

護岸背後の液状化により杭基礎に作用する流動圧に関する振動台実験

谷本俊輔¹・田村敬一²・岡村未対³

¹独立行政法人土木研究所耐震研究グループ振動チーム

(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6) E-mail:s-tanimo@pwri.go.jp

²独立行政法人土木研究所耐震研究グループ振動チーム上席研究員

(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6) E-mail:tamura@pwri.go.jp

³独立行政法人土木研究所耐震研究グループ振動チーム主任研究員

(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6) E-mail:okamura@pwri.go.jp

護岸背後地盤などの液状化による地盤流動が生じる地盤では、流動に伴い地盤から杭に作用する力によって杭基礎に被害が生じることがある。本研究では、矢板護岸背後地盤に上部構造物のない杭基礎を設置した模型を用いて振動台実験を行い、群杭基礎に作用する流動圧および杭位置による流動圧の違いについて明らかにするとともに、道路橋示方書で規定されている流動力との比較を行った。その結果、護岸から最も離れた杭列によって群杭に作用する流動力圧の大半を支え、護岸に近い杭列の杭に作用する流動圧は小さなものとなること、液状化層の流動圧は杭位置によっては道路橋示方書で規定されている流動圧よりも大きいことがわかった。

Key Words :Liquefaction, Ground flow, Pile foundation, Earth pressure, Shaking table test

1. はじめに

護岸背後地盤など地震時の液状化による地盤流動が生じる地盤では、流動に伴い地盤から杭に作用する力によって杭が損傷を受けることがある。これまでに行われた多くの実験的研究や被害事例の分析により、地盤流動による杭の損傷メカニズムが検討され、地盤流動を考慮した簡易設計法が道路橋示方書¹⁾等の設計基準で規定されている。しかしながら、これらの簡易設計法にはあくまでも限られたケースに対する検討結果から導かれたものもあり、より合理的な耐震設計法を確立するためには、さらなる検討を行うことが必要である。特に、杭に作用する流動力については、統一的な見解が得られるまでには至っていないのに加え、群杭効果についてはこれまでに行われた実験的な検討が極めて少ないのが現状である。本研究では、矢板式護岸背後の杭基礎を対象とした振動台実験を行い、液状化による地盤流動を生じさせ、群杭基礎に作用する流動圧および杭位置による流動圧の違いについて明らかにするとともに、道路橋示

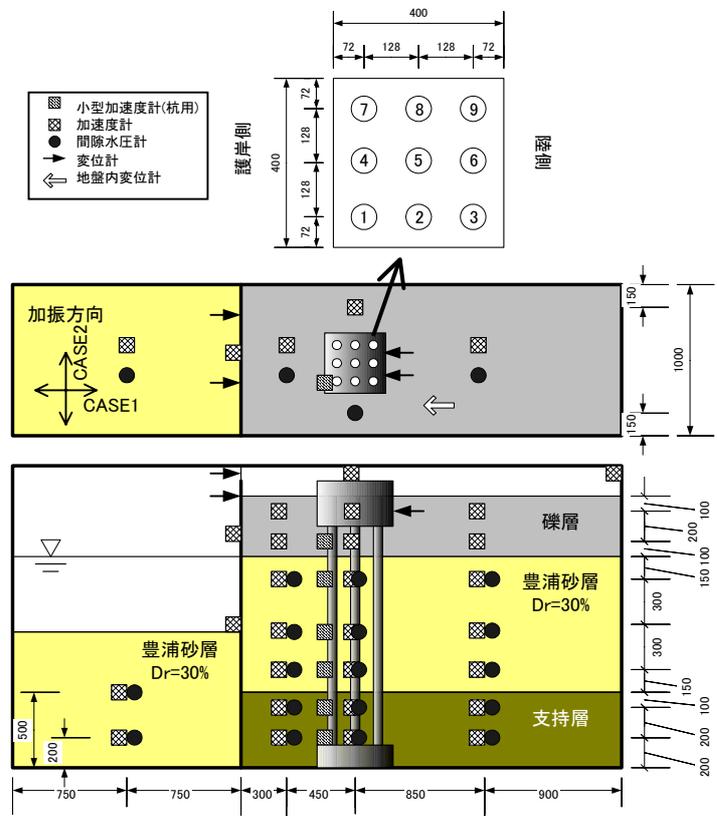


図-1 模型概要図

方書で規定されている流動力との比較を行った。実際の構造物では上部構造と基礎の動的相互作用等も杭の損傷の要因であるが、本研究では杭に作用する流動圧に特に着目しているため、上部構造のない単純化したモデルで実験を行った。

2. 実験概要

実験は、独立行政法人土木研究所の大型振動台(8m×6m)と剛な土槽(幅4m×奥行き1m×高さ2m)を用いて行った。実験モデルは、図-1に示すように矢板護岸と群杭基礎および加振時に地盤流動が生じるように緩い砂層を含む地盤からなるものである。杭モデルは、外径D=50.8mm、肉厚1.5mmの中空ステンレス管で、杭間隔2.5Dで3×3列の配置とした。杭頭はフーチング、先端は土槽底面に設置した鋼製ブロックに剛結し、杭頭は回転拘束、杭先端は変位及び回転拘束の条件とした。フーチングの質量は21.6kgである。

矢板護岸は、高さ1.9m、厚さ6mmの鋼板を用いた。矢板の側面と土槽の内壁との間の摩擦が矢板の変位を拘束することを避けるため矢板を奥行き方向に3分割した。矢板下端と土槽底面の境界には特に処理

を施さず、土槽底面に直接設置した。

地盤は矢板護岸の前面側に相対密度 $Dr \approx 30\%$ の豊浦砂層を水中落下法により作成した。矢板背面側には気乾状態の豊浦砂を突固めて $Dr \approx 90\%$ 、層厚50cmの支持層を作成し水で飽和し、この上に水中落下法によって $Dr \approx 30\%$ 、層厚90cmの豊浦砂層を作成した。さらに、いわき硅砂2号(平均粒径1.7mm)を用いて層厚40cm、乾燥単位体積重量 1.354g/cm^3 の礫層を作成し、地下水位は礫層下面とした。 $Dr 30\%$ の豊浦砂層上には紙を敷き、種類の異なる砂が混ざることにより地盤物性が不明瞭になることのないよう配慮した。非液状化層として粒径の粗いいわき硅砂を用いたのは、サクシオンによる不飽和領域を小さくすること、不飽和領域での見かけの粘着力を小さくし、不飽和層の土の物性を明確にすることを意図したものである。また、土槽の亚克力面近くの地盤には、地盤の変形状況を観察するために色砂で測線を設けた。

杭1~6については12深度で曲げひずみを測定するためのひずみゲージを杭の内側に貼り付けたものとした。その他、地盤、杭、矢板に対して図-1のとおり加速度計、間隙水圧計、変位計を設置した。また同図に示す地盤内変位計とは、12枚の亚克力板をヒンジで鉛直方向に連結し、各亚克力板に加速度

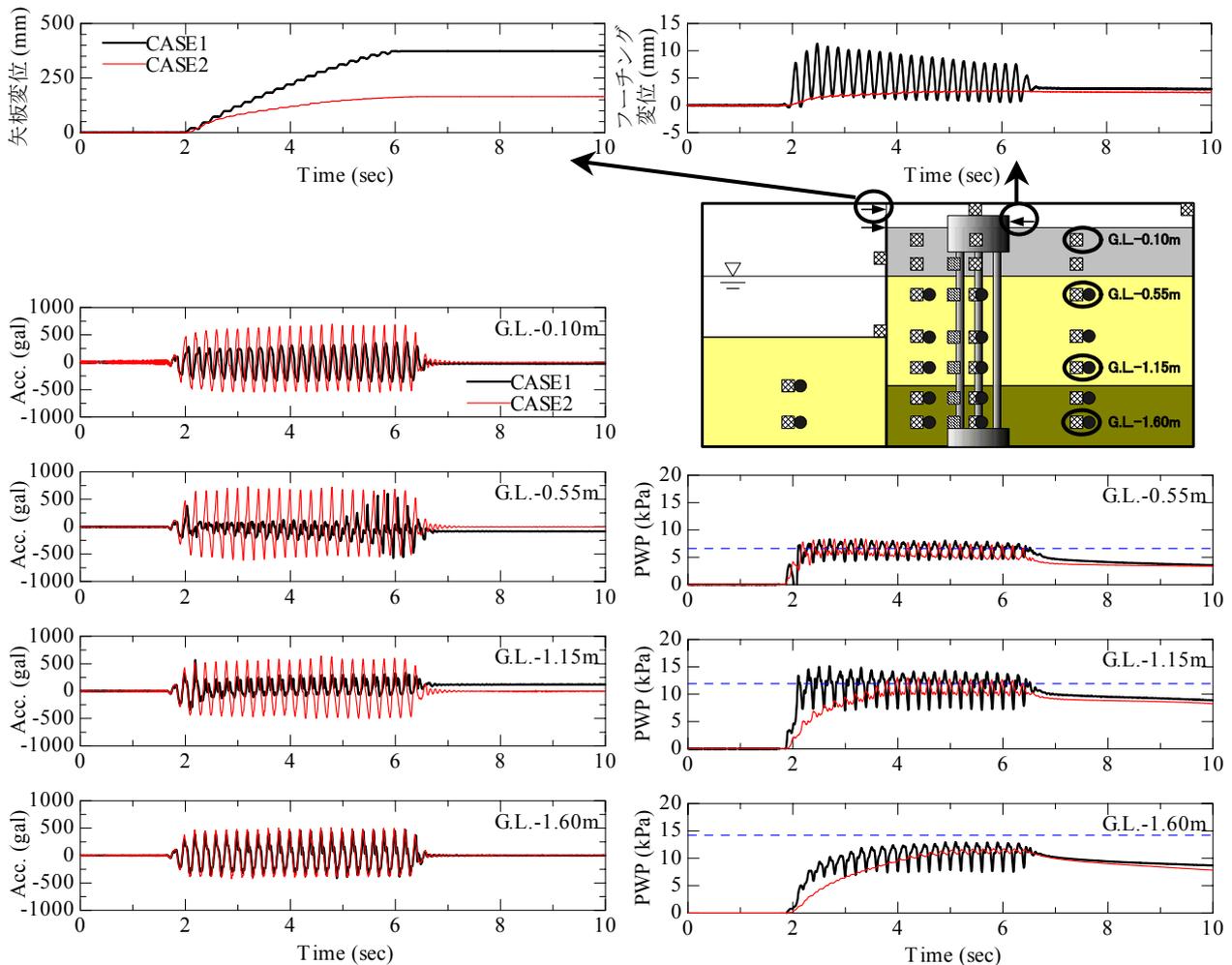
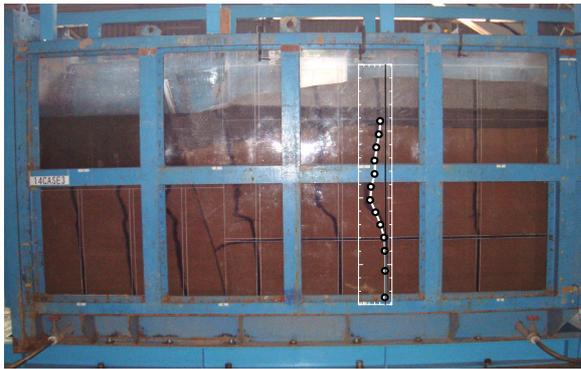


図-2 矢板・フーチング変位、杭背面における地盤加速度および間隙水圧の時刻歴



(a) CASE1



(b) CASE2

写真-1 加振後の地盤の変形状況および地盤内変位計の計測結果

計を設置したものである。加速度計からアクリル板の傾斜を計測することにより、加振後の地盤変位を求めた。

実験ケースは、上記の実験模型に対して、流動方向に加振するCASE1および流動直角方向に加振するCASE2の2つである。入力波は両ケースともに周波数5Hz、振幅300gal、5秒間の正弦波とした。地震中に杭基礎に作用する土圧としては、土の慣性力による動土圧と、自重による流動変形に起因する土の流動圧とがあり、この2つの土圧を調べるために加振方向を90度変えた実験を行った。

3. 実験結果

(1) 模型各部の応答

図-2に各実験ケースにおいて計測した代表的な時刻歴波形を示す。CASE1では、Dr30%の豊浦砂層で過剰間隙水圧が有効上載圧に達して液状化した。応答加速度は大きく減衰し、深度によってはサイクリックモビリティの影響と思われるスパイク状の加速度波形も見られ、典型的な液状化した地盤の加速度応答となっている。CASE2のDr30%豊浦砂層でも過剰間隙水圧が有効上載圧に達し地盤が液状化した。CASE1で見られた著しい加速度の減衰は見られなかった。これは、Dr=30%豊浦砂層が土槽壁面と礫層により変形を拘束されていたことによるものと考えられる。

また同図より、矢板天端の水平変位量が加振方向の違いによって2倍以上異なることが分かる。矢板に作用する力が、流動直角方向に加振したCASE2では液状化に伴う地盤の水平全応力の増加によるものであることに対し、流動方向に加振したCASE1では上記の力に加えて地盤の慣性力が作用していることにより、この差が生じたものと考えられる。また、両ケースでフーチング変位の時刻歴波形の形状が大きく異なるが、加振終了後にはほぼ同程度となった。

写真-1に各実験ケース加振終了後の地盤の変形状況および地盤内変位計の計測結果を示す。地盤内変位計の計測結果は色砂の変形と良い対応を示した。

CASE1では、矢板が大きく傾斜するとともに、豊浦砂層下部にすべり線が生じ、矢板背面側の地盤護岸側に向かって大きく変形した。CASE2では、矢板の傾斜はCASE1に比べて小さく地盤全体の变形は小さい。地盤の变形は矢板近傍の礫層に集中しており、護岸からの距離が増加すると地盤の变形量が急激に

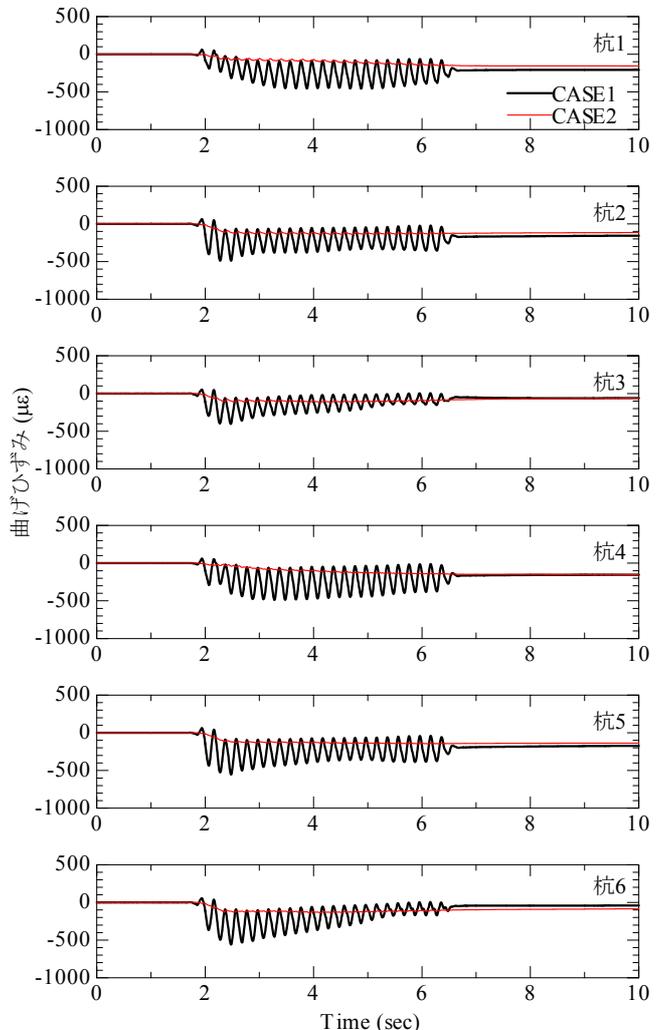


図-3 各杭の杭頭ひずみの時刻歴 (フーチング下面位置)

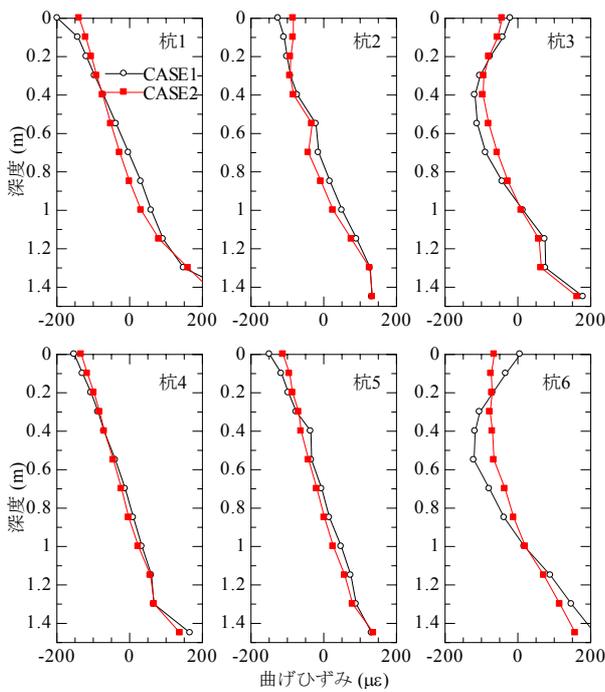


図-4 杭の計測ひずみ分布(加振終了後)

小さくなっており、加振方向の違いが地盤全体の变形性状にも影響する結果となった。

(2) 杭のひずみ

杭1~6における杭頭の曲げひずみの時刻歴を図-3に示す。CASE1では、加振開始後に振動しながらひずみが一度増加し、その後時間とともに徐々に減少していることが分かる。このように、フーチングの変位や杭のひずみがピークを持つことは既往の研究²⁾³⁾⁴⁾でも報告されている。一方CASE2では、1回の加振サイクルごとの曲げひずみ振幅は小さく、時間とともに単調増加し、ピークを示すことはない。このように、上部構造がない杭でも加振方向の違いによって杭に生じる曲げひずみに大きな違いが生じることが明らかとなった。

図-4に加振終了後における杭の曲げひずみ分布を示す。ひずみの分布形状は、特に護岸側の杭(杭1,4)と陸側の杭(杭3,6)で大きく異なったものとなっている。すなわち、ひずみのピーク位置が矢板護岸から最も遠い杭3および杭6では杭中間部、その他の杭では杭頭と、杭位置により異なる形状を示しており、杭位置により土圧の作用状態が異なっていると考えられる。また、このような杭位置による曲げモーメント分布形状の違いには、ケースによる違い、すなわち加振方向による違いはほとんど見られない。このことから、加振終了時における杭位置による流動圧の分担は、加振方向が異なることによる地盤の变形量の違いに関わらず類似しているという結果が得られた。次章では、加振方向、杭位置による流動圧の違いを定量的に求めた結果を示す。

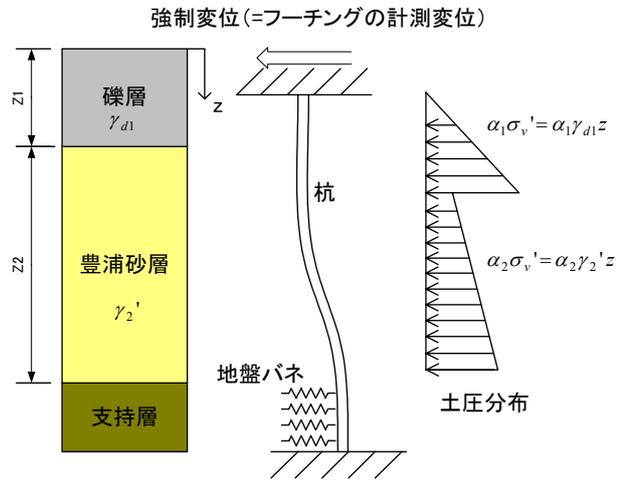


図-5 解析概要

4. 骨組解析による流動圧の推定

(1) ひずみ計測値からの流動圧の算出

杭のひずみ計測値から杭に作用する土圧を算出する方法として、杭の曲げひずみから求めた曲げモーメントを杭軸方向に補間し、2回微分を行う方法がある。しかし、2回微分の演算は、データのばらつきに対して非常に敏感であり、補間方法や補間に用いる関数によっても異なった計算結果を与える。

本研究では曲げモーメント分布を微分して流動圧を算出する方法を用いず、梁要素でモデル化した杭に対して流動圧を作用させる骨組解析を行い、曲げひずみの実測値と解析値が一致するような流動圧を逆解析的に算出した。着目した時刻は加振終了後である。

(2) 解析概要

解析方法の概念図を図-5に示す。杭は1本ごとに梁要素でモデル化した。モデルの境界条件は、杭下端を剛結、杭頭を回転固定とした。また、実験で計測したフーチング変位を杭頭に強制変位として与えることにより、各杭の杭頭の変位に関する境界条件を満足させた。この杭に式(1)、(2)のような土圧を作用させた。この土圧分布は、液状化層及び上部層の土圧が初期有効上載圧に比例すると仮定したものである。

$$P(z) = \alpha_1 \sigma_{v0}' = \alpha_1 \gamma_{d1} z \quad (\text{礫層}) \quad (1)$$

$$P(z) = \alpha_2 \sigma_{v0}' = \alpha_2 (\gamma_{d1} z_1 + \gamma_2' (z - z_1)) \quad (\text{Dr30\%豊浦砂層}) \quad (2)$$

ここに、 z は深度、 z_1 は礫層の厚さ、 γ_{d1} 、 γ_2' はそれぞれ礫層の乾燥単位体積重量およびDr30%豊浦砂層の有効単位体積重量、 $p(z)$ は土圧、 σ_{v0}' は有効上載圧、 α_1 、 α_2 は礫層、豊浦砂層に対する流動圧の係数である。支持層は地盤バネを与えることによりモデル化した。ひずみの計測値と計算値が合うような α の値を求めた。また、地盤バネの値についてもひずみの計測値と計算値が合うように決め、その値は概ね15,000kN/m³前後であったが、地盤バネの値を変

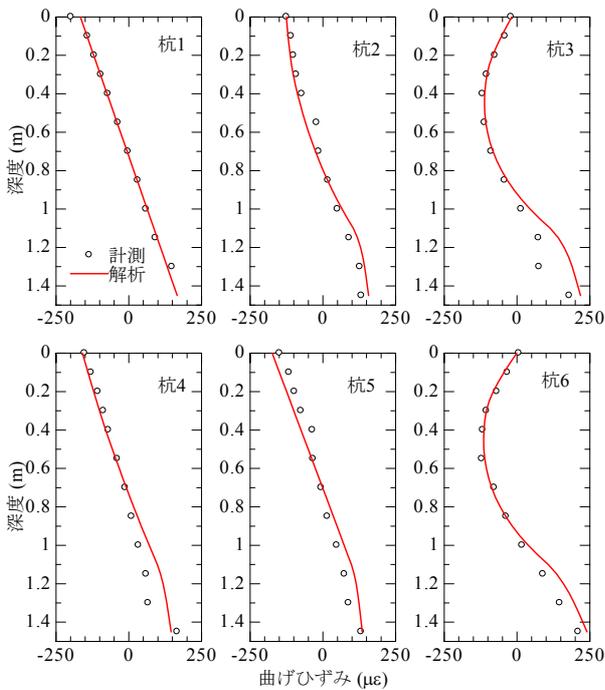


図-6 杭ひずみの計測結果と計算結果 (CASE1, 加振終了後)

化させても礫層およびDr30%豊浦砂層での土圧に及ぼす影響が非常に小さかった。また、各地層の深度および層厚は加振終了後の地盤沈下量の計測結果に基づいて設定した。

この解析モデルは、地盤剛性と地盤の変形量の違いを反映させる応答変位法的なアプローチとは異なり、杭に作用した土圧を逆算するためのものである。杭を1本ずつモデル化することにより、杭位置による土圧の違いを最小限のパラメータから推定することができる。

(3) 流動圧の算出結果

図-6に実験で計測した杭のひずみと、解析で得られた杭のひずみの例を示す。ひずみの計測値と計算値の間に地盤深部で差が見られる杭もあるが、着目している礫層およびDr30%豊浦砂層に相当する約1m以上の部分については計測結果をよく近似しており、

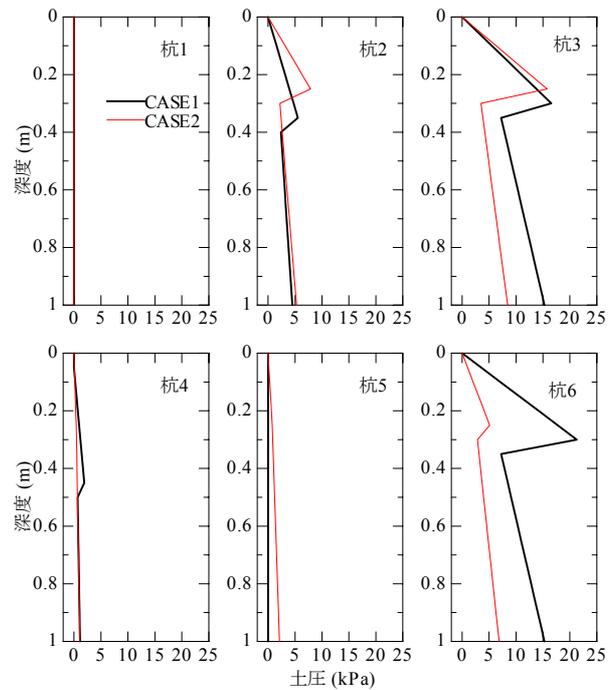


図-7 土圧の算出結果

精度よく土圧を求めていることが分かる。

杭に作用する土圧の算出結果を図-7に示す。実験ケースおよび杭位置により土層境界位置が異なっているが、これは式(1)、(2)により土圧を推定する際に加振終了後の地盤沈下量を考慮したことによるものである。いずれのケースでも護岸から遠い位置の杭に最も大きな土圧が作用し、護岸に近い位置の杭に作用する土圧は極めて小さいことが分かった。これは、各杭に対して均等に流動圧が作用するのではなく、護岸から最も遠い位置の杭列が流動圧のほとんどを支えていることを示している。また、全体的に土圧はCASE2よりCASE1の方が大きいことから、土圧は地盤変位量にも依存するものと考えられる。ただし、ここで述べた結果は、限られた条件の下で行われた実験の結果であり、杭間隔や地盤の密度が異なれば群杭中の杭に作用する流動圧分布も異なるものと考えられる。

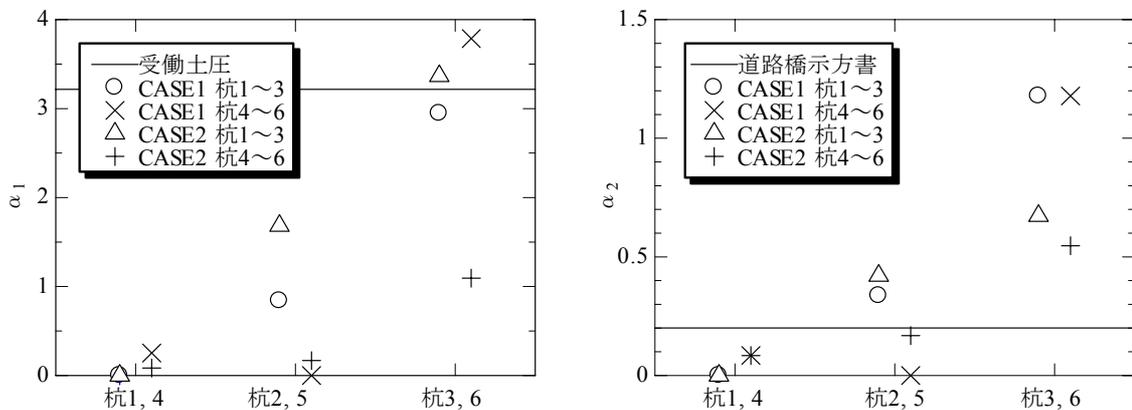


図-8 α_1 と受働土圧, α_2 と道路橋示方書の比較

(4) α_1 と受働土圧, α_2 と道路橋示方書の比較

図-8に α_1 と受働土圧に相当する算出した流動圧を比較したものの、 α_2 と道路橋示方書に基づいて算出した結果を比較したものを示す。ただし、非液状化層の受働土圧に相当する流動圧の α_1 および液状化層の道路橋示方書で規定されている流動圧の α_2 は以下の手順により算出した。

- ① 非液状化層では受働土圧、液状化層では道路橋示方書の流動圧に対して、杭の最外縁幅を乗ずる。
- ② 上記の力を全ての杭で均等に分担すると仮定し、杭の本数で除す。
- ③ 杭幅で除す。

また、道路橋示方書の流動圧の算出にあたっては水際線からの距離による補正係数 c_s は1とした。

解析結果と受働土圧に相当する流動圧を比較した礫層については、護岸遠方に位置する杭3, 6ではほぼ同程度、護岸に最も近い杭1, 4では解析結果が概ね10分の1程度であり、全体的に受働土圧に相当する流動圧よりも小さな流動力が作用したことが分かる。

豊浦砂層については、杭1, 4では道路橋示方書の流動圧が解析結果を上回るが、その他の杭には道路橋示方書の流動圧を上回る流動力が作用したことが分かる。

5. まとめ

本研究では、液状化による地盤流動の作用を受ける杭基礎に作用する土圧と、土圧に関する群杭効果を調べることを目的として振動台実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 加振方向の違いにより、地盤および矢板護岸、の変位量は大きく異なるが、フーチングおよび杭の残留変形量の違いは小さい。
- (2) 本実験の条件のもとでは、護岸から最も離れた杭列に最も大きな流動圧が作用し、護岸に近づくにつれて杭に作用する流動圧は急激に小さくなる。
- (3) 非液状化層で杭に作用する流動圧は受働土圧に相当する流動圧よりも全体的に小さい。
- (4) 液状化層の流動圧は杭位置によっては道路橋示方書の流動圧よりも大きい。

謝辞：本研究は、文部科学省の委託事業「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」のプログラムの一環として実施したものである。貴重なご意見、ご指導を頂いた、当プロジェクト地盤基礎実験委員会の関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 社団法人日本道路協会, 2002.
- 2) 吉田望: 2.液状化に伴う流動のメカニズム, 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム, 地盤工学会, pp.53-70, 1998
- 3) Abdoun, T. and Dobry, R. : Seismically induced lateral spreading of two-layered sand deposit and its effect on pile foundations, Proc. Int. Conf. Centrifuge 98, pp. 321 - 326, 1998.
- 4) Horikoshi, K., Fujiwara, T. and Tateishi, A.: Pile behavior during seismically-induced lateral spreading on liquefied sand, Proc. Int. Conf. Centrifuge 98, pp. 377 - 382, 1998.

(2003. 7. 2 受付)

SHAKING TABLE TESTS ON EARTH PRESSURES ON A PILE GROUP DUE TO LIQUEFACTION-INDUCED GROUND FLOW

Shunsuke TANIMOTO, Keiichi TAMURA and Mitsu OKAMURA

Ground flow near a waterfront is one of typical ground failures due to soil liquefaction. Effects of the liquefaction-induced ground flow on deep foundations are demonstrated by the extensive damage of many piles during past large earthquakes. Despite a large number of research works conducted so far, there are still uncertainty in the earth pressures on piles due to liquefaction-induced ground flow. In this study, shaking table tests were carried out, aiming at investigating earth pressures on a pile group in the liquefied sand and non-liquefied overlying soil. It was found that the lateral force on the pile group from both the liquefied sand and the overlying soils were sustained mostly by a row of piles facing against ground flow.