

二次覆工されたシールドトンネル軸方向曲げ特性のモデル化について

高松伸行*・村上博智**・小泉 淳***

本論文は、二次覆工されたシールドトンネルの軸方向曲げ挙動を説明できる解析モデルを提案し、これを模型実験結果と比較・検討して、提案した解析モデルの妥当性を検証したものである。解析には、一次覆工と二次覆工をそれぞれ棒-ばね構造モデルで評価し、両覆工間の相互作用をばねで評価した解析モデルを用いている。実験では、まず、単純な荷重状態における模型実験によりトンネルの構造解析モデルの妥当性を確認し、この模型を土中に埋設した実験を通してトンネルと地盤との相互作用についても考察を加えている。

Key Words : shield tunnel, secondary lining, longitudinal behavior

1. はじめに

都市部地上空間の有効利用が限界に近くなってきた現在、我々の目は地下空間へと向けられてきているが、地下浅層部は道路、地下鉄道を始めとする各種のライフラインで満たされ、地下空間の高度利用を図る上で、地下構造物はますます大深度化する傾向にある。

シールド工法は、従来、河底や海底など地盤条件の悪い場所にトンネルを構築する特殊工法として開発されたが、地盤沈下が少なく、工事中、地上空間を占有することも少なく、また、切羽の安定性に優れているなど経済性や安全面で他を凌ぐ有力な工法として、現在では都市トンネルの代表的な構築法となっている。

シールドトンネルは一般的には、数多くのセグメント継手やリング継手を有するプレキャスト構造物であり、地下水下に建設される構造物である。最近では、トンネル内への地下水の侵入を防止する技術がかなり発達してきてはいるものの、二次覆工を防水の目的で施工する場合も多く、セグメントリングの蛇行修正や仕上げ工としても二次覆工は施されている。

シールドトンネルの軸方向の検討にあたっては、一次覆工のみによるシールドトンネルはリング継手が存在することによりかなりフレキシブルであるので、立坑との取付け位置や地盤条件が急変する場所を除けば、他の線状地中構造物より安全性に優れた構造物と考えられる場合が多い。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のシールドトンネルは、その特有の性能であるフレキシビリティが損なわれるため、新たに付加される上載偏荷重や地盤沈下、近接施工および地震

などによって大きな影響を受ける可能性が高い¹⁾。

シールドトンネル軸方向の設計に際して、これらの影響を検討することは不可欠であるが、なかでも地震による影響や地盤の不等沈下による影響は、シールドトンネルに外力が作用すると考えるよりも地盤変位が強制的に与えられると考える方が現実に近いものと考えられるため、剛性の高い二次覆工を有するトンネルの場合には、地盤変位に十分に追従できず、大きな応力が発生することが想定される。

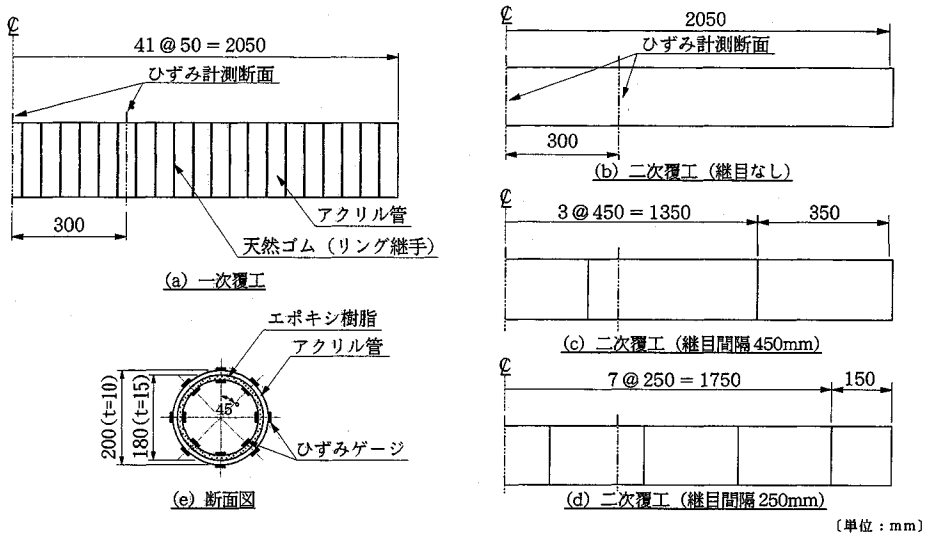
シールドトンネルの軸方向挙動に関する研究は、最近になって多くなってきており^{2)~14)}、これらの中には二次覆工を対象としたものもある^{7)~14)}。セグメントリングのみで構成されるシールドトンネルの挙動はほぼ明らかにされたようであるが、外力の適切な評価方法やトンネルと地盤との相互作用のモデル化など、まだ十分な精度を有するものとは言いがたい状況にあり、急曲線施工時の検討⁹⁾など一部を除いてシールドトンネル軸方向の設計法はいまだ一般化されていない。一方、二次覆工を有するトンネルのうち、一次覆工として鋼製セグメントを用いた場合には、両覆工は合成構造として挙動することが指摘されており^{7)~14)}、また、アイソレーション材を有する場合には筆者らが模型実験を行い、実験結果を説明できる解析モデルを提案することでその挙動を明らかにしている¹³⁾が、内面が平滑な一次覆工の内側に二次覆工が直打ちされたトンネルについては、両覆工間の相互作用を定量的に定めてトンネルの挙動を把握しているものはない。

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が直打ちされた場合のシールドトンネルについて、軸直角方向から荷重あるいは地盤変位が与えられた場合を想定して、二次覆工されたシールドトンネルの軸方向挙動を明らかにしようとするものである。まず、一次覆工と二次覆工とを棒部材とばね部材が

* 正会員 工修 東急建設株式会社 技術本部土木技術部
(〒150 渋谷区渋谷 1-16-14)

** 正会員 早稲田大学名誉教授

*** 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科



図一 トンネル模型概要

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提案し、このモデルの各種ばねのばね定数の定め方について言及している。次に、地上におけるトンネル模型の曲げ実験¹⁵⁾結果と本解析モデルを用いた解析結果との比較を行って提案した解析モデルの妥当性を検証し、トンネル模型を乾燥砂を用いた模型地盤に埋設して上載荷重を作用させた実験¹⁶⁾と模型地盤を部分的に沈下させた実験¹⁷⁾を行って、トンネルと地盤との相互作用についても検討を加えている。

2. 実験概要

二次覆工されたシールドトンネルの軸方向の曲げ挙動を調べる目的で、外力の状態が異なる3種類の模型実験を行った。

(1) トンネル模型と計測項目

実験に用いたトンネル模型は、図一に示すように、コンクリート平板形セグメントを用いたセグメントリングの内側に現場打ちコンクリートによる二次覆工を直打ちしたトンネルを想定したものである。

セグメントリングとしては外径20 cm、厚さ1 cmの亚克力円管を用い、リング継手の特性を表現するため、天然ゴムシート円管(厚さ5 mm)をこれと交互に接着して一次覆工とした。二次覆工は外径18 cm、厚さ1.5 cmで、エポキシ樹脂を一次覆工の内側に直打ちして作製した。二次覆工には継目がないものと、継目間隔が45 cmのものおよび25 cmのもの計3体を用いた。継目は、無筋コンクリートのひびわれ箇所や打継目あるいは応力が集中すると考えられる箇所にあらかじめ設けられた継目構造を想定したもので、薄いシリコンゴムリン

グ(厚さ0.5 mm)を用いてこれを評価した。

表一は、実験名の一覧を示したもので、3種類の実験に対してそれぞれ3体の模型を用いて計9タイプの実験を行っている。

計測項目は、両覆工に発生する軸方向ひずみとトンネルのたわみである。

軸方向ひずみは、図一に二点鎖線で示すようにトンネル中央断面とそれから30 cm離れた対称な2断面の計3断面において、一次覆工と二次覆工でそれぞれひずみゲージを用いて測定した。各断面では、一次覆工は外周で、二次覆工は内周でトンネル上端を含み45°間隔にそれぞれ計8箇所にひずみゲージを貼付している。

トンネルのたわみは、地上における実験では一次覆工下縁7か所において(図二)、地中における実験では二次覆工内面上部9か所(図三)でそれぞれひずみゲージ変位計を用いて測定した。

地中における実験では、図四に示すように、土槽底面における土圧も併せて測定した。土圧は、土槽底面に設置した2方向ロードセルにより測定している。

(2) 実験方法

a) 地上における曲げ実験

図二は、曲げ実験概要図である。載荷方法は、曲げ支間を800 mm、せん断支間を300 mmとする対称2点載荷である。載荷点および支点には集中荷重の影響による断面変形を拘束するために、内径が亚克力管の外径と一致する厚さ9 mm、幅20 mmの鋼製リングを用いた¹³⁾。載荷ステップは $2P=25 \text{ kgf}$ ピッチで、最大500 kgfまで載荷を行った。

b) 上載荷重を対象とした実験

図三は、土中実験概要図である。模型地盤は、幅80

表-1 実験名一覧

二次覆工継目間隔 実験の種類	なし	45cm	25cm
地上における曲げ実験	D00	D45	D25
上載荷重を対象とした実験	SD00	SD45	SD25
地盤沈下を対象とした実験	OD00	OD45	OD25

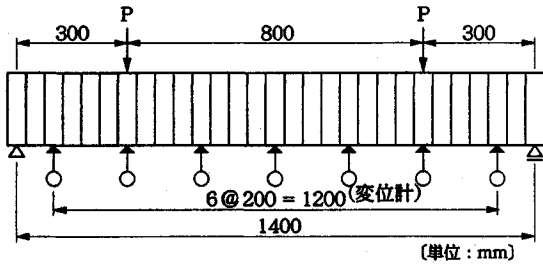


図-2 曲げ実験概要図

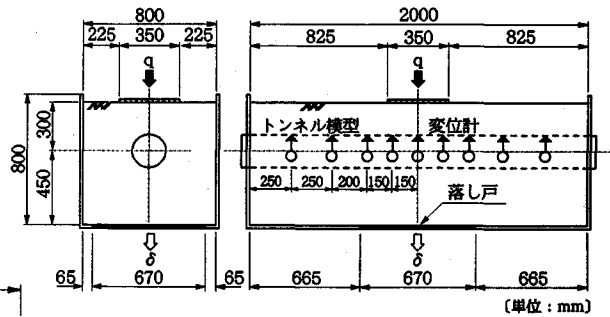


図-3 土中実験概要図

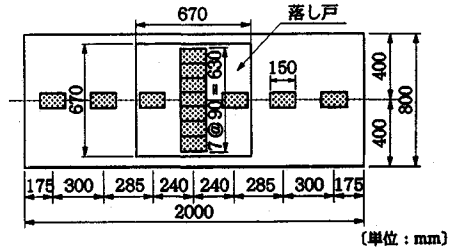


図-4 ロードセル配置図

cm, 高さ 75 cm で長さが 200 cm である。土槽壁面にはその影響を極力少なくするためにシリコングリスを介して薄いゴム膜を貼付した。地盤材料には豊浦標準砂を用い、所定の高さより落下堆積させることにより密度管理を行って模型地盤を作製した。トンネルは土被りが $1D (=20 \text{ cm})$ となるように埋設し、両端部は土槽側面で鉛直方向に単純支持した。荷重は、35 cm 四方で厚さ 1.6 cm の正方形の鋼板 (重量 15.5 kgf) を積み重ねて作用させた。載荷ステップは 31 kgf ($2.53 \times 10^{-2} \text{ kgf/cm}^2$) ずつで、372 kgf ($3.04 \times 10^{-1} \text{ kgf/cm}^2$) まで載荷した。模型地盤は、比重 $G_s=2.64$, 含水比 $w=0\%$, 密度 $\gamma=1.51 \text{ tf/m}^3$, 間げき比 $e=0.75$, 内部摩擦角 $\phi=39.1^\circ$ および地盤反力係数 $k_{gv}=0.77 \text{ kgf/cm}^3$ であった。地盤反力係数は、実験で用いた鋼板の重量とその沈下量との関係から求めた。

c) トンネル底部地盤の沈下を対象とした実験

上載荷重を作用させた実験に続いて、その最終荷重状態において計測項目のすべての値を零として、実験土槽下面の一部を落とし戸を用いて沈下させる実験を行った。落とし戸の形状は一辺が 67 cm の正方形で、沈下量は 0.5 mm ずつ 5 mm までである。

なお、b) と c) の実験では、地盤の挙動を調べる目的で、トンネルを埋設しない状態での実験も行っている。

3. 解析方法

(1) 解析モデル

地上における曲げ実験を行った結果、ひずみ計測断面における一次覆工と二次覆工のひずみ分布の傾きは一致せず、重ね構造的に挙動していることが確認された (図-14~16)。したがって、解析には、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

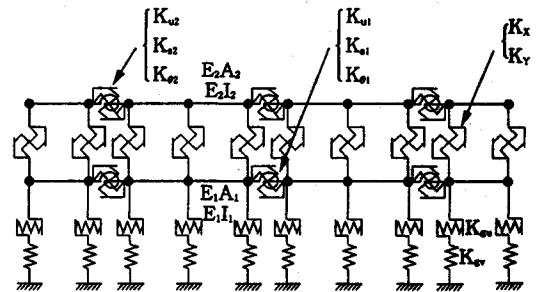


図-5 解析モデル

モデル³⁾を拡張し、両覆工を並列梁で評価し、覆工間の相互作用をばねに置換した解析モデルを用いた (図-5)。

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_{r1}) で評価している。二次覆工も一次覆工と同様に覆工部分を棒部材 (軸剛性 E_2A_2 、曲げ剛性 E_2I_2) に、継目部分あるいはひびわれ部分など (以下、二次覆工の継目部分と呼ぶ) 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_{r2}) 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。また、トンネルと地盤との相互作用は、一次覆工を想定した梁の各節点に付したトンネル軸方向の地盤ばね K_{gv} および軸直角方向の地盤ばね K_{gv1} で評価している。

リング継手の剛性を表わすばねのばね定数は、実トンネルの場合には、個々のリング継手をリング継ぎボルト

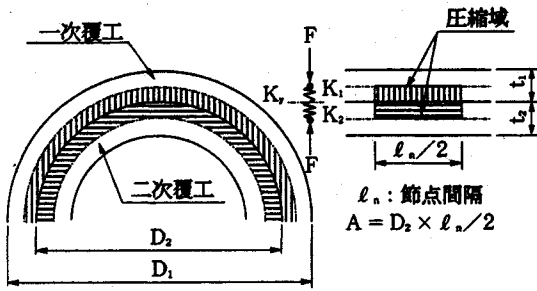


図-6 覆工間ばね

と継手板の変形をともに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³⁾が、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ている¹³⁾。

トンネルと地盤との相互作用は、一般的には線形な地盤ばねで評価しているため、本解析モデルにおいても線形ばねを適用する。そのばね定数は、実トンネルの場合には、トンネル周辺の状況に応じて、例えばトンネル周辺地盤の N 値と関連をもたせて定めている実情にある¹⁾が、本研究は提案したトンネルの構造解析モデルの妥当性を検証することを目的としているため、土中実験の解析に用いた地盤ばねのばね定数は土圧の実験結果をもとに直接これを定めている。

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_Y および二次覆工継目部分のばねのばね定数 K_{s2} と K_{e2} は以下に示す方法により定める。

なお、本研究はトンネル軸直角方向からの外力に対する検討をその対象としているため、図-5に示す解析モデルのうち、軸剛性 ($E_1 A_1$, $E_2 A_2$)、軸ばねのばね定数 (K_{u1} , K_{u2})、軸方向の覆工間ばねのばね定数 K_X および軸方向の地盤ばねのばね定数 K_{em} についてはその求め方を省略する。

(2) 覆工間ばねのばね定数 K_Y

一次覆工と二次覆工の相互作用を表わ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評価する。

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。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 t_1 および t_2 の2分の1¹⁸⁾とすると図-6よりそれぞれの圧縮域の法線方向ばねのばね定数 K_1 および K_2 は次式で示される。

$$K_1 = \frac{2E_1 \cdot A}{t_1} \dots\dots\dots (1)$$

$$K_2 = \frac{2E_2 \cdot A}{t_2} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 E_1 および E_2 は一次覆工および二次覆工の弾

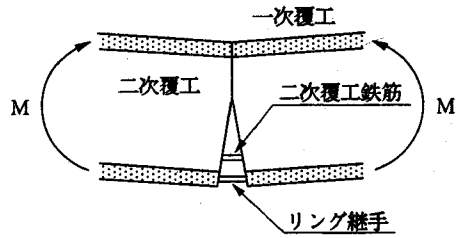


図-7 二次覆工継目の変形状態

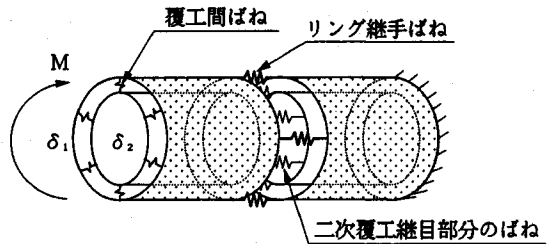


図-8 シールドトンネルの立体シェル構造モデル

性係数を表わす。また、 A は図-5に示す解析モデルにおける節点間隔 l_n 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、覆工間ばねのばね定数 K_Y はこれらのばねを直列に連結したものと考えて次式により定める。

$$K_Y = \frac{K_1 \cdot K_2}{K_1 + K_2} \dots\dots\dots (3)$$

(3) 二次覆工継目部分のばねのばね定数 K_{s2} , K_{e2}

二次覆工の継目部分に曲げモーメントが作用すると、シールドトンネルは図-7に示すような変形状態になると考えられる。したがって、継目部分は完全なヒンジとはならないで若干曲げモーメントに抵抗する。この抵抗を回転ばね K_{e2} で評価すると、そのばね定数は以下に示す方法により求められる。

まず、図-8に示すように、一次覆工の一端が固定されている二次覆工を含めたシールドトンネル2リング分の立体構造モデルを用いて一次覆工モデルの先端に合力が M となる曲げ応力を作用させ、載荷断面の中心位置での鉛直変位 δ_1 および δ_2 を求める。

次に、図-9に示すシールドトンネル2リング分の並列梁モデルを用いて、立体解析で用いた曲げ応力の合力と等しい曲げモーメント M を一次覆工の先端に作用させて、両覆工の荷重点の鉛直変位 δ_1 および δ_2 が立体解析で得られた δ_1 および δ_2 と等しくなるように繰り返し計算を行って二次覆工継目部分の回転ばね定数 K_{e2} を定める。

立体解析において δ_1 および δ_2 を求めるにあたっては、図-8に示すように、一次覆工と二次覆工はその形状を考慮し、それぞれ立体円筒シェル構造にモデル化し、セグメント継手、リング継手、二次覆工の継目部分お

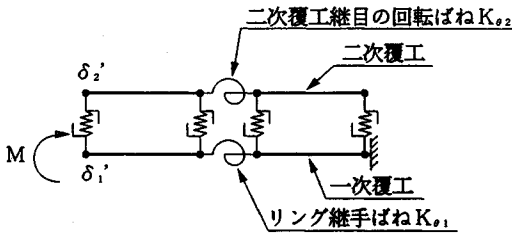


図-9 シールドトンネルの並列梁構造モデル

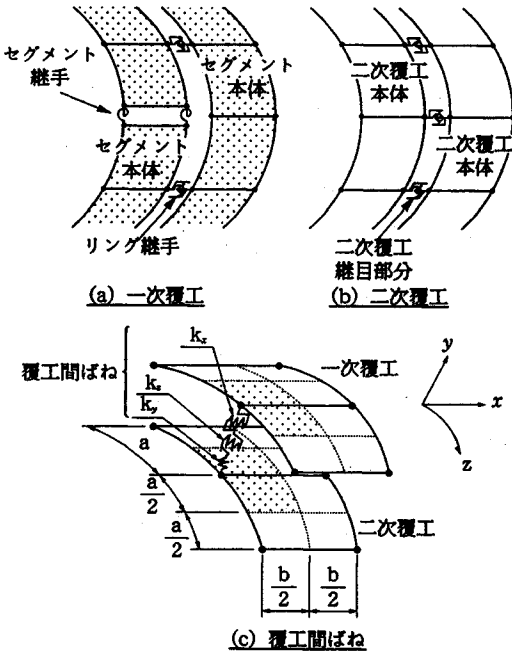


図-10 立体シェル構造モデルのばね部材

び両覆工間の相互作用をばねで評価した解析モデルを用いる。図-10はこれらのばねの配置を示したもので、表-2はそのばね定数を示したものである。表中、 k_{xx} , k_{yy} , k_{zz} 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ている。座標系は図-10に示すとおりである。また、 k_{su} , k_{ss} , $k_{s\theta}$ はセグメント継手の軸ばね, せん断ばね, 回転ばねのばね定数¹⁸⁾を、 k_{ru} , k_{rs} , $k_{r\theta}$ はリング継手に対する同様なばねのばね定数³⁾を、 k_{ju} , k_{js} , $k_{j\theta}$ は二次覆工の継目部分に対する同様なばねのばね定数を、 k_x , k_y , k_z は覆工間ばねのばね定数をそれぞれ表わしている。

二次覆工継目部分の軸ばねのばね定数 k_{ju} は、圧縮に対しては無限大とし、引張に対しては二次覆工の実状にあわせて以下のように定める。

無筋コンクリートのひびわれ部分あるいは縁を切った状態での継目部分は引張力を伝達しないのでそのばね定数を零とする。二次覆工が軸方向鉄筋を持つ鉄筋コン

表-2 立体モデルにおける各種ばねのばね定数

	セグメント継手	リング継手	二次覆工継目部分	覆工間ばね
k_{xx}	k_{su}	k_{ru}	k_{ju}	k_x
k_{yy}	k_{ss}	k_{rs}	k_{js}	k_y
k_{zz}	$k_{s\theta}$	$k_{r\theta}$	$k_{j\theta}$	k_z
$k_{\theta x}$	$k_{s\theta}$	∞	∞	—
$k_{\theta y}$	—	—	—	—
$k_{\theta z}$	∞	$k_{r\theta}$	$k_{j\theta}$	—

リートの場合には、鉄筋とコンクリートの物性値から得られるひびわれ部分の引張剛性とひびわれ間隔とからばね定数を求め、その値を用いる^{14), 19)}。

また、立体モデルにおける覆工間のばねは、図-10(c)に示すように、二次覆工シェル要素の要素面積の2分の1を射影面積 A' とし、一次覆工と二次覆工それぞれの変形領域 (y方向の場合はそれぞれの覆工厚の2分の1, x方向およびz方向の場合は全厚) をもつばねが直列に連結されたものとして評価する。

一次覆工と二次覆工の圧縮ばね k_{y1} , k_{y2} (y方向), せん断ばね k_{z1} , k_{z2} および k_{x1} , k_{x2} (x方向およびz方向) は次式で表わされる。

$$k_{y1} = \frac{2E_1 \cdot A'}{t_1} \dots \dots \dots (4)$$

$$k_{y2} = \frac{2E_2 \cdot A'}{t_2} \dots \dots \dots (5)$$

$$k_{z1} = k_{z1} = \frac{E_1 \cdot A'}{2(1+\nu_1) \cdot t_1} \dots \dots \dots (6)$$

$$k_{z2} = k_{z2} = \frac{E_2 \cdot A'}{2(1+\nu_2) \cdot t_2} \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 E_1 , E_2 は両覆工の弾性係数を、 ν_1 , ν_2 はポアソン比を表わす。

したがって、立体モデルにおける覆工間ばね k_y , k_x および k_z は次式で表わされる。

$$k_y = \frac{k_{y1} \cdot k_{y2}}{k_{y1} + k_{y2}} \dots \dots \dots (8)$$

$$k_x = k_z = \frac{k_{x1} \cdot k_{x2}}{k_{x1} + k_{x2}} \dots \dots \dots (9)$$

これらの覆工間ばねは、圧縮ばね k_y に圧縮力が作用した場合のみばねを付加し、引張力が作用した場合には3方向全部のばねを取り除く。

このように、一次覆工の各種ばね、二次覆工の継目部分および覆工間ばねの収束計算を行い、しかる後に載荷断面の中心位置での鉛直変位 δ_1 および δ_2 が求められる。

なお、現状では二次覆工の継目部分のせん断変形を解析的に推定することが困難であることから、今回の解析においては、継目部のせん断剛性を評価するばねのばね定数 K_{s2} は無限大としている。

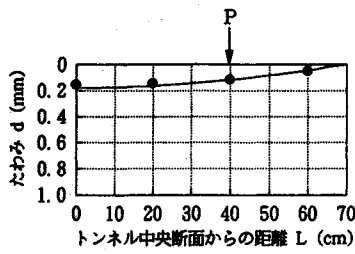


図-11 たわみ曲線 (D 00)

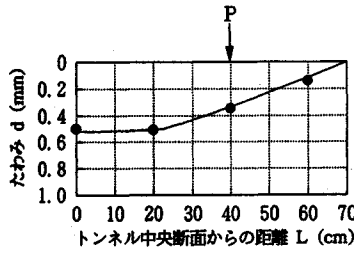


図-12 たわみ曲線 (D 45)

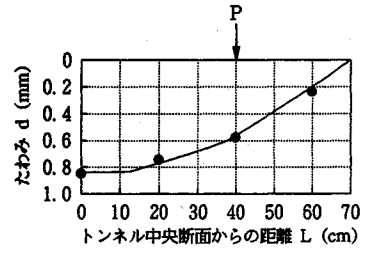


図-13 たわみ曲線 (D 25)

4. 実験結果と解析結果との比較

(1) 地上における曲げ実験

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 $2P=50 \text{ kgf}$ に対して整理した。

解析に用いた模型材料の物性は、各材料の特性試験から求めた。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 50 mm、高さ 100 mm 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。

リング継手部の各種ばねのばね定数は、 $K_{s1}=1.28 \times 10^6 \text{ kgf/cm}$ 、 $K_{\theta 1}=7.66 \times 10^5 \text{ kgf}\cdot\text{cm/rad}$ とした¹³⁾。また、第 3 章に示す解析方法により求めた二次覆工の継目部分の回転ばね定数は、 $K_{\theta 2}=3.5 \times 10^5 \text{ kgf}\cdot\text{cm/rad}$ であった。

図-11～13 は、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-2 に示す変位計測位置での実験結果を、実線は図-5 に示す解析モデルを用いた解析結果を示す。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-14～16 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-5 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-11 および図-14 を見ると、実験結果と解析結果とはよく符合している。このことより、式 (1)～(3) に示す覆工間ばねの評価方法が妥当性を有し、図-5 に示す解析モデルを用いることで二次覆工されたシールドトンネル模型の挙動をよく説明できることが確認された。また、図-12、13 および図-15、16 より、実験結果と解析結果とはほぼ一致しており、二次覆工継目部分の回転ばね定数は、図-8 に示す立体シェルモデルと図-9 に示す並列梁モデルを用いて算出することが可能で

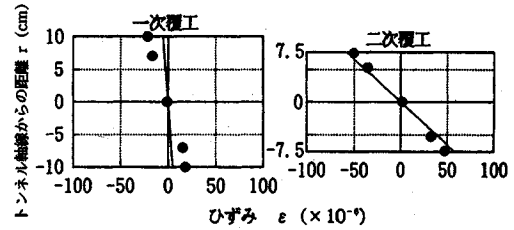


図-14 ひずみ分布図 (D 00)

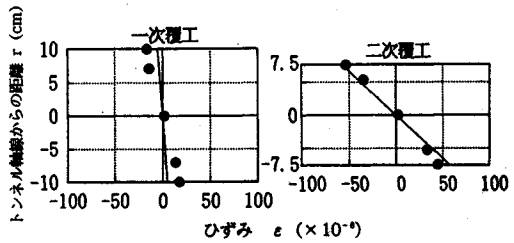


図-15 ひずみ分布図 (D 45)

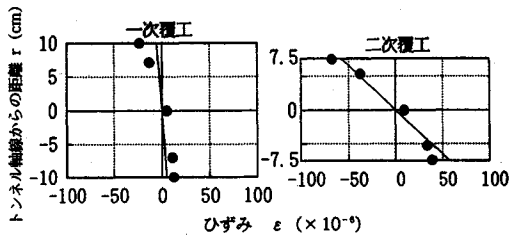


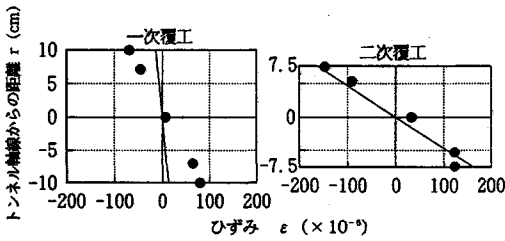
図-16 ひずみ分布図 (D 25)

あることが明らかとなった。

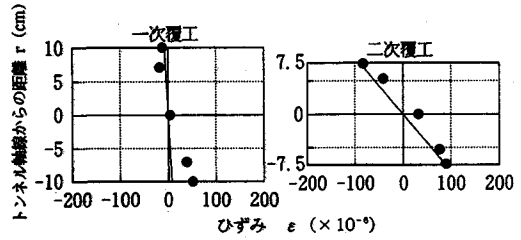
(2) 上載荷重を対象とした実験

各実験段階における荷重とトンネルのたわみとの関係および荷重と曲げひずみとの関係は概ね直線となったので、実験結果は最小 2 乗法により直線近似し、代表荷重として最終荷重状態である $q=372 \text{ kgf}$ において整理した。

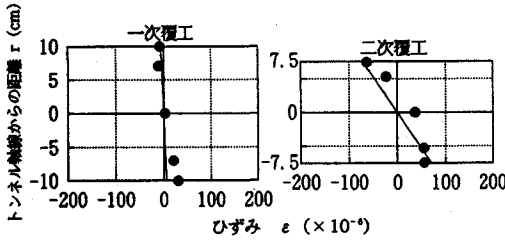
図-17～19 は、トンネル中央断面における一次覆工と二次覆工それぞれのひずみ分布を示したものである。図中、黒丸印は実験結果を、実線は解析結果を示す。これらの図の実験結果を見ると、ひずみは概ね直線的に分布しており、トンネルは土中に埋設した状態においても



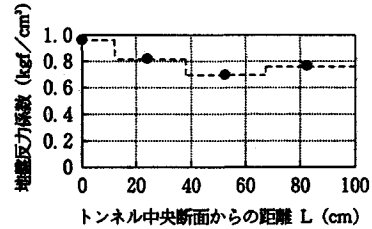
図一17 ひずみ分布図 (SD 00)



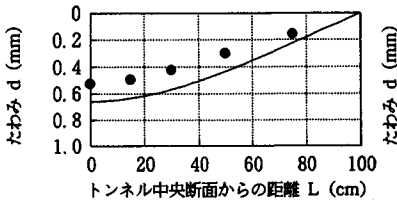
図一18 ひずみ分布図 (SD 45)



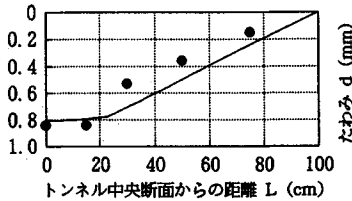
図一19 ひずみ分布図 (SD 25)



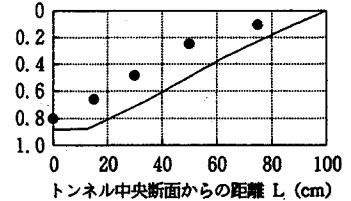
図一20 地盤反力係数 (SD 00)



図一21 たわみ曲線 (SD 00)



図一22 たわみ曲線 (SD 45)



図一23 たわみ曲線 (SD 25)

断面変形がほとんどなく、棒部材として挙動していることがわかる。

図一20は、SD 00における地盤反力係数の分布を示したものである。地盤反力係数は、土槽底面に作用する土圧の測定結果とトンネルのたわみから得られる地盤の変形量とから算出した。図中、黒丸印は、土圧測定点での実験結果である。点線は、それぞれの土圧測定点の間でこれらの地盤反力係数が変化すると仮定した場合の分布を示したもので、解析に用いる地盤ばね定数 K_{gv} はこの分布をもとに定めている。また、トンネルに作用する荷重は、地表面荷重 q が土層中に 45° の広がりをもって分布する近似応力分布²⁰⁾として求めた。

ひずみの実験結果と解析結果は、概ね一致している。

図一21～23は、二次覆工内面上部のたわみ曲線である。図中、黒丸印は実験結果を、実線は解析結果を示す。解析結果は実験結果よりもやや大きくなってはいるもののその傾向は概ね一致しており、トンネルと地盤との相互作用をばねで評価した解析方法の妥当性が確認された。

(3) トンネル底部地盤の沈下を対象とした実験

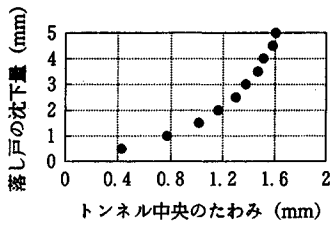
図一24は、OD 00における落とし戸の沈下量とトンネル中央断面のたわみとの関係を示したものである。図か

ら明らかなように、落とし戸の沈下量とトンネルのたわみとの関係は直線的にはなっていない。この関係は、二次覆工に継目がある他の2タイプの実験でも同様であり、落とし戸の沈下量とひずみとの関係も同様の傾向を示した。

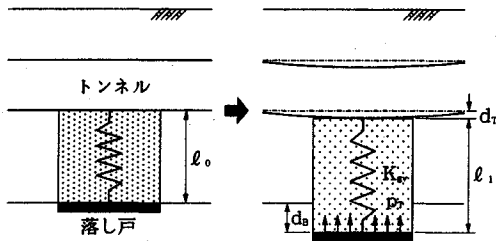
トンネルと地盤との相互作用を図一5に示す解析モデルの地盤ばね K_{gv} で表わすと、落とし戸の沈下量とトンネルのたわみやひずみとの関係が直線的にならないのはこのばね定数 K_{gv} が落とし戸の沈下量の増加と共に変化したためと考えられる。そこで、土槽底面の土圧の測定結果とトンネルのたわみの実験結果とを用いて図一25を参考に地盤を評価するばねのばね定数 K_{gv} を求めた。その方法を以下に具体的に示す。

図一26は、土槽底面の土圧 p_r の測定結果の一例で、OD 00において落とし戸の沈下量が3mmのときのものである。図中、一点鎖線より左の土圧分布は、図一4におけるトンネル中央断面位置での横断方向の土圧分布を示しており、一点鎖線より右の分布はトンネル軸方向の土圧分布を示している。正の土圧はトンネル底部地盤に圧縮応力が作用したことを示しており、それぞれ軸線より対称な2点では平均した値を用いている。

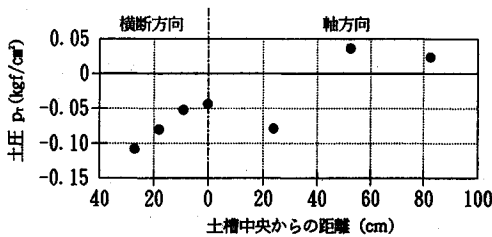
この図とトンネルを埋設せずに行った実験の土圧 p_c



図—24 落し戸の沈下量とトンネルのたわみとの関係 (OD 00)



図—25 地盤ばね定数



図—26 土槽底面の土圧分布 (OD 00)

の測定結果から地盤の滑り面における摩擦と土槽壁面の摩擦の影響を取り除き、トンネル底部地盤に発生する内部応力 ($\Delta\sigma = p_r - p_G$) を求める。これと、各土圧測定点で落し戸を 1 mm ずつ沈下させた時の地盤の変形量 ($\Delta l = d_B - d_r$) から地盤反力係数 k_{gv} を下式により求めた。

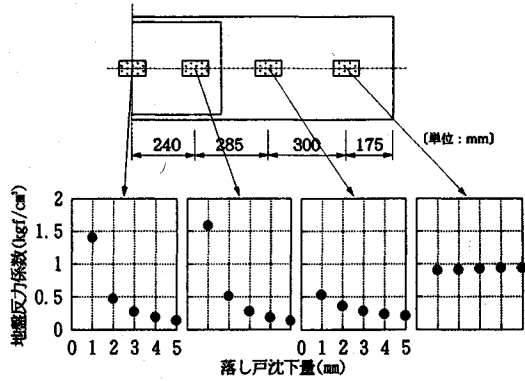
$$k_{gv} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta l} \dots\dots\dots (10)$$

図—27～29 は、各実験における土圧測定点での地盤反力係数の変化を表わしたものである。これらの地盤反力係数を用いて図—5 に示す解析モデルの地盤ばね K_{gv} のばね定数を求めた。

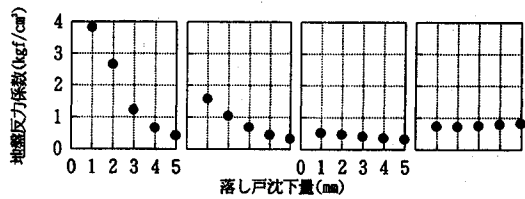
実験結果と解析結果との比較は、落し戸を 0～1, 1～2, 2～3, 3～4, 4～5 mm 間で 1 mm ずつ沈下させた場合について整理した。実験値は実験結果をそのまま用い、解析結果は落し戸の沈下量を強制変位として、図—5 に示す解析モデルの地盤ばね K_{gv} に与えることで求めた。

なお、強制変位は、落し戸の沈下量に地盤ばね定数を乗じた値を外力として、地盤ばねがある節点にその外力を作用させることで評価した。

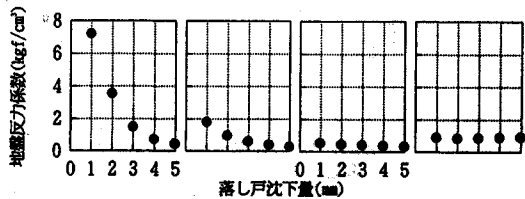
図—30 は、二次覆工に継目がない場合の、図—31 は継目間隔が 45 cm の場合の、図—32 は継目間隔が 25 cm の場合のたわみの実験結果と解析結果とを示したも



図—27 地盤反力係数 (OD 00)



図—28 地盤反力係数 (OD 45)



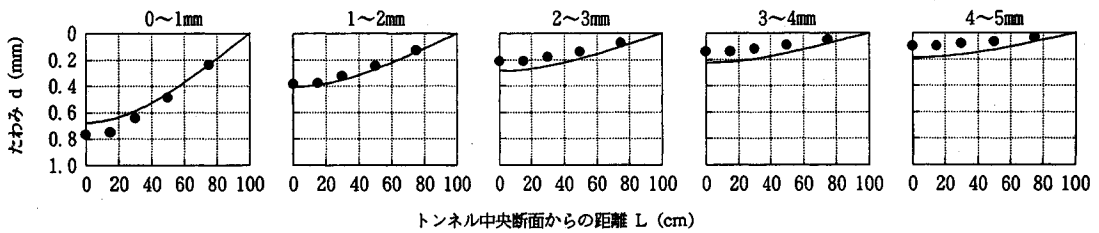
図—29 地盤反力係数 (OD 25)

のである。各図とも、左からそれぞれ 0～1, 1～2, 2～3, 3～4, 4～5 mm 間で 1 mm ずつ落し戸を沈下させた場合の結果を示している。黒丸印は実験結果を、実線は解析結果を示している。実験結果と解析結果とは概ね符合している。したがって、地盤ばねのばね定数を適切に評価し、落し戸の沈下量を強制変位として与えることで、トンネル構築位置の一部が沈下した場合にも図—5 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の挙動を説明できるものと考えられる。

5. まとめ

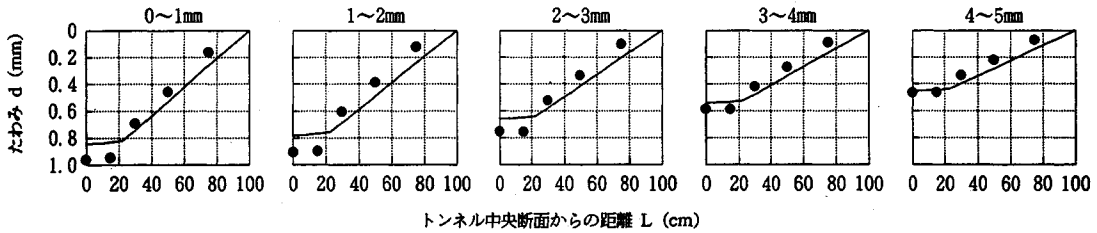
3 種類の実験結果と、第 3 章に示した解析モデルを用いた解析結果とを比較して得られた知見をまとめて列挙すれば以下のとおりである。

- ① 両覆工間の軸線間の圧縮変形をばねで評価する解析モデルは、二次覆工に継目がない場合の地上における曲げ実験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を用い、その内側に二次覆工が施された場合のように、シールドトンネルが重ね構造的に挙動する場合には、この解析モデルが妥



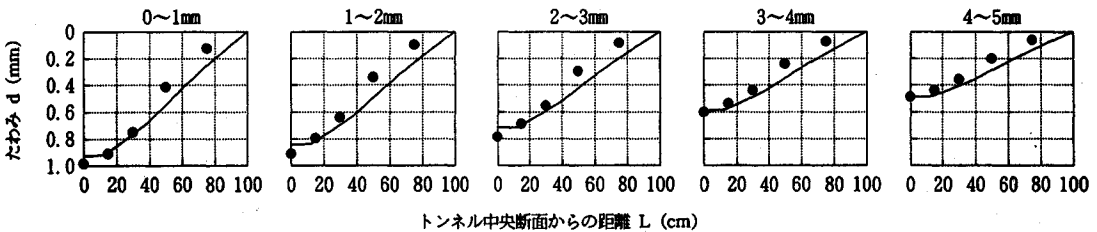
トンネル中央断面からの距離 L (cm)

図-30 たわみ曲線 (OD 00)



トンネル中央断面からの距離 L (cm)

図-31 たわみ曲線 (OD 45)



トンネル中央断面からの距離 L (cm)

図-32 たわみ曲線 (OD 25)

当性を有することが確認された。

② 二次覆工の継目部分をばねで評価し、そのばね定数を立体シェル解析モデルと並列梁モデルを用いて求め、図-5に示す解析モデルに適用する方法は、二次覆工に継目がある場合の地上における曲げ実験結果をよく説明できることがわかった。これにより、二次覆工の継目部分のモデル化の妥当性が確認された。

③ トンネルと地盤との相互作用をばねで評価する解析モデルは、土中実験の結果をよく説明できることがわかった。これにより、地盤をばねでモデル化した本解析方法の妥当性が確認された。

6. おわりに

以上により、コンクリート平板形セグメントの内側に二次覆工が直打ちされたシールドトンネルの軸方向曲げ挙動を説明することのできる解析モデルを示した。本研究では解析モデルの検証を模型実験により行っており、実物との対比は行っていないが、筆者らのシールドトンネル設計法に関する従来からの研究^{3), 18), 21)~23)}では、本論文で述べたような棒-ばね構造モデルは、模型実験の結果が説明できれば、実物を用いた実験の結果もほぼ説明できることから、これらの研究と本実験に用いたトンネル模型の性状とから推測すると、ここに提案した解析

モデルも実トンネルに対して十分適用できるものと考えている。

具体的な設計計算を行う場合には、まず、トンネルを構成する各部材の形状寸法を用いてモデル化する部材の断面諸量や各種ばね定数を定め、本論文に述べたような構造解析モデルを構築する。次に、このモデルに適切に算定した外的要因（外力や強制変位）を作用させ、断面力および変形を計算する。最後に、リング継手部および二次覆工のその位置における断面力と変形に着目して、そこに発生する応力度と継手の目開き量や二次覆工のひびわれ幅などに検討を加える。この検討の結果として、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、二次覆工の継目（その機能はセグメントリングの可撓性セグメントに相当する）の位置や間隔を適切に定めることが可能になると考えている。

なお、本研究ではシールドトンネルの軸方向に対して直角な方向から荷重などが作用した場合について考察したが、トンネルに地震力が作用する場合には両覆工間には軸方向の相互作用が発生すると考えられる。これについては、現在、振動実験^{24), 25)}や軸方向載荷試験により検討を進めている。最後に、本研究を行うにあたり実験およびデータ整理などに協力して頂いた早稲田大学の修論生および卒論生に感謝する次第です。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：トンネル標準施工書（シールド編）・同解説，1986年。
- 2) 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，No. 376，Ⅲ-6，pp.131～140，1986年12月。
- 3) 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。
- 4) 志波由紀夫・川島一彦・大日方尚巳・加納尚史：応答変位法によるシールドトンネルの地震時断面力の算定法，土木学会論文集，No. 404，Ⅰ-11，pp.385～394，1989年4月。
- 5) 堀地紀行・平嶋政治・松下芳亮・石井恒生：トンネル軸方向の剛性を考慮したシールドトンネルの断面力解析法，土木学会論文集，No. 406，Ⅲ-11，pp.195～204，1989年6月。
- 6) 小泉 淳・村上博智・石田智朗・高松伸行：急曲線施工用セグメントの設計法について，土木学会論文集，No. 448，Ⅲ-19，pp.111～120，1992年6月。
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 川島一彦・杉田秀樹・加納尚史：RCシールドトンネルの耐震設計に必要な二次覆工の長手方向最小鉄筋量，第21回地震工学研究発表会講演概要，No. 81，pp.313～316，1991年7月。
- 10) 内田 隆・亀岡弘之・川島一彦・和佐勇次郎：アイン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。
- 11) 岡本 晋・杉田秀樹・吉田幸司：アイン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。
- 12) 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。
- 13) 高松伸行・村上博智・小泉 淳：覆工間にアイン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. 38 A，pp.1397～1407，1992年3月。
- 14) 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。
- 15) 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。
- 16) 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土中実験について，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。
- 17) 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。
- 18) 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。
- 19) 吉川弘道・田辺忠顕：鉄筋コンクリート部材の引張剛性に関する解析的研究，土木学会論文集，No. 366，Ⅴ-4，pp.93～102，1986年2月。
- 20) 土質工学会：土質工学ハンドブック，pp.133～134，1982年。
- 21) 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，No. 272，pp.103～115，1978年4月。
- 22) 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，No. 388，Ⅲ-8，pp.85～94，1987年12月。
- 23) 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，No. 430，Ⅲ-15，pp.135～142，1991年6月。
- 24) 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。
- 25) 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。

(1993.1.8 受付)

STUDY ON THE ANALYTICAL MODEL ON BENDING BEHAVIOR IN LONGITUDINAL DIRECTION OF SHIELD TUNNEL WITH SECONDARY LINING

Nobuyuki TAKAMATSU, Hiroto MURAKAMI and Atsushi KOIZUMI

The analytical proposal was investigated through a series of model tests on the bending behavior in the longitudinal direction of shield tunnels with secondary linings. The analytical model is composed of beams and springs which simulate the primary and secondary linings, joints and the interaction between the linings respectively. In the experimental study, firstly, concentrated load was applied to the test models to confirm effectiveness of the analytical model. Secondly, the interaction between tunnels and the ground was investigated through the tests in the model ground.