

討議 (和文)

DISCUSSION
/CLOSURE

【討議・回答】

木山英郎
藤村 尚 共著
西村 強

“連続体の大変形解析のための流動要素法 (FLEM) の提案” への討議

(土木学会論文集, No. 439/Ⅲ-17, pp. 63~68, 1991年12月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

黒田充紀 (足利工業大学)

Mitsutoshi KURODA

大変興味深く拝見しました。本研究は、動的問題を含む大変形・大ひずみ問題解析に対する新たな可能性を与えるものと思われます。ただ、以下の点に疑問があります。

(1) 式(8)の $[K']$ は通常の増分形 FEM の要素剛性マトリクスに対応するものとあります。しかし、貴論文では大変形(大ひずみ)を対象としているので式(8)は要素剛性マトリクスとしては不十分と思われます。図-8などの解析例でも要素は大きく変形するとともに回転しています。用いられた構成式は、

$$\{\Delta\sigma\} = [D] \{\Delta\varepsilon\} \dots\dots\dots (a)$$

という形と思いますが、周知のように有限な変形・ひずみおよび回転を考慮する場合には、応力の定義(例えばコーシー応力, キルヒホフ応力など)を明確にする必要があるとともに、式(a)の $\{\Delta\sigma\}$ にいわゆる客観性が要求されます。通常の大ひずみ問題の解析では、回転や体積変化などが剛性に及ぼす影響を無視することはできません。

その客観性を有する応力増分はスピンとその時点での応力とで定義されますが、ここで客観性のある量に ∇ を付けるとすると、式(a)は、次式のようにになります。

$$\{\Delta\tilde{\sigma}\} = [D] \{\Delta\tilde{\varepsilon}\} \dots\dots\dots (b)$$

$\{\Delta\tilde{\sigma}\}$ はテンソル表示で次式のとおりです。

$$\Delta\tilde{\sigma}_{ij} = \Delta\sigma_{ij} - \Delta W_{ik}\sigma_{kj} + \sigma_{ik}\Delta W_{kj} \dots\dots\dots (c)$$

ここに、 ΔW_{ij} は任意のスピンです。構成式(b)に基づいて要素剛性マトリクスを誘導すると、式(8)の $[K']$ に加えて幾何剛性の項が現れます。またその場合、応力の発展式は式(11)のように表わすことはできなくなり、応力は式(c)における $\Delta\sigma_{ij}$ を加算(積分)して求めることとなります。

討議者の第1の疑問点は、大変形を前提に変位抵抗を式(7)で求める以上 $[K']$ は上記の幾何剛性項を含むべきではないか、という点です。

貴論文で上記の点を考慮していない理由、または提案の解析法の場合は理論的に幾何剛性は考慮しなくてもよいのであればその理由を、また、すでに比較計算などを実施されていればその結果を示していただければと思います。

(2) 上記のように、討議者は本 FLEM においても構成式の客観性、および幾何剛性項が必要と考えてます。その場合には、要素剛性マトリクスは一般に用いられている大変形・大ひずみ FEM のものと同一なものとなり、全体剛性マトリクスを必要としない点のご提案の FLEM の利点となりますが、要素剛性マトリクスレベルでの「煩雑さ」は FEM と全く同等と考えられそうです。いかがでしょうか。(1992. 2. 24 受付)

▶ 回答者 (Closure)

木山英郎・藤村 尚・西村 強 (鳥取大学)

Hideo KIYAMA, Hisashi FUJIMURA

and Tsuyoshi NISHIMURA

筆者らの論文に対し、大ひずみ問題の一般的な解析論の立場から、鄭重な御討議を頂き深く感謝いたします。結論から先に申しますと、有限要素法(FEM)で大ひずみ問題を解く場合に生ずる御指摘の(1), (2)のような煩雑な処理を、運動方程式を基礎においた流動要素法(FLEM)によって回避できるのではないかと、というのが本論文における著者らの主張であります。そこで、

FEMとは違った FLEM 特有の考え方を手短かに要約することから回答を申し上げたいと思います。

FLEMは、亀裂性岩盤や砂質地盤など不連続な要素集合体の大変形や運動挙動の数値解析に威力を発揮しつつある個別要素法(DEM)の原理を活かし、連続体の運動挙動や塑性流動に至る大変形に適用可能な解析法の開発を目指したものである。両者とも、有限個の要素が

運動方程式に従って、周辺要素から受ける変位抗力（弾性抗力）や速度抗力（粘性抗力）のもとに運動する様子を、陽形式の時間差分近似によって逐次的に解析する手法を基本としている。

DEMにおいては、ブロックや粒子を要素にとり、個々の要素の並進・回転運動に対する変位抗力や速度抗力を要素間の接触力として算出する。隣接要素と常に連続性を保ちながら変形するFLEMにおいては、連続体を差分格子で分割し、格子点を質点とみなして運動方程式を立て、格子のゆがみで連続体の変形を表す。差分格子なので概念的には格子点を重心とする区画要素が存在し（図-1a）、これがDEMのブロックや粒子に相当するが、質量をはじめとした必要な特性は質点に擬せられた格子点に集約され、以下の解法ではこの要素形状が表に現れることはない。それに代わって、格子で区切られた四辺形の領域（図-1b）が格子点の運動に抗してひずみや応力を生じる実体要素の役割を担い、目標とする格子点力（DEMの接触力に相当）の計算の対象となる。そこで、差分格子を改めてFEMの要素分割に重ね、通常FEM手法を適用すれば、格子点の運動に対する周辺要素の弾性抗力は、節点変位を与えられた要素の節点力として容易に計算できる。これが物理モデルから見たFLEMの概要といえる。

このように、FLEMの基本はDEMと同様に運動方程式の時間差分近似による逐次解法なので、微小時間増分 Δt の1ステップ毎に、運動質点としての節点の位置

が物理的な意味を有するものとして決定される。その際、弾性抗力（増分）のFEM計算で、 Δt 毎に新しい節点座標に基づいて要素剛性マトリクスが更新されることになる。そのため、 Δt は差分における解の安定性の制約を受けるとともに、 Δt 間の要素変形（増分）が微小ひずみの範囲に収まるように配慮される。

結果の一例として、例えば本文4.（1）一軸圧縮試験の場合についてみると、 $\Delta t=1.0 \times 10^{-4}$ sec、供試体高さ $L=20$ cm、圧縮変位速度 $\dot{u}=1$ cm/secであって、1ステップに当たる Δt 間の平均的な要素ひずみ増分は $\dot{u} \cdot \Delta t/L=5 \times 10^{-6}$ となる。大体の目安がこの程度であり、この間の節点変位増分-節点力増分対応に微小ひずみの要素剛性マトリクスが十分に適用できると考えている。なお、本文中の解析結果の図-6, 8, 11に示されているのも、こうした微小変形（正しくは質点運動）の数千回～数万回の積み重ねの結果として生じた大変形であることに注意する必要がある。

以上が討議者のご指摘（1）、（2）に対する回答であるが、残念ながら筆者らは大ひずみFEMの具体的な解析経験を有さないので、現在のところ比較計算によって詳細を明らかにする術を知らない。FLEMの適用性を正しく認識するためにも是非とも取り組みたい課題であり、この点では今後とも討議者をはじめ読者諸賢のご教示をお願いする次第である。最後に、いま一度討議者の大変貴重なご意見、ご指摘に対し深く謝意を表します。

（1992.6.12受付）

個別要素法プログラム

未来設計企業

CRC

CRC-ITASCAが提供するカンドールモデル個別要素法(DEM)!!

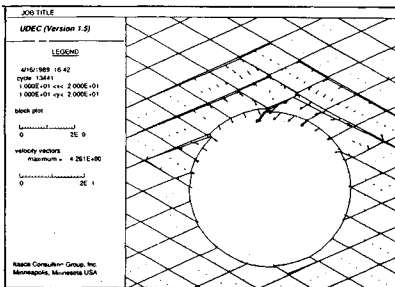
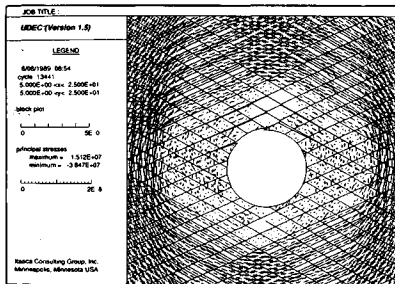
二次元個別要素法プログラム(ソースコード)

UDEC

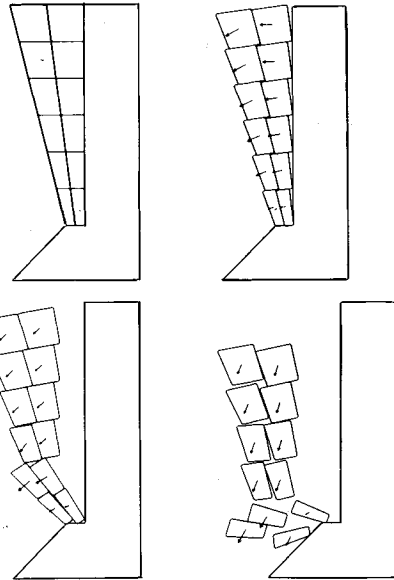
三次元個別要素法プログラム(ロードモジュール)

3DEC

個別要素法とは、1971年にDr. P. Cundallが発表した不連続体に対する動的崩壊過程をシュミレートするための解析手法です。すなわち、岩盤をジョイントとブロックから構成される岩石ブロックの集合体と考え、個々のブロックの挙動を時々刻々に追跡し、全体挙動を解析しようとするものです。集合体としての岩盤や地盤が最終的に、安定状態となるものか、あるいは大変形するのか、崩壊していくのかなど、時間の経過に伴うモデル全体のブロックの動きや破壊の進行の様子を視覚的に追跡できます。現在、岩盤・地盤の崩落や安定性の解析など、不連続体力学の有力な解析手法となっています。



大深度地下掘削時の安定解析



岩盤斜面崩落シミュレーション

- 岩盤の転倒・滑落解析
- 岩盤の掘削解析
- 不連続性岩盤の安定解析
- 地震応答解析
- 浸透—ブロック連成解析 (UDEC)
- 熱—ブロック連成解析 (UDEC)

■販売条件

UDEC・3DEC

- ◆ EWS, SUN-SPARC, HP, SONY-NEWS
- ◆ IBM-PC/AT及び互換機
- ◆ UDECはソースコードで提供します。
- ◆ 3DECはロードモジュールで提供します。

株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

〒541
 大阪府中央区久太郎町4丁目1-3
 (06)241-4121 営業担当: 岩崎



地球を切る! 視る! 創る!

3次元地質解析システム **GEORAMA** ジオラマ

概要

地質調査で得られたデータを基に、利用者の判断を加味して3次元地質モデルを作成します。この3次元モデルより地質・岩級区分・地下水位等をグラフィック表示並びに作画します。今後この3次元モデルを利用して解析用メッシュ作成等への応用が考えられます。

特徴

- ・走向、傾斜データも考慮できる高度な推定法
- ・複雑な地質体モデルの表現が可能
- ・ビジュアルで豊富な出力機能
- ・図面間での整合性がとれる
- ・操作性の高いシステム

出力図面



ユーザーインターフェースにより、拡がる適用分野

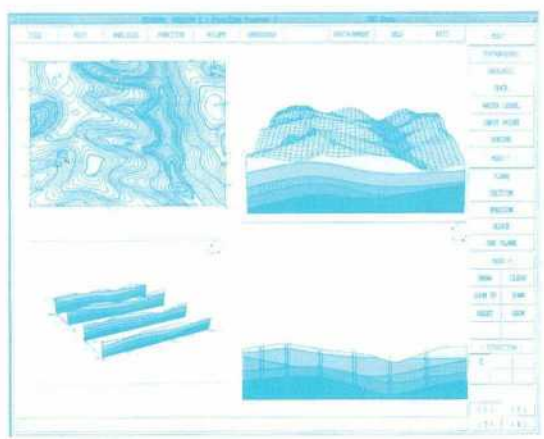
- データベース 土量計算 構造物マッピング
 メッシュジェネレータ プレゼンテーション資料 その他

標準適応機種(EWS)

- ・SONY-NEWSシリーズ*
 - ・Sun-3, Sun4, Sun-SPARCシリーズ*
 - ・HP9000/300, HP9000/800シリーズ*
- *ウィンドウシステムとしてX-Window System, Version 11 (X11)が必要です。
 (標準以外のものにつきましても御相談に応じます)

㈱アイ・エヌ・イー アイサウ工業㈱ アイドルエンジニアリング㈱ アサヒ地水探査㈱ ㈱エイトコンサルタント 応用地質㈱ 大阪ガス㈱ 大手開発㈱ ㈱大林組 ㈱奥村組 川崎地質㈱ 基礎地盤コンサルタント㈱ ㈱熊谷組 ㈱建設技術研究所 建設省 土木研究所 五洋建設㈱ 佐藤工業㈱ サンコーコンサルタント㈱ ㈱監理総合研究所 ㈱西電技術コンサルタント 清水建設㈱	情報処理研究所 ㈱新日本技術コンサルタント 住友建設㈱ 住友建設㈱ 石油資源開発㈱ 全日本コンサルタント㈱ 大成建設㈱ 大豊建設㈱ ㈱ダイソク ㈱ダイヤコンサルタント ㈱竹中工務店 中央開発㈱ ㈱地球科学総合研究所 中電技術コンサルタント㈱ 通産省 地質調査所 電源開発㈱ ㈱電力中央研究所 東急建設㈱ 東建地質調査㈱ 東京電力㈱	東電設計㈱ 東電ソフトウェア㈱ 東洋地質調査㈱ 動力・核燃料開発事業団 ㈱中堀ソイルコーナ 西松建設㈱ 日本工営㈱ 日本国土開発㈱ ㈱日本パブリック エンジニアリング ㈱出組 ㈱阪神コンサルタンツ ヒロセ㈱ フジタ工業㈱ ㈱富士和ボーリング 北光ジオサーチ㈱ 北海道開発コンサルタント㈱ 三井建設㈱ 三菱金属㈱ 村本建設㈱ 明治コンサルタント㈱
--	--	--

3次元地質解析システム研究会 参加メンバー



株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

〒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

土木学会論文集

定価1,000円(本体価格九七〇円)