

河川堤防の水分・応力変化を考慮した 地震時変形予測に関する研究

徳島大学 教授 渦岡良介

概要：

東日本大震災では軟弱粘性土地盤上の堤体内の液状化が原因と思われる堤防被害がみられた。軟弱粘性土地盤上の堤体では、基礎地盤の圧密変形により堤防下部に飽和領域や低拘束圧領域が発生することが従来から指摘されていたが、その領域の定量的な評価方法はなく、地震時変形量に与える影響も明らかになっていない。そこで本研究では、堤防内の飽和領域や低拘束圧領域の定量的な評価手方法を確立することを目的とし、その第一段階として、遠心模型実験により軟弱粘性土地盤上の堤体内の水分（負の間隙水圧）・水平応力分布を検討した。遠心模型実験では、基礎地盤が砂質土と粘性土の2 ケースを対象として、遠心加速度載荷過程の堤防模型内の間隙水圧および水平応力分布を計測した。その結果、基礎地盤の圧密沈下量の違いによって堤防模型内の水平応力分布が異なり、砂質土地盤上の堤防では水平応力の深度分布が三角形分布を示すのに対して、粘性土地盤上の堤防では堤防天端付近では水平応力が大きく、堤防下部では水平応力が小さくなる分布となることがわかった。この結果は既往の数値解析結果と整合するものである。

キーワード：河川堤防、液状化、水平応力、間隙水圧、圧密

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震は、東北と関東地方の広範囲の河川堤防に被害¹⁾をもたらした。従来の研究により、河川堤防の地震被害の2つの主な原因が示されている。1つは砂質土地盤の液状化であり、もう1つは粘性土地盤上の盛土底部の液状化である。前者の破壊メカニズムは広く研究され、その対策は過去の地震で立証されている。後者は1993年釧路地震から指摘されている²⁾が、明確な破壊メカニズムは解明されていない。

そこで、本研究では粘性土地盤上の盛土底部の液状化が堤防の地震時変形量に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、まず粘性土地盤上の堤防内の飽和領域や低拘束圧領域に着目した。粘性土地盤上の堤体では、基礎地盤の圧密変形により堤防下部に飽和領域や低拘束圧領域が発生することが従来から指摘されていた^{3), 4)}が、その領域の定量的な評価方法はなく、地震時変形量に与える影響も明らかになっていない。そこで本研究では、堤防内の飽和領域や低拘束圧領域の定量的な評価手方法を確立することを目的とし、その第一段階として、遠心模型実験により軟弱粘性土地盤上の堤体内の水分（負の間隙水圧）・水平応力分布を検討した。

2. 遠心模型実験の方法

本研究で実施した遠心模型実験について、実験装置、模型地盤および実験方法について述べる。

(1) 実験装置

本実験には、徳島大学で所有している有効半径 1.55m のビーム型遠心模型実験装置を用いる。装置内部の実験土槽を設置するプラットフォームには、土槽の側面及び上面に模型地盤の挙動を観察および記録するために小型デジタルカメラが設置されている。

実験に用いる土槽は内法寸法が H350×L450×W200mm のアルミ製でプラットフォーム上に設置する。前面は観測のためにガラス張りになっている。

図-1 に土槽の側面図と配置された計測器の模式図を示す。本実験は盛土内部の内部状態を知ることが目的であることから、盛土は半断面を対象として、対称面（土槽の左側の側面）に計測板を設置した。その中に土圧計および間隙水圧計を高さ 2.5cm（模型寸法）間隔で取り付け、それぞれ5つの深度で水平土圧および間隙水圧を計測した。一番下の土圧計・水圧計は基礎地盤内に位置している。なお、間隙水圧計にはセラミックフィルターを取付け負圧（サクション）も計測できるようにした。

また法肩および法尻の鉛直変位量の計測には、レーザー変位計を用いた。

(2) 模型地盤

堤体には稲城砂 (2mm ふり通過分) を使用した。稲城砂の土粒子密度は $2.636\text{g}/\text{cm}^3$ 、細粒分含有率は 21.2% である。図-2 は稲城砂 (図中の inagi sand)、江合川 (宮城県) 左岸 18k 付近の盛土試料 (図中の sample)、信楽粘土 (図中の shigaraki clay) および豊浦砂 (図中の toyoura sand) の粒度分布を比較したものである。稲城砂は現場の堤体土の粒度と近い分布を示していることから、ここでは堤体の材料として稲城砂を使用した。

堤体模型は半断面模型とし、天端幅 3cm、底面幅 33cm、高さ 10cm、のり面勾配 3.0 である。実際の堤防ではのり面勾配は 2 程度であるが、予備実験の結果、ここで用いた粘性土地盤では盛土の沈下量が大きくなりすぎたため、暫定的にのり面勾配は 3.0 とした。同寸法で作製した型枠に締固め度を約 60% で締固め、基礎地盤への設置を容易にするために冷凍による成形を行った。冷凍しておいた盛土を基礎地盤に載せ、一度天端付近まで水で浸した。数時間温水で浸した後、天端から地表面までの水を取り除き、盛土表面を約 30 分間温風による乾燥を行った。いずれのケースでも地下水位は基礎地盤表面である。

粘性土地盤には信楽粘土を用いた。信楽粘土の土粒子密度は $2.610\text{g}/\text{cm}^3$ 、塑性限界は 18.3%、液性限界は 43.9%、塑性指数は 25.6 である。粘性土地盤は、信楽粘土をスラリー状 (含水比 75%) にし、土槽に敷き詰めた。十分に攪拌し脱気を行い、初期厚さ 7cm とした。その後、地表面に載荷板を設置して、重りを用いて約 35kPa を載荷し、24 時間放置して圧密を行った。圧密後の粘性土地盤の厚さは約 5cm である。粘性土地盤の下部には排水層として、3 号珪砂を厚さ 10cm に締め固めて作成している。

比較のために基礎地盤を砂質土地盤としたケースも実施した。この砂質土地盤には豊浦砂を用いた。乾燥させた豊浦砂を高さ 80cm から空中落下用で作製したふるいで落下させ、厚さ 15cm の砂質土地盤を作成した。次にアクリル円筒を通して水頭差を利用して土槽下部から水を送り、飽和させた。

(3) 実験方法

作製した基礎地盤上に盛土を載せ、計測板と冷凍盛土の隙間をなくすために天端付近まで水で浸ける。数時間水で浸した後、天端から地表面までの水を取り除き、地表面を約 30 分間温風で乾かす。表面が硬くなってきたら送風を止め、遠心荷重装置に載せる。諸計測器及び固定器具を取り付け、加速を開始する。計測及び模型状態の撮影は加速開始と同時に始める。遠心加速度は 50g まで加速させるが、5g 毎 (基礎地盤が砂質土の場合は 10g 毎) に増加させ、それぞれの遠心力場での水平土圧、間隙水圧及び盛土の変位量が安定するまで放置し、計測値が安

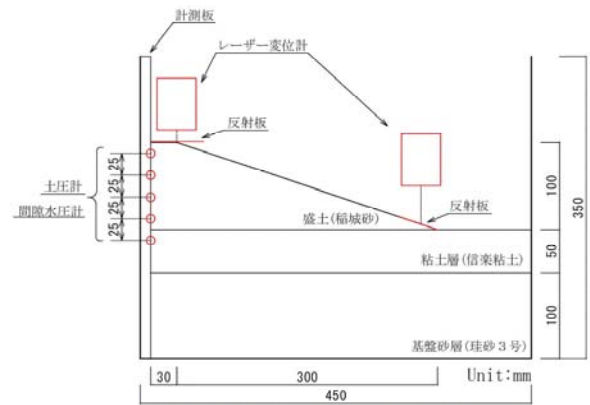


図-1 実験模型と計測器配置図

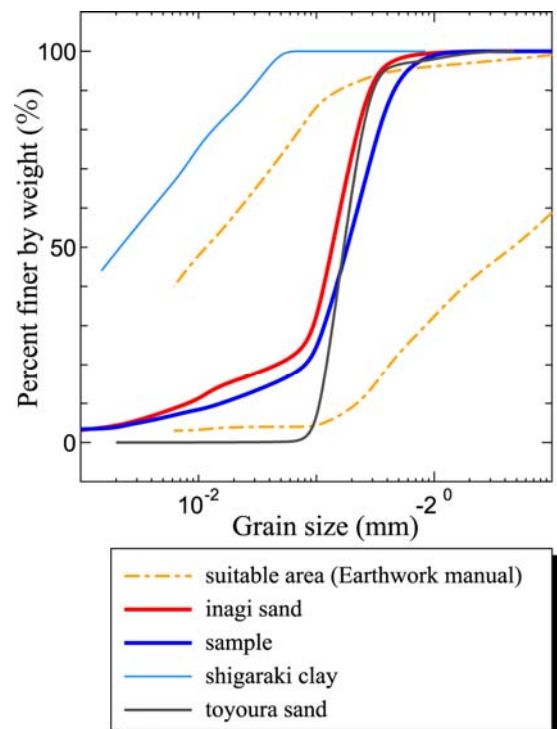


図-2 実験材料の粒度分布

定すれば再度加速を再開した。

3. 実験結果

はじめに参考のために実施した基礎地盤が砂質土の結果を示し、続いて基礎地盤が粘性土の結果を示す。

(1) 基礎地盤が砂質土のケース

図-3 は、遠心加速度 10g 毎の水平土圧分布および間隙水圧分布である。どの遠心場においても水平土圧は、上部ほど小さく底部ほど大きい傾向がみられる。値としては静止土圧よりは小さく、主動土圧に近い値となっている。間隙水圧について、盛土内では遠心加速度の上昇に伴って、間隙水圧が減少し負の値となるため、盛土内が不飽和化していることが考えられる。ただし、天端付近

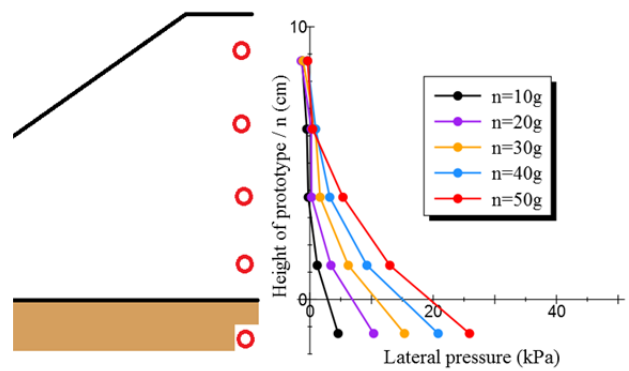
の間隙水圧計はほぼゼロであり、この深度の水平土圧もほぼゼロであることから間隙水圧計の計測面と盛土との密着が不十分であった可能性がある。また、地表面以下は常に正の間隙水圧となり、基礎地盤が飽和を維持していることが分かる。沈下量は法肩で約 2mm となり、水平土圧及び間隙水圧に大きな影響はないと考えられる。

(2) 基礎地盤が粘性土のケース

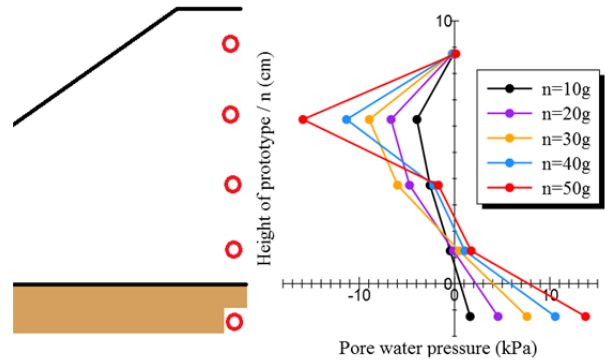
図-4 は 10g 毎の水平土圧分布および間隙水圧分布である。なお、上から 1 番目、2 番目の間隙水圧は計測値の不具合により省略している。図-5 に 10g 場と 50g 場の実験中の模型側面の様子を示す。沈下量は約 10mm となり、基礎地盤が砂質地盤の場合と比較して、上部の水平土圧が大きく、中央及び底部では小さくなる傾向がみられた。これは基礎地盤が沈下したことにより、上部に水平方向の圧縮、中央及び底部に水平方向の引張の力が生じたことが一因であると考えられる。最下部は基礎地盤内の応力であるが、砂質地盤の場合よりも大きな値を示しており、盛土荷重による粘性土地盤の圧縮に伴い水平土圧が増加した可能性がある。間隙水圧は遠心加速度の上昇に伴い盛土上部では飽和から不飽和に移行しているが、盛土底部の分布は図-3 (b) の砂質地盤基礎地盤の分布とは異なっている。この点については今後さらに検討が必要である。50g 場において最下部の基礎地盤内で大きな間隙水圧が発生しているが、これは実験終了時には基礎地盤の圧密が継続しており、過剰間隙水圧が十分に消散していなかった可能性がある。実際、実験終了時には最下部の水平土圧は減少傾向、最上部の水平土圧は上昇傾向にあり、基礎地盤の圧密完了時には図-4 に示す傾向（盛土上部の水平土圧が大きく、盛土底部では小さくなる）はより顕著になる可能性がある。

4. 既往の研究との比較

図-6 に 50g 場における砂質地盤および粘性土地盤上の盛土の水平土圧分布を示す。図に示すように基礎地盤が粘性土地盤の場合は、砂質地盤の場合と比較して、盛土上部の水平土圧が大きく、盛土底部では小さくなる傾向がみられた。この傾向は既往の実験的研究⁴⁾および解析的研究⁵⁾でも指摘されており、本実験結果は定性的には妥当な結果を与えていると考えられる。図-7 は既往の数値解析による盛土内の水平有効応力分布⁵⁾を示したものである。この解析では東日本大震災で被災した江合川の粘性土地盤上の堤防（堤体高さ約 5m、底面幅約 23m、小段有）断面を対象としており、比較のために (a) に基礎地盤を砂質地盤とした仮想的なケースを (b) に実際の条件で解析したケースを示している。図-6 同様に粘性土基礎地盤では盛土上部の水平土圧が大きく、盛土底部では小さくなる傾向がみられる。

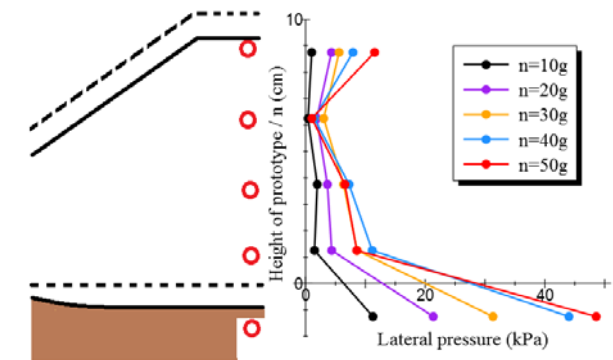


(a) 水平土圧

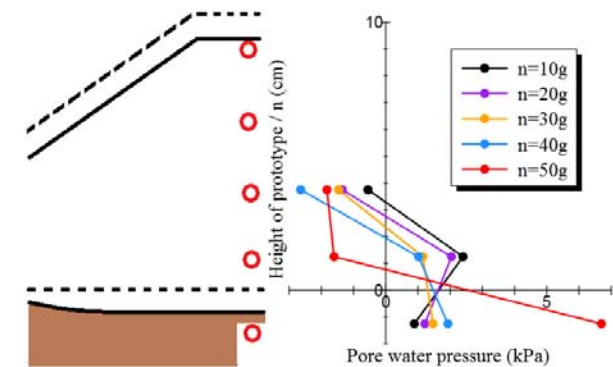


(b) 間隙水圧

図-3 水平土圧及び間隙水圧の深度分布（砂質地盤）



(a) 水平土圧



(b) 間隙水圧

図-4 水平土圧及び間隙水圧の深度分布（粘性土地盤）

5. まとめ

本研究では、遠心模型実験を用いて、砂質土基礎地盤および粘性土基礎地盤において、遠心加速度増加過程における盛土の内部状態の変化を土圧・間隙水圧について検討した。その結果、砂質土基礎地盤の盛土の水平土圧分布に対して、粘性土基礎地盤上の盛土は上部で圧縮応力が大きく、下部では圧縮応力が小さくなった。これは、粘性土地盤の盛土荷重による大きな変形に起因するものであり、既往の実験結果や解析結果と調和的な結果である。

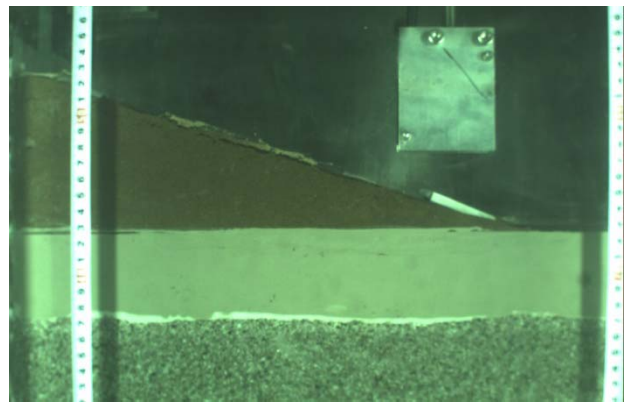
今後、盛土の形状、粘性土地盤の厚さや剛性の違い、さらには盛土の築堤過程や降雨などが盛土内の内部状態に与える影響をさらに検討する予定である。さらに不飽和連成解析も実施し、盛土内の飽和領域や低拘束圧領域の定量的評価手法を検討する。最後に動的不飽和連成解析を用いて、飽和領域や低拘束圧領域が堤体の地震時変形量に与える影響を明らかにし、合理的な変形予測手法を提案する予定である。

謝辞

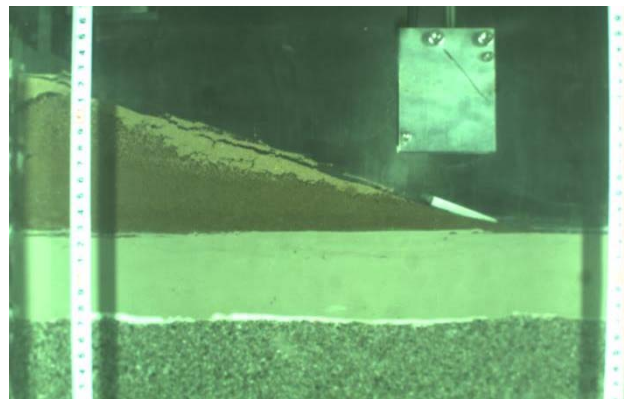
本研究は(財)国土技術研究センターの研究開発助成に基づいて実施したものです。研究の実施にあたり、佐々木康先生(広島大学名誉教授、JICE 技術顧問)には貴重な助言を頂きました。実験結果は徳島大学大学院博士前期課程の下河太一氏、居上靖弘氏によるものです。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省東北地方整備局: 北上川等堤防復旧技術検討会報告書, 2011.
- 2) Sasaki, Y., Oshiki, H. and Nishikawa, J.: Embankment failure caused by the Kushiro-oki earthquake of January 15, 1993, Performance of Ground and Soil Structure during Earthquakes, 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 61-68, 1993.
- 3) Kaneko, M., Sasaki, Y., Nishikawa, J., Nagase, M. and Mamiya, K.: River dike failure in Japan by earthquakes in 1993, 3rd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 495-498, 1995.
- 4) Okamura, M., Tamamura, S. and Yamamoto, R.: Seismic stability of embankments subjected to pre-deformation due to foundation consolidation, Soils and Foundations, 53(1), 11-22, 2013.
- 5) Uzuoka, R. and Semba, K.: Numerical analysis of liquefaction in a river levee on soft cohesive ground, Journal of Disaster Research, 7(6), 711-717, 2012.



(a) 10g



(b) 50g

図-5 模型側面の様子布(粘性土地盤)

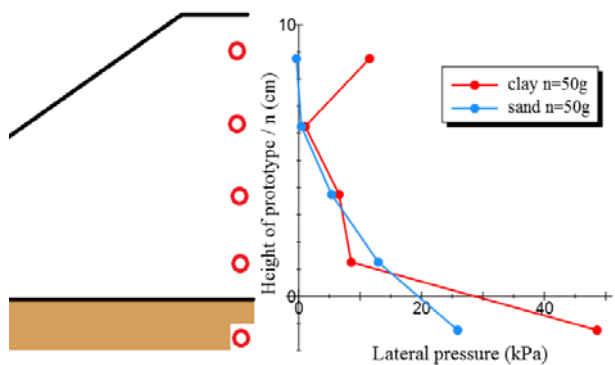
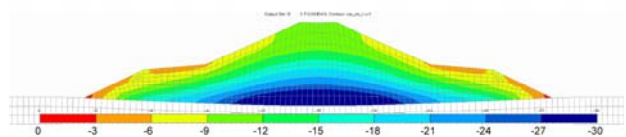
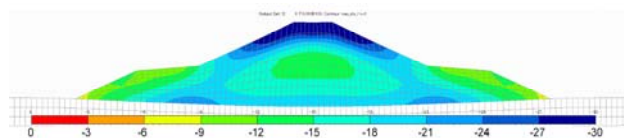


図-6 水平土圧深度分布 (50g 場)



(a) 砂質土基礎地盤



(b) 粘性土基礎地盤

図-7 数値解析による水平有効応力の分布⁵⁾