

造物よりも、砂防堰堤等の規模が大きいため積算にも影響しているものと考えられる。しかし、それらを鑑みても残存型枠工は一般型枠工と同程度のコストにて施工することが可能であるものと思われ、斜面側での作業が少ない分、作業員が斜面崩壊にて被災する危険は低減されるものと言える。

4.5 まとめ

床掘りを伴う斜面安定工事の重力式擁壁などの構造物築造では、構造物の背面側（斜面側）での作業（型枠の設置、撤去、裏込め土砂の埋戻しなど）があるため、作業員が斜面崩壊にて被災する可能性がある。残存型枠は、内側から施工すること、型枠をはずさないこと、構造物の背面側（斜面側）の作業が少ないため、一般型枠の施工に比べると斜面崩壊にて被災する危険は低減される。本章では残存型枠の種類やその特徴について概説し、一般型枠と残存型枠の施工手順を示し、それぞれの概算材工費を比較した。その結果、以下のことが言える。

1. 残存型枠は型枠の撤去がないため、コンクリート打設（打設高 1.0m～1.2m程度）後すぐに、裏込め土を埋め戻すことができるため、斜面崩壊の危険を低減できる。
2. 残存型枠は型枠の撤去がないことから型枠の設置やコンクリートの打設の検査、管理写真の撮影がすぐに行える。
3. 一般型枠と残存型枠の型枠 1m²当たりの概算材工費を比較したところ、残存型枠工のほうが安価な結果となった。これは算出した土木工事積算基準が異なることも影響している可能性があるが、それを鑑みてもコスト的には一般型枠と同程度と考えられる。

4.6 第4章の参考文献

1. 日下部治，竹村次朗，高橋章浩，井澤淳，豊澤康男，玉手聡，伊藤和也：第3章 擁壁のより安全な施工方法に関する調査・検討，土砂崩壊防止のための対策工に関する研究，平成21年度 統括・分担研究報告書，pp.17-36，2010.
2. 国土交通省大臣官房技術調査課（監修）：国土交通省土木工事積算基準（平成19年度版），建設物価調査会，973p，2007.
3. 財団法人経済調査会：積算資料 2009年 5月 東京，月刊 積算資料，2009.

第5章 まとめ

5.1 はじめに

本研究は、工事中の土砂崩壊災害を防止するため、中小規模の斜面切取り掘削工事に特化した対策工の基本概念および最適設計手法を提案し、安全に掘削工事を行える工法の開発または高度化を図ることを目的として平成20年度より3カ年計画で開始した。本研究では、以下の3項目について研究を行う。

- ① 災害事例および土砂崩壊防止対策に関する設計手法の調査
- ② 土砂崩壊防止のための対策工の各種要因の影響評価
- ③ 土砂崩壊防止のための対策工に関する最適設計手法の提案

本章では、本報告書のまとめとして、各章で得られた知見を要約する。

5.2 第2章の要約

「明かり掘削における掘削面の高さや勾配の安全性評価」では、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、掘削面の高さや勾配の基準である労働安全衛生規則第356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的手法により考察を行った。主な結果を下記に示す。

- 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。
- 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。

5.3 第3章の要約

「斜面の安定性に関する水平面の影響」では、小段や犬走りと呼ばれる掘削面に設置される水平な段が斜面の安定性や崩壊形状に与える影響について、小段の幅を変化させた剛塑性有限要素解析により検討した。主な結果を下記に示す。

- 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。また、小段に斜面の安定性に寄与する効果を期待する基準もある。
- 2) 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。一方、1m 幅の小段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。

5.4 第 4 章の要約

「擁壁に残存型枠を利用する施工方法に関する検討」では、土止め擁壁施工時の床掘りや急勾配掘削を行った斜面近傍で行う作業をなるべく軽減するような“より安全な”施工方法の一つとして検討された残存型枠を利用した施工方法について、一般型枠との比較検討を行った。主な結果を下記に示す。

- 1) 残存型枠は型枠の撤去がないため、コンクリート打設（打設高 1.0m~1.2m 程度）後すぐに、裏込め土を埋め戻すことができるため、斜面崩壊の危険を低減できる。
- 2) 残存型枠は型枠の撤去がないことから型枠の設置やコンクリートの打設の検査、管理写真の撮影がすぐに行える。
- 3) 一般型枠と残存型枠の型枠 1m² 当たりの概算材工費を比較したところ、残存型枠工のほうが安価な結果となった。これは算出した土木工事積算基準が異なることも影響している可能性があるが、それを鑑みてもコスト的には一般型枠と同程度と考えられる。

5.5 健康危険情報

健康に危険を及ぼすような情報は無し。

5.6 研究成果による特許権等の知的財産権の出願・登録状況

特に無し。

研究成果の刊行に関する一覧

平成 23 年度に発表した研究成果を以下に示す。

| 発表者氏名 | 論文タイトル | 発表誌 | 巻号 | ページ | 年 |
|---|--|---|-------------------|---------------|------|
| 伊藤和也 豊澤康男 高橋章浩 竹村次朗 日下部治 | 斜面掘削工事中の土砂崩壊による労働災害の崩壊形態・崩壊原因の傾向 | 安全工学 シンポジウム 2010 | — | pp. 462-465 | 2010 |
| 井澤淳 Fraser Bransby | 建設現場における降雨による斜面崩壊に関する遠心模型実験 | 地盤工学会 地盤工学研究発表会 発表講演集 | Vol.45 No.2 | pp. 1735-1736 | 2010 |
| 伊藤和也 豊澤康男 井澤淳 高橋章浩 竹村次朗 日下部治 | 斜面崩壊による労働災害の崩壊形態・原因の傾向および対策について | 土木学会 年次学術講演会講演 概要集 | Vol.65 III-035 | pp.69-70 | 2010 |
| 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や勾配の安全性評価-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 | Vol. 3 No.2 | pp.103-110 | 2010 |
| 伊藤和也 | 斜面崩壊による労働災害の現状と防止対策について | 日本緑化工協会 緑化工技術 | 第 31 集 | pp.61-82 | 2011 |
| S. J. Harris R. P. Orense K. Itoh | Rainfall-induced slope failure in Northland Allochthon formation | the 5th Asia-Pacificconference on unsaturated soils | | | |
| 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勾配と高さの基準制定に至る歴史的背景 | 地盤工学会 地盤工学研究発表会 発表講演集 | | | |

研究成果の刊行物・別刷り

斜面掘削工事中の土砂崩壊による労働災害の崩壊形態・崩壊原因の傾向

○伊藤和也 (独)労働安全衛生総合研究所)
 高橋章浩 (東京工業大学工学部)
 日下部治 (東京工業大学工学部)

豊澤康男 (独)労働安全衛生総合研究所)
 竹村次郎 (東京工業大学工学部)

1. はじめに

一般的に土砂崩壊発生の誘因は豪雨や地震のような自然現象と建設工事等の人為的なものの2種類に分けることができる。後者の誘因により、建設工事に従事する労働者が被災する労働災害が毎年繰り返し発生している。図-1に建設業に関する労働災害の年度別推移を示す。土砂崩壊による労働災害の死亡者は、1990年代に毎年40~80名前後で推移していたが、近年の公共工事市場の縮小などにより2007年には20件まで減少してきた。そのうち約半数が道路建設工事等における斜面の切取り工事などにおける斜面崩壊によるものである。こうした災害の有効な防止対策を樹立するために、災害事例を調査し、斜面掘削工事中の土砂崩壊による労働災害の崩壊形態・崩壊原因の傾向について分析を行った。

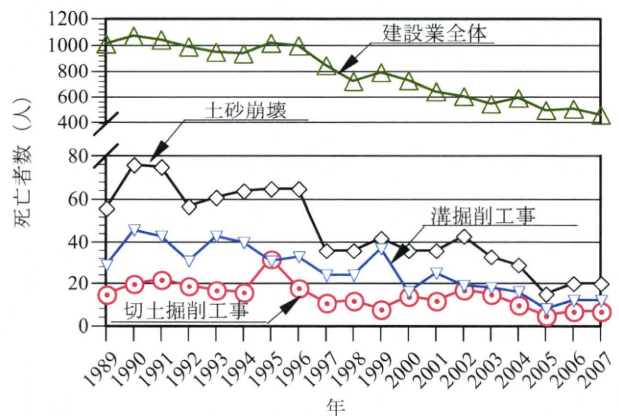


図-1 労働災害の年度別推移¹⁾

2. 対象および崩壊形態・崩壊原因の分類方法

本研究では、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調べた既往の調査・分析結果²⁾をもとに、地盤工学に携わる技術者から見た崩壊形態・崩壊原因の類型化作業を行うためのデータベースシート (以下、DB) を作成した。DBの詳細について以下に示す。

(1) 崩壊形態

奥園が示した崩壊形態分類図(図-2)³⁾を参考に、規模別分類と地質別分類に分けて記載することとした。

I. 規模別分類

a. 落石, 浸食, 表面剥落

(特に不安定要因は持たないが急勾配な法面)

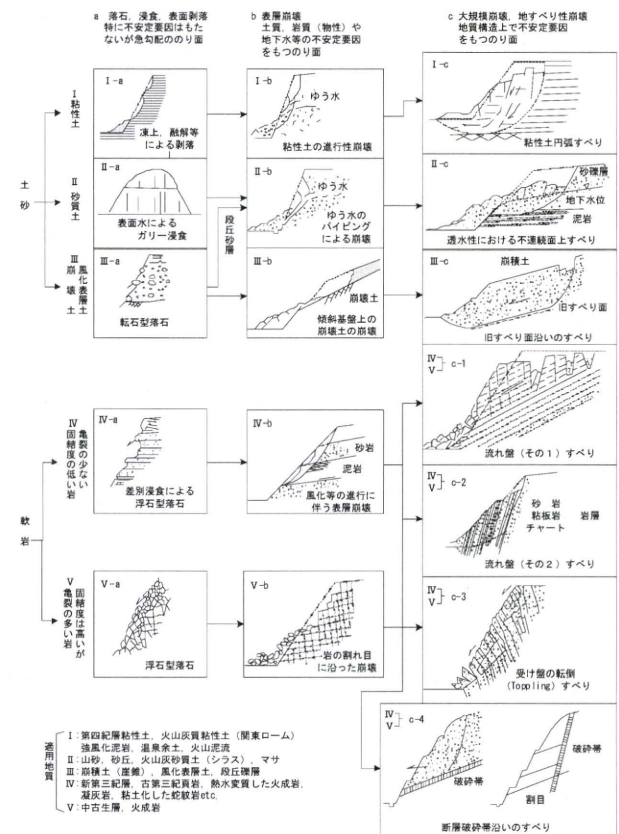


図-2 崩壊形態分類図 (奥園原図)³⁾

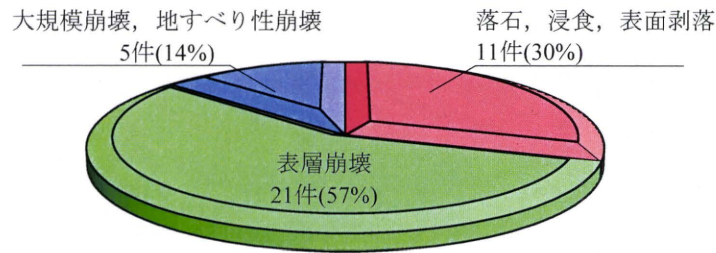


図-4 崩壊形態・規模別分類

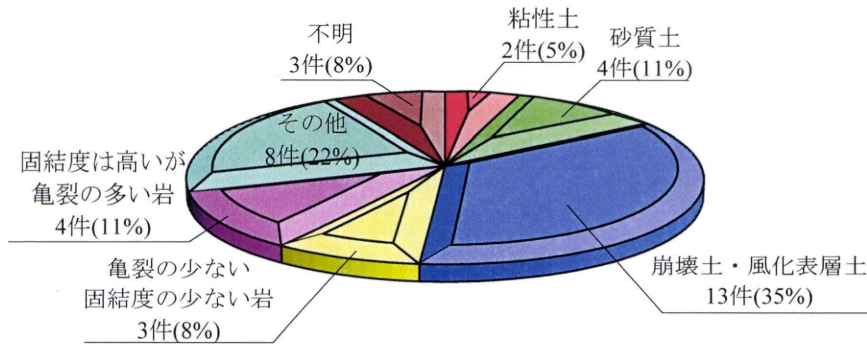


図-5 崩壊形態・地質別分類

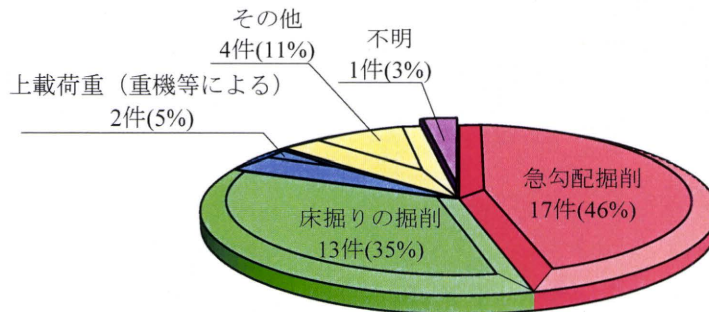


図-6 崩壊原因・施工上

51 件中、詳細を確認することが出来た 37 件について実施した。以下に、斜面掘削工事中における土砂崩壊による労働災害の崩壊形態および崩壊原因の傾向を示す。

(1) 崩壊形態の傾向

規模別に分類した結果を図-4 に示す。表層崩壊が 21 件あり、全体の 60%弱を占めている。また表層崩壊と落石、浸食、表層剥落による災害を含めると 87%となり、小規模な崩壊によって被災していることが多いことが分かる。既往の調査・分析結果²⁾でも労働災害となる崩壊規模は崩壊土量が 50m³未滿の崩壊が全体の 6 割を占めていることが分かっており、これらとも合致する。

地質別に分類した結果を図-5 に示す。崩壊土・

風化表層土がもっとも多く 13 件、その後に砂質土と固結度は高いが亀裂の多い岩が 4 件となっている。崩壊土・風化表層土に該当する災害事例の多くは、斜面下部に岩盤などの基盤層があり、その上部に堆積しているこれらの地質が崩壊している。この場合には、事前に簡易的に何らかの地盤調査を行ってれば未然に防げた可能性が高い。

(2) 崩壊原因の傾向

施工上による崩壊原因について分類した結果を図-6 に示す。急勾配掘削が 17 件で全体の 46%、床掘り掘削が 13 件で 35%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。

自然現象による崩壊原因について分類した結果を図-7 に示す。降雨・雪、地下水・湧水といった

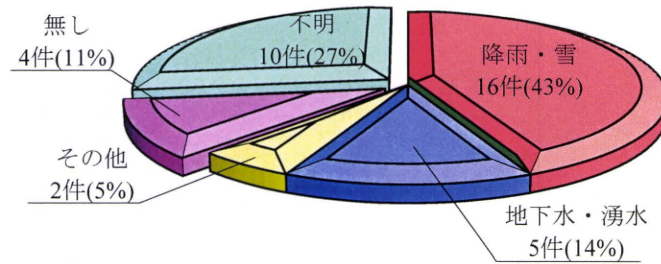


図-7 崩壊原因・自然

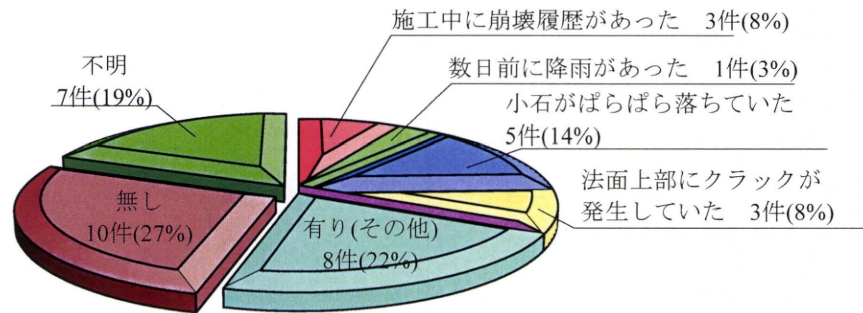


図-8 予見可能性の有無

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。

(3) 予見可能性の有無について

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-8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22%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。

4. 結論

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分析を行った。その結果、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。また、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。

今後、調査件数を増やすことにより、①施工法

の問題、②発注形態の問題、③施工中の人員配置の問題（写真撮影や測量など）といった斜面掘削工事中の土砂崩壊による死亡災害の問題点が統計量として得られるものと考えている。

謝辞

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、代表研究者：日下部治）の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 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.
- 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.
- 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.

建設現場における降雨による斜面崩壊に関する遠心模型実験

斜面安定, 降雨, 遠心模型実験

東京工業大学大学院 国際会員 井澤 淳
University of Dundee Fraser Bransby

1. はじめに

伊藤ら¹⁾による 1989 年から 2002 年までの統計調査によると、毎年 15~20 人ほどの作業員が切土作業中の斜面崩壊および落石で亡くなっており、14 年間の総死者数は 131 人にのぼる。切土工事中の労働安全を目的として、表 1 に示す労働安全衛生規則第 356 条・第 357 条において工事中の切土勾配および高さの基準が定められている。表 2 は 1989 年から 2002 年まで切土工事に発生した死亡事故現場の斜面高さおよび勾配をまとめたものである。灰色でハッチした部分は労働安全衛生規則を満たしていないために事故が発生した現場であり、適切に工事が進められていれば避けられた可能性がある。逆に労働安全衛生規則を満たしていたにもかかわらず発生した事故は 41 件(不明事例を除く)にのぼっており、その原因究明が急務である。一方で、多くの切土斜面崩壊が降雨から 3 日以内に発生していることも統計調査から分かっている。本研究では、遠心模型実験から、切土斜面の安定性に及ぼす降雨の影響、特に降雨後の挙動を評価した。

2. 実験概要

本研究では表 2 に示された事故区分のうち、労働安全衛生規則を満たしていたにもかかわらず 15 件もの事故が発生している斜面角度 60° ~ 75°, 斜面高さ 2 m - 5 m の断面に着目した。この切土形状を労働安全衛生規則第 356 条・第 357 条と照らし合わせると、「その他の地山における 75° 斜面」または「砂からなる地山の 5 m 未満の斜面」に相当すると考えられ、これらの地質特性、形状を有する切土斜面の安定性について詳細に検討する必要がある。そこで、斜面勾配 60°, 高さ 5 m の砂質土斜面の安定性に及ぼす降雨の影響を、遠心模型実験装置を用いて評価した。図 1 に模型地盤概要図を示す。試料は英国スコットランドのダンディ近郊にある Scottish Crop Research Institute 内の実験フィールドから採取した Bullionfield Soil を使用した。Bullionfield soil は砂分 71%, シルト分 19%, 粘土分 10% で構成されており、液性限界 LL = 33%, 塑性限界 PL = 25%, IP = 8, 最適含水比 17.7% (最大乾燥密度 1.67 g/cm³) である。本実験では最適含水比で試料を調整し、乾燥密度 1.40 g/cm³ (締固め度 84%) となるよう矩形ランマーを用いて動的に締め固めて模型地盤を作成した。実験は University of Dundee 所有の遠心模型実験装置および気候変動シミュレータ²⁾を用いて行った。遠心加速度 20 G に到達後、切土のクリープ変形が概ね収束するまで 10 分間放置したあと、降雨実験

表 1 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 | 掘削面の勾配 |
|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 岩盤または堅い粘土からなる地山 | 5m 未満 | 90° |
| | 5m 以上 | 75° |
| | 2m 未満 | 90° |
| その他の地山 | 2m 以上 5m 未満 | 75° |
| | 5m 以上 | 60° |
| | 砂からなる地山 | 掘削面の勾配 35° 以下 又は 掘削面の高さ 5m 未満 |
| 発破等で崩壊しやすい状態になっている地山 | 掘削面の勾配 45° 以下 又は 掘削面の高さ 2m 未満 | |

表 2 死亡事故現場における崩壊斜面高さおよび勾配の区分

| 高さ | 勾配 | | | | | 計 |
|-----------|------|------|------|-----|----|-----|
| | ~60° | ~75° | ~90° | 90° | 不明 | |
| - 2m | - | 1 | 1 | 2 | - | 4 |
| 2m - 5m | 1 | 15 | 8 | 1 | - | 25 |
| 5m - 10m | 8 | 12 | 3 | 3 | 1 | 27 |
| 10m - 30m | 10 | 16 | 5 | 1 | 1 | 33 |
| 30m - 50m | 2 | 1 | - | - | 1 | 4 |
| 50m - 30m | 1 | 3 | - | - | - | 4 |
| 不明 | 8 | 12 | 4 | 1 | 9 | 34 |
| 計 | 30 | 60 | 21 | 8 | 12 | 131 |

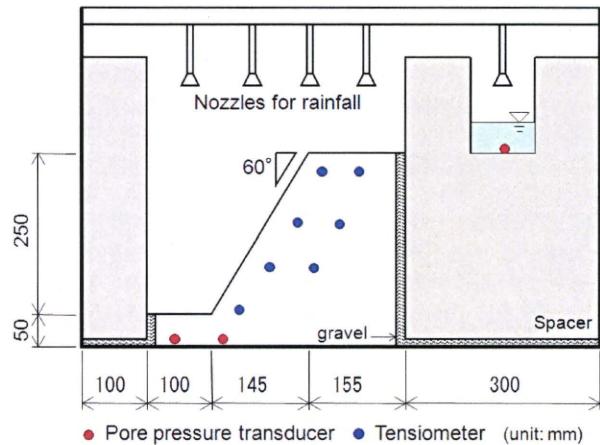


図 1 模型地盤概念図



図 2 実験終了後の模型地盤



図 3 実験終了後の含水比分布

| | | | |
|------|------|------|---------------------|
| 25.4 | 24.9 | 23.7 | |
| 27.4 | 26.9 | 24.5 | 24.7 |
| 29.4 | 27.2 | 24.4 | 25.3 |
| 29.4 | 26.4 | 24.5 | 25.7 27.3 |
| 30.5 | 27.8 | 25.3 | 26.0 27.3 27.3 28.3 |

(単位%)

を開始した。降雨を2分間（実物換算で20時間）シミュレートした後、7分間（実物換算で46.7時間）の放置を1イベントとし、6イベント行った。実験中の模型の画像をデジタルカメラで撮影し、PIV（Particle Image Velocimetry）手法を用いて、模型の変形を求めた。PIV解析にはオープンソースのPyPIVを用いた。

3. 実験結果

図2に実験終了後の模型地盤の様子を示した。降雨により切土斜面表層部が大きく崩壊していることが分かる。ただし、前背面の亚克力板との摩擦はグリスを塗布することにより軽減させたが、完全な平面ひずみ状態は模擬できていなかったため模型前面にそのような大崩壊は見られず、崩壊発生時を正確に推定することは出来なかった。図3に実験終了後（6回の降雨イベント終了後）に計測した切土模型内の含水比分布を示す。切土上部から下部にかけて徐々に含水比は増加しており、実験中に雨水の浸透が底部にまで達していたことが分かる。崩壊土砂の含水比も30%を超えておらず、地盤が液性限界に達する前に斜面崩壊が発生していたと考えられる。

実験では6回の降雨をシミュレートしたが、ここでは最初の3回の降雨実験における切土斜面の挙動について述べる。図4にノズルに作用する水圧と総降雨量の時刻歴を示す。各降雨イベントの降雨速度は6.97mm/hr、7.5mm/hr、6.142mm/hrと若干の誤差はあるものの、概ね7.0mm/hr程度の降雨速度を模擬している。これは気象庁の降雨レベルでは弱い雨の部類に該当しており、日常よくある降雨であると考えられる。また、総雨量はそれぞれ92.66mm、150.5mm、122.84mmである。上述の通り、模型の平面ひずみ条件を完全に満たすことが出来なかったため、デジタルカメラで撮影した画像から求めた変形は、模型内の変形とは異なることを注意する必要がある。ただし地盤の変形が比較的小さい最初の3回の降雨イベントでは、その影響もそれほど大きくないと考えられる。PIV解析から求めた実験開始から降雨2回目直後まで変位ベクトル図、および実験開始から降雨3回目直前までの変位ベクトル図（変位は5倍表示）を図5に示す。天端付近はほぼ鉛直に沈下し、斜面表層が水平変位を伴いながら沈下していることが分かる。また2回目の降雨以降、3回目の降雨直前までに大きな変形が生じている。図6に法肩から75mm地点の天端沈下および法尻から100mmの高さでの水平変位の時刻歴を示す。この変位も全てPIVによる画像解析から求めている。水平変位は2回目の降雨終了前の90時間経過した付近から比較的大きな変位を生じ始め、それに少し遅れて天端沈下が急激に増加している。したがって、降雨により切土斜面の表層部が斜め下方にまず変形し、それに伴い天端付近の沈下が卓越する変形モードであると考えられる。また、砂から切土斜面は降雨からある程度時間をかけて変形が卓越する傾向にあり、降雨終了後も斜面の崩壊に留意する必要がある。

4. まとめ

本研究では労働安全衛生規則第356条・第357条に示された砂からなる切土の限界形状（斜面勾配60°、高さ5m）と同一形状の遠心模型を作成し、降雨による変形挙動を観察した。実験ではPIVによる画像解析を行い、詳細な変形観察を行った。その結果、砂から切土斜面は降雨からある程度時間をかけて変形が卓越する傾向にあり、切土工事中は降雨終了後の斜面の変形に注意し、崩壊に留意する必要があることを示した。また、切土斜面の変形は斜面近傍の変形が先行し、それに伴って天端の沈下が急激に進行することを明らかにした。したがって、崩壊の予知には斜面の水平変位を計測することが有効であると考えられる。

謝辞：本稿は労働安全衛生総合研究推進事業日本人研究者派遣事業により University of Dundee にて行った研究成果の一部である。

参考文献：1) 伊藤ら、切土掘削工事現場における斜面崩壊による労働災害の調査・分析、労働安全衛生総合研究所特別研究報告、No. 35, pp. 7-18, 2007. 2) Hudacsek et al., Centrifuge modelling of climatic effects on clay embankments, Proc. of the Institution of Civil Engineers, Engineering Sustainability 162, ES2, pp. 91-100, 2009

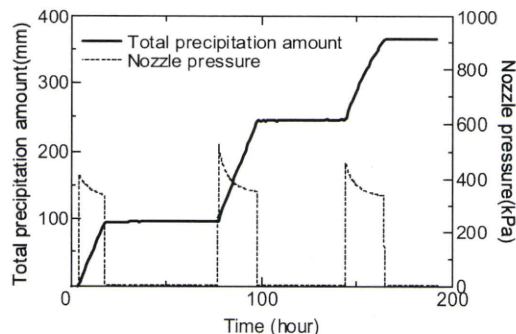
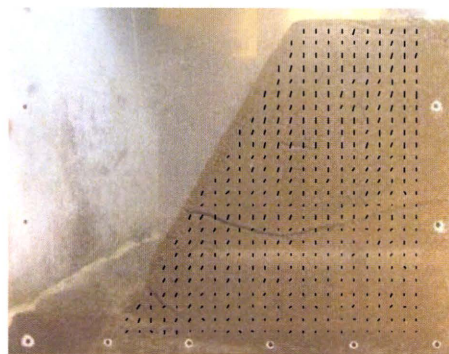
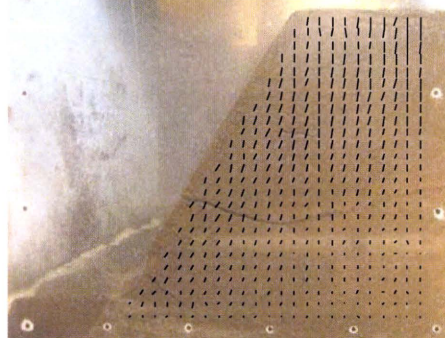


図4 ノズル圧力と総雨量の時刻歴



(a) 2回目降雨直後 (at 97hours)



(b) 3回目降雨直前 (at 144hours)

図5 変位ベクトル図

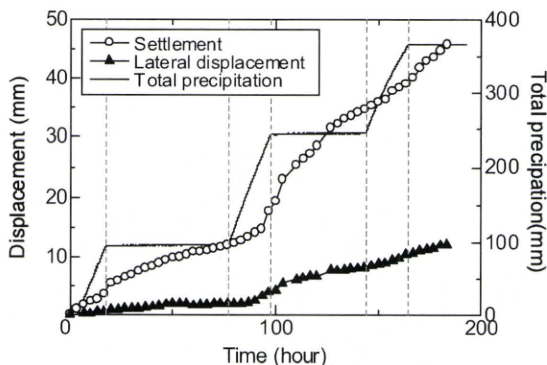


図6 鉛直および水平変位時刻歴

斜面崩壊による労働災害の崩壊形態・原因の傾向および対策について

(独)労働安全衛生総合研究所 ○正 伊藤和也, 正 豊澤康男
東京工業大学 正 井澤淳, 正 高橋章浩, 正 竹村次朗, 正 日下部治

表-1 崩壊原因の分類分け

| 施工上 | 自然原因 |
|---------------|---------|
| ・急勾配掘削 | ・降雨・雪 |
| ・床掘りの掘削 | ・地震 |
| ・上載荷重(重機等による) | ・地下水・湧水 |
| ・その他 | ・その他 |

1. はじめに

土砂崩壊による労働災害の死亡者は、1990年代に毎年40～80名前後で推移していたが、近年の公共工事市場の縮小などにより2007年には20名まで減少している¹⁾。そのうち約半数が道路建設工事等における斜面の切取り工事などにおける斜面崩壊によるものであり、斜面崩壊が土砂崩壊による労働災害に占める割合は増加傾向にある。本研究では、地盤工学に携わる技術者から見た崩壊形態・崩壊原因の類型化を行い、その傾向を把握するためのデータベースの構築を試みている。既報²⁾では、3年間の災害事例について調査・分析を実施したが、具体的な問題点を統計量として示すためには調査件数が少ないことが危惧された。そこで、本報では計5年間の災害について調査分析を実施し、斜面崩壊による労働災害の崩壊形態や原因の傾向を示し、その対策について述べる。

2. 調査対象および崩壊形態・崩壊原因の分類方法

本研究では、斜面崩壊による労働災害事例について調べた既往の調査・分析結果³⁾をもとに、地盤工学に携わる技術者から見た崩壊形態・崩壊原因の類型化作業を行った。詳細について以下に示す。

(1) 崩壊形態

奥園が示した崩壊形態分類図⁴⁾を参考に、規模別分類と地質別分類に分けて記載することとした。

規模別分類

- ・落石、浸食、表面剥落
- ・表層崩壊
- ・大規模崩壊、地すべり性崩壊

地質別分類

- ・粘性土
- ・砂質土
- ・崩壊土・風化表層土
- ・亀裂の少ない固結度の少ない岩
- ・固結度は高いが亀裂の多い岩

(2) 崩壊原因

施工上によるものと自然原因に分けて表-1のように記載した。他に、予見可能性の有無(専門家から見た場合の崩壊の前兆の有無)、退避可能性の有無(現状として退避は可能であったか)、災害回避可能性の有無(何らかの改善処置により災害を免れることができたか)なども検討した。

3. 崩壊形態・崩壊原因の傾向について

本報では、上述のような分類分けを1989年～1993年の5年間に発生した死亡災害事例88件中、詳細を確認することができた62件について実施した。以下に、斜面崩壊による労働災害の崩壊形態および崩壊原因の傾向を示す。

(1) 崩壊形態の傾向

規模別に分類した結果を図-1に示す。表層崩壊が34件あり、全体の60%弱を占めている。また表層崩壊と落石、浸食、表層剥落による災害を含めると85%となり、小規模な崩壊によって被災していることが多いことが分かる。既往の調査・分析結果でも労働災害となる崩壊規模は崩壊土量が50m³未満の崩壊が全体の6割を占めていることが分かっており³⁾、これらとも合致する。

地質別に分類した結果を図-2に示す。崩壊土・風化表層土がもっとも多く28件、その後固結度は高いが亀裂の多い岩が8件となっている。崩壊土・風化表層土に該当する災害事例の多くは、斜面下部に岩盤などの基盤層があり、その上部に堆積しているこれらの地質が崩壊している。この場合には、事前に簡易的に何らかの地盤調査を行っていれば未然に防げた可能性が高い。

(2) 崩壊原因の傾向

施工上による崩壊原因について分類した結果を図-3に示す。急勾配掘削が27件で全体の44%、床掘り掘削が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。

自然現象による崩壊原因について分類した結果を図-4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。

(3) 予見可能性の有無について

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-5に示す。不明や無しも多いが、

Key Words: 斜面崩壊, 労働災害, 調査・分析

連絡先:(独)労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ 〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6 TEL&FAX 042-494-6214

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。斜面崩壊などから

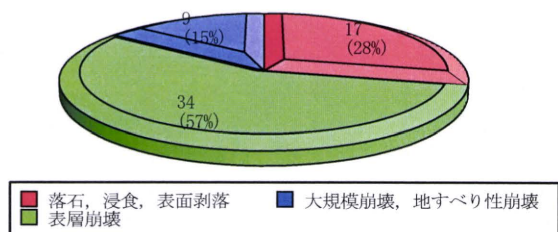


図-1 崩壊形態・規模別分類

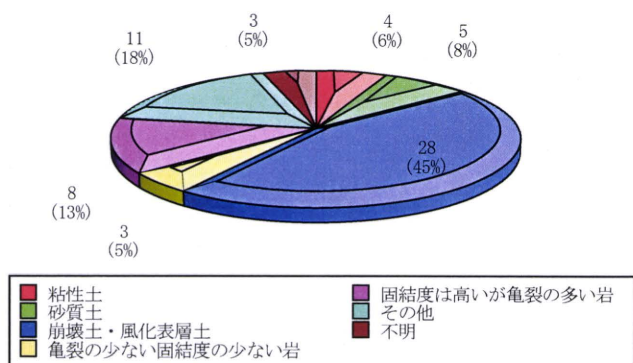


図-2 崩壊形態・地質別分類

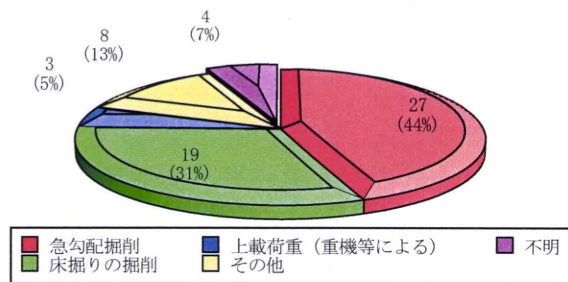


図-3 崩壊原因・施工上

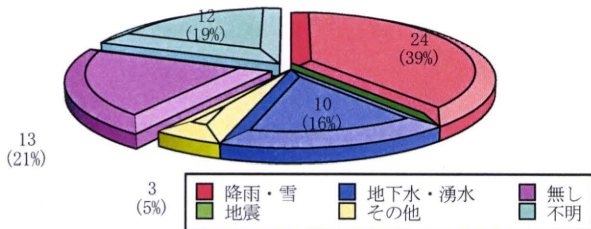


図-4 崩壊原因・自然原因

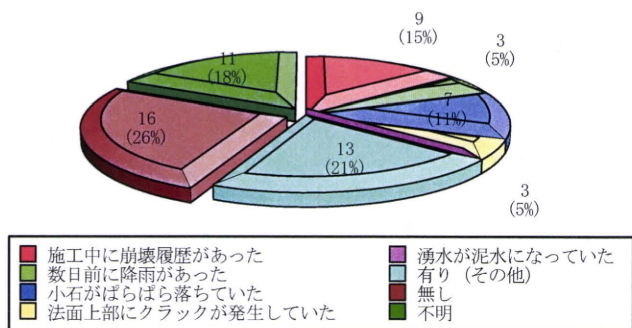


図-5 予見可能性の有無

作業員の命を守るためには、崩壊前兆現象の理解や、崩壊発生時の対応などを、日ごろから勉強しておくことが必要であろう。

4. 斜面崩壊による労働災害の防止対策について

既往の研究および斜面崩壊による労働災害の調査・分析結果から、当該災害を減少するためには、労働災害の件数が多い、以下のような崩壊形態・工事を中心として具体的な対策を講ずる必要がある。すなわち、
・工事について：主に中小規模の事業所が行う小規模な重力式擁壁やもたれ式擁壁築造の際の斜面切り掘削作業

・崩壊形態について：崩積土・風化表層土の表層崩壊を中心とした小規模崩壊

また、斜面切り掘削を伴う工事は、工程やパターンが多様でありハードだけに頼った対策では費用対効果を考えると難しい場合が多い。そのため、計画・設計・施工の各段階において適正で有効なリスクアセスメントを実施することが不可欠であろう。

5. 結論

斜面崩壊による労働災害事例について、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分析を行った。その結果、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。また、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。既往の調査研究と本報の結果から、中小規模の斜面切り掘削を伴う工事においても、計画・設計・施工の各段階において適正で有効なリスクアセスメントを実施することが必要である。

謝辞：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、代表研究者：日下部治）の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

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) 伊藤和也，豊澤康男，井澤淳，高橋章浩，竹村次朗，日下部治：斜面掘削工事中の土砂崩壊による労働災害の崩壊形態・崩壊原因の傾向について，第44回地盤工学研究発表会，pp.797-798, 2009。
- 4) 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。

明かり掘削における掘削面の高さや勾配の安全性評価 -掘削面の勾配と高さの基準制定に至る歴史的背景-†

伊藤和也*1 豊澤康男*2 前 郁夫*3
高橋章浩*4 竹村次朗*4 日下部治*4

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る。その防止対策の重要性は古くから認識されており、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、掘削面の勾配と高さの基準等が定められ、現在に至るまで引き継がれている。本報では、国内の各機関で用いられる掘削面の勾配と高さに関する規制・設計基準について調査を行い、特に、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・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。

キーワード: 労働安全衛生規則第356条・357条、掘削勾配、掘削高さ、剛塑性有限要素解析、労働安全

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。明かり掘削はダムの基礎掘削、道路建設のための山の切り取り、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¹⁾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)安全な切り高さ、切り勾配、(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²⁾。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。

本報では、(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。

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。

労働安全衛生規則以外の現行の各種規則および設計基準は、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いない。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³⁾が、現在でも同様な傾向が見られる。

3 労働安全衛生規則第356条・357条について

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

† 原稿受付 2010年05月25日

† 原稿受理 2010年08月16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 (独)労働安全衛生総合研究所 研究企画調整部。

*3 元 労働省産業安全研究所 所長

*4 東京工業大学大学院 理工学研究科 土工学専攻

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

表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 | | ○ |

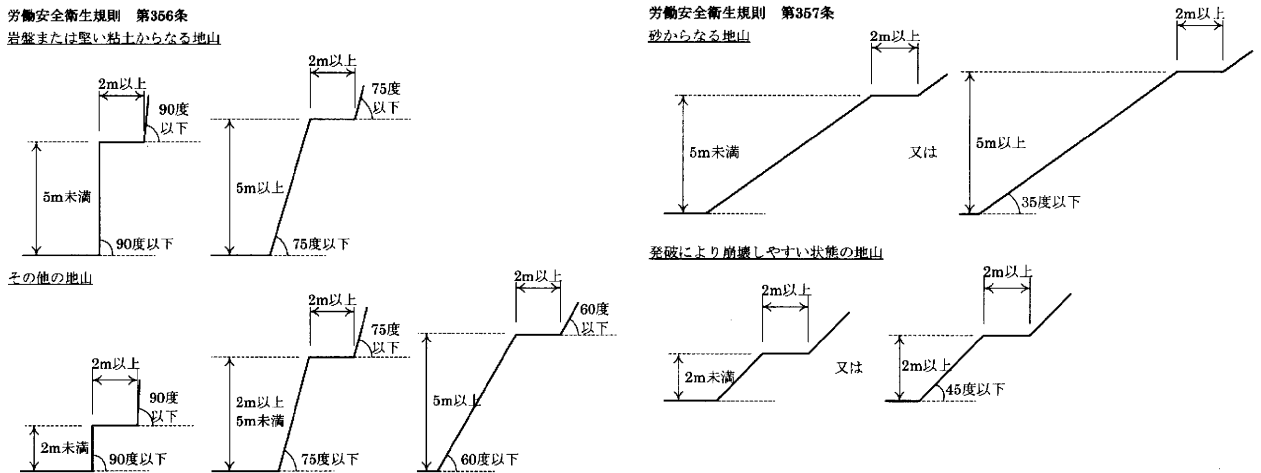


図1 労働安全衛生規則第356条・第357条

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1および表2にそれぞれ示す。

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，

表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 | |

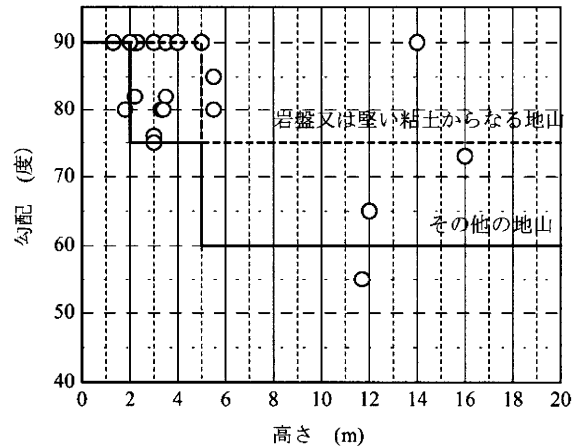


図3 災害事例における掘削面の勾配と高さの関係と労働安全衛生規則第356条の比較

表3 粘土の切取限界高さ(安全率各1.5) 4)に加筆修正

| 粘土の種類 | | 単位体積重量 γ t/m ³ [kN/m ³] | 粘着力 c tf/m ² [kN/m ²] | 内部摩擦角 ϕ 度 | 限界高さ m | | | | | |
|------------|-----------------|---|--|-------------------|--------|------|------|------|------|------|
| | | | | | 切取勾配 度 | | | | | |
| 翻訳本 5)での表記 | 原本 6)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

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2) 4)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は文献4)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。最低限度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

らも、制定に携わった当時の技術者の見識の高さが伺える。

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)。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 5)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」 7) (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。

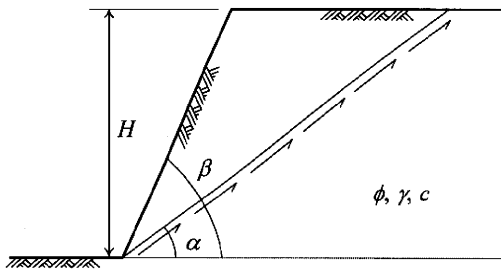


図4 直線すべり法

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。

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。

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 4）。

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

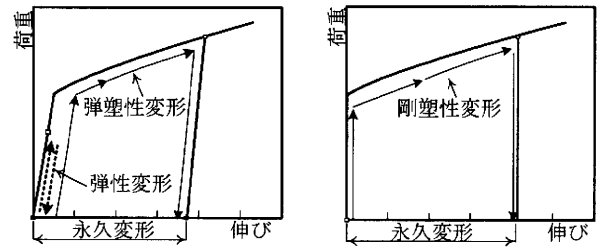
$$H_c = \frac{4c}{\gamma} \cdot \frac{\sin \beta \cdot \cos \phi}{1 - \cos(\beta - \phi)} \quad (1)$$

と表される。ここで、 c : 粘着力、 ϕ : 内部摩擦角、 γ : 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 α は、



(a) 弾性変形と弾塑性変形

(b) 剛塑性変形

図5 荷重と伸びの関係

表4 材料の物性値

| | | 直線 すべり法 | 剛塑性 FEM |
|---|-----------------------------|------------|------------|
| 単位体積重量 γ (kN/m ³) | 15.7 | ○ | ○ |
| 粘着力 c (kN/m ²) | 10.0 | ○ | ○ |
| 内部摩擦角 ϕ (度) | 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 | ○ | ○ |
| ダイレイタンシー角 ψ (度) | ϕ | - | ○ |

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

である。

(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 5）⁸⁾。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⁹⁾。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、解析結果として荷重係数 μ 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 μ 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¹⁰⁻¹²⁾。これらの定式化に至る詳細は Tamura ら¹⁰⁾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かかるかを判定する“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4に示す。剛塑性有限要素法では、粘着力 c 、単位体積重量 γ 、内部摩擦角 ϕ を使用し、ダイレイタンシー角 ψ については、関連流れ則 ($\psi = \phi$) として解析を行った。

(3) Chen らの安定係数¹³⁾

Chen らは図6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 β (度)、上側斜面の勾配を α (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¹⁴⁾ 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¹⁵⁾。ここで、安定係数 N は

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

で表される。

2) 解析結果

(1) Chen らの安定係数の比較

図7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7(a))

勾配が90度では Chen ら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7(b))

Chen ら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。

(2) すべり線の比較

剛塑性有限要素法より得られた速度場ベクトル図の一覧を表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灰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

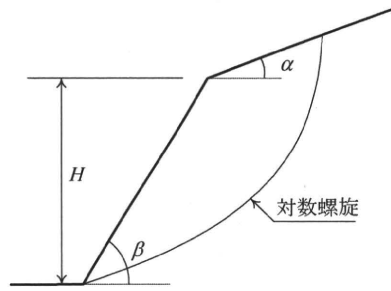
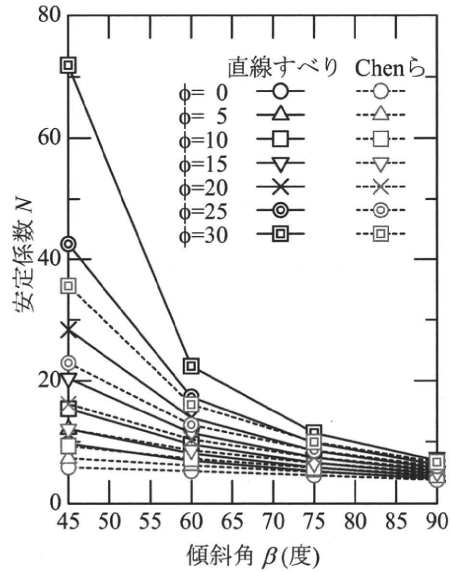
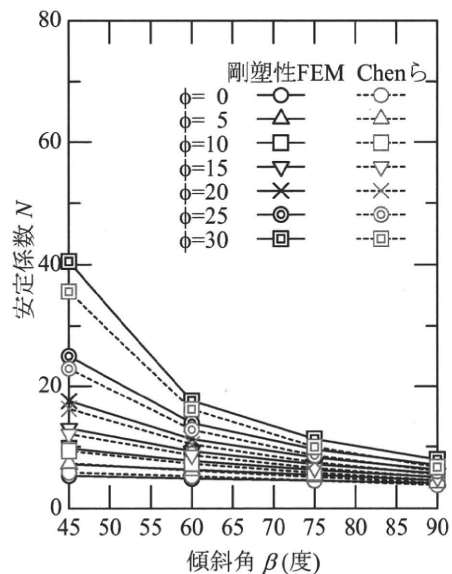


図6 Chen らによる対数螺旋による安定係数^{13),15)}



(a) 直線すべり

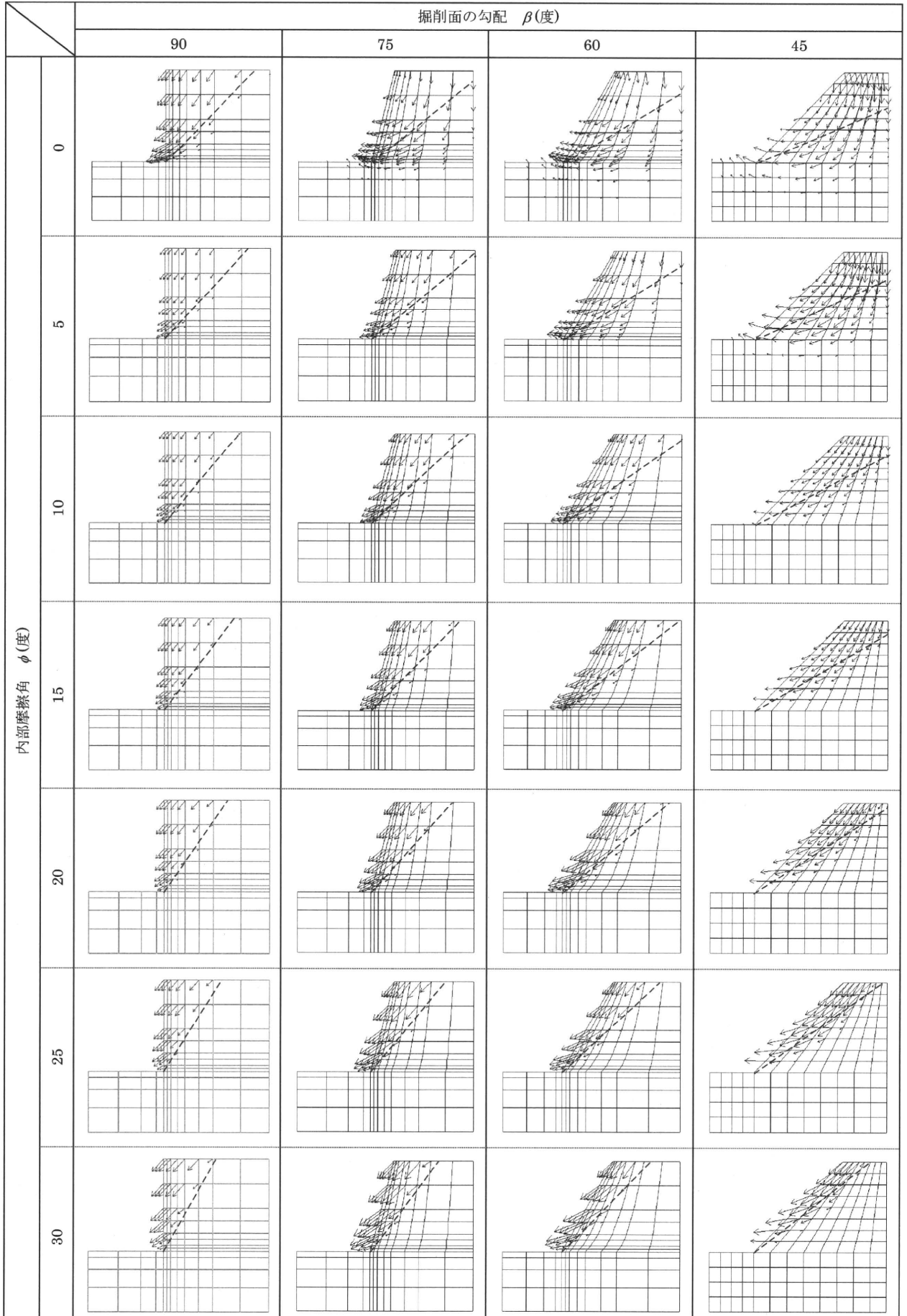


(b) 剛塑性 FEM

図7 Chen らの安定係数との比較

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5 剛塑性FEMでの崩壊時の速度場ベクトルと直線すべり法でのすべり線



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。
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ら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。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、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。また、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る。ここに記して謝意を表す。

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. 1962; 4, 4: 34-37.
- 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. 1965: 179.
- 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. 1986: 141.
- 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」. 1959: 130-136.
- 5) ホグントグラ (宇都宮寿夫訳). 土の工学的性質. コロナ社. 1944: 135.
- 6) Hogentogler. C. A.: Engineering properties of soil. McGraw-Hill Book Company Inc., NY and London. 1937: 220.
- 7) 最上武雄. 第12章 法面の安定. 土質力学. 岩波全書 148. 1951: 166-172.
- 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. 1994: 36-37.
- 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. 2001; 49, 11: 33-38.
- 10) Tamura, T., Kobayashi, S. and Sumi. T. Rigid-plastic finite element method for frictional materials, Soil and Foundations. 1987; 27, 3: 1-12.
- 11) Tamura, T., Kobayashi, S. and Sumi. T. Limit analysis of soil structure by rigid plastic finite element method. Soils and Foundations. 1984; 24, 1: 34-42.
- 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. 1986: 50-79.
- 13) Chen, W. F., Giger, M. W., and Fang, H. Y. On the limit analysis of stability of slopes, Soil and foundations. 1969; 9, 4: 23-32.
- 14) Drucker, D. C. and Prager, W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Quarterly of Applied Mathematics. 1952; 10, 157-165.
- 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. 1981: 32-33.