

# 不連続面を有する岩盤斜面の 地震時安定性に関する解析的検討

岩田 直樹<sup>1\*</sup>・高橋裕徳<sup>1</sup>・由利厚樹<sup>2</sup>・佐々木 猛<sup>3</sup>・吉中 龍之進<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中電技術コンサルタント(株) 原子力プロジェクト室 (〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30)

<sup>2</sup>中国電力(株) 電源事業本部 (〒730-8701 広島市中区小町4-33)

<sup>3</sup>サンコーコンサルタント(株) 岩盤工学研究所 (〒136-8522 東京都江東区亀戸1-8-9)

<sup>4</sup>埼玉大学名誉教授 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

\*E-mail: niwata@cecnet.co.jp

原子力発電所などの重要土木構造物に隣接する岩盤斜面は、高い耐震安全性が求められるため動的FEM解析による安定性評価が行われるが、一般的に岩盤は弾性体でモデル化され、節理などの不連続面群は考慮されていない。しかしながら、対象地震動が大きい場合、不連続面の非線形性挙動や岩盤に発生する引張応力が無視できなくなることから、不連続面を考慮した評価が必要と考えられる。そこで本検討では、均質な岩盤からなる一様勾配の斜面モデルを用いて、従来の弾性モデルと不連続面を考慮した複合降伏モデル(MYM)による地震応答解析を行い、地震時挙動を比較した。この結果、不連続面を考慮することで引張破壊の領域が弾性モデルよりも小さくなり、より合理的な評価が可能であることが分かった。

**Key Words :** dynamic response analysis, Multiple Yield Model, discontinuous rock, slope stability

## 1. はじめに

主要道路や原子力発電所などの重要土木構造物に隣接する斜面は、高い耐震安全性が求められるため、動的FEM解析による斜面安定性評価がなされている。一般的に、岩盤斜面の安定性は、岩盤を均質な弾性体と仮定した数値解析により評価されており、岩盤物性値の設定に当たっては、基礎岩盤や斜面のPS検層やダウンザホールによる地質調査結果をもとにした物性値が用いられている。しかしながら、岩盤は本来、不連続で、節理、亀裂などの不連続面を有しており、岩盤の力学的な挙動は、節理群の方向、傾斜角、間隔や系列といった不連続面の力学物性や地質状況の影響を強く受けることが知られていることから、耐震性評価においても不連続面を考慮することが重要と考えられる。

これに対して筆者らは、岩盤不連続面の变形特性の拘束応力依存による載荷-除荷を考慮した非線形モデルを提案し、これを不連続面の分布、变形特性を考慮できる有限要素法による等価連続体解析の一種である複合降伏モデル(the multiple yield model, MYM)<sup>1)</sup>に導入して、2005年宮城県沖の地震と2013年東北地方太平洋沖地震における大型構造物基礎地盤の観測波の再現計算を行った<sup>2),3)</sup>。この結果、一般的な岩盤を弾性体としたモデル

では再現できない挙動を、岩盤不連続面を適切にモデル化することで再現できることを示すとともに、解析手法とモデル化の妥当性について示した。しかしながら、岩盤斜面の地震時挙動については、観測事例も少なく、不連続面の影響について検討した事例はほとんどない。

そこで本検討では、均質な岩盤からなる一様勾配のモデル斜面を対象として、複合降伏モデル(MYM)と弾性モデルによる地震応答解析を実施し、地震応答やすべり安全率に対する不連続面の影響(傾斜角、系列など)について解析的検討を行った。

## 2. 解析理論の概要

### (1) 全体の運動方程式

式(1)は、Hamiltonの原理による運動方程式を示す。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \int_{S_2} [N]^T \{f\} ds - [M]\{\ddot{U}\} + \int_V [N]^T \begin{Bmatrix} 0 \\ -\gamma \end{Bmatrix} dV \quad (1)$$

ここに、 $[M]$ : 質量マトリックス、 $[C]$ : 減衰係数マトリックス、 $[K]$ : 剛性マトリックス、 $\{\ddot{u}\}$ : 加速度、 $\{\dot{u}\}$ : 速度、 $\{u\}$ : 変位、右辺第1項は表面外力、第2

項は地震による加速度外力，第3項は自重による物体力である．また，減衰係数マトリックス[C]は，質量マトリックス[M]と剛性マトリックス[K]の線形結合で得られる Rayleigh 減衰とし，この運動方程式を Newmark の法で各時間刻みで解く．

(2) 複合降伏モデルによる不連続面の構成則

複合降伏モデルは，図-1に示すように岩盤のひずみを母岩のひずみと複数の節理群のひずみの和で表現し，母岩と節理群の応力は等しいと仮定し，有限要素法の剛性マトリックスに弾性コンプライアンスを適用して足し合わせることで岩盤のひずみを算定する．このため，母岩および各方向に分布する不連続面の変形・強度特性を個別に設定でき，各々の変形特性の非線形性，破壊を個別に評価できる．この岩盤の構成則を運動方程式に導入し，時々刻々解くことにより地震応答を算定する．

(3) 不連続面の変形・強度特性

不連続面の変形特性のうち垂直剛性 $K_n$ は，式(2)に示すBandisらの提案式<sup>4)</sup>による拘束圧に依存した非線形性を考慮するとともに，図-2に示すような除荷時に残留変位が生じるモデルを設定した．

$$K_n = K_{ni} \left[ 1 - \frac{\sigma_n}{V_m K_{ni} + \sigma_n} \right]^{-2} \quad (2)$$

ここに， $K_{ni}$ は初期垂直剛性， $V_m$ は不連続面の最大閉合量， $\sigma_n$ は不連続面の垂直応力である．

また，不連続面のせん断剛性 $K_s$ は式(3)に示すKulhawyの提案式<sup>5)</sup>により拘束圧依存性と，Mohr-Coulombの破壊規準による非線形性を考慮するとともに，図-2に示すような除荷時に残留変位が生じるモデルを設定した．

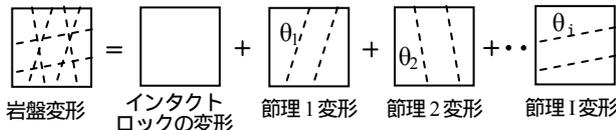


図-1 不連続面を含む岩盤の変形特性

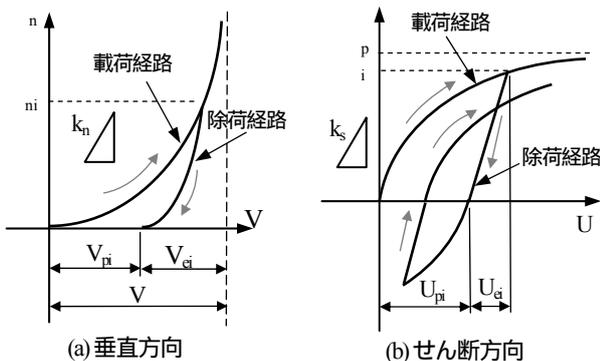


図-2 不連続面の垂直およびせん断方向の変形特性

$$K_s = K_{si} (\sigma_n)^{nj} \left( 1 - \frac{\tau_s \cdot R_f}{\tau_p} \right)^2 \quad (3)$$

ここに， $K_{si}$ は初期せん断剛性， $\sigma_n$ は不連続面の垂直応力， $\tau_p$ はMohr-Coulomb破壊規準より計算される不連続面のせん断強度， $\tau_s$ はせん断応力， $nj$ は剛性係数， $R_f$ は破壊比であり一般的に0.7~0.9の係数である．なお，係数 $nj$ ， $R_f$ は一般的に不連続面のせん断試験結果をもとに設定される．

3. 解析内容

図-3に示す均質な岩盤からなる高さ50m，勾配45°の一樣勾配斜面について，岩盤を弾性体としたケース（以降，弾性モデルと呼ぶ）と不連続面を考慮したケース（以降，MYMモデルと呼ぶ）の比較検討を行った．なお，弾性モデルの解析は，原子力発電所の基礎岩盤や周辺斜面の耐震解析で使用されている複素応答法による有限要素法解析ソフト FLUSH を用いた．

表-1に解析用物性値を示す．この物性値は，2011年東北地方太平洋沖地震において観測された大型構造物基礎地盤の地震記録を MYM で再現した際に用いた物性値

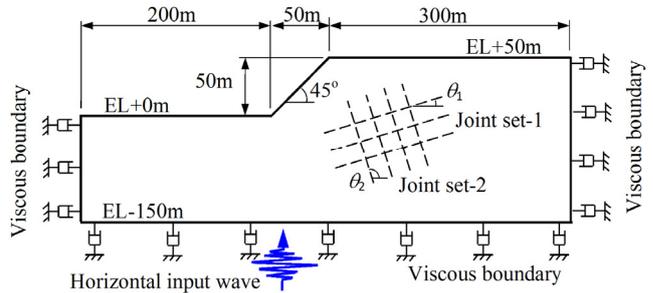


図-3 解析モデルの概念図

表-1 解析用物性値<sup>2)</sup>

|  |   |       |
|--|---|-------|
| 弾性モデル                                  | S波速度 $V_s$ (m/s)                                    | 1,300 |
|  | P波速度 $V_p$ (m/s)                                    | 3,500 |
|  | 単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )                         | 25.6  |
|  | 弾性係数 E(GPa)   | 12.5  |
| MYMモデル<br>不連続面                         | ポアソン比   | 0.42  |
|  | 単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )                         | 25.6  |
|  | 弾性係数 E(GPa)   | 38.9  |
|  | ポアソン比   | 0.32  |
|  | 初期垂直剛性 $k_{ni}$ (MN/m <sup>3</sup> )                | 1,800 |
|  | 初期せん断剛性 $k_{si}$ (MN/m <sup>3</sup> )               | 1,400 |
|  | せん断強度 $\sigma$ (MPa)                                | 0.1   |
|  | 内部摩擦角 (°)   | 30    |
|  | 間隔 S(m)   | 0.3   |
|  | 最大閉合量 $V_m$ (mm)                                    | 0.4   |
| 傾斜角 (°)                                | 15, 45, 75, -15, -45, -75<br>15+105, 45+135, 75+165 |       |
| 岩盤の $\sigma$ - $\tau$ 強度 $c_p, \tau_p$ | $C=1400 \text{ kN/m}^2, \phi=43^\circ$              |       |
| 岩盤の残留強度 $\sigma_n$                     | $6.24 \sigma_n^{0.73} \text{ (kN/m}^2\text{)}$      |       |
| 減衰定数 $h$ (%)                           | 3.0   |       |

であり、弾性解析における物性値はPS検層から、MYMに用いる物性は試掘坑調査や岩石試験等から設定したものである。本検討では、不連続面の傾斜角の違いによる応答比較を目的としていることから、不連続面の傾斜角を1系列の場合には15, 45, 75, -15, -45, -75°, 直交する2系列の場合には15+105°, 45+135°, 75+165°としてパラメータスタディを行った。ここで、不連続面の傾斜角は水平から反時計回りの角度で表す。また、減衰定数は、減衰定数3%と卓越振動数からRayleigh減衰を設定した。

入力地震動は、図-4に示すように応答スペクトルの0.1秒付近に卓越周期を持つ模擬地震波であり、最大加速度振幅を300, 500, 1000, 1500Galに調整して用いる。

解析に当たっては、等方応力状態を仮定し、自重計算により初期応力状態を設定した後に、地震動を水平方向のみに作用させる。なお、地震応答解析時の境界条件は、逸散波によるエネルギーを吸収するために、側方と底面に粘性境界を設定した。

#### 4. 解析結果

##### (1) 不連続面の傾斜角の違いによる加速度応答の比較

###### a) 1系列の不連続面が分布する場合

1系列の不連続面が分布するMYMモデルの固有値解析から求まる斜面部の卓越周期は、弾性モデルが0.15秒であるのに対し、MYMモデルは0.20~0.23秒であり、弾性モデルよりも長周期となっている。これは、弾性モデルの物性値が、実際の地震動の周波数帯（数Hz）と大きく異なる数100Hzの波形を用いたPS検層から設定していることが原因であるとも考えられる。

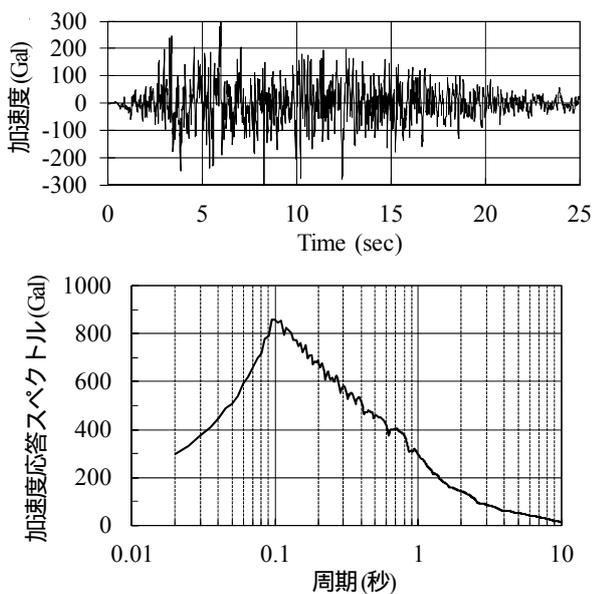


図-4 最大加速度 300Gal の入力地震動の加速度波形と応答スペクトル

図-5 は、最大振幅 300Gal の地震動を入力したときの法肩の加速度応答の比較を示す。最大水平加速度は、弾性解析で 287Gal に対して、MYM は 400Gal 以上と非常に大きな応答を示す。また、傾斜角の違いによって応答が大きく異なり、差し目に比べて流れ目のケースが大きな応答となる傾向が見られる。また、傾斜角については、傾斜角が大きいものほど大きな応答を示す傾向が見られる。鉛直加速度応答は、弾性解析では、入力地震動が水平方向のみであることから、地形の影響による 35Gal の応答しか発生していないのに対し、MYM は 100Gal 以上の大きな応答を示す。また、水平応答と同様に、傾斜角の違いによって応答が大きく異なり、差し目に比べて流れ目のケースが大きな応答となる傾向が見られる。傾斜角については、45° の場合が大きな応答を示しており、低角度もしくは高角度の応答は小さくなっている。

図-6 は、法肩の加速度応答スペクトルの比較を示す。弾性モデルの水平応答は、周期 0.5 秒以下の全周期帯で MYM よりも小さく、周期 0.1~0.3 秒付近では MYM の 50% 以下の応答となっている。MYM の水平応答スペクトルの形状は、概ね固有周期の 0.2 秒付近にピークを持つ分布形状となるが、不連続面の剛性が拘束圧に応じて時々刻々変化するため非常に複雑な形状となっている。

=15° のケースを除くと、高角度の不連続面を持つモデルほど、スペクトルのピークが長周期側にあり、応答スペクトルのピークも大きくなる傾向が見られる。これは、水平方向に加振するために、高角度の不連続面ほど拘束圧の変化の影響を受けやすく、斜面前面側に拳動した際に拘束圧が低減し、剛性が低下するために大きな応答を示しているためと考えられる。応答スペクトルの大きさは、=45, 75, -45° のケースが大きく、低角度や差し目で不連続面が分布する場合には小さくなっているが、これは、水平加振時に不連続面のせん断拳動により上下動が生じることを示している。

###### b) 2系列の不連続面が分布する場合

2系列の不連続面が分布するMYMモデル(15+105°, 45+135°, 75+165°)の斜面部の卓越周期は0.28~0.23秒となり、1系列の場合よりも長周期となり、弾性モデルと比べると更に長周期となっている。

図-7は、最大振幅300Galの地震動を入力したときの法肩の加速度応答の比較を示す。15+105°の応答が他のものに比べると若干大きいほかは、明瞭な違いは見られない。一方、鉛直加速度応答は、1系列の不連続面を考慮したケースと異なり、45+135°の応答が他のケースのよりも小さくなっており、この結果は、1系列の不連続面を考慮した場合と異なっている。

図-8は、法肩の加速度応答スペクトルの比較を示す。水平応答スペクトルについてみると、15+105°と45+135°のスペクトルの形状およびピークの大きさは、

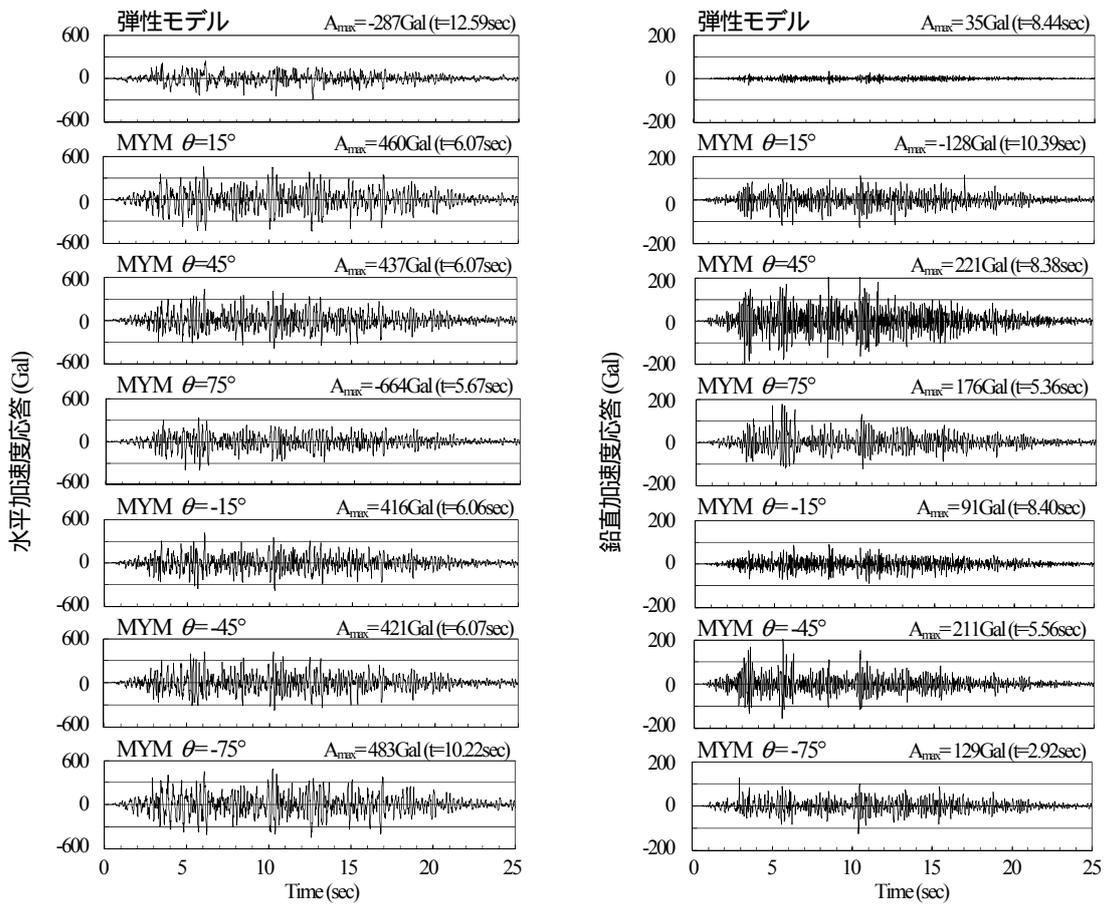


図-5 1系列の不連続面を考慮したMYMモデルと弾性モデルの法肩の加速度応答の比較

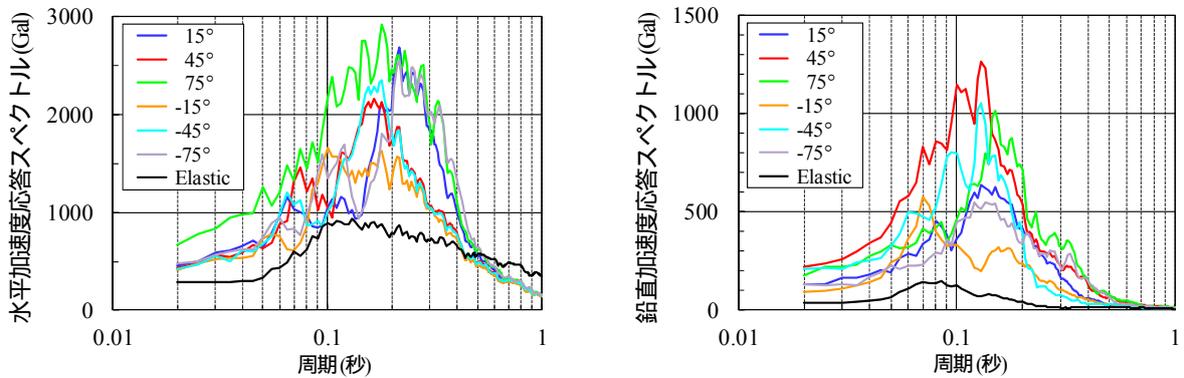


図-6 1系列の不連続面を考慮したMYMモデルと弾性モデルの法肩の加速度応答スペクトルの比較

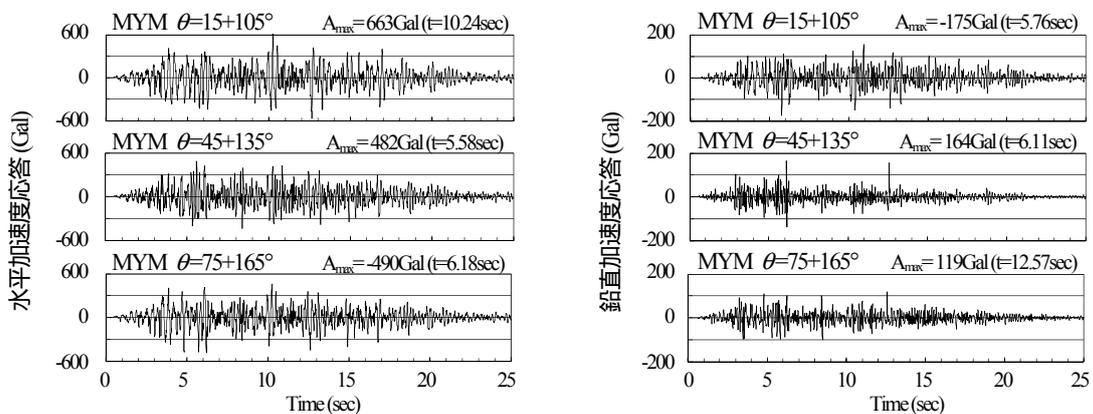


図-7 2系列の不連続面を考慮したMYMモデルの法肩の加速度応答の比較

1系列の15°、45°のケースと良く一致している。このことから、2つの直交する節理群を有するMYMモデルの応答は、低角度で分布する不連続面の挙動が支配的となっているものと考えられる。しかしながら、75+165°のスペクトルの形状は、1系列の不連続面を考慮したケースとは明らかに異なっており、これは、高角度不連続面の拘束圧の減少とこれに伴う複雑な挙動が原因と考えられる。一方、鉛直応答スペクトルについてみると、15+105°のスペクトルの形状は、1系列のケースと似ているが、その他のケースは、スペクトルのピークが1系列のケースの半分以下となっている。これらの挙動は、直交する節理群がお互いに干渉しあっているため、これらの原因を明確に説明することは困難である。

(2) 不連続面の傾斜角の違いによるすべり安全率の比較

表-2に示す法尻を通る3本のすべり線を設定し、最大振幅300Galの地震動を入力したときの最小すべり安全率を算定した。ここで、すべり線の設定に当たっては、一般的には破碎帯やシーム等の不連続面は考慮されるものの、節理等の不連続面はほとんど考慮されないことから、今回も不連続面の方向によらず、表層付近を通るすべり線-1とそれよりも奥側を通るすべり線-2, 3を設定した。また、すべり安全率の計算に当たっては、原子力発電所の基礎地盤・斜面で採用されている破壊判定ルール<sup>6)</sup>に基づき、時々刻々変化する地盤応力を用いて、要素がせん断破壊もしくは引張応力が発生した場合には残留強度とするが、要素に引張応力が発生し、すべり面が最大引張面

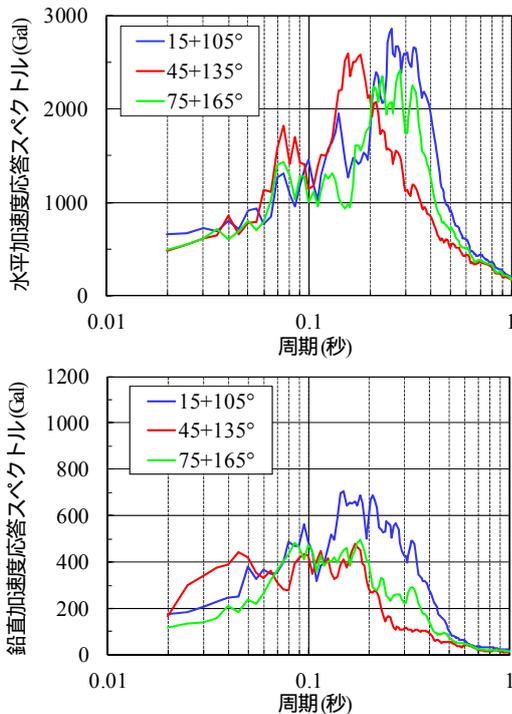


図-8 2系列の不連続面を考慮したMYMモデルの法尻の加速度応答スペクトルの比較

±20°の範囲にある場合もしくはすべり面に引張応力が発生している場合は強度をゼロとしてすべり安全率を算定した。表-2にすべり安全率の比較を示す。すべり安全率は、表層付近を通るすべり線ほど大きくなる傾向があるが、岩盤のモデル化の違いによって大きく異なっている。300Galの地震動を入力した場合、いずれのモデルにもせん断破壊は生じず、引張応力も表層付近の一部でしか発生しておらず、すべり安全率の違いは応力分布の違いに起因する。MYMモデルの応力分布は、不連続面方向もしくはこれと直交する方向に応力が集中する傾向となることから、不連続面の傾斜角の違いによりすべり安全率が大きく異なる結果となる。このため、モビライズド面がすべり線方向に近い1系列の不連続面を考慮したMYMモデルでは = -15, -45°, 2系列の不連続面を考慮したMYMモデルでは = 45+135, 75+165°のケースですべり安全率が小さくなっている。

次に、弾性モデルと2系列の不連続面を考慮したMYMモデル( = 15+105° )について、入力地震動の振幅を変えた場合のすべり安全率の比較を表-3に示す。弾性モデルでは、振幅の増大に伴って図-10の主応力分布図に

表-2 最大加速度振幅300Galの地震動を入力したときの岩盤のモデル化の違いによるすべり安全率の比較

| 岩盤モデル  | すべり線-1  | すべり線-2 | すべり線-3 |
|--------|---------|--------|--------|
| 弾性モデル  | 8.97    | 7.06   | 6.41   |
| MYMモデル | 15°     | 10.03  | 7.06   |
|        | 45°     | 8.37   | 7.60   |
|        | 75°     | 9.16   | 7.91   |
|        | -15°    | 7.24   | 5.28   |
|        | -45°    | 6.94   | 5.68   |
|        | -75°    | 10.86  | 8.77   |
|        | 15+105° | 10.95  | 8.76   |
|        | 45+135° | 5.76   | 5.18   |
|        | 75+165° | 7.38   | 6.68   |

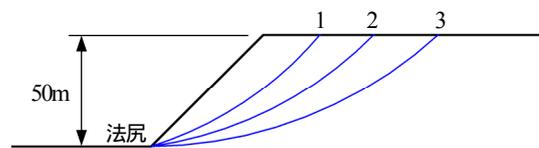


表-3 入力地震動の違いによる弾性モデルとMYMモデル(15+105°)のすべり安全率の比較

| 岩盤モデル | すべり線-1  | すべり線-2 | すべり線-3 |
|-------|---------|--------|--------|
| 弾性    | 300Gal  | 8.97   | 7.06   |
|       | 500Gal  | 4.74   | 5.84   |
|       | 1000Gal | 2.36   | 3.48   |
|       | 1500Gal | 1.51   | 1.70   |
| MYM   | 300Gal  | 10.95  | 8.76   |
|       | 500Gal  | 10.92  | 8.13   |
|       | 1000Gal | 10.19  | 8.06   |
|       | 1500Gal | 7.77   | 7.73   |

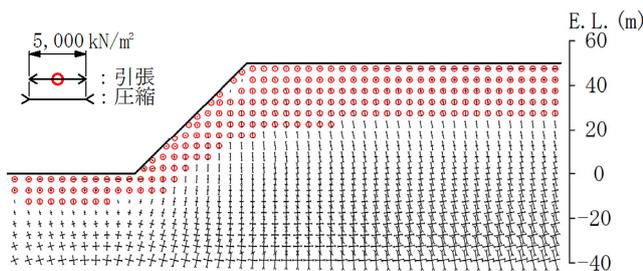


図-10 弾性モデルの最小すべり安全率発生時刻の主応力分布  
(入力地震動 1000Gal,  $t=12.69$  秒)

において赤丸で示すように、斜面部表層の広範囲で引張応力が発生することから、すべり安全率計算時の強度設定において残留強度もしくは強度ゼロの要素が多くなるため、表層付近のすべり線ほどすべり安全率が小さくなる傾向となるとともに、振幅の増大に伴って急激にすべり安全率が低下する。一方、MYMモデルでは、弾性モデルと異なり、表層付近の応力低下に伴って図-2に見られるように不連続面の垂直剛性が低下し、要素としての剛性が低下することから、斜面表層付近の応力負担が減り、引張応力の発生領域が弾性モデルと比べると非常に小さくなるため、急激なすべり安全率の低下は発生しない。一般的に、岩盤にはネットワーク状に不連続面が分布しており、弾性モデルのように広範囲に引張領域は発生しないものと考えられる。このため、すべり安全率を適切に評価するためには、不連続面を考慮した解析を実施することが必要と考えられる。

## 5. おわりに

本検討では、岩盤不連続面の非線形挙動を考慮できる複合降伏モデルを用いて、岩盤モデル斜面を対象として、地震時挙動における不連続面の影響と安定性を検討するとともに、弾性解析との比較を行った。この結果、以下の結果が得られた。

- (1) MYMモデルの加速度応答は、不連続面の傾斜角により異なり、弾性モデルよりも大きな応答となる。
- (2) 水平加振の際に弾性モデルではほとんど生じない鉛直方向の挙動が、不連続面の考慮することで生じる。
- (3) 弾性モデルでは、地震動の増大に伴って広範囲に引張応力が生じ、すべり安全率が急激に低下するのに対し、MYMモデルでは、不連続面の非線形性により引張応力の発生領域が非常に小さく、すべり安全率の急激な低下は生じない。

このことから、岩盤斜面の地震時安定性を検討する際、不連続面の分布を考慮することでより合理的な評価が可能であることが分かった。しかしながら本検討は、不連続面間隔0.3mと比較的不連続面の影響の大きい地盤に対する結果であり、不連続面間隔が大きくなると必ずしも上記のような結果にはならず、弾性モデルに近づくものと考えられる。また、実斜面への適用に当たっては、岩盤斜面での観測記録をもとにしたシミュレーションを行い、十分な検証を行っていく必要があると考えている。

## 参考文献

- 1) 佐々木猛, 吉中龍之進, 永井文男: 有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する研究, 土木学会論文集, No. 505/III-29, pp. 59-68, 1994.
- 2) 吉中龍之進, 岩田直樹, 佐々木猛: 大型構造物基礎地盤の地震挙動における複合降伏モデルの適用性, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.68, No.3, pp. 451-465, 2012.
- 3) 吉中龍之進, 岩田直樹, 佐々木猛: 岩盤の不連続性を考慮した大型構造物基礎の地震応答解析 - 東北地方太平洋沖地震を基本事例として -, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.70, No.1, pp. 16-32, 2014.
- 4) Bandis S. C., Linsden A. C. and Barton, H. R.: Fundamentals of rock joint deformation, *Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 20, No. 6, pp. 249-268, 1983.
- 5) Kulhawy F. H.: Stress-deformation properties of rock and discontinuities, *Engng. Geol.* 8, pp. 327-350, 1975.
- 6) 例えば, 原子力安全・保安院: 中国電力(株)島根原子力発電所 3号機地震随件事象(周辺斜面の安定性)(コメント回答), 地震・津波に関する意見聴取会(第12回)配布資料, 地震・津波 12-3, 2012.

## NUMERICAL STUDIES ON DISCONTINUOUS ROCK SLOPE STABILITIES UNDER SEISMIC CONDITION

Naoki IWATA, Yasunori TAKAHASHI, Atsuki YURI, Takeshi SASAKI and Ryunoshin YOSHINAKA

Seismic response analysis assuming that rock mass is elastic is conducted to evaluate rock slope stability for the important facilities, though seismic behavior of rock mass is nonlinear due to discontinuities. In this study, we conducted seismic response analysis of simple rock slopes using Multiple Yield Model (MYM), which is considered elastic-plastic deformation characteristics of rock joints, and compared them with the traditional elastic analysis. As a result, seismic response is strongly influenced by the distribution of discontinuities, and the seismic response and slip safety factor of MYM are distinctly different from one of elastic body.