

道路斜面における液状化に因らないすべり発生量予測に関する研究 ～時間履歴解析による接近について～

鹿島建設技術研究所 正会員 ○李済宇 吉迫和生 大保直人
東京ガスパイプライン技術センター 正会員 坂上貴士

1. 研究の目的

緩斜面における地震時の地盤の永久変位(PGD; Permanent Ground Deformation)は地盤の液状化に伴う側方流動現象によるものが知られている。一方、液状化状態には至らない間隙水圧上昇による地盤強度低下に起因しても PGD が発生すると考えられるが、そのような液状化現象を伴わない斜面の PGD 発生量予測に関する研究は少ない。著者らは動的遠心模型実験により道路上の緩斜面を対象としたすべり実験とそのモデルを対象とした数値解析を実施し、地震時に発生する地盤液状化によらない斜面の PGD 発生量の定量的把握を図る研究を実施してきた。今回、PGD 発生量を定量的に予測することを目的として、繰返し載荷時の間隙水圧上昇による強度低下を考慮した時間履歴有効応力解析を実施し、斜面の傾斜角度、入力地震動の特性等による緩斜面における PGD 発生量を比較・検討したので、その結果について報告する。

2. 解析モデル概要

著者らが実施してきた遠心模型実験では図-1 と同様に不飽和砂層が上部地盤を、飽和シルト質砂層が下部地盤を形成する条件下で、正弦波を地震動として入力し実験を行い、加振時の下部斜面地盤(飽和粘土質砂層)での過剰間隙水圧の上昇と非可逆的せん断変形の発生を確認している。なお、殆どのせん断変形が下部斜面地盤にて発生していることから、遠心模型実験において緩斜面の水平変位は地震動の振幅によって発生する地盤変位に加え、下部斜面地盤での有効応力の低下に伴う塑性変形に大きく起因すると考えられる。これらの実験結果を踏まえ、今回の数値解析においても加振時繰返しせん断荷重による飽和層での過剰間隙水圧の発生を再現するため、有限差分法をベースとした FLAC2D V5.0(Fast Lagrangian Analysis of Continua²⁾)を採用し、式-1 に示す FINN-BYRNE モデルを用いて加振時飽和地盤内での過剰間隙水圧の上昇をシミュレートしながら Mohr-Coulomb 破壊基準を基本とした完全非線形有効応力解析を行った。

$$\Delta \varepsilon_{vd} / \gamma = C_1 \exp(-C_2 (\varepsilon_{vd} / \gamma)) \quad \text{式-1}$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_{vd}$ = 体積ひずみ、 ε_{vd} = 非可逆的体積ひずみ累積増分、 γ = 繰返しせん断振幅、 C_1, C_2 = 定数を示す。

解析に用いられた地盤物性値は表-1 に示してある。また、斜面の地盤構成及び入力波は遠心実験のものを実物スケールに換算したものであり、図-1 に示すようにモデルの低部から入力地震波が伝播していく際に解析モデルの側面境界からの反射による影響を防ぐため、Free-field boundary(粘性境界)を導入した。入力地震動は遠心模型実験で使用した正弦波(最大加速度=332Gal, 卓越周期=2Hz)を入力波として採用した。また、斜面勾配変化の影響検討を実施した解析ケースは表-2 に示すとおりである。

3. 数値解析結果

図-2 に遠心模型実験と同様なモデルにおいて数値解析による下部の飽和地盤における加振時間間隙水圧の変化を示す。遠心模型実験の結果と同様に、加振開始後振幅の増加に伴い過剰間隙水圧が発生し、実験時の計測されたピークの値に近接する間隙水圧を(Case1 ≒ 59kPa)を表している。また、間隙水圧の上昇はあるものの、有効応力がゼロとなる完全液状化状態(全応力=70kPa)までは至っていない結果を示している。図-3 には加振開始後過剰間隙水圧の上昇に伴い発生する斜面中央部における地盤の水平変位を表す。加振開始から過剰間隙水圧の上昇が顕著になる加振時刻 4 秒を基点に(図-2 参照)水平変位が増加し始め斜面の下流側に非可逆的変位が進み単調に増加している。このことから、遠心模型実験の結果と同様に過剰間隙水圧による有効応力の低下が下部斜面地盤における塑性変位の発

キーワード 地震、時間履歴解析、道路斜面、永久変位

連絡先：〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 TEL 042-489-7157 FAX 042-489-7034 E-mail jaylee@kajima.com

生を促進していると思われる。また、図-4~5には表-2のケースごとに斜面の傾斜変化による飽和層における間隙水圧変化及び斜面中央部における水平変位(加振時刻20秒の時)の解析結果を示す。図-4に示すように加振後間隙水圧の変化は、他のケースに比べピーク値が若干大きい上部地盤傾斜と下部地盤傾斜が5%/10%のケースを除き、斜面傾斜の変化に関わらずほぼ同じ形態で増加していくように計算された。一方、斜面中央部の地盤変位は斜面傾斜に比例し急傾斜において変位が大きく計算されたことから、主に永久変位が生じている飽和層において有効応力の水準がほぼ同じであっても、地盤変形は斜面傾斜の影響を受けて異なることが確認できた。

4. おわりに

今後は、多様な地盤構成、実測波等の地震動の種類による、地震時に発生する斜面すべり量予測解析手法の検討・検証を進める予定である。

参考文献

- 1) 吉迫ら：道路斜面における液状化に因らないすべり発生量予測に関する研究～動的遠心模型実験結果(その2)～、地盤工学会第59回年次学術講演会、平成17年7月
- 2) LEE et al. : Centrifuge Modeling for Sliding of Gentle Slope on Partially Saturated Fine Sand Subject to Sinusoidal Ground Motion, Proc. of 4th ICEGE, GREECE, JUN. 2007

表-1 解析用地盤物性値

Soil	Dry density (t/m ³)	Shear Modulus (kPa)	Bulk Modulus (kPa)	S-wave velocity (m/sec)	Rayleigh Damping	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Poisson's ratio	FINN-BYRNE coefficient	
									C1	C2
Unsaturated Sand (upper)	1.530	6.61E+04	1.98E+05	186	0.5% (2Hz)	5.0	40.0	0.32	0.086	4.625
Saturated Sand (Lower)	1.512	4.22E+04	1.27E+05	167		11.3	33.9	0.35	0.764	0.523
Foundation	2.700	1.00E+06	1.67E+06	609		-	-	0.25	-	-

表-2 道路傾斜の影響の検討ケース

ケース	傾斜角度	
	上部地盤(不飽和)	下部地盤(飽和)
遠心実験	15%	15%
解析I	10%	10%
		5%
解析II	5%	10%
		5%

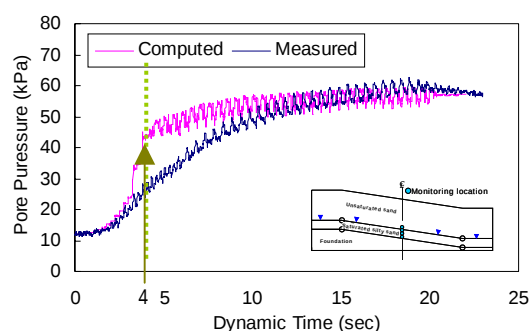


図-2 飽和層における加振後間隙水圧の変化

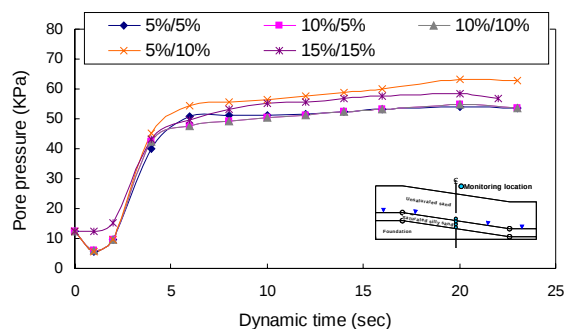


図-4 異なる斜面傾斜による間隙水圧の変化

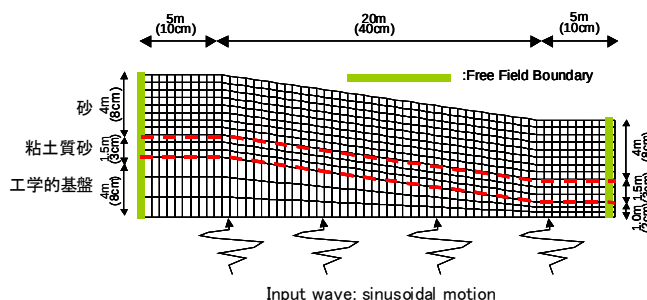


図-1 数値解析用モデル

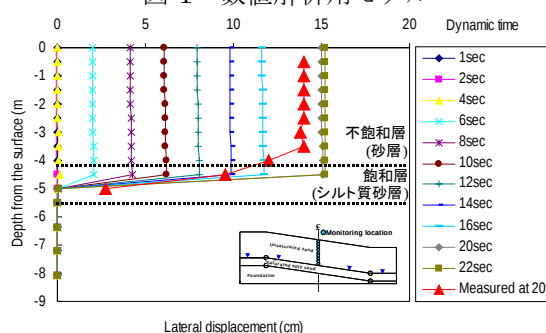


図-3 斜面中央部における水平変位(遠心モデル)

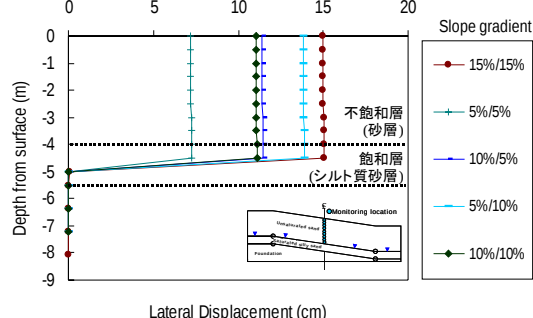


図-5 異なる斜面傾斜による斜面中央部の水平変位