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¹⁾.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²⁾⁻⁴⁾. 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⁵⁾.

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⁹. 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⁷⁾⁻⁸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⁹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⁹の手法をすべり土塊の回転モード(図-1)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.

$$N = W \cos \alpha - E_{\mu}(t) \sin \alpha - E_{\nu}(t) \cos \alpha - U_{\nu}$$
⁽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_h(t)とE_h(t)はそれぞれ地 震動による水平・鉛直方向の慣性力、U_wはすべり面に 作用する間隙水圧、α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, ϕ は土のせん断強度定数、lはスライス底 面の長さ、 η 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_h(t)と a_h(t)及びスライスの重さによって, 式(3)に表される.

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

$$J\ddot{\theta} = \sum E_h y_g + R \sum W \sin \alpha - R \sum E_v \sin \alpha - \sum RT$$
(5)

式(1)~(4)を式(5)に代入し整理すると、次式が得られる.

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

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

$$A(t) = \frac{R^2 \eta}{Jg} (\sin \alpha + \frac{a_h(t)}{g} \cos \alpha - \frac{a_v(t)}{g} \sin \alpha)W$$
$$B(t) = \frac{R}{J} (B1 + B2 - B3 + B4)$$
$$B1 = (W \sin \alpha - cl - W \cos \alpha \tan \phi)$$

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

$$B3 = (\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi) \frac{a_v}{g}$$
$$B4 = U_w^s (1 + \frac{a_h}{g} \sin \alpha + \frac{a_v}{g} \cos \alpha) \tan \phi$$

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 Δt に分割し,各微小区間 Δt 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, Δt 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+Δt 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Δt 区間において積分すると,時刻 t+Δt における角速度は得られる.

$$\dot{\theta}_{t+\Delta t} = \dot{\theta}_{t} + \frac{1}{2} \Delta t \Big(\ddot{\theta}_{t} + \ddot{\theta}_{t+\Delta t} \Big)$$
(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*θ* (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¹⁰. Kuwano ら¹¹⁾⁻¹²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¹²⁾. 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¹⁰. 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 γ , 粘着力 c と内部摩擦角 ϕ)は, Kuwano らと同じ値 ($\gamma_1=\gamma_2=17.26$ kN/m³, $c_7=4.9$ kN/m², $c_2=9.8$ kN/m², $\phi=18.5^\circ$, $\phi_2=36.5^\circ$)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¹¹⁰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.





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.
- (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.
- Newmark, N.M : Effects of earthquakes on dams and embankments, Geotechnique, Vol.15, No.2, pp.139-160, 1965.
- 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.
- 9) 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.
- 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.
- 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.
- 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.