

## 土被りの浅い山岳トンネルの地表沈下

### SURFACE SETTLEMENT ABOVE THE CONVENTIONALLY EXCAVATED TUNNELS WITH THIN EARTH COVER

島 田 隆 夫\*

By Takao SHIMADA

#### 1. 結 言

鉄道や道路の建設においては、用地取得の困難さ、騒音・振動等の環境問題に伴って、建造物の存在する丘陵地下でもトンネルで通過することが多くなってきている。この種のトンネルは土被りが浅いため、これまではあまり問題にされなかった掘削に伴う地表沈下が、問題となり、これが工事の死命を制するようになってきている。

地下空洞の掘削に伴う地表面沈下に関する研究は炭鉱や鉱山の採掘関係においては古くから行われていたが、山岳トンネルの地表沈下が問題とされたしたのは東海道新幹線における足立の問題提起<sup>1)</sup>からである。山岳トンネルは炭鉱・鉱山とは対象地質、掘削工法、掘削断面などが異なるため、採掘関係の考えをそのまま適用できないので筆者は上述の提起を受けこの対策の研究にとりかかり、昭和 41 年に筆者を中心に「トンネル沈下測定指針(案)」<sup>2),3)</sup>を作成し、以後多くの現場で地表沈下の測定調査を実施してきた。この間実測データをもとに地表沈下現象の分析を行い、地表沈下の横断形状、土被りと沈下、トンネルの変形と沈下などにある関係があることを定性的であるが概略報告<sup>2),3)</sup>しており、宮下<sup>4)</sup>もジャッキアップ工法をもとにした地表沈下対策を論じている。しかし地質、土被り、施工法、断面などの沈下に関係すると思われる因子が各トンネルでばらばらであるため定量的分析に結びついていない。

一方、トンネル掘削に伴う沈下現象の理論的な研究は、大別して、① FEM を用いた弾塑性解析、② 落し戸理論による局部沈下、③ 地下水位低下による地表沈下、の 3 つに分類できるが、いずれも現実のトンネル施工の沈下問題に適応させたものはほとんどなく、現実の沈下現象を矛盾なく説明できるものはなかったように思われる。したがって、種々採用されている沈下対策も真

に効果的な系統だったものとはいえない。

したがって、筆者は、① 沈下の原因およびその発生機構を明確にし、② 沈下に影響を及ぼす因子のウェイトを明かにし、③ 上述を考慮に入れた適切な対策工法を整理することを目標として、地質、土被り、施工法などの因子を比較的多様に組合せることのできる模型実験を行うとともに、現場実測を追加した。

本論はこれらの実験・実測から明らかになった事項について整理したものである。

#### 2. 模型実験

##### (1) 実験の概要

トンネル周辺地山の挙動を明らかにする実験として降下床を用いた実験がよくなされる。この実験としては降下床の降下量と荷重の関係を求めた Künztl の実験<sup>5)</sup>、盛土や切取がトンネル土荷重に及ぼす影響を求めた高橋の実験<sup>6)</sup>、ロックボルトの効果確認を目的とした山本の実験<sup>7)</sup>および、降下床の降下によるアルミ棒積層体中の棒の移動状況や降下床の降下量と積層体の沈下量との関係を精測し、沈下現象を明らかにし、これらの特性をもとに地表面および地盤中の中心沈下量の算定式を誘導した村山の実験<sup>8)</sup>などがある。これらのうち前三者は地表沈下を対象とした実験ではなく直接の参考にはならないが、トンネル周辺地山の掘削による応力変化等を明らかにしており、トンネル掘削に伴う地表沈下がこれらの応力変化の地表への表現であると考えれば、示唆するものを多くもっている。村山の実験は沈下現象をとらえたものとして高く評価されるべきものであるが、前述したような実際のトンネルで直面するような、① 横断地表沈下形状、② 土被りの効果、③ 施工法の効果、などの問題への具体的な言及がなく、筆者が対象としているものといく分異なっている。

したがって、ここでは既往の実験を参考にしつつ、現

\* 正会員 鉄建建設(株)常務取締役

場実測の結果不明瞭であった上記 ①～③ の事項に関して、傾向を把握するため、以下 a)～c) に述べる 3種の模型実験を実施した。

a) 降下量・土被り・離れと地表沈下(実験 1)

(ア) 実験装置類

実験容器：大きさ 90×60×60 cm, 側板の一面はガラス, 底面中央に幅 6 cm, 奥行き 60 cm のスリット

トンネル模型：幅 6 cm の 1/200 新幹線型(側壁直)

標準砂：粒径 0.4～0.6 mm, 単位容積重量は約 1.4 g/cm<sup>3</sup> (ゆる詰め), 1.6 g/cm<sup>3</sup> (密詰め) の 2 種類

その他：ダイヤルゲージおよび手動式ジャッキ

(イ) 実験方法(図-1 参照)

1) トンネル模型をスリットを通して容器の中に水平になるように手動式ジャッキで調整, 固定する。

2) 標準砂をトンネル模型天端から 3 cm の厚さに自然に盛上げる(ゆる詰め)。このときの土被りはトンネルの大きさを考慮して, トンネル中心から地表までの厚さ( $z=6$  cm)をトンネル径( $r=3$  cm)で除した比土被り  $Z=z/r=2$  で表示する(図-2 参照)。

2) 横断方向にダイヤルゲージを複数個セットして初期値を読み取る。なお中心から測点までの水平離れは, 図-2 により  $X=(x/z)^2$  で表示する。

4) 手動式ジャッキでトンネル模型を 0.25～20 mm の間で約 10 段階に分けて降下させ, 各降下量 ( $T_{mm}$ )

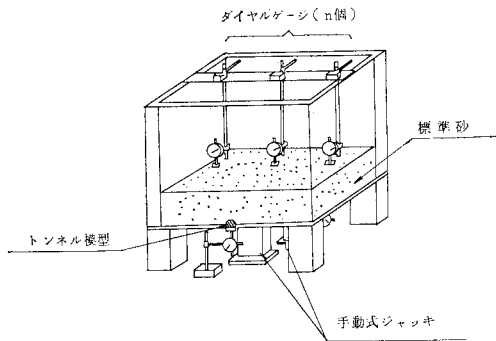


図-1 実験装置(実験 1)

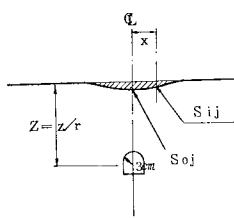


図-2 測定値の表示法

$Z$ : トンネル中心から地表までの土被り  $z$  をトンネルの半径  $r$  (ここでは半径は 3 cm) で除したもの ( $z/r$ )。比土被りとよぶ。  
 $x$ : 地表におけるトンネル中心からの横断方向水平距離  
 $X: (x/z)^2$   
 $T$ : トンネル降下量  
 $S_{ij}$ :  $Z=j, X=i$  のときの地表沈下量  
 $S_{0j}$ :  $X=0, Z=j$  のときの地表沈下量

ごとの地表沈下量  $S_{ij}$  (図-2 参照) を読み取る。

5) 比土被り  $Z(=z/r)$  を 2～8 くらいの範囲で数段階変化させ, 各  $Z$  ごとに 1)～4) の実験を繰り返す。

6) 上記 1)～5) の実験を密詰め(ガラス棒が貫入しなくなるまで突固めた状態のもの)の砂について繰り返す。

b) 降下量とグラウンドアーチの形成(実験 2)

(ア) 実験装置

実験容器：大きさ 90×10.5×60 cm, 側板は一面ガラス, 底面中央に幅 10 cm, 奥行き 10.5 cm のスリット

トンネル模型：木製角材 10×10×10.5 cm

アルミ棒： $\phi 5$  mm×7.5 cm, 5 色のもの数百本

その他：手動式ジャッキ, カメラ

(イ) 実験方法

1) アルミ棒をトンネル模型を包む形で水平層状に積上げる(適当に色別する)。

2) 比土被りは 2 以下のもの(実験 2.1)と 6 くらいのもの(実験 2.2)の 2 種類とする。

3) 実験 2.1 は手動式ジャッキを 5, 10 mm の 2 段階に分けて降下し, 各段階のアルミ棒の移動状況を測定する。

4) 実験 2.2 は 5～25 mm まで 5 mm ごとに 5 段階にわたって降下する。

c) 支保条件一定のときの土被りと地表沈下(実験 3)

(ア) 実験装置類

実験 1 で使用の機器のほかにリング式荷重計および指示計を使用(図-3 参照)。

(イ) 実験方法

1) 容器内にトンネル模型を水平にセットし, このときの初期荷重をリング式荷重計で読み取る。

2) 模型上に砂を所定の厚さだけゆるく盛上げる。この際, 手動式ジャッキの調整により上記初期値を保持する。

3) 手動式ジャッキの降下によりトンネル模型をリン

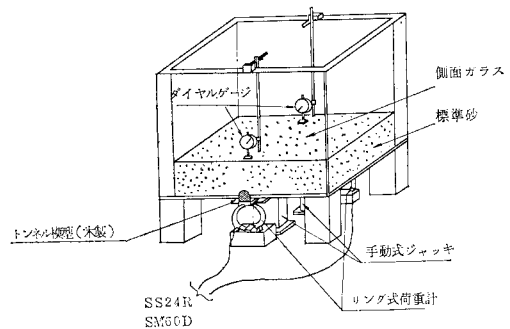


図-3 実験設置(実験 3)

グ式荷重計で受ける。このときのトンネル降下量と地表中心沈下量を荷重計およびダイヤルゲージで読み取る。

4) 上述の実験を土被り比を 10 種類ほど変化させて繰り返す。

(2) 実験の考察

以上の室内実験のうち、実験 1 は各土被り、填充状態、トンネル降下量ごとの横断沈下形状図、実験 2 は各降下段階ごとの写真、実験 3 は土被りと沈下の関係図としてまとめた。これらの成果を、① 横断方向の沈下形状と、填充状態との関係、② 土被りと沈下量との関係、③ グラウンドアーチの効果と沈下という観点から分析した結果、下記のような事項が判明した。

a) 横断方向の沈下

多くの現場計測の結果より、横断方向の地表沈下は正規分布曲線に近似しているように思われるので、実験 1 の結果を正規分布曲線と比較した。沈下曲線が正規分布曲線に従うならば、式 (1) を満足することになる。

$$y = y_0 \cdot e^{-x^2/2\sigma^2} \dots \dots \dots (1)$$

- x : トンネル中心からの水平距離
- y : x の位置における地表沈下量
- y<sub>0</sub> : トンネル中心直上の地表沈下

σ : 標準偏差

式 (1) は対数表示すれば、式 (2) で示される。

$$\ln y = Y, \ln y_0 = Y_0, 1/2 \sigma^2 = A, x^2 = X$$

とすれば、式 (3) のようになり、片対数表示すれば勾配 -A の直線で表示される。

$$\ln y = \ln y_0 - x^2/2 \sigma^2 \dots \dots \dots (2)$$

$$Y = Y_0 - A \cdot X \dots \dots \dots (3)$$

図-4 はある土被りにおける横断沈下曲線 (S<sub>ij</sub>) を各降下量の中心沈下 (S<sub>0j</sub>) を 1 とし、式 (2), (3) に基づき表示したものである。これより、ゆる詰めと密詰めの違いはあるが、それぞれが同様な傾向にあることから、横断沈下形状は降下量に支配されないことがわかる。また、両者とも 2 つの折れ線上にあり、中央付近の勾配、外側の勾配、折れ線の位置がゆる詰めと密詰めとで異なっていることから、横断沈下曲線は 2 つの異なった正規分布曲線からなっているとみなすことができる。

図-5 はある降下量における横断沈下曲線 (S<sub>ij</sub>) を各土被りごとの中心沈下量 (S<sub>0j</sub>) を 1 とし、図-4 と同じ様式で表示したものである。ゆる詰めときは全体が同じ直線上にあるし、密詰めときは 2 つの折れ線の上にあることから、横断沈下形状は、① 比土被りに支配されない、② トンネル中心を最大とする正規分布曲線状の

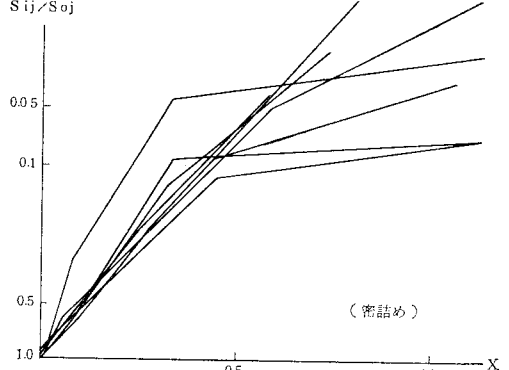
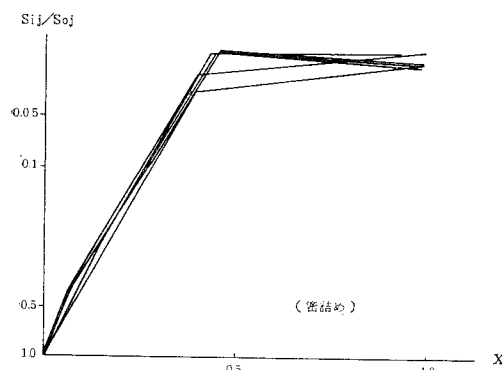
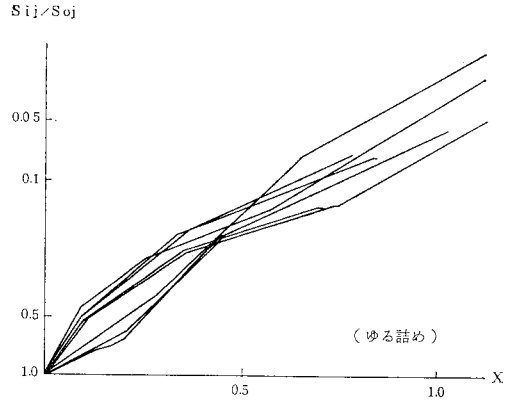
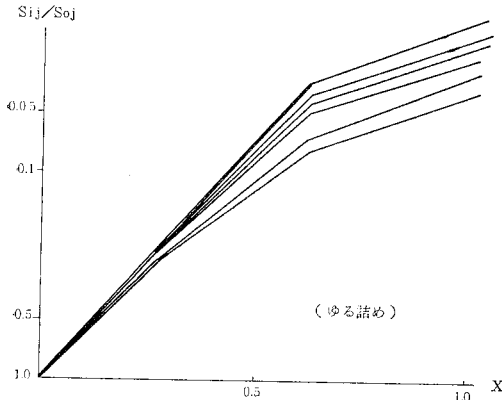


図-4 横断沈下形状 (土被り一定、降下量を変化)

図-5 横断沈下形状 (降下量一定、土被りを変化)

沈下形状をなす、③ その形状はゆる詰めと密詰めとは異なる、ことなどがわかる。

トンネル掘削に伴う地表沈下で問題になるのは、トンネル真上付近であり、外方は無視できるので、図-4、5のトンネル中心直上部の第1折点までの直線にだけ着目してみると、ゆる詰めの場合の傾きは緩く、密詰めの場合は急であり、傾きを $\alpha$ とすれば、式(4)で示されることがわかる。

$$S_{ij} = S_{0j} \cdot e^{-\alpha X} \dots\dots\dots (4)$$

図-4、5より $\alpha$ を求めれば次式のようになる。

ゆる詰めの場合、

$$S_{ij} = S_{0j} \cdot e^{-(3-4.5)X} \dots\dots\dots (4.1)$$

密詰めの場合、

$$S_{ij} = S_{0j} \cdot e^{-(6-8)X} \dots\dots\dots (4.2)$$

以上より、地表沈下の横断形状は、式(2)、(3)のような表示法による限り、トンネルの降下量( $T$ )や比土被り( $Z$ )に関係なく、填充条件のみ支配されており、式(4)のような指数関数で表現されることがわかる。式(4)の $\alpha$ は填充状態により異なり、ゆる詰めるときは小さく(沈下範囲は広い)、密詰めるときは大きく(沈下範囲は狭い)なる傾向を有している。

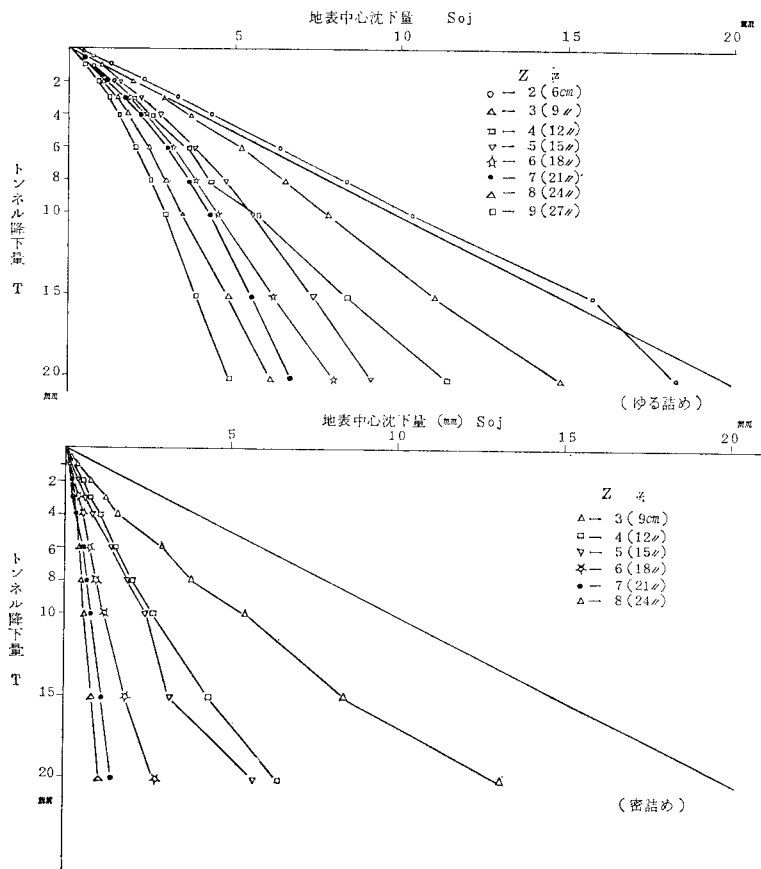


図-6 トンネル直上沈下量

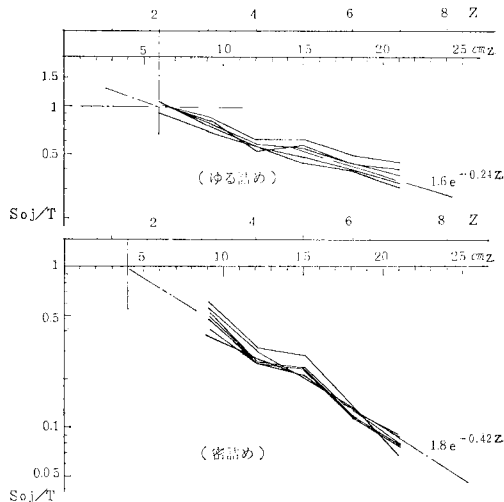


図-7 Z と  $S_{0j}/T$  との関係

b) 土被りと沈下

実験1の結果をトンネル降下量( $T$ )と地表中心沈下量( $S_{0j}$ )との関係で示した図-6によると、①同一の比土被りの場合  $T$  にはほぼ正比例的に  $S_{0j}$  は増加する、② 増加の傾向は比土被りが大きくなるほど小さくなる、③  $T=S_{0j}$  となる比土被り ( $Z$ ) は、ゆる詰めるときは  $Z=2$  で、密詰めるときは  $Z \leq 2$  であることなどがわかる。

$T$  に対する  $S_{0j}$  の割合 ( $S_{0j}/T$ ) と  $Z$  との関係を示したのが図-7である。おのおのが降下量の相違にもかかわらず、ほぼ同じ直線となっており、式(5)の指数関数で表現できる。

$$S_{0j} = a \cdot T \cdot e^{-\beta Z} \dots\dots (5)$$

図-7は次式で概略表わすことができる。

ゆる詰めの場合

$$S_{0j} \cong 1.6 T \cdot e^{-0.24Z} \dots\dots (5.1)$$

密詰めの場合

$$S_{0j} \cong 1.8 T \cdot e^{-0.42Z} \dots\dots (5.2)$$

図-7より  $T=S_{0j}$  となる  $Z$  を求めれば、ゆる詰めるとき 2、密詰めるとき 1.34 となる。これ以上浅い比土被りではトンネル直上付近の土塊はトンネルとまったく

同じ動きをすることを意味する。これは後述の実験2.1の結果のようにグラウンドアーチがまったく形成されない土被りでは、降下床とその上に乗るアルミ棒とが1対1の動きを示しているのと共通する現象と思われる。  $T=S_{0j}$  となる  $Z$  が密詰めするとき小さいのはグラウンドアーチ形成の考えからすれば当然な現象である。

これより  $S_{0j}/T$  は、グラウンドアーチ形成に関連した土被りまでは1対1で対応しているが、それ以降は式(5)で示されるように急減する(その傾向は地質条件と土被りに支配されており、密な地盤ほど、また比土被りが大きいものほど減少する)と結論できる。したがって、式(4)の  $S_{0j}$  に式(5)を代入すれば式(6)が得られ、トンネル降下量 ( $T$ ) を知れば、任意の比土被り ( $Z=j$ )、任意の水平距離 ( $X=(x/z)^2=i$ ) のときの地表沈下量を推定できる。

$$S_{ij} = a \cdot T \cdot e^{-(\alpha X + \beta Z)} \dots\dots\dots (6)$$

ゆる詰めするとき、

$$S_{ij} \cong 1.6 T \cdot e^{-((3 \sim 4.5) X + 0.24 Z)} \dots\dots\dots (6.1)$$

密詰めするとき、

$$S_{ij} \cong 1.8 T \cdot e^{-((6 \sim 8) X + 0.42 Z)} \dots\dots\dots (6.2)$$

式(6)の予測式をもとに描いた横断沈下形状と、実測の沈下形状との関係を図-8に示したが、ほぼ実態を表現していると考えられる。

c) グラウンドアーチ効果と沈下

(ア) 実験2について

実験の結果は写真-1, 2に示したとおりである。被りの浅いもの(写真-1)は降下床を5mm降下させると、トンネル天端を底辺とする台形状の部分がトンネルと同じ動きをするし、さらに降下させると台形の側方が逆三角形に引きずり込まれてくる。これは2.(2)a)で述べた横断沈下曲線が2つの異なる正規分布曲線の合成されたものに類似するというを示唆しているものように思われる。被りの深いもの(写真-2)は降下床を5mm降下させると、トンネル天端を底辺とする正三角形の部分がトンネルに載ったまま同じ動きをする。周辺のアルミ棒はまったく動かず、その境界は最密充填

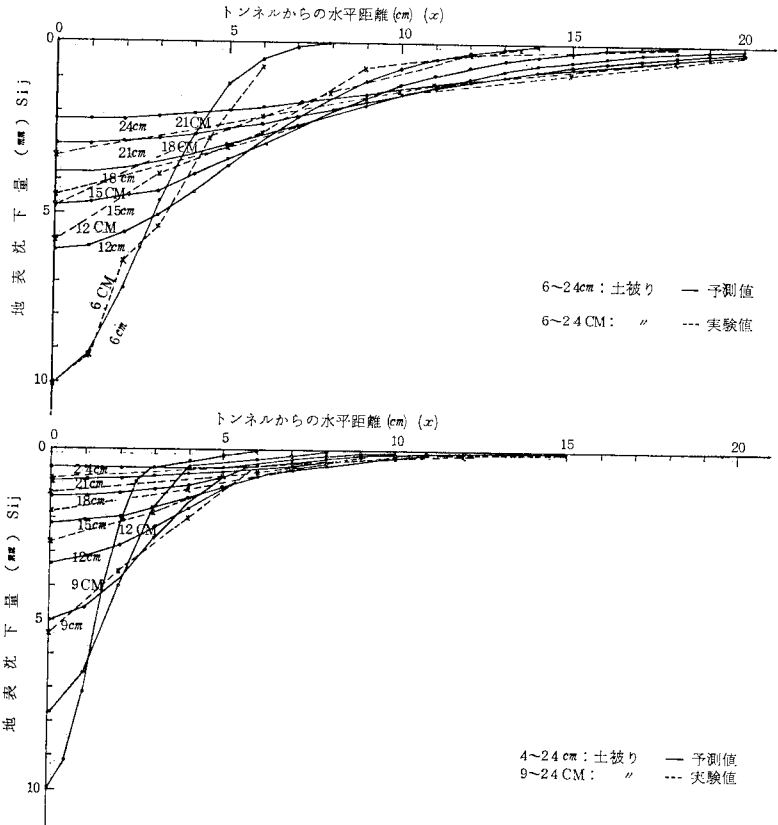


図-8 トンネル降下量 10 mm のときの横断沈下曲線

から最粗充填へと変化し、縁が切れた状態となる。10mm降下になると先の正三角形のゆるみの両側に倒立した正三角形のゆるみが生長してくる。15mm降下になると先にできた3つの正三角形のものからなる台形の上辺を底辺とする大きな三角形のゆるみが生長してくる。さらに降下させると上記と同様なパターンで、さらに大きな正三角形のゆるみが上方へ向けて発達しているのがわかる。このような正三角形のゆるみの外方に形成される静止領域は一般に知られているグラウンドアーチであり、土被りが浅い場合はこれが形成されることなく地表へ直接抜けている。

この実験は定性的ではあるが降下床の降下規模に応じてグラウンドアーチの大きさが異なることを示している。すなわち、小さな降下量の場合は小さなグラウンドアーチで済む(死荷重が小さい)が、降下量が大きいと大きなグラウンドアーチを必要とする(死荷重が大きい)ようになり、さらに大きくなると、地表まで抜けてグラウンドアーチが切れてしまうことを意味している。この結果はKünzcl<sup>9)</sup>の実験結果と共通する点があるように思われる。

(イ) 実験3について

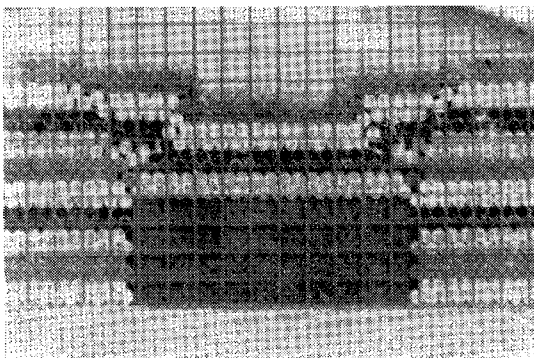
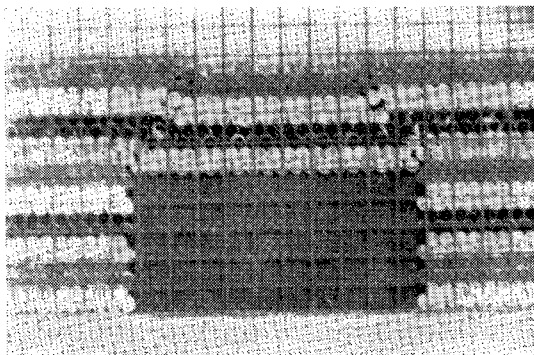


写真-1 実験 2.1 (上 5 mm 降下, 下 10 mm 降下)

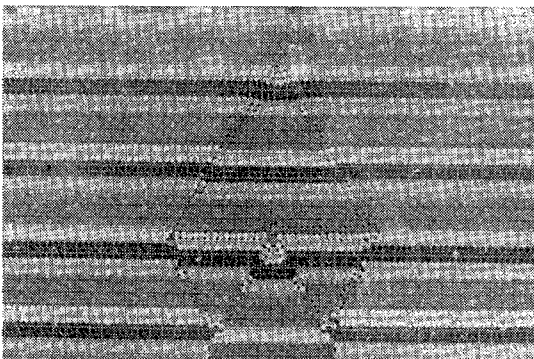
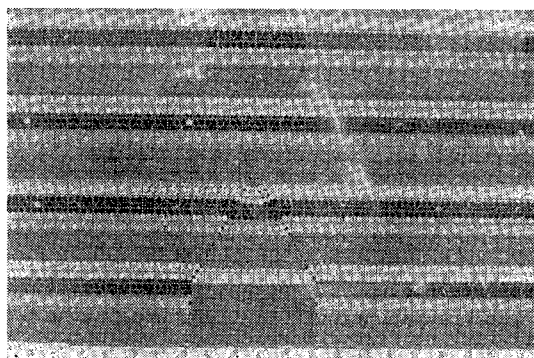


写真-2 実験 2.2 (上 5 mm 降下, 下 15 mm 降下)

実験の結果は図-9 に示したとおりで、比土被り ( $Z$ ) が 2 まではトンネルは土被りの増加とともに正比例的に沈下し、それに伴い地表沈下も直線的に増加する。  $Z$  が 3 以上になると、多少のばらつきはあるものの、トンネル自体の沈下はほぼ一定あるいはわずかながら増加してゆるく傾向にあるが、地表沈下は土被りの増加とともに漸減の傾向をみる事ができる。

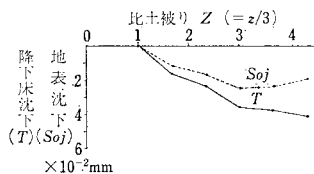


図-9 土被りと降下床沈下の関係

① の段階は土被りが浅いためグランドアーチを形成できず、トンネルがその上の上載荷重を直接受けるため、土被りの増とともにトンネルが正比例的に沈下する。その沈下に伴い、地表も正比例的に沈下するが、トンネル降下量と同じではなく、ダイレイタンスの効果を受けるためかいく分少ない。② の段階はグランドアーチが形成された状態を示しており、土被りの増加ほどには土荷重が増えないため、トンネルはさほど沈下せず、したがって、2. (2) で述べた傾向により地表沈下は漸減すると考えられる。

この実験におけるトンネルの降下量 ( $T$ ) はリング式荷重計の弾性に支配されており、同一の土被りでも弾性の強いリングの  $T$  は小さく、弾性の弱いリングの  $T$  は大きくなる。したがって、トンネル降下量は、地質条件・土被り・施工法などの違いにより変動するので地表中心沈下量は 図-10 に示したように、ある幅で変化するといえる。

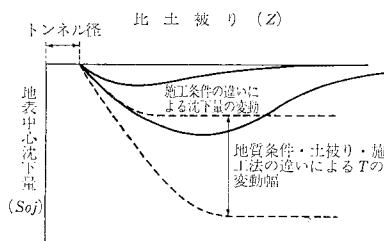


図-10 地表中心沈下量の範囲 (模式図)

### 3. 施工時の注意点

#### (1) 現場測定結果との対比点

a) 横断沈下形状  
横断沈下形状については筆者は既報告<sup>2),3)</sup>でもってすでに明らかにしているが、その後新たに現場測定したも

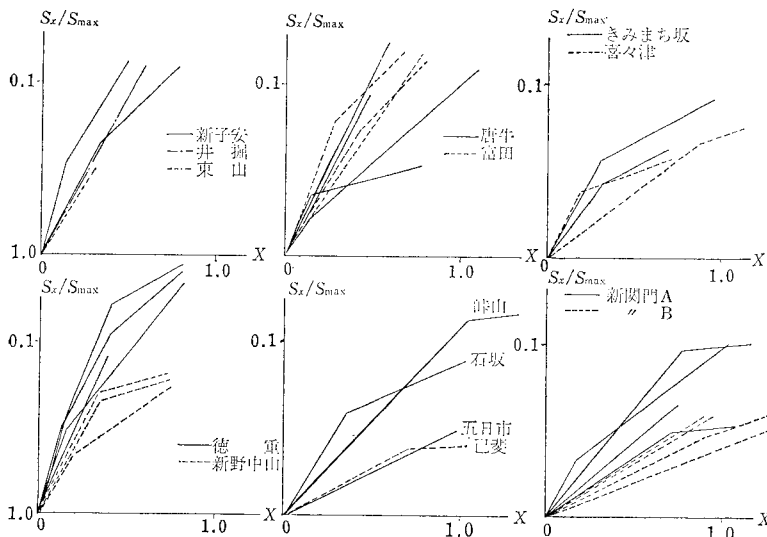


図-11 横断方向の沈下の形状

のも含めて、トンネル直上付近の横断沈下形状について、2.で明らかにした傾向の有無を検討してみる。図-11は横断沈下測定記録のあるトンネルについて、式(2)、(3)の要領により中心最大沈下を  $S_{max}$ 、中心より  $x$  の水平距離の沈下を  $S_x$  として、 $\log S_x/S_{max}$  と  $X$  の関係で示したものである。図-4、5に示したものと同様な傾向にあることから、沈下の横断形状は2つの正規分布曲線を複合したものに近似しているとみなしてよさそうである。しかし、外方の沈下は2.(2)のa)でも触れたと同様にほとんど無視できるので、トンネル直上付近の沈下形状について式(4)と同様に指数  $\alpha$  を求めてみたのが表-1である。模型実験と比較して、地形・地質が一樣でなく、しかも定量的な把握がなされていないので詳細な分析はできないが、次のような傾向を指摘できる。

- (ア) 帯水した砂質地盤の  $\alpha$  は小さい。
- (イ) 比較的乾燥した砂質地盤の  $\alpha$  は大きくなる。

表-1 トンネルの横断沈下形状を表わす指数

トンネル名	$\alpha$	地質
新子安	5~8	洪積砂層
北九州(井堀)	3~4	風化砂岩
東山	3.5	洪積砂, シルト
唐牛	3~6	段丘礫, ローム
富田	3.5~7.0	風化結晶片岩
きみまち坂	3.5~4.5	軟質泥岩
喜々津	1.8~4.6	第三紀頁岩, 砂岩
徳重	4.6~9.0	シラス, 安山岩
新野中山	3.8~4.6	風化安山岩
峠山	2.5	マサ
石坂	3.8	風化頁岩
五日市	1.2	マサ
己斐	1.3	マサ
新関門A	1.6~4.6	洪積砂礫
〃 B	1.6~2.4	風化粘板岩

(ウ) 良好な地盤ほど  $\alpha$  は比較的大きくなる。

(エ) 粘土質地盤は砂質地盤と比較して一般に小さい。

模型地盤と実地盤とは相似率の問題、地下水の点などでおのずから異なるので一律にはいえないが、2.(2)のa)に述べた実験の結果と同様な傾向がある。地質条件を定量的に把握していないので詳細な分析はできないが、概略表-2のような指数を提案できるようである。

なお横断沈下の時系列変化に注目してみると、図-12に示したように、切羽の接近によって地表沈下は影響範囲全体にわたる盆地

状の沈下として始まるが、切羽の通過に伴って、縁辺部の沈下は早期に終結し、トンネル直上付近に最後まで沈下が残る、陥没状の沈下として終結する傾向にあることは注目に値する。これは最終的な横断沈下形状が図-4、5、11のように、2つの正規分布曲線の合成されたものに近似することと関連しており、まず緩い傾きをもった正規分布曲線状の沈下が広域に形成され、しばらくして、トンネル直上付近に急な傾きをもった正規分布曲線状の沈下が生じると考えることができる。

表-2 地質条件による指数( $\alpha$ )の提案

地質	条件	指数( $\alpha$ )
		湿润 ↔ 乾燥
砂質	岩盤 密 粗	4 ~ 8
		2 ~ 8
		1 ~ 3
粘土質	岩盤 密 粗	3 ~ 6
		2 ~ 5
		1 ~ 2

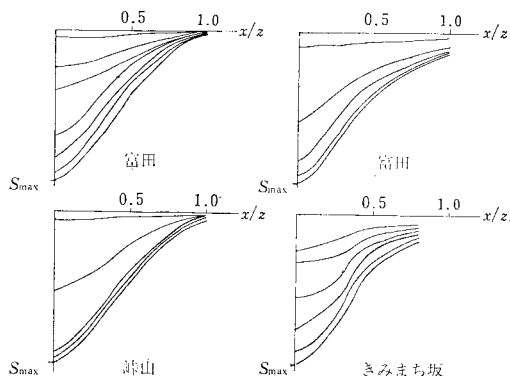


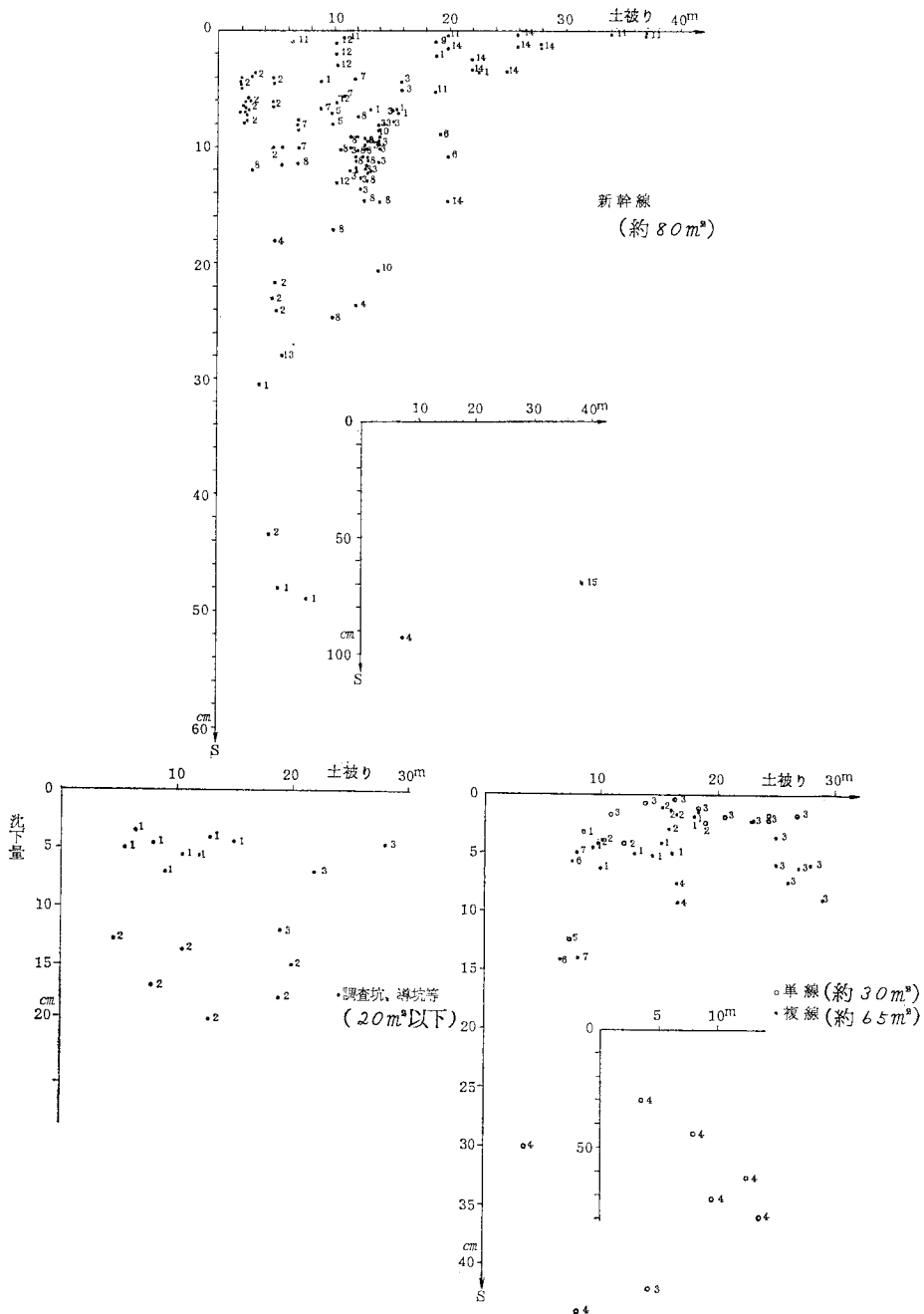
図-12 横断沈下の時系列変化

したがって、沈下は少なくとも2つの異なった要因から構成されていると考えることが可能であり、前者はトンネル掘削の初期に広域に盆状に生じる弾塑性沈下、後者はトンネル直上付近に陥没状に生じる局部沈下<sup>8)</sup>とみなしたらよいと考える。

b) 土被りと沈下

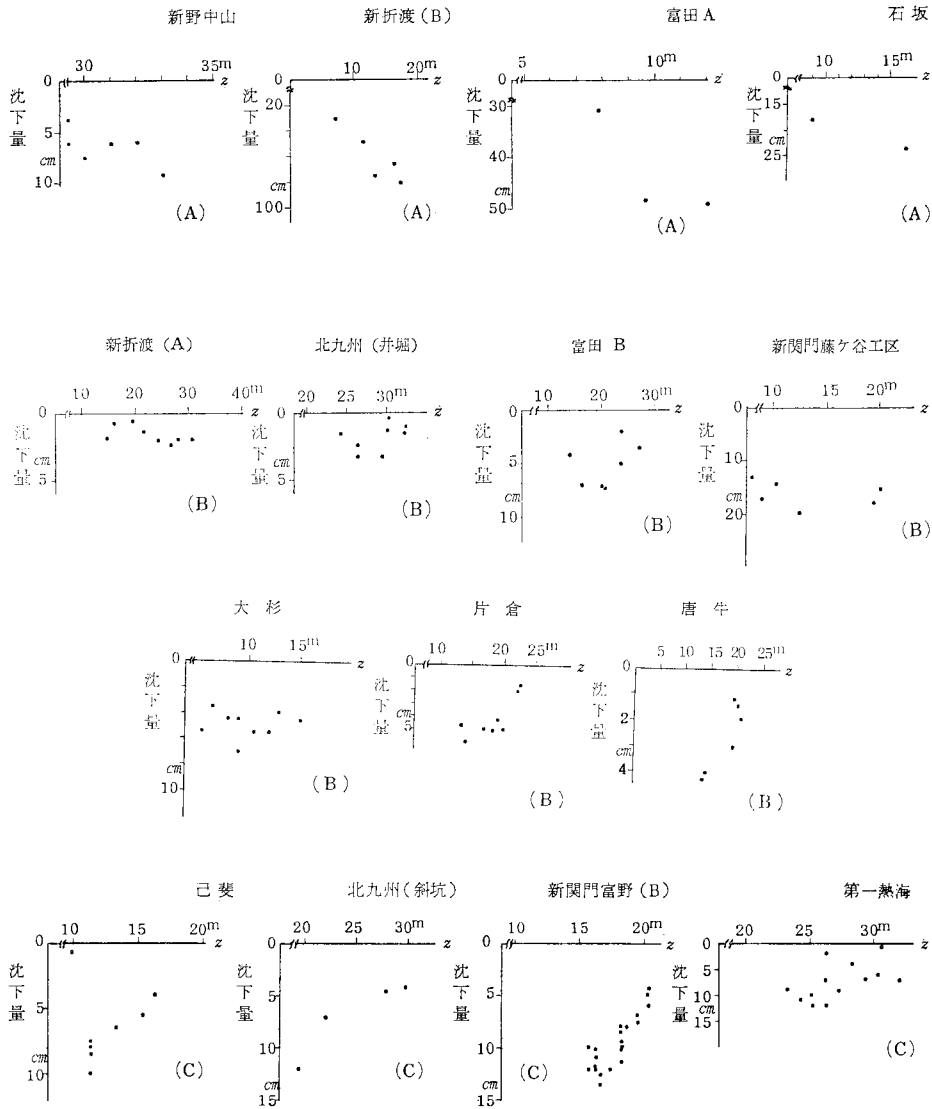
図一13 は筆者らがいままでに集めた現場実測データを、

トンネル断面別にトンネル土被りと直上部の地表沈下量との関係で示したものである。これより、① 土被りが30~40 m を超えると地表沈下がみられないこと、② 土被りが浅くなると沈下は一般に小さくなること、③ 土被りが5~20 m くらいのもは最大の沈下からわずかの沈下までばらつきが大きいことがいえるが、それ以上の傾向を指摘することはできない。トンネルごとに



図一13 掘削断面別土被りと沈下量 (土被りはクラウンからの厚さで表示)





図一14 トンネル別土被りと沈下量 (○) は型)

地質条件、施工条件が異なり、特徴が隠されていると思われるのでこれを図一14のように個々に示してみると、次の3型に分類できる。

- A型：土被りとともに沈下量が増加するもの。
- B型：ある土被りで沈下量は最大となり、これより浅くても深くても減少するもの。
- C型：土被りとともに沈下量が減少するもの。

しかし、この3型はA型が土被りの浅いもの（新折渡は膨張性地質、新野中山は双設トンネルと特殊であるので除外）、C型が土被りの深いものにみられることから、A型、C型はB型の片側だけを示したものととして、土被り全域に対してはB型1つに整理できる。この傾向は図一9、10に述べた実験結果と共通するもので

あり、土被りと沈下量はある土被りで最大となり、これより浅くても深くても減少するという関係があることは確かである。しかし、最大沈下を示す土被りはトンネルごとに異なり、良好な地盤では浅く、軟弱な地盤、膨張性地盤、双設トンネルなどの地盤では深い傾向にある。これは、2.(2)のe)で述べたグランドアーチの効果と確実に関係している。

土被りとともに沈下量が減少する部分をとらえて、式(5)の指数を求めてみると表一3のようになり、実験で求められたような傾向が実際のトンネルにもみられる。実験から求められた $\beta$ が、ゆる詰めの砂で $-0.24$ 、密詰めの砂で $-0.42$ であるのと比較すれば、実験の地盤状態から現場測定の地質条件へストレートにもってゆく

表一3 土被りに関係した地表沈下減少傾向を表わす指数 ( $\beta$ )

トンネル名	$\beta$	地質
峠	—	マサ (乾燥)
新 関	0.60	風化粘板岩
己	—	マサ (帯水)
第 1 熱	0.57	変質安山岩
片 倉	0.25	土丹, 洪積砂層
北 州	0.40	強風化砂岩
大 杉	0.11	千枚岩質凝灰岩
唐 牛	0.47	段丘陵, ローム
富 田	0.50	風化結晶片岩

表一4 地質条件による指数 ( $\beta$ ) の提案

地質	条件	指数 ( $\beta$ )
砂質	岩盤	0.7 以上
	密粗	0.5~0.7
粘土質	岩盤	0.6 以上
	密粗	0.4~0.6
	粗	0.2~0.4

べきでなく、相似率を考慮すべきであるといえる。地質条件を定量的に把握していないので詳細な分析は困難であるが、岩盤や砂質であるほど  $\beta$  は比較的大きく、粗なもの、粘土質のものほど小さいことから概略的には表一4を提案できる。

(2) 沈下防止対策

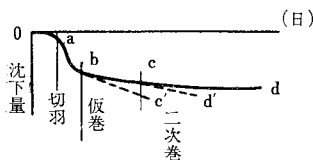
a) 支保工・覆工の効果

地表沈下の時系列変化は一般に図一15のような形状をしているが、この曲線から支保工・覆工の地表沈下抑止に与える効果を検討してみる。この曲線はクリープ曲線に類似しているため、最終沈下量を  $S_0$ 、切羽通過  $t$  日後の沈下量を  $S$  としたとき、このクリープ曲線は、式(7.1)で与えられる。これを片対数表示すれば、式(7.2)となる。

$$S = S_0(1 - e^{-rt}) \dots\dots\dots (7.1)$$

$$\log(1 - S/S_0) = -rt \dots\dots\dots (7.2)$$

式(7.1)は傾き  $-r$  の直線であるので、各トンネルの時系列沈下を式(7.2)に従って片対数表示してみる。図一15で通常の施工での沈下曲線は  $a \rightarrow b \rightarrow c'$  となることを仮巻きコンクリートの効果で  $c' \rightarrow c$  となつたとする。また、そのまま放置すれば  $b \rightarrow c \rightarrow d'$  となることを本巻きコンクリートの効果で  $d' \rightarrow d$  となつたとする。



図一15 沈下の時系列変化と施工との関係 (模式図)

とすると、曲線  $a-b$ ,  $b-c$ ,  $c-d$  はそれぞれ異なる曲線の合成となっているとみなすことができる。したがって、式(7.2)の表示によれば仮巻き・本巻きコンクリートを施工するごとに傾きが緩やかになる直線の組合せとなる。

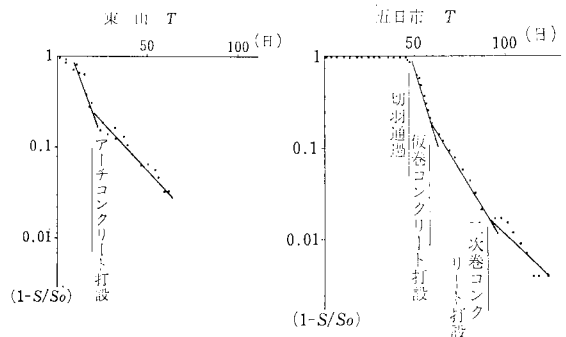
図一16は東山トンネルと五日市トンネルの沈下測定データを式(7.2)の表示法に従ってプロットしたものである。両方の例とも直線状をなし、沈下現象がクリープ的であることを示しているが、明らかに仮巻きコンクリート、本巻きコンクリートを打設することに勾配が変化し、沈下の速度が減少している。この勾配の変化は仮巻きコンクリート、本巻きコンクリートの効果と考えられる。

これより地山の変位をできるだけ早期に拘束しようとしてなされる仮巻きコンクリート、本巻きコンクリート、あるいは支保工の建込みなどは地表沈下の減少対策として有効であるといえる。

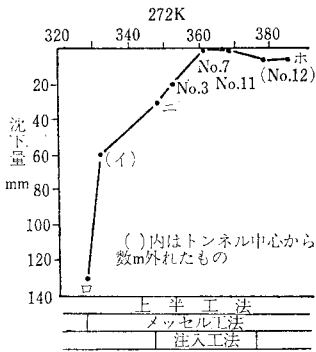
b) 補助工法の効果

同一のトンネルで、土被り、地質はあまり違わないが、途中からメッセル工法、地盤注入、根固めコンクリート等の補助工法を採用したトンネルの地表沈下について、補助工法採用前後の比較を行ったものが図一17である。

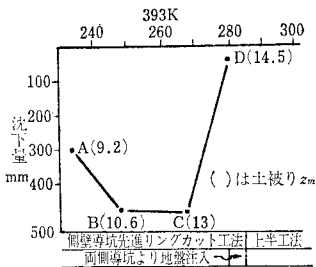
竹原トンネルは上半工法の一部にメッセル工法を採用し、さらにその一部の道路との交差部に注入工法を併用したものであるが、沈下量はメッセル工法開始部分 > メッセル工法採用部分 > メッセル工法・注入工法併用部分の順に小さくなっている。富田トンネルは側壁導坑先進工法から上半工法へ切換えたが、切換部分の約5m間に地盤注入を実施した。注入の有無で45cmほどの沈下差がみられる。新開門トンネルはF点より終点方を支保工の脚部沈下量を押さえるべく、皿板、根固めコンクリート、仮巻きコンクリートを支保工1基建込みごとに施工した。結果として対策前の1/6程度に地表沈下量が減少している。片倉トンネルでは縫地工法やメッセル工法と比較して、メッセル工法と支保工をジャッキで地山側



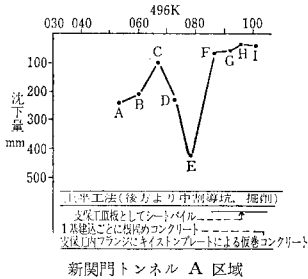
図一16 沈下の時系列変化とコンクリート打設の効果



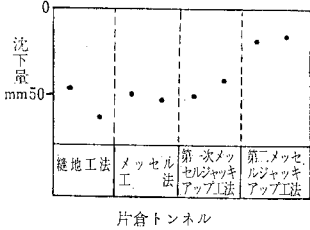
竹原トンネル、土被りは 10 m 土



富田トンネル A 区間



新潟門トンネル A 区間



片倉トンネル

図一17 メッセル、注入・根固め・仮巻き工法、の有無による地表沈下の差異

へ押し上げるジャッキアップ工法との併用工法を採用しているが、より慎重に施工したとされる第2次メッセル・ジャッキアップ工法は従来の 1/2 程度に沈下量が減少している。

以上の例からも明らかなように補助工法採用区間の沈下量は無対策区間と比較して確かに少ない。地質・土被り条件がほとんど一緒でありながら沈下量に大きな差が生じるのは施工法に原因していると考えるのが妥当である。支保工の沈下、内空へのたわみ、切羽の押し出し、

覆工背面の空隙などの有無が沈下量の大小に関係していることは、模型実験の結果から求められる地表沈下が、式(6)に示したようにトンネルの降下量(T)に正比例の関係にあることと共通しており、トンネル周辺の変形を少なくしようとする補助工法が地表沈下の減少対策として有効であることは当然のことといえる。

c) 掘削工法の効果

側壁導坑先進上部半断面工法(側導上半工法)、底設導坑先進上部半断面工法(底導上半工法)、上部半断面工法(上半工法)による1番目の切羽が通過した後、後続の切羽がかなり遅れて到達する場合は、最終沈下量に対して、各切羽が沈下に占める割合を分離できる。図一18は、上記を満足するトンネルについて、掘削工法別にならべたものであるが、これより次の傾向を指摘できる。

(ア) 底導上半工法における底設導坑が全沈下に占める比率は 10% で、面積比率の 20% に比較してかなり小さい。これは底設導坑が掘削断面の中で被りの深い最下部に位置していることが原因と思われる。

(イ) 側導上半工法における側壁導坑が全沈下に占める比率は約 40% で、面積比率の約 30% に比較してかなり大きい。個々の導坑が沈下に占める割合を観察すると、後続導坑が 70~80% を占めている。このことから後続の側壁導坑を掘削することは、両側導に挟まれた広い範囲の地盤が緩むため、結局トンネル全幅の導坑を掘削したと同程度の沈下に結びついていると考えられる。

(ウ) 上半工法における上半断面が全沈下に占める比率は 80% 前後で、面積比率の 50~70% に比していくぶん大きい。これは上半が全断面の中で被りの浅い部分に位置することが原因していると思われる。このことは逆に下半掘削の影響が地表沈下に現われにくいことも意味する。

(エ) 掘削工法別の各切羽が全沈下に占める割合は図一18の右側に示したとおりに整理できる。上半掘削により生じる地表沈下量が各工法とも一定であるとすれば、 $S_1 \cdot S_2 = S_3$  として、 $0.8 S_1 = 0.7 S_2 = 0.6 S_3$  という等式が成立する。これより  $S_1 < S_2 < S_3$  が得られるので、上半工法は他工法より地表沈下が少なくなることが考えられる。

図一19は当初側導上半工法で施工していたものを中途より上半工法に変更した富田トンネルの地表沈下量の変化を示したものである。側導上半工法区間の平均沈下量 427 mm に比較し、上半工法区間の平均沈下量 52 mm は 1/8 でしかなく、土被り、地質条件の若干の差はあるにしても、この差はそれだけで説明できるものでな

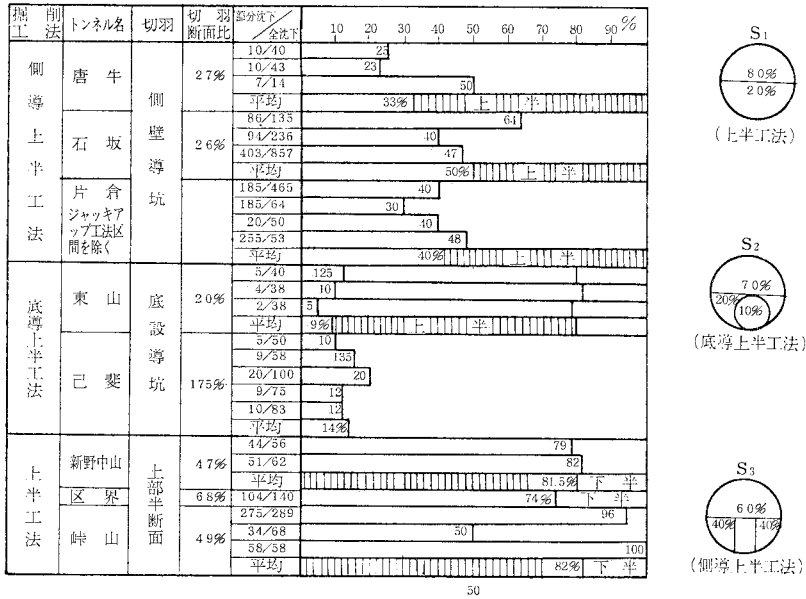


図-18 掘削工法の違いによる各切羽の全沈下に占める割合 (S<sub>1</sub>~S<sub>3</sub> は各工法による地表沈下)

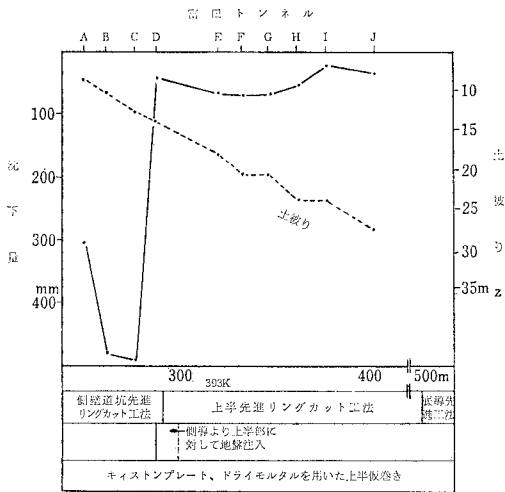


図-19 掘削工法と沈下量

く、掘削工法の差も考慮しなければならないほど大きなものである。図-19の傾向からしても上半工法は側導上半工法よりも脚部沈下を防止できる限り地表沈下を少なくできる工法と考えられる。

以上より同一断面のトンネルを施工する場合でも、掘削工法によって、地盤を掘削した後の支保、覆工の時間的な差があるためと思われるが、地表沈下の傾向は異なるので、地表沈下対策が必要な場合は掘削工法そのものの選択から考慮する必要がある。

d) 地表沈下の原因と対策

いままでに述べてきたことがらと文献調査などの成果から地表沈下の原因および発生機構と、沈下防止対策を

表-5 地表沈下の原因と対策

	原因	対策	工法
弾塑性沈下	弾塑性変形	1. 掘削先端の変形を小さくする。 2. 地山の強度を増す。 3. 掘削後支保工を持ち上げる。	縫地、メッセル、パイプルーフ、地盤注入、ロックボルト、ジャッキアップ
	塑性流動(粘性)	1. 切羽の押し出しを抑える。 2. 地山クリープ時間を短くする。	鏝張り、リングカット、吹付、ベルノルド、ショットベンチ
局所沈下	地山の崩落	1. 天端崩落防止 2. 切羽上方流出防止 3. 覆工背面の空隙填充 4. 矢板背面の空隙をなくす	縫地、メッセル、パイプルーフ、ウェルポイント、ディープウェル、地盤注入、裏込注入、メッセル、リップアンドラッキング、ジャッキアップ、ベルノルド
	トンネル土圧による変形	1. 支保工脚部沈下防止 2. 支保工、覆工の変形制御	ウォールプレート、根固め、仮巻き、皿板、高剛度支保工、裏込注入、覆工厚増(鉄筋巻)
	脱水压密	1. 水位低下防止	地盤注入、注水
	その他	1. 沈下形状を制御	縁切り工、地中壁

目的として採用された各種施工法の効果とをあわせ考えて、地表面沈下対策工法を整理すると表-5のようにまとめることができる。

4. 結 言

トンネル掘削に伴う地表沈下の傾向を知るために行った室内模型実験により、次に述べるような傾向が明らか

になった。

(1) トンネル直上付近の横断方向の沈下形状は正規分布曲線に近似する。なお、形状は填充条件に支配される。

(2) 同一のトンネル降下量の場合は土被りの増加とともに地表沈下は、式(5)の傾向で減少する。なお、減少の割合は填充条件に左右される。

(3) 地表沈下量はトンネルの地下量に正比例的である。

(4) 同一の支保条件の場合、最大沈下を示す土被りがある。支保工の強さによりトンネル降下量が異なり、したがって、グラウンドアーチの大きさに差があるので、支保工の強さにより、最大沈下を示す土被りは異なると思われる。

(5) 以上より、任意の土被り、任意の離れにおける地表沈下は、式(6)で表わすことができる。

模型実験より得られた上述の傾向をもとに数多くのトンネルで実測された地表沈下のデータを分析してみた結果、次の述べるように模型実験とほとんど同様な傾向があり式(6)に従うように思われる。

(1) トンネル直上付近の横断方向沈下形状は、正規分布曲線に近似する。その形状は地質条件に左右され、式(4)のような表現法を用いれば、概略、表—2のような指数で表わすことが可能と思われる。

(2) 地表沈下はある土被りで最大となり、これより浅くても、深くても減少する。なお土被りの増加に伴う沈下量の減少傾向は地質条件に左右され、式(5)のような指数関数で表現できる。この表現法を用いれば概略表—4のような指数で表わすことが可能と思われる。また、最大値を示す土被りはグラウンドアーチを形成し得る土被りと関係していると思われる、図—10に示したよう

に、いわゆる不良な地盤ほど、良好な施工ができなかったトンネルほど深くなるようである。

(3) トンネル周辺の変形( $T$ )を少なくすれば式(6)により、地表沈下は少なくなる。そのためには、①支保工、覆工、裏込注入を早期に建込むあるいは打設すること、②メッセル工法、地盤注入、根固めコンクリート、等の補助工法を用いてトンネルの沈下、変形を防止するなどの配慮が要求される。この点では上半工法は側導上半工法、底導上半工法よりも良好な工法といえそうである。

(4) トンネル掘削に伴う地表沈下の原因とその防止対策を整理すると表—5のようにまとめられる。

本研究にあたっては鉄道技術研究所大島洋志主任研究員にご協力いただいた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 足立貞彦：地山のゆるみと地圧の大きさ，土木学会誌，Vol. 49, No. 5, 1964.
- 2) 島田隆夫・飯塚 全：トンネルの掘きくに伴う地表沈下測定例について，第5回トンネル工学シンポジウム，1969.
- 3) 島田隆夫・飯塚 全・高木盛男：トンネル掘きくに伴う地表沈下と坑内土圧現象について，鉄道技術研究所報告，No. 756, 1971.
- 4) 宮下和夫：大都市周辺のアーストンネル掘きくにおける諸問題に関する研究，鉄研報告，No. 768, 1971.
- 5) K・チェッキー（島田隆夫訳）：トンネル工学，pp. 87～88.
- 6) 高橋彦治・小林芳正・白井慶治ほか：上部開削・盛土によるトンネルへの影響に関する一考察，鉄研速報，1972. 6.
- 7) 山本 稔：ロックボルトの作用効果と模型実験，トンネルと地下，Vol. 9, No. 11, 1978.11.
- 8) 村山朝朝・松岡 元：粒状土地盤の局部沈下現象について，土木学会論文集，1969.12.

(1979.4.13・受付)