

シールドトンネルの軸方向特性のモデル化について

STUDY ON THE ANALYTICAL MODEL OF SHIELD
TUNNEL IN LONGITUDINAL DIRECTION

小泉 淳*・村上博智**・西野健三***

By Atsushi KOIZUMI, Hiroto MURAKAMI and Kenso NISHINO

As well known, a shield tunnel is one of typical long structures. Its lining 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 structural calculation.

This study shows approaches to evaluate the effects of the joints for longitudinal tunnel design. For this purpose, the authors present a numerical calculation model to predict longitudinal behaviour of the shield tunnel. In this model, joint elements are introduced so as to evaluate segment joints.

Compared with results of prototype test and calculation model on longitudinal behaviour of a shield tunnel, it was found that the calculation model could give results consistent with the prototype ones.

Keywords: shield tunnel, longitudinal behaviour, segment design

1. はじめに

トンネル構築方法の1つであるシールド工法は、従来河底や海底などきわめて地質条件の悪い場所にトンネルを構築する際の特長工法として用いられてきた。しかし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長があり、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優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、シールド工事費の5割程度を占めるセグメントの合理的かつ経済的な設計法の確立が急務となっている。

シールドトンネルはプレキャストのピースであるセグメントを、ボルトなどで組み立てて作る長大な筒状の構造物である。このためシールドトンネルの設計に際して

はセグメントを閉合してリングを構成するためのセグメント継手と、リング相互を連結するリング継手の2種類の継手をそれぞれ合理的にモデル化することがまず第一に必要なとなる。次にこれらの数千から1万個にも達する継手をトンネル全体の構造モデルの中にどのように取り入れていくかが問題となる。これは単にシールドトンネル本体のモデル化だけではなく、トンネルを取り巻く周辺の地山の評価の問題、すなわちトンネルに作用する荷重やトンネルの支持状態なども密接な関連をもっている。

シールドトンネルの設計はトンネル横断面方向のみでなくてトンネル軸方向についても行われるべきである^{1),2)}が、実際の設計ではトンネル横断面内についてのみ行われるのが普通である。特に軸方向の検討が要求される場合には、リング継手があることで変形しやすくなったトンネル全体の剛性がセグメントリングの剛性を一様に低下させたものであるとして、これを地盤に支持された弾性床の上のほりにモデル化して、検討を行うことが多いが、しかし現在のところ、どの程度の剛性低下を考えればよいかを推定する方法がないため、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。

シールドトンネル横断面内の設計については、すでにいくつかの方法³⁾⁻⁹⁾が提案され、トンネルの状況に応じ

* 正会員 工博 東洋大学助教授 工学部土木工学科
(〒350 川崎市鯉井中野台 2100)

** 正会員 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)

*** 正会員 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)

てそれぞれ実績をあげているが、シールドトンネル軸方向の挙動については、従来ほとんど取り上げられていなかった。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^{10)~21)}。

シールドトンネルの軸方向の挙動を解析的に研究する場合には、セグメント本体の力学的モデル化および個々の継手の力学的モデル化の問題もさることながら、膨大な部材（要素）数と継手数をどのように処理するかが問題であり、一方実験的に研究を行おうとする場合には、相当数のリングを組み立てることが必要であり、その費用が多大となるほかに、大規模な実験設備を必要とすることが問題となる。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挙動を明らかにすることが避けて通れない状況となってきたことは事実である。すでに述べたようにトンネルの軸方向の挙動を明らかにするためには、トンネルとトンネル周辺地山との相互作用を考慮に入れることは必須なことであり、もちろんシールドトンネルの構造モデルは可能な限り現実に近いものであることが要求される。一方、解析的には電子計算機の容量などに制限があるため、計算可能な範囲まで構造モデルの単純化が必要となる。

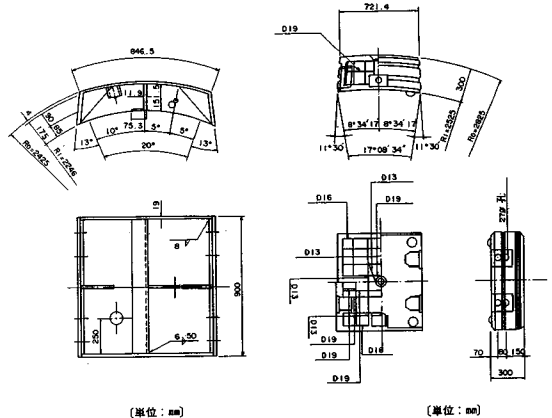
本研究は以上に述べた観点に立って、まず継手部の個々のモデル化を行い、次に有限要素法などの手法を用いてシールドトンネル全体を各種のばねを有する棒構造モデルに置換する方法を述べ、すでに行われた実験¹²⁾の結果を用いてこれらのモデル化の妥当性を検証したものである。

2. 実験概要

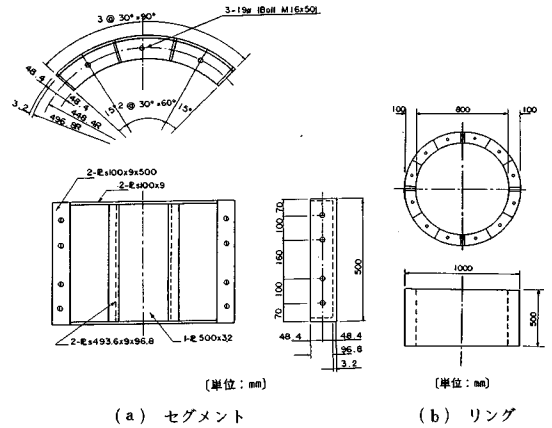
シールドトンネルの軸方向の挙動を実験的に調べることを目的として、東京電力株式会社からの依頼により財団法人電力中央研究所において次の4種類の実験が行われた¹²⁾。

- ① 鋼製実物Kセグメントの2ピース軸方向引張および圧縮試験
- ② コンクリート平板形実物Kセグメントの2ピース軸方向引張および圧縮試験
- ③ 鋼製模型セグメントの2リング軸方向引張および圧縮試験
- ④ 鋼製模型セグメント15リングを組み立てたトンネル曲げ試験

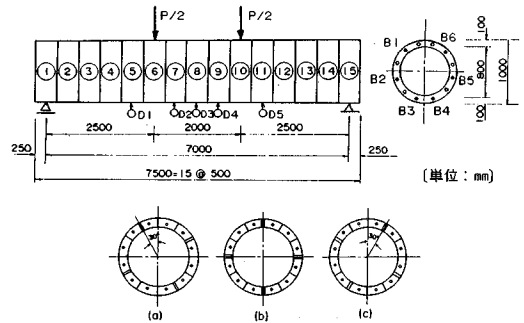
これらの実験に用いられたセグメントの形状寸法を図1~図3に示す。実験①および②はKセグメント2ピースをトンネル軸方向にボルトで接合し、軸方向に引



図一 鋼製実物Kセグメント 図二 コンクリート平板形実物Kセグメントの形状寸法



図三 鋼製模型セグメントの形状寸法



図四 15リング曲げ試験の概要とリングの組み方

張力または圧縮力を作用させたもので、両セグメント間の相対変位量、リング継手の開口量、ボルトのひずみ、継手板のひずみ、およびセグメント本体のひずみなどを測定している。また実験③は鋼製模型セグメント2リングを千鳥組したうえでトンネルの軸方向に引張力または圧縮力を作用させたもので、両リング間の相対変位量、

リング継手の開口量、ボルトおよびセグメント本体のひずみなどを測定している。実験④は実験③に用いたものと同じのセグメントリング、15リング分を3リング1サイクルに千鳥組したうえで、図-4に示すように、荷重を2点载荷したもので、リング下面のたわみ量、リング継手の開口量、ボルトおよびセグメントに生ずるひずみなどを測定している。

3. 継手部のモデル化

(1) セグメント継手

セグメント継手は曲げモーメントに対する回転ばねに評価する。その回転ばね定数は文献7)に示す方法により求める。

(2) リング継手

図-5は鋼製セグメントおよびコンクリート平板形セグメントのリング継手部を模式的に示したもので、構造的にはセグメント継手とよく似ている。このためリング継手のモデル化にあたっては基本的にはセグメント継手と同様に文献7)に示されるモデルを準用するが、リング継手全体に作用する力の特性を考慮し、リング継手を曲げに対する回転ばねにモデル化するほかに、軸方向力に対する軸ばね、せん断力に対するせん断ばねにモデル化する。特にリング継手のモデル化は、トンネル全体のモデル化にあたって重要な役割を分担するものであるから、以下に鋼製セグメントの場合およびコンクリート平板形セグメントの場合についてこれを詳述する。

a) 鋼製セグメントの場合

鋼製セグメントのリング継手は、主桁、縦リブ、スキンプレートおよびボルトで構成されている(図-5(a)参照)。図-6はこの継手部に縦リブを通して作用する荷重Pによるリング継手の変形状態を考えて、力のつ

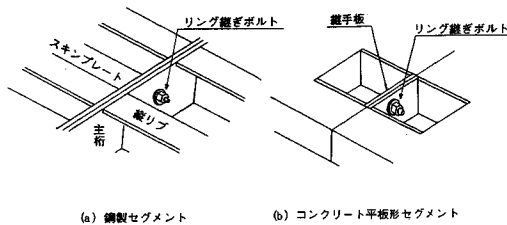


図-5 リング継手部の模式図

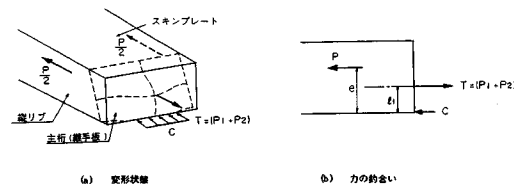


図-6 リング継手の変形状態と力のつり合い

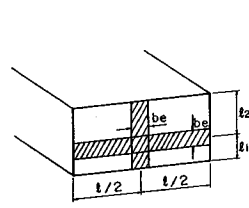


図-7 変形を評価する格子ばり (鋼製セグメント)

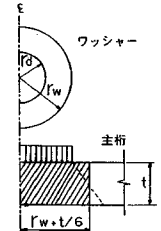


図-8 圧縮有効域 (鋼製セグメント)

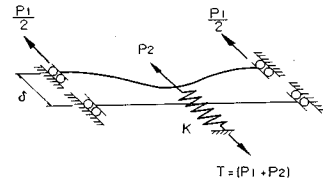


図-9 円周方向のはりのモデル

り合いを模式的に表わしたものであり、図中Cはボルト軸に対して偏心する荷重Pによって生じる圧縮力を示し、Tはボルト部に生じる引張力を表わしている。変形は局所的なものであるから、主桁(継手板)を図-7に示すような有効幅 b_e をもつ格子ばりに置換する。このはりの有効幅 b_e および曲げ剛性Dはそれぞれ式(1)および式(2)で与える⁷⁾。

$$b_e = 2 \left(r_w + \frac{t}{6} \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$D = \frac{b_e \cdot t^3}{12(1-\nu^2)} \cdot E \dots \dots \dots (2)$$

ここに r_w は用いたワッシャーの半径、 t は主桁の板厚、 ν と E はそのポアソン比とヤング率である(図-8参照)。

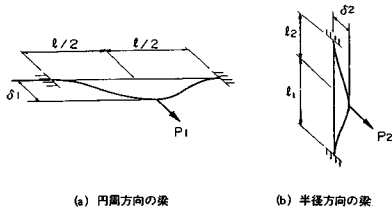
次に継手位置における変位と力との関係を求める目的で円周方向のはりを取り出し、継手部を図-9に示すようにモデル化する。

図-9中のKはボルトおよび板の軸剛性を表わす複合ばねであり、このばねのばね定数 k は式(3)および式(4)により与えられる⁷⁾。式(3)は主桁どうしが離間する前のばね定数を、また式(4)は離間した後のばね定数を与えている。

$$k = \frac{2k_b \cdot 2k_{pu}}{2k_b + 2k_{pu}} + 2k_{pl} \dots \dots \dots (3)$$

$$k = \frac{2k_b \cdot 2k_{pu}}{2k_b + 2k_{pu}} \dots \dots \dots (4)$$

ここに k_b はボルトの軸剛性を評価するばねのばね定数、 k_{pu} は主桁のボルトに拘束される部分(圧縮有効域)が圧縮される際に、板の軸圧縮剛性を評価するばねのばね定数、 k_{pl} はボルトの初期締付けによって主桁に蓄え



図—10 円周方向のはりと半径方向のはり（鋼製セグメント）

られた圧縮ひずみが解放される際に、板の剛性を評価するばねのばね定数をそれぞれ表わしている。

また、図—9中の P_1, P_2 はボルト部に生ずる軸力 T を円周方向のはりおよび半径方向のはりの剛性に従って分けた分力である。図—10を参照してこれらの2方向のはりに生ずる変位 δ_1, δ_2 は式 (5), (6) で与えられる。

$$\delta_1 = \frac{P_1 l^3}{192 D} \dots\dots\dots (5)$$

$$\delta_2 = \frac{P_2 l_1^3 \cdot l_2^3}{3(l_1 + l_2)^3 D} \dots\dots\dots (6)$$

これらの変位は等しいので、 $\delta_1 = \delta_2$ と置いて P_2 は、

$$P_2 = \alpha P_1 \dots\dots\dots (7)$$

$$\alpha = \frac{l^3(l_1 + l_2)^3}{64 l_1^3 \cdot l_2^3} \dots\dots\dots (8)$$

と書ける。ボルト部に作用する力 T は、 $T = P_1 + P_2$ であるから、

$$T = P_1 + P_2 = (1 + \alpha)P_1 \dots\dots\dots (9)$$

となる。いま図—6に示した継手部の力のつり合いを考えると、

$$P \cdot e = T \cdot l_1 = (1 + \alpha)l_1 \cdot P_1 \dots\dots\dots (10)$$

となり、これから P_1 は継手部に作用する偏心荷重 P を用いて式 (11) のように書くことができる。

$$P_1 = \frac{e}{l_1 \cdot (1 + \alpha)} \cdot P \dots\dots\dots (11)$$

次に、図—9に示した円周方向のはりの変位 δ を求めると、

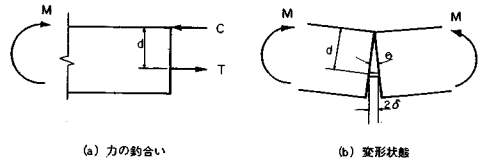
$$\delta = \frac{l^3}{192 D} \cdot P_1 + \frac{1}{k} (P_1 + P_2) \dots\dots\dots (12)$$

となり、式 (12) に式 (9) および式 (11) を代入してまとめると、継手部に作用する荷重 P と継手部の変位 δ との間に、

$$\delta = \frac{\{k l^3 + 192 D(1 + \alpha)\} e}{192 D \cdot k \cdot l_1(1 + \alpha)} \cdot P \dots\dots\dots (13)$$

なる関係が得られる。これから引張荷重 P に対するリング継手1か所当たりの軸引張剛性を表すばねのばね定数 k_{ru} は、主桁の両側で変形が2倍となることを考えて、

$$k_{ru} = \frac{96 D \cdot k \cdot l_1(1 + \alpha)}{\{k l^3 + 192 D(1 + \alpha)\} e} \dots\dots\dots (14)$$



図—11 曲げに対する力のつり合いと変形状態（鋼製セグメント）

で与えられる。

一方、この継手部に曲げモーメントが作用した場合には、継手部の力のつり合いおよび継手部の変形状態を図—11のように考えて、式 (15) および式 (16) に示すような関係が得られる。

$$M = T \cdot d \dots\dots\dots (15)$$

$$\delta = \theta \cdot d/2 \dots\dots\dots (16)$$

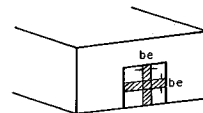
ここでボルト部に作用する引張力 T と継手部の変位 δ との間に、 $T = k_{ru} \cdot \delta$ なる関係があることを考えると、継手部に作用する曲げモーメント M と継手部の回転角 θ との関係は、

$$M = \frac{k_{ru} \cdot d^2}{2} \cdot \theta = k_{ro} \cdot \theta \dots\dots\dots (17)$$

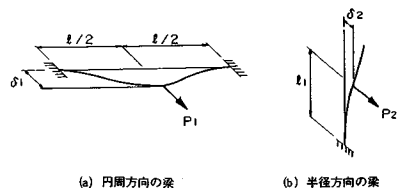
で表わされ、これよりリング継手部の回転ばね定数 k_{ro} が得られる。

b) コンクリート平板形セグメントの場合

コンクリート平板形セグメントのリング継手は一般的には図—5(b)に示すように継手板とボルトで構成されている。継手部の変形はそのほとんどが継手板自身の変形によって生じていると考えられるため、継手部のモデル化は継手板だけを取り出して行えばよい（図—12参照）。したがって以降の取扱いは、円周方向のはりと半径方向のはりの剛性に従って分けた分力 P_1, P_2 の比 α 、および図—15に示す曲げに対する力のつり合いと変形状態を除けば、鋼製セグメントの場合とまったく同様と



図—12 変形を評価する格子ばり（コンクリート平板形セグメント）



図—13 円周方向のはりと半径方向のはり（コンクリート平板形セグメント、帯板タイプ）

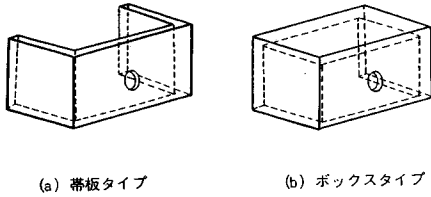


図-14 リング継手金具のタイプ

なる。

図-13は鋼製セグメントの場合の図-10に相当するもので、両者の相異は半径方向のはりの境界条件だけである。すなわち鋼製セグメントの場合には、はりの上縁はスキンプレートに拘束され、また下縁は継手板どうしがせり合い、変形が拘束されるのに対して、コンクリート平板形セグメントの場合には、はりの上縁はその構造から変形が自由であると考えられるからである(図-14(a)参照)。なお図-14(b)に示すようなタイプの継手金具を用いる場合は、 α も含め鋼製セグメントの場合とまったく同じになる。今回用いたセグメントは図-14(a)に示すタイプであるから、同図を参照して α は、

$$\alpha = \frac{l^3}{64 I_1^2} \dots \dots \dots (18)$$

となる。この式 α を式(14)に適用すれば、コンクリート平板形セグメントの場合、リング継手1か所当たりの軸引張剛性を表すばねのばね定数が求められる。

また、リング継手部に曲げモーメントが作用した場合には、図-15に示す継手部の力のつり合いおよび継手部の変形状態⁷⁾を参照して、式(19)、(20)の関係が得られる。

$$M = T \cdot (d - x/3) \dots \dots \dots (19)$$

$$\delta = \theta(d - x)/2 \dots \dots \dots (20)$$

これに鋼製セグメントの場合と同様、 $T = k_{ru} \cdot \delta$ なる関係を考慮すると、曲げモーメント M と継手部の回転角 θ との関係は、

$$M = \frac{k_{ru}(d - x/3)(d - x)}{2} \cdot \theta = k_{ro} \cdot \theta \dots \dots \dots (21)$$

で表わされ、これよりリング継手部の回転ばね定数 k_{ro} が求められる。

c) その他のばねのばね定数

リング継手が軸圧縮力を受ける場合は、継手での変位

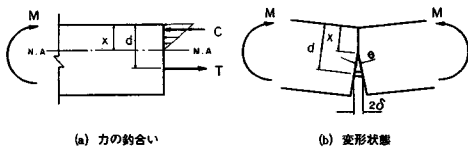


図-15 曲げに対する力のつり合いと変形状態 (コンクリート平板形セグメント)

は生じないと考えて、継手部の軸圧縮剛性を評価するばねのばね定数は無限大とする。

リング継手がせん断力を受ける場合は、生じるせん断変形を解析的に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、継手部のせん断剛性を評価するばねのばね定数は無限大とした。すなわちボルトの初期締付けによりリング継手部には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考えた。

4. シールドトンネルのモデル化

(1) シールドトンネルの立体構造モデル

鋼製セグメントを用いたシールドトンネルを図-16に示すような立体骨組構造にモデル化する。図-17は用いた座標系を、また表-1は各種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_{ox}, k_{oy}, k_{oz} 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_{so} 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_{ro} 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。また主桁、縦リブおよびセグメント継手板を骨組部材に置換するにあたって、スキンプレートの剛

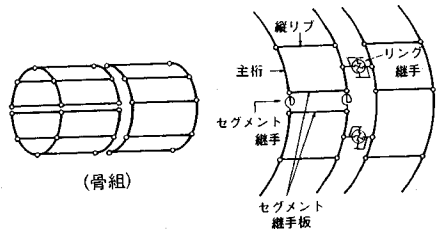


図-16 シールドトンネルの立体骨組構造モデル

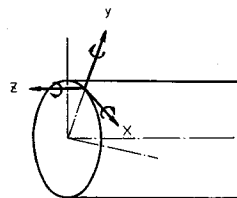


図-17 立体構造モデルの座標系

表-1 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_{ox}	—	k_{ro}
k_{oy}	—	k_{ro}
k_{oz}	k_{so}	—

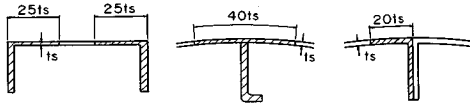


図-18 スキンプレートの有効幅

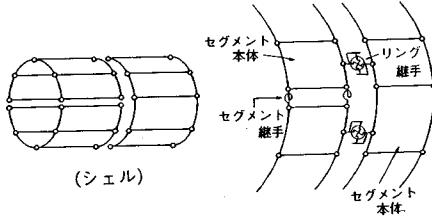


図-19 シールドトンネルの立体シェル構造モデル

性は図-18に示すような有効幅を考え、各骨組部材の断面の中へ取り入れた。

一方、コンクリート平板形セグメントの場合は、その形状を考えて立体円筒シェル構造にモデル化する(図-19参照)。用いた座標系および各種のばねのばね定数は鋼製セグメントの場合と同様に考えている。

以上に述べたような立体解析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解析モデルを用いたうえで、シールドトンネル全体を以下に示すような棒構造モデルに置換する。

(2) シールドトンネルの棒構造モデル

図-20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

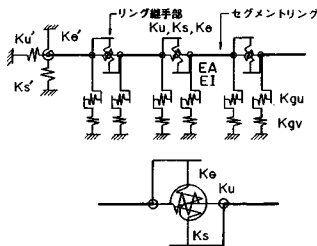


図-20 シールドトンネルの棒構造モデル



図-21 継手部のない立体構造モデル

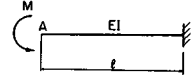


図-22 継手部のない棒構造モデル

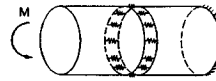


図-23 継手部のある立体構造モデル

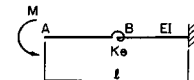


図-24 継手部のある棒構造モデル

により、剛結(ばね定数が無限大)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。

$$K_u = \infty \dots \dots \dots (22)$$

$$K_u = k_{ru} \cdot n_r \dots \dots \dots (23)$$

式(22)は軸圧縮力を受けた場合のばね定数を、式(23)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(23)中の k_{ru} は式(14)で与えられるリング継手1か所当たりの軸引張ばねのばね定数であり、 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 K_s はすでに述べた理由(3.(2), c)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解析モデルを用いて以下に示す方法で算出する。

まず、図-21に示すように継手部をもたないセグメントリング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、載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-22に示すようなはりにみなし、一端を固定し他端に M を作用させてはり先端のたわみ δ_A を求める。

さらに図-23に示すように継手部を考慮したうえで、セグメントリング2リング分を考え、同様に載荷断面の中心位置におけるたわみ δ' を計算する。このとき、リング継手1か所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、引張の内力が生じた位置には引張のばね定数

を与え、圧縮の内力が生じた位置には圧縮のばね定数を与えて、これらのばねの状態が定まるまで計算は繰り返し行う。次に、図-24に示すようにセグメントリングをはりに、リング継手を回転ばねに評価したうえで、同様にはり先端のたわみ δ'_A を求める。いまはりどうしを考え、セグメントリング2リング分の長さを l 、リングの曲げ剛性を EI 、回転ばね定数を K_θ 、リング継手位置 B での曲げモーメントおよび回転角差を M_B 、 θ_B とすると、はり先端のたわみ δ_A および δ'_A は、

$$\delta_A = \frac{Ml^2}{2EI} \dots\dots\dots (24)$$

$$\delta'_A = \frac{Ml^2}{2EI} + \theta_B \cdot \frac{l}{2} \dots\dots\dots (25)$$

で表わされる。また、B 点の曲げモーメントは、

$$M_B = M = K_\theta \cdot \theta_B \dots\dots\dots (26)$$

であることから、

$$\theta_B = M / K_\theta \dots\dots\dots (27)$$

となり、これと式 (24) とを式 (25) に代入して K_θ を求めると、

$$K_\theta = \frac{Ml}{2(\delta'_A - \delta_A)} \dots\dots\dots (28)$$

となる。トンネルの棒構造モデルは立体解析モデルをこれに置き換えるものであるから、式 (28) で示される回転ばね定数は、立体解析モデルを用いて計算された δ および δ' を使って式 (29) で表わすことができる。すなわちリング継手1断面当たりの曲げ性能を評価する回転ばねのばね定数 K_θ は、

$$K_\theta = \frac{Ml}{2(\delta' - \delta)} \dots\dots\dots (29)$$

で表わされる。

5. 実験結果と解析結果との比較

(1) 鋼製実物Kセグメントの2ピース軸方向引張試験

図-25は実験結果と解析結果のうち、荷重 P と継手の開口量 δ との関係を表わしたもので、図中各種の点は実験結果を、実線は解析結果を示している。なお各種の点のうち丸印のものは1回目の載荷の結果を、三角印のものは2回目の載荷結果を、また四角印のものは3回目の結果を表わしている。この図からリング継手1か所当たりのモデル化の妥当性が確認される。なお $P=12$ tf (117.7 kN) 以降の実験値は継手板の一部が降伏したことを表わしている。

(2) コンクリート平板形実物Kセグメントの2ピース軸方向引張試験

図-26は荷重 P と継手の開口量 δ との関係を表わした鋼製セグメントの場合と同様の図である。解析結果は

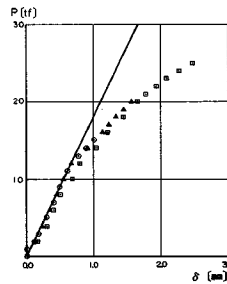


図-25 荷重と継手開口量との関係 (鋼製実物Kセグメント)

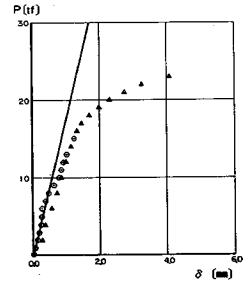


図-26 荷重と継手開口量との関係 (コンクリート平板形実物Kセグメント)

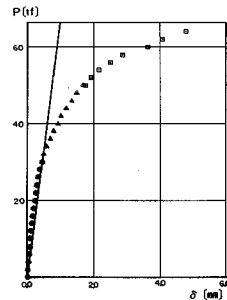


図-27 荷重と継手開口量との関係 (鋼製模型セグメント)

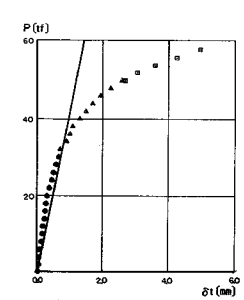


図-28 荷重と全体変形量との関係 (鋼製模型セグメント)

実験結果に比べ、やや開口量が大きいようであるが、おおむね両者は一致しており、リング継手1か所当たりのモデル化が妥当であることがわかる。

(3) 鋼製模型セグメントの2リング軸方向引張試験

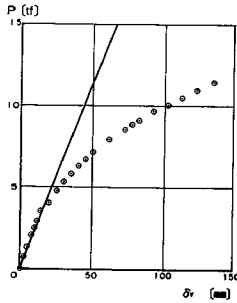
図-27は荷重 P と継手の開口量 δ との関係を表わしたもので、実験結果は測定された4か所の開口量を平均して示し、また解析結果はトンネルの立体解析モデルを用いて計算したものを示してある。図-28は荷重 P とセグメントリング全体の変形量 δ_t との関係を示したものである。これらの図をみると、解析結果が実験結果に比べ、やや大きな開口量または全体変形量を与えるものの、両者はほぼ一致し、鋼製セグメントを用いたシールドトンネルの立体解析モデルの妥当性が示された。

(4) 鋼製模型セグメントの15リング曲げ試験

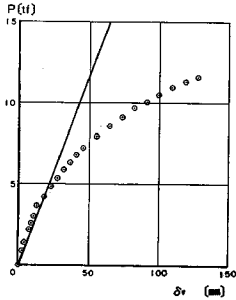
曲げ試験の結果は、トンネルのたわみ量とリング継ぎボルトに生じた軸ひずみに着目して整理を行った。これは前者がトンネル全体の性状を、また後者がリング継手の性状をそれぞれ把握するのに便利なためである。

解析にはシールドトンネルの棒構造モデルを用いた。立体解析モデルではトンネルの対称性を考えても計算機の容量が不足するためである。

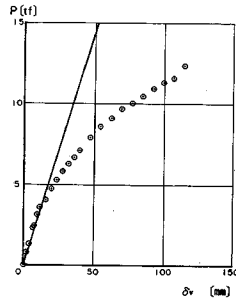
a) トンネルのたわみ量



図—29 荷重とたわみとの関係 (D3)



図—30 荷重とたわみとの関係 (D2, D4)



図—31 荷重とたわみとの関係 (D1, D5)

図—29は荷重 P とトンネル中央部下端 (D3, 図—4 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、実線は棒構造モデルによる解析結果を表わしている。この図をみると解析結果は実験結果をよく説明していることがわかる。図—30, 図—31はトンネル中央から1リング離れた位置 (D2, D4, 図—4 参照) および載荷点から1リング外側の位置 (D1, D5, 図—4 参照) における荷重 P とたわみ量の平均値 δ_v との関係を示したものであるが、図—29と同様に、 $P=5 \text{ tf}$ (49.03 kN) 付近までは両者はよく一致しており、本解析モデルが妥当性を有していることが確認できる。なお、 $P=5 \text{ tf}$ (49.03 kN) 以上の荷重では、たわみの実験値は解析値に比べ、かなり大きくなっている。これは、リングの断面変形などに起因するものと考えられるが、棒構造モデルにこれを考慮することは困難と思われる。 $P=5 \text{ tf}$ (49.03 kN) では、すでに2.5 cm程度のたわみが生じており、また測定されたひずみの値などをみると、この荷重では部分的に降伏した状態にある箇所がみられることなどを合わせ考えると、トンネルの実用範囲内ではここに述べた棒構造モデルでも十分その挙動を把握できるとと思われる。

b) リング継ぎボルトに生じる軸力

鋼製セグメントのリング継手断面は力学的には、縦リブ、セグメント継手板およびスキンプレートの有効断面

(図—18 参照) からなる圧縮断面と、全ボルトの有効断面積からなる引張断面とに分けて考えられる。いまこれらの断面が、リング断面の図心半径に沿って一様に分布していると考えれば、それぞれの分布の幅 t_c および t_t は次式で与えられる。

$$t_c = \frac{A_c}{2 \pi r_c} \dots\dots\dots (30)$$

$$t_t = \frac{A_t}{2 \pi r_c} \dots\dots\dots (31)$$

ここに A_c はリング断面の圧縮有効断面積、 A_t は全ボルトの引張有効断面積である。このようにして求めたリング継手断面を模式的に示したものが図—32である。

図—32において、断面一次モーメントが零となる x_0-x_0 軸を中立軸と考えて(その位置は繰返し計算を行って求める)、リング継手断面内のひずみ分布は、トンネルの棒構造モデルによって求められた継手断面の断面力に対して直線的であると仮定する。引張側にあるリング継手1か所当たりに作用すると考えられる引張力 P は、当該位置にあるボルトを評価する断面積 $A (= t_t \cdot r_c \cdot 2 \pi / n_r, n_r$: リング継ぎボルトの総数) にその位置のひずみ量 ϵ とボルトの弾性係数 E を乗じて、

$$P = E \cdot A \cdot \epsilon \dots\dots\dots (32)$$

より求める。さらにリング継ぎボルト部に作用する力 T は、図—6を参照して次式より求められる。

$$T = P \cdot e / l_1 \dots\dots\dots (33)$$

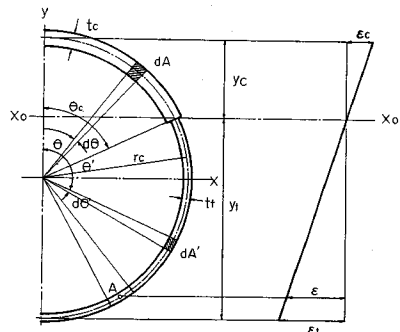
リング継ぎボルトに生ずる軸力 N_B は、文献7)を参照して、継手部の離間前、離間時および離間後のそれぞれの状況に応じて、式 (34), (35), (36) で計算される。

$$N_B = N_{B0} + \frac{k_b \cdot k_{\rho u}}{k_b \cdot k_{\rho u} + k_{\rho}(2 k_b + k_{\rho u})} \cdot T \dots\dots\dots (34)$$

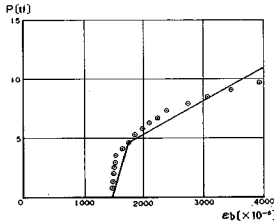
$$N_{Bsep} = \frac{k_b \cdot k_{\rho u} + k_{\rho}(2 k_b + k_{\rho u})}{k_{\rho}(2 k_b + k_{\rho u})} \cdot N_{B0} \dots\dots\dots (35)$$

$$N_B = T \dots\dots\dots (36)$$

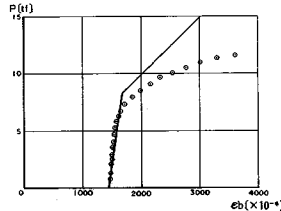
図—33~35は、リング曲げ試験の載荷重 P と、リング継ぎボルトに生じた軸ひずみとの関係を示したもので、図中の点が実験結果を、また実線が上述した方法に



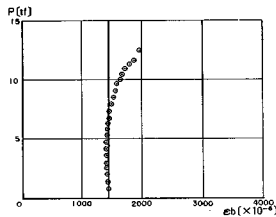
図—32 リング継手断面の圧縮有効断面積と引張有効断面積



図—33 荷重とボルトひずみとの関係 (B3, B4)



図—34 荷重とボルトひずみとの関係 (B2, B5)



図—35 荷重とボルトひずみとの関係 (B1, B6)

より計算した解析結果をそれぞれ表わしている。なお、図—33は、中央のリングの最も下縁にある4つのボルト(リング⑧⑦間とリング⑧⑨間のボルトB3とB4、図—4参照)に生じた軸ひずみの平均値を、図—34は、スプリングラインよりやや下の位置にあるボルト(リング⑧⑦間とリング⑧⑨間のボルトB2とB5、図—4参照)ひずみの平均値を、図—35は、圧縮側にあるボルト(リング⑧⑦間とリング⑧⑨間のボルトB1とB6、図—4参照)の平均値をそれぞれ実験結果として用いている。

図—33~35をみると、解析結果は実験結果をほぼ説明しており、トンネル全体を棒構造にモデル化して計算を行ってもかなりよい精度でトンネルの挙動が推定できることを示している。

6. まとめ

各種の実験結果と、ここに示した解析モデルによる解析結果とを比較して、得られた知見をまとめて列挙すれば以下のとおりである。

(1) 鋼製実物Kセグメントの2ピース軸方向引張試験

主桁とリング継ぎボルトからなるリング継手部の解析モデルは、2ピース軸方向引張試験の結果を、よく説明できることがわかった。これより、鋼製セグメントについて、リング継手部1か所当たりのモデル化の妥当性が確認された。

(2) コンクリートの平板形実物Kセグメントの2ピース軸方向引張試験

リング継手板とリング継ぎボルトからなるリング継手部の解析モデルは、2ピース軸方向引張試験の結果を、

よく説明できることがわかった。これにより、コンクリート平板形セグメントについて、リング継手部1か所当たりのモデル化の妥当性が確認された。

(3) 鋼製模型セグメントの2リング軸方向引張試験
シールドトンネルの立体構造モデルは、2リング軸方向引張試験の結果を、よく説明できることがわかった。これにより、鋼製セグメントについて継手部のモデル化とシールドトンネルの立体構造モデルの妥当性が確認された。

(4) 鋼製模型セグメントの15リング曲げ試験
シールドトンネルの棒構造モデルは、シールドトンネルのトンネル軸方向曲げ試験の結果を、よく説明できることがわかった。これにより、鋼製セグメントについてシールドトンネルの立体構造モデルを用いたうえで棒構造モデルに置換する方法の妥当性が確認された。

7. おわりに

以上により、シールドトンネルの軸方向の挙動を説明することのできる解析モデルを示した。ここに示した解析モデルを用いることにより、リング継手位置の断面力も定められるので、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。

しかしながらこれら一連の解析モデルの妥当性については、さらに多くの実験により検証する必要があると考えている。特に、今回の鋼製セグメントを主とした実験に対し、コンクリート平板形セグメントでの実験による検証が必要である。コンクリート平板形セグメントについては、模型セグメントを用いて、今回と同様な実験のほかには地中での実験も含めて、すでに実施されており¹⁸⁾、別の機会に結果がまとまり次第公表したいと考えている。

なお、ここで示した解析モデルは、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の検討に用いた実績がある²¹⁾。また、併設トンネルへの適用についても検討している²⁰⁾。このほか、一般的な、地震時の検討および地盤沈下を受ける場合の検討などにおいても適用は容易であり、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。

最後に本報告をまとめるにあたって、貴重な実験データの提供をいただいた東京電力株式会社ならびに財団法人電力中央研究所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)，1977。
- 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)，1986。
- 3) 山本 稔・遠藤浩三・福井正憲：多ヒンデ系セグメントリングの設計計算法，土木学会論文集，第150号，1968.2。

- 4) 久保慶三郎・結城皓曠：シールドセグメントの応力に対する継手剛性の影響，土木学会論文集，第150号，1968.2.
- 5) 結城皓曠：継手の剛性と組み方を考慮したシールドセグメントの解析，土木学会論文報告集，第176号，1970.4.
- 6) 村上博智・小泉 淳：シールドセグメントリングの耐荷機構について，土木学会論文報告集，第272号，1978.4.
- 7) 村上博智・小泉 淳：シールド工専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.
- 8) 長崎光男・土井博巳・河田博之：新しい計算法を用いた直径13mのセグメントリングの設計，第35回土木学会年次学術講演会概要集，Ⅲ-244，1980.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 東京電力(株)：シールド洞道の軸方向剛性評価の検討報告書，1980，1981.
- 13) 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，H-5，1984.
- 14) 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.
- 15) 志波由紀夫・川島一彦・大日方尚己・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.
- 16) 加納尚史・川島一彦・大日方尚己・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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 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-425，1986.
- 21) 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.

(1987.8.21・受付)