

ドレーン工を有する砂地盤～盛土系の地震応答解析における $u-w-p$ formulation の優位性

河川堤防 グラベルドレーン 数値解析

名古屋大学 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、地盤の動的変形解析手法としては、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) に基づく水～土骨格連成解析が主流であるが、ドレーン材のような高透水性領域を有する地盤の液状化解析においては、 $u-p$ による計算が実行不能に陥ることが知られており、計算を安定して遂行するためには、間隙水の動的浸透を考慮する $u-w-p$ formulation³⁾ (以下、単に $u-w-p$ と記す) の適用が必要不可欠となる。本稿では、ドレーン工を有する砂地盤～盛土系の地震応答解析を $u-p/u-w-p$ による比較を通じて、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 $u-w-p$ の優位性を示す。また、 $u-w-p$ により解かれたドレーン内流速場の可視化事例を紹介する。

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、Case1, Case2 に対し、 $u-p$, $u-w-p$ でそれぞれ解析を行った。模型底面および側面は非排水条件とした。

【解析手法】 $u-p$ 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 GEOASIA⁴⁾による。 $u-w-p$ 解析は同手法を間隙水の相対加速度を考慮する形で高度化した Noda and Toyoda³⁾による。

【入力地震動】入力波は模型実験に準拠し、新晩翠橋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、時刻 100 sec 付近で達成される。

【材料定数・初期状態】事前に実施された室内透水試験結果を参照しつつ、簡単のため、ドレーン材以外の領域の透水係数を $k = 1.5 \times 10^{-2}$ cm/s, ドレーン材の透水係数を $k_D = 1.5 \times 10^0$ cm/s (透水係数比: $k_D/k = 100$) とした。また、ドレーン材の排水効果のみを議論の対象とし、ドレーン材で置換したことによる強度増加は考慮しない。そこで簡単のため、弾塑性パラメータおよび初期状態は表 1 の値を模型全体で共通に与えた。なお、表中のパラメータは先行研究⁵⁾で実施された江戸崎砂の要素試験結果に対し同定されたものである。

3. 解析結果

【Case1】Case1 (無対策の場合) について、 $u-p$ により得られる過剰水圧分布は図 4(a), 盛土直下の点 C における過剰間隙水圧および天端沈下量の時刻歴は図 5 緑線で示す。

紙幅の都合上割愛するが、本ケースでは $u-w-p$ 解は $u-p$ 解と概ね一致する結果となった。これは、模型全域の透水係数が砂程度であり、間隙水の動的浸透の影響が比較的小さく、 $u-p$ の静的浸透仮定が妥当したことによる。

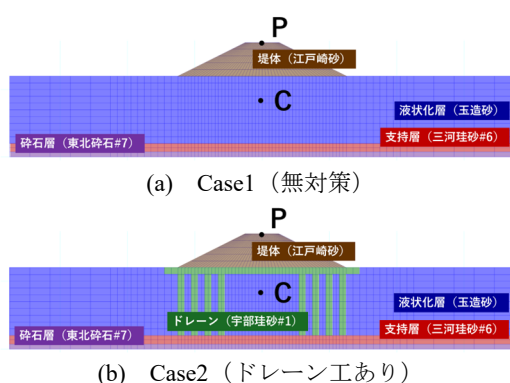
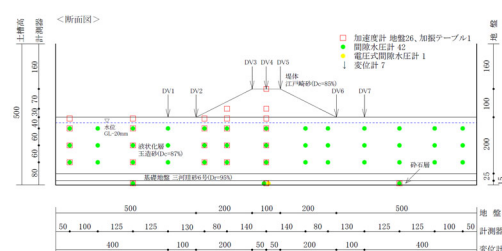
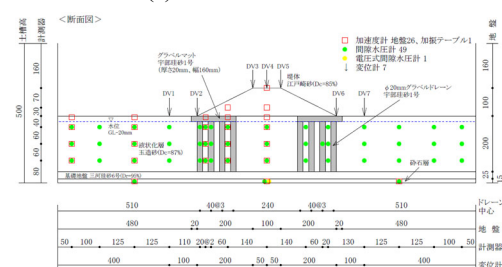


図 2 有限要素メッシュと境界条件



(a) Case1 (無対策)



(b) Case2 (ドレーン工あり)

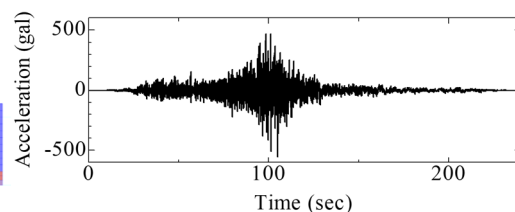
図 1 遠心力模型実験¹⁾

図 3 入力地震動 (新晩翠橋 NS 成分×0.8)

Superiority of $u-w-p$ formulation in seismic response analysis of sandy ground – embankment system with drain, Toyoda, T., Noda, T., Nagoya University

【Case2】Case2（ドレーン工ありの場合）について、 $u-w-p$ による解析結果を図 4(b), および図 5 青線で示す。Case1 に比べ、ドレーン近傍での過剰間隙水圧上昇が抑制され（図 4）、天端沈下量も無対策の場合に対し 10%程度低減できていること（図 5(b)）から、グラベルドレーン工法の有効性が確認された。これは、ドレーン工の過剰水圧消散機能により

平均有効応力減少による地盤の剛性低下が抑制されたことによる。また、図 6 はドレーン内の相対平均流速分布であり、ドレーン部において鉛直上向きの流速が卓越して発生する様子が確認された。

【 $u-p$ formulation の限界と $u-w-p$ formulation の優位性】Case2 に $u-p$ を適用すると、解析途中でドレーン近傍の過剰間隙水圧が次第に発散し、時刻 100 sec 近傍で求解不能に陥る結果となった（図 5 赤線）。これは、解析において地盤の不安定化に伴う step 毎の変位量増大に応じて時間刻み幅 Δt を小さくしてゆく必要があるが、このとき高透水性領域において $u-p$ の離散化方程式に破綻を生じるためである⁴⁾。これに対し、 $u-w-p$ では 100 sec 以降も破綻することなく計算を継続可能であることから、高透水性領域を有する地盤の地震応答解析における $u-w-p$ の優位性が示された。

なお、高透水性土の $u-p$ 計算が破綻する場合に、その透水係数を $u-p$ 計算が可能となる範囲まで引き下げて解析を行う場合があるが、これは適切とは言いがたい。図 5(b) 橙線・紫線は、 $u-p$ 計算が継続可能となるよう、ドレーンの透水係数 k_D をそれぞれ 3.0×10^{-1} , 1.5×10^{-1} cm/s ($k_D/k = 20, 10$) まで引き下げた解析結果であるが、その解はむしろ Case1（無対策）と一致しており、ドレーンの排水性能を適切に評価できていない。このことから、グラベルドレーンが効くような透水係数の範囲においては、 $u-w-p$ の適用は必須であるといえる。

【 $u-w-p$ 解析の留意点】ただし、 $u-w-p$ 計算においては、ドレーン内の流速場を十分に解像できるだけのメッシュ分割をしなければ、ドレーンの排水性能を十分に評価することは難しい。紙幅の都合上割愛するが、図 2(b)において盛土直下のドレーン部における水平方向の要素分割を 2 倍粗くして解析を行ったところ、解は Case1（無対策）と同様の傾向を示す結果となった。これは、ドレーン幅を一要素とした場合、ドレーン内に流速の自由度が存在しないため、図 6 のようなドレーン内の流速場を再現することができないことによる。

4. おわりに

高透水性領域（ドレーン工）を有する盛土～地盤系の地震応答解析を $u-p/u-w-p$ でそれぞれ実施し、 $u-p$ の限界と $u-w-p$ の優位性を示した。また、透水係数を落とした $u-p$ 解析によってはドレーンの性能を適切に評価することは難しいこと、 $u-w-p$ 解析においてはドレーン内の流速分布を解像可能なメッシュ分割が重要となることを指摘した。

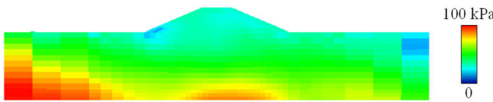
謝辞 （一財）国土技術研究センターの「河川堤防耐震対策高度化研究会」を通じて、土木研究所石原上席研究員から資料⁵⁾記載データをご提供いただいた。また、科学研究費補助金（若手研究：課題番号 22K14324）の補助を受けた。

参考文献）

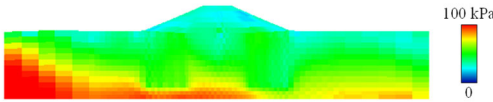
1) 青柳, 石原, 佐々木, 田川 (2021): 河川堤防の地震時変形とグラベルドレーン工法を施した…, 第 56 回地盤工学研究会, 12-6-3-05.
2) 土木研究所(2016): 河川堤防の液状化対策の手引き, 15-33.
3) Noda, T. and Toyoda, T. (2019): Development and verification of a soil-water coupled finite deformation analysis…, *S&F*, **59**(4), 888-904.
4) Noda, T. et al. (2008): Soil-water coupled finited deformation analysis based on a rate-type equation of motion…, *S&F*, **48**(6), 771-790.
5) 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.

表 1 材料定数

物性値	
土粒子密度 ρ^s (g/cm ³)	2.65
弾塑性パラメータ	
圧縮指数 λ	0.050
膨潤指数 κ	0.012
限界状態定数 M	1.00
正規圧密線の切片 N	1.98
ポアソン比 ν	0.30
発展則パラメータ	
正規圧密土化指数 m	0.060
構造劣化指数 a	1.00
回転硬化指数 b_r	3.50
回転硬化限界定数 m_b	0.90
初期条件	
初期過圧密比 $1/R_0$	分布
初期構造の程度 $1/R_0^*$	2.00
初期土圧係数 K_0	0.60
初期間隙比 e_0	0.90

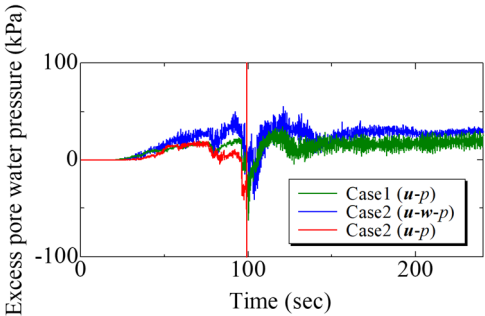


(a) Case1（無対策, $u-p$ ）

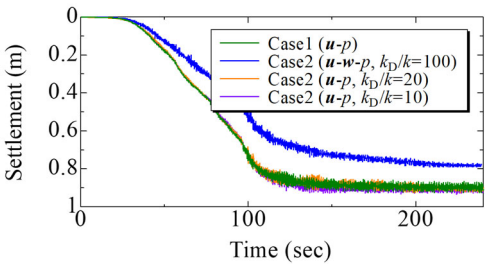


(b) Case2（ドレーン工あり, $u-w-p$ ）

図 4 過剰間隙水圧分布（80 sec）



(a) 過剰間隙水圧～時間関係（点 C）



(b) 沈下～時間関係（天端中央 P）

図 5 解析結果

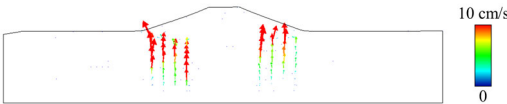


図 6 相対平均流速分布（120 sec）