

投稿論文(和文ノート)
TECHNICAL
NOTE

不飽和土の水浸に伴う体積変化特性に及ぼす試験手法の影響

亀井健史¹・榎本雅夫²

¹正会員 工博 基礎地盤コンサルタント(株) 地盤物性研究室 室長 (〒145 大田区石川町 2-14-1)

²正会員 工修 基礎地盤コンサルタント(株) 地盤調査研究室 研究員

不飽和地盤の水浸に伴うコラプス沈下量を判定するコラプス試験には、Single-oedometer test と Double-oedometer test の2種類の試験手法がある。本研究では、2種類の土試料を対象に、初期飽和度と初期乾燥密度を種々変化させて静的に締めた供試体に対して、種々の上載圧条件下で両試験手法により実験を行い、試験手法の違いが水浸に伴う体積変化特性に及ぼす影響を定量的な観点から検討している。

Key Words: clay, collapse, compression, oedometer test, partially saturated soil, silt, test procedure

1. はじめに

不飽和地盤に水が浸透することによって生じる重要な工学的問題の一つにコラプス沈下現象がある。このような不飽和土の水浸に伴う体積変化挙動は、地盤の飽和度、乾燥密度および地盤に作用している上載圧等に大きな影響を受ける^{1),2)}。一方、コラプス沈下量を評価する際に適用されるコラプス試験には、Single-oedometer test (S.O.T.) と Double-oedometer test (D.O.T.) の2種類の手法がある。この2種類の試験手法より得られた試験結果は、比較的良好な対応を示す場合もあるが^{3),4)}、ある試験条件下では、D.O.T. は S.O.T. よりコラプス沈下量を過大評価するという報告例もある⁵⁾。また、水浸に伴い土が膨潤を生じる場合には、D.O.T. で得られた膨潤量は、S.O.T. から得られた値に比べ、過大に評価されることが指摘されている⁶⁾。

以上のように、両試験手法から得られる結果の対応性と試料の違いおよび供試体の内的・外的条件との関係には不明な点が多い。このことから、本研究では粒度分布の異なる2種類の試料に対して、供試体の内的条件として初期飽和度 S_{ri} ・初期乾燥密度 ρ_{di} 、外的条件として上載圧 p を種々変化させることによって、両試験手法の違いが不飽和土の水浸に伴う体積変化量にどのような影響を及ぼすのかを定量的な観点から検討している。

2. 試料および試験方法

試料としては、市販の DL クレーとカオリンを用いた。その物理的特性を Table 1 に示す。ここで、DL クレー

Table 1 Index properties of soil samples.

Soil Sample	DL Clay	Kaolin
ρ_s (g/cm ³)	2.650	2.679
w_L (%)	NP	73.1
w_P (%)	NP	36.7
I_p	NP	36.4
Sand (%)	0	0
Silt (%)	89.6	3.2
Clay (%)	10.4	96.8

は商品名であり、細粒分を極力除去したシルト分がその大半を占める試料である。供試体は静的に締めることにより作製し、その内的条件はコラプス沈下が生じやすい条件を考慮して、DL クレーでは初期飽和度 $S_{ri}=20, 40\%$ 、初期乾燥密度 $\rho_{di}=1.10, 1.20, 1.30 \text{ g/cm}^3$ 、カオリンでは $S_{ri}=20, 40, 60\%$ 、 $\rho_{di}=1.00, 1.10, 1.20 \text{ g/cm}^3$ を対象とした。実験は任意の内的条件を有する供試体に対して、以下に示す2種類の試験手法を行った。

(1) Single-oedometer test (S.O.T.)

Fig.1 (a) に示すように、S.O.T. は不飽和状態の供試体に上載圧を負荷し、沈下が終了した後その上載圧を負荷した状態で供試体を水浸させ、それに伴うコラプス沈下量を測定する試験である。この手法では、原位置で地盤が水浸を受ける状態を室内試験により再現しており、図中の任意の上載圧下における水浸に伴う間隙比の変化がコラプス沈下量に相当している。その水浸に伴う体積変化量比 $\Delta V_c/V_{ci}$ は次式で表わされる⁴⁾。

$$\frac{\Delta V_c}{V_{ci}} = \frac{\Delta e}{1+e_i} \quad (1)$$

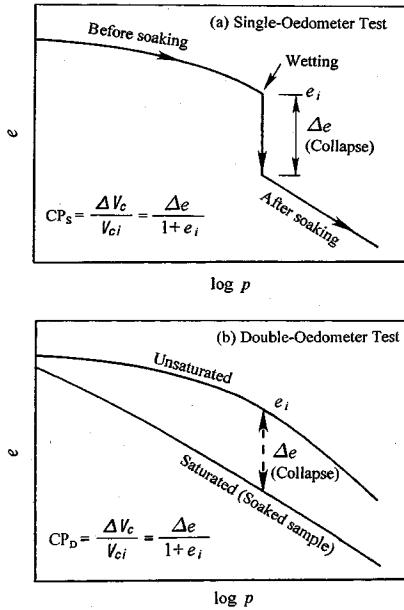


Fig.1 Single- and double-oedometer tests.

ここで、 e_i は水浸前の間隙比、 Δe は水浸に伴う間隙比の変化量を示している。今回の試験では、同じ S_{ri} 、 ρ_{di} を有する 7 本の供試体に対して 7 段階の上載圧を載荷させた。また、水浸後の供試体の体積変化は時間経過に伴い収束する傾向にあり、各々の供試体でほぼ体積変化が生じなくなる時点（約 24 時間後）の体積変化量を ΔV_c とした。

(2) Double-oedometer test (D.O.T.)

D.O.T. は Fig.1 (b) に示すように、不飽和状態の供試体と圧密リング内の不飽和供試体に下面より水を吸水させて作製した飽和供試体のそれについて試験を実施し、両曲線の差よりコラプラス沈下量を算出する手法である⁴⁾。その体積変化量比 $\Delta V_c/V_{ci}$ は、S.O.T. 同様式 (1) で表される。この試験手法では、2 本の供試体の試験結果から、種々の上載圧下におけるコラプラス沈下量が求められるため、試験時間が短く S.O.T. に比べ簡便であり、工学的には有意な試験手法であると考えられる。

しかしながら、この試験手法では、S.O.T. における供試体の水浸後の間隙比が、D.O.T. での飽和供試体の圧密曲線に一致するという仮定に基づいて $\Delta V_c/V_{ci}$ を求めていることから、その適用に際しては S.O.T. から得られた試験結果との比較検討が必要と考えられる。

3. 実験結果および考察

S.O.T. から得られた DL クレーの試験結果を Fig.2

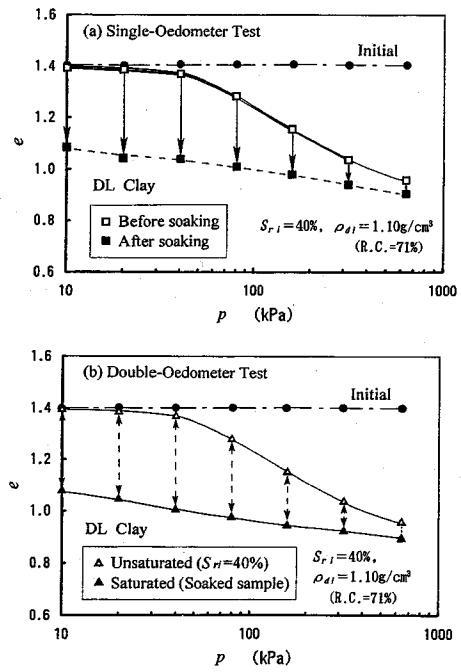


Fig.2 Typical compression curves for single- and double-oedometer tests (DL Clay).

(a) に示す⁷⁾。なお、以下では締固め度 $R.C.=70\%$ 、 $S_{ri}=40\%$ の供試体における試験結果をそれぞれその代表例とした。ここで、締固め度 ($R.C.$) は最大乾燥密度との比で表され、 $R.C.=\rho_{di}/\rho_{d\max}$ である。図より、小さな上載圧下では、不飽和状態での圧縮変形量は小さく、そのため水浸に伴って大きなコラプラス沈下量が生じている。また、 $p=80$ kPa 以上では上載圧の増加に伴って、圧縮変形量が増大し、このため水浸に伴うコラプラス沈下量は小さくなっている。同様の傾向は Fig.2 (b) の D.O.T. においても認められる。

Fig.3 (a), (b) は両試験手法から得られたカオリンの試験結果を示している。図より、両試験手法とも $p=10$ kPa では水浸により膨潤が生じているが、上載圧の増加に伴いコラプラス沈下に転じ、その沈下量が増大している。さらに $p=160$ kPa 以上では、DL クレーと同様上載圧の増加に伴い圧縮変形量が増大し、その結果コラプラス沈下量が減少している。また、両試験手法による結果はほぼ類似した傾向を示しているが、後に示す Fig.6 のように S.O.T. に比べ D.O.T. は膨潤量を過大評価する傾向が認められ、膨潤から収縮に転ずる点での上載圧が大きくなっている。

Fig.4 (a), (b) に両試験手法の違いが体積変化量比 $\Delta V_c/V_{ci}$ に及ぼす影響を示す。DL クレーでは、 $p=20$ kPa 程度以下の低い上載圧下においては両手法の試験結果は、 $|\Delta V_c/V_{ci}|=13\sim14\%$ の値を示しており、よ

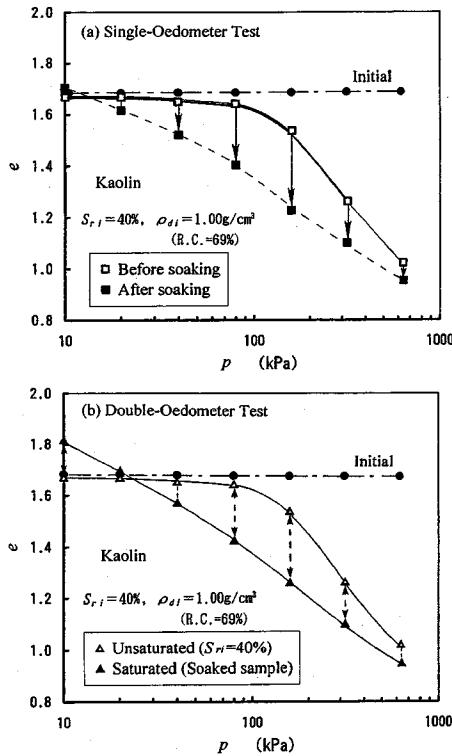


Fig.3 Typical compression curves for single- and double-oedometer tests (Kaoline).

く一致している。しかしながら、それを越える上載圧下では圧縮変形量が増大するため $|\Delta V_c/V_{ci}|$ は上載圧の増加に伴い直線的に減少している。また、D.O.T. から得られた沈下量が S.O.T. で得られた値に比べ $|\Delta V_c/V_{ci}|=1\sim2\%$ 程度大きくなっている。これに対し、カオリンでは $p=10 \text{ kPa}$ で膨潤を生じており、S.O.T. に比べ D.O.T. がその膨潤量を 4% 程度大きく評価している。また、 $p=40 \text{ kPa}$ を越えるコラプス沈下を生じる領域では、上載圧の上昇に伴い $|\Delta V_c/V_{ci}|$ が増加し、D.O.T. で得られたコラプス沈下量に比べ、S.O.T. より得られた値が $|\Delta V_c/V_{ci}|=1\sim2\%$ 程度大きくなっている。さらに、コラプス沈下量は $p=150 \text{ kPa}$ 程度でピーク値 ($|\Delta V_c/V_{ci}|=11\%$) を示した後上載圧の増加に伴って減少し、 $p=300 \text{ kPa}$ 以上では両手法より得られた値は非常によく一致している。

Fig.5 (a), (b) は、それぞれの試料において、上記の両試験手法より得られたコラプス沈下量の関係を示している。図より、DL クレーでは、供試体が有する $S_{ri} \cdot \rho_{di}$ によらず、D.O.T. から得られたコラプス沈下量は、S.O.T. で得られた値との比で 10% 程度大きな沈下量を示している。一方、カリオンでは、両試験より得られたコラプス沈下量は、供試体の $S_{ri} \cdot \rho_{di}$ によらず試験手

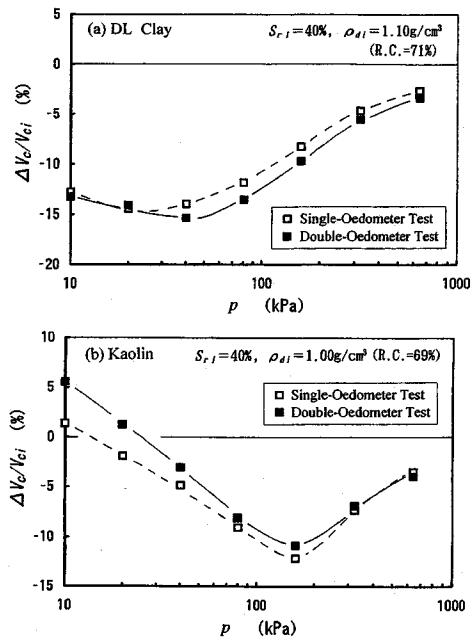


Fig.4 Comparison of volumetric strain between single- and double-oedometer tests.

法の違いによる明瞭な差異は認められず、両者はある程度の相関性を有していることがわかる。 $(r=0.87)$.

このように、供試体の内的条件 ($S_{ri} \cdot \rho_{di}$) によらず、両試験手法から得られたコラプス沈下量は、土の種類の影響を受けることが明らかとなった。

カリオンに関して、両手法より得られた水浸に伴う膨潤量の関係を Fig.6 に示す。供試体の $S_{ri} \cdot \rho_{di}$ によらず、D.O.T. から得られた膨潤量は、S.O.T. で得られた値に比べ約 2 倍以上大きくなっている。この傾向は、Lawton et al.⁶⁾ が示した結果と一致しており、膨潤特性を評価する際に D.O.T. を用いると、膨潤量を過大評価する可能性があることを示唆している。また、このことは D.O.T. では供試体をほぼ上載圧が負荷されていない条件下で水浸膨潤させた後圧密するのに対して、S.O.T. では、供試体に任意の上載圧を負荷した拘束条件下で膨潤させるため、その膨潤量は D.O.T. から得られる値よりも小さくなるものと考えられる。よって、D.O.T. は簡便で試験が短時間という工学的に優れた点が認められるが、その適用性については注意を要することが明らかとなった。

4. 結論

不飽和土の水浸に伴う体積変化量に及ぼす試験手法の影響を、供試体の初期飽和度と初期乾燥密度および上載圧を種々変化させることによって検討した。その結果、

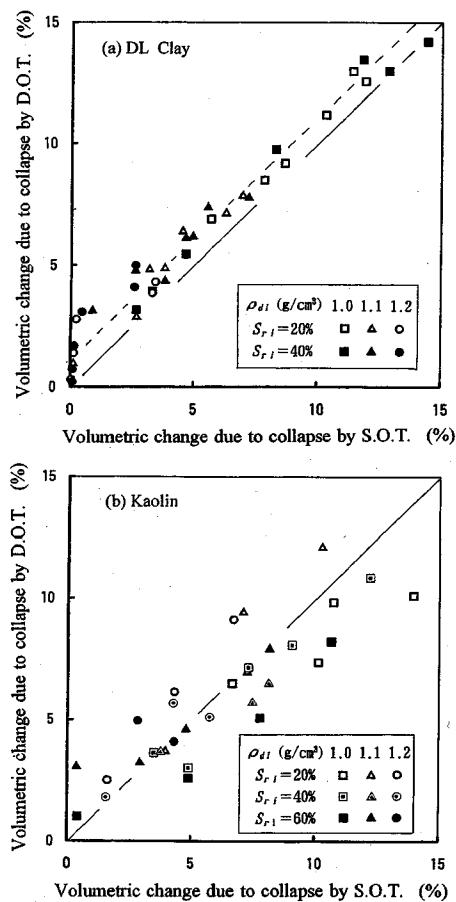


Fig.5 Comparison between single- and double-oedometer tests to determine collapse.

S.O.T. および D.O.T. から得られたコラップス沈下量は、供試体の内的条件によらずシルト質土、粘性土両試料ともある程度良好な対応が得られるが、シルト質土に對しては、D.O.T. は S.O.T. に比べコラップス沈下量を両手法より得られた値の比で 10% 程度大きく評価する傾向が認められた。なお、膨潤特性に関しては、S.O.T. と比較して D.O.T. の試験結果は、膨潤量を

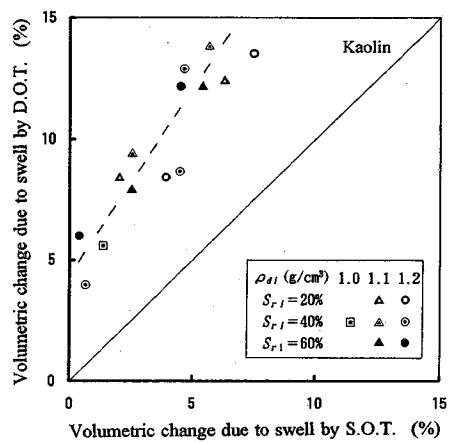


Fig.6 Comparison between single- and double-oedometer tests to determine swell.

過大に評価する可能性がある。

参考文献

- Dudley, J.H. : Review of Collapsing Soils, *Proc. ASCE*, Vol.96, No.SM3, pp.925-947, 1970.
- Barden, L., McGown, A. and Collins, K. : The Collapse Mechanism in Partly Saturated Soil, *Engrg. Geol.*, 7, pp.49-60, 1973.
- Basma, A.A. and Tuncer, E.R. : Evaluation and Control of Collapsible Soils, *Proc. ASCE*, Vol.118, No.GT 10, pp.1491-1504, 1992.
- Lutenegger, A.J. and Saber, R.T. : Determination of Collapse Potential of Soils, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.11, No.3, pp.173-178, 1988.
- Lawton, E.C., Fragaszy, R.J. and Hetherington, M.D. : Review of Wetting-Induced Collapse in Compacted Soil, *Proc. ASCE*, Vol.118, No.GT 9, pp.1376-1394, 1992.
- Lawton, E.C., Fragaszy, R.J. and Hardcastle, J.H. : Collapse of Compacted Clayey Sand, *Proc. ASCE*, Vol.115, No.GT 9, pp.1252-1267, 1989.
- 亀井健史, 榎本雅夫: 締固めたシルト質土の水浸に伴うコラップス沈下拳動, 土木学会論文集, No. 505/III-29, pp. 97-103, 1994.

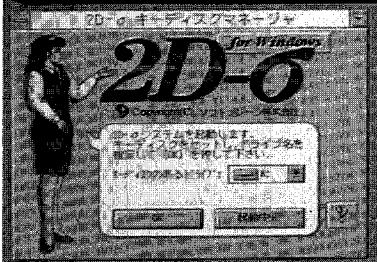
(1994.7.21 受付)

INFLUENCE OF TEST CONDITIONS ON VOLUME CHANGE CHARACTERISTICS OF UNSATURATED SOILS AFTER SOAKING

Takeshi KAMEI and Masao ENOMOTO

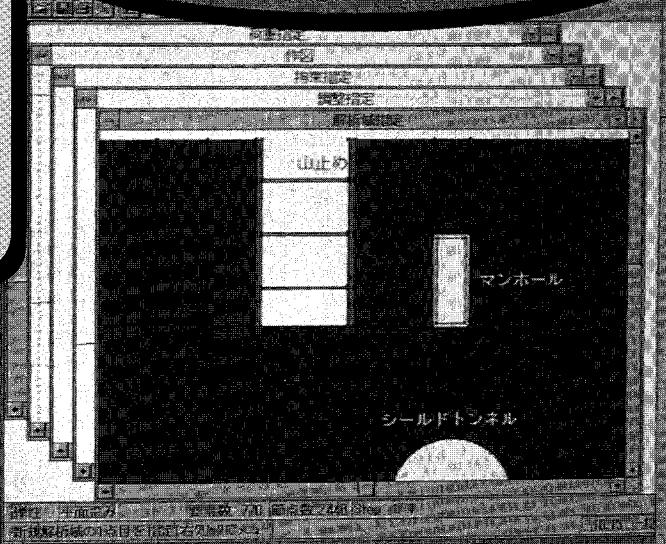
This paper describes the influence of test conditions on volume change characteristics of unsaturated soils after soaking. Two types of commercially available soils referred to as DL clay and Kaolin were used in this series of experiments. The specimens were then statically compacted up to the required height corresponding to a specified dry density. The test program consisting of the single-oedometer and double-oedometer tests were performed for the two kinds of soils. It is also investigated the influence of some important factors such as the initial degree of saturation, the initial dry density and the applied pressure on the amount of collapse of unsaturated soils after soaking in this paper.

道路公団、建設省、通産省の研究機関をはじめ、ゼネコンやコンサルのユーザーは既に
170社以上
 土木学会第19回情報システムシンポジウムにて**受賞**
 「日経コンストラクション」コンピュータ応用技術特集記事掲載



あの人の夢の構造解析システム

もうご存知ですか?



お確かめください。世界の土木構造解析をリードする。

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、低成本で簡単に／(一般技術者がノート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。

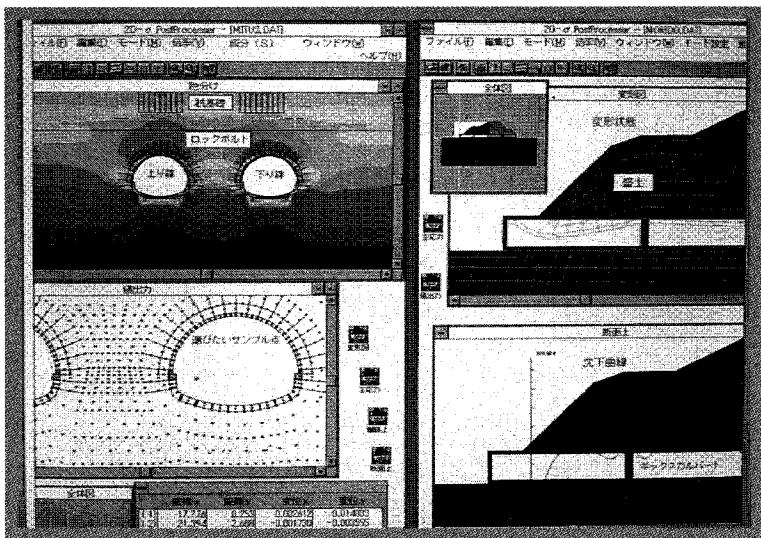
土木構造解析特有の面倒な解析特に有效(ステップ施工、掘削、盛土、支保、近接・拡幅、接触問題など)。

■膨大な解析容量(1万節点以上)と驚異の演算速度(例えば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、コメントやキャプチャーを付けた上、最終成果物としてあらゆる出力装置へ出力できる。

ワープロや表計算などの他のソフトにも図面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、熱応力、地震慣性力等)。



土木業界で大好評

開発・販売

ソフトブレーン

詳細資料提供

本社:〒001 札幌市北区北37条西4丁目 王陽ビル

お問合せは 03-3592-7659

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

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 Ver.3.0 WINDOWS 版

Mr. SOILの新バージョン(Ver.3.0)はWindows*で稼働する強力なシステムに生まれ変わり大モデルも扱えるようになりました。

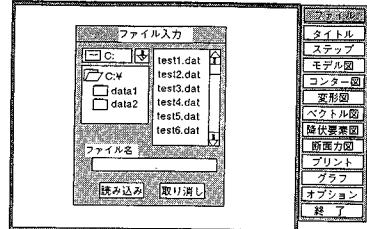
また、マウスを使ったメニュー形式の導入、画面上での出力が可能になるなどの新機能により、すぐれた操作性をもたらします。

*Windowsは、米国マイクロソフト社の登録商標です。

バージョンアップ項目

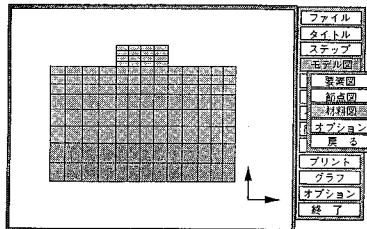
入力部

- モデル作成のためのメッシュジェネレート機能。
- モデル図を参照しながら荷重条件、境界条件、材質条件、はり、棒要素のデータをメニュー画面のテーブルにより入力することが可能。



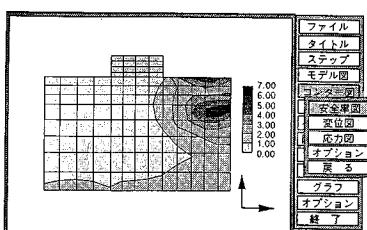
ソルバー部

- 強制変位。
- 解析途中の材質の変更。(渠注施工のモデル化)
- 節点数制限のUP。(約3000節点が可能)



出力部

- 線画だけでなく画面塗りつぶし処理が可能。
- マウス入力とメニュー型式による操作性の大幅な向上。



動作環境

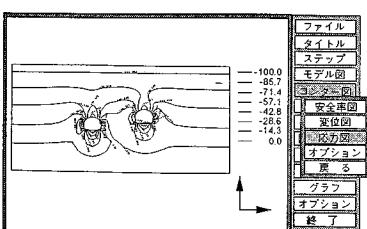
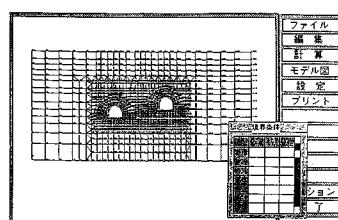
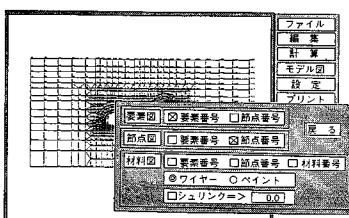
CPU 80386 以上。(推奨 80486 以上)

Windows 3.1 以上

メモリ 640Kbyte + 7Mbyte (プロテクトメモリー)

ハードディスク 10Mbyte以上

以上のメモリーは今後、改良により小さくなる場合もあります。



製品版は、一部異なる場合があります。

株式会社 CRC総合研究所 西日本事業部

大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06)241-4121 担当／村中一意

(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

オプション

■Barton-Bandisモデル

適用分野

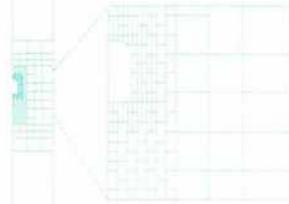
- 粒状物質の挙動解析
- 並山採掘等 挖削解析
- 地震応答解析
- ジョイント内流れ解析
(浸透連成: UDEC)
- 核廃棄物の熱応力解析
(熱連成: UDEC)

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。

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。



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

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

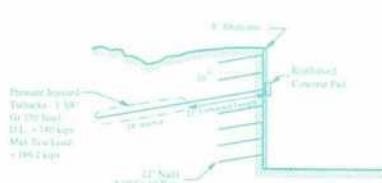
適用分野

- 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

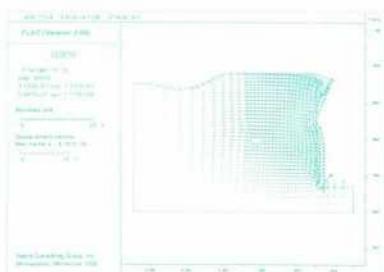
FLACは個別要素法コード UDEC・3DECを発展したDr. P. Cundallが同様の有限差分ロジックを用いて連続体の塑性大変形の解析するために開発したコードで、現在、全世界で数多く使用されています。有限差分法は、地盤、岩盤を有限な領域内で離散化し、運動方程式と構成則を差

分方程式として解析するもので、個別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～大歪、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。



地盤安定解析



〒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

株式会社 CRC総合研究所

西日本事業部

定価 一、五〇〇円(本体価格・四五六円)

昭和二十七年五月一十八日 第三種郵便物登録
平成廿年三月十五日印行
土木学会論文集(通巻)第(十一)号
平成廿年三月二十日発行

土木学会論文集