

投稿論文 (和文ノート)
**TECHNICAL
NOTE**

地盤の連続体・不連続体挙動の一解析手法

久武勝保¹・村上敏夫²

¹正会員 工博 近畿大学助教授 理工学部土木工学科 (〒577 東大阪市小若江 3-4-1)

²正会員 (株)地崎工業 技術開発部

地盤の連続体的挙動から不連続体的挙動に至るまでを一貫して解析するために、個別要素法の考え方を発展させた一解析手法 (CEM: Contact Element Method) を提案した。提案手法では、砂のような摩擦抵抗を示す材料だけでなく粘土のような引張抵抗を示す材料にも適用することを想定して、要素間の力学モデルが構築されている。貧配合のモルタル斜面上に載荷する模型実験について、破壊前後の斜面挙動と本解析結果を比較・検討することにより提案手法の適応性を示した。

Key Words : DEM, continuous, discontinuous, numerical analysis

1. 緒 論

地盤工学の分野では、地盤を連続体として解析する有限要素法 (FEM) や境界要素法 (BEM) が多く採用されている。しかし、斜面の崩壊や空洞の崩落現象などに象徴される地盤の不連続体挙動を追跡するには、未だ困難な状況にある。

一方、Cundall により提案された個別要素法 (DEM)¹⁾ では、要素の接触を簡単な力学モデルで理想化して、個々の要素の運動方程式を時間領域で解くことにより、砂や粒状体の不連続体挙動を要素集合体の挙動として追跡することが可能になり始めている^{2),3)}。しかし、DEM の力学モデルでは、要素間の引張抵抗が考慮されないため、粘土的な性質を要素集合体に持たせることはできない。粘性土を含む一般的な地盤に対する解析手法として、DEM が用いられるためには、引張外力に対してもある程度まで抵抗する特性を要素集合体に持たせる工夫が必要となる。

本研究では、DEM の考え方を発展させ、要素集合体に一体性を持たせるような力学モデルを開発することにより、砂質地盤だけではなく粘性地盤への適用も想定した解析手法 (CEM: Contact Element Method) を提案する。ただし、本手法も含め個別要素法に属する手法を地盤解析に適用する場合には、地盤を要素集合体で表現することになるが、要素集合体の挙動は、要素間に挿入する力学モデルの特性だけでなく、要素の形状や大きさ、配置状況などにも影響されるため、これらを地盤の力学特性に対応させて決定する必要がある。本研究は、接触による要素の結合、引張外力やせん断外力による要素の分離・滑動を表現する力学モデルを提示し、この手法が

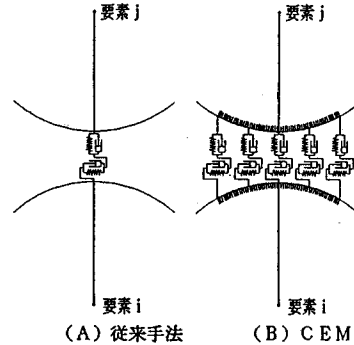


Fig.1 要素間の力学モデル

現実の連続体・不連続体挙動をどの程度まで表現できるかを、模型実験結果のシミュレーションを通してなお、粘性性を有する地盤への適用⁴⁾がなされているが、本手法は、このような地盤への適用手法という点において、従来とは異なる力学モデルを採用した一手法に位置付けられる。

2. 解析手法

(1) 概要

個別要素法は、岩質粒状体や砂質地盤など粒子間に引張力が生じない問題に対して適用されていた。しかし粘性地盤にも適用するためには、要素間に引張抵抗力が発揮されるようにする工夫が必要であり、また滑りや崩壊により不連続面が生じた後、その面で再び要素同士が接触する場合には、引張抵抗力を回復させるメカニズムも必要である。そこで、本研究では、2次元円形要素の結合・

○ : 反発力 ■ : 引張力

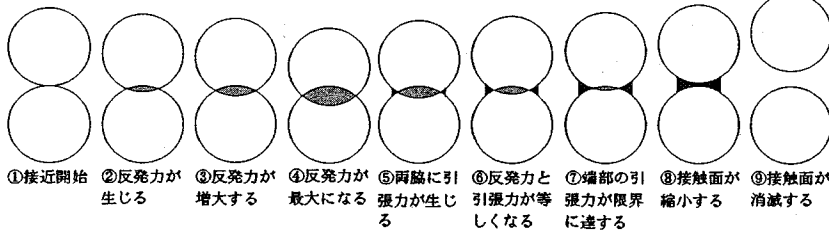


Fig.2 要素の接触・結合・分離

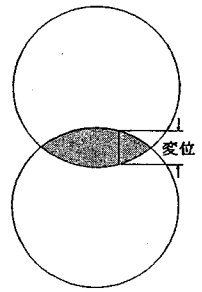


Fig.3 縦方向のバネに与える変位

分離・滑動が表現できる力学モデルを提案する。詳細は後述するとして、本手法の直感的理解の為に、個別要素手法との違いや本手法の特徴等を概述する。

個別要素法では、Fig.1 (A) に示すように点と点の間にバネ-ダッシュポット系の力学モデルを挿入するのに対し、本手法では、(B) に示すように要素境界上の面（ハンチング部分）と面の間に単位面積当たりの力学定数をもつ力学モデルを分布させている。このように接触を面として理想化した上で、以下に示すような種々の働きを力学モデルで持たせている。以後、力学モデルを分布させる面を接触面と呼び、また接触面上の分布力を接触分布力と呼ぶことにする。

接触面の定義と接触面の相対的位置から接触分布力を求めるための仮定を Fig.2 を用いて概略する。同図は、2要素の接触開始から分離までを表したものである。ただし、説明を簡単にするため要素は回転しないと、またダッシュポットは無視する。Fig.2 の①~④は、要素を強制的に接近させる過程である。この間での接触面を要素が重なる部分の円弧で定義する。この面上の任意位置の接触分布力は、Fig.3 に示すように測った距離を Fig.1 (B) の縦方向のバネに変位として与えて求める。このようにすると接近過程では、接触面が拡大すると同時に、反発力も要素の重なり部分の面積（薄く網をかけた部分）に比例して増大する。Fig.2 の⑤~⑨は要素を強制的に引き離す過程である。⑤では変位が減少し、接触面の両端付近（濃い網をかけた部分）のバネには引張力が生じる。⑥の状態は薄い網かけ部分と濃い網かけの部分の面積が等しい状態、即ち反発力と引張力が釣り合う状態である。もし、ここで要素を強制的に引き離すのを止めるならば、要素が接触したまま平衡状態を保つ。本手法では、この状態を要素が結合した状態と呼んでいる。また、本手法では、バネに生じる引張力が限界値に達するとその位置の力学モデルを消去するようにしており、⑦以降、接触面が順次縮小し、最終的に要素間の力学モデルが全て解消された⑨の状態になる。途中の⑧は、2要素が幾何学的に離れていても、要素が結合状態にあることを示している。⑧の時点で外力を取り除くと、反発力と引張力が釣り合う平衡状態に移行するが、この時

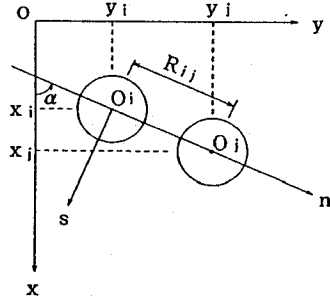


Fig.4 全体座標系と要素座標系

の接触幅は⑥に比べて小さく結合力が弱いため、⑥の場合よりも分離や変形をおこしやすくなる。つまり⑥から⑧の過程は、要素を繋ぐ単位面積当たりの力学モデルが端点から消失することによって要素間の結合の強さ、変形に対する抵抗性が低下してゆく状況を表現している。なお、本手法は上述した要素間の引張抵抗の他にも、摩擦抵抗を考慮しており、それと合わせて詳細を次節で述べる。

(2) 要素座標系と相対変位増分

Fig.4 に示す x, y 軸が作る全体座標系に対して、要素 i の中心 $O_i(x_i, y_i)$ を原点とし、要素 j の中心 $O_j(x_j, y_j)$ を通る軸を n 軸、これと直交する軸を s 軸とする要素座標系を定義する。 n 軸が x 軸に対し反時計回りになす角を α とする。要素中心間距離 R_{ij} を

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

で表し、要素の接近量 δ を次式 (2) で定義する。

$$\delta = r_i + r_j - R_{ij} \quad (2)$$

ここで、 r_i, r_j は要素 i, j の半径である。時刻 $t - \Delta t$ から時刻 t に至る微小時間 Δt での要素 i, j の中心座標の増分を、それぞれ $(\Delta u_i, \Delta v_i), (\Delta u_j, \Delta v_j)$ で表し、 δ, α の増分量 $\Delta \delta, \Delta \alpha$ を、次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \delta &= -(\Delta u_j - \Delta u_i) \cos \alpha - (\Delta v_j - \Delta v_i) \sin \alpha \\ \Delta \alpha &= \frac{-(\Delta u_j - \Delta u_i) \sin \alpha + (\Delta v_j - \Delta v_i) \cos \alpha}{R_{ij}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、

$$\sin \alpha = (y_j - y_i) / R_{ij}$$

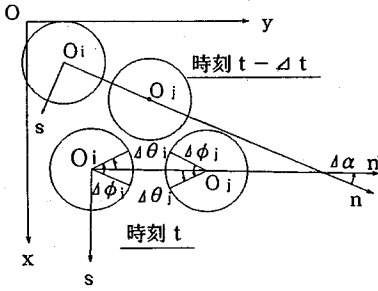


Fig.5 相対変位増分

$$\cos \alpha = (x_j - x_i) / R_{ij}$$

要素 i, j の反時計回りを正とする回転量増分を $\Delta\phi_i, \Delta\phi_j$ とすると, Fig.5 に示す要素座標から観察した要素の回転量増分 $\Delta\theta_i, \Delta\theta_j$ は, 次式

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_i &= \Delta\phi_i - \Delta\alpha \\ \Delta\theta_j &= \Delta\phi_j - \Delta\alpha \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

で表される. 式 (3), 式 (4) により, 全体座標系での変位・回転増分から要素座標系での変位・回転増分 $\Delta\delta, \Delta\theta_i, \Delta\theta_j$ が計算できる.

(3) 接触面と力学モデル

本手法では, 着目要素 i, j が接触判定条件を満足したとき, 以下で示す力学モデルを要素間に挿入する. 要素 i, j の接触面を, Fig.6 (A) に示す要素座標系の s 座標値 s_L, s_R の2量により区切られる要素境界面上の領域として与え, $s_L \leq s_c \leq s_R$ である任意の s_c により指定される接触面上の点 C_i, C_j の間に, Fig.6 (B) に示すバネ-ダッシュポット系の力学モデルを挿入する. 力学モデルの n, s 軸方向のバネ定数 k_n, k_s および粘性係数 η_n, η_s は単位面積当たりの値とする. 図の網かけ部分は, 二つの接触面が単位面積当たりの力学モデルにより繋がれている様子を表す. なお, 接触判定条件および s_L, s_R の決定方法については後述する.

(4) 力学モデルの変位と接触分布力

接触面の相対位置を, 接触開始時点からの要素 i, j の相対的回転量 θ_i, θ_j と式 (2) により求まる δ を用いて表す. θ_i, θ_j は, 接触開始時刻から現在の時刻に至る期間での $\Delta\theta_i, \Delta\theta_j$ の積算値とする. Fig.7 には, 接触面の相対位置が $\theta_i > 0, \theta_j > 0, \delta < 0$ である時の状態を示す. 図中の点 C_i, C_j は, 接触開始時において挿入された力学モデルの端点である.

要素 i の点 C_i に作用させる接触分布力については, 点 C_j を始点とし点 C_i を終点とするベクトル $\overrightarrow{C_j C_i}$ の n, s 軸方向成分 u_n, u_s とそれらの速度 \dot{u}_n, \dot{u}_s を n, s 軸方向の力学モデルに与えた次式

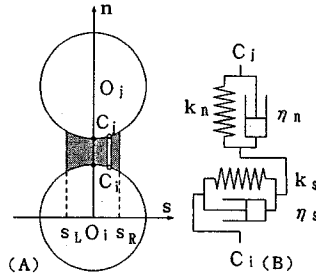


Fig.6 接触面と力学モデル

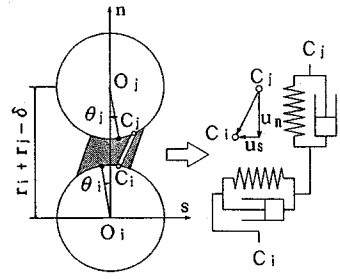


Fig.7 接触面の相対位置と力学モデルの変位

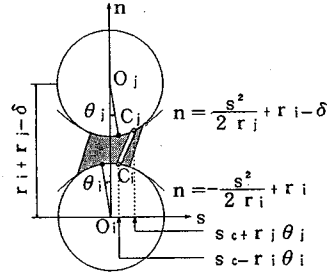


Fig.8 接触面の近似

$$\left. \begin{aligned} f_n &= k_n u_n + \eta_n \dot{u}_n \\ f_s &= k_s u_s + \eta_s \dot{u}_s \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

で算出するものとする. ここで, f_n は要素を押し方向 (n 軸と逆方向) を正, f_s は要素を反時計回りに回転させる方向 (s 軸と逆方向) を正とする. また, 点 C_j には, これらの反力を作用させる. このように接触分布力を定義すると, Fig.7 の状態においてダッシュポットを無視するときの点 C_i, C_j 接触分布力 f_n, f_s は, n, s 軸方向のバネがそれぞれ u_n, u_s 伸びた状態におけるバネの復元力に相当し, f_n は2要素を接近させようとし, f_s は要素 i, j を時計回りに回転させようとする.

u_n, u_s は点 C_i, C_j の座標から求めるが, これらの座標を厳密に計算することは, 演算速度の面から不経済であるし, 後続の展開も複雑になる. そこで, 座標を以下のように近似的に求める. すなわち, Fig.8 に示すように, n 軸と要素の交点を通り, この点での曲率が要素の曲率と等しいように, 要素 i の接触面形状を次式

$$n = -\frac{s^2}{2r_i} + r_i \quad (6)$$

で近似し, これに点 C_i の s 座標値 $s_c - r_i \theta_i$ を代入することにより点 C_i の n 座標を求めるわけである. 同様に, 要素 j の接触面を次式,

$$n = \frac{s^2}{2r_j} + r_j - \delta \quad (7)$$

で近似し, これに点 C_j の s 座標値 $s_c + r_j \theta_j$ を代入することにより点 C_j の n 座標値を求める. u_n, u_s はベクトル $\overrightarrow{C_j C_i}$ の n, s 軸方向成分として, 次式,

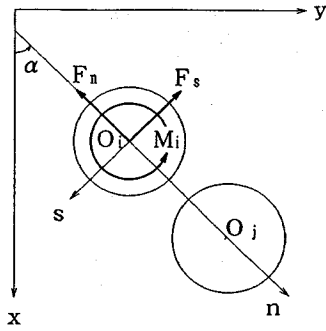


Fig. 9 要素間伝達力

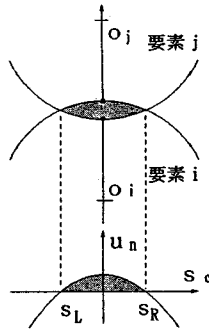


Fig. 10 接触直後の u_n の分布状況

$$u_n = -\frac{(s_c - r_i \theta_i)^2}{2r_i} - \frac{(s_c + r_j \theta_j)^2}{2r_j} + \delta \quad (8)$$

$$u_s = -r_i \theta_i - r_j \theta_j \quad (9)$$

で表す。これらの微小時間 Δt での増分を Δu_n , Δu_s とすると、式 (8), (9) を t に関して微分した \dot{u}_n , \dot{u}_s の近似式 $\Delta u_n / \Delta t$, $\Delta u_s / \Delta t$ は、

$$\frac{\Delta u_n}{\Delta t} = (s_c - r_i \theta_i) \frac{\Delta \theta_i}{\Delta t} - (s_c + r_j \theta_j) \frac{\Delta \theta_j}{\Delta t} + \frac{\Delta \delta}{\Delta t} \quad (10)$$

$$\frac{\Delta u_s}{\Delta t} = -r_i \frac{\Delta \theta_i}{\Delta t} - r_j \frac{\Delta \theta_j}{\Delta t} \quad (11)$$

で表される。時刻 t での接触分布力 f_n , f_s は、式 (8) ~ (11) を式 (5) に代入して得られる。

(5) 要素間伝達力と運動方程式の解法

要素 i の中心に作用させる要素間伝達力 F_n , F_s は、 f_n , f_s を区間 $[s_L, s_R]$ で、 s_c に関して積分することにより、次式で求められ、

$$F_n = \int_{s_L}^{s_R} f_n ds_c \quad (12)$$

$$F_s = \int_{s_L}^{s_R} f_s ds_c \quad (13)$$

また、モーメント力 M_i は、

$$M_i = r_i F_s - \int_{s_L}^{s_R} (s_c - r_i \theta_i) f_n ds_c \quad (14)$$

で求められる。ただし、これら伝達力は、Fig. 9 に示す向きを正とする。要素 i に関する全体座標系での軸方向力 F_{xi} , F_{yi} は、次式で求められる。

$$F_{xi} = -F_n \cos \alpha - F_s \sin \alpha \quad (15)$$

$$F_{yi} = -F_n \sin \alpha + F_s \cos \alpha \quad (16)$$

要素 i に接触する全ての要素間で求められる軸方向力とモーメントの和をそれぞれ F_x , F_y , M とし、要素 i の質量を m , 慣性モーメントを I とすれば、 x , y 軸方向加速度 \ddot{U} , \ddot{V} および角加速度 $\ddot{\Phi}$ は、

$$\ddot{U} = F_x / m \quad (17)$$

$$\ddot{V} = F_y / m \quad (18)$$

$$\ddot{\Phi} = M / I \quad (19)$$

となり、これらに線形加速度法を適用することにより、各時刻毎の速度および変位が算出できる。

(6) 接触範囲の決定方法

(3) 節で説明を省略した接触判定条件と接触面の範囲を表す s_L , s_R の決定方法、および要素間の引張抵抗、摩擦抵抗に関して設定した条件を以下に示す。

要素の接触開始は、式 (2) で定義した δ が次式

$$\delta > 0 \quad (20)$$

を初めて満足したときとし、接触直後の接触範囲は次式

$$u_n > 0 \quad (21)$$

を満足する s_c の領域として、区間 $[s_L, s_R]$ を決定する。ここで、 u_n は要素形状を近似した式 (6), (7) から導かれた式であり、また接触直後は、 θ_i , θ_j は 0 であるから、Fig. 10 に示すように s_L , s_R の両点は 2 要素の交点の位置を近似したものとなる。

接触範囲の決定後、式 (5) により接触分布力 f_n , f_s を求めるが、式中の η_n , η_s については、これらの値を一定値として扱おうと、単位面積当たりの粘性抵抗力が小さくても、全体の粘性抵抗力が過大に計算される場合があるため、分布バネの総和を等価な一本のバネに置き換え、これを 1 自由度系の減衰自由振動での臨界粘性係数 η_{cr} を与える次式に適用して、ステップ毎に η_n , η_s を更新することとする。

$$\eta_{cr} = 2\sqrt{km} \quad (22)$$

ここに、 k はバネ定数、 m は質量である。すなわち、力学モデルを分布させる領域に単位奥行き長さを乗じて求まる面積を b とすると、 n , s 軸方向の分布バネに対する等価なバネの剛性は、それぞれ bk_n , bk_s となり、これを式 (22) に代入し、さらに b で除せば、単位面積当たりの分布バネに対する臨界粘性係数 η_{ncr} , η_{scr} が次式

$$\left. \begin{aligned} \eta_{ncr} &= 2\sqrt{mk_n/b} \\ \eta_{scr} &= 2\sqrt{mk_s/b} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

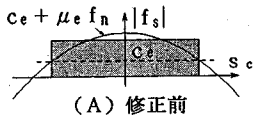
で求められる。ステップ毎の η_n , η_s は、 η_{ncr} , η_{scr} に減衰の程度を 0~1 の値で表す入力定数 ζ_n , ζ_s をそれぞれ乗じて求めることとする。

$$\left. \begin{aligned} \eta_n &= \zeta_n \eta_{ncr} \\ \eta_s &= \zeta_s \eta_{scr} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

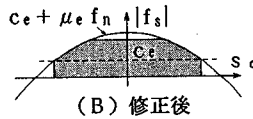
η_n , η_s が求まると、 f_n , f_s の分布形状が決定されるが、本手法では要素間の摩擦抵抗、引張抵抗に関する条件を設定し、 f_n , f_s に対して次のような処理をする。

まず、接触範囲のうち $f_n > 0$ である範囲、すなわち要素を押す方向に f_n が作用する範囲において、 f_s の絶対値が要素間粘着力 c_e と f_n に要素間摩擦係数 μ_e を乗じたものの和より大きくなる領域、すなわち次式

$$|f_s| > c_e + \mu_e f_n \quad (25)$$

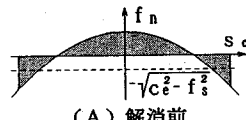


(A) 修正前

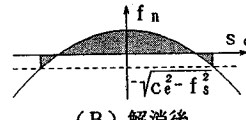


(B) 修正後

Fig.11 f_s の分布状況



(A) 解消前



(B) 解消後

Fig.12 f_n の分布状況

を満足する領域において、 f_s の大きさを強制的に $c_e + \mu_e f_n$ に修正する。ここで、 c_e 、 μ_e は正の値をもつ入力定数である。修正前後の $|f_s|$ の分布状況を Fig.11 に示すが、前述の処理は、修正前の (A) において $c_e + \mu_e f_n$ を越える部分をカットして、(B) のように f_s の分布形状を修正するものであり、要素間の接触に一種のせん断破壊基準を導入したものである。

次に、接触範囲のうち $f_n < 0$ である範囲、すなわち要素を引っ張る方向に f_n が作用する範囲においては、 f_n と f_s を合成した分布力が要素間粘着力 c_e を越える領域の力学モデルを解消し、接触範囲を再定義する。力学モデルを解消する領域は、次式

$$\sqrt{f_n^2 + f_s^2} > c_e \quad (26)$$

を満足する s_c の領域として求める。この処理は、Fig.12 に示すように、力学モデルを解消する前の (A) において f_n の分布が $-\sqrt{c_e^2 - f_s^2}$ より下の部分の力学モデルを解消して、(B) のように力学モデルを分布させる範囲を縮小させるものである。ただし、 $|f_s| > c_e$ の場合は、 $f_n < 0$ である部分の力学モデルを解消する。なお、式 (25)、(26) において、 c_e 、 μ_e および修正前の f_s は変数 s_c に関係なく一定量であり (式 (5)、(9)、(11) 参照)、 f_n は s_c の 2 次多項式であるから (式 (5)、(8)、(10) 参照)、それぞれの式を満足する領域は、 s_c に関しての 2 次不等式を解くことにより求められる。

f_n 、 f_s の分布形状が決定された後、式 (12)~(14) より要素間伝達力を求め、式 (15)~式 (19) により次ステップの要素位置を算出する。

次ステップの接触範囲は、要素の新たな相対位置 θ_i 、 θ_j 、 δ を式 (21) に代入して求まる範囲と現ステップの接触範囲の合領域とする。これを、Fig.2 の例で説明するならば、④の接触範囲を次ステップの⑤でも引き継ぐことを意味し、そのため要素の両脇に引張力が発生する仕組みとなっている。こうして接触範囲が決定された後、上述した式(23)以降の手順を繰り返すことによりステップ計算を行う。

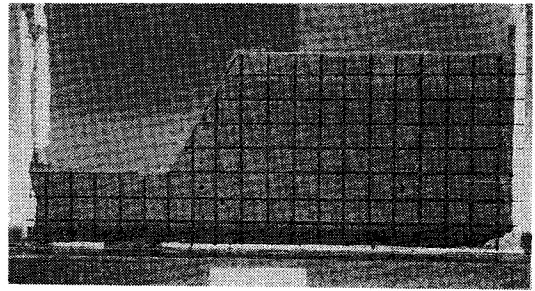


Photo.1 初期模型斜面

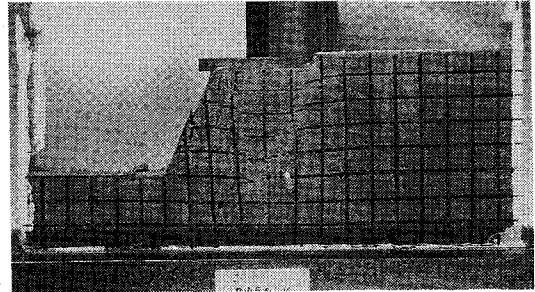


Photo.2 支持力最大時の地盤状況

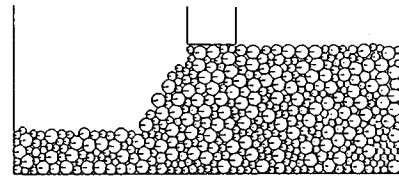


Fig.13 初期地盤状況

3. 载荷による斜面の崩壊シミュレーション

斜面肩部に载荷することによる地盤の連続体・不連続体挙動を貧配合のモルタルを用いた模型実験により観察し、その結果を CEM 解析によりシミュレートする。

(1) 模型実験

Photo.1 は初期地盤状況であり、底部支持板からの地盤高さ 16 cm、幅 40 cm、奥行き 5 cm である。地盤の変形と不連続面の発生位置を確定するために、地盤には縦横に 2 cm 間隔の線を入れている。地盤の前後面には平面ひずみ状態を保持するために、硬質ガラス板をセットして実験を行った。

Photo.2 は支持力がピークに達した時の地盤変状を示す。不連続面が載荷面下方に縦長のくさび状に伸びており、また斜面付近にも発生している。

(2) 実験結果の CEM 解析によるシミュレーション

Fig.13 は、摩擦抵抗と引張抵抗を無視した要素を自然落下させ上部から水平板によりバックングした後、

Table 1 解析に用いたパラメーターの値

	Element to element	Wall to element
k_n (dyn/cm ²)	1×10^7	2×10^7
k_s (dyn/cm ²)	0.25×10^7	0.5×10^7
μ_e	0.839	0.839
c_e (dyn/cm ²)	1×10^5	1×10^5
ζ_n, ζ_s	1.0	1.0

$\Delta t = 4.0 \times 10^{-5}$ sec, $r_1 = 0.42$ cm, $r_2 = 0.78$ cm, $\rho = 2.5$ gr/cm³

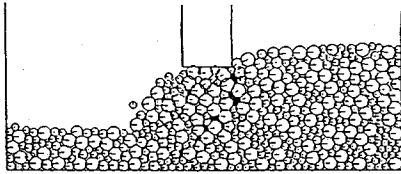
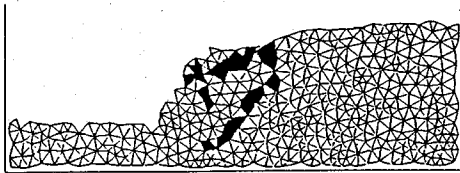


Fig.14 支持力最大時の地盤状況



■ : せん断ひずみ 35%以上

Fig.15 35%を越えるせん断ひずみ領域

Table 1 に示す要素間粘着力と要素間摩擦係数を与えてから、水平板を取り除き、さらに左側の要素を削除して作成した初期斜面地盤である。要素間には摩擦抗力と引張抗力が発揮されるため、斜面は安定している。

Fig.14 は、斜面肩部に載荷板を一定速度で降下させたとき、それに作用する鉛直方向合力が最大に達した時点の地盤状況である。なお、Fig.14 には、当初結合していた要素が分離した位置を黒く塗りつぶしてある。

Fig.15 は、FEM の表現を援用し、要素の初期状態からの移動量を節点変位とみなし、要素の中心を結んだ FEM 要素のせん断ひずみが 35% 以上の位置すなわち要素の相対的位置変化が顕著な領域を黒塗りして示したものである。これらの黒塗りの位置は、縦長のくさび状に

発達しており、実験による不連続面の位置によく対応している。

本解析の入力パラメーターを Table 1 に示すが、これらの値は実験材料の力学特性に対応して確固たる手法で決定されたわけではないため、本手法の妥当性を定量的に確認することはできない。しかし、実験で示された破壊前後の形態を定性的にせよシミュレートできたことは、本手法が地盤の連続体・不連続体挙動を追跡する有力な解析手段となり得ることを意味している。

7. 結 論

本研究では、要素の結合・分離・滑動が表現できる解析手法 (CEM) を提案した。さらに貧配合モルタル斜面に載荷する実験に提案手法を適用した結果、定性的ではあるが斜面の破壊前後の挙動をシミュレートすることができ、手法の妥当性を確認することができた。

以上が本研究の成果であるが、本研究では一つの新しい力学モデルの考え方の提示に力点を置いており、要素の形状や大きさ、初期配列および力学モデルの入力パラメーターの決定方法については言及していない。したがってこれらを地盤の力学特性に対応させて客観的・合理的に決定する方法を開発する必要が認められる。

参考文献

- 1) Cundall, P.: A computer model for simulating progressive large scale movement in blocky rock system, *Proc. of ISRM, Nancy(France), Vol.2, pp.129-136, 1971.*
- 2) 木山英郎, 藤村 尚: カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, *土木学会論文集, No. 333, pp. 137-146, 1989.*
- 3) 吉田 博, 升谷 浩, 今井和昭: 個別要素法による数砂上への落石の衝撃特性に関する解析, *土木学会論文集, No. 392, I-9, pp. 297-306, 1988. 4.*
- 4) 岩下和義, 伯野元彦: 修正個別要素法による崖の進行性破壊解析, *土質工学会論文報告集, Vol. 30, No. 3, pp. 197-208, 1990. 9.*

(1994. 2. 4 受付)

AN ANALYTICAL METHOD OF CONTINUOUS AND DISCONTINUOUS BEHAVIOR OF THE GROUND

Masayasu HISATAKE and Toshio MURAKAMI

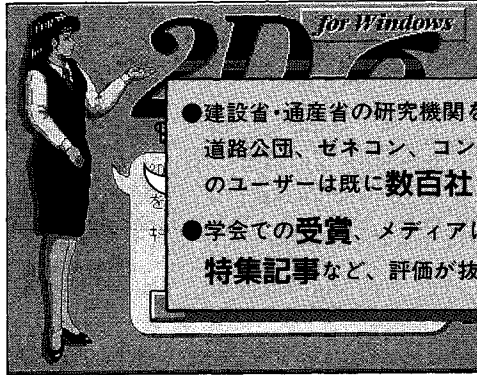
In order to analyze the continuous and discontinuous behavior of the ground, an analysis method named CEM(Contact Element Method) has been proposed as a development method of DEM. A mechanical model, which idealizes the contact behavior of two circular particles, has been devised for the purpose of expressing not only friction material such as sand but also cohesive material such as clay by an assembly of particles. The proposed method was applied to a model loading test of mortar slope. The result shows that the motion of mortar slope before and after its collapse could be simulated by CEM.

2D-σ for Windows

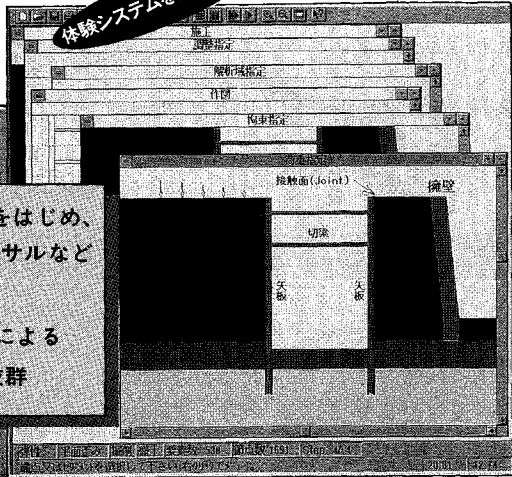
世界をリードする
夢の土木構造解析システム

ツー ディー

シグマ



- 建設省・通産省の研究機関をはじめ、道路公団、セネコン、コンサルなどのユーザーは既に**数百社**
- 学会での**受賞**、メディアによる**特集記事**など、評価が抜群

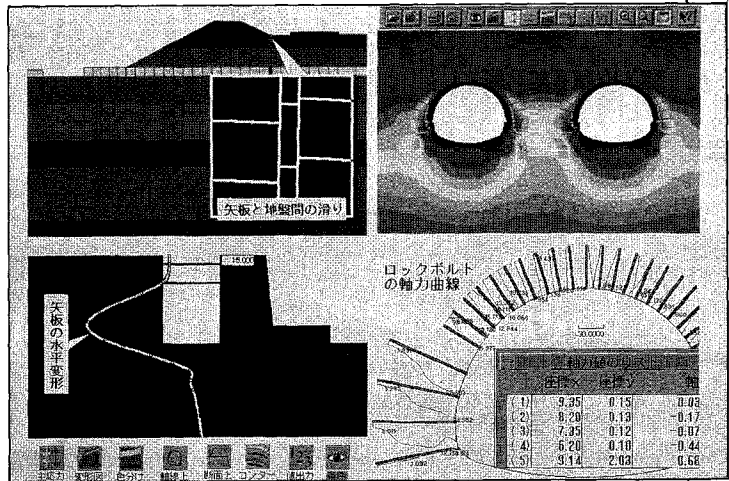


体験システムを無料提供

斬新なコンセプトと驚異の自動化・高速化・大容量。

大型機で数日間かかった解析がパソコンでわずか数十分間で / 有限要素を意識せず、誰でも、どこでも、低コストで簡単に / 一般技術者のノートPCによる現場解析も楽々 /

- 有限要素の概念は一切表に出ない。解析の条件とプロセスを内蔵の高性能CADで作成した図面へ直感的に与えるのみ。
土木構造解析特有の面倒な解析に特に有効(ステップ施工、掘削、盛土、支保・近接・拡幅、接触問題など)
- 膨大な解析容量(1万節点以上)と驚異の演算速度(たとえば5000節点前後の解析は66MhzのPCでも2、3分間で完了。)
- 豊富な入出力画面に編集を加え、説明文やキャプションを付けた上、ワンタッチで高品質の最終成果物が得られる。ワープロや表計算などの他のソフトにも図面と数値を転送できるので設計技術者が夢見る調査・設計・評価の一括自動化を実現。
- 土木解析に必要な機能のほとんどに対応(非線形、弾塑性、接触面・弱面、熱応力、地震慣性力、自動ステップ解析、掘削、盛土)



土木業界で大好評
詳細資料提供

開発・販売



ソフトプレーン(株)

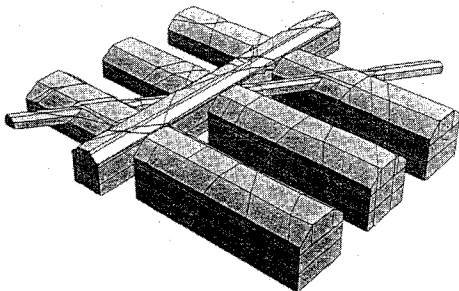
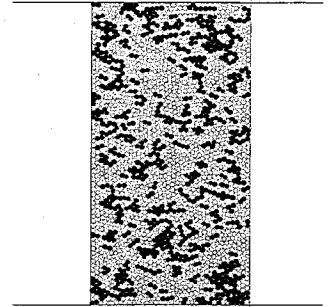
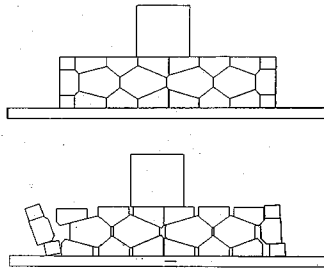
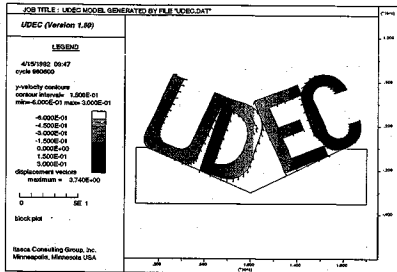
お問合せは 03-3592-7659

本社: 〒001 札幌市北区北37条西4丁目 王陽ビル

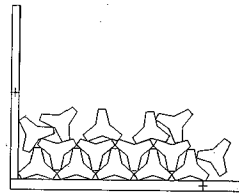
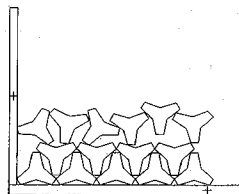
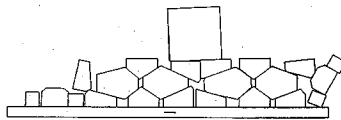
Tel 011-736-7009 Fax 011-736-7449

個別要素法プログラムシリーズ

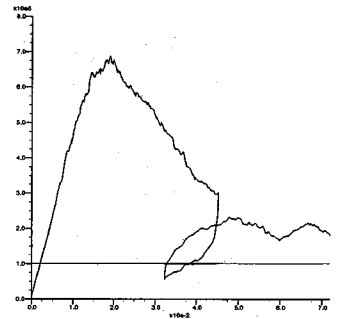
■開発元 Dr.Cundall (ITASCA社)



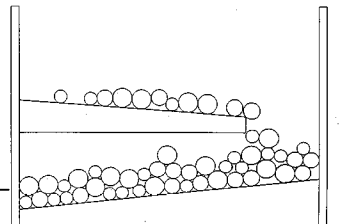
3DEC



BFLOW



PFC-2D



BALL-Poly

■価格

●ロード・モジュール

- ・UDEC SUN/IBM-PC(標準バージョン)110万円
(Barton-Bandis Optionを含む場合)160万円
- ・3DEC SUN/IBM-PC550万円
- ・PFC-2D SUN/IBM-PC70万円

●ソース・コード

- ・UDEC SUN/IBM-PC(標準バージョン)190万円
(Barton-Bandis Optionを含む場合)240万円
- ・BFLOW SUN190万円

プログラムはいずれも最新バージョンを提供いたします。また、問題に応じたプログラムの開発も行っています。

* 当社は1988年7月からITASCA社の販売代理店をしています。

OKL 株式会社 応用工学研究室

TEL.03-3437-2164 FAX.03-3437-2652

〒105 東京都港区虎ノ門5-1-4 東都ビル6F

(株)システムネットワーク内

地盤の非線形解析プログラム

■開発元 Dr.Cundall (ITASCA社)

FLAC-2D/3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua)

1950年代に有限要素法が出現し、コンピュータの発展と共に進歩をとげていったのと並行して、衝撃分野での解析を目的に始まった差分法に基づく、“Hydrocodes”もすくなく成功をおさめていました。応力波伝播を基本とする弾塑性固体の大変形、スライド・ライン手法による滑り・剥離挙動の解析には目覚ましいものがありました。しかし、これらを取り扱うプログラムの多くは公的機関での開発のため公開されたものは余りありませんでした。FLACはこの流れをくむ地盤非線形解析プログラムです。

プログラムの特徴

- 幾何学的大変形及び材料非線形を取り扱うことができます。陽解法のため歪み軟化解析が容易です。
- 複雑な3次元地盤をモデル化するため、優れたジェネレーター機能をそなえています。
- 機能追加のための開発ツールFISHプログラミング言語を備えていますので、機能追加が容易です。

要素ライブラリー

- 2次元平面歪/応力要素(2D)
- ソリッド要素(3D)
- ビーム要素(2D)
- ロックボルト要素(2D, 3D)

適用分野

- 斜面・盛土の設計及び安定解析
- アースダム及びコンクリートダム解析
- トンネル、鉱山掘削解析
- 地下水、圧密、液状化解析(2D)

構成則

- 等方性、非等方性弾性
 - 弾塑性(Mohr-Coulomb, Drucker-Prager)
 - 偏在ジョイント・モデル(Ubiquitous joint)
 - 歪一硬化/軟化 ●ヌル要素
 - 液状化FINNモデル(2D)等
- その他の構成則の機能追加も可能です。

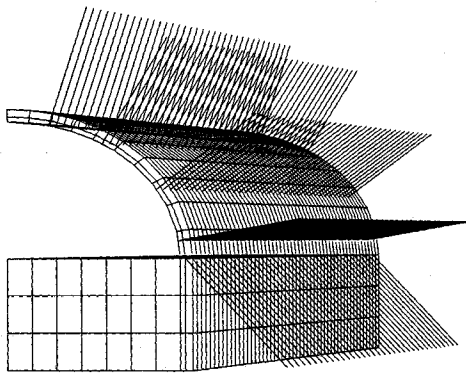
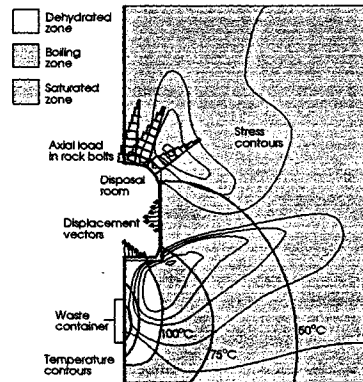


Figure 5 Steel bolt pattern for Method 2



Thermomechanical conditions five years after nuclear waste emplacement.

■価格(ロード・モジュール)

- FLAC-2D SUN/IBM-PC(標準バージョン)80万円
(Dynamic, Creep, Thermal Optionを含む場合)110万円
- FLAC-3D SUN/IBM-PC(Creep Optionを含む)190万円

プログラムはいずれも最新バージョンを提供いたします。また、問題に応じた地盤非線形プログラムの開発も行っています。

* 当社は1988年7月からITASCA社の販売代理店をしています。

OKL 株式会社

日本技術開発株式会社

研究室

TEL.03-34
〒105 東京
株



-2652
6F

土と水の連成逆解析プログラム

未来設計企業
CRC

UNICOUP

応力解析と浸透解析がドッキングした!

軟弱地盤の解析に!

海洋開発・埋立

盛土・掘削

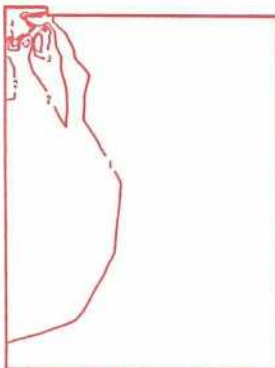
出力項目

- 各節点での変位、各要素での応力
- 各節点での全水頭・圧力水頭 他
- 豊富な図化処理
変位図、変位ベクトル図、応力ベクトル図、応力コンター図、安全率コンター図、水頭コンター図、圧力水頭コンター図

プログラムの特長

- 応力と地下水の流れをカプラーさせた問題が解析可能です。(圧密含む)
- 地下水の流れは飽和・不飽和域を対象としています。
- 多段掘削・盛土や降雨等が扱えます。
- 梁や連結要素も扱い実用的です。
- 経時観測記録(変位・水位)があれば、非線形最小二乗法に基づき変形係数や透水係数が逆解析できます。(順解析、逆解析がスイッチにて選択可能です。)
- 弾性・非線形弾性・弾塑性・弾粘塑性を示す地盤が扱えます。
非線形弾性(電中研式、ダンカン・チャンの双曲線モデル)
弾塑性(ドラッカー・ブラガー、モール・クーロン、カムクレイモデル、ハードニング、ソフトニング)
弾粘塑性(関口・太田モデル)

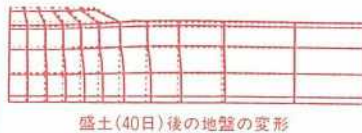
(荷重)



応力増分コンター ($d\sigma V$)
(10日後)



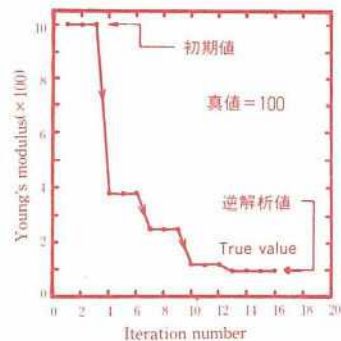
変位ベクトル図 (40日後)



盛土(40日)後の地盤の変形



盛土(40日)後の地下水の流れと水頭コンターおよび自由水面



ヤング率と繰り返し回数
の関係
逆解析によるパラメータの推定

この製品は、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。
通商産業省 特別認可法人

IPA 情報処理振興事業協会

株式会社 **CRC** 総合研究所

西日本事業部

〒105 東京都港区芝公園三丁目1番38号
TEL.(03) 3437-2301

問合せ先

〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06) 241-4121 営業担当:岩 崎
(03) 3665-9741 本社窓口:菅 原