

投稿論文 (和文ノート)
**TECHNICAL
NOTE**

弾性拘束を必要とする長大斜張橋の橋軸方向ばね定数設定に関する一考察

米田昌弘*

斜張橋の長スパン化に伴い、現在では橋軸方向ばねを設置して、地震時における桁端部の水平移動量や塔基部曲げモーメントの緩和を図る方法が定着しつつある。本文は、中央支間長 800 m の長大斜張橋を対象として、水平ばねの設置によって遊動円木振動が主桁の逆対称振動と接近した場合の影響を、地震応答解析を実施して検討している。そして、長大斜張橋の水平ばね定数設定に関し、耐震設計上留意すべき有用な知見を報告している。

Keywords : cable-stayed bridge, internal resonance, seismic response analysis, seismic resistant design

1. まえがき

高強度材料の使用や設計・架設および解析手法の進歩を始めとした近年における橋梁技術の進展は目覚ましく、その結果は最近の橋梁構造物の長スパン化傾向に強く反映されている。その中でも、特に斜張橋の長スパン化傾向には特筆すべきものがあり、最近では、完成すれば世界最大となる中央支間長 890 m の多々羅大橋も着工の運びとなっている。

このような斜張橋の長スパン化に伴い、橋軸方向地震に対する耐震検討が極めて重要となりつつあり、名港西大橋、櫃石島橋、岩黒島橋、生口橋などで実施例が見られるように、現在では橋軸方向ばねの設置により、遊動円木振動モードの固有周期を数秒程度に調整して地震時における桁端部の水平移動量や塔基部曲げモーメントの緩和を図る方法が定着しつつある。

従来の知見では、橋軸方向地震に対する遊動円木振動の有効質量比はおおよそ 90% 前後の非常に大きな値を有しており、また、地震時における桁端部の水平移動量は水平ばね定数の増加とともに漸減し、塔基部曲げモーメントはある水平ばね定数までは漸減するがそれ以上の範囲ではばね定数の増加とともに漸増すると一般に考えられてきた。それゆえ、実務設計における水平ばね定数の設定は、設計可能と予想される水平ばね定数の範囲内にある 2, 3 種類の水平ばね定数に限定して地震応答解析を行い、その結果をもとに具体的なばね定数を決定するのが通常であった。しかしながら、弾性拘束を必要とする長大斜張橋では、当然のことながら水平ばねの設置によって遊動円木振動数が増加し、主桁の逆対称振動数と接近することも十分に予想される。その結果、遊動円木振動の有効質量比および地震時における桁端部の水平

移動量や塔基部曲げモーメントの応答特性も変化するものと考えられるが、弾性拘束を必要とする長大斜張橋の歴史が比較的浅いこともあり、遊動円木振動と主桁の逆対称振動の接近に着目した検討は今までのところなされていない。

このような観点から、本文では、中央支間長 800 m の長大斜張橋を対象として種々の水平ばね定数に対する地震応答解析を行った。そして、その結果から遊動円木振動と主桁の逆対称振動が接近した場合の影響について検討し、実務設計者のための耐震設計に関する技術資料を提供した。

2. 対象とした斜張橋

対象とした橋梁は、図-1 に示すような中央支間長が 800 m (支間長比 0.400)、ケーブル段数が 18 段のファン型マルチケーブル形式斜張橋である。仮定した基本構造諸元を表-1 に示す。

まず、対象橋梁の固有振動特性を把握するため、水平ばねを設置しないオールフリーなる状態で固有振動解析を実施した。得られた遊動円木振動モードと代表的な逆対称振動モードを図-2 に示す。図-2 からわかるように、オールフリーなる状態では、遊動円木振動は主桁の逆対称振動と接近しておらず、MODE-L の有効質量比は 90.2% と極めて大きいことが理解できよう。

なお、オールフリーなる状態について、次章に述べる手法で地震応答解析を行った結果、桁端部の水平移動量は 3.310 m、塔基部曲げモーメントは 60 970 t・m/支柱となり、適切な水平ばねの設置が必要と考えられた。

3. 地震応答解析結果と考察

(1) 地震応答解析法

遊動円木振動モードは橋軸方向に卓越した振動モードではあるが、中央径間部分に着目すれば、程度の差こそ

*正会員 工博 川田工業(株)技術本部振動研究室長
(〒550 大阪市西区北堀江 1-22-19)

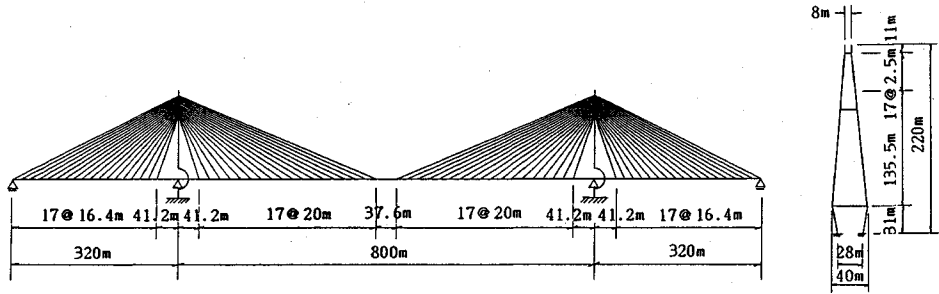


図-1 対象とした斜張橋モデル

表-1 対象とした斜張橋の構造諸元

	断面	断面2次モーメント		ねじれ定数	弾性係数	せん断弾性係数	重量	慣性モーメント	
		(m^4)	面内(m^4)						面外(m^4)
桁	1.50	2.50	100.0	8.00	2.1×10^7	0.81×10^7	25.0	150.0	
タワー	塔柱部	1.20	5.00	13.00	8.00	2.1×10^7	0.81×10^7	9.0	-
	水平材	1.20	13.00	5.00	8.00	2.1×10^7	0.81×10^7	-	-
ケーブル	1 段目	0.005	-	-	-	2.0×10^7	-	-	-
	2-16 段目	0.010	-	-	-	2.0×10^7	-	-	-
	1.2 段目	0.005	-	-	-	2.0×10^7	-	-	-
	3-15 段目	0.007	-	-	-	2.0×10^7	-	-	-
	16,17 段目	0.016	-	-	-	2.0×10^7	-	-	-
	18 段目	0.032	-	-	-	2.0×10^7	-	-	-

注) ケーブル段数は、下段側から上段側に向かって定義した。

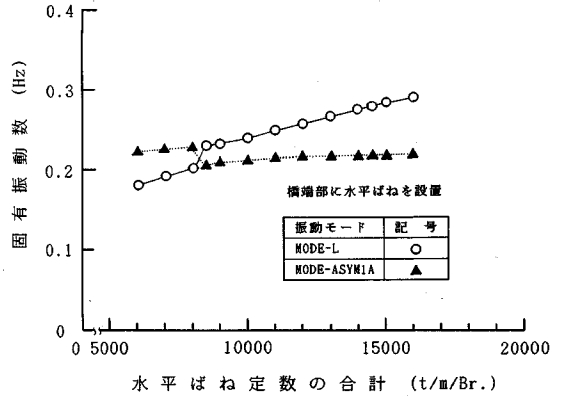


図-3 固有振動数の変化 (MODE-LとMODE-ASYM1Aが接近する場合)

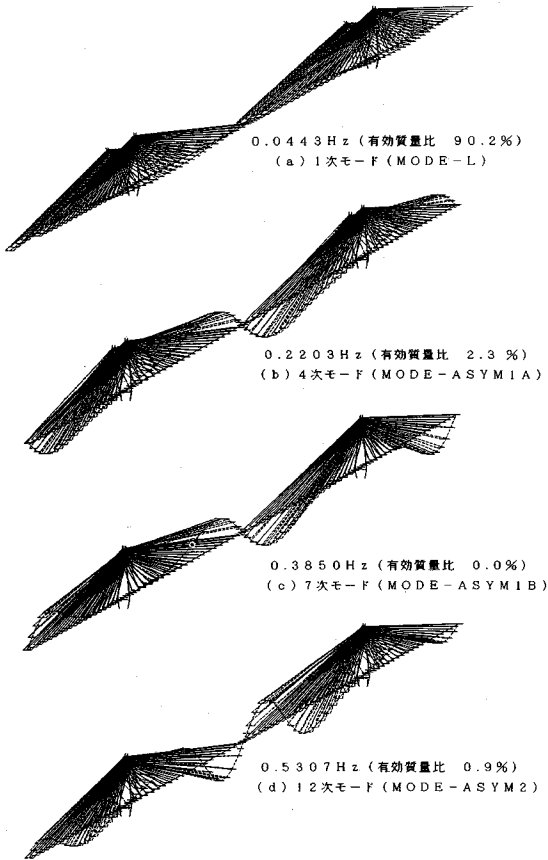


図-2 オールフリーとした場合の固有振動解析結果

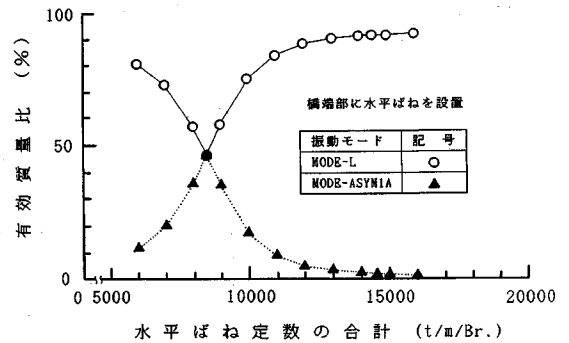


図-4 有効質量比の変化 (MODE-LとMODE-ASYM1Aが接近する場合)

あれ、逆対称の鉛直方向成分が連成する¹⁾。それゆえ、水平ばねの設置によって遊動円木振動が主桁の逆対称振動と接近した場合、遊動円木振動の有効質量比が大きく変化し、その結果、桁端部の水平移動量や塔基部曲げモーメントの応答特性も影響を受けるものと考えられる。ここでは、前述の中央支間長 800 m の長大斜張橋を対象とし、水平ばね定数を種々変化させた場合の固有振動解析および地震応答解析を行い、遊動円木振動が主桁の逆対称振動と接近した場合の影響について検討した。

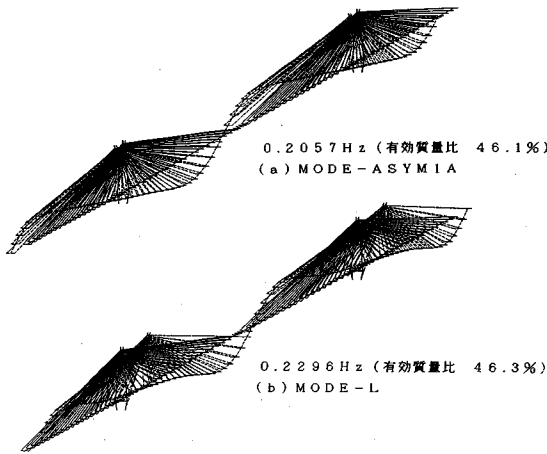


図-5 橋端部に8500 t/m/Br.なる水平ばねを設置した場合の固有振動解析結果

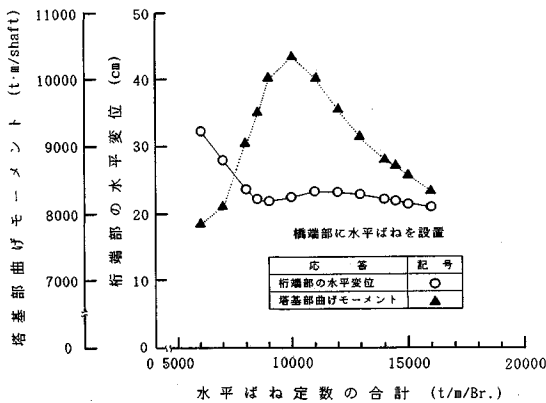


図-6 動的応答値の変化 (MODE-LとMODE-ASYM1Aが接近する場合)

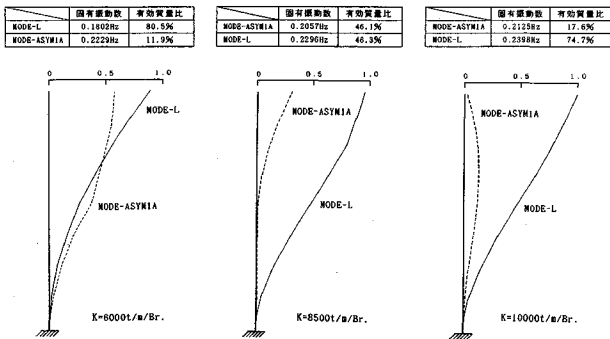


図-7 水平ばね定数の大きさと塔の振動モード成分の関係 (橋端部に水平ばねを設置した場合)

なお、地震応答解析では、橋軸方向に対する有効質量比の合計が95%以上となるすべての固有振動モード(35次までの固有振動モード)について減衰定数を0.02(2%)と仮定し、また、本四公団の加速度応答スペク

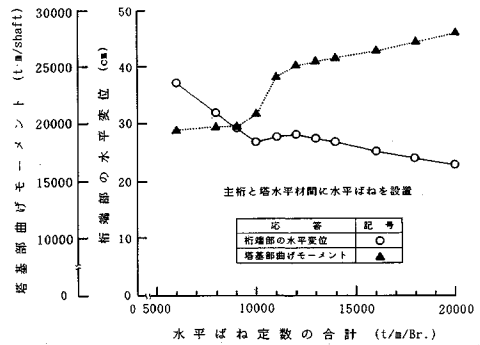


図-8 動的応答値の変化 (MODE-LとMODE-ASYM1Aが接近する場合)

トル²⁾を用いてCQC法なる手法で解析するものとした。

(2) 解析結果と考察

実務設計で最も起こり得ると考えられる、遊動円木振動(MODE-L)とMODE-ASYM1Aなる逆対称1次振動が接近した場合の影響を把握するため、水平ばね定数Kを6000 t/m/Br.~16000 t/m/Br.の範囲で変化させた場合の固有振動解析を実施した。ここに、水平ばねは檜石島橋や岩黒島橋などと同じく橋端部に設置するものとした。得られた固有振動数と有効質量比の変化をそれぞれ図-3,4に示す。これらの図からわかるように、K=8500 t/m/Br.なる場合に遊動円木振動数と逆対称1次振動数がほぼ一致しており、図-5に示すような有効質量比の大きな2つのモードが出現している。なお、これらの図中には、有効質量比の大きい方をMODE-L、小さい方をMODE-ASYM1Aと記している。

地震応答解析結果を図-6に示す。図-6により、桁端部の水平移動量については、水平ばね定数の増加とともに減少する傾向を示すものの、MODE-LとMODE-ASYM1Aの固有振動数がほぼ一致するK=8500 t/m/Br.なる付近で極小値となる応答特性を示していることがわかる。一方、塔基部曲げモーメントは、水平ばね定数の増加とともに大きくなってK=10000 t/m/Br.で極大値(最大値)を示した後は緩やかに低下する応答特性を示している。このように、橋端部に水平ばねを設置した場合、塔基部曲げモーメントが特徴ある変化を示すのは以下の理由による。すなわち、遊動円木振動と接近しない通常の逆対称1次振動(MODE-ASYM1A)は、塔に大きな橋軸方向変位モードが生じているものの、橋軸方向の有効質量はほぼゼロに近い値であることから、動的応答に及ぼす寄与は遊動円木振動が支配的となり、MODE-ASYM1Aの寄与は非常に小さい。これに対し、遊動円木振動と接近した場合には有効質量比が大きくなって、遊動円木振動に起因した塔基部曲げモーメントに加え、MODE-ASYM1Aに生じている塔の橋軸方向変位に伴う曲げモーメントが新たに付

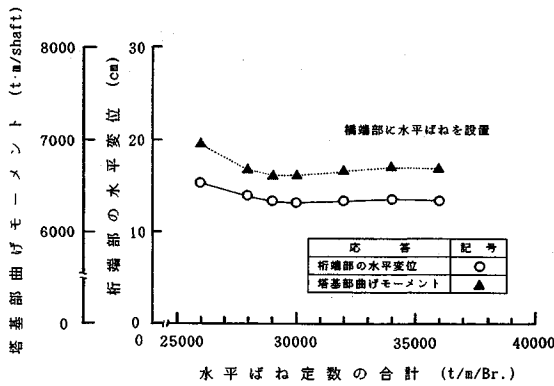


図-9 動的応答値の変化 (MODE-LとMODE-ASYM1Bが接近する場合)

加されたことによる。参考までに、図-7には水平ばね定数の大きさと塔の振動モード成分の関係を示すが、この図からも動的応答特性を支配するMODE-LとMODE-ASYM 1 Aにおける塔の振動モード成分が水平ばね定数の大きさによって微妙に変化している様子が理解できよう。

なお、名港西大橋に見られるように、主桁と塔水平材間にばねを設置した場合にも、図-8からわかるようにMODE-LとMODE-ASYM 1 Aが最も接近する付近から塔基部曲げモーメントが増加する傾向が見られた。ここに、橋端部に水平ばねを設置した場合と相違し、塔基部曲げモーメントには緩やかに低下する領域が存在していないが、これは水平ばね定数の増加とともにばね反力に起因した塔基部曲げモーメントが付加されたことによる。また、実際の設計ではほとんど有り得ないが、MODE-Lと塔の橋軸方向変位モード成分が大きいMODE-ASYM 2が接近した場合にも同様に塔基部曲げモーメントが増加する傾向を示していたことを述べておきたい。

これに対し、MODE-Lが塔の橋軸方向変位モード成分が小さい逆対称1次振動であるMODE-ASYM 1 Bと接近した場合にも同様に有効質量比の大きな2つの振動モードが出現するものの、図-9からわかるように塔基部曲げモーメントが極端に増加する傾向は認められな

かった。これは、図-2からわかるように、MODE-ASYM 1 Bは塔の橋軸方向変位モード成分がもともと小さく、遊動円木振動と接近した場合でも新たに付加される塔基部曲げモーメントが非常に小さいことに起因する。

4. あとがき

本文は、水平ばねの設置によって斜張橋の遊動円木振動が主桁の逆対称振動と接近した場合の影響を、地震応答解析を実施して検討したものである。その結果、遊動円木振動が塔の大きな橋軸方向変位モードを伴う逆対称振動（たとえば、MODE-ASYM 1 AとMODE-ASYM 2）と接近した場合には、桁端部の水平移動量は極小値を示すものの、塔基部曲げモーメントは逆に増加する傾向を示すことが明らかとなった。これに対し、塔の橋軸方向変位モード成分が小さい逆対称振動（たとえば、MODE-ASYM 1 B）と接近した場合には、このような傾向は認められないこともわかった。

現在までも長大斜張橋に対する種々の弾性拘束材が実用化されているが、ゴム支承を採用した場合にはばね定数の製作誤差や経年変化を考える必要がある。一方、固有振動解析結果と振動実験で得られる実測値には若干の差異が生じることも知られており、設計では想定していなかった遊動円木振動と逆対称振動の接近によって計算値より大きな塔基部曲げモーメントが生じる可能性もある。それゆえ、橋軸方向に弾性拘束を必要とする長大斜張橋の耐震設計にあたっては、弾性拘束材のばね定数の変化を適切に評価し、水平ばね定数の目標値を含む前後数%程度の範囲において、遊動円木振動と逆対称振動との接近の可能性およびその応答特性把握を行うことが重要であると言える。

参考文献

- 1) 米田昌弘：斜張橋の遊動円木振動数特性とその実用算定法に関する研究，土木学会論文集，第422号/I-14，pp. 285-294，1990年10月。
- 2) 本州四国連絡橋公団：耐震設計基準・同解説，1977年3月。

(1991.10.22 受付)

A CONSIDERATION ON SEISMIC RESISTANT DESIGN OF LONG SPAN CABLE-STAYED BRIDGES WITH LONGITUDINALLY ELASTIC SUPPORT CONDITIONS

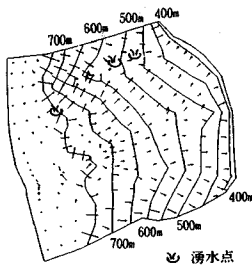
Masahiro YONEDA

This paper deals with internal resonance between longitudinal sway mode vibration and asymmetric vibrations of the girder for long span cable-stayed bridges. The seismic behavior is investigated by means of seismic response analyses using the response spectrum method on the cable-stayed bridge model with a center span of 800m.

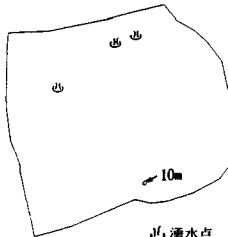
あの地下水解析ソフトがさらに機能充実!

UNISSE_{ユニセフ(V-2)}

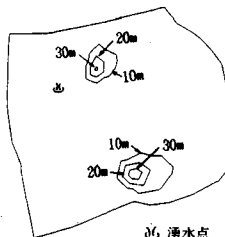
スピーディな同定・安価な解析



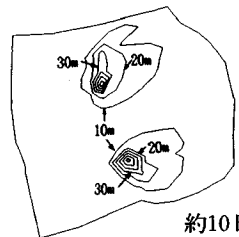
初期状態の地下水流



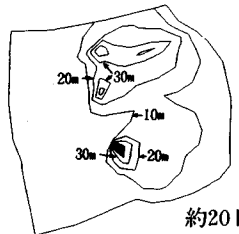
トンネル掘削開始直後



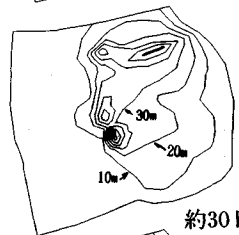
約4日後



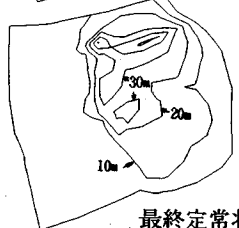
約10日後



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。

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

株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

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

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

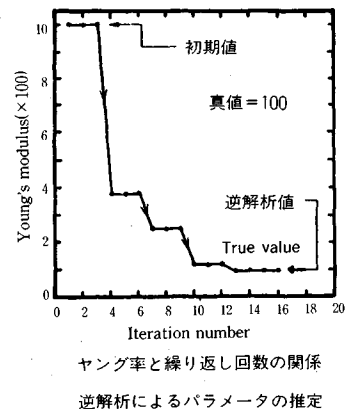
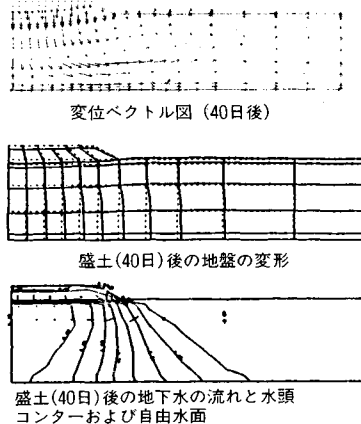
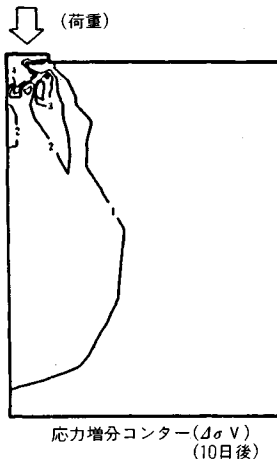
盛土・掘削

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)



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

株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

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

MATRAN EX

地下水汚染
の解析に!

塩水くさび
農業汚染
廃棄物処理
その他

飽和・不飽和浸透解析に、移流分散・拡散を考慮。
EXTENSIVEな問題に適用可能なEXcellentなプログラム。

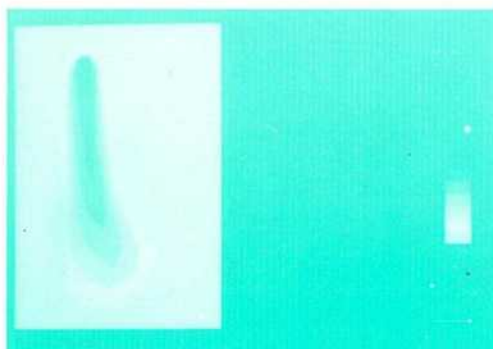
プログラムの特長

■断面(EXV)および平面(EXH)の解析が可能

■充実した解析機能

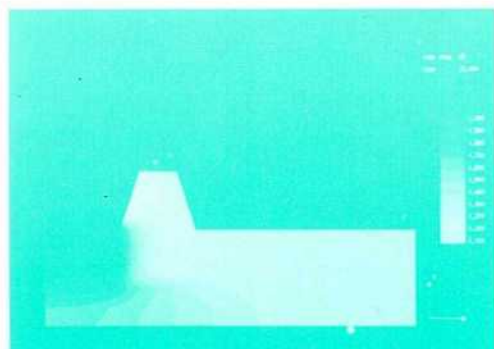
- 定常・非定常解析 (断面、平面)
- 軸対称解析 (断面)
- 降雨 (断面、平面)
- 揚水・注水 (断面、平面)
- 浸出面 (断面)
- 材質変更 (断面、平面)
- 境界条件の変更 (断面、平面)
- 水位・濃度の経時変化 (断面、平面)

■豊富なグラフィック出力 (濃度コンター図、流速ベクトル図、濃度の時間推移グラフ 他)



濃度コンター図 (平面解析例)

断面出力図



濃度コンター図 (断面解析例)

断面出力図

株式会社 **CRC** 総合研究所 西日本支社

〒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