

二次覆工されたシールドトンネルの軸方向挙動に関する覆工間相互作用について INTERACTION BETWEEN LININGS IN LONGITUDINAL DIRECTION OF SHIELD TUNNEL WITH SECONDARY LINING

高松伸行*・小泉 淳**・村上博智***

Nobuyuki TAKAMATSU, Atsushi KOIZUMI, Hiroto MURAKAMI

Tension tests and bending tests using shield tunnel models simulating flat type concrete segments with secondary linings were carried out. Analytical method which can properly explain the test results was proposed. The analytical model is composed of beams and springs which simulate the primary and secondary linings and joints. The interaction between the linings was modeled as spring. One of features of this study is that the spring constant of the interaction between linings was analytically estimated.

Keywords: shield tunnel, secondary lining, interaction between linings, longitudinal behavior

1. はじめに

シールドトンネルの設計は、その施工過程においてセグメントリングのみで種々の荷重に対応する必要があることから、二次覆工は主体構造として取り扱われることは少ない。しかしながら、二次覆工が耐荷能力を発揮できるようになった後に外力が累加されたり、除去されるような場合（上載荷重の変化、地盤沈下の影響、近接施工による影響および地震の影響など）には、セグメントリングのみならず二次覆工もその外力の一部を分担するという設計の方が合理的であると考えられる。

二次覆工されたシールドトンネルの横断面の挙動については半谷¹⁾や筆者ら^{2), 3)}が明らかにしており、その考え方をういて実トンネルの設計に適用された例もあるが、軸方向挙動についてはいまだ明らかにされていない。

二次覆工されたシールドトンネルの軸方向挙動に関する研究は最近になって多くなってきている^{4) ~11)}。これらの研究のうち、一次覆工として鋼製セグメントを用いた場合には、両覆工は合成構造として挙動することが指摘されている^{4) ~6)}が、内面が平滑な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の場合、両覆工間の相互作用を実験的に確認しその挙動を調べたものはある^{7) ~11)}ものの、解析的な研究は行われていない。

本研究はコンクリート平板形セグメントを対象に、その内側に二次覆工されたシールドトンネルについて、模型を用いた地上における各種実験^{12) ~14)}を行い、その実験結果を説明できる解析方法を提案し、これに考察を加えたものである。シールドトンネル模型は二次覆工が直打ちされたものと両覆工間にアイソレーション材などの覆工間部材がある場合を想定したものの2種類を用い、それぞれトンネル軸方向の載荷実験と曲げ実

※ 正会員 工修 東急建設株式会社 技術本部土木技術部
※※ 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科
※※※ 正会員 早稲田大学名誉教授

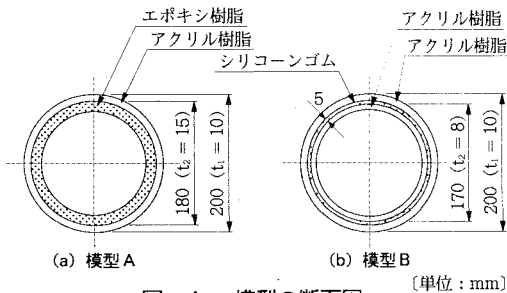


図-1 模型の断面図

(単位: mm)

表-1 模型一覧

模型の種類	二次覆工の継目間隔 (mm)		
	継目なし	450	250
A	A00	A45	A25
B	—	B45	—

験を行っている。実験結果から、両覆工は重ね構造的に挙動していることが確認されたため、解析には一次覆工と二次覆工とを棒部材とばね部材が交互に連結された棒-ばね構造に置き換え、両覆工間の相互作用をばねで評価した構造解析モデルを用いた。本研究は、このモデルの覆工間ばねのばね定数を解析的に定めているところに特徴がある。

2. 実験概要

二次覆工されたシールドトンネルの軸方向挙動を調べる目的で、地上における軸引張実験と地上における曲げ実験を行った。

2・1 実験に用いた模型

すでに明らかにされている小泉・村上・西野の研究¹⁵⁾によれば、二次覆工されていないシールドトンネルの軸方向挙動は、セグメントリングを棒部材で、リング継手をばね部材で評価した棒-ばね構造モデルで示されることが確認されている。したがって、本研究で用いた一次覆工模型は、セグメント継手を省略し、セグメントリングはアクリル円管で評価し、リング継手はセグメントリングよりも剛性が低くセグメントリング模型と同じ断面形状を有するゴム円管で評価している。二次覆工は、一次覆工模型の内側にエポキシ樹脂を直打ちしたものと、両覆工をアイソレートする目的で覆工間部材をはさんでアクリル円管を設けたものの2種類を研究の対象とした。

図-1は、本研究で用いた模型の断面図を示したものである。

模型Aは一次覆工模型の内側に二次覆工を直打ちしたものである。図-1(a)はその断面形状を示したものである。セグメントリングとしては外径200mm、厚さ10mmのアクリル円管を用い、リング継手には天然ゴムシート円管(幅5mm)を用いた。二次覆工は厚さ15mmで、一次覆工の内側にエポキシ樹脂を直打ちすることでこれを評価した。

模型Bは図-1(b)に示すように、覆工間部材としてシリコーンゴムを用いたものである。一次覆工は模型Aと同様の断面形状のアクリル円管である。二次覆工としては、外径170mm、厚さ8mmのアクリル円管を用いている。

表-1は曲げ実験に用いた模型の一覧を示したものである。模型Aでは二次覆工の継目の間隔を変化させて実験を行った。二次覆工の継目(以下、二次覆工の継目部分と呼ぶ)はコンクリートの打継目や無筋コンクリートのひびわれ部分あるいは設計上、あらかじめ設けられた継目構造を想定したものである。表中、各模型の種類を示す英字に続く数字は、二次覆工の継目間隔を示したものである。二次覆工に継目がない場合には便宜上添付する数字を"00"とした。軸引張実験では、二次覆工の継目は設けていない。

2・2 軸引張実験¹⁴⁾

一次覆工と二次覆工との軸方向の相互作用を調べる目的で、地上における軸引張実験を行った。

図-2は軸引張実験の概要を示したものである。トンネル模型7リング分を対象に、模型の一端は一次覆工、二次覆工とも固定し、他端のリング継手に合力がPとなる均等な軸引張応力を作用させて、トンネル全体の変形量と一次覆工と二次覆工それぞれの3断面における軸方向ひずみを測定した。

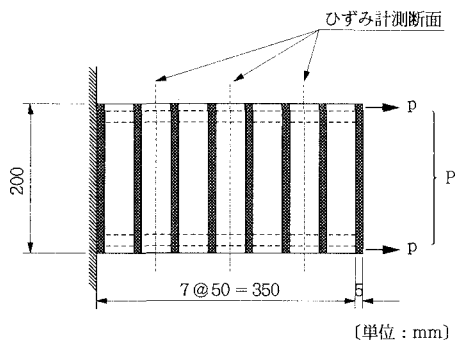


図-2 軸引張実験概要

一次覆工の軸方向ひずみは各断面で管外面の上縁および下縁を含み中心角 45° 間隔に8箇所、計24点で測定した。二次覆工の軸方向ひずみは、模型Aでは管内面で、模型Bでは管外面で一次覆工と同位置の3断面で測定を行っている。図-2には、これらの測定断面を一点鎖線で示す。

2・3 曲げ実験^{12), 13)}

一次覆工と二次覆工との軸直角方向の相互作用を調べる目的で、地上における曲げ実験を行った。

図-3は曲げ実験の概要を示したものである。載荷方法は、曲げ支間を800mm、せん断支間を300mmとする対称2点載荷である。集中荷重による断面変形を拘束するために、載荷点および支点には内径がアクリル管の外径と一致する厚さ9mm、幅20mmの鋼製リングを用いた¹²⁾。

計測項目は、両覆工に発生する軸方向ひずみ(3断面)とトンネルのたわみである。トンネルのたわみは、支間中央点を含み200mm間隔に7箇所測定している。

3. 解析方法

3・1 解析モデル

各種実験の結果から、一次覆工と二次覆工とは棒部材として挙動していると考えてよいことが確認され、また、両覆工は重ね構造的に挙動していることが確認された(図-7(b)と(c)、図-8(b)と(c)および図-9～図-12中の(b))。したがって、解析には図-4に示すように、すでに明らかにされている一次覆工のみのシールドトンネル軸方向の解析モデル¹⁵⁾を拡張し、両覆工をそれぞれ棒部材とばね部材が交互に連結された棒-ばね構造モデルで評価するとともに両覆工間の相互作用をばねに置換した棒構造解析モデルを用いた。

モデル化にあたって、一次覆工であるセグメントリングは軸剛性 E_1A_1 、曲げ剛性 E_1I_1 を有する棒部材で評価し、リング継手はばね部材(軸ばね K_{u1} 、せん断ばね K_{s1} および回転ばね $K_{\theta 1}$)で評価している。二次覆工も一次覆工と同様に覆工本体を棒部材(軸剛性 E_2A_2 、曲げ剛性 E_2I_2)に、二次覆工の継目部分をばね部材(軸ばね K_{u2} 、せん断ばね K_{s2} および回転ばね $K_{\theta 2}$)に置換している。両覆工間の相互作用は、トンネル軸方向の力を伝達する覆工間ばね K_x およびトンネル軸直角方向の力を伝達する覆工間ばね K_y で評価する。なお、実トンネルにこのモデルを適用する場合には、地盤との相互作用をトンネル軸方向の地盤ばね $K_{\theta u}$ とトンネル軸直角方向の地盤ばね $K_{\theta v}$ で評価し、立坑との取合い部分も各種のばね部材で評価することを考えている¹²⁾。

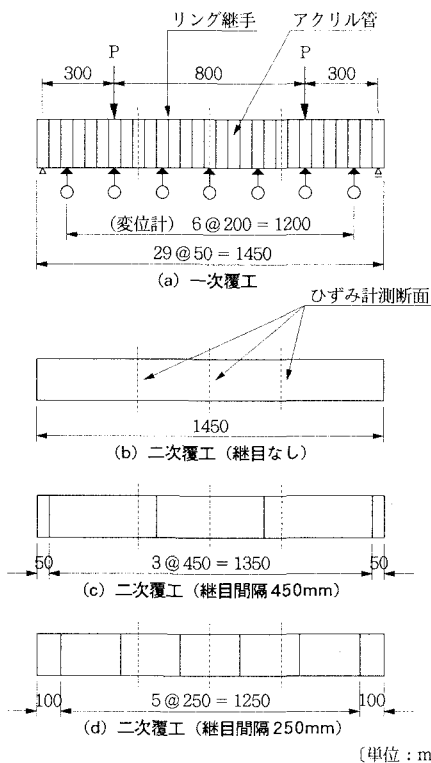


図-3 曲げ実験概要

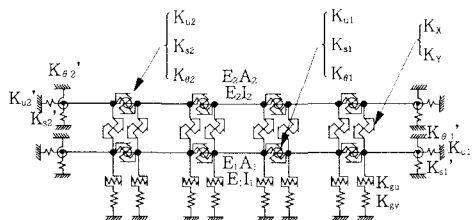


図-4 解析モデル

3・2 各種ばねのばね定数

リング継手の剛性を表すばねのばね定数は、実トンネルの場合には、小泉・村上・西野の研究¹⁵⁾ですでに明らかにされている方法に基づき定める。すなわち、個々のリング継手をリング継ぎボルトと継手板の変形とを考慮したばねで評価し、このばねを有する立体構造モデルを用いて定める。本実験のトンネル模型の場合には、リング継手模型の各種試験とその結果を用いた計算により定めた¹²⁾。二次覆工継目部分のばねのばね定数は、二次覆工されたシールドトンネルの立体構造モデルと並列梁モデルを用いて定める¹²⁾。また、両覆工間の相互作用を評価する覆工間ばねのばね定数 K_X 、 K_Y は以下に示す方法により定める。

3・3 両覆工間の相互作用を評価するばねのばね定数

(a) 軸方向ばねのばね定数¹⁴⁾

①二次覆工が直打ちされた場合

二次覆工されたシールドトンネルに、たとえば地震力のような軸方向の外力が作用する場合には、まず、トンネル周辺地盤を介して一次覆工に外力が伝達され、次にそれが二次覆工に影響を与える。このような両覆工間の力の伝達はせん断力により行われるものと考えられる。

図-5(a)に示すように、二次覆工が直打ちされた場合の両覆工間の軸方向相互作用は、一次覆工、二次覆工それぞれのせん断変形を考慮したばね K_{X1} と K_{X2} とが直列に連結されたものとしてモデル化する。

覆工厚さ方向の一次覆工と二次覆工のせん断変形域を両覆工の厚さ t_1 、 t_2 とすると、それぞれのばねのばね定数 K_{X1} 、 K_{X2} は次式で示される。

$$K_{X1} = \frac{E_1 A_X}{2(1+\nu_1) t_1} \dots\dots\dots (1)$$

$$K_{X2} = \frac{E_2 A_X}{2(1+\nu_2) t_2} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 E_1 および E_2 は一次覆工および二次覆工の弾性係数を、 ν_1 、 ν_2 はそれぞれのポアソン比を、また、 A_X は図-4に示す解析モデルにおける節点間隔の2分の1を幅とする二次覆工の周面積を表す。

したがって、二次覆工が直打ちされた場合の両覆工間のトンネル軸方向相互作用を評価するばねのばね定数 K_X はこれらのばね定数を用いて次式で示される。

$$K_X = \frac{K_{X1} \cdot K_{X2}}{K_{X1} + K_{X2}} \dots\dots\dots (3)$$

②覆工間部材がある場合

両覆工間にアイソレーション材のような覆工間部材がある場合には、両覆工間の軸方向相互作用は、図-5(b)に示すように一次覆工、二次覆工それぞれのせん断変形を考慮したばね K_{X1} 、 K_{X2} とその中間に覆工間部材のせん断変形を評価するばね K_{Xiso} を配置し、それらが直列に連結されたものとしてモデル化する。

覆工間部材のせん断変形域はその全厚 t_{iso} が有効であると考えられるため、そのばね定数は次式で示される。

$$K_{Xiso} = \frac{E_{iso} A_X}{2(1+\nu_{iso}) t_{iso}} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 E_{iso} は覆工間部材の弾性係数を、 ν_{iso} はそのポアソン比を表す。

したがって、覆工間部材がある場合の両覆工間のトンネル軸方向相互作用を評価するばねのばね定数 K_X は式(1)、式(2)および式(4)で示されるばね定数を用いて次式で示される。

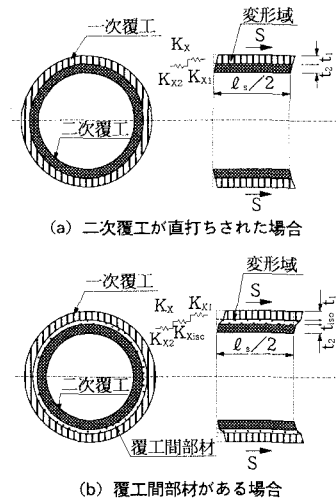


図-5 両覆工間の軸方向相互作用のモデル化

$$K_x = \frac{K_{X1} \cdot K_{Xiso} \cdot K_{X2}}{K_{X1} \cdot K_{Xiso} + K_{Xiso} \cdot K_{X2} + K_{X2} \cdot K_{X1}} = \frac{K_{X1} \cdot K_{X2}}{K_{X1} + K_{X2} + \frac{K_{X2} \cdot K_{X1}}{K_{Xiso}}} \dots (5)$$

なお、式(5)で K_{Xiso} の値を無限大とすれば、二次覆工が直打ちされた場合の式(3)と一致し、また、この値を零とすれば、両覆工間はすべりを生じ、力の伝達が行われない状態を表す。

(b) 軸直角方向ばねのばね定数^{(12), (13)}

①二次覆工が直打ちされた場合

二次覆工されたシールドトンネルがトンネル軸方向に曲げを受けると、両覆工が接する軸方向圧縮域では、覆工の厚さ方向にも互いに圧縮されると考えられる。したがって、一次覆工と二次覆工の軸直角方向相互作用を表す覆工間ばねのばね定数 K_y は、両覆工間の軸線間の圧縮変形を考慮して定める。

一次覆工および二次覆工の圧縮有効厚さはそれぞれの覆工厚の2分の1とする⁽¹⁶⁾と、図-6(a)より圧縮域の法線方向ばねのばね定数 K_{y1} および K_{y2} は次式で示される。

$$K_{y1} = \frac{E_1 \cdot A_y}{\frac{t_1}{2}} = \frac{2E_1 \cdot A_y}{t_1} \dots (6)$$

$$K_{y2} = \frac{E_2 \cdot A_y}{\frac{t_2}{2}} = \frac{2E_2 \cdot A_y}{t_2} \dots (7)$$

ここに、 A_y は図-4に示す解析モデルにおける節点間隔の2分の1を幅とする二次覆工の射影面積である。

したがって、二次覆工が直打ちされた場合の両覆工間のトンネル軸直角方向相互作用を表すばねのばね定数 K_y はこれらのばねを直列に連結したものと考え、それぞれのばね定数を用いて次式により定める。

$$K_y = \frac{K_{y1} \cdot K_{y2}}{K_{y1} + K_{y2}} \dots (8)$$

②覆工間部材がある場合

両覆工間に覆工間部材がある場合には、両覆工間の軸直角方向相互作用は図-6(b)に示すように一次覆工と二次覆工それぞれの軸線間の圧縮変形を考慮したばね K_{y1} 、 K_{y2} とその中間に覆工間部材の圧縮変形を考慮したばね K_{yiso} を配置し、それらが直列に連結されたものと考えて定める。

覆工間部材の圧縮域における法線方向ばねのばね定数は覆工間部材の全厚 t_{iso} が圧縮有効厚さと考えられるため、次式で示される。

$$K_{yiso} = \frac{\overline{E}_{iso} \cdot A_y}{t_{iso}} \dots (9)$$

ここに、 $\overline{E}_{iso}$ は荷重方向と直角な方向を拘束した状態での材料の圧縮試験で得られる覆工間部材の弾性係数を表す。

したがって、覆工間部材がある場合の両覆工間のトンネル軸直角方向相互作用を評価するばねのばね定数 K_y は式(6)、式(7)および式(9)で示されるばね定数を用いて次式により定める。

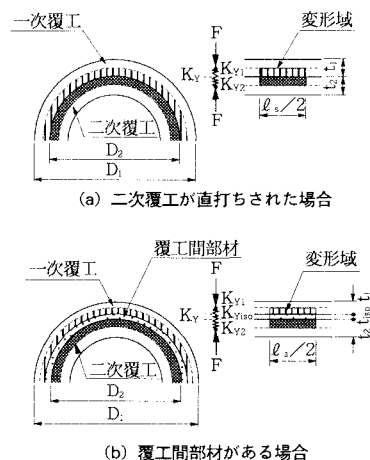


図-6 両覆工間の軸直角方向相互作用のモデル化

$$K_Y = \frac{K_{Y1} \cdot K_{Yiso} \cdot K_{Y2}}{K_{Y1} \cdot K_{Yiso} + K_{Yiso} \cdot K_{Y2} + K_{Y2} \cdot K_{Y1}} = \frac{K_{Y1} \cdot K_{Y2}}{K_{Y1} + K_{Y2} + \frac{K_{Y2} \cdot K_{Y1}}{K_{Yiso}}} \dots \dots \dots (10)$$

なお、二次覆工が直打ちされた場合には、式(10)で、 K_{Yiso} の値を無限大とすればよいから、式(8)と一致する。

4. 実験結果とその考察

解析に用いた模型材料の物性は、各材料の要素試験から求めた。アクリル円管の弾性係数は、アクリル円管の軸方向圧縮試験およびリング載荷試験により求められた弾性係数（それぞれ $E_1 = 4.19 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ および $E_1 = 2.75 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ ）を平均して $E_1 = 3.47 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ とした。また、ポアソン比は軸方向圧縮試験結果から $\nu_1 = 0.36$ とした。エポキシ樹脂円環の弾性係数とポアソン比は直径50mm、高さ100mmの円柱形供試体の軸圧縮試験から $E_2 = 3.46 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ および $\nu_2 = 0.36$ とした。覆工間部材を評価したシリコンゴムの弾性係数は $E_{iso} = 10.5 \text{kgf/cm}^2$ であり、 $\overline{E}_{iso} = 413 \text{kgf/cm}^2$ であった。

リング継手部の各種ばねのばね定数は、 $K_{w1} = 1.69 \times 10^4 \text{kgf/cm}$ 、 $K_{s1} = 1.28 \times 10^3 \text{kgf/cm}$ 、 $K_{\theta 1} = 7.66 \times 10^5 \text{kgf} \cdot \text{cm/rad}$ とした¹²⁾。また、二次覆工継目部分の回転ばねのばね定数は、模型Aでは $K_{\theta 2} = 3.5 \times 10^5 \text{kgf} \cdot \text{cm/rad}$ 、模型Bでは $K_{\theta 2} = 2.0 \times 10^5 \text{kgf} \cdot \text{cm/rad}$ であった¹²⁾。

4・1 軸引張実験

①二次覆工が直打ちされた場合

図-7は、模型Aを用いて行った軸引張実験の実験結果と解析結果とを比較したものである。図中、黒丸印は実験結果を、実線は解析結果を示している。図-7(a)は、トンネル全体の軸方向変形量を、図-7(b)および図-7(c)は一次覆工と二次覆工の中央断面におけるそれぞれのひずみを示したものである。これらの図を見ると、実験結果と解析結果とはよく一致しており、二次覆工が直打ちされた場合の両覆工間の軸方向相互作用を評価するばねのばね定数の定め方が妥当性を有し、図-4に示す解析モデルを用いて二次覆工されたシールドトンネル模型の軸方向挙動を説明できることがわかる。

②覆工間部材がある場合

図-8は模型Bを用いて行った軸引張実験の実験結果と解析結果とを比較したものである。これらの図を見ると、実験結果と解析結果とはよく一致しており、覆工間部材がある場合の両覆工間の軸方向相互作用を評価するばねのばね定数の定め方が妥当性を有し、図-4に示す解析モデルを用いて二次覆工されたシールドトンネル模型の軸方向挙動を説明できることがわかる。

4・2 曲げ実験

①二次覆工が直打ちされた場合

実験結果は、荷重とたわみとの関係および荷重と曲げひずみとの関係が概ね線形であったので最小2乗法により直線近似し荷重の代表値2P=50kgfに対して整理した。

図-9～図-11中の(a)は、模型Aを用いて行った曲げ実験のたわみの実験結果と解析結果とを比較したものである。図中、黒丸印は図-3(a)に示す変位計測位置での実験結果を、実線

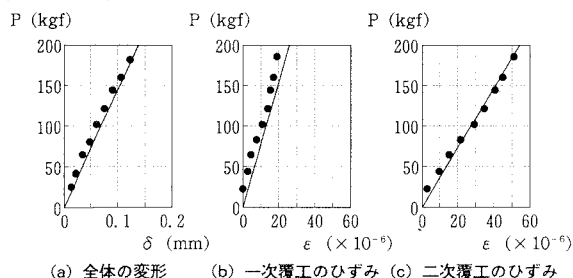


図-7 軸引張実験結果（模型A）

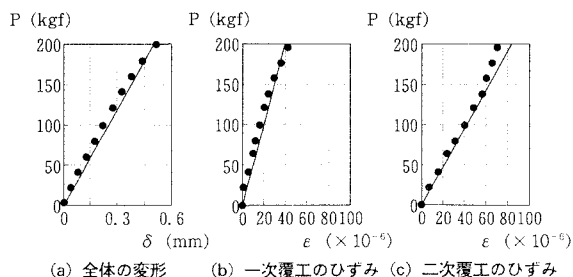


図-8 軸引張実験結果（模型B）

は図-4に示す解析モデルを用いた解析結果を示している。なお、実験結果は、トンネル軸方向中央断面から対称な2点では平均した値を用いている。図-9～図-11中の(b)は、トンネル中央断面における一次覆工と二次覆工それぞれの曲げひずみ分布図である。たわみ曲線と同様に、黒丸印は実験結果を、実線は解析結果を示している。解析結果は、図-4に示す解析モデルを用いて求められた断面力を平面保持の仮定が成り立つものとして直線分布するひずみに換算したものである。

図-9～図-11を見ると、一次覆工のひずみの実験結果は解析結果よりもやや大きな値を示してはいるものの、たわみと二次覆工のひずみは実験結果と解析結果とがよく符合している。このことより、二次覆工が直打ちされた場合の両覆工間の軸直角方向相互作用を評価するばねのばね定数の定め方が妥当性を有し、図-4に示す解析モデルを用いて二次覆工されたシールドトンネル模型の曲げ挙動を説明できることがわかる。

②覆工間部材がある場合

図-12(a)は、模型Bを用いて行った曲げ実験のたわみの実験結果と解析結果とを比較したものである。図-12(b)は、トンネル中央断面における一次覆工と二次覆工それぞれの曲げひずみ分布図である。

図-12(a)を見ると実験結果は解析結果よりもやや大きな値を示してはいるものの概ねよい符合を示している。また、図-12(b)を見ると実験結果は直線分布ではないがその傾向は解析結果と概ね符合している。実験結果が、直線分布にならないのはトンネル模型の断面変形による影響ではなく、二次覆工として用いた管の継目に部分的に圧縮応力が集中する箇所が生じていたためと考えられる¹²⁾。

これらのことから、覆工間部材がある場合の両覆工間の軸直角方向相互作用を評価するばねのばね定数の定め方が妥当性を有し、図-4に示す解析モデルを用いて二次覆工されたシールドトンネル模型の曲げ挙動を説明できることがわかる。

5. おわりに

以上により、二次覆工されたシールドトンネルの軸方向挙動に関する覆工間相互作用を明確にし、その挙動を説明できる解析モデルを示した。この解析モデルは、模型地盤を用いて上載荷重を対象に行った静的載荷実験¹⁷⁾ や不等沈下を対象とした実験¹⁸⁾ および振動実験^{19)~23)} においても実験結果を説明できている。また、

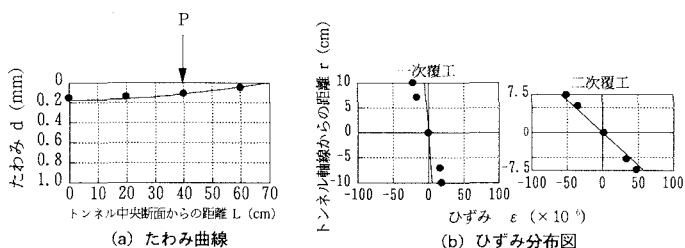


図-9 曲げ実験結果 (A00)

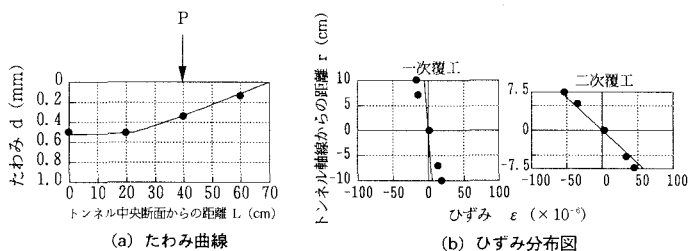


図-10 曲げ実験結果 (A45)

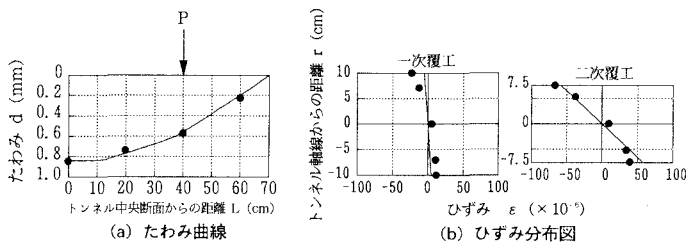


図-11 曲げ実験結果 (A25)

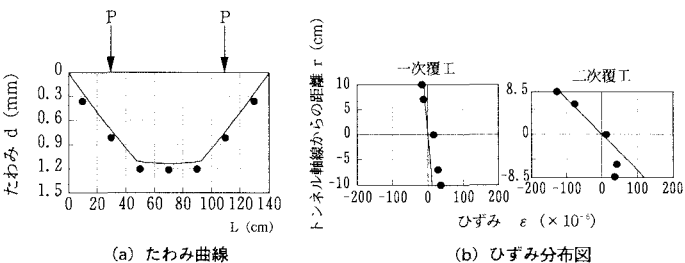


図-12 曲げ実験結果 (B45)

このモデルの各種ばねのばね定数は、トンネル部材の諸量を用いることで解析的に定められるため、提案した解析モデルを用いて、二次覆工されたシールドトンネルの軸方向挙動に関する部材断面力が比較的容易に求めることができる。このため、永久構造物である一次覆工の有すべき性能を確認でき、また、セグメントリングの可撓性セグメントに相当する機能を有する二次覆工の継目の位置や間隔を適切に定めることが可能となり、筆者らは、二次覆工を考慮したシールドトンネルの具体的な設計法を提案できたと考えている。なお、ここに提案した解析モデルは、実際のトンネルに対しても十分適用できるものと考えているが、今後、実トンネルを対象とした実験や現場計測などを行い、解析モデルの検証を進めるとともに、解析精度の向上を目指してゆきたいと考えている。

6. 参考文献

- 1) 半谷哲夫：二次覆工を有するシールドトンネル覆工の力学的特性に関する研究。鉄道技術研究報告，No. 1303，1985年10月。
- 2) 村上博智・小泉 淳：二次覆工で補強されたシールドセグメントリングの挙動について，土木学会論文集，第388号，Ⅲ-8，pp. 85～94，1987年12月。
- 3) 村上博智・小泉 淳：二次覆工された千鳥組セグメントリングの挙動について，土木学会論文集，第430号，Ⅲ-15，pp. 135～142，1991年6月。
- 4) 滝 英治・依田 真・奥田康三・児玉守広・田中 弘・和田正樹：有筋二次覆工を施したシールドトンネルの軸方向剛性について，土木学会第44回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-20，pp. 114～115，1989年10月。
- 5) 奥田康三・依田 真・滝 英治・児玉守広・田中 弘・和田正樹：二次覆工（無筋・有筋）を施したシールドトンネルの継手部曲げ挙動について，土木学会第44回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-21，pp. 116～117，1989年10月。
- 6) 田中 弘・山越重志・児玉守広・小泉 淳：二次覆工を有するシールドトンネルの軸方向解析モデルについて，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-11，pp. 64～65，1992年9月。
- 7) 佐久間彰三・石田智朗・上原精治・小泉 淳：一次覆工・二次覆工間のせん断特性を考慮したシールドトンネルの軸剛性評価，土木学会論文集，No. 424，Ⅲ-14，pp. 251～259，1990年12月。
- 8) 内田 隆・亀岡弘之・川島一彦・和佐勇次郎：アイソレーションシートを施工したシールドトンネルの軸力載荷実験，土木学会第46回年次学術講演会講演概要集，Ⅰ-591，pp. 1220～1221，1991年9月。
- 9) 岡本 晋・杉田秀樹・吉田幸司：アイソレーションシートを施工したシールドトンネルの曲げ載荷実験，土木学会第46回年次学術講演会講演概要集，Ⅰ-593，pp. 1224～1225，1991年9月。
- 10) 和佐勇次郎・三木克彦・林 光俊：二次覆工を有するシールドトンネルの地震時挙動，土木学会論文集，No. 436，Ⅲ-16，pp. 47～56，1991年9月。
- 11) 和佐勇次郎・阿部廣二・吉田幸司・元山 宏：防水シートを施工したシールドトンネルの軸方向剛性と地震時挙動に関する一考察，土木学会論文集，No. 463，Ⅲ-22，pp. 115～124，1993年3月。
- 12) 高松伸行・村上博智・小泉 淳：覆工間にアイソレーション材を用いたシールドトンネルの軸方向挙動に関する研究，構造工学論文集，Vol. 38A，pp. 1397～1407，1992年3月。
- 13) 栗山雄三・村上博智・小泉 淳・蔵品 稔・高松伸行：二次覆工されたシールドトンネル模型の曲げ実験について，土木学会第46回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-15，pp. 52～53，1991年9月。
- 14) 高松伸行・小泉 淳・村上博智：二次覆工されたシールドトンネルの軸方向の覆工間相互作用について，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-14，pp. 82～83，1993年9月。
- 15) 小泉 淳・村上博智・西野健三：シールドトンネルの軸方向特性のモデル化について，土木学会論文集，No. 394，Ⅲ-9，pp. 79～88，1988年6月。
- 16) 村上博智・小泉 淳：シールド工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，No. 296，pp. 73～86，1980年4月。
- 17) 高松伸行・村上博智・栗山雄三・小泉 淳・蔵品 稔：二次覆工されたシールドトンネル模型の上中実験について，土木学会第46回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-16，pp. 54～55，1991年9月。
- 18) 高松伸行・村上博智・小泉 淳：二次覆工されたシールドトンネルの不等沈下時の挙動に関する模型実験，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-26，pp. 94～95，1992年9月。
- 19) 深井直光・高松伸行・栗山雄三・小泉 淳・村上博智：シールドトンネルの模型振動実験に用いた地盤の挙動について，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-27，pp. 96～97，1992年9月。
- 20) 栗山雄三・高松伸行・深井直光・小泉 淳・村上博智：シールドトンネルの模型振動実験について，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-28，pp. 98～99，1992年9月。
- 21) 小泉 淳・高松伸行・深井直光・大井 純・村上博智：シールドトンネルの模型振動実験について（その3），土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-52，pp. 158～159，1993年9月。
- 22) 大井 純・高松伸行・深井直光・小泉 淳・村上博智：シールドトンネルの模型振動実験について（その4），土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-53，pp. 160～161，1993年9月。
- 23) 深井直光・高松伸行・小泉 淳・大井 純・村上博智：シールドトンネルの模型振動実験について（その5），土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-54，pp. 162～163，1993年9月。