

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

東北工業大学大学院工学研究科 正会員 ・ 西山 卓
 東北工業大学工学部都市マネジメント学科 フェロー会員 今西 肇
 東北工業大学工学部都市マネジメント学科 正会員 千葉則行

1. はじめに

2011年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震（東日本大震災と呼ぶ）において、仙台市の宅造盛土地盤を中心とした“滑動崩落”や“表層崩壊”，宅盤内の“開口亀裂”など，住宅，市道などに甚大な被害を与えた。

提案する盛土地盤も含めた斜面の簡易耐震性評価法は，静的な力の釣り合いと土質力学的手法を組み合わせ，簡易に耐震性を評価しようとするもので，詳細検討を行う前の予察的検討に資することを狙いとした。

本手法は，これまでの解析手法とは異なった計算モデルで，解析手法の特徴から“簡易耐震性評価（ ϕ_p ）法”と呼ぶこととした．本論では，本解析法の考え方を詳細に示す。

2. ϕ_p 法による斜面の安定計算法

図-1に垂直圧力（ p ）とせん断強さ（ τ ）との関係を示す．なお，垂直応力（ σ ）と識別するために，垂直圧力（ p ）と呼ぶこととする．ここで，原点 O と O_2 を直線で結ぶ点 O_2 の座標は，垂直圧力（ p_2 ）の時のせん断強さ（ τ_{p2} ）に対応している．横軸と線 OO_2 のなす角を ϕ_{p2} で表す． ϕ_{p2} を“せん断抵抗角”と呼ぶこととする。

点 O_2 の時のせん断強さ（ τ_{p2} ）は，式(1)で示される。

$$\tau_{p2} = p_2 \cdot \tan \phi_{p2} \quad (1)$$

ここで，サフィックス p は，荷重に関係していることを示す．垂直圧力（ p ）とせん断強さ（ τ ）との一般式は，式(2)，(3)で示される。

$$\tau_{pi} = p_i \cdot \tan \phi_{pi} \quad (2)$$

$$\tan \phi_{pi} = \frac{\tau_{pi}}{p_i} \quad (3)$$

せん断抵抗角（ ϕ_p ）は，垂直圧力の増加とともに減少する．したがって， ϕ_p の値は，ある一定の圧力（ p ）に関係づけて表すことが全ての場合において必要となる。

$\tau_p = f(p)$ が直線関係にあるとき，すなわち，

$$\tau_p = p \cdot \tan \phi + c$$

の関係にあるとき，両辺を p で除することにより， τ_p / p は $\tan \phi_p$ であることから， ϕ_p は式(4)となる。

$$\tan \phi_p = \tan \phi + \frac{c}{p} \quad (4)$$

平衡を保つためのすべり面強度（ c ， ϕ ）の組み合わせは無数にあるが，せん断抵抗角（ ϕ_p ）で表せばひとつの値で表すことができる．安定計算式は，式(5)が得られる。

$$Fs = \frac{(P \cdot \cos \beta) \cdot \tan \phi_p}{P \cdot \sin \beta} \quad (5)$$

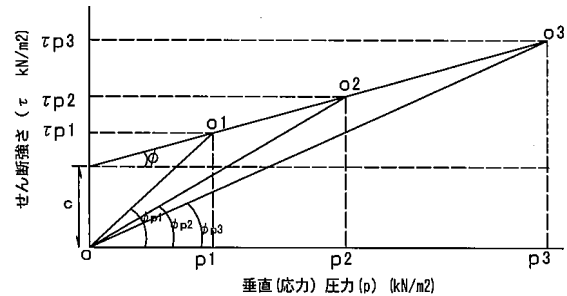


図-1 垂直圧力（ p ）とせん断強さ（ τ ）との関係

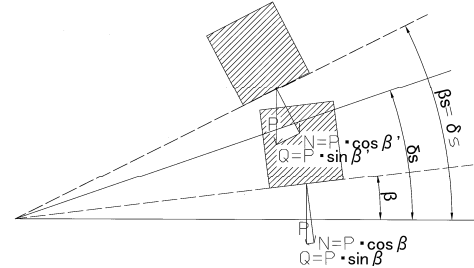


図-2 地震力が作用した場合の斜面挙動イメージ

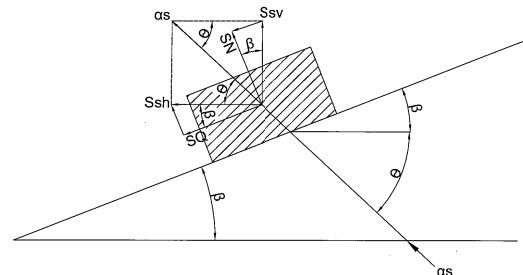


図-3 傾斜地盤上のブロックに作用する地震慣性力イメージ

また，式(5)からせん断抵抗角（ ϕ_p ）は，安全率を仮定することにより逆算することができる．算定式は，式(6)となる。

$$\phi_p = \frac{Fs \cdot (P \cdot \sin \beta)}{P \cdot \cos \beta} \quad (6)$$

以上が， ϕ_p 法による安定計算の一般式である．なお，一般に斜面の安定計算はスライス分割して取り扱うが，ここでは，スライス分割のサヒックスは省略して表記した。

3. ϕ_p 法による地震力を考慮した安定計算式

(1) ϕ_p 法による地震時の安定計算式

図-2に地震力が作用した場合の斜面挙動のイメージを示す．また，図-3に， β で傾く傾斜地盤上ブロックの地震慣性力のイメージを示す．ブロックには，水平から角度 θ をなす方向から地震加速度（ a_s ）が作用すると，ブロックには同時に加速度が作用する．なお，本論では，地震加速度（ a_s ）を地震強度と呼ぶこととする。

・ 水平方向の加速度

$$a_{sh} = a_s \cdot \cos \theta \quad (7)$$

・ 鉛直方向の加速度

$$\alpha_{sv} = \alpha_s \cdot \sin \theta \quad (8)$$

・地震慣性力(S_s)

$$S_s = \pm m \cdot \alpha_s \quad (9)$$

ここに、 m は、ブロックの質量である。質量(m) は、次式で与えられる。

$$P = m \cdot g, \quad m = P/g$$

この式を、式(9)に代入して、式(10)を得る。

$$S_s = \pm \frac{P}{g} \cdot \alpha_s \quad (10)$$

ここから、地震慣性力の水平成分、鉛直成分は、式(11)、(12)となる。

・水平成分

$$S_{sh} = \pm \frac{\alpha_s}{g} \cdot P \cdot \cos \theta \quad (11)$$

・鉛直成分

$$S_{sv} = \pm \frac{\alpha_s}{g} \cdot P \cdot \sin \theta \quad (12)$$

ここで、 α_s / g は式(13)で示され、本論では地震係数(ks)と呼ぶこととする。

$$ks = \frac{\alpha_s}{g} \quad (13)$$

地震係数(ks)は、式(14)の関係にある。すなわち、地震加速度により、地盤が傾くことを示している。

$$\delta s = \tan^{-1}(ks) \quad (14)$$

ここで、 δs を地震角と呼ぶこととする。

地震時において斜面が平衡を保つための条件は、 $\delta s + \beta = \beta_s$ の条件の時である。

地震時においては、悪影響を与える慣性力が問題となる。問題を考えるために、 S_{sh} は(+)の符号を付けた慣性力(せん断力の増加)、 S_{sv} は(-)の符号を付けた慣性力(ブロック重量を軽減して、ブロックと β 面の摩擦力を低減する力)とする。

・傾斜する面に平行な地震慣性力(S_Q)

$$\begin{aligned} S_Q &= +ks \cdot P \cos \theta \cdot \cos \beta + ks \cdot P \sin \theta \cdot \sin \beta \\ &= ks \cdot p(\cos \theta \cdot \cos \beta + \sin \theta \cdot \sin \beta) \\ S_Q &= ks \cdot P \cos(\beta - \theta) \end{aligned} \quad (15)$$

・傾斜する面に垂直な地震慣性力(S_N)

$$\begin{aligned} S_N &= -ks \cdot P \sin \theta \cdot \cos \beta + ks \cdot P \cos \theta \cdot \sin \beta \\ &= -ks \cdot P(\sin \theta \cdot \cos \beta - \cos \theta \cdot \sin \beta) \\ S_N &= -ks \cdot P \sin(\beta - \theta) \end{aligned} \quad (16)$$

・地震慣性力の水平分力(Q_s)

$$\begin{aligned} Q_s &= Q + S_Q \\ Q_s &= P \sin \beta + ks \cdot P \cos(\beta - \theta) \end{aligned} \quad (17)$$

・地震慣性力の鉛直分力(N_s)

$$\begin{aligned} N_s &= N + S_N \\ N_s &= P \cos \beta - ks \cdot P \sin(\beta - \theta) \end{aligned} \quad (18)$$

・地震時のせん断抵抗力(R_s)

$$R_s = N_s \cdot \tan \varphi_p = N_s \cdot \tan \varphi + \frac{c}{\sigma} \quad (19)$$

地震時の平衡条件は、 $R_s = Q_s$ であることから、地震時安全率(Fse)の一般式は式(20)となる。

$$Fse = \frac{Rs}{Qs}$$

$$Fse = \frac{\{P \cos \beta - ks \cdot P \sin(\beta - \theta)\} \tan \varphi + c \cdot A}{P \sin \beta + ks \cdot P \cos(\beta - \theta)} \quad (20)$$

また、せん断抵抗角(φ_p)で表せば、式(21)となる。

$$Fse = \frac{\{P \cos \beta - ks \cdot P \sin(\beta - \theta)\} \tan \varphi_p}{P \sin \beta + ks \cdot P \cos(\beta - \theta)} \quad (21)$$

また、一般的に地震波入射角(θ)を一義的に設定することは困難であることから、 $\theta = 0^\circ$ (水平地震加速度)とすれば式(21)は、式(22)となる。

$$Fse = \frac{\{P \cos \beta - ks \cdot P \sin \beta\} \tan \varphi_p}{P \sin \beta + ks \cdot P \cos \beta} \quad (22)$$

さらに、式(22)から、安全率を仮定することにより地震時のせん断抵抗角(φ_p)を算定(逆算)することができる。算定式は、式(23)となる。

$$\tan \varphi_p = \frac{Fse \cdot (P \cdot \sin \beta + ks \cdot P \cdot \cos \beta)}{P \cdot \cos \beta - ks \cdot P \cdot \sin \beta} \quad (23)$$

以上が φ_p 法による地震時の安定性を評価するための安定計算式と地震時のせん断抵抗角(φ_p)の算定法である。

(2) 既往地震強度(α_s)を用いたせん断抵抗角(φ_p)の算定の考え方

地震時において斜面が平衡を保つための条件は、地震角(δs) + 弱面勾配(β)と臨界角(β_s)が等しい時である。 $\delta s + \beta$ の時には、 φ_p なるせん断強さを発揮することになる。従って、等式(11)と書ける。すなわち、斜面が平衡を保つためには、ブロックの β_s と φ_p 、そして地震角(δs) + β が等しい時である。

$$\beta_s = \varphi_p, \quad \delta s + \beta = \beta_s \quad (24)$$

たとえば、ある斜面が、過去において震度5強の地震を経験し、その時点で変状が認められなかったとすると、地震時の地盤強度(φ_p 「 c , φ 」)は、式(24)から、 $\delta s_5 + \beta \leq \varphi_{p5}$ であったと推察することができる。すなわち、地震強度の付加に伴って、土は限りなくピーク強度まで強度を発現すると考えることができる。

以上の考えをもとに、既往最大地震強度から式(23)を用いて地震時のせん断抵抗角(φ_p)の算定、そして、式(22)を用いて地震時安全率を算定することができる。

5. まとめ

φ_p 法に基づく一般斜面および地震時の安定計算式の展開を図った。地震時の弱面(すべり面)強度は、既往最大地震強度を用いることにより、地震強度に対応したせん断抵抗角(φ_p)として求めることができ、地震時の安定性を簡易に評価できるものとする。

現在、 φ_p 法に基づく東日本大震災の事例解析を進め、 φ_p 法の適応性(地震前の安定性、地震後の安定性、そして、補強対策を構築する上で重要となる地震後の安定性)の検証を進めている。順次報告する予定である。

参考文献

- 1) 太田英将, 釜井俊孝: 2011年東北地方太平洋沖地震に伴う造成盛土の地すべり(宅地盛土の被害), 土木学会, 2011.