

道路盛土の耐震性能評価における盛土内の応答加速度と残留変位について

西日本高速道路エンジニアリング関西(株) 正会員 ○三好 忠和
西日本高速道路(株) 正会員 田久 勉

1. はじめに

高速道路の大規模更新事業では、道路盛土についても対象盛土を抽出し、地震時の安定性を要求性能レベルに応じた変形量で評価している。盛土の地震時残留変位量の解析手法には、円弧すべり計算に地震加速度波形を考慮し、すべり土塊の剛体変形量を算定するニューマーク法（以下、従来型ニューマーク法と呼ぶ）が用いられている。従来型ニューマーク法は、盛土内における応答加速度の増幅特性を考慮できないため、高盛土や傾斜地盤上の盛土では、過小評価となることが知られている。NEXCO の設計要領には、動的 FEM（等価線形解析）によりすべり土塊の加重平均加速度の地震動である等価加速度波形を算出し、ニューマーク法の入力波形とする解法¹⁾が示されている（以下、NEXCO 型ニューマーク法と呼ぶ）。

NEXCO 型ニューマーク法では、従来型ニューマーク法の 2～3 倍程度の残留変位量が算出されるとされているが、盛土材料によっては応答加速度が過度に小さくなる場合があり、残留変位量を過小評価する恐れがある¹⁾。土砂部が厚い盛土や剛性の低い盛土では地震によるせん断ひずみが大きくなり、応答加速度が減衰する。その結果、せん断ひずみの大きいひずみ領域の加速度が小さくなり、応答加速度波形も標準波形より小さくなる。

一方、等価線形解析の適用目安は、ひずみレベルが 10⁻³ 程度とされ²⁾、大きなひずみ領域(10⁻² 程度以上)では等価線形解析の適用範囲外であるといわれている。しかし、等価線形解析は大きなひずみ領域まで使われることが多く、解析結果に対する信頼性の低下や誤差の拡大が懸念される。

表-1 評価対象盛土の解析条件一覧

盛土番号	盛土高 H (m)	盛土材料	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	非排水強度			排水強度		土砂層厚 (盛土+ 未固結部) D (m)	盛土部の 土質	基礎面の 平均傾斜 (°)
				粘着力 c_u (kN/m ²)	内部 摩擦角 ϕ_u (°)	強度 増加率 m	粘着力 c' (kN/m ²)	内部 摩擦角 ϕ' (°)			
1	24.4	排水し難い材料 (スレーキング性材料)	1.941	24.5	17.2	0.49	6.7	32.1	15	粘性土	31
2	21.0	排水し易い材料	1.939	4.6	9.7	0.26	0.3	30.6	23	砂質土	26
3	30.8	排水し易い材料	1.925	5.6	12.6	0.35	2.9	31.1	20	礫質土	14
4	18.5	排水し易い材料	2.094	94.0	39.8	1.32	3.4	36.9	10	砂質土	18
5	19.7	排水し易い材料	2.220	108.5	35.0	1.11	1.1	37.3	7	砂質土	32
6	20.1	排水し易い材料	2.131	23.0	13.9	0.39	9.4	29.5	12	礫質土	20
7	15.6	排水し易い材料	2.159	58.0	20.7	0.60	10.7	35.5	10	礫質土	30
8	15.0	排水し難い材料 (スレーキング性材料)	1.879	54.4	30.0	0.91	14.7	33.4	12	砂質土	15
9	19.5	排水し易い材料	1.911	1.0	11.4	0.32	1.7	39.1	20	礫質土	14
10	13.7	排水し易い材料	1.970	38.0	12.6	0.35	13.8	29.2	20	砂質土	18
11	42.2	排水し易い材料	2.302	87.0	27.5	0.82	3.7	40.0	33	礫質土	15
12	35.4	排水し易い材料	2.015	0.5	14.0	0.39	3.7	37.2	15	礫質土	18
13	15.4	排水し易い材料	1.972	23.5	13.7	0.38	7.3	31.2	15	砂質土	24
14	19.2	排水し難い材料 (スレーキング性材料)	1.912	56.6	21.1	0.61	7.7	35.0	28	粘性土	19
15	15.4	排水し易い材料	1.955	0.7	11.7	0.32	2.4	30.9	10	礫質土	20
16	11.6	排水し難い材料 (スレーキング性材料)	2.156	34.0	20.4	0.59	6.3	33.4	15	砂質土	35
17	11.4	排水し易い材料	1.930	2.4	8.5	0.23	0.0	24.7	10	礫/粘性土	34
18	10.8	排水し易い材料	2.001	4.8	10.7	0.29	0.0	30.8	5	礫質土	30
19	13.2	排水し易い材料	2.215	7.5	11.7	0.32	6.0	24.6	10	礫質土	25
20	13.6	排水し易い材料	2.174	109.5	23.6	0.69	0.0	37.2	5	砂質土	28
21	7.0	排水し易い材料	1.848	6.6	6.9	0.19	2.2	20.6	8	砂質土	20
22	15.5	排水し難い材料 (粘性土)	1.960	19.1	19.9	0.57	2.9	35.3	18	粘性土	17
23	17.0	排水し易い材料	1.969	49.8	38.4	1.25	1.0	39.5	12	礫質土	14
24	18.1	排水し易い材料	1.959	2.8	7.5	0.20	1.4	31.2	13	礫質土	14
25	27.0	排水し易い材料	2.096	7.5	20.7	0.60	0.3	33.6	12	砂質土	22

※安定解析には灰色の塗りつぶしをしていないセルのせん断定数を用いた
・排水し易い材料：FC≦35%もしくは、FC>35%かつ IP≦15 の材料
・排水し難い材料：上記以外の材料

本稿では、NEXCO 型ニューマーク法による解析事例について、盛土内の応答加速度の増幅やせん断ひずみの影響を整理し、等価線形解析の適用性を考察する。

2. 解析条件

解析事例は NEXCO 西日本関西支社管内の盛土で詳細調査および耐震性評価を実施したものである。解析条件の一覧を表-1 に、動的 FEM に用いたパラメータ³⁾を表-2 に示す。入力地震動波形は道路橋示方書にあるレベル 2 地震動（タイプ II）の I 種地盤における地震動である。また、

表-2 動的 FEM 解析入力パラメータ³⁾

土質	V_s (m/s)	ν
砂礫層	240	0.330
砂質土層	190	0.450
粘性土層	170	0.450
岩盤(基礎地盤)	300	0.330

キーワード 道路盛土, ニューマーク法, 等価線形解析, 残留変位量, 応答加速度
連絡先 〒567-0032 大阪府茨木市西駅前町 5-26 西日本高速道路エンジニアリング関西(株) TEL072-631-5334

初期せん断剛性率 $G_{ma}(kN/m^2)$ は、以下の式にて設定した。

$$G_{ma}=\rho_t \cdot V_s^2 \quad (\text{ここで、} G_{ma} \text{は初期せん断剛性率、} \rho_t \text{は湿潤密度、} V_s \text{はS波速度である。})$$

3. 解析結果

解析結果を表-3に、動的FEM解析結果の一例(盛土番号3)を図-1に示す。従来型ニューマーク法による残留変位量は表中「①地表面波形による δ_s 」の欄に、NEXCO型ニューマーク法による残留変位量は表中「②等価加速度波形による δ_r 」の欄に示している。「のり肩最大加速度/入力地震動」は、入力地震動波形の最大加速度とのり肩における応答加速度の最大値との比である。応答加速度の増幅により $\delta_r/\delta_s>1$ となるケースは、全25ケース中5ケースと頻度は低い。 $\delta_r/\delta_s<0.5$ となるケースは9ケースあり、6ケースは「のり肩最大加速度/入力地震動」 <1 となっている。

盛土内の最大せん断ひずみについては、23ケースで0.01(1%)を超えており、1ケースは0.0097とほぼ0.01である。これは、等価線形解析の適用範囲を超え、かつ地盤の動的変形特性から減衰が大きいことを示している。また、地山の未固結層を含む土砂層が厚い盛土では、 δ_r/δ_s がより小さくなる傾向がみられる。図-1の例では、のり肩の加速度はやや増加しているが、盛土下部でせん断ひずみが増大し、盛土全体のせん断剛性が低下している。

4. まとめ

時刻歴非線形解析が有効とされる大きなひずみ領域(10^{-2} 程度以上)でも等価線形解析が用いられる理由として、盛土の耐震性評価では中～大ひずみの領域を扱うため、ある程度の精度を有していることや解析プログラムが使いやすいといったことが考えられる。平坦地における層厚27mの高盛土(粘性土)を想定したケーススタディ⁴⁾では、等価線形解析を用いたNEXCO型ニューマーク法による残留変位量は従来型ニューマーク法の約半分の値であった。時刻歴非線形解析では、修正R-Oモデルの場合に盛土内の応答加速度が増大している結果となり、大ひずみ領域における時刻歴非線形解析の活用が示唆されている。今後は、本稿の事例に対して、時刻歴非線形解析の要否を検証していきたい。

【参考文献】 1) 西日本高速道路(株):設計要領 第一集 土工 建設編, pp.4-13-4-27, 2020. 2) 石原研而:土質動力学の基礎, 鹿島出版会, pp.1-69, 1976. 3) 三好忠和, 田久勉:道路盛土の耐震性能評価における動的パラメータの推定と適用について, Kansai Geo-Symposium2018, pp.137-142, 2018. 4) 三好忠和, 常田賢一, 三谷浩司, 木村武雄:盛土内の地震応答加速度を考慮したニューマーク法の解析手法についての一考察, 第33回日本道路会議, No.4036, 2019.

表-3 解析結果一覧

盛土番号	盛土高 H (m)	盛土材料	残留変位量		② δ_r / ① δ_s	土砂層厚 (盛土+ 未固結部) D (m)	盛土部の土質	降伏震度 k_y	のり肩の 最大応答 加速度 ^{*)} A_{max} (gal)	盛土内の 最大せん断 ひずみ値 ^{*)} γ_{max}	のり肩最大 加速度/入力 地震動
			① 地表面波形 による δ_s (m)	② 等価加速度波 形による δ_r (m)							
1	24.4	排水し難い材料 (スレーキング性材料)	2.725	3.043	1.117	15	粘性土	0.033	882.4	0.0097	1.09
2	21.0	排水し易い材料	13.638	10.580	0.776	23	砂質土	0.003	621.5	0.0204	0.77
3	30.8	排水し易い材料	0.432	0.129	0.299	20	礫質土	0.211	874.9	0.0232	1.08
4	18.5	排水し易い材料	0.697	0.161	0.231	10	砂質土	0.159	541.5	0.0170	0.67
5	19.7	排水し易い材料	0.918	0.699	0.761	7	砂質土	0.138	773.3	0.0244	0.95
6	20.1	排水し易い材料	2.513	1.558	0.620	12	礫質土	0.056	903.2	0.0178	1.11
7	15.6	排水し易い材料	0.141	0.181	1.284	10	礫質土	0.330	969.1	0.0175	1.19
8	15.0	排水し難い材料 (スレーキング性材料)	0.066	0.054	0.818	12	砂質土	0.392	919.6	0.0217	1.13
9	19.5	排水し易い材料	0.121	0.073	0.603	20	礫質土	0.337	1157.2	0.0249	1.43
10	13.7	排水し易い材料	1.269	0.342	0.270	20	砂質土	0.109	535.0	0.0194	0.66
11	42.2	排水し易い材料	0.477	0.007	0.015	33	礫質土	0.204	680.3	0.0213	0.84
12	35.4	排水し易い材料	2.301	0.857	0.372	15	礫質土	0.064	618.7	0.0289	0.76
13	15.4	排水し易い材料	7.006	6.770	0.966	15	砂質土	0.009	800.4	0.0246	0.99
14	19.2	排水し難い材料 (スレーキング性材料)	0.292	0.040	0.137	28	粘性土	0.243	796.7	0.0248	0.98
15	15.4	排水し易い材料	1.900	2.082	1.096	10	礫質土	0.079	867.8	0.0172	1.07
16	11.6	排水し難い材料 (スレーキング性材料)	3.090	2.947	0.954	15	砂質土	0.025	860.6	0.0190	1.06
17	11.4	排水し易い材料	1.886	2.283	1.210	10	礫/粘性土	0.075	825.9	0.0282	1.02
18	10.8	排水し易い材料	0.529	0.307	0.580	5	礫質土	0.187	818.5	0.0028	1.01
19	13.2	排水し易い材料	1.278	1.079	0.844	10	礫質土	0.114	787.8	0.0151	0.97
20	13.6	排水し易い材料	0.275	0.331	1.204	5	砂質土	0.257	950.0	0.0185	1.17
21	7.0	排水し易い材料	1.944	1.879	0.967	8	砂質土	0.072	767.5	0.0182	0.95
22	15.5	排水し難い材料 (粘性土)	0.686	0.332	0.484	18	粘性土	0.142	759.6	0.0243	0.94
23	17.0	排水し易い材料	0.241	0.117	0.485	12	礫質土	0.276	990.5	0.0201	1.22
24	18.1	排水し易い材料	0.619	0.366	0.591	13	礫質土	0.171	1043.7	0.0195	1.29
25	27.0	排水し易い材料	1.580	0.766	0.485	12	砂質土	0.092	822.5	0.0228	1.01

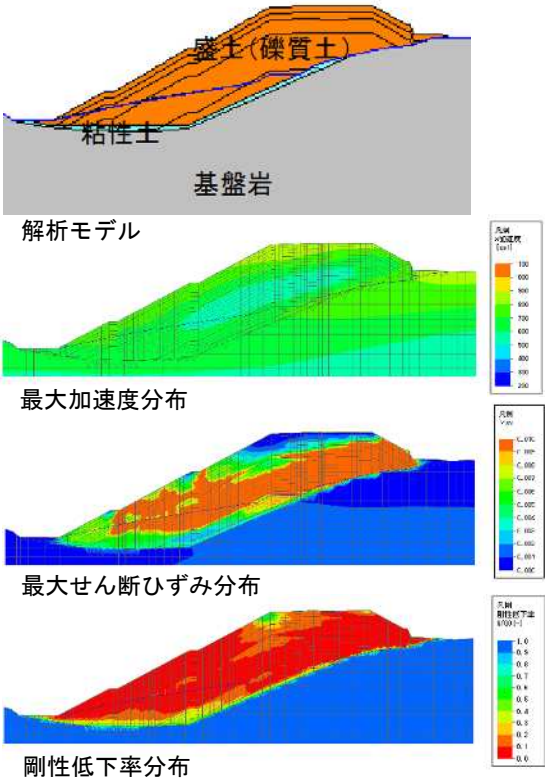


図-1 動的FEM解析結果例(盛土番号3)