

論文の要旨

題目 埋立地盤における地盤状態の変化を考慮した液状化予測に関する研究
(Study on liquefaction prediction of reclaimed land considering the variation in the state of the ground)

氏名 北出 圭介

地盤の液状化により被害を受けた構造物を補修・修復することは大きな損失になるため、液状化を防止して構造物の被害を軽減することが重要である。そして、液状化を防止するためには、対策が必要であるが、実際の対策の実施にあたっては、全ての地盤に対策を行うことは費用面からも現実的ではないため、想定される地震に対して地盤が液状化するか否かを評価する液状化予測が必要となる。

例えば、国や各自治体では液状化による被害軽減のため液状化危険度マップを公開している。液状化予測を行うために必要な地盤情報は、ボーリングから採取した試料による土質試験、もしくはボーリングを使用した標準貫入試験値などの原位置試験を用いることが多い。つまり、公表されている液状化危険度マップは、ボーリングデータから得られた点の情報としての液状化危険度の評価結果を補完して、面的な情報として液状化危険度を公開したものである。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、震源から300km～500km離れた関東地方沿岸部においても広範囲で液状化による被害が多く発生した。このとき、実際には液状化した範囲と液状化しなかった範囲が混在していた。この事から面的な情報としての液状化危険度評価の精度向上が必要であるといえる。

また、液状化危険度の評価の対象となるような埋立地盤は粘性土地盤上に築造されることが多い。このような地盤では、埋立後にも粘性土地盤の圧密沈下等により、地盤の物性が変化していく可能性がある。そのような地盤状態の時間的変化の発生が実際に生じる現象であれば、埋立地の液状化予測においても、その影響を考慮することが必要である。

本研究は、埋立地盤における液状化予測と実際の液状化被害を踏まえ、液状化予測の高度化を図ることを目的とした。主な検討項目は、実際の液状化被害の分析、埋立後の圧密沈下に伴う埋立地盤内の状態変化の有無とその影響、および地盤調査法として地盤の状態を面的に捉えることが出来る表面波探査の適用性である。

まず、過去の液状化被害のレビューと既往の液状化予測、および地盤調査手法について整理した。液状化予測手法は、過去の地震被害事例を教訓として改良を重ね現在に到っており、その手法は高度化されている。しかし、考案された時点から、液状化予測に用いるデータとして、ボーリングから得られる原位置試験結果(N値、PS検層)や土質試料の室内試験結果といった点情報を使用していることは変わっていない。つまり、地盤調査手法は、地盤内を深度方向の1次元的に把握するものと、2次元的に把握できるものと大別できるが、実務の設計で使用されているものの多くは、1次元に地盤内を把握する調査手法である。

そして、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の事例分析として、関東地方沿岸部の埋立地に位置する工場を対象に、工場敷地内の液状化が経済的被害に及ぼす影響の分析結果を示した。経済的被害は企業の有価証券報告書に記載されている特別損失を使用した。また、工場位置での地震動の大きさは気象庁発表による計測震度を使用し、液状化の有無は、国土交通省関東地方整備局と地盤工学会の合同

で実施した液状化調査の結果をもとに判定した。工場の経済的損失は、工場敷地全体の単位面積あたりに換算して、液状化の発生により震度 5 弱で液状化なしの場合の 1.9 倍、震度 5 強で 1.4 倍に大きくなることがわかった。一般的な液状化対策費用と比較すると、この程度の損失の差はそれほど大きくない。つまり、液状化対策の費用対効果を考えると、多くの場合においては、重要な範囲を選定して液状化対策をしていくことが必要であることもわかった。

さらに、液状化対策範囲の選定方法を検討するため、千葉県浦安市を対象に液状化の発生と地盤特性の差異の関係について分析した。分析の結果、液状化被害の程度は、浚渫砂質土層厚や沖積粘性土層厚が厚い方が大きくなることが明らかになった。

以上の検討結果を踏まえて、さらなる液状化予測の高度化を図るために、埋立地盤内の状態変化に対する液状化への影響と地盤内の状態変化を面的に捉えることが出来る表面波探査の適用性の 2 項目を検討した。

前者の検討の着目点は、粘性土地盤上に埋立地盤を造成した場合に、粘性土地盤の不同沈下により発生する埋立地盤の状態変化である。まずは、FEM 解析により不同沈下を模擬し、不同沈下による地盤の状態変化、および液状化の発生への影響について解析的検討を行った結果を示した。不同沈下した際の地盤内応力として、沈下量が大きい位置の底面近傍で有効拘束圧が低下し、沈下量が小さい位置の底面近傍では、有効拘束圧は増加した。これは、不同沈下により、沈下箇所周辺にアーチが形成されたことを意味している。また、初期せん断応力比は、沈下量が大きい位置の地表面部と、沈下量が大きい位置と小さい位置の中間部で増加した。さらに、沈下量が増加するほど、地盤内応力の変化も大きくなった。不同沈下した状態において、地盤を加振させた場合、沈下量が大きい位置と小さい位置の中間部で過剰間隙水圧比の上昇が早くなった。また、その位置は、初期せん断応力比が他より大きくなる範囲であった。つまり、不同沈下による地盤状態の変化が、液状化の発生に影響を及ぼすことが解析的に確認された。

さらに、このような現象が実地盤で発生するかどうかを確認するため、遠心力場で地盤の不同沈下を模擬した模型実験を実施した。また、FEM 解析により実験結果を再現し、実験結果の妥当性を検証した。検討の結果、不同沈下により地盤内にアーチ構造が発生し、不同沈下部上の地盤では鉛直土圧が小さくなるなど地盤内応力が変化することが確認できた。この変化は、一般の埋め立て地盤では、N 値の変化などに反映される可能性があり、その変化の大きさは+50 ~ -50%程度になり得ることがわかった。また、加振による水圧の上昇は同一深度の計測点で同程度であったが、初期の応力状態が不均質であることを踏まえると、過剰間隙水圧の上昇が及ぼす影響も不均質であると推測された。これは、前述の解析結果と調和的である。さらに、不同沈下による地盤内応力の変化は、実地盤で数 cm の小さい沈下量でも発生する可能性があることがわかった。つまり、粘性土地盤の圧密沈下のばらつきにより、埋立ての初期の段階もしくは、圧密度が大きい場合の比較的小さな圧密沈下でも、地盤内応力の不均質化が起り得ることが示唆された。このように粘性土地盤の不同沈下による地盤状態の変化が、埋立地盤の液状化の有無の分布に影響している可能性が模型実験及び数値解析により確認された。

後者の検討の着目点は、実務的に地盤の面的な物性値を把握する手法として、埋立地盤内のせん断波速度分布を得る表面波探査の適用性があるかどうかという点である。解析および実地盤における計測の結果、矢板式岸壁背後の埋立地盤において、エプロン部のコンクリート舗装の影響が見られるものの、地表面と海底面との段差の存在や矢板等の構造物の存在が計測結果に及ぼす影響は小さいことを確認した。また、実地盤での計測において、せん断波速度の推定結果は既往の土質調査結果と良い整合性が得られた。これらより、表面波探査手法が液状化予測を目的とした面的な地盤調査法として一定の適用性を有していることを示した。

本研究成果の意義は次の通りである。埋立地盤の物性値は空間的にばらつきを有している。このような

ばらつきが生じる原因の一つとして、埋立土直下の粘性土層の沈下が影響している可能性を示し、遠心模型実験および解析によりそれを確認した。そして、この現象が液状化の発生の有無に影響を与えることも示した。これは、液状化予測において、空間的にばらつきを有している土質調査結果の取り扱いに対し、そのばらつきのメカニズムに基づいた考察が可能であることを示したといえる。また、時間とともに進行する圧密沈下の影響という観点から、過去の土質調査結果の利用において、時間的変化の有無を考慮する必要性も明らかとなった。

また、実務的に地盤情報を 2 次元的に把握する手法として、表面波探査が一定の適用性を有していることを示した。さらに多くの地点での検証は必要であるが、このように表面波探査を活用していくことで、液状化危険度マップをより精度の良いものにしていくことが可能となる。

今後の課題としては以下の点が挙げられる。粘性土地盤の物性値や層厚のばらつきなどのような実地盤の状態を忠実に反映させた場合、不同沈下の状態はさらに複雑になることが想定され、それに伴う地盤内応力も複雑になることが想定される。このことから、今後は粘性土地盤と上層の埋立地盤を一体としたモデルによる検討が望ましい。また、表面波探査の適用性については、地表面の舗装の影響が課題である。コンクリートやアスファルト等の舗装の影響など、様々な調査状況で検討を行い、表面波探査の調査技術の向上を図ることが望まれる。