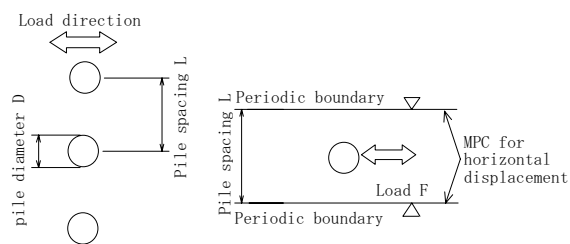
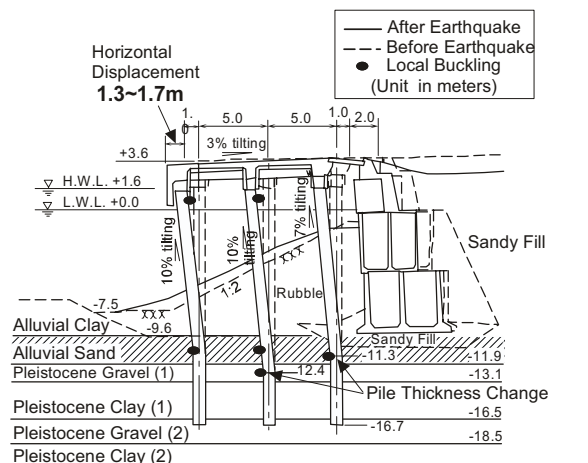
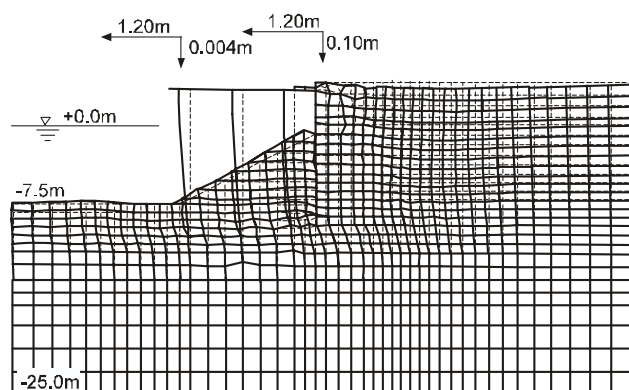


Fig. 2 Pile-soil interaction model in horizontal plane



(a) Damage to a pile-supported wharf during Hyogoken-Nambu earthquake of 1995 (after iai, 1998)



(b) Two dimensional effective stress analysis of a pile-supported wharf

Fig. 1 Damage to a pile supported wharf during Hyogoken-Nambu earthquake and effective stress analysis

2. 実験方法

本研究では、図-3 に示すアルミニウム製の試験床（内寸法幅 800mm、奥行き 500mm、高さ 40mm）の中央に杭模型（直径 50mm、高さ 40mm のテフロン製の

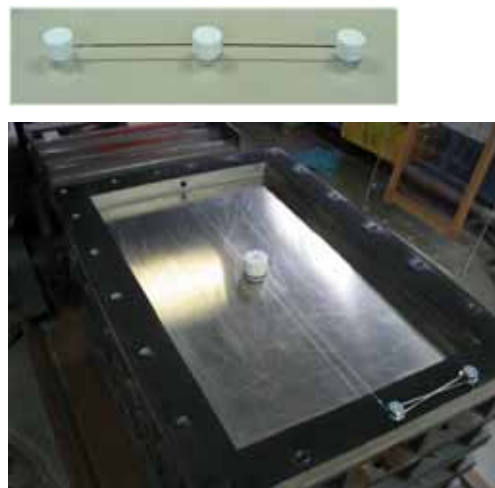


Fig. 3 Apparatus for model tests for soil-pile interaction in horizontal plane

円柱)を置きその周囲に砂を敷いた。砂地盤（珪砂7号）は、乾燥砂地盤の場合には気中落下で、飽和砂地盤の場合には間隙水として粘性を高めた水（120cSt）を用いた飽和砂を試験床に流し込み作成した。乾燥砂地盤の相対密度は約70%，飽和砂地盤はスラリー状態で相対密度は約-150%である。杭模型の側面中央部に取り付けたワイヤーを載荷速度 7.2mm/minで牽引して杭に変位を与えた。なお、群杭の実験では、図-3上段に示すような3連の杭模型を用いている。

実験は表-1に示すように杭の条件（単杭、群杭）

Table 1 Model test cases

Case No.	Pile	Sand deposit	Relative density (%)
Case-1	Single	Dry	70
Case-2	Single (friction large)		
Case-3	Single	Saturated	-135
Case-4	Single (friction large)		
Case-5	Group (3D)	Dry	72
Case-6	Group (3D)	Saturated	-166
Case-7	Group (5D)	Dry	66
Case-8	Group (5D)	Saturated	-161

と地盤の条件（乾燥，飽和）を変えて行った。単杭の場合には杭模型の周囲に紙やすりを巻き付け，杭周面の摩擦を増大させた実験も行った（Case 2 と Case 4）。群杭の場合には，単杭の場合と同じ杭模型を径4mmの真鍮棒で荷重（変位）方向に3個連結したものをを用い，杭間隔（3Dと5D：Dは杭径）を変えた実験を行った。

杭周辺地盤の水平面での変形挙動は，試験床に取り付けたアクリル板を通して試験床上部からビデオカメラおよびデジタルマイクロスコープで観察・記録した。また，杭に作用する荷重をワイヤーにつないだ荷重計で計測し，試験床外におけるワイヤーの変位量をレーザー変位計で計測した値をもって杭の変位とした。

3. 水平断面内の杭-地盤系の変形解析の方法

杭-地盤系の水平断面内の変形挙動の解析には，はじめに述べたとおり，多重せん断機構に基づく砂の力学モデルを組み込んだ解析プログラム FLIP を用いた（Iai et al, 1992）。この解析では，図-2 に示したとおり，杭一列分の範囲を解析領域として取り出し，その境界を循環境界としての条件で設定した。

単杭の場合で，杭間隔 $L=10D$ ， $D=5\text{cm}$ の場合の有限要素メッシュを図-4 に示す。解析における初期条件としては，まず，はじめに，模型地盤の厚さの半分 2cm に相当する有効拘束圧力 0.28kPa で圧密解析を実施し，次に，弾性体でモデル化した杭本体に強制変位を与えて解析した。解析に用いた土のパラメタは，表-2 に示すとおりである。

Table 2 Parameters for silica sand No.7

ρ (t/m^3)	G_{ma} (kPa)	ν	σ_{ma}' (kPa)	ϕ (deg)	H_{ma}
2.0	3760	0.33	0.28	35	0.240

ρ : density; G_{ma} : initial shear modulus at a confining pressure of σ_{ma}' ; σ_{ma}' : reference confining pressure; ϕ : internal friction angle; ν : Poisson's ratio; H_{ma} : limiting value of hysteretic damping factor

4. 単杭-地盤系の模型実験と数値解析による杭周辺地盤の変形挙動

実験により得られた杭周辺地盤の変形性状を図-5 に変位ベクトルによって示す。図の作成にあたっては，ビデオカメラで記録した荷重前後の画像を用い格子点などのターゲットの変位を読み取った。同図 (a) に示す乾燥砂地盤（Case 1）の変形についてみると，杭前方斜め45度方向に大きな変位が生じている。一方，杭側方の地盤変位は杭から離れるにつれ急速に小さくなっていることがわかる。また，杭背後では地盤が自立できないため，杭の移動に伴い空隙が生じ，そこに砂が落ち込んでいる。次に図-5(b) に示す飽和砂地盤(Case3)では，杭前方から後方へと反時計回りに渦を巻くように地盤が移動している。このとき杭の背後地盤には空隙は生じなかった。また，杭周面摩擦を考慮した実験(Case 2 と Case 4)においても，定性的には同様の地盤変位が得られた。

図-6(a)および(b)は，それぞれ乾燥砂，飽和砂地盤における解析結果であるが，解析においては杭と地盤間のすべりを考慮していないため，摩擦が大きい Case 2 と Case 4 に対応する。実験と等価な解析条件とするため，杭径，試験床は実験と同一のサイズとし，実験時の平均地盤深さ 20mm に対応する初期平均有効応力を用いた。また本実験とは別に行った硅砂7号に関する室内試験より得られた内部摩擦角等のデータを入力した。図-6(a)より杭前方斜め45度方向に大きな変位が生じており，杭側方では変位はほとんど生じていないことがわかる。先に述べたように解析では地盤要素と杭要素との滑りやはく離は考慮されていないため実験で見られたような杭背後の空隙は生じていない。同図(b)では，図-6(b)で見られたような杭側方地盤の杭後方への回りこみが生じている。これは，杭の変位に伴い杭背後に負圧が生じ地盤が杭に追随して変位するためであると考えられる。

次に杭周面の摩擦が周辺地盤の変形挙動に与える影響について考察する。図-7は杭の変位が杭側方の地盤に与える影響を検討するため，杭の変位量と杭変位直角方向の地盤変位量を杭心からの距離の関数

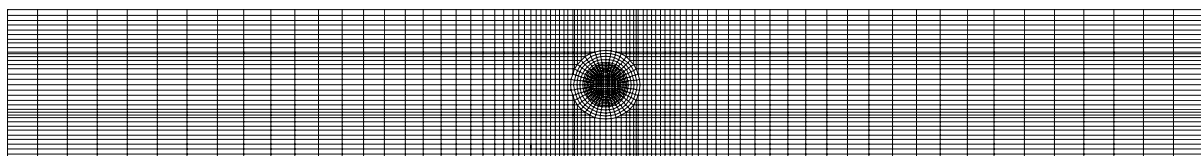
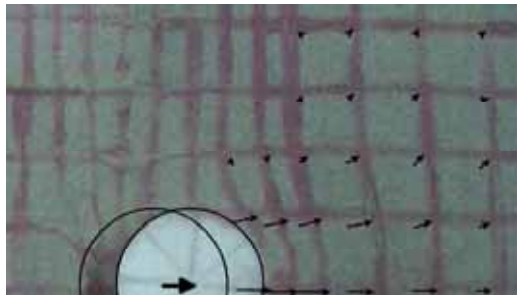
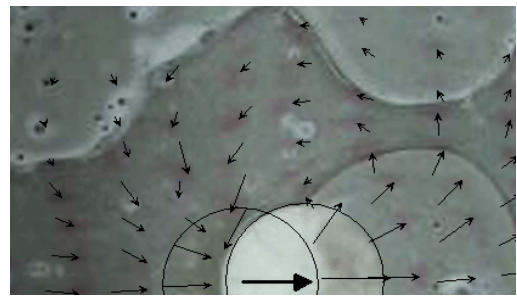


Fig. 4 Finite element mesh used for the analysis for single pile

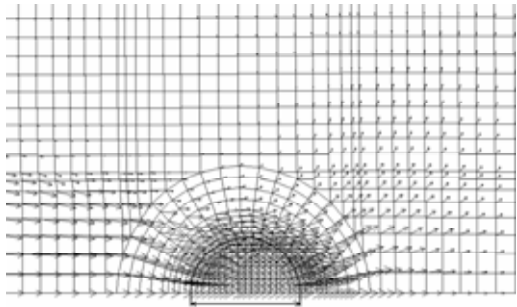


(a) dry sand (Case 1)

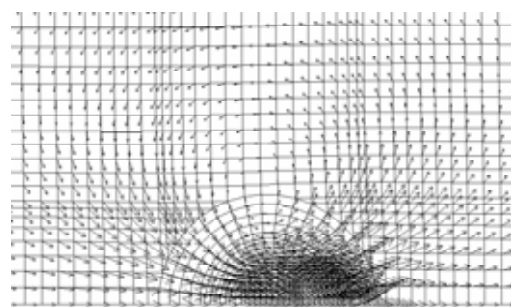


(b) saturated sand (Case 3)

Fig. 5 Measured pile-soil displacement fields



(a) dry sand (Case 2)



(b) saturated sand (Case 4)

Fig. 6 Computed pile-soil displacement fields

として示したものである。同図中、杭心からの距離 $R=25\text{mm}$ 以下は杭本体の変位量を表している。図-7(a)より、摩擦が小さい場合には杭周辺地盤は杭のごく近傍（杭から約 0.4mm ）において杭の変位と同一方向に移動しているが、同図(b)に示すように、摩擦が大きい場合には、杭の変位と同方向の地盤変位が広い範囲にわたって生じている。同図(a)の周面摩擦が小さい場合には、杭と地盤の接触面で砂粒が滑動・回転できるため、杭の変位に伴う周辺地盤の拘束圧の増加は小さくせん断力は伝わりにくい。一方、同図(b)の周面摩擦が大きい場合には、杭と地盤の接触面における砂粒の滑動や回転は生じない。その結果、杭の変位に伴い杭周辺地盤の拘束圧が増加しせん断力がより遠方まで伝わるため、杭と同方向の地盤変位が広い範囲にわたって生ずるものと考えられる。ただし、本研究では初期拘束圧と地盤変位量との関係を考慮していない。

5. 群杭-地盤系の模型実験と数値解析による杭周辺地盤の変形挙動

群杭の場合の実験により得られた杭周辺地盤の変位ベクトルを図-8(a)(b)に示す。図の作成にあたっては、ビデオカメラで記録した载荷前後の画像を用い

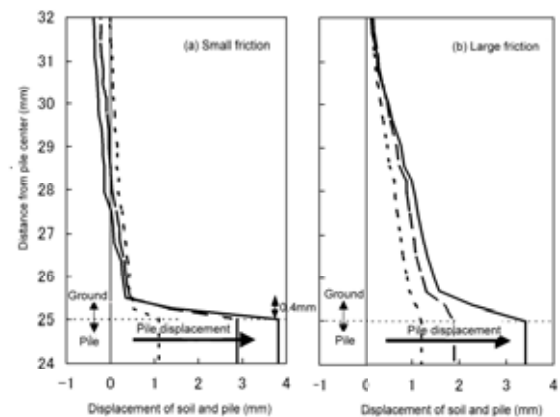
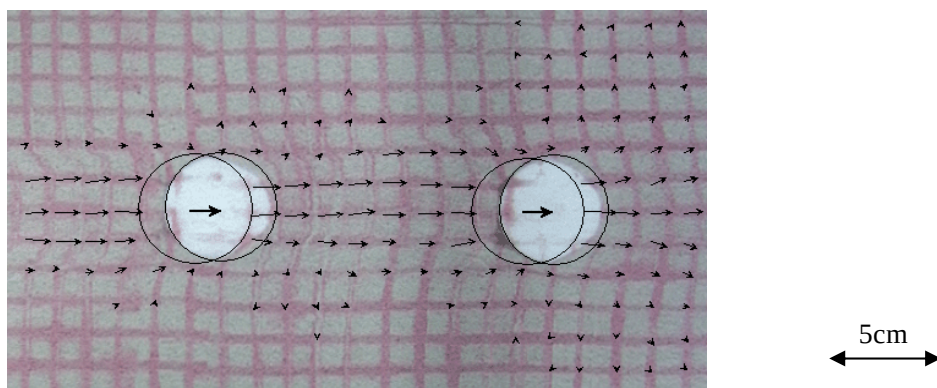
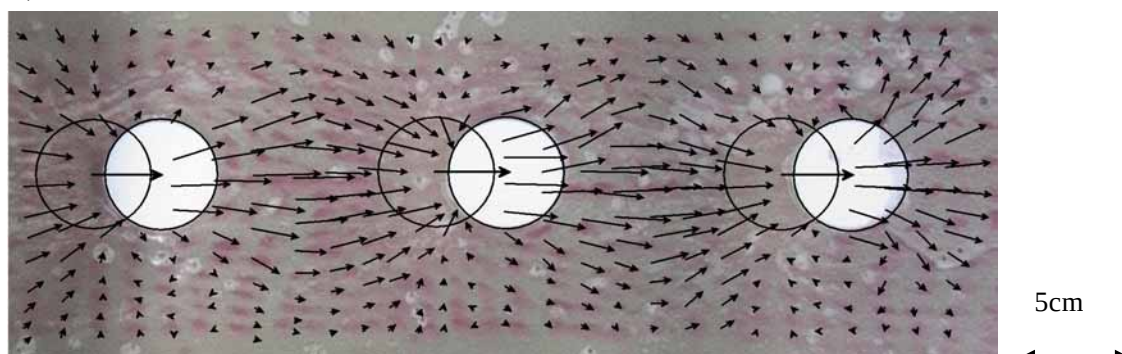


Fig. 7 Displacement distribution along transverse direction from the pile center

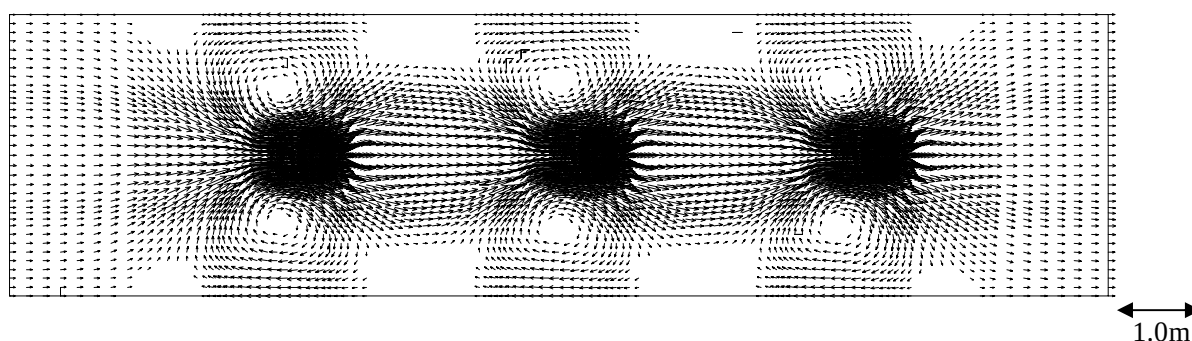
格子点などのターゲットの変位を読み取って作成した。同図(a)に示す乾燥砂地盤（Case 3）の変形は、図に向かって右側の先行杭前方では、杭前方斜め45度の方向に広がるような形態を示しているが、先行杭と中間杭との間では、杭間の地盤が杭と一体となって変位しており、その側方（向かって上下方向）の地盤の変位が杭の変位にほとんど影響されないと対照的である。一方、同図(b)に示す飽和砂地盤（Case-4）では、杭間の地盤変位が杭間の側方に広がるような形態を示しており、乾燥砂の変形形態と



(a) Measured displacement vectors around piles in dry sand ((Case-5) (front and middle piles) displacement of pile=15mm, with a load of 90N



(b) Measured displacement vectors around piles in saturated sand (Case-6), displacement of pile= 30mm, with a load of 3N



(c) Computed displacement vectors around the pile group for undrained condition (Case-6)

Fig. 8 Measured and computed displacement vectors for group piles

は異なっている。また、杭側方の地盤では、杭前方から後方へと渦を巻くように地盤が変形しているのも特徴的である。

図-8(c)は、実大スケール(杭の直径1m, 杭間隔5D, 地盤の拘束圧力98kPa)で実施した飽和砂地盤での数値解析結果である。解析条件が実験条件とは異なるので、厳密な議論を行うには無理があるが、解析で得られた変形形態は、図-8(b)に示した飽和砂地盤での実験結果と整合するもので、基づく杭・地盤系の相互作用解析に対する多重せん断モデルの適用性に関する見通しを示唆するものといえる。

6. 結論

杭―地盤相互作用に伴って生じる水平断面内での杭周辺地盤の変位・変形性状を詳細にとらえることを目的として模型実験を行い、この結果と、多重せん断機構に基づくモデルを用いた数値解析結果とを比較した。この結果、以下のことが明らかになった。

(1)杭-地盤系の挙動は、乾燥砂を用いた排水条件の場合と飽和砂を用いた非排水条件の場合で、著しく異なる。乾燥排水条件では、杭周辺の地盤変位ベクトルは杭前面では杭変位と同じ方向に、また、杭の側面では杭表面からの距離に応じて急速に変

位が小さくなる傾向を示した。飽和非排水条件では、杭側面で渦状の変位形態が見られ、杭の前後では、それぞれ押出し、引込みの変位形態を示した。杭間の変位は、杭表面付近にひずみが集中する傾向が見られた。

(2)本研究で数値シミュレーションに用いた解析法は、杭-地盤系の水平面内の挙動を表現することが可能と思われる。したがって、この解析法に基づいて、鉛直断面内の2次元解析における杭-地盤系の非線形バネ特性を表現することには、それなりに妥当性があるものと判断される。

参考文献

- Iai, S., Matsunaga, Y., and Kameoka, T. (1992): Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15
- Iai, S. (1998): Seismic analysis and performance of retaining structures, *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil dynamics III*, Geotechnical Special Publication No.75, ASCE, Vol.2, pp.1020-1044

Soil-Pile Interaction in Horizontal Plane

Susumu IAI, Tetsuo TOBITA, Matthew DONAHUE*, Masato NAKAMICHI**, Hidehisa KANEKO**

* Oregon State University, USA

** Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport

Synopsis

Two dimensional model tests are performed on a horizontal cross section of a soil-pile system in a pile foundation. The objective of the model tests is to evaluate local soil displacement field in the vicinity of the piles associated with a global displacement of soil around the pile foundation. Two dimensional effective stress analyses in horizontal plane are also performed to generalize the findings from the model tests. An effective stress model based on multiple shear mechanism is used through a computer code FLIP. In dry condition, displacement vectors are directed away from pile front, and displacement at pile side rapidly decreases with an increasing distance from soil pile interface. In undrained condition, displacement field shows vortexes at pile side associated with push-out/pull-in pattern of displacements in front of and behind the pile. Distribution of local soil displacement between piles shows high strain concentration at soil-pile interface.

Keywords: soil-structure interaction, pile, foundation, seismic