

橋桁の連成フラッターに対する T. M. D. の制振効果について

A STUDY ON THE EFFECTIVENESS OF T. M. D. TO
SUPPRESS A COUPLED FLUTTER OF BRIDGE DECK

延藤 遵*・藤野陽三**・伊藤 学***

By Jun NOBUTO, Yozo FUJINO and Manabu ITO

This technical note presents an analytical and experimental study on the effectiveness of tuned mass damper (TMD) to suppress a wind-induced coupled flutter of bridge deck. In the analysis, Theodorsen's aerodynamic forces are assumed to act on a bridge deck model. Parametric calculations indicate that critical velocity of the coupled flutter can be increased appreciably by TMD. Wind tunnel test is also performed and confirmed the effectiveness of TMD.

Keywords: TMD, coupled flutter, critical velocity, wind tunnel experiment, theory

1. ま え が き

近年、主桁として流線形箱桁を用いる例が多くなってきた。この形式の箱桁は、水平風のもとで発生が予想される連成フラッターで動的な耐風安定性が支配される場合が多い。

連成フラッターの励振力は一般に非常に強いことからその発振風速を向上させるにあたっては、空気力学的な対策方法を第一に考える必要がある。しかしながら、超長径間吊橋においては固有振動数が大変低く、実用的な空気力学的対策のみでは、十分な効果が得られない場合もあり得る。そのような場合には、構造力学的対策を併用することも1つの方法と考えられる。ここでは、構造力学的対策としてTMD (tuned mass damper) に着目してみる。元来、連成フラッターは非定常空気力中に含まれる連成項がもたらす負減衰効果によるものであるため、単に減衰を高めることにより振動を抑えるTMDでは有意な効果は得られないのではないかと考えられている面も強い。ここでは、数値解析と風洞実験を通して

連成フラッターの発振風速に対するTMDの有効性を考察することにする。

2. 数値解析結果

たわみ、ねじれの2自由度を有する流線形箱桁断面に作用する非定常空気力としてTheodorsenの空気力¹⁾を用いると、Fig. 1に示すTMDを設置した運動方程式は式(1)のようになる。TMD²⁾⁻⁵⁾としてはFig. 1に示してあるように左右に同質量のマス、ばねとダッシュポットを介して桁に取り付けたものを考える。このタイプのTMDは曲げ方向、ねじれ方向ともに効果をもつと考えられるからである。ここでは、橋軸方向のモードは考えないこととする。またTMDは左右同じとする。

$$[M][\ddot{Y}] + [C][\dot{Y}] + [K][Y] = [0] \dots \dots \dots (1)$$

[M]: 質量マトリックス, [C]: 空力減衰マトリックス, [K]: 空力減衰を含めた剛性マトリックス, [Y]: 変位ベクトル

また、具体的なマトリックスおよびベクトルはそれぞれ次式で求められる。

$$[Y] = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \phi_1 \end{bmatrix} \quad [M] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 \\ M_2 & M_2 & 0 & M_2 XB \\ M_2 & 0 & M_2 & M_2 XB \\ 0 & 0 & 0 & I_1 \end{bmatrix}$$

* 学生会員 東京大学大学院土木工学専攻修士課程
(〒113 文京区本郷7-3-1)

** 正会員 Ph.D. 東京大学助教授 工学部総合試験所

*** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

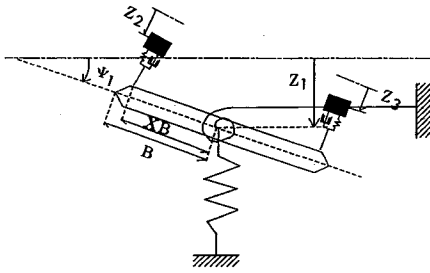


Fig. 1 Bridge model with TMD.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{z1} + 2\pi\rho UBF & -C_{z2} & -C_{z2} & & & \\ 0 & C_{z2} & 0 & & & \\ 0 & 0 & C_{z2} & & & \\ -\pi\rho UB^2 F & 0 & 0 & & & \\ & & & \pi\rho B^2 U(1+F+2G/S) & & \\ & & & 0 & & \\ & & & 0 & & \\ & & & & & C_{\psi 1} + \pi\rho B^3 U/2(1-F-2G/S) \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{z1} & K_{z2} & K_{z2} & \pi\rho BU^2(2F-SG) \\ 0 & K_{z2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{z2} & 0 \\ 0 & XBK_{z2} & XBK_{z2} & K_{\psi 1} - \pi\rho B^2 U^2(F-SG/2) \end{bmatrix}$$

ここに、 M_1 、 I_1 はそれぞれ主構造系の質量と極慣性モーメント、 K_z 、 K_ψ はそれぞれ主構造系の鉛直方向とねじれ方向のばね定数、 C_z 、 C_ψ はそれぞれ主構造系の鉛直方向とねじれ方向の減衰係数であり、添字では1は主桁を、2、3はそれぞれ風上側、風下側のTMDであることを表わす。また、 A は桁の中心からTMDまでの距離、 B は半弦長、 X はTMDの取付け位置を表わす無次元量($X=A/B$)、 ρ は空気密度、 U は風速、 F 、 G はそれぞれTheodorsen関数の実数部と虚数部で、変数 $S=\omega B/U$ の関数である。

連成フラッターの発振風速 U_F はFossの方法²⁾を利用して、複素固有値解析に繰り返し計算を施して求める。最初に U と ω を仮定し、Fossの方法を利用して得られた複素固有値の虚部が仮定した円振動数 ω と等しくなるまで繰り返し計算を行う。次に、 U について、複素固有値の実部(減衰に対応)がゼロになるまで繰り返し計算を行い、その際の U が発振風速 U_F である。

3. 対象とした吊橋

対象とした吊橋は中央支間長1980mの超長大吊橋である。解析に用いた諸量をTable 1に示す。ただし、モード形は考慮しない。この吊橋に対して、TMDを設置する前の連成フラッターの発振風速および発振モードは以

Table 1 Properties of the bridge model per 1 m.

mass M_1 (ts^2/m^2)	3.96	
inertia moment I_1 (tms^2/m)	878.5	
half width B (m)	46.0	
air density ρ (ts^2/m^4)	1.25×10^{-4}	
natural circular frequency	bending ω_z (rad/s)	0.355
	torsional ω_ψ (rad/s)	1.268
ratio of freq. ω_ψ/ω_z	3.572	
damping (log-dec.)	bending δ_z	0.02
	torsional δ_ψ	0.02
spring coeff.	bending K_{z1} (t/m^2)	0.499
	torsional $K_{\psi 1}$ (t)	1412.4

下のようなになる。

発振風速： $U_F=78.4$ m/s ($\omega_F=0.835$ rad/s)

発振モード： $\begin{bmatrix} Z_1 \\ \psi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0 \text{ m} & 0^\circ \\ 0.0030 \text{ rad} & 21.90^\circ \end{bmatrix}$

ただし、 21.90° は位相差の意味である。

4. 数値解析結果

2つのTMDの合計質量と、吊橋の桁とケーブルを合わせた総質量の比を1%に設定し、連成フラッターの発振風速に及ぼすTMDの効果を検討した。 $X=1.0$ (TMDを桁の両端に設置)なる条件のもとで、TMDの固有円振動数と対数減衰率をそれぞれ変化させた場合の結果をFig. 2に示す。

Fig. 2より、TMDの最適固有円振動数は、対数減衰率の大きさによって若干変化しているが、常に吊橋の鉛直方向とねじれ方向の固有円振動数の平均値である0.8115 rad/sよりもやや小さい。 U_F は $\delta_z=0.50$ のとき85.5 m/sに達するが、これ以上、以下の対数減衰率を与えると、発振風速は逆に低下する傾向を示し、ピークをもつ。以下にそのケースを示す。

最高値 発振風速： $U_F=85.52$ m/s ($\omega_F=0.768$ rad/s)
TMDのTUNING

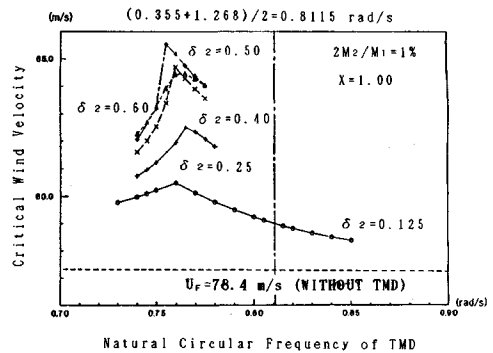


Fig. 2 Relations between critical wind velocity and natural circular frequency of TMD.

固有振動数 $\omega_2=0.755 \text{ rad/s}$ 対数減衰率 $\delta_2=0.50$

$$\text{発振モード: } \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.11 \text{ m} & 110.96^\circ \\ 0.42 \text{ m} & 31.19^\circ \\ 1.0 \text{ m} & 0.0^\circ \\ 0.0023 \text{ rad} & 82.93^\circ \end{bmatrix}$$

以上のように TMD の固有円振動数をフラッターの発振振動数に一致させてやれば、かなりの効果が得られることがわかる。また、発振円振動数は一般的に TMD を付けることにより減少する傾向がある。発振モードより、TMD は風下側の方が激しく振動し桁の振動を抑えていることがわかる。これについては以下の解析結果によりさらに明らかになる。これまでは左右に同じ TMD を設置していたが、今回は風上側と風下側に設置する TMD の諸量を変えどちらの TMD を同調させるほうが効果的かを検討する。ここでは、2つの TMD の固有円振動数の平均を、吊橋の曲げとねじれの振動数の平均値である 0.8115 rad/s とし、対数減衰率は2つとも 0.60 としたモデルのうち、かなりよく同調している2つのケースの結果を Table 2 に示す。

Table 2 の case-1 と case-2 を比較すると、発振風速 $U_F=86.65 \text{ m/s}$ となっている case-1 においては発振円振動数 $\omega_F=0.731 \text{ rad/s}$ であり、これは風下側の TMD の固有円振動数と同調している場合であり、case-2 は風上側の TMD と連成フラッターが同調している場合であるが、このときは発振風速は $U_F=79.7 \text{ m/s}$ となり有意な効果は得られておらず、風上側の TMD は制振に対しあまり寄与していないことがわかる。次に、TMD の固有円振動数と対数減衰率がそれぞれ 0.760 rad/s 、 0.60 なる条件のもとで、TMD の取付け位置 X を変化した結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、TMD の取付け位置は少なくとも桁の両端より外側としなければ十分な効果は得られないことがわかる。このケースでは、 $X=1.25$ で発振風速は最高となり、また、そのときの諸量を示すと以下のようになる。

発振風速: $U_F=85.1 \text{ m/s}$

発振円振動数: $\omega_F=0.768 \text{ rad/s}$

Table 2 A comparison between two cases.

		case-1	case-2
natural circular freq. of TMD	windward	0.892 (rad/s)	0.772 (rad/s)
	leeward	0.732 (rad/s)	0.852 (rad/s)
critical wind velocity		86.65 (m/s)	79.67 (m/s)
critical circular freq.		0.731 (rad/s)	0.788 (rad/s)
mode		absolute phase value	absolute phase value
	Z_1	0.114 97.92°	0.185 45.30°
	Z_2	0.143 94.14°	0.410 -59.70°
	Z_3	1.0 0.0°	1.0 0.0°
	ψ_1	0.0021 69.74°	0.0053 21.59°

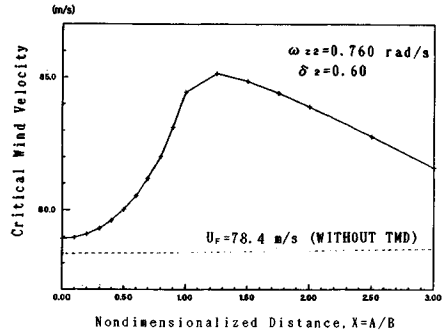


Fig. 3 Relations between critical wind velocity and the distance of TMD from the center of bridge deck ($X=A/B$).

$$\text{発振モード: } \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.13 \text{ m} & 85.17^\circ \\ 0.36 \text{ m} & 38.62^\circ \\ 1.0 \text{ m} & 0.0^\circ \\ 0.0026 \text{ rad} & 57.80^\circ \end{bmatrix}$$

5. 風洞実験の方法およびその結果

以上のような数値解析結果より、TMD が連成フラッターの発振風速の上昇に対して有意な効果をもつことがわかった。そこで、次にばね支持模型風洞実験を実施して、TMD による効果を検証することにする。吊橋模型 (Model-I) の諸元および断面図をそれぞれ、Table 3, Fig. 4 に示す。TMD としては、板ばねの先にマスを取り付けることにより TMD の質量と固有円振動数 ω_2 を合わせ、構造減衰については板ばねのまわりに絶縁テープを巻くことにより調整した。TMD 1 個の諸量を、Table 4 に示す。TMD は二次元部分模型の支持棒の両

Table 3 Properties of the bridge model (Model-I) (length: 1.05 m).

mass M_1 ($\text{kg s}^2/\text{m}^2$)	4.082*10 ⁻¹	
inertia moment I_1 ($\text{kg m s}^2/\text{m}$)	1.802*10 ⁻²	
half width B (m)	0.261	
natural circular freq.	bending ω_{z1} (rad/s)	9.817
	torsional $\omega_{\psi 1}$ (rad/s)	18.41
damping (log -dec.)	bending δ_{z1}	0.005
	torsional $\delta_{\psi 1}$	0.005

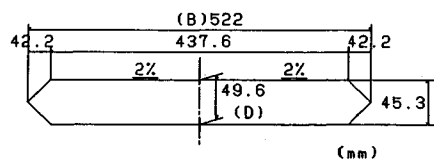


Fig. 4 Cross section of the model.

Table 4 Properties of TMD model used in the experiment.

mass M_2 ($\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2$)	9.18×10^{-3}
non-dimen. distance X	0.67
circular freq. (rad/s)	14.73
damping (log-dec.)	0.30

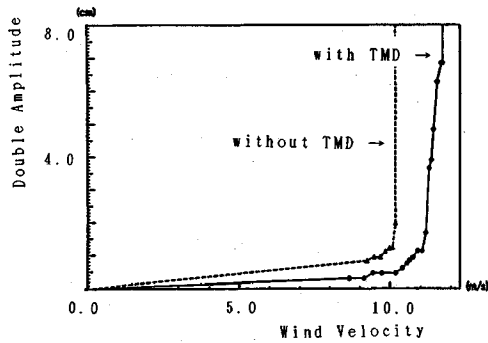


Fig. 5 Relations between double amplitude and wind velocity.

端に1つずつ取り付けた。

実験は一樣流中で行った。その V-A 図を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より TMD が発振風速の上昇に対して効果をもつことがわかる。また、橋桁模型に付いているおもり ($0.251 \times 4 = 1.004 \text{ kg}$) を取り外し (Model-II), 諸量を Table 6 のように若干変えて実験を行ったが、その場合においても Table 7 に示すように同様な結果が得られている。この実験における TMD は同じものを使用している。実験での発振風速と比較するために前節で述べた手法により求めた数値解析結果を並べて Table 5, 7 におおのこのケースを示す。Table 5, 7 は実験結果と解析結果が定性的に一致していることを示している。

6. ま と め

本研究は、従来連成フラッターの抑制に対しては疑問がもたれていた TMD の効果を、数値解析と風洞実験を実施して検討したものである。その結果、TMD を同調させることができれば、連成フラッターに対しても有意な効果をもつことがわかった。また、その際の TMD としては、曲げ、ねじれ両方向に対して効果をもつものが好ましく、仮に本研究のように両端に設置する形式を考慮するならば、風上側よりも風下側の TMD の方が

Table 5 The results of wind tunnel tests and calculations in Model-I.

	critical wind velo. (m/s)		critical frequency (Hz)	
	experiment	calculation	experiment	calculation
without TMD	10.3	11.88	2.539	2.408
with TMD	11.9	12.88	2.246	2.182

Table 6 Properties of the bridge model (Model-II) (length : 1.05 m).

mass M_1 ($\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2$)	3.06×10^{-1}	
inertia moment I_1 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{m}$)	1.229×10^{-2}	
half width B (m)	0.261	
natural circular freq.	bending ω_{z1} (rad/s)	11.05
	torsional $\omega_{\psi 1}$ (rad/s)	20.86
damping (log -dec.)	bending δ_{z1}	0.005
	torsional $\delta_{\psi 1}$	0.005

Table 7 The results of wind tunnel tests and calculations in Model-II.

	critical wind velo. (m/s)		critical frequency (Hz)	
	experiment	calculation	experiment	calculation
without TMD	10.0	11.84	2.715	2.930
with TMD	11.2	13.67	2.720	2.930

有意に作用することが実験の際にも確認されている。しかしながら、連成フラッターの発振振動数は風の迎角によっても大きく変化することがあり、TMD を同調させることはかなり困難である。そのうえ設置場所や経済性等の問題も残されており、この TMD による制振が現時点で工学的に有力な方法というわけではない。そこで、振動数同調に敏感でない TMD、もしくはそれに代わる受動式ダンパーの開発が望まれる。

参 考 文 献

- 1) 伊藤 学・岡内 功・宮田利雄：耐風構造，丸善，昭和52年。
- 2) 柴田明徳：最新耐震構造解析—最新建築学シリーズ9，森北出版，昭和56年。
- 3) デンハルトック（谷口 修 訳）：機械振動論，コロナ社，昭和9年。
- 4) 藤井澄二：機械力学 I—応用力学講座 2-A，共立出版，昭和32年。
- 5) 山本善之：振動学—応用力学講座 2-B，共立出版，昭和32年。

(1988. 4. 20・受付)

構造工学シリーズ1

構造システムの最適化～理論と応用～

土木学会構造工学委員会構造物最適性研究小委員会 編

B5判 300ページ 定価7000円、会員特価6300円(送料350円)

本書は、土木学会構造工学委員会構造物最適性研究小委員会(山田善一委員長)がとりまとめたもので、近年種々の工業設計の分野で応用されている最適設計法について、その基本的な考え方、理論および多くの構造設計における応用について、初心者にも容易に理解できるように書かれたものである。最適設計法の理論そのものは、多くの数学者により研究・開発され、それらの著書もたくさんあるが、本書の大部分は、構造設計に関わる研究者、実務者により書かれており、実務への応用を第一の目標としているのが、他書とは異なる大きな特徴の一つである。工学者が書いた本格的な最適設計法の著書としては、国内では最初のものであり、土木工学のみでなく、他の工学の分野でも利用できる内容になっている。

本書は、3編、29章から構成されている。第I編は「構造設計と最適設計法」で、最適設計法はなぜ必要か、さらに構造設計の基本構成との関わりなどが説明されている。第II編は「理論」で、構造設計の種々の要求に対応する最適化理論、および数値計算上の工夫などが説明されている。第III編は「応用」で、各種の構造設計への15の応用例が平易に説明されている。

以上のように、本書は、大学における構造設計のテキストとして、実務の設計における手引書として、あるいは、最適設計法の現状を理解し、今後の研究の方向を探る参考書として、それぞれの立場からの目的に応じて利用できる内容になっている。

●総論

第I編 構造設計と最適設計法

1.概説/2.構造設計における最適化の概念/3.設計基準にみられる最適性と安全性/4.構造設計の基本構成/5.構造最適設計における最大荷重設計と最小重量設計

第II編 理論

1.概説/2.構造最適設計における基礎的事項/3.数値計算法/4.双対法/5.最適性規準法/6.感度解析法/7.多段階決定による最適設計法/8.計算効率をあげるための工夫

第III編 応用

1.概説/2.骨組構造物の設計における応用/3.斜張橋の最適設計/4.幾何形状の最適化問題における応用/5.塑性設計における応用/6.橋梁振動問題における応用/7.耐震設計における応用/8.ファジィ理論の構造最適化への応用/9.信頼性設計における応用/10.鋼構造の設計・製作システムにおける応用(1)/11.鋼構造の設計・製作システムにおける応用(2)/12.コンクリート構造物の設計における応用/13.土構造物の設計における応用/14.建築工学における応用/15.機械工学における応用/16.造船工学における応用

鋼構造シリーズ2

座屈設計ガイドライン

B5判 361ページ 定価8000円 会員特価7000円(送料350円)

鋼構造シリーズ3

鋼構造物設計指針

B5判 上製2分冊

(PART.A・Bセット購入時の送料500円)

●PART.A 一般構造物 157ページ 定価2500円、会員特価2200円(〒350)

●PART.B 特定構造物 225ページ 定価7000円、会員特価6300円(〒350)

●お申込みは土木学会または全国主要書店へ●

土と水の連成逆解析プログラム (UNICOUP)

ついにベールを脱いだ!

UNICOUP 新発売

CRC

今こそ、頼りがいのあるソフトを!

特長

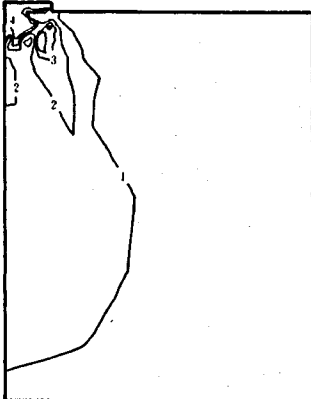
- ① 応力と地下水の流れをカップルさせた問題が解析可能です (圧密含む)
- ② 地下水の流れは飽和・不飽和域を対象としています。
- ③ 多段掘削・盛土や降雨等が扱えます。
- ④ 梁や連結要素も扱え実用的です。

- ⑤ 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。)
- ⑥ 弾性・非線形弾性・弾塑性・粘弾塑性を示す地盤が扱えます。
(関口・太田モデル・カムクレイモデル使用可)

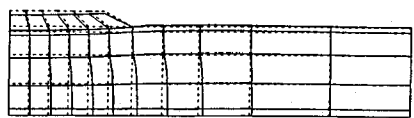
対応機種

FACOM-Mシリーズ, HITAC-Mシリーズ
IBM303X,308X,43XX, CRAY
NEC ACOSシリーズ, DEC VAX11
シグマワークステーション
(その他別途相談に応じます。)

↓ (荷重)



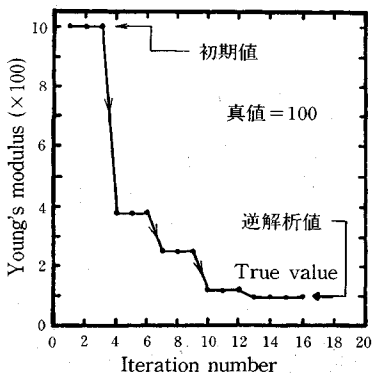
応力増分コンター(Δσ_v)
(10日後)



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

CRC センチュリリサーチセンター 株式会社
IPA 情報処理振興事業協会

問合せ先
大阪市東区北久太郎町4-68
(06-241-4121)担当: 岩崎、今井

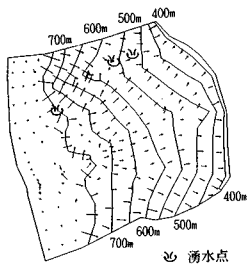
このシステムは、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。

地下水解析のことなら CRC

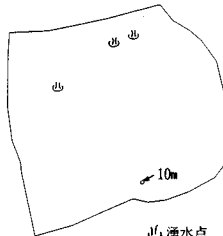
日本初!! 逆解析手法による 地下水変動解析プログラム

UNISSF

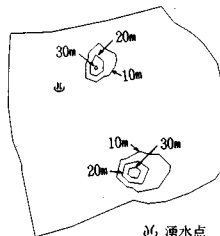
スピーディな同定・安価な解析



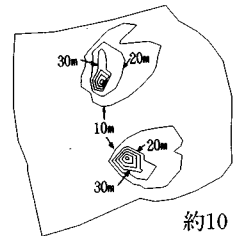
初期状態の地下水流



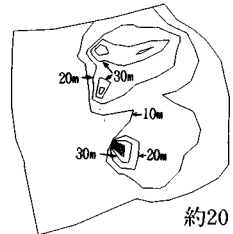
トンネル掘削開始直後



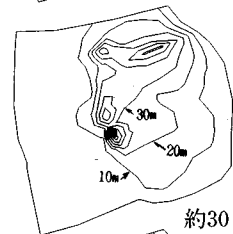
約4日後



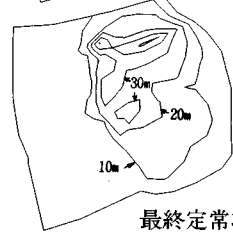
約10日後



約20日後



約30日後



最終定常状態

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。

機種：FACOM-Mシリーズ、HITAC-Mシリーズ
IBM303X,308X,43XX, CRAY
NEC ACOSシリーズ、DEC VAX11 他

このシステムは、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。

IPA 情報処理振興事業協会

CRC センチュリリサーチセンター 株式会社

大阪市東区北久太郎町4-68
(06-241-4121) 担当:岩崎、中屋

圧密解析ソフトパソコンに上陸!!

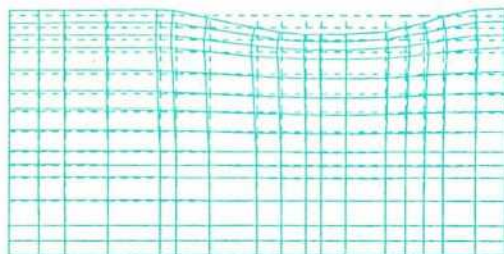
地盤の非定常圧密解析プログラム

Mr.圧密

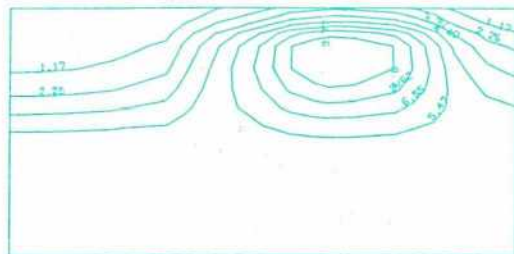
(特長)

- 非定常FEMによる線形弾性解析(christian系の解法)。
- 二次元平面歪解析。
- 要素として三角形・任意四角形が扱える。
- スケーリングをしているので安定して解が求まる。
- リスタート機能の完備。
- 入力はわかりやすいコマンド形式を採用(フリーフォーマット)。
- 図化处理(プロッタ、画像出力)等、豊富な機能を持つポストプログラムを完備。
- ジェネレート機能(長方形要素)により簡単にモデル作成が可能。
- 大モデルはそのままCRCネットワークでも(ホスト処理)可能。

販売価格：60万円 機種：NEC PC9800シリーズ 他



変形図



過剰間隙水圧コンター図

※EWS、汎用機用の圧密解析プログラム(逆解析も可能)として"UNICON"も用意しております。

CRC センチュリサーチセンター 株式会社

大阪市東区北久太郎町 4-68
(06-241-4121)担当:浜口・柳原

