

## 剛体回転に関する不連続変形法 (DDA) の研究

Study on the Rigid Body Rotation Problem in Discontinuous Deformation Analysis (DDA)

呉 建宏\*, 大西 有三\*\*, 大津宏康\*\*\*, 西山 哲\*\*\*\*

Jian-Hong WU, Yuzo OHNISHI, Hiroyasu OHTSU and Satoshi NISHIYAMA

\*工修, 京都大学博士後期課程学生, 土木システム工学 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

\*\* 正会員 工博 京都大学教授, 土木システム工学 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

\*\*\* 正会員 工博 京都大学助教授, 土木システム工学 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

\*\*\*\* 正会員 工修 京都大学助手, 土木システム工学 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

The separation of rigid body rotation term,  $r_0$ , from the other displacement variables is a breakthrough idea in original discontinuous deformation analysis (DDA) formula. Although the original linear displacement function is a fast and efficient method in computation, it loses accuracy when blocks undergo large rigid body rotations. It can be a significant problem especially when solving the problem with high speed rigid body rotation, such as rock fall problem, or the larger time interval is introduced to the problem with rigid body rotation to obtain the results within less computation steps. Up to date, it is only known that the large rigid body rotation can cause free expansion and change the weight of block in the analysis. However, the authors consider that the problem can also affect the contact judgments in open-close iterations and cause wrong contact forces in the computation. In this paper, this problem will be discussed, and a new method named "post contact adjustment" is developed and applied to the contact computation terms of DDA. After the improvements, the simulation results show better contact computations and block area preservations even when the large rigid body rotation is carried out.

*Key Words: rigid body rotation, contact computation, post contact adjustment, Discontinuous Deformation Analysis*

キーワード: 剛体回転, 接触計算, 接触後座標調整法, 不連続変形法

## 1. はじめに

不連続変形法 (Discontinuous Deformation Analysis, DDA) は, 任意形状の岩石ブロックの運動を, 有限要素法と同じようにポテンシャル最小化原理を利用して追跡する解析手法であり, 解が安定しており, また入力パラメーターの物理的な概念が分かり易いことから, 落石や岩盤崩落をシミュレーションするための解析手法として期待されている. 特に岩石ブロックの接触問題に関して, 同じ不連続体解析である個別要素法 (Distinct Element Method, DEM) と比較した場合, ダッシュポットで表される粘性抵抗を岩石ブロック間に加えるという操作が無いため, その取り扱いが容易であるという特徴がある. 本研究では, さらに DDA におけるブロック同士の接触問題を改善することで, 回転の挙動を伴う現象を高精度に解析するための研究を行った. これにより, 落石現象をより高精度にシミュレーションするこ

とが可能になると期待される.

## 2. DDA による剛体の回転問題について

DDA<sup>1)</sup> では, 解析対象を任意のブロックに分割し, そのブロック  $i$  の中の任意の点  $(x, y)$  の変位を, 式(1)に示す線形関数に基づいて計算する.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) & (x-x_0) & 0 & \frac{(y-y_0)}{2} \\ 0 & 1 & (x-x_0) & 0 & (y-y_0) & \frac{(x-x_0)}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ r_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$= [r_i] [D_i]$$

ここに、 $(x_0, y_0)$ はブロック  $i$  の重心座標、 $(u_0, v_0)$ はブロック  $i$  の剛体変位、 $m$ はブロック重心 $(x_0, y_0)$ を回転中心とした場合の剛体回転角、また $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy})$ はブロック  $i$  の歪みを表しており、さらに $[T]$ はブロック  $i$  の線形変位関数、 $[D]$ はブロック  $i$  の変位ベクトルを表している。

次に、ブロックの回転が半角の場合、点 $(x, y)$ の正しい変位は式(2)のような非線形な関数で表現される。<sup>2)</sup>

$$\begin{aligned} u &= u_0 + (x - x_0)(\cos r_0 - 1) - (y - y_0)\sin r_0 + (x - x_0)\varepsilon_x + (y - y_0)\gamma_{xy}/2 \\ v &= v_0 + (x - x_0)\sin r_0 + (y - y_0)(\cos r_0 - 1) + (y - y_0)\varepsilon_y + (x - x_0)\gamma_{xy}/2 \end{aligned} \quad (2)$$

式(1)と式(2)を比較すると、式(1)は式(2)を近似したものであり、ブロックの剛体回転  $m$  が小さい時、すなわち  $\sin r_0 \approx 0$  と

$\cos r_0 \approx 1$  の条件が成り立つ時のみ両式が等しくなることが分

かる。図-1 に示すように、点  $P$  が点  $P_0$  を中心として  $m$  の回転運動をする場合、計算によって得られる移動後の点  $P$  の位置は、式(1)と式(2)ではその値が異なる。その結果、剛体の回転運動を解く場合、単位解析ステップごとの回転量が大きいと、式(1)に基づいて解析した場合には、その解析に伴う誤差が大きくなるという問題が発生する。これは、例えば剛体回転するブロックを考えた場合、回転に伴ってそのブロックの面積が膨張してしまうという解析結果 (Free Expansion Problem)<sup>2-7)</sup> を与えてしまう。

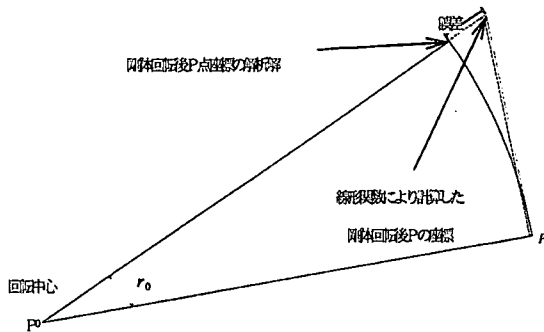


図-1 剛体回転の計算誤差<sup>3)</sup>

また落石のような回転を伴う剛体運動を解析する場合、解析時間を短縮するため解析時間の刻みを大きくする操作が行われるが、解析を進めていくに従い図-1 に示すような誤差が蓄積していく。また、解析時間の刻みを小さくして誤差を少なくしようとしても、単位解析ステップごとの移動量が大きい場合には同じ問題が発生することになる。この問題を解決するため、これまで幾つかの方法が提案されている。次にそれらの方法について考察する。

## 2.1 Post Adjustment Method

ブロックが回転するに伴って、膨張するという問題を解決するため、Ke は Post Adjustment と称する手法を提案した。この方法は、解析の最後に変位ベクトルを式(2)を使って計算し、個々のブロックの頂点の座標を更新する。各ステップごとの最大許

容剛体回転量を  $0.1\text{rad}$  とし、この許容値以下の剛体回転量では、ブロックの膨張面積が小さいことを確認した。また、Koo and Chem<sup>3)</sup> もこの Post Adjustment 法に類似した Post-correct 法を提案し、その適用性を検討した。なお、Post Adjustment 法においてはブロック同士の接触時の問題を扱っていないため、ブロック同士の接触判断を誤る可能性もある。

## 2.2 テイラー展開で近似する手法

MacLaughling and Sitar<sup>6)</sup> は式(2)の  $\sin(r_0)$  と  $\cos(r_0)$  を式(3)のようにテイラー展開し、 $m$  の 2 次の項までブロックの変位関数に取り入れた (式(4))。

$$\begin{aligned} \sin(r_0) &= r_0 / 1! - r_0^3 / 3! + r_0^5 / 5! \cdots \\ \cos(r_0) &= 1 - r_0^2 / 2! + r_0^4 / 4! \cdots \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} u &= u_0 + (x - x_0)(\cos r_0 - 1) - (y - y_0)\sin r_0 \\ &= u_0 - (x - x_0)r_0^2 / 2 - (y - y_0)r_0 \\ v &= v_0 + (x - x_0)\sin(r_0) + (y - y_0)(\cos r_0 - 1) \\ &= v_0 + (x - x_0)r_0 - (y - y_0)r_0^2 / 2 \end{aligned} \quad (4)$$

MacLaughling and Sitar の研究により、テイラー展開法を導入した後、ステップごとに許容される剛体回転量は  $0.4\text{rad}$  となった。但し、単位解析ステップごとの剛体の移動量が小さい時のみ精度が保証されるという問題がある。そのため、解析時間の刻みを小さくする必要があるために、大変形問題を解く際には計算に要する時間が大きくなり、また各ステップごとの計算によって生じる誤差が最終的には大きくなるという問題が発生する。

## 2.3 Trigonometric Method

Cheng and Zhang<sup>7)</sup> は、式(5)に示す三角関数の変換式を使って、式(2)を式(6)で表現しなおした。

$$\cos(r_0) - 1 = -\sin^2(r_0) / (1 + \cos(r_0)) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \left[ -(x - x_0) \frac{\sin r_0}{1 + \cos r_0} - (y - y_0) \right] \sin r_0 + (x - x_0)\varepsilon_x + (y - y_0)\gamma_{xy}/2 \\ v &= v_0 + \left[ -(y - y_0) \frac{\sin r_0}{1 + \cos r_0} + (x - x_0) \right] \sin r_0 + (y - y_0)\varepsilon_y + (x - x_0)\gamma_{xy}/2 \end{aligned} \quad (6)$$

これによって、ブロックの変位関数 $[T]$ は式(1)の線形式から非線形式(7)に書き換えられる。MacLaughling と Sitar が提案するテイラー展開法は、この Trigonometric Method の特例である。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -(x - x_0) \frac{\sin r_0}{(1 + \cos r_0)} - (y - y_0) & (x - x_0) & 0 & (y - y_0)/2 \\ 0 & 1 & -(y - y_0) \frac{\sin r_0}{1 + \cos r_0} + (x - x_0) & 0 & (y - y_0) & (x - x_0)/2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

また、ブロックの変位ベクトル $[D]$ は、式(1)の  $m$  項から式(8)の

$\sin(r_0)$ に変更される。

$$[D_i]=\{\mu_0 \quad \nu_0 \quad \sin r_0 \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy}\} \tag{8}$$

なお、DDAは陰的な解法であるため、Trigonometric Method を使う際、剛体マトリクスと変位ベクトル両方に、 $\sin(r_0)$ の関数が存在する。そのため、Cheng and Zhang はステップ「i」の計算でステップ「i-1」の $\sin(r_0)$ を式(7)に導入する方法を提案した。この方法によって、Trigonometric Method の解析は繰り返し計算になるが、 $\sin(r_0)_0$ と $\sin(r_0)_{i-1}$ が同じ場合のみ正確な解が得られる。従って、ブロックが角加速度が持つて運動している場合は、解析結果の精度は $\sin(r_0)$ 値に依存することになり、しかも、誤差の累積も大きくなる。

### 2.4 回転を伴う剛体運動の解析例

次に、これまで提案されてきた手法の解析結果を、例題によって検証する。例題は図-2 に示すような剛体の回転問題であり、ブロック同士の接触問題が発生するものである。DDA の接触貫入の判定にはPenalty 法が用いられる。これは、ブロックの運動に関する弾性体の動的な大変形問題であり、接触貫入時にはブロック間にバネが組み込まれ、両者が貫入しないように設定される。

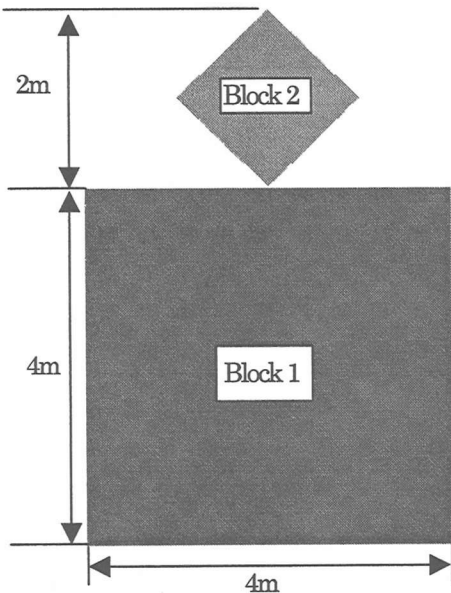
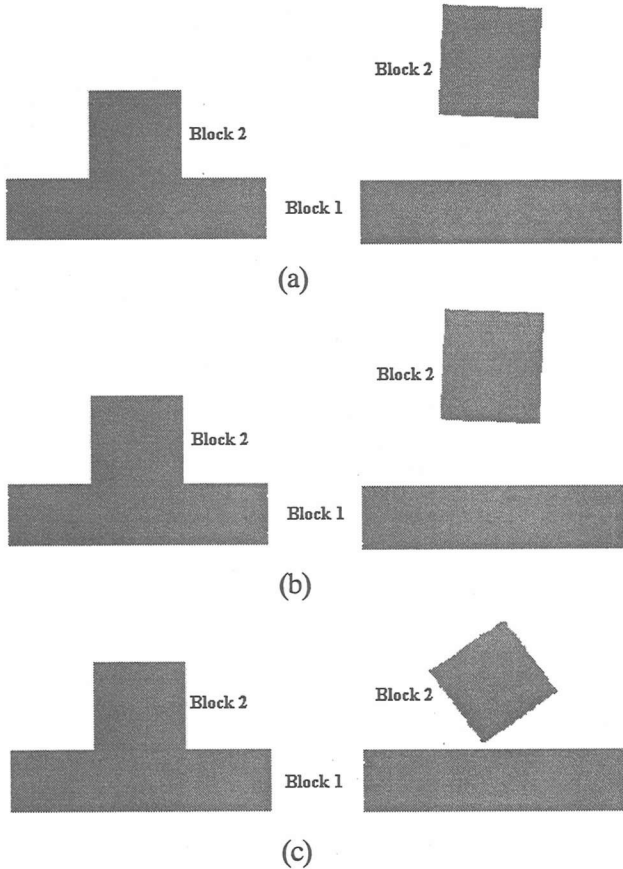


図-2 例題の概念図

図-2 に示す例題は、二つブロックから形成されるもので、長さ4m、高さ4mで固定されているBlock1 と対角線の長さが2mの固定されていない正方形Block2 が図のように配置されている。二つのブロックの物性は同じで、密度は2.6 ton/m<sup>3</sup>、弾性係数は100 MPa、そしてポアソン比は0.25 である。ここで、Block2 は重心を中心に回転するという仮想的な場合を考える。もし、回転に伴ってBlock2 の面積が膨張すれば、Block1 との接触が生じ、それに伴う貫入判定等の解析が行われ、Block2 の挙動が、重心を中心とした回転ではなくなる。これにより、これまで提案された解析手法が正しく回転問題をシミュレーションできるかどうかを検証した。

計算に際しては、Block2 には重力が働かないとする条件を設定することで、Block2 が重心を中心に回転するように設定し、また二つのBlock1 および2 の境界には摩擦が無く、粘着力および引張り強度に相当する力も働かないと仮定した。さらに、時間刻みを0.1 sec とし、また、ブロック同士の貫入時に挿入される接触ばねの剛性は3 GN/m とした。

解析は、Original DDA Method、Post Adjustment Method および Trigonometric Method の3つの手法を用いた。なお、本論文では式(1)に示す線形の変位関数を用いる手法をOriginal DDA と称する。また、Trigonometric Method を使う場合、解析ステップが1である場合、式(7)中の $\sin(r_0)$ と $\cos(r_0)$ にはそれぞれ0 と1を代入し、解析ステップが1より大きい場合には、ステップ i-1 の値をステップ i の $\sin(r_0)$ と $\cos(r_0)$ に代入する。解析は、許容剛体回転量に見合った2つの回転速度 0.01 rad/sec と 1 rad/sec の条件の下で解析を行った。解析の結果を図-3 に示す。図-3 の結果において、左は0.01rad/sec の場合であり、右は1 rad/sec の場合である。



(a)Original DDA Method (b)Post Adjustment Method  
(c)Trigonometric Method  
左: 0.01 rad/sec, 1000 steps の解析結果  
右: 1 rad/sec, 30 steps の解析結果

図-3 解析結果

図-3 から分かるように、各解析手法において、回転速度が 0.01 rad/sec の時はBlock2 はBlock1 と接触して、回転が止ま

ってしまう。一方、回転速度が1 rad/sec の時には、Block2 が Block1 から離れる挙動を示した。図-3 の結果は、いずれも Block2 が Block1 に貫入した結果生じたものである。これは、何らかの原因で Block2 の形状が変化したために起きたのか原因である。そこで、表-1 に各解析手法によって計算された Block2 の面積の変化を示す。表-1 は回転速度が0.01rad/s の場合の1000 ステップ後の Block2 の面積と1.0rad/s の場合の30 ステップ後の面積の値を示したものである。

表-1 解析手法と Block2 の面積変化の関係

| 解析方法                   | 1.0 rad/sec            | 0.01 rad/sec           |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| Original DDA Method    | 2.414868m <sup>2</sup> | 2.001306m <sup>2</sup> |
| Post Adjustment Method | 2.000000m <sup>2</sup> | 1.999999m <sup>2</sup> |
| Trigonometric Method   | 2.019648m <sup>2</sup> | 2.000002m <sup>2</sup> |

線形の変位式を用いる Original DDA Method では面積の膨張が生じており、回転速度が速くなるにつれて膨張の度合いは大きくなる。また、Trigonometric Method については、回転速度が遅い場合には面積変化は無視できるほどに小さいが、回転速度が速くなると Original DDA Method と同様に明らかな面積の膨張を示す。これにより、図-3 に示すような Block2 の挙動が生じる。一方、Post Adjustment Method では、面積膨張が生じていない。これは、この手法が最終的に面積を修正する計算過程を組み込んでいるためである。しかしながら、図-3 に示すように、Post Adjustment Method による Block2 の挙動は Block1 への接触を生じた結果を示している。

この原因を詳細に考察するため、図-4 に DDA においてブロック同士が接触する際の解析過程を表すフローチャートを示す。ブロック同士の接触が生じた場合には、“Open-Close 反復法”という逆解析手法を利用して、“貫入無し (No Penetration) 、引張り応力無し (No Tension) ”の法則を満たすように、ブロック間にバネを組み入れる。このようにしてブロック同士の貫入を防止し、6回の反復計算後、この貫入および引張り応力無しの法則が満たされない場合、解析時間刻みを小さくして、新しい反復計算に移行する。そして、貫入および引張り応力無しの法則を満たす変位ベクトルを利用して、それぞれのブロックの頂点座標の更新を行う。

これまでの手法は、いずれも解析の最終段階ではブロック座標の更新を行うが、接触の反復計算中は、Original DDA Method と同じ線形式を使っている。従って、表-1 の Post Adjustment Method ではフローチャートの最終段階での面積変化は見られないものの、接触時の Open-Close 反復法の段階においては、何らかの面積膨張が生じていることになる。

そこで、Open-Close 反復法の段階での Block2 の面積を詳細に分析した結果を図-5,6,7 および8 に示す。図-5,6 は Original DDA Method で回転速度が0.01rad/sec と1.0rad/sec の場合の Block2 の面積の変化を示すものである。

図-5,6 より、Original DDA Method は、Block2 の面積が

回転にともなって変化し、その変化は回転速度が速いほど大きくなっている。この変化は面積の膨張を表しており、その結果二つの Block1 と Block2 の間に貫入を防ぐバネが挿入され、図-3 に示すような挙動が現れるという結果になる。

一方、Post Adjustment Method およびTrigonometric Method で解析した場合の、Open-Close 反復法の段階での Block2 の面積をそれぞれ図-7 および 8 に示す。図-7 は回転速度が0.01rad/sec の場合、図8 は1.0rad/sec の場合である。回転速度が遅い場合には、Open-Close 反復法の段階での Block2 の面積変化は無視できるほどに小さいが、回転速度が速い場合には、その変化の大きさは小さいものの、最初は 2.0m<sup>2</sup> であった Block2 の面積がPost Adjustment Method においても膨張していることが分かる。図-3 に示す結果は、Open-Close 反復法の段階でBlock2 がBlock1 へ接触する際に面積変化が生じていることが原因である。

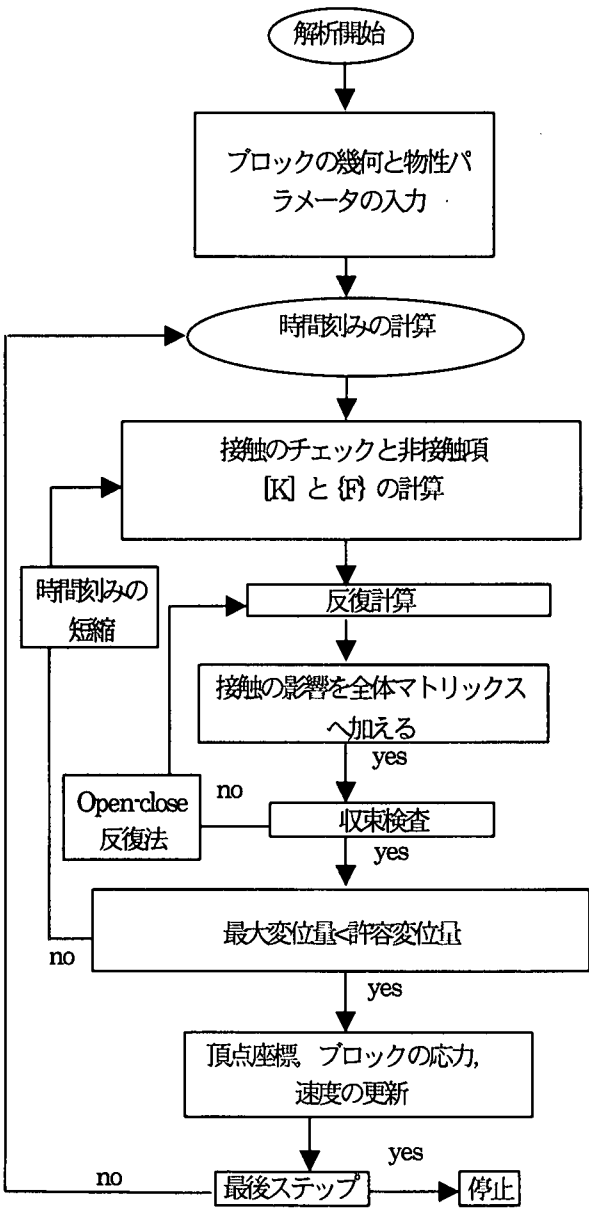


図-4 DDA 解析フローチャート

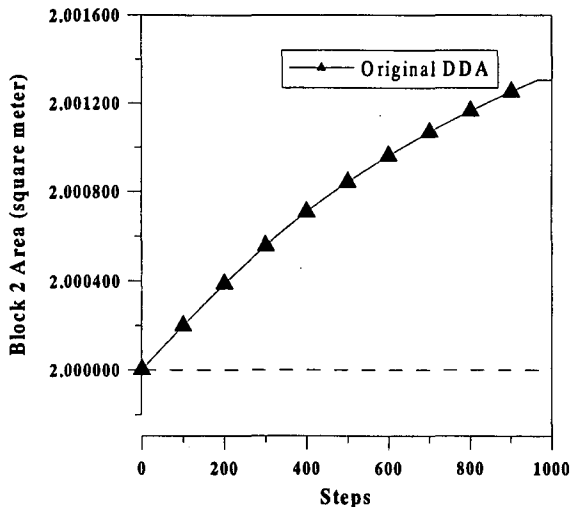


図-5 Original DDA 法でのBlock 2の面積変化  
(回転速度 =0.01 rad/sec)

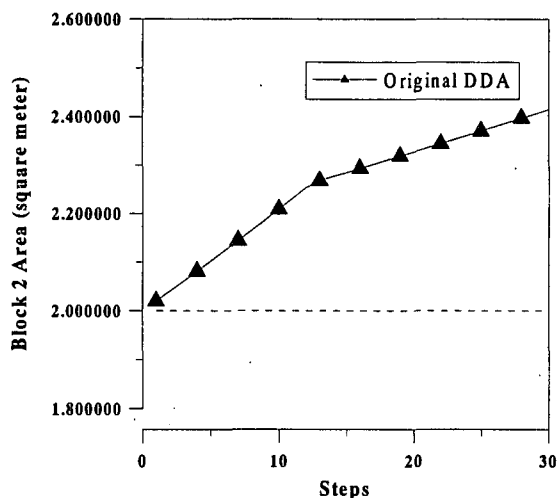


図-6 Original DDA 法でのBlock 2の面積変化  
(回転速度 =1.0 rad/sec)

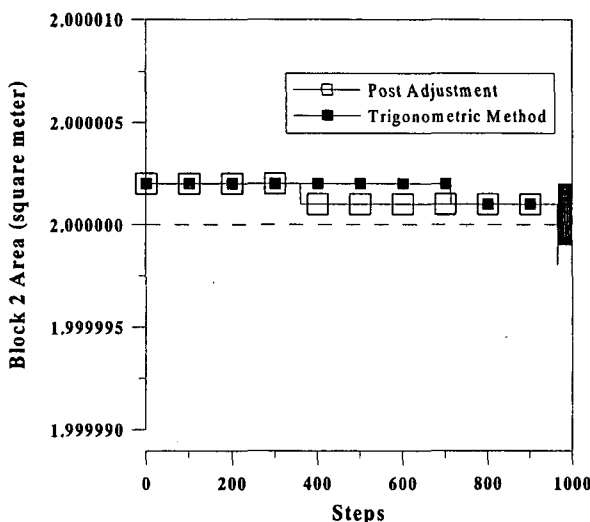


図-7 Post Adjustment Method および Trigonometric Method でのBlock 2の面積変化  
(回転速度 =0.01 rad/sec)

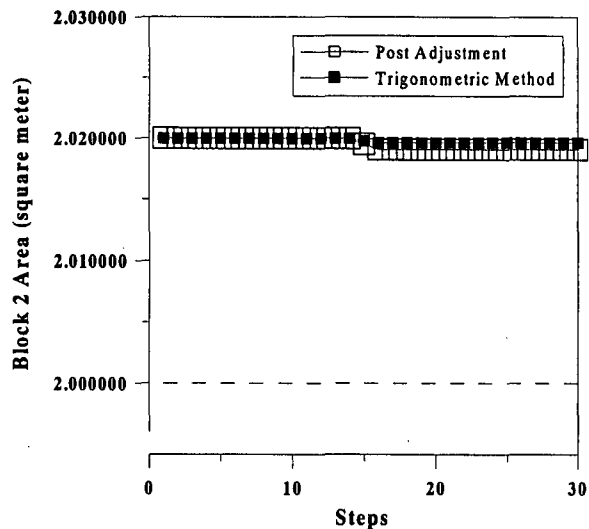


図-8 Post Adjustment Method および Trigonometric Method でのBlock 2の面積変化  
(回転速度 =1.0 rad/sec)

これらの結果より、高速の回転を伴いながら接触する現象を解析する場合、例えば落石のシミュレーションなどでは、計算結果に大きな誤りが含まれてしまうことになる。

### 3. Post Contact Adjustment Methodの導入

これまで考察したような高速の回転を伴う現象に対するシミュレーションを高精度に行えるようにするため、本研究では次に述べるような Post Contact Adjustment Method という新しい方法を提案する。

図-9 に、DDAにおいて二つのブロックが接触、貫入する場合の模式図を示す。ブロックの貫入に伴い、各ブロック間には垂直の接触ばねとせん断の接触ばねが挿入される。この図に基づいて、垂直接触ばねとせん断接触ばねのそれぞれに関して議論する。

#### 2.1 垂直接触ばねについて

Shi<sup>1)</sup> のDDA理論に基づき、ブロック  $i$  の頂点  $P_1(x_1, y_1)$  がブロック  $j$  の辺  $P_2P_3$  に接触貫入する可能性がある場合、垂直接触ばねを入れて、ブロック同士が貫入しないようにする。  $P_2$  の座標は  $(x_2, y_2)$ 、  $P_3$  の座標は  $(x_3, y_3)$  であり、また、垂直接触ばねの長さ  $d$  は、式(9)に基づいて計算する。

$$d = \frac{\Delta}{l} = \frac{1}{l} \begin{vmatrix} 1 & x_1 + u_1 & y_1 + v_1 \\ 1 & x_2 + u_2 & y_2 + v_2 \\ 1 & x_3 + u_3 & y_3 + v_3 \end{vmatrix} = \frac{1}{l} \left[ S_0 + \begin{vmatrix} 1 & u_1 & y_1 \\ 1 & u_2 & y_2 \\ 1 & u_3 & y_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & x_1 & v_1 \\ 1 & x_2 & v_2 \\ 1 & x_3 & v_3 \end{vmatrix} \right] \quad (9)$$

$$\text{ここに、} \quad l = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}, \quad S_0 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix},$$

$$\text{また } \begin{vmatrix} 1 & u_1 & v_1 \\ 1 & u_2 & v_2 \\ 1 & u_3 & v_3 \end{vmatrix} \text{ の値は小さいため、省略可能である。}$$

また  $\Delta$  は下のように表される:

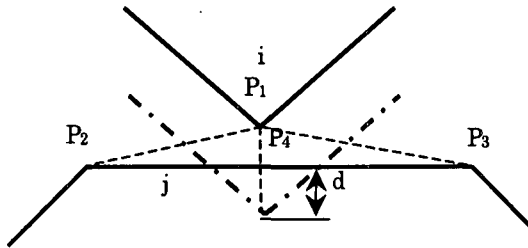


図-9 接触計算の説明図

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} 1 & u_1 & v_1 \\ 1 & u_2 & v_2 \\ 1 & u_3 & v_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \\ &= S_0 + \begin{bmatrix} (y_2 - y_3) & (x_3 - x_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (y_3 - y_1) & (x_1 - x_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (y_1 - y_2) & (x_2 - x_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_3 \\ v_3 \end{bmatrix} \\ &= S_0 + f(i) + g(j) \end{aligned} \quad (10)$$

本研究では、接触後の座標調整を加えた3つ段階の計算過程が行われる。各過程の詳細は次の通りである。

**段階1:** 式(9)と(10)を使って、ブロックの全体剛性と力のマトリックスを形成する。この段階で式(2)の非線形関数で表される変位ベクトルを使用した場合には全体マトリックスの形成が難しく計算が困難になるので、式(2)の理論解の代わりに、式(1)の線形関数を用い計算を容易にする。

**段階2:** ブロックの変位ベクトルの計算が終わった後、式(9)と式(10)を用いて、各接触箇所において“貫入無し (No Penetration)”，“引張り応力無し (No Tension)”の法則が満たされているかどうかを検証する。この際、正しいブロックの頂点座標を示す理論解の式(2)を式(9)と(10)に代入し計算を行う。これにより、正確なブロック同士の接触判定が行われる。

**段階3:** 段階3において、式(2)の理論解を使用して頂点座標を更新する計算を行う。

この3段階の解析ステップより、DDAの特徴である接触に関する物理的な概念の分かり易さを保ち、かつ計算を容易にしながらも、非線形関数による正確な頂点座標の計算が行えるという利点を得ることができる。

## 2.2 せん断接触面について

DDAの解析では、ブロック同士が接触している際のせん断

方向の破壊判定は Mohr-Coulomb の破壊基準に従う。もし、不連続面で発生したせん断力がその面のせん断強度より小さい場合は、これを Lock 条件と呼び、ばね定数  $k_s$  のせん断ばねを接触しているブロック間の接線方向に加える。図-9 に示すように、ブロック  $i$  の頂点  $P_1(x_1, y_1)$  のブロック  $j$  への接触点は  $P_4(x_4, y_4)$  である場合、その際のせん断ばねの長さの計算は次のように行う。

$$[d_x \ d_y] = [(x_1 + u_1 - x_4 - u_4) \ (y_1 + v_1 - y_4 - v_4)] \quad (11)$$

また、せん断ばねによるせん断力は次のようになる。

$$[F_x \ F_y] = -k_s [(x_1 + u_1 - x_4 - u_4) \ (y_1 + v_1 - y_4 - v_4)] \quad (12)$$

このせん断ばねに関する計算を、全ブロックの全体マトリックスに加える際には、垂直接触ばねの計算と同じように、式(1)に示す線形関数を使う。また、Open-Close 反復法における接触判断と頂点座標の更新を行う際には、垂直接触ばねと同じように、段階2と段階3において非線形関数の式(2)を使用する。これにより、せん断接触ばねにおいても正確なブロック間の接触判定が行えるようになる。

## 4. Post Contact Adjustment Method 解析例及び考察

本研究によって提案する Post Contact Adjustment Method による解析法を検証するために二つ例題の解析を行った。

まず、前述の図-2 に示す例題に、本手法を適用した結果を図-10 に示す。図-10 には、Block 2 が 0.01rad/s と 1.0rad/s の速度で回転する例を 4600 ステップまで解析した場合の Block 2 の面積の変化を示す。図より明らかなように本研究による解析手法では、従来の手法で見られた Block 2 の面積変化は認められない。

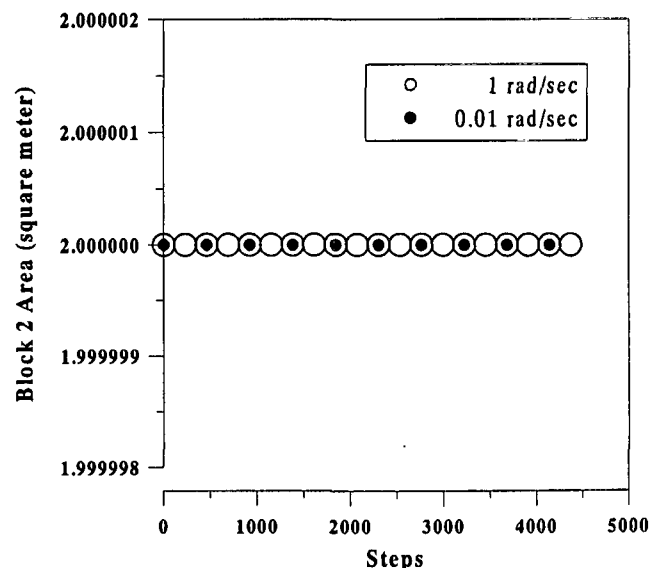


図-10 Post Contact Adjustment Method 法での Block 2 の面積変化

表—2 単位解析ステップでの回転量に対する面積と重心位置の変化

| 回転量 0.17 rad        |         | 回転量 0.35 rad        |         | 回転量 0.80 rad        |         |
|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|
| 面積(m <sup>2</sup> ) | 重心位置(m) | 面積(m <sup>2</sup> ) | 重心位置(m) | 面積(m <sup>2</sup> ) | 重心位置(m) |
| 2.000000            | 5.00    | 2.000000            | 5.00    | 2.000000            | 5.00    |

表—4 落石現象のシミュレーションにおける落石面積の変化

| Original DDA Method |        | Post Contact Adjustment Method |         |
|---------------------|--------|--------------------------------|---------|
| 面積                  | 誤差(%)  | 面積                             | 誤差(%)   |
| 32.2645             | 281.69 | 8.4530                         | 5.92E-4 |

表—2 には、単位解析ステップごとの Block2 の回転量を変化させた場合の Block2 の面積と重心座標の値を示す。接触貫入が生じない場合の Block の面積は 2m<sup>2</sup> であり、重心の位置は 5m である。結果より、単位解析ステップの回転量が 0.8rad まで高精度の解析結果が得られることが分かる。単位解析ステップの最大許容回転量は、これまで開発されてきたどの手法よりも大きな値であり、解析ステップごとの回転量が大きい問題に対して、本手法が有用であることを示す。また、これは単位解析ステップごとの移動量を大きくすることが可能であることを示し、長時間の解析を必要としてきた問題に対し、その解析時間を短縮できるという利点を有していることが分かる。

次に本研究による手法を落石現象のシミュレーションに適用した例を示す。落石現象を表—3 に示す物性値などのパラメータを用いて解析した。なお、単位解析ステップの時間刻みおよびここでは、落石は斜面と衝突する際にはエネルギーを損失すると考え、速度・エネルギー比の概念に相当するエネルギー損失が生じるようにした。なお、エネルギー損失は式 (13) で表現される式を解析に組み込むことで発生させ、本解析においてはこれまでの研究結果<sup>8)</sup> からその値を 0.7 に設定した。

$$Loss = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \quad (13)$$

ここに、

v<sub>1</sub>: 衝突前の速度

v<sub>2</sub>: 衝突後の速度

である。

表—3 解析に使用したパラメータ

| ブロックの物性値                     |      | 不連続面の物性値        |    |
|------------------------------|------|-----------------|----|
| 単位重量<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 26   | 摩擦角<br>(Degree) | 40 |
| 弾性係数<br>(Gpa)                | 32   | 粘着力<br>(Mpa)    | 0  |
| ポアソン比                        | 0.15 | 引張り強度 (Mpa)     | 0  |

図—11 に本研究によるシミュレーションの結果の一例を示す。また表—4 には、Original DDA Method と本研

究による解析手法で計算した 1000 ステップ後の落石の面積の計算結果を示す。なお落石の面積の初期値は 8.45305 m<sup>2</sup> である。表より Original DDA Method では面積変化が大きく生じているのに対して、本研究では、1000 ステップ後の落石の面積はほとんど変化がないことが分かる。これにより、落石などを高精度にシミュレーションすることが可能になり、これまででない不連続変形法の応用の広がりを実現するものであると考えられる。

## 5. 結 論

本研究は回転を伴う現象において、これまで適用されてきた DDA の問題点と、それを解決するための新しい手法についての議論を行った。回転に伴う移動量が大きな場合、これまでの DDA の解析手法では高精度なシミュレーションが困難であるばかりでなく、斜面での落石現象などを対象にした場合、ブロック同士の接触貫入が生じる際に、誤った解析結果を出現させる可能性があった。これは、誤差を含んだ座標に基づいて接触判定を行うことに起因するためであり、これらの問題は接触判定時に正確な座標が得られていないと解決できないことを事例に基づいて示した。これまでいくつか回転問題の解析精度の向上に取り組んだ研究はあったが、いずれも接触貫入問題を解決しておらず、落石のような具体的事例には対処できないのが実状であった。本研究はこのような問題を解決するため、接触判定後に座標を調整する手法を開発し、その有用性をいくつかの例題を通して示した。本研究によれば、斜面での落石現象などが、解析時間を短縮しながらも高精度にシミュレーションすることが可能であることが実証された。今後さらに具体的な事例で検証を進めながら応用の展開を図ってきたいと考える。

(last page)

## 参考文献

- 1) Shi, Gen-Hua: Discontinuous Deformation Analysis A New Numerical Model for the Static and Dynamics of Block Systems, PhD Dissertation, Dept. of Civil Engineering, UC Berkeley, USA, 1989.
- 2) Ke, Te-Chih: Modification of DDA with Respect to

Rigid-body Rotation, Proceedings of First International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation (ICADD-I), Taiwan, ROC, pp260-273, 1995.

- 3) Koo, C. Y. and Chern, J. C.: Modification of the DDA Method for Rigid Block Problems, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 35, Issue 6, September 1998, pp. 683-693, 1998
- 4) Ke, T.C.: Simulated Testing of Two Dimensional Heterogeneous and Discontinuous Rock Masses Using Discontinuous Deformation Analysis, PhD Dissertation, Dept. of Civil Engineering, UC Berkeley, USA, 1993.
- 5) Ke, Te-Chih: The Issue of Rigid Body Rotation in DDA, Proceedings of the First International Forum on Discontinuous Deformation Analysis (DDA) and Simulation of Discontinuous Media, TSI Press: USA, pp318-325, 1996.

- 6) MacLaughlin, MM and Sitar, N.: Rigid Body Rotation in DDA, Proc. of the First International Forum on Discontinuous Deformation Analysis (DDA) and Simulation of Discontinuous Media, TSI Press: USA, pp 620-635, 1996.
- 7) Cheng, Y.M. and Zhang, Y.H.: Rigid Body Rotation and Block Internal Discretization in DDA Analysis, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.24, No.6, pp567-578, 2000.
- 8) 右城猛, 吉田博, 矢野光明, 高石協, 八木則男: 斜面を落下する岩石の運動定数と跳躍量に関する考察, 土木学会論文集, No.581/VI-37, 49-58, 1997.12

(2002年4月19日 受付)

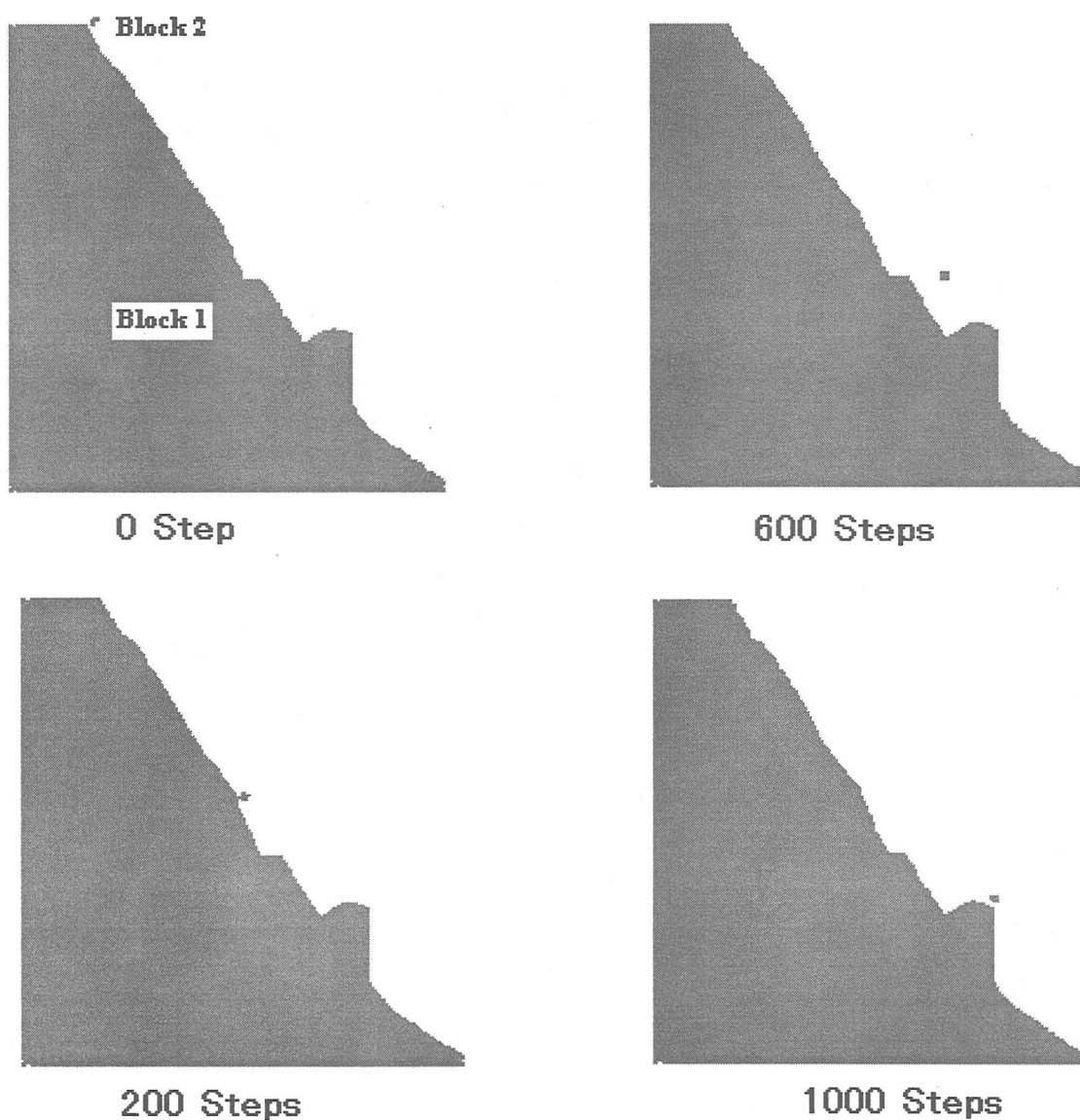


図-11 例2の落石シミュレーション