

# 2種類の解析手法による亀裂性岩盤の地震時応答解析の比較

田部井 和人<sup>1\*</sup>・Sadr Amir Ahamad<sup>1</sup>・森川 誠司<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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: tabei@kajima.com

岩盤斜面の地震時安定性は、岩盤斜面に内在する亀裂の影響を受けると考えられる。亀裂性岩盤の動的非線形解析手法としては、個別要素法(DEM)や不連続体解析法(DDA)などの不連続体解析が一般に良く使われるが、近年亀裂を含む岩盤を等価な連続体として表現する等価連続体解析による動的非線形解析も開発されている。筆者らは動的解析が可能な有限差分法解析プログラムFLAC ver.6 (開発元: 米国Itasca社)に等価連続体モデルの一種である複合降伏モデルを組み込み、要素試験や実規模の岩盤斜面モデルによる動的非線形解析を行い、個別要素法解析プログラムUDEEC ver.4 (開発元はFLAC ver.6と同じ)との比較を行った。

**Key Words :** jointed rock masses, earthquake response analysis, Multiple Yield Model, DEM

## 1. はじめに

岩盤斜面の地震時安定性は、岩盤斜面に内在する亀裂の影響を受けると考えられる。亀裂性岩盤の動的非線形解析手法としては、個別要素法<sup>1)</sup>や不連続変形法<sup>2)</sup>などの不連続体解析手法が一般に良く使われるが、近年亀裂を含む岩盤を等価な連続体として表現する等価連続体解析手法による動的非線形解析も開発<sup>3)</sup>されている。不連続体解析手法では、亀裂を直接モデル化する必要があるため、多数の亀裂を含む岩盤の場合、モデル化が困難になる。そこで、亀裂性岩盤を等価連続体モデルとして表現でき、不連続体解析と同等の解析結果が得られれば、亀裂の多い岩盤斜面の大規模地震時安定性検討などで有用であると考えられる。

筆者らは動的解析が可能な有限差分法解析プログラムFLAC ver.6 (開発元: 米国Itasca社)に等価連続体解析モデルの一種である複合降伏モデル<sup>4)</sup>を組み込み、簡易モデルおよび実規模の岩盤斜面モデルによる動的非線形解析を行い、個別要素法解析プログラムUDEEC ver.4 (開発元はFLAC ver.6と同じ)との比較を行った。

## 2. 有限差分法への複合降伏モデルの組み込み

### (1) FLACの計算プロセス<sup>5),6)</sup>

本報告では、等価連続体解析モデルの一種である複合

降伏モデルを有限差分法のプログラムであるFLACにUDM(User-Defined and extended constitutive Models)として組み込んだものである。FLACにおける計算のフローを図-1に示し、その計算プロセスは以下に示す。

1) 荷重の载荷もしくは節点を取り囲んでる既知の要素応力 $\sigma_{ij}$ から(1)式を用いて節点力 $F_i$ を計算する。

$$F_i = \frac{1}{2} \sigma_{ij} (n_j^{(1)} S^{(1)} + n_j^{(2)} S^{(2)}) \quad (1)$$

ここで、FLACでは、四角形要素を2つの三角形領域に分割しており、上付きの添え字は、各三角形領域を表し、 $S$ は三角形領域の各辺の長さ、 $n_j$ は三角形領域境界を表す単位法線ベクトルを表す。

2) 運動方程式を中央差分近似した(2)式を用いて節点力

$F_i$ から新しい加速度 $\frac{\sum F_i^{(t)}}{m}$ 、節点速度 $\dot{u}_i$ を計算する。

$$\dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} = \dot{u}_i^{(t-\Delta t/2)} + \sum F_i^{(t)} \frac{\Delta t}{m} \quad (2)$$

ここで、 $\dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)}$ は時刻 $t + \Delta t/2$ における速度、 $m$ は節点の等価質量を表す。

3) 節点速度を積分し、変位増分を計算する。

4) 既知の節点速度から、(3)式を用いてひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}$ を計算する。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\delta \dot{u}_i}{\delta x_j} + \frac{\delta \dot{u}_j}{\delta x_i} \right] \quad (3)$$

5) 材料構成則を用いてひずみ速度から新しい応力を計算するという操作（FLACではUDMやFISHというマクロを使う事によりユーザーが操作できる）を繰返し行う。本報告では材料構成則として複合降伏モデルを用いる。

## (2) 複合降伏モデル<sup>4)</sup>

複合降伏モデルは有限要素法による等価連続体解析の一種である。岩盤中の亀裂は直線であり、平行かつ等間隔に存在するものとして仮定している。また、図-2に示すように、岩盤の変形は、岩盤基質部の変形と複数の卓越亀裂群の開口やすべりによる変形の和で表されるものとする。従って、岩盤のひずみ $\{\epsilon\}$ は、岩盤基質部のひずみ $\{\epsilon_R\}$ と各亀裂群のひずみ $\{\epsilon_J^m\}$ の和となり、亀裂を含む岩盤のコンプライアンスマトリックス $[C]$ と応力 $\{\sigma\}$ は、(4)式で表される。

$$\{\epsilon\} = \sum_m \{\epsilon_J^m\} + \{\epsilon_R\} = \left[ \sum_m [F_J^m] + [C_R] \right] \cdot \{\sigma\} = [C] \cdot \{\sigma\} \quad (4)$$

ここで、 $[F_J^m]$ は、m番目の亀裂のコンプライアンスマトリックス、 $[C_R]$ は基質部のコンプライアンスマトリックスである。

## (3) 岩盤基質部のモデル化

複合降伏モデルの岩盤基質部のモデル化は任意の構成式を用いる事が可能であるが、本報告では条件を単純にするため、線形弾性体とした。

## (4) 亀裂部のモデル化

複合降伏モデルの亀裂部のモデル化のうち、せん断剛性は(5)式に示すモール・クーロン型の破壊規準を用い、破壊規準に達した後に剛性が低下するパイリニアモデルを用いた。

$$f = c_J + \sigma_n \cdot \tan \phi_J \quad (5)$$

垂直剛性は引張強度 (=0) で剛性が低下するパイリニ

アモデルを用いた。ここで、 $\sigma_n$  : 亀裂の法線方向の応力、 $c_J$  : 亀裂部の粘着力、 $\phi_J$  : 亀裂部の摩擦角を表す。

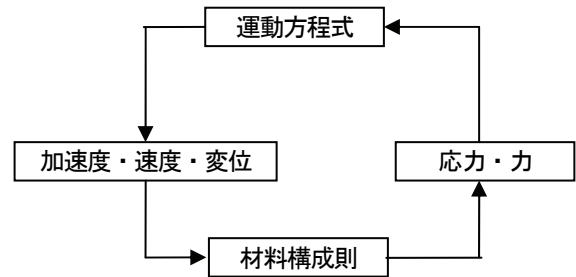


図-1 FLACの計算フロー

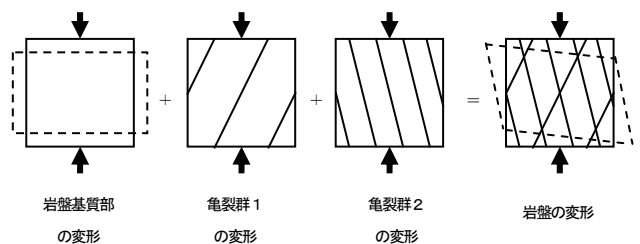


図-2 複合降伏モデルの概念

## 3. 要素試験による解析結果の比較

### (1) せん断方向の繰返し载荷

本解析は図-3に示すような1本の亀裂を含む1m×1mサイズの岩盤ブロックに繰返しのせん断変位を静的に与えることで、せん断方向の繰返し载荷を行った場合の応答を、個別要素法による解析と複合降伏モデルによる解析を比較したものである。図-4に入力変位の履歴、表-1に解析用物性値を示す。なお、複合降伏モデルでは、亀裂間隔を1mとすることで図-2の解析モデルを表現した。図-5はせん断変位と亀裂面におけるせん断応力の履歴を示したものである。個別要素法による解析結果と複合降伏モデルによる解析結果を比較すると、その履歴は一致している事が分かる。

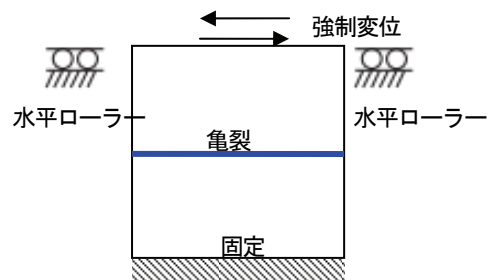


図-3 解析モデル

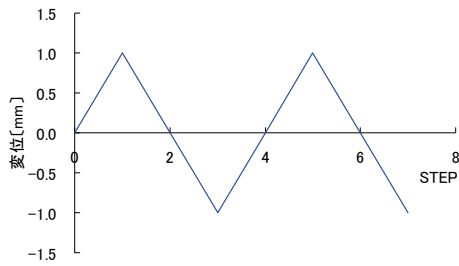


図-4 入力変位

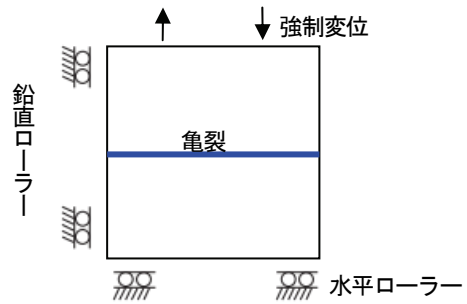


図-6 解析モデル

表-1 解析用物性値

	項目	値
岩盤基質部	せん断弾性係数	8000.0 MPa
	体積弾性係数	10000.0 MPa
	密度	2.0 t/m <sup>3</sup>
亀裂部	垂直バネ剛性	1.0×10 <sup>5</sup> MPa/m
	せん断バネ剛性	1.0×10 <sup>4</sup> MPa/m
	粘着力	0.1 MPa
	摩擦角	30度
	引張強度	0.0 MPa

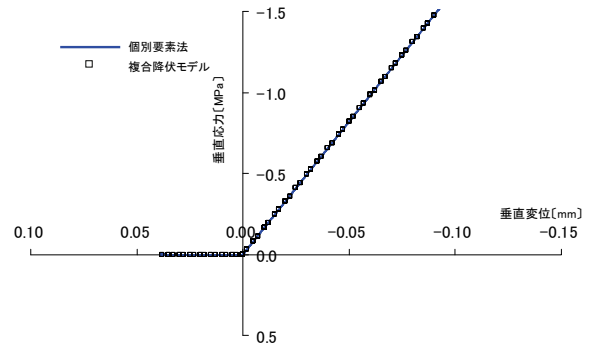


図-7 垂直変位と亀裂面における垂直応力の履歴

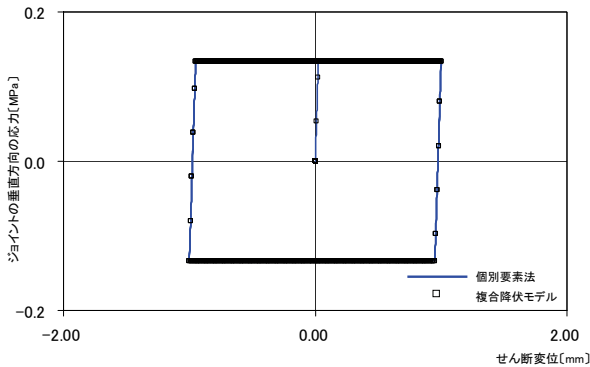


図-5 せん断変位と亀裂面におけるせん断応力の履歴

## (2) 垂直方向の繰返し載荷

本解析は図-6に示すような1本の亀裂を含む1m×1mサイズの岩盤ブロックに繰返しの垂直変位を静的に与えることで、亀裂に対し垂直方向の繰返し載荷を行った場合の応答を、個別要素法による解析と複合降伏モデルによる解析を比較したものである。解析は初期応力として、モデル上部から1.0MPaの上載荷重を載荷後、図-4の変位履歴をモデル上部に作用させることで、繰返し載荷を行った。解析用物性値は表-1に示す通りである。図-7は垂直変位と亀裂面における垂直応力の履歴を示したものである。個別要素法による解析結果と複合降伏モデルによる解析結果を比較すると、その履歴は完全に一致している事が分かる。

## 4. 亀裂性岩盤斜面モデルによる解析結果の比較

本解析は岩盤斜面モデルに対し、個別要素法による解析を行った場合と複合降伏モデルによる解析を行った場合で、時刻歴の変位応答や破壊分布にどのような違いがあるか検討したものである。深さ40mの半無限地盤の上にある法面勾配1:1、高さ30m、底辺の長さ100mの台形状の斜面をモデル化した。斜面には、亀裂間隔3m、左落ち10度の傾斜を持つ亀裂が存在する。個別要素法を用いた解析では、この亀裂を不連続面とし、図-8に示すようなモデル化をした。複合降伏モデルを用いた解析では、斜面部を複合降伏モデルでモデル化した。解析ステップとしては、静的に自重解析を行った初期応力を設定した後、地震応答解析を行う。入力地震動としては、図-9に示す周期0.1秒、最大振幅100Gal相当の速度波形を解析モデル下部から与える。そして、図-8の入力速度波形を1.0とし、その振幅を1.5倍、2.0倍、2.5倍・・・と増やしていき、入力波を何倍にすれば斜面が破壊するか検討した。なお、解析用物性値は要素試験解析を行った表-1と同じ値を用い、減衰はレーリー減衰を用い、レーリー減衰パラメータ $\alpha$ は0.375、 $\beta$ は0.0024とした。

解析の結果、個別要素法による解析も複合降伏モデルによる解析も図-9に示す入力波を2.5倍～3.0倍にすれば

斜面が滑り破壊する事が分かった。図-10(a), (b)は2.5倍の入力波の解析において、各解析手法による斜面の左肩部と左中央部の水平変位の時刻歴を比較したものである。変位の時刻歴は、ほぼ一致していると言える。次に、変位の振幅が最大となった0.91秒における亀裂の破壊分布図を図-11(a), (b)に示す。どちらの解析結果も斜面の左法尻から右側に約10度方向で亀裂のせん断破壊域が分布しており、右側法面で亀裂の引張破壊領域が分布している。次に、3倍の入力波の解析において、各解析手法による斜面の左肩部と左中央部の水平変位の時刻歴を比較したものを図-12(a), (b)に示す。どちらの解析結果も水平変位は斜面左側（グラフではマイナス方向）に変形の振幅がシフトしているのが分かる。これは、亀裂のせん断破壊による塑性ひずみが累積するためと考える。また、各解析手法による左肩部の水平変位履歴は0.51秒まではほぼ一致しているが、0.51秒以降は個別要素法による解析結果のほうが変位が累積的に大きくなっている。0.51秒における亀裂の破壊分布図を図-13(a), (b)に示す。どちらの解析結果も2.5倍の入力波の解析結果に比べ、亀裂のせん断破壊領域が進展しており、斜面の左法尻から右側に約10度方向で亀裂のせん断破壊域が分布しており、右側法面で亀裂の引張破壊領域が分布している。従って、個別要素法による解析では解析開始0.51秒時点で亀裂の破壊域が斜面の左側から右側に貫通し、0.51秒以降は貫通した亀裂に変形が集中したため、変位の時刻歴の違いが生じたものと考えられる。図-14(a), (b)は、最も水平変位が大きくなる解析開始0.91秒における時刻の変形図であり、個別要素法は、変形が特定の亀裂に集中（図-14(a)の赤丸部分）していることから確認できる。複合降伏モデルによる解析では、亀裂は一定の幅を持って降伏しているが、個別要素法による解析では、亀裂が貫通する0.51秒以降は、貫通した亀裂を境とした2つの不連続体ブロックとして挙動するため、亀裂が貫通した後の変形挙動に違いを与えているものと考えられる。

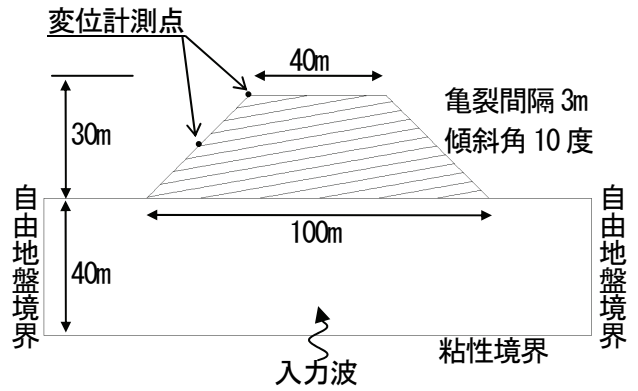


図-8 解析モデル

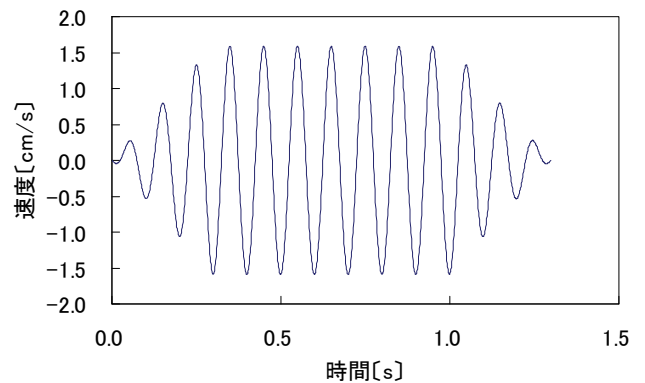
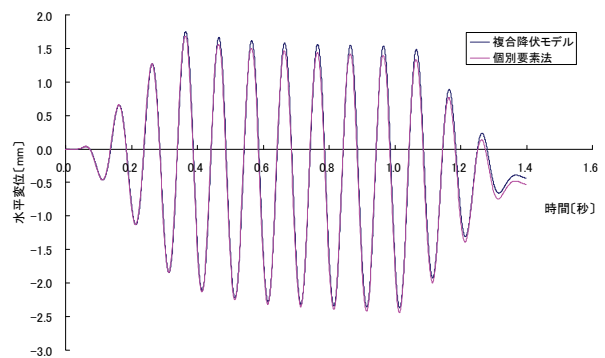
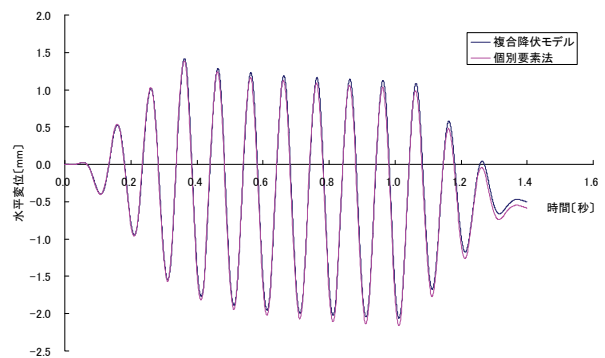


図-9 入力速度波形

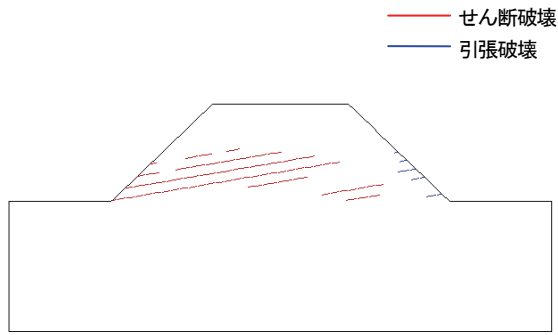


(a) 左肩部

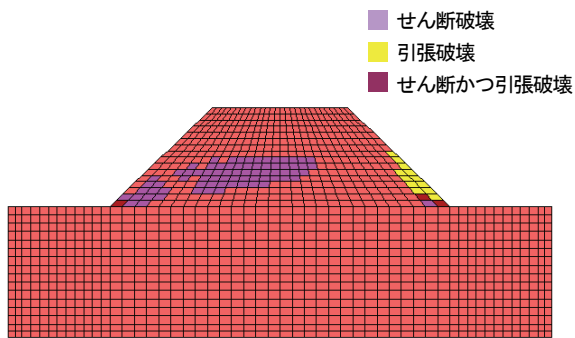


(b) 左中央部

図-10 水平変位時刻歴 (2.5倍の入力波)

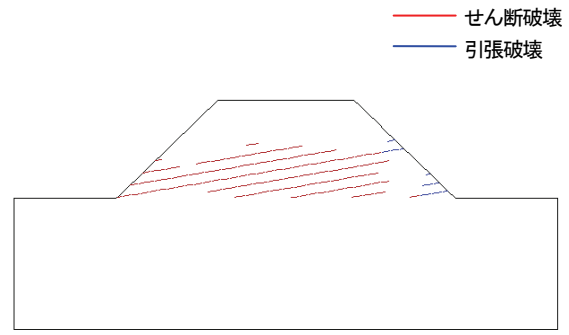


(a) 個別要素法

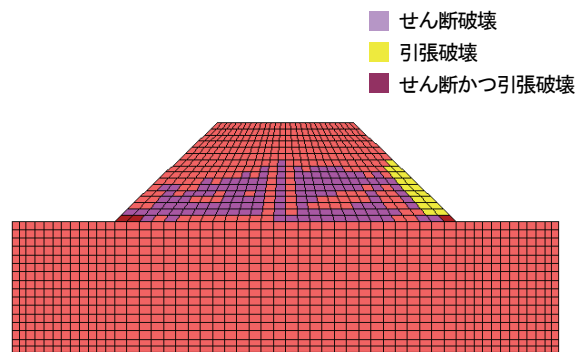


(b) 複合降伏モデル

図-11 2.5倍の入力波による解析開始0.91秒の亀裂破壊分布

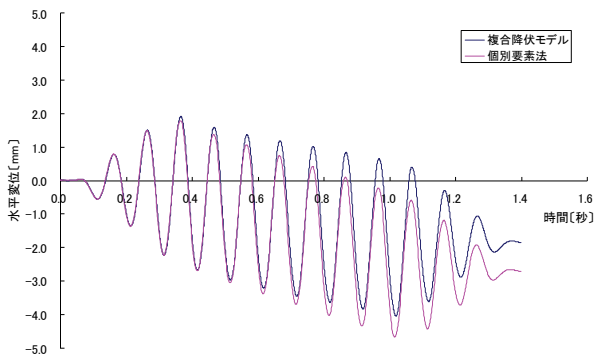


(a) 個別要素法

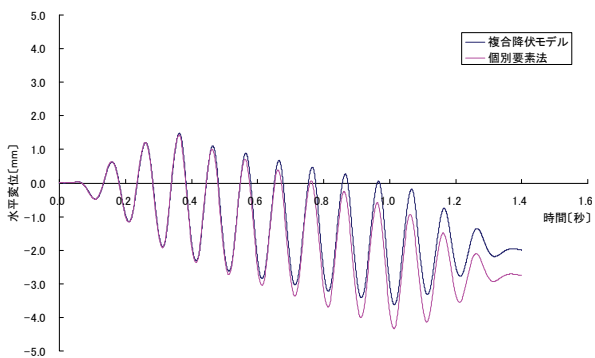


(b) 複合降伏モデル

図-13 3倍の入力波による解析開始0.51秒後の亀裂破壊分布

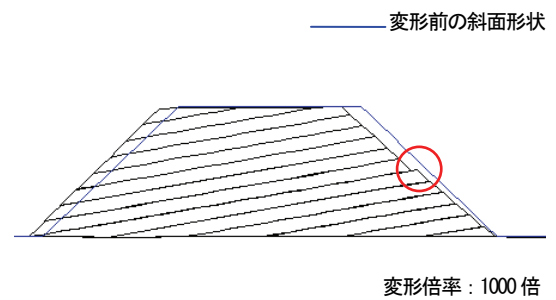


(a) 左肩部

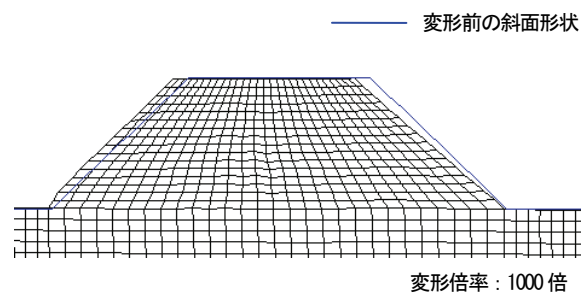


(b) 左中央部

図-12 水平変位時刻歴 (3倍の入力波)



(a) 個別要素法



(b) 複合降伏モデル

図-14 3倍の入力波による解析開始0.91秒後の変形図

## 5. まとめ

亀裂性岩盤の動的非線形解析として、不連続体解析を用いる事例も増えてきているが、亀裂が非常に多く分布している岩盤では不連続体解析手法でモデル化する事が困難な場合がある。今回の比較検討により、要素試験レベルでは複合降伏モデルによる等価連続体解析と個別要素法による不連続体解析結果は一致する事が分かった。また、岩盤斜面モデルにおいても、斜面が特定の亀裂で滑り破壊する直前までの挙動は、両解析手法の結果はほぼ一致しており、亀裂が非常に多く含まれる岩盤においては亀裂一本一本をモデル化することなく、複合降伏モデルによって個別要素法と同等の結果を得られる可能性があることが分かった。今回の検討では、1種類の亀裂方向による検討を行ったが、今後は複数の亀裂方向による解析による比較も試みる予定である。また、亀裂長の影響や亀裂の三次元的な傾斜の影響も検討すべき課題であると考えられる。

## 参考文献

- 1) Cundall, P.A.: A computer model for simulating progressive large-scale movement in blocky rock systems, *Proc. Int. Symp. Soc. for Rock Mech.*, Nancy, France, 1971
- 2) Shi, G.H. and Goodman, R.E., *Discontinuous Deformation Analysis, Proc. 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, pp.268-277, 1984
- 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, 土木学会第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.21-26, 2010
- 4) 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, pp.59-68, 1994
- 5) Itasca Consulting Group, Inc. : *FLAC ver. 6.0 manual Theory and Background*, 2008
- 6) 中川光雄, 蔣宇静, 江崎哲郎: 大変形理論の岩盤挙動および安定性評価への適用, 土木学会論文集, No.575/III-40, pp.93-104, 1997

## COMPARATIVE STUDY BETWEEN CONTINUUM AND DISCONTINUUM ANALYSIS OF JOINTED ROCK MASS SUBJECT TO SEISMIC LOAD

Kazuto TABEL, Sadr Amir AHAMAD and Seiji MORIKAWA

Seismic response and stability of a rock Slope is dependent on its embedded joints characteristics. There are several methods commonly used for dynamic discontinuum analysis of jointed rock masses including Discrete Element Method (DEM) and Discontinuous Deformation Analysis (DDA). On this work, a continuum analysis approach is adopted, with using Multiple Yield Model (MYM) as constitutive model of rock masses and FLAC as analysis platform, several dynamic problems ( element tests and rock slope model ) are analyzed and results are compared with DEM analysis.