

投稿論文(和文ノート)

**TECHNICAL
NOTE**

舗装設計式に基づいたニューロパフォーマンスモデル

齋藤 雅道¹・福田 正²

¹ 学生員 東北大学大学院情報科学研究科博士課程前期 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

² フェロー員 工博 東北大学大学院情報科学研究科教授 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

舗装の路面状態を予測するパフォーマンスモデルとして、著者らはニューラルネットワークによるパフォーマンスモデルの構築方法について既に報告した¹⁾。この場合には、ニューラルネットワークの学習のために、比較的大量のアスファルト舗装の供用履歴データを使用する必要があった。本研究においては、舗装設計式 (AASHTO 式) を基にしてモデル化を行うことによって、少ないデータからパフォーマンスモデルを作成する方法を構築した。

Key Words : performance, neural network, AASHTO equation

1. はじめに

アスファルト舗装は、交通供用によって路面が劣化し、修繕が必要とされるようになる。舗装の修繕管理を合理的に行うためには、路面状態を的確に予測する必要がある。現在、路面状態は、路面のわだち、ひび割れ、縦断凹凸等の破損量を基に、供用性指標値によって評価され、この供用性指標値の時系列的な推移を表現するパフォーマンスモデルにより予測されている。

このようなパフォーマンスモデルとして、著者らは、ニューラルネットワークによる舗装のパフォーマンスモデル (以下、本論文においてはニューロモデル) を構築する方法について既に報告した^{1), 2)}。この場合には、ニューラルネットワークの学習のために、比較的大量のアスファルト舗装の供用履歴データを使用する必要があった。しかしながら、このようなデータを大量に収集することは、一般にはきわめて困難なことである。また、このニューロモデルの説明変数は、使用したデータに共通した属性に限定されるなどの問題があった。

ニューロモデルは、学習するデータによって容易に修正できる特徴がある。そこで、本研究においては、アスファルト舗装に関する AASHTO 設計式³⁾を学習させた基本ニューロモデルを構築し、これに利用可能なその地域の舗装の供用履歴データを学習させる方法を検討した。この方法によって、ニューロモデルに AASHTO 設計式における舗装の構造要因を導入し、且つ使用したデータが持つ地域的な特性を付加したパフォーマンスモデルを作成することができる。

2. AASHTO 設計式について

AASHTO 指針の舗装設計式をわが国の舗装要綱の諸量に対応させると、式(1)のように変換することができる⁴⁾。式(1)とわが国のアスファルト舗装の設計式の関係は、同一の設計概念であると見なせることを既に著者らは述べている⁴⁾。そこで、本研究においては、基本ニューロモデルを構築するための学習データとして、AASHTO の舗装設計式³⁾をわが国の舗装設計式における諸量に変換した式(1)⁴⁾を用いることにする。

$$\log(W_5/0.452) = 9.36 \log(T_A/7.26 + 1) - 0.96 + 2.32 \log(CBR) + \frac{\log(\Delta PSI / (4.2 - 1.5))}{0.4 + 1094 / (T_A / 7.26 + 1)^{5.19}} \quad (1)$$

ここで、

W_5 : 累積 5t 換算輪数

CBR : 路床土の設計 CBR (%)

T_A : アスファルト舗装の等値換算厚 (cm)

ΔPSI : 初期供用性指数 PSI_0 と終局供用性指数 PSI_t との差

現在、わが国において実施されている路面性状調査において収集されるデータは、路面の供用性指標として MCI が用いられる場合が多く、また交通条件に関しては大型車交通量が用いられる。そのため、日常での道路管理における利便性を考慮した場合には、容易に入手可能なこれらのデータを使用したモデル式への変換が必要とされる。そのため、式(1)を基本学習のデータとして用いるために、対応する諸量の変換を行う。

PSI と MCI の変換については、次の式(2)を用いる⁴⁾。

$$MCI = 1.6 \cdot PSI + 0.8 \quad (2)$$

5 t 換算輪数と大型車交通量の変換については、建設省の研究⁹⁾による式(3)を用いる(相関係数0.66)。

$$\log w_5 = 0.981 \cdot \log(W) - 0.03 \quad (3)$$

ここで、

w_5 : 5 t 換算輪数 (輪)

W : 大型車交通量 (台)

これらを式(1)に代入して変換すると、式(4)が得られる。

$$0.98 \cdot \log(W) = 9.36 \log(T_A / 7.26 + 1) - 1.34 + 2.32 \log(CBR) + \frac{\log((\Delta MCI - 7.2) / 1.12 + 6.43)}{0.4 + 1094 / (T_A / 7.26 + 1)^{5.19}} \quad (4)$$

3. ニューロパフォーマンスモデル

(1) ニューラルネットワークモデル

本研究においては、舗装のパフォーマンスモデルの予測手法として Perceptron (階層) 型のニューラルネットワークを適用し、学習アルゴリズムとして BP (Back Propagation) 法による学習を行う。

この BP 法のアルゴリズムは以下のとおりである^{10), 7)}。図-1 に示すような n 層からなるネットワークを考える。入力された各ユニットの情報は、結合ウェイトと呼ばれる重みを付けられて次の層に伝わる。最終層で出力された情報は期待される出力(教師信号と呼ぶ)と比較され、両者の差が小さくなるように結合ウェイトは修正される。

すなわち、パターン p を掲示したときの第 k 層 (k = 2, 3, 4, …, n) の各出力関数を次のように表す。

$$o_{pj}^k = f_j^k(i_{pj}^k) \quad (5)$$

$$i_{pj}^k = \sum_{i=1}^{N_{k-1}} w_{i,j}^{k-1,k} o_{pi}^{k-1} + \theta_j^k \quad (6)$$

ここで、

o_{pj}^k : パターン p における第 k 層の j 番目のユニットの出力値

i_{pj}^k : パターン p における第 k 層の j 番目のユニットの入力値

$w_{i,j}^{k-1,k}$: 第 k-1 層の i 番目のユニットと第 k 層の第 j 番目のユニットとの結合ウェイト

f_j^k : 第 k 層の j 番目のユニットの入出力関数

θ_j^k : 第 k 層の j 番目のユニットのしきい値

N_k : 第 k 層のユニットの数

評価関数として、教師信号と出力値の 2 乗差 E_p 及び E を考える。

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_n} (t_{pi}^n - o_{pi}^n)^2 \quad (7)$$

$$E = \sum_p E_p \quad (8)$$

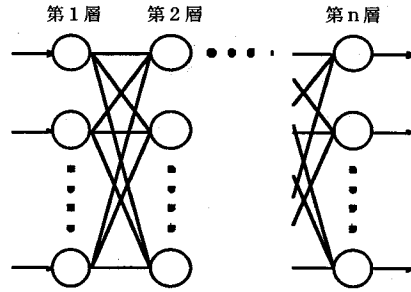


図-1 ニューラルネットワーク

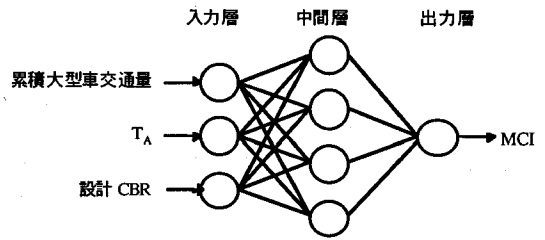


図-2 本研究で用いるニューラルネットワーク

ここで、

t_{pj}^n : パターン p における最終層 n 層のユニット j の教師信号

この評価関数 E_p が最小になるように、教師信号と出力値との差を出力側から入力側へ逆方向に伝搬を繰り返すことで学習を行う。

(2) ニューロモデル

本研究においては、図-2 に示すような入力層 3 ユニット、中間層 4 ユニット、出力層 1 ユニット構造のニューラルネットワークを用いる。また、次に示す計算手順に基づいて学習を行う。

STEP1: PSI から MCI, 5 t 換算輪数から大型車交通量への変換後の式(4)を用いて、基本学習データのための出力を行う。

STEP2: STEP1 で出力されたデータを基に基本のニューラルネットワークの学習を行い、基本ニューロモデルを構築する。

STEP3: STEP2 で作成された基本ニューラルネットワークを、対象地域の実測データを用いて再学習を行い、修正ニューロモデルを作成する。

4. 東北地方の事例

AASHTO 設計式を 30000 回学習させ、基本ニューロモデルを作成した。次にこの基本ニューロモデルを実測データによって再学習を行った。再学習に用

表-1 再学習の対象とした実測データ⁸⁾

| NO | 調査箇所 | 設計 CBR | T _A | MCI/累積大型車交通量 (万台) |
|----|--------|--------|----------------|--|
| 1 | 7号 弘前市 | 10 | 24.2 | 7.7/131, 6.8/176, 5.2/229, 4.7/278, 4.2/328, 5.0/371 |

表-2 検証に使用した実測データ⁸⁾

| NO | 調査箇所 | 設計 CBR | T _A | MCI/累積大型車交通量 (万台) |
|----|----------|--------|----------------|--|
| 1 | 7号 碓ヶ関 | 10.0 | 19.8 | 7.7/119, 7.4/144, 4.2/171, 5.1/191 |
| 2 | 45号 種市町 | 4.0 | 21.0 | 8.1/19, 8.2/27, 8.1/36, 7.8/41, 7/52, 6.6/60, 5.6/71, 5.5/89, 5.4/122, 5.2/140, 5/160, 4.7/181, 4.5/195, 4.1/215 |
| 3 | 4号 紫波町 | 4.0 | 32.0 | 7.8/109, 7.3/192, 6.6/265, 6/349, 5.6/419 |
| 4 | 4号 三戸町 | 5.0 | 29.5 | 7.5/132, 7/193, 6.6/266, 6.1/348, 5.3/430 |
| 5 | 46号 盛岡市 | 10.0 | 26.4 | 8.3/30, 7.9/53, 7.3/83, 7/120, 6.4/173, 6.3/198 |
| 6 | 7号 能代市 | 19.0 | 24.0 | 7.9/111, 7/166, 6.3/211, 5.8/274, 5.3/327 |
| 7 | 13号 十文字町 | 10.0 | 24.0 | 8.1/75, 7.9/114, 7.4/157, 6.3/201, 5.8/232, 5/276, 3.3/326 |
| 8 | 4号 柴田町 | 9.2 | 27.3 | 7.6/118, 7.6/227, 7.5/363, 6.8/417, 6.2/548, 5.9/663, 5.7/788, 5/923, 4.8/1052, 4.2/1167, 3.8/1305 |
| 9 | 6号 亶理町 | 5.0 | 31.6 | 7.8/78, 7.7/146, 7.5/209, 6.3/211 |
| 10 | 4号 白石市 | 3.0 | 33.1 | 8.2/62, 7.7/138, 7.3/221, 6.9/306, 6.5/392, 6.1/451, 5.7/539, 5.3/633 |
| 11 | 6号 いわき市 | 8.0 | 33.1 | 7.0/115, 6.5/175, 6.0/242, 5.4/349 |
| 12 | 13号 山形市 | 10.0 | 28.2 | 8.0/237, 7.6/294, 7.3/358, 7.0/405, 6.0/519, 3.4/563, 3.3/654 |
| 13 | 47号 立川町 | 10.0 | 23.0 | 7.9/102, 7.4/135, 6.9/179, 5.9/206, 5.4/256, 5.3/299, 5.2/342 |
| 14 | 112号 鶴岡市 | 6.0 | 28.0 | 8.6/20, 8.2/34, 8/50, 7.8/69, 7.6/91, 7.5/112, 7.2/136, 7.1/138, 7.1/212 |

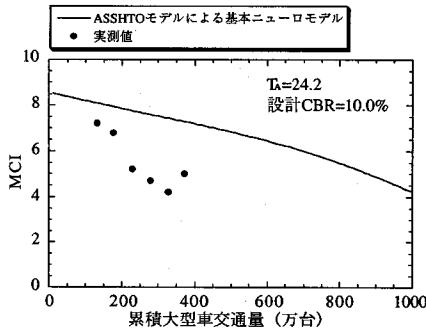


図-3 基本ニューロモデルと実測値

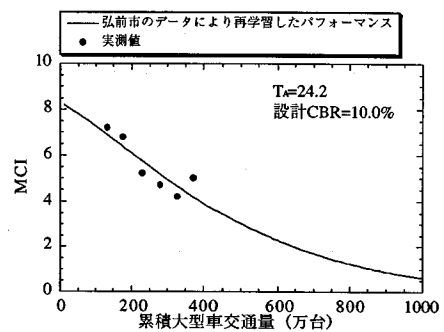


図-4 修正ニューロモデルと実測値

いた実測データは、表-1 に示す弘前市の7個のデータ⁸⁾である。

このように作成されるパフォーマンスモデルの東北地方における適合性の検証には、既往の研究¹⁾で用いた18箇所のデータから設計 CBR が不明な3地点と学習データを除いた14箇所、96個のデータ⁸⁾ (表-2) を用いた。

まず、基本ニューロモデルを出力し、これを表-1 に示す弘前市の実測データを比較すると、図-3 のようになる。このように、AASHTO 設計式から得られた基本ニューロモデルは地域特性が加味されていない

いたために、実測データと合致しない。そこで、実測データをこの基本ニューロモデルを用いて、1000回の再学習を行った。図-4 はその結果である。

次に、この表-1 の実測データによる修正ニューロモデルと東北地方における他の地域の実測データとの適合性を検討した。図-5 は修正ニューロモデルを用いて、実測データを出力値と比較したものである。出力値と実測データの相関係数は0.79であり、実測データの全数の学習によって作成した場合の相関係数(0.86)¹⁾より、若干低い値になった。しかし、実測データの中で特異な傾向を示したNO.1の碓ヶ関のデータを除くと相関係数は0.81である。特に路

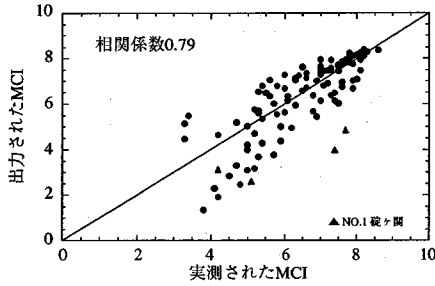


図-5 実測値と出力値との比較

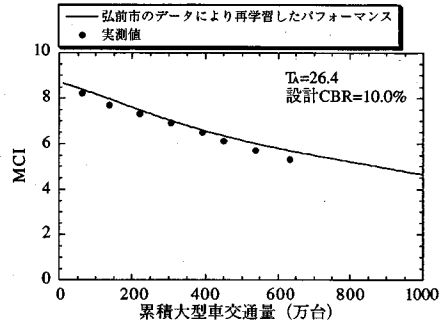


図-8 NO.10 (白石市) の場合

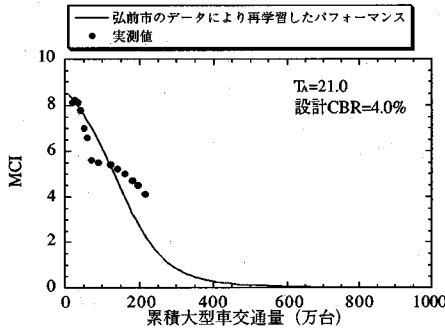


図-6 NO.2 (種市町) の場合

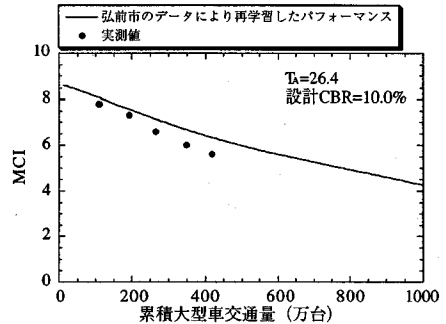


図-9 NO.3 (紫波町) の場合

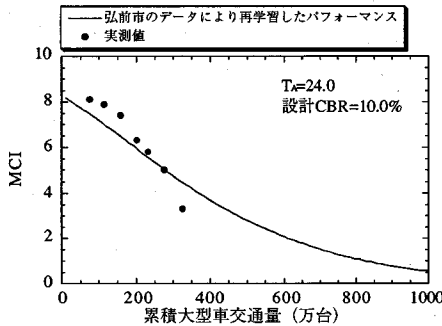


図-7 NO.7 (十文字町) の場合

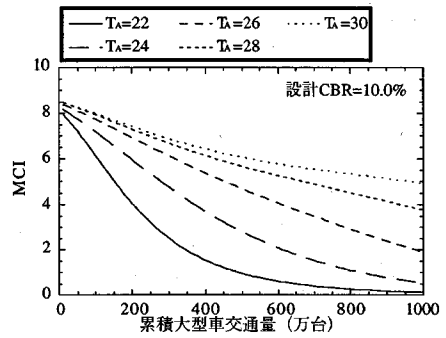


図-10 設計曲線の例 (設計CBR=10%)

面状態が悪いMCIが5以下の領域において、両者のばらつきが大きいですが、通常の舗装管理において必要とされるMCIが5以上の領域では両者は比較的良好に合致していると言える。

図-6～図-9は、累積大型車交通量とMCIとの関係を、修正ニューロモデルによる出力値と実測データによって示したものである。また、図-10は、修正ニューロモデルによって、設計CBRが10%の場合を事例にパフォーマンス曲線を示したものである。このように、実測データを用いて再学習を行うことによって、地域特性を考慮した設計曲線を作成することができる。

5. むすび

ニューロパフォーマンスモデルには優れた長所があることは既に報告した^{1), 2)}。しかしながら、ニューラルネットワークによって舗装のパフォーマンスモデルを作成するためには、比較的大量のアスファルト舗装の供用履歴データを学習する必要があり、このような大量のデータを収集することは、一般にはきわめて困難である。そこで、本研究においては、舗装設計式(AASHTO式)による基本モデルを作成し、これを少量の実測データを用いて再学習することによって汎用性の高いパフォーマンスモデルを構

築する方法を提案した。

本研究の事例研究に、建設省土木研究所ならびに東北地方建設局の貴重な資料を使用させていただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 堀木 賢一, 福田 正:ニューラルネットワークによる舗装のパフォーマンスモデル, 土木学会論文集, NO.496/V-24, pp99-102, 1994.
- 2) 堀木 賢一, 福田 正:ニューロパフォーマンスモデルを用いたプロジェクト型舗装管理システム, 土木学会論文集, NO.520/V-28, pp195-201, 1995.
- 3) AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1986.
- 4) 孔 永健, 福田 正:動的計画法に基づくアスファルト舗装の最適設計, 土木学会論文集, NO.502/V-25, pp167-170, 1994.
- 5) 建設省:車両重量調査結果の解析, 土木研究所資料第1722号, 1981.
- 6) 安居院 猛, 長崎 宏, 高橋 裕樹:ニューラルプログラム, 昭晃堂, 1993.
- 7) 麻生 英樹:ニューラルネットワーク情報処理, 産業図書, 1988.
- 8) 建設省:アスファルト舗装の構造設計に関する検討報告書, 土木研究所資料第3041号, 1991.

(1996.3.22 受付)

NEURO PERFORMANCE MODEL BASED ON PAVEMENT DESIGN EQUATION

Masamichi SAITOH and Tadashi FUKUDA

The authors reported already a method of neural network modeling of pavement performance. In that case, a large quantity of performance data was required for modeling. The new method of neural network modeling based on the pavement design equation (AASHTO equation) requires only a few performance data.

パソコン用、地下水解析トータルシステム

PC/UNISSF Ver. 3.5 for Windows

PC/UNISSF Ver. 3.5 for Windows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と断面2次元飽和／不飽和浸透解析プログラム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、生まれ変わったPC用地下水解析トータルシステムです。

| | |
|---|------------------------|
| 準3次元版 PC/UNISSF(H) ¥980,000 | } セットの場合 ¥1,400,000 |
| 断面2次元版 PC/UNISSF(V) ¥700,000 | |

プログラムの特徴

■プリ処理 [(H)、(V)共通]

- ★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(PC/UNISSF(H)のみで使用)、初期水位データ等の自動発生機能
- ★モデル図を参考しながら、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

[準3次元版PC/UNISSF(H)]

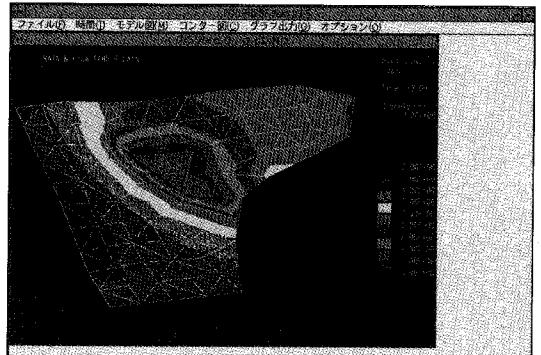
- ★汎用機、EWS版と同一機能(順解析)、同一データフォーマット
- ★約3000～10000節点までのモデルが解析可能
- ★降雨・揚水井・浸出面の取り扱いが可能
- ★水位・流量の経時変化
- ★境界条件の変更、材質の変更
- ★掘削機能・簡易漏水機能
- ★初期定常計算・非定常計算・最終定常計算

[断面2次元版PC/UNISSF(V)]

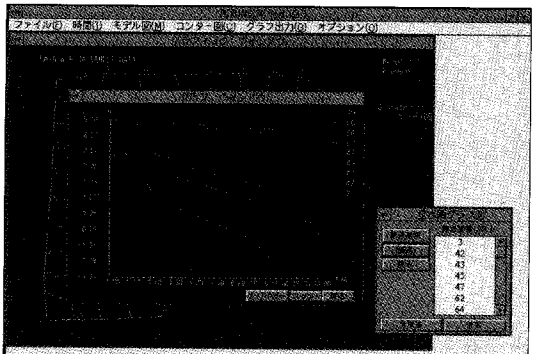
- ★収束状態により Δt を変化
- ★降雨および水位の経時変化に対応可能
- ★鉛直二次元解析だけでなく軸対称解析が可能
- ★自由地下水面を求めることができる
- ★浸出点の位置と浸出量を求めることができる
- ★①定常計算、②非定常計算、③定常計算を行ったのち非定常計算の3通りが可能

■ポスト処理 [(H)、(V)共通]

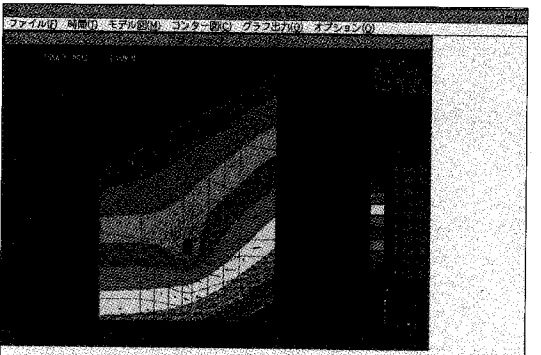
- ★線画に加えて画面塗りつぶし処理が可能
- ★水位の時間変化が簡単にグラフ化可能
- ★マウス入力とメニュー形式による操作性の大幅な向上



PC/UNISSF(H)：全水頭コンター図



PC/UNISSF(H)：水位時間変化グラフ



PC/UNISSF(V)：圧力水頭コンター図と流速ベクトル図

| | |
|------|---------------------|
| 動作環境 | Windows Ver. 3.1 |
| | CPU:80486DX 33MHz以上 |
| | RAM: 8MB以上 |
| | ハードディスク空き容量: 10MB以上 |

* Windowsは米国マイクロソフト社の商標です。
* UNISSF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。

問い合わせ先

株式会社 **CRC** 総合研究所
日本技術開発株式会社

科学システム営業

TEL: 06-241-4

営業第1部/担当



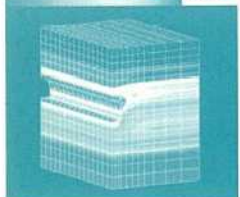
* 8 0 1 5 1 2 1 *

CIVAS; Civil Engineering Analysis Service

CRC総研がお届けする土木・建設分野向けサービス

地盤解析には 3次元地盤FEM解析プログラム for Windows®

Mr.SOIL-3D 95



[Mr.SOIL-3D for Windows 95]
[トンネル掘削による土圧カウンター図]

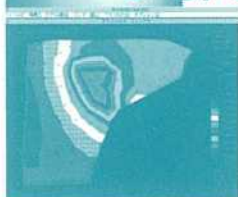
450本を超える販売実績をもつ地盤FEM解析の定番ソフトです。3D解析を可能にしており、FEM解析初心者でも、使い易い3Dプリポストプロセスも完備。もちろん2D解析も可能で非線形弾性解析(電中研法、Duncan-Chang法)、弾塑性解析(歪み軟化、硬化)等の多岐にわたる解析が選択できます。ステップ解析機能を有し、施工順序に従って地盤の挙動を把握できます。

'97.1 リリース

'96.9 リリース

地下水解析には 広域地下水変動解析プログラム for Windows®

PC/UNISSF 95



[UNISSF for Windows 95]
[掘削に伴う水位低下カウンターと高速ベクトル図]

データ作成、結果の表示等のFEM解析に必要な諸作業がすべてマウスで行える強力なプリポスト機能を備えた浸透流解析ソフトです。準3次元解析版と断面2次元解析版があります。工事施工時の周辺地下水影響解析等の定常/非定常解析が可能です。降雨・揚水井・浸出面が取り扱え、水位・流量の経時変化に加え、浸出点の位置、流量を求めることができます。

実力の解析ツール群 続々登場!

連成解析には 応力・浸透・熱連成解析プログラム for Windows®

CONHEAT 95



[CONHEAT for Windows 95]
[地中温排水パイプ周りの温度と流速分布図]

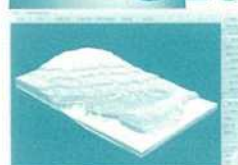
圧密解析から、応力・浸透・熱の連成問題まで解析が可能な2次元FEM解析ソフトです。多段掘削・盛土や降雨条件が扱え、経時観測記録より、変形・透水係数を逆解析で求めることができます。弾性・非線形弾性・弾塑性・弾粘塑性を示す地盤に適用でき、凍結についても適用可能です。プリポスト完備で優れたユーザーインターフェースを実現しています。

'96.11 リリース

'96.11 リリース

地質解析には 3次元地質解析プログラム for Windows®

GEORAMA 95



[GEORAMA for Windows 95]
[3次元地質モデル図]

EWS版で好評を得た3D地質解析ソフトのWindows95対応版です。地形データやボーリングデータ等の情報から地質面を3次元的に推定後、3D地質モデルを構築し、任意断面及び、3Dの各種地質関連図面を出力表示します。人手に頼っていた地質図作成、地質モデルデータベース管理等に大幅なコストダウンをもたらします。計画立案等のプレゼンテーションを強力にサポートします。

未来設計企業

CRC

株式会社CRC総合研究所

東京本社

〒136 東京都江東区南砂2-7-5
科学システム事業部 営業第1部

TEL:03-5634-5790 FAX:03-5634-7337

〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3

西日本事業部

科学システム営業部
TEL:06-241-4730 FAX:06-241-4136

新製品リリース時に発売キャンペーンを実施!
キャンペーン期間中、新規ユーザー向け特別価格
&旧バージョンユーザー向け優待価格を設定。
また、上記プログラムを用いての受託解析サービスも展開。詳しくは左記までお問い合わせください。

- 掲載の社名・製品名・ロゴは各社の各国での商標・登録商標です。
- UNISSFは、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発した製品です。
- 製品の仕様・価格は将来予告なしに変更することがあります。