

盛土内の応答加速度を考慮したニューマーク法の適用性の向上について

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
 (一財)土木研究センター 非会員 常田 賢一
 五大開発(株) 非会員 三谷 浩司
 五大開発(株) 非会員 木村 武雄

1. はじめに

盛土の地震時残留変位量の解析手法には、盛土基礎地盤の地表面に加速度波形を入力し、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）が一般的である。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しないため、盛土高さ 30m 程度以上の高盛土や傾斜地盤上の盛土では、動的 FEM（等価線形解析）により増幅を考慮した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 NEXCO の設計要領に示されている（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盛土内応答加速度の増幅が考慮されるため、残留変位量は従来型ニューマーク法の 2~3 倍程度になるとされているが、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る。

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）では適用範囲外といわれているが、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ことから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い。例えば、NEXCO 型ニューマーク法を用いた解析事例³⁾では、多くのケースで盛土内の最大せん断ひずみが 10^{-2} を超え、応答加速度が減衰し残留変位量が従来型ニューマーク法による残留変位量より小さく算出されている。

一方、常田他⁴⁾は動的 FEM 解析（時刻歴非線形解析）を組み合わせ盛土の応答加速度特性を考慮した手法を提案している（以下、改良型ニューマーク法と呼ぶ）。改良型ニューマーク法は、時刻歴非線形解析により計算した盛土内の応答加速度分布を外力とする円弧すべり安定計算により破壊発生の判定を行い、すべり土塊の重心における応答加速度波形をニューマーク法の入力波形としてすべり変位量を算出する手法である。

本稿では、盛土内の応答加速度を考慮したニューマーク法の適用が妥当との認識の下で、その適用性を検証し、適用性向上のための検討結果について報告する。

2. 解析事例

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³⁾。事例では 25 ケースについて等価線形解析を用いた NEXCO 型ニューマーク法により残留変位量を算出している。盛土内の最大せん断ひずみは 0.003~0.029 で、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 であった。

従来型ニューマーク法による残留変位量を δ_s 、NEXCO 型ニューマーク法による残留変位量を δ_r としたときの事例における δ_r / δ_s の頻度を図-1 に示す。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 ケースであった。これは、せん断ひずみが 0.01 を超えるような盛土材料では、NEXCO 型ニューマーク法は従来型ニューマーク法より小さい残留変位量を算出し、過小評価となるおそれが大きいことを示唆する。

3. NEXCO 型ニューマーク法の等価線形解析と時刻歴非線形解析の比較

平坦地における層厚 30m の高盛土を想定した解析モデルを用いて、従来型ニューマーク法と時刻歴非線形解析（修正 R-O モデル）により解析法を向上させた NEXCO 型ニューマーク法を比較し、動的 FEM の適用性を検証する。

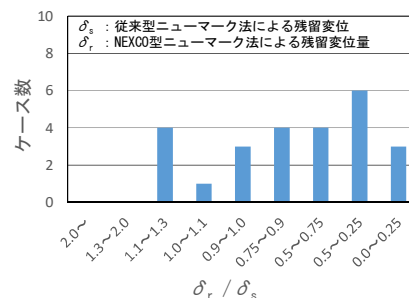


図-1 δ_r / δ_s の頻度

キーワード 道路盛土, ニューマーク法, 等価線形解析, 時刻歴非線形解析, 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

検証は、(1)従来型ニューマーク法、(2)等価線形解析による現行の NEXCO 型ニューマーク法、(3)時刻歴非線形解析 (修正 R-O モデル) を用いた NEXCO 型ニューマーク法および(4)改良型ニューマーク法に対して、盛土材料を粘性土および砂質土のそれぞれについて解析を行った。解析モデルを図-2 に、地盤定数を表-1 に、解析結果を表-2 に示す。表-2 の最大応答加速度は各ニューマーク法の入力波形の最大加速度を示している。粘性土および砂質土ともに、等価線形解析を用いた方法(2)は、方法(1)に対し最大応答加速度は半減し、残留変位量は小さく算出された。一方、時刻歴非線形解析を用いた方法(3)と方法(4)は、方法(1)と方法(2)よりも最大応答加速度および残留変位量は大きくなり、盛土内の応答加速度の増幅が反映された。最大せん断ひずみについては、等価線形解析を用いた場合は 1%を超えており、時刻歴非線形解析を用いた場合は 1%未満であった。方法(3)と方法(4)の残留変位量の差は、すべり円弧が異なることに起因する。

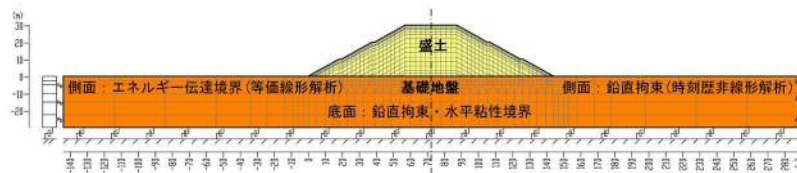


図-1 解析モデル図

方法(2)~(4)の応答加速度波形を図-3 に示す。各図には地表面波形を標準波として併記している。動的 FEM の入力波形である地表面波に対して、方法(2)は加速度が減衰し、方法(3)と方法(4)は加速度が増幅している。

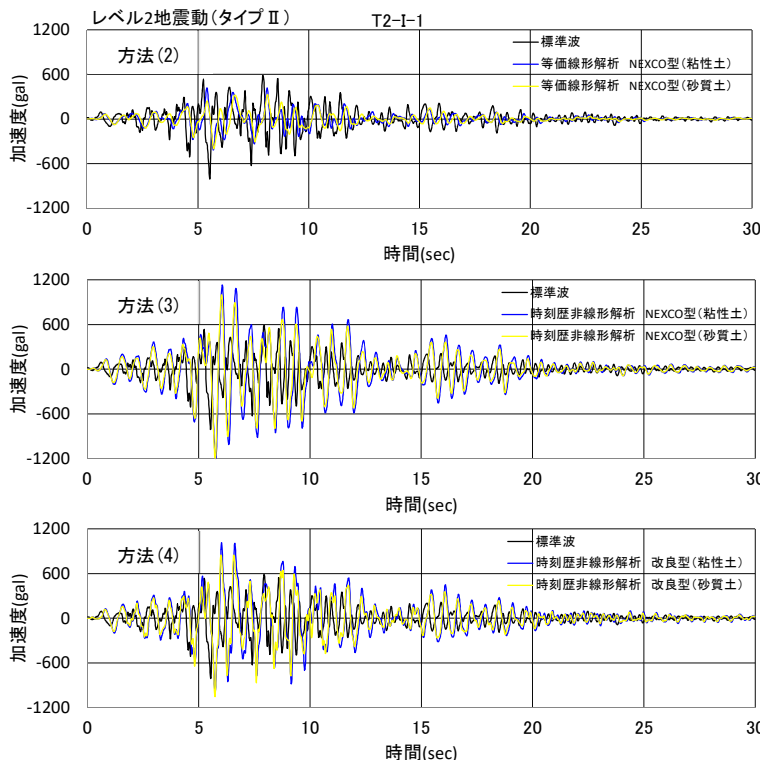


図-3 応答加速度波形

方法(2)~(4)の応答加速度波形を図-3 に示す。各図には地表面波形を標準波として併記している。動的 FEM の入力波形である地表面波に対して、方法(2)は加速度が減衰し、方法(3)と方法(4)は加速度が増幅している。

4. まとめ

大ひずみ領域において NEXCO 型ニューマーク法を適用する場合、等価線形解析は過小評価となるおそれがあり、その適用には留意する必要がある。一方で、時刻歴非線形解析を用いた NEXCO 型ニューマーク法と改良型ニューマーク法は、盛土内の応答加速度が増幅し、実証的で安全側の評価に資すると考えられるため、実盛土への適用実績の蓄積を図る予定である。

表-2 地盤定数一覧

土質	γ_t (kN/m ³)	ν	G (kN/m ²)	E (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ (度)
砂質土層	19.0	0.450	74,000	220,000	30	25
粘性土層	18.0	0.450	56,000	165,000	50	15
岩盤(基礎地盤)	21.0	0.330	190,000	500,000	500	0

表-2 盛土内応答加速度の考慮の有無、解析法の差異による解析結果の比較

	残留変位量の解析方法	降伏震度	残留変位量	最大応答	最大せん断	すべり円弧
		k_y	δ (m)	加速度(gal)	ひずみ γ_{xy} (%)	半径R(m)
粘性土	(1)従来型ニューマーク法	0.180	0.543	812	-	69.8
	(2)NEXCO型ニューマーク法(等価線形解析)	0.179	0.236	420	1.20	69.3
	(3)NEXCOニューマーク法(時刻歴非線形解析)	0.192	3.401	1200	0.62	79.3
	(4)改良型ニューマーク法(時刻歴非線形解析)	0.153	2.776	1015	0.62	69.3
砂質土	(1)従来型ニューマーク法	0.218	0.392	821	-	59.4
	(2)NEXCO型ニューマーク法(等価線形解析)	0.224	0.063	400	1.49	54.1
	(3)NEXCOニューマーク法(時刻歴非線形解析)	0.256	1.739	1200	0.54	70.4
	(4)改良型ニューマーク法(時刻歴非線形解析)	0.232	1.179	1050	0.54	63.3

【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.413-427, 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盛土内の応答加速度と残留変位について, 土木学会第 76 回年次学術講演会, III-314, 2021. 4) 江川祐輔, 常田賢一, 小田和広, 中平明憲: 地震時における道路盛土のすべり破壊の制御工法に関する解析的検討, 土木学会地震工学論文集(報告), VOL.29, pp.1319-1327, 2007.