

グラベルドレーン工の透水性および剛性が河川堤防の液状化被害抑制に及ぼす影響の検討

河川堤防 グラベルドレーン 液状化

名古屋大学 特別会員 ○蜂須賀 有哉

国際会員 豊田 智大, 野田 利弘

1. はじめに

東日本大震災後の既設堤防被害状況調査において、基礎地盤にグラベルドレーンが施工された区間においては大規模変状を生じなかったことから、大規模地震に対する河川堤防の液状化対策工として「グラベルドレーン工法」が注目を集めている¹⁾。しかし、その有効性に反し、その性能照査手法は未だ確立されていないことから、現行の河川堤防の液状化対策の手引き²⁾では、同工法に関する記載が欠落している。この状況を踏まえ、「河川堤防の液状化対策の手引き検討委員会」においては、同手引きの改訂に向けたグラベルドレーンの性能照査手法の検討が進められてきた。

一方、既報³⁾ではドレーン工を有する砂地盤～盛土系の地震応答解析を、間隙水の静的浸透を仮定する $u-p$ formulation (以下、単に $u-p$ と記す) と間隙水の動的浸透を考慮する $u-w-p$ formulation⁴⁾ (以下、単に $u-w-p$ と記す) でそれぞれ実施し、ドレーン工を有する河川堤防の地震時変形予測手法としての $u-p$ の限界と $u-w-p$ の優位性が示された。これを受け、本稿では、その工法原理をより詳細に把握するため、ドレーン工の沈下抑制効果を透水性が向上したことの影響 (過剰水圧消散に寄与) と力学特性が異なる材料で置換したことの影響 (系の剛性増大に寄与) に分解し、これらを系統的に変化させた $u-w-p$ 解析を実施することで、ドレーン材による沈下抑制のメカニズムについて検討した結果を示す。

2. 解析条件

【有限要素メッシュ・境界条件】土木研究所による剛土槽を用いた砂地盤～盛土系の 50G 遠心力模型実験¹⁾ (図 1, Case1: 無対策, Case2: ドレーン工あり) を参考に、図 2 に示す実規模の有限要素メッシュを作成し、Case A～E (表 1) の 5 ケースに対して $u-w-p$ で解析を行った。模型底面および側面は非排水条件とした。

【解析手法】 $u-w-p$ 解析は、弾塑性構成式 SYS Cam-clay model を搭載した飽和地盤の動的／静的有限変形解析コード GEOASIA⁵⁾を、間隙水の相対加速度を考慮する形で高度化した Noda and Toyoda⁴⁾による。

【入力地震動】入力波は模型実験に準拠し、新晩翠橋 NS 成分の地表面加速度の振幅を 0.8 倍したものの (図 3, 継続時間 240 sec, L2 地震動を想定) を模型底面・側面に水平方向に入力した。最大加速度は 550 gal 程度であり、地震入力開始後約 100 sec 後に達成される。

【材料定数・初期状態】ドレーン周辺地盤に関して、透水係数は、事前に実施された室内透水試験結果を参照しつつ、図 2 のように与えた。力学特性は、簡単のため、表 2 に示す江戸崎砂のパラメータで統一した。また、ドレーン材の領域については、透水係数を表 1 のように「周辺地盤と同等」「礫質土相当」「非排水」の 3 種類で与えた。なお、ドレーン部の透水係数は、基礎地盤とドレーン材の透水係数を奥行き方向の占有面積比に応じて合成したものを用いている。また、弾塑性パラメータおよび初期状態は、表 2 のように「周辺地盤と同等」「疑似礫質土」の 2 種類で与えた。なお、江戸崎砂のパラメータは、先行研究⁶⁾で実施された要素試験結果に対し同定されたものである。また、疑似礫質土のパラメータは、筆者ら⁷⁾が実施した実河川堤防礫質土のCU試験の応力経路を参考に、礫質土の方が同一の締固め度で砂より緩結めの挙動を呈することを踏まえ、江戸崎砂の正規圧密線の切片 N やその他パラメータを調整したものである。

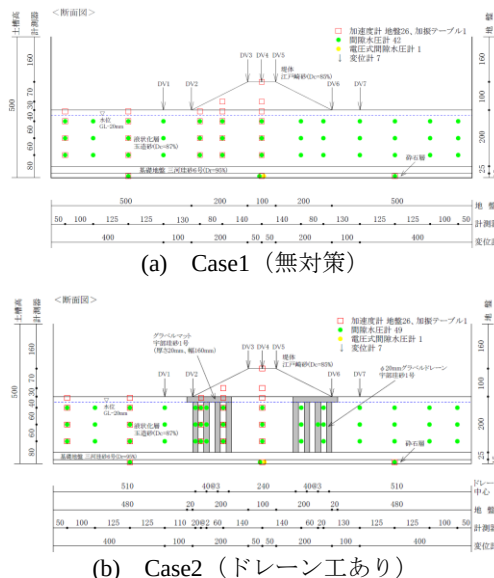


図 1 遠心力模型実験¹⁾

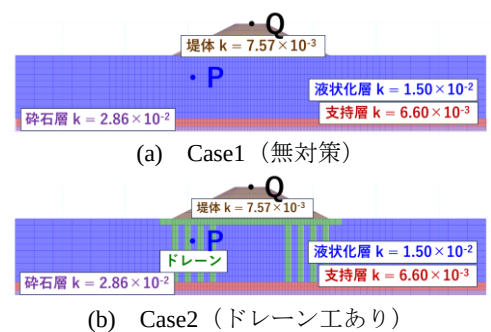


図 2 有限要素メッシュと境界条件

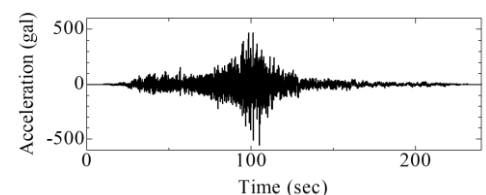


図 3 入力地震動 (新晩翠橋 NS 成分×0.8)

表 1 解析ケース

	江戸崎砂	疑似礫質土
周辺地盤と同等 $k = 1.5 \times 10^{-2}$ cm/s	Case A	-
非排水 $k_D = 9.50 \times 10^{-3}$ cm/s	Case B	Case D
礫質土相当 $k_D = 9.26 \times 10^{-1}$ cm/s	Case C	Case E

表 2 材料定数および初期状態

	江戸崎砂	疑似礫質土
物性値		
土粒子密度 ρ^s (g/cm ³)	2.65	2.65
弾塑性パラメータ		
圧縮指数 λ	0.050	0.050
膨潤指数 $\bar{\kappa}$	0.012	0.012
限界状態定数 M	1.20	1.20
正規圧密線の切片 N	1.98	1.76
ポアソン比 ν	0.30	0.30
発展則パラメータ		
正規圧密土化指数 m	0.080	0.080
構造劣化指数 a	1.00	2.20
回転硬化指数 b_r	3.50	3.50
回転硬化限界定数 m_b	0.70	0.70
初期条件		
初期過圧密比 $1/R_0$	分布	分布
初期構造の程度 $1/R_0^*$	2.00	5.00
初期土圧係数 K_0	0.60	0.60
初期間隙比 e_0	0.90	0.90

3. 解析結果

【透水性】有効応力減少比分布は図 4，ドレーン近傍の点 P における有効応力減少比および天端沈下量の時刻歴は図 5 で示す。Case A と Case B は有効応力減少比の分布および時刻歴にほとんど差を生じず，天端沈下量も同程度であった。一方，Case C ではドレーン近傍での有効応力低下が抑制され，天端沈下量も 10% 程度低減できている。また，Case D と Case E の比較においても，同様の傾向を示している。したがって，ドレーンによる透水性の向上が沈下の抑制に寄与していることが確認された。

【剛性】Case B と Case D，Case C と Case E のいずれの比較においても，有効応力減少比の分布や時刻歴，沈下量に大差はないことから，ドレーン材で置換したことによる複合地盤系の力学特性の変化は限定的であるといえる。

4. おわりに

ドレーンの透水性や剛性を系統的に変化させた u - w - p 解析を実施し，沈下抑制効果としては透水性向上の影響が支配的で，置換材の力学特性の影響は限定的であることを示した。今後は，液状化層とドレーン材の透水係数比を細かく変化させることで，沈下抑制効果の高い透水係数比の範囲を調べるとともに，周辺地盤の地層構成の影響も検討してゆきたい。

謝辞 (一財) 国土技術研究センターの「河川堤防耐震対策高度化研究会」を通じて，土木研究所石原上席研究員から資料⁹⁾記載データをご提供いただいた。また，科学研究費補助金（若手研究：課題番号 22K14324）の補助を受けた。

参考文献

- 青柳，石原，佐々木，田川 (2021): 河川堤防の地震時変形とグラベルドレーン工法を…，第 56 回地盤工学研究発表会，12-6-3-05.
- 土木研究所(2016): 河川堤防の液状化対策の手引き，15-33.
- 豊田，野田 (2024): ドレーン工を有する砂地盤へ盛土系の地震応答解析における u - w - p …，第 59 回地盤工学研究発表会，24-10-3-06.
- Noda, T. and Toyoda, T. (2019): Development and verification of a soil-water coupled finite deformation analysis…，*S&F*, **59**(4), 888-904.
- Noda, T. et al. (2008): Soil-water coupled finited deformation analysis based on a rate-type equation of motion…，*S&F*, **48**(6), 771-790.
- 国土技術研究センター (2002): 河川堤防の地震時変形量の解析手法，JICE 資料第 102001 号，A1-A2.
- 蜂須賀，山下，小高，李，久保 (2024): 変位制御繰返し載荷試験による細粒分を含まない…，土木学会中部支部研究発表会，III-31.

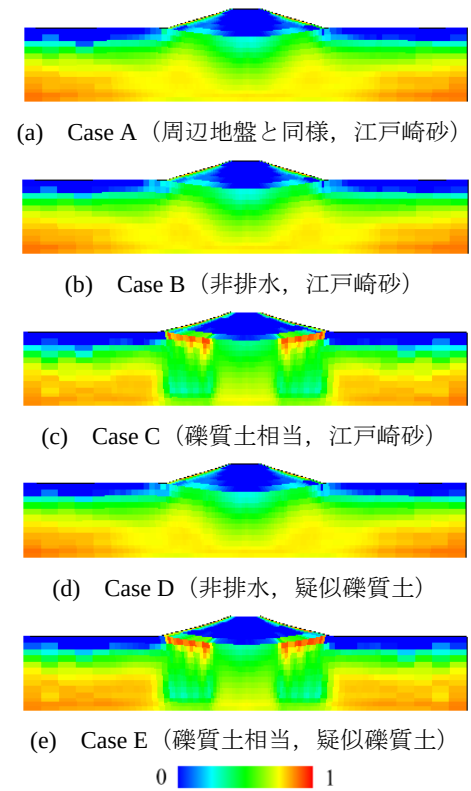
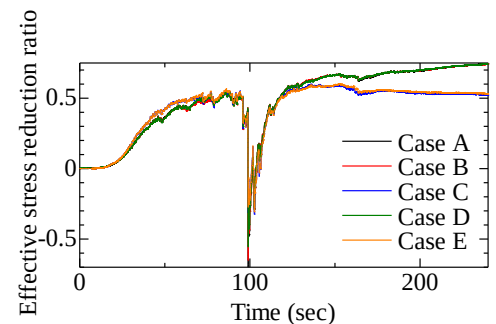
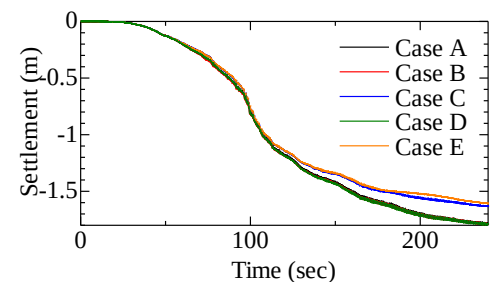


図 4 有効応力減少比分布 (150 sec)



(a) 有効応力減少比～時間関係 (点 P)



(b) 沈下～時間関係 (天端中央 Q)

図 5 解析結果