

動的塑性問題の解法に関する研究

鳥取大学(正) 榎 明潔

西日本旅客鉄道株式会社(正) ○ 山中 雅司

鳥取大学(学) 粕谷 広史・文村 昌史

1. はじめに

これまで塑性化している物体の加速度分布を求めることは不可能であった。ところが、鳥取県西部地震の現地調査や山腹斜面表層土の運動の研究から、斜面表層土が基岩上をすべっている場合、すべり面に垂直な加速度成分がすべり面の両側で連続である¹⁾(以後「加速度の連続条件」と呼ぶ)ことがわかり、塑性化している物体の加速度分布を求めることが可能となった。そこで本研究では、動的塑性問題の新たな解法を明示し、それを用いて自然斜面表層土、楔土塊と擁壁、すべり面に囲まれた各ブロック土塊と基礎について、地震時の運動を求める。

2. 塑性問題の難易度

自然斜面の山腹上半部では表層土厚は数十 cm～数 m 程度と、斜面長に対して十分薄い¹⁾ため、側面力を無視できる無限斜面を考える。また基岩の弾性波速度、数 km/s に対し、表層土は 100m/s 程度である。これらから、表層土は地震波に対して剛体のように挙動すると考えられる。しかも斜面表層土内には通常、雨期を除いて地下水面は存在しないため、間隙水圧を考慮する必要はなく、表層土は地震時にも c-φ 材として扱う。土圧問題では擁壁は根入れのない矩形断面擁壁、支持力問題ではサーチャージのない小さい基礎を考え、これらも斜面問題と同様に対象地盤を剛塑性体、c-φ 材とする。またそれぞれの塑性問題について比較すると表 1 となり、無限斜面、土圧、支持力の順に問題が難しくなる。

表 1. 塑性問題の難易度

	無限斜面	土圧	支持力
すべり面形状	平面	平面	曲面
面積	一定	変化	変化
対象物	1	2	n+1
構造物応答	×	○	○
概略図			

3. 初期条件と解析手法

対象地盤を剛塑性体、c-φ 材とし、対象物について存在する運動形態(モード)を考える。これらについて ダランベールの原理を用いて地震加速度を慣性力に置き換え、力のつりあい式をたてる。これと 加速度の連続条件式から、動的塑性問題を静定問題として解き、地震時に塑性化した対象物の運動を求める。ここで土圧・支持力問題においては、着目している物体に働く外力が最小になるように塑性化が起こるとして、すべり面を決定し、また対象物の基岩(基盤)に対する相対運動の静止条件は、相対速度がゼロになるときとする。

3.1 斜面問題

表層土の運動モードは、基岩と一体、基岩上をすべり上がる・すべり下がる、分離の 4 つで、一例としてすべり下がるモードについて載せる。図 1 のように力や加速度を定めると、塑性化している斜面表層土の加速度が式(1)ように求まる。

$$\alpha_{\beta}' = (\alpha_v + g) \cos \beta \tan \phi - (\alpha_h \tan \phi + g) \sin \beta + c / \rho H \cos \beta \quad (1)$$

ここで α_v , α_h , α_n , α_{β}' は基岩の加速度、 α_v' , α_h' , α_n' , α_{β}' は表層土の加速度で、 ρ : 密度、 H : 表層厚、 β : 傾斜角、 ϕ : 内部摩擦角、 c : 粘着力である。

3.2 土圧問題

運動モードは 1) 擁壁と楔土塊が共に基盤と一体、2) 擁壁もしくは楔土塊が基盤から分離、3) 擁壁のみが主動方向に変位、4) 楔土塊のみが受動方向に変位、5) 擁壁と楔土塊が一体で主動方向に変位、6) 擁壁と楔土塊が一体で受動方向に変位の 6 つである。2)3)4) は土圧としては考える必要は無いが、破壊形態の分類において考える必要がある。なお、これらのケースは斜面安定解析の立場で考えればよい。また本研究では 5)6) の、擁壁が基盤に対して相対変位するときに、土圧が発生すると考える。一例として主動土圧 P_{ae} を載せる。図 2 のように力と加速度を定めると、 P_{ae} は式(2)となり、これを鳥大式と呼ぶ。同様にして受動土圧も求めることができる。

$$P_{ae} = \frac{M_w [(\alpha_v + g) \{ \tan \delta \tan \theta \tan (\theta + \phi) + \tan \delta + \tan \theta \} - \alpha_h] + a_d A_w \{ \tan \theta \tan (\theta + \phi) + 1 \}}{(M + M_w) \tan \theta \tan (\theta + \phi) + M} \quad (2)$$

ここで M : 土塊の質量、 N, T : すべり面 ab に働く垂直抗力とせん断抵抗力、 ϕ : 土の内部摩擦角、 α_v' , α_h' : 土塊の加速度、 M_w : 擁壁の質量、 N_w, T_w : 擁壁底面の垂直抗力とせん断抵抗力、 δ : 擁壁底面の壁摩擦角、 α_v'' , α_h'' : 擁壁の加速度。ただし擁壁側面は滑らかであるとする。

従来の耐震設計では、物部・岡部式が用いられている。水平地震加速度を考慮したときの鳥大式と物部・岡部式の主動土圧の比較を図 3 に載せる。物部・岡部式では、地震加速度が大きくなるにつれ、主動土圧が増加する。物部・岡部式では地震時の土圧問題を、基盤と楔土塊に同一の加速度を与えて解いていることや、擁壁の運動を考慮に入っていないことから、妥当性に欠けると考えられる。なお擁壁の高さ H : 5 m、擁壁の質量 M_w : 50 t/m、擁壁底面の壁摩擦角 δ : 27°、擁壁底面の付着力 a_d : 0、土の密度 ρ_t : 1.8 t/m³、内部摩擦角 ϕ : 40° で解析を行った。

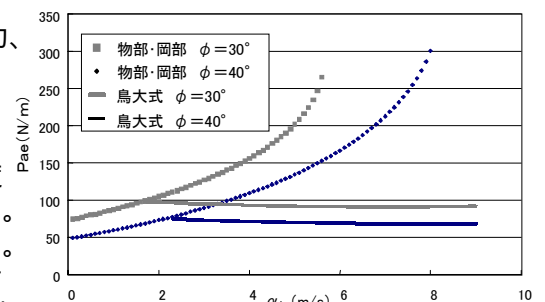


図 3. 鳥大式と物部・岡部式の主動土圧の比較

キーワード

斜面、土圧、支持力、動的塑性問題、地震強震加速度

連絡先

〒680-8550 鳥取市湖山町南 4 丁目 101 TEL(0857)31-5291 (土質工学研究室)

3.3 支持力問題

基礎の運動モードは基礎と一体、基礎に沿って滑動、基礎に対して沈み込む、基礎から分離の4つである。解析にはすべり線法の近似解を得ることのできる、一般化された極限平衡法(GLEM)¹⁾の、ブロック全体での力のつりあいを考える「つりあい法」を用いた。図4に基礎とすべり面に囲まれる任意のブロックのモデル図を示す。ただし今回、滑動は起こらず、基礎と基礎直下の土塊ブロックは一体で運動すると仮定する。また基礎幅:3m、内部摩擦角 30° 、粘着力 1 tf/m^2 、単位体積重量 1.8 tf/m^3 として解析を行った。

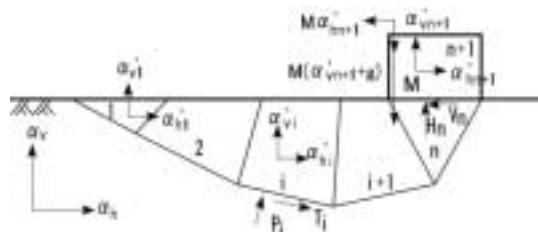


図4. 基礎とすべり面に囲まれる任意のブロック

4. 実際の地震加速度を用いた解析結果

鳥取県西部地震の震源地周辺の地震加速度²⁾を用いて解析を行ったところ、以下に示す結果を得た。図5,7,10は鉛直方向と水平方向の加速度分布 $\alpha_v - \alpha_h$ 上に、それぞれ斜面表層土、擁壁、基礎の相対運動領域を図示したものである。図5を見ると基岩と表層土は、一体とすべり下りの運動が発生していることがわかる。図7,10を見ると理論通り安全率が大きくなるほど、擁壁と基礎の相対運動が起こりにくことがわかる。地震時の主動土圧は図9のように求めることができる。擁壁が相対変位をしていない時にも P_{ae} が計算できてしまうが、あくまで解析上の値であり、主動土圧とは扱わない。また地震時の受動土圧領域は $\alpha_v - \alpha_h$ 上に図示できないほど、発生しにくい。

図6,8,12は斜面表層土のすべり下りによる相対変位量、安全率3の擁壁の相対変位量、安全率3の基礎の相対変位量を表している。図11では基礎と基礎の水平方向加速度が一致しているときが一体運動で、異なるときに沈み込みが発生している。また加速度の正負方向の違いが、図12中の変位方向の違いに対応している。

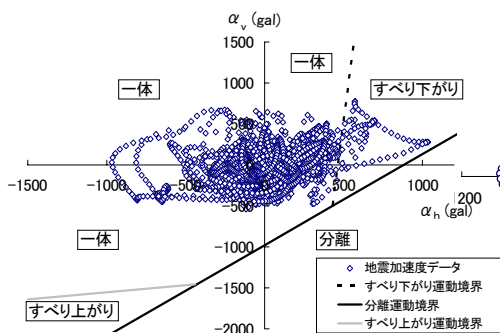


図5. 日南町役場裏山の斜面表層土の運動

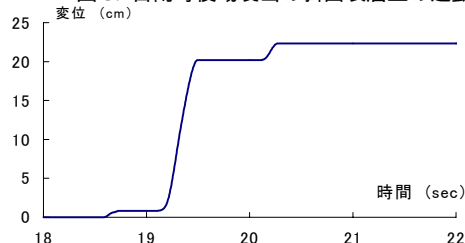


図6. 日南町役場裏山の斜面表層土の相対変位量

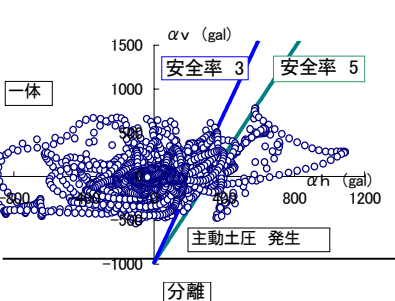


図7. 安全率の違いによる擁壁の運動

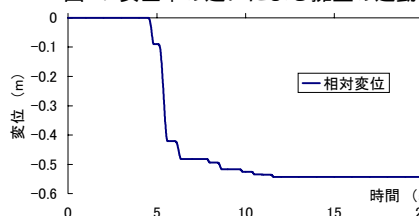


図8. 安全率3の擁壁の相対変位量

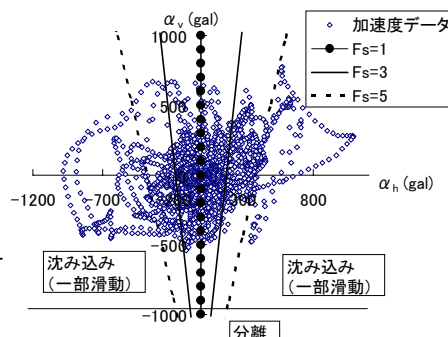


図10. 安全率の違いによる基礎の運動

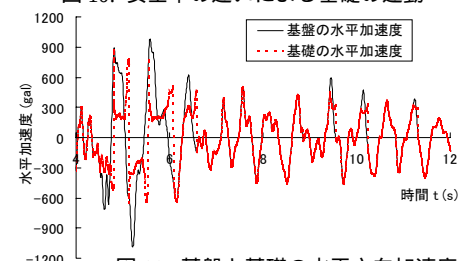


図11. 基礎と基礎の水平方向加速度

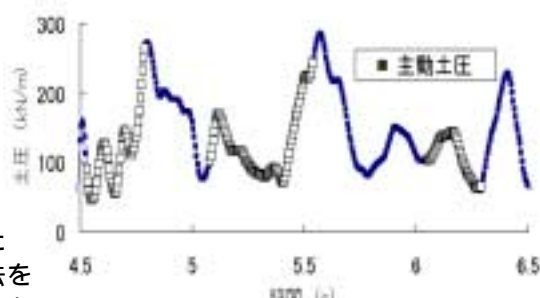


図9. 安全率3の擁壁の主動土圧

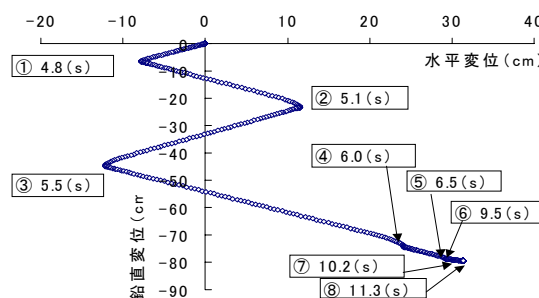


図12. 基礎に対する 安全率3の基礎の相対変位量

5. 結論

本研究で明示した動的塑性問題の解法を用い、これまで明らかにされなかった、地震時の「自然斜面表層土の運動」や、「擁壁の運動と、それを考慮に入れた主動・受動土圧」、「基礎の運動」を求めることができた。大規模地震を対象にした耐震設計では、従来のように安全率を満たすように設計を行うよりも、対象物の相対変位量を、許容範囲内に押さえようとする設計を行うことが合理的であると思われる。よって本研究の成果は耐震設計に大いに役立つものとする。実現により近い問題として、有限斜面問題、擁壁や基礎の根入れやサーチャージの効果、滑動や転倒モードを考慮に入れた研究などが今後の課題である。

参考文献

- 1) 榎 明潔: 地震時の斜面災害の特徴 2000 年 10 月鳥取県西部地震による災害に関する調査研究 pp.155-164 2001.3
- 2) 榎 明潔: 降雨時の斜面崩壊 - 対策の設計法 - 1998. 榎 明潔: 各種スライス法の妥当性に関する議論の終焉のために 1994. 基盤強震観測網 (kik-net) 防災科学技術研究所