

# 等価 1 自由度モデルによる鉄道盛土の地震時非線形応答の評価法

荒木 豪\* 坂井 公俊\*\* 室野 剛隆\*\*\*

Equivalent Single-degree-of-freedom Method for the Nonlinear Dynamic Analysis of Embankments

Go ARAKI Kimitoshi SAKAI Yoshitaka MURONO

In this research, a nonlinear dynamic analysis method by means of an equivalent single-degree-of-freedom model is proposed for the seismic design of railway embankments. The response of an embankment calculated by the method proposed is well consistent with the response calculated by the 2D finite element method. From the results of static push-over analyses for various embankments, the model parameters used for the method proposed are characterized. These parameters can be represented by simple information such as the height of the embankment. Since using the method proposed we can evaluate the dynamic response of railway embankments more conveniently than the conventional method, it is useful as a response evaluation method of a huge number of railway structures.

キーワード：鉄道盛土，等価 1 自由度モデル，静的非線形解析

## 1. はじめに

鉄道盛土の地震応答値（滑動変位量）を評価する手法として、ニューマーク法<sup>1)</sup>が一般的に用いられている<sup>2)</sup>。このニューマーク法は取り扱いが容易である一方で、現象を極端に単純化しているため、以前からその問題点が指摘されている<sup>例え<sup>3)</sup> 4)</sup>。そのため設計における適用範囲も限定されており、例えば高盛土においては加速度増幅の影響を考慮する必要があること等が設計標準に明記されている。これらの問題点、適用限界に対応するために、盛土本体の地震増幅を有限要素法で評価し、これと土の強度低下の影響を考慮したニューマーク法を組み合わせた詳細ニューマーク法などの各種派生手法<sup>例え<sup>5)</sup></sup>が提案され、実務設計にも用いられている。本論文ではこれを従来詳細法（2DFEM）という。しかしこの方法はモデル構築、計算の実施等において比較的煩雑な手順を必要とするため、全ての盛土の設計手法として適用することは困難であると考えられる。一方で、高盛土のみに地震増幅の影響を考慮とした場合は設計の連続性が保てなくなるという問題も発生する。

このような状況に対して著者らは、鉄道盛土を等価 1 自由度モデルに置換することで、大規模地震時の非線形挙動を考慮した上での動的応答を簡易に評価可能な手法を提案している<sup>6)</sup>。この手法は、表層地盤において提案

されている地盤全体系の静的非線形解析法とこれに基づく地盤の等価 1 自由度モデルの考え方<sup>7)</sup>を鉄道盛土に適用可能な形に拡張したものであり、非線形有限要素法による結果と比較することで、提案手法による応答評価の妥当性を確認している。この方法によって得られる盛土の応答波形を入力として、ニューマーク法<sup>1)</sup>や片側非線形モデル<sup>3)</sup>を適用することで、盛土本体の動的応答を考慮した上での滑動変位量の評価を実務的に実施することが可能である。

本検討では、上記の等価 1 自由度モデルによる応答評価をより一般化することを目的として、多様な諸元を有する鉄道盛土に対して静的非線形解析を実施する。続いて、盛土の形状（高さ、勾配等）やせん断剛性といった比較的容易に入手、推定が可能なパラメータのみから等価 1 自由度モデルを構築する手法を提案する（図 1）。本論文ではこれを提案法という。本手法を用いることで、全国の鉄道路線を対象とした場合にも、限られた情報からモデル構築、応答評価を容易に実施することが可能と

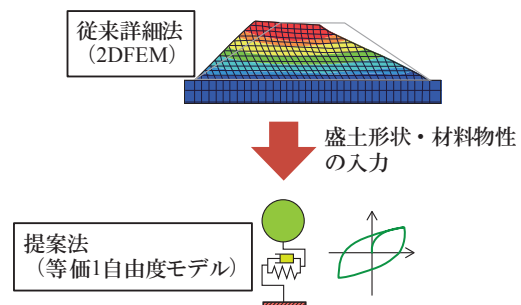


図 1 提案手法のイメージ

\* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室  
 (現 ライト工業株式会社)  
 \*\* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室  
 \*\*\* 鉄道地震工学研究センター

特集：地震防災・耐震技術

なり、地震時の弱点箇所抽出や即時被害推定を行う際などに活用が期待できる。

2. 等価1自由度モデルの標準パラメータの構築

2.1 2DFEMモデルによる固有周期の評価

盛土の等価1自由度モデルを構築するためには、弾性振動の特性や非線形特性が必要となる。そこで、それらのパラメータを簡易に設定可能とするため、多様な諸元を有する鉄道盛土を対象に網羅的な静的非線形解析を実施するとともに、得られた結果を一般化することで、盛土形状等の容易に入手可能な指標のみから等価1自由度モデルに必要な各パラメータを推定可能な手法を構築する。

検討の対象とする盛土条件を図2に示す。一般的な鉄道盛土の形状が包含されるように、盛土高さ $H$ 、法勾配 $\alpha$ 、天端幅 $D$ を変化させた、複数の組み合わせに対して各種整理を行う。盛土本体の物性値は均質な砂によって構成されているものとし、 $V_s=200\text{m/s}$ 、 $\gamma=20\text{kN/m}^3$ に固定した。支持地盤の条件としては、 $V_s=400\text{m/s}$ 、 $\gamma=20\text{kN/m}^3$ の砂が連続していると仮定する。2DFEMモデルの非線形動的解析を行う際の構成則はGHE-Sモデル<sup>8)</sup>とする。この時の非線形パラメータは、盛土本体の動的変形特性試験に基づき設定するのが望ましいが、今回は多様な地盤の静的非線形解析に基づき標準化されたパラメータ<sup>7)</sup>を準用することとした。また規準ひずみ $\gamma_{0.5}$ は、盛土材料が水平に堆積したと仮定した場合の盛土中心位置での有効拘束圧 $\sigma_m$ を用いて、既往の提案式<sup>9)</sup>により一律に設定した。また、ひずみ方向の複雑さに対応できるように、マルチスプリング要素<sup>10)</sup>によって非線形挙動を表現することとした。

このうち、高さ $H=9\text{m}$ 、勾配 $\alpha=1:1.5$ 、天端幅 $D=10\text{m}$ とした条件での2DFEMモデルの要素分割結果を図3に示す。今回は支持地盤と盛土本体の相互作用を適切に表現するために、支持地盤についてもある程度広い範囲(側方100m、深さ方向21m)のモデル化を行うこととした。また、モデル底面、側面の境界条件は粘性境界とし、側方には自然地盤を表現するために大きな質量を有する1次元地盤を結合している。

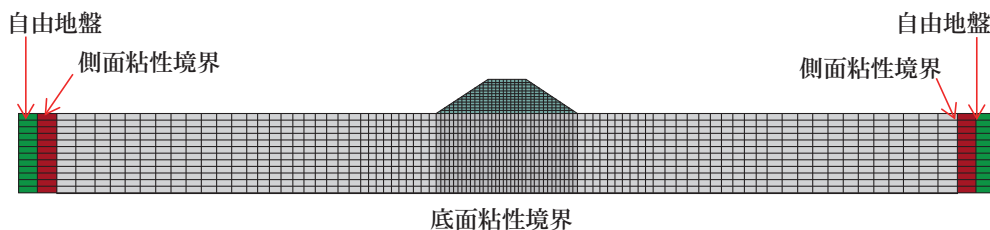


図3 2DFEMモデルのメッシュ分割

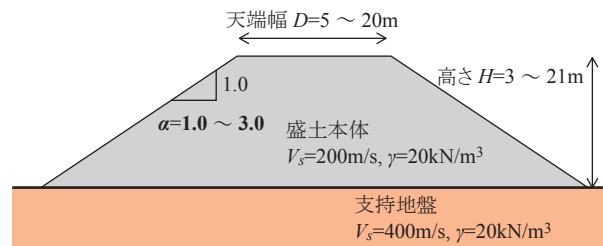


図2 検討対象とした盛土

表1 2DFEMモデルの固有値解析結果(代表ケース)

次数	振動数 (Hz)	刺激関数		有効質量比	
		水平	鉛直	水平	鉛直
1	6.768	1.432	0.000	0.750	0.000
2	10.915	0.000	0.683	0.000	0.150
3	12.781	0.133	0.000	0.005	0.000
4	15.127	0.000	0.243	0.000	0.018
5	16.012	-0.608	0.000	0.096	0.000

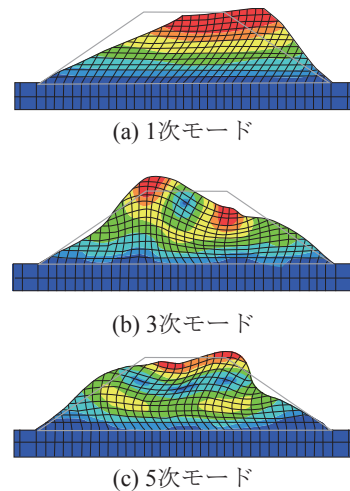


図4 2DFEMモデルのモード形状(代表ケース)

また、2DFEMモデルを用いた固有値解析の実施において、支持地盤の条件は固定としている。図3に示した代表ケースを対象とした固有値解析結果を表1に示すとともに、水平方向の主要なモード形状を図4に示す。これと同様の考え方で、多様な諸元を有する盛土に対してモデル構築、固有値解析を実施することで、後述する等

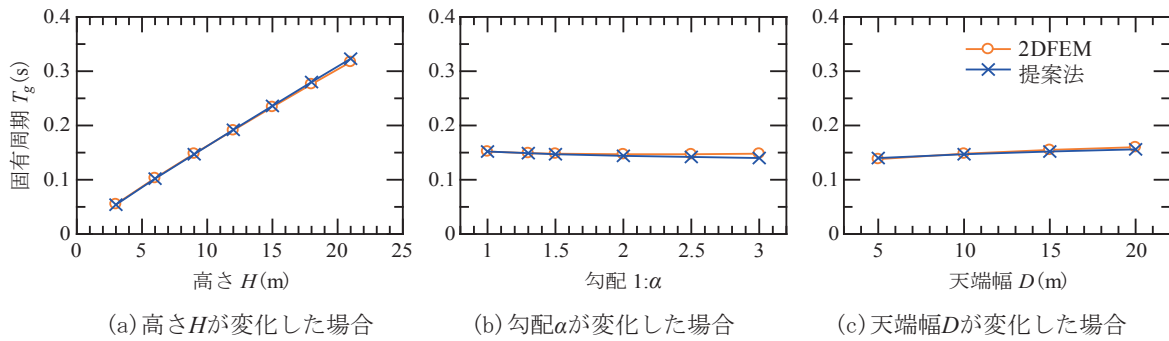


図5 固有周期  $T_g$  の算定結果

価 1 自由度モデルの固有周期設定法の妥当性を確認するための基本情報として整備する。

### 2.2 等価 1 自由度モデルの固有周期の評価法

等価 1 自由度モデルの標準パラメータの構築に際し、まず盛土の弾性時の振動特性を簡易に算定する手法を提案する。振動特性である 1 次モード固有周期  $T_g$  は、Rayleigh の方法<sup>11)</sup> を用いた式 (1) によって近似的に算定することができる。

$$T_g = \frac{2\pi}{V_s} \left( \frac{k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6}{k_7 + k_8 + k_9 + k_{10}} \right)^{0.5} \quad (1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{8}{15} H^5, \quad k_2 = \frac{5}{6} \kappa H^4, \quad k_3 = -\frac{5}{9} \kappa^2 H^3, \\ k_4 &= \frac{3\lambda - 5}{6} \kappa^3 H^2, \quad k_5 = \frac{3\lambda + 2}{6} \kappa^4 H, \quad k_6 = -\frac{3\lambda^2 + 4\lambda}{24} \kappa^5, \quad (2) \\ k_7 &= \frac{8}{3} H^3, \quad k_8 = 2\kappa H^2, \quad k_9 = -2\kappa^2 H, \quad k_{10} = \lambda \kappa^3 \end{aligned}$$

$$\kappa = \frac{D}{\alpha}, \quad \lambda = \log \left( 1 + 2 \frac{\alpha H}{D} \right) \quad (3)$$

$H$ : 盛土高さ,  $D$ : 天端幅,  $\alpha$ : 法勾配 (1 :  $\alpha$ ),  $V_s$ : 盛土材料のせん断弾性波速度である。式 (1) ~ (3) による盛土の固有周期簡易算定法の適用性を確認するために、盛土高さ  $H$ , 法勾配  $\alpha$ , 天端幅  $D$  を変化させた複数ケースを対象に、2DFEM モデルを用いた固有値解析結果との比較を行った。得られた結果を図 5 に示す。いずれのケースにおいても 2DFEM モデルによる結果とほぼ同一の固有周期が得られており、式 (1) ~ (3) を用いることで、盛土の形状等の簡易な情報のみから適切な 1 次固有周期を算出することが可能となる。また、実盛土で常時微動観測を実施し、固有振動数を評価した結果、実測による評価結果と提案法の結果は良好に一致することも確認している<sup>12)</sup>。

### 2.3 等価 1 自由度モデルの非線形特性の設定法

ここでは、等価 1 自由度モデルで用いる標準的な非線形特性を設定する手法を構築する。具体的には前節と同様に、盛土形状等の各諸元を網羅的に変化させた多数の盛土を用意するとともに、これらの盛土に対して静的非線形解析を実施し、これを一般化する。盛土の諸元としては一般的な鉄道盛土の形状が包含されるように、盛土高さ  $H$  を 3 ~ 21m, 法勾配  $\alpha$  を 1:1.0 ~ 1:3.0, 天端幅  $D$  を 5 ~ 20m の範囲で変化させた。盛土の静的非線形解析は、表層地盤において提案されている地盤全体系の静的非線形解析法<sup>7)</sup> を拡張して実施した。

以上の条件に従って全 22 ケースの盛土を対象に静的非線形解析を実施した。最終的に得られた  $G/G_0 - \delta$  関係,  $h - \delta$  関係,  $PF - \delta$  関係,  $EMR - \delta$  関係をまとめて図 6 に示す。これらの結果から、変位  $\delta$  の増大に伴って剛性が低下し、履歴減衰が上昇する傾向は全てのケースに見られる。ただしそれぞれの結果は大きくばらついている。また刺激関数は変位  $\delta$  の増大とともに小さくなり、有効質量比については多少増大する傾向はみられるが、その変化は小さい。

続いて、各静的非線形解析結果を  $G/G_0=0.5$  となる変位 (規準変位  $\delta_r$ <sup>7)</sup>) で正規化した結果を図 7 に示す。まず図 7 (a), (b) の  $G/G_0 - \delta/\delta_r$  関係,  $h - \delta/\delta_r$  関係は、規準変位  $\delta_r$  によって正規化することで盛土の形状によらずほぼ同一の傾向を示している。そこで、この平均的な特性を表現できるように設定した GHE-S モデルの非線形パラメータを表 2 に示す。このパラメータによって計算される  $G/G_0 - \delta/\delta_r$  関係,  $h - \delta/\delta_r$  関係 (図 7 の橙点線) は、全結果の平均値 (図 7 の青実線) を適切に再現できている。

次に刺激関数  $PF$ , 有効質量比  $EMR$  については、既往の水平成層地盤を対象とした  $PF$  の簡易推定式<sup>7)</sup> と同様の形式によって表現することとし、図 7 (c), (d) の平均的な傾向を表現できるように各係数を最小二乗法によって決定し式 (4), 式 (5) を得た。

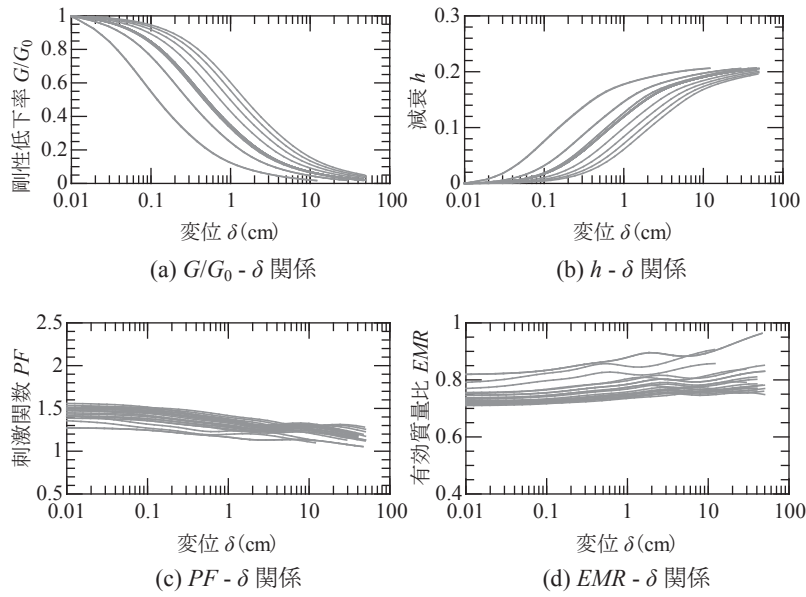


図6 諸元を変化させた複数盛土の静的非線形解析結果

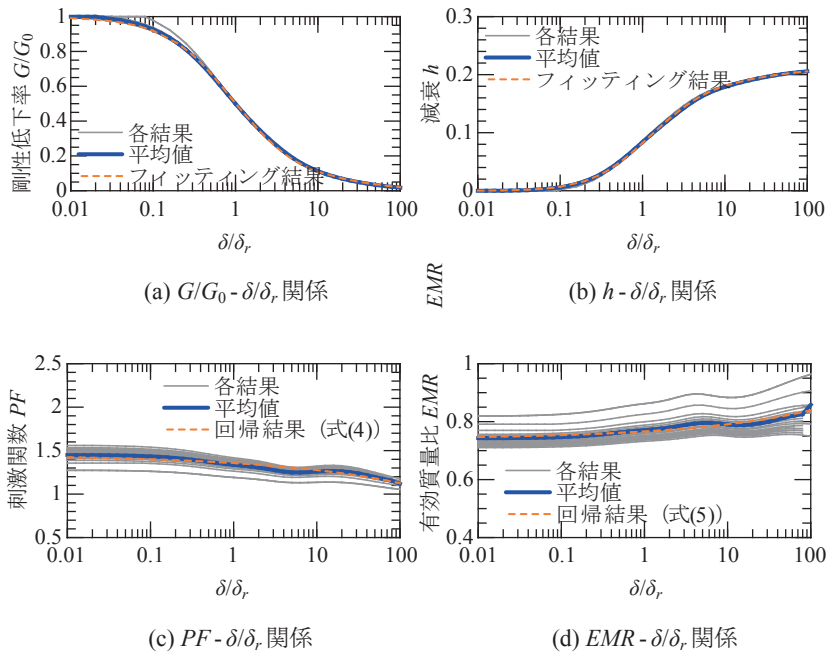


図7 静的非線形解析結果を規準変位  $\delta_r$  で正規化した結果

表2 設定した GHE-S モデルのパラメータ

$C_1(0)$	$C_2(0)$	$C_1(\infty)$	$C_2(\infty)$	$C_1(1)$	$C_2(1)$	$\kappa$	$h_{max}$
1.00	1.20	0.15	2.5	0.80	1.35	1.35	0.212

$$PF = 1.45 - 0.094 \cdot \left( \frac{\delta}{\delta_r} \right)^{0.27} \quad (4)$$

$$EMR = 0.74 + 0.026 \cdot \left( \frac{\delta}{\delta_r} \right)^{0.29} \quad (5)$$

この式 (4), 式 (5) によって得られる結果も図 7 (c), (d)

に橙点線で表示しているが、簡易な式によって全体の平均的な傾向を適切に表現出来ていることが分かる。ここで、刺激関数  $PF$  については等価 1 自由度モデルによる動的解析終了後に考慮することになるため、応答変位の大きさによって変化しても問題ないが、有効質量比  $EMR$  は、解析を実施する前に何らかの値を設定する必要がある。図 7 (d) より、 $EMR$  の変位依存性はそれほど大きくないことと、大規模地震時には相対的に履歴減衰の影響が大きくなり、下端境界条件が多少変化することの影響は小さいことを鑑みて、ここでは式 (5) を直接用いるのではなく、 $\delta=0$  における平均的な値 (0.74) を

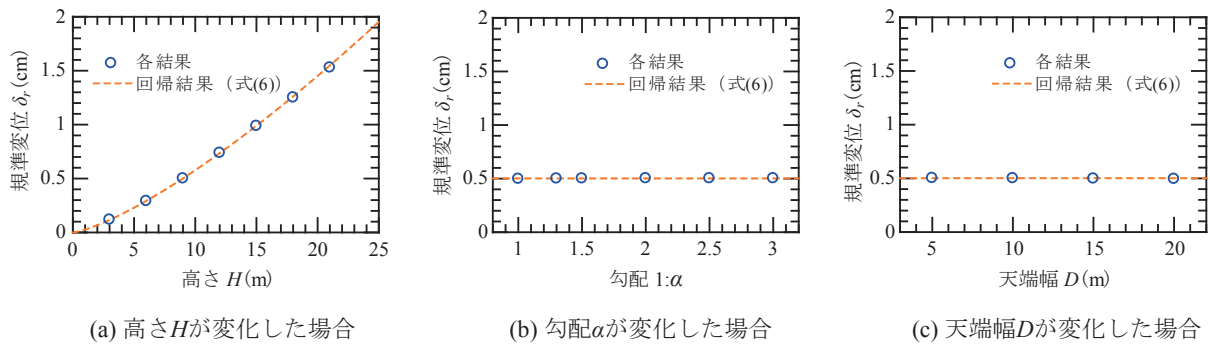


図8 規準変位  $\delta_r$  の算定結果

全ての盛土に共通して用いることとした。

最後に規準変位  $\delta_r$  について検討を行う。盛土高さ  $H$ 、法勾配  $\alpha$ 、天端幅  $D$  の変化に伴う規準変位  $\delta_r$  の変化の傾向をまとめて図8に示す。これを見ると規準変位  $\delta_r$  は、法勾配  $\alpha$ 、天端幅  $D$  の変化にほとんど影響を受けないことが分かる。一方で盛土が高くなるほど規準変位  $\delta_r$  が大きくなっている。そこで盛土高さ  $H$  (m) のみを指標として規準変位  $\delta_r$  (cm) の変化の傾向を再現可能な式(6)によって評価することとした。なお式(6)の係数は各条件での静的非線形解析結果をもとに最小二乗法によって決定している。

$$\delta_r = 0.027 \cdot H^{1.33} \quad (6)$$

式(6)による規準変位  $\delta_r$  の算定結果も図8に示すが、 $H$ (m)の増大に伴う  $\delta_r$  の増加の傾向を適切に表現している。

### 3. 等価1自由度モデルを用いた応答評価

2章の検討結果により、盛土の形状等の指標のみから等価1自由度モデルに必要なパラメータを簡易に設定可能となった。以下に、等価1自由度モデルの具体的な構築手順を示す。

- [1] 対象とする盛土の形状(高さ  $H$ 、勾配  $1:\alpha$ 、天端幅  $D$ )、各種物性値(単位体積重量  $\gamma$ 、せん断弾性波速度  $V_s$ )を設定する。
- [2] 上記[1]の情報を式(1)～(3)に代入することで、盛土本体の固有周期  $T_g$  を算定する。有効質量比  $EMR$  は  $0.74$  とし、これを盛土全体の重量に乗ずることで、質点に付与する重量を求める。
- [3] 盛土高さ  $H$  を式(6)に代入することで、規準変位  $\delta_r$  を算定する。GHE-Sモデルの非線形パラメータは表2を用いる。
- [4] 上記[2]、[3]の条件に適合する等価1自由度モデルを構築し、非線形の動的解析を行う。得られた最大変位  $\delta_{max}$  を式(4)に代入し、刺激関数  $PF$  を算定するとともにこれを考慮することで、1自由度系の応

答を盛土天端位置の応答に変換する。

この標準パラメータによる盛土の簡易応答評価の妥当性を確認するため、図3の代表ケースの盛土に対して2DFEMによる非線形動的解析を実施するとともに、上記[1]～[4]に従って盛土の概形情報のみから等価1自由度モデルを構築して地震応答値を算定した。支持地盤については弾性条件として、支持地盤と相互作用の影響を考慮する。入力地震動としては、鉄道構造物の耐震設計に用いられているL2地震動スペクトルIIを用いる。入力の方法としては、2DFEMモデルについてこの地震動をモデル下端に2E波として作用させることとし、等価1自由度モデルでは、2DFEMモデルの自由地盤上端の応答波形を抽出して、これを盛土下端の露頭基盤波(2E波)として用いる。

得られた盛土天端の応答波形、天端位置波形の弾性加速度応答スペクトルを図9に示す。この結果を見ると、等価1自由度モデルによる盛土天端の応答は、2DFEMモデルによる応答値と概ね一致していることが分かる。さらに、この盛土天端位置の応答波形を入力としてニューマーク法を実施し、滑動変位量を評価した結果を図10に示す。等価1自由度モデルによる最終的な変位量は  $83.9\text{cm}$  と、2DFEMモデルによる結果 ( $89.9\text{cm}$ ) とほぼ同一の値となっている。一方で、盛土の動的挙動を無視して地表面地震動をそのまま用いた結果は、2DFEMモデルによる結果と大きくかい離していることが分かる。これらの結果から、提案した等価1自由度モデルによって盛土の動的応答を考慮した上での滑動変位を適切に評価できていることが確認できる。

### 4. まとめ

本検討では、鉄道盛土の地震増幅特性を適切に考慮した上での滑動変位量の評価を簡易に実施するために、等価1自由度モデルによる非線形応答評価法の開発を行った。提案法を用いることにより、盛土形状等の簡易な指標のみから等価1自由度モデルを構築することが可能で

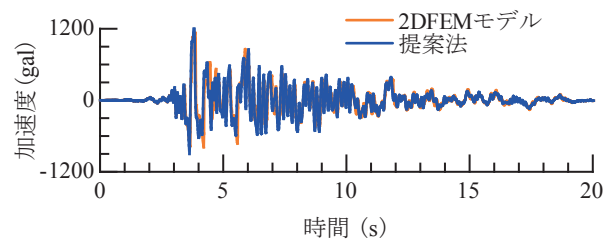
特集：地震防災・耐震技術

あるとともに、1自由度モデルの非線形応答解析であれば比較的容易に実施できるため、仮に延長の長い鉄道路線等を対象とした場合にも、実務的な作業量で応答値評価が可能となる。さらに、盛土材料の動的変形特性試験を実施した場合にはこれを用いた静的非線形解析を実施することで、より精度の高い応答値評価が可能となる。これらの地震応答値を入力として、従来から提案されている盛土の滑動変位量評価法<sup>(例えば1)3)</sup>を適用することで、これまで一般的には無視されていた盛土の動特性を考慮した上での変形量評価が容易に可能となる。

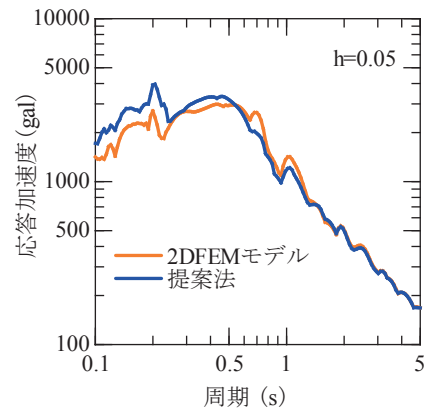
なお本検討の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 館山勝, 龍岡文夫, 古関潤一, 堀井克己: 盛土の耐震設計法に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.12, No.4, pp.7-12, 1998
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説(土構造物), 丸善出版, 2007
- 3) 澤田純男, 土岐憲三, 村川史朗: 片側必要強度スペクトルによる盛土構造物の耐震設計法, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp.3033-3038, 1998
- 4) 秦吉弥, 一井康二, 加納誠二, 土田孝: 地震時における盛土の降伏加速度に関する基礎的研究, 広島大学大学院工学研究科研究報告, Vol.57, No.1, 2008
- 5) 龍岡文夫, Duttine, A., 矢崎澄雄, 毛利栄征: 非排水繰返し載荷による強度低下およびひずみ軟化を考慮したニューマーク法による地震時斜面残留変位推定, 地盤工学会一東日本大震災を乗り越えて—発表論文集, pp.394-403, 2014
- 6) 坂井公俊, 荒木豪, 室野剛隆: 等価1自由度モデルを用いた盛土の地震時非線形挙動の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.1, pp.174-186, 2017
- 7) 坂井公俊, 室野剛隆: 地盤の等価1自由度モデルを用いた非線形動的解析法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.3, pp.341-351, 2015
- 8) 室野剛隆, 野上雄太: S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力~ひずみ関係, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.494-497, 2006
- 9) 安田進, 山口勇: 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会, pp.539-542, 1985



(a) 応答時刻歴波形



(b) 弾性加速度応答スペクトル

図9 盛土天端位置の応答比較(標準パラメータ)

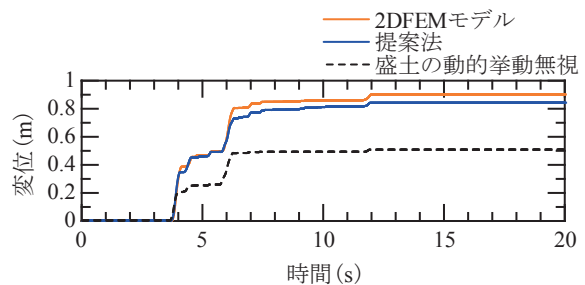


図10 盛土滑動変位量の評価結果(標準パラメータ)

- 10) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modelling soil behavior under principal stress axes rotation, Proc. 5th International Conference for Numerical Method in Geomechanics, Nagoya, Vol.1, pp.523-530, 1985.
- 11) 小坪清真: 土木振動学, 森北出版, 1973
- 12) 荒木豪, 坂井公俊, 小島謙一, 赤坂大介, 藤原雅仁, 山田孝弘: 常時微動観測記録に基づく鉄道盛土の等価1自由度モデル構築手法の妥当性確認, 第52回地盤工学研究発表会, 2017