

六甲山系風化花崗岩斜面における土質強度の空間分布に関する調査

国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所 木下篤彦・八木啓太
国土技術政策総合研究所 内田太郎
国土防災技術株式会社 ○柴崎達也・眞弓孝之・山崎孝成

1. はじめに

斜面の安定度評価を行う際、土層厚、斜面傾斜、土質強度（ $C \cdot \phi$ ）、単位体積重量、地下水条件といった地盤条件の設定が必要となる。表層崩壊場の土層厚の調査は、従来簡易動的コーン貫入試験による調査がよく行われており¹⁾、現地作業性のよい土層強度検査棒（土検棒）を用いた調査法²⁾も近年提案されている。斜面内の多地点でこれらの調査を面的に行えば、その空間分布の把握が可能である。一方、土質強度については現地での試料のサンプリングや室内試験の実施に時間や経費も要することから、斜面内の多地点で計測を行った事例も少なく、そのバラツキが斜面の安定度評価にどのように影響を及ぼすのか明確になっていない。そこで本研究では、表層崩壊の発生が懸念されている六甲山系の斜面において土質強度を多点で調査し、現地の土層厚、傾斜、土質強度のバラツキが斜面安定評価に及ぼす影響について考察を行った。

2. 調査概要

花崗岩を基盤岩とする六甲山系の3地区の斜面（西おたふく地区、渦ヶ森地区、黄蓮谷地区）において、1.2～1.4m 深のテストピットを各1～2箇所設け、土層断面の観察及び室内試験用のサンプリングを行った。また、同地点においてSH型貫入試験や土検棒貫入試験も実施し、土層厚を把握した。室内試験としては、浅層の表層土と深部のマサ土を対象に各種物理試験の他、力学試験として定体積一面せん断試験、三軸圧縮（CUB）試験を実施した。また、西おたふく地区斜面において、土質強度の空間的なバラツキを検討することを目的に、土層強度検査棒による調査を地内30箇所で行った。土質強度を求めるベーンコーンせん断試験は、転石や岩盤の影響で試験が不能であった箇所を除き計26箇所で行った。

3. 調査結果

3.1 室内試験の結果

表-1に、3地区のテストピットで実施した貫入試験により把握した土層厚と、ブロックサンプリング試料による室内試験結果を示す。六甲山系のマサ土は、粒度分布としては砂礫分を主体とし、流動限界が他の花崗岩地帯のマサ土に比べ小さく、少ない含水状態でも流動化を起こしやすい特性を示すことがわかった。

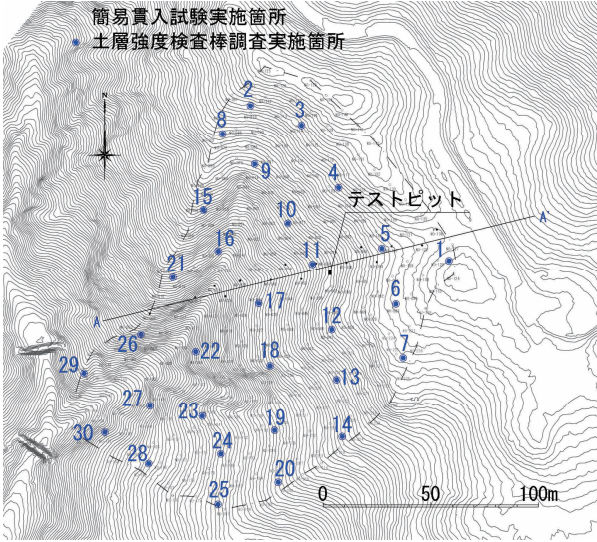


図 1 調査地平面図(六甲山西おたふく地区)

表-1 テストピット箇所の貫入試験、室内試験の結果

地区名			西おたふく		渦ヶ森		黄蓮谷			
テストピット No.			①		①	②	②			
試験対象土層			表層土	マサ土	表層土	マサ土	表層土	マサ土		
採取深度 (GL-m)			GL-0.3～0.7m	GL-0.9～1.4m	GL-0.4～0.8m	GL-0.5～1.2m	GL-0.2～0.4m	GL-0.6～1.2m		
貫入試験	土検棒貫入試験	貫入深 (m) ※6～13点の平均	Ddk (1700)		0.71	0.76	0.54	1.22		
	S H型貫入試験	土層厚 (m) ※3点の平均	Nd≤5		1.93	1.05	0.95	1.73		
			Nd≤10		2.22	1.76	0.99	1.75		
			Nd≤20		2.27	1.87	1.31	2.01		
			Nd≤50		2.47	1.91	1.57	2.22		
物理特性	一般物理特性	湿潤密度	ρ_w (g/cm ³)		1.371	1.464	1.757	1.755	1.458	1.460
		乾燥密度	ρ_d (g/cm ³)		0.903	1.293	1.497	1.628	1.251	1.118
		自然含水比	w _n (%)		51.9	13.2	17.4	9.0	16.6	8.1
		飽和度	Sr (%)		71.7	33.1	60.2	37.6	39.4	58.6
		焼熱減量	Li (%)		4.1	2.4	4.8	3.1	5.9	1.9
	粒度特性	練分	(%)		27	53	14	37	36	53
		砂分	(%)		37	39	52	51	49	42
		シルト分	(%)		19	7	17	9	11	4
		粘土分	(%)		17	1	17	3	4	1
		流動限界	w _L (%)		67.02	23.58	30.57	20.89	27.41	24.58
力学特性	三軸圧縮試験 (CUB)	全応力	C _u (kN/m ²)		4.1	21.2	19.7	79.4	4.9	25.1
			ϕ_u (°)		18.4	14.2	10.8	24.8	15.5	15.3
		有効応力	C' (kN/m ²)		4.5	8.9	13.8	34.1	1.8	3.4
	一面せん断試験 (定体積)		ϕ' (°)		27.7	31.0	21.2	30.6	35.2	33.3
		浸水条件	C' (kN/m ²)		0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	5.2
			ϕ' (°)		42.4	45.6	42.9	50.6	39.9	41.7
		自然含水条件	C' (kN/m ²)		7.5	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0
			ϕ' (°)		38.8	44.0	40.8	50.1	43.7	44.2

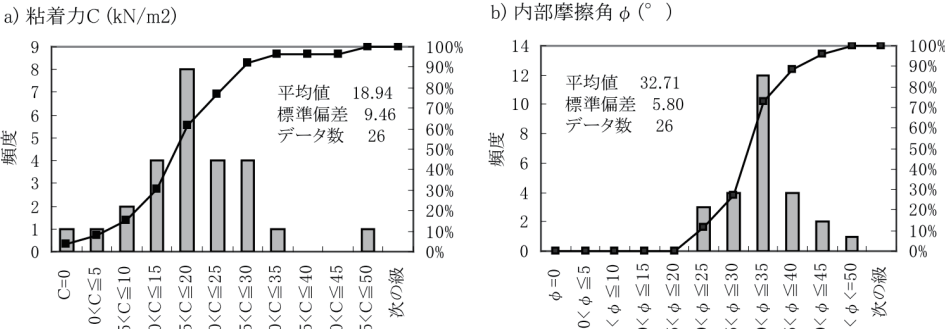


図 3 ベーンコーンせん断試験により得られたCφの頻度分布(西おたふく地区 26 地点)

また、マサ土の三軸圧縮試験で求められた ϕ' は $30.6\sim 33.3^\circ$ であり、一面せん断試験で得られた ϕ' は $38.6\sim 50.6^\circ$ より小さな値を示した。三軸圧縮試験で求めた粘着力 C' は、 $3.4\sim 34.1\text{kN/m}^2$ の開きが認められ、供試体の密度が高い試料ほど大きな C' が得られた。一面せん断試験で得られた C' はゼロの試験値が多く、サンプリングの乱れなどが影響した可能性もある。現地の平均土層深における有効土被り圧は、 15kN/m^2 と非常に小さいことから、試験時に与えた垂直応力や拘束圧の条件($25\sim 150\text{kN/m}^2$)が過大すぎた可能性もある。

3.2 ベーンコーンせん断試験による土層強度調査

図-3に西おたふく地区の26箇所において実施したベーンコーンせん断試験で得られた C 、 ϕ の頻度分布を示す。土検棒の貫入限界深付近で試験を実施した。土木研究所のマニュアル(案)²⁾に示された相関式法の適用が困難であったことから、経験式法により垂直応力とせん断応力を算出して C 、 ϕ を求めた。各地点で垂直荷重とトルクをプロットした際にバラツキが大きいと思われた箇所では、同じ垂直荷重の条件で複数回試験を行った。全体のプロットの傾向から逸脱するようなデータは特異値と判断し、 C 、 ϕ 算出の対象外とした。 C 、 ϕ とも正規分布に近い頻度分布を示しており C は $0\sim 46.6\text{kN/m}^2$ のバラツキが認められ、 ϕ は $23.1\sim 47.2^\circ$ のバラツキが確認された。平均値は、 $C=18.9\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=32.7^\circ$ であった。

3.3 斜面安定度評価に及ぼす各因子のバラツキの影響

西おたふく地区で、現地試験やLPデータより求めた以下の3因子のバラツキが安全率にどの程度寄与するか検討を行った。

- ① 土層厚 (地内239点で実施した動的コーン貫入試験による $N_d \leq 10$ の土層深データ^{3), 4)})
- ② 斜面傾斜 (対象斜面となる流域を10mメッシュで区分した際の29区画の傾斜データ)
- ③ 土質強度 (地内26箇所にてベーンコーンせん断試験で得られたせん断強度)

斜面傾斜の平均値は 31.8° 、土層厚の平均値は1.21m、平均土被り圧相当の鉛直荷重条件で得られたせん断強度の平均値は 27.4kN/m^2 であった。安全率 F_s は、単純な斜面を想定し、地下水条件は考慮せず、以下の式で定義した。

$$F_s = \text{せん断強度} / \text{滑動力} = \tau / (\gamma_t \times D \times \sin \theta \times \cos \theta)$$

ここで、 τ :ベーンコーンせん断試験により平均土被り圧相当の鉛直荷重条件で得られたせん断強度(kN/m^2)、 γ_t :湿潤単位体積重量(土質試験を参考に、 15kN/m^3 とした)、 D :土層厚(m)、 θ :斜面傾斜($^\circ$)である。①～③の3因子のうち、2因子を平均値、1因子については全データを用いて安全率 F_s を計算し、その際の F_s の頻度分布を図-5に示した。図より、安全率のバラツキに大きな影響を与えるのは、土層厚>土質強度>斜面傾斜の順であることがわかった。表層崩壊発生箇所を予測する際、各因子のバラツキの影響度にも留意して地盤条件の設定を行うことが必要であることを示している。

3地区のテストピットでの土層断面の観察によると、浅層部は根茎が密に発達し、その引張強度が斜面安定に及ぼす影響も無視できないものと推察された。また、土塊内にレキが分布し、ベーンコーンの挿入が極浅層部で停止する箇所も数多く確認された。斜面構成材料が礫質土主体の斜面では、ベーンコーンせん断試験の実施は困難であることから、バラツキの評価の適用限界なども今後検討を行う必要がある。

【引用文献】

- 1)国土技術政策総合研究所(2005):国総研資料 第261号、簡易貫入試験を用いた崩壊の恐れのある層厚推定に関する研究
- 2)土木研究所(2011):土研資料 第4176号、土木土層強度検査棒による斜面の土層調査マニュアル(案)
- 3)六甲砂防事務所(2009):六甲砂防管内東六甲地区土層厚調査業務報告書
- 4)六甲砂防事務所(2010):六甲山系斜面崩壊観測施設計画・設置業務報告書

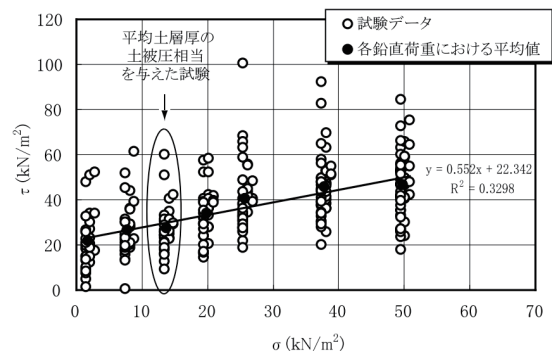


図4 土検棒ベーンコーンせん断試験結果
(西おたふく地区26地点での全試験値のプロット)

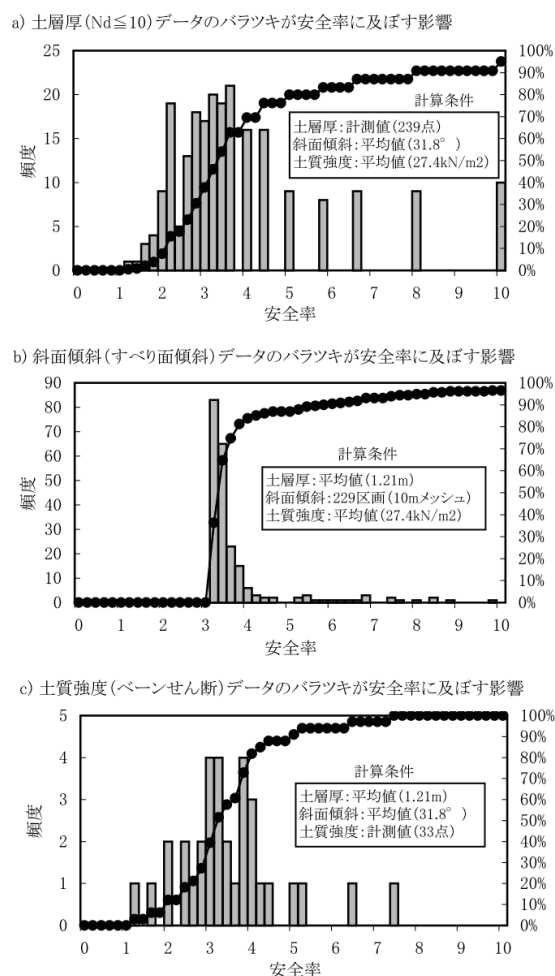


図5 安全率に及ぼす各因子のバラツキの影響