

三次元複合降伏モデルによる 岩盤せん断強度の異方性の検討

森川 誠司^{1*}・田部井 和人¹・Sadr Amir Ahamad¹

¹鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

*E-mail: morikawa-seiji@kajima.com

亀裂を含む岩盤は載荷方向によって異なる剛性と強度を有することから、岩盤構造物をより合理的に設計するためには、このような力学特性を的確に設計に反映させる必要がある。筆者らは、亀裂を含む岩盤の異方性の剛性と強度特性を的確に表現し得る三次元複合降伏モデルによる岩盤の応力・変形解析手法を開発した。本論文では開発した解析手法の内容を紹介するとともに、原位置せん断試験のシミュレーションを行い、亀裂の傾斜方向とせん断荷重の方向の違いによる岩盤せん断強度の変化を定量的に示した。

Key Words : jointed rock masses, rock shear test, Multiple Yield Model

1. はじめに

亀裂を含む岩盤の変形・強度特性を解析的に評価する手法の一つに佐々木¹⁾が提案している複合降伏モデルがある。複合降伏モデルは等価連続体解析手法の一種で、亀裂を含む岩盤の変形特性が、亀裂群それぞれの変形（開口・閉合とすべり）と岩盤基質部の変形の和としてあらわせると仮定する弾性コンプライアンス理論を基本に、亀裂と岩盤基質部の構成式それぞれに非線形構成モデルを適用した方法である。最近では繰り返し載荷条件の解析²⁾や動的解析³⁾へ適用範囲を広げており、実用性を向上させている。ただし、その計算事例は全て二次元問題であった。

今回筆者らは、この複合降伏モデルを組み込んだ三次元FEM解析プログラムを開発し、その適用例として原位置岩盤せん断試験のシミュレーションを行った。本論文では、その結果を紹介する。

2. 三次元複合降伏モデルの概要

(1) 亀裂を含む岩盤の三次元コンプライアンスマトリックス

複合降伏モデルでは、岩盤中の亀裂は平行で等間隔に存在する平面としてモデル化する。そして、岩盤のひずみは、岩盤基質部のひずみと各亀裂群のひずみの和と仮定し、岩盤基質部と各亀裂群の応力は等しいとする。

この場合、亀裂を含む岩盤の応力 $\{\sigma\}$ とひずみ $\{\varepsilon\}$ の

関係は(1)式のようになる。

$$\{\varepsilon\} = \sum_m \{\varepsilon_J^m\} + \{\varepsilon_R\} = \left[\sum_m [F_J^m] + [C_R] \right] \cdot \{\sigma\} = [C] \cdot \{\sigma\} \quad (1)$$

ただし、 $[F_J^m]$: m番目の亀裂群のコンプライアンスマ

トリックス、 $[C_R]$: 岩盤基質部のコンプライアンスマ

トリックス、 $[C]$: 亀裂を含む岩盤のコンプライアン

スマトリックスである。なお、 $[F_J^m]$ は(2)式と(3)式か

ら求められる。

$$[F_J^m] = [T_{J\varepsilon}^m]^T \cdot [C_J^m] \cdot [T_{J\sigma}^m] \quad (2)$$

$$[C_J^m] = \frac{[K_J^m]^{-1}}{S_J^m} \quad (3)$$

ここで、 $[T_{J\varepsilon}^m]$: m番目の亀裂群の全体座標系から局所

座標系への三次元ひずみ変換マトリックス、 $[T_{J\sigma}^m]$: m

番目の亀裂群の全体座標系から局所座標系への三次元応

力変換マトリックス、 S_J^m : m番目の亀裂群の亀裂間隔

である．さらに， $[K_J^m]$ は(4)式で表される．

$$[K_J^m] = \begin{bmatrix} k_n^m & 0 & 0 \\ 0 & k_s^m & 0 \\ 0 & 0 & k_s^m \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで， k_n^m ：m番目の亀裂群の垂直方向バネ定数，

k_s^m ：m番目の亀裂群のせん断方向バネ定数である．さ

らに， $[C_R]$ は(5)式で表される．

$$[C_R] = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで， E ：岩盤基質部の弾性係数， G ：岩盤基質部のせん断弾性係数， ν ：岩盤基質部のポアソン比である．

なお，上述の亀裂を含む岩盤のコンプライアンスマトリックスは線形弾性体を仮定してのものだが，複合降伏モデルにおける岩盤基質部と亀裂群の応力-ひずみ関係は次節で示すような非線形特性を有するため，実際の解析では，各要素に生じる不釣り合い力を算出して，それが十分小さくなるまで反復計算を行った．

(2) 岩盤基質部の非線形特性

岩盤基質部の非線形特性は，図-1 に示すような弾完全塑性型の応力-ひずみ関係とし，繰り返し载荷による塑性変形の蓄積を考慮できるようにした．また，降伏関係はMohr-Coulomb の式とした．なお，図-2 に示すように引張側応力に対しては，引張強度以上は抵抗しない Tension cut-off 条件としたが，引張破壊時の応力解放や再接触変位の考慮は今回しなかった．

(3) 亀裂の非線形特性

亀裂を表すせん断バネの非線形特性としては，岩盤基質部と同じように図-3 に示すような弾完全塑性型の応力-せん断変位関係とし，繰り返しのせん断荷重による塑性変形の蓄積を考慮できるようにした．亀裂の垂直方向バネの非線形特性は，圧縮側については線形バネとして履歴特性を特に考慮せず，引張側については引張応力には一切抵抗しない条件とした（図-4）．

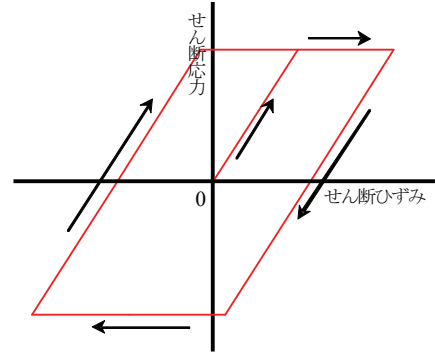


図-1 せん断応力-せん断ひずみ関係（岩盤基質部）

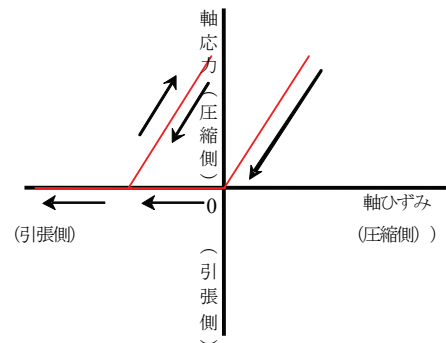


図-2 軸応力-軸ひずみ関係（岩盤基質部）

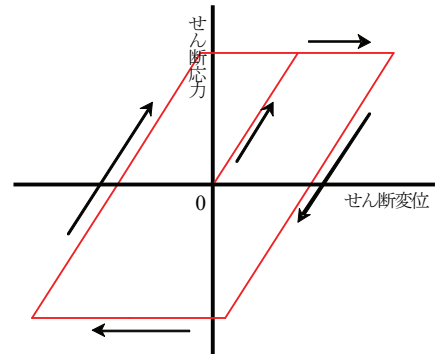


図-3 せん断応力-せん断変位関係（亀裂）

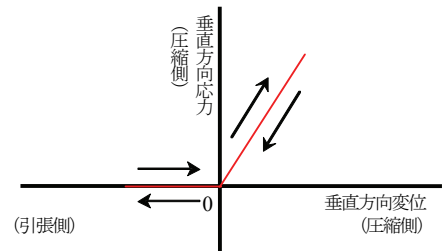


図-4 垂直方向応力-垂直方向変位関係（亀裂）

3. 三次元複合降伏モデルによる一要素解析

(1) 解析モデルと解析条件

今回開発した三次元複合降伏モデルを組み込んだFEM解析プログラムの検証も兼ねて、一要素モデルを用いて亀裂を含む岩盤の等体積単純せん断挙動を検討した。

図-5は解析に用いた一要素モデルである。底面を固定、上面を水平ローラーとして上下方向の動きを拘束した上で、上面の4節点に同じ水平変位を強制的に与えるという荷重条件とした。ただし、水平変位を与える方向は亀裂の傾斜方向に対して直交させている。物性は表-1に示す通りであり、亀裂は非線形体、岩盤基質部は線形弾性体とし、初期応力は1MPaの等方圧を与えた。なお、今回の検討では、強度の異方性の影響に着目したため、亀裂部の垂直・せん断バネ剛性は岩盤基質部の弾性係数に対し、十分大きい値とし、あえて両者に差異をつけなかった。解析ケースは、亀裂の傾斜角をパラメータとし、傾斜角0度、30度、45度、60度、90度の5ケースとした。

(2) 解析結果

図-6は一要素解析によって得られた各傾斜角でのせん断応力-せん断変位関係を示している。同図中の傾斜角0度のケースでは、亀裂の応力が拘束圧1MPaにおける亀裂のせん断強度(0.68MPa)に達した時点で亀裂が滑り始めており、これは理論解どおりである。一方、亀裂の傾斜角30度、45度、60度の解析結果を見ると、水平亀裂の場合に比べ、傾斜が大きいほど亀裂が滑り始めるせん断応力も、降伏後のせん断応力-せん断変位関係の勾配も大きくなっている。亀裂傾斜が大きいほど亀裂が滑り始めるせん断応力が増加するのは、傾斜によって亀裂面内に作用するせん断応力成分が減少する一方で、亀裂垂直方向成分の応力は増加するためである。亀裂傾斜が大きいほど亀裂の降伏後のせん断応力-せん断変位の勾配が大きくなるのは、亀裂傾斜の増加に伴い要素全体のせん断変位に占める亀裂のせん断変位の割合が減少する一方、岩盤基質部のせん断変位の割合が増えるためである。なお、従来の二次元複合降伏モデル解析では、今回の一要素解析のようにせん断応力が加えられる方向と亀裂の傾斜方向が一致しない場合、合理的なモデル化が難しくなるため、過度に安全側に評価する場合があることを示している。

4. 三次元複合降伏モデルによる原位置岩盤せん断試験のシミュレーション

(1) 解析モデルと解析条件

三次元複合降伏モデルによって原位置岩盤せん断試験

のシミュレーションを行い、亀裂の幾何学特性の影響、特にその傾斜方向の違いによる岩盤のせん断強度への影響を検討した。図-7は原位置岩盤せん断試験の三次元解析モデルである。全体の解析領域は図-7に示す通りであり、30cm×30cm×高さ15cmに切り出した岩盤ブロックをカバーコンクリートで補強し、垂直荷重0.3MPaを与えた後、やや押し込む形でせん断荷重を与える。岩盤基質部及び亀裂の物性は表-2に示すとおりである。なお、上述の一要素解析では岩盤基質部は線形弾性体と仮定したが、本解析では岩盤基質部自身の破壊も考慮した。その他の物性値は一要素解析と同じとした。

表-1 解析用物性値

	項目	値
岩盤基質部	弾性係数	2000.0 MPa
	ポアソン比	0.2
	密度	2.0 t/m ³
亀裂部	垂直バネ剛性	1.0×10^5 MPa/m
	せん断バネ剛性	1.0×10^5 MPa/m
	粘着力	0.1 MPa
	摩擦角	30 度
	引張強度	0.0 MPa
	間隔	0.05m

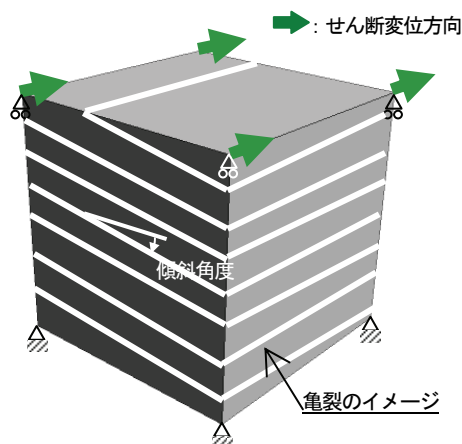


図-5 一要素モデル

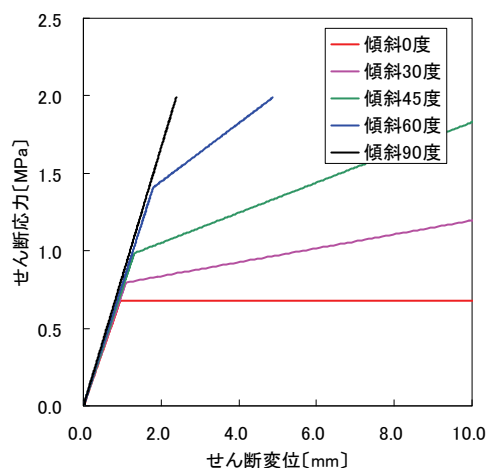


図-6 せん断応力-せん断変位関係

(2) 解析結果

a) せん断荷重方向の違いによるせん断強度への影響

亀裂の傾斜角はすべて10度とし、せん断荷重方向の違いで原位置岩盤せん断強度にどの程度影響があるかを検討するため、亀裂の傾斜方向とせん断荷重の方向を一致させたケース（流れ目と差し目の2ケース）と亀裂の傾斜方向とせん断荷重の方向が直交しているケースの解析を行った。図-8は、その3ケースの解析のせん断応力-変位関係を示したものである。まず、せん断荷重方向を亀裂の流れ目方向に一致させたケースと亀裂の差し目方向に一致させたケースを比較すると、差し目のケースの方がより低いせん断荷重でせん断応力-変位関係の勾配が低下し始めるものの、最終的な岩盤せん断強度は流れ目のケースの方が低くなる結果となり、一般に言われている実験事実と整合している。亀裂の傾斜方向とせん断荷重の方向が直交しているケースとの比較では、直交しているケースが最も岩盤せん断強度が低くなった。このケースを二次元縦断面でモデル化すれば水平方向の亀裂でモデル化することになり、上述の一要素解析結果からも分かるように10度程度の亀裂の傾斜角であれば、水平方向亀裂のケースと比べてもさほど大きな強度増加がないためと考えられる。図-9と図-10は、流れ目のケースと差し目のケースにおける岩盤の破壊域分布図である。本図では、三次元的に透視した形で岩盤内部の破壊した要素（せん断破壊、引張破壊、せん断+引張破壊をそれぞれを色で区別）が分かるようにしている。差し目のケースでは試験体が破壊する前に、流れ目のケースと比べ、せん断荷重を加えている側の岩盤の亀裂がより広い範囲で引張破壊（すなわち開口）していることが分かる。ただし、亀裂の開口やせん断破壊が進んでも、最終的に岩盤せん断強度を決定づけるのは、試験体ブロック底面における岩盤基質部の引張破壊であり、流れ目のケースでは差し目のケースよりも速く岩盤基質部の応力が引張強度に達している。なお図-11は、参考として行った二次元平面ひずみ解析によるせん断応力-変位関係との比較である。亀裂が流れ目方向でも差し目方向でも、二次元平面ひずみ解析結果の方が、せん断応力-変位関係の勾配が小さくかつその低下傾向も大きい。岩盤のせん断破壊強度そのものは二次元解析と三次元解析ではほとんど変わらなかった。この結果は、せん断荷重の方向が亀裂の傾斜方向と一致していれば、原位置岩盤せん断試験におけるせん断強度の評価は二次元解析でも行えることを意味するが、試験体の破壊前における岩盤の変形については、二次元平面ひずみ解析の方が過大な結果を与えることに留意すべきである。

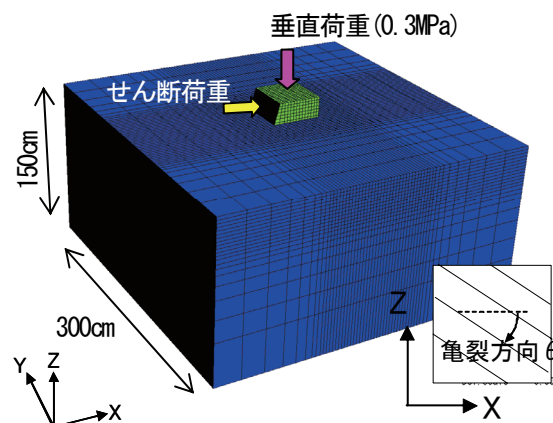


図-7 原位置岩盤せん断試験の三次元解析モデル

表-2 解析用物性値

	項目	値
岩盤基質部	弾性係数	2000.0 MPa
	ポアソン比	0.2
	密度	2.0 t/m
	粘着力	1.0 MPa
	摩擦角	30度
	引張強度	0.5 MPa
亀裂部	垂直バネ剛性	1.0×10^5 MPa/m
	せん断バネ剛性	1.0×10^5 MPa/m
	粘着力	0.1 MPa
	摩擦角	30度
	引張強度	0.0 MPa
	間隔	0.05m

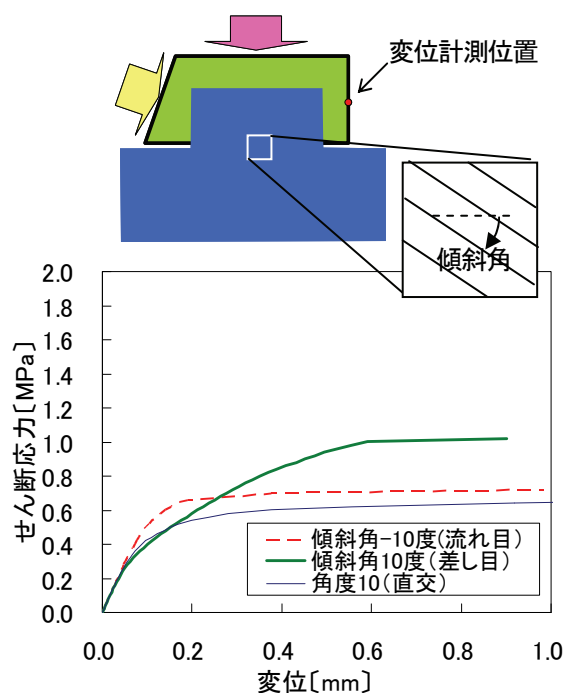


図-8 せん断応力-変位関係（せん断荷重方向の違い）

b) 亀裂の傾斜角の違いによるせん断強度への影響

亀裂の傾斜角方向に対してせん断荷重の方向が直交する条件において、亀裂の傾斜角が原位置岩盤せん断強度に与える影響を検討するために、亀裂の傾斜角をパラメータとして、7 ケース（傾斜角=0 度、15 度、30 度、45 度、60 度、90 度と亀裂なし）の解析を行った。図-12 は、その7 ケースの解析によるせん断応力-変位関係を示したものである。本図から、亀裂の傾斜角が大きくなるほど岩盤せん断強度が増加することが分かる。例えば、亀裂の傾斜角が15 度のケースでは、亀裂の傾斜角0 度（水平亀裂）のケースの約1.7 倍、傾斜角45 度のケースでは、水平亀裂のケースの約2.7 倍のせん断強度になる。しかし、亀裂の傾斜角が45 度よりも大きくなった場合は、せん断強度の増加は小さくなく、亀裂の傾斜角45 度のケースより亀裂なしもしくは傾斜角90 度（垂直亀裂）のケースでは、約1.2 倍強度が増えるだけであった。これらの結果は、低角度の亀裂については、わずかな亀裂の傾斜角の影響が岩盤せん断強度に敏感に影響する可能性があることを意味しており、原位置岩盤せん断試験結果を評価する際の参考になろう。また、二次元断面内では水平亀裂に見えても、実際には奥行き方向に傾斜しているような岩盤を二次元平面ひずみ条件で解析すると、過度に安全側の評価になる場合があると言える。図-13 と図-14 は、亀裂の傾斜角が15 度のケースと60 度のケースにおける岩盤の破壊域分布図である。傾斜角15 度の低角度のケースでは、試験体ブロック周辺の亀裂開口域（亀裂の引張破壊域）が大きく広がる前に、試験体ブロック直下にせん断応力が集中し岩盤基質部の破壊に至っている様子が分かる。亀裂の傾斜角が小さいほど、試験体ブロック直下の亀裂のせん断破壊が早く進むために、その影響で岩盤基質部のせん断破壊もより小さいせん断荷重で生じたものと考えられる。

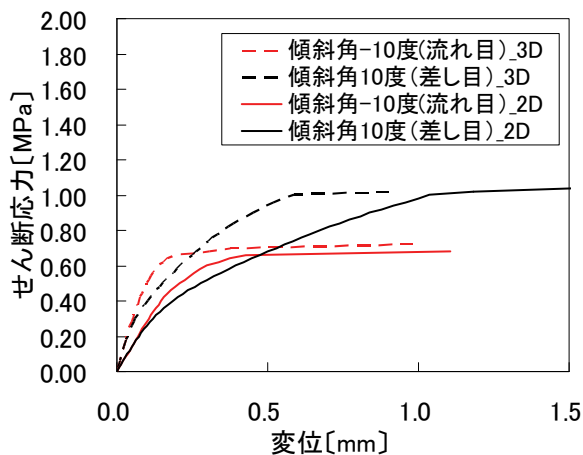


図-11 せん断応力-変位関係（二次元解析との比較）

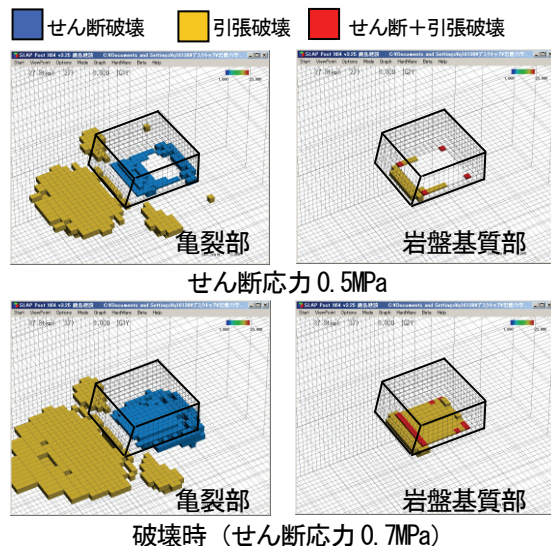


図-9 破壊域分布図（流れ目のケース）

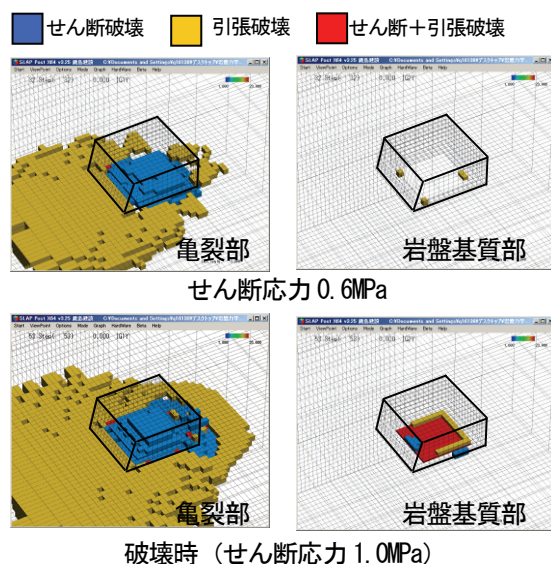


図-10 破壊域分布図（差し目のケース）

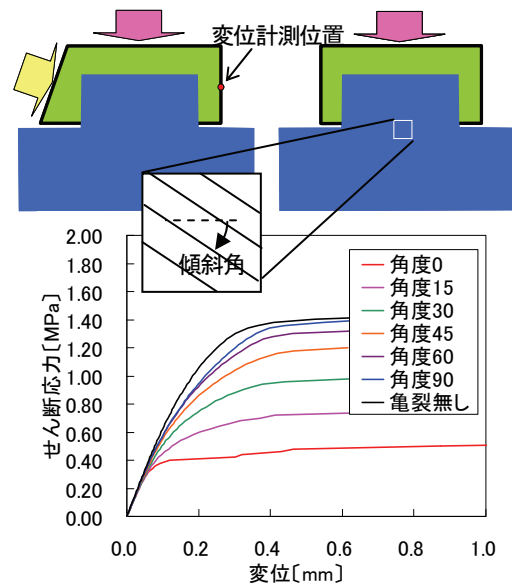


図-12 せん断応力-変位関係（亀裂の傾斜角の違い）

5. おわりに

今回、三次元複合降伏モデルによるFEM プログラムを開発し、原位置岩盤せん断試験のシミュレーションを行った。そして、亀裂の傾斜方向とせん断荷重の方向の違いによる岩盤せん断強度の変化を定量的に示した。今後、実験結果等との比較・検証は必要であるが、三次元複合降伏モデルは、従来の二次元解析では評価できなかった亀裂の傾斜方向と岩盤構造物の主荷重方向が三次元的には一致してない事により一般的な条件下での岩盤挙動を直接評価できるため、より合理的な岩盤安定性評価ツールになるであろう。なお、複合降伏モデルの理論では亀裂長さは無限と仮定しているが、実際の岩盤の亀裂の長さは有限である。この点を複合降伏モデルにどのように取り入れるかが今後の課題である。また、複数の亀裂群を考慮した場合、それぞれの亀裂が岩盤せん断強度へどのように影響するかを検討も今後行いたい。

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) 岩田直樹, 佐々木猛, 吉中龍之進: 複合降伏モデルによる多重繰返し载荷における平板载荷試験の解析的検討, 第40回地盤工学研究発表会, pp.1221-1222, 2005.
- 3) 岩田直樹, 佐々木猛, 吉中龍之進: 不連続性岩盤上に設置する構造物の複合降伏モデルによる地震応答解析, 第39回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.21-26, 2010.

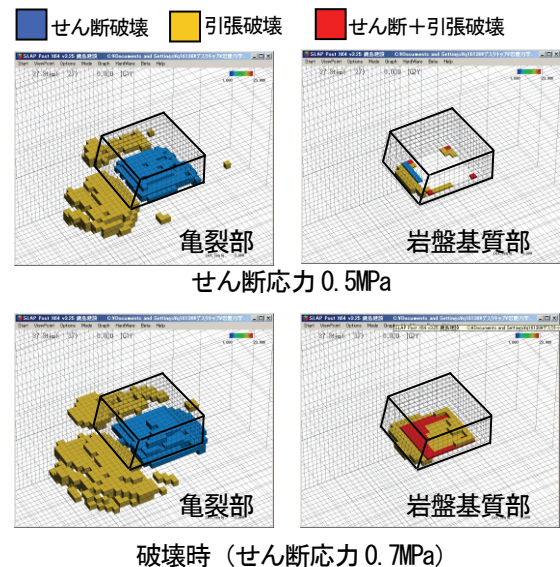


図-13 破壊域分布図（傾斜角15度のケース）

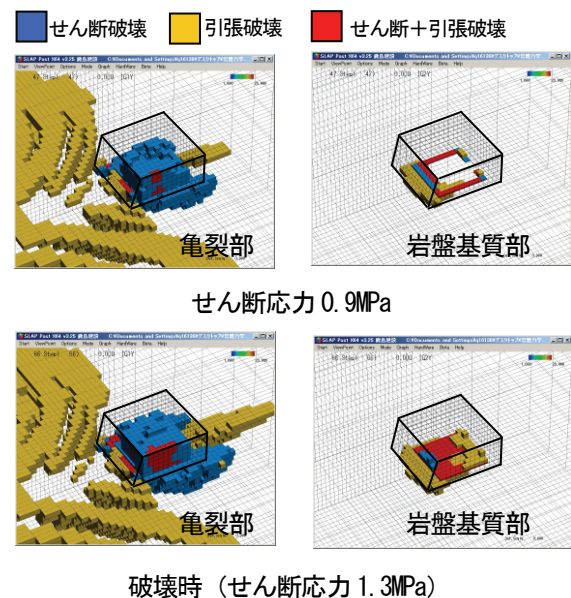


図-14 破壊域分布図（傾斜角60度のケース）

EVALUATION OF ANISOTROPIC SHEAR STRENGTH OF JOINTED ROCK MASS USING THREE-DIMENSIONAL MULTIPLE YIELD MODEL

Seiji MORIKAWA, Kazuto Tabei and Sadr Amir AHAMAD

Jointed rock masses exhibit strongly anisotropic behavior for both stiffness and strength. For rational design of rock slopes and structures, these mechanical characteristics of jointed rock masses should be considered. To fulfill these requirements, a three-dimensional Multiple Yield Model is developed by authors, which can represent anisotropic stiffness and strength characteristics of jointed rock masses in stress-deformation analysis. In this paper, the developed analysis method is introduced and for in situ direct shear test, numerical case studies are done for investigating effects of joint inclination and loading direction on strength.