

## 審査の結果の要旨

氏名 本多 剛

論文題目 液状化被害の軽減技術向上のための模型実験と個別要素法解析

兵庫県南部地震以降、液状化被害の軽減を目的とした対策工法は、一部の重要構造物を除くと、「地盤改良による液状化の発生を防止する対策」から「液状化の発生を許容しつつ、基礎の強化や地盤変位の抑制といった方法で構造物被害を軽減する対策」に移行する傾向がある。これは L2 地震のような強震動に対して対象地盤全域の液状化防止対策を施すにはコストが膨大になること、既設構造物の対策には十分な地盤改良領域を確保できないといった理由からである。そして、構造物周囲の地盤の液状化を許容しているため、液状化地盤と構造物の相互作用を考慮しながら耐震性能を評価技術せねばならない。

現在の技術レベルでは任意の複雑な応力条件下での液状化した土の強度変形特性について未解明な点が多く、数値解析手法による耐震性能の評価には多くの課題がある。そこで模型実験を用いることが多い。しかし、定量的な評価には模型実験の相似則の問題がある。例えば、重力場の小型模型実験では実物に比べて拘束圧が低く、遠心力場の小型模型実験では実物と同じ応力レベルを再現できるが粒径の寸法効果の影響が懸念されている。

このように液状化被害の軽減技術の向上のためには、液状化した土の挙動を解明することによって数値解析手法を向上させるとともに、模型実験から得られる結果を定量的に信頼できるものにするため、実験技術の検証が必要である。そこで本研究では、河川盛土およびケーソン護岸の遠心模型実験と重力場振動台実験の結果から液状化の被害軽減技術の検証を行なった。さらに、間隙水モデルを用いた個別要素法の数値実験を実施した。それらの成果が本論文における全八章に記述されている。以下にその内容を説明する。

第一章では近年の自然災害の発生状況について調べ、自然災害として豪雨や地震による地盤工学に関連した災害の発生頻度が高く、自然災害の脅威が依然として高いことを示した。そして、これらの自然災害の被害を軽減する技術を確立するための研究手法について、現状の課題とその解決手法について検討した。

第二章では、地盤に関連した自然災害として液状化被害に着目し、液状化被害と対策技術、液状化地盤の解析手法について既往の研究をまとめた。また、液状化地盤の新しい取扱い方法として個別要素法の利用を提案した。

第三章では、地中壁工法（連続矢板壁と薬液改良工法）の対策効果をより詳しく評価するため、実物と同じ応力レベルを再現できる遠心模型実験装置を用いて強震動を受ける河川盛土の振動台実験を実施した。この結果より、地中壁工法によって河川盛土直下の基礎地盤の側方変位が抑制され、また盛土の沈下が軽減できることを確認した。ただし、既往の重力場の実験結果に比べ、その効果は小さかった。

続いて、重力式護岸の遠心模型実験を実施し、抑止杭や矢板壁、薬液改良の効果を検討した。剛性の高い抑止杭を護岸の背後に密に設置した場合、護岸の変位や背後地盤の変位を抑えることができた。一方、護岸海側に矢板壁を設置したケースでは、矢板壁の陸側で過剰間隙水圧が大きく上昇し地盤がもち上がり、対策効果が打ち消された。また護岸直下に薬液改良体を設置したケースでは、改良体上の捨石マウンドに変形が集中したために対策効果は小さくなった。

第四章と第五章では、液状化中の土の物性を再現するために間隙水モデルを用いた個別要素法による数値実験手法を開発した。具体的には、既存の間隙水モデルを用いた個別要素法を動的な境界値問題に適用できるように拡張し、また二次元の円形要素によって液状化現象を再現するための解析パラメータの決定方法について検討した。そして、河川盛土の数値実験から盛土の変形量に影響する要因を調べ、また液状化中の要素の集合体としての挙動について調べた。

第六章では個別要素法を河川盛土の遠心模型実験に適用した。そして結果を実物スケールに換算して比較し、次のことが分かった。

1. 地盤の寸法と粒子寸法を実物スケールに換算したとき、二種の異なる大きさの模型実験が完全に一致する場合には、大変形領域においても変位変形が一致した。
2. 実物スケールでの透水係数を一定に保つよう間隙水の粘性係数を変化させたところ、大きな粘性係数を用いると地盤の変形量が小さくなった。つまり、粘性流体を使用することによって地盤変位は過小評価される。

続いて、模型寸法が長さで2倍異なる模型（解析モデル）を用意し、それぞれに模型スケールにて同一寸法の要素を配置した。実物スケールでの変位量を比較したところ、次のことが分かった。

3. 粒子の寸法効果の変形量に影響する。実物換算での粒子寸法が大きいケースほど変形量が小さくなった。
4. 相似率（模型/実物）が小さい条件ほど、正規化した変形量（地盤沈下ひずみ）が小さくなった。剛体容器を用いた土槽では変位応答の増幅が起り難いため、地盤層厚が厚くなるほど正規化した変位量は小さくなる。

次に、河川盛土の遠心模型実験の個別要素解析を行った。この結果より、この個別要素法によって河川盛土の遠心模型実験の結果を再現できることを確認した。そして、解析結果から得られた地盤内の応力分布から、矢板壁の対策効果のメカニズムを捉えることができた。

第七章では、重力場と遠心場モデルの矢板護岸の振動台実験の数値実験を行った。ここから得られた知見を次に示す。

1. 加振周波数が小さくなると、矢板頭部の水平変位量は指数的に増加する。
2. 重力場と遠心場モデルの時間の相似則を適用することで、両者の結果は近いものとなる。実物換算した同一の加振周波数では、遠心場モデルの方が矢板の回転量が大きい。
3. 実物換算した矢板頭部の水平変位量で重力場モデルと遠心場モデルの結果を比較すると、約 1000 mm の変位量までは両者の結果が非常に良く一致している。
4. この解析モデルでは、重力場モデルおよび遠心場モデルともに矢板の回転量が約 20 度で頭打ちになった。このことから、約 20 度の矢板の回転量が力学的に安定状態となる限界値であると判断できる。したがって、安定状態に近づいた同一の回転量で両者の変位量を比較すると、重力場モデルの方が実物換算した変位量が大きくなってしまう。これは、重力場モデルの相似則では長さの変位の相似比が異なっていることに由来している。
5. 矢板の限界回転量である 20 度に対して、約 12 度までの回転量の範囲までは両者の結果が良く一致しており、この変形量までは両者の相似則が妥当と判断できる。

第 8 章では、本研究の総括として各章の要約と結論を取りまとめた。

以上の成果は地盤の工学から見た地震災害軽減技術の発展に寄与するところが大きく、よって博士（工学）の学位にふさわしい、と認められた。