

## 2.4.2 崩壊原因の傾向

### 1. 施工上による崩壊原因について

施工上による崩壊原因について分類した結果を図-2.10 に示す。急勾配掘削が 27 件で全体の 44%，床掘りの掘削が 19 件で 31%を占めており，これらの原因により崩壊していることが分かる。

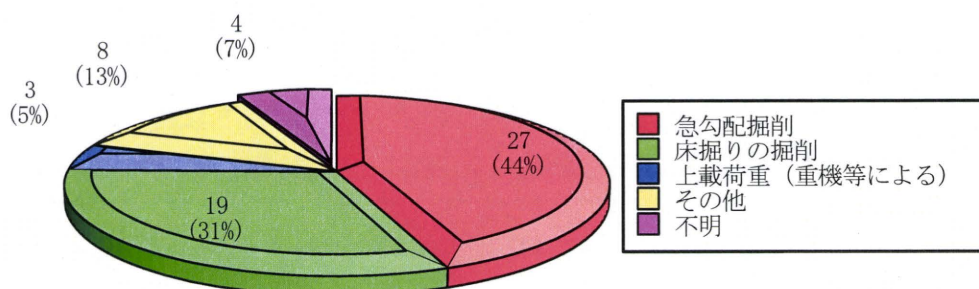


図-2.10 崩壊原因・施工上

### 2. 自然現象による崩壊原因について

自然現象による崩壊原因について分類した結果を図-2.11 に示す。降雨・雪，地下水・湧水といった水に関連する原因によって崩壊した事例が全体の約 6 割となっており，水が崩壊に何らかの影響を与えていることが分かる。

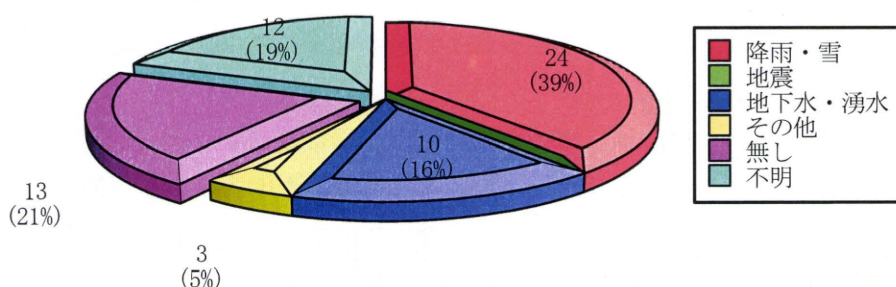


図-2.11 崩壊原因・自然現象

## 2.4.3 予見可能性の有無についての傾向

地盤工学の専門家から見た場合の予見可能性について分類した結果を図-2.12 に示す。不明や無しも多いが，同じ箇所を施工中に崩壊履歴があった事例や崩壊前に小石がパラパラと落ちるといった崩壊の前兆現象が報告された事例が 26%存在しており，事前に何らかの処置をすれば，防げた可能性が高い。

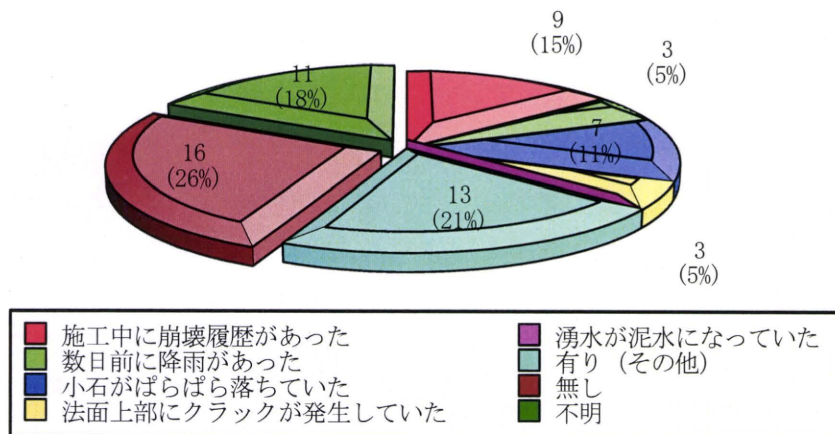


図-2.12 予見可能性の有無

## 2.5 まとめ

本章では、施工前・施工中の具体的な問題点を抽出して考察を行った。その結果、斜面掘削工事の安全化を図るには、①施工途上の斜面安定性の検討、②安全な施工方法の開発・普及、③計測施工方法の開発・普及および④切取り斜面下で行う各種作業の必要性の見直しなどによる計画・設計から施工に至るまでの適切な安全対策が必要であることが言えた。

また、斜面掘削工事中の土砂崩壊による死亡災害事例について、地盤工学に携わる技術者から見た崩壊形態・崩壊原因の傾向について調査・分析を行った。その結果、以下の傾向が見られた。

1. 崩壊形態として規模別には表層崩壊や落石のような小規模崩壊、地質別としては基盤層に堆積した崩壊土・風化表層土によって多くが被災していることが分かった。
2. 崩壊原因として降雨・雪、地下水・湧水など水が崩壊に影響を及ぼしている傾向が見られた。
3. 施工箇所に崩壊履歴があったり小石がパラパラ落ちるなど、崩壊前に何らかの前兆現象がある場合が半分以上あった。すなわち、半数以上の災害については、専門的な知識をもった技術者の的確な対応により災害を未然に防げた可能性がある。

## 2.6 第2章の参考文献

1. 例えば、建設業災害防止協会：平成19年度版建設業安全衛生年鑑，建設業災害防止協会，216p，2007.
2. 伊藤和也，豊澤康男，Tamrakar S. B.，堀井宣幸：建設工事中の斜面崩壊による労働災害の調査・分析，日本地すべり学会誌，Vol. 41, No. 6, pp. 17-26, 2005.
3. 奥園誠之：小規模崩壊は物性（土質）に，大規模崩壊は地質構造に支配される，これだけは知っておきたい斜面防災100のポイント，鹿島出版会，pp. 7-9, 1986.

## 第3章 明かり掘削における掘削面の高さや勾配の安全性評価

### 3.1 はじめに

社会基盤の対象となるほとんどの建造物は、地盤の上に構築されていることから、全ての建設工事には掘削工事が多かれ少なかれ生じる。一般に掘削工事は、トンネル・坑道などの掘削とそれ以外の地盤の掘削とに分けられ、後者は「明かり掘削」と呼ばれている。明かり掘削はダム基礎掘削、道路建設のための山の切取り、ビル建築のための根切り、水道管の敷設のための布掘りなどその種類は多種多様であり、工事規模や立地条件も様々である。このような掘削工事における労働災害の大部分は土砂崩壊による災害であり、その防止対策の重要性は、古くから認識されていた。前<sup>1)</sup>は土砂崩壊による労働災害について1954(昭和29)年～1958(昭和33)年に発生した重大災害64件について分析を実施し、

- 1) 土質調査、土質試験の実施、
- 2) 安全な切取り高さ、切取り勾配、
- 3) すかし掘りの禁止、ベンチカット工法の採用、
- 4) 土止め工を施すこと、
- 5) 看視人をおくこと、
- 6) 気象条件を充分考慮すること

を特に強調している。その後、1965(昭和40)年の労働安全衛生規則の一部を改正する省令において、掘削面の高さ及び勾配の基準等が新たに定められた<sup>2)</sup>。これが、現在まで当時のまま引き継がれている掘削面の勾配の基準、すなわち労働安全衛生規則第356条及び357条である。

本章では、(1)掘削工事において国内の各機関で用いられている掘削勾配と高さに関する規制・設計基準について例示し、(2)掘削法面の勾配と高さの基準である労働安全衛生規則第356条・357条について、制定された歴史的背景の調査を行い、また理論的背景についても幾つかの数値解析手法により考察を行った。

### 3.2 国内の各機関で用いられる規制・設計基準における掘削面の勾配と高さに関する調査

切土斜面の場合、計画・設計上重要なことは、掘削法面の勾配の決定である。地形や土質に応じ、また掘削後の法面対策工の有無なども勘案し、完成後の崩壊および施工中の崩壊に対して安全な勾配を設定しなければならない。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を表-3.1に示す。ここでは、仮設・本設の対応状況について示しているが、仮設について検討されているものの全てにおいて「労働安全衛生規則第356条の規定を満足しなければならない」との記載がなされている。すなわち、施工中の法面勾配については、事実上、労働安全衛生規則が最低限遵守すべき基準となっている。図-3.1～3.3に規制および設計基準の掘削高さや勾配を物性ごとに分類したものを示す<sup>1)</sup>。この図においても、他の規制および設計基準は、労働安全衛生規則による基準を満たすように設定されていることが分かる。

労働安全衛生規則以外の現行の各種規制および設計基準は、主として完成断面における中・大規模な崩壊を防止するためのものであり、施工中の断面については考慮されてない。施工中に発生する労働災

害は、小規模な崩壊が多いが、これらを想定した設計基準となっていないと言える。また、多くの設計基準では、地山条件が主として物性（硬岩、軟岩、砂質土等）のみによって決定されており、崩壊に大きな影響を与える地質構造（例えば、流れ盤、受け盤）や地下水の条件等が十分には考慮されていない。これらの諸問題は、1980年代から既に指摘されている<sup>3)</sup>が、現在でも同様な傾向が見られる。

表-3.1 国内における掘削勾配に関する主な基準

区分	基準等	所管・発行	内容・特徴	対応	
				仮設	本設
労働安全	労働安全衛生規則	厚生労働省	第356条・357条に掘削作業において掘削地盤の種類・掘削高さに応じた勾配を規定	○	—
造成	都市計画法施行令	国土交通省	第28条に開発行為によって発生した崖、切土面の処理について規定		
	都市計画法施行規則		第23条に切土面を擁壁で覆わなくても良い範囲（地盤の種類、高さ）を規定		
	宅地造成法等規制法施行令		第4条、5条、13条に切土面を擁壁で覆わなくても良い範囲およびその排水処理等について規定		
	宅地造成マニュアル		開発行為によって生じた崖、切土に擁壁を設置しなくても良い範囲について記述		○
道路	道路土工のり面工・斜面安定工指針	日本道路協会	道路構造物の斜面関係基準として最も広く用いられている		○
	道路土工擁壁指針		擁壁背面の地山掘削時における留意点が示されている	○	
	設計要領 第一集 土工・舗装・排水・造園	日本道路公団			○
鉄道	鉄道建造物等設計標準・同解説 土構造物	鉄道総合技術研究所	平成19年の改訂で他に先駆けて性能照査型設計に移行した		○
河川	河川砂防技術基準（案）・同解説	日本河川協会	堤防・護岸の裏のり勾配に関する規定がある	○	○
農林	土地改良事業計画設計基準・計画「農道」	農林水産省	人力掘削、機械掘削で異なる標準切土勾配としている	○	○
	林道基準	林野庁	他の基準に比べて基準切土勾配が急である		○

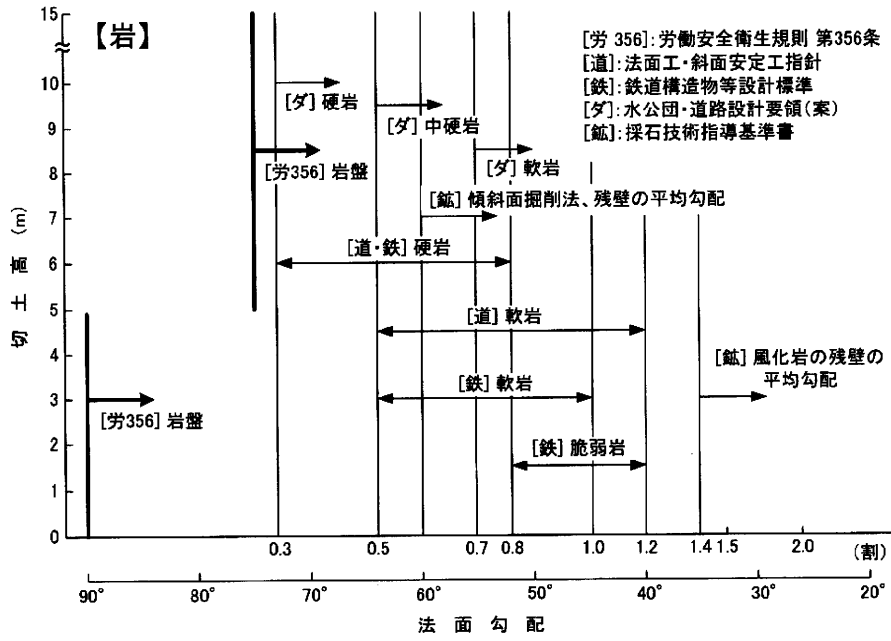


図 3-1 法面勾配の基準・標準の比較 (岩)<sup>1)</sup>

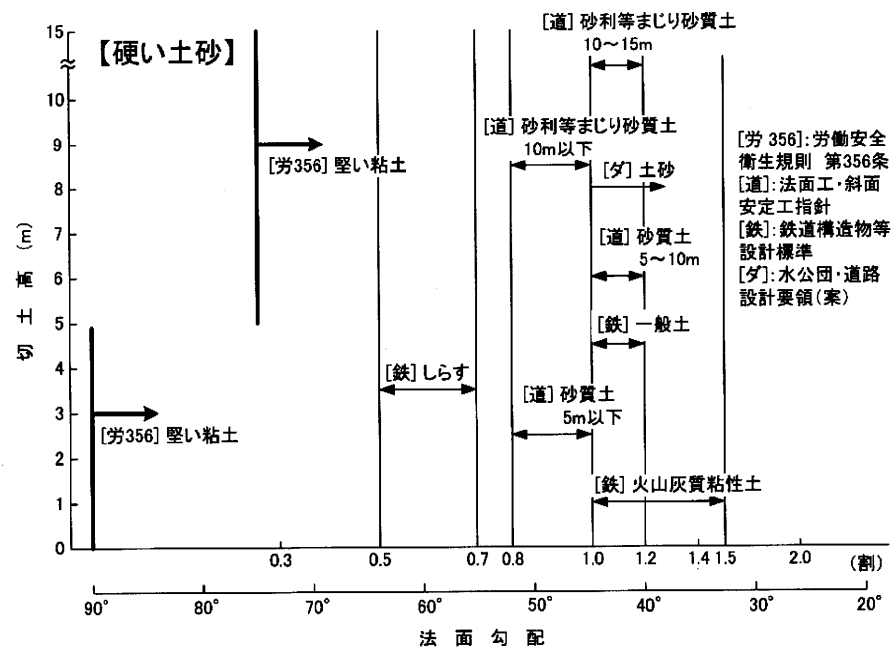


図 3-2 法面勾配の基準・標準の比較 (硬い土砂)<sup>1)</sup>

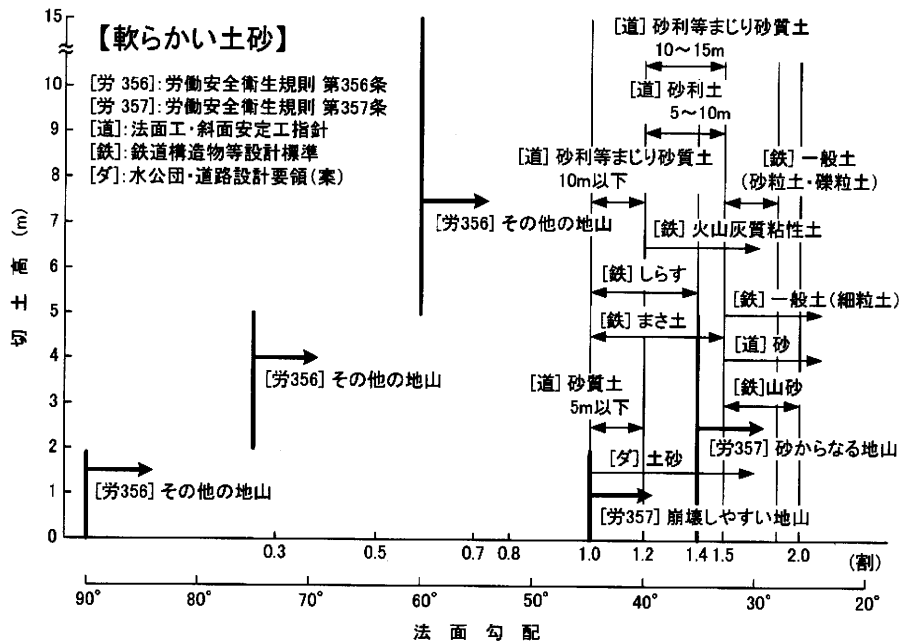


図 3-3 法面勾配の基準・標準の比較 (軟らかい土砂)<sup>1)</sup>

### 3.3 労働安全衛生規則第 356 条・357 条について

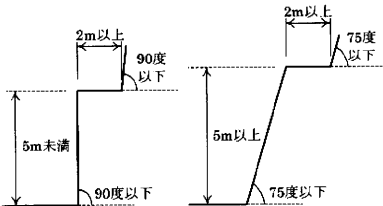
#### 3.3.1 労働安全衛生規則の歴史的背景

労働安全衛生規則は、1947 (昭和 22) 年 9 月の労働基準法制定に伴い、同年 10 月に制定された。その後、技術の進歩に伴う労働災害の多様化など労働安全衛生に関する事項について労働基準法では十分な対応が難しくなり、1972 (昭和 47) 年 6 月に労働安全衛生法が制定されたことに伴い、労働安全衛生規則も労働安全衛生法に基づく規則として 1972 (昭和 47) 年 9 月に制定された。明り掘削作業における掘削面の勾配と高さの基準である第 356 条、第 357 条は、労働基準法に基づく規則であった 1965 (昭和 40) 年 4 月 1 日に施行されたものであり、施行当時は第 163 条の 8、第 163 条の 9 に定められていた。労働安全衛生規則第 356 条、357 条の勾配と高さについてまとめたものを図-3.4 および表-3.2 にそれぞれ示す。

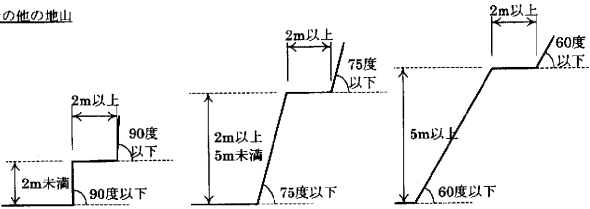
表-3.2 労働安全衛生規則第 356 条・第 357 条

	地山の種類	掘削面の高さ (単位 m)	掘削面の勾配 (単位 度)
356	岩盤又は 堅い粘土からなる地山	5 未満	90
		5 以上	75
	その他の地山	2 未満	90
		2 以上 5 未満	75
		5 以上	60
357	砂からなる 地山	勾配 35 度以下又は 掘削面の高さ 5m 未満	
	発破等の 後の地山	勾配 45 度以下又は 掘削面の高さ 2m 未満	

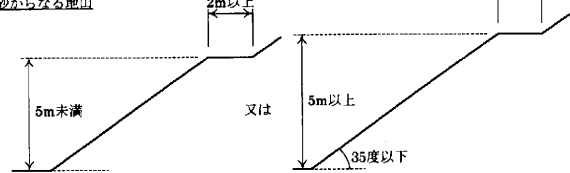
労働安全衛生規則 第356条  
岩盤または堅い粘土からなる地山



その他の地山



労働安全衛生規則 第357条  
砂からなる地山



発破により崩壊しやすい状態の地山

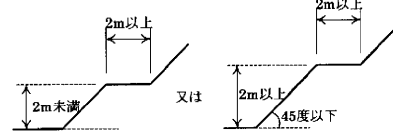


図-3.4 労働安全衛生規則第 356 条・第 357 条

### 3.3.2 掘削面の勾配と高さの基準の歴史的背景

掘削面の勾配と高さの基準の歴史的背景，特にどのように勾配と高さを決定したかについて，当時を知る複数の関係者から聞き取り調査を行った。これらの決定根拠としては大きく2つの理由があるようである。1点目は，1959（昭和34）年労働基準局長通達（昭和34年5月15日 基発第367号）により高さ2m以上の法面下作業について，緻密な岩盤及び堅硬な粘土を除いて75度を超えない勾配の基準とするように指導を行っていたことである。2点目は，過去の災害事例の掘削面の勾配と高さについて調査したことである。具体的には，1959（昭和34）年5月発行の安全資料「土砂崩壊災害の防止」（図-3.5）<sup>4)</sup>内に記載されている1954（昭和29）年～1958（昭和33）に発生した土砂崩壊による重大災害64件（死傷者数283名，うち死亡者数132名）および岩石崩壊落下による重大災害23件（死傷者数123名，うち死亡者数50名）から掘削面の勾配と高さが記載された24件の災害事例の掘削面の勾配と高さの分布を参考にして決定している。図-3.6は文献から筆者らが抽出した24件の災害事例の分布に労働安全衛生規則第356条での基準を併記したものである。以上の2つの理由より掘削面の勾配と高さは総合的に決定されたものと考えられる。最低限遵守すべき基準として現在まで変更されずにいることから，制定に携わった当時の技術者の見識の高さが伺える。

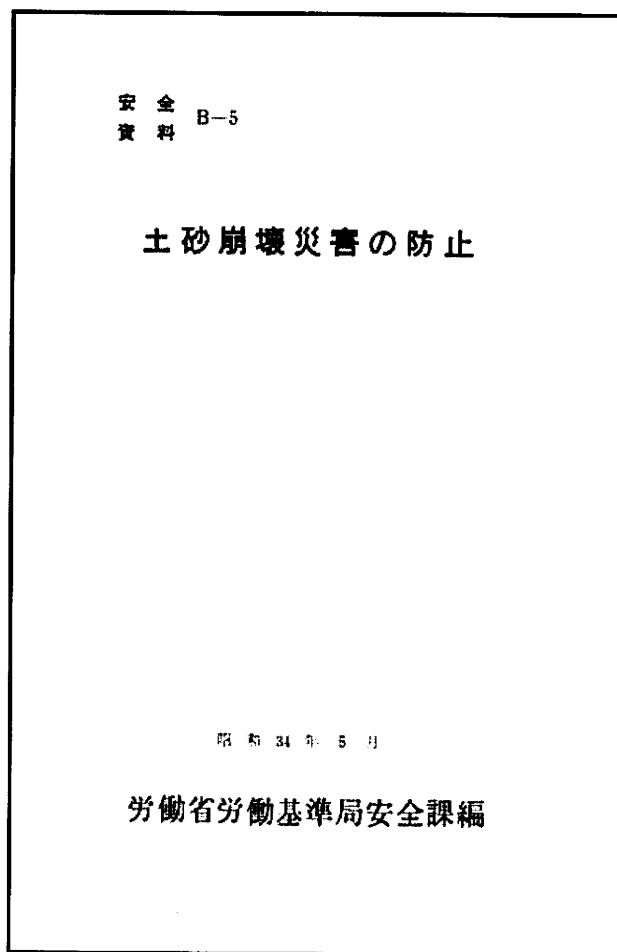


図-3.5 安全資料 B-5 土砂崩壊災害の防止



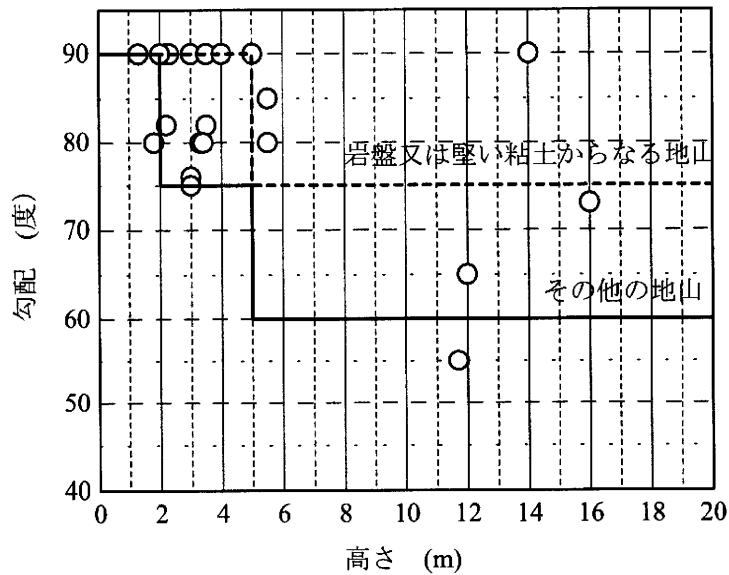


図-3.6 災害事例における掘削面の勾配と高さの関係と労働安全衛生規則 356 条の比較

### 3.3.3 掘削面の勾配と高さの基準の理論的背景

上述のように掘削面の勾配と高さの基準は、基本的には制定前に存在した通達と災害事例データから決定されたが、同時に理論的な検討もなされていた。安全資料「土砂崩壊災害の防止」には、直線すべり法にて粘土の切取限界高さを計算した結果が示されている（表-3.3）。ここで、注目されるのは、使用した土質パラメータを Hogentgler の書籍<sup>5)・6)</sup>より引用している点である。すなわち、この数値解析は、米国の土のパラメータを用いて行われていたことになる。これは、当時、土質試験方法が簡単でなかったこと、土質試験はほとんど行われておらず過去の経験に基づく「勘」に頼ることが多かったことなどから、日本の土質材料に関する適当なパラメータが揃っていなかったものと想像される。また、当時の土質力学の書籍「土質力学」<sup>7)</sup>（1951（昭和 26）年発行）では、“12 章 法面の安定”にて Taylor の安定図表等が示されている。これらの検討は全て円弧すべり法によるものであったが、災害による崩壊形状では円弧すべりは極僅かであり、そのほとんどが直線すべりであったことから安全資料では直線すべり法による計算を採用している。

現在でも土質力学（地盤工学）の教科書として定着している Terzaghi & Peck による「Soil Mechanics in Engineering Practice（1948（昭和 23）年発行）」が「土質力学 基礎編・応用編」として翻訳・出版されたのが 1955（昭和 30）年である。当時の土質力学はまだ未成熟な時代であったが、労働安全衛生規則第 356 条および第 357 条は当時の最先端の知見と実情を取り入れて制定されたと言えよう。

表-3.3 粘土の切取限界高さ (安全率各 1.5) <sup>4)</sup>に加筆修正

粘土の種類		単位体積 重量 $\gamma$ t/m <sup>3</sup> [kN/m <sup>3</sup> ]	粘着力 c tf/m <sup>2</sup> [kN/m <sup>2</sup> ]	内部 摩擦角 $\phi$ 度	限界高さ m					
					切取勾配 度					
翻訳本 <sup>5)</sup> での表記	原本 <sup>6)</sup> での表記				90	85	75	70	65	60
著しく柔軟 な粘土	Very soft clay	1.28 [12.54]	0.976 [9.56]	2	2.11	2.30	2.53	3.05	3.76	3.75
普通の粘土	Medium clay	1.44 [14.11]	4.88 [47.82]	6	9.66	10.6	11.7	14.3	15.8	17.8
堅硬な粘土	Stiff clay	1.60 [15.68]	7.32 [71.74]	8	13.3	14.7	16.1	19.8	22.0	24.7
良好な砂質 粘土	Good sand clays	1.76 [17.25]	4.88 [47.82]	34	11.4	13.1	15.1	20.8	25.0	30.6
沈泥質粘土	Silty clays	1.60 [15.68]	0.976 [9.56]	14	1.91	2.11	2.35	2.93	3.28	3.75

※原本は重力単位系であったので、SI 単位系を[ ]内に付記した

### 3.4 数値解析による検討

労働安全衛生規則第 356 条および第 357 条の検討にも利用された「直線すべり法」に加えて、「剛塑性有限要素法」を用いて Chen らの安定係数やすべり線形状などについて比較・検討を行った。

#### 3.4.1 解析手法の概要

##### 1. 直線すべり法

斜面の安定性を求める解析法に極限解析法がある。破壊が発生するときのすべり面と位置を決め、極限平衡状態におけるすべり面に沿う土塊の滑動力（すべり面に作用するせん断力）と土塊の持つ抵抗力（摩擦および粘着力）との釣り合いを計算する方法である。その中で、すべり線を直線と仮定し計算を行うものを直線すべり法という（図-3.7）。

直線すべり法では、傾斜角 $\beta$ で斜面を掘削しているとき、その限界高さ $H_c$ は、

$$H_c = \frac{4c}{\gamma} \cdot \frac{\sin \beta \cdot \cos \phi}{1 - \cos(\beta - \phi)} \quad (1)$$

と表される。ここで、 $c$ ：粘着力、 $\phi$ ：内部摩擦角、 $\gamma$ ：単位体積重量である。

また、 $\frac{H_c \cdot \gamma}{c}$  は安定係数と呼ばれ、

$$\frac{H_c \cdot \gamma}{c} = 4 \times \frac{\sin \beta \cdot \cos \phi}{1 - \cos(\beta - \phi)} \quad (2)$$

で表される。なお、直線すべり法で算出されるすべり線の傾斜角度 $\alpha$ は、

$$\alpha = \frac{\beta + \phi}{2} \quad (3)$$

である。

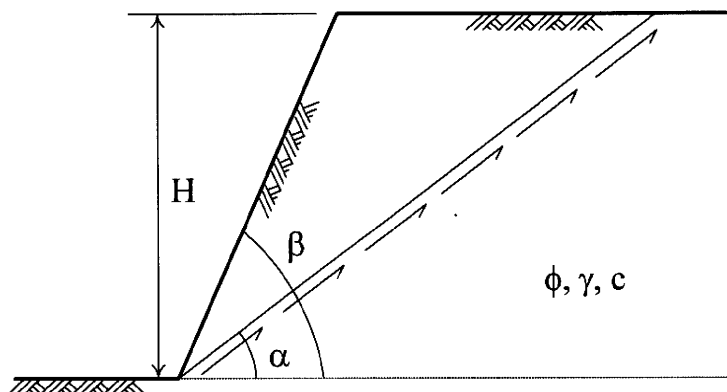


図-3.7 直線すべり法

## 2. 剛塑性有限要素法

一般に材料は、加えた荷重を除去すると変形が復元する弾性と、荷重がある値（降伏点）を超えると変形が急激に増大し、荷重を除去しても変形が残留する塑性を持っている。1つの材料で弾性・塑性の両方の性質を考慮する場合を弾塑性体、弾性変形を無視して剛体と考える場合を剛塑性体という（図-3.8）<sup>8)</sup>。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>9)</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、载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、破壊が生じるまでの変化量を求めることはできない。

解析によって得られた荷重係数 $\mu$ から以下の式で安定係数 $N$ を算出する。

$$N = \mu \times \frac{H \cdot \gamma}{c} \quad (4)$$

剛塑性有限要素法は金属の塑性加工の分野で開発されてきた。その中で、田村らは地盤工学分野の安定問題に剛塑性有限要素法を適用し、その定式化と数値解析結果を報告している<sup>10)~12)</sup>。これらの定式化に至る詳細は Tamura et. al<sup>10)</sup>の論文に譲る。本解析では、外力として自重を0から少しずつ増加させて崩壊時の重力加速度を求め、その大きさにより崩壊が現実に起こるかを判定する“重力加速度増加手法”を用いた。

これら2つの数値解析に使用した物性値を表-3.4に示す。剛塑性有限要素法では、粘着力 $c$ 、単位体積重量 $\gamma$ 、内部摩擦角 $\phi$ を使用し、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。

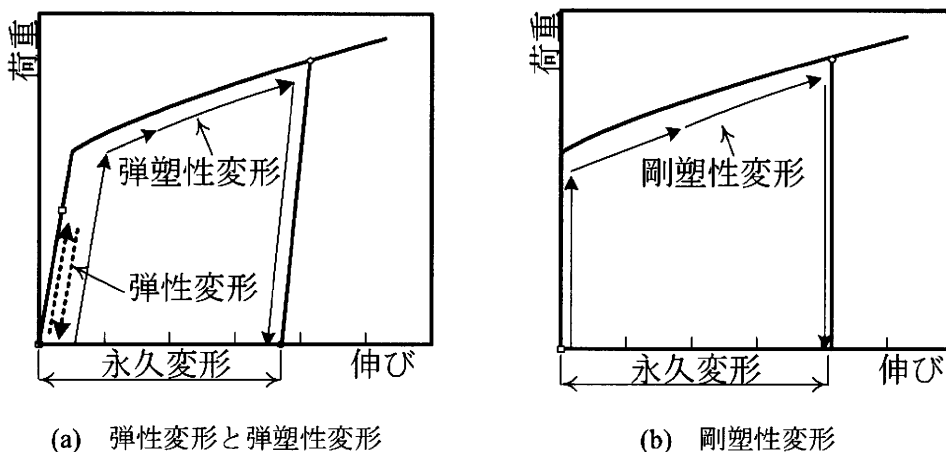


図-3.8 荷重と伸びの関係

表-3.4 材料の物性値

		直線 すべり法	剛塑性 FEM
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, 5, 10, 15, 20, 25, 30	○	○
ダイレイタンシー角 $\psi$ (度)	$\phi$	-	○

3. Chen らの安定係数<sup>13)</sup>

Chen らは図-3.9 のように上表面も傾斜したような複合斜面で下側斜面の勾配を $\beta$  (度), 上側斜面の勾配を $\alpha$  (度) とした斜面の限界高さについて極限解析を行っている. Drucker and Prager が鉛直切り取り ( $\alpha=0$  度,  $\beta=90$  度) について, 直線すべり線を仮定して解析を試みている<sup>14)</sup>が, Chen らは対数螺旋すべり線がより合理的だとし, 対数螺旋すべり線を用いて詳細な解析を行い, 内部摩擦角と勾配に関する安定係数の一覧表を示した<sup>15)</sup>. ここで, 安定係数  $N$  は

$$N = H_c \cdot \frac{\gamma}{c} \tag{5}$$

で表される.

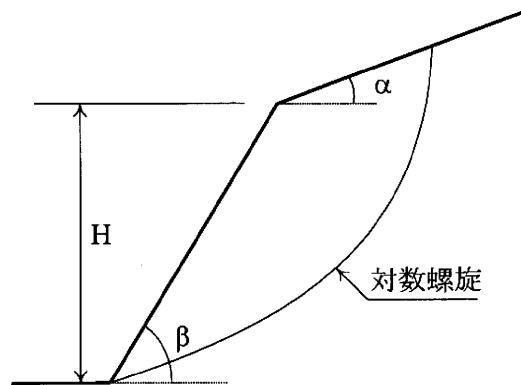


図-3.9 Chen らによる対数螺旋による安定係数<sup>13),15)</sup>

### 3.4.2 解析結果

#### 1. Chen らの安定係数の比較

図-3.10 に 2 種類の数値解析結果と Chen らの安定係数を示す。なお、凡例の数字は内部摩擦角である。以下にそれぞれの解析手法による特徴を示す。

- ・直線すべり法 (図-3.10(a))

勾配が 90 度では Chen の安定係数と近い値を示しているが、その他の勾配では直線すべりの安定係数が大幅に上回っている。緩勾配のケースほどその差は広がる。

- ・剛塑性有限要素法 (図-3.10(b))

Chen の安定係数に近い値、傾向を示した。若干剛塑性有限要素法の安定係数が大きな値を示しているが、これは、剛塑性有限要素法の収束判定による誤差の影響だと考えられる。

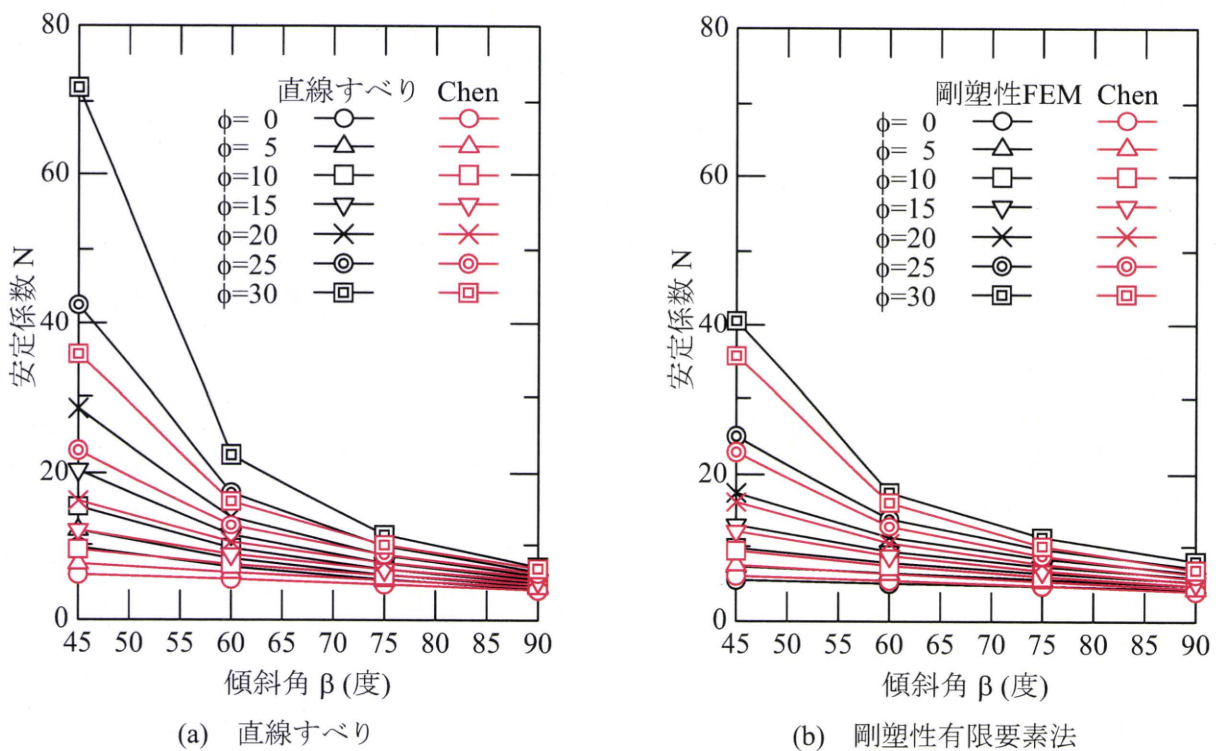
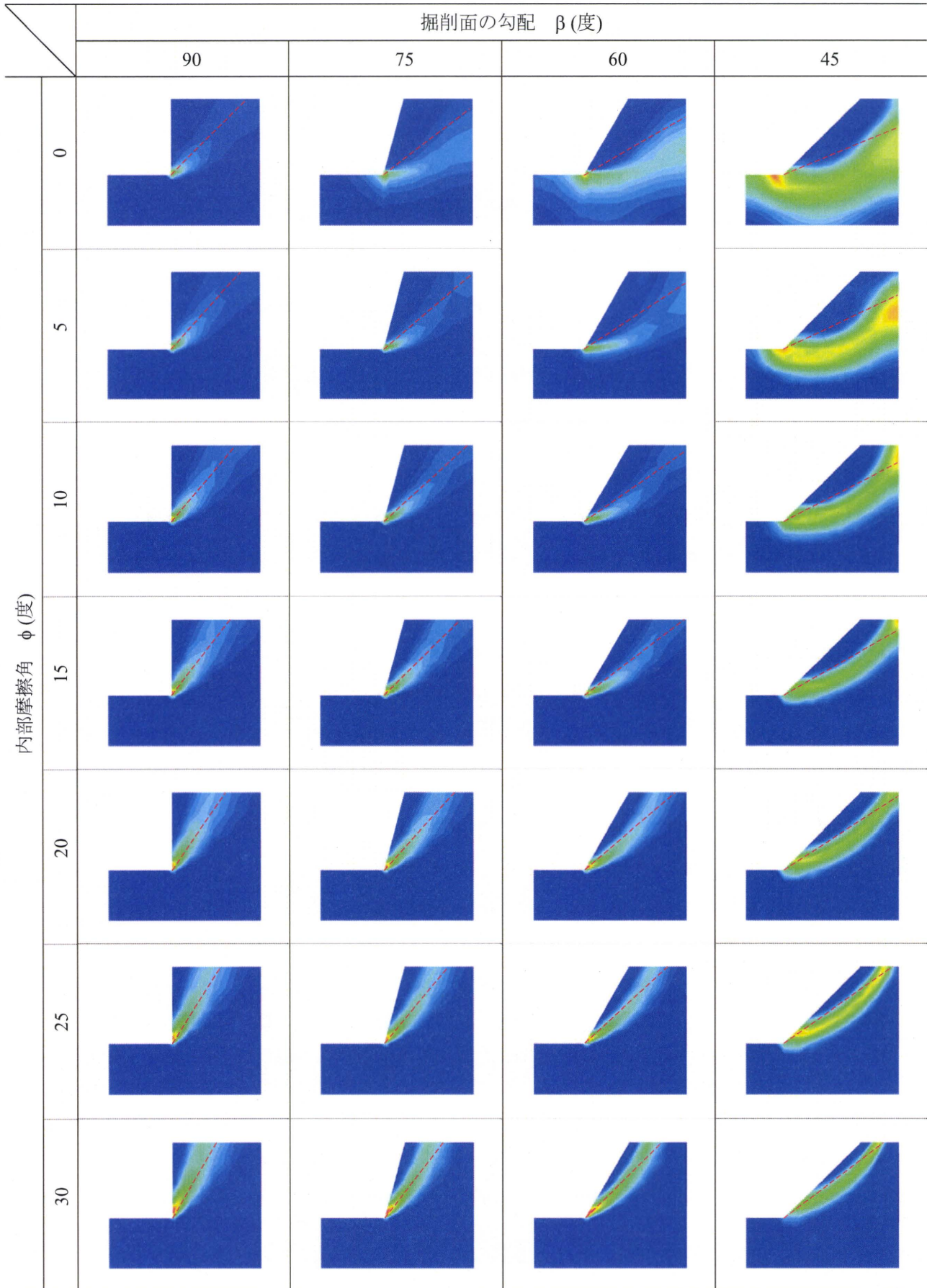


図-3.10 Chen らの安定係数との比較

#### 2. すべり線の比較

剛塑性有限要素法より得られた相当塑性ひずみ速度分布の一覧を表 3.5 に示す。この表には、直線すべり法にて得られるすべり線勾配も赤色点線で一緒に図示した。内部摩擦角が小さい、すなわち粘性土地盤のケースでは、崩壊形状が円弧状となっており、直線すべり法によるすべり線勾配とは全く異なる。しかし、内部摩擦角が大きい、すなわち砂質土地盤では、崩壊形状が表層部分に集中し、直線すべり法によるすべり線と合致する。また、勾配の違いで見ると、急勾配ほどすべり線形状は内部摩擦角が小さい場合でも直線となる傾向が見られた。直線すべり法では、このようなすべり線の違いが安定係数にも大きな影響を与えたものと想像される。しかし、急勾配掘削において簡易的に安定係数を求める場合には、直線すべり法でも大きな差とはならないとも言える。

表-3.5 剛塑性有限要素法での崩壊時の相当塑性ひずみ速度分布と直線すべり法でのすべり線



### 3.5 まとめ

本報では、(1)切土掘削工事において国内の各機関で用いられている掘削勾配に関する規制・設計基準について提示し、(2)仮設時に最低限遵守すべき基準である労働安全衛生規則について、制定された歴史的背景の調査および理論的背景について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

1. 仮設について検討されているものの全てにおいて「労働安全衛生規則第 356 条の規定を満足しなければならぬ」との記載がなされている。すなわち、施工中の法面勾配については、事実上、労働安全衛生規則が最低限遵守すべき基準となっている。
2. 労働安全衛生規則第 356 条および第 357 条の掘削面の勾配と高さの基準は、制定前に存在した通達と災害事例データから決定された。しかし、それ以外にも直線すべり法による数値解析なども行って理論的な検討もされていた。当時の土質力学はまだ未成熟な時代であったが、当時の最先端の知見を取り入れて制定されたと言える。
3. Chen らによる対数螺旋による極限解析の結果と直線すべり法および剛塑性有限要素法の結果を比較したところ、剛塑性有限要素法から得られた安定係数は Chen の安定係数と一致する傾向を示した。
4. 直線すべり法による結果は急勾配掘削の場合には、剛塑性有限要素法の崩壊形状とも良い整合を示していることから、急勾配掘削において簡易的に安定係数を求める場合には、直線すべり法でも大きな差とはならないといえる。

実際の現場では、掘削面に傾斜の異なる箇所があるため勾配が算定できない場合がある。これらについて、簡易的な一覧表などを提供出来るように検討を進めていきたい。

### 3.6 謝辞

本章をまとめるにあたり、前郁夫氏（前 労働省産業安全研究所所長）ならびに加来利一氏（前 労働省安全衛生部長）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。

### 3.7 第 3 章の参考文献

1. 前郁夫：土砂崩壊による労働災害について，土と基礎，No.4, Vol. 4, pp.34-37, 1962.
2. 労働省労働基準局編：改正労働安全衛生規則の解説，建設業労働災害防止協会，179p, 1965.
3. (社)土質工学会 掘削工事の安全技術に関する調査研究委員会（労働省委託）：掘削工事の安全技術に関する調査研究報告書，141p, 1986.
4. 労働省労働基準局安全課：安全資料（B-5）「土砂崩壊災害の防止」，pp.130-136, 1959
5. ホгентグラウ（宇都宮寿夫訳）：土の工学的性質，コロナ社，135 p, 1944
6. Hogentogler, C. A.: Engineering properties of soil, McGraw-Hill Book Company Inc., NY and London, 220p, 1937.
7. 最上武雄：第 12 章 法面の安定，土質力学，岩波全書 148, pp.166-172, 1951.



8. 日本塑性加工学会：非線形有限要素法—線形弾性解析から塑性加工解析まで—，コロナ社，pp.36-37，1994
9. 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，Vol.49，No.11，pp.33-38，2001.
10. Tamura, T., Kobayashi, S. and Sumi, T.: Rigid-plastic finite element method for frictional materials, Soil and Foundations, Vol. 27, No. 3, pp.1-12, 1987.
11. Tamura, T., Kobayashi, S. and Sumi, T. : Limit analysis of soil structure by rigid plastic finite element method, Soils and Foundations, Vol. 24, No. 1, pp.34-42, 1984.
12. 田村武：剛塑性有限要素法の基礎と適用，地盤力学数値解析—“限界状態”の予測手法を中心として—，（社）土質工学会関西支部，pp. 50-79，1986.
13. Chen, W. F., Giger, M. W., and Fang, H. Y.: On the limit analysis of stability of slopes, Soil and foundations, Vol. 9, No. 4, pp.23-32, 1969.
14. Drucker, D. C. and Prager, W. : Soil mechanics and plastic analysis or limit design, Quarterly of Applied Mathematics, Vol. 10, pp. 157-165, 1952.
15. 中瀬明男，中ノ堂裕文，日下部治：斜面および盛土のための安定図表，技報堂出版，pp.32-33，1981.

## 第4章 斜面の安定性に関する水平面（小段）の影響

### 4.1 はじめに

明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（以下、安衛則）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をいうと定義されている。すなわち、2m以上の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出来ることを意味している。本章では、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、小段の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。

### 4.2 国内の各機関で用いられる規制・設計基準における小段の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の幅と高さについて記載されたものを表-4.1に示す。各機関の規制や設計基準は、それぞれの目的に応じて決められているため、小段の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 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>1)</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>2)</sup>。

小段の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の小段を設けるようであるが、林道技術基準では“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る。また、盛土構造物である堤防については小段幅が3m以上とすると記載されている。

労働安全衛生規則第356条では2m以上の小段を設けることにより斜面を分離して考えることが出来ることから、小段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。しかし、小段の幅が斜面安定性にどの程度寄与するのかについては知見がほとんど蓄積されていない。そこで、小段の幅、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法による数値解析を行い、崩壊形状や安定性の検証を行うこととした。

表-4.1 国内における小段の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 (中略) (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)・・・(以下省略)
造成	宅地防災マニュアル	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)

## 4.3 小段幅が斜面の安定性に与える影響に関する剛塑性有限要素解析

### 4.3.1 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>3)</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、载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、破壊が生じるまでの変化量を求めることはできない。

本解析では、外力として自重を0から少しずつ増加させて崩壊時の重力加速度を求め、その大きさにより崩壊が現実にかかるかを判定する“重力加速度増加手法”を用いた。

### 4.3.2 斜面形状と解析ケースについて

小段の幅が斜面の安定性に与える影響を確認するために、図-4.1に示すような6種類の斜面高さと同配を有する幾何学的条件の斜面について小段の幅を0, 1, 2, 3mとした24種類の形状について対象とした。解析に使用した物性値は表-4.2に示すように、内部摩擦角 $\phi$ を0~40度まで変化させており、全120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( $\psi = \phi$ )として解析を行っている。

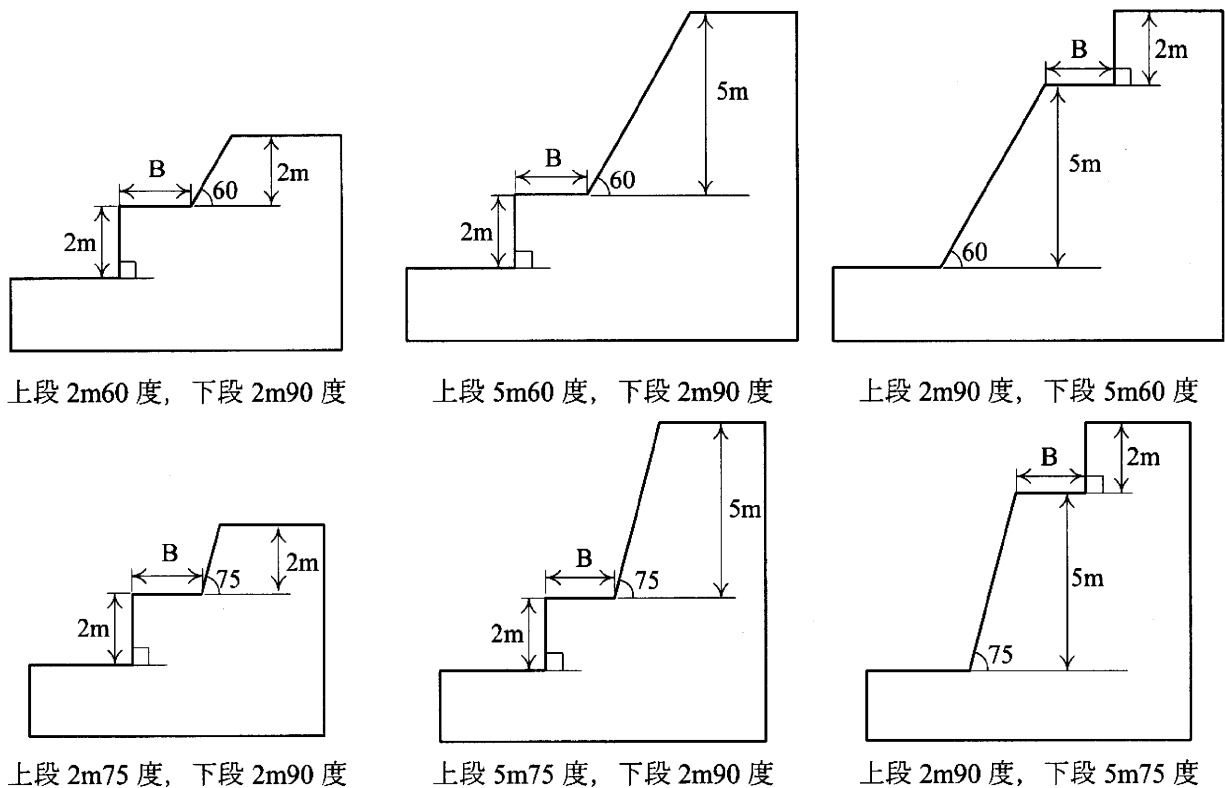


図-4.1 解析した斜面勾配と高さの幾何学形状