

京都大学工学部 学生員 ○水上 輝
京都大学工学研究科 正会員 清野 純史

京都大学工学研究科 正会員 古川 愛子

1. 研究の背景と目的

近年の地震において、道路盛土構造物の甚大な被害が発生している。全国の盛土の耐震化のためには、路線全体に対する盛土の地震時安全性を評価し、耐震補強の必要な箇所の抽出が必要である。現行の盛土の地震時安全性評価手法としては、Newmark 法が代表的である。Newmark 法は有限要素法に比べると簡易な手法であるが、盛土毎に安全率が最小となる円弧を探索する必要がある。全国に存在する盛土は膨大な数に及ぶので、より簡易でかつ精度よい評価手法の開発が望まれる。以上を鑑み本研究では、Newmark 法による評価と同等の精度を持つ簡易な評価手法の開発を目指す。

2. 提案する地震時安全性簡易評価手法

本研究では、円弧すべりを仮定した Newmark 法により算定された滑動変位量が許容値以内に収まるかどうかで地震時安全性を評価することとする。提案手法は 2 段階からなり、それぞれについて説明する。

(1) 等価降伏加速度を用いた評価手法

第 1 段階では、Newmark 法による滑動変位量が許容値に一致するときの最大地動加速度を“等価降伏加速度”と定義し、照査用地震動の最大地動加速度と等価降伏加速度を比較することによって安全性を満たさない可能性のある盛土を抽出する。等価降伏加速度は、あらかじめ Newmark 法の計算によって整理しておく。盛土毎に様々な地震動を振幅調整して入力し、等価降伏加速度を整理する。滑動変位量は最大地動加速度だけでなく、継続時間の影響も強く受けることから、継続時間の影響を表す指標を用いて等価降伏加速度を整理することとする。継続時間を考慮に入れた指標として Arias 強度 $I_a^{(1)}$ があるが、本研究では Arias 強度を修正した修正 Arias 強度 $I_a^{(m)}$ を新たに提案し採用する。Arias 強度および修正 Arias 強度は次式で表される。

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} (a(t))^2 dt \quad I_a^{(m)} = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} \{\max(a(t) - a_y, 0)\}^2 dt \quad (1)$$

ここに、 g は重力加速度、 $a(t)$ は時間 t における地動加速度、 T_d は継続時間、 a_y は降伏加速度である。 a_y の算

定方法については後述する。Arias 強度は加速度振幅の二乗和で表され、振幅と継続時間の影響を含んだ指標である。しかし、盛土の滑動を引き起こすのは地動加速度が降伏加速度（滑動が起こる最小の地動加速度）を超えたときのみであることから、修正 Arias 強度では地動加速度が降伏加速度を上回る分だけ二乗和を取ることとした。盛土高や媒質の異なる盛土毎に等価降伏加速度を修正 Arias 強度 $I_a^{(m)}$ の関数 $A_r(I_a^{(m)})$ として整理しておき、照査用地震動の最大地動加速度 A_{PGA} が $A_r(I_a^{(m)})$ を上回る場合に滑動変位量が許容値を超える可能性のある盛土として抽出する。

(2) 平面すべりを仮定した評価手法

第 2 段階では、第 1 段階で抽出された盛土に対し、平面すべりを仮定した簡易計算により滑動変位量を算定する。滑動変形量 x の運動方程式は次の通りである。

$$\ddot{x} = p_y^f (a(t) - a_y^f) \quad (2)$$

ここに、 p_y^f は $p_y^f = \cos \theta (1 + \tan \theta \tan \phi)$ で表される加速度に掛かる係数である。 θ は盛土の傾斜角、 ϕ は内部摩擦角、 a_y^f は平面すべりを仮定した際の降伏加速度で、 $a_y^f = g(\tan \phi - \tan \theta) / (1 + \tan \phi \tan \theta)$ で表される。平面すべりを仮定した簡易計算では、安全率が最小となる円弧の探索が不要で、Newmark 法に比べて簡易である。

以上述べた照査手法のフローチャートを図 1 に示す。

3. 提案手法の有効性検証

3.1 解析モデル

解析モデルを図 2 に示す。盛土高は 10, 20, 30m の 3 通り、斜面勾配は 1:1.8 とした。砂質土を仮定し、単位体積重量を 19 kN/m^3 、粘着力は 0 kN/m^2 、内部摩擦角はピーク強度で 40° 、残留強度で 35° とした。式(1)の降伏加速度 a_y は残留強度から算定した。

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 波形と、新潟県中越地震時の観測記録の 8 波形、および強震動計算によって評価された高知自動車道における想定地震動 24 波形の計 50 波形を使用した。

3.3 解析結果

(1) 等価降伏加速度を用いた評価手法

滑動変位量の許容値を 20cm と仮定したときの、50 波形に対する等価降伏加速度を盛土高毎に図 3 に示す。地震動によるばらつきが大きい。安全側の評価をするには下側を包絡する線で等価降伏加速度を決定するのがよいと考えられるが、多くの安全な盛土を候補に残してしまうことになる。そこで、等価降伏加速度を Arias 強度および修正 Arias 強度との関係で整理すると図 4 のようになる。Arias 強度に比べ、修正 Arias 強度で整理した場合は地震動毎のばらつきが低減されていることがわかる。安全側の評価のため、図 4 右のプロット点の下側を通る直線を引き、等価降伏加速度を修正 Arias 強度の関数 $A_r(I_a^m)$ で表現する。以上のように修正 Arias 強度を用いることによって、滑動変位量が許容値を上回る盛土を効率よく抽出できるようになる。

(2) 平面すべりを仮定した照査手法

平面すべりを仮定した簡易手法による滑動変位量と円弧すべりを仮定した Newmark 法による滑動変位量の比較を図 5 左に示す。簡易手法は滑動変位量を過大評価している。過大評価自体は安全性の低い盛土を取りこぼさないという点でよい性質であるが、精度を上げるために式(2)に補正を施す。具体的には、平面すべりを仮定した運動方程式(2)における係数 p_y^f と降伏加速度 a_y^f を、Newmark 法における係数 p_y^c と降伏加速度 a_y^c に一致するように補正係数 α_p 、 α_{a_y} を用いて補正する。

$$\ddot{x} = \alpha_p \cdot p_y^f (a(t) - \alpha_{a_y} \cdot a_y^f) \quad (3)$$

Newmark 法では p_y^c と a_y^c を解析的に得ることができないため、盛土毎に数値的に算出した。なお、式(2)の修正 Arias 強度の算定の際に必要な降伏加速度 a_y は、 $a_y = \alpha_{a_y} \cdot a_y^f$ によって算定できる。補正した運動方程式(3)を解いて得られる滑動変位量と Newmark 法による滑動変位量の比較を図 5 右に示す。補正によって平面すべりを仮定した滑動変位量は円弧すべりを仮定した滑動変位量と良好な一致を示していることがわかる。

4. 結論

本研究では、照査用地震動の最大地動加速度と盛土毎の等価降伏加速度を比較することによる第 1 段階の評価と、平面すべりを仮定した簡易計算による第 2 段階の評価を組み合わせた 2 段階の盛土の地震時安全性評価手法を提案し、数値解析により有効性を検証した。

提案手法は、事前に盛土毎に等価降伏加速度や補正係数を整理しておけば、簡易に Newmark 法と変わらない精度で盛土の安全性を評価することが可能である。

参考文献 1) Arias, A. : A measure of earthquake intensity. In: Hansen, R.J. (Ed.), Seismic Design for Nuclear Power Plants. Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, MA, 438-483, 1970. 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，2012。

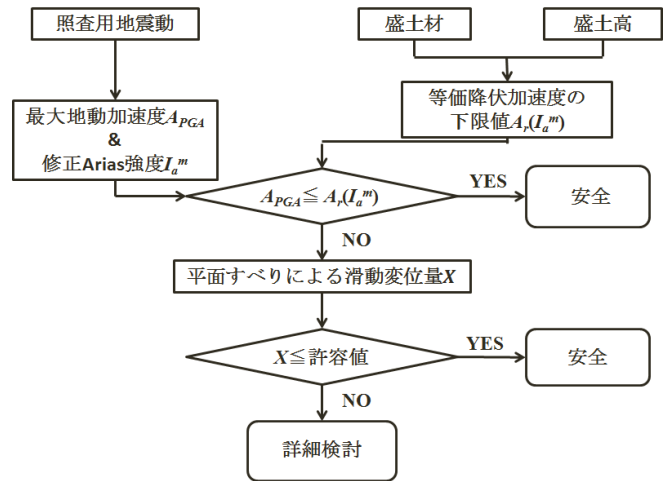


図 1 提案手法のフローチャート

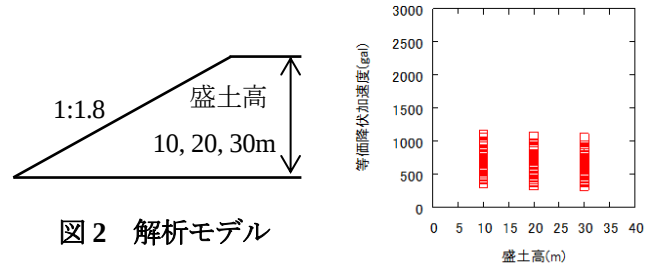


図 2 解析モデル

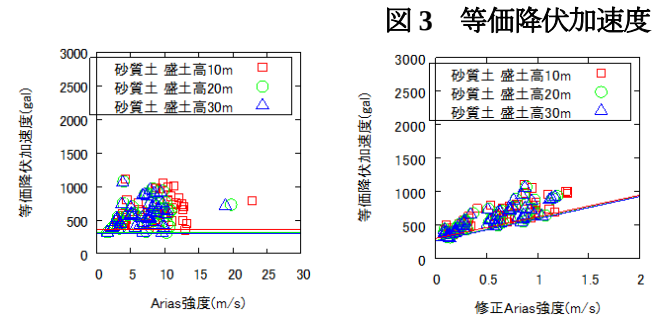


図 3 等価降伏加速度

図 4 Arias 強度及び修正 Arias 強度と等価降伏加速度の関係 (左 : Arias 強度, 右 : 修正 Arias 強度)

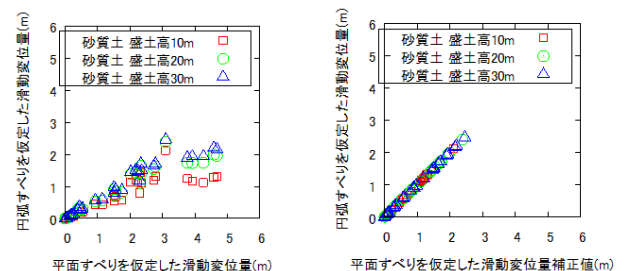


図 5 平面すべりを仮定した滑動変位量と円弧すべりを仮定した滑動変位量の比較 (左 : 補正前, 右 : 補正後)