

トンネル周辺地山の違いによる切羽天端部の軸方向変位の挙動について

小泉 直人¹ 川原睦人² 黒田千歳³

¹正会員 佐藤工業株式会社 土木事業本部 技術部 (〒103-8639 東京都中央区日本橋 4-12-19)

E-mail:n.koizumi@satokogyo.co.jp

²正会員 中央大学教授 理工学部 都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

³佐藤工業株式会社 管理本部 情報管理部 企画課 (〒103-8639 東京都中央区日本橋 4-12-19)

山岳トンネルを安全に、経済的に掘削するためには、周辺地山状態を工学的につかむことが必要である。しかしながら、施工前に地山の特性を完全に把握することは難しく、施工前の TSP 探査や調査ボーリングによる前方地山調査および有限要素法による解析、施工中には、切羽観察、内空変位測定および計測結果による逆解析を行い、地山に適した支保設計を実施している。トンネルの計測は 2 次元で行われるが、本研究は、トンネル軸方向変位に着目し、軸方向変位により有限要素法 3 次元逆解析を実施し、トンネル周辺地山のヤング係数とポアソン比を同定した。ポアソン比が軸方向変位に最も影響を及ぼすことが判明した。

Key words : axial direction displacement, 3-D inverse finite element method, parameter identification

1. はじめに

山岳トンネルの設計は、ボーリング調査、弾性波探査などの事前地質調査をもとに行われるが、測定位置や頻度および解析原理上の問題点などにより、トンネル全体の地山状況を正確に把握することは、困難である。それゆえ、施工中においては、TSP (坑内弾性波探査)、坑内調査ボーリングなどの前方探査により前方地山を把握し、掘削中には、切羽観察、内空変位測定、支保部材および地山の応力・変位測定などの観察・計測結果をもとに、支保の修正設計が実施されている。

観察・計測の内、日常の施工管理として行われる内空変位計測 (天端部沈下測定、内空変位測定) は、最も多用される重要な計測であり、地山および支保構造が異常な挙動をしていないか、安定しつつあるかなどの判定資料を得るために、トンネル延長方向に一定の間隔で実施される。

近年、トンネルの内空変位測定に光波測距儀を用いることで、3 次元の計測が容易に行えるようになったが、地山の安定性および支保構造の妥当性の指標として使用されるのは、トンネル 2 次元横断面の変位であり、トンネルの軸方向 (延長方向) 変位の計測データを活用する技術は、いまだに確立されていない。

本報告は、トンネル壁面の軸方向変位を含む 3 次元変位を用いて切羽前方地山を評価することを目的に下記の 4 項目について調査および解析を実施した。

- ① 実トンネル現場での軸方向変位の挙動調査
- ② 計測データと解析値の比較検証
- ③ 軸方向変位に最も影響を与える地山物性値の特定
- ④ 3 次元有限要素法逆解析によるトンネル周辺地山物性値の同定

2. 実トンネル現場での軸方向変位の挙動調査

(1) 軸方向変位の計測結果

軸方向変位を実トンネル現場において測定、記録したところ、トンネル軸方向変位は、一定の方向に変位することは無く、掘削直後には、切羽前方および後方に変位していることが判明した。切羽前方や周辺地山の性状の影響により変位しているものと考えられた。

図-1 に A トンネル (水路トンネル 掘削断面積 50m²) の天端部初期変位量 (初期値と次回計測の変位量の差) および変位方向の計測結果を示す。硬岩の地山では、軸方向の変位は、ほとんど無いが、軟岩地山区間は、軸方向変位が大きく、切羽前方および後方に変位することが観測された。図-2 に A トンネルの軟岩地山の軸方向変位と沈下変位の比較 (軸方向の変位が顕著に現れていた断面) を示す。

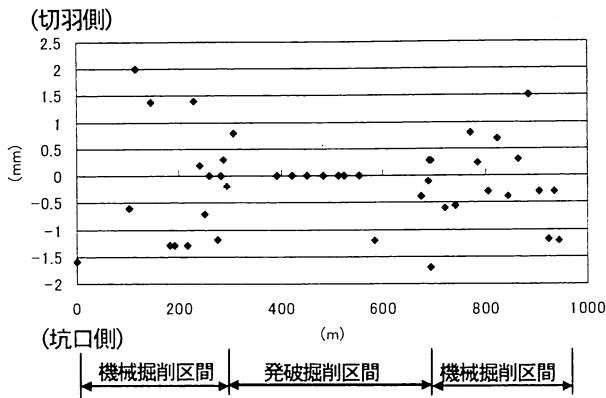


図-1 天端部軸方向変位量と変位方向

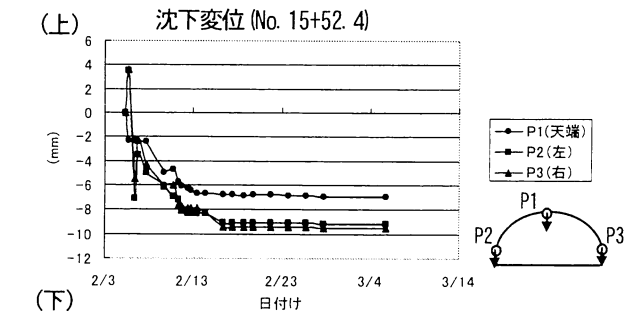
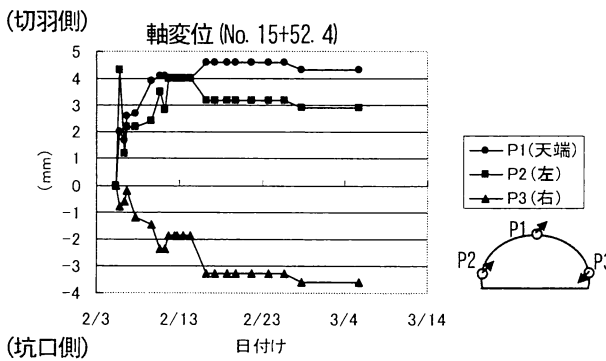


図-2 軸方向変位と沈下変位

Bトンネル（一般道路トンネル）においては、計測断面を1.2m間隔で3点連続設置し、天端部の測点において、変位の傾向を確認した。図-3 にトンネル断面図、図-4 にトンネル計測位置図を示す。

図-5 は、白抜き記号が鉛直方向の変位を示し、中実記号が軸方向変位を示す。鉛直方向変位は沈下をマイナスで表している。軸方向変位は坑口側（切羽後方）をマイナスとした。鉛直方向変位（沈下）は切羽から9m地点で変位がほぼ収束しているのがわかる。一方、軸方向変位は、はじめは切羽側に変位し、その後徐々に坑口側に戻ってくる傾向を示し、鉛直変位の挙動とは明らかに違った傾向を示している。

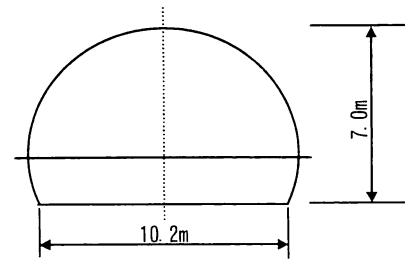


図-3 Bトンネル断面図

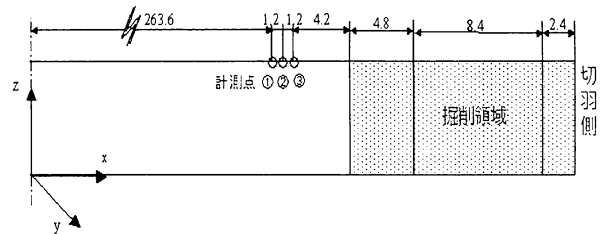


図-4 Bトンネル計測位置図

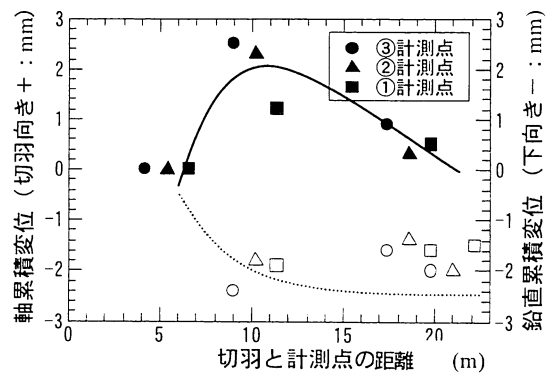


図-5 Bトンネルの変位と切羽の関係

3. 計測データと解析値の比較検証

(1) 3次元有限要素法弾性解析

3次元有限要素法弾性解析を用いて軸方向変位をもとめ、Bトンネルの計測データとの比較を行った。

計算に用いたメッシュの左半断面を図-6 に示す。

○解析条件

全体領域 : 60×60×96m

29,565 節点, 162,240 の四面体要素

ヤング係数 : 49MPa

ポアソン比 : 0.3

支保 : 無支保

境界条件 : 領域上面に(1,000kN/m²)を下向きに載荷 下面と側方4面はスライド

58.8m まで切羽を掘削し、その点から掘削長 1.2m 毎に掘削するものと仮定し、58.8m 地点の変位解析を実施した。軸方向変位と鉛直変位の増分変位を図-7 に示す。x 座標は計測データとの比較ができるように掘削完了後の x 座標(x=60)を切羽位置として、切羽から坑口側に向かって切羽からの距離をプラスとし、地山側をマイナスと表示した。

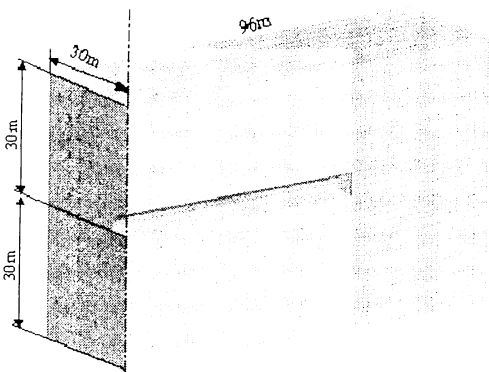


図-6 解析メッシュ図

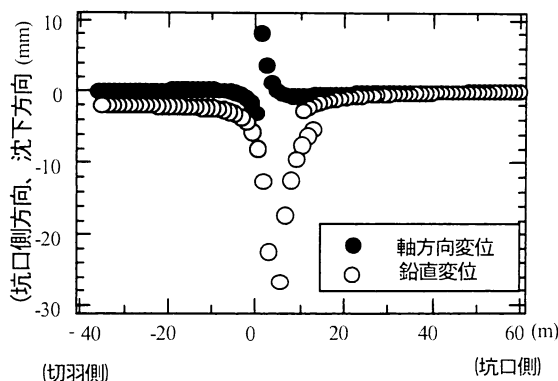


図-7 軸方向変位と鉛直変位の増分変位

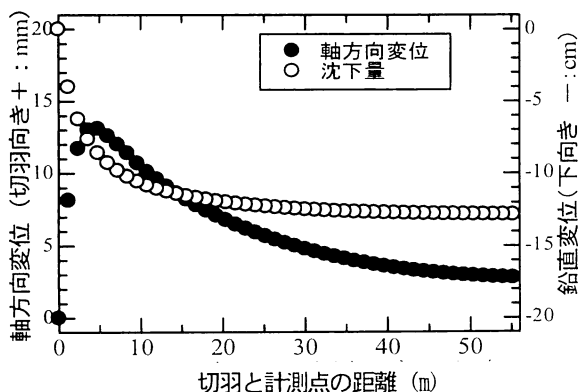


図-8 軸方向変位と沈下量の変化

図-7 の増分変位をみると、軸方向変位は切羽を境にして変位が逆転するのに対し、沈下は同じ方向の変位である。

図-8 では、切羽地点の変位をゼロにして切羽から遠ざかる向きに増分変位を足し合わせた。累積した軸方向変位は一旦切羽側に変位した後に坑口側に戻り初めて初期変位を相殺していき切羽から50m離れると3mm程度となる。それに比べて鉛直方向は、常に沈下方向の変位なので沈下の累積変位は、この計算では13cmとなった。

これまで、軸方向の変位は他の成分に比べて小さいと考えられてきたのは、このような挙動の違いによるものと思われる。

(2) 計測データと解析結果の比較

計測データと計算結果を比較する。図-9 に軸方向変位 図-10 に沈下変位の比較図を示す。

解析は、支保を考慮していないことより、計測値と解析値の変位量が相違すると考えられたため、ここでは、経時による変位量の傾向を比較するものとした。

a) 軸方向変位

計測値は、3mm 程度切羽方向に変位し、その後、逆転して坑口方向（手前）に変位している。一方、計算結果でも、6mm 程度切羽方向に変位し、その後に坑口側に変位し、計測値と計算結果は、同様な変位を示した。

相違点は変位量が2倍程度異なること、変位の反転位置である。これらは、地山の物性などの境界条件が実際の地山と違っているためと考えられる。以上の考察より、定性的には一致していると考えられる。

b) 沈下変位

天盤の沈下変位についての計測データと計算結果の比較を図-10 に示す。計測データと計算結果は、変位量の違いにより、同じオーダーの図に図示できなかったが、変位の傾向は、同じであることがわかる。

以上の比較結果検討から、つぎのことが判明した。

○軸方向の変位は一旦は、切羽側に変位したのち、掘削の進行で切羽が遠ざかると坑口側に戻る。

○沈下は、支保の効果を受けるが、軸方向変位は支保の影響を受けにくい。

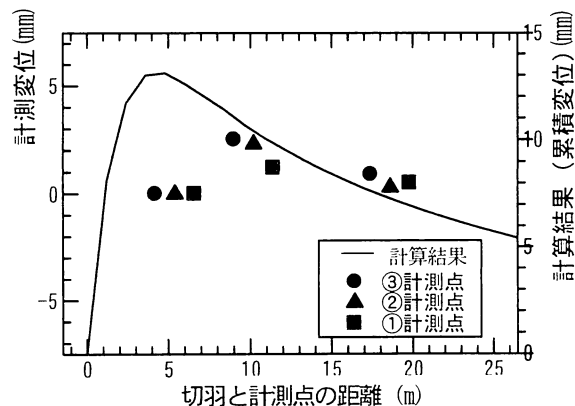


図-9 計測データと計算結果の比較(軸方向)

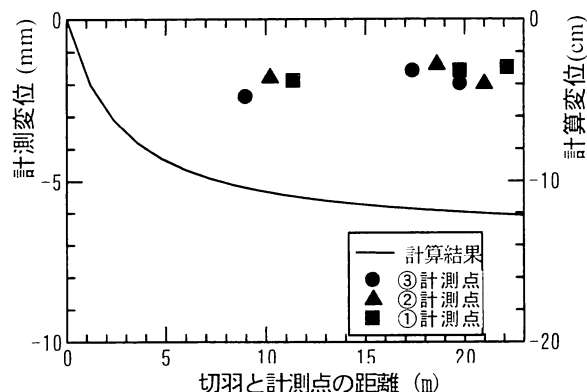


図-10 計測データと計算結果の比較(沈下変位)

4. 軸方向変位に影響を与える解析因子の特定

軸方向変位の挙動は、支保の影響をあまり受けず、前方および周辺地山の地質の影響を大きく受けると考えられるため、切羽前方に軟弱地山が存在するものとした解析と、地山の物性値ポアソン比を変えた場合の解析を実施した。

(1) 切羽前方に軟弱地山が存在する場合

前述のメッシュ図を使用し、切羽前方に軟弱な地盤が存在することと仮定し、解析を試みた(図-11)。

○解析条件

硬岩部ヤング係数：49MPa

硬岩部ポアソン比：0.3

軟岩部ヤング係数：9.8 MPa

軟岩部ポアソン比：0.35

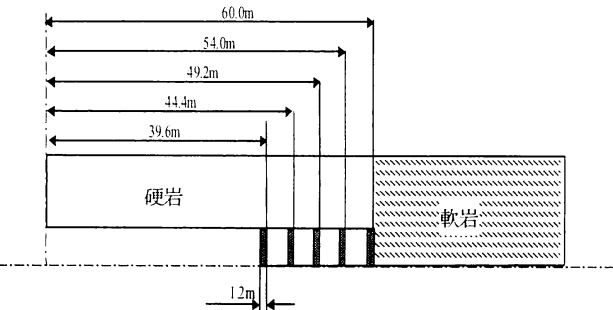


図-11 切羽前方の軟岩の影響解析

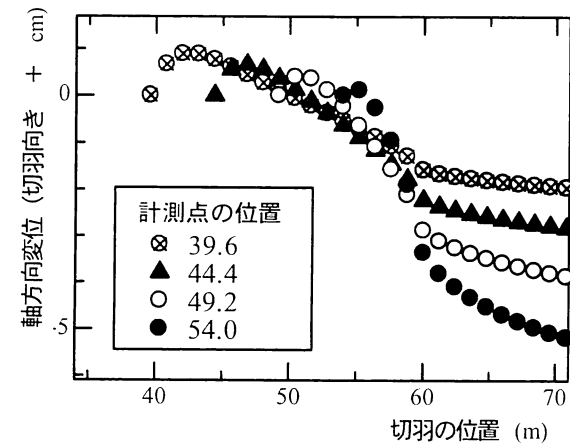


図-12 軸方向変位の計算結果

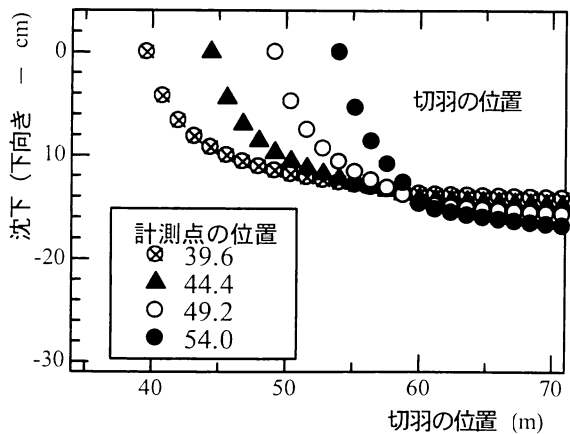


図-13 沈下の計算結果

図-12 の軸方向の計算結果では、計測点が軟弱層に近づくると軸方向変位は切羽側への変位が小さくなり切羽が軟弱地山に近づくにつれて、収束傾向が消えて坑口側への変位が大きくなるのが分かる。それに対し、図-13 の沈下の計算結果では、計測点から切羽が遠ざかると沈下は一樣に収束し、軟岩の影響があまり見られていない。軸方向変位は地山前方の軟岩の影響を受けることが分かる。

(2) 地山の物性値を変えた場合

無限板内の孔に1方向からの等分布荷重 p をうける場合の円孔の変位は、

$$u = -\frac{3(1-\nu^2)pr}{E} \quad (1)$$

で表される。式(1)の E はヤング係数、 ν はポアソン比、 r はトンネル半径である。トンネル変位はヤング係数に反比例し、ヤング係数が小さくなると逆比例関係で変位が大きくなる事が分かる。

一方、ポアソン比は、2 次式の関係に有り、変位に与える影響はヤング係数に比べて複雑であるため、ポアソン比を変えた場合の解析を行うこととした。

図-14 に軸方向変位に対するポアソン比の影響を示す。ポアソン比が小さい時は切羽に向う変位が小さくその後坑口側への変位が大きい。ポアソン比が大きくなると、切羽側への変位が大きくなり、坑口側への戻りが小さくなる事がわかる。

図-15 に鉛直変位へのポアソン比の影響を示す。鉛直変位は、ポアソン比の違いによって変位の形状が変化することは見られない。但し、ポアソン比が0.2の時に鉛直変位が大きくなっていることが判る。

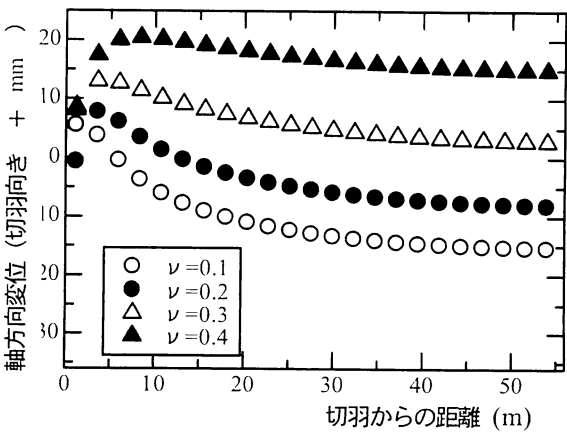


図-14 軸方向変位へのポアソン比の影響

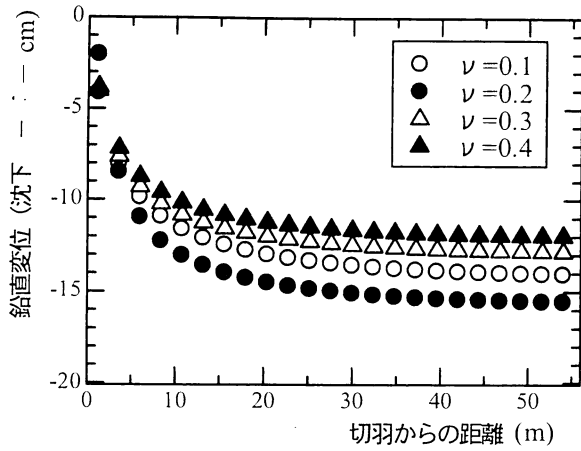


図-15 鉛直変位へのポアソン比の影響

これらの考察から、本トンネルにおいては、荷重とヤング係数は変位の大きさ（マグニチュード）に関連し、前方の地質とポアソン比が軸方向の変位形状に大きく影響することが判明した。

すなわち、軸方向変位を用いて逆解析を行えば、トンネル前方地山を予測できることが判明した。次に軸方向変位を用いた逆解析について述べる。

5. 地山の逆解析¹⁾

(1) 順解析

地山の挙動を3次元弾性体とした釣り合い方程式は、

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (2)$$

である。ここで、 σ は応力を、添え字の ij は、応力の3方向成分、添え字の中の、 j は偏微分を表し、添え字は総和規約に従うものとする。3次元を対象とするため、添え字は $i = 1, 2, 3$ である。

応力-ひずみ方程式を(2)式に示す

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (3)$$

ここで、 ε_{kl} はひずみを示す。 D_{ijkl} は応力とひずみの常数であり、ラメの定数 λ と μ で表すと、

$$D_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (4)$$

である。ここで、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ記号である。ラメの常数である λ と μ をヤング係数とポアソン比で表わすと、

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6)$$

となる。重み付残差法によって、3次元の有限要素法方程式を得る。

$$[K]\{u\} = \{\Gamma\} \quad (7)$$

この順解析の有限要素法方程式に基づいた逆解析手法について述べる。

(2) 逆解析

評価関数は観測値と計算値の差の二乗和で表わす。

$$J(p) = \frac{1}{2} \sum (u(p) - u^*)^T (u(p) - u^*) \quad (8)$$

ここで、 $*$ は計測データを、 $u(p)$ は計算値を表わす。計算値はパラメータ p (ここではヤング係数とポアソン比) の値によって変化する。評価関数を最小にするパラメータ p の値を見つけるために、評価関数の勾配をゼロとしてパラメータを求める。

評価関数の勾配は、

$$\{d\} = -\left\{ \frac{\partial J}{\partial p} \right\} = -\left[\frac{\partial \bar{u}(p)}{\partial p} \right]^T (\bar{u}(p) - \bar{u}^*) \quad (9)$$

となる。ここで $\left[\frac{\partial \bar{u}(p)}{\partial p} \right]$ は感度行列と呼ばれる。

一方、3次元弾性体の有限要素法方程式(10)

$$[K] \bar{u} = \hat{\Gamma} \quad (10)$$

を、パラメータ p で偏微分すると、

$$\left[\frac{\partial K}{\partial p} \right] \bar{u}(p) + [K] \left[\frac{\partial \bar{u}(p)}{\partial p} \right] = \left[\frac{\partial \hat{\Gamma}}{\partial p} \right] \quad (11)$$

が得られ、(9)式と(10)式から、感度行列は、

$$\left[\frac{\partial \bar{u}(p)}{\partial p} \right] = [K]^{-1} \left\{ -\left[\frac{\partial K}{\partial p} \right] \bar{u}(p) + \left[\frac{\partial \hat{\Gamma}}{\partial p} \right] \right\} \quad (12)$$

と書き表すことができる。

感度行列式(12)のパラメータをヤング係数とするには、式(12)をヤング係数で偏微分すると下記のとおりとなる。

$$\frac{\partial \lambda}{\partial E} = \frac{\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial E} = \frac{1}{2(1+\nu)} \quad (14)$$

また、ポアソン比をパラメータとする場合はポアソン比で偏微分すると下記のとおりとなる。

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \nu} = \frac{E(1+2\nu^2)}{(-1+2\nu)^2(1+\nu)^2} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial \nu} = \frac{-E}{2(1+\nu)^2} \quad (16)$$

(3) 計測データからの逆解析の計算例

a) 計算条件

前述した B トンネルの計測データ (1.2m 間隔で 3 点連続計測) をもとにヤング係数とポアソン比を逆解析により同定する. 計測データの増分変位と解析時の増分変位とを比較することにより, 物性値の同定を試みた. 表-1 に計測データを示す. ここで, 計測点①は変位が小さいため, 変位の大きい計測点②と③を採用するものとした.

掘削解析には, 順解析で使用した要素分割図を用い, 掘削は, 8.4m を掘削するものとした.

表-1 計測データ

計測点	切羽からの距離 (m)	掘削距離 (m)	軸方向 (x)	
			計測値	増分
①	11.4	8.4	25.1053	-0.0007
	19.8		25.1046	
②	10.2	8.4	25.7814	-0.0020
	18.6		25.7794	
③	9.0	8.4	26.4567	-0.0016
	17.4		26.4551	

掘削解析には, 順解析で使用した図-6 要素分割図を用いた.

掘削は 60.0m 地点から 68.4m 地点までの 8.4m とする.

ヤング係数とポアソン比の初期値を 39.2MPa, 0.4 とし, 同定計算を実施した.

b) 計算結果

評価関数の収束判定は, 0.5×10^{-7} とした. 収束のための繰返し計算を 25 回行なったところ, 評価関数は, 0.67×10^{-7} でほぼ一定になった. 評価関数の推移を図-16 に示す. ヤング係数とポアソン比の収束状況を図-17 に示す. 解析結果では, 本トンネルのヤング係数は, 39.2MPa, ポアソン比は 0.44 であると推定された.

同定した物性値を用いて計測データとの照合計算を行なった. 結果を図-18 に示す. ポアソン比の修正によって, 軸方向変位の傾向をよく一致していると考えられる.

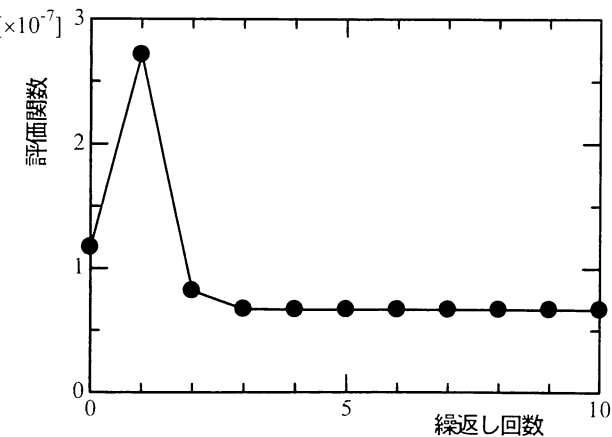


図-16 評価関数の収束状況

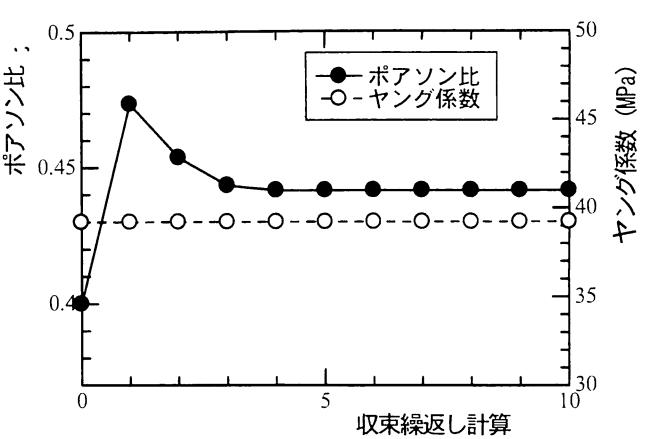


図-17 ヤング係数とポアソン比の収束状況

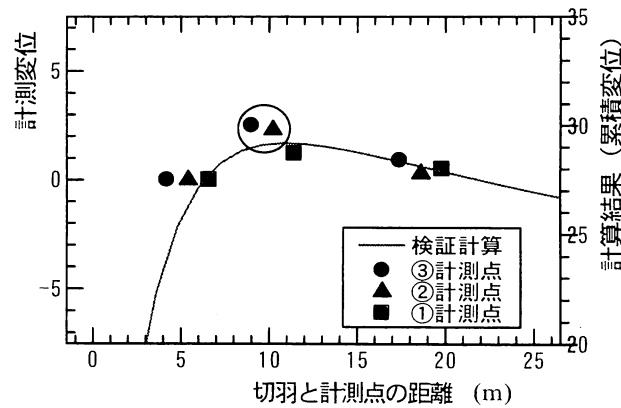


図-18 同定した物性値を用いた検証計算と計測値との比較

6. 結論

トンネル切羽の影響を考慮した軸方向変位に着目し, 3 次元的地山の挙動を検討した. その結果,

- ・トンネル軸方向変位が, 他の 2 成分 (沈下と内空変位) と同程度に, トンネル挙動を評価する指標になることを示した.
- ・トンネル軸方向変位は, 地山のヤング係数とポアソン比の両方のパラメータの影響を受けることを示した.
- ・トンネル壁面変位からトンネル周辺地山のパラメータを逆解析により同定できる可能性を示した.

今後は, さらに多くの現場計測を実施して数値計算の実施例を増やして, 本手法による地山が評価できるシステムの構築の可能性を探っていきたい.

参考文献

1) A Hikawa, M Kawahara, N Kaneko:
"Parameter Identification of Ground Elastic Modulus at Excavation Site of Tunnel"
Internal Research Report, Kawahara laboratory, 1, pp16-39, 2004

THE DIFERENCE OF THE TUNNEL SURROUDING GROUND GIVES TO BEHAVIOR OF THE AXIAL DIRECTION DISPLACEMENT OF THE TOP FACE

Naoto KOIZUMI, Mutsuto KAWAHARA ,Chitose KURODA

As a result of having carried out the measurement of the tunnel axial direction displacement. It was recognized that the tunnel face moved during excavation.

We carried out 3-D inverse finite element method by the axial direction displacement for the purpose of grasping the state of the tunnel surrounding ground and identified Young's modulus and Poisson ratio.