

## パソコンによるトンネル設計支援システムの開発

|          |    |     |    |
|----------|----|-----|----|
| 日本鉄道建設公団 | 正員 | 鬼頭  | 誠  |
| 日本鉄道建設公団 | 正員 | 末永  | 充弘 |
| 日本鉄道建設公団 | 正員 | ○梶原 | 雄三 |

## 1 はじめに

今日の社会が高度情報化社会と呼ばれるようになってから、建設分野でも情報化への対応が盛んに行われ、工事実績情報のデータベース化、設計支援システムのなどの開発が行われている。これらは、情報処理に関する効率化を促進するうえで有効な手段となっている。(図-1参照)

当公団では、鉄道建設工事にかかわる調査・計画・設計・施工業務を行っており、このような建設プロセスにおいては、さまざまな情報の収集・分析をする必要がある。これらの情報処理は、自然環境に対して影響を与えない工法の開発や、交通阻害を極力少なくするための施工期間短縮の検討、あるいは都市部での深部地下鉄道の合理的な覆工の設計など、鉄道構造物を安全に、早く、経済的に建設するために必要不可欠である。こうした業務を円滑に進め、効率的に支援するものとして、これまでパソコンによるトータルシステムである設計・施工情報支援システムの構築を推進してきた。これらのシステムは次に示すとおりである。

- ① トンネルデータバンクシステム  
(NATM、シールドトンネルの工事実績情報のデータベース化)
- ② 既設計情報検索システム  
(明り関係設計情報のデータベース化)
- ③ 工事実績情報システム  
(明り関係工事における施工法等のデータベース化)
- ④ 自動設計システム  
(明り関係構造物の設計支援システム)
- ⑤ トンネル覆工応力解析システム  
(シールドセグメント、直打ちコンクリート覆工の応力解析システム)
- ⑥ 地盤変形解析システム  
(FEMによる地盤変形解析システム)  
(破壊接近度法による非線形弾性解析システム)

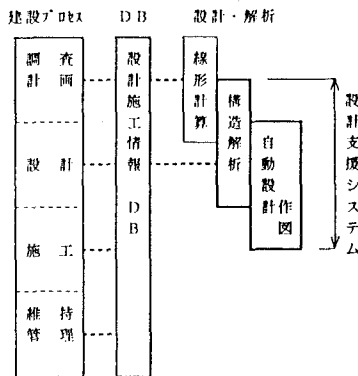


図-1 建設プロセスにおける設計支援システムの位置づけ

以上の情報処理システムのうち、今回、パソコンによるトンネル設計支援システムを開発したので、開発にあたっての留意点とその活用効果についての事例を述べる。

## 2 トンネル設計支援システムの構築

### (1) システム開発のねらい

トンネル工事のなかでも特に近年は、都市部での工事が増加する傾向にある。また、将来の大深度地下鉄道構想など、トンネルの計画・設計・施工あるいはこれらに伴う技術開発については重要な課題となっており、トンネル工事を安全に早く、しかも経済的に施工することは時代の要請となっている。このような技術課題に対して、当公団では施工速度等の面で有利な「掘削・覆工併進工法」（直打ちコンクリートライニング工法／図-2参照）の開発を進めることとし、この工法を確立するためには、合理的な覆工

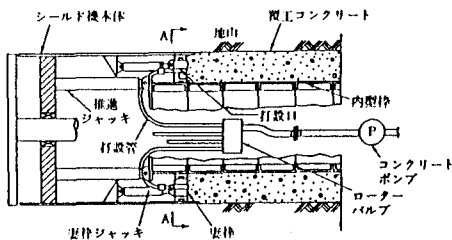


圖-2 併進工法概念圖

設計の理論的背景の解析を行う必要があった。

トンネル覆工の周辺地盤の挙動は複雑で多面的であり、非線形性をもつ地盤との連成系モデルの検討においては、定性的検討の段階を経て定量的検討に向かうのが最も賢明な方法といえよう。このような非線形性を容易に表現するためには、計算機シミュレーションによってその現象を解明してゆく手法が適切であり、さらに実施工での挙動観察（現場計測）により、そこから得られる情報を設計・施工にフィードバックすることで当初の設計の妥当性を実証する手段が必要である。

具体的には次に述べるようなシステムを開発することとした。

(2)開発各種システムの位置づけ

トンネル設計におけるニーズは、図-3に示すように、大きく三つに分けられる。それは、①現状の分析を行い改善の余地や安全性の照査の確認。②設計の理論的根拠を解明するための解析的手法の導入。③理論を実証するための現場における計測と解析処理の実現である。

これらのニーズに対して、システム側の要件は、構造計算プログラムと有限要素法による解析プログラムの開発が有効であり、次のような4種のシステム群を構築して、合理的な覆工設計を実施するにあたってのツールとした。

- ①併進工法覆工応力解析（略称HEIK）
- ②セグメントリング応力解析（略称SEIK）
- ③地盤変形解析システム（略称SANC）
- ④破壊接近度法による非線形弾性解析システム（略称NATM/PC）

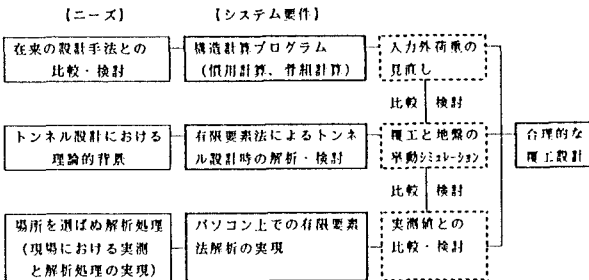


図-3 トンネル設計におけるニーズとシステム要件

3 システム設計の基本構想

トンネル覆工の応力解析をパソコンで手軽に、確実に、迅速に行えることを念頭において以下のような条件でシステム設計を行った。

(1)ハードウェアの選定

本システムを利用するために特別なハードウェアを意識することなく運用することを目的として、当公団に広く普及しているPC-9801シリーズとした。開発用機器構成を図-4に示す。

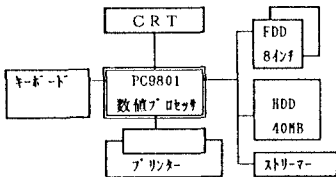


図-4 開発用機器構成

(2)対話形式の採用

本システムの利用者は公団内部に限られるが、トンネルに関する知識のレベルには大きな幅がある。しかし、できるだけ多くの利用者が利用できるように、パソコンの操作は対話形式で行うこととし、マニュアルレスで操作可能な環境となるよう、入力から出力まで適切なガイド画面を設定した。これは、データエントリーの際の単純ミスの防止に大いに役立っている。

(3)ターンアラウンドの短縮

設計作業は、数多くの試行により繰り返し計算を行うものであり、その都度プリンターに印刷させたのでは、無駄な時間を費やすこととなる。したがって本システムでは、解析結果リスト並びに解析結果の図形のイメージはプリントイメージと同一

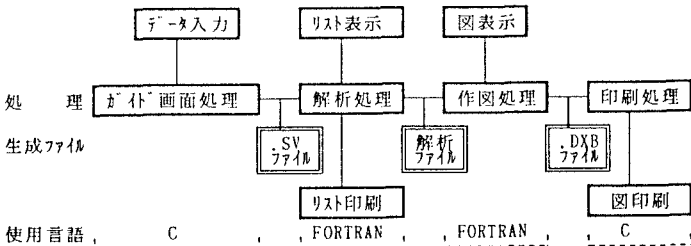


図-5 システムの基本的な流れ

のものをディスプレイ画面に表示することを基本とした。したがって、利用者は必要な結果のみをプリントアウトすることが可能となり、不要な時間を費やすことがない。(図-5参照)

(4)開発プログラム言語の選択

ソフトウェアについては、計算の中核となる剛性方程式の精度を確保し、計算処理の高速性と適切なプログラム開発が行えるものとして、「RM/FORTRAN」を使用することにした。併せて演算の高速化を計るため、ハードウェアによる浮動小数点演算装置を搭載することとした。

(5)図化处理

部材の断面力図・FEMのメッシュ図などを図化する作業の軽減、及び演算結果を感覚的に理解しやすくするため、本システムでは図形処理機能を特別な装置を用いることなく充実させることにした。従来では、画面に描かれた線画をハードコピーなどの簡易的な処理で行うのが一般的であったが、本システムでは、X Yプロッター並の高品位な図形印刷をページプリンターで行えるようにすることとした。

4 各設計支援システムの開発内容

4. 1 併進工法覆工応力解析システム (H E I K)

(1)システム概要

このシステムは、併進工法の直打ちコンクリート覆工の変位量および断面力解析をパソコン上で処理するものである。システム構成は、図-6に示すように4つのモジュールで構成されており、機能の概略は以下のとおりである。

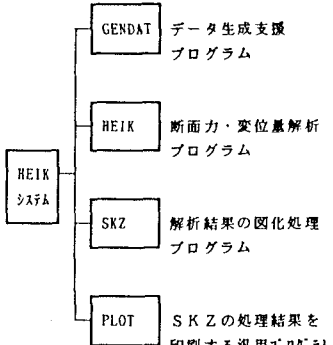


図-6 HEIKシステム構成図

①モデル生成機能は、リング上に2.5° 間隔に節点を設け、相隣合う節点間を直線で結ぶことにより、平面骨組みモデルを自動生成する。なお、生成モデルは一軸対称であり、リングを剛性一様とした単体リングとして変位法により解析を行う。

②荷重条件および地盤反力係数などの入力条件は、「シールドトンネルの設計施工指針(案)」によるものとし、覆工変位に伴って発生する地盤反力は、自動的に計算を行う。

基本荷重として6種類、荷重の組合せは各荷重の合成を行っている。  
(鉛直土圧/水平土圧/鉛直水圧/水平水圧/水平方向の地盤反力/自重)

③直打ちコンクリート覆工であることから、自重による水平方向の地盤反力を考慮している。

(2)システム設計上の留意点

①解析モデルの基本条件は、資料-1に示した計算指示データの入力ガイド画面により、下線部分に数値、文字をエンタリーする。画面切り替えごとに入力チェックを行い、エラーがある場合にはメッセージを表示し、単純ミスの防止に努めた。

②断面力図は自動スケーリングを基本とし、適切な大きさで作図ができるようにした。なお、比較検討のための固定スケールでも作図可能である。

資料-1 計算指示ガイド画面(例)

(3)システムの実行結果

本システムによる実行結果を資料-2に示す。

4. 2 セグメントリング応力解析システム (S E I K)

(1)システム概要

本システムは、シールド工法で施工されたセグメントリングに生ずる変位量および断面力を算定

する構造解析プログラムである。解析モデルは、セグメントリングの円形モデルを4タイプ用意し、千鳥組による2連リングモデルも解析可能とした。

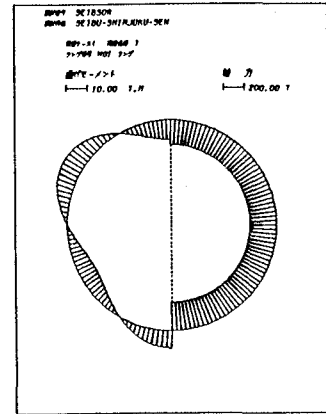
- ①単体リング・剛性一様
- ②単体リング・回転バネ
- ③複合リング・回転バネ
- ④複合リング・回転バネ・継手部せん断バネ

## (2)システム設計上の留意点

セグメント継手部の曲げ剛性の劣化を容易に表現できるようにするため、リング上の任意の点に回転バネの配置が行えるようにした。この場合、せん断力などの断面力は複雑な結果となるが、作図処理により各リングの応力状態を分かりやすい表示で行うようにした。

## (3)システムの実行結果

本システムによる実行結果を資料-3に示す。



資料-2 併進工法断面力図(例)

## 4. 3 地盤変形解析システム(SANC)

### (1)システム概要

本システムは、有限要素法による二次元地盤変形解析プログラムであり、盛土の築堤解析、トンネルの掘削解析など施工過程を考慮した解析を行うことができる。そして、作図種類も豊富に用意しており、大型コンピュータ並の処理機能をパソコン上で実行できるシステムとなっている。これらの機能を以下に示す。

#### ①解析種類

線形弾性解析／非線形弾性解析(Duncan-Chang)  
／弾塑性解析(Drucker-Pragerの破壊基準)

#### ②要素種類

平面ひずみ要素(三角形・四角形・四角形アイソパラメトリック)／梁要素(剛結合・ヒンジ結合)  
／ジョイント要素(せん断強度を越すせん断力が働く場合には、せん断強度が低減される。)

#### ③荷重条件

地盤および構造物の自重／節点集中荷重／要素分布荷重／震度法による水平慣性力／掘削による応力解放力／強制変位

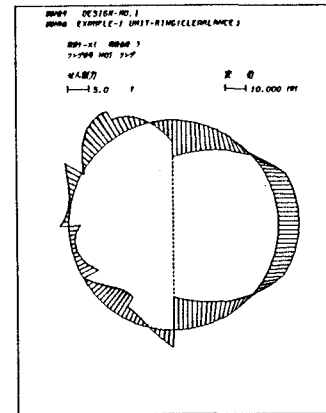
#### ④逐次解析機能

トンネルや切取りの掘削過程を、施工過程を追って段階的に解析することができる。この際、途中で要素の材料特性を変更することによって、コンクリート覆工の硬化の過程を考慮することができる。また、途中段階における応力状態、変形状態を出力することができる。

#### ⑤作図機能

解析結果をディスプレイ表示およびプリンターに印刷することができる。

要素分割図／変位図／変位差図／応力ベクトル図／主応力図／最大せん断力図／コンター図(表-1 参照)／荷重～変位曲線図／応力～ひずみ曲線図／モールの応力円図／点安全率図



資料-3 セグメントリング断面力図(例)

表-1 コンター図の作図種類

| コンター図作図種類 |          |            |
|-----------|----------|------------|
| X方向応力成分   | X方向ひずみ成分 | X方向変位量     |
| Y方向応力成分   | Y方向ひずみ成分 | Y方向変位量     |
| せん断応力成分   | せん断ひずみ成分 | 変位ベクトル     |
| 最大主応力     | 主応力比     | 最大主ひずみ成分   |
| 最小主応力     | 平均主応力    | 最小主ひずみ成分   |
| 最大せん断応力   | 応力レベル    | 最大せん断ひずみ成分 |
| 点安全率      | せん断応力比   | 体積ひずみ成分    |

⑥解析規模

本システムにおいては、次のような解析規模を有している。

- (解析モデル) 全節点数……………510節点  
全要素数……………600要素  
材料の種類数……………35種類
- (荷重データ) 全荷重ステージ数……20ステージ  
荷重の小分割数……………50分割

(2)システム設計上の留意点

①演算時間と解析規模の確保

可能な限り短い演算時間とするため、ワークファイルのリード・ライトは1レコードの取り扱い容量を大きくとるなどして、アクセス時間の短縮化を図った。また、取り扱い要素数600要素を確保するため、プログラムをオーバーレイ構造とし、限られたメモリ空間を最大限有効に使用することとした。この結果、解析規模により演算時間は大きく異なるが、要素数250・荷重ステージ数3の場合の弾性解析で約7分程度となり、実用上支障の少ない演算時間が得られた。

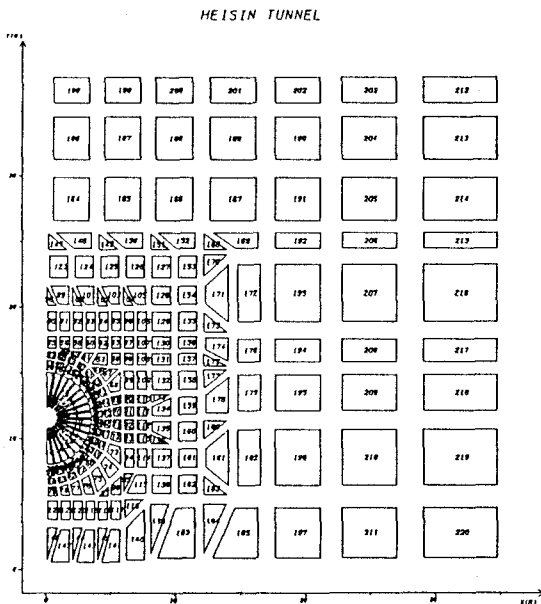
②自動メッシュ分割機能を付加し、データ作成作業の効率化に努めた。

③作図種類の充実を図り、全ての図はディスプレイ上で表示可能とし、かつプリンターで同一イメージのものを印刷できるようにした。

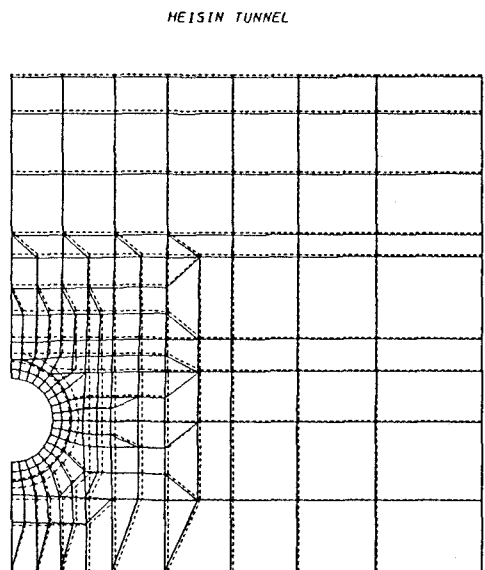
(3)実行例

SANCによる掘削解析の実行例を資料－4～資料－11に示す。なお、主な条件は次のとおりである。

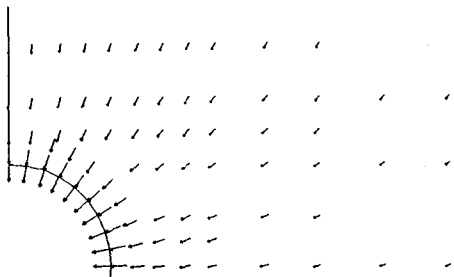
- ・トンネル通過部土質：洪積砂質土（N値50以上）、
- ・土被り： $H_d=22\text{m}$
- ・覆工外径： $D=8.1\text{m}$ 、
- ・覆工厚： $t=30\text{cm}$
- ・土の弾性係数： $E=15,000\text{kg/cm}^2$ 、
- ・ポアソン比： $\nu=0.3$



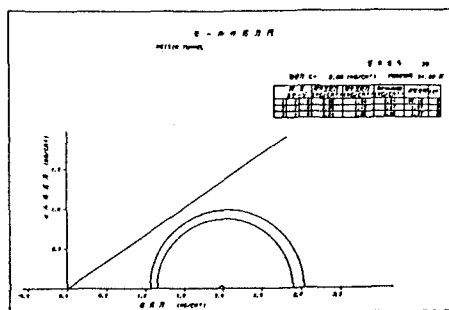
資料－4 モデルチェック画面(シュリンク図)



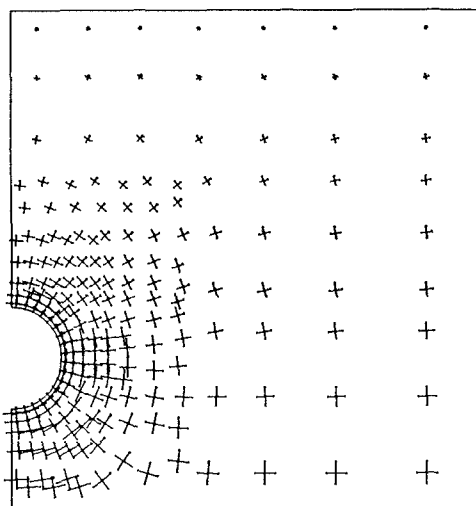
資料－5 地盤変位図(モード図)



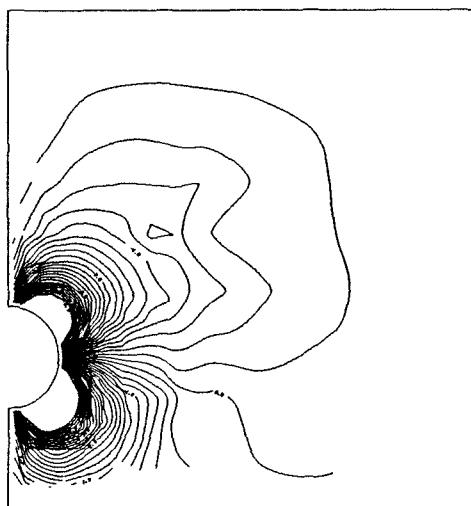
資料-6 地盤変位拡大図(ベクトル図)



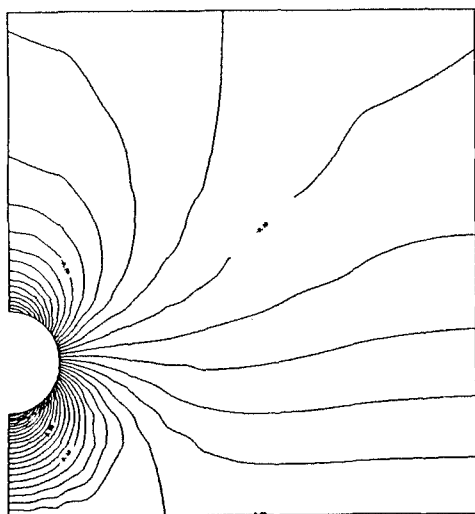
資料-7 モールの応力円図



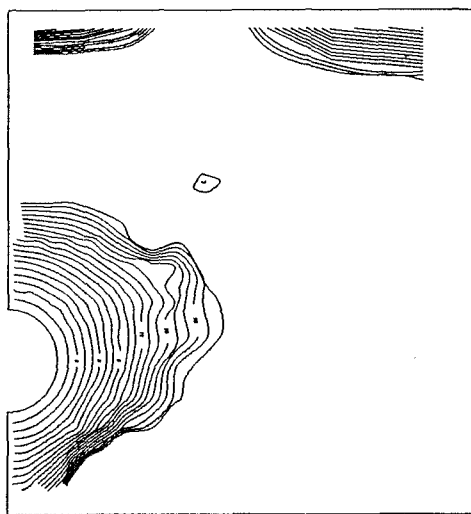
資料-8 地盤応力図



資料-9 せん断応力コンター図



資料-10 鉛直方向変位量コンター図



資料-11 点安全率コンター図

#### 4. 4 破壊接近度法による非線形弾性解析システム (NATM/PC)

##### (1) システム概要

本システムは、トンネル等の地下空洞のNATMによる掘削工事における地盤(岩盤)の挙動に対して、掘削順序に応じた载荷、材料のクリープ特性、あるいはロックボルト等を考慮して解析するシステムである。

- ① 材料の非線形特性は、岩盤に対して庄子らが提案している破壊接近度法を使用し、前ステップまでの累積応力より変形係数とポアソン比を決定する。
- ② ロックボルトの評価は、ロッド要素を用いてモデル化し、岩盤とのすべりに対しては更に特殊結合要素を使用できる。また、ロックボルトの非線形特性を与えることができる。
- ③ 非線形解析手法は、増分法によった。

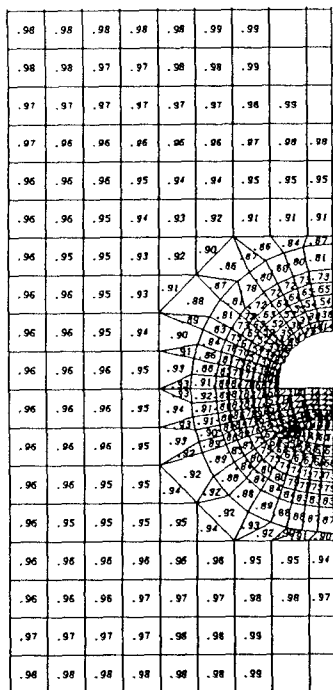
##### (2) システム設計上の留意点

本システムの解析対象トンネルは、主としてNATMによるトンネル掘削を対象としているため、掘削段階を表現する詳細な要素作成、あるいは吹付けコンクリート、ロックボルトの施工による要素追加があり、取り扱い要素数が多くなる。また、破壊接近度法を用いた地盤の変形特性を各段階ごとに定めて逐次解析するものであること、さらに指定によりクリープによる変位・ひずみ・応力も解析できるシステムとしたため、できるだけ多くの要素を取り扱えるようにすることと、演算精度確保のための倍精度変数の使用という相反する条件をパソコン上で実現する必要があった。

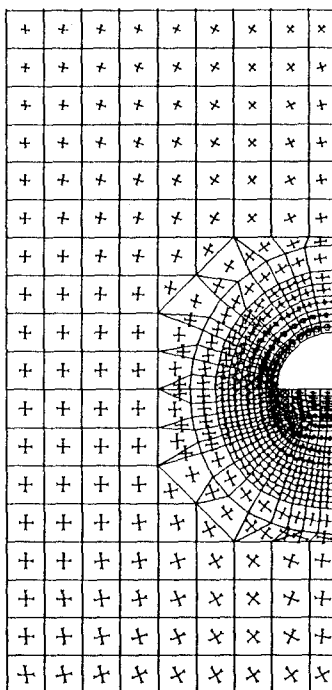
このため、大きくなる全体剛性マトリックスをブロック単位で分割作成する手法をとった。その処理順序は、全剛性マトリックスブロックおよび荷重ベクトルの項をメモリに展開し、2ブロックずつ作成したものを剛性ファイルに出力するものである。このようにして演算の精度確保と取り扱い要素の増大の要件に対処した。

##### (3) 実行例

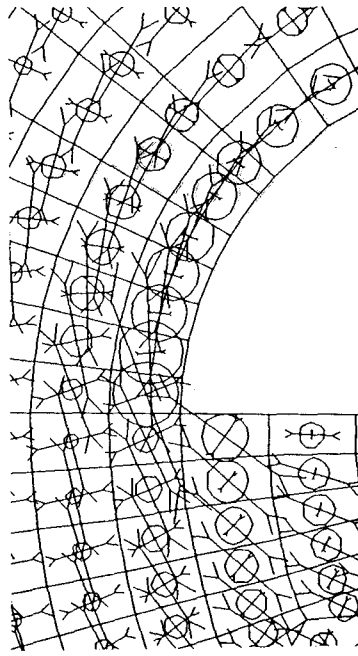
NATM/PCによる解析事例を資料-12～資料-14に示す。



資料-12 破壊接近度



資料-13 応力図



図面注) 円表示 :  $\tau_{xy}$ を示す。

資料-14 応力拡大図

## 5 パソコンを利用した設計支援システム活用の効果

- ① F E Mによるトンネル掘削時の周辺地盤挙動や地表面沈下の把握、将来の建物荷重に対するトンネル覆工の応力状態の変化をシミュレートすることで、新工法による覆工耐力の確認、安全性を理論的背景をもって評価することを効率的に行うことができた。これは、本システムが数値解析結果を視覚化し、設計者に対して適切な判断材料を提供する設計ツールとして有効であった結果と考えられる。
- ② 記憶容量等に制約はあるものの、パソコン上で十分実用的に解析・設計が行え、設計者自身の都合で自由に操作ができることを考えると、むしろ汎用コンピュータよりターンアラウンドが早い。こうしたことから、設計者の納得のいくまで繰り返し設計業務を行うことができ、結果として合理的な設計が行えた。
- ③ 場所を選ばぬ解析処理により、技術者が身近に利用できる設計ツールとしての活用が計れ、これに伴い、設計入力情報に対する価値観の高揚にもつながった。一例としては、F E M解析における入力物性値であるポアソン比( $\nu$ )や土の変形係数( $E$ )の設定値など、土質調査における試験の重要性を再認識し、設計に必要な地質情報を適切に得るための土質試験法の検討などに結びつくこととなった。

## 6 おわりに

これらのシステムは、トンネル設計支援をパソコン上で十分に発揮することが可能であることを実証した。安価なパソコンを使用した設計支援システムへの期待は大きく、本システムを全社的な情報化の一環としてさらに発展させたいと考えている。

今後、複雑化する都市内施設に対する影響評価や、複雑な地盤構成を対象にした高度な解析では、演算要素数および非線形弾性計算の解析ステップ数の増大など、システム機能の強化が必要となろう。このような課題には、最近急速に機器の価格がパソコン並の価格に近づきつつあるEWSの高機能性(高速演算、大容量メモリ)を活用することが有効であると考えられる。現在、次の取り組みに向けて、パソコン(PC9801)の取り扱いやすさとEWS(FUJITSU、S-4/1)の高速処理などの特長を相互に生かすためのネットワークシステムを検討中である。

また、設計支援システムとデータバンクの有機的な接続や図表類保管のシステム化(CAD化、光ファイル装置の利用)なども設計支援システムの機能向上に結びつくものと考えられる。こうした時代の潮流に対応した適切な機器の導入と活用を行い、よりよいトンネル構造物を建設することを目指していきたいと考えている。

### [参考文献]

- 1) 併進工法研究会編：掘削・覆工併進工法（直打ちコンクリートライニング工法）  
吉井書店、産業図書
- 2) 桑原清、鈴木啓晋、井口光雄：パソコンによる情報化設計ツール  
第14回土木情報システムシンポジウム講演集
- 3) 佐々木幸一、片山正、井口光雄：パソコンによる設計情報支援システムの開発  
第13回電算機利用に関するシンポジウム講演集
- 4) 土屋 敬：ロックボルト・吹付けコンクリートトンネル工法の設計に関する研究
- 5) 川井忠彦：科学技術計算と計算機シミュレーション  
生産研究37巻12号(1985.12)