

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17件で全体の46%、床掘りの掘削が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。

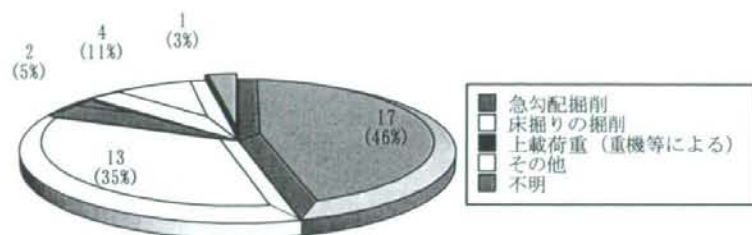


図-2.10 崩壊原因・施工上

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。

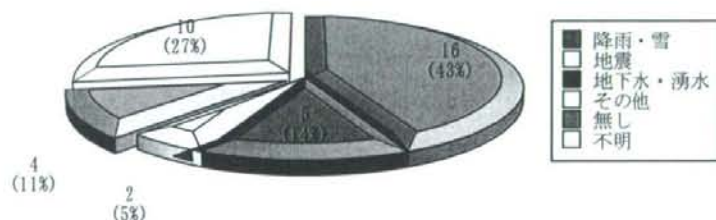


図-2.11 崩壊原因・自然現象

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。

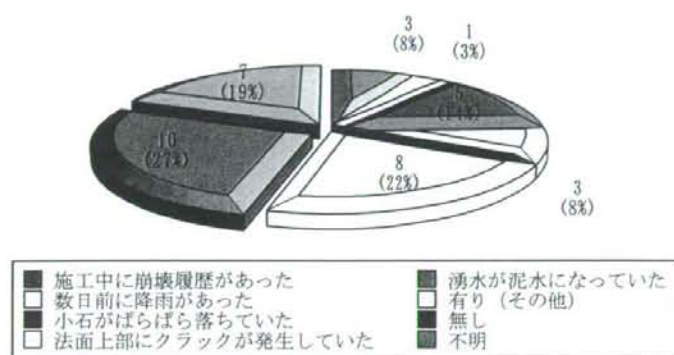


図-2.12 予見可能性の有無

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切り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バラバラ落ちるなど、崩壊前に何らかの前兆現象がある場合が半数以上あった。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。

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。

2.6 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 斜面の安定性に関する斜面高さや勾配の安全性評価

3.1 はじめに

我が国の地形は急峻で地形構造が複雑であり、斜面を形成している土砂・岩石の性状等についても崩壊しやすい条件下にある。一方、気象条件として、梅雨、台風等に伴う集中豪雨や、寒冷地帯の凍結融解等もあり、斜面の安定にとって望ましくない環境下におかれている。このような自然条件の下で行われる切土掘削工事は、自然斜面の下方部分を掘削したり、斜面の勾配を急勾配にしたりする 경우가多く、地山内部のせん断応力を増加させたり、地山の強度を低下させる結果を招き、斜面の崩壊に対する安定性を失わせることになりやすい。さらに、切土掘削工事によって発生する崩壊現象は、地すべり等の現象と異なり、時間的余裕がほとんど無く一瞬のうちに土塊の滑動が起こることや、崩壊の前兆現象が顕著にあらわれる場合が少ないため、崩壊発生の予測が難しいと考えられてきた。このような斜面の切土掘削工事による労働災害を防止するためには、切土掘削工事の現状とその問題点を抽出し、その解決策を講じる必要がある。本章では、①切土掘削工事における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、その制定の背景および理論的背景について検討を行う。

3.2 国内の各種設計基準における掘削勾配について

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、また掘削後の法面保護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¹⁾。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。施工中の労働災害は、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、現行の設計基準では、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点が挙げられる。これらの諸問題は、1980年代から既に指摘されている²⁾が、現在でも同様な傾向が見られる。

そこで、掘削法面の勾配と高さの基準である労働安全衛生規則356条・357条について、制定された歴史的背景および理論的背景について調査を行った。

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廃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		○

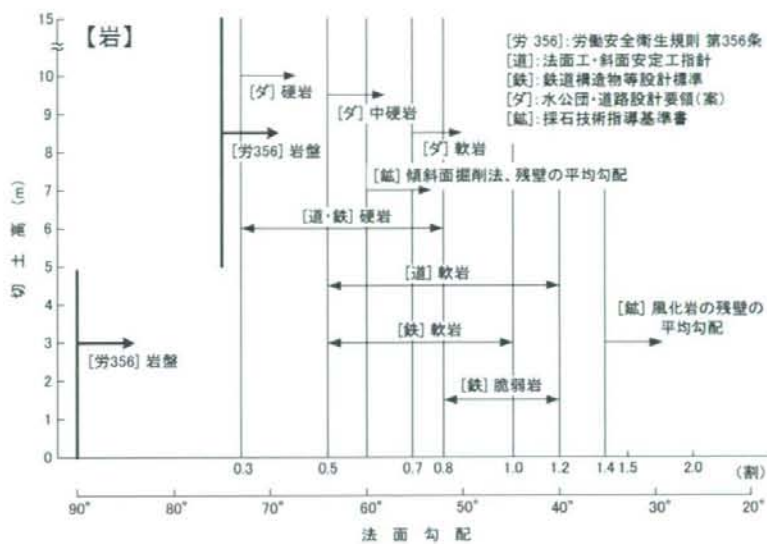


図 3-1 法面勾配の基準・標準の比較 (岩)¹⁾

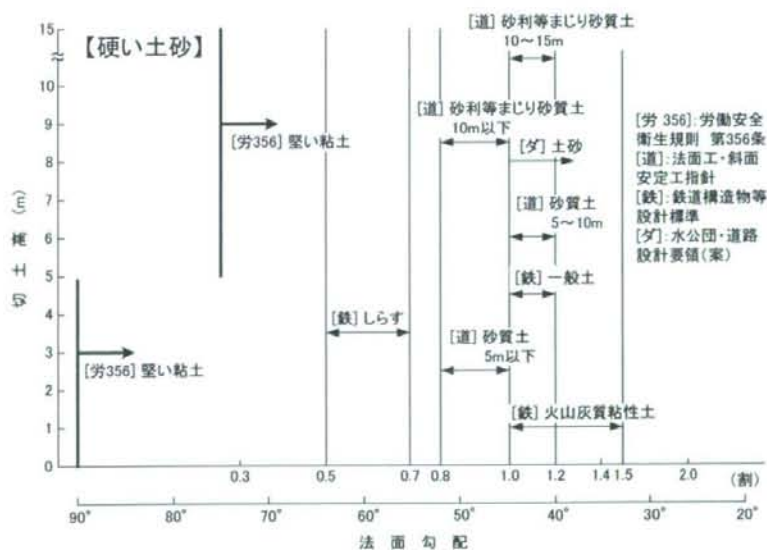


図 3-2 法面勾配の基準・標準の比較 (硬い土砂)¹⁾

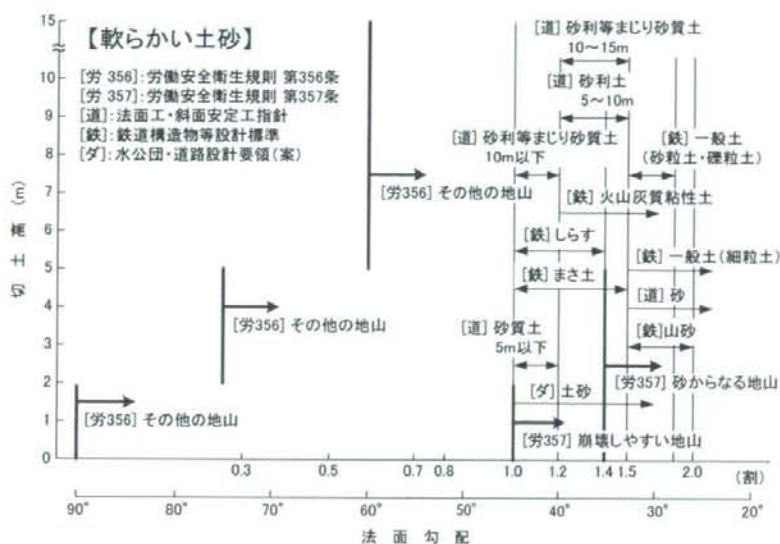


図 3-3 法面勾配の基準・標準の比較 (軟らかい土砂) 1)

3.3 労働安全衛生規則 356 条・357 条について

3.3.1 安全衛生規則の歴史的背景

安全衛生規則 (以下、安衛則) は、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にて規定しきれなくなり、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、安衛則も労働安全衛生法に基づく規則として昭和 47 年 9 月に制定された。明り掘削作業における切土勾配についての条文である第 356 条、第 357 条は、労働基準法に基づく規則であった昭和 39 年 12 月に新たに制定されたものであり、制定当時は第 163 条の 8、第 163 条の 9 と呼ばれていた。安衛則第 356 条ならびに第 357 条の条文を以下に示す。

【労働安全衛生規則第 356 条】

(掘削面のこう配の基準)

事業者は、手掘り (パワー・ショベル、トラクター・ショベル等の掘削機械を用いないで行なう掘削の方法をいう。以下次条において同じ。) により地山 (崩壊又は岩石の落下の原因となるき裂がない岩盤からなる地山、砂からなる地山及び発破等により崩壊しやすい状態になっている地山を除く。以下この条において同じ。) の掘削の作業を行なうときは、掘削面 (掘削面に奥行きが 2 メートル以上の水平な段があるときは、当該段により区切られるそれぞれの掘削面をいう。以下同じ。) のこう配を、次の表の上欄に掲げる地山の種類及び同表の中欄に掲げる掘削面の高さに応じ、それぞれ同表の下欄に掲げる値以下としなければならない。

- 前項の場合において、掘削面に傾斜の異なる部分があるため、そのこう配が算定できないときは、当該掘削面について、同項の基準に従い、それよりも崩壊も危険が大きくないように当該各部分

の傾斜を保持しなければならない。

【労働安全衛生規則第 357 条】

(地山掘削作業時の措置)

事業者は、手掘りにより砂からなる地山又は発破等により崩壊しやすい状態になつている地山の掘削の作業を行なうときは、次に定めるところによらなければならない。

1. 砂からなる地山にあつては、掘削面のこう配を 35 度以下とし、又は掘削面の高さを 5 メートル未満とすること。
 2. 発破等により崩壊しやすい状態になつている地山にあつては、掘削面のこう配を 45 度以下とし、又は掘削面の高さを 2 メートル未満とすること。
- 2 前条第 2 項の規定は、前項の地山の掘削面に傾斜の異なる部分があるため、そのこう配が算定できない場合について、準用する。

これらの条文をまとめたものを図-3.4、表-3.2 に示す。

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

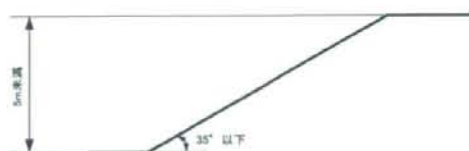


●その他の地山



労働安全衛生規則 第357条

●砂からなる地山を手掘りにより掘削作業



●発破等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

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 メートル)	掘削面の勾配 (単位 度)
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
砂からなる地山	勾配 30 度又は掘削面の高さ 5 メートル未満	
発破等の後の地山	勾配 45 度又は掘削面の高さ 2 メートル未満	

3.3.2 斜面の勾配と高さの基準の理論的な考察

斜面の勾配と高さの基準の理論的考察について調べると、昭和34年5月発行の安全資料「土砂崩壊災害の防止」(写真-3.1)³⁾に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はホグセントグラの書籍⁴⁾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、過去の経験による勘で間に合っていたことなどを理由に土質試験はほとんど行われておらず、日本の土の適当なパラメータが揃っていなかったためであろう。

安衛則第356条および第357条の切取勾配と高さの基準は、過去の災害事例における斜面勾配と高さから決定したと言われている。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ことが分かる。現在でも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 (昭和23年発行)」が「土質力学 基礎編・応用編」として翻訳・出版されたのが昭和30年であり、当時の土質力学はまだ未成熟な時代であり、当時の最先端の知見を取り入れて制定されたと言える。

安全資料 B-3

土砂崩壊災害の防止

国土院

労働省労働基準局安全課編

写真-3.1 土砂崩壊災害の防止

表-3.3 粘土の切取限界高さ(安全率各1.5)³⁾

粘土の種類	γ t/m ³	c t/m ²	ϕ 度	限界高さ m					
				切取勾配 度					
				90	85	75	70	65	60
著しく柔軟な粘土	1.28	0.976	2	2.11	2.30	2.53	3.05	3.76	3.75
普通の粘土	1.44	4.88	6	9.66	10.6	11.7	14.3	15.8	17.8
堅硬な粘土	1.60	7.32	8	13.3	14.7	16.1	19.8	22.0	24.7
良好な砂質粘土	1.76	4.88	34	11.4	13.1	15.1	20.8	25.0	30.6
沈泥質粘土	1.60	0.976	14	1.91	2.11	2.35	2.93	3.28	3.75

3.4 数値解析による検討

安衛則第 356 条および第 357 条の検討にも利用された「直線すべり法」と「剛塑性有限要素法 (RP-FEM)」を用いて、Chen 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線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) とのつ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 3-5)。

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、

$$H_c = \frac{4c}{\gamma} \cdot \frac{\sin \beta \cdot \cos \phi}{1 - \cos(\beta - \phi)} \quad (3.2.1)$$

で表される。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、

$$\frac{H_c \cdot \gamma}{c} = 4 \times \frac{\sin \beta \cdot \cos \phi}{1 - \cos(\beta - \phi)} \quad (3.2.2)$$

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、

$$\alpha = \frac{\beta + \phi}{2} \quad (3.2.3)$$

である。

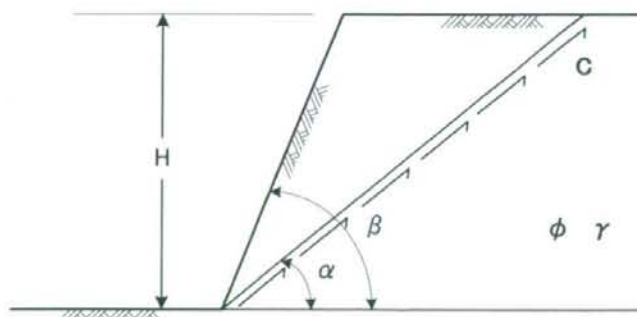


図-3.5 直線すべり法

2. 剛塑性有限要素法

極限定理（上界定理・下界定理）に基づき、ある境界条件下における固体の限界強度を求め、いくつかの条件を満足する解（上限値・下限値）を算出し、正解の範囲を狭めて正解に対する精度を高める手法を極限解析法という。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-3.6）⁵⁾。

剛塑性有限要素法（RP-FEM）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⁶⁾。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。RP-FEM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（今回は粘着力 c 、単位体積重量 γ 、内部摩擦角 ϕ 、ダイレイタンシー角 ψ のみで解析）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。しかし、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。

$$N = \mu \times \frac{H \cdot \gamma}{c} \quad (3.3.1)$$

剛塑性有限要素法は金属の塑性加工の分野で発展し、京都大学田村武教授らのグループが地盤工学分野に積極的に使用しており、理論的背景は Tamura et. al⁷⁾の論文に譲るものとする。なお、解析に使用したプログラムは、京都大学田村武教授が作成したものを改良したものである。解析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-3.4に示す。

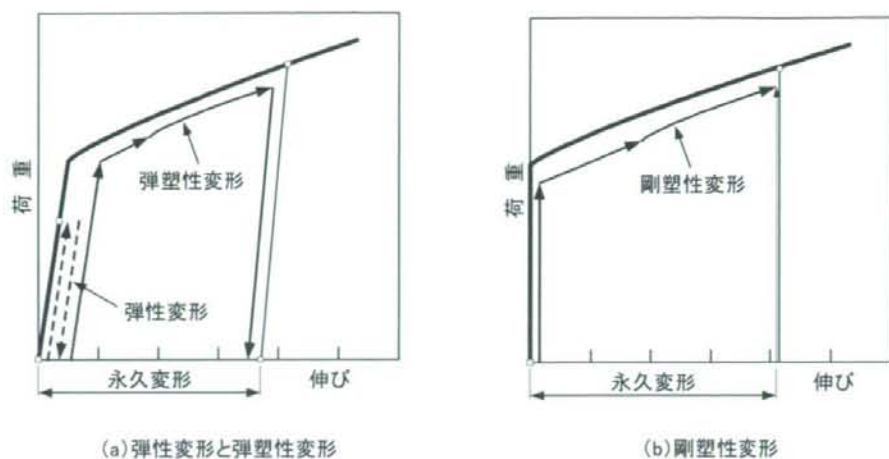


図-3.6 荷重と伸びの関係⁵⁾

表-3.4 材料の物性値

		直線すべり 法	RP-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	-	○

3.4.2 Chen の安定係数について

Chen は土の破壊が Mohr-Coulomb の破壊規準に従うものとし、すべり落ちる土塊の量は最小値をとるとして、すべり面は対数螺旋であることを証明した⁸⁾。

$$\gamma = \gamma_0 \exp \theta \tan \phi \quad (3.4.1)$$

ここで、 θ : 角変数、 ϕ : 内部摩擦角である。Chen は、図-3.7 のような斜面について、対数螺旋を仮定して極限解析を行い、その結果を表-3.5 に示した。安定係数 N は、

$$N = H_c \cdot \frac{\gamma}{c} \quad (3.4.2)$$

で表される。したがって、 ϕ 、 α 、 β に対応して求めた安定係数が求められると、限界高さ H_c に対する安全率 F_c として、

$$F_c = \frac{H_c}{H} = \left(\frac{c \cdot N}{\gamma} \right) / H \quad (3.4.3)$$

が求められる。

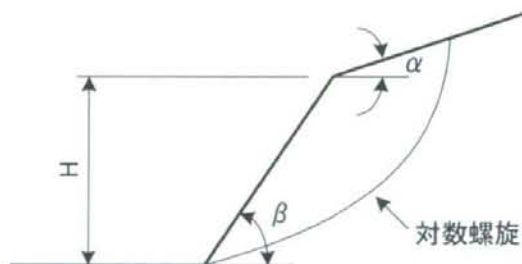


図-3.7 Chen らによる対数螺旋による安定係数

表-3.5 Chen らのよる安定係数一覧表⁹⁾

$\phi (^{\circ})$	$\alpha (^{\circ})$	$\beta (^{\circ})$					
		90	75	60	45	30	15
0	0	3.83	4.57	5.25	5.86	6.51	7.35
5	0	4.19	5.14	6.17	7.33	9.17	14.80
	5	4.14	5.05	6.03	7.18	8.93	14.62
10	0	4.59	5.80	7.26	9.32	13.53	45.53
	5	4.53	5.72	7.14	9.14	13.26	45.15
	10	4.47	5.61	6.98	8.93	12.97	44.56
15	0	5.02	6.57	8.64	12.05	21.71	
	5	4.97	6.49	8.52	11.91	21.50	
	10	4.90	6.39	8.38	11.73	21.14	
	15	4.83	6.28	8.18	11.42	20.59	
20	0	5.51	7.48	10.39	16.18	41.27	
	5	5.46	7.40	10.30	16.04	41.06	
	10	5.40	7.31	10.15	15.87	40.73	
	15	5.33	7.20	9.98	15.59	40.16	
	20	5.24	7.04	9.78	15.17	39.19	
25	0	6.06	8.59	12.75	22.92	120.0	
	5	6.01	8.52	12.65	22.78	119.8	
	10	5.96	8.41	12.54	22.60	119.5	
	15	5.89	8.30	12.40	22.37	118.7	
	20	5.81	8.16	12.17	21.98	117.4	
	25	5.71	7.97	11.80	21.35	115.1	
30	0	6.69	9.96	16.11	35.63		
	5	6.63	9.87	16.00	35.44		
	10	6.58	9.76	15.87	35.25		
	15	6.53	9.67	15.69	34.99		
	20	6.44	9.54	15.48	34.64		
	25	6.34	9.37	15.21	34.12		
	30	6.22	9.15	14.81	33.08		
35	0	7.43	11.68	20.94	65.53		
	5	7.38	11.60	20.84	65.39		
	10	7.32	11.51	20.71	65.22		
	15	7.26	11.41	20.55	65.03		
	20	7.18	11.28	20.36	64.74		
	25	7.11	11.12	20.07	64.18		
	30	6.99	10.93	19.73	63.00		
	35	6.84	10.66	19.21	60.80		
40	0	8.30	14.00	28.99	185.6		
	5	8.26	13.94	28.84	185.5		
	10	8.21	13.85	28.69	185.3		
	15	8.15	13.72	28.54	185.0		
	20	8.06	13.57	28.39	184.6		
	25	7.98	13.42	28.16	184.0		
	30	7.87	13.21	27.88	183.2		
	35	7.76	12.95	27.49	182.3		
	40	7.61	12.63	26.91	181.1		

3.4.3 解析結果

1. Chen の安定係数の比較

2つの数値解析結果と Chen の安定係数を比較した。結果を図 4-1～図 4-4 に示す。なお、凡例の () 内は内部摩擦角である。全体的に勾配が 90 度するとき安定係数の値はまとまっているが、勾配が緩くなるにつれてばらつきが見られる傾向となった。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-3.8)

勾配が 90 度ときは近い値を示しているが、その他の勾配ではどのケースにおいても直線すべりの安定係数が大幅に上回っている。勾配が緩くなるにつれて差は広がり、直線すべり法による安定係数は急上昇していることがわかる。

・剛塑性有限要素法 (図-3.9)

Chen の安定係数に近い値・傾向を示した。内部摩擦角が 15、25 度ときは Chen の値を上回っている。

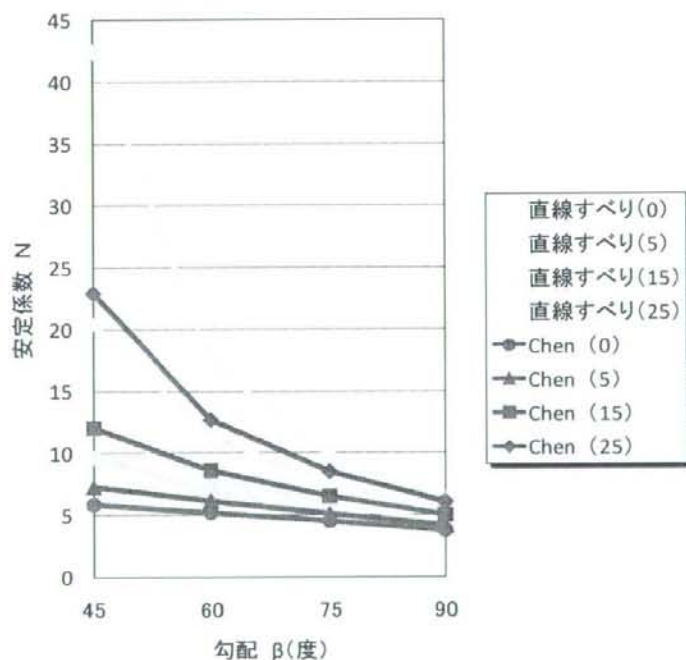


図-3.8 Chen の安定係数との比較 (直線すべり法)

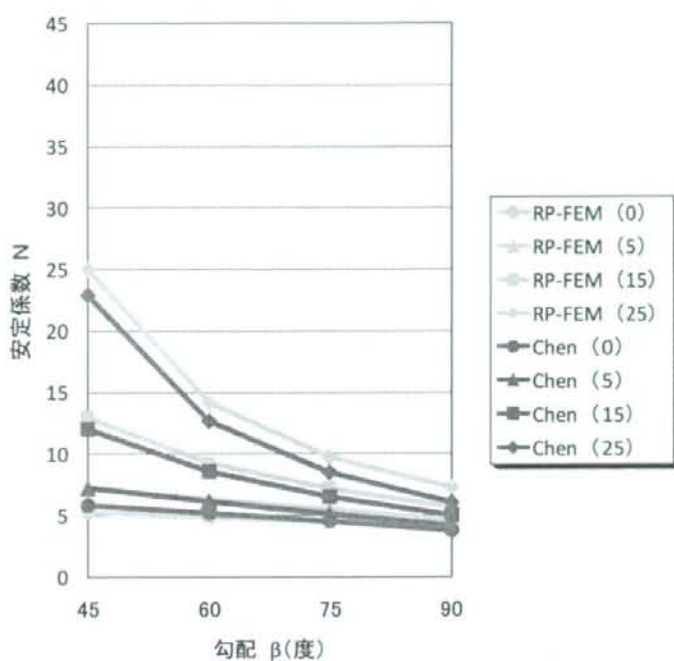


図-3.9 Chen の安定係数との比較 (RP-FEM)

2. すべり線の比較

RP-FEM より得られた変位速度ベクトル図の一覧を表-3.6 に示す。この図には、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。勾配 45 度するとき、滑り面は円弧状となっているが、勾配が急になるにつれてすべり線は変化していき、勾配 90 度になるとすべり線は、ほぼ直線になった。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てくる。言い換えれば、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-3.6 剛塑性有限要素法での速度変位ベクトル図と直線すべり法でのすべり線 (灰色直線)

		内部摩擦角 ϕ (度)						
		0	5	10	15	20	25	30
斜面の勾配 β (度)	45							
	60							
	75							
	90							

3.5 まとめ

本章では、①切土掘削工事における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、その制定の背景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. 安衛則第 356 条および第 357 条の切取勾配と高さの基準は、過去の災害事例における斜面勾配と高さから決定したと言われている。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り、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安定係数の結果と直線すべり法と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。一方、直線すべり法による結果は 90 度に近づくにつれて一致するが、勾配が緩やかな場合には大きく異なる結果となった。これは、決定するすべり線の違いが安定係数に影響を与えているといえ、言い換えれば、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。

3.6 参考文献

1. 土木学会：岩盤斜面の安定解析と計測、土木学会、pp34-34、1994
2. (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.
3. 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
4. ホгентグラー（宇都宮寿夫訳）：土の工学的性質、コロナ社、pp.140、1944
5. 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
6. 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
7. 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.
8. W.F.Chen, M.W.Giger, H.Y.Fang : On the limit analysis of stability of slopes, Soil and foundations, Vol. 9, No. 4, pp.23-32, 1969.
9. 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 砂からなる切土斜面の安定性に及ぼす降雨の影響

4.1 はじめに

切土工事および掘削工事はあらゆる建設現場に必要な作業であり、建設規模の大小にかかわらず、多くの建設現場で行われている極めて一般的な建設作業である。しかしながら、切土工事中に多くの斜面崩壊事故が発生しており、毎年多くの作業員が死亡している。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。一方、切土工事中の労働安全を目的として、労働安全衛生規則第356条・第357条に示されている切土勾配および高さの基準を満たした状態で作業が行われるよう定められている。表-4.1は1989年から2002年まで切土工事中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。灰色ハッチ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、現行の労働安全衛生規則の見直しが必要であると考えられる。

本研究では、表-4.1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2m-5m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5m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。また、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が統計調査から分かっている。以上から、本研究では遠心模型実験装置を用いて斜面角60°、高さ5mの砂からなる切土斜面を模擬し、降雨をシミュレートすることにより、切土斜面の安定性に及ぼす降雨の影響を評価した。一方で、床掘り掘削時の切土斜面の崩壊も多数報告されており、床掘りの有無についても検討した。

表-4.1 死亡事故現場における崩壊斜面高さおよび勾配の区分

角度 高さ	-60°	60° - 75°	75° - 90°	90°-	不明	計
- 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

4.2 遠心模型実験

4.2.1 実験概要

本実験では、斜面勾配 60° 、高さ 5m の切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-4.1 に模型地盤概要図を示したが、降雨後の変形挙動および床掘りの有無に着目しており、床掘りの無い Case1 と床掘りの有る Case2 を行った。実験では遠心加速度 20G 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、降雨実験を開始した。表-2 に示すとおり、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）放置するスキームを 1 イベントとしている。各ケース、大変形が生じるまでそれぞれ 6 回、 4 回の降雨イベントを行っている。実験中は、模型前面に設置したデジタルカメラで模型を撮影し、実験終了後、PIV 手法を用いて斜面の変形を求めている。実験装置および実験手順、使用した試料については以下に示す。

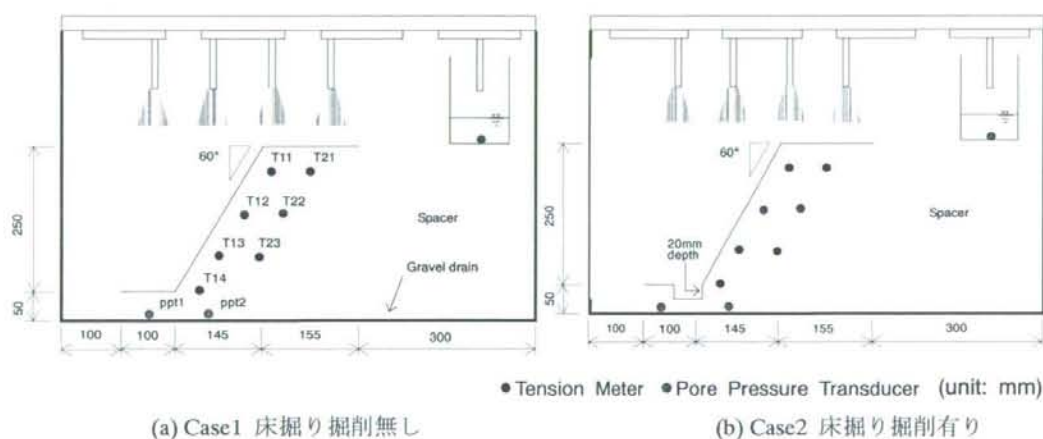


図-4.1 模型地盤概念図

表-4.2 実験ケース

	床掘り	イベント	回数
Case1	無し	3分間の降雨+7分間の放置	6セット
Case2	有り	(実物換算：20時間の降雨+46.7時間の放置)	4セット

4.2.2 実験装置

本実験では、図-4.2 に示す英国ダンディ大学所有のビーム型遠心模型実験装置（有効半径 3m ）を使用した。降雨のシミュレーションには、同大学所有の気候変動シミュレーターを用いた。本装置は噴霧ノズルからの散水による湿潤期と空気注入による乾燥期をシミュレーションすることにより年間を通した気候変動を再現することが出来る。また、容器底部には雨水採取機構を備えており、容器内の水収支を正確にモニタリングできるようになっている。本研究では、噴霧ノズルを用いた散水機能のみを用いて、降雨を再現した。本装置は、 3 列に並んだ 12 本の噴射ノズルを通して、地盤に降雨を供給する。単

位時間あたりの降雨量と噴霧ノズル内に作用する水圧は比例関係にあり、ノズル内の水圧を計測することにより、実験中の単位時間あたりの降雨量を計算できる。ノズルに急速に圧力を与えられるようにノズル近くに水供給タンク設置している。この水供給タンクに、遠心模型実験装置外に設置した水供給ポンプからロータリージョイントを通して水を供給し、水供給タンク内を所定の圧力まで上昇させる。その後、供給タンクとノズル間に設置したソレノイドバルブを開くことにより、急速に所定の水圧をノズルに与えることが出来る。この気候変動シミュレーターは、遠心模型実験装置に設置したコンピュータにインストールした Labview を用い、同様に遠心模型実験装置に設置したリレーボックスに DA ボードを介して信号を送ることで、水圧供給用ポンプとソレノイドバルブを制御している。供給タンク等の許容値は約 1,000kPa のため、本実験では供給ポンプの圧力を約 900kPa で使用した。この供給圧力をソレノイドバルブ解放時も常に維持することで、ノズルからの単位時間あたりの降雨は約 6.0mm/hr.(遠心加速度 20G 場での実物換算値)を得ることが出来る。

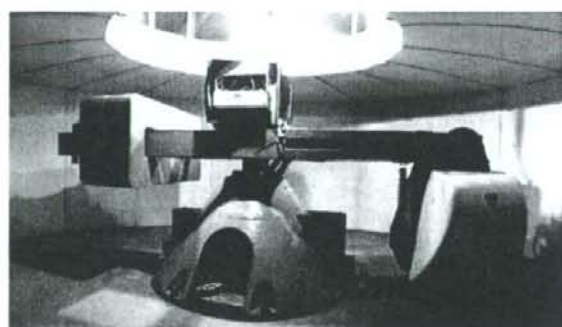


図-4.2 ダンディ大学所有 ビーム型遠心模型実験装置

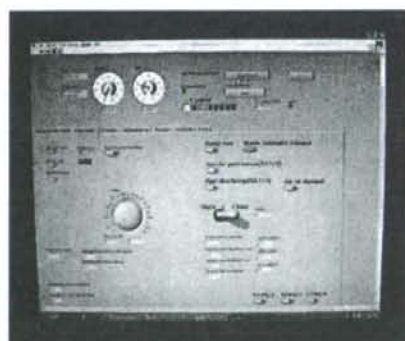
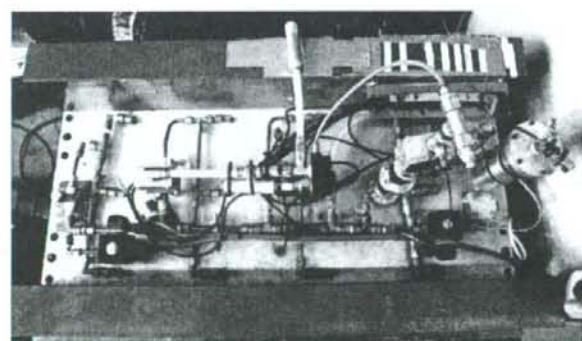


図-4.3 気候変動シミュレーター

4.2.3 模型および実験手順

模型地盤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 Bullionfield Soil を採取し、1 週間の乾燥後、1.2mm ふるいでふるい分けした試料を使用した。Bullionfield soil は砂分 71%、シルト分 19%、粘土分 10%で構成されており、アッターベルグ限界は液性