

### 排水工を施した不飽和道路盛土の動的遠心模型実験とそのシミュレーション

京都大学大学院 正会員 ○肥後 陽介, 木村 亮, 木元 小百合  
 京都大学大学院 フェロー 岡 二三生  
 京都大学大学院 (現ジェイアール西日本コンサルタンツ(株)) 正会員 土井 達也  
 京都大学大学院 李 忠元  
 京都大学大学院 学生会員 衣川 哲平

#### 1. はじめに

我が国ではこれまで、地震により道路盛土が崩壊する事例が発生してきている。これらの被害の主要な原因として、地下水や雨水の浸透などにより盛土内の水分量が多かったことが指摘されており<sup>1)</sup>、水分履歴を考慮した不飽和道路盛土の耐震性の評価と強化が重要である。この事から本研究グループでは、遠心模型実験と多相連成動的解析法によるシミュレーションを通して、盛土の地震時の変形メカニズムを明らかにするとともに、不飽和盛土の耐震性の評価法を確立する事を目的とし研究を進めている<sup>2)</sup>。本報では、排水工を施した不飽和盛土の動的遠心模型実験を実施するとともに、多相連成弾塑性有限要素法によるシミュレーションを行った結果を示し、これらの結果にもとづいて排水工による盛土強化の効果と解析手法の適用性を示す。

#### 2. 動的遠心模型実験

実験には淀川の堤防の改修に用いられる砂質土を用いた。試料は 2mm 以下に粒度調整し、 $D_{50}$  は 0.29mm、細粒分含有率は 26.8% である。また、最適含水比  $w_{opt}$  は 13.7% で、最大乾燥密度  $\rho_{dmax}$  は  $1.861g/cm^3$  であった。

模型地盤の模式図及び計測器位置を図 1 に示す。遠心加速度は 50g であり、プロトタイプ換算値で盛土高は 5m、勾配は 1:1.8、基礎地盤高さは 3m である。模型地盤は 14.5% の含水比に調整した試料を締固め度 90% になるように突き固めて作製した。なお、含水比 14.5% の試料で締固めを行うと作成中の乾燥の影響で実験時に最適含水比に近い含水比となる事が経験的に分かっている。法尻部に、3号珪砂 ( $D_{50}=1.30mm$ ) で厚さ 50cm、長さ 5m の層を作成し、排水工を模擬した。排水工はなるべく密に作成し、密度は  $1.332g/cm^3$  であった。

間隙流体には水を使用した。浸透現象と動的現象の時間に関する相似率が一致しないが、粘性流体として良く用いられるメトロゾ水溶液は表面張力が水よりも小さいため、サクシオンを正確に再現できない。水位調整タンクの水位は 6.75m に保ち、土槽右側面から土槽左側面の排水タンクに向かって水を浸透させた。

2 ケースの実験を実施し、一方は排水工無しで他方は排水工を設置した。浸透過程では間隙水圧をモニタリングし、ほぼ定常状態となった事を確認した後に、加振し動的過程へと移った。入力波として、最大加速度 400gal 程度、振幅 75mm、周波数 1Hz、主要動 20 波のテーパつき正弦波を使用した。

#### 3. 弾塑性構成式を用いた多相連成動的有限要素解析

多孔質媒体の混合体理論に基づき、固相、水相、気相の運動量保存則、質量保存則を Darcy の法則に従う相互作用を適用して定式化した。解法には u-p 定式化を適用し、液状化解析法 LIQCA<sup>3)</sup> と同様の方法で動的有限要素法定式化を行った。本研究では、固相と水相を非圧縮と仮定する一方で、間隙空気の圧縮性が十分に大きい事を考慮する簡易三相法を適用した。構成式には砂の繰返し弾塑性構成式<sup>5)</sup>を用いた。応力変数には、不飽和土の力学特性を記述するために骨格応力<sup>4)</sup>を用いた。定式化の詳細は参考文献を参照されたい<sup>4)</sup>。

解析モデルと境界条件は実験を模擬した条件とした(図 2)。盛土右側は静水圧の流入境界(定水位境界)とし、盛土左側は底面から 1.5m の要素を排水境界にした。土槽との境界は非排水境界、それ以外は間隙水圧が負の時は非流入境界、正の時は排水境界とした。解析に用いた材料定数を表 1 に示す。排水工は透水係数を盛土材の 100 倍としてモデル化した。また、流入境界部の水平透水係数は 1/10 倍とした。止水を入念に行っても水が土槽境界を流れやすく、盛土内部への流入速度が相対的に遅くなる事を再現するためである。また、盛土内が不飽和浸透流れになっている事から<sup>2)</sup>、空気との混合体とみなして水の体積弾性係数を低減した。

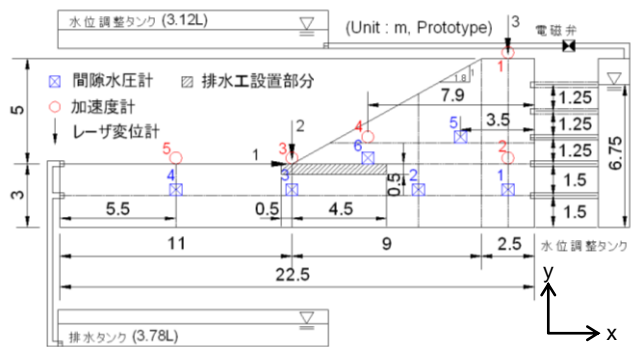


図 1 実験の模型地盤模式図と計測器配置図

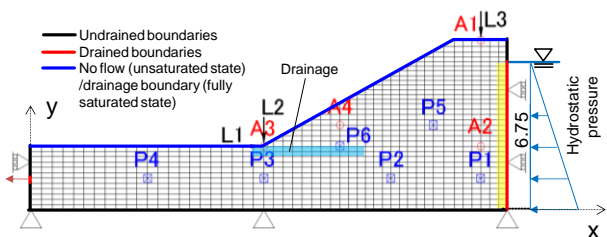


図 2 解析モデルと境界条件

キーワード：盛土, 排水工, 遠心模型実験, 多相連成弾塑性解析  
 連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスターC1 棟 583

表1 解析に用いたパラメータ

初期間隙比, $e_0$	0.589	異方性パラメータ, $C_d$	2000
圧縮指数, $\lambda$	0.0804	ダイレイタンシー係数, $D_0^*$	1.0
膨潤指数, $\kappa$	0.0001	ダイレイタンシー係数, $n$	2.0
正規化せん断弾性係数, $G_0/\sigma_{m0}'$	4000	規準ひずみ(塑性), $V_{ref}^{P^*}$	0.008
飽和透水係数, $k(m/s)$	$4.79 \times 10^{-5}$	規準ひずみ(弾性), $V_{ref}^{E^*}$	0.08
湿潤単位体積重量 $\rho_s(t/m^3)$	1.90	Rayleigh減衰の係数 $\alpha_0$	0
水の体積弾性係数, $K'$ (kPa)	6000	Rayleigh減衰の係数 $\alpha_1$	-0.0023
変相応力比, $M_m^*$	1.270	水分特性曲線パラメータ $a$ (1/m)	19.6
破壊応力比, $M_b^*$	1.270	水分特性曲線パラメータ $n'$	1.2
硬化関数中のパラメータ, $B_0^*$	10000	初期サクション(kPa)	-3.209
硬化関数中のパラメータ, $B_1^*$	150	初期飽和度	0.678
硬化関数中のパラメータ, $C_1$	50	重力加速度, $g(m/s^2)$	9.81
擬似過圧密比, $OCR^*$	1.3	高サクション下の体積含水率, $\theta_s$	0

表2 加振による変位量の比較 (単位: m)

	実験結果		解析結果	
	無し	有り	無し	有り
排水工				
法尻水平	-0.213	-0.131	-0.151	-0.098
法尻鉛直	0.024	0.004	0.025	-0.002
天端鉛直	-0.380	-0.184	-0.288	-0.192

4. 実験結果及び解析結果

浸透過程の間隙水圧時刻歴を図3に示す。解析結果は、実験の計測器設置位置の間隙水圧を示している。実験、解析共に、排水工を設置した事により法尻部(P6)の間隙水圧が低下している事がわかる。図4に示す解析で得られた間隙水圧分布図を見ても、排水工によって法尻部の間隙水圧が低下している事がわかる。P1, P2で解析に比べて実験の間隙水圧が低いのは、実験では不飽和浸透流れとなっており、上部を流れる水と間隙水圧計が完全に連結していないためと考えられる。

動的過程におけるレーザー変位計の計測結果と同設置位置での解析結果を表2に示す。排水工を設置したケースの変位量が小さくなっている事がわかる。また、

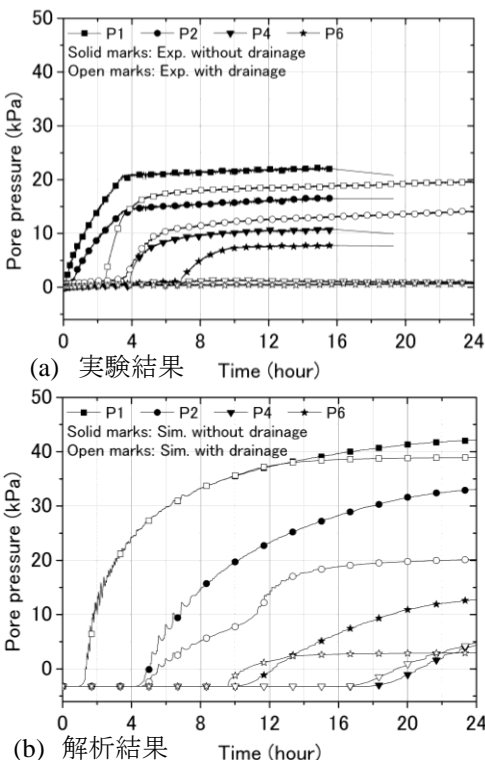


図3 浸透過程の間隙水圧時刻歴

解析結果は、実験結果を良く再現している。さらに、図5に示す蓄積塑性偏差ひずみ $\gamma^p (= \int (de_{ij}^p de_{ij}^p)^{1/2}, de_{ij}^p$ : 塑性偏差ひずみ増分テンソル) 分布図を見ると、排水工無しのケースの法尻部からのひずみの局所化が、排水工有りのケースでは見られない事がわかる。また、排水工が有る方がひずみの量が全体に小さい。図6には平均骨格応力減少比分布図を示す。排水工によって法尻付近への浸透が防がれているため、骨格応力減少比が小さくなっており、これが動的载荷による変形を抑制する排水工の主たる効果であると考えられる。

5. まとめ

浸透を考慮した不飽和道路盛土の動的遠心模型実験と多相連成動的有限要素解析によりそのシミュレーションを行った。これらの結果は、不飽和盛土の地震時変形挙動を明らかにするとともに、排水工による盛土強化の有効性を明らかにした。また、本解析手法の盛土の耐震性評価への適用性を示した。

謝辞：本研究は、国土交通省国土技術政策総合研究所の受託研究（道路政策の質の向上に資する技術開発，No. 21-4，2009-2012）の一部として実施した。記して謝意を表す。

参考文献：1) 佐々木哲也，杉田秀樹，大川寛，水橋正典，土木学会第63回年次学術講演会，仙台，III-034 (DVD-ROM)，pp.67-68, 2008., 2) 土井達也，肥後陽介，岡二三生，木村亮，木元小百合，李忠元，衣川哲平，第47回地盤工学研究発表会，八戸，2012（発表予定）.，3) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ，LIQCA2D11・LIQCA3D11（2011年公開版）資料，2011., 4) Oka, F., Kimoto, S., Kato, R., Sunami, S. & Kodaka, T., Proc. 12th Int. Conf. IACMAG, Singh, D.N. ed., 2029-2041, 2008., 5) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, T. & Yamashita, S., Géotechnique, 49(5), 661-680, 1999.

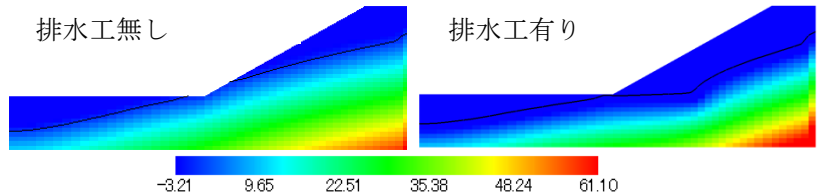


図4 間隙水圧分布図（解析結果，24時間浸透後，単位：kPa，図中の黒線は間隙水圧が0のコンターライン）

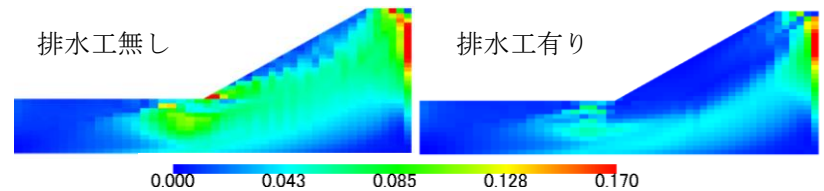


図5 蓄積塑性偏差ひずみ $\gamma^p$ 分布図（解析結果，30秒加振後）

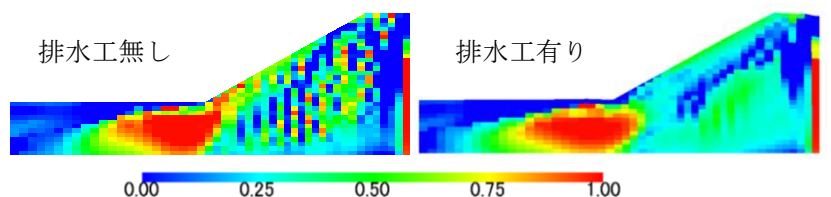


図6 平均骨格応力減少比分布図（解析結果，30秒加振後，初期値0.0で1.0で液状化を表す）