

シールドトンネルの軸方向挙動に関する模型実験とその解析

MODEL TESTS AND ANALYSIS FOR BEHAVIOUR OF SHIELD TUNNEL
IN LONGITUDINAL DIRECTION

西野健三*・土山茂希**・小泉 淳***・村上博智****

By Kenso NISHINO, Shigeki TSUCHIYAMA, Atsushi KOIZUMI and Hiroto MURAKAMI

A shield tunnel has many segment joints in the cross section and in longitudinal direction. For rational design of a shield tunnel subject to strong earthquake motion or ground subsidence, it is essential to evaluate its longitudinal structural characteristics accurately. Namely, effects of the joints should be taken into account in a numerical calculation model.

This study shows approaches to evaluate the effects of the joints for longitudinal tunnel design. For this purpose, model tests were performed on longitudinal behaviour of a shield tunnel using concrete segments. The authors presented the analytical structural model to predict longitudinal behaviour of the shield tunnel. In this analytical model, joint elements were introduced so as to evaluate segment joints.

In comparison with the results of model tests on longitudinal behaviour of a shield tunnel, it was found that the analytical model could give results consistent with the model tests ones. Keywords, shield tunnel, longitudinal behaviour, segment design

1. まえがき

シールド工法は従来、河底や海底などごく限られた極めて地盤条件の厳しい場所にトンネルを構築する際の特許工法として用いられてきたが、近年都市トンネル建設の急激な需要増加に伴い、地盤条件の悪い都市部においてトンネルを構築する際に多用されている。特にシールド工法は、他のトンネル構築工法に比べて地盤沈下など地盤への影響が少ないことや、工事中に路面交通を妨げないという特徴があり、また既設構造物の下をトンネルが通過する場合や、既設埋設物との関係から地下深くにトンネルを構築せざるを得ない場合などでは、他の工法より安全性や経済性に勝れていることもあって、シールド工法は都市部におけるトンネル構築方法として、近年急速に一般的工法となってきた。これに伴い、鉄道、上下水道、電力、通信、ガスなど、都市生活を支える生命線、いわゆる都市のライフラインを形成する重要な都市施設としてのシールドトンネルの合理的かつ経済的な設計が急務となっている。

シールドトンネルの設計は本来、トンネル横断方向のみでなくトンネル軸方向についても行なわれるべきであるが、^{1),2)}実際の設計ではトンネル横断方向についてののみ行なわれるのが普通である。しかしながらトンネルの周辺地山が急変する場合や、不等沈下が生ずる可能性が考えられる場合、またトンネルが併進したり交差する場合、さらには地震時の安全性の検討など、シールドトンネルの軸方向の設計が避けて通れない状況

* 工修 中部電力(株)中央送変電建設所土木工事課 (〒456 名古屋市熱田区横田2-3-24)

** 工修 中部電力(株)総合技術研究所土木研究室副主査 (〒459 名古屋市緑区大高町字北関山20-1)

*** 工博 東洋大学助教授 工学部土木工学科 (〒350 川越市鯨井中野台2100)

**** 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒160 新宿区大久保3-4-1)

となってきたことは事実である。これに対し特にトンネル軸方向の検討が要求される場合には、埋設管路、沈埋トンネルなど他の地中線状構造物の軸方向の検討を参考にして、トンネルを剛性様な梁、地盤を弾性ばねとした弾性床土梁モデルを用いて検討を行うことが多いが、しかし現在のところ、シールドトンネルを梁に置き換える際に、その剛性をどのように評価するかが明確でないため、その場その場に応じて適当に定めて検討しているのが現状である。

シールドトンネルの横断方向の設計法に対しては、各種の方法が提案されてほぼ明確になったといえるが、シールドトンネルの軸方向の設計については、シールドトンネルが非常に多くの継手を有する長大な構造であり、これらの継手の適切な力学的評価の問題や、膨大な部材数をどのようにして構造解析モデルに組み入れるかなど多くの困難な問題をかかえているため、従来ほとんど取り上げられなかった。しかしながら、ごく最近になって、ようやく研究が緒につき始められたようである。^{3)~15)}

シールドトンネルの軸方向の設計法に対して、著者らはすでにいくつかの研究を行いその成果を報告している。^{4)~6), 10)~15)} 本研究もこの一連のものであり、シールドトンネルの軸方向の挙動を明確にして、トンネル軸方向の合理的な設計法の確立を目的としたものである。本研究は、まずシールドトンネルの軸方向の挙動を実験的に調べるために、継手部をできるだけ忠実にモデル化したシールドトンネルの模型を用いて、軸方向力に対する各載荷試験を行い、次に同じ模型のシールドトンネルを地中に埋設して、地表面への載荷および地盤沈下の各試験を実施した。これらの実験結果に対し、シールドトンネルの軸方向挙動を説明する解析モデルを提示するとともに、これにより解析結果と実験結果との比較に検討を加え、解析モデルの妥当性を検証した。なお、本研究においては、検討対象をコンクリート平板形セグメントを用いたシールドトンネルとしている。

2. 実験概要

(1) シールドトンネルの軸方向載荷実験

本研究で用いた模型セグメントの形状寸法を図-1に示す。また、継手部分に用いた継手金具の形状寸法を図-2に示す。セグメントの形状寸法は、外径4.5m、厚さ0.2m、幅1.0mのコンクリート平板形セグメントを想定して、それを15分の1に縮小したものとなっている。なお、このサイズのコンクリート平板形セグメントは電力洞道工事で用いる標準的なものである。セグメント本体の材料は塩化ビニールであり、セグメントとしての成形は、旋盤を用いた切り出しによって行った。継手は図-2に示した継手板を継手ボルトによって結合する構造とした。

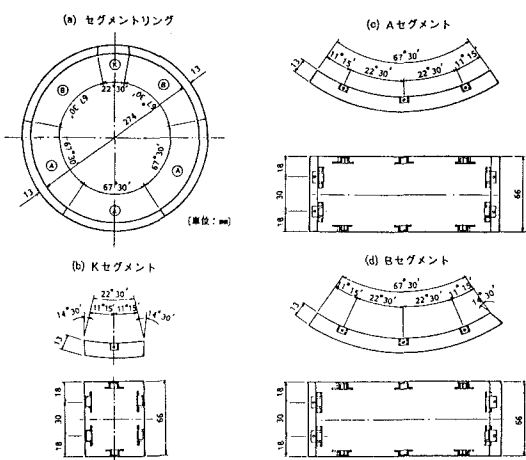


図-1 模型セグメントの形状寸法

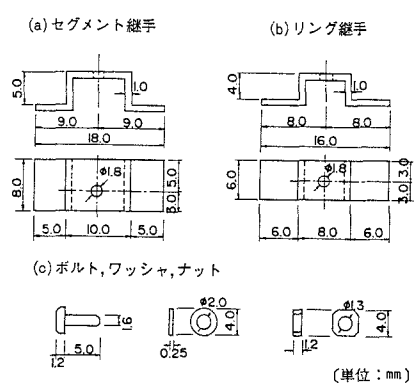


図-2 継手金具の形状寸法

模型セグメントを組み立てて作った模型のシールドトンネルに対して次の2種類の実験を行った。

㉑ 軸方向引張および圧縮試験

㉒ 軸方向曲げ試験

実験㉑は、セグメント17リング分を2リング1サイクルに千鳥組した上で、トンネル軸方向に引張力または圧縮力を作用させたもので、中央5リング分の変位量、セグメント本体のひずみなどを測定した。実験㉒は、セグメント39リング分を2リング1サイクルに千鳥組した上で、図-3に示すように、両端単純支持、中央載荷したもので、リング下面のたわみ量、リング継手の開口量、セグメント本体のひずみなどを測定した。

この他に、セグメント本体の圧縮試験、Kセグメントの2ピース軸方向引張および圧縮試験（リング継手引張および圧縮試験）、Kセグメントの3ピースを用いたリング継手せん断試験（リング継手せん断試験）ならびにトンネル横断方向1リングの曲げ試験（1リング曲げ試験）および3リング千鳥組したリングの曲げ試験（3リング曲げ試験）などを行い、解析を行う際の参考とした。

(2) シールドトンネルの地中実験

大型実験土槽を用いて行ったシールドトンネルの地中実験の概要を図-4に示す。実験で用いた地盤は、長良川河口産の砂を所定の高さより落下堆積させることにより密度管理をして作成した。使用した砂の粒度分布は図-5に示すとおりであり、土粒子の比重は $G_s=2.65$ 、含水比は $w=0.36\%$ であった。また、密度試験の結果、間げき比は $e_{max}=1.02$ 、 $e_{min}=0.59$ であった。地盤は、湿潤密度 $\gamma_t=1.54\text{t/m}^3$ 、間げき比 $e=0.72$ で作成した。図-6は三軸圧縮試験結果を示したものである。また、図-7は矩形剛性板（ $45\text{cm}\times30\text{cm}$ ）を用いた簡易的な平板載荷試験の結果を示したものである。

模型のシールドトンネルを地中に埋設して行った実験は次の2種類である。

㉓ 地表面載荷試験

㉔ 地盤沈下試験

実験㉓は地盤の地表面に荷重 q を載荷させたもので、リング上面のたわみ量、セグメント本体のひずみ、ト

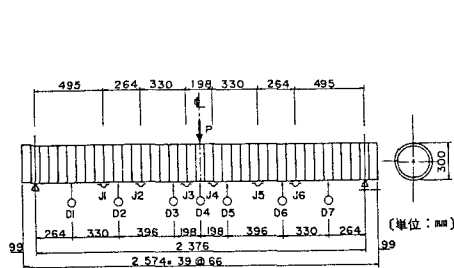


図-3 シールドトンネルの軸方向曲げ試験

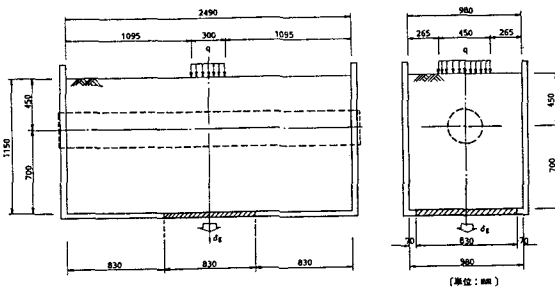


図-4 シールドトンネルの地中実験

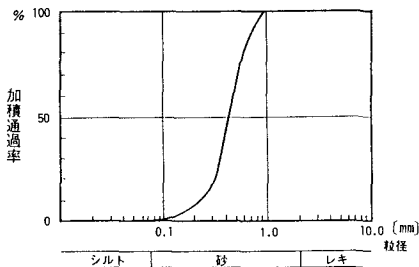


図-5 粒度分布曲線

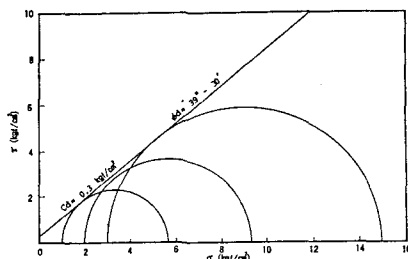
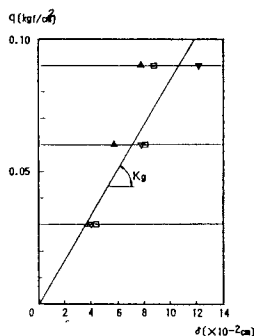


図-6 三軸圧縮試験結果

表－１ 載荷荷重と沈下量

載荷試験	載荷重	$q_1=0.0444\text{kgf/cm}^2$ $q_2=0.0744\text{kgf/cm}^2$ $q_3=0.1044\text{kgf/cm}^2$ $q_4=0.1344\text{kgf/cm}^2$
沈下試験	沈下量	$\delta_{s1}=1.0\text{mm}$ $\delta_{s2}=2.0\text{mm}$ $\delta_{s3}=3.0\text{mm}$ $\delta_{s4}=4.0\text{mm}$



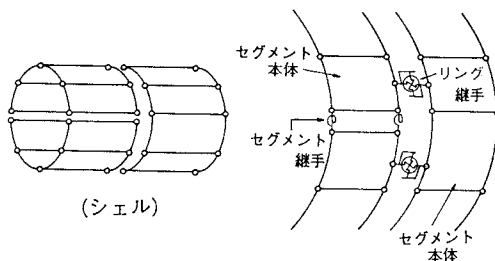
図－７ 平板載荷試験結果

ンネルに作用する土圧などを測定した。実験④は実験③の最終荷重載荷後、実験土槽下面の一部を沈下させたもので、実験③と同様な測定を行った。荷重の分布および沈下部分については図－４中に示した。また、載荷ステップおよび沈下ステップについては表－１に示した。

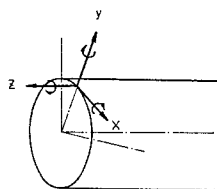
３．シールドトンネルの解析モデル

(１) シールドトンネルの立体構造モデル

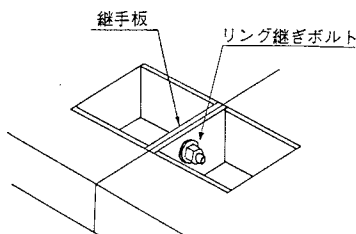
コンクリート平板形セグメントを用いたシールドトンネルを図－８に示すような立体円筒シェル構造にモデル化する。セグメント本体はその形状を考慮して円筒シェルに、セグメント継手とリング継手はその構造を考慮してそれぞれ３種類のばねにモデル化している。図－９は立体構造モデルの座標系を、また表－２は各種のばねのばね定数をそれぞれ示したものである。表中、 k_x , k_y , k_z はそれぞれ x 軸、 y 軸、 z 軸方向のばねのばね定数を、 $k_{\theta x}$, $k_{\theta y}$, $k_{\theta z}$ は x 軸、 y 軸、 z 軸回りの回転ばねのばね定数を表わし、 k_{su} , k_{ss} , $k_{\theta s}$ は、セグメント継手の軸方向ばね、せん断ばね、回転ばねのばね定数を、 k_{ru} , k_{rs} , $k_{\theta r}$ は、リング継手に対する同様なばねのばね定数をそれぞれ表わしている。



図－８ シールドトンネルの立体シェル構造モデル



図－９ 立体構造モデルの座標系



図－１０ コンクリート平板形セグメントの継手部

表－２ 各種ばねの一覧

	セグメント継手	リング継手
k_x	k_{su}	k_{rs}
k_y	k_{ss}	k_{rs}
k_z	k_{ss}	k_{ru}
$k_{\theta x}$	—	$k_{\theta r}$
$k_{\theta y}$	—	$k_{\theta r}$
$k_{\theta z}$	$k_{\theta s}$	—

コンクリート平板形セグメントの継手部を模式的に表わすと図-10に示すとおりである。コンクリート平板形セグメントの場合、セグメント継手とリング継手はほぼ同様な構造であり、図-10に示すように、継手は、継手板とボルトで構成されている。次に、実際に工事で用いられているコンクリート平板形セグメントについて、各継手を表わすそれぞれのばねのばね定数の定め方を述べる。

a) セグメント継手

シールドトンネルは通常地中にあり、土圧水圧などの外圧がトンネル周辺から作用した状態にあるので、トンネル横断方向には軸圧縮力が生じている。セグメント継手に圧縮力が作用した場合、その構造上の理由から軸方向に変位を生じることがないと考えられるので、セグメント継手の軸方向ばねのばね定数 k_{su} は無有限大とする。また、セグメント継手がせん断力を受ける場合は、生じるせん断変形を推定することが現状では困難であることから、今回の解析においてはセグメント継手のせん断剛性を評価するばねのばね定数 k_{ss} は無有限大とする。すなわちボルトの初期締付けによりセグメント継手部に十分な摩擦力が生じ、せん断力によるずれは生じないものとする。セグメント継手が曲げモーメントを受ける場合のセグメント継手の回転ばねのばね定数 k_{so} は、文献16)に示す方法により求めることができる。

b) リング継手

リング継手が軸圧縮力を受ける場合はセグメント継手の場合と同様、継手部での変形は生じないと考えて、リング継手部の軸圧縮剛性を評価するばねのばね定数 k_{ru} は無有限大とする。一方、リング継手が軸引張力を受ける場合は文献16)を参考にして、ボルト部分を¹⁵⁾評価したばねと継手板を格子梁として評価したばねとの合成ばねとしてばね定数 k_{ru} を求めることができる。なお、継手板の変形については、継手板のFEM解析などによっても得られる¹⁷⁾。リング継手がせん断力を受ける場合は、セグメント継手の場合と同様にそのばねのばね定数 k_{rs} は無有限大とする。リング継手が曲げモーメントを受ける場合のリング継手の回転ばねのばね定数 k_{ro} については、セグメント継手と同様に文献16)を参考にして求めることができる。¹⁵⁾

リング継手のばねは、シールドトンネル立体構造モデルの中でも重要な役割を分担するものである。特にリング継手の軸引張剛性を評価するばねのばね定数は、解析上その影響が大きいと考えられるため、設定に当たっては細心の注意が必要である。また、荷重載荷条件などにより、解析上その影響が比較的大きい場合には、軸圧縮剛性を評価するばねのばね定数やせん断剛性を評価するばねのばね定数を文献13)、17)に示すような方法で実験的に求めれば、それらを考慮した解析を行うことができる。

(2) シールドトンネルの棒構造モデル

シールドトンネルの立体構造モデルを用いればシールドトンネルの挙動を把握できるが、トンネル全体をこのようなモデルに置換することは計算機の容量を考えると物理的に困難である。そこで次にこれらの立体構造モデルを用いた上で、シールドトンネル全体を以下に示す棒構造モデルに置換する。

図-11はシールドトンネルの棒構造モデルを示したものであり、セグメントリングを棒部材に、リング継手部を、トンネル軸方向に K_u 、せん断方向に K_s 、および回転方向に K_θ なるばね定数をもつばね部材に、また、トンネル周辺の地山をトンネル接線方向(K_{gu})と法線方向(K_{gv})の地盤ばねにそれぞれ置換している。なお図中 K_u' 、 K_s' 、 K_θ' は、トンネルと立坑との接合部の剛性を表わすばねで、それぞれトンネル軸方向、せん断方向、回転方向の剛性を示している。これらのばねのばね定数のうち、 K_{gu} 、 K_{gv} はトンネル周辺の地盤の状況に応じて定め、また、 K_u' 、 K_s' 、 K_θ' はトンネルと立坑との接合状況により、剛結(ばね定数が無有限大)から完全にフリーの状態(ばね定数が零)までの間で実状に応じて定める。リング継手の剛性を表わすばねのばね定数は、それぞれのトンネルに固有のものであり、以下に示すような考え方に基づき定めることができる。

a) 軸方向ばねのばね定数, K_u

トンネルが軸方向力を受ける場合(施工時のジャッキ推力を受ける場合や、地震時にトンネルが軸方向に地震波を受ける場合など)には、軸方向のばねのばね定数 K_u は以下の式で与える。

$$K_u = \infty$$

(1)

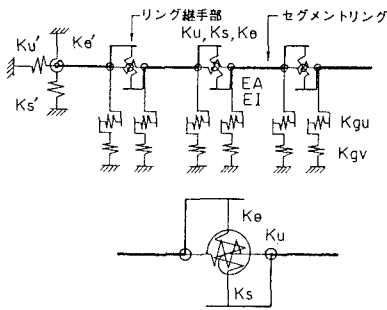


図-11 シールドトンネルの棒構造モデル

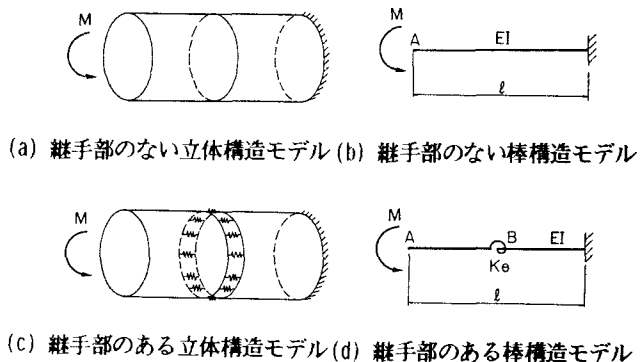


図-12 回転ばね定数の算定

$$K_u = k_{ru} \cdot n_r$$

(2)

式(1)は軸圧縮力を受けた場合のばね定数を、式(2)は軸引張力を受けた場合のばね定数を表わしている。なお式(2)中の k_{ru} はリング継手1ヶ所当りの軸引張ばねのばね定数(3, (1), b)参照)であり、 n_r はリング継手断面におけるリング継手の個数である。

b) せん断ばねのばね定数, K_s

せん断ばねのばね定数はすでに述べた理由(3, (1), a)参照)から、これを無限大とする。

c) 回転ばねのばね定数, K_θ

回転ばねのばね定数は、トンネルの立体構造モデルを用いて以下に示す方法で算出する。まず図-12(a)に示すように継手を持たないセグメント2リング分を考え、一端を完全固定とし他端にモーメント M を作用させて、载荷断面の中心位置におけるリングのたわみ δ を計算する。次にこのセグメントリングを図-12(b)に示すような梁に見なし、一端を固定し他端に M を作用させて梁先端のたわみ δ_A を求める。さらに図-12(c)に示すように継手を考慮した上で、セグメント2リング分を考え、同様に载荷断面の中心位置におけるたわみ δ を計算する。この時、リング継手1ヶ所当りの軸方向ばねのばね定数 k_{ru} は、その位置に生ずる内力が引張であるか圧縮であるかによって異なるため(3, (1), b)参照)、状態が定まるまで計算は繰返し行う。次に図-12(d)に示すようにセグメントリングを梁に、リング継手を回転ばねに評価した上で、同様に先端のたわみ δ_A' を求める。いま梁どうしを考え、セグメントリング2リング分の長さを l とすると、回転ばね定数 K_θ は梁先端のたわみ δ_A および δ_A' を用いて次式で表すことができる。

$$K_\theta = Ml / 2 (\delta_A' - \delta_A)$$

(3)

トンネルの棒構造モデルは立体構造モデルをこれに置き換えるものであるから、式(3)で示される回転ばね定数は、立体構造モデルを用いて計算された δ および δ' を使って次式で表わすことができる。

$$K_\theta = Ml / 2 (\delta' - \delta)$$

(4)

4. 実験結果とその考察および解析

(1) シールドトンネルの軸方向引張および圧縮試験

図-13は、シールドトンネルの軸方向引張試験結果のうち荷重 P と中央部分のセグメントリング5リング分の変形量 δ_T との関係を示したものである。図中の丸印は実験結果を示したものであるが、実験は繰り返して5回行ったので、その結果をまとめて示した。図中の実線はシールドトンネルの棒構造モデルを用いて計算した解析結果を示したものである。解析に用いた諸定数のうちセグメント本体の弾性係数はセグメント

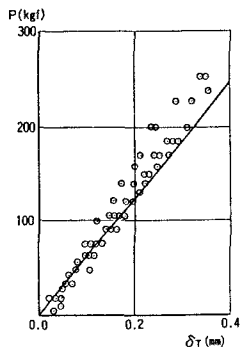


図-13 荷重と全体変形量との関係（軸方向引張試験）

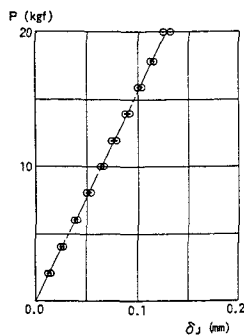


図-14 荷重と継手開口量との関係（リング継手引張試験）

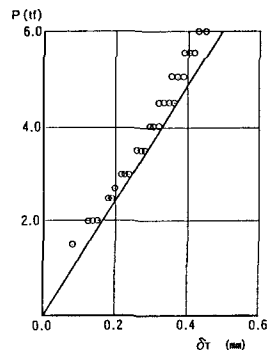


図-15 荷重と全体変形量との関係（軸方向圧縮試験）

単体の圧縮試験より求めて $E = 3.33 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ とした。リング継手 1 ヶ所当りの引張力に対する軸方向ばねのばね定数 k_{ru} は、3, (1), b) に述べた方法を用いれば解析的に求められるが、模型セグメントの継手部に用いられた金具の製作精度とそれらの物性値を求める試験の精度などを考慮して、今回はリング継手引張試験より実験的に定めた。図-14 は荷重 P と継手開口量 δ_j との関係を示したものである。図中の一点鎖線は実験値を最小 2 乗法で求めた直線であり、その勾配すなわちリング継手 1 ヶ所当りの引張り力に対する軸方向ばねのばね定数は $k_{ru} = 1.59 \times 10^3 \text{ kgf/cm}$ であった。

図-15 はシールドトンネルの軸方向圧縮試験結果のうち荷重 P と中央部分のセグメントリング 5 リング分の変形量 δ_r との関係を示したものである。図-13 と同様に、図中の丸印は実験結果を、実線は解析結果をそれぞれ示したものである。

図-13, 15 を見ると、解析結果が実験結果に比べやや大きな変形量を与えるものの、両者はほぼ一致し、シールドトンネルの棒構造モデルの妥当性が示された。

(2) シールドトンネルの軸方向曲げ試験

図-16 は荷重 P とトンネル中央部下端（図-3 参照）の鉛直方向たわみ量 δ_v との関係を示したもので、図中丸印は実験結果を、実線はシールドトンネルの棒構造モデルを用いて計算した解析結果をそれぞれ表わ

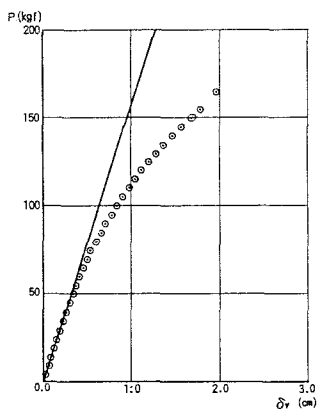


図-16 荷重とたわみとの関係（軸方向曲げ試験, $L_c = 0 \text{ cm}$ ）

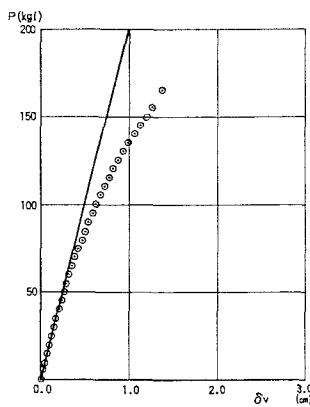


図-17 荷重とたわみとの関係（軸方向曲げ試験, $L_c = 59.4 \text{ cm}$ ）

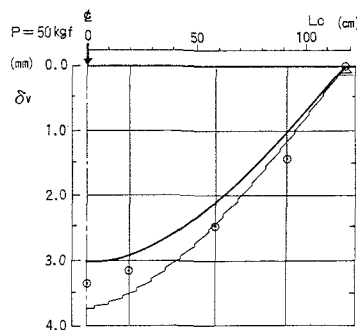


図-18 たわみ曲線（軸方向曲げ試験）

したものである。図-17は荷重Pとトンネル中央から9リング離れた位置のたわみ量 δ_v （図-3参照）との関係を図-16と同様に示したものである。図-18は荷重P=50Kgfの場合のたわみ曲線を示したものである。図中の丸印は実験結果を、実線は解析結果を示したものである。解析にはシールドトンネルの棒構造モデルを用いているが、同図中にはリング継手のせん断ばね定数を無限大とした場合の他に、実験から求めたせん断ばね定数を用いた場合の解析結果（細い方の実線）についても示した。なお図中のLcはトンネル中央からの距離を示したものである。また、図-17, 18中の実験結果は、中央から等距離の位置で測定した2つの値を平均して表した（図-3参照）。解析に用いた各種ばねのばね定数は前述したように解析的にも求めることが可能であるが、今回の実験では、用いた供試体の形状寸法や解析精度を考慮して、試験結果に対する逆解析を用いて実験的に定めた。セグメント継手の回転ばねのばね定数は、別途実施した1リング曲げ試験の結果から逆解析を行い $K_{\theta} = 6.50 \times 10^2 \text{ Kgf} \cdot \text{cm} / \text{rad}$ とした。リング継手の引張力に対する軸方向ばねのばね定数は、シールドトンネルの軸方向引張試験の結果から逆解析を行い $k_{ru} = 1.73 \times 10^3 \text{ kgf} / \text{cm}$ とした。またリング継手のせん断ばねのばね定数は、リング継手せん断試験の結果から得られる値と、別途実施した3リング曲げ試験の結果から逆解析を行って求めた値とを参考にして、 $k_{rs} = 3.78 \times 10^2 \text{ kgf} / \text{cm}$ とした。なお、棒構造モデルにおけるリング継手のせん断ばねのばね定数は次式で与えた。

$$K_s = n_r \cdot k_{rs} \quad (5)$$

ここに、 n_r はリング継手断面におけるリング継手の個数である。

図-16, 17を見ると、実験結果は解析結果に比べやや大きなたわみ量となっているものの、荷重P=50kgf付近までは両者の値がほぼ一致し、荷重の実用上の範囲を考えれば、解析モデルの妥当性が示されたと思われる。なお、P=50kgf以上の荷重では、たわみの実験結果は解析結果に比べ、次第に大きくなる傾向にある。これはリング継手金具の降伏やリングの断面変形およびリング継手のせん断変形などに起因するものと考えられる。棒構造モデルにリングの断面変形の影響を考慮することは困難であると思われるが、リング継手のせん断変形については参考までにこれを考慮した解析結果を図-18中に細い実線で示した。せん断ばねのせん断変形を考慮した解析結果は一部実験結果を上まわる傾向にあるが、全体的にはせん断ばねのばね定数を無限大とした場合（太い方の実線）よりやや実験結果に近いようである。今回の試験での載荷状態は、比較的せん断力の影響が大きい状態にあったため、上述のような結果になったと思われる。しかしながら、実際のトンネルは地中にあり、大きなせん断力を受けにくいことや、荷重の初期段階での直線的な変化を示す部分で、解析結果と実験結果はほぼ一致したことなどを考え合せると、リング継手のせん断ばねのばね定数を無限大とする解析結果は十分実用的であると考えられる。ただし、リング継手のせん断ばねのばね定数が解

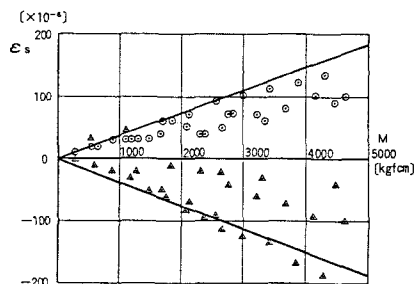
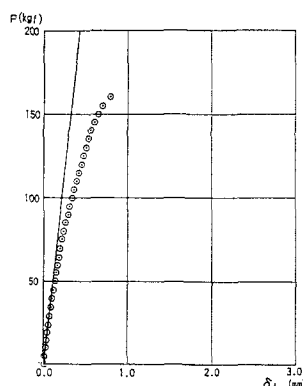
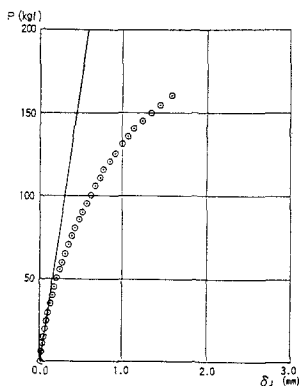


図-19 荷重と継手開口量との関係 図-20 荷重と継手開口量との関係 図-21 軸方向ひずみと作用曲げモーメントとの関係
(軸方向曲げ試験, $L_c = 9.9\text{cm}$) (軸方向曲げ試験, $L_c = 42.9\text{cm}$)

析的に容易に求めることが可能になれば、これを考慮した方がより実際の挙動に近い解析結果を与えるであろうことは言うまでもない。

図-19は荷重 P と中央リングから1リング目と2リング目のリング間下端の開口量 δJ （図-3参照）との関係を示したものである。また図-20は荷重 P と中央リングから6リング目と7リング目のリング間下端の開口量 δJ （図-3参照）との関係を示したものである。図中の丸印は実験結果を、実線は解析結果をそれぞれ表わしている。荷重とたわみ量との関係と同様に荷重 $P=50\text{kgf}$ 付近までは、実験結果と解析結果がほぼ一致しているのがわかる。また、図-21はセグメント本体に生じた軸方向ひずみ ϵ_s と作用曲げモーメント M との関係を表わしたものである。図中の丸印は下面でのひずみ、三角印は上面でのひずみの実験結果をそれぞれ表わしており、また実線は下面および上面でのひずみの解析結果を表わしている。実験結果は多少ばらついているものの、概ね解析結果と一致しているのがわかる。

(3) 地表面載荷試験

図-22は地表面載荷荷重 q とトンネル中央付近($L_c=10.0\text{cm}$) 上面の鉛直方向たわみ量 δv との関係を示したものである。また図-23は最終荷重 $q_4=0.1344\text{kgf/cm}^2$ の状態でのたわみ曲線を示したものである。図中の丸印は実験結果を、実線はシールドトンネルの棒構造モデルを用いて計算した解析結果をそれぞれ表わしている。図-24はトンネル上面に作用する土圧の分布を示したものであり、図中の丸印が最終荷重 q_4 の状態での土圧の実測値である。なお図-22~24 中の実験結果は、中央から等距離で測定した2つの値を平均して表した。解析に用いた諸定数の内、シールドトンネルの各ばね定数は4, (2) と同様な値を用いたが(リング継手のせん断ばね定数は無限大)、地盤ばねのばね定数については、平板載荷試験の結果や文献18), 19)などを参考にして $kg=0.8\text{kgf/cm}^3$ とした。また、トンネルに作用する荷重については、図-24中の土圧の実測値²⁰⁾などを参考にして地表面荷重 q が地盤下方に 45° の広がりをもって分布する²⁰⁾とした近似応力分布を用いた。

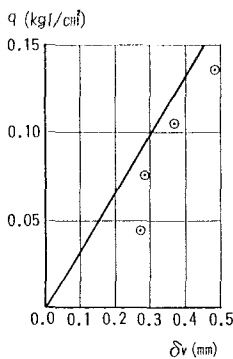


図-22 荷重とたわみとの関係
(地表面載荷試験, $L_c=10.0\text{cm}$)

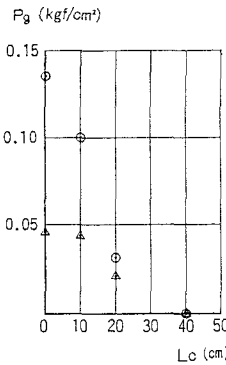


図-24 土圧の分布

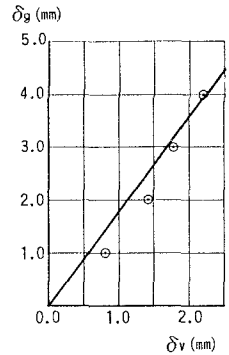


図-25 地盤沈下とたわみとの関係
(地盤沈下試験, $L_c=10.0\text{cm}$)

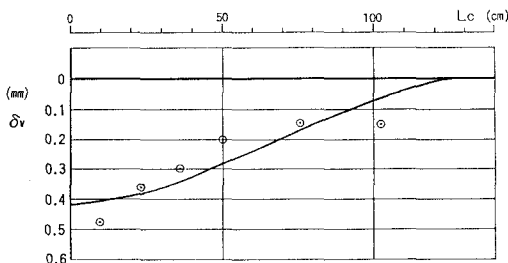


図-23 たわみ曲線 (地表面載荷試験)

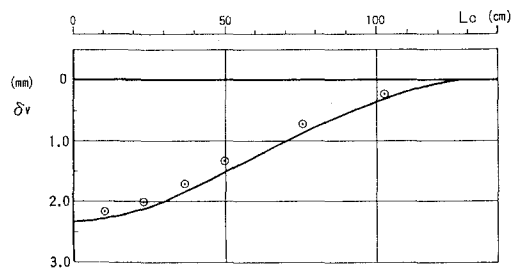


図-26 たわみ曲線 (地盤沈下試験)

図-22, 23を見ると、解析結果は部分的に実験結果と多少差があり、上述した地上での曲げ試験ほど、両者はよく一致はしていないものの、全体的には解析結果がほぼ実験結果を説明しているのがわかる。地中での試験でもあり、地盤の不均一性またはその他の実験精度などを考え合わせると、本解析モデルが実用上十分な妥当性を有していることが示された。

(4) 地盤沈下試験

図-25は地盤沈下量 δg とトンネル中央付近($l_c=10.0\text{cm}$)上面の鉛直方向たわみ量 δv との関係を示したものである。図-26は最終沈下 $\delta g_f=4\text{mm}$ の状態でのたわみの分布を示したものである。図中の丸印は実験結果を、実線は4, (3)に用いたものと同様な解析モデルを用いて行った解析の結果をそれぞれ示したものである。地盤沈下試験は地表面載荷試験の最終荷重状態で実施したので、図-24~26の実験値は初期値を地表面載荷試験の最終荷重状態を零として表わした。トンネルに作用する土圧分布については、最終沈下 δg_f の状態での土圧の実測値を図-24中に三角印で示した。地盤沈下部分には、地盤沈下に伴って土圧が増加しているのがわかる。解析に用いたトンネル位置での地盤沈下量は、文献(21), (22)による方法で算定した。図-25, 26を見ると、4, (3)での比較同様、解析結果は実験結果とほぼ一致し、解析モデルの妥当性が示された。

5. あとがき

以上により、模型セグメントを用いたシールドトンネルのトンネル軸方向の実験と、トンネル軸方向の挙動を説明する解析モデルについて述べた。実験結果と解析結果との比較から、解析モデルの妥当性が示された。解析に当って一部ばね定数に実験値を用いたが、実物のセグメントの場合には、すでに述べたように解析的に求めることが可能であり、実際のシールドトンネルに対しても本解析モデルは十分適用できると思われる。ここに示した解析モデルを用いることにより、セグメント本体ならびにリング継手部の検討など具体的な設計へのルートが開かれたと著者らは考えている。なお、今回は検討対象をコンクリート平板形セグメントを用いたシールドトンネルとしているが、鋼製セグメントを用いたシールドトンネルについても今回とほぼ同様な検討をすでに行っている。¹⁵⁾

著者らは、これらの解析モデルを用いて、実際に計画されたシールドトンネルの急曲線施工用セグメント¹⁴⁾の検討、併設トンネルへの適用についての検討を行っている。¹²⁾また、この他に一般的な地震時および地盤沈下を受ける場合の検討などにおいても本解析モデルの適用は容易であり、これらについても適当な時期をみてまとめて報告したいと考えている。

最後に、この報告をまとめるにあたって、各種の実験やデータ整理などで多大なご助力をいただいた日本シールドエンジニアリング㈱加藤教吉氏、中部電力㈱野々村十九一氏、同宮田隆雄氏、日本国土開発㈱石田智朗氏(当時東洋大学大学院修士課程学生)ほか、関係各位に深く感謝する次第です。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書(シールド編)，1986
- 2) 日本鉄道施設協会：シールドトンネルの設計施工指針(案)，1977
- 3) 鳥取孝雄：シールドトンネルの軸方向変形に関する実験，第24回土木学会年次学術講演会概要集Ⅲ-144, 1972
- 4) 小泉 淳・小柳隆司・村上博智：シールドトンネル長手方向の変形挙動について，第34回土木学会年次学術講演会概要集，Ⅲ-263，1979
- 5) 藍田正和・西野健三・田中 弘：セグメント継手部の剛性を考慮した耐震設計について，第19回土質工学研究発表会概要集，1984
- 6) 藍田正和・西野健三：入力波の違いによるシールドトンネルの耐震性に関する一考察，第39回土木学

会年次学術講演会概要集, I-318, 1984

- 7) 野々山十九一・宮田隆雄: シールドトンネル模型の変形実験について(その1), 第20回土質工学研究発表会概要集, 1985
- 8) 志波由紀夫・川島一彦・大日方尚巳・加納尚史: シールドトンネルの耐震解析手法に関する提案, 第41回土木学会年次学術講演会概要集, I-533, 1986
- 9) 加納尚史・川島一彦・大日方尚巳・志波由紀夫: 覆工の軸剛性の非線形を考慮したシールドトンネルの動的応答解析, 第41回土木学会年次学術講演会概要集, I-532, 1986
- 10) 村上博智・小泉 淳・桜木 満: シールドトンネル急曲線部における鋼製セグメント主桁の面外変形について, 第41回土木学会年次学術講演会概要集, III-419, 1986
- 11) 土山茂希・入川 誠・加藤教吉: シールドトンネル模型の曲げ試験, 第41回土木学会年次学術講演会概要集, III-412, 1986
- 12) 堀地紀行・鳥取孝雄・小泉 淳: 併設シールドトンネルにおける縦断方向の剛性を考慮した検討手法について, 第41回土木学会年次学術講演会概要集, III-427, 1986
- 13) 西野健三・吉田和夫・小泉 淳: シールドトンネル縦断方向の現場載荷試験とその考察, 土木学会論文集, 第376号/III-6, 1986.12
- 14) 小泉 淳・石田智朗・村上博智: シールドトンネルの急曲線施工時の検討, 東洋大学工学部研究報告, 第22号, 1987
- 15) 小泉 淳・村上博智・西野健三: シールドトンネルの軸方向挙動特性のモデル化について, 土木学会論文集, III, 投稿中
- 16) 小泉 淳・村上博智: シールド工事用セグメントのセグメント継手の挙動について, 土木学会論文報告集, 第296号, 1980.4
- 17) 西野健三・近藤寛通・吉田和夫: RCセグメント継手部の構造モデル化に関する試験とその考察, 構造工学論文集, Vol.31A, 1985.3
- 18) 大石 博: 地盤沈下を受ける埋設管路の挙動に関する二、三の考察, 土木学会論文集, 第356号/I-3, 1985.4
- 19) 田辺揮司良・高田至郎: 地盤沈下を受ける地中管路の設計式と適用, 土木学会論文集, 第374号/I-6, 1986.10
- 20) 土質工学会: 土質工学ハンドブック, 1982
- 21) 村山朔郎・松岡 元: 粒状土地盤の局部沈下現象について, 土木学会論文報告集, 第172号, 1969.12
- 22) 村山朔郎・松岡 元・中井照夫: トンネル掘削による地表面沈下の解析, 第27回土木学会年次学術講演会概要集, III-149, 1979

(1987年10月16日)