

堤体液状化発生時の堤防の地震時挙動に関する実験的検討

独立行政法人土木研究所 正会員 ○谷本俊輔, 荒木裕行, 石原雅規, 佐々木哲也

1. はじめに 東北地方太平洋沖地震においては、堤体下部に形成された飽和域の液状化により、河川堤防に著しい被害が生じたと見られる事例が多数確認された¹⁾。著者らは、堤体の液状化による被災事例のマクロ傾向分析から被害に影響を及ぼす要因を分析²⁾するとともに、堤体の液状化による被害を抑制するための対策工法の方方向性を実験的に検討してきた³⁾。本報では、堤体の液状化による堤防の地震時挙動について理解を深めるため、動的遠心力模型実験の結果を詳細に分析した結果を報告する。

2. 実験方法 動的遠心力実験は遠心加速度 50 G で実施したものである。以降に示す数値は実物スケールに換算した値である。

図-1 に示す通り、軟弱粘性土上において砂質土で築かれた堤体を想定した模型を作製した。粘土地盤にはスミクレーを用い、土槽内で 40 kPa の圧力で予圧密を行った後、堤体直下を地表面から最大深さ 1m の弧状に掘削した。実際の堤体底部のめり込み沈下は堤体荷重による粘土地盤の圧密の影響によるものが多いと考えられるが、寸法に制約のある模型内で実事例相当の圧密量を再現すると粘土材料の強度が不足したことから、やむなく掘削によりめり込み沈下を表現することとした。堤体については江戸崎砂と東北硅砂特8号を乾燥重量比 1:1 の比率で混合した材料を用い、締固め度は $D_c=82\%$ とした。

入力地震動は、道路橋示方書に示される地表面での動的解析用波形のうち L2 タイプ I 地震動・II 種地盤の波形(板島橋)とし、土槽底面からの入力にあたって下方への逸散減衰の影響等を勘案し、振幅を 0.7 倍に調整した。

3. 加振中における天端の沈下量と過剰間隙水圧の変化

加振前後における画像を基に作成した堤体の変形状況のスケッチを図-2 に示す。また、天端の沈下量、堤体下部の過剰間隙水圧、堤体下面における加速度の時刻歴を図-3 に示す。過剰間隙水圧の時刻歴に示す有効上載圧 σ_v' は、個々の間隙水圧計設置位置における土被り厚と堤体内水位を画像から読み取って計算した値である。なお、加振前の間隙水圧計による計測値から求めた堤体内水位は、画像の読み取りから計算した値とほぼ等しい値であった。

加振による天端沈下量は 68.0~80.3cm であり、天端直下 (P4) ~裏のり下部 (P5) で加振による過剰間隙水圧の上昇が比較的大きいこと、両のり尻 (P2, P6) では過剰間隙水圧があまり上昇していないことが分かる。小型圧力センサー(図-1)による堤体内の水平方向の土圧の計測結果によると、遠心加速度が 50 G に達した時点から堤体荷重による圧密(天端直下の沈下計で 7.5cm)が完了するまでの間に、堤体下部における水平土圧 (EP1) は 25 %程度低下した。これは、圧密沈下に伴って生じる堤体下部の側方伸張変形により応力緩和が生じたものと解され、天端直下付近での過剰間隙水圧比が大きいことの一因⁴⁾であると考えられる。一方、のり尻付近では上方の盛土厚さに比して水位が相対的に高いものの、大きな初期せん断を受けていたため、過剰間隙水圧が上昇しにくかったものと考えられる。

図-2 に示す加振前後での堤体の変位ベクトルからは、天端直下付近は鉛直下向きに、両のり中腹付近からは盛土の外側に向かって変形していることがわかる。過剰間隙水圧が大きく上昇した天端直下付近の領域がほぼ等方応力状態に至り、せん断抵抗を發揮できなくなると、水圧上昇域の側圧が増加する。この側圧を受けた水圧上昇域の側方(のり尻周辺)の盛土が外側に押し出されるように変形すると、水圧上昇域には水平方向の伸張変形と、これに伴う鉛直方向の圧縮変形が生じる(図-4)。堤体下部の飽和域がこうに変形すれば、その上部の不飽和域の盛土はこれに追従し、引張亀裂を生じつつ不連続に変形する。これが本実験における堤防の変形メカニズムであると考えられる。なお、東北地方太平洋沖地震では、堤防が原形をとどめないほどの大変

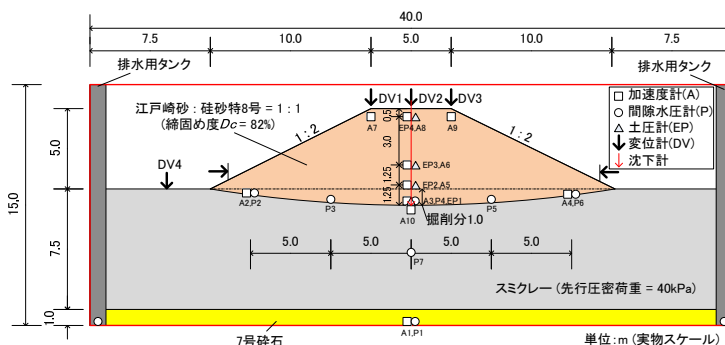


図-1 模型概要

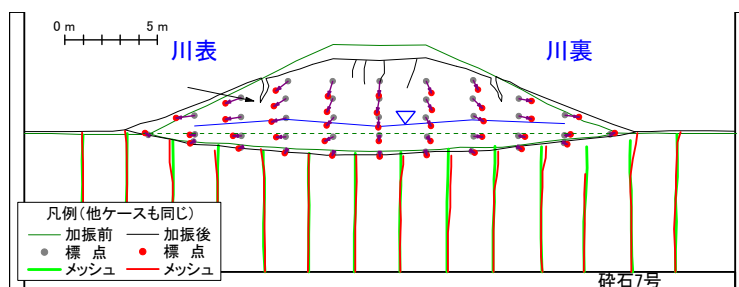


図-2 変形状況のスケッチ

キーワード 堤防, 液状化, 耐震対策, レベル2地震動

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 独立行政法人土木研究所 TEL029-879-6771

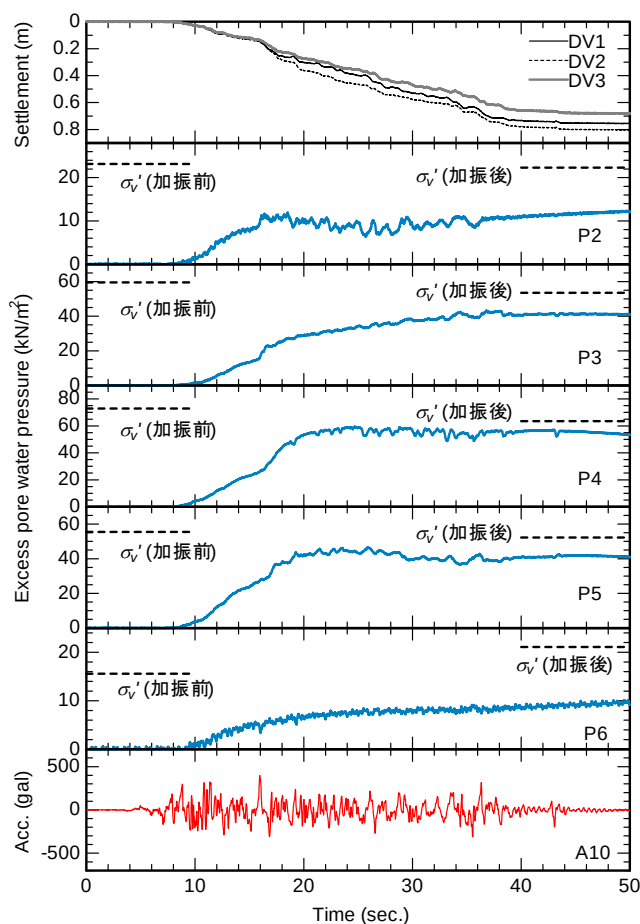


図-3 沈下量，過剰間隙水圧，加速度の時刻歴

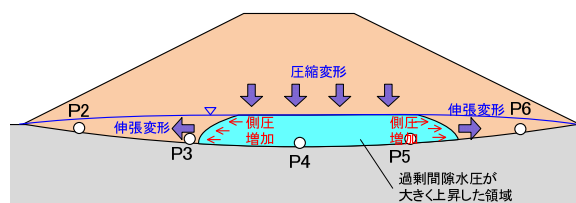


図-4 本実験における堤体下部の水圧上昇域の変形模式図

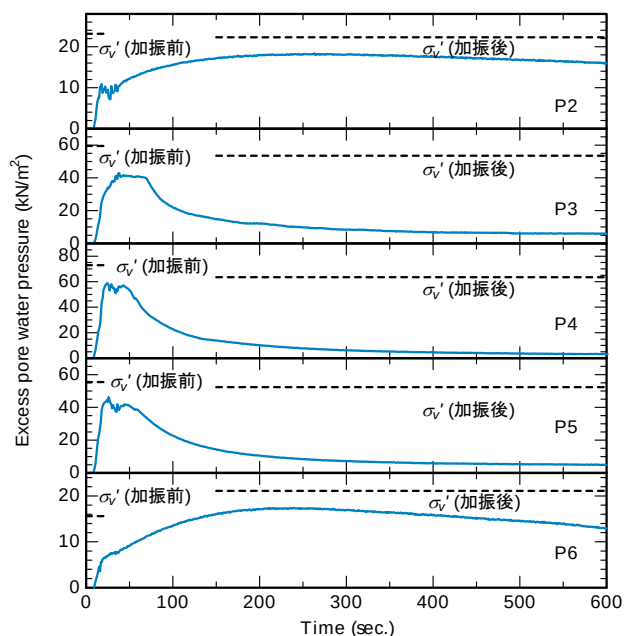


図-5 加振後の過剰間隙水圧の変化

形を生じた事例がいくつか見られたが、本実験における盛土の

変形はそこまで顕著ではない。この原因としては、本実験におけるのり尻付近の過剰間隙水圧の上昇が小さかったため、のり尻付近が、堤体中央部の水圧上昇域から受ける側圧や、盛土形状に起因するせん断応力の作用に対して顕著な変形を生じなかったことが考えられる。

4. 加振後における過剰間隙水圧の変化 加振開始～600 秒後までの堤体下部の過剰間隙水圧の変化を図-5 に示す。加振が終了したのは約 50 秒であり、天端直下 (P4) および裏のり中腹の直下 (P5) では加振終了とともに水圧の消散が始まっているのに対し、表のり中腹の直下 (P3) では 70 秒程度まで水圧を保持していること、両のり尻 (P2, P6) では 250 秒程度まで上昇し続けていることが分かる。本実験では堤体下部の飽和域の厚さが最大でも 1.35m 程度と薄い、過剰間隙水圧の消散過程の浸透流には、上方の水面境界に向かう流れだけでなく水平方向の流れも存在する。これは、加振によって特に堤体中央部の過剰間隙水圧が著しく上昇したため、堤体中央部からのり尻に向かう動水勾配が形成された結果であると考えられる。また、堤体の中でも飽和部に比べて不飽和部の透水性が低いことが、水平方向の浸透流に関与しているかもしれない。本実験では、加振後の水圧消散過程で盛土の変形が進行することにはなかったが、のり尻付近に浸透流が著しく集中する場合は、のり尻付近の過剰間隙水圧の上昇、浸透圧の作用により浸透破壊につながる可能性も考えられる。今後、さらなる検討が必要な問題である。

5. まとめ 堤体下部に飽和層を有する堤防を想定した動的遠心模型実験を実施し、過剰間隙水圧と堤体の変形に着目して検討した。本実験における堤防の変形メカニズムとしては、圧密時に天端直下付近において水平応力の緩和が生じていたことが関与し、堤体内水位以深の過剰間隙水圧の上昇は盛土中央部で大きく上昇したため、この水圧上昇域の側圧が増加することで水圧上昇域の水平方向の伸張変形、鉛直方向の圧縮変形が生じたものと考えられる。また、加振後の過剰間隙水圧消散過程では、水平方向への浸透流が存在し、のり尻付近では加振後しばらく経った後に間隙水圧が上昇する様子が確認された。

参考文献 1) 河川堤防耐震対策緊急検討委員会：東日本大震災を踏まえた今後の河川堤防の耐震対策の進め方について 報告書，2011.9. 2) 谷本ら：東北地方太平洋沖地震における堤体液状化の要因分析，河川技術論文集，第 18 巻，2012.6. 3) 荒木ら：法尻の安定化を目的とした堤体盛土の液状化対策，第 48 回地盤工学研究発表会，2013.7 (投稿中) 4) Okamura M., Tamamura S.: Seismic stability of embankment on soft soil deposit, *Int. J. of Physical Modeling in Geotechnics*, 11(2), pp.50–57, 2011.