

京都大学工学部地球工学科 学生会員 ○真辺 寛人

京都大学大学院地球環境学堂 正会員 古川 愛子

京都大学大学院地球環境学堂 正会員 清野 純史

1. 研究の背景と目的

近年の地震において、道路盛土構造物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箇所損傷が全体の性能に影響を及ぼす可能性があるため、路線全体に対して安全性を評価する必要がある。しかし、全国の盛土は膨大な数に及ぶため、簡易な方法により安全性の十分でない箇所を抽出する必要がある。現行の地震時安全性評価手法としては、Newmark 法¹⁾による照査が一般的であるが、円弧の探索などの計算工程を必要とするため、広範囲な盛土を対象に照査するためには膨大な時間を必要とする。このことから、Newmark 法による滑動量を簡易に算出することが望まれる。以上を鑑み本研究では、Newmark 法による滑動量を簡易に算出する手法を構築する。また、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。

2. 提案する地震時安全性簡易評価手法

2.1 Newmark 法による滑動量の運動方程式

円弧すべりを仮定した Newmark 法による滑動量 $\delta(t)$ の運動方程式は、次のように表される。

$$\ddot{\delta}(t) = p \cdot (k_h(t) - k_y) \quad (1) \quad p = r \cdot (M_{RK} + M_{DK}) / J \quad (2)$$

ここで、 r はすべり円弧の半径、 $k_h(t)$ は時間 t における土塊に作用する地動加速度 $a(t)$ を震度 $k_h(t) (= a(t)/g)$ に換算したもの、 k_y は降伏震度、 J は土塊の慣性モーメント、 M_{RK} 、 M_{DK} はそれぞれ震度 $1g$ による地震慣性力が作用した場合の抵抗モーメントと滑動モーメントである。また、 p は式(2)のように表され、本研究では滑動係数と定義する。式(1)より、滑動量 $\delta(t)$ を算定する際に必要な盛土のパラメータは、降伏震度 k_y と滑動係数 p である。本研究では、これらのパラメータを簡易に推定する手法を構築する。

2.2 解析モデル

解析モデル、盛土地盤の諸元を図 1、表 1 に示す。盛土の材質としてせん断抵抗角 ϕ を 6 種類と粘着力 c を 5 種類設定した。また、盛土高 H として 18 通り、盛土勾配 θ として 3 通りの盛土モデルに対して、Newmark 法における降伏震度 k_y と滑動係数 p を算出した。

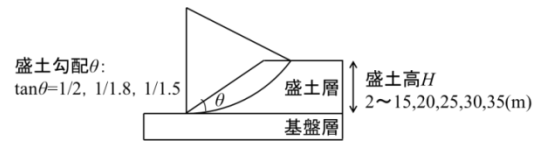


図 1 解析モデル

表 1 盛土地盤の諸元

土質区分	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断抵抗角 $\phi(^{\circ})$	粘着力 c (kN/m ²)
土質1	20	40	0,3,5,10,15
土質2	20	35	0,3,5,10,15
土質3	19	30	0,3,5,10,15
土質4	19	25	0,3,5,10,15
土質5	18	20	0,3,5,10,15
土質6	18	15	0,3,5,10,15

2.3 降伏震度 k_y 、滑動係数 p の算定結果

例として、盛土勾配 $\tan\theta = 1/2.0$ 、せん断抵抗角 $\phi = 30^{\circ}$ 、粘着力 $c = 0, 10$ (kN/m²) の盛土モデルに対して、降伏震度 k_y 及び滑動係数 p と盛土高 H の関係を算出した結果を図 2 に示す。図 2 より、粘着力の有無によって盛土高 H に対する傾向が異なることが確認された。

2.4 降伏震度 k_y 、滑動係数 p を推定する回帰式

まず、粘着力を考慮しない場合について、回帰式を構築する。続いて、粘着力を考慮する場合については、粘着力を考慮しない場合からの変化量に対して回帰式を構築し、粘着力を考慮しない場合を足し合わせることで、回帰式を構築する。構築した回帰式を式(3)、(4)に示す。また、式(3)、(4)の各係数 α_k 、 β_k 、 γ_k 、 α_p を式(5)~(8)に示す。

$$k_y = 0.823 \tan\phi - 0.652 \tan\theta - 0.0761 + \alpha_k / H^2 + \beta_k / H + \gamma_k \quad (3)$$

$$p = 6.79 \tan\theta \tan\phi + 1.09 \tan\phi - 3.18 \tan\theta + 10.543 + \alpha_p / H \quad (4)$$

$$\alpha_k = (0.153 \tan\phi - 0.241) \cdot c \quad (5)$$

$$\beta_k = (0.000705 \tan\phi - 0.00907) \cdot c^2 + (-0.193 \tan\phi + 0.403) \cdot c \quad (6)$$

$$\gamma_k = (-0.000197 \tan\phi + 0.000251) \cdot c^2 \quad (7)$$

$$\alpha_p = (0.135 \tan\theta / \tan\phi - 0.0567) \cdot c \quad (8)$$

また、横軸に Newmark 法におけるパラメータの算出結果、縦軸に回帰式からパラメータを算出した結果をプロットしたものを図 3 に示す。図 3 より、降伏震度及び滑動係数ともに、よく一致しているといえる。

2.5 提案する地震時安全性簡易評価手法

図 4 に提案する地震時安全性簡易評価手法のフローチャートを示す。第 1 段階では、回帰式から算出された降伏震

度 k_y から降伏加速度 $a_y (= k_y \cdot g)$ を算出し、入力地震動の最大地動加速度 PGA と比較し、照査する。第2段階では、回帰式から降伏震度 k_y と滑動係数 p を算出し、Newmark 法の運動方程式から最終滑動量 δ_r を算出する。算出された最終滑動量 δ_r と変形の許容値を比較し、照査する。

3. 滑動量を指標とした地震動の簡易表現

3.1 滑動量スペクトルの定義

Newmark 法による滑動量の運動方程式は式(1)で表されることから、この式を変形すると次式が得られる。

$$\ddot{\delta}(t)/p = k_h(t) - k_y \quad (9)$$

式(9)より、横軸に降伏震度 k_y 、縦軸に Newmark 法による最終滑動量 δ_r を滑動係数 p で割った δ_r/p をプロットしたものを滑動量スペクトルと定義する。

3.2 入力地震動

入力地震動として、道路橋示方書²⁾のレベル2地震動18波形を使用した。例として、TYPE I-II-1、I-II-3、I-III-3の加速度波形を図5、加速度応答スペクトルを図6に示す。図5より、TYPE I-II-3はTYPE I-II-1に比べて継続時間が長いことがわかる。また、図6より、TYPE I-III-3は長周期成分が卓越していることがわかる。

3.3 滑動量スペクトルの算出結果

上で挙げた入力地震動に対する滑動量スペクトルを算出し図7に示す。図7より、継続時間が長いあるいは長周期成分が卓越している地震動ほど、降伏震度が小さくなるにつれて滑動量スペクトルが急に増加する傾向がある。

3.4 滑動量スペクトルを用いた滑動量の算出法

滑動量スペクトルを用いた滑動量の算出法は、以下の手順で表される。

- 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: 盛土の降伏震度と滑動係数を、回帰式から算出する。
- 手順3: 降伏震度に対応する滑動量スペクトルの縦軸を読み取り、滑動係数を乗ずることで滑動量を算出する。

4. 結論

本研究では、道路盛土の地震時安全性を簡易に評価する手法の提案した。まず、道路盛土の地震時における滑動量を Newmark 法によって算定する際に必要なパラメータを簡易に推定する回帰式を構築した。構築した回帰式を用いることで、盛土の地震時安全性を簡易に評価することができる。さらに、本研究では、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。

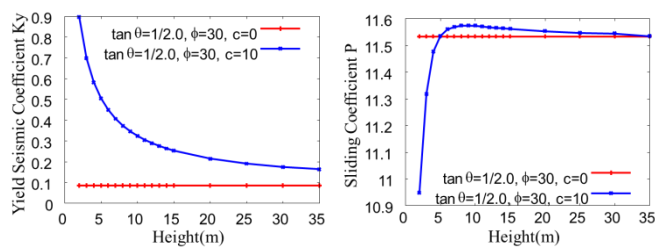


図2 盛土高と降伏震度及び滑動係数の関係

(左: 降伏震度 k_y , 右: 滑動係数 p)

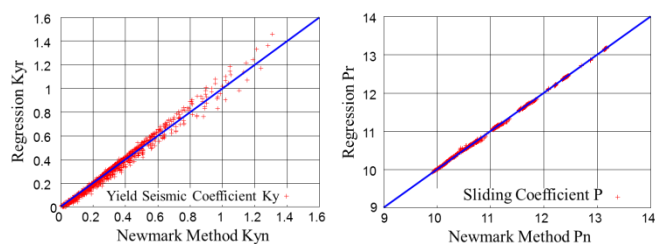


図3 回帰式の精度に関する検討結果

(左: 降伏震度 k_y , 右: 滑動係数 p)

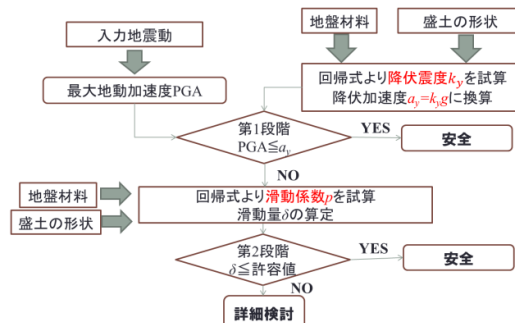


図4 提案手法のフローチャート

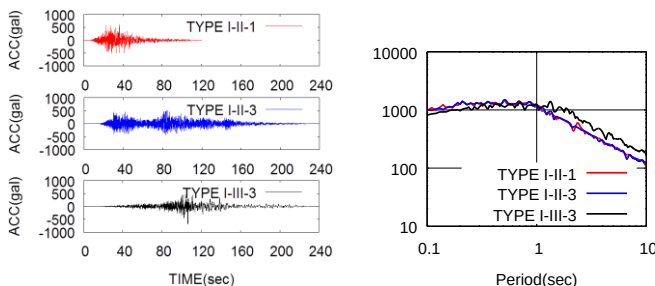


図5 加速度波形

図6 加速度応答スペクトル

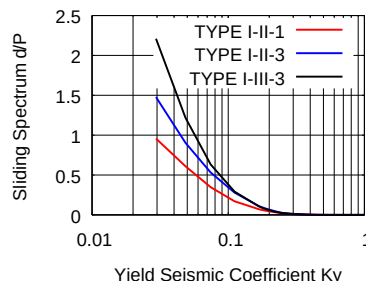


図7 滑動量スペクトル

- 参考文献 1) Newmark, N.M.: Effects of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique*, Vol.15(2), 139-159, 1965.
2) 社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2012.