

動的計画法に基づくアスファルト舗装の最適設計

孔 永健*・福田 正**

アスファルト舗装の設計においては、ライフサイクルコストを考慮する必要がある。そこで、本研究においては、動的計画法に基づいたプロジェクトレベルの舗装管理システムを構築し、これを用いることによって、ライフサイクルコストを考慮したアスファルト舗装の最適設計を決定する方法を提案した。

Key Words: dynamic programming, pavement management system, pavement design, life cycle cost

1. はじめに

道路舗装は、交通供用後に維持、修繕作業を適切に行うことによって、交通に提供すべき路面の管理水準を保つ必要がある。したがって、舗装の設計は新設時の建設費だけでなく、その供用後における維持、修繕の費用をも含めて検討する必要がある。そのようなことから、AASHTO 指針 (1986)¹⁾、アスファルト舗装要綱 (1992)²⁾ において、舗装のライフサイクルコストの概念が導入された。

しかしながら、舗装の新設時の設計とその修繕計画の組み合わせは数多くある。これらの代替案についてその経済性を算出して比較し、最適設計を決定することは大変な労力を必要とする。そこで本研究では、動的計画法 (dynamic programming) を用いたプロジェクトレベルの舗装管理システムを構築することによって、ライフサイクルコストを考慮した、アスファルト舗装の最適設計を決定する方法を検討した。

2. アスファルト舗装のパフォーマンス式

(1) パフォーマンス式の比較

わが国のアスファルト舗装の構造設計には、付録—1 に示すように AASHTO 道路試験の結果及びわが国の舗装データから導かれる次式²⁾を用いている。

$$T_A = \frac{3.84 \cdot N^{0.16}}{CBR^{0.3}} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

N : 累積 5tf 換算輪数

CBR : 路床土の設計 CBR (%)

T_A : 舗装各層を表層及び基層用加熱アスファルト混

合物で設計したときの必要厚さ、等値換算厚 (cm)

本研究は、アスファルト舗装の最適設計の手法を構築することを目的としているので、研究に用いるパフォーマンス式は、式 (1) との整合が必要である。そこで、次の米国の AASHTO 指針¹⁾の構造設計式をパフォーマンス式に適用することを検討した。

$$\begin{aligned} \log_{10}(W_{18}) &= Z_R \cdot S_0 + 9.36 \cdot \log_{10}(SN+1) - 0.2 \\ &- 8.07 + 2.32 \cdot \log_{10}(M_R) \\ &+ \frac{\log_{10}[\Delta PSI / (4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1094 / (SN+1)^{5.19}} \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

ここで

W_{18} : 18kip (=8.2tf) の等価単軸荷重の予測数

Z_R : 信頼性確率に関する係数で、信頼性確率 50% の場合 $Z_R=0$ となる。

S_0 : 交通量とパフォーマンスの予測の標準偏差

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

M_R : 路床土のレジリエント係数 (psi)

SN : 構造厚指数

アスファルト舗装要綱の式 (1) の諸量に対応するため、式 (2) の (SN, M_R, W_{18}) を次の諸関係式を用いて、(T_A, CBR, N) に変換する。

アスファルト混合物の層係数の中間値は 0.35 であること¹⁾及び cm と in の変換により

$$SN = T_A \cdot 0.35 / 2.54 = T_A / 7.26 \dots\dots\dots(3)-1$$

路床土について、変形係数 (kgf/cm^2) $\approx 100 \cdot CBR$ の関係及び kgf/cm^2 と psi の変換により

$$M_R = 100 \cdot CBR / 0.0703 = 1422 \cdot CBR \dots\dots(3)-2$$

交通荷重に関しては 4 乗則²⁾の関係を用いることにより

$$N = (4.1/5)^4 \cdot W_{18} = 0.452 \cdot W_{18} \dots\dots\dots(3)-3$$

これらを式 (2) に代入し、信頼性確率 50% とした場合、 $Z_R=0$ であることから、式 (2) は次のようになる。

$$\log_{10}(N/0.452) = 9.36 \cdot \log_{10}(T_A/7.26 + 1)$$

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

**正会員 工博 東北大学大学院情報科学研究科教授

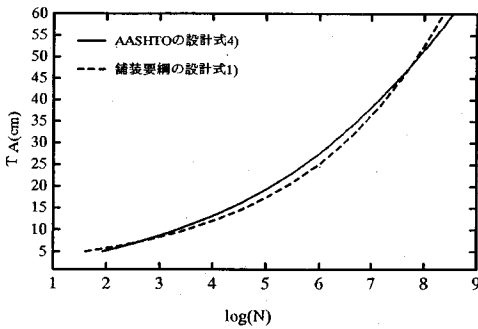


図-1 式(4)と式(1)の比較

$$-0.96 + 2.32 \cdot \log_{10}(CBR) + \frac{\log_{10}[\Delta PSI / (4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1094 / (T_A / 7.26 + 1)^{5.19}} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、式(1)と式(4)との整合性について検討する。いま式(1)を終局供用性指数 $PSI=2.5$ とした場合のパフォーマンス式と見なして⁹⁾、式(4)と比較すると図-1のようになり、両者はほぼ一致する。このことから、基本的に両者は同一の設計概念と言えることを示している。

(2) 修繕後のパフォーマンス

修繕によって厚さ d_0 のアスファルト混合物によるオーバーレイを施工した後のパフォーマンスについては、式(4)の T_A の代わりに次式の T_{AR} を用いることによって表すものとする。

$$T_{AR} = d_0 + T_{A0} = d_0 + \alpha \cdot T_A \dots\dots\dots(5)$$

ここで、

- T_{A0} : 修繕時における既設舗装の残存等値換算厚
- α : その舗装の新設時の等値換算厚に対する有効度を示し、ここでは付録-2の検討により $\alpha=0.80$ とした。

3. 動的計画法による最適設計

(1) 修繕計画の最適化

時間的要素を含む多段階意志決定の最適化手法として動的計画法⁹⁾がある。Feighan (1987年)⁹⁾、水野 (1989年)⁹⁾らは舗装の最適修繕計画決定に動的計画法を適用した研究を行っている。しかしながら、これらの研究による舗装管理システムにおいては、新設時の舗装構造が考慮されていない。そこで、本研究においては式(4)を適用し、初期舗装構造を考慮した最適修繕計画を検討できるようにした。

舗装の状態は供用性指数 PSI によって表される。動的計画法の最適性原理⁹⁾に基づいて、舗装の最適修繕計画を定式化すると、次のようになる。

$$f_n[P(t)] = \min \begin{cases} R + C [P(0)] + f_{n+1} [P(1)], \\ C [P(t)] + f_{n+1} [P(t+1)] \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

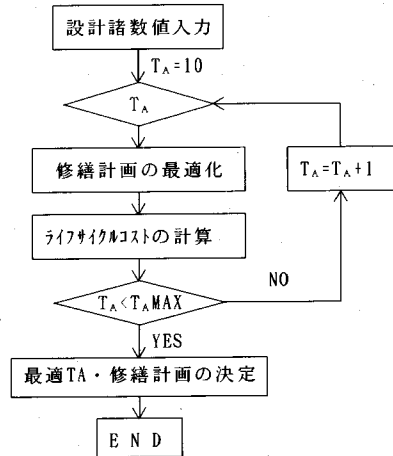


図-2 フローチャート

ここで、

- t : 舗装の供用年数
- $P(t)$: 供用年数 t 年後の供用性指数 PSI
- $f_n [P(t)]$: 状態 $P(t)$ の舗装を最適に管理するのに必要な n 年目以降の費用
- R : 修繕を行った場合の費用 (オーバーレイ費用)
- $C [P(t)]$: 舗装が状態 $P(t)$ の場合の利用者費用と管理者費用の合計

(2) 最適設計の手順

設定された解析期間に対して、ライフサイクルコストを最小とする初期舗装構造と修繕計画を決定する。ライフサイクルコストとして初期建設費、維持費、修繕費、利用者費用を対象とし、現在価値法に基づいた解析を行う。

図-2に本システムのフローチャートを示す。設計諸数値として解析の対象とする T_A の範囲を入力する。 T_A に関して修繕計画の最適化を行い、それぞれの T_A に対してライフサイクルコストを計算する。これを設計で対象とする最大 T_A まで繰り返し計算する。次に、 T_A に関してライフサイクルコストを最小とする T_A を決定する。同時にこの T_A に対応する修繕計画が決定される。

4. 解析事例

(1) 設計諸数値

a) 初期建設費と T_A との関係

初期設計の建設費用と T_A の関係は付録-2の検討により次式を用いた。

$$IC = 356.64 \cdot T_A - 382.20 \dots\dots\dots(7)$$

ここで

IC : 初期建設費用 (円/ m^2)

b) 管理者費用 (円/ $m^2 \cdot$ 年) と利用者費用 (円/

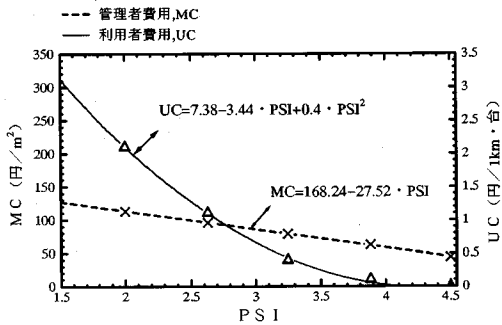


図-3 管理者費用と利用者費用

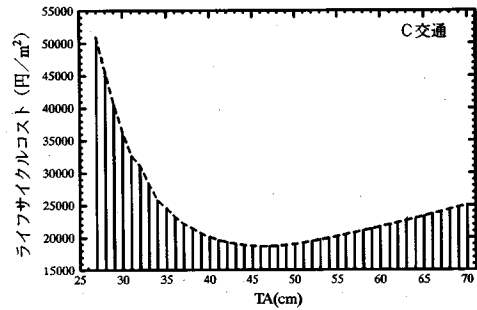


図-4 T_A とライフサイクルコストの関係

km・台)

管理者費用は舗装の状態と管理費用の関係に関する建設省の研究⁷⁾により、また、利用者費用は車両の走行費用に関する安崎らの研究⁸⁾により、図-3に示される計算式を用いる。なお、 PSI と MC は、次の近似式で変換した。

$$MC \approx 1.6 \cdot PSI + 0.8 \dots\dots\dots (8)$$

c) その他の入力数値

- 解析期間：30年，道路延長：1km，車線数：2
- 車線の幅員：3.5m，路床土の設計 CBR (%)：3
- 交通量：C交通を対象に，全交通量は8000台/1日・1車線，1方向，またその5tf輪荷重換算輪数は70000回/年とする²⁾
- 交通増加率：0
- 舗装の管理水準： $PSI=2.5$ を修繕(オーバーレイ)実施の管理水準とした。
- 初期供用性指数： $PSI=4.5$
- 修繕後の供用性指数： $PSI=4.5$
- 割引率：公共土木計画における割引率であって，金利及び修繕計画の不確実性を考慮して8%とした⁹⁾。
- 解析で対象とする T_A の範囲： $T_A=10\sim70$
- 修繕費用(オーバーレイ厚さ $d_0=5cm$)：4000円/ m^2

(2) 解析結果

a) 最適 T_A

舗装構造の初期 T_A とそのライフサイクルコストとの関係は図-4のようになる。ライフサイクルコストは T_A の増加に従って急激に減少し、ある範囲の T_A に対してばば一定値に達し、その後は徐々に増加する。ライフサイクルコストのわずかな変動は解析の精度上意味がないので、ここでは変動範囲千円内における最小 T_A 値を最適 $T_A=42$ として決定した。なお、通常の設計の場合である舗装要綱の式(1)によれば、 $T_A=35$ である。

b) ライフサイクルコストの年間推移

C交通において、PMSによる最適 $T_A=42$ とアスファルト舗装要綱による $T_A=35$ を用いた場合の30年間のライフサイクルコストの推移を図-5で示した。解析期間の30年間で両者は5000円/ m^2 の差が生じることが

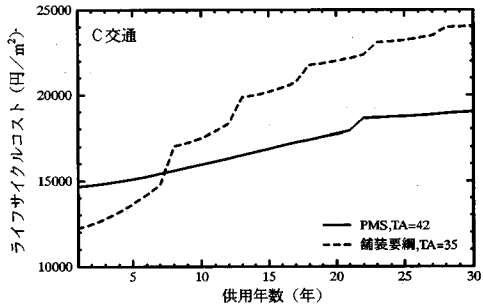


図-5 供用年数に伴うライフサイクルコストの変化

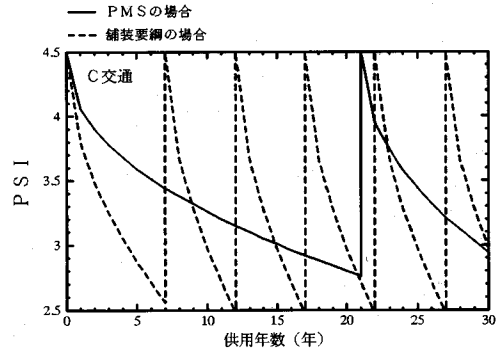


図-6 供用年数に伴うPSIの変化

わかる。

c) 最適修繕時期

図-6にはPMSによる最適 $T_A=42$ の場合と舗装要綱による $T_A=35$ の場合の供用性指数 PSI の遷移過程の解析結果を示した。ここで、供用性指数 PSI の上昇はオーバーレイ施工を意味する。

5. むすび

舗装，特にアスファルト舗装は、交通供用後において日常的な路面の維持作業と、舗装の構造的劣化を回復させるために修繕作業を必要としている。そしてこれらの作業に伴う費用は、アスファルト舗装の初期設計に大きく係わっている。したがって、アスファルト舗装の構造は、交通供用後の維持、修繕費用及び利用者費用を含めたライフサイクルコストを最小とする条件で設計する必

要がある。

本研究においては、アスファルト舗装のパフォーマンスに AASHTO モデルを適用し、動的計画法によってアスファルト舗装に関するプロジェクトレベルの舗装管理システムを構築した。そして、このシステムを用いてライフサイクルコストを最小とするアスファルト舗装の最適設計を試みた。その結果、ライフサイクルコストを考慮した場合の舗装構造は、通常の設計で決定された舗装の等価換算厚では不足する事が判明した。なお、本研究においては、アスファルト表層の塑性流動によるわだちなど、アスファルト材料に起因する PSI の低下が考慮されていない。これは今後の研究課題と考えている。

本研究のアスファルト舗装の建設費積算などに際しては、日本道路(株)東北支店橋本賢治氏にご協力を頂いたことに感謝致します。

付録—1 式(1)の誘導

竹下は AASHTO 道路試験及びわが国の舗装のデータから次式を提案した⁹⁾。

$$SN=2.2 \cdot P^{0.64} / CBR^{0.3} \dots\dots\dots (*1)$$

これは P を 100 万回載荷した場合に PSI=2.5 になるような舗装の SN と P の関係を示している。

一方、4 乗則により P と N には次の関係がある。

$$P=5 \cdot (N/10^6)^{1/4} \dots\dots\dots (*2)$$

SN と T_A については次の関係を用いる。

$$SN=T_A \cdot 0.44 / 2.54 = T_A / 5.68 \dots\dots\dots (*3)$$

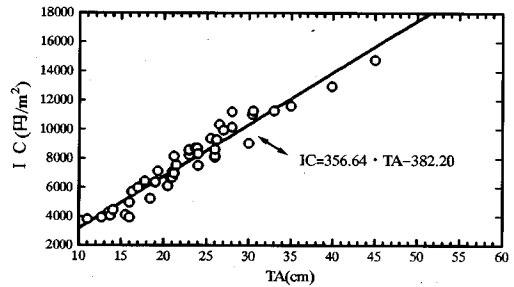
式(*1)、式(*2)及び式(*3)より、本文の式(1)が得られる。

$$T_A = 3.84 \cdot N^{0.16} / CBR^{0.3} \dots\dots\dots (1)$$

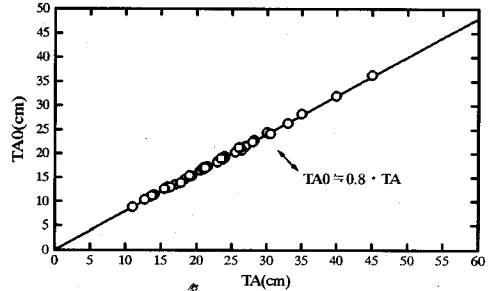
付録—2 T_Aと初期建設費の関係及び係数 α について

実際に施工された 50 箇所のアスファルト舗装の設計例を選び、これを「建設省土木工事積算基準」¹⁰⁾により初期建設費を積算した。施工面積は 5000m² を対象とした。その結果、舗装等価換算厚 T_A と初期建設費 IC との関係は付図—1 のようになる。

次に、これらの舗装の修繕時の T_A をアスファルト舗装要綱の手法 (10—4—4 参照) を用いて T_{A0} を計算し、



付図—1 初期建設費 IC と TA



付図—2 TA₀と TA の関係

付図—2 の関係を得た。

参考文献

- 1) AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1986.
- 2) 日本道路協会, アスファルト舗装要綱, 1992年11月.
- 3) 竹下春見: アスファルト舗装の構造設計に関する考え方, 舗装, Vol. 1, No.2, 1966.
- 4) 鍋島一郎: 動的計画法, 森北出版, 1973. 7.
- 5) Feighan, K. J., Shahin, M. Y., and Sinha, K. C.: A Dynamic Programming Approach to Optimization for Pavement Management Systems, Proceedings, SNACMP, 1987.
- 6) 水野直樹・福井康裕・松井邦人・井上武美: アスファルト舗装を対象とした維持管理支援システムの開発, 土木学会論文集, 第 409 号 VI-11, 1989. 9.
- 7) 建設省: 舗装の管理水準と維持修繕工法に関する総合的研究, 第 41 回建設省技術研究会報告, 1987.
- 8) 安崎裕・片倉弘美・伊佐真秋: 舗装の供用性と車両走行費用に関する検討, 舗装, Vol. 25, No.3, 1990.
- 9) 長尾義三: 土木計画序論, 共立出版, 1981. 1.
- 10) 土木工事積算研究会: 建設省土木積算基準, 1993. 4.

(1994.3.11 受付)

OPTIMAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENT BASED ON DYNAMIC PROGRAMMING

Yong-Jian KONG and Tadashi FUKUDA

It is necessary to analyze the life cycle cost in the case of designing asphalt pavement. In this paper, we developed a project level pavement management system based on dynamic programming and propose the optimal design method of asphalt pavement in consideration of the life cycle cost by using this system.

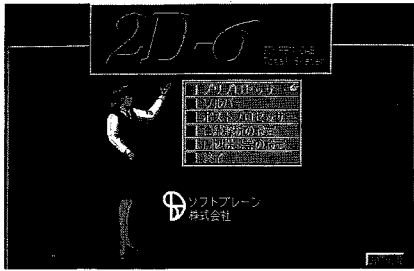
パソコン用土木構造解析CAEシステム

ツーディーシグマ

2D-σ

TOTAL SYSTEM

土木業界で大好評



■システムマネージャー（動画、音声）

「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。

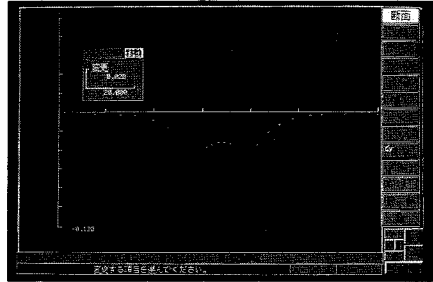
土木解析に必要な機能のほとんどに対応。（非線形、弾塑性、ジョイント、掘削、盛土、支保、熱応力など）

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）

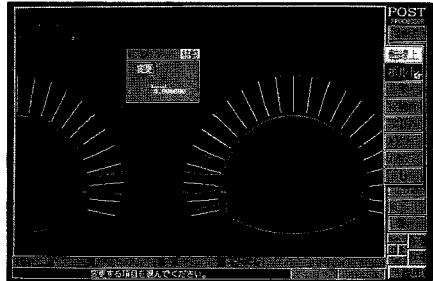
EWS並みの大規模解析能力と高速演算。（3000節点、拡張可、1400節点の演算はCPU486DXで約2分間）

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。

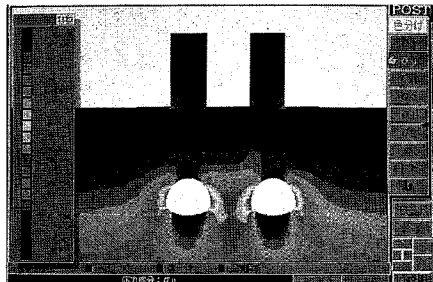
任意断面の成分分布曲線



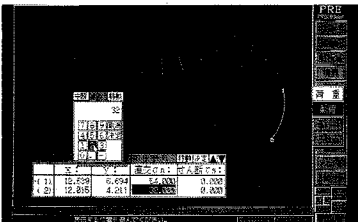
ワンタッチでM・Q曲線



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



ソフトブレーン(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

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

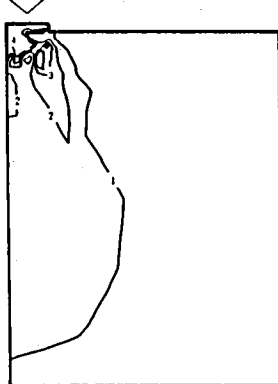
出力項目

- 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

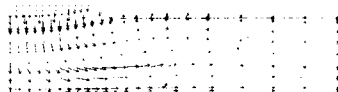
プログラムの特長

- 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)

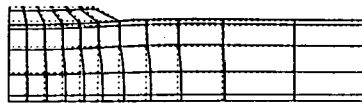
(荷重)



応力増分コンター($\Delta\sigma V$)
(10日後)



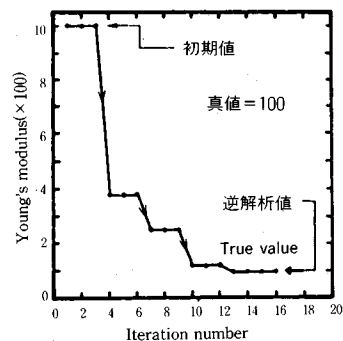
変位ベクトル図(40日後)



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

UDEC 3DEC

個別要素法(DEM)プログラム

個別要素法(離散要素法)は、1977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

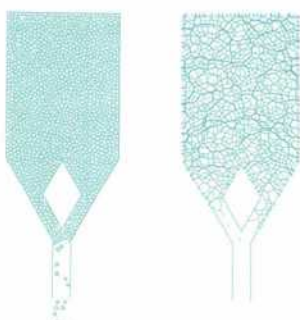
UDEC・3DEC・FLAC

◆ 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。

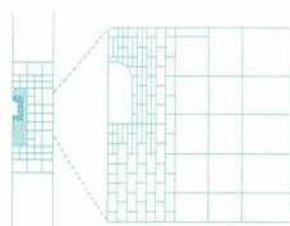
◆ 3DEC・FLACはロードモジュールで提供します。



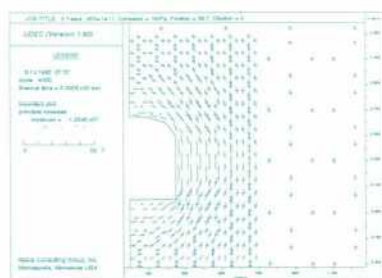
ホッパー内粒状体挙動解析



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



有限差分法(FDM)プログラム

FLAC

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-大歪 非線形、動的-静動挙動を始めとし、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

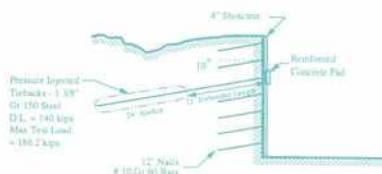
■ ダイナミック解析モデル

■ 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

