

## (65) 近接交差トンネルの2次元・3次元解析

(財) 鉄道総合技術研究所 正会員 朝倉俊弘  
" 正会員 ○松本吉雄  
(株) 構造計画研究所 伊藤和郎  
近畿大学 正会員 久武勝保

### Two- and Three-Dimensional Analyses of Closely Crossing Tunnels

Toshihiro ASAKURA, Railway Technical Research Institute  
Yoshio MATSUMOTO, Railway Technical Research Institute  
Kazuo ITO, Kozo Keikaku Engineering Inc.  
Masayasu HISATAKE, Kinki University

#### a b s t r a c t

When a new tunnel is constructed near an existing tunnel, effects of the new tunnel on stability of the existing tunnel should be inquired prior to the construction. In order to make the effects clear numerically, a three-dimensional finite element analysis has been performed. The three-dimensional analysis, however, requires a great deal of time and cost, so an approximate estimation method of lining stresses by two-dimensional analysis is also proposed here. The model of the analyses is the closely crossing tunnels with 2m separate distance. FEM programs of ADINA and NATMFEM are applied for three- and two-dimensional analyses respectively. The three-dimensional analysis of linear elasticity with 4400 nodes and 3200 elements has been performed by taking construction sequence into account. The two-dimensional analyses have been performed in two planes in which the new tunnel axis and the existing tunnel axis lie respectively. Through three- and two-dimensional parametric studies, an approximate three-dimensional tunnel behavior by two-dimensional analysis has been proposed.

#### 1. はじめに

近年国土の高度利用の傾向と相まって、既設トンネルに非常に近接して工事が行われる例が増えている。この場合、既設トンネルの覆工の現状での健全度評価もさることながら、既設トンネルへの影響予測が重要な課題となる。

トンネルの交差は3次元的問題であり、厳密には3次元解析に基づく検討がなされるべきであるが、現状では3次元解析はデータの作成、解析時間等多くの時間と経費を要し、又その扱える範囲も2次元解析に比較し多くの制限をもっている。この為、比較的容易に実施できる2次元解析によりトンネルの交差問題を近似的に表現する方法を提案する。

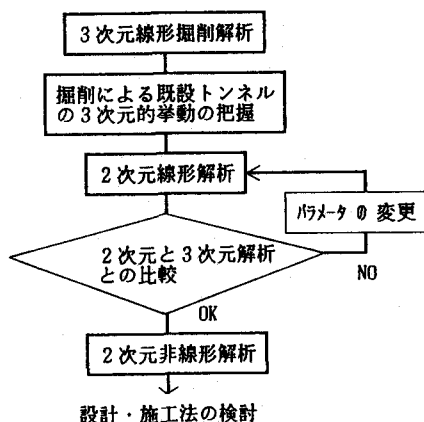


図1 解析全体フロー

これまで用いられている既設トンネルを梁として表現するような方法<sup>1)</sup>では、既設トンネル直交断面での解析が行えないこともあり、今回提案する方法では2枚の要素を重ね合わせることで、新設トンネルの掘削を近似的に表現した。本手法の妥当性は図1に示すフローにより検討したが、今回実施した例について見れば、比較的良く3次元効果を表現していると考えられる。以下検討結果を報告する。

## 2. 3次元掘削解析

本研究では、いくつかのケースについて3次元解析を行い、提案する2次元モデルにおける適切なパラメータを同定することを目的とするが、現在はこれらの検討に着手したところであり、今回は図2に示す近接度の高い（離隔距離2m）硬岩地山における1ケースのみ、汎用プログラム「ADINA」を用い解析を行った結果を報告する。

本ケースは、既設の鉄道複線トンネル（土盛り110m：内空断面約50m<sup>2</sup>）直下に内空断面約30m<sup>2</sup>のトンネルを直交して新設するものである。解析に用いた要素は、それぞれ地山には8節点のアイソパラメトリック要素、覆工部分には12節点要素を使用し、またそれに隣接する地山要素には10節点要素を用いた。以下に解析結果の一部を示す。

### （1）新設トンネルの天端沈下曲線

各掘削ステップにおける沈下曲線の形状は、既設トンネルより離れた位置に切羽が在る場合には、切羽到達位置での沈下量は概ね最終沈下量の1/3程度である。しかし、既設トンネル近傍においては、トンネル掘削により周辺地盤の応力再配分の影響を受け、新設トンネル部の鉛直方向の解放力が小さくなり、図に示す様に既設トンネル直下においては他の区間と較べ小さな値となっているのが特徴である。最大沈下量は0.17mmである。

### （2）既設トンネル覆工各部に発生する応力

掘削の進行に伴い、まず既設トンネル右側脚部が引きずられる様な状態で沈下し、覆工に発生する最大応力はいずれも引張応力となり、発生位置を右側肩部、右脚部、左脚部と変化し、切羽位置が既設トンネルを過ぎて4m前進した時点が最も大きな応力を発生する（最大発生応力は引張応力で22kgf/cm<sup>2</sup>となった）。次に解析結果の3次元表示の一例を図5に示す。

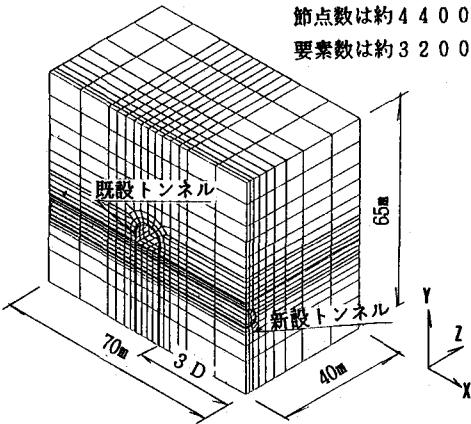


図2 3次元モデル

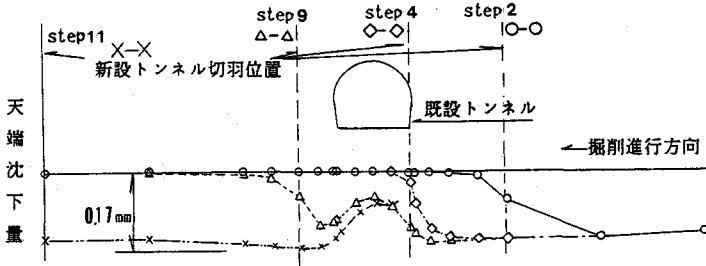


図3 掘削各ステップにおける新設トンネルの天端沈下量

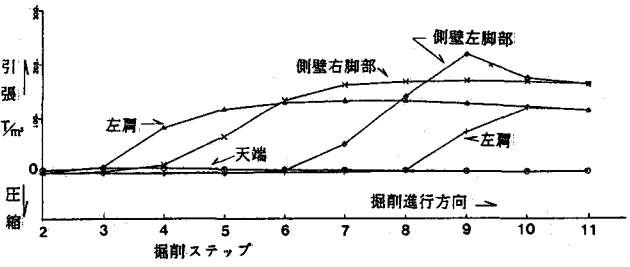


図4 既設トンネル覆工各部の最大応力  
（新設トンネル直上部における）

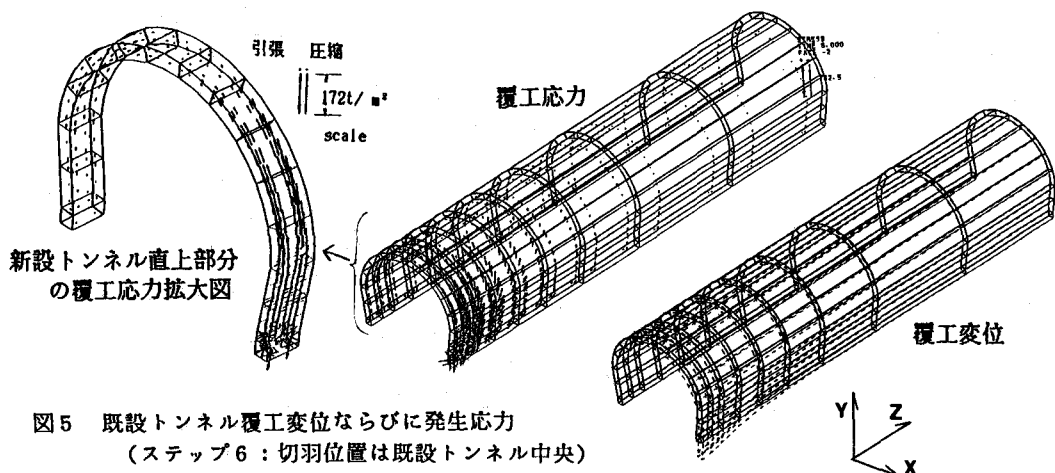


図5 既設トンネル覆工変位ならびに発生応力  
(ステップ6：切羽位置は既設トンネル中央)

3次元解析結果の出力情報は非常に多く、その中からいくつか整理したものを示したが、本解析により概ね既設トンネルの挙動が把握できた。次の章では更に2次元解析モデルの結果と比較し近似度を検証する。

### 3. 2次元掘削解析

#### (1) 2次元モデルの考え方

2次元モデルは、既設トンネル軸方向と、直角方向（新設トンネル軸方向）の2つの面において考える必要がある。既設トンネル軸方向モデルにおいては、主として新設トンネルの施工法、既設トンネル軸方向への影響範囲等を検討することが出来る。また、既設トンネル軸直角方向モデルでは既設トンネル覆工各部の発生応力ならびに補強方法等の検討が可能となる。モデル化の概念を図7、8に示す。モデルの基本的な考え方は、既設トンネル軸方向においては既設トンネル部分の解析要素を覆工部と地山部の2枚の要素を重合させたものとし、それぞれの剛性比ならびにトンネル周辺地山に及ぼす影響範囲を考慮し、その要素の厚さ比率をパラメータとするものである。又、既設トンネル直角方向面においては、新設トンネル掘削部分を2枚重ねの要素とし、掘削解析においては周辺地山への影響範囲を考慮し、残存する地山部と掘削によって除去される要素の厚さ比率をパラメータとし、3次元解析結果と照合することによりその近似度を判定し、適切な上述のa：bの比率を求めようとするものである。

#### (2) 2次元解析結果ならびに3次元解析結果との比較

比較検討のため行った2次元モデルによる解析ケースを表1に示す。以下に2つの解析面についてそれぞれ検討した結果を述べる。

##### ① 既設トンネル直角方向

ここでは、まず新設トンネルの天端沈下曲線が3次元解析

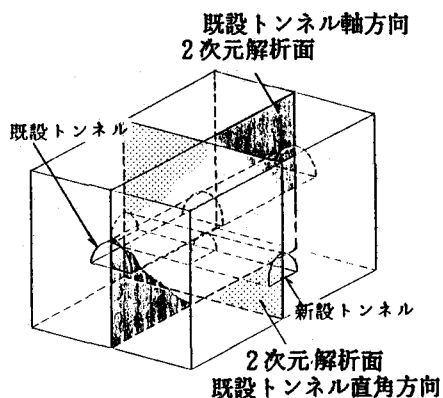
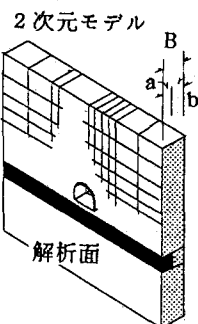
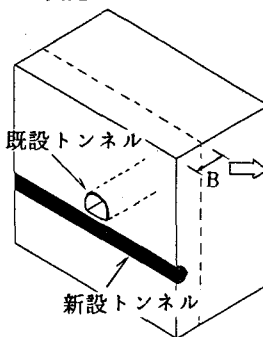


図6 3次元解析モデルと2次元解析面の関係

#### 3次元モデル



B：2次元化想定幅  
a：新設トンネル掘削部分（等価要素厚さ）  
b：周辺地山部分（ " ）

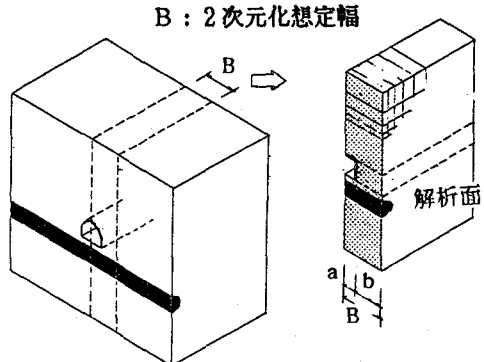
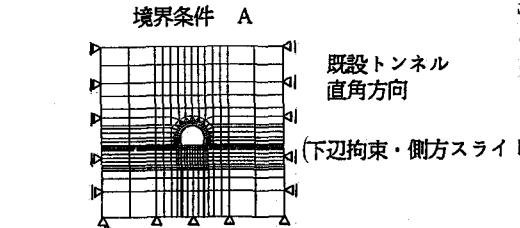
図7 既設トンネル直角方向モデル化の概念図

結果に良く近似するものを見出すこととした。  
 初期ケースのA-1モデルでは $a : b$ の比率を1:1.5と仮定し解析を行った。この結果は図9に示すように3次元解析結果のほぼ1/2の沈下量となったので、次に地山部分の厚さを半分にしたA-2ケースを行った。この場合、沈下カーブを良く近似することが出来たが、既設トンネル部の変位および覆工に発生する応力の適合性が悪かった。従って、現実には発生する力の伝達方向と2次元モデルとの相違を考慮し、境界条件を変えた2ケースを追加しこの点を考察した。A-4ケースに示す上辺の境界を拘束したモデルで比率を1:0.43にしたケースが、3次元解析結果と良い一致を示した。

② 既設トンネル軸方向

目標を既設トンネル脚部の沈下量が良く近似するものを見出すこととし、表1に示す4ケースについて解析を行った。それぞれのケースにおける沈下曲線を図10に示す。この場合、B-4ケースにおける1:2.3の比率において、変位の影響範囲ならびに覆工に発生する応力が良く一致する結果となった。ここで注目されることは、3次元解析結果では、既設トンネルの側壁脚部の沈下量は0.13mmとなっており、これは図に見られるように既設トンネルの影響の及ばない位置での変位とほぼ同様の値であり、ここでは地山部分の要素厚さを大きくとれば、結果が良くなることを示唆していると考えられる。

以上の試行を繰り返し、本ケースでは各解析面においてほぼ満足する結果を得ることができた。本手法においてキーとなる重合する要素厚さの比率を一般化し決定するためには、さらに解析事例を増やすことならびに、これらの結果を力学的に考察することが必要であろうと考える。



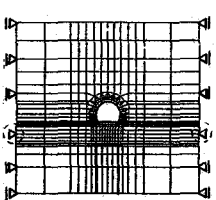
- a : 既設トンネル覆工部分 (等価要素厚さ)
- b : 掘削影響範囲の地山部分 ( " )

図8 既設トンネル軸方向モデル化の概念図

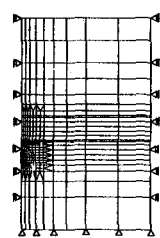
表1 2次元モデル解析ケース一覧表

| 解 析 ケース | 解 析 面      | 重ね合わせ要素厚さ比率 (a : b) | 境 界 条 件              | 備 考                       |
|---------|------------|---------------------|----------------------|---------------------------|
| A-1     | 既設トンネル直角方向 | 1 : 1.5             | 自重解析時 A条件            | ・掘削解析時 A条件<br>・ 同上        |
| A-2     |            | 1 : 0.75            | "                    |                           |
| A-3     |            | 1 : 1.5             | "                    | ・掘削解析時 B条件<br>・掘削解析時 上辺拘束 |
| A-4     |            | 1 : 0.43            | "                    |                           |
| B-1     | 既設トンネル軸方向  | 1 : 0.5             | 自重解析時 C条件<br>掘削解析時 " |                           |
| B-2     |            | 1 : 0.8             |                      |                           |
| B-3     |            | 1 : 1.6             |                      |                           |
| B-4     |            | 1 : 2.3             |                      |                           |

境界条件 B



境界条件 C



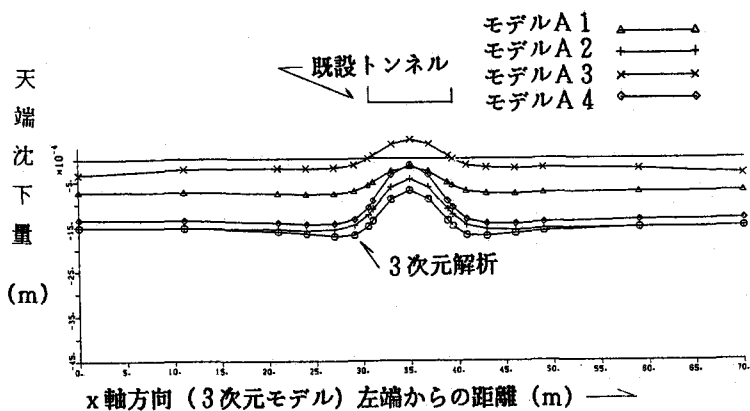


図9 各解析ケースにおける  
新設トンネル天端沈下  
量の比較

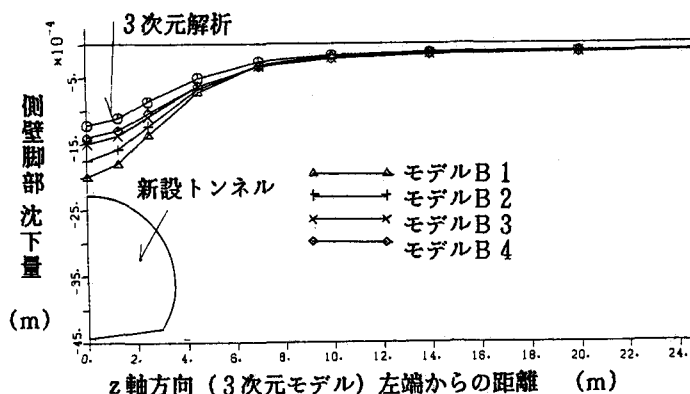


図10 各解析ケースにおけ  
る既設トンネル側壁  
脚部沈下量の比較

#### 4. おわりに

2次元解析により、3次元的な近接交差トンネルの挙動を近似的に表現する手法について提案した。今回は1ケースの事例についてのみ検討したが、地山の応力状態の表現等で2次元解析ゆえの限界があるものの概ね既設トンネルの沈下モード、覆工応力等について近似的な表現が可能であることが分かった。

今後、新設・既設両トンネルの直径、離隔、地山剛性等をパラメータとして本手法の妥当性及び適用範囲について検討を深度化し、さらに現場実測データ、模型実験データとの比較検討を行う予定である。本報告が近接交差トンネルの影響評価を簡便化する一助となれば幸いである。最後に、解析に当たっては隣構造計画研究所の福田昌幸氏に多大な協力を得たことを記して結びとする。

#### (参考文献)

- 1) 土屋 敬、吉田恒彦、安田憲彰、松本吉雄：「トンネル設計用プログラムの開発と解析事例」、鉄道技術研究所報告 NO.1351,1987.3
- 2) 朝倉俊弘、松本吉雄、伊藤和郎、久武勝保：「トンネル交差の影響予測解析(1)」土木学会第45回年次講演会講演概要集 第3部 p 566,1989.9
- 3) Lampman L.E,et,al: Use of ADINA for nonlinear three-dimensional analysis of intersecting tunnels in rock medium ,Comput.Struct.,Vol.21,No.1/2,1985