

エネルギーNewmark 法による斜面地震時安定性と滑り変位量の統一的评价 その3：円弧滑り Newmark 法との比較

西日本技術開発(株) 正会員 ○水原道法 森 二郎
中央大学名誉教授 正会員 國生剛治
中国浙江大学 方 火浪

1. はじめに

前報その 1¹⁾、その 2²⁾にて、エネルギーNewmark 法により、設計加速度波形を必要とせず、マグニチュード M と震源距離 R から簡便に滑りの有無と滑る場合の水平変位量 δ_r が統一的に計算できることを示した。ここでは、小規模斜面を対象に、エネルギーNewmark 法による変位量と、加速度時刻歴を用いた従来の円弧滑り Newmark 法³⁾による変位量の比較を行い、提案するエネルギーNewmark 法の実用性を示す。

2. 検討条件

図-1(a)に示す高さ 20m、傾斜角 $\theta_0=35^\circ$ の斜面を対象に、エネルギーNewmark 法及び円弧滑り Newmark 法による変位量の比較を行った。エネルギーNewmark 法では、図-1(a)の円弧滑りは、図-1(b)に示す傾斜角 $\theta=30^\circ$ の無限長斜面の同一区間で同一質量を持つ深さ $D=5m$ のブロック滑りで置換えられる。対象とする地震は 2004 年新潟県中越地震 ($M6.8$) とし、異なる震源距離における両手法による変位量を比較した。

3. エネルギーNewmark 法による変位量

エネルギーNewmark 法による変位量算出手順を図-2 に示す。なお、エネルギーNewmark 法の詳細については、既報⁴⁾を参照されたい。

①地震のマグニチュード M と震源距離 $R(km)$ より、式(1)より地震基盤での入射エネルギー E_{IP} (kJ/m^2) を算定する。

$$E_{IP} = E_{total} / 4\pi(R \times 1000)^2 \quad \log E_{total} = 1.5M + 11.8 \quad (1)$$

ここでは、震源距離 R は、円弧滑り Newmark 法で用いる加速度時刻歴波形を採用した K-NET 観測点の震源距離に合わせ、17km、21km、31km および 42km とした。

②入射エネルギー E_{IP} より、滑り土塊直下地盤の $\rho_s V_s$ と基盤での $(\rho_s V_s)_{s.base}$ を使って滑り土塊直下での累積上昇エネルギー $E_{u,2D}$ を算定する。

$$(E_{u,2D}) / (E_{u,2D})_{s.base} = [(\rho_s V_s) / (\rho_s V_s)_{s.base}]^{0.70} \quad (2)$$

滑りに関わる斜面上下流方向のエネルギー E_u は、 $E_{u,2D}$ の 1/2 として定める。

$$E_u = E_{u,2D} / 2 \quad (3)$$

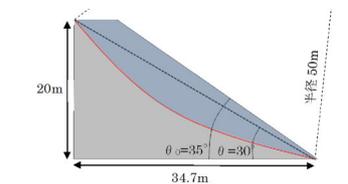
本検討では、滑り土塊直下地盤の ρ_s を $1.8t/m^3$ 、 V_s を $200m/s$ 、基盤の ρ_s を $2.7t/m^3$ 、 V_s を $3,000m/s$ とした。

③想定滑り土塊直下の斜面上下流方向でエネルギー E_u を持つ不規則上昇波を、上昇波加速度振幅 A_1 、等価繰返し回数 N_{eq} 、角振動数 $\omega = 2\pi f$ の調和加速度波 $u_1(t) = A_1 \sin \omega t$ に置き換える。加速度振幅 A_1 は、調和波加速度への低減係数 0.65 や、地中の上昇波と地表加速度との振幅比 1/2 を考慮して、次式となる。

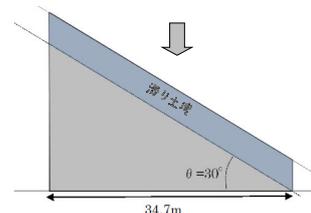
$$A_1 = 0.65(1/2)PGA \quad (4)$$

キーワード 地震波動エネルギー、Newmark 法、無限長斜面、重力エネルギー、摩擦角

連絡先 〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通 1-1-1 西日本技術開発(株)施設開発部 TEL 092-781-2890



(a) 円弧滑り Newmark 法 (円弧滑り)



(b) エネルギーNewmark 法 (無限長斜面滑り)

図-1 評価対象斜面形状

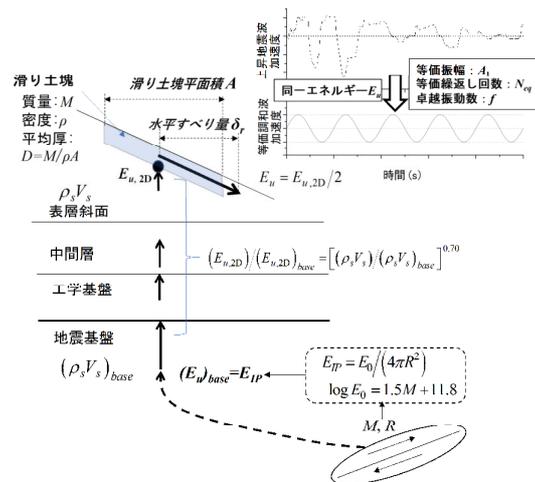


図-2 エネルギー法による変位量算出手順⁴⁾

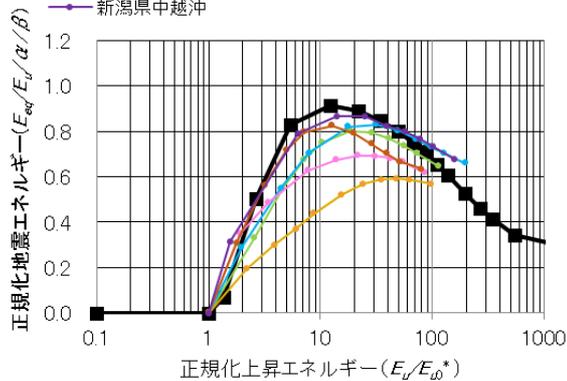


図-3 設計用曲線

地表面最大加速度 PGA は、防災科学技術研究所による震源距離 R と地表最大加速度の関係⁵⁾を $PGA=6.0 \times (R/10)^{-1}$ で近似し求めた。等価調和波の繰返し回数 N_{eq} は地震マグニチュード M との関係より算出し⁴⁾、振動数 f は調和波 1 サイクル当たりの上昇エネルギー E_u/N_{eq} より式(5)で算出される。

$$f = \omega / 2\pi = [\pi \rho_s V_s A_l^2 / (E_u / N_{eq})]^{1/3} / 2\pi \quad (5)$$

④ 滑動開始エネルギー E_{u0}^* を、前報その 1 の式(7)による正弦波の E_{u0} と、前報その 2 の E_u と δ_r の関係より求めた地震動の滑動開始エネルギーとの相関式(式(6), 図-4)より算出し、これより E_u/E_{u0}^* を求める。

$$E_{u0}^* = 7.30 E_{u0}^{0.73} \quad (6)$$

⑤ 地震動による基準化上昇エネルギー E_u/E_{u0}^* と基準化エネルギー比 $E_{eq}/E_u/\alpha/\beta$ の関係より、設計用曲線を設定する(図-3)。なお、地震動の $E_u/E_{u0}^* \sim E_{eq}/E_u/\alpha/\beta$ 関係は、式(6)にて算出した E_{u0}^* を用いて整理している。この設計用曲線より、 $E_u/E_{u0}^* < 1.0$ では $E_{eq}=0$ かつ $\delta_r=0$ となるため滑りは生じず、 $E_u/E_{u0}^* > 1.0$ では滑動が生じるため④で算出した E_u/E_{u0}^* に対する地震エネルギー E_{eq} を求め、滑動変位量が式(7)で算出される。つまり滑動の有無と滑動する場合の変位量が同時かつ統一的に算出されることが分かる。

$$\delta_r = E_{eq} / [\rho g D \tan(\phi - \theta)] \quad (7)$$

4. 円弧滑り Newmark 法による変位量

図-1(a)に示す滑り土塊を対象に、加速度時刻歴波形を用いる円弧滑り Newmark 法による滑動の有無と変位量評価を行った。地震動として、2004 年新潟県中越地震 (M6.8) における震源から 17km、21km、31km 及び 42km に位置する K-NET 観測点における地表面の加速度時刻歴波形を用いた。例として、震源距離 17km における地震動波形を図-5 に示す。本検討では、滑り土塊を剛体と仮定し、斜面における地震動の増幅は考慮せず、図-5 に示す加速度波形が滑り土塊に直接作用するものとした。滑り変位量は、円弧滑りとして設定したすべり土塊の回転に対する運動方程式を数値積分することで算出した。

5. 検討結果

エネルギー Newmark 法及び円弧滑り Newmark 法による変位量を図-6 に示す。横軸を内部摩擦角 ϕ と斜面傾斜角 θ の差分 ($\phi - \theta$) とし、 1° 刻みで変位量をプロットしている。図中の赤矢印で示す点がエネルギー Newmark 法の滑動開始点、青矢印で示す点が円弧滑り Newmark 法の滑動開始点 (震源距離 21km の滑動開始点は $\phi - \theta > 20^\circ$) である。 $\phi - \theta = 1 \sim 20^\circ$ にわたる全範囲で、4 段階の震源距離について両手法による変位量は概ね一致していることがわかる。

6. まとめ

エネルギー Newmark 法による変位量と円弧滑り Newmark 法による変位量は概ね一致し、エネルギー Newmark 法により、設計加速度波形を必要とせずマグニチュード M と震源距離 R から簡便に滑りの有無と滑る場合の水平変位量 δ_r が統一的に計算できることを示した。

(謝辞) 防災科学技術研究所強震観測網 K-net の鉛直アレー記録を使用させて頂きました。ここに謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 國生・森・水原・方：エネルギー Newmark 法による斜面地震時安定と変位量評価 その 1：正弦波入力による計算、土木学会第 75 回年次学術講演会
- 2) 國生・森・水原・方：エネルギー Newmark 法による斜面地震時安定と変位量評価 その 2：地震波入力による計算、土木学会第 75 回年次学術講演会
- 3) Newmark, N. M. (1965): Effects of earthquakes on dams and embankments, Fifth Rankine Lecture, *Geotechnique*, Vol.15
- 4) 國生剛治 (2019)：エネルギー Newmark 法による地震時斜面滑り発生と滑り変位量の簡易評価、地盤工学ジャーナル, Vol.14, No.1, 1-16.
- 5) 防災科学技術研究所：2004 年新潟県中越地震 (10 月 23 日 17 時 56 分) の地震動と震源過程、http://cais.gsi.go.jp/KAIHOU/report/kaihoh73/07_16.pdf

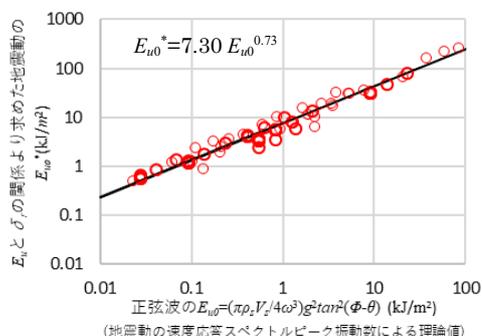


図-4 正弦波の E_{u0} と地震動の E_{u0}^* の関係

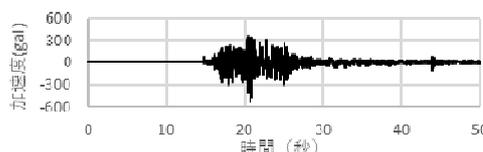


図-5 地震動波形の例 (震源距離 17km)

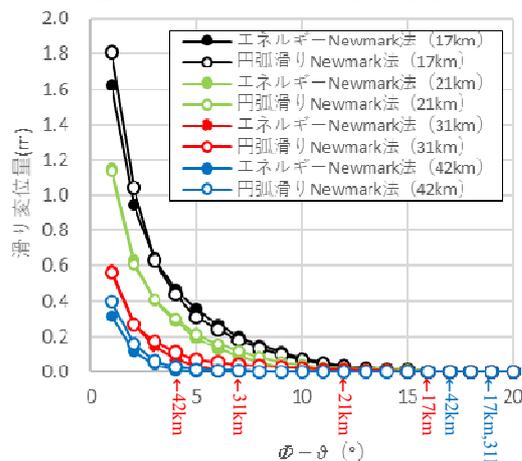


図-6 滑り変位量の比較