

## 論文の内容の要旨

論文題目

T T P G S  
Shaking table tests on pile group subjected to  
liquefaction induced large ground deformation

(液状化に起因する地盤流動が群杭基礎に及ぼす影響に関する  
模型振動実験)

氏名

モタメド ラミン

地震時に液状化した砂地盤が横方向に流動変形する現象は、側方流動とも呼ばれ、ライフラインや港湾岸壁など多くの施設にとって、脅威とされている。そのような問題の一つに杭基礎に作用する側方流動土圧があり、1995年の阪神大震災以来、杭基礎の地震時破壊の主要メカニズムの一つとして、認識されてきた。耐震設計の観点から言うと、側方流動土圧の定量的な評価が課題である。それには、1995年以来、経験的に提案された計算公式はあるものの、詳しい実験的実証に乏しく、特に実際のビルディングなどに見られる何十本もの群杭基礎についての実験的なデータは存在しなかった。本研究はこのような実情に鑑み、 $6 \times 6 = 36$  本ないしは  $11 \times 11 = 121$  本の多数杭基礎の模型振動実験を中心に、外部との共同研究として実施した実物大模型（杭本数は6本）の振動実験もあわせ、杭基礎に作用する側方流動土圧の評価、既存設計公式との比較検討、そして対策工法の提案を行なったものである。

本論文は9章からなっている。第1章は前書きであり、本論文の目的と構成について簡単に紹介している。また第2章は既往の研究のレビューであり、液状化地盤の側方流動の事例、杭被害の紹介、模型実験や数値解析の例をまとめている。

第3章では、模型実験の方法を詳細に説明している。前に触れた実物大模型実験を除くと、本研究の模型振動実験は、 $6 \times 6 = 36$  本ないしは  $11 \times 11 = 121$  本の多数杭基礎の模型と、 $3 \times 3 = 9$  本の模型を斜面ないしは護岸背後に設置した模型の実験である。杭基礎模型の仕様に関しては、地盤流動実験に関して定まった相似則が存在しないことに鑑み、実験時に正確な測定が可能な曲げひずみが生じる程度の軟らかさと、大変形しない程度の硬さを備えた材質と寸法の杭基礎模型を、アクリル材料で作成した。これにひずみゲージを多数貼り付け、曲げひずみ、曲げモーメント、そして側方流動土圧を、測定した。また、地盤流動変位の測定に当たっては、従来から開発してきた傾斜計タイプの埋設型変位計、新たに導入した三次元シェーブテープ型変位計を用いると同時に、地表や側面に色砂で模様を描き、その変位変形から地盤の変位場を観測した。

以上のような中型模型に加え、長さ15m、深さ6mの土槽を利用した実物大模型の振動実験プロジェクトにも参加して、杭の挙動を研究した。実物大模型実験の意義としては、実地盤と同様の応力レベルで砂地盤が挙動するため、従来から重力場の振動実験の短所として指摘されていた過少な有効応力レベルの問題、遠心模型実験の短所であった模型寸法の小ささ（寸法効果）のいずれもが、解決されていることがある。ただし実験の実施が極めて高価であり、本論文の期間中に側方流動実験は2度しか実施されず、しかもデータ供給が間に合ったのは、一度だけであった。

第4章は、 $6 \times 6$  および  $11 \times 11$  本の大型群杭基礎の模型実験結果を、紹介している。このシリーズの実験では、群杭を緩斜面模型地盤に埋設し、これを加振して側方流動を起こさせた。本研究で着目しているのは、杭基礎に作用する側方流動土圧である。そこで杭にひずみゲージを多数設置して曲げモーメントの深さ方向分布とその時刻歴を測定し、曲げモーメントの深さ方向の二回微分によって、流動土圧の時刻歴を得た。得られたモーメントや流動土圧から高周波の振動成分を除去し、純粹に地盤流動によって生じたと考えられる平均傾向に着目した。その結果、流動土圧は現行設計のように深さ方向に三角形分布するのではなく等分布に近いこと、個別の杭に均等に分布するのではなく、流動砂が直接衝突する上流端の杭で大きく、その背後の杭では小さい（日陰効果）ものの、最下流端の杭で、再び大きくなることが判った。また地表面に設置し

た色砂模様の変形から、流動砂が群杭間をすり抜けるものの、杭近傍では引っかかりのような挙動を示すことが見出された。これらのこととは現行設計では無視されている。他方、各杭に作用する流動土圧を合計すると、現行設計の計算値を同様の値になった。このことから設計法の問題は、杭間の荷重分担を考慮していないことがあることが、判明した。

第5章では知見を補うために、 $3 \times 3$  の群杭模型で、研究を続行した。実地盤と同様に、地表に不飽和非液状化層を設けたことが、特徴である。特に着目したのは、流動土圧と地盤の流動速度との関係である。実験結果によれば、土圧の時間変化と速度のそれとの間には明らかな相関がある。したがって、後述のように、液状化した砂は粘性流体のような挙動をする、という仮説が可能である。また、流動が停止した後にも残留する土圧がある。後者の発生機構について検討するため、地表面の側方変位分布を詳細に調べ、上流側の杭に前面では地盤が水平に圧縮変形するので、杭に大きな土圧が作用すること（杭による流動せき止め）、下流側では、群杭外部の砂が下流方向へ伸張変形、流失するので、地表面の標高が下がり、杭に偏土圧が作用して残留値を生じること、がわかった。このようなことから、杭に作用する土圧には、流動速度に依存する粘性的成分と、地盤変形に関連する幾何学的成分がある、と結論した。

第6章は、E-Defense施設で実施された実物大模型の実験結果を考察している。この実験でも速度依存性が観察された。この性質は液状化砂の粘性流体的性質に起源を持つ、というのが指導教官の所論であるが、他方、杭背後で負圧が生じるために速度依存性が現れる、という主張もある。そこで杭周辺の実測間隙水圧を用いて負圧から生じる土圧を試算し、実測値よりはるかに小さく、定量的には実現象を負圧説では説明できないことを示した。また、この実験では矢板護岸の背後に群杭基礎を設置したため、護岸側の杭周辺で地盤の流動変位、速度が大きく、土圧も下流側で最大となった。残留土圧も大きく、護岸背後では地表の陥没と偏土圧が著しいことが、重要であった。

第7章では、6章の知見を多数の実験で補強するため、護岸模型実験を行った。 $3 \times 3$  の群杭基礎の土圧分担によれば、下流側の杭で流動土圧が最大、上流側で最小であった。護岸の倒壊を再現した実験では、上述した斜面の流動実験とは異なり、下流側の杭ほど大きな流動荷重を受けた。このように日陰効果が見られない理由としては、護岸に近い下流側ほど地盤の流動速度が大きく粘性効果が著しくなること、地表面の陥没と偏土圧も下流側ほど著しいこと、が挙げられている。

第8章では、耐震性に劣る護岸の直近に設置された杭基礎を、地盤流動現象から防護するための技術を、研究した。護岸と杭基礎との間に矢板地中壁を設置し、護岸変状の影響が杭基礎に波及しないようにすると、被害が軽減できた。また前述の日陰現象を利用して、群杭の上流側と下流側とに捨て杭を打設し、これらには上部構造の荷重は負担させないようにする。これにより地盤流動荷重だけを捨て杭が主に分担すれば、万一これらが破壊しても上部構造には影響が及ばず、かつ杭基礎本体を防護することが可能である。

第9章は、以上の結果をまとめた結論である。

以上の内容を通覧すると、1990年代以来問題となってきた液状化地盤流動と杭基礎との関係を、大型群杭や実物大模型実験という、実際ときわめて近い条件で実証的に研究し、一応の結論を得たものである。そして設計に用いるべき荷重値についても、定量的な成果を得ている。また既存杭基礎の防護技術についても研究が及んでいる。これらのことから本研究は耐震工学、特に地盤の耐震技術の進歩への貢献が、きわめて大きい。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。