### 鉛直地震動が地震時斜面の永久変位に 及ぼす影響について

### 蒋 景彩1

<sup>1</sup>正会員 徳島大学准教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

E-mail: jiang@ce.tokushima-u.ac.jp

盛土斜面のすべり破壊が想定された場合、地震時斜面の安定性はNewmark法によって評価されることが多い、Newmark法はある一つのすべり面を特定し、それに沿う地震動による永久変位量を求める方法である。永久変位の計算は一般に水平地震動のみが用いられる(つまり、鉛直地震動の影響を無視されている)。しかし、近年では新潟中越地震や岩手・宮城内陸地震・兵庫県南部地震など、水平方向の加速度を大きく上回る鉛直方向の加速度が観測されている。こうした大きな鉛直地震動の影響を考慮した地震時の斜面安定性評価法に関する研究は少ない。そこで、本研究では盛土斜面において水平・鉛直方向の地震動を考慮したすべり土塊の運動方程式を誘導し、鉛直地震動が地震時斜面の永久変位計算に及ぼす影響について調べた。ここで幾つかの事例に適用した結果を報告する。

Key Words: earthquake, earth presuure, vertical seicmic acceleration,

#### 1. はじめに

兵庫県南部地震時には、広い範囲にわたって宅地盛 土等の人工斜面が変動・変形し、多くの被害が発生し た<sup>1)</sup>. 近年の大地震(例えば、2004年の新潟県中越地震 (M6.8)、2007年の能登半島地震(M6.9)、2008年の岩手・ 宮城内陸地震(M7.2)など)では盛土斜面の被害が多発 している<sup>2)-4)</sup>. 2011年の東日本大震災においても、盛土 斜面の大規模崩壊事例が多数報告されている<sup>5)</sup>.

これまで地震による盛土被害事例の研究によると, 地震時斜面の破壊形態は,概ね法面崩壊,すべり破壊, 分断破壊,沈下の4タイプに分類できることがわかっ たり。これらの破壊形態は,それぞれの破壊メカニズム が異なるため,異なる手法による評価が求められる。 地震時盛土斜面のすべりに対する安定性は,Newmark 法<sup>ħ・8</sup>によって評価される場合が多い。Newmark法は, ある一つのすべり面を仮定し,繰り返し地震力により 蓄積されるこのすべり面に沿う永久変位量を求める方 法である。永久変位の計算は一般に水平地震動のみが 用いられる(つまり,鉛直地震動の影響を無視されて いる)。しかし,近年では新潟中越地震や岩手・宮城内 陸地震・兵庫県南部地震など,水平方向の加速度を大き く上回る鉛直方向の加速度が観測されていて,こうした 大きな鉛直地震動の影響を考慮した地震時の斜面安定 性評価法に関する研究は少ない. そこで, 本研究では盛 土斜面において水平・鉛直方向の地震動を考慮したす べり土塊の運動方程式を誘導し, 鉛直地震動が地震時 斜面の永久変位計算に及ぼす影響について調べた. こ こで幾つかの事例に適用した結果を報告する.

## 2. 鉛直地震動を考慮した地震時斜面の永久変位評価法

Omer Aydanら<sup>9</sup>は岩盤斜面を対象に、直線すべり面を 想定したすべり土塊の地震時永久変位の計算方法を提 案した. 地震動を受けた盛土斜面のすべり破壊は、(直 線ではなく)円形形状に近いすべり面に沿って発生する ことが多いため、すべり土塊の回転運動に基づく永久 変位の算出が求められる。そこで本研究はOmer Aydan ら<sup>9</sup>の手法をすべり土塊の回転モード(図-I)に拡張し、 水平と鉛直地震動を考慮した永久変位量の算定法を提 案した. 提案法の概要は以下の通りである。

まず、図-1に示されているように、すべり土塊を多数のスライスに分割し、各スライス底面に垂直な方向のつり合い条件から、すべり面に作用する垂直力Nが式(1)のように得られる.

$$N = W \cos \alpha - E_h(t) \sin \alpha - E_v(t) \cos \alpha - U_w \tag{1}$$

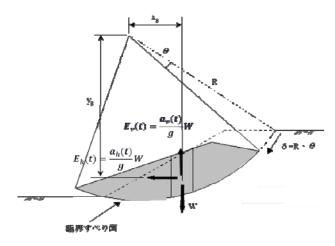


図-1 地震による回転すべりの模式図

ここに、Wはスライスの重さ、 $E_n(t)$ と $E_n(t)$ はそれぞれ地 震動による水平・鉛直方向の慣性力、 $U_n$ はすべり面に 作用する間隙水圧、 $\alpha$ はすべり面の傾斜角である.

スライス底面のせん断強度は、地盤材料の変形による影響を考慮した式(2)により表される.式(2)の右辺の最後の項は土の粘性による抵抗と考えることができる.

$$T = cl + N \tan \phi + \eta \frac{W \sin \alpha + E_h(t) \cos \alpha - E_v(t) \sin \alpha}{g} R\dot{\theta}$$
(2)

ここで、c, $\phi$ は土のせん断強度定数,lはスライス底面の長さ、 $\eta$ は粘性抵抗係数,gは重力加速度,Rはすべり土塊の回転半径, $\dot{\theta}$ は回転すべり土塊の角速度である。

スライスに作用する地震慣性力は、水平・鉛直方向の地震加速度  $a_k(t)$ と  $a_k(t)$ 及びスライスの重さによって、式(3)に表される.

$$E_{h}(t) = \frac{a_{h}(t)}{g}W, \quad E_{v}(t) = \frac{a_{v}(t)}{g}W$$
 (3)

スライス底面に作用する間隙水圧 $U_w$ は地震動による動的な水圧 $U_w^d$ と静水圧 $U_w^s$ に分けることができるが、動的水圧は地震慣性力に比例すると仮定すると、間隙水圧 $U_w$ は次式で表される.

$$U_{w} = U_{w}^{s} + U_{w}^{d} = U_{w}^{s} (1 + \frac{a_{h}(t)}{g} \sin \alpha + \frac{a_{v}(t)}{g} \cos \alpha)$$
 (4)

図-1に示すすべり土塊の運動方程式を誘導すると、以下のようになる.

$$J\ddot{\theta} = \sum E_h y_g + R \sum W \sin \alpha - R \sum E_v \sin \alpha - \sum RT$$

式(1)~(4)を式(5)に代入し整理すると、次式が得られる.

 $J\ddot{\theta} = \sum E_{h} y_{g} + R \sum W \sin \alpha - R \sum E_{v} \sin \alpha - R \sum cl - R \sum W \cos \alpha \tan \phi + R \sum E_{h} \sin \alpha \tan \phi + R \sum E_{v} \cos \alpha \tan \phi + R \sum U_{w} \tan \phi - R^{2} \sum \eta \frac{W \sin \alpha + E_{h} \cos \alpha - E_{v} \sin \alpha}{\alpha} R\dot{\theta}$ (6)

地震動が継続中のどの時刻においても、式(6)が成り立つので、式(6)は次式のように表すことができる.

$$\ddot{\theta} + A(t)\dot{\theta} - B(t) = 0 \tag{7}$$

$$A(t) = \frac{R^2 \eta}{Jg} (\sin \alpha + \frac{a_h(t)}{g} \cos \alpha - \frac{a_v(t)}{g} \sin \alpha) W$$

$$B(t) = \frac{R}{I}(B1 + B2 - B3 + B4)$$

$$B1 = (W \sin \alpha - cl - W \cos \alpha \tan \phi)$$

$$B2 = (\frac{y_g}{R} + \sin \alpha \tan \phi) \frac{a_h}{g}$$

$$B3 = (\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi) \frac{a_{\nu}}{g}$$

$$B4 = U_w^s (1 + \frac{a_h}{g} \sin \alpha + \frac{a_v}{g} \cos \alpha) \tan \phi$$

本研究では逐次線形加速度法を用いて式(7)を解くことにした。まず回転運動が発生する時間区間を多数の微小区間 $\Delta t$  に分割し、各微小区間 $\Delta t$  において角加速度  $\ddot{\theta}$  が時間 t に対して一定の割合で変化していると仮定する。すなわち、 $\Delta t$  において角加速度の時間的変化が次式で表される。

$$\ddot{\theta}_{\tau} = \ddot{\theta}_{t} + \left(\frac{\ddot{\theta}_{t+\Delta t} - \ddot{\theta}_{t}}{\Delta t}\right) \tau \qquad (t \leq \tau \leq t + \Delta t)$$
(8)

式(8)を式(7)に代入して時刻  $t+\Delta t$  における加速度を求めることができる.

$$\ddot{\theta}_{t+\Delta t} + A_{t+\Delta t} \dot{\theta}_{t+\Delta t} - B_{t+\Delta t} = 0 \tag{9}$$

加速度に対し $\Delta t$  区間において積分すると, 時刻  $t+\Delta t$  における角速度は得られる.

$$\dot{\theta}_{t+\Delta t} = \dot{\theta}_t + \frac{1}{2} \Delta t \left( \ddot{\theta}_t + \ddot{\theta}_{t+\Delta t} \right) \tag{10}$$

さらに、Δt 区間において式(10)を積分すると、時刻 t+Δtにおける回転角度は次式で求められる.

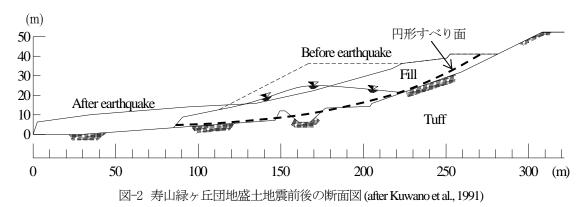
$$\theta_{t+\Delta t} = \theta_t + \dot{\theta}_t \Delta t + \frac{1}{6} \Delta t^2 \left( 2\ddot{\theta}_t + \ddot{\theta}_{t+\Delta t} \right)$$
 (11)

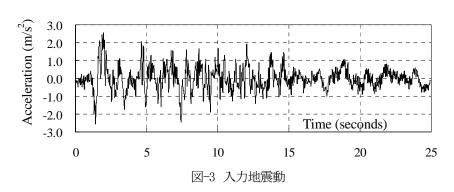
式(9)-(11)を逐次的に解くと、地震動によるすべり 土塊の回転角度 $\theta$ (つまりすべり変位量)が得られる.

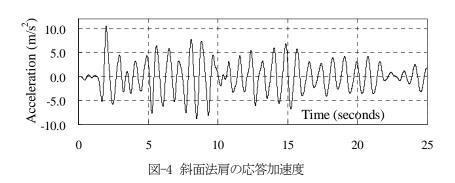
#### 3. 適用事例

1978年6月12日の宮城県沖地震(M7.4)による造成宅 地盛土斜面の崩壊を適用事例とした. この事例は深い 谷部を埋めて造成された寿山緑ヶ丘団地において幅 120m, 長さ 120m, 滑動した土量 8万 m³にも及ぶ大き な斜面崩壊である <sup>10)</sup>. Kuwano ら <sup>11)-12)</sup>は、当該盛土斜面 に地震により生じる残留変形を解析する手法を適用し、 解析結果くを実際の破壊状況との比較検討を行った. 彼らはまず、非線形な応力~ひずみ関係を用いた ISBILD により静的応力を求めた後、等価線形化を用い た FLUSH により動的応力変化を得た. 次いで求められ た原位置応力を中空ねじり三軸せん断試験装置の中で 再現した. 最後に実験で得られた残留ひずみポテンシ ャルから残留変位量を求め、実際斜面の変形量を推定 した. 得られた変形量から概ね実現象を説明すること ができた<sup>12)</sup>. そこで、著者らの提案手法を寿山緑ヶ丘 団地の盛土斜面に適用し、Kuwano らの結果と比較した. Kuwano らと同じ解析断面を図-2 に示す。図中の円形すべり面は実際の破壊面より近似的に作成した。対象斜面は火山灰質凝灰岩からなる基盤上に同質の盛土材料を用いて最大 25m の盛土を施して造成されたものである  $^{12}$ . 斜面を構成する 2 種類地層の土質パラメータ (単位体積重量 $\gamma$ , 粘着力 c と内部摩擦角 $\phi$ )は、Kuwanoらと同じ値 ( $\gamma_1=\gamma_2=17.26$ kN/m³,  $c_1=4.9$ kN/m²,  $c_2=9.8$ kN/m²,  $\phi=18.5$ °,  $\phi=36.5$ °)を用いた。また、Kuwanoら  $^{12}$ と同様、石巻市開北橋で得られた宮城県沖地震の際の加速度記録のうち、主要動を含む 25 秒間を最大加速度=250gal にしたものを使用した (図-3)。地震応答解析  $^{13}$ によって得られた斜面法肩の加速度を図-4 に示す。

図4に示す応答加速度のもと、本提案法による永久変位の算定を行った.粘性抵抗係数をゼロとし、間隙水圧の影響を無視した.得られる永久変位は図-5に示す. Kuwanoら <sup>11)</sup>の結果によれば、斜面肩における永久変位は、水平成分が 1.57m、鉛直成分が 1.81m であり、両者の合成は 2.40m となっている.これに対して本提







案法による永久変位量は12.7mであり、Kuwanoらの結果よりかなり大きい結果となっている。その原因として本研究では増幅の大きい法肩の応答加速度を用いたことによるものだと思われる。すべり土塊全体の平均応答加速度を用いると、より有限要素法の変位量に近い結果が得られるはずである。因みに、文献10)により実際には崩壊した土砂は壊れた水道管からの排水の影響もあってかなり長い距離移動している。どちらの結果がより実態に近いかは更なる検討が必要である。

鉛直地震動を影響を調べるため、観測された鉛直方 向の地震加速度及びそれを2倍にしたものを用いて再 解析を行ったが、算出された永久変位に有意の差は得 られなかった.

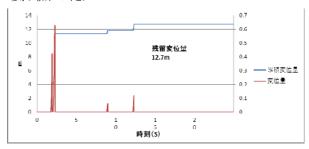


図-5 本提案法による永久変位

#### 4. あとがき

本研究では盛土斜面において水平・鉛直方向の地震動を考慮したすべり土塊の運動方程式を誘導し、水平・鉛直地震動による回転地すべり永久変位の算定法を提案した。今後、様々な地震時の斜面崩壊事例に適用し、提案法の適用性を検討していくつもりである。

#### 参考文献

- 1)(社)日本地すべり学会: 兵庫県南部地震等に伴う地すべり・ 斜面崩壊研究報告書, 1995.
- 2) (社)地盤工学会:新潟県中越地震災害調査委員会報告書,2007.
- 3) 蒋景彩, 三神厚, 岡部健士, 中野晋, 藤田真人: 2007年能

- 登半島地震災害調査—建物被害・道路法面崩壊を中心に—, 南海地震研究, Vol. 3, pp. 25-34, 2007.
- 4) 蒋 景彩,中野 晋,上野勝利,岡部健士:平成20年(2008年) 岩手・宮城内陸地震による地盤災害の現地調査報告,平成 20 (2008) 年岩手・宮城内陸地震被害に関する緊急調査研究 報告書,2009. (印刷中)
- 5) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会:東日本大震災合同調査報告「共通編3 地盤災害」,地盤工学会,土木工学会等。2014.
- 6) 例えば、土木学会地震工学委員会:高地震力に対する土構造物の耐震設計法に関する報告、高地震力に対する土構造物の耐震設計法に関する研究小委員会、pp.21-53,2000.
- 7) Newmark, N.M: Effects of earthquakes on dams and embankments, Geotechnique, Vol.15, No.2, pp.139-160, 1965.
- 8) 鵜飼恵三:地震時に生じる斜面のすべり変位量の解析,土質工学会論文報告集, Vol. 27, No.1, pp.136-146,1987.
- Omer Aydan, Resat Ulusay: Back-analysis of a seismically induced highway embankment failure during the 1999
   Duzce earthquake, Environmental Geology, Vol. 42, pp. 621-631, 2002.
- 10) Kawakami F., Asada A. and Yanagisawa E.: On damages to housing sites by the Off-Miyagi Earthquake of June 12, 1978, Journal of Natural Disaster Science, Vol. 1, No. 2, pp. 81-97, 1979.
- 11) Kuwano, J., Ishihara, K., Haya, H., and Izu, F.: Analysis on permanent deformation of embankments caused by earthquakes, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 3, pp. 97-110, 1991.
- 12) Kuwano, J., and Ishihara, K.: Analysis of permanent deformation of earth dams due to earthquakes", Soils and Foundations, Vol. 28, No. 1, pp. 41-55, 1988.
- 13) Nguyen, B. V., Jiang J.-C. and Yamagami T.: Modified Newmark analysis of seismic permanent displacements of Slopes, Journal of the Japan Landslide Society, Vol. 41, No. 5, pp. 12-20, 2005.

# Evaluation of seismic displacements of embankment slopes by considering both horizontal and vertical earthquake motions

#### Jing-Cai JIANG

A methodology is proposed to evaluate earthquake-induced permanent displacements of embankment slopes by considering both horizontal and vertical motions. This method extendeds the original Newmark procedure to a circular failure surface, and rotational displacements of a sliding body are computed. The proposed method is used to analyze a large-scale embankment slope in Japan which suffered severe damage during the 1978 Miyagiken-oki Earthquake.