

審査の結果の要旨

氏名 ALAM MD.JAHANGIR

論文題目：MODEL TESTS ON MITIGATION MEASURES OF GROUND DISTORTIONS INDUCED BY SEISMIC LIQUEFACTION

和訳 地震時に液状化した地盤の大変形の軽減技術の模型実験

本論文の研究は、都市施設の耐震性向上技術の開発研究の一環として実施されたものであり、対象構造物としては、港湾や海岸ないしは河川の重力式護岸および堤防を選んだ。これらの構造物において頻繁に発生する液状化災害を想定し、既設の構造物の液状化抵抗を向上させる技術の比較検討、効果実証を、模型実験によって行った。実験には重力場の振動台実験と遠心場の振動実験がある。本論文は全体で七章から構成されている。以下、各章の内容を説明する。

第一章は前書きであり、研究課題の所在とその意義を説明している。

第二章では、既往の知見や災害例を取りまとめている。港湾の重力式護岸の地震被災例としては、1995年の神戸港および2005年の博多湾の事例が記憶に新しい。また河川堤防の液状化災害としては、1995年の淀川堤防の事例が重要である。これらの被災地点を踏査した知見および文献調査から研究課題を導出し、さらに既往の研究例を調査して、本研究で新たに取り組むべき研究方針を抽出した。

第三章では実験の方法を説明している。遠心場での模型実験は、外部機関との共同研究として実施したものである。遠心模型実験は、寸法の小さい地盤模型に大きな遠心力を作用させて実際の地盤と同等の重力を発生させるものであり、応力のレベルによって敏感に変化する土の性質を、模型と実際とで一致させうる長所がある、とされている。しかし一方で、模型格納容器の寸法が小さいため、本研究のように広大な地盤の変位変状が構造物の被害を支配する、といった状況では広大な地盤を再現することが出来ず、実被害を完全に再現するには至っていないことが、懸念された。しかし本研究の最重要目的は被害の定量的再現ではなく被害軽減諸技術の相互比較であるため、このことは深刻な問題とはされなかった。また、使用する土粒子の寸法は調整できないため、実験における土粒子は実地盤では50倍程度大きいレキ粒子に相当してしまう。この問題は完全には解決できないものであるが、本研究ではシルト粒径の細かい土を使用する、ないしは通常の砂を使うものの間隙流体として粘性の高いシリコンオイルを用いる、という手法で、ある程度の対応を行った。

重力場の振動実験では、応力レベルが実地盤より低いことが、しばしば問題視される。しかしこの問題に対しては、実際よりゆる詰めな砂地盤を造成することにより、ある程度対応されている。また、模型そのものの寸法が遠心実験の場合よりはるかに大きいため、上述の砂粒子がレキに対応する問題は、重大視されない。また実験模型の寸法に余裕があるため、さまざまな計測器を設置できることも、長所である。

実験に用いた計測機器としては、加速度計、間隙水圧計、レーザー式変位計など、一般に広く使用されているものの他に、加速度計を応用した傾斜角度計測式の地中変位計、本研究で初めて製作したプレート型土圧計がある。これらの装置の動作原理、検定結果も第三章で説明されている。

第四章は、重力場で実施された護岸の振動実験の結果を、説明している。実験結果の再現性を検討し、さらに水で飽和した模型地盤の作り方として湿潤締固め法と水中落下とを比較し、土の密度を下げることは出来ないものの飽和度が高まる点を重視して、後者の水

中落下法を採用した。重力場での実験では、次のような防災技術の効果を比較検討した。まず、護岸の裏側（陸側）に地中壁や杭を設置して、護岸構造物に作用する地盤圧力を軽減する手法を実験した。後述する遠心実験から分かるように、地盤の地震時圧力軽減は、一定の効果があるはずである。しかし第四章の実験ではある程度大型の護岸構造を想定しており、護岸の背面に大型のレキからなるフィルターゾーンが埋め込まれる。そして、このレキを貫通する地中壁は、施工することが出来ない。このような施工上の理由から壁の位置は護岸からかなり離れたところにならざるを得ず、それでは圧力軽減効果が上がらないことが、実験から判明した。

護岸海側に被害軽減対策を施すことは、海上の作業船から施工することになり、大型機械の使用が容易になる。無対策模型の実験から、護岸の被害の原因として護岸基礎の砂地盤の液化化と軟化とが重要であることが、分かっていた。軟化した砂地盤が海側へ流動し、これに乗るかたちで護岸も海側へ変位、傾斜する。これを防止するために、砂地盤中に鋼矢板壁を設けること、砂地盤そのものを薬液注入で固化すること、を検証した。矢板壁については、その設置位置によって効果に差異があり、あまりにも遠方では効果が無い。逆に護岸先端に近づきすぎると被害の発生パターンが変わり、基礎を固定された護岸が裏から地盤圧力に押されて傾斜、転倒するパターンが卓越する。そこで、護岸のつま先からその高さの 50%程度沖へ出た位置に矢板壁を設置すると、護岸の傾斜と滑り変位とがいずれも最小になることが分かった。

護岸の被災のパターンに、転倒と滑りとがありうることは、重要である。実験結果を通じて分かったことは、基礎が液化化する場合には滑り（基礎の砂層のせん断変形）が重大であり、基礎が安定している場合には、背後地盤からの土圧によって護岸が転倒するのである。

第五章は、護岸模型の遠心実験結果を説明している。無対策模型の他に、前述した陸側に変形抑止杭を設置したケース、護岸基礎を固化ないしは締固め、あるいは海側に矢板壁を設けたケースを実験した。加振加速度としてとして 400ガルを越える強大な振動を設定したため、模型はいずれのケースも大きな被害状態に至った。そして護岸模型の変位で見ると、被害軽減対策の有無によらず、被害の程度は同様になってしまった。このことは、第四章で見られたように、基礎砂層の安定・不安定が護岸の被災パターンを変化させる（滑りと転倒）ことに起因している。したがって、被害を十分軽微にするためには、両方の被災パターンに対して方策を講じなければならない。本研究で実施した方策はすべて基礎砂層の変形を抑制することを目指していた。したがって、基礎砂層のせん断変形を 5ないし 6割に縮減することには成功したものの、護岸傾斜が大きくなってしまった。傾斜を小さくするためには今後、背後からタイロッド（鋼棒）で牽引するという技法が考えられる。

第六章は、遠心模型実験装置を用いて盛土・堤防の液化化災害軽減の試みを、報告している。この課題については、過去に重力場での振動実験を行った経験があり、盛土側方に地中壁を埋設することが有効である、との見通しがあった。盛土の被害パターンは沈下であり、沈下は基礎液化化砂が側方へ移動することで、可能となる。これを阻害するために地中壁が有効である。この見通しを遠心力場で確認することが、研究の目的であった。この目的は、十分達成された。また、地盤の変位、沈下が発生するのは加振中に限られ、振動の終了とともに変形も停止することが示された。このことは、被害、変位の程度を推定する上で、振動の継続時間が重要であることを示している。多くの設計指針で、設計地震として強さ（振幅、スペクトル）は重視されているものの、継続時間には注意が払われていない。この実情は、液化化地盤の被害予測（性能設計）に関しては不十分と言える。

第七章では、結論と今後の課題を記述している。

以上を要約すると、本研究は、液化化に伴う地盤構造物の被害軽減技術の実用化を目指したものであり、諸技術の有効性、問題点を実験的に明示した。またその成果は、今後実施される予定の実物大模型の振動台実験に生かされる予定である。このような成果

は、地盤工学、地盤耐震工学の発展に貢献するところが大きい。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。