堤体の地震応答を考慮した盛土構造物の地震時安全性簡易評価手法に関する研究

京都大学工学研究科　学生員　○眞邉寛人　京都大学地球環境学堂　正会員　古川愛子
京都大学地球環境学堂　正会員　清野純史

1. 研究の背景と目的

近年の地震では道路盛土に甚大な被害が発生している．道路盛土の耐震化を考える場合，1 箇所の損傷が全体の性能に影響を及ぼすため，路線全体に対して安全性を照査する必要がある．したがって，照査すべき盛土の箇所数が膨大となるため，簡易な方法によって安全性の十分でない箇所を抽出する必要がある．盛土の地震時安全性の照査では，円弧すべりを仮定した Newmark 法が一般的であり，設計要領[1]等では地震応答を考慮した Newmark 法が明記されている．この手法では，Newmark 法に入力する等価加速度を算定するのに有限要素解析を実施する必要がある．等価加速度を簡易に推定することが可能となれば，地震応答を考慮した Newmark 法に基づく滑動量を簡易に算出でき，大変有用であると考えられる．以上を鑑み本研究では，地震応答を考慮した Newmark 法と同じ結果をより簡易に推定する手法として，等価加速度を簡易に推定する手法を提案することを目的とする．また，設計地震動など照査によく用いられる地震動に対しては，予め滑動量を算出しておくのが簡便と考え，滑動量を指標とした地震動の簡易表現法として，滑動量スペクトルを提案する．さらに，常に対象地点の想定地震動の加速度波形が与えられるとは限らないことから，地震動の最大加速度と最大速度のみが与えられた場合に盛土の滑動量を概算する手法を検討する．

2. 提案する地震時安全性簡易評価手法

(1) 1 自由度系による等価加速度の推定

固有周期 T，減衰定数 h を持つ 1 自由度系の絶対応答加速度 $a_{obs}(t)$と有限要素解析から得られる等価加速度 $a_{eq}(t)$との残差平方和 S を最小とする 1 自由度系の固有周期 T 及び減衰定数 h を最小二乗法によって同定し，それぞれ等価固有周期 T_{eq} 及び等価減衰定数 h_{eq} と定義する．また，等価固有周期 T_{eq} 及び等価減衰定数 h_{eq} を持つ 1 自由度系の応答加速度を再現加速度と呼ぶ．

(2) 解析ケース及び入力地震動

本研究では，せん断波速度 V_s，盛土高 H 等を変化させた 19 通りの解析ケースを用い，入力地震動には，道路橋示方書[2]のレベル 2 地震動から 6 波形を使用する．

(3) 等価固有周期及び等価減衰定数の推定式

等価固有周期 T_{eq} と盛土のせん断波速度 V_s 及び盛土高 H の関係を図-1 に示す．図-1 より，等価固有周期の推定式を式(1)で提案する．また，等価減衰定数は盛土の各諸元に対して概ね一定値となる傾向から，等価減衰定数の推定式を式(2)で提案する．

$$T_{reg} = 3.451 \cdot H / V_s \quad (1) \qquad h_{reg} = 0.157 \quad (2)$$

ここで，T_{reg} は推定式から求まる等価固有周期，h_{reg} は推定式から求まる等価減衰定数である．また，推定式から求まる等価固有周期 T_{reg} 及び等価減衰定数 h_{reg} を持つ 1 自由度系の応答加速度を推定加速度と呼ぶ．

(4) 1 自由度系による等価加速度の推定結果

横軸に等価加速度，縦軸に再現加速度による滑動量をプロットしたものを図-2，横軸に等価加速度，縦軸に推定加速度による滑動量をプロットしたものを図 3-に示す．図-2 より，全体的に良好な精度で一致しており，等価加速度を 1 自由度系の応答加速度で十分推定できている．図-3 より，全体的に良好な精度で一致しており，推定式により滑動量は十分推定できている．

(5) 提案する地震時安全性簡易評価手法

Newmark 法の運動方程式は以下の式で表され，降伏震度 k_y および滑動係数 p を推定する推定式[3]がある．

$$\ddot{\delta}(t) = p \cdot (k_h(t) - k_y) \quad (3)$$

第 1 段階では，推定式[3]から求まる降伏震度 k_y を降伏加速度に換算し，入力地震動の最大地動加速度と比較し照査する．第 2 段階では，式(1)(2)から求まる固有周期と減衰定数を持つ 1 自由度系の応答加速度を震度 $k_h(t)$に換算し式（3）に入力し，得られた滑動量$\delta(t)$を許容値と比較して照査する．

3. 滑動量を指標とした地震動の簡易表現

(1) 滑動量スペクトルの定義

滑動量スペクトルは，地震動毎に等価な 1 自由度系による応答加速度を算出し，得られた応答加速度による盛土の滑動量を表したものである．1 自由度系の応答加速度を震度に換算したものを $k_{heq}(t)$とすると，Newmark 法の運動方程式から，次式が得られる．

$$\ddot{\delta}(t) / p = k_{heq}(t) - k_y \quad (4)$$

地震動後の滑動量を δ_{eqr} とすると，式(4)より，横軸に降伏震度 k_y，縦軸に滑動量を滑動係数 p で割った δ_{eqr}/p を，固有周期 T と減衰定数 h を凡例にとりプロットしたものを 1 つ目の定義，降伏震度 k_y と固有周期 T を入れ替えたものを 2 つ目の定義とする．

(2) 滑動量スペクトルの算出

道路橋示方書のレベル 2 地震動 18 波形に対して滑動量スペクトルを図化した．例として，TYPE I-I-1，I-II-1，I-III-1 の地震動の加速度応答スペクトルを図-4 に示す．これらの地震動の継続時間に概ね等しく，また，図-4 より，TYPE I-III-1 の地震動は長周期成分が卓越している．

キーワード　盛土構造物，地震時安全性，簡易評価手法，堤体の地震応答
連絡先　〒615-8540　京都府京都市西京区京都大学桂 C1

(3) 滑動量スペクトルの算出結果

例に挙げた地震動に対する滑動量スペクトルを図-5に示す．図-5より，降伏震度が小さいときは，長周期成分が卓越する TYPE I-III-1，降伏震度 k_y=0.5 付近では TYPE I-I-1 の地震動に対する滑動量スペクトルが大きくなることがわかる．また，滑動量スペクトルを用いると，以下の手順で滑動量を算出することができる．

手順 1：設計地震動など耐震設計によく用いられる地震動に対して滑動量スペクトルを算出しておく．

手順 2：照査する盛土の固有周期と減衰定数を式(1)(2)から，降伏震度と滑動係数を回帰式 [3]から算出する．

手順 3：降伏震度に対応する滑動量スペクトルの縦軸の値に滑動係数を乗じ，滑動量を算定する．

4. 盛土の地震被害推定ノモグラム

(1) 地震被害推定ノモグラムの算出

ある地震動に対する 1 自由度系の応答加速度を算出し，Newmark 法に入力したときの滑動量を算出する．得られた滑動量が目標滑動量となるよう地震動の振幅を調整し，地震動の最大加速度 PGA と最大速度 PGV を算出する．また，地震動の卓越周期 T は次式から簡易的に算定する．

$$T = 2\pi \cdot PGV / PGA \qquad (5)$$

ここで，T_{eq} は盛土の固有周期，k_y は降伏震度とすると，正規化周期 T_r，正規化加速度 A_r を次式により評価する．

$$T_r = T / T_{eq} \qquad (6) \qquad A_r = PGA / (k_y \cdot g) \qquad (7)$$

横軸に正規化周期 T_r，縦軸に正規化加速度 A_r をプロットし，盛土の地震被害推定ノモグラムを構築する．

(2) 被害推定ノモグラムの構築

道路橋示方書のレベル 2 地震動に対する被害推定ノモグラムの算出結果(目標滑動量 δ_r=100cm の場合)を図-6 に示す．図-6 より，正規化周期 T_r=1 付近で正規化加速度 A_r は最小となる傾向が見られる．本研究では，安全側の評価のために，各目標滑動量を生じる正規化加速度 A_r の下限値を包絡する曲線を次式の形で提案し，盛土の地震被害推定ノモグラムを構築する．

$$A_r = k_3 / (T_r / k_1) \times \sqrt{\left(1 - (T_r / k_1)^2\right)^2 + 4k_2^2 (T_r / k_1)^3} \qquad (8)$$

図-6 の黒線は式(8)によって，下限値を包絡する曲線を表したものである．このときの回帰係数 k_1，k_2，k_3 は図中に示す．図-6 より，下限値を包絡する曲線を概ね良好に再現できている．また，図-7 は，目標滑動量毎の包絡線を合わせて示したものであり，下限値を包絡したとき，正規化加速度 A_r の差は小さいことがわかる．

(3) 被害推定ノモグラムを用いた被害推定手法

盛土の地震被害推定ノモグラムを用いた地震時滑動量を概算する手法の手順は以下で表される．

手順 1：各地点の地震動の最大加速度，最大速度を取得し，式(5)から地震動の卓越周期 T を算出する．

手順 2：盛土の固有周期 T_{eq} と降伏震度 k_y の関係から，図-7 の地震被害推定ノモグラムを用いて，盛土の滑動量を概算し，被害レベルを判定する．

5. 結論

本研究では，地震応答を考慮した盛土の地震時安全性を簡易に評価する手法の検討した．提案手法は，地震応答を考慮した Newmark 法に基づく滑動量が許容値を上回るかどうかで地震時安全性を評価するが，有限要素解析及び Newmark 法解析を行わずに，地震応答を考慮した Newmark 法と同じ滑動量をより簡易に推定することができる．次に，地震動が盛土の滑動量に及ぼす影響を表現する指標として滑動量スペクトルを提案した．滑動量スペクトルにより，地震動の周期特性が滑動量に及ぼす影響を表現できる．さらに，限られた指標から盛土の地震時滑動量を概算する被害推定ノモグラムの検討を行い，地震動の最大加速度と最大速度のみから，盛土の地震時滑動量を概算することができる．

参考文献

1) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社:設計要領　第一集　土工編，2013.　2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説　V 耐震設計編，2012.　3) 真辺寛人：滑動量を指標とした道路盛土構造物の地震時安全性簡易評価手法に関する研究，京都大学卒業論文，2014.

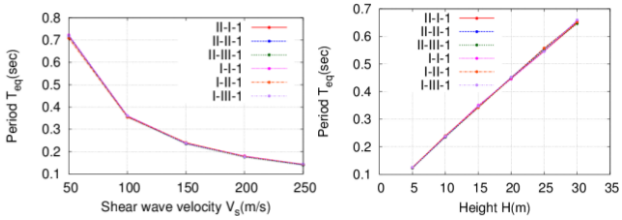

図-1 せん断波速度及び盛土高と等価固有周期の関係（左：せん断波速度，右：盛土高）

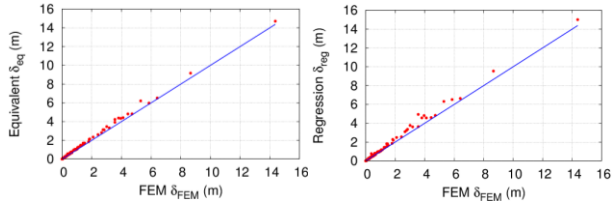

図-2　1 自由度系による推定結果

図-3　推定式を用いた滑動量の再現結果

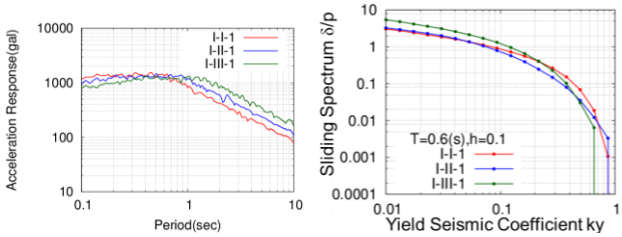

図-4 加速度応答スペクトル　図-5 滑動量スペクトル

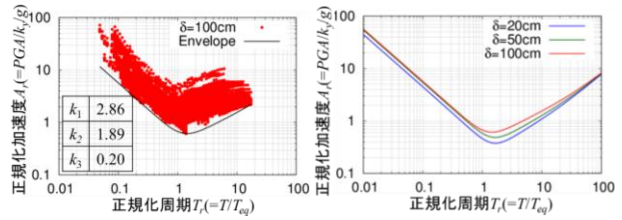

図-6 ノモグラム算出結果　図-7 被害推定ノモグラム