

# 不連続性岩盤の動的解析手法の現状と課題

佐々木 猛

サンコーコンサルタント（株）岩盤工学研究所

（本稿は、平成22年度深田研ジオフォーラムにおける講演内容を、著者自身が取り纏め、投稿いただいたものである。）

要旨：本稿では、主として2007年にLisbonで開催された第10回ISRM Congressから昨年11月にシンガポールで開催されたICADD9および本年6月にEUROCK2010に発表された最近の論文を含めた、約10年間における岩盤の不連続面を考慮した解析手法を概括すると共に、著者らがこの間に実施してきた研究の中から代表的な事例を紹介する。また、このような解析を実施するに際し、岩盤不連続面の調査に基づくモデル化の精度を現実の現象に近づけることが最も重要である。したがって、本稿では解析に用いる不連続面の物性評価法やモデル化の著者らが行った代表的な研究も概括する。

キーワード：岩盤不連続面、数値解析、FEM、DDA、マニフォールド法

## 1. はじめに

地盤の動的解析は、特に液状化現象に代表される二相系の解析分野で発達してきた。1964年の新潟地震による川岸町アパートの倒壊、1995年の兵庫県南部地震によるポートアイランドの埋め立て地盤の変形など、その被害が生活に直結することから、我が国では極めて高度な研究が多数なされている。

一方、岩盤では、Goodman (1989) がインタクトな供試体の繰返し載荷試験を実施し、繰返し回数と残留変形と強度の関係を示している(図1)。これは、比較的小さな供試体でもその中に微細な亀裂が存在し、その結果残留ひずみが生じることを示している。

比較的大きな不連続面である断層についてはGoodman *et al.* (1968) がジョイント要素を提案し、その後これらを用いた多数の解析例があり、定番となっている。また、それより規

模の小さなジョイントなどは、その生成過程で様々な形態と複雑な構造となっていることから、そのモデル化がそれほど簡単ではない。また、岩盤の強度・変形試験装置は高い剛性が必要なことから、多額の費用が必要であり、ダム、発電所など重要構造物の設計などで主として発展してきた。

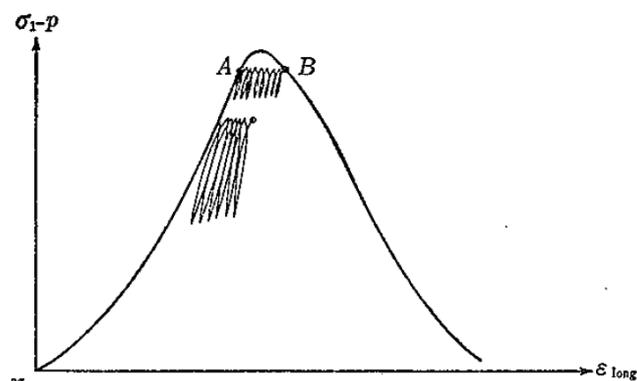


図1 繰返し載荷と強度の関係

(Goodman, 1980)

岩盤中に存在するジョイントなどの岩盤不連続面を考慮した解析法に関する評価はこれまでに幾度か拙著に述べられている(大西・佐々木, 1995; 佐々木, 1996; 佐々木, 1999; 佐々木, 2000; 大西・佐々木, 2002)。しかし, これらは静的解析を主として対象としている。

岩盤内に存在する亀裂と周波数特性, 減衰特性の関係は, King *et al.* (1975) が割れ目の多い場合, 高周波の波動の減衰が著しいことを示した(図2)。これと関連して, 周期と振幅の関係も示している。Schneider (1967), Bieniawski (1978) は, 亀裂性岩盤の平板载荷試験における繰返しの残留変形特性, 岩盤の変形係数とせん断波の周波数の関係などを示した(図3, 4)。また, 周波数と亀裂頻度が逆比例関係にあることも示している。

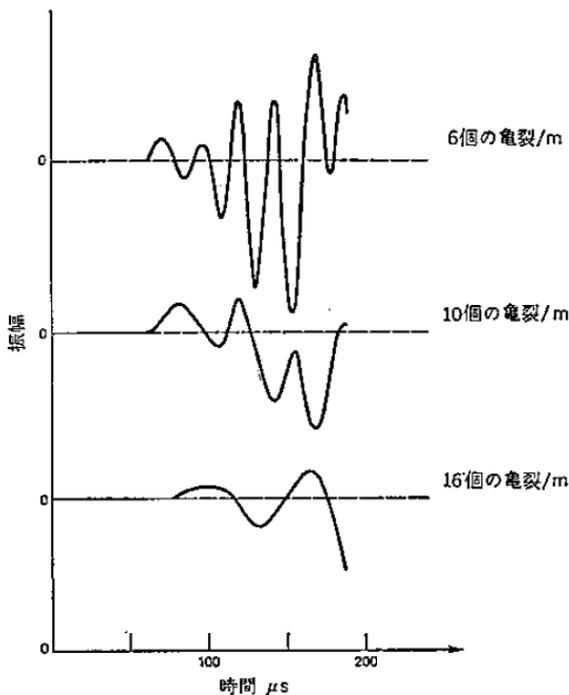


図2 亀裂数と振幅の関係  
(King *et al.*, 1975)

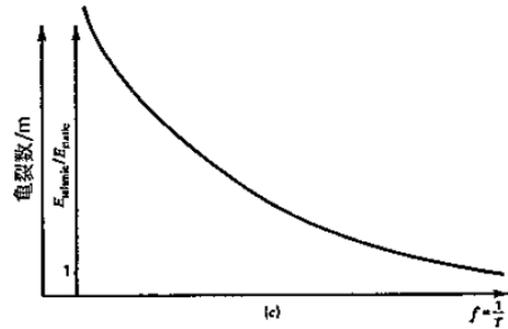


図3 周波数と亀裂頻度の逆比例関係  
(Schneider, 1967)

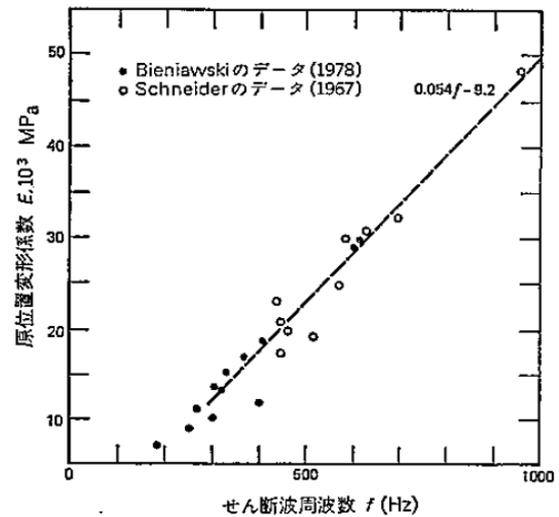


図4 伝播波動の周波数と変形特性  
(Bieniawski, 1978)

つまり, 岩盤の変形試験で現れる非線形な特性の原因は亀裂の滑りが主要なものであることを指摘している。Jafari *et al.* (2004) は亀裂のレプリカによる動的繰返し荷重実験を行っている。これらから, ジョイントの強度は繰返し回数に反比例して指数的に低下し, 残留強度に収束して行くことを示している(図5)。不連続性岩盤の等価連続体モデルによる動的解析手法については, Cho (1988), Cho *et al.* (1991) が超電導磁石による電力地下貯蔵の岩盤内繰返し载荷モデルについて, 節理群を考

慮したコンプライアンス法を初めて提案した。これは岩盤のジョイント内の間隙水圧の変動を考慮した2相系の解析である。

佐々木ほか(1994)はこれらを基本に複数の任意方向のジョイントの組合せとその非線形特性を考慮した複合降伏モデルを提案した。また、佐々木ほか(2004)はこれらに繰返し載荷特性を考慮し、平板載荷試験の繰返し載荷による応力-変形特性を表現した。萩原ほか(2010)、岩田ほか(2010)、Iwata *et al.* (2010) は、岩盤斜面、大型構造物基礎の地震応答解析を行っている。本稿では、これらを中心に解析手法の歴史と現状および課題について述べる。

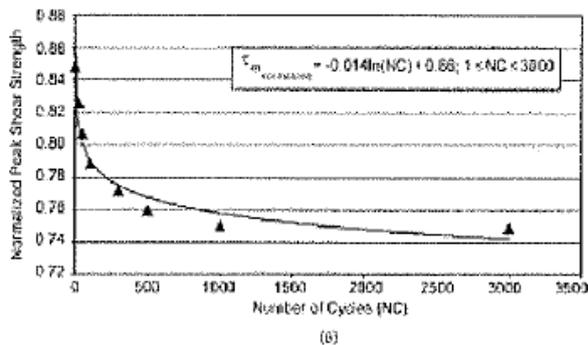


図5 繰返し回数と強度低下の関係  
(Jafari *et al.*, 2004)

## 2. 不連続面の非線形繰返し強度、変形特性

岩盤不連続面の強度、変形特性に関する代表的な研究とこれらに関連した研究を参考文献に示した (Kulhawy, 1975; Bandis *et al.*, 1981; Sasaki *et al.*, 2004; 佐々木ほか, 2005; 岩田ほか, 2006; 吉中ほか, 2006)。これらの研究から、岩盤不連続面の強度、変形特性はその拘束応力に強く依存し、非線形な関係にあることが知られている (Kulhawy, 1975; Bandis *et al.*,

1981)。またこれらは、荷重の載荷と除荷経路で異なる履歴を有している。佐々木ほか(2005)は岩盤不連続面の繰返し載荷特性を考慮した構成式を提案し、平板載荷試験の解析を行いこれまでに行われた実験結果を説明している。

また、吉中ほか(2006)は岩盤不連続面の強度、変形特性と寸法効果についてこれまでの研究結果をまとめている。これまで岩盤不連続面の強度、変形特性は主として載荷状態の研究が多く、除荷特性や繰返し特性を考慮した解析は少ない。これらは、節理を含む岩盤の掘削解析や動的解析の基本特性として利用することが考えられる (岩田ほか, 2005; 佐々木ほか, 2005) (図6)。

Amadei *et al.* (1995) は繰返し一面せん断試験にジョイントの強度特性を提案している。また、前述のJafari *et al.* (2003, 2004) はジョイントの繰返し強度・変形特性と繰返し回数との関係を示した。

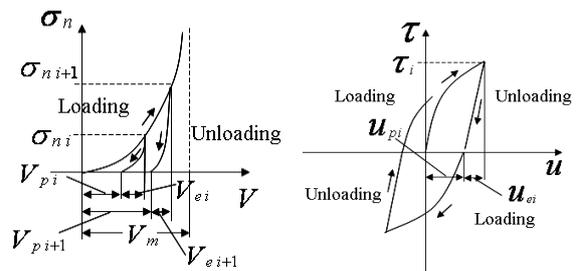


図6 ジョイントの変形特性  
(萩原ほか(2010), 岩田ほか(2010))

## 3. 等価連続体解析

図7に等価連続体解析手法の代表的なものを示す。これらは、応力一定仮定とひずみ一定仮定に分類される。応力一定仮定は地盤のような圧縮材料を対象としている。基盤と不連

続面の応力は同一と仮定し、コンプライアンス法を用いて等価な変形係数を求める。この場合、不連続面の非線形性や強度も設定することができる。

等価連続体解析手法は著者らが提案した複合降伏モデルの他に、これまで、種々の手法が提案されているが、動的解析に限っては、弾性波速度検層結果を基本とする等方弾性を仮定する方法がほとんどである。

Yoshinaka *et al.* (2007) は複合降伏モデルを用いて地震による大規模斜面崩落解析を簡便的な静的解析により行い、崩落面の滑り安全率を評価している。前述のように、萩原ほか(2010)、岩田ほか(2010)、Iwata *et al.* (2010) は、岩盤斜面、大型構造物基礎の地震応答解析を行っている。

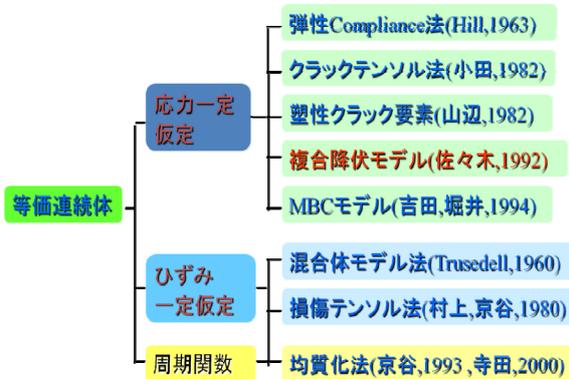


図7 代表的な等価連続体解析手法

### 3.1 複合降伏モデルの概要

#### (1) 全体運動方程式

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。これらを式(2)の増分形式で表わす。

$$[M]\{\Delta\ddot{u}\} + [C]\{\Delta\dot{u}\} + [K]\{\Delta u\} = \{\Delta f\} \quad (2)$$

#### (2) 釣合方程式の解法

式(2)の運動方程式は、Newmarkの $\beta$ 、 $\gamma$ 法で、 $\beta=0.25$ 、 $\gamma=0.5$ とし、これを増分変位に対する連立方程式の式(3)を各時間刻みで解くことにより得られる。

$$\left[ [K] + \frac{1}{\beta\Delta t^2}[M] + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}[C] \right] \{\Delta u\} = -\alpha(\Delta t)[M] + [M] \left[ \frac{1}{\beta\Delta t} \{\ddot{u}(t)\} + \frac{1}{2\beta} \{\ddot{u}(t)\} \right] + [C] \left[ \frac{\gamma}{\beta} \{\dot{u}(t)\} + \left\{ \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right\} \Delta t \{\ddot{u}(t)\} \right] \quad (3)$$

ここに、 $\{\Delta u\}$ : 増分変位、 $\Delta t$ : 時間刻み、 $\beta$ 、 $\gamma$ : Newmarkの積分定数、 $\alpha(t)$ : 地震加速度の時刻歴である。変位増分が求まったら、式(4)で加速度増分、式(5)で速度増分を求める。

$$\{\Delta\ddot{u}\} = \frac{1}{\beta\Delta t^2} \left[ \{\Delta u\} - \{\dot{u}(t)\}\Delta t - \frac{\Delta t^2}{2} \{\ddot{u}(t)\} \right] \quad (4)$$

$$\{\Delta\dot{u}\} = [\{\ddot{u}(t)\} + \delta\{\Delta\ddot{u}\}]\Delta t \quad (5)$$

#### (3) 質量および構造減衰

式(3)のブロックの構造減衰マトリックス $C$ は粘性係数と質量マトリックス $M$ を用いて式(6)で表わされる。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (6)$$

ここに、 $\alpha$ : 質量減衰定数、 $\beta$ : 構造減衰定数である。

#### (4) 複合降伏モデルによる不連続面の構成則

複合降伏モデルは式(7)に示すように岩盤の総ひずみ $\{\epsilon_T\}$ を母岩のひずみ $\{\epsilon_R\}$ と複数の節

理群のひずみ  $\{\varepsilon_I\}$  の和で表現されるものと仮定している。

$$\{\varepsilon_T\} = \sum \{\varepsilon_I\} + \{\varepsilon_R\} \quad (7)$$

ここで、各節理群は周期的に存在し、それらの体積が母岩に比較して無視でき、母岩の応力と節理群の応力は等しいと仮定すれば、岩盤の総ひずみは次式で表すことができる。

$$\{\varepsilon_T\} = [\sum [F_I] + [E]^{-1}] \cdot \{\sigma\} = [C] \cdot \{\sigma\} \quad (8)$$

ここに、 $\{\sigma\}$  : 総応力ベクトル,  $[E]$  : 等方弾性体の応力-ひずみマトリックス,  $[F_I]$  : 節理群のコンプライアンスマトリックス,  $[C]$  : 母岩と節理群の和のコンプライアンスマトリックスである。

#### (5) 節理群の降伏条件

式(9)に示すMohr-Coulombの降伏条件を節理群に用いる。

$$F_s = |\tau_s| - (C + \sigma_n \tan \phi_j) \quad (9)$$

ここに、 $\tau_s$  : 不連続面のせん断応力,  $\sigma_n$  : 不連続面の垂直方向応力,  $C$  : 不連続面の粘着力,  $\phi_j$  : 不連続面の摩擦角である。

#### (6) 節理群の変形特性

不連続面の垂直剛性  $K_n$  は式(10)に示すBandisらの提案式による双曲線型の変形特性を用いた。

$$K_n = K_{ni} \left[ 1 - \frac{\sigma_n}{V_m K_{ni} + \sigma_n} \right]^{-2} \quad (10)$$

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

不連続面の垂直方向の繰返し載荷試験では、

図6に示すように除荷過程においても非線形性を示し、残留変形を生じる。任意の拘束圧  $\sigma_{mi}$  における不連続面の閉合量を  $V_i$  とし、これを弾性変形  $V_{ei}$  と塑性変形  $V_{pi}$  の和として式(11)で表し、弾性変形  $V_{ei}$  は式(12)に示す最大閉合量  $V_m$  の二次関数で定義する。除荷時の変形特性は、この弾性変形  $V_{ei}$  を Bandis の提案式に除荷特性を付加した。

$$V_i = V_{ei} + V_{pi} \quad (11)$$

$$V_{ei} = \left( 1 - \frac{V_i}{V_m} \right)^2 V_i \quad (12)$$

また、不連続面のせん断剛性  $K_s$  は式(13)に示すKulhawyの提案式による双曲線型の変形特性を用いた。

$$K_{st} = K_{si} \left( \frac{\sigma_n}{P_a} \right)^{nj} \left( 1 - \frac{\tau_s \cdot R_f}{\tau_p} \right)^2 \quad (13)$$

ここに、 $K_{si}$  : 初期せん断剛性,  $\sigma_n$  : 不連続面の垂直応力,  $P_a$  : 大気圧,  $\tau_p$  :  $C$ ,  $\phi_j$  により計算されるせん断強度,  $\tau_s$  : せん断応力,  $nj$  : 剛性係数,  $R_f$  : 破壊比であり一般的に 0.7~0.9 の係数。なお、一般的に係数  $nj$ ,  $R_f$  は不連続面のせん断試験結果をもとに設定される。

不連続面のせん断方向の繰返し載荷試験においても、図6に示すように除荷過程で残留変形が生じる。垂直方向と同様に、任意の拘束圧  $\tau_i$  における不連続面のせん断変位  $U_i$  を、弾性変形  $U_{ei}$  と塑性変形  $U_{pi}$  の和として式(14)で表し、弾性変形  $U_{ei}$  は式(15)に示す破壊接近度  $\tau_i/\tau_p$  の二次関数で定義する。除荷経路の変形特性は、単純化のために線形とした。

$$u_i = u_{ei} + u_{pi} \quad (14)$$

$$u_e = u_i \cdot \left( 1 - \frac{\tau_i R_f}{\tau_p} \right)^2 \quad (15)$$

岩盤不連続面の動的繰返し一面せん断試験

はJafari *et al.* (2003, 2004), Puntel *et al.* (2006), Belem *et al.* (2004) により行われている。これらの結果では、繰返し回数により不連続面の凹凸が平滑化することにより、強度が一定に収束する挙動などが報告されている。しかし、本報告ではそのような特性は考慮していない。また、地震応答解析では、不連続面の垂直応力は引張り側と圧縮側に交互に変化し、連続的な応力経路を辿ることは少ない。したがって、不連続面の剛性の変化も拘束応力の変化に伴い断続的な変化をする。

図8から図13は萩原ほか(2010), Iwata *et al.* (2010) による、2004年の中越地震で崩落した斜面の複合降伏モデルによる、地震応答解析結果を示す。

入力地震波は沖積地盤上で観測されており、崩落斜面から2km程度離れた地点である。そのため、崩落斜面の洪積地盤の-50mまでSHAKEで引き戻し、長周期成分を少なくしたものを入力している。図11の法先の変位応答では、ジョイントを考慮したモデルが多少大きくなっており、残留変位が生じている。図12は、法先要素の低角度(22°)のジョイント面上のせん断応力分布を示す。弾性解と比較し、川側へのせん断応力が大きくなっている。図13は

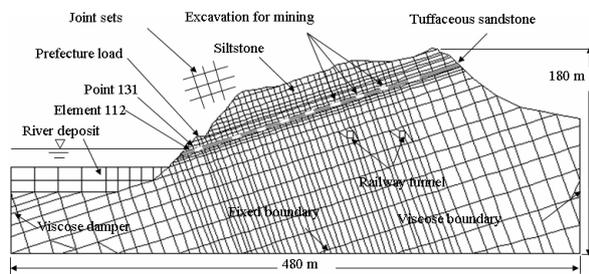


図8 斜面崩落モデル

(萩原ほか, 2010; Iwata *et al.*, 2010)

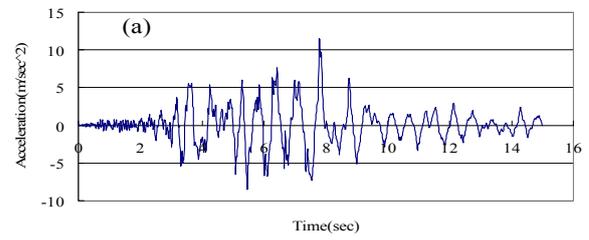


図9 入力地震波(水平)

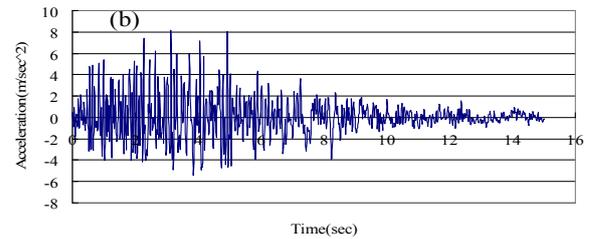


図10 入力地震波(上下)

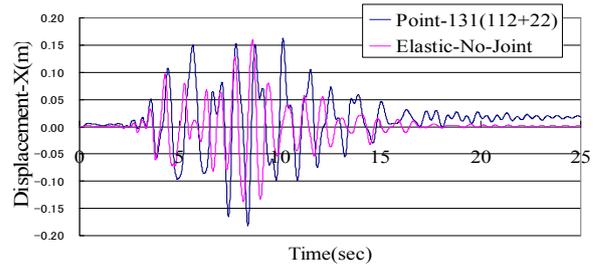


図11 斜面法先の変位応答

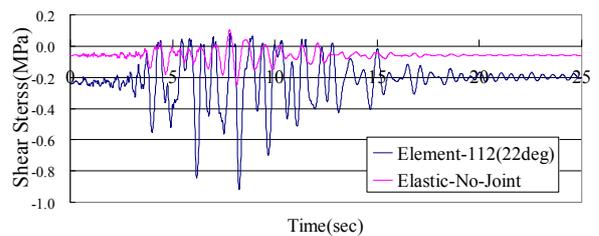


図12 法先要素ジョイント面上のせん断応力

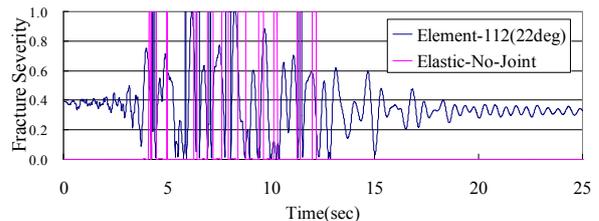


図13 ジョイント面上の破壊接近度

同じくジョイント面上の破壊接近度を示すが、初期の破壊時刻はほぼ同時期である。また、弾性解の破壊接近度はジョイント面上の鉛直応力とせん断応力を同様に計算して算出している。

図14は岩盤基礎上の大型構造物のモデルである。図15に設計用の入力地震波を示す。これは、硬岩用にスペクトルから作成された人工地震波である。図16は建屋基礎における弾性およびジョイントの組合せがそれぞれ、 $15^\circ + 105^\circ$ 、 $30^\circ + 120^\circ$ 、 $45^\circ + 135^\circ$ の場合の加速度応答結果を示す。各ジョイント角度の組合せの違いにより異なる応答結果を示しているのが分かる。図17はジョイントの組合せが $30^\circ + 120^\circ$ の場合の7秒での破壊接近度分布を示す。建屋の隅角部付近で大きな値となっている。

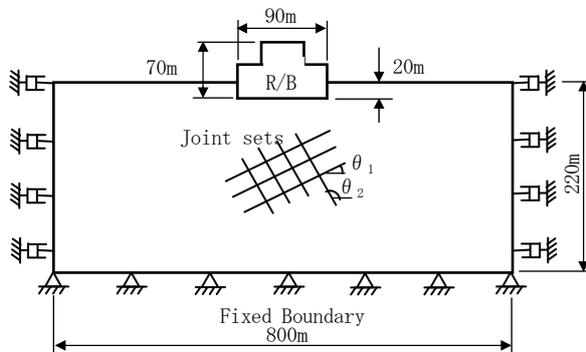


図14 大型構造物基礎モデル

(Iwata *et al.*, 2010)

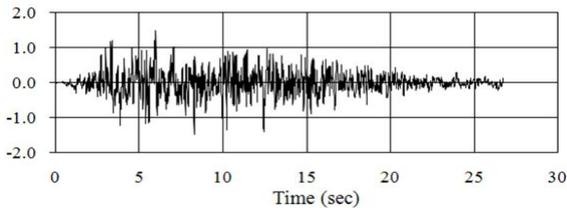


図15 設計用地震入力波

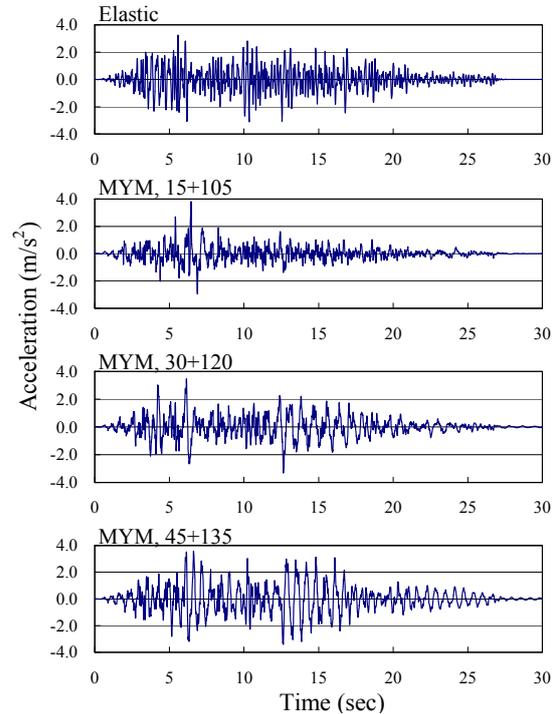


図16 建屋基礎上の加速度応答

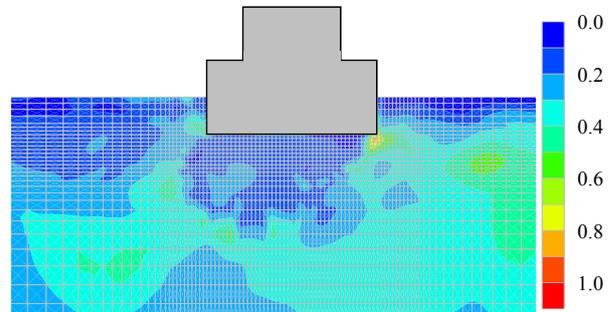


図17 破壊接近度分布

#### 4. 不連続体解析手法

図18に代表的な不連続体解析手法を示す。

不連続変形法 (DDA) はShiにより開発された (Shi, 1989)。わが国では、京都大学大西教授を委員長とする不連続性岩盤解析実用化研究会を中心に研究活動を行っている。また、これらは国際不連続体解析会議が組織化され本年で第9回がシンガポールで開催されている。こ

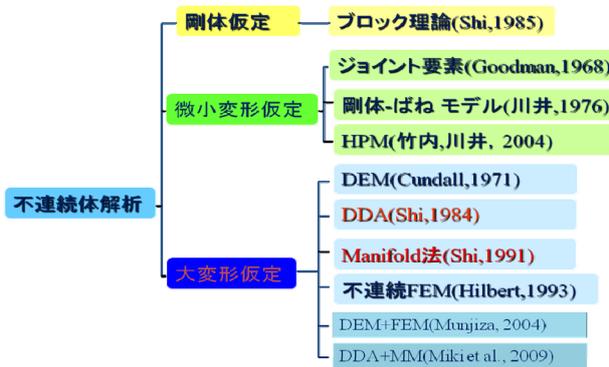


図18 代表的な不連続体解析手法

の中には、DDAの他にブロック理論、DEMや竹内・川井らが提案する統一エネルギー理論を適用したHPMも含まれる。これは、アメリカ、日本、イギリス、中国、台湾、シンガポール、イスラエル、イランなどが主要なメンバーで今回は100編が投稿され活発な活動を行っている。

わが国では、大西・陳(1997)による豊浜トンネルの崩落解析が注目された。また、佐々木・吉中(2002)によるピラミッドの解析や、最近では、Sasaki *et al.* (2004), Sasaki *et al.* (2005), Ohnishi *et al.* (2005), Sasaki *et al.* (2007)による地震応答解析の実験シミュレーションや適用解析が行われている。また、萩原ほか(2004)による落石の3次元解析も行われ、落石経路と範囲の推定に利用されている。その他の代表的な事例は拙著(大西ほか, 2005)を参考にされたい。

マニフォールド法(Manifold法)はDDAと同様にShiにより開発された(Shi, 1991; Shi, 1992)。わが国では、鈴木、大坪ほか(1998)により有限被覆法として研究されている。ここでは、それらの研究は省略する。

Shiによる手法はメッシュが自動化されており、メッシュレス法の一つに数えられている。

その後、Sasaki *et al.* (1997) による4節点アイソパラメトリック要素や弾塑性解析がなされ、最近では、Miki *et al.* (2007)によって、接触面の釣合い条件の改良や地層境界を考慮した解析が可能となり、より精度が向上している。また、本手法は中国グループやシンガポールグループでも熱心に研究が行われている。

#### 4.1 DDAによる地震応答解析の概要

動的大変形解析の弾性体ブロックの接触を含む運動方程式を統一的に表現すると、系全体のポテンシャルエネルギー  $\Pi^{sys}$  は式(16)のようになる。

$$\Pi^{sys} = \sum_{i=1}^n \Pi^{(block)i} = \sum_{i=1}^n \left( \Pi^i + \sum_{j=1}^m \Pi_{PL}^{i,j} \right) \quad (16)$$

式(16)の右辺第1項は各ブロックの連続体としてのポテンシャルエネルギーであり、第2項はブロック  $i$  のブロック  $j$  に対する接触のポテンシャルエネルギーである。第1項は式(17)で表される。

$$\Pi^i = F(x, y) \int_V \frac{\rho^c}{\rho_0} \left[ \bar{r}_{ij}^* \delta D_{ij} - \frac{1}{2} \sigma_{ij} \delta (2 D_{ik} D_{kj} - v_{k,i} v_{k,j}) \right] dV - \int_{\Gamma} \bar{f} \cdot u d\Gamma - F(x, y) \int_V [\rho(\dot{b} - \ddot{u}) - c\dot{u}] \cdot dV \quad (17)$$

式(17)の第1項は速度場のひずみエネルギー、第2項は表面摩擦エネルギーであり、第3項は慣性力及び減衰力によるエネルギーである。ここに、 $\ddot{u}$  : 加速度、 $\dot{u}$  : 速度、 $\rho$  : 質量、 $b$  : 物体力、 $c$  : 減衰定数、 $\bar{f}$  : 表面摩擦力、 $V$  : ブロックの体積、 $\Gamma$  : ブロックの表面積である。

DDA(Shi,1985)は式(18)に示すHamiltonの原理による接触を含む運動方程式をひずみエネルギー最小化原理により釣合い方程式を求めて定式化している。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (18)$$

ここに、 $M$ ：質量マトリックス、 $C$ ：減衰マトリックス、 $K$ ：剛性マトリックス、 $F$ ：外力ベクトル、 $\ddot{u}$ ：ブロック重心加速度、 $\dot{u}$ ：ブロック重心速度、 $u$ ：ブロック重心の剛体変位、剛体回転、ひずみである。式(18)の減衰マトリックス  $C$  は粘性係数  $\eta$  と質量マトリックス  $M$  を用いて、式(19)で表される。

$$C = \eta M \quad (19)$$

粘性係数  $\eta$  の物理的意味は、落石自身の減衰や空中にある状態での空気抵抗、斜面上の植生や樹木による減衰などとして評価される。

式(18)の運動方程式は、Newmark の  $\beta$ 、 $\gamma$  法で、 $\beta=0.5$ 、 $\gamma=1.0$  とし、これを増分変位に対する連立方程式の式(20)を各時間刻みで解くことにより得られる。

$$\tilde{K} \cdot \Delta u = \tilde{F} \quad (20)$$

$$\tilde{K} = \frac{2}{\Delta t^2} M + \frac{2\eta}{\Delta t} M + \frac{\rho^c}{\rho^0} [K_e + K_s] \quad (21)$$

$$\tilde{F} = \frac{2}{\Delta t} M \cdot \dot{u} + (\Delta F - \sum [\sigma dv]) - M \alpha(t) \quad (22)$$

ここに、 $\Delta u$ ：増分変位、 $K_e$ ：線形項の剛性マトリックス、 $K_s$ ：剛体回転に伴う初期応力マトリックス、 $\alpha(t)$ ：地震加速度の時刻歴である。

また、 $i$  ステップでのブロック内の任意点の時刻  $t$  の変位、速度、加速度の関係は式(23)～(25)で表される。

$$u_i = [D_i] = \frac{\Delta t^2}{2} \frac{\partial^2 [D(t)]}{\partial t^2} + \Delta t \frac{\partial [D(t)]}{\partial t} \quad (23)$$

$$\dot{u}_i = \frac{\partial [D(t)]}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t} [D_i] - \frac{\partial [D(t - \Delta t)]}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t} [D_i] - \dot{u}_{i-1} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \ddot{u}_i &= \frac{\partial^2 [D(t)]}{\partial t^2} = \frac{2}{\Delta t^2} [D_i] + \frac{2}{\Delta t} \frac{\partial [D(t - \Delta t)]}{\partial t} \quad (25) \\ &= \frac{2}{\Delta t^2} [D_i] - \frac{2}{\Delta t} \dot{u}_{i-1} \end{aligned}$$

図19は、DDA (Yoshinaka *et al.*, 2007) による斜面の崩壊解析結果であるが、実際の崩落形状とほぼ一致している。特に不連続体解析では、ブロックの形状が結果に大きな影響を与えることが分かっており、どのような形状にブロックが分割されるかと言うモデル化の調査が特に重要である。

図20、図21、図22は、斜面上にある砂利崩落の振動実験を解析した(萩原ほか, 2008)、入力波、解析結果と実験結果の比較である。この解析では、図22に示す斜面と斜面上の碎石の固有振動数に比率に対して、応答倍率を示している。

これらでは、碎石の固有振動数が一定以上では、応答倍率がゼロに近くなり、無意味な解析となることを示している。特に、碎石を剛体と仮定した解析法では、碎石の固有振動数が無限大となり、応答倍率がゼロとなるので、上部ブロックは基盤の変位と同期することになり解析する意味が小さい。

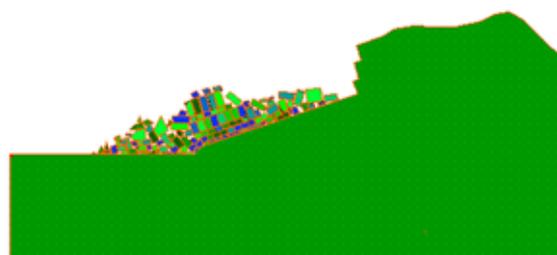


図19 DDAによる斜面崩壊解析

(Yoshinaka *et al.*, 2007)

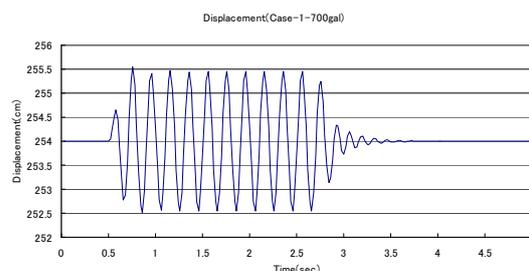


図20 DDAによる落石実験入力波(萩原ら, 2008)

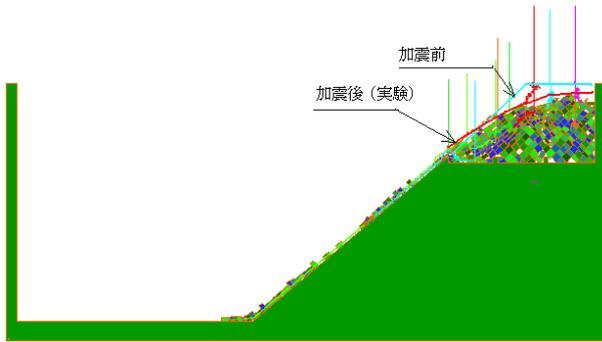


図21 DDAによる落石実験解析結果

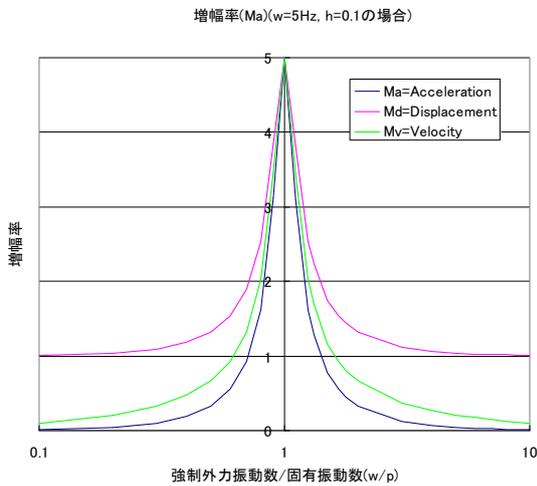


図22 DDAによる落石実験解析応答倍率

図23、図24はピラミッドの上部構造の応力と基礎の応力をDDAとManifold法で比較した結果である。DDAでは上部のブロック構造の変位や応力が求まるが、その基盤の沈下などは一定となり、上部構造の安定性評価の一つである基盤の不同沈下現象を解析しづらい。上部構造は完全にブロック状態でDDAの応力分布は実際に近いが基礎部分はManifold法の結果が現実に近い。図25、図26のGard橋の結果も同様である。図25はDDAによるGard橋の主応力分布を示す。これらはアーチに沿って綺麗に分布しているのが分かる。図26は橋脚部基

礎の不同沈下を見るため、Manifold法で解析した結果である。これらでは、橋脚基礎部分で大きな不同沈下は認められず、安定した上部構造であることが分かる。

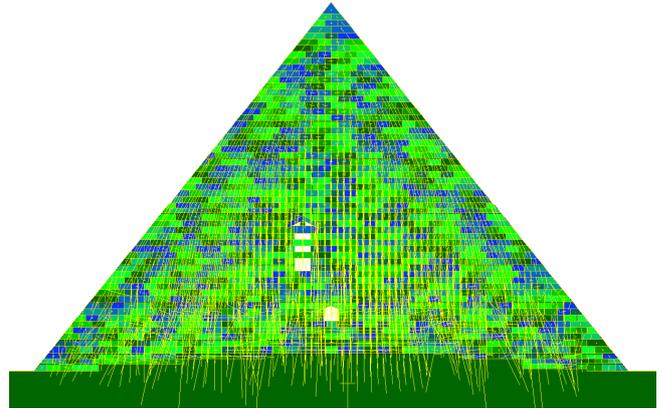


図23 DDAによるピラミッドの主応力  
(Sasaki *et al.*, 2009)

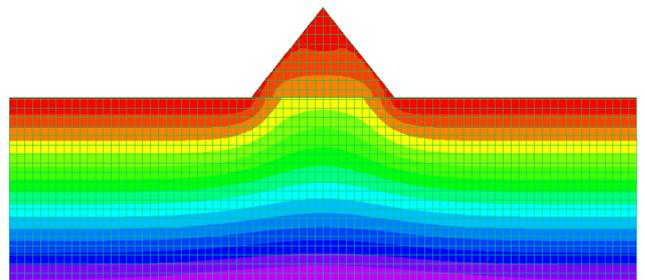


図24 MMによるピラミッドの鉛直応力  
(Sasaki *et al.*, 2009)

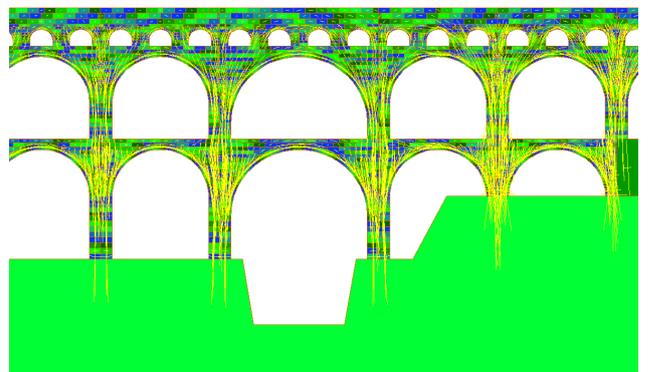


図25 DDAによるGard橋の主応力  
(Sasaki *et al.*, 2009)

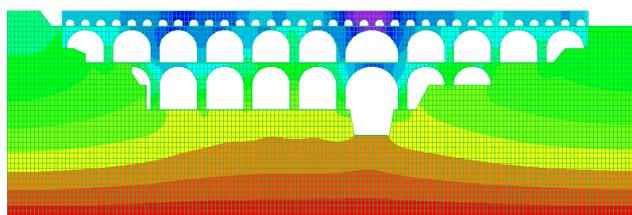


図26 MMIによるGard橋の鉛直変位

(Sasaki *et al.*, 2009)

図27はDDAとManifold法を組合せた解析で両者の欠点を補っている (Miki *et al.*, 2009). DDAでは、地震加速度が斜面で場所にかかわらず同じであるが、この方法では、場所によって異なった振動特性を上部ブロックに与えることが出来、より現実的である。また、DDAではブロック剛体回転が未知数になっており、斜面上を回転しながら崩落するブロックの表現が可能であるが、Manifold法は本質的には有限要素法と同じであり、剛体回転モードを表現できないため、このような組合せの解析が必要である。

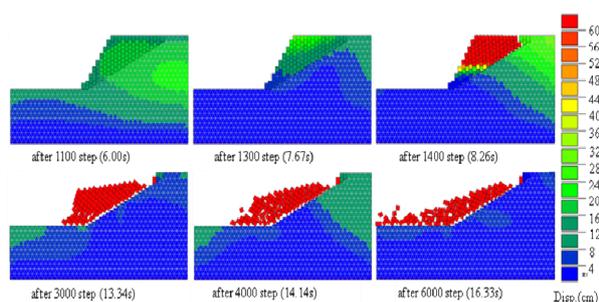


図27 DDA+MMIによる地震応答解析

(Ohnishi *et al.*, 2009)

## 5. 結論と課題

本稿では、岩盤工学における最近の不連続体解析法に関して、特に著者らの研究グルー

プを中心に述べた。

複合降伏モデルでは、不連続面の繰り返し変形特性を考慮することにより、今まで弾性体と仮定した解析では表現が困難であった掘削解析や計測値との照合が容易となり、より実現象を表現可能になった。

また、DDAは、理論的には、微小変形の範囲では、連続体のFEMと同等の精度を有し、回転モードが含まれる現象は、格段に不連続体解析法が物理現象を良く表現し得ることが分かっている。

今後の課題としては、

- 亀裂の調査に基づく走向/傾斜、間隔、長さ分布の推定などをよりの確に行い、モデル化の精度を向上させる手法の確立
- 不連続面の接触の非線形な強度・変形特性の導入と寸法効果の評価
- 不連続面の接触力の精度向上手法の開発、例えば、川井による統一エネルギー理論の導入など
- 他モデルとの結合、例えば、FEMとDEMとの結合 (Munjiza, 2004)、DDAとFEMとの結合 (中国)、DDAとManifold法との結合 (Miki *et al.*, 2009)
- 3次元モデルの実用化

などである。岩盤不連続面の本質は3次元であり、現在 3D-DDAの基本的な部分は完成しており、これら実用化作業を進めている。また、究極的には3D-DDAと3D-Manifold法の結合が考えられる。

またジョイントの繰り返し载荷の構成則では Jafari *et al.* (2003), Belem *et al.* (2004), Puntel *et al.* (2006)が示している、ジョイント面の繰り返し回数と強度低下の関係について、著者は以下の関数を定義し、若干の検討を行った。

$$\tau_{ij} = c_{jo} - c_{jd} \left( \frac{N_{ij}}{N_{cr}} \right)^{m_j} + \sigma_n (\phi_{jo} - \phi_{jd} \left( \frac{N_{ij}}{N_{cr}} \right)^{p_j}) \quad (26)$$

ここに、 $c_j$  : ジョイントの強度、 $\phi_j$  : ジョイントの摩擦角、 $\sigma_n$  : ジョイントの鉛直方向拘束応力、 $c_{jd}$  : 粘着力の繰返しによる低下率、 $\phi_{jd}$  : 摩擦角の繰返しによる低下率、 $N_{cr}$  : 残留強度に達する繰返し回数とする。

式(26)の指数関数を定義し、斜面モデルに適用し試算した。本モデルでは、前述の斜面モデルで、ジョイントの強度が繰返し回数1000回で20%低下し、残留強度に収束して行くと仮定している。

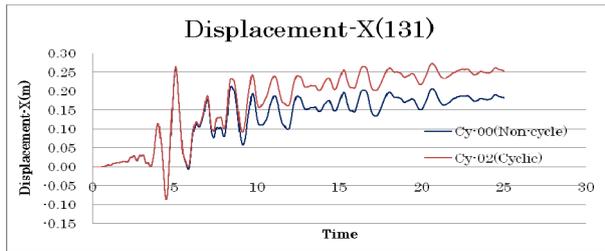


図28 繰返し载荷による強度低下を考慮した解析

この結果では、繰返し回数の増加に従って残留変位が増加している(図28)。しかし、実験に使用した供試体の寸法に限度があり、実際の自然に存在する寸法との関係を今後とも、検討する必要がある。

解析精度の観点では、小さすぎる時間刻み、大きなブロックと小さなブロックが混在するモデルでは有効計算桁の関係から桁落ちにより精度が低下する。これは、弾性係数やペナルティ係数も同様で、その比が大きな値を用いると同様の現象が発生する。これらの解決には、全体剛性マトリックスのスケールリング手法や4倍長桁のOSやコンパイラが必要である。

しかし、本分野の研究は日進月歩であり、

研究者らの絶え間ない努力により必ず解決されるものと期待している。

### 参考文献

- Amadei, B. and Wibowo, J.: Applicability of existing models to predict the behavior of rock joints under different boundary conditions, *Proceedings of the Second International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation*, pp. 36-106, 1997.
- Bandis, S., Lumsden, A. C. & N. R. Barton : Experimental studies of scale effects on the shear behavior of rock joints, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 18, pp. 1-21, 1981
- Belem, T., Souley Mountaka, Françoise Homand: Generalized directional peak shear stress criterion for dilatant rock joints, *Proceedings of 57<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference*, 2004.
- Bieniawski, Z. T.,: Determining rock mass deformability – experience from case histories, *Int. J., Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 15, No. 5, pp. 237-248, 1978.
- Cho, T. F. : Continuum and discrete modeling of porous and jointed rock : Application to the design of near surface annular excavations, The University of Wisconsin, 1988.
- Cho, T. F. *et al.* : Continuum modeling of porous rock with arbitrary joint sets, including coupled deformation-diffusion behavior, *Proceedings of the 7<sup>th</sup> ISRM Congress, Aachen*, pp.805-811, 1991.
- Goodman, R. E.: *Introduction to the rock mechanics*, Second Edition, Jhon Willy & Sons, Inc., 1989.
- Goodman, R. E., and Taylor, R. L.: A model for the mechanics of jointed rock, *Jl. Soil Mech. & Found. Div., Proc. ASCE*, Vol. 94, No. SM3, pp. 637-659,

- 1968.
- 萩原育夫, 三木茂, 佐々木猛, 大西有三, 西山哲: 不連続変形法による 3 次元落石解析事例, 第 9 回計算工学講演会論文集, pp. 217-218, 2004.
- 萩原育夫, 佐々木猛, 佐々木勝司, 大西有三, 西山哲, 伊藤洋: DDA による積層ブロックモデルの応答特性に関する基礎的検討, 土木学会, 第 62 回年次講演会, pp.91-92, 2007.9
- 萩原育夫, 佐々木猛, 大西有三, 伊藤洋: DDA によるブロック構造の動的応答に関する基礎的検討, 土木学会, 第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 153-158, 2008.
- 萩原育夫, 佐々木猛, 大西有三, 伊藤洋: 不連続変形法による斜面崩壊振動実験の検討, 土木学会, 第 63 回年次講演会, 2008.
- 萩原育夫, 佐々木猛, 吉中龍之進, 大西有三: 不連続体解析法による地震時岩盤斜面崩壊の挙動解析, 地すべり学会, 2009.
- 萩原育夫, 佐々木猛, 佐々木勝司, 吉中龍之進: 不連続面に着目した複合降伏モデルによる崩壊斜面の地震応答解析, 土木学会, 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 328-333, 2010.
- 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講演論文集, pp. 1221-1222, 2005.
- 岩田直樹, 佐々木猛, 吉中龍之進: 複合降伏モデルによる平板载荷試験における変形特性の寸法効果に関する解析的検討, 土木学会第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 149-154, 2006.
- 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.
- Iwata, N., Sasaki, T., K. Sasaki and R., Yoshinaka: Applicability of earthquake response analysis by Multiple Yield Model for discontinuous rock, ISRM Symposium, EUROCK2010, Swiss Lausanne, pp. 535-538, 2010.
- Jafari, M. K., K. Amini Hosseini, F. Pellet, M. Boulon, O. Buzzi: Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 23, pp. 619-630, 2003.
- Jafari, M. K., F. Pellet, M. Boulon, K. Amini Hosseini: Experimental study of mechanical behaviour of rock joints under cyclic loading, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 37 (1), pp. 3-23, 2004.
- King, M. S., Pobran, V. S., and McConnell, B. V.,: Acoustic borehole logging system, Proceedings 9<sup>th</sup> Canadian Rock Mechanics Symposium, Montreal, 1975.
- Kulhawy, F.H.: Stress deformation properties of rock and rock discontinuities, *Engineering Geology*, Vol.9, pp. 327-350, 1975.
- Miki, S., Sasaki T., Ohnishi, Y., Nishiyama, S.: Applications of Manifold method to geotechnical problems involving excavations, Eighth International Conference on the Analysis of Discontinuous Deformation, pp. 275-280, 2007.
- Miki, S., T. Sasaki, T. Koyama S. Nishiyama, and Y. Ohnishi: Combined analysis of DDA and NMM (NMM-DDA), and its application to dynamic response models, Ninth International Conference on the Analysis of Discontinuous Deformation, pp.

- 255-263, 2009.
- Miki, S., T. Sasaki, T. Koyama S. Nishiyama, and Y. Ohnishi: Development of Coupled Discontinuous Deformation analysis and Numerical Manifold Method (NMM-DDA), *International Journal of Computational Methods*, Volume 7, Issue 1, pp. 131-150, 2010.
- Munjiza, A.: *The combined finite-discrete element method*, Wiley, Chichester, 2004.
- 大西有三, 佐々木猛: FEM, DDA から Manifold Method, (社)システム総合研究所, 第6回 Manifold 法実用化研究会, 1995.
- 大西有三, 陳光齋: 豊浜トンネル岩盤崩落の解析について, 第9回 Manifold Method 実用化研究会, (社)システム総合研究所, pp. 45-51, 1997.
- 大西有三, 佐々木猛: マニフォールド法と不連続体解析, 計算工学, 特集, メッシュ法, Vol. 7, No. 1, pp. 11-15, 2002
- Ohnishi, Y., Nishiyama, S., Sasaki, T., Nakai, T.: The application of DDA to practical rock engineering problems: Issues and recent insight, *Seventh International Conference on the Analysis of Discontinuous Deformation*, pp. 277 -287, 2005.
- 大西有三, 佐々木猛, G.H.Shi: 不連続変形法 (DDA), 計算工学会編, 丸善, 2005.
- Ohnishi, Y., Nishiyama, S., Sasaki, T.: Development and application of discontinuous deformation analysis, *4<sup>th</sup> Asia Rock Mechanics Symposium*, pp. 59-70, 2006.
- Puntel, E., Gabriella Bolzon, Victor E. Saouma: A fracture mechanics based model for joints under cyclic loading, *Juur. Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 123, Issue 11, pp. 1151-1159, 2006.
- 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.
- 佐々木猛: 岩盤解析の現状と課題, 第13回岩盤システム工学セミナー, (社)システム総合研究所, pp. 57-86, 1996.
- Sasaki, T., Morikawa, S., Ishii, D., Ohnishi, Y.: Elastic - Plastic analysis of jointed rock models by Manifold method, *Second International Congress on Analysis of Discontinuous Deformation*, pp. 309-316, 1997.
- 佐々木猛: 不連続体解析法の現状と課題, 土木学会 第29回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 315-318, 1999.
- 佐々木猛: 岩盤解析方法の進歩と今後の展望, 第17回岩盤システム工学セミナー, (社)システム総合研究所, pp. 95-124, 2000.
- 佐々木猛, 吉中龍之進: マニフォールド法及び DDA による石積構造の検討, 第7回計算工学講演会論文集, pp. 431 -434, 2002.
- Sasaki, T., et al.: Parameter studies of a plate-loading test of jointed rock mass by Multiple Yield Model, *ISRM Symposium & 3<sup>rd</sup> Asia Rock Mechanics Symposium*, Millpress, pp. 1153-1158, 2004.
- Sasaki, T., et al.: Earthquake response analysis of a rock falling model by Discontinuous Deformation Analysis, *ISRM Symposium & 3<sup>rd</sup> Asia Rock Mechanics Symposium*, Millpress, pp. 1267-1272, 2004.
- 佐々木猛, 吉田淳, 佐々木勝司, 吉中龍之進, 岩田直樹: 複合降伏モデルによる不連続性岩盤における平板載荷試験の解析的検討, 土木学会第34回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 189-194, 2005.
- 佐々木猛, 吉田淳, 佐々木勝司, 吉中龍之進,

- 岩田直樹：節理の載荷-除荷変形特性と複合降伏モデルによる掘削問題の検討，第40回地盤工学研究発表会講演論文集，pp. 1229-1230, 2005.
- Sasaki, T., Hagiwara, I., Sasaki, K., Horikawa, S., Ohnishi, Y., Nishiyama, S., Yoshinaka, R.: Earthquake response analysis of a rock falling by Discontinuous Deformation Analysis, Seventh International Conference on the Analysis of Discontinuous Deformation, pp. 137-146, 2005.
- Sasaki, T., Hagiwara, I., Sasaki, K., Ohnishi, Y. and H. Ito: Fundamental studies for dynamic response of simple block structures by DDA, Eighth International Conference on the Analysis of Discontinuous Deformation, pp. 141-146, 2007.
- Sasaki, T., Ohnishi, Y., Yoshinaka, R.: Stability analysis of ancient block structures by using DDA and Manifold method, DDA Symposium in Hawaii Kona, pp. 83-96, 2008.
- Sasaki, T., I. Hagiwara, K. Sasaki, Yoshinaka, R., Y. Ohnishi, S. Nishiyama, T. Koyama: Stability analysis of ancient block structures by using DDA and Manifold method, Ninth International Conference on the Analysis of Discontinuous Deformation, pp. 265-272, 2009.
- Schneider, B.: Moyens nouveaux de renaissance des massifs rocheux, Sup. To Annales de L'Inst. Tech. de Batiment et des Travaux Publics, Vol. 20, No. 235-236, pp. 1055-1093, 1967.
- Shi, G. H., and Goodman, R. E.: Two dimensional discontinuous deformation analysis, Int. J. Numer. Anal. Mechods Geomech., Vol. 9, pp.541-556, 1985.
- Shi, G. H.: Block system modeling by Discontinuous Deformation Analysis, Univ. of California, Berkeley, Dept. of Civil Eng. August, 1989.
- Shi, G. H.: Manifold method of material analysis, Trans. 9th Army Conf. on Appl. Math. and Comp., Rep. No. 92-1. U.S. Army Res. Office, 1991.
- Shi, G. H.: Modeling rock joints and blocks by Manifold method, Proc. 33rd U.S. Symp. on Rock Mech., A.A. Balkema, pp. 639-648, 1992.
- 鈴木克幸, 大坪英臣ほか：有限被覆法による3次元ソリッドモデルの解析法，日本造船学会論文集，第184号，pp. 589-594, 1998.
- 吉中龍之進, 吉田淳, 佐々木猛, 佐々木勝司：寸法効果を考慮した岩盤不連続面の設計用物性値の設定，土木学会論文集 C, Vol. 62 No.2, pp. 457-470, 2006.
- Yoshinaka, R., Sasaki, T., Sasaki, K., Horikawa, S.: Consideration on stability and collapse at earthquake of soft rock slope based on an example, 11<sup>th</sup> ISRM Congress Lisbon, Portugal, pp. 1109-1112, 2007.
- Yoshinaka, R., Iwata, N., Sasaki, T., Sasaki, K., Yoshida, J.: Deformation behavior of discontinuous rock due to large scaled vertical excavation - Comparison between the prediction by numerical analysis and the measurement -, ISRM Symposium, SINOROCK2009, Hong-Kong, pp.547-551, 2009.