

事前数値解析による電力洞道連係部地下空洞の挙動予測手法について

THE NUMERICAL ANALYSIS FOR THE FORECASTING METHOD OF THE CAVERN'S BEHAVIOR
APPLIED TO THE MANHOLE FOR THE JUNCTION OF THE ELECTRIC POWER TUNNELS

畑 敦* ・ 松平伊三男** ・ 真下義章***

Atsushi HATA, Isao MATSUDAIRA, Yoshiaki MASHIMO

Generally speaking, the finite element method (FEM) analysis in condition of the 2-D plane strain is applied to the design for tunnels regarded as 2-D structure. But in case of 3-D underground caverns, such as manholes of a electric power tunnel, 3-D effects of the ground behavior cause the the plane strain theory not to hold good, and real behavior of the underground cavern becomes remarkably different from analytic forecasts. This paper explains the point at issue of 2-D plane strain FEM through the design, the execution, and the post-analysis for the underground manhole construction in a part of Miyamasuzaka electric power tunnel project, and proposes a reasonable new design method based on the exact analytic forecasts.

keywords : FEM, analytic forecast of tunnel behavior, 2-D plane strain model, axial symmetry model, underground junction of the electric tunnels

1. ま え が き

一般的に、線形構造物であるトンネルの設計に数値解析手法を適用する場合、二次元平面ひずみモデルによるFEMが用いられる。これは、トンネルの挙動は切羽近傍では三次元的挙動を示すものの、最終結果は平面ひずみ解に近似できることによる。しかし、電力洞道人孔部のような三次元的な形状を持つ地下空洞の場合、地山の三次元的な挙動が無視できず、平面ひずみの仮定が成立しなくなり、事前解析による挙動予測と実際の現象との間に著しい相違が見られることになる^{1) 2)}。

しかし実際の設計では、このようなケースでも二次元平面ひずみモデルが適用されることが多い。これは三次元解析が作業の煩雑さやコストの面で現在一般化されていない点、また一般に平面ひずみ解析では三次元解析よりも安全側の評価が得られる点などの理由に基づいている³⁾。こうした現状は、地下空洞の合理的な設計を追究する意味から改善が望まれる点であると思われる。

本報告は電力洞道連係部地下空洞の設計、施工、事後解析を通じて、二次元平面ひずみFEMによる挙動予測の問題点を抽出するとともに、精度の高い予測解析に基づく合理的な設計手法の提案を行うものである。

* 東京電力（株） 東京南支店流通施設部

** 清水建設（株） 土木本部土木第3部 工事長

*** 清水建設（株） 東北支店三戸トンネル作業所

2. 工事概要

対象工事は東京都渋谷区渋谷の街路交差点直下（土被り13m）において施工された、東京電力（株）宮益坂変電所付近管路新設工事の中の洞道の人孔築造工事である⁴⁾。これは新設洞道（ $\phi 2,800$ ）を既設洞道（ $\phi 3,550$ ）にT字型に連係するものであり、高さ8.9m、幅6.36m、長さ7.35mの卵型断面の地下空洞をNATMにより掘削した後、既設洞道のセグメントを撤去し躯体を構築した。既設および新設の洞道と連係部の概念図と平面図を図1、2に示す。

施工箇所付近の地質は上位より埋土、関東ローム層、上部東京層、東京礫層および上総層から構成されており、連係部の掘削深度には図3に示すように洪積粘性土と砂質土との互層となっている。これらは強度の非常に低い軟弱な層であり地山強度比 $qu/\gamma h=0.4$ 程度と予測されたため、掘削に先立ち地上からのJSGにより周辺地山の改良を実施した。

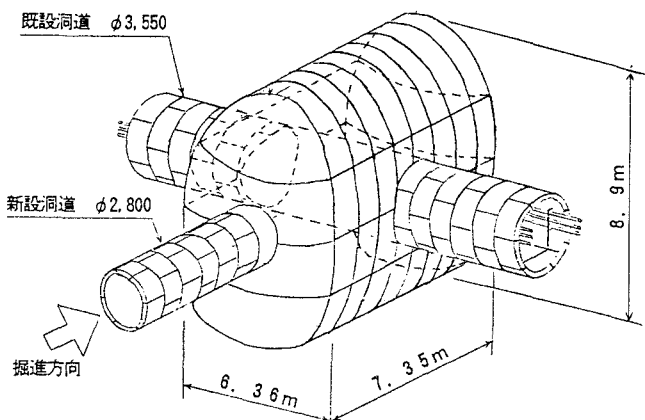


図1 連係部地下空洞形状概念図

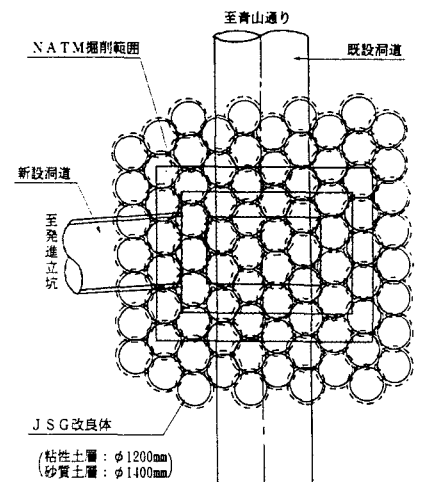


図2 連係部平面図

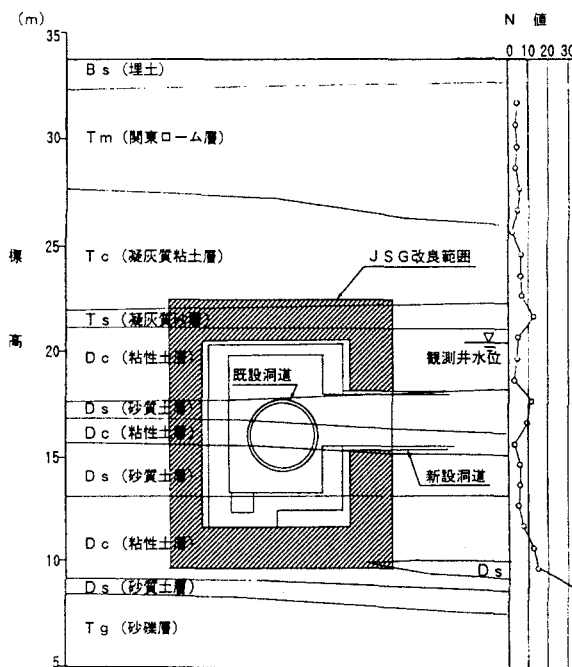


図3 地質縦断図

掘削方式はピックハンマーによる人力掘削で行い、加背割は全断面を4段階に分割した。また一次支保には吹付けコンクリート（一次： $t=50\text{mm}$ ，二次： $t=200\text{mm}$ ），鋼製支保工（H-150，H-200），ロックボルト（ $L=1.5\text{m}$ ， 2.0m ）を用いた。標準支保パターンを図4に示す。

3.設計解析（平面ひずみモデル）

設計時の挙動予測解析は二次元平面ひずみ条件で弾塑性FEM解析により実施した。解析順序は，最初に地山要素の自重による初期応力解析を実施し，その後掘削順序に従って逐次地山要素の掘削，支保建込みを繰り返した。先行応力開放率は40%とし，地山要素の掘削に伴う掘削相当外力が40%に達した時点で支保建込みを実施した。地山の破壊基準にはモール・クーロンの基準を用いた⁵⁾。

解析は，既設洞道の中心軸で切った断面，既設洞道を含まない断面，その中間，の3ケースで実施した。解析ケースを図5に示す。なおロックボルトに関してはモデル化を行う上でその作用効果に不明な点が多いため安全側の考慮から入力を行わなかった。

解析結果のうち，坑内変位について図6に示す。

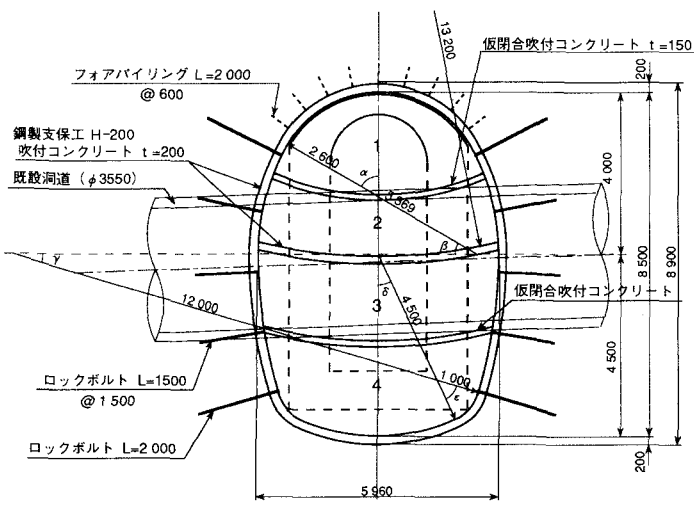


図4 NATM標準断面図

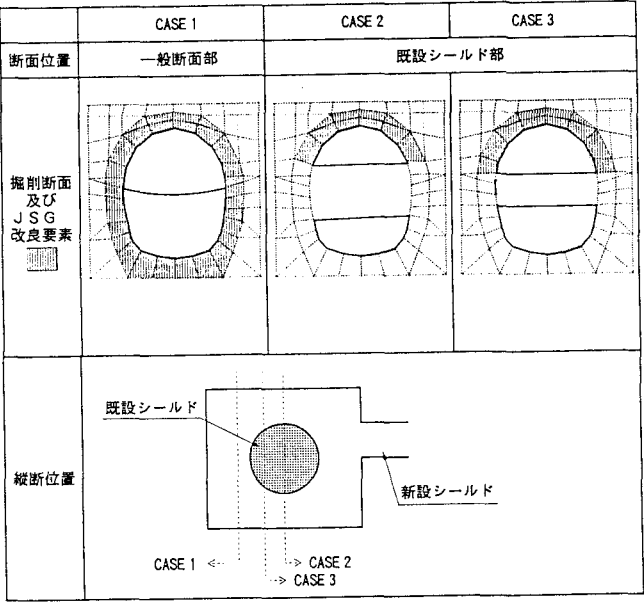


図5 設計FEM解析ケース

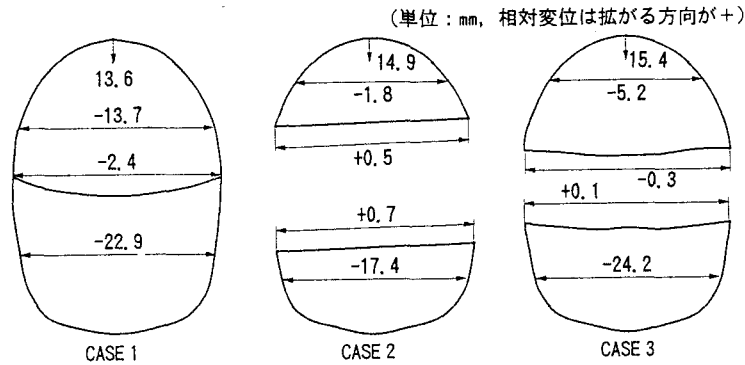


図6 FEM解析結果（内空変位，天端沈下）

4.現場計測結果

4.1.計測概要

当工事では、トンネル支保と周辺地盤の挙動を把握し、施工の安全性および初期設計の妥当性を検証することを目的として計測管理を実施した。計測断面は3断面であり、計測項目はトンネル支保（吹付けコンクリート、鋼製支保工、ロックボルト）応力、内空変位、地表面・地中内変位を設定した。図7に配置を示す。

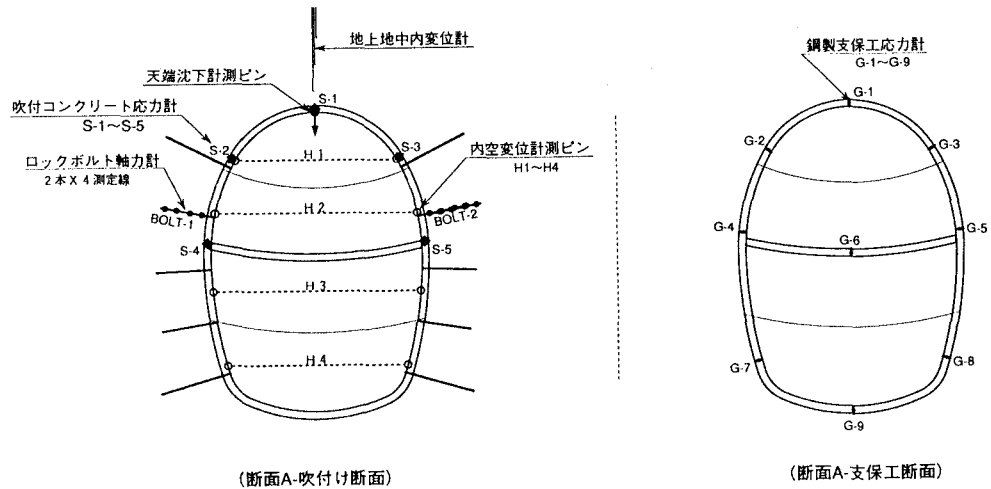


図7-a 計測器配置（坑内）

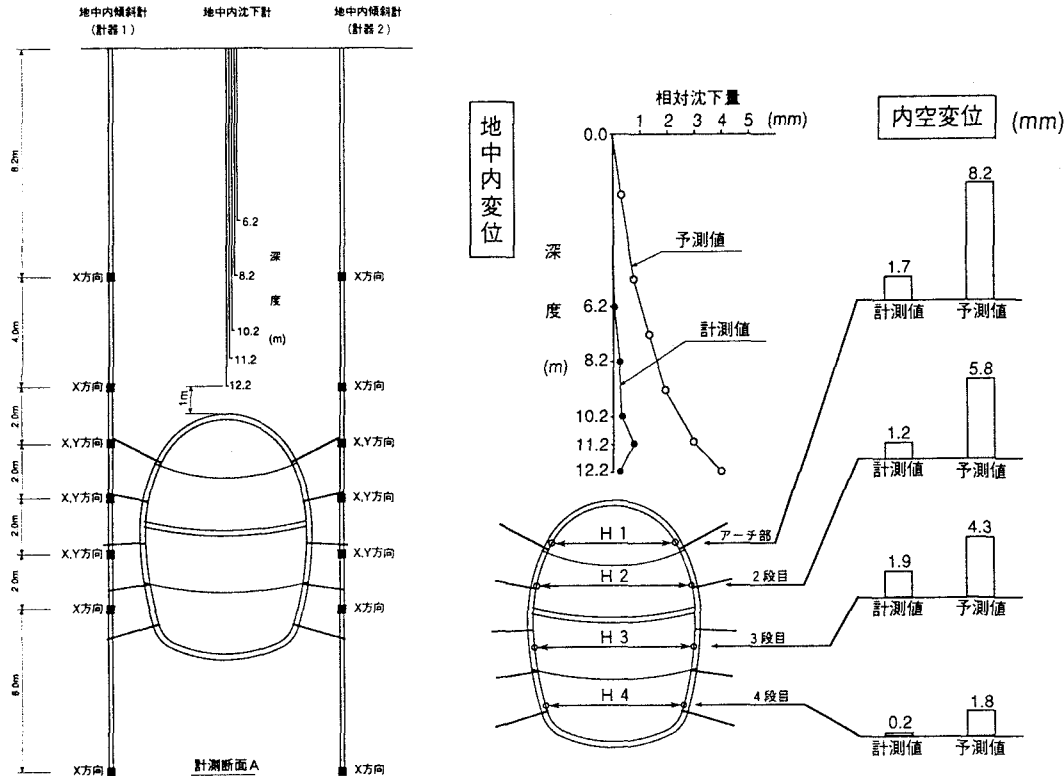


図7-b 計測器配置（坑外）

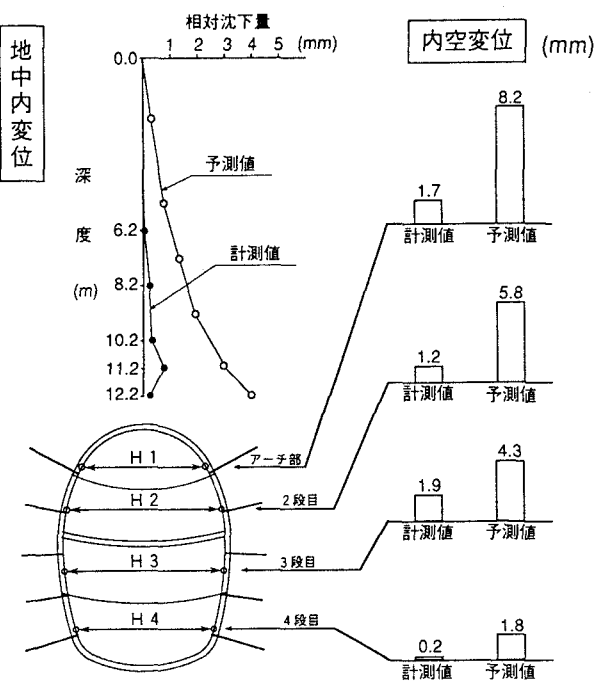


図8 計測結果と予測値との比較（変位）

4.2.事前解析結果との比較

現場での計測の結果、トンネル支保応力、変位ともに問題のない範囲に収まった。その点では安全を十分に確保した良好な設計・施工の結果であったと評価できるが、図8に示すように事前予測結果との開きが大きい点では予測解析手法の適切さに問題を残す結果と考えられた。

事前解析が、計測により確認された実際の地下空洞の挙動を精度良く予測できなかった点に関しては以下に示す様々な要因が考えられた。

①解析に入力した物性値はそれ自体が誤差を多く含むものであるうえ、地盤の初期応力も推定されたものであるなど、FEM解析そのものに限界がある。

②解析では二次元平面ひずみモデルを用いたのに対し、空洞形状の三次元的な影響が強く、解析モデルが適切でなかった。

③解析上はロックボルトの効果を考慮しておらず、支保効果が過小評価されていた。

今回のケースでは空洞の形状が高さ8.9m、幅6.36mに対して奥行きが7.35mと小さいため、上記の中でも特に②の要因による影響が大きいものと推定できる。

そこで、より現実の空洞形状に近いモデルとして、軸対称モデルによるFEMを用いた事後解析を実施し、計測結果との比較評価を行った。

5.事後解析（軸対称モデル）

5.1.解析条件

軸対称FEMの解析条件、入力定数および掘削手順などは前述の平面ひずみ解析と同じものを用いた。解析ケースに関しては、既設洞道を含まないケースのみ実施した。軸対称モデルの解析メッシュを図9に示す。

5.2.解析結果と計測値との比較

軸対称解析結果と主計測断面の計測値との比較を地中内変位、内空変位について図10、11に示す。図より、軸対称解析値と計測値との比較では解析値が若干大きい傾向であるが、全般的に両者は良好な一致を示している。

このように事後解析の結果から判断して、本ケースにおいてFEMによる地下空洞の挙動予測を行う場合、平面ひずみモデルよりも軸対称モデルを用いる方が実際の現象に近い解析結果を得ることができた。言い換えれば、今回対象とした地下空洞の場合、軸対称FEMを用いることによりより合理的で経済的な設計結果が得られるものと考えられる。

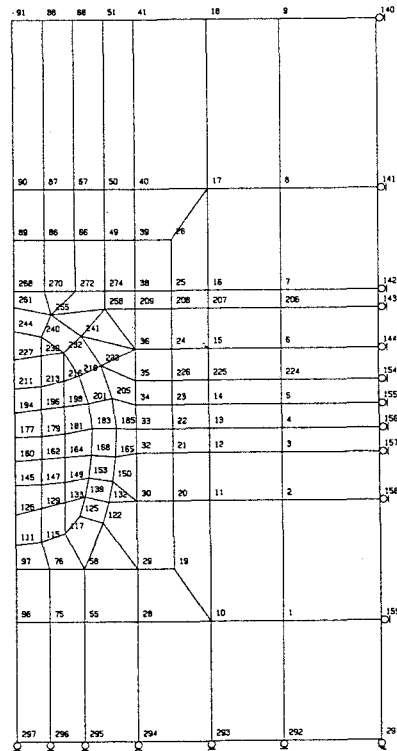


図9 軸対称FEMメッシュ

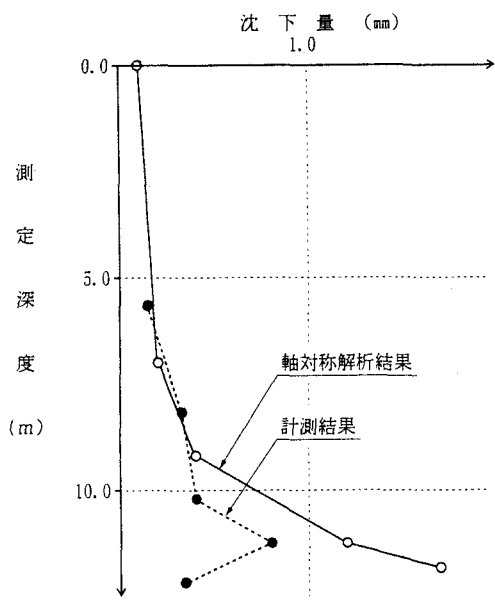


図10 計測結果と軸対称解析結果との比較
(地中内変位)

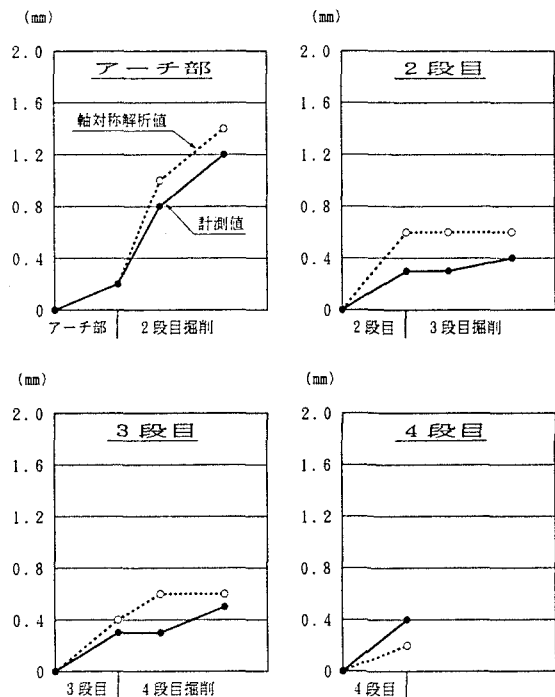


図11 計測結果と軸対称解析結果との比較 (内空変位)

6. まとめ

一般的なトンネルのFEM解析は、通常二次元平面ひずみモデルにより実施されており、今回実施した洞道の連係部地下空洞の設計においてもそれに従った。その結果、計測値から判断すると、トンネルの変形や支保の応力などには大きな余裕が残ることが判明した。このことは安全率を大きく確保した設計であったという点では評価できるが、地下空洞のより合理的な設計を追究するという意味では若干不満が残った。

一方、施工後に実施した軸対称FEMの結果は計測値とよく一致することが判った。したがって本ケースでは軸対称FEMに基づく設計が妥当であったと考えられる。この結果は、類似した地下空洞工事における合理的で経済的な最適設計を模索する上で、ひとつの方向を示唆するものと位置づけられる。

今後は類似の地下空洞掘削工事において更にデータの収集、蓄積を行い、安全面での裏付けを得たうえで、現実に即した解析モデルを効果的に用いた新たな設計手法が確立されることが望まれる。

7. 参考文献

- 1) 里優, 亀村勝美: 切羽の進行を考慮したトンネルの二次元平面ひずみ弾塑性解析, 第15回岩盤力学に関するシンポジウム, 1983年, pp.150~153
- 2) 伊藤淳, 村西佳美, 安藤知明: 山岳トンネルの新技术 (34), トンネルと地下Vol.21-1号, 1990年, pp.61~74
- 3) 安藤知明, 高尾肇: 三次元有限要素法による掘削解析, 富士総研技報Vol.1 No.2, 1990年, pp.68~77
- 4) 畑敦, 真下義章: 交差点直下における洞道地中連係部のNATMによる施工, 第46回土木学会年次学術講演会, 1991年, VI-70, pp166~167
- 5) 地盤工学における数値解析の実務, 土質工学会, 1987年