

信頼性解析を用いた斜面施工時における掘削手順の相違による安全性の比較

中央大学大学院 学生会員○高橋祐幸¹⁾中央大学 正会員 佐藤尚次¹⁾独立行政法人 産業安全研究所 正会員 豊澤康男²⁾ 正会員 堀井宣幸²⁾ 正会員 花安繁郎²⁾

1. 序論

斜面切土等の施工中の斜面において土砂崩壊により年間約 15 人が死亡している。斜面災害の事例を分析した結果¹⁾、その原因として土質定数等には潜在的にばらつきが存在するため施工時に当該斜面の地盤特性を正確に把握する事が困難であることや、工事に際しての安全性は技術者による経験的な判断に基づくことが多い事等が挙げられる。技術者による経験的な判断は、個人差が大きい的確な判断が下せるようになるために時間を要すること、土木工事が一品生産的であるということから、それらを一般化する事は困難である。

これらのことから、斜面の施工時においてある程度理論的な背景を持ち、かつ汎用的な定量的判断基準として使用可能な安全性評価手法の開発が有用である。

本研究は、斜面施工時における掘削手順の相違による安全性の比較を行うことを目的とし、2 種類の掘削手順を事例として取り上げ、信頼性解析手法によって施工段階での安全性の差を明らかにすることを試みたものである。

2. 解析対象モデル

2.1 地山の形状と土質定数

解析対象の地山は Fig.1 に示すモデルであり、均一な層で構成されているものとする。土質については、粘着力が支配的な土質と内部摩擦角が支配的な土質の 2 種類を用いた。(Table.1)

2.2 各施工段階における掘削手順を変化させたモデル

Fig.1 の斜面 (63.5 度、5 分勾配) を勾配が 75 度 (約 3 分) になるまで切り取る工事を想定し、斜面上部より掘削を行う手順を Sequence-1、下部より掘削を行う手順を Sequence-2 とする。切り土高さに従い Fig.2、Table.2 に示すように施工段階を設定し、切り取り完了までに 2 段階の過程を経るものとする。施工に用いる掘削機械は両 Sequence とも 10m の高さまで掘削可能であり、施工中は常に斜面底部に位置するものとする。

3. 信頼性解析

3.1 性能関数とシミュレーション法

破壊モードを円弧すべりとし、性能関数は、式 3.1 とする。シミュレーションの中で $F_s < 1.0$ となる場合は破壊とみなし、総破壊回数をシミュレーション回数で除した値を破壊確率とする。

シミュレーション法はパラメータの変動に伴い毎回最小安全率を算出することが可能であり、より正確に実際の現象を表現できるモンテカルロ (以下 MC) 法を用い、計算回数は 30000 回とした。

なお、シミュレーションに用いた乱数は混合式合同法により発生させた。

$$Z = F_s - 1.0 \quad (3.1)$$

F_s : 抵抗モーメント / すべりモーメント

Table.1 Soil profile

	$\mu_r(\text{kN/m}^3)$	$\mu_c(\text{kN/m}^2)$	$\mu_\phi(\text{deg})$
soil-1	16.0	32.0	10
soil-2	16.0	16.0	35

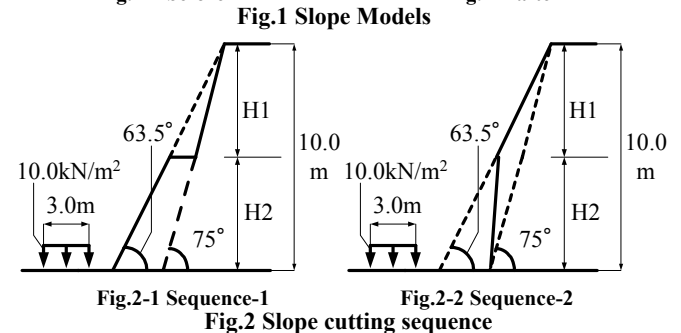
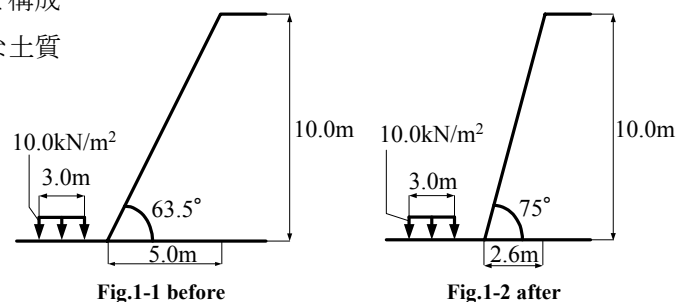


Table.2 sequence steps

	sequence1		sequence2	
	step1	step2	step1	step2
H1	2.5m	5.0m	7.5m	5.0m
H2	7.5m	5.0m	2.5m	5.0m

キーワード：信頼性解析、施工、掘削手順、斜面、破壊確率

連絡先：1) 東京都文京区春日 1-13-27 Tel 03-3817-1816 (直通) 2) 東京都清瀬市梅園 1-4-6 Tel 0424-94-6216 (直通)

3.2 解析に用いるパラメータについて

シミュレーションで用いるパラメータは c 、 ϕ 、 γ であり、全て正規分布に従うものとし、変動係数は Soil-1、Soil-2 共に **Table.3** に示した 2 種類の値の組を用いた。Analysis case1 は既往の研究²⁾を参考とし、Analysis case2 については、 ϕ は N 値から図表等より読み取る場合もあり c と比べて大きくばらつく可能性を想定した。**2.1** で示した土質定数の設定が正しいかを検証する為、Analysis case-1 の変動係数を用いて **Fig.1-1** のモデルに対して感度解析を行い、 F_s に対する c と ϕ の相関係数を算出した (**Table.4**)。

各パラメータ間の相関は、粘土地盤には γ と $\tan \phi$ に正の相関があるという報告²⁾から相関係数 0.6 とし、MC 法でのパラメータ抽出³⁾にはコレスキー分解法を利用した。それ以外のパラメータについては完全独立とした。

3.3 解析結果

信頼性解析の結果一覧を **Table.5** に示す。また、**Fig.3** は各 step の進行に伴う破壊確率の挙動を **2.1** で設定した soil profile 別に示したものである。実線が Sequence-1、点線が Sequence-2 を示し、両者の相違点を考察する。

4 考察

両 sequence の結果を比較すると中央安全率が 1.0 を上回っていることから、確定論的な解析では安全であるという結果となる。しかし、破壊確率に着目すると両者の差は 1order 以上も異なっている事が確認できる。

Fig.3-1 と **Fig.3-2** を比較すると、**3.2** で示したように soil-2 は ϕ の影響が強い為、変動係数の変化により、破壊確率の変動も大きくなっていることがわかる。しかし、パラメータの変動係数の影響よりも施工手順による影響が大きい。

また、 c が支配的な土質でも、 ϕ が支配的な土質でも sequence1 は 2 より安全側であるという結果が得られた。今回は、2 種類の掘削手順を例に挙げ、施工段階において信頼性評価を行った結果、掘削手順の相違により安全性が低下する過程が存在する事を示すことができた。パラメータや解析条件を過去の文献や調査報告から設定したが、実際のデータを入力すれば、より改善できると考えられる。また、今回は行っていないが、コストの面でも重機等の面で若干 sequence1 が高くなってしまう可能性があるが、破壊確率の差が大きいことより総合的なコストは抑えられる期待もできると考える。参考文献) 1)豊澤康男,伊藤和也,高橋祐幸 法面による労働災害の発生状況 土木学会第 58 回年次講演会 (投稿中) 2003.9 2) 松尾稔、上野誠,破壊確率を用いた自然斜面の崩壊予知に関する研究 土木学会論文報告集第 281 号 1979.1 3) 星谷勝,石井清 構造物の信頼性設計法 鹿島出版 1986.5

Table.3 Analysis cases
(Coefficient of variation)

	analysis case1	analysis case2
V_γ	0.03	0.03
V_c	0.1	0.1
V_ϕ	0.1	0.2

Table.4 Correlation coefficient

	soil-1		soil-2	
	ϕ	c	ϕ	c
F_s	0.82	0.94	0.95	0.8

Table.5 Results of reliability analysis
5.1 Results of Soil profile-1

Models	Analysis-case1 (A-c1)				Analysis-case2 (A-c2)			
	Pf	θ	Pf	θ	Pf	θ	Pf	θ
	Sequence1		Sequence2		Sequence1		Sequence2	
before	8.76E-03	1.29	8.76E-03	1.29	2.04E-02	1.29	2.04E-02	1.29
step1	7.50E-03	1.30	7.56E-02	1.16	1.79E-02	1.30	1.05E-01	1.16
step2	4.47E-03	1.33	2.97E-01	1.05	9.87E-03	1.33	3.17E-01	1.05
after	1.14E-01	1.13	1.14E-01	1.13	1.46E-01	1.13	1.46E-01	1.13

5.2 Results of Soil profile-2

Models	Analysis-case1 (A-c1)				Analysis-case2 (A-c2)			
	Pf	θ	Pf	θ	Pf	θ	Pf	θ
	Sequence1		Sequence2		Sequence1		Sequence2	
before	1.01E-02	1.30	1.01E-02	1.30	6.79E-02	1.31	6.79E-02	1.31
step1	8.00E-03	1.32	5.95E-02	1.19	6.12E-02	1.32	1.63E-01	1.20
step2	4.50E-03	1.35	1.72E-01	1.11	4.58E-02	1.36	2.87E-01	1.12
after	1.28E-01	1.13	1.28E-01	1.13	2.80E-01	1.12	2.80E-01	1.12

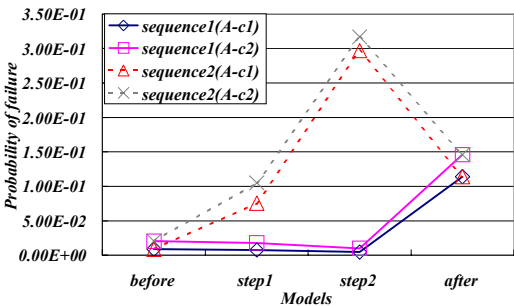


Fig.3-1 soil profile-1

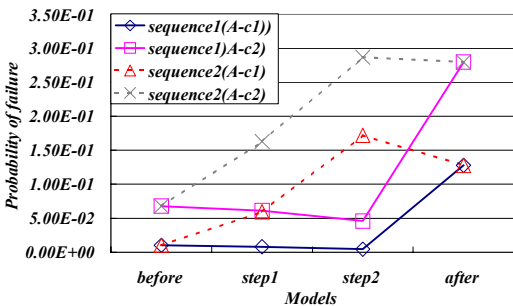


Fig.3-2 soil profile-2

Fig.3 Results of reliability analysis