資源と素材 (Shigen-to-Sozai)
Vol. 110 p. 953−958 (1994)

論文

ジョイントを考慮した三次元境界要素法解析手法の開発と地下空間開削事例への適用*

茂住洋史[1]　栗山憲[2]
柳之内浩[3]　水田義明[4]

Development of a Boundary Element Method with Joint Elements and Application to Practical Problems on Underground Excavation

by Hiroshi MOZUMI[1], Ken KURIYAMA[2],
Hiroshi YANAGINOUCHI[2] and Yoshiaki MIZUTA[2]

1. Kamioka Mining & Smelting Co., Ltd., Kamioka, Gifu-ken 506−11
2. Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Tokiwadai, Ube-shi 755

The authors have developed a computing system for 3 D analysis by combined Fictitious Stress and Displacement Discontinuity Methods with Joint Elements. In the system, the boundary surface of an underground cavern is divided into triangular leaf elements and the constant fictitious stress components are distributed over each element. The joint having some thickness is divided into triangular pillar elements which consist of soft elastic mateiral and the constant displacement discontinuity components (normal convergence and transverse dislocations) are distributed over each element. The solution procedure is briefly presented first and it is applied to two practical problems on underground excavation next. Applicability of the procedure is demonstrated by comparing the excavation-induced displacements around a large rock cavern, the excavation-induced convergences between the points on tunnel boundary and total stress distribution on the tunnel wall which are numerically calculated by the procedure, with those practically observed in-situ.

KEY WORDS: Combined FSM-DDM Analysis, Joint Element, Large Rock Cavern, Tunnel, Extensometer, Convergence meter

1. はじめに

近年，地下発電所，石油地下備蓄，鉱山跡地活用など地下空間の利用が積極的に行われるようになり，岩盤内空洞の挙動の予測，安定性の評価等に関する研究の必要性が増大している。

工学の分野においてはコンピュータの急速な進歩と普及に伴い数値計算が重要な位置を占めるようになってきている。連続体力学における数値解析手法として有限要素法が多く用いられているが，入力データ数や計算時間が少なく，無限領域を取扱うことのできる境界要素法の利用も増えてきている。岩盤力学の分野では，鉱山における採掘や，地下空間利用における空洞掘削等の擾乱により岩盤内に誘起される応力と変位の解析そして空洞の安定性の評価に，境界要素法による数値解析が利用されるようになっている。空洞形状の影響をより高度に評価するためには三次元問題として解析を行うことが求められる。また岩盤特有の不連続性をも含めてモデル化しなければならないことも多く，それが目前の課題となっている。これまで水田らは三次元境界要素法の適用について研究[1)]し，空洞形状をより細かく表現できる三角形要素を用いた解析手法の開発[2)]を行った。また不連続性岩盤に対しては「仮想応力法−変位くい違い法組合せ解析」手法の開発[3)]を行った。筆者らはこれまでの三次元変位くい違い要素としてジョイント要素を用いる新たな解析手法を開発した。本研究は地下空間開削のケーススタデイ 2 例にこれを適用し，不連続面を含んだ空洞周辺岩盤の挙動の予測といった問題に対する一つの解析手法の提案を行うものである。

* 1994年4月11日受付　6月21日受理　第24回岩盤力学に関するシンポジウム，資源・素材学会平成5年度春季大会および秋季大会にて一部講演

1．正会員　神岡鉱業(株)地下利用事業室主査
2．理博　山口大学教授　教養部人間環境論
3．山口大学大学院
4．正会員　工博　山口大学教授　工学部社会建設工学科

キーワード：FSM-DDM組合せ解析，ジョイント要素，岩盤大空洞，坑道，地中変位計測，内空変位計測

2．仮想応力法 - 変位くい違い法組合せ解析

境界要素法による応力解析手法には仮想応力法（Fictitous Stress Method, FSM）と変位くい違い法（Displacement Discontinuity Method, DDM）とがある。空洞などのモデルの解析に適しているのが FSM であり，クラックやき裂などのモデルの解析に適しているのが DDM である[4)]。組合せ解析においては両者の方程式を重ね合わせることで求められる。

2・1　仮想応力法

仮想応力法の基礎となっているのは弾性問題における Navier 方程式の Kelvin の解である。Kelvin解は，無限弾性体内で原点に P_z を点載荷したときに任意の点に発生する変位，応力を与える。点載荷 P_z により発生する変位，応力を座標変換することにより点載

荷 P_x, P_y により発生する変位，応力を求めることができる。弾性体内に一つの三角形面要素を考え，直角座標系 O-XYZ において，この三角形面要素の重心を原点とし法線方向を Z 軸とする。原点において X, Y, Z 方向に応力不連続量 P_x, P_y, P_z を考えたとき，任意の点 (x, y, z) に発生する変位と応力は，Z 軸方向のみを表示すると次式のようである[2]。

$$
\begin{aligned}
u_z &= [(zx/R^3)P_x+(yz/R^3)P_y+\{(z^2/R^3)\\
&\quad +(3-4\nu)/R\}P_z]/16\pi G(1-\nu) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)\\
\sigma_z &= [(x/R^3)\{(1-2\nu)-3z^2/R^2\}P_x\\
&\quad +(y/R^3)\{(1-2\nu)-3z^2/R^2\}P_y\\
&\quad -(z/R^3)\{(1-2\nu)+3z^2/R^2\}P_z]/8\pi(1-\nu)\\
\tau_{yz} &= [3xyz^2/R^5P_x+(z/R^3)\{(1-2\nu)+3y^2/R^2\}P_y\\
&\quad +(z/R^3)\{(1-2\nu)+3x^2/R^2\}P_z]/8\pi(1-\nu)\\
\tau_{zx} &= [(z/R^3)\{(1-2\nu)+3x^2/R^2\}P_x+3xyz^2/R^5P_y\\
&\quad +(x/R^3)\{(1-2\nu)+3x^2/R^2\}P_z]/8\pi(1-\nu)\\
R^2 &= x^2+y^2+z^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)
\end{aligned}
$$

ここで，G は剛性率，ν は Poisson 比であり P_x, P_y, P_z はそれぞれの軸方向の仮想応力成分である。三角形要素全体にわたって均一に分布する応力不連続量 (P_x, P_y, P_z) によって，任意の点 (x, y, z) に誘起される変位と応力は(1)，(2)式を三角形上で積分することにより得られる。

2・2　変位くい違い法

変位くい違いとは弾性体内の一つの三角形要素に応力を与えた時その要素の表と裏側に生じる変位のずれのことである。三角形要素の面に垂直な方向を Z 軸とし，変位くい違い量を D_x, D_y, D_z とすると次式で表わされる。

$$
\left.
\begin{aligned}
D_x &= (u_x)_{z=0-}-(u_x)_{z=0+}\\
D_y &= (u_y)_{z=0-}-(u_y)_{z=0+}\\
D_z &= (u_z)_{z=0-}-(u_z)_{z=0+}
\end{aligned}
\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)
$$

これらの変位不連続が存在するとき，任意の点に誘起される変位，応力は Z 軸方向のみを表示すると次式のようである[1]。

$$
\begin{aligned}
u_z &= [\{(1-2\nu)f_x-zf_{xz}\}D_x+\{(1-2\nu)f_y-zf_{yz}\}D_y\\
&\quad +\{2(1-\nu)f_z-zf_{zz}\}D_z]/8\pi(1-\nu)\\
\sigma_z &= [-zf_{xzz}D_x-zf_{yzz}D_y+(f_{zz}-zf_{zzz})D_z]G/4\pi(1-\nu)\\
\tau_{yz} &= [(-\nu f_{xy}+zf_{xyz})D_x+(f_{zz}+\nu f_{xx}-zf_{yyz})D_y\\
&\quad -zf_{yzz}D_z]G/4\pi(1-\nu)\\
\tau_{zx} &= [(f_{zz}+\nu f_{yy}-zf_{xxz})D_x-(\nu f_{zy}+zf_{xyz})D_y\\
&\quad -zf_{xzz}D_z]G/4\pi(1-\nu)\\
&\quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)
\end{aligned}
$$

(4)式中の f_x, f_y, f_z, …, f_{zzz} などは，影響関数 f を添字の方向に偏微分した導関数を表す。この影響関数は次式で表わされる。

$$
f(x, y, z)=\iint_\Delta 1/\sqrt{\{(\xi-x)^2+(\eta-y)^2+z^2\}}\,d\xi\, d\eta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (5)
$$

(5)式の積分ならびに導関数は栗山，水田[5] によって解が得られている。したがって，三角形面要素内に変位不連続が存在するとき(3)～(5)式によって任意の点 (x, y, z) に誘起される変位および応力が計算される。

2・3　組合せ解析の方法

要素内に不連続成分が存在するとき，各要素の応力不連続成分を使って，式(1)～(5)により任意の点に誘起される変位や応力を求めることができる。仮想応力法，変位くい違い法における不連続成分を求める手順を以下に示す。

まず岩盤内における空洞を解析の対象とするとき，空洞壁面が数値解析における境界面となる。その壁面を N 個の三角形要素に分割する。仮想応力法のケースでは，求められるべき各要素の応力不連続成分は各要素固有の局所座標で表わされている。すなわち要素 $i\,(i=1\sim N)$ によって要素 $j\,(j=1\sim N)$ の重心に誘起される変位や応力は要素 i の座標系によって表わされている。したがって要素 j の重心において要素 i により誘起される応力不連続成分 P_{xi}, P_{yi}, P_{zi} は(1)，(2)式等により次のマトリックス表示ができる。

要素 $j\,(j=1\sim N)$ について

$$
\begin{Bmatrix}\sigma_{zj}\\ \tau_{yzj}\\ \tau_{zxj}\end{Bmatrix}=\sum_{i=1}^{N}[T_{ji}][S_{ji}]\begin{Bmatrix}P_{xi}\\ P_{yi}\\ P_{zi}\end{Bmatrix} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)
$$

ここで，$[T_{ji}]$ は要素 i の座標系から要素 j への座標系への変換マトリックスであり，$[S_{ji}]$ は(2)式の各不連続成分の影響係数を三角形面要素上でマトリックス表示したものである。さらに初期応力場によって要素 $j\,(j=1\sim N)$ に生ずる応力は，

$$
\begin{Bmatrix}P_{zj}\\ P_{yzj}\\ P_{zxj}\end{Bmatrix}=[L_j]\{P_x, P_y, P_z, P_{xy}, P_{yz}, P_{zx}\}^T \quad \cdots\cdots\cdots (7)
$$

ここで，P_x，P_y，P_z，…，P_{zx} は全体座標における初期地圧の各成分である。$[L_j]$ は $[T_{ji}]$ と同じ形の変換マトリックスとなる。すなわち要素 j について，空洞開削後の全応力は初期応力と誘起された応力との和であること，また要素 j の面に直交する Z 軸方向の応力は空洞壁面に作用する圧力と釣り合っていることから(6)，(7)式より(8)式を得る。

$$
\begin{Bmatrix}P_{0j}\\ 0\\ 0\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}P_{zj}\\ P_{yzj}\\ P_{zxj}\end{Bmatrix}+\sum_{i=1}^{N}[T_{ji}][S_{ji}]\begin{Bmatrix}P_{xi}\\ P_{yi}\\ P_{zi}\end{Bmatrix} \quad \cdots\cdots\cdots (8)
$$

p_{0j} は空洞壁面の要素 j に作用する流体圧で，通常は大気圧として解かれる。(8)式の左辺の応力，右辺の変換マトリックスは既知であるから，$3N$ 個の不連続成分 P_{xi}, P_{yi}, P_{zi} に関する $3N$ 本の連立一次方程式が与えられ，これを解いて得られた応力不連続成分から，(4)式により任意の点の変位，応力が計算できる。

変位くい違い法の場合も変位不連続量 D_x，D_y，D_z を同様に求め任意の点の変位，応力を計算する。

3．三次元ジョイント要素

岩盤中には断層やき裂などの不連続面（ジョイント）が多数存在している。予測解析の対象となる空洞をモデル化する場合，ジョイントを無視できないケースがある。またジョイントを含んだモデルを構成すれば岩盤の挙動をより精度よく説明することが可能となる。

3・1　解析の理論

Crouch[4] は二次元の問題においてジョイント要素を考慮した境界要素解析手法の研究を行っている。筆者らはこれを三次元の問題に拡張した。Fig. 1 はジョイント要素としての変位くい違い要素 j の構成要素を示す。この要素はある一定の厚み h を持っておりヤング率 E_0，剛性率 G_0 の弾性物質からなるものとする。ジョイント要素 j が位置する境界での変位不連続 (D_x, D_y, D_z) によるジョイントの弾性変形によって要素 j に誘起される応力を $(\sigma^*_{zi}, \tau^*_{yzi}, \tau^*_{zxj})$ とすると

$$
\begin{Bmatrix}\sigma^*_{zj}\\ \tau^*_{yzj}\\ \tau^*_{zxj}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 0 & -E_0/h\\ 0 & -G_0/h & 0\\ -G_0/h & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}D_{xj}\\ D_{yj}\\ D_{zj}\end{Bmatrix} \quad \cdots (9)
$$

M 個の仮想応力要素と $N-M$ 個の変位くい違い要素からなるモデルの組合せ解析において，要素 $i\,(i=1\sim N)$ の仮想応力や変位くい違いによって要素 j に誘起される応力は次式で与えられる。

$$
\begin{Bmatrix}\sigma_{zj}\\ \tau_{yzj}\\ \tau_{zxj}\end{Bmatrix}=\sum_{i=1}^{M}[T_{Fji}][S_{Fji}]\begin{Bmatrix}P_{xi}\\ P_{yi}\\ P_{zi}\end{Bmatrix}
$$

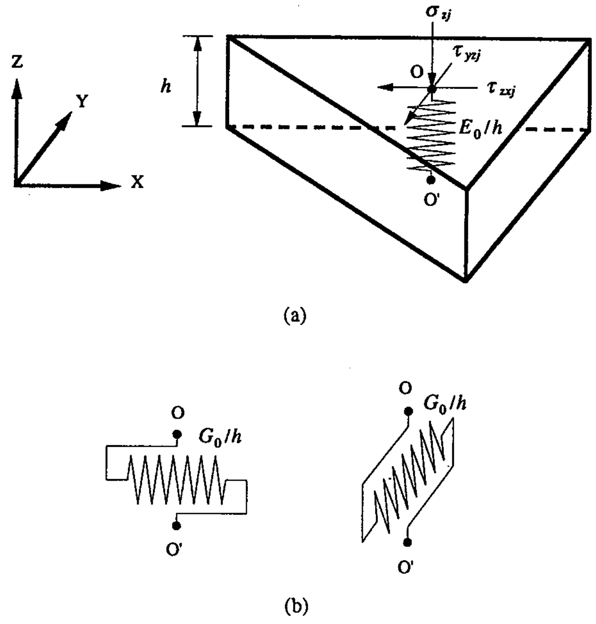

Fig. 1　3－D Representation of a joint element j with stresses. The springs shown in (b) are inserted between the points O and O' shown is (a).

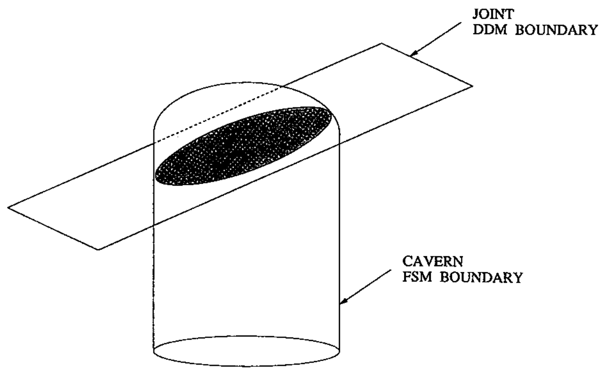

Fig. 2　An image model of 3－D combined FSM-DDM analysis.

$$+\sum_{i=M+1}^{N}[T_{Dji}][S_{Dji}]\begin{Bmatrix}D_{xi}\\D_{yi}\\D_{zi}\end{Bmatrix} \quad \cdots\cdots (10)$$

(9)および(10)式から次式が得られる。

$$\begin{Bmatrix}0\\0\\0\end{Bmatrix}=-\begin{Bmatrix}\sigma^*_{zj}\\\tau^*_{yzj}\\\tau^*_{zxj}\end{Bmatrix}+\begin{Bmatrix}\sigma_{zj}\\\tau_{yzj}\\\tau_{zxj}\end{Bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}0&0&E_0/h\\0&G_0/h&0\\G_0/h&0&0\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}D_{xj}\\D_{yj}\\D_{zj}\end{Bmatrix}$$

$$+\sum_{i=1}^{M}[T_{Fji}][S_{Fji}]\begin{Bmatrix}P_{xi}\\P_{yi}\\P_{zi}\end{Bmatrix}$$

$$+\sum_{i=M+1}^{N}[T_{Dji}][S_{Dji}]\begin{Bmatrix}D_{xi}\\D_{yi}\\D_{zi}\end{Bmatrix} \quad \cdots\cdots (11)$$

すべての不連続量を(X_x, X_y, X_z)とすると以下の式で表わされる。

$$\begin{Bmatrix}P_{0j}-P_{zj}\\-P_{yzj}\\-P_{zxj}\end{Bmatrix}=\sum_{i=1}^{N}[T_{ji}][S_{ji}]\begin{Bmatrix}X_{xi}\\X_{yi}\\X_{zi}\end{Bmatrix} \quad (1\leqq j\leqq M)$$

$$\cdots\cdots (12)$$

$$\begin{Bmatrix}0\\0\\0\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}0&0&E_0/h\\0&G_0/h&0\\G_0/h&0&0\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}X_{xj}\\X_{yj}\\X_{zj}\end{Bmatrix}$$

$$+\sum_{i=1}^{N}[T_{ji}][S_{ji}]\begin{Bmatrix}X_{xi}\\X_{yi}\\X_{zi}\end{Bmatrix} \quad (M+1\leqq j\leqq N)$$

$$\cdots\cdots (13)$$

ここに,

$$X_{xi}=P_{xi}$$
$$X_{yi}=P_{yi}$$
$$X_{zi}=P_{zi} \quad (1\leqq i\leqq M)$$

$$X_{xi}=D_{xi}$$
$$X_{yi}=D_{yi}$$
$$X_{zi}=D_{zi} \quad (M+1\leqq i\leqq N)$$

今回開発したジョイントモデルは等方性の弾性体となっているが，ジョイントに異方性がある場合やジョイント面での滑りがある場合についても(10)式のマトリックス部をそれぞれに適合したものに変更することで比較的容易に拡張することができる。

3・2　解析の方法

ジョイントを含む岩盤内における空洞周辺の変位，応力を解析の対象とする場合や水圧破砕等におけるき裂の進展を逐次予測する場合などに，今回開発した組合せ解析手法は有効である。Fig. 2 は岩盤中の空洞とジョイントとを対象とした組合せ解析モデルのイメージ図である[6]。岩盤中には多数の不連続面が存在することが知られている。そのすべてをモデル化して組合せ解析することは不可能ではないが現実には難しい。計算機の容量や能力の限界がその第一の理由である。図のケースでは1枚のジョイントを組み入れて予測解析のモデルとしている。現場における地質に関する情報を考慮し，技術者があらかじめ空洞開削に対し影響の大きそうなジョイントを絞り込むことは可能であると考えられる。後に述べるケーススタディにおいてもジョイント面を1枚として解析し実測変位をよく説明できる結果となっている。

実際のモデリングでは対象とするジョイントならびに空洞壁面をそれぞれ M 個，$N-M$ 個の要素数を持つ三角形要素に分割する。組合せ解析ではジョイントを変位くい違い法の要素とし空洞壁面を仮想応力法要素として計算する。求められるべき各要素の変位，応力不連続成分は(12)，(13)式から $3N$ 本の連立一次方程式の解として $3M$ 個の応力不連続成分と $3(N-M)$ 個の変位不連続成分が決定できる。各不連続成分決定後は無限弾性体内の任意の点 k における変位，応力が次式から得られる。

$$\begin{Bmatrix}\sigma_{zk}\\\tau_{yzk}\\\tau_{zxk}\end{Bmatrix}=\sum_{i=1}^{N}[T_{ki}][S_{ki}]\begin{Bmatrix}X_{xi}\\X_{yi}\\X_{zi}\end{Bmatrix} \quad \cdots\cdots (14)$$

連立方程式の解法には Gauss-Seidel 法を用い反復回数 150 とした。計算においては山口大学計算機センタのワークステーション EWS4800 を利用しオペレーティングシステム (OS) は UNIX SystemV Release 4.0，言語は FORTLAN 77 を使用した。

4．地下空間開削事例への応用

筆者らの開発したジョイントを考慮した三次元境界要素法組合せ

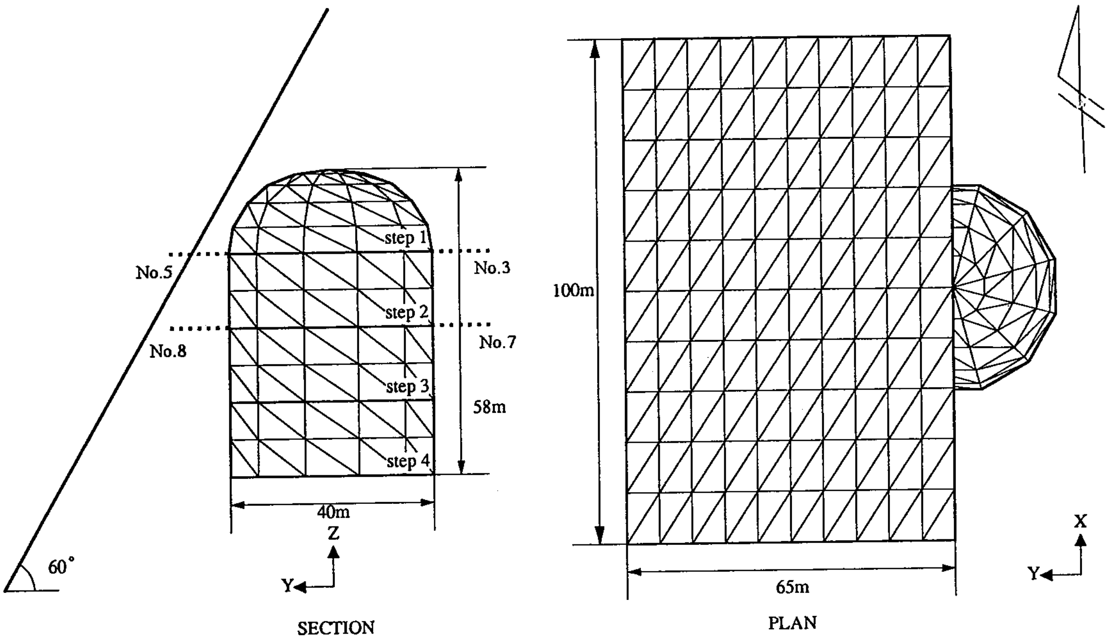

Fig. 3　A model of the dome shaped cavern (Super Kamiokande) with a joint plane for 3-D combined FSM-DDM analysis. Dotted line shows the levels of Geo-extensometers(No.3, No.5, No.7, No.8).

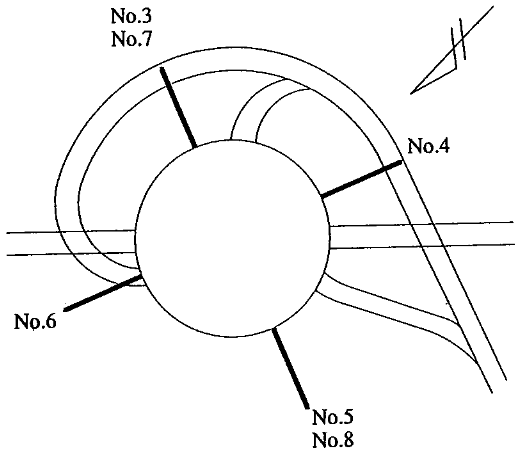

Fig. 4　Layout of installation of geo-extensometers.
No. 3 ～No. 6, level 16 m below from the top of the dome.
No. 7, No. 8, level 30 m below from the top of the dome.

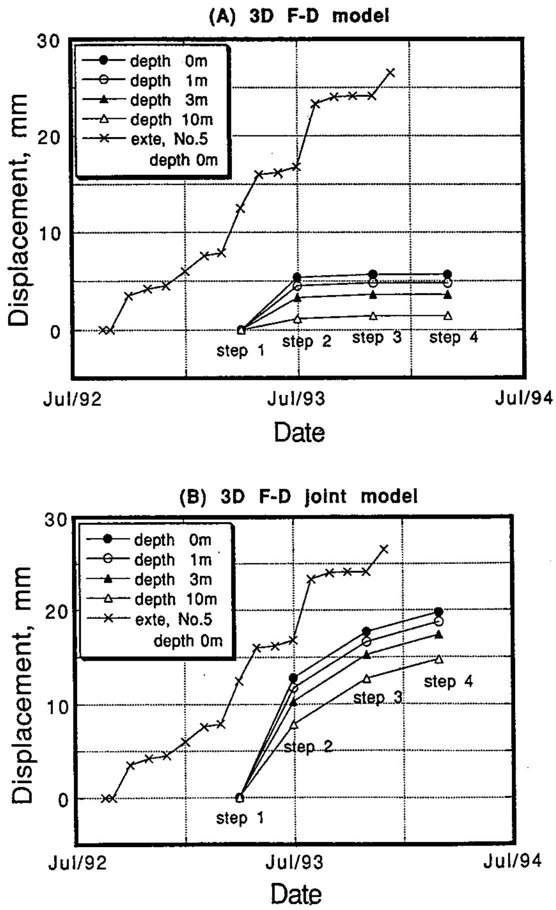

Fig. 5　Comparison of the displacements measured by extensometer No. 5 with the corresponding displacements numerically computed (A : no joint element)(B : with joint element).

解析手法を現場の開削事例に照らして評価を行った。現場は岐阜県にある神岡鉱山の茂住坑で，同坑内にある宇宙線観測のための地下ドーム（Super Kamiokande）開削地点と探鉱坑道を予測解析の対象とした。

4・1　ドーム型地下空洞

Super Kamiokande は東京大学宇宙線研究所のプロジェクトで，地下 1,000 m に直径 40 m，高さ 40 m の観測用純水タンク設備を持つ地下利用型研究施設である。地下 1,000 m の強地圧下での開削が平成 3 年 12 月に開始された。

解析例ではジョイントを含む空洞周辺岩盤の地中変位量として計測中のデータとの比較を行った。

解析に供したモデルを Fig. 3 に示す。ドームの頂上から底までの高さは 58 m，ジョイントの走行は北向で傾斜は 60 度西落ちとした。これは現場の地質データから絞り込んだものである。ジョイントの大きさは長さ 100 m，高さ 130 m とした。地中変位計のアンカー部が空洞壁面より 20 m の位置にあるためそれを考慮し余裕をとった。Kelvin 解で明らかなように，各不連続成分の影響は求める点との距離の二乗の逆数が係数として掛かっており，ある程度距離が

Table 1　Initial stress and elastic constants used as input data.

応力成分，MPa	$\sigma_x=-17.1$ $\tau_{xy}=-4.0$	$\sigma_y=-10.7$ $\tau_{yz}=-6.0$	$\sigma_z=-26.4$ $\tau_{zx}=4.7$
ヤング率，GPa	52.5		
ポアソン比	0.16		

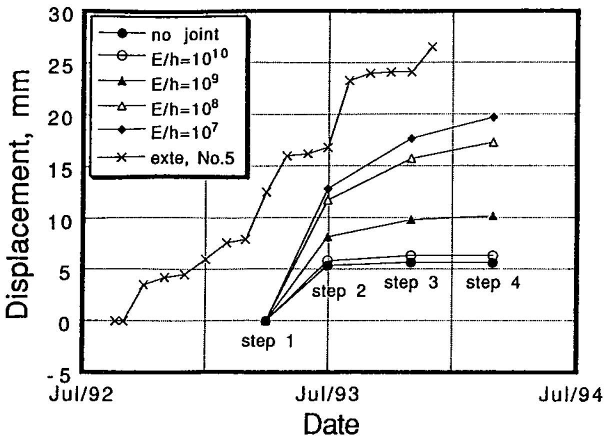

Fig. 6　Comparison of the displacements computed varying parameters, E_0/h, G_0/h from 10^7 Pa/m to 10^{10} Pa/m.

離れれば影響は少ないものとしてジョイントの大きさを定めた。

分割された要素数はジョイント部で200要素，空洞部で336要素の計536要素である。開削の順序は上から順に4つのステップに分けて開削が進むものとして計算を行った。

地中変位量の計算は空洞壁面から20 m奥の位置を不動点とみなし各定点(0 m，1 m，3 m，10 m)との差を累計の変位として計算を行った。現場での計測システムは電気式地中変位計（東亜測器）メカニカルアンカータイプ（6チャンネル/孔）であり，空洞周辺に8点埋設されており，データスキャナ，データロガー，モデムを介して電話回線を通じ遠隔計測されている。Fig. 4に地中変位計の埋設状況を示す。

解析結果と測定データの比較をFig. 5に示す。データは地中変位計No. 5のものである。No. 5はジョイントを横切る位置に配置されておりその壁面(0 m)の結果を代表例として掲げる。Fig. 5 (A)は対象岩盤中にジョイントを含まないモデルでの計算結果である。横軸は時間を表わし図中に各Stepの開削時期を記入した。縦軸は地中内変位量を表わす。Fig. 5 (B)はジョイントを含んだモデルでの計算結果である。解析モデル中でのジョイントと変位計との交点は壁面より13 mの位置である。

解析に利用したインプットデータをTable 1に示す。本解析中ではジョイント要素のE_0/h，G_0/hは要素の垂直応力－垂直変位，せん断応力せん－断変位関係を与える独立な定数と考え，その値を10^7 Pa/mとして計算を行った。また各応力成分は現位置における測定結果を用いた。測定は水圧破砕法と応力解放法の2種で実施しその平均を初期地圧のインプットデータとした。

Fig. 5 (B)よりジョイントを含んだモデルが地中内変位の傾向をよりよく表わしていることがわかる。変位量はStep 3の段階で計測データより25％程度少なめにでているが，Step 2直後の計測データの不連続性がジョイント面での滑り等極端な非弾性的挙動を示したものと解釈し，仮に計測データのStep 3以降を下方へ平行移動すれば計算結果とよく合致することがわかる。データの始点がずれているのは解析で仮定したStep数が少ないため，実際の地中内変位計埋設時期と解析上の計測開始時期とにずれがあるからである。

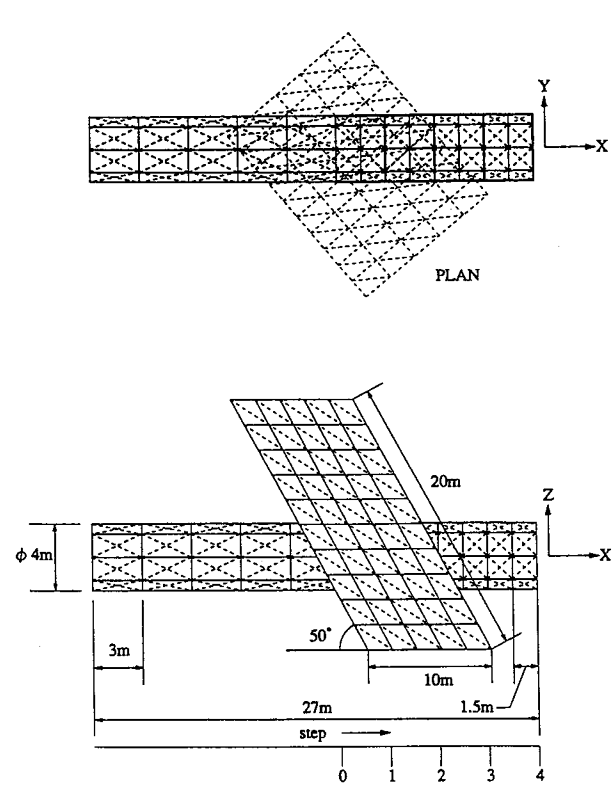

Fig. 7　A model of the tunnel model with a joint plane for 3-D combined FSM-DDM analysis.

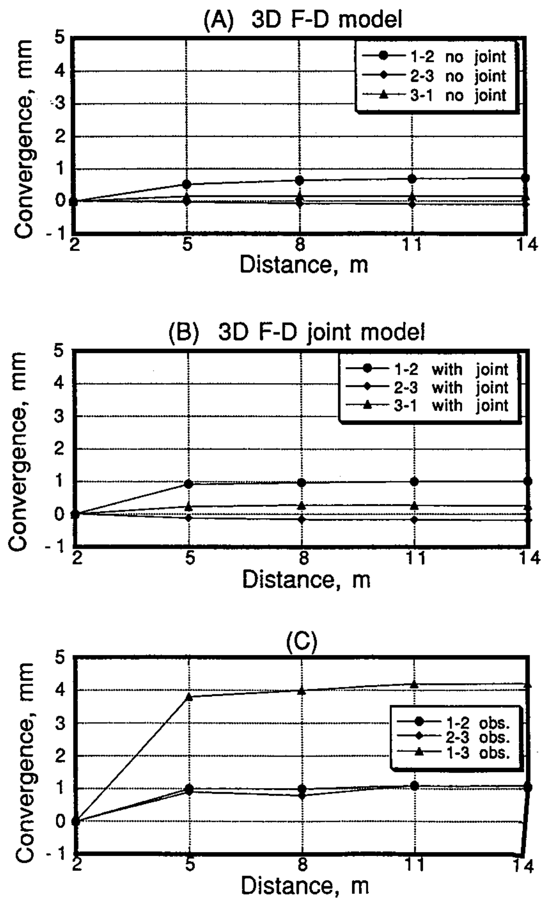

Fig. 8　The convergences computed (A : step 1～4, no joint element) (B : step 1～4, with joint element) and observed (c).

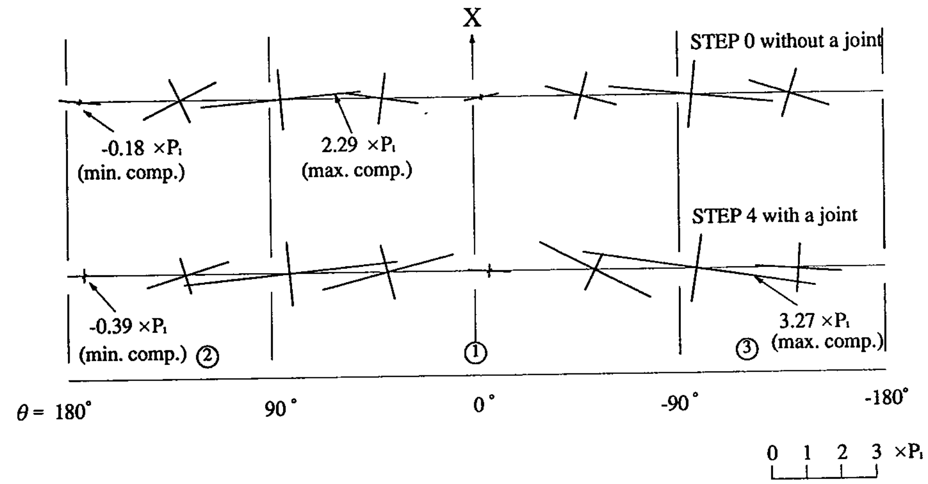

Fig. 9　Calculated stress distributions on the round shape tunnel. The diagram shows unfold view and $\theta = 0°$ is the top of the tunnel. The numbers in the circles indicate observation points of convergence.

これはStep数を増やすことで，より現実的な対応が可能となる。

次にFig. 6にジョイントの持つ特性を，この場合E_0/hであるが，変化させたときの変位量の変化を示す。横軸は時間を表わし，縦軸は地中内変位量を表わす。解析に用いたのは定数E_0/hを10^7 Pa/mから一桁ずつ上昇させ10^{10} Pa/mまでである。

10^{10} Pa/mの場合は岩盤に与えたヤング率とほぼ等しくなりジョイントがないケースと同等である。解析結果と観測データとの比較から10^7 Pa/mをジョイントの特性とすれば当該現場の岩盤条件をよく表わすことがわかった。空洞開削による岩盤中の変位のうち大半はジョイント部での動きであると解釈される。Fig. 6のケースにおいてよく一致する計算例では変位のうち70％程度がジョイント部での動きである。このことからジョイントを考慮した組合せ解析手法は岩盤の挙動をより精度よく表現できるといえる。

次節において坑道の進展にジョイントを考慮したモデルでの解析例において適用性を検証してみる。

4・2　坑道掘削

開削の進展に伴う坑道の変形を三次元変位くい違い法・仮想応力法組合せ手法を用いて計算した。計測は坑道断面内の内空変位の観測点を定めコンバージェンスメータを用いて行った。開削の進展は4発破とし1発破進行は3 mである。Fig. 7にジョイントを含めたモデルを示す。坑道は直径4 mの円形坑道とし，ジョイントの大きさは長さ10 m，高さ2mである。またジョイントの走行はN20°E，傾斜は50°Eである。これは現場のき裂を観測[7]し卓越した方向を絞りこんで得た。分割された要素数はジョイント部で100要素，坑道部で232要素計332要素である。開削の順序は掘削順に4つのステップに分けて進行するとして計算を行った。現地は前出のドーム状空洞開削地点から約200 m離れた位置にあるが，解析に必要な初期応力等の入力データはTable 1と同じデータを利用した。

Fig. 8に結果を示す。横軸は観測点から切羽面までの距離を表わし，縦軸には内空変位量を表わす。測点は坑道天盤の頂部を①とし切羽面に向かって左側壁を②，右側壁が③である。Fig. 8では上から観測データ，ジョイント要素のないモデルでの計算，ジョイントを含むモデルの計算結果である。観測データにおける①～③の内空変位が突出しており，②～③の変位は計算と比較すれば引張り圧縮が逆転している。①～②についてはジョイントを含むモデルがよく観測結果と合致している。

観測データ①～③の突出は右側壁の③点周辺においてき裂面での非弾性挙動が原因であると考えられる。また②～③の逆転は入力データに現位置のものが得られていないこと，③における非弾性挙動が原因と考察される。ここで組合せ解析によって計算された観測点周辺の応力分布をFig. 9に示す。展開図上に計算された応力をプロットした結果，測点③点付近に周方向の圧縮応力の最大値が認められる。主応力P_1の値は約3×10^7 Paである。ジョイントの影響でP_1の3倍強の圧縮が働いていることが予測され，これが非弾性的な挙動を起こさせたものの原因と解釈される。

5．結　　論

本研究から得られた知見を結論として以下に示す。

1．筆者らは境界要素法による三次元仮想応力法－変位不連続法組合せ解析のコードを開発した。

2．その手法にジョイントモデルを組込みき裂等を含む岩盤中の空洞開削の予測解析手法を開発した。

3．2箇所の現場事例研究に適用し評価を行った結果，ジョイントの応力－変位の関係を表わす定数に適当な値を選定すれば，岩盤の挙動をよく表わすことができることがわかった。

本研究に当たって，三井金属鉱業(株)より一部データを提供していただき協力を得た。ここに同社関係各位に謝意を表する。

引　用　文　献

1) 水田義明・李喜根：変位不連続法による3次元弾性解析の適用性について，水曜会誌　第20巻　第2号，(1984)

2) 水田義明・栗山　憲・渡部智一：解析的積分と岩盤力学における3次元境界要素法，資源・素材学会秋季大会講演資料，E-5，(1993)

3) 渡部智一・栗山　憲・水田義明・茂住洋史：三角形面要素を用いた三次元仮想応力法－変位くい違い法組合せ解析コードの開発，資源・素材学会春季大会講演要旨集，p. 271－272，(1993)

4) Crouch, S. L. and Starfield, A. M.: Boundary element methods in solid mechanics, George Allen & Unwin, London (1983)

5) Kuriyama, K. and Mizuta, Y.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci.& Geomech. Abstr., Vol. 30, p. 111－123, (1993)

6) 渡部智一：山口大学修士論文 (1993)

7) 斎藤修二・滑川正朗・中川哲夫：神岡鉱山におけるボルト支保，資源・素材学会秋季大会講演資料，B-4，(1992)