地震時盛土斜面の安定性評価手法による事例検討

蒋 景彩1·山上拓男2·Bao Viet NGUYEN3

¹徳島大学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 ²徳島大学名誉教授 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1) E-mail: takuo@ce.tokushima-u.ac.jp ³Hanoi University of Civil Engineering (55 Giai Phong Street, Hai Ba Trung - Ha Noi - Viet Nam) E-mail: nbviet_huce@yahoo.com

著者らは従来のNewmark法の問題点を克服するため、FEMによる地震応答解析,動的計画法に基づく臨 界すべり面探索法,およびNewmark永久変位(残留変位)の概念を結合して,地震時斜面の不安定性を検 討する新しい方法を開発してきた.本稿は,1978年宮城県沖地震の盛土被災地の一つである白石市寿山緑 ヶ丘団地の斜面崩壊に提案法を適用し,非線形有限要素法の結果との比較検討を行い,本手法の妥当性と 有用性を検証した.

Key Words : Slope stability, earthquake, permanent displacement, FEM, dynamic programming, critical slip surface.

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⁾.近年の地震においても盛土斜面の被害が 多く報告されている²⁾⁻⁴⁾.例えば、2004年の新潟県 中越地震(M6.8)では、中山間地での自然斜面の 崩壊や土砂ダムの形成などが多発すると共に、都市 域において鉄道、道路、宅地造成地内の盛土部が広 範囲にわたって変形・変状し、盛土斜面の大規模な 崩壊が多数発生した²⁾.2007年の能登半島地震では 能登有料道路沿線に大きな盛土法面崩壊が11箇所も 発生し、交通復旧に長時間を要した³⁾.昨年発生し た岩手・宮城内陸地震でも、盛土斜面の大規模崩壊 事例が報告されている⁴⁾.

これまで地震による盛土被害事例の研究が数多く 行われてきた.その結果,地震時盛土斜面の破壊形 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⁵⁾.これら の破壊形態は,それぞれの破壊メカニズムが異なり, 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⁶⁾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,繰り返しの地震力により蓄積 されるこのすべり面に沿うすべり変位量から安定性 を評価するものである.この方法は地震時に生じる 永久変位量を比較的容易に求めることができるため よく用いられる.しかし従来のNewmark法は,地震 前に予め特定された1つのすべり面について解析す る仕組みをとっているため,得られるすべり変位量 はこの特定されたすべり面に沿うだけのものであっ て,地震時に生じるであろう最大の変位量を与える 保証はない.

著者らは上述した問題点を克服するため,FEM地 震応答解析法と、それによって求められる応力場か ら臨界すべり面を決定できる探索法の2つを連動さ せ、地震中の臨界すべり面の時刻歴変化を考慮した 永久変位の評価法を提案してきた⁷⁾.本報告は、 1978年宮城県沖地震の盛土被災地の一つである白石 市寿山緑ヶ丘団地の斜面崩壊に提案法を適用し、非 線形有限要素法の結果との比較検討を行い、本手法 の妥当性と有用性を示すものである.

2. 提案法の概要

著者らの提案法は地震動の間斜面中の臨界すべり 面の時刻歴変化を考慮した永久変位を算定し、その 大きさに基づき斜面の不安定性を評価するものであ る⁷⁾.まず、FEMによる地震応答解析を行い、各タ イムステップにおける対象斜面の応力場を得る.次 いでFEM応力場における潜在(臨界)すべり面を動 的計画法で探索する⁸⁾. そしてこれによって得られ る時間的にその形状と出現位置が変動する臨界すべ り面に対して永久変位を算定する. すなわち, 各タ イムステップごとに探索された臨界すべり面のうち, 一度でも安全率が1.0を下回ったすべり面のみに着 目し、それらのすべり土塊についてFEMによる地震 応答解析結果から安全率・応答加速度の時間履歴を 計算する.そして安全率1.0に対応する応答加速度 すなわち限界加速度を定め、安全率が1.0を下回る (つまり応答加速度が限界加速度を超える)時間区 間においてすべり変位量を求める.本手法は地震中 時々刻々と変化する臨界すべり面のすべてについて 永久変位を求めているため,最大の変位量及びそれ を与えるすべり面を確実に見いだすことができる. なお、本手法はいかなるFEM地震応答解析プログラ ムとも容易に連動させることができる点において有 用である.

3.1978年宮城県沖地震による寿山緑ヶ丘団地 の斜面崩壊事例への適用

1978年6月12日の宮城県沖地震(マグニチュード 7.4)は、仙台市を中心とする宮城県に大きな被害を もたらした.盛土被害の中、顕著なものは造成宅地 の被害であった.深い谷部を埋めて造成された寿山 緑ヶ丘団地では幅120m、長さ120m、滑動した土量8 万m³に及ぶ大きな斜面崩壊が起こっている⁹.

Kuwanoら¹⁰⁾⁻¹¹⁾は、寿山緑ヶ丘団地の盛土斜面に 地震により生じる残留変形を解析する手法を適用し、 実際の破壊状況と解析結果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¹⁰⁾.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¹⁰⁾の結果と比較検討を試みた.

事例検討にあたり,Kuwanoらと同じ解析断面 (図-1)を用いた.この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⁹.斜面を構成 する2種類の地層の土質パラメータを表-1にまと めた.表中のパラメータの値は、せん断剛性を除い

表-1 解析に用いたパラメータ

パラメータ(単位)	盛 飽和	土 不飽和	基盤
単位重量(kN/m ³)	17.26	17.26	18.23
粘着力(kN/m ²)	4.9	9.8	16.7
内部摩擦角(°)	18.5	36.5	39.0
ポアソン比	0.33	0.33	0.327
初期せん断剛性 G ₀ (kN/m ²) (Kuwano ら)	39,000	39,000	28,400
せん断剛性 0.6 G ₀ (kN/m ²)(本研究)	23,400	23,400	170,400



図-1 寿山緑ヶ丘団地盛土地震前後の断面図 (after Kuwano et al., 1991)



図-2 寿山緑ヶ丘団地盛土斜面の要素分割図

てKuwanoらの数値と同じ値を用いている.要素分 割図を図-2に示した.この要素分割は,動的計画 法と結合させる必要上,KuwanoらのFEMメッシュ

と少し異なっている. なお入力地震動は, Kuwano ら¹⁰⁾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).

本提案法による解析結果は、以下の通りである. 図-4は斜面肩(図-1のP点)における応答加速度の時 刻歴を示したものである.地震前の臨界すべり面と 地震中安全率が1.0を下回った臨界すべり面を図-5

に示した.これらの臨界すべり面の内,すべり変位 量が最も大きかったすべり面および最大変位量の 80%以上の変位が示されたすべり面を図-6に示す. 図-5,図-6の結果から地震時斜面のすべりは,一つ の明確なすべり面に沿ってではなく,複数のすべり 面からなる帯状のすべり帯に沿って発生すると言え る.図中の太い実線はすべり変位量が最大となった すべり面を表しており,また参考のため地震前の臨



図-6 最大変位量および最大変位量 80%以上の変位をを与えたすべり面



図-7 最大変位量を与えたすべり面の安全率・応答加速度時刻歴および永久変位

界すべり面も図-5と図-6に併記した.両図中の点線 のすべり面は,静的応力場で探索された臨界すべり 面である.また図中の2点破線は通常Newmark法で 仮定されるすべり面を示しているが,これは震度法 (簡便Bishop法)により求めた.図から最大変位を 与えるすべり面は,一般に従来のNewmark法のそれ と異なることが分かる.

最大変位量を与えたすべり面の安全率と応答加速 度の時刻歴を図-7(a),(b)にそれぞれ示し、応答加速 度の時刻歴から求められたすべり土塊の速度と永久 変位を図-7(c),(d)に示した.本手法によるすべり土 の永久変位は、2.36mであった.図-8は、最大変位 量を与えたすべり面をKuwanoらの変位分布図と重 ね合わせたものである.P点における永久変位は 2.4m(水平成分1.57mと鉛直成分1.81mの合成)となっている.本提案手法による結果と比較すると,両者が概ね一致していることが分かる.すなわち,本提案法により妥当な永久変位が得られたと言える.

4. あとがき

FEM地震応答解析と動的計画法を連動させ,臨界 すべり面の変化時刻歴を考慮した永久変位算定法を 提案し,地震によって崩壊した宅地造成盛土斜面に 適用した.線形有限要素法の結果と比較することに よって,提案法の妥当性と有用性が検証された.そ の結果,特に重要な知見として以下の3点が得られ ている:



図-8 最大変位量および最大変位量 80%以上の変位をを与えたすべり面

(1) 最大永久変位が生じるすべり面とその変位量は 入力地震動の違いによって異なる.

(2) 最大変位を与えるすべり面は、一般に従来の Newmark法のそれと異なる;即ち、すべり面を固定 して考える従来のNewmark法は最大変位を与えない.

(3) 地震時斜面のすべりは、一つの明確なすべり 面に沿ってではなく、複数のすべり面からなる帯状 のすべり帯に沿って発生し得る.

今後,様々な地震時の斜面崩壊事例に適用し,さ らに提案法の有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) 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.
- 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.
- 8) Yamagami, T. and Ueta, Y : Search for critical slip lines in finite element stress fields by dynamic programming, *Proc. the 6th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics*, Innsbruck, Vol. 2, pp. 1347-1352, 1988.
- 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.
- 10) 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.
- 11) 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.

POST-EARTHQUAKE ANALYSIS OF PERMANENT DISPLACEMENTS OF AN EMBANKMENT SLOPE

Jing-Cai JIANG, Takuo YAMAGAMI and Viet Bao NGUYEN

A methodology proposed by the authors to evaluate earthquake-induced permanent deformation of embankment slopes is briefly presented. In this method, a finite element seismic analysis and dynamic programming are combined to determine critical slip surfaces within a slope during an earthquake. Then, a modified Newmark procedure is proposed to evaluate seismic displacements of slopes by considering variable critical slip surfaces. The methodology is used to analyze a large-scale embankment slope in Japan which suffered severe damage during the 1978 Miyagiken-oki Earthquake. The results show reasonably good agreement with the permanent displacements from a nonlinear FEM analysis and the observed in-situ seismic deformations of the embankment.