

# (43) 実測値に基づいたトンネル断面の違いによる地山挙動の差について

日本道路公団・大阪建設局・神戸工事事務所

坂山 安男

前田建設工業・技術研究所

正会員 ○ 井上 博之

"

久慈 雅栄

*Difference of Ground Behavior Caused by Tunnel-section Shape Based on In-situ Measurement*

Yasuo SAKAYAMA Japan Highway Public Corporation

Hiroyuki INOUE Maeda co.,ltd.

Masayoshi KUJI

"

## Abstract

Under the condition of high water content and loose formation, 3-lane and 2-lane tunnels were excavated whose location were close each other. Ground behavior were measured at many points, then those are compared from the viewpoints of tunnel-section shape. And also the ground behavior were compared with F.E.M. analysis. The results are followings.

- ① The ground settlement are closely resembled by index function.
- ② In this condition, ground settlement are calculated by Limanov's method within 0.3D to 1.5D of overburden ratio.
- ③ Strain of tunnel crown settlement are same in wide dispersion, and strain of 3-lane tunnel is over 2 times by 2-lane.
- ④ The quantity of tunnel crown settlement is almost equal to the leg settlement.
- ⑤ Strain of inner section are very small and spread at a part of 3-lane tunnel. This reason is estimated a difference of displacement-mode.
- ⑥ F.E.M. analysis results are fit roughly at ground behavior.
- ⑦ Possibility of settlement of tunnel neighborhood are estimated by increase of vertical stress from the study of cause of tunnel leg settlement.

## 1. はじめに

第2東名・名神高速道路など、今後計画される道路では交通量の増大に伴って3車線の偏平大断面トンネルが増加することが予測される。

今回、含水未固結砂礫層において3車線断面と2車線断面のトンネルを平行して同時に掘る機会に恵まれた。ここで、両者の地山挙動や支保挙動を把握しておくことは、今後の3車線トンネルの設計・施工にとって非常に有用と考えられる。今回は、地山挙動について現場計測結果を比較し、かつFEM解析により検証を行って、3車線と2車線の断面の違いについて検討した。

## 2. トンネル概要

今回検討を行ったのは、兵庫県三木市に建設された山陽自動車道・平井トンネル(延長約800m)である。土被りは0m~45mと薄く、上り線が登坂車線を含む3車線の偏平大断面、下り線が2車線断面の双設トンネルである。また、地質は上位に大阪層群に属する未固結の粘土質砂礫土層、下位に神戸層群の砂岩、礫岩、泥岩および凝灰岩が分布し、地形は丘陵〜丘陵性山地を形成しており、地下水は大阪層群と神戸層群の境を流れている。トンネルは、主に大阪層群を通過している。図-1に3車線と2車線のトンネル断面図を示す。

2本のトンネルは全線にわたって約16mの離間距離があり、2車線トンネルを先行して地質、湧水状況を確認するとともに地山特性を把握し、3車線トンネルの施工に反映させた。また、3車線トンネルではトンネル掘削方法として上半ショートベンチ工法、上半一次閉合法、上半CD工法、および上下半CD工法の

4 工法について検討を行った結果、トンネルの内空変位や緩みに関して大差がないと判断され、2車線トンネルと同様に施工性に優れる上半ショートベンチ工法が採用された。薄い土被りのトンネル掘削において特に問題となる地表面沈下については、土地利用が観光ブドウ園とゴルフ場のため特に規制条件はなかった。

### 3. 地山挙動と考察

地山挙動について、主にA計測の結果を主体に取りまとめて考察を行う。また、FEMにより解析をした結果も図の中に同時に示した。解析はある計測断面の地形を用い、スプリングラインを同一にして3車線トンネルと2車線トンネルを別々に行った。用いた地山物性値は表-1に示すとおりであり、支保工は線材として評価し、施工過程を追って導入することとした。また、先行変位を考慮し、支保工導入までの荷重開放率は40%とした。図-2に3車線トンネルの解析メッシュ図を示す。

表-1 解析に用いた地山物性値

| $\gamma$<br>tf/m <sup>3</sup> | E<br>tf/m <sup>2</sup> | $\nu$ | C<br>tf/m <sup>2</sup> | $\phi$<br>deg |
|-------------------------------|------------------------|-------|------------------------|---------------|
| 2.10                          | 10000                  | 0.40  | 0 or 2                 | 35.0          |

#### 3.1 地表面沈下

トンネル計測結果のうち地表面沈下量を縦軸に、それぞれの計測位置の土被り高さをトンネル幅で除した値(以下土被り比と呼ぶ)を横軸にとって整理したものを図-3に示す。図-3より、土被り比が大きいほど地表面変位は小さくなる傾向を示し、3車線トンネルと2車線トンネルとはほぼ平行な関係にあって3車線の方が35mm程度大きく、バラツキは大きいものの指数関数で近似できることがわかる。また、FEMの結果は、バラツキの範囲ではあるがほぼ実測値に合っているといえる。これに対して、トンネル掘削による地表面沈下量を予測する方法としてLimanovの式<sup>1)</sup>の適用を試み、図-3に合わせて示す。ここで、地山の变形係数とポアソン比は表-1の値を用いた。今回の計測結果では、3車線はLimanovの結果と比較的合っているが、2車線は合っているとは言えない結果となった。これは、実測値の土被り0.3D以下と1.5D以上の傾向がLimanovの式と違うもので、Limanovの式が土被りが零の場合には沈下量は無限大となり、土被りが無限に大きい場合には一定値に収束するのに対して、実際には土被りが小さくなると沈下量は大きくなるものの、土被りが大きくなると零に近づくためである。しかしながら、今回の地山の特性( $\gamma$ 、E、 $\nu$ )とトンネル幅で

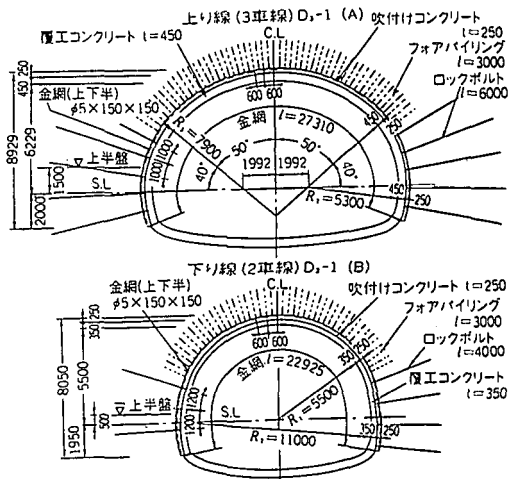


図-1 トンネル断面図

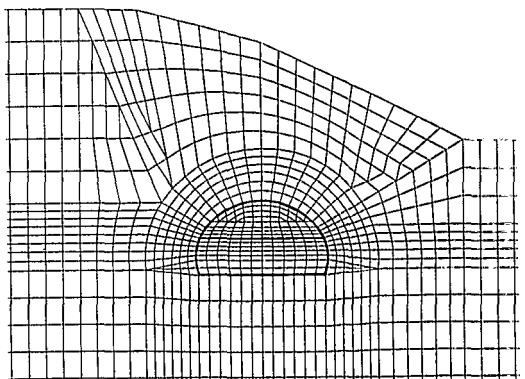


図-2 3車線トンネル・解析メッシュ図  
(トンネル周辺のみ)

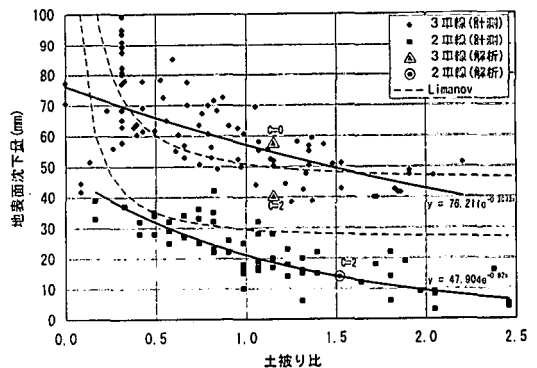


図-3 土被り比と地表面沈下量の関係

は、土被り比0.3D~1.5Dの範囲においてLimanovの式で地表沈下量をほぼ予測できることが分かる。ただし、式中には支保工の剛性が考慮されていないので、標準支保の場合に限定されると考えられる。

また、切羽の進行による沈下の発生について検討を行った結果、3車線トンネル、2車線トンネルともにバラツキは大きいものの影響角度は40°程度であり、両者ともにほぼ同じ結果となった。

3.2 天端沈下

図-4は天端沈下量を上半高さで除した天端ひずみを縦軸に、土被り比を横軸にとって整理したものである。図-4より、天端ひずみは土被り比には無関係でバラツキは大きいものの3車線は平均0.70%(48.3mm)、2車線は平均0.29%(17.7mm)のほぼ一定値を示す。また、FEMの結果はバラツキの下限近くに位置しているものの、ほぼ実測値に合っている。このように、3車線トンネルの天端ひずみは2車線トンネルの2倍以上に達していることがわかる。

次に、横軸に天端沈下量を、縦軸に脚部沈下量をとって整理したものを図-5に示す。このように、天端沈下量と脚部沈下量はほぼ1:1の関係にあることが分かった。また、FEMの結果でも、バラツキの下限に近いものの、ほぼ同様の傾向がうかがえる。したがって、何らかの原因で脚部沈下が生じたため、それに引きづられて天端沈下が発生したものと考えることができる。この脚部沈下の原因については後述する。

3.3 内空変位

図-6は上半の内空変位量をトンネル幅で除した内空ひずみを縦軸に、土被り比を横軸にとって整理したものである。図-6より、内空ひずみも土被り比には無関係でバラツキは大きいものの3車線で平均0.04%(6.4mm)、2車線で平均0.09%(11.0mm)の変位が発生している。ここで特徴的なのは、地表沈下や天端沈下と違って内空変位量は3車線トンネルの方が小さく、一部に拡大傾向が認められる点である。このことは、FEM解析の結果でもうまく再現することができている。これは、図-7に模式的に示すように、3車線と2車線のトンネルアーチ形状の違いにより、2車線ではアーチ形状が有効に作用しているのに対して、3車線では形状が扁平なためアーチがつぶれる現象が生じているためと推定される。

また、3車線トンネル近傍で挿入式傾斜計により地

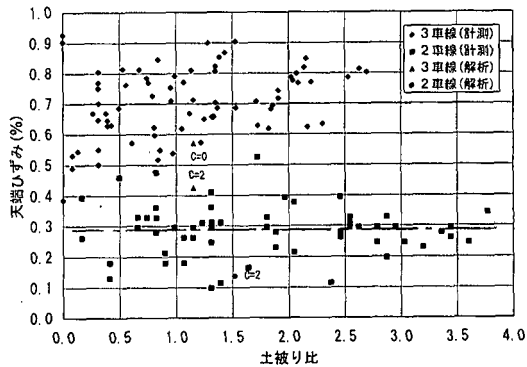


図-4 土被り比と天端ひずみの関係

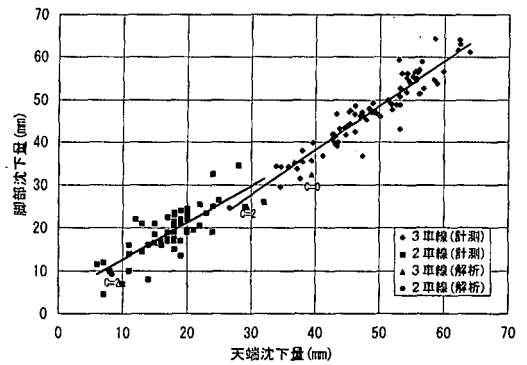


図-5 天端沈下と脚部沈下の関係

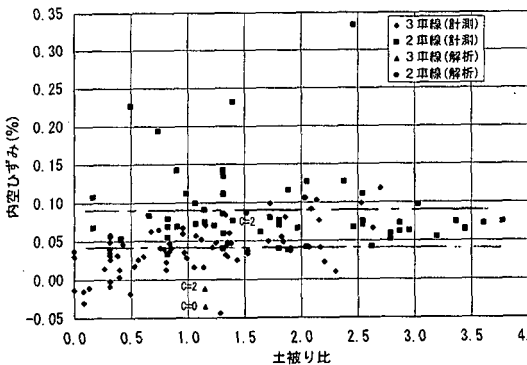


図-6 土被り比と内空ひずみの関係

山の側方変位を計測した結果を図-8に示す。図-8で3車線トンネルの右手に2車線トンネルがあり前述のように先行したため、当初はその影響もありやや斜面下方に変位した(②)。その後3車線トンネルが掘削され(③④)、トンネル左側の測線はそのままトンネルに向かって変位し、トンネル右側の測線はトンネル側にやや戻される変位が生じている。このトンネルの側方変位は、断面的にはトンネルのスプリングラインよりやや上方のみでしか生じておらず、したがってトンネルの内空変位がほとんど生じていないことと一致している。また、地表面変位量に比べて小さく、本トンネルではほとんど沈下変位のみが発生しているものと考えられる。

### 3.4 FEMより考察される脚部沈下の原因

3.2でも触れたように、本トンネルでは天端沈下と同程度の脚部沈下が生じており、これがトンネル変位量が大きく生じている原因の1つと考えられる。通常は、脚部沈下の原因としては下記の要因が考えられる。

- ① 地耐力不足による支保工の沈下
- ② 掘削による応力開放に伴う脚部の緩み
- ③ 施工的要因(根底部の掘り過ぎ等)

しかしながら、これらはどちらかと言えば局部的な変形の要因であり、全体的に傾向が現れる様な原因とは考えにくい。したがって、今回の脚部沈下の原因は、特にFEM結果と実測値が良くあっていると見なせることから考えると、何らかの別の原因があることを示唆していると考えられる。

図-9に、FEM解析における3車線トンネルの最終掘削段階の変位図を示す。スプリングラインよりやや下のトンネル近傍の地山内に沈下が発生していることが認められる。図-10は、同様に地山応力のうちの垂直応力コンターの分布の変化を示したのであるが、特にトンネル近傍において応力の増加が顕著である。これらのことから、トンネル掘削によって垂直応力が増加したため地山が全体に沈下を生じたとする推定が成り立つ。このように考えると、計測値の説明が成り立つものが多い。ただし、このような結果は、トンネルの掘削幅と土被り高さなどに起因する垂直応力の増加量と地山の变形係数に大きく依存するものと考えられるが、今後の検討課題である。

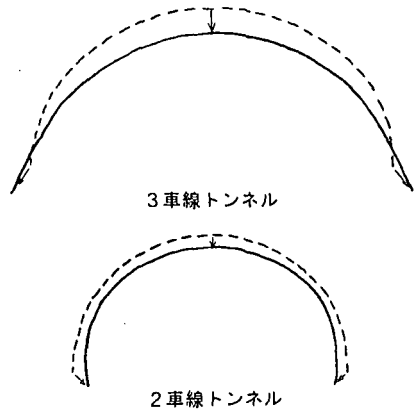
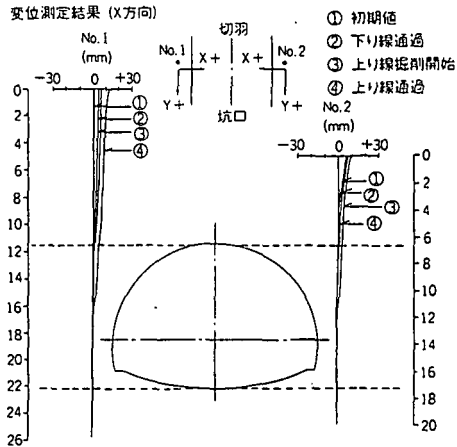


図-7 トンネル変形模式図



計測断面 STA 222+10 (切羽に向かって)  
図-8 地山側方変位の計測結果

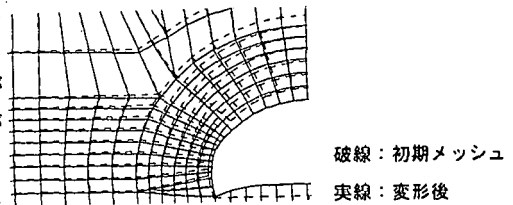


図-9 トンネル側壁近傍の沈下変位

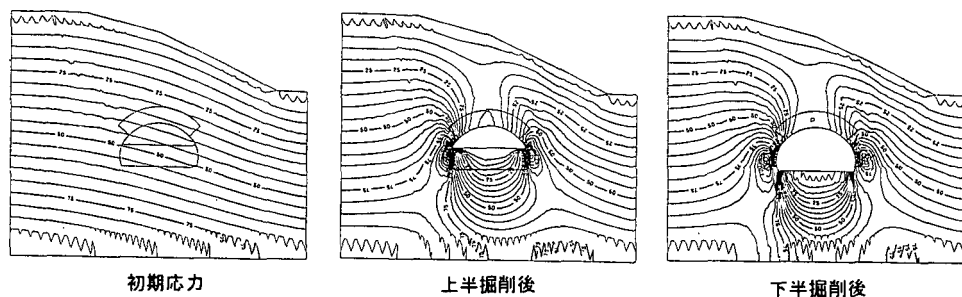


図-10 垂直応力分布の変化

#### 4. 結論

以上の検討より、結論をまとめると以下の通りである。

- ① 地表面沈下は土被り比に関する指数関数で近似が可能である。
- ② 今回の条件では、 $0.3D \sim 1.5D$  程度の土被り比の範囲で地表面沈下量 Limanov の式により予測できる。
- ③ 天端ひずみはバラツキは大きいもののほぼ一定値を示すが、3車線トンネルのひずみは2車線トンネルの2倍以上を示す。
- ④ 天端沈下量と脚部沈下量はほぼ同程度である。
- ⑤ 内空ひずみは非常に小さく、3車線では一部拡大傾向を示す。これは変形モードの違いと推定される。
- ⑥ FEM解析の結果は、変位に関してはほぼ合っているとみなすことができる。
- ⑦ 脚部沈下の原因の考察より、トンネル近傍で垂直応力の増加に伴って沈下が生じている可能性が推定される。

今後は、⑧で述べた変形モデルの検証を行うことと、応力的な検討を進める予定である。

#### 参考文献

- 1) K. チェット(島田隆夫訳)「トンネル工学—理論・設計・施工—」鹿島出版会, pp. 653~pp. 655, 1971