

軟弱地盤上の河川堤防内の 液状化抵抗に関する実験的研究

京都大学 准教授 ピパットポンサー ティラポン

概要：

本研究では、盛土内部の液状化抵抗に対して地震履歴が与える影響を、盛土内のアーチ作用等を受けて変化する応力分布状態も含めて詳細に検討し、今後の盛土補強や堤防整備の適切な指針作りに資することを目的とする。京都大学防災研究所の遠心実験装置を用いて軟弱地盤上の堤防をモデル化して動的実験を行った。模型の基礎地盤にはウレタンを用いて、盛土の材料には広島呉市の山砂を用いる。盛土内部にチューブを設置して給水を行い、実際の盛土内の水面形を再現する。実験を通して、堤防内の土圧、水圧、変形、水平加速度の計測を行い、加振時にはそれらの値から液状化判定を検討した。また、動的材料パラメータを調べるため、遠心模型実験で得られた応力状態などを参照しながら三軸繰り返し試験を行い、堤防の液状化強度について定量的な評価を検討した。その結果、軟弱地盤上の盛土では中央底部の有効垂直応力が周辺底部と比較して小さい分布を示しており、理論計算結果と似た傾向を示すことが分かった。

キーワード：遠心模型実験、繰返し三軸試験、盛土内液状化、基礎地盤沈下、アーチ効果

1. はじめに

以前より、河川堤防における基礎地盤の液状化抵抗について数多く研究されてきた。しかし、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、非液状地盤である粘土地盤上における河川堤防の液状化被害が多く報告された¹⁾。非液状地盤上の河川堤防の液状化抵抗は、築堤後の基礎地盤の沈下によって堤防内にアーチ作用が働くことで堤防中央底部の鉛直応力が減少することが考えられている。既往の研究では、ピパットポンサーら²⁾が、砂山の応力分布に関する実験と理論解析から、基礎地盤が三角形型に沈下する際に盛土内にアーチ作用が働き、盛土中央底部の鉛直応力が減少することを確認している。また、権代³⁾は、基礎地盤の沈下形状の違いにより、盛土内部の応力状態がアーチ作用に伴いどのように変化するかを、遠心模型実験により調べた。しかしながら、非液状軟弱地盤上の堤防内部に水位を有する河川堤防の液状化挙動について室内試験結果を用いた検討や予測は進んでおらず、地震大国であり河川堤防を多く有す日本では、液状化を考慮した設計や築堤後の河川堤防の液状化対策の点から、これらを検討することは非常に重要である。そこで本研究では、権代ら³⁾の遠心模型実験結果を理論計算結果と比較検討しながら分析し、さらに非排水繰返し三軸試験結果を用いた液状化予測を試みた。

2. 遠心模型実験結果の分析

本研究では、権代ら³⁾の遠心模型実験結果の分析を、ピパットポンサーら⁴⁾が提案したアーチ作用を受ける盛土内の応力状態に関する理論を用いて行った。実験条件の詳細は、権代ら³⁾の報告を参照される。また、盛土内の鉛直応力の理論計算は、ピパットポンサーら⁴⁾が提案した、Mohr-Coulomb 破壊条件から得られる堤防下部の角度 α で主応力が固定される状態を仮定した理論を用いて計算する。この計算において、堤防内の微小要素のつり合い式から微小要素の応力成分を求める。さらに、図1のように境界条件から堤防を6つの領域に分割し、それぞれの領域で応力成分の積分計算を行うことで、アーチ作用を受けた河川堤防の応力分布を求める。

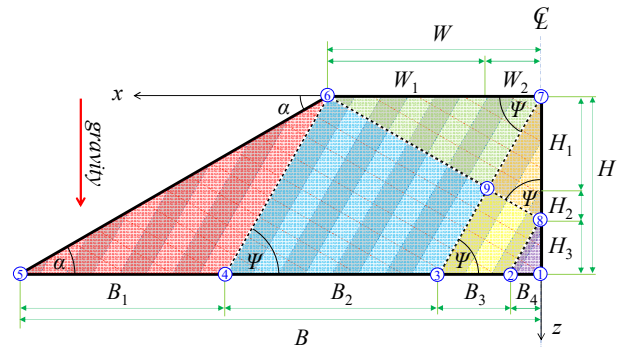


図1 境界条件で分割した堤防の模式図

角度 α は、圧密非排水試験から得た内部摩擦角 27.4° を用いて求めている。遠心模型実験における初期鉛直土圧を理論計算結果と比較した結果を代表して、ウレタン地盤条件で中央底部から流体を供給した第 1 加振直前の結果を図 2 に示す。図 2 より、ばらつきはあるものの盛土中央底部の有効垂直応力が周辺底部と比較して小さい分布を示しており、理論計算結果と似た傾向を示す。また加振回数が増えると理論計算との乖離が大きくなる。これは、加振により最大主応力を固定していた理論計算を満たさないことや、盛土内の密度が変化したことが原因と考えられる。また、どのケースにおいても中央底部の液状化抵抗が低く、中央底部を皮切りに液状化がみられた。剛体地盤条件では、中央底部が周辺部より有効垂直応力が低下する傾向がみられず、土被り計算に近い応力分布となり、加振による中央底部の液状化は見られなかった。

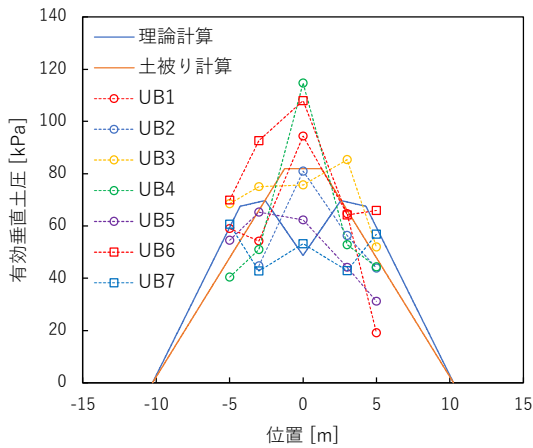


図 2 初期有効垂直土圧と理論計算の比較

3. 室内試験結果を用いた液状化予測

繰返し非排水三軸試験結果を液状化発生時点で整理した結果を用いて液状化予測を行う。遠心模型実験の結果から、加速度からせん断応力を求め、初期有効垂直土圧を初期有効拘束圧とし、繰返しせん断応力を各ケースで求める。遠心模型実験では全てのケースで、本加振において 20 波の連続波が入力されている。以上の方法で繰返し非排水三軸試験結果に遠心模型実験結果を、縦軸に繰返しせん断応力比、横軸に繰返し载荷回数をとったグラフにプロットし、液状化予測を行う。その結果を通常ウレタン地盤条件の繰返しせん断応力比が 0.5 以下のケースを図 3 に示す。0.5 以上の 5 ケースは全て液状化が発生している。図 4 より、繰返しせん断応力比が三軸試験より求めた液状化基準より大きく実際に液状化が発生したケースと液状化基準より小さく実際に液状化が未発生したケースは、予測が成功していると考えられ、18 ケース中 16 ケースで液状化を予測できていることが分かる。

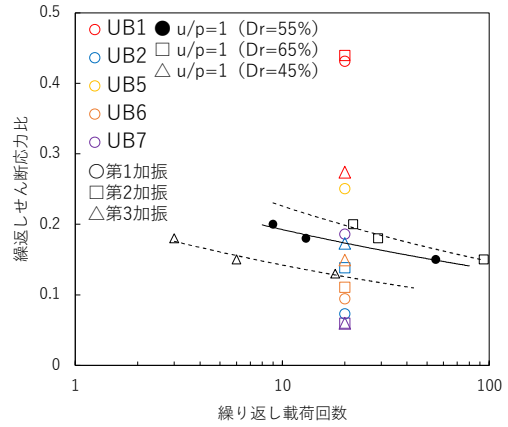


図 3 繰返しせん断応力比と繰返し载荷回数の関係

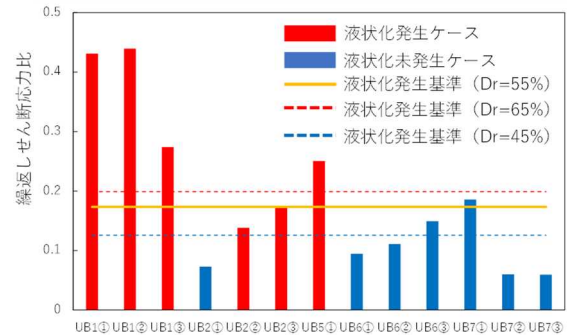


図 4 繰返し三軸試験を用いた液状化予測結果

4. まとめ

見本研究では、非液状化軟弱地盤上の堤防内部に水位を有する河川堤防における応力分布を、アーチ作用を考慮した応力状態の理論値と比較検討した。その結果、軟弱地盤上の盛土では中央底部の有効垂直応力が周辺底部と比較して小さい分布を示しており、理論計算結果と似た傾向を示すことが分かった。さらに、繰返し非排水三軸試験結果から、非液状化軟弱地盤上の堤防内部の液状化予測を行える可能性があることが分かった。

参考文献

- 1) 地盤工学会：東日本大震災合同調査報告 地盤編 1，丸善株式会社出版，pp.211-241,2015.
- 2) ピパットボンサー・ティラボン，竹山智英，飯塚敦，太田秀樹：アーチ作用による盛土中央の圧力減少が基礎の沈下によって引き起こされる液状化に及ぼす影響，第 62 回理論応用力学講演会，OS20-05,2013.
- 3) 権代知輝，ピパットボンサー・ティラボン，北岡貴文，大津宏康：沈下形状に伴う盛土内アーチ作用に関する動的模型実験，京都大学防災研究所研究発表講演会，D15,2020.
- 4) ピパットボンサー・ティラボン，竹山智英，飯塚敦，太田秀樹：安息角で形成された平面状斜面における固定主応力軸を仮定した応力解析，第 45 回地盤工学研究発表会，pp.307-308 2010.