

# 等価 1 自由度モデルによる鉄道盛土の地震時非線形挙動の表現

盛土 地震応答解析 等価 1 自由度モデル

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 坂井 公俊, 荒木 豪  
(株) 複合技術研究所 正会員 ○鈴木 聡

## 1. はじめに

盛土天端位置での地震応答を適切に評価する手法としては、2次元の有限要素法等が用いられている。しかしながらこれを各地点での評価に用いることは実務的に困難であり、何らかの簡易な手法によって応答を評価することが望ましい。そこで本検討では、水平成層地盤において提案されている地盤の静的非線形解析とそれに基づく等価 1 自由度モデル<sup>1)</sup>による盛土本体の応答評価の可能性について検討を行う。

## 2. 等価 1 自由度モデルによる鉄道盛土の地震挙動評価

### (1) 鉄道盛土の等価 1 自由度モデルの構築

盛土本体の等価 1 自由度モデルの構築イメージを図 1 に示す。モデル化の基本的な考え方は、水平成層地盤から等価 1 自由度モデルを構築する手法<sup>1)</sup>と基本的には同一である。ただし、これまでの等価 1 自由度モデルでは、水平成層地盤を対象としていたために、単位面積当たりの重量を考慮した土柱モデルを用いた静的非線形解析によって評価を行っていたが、盛土では高さによって幅が異なるとともに、2次元的な挙動の影響も考えられる。そこで、本検討ではこのうち高さによる重量変化の影響のみを図 1 に示すように考慮することとし、各位置毎に重量を調整した 1 次元の多層モデルを用いた静的非線形解析を実施することとした。また、盛土の地震時挙動を評価する場合には、支持地盤との相互作用の影響も無視できないと考えられ、この効果を適切に考慮する必要がある。そのため静的非線形解析を実施する際に、盛土本体の 1 次モード有効質量比も結果として算出することとする。

対象とする盛土は、一般的な鉄道盛土を想定し、高さ 9m、勾配 1:1.5、天端幅 10m とした。また盛土本体のせん断弾性波速度は 200m/s、重量 $\gamma=20\text{kN/m}^3$ の均質な材料で構成されているものとし、支持層は  $V_s=400\text{m/s}$ 、 $\gamma=20\text{kN/m}^3$  と設定した。各層に与える非線形の構成則は、GHE-S モデル<sup>2)</sup>とし、盛土中心位置の拘束圧を用いた規準ひずみ<sup>3)</sup>と各非線形パラメータ<sup>4)</sup>を設定した。静的非線形解析は、1 ステップでの増分変位  $\Delta\delta$  を 0.01cm とし、最終ステップの変位が 50cm となるように漸増载荷させた (計 5000 ステップ)。

以上の条件に従って、地盤全体系の静的非線形解析を実施した結果をまとめて図 2 に青線で示す。なおこれらの図は、横軸を規準変位 $\delta^1$  (剛性低下率  $G/G_0$  が初期剛性の 0.5 倍となる地表面変位) で除して規準化している。これらの結果を見ると、通常の水平成層地盤と同様に、天端変位の増加に伴う全体系の剛性低下、減衰の上昇が見られる。また、変位の増大に伴って、刺激関数  $PF$  は減少し、有効質量比  $EMR$  は多少増加していることが分かる。

続いて、この結果を再現できるような等価 1 自由度モデルのパラメータを設定した。この時の非線形構成則は GHE-S モデルで与え、その他のパラメータは、図 2 の解析結果を最も再現できるものを目視によって決定した。最終的なパラメータを表 1 に、このパラメータを用いて再現される  $G/G_0-\delta\delta$  関係、 $h-\delta\delta$  関係を図 2(a), (b) にそれぞれ点線で示す。これを見ると、盛土全体系の静的非線形解析結果を概ね適切に再現できており、このパラメータを用いることで、盛土全体の非線形挙動の再現が期待できる。

### (2) 非線形動的解析による妥当性の確認

構築した等価 1 自由度モデルによる応答評価の妥当性を評価するため、2次元の FEM による応答解析の結果を正解値と位置付けて、これ等価 1 自由度モデルによる結果との比較を行う。2DFEM モデルに付与するパラメータは、上記(1)の 1DMDOF モデルと基本的には同一である。ただし、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>4)</sup>によって非線形挙動を考慮することとしている。底面の境界条件は固定とした。動的解析時の減衰は、0.2Hz と 10Hz で 3% となるようなレイリー減衰を設定した ( $\alpha=9.362\text{E-}4$ ,  $\beta=7.392\text{E-}2$ )。入力地震動は、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 (G1 地盤) を用いた。また計算は、地盤を線形とした場合と非線形にした場合の 2 パターンの検討を実施した。さらに等価 1 自由度モデルによって得られた応答波形を盛土天端位置に換算する際には、簡易的に 1 自由度モデルによって得られる最大変位の時点での刺激関数  $PF$  を全時刻に用いることとした。

以上の条件に従って動的解析を実施した結果得られた盛土天端位置の応答波形と、天端応答の弾性応答スペクトルを図 3 にまとめて示す。まず線形解析の場合は、等価 1 自由度モデルによって盛土天端位置の応答をほぼ完全に再現できている。また非線形解析の場合においては、刺激関数を振幅の大きさに依存せず一定の値としているものの、2DFEM による応答を概ね再現できており、天端応答の応答スペクトルも調和的な結果を得ている。

## 3. まとめ

本検討では、鉄道盛土の地震時挙動を簡易に算定するための等価 1 自由度モデルを提案するとともに、詳細法による応答解析結果との比較を行った。本手法を用いることで、簡易かつ適切に盛土天端の応答を算定できることを確認した。

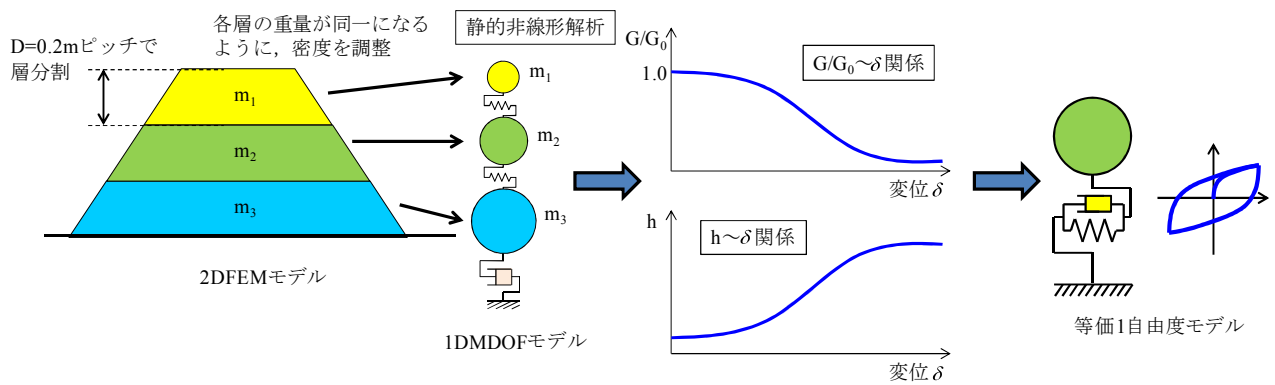


図1 盛土の等価1自由度モデルの作成手順の概要

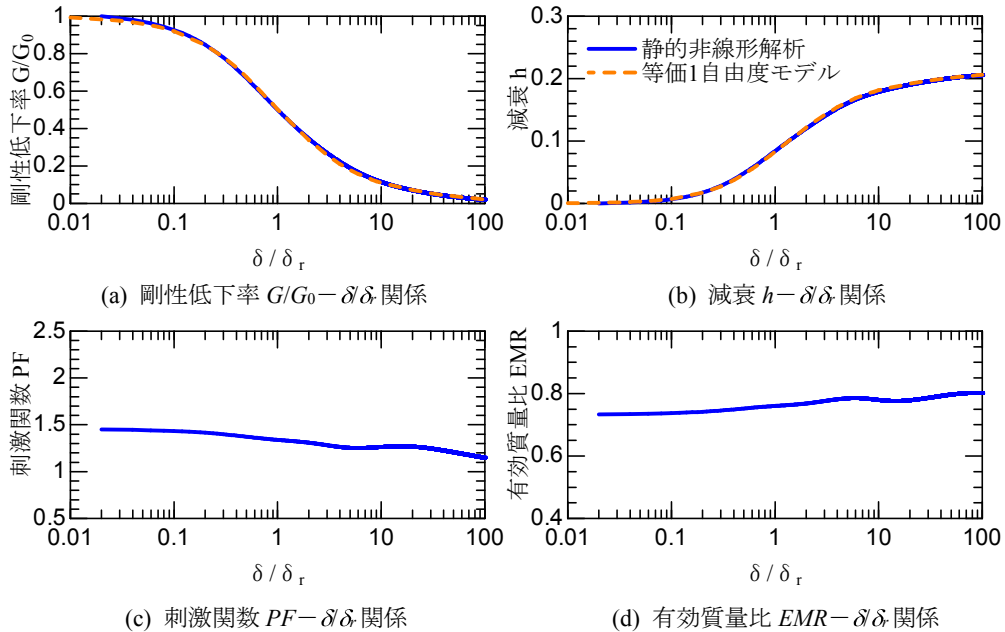


図2 盛土の静的非線形解析結果，パラメータ設定結果

表1 設定した等価1自由度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	1.00	0.15	2.5	0.87	1.15	1.30	0.21

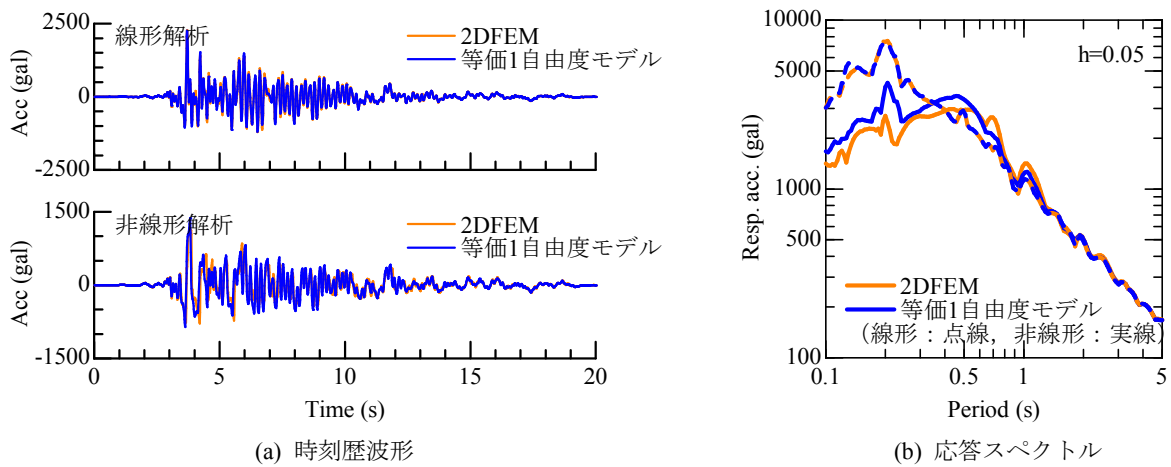


図3 盛土天端位置の応答波形算定結果

謝辞 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。

参考文献 1) 坂井，室野：土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.71，No.3，pp.341-351，2015。2) 室野，野上：第12回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.494-497，2006。3) 安田，山口：第20回土質工学研究発表会，pp.539-542，1985。4) Towhata and Ishihara：Proc. 5th International Conference for Numerical Method in Geomechanics，Vol.1，pp.523-530，1985。