総説

岩盤モデルおよび解析手法の歴史的な変遷と特徴*

宇野 晴彦¹ 石田 毅² 水田 義明³

Historical Changes of Rock Mass Modelling and Numerical Technique and the Features of Those

by Haruhiko UNO^a, Tsuyoshi ISHIDA^b and Yoshiaki MIZUTA^b

a. Tokyo Electric Power Services Co., Ltd. Advanced Engineering Operation Center
Civil Engineering Dept, Taito-ku, Tokyo 110-0015, Japan

b. Dr., Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Tokiwadai, Ube 755-8611, Japan

A lot of methods have been developed in order to evaluate mechanical behavior of rock mass containing discontinuities. The methods can be classified roughly into three categories. First one is to model the rock mass which contains many and unspecific discontinuities by replacing it with an equivalent continuum. Second one is to analyze failure behavior of rock mass, modeling all of the discontinuities as they are, for the rock mass in which specific joints exist distinctly. Third one is to analyze formation of shear band as the result of successive development of micro fractures and accumulation of those, which depend on heterogeneity of rock mass.

These numerical methods have been rapidly developed since the decade of 1960 when FEM analyses were introduced into rock engineering and computer came into wide use, and further development are still being carried out. Historical changes in development of the numerical methods and the significant features of those are described in this report.

KEY WORDS : Rock Mass, Discontinuity, Equivalent Continuum, Heterogeneity, Anisotropy

1. はじめに

岩盤構造物が構築される際、施工時の安全性確保と供用時の安定性を事前評価するために、信頼性の高い岩盤の挙動予測が要求される。その場合、図1に示すように岩盤の力学的挙動に支配的な岩盤の不連続性と構造物規模を考慮して、その力学的挙動が表現できる解析手法を適用する必要がある。

岩盤の力学的挙動を評価する解析手法としては、図2に示すように大きく3種類に分けることができる。一つは、等方性岩盤、異方性岩盤とにかかわらず、不特定多数の不連続面を内在する岩盤を対象として、岩盤を等価な連続体に置き換えて解析する方法であり、次に、不連続面の幾何学的特性に大きく依存する破壊挙動を解析する手法、すなわち特定の弱層等が顕著な岩盤を対象として、それぞれの不連続面に着目した不連続体として岩盤モデルを構築する方法である。さらに、もう一つは岩盤物性の不均一性に依存する破壊挙動、すなわち微小破壊の逐次的な進展と集積の結果としての Shear Band の形成を解析する手法である。

これらの解析手法は、1960年代の岩盤工学へのFEM解析の導入とコンピュータの普及により急激に発達し、それぞれ等価連続体解析、不連続体解析および不均質体解析として、種々の岩盤での適用性の検討を経て、現在でも開発が進められている。

以下に、不連続性岩盤の力学的挙動を推定する解析手法の歴史的変遷について等価連続体解析、不連続体解析および不均質体に大別して概説する。

2. 解析手法の歴史的変遷

図2のフロー図に基づき、それぞれの解析手法毎に不連続性岩盤の力学的挙動を表現する数値解析手法の歴史的な変遷について述べる。

岩盤を節理等を内在した等価な連続体として評価する等価連続体解析については、1960年代にFEM解析が土木工学分野に適用されるようになり、岩盤と構造物の相互解析が実施されるようになった。FEM解析での岩盤の材料物性は、等方性あるいは直交異方性モデルで表現されていたが、Hill(1963)が提案した複合材料の等価弾性係数を求める理論に基づき、Singh(1973)が等価弾性コンプライアンスによる不連続性岩盤モデルを提案した。このモデル

図1 岩盤構造物の規模と岩盤の相対的な関係 (地盤工学会, 1997)

* 2001年9月5日受付 12月19日受理

1. 普通会員 東電設計(株)技術開発本部土木技術部

2. 普通会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科

3. 普通会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

[著者連絡先] FAX 03-4464-5595 (東電設計(株)土木技術部)

キーワード: 岩盤, 不連続面, 等価連続体, 不均質性, 異方性

図 2 不連続岩盤の解析手法および岩盤モデルの変遷

は、図 3 に示すような岩盤に不連続面が規則的に介在するものと仮定し、一組の不連続面を含む代表的な岩盤要素を取り出し、そのコンプライアンスを求め、FEM 解析により不連続面を含む岩盤の力学挙動を表現するものである。その後、原位置の不連続面の幾何学特性を統計学的に取り扱い、直接、地質情報を解析に取り入れるために山辺ら (1987) は、小田 (1982) が提案するクラックテンソルの概念を適用して、亀裂を含む岩盤を等価連続体モデルとして評価する解析手法を開発した。クラックテンソルモデルでは、岩盤の等価コンプライアンスは、基質部 (岩石) と不連続面に生じるひずみの和から定式化され、クラックテンソル、無次元化した不連続面のせん断剛性および垂直剛性 (図 4 参照)、基質部

の剛性により表現されている。そして、クラックテンソルと同様に原位置での不連続面の幾何学特性を解析に取り入れ、図 5 に示すような不連続面の分布による有効断面積の減少を岩盤の損傷として定量化した損傷テンソルによる解析が京谷ら (1987) によって開発された。

これまでに述べた、等価連続体解析は、主に岩盤の変形特性に着目して、解析手法の開発が行われてきたが、大規模空洞掘削時のゆるみの評価等の問題から不連続面に起因する岩盤の破壊を考慮した等価連続体解析が行われるようになってきた。佐々木ら (1994) は、図 6 に示すような岩盤をインタクトな母岩 (岩石) と無指向性のクラックおよび節理のような指向性の不連続面から形

図3 応力～ひずみ関係の基本的考え方 (永井, 1992)

図4 不連続面のモデル化とクラックによって発生する変位 (Oda, 1982)

図5 損傷テンソルの定義; (a) 一様な損傷を受けた材料, (b) 損傷による有効断面の欠損効果 (Murakami and ohno, 1980)

図6 掘削による節理性岩盤の変形要因 (佐々木ら, 1994)

成されると仮定し、それぞれの変形・強度特性を設定して直列的に重ね合わせた複合降伏モデルを開発した。

また、田坂ら(1998, 2000)は、図7(a)に示すように、無指向性の微節理を含む等方性均質の基質部(基質岩盤)と一方向節理群から岩盤が形成されると仮定し、基質部は、図7(b)に示すように、

図7(a) 節理性岩盤モデルの概要 (田坂ら, 1998)

図7(b) 基質岩盤の応力～ひずみ関係のモデル化 (田坂ら, 1998)

図8(a) 微視構造を有する物体と等価連続体 (吉田・堀井, 1996)

図8(b) 起伏を有するジョイント (吉田・堀井, 1996)

ひずみ軟化材料として、不連続面(節理)は、弾・完全塑性材料としてモデル化した基質岩石の破壊とジョイントの破壊を考慮したひずみ軟化解析(NAPIS)を提案した。この手法では、岩盤内の応力挙動も表現が可能であり、連続体解析による原位置での支保挙動を再現できるようになってきた。

両解析手法は、現象論的に材料特性をモデル化して構成則を構築したものであるが、不連続岩盤のメカニズムに着目した解析手法として、吉田・堀井(1996)によるマイクロメカニズムに基づく連続体解析(MBC解析)が開発された。この解析手法は、図8(a)に示すように岩盤内の個々のジョイントの微視的な構造要素に着目し、図8(b)に示すような不連続面のすべりに伴うせん断変位、開口変位挙動を代表要素の巨視的な構成式として求め、連続体と

して解析するものであり、現在も熱、水との連成解析への開発が進められている。

上述した解析手法はすべて FEM によるものであるが、Cundall は後述する DEM の開発と平行して、DEM と同じく有限差分法の陽解法 (Explicit Finite Difference Method: FDM) による大変形解析コード (Cundall, 1976) を開発し、これに偏在ジョイントモデル (Ubiquitous Joint Model) を取り込んだ。米国 ITASCA 社から商品名 FLAC として売り出されているこの解析においては、一方向の不連続面群を含むモデル化を行うことができる。また、Crouch et al.(1983) は、岩盤が数多くの密に配置する不連続面を含んでいる場合には、彼が開発した後述の DDM ジョイント要素を用いるのは実用的でないことから、不連続面の配置が規則正しい岩盤や層理性岩盤を異方性の弾性体で近似して、図 9 に示すように、不連続性岩盤に対する有効弾性定数を岩盤基質部のヤング率 E 、ポアソン比 ν および剛性率 G と節理の垂直剛性 K_n 、せん断剛性 K_s 、節理の間隔 S_0 の関数として与える BEM 解析を提案した。FEM や FDM が領域型解法であるのに対して、BEM は境界型解法である。すなわち、BEM 解析では (後述の DDM も含めて) 境界だけを要素分割すればよく、入力データは 1 次元減少する。

表 1 に上述した代表的な等価連続体解析手法 (岩盤モデル) の比較を示す。

一方、特定の不連続面を岩盤モデルに考慮する不連続体解析については、1960 年代当初に実施されていた FEM 解析では、斜面

図 9 異方性弾性連続体として表わされる節理性岩盤 (Crouch and Starfield, 1983)

安定や支持力などの全体破壊問題などに適用できないとされていたため、岩盤の分離や不連続面を表現するインターフェースエレメントの開発が行われた。その代表的なものとして、1968 年に Goodman et al.(1968) が提案したジョイント要素が挙げられる。ジョイント要素は、図 10 に示すように FEM のソリッド要素の節点間に軸方向およびせん断方向にバネを用いることにより、岩盤の不連続挙動を表現するものである。

このジョイント要素によりある程度の不連続性挙動が表現できるようになったが、計算過程での新たな接触、要素の回転および大きな変形を取り扱うことができなかった。この問題に対して、岩盤を剛体ブロックの集合と考え、運動方程式に基づいて、系の大きな変形を微小時間ごとに追跡して計算を行う離散化モデルの個別要素法 (DEM) が Cundall(1971) により開発された。DEM は、任意のブロックのモデル化が可能であること、運動方程式はすべて力の釣り合いで求めて陽解法による有限差分法 (Explicit Finite Element Method) で解くため、定式化が簡単であること、などから、その後、種々の改良が加えられ、不連続面ブロックが確定できる岩盤の挙動解析に広く適用されている。近年の適用例としては、図 11 に示す岩盤内に構築されたリレハンメルオリンピックのアイスアリーナの解析 (Barton et al., 1991) が有名である。

1970 年代初頭の DEM 解析では、計算機の演算処理速度の制約からブロックの接触判定を限定したブロックで行っていたことやブロック辺と他のブロックの頂点との接触の場合しか適切に評価できないことなどの問題点があった。

この DEM 解析における差分法での接触点の不明瞭な定義を克

図 10 Goodman らのジョイント要素 (Goodman et al., 1968)

表 1 代表的な等価連続体解析手法の比較

手法 項目	コンプライア ンスモデル	クラックテンソ ルモデル	損傷テンソル モデル	複合降伏 モデル	NAPIS	MBC モデル	異方性モデル (BEM)	強度異方性 モデル (FDM)	異方性モデル (FEM)
提案者	Singh (1973)	oda, (1982)	京谷ら (1987)	佐々木ら (1994)	田坂ら (1998)	吉田と堀井 (1996)	Crouch ら (1983)		Sakurai (1988)
基礎理論	等価弾性理論	ファブリックテ ンソル	損傷理論	コンプライア ンス法 弾塑性論	コンプライア ンス法 弱面理論	マイクロメカニ クスに基づく連 続体理論	弾性論	弾塑性	弾性論
不連続面の 系の数	複数	複数	複数	複数	1 方向の不連 続面群	複数	1 方向の不連 続面群	1 方向の不連 続面群	1 方向の不連 続面群
不連続面の 破壊	—	—	—	考慮	考慮	考慮	考慮	考慮	考慮
不連続面の グレイゾーン	—	—	—	—	—	考慮	—	—	—
基質部の 破壊	—	—	—	考慮	考慮	—	—	考慮	—
不連続面の 応力分担	応力集中係 数: FEM 解	厳密解	—	応力集中係 数: 単位テン ソル	応力集中係 数: 単位テン ソル	系の剛性: FEM 解	系の剛性	—	—
RVE の平均 ひずみ ϵ^*	$\epsilon_r + \epsilon_j$ 基質+不連続面	$\epsilon_r + \epsilon_j$ 基質+不連続面	E_r 基質	$\epsilon_r + \epsilon_j$ 基質+不連続面	$\epsilon_r + \epsilon_j$ 基質+不連続面	$\epsilon_r + \epsilon_j$ 基質+不連続面	—	—	—
長所	不連続面の性 状を考慮でき る	変形解析の他、 水との連成解析 に適用できる	不連続面の剛性 が不要	基質と不連続 面の破壊を考 慮できる	岩盤のひずみ 軟化挙動を考 慮できる	不連続面のすべ りに伴う開口変 位を考慮できる	空洞境界だけ を要素分割	同じモデルで 浸透流解析も 可、3D も可	入力パラメー タの数が少な い
短所	変形挙動のみ 評価	変形挙動のみ 評価	変形挙動のみ 評価	パラメータの 数が多い	複数の不連続 面群を考慮で きない	基質の破壊を考 慮できない	不連続面の剛 性評価が必要	複数の不連続 面群を考慮で きない	得られる解析 精度は計測点 数ならびに計 測精度に依存 する

図 11 DEM による掘削解析 (Barton et al., 1991)

図 12 DDA の座標系と未知変数 (地盤工学会, 1995)

服して、有限要素法と同じようにポテンシャルの最小原理を利用し、剛性マトリクスを作成して解析する不連続変形法 (DDA) が Shi(1988) により開発された。不連続変形法では、図 12 に示すように任意形状の個々の岩盤ブロックの重心点で定義されたひずみ、剛体変位、回転を未知数として用いており、要素内では一定としている。したがって、1 ブロックを一要素としているため、要素内応力の分布を求めることができなかった。この不連続変形法の欠点を補うため、マニフォールド法が Shi(1991) により開発された。この解析手法は、モデルを図 13 に示すように物理メッシュと数学メッシュに分離し、物理メッシュにより現実の解析対象の物理境界が定義され、規則正しい数学メッシュを重ねることにより要素の応力と変位分布を求めることが可能となった。

また、1970 年代の DEM 解析の開発と平行して、構造系全体を多数の要素に分割し、図 14 に示すような個々の要素を剛体と仮定して隣接する剛体要素を互いにバネで結合した剛体バネモデル RBSM が川井 (1980) によって提案された。これは、DEM と同様に剛体ブロックを取り扱うものであるが、基本式の解法は FDM ではなく FEM 解析に準拠したものである。したがって、最初に設定された要素の位置関係は最後まで保たれる (DEM においては、最初隣接していたブロックが遠ざかったり、初めは離れていたブロックが接触することもあり得る)。RBSM は、一般化された極限解析モデルであり、変形パラメータとして要素重心に剛体変位を設定するため、要素間の切断が可能であり、構造物の破壊、すべり線の発生、進展などの現象を取り扱うことができる。さらに、この解析手法に基づき、不連続岩盤への適用を考慮して、剛体要素を弾性体ブロックとして取り扱う解析手法 (FESM) を浜島 (1993)

図 13 DDA (上図) とマニフォールド法 (下図) による斜面すべりの解析 (大西, 1997)

(a) 平面要素 (b) はり要素

図 14 RBSM の要素 (大西, 1997)

図 15 FESM の自由度の設定 (鈴木・浜島, 1996)

が提案した。この解析手法は、要素の変形に FEM を使い、要素間の接触部に RBSM を用いた手法であるため、連続体から不連続体までを含めて、応力、変形、破壊挙動の解析に適用可能であり、要素には FEM で用いられる構成則をそのまま使用できる。そして、図 15 に示すように、要素重心のひずみ、剛体変位、剛体回転を未知量として解くものである。これをベースとして多数の大規模な不連続面を有する岩盤構造物の極限解析手法の開発が現在も進められている。

特定の不連続面をモデル化する上記の解析手法はすべて領域型であるが、Crouch(1979) は断層を図 16 に示す DDM ジョイント要素 (Crouch and Starfield, 1983) で模した BEM 解析方法を提案した。また、茂住ら (1994) はこれを 3 次元に拡張し、Sulistianto and Mizuta(1998) は 3 次元モデルにおける弱面の滑りと開口を取り扱うことのできるシステムを開発した。なお、数値解析手法とは異

図 16 DDM3 角形ジョイント要素 (Sulistianto and Mizuta, 1998)

なるが, Goodman and Shi(1987) は, 図 17 に示すような岩盤が崩れ落ちる原因となる危険な状態のクサビ岩塊 (移動可能ブロック) をステレオ投影法により抽出するブロック理論を提案した。これにより滑動の危険性のある移動可能ブロック (キーブロック) を決定し, 自重による作用力とすべり面の摩擦力から極限平衡解析を用いて, 安全性を保つための支保量を設定できるが, 不規則に発達する不連続面を有する岩盤では, 各不連続面の位置, 方向性の設定が困難であるなどの計測上の問題点も指摘される。

表 2 に上述した代表的な不連続体解析手法 (岩盤モデル) の比較 (佐々木 (1996) を修正・加筆) を示す。

有限要素法などを基礎とした等価連続体解析や不連続体解析による空洞安定解析などでは, 各要素の応力値を破壊基準と比較することにより, 破壊領域, すなわち補強を必要とする領域を推定できるため有用と考えられる。しかし, 例えば, 応力が一様に分布する仮定のもとに岩石供試体の一軸圧縮試験を等価連続体解析で解いた場合, 載荷圧力の増大に伴い全要素の応力値がある時点で同時に破壊基準を満たすため, 岩石供試体全体が同時に一斉破壊することになり, AE の発生や Shear Band の出現といった岩石で一般的に観察される破壊現象を表現することは難しいとされている。

このような岩盤の不均質性に依存した破壊現象については,

図 17 ブロックのタイプ (地盤工学会, 1995)

Tang(1997) が有限要素法を基礎として, 各要素に不均質な強度とヤング率を与え, 一軸圧縮試験のような一様な応力の作用下において AE の発生や Shear Band の形成をシミュレートできる数値解析コード RFPA(Rock Failure Process Analysis)を開発している。また, Sellers and Napier(1997) は, 境界要素法を基礎として, 岩石をランダムな三角形に分割し, 三角形の各辺を境界要素法の DDM 要素 (変位不連続要素) で表現し, 不均質性に依存する岩石の破壊現象を解析する数値解析コード DIGS(Discontinuity Interaction and Growth Simulation)を開発している (Sellers and Napier, 1997)。図 18 には, DIGS による一軸および三軸圧縮試験のシミュレーションの例を示す。

表 3 にここで取り上げた不均質解析手法 (岩盤モデル) の比較を示す。

3. ま と め

不連続性岩盤の力学的挙動の解析手法として, 等価連続体解析, 不連続体解析および不均質体解析に分けて, 代表的な解析手法の歴史的な変遷を概略的な理論的背景も合わせて述べた。等価連続体解析では, 岩盤構造物に対して, 微小な不連続面が介在し, 不

表 2 代表的な不連続体解析手法の比較 (佐々木 (1996) を修正・加筆)

手法 項目	ジョイント要素 (FEM)	ジョイント要素 (DDM)	剛体ばねモデル (RBSM)	修正仮想変位法 (FESM)	個別要素法 (DEM)	不連続変形法 (DDA)	マニフォールド 法	ブロック理論
提案者	Goodman ら (1968)	Goodman ら (1979)	Kawai (1980)	浜島 (1993)	Cundall (1971)	Shi and Goodman (1988)	Shi (1991)	Goodman and Shi (1987)
変形	微小変形	—	微小変形	微小変形	大変形	大変形	大変形	—
ブロックの 剛性	弾性体	弾塑性体	剛体	弾性体	剛体	弾性体	弾性体	剛体
不連続面の 特性	バネ	バネ スライダ	バネ	バネ	バネ ダッシュポット	ペナルティ係数	ペナルティ係数	—
支配方程式	静的・動的	静的	静的: 仮想仕事の原理	静的: 仮想仕事の原理	動的: Hamilton 原理	動的: Hamilton 原理	動的: Hamilton 原理	釣合い方程式
基礎理論	結合バネ要素 FEM 要素一部	ジョイント 充填材料	差分法と FEM の 中間的理論	RBSM と FEM の 組み合わせ	Explicit FDM	FEM の一種	FEM と DDA の 組み合わせ 物理メッシュと 数学メッシュの 組み合わせを利用	ステレオ投影 極限平衡法
未知数	節点変位	要素の 変位の違い	ブロック重心の 変位	ブロック重心の ひずみ、剛体変 位、剛体回転	ブロック重心の 速度	ブロック重心の ひずみ、剛体変 位、剛体回転	節点変位	三次元キーブ ロック
長所	FEM での利用が 容易	不連続面と 空洞境界だけを 要素分割	任意形状 極限解析(滑り)	任意形状 ブロックの破壊 を考慮できる	任意形状 動的な崩壊過程 の解析ができる	任意形状 解の唯一性が保 証されている	任意形状 ブロック内のひ ずみ・応力分布 を評価できる	ブロックの安定 性評価と支保量 を決定ができる
短所	多数の不連続面 をモデル化でき ない	多数の不連続面 をモデル化でき ない	ブロックの破壊 を考慮できない	実岩盤での適用 実績がない	剛性・強度決定 に経験が必要 解の唯一性が保 証されない	ブロック内のひ ずみ・応力分布 を評価できない	実岩盤での適用 実績がない	多数の不規則不 連続面を有する 岩盤には不適
適用事例	断層のすべり クラックの進展	弱面のすべり・ 剥離	クラックの進展 斜面のすべり	クラックの進展 断層の解析	斜面崩壊 トンネル崩壊 空洞安定解析	斜面、空洞、基 礎地盤の安定解 析 落石解析	斜面、空洞解析 クラックの進展	斜面、空洞のキ ーブロック解析

図 18 Sellers と Napier が開発した数値解析コード DIGS による岩石の軸および三軸圧縮試験のシミュレーション (Sellers and Napier, 1997)
(a) 解析モデルに DDM 要素 (このうち太い線は欠陥要素を示す)
(b) 4% の欠陥要素を含むモデルの三軸圧縮試験結果 (拘束圧は 10MPa)

連続面の幾何学形状がランダムあるいは一方向に卓越した場合には、等方的な等価連続体モデルあるいは岩盤の異方的な力学挙動が表現できるコンプライアンス法や NAPIS 等の FEM 解析手法が適用できるものと考えられる。また、FDM 解析や BEM 解析においても一方向の不連続面群を取り扱うことができる。数種類の節理群が介在する場合には、節理群の相互作用が岩盤挙動に大きく寄与することが考えられ、岩盤内の不連続面の挙動メカニズムを考慮した MBC 解析などの解析手法の適用性が良いものと考えられる。また、MBC 解析のように挙動メカニズムに基づくものは、岩盤モデルの拡張性が高く、今後、熱、水等との連成解析の開発が期待される。

不連続体解析では、不連続モデルと不連続面の力学特性が解析結果に大きく影響を与える。また、ここで述べた解析手法の多くは 2 次元解析であるが、3 次元 BEM 解析において、不連続面を 3 次元 DDM ジョイント要素でモデル化すれば、実岩盤の 3 次元構造に対する不連続体解析を行うことができる。不連続体解析では、それぞれの岩盤構造の違いにより解析手法の適用性が異なる。FEM ジョイント要素、DDM ジョイント要素および RBSM は、岩盤のすべりや破壊を設計的な観点から静的に評価する手法としては適しているものと考えられる。また、Explicit FDM は大変形問題に適用でき、とくに DEM、DDA は、個別ブロックの大変形問題にまで適用できる。ただし、DEM、DDA では、ブロック間の物性値と実際の物性値との物理的意味の整合が難しいとされており、設定された不連続モデルとブロック間物性値に解が大きく依存することを念頭におく必要がある。DEM は、剛体ブロックであり、変形がブロック表面で規定されることから表面的な崩壊現象などの解析に適する。また、DDA は、弾性体ブロックであるため、岩盤内応力が発生する場合にも適用可能と考えられる。ここまで述べてきたように、現状では、等価連続体解析と不連続体解析は、異なった変遷をたどって開発が進められてきたが、岩盤のメカニズムを考慮した等価連続体解析と不連続構造を微細に評価する不連続体解析は、将来的に融合され、岩盤構造物のいずれの問題にも対応可能な解析手法が開発されるものと考えられる。

不均質体解析手法では、DIGS は、不連続体解析手法でもあり、それゆえにより広範囲にわたる問題への対応が可能である。これに対して RFPA は、その基本手順が古くから多くの人によって試みられてきたものと同じである。しかし、ここで挙げた 2 つの解析手法によれば、岩盤内の応力伝播、破壊状況の微小破壊に伴う AE の発生を対応づける解析が与えられている。

表 3 不均質体解析手法の比較

項目 \ 手法	RFPA (FEM)	DIGS (DDM)
提案者	Tang (1997)	Sellers ・ Napier (1997)
変形	大変形	—
ブロックの剛性	—	弾性体
不連続面の特性	—	ダッシュポット スライダー
支配方程式	ひずみ軟化	脆性・延性
基礎理論	物性が Weibull 分布 線型 FEM	粒子内亀裂+ 粒子境界要素+欠陥要素 (ランダム分布)
未知量	節点変位	要素の変位くい違い
長所	FEM での利用が容易	DDM 要素のエネルギー 解放量を評価
短所	解の唯一性が保証され ない、実岩盤での適用 実績がない	解の唯一性が保証され ない
適用事例	微小破壊の集積から巨 視的なせん断破壊	深部鉱山における山鳴 り (AE) の解析

4. おわりに

不連続岩盤や不均質岩盤の解析手法は、解析技術の飛躍的な進歩とともに開発が進められている。しかし、それらの力学的挙動を解析的に評価する上で最も重要なことは入力情報の信頼性である。不連続性岩盤に起因する事故は、主に地質状況の把握が不十分であったために発生する。したがって、現在の不連続岩盤での力学的挙動の評価は、解析手法による挙動予測と合わせて、情報化施工による岩盤挙動の監視が重要な役目を果たしている。今後、岩盤構造物の岩盤力学挙動を解析的に評価するには、解析手法の改良、開発と合わせて、地質調査方法の確立、岩盤物性値設定の確立が重要であり、これらの研究も同精度で開発されることが望まれる。

引用文献

- Barton, N., Tunbridge, L. et al.(1991): 7th Congress of ISRM, Aachen, Vol. 2, p. 1073-1081
Crouch, S. L.(1979): J. S. Afr. Inst. Min. Metall. Vol. 79, p.159-173
Crouch, S. L. and Starfield, A. M.(1983): George Allen & Unwin
Cundall, P.A.(1971): TSRM Symposium, Nancy, France, p. 11-19
Cundall, P.A.(1976): Numerical Methods in Engineering (Proc. EF Conf. On Num. Methods in Geomech.)
Goodman, R. E., Tylor, R. and Brekke, T. L.(1968): J. Soil Mech. and Found. Eng. Div., ASCE, SM3, 94, p. 637-659
Goodman, R. E. and Shi, G.H. (1987): Felsbau 5 (吉中, 大西訳)
浜島良吉 (1993): 第 42 回応用力学連合講演会, p. 263-264
Hill, R.(1963): J.Mech. Phys. Solids, Vol. 11, p. 357-372
Kawai, T.(1980): Int. J. Numerical Methods in Engineering, Vol. 16, p. 81-120
京谷孝史・市川康明・川本脱万 (1987): 土質工学会, 土と基礎, Vol. 35-3, p. 23-28
茂住洋史・栗山 憲・柳之内浩・水田義明 (1994): 資源と素材, Vol. 110, No. 12, p. 953-958
Murakami, S. and Ohno, N.(1980): Proc. 3rd IUTAM Symp. on Creep in Structures, Springer-Verlag, p. 422-443
永井哲夫 (1992): 神戸大学博士論文
Oda, M.(1982): Soil & Found., Vol. 22, No. 4, p. 96-108
大西有三 (1997): 電力土木, No. 270, p. 3-12
Sakurai, S.(1988): Proc. 2nd Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, Kobe, Vol. 2, p. 1155-1166
佐々木 猛・吉中龍之進・永井文夫 (1994): 土木学会論文集, No. 505/III-29, p. 59-68
佐々木 猛 (1996): 第 7 回マニフォールド実用研究会, システム総合研究所
Sellers, S. and Napier, J.(1997): Computational Mechanics, Vol. 20, p. 164-169
Shi, G. H. and Goodman, R. E.(1988): Proc. 29th U.S.Sympo. on Rock Mechanics, p. 381-393
Shi, G. H.(1991): Trans. 9th Army Conf. on Appl. Math. and Comp., Rep. No. 92-1. U.S. Army Res. Office
Singh, B.(1973): Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst., Vol. 10, p. 311-335
Sulistianto, B. and Mizuta, Y.(1998): 資源と素材, Vol. 114, No. 2, p. 73-78
鈴木隆次・浜島良吉 (1996): 土木学会論文集, No. 547/III-36, p. 23-38
Tang, C. A.(1997): Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 34, No. 2, p. 249-261
田坂嘉章・宇野晴彦・大森剛志・工藤奎吾 (1998): 第 10 回岩の力学国内シンポジウム論文集, p. 575-580
田坂嘉章・宇野晴彦・大森剛志・工藤奎吾 (2000): 土木学会論文集, No. 652/III-51, p. 73-90
山辺 正・原 夏生・小田国寛 (1987): 土木学会論文集, No. 382, III-7, p. 121-130
Yanagidani, T., Ehara, S., Nishizawa, O., Kusunose, K. and Terada, M.(1985): Journal of Geophysical Research, Vol. 90, p. 6840-6858
吉田秀典・堀井秀之 (1996): 土木学会論文集, No. 535/III-34, p. 23-41
地盤工学会 (1995): 不連続性岩盤と構造物に関する研究報告書, p. 217
地盤工学会 (1997): 岩盤構造物の設計法に関する研究報告書, p. 68