地震時の基礎の運動

鳥取大学工学部　（正）　榎　明潔
鳥取大学大学院　（学）○吉村　崇
鳥取大学大学院　（学）　Elhandania　Youssef

1. はじめに　現在、地震時の地盤被害の原因については正確なメカニズムが解明されていない。地震時の基礎の構造物応答を求められる方法が提案できれば、基礎の運動を解明する手がかりとなる。

榎らが鳥取県西部地震による斜面崩壊機構についての研究で、基岩深部から伝播した地震動がすべり面を越える際に、「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」という「加速度の連続条件」に気付いた。これにより、塑性化した領域の加速度分布を求めることができる。この条件を、静的塑性理論の *Kötter* 式に導入する事により、地震時を対象とした動的塑性理論の確立が可能である。本研究では、地震動を受け塑性化した領域の加速度分布を求め、この加速度を慣性力として *Kötter* 式の近似数値解法である「一般化極限平衡法（GLEM）」に導入する。この方法を用いて地盤上の基礎の運動を明らかにする。

2. 基礎の運動の解法　従来、塑性化した領域内の加速度分布は分かっていなかった。そこで、塑性化した領域内の加速度分布を求めるにあたって、「加速度の連続条件」を用いて地盤内の加速度の分布を求めることができる。以下にその方法を述べる。

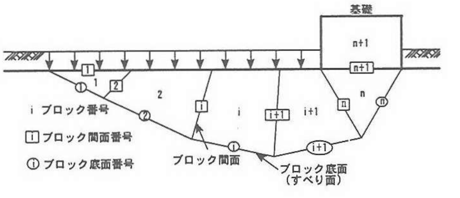


図.1 すべり面で囲まれるブロック

図. 1 に示したすべり面で囲まれる任意のブロックを想定する。この n 個のブロックが極限状態（安全率＝1）にある時、

・各ブロックの底面に垂直な加速度成分と基盤のブロックの底面に垂直な加速度成分は等しい。

・隣接する 2 ブロックの間面に垂直な加速度成分は等しい。

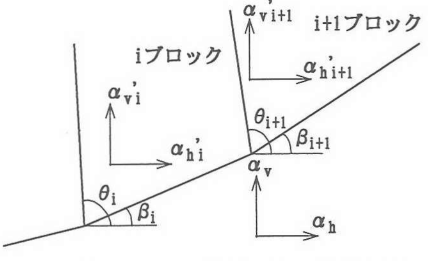


図.2 ブロックに伝達する加速度

図. 2 は、隣接する 2 ブロックの関係である。基盤の鉛直加速度 α_v・水平加速度 α_h、第 i ブロックの鉛直上向きの加速度を α_{vi}'、右向きの加速度を α_{hi}'とする。上述の条件から第 i ブロックでの底面の加速度の連続式は次式で表せる。

$$\alpha_{vi}' \cos\beta_i - \alpha_{hi}' \sin\beta_i = \alpha_v \cos\beta_i - \alpha_h \sin\beta_i$$

さらに第 i ブロックの間面での加速度の連続式は次式で表せる。

$$\alpha_{vi}' \cos\theta_{i+1} - \alpha_{hi}' \sin\theta_{i+1} = \alpha_{v+1}' \cos\theta_{i+1} - \alpha_{h+1}' \sin\theta_{i+1}$$

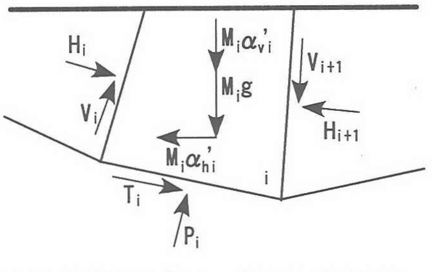


図.3 任意のブロックに加わる力

こうして求めた加速度に「ダランベールの原理」を用いて質量を乗じた慣性力とし、各ブロックに作用する力とする。第 i ブロックに加わる力は図.3 のようになり、未知数の数と式の数は表 1 に示すとおり静定となる。この場合、基礎の質量を仮定するならば基礎の応答加速度を求められ、基礎の加速度を仮定するならば地震時の支持力が求められる。本研究では、前者の仮定を用いて基礎の運動を明らかにする。また、基礎の支持力とその向きは基礎の応答加速度によって変わる。そのため、基礎の水平方向の力と鉛直方向の力を合成した力が最小となるすべり面で地盤の破壊が発生すると考えている。

表.1 未知数の数と式の数

未知数	未知数の数	式	式の数
ブロック底面		ブロックのつりあい式（運動方程式）	
垂直力 P_1～P_n	n個	水平方向 1～n+1	n+1個
せん断力 T_1～T_n	n個	鉛直方向 1～n+1	n+1個
ブロック間面		破壊条件式（クーロンの式）	
垂直力 H_2～H_{n+1}	n個	ブロック底面 1～n	n個
せん断力 V_2～V_{n+1}	n個	ブロック間面 2～n+1	n個
ブロック加速度		加速度の連続条件式	
水平加速度 α_{h1}～α_{hn+1}	n+1個	ブロック底面 1～n	n個
鉛直加速度 α_{v1}～α_{vn+1}	n+1個	ブロック間面 2～n+1	n個
未知数の合計	6n+2個	式数の合計	6n+2個

3. 地震時の基礎の運動　地震動を受けて塑性化した領域内の基礎の応答加速度を定式化することができた。これは塑性化した領域内だけを表現しているので、基盤から非塑性領域を伝播してくる地震を解明することができず、一般的な構造物～地盤系の地震応答解析になり得ない。ただし、系全体の地震応答にあまり影響を与えないような、地盤に対して質量的にも寸法的にも小さな基礎を考えるなら、これら周辺の塑性応力場の解析に使える可能性があると考える。

地震時の基礎の運動には①基盤と一体となって運動するモード、②基盤には接触しているが基盤に沿って滑動するモード、③基盤に対して沈み込んでいくモード、④基盤から分離するモードが考えられる。また各モードは、①⇔②、①⇔③、①⇔④、②⇔③、②⇔④のように変化する可能性がある。(⇔はモード間の行き来を示す) 基盤の地震動を表す $\alpha_v-\alpha_h$ 空間で表示すると図. 4 となる。本研究の目的は動的な支持力破壊をした時の基礎の運動を明らかにする事であるため、基礎が沈み込んでいる時の運動について明らかにする。基盤の鉛直加速度 α_v、基礎の鉛直加速度 α_v' とする。基礎が基盤に沈み込まない条件は前述した解析方法を用い、基盤の加速度を与えた時の基礎の加速度を求める。図.5 に示すように基礎の基盤に対する加速度が $\alpha_v'-\alpha_v<0$ となる時、沈み込んでいるとする。

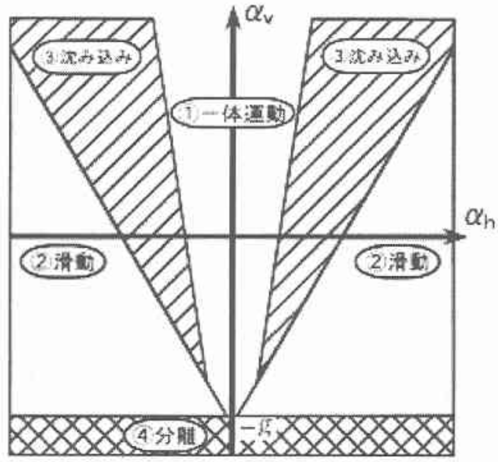


図.4 基礎の相対運動モード

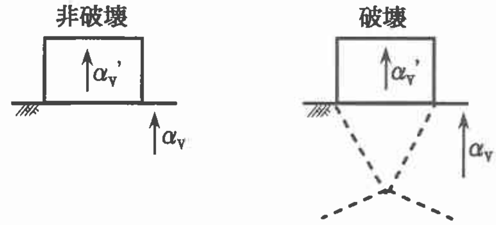
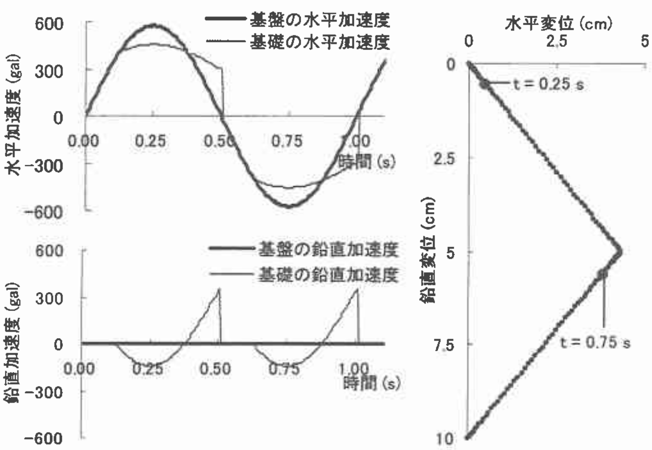


図.5 基礎が地盤に沈み込まない条件

4. 地震波を用いた基礎の相対変位量　前述した解析方法により、基礎の応答加速度を求めることができる。この加速度を2回積分する事で地盤の破壊による基礎の変位が求まる。この時、基礎と基盤の相対速度が 0 になるところで破壊が終わるとする。また、相対速度の初速は 0 である。しかし、基礎が動き始めてからの運動は、まだ解明されていない点がある。そこで、以下に示すような仮定を設けた。

1) 基礎が破壊する時の変位は基礎幅に比べて微小であると考えられるので、微小変形理論を適用している。

2) すべり面の形状は基盤の加速度と共に変化する。



基盤と基礎の加速度　　基礎の相対加速度

図.6 sin 波を用いた解析(周波数 1 Hz、振幅 575 gal)

sin 波を用いて解析を行う。地盤の強度定数は $\phi=35°$、c=10 kN/m²、$\gamma=18$ kN/m³ とし、基礎の形状は奥行き 1 m、幅が 3 m、根入れはなく安全率を 3 とする。図. 6 に解析の結果を示す。水平方向の相対変位が地表面に対して左右に振れているのは、図. 7 に示すように基礎の加速度の向きによって滑り面が変化するためである。これから地震波における基礎の応答解析はできていると考える。

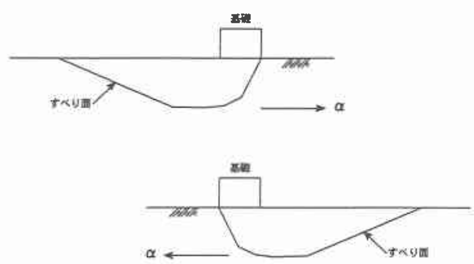


図.7　加速度の向きによるすべり面

5. 結論　加速度の連続条件式により、場所的な加速度分布を求めることができる。この加速度を慣性力とすることで基礎の応答加速度を求める。これにより地震時の基礎の運動を明らかにできる。

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　2）Emoki,M, et al : Generalized Limit Eqilibrium Method and Its Relation to Limit Analysis Method , Soils and Fundations, Vol.31, No.2, 1991