

シールドトンネル縦断方向の現場載荷試験とその考察

IN-SITU TESTS AND CONSIDERATION ON SHIELD TUNNEL IN THE LONGITUDINAL DIRECTION

西野 健三*・吉田 和夫**・小泉 淳***

By Kenso NISHINO, Kazuo YOSHIDA and Atsushi KOIZUMI

To evaluate the rigidity of a shield tunnel in the longitudinal direction, in-situ load tests were performed using the drive power of a shield machine and the dead weight of a battery locomotive.

It was shown that, if deformation characteristics of the segments ring joints were known, the behavior of the shield tunnel as a cylinder could be represented by a simple beam model on a elastic foundation.

We also discussed on the construction of sharply curved tunnels in the longitudinal direction, using the proposed analytical model.

Keywords : shield tunnel, in-situ test, segment, longitudinal direction

1. まえがき

シールド工法は、他工法と比べて地上施設に対する影響が少ないとや、既設構造物との関係で深いトンネルを掘る場合、安全性や経済性に優れていることなどから、都市トンネル構築方法として代表的な位置を占めている。この工法も近年の都市トンネル建設の急激な増加に伴い、軟弱地盤中や周辺地盤が急変する地山中の建設をはじめとして、急曲線施工や既設構造物に対する接近施工など、ますます厳しい条件下での建設を余儀なくされている。これらの悪条件下のシールド工事では、トンネルの一次覆工であるセグメントの設計も、トンネル横断方向の設計だけでなく、地盤沈下や曲線施工に対する検討、さらには地震時の検討などトンネル縦断方向の安全性の検討が不可欠な問題となってきている^{1), 2)}。

地中構造物のうち、埋設管路の場合には一般に、これらの検討に際して、管路をはり、地盤を弾性ばねとした弾性床上はりモデルが用いられているが、これをシールドトンネルに適用する場合においては、特にシールドト

ンネルをはりに置き換える際に、その剛性をどのように評価するかが重要な問題となる。すなわち、シールドトンネルは数多くの継手を有するため、これを弾性床上のはりとして取り扱う場合には、継手部における剛性低下を明確に把握することが必要不可欠であると考えられるからである。

シールドトンネルの縦断方向の剛性評価については、従来ほとんど取り上げられなかつたのが実状である。これは、シールドトンネルが長大な構造物であり、直接的な試験を行うには、膨大な費用を要することや、無数にある継手を解析上どのように取り扱えばよいかが明確でないことによると思われる。したがって、シールドトンネルの縦断方向の挙動に関する研究は、文献3), 4) にみられる程度にすぎない。

本研究は、まず、シールドトンネルの縦断方向の挙動を実験的に把握する目的で、シールド機掘進推力（以下推力とよぶ）や坑内作業車（以下作業車とよぶ）などの荷重を利用して、施工中のトンネルに対する現場載荷試験を行い、次に、これらの試験結果をもとに、シールドトンネルの簡単な解析モデルを提示するとともに、これにより得られた解析結果と試験結果とを比較し検討を加えたものである。また、本研究は得られたトンネル解析モデルを用いて、急曲線施工時の曲線内側の継手目開き

* 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)

** 中部電力(株)中央送変電建設所調査役 (同上)

*** 正会員 工博 東洋大学助教授 工学部土木工学科 (〒350 川越市鶴井町野台2100)

問題など、施工時におけるトンネル縦断方向の検討方法についても言及している。

2. 現場載荷試験

現場で行った試験は、トンネル直線部において推力を利用して行った直線部推力試験、作業車自重を利用して行った鉛直載荷試験、およびトンネル曲線部で推力を利用して行った曲線部推力試験の3種類である。試験は、2か所の電力洞道建設工事（A工区、B工区）において実施した。その概要を表-1に示す。これらのトンネルは、電力洞道としては標準的なサイズであり、使用したRC平板型セグメントは、シールド工事用標準セグメント⁵⁾に準拠して設計したものである。なお、B工区のセグメントのリング継手の数が、A工区のそれと比べて多いのは、軟弱地盤中での地震時の検討⁶⁾と、急曲線施工の検討を行った結果である。RCセグメントのコンクリート配合は、両工区とも同じものを用いた。その配合表を表-2に示す。

以下に、各試験の目的とその概要を示す。

(1) 直線部推力試験

試験の概要を図-1に示す。この試験は、トンネル直線部において、トンネル縦断方向に圧縮力が作用した場合の挙動を把握するためのものであり、これにより、地盤の剛性すなわちトンネル縦断方向と平行する地盤反力ばね定数（以下接線方向地盤反力ばね定数とよぶ）と、圧縮力に対するトンネルの軸剛性を推定した。

表-1 工事の概要

	A工区	B工区
シールド機	機種 泥水加压式	泥水加压式
	外径 4.64m	4.54m
	機長 5.64m	5.48m
	総推力 $100 \times 18 = 1,800\text{tf}$	$100 \times 18 = 1,800\text{tf}$
セグメント	機種 RC平板型	RC平板型
	外径 4.5m	4.5m
	厚さ 0.2m	0.2m
	幅 1.0m	1.0m
	分割 6分割	6分割
	継手 16個	21個
	地盤	
土被り	14m	13m
土質 (JIS分類)	固結シルト	砂質シルト
N値	40~50	5~10

表-2 セグメントのコンクリート配合表

設計基準強度	スランプ	空気量	W/C	S/A	セメント	水	S	G
420 [kg/cm³]	3±1 [cm]	15 [%]	31 [%]	41 [%]	430 [kg/m³]	130 [kg/m³]	775 [kg/m³]	1125 [kg/m³]

測定は、セグメント本体中央部に設置した鉄筋計と、リング継手部に設置したπ型継手変位計（以下継手変位計とよぶ）により行った。なお、試験は、先に述べたA工区、B工区の2か所において同様に実施し、地盤状況の相異による比較検討を行った。A工区およびB工区での土質概要を図-2に示す。

(2) 鉛直載荷試験

試験の概要を図-3に示す。この試験はトンネル直線部において鉛直荷重が作用した場合の挙動を把握するためのものであり、これにより、地盤の剛性すなわちトンネル縦断方向に直交する地盤反力ばね定数（以下法線方向地盤反力ばね定数とよぶ）と、トンネルの曲げ剛性を推定した。

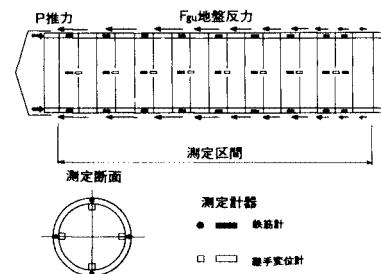


図-1 直線部推力試験の概要

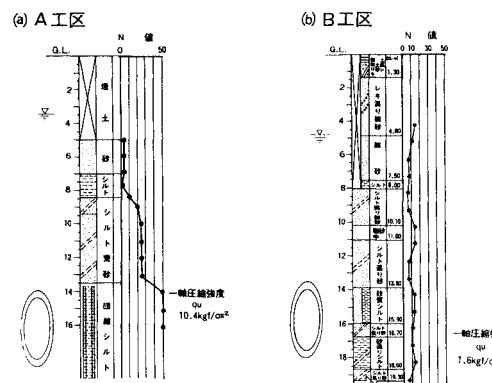


図-2 土質柱状図

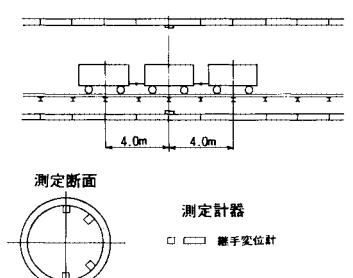


図-3 鉛直載荷試験の概要

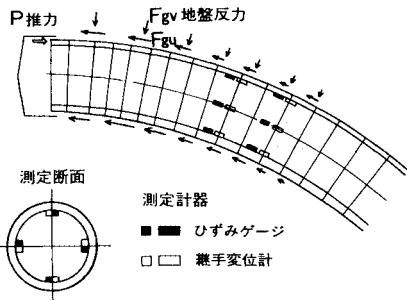


図-4 曲線部推力試験の概要

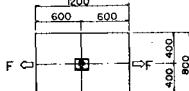
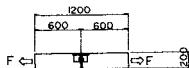


図-5 リング継手部引張り試験の概要

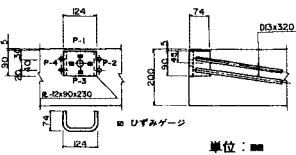


図-6 リング継手部の詳細

測定は、リング継手部に設置した継手変位計により行い、リング継手部の伸縮量を計測した。なお、この試験も直線部推力試験と同じ位置で、両工区同様に実施し、比較検討を行った。

(3) 曲線部推力試験

試験の概要を図-4に示す。この試験はトンネル曲線部において圧縮力および曲げモーメントが作用した場合の挙動を把握するためのものであり、これにより、地盤の剛性と、圧縮力と曲げモーメントを受ける場合のトンネルの剛性を検討した。

測定は、セグメント本体内面に貼付したひずみゲージと、リング継手部に設置した継手変位計により行った。なお、この試験は、B工区のみにおいて実施し、場所は上記2つの試験とほぼ同じ位置で行った。

以上の現場での各試験のほかに、室内において、実物大のリング継手部引張り試験(図-5参照)など⁷⁾を行い、トンネルの剛性を推定する際の参考とした。なお、すべての試験に用いたセグメントのリング継手部の詳細は、図-6に示すとおりである。ボルトは、M 22 (8.8) を用い、その締め付けトルクは、30 kgf m (294 Nm)となるようにトルクレンチを用いて管理した。

3. 直線部推力試験の結果とその解析⁸⁾

(1) 試験結果と考察

両工区ともシールド機には、100 tf (980 kN) の推力ジャッキを18本装備してあったが、載荷に際しては、

全ジャッキを使用し、均等に作用するように注意を払った。平均推力はA工区で780 tf (7 640 kN)、B工区で700 tf (6 860 kN) であり、以下の測定値は、この平均推力を換算した値としてまとめた。

図-7は、推進時のセグメント本体のひずみ分布を示したものである。横軸には、推力が作用している地点と各測定計器との距離を示した。なお、図中の丸印は試験

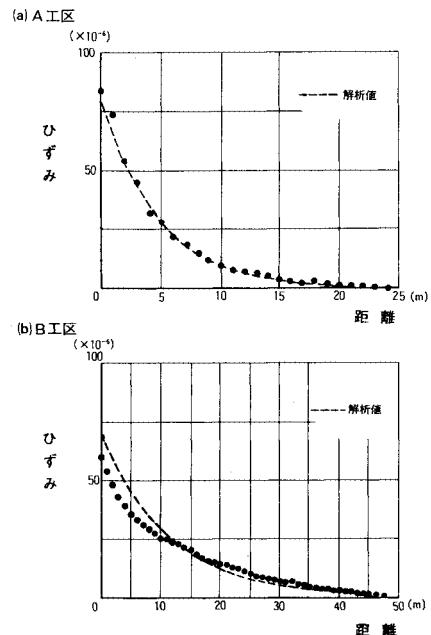


図-7 セグメント本体のひずみ分布(直線部推力試験)

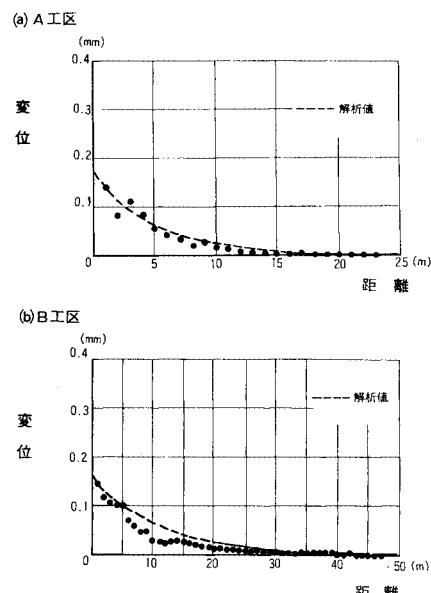


図-8 リング継手部の変位分布(直線部推力試験)

結果を、また、破線は後で述べる解析モデルを用いて行った解析結果を、それぞれ示したものである。地盤反力による推力の減衰状況がはっきりと現われているが、減衰は地盤の硬いA工区の方が著しい。A工区では、ジャッキが直接作用しているリングより約25m後部で推力の影響がほぼなくなっているのに対し、B工区では、その2倍の地点まで影響が及んでいることがわかる。

図-8は、推進時のリング継手部の変位分布を示したものである。セグメント本体のひずみ分布に比べ、その影響範囲は比較的小さいが、これも軟らかい地盤の方がより後部へ影響が及んでいることがわかる。なお、これらの図中の点は、測定断面についての各計器の平均値を示したものである。

図-9は、図-7と図-8とを用い、それぞれ25m後部と50m後部を不動点と仮定し、セグメント本体のひずみから求めたセグメント本体の縮み量と継手部の変位量を累積して求めたトンネルと地盤との相対変位の分布を示したものである。試験値をみると相対変位の減衰状況は、比較的なめらかなものとなっているものの、地盤の硬いA工区の方が急激な減衰を示しているのがわかる。A工区では、ジャッキが直接作用しているリングより約5m後部で相対変位がほぼ半減しているのに対し、B工区では、約10m後部でほぼ半減している。

次に、これらの分布図より、地盤の剛性とリング継手部の剛性を推定してみた。図-10は、図-7と図-9より求めた地盤反力と相対変位との関係を示したものである。地盤反力は、図-7におけるセグメント本体のひずみ分布の差分量にセグメントの弾性係数とトンネル断面積を乗じて求めた。なお、セグメントの弾性係数は、静

弹性係数試験結果より求めた $E = 3.7 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ (36 GPa) を用いた。図-10をみると地盤反力は、相対変位に比例し、地盤の抵抗をトンネル縦断方向に平行な地盤反力ばねとして評価することの妥当性が示されている。なお、その勾配から与えられる地盤反力ばね定数は、セグメント外面の単位面積当たり、A工区で $k_{\text{gu}} = 9.0 \text{ kgf/cm}^3$ (88 MN/m³)、B工区で $k_{\text{gu}} = 1.5 \text{ kgf/cm}^3$ (15 MN/m³) となった。

図-11は、図-7と図-8より求めたリング継手部に作用する圧縮力と変位との関係を示したものである。図-11をみるとリング継手部の挙動も、ほぼ弾性的なばねとして評価できることがわかる。この勾配より与えられるリング継手部のばね定数は、両工区ともほぼ同じ値で $K_{rc} = 4.5 \times 10^7 \text{ kgf/cm}$ (44 GN/m) となった。圧縮力に対するリング継手面の剛性を考えると、理論的にはトンネル横断面の断面積は、ほぼ全断面有効とみなしてよいと思われるが、実際には、コンクリートや継手金具などリング継手面における製作精度、リング継手部の断面欠損、セグメントの組み立て精度、シール材のはみ出しなどの影響を受けて、リング継手面の剛性はかなり低下していることが予想される。なお、当工事に用いたシール材は、セグメントのシール溝内に100%おさまるシール材を用いているため、これによる影響はあまりないと考えられる。また、参考までに、水中養生下での裏込め注入材強度試験結果を図-12に示す。約1/4日で周辺地盤と同程度の強度に達している。この間におけるシー

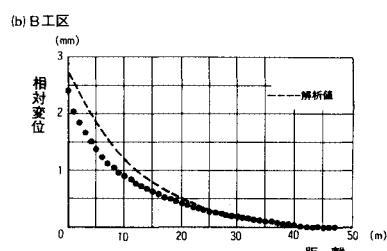
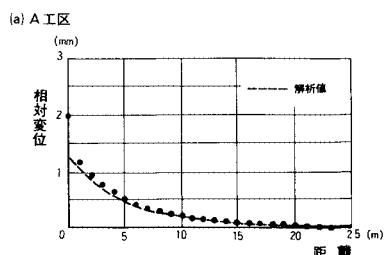


図-9 トンネルと地盤との相対変位分布

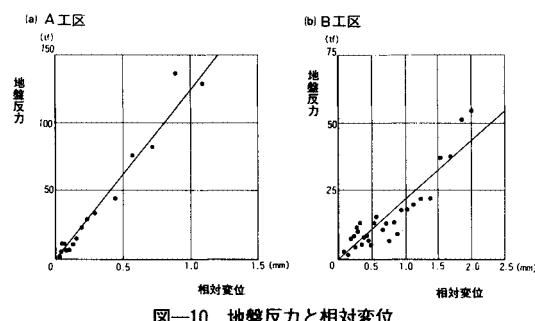


図-10 地盤反力と相対変位

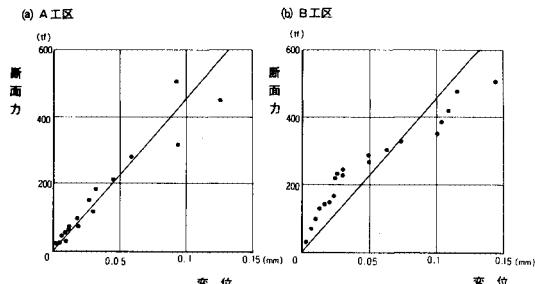


図-11 リング継手部の断面力と変位

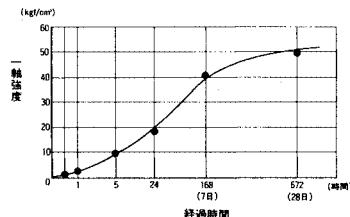


図-12 裏込め注入材の強度

ルド掘進は2~4mであり、推力作用部付近の数リングを除いて、裏込め注入材の強度不足による影響はほぼないと考えられる。

(2) 解析

a) 構造解析モデル

図-13は、直線部推力試験に対する構造解析モデルを示したものである。トンネルは剛性一様なはりに、また、地盤は弾性ばねにそれぞれ評価した。図中の P_J は推力、 $(EA)_{eq}$ はトンネルの等価軸剛性、 K_{gu} は接線方向地盤反力ばね定数をそれぞれ表わしている。

圧縮力に対するトンネルの等価軸剛性は、セグメント本体の軸剛性 EA と、試験より得られたリング継手部の圧縮力に対するばね定数 K_{rc} を用いて、式(1)および(2)から求めた(図-14参照)。

$$(EA)_{eq} = \alpha_c EA \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\alpha_c = \frac{K_{rc}}{K_{rc} + EA/l_s} \quad \dots \dots \dots (2)$$

式中の l_s は、セグメント幅を表わし、 α_c は、トンネル本体の軸剛性的有効率を表わしている。なお、得られた結果からリング継手部の変位を求めるには、式(3)を用いればよい。

$$F_{rc} = K_{rc} \delta_r \quad \dots \dots \dots (3)$$

式中の F_{rc} はリング継手部に作用する圧縮力、 δ_r はリング継手部の変位をそれぞれ表わしている。

本試験の結果得られた圧縮力に対するトンネルの軸剛性的有効率は、 $\alpha_c=0.3$ 程度であった。

b) 試験結果と解析結果との比較

以上に述べた解析モデルを用いて解析を行った結果を図-7~9中に破線で示す。解析結果は試験結果をよく



図-13 構造解析モデル(直線部推力試験)

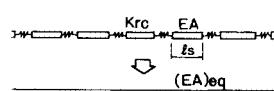


図-14 等価軸剛性の設定

説明しており、この解析モデルの妥当性が示された。

なお、解析に際して荷重は、平均推力を用い、また、地盤反力ばねおよびリング継手部のばねのばね定数はそれぞれ試験より求めた値を用いている。

4. 鉛直載荷試験の結果とその解析

(1) 試験結果と考察

作業車は、両工区とも3台使用し、その自重は、A工区では3台とも6tf(59kN)、B工区では中央の1台が6tf(59kN)両側2台が4tf(39kN)である。

図-15は、A工区において、トンネル断面のクラウン位置とインバート位置でのリング継手部の変位分布を示したものである。横軸は、測定断面と中央の作業車の中心との距離を示し、縦軸の変位は、圧縮方向を正、引張り方向を負として示した。同様に、B工区における試験結果を図-16に示す。

リング継手部の最大変位は、B工区でのものがA工区でのものの約7倍程度であった。これは、地盤の軟らかいB工区において、荷重が小さいうえに、継手個数

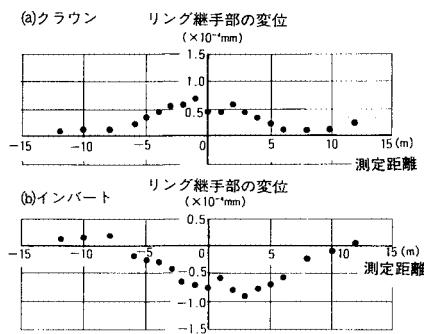


図-15 リング継手部の変位分布(鉛直載荷試験、A工区)

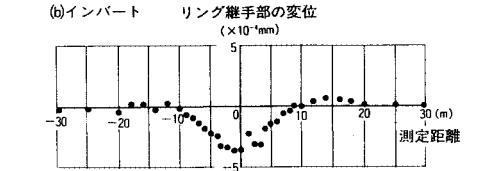
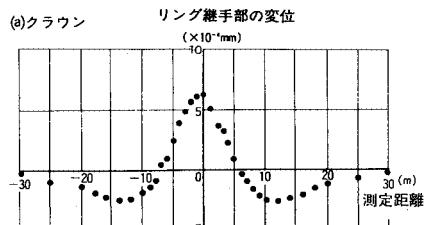


図-16 リング継手部の変位分布(鉛直載荷試験、B工区)

が多いにもかかわらず、トンネルの変形がかなり大きいことを示している。また、地盤の軟らかいB工区では、その変形の影響が地盤の硬いA工区に比べ、3倍程度にも及んでいる。

一方、リング継手部の変位分布形状をみると、B工区でのものが10m付近において大きく変曲し、0m付近における変位と逆方向に変位しているのがわかる。これに対し、A工区では、ほとんど一方向のみで、比較的単調な分布となっている。これは、A工区においては、地盤が硬いため、地盤がよく荷重を支えており、B工区においては、地盤が軟らかいために、トンネルの方が荷重を支える傾向にあるためと考えられる。

(2) 解析

a) 構造解析モデル

図-17は、鉛直載荷試験に対する構造解析モデルを示したものである。直線部推力試験に対する解析モデル同様、トンネルは剛性一様ななりに、また、周辺の地盤は弾性ばねにモデル化した。図中の P_v は鉛直荷重すなわち作業車の自重、 $(EI)_{eq}$ はトンネルの等価曲げ剛性、 K_{gv} は法線方向地盤反力ばね定数をそれぞれ表わしている。トンネルの等価曲げ剛性は、セグメント本体の曲げ剛性 EI とリング継手部の回転ばね定数 K_{re} から式(4)および式(5)を用いて算出した(図-18参照)。

$$(EI)_{eq} = \beta EI \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$\beta = \frac{K_{re}}{K_{re} + EI/l_s} \quad \dots \dots \dots (5)$$

式中の l_s は、セグメント幅を表わし、 β は、トンネル本体の曲げ剛性の有効率を表わしている。なお、得られた結果からリング継手部の回転角を求めるには、式(6)を用いればよい。

$$M_r = K_{re} \theta_r \quad \dots \dots \dots (6)$$

式中の M_r はリング継手部に作用する曲げモーメント、 θ_r はリング継手部の回転角をそれぞれ表わしている。

本試験の結果および次に述べるリング継手部の回転ばね定数より、トンネルの曲げ剛性の有効率は、 $\beta=0.2$

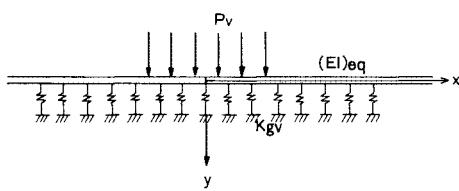


図-17 構造解析モデル(鉛直載荷試験)

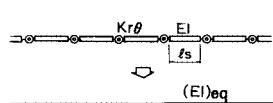


図-18 等価曲げ剛性の設定

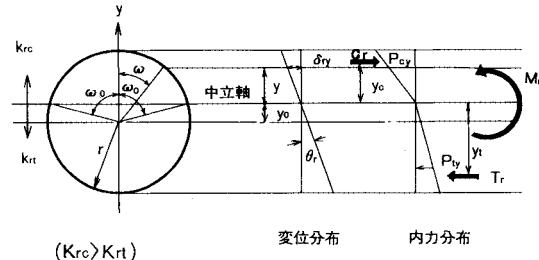


図-19 リング継手部のモデル化

程度であった。

b) リング継手部の回転ばね定数

リング継手部の回転ばね定数を求めるにあたり、曲げモーメントが作用するリング継手部に、以下の仮定を設ける。

① 図-19に示すように、リング継手部のばねは、セグメントリングの図心半径 r で示される円周上に、一様に分布する。

② 断面の中立軸を挟んで、上側は圧縮ばね、下側は引張りばねとする。

なお、図-19中の k_{rc} および k_{rt} は、単位周長当たりの圧縮力および引張り力に対するばね定数をそれぞれ表わしており、その値は、式(7)および式(8)で与えられる。

$$k_{rc} = \frac{K_{rc}}{2\pi r} \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$k_{rt} = \frac{K_{rt}}{2\pi r} = \frac{n k_t}{2\pi r} \quad \dots \dots \dots (8)$$

式中の K_{rt} は、リング継手部の引張り力に対するばね定数であり、 n はリング継手の個数、 k_t はリング継手1個当たりの引張り力に対するばね定数⁹⁾である。また、図-19中の断面力 P_{cy} 、 P_{ty} は式(9)、(10)より求められる。

$$P_{cy} = k_{rc} \delta_{ry} = k_{rc} r (\cos \omega - \cos \omega_0) \theta_r \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$P_{ty} = k_{rt} \delta_{ry} = k_{rt} r (\cos \omega - \cos \omega_0) \theta_r \quad \dots \dots \dots (10)$$

これらの合力 C_r 、 T_r は式(11)、(12)で与えられるが、この2つの合力のつり合い式(13)より、図-19中の断面中立軸位置を示す ω_0 は式(14)で与えられる。

$$C_r = 2 \int_0^{\omega_0} P_{cy} r d\omega \quad \dots \dots \dots (11)$$

$$T_r = 2 \int_{\omega_0}^{\pi} P_{ty} r d\omega \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$C_r + T_r = 0 \quad \dots \dots \dots (13)$$

$$\tan \omega_0 = \omega_0 + \frac{k_{rt}}{k_{rc} - k_{rt}} \pi \quad \dots \dots \dots (14)$$

さらに、モーメントのつり合い式(15)を用いることにより、リング継手部の回転ばね定数は式(16)で与えられる。

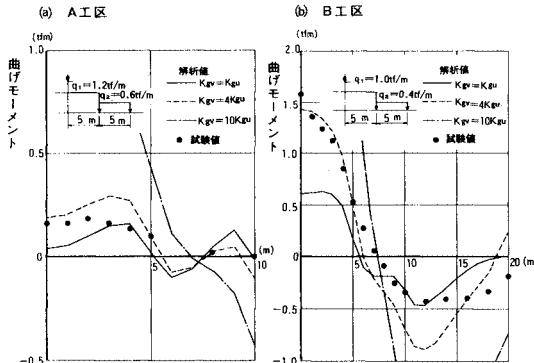


図-20 曲げモーメント分布（鉛直載荷試験）

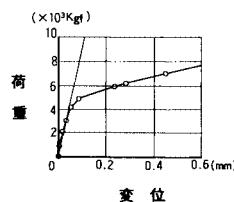


図-21 リング継手部引張り試験の結果

$$M_r = C_r \cdot y_c + T_r \cdot y_t \quad \dots \dots \dots (15)$$

$$K_{r\theta} = 2r^3 \left[(k_{rc} - k_{rt}) \left(\frac{\cos 2\omega_0}{2} + 1 \right) \omega_0 - \frac{3}{4} \sin 2\omega_0 \right] + k_n \left(\frac{\cos 2\omega_0}{2} + 1 \right) \pi \quad \dots \dots \dots (16)$$

c) 試験結果と解析結果との比較

図-20は、以上に述べた解析モデルを用いて求めた解析結果と、試験結果とを比較したものである。荷重は図-20中に示すように、まくらぎやセグメントの剛性などによる荷重分散を考慮し、等分布荷重に換算して、解析を行った¹⁰⁾。また、リング継手の1個当たりの引張り力に対するばね定数は、別途実施したリング継手部引張り試験結果（図-21参照）を用いて、 $k_t = 1.0 \times 10^6$ kgf/cm (980 MN/m)とした。なお、図-20中の試験値は、図-15、16より得られるリング継手部の回転角 θ_r に式（16）で得られる回転ばね定数 $K_{r\theta}$ を乗じて求めた。

図-20をみると、解析結果は試験結果をおおむね説明しており、モデル化の妥当性が示された。なお、今回の場合には、法線方向の地盤反力ばね定数は、接線方向のものの4倍程度が現状をよく説明できるようである。

5. 曲線部推力試験の結果とその解析

(1) 試験結果と考察

曲線部推力試験は、曲率半径150 m、曲線弧長50 mの区間を用いて行った。この曲線部の施工に際しては、

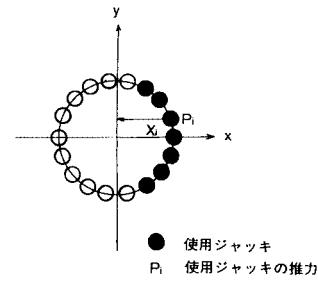
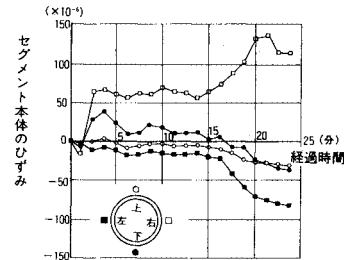


図-22 曲線施工の使用ジャッキ

(a) セグメント本体のひずみの時間変動



(b) リング継手部の変位の時間変動

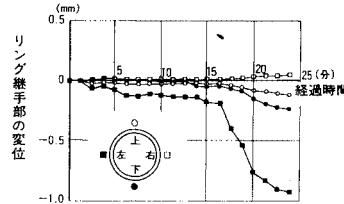


図-23 各測定値の時間変動

18本のジャッキのうち、図-22に示すように、ほぼ半数を用いた。その平均推力は $P_j = 500$ tf (4 900 kN)である。また、図-22を参照して、これらのジャッキ推力の偏心により生ずるモーメント M_j は、式（17）で与えられる。

$$M_j = \sum P_i x_i \quad \dots \dots \dots (17)$$

今回の場合には、平均で $M_j = 200$ tfm (1 960 kNm)であった。

図-23は、推力作用点より5 m後方の測定断面におけるシールド推進中の各測定値の時間的変化を示したものである。なお、シールド推進は1リング分、1 mであり、その間の推進速度はほぼ一定であった。セグメント本体のひずみとリング継手部の変位の両方とも、推進前半の変動の小さな部分と、推進後半の変動の大きな部分から成っている。この傾向は、測定断面との距離に関係なく、ほとんど全部の測定結果に現われている。シールド機とセグメントとのクリアランスやジャッキストロークなどの挙動をみると、曲線部を施工中のシールド機は、推進後半に所定の方向転換を生じるようで、これがセグ

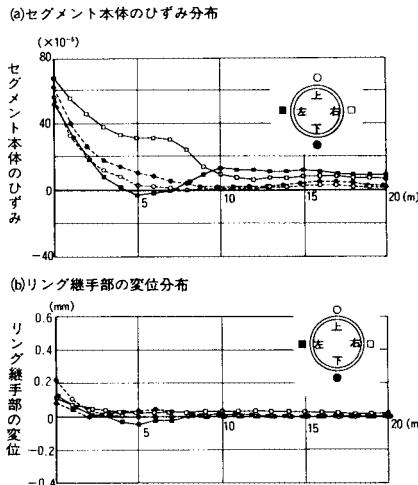


図-24 セグメント本体のひずみとリング継手部の変位の分布
(曲線部推力試験、推進前半)

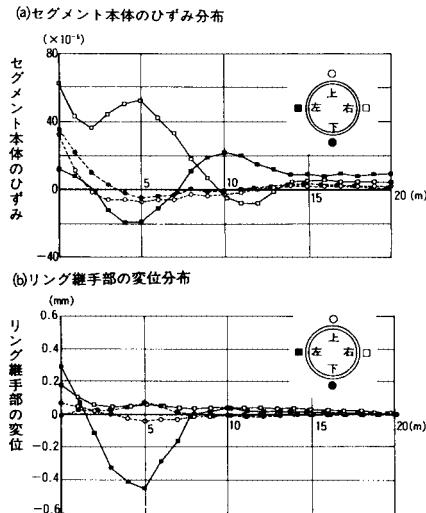


図-25 セグメント本体のひずみとリング継手部の変位の分布
(曲線部推力試験、推進後半)

メント本体のひずみや継手部の変位を推進後半に変動させる原因と考えられる。

なお、図中のセグメント本体のひずみ、リング継手部の変位の両方とも、圧縮方向を正、引張り方向を負としている。

図-24は、変動の小さい推進前半における、セグメント本体のひずみとリング継手部の変位の分布を示したもので、横軸は、測定断面と推力作用点との距離を表わしている。これに対し、図-25は、変動の大きな推進後半部分の同様な分布を示したものである。推進前半は、単調な減衰傾向を示しているのに対し、推進後半は、推力作用点から約5m後部付近にピークをもつやや複雑

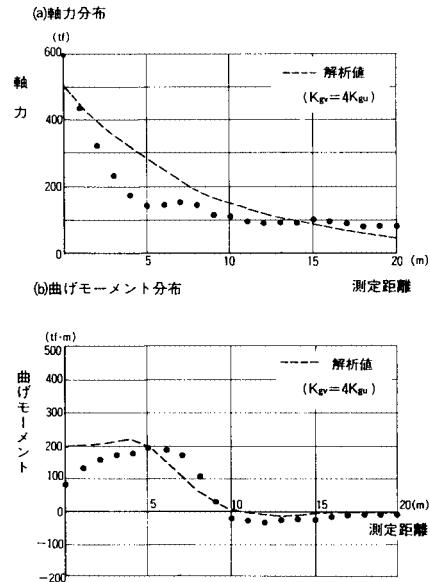


図-26 軸力と曲げモーメントの分布
(曲線部推力試験、推進前半)

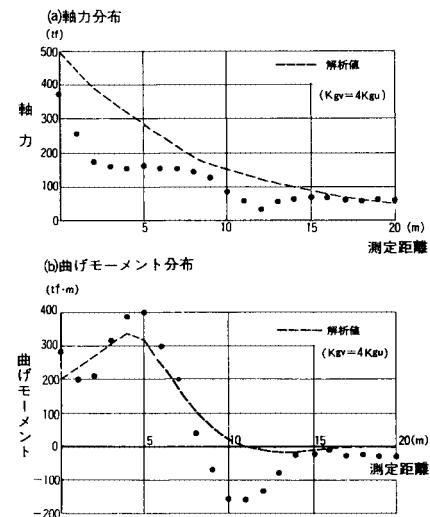


図-27 軸力と曲げモーメントの分布
(曲線部推力試験、推進後半)

な減衰を示している。

図-26は、推進前半におけるセグメント本体のひずみから、以下の仮定に基づいて算出したトンネル縦断方向の軸力と曲げモーメントの分布を示したものである。

① セグメント本体に引張りひびわれが発生せず、かつ、引張りに対する弾性係数は、圧縮に対するものと同じ値である。

② セグメントリングは、一様な円管断面である。
軸力は、推力作用点付近でかなり大きな値を示すもの

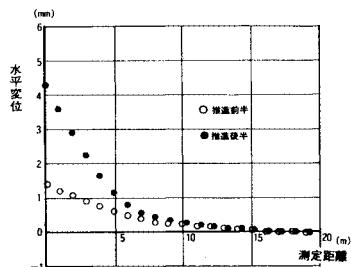


図-28 トンネルの水平変位分布

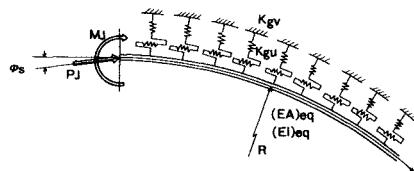


図-29 構造解析モデル（曲線部推力試験）

の急激に減少し、直線部推力試験の結果（図-7 参照）とほぼ同じような傾向を示している。一方曲げモーメントは、後方 5 m 付近までは増加し、最大 200 tfm (1960 kNm) まで達してから減少している。

図-27 は、推進後半におけるセグメント本体のひずみから、同様に算出した軸力と曲げモーメントの分布を示したもので、推進前半に比べ軸力が小さく、曲げモーメントが卓越していることがわかる。特に後方 5 m 付近で約 400 tfm (3920 kNm) に達した後、後方 10 m 付近では逆に -160 tfm (-1570 kNm) 程度の負曲げが発生しているのが特徴的である。

図-28 は、図-24 および図-25 に示した継手部の変位を累積して求めたトンネル水平方向の変位分布を示したものである。変動の大きい推進後半では、推力作用点において、トンネルが約 4 mm 程度移動していることがわかる。

曲線施工時の偏心荷重によりトンネルに生じる曲げモーメントは、セグメント本体のひびわれおよびリング継手部の目開きなど、セグメントの覆工部材としての機能を低下させることになるため、注意を要する事項である。特に、RC セグメントでは、ボルトの破断や継手板の降伏のおそれがあり問題となる一方、スチールセグメントでは、縦リブが座屈することも考えられ、継手部の設計に際して十分な検討が必要である。

(2) 解析

a) 構造解析モデル

図-29 は、曲線部推力試験に対する構造解析モデルを示したものである。図中の ϕ_s は、トンネル線形に対する推力の作用角度であり、シールド推進中に、シールド機が急激な方向の転換をするために生じるもので、今

回のシールド機の場合ではテールクリアランスなどより、最大値が約 3 度程度と考えられる。

b) 試験結果と解析結果との比較

図-29 に示した解析モデルを用いて解析した結果を図-26, 27 中に破線で示す。解析に用いたトンネルの剛性および地盤反力ばね定数は、前述した B 工区における 2 つの試験で得られた値と同じ値とした。なお、法線方向地盤反力ばね定数については、水平方向と鉛直方向が等しいと仮定し、また、推力の作用角度は、推進前半で $\phi_s=0$ 度、推進後半で $\phi_s=3$ 度と仮定した。

軸力では試験値が解析値を下回り、曲げモーメントでは試験値が解析値を上回る傾向にあるが、解析結果は試験値をおおむね説明している。現場における各種の不確定要素を考慮すれば、実際の設計を行いうえでここで示す解析モデルは、ほぼ妥当であるといえる。

6. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると次のとおりである。

(1) 直線部推力試験

- ① セグメント本体およびリング継手部に推力の影響が及ぶ範囲は土質条件によって大きく異なり、今回の場合硬質地盤で 25 m、軟弱地盤で 50 m 程度であった。
- ② 圧縮力に対するトンネルの軸剛性は、リング継手部の存在により、継手をもたないソリッドな場合に比べかなり低下し、その有効率はおおむね 30 % 程度であった。
- ③ 推力に対するシールドトンネルの挙動は、リング継手部の変形特性を考慮に入れれば、簡単な弾性床上はりモデルでよく説明できる。

(2) 鉛直載荷試験

- ① 鉛直荷重により生ずるリング継手部の変位は、土質条件によって大きく異なり、軟弱地盤では硬質地盤での値の 7 倍程度であった。
- ② 曲げモーメントに対するトンネルの曲げ剛性は、リング継手部の存在により、継手をもたないソリッドな場合に比べかなり低下し、その有効率はおおむね 20 % であった。
- ③ 鉛直荷重に対するシールドトンネルの挙動は、リング継手部の変形特性を考慮に入れれば、簡単な弾性床上はりモデルでよく説明できる。

(3) 曲線部推力試験

- ① 曲線施工時に生じるセグメント本体のひずみおよびリング継手部の変位は、推力の大きさ、作用角度および地盤の剛性に影響を受ける。
- ② 推力の作用角度は、現場でのシールド機の実測な

どより0~3度程度を考えるべきである。

- ③ 曲げモーメントと軸力が同時に作用する場合でも
リング継手部の変形特性を考慮に入れれば、シールドトンネルの挙動は簡単な弾性床上はりモデルでおむね説明できる。

7. あとがき

RCセグメントを用いたシールドトンネルの現場載荷試験結果とその考察について報告した。今回解析に用いた各種の定数は、試験結果に基づくものがほとんどであったが、シールドトンネルの縦断方向の検討を行う場合に、リング継手の変形特性が明らかになれば、シールドトンネルの挙動は、基本的には簡単な弾性床上のはりで説明できることがわかった。したがって今後はこれら各種の定数の合理的な推定方法を明らかにするとともに、今回得られた構造解析モデルを用いて、地震時および地盤沈下などの検討を行っていきたいと考えている。なお、現在セグメント模型を用いて、各種試験を行っており、トンネルの剛性のより詳細な評価方法を検討中である。

最後に、この報告をまとめるにあたって、貴重なご意見をいただいた早稲田大学理工学部 村上博智教授、電力中央研究所土木研究所 岩橋敬広博士、同担当研究員当麻純一氏、また、現場計測にあたって多大なご協力を

いただいた日本シールドエンジニアリング(株) 加藤教吉氏ほか、関係各位に深く感謝する次第である。

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），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27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) 土木学会、日本下水道協会：シールド工事用標準セグメント、1982.
- 6) 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.
- 7) 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. 31 A, 1985.
- 8) 西野健三・加藤教吉：RCセグメントの推力伝播計測とその考察、第40回土木学会年次学術講演会概要集，Ⅲ-164, 1985.
- 9) 村上博智・小泉 淳：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.
- 10) 土木学会：構造力学公式集、1974.

(1986.3.28・受付)