

せん断抵抗角(ϕ_p)を用いた斜面の安定計算式の誘導とその適用性 (その2)

1214207 菅野健

はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震などの大規模地震やその余震に伴い、地すべりや盛土の滑動崩落など多くの斜面災害が発生した。地すべりを含む斜面の地震動に対する危険度評価に関して、数値解析法や極限平衡法に基づく震度法を適用した安定解析法が用いられている。震度法を適用した地すべりの耐震安定性に関する近年の研究として、たとえば森脇寛(2011)¹⁾などの研究がある。これらの解析上の課題の一つとして、すべり面強度(c, ϕ)の設定が挙げられている。安定計算に用いるすべり面強度(c, ϕ)の設定には、土質試験あるいは $c-\phi$ 逆算法などを適用しているが、その設定に苦慮しているのが実情である。

本研究では、クーロンの破壊規準に準拠した垂直応力(σ)とせん断応力(τ)の関係から求まる、せん断抵抗角(ϕ_p)を用いた常時・地震時安定計算法(ϕ_p 法)を提案²⁾している。 ϕ_p 法は、 c, ϕ を用いない安定計算法で、その適用範囲は逆算法を適用した安定計算法に用いることが出来る。今年度は、平成25年度卒業論文³⁾で検討した平均せん断抵抗角法(ϕ_{pver} 法)に引き続き、スライスごとのせん断抵抗角(ϕ_{pi})を用いる ϕ_{pi} 法の計算式の誘導とその適用性について検討した。

1. 研究目的

スライスのせん断抵抗角(ϕ_{pi})を用いた安定計算法の誘導とその適用性に関する検討

2. せん断抵抗角(ϕ_p)法の主な研究課題

- ① せん断抵抗角(ϕ_p)を用いた常時・地震時安定計算式の確立
- ② すべり面強さ係数としてのせん断抵抗角(ϕ_p)逆算法の確立
- ③ せん断抵抗角(ϕ_p)を用いたすべり面強度(c, ϕ)への変換法の確立

3. 研究計画

本研究の研究計画を、表-1に示す。今年度は、せん断抵抗角(ϕ_{pi})法による安定計算式の展開とせん断抵抗角(ϕ_{pi})の逆算法、およびせん断抵抗角(ϕ_{pi})からの c, ϕ への変換手法の検討を行った。

4. 研究から得られる主な成果

- ・せん断抵抗角(ϕ_p)を用いた c, ϕ を用いない斜面の常時・地震時安定計算手法の提案(ϕ_{pver} 法、 ϕ_{pi} 法)
- ・せん断抵抗角(ϕ_p)から粘着力(c)、内部摩擦角(ϕ)の変換手法の提案

5. せん断抵抗角(ϕ_p)法による常時・地震時安定計算式および ϕ_p 逆算法の誘導

図-1にクーロンの破壊規準とせん断抵抗角(ϕ_p)の関係を示す。せん断抵抗角(ϕ_p)とは、垂直応力(σ)と関連付けて原点 o 点からクーロンの破壊規準に交差する線と横軸の角度を表す。

表-1 ϕ_p 法に関する研究計画

検討年度	従来法	平成25年度	平成27年度	平成28年度以降
解析手法	$c-\phi$ 法	ϕ_{pver} 法の展開	ϕ_{pi} 法の展開	—
すべり面強度及びすべり面強さ係数	c, ϕ	ϕ_{pver}	ϕ_{pi}	—
すべり面の強さ(τ)	$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi$ (クーロン則)	$\tau = \sigma \cdot \tan \phi_{pver}$	$\tau_i = \sigma_i \cdot \tan \phi_{pi}$	—
すべり面強度の求め方	①土質試験	—	—	—
	② $c-\phi$ 逆算法	ϕ_{pver} 逆算法	ϕ_{pi} 逆算法	—
安定計算式	①常時	①常時平均 ϕ_p 法	①常時 ϕ_{pi} 法	—
	②地震時	②地震時平均 ϕ_p 法	②地震時 ϕ_{pi} 法	—
主な課題と解決方法	すべり面強度の逆算に関して多くのマニュアルで示されている。 ①C-H法 H=移動層厚max② Fsの仮定	平均 ϕ_p の逆算において用いるFsの仮定 → $c-\phi$ 法の①法、 ②法に準拠	ϕ_{pi} の逆算に用いるFsの仮定 → $c-\phi$ 法から求められるスライスごとの安全率(Fs)を採用	事例解析による $c-\phi$ 法を順計算した ϕ_{pver} 法、 ϕ_{pi} 法の整合性の検証
	震度法 海洋型 (野田、上部式) 直下型 (黒田、鳥居式)	震度法 海洋型 (野田、上部式) 直下型 (黒田、鳥居式)	震度法 海洋型 (野田、上部式) 直下型 (黒田、鳥居式)	特性値分析

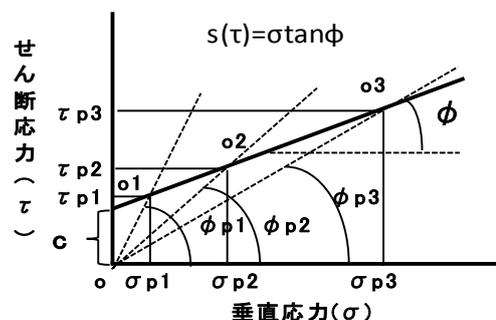


図-1 垂直応力(σ)とせん断応力(τ)の関係図

5.1 c-φ 法による安定計算式とすべり面強度逆算式

土の強さ(τ)は、クーロンの破壊基準に基づき粘着力(c)、内部摩擦角(φ)を用いて、式(1)で示される。

$$\tau = \sigma \cdot \tan \phi + c \quad \text{----- (1)}$$

ここで、σ は、すべり面底面に垂直に作用する垂直応力である。式(2)に分割(スライス)法による Fellenius 式(1927)を示す(簡便法とも呼ばれている)。

$$F_s = \frac{\sum_i^n (w_i \cos \theta_i - u_i l_i) \cdot \tan \phi + c \cdot \sum_i^n l_i}{\sum_i^n (w_i \sin \theta_i)} \quad \text{----- (2)}$$

Fellenius の式を地震時の安定計算式で示すと式(3)となる。

$$F_{se} = \frac{\sum_i^n (w_i \cos \theta_i - u_i l_i - k_s \cdot w_i \sin(\beta_i - \alpha)) \tan \phi + c \cdot \sum_i^n l_i}{\sum_i^n (w_i \sin \theta_i + k_s \cdot w_i \cos(\beta_i - \alpha))} \quad \text{----- (3)}$$

ここで、α は、地震波の入力角度である。入力角度は、地震慣性力が最も大きくなる角度として、水平方向(α = 0)から入浴するものとして検討している。また、安定計算に用いる地震係数(k_s)は、最大加速度(α_s)を重力加速度(g)で除することにより、式(4)で求められる。地震係数(k_s)の設定には、海洋型タイプとして、野田らの式³⁾などがある。なお、本研究で用いる地震係数(k_s)は、耐震設計で用いている設計水平震度係数(k_h)とは区別する。

$$k_s = \frac{\alpha_s}{g} \quad \text{----- (4)}$$

5.2 せん断抵抗角(φ_p) 法による安定計算式とすべり面強さ逆算式の誘導

φ_p 法は、クーロンの破壊基準に準拠したせん断抵抗角(φ_p)を用いる手法である。せん断抵抗角(φ_p)を用いた土の強さ(s)は、式(5)で与えられる。

$$s_{(\phi_p)} = \sigma \cdot \tan \phi_p \quad \text{----- (5)}$$

すなわち、c-φ 法の土の強さ(s_{cφ})と φ_p 法の土の強さ(s_{φp})は、対象となるブロックの垂直応力(σ)と関連づけて式(6)のように表される。

$$s_{(c,\phi)} = s_{(\phi_p)} \quad \text{すなわち} \quad \sigma \tan \phi + c = \sigma \tan \phi_p \quad \text{----- (6)}$$

せん断抵抗角(φ_p)をスライス法に適用すると解析上の安定計算式は、平均せん断抵抗角(φ_{pver})を用いた計算式と垂直応力(σ)に関連付けたせん断抵抗角(φ_{pi})を用いた計算式がある。

5.2.1 平均せん断抵抗角を用いた安定計算式(φ_{pver}法)とφ_{pver}の逆算法(平成25年度卒論)²⁾

式(7)に常時安定計算式、式(8)にφ_{pver}の逆算式を示す。

$$F_s = \frac{\sum_i^n (w_i \cos \theta_i - u_i l_i) \tan \phi_{pver}}{\sum_i^n (w_i \sin \theta_i)} \quad (7) \quad \tan \phi_{pver} = \frac{F_s \cdot \sum_i^n (w_i \sin \theta_i)}{\sum_i^n (w_i \cos \theta_i - u_i l_i)} \quad (8)$$

せん断抵抗角(φ_{pver})は、ブロック全体の安全率(F_s)を仮定することで、求めることができる。式(9)に地震時安定計算式、式(10)に地震時φ_{pver}の逆算式を示す。

$$F_{se} = \frac{\sum_i^n (w_i \cos \theta_i - u_i l_i - k_s \cdot w_i \sin(\beta_i - \alpha)) \tan \phi_{pver}}{\sum_i^n (w_i \sin \theta_i + k_s \cdot w_i \cos(\beta_i - \alpha))} \quad (9) \quad \tan \phi_{pver} = \frac{F_s \cdot \sum_i^n (w_i \sin \theta_i + k_s \cdot w_i \cos(\beta_i - \alpha))}{\sum_i^n (w_i \cos \theta_i - u_i l_i - k_s \cdot w_i \sin(\beta_i - \alpha))} \quad (10)$$

φ_{pver} から c, φ を変換する場合、粘着力(c)を仮定して内部摩擦角(φ)を求めると式(11)が得られる。また、内部摩擦角(φ)を仮定して粘着力(c)を求めると式(12)が得られる。

$$\tan \phi = \tan \phi_{pver} + \frac{c}{\sigma'} \quad (11) \quad c = \sigma' (\tan \phi_{pver} - \tan \phi) \quad (12)$$

ここで、σ' は、式(13)で示され、各スライスのすべり面に作用する単位垂直応力で、スライスの抵抗力成分をすべり面長(l_i)で除することにより求められる。

$$\sigma' = \{w_i \cos \theta_i - u_i l_i - k_s \cdot w_i \cos(\theta_i - \alpha)\} / l_i \quad \text{----- (13)}$$

5.2.2 せん断抵抗角(φ_{pi})を用いた安定計算式(φ_{pi}法)とφ_{pi}の逆算法(平成27年度卒論)

式(14)に常時安定計算式、式(15)にφ_{pi}の逆算式を示す。

$$F_s = \frac{\sum_i^n \{w_i \cos \theta_i - u_i l_i\} \tan \phi_{pi}}{\sum_i^n (w_i \sin \theta_i)} \quad (14)$$

$$\tan \phi_{pi} = \frac{\sum_i^n \{F_{si} (w_i \sin \theta_i)\}}{\sum_i^n (w_i \cos \theta_i - u_i l_i)} \quad (15)$$

各スライスの安全率(F_{Si})を仮定することで、各スライスのせん断抵抗角(ϕ_{pi})を求めることができる。ここで、 ϕ_{pi} 法では、各スライスの安全率(F_{Si})を設定する必要がある。この各スライスの安全率(F_{Si})は、逆計算の結果 $c-\phi$ 法で求めたすべり面強度(c, ϕ)から求めた安全率(F_{Si})を用いることにより、各スライスのせん断抵抗角(ϕ_{pi})を求めることができる。式(16)に地震時安定計算式、式(17)に地震時 ϕ_{pi} の逆算式を示す。

$$F_{se} = \frac{\sum_i^n \{w_i \cos \theta_i - u_i l_i - k_s \cdot w_i \sin(\beta_i - \alpha) \tan \phi_{pi}\}}{\sum_i^n (w_i \sin \theta_i + k_s \cdot w_i \cos(\beta_i - \alpha))} \quad (16) \quad \tan \phi_{pver} = \frac{\sum_i^n \{F_{se} (w_i \sin \theta_i + k_s \cdot w_i \cos(\beta_i - \alpha))\}}{\sum_i^n (w_i \cos \theta_i - u_i l_i - k_s \cdot w_i \sin(\beta_i - \alpha))} \quad (17)$$

ϕ_{pi} から c, ϕ を変換する場合、粘着力(c)を仮定して内部摩擦角(ϕ)を求めると式(18)が得られる。また、内部摩擦角(ϕ)を仮定して粘着力(c)を求めると式(19)が得られる。

$$\tan \phi_i = \sum_i^n \left(\tan \phi_{pi} + \frac{c}{\sigma_i'} \right) \quad (18)$$

$$c_i = \sum_i^n (\tan \phi_{pi} - \tan \phi) \quad (19)$$

6. 震度法に用いる最大加速度(PGA)と地震係数 (k_s)の設定

最大加速度(PGA)の設定は、防災科学技術研究所の K-NET, KIK-net (強震観測網), 大学 (例えば東北工業大学: アレー強震観測網) などから抽出する。また、地震係数(k_s)の設定は、海洋型タイプは野田・上部の式⁴⁾, 直下型タイプは鳥居・黒田の式⁵⁾などを用いて設定することができる。



図-2 ϕ_p 法のスプレッドシート(西山研究員作成)

7. Excel(VBA)を活用した ϕ_p 法による安定計算システム

ϕ_p 法の安定計算は、EXCEL の VBA (Visual Basic for Applications) を活用して、 ϕ_{pi} 法、 ϕ_{pver} 法、 $c-\phi$ 法を一連計算ができる。スプレッドシートを、図-2 に示す。計算システムは、ユーザーフォームを活用して箇所名などの基本データ、スライス座標データを効率よく入力できる。また、計算結果も、印刷フォームにより一覧表で出力される仕様となっている。

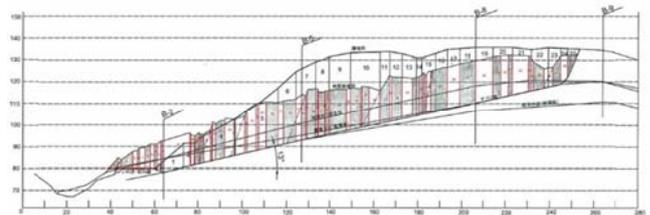


図-3 福島県いわき市上釜戸地すべり断面図 (2011.04.11, 東日本太平洋沖地震の余震で被災)

8. ϕ_p 法の整合性検証

福島県いわき市上釜戸地すべり⁶⁾を事例に $c-\phi$ 法を順計算として ϕ_p 法(ϕ_{pi} 法、 ϕ_{pver} 法)の比較計算を行った。上釜戸地すべりは2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の1ヶ月後、4月11日の福島県浜通り地震で発生した。計算断面図を図-3に示す。計算結果を表-2に示す。すべり抵抗抗力(s)は、 ϕ_{pi} 法、 ϕ_{pver} 法、 $c-\phi$ 法ともほぼ同値と見なせる。平均 ϕ_p 法で得られた地震時の極限せん断抵抗角 (ϕ_{pver}) は、27.29°が得られた。 ϕ_{pi} 法による常時安全率は、2.18であり、 ϕ_{pver} 法による常時安全率は、2.20である。また、粘着力(c)を 25.0 kN/m² として変換した内部摩擦角は、 ϕ_{pi} 法、 ϕ_{pver} 法、 $c-\phi$ 法とも 23.86°が得られ、地震前の常時安全率は ϕ_{pi} 法、 ϕ_{pver} 法、 $c-\phi$ 法とも $F_s=2.19$ が得られた。

表-2 上釜戸地すべり計算結果一覧表

計算手法	ϕ_{pi} 法	ϕ_{pver} 法	$c-\phi$ 法	(単位)
・すべり面強度係数 (ϕ_{pi}, ϕ_{pver})	ϕ_{pi}	ϕ_{pver}	c, ϕ	(°)
	25.96~76.40	27.29	-	
・算定すべり面抵抗抗力 ($\Sigma \tau$)	36216.53	36212.29	36219.05	(kN/m ²)
すべり面強度 (c, ϕ) 逆算値				
・単位垂直応力 (σ') [$\Sigma \sigma (\sigma - U - \sigma_{ev}) / \Sigma L$]	計算表参照	339.0	339.04	(kN/m ²)
・設定粘着力 (c)	25.0	25.0	25.0	(kN/m ²)
・変換内部摩擦角 (ϕ)	23.86	23.86	23.86	(°)
・地震時安全率 (F_{se})	1.00	1.00	1.00	
・常時安全率の検証 ($F_s(\phi_{pi}, \phi_{pver})$)	2.18	2.20	-	-
・常時安全率の検証 ($F_s(c, \phi)$) (変換 c, ϕ 値)	2.19	2.19	2.19	-

9. 近年の地震地すべり・滑動崩落の事例解析

表-3に近年の大規模地震で発生した地震地すべり・滑動崩落の事例計算結果を示す。各箇所の最大加速度(PGA)は 260gal~400gal, 地震係数(k_s)は 0.21~0.25 である。地震時の安全率=1.00(極限安全率)とした時、せん断抵抗角 ϕ_{pver} はおおよそ 27°~33°の範囲に分布している。また、常時安全率(F_s)は、2.00~3.00 の範囲に分布している。

表-3 近年の地震地すべり・滑動崩落の事例解析

	検討箇所		検討地震の諸元			地震時 基準安全率	地震時極限 すべり面強度				すべり抵抗力比較 (計算法の検証)			算出されたφ(内部摩擦角)			常時安全率 F_s
			対象地震名	PGA	地震係数		地震時極限 安全率	C_e	ϕ_e	ϕ_{pver}	ϕ_{pi}	$\tau_{c, \phi}$	$\tau_{\phi_{pver}}$	$\tau_{\phi_{pi}}$	c-φ法 φ	φ _{pver} 法 φ	
	(gal)	(ksh)		F_{se}	(kN/m ²)	(°)											(°)
ケース 1	福島県いわき市	上釜戸地すべり	2011東日本大震災	382	0.243	1.000	25.0	23.9	27.3	26.0~76.4	3.62E+04	3.62E+04	3.62E+04	23.9°	23.9°	23.9°	2.19
ケース 2	福島県白河市	業ノ木平地すべり	2011東日本大震災	380.9	0.243	1.000	8.0	24.4	27.6	27.0~76.4	6.99E+03	6.99E+03	6.99E+03	24.4°	24.4°	24.4°	2.09
ケース 3	福島県あさひ台団地	あさひ台団地滑動崩落	2011東日本大震災	329.1	0.232	1.000	9.7	26.7	31.8	30.1~66.9	5.58E+03	5.58E+03	5.58E+03	26.7°	26.7°	26.7°	2.23
ケース 4	宮城県仙台市	N団地滑動崩落	2011東日本大震災	400	0.247	1.000	8.0	27.1	33.6	30.6~71.6	4.70E+03	4.70E+03	4.70E+03	27.1°	27.1°	27.1°	3.07
ケース 5	宮城県仙台市	緑ヶ丘3丁目滑動崩落	1978宮城県沖地震	260	0.214	1.000	20.0	23.3	27.4	26.4~67.8	3.60E+04	3.60E+04	3.60E+04	23.3°	23.3°	23.3°	2.33
ケース 6	宮城県栗駒	荒砥沢地すべり	2008岩手・宮城内陸地震	330	0.232	1.000	50.0	24.7	27.2	25.7~43.0	5.35E+05	5.35E+05	5.34E+05	24.7°	24.7°	24.7°	3.08

10. まとめと今後の課題

本研究は、 c, ϕ を用いない安定計算法として平成 25 年度卒論(ϕ_{pver} 法) に引き続き、スライスのせん断抵抗角を用いる ϕ_{pi} 法について検討した。 ϕ_p 法の特徴と得られた知見は、次のようにまとめられる。

- (1) ϕ_p 法はクーロンの破壊規準に準拠した c, ϕ を用いない計算法として位置付けられる。
- (2) ϕ_p 法の適用範囲は、逆算法に準拠した安定計算法に適用できる。
- (3) 逆算されたせん断抵抗角(ϕ_p)から、すべり面強度(c, ϕ)を変換することができる。
- (4) せん断抵抗角(ϕ_{pver})法の逆算は、すべりブロック全体の安全率(F_s)を与えることにより算定できる。
- (5) せん断抵抗角(ϕ_{pi})法の逆算は、スライスの安全率(F_{si})を与えることで、スライスのせん断抵抗角(ϕ_{pi})を求めることができる。また、スライスのせん断抵抗角(ϕ_{pi})を用いて、スライスのすべり面強度(c, ϕ)に変換することができる。
- (6) $c-\phi$ 法を順計算として ϕ_p 法(ϕ_{pi} 法, ϕ_{pver} 法)の検証をした結果、計算式の整合性が確認できた。
- (7) ϕ_{pi} 法の課題は、 ϕ_{pi} を逆算する過程においてスライスごとの安全率(F_{si})が必要になることである。スライスごとの安全率は、逆解析の結果 $c-\phi$ 法で求めたすべり面強度(c, ϕ)による安全率を与えることにより、逆算できる。ただし、実用的ではない。
- (8) ϕ_{pver} 法は、 ϕ_{pi} 法のように c, ϕ に依存するという課題はなく、実用的である。
- (9) 近年の地震地すべり・滑動崩落の事例計算から、せん断抵抗角(ϕ_{pver})が $27^\circ \sim 33^\circ$ の範囲に分布、常時安全率 (F_s)が 2.00~3.00 程度の範囲に分布しているなど、広域的な耐震安定性を評価する上での重要な情報が得られた。

今後、多くの事例解析を行うことにより、最大加速度(α_s)とせん断抵抗角(ϕ_p)・ c, ϕ との関係、最大加速度(α_s)と常時安全率(F_s)、せん断抵抗角(ϕ_p)と常時安全率(F_s)の関係などがより明確となり、広域的に分布する地すべり・滑動崩落の耐震安定性評価を行うための基礎資料が得られるものとする。次年度は、2004 年新潟中越地震で発生した地震地すべりを中心に事例解析を進める予定である。

謝辞

本研究は、本学 工学部 都市マネジメント学科 西山卓客員研究員のご指導をいただきました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 森脇寛(2011)：地すべり地形斜面の地震時危険度評価と崩壊予測システムの構築，日本地すべり学会誌，Vol.48, No.6, pp.305-317.
- 2) 西山卓,今西肇,千葉則行(2013)：宅地造成された盛土地盤の地震時安定性に関する簡易耐震性評価(ϕ_p)法の提案,土木学会東北支部技術発表会,講演概要集.
- 3) 山田雅樹(2014)：斜面の安定解析に用いるすべり面強度設定手法(ϕ_p 法)の適用性について，東北工業大学工学部都市マネジメント学科卒業論文.
- 4) 野田節男,他 2 名(1975)：重力式擁壁の震度と地盤加速度，港湾技術研究所報告，vol.14, No.4, pp.67-111.
- 5) 鳥居剛,他 2 名(2001)：震度法における盛土の限界水平震度と地盤加速度の関係について，第 26 回地震工学研究発表会.
- 6) 秦吉弥,他 2 名(2013)：余震観測記録に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震および 2011 年福島県浜通りの地震における上釜戸地すべり地での地震動の評価，日本地すべり学会誌，Vol.50, No.5, pp.209-218.