

# 小段幅の違いが斜面の安定性や崩壊形状に与える影響に関する 剛塑性有限要素解析†

伊藤和也\*1 豊澤康男\*1 高橋章浩\*2 竹村次朗\*2 日下部治\*3

明かり掘削作業における掘削面の勾配と高さの基準である労働安全衛生規則第 356 条および第 357 条では、掘削面について奥行きが 2 メートル以上の水平な段があるときは、当該段より区切られるそれぞれの掘削面にこれらの規則が適用される。すなわち、2m 以上の水平面（小段）を設けることにより下方や上方の斜面を分離して考えることができることを意味している。本報では、まず小段設置に関する国内の代表的な機関で用いられている規則や設計基準について例示する。次に、小段の幅を変化させた剛塑性有限要素解析から、小段の幅が斜面の安定性や崩壊形状に与える影響について検討を行った。

**キーワード:** 小段, 斜面安定, 剛塑性有限要素解析, 労働安全, 労働災害

## 1 はじめに

斜面の切り取り工事の場合、計画・設計上最も重要なことは、掘削法面の勾配の決定である。地形、地質、土質等の施工場所の条件に応じ、また掘削後の法面対策工の有無等も勘案し、完成後の崩壊および施工中の崩壊に対し、安全な勾配が設定され工事が行われている。これらの掘削法面の勾配について、筆者らは国内の各機関における主要な規制・設計基準を調査し、施工中すなわち仮設時の斜面崩壊に対する掘削勾配については、全て労働安全衛生規則（以下、安衛則）第 356 条・第 357 条の規定を満足しなければならず、掘削法面の勾配については、安衛則が最低限遵守すべき基準となっていることや、安衛則制定に至る歴史的背景や当時の理論的検証結果の整合性について示してきた<sup>1)</sup>。この明かり掘削作業における掘削面の勾配と高さの基準である安衛則第 356 条・第 357 条では、掘削面について「奥行きが 2 メートル以上の水平な段があるときは、当該段より区切られるそれぞれの掘削面をいう」と定義されている。これは、奥行き（幅）2m 以上の水平な段、すなわち“小段”を設けることにより、それより下方や上方の斜面を分離して考えることができることを意味している。一般に切土法面では、高さ 5~10m ごとに幅 1~2m の小段が設けられる。これは、法面の下部では表面水の流量、流速が増加し、洗掘力が大きくなることから、小段を設けることによって表面水の流速を低下させ、さらに小段に排水溝を設けることで法面下部に表面水が集中することを防ぐ効果を期待したものである。斜面崩壊は、法面を流下する表面水による浸食や洗掘、または地下水による土のせん断強

度の低下や間隙水圧の増加等が原因となっていることが多い。そのため、小段の設置は、法面内の排水処理を中心として検討されている。しかしながら、幾何学形状からも小段設置による斜面安定効果があるものと考えられ、安衛則では小段設置が斜面安定に寄与することを期待しているものと思われる。小段設置が斜面の安定性に与える影響の解明を主目的とした研究はほとんど見られないが、斜面や盛土のための安定解析や安定図表の利用が盛んとなる時期には、幾つかの研究が報告されている。例えば、Huang は斜面上に小段がある場合について安定解析を実施した結果、安全率に及ぼす影響は幾何学的条件の方が大きいことを明らかにしている<sup>2)</sup>。しかし、Huang の解析は地山に腹付け盛土を設置したような場合での検討であり、後述する本研究での検討とは若干異なる。また、様々な斜面安定計算の妥当性を検証するために小段付き斜面について検討した事例もある<sup>3)</sup>。最近ではヒースロー空港ターミナル 5 の開削工事における仮設斜面の自立時間を予測するための FEM 解析において小段の有無を変化させた解析なども実施されている<sup>4)</sup>。小段が安定性に与える影響を主目的として検討したものとして、Kaniraj & Abdullah の研究がある。彼らは軟弱地盤上の盛土の安定性に及ぼす小段と引張クラックの影響について円弧すべり計算を実施し、小段の最適形状を選択することができる<sup>5)</sup>。しかし、彼らの研究は勾配が緩やかな軟弱盛土を対象としており、その検討結果は限定的である。このように小段幅が斜面安定性に与える影響に関する知見がほとんど蓄積されていないと言える。

そこで本報では、小段設置に関する国内の代表的な機関で用いられている規則や設計基準を示し、小段幅を変化させた剛塑性有限要素解析を行い、小段幅が斜面の安定性や崩壊形状に与える影響について検討を行った。

## 2 国内の各機関で用いられる

### 規制・設計基準における小段幅と高さに関する調査

国内の各機関で用いられている主要な規制および設計基準にて小段幅と高さについて記載されたものを表 1 に示す。各機関の規制や設計基準は、それぞれの目的に応

† 原稿受付 2011 年 09 月 15 日

† 原稿受理 2011 年 11 月 24 日

\*1 (独)労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ

\*2 東京工業大学大学院 理工学研究科 土工学専攻

\*3 茨城工業高等専門学校 校長

連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6

労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ 伊藤和也\*1

E-mail: k-ito@s.jniosh.go.jp

じて決められているため、小段幅と高さについても様々な記載がなされている。例えば、道路土工一切土工・斜面安定工指針では“小段は、のり面排水と維持管理時の点検作業を考慮して設けるもの”とされている<sup>6)</sup>。一方、鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物では“犬走りは、のり面を流下する水の流速の抑制や犬走り上に設けた排水工による水の排除のために設けるが、切土の安定性の増加、のり面保守時の通路確保という点も考慮している”とあり、斜面安定にも寄与することが記載されている<sup>7)</sup>。

小段幅と設置する高さの間隔についても、各機関の規制や設計基準で様々であるが、概ね法高5~10m毎に1~2mの小段を設けられている。しかし、林道技術基準のように“小段は原則として設けないものとする”と記載されているものもあれば、盛土構造物である堤防に関する河川管理施設等構造令では、小段幅が3m以上とす

ると記載されているなど、その目的に応じて様々である。

### 3 小段幅を変化させた斜面の安定性や崩壊形状に関する剛塑性有限要素解析

#### 1) 剛塑性有限要素解析の概要

剛塑性有限要素法は、地盤を剛塑性体と仮定し、上界定理を用いた極限解析を有限要素法によって計算する方法である<sup>8)</sup>。弾完全塑性体の物体に力を加えると、降伏するまでは弾性変形、それ以上の力が加わると応力一定のまま塑性変形が進行する極限状態となる。この極限状態は、載荷履歴に関係なく最終的な荷重形態のみで決定され、解析結果として後述する荷重係数 $\mu$ を得る。剛塑性有限要素法では、極限状態のみに着目した解析を行うため、極限状態では意味を持たない材料定数や初期応力に関する情報は不要であり、地盤が破壊を起こす瞬間の諸量を求めることができる。ただし、破壊が生じるまで

表1 国内における小段幅と高さに関する主な基準等

区分	基準等	所管・発行	小段の幅と高さの記載
労働安全	労働安全衛生規則	厚生労働省	第356条・第357条 (中略) 掘削面(掘削面は、奥行きが2メートル以上の水平な段があるときは、当該段より区切られるそれぞれの掘削面をいう。以下同じ。)・(以下省略)
造成	宅地造成マニュアル	国土交通省	V切土 V・3 切土のり面の形状 のり高の大きい切土のり面では、のり高5m程度ごとに幅1~2mの小段を設けるのが一般的である。
道路	道路土工切土工・斜面安定工指針	日本道路協会	6-3-4 切土のり面の小段 (中略) (2)小段の位置及び幅 ①切土のり面では土質・岩質・のり面の規模に応じて、高さ5~10m毎に1~2m幅の小段を設けるのが良い。
鉄道	鉄道構造物等設計標準・同解説土構造物	鉄道総合技術研究所	4.1.4 切土の形状(3) 原則としてのり高に応じて設けるものとし、その幅は1.5mを標準とする。
河川	河川管理施設等構造令	国土交通省	(小段)第23条 堤防の安定を図るため必要がある場合においては、その中腹に小段を設けるものとする。 2 堤防の小段の幅は、3メートル以上とするものとする。
農林	土地改良事業計画設計基準・設計「農道」技術書	農林水産省	5.4 小段 一般に、切盛土高が高い場合には、法面の途中に小段を設ける、切土法面では土質・岩質・法面の規模に応じて、高さ5~10mごとに幅1~2mの小段を設けるのが標準である。また、盛土法面では法肩から垂直距離5~7mごとに幅1~2mの小段を設けることが望ましい。
	林道技術基準	林野庁	(3) 小段 小段は原則として設けないものとする。ただし、切土高が10mを超え剥落等の恐れがあるについては、次により設けることができる。 ア 小段幅は1.0mを標準とする。 イ 小段は画一的に設けるのではなく、法長、土質等の現場条件を考慮し5~10mの間隔で設置する。なお、土砂類切取の小段設置は十分留意し、安易に設けないものとする。 (以下省略)

の変化量を求めることはできない。

本解析では、Tamura et. al<sup>9)</sup>の開発したプログラムを利用し、重力加速度を0から徐々に大きくしていき、系が不安定となった時の重力加速度を求める“重力加速度増加手法”による解析を実施した。重力加速度増加手法による解析結果として、破壊時の変位速度、応力状態、重力加速度等を求めることができる。

## 2) 斜面形状と解析ケース

小段幅が斜面の安定性に与える影響を確認するために、図1に示すような4種類の斜面高さ5mと勾配を有する幾何学的条件の斜面について、小段幅Bを0, 1, 2, 3mとした16種類の形状を対象とした。これらは、安衛則第356条における勾配と高さをもとに決定したものである。解析に使用した物性値は表2に示すように、内部摩擦角 $\phi$ を0~40度まで10度刻みで変化させており、全80ケースの解析を実施した。なお、ダイレイタンシー角 $\psi$ については、関連流れ則( $\psi = \phi$ )として解析を行った。

## 3) 塑性ひずみ速度分布

座標 $x_i$ 方向の変位速度 $\dot{u}_i$ として、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 、塑性ひずみ速度の絶対値 $\bar{\epsilon}$ は式(1)~(2)で示される<sup>10)</sup>。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} \quad (2)$$

表3~6に示す塑性ひずみ速度分布は、 $\bar{\epsilon}$ を示したものであり、ひずみ速度が大きい部分ほど暖色で示しており、青色部分は塑性ひずみ速度が生じない剛体領域である。塑性ひずみ速度の大きな部分をたどる線が生じるすべり線と考えることができる。なお、塑性ひずみ速度分布では、その絶対値に意味はなく、それぞれの相対的な大きさや方向に意味がある。塑性ひずみ速度分布の卓越する箇所が斜面の上段もしくは下段のみであれば、小段幅が斜面安定性に寄与したと見なせる。以下にそれぞれの

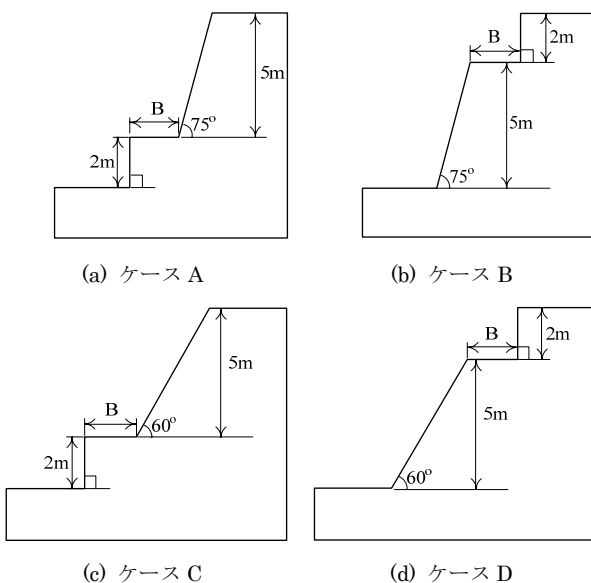


図1 解析した斜面勾配と高さの幾何学形状

表2 材料物性値・小段幅

単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.7
粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	10.0
内部摩擦角 $\phi$ (度)	0, 10, 20, 30, 40
ダイレイタンシー角 $\psi$ (度)	$\phi$
小段幅 B(m)	0, 1, 2, 3

ケースにおける塑性ひずみ速度分布を示し、それぞれの斜面形状での特徴を示す。

### (1) ケース A (上段 5m75度, 下段 2m90度)

ケース A (上段 5m75度, 下段 2m90度)における塑性ひずみ速度分布の一覧を表3に示す。上段もしくは下段のみ塑性ひずみ速度が卓越するのは、小段幅が2mでは内部摩擦角が30度から、小段幅が3mでは内部摩擦角が20度からで、これら全ての条件で上段にすべり線が発生した。

### (2) ケース B (上段 2m90度, 下段 5m75度)

ケース B (上段 2m90度, 下段 5m75度)における塑性ひずみ速度分布の一覧を表4に示す。上段もしくは下段のみ塑性ひずみ速度が卓越するのは、小段幅が3mで内部摩擦角30度からであり、下段にすべり線が発生した。それ以外の条件では、斜面全体にすべり線が発生した。

### (3) ケース C (上段 5m60度, 下段 2m90度)

ケース C (上段 5m60度, 下段 2m90度)における塑性ひずみ速度分布の一覧を表5に示す。上段もしくは下段のみ塑性ひずみ速度が卓越するのは、小段幅が2mでは内部摩擦角が40度で、小段幅が3mでは内部摩擦角が20度からであり、小段幅2mでは下段が、小段幅3mでは上段にそれぞれすべり線が発生しており、ケースAとは異なる傾向を示した。

### (4) ケース D (上段 2m90度, 下段 5m60度)

ケース D (上段 2m90度, 下段 5m60度)における塑性ひずみ速度分布の一覧を表6に示す。上段もしくは下段のみ塑性ひずみ速度が卓越するのは、小段幅が2mでは内部摩擦角が40度で、小段幅が3mでは内部摩擦角が30度からであり、小段幅3m・内部摩擦角40度では上段にすべり線が発生し、小段幅2m・内部摩擦角40度と小段幅3m・内部摩擦角30度では下段にすべり線が発生した。

以上をまとめると、内部摩擦角が30度以上の砂質土地盤の場合、2m以上の小段を設けることにより崩壊領域を分断できる傾向が確認された。しかし、砂質土地盤でも斜面の勾配や高さによっては崩壊領域が全体となる場合も見られた。一方、小段幅1mでは全てのケースで崩壊領域が全領域となり、分断する効果は無かった。

## 4) 斜面の安定性 (荷重係数 $\mu$ ) と小段幅の関係

重力加速度増加手法による解析結果から得られる加速度と重力加速度の比を荷重係数と呼び、 $\mu$ で表す。荷重係数 $\mu$ は、 $\mu > 1$ の場合は1Gの重力場で安定であることを、 $\mu < 1$ の場合は1Gの重力場で不安定であることを意味し、ある重力加速度に着目すればその時に破壊規準線に近い

表3 塑性ひずみ速度分布 (ケース A)

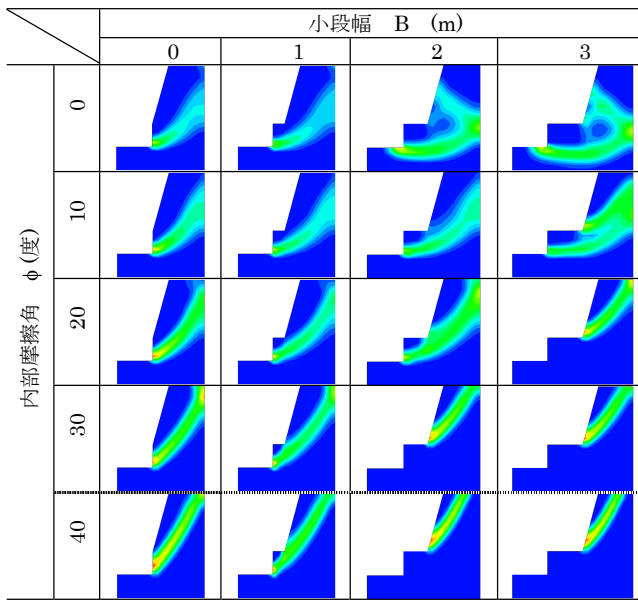


表5 塑性ひずみ速度分布 (ケース C)

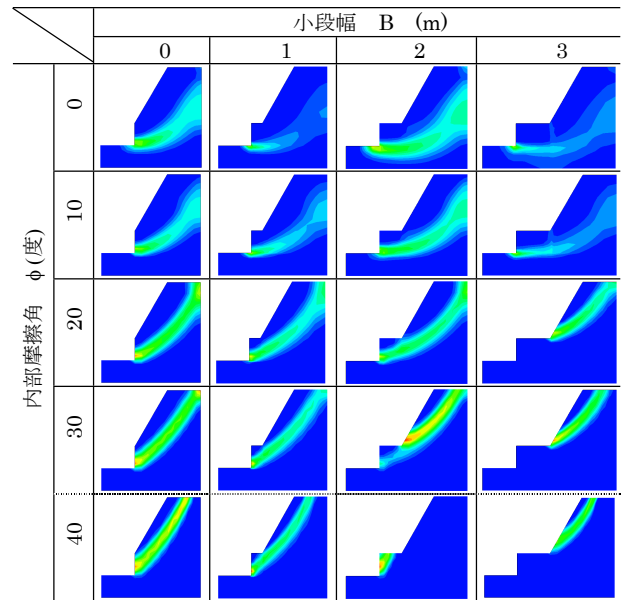


表4 塑性ひずみ速度分布 (ケース B)

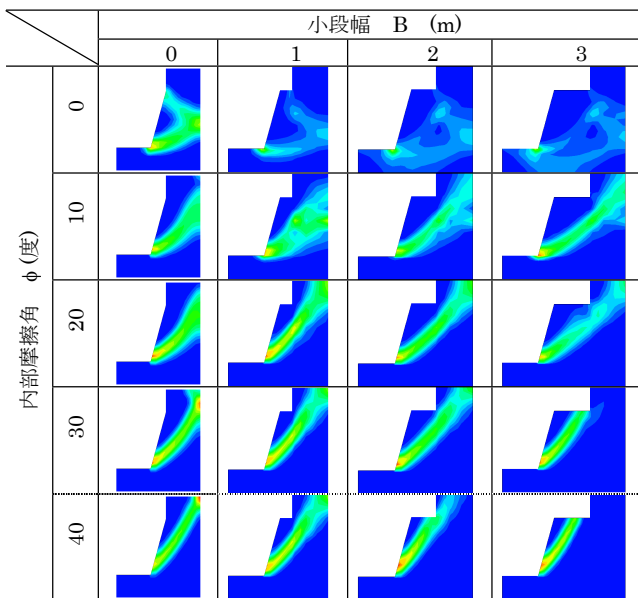
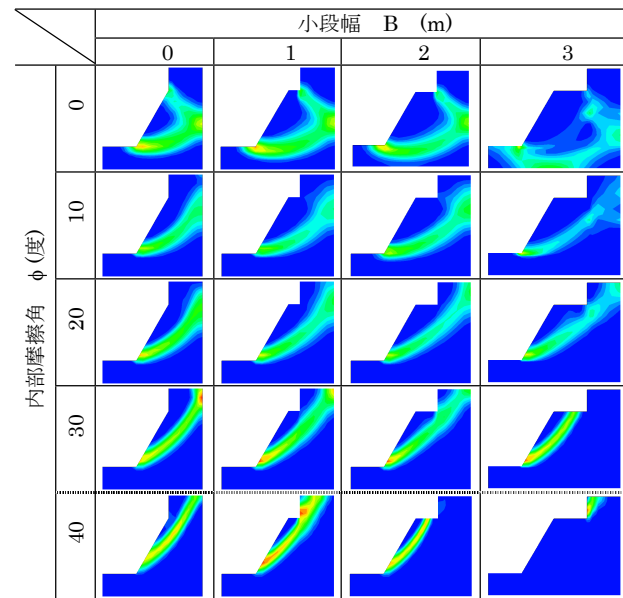


表6 塑性ひずみ速度分布 (ケース D)



か遠いかを示すインデックスであり、安全率  $F_s$  と等価なものと考えることができる。以下に各ケースにおける内部摩擦角、小段幅と荷重係数  $\mu$  の関係を示し、それぞれの斜面形状での特徴を示す。

**(1) ケース A (上段 5m75 度, 下段 2m90 度)**

ケース A (上段 5m75 度, 下段 2m90 度) における荷重係数～小段幅関係を図 2(a) に示す。内部摩擦角が 30 度、40 度の場合、小段幅が 2m と 3m の荷重係数が同じとなっている。これは、表 3 のようにすべり線が上段の斜面にて発生しているため、小段幅の影響が無いためである。

**(2) ケース B (上段 2m90 度, 下段 5m75 度)**

ケース B (上段 2m90 度, 下段 5m75 度) における荷重係数～小段幅関係を図 2(b) に示す。表 4 のようにすべり線が小段より下段の斜面から発生しており、内部摩擦角の違いによるすべり線の影響範囲と小段上部の土塊に

よる上載荷重の相互作用を受け、2m 以上でも小段幅が荷重係数に影響を与えている。

**(3) ケース C (上段 5m60 度, 下段 2m90 度)**

ケース C (上段 5m60 度, 下段 2m90 度) における荷重係数～小段幅関係を図 2(c) に示す。内部摩擦角が 30 度の場合、小段幅が 2m と 3m の荷重係数が近い値となっており、ケース A と同様の傾向が見られる。さらに、ケース C では内部摩擦角が 40 度の場合において、小段幅 2m と 3m のすべり線の発生箇所が異なっており、それが荷重係数に大きな影響を与えている傾向を見ることができる。

**(4) ケース D (上段 2m90 度, 下段 5m60 度)**

ケース D (上段 2m90 度, 下段 5m60 度) における荷重係数～小段幅関係を図 2(d) に示す。内部摩擦角が 40 度の場合、小段幅 2m のほうが小段幅 3m よりも荷重係

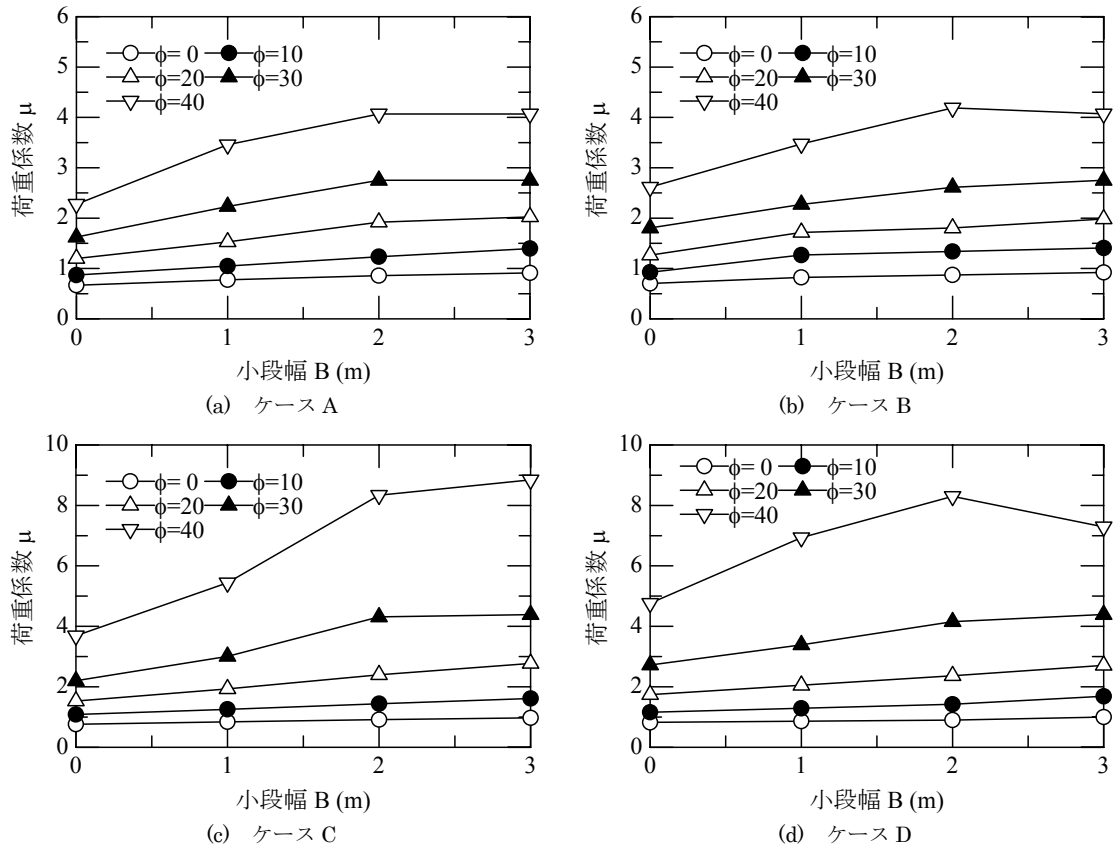


図2 荷重係数～小段幅の関係

数が大きい値を示している。これは塑性すべり線の発生箇所が異なるためである。

以上をまとめると、基本的には小段幅を広げると荷重係数が大きくなる傾向を示した。内部摩擦角が30度以上の砂質系地盤の場合、小段幅2m以上では崩壊領域が分断されることによって荷重係数に変化が見られない場合や崩壊領域の違いにより低下する場合も見られたが、いずれも小段幅1mにおける荷重係数よりは大きく、小段幅を広くすることで斜面がより安定となることが分かった。

#### 4 小段幅の違いが斜面安定性に与える影響

前章の検討から、塑性ひずみ速度分布の結果より小段幅1m以下では崩壊領域を分断する効果が見られないことや、小段幅2m以上でも斜面の勾配や高さによっては崩壊領域が分断できない場合があることが示された。また、斜面安定性を示す荷重係数の結果からは、小段幅を広げることで斜面安定性は高くなる傾向が示された。

本報の解析は、安衛則第356条における勾配と高さを参考として決定された16種類の幾何学形状について検討したものであり、他の国内基準等についての厳格な検討は行っていない。なぜならば、小段設置が法面の排水機能と維持管理時の点検作業を主目的としており、斜面の安定性については、別途設計計算等で担保されている場合が多いためである。これは、永久構造物築造のための国内各基準等と施工中の安全を担保するための安衛則の根本的な違いとも言える。

既報<sup>1)</sup>では、労働災害による崩壊形状のほとんどが直線すべりであったことから直線すべり法による計算を採用したこと、そしてそれは労働災害が発生する危険性が高い急勾配な幾何学的形状かつ砂質土地盤のケースでは安定係数を簡易的に求める場合に利用することが可能であることが示されている。本報の剛塑性有限要素解析の結果についても、労働災害が発生する危険性が高い急勾配な幾何学的形状かつ砂質土地盤のケースでは、小段幅2m以上の場合には斜面の崩壊領域が分断されていることから、適用できる範囲は限定的ではあるが、小段幅2m以上を確保することで、斜面安定性に相応の効果があることが示されたものと言える。

#### 5 まとめ

本報では、(1) 小段設置に関する国内の代表的な機関で用いられている規則や設計基準を提示し、(2) 小段の幅を変化させた剛塑性有限要素解析から、小段幅が斜面の安定性や崩壊形状に与える影響について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

1. 国内の各機関で用いられている主要な規制および設計基準にて記載されている小段の幅と設置する高さの間隔は、各機関の目的に応じて決められていることから各基準で様々ではあるが、概ね法高5~10m毎に1~2mの小段を設けられている。
2. 規制・設計基準には、小段に斜面の安定性に寄与する効果を期待されて設置されるものもある。

3. 小段幅、斜面の勾配と高さ、土質パラメータを変化させた剛塑性有限要素解析を行い、崩壊形状や安定性の検証を行ったところ、内部摩擦角が30度以上の砂質土地盤の場合、2m以上の小段を設けることにより崩壊領域を分断することができる傾向が確認された。しかし、砂質土地盤でも斜面の勾配や高さによっては崩壊領域が全体となる場合も見られた。
4. 一方、幅1mの小段では全てのケースにおいて崩壊領域が上段・下段を含む全領域となり、小段が崩壊領域を分断する効果は見られなかった。

### 謝 辞

本論文をまとめるにあたり、前郁夫氏（元労働省産業安全研究所所長）から掘削面の勾配と高さの制定について貴重な情報を提供して頂くとともに有益なご助言を戴きました。ここに深謝の意を表します。また、本研究で用いた解析プログラムは、京都大学 故 田村武教授が作成されたプログラムを公益財団法人鉄道総合技術研究所 小西真治氏から提供して頂き、第一筆者が改良したものです。プログラムを快く提供して頂いたお二人に末筆ながら感謝の意を表します。本論文を査読して頂いた査読者の方々には、多くの建設的な御指摘および御意見を頂戴いたしました。ここに記して深く感謝致します。最後に、本研究は厚生労働省科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業 課題番号H20-労働一般-001、研究代表者：日下部治）の補助を得て実施したものであり、ここに記して謝意を表します。

### 文 献

- 1) 伊藤和也, 豊澤康男, 前郁夫, 高橋章浩, 竹村次朗, 日下部治. 明かり掘削における掘削面の高さ勾配の安全性評価-掘削面の勾配と高さの基準制定に至る歴史的背景-. 労働安全衛生研究. 2010; 3-2: 103-110.
- 2) Huang, Y. H.. Stability Coefficients for Sidehill Benches, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. 1977; 103-GT5: 467-481.
- 3) 望月秋利, 三笠正人, 勝田守文. 2つの斜面安定計算法の提案, 土木学会論文集. 1986; 370/ III-5: 261-270.
- 4) Kovacevic, N., Hight, D. W. and Potts, D. M.. Predictiong the stand-up time of temporary London Clay slopes at Terminal 5, Heathrow Airport, Geotechnique. 2007; 57 – 1: 63-74.
- 5) Kaniraj, S. R. and Abdullah, H.. Effect of Berms and Tension Crack on the Stability of Embankments on Soft Soils, Soils and Foundations. 1993 ; 33- 4: 99-107.
- 6) 社団法人日本道路協会編. 6-3-4 切土のり面の小段, 道路土工一切土工・斜面安定工指針 (平成 21 年度版) . 2009 : 151-153.
- 7) 国土交通省監修 鉄道総合技術研究所編. 4.1.4 切土の形状, 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物. 2007: 157-163.
- 8) 小高猛司. 地盤工学における剛塑性有限要素法 (その1), 講座「有限要素法の基礎と地盤工学への応用」, 土と基礎. 2001; 49-11: 33-38.
- 9) Tamura, T. et. Al. Limit analysis of soil structure by rigid plastic finite element method, Soils and Foundations. 1984 ; 24- 1: 34-42.
- 10) 田村武, 足立紀尚, 小西真治, 辻鉄也. 剛塑性有限要素法によるトンネル切羽の安定性評価について, 土木学会論文集. 1999 ; 638 / III-49: 301-310.

# Effect of Berm on the Stability of Slope and Its Failure Mode Studied by Rigid-Plastic Finite Element Analysis

by

Kazuya ITOH<sup>\*1</sup>, Yasuo TOYOSAWA<sup>\*1</sup>, Akihiro TAKAHASHI<sup>\*2</sup>,  
Jiro TAKEMURA<sup>\*2</sup>, and Osamu KUSAKABE<sup>\*3</sup>

Berms are used to control erosion and scouring by reducing the rate of surface runoff. In addition, the berms are expected to improve the stability of a slope. Regarding the standard for the gradient of excavation surfaces, which is covered by the Ordinance on Industrial Safety and Health, Japan (Articles 356 and 357), each excavation surface divided by said horizontal step, i.e., berm, can be regarded as an individual surface if the width of the step is 2m or more. This paper introduces regulations and design standards for the berm width and slope height for each institution. Then the analyses of the effect of berm width on the stability of slope and its failure mode are carried out using the Rigid-Plastic Finite Element Method.

**Key Words:** berm, slope stability, rigid-plastic finite element method, occupational safety, labour accident

---

\*1 Construction Safety Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health

\*2 Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology

\*3 President, Ibaraki National College of Technology