

フラット・ダイラトメーター試験による 砂質土のせん断抵抗角の評価

岩崎公俊*・亀井健史**

フラット・ダイラトメーター試験(DMT)は、簡便、安価、迅速で、多くの土質定数が評価可能となるため、欧米を中心に高く評価されている。しかしながら、DMTよりせん断抵抗角を得ようとする場合、通常、コーン貫入試験の併用が必要となる。本研究は、上記の点に着目し、DMTのみの試験結果に基づいた砂のせん断抵抗角評価手法を新たに提案し、それによって評価されたせん断抵抗角を室内試験結果と比較することにより、本評価手法の妥当性を実証している。

Key Words : flat dilatometer, in situ test, angle of shear resistance

1. はじめに

地盤の原位置強度・変形特性を評価する場合、一般的に原位置試験が実施される。これは、試料採取の必要がなく、そのためそれに伴う応力開放による乱れの問題が少なく、さらに深度方向の土質データがある程度連続して測定できる等のことによるものである。しかしながら、実際には境界条件が不明確等の問題点も指摘されている。一方、室内土質試験においては、原位置における試料採取が困難で試料採取から供試体の設置に至るまでの応力開放に伴う乱れや機械的乱れが避けられない。このことから、得られた試験結果と原位置強度・変形特性の関係には定量的な観点から問題点が残されている。

国内で最も実績を有している代表的な原位置試験としては、標準貫入試験(SPT)が挙げられる。この試験は、原位置における乱した試料の採取が可能のため、簡単な物理試験が実施できる。また、得られた N 値は、各機関の設計指針の主要なパラメータとして土質定数を評価する際に多用されている。しかしながら、その試験の性質上得られた N 値には試験手法および試験者の技術力の差に起因する誤差が少なくなく、より高い精度の土質定数が必要となると、 N 値より評価した土質定数では不十分な場合も少なくない。

フラット・ダイラトメーター試験(DMT)は、簡便、安価、迅速等の特徴を有しており、欧米を中心に普及しつつある原位置試験である。また、原位置における多くの土質定数が評価可能となるため原位置試験として比較的高く評価されている。しかしながら、こ

のような土質定数を評価する上でせん断抵抗角に着目すると、通常、コーン貫入試験の併用が必要となる。このことは、工学的な面から考えると2種類の原位置試験を実施することとなり不経済的となる。

本研究は、上記の点に着目しDMTのみの試験結果に基づいた砂のせん断抵抗角評価手法を新たに提案し、それによって評価されたせん断抵抗角を室内試験結果と比較し、本評価手法の妥当性を実証している。なお、本研究の位置づけと従来のDMT推定式の対応関係の概要を Fig.1 に示す。

2. フラット・ダイラトメーター試験の概要

DMTのシステム構成を Fig.2 に示す。DMTは、鋼製のブレード(Fig.3)と貫入ロッド・圧力制御装置等からなる。また、電源装置等の特別な設備は不要である。ブレードの中央部には鋼製メンブレンが取り付けられており、ロッド内のエアチューブを介して地上からのガス圧によりそれを膨ませることができる。DMTの適用地盤に関しては、SPTがほとんどの未固結地盤に適用できるのに対し、DMTは通常静的貫入によるため貫入能力に限界があることより、一般的に N 値 20 程度以下の沖積地盤が可能となる。また、DMTの適用範囲を広げるため、重錘を用いた打撃貫入も行われる場合があり、この場合では、 N 値 30 ~ 40 程度までの地盤に対して適用可能となる。

試験は、ブレードを 2cm/sec の速度で所定深度まで貫入し、貫入後メンブレン中央部を 1.1mm 膨張させ、地盤を水平載荷することにより行う。このとき、膨らみ始め、1.1mm 膨張時および除荷時にメンブレンがブレードに接したときの圧力を読み取る。これらの読み値にメンブレンの剛性補正を加えて、それぞれ p_0 、 p_1 、 p_2 値としている。通常、この載荷は深度 20cm 毎に行う。

* 正会員 工修 基礎地盤コンサルタンツ(株)地盤調査研究室長(信州大学大学院工学研究科博士後期課程) (〒145 大田区石川町2-14-1)

** 正会員 工博 基礎地盤コンサルタンツ(株)地盤物性研究室長

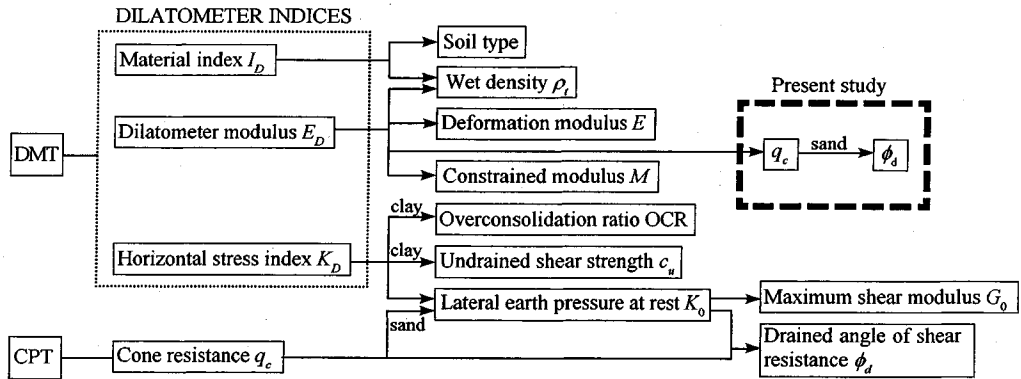


Fig.1 Dilatometer data deduction flow

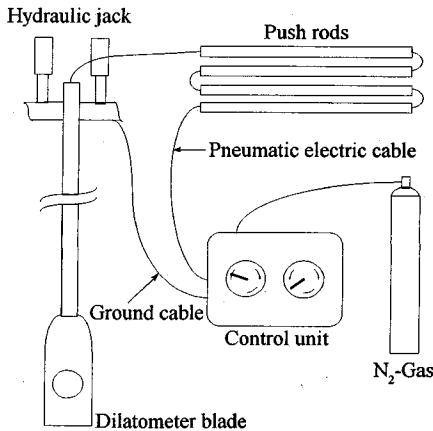


Fig.2 Flat dilatometer (DMT) system

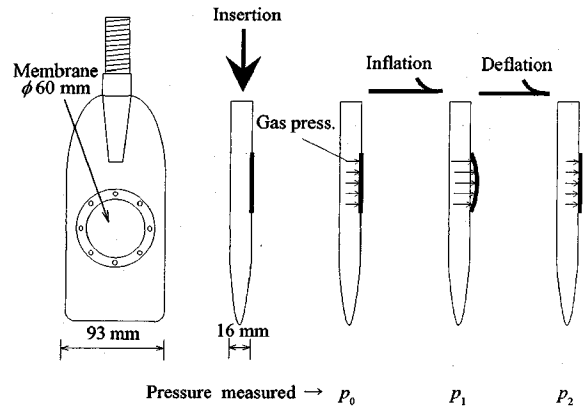


Fig.3 DMT blade and test procedure of DMT

このようにして得られた測定値より、以下に示すダイラトメーター・インデックスが計算される²⁾。

- ① 材料インデックス (Material Index)

$$I_D = (p_1 - p_0) / (p_0 - u_0) \dots\dots\dots (1)$$
- ② 水平応力インデックス (Horizontal Stress Index)

$$K_D = (p_0 - u_0) / \sigma'_v \dots\dots\dots (2)$$
- ③ ダイラトメーター係数 (Dilatometer Modulus)

$$E_D = 34.7 (p_1 - p_0) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 u_0 は静水圧、 σ'_v は有効上載圧である。なお、メンブレン載荷は半無限地盤上の円形たわみ性基礎の載荷試験を想定しており、このことより、 E_D 値はその弾性解より導き出されたものである。また、 p_2 値は、上記インデックスの計算に用いていないが、ブレード貫入時に発生する間隙水圧に相当するものと指摘されており³⁾、今後のデータの蓄積に伴いその工学的有用性が明らかになるものと考えられる。

以下の検討においては、DMT と CPT が併せて実施された国内 5 箇所の試験結果とこれまでに公表された海外の代表的な DMT 結果を対象とした。なお、対象土質は沖積砂質土である。

3. 砂質土のせん断抵抗角の評価

DMT による砂質土のせん断抵抗角 ϕ_d 値の推定方法は、Schmertmann(1982)⁴⁾により最初に提案されている。この方法は、Durgunoglu and Mitchell(1975)⁵⁾の支持力理論に基づき、地上あるいはブレード直上で別途ブレード貫入時に測定した DMT 押し込み力を用いて、貫入理論から ϕ_d 値を逆算することによって求めるものである。しかしながら、この手法は押し込み力が必要となるため新たに測定項目が増すことになり、さらに収束計算が必要となること等の問題点があるため、標準的な DMT においては通常適用されていない。

このため、Marchetti(1985)⁶⁾は、新たに押し込み力の代わりに、近傍で実施した静的コーン貫入試験(CPT)から得られる先端貫入抵抗 q_c を導入して、Fig.4 の関係⁷⁾より ϕ_d 値を求める方法を提案した。この方法は、簡便なため現在のところ比較的一般に用いられており、Lacasse and Lunne(1988)⁷⁾により良好な検証結果が報告されている。しかし、DMT 以外にさらに CPT を実施することは、特に CPT が不要でない限り経済的な面で問題が

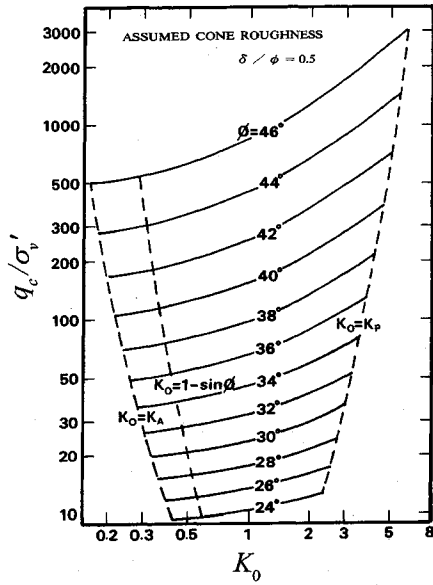


Fig. 4 Chart for interpreting drained angle of shear resistance from q_c/σ'_v and K_0 -value²⁾

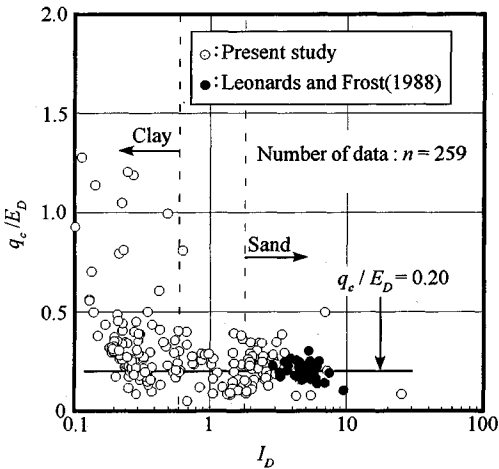


Fig. 6 Relationship between q_c/E_D and DMT material index I_D

残る。このような点に着目し、DMT結果より q_c 値を推定し、Fig. 4より ϕ_d 値を求める方法を検討した。

Fig. 5は、国内データおよび海外文献データ⁸⁾に基づいた q_c 値と E_D 値の関係を示している。図より、 E_D 値の増加に伴い q_c 値は直線的に増加しており、両者の間には次式に示すような良好な相関関係が認められる。

$$q_c = 0.20 E_D \quad (\text{相関係数} : r = 0.93) \dots\dots (4)$$

次に、式(4)の土質依存性を検討するため、Fig. 6に q_c/E_D 比と I_D 値の関係を示す。ここに、 I_D 値は土の粒径に依存するインデックスであり、一般的には、 $I_D < 0.6$ の場合に粘土、 $I_D > 1.8$ の場合に砂であると提案さ

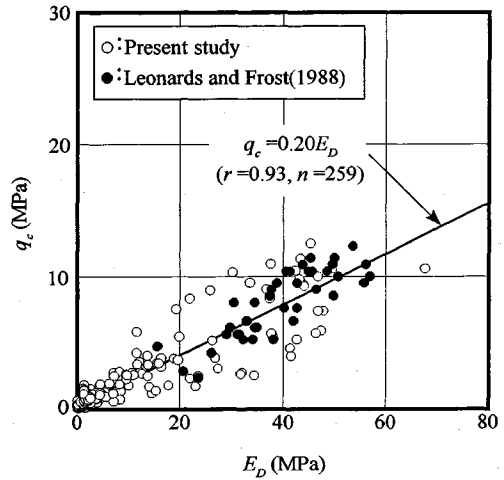


Fig. 5 Relationship between cone resistance q_c and DMT modulus E_D

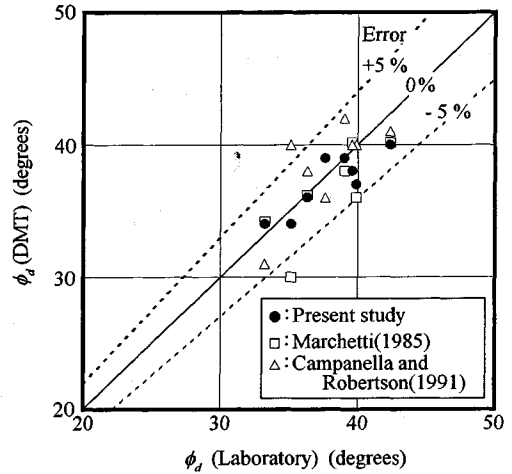


Fig. 7 Relationship between drained angle of shear resistance ϕ_d obtained by DMT and that by triaxial compression test under drained condition

れている。Fig. 6によると、粘土のデータの一部で、 q_c/E_D 比にばらつきが認められるものの、砂質土では q_c/E_D 比はほぼ一定値を示している。

以上より、式(4)を用いて E_D 値から q_c 値が推定できるので、 K_0 値および σ'_v 値が分かれば、Fig. 4より ϕ_d 値が推定できる。 K_0 値は、Baldi et al. (1986)⁹⁾によって q_c 値を用いた次式が提案されており、最もよく利用されている。

$$K_0 = 0.376 + 0.095 K_D - 0.00461 (q_c/\sigma'_v) \dots\dots (5)$$

しかしながら、Fig. 4より分かるように、 K_0 値の違いが ϕ_d 推定値に及ぼす影響は少ないため、便宜的に K_0 値を仮定してもその誤差は小さいものと考えられる⁹⁾。

なお、 σ'_v 値は、 I_D 値および E_D 値から湿潤密度を推定²⁾することにより得られる。

Fig.7は、この提案手法の推定精度を確認するため、国内の沖積砂質土を対象に、DMT結果に基づいて推定した ϕ_d 値とロータリー式三重管サンプラーにより採取した乱さない試料を用いた三軸圧縮試験(CD)結果より算出した ϕ_d 値の関係を示している。図より、今回の提案手法から得られた値は、三軸圧縮試験結果と比較的良好対応を示しており、両者の相関性に着目するとそのばらつきは $\pm 5\%$ 程度の誤差範囲内にある。なお、先述したように、 K_0 値が ϕ_d 値に及ぼす影響は少ないものと考えられるため、地盤工学においてよく用いられる $K_0=0.5$ の値を採用した。本手法による結果の信頼性を評価するため、既往の手法に基づいた推定値との比較検討のため、Marchetti(1985)⁶⁾による方法と K_0 値を応用したCampanella and Robertson (1991)³⁾の提案による、 $q_c/\sigma'_v=33K_0$ (ただし、 $K_0=0.5$ を仮定)を用いた結果も併記した。図より既往の提案手法に基づいた値と今回の提案値はほぼ同様の結果が得られた。

以上のことから、CPTを併用することなしにDMTのみにより E_D 値から q_c 値が推定可能となり、本提案式を用いることにより従来の手法に比べより簡単かつ経済的に ϕ_d 値を評価できる可能性を見い出した。

4. 結 論

フラット・ダイラトメーター試験(DMT)は、簡便、安価、迅速、多くの土質定数が評価可能であること等の特徴を有する。しかしながら、DMTよりせん断抵抗角を得ようとする場合、通常、コーン貫入試験の併用が必要となるため、2種類の原位置試験を実施することとなり不経済的である。本研究は、このような点に着目し、DMTのみの試験結果に基づいた砂のせん断抵抗角評価手法を新たに提案し、それによって評価されたせん断抵抗角の信頼性を室内試験結果と比較した。

その結果、DMTのみの試験結果に基づき、せん断抵抗角が推定できる可能性を見い出した。

謝 辞

本研究の実施にあたり、信州大学工学部 川上 浩教授には、終始ご指導および貴重なご助言を頂いた。ここに、記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Marchetti, S. : In situ tests by flat dilatometer, Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.106, No.GT3, pp.299 - 321, 1980.
- 2) Marchetti, S. and Crapps, D. : Flat dilatometer manual, Schmertmann and Crapps Inc., 1981.
- 3) Campanella, R. G. and Robertson, P. K. : Use and interpretation of a research dilatometer, Canadian Geotechnical Journal, Vol.28, pp.113 - 126, 1991.
- 4) Schmertmann, J. H. : A method for determining the friction angle in sands from the Marchetti dilatometer test (DMT), Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, Vol.2, pp.853 - 861, 1982.
- 5) Durgunoglu, H. T. and Mitchell, J. K. : Static penetration resistance of soils: I - analysis, ASCE Special Conference on In Situ Measurement of Soil Properties, Vol.1, pp.151 - 171, 1975.
- 6) Marchetti, S. : On the field determination of K_0 in sand, Proceedings of the 11th ICSMFE, Vol.5, pp.2667 - 2672, 1985.
- 7) Lacasse, S. and Lunne, T. : Calibration of dilatometer correlations, International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Vol.1, pp.539 - 548, 1988.
- 8) Leonards, G. A. and Frost, J. D. : Settlement of shallow foundations on granular soils, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.114, No.7, pp.791 - 809, 1988.
- 9) Baldi, G., et al. : Flat dilatometer tests in calibration chambers, In-Situ'86, ASCE Special Conference, pp.431 - 446, 1986.

(1993. 11. 5 受付)

EVALUATION OF ANGLE OF SHEAR RESISTANCE OF SANDY SOILS USING FLAT DILATOMETER

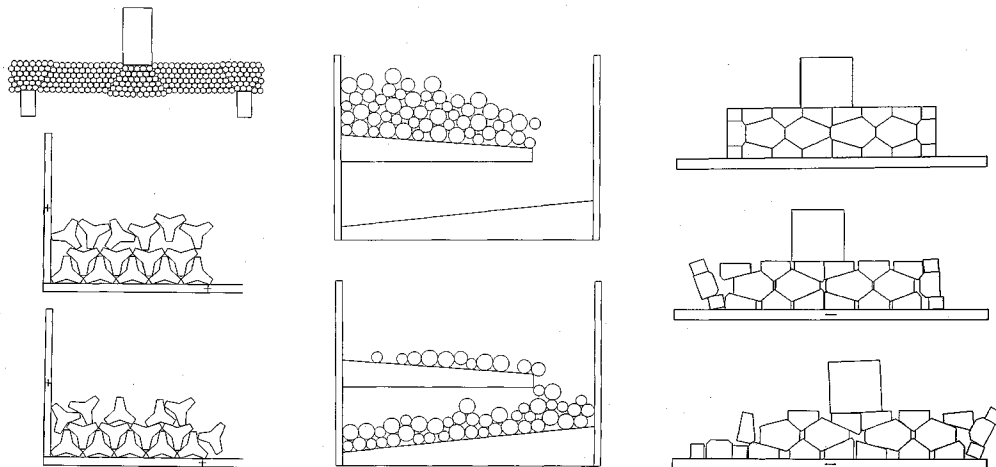
Kimitoshi IWASAKI and Takeshi KAMEI

The flat dilatometer in situ testing device (DMT) has been frequently in use in North America and Europe. The ease of operation, good repeatability and instrument durability appear to be reasons for its popularity.

Based on limited available test data, a simple procedure has been developed to estimate the angle of shear resistance of sands from only the results of the flat dilatometer in situ testing device.

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。

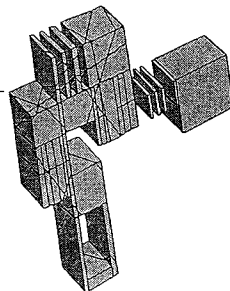
3DEC

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 (Barton-Bandis Model等の機能追加も可能です。)	ソース・コード	260万円
● 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・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-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

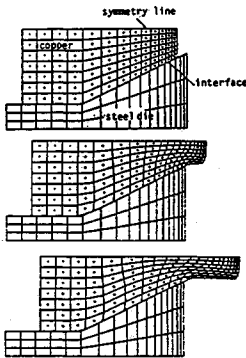
- ・2次元平面歪/応力要素
- ・ケーブル要素
- ・ビーム要素
- ・ロックボルト要素(point anchor/grouted)

適用分野

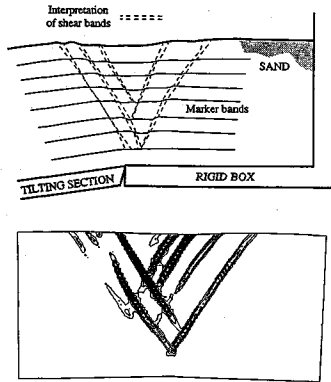
- ・斜面・盛土の設計及び安定解析
- ・浅/深基礎解析
- ・アースダム及びコンクリートダム解析
- ・トンネル、鉱山掘削解析
- ・圧密、流れ解析
- ・固体と流体の相互作用解析

構成則

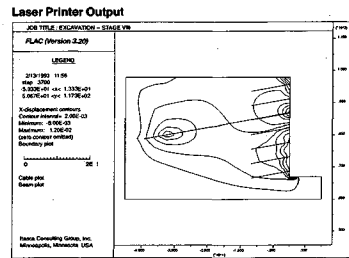
- ・等方性、非等方性弾性
 - ・弾塑性 (Mohr-Coulomb, Von Mises, Drucker-Prager 等)
 - ・偏在ジョイント・モデル (Ubiquitous joint)
 - ・歪硬化/軟化
 - ・ヌル要素
 - ・体積歪依存の間隙水圧発生モデル 等
- その他の構成則の機能追加も可能です。



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

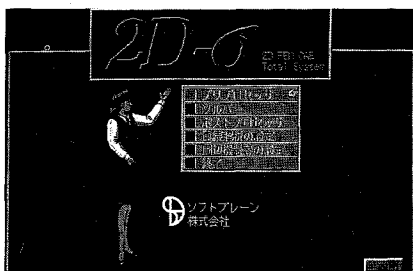
プログラムはいずれも最新バージョンを提供いたします。また、問題に応じた地盤非線形プログラムの開発も行っています。

* 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

パソコン用土木構造解析CAEシステム



■システムマネージャー（動画、音声）

ツードレーシングマ

2D-σ

TOTAL SYSTEM

土木業界で大好評

「噂は聞いているが、ここまでできると思わなかった！」
「これなら私にも使える！」「もう他のソフトは使えない。」

—よく聞くユーザーの声

詳細資料提供

数日間かかった解析がわずか数十分間で！
だれでも、どこでも、低コストで、簡単に。
斬新なコンセプトで設計のあり方が変わる！

高性能CADを内蔵、全ての情報はCAD図面に直感的に指定。（境界・荷重条件、掘削、盛土、支保等）

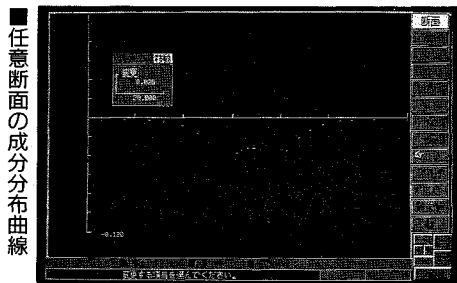
有限要素的な指定は存在しない。システムはCAD上の情報から全てのデータを自動的に生成する。

土木解析に必要な機能のほとんどに対応。（非線形、弾塑性、ジョイント、掘削、盛土、支保、熱応力など）

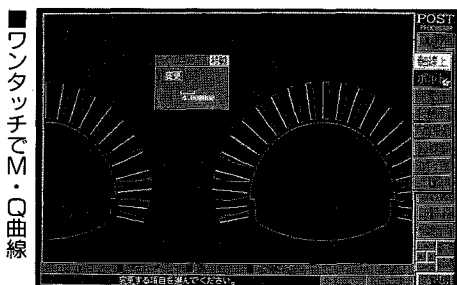
高度なステップ解析機能により、施工中の力学的変化をリアルに再現。（前ステップのデータは自動的に継承されユーザーは図面上で「施工」する感じ）

EWS並みの大規模解析能力と高速演算。（3000節点、拡張可、1400節点の演算はCPU486DXで約2分間）

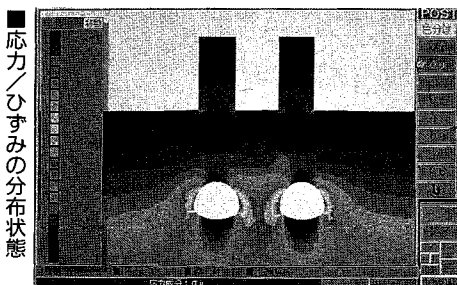
独自のウィンドウズシステム、音声サポート、オンラインヘルプ、豊富で高品質な出力など。



任意断面の成分分布曲線

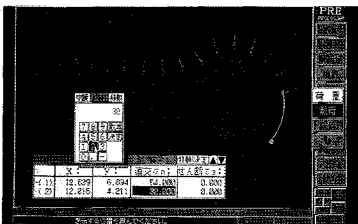


ワンタッチでM・Q曲線

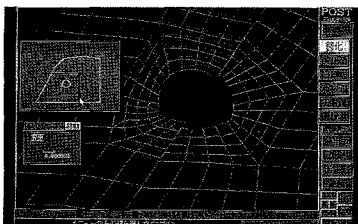


応力/ひずみの分布状態

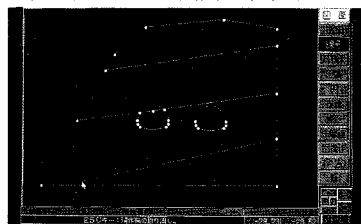
■全ての条件は図面上に直接指定



■断層・弱面の挙動はリアルに再現



■高性能CADで図面を素早く入力



開発・販売



ソフトブレン(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

販売代理 株式会社CRC総合研究所

地盤の有限要素法解析ソフト



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。(薬注施工のモデル化)
- 節点数制限のUP。(約3000節点が可能)

出力部

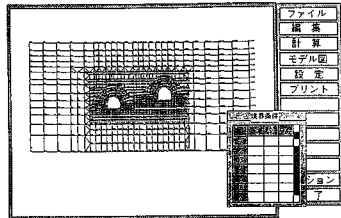
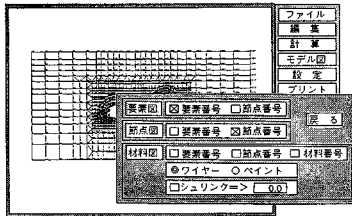
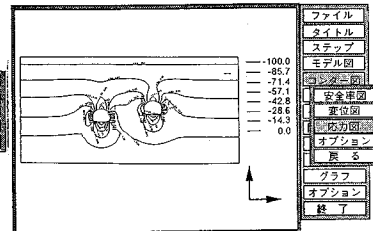
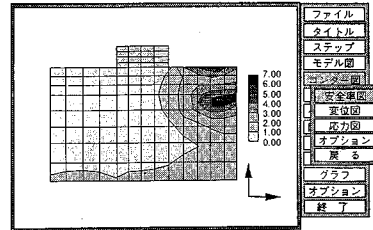
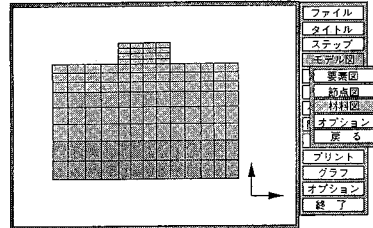
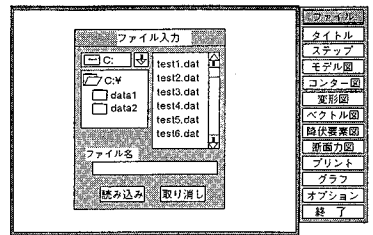
- 線画だけでなく画面塗りつぶし処理が可能。
- マウス入力とメニュー型式による操作性の大幅な向上。

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。

新価格 ¥980,000
(当社比40%オフ)



製品版は、一部異なる場合があります。

パソコン用、準3次元広域地下水変動解析プログラム

未来設計企業

CRC

PC/UNISSF^{★★} Ver.3.0 for Windows

“PC/UNISSF Ver.3.0”は、すでに汎用機やEWSで実績のある準3次元広域地下水変動解析プログラム、UNISSF(V-2)に強力なプリ・ポスト処理プログラムを付加し、Windows版として新登場しました。このプリ・ポストプログラムは、マウスを使ったメニュー形式の導入、画面上での入出力等の機能により、すぐれた操作性をもちます。

新登場!

プログラムの特徴 (☆印は新機能)

■プリ処理

- ☆モデル作成のためのメッシュジェネレート機能
- ★地層データ、初期水位データ等の自動発生機能
- ☆モデル図を参照しながら、境界条件等各種データの入力、修正が可能
- ☆マウス入力とメニュー形式による操作性の向上

■解析機能

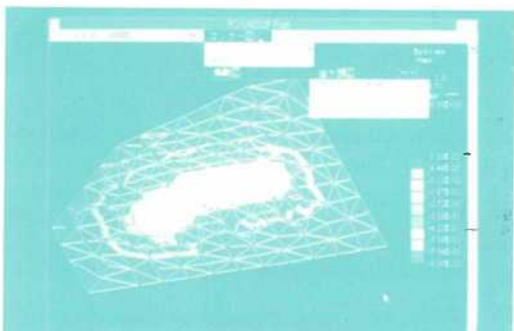
- ☆汎用機、EWS版と同一機能(順解析)、同一データフォーマット
- ☆約3000~10000節点までのモデルが解析可能
- ★降雨・揚水井・浸出面の取り扱いが可能
- ★水位・流量の経時変化
- ★境界条件の変更、材質の変更
- ★掘削機能・簡易漏水機能
- ★初期定常計算・非定常計算・最終定常計算

■ポスト処理

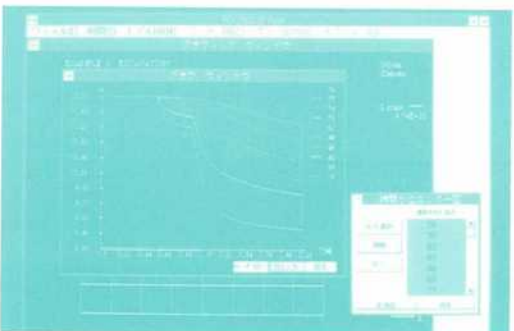
- ☆線画に加えて画面塗りつぶし処理が可能
- ☆水位の時間変化が簡単にグラフ化可能
- ☆マウス入力とメニュー形式による操作性の大幅な向上



【モデル図】



【全水頭コンター】



【水位変化グラフ】

動作環境

Windows Ver.3.1
CPU: 80386 以上 (推奨 80486DX 33MHz以上)
RAM: 8MB 以上
ハードディスク空容量: 10MB以上

★★PC/UNISSF Ver.3 for Windows は 地下水変動解析プログラム (V-2) の Windows 版のプログラム名称です。

- ・UNISSFは情報処理振興事業会の委託を受けて当社で開発したプログラムです。
- ・Windowsは米国マイクロソフト社の商標です。

問い合わせ先

株式会社 **CRC総合研究所**

西日本事業部 科学システム営業部
〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3
TEL.06-241-4730 (担当/松本)

通商産業省 特別認可法人

情報処理振興事業協会 (IPA)

〒105 東京都港区芝公園3丁目1番38
TEL.03-3437-2301