

異なる特性を持つ2つの地震動に対する泥岩高盛土の耐震性に関する数値解析的検討

地震応答解析 盛土 泥岩

名古屋大学 国際会員 中野正樹 酒井崇之
名古屋大学 学生会員 犬飼翔吾

1. はじめに

泥岩で造成された盛土は、高速道路でも広く用いられており、中には水の作用等より泥濁化・細粒化する「スレーキング現象」によって強度低下するものも存在する。その一例として、2009年に発生した東名高速道路牧之原 SA 付近での盛土崩壊が挙げられ、スレーキングが原因の1つであることが調査より示されている¹⁾。本研究では、図1に示す実在する泥岩高盛土を対象に、ボーリング、サンプリング、室内試験をはじめ、詳細な地盤調査をもとに、直下型・海溝型レベル2地震時の耐震性を把握することを目的とする。なお盛土の数値解析には、SYS Cam-clay model²⁾を搭載した水～土骨格連成有限変形解析コード *GEOASIA*³⁾を用いた。

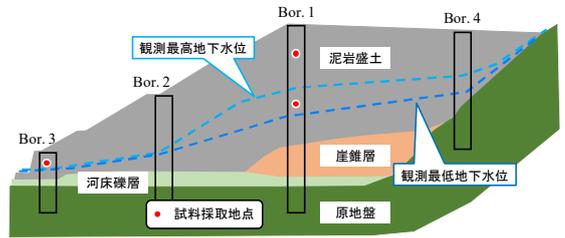


図1 調査断面

2. 対象盛土の地盤調査結果について

2018年に詳細な地盤調査が行われた。図1に4地点のボーリングの位置を示す。また、調査期間内の観測最高地下水位及び最低地下水位も、自記水位計により得られている。Bor.4地点では地下水位が高く、Bor.2地点から法尻にかけて、地下水位が低い。地下水位の変動も観測されており、盛土内で乾湿を受けていることが予想される。

ボーリング調査結果によると、最高地下水位よりも上側では、N値が高く礫分が多い。一方、地下水位以下では細粒分が増え、N値が小さくなっていった。また、建設前のスレーキング率は6.6~15.2%であり、一方、調査時には73.9%であった。供用後10年が経過すると、スレーキングしやすい材料へと変化、判定されることになる。このことは、スレーキング率は泥岩固有の値ではなく、状態により値が変わることを示唆している。

3. 解析条件および解析手順

図2は本解析に用いる盛土造成後の有限要素メッシュ及び境界条件を示す。なお、盛土・基盤ともに完全飽和状態を仮定している。地盤調査時に測定した物性の差異や施工記録より、盛土部分を3層に分けた。盛土各層の材料定数を定めるため、図1に示す試料採取位置での不攪乱試料を用いた室内試験、およびSYS Cam-clay modelによる再現計算を実施した。なお、別途実施した層2、3の練返し試料および再構成試料に対する力学試験での挙動が同じであったため、層2と層3の材料定数は同じ値とした。また初期値は、盛土施工時から採取までの荷重経路を仮定、逆算し得ている。基盤部分は、材料定数は層3と同じ値とし、地震時に変形しないように初期比体積を小さくしている。表1は、再現結果で得られた材料定数、状態量の初期値を示す。

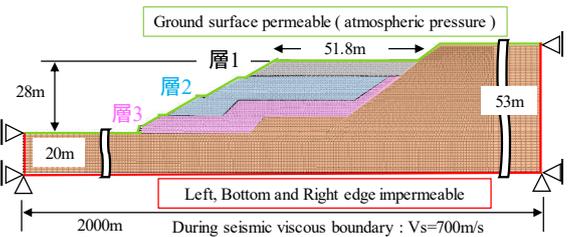


図2 有限要素メッシュと境界条件

表1 盛土の材料定数

材料名		層1	層2	層3
弾塑性パラメータ				
圧縮指数	$\tilde{\lambda}$	0.085	0.080	0.080
膨潤指数	$\tilde{\kappa}$	0.015	0.018	0.018
限界状態定数	M	1.375	1.350	1.350
NCLの切片	N	1.350	1.380	1.380
ポアソン比	ν	0.300	0.150	0.150
発展則パラメータ				
正規圧密土化指数	m	0.200	0.300	0.300
構造劣化指数 ($b=c=1$)	a	0.400	0.500	0.500
塑性指数	c_s	0.100	0.100	0.100
回転硬化指数	b_r	0.010	0.010	0.010
回転硬化限界定数	m_b	1.000	1.000	1.000
初期値				
比体積	v_0	1.453	1.410	1.504
構造の程度	$1/R^*_0$	10.0	6.76	45.0
異方性	ζ_0	0.000	0.800	0.000
応力比	η_0	0.100	0.000	0.160

図3は耐震性評価に用いた入力地震動を示す⁴⁾。青線は兵庫県南部地震の地震動であり、直下型レベル2地震動である。黄緑線は東日本大震災において、仙台河川国道事務所にて観測された地震動であり、海溝型レベル2地震動である。また50秒までとそれ以降で2つの大きな加速度群が示される特徴を持つ。

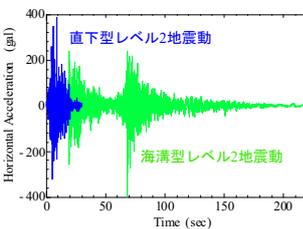


図3 入力地震動

4. 解析結果：解析コード・設定材料定数の妥当性の検証

施工記録をもとに、盛土造成を、有限要素メッシュを追加することで再現し、調査時まで解析を行った。調査時での平均有効応力分布を図4に示す。層1 (element-1)、層2 (element-2)、層3 (element-3)の土要素は、調査時の不攪乱試料の採取位置を示している。図5は、各土要素において三軸試験の数値積分を行った計算結果と、三軸試験結果との比較である。どの層においても概ね三軸試

験の結果を再現できており、調査時における盛土内の状態を模擬できている。すなわち、解析コード及び推定した盛土材料の初期状態、材料定数は妥当であったことを確認できた。なお、紙面の都合で示すことができないが、対象盛土は建設後5年で比較的大きな地震動を受けている。解析でもその地震動を入力しており、実際と同様の変状を示していた。

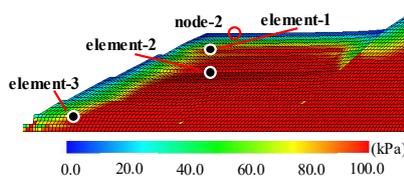


図4 調査時の平均有効応力分布（解析）

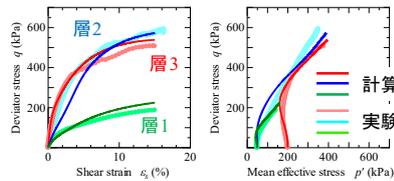


図5 力学試験との比較

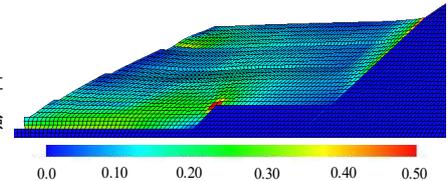


図6 直下型レベル2地震後のせん断ひずみ

5. 解析結果：2つの地震に対する耐震性評価

図6は直下型レベル2地震終了時のせん断ひずみ分布を示す。大変形は起きなかったが、法尻及び盛土下部においてせん断ひずみが25%程度生じた。

海溝型レベル2地震時のせん断ひずみ分布、平均有効応力分布を図7、図8に示す。図には、(a)地震開始から50秒後（1つ目の加速度群後）、(b)地震終了時をそれぞれ示している。(a)より、1つ目の加速度群では法尻や盛土下部にせん断ひずみが生じたが、大きなせん断ひずみの進展は生じなかった。しかし、平均有効応力は低下しているため、2つ目の加速度群が伝わった際、大きなせん断ひずみが法尻や盛土下部で進展し、(b)のように大変形が生じた。

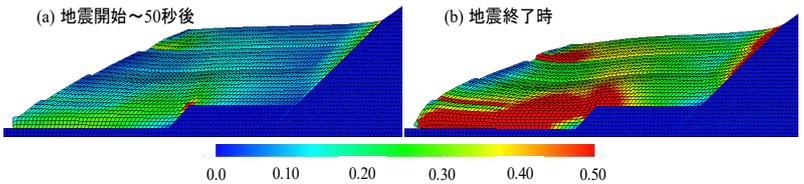


図7 海溝型レベル2地震によるせん断ひずみ分布

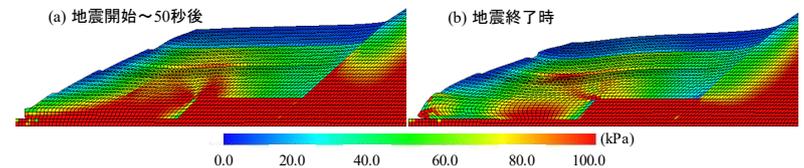


図8 海溝型レベル2地震による平均有効応力分布

両地震動において、法尻でのせん断ひずみの進展が見られた。そのため、法尻の要素（element-3）の地震時挙動を示す。図9が直下型地震、図10が海溝型地震である。直下型地震では、大きな平均有効応力の低下は生じなかったため、顕著な水圧の上昇も生じなかった。また、過圧密の解消も起きなかった。一方、海溝型地震では1つ目の加速度群・2つ目の加速度群の両加速度群において、せん断ひずみが大きく進展した。特に2つ目の加速度群は1つ目の加速度群よりも加速度が大きいため、ひずみがより進展した。これらの地震動により過圧密の解消および構造の劣化が生じている。その後は塑性圧縮しながら、顕著な水圧の上昇がみられた。これにより土の剛性が低下するため、地震動の振幅が小さくてもひずみが進展していく。

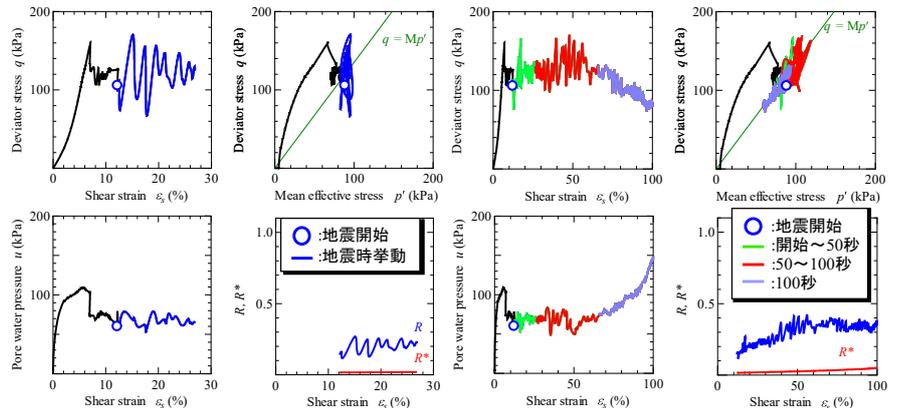


図9 直下型レベル2地震での法尻の要素挙動 図10 海溝型レベル2での法尻の要素挙動

6. おわりに

(1) 盛土造成から調査時まで計算機上で再現し、調査時に力学試験を行った地点と同地点の要素の材料定数・状態量を用い、サンプリング過程を模擬した上で三軸圧縮試験を計算したところ、実験結果と力学挙動が一致した。また、過去に受けた地震を解析上で同時期に入力した際、実際の変形も定性的ではあるが、再現できたことから、解析モデルの妥当性を確認できた。(2) 海溝型レベル2地震動では、長時間にわたり繰り返し载荷を受けることで、より法尻でのせん断ひずみが進展した。また、第一波により平均有効応力が減少した地盤が、第二波を受けることにより、地盤内のせん断ひずみがより進展した。一方で直下型レベル2地震動では、最大加速度は海溝型と同程度であるが地震動が短い、つまり繰り返し载荷回数が少ないことより、大変形に至らなかった。(3) 建設前よりも調査時のスレーキング率の方が顕著に大きくなった。対象盛土内では細粒化が進行していたことから、建設前のスレーキング率を材料選定の指標とすることは危険である。

参考文献：1.) 齊藤ら (2011) : NEXCO 中日本における防災への取組み, 第20回調査・設計・施工技術報告会, pp.1-2. 2.) Asaoka et al. (2002) : An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils and Foundations, Vol.42, No.5, pp.47-57. 3.) Noda et al. (2008) : Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, Soils and Foundations, Vol.48, No.6, pp.771-790. 4) 日本道路協会 : <https://www.road.or.jp/dl/tech.html>.