

地震観測記録に基づく道路盛土の地震応答解析

石井 洋輔¹・大道 一步²・山田 雅行³・八木 悟⁴・長谷 東子⁵
増田 仁⁶・片岡 正次郎⁷

¹正会員 国土技術政策総合研究所 道路地震防災研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

²非会員 修（工）国土交通省 不動産・建設経済局情報活用推進課
（元 国土技術政策総合研究所 道路地震防災研究室）
（〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-2）

³正会員 博（工）株式会社ニュージェック 研究開発グループ
（〒531-0074 大阪市北区本庄東2丁目3番20号）

⁴正会員 修（工）株式会社ニュージェック 革新技術グループ（同上）

⁵非会員 博（工）株式会社ニュージェック 都市・上下水道グループ（同上）

⁶正会員 修（工）国土技術政策総合研究所 道路地震防災研究室長（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

⁷正会員 博（工）国土技術政策総合研究所 道路構造物管理システム研究官（同上）
（元 国土技術政策総合研究所 道路地震防災研究室長）

1. はじめに

2016年（平成28年）熊本地震では、地震により道路延長約120m区間の大規模な道路盛土の崩壊が発生した¹⁾。道路盛土をはじめとした盛土構造物は、橋等と比較して、地震被害を受けた際に迅速に復旧できるものの、道路盛土の耐災害性向上の必要性は、国土交通省の基本政策にも掲げられており²⁾、より一層の耐震対策が必要であると考えられる。

道路盛土の耐震対策の検討は、盛土崩壊発生可能性の評価³⁾や、近年では、道路ネットワークとしての耐災害性の評価²⁾がされている。一方、個別の道路盛土の耐震対策の検討は、室内実験⁴⁾や数値解析⁴⁾⁵⁾が主に実施されており、実挙動を用いた道路盛土の地震応答特性の評価は十分に実施されていない。性能照査による設計合理化の観点からも、個別の道路盛土の地震応答特性を観測記録を用いて詳細に把握する必要があることが考えられる。

道路盛土の耐震照査には、FEMモデル等を用いた地震応答解析を用いることもあるが、道路盛土の地震観測事例は少なく⁶⁾、実地震時の道路盛土の解析モデルの応答再現性は必ずしも検証されていない。

そこで本研究は、道路盛土で観測された地震記録を用いて、その観測記録を入力地震動として2次元モデルおよび3次元モデルで地震応答解析を行った。

解析結果と道路盛土で得られた観測記録と比較し、実地震による挙動と整合する解析結果を示すモデルを検討した。

2. 対象盛土と地震観測記録

(1) 対象盛土

本研究で対象とする道路盛土（以下、「対象盛土」という。）の航空写真および地形図を図-1に示す。対象盛土は、国総研で地震観測を実施しており、高知県の国道56号に位置する図-1の赤丸で示した箇所である。対象盛土は、延長約20m、道路天端幅約5.5m、基礎幅約25m、高さ約11mとして構築されている。また、地理院地図⁷⁾の土地条件より、対象盛土は、山地斜面等、及び谷底平野・氾濫平野に構築されており、比較的浅い深度に岩盤面（盛土底面の工学的基盤相当）が位置していると考えられる。

対象盛土位置の道路設計図より復元した、図-1に示す法線方向の盛土断面図を図-2に示す。なお、対象盛土と岩盤の境界線は推定線として図示している。

(2) 地震観測記録

図-1より、対象盛土は、盛土天端および周辺の地山に地震計が設置されている。対象盛土では、2004

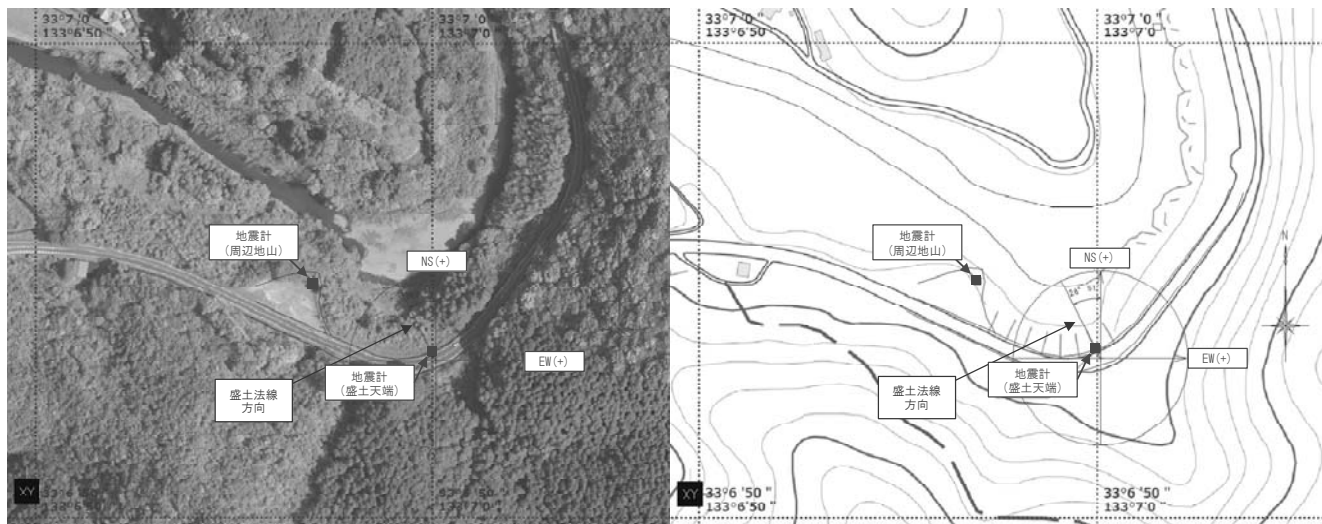


図-1 対象盛土（地理院地図を基に作成）（左図：航空写真，右図：地形図）

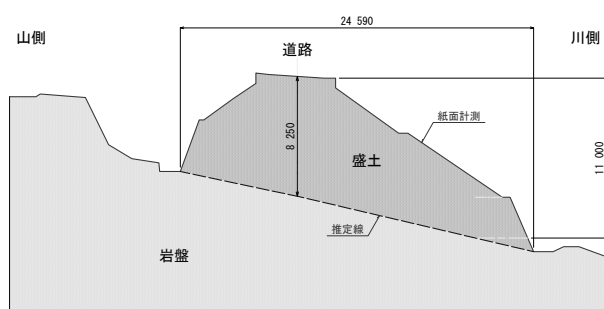


図-2 対象盛土法線方向断面図

～2019年の期間で地震観測を実施しており，最大震度5弱以上の地震は観測されていないが，最大震度4程度の地震が数回観測されている。

そこで，地震応答解析に用いる入力地震動として，2009年12月16日14時12分ごろに発生した土佐湾を震源とする地震（最大震度4）で観測された地震動を用いた．対象盛土周辺の地山で観測された時刻歴波形を図-3に示し，加速度応答スペクトル（減衰定数 $h=0.05$ ）を図-4に示す。

3. 常時微動観測

対象盛土の固有周期及び地盤の速度構造を把握するため，常時微動観測を実施した．本研究で実施した常時微動観測の観測地点を図-5に示す．観測は微動計を用いて，図-5の赤丸の地点で単点観測を実施し，青丸の地点で，図-6に示す4点アレー（60cmアレー）観測と中心から約10m離れた1点の5地点を同時に観測する極小アレー観測⁹⁾を実施した．微動観測の記録時間は1箇所あたり11分間，サンプリング周波数は100Hzとした．

図-5に示すTS12地点での単点観測で得られた，盛

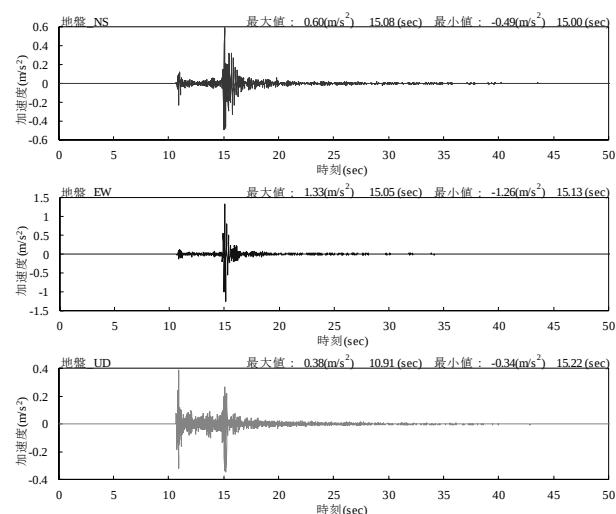


図-3 観測記録の時刻歴波形（周辺地山）

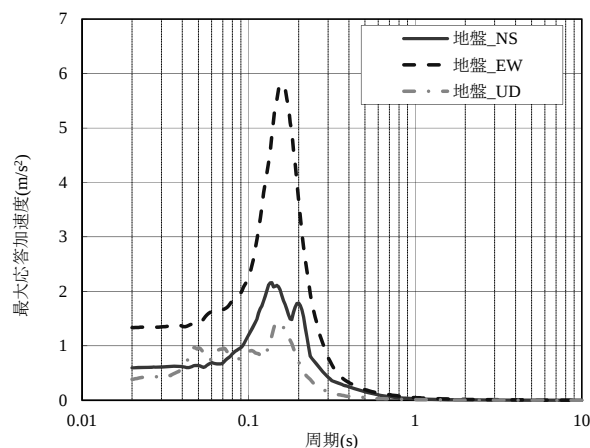


図-4 加速度応答スペクトル（減衰定数 $h=0.05$ ）

土法線方向の常時微動H/Vスペクトル比を図-7に示す．図-7より周期約0.17秒（約6.0Hz）及び周期約0.06秒（約18Hz）のピーク周期を確認した．常時微動H/Vスペクトル比のピーク周期は，地盤の固有周期と関係があると考えられている^{例えら9)}ため，図-7で確認されたピーク周期は，対象盛土の1次固有周

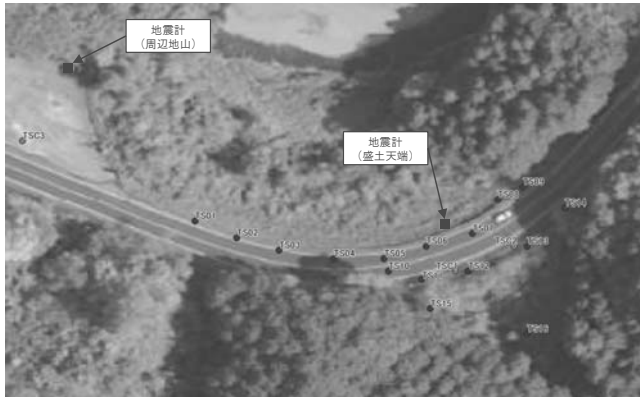


図-5 微動観測位置（地理院地図を基に作成）



図-6 微動観測（極小アレー観測）

期，2次固有周期と考えられる。

以上より，対象盛土の1次固有周期を約0.17秒（約6.0Hz）であると推定した。これは，盛土天端で観測された中小地震のフーリエスペクトルのピーク周期と概ね一致している。

次に，図-5に示すTSC2地点で実施した対象盛土の極小アレー観測で得られた観測記録より計算した，位相分散曲線¹⁰⁾を図-8に示す。対象盛土は，前述より，表層地盤と岩盤（盛土底面の工学的基盤相当）の2層で構成される地層区分と推定している。位相速度のうち，低周波数側は地盤の深部や工学的基盤のせん断波速度，高周波数側は地盤の浅部や表層地盤のせん断波速度と関係があると考えられる^{例えば11)}ため，図-8より，道路盛土の表層のせん断波速度 V_{s2} を200m/s，岩盤（盛土底面の工学的基盤面相当）のせん断波速度 V_{s1} は800m/s程度であると推定した。

4. 地震応答解析

(1) 2次元解析モデル

対象盛土の2次元解析モデルは，常時微動観測よ

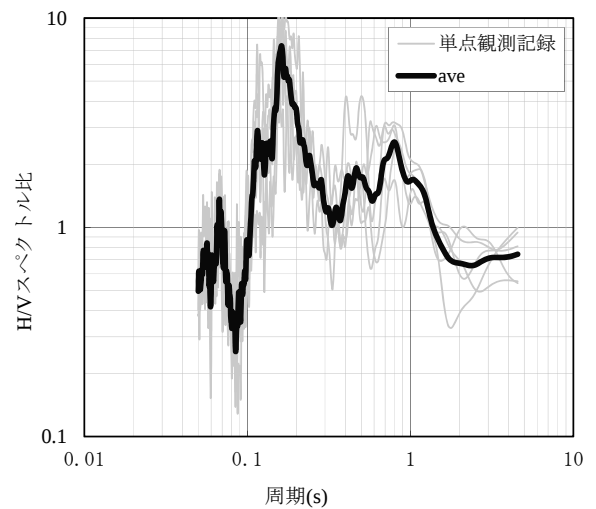


図-7 H/V スペクトル比（TS12）

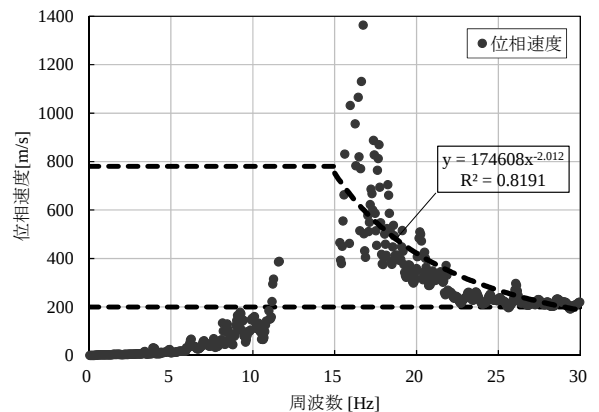


図-8 位相分散曲線（TSC2）

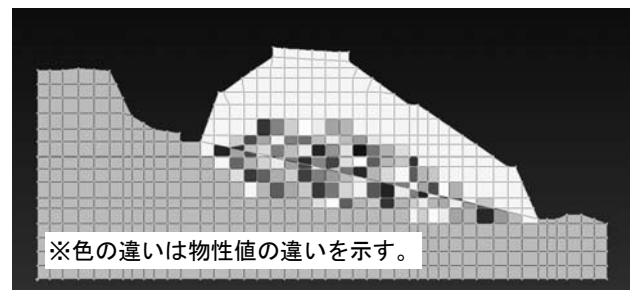


図-9 対象盛土の2次元解析モデル

り推定した地盤定数をもとに，対象盛土の表層地盤の速度構造 $V_{s1}=200\text{m/s}$ ，盛土底面の速度構造 $V_{s2}=800\text{m/s}$ を初期値として設定した。盛土の質量密度 ρ と初期減衰定数 h は，一般的な値として， $\rho=2.0\text{t/m}^3$ ， $h=0.03$ を設定した。盛土の非線形特性を考慮する場合は，対象盛土で過去に観測された地震動をもとに剛性低下率を逆解析した結果より，初期剛性の約81%とした。地盤層厚 H は，常時微動観測で推定された地盤の固有周期約0.17秒（約6.0Hz）を再現することが可能な層厚として，均質地盤で1次元地盤応答解析を実施し， $H=10\text{m}$ を設定した。これらの設定条件に対し，地盤のせん断弾性係数 G_0 は，

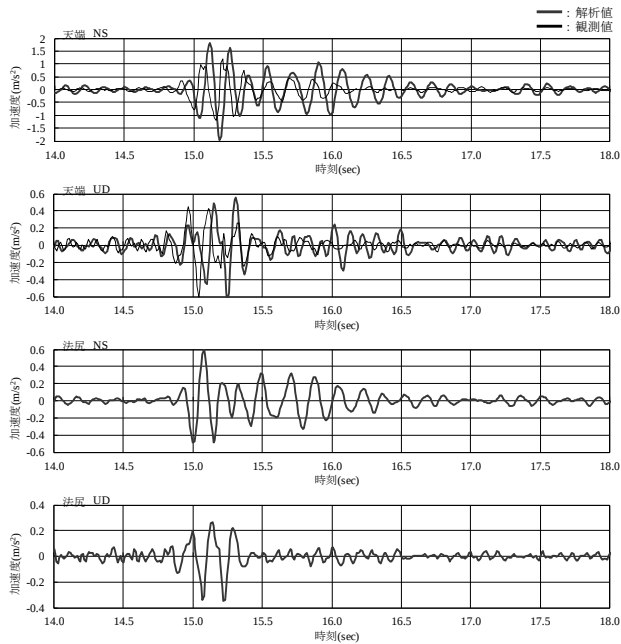


図-10 解析対象波形の加速度時刻歴

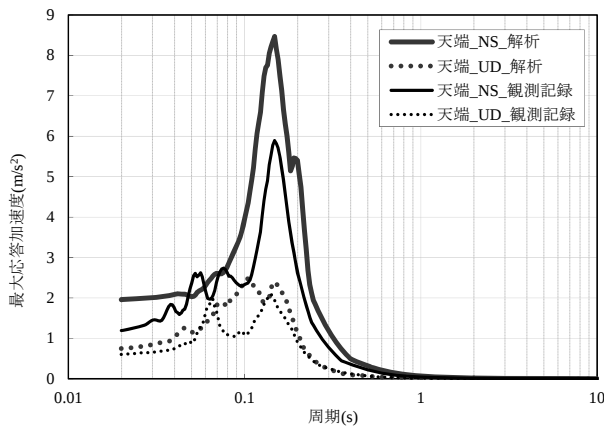


図-11 加速度応答スペクトル (減衰定数 $h=0.05$)

有効拘束圧 σ_m 、係数 A 、べき指数 $n=0.5$ の拘束圧依存性 ($G_0=A \cdot \sigma_m^{0.5}$) を考慮した。具体的には、盛土の深度ごとの有効拘束圧を自重解析で求め、地盤の固有周期約0.17秒 (約6.0Hz) を再現することが可能な係数 A を1次元地盤応答解析により同定した。

以上の条件をもとに作成した盛土の2次元FEMモデルを図-9に示す。2次元FEMモデルの最小要素サイズは、時刻歴地震応答解析の波動の透過振動数 f_0 を考慮し、 $1.0\text{m} \times 1.0\text{m}$ としている。なお、解析モデルの検討断面は、図-1に示す法線方向の断面とした。

(2) 2次元解析モデルによる地震応答解析

a) 初期解析

(1) で作成した2次元解析モデルに対し、図-3に示す周辺地山で観測された地震記録 (NS, UD 方向) を解析モデル底面に2成分の地震動を入力する地震応答解析を実施した。なお、解析モデルは盛土法線方向を断面として作成したが、盛土法線方向とNS方

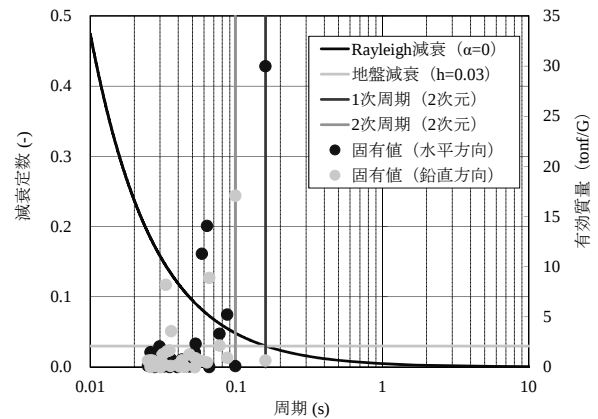


図-12 2次元モデルの Rayleigh 減衰

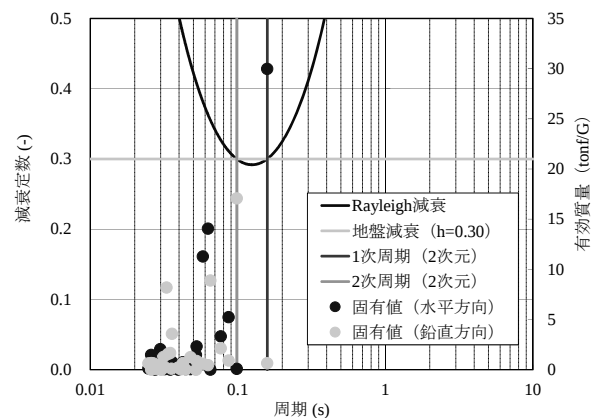


図-13 修正した2次元モデルの Rayleigh 減衰

向では、盛土内部のパラメータに大きな差はないと考え、本研究ではNS方向に観測された波形を方位修正せずそのまま入力した。盛土法尻および天端の応答の解析結果の時刻歴波形を図-10、加速度応答スペクトルを図-11に示す。

図-10および図-11より、本解析では、観測記録のピーク周期を捉えることができたが、盛土天端の加速度応答値は、2成分とも解析結果の方が過大に評価された。

b) 解析モデルの修正

図-11より、解析結果と観測記録の加速度応答スペクトルの卓越周期は一致しているため、運動方程式を構成する慣性力項 (質量) と復元力項 (剛性) は概ね再現できていると考えられる。そこで本研究では、調整が必要なパラメータとして、地盤の減衰定数に着目した。

なお、本研究では、観測記録を直接入力しているため、解析モデルの底面と側面の境界条件を固定境界としている。そのため、ダッシュポットなどの粘性境界で考慮することが可能な地下逸散減衰は考慮できていない。また、不均質地盤等にみられる散乱減衰なども通常の解析では考慮できない (例えば9)。

上記を踏まえ、地下逸散減衰や散乱減衰に相当す

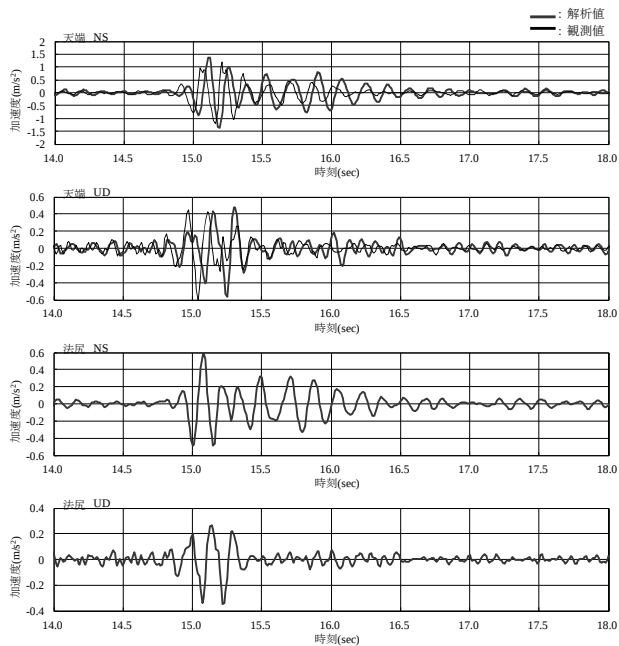


図-14 解析対象波形の加速度時刻歴

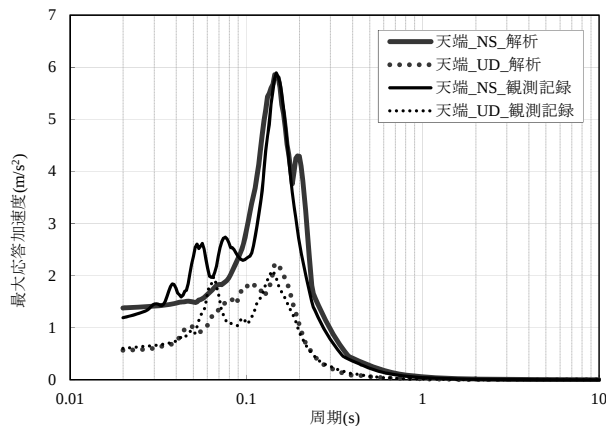


図-15 加速度応答スペクトル (減衰定数 $h=0.05$)

る減衰項をRayleigh減衰として加算することを目的として、解析モデルの減衰定数を調整した。また、(2)a)で実施した初期解析は、解析安定性を目的に質量項 α をゼロとした(1次固有周期のみによる)Rayleigh減衰を設定していたが、修正モデルでは、1次、及び2次固有周期を基準周期として、着目している周期帯の減衰定数が過大に評価されないようにRayleigh減衰を設定した。初期解析のRayleigh減衰を図-12、修正したRayleigh減衰を図-13に示す。観測記録を再現可能な減衰定数として、減衰定数 $h=0.3$ を設定した。

c) 修正モデルによる地震応答解析

図-13のRayleigh減衰を用いて、再度地山で観測された波形を用いて解析を実施した。修正モデルによる地震応答解析で得られた、盛土法尻および天端の応答の時刻歴波形を図-14、加速度応答スペクトルを図-15に示す。

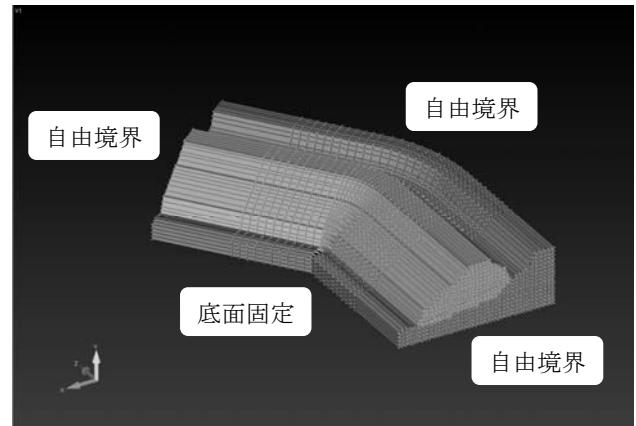


図-16 対象盛土の3次元解析モデル

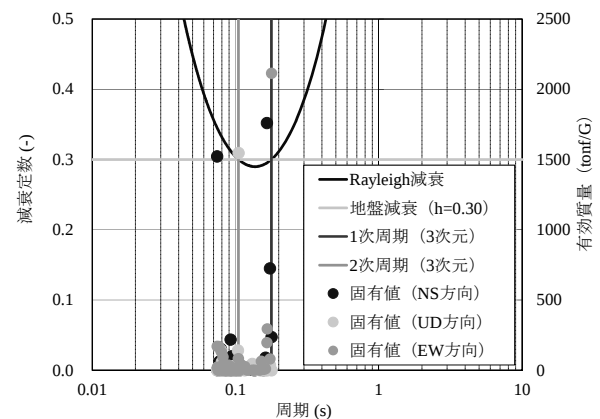


図-17 3次元モデルのRayleigh減衰

図-14および図-15より、加速度時刻歴波形の位相特性および振幅値、及び加速度応答スペクトルを見ると、修正前と比較して観測記録を概ね再現することができた。

(3) 3次元解析モデルによる地震応答解析

a) 解析モデル

対象盛土の3次元解析モデルは、図-9に示した2次元FEMの解析モデルのメッシュ分割をもとに、道路盛土の縦断線形に沿って平面要素を押し出すことで作成した。作成した3次元FEMの解析モデルを図-16に示す。

図-16の縦断線形は、総延長80mとして、曲線部の平面上の角度は 37° とし、直線区間は20mのメッシュ細分化区間と20mの緩衝領域をモデル化している。境界条件としては、地震観測記録を入力地震動とするため、底面境界は固定境界、側方境界はせん断波速度が大きい岩盤と道路盛土に緩衝領域をモデル化することより、自由境界とした。要素構成は、3次元ソリッド要素(等方連続体要素)を約18万要素で構成している。地盤の物性値は、道路盛土は $V_s=200\text{m/s}$ 、岩盤(盛土底面の工学的基盤)は $V_s=800\text{m/s}$ の均質物性としている。

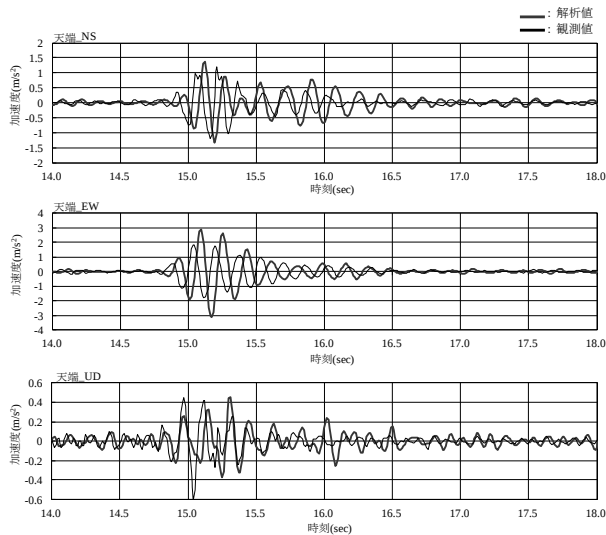


図-18 3次元解析の加速度時刻歴波形（天端）

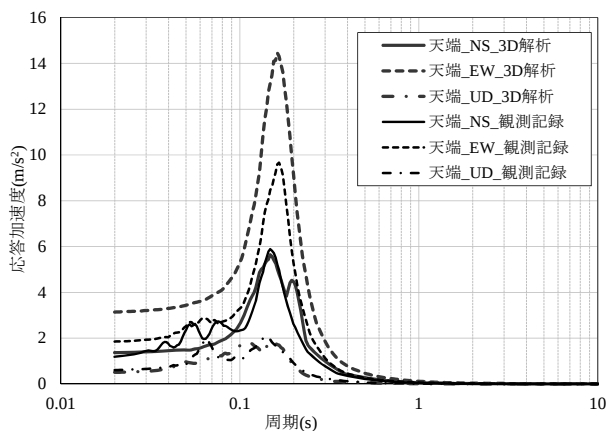


図-19 加速度応答スペクトル（減衰定数 $h=0.05$ ）

なお、3次元モデルのRayleigh減衰は、3次元モデルの固有値解析結果を基準に、2次元解析の減衰定数を参考にして、図-17のRayleigh減衰を設定した。

b) 解析結果

3次元解析モデルを用いた解析で得られた対象盛土天端の地震観測記録との比較（盛土天端の応答）の時刻歴波形を図-18、加速度応答スペクトルを図-19に示す。

図-19より、EW成分は解析結果が過大に評価されたものの、3成分ともピーク周期を捉えており、特にNS成分とUD成分は、2次元解析と概ね対応した結果となり、3次元解析特有の振動特性は確認されなかった。

なお、3次元解析でEW成分の大きさが再現できなかった理由として、底面境界を固定境界として設定しているため、散乱減衰等が考慮できていない可能や、縦断方向（EW方向）端部の境界条件など、解析モデルの境界条件の設定に課題があることが考えられる。

5. まとめ

本研究では、道路盛土を対象に、常時微動観測より作成した解析モデルを用いて、道路盛土で観測された地震観測記録の再現解析を実施した。その結果、解析モデルの減衰特性を修正することで、地震観測記録を概ね再現することができた。

今後、道路盛土を対象とした地震観測を継続して記録を蓄積し、解析モデルの再現性を検証していく。

謝辞：地震観測および微動観測にあたり、四国地方整備局中村河川国道事務所中村国道出張所にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所，（国研）土木研究所：平成28年（2016年）熊本地震土木施設被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料，No.967，2017.
- 2) 国土交通省：2040年、道路の景色が変わる，<https://www.mlit.go.jp/road/vision/pdf/01.pdf>（2020年11月27日閲覧）
- 3) 片岡正次郎，長屋和宏，松本幸司：新潟県中越地震時の道路盛土被害の分析，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 71, No. 4（地震工学論文集第34巻），pp. I_568-I_576, 2015.
- 4) 常田賢一，小田和広：道路盛土の耐震性能評価の方向性に関する考察，土木学会論文集C，Vol.65, No.4, pp.857-873, 2009.
- 5) 都間英俊，常田賢一，小田和広，江川祐輔：応答加速度分布に及ぼす盛土の幾何学的形状の影響に関する解析的研究，土木学会地震工学論文集，Vol.29, pp.1205-1210, 2007.
- 6) 西本聡，橋本聖，池田孝明，三輪滋，上明戸昇：地震観測記録を用いた軟弱地盤上の道路盛土の地震時挙動分析，土木学会論文集 C，Vol.64 No.4, 802-812, 2008.
- 7) 国土地理院：地理院地図ウェブサイト，<https://maps.gsi.go.jp/>（2020年11月27日閲覧）
- 8) （社）物理探査学会：新版物理探査適用の手引き，2008.
- 9) 長尾毅，山田雅行，野津厚：常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究，構造工学論文集 Vol.56A, pp.324-333, 2010.
- 10) 長郁夫，多田卓，篠崎祐三：極小アレイによる新しい微動探査法～浅部地盤平均S波速度の簡便推定，物理探査，61, 457-468, 2008.
- 11) 吉田望：地盤の地震応答解析，鹿島出版会，2010.