

NATMにおける三次元支保の効果とその適用<sup>1)</sup>

日本鉄道建設公団：正会員 小森 博 同：同 ○堀地 紀行

同：同 熊耳 哲雄 大成建設(株)：同 大津 宏康

## 1. はじめに

一般にNATMの支保設計は、地質調査などの結果を基に、切羽に出現するであろう地山を想定し、これに地山の物性値を加味して、支保の諸元を決定している。つまり、現行のNATMの支保設計では、地山が同一の条件を有していると判定されれば、地山内に均一の支保を連続させることになる。

こうした背景には、幾何学的に見ても本来であれば三次元として取り扱われるべきトンネルの力学挙動を、NATMの導入期においては解析手法の制約などから、平面ひずみ状態を仮定した二次元問題として支保の設計を説明してきたことも、その大きな理由の一つと考えられる。

一方、トンネル掘削では切羽の進行に伴い、支保及び地山が三次元的な挙動を示すことが知られている。また最近では計算技術の進歩から、トンネル掘削時の支保及び地山の挙動を三次元として解析することが可能となってきた。こうした状況を踏まえ、本来であれば地山の判定から均一の支保を連続すべきところを、竹における節の効果やボックス・ガーダーにおけるダイアフラムの効果を着想として、あえてトンネルの縦断方向について支保剛性に強弱をもたせた三次元支保を考案した。この支保の効果として、地山については、トンネル縦断方向のアーチ効果の発現を、また支保構造としては、薄肉円筒構造におけるリブやダイアフラムの効果を期待した。

本稿では、三次元支保の効果を把握する目的で行った、施工前の予備解析である三次元弾性FEM逐次掘削解析(図-1)の結果の概要と、試験施工の結果の一部を報告する。

## 2. 三次元弾性FEM逐次掘削解析による予備解析

三次元弾性FEM逐次掘削解析は、同一の地山物性値に対して次の3ケースについて実施した。

- 1) 軽い支保(軽支保)を連続させるケース
- 2) 重い支保(重支保)を連続させるケース
- 3) 軽い支保6基、重い支保3基の計9基を1サイクルとした三次元支保のケース

解析結果の一つとして、トンネルの安定性を評価する際、重要な指標となる形状弾性ひずみエネルギーの3ケースの分布状況を図-2に示す。ここでz軸の値は切羽後方の位置を示す。三次元支保における重支保区間の中央部の形状弾性ひずみエネルギー $U_s$ は、軽支保区間の影響を受けて、均一な重支保に比べて多少大きめの値を示した。また三次元支保の軽支保区間は重支保区間の影響を受けて、均一な軽支保に比べて形状弾性ひずみエネルギーは多少小さめの値となった。さらに三次元支保における重支保と軽支保のすりつき部では、均一な重支保の値と均一な軽支保の値の中間的な値を示している。注目している点は、この区間で地山が三次元応力状態となり、トンネル縦断方向に作用するせん断応力が発生し、主応力の方向が軽支保区間を跨ぐかたちで、トンネル縦断方向にアーチ形状として認められたことである。しかもトンネル縦断方向の主応力と平均主応力の値が、解析結果(図-3・4)によると概ね等しいため( $\sigma_2 \approx \sigma_m$ )、(1)式に示す形状弾性ひずみエネルギー $U_s$ の増加に対し、トンネル縦断方向の主応力 $\sigma_2$ はほとんど寄与しない。

$$U_s = 1/4 G \{ (\sigma_1 - \sigma_m)^2 + (\sigma_2 - \sigma_m)^2 + (\sigma_3 - \sigma_m)^2 \} \quad (1)$$

ここに、 $G$ はせん断弾性係数、 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ は各主応力、 $\sigma_m$ は平均主応力を表す。

## 3. 試験施工

事前解析の結果を裏付けとして、三次元支保の試験施工と現場計測を実施した。

この区間の地質は転石を含む凝灰角れき岩層で、湧水も生じた。このため施工を優先し、重支保と軽支保の支保剛性の強弱は、ロックボルトの本数のみで差異をつけた。図-5に三次元支保の重支保パターン(右)、軽支保パターン(左)を示す。図-6には収束した天端沈下量をトンネル最大幅( $D$ )で無次元化した天端

沈下係数の分布状況を示す。H2, L2, H3の3点を比較すると、H2の値が0.005程度であるのに対し、H3の値は0.002程度に減少している。H2の値は長く続く軽支保区間の影響で、大きめの値を示したと考える。一方、H3の値は、H2付近の重支保区間の影響を受け、H2の値と比較して低く抑えられたと考える。また、L2の天端沈下係数は、H2, H3の重支保区間の影響を受け、ほぼ重支保と等価な天端沈下係数を示した。

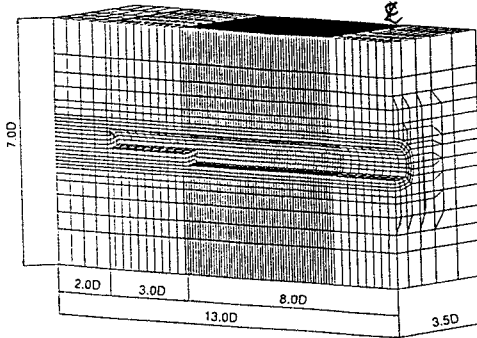


図-1 解析メッシュ図（鳥瞰図；掘削終了時）

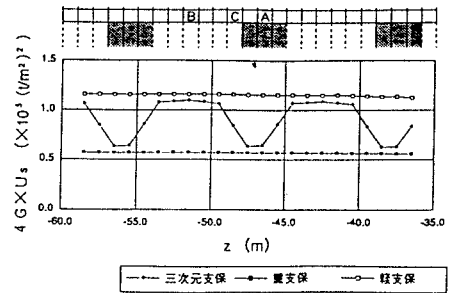


図-2 形状弾性ひずみエネルギーの分布状況

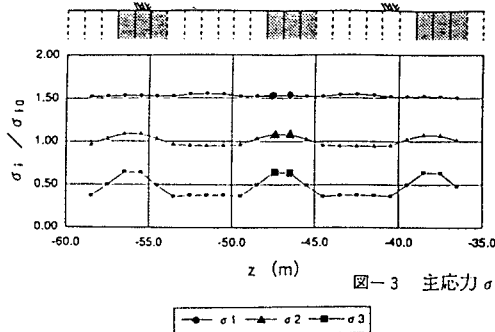
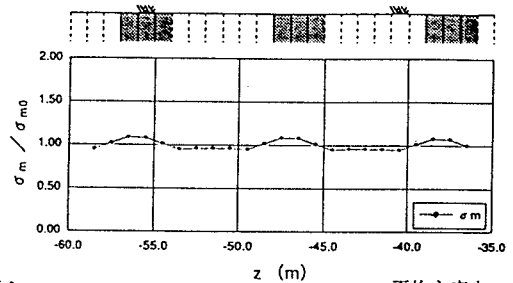
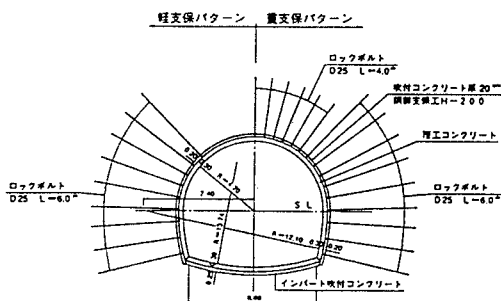
図-3 主応力  $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 図-4 平均主応力  $\sigma_m$ 

図-5 試験施工区間の支保パターン

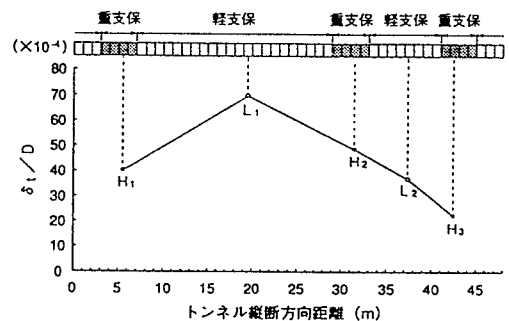


図-6 天端沈下係数の分布状況

#### 4. まとめ

このように試験施工とFEM解析の結果から、トンネル縦断方向の地山アーチの形成が把握され、立体的な支保効果を狙った三次元支保の有効性が概ね確認された。しかしながら、重支保、軽支保の個々の設計や支保間隔といったバリエーションの問題など、具体的な三次元支保の設計についてはまだ課題を残しており、今後さらに検討を深め、より合理的かつ経済的なNATMの支保構造を追求したいと考えている。

#### 【参考文献】

- 1) 小森博・堀地紀行・熊耳哲雄・大津宏康・瀧治雄：NATMにおける支保構造の三次元効果とその評価について，土木学会論文集投稿中