

**投稿論文** (和文ノート)

**TECHNICAL  
NOTE**

# 自動制御・計測可能な中空ねじりせん断試験装置の試作とひずみ制御試験への適用

中田幸男\*・山本修三\*\*・安福規之\*\*\*・  
村田秀一\*\*\*\*・兵動正幸\*\*\*\*\*

本報は、複雑な制御を伴う実験や長期的な実験を可能にするために試作した、自動制御・計測可能な中空ねじりせん断試験装置の特徴や制御・計測プログラムについて述べるものである。また、その装置の有用性や供試体にねじり変形を与えながら3つの応力を制御するひずみ制御試験への適用性について検討を行っている。その結果、試作した試験システムは、一般応力空間内において、特に流動変形を伴うような非排水条件下での挙動を体系立てて検討できるという点で意義が大きいことを示した。

**Key Words**: special shear test, torsion, strain controlled test, consolidated undrained test, flow deformation

## 1. まえがき

中空ねじりせん断試験機は、3つの直応力と1つのせん断応力を供試体に独立に載荷できることから、地盤材料の複雑な変形・強度特性を把握する上で有効な試験機の一つといえる。これまでに、実験結果の精度の向上を目的としてこの試験装置の開発や応力状態の計算方法、システムコンプライアンスの補正方法に関する検討が多くの研究者<sup>1)~4)</sup>によりなされ、主応力回転あるいは繰返し載荷時における土の挙動等に対する有益な研究成果が示されている<sup>3)~12)</sup>。また、その装置を用いて単純せん断時の変形モードを再現する自動システム<sup>13),14)</sup>の開発も行われ、特定の境界条件下での土の挙動を明らかにする研究に利用されている。その中で、特に主応力方向に着目した研究<sup>3),4),8),12)</sup>には、排水、非排水試験に関わらず主として応力制御方式の試験が多く行われている。しかしながら、一般応力空間内における土のせん断挙動を体系づけて明らかにするためには、ひずみ制御試験による精度の高い実験が望まれる。本報は、以上のことを踏まえひずみ制御の中空ねじりせん断試験機の自動制御・計測化を試み、その装置の特徴や制御・計測プログラムについて述べるものである。さらに、その装置を用いたせん断試験結果から、装置の有用性や複雑な制御を伴うひずみ制御試験への適用性について検討を行うものである。

## 2. 試験装置の概要と特色

### (1) 装置の概要

図-1は、試作したひずみ制御の中空ねじりせん断試

験機の概要を示したものである。本試験装置の基本的な構造は、これまでに開発されている試験装置と同様、供試体上部から載荷する仕組みになっている。以下、本試験装置の特色を図中の番号と対応させながら示す。

①トルクコントロールシステム [1]は、DC サーボ・モーター [1b] とボールネジ [1d] によるリニアアクチュエーター部と、ラック [1j] と平ギア [1i] による回転変換部から構成される。ラック [1j] と平ギア [1i] のすき間は、偏心形カムフォロア [1h] によって調整し、リニアアクチュエーター部にボールネジ [1d] を使用することによって、トルク力の伝達に対してバックラッシュをなくす工夫をしている。図-2は、ねじり変位を与えた直後のトルク力とねじり変位の時刻歴を示したもので、バックラッシュのないトルク力の伝達が可能なことが認められる。

②ペロフラムシリンダー [2] とスプラインシャフト [16] 間のジョイント [17] に予圧したテーパーローラーベアリングを用いることで回転の摩擦を切りながら軸方向のガタつきを無くしている。

③ねじり変位は上部ペダスタルに取り付けたナイロンギアの回転角をポテンシオメーター [12] を用いて測定している。

④体積変化と内容積変化は、ビューレットの水位変化を差圧計 [13, 14] を用いて計測している。

図-2は、中空円筒形供試体の一要素を示したものである。中空円筒形供試体は、概ね高さ 20 cm、外径 10 cm、内径 6 cm を目標に作成される。供試体への載荷は、トルク力  $T$ 、鉛直荷重  $W$ 、外圧  $P_o$ 、内圧  $P_i$  及び背圧の 5 系統で行われるが、トルク力、鉛直荷重、外圧、内圧は、コンピューター [18a] からの命令を  $D/A$  変換器 [18d] を介してそれぞれ独立に制御される。トルク力の制御はドライバー [1a] を介してモーターの回転速度、回転方向を変化させることで、鉛直荷重、外圧、内圧の制御

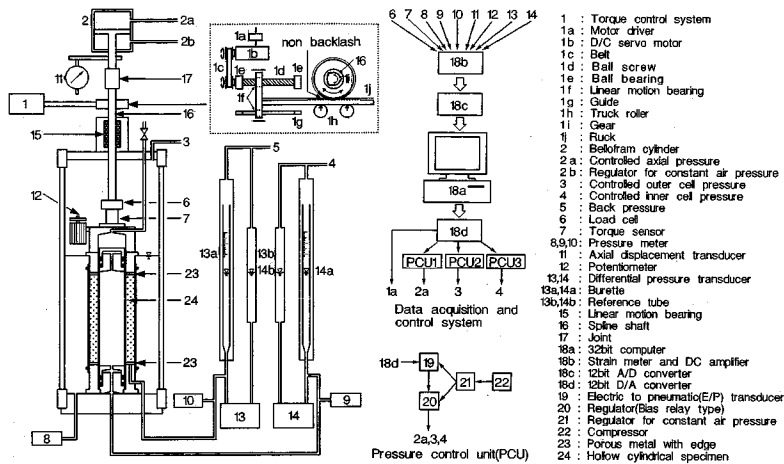
\* 学生会員 工修 山口大学大学院博士後期課程  
(755 山口県宇部市常盤台 2557)

\*\* 山口大学工学部技官

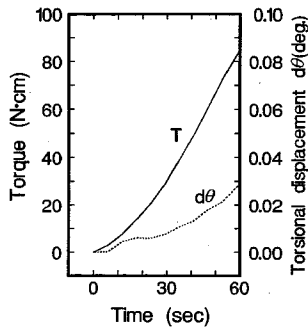
\*\*\* 正員 工博 九州大学工学部助教授

\*\*\*\* 正員 工博 山口大学工学部教授

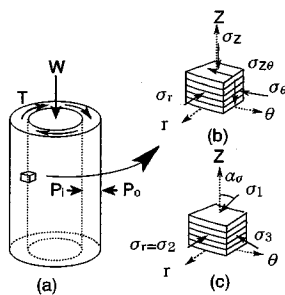
\*\*\*\*\* 正員 工博 山口大学工学部助教授



図一 試作した中空ねじりせん断試験装置の概要



図二 トルク力とねじり変位の時刻歴



図三 供試体要素

表一 測定項目，測定計器と能力

	Transducer	Max.	Min.
Torque	Torque sensor	±2kN*cm	±1N*cm
Axial load	Load cell	±2kN	±1N
Outer pressure	Pressure meter	500kPa	0.5kPa
Inner pressure	Pressure meter	500kPa	0.5kPa
Pore water pressure	Pressure meter	500kPa	0.5kPa
Axial displacement	Displacement transducer	4cm	0.01mm
Torsional displacement	Potentiometer	40°	0.01°
Volume change of specimen	Differential pressure transducer	50cm³	0.02cm³
Volume change of inner cylinder	Differential pressure transducer	150cm³	0.05cm³

は E/P 変換器 [19] を用いて空気圧を最小で 1kPa 変化させることで行われる。計測項目は、トルク力、鉛直荷重、外圧、内圧、間隙水圧、軸変位、ねじり変位、体積変化、内容積変化の 9 つである。鉛直荷重用のロードセルに対するトルクの補正は、その影響が無視できるほど小さいため行っていない。表一はそれぞれの計測項目に対して使用した計器と測定可能な最大・最小値を一覧にしたものである。

(2) 制御・計測プログラム

図一4 はねじり速度一定ひずみ制御方式で行う試験のせん断時のメインプログラムのフロー図を示したものである。以下にフロー図の順にしたがって説明する。

- 1) 応力径路の入力は、平均主応力  $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$ 、中間主応力係数  $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 、鉛直軸と最大主応力方向とのなす角 (図一3 参照)  $\alpha_\sigma = \tan^{-1} [(2\sigma_{2\theta}) / (\sigma_z - \sigma_\theta)] / 2$  によって行われる。ここで、 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  は最大、中間、最小主応力、 $\sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_{2\theta}$  は、鉛直方向、円周方向、ねじりせん断応力である。以下の有効応力表示には、応力記号に “'” を付記する。
- 2) 指定した速度で供試体にねじり変形を与える。
- 3), 4) トルク力を計測し、メンブレン張力を加味した

上で供試体に作用している  $\sigma_{2\theta}$  を求める。

- 5) 4) で得られた  $\sigma_{2\theta}$  と  $p, b, \alpha_\sigma$  及び次式を用いて、内部摩擦角  $\phi$  を求める。

$$\phi = \sin^{-1} \frac{3\sigma_{2\theta}}{3p \sin 2\alpha_\sigma - (2b-1)\sigma_{2\theta}} \dots\dots\dots (1)$$

その  $\phi$  と入力した  $p, b, \alpha_\sigma$  を以下に示す式 (2)~(4) に代入し、鉛直方向応力  $\sigma_z$ 、半径方向応力  $\sigma_r$ 、円周方向応力  $\sigma_\theta$  を求める。

$$\sigma_z = \frac{3p}{(2b-1)\sin\phi + 3} (1 + \sin\phi \cos 2\alpha_\sigma) \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_r = \frac{3p}{(2b-1)\sin\phi + 3} \{1 + (2b-1)\sin\phi\} \dots\dots\dots (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{3p}{(2b-1)\sin\phi + 3} (1 - \sin\phi \cos 2\alpha_\sigma) \dots\dots\dots (4)$$

- 6), 7) メンブレン貫入量及び配管の膨張に関する補正を行った上で現時点での供試体寸法を用いて  $W, P_o, P_i$  を求め、中空円筒形供試体に  $W, P_o, P_i$  を載荷させる。
- 8) 所定の時間間隔で 9 つの計測項目の値を保存する。以上の一連の手順による制御計測を供試体が所定の変形に至るまで行い続ける。

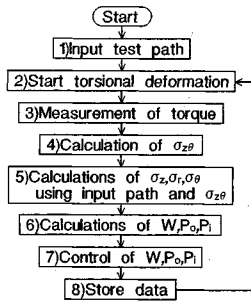


図-4 ひずみ制御試験のフロー

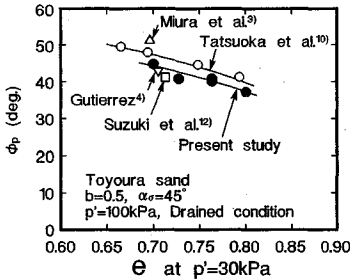


図-5 破壊時の内部摩擦角と間隙比の関係

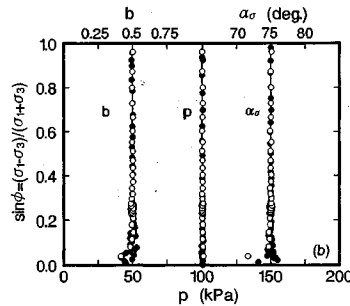
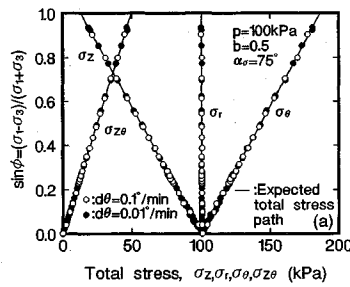


図-6 ひずみ制御試験で得られた応力径路

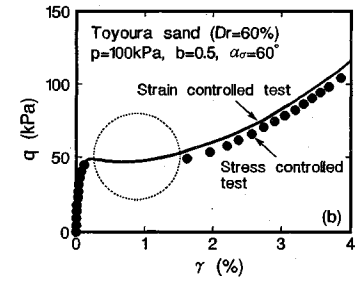
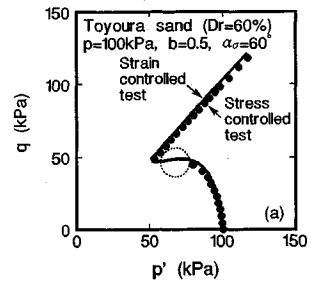


図-7 応力制御試験とひずみ制御試験の比較; (a) p'-q関係, (b) q-gamma関係

供試体に作用する平均的な応力やひずみの計算式やメンブレン貫入量、配管の膨張、メンブレン張力に関する補正方法及び供試体寸法の計算方法は、参考文献15)に詳しく示している。制御間隔は、外力を制御する場合に問題になるオーバーシュートを防ぐため、制御信号を出力して外力の計測値が反応するまでの時間を考慮して、トルク力で概ね1 sec、鉛直荷重で2 sec、外圧と内圧で6 secの十分な時間間隔で制御を行っている。

### 3. 装置の有用性とひずみ制御試験への適用

実験に用いた試料は豊浦砂であり、供試体は空中落下法により作成された。供試体は、30 kPaの負圧で自立させ側圧と置換した後、炭酸ガスの通気、脱気水の通水、200 kPaの背圧の負荷によって飽和させた。その後、平均有効主応力  $p'$  を100 kPaまで応力制御方式により増加させることで等方圧密を行った。

図-5は、排水条件下で  $\sigma'_z = \sigma'_r = \sigma'_\theta = 100$  kPa一定でねじりせん断応力のみを増加させる応力制御せん断試験で得られた破壊時の内部摩擦角  $\phi_p$  と自立時の供試体の間隙比  $e$  の関係を示したものである。 $e$  の増加に伴う  $\phi_p$  の減少の仕方は、Tatsuoka et al. (10)で得られた結果と同様の傾向を示し、また、 $e=0.7$  付近での  $\phi_p$  は他の4機関の結果のはば平均的な値を示している。この結果は、今回試作した試験装置から得られる実験結果が、客観性の高い結果であることを示している。

図-6は、非排水条件下で  $p=100$  kPa一定、 $b=0.5$

一定、 $\alpha_\sigma=75^\circ$ 一定のひずみ制御せん断試験で得られた応力径路を示したものである。用いた供試体は、初期相対密度60%を目標に作成されたものである。図中にはねじり速度  $d\theta=0.1$  (○プロット)、 $0.01$  (●プロット)  $^\circ/\text{min}$ の結果を示している。図(a)は全応力の  $\sigma_z$  と  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_{zp}$  と  $\sin\phi$  の関係を示したものである。図中の実線は、指定した応力パラメーター ( $p$ ,  $b$ ,  $\alpha_\sigma$ ) を式(1)~(4)に代入して得られる応力径路を示したものである。図(b)は  $p$ ,  $b$ ,  $\alpha_\sigma$  と  $\sin\phi$  の関係をそれぞれ示したものである。いずれのねじり速度においても実験時の全応力径路は、 $\sin\phi$  が低いところにおいて若干ばらつきがあるものの、全体的には指定した応力径路をたどっていることがわかる。この結果を見ると、今回試作した試験装置は、ねじり速度が  $0.1\sim 0.01^\circ/\text{min}$  の範囲において指定した全応力径路を満足しつつひずみ制御せん断試験を行うことが可能であると考えられる。

図-7は、非排水条件下で  $p=100$  kPa一定、 $b=0.5$ 一定、 $\alpha_\sigma=60^\circ$ 一定の応力制御及びひずみ制御せん断試験結果を示したものである。ひずみ制御試験で用いたねじり速度及び応力制御試験で用いたねじり変形の収束条件は  $0.1^\circ/\text{min}$  である。実験に用いた供試体は、初期相対密度60%を目標に作成されたものである。図(a)は有効応力径路、図(b)は軸差応力  $q = \{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\}^{0.5} / \sqrt{2}$  と軸差ひずみ  $\gamma = \sqrt{2/3} \{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2\}^{0.5}$  の関係を示し、実線がひずみ制御試験、プロットが応力制御試験の結果を示して

いる。ここで、 $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  はそれぞれ最大, 中間, 最小主ひずみである<sup>15)</sup>。応力制御試験ではひずみ軟化挙動を示す径路(図中の点線で囲った部分)のデータが得られていないものの、ひずみ制御試験ではひずみ軟化挙動の部分も含めて連続的なデータが取得されているのが特徴的である。このような非排水条件下の挙動を一般応力空間において実験的に明らかにできる点は、本試験システムの大きな特色であり、特に流動変形を伴うような非排水条件下での挙動を種々の応力状態を想定して体系立てて検討できる可能性を有しているという点で本試験システムの意義は大きいと考える。

#### 4. ま と め

本報は、自動制御・計測可能な中空ねじりせん断試験装置を試作し、装置の有用性やひずみ制御試験への適用性について検討を行った。得られた主要な知見をまとめると以下ようになる。

- 1) 排水せん断試験結果から求めた破壊時の内部摩擦角と初期間隙比の関係は従来の研究成果と比較的よい対応関係にあり、試験装置は客観性の高い実験結果を与えることが確かめられた。
- 2) 試作した試験装置を用いれば、ねじり速度が0.1~0.01°/minの範囲において指定した全応力径路を満足しつつひずみ制御せん断試験を行うことが可能であることを示した。また、この制御方法を用いた実験結果では非排水せん断時のひずみ軟化挙動を適切に捉えることが可能であることを明確にした。

謝 辞：試験装置の試作を行うにあたり、貴重な助言を頂いた(株)奥村組 日下部伸氏に心から感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) Tatsuoka, F., Iwasaki, T. and Takagi, Y. : Hysteretic damping of sands it's relation to shear modulus, *Soils and Foundations*, Vol.18, No.2, pp.25~40, 1978.
- 2) Hight, D.W., Gens, A. and Symes, M.J. : The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating of principal stress rotation in soils, *Geotechnique*, Vol.33,

No.4, pp.355~383, 1983.

- 3) Miura, K., Miura, S. and Toki, S. : Deformation behavior of anisotropic dense sand under principal stress axis rotation, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.1, pp.36~52, 1986.
- 4) Gutierrez, M. : Behavior of sand during rotation of principal stress directions, D. Eng. thesis University of Tokyo 1989.
- 5) Ishihara, K. and Yasuda, S. : Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation, *Soils and Foundations*, Vol.15, No.1, pp.45~59, 1975.
- 6) Ishihara, K. and Takatsu, H. : Effects of overconsolidation and  $K_0$  conditions on liquefaction characteristics of sands, *Soils and Foundations*, Vol.19, No.4, pp.59~68, 1979.
- 7) Ishihara, K. and Tohata, I. : Sand response in cyclic rotation of principal stress directions as induced wave loads, *Soils and Foundations*, Vol.23, No.4, pp.11~26, 1983.
- 8) Symes, M.J., Gens, A. and Hight, D.W. : Undrained anisotropy and principal stress rotation in saturated sand, *Geotechnique*, Vol.34, No.1, pp.11~27, 1984.
- 9) Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S. and Okamoto, M. : Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength for different sample preparation methods, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.3, pp.23~41, 1986.
- 10) Tatsuoka, F., Sonoda, S., Hara, K., Fukushima, S. and Pradhan, T.B.S. : Failure and deformation of sand in torsional shear, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.4, pp.79~97, 1986.
- 11) 日下部伸・森尾 敏・有本勝二：オンライン地震応答実験による2層系砂地盤の液状化挙動，土質工学会論文報告集，Vol.30, No.3, pp.174~184, 1990.
- 12) 鈴木輝一・菅野高弘・柳澤栄司：初期構造異方性を有する砂の排水時せん断挙動特性，土木学会論文集，No.481/III-25, pp.117~124, 1993.
- 13) Shibuya, S. and Hight, D.W. : On the stress path in simple shear, *Geotechnique*, Vol.37, No.4, pp.511~515, 1987.
- 14) Pradhan, T.B.S., Tatsuoka, F. and Horii, N. : Simple shear testing on sand in a torsional shear apparatus, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.2, pp.95~112, 1988.
- 15) 安福規之・村田秀一・兵動正幸・山本修三・浜田 透：中空ねじりせん断試験機の試作とその適用，地盤と建設，Vol.10, No.1, pp.83~92, 1992.

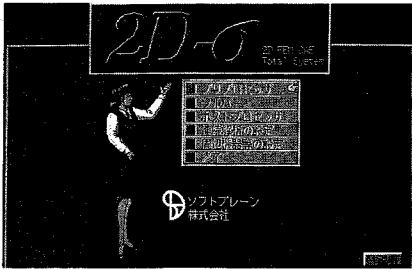
(1994.5.18 受付)

## DEVELOPMENT OF AUTOMATIC HOLLOW CYLINDER TORSIONAL SHEAR APPARATUS AND ITS APPLICATION TO STRAIN CONTROLLED TEST

Yukio NAKATA, Osami YAMAMOTO, Noriyuki YASUFUKU,  
Hidekazu MURATA and Masayuki HYODO

A hollow cylinder torsional shear apparatus together with its automatic control system have been developed in this study. The applicability and reliability of the apparatus are discussed using the results from stress controlled torsional drained tests and strain controlled torsional undrained tests for sand. It is shown that using the equipment softening behaviour in an undrained stress path can be investigated in detail for general stress conditions including consideration of changes of the principal stress direction.

# 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）

ツードイージグマ  
**2D-σ**  
 TOTAL SYSTEM

土木業界で大好評

- ◎道路公団、建設省・通産省の研究機関を始め、ゼネコンやコンサルのユーザーは既に150社以上
- ◎土木学会情報委員会から賞をいただいた(第19回)
- ◎「日経コンストラクション」が特集した(第119号)

詳細資料提供



■任意断面の成分分布曲線

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)

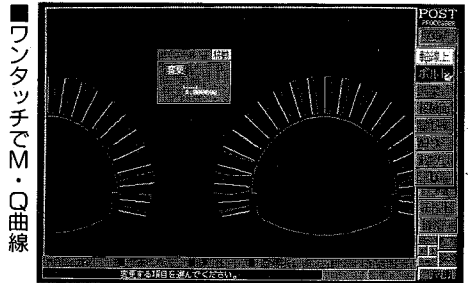
有限要素的な指定は存在しない。システムはCAD上の情報から全てのデータを自動的に生成する。

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)

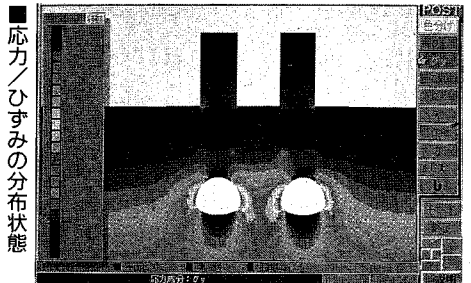
高度なステップ解析機能により、施工中の力学的変化をリアルに再現。(前ステップのデータは自動的に継承されユーザーは図面上で「施工」する感じ)

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。

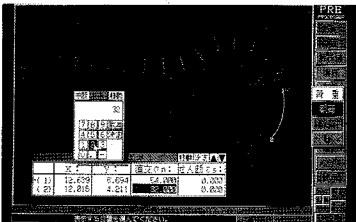


■ワンタッチでM・Q曲線

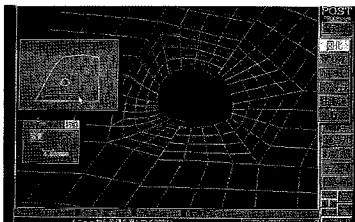


■応力/ひずみの分布状態

■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  ソフトブレイン(株) お問い合わせは 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

# 土と水の連成逆解析プログラム

# 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

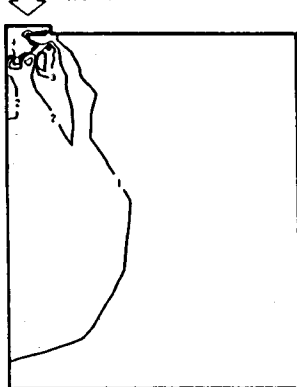
## 出力項目

- 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

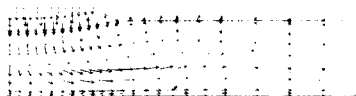
## プログラムの特長

- 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・プラガー、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(Δσ<sub>V</sub>)  
(10日後)



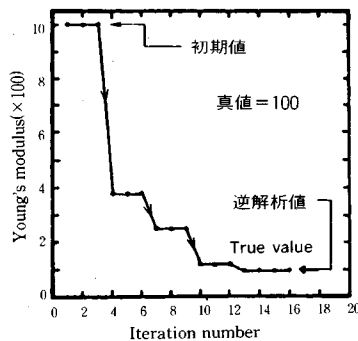
変位ベクトル図(40日後)



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

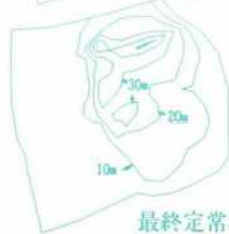
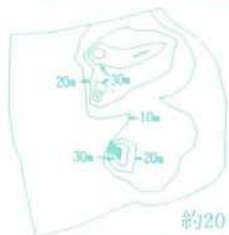
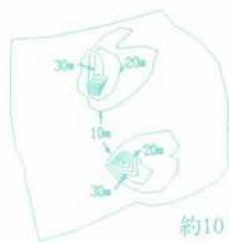
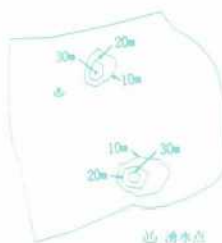
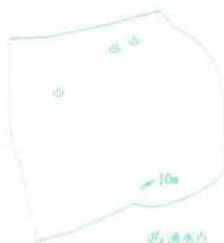
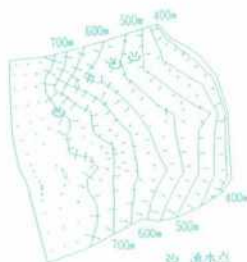
〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3  
(06) 241-4121 営業担当: 岩崎  
(03) 3665-9741 本社窓口: 菅原



## あの地下水解析ソフトがさらに機能充実!

# UNISSF<sub>ユニセフ(V-2)</sub>

スピーディな同定・安価な解析



特長 ○有限要素法による準3次元解析を中心とした地下水の流れのトータルシステムです。

○観測水位と計算水位より、非線形最小二乗法を用いて帯水層定数の同定が可能です。(逆解析手法)

○建設・土木工事(掘削・ディープウェルその他)の解析に対応する多くの機能を備えています。

○メッシュ・ジュネレータにより、モデル(要素分割)作成の手間を軽減できます。

○図化処理プログラムにより、結果の確認が容易に行えます。

適応機種: SUN, NEWS, HP,  
IBM 30XX, FACOM-Mシリーズ 他

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