

討議 (和文)

**DISCUSSION
/CLOSURE**

[討議・回答]

久武勝保 共著
村上敏夫

“トンネルのA計測変位を用いた覆工応力推定法”への討議・回答

(土木学会論文集, No. 457/Ⅲ-21, pp. 79~86, 1992年12月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

青木謙治 (鹿島建設(株))

Kenji AOKI

本研究は覆工の耐荷力をトンネルのA計測結果に基づき評価する方法を提案されており、トンネルの設計・計測管理において非常に有用な手法となり得る可能性があり、大変興味深く拝見しました。

本論文に対し、以下のような点について討議したいと思います。

(1) 本論文では(A)「外力の自乗和が最小となる解」、(B)「覆工に与えられるエネルギーが最小である解」の2通りの逆解析手法を示されており、精度の面からみると(A)の方が良いとされています。

この外力自乗和最小化法では、覆工外面に作用する外力の自乗和が最小であるものから覆工の応力、ひずみ、変位、外力を推定していますが、外力の自乗和が最小であるものを解とする点についてのいまいし詳細な説明が望まれます。

さらに、ここではKマトリックスを既知とされているが、例えば吹付コンクリートと鋼材で支保を行う際、その覆工にかかる力から吹付や鋼製支保工への分担荷重を評価する必要が生じた場合、どのようにして取り扱われるのでしょうか。

(2) 一般にこの種の問題に対する妥当性の検証は順解析のデータを使用して逆解析を実施すると精度のよい結果が得られます。(B)の方法についての現場適用例はあるようですが、(A)の方法についての現場データを用いた適用事例はあるのでしょうか。

(3) 解析モデル図をみると、一次支保(覆工)の根

足部は固定条件とし、要素は一般部に比べて厚くしてありますが、これは解析上の工夫によるものと思われる。

最近のトンネル断面でよく見られる根足部が絞られた馬蹄形に対して断面形状の違いによる影響は検討されたでしょうか。加えて現実には根足部の吹付コンクリートも変位することから、根足部を固定条件とせず、パネ支保等を想定したモデルとすることが現実に近いように思われますが、このような点についてその影響度の検討結果はいかがでしょうか。

(4) 覆工応力の算定には、材料定数を一律に仮定していますが、現実には支保メンバーの組み合わせによって支保の剛性は大きく変わるため、実用的に用いるためには、この材料定数の差異についても考慮が必要でしょう。

さらに、計測変位についても計測時点での、吹付コンクリートの材令に伴う弾性係数の変化等に注意を払う必要があると思われる。

(5) 3点の内空変位でも十分な精度が得られるとされていますが、逆解析には1計測点につき鉛直、水平の2成分の変位を使用することが前提となっております。現実には壁面の変位が左右非対象となり得る場合も多く、各測定点で独立した鉛直、水平の変位成分を求めるためには、たとえば光速測距儀による絶対変位測定などによる非対象変形の測定値を併用すればさらに現実的な手法になっていくものと思われる。

(1993.6.18 受付)

▶ 回答者 (Closure)

久武勝保 (近畿大学) 村上敏夫 ((株)地崎工業)

Masayasu HISATAKE and Toshio MURAKAMI

(1) 本手法は、A計測などで得られるトンネル覆工内壁の変位から覆工外壁に作用する外力を推定し、この外力より変位、ひずみ、応力を求める逆解析手法であります。工事現場の状況を有限要素法などで表現した場合、既知量である計測変位の数は、未知量である外力の

数より格段に少ないのが一般的な状況です。従って、方程式の数がそれに含まれる未知量の数より少なくなりますので、このままでは唯一解を得る事が出来ず、計測変位を満足さず外力の組み合わせは無限に存在することになります。

従来、計測変位を計測点に強制的に与えたり、スプライン関数を用いて計測変位から他の位置の変位を内挿して推定し、見かけの既知量の数を増やして唯一解を求める手法があります。しかし偏圧が作用する場合などでは計測変位数を相当多くしなければ、精度の良い逆解析結果は得られず、従って現実的な手法とはいえませんでした。

本論文ではこの問題に対し、制約条件を与える事によって唯一解を求めようと試みたわけです。当然、得られる解は制約条件によって異なりますが、ここでは (A) または (B) の制約条件を与えて、無限にある解の中からそれぞれ一組の解を理論的に求めたわけです。

まず、(B) のエネルギー最小化法に良い結果を期待しました。しかしこれより推定される外力は、論文内で説明した理由により、計測点付近に集中するという明らかな欠点が判明しました。そこで、自乗和が最小である外力組み合わせで計測変位を算出する (A) の手法を提案し、(B) の欠点を除いたわけです。

以上の検討結果を基にして、数値解析を行った結果、(A)、(B) のいずれにおいても、変位、応力の逆解析精度は意外な程高く、また (B) よりも (A) の方で高い精度が得られました。次に解の精度をどの程度保てるかという問題が提起されますので、本論文で示した数値解析でのパラメトリック・スタディーだけでなく、(A) に対する模型実験¹⁾、(B) に対する現場実験²⁾の検証を通して、本手法が工学的に十分な精度を保持できる事を確認しています。

次に K マトリックスを既知とする点についてですが、当然の事ながら、現場への適用では吹き付けコンクリートの弾性係数は時間的に変化するので、この値は経時的に求めておき、それを入力する必要があります³⁾。即ち、計測期間を適当に分割し、各区間内の変位増分に対して、その期間の平均弾性係数を用いて逆解析を行い、応力やひずみの増分を求め、その和によって覆工の評価を行う事になります。また、吹き付けコンクリートと鋼製支保工から成る合性材料の剛性や分担荷重は文献 3) の手法で評価出来ます。

(2) (1) の中段で説明しました。数値解析と模型実験の結果からすると、現場適用においても (A) の方

が良い結果を与えます。

(3) 解析モデルの根足部を一般部に比べて厚くしている点については、特に理由はありません。一般部と同一厚さの場合でも同様の結果が得られていますし、また根足部を絞った場合でも同様の結果が得られると思われる。

根足部を固定とする点については、順解析時に剛体変位を生じさせないために設けた条件でありまして、逆解析を行う上でこれは何等必要な条件ではありません。ひずみ等を求めようとする位置が計測点で囲まれさえすれば、根足部沈下の有無に拘らず、解を得る事が出来ます。従って、根足部にバネ支承を入れる必要はありません。

(4) (1) の後段で述べましたので、省略いたします。

(5) 本手法は計測変位が相対変位の場合や、覆工の変形が左右非対称である一般的な場合に対して定式化しています。覆工内壁で 3 点の相対変位が得られれば工学的に十分な精度を得る事が出来ます。即ち、一つの点を基準にとり、他の 2 点における基準点からの鉛直と水平の相対変位 (合計 4 成分) が得られればよいわけです。これらは A 計測において、3 測線の変化量とクラウンの沈下量から容易に求められ、その詳細は論文の付録を見て頂ければよいと思います。もちろん、光波測距儀による絶対変位をそのまま用いる事もできます。

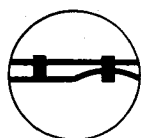
最後に、貴重な討議の場を与えて頂き感謝致します。未知量の数が方程式の数よりも格段に多い問題ですので、真の解を得る事は困難と思われそうですが、しかし本討議を踏まえ、本手法の適用性をさらに高めたいと思います。

参 考 文 献

- 1) 久武勝保・土岐晃生・村上讓二・村上敏夫：トンネル覆工の安定性評価法と模型実験、第 25 回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.201-205, 1993.
- 2) 村上讓二・土岐晃生・久武勝保：覆工応力逆解析法の現場への適用、土木学会第 46 回年次学術講演会、第 3 部、pp.582-583, 1991.
- 3) 久武勝保・伊藤富雄・桜井春輔：時間依存性を示す膨張性軟岩トンネルの一次覆工挙動、土木学会論文集、第 412 号/Ⅲ-12, pp.153-160, 1989.

(1993. 11. 26 受付)

図 書 案 内



軟岩評価

—調査・設計・施工への適用—

Evaluation of Soft Rock

Application to Investigation Design and Construction

B 5 版 / 385頁
定 価 / 6,000円
会員特価 / 5,400円
〒480円

軟 岩

—調査・設計・施工の基本と事例—

Soft Rock Engineering

Foundamentals and Case Studies for Investigation,
Design and Construction

B 5 版 / 287頁
定 価 / 5,500円
会員特価 / 4,900円
〒480円

ダムの岩盤掘削

Rock Excavation for Dams

B 5 版 / 213頁
定 価 / 5,000円
会員特価 / 4,500円
〒480円

初期地圧測定法の現状と課題

フロッピーディスク付

The Present State of In-Situ Rock Stress
Measurements in Japan

B 5 版 / 148頁
定 価 / 3,600円
会員特価 / 3,200円
〒410円

第25回岩盤力学に関する シンポジウム講演論文集

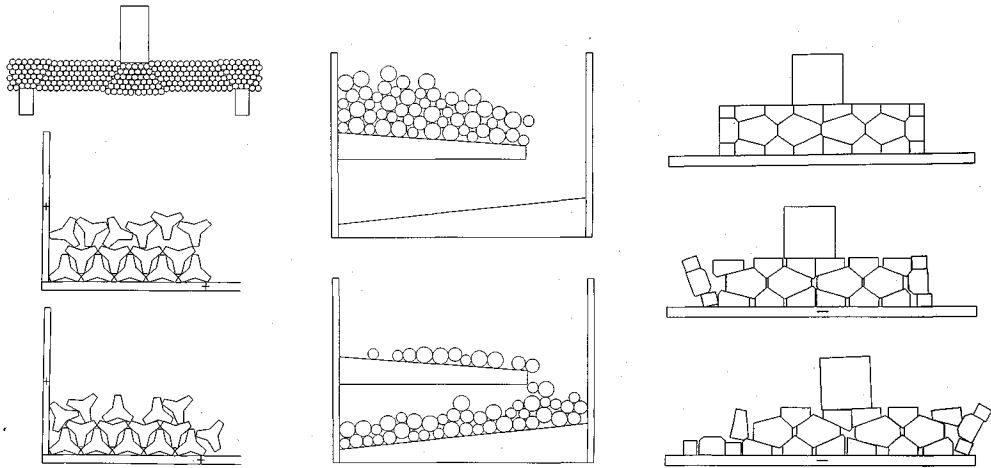
Proceedings of the 25th Symposium
on Rock Mechanics

B 5 版 / 641頁
定 価 / 8,500円
〒550円

お申込みは……社団法人 土木学会 刊行物販売係 郵便振替 東京4-763225
〒160 東京都新宿区四谷1丁目無番地
☎03(3355)3441 内線144・145・146 FAX 03(3355)3446

個別要素法プログラムシリーズ

■開発元 Dr.Cundall (ITASCA社)



UDEC

個別要素、差分要素を基本とする汎用 2 次元コードです。

- ・転倒、滑落解析
- ・地震応答解析
- ・地盤、不連続性岩盤の安定解析
- ・岩盤の掘削解析
- ・コンクリートの亀裂進行解析
- ・流れ解析 (Coupled flow-mechanical analysis)
- ・熱解析 (Coupled thermal-mechanical analysis)

BALL2D/3D

解析対象を円あるいは球でモデル化する手法のコードで、この手法は数多くの個別要素法プログラムに採用されています。

BALL2D-Polygon

BALL2Dに多角形ブロックを機能追加したバージョンです。任意剛体壁境界あるいは、飛翔体等を多角形ブロックとし、円ブロックとの相互作用解析が可能です。

BFLOW

解析対象を任意多角形でモデル化する手法のコードで、接触判定ロジック、特に凹型のブロックの接触判定の難点を解決したものです。

UDECではやや困難な完全崩壊、流動解析に適します。

CASK-3D

キャスク等の 3 次元円筒構造物の地震時の転倒解析コードです。

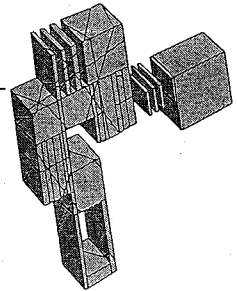
3DEC

UDECの 3 次元バージョンです。充実した 3 次元グラフィック機能をもっています。

- ・転倒、滑落解析
- ・地震応答解析
- ・地盤、不連続性岩盤の安定解析
- ・岩盤の掘削解析
- ・コンクリートの亀裂進行解析

■価格

● UDEC	SUN/IBM-PC	ソース・コード	260万円
	(Barton-Bandis Model等の機能追加も可能です。)		
● BALL2D/3D	SUN/IBM-PC/FACOM/HITAC	ソース・コード	各200万円
● BALL2D-Polygon	SUN/IBM-PC	ソース・コード	260万円
● BFLOW	SUN/IBM-PC	ソース・コード	260万円
● CASK-3D	SUN/IBM-PC	ソース・コード	200万円
● 3DEC	SUN/IBM-PC	ロード・モジュール	680万円



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、問題に応じた個別要素法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

〒151 東京都渋谷区上原2-2-7 カマタビル201
TEL.(03)3485-9360 FAX.(03)3485-6955

FLAC-2D (Fast Lagrangian Analysis of Continue)

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”もすくなくならぬ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・剝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-2D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。微小変形・歪解析も可能です。
- ・要素の大きなゆがみの発生からくる数値不安定を避けるため3角形差分要素を採用しています。
- ・要素間の滑りを考慮できるスライド・ライン機能(大変形)を備えています。

要素ライブラリー

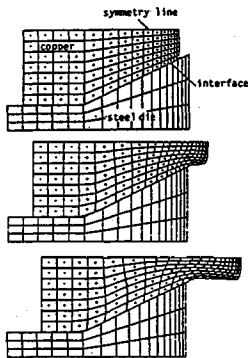
- ・2次元平面歪/応力要素
- ・ケーブル要素
- ・ビーム要素
- ・ロツフボルト要素(point anchor/grouted)

適用分野

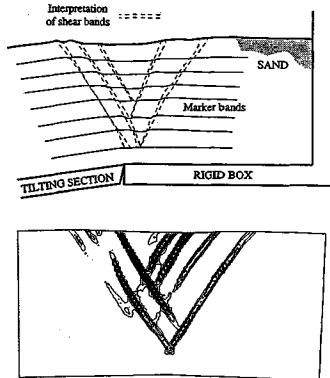
- ・斜面・盛土の設計及び安定解析
- ・浅/深基礎解析
- ・アースダム及びコンクリートダム解析
- ・トンネル、鉱山掘削解析
- ・圧密、流れ解析
- ・固体と流体の相互作用解析

構成則

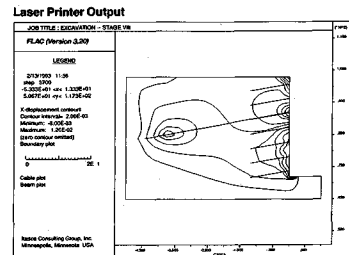
- ・等方性、非等方性弾性
 - ・弾塑性(Mohr-Coulomb, Von Miseses, Drucker-Prager等)
 - ・偏在ジョイント・モデル(Ubiquitous joint)
 - ・歪硬化/軟化
 - ・ヌル要素
 - ・体積歪依存の間隙水圧発生モデル 等
- その他の構成則の機能追加も可能です。



スライド・インターラクション



断層解析



地盤安定解析

価格

- FLAC-2D SUN/IBM-PC ロード・モジュール 標準バージョン……80万円
- ※追加オプションとして、動解析、クリープ解析及び熱解析があります。
- 追加オプションを含む一括購入の場合……150万円

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 応用工学研究室

〒151 東京都渋谷区上原2-2-7 カマタビル201
TEL.(03)3485-9360 FAX.(03)3485-6955

地盤の有限要素法解析ソフト

未来設計企業
CRC

世界標準のソフトウェア

Mr.SOIL Version-2.5

◆豊富な機能

- ・弾性、及び弾塑性解析が可能
- ・掘削、盛土機能により、施工ステップを辿った解析が可能
- ・荷重の段階的載荷が可能
- ・側圧係数の指定が可能*

◆充実したグラフィック機能

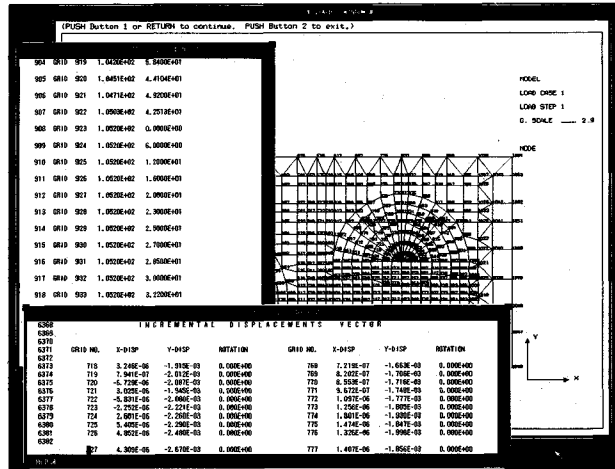
- 変位ベクトル図、変位コンター図*
- 応力ベクトル図、応力コンター図
- 棒、梁要素の断面力図*、安全率図
- 降伏要素プロット図* (各図拡大可能)
- *はv2.5による追加機能

◆お求めやすい価格設定

- ・パソコン版 (PC-9801シリーズ).....64万円 (税別)
- ・EWS版 (NEWS、SUN、HPなど).....220万円 (税別)

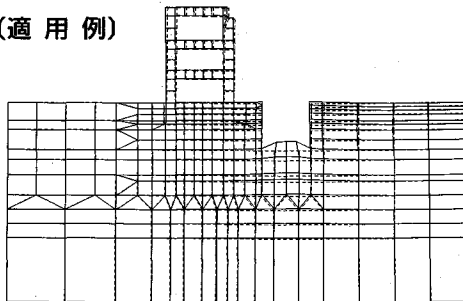
◆実績が示す信頼性

(使用実績 261本 平成5年8月現在)

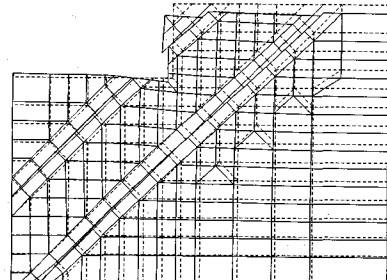


EWS画面面表示

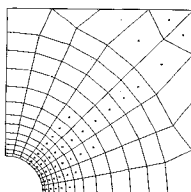
(適用例)



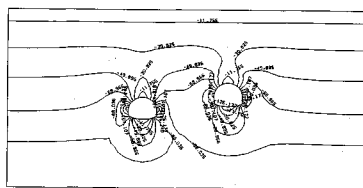
近接施工解析



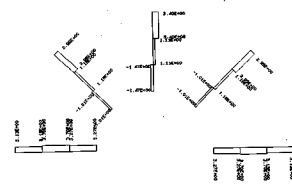
ジョイントを考慮した掘削解析



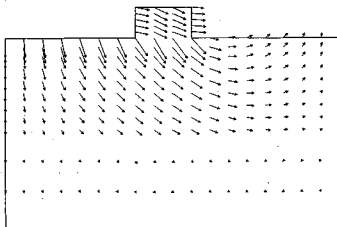
降伏要素プロット図



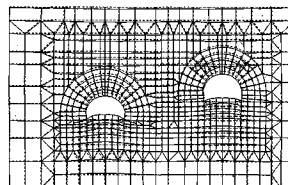
応力コンター図



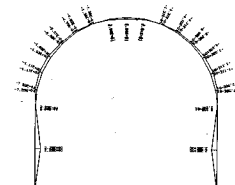
ロックボルト棒要素軸力図



変位ベクトル図



変形図



梁要素モーメント図

NATM工法による掘削解析

株式会社 **CRC** 総合研究所 西日本支社

大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06)241-4121 営業担当: 岩崎

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

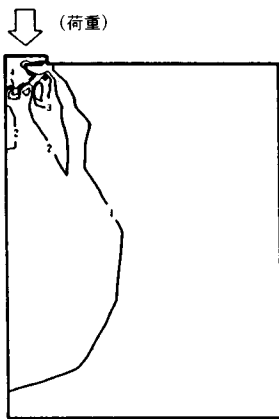
盛土・掘削

出力項目

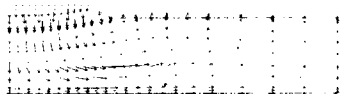
- 各節点での変位、各要素での応力
- 各節点での全水頭・圧力水頭 他
- 豊富な図化処理
変位図、変位ベクトル図、応力ベクトル図、応力コンター図、安全率コンター図、水頭コンター図、圧力水頭コンター図

プログラムの特長

- 応力と地下水の流れをカップル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。
- 梁や連結要素も扱え実用的です。
- 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)



応力増分コンター ($d\sigma_v$)
(10日後)



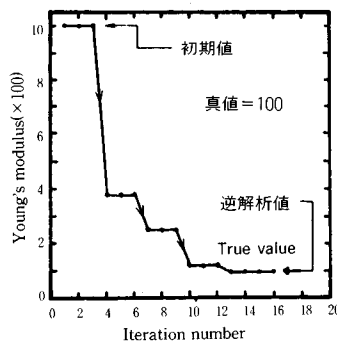
変位ベクトル図 (40日後)



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との関係
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 西日本支社

〒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

(イタスカ)
米国ITASCA社開発の岩盤・地盤解析プログラム

未来設計企業
CRC

UDEC 3DEC

個別要素法 (DEM) プログラム

個別要素法 (離散要素法) は、1971年に Dr. P. Cundall が発表した不連続体数値解析手法であり、岩盤や地盤をブロックや土粒子の要素の集合体と考え、個々の要素が隣接要素から受ける力により運動方程式にもとづき挙動する様子を時間差分式にて時刻繰返し計算する手法です。個別要素法は不連続力学の中心手法として位置づけ

られ、岩盤・地盤の崩落や安定性の解析、大深度地下空間、核廃棄物地下処理、鉱物資源開発等のプロジェクトおよび粒状体力学 (粉体工学) の分野で有力な解析手段となっています。現在 UDEC、3DEC は全世界の研究機関・企業で標準コードとして広く使用されています。

オプション

■ Barton-Bandisモデル

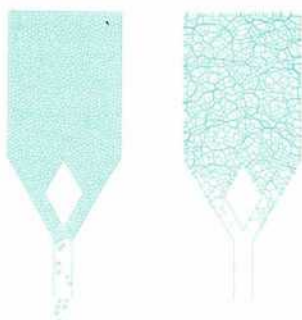
適用分野

- 粒状物質の挙動解析
- 鉱山採掘等 掘削解析
- 地震応答解析
- ジョイント内流れ解析 (浸透連成: UDEC)
- 核廃棄物の熱応力解析 (熱連成: UDEC)

販売条件

UDEC・3DEC・FLAC

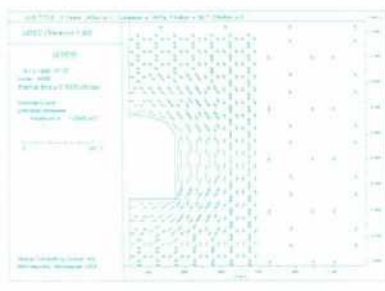
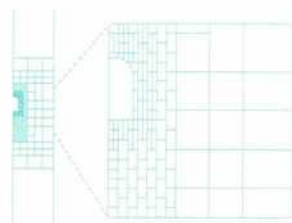
- ◆ EWS (SUN-SPARC)
- ◆ IBM-PC/AT 及び互換機
- ◆ UDEC はソースコードで提供します。
- ◆ 3DEC・FLAC はロードモジュールで提供します。



ホッパー内粒状体挙動解析



亀裂性岩盤の3次元掘削解析



核廃棄物地中処理影響解析

FLAC

有限差分法 (FDM) プログラム

FLAC は個別要素法コード UDEC、3DEC を発表した Dr. P. Cundall が同様の有限差分ロジックを用いて連続体の塑性大変形の解析するために開発したコードで、現在、全世界で数多く使用されています。有限差分法は、地盤、岩盤を有限な領域内で離散化し、運動方程式と構成則を差

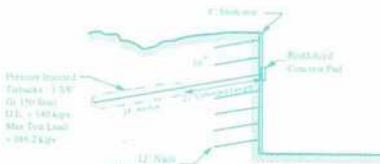
分方程式として解析するもので、有限要素法に比べ非線形大歪が扱えることで大きな優位性を持っています。FLAC は小・大型 非線形、動的・静的挙動を始めとし、豊富な機能 オプションを備えた PC、ワークステーション用の地盤解析コードです。

オプション

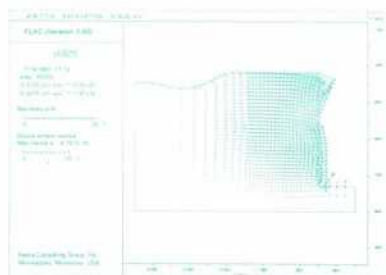
- ダイナミック解析モデル
- クリープ解析モデル
- 熱解析モデル

適用分野

- 斜面・盛土の設計、安定解析
- 浅/深基礎設計
- アースダム、コンクリートダムの設計
- トンネルの設計
- 核廃棄物貯蔵解析
- 液状化解析



地盤安定解析



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