

京都大学	博士 (工学)	氏名	姜 基天
論文題目	Assessing uplift displacement of buried geotechnical structures in liquefied ground during earthquakes (液状化地盤中における埋設構造物の浮き上がり量の評価に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、マンホールに代表される地中埋設構造物が地震時の地盤液状化に伴って浮き上がる現象を対象とし、同構造物に作用する浮力と自重との平衡関係および同構造物の浮き上がりによって生じる地盤沈下を考慮した土の収支バランスの原理に基づいて浮き上がり量の上限値の評価方法を提案するとともに、砂の力学モデルとしての多重せん断モデルを用いた地盤・構造物系としての数値解析により浮き上がり量の時系列的評価を行い、これらの解析方法の適用性を、遠心力場での模型振動実験および地震被害調査を通じて明らかにしたものであって、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、液状化地盤中のマンホールの浮き上がり現象に関する既往の研究のレビューに基づいて、地震時における浮き上がり量には条件によって大小のものがああり、浮き上がりの発生の有無の予測・判定のみならず、浮き上がり量を予測・評価するための新たな解析手法を研究する必要性を論じた。</p> <p>第2章では、遠心力場での模型振動実験による液状化地盤中の埋設構造物の浮き上がり現象の検討結果を示した。この検討においては、地下水位、地震動の加速度振幅、地盤の密度、地中埋設構造物の見かけの密度などを変化させた種々の条件の下で、延べ22ケースの総合的な模型振動実験を実施した。この結果、まず、地盤中の過剰間隙水圧が上昇し、同構造物に作用する浮力が自重を越え、両者の比により定義される浮き上がり安全率が1を下回る状態に達すると、浮き上がり現象が発生することを確認した。また、浮き上がり現象が発生した際の浮き上がり量は、地下水位、地中埋設構造物の見かけの密度など、振動前に規定される条件とともに、振動の結果地盤中に発生する過剰間隙水圧の値や振動の継続時間など振動に伴う条件に応じて、変化することを明らかにした。さらに、2次的な影響として、マンホールをはじめとする埋設構造物を地盤中に設置する際に掘削により一時的に形成されるトレンチ周辺の原地盤の剛性や透水係数などの条件について検討を行い、原地盤の剛性が高い場合には、マンホールの浮き上がり量が抑制されることを明らかにした。</p> <p>第3章では、地震時に地盤中に発生する過剰間隙水圧による浮力と地中埋設構造物の自重との力の平衡関係および同構造物の浮き上がり量に相当する土の体積分の地表面沈下(土の収支バランス)の原理に基づいて、同構造物の浮き上がり量の上限値の評価方法を提案した。提案方法の適用性の検討の第一段階として、まず、水で飽和した砂地盤模型の下部から地表に向けて間隙水を強制的に流してボイリングによる地盤液状化を発生させ、その際の埋設構造物の浮き上がり量の上限値の実測値と提案方法による計算値との比較を行い、両者がよく一致することを確認した。次に、提案方法の適用性を、第2章に示した遠心力場での模型振動実験結果との比較を通じて検討した。その結果、全ての実験ケースについて、振動に伴って地盤中の過剰間隙水圧が上昇し、浮き上がり安全率が1を下回る状態に達して浮き上がり開始された後、浮き上がり量が振動継続に伴って上昇を続け、最終的には、提案方法による上限値に達するか、ないしは、上限値に達しない時点で振動が終了するとともに浮き上がり量の上昇も停止するという結果が示された。この結果より、浮き上がり量の上限値の評価法としての提案方法の適用性が明らかにされた。</p>			

第4章では、砂の力学モデルとしての多重せん断モデルを用いて、地盤・構造物系としての地中埋設構造物の有限要素解析を行い、同構造物の浮き上がり量の時系列的評価を行った。これは、第3章での検討過程において、地震時の地中埋設構造物の浮き上がり量は、地震動の継続時間が短い場合や地盤の密度が大きい場合などでは、必ずしもその上限値に達しないことが明らかにされたため、この点を補う解析として、検討を行ったものである。解析により、液状化地盤中の埋設構造物の浮き上がりは、地盤中の過剰間隙水圧が上昇し、これに伴って、埋設構造物直下の地盤において、周辺地盤からの土の回りこみ現象に伴って発生する伸張せん断が卓越し、このせん断変形の発達とともに、埋設構造物が上方に変位していく挙動が明らかにされた。また、解析による埋設構造物の浮き上がり量時刻歴は、振動加速度が0.4g以下の範囲においては、遠心力場での模型振動実験による時刻歴とよい一致を示した。実際の地震においては、最大加速度が0.4gを越える地震が発生することはまれであり、多重せん断モデルに基づく数値解析の実際上の適用性は高いことが明らかにされた。

第5章では、2004年新潟県中越地震における地中埋設構造物の地震被害調査結果に基づいて、本研究で提案する解析方法の実被害事例への適用性を検討した。被害調査の対象とした長岡市内では、最大加速度0.46gの地震動により、下水道の総延長1,258kmのうち63kmが地盤の液状化により被害を受け、延べ436個のマンホールが浮き上がりによる被害を受けた。調査対象とした地域のマンホールの地下水位は、マンホールの深さの0.1~1.0倍の範囲にあり、これらの条件において実測された浮き上がり量は、第3章において提案した方法により推定した浮き上がり量の上限値と近い値、ないしは、それを下回る値となり、浮き上がり量の上限値の評価法としての提案方法の実被害事例への適用性が明らかにされた。また、第4章で提案した多重せん断モデルによる有限要素解析により、これらの地下水位の条件を考慮して解析した浮き上がり量は、地震時に実測された大多数のマンホールの浮き上がり量と整合する結果となり、浮き上がり量の時刻歴解析の実被害事例への適用性が明らかにされた。また、マンホールの浮き上がりに与える2次的な影響として、原地盤の条件と浮き上がり量に関する回帰分析を行い、原地盤が軟弱であるほど、浮き上がり量が增大する傾向が明らかにされた。

第6章では、本研究の地震防災への応用を目的として、地盤中に発生する過剰間隙水圧が浮き上がり量に与える支配的な影響に着目し、過剰間隙水圧の消散機構や密度増大機構の導入による浮き上がり量軽減のための対策工法とその設計法を提案した。遠心力場での模型実験では、対策がない場合の浮き上がり量が0.95mの場合に、提案する対策工法により、その浮き上がり量が、0.13mにまで低減されることを明らかにした。あわせて、設計実務への応用として、浮き上がり量を決定づける過剰間隙水圧比を、地震動の強さおよび地盤の液状化抵抗から推定する設計法を提案した。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、マンホールに代表される地中埋設構造物が地震時の地盤液状化に伴って浮き上がる現象を対象とし、同構造物に作用する浮力と自重との平衡関係および同構造物の浮き上がりによって生じる地盤沈下における土の収支バランスの原理に基づいて浮き上がり量の上限値の評価方法を提案するとともに、砂の力学モデルとしての多重せん断モデルを用いた地盤・構造物系としての数値解析により浮き上がり量の時系列的評価を行い、これらの解析方法の適用性を、遠心力場での模型振動実験および地震被害調査を通じて明らかにしたものである。得られた研究成果の概要は、次のようにまとめられる。

1) 地震時に地盤中に発生する過剰間隙水圧による浮力と地中埋設構造物の自重との力の平衡関係および同構造物の浮き上がり量に相当する土の体積分の地表面沈下(土の収支バランス)の原理に基づいて、同構造物の浮き上がり量の上限値の評価方法を提案した。

2) 地震時の地中埋設構造物の浮き上がり量は、地震動の継続時間が短い場合や地盤の密度が大きい場合などでは、必ずしもその上限値に達しないため、この点を補う解析として、砂の力学モデルとしての多重せん断モデルを用いて、地盤・構造物系としての地中埋設構造物の有限要素解析を行い、同構造物の浮き上がり量の時系列的評価を行った。

3) 地中埋設構造物の浮き上がりの挙動について、地下水位、地震動の加速度振幅、地盤の密度、地中埋設構造物の密度などを変化させた種々の条件の下で遠心力場における総合的な模型振動実験を実施し、得られた実験結果と解析結果との比較を通じて、本研究で提案する解析方法の適用性を明らかにした。

4) さらに、2004年新潟県中越地震における地中埋設構造物の地震被害調査を行い、本研究で提案する解析方法の実被害事例への適用性を明らかにした。

5) 本研究の地震防災への応用を目的として、地盤中に発生する過剰間隙水圧が浮き上がり量に与える支配的な影響に着目し、過剰間隙水圧の消散機構や密度増大機構の導入による浮き上がり量軽減のための対策工法とその設計法を提案した。

以上のとおり、本論文は、液状化地盤中の埋設構造物の浮き上がり量を予測・評価するための独創的な手法を提案し、その適用性を模型実験および地震被害事例に基づいて明らかにしたものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成22年2月24日、論文内容とそれに関連した事項について諮問を行った結果、合格と認めた。