

# 南海地震を想定した斜面崩壊の解析的予測法

(株)第一コンサルタンツ  
右城 猛 USHIRO Takeshi  
(総合技術監理部門, 建設部門)



## 1. まえがき

南海トラフを震源域とする南海地震は、90年から150年の間隔で繰り返し発生している。58年前にはM8.0の昭和南海地震が発生した。今後30年から40年の間に、確率50%で安政地震(1985年、M8.4)クラスの地震が起きると予想されている。

2003年4月17日に中央防災会議が発表した予測によれば、高知県の死者数は図1となる。津波による死者が圧倒的に多く、続いて建物倒壊、斜面崩壊となっている。

1999年の台湾集集地震(M7.1)では、車籠埔(シャロンブ)断層周辺で400~990Galの加速度が発生し、草嶺(写真1)、九分二山の大規模崩壊で多数の人命と財産が奪われた。また、各地の斜面で表層崩壊が見られた(写真2)。

南海地震においても斜面崩壊が予想されており、最悪のケースには700名の死者が見込まれている。斜面の安定解析を行って崩壊危険箇所を特定し、ハード的な対策と共にハザードマップを整備することが必要である。

地震時における斜面の安定解析には、これまで震度法が用いられてきた。しかし筆者は、震度法では斜面の安定性を適切に判定できないと思っている。

本論文では、震度法が適用できない理由を具体的に示した上で、簡易動的解析法とそれを用いた斜面崩壊の予測法を提案する。

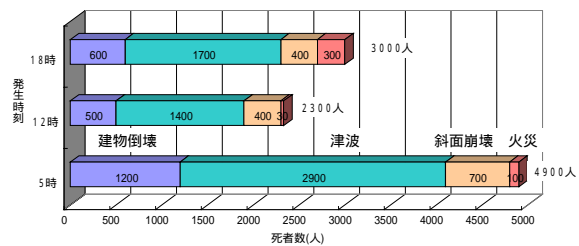


図1 南海地震による死者数の予測  
(中央防災会議発表, H15.4.17)



写真1 草嶺の大規模斜面崩壊(台湾地震)



写真2 南投県火炎山の表層崩壊(台湾地震)

## 2. 南海地震による最大加速度

「第2次高知県津波防災アセスメント調査事業報告書」(高知県, H14年)では、安政地震と同じM8.4クラスの地震が南海トラフ沿いで発生するものとして、高知県全域を500mメッ

シュに区切り,各地点の最大加速度  $a$  を予測している。

それによると 700Gal を超える地域もあるが,地すべりや斜面崩壊が懸念される山間部の最大加速度は 180~250Gal と予測されている。

### 3. 震度法による斜面安定解析

震度法とは,1916年に東大の教授をされていた佐野利器博士によって提案されたもので,物体の質量  $m$  に地震時の最大加速度  $a$  を乗じて求められ慣性力  $ma$  が,時間に関係なく作用し続けると仮定した計算法だ。

すべり面を円弧と仮定したときのフェレニウス法によるすべり安全率  $F_{se}$  は,震度法では次式で表される。

$$F_{se} = \frac{\sum \{m_i (g \cos \theta_i - \alpha \sin \theta_i) \tan \phi + cL_i\}}{\sum m_i \left( \sin \theta_i + \alpha \frac{y_i}{r} \right)} \quad (1)$$

すべり面を直線と見なせる場合には,式(2)で安全率が求めることができる。

$$F_{se} = \frac{m(g \cos \theta - a \sin \theta) \tan \phi + cL}{m(g \sin \theta + a \cos \theta)} \quad (2)$$

ここに,  $g$  は重力加速度( $=9.8\text{m/s}^2$ )である。

すべりブロックの長さを  $L$ , 高さを  $h$ , 奥行きを 1 とすれば,すべり土塊の重量  $mg$  は次式で表される。

$$mg = \gamma h L \cos \theta \quad (3)$$

地すべり解析で一般的に仮定されているように,すべり面の粘着力  $c$  は,すべり面までの深さ  $h$  に比例するとし,比例定数を  $\lambda$  とすれば,式(4)で表される。

$$c = \lambda h \quad (4)$$

式(3),式(4)を用いると,式(2)で示した地震時の安全率  $F_{se}$  は式(5)のように表すことができる。ただし,常時( $a=0$ )の安全率を  $F_{su}$  としている。

$$F_{se} = \frac{a \tan \theta}{a + g \tan \theta} \left\{ F_{su} \left( \frac{g}{a} - \tan \theta \right) + \frac{\lambda}{\gamma \cos^2 \theta} \right\} \quad (5)$$

また,すべり面を直線と仮定したときの限界加速度  $a_0$ ,つまり  $F_{su}=1.0$  となる加速度は,

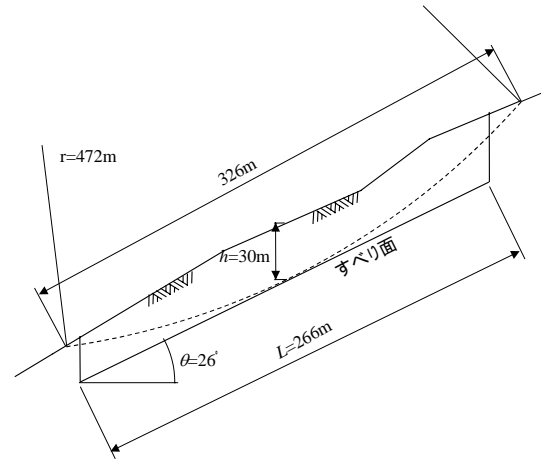


図2 すべり面の形状

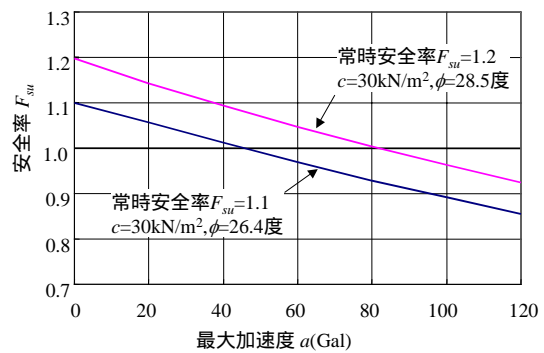


図3 最大加速度と安全率(円弧すべり)

式(6)で求めることができる。

$$a_0 = \frac{F_{su} - 1}{F_{su} \tan \theta + \cot \theta - \frac{\lambda}{\gamma \cos^2 \theta}} g \quad (6)$$

図2に示す地すべりブロックについて,地震時の安全率を算定してみる。

地すべり対策では,計画安全率を一般に 1.1~1.2 の範囲で設定しているので,常時安全率は  $F_{su}=1.1$  と  $F_{su}=1.2$  の2ケースとする。

すべり面を  $r=472\text{m}$  の円弧とみなしたときの加速度と安全率の関係は図3となる。ただし,  $\gamma=18\text{kN/m}^3$ ,  $c=h=30\text{kN/m}^2$  ( $\lambda=1$ )とし,  $\gamma$  は逆算で求めている。限界加速度は,  $F_{su}=1.1$  のとき  $a_0=45\text{Gal}$ ,  $F_{su}=1.2$  のとき  $a_0=80\text{Gal}$  となる。

一方,すべり面を直線とみなしたときの限界加速度を式(6)で求めると,  $F_{su}=1.1$  のとき  $a_0=39\text{Gal}$ ,  $F_{su}=1.2$  のとき  $a_0=76\text{Gal}$  となる。地すべりのブロック長が,すべり面の深さの約 9

倍と大きいので、限界加速度の値はすべり面を円弧とみなしたときと大きくは変わらない。

南海地震では山間部であっても180～250Galの加速度が予測されている。震度法を用いて安定解析すれば、全ての斜面で安全率が1.0を下回り、不安定と判定されることになる。

#### 4. 斜面崩壊のメカニズム

地震加速度が限界加速度を超えると、すべり安全率は1.0を下回る。安全率が1.0を下回るとブロックはすべり運動をする。しかし、地震加速度は時々刻々と変化するのでいつまでも運動を続けるわけではない。加速度が限界加速度以下になれば運動は停止する。再び、限界加速度を超える地震波が来れば再度運動を開始する。

ブロックが運動しても、速度が遅いか、運動する時間が短ければ移動量は小さい。このためブロックは不安定な状態に至らない。

2001年の芸予地震の後、松山市の国道317号の斜面調査を行った。岩盤が節理面に沿って10cmほどすべったり(写真3)、亀裂の入った岩盤から岩塊の1個が15cmほど抜け出したもの(写真4)が確認された。

地震後に斜面を詳細に調べると、至る所でこのような現象を見ることができる。地震によって斜面崩壊や落石が起きていなくても、斜面は地震加速度で動いているのである。

ブロックが移動することによって不安定になる原因としては、すべり面のせん断強度の低下、幾何学的不安定への移行の2つが考えられる。

土のせん断歪みとせん断強度の関係は、図4のようになる。密な砂質土や堅い粘土はピーク強度をもち、せん断歪みが大きくなると残留強度まで低下する。緩い砂質土や軟らかい粘性土はピーク強度を持たず、せん断歪みの増加に伴ってせん断強度も増加する。

密な砂質土や堅い粘土では、常時に図4に示

すa点にあったせん断歪みが、ブロックの移動でc点まで増加すると、せん断強度は残留強度に至るので、常時よりも安全率が低下し不安定になる。

緩い砂質土や軟らかい粘性土はピーク強度を持たないのでせん断歪みが増加しても破壊に至ることはない。



写真3 芸予地震による岩塊のすべり



写真4 芸予地震による岩塊の抜け出し

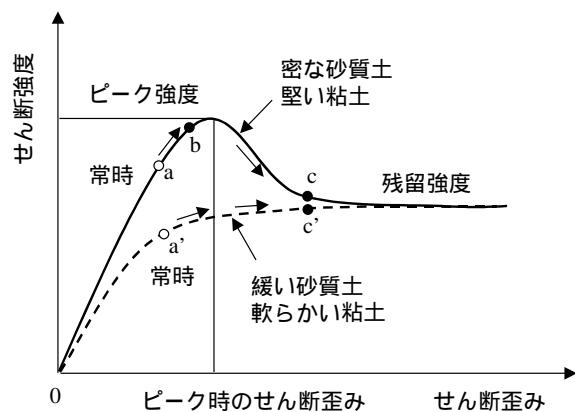


図4 せん断強度の低下

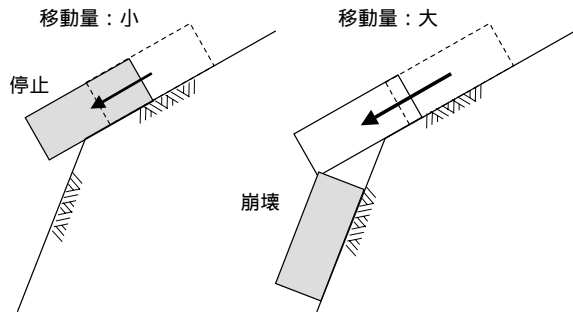


図5 幾何学的不安定

幾何学的不安定とは、ブロックの移動で、図5のような状態に至るメカニズムである。

5. 簡易動的安定解析

斜面が不安定な状態に至るかどうかを判断するには、すべりブロックの移動量を知る必要がある。以下に示す簡易動的安定解析法を適用すれば、地震時による移動量を簡単に予測することができる。

一般に、地すべりブロックの形状は、直線と円弧の複合形であるが、ブロックの長さが厚さの数倍あるため、図6に示すような帯状ブロックとみなして解析をしても誤差は少なく、安全率は安全側の小さめに与えられる。

すべり面は直線で、の傾斜角をしているものとみなすと、ブロックのすべり面方向の運動方程式は、式(7)で表される。

$$m\ddot{X} = mg \sin \theta + ma \cos \theta - (mg \cos \theta - m \sin \theta) \tan \phi - cL \tag{7}$$

ブロックに作用する加速度  $a$  が限界加速度  $a_0$  を超えると、ブロックはすべり始める。 $t$  秒後のブロックの移動量  $X$  は、式(7)を時間で2回積分すれば求められる。

地震加速度  $a$  は経時的に変化するが、計算を簡単にするため図7のような矩形パルスとみなせば、 $t$  秒間の移動量は式(8)となる。

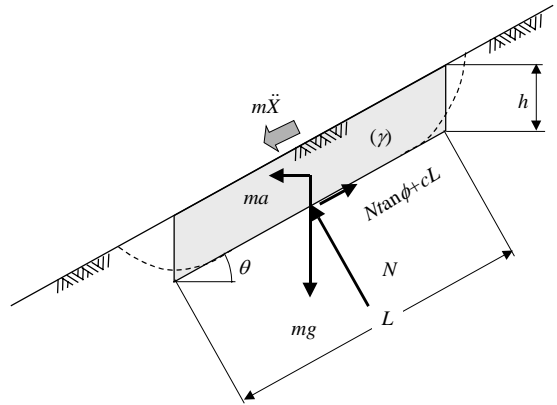


図6 地すべりブロックのモデル化

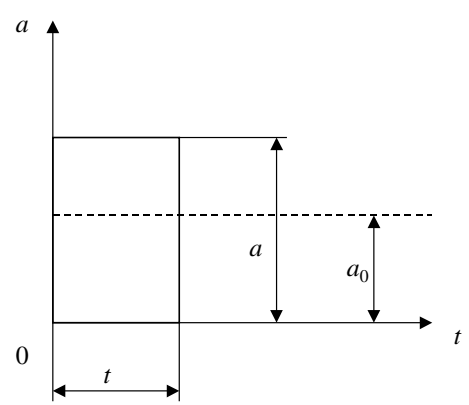


図7 加速度パルス

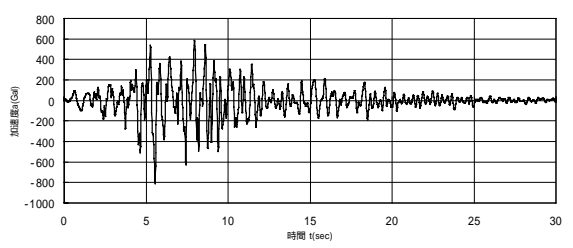


図8 兵庫県南部地震による地震波形(神戸海洋気象台)

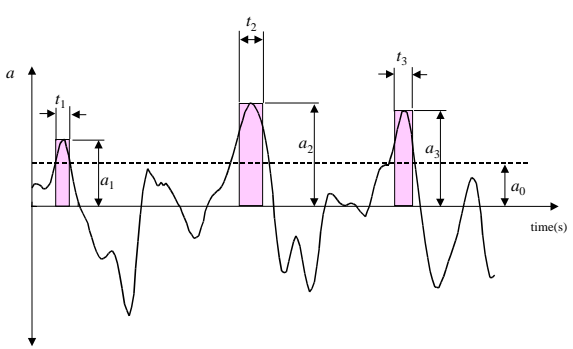


図9 複数個の矩形パルスの集合

$$X = \frac{1}{2}gt^2 \cos\theta \times \left\{ \tan\theta + \frac{a}{g} - \left(1 - \frac{a}{g} \tan\theta\right) \tan\phi - \frac{cL}{mg} \right\} \quad (8)$$

式(3), 式(4), 式(5)を用いると, 式(8)は式(9)のように表すことができる。

$$X = \frac{1}{2}gt^2 \cos\theta(1 - F_{se}) \left( \frac{a}{g} + \tan\theta \right) \quad (9)$$

実際の地震は図8のような波形を示すが, 図9のように波の高さが限界加速度  $a_0$  を超える加速度を矩形パルスに置き換え, 各パルス毎にブロックの移動量を求め, それらを足し合わせると, 地震時のブロックの移動量が求められる。

図2で示した地すべりについて, 最大加速度を  $a=250\text{Gal}$ , 最大加速度が限界加速度を超える波の個数を10個, 一個のパルスの時間を  $t=0.1$ 秒, 常時安全率を  $F_{se}=1.1$ として, ブロック移動量を計算すると,  $X=0.035\text{m}$ となる。

地すべりの場合には, 幾何学的不安定になることはない。また, 過去に大きく運動した履歴のある地すべりについては, 常時の歪みが既に残留歪み領域に入った状態で安定している判断される。このため, 地震で歪みが増加しても不安定に至るとは考えがたい。

過去の運動が少なく, 常時のせん断歪みがピーク強度の手前にある地すべりについては, 地震によるせん断歪みの増加でピーク強度を超えるかどうかを照査する必要がある。

ブロックの移動量  $X=0.035\text{m}$ による平均せん断歪みは  $=X/L=0.013\%$ となるが, すべりブロックが長いとせん断歪みは一様分布しない。一様とみなせるブロック長を  $l=10\text{m}$ としても, すべり面の平均せん断歪みは  $=X/l=0.35\%$ である。

一般に, せん断強度がピークを示すせん断歪みは2~3%と思われる。したがって, 試算のケースでは破壊に対して十分余裕があると判断される。

## 6. まとめと今後の課題

地震時には急傾斜地で斜面崩壊が多発することが経験的にも知られている。しかし, 全ての斜面が崩壊するわけではない。

ところが震度法を用いて地震時の斜面解析を行うと, ほとんどの斜面で安全率が1.0を下回り, 不安定と判定せざるを得ないことになる。

地震加速度は時々刻々と変化するにもかかわらず経時的に変化しないとした仮定した震度法は適用できない。

本論文で示した動的解析法を適用すれば, すべりブロックの移動量を簡単に計算できる。そして, 地震時における斜面崩壊の有無を合理的に判定することができる。

しかしながら動的解析を行うには, すべり面における土の動的強度, ピーク強度に対するせん断歪み, 常時の安全率が既知でなければならない。これらの値をどのように決めるか今後検討を要する。

また, 本論文では, 地震加速度として水平方向成分( $x$ 方向成分)しか考慮しなかったが, 実際の地震加速度は  $x, y, z$ 方向成分をもつ。3方向成分を取り込んだ解析が必要である。

さらに, 過去の地震被害事例に照らし合わせて簡易動的解析法の妥当性を検証する必要がある。