

外99-8

早稲田大学審査学位論文(博士)の要旨  
1983  
早稲田大学大学院理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

液状化地盤の側方流動による  
外力特性に関する実験的研究

申請者

大友 敬三

KEIZO OHTOMO

1999年7月

1964年新潟地震や1983年日本海中部地震においては、地盤の液状化に伴って地表面が数メートルオーダーで水平移動する側方流動が発生した。このような地盤の側方流動が建物基礎杭、橋脚基礎杭、埋設管などに甚大な被害を与えていたことが1980年代後半に明らかにされた。これを契機として、大別すると①側方流動のような地盤の大変形量の予測、②地中構造物や杭基礎に作用する側方流動の外力評価、の2課題に対して実験・解析・被害事例の分析などを通じた研究が今日まで精力的に進められてきている。

地盤の液状化発生メカニズムや判定方法に関する研究には、1964年新潟地震以来の研究蓄積がある。これらの研究成果の一部は既に実務設計に反映されている。たとえば、わが国の代表的な耐震設計基準・指針類には液状化判定法に関する記述がなされている。しかし、側方流動が研究者や実務者に認識されたのは1980年代後半ということもあり、基準・指針類に反映するだけの研究成果が充分に蓄積されていない。

周知のとおり1995年兵庫県南部地震においては、神戸市内の臨海部における人工埋立地で地盤の液状化が広い範囲で発生した。この液状化に伴う側方流動が液状化地域のほぼ全域にわたって発生し、基礎杭やライフライン施設に再び甚大な被害を及ぼした。また、これら被害の修復・復旧には多額の費用と多くの時間が費やされた。このような地震被害は臨海部の埋立地における地盤の液状化対策が地震防災の観点から極めて重要であることをわれわれに再認識させた。このため、地盤の液状化に伴う側方流動に関する研究の進展に対する社会的要請がますます高まっているといえる。

兵庫県南部地震の各種施設や構造物の被害を教訓にして、関係諸機関は地震発生直後から被害事例の分析を精力的に進め、耐震設計基準類の見直し作業を行った。現在、杭基礎に対する側方流動の外力を耐震設計の一項目として追加した基準類がいくつか見られる。しかし、これらに採用された側方流動の外力設定法は数多くの杭基礎の被害事例のうちの数例を対象とした被災分析結果に基づいている。今後の基礎構造の耐震設計において側方流動の外力を合理的に設定していくためには、さらに被害事例の分析や実験・解析に基づく研究が必要である。

本研究は、側方流動の影響を考慮した地中構造物や基礎構造の耐震設計法確立のための基礎的な知見と情報を提供することを目指し、流動する液状化地盤からの外力の評価を主題としている。側方流動は地盤剛性が著しく低下した液状化層が地表面の傾き等の影響によって大変形することにより発生する。この場合、液状化層中に設置せざるを得ないケースもある基礎杭や地中構造物は流動中に強制的な外力を受けることになる。しかし、流動中の外力の特性については不明な部分が残されている。本研究はこの点に着目して、研究の目的を側方流動中の地盤が基礎杭および地中構造物に及ぼす外力の特性を明らかにすること、と設定した。

本論文は6章から構成されている。各章の概要は以下のとおりである。

第1章は序論であり、地盤液状化に伴う側方流動の外力評価に関する研究を必要とする背景をとりまとめ、本研究の目的について述べた。まず、既往地震における側方流動による被害は極めて深刻なものであることを説明し、地震防災の観点から非常に重要な研究課題であることを指摘した。次に、1995年兵庫県南部地震以降の各種耐震設計基準類における側方流動の外力の設定方法に関する技術レベルを整理し、側方流動の外力特性評価法についてはまだ不充分な部分が残されていることを述べた。これを踏まえ、側方流動に対する地中構造物および杭基礎の耐震性に関して取組むべき主要な研究課題を抽出した。さらに、これらの研究課題に対して本研究で扱う範囲を明確にして、本研究の目的を、側方流動中の地盤が基礎杭および地中構造物に及ぼす外力の特性を明らかにすること、と設定することを述べた。

第2章では、側方流動の外力特性に関する既往の研究について、研究の現状と残されている課題を整理し、本研究の位置づけを明確にした。まず、杭の被害事例分析に関する研究については、側方流動による地盤変位と杭被害の因果関係が明らかにされているが、地盤変位による流動外力の算定は流動中の地盤に対しては合理的でないことを指摘した。次に、杭基礎模型に作用する外力に関する実験的研究においては、杭に作用する外力は流動速度に大きく影響されており、流体力が支配的であることが認められているが、流体力の定量的な評価方法は提案されていない点が課題であることを説明した。さらに、液状化土の流体としての物性に関する実験的研究を取り上げ、液状化土の粘性係数は液状化の程度や相対密度によって変化する特性を有するものの、外力の評価に活用できるほどその特性が解明されていない点を説明した。本研究では、これらの課題に対して、模型実験（杭および地中構造物）、液状化土の物性試験および数値解析を総合化することにより、側方流動が基礎杭と地中構造物に及ぼす外力の特性を明らかにし、その評価方法を提案することを述べた。

第3章では、単杭模型を対象とした側方流動の外力特性実験と液状化土の粘性特性試験の結果に基づいて、杭に作用する流動地盤の外力特性ならびに模型杭に作用する外力を流体力として定量的に評価する方法について検討した。本章で扱っている振動台実験の特色は地盤中の側方流動の時刻歴変化を計測していることである。この計測結果を利用して、まず、流動が継続中には、杭の曲げひずみの経時変化は流動速度と相似形となり、杭に作用する外力は流体力と見なせることを明らかにした。次に、外力特性実験と同一試料を用いた液状化土中の鋼球および鋼棒の引上げ実験結果より、実験対象とした液状化土が線形粘性流体としての特性を有することを示し、抗力係数とレイノルズ数の関係に関する実験式を提案した。さらに、これらの粘性特性データを用いた抗力の解析により、流動中に杭に作用した外力の最大値や経時変化を抗力によって充分な精度で推定できるこ

とを明らかにした。

第4章では、火力発電所の電気洞道が液状化時の浮上対策のため横断方向に2本の杭で支持されている条件を想定して、杭基礎を有する洞道模型を地表面勾配2%の地盤に埋設した模型実験を行った。この結果に基づいて、洞道と杭に作用する外力特性について検討を加え、実構造物の耐震設計のための外力を推定した。まず、洞道のような形式では、流動中に上流側と下流側の洞道側壁土圧に圧力差が生ずることを示し、この圧力差が杭の変形に寄与する洞道の外力であることを明らかにした。洞道に作用する外力の経時変化は流動速度と相似形であり、流体力としての特性を有していることを解明した。一方、杭に作用した外力についても流動速度に依存することを指摘し、第3章での解説事項と矛盾することなく洞道および杭に作用する外力が流体力であることを明らかにした。次に、洞道および杭に作用する外力の最大値は上載圧に対する比率（土圧係数）によって評価できることを示し、これらの外力の最大値は土圧係数  $K=0.1 \sim 0.2$  の土圧に相当することを提示した。なお、この値は流動速度によって影響を受けるものである。

第5章では、第3章、第4章で得られた結果をもとに側方流動地盤の外力を評価して、既存の電力用地中構造物の基礎杭の応力と変形を算定し、側方流動による外力が基礎構造の耐震性に与える影響について検討した。まず、実地盤が粘性流体として流動することを仮定して、粘性流体の相似則を適用して、杭力に関する相似縮尺について考察した。この結果を踏まえ、土圧係数の相似縮尺は模型地盤と実地盤で一致することを示した。第4章で推定した土圧換算による流動外力の最大値は流動速度に応じて変化する性質を持ち、地表面勾配2%の模型地盤における外力である。流動速度は地表面勾配に比例すると考えられ、既往地震における側方流動の発生事例では、地表面勾配が概ね2%以下となっている。以上の考察から、模型実験で推定した外力は実地盤にも適用できると見なし、第4章で推定した土圧係数  $K=0.1 \sim 0.2$  の中間値である土圧係数  $K=0.15$  で外力を設定した。次に、火力発電所施設の中から、液状化時の浮上対策のため外径300mmのコンクリート杭で支持される3種類の電気洞道を選定し、非線形解析により流動外力を載荷した場合の杭の応力・変形を算定した。解析結果より、浮上対策用の外径300mmの杭は流動外力に対して大きく曲げ変形するので、杭外径を増やして杭剛性を向上させる必要があることが示唆された。また、その割合は液状化層の厚さに応じて大きくなる傾向があることを示した。以上の試算結果を見れば、液状化土の側方流動に対する基礎構造の耐震性を検討する上で、土圧係数  $K=0.1 \sim 0.2$  は設計上の目安を与えているものと考えられる。

第6章は結論であり、第1章から第5章で得られた成果と知見を総合して、流動する液状化地盤から地中構造物や杭に作用する外力特性の評価に関する結論を述べた。