

岩盤斜面における平坦でない2組の不連続面の三次元モデル化と安定解析  
3-Dimensional Modeling and Stability Analysis of Rock Slope  
with Two Sets of Uneven Discontinuous Surface

碓井 敏彦\*\*・江崎 哲郎\*・張 曉兵\*・古賀 靖久\*\*

Toshihiko USUI, Tetsuro ESAKI, Xiaobing ZHANG, Yasuhisa KOGA

In this paper, the FLAC<sup>3D</sup> code is used to analyze the slope including a nearly horizontal fault and a steep one crossing each other. The model is established by different shapes of polyhedron based on the field survey. In order to reflect the real condition of the fault surface, the triangle assemblage is used to build the fault model. The polyhedron boundary are used as model mesh considering that the density mesh is not necessary for slope analysis. After the calculation of the initial stress, the initial deformation is set to zero, then the load of the dam and water is placed on the slope. The result of the calculation reveals that there is a stress concentration on a part of the horizontal fault surface where the over burden is thick, where as a large shear deformation occurs on the surface of the steep fault. This analysis procedure is suitable for the evaluation rock slope stability of complex fault formation.

## 1. はじめに

不連続性岩盤の変形破壊シミュレーションには、さまざまな数値解析法が用いられている。それらの解析手法は大きく二次元と三次元に分けられる。二次元の解析は平面ひずみ状態での安定度を評価するため、三次元に比べ単純であり、簡便に解析できるという有利な点はあるが、対象とする不連続面が複数で、それらの不連続面の傾斜方向が解析断面と大きく異なる場合などには、それらの不連続面を偽傾斜として解析せざるを得ないため正しい安定度の評価ができないという欠点がある。三次元解析の場合は二次元とは逆に解析が複雑となり、モデル分割、解析に多くの手間と時間を必要とする。しかし、複数の不連続面を現地に忠実な状態で解析できるので、正確な安定度の評価が可能である。また、三次元解析手法には有限要素法(FEM)、キープロック理論、大変形差分法などがある。この内、FEMは微小変形には適しているが、大変形の解析には適さない。キープロック理論は一般に変形問題、不連続面内の応力分布などには適していない。それに比べて大変形差分法は、実際の岩盤内にある様々な方向に発達した必ずしも平坦な面と言えない複数の不連続面からなる岩盤に適用可能と考えられ、更に自重以外の外荷重や不連続面内の応力分布や大変形を解析できる。そこで、本論文では三次元大変形差分解析コードFLAC<sup>3D</sup>：(有限差分法による連続体解析モデル)を用い、複雑な表面形状をした2つの不連続面を含むダムサイト岩盤斜面のモデル化およびダム湛水による外荷重を考慮した斜面安定の解析、評価を行った。

\* 正会員 九州大学

\*\* 法人会員 昭和地下工業株式会社

## 2. 三次元解析法<sup>1)</sup>

三次元大変形差分解析コードFLACの一般的な手順はFig. 1のようになる。この手順はまず、節点速度から歪み速度を得る。そして、歪み速度から構成方程式を用い新たな応力を求める。さらに、新たな応力から運動方程式を用い節点速度を求め、これらの過程を繰り返す。このうち構成方程式は

$$[\sigma]_{ij} = H_{ij} \{ \sigma_{ij}, \xi_{ij}, k \} \text{----- ①}$$

ここで  $[\sigma]_{ij}$  は新たな応力 (N/m<sup>2</sup>)、 $\sigma_{ij}$  は既存応力 (N/m<sup>2</sup>)、 $\xi_{ij}$  はひずみ速度 (m/s)、 $k$  は载荷重の履歴を考慮したパラメータである。

運動方程式は

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = \rho (dv_i/dt) \text{----- ②}$$

ここで  $\sigma_{ij,j}$  は新たな応力微分 (N/m<sup>3</sup>)、 $\rho$  は密度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $b_i$  は単位質量の物体力 (N/kg)、 $dv_i/dt$  は加速度 (m/sec<sup>2</sup>) である。この解析法は大変形に対応するため運動方程式で加速度に (dv / dt) を使用する動的解析法である。

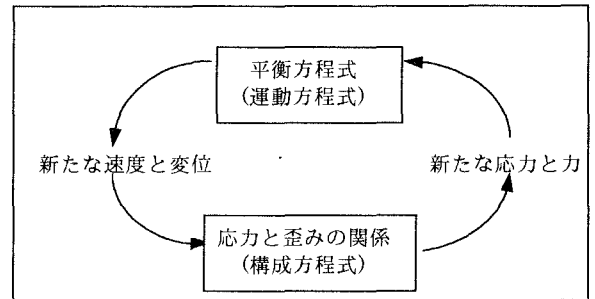


Fig. 1 基本的な計算サイクル<sup>1)</sup>

## 3. 解析概要

### 3.1 解析モデルの作成

#### (a) 地形地質概要

解析の対象とする斜面はある河川に計画されたダム左岸リム部である。現地の地形は平均斜度30°以上の急斜面である。ほぼ北から南へ流れる河川の標高は約200m、ダムリム部の標高は320mである。地質は白亜紀に形成された四万十累層群の砂岩、頁岩およびそれらの互層からなる。ダムサイト地点は亀裂の発達した砂岩を主体とし、左岸リム部に砂岩頁岩互層、右岸リム部から上流にかけて頁岩が分布する。この内、砂岩は直径3cm内外の頁岩のレンズ状ハッチを多く含む。これらの層は概ねNE-SW方向の走向で北へ約50°で傾斜する。これらの地層はいずれも硬質であるが亀裂が発達している。頁岩の亀裂間隔は10cm以下で多くは密着している。砂岩の亀裂間隔は0.3m~0.7mを示し、地表面の亀裂の多くは開口している。

#### (b) 不連続面の選定

本調査地点には主に以下の3種類の不連続面(断層系)が確認されている。

- ① NE-SW方向で北へ50°以上の急角度で傾斜する不連続面。数は一番少なく、ダム左岸下流から左岸リム部にかけて1本とダム右岸リム部から左岸上流部にかけて1本の計2本が認められる。この断層は以下に示す②、③の断層を切っている。この断層部は粘土状~礫混じり粘土状を呈し、厚さは平均約0.3mである。
- ② 不規則な走向傾斜を示し、30°以下の低角度で北側(上流側)もしくは南側(下流側)に傾斜する不連続面。

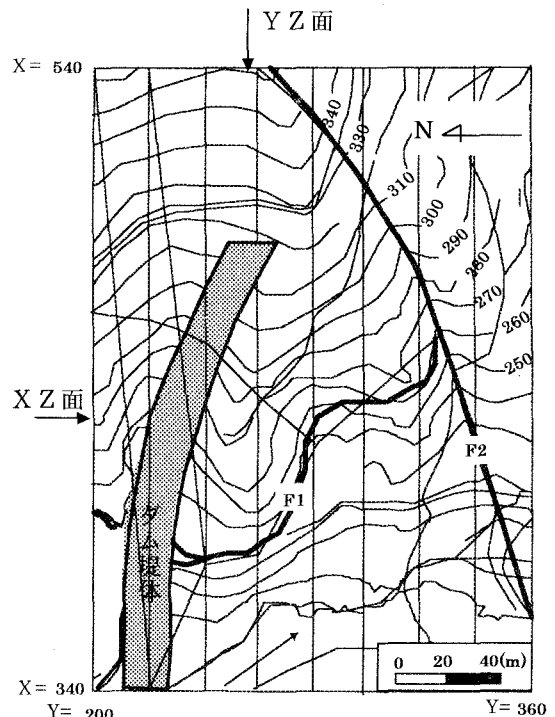


Fig. 2 解析領域平面図 (XY平面)

統面。ダム堤体部の断面では左岸側から右岸側に緩く傾斜するので、左岸側では水平か低角度の流れ盤、右岸側は低角度の受け盤構造となる。断層は右岸側左岸側にそれぞれ4本ずつの計8本認められる。この断層は①断層に切られている。断層部は角礫状を呈し、厚さは平均約0.2mである。

③ NE-SW方向で北西へ50°前後で傾斜する不連続面。断層はダム堤体部より下流側の右岸側に5本、左岸側に2本の計7本認められる。この断層は①、②断層のいずれにも切られている。断層は角礫状～粘土状を呈し、厚さは平均約0.15mである。

これら3種類の断層の分布状況とダムの位置関係から最も不安定となりやすい区域は低角度の断層が流れ盤を呈すダムの左岸下流域と考えられている。このダム左岸下流域には低角度の4本の断層と下流側に北東-南西方向で北傾斜の高角度の断層が分布する。解析モデルではこれらの断層の組み合わせおよびその位置関係からダムの建設による影響を最も受けやすいと判断される低い標高で、かつ連続性が確認されている②の不連続面の1つである低角度断層(F-1)と①の不連続面の1つである高角度断層(F-2断層)の2本の断層を不連続面としてとりあげた。

#### (c) 解析範囲

この調査地で不安定となることが懸念される区域は、ダム左岸下流部の斜面最上部から一体として移動する可能性も否定できないが、今回はダム堤体およびその延長線とF-2断層が交わる線とF-1およびF-2で囲まれる区域を考えた。よって、解析の範囲は現場の測量座標をもとに河川に直交する方向(横断方向) X座標=340~540m、上下流方向(縦断方向) Y座標=200~360m、垂直方向(標高) Z座標=140m~地表とした。このうちZ座標=140mはF-1断層の解析結果に影響を及ぼさないよう堤底より約20m低い標高とした。解析領域の平面図をFig.2に示す。

#### (d) 境界条件

不安定となる可能性のある部分はF-1断層、F-2断層、YZ面のY=200mからF-2断層に至る面、XZ面のF-1断層からX=540mに至る面の4つの面で囲まれる部分と考えられる。よって、境界条件は以下のように定めた。

X座標340mと540mでYZ面を固定する。Y座標200mと360mでXZ面を固定する。Z座標140mで底面を固定する。地表面は自由表面にする。なお、上記に示す境界のうち、不安定になると考えられる部分はいずれの面も固定せずに自由に動けるものとした。

#### (e) 解析モデルの作成

解析モデルの作成はY方向に20m間隔で作成された地質横断面図をもとに行った。この図は、ボーリングおよび横坑調査をもとに作成されたものである。その際、隣接する地質断面図間の断層の連続性を検討した。特に、前後する横断面図中の不連続面の位置を直接結ぶと不連続面にねじれが生じ、不連続面を挟む上下のブロックが正常にかみ合わない。そのため、隣り合う断面図の不連続面を2つの三角形で表現した。不連続面(インターフェース面)の模式図をFig.3に示す。

Fig.3に示すように、F-2断層は $\triangle ABF$ と $\triangle AEF$ で表現される。一方、F-1断層は $\triangle CDH$ と $\triangle CHG$ で表現される。しかし、F-1断層はF-2断層に切れ、 $\triangle CDH$ は直線 $\overline{CI}$ で $\triangle ABF$ と接し、直線 $\overline{ID}$ で $\triangle AEF$ に接する。そのため、 $\triangle CDH$ は $\triangle CIH$ と $\triangle DIH$ に分けられる。この時Iの座標は $\triangle CDH$ の平面方程式と直線A-Fの式を求め、2つの式の交点として求めた。さらに、解析に用いる法線は各三角形ごとに算

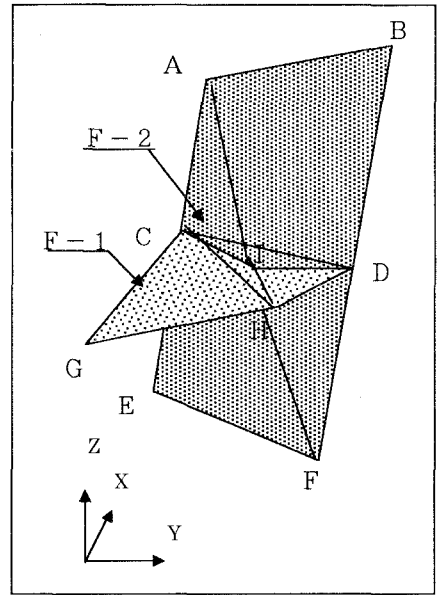


Fig.3 不連続面の模式図

定した。次に、2つの不連続面に接するブロックは各三角形を1面とする四面体の集合体として組み立てた。Fig.4に解析モデルの立体図を、Fig.5にインターフェース図を示す。

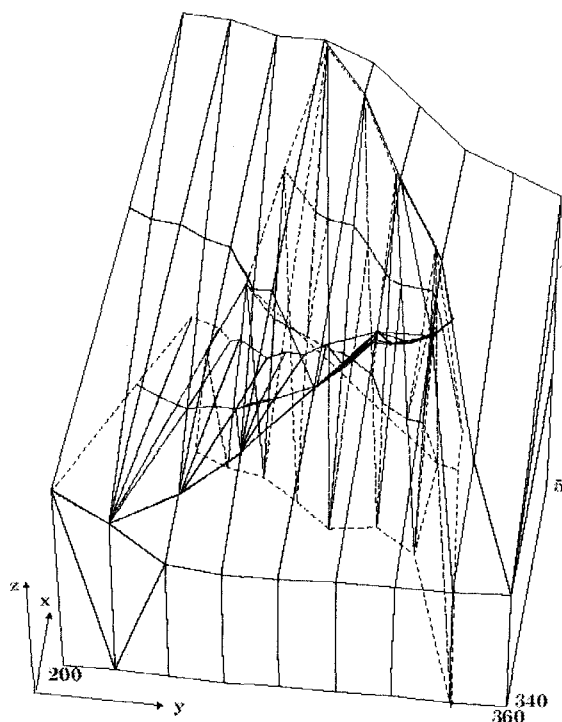


Fig. 4 解析モデル全体図

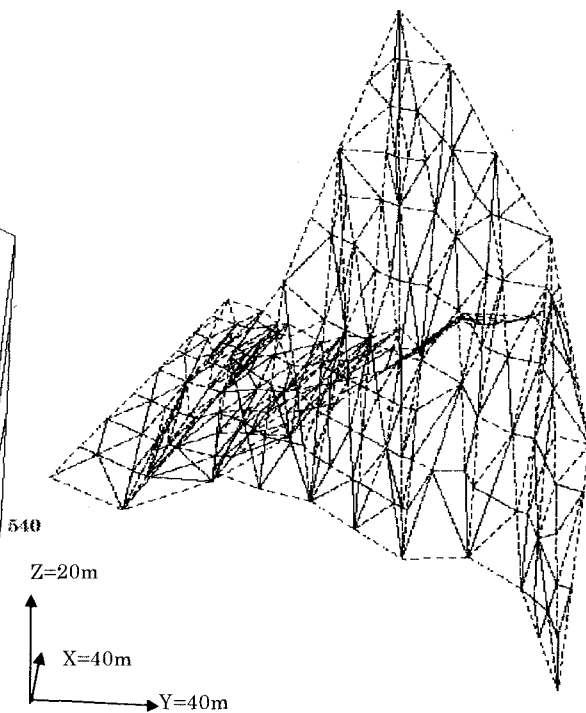


Fig. 5 インターフェース図

### 3.2 入力値の検討

#### (a) 応力場の設定

岩盤に加わる力は自重のほか、地山に加わる初期応力、地下水の存在に従う間隙水圧が考えられる。しかしながら、現状では、これらは明らかでない。そこで、今回の解析は地山の自重だけ考慮して、初期応力状態を解析した。そして、初期状態を収束するまで計算した後初期応力を保存し、初期変位を0として再びダムと水が斜面と接する部分に生じた応力をモデルに加えて解析した。

#### (b) 物性値

岩盤の物性値や不連続面の物性値はともに調査結果をもとにした。今回の解析で使用した不連続面の物性値はヤング率(E)、せん断係数(G)、ポアソン比( $\nu$ )、摩擦角( $\phi$ )、比重( $\gamma$ )であり、いずれの値も調査結果の平均値を用いた。また同じく、不連続面の厚さも0.3mとした。次に、湛水前の不連続面の垂直剛性と、せん断剛性は以下の式を用いた。

$$Kn = E \cdot Er / s(Er - E) \text{ ----- } \textcircled{3}$$

$$Ks = G \cdot Gr / s(Gr - G) \text{ ----- } \textcircled{4}$$

ここで、Kn：不連続面の湛水前の垂直剛性(MPa/m)、Ks：不連続面の湛水前のせん断剛性(MPa/m)、E：不連続面の湛水前のヤング率(MPa)、Er：岩盤のヤング率(MPa)、s：不連続面の厚さ(m)、G：不連続面の湛水前のせん断係数(MPa/m)、そして、Gr：岩盤のせん断係数(MPa/m)である。以上のように調査結果をもとに求めた物性値をTable.1に示す。

Table.1 岩盤および不連続面の物性値

項目	ヤング率 E(MPa)	せん断係数 G(MPa/m)	ポアソン比 $\nu$	摩擦角 $\phi(^{\circ})$	せん断力 $\tau_o$ (MPa)	せん断剛性 Ks(MPa/m)	垂直剛性 Kn(MPa/m)	比重 kN/m <sup>3</sup>
岩盤	3500	1500	0.17	40	0.49	—	—	23.5
不連続面 湛水前	200	80	0.25	30	—	281	707	—

#### 4. 解析結果

解析ではダム湛水後の応力状態の変化と変位量を求めた。その結果をFig.6～ Fig.8に示す。

Fig.6は不連続面における垂直応力の分布を示している。F-1断層面の垂直応力は土被り厚さの影響を受けるため、概ね土被りの厚い地下深部のF-2断層との接合部で大きな値を示す傾向にあり、その値はY座標=200m～240mのF-2断層との接合部近くで最大約7.3MPaを示す。しかし、垂直応力の分布は一様ではなく、大きな値を示す範囲はX軸方向に広がる傾向にある。特に、先に示した最大値に近接するY座標=240m～260mのF-2断層との接合部近くなどでは、F-2断層との接合部に近いにもかかわらず0.5MPa以下の低い値を示す。

F-2断層面の垂直応力はF-1断層に比べ低い値を示し、最大値はY座標=340m～360mの地表面付近で1MPa以下を示す。F-2断層面の垂直応力の分布はF-1断層と同じく一様ではなく、同じ値を示す範囲はZ軸方向に広がる傾向にある。

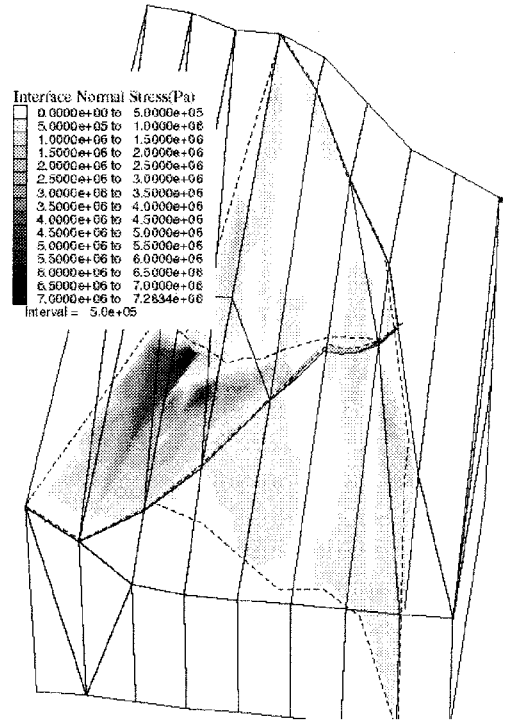


Fig.6 垂直応力分布の透視図

Fig.7は不連続面におけるせん断応力の分布を示している。F-1断層面のせん断応力の分布は垂直応力に似た分布を示すが、その値は垂直応力に比べ低く、Y座標=200m～240mのF-2断層との接合部近くで最大約1.6MPaを示す。また、垂直応力と同様にせん断応力の分布は一様ではなく、大きな値を示す範囲はX軸方向に広がる傾向にある。特に、先に示した最大値に近接するY座標=240m～260mのF-2断層との接合部近くなどでは、F-2断層との接合部に近いにもかかわらず0.5MPa以下の低い値を示す。F-2断層面のせん断応力はF-1断層に比べ低い値を示し、最大値はY座標=200m～240mのXZ面との接合部近くで1MPa程度を示す。F-2断層面のせん断応力の分布はF-1断層と同じく一様ではなく、同じ値を示す範囲はZ軸方向に広がる傾向にある。また、F-2断層のせん断応力の分布は垂直応力に似た分布を示すが、F-1断層のせん断応力と異なり、せん断応力はほぼ垂直応力と同じ最大値（1MPa程度）を示す。

Fig.8は不連続面におけるせん断変位の分布状態を示している。F-1断層のせん断変位はせん断応力の大きな部分で大きな値を示すが、その値は最大でも0.5cm以下を示す。また、せん断応力と同様にせん断変位の分布は一様ではなく、大きな値を示す範囲はX軸方向に広がる傾向にある。F-2断層で最も大きなせん断変位を示すのはXZ面との接合部近くで2.5cmを示す。これは不連続面の交差線の長さ160mで除したものを仮にせん断歪とすれば $1.6 \times 10^{-4}$ となる。F-2断層面上でその他大きなせん断変位を示すのはF-1断層より下位のF-2断層と地表面と交わった部分（Y座標=360）で1cm程度を示す。そのほかはいずれも0.5cm以下を示す。

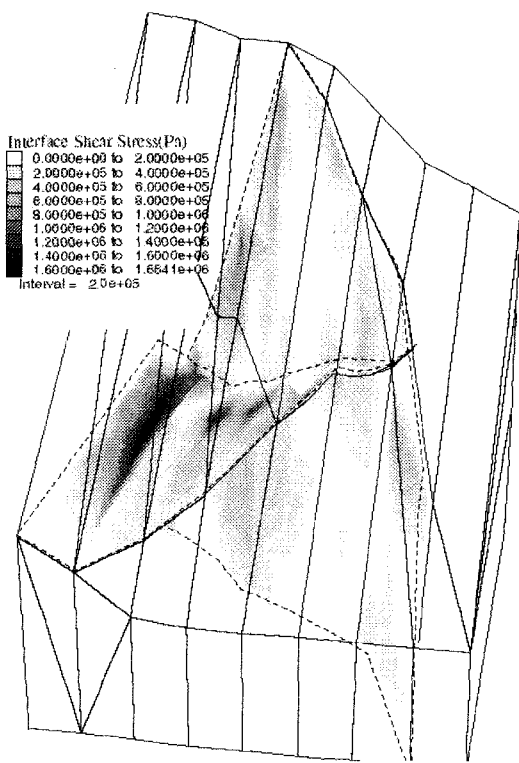


Fig.7 せん断応力分布の透視図

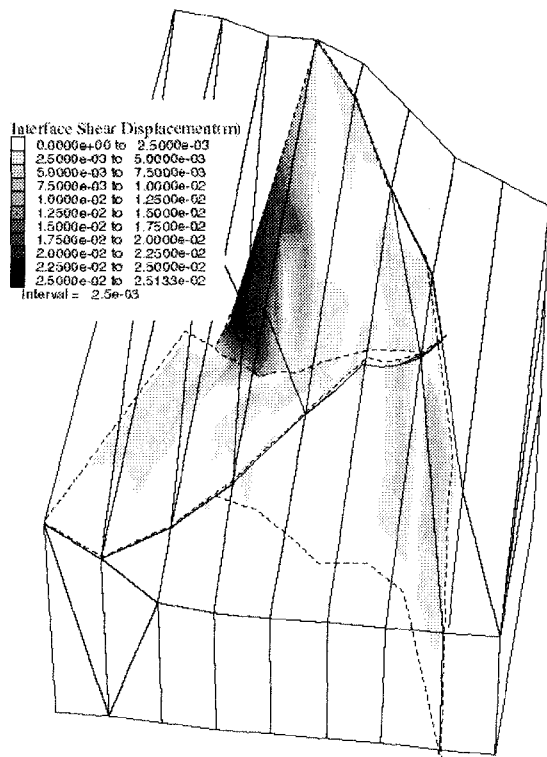


Fig.8 せん断変位分布の透視図

以上の解析結果から次のことが考えられる。

1) 解析結果によると変位や応力の大きな範囲はいずれもX軸方向もしくはZ軸方向に広がる傾向を示す。また、大きな値を示す範囲は鋭角三角形の形状をなしている。この三角形の形状は先の不連続面のモデル化で示した三角形の形状を示している。つまり、不連続面に作用する応力や変位は平坦でない不連続面の傾斜の変化の影響を受けていると考えられる。

2) 今回の解析結果では不連続面の中で緩い傾斜の部分には応力集中が生じているが、急傾斜の部分には応力集中が生じていない。これは応力が主に土被りによって生じるため緩い傾斜の不連続面には応力集中が発生したものと考えられる。

3) F-2断層面に沿ってせん断変位は最大2.5cm程度 ( $25/160000=1.6 \times 10^{-4}$ ) に対して、F-1断層のせん断変位は0.5cm以下となり、F-2断層に比べ小さな値を示している。この場合、計算は収束しているの、今回入力した調査に基づく物性値をもとに考えると大きな変位やすべり破壊は生じないと判断される。この解析計算における値の収束について、Fig.9に示す。Fig.9は速度の収束を示している。今回の解析では2000ステップ実施したが、はじめの1000ステップで速度は収束し加速度は  $(dv_i/dt) = 0$  となる。

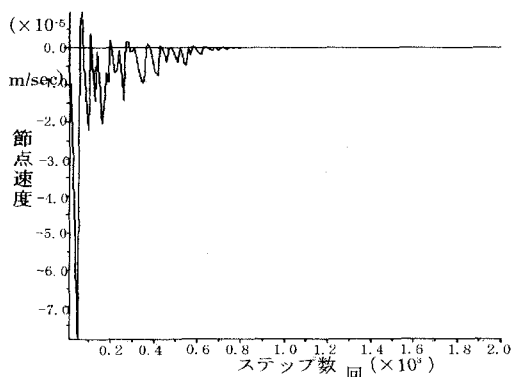


Fig.9 速度の収束状況

## 5. まとめ

今回の不連続面の数値解析結果では、応力と変位いずれも2つの不連続面内の走向、傾斜の変化の影響を受けやすいことが判明した。すなわち仮定した2つの不連続面に沿って移動するブロックの移動ベクトル方向に対して、それよりもゆるい傾斜の不連続面の部分にはせん断応力や垂直応力が大きくなる傾向を示し、それより急傾斜となるとせん断応力や垂直応力が小さくなる傾向にあると考えられる。したがって、不連続面内の応力分布は図のように不均質となると考えられる。このことは現場で計測される走向傾斜は同一とされる不連続面の位置によって多少変化するが、この方向を用いればより忠実に現地の状況を表現でき、より正確に安定度を評価できると考えられる。今回の解析は、建設前と完成後（湛水後）について行ったが、この間に不連続面に生じる変位は最大2.5cmで収束し、すべり破壊は生じないと考えられる。しかし、この解析では岩盤中の間隙水圧を考慮していない。現状では間隙水圧は作用しておらず、その分布状況に不明な点もあるが、厳密にはこれを考慮すべきであり、また、解析に含めることも可能である。今後ダム建設過程で計測を行い、その結果をもとにさらに解析を進める予定である。

## 6. 参考文献

- 1) ITASCA : Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions Version2.0, ITASCA社, 1997.
- 2) 後藤直人: 岩盤斜面の安定機構とその調査設計に関する総合研究, 九州大学環境システム工学研究センター修士論文, 1997.