

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

BEHAVIOR IN THE LONGITUDINAL DIRECTION OF SHIELD TUNNELS
WITH ISOLATION SHEETS BETWEEN LININGS

高松伸行*・村上博智**・小泉 淳***

By Nobuyuki TAKAMATSU, Hiroto MURAKAMI and Atsushi KOIZUMI

Some bending tests were carried out using shield tunnel models. The behaviors were investigated with analytical models. The test models are composed of acrylic tubes with rubber sheets used as primary linings and PVC tubes or acrylic tubes used as secondary linings. The rubber sheets used as ring joints adhere to the acrylic tubes. Fine sand or silicone rubber is used as isolation materials. The analytical values are calculated by the models composed of two parallel beams with several springs. These springs are classified into three types. The first type represents the ring joints, the second type represents the construction joints of the secondary linings, and the third type represents the interaction between primary linings and secondary linings.

1. はじめに

河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シールド工法は、トンネル設計法の進歩や施工法の改良と相まって、今や都市トンネルの一般的工法として多用されるようになってきている。しかしながら、シールドトンネルは、数多くのセグメント継手やリング継手を有しているため、その防水には従来から多大の関心が寄せられてきていた。特に、トンネル位置における地盤条件やその使用目的によっては、トンネルの防水工を十分に行うことが重要な課題となっている。

その対応として、防水材の開発や防水技術の向上に加えて、最近では、一次覆工内側に二次覆工を施すとともに山岳トンネル工法で用いられているような防水シートをこの間に施工する場合も見られるようになってきた^{1), 2)}。このような防水シートは、一方では、防水工としての役割を果たすばかりでなく、一次覆工と二次覆工とをアイソレートする効果があるため構造体としても注目を浴びつつある^{3) ~ 5)}。

地震やトンネル位置における不等沈下などによるシールドトンネルの軸方向挙動を考察する場合、これらの影響は、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。一次覆工のみによるトンネルは、構造的には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これらの変位を吸収することが可能であるように思わ

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

** 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)

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

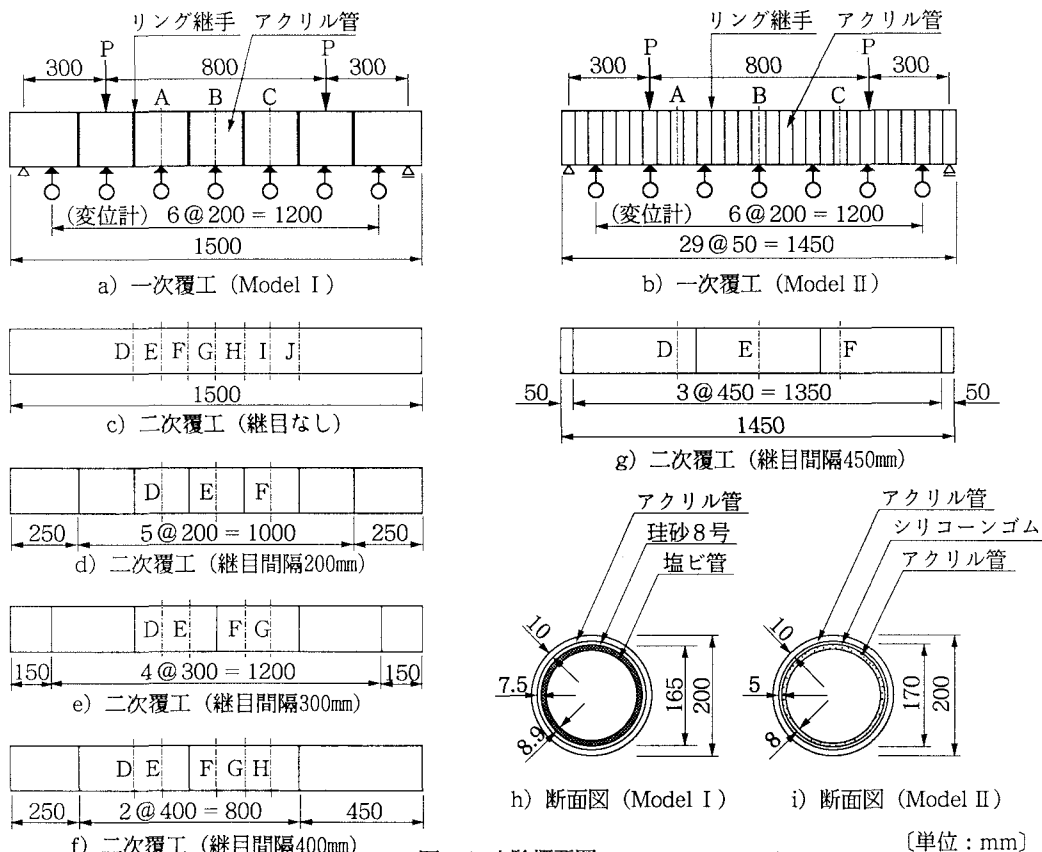


図-1. 実験概要図

れる。しかしながら、一次覆工の内側に連続した二次覆工が施工されると、トンネルは軸方向に剛な構造に近づくので、地盤変位に追従できなくなり大きな応力を受けることとなる。

このような問題を解決する一つの考え方として、両覆工間に防水シートなどを用いて防水効果を高めるとともに、両覆工を構造的にアイソレートした上で、二次覆工に適切な間隔で継目を設けるならばシールドトンネルはある程度フレキシブルな構造となり、地盤変位を吸収することも可能であると考えられる。

本研究は、このような立場から、両覆工間にアイソレーション材を有するシールドトンネルの軸方向挙動を実験的に検討し、これに理論的考察を加えたものである。

2. 実験概要

実験に用いたトンネル模型は、平板形コンクリート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施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アクリル円管を用い、リング継手の特性を表現するため、天然ゴムシート円管⁶⁾をこれと交互に接着して一次覆工とした。二次覆工としては塩化ビニル円管⁷⁾またはアクリル円管を用いた。また、両覆工間に用いるアイソレーション材としてはその力学的特性を評価することを目的として、前者の場合には細砂(珪砂8号)を〔Model I〕、後者の場合にはシリコーンゴムを用いた〔Model II〕。

すでに明らかにされている筆者らの研究⁸⁾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に、リング継手をばね部材に評価した棒-ばね構造モデルで示される。したがって、実験では図-1に示すようにセグメントリングにアクリル円管を用い、これに天然ゴムシートを接着

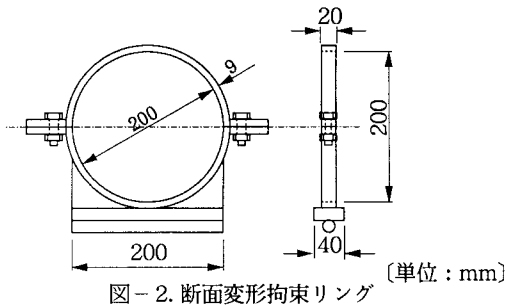


表-1. 実験の種類 (TYPE)

一次覆工		二次覆工の継目間隔 (mm)				
		継目なし	450	400	300	200
リング の間隔 継手 (mm)	Model I	継手なし	I	—	—	—
		200	II	—	III	IV
	Model II	50	—	VI	—	—

してリング継手を評価し一次覆工模型を作成した。これらのアクリル円管は外径200mm、厚さ10mmで、管の端
面は応力の伝達に乱れが生じないように平滑に加工した。

リング継手を評価する天然ゴムシートは厚さ5mmで、その形状がアクリル円管の横断面形状と同様になるよ
うに加工した。アクリル円管とこのゴムシートとの接着には瞬間接着剤を用い、十分な接着養生時間をおい
て実験を行った。リング継手の間隔は、図-1に示すように、Model I では200mmとし、Model II では50mmと
した。なお、Model I では参考までにリング継手がない場合の実験も行った。

Model I における二次覆工としては、外径165mm、厚さ8.9mmの塩化ビニル円管を用いた。また、二次覆工
の継目は塩化ビニル管を切断することにより評価した。塩化ビニル管の継目は、継目がないものと、継目間
隔が200mm、300mmおよび400mmのものをを用いた。Model II におけ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、その継目間隔は450mmとした。

載荷方法は、図-1に示すように曲げ支間を800mm、せん断支間を300mmとする対称2点載荷である。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、図-2に示す内径がアクリル管の外径と一
致する厚さ9mm、幅20mmの鋼製の断面変形拘束リングを用いた。実験の種類は、一次覆工と二次覆工の組み合
わせにより表-1に示す6種類である。

測定項目は、一次覆工下縁の鉛直変位と一次覆工および二次覆工の軸方向ひずみである。鉛直変位は、支
間中央点を含み200mm間隔に7箇所、変位計を設置して測定した。一次覆工の軸方向ひずみは図-1に示すA、
BおよびC断面に、Model I では管外面の上縁および下縁を含み中心角30° 間隔に12箇所、計36点で、Model II
では、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、TYPE I およびTYPE II につい
ては7断面 (D~J断面) で、TYPE IIIは5断面 (D~H断面) で、TYPE IVについては4断面 (D~G断面) で、
TYPE VおよびTYPE VIでは一次覆工と同位置の3断面 (D、EおよびF断面) で、各断面では一次覆工と同様
に測定を行った。図-1には、これらの測定断面を一点鎖線で示す。なお、アクリル円管の弾性係数は、幅
35mm、厚さ10mm、長さ350mmのアクリル板の引張試験と、継手を持たない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 Model I では $E_1 = 3.19 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ および Model II
では $E_1 = E_2 = 3.47 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ であった。塩化ビニル円管の弾性係数はアクリル円管と同様な実験を行って、
 $E_2 = 3.06 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ であった。

3. 解析方法

(1) 解析モデル

解析モデルは図-3に示すとおりである。一次覆工および二次覆工は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もばねで評価するものとした。

一次覆工は、アクリル部分を棒部材 (曲げ剛性 $E_1 I_1$) で、リング継手をばね部材 (せん断ばね K_{s1} および回
転ばね $K_{\theta 1}$) で評価した。二次覆工も一次覆工と同様に覆工部分を棒部材 (曲げ剛性 $E_2 I_2$) に、継目部分をば
ね部材 (せん断ばね K_{s2} および回転ばね $K_{\theta 2}$) に置換した。リング継手を評価したばね部材のばね定数、両覆

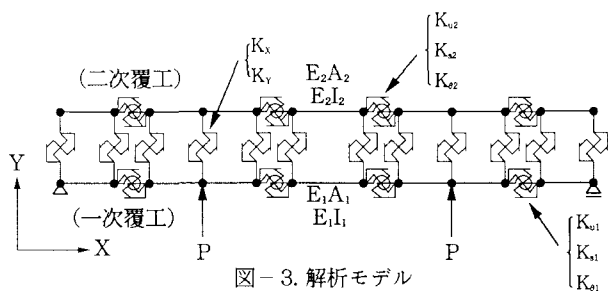


図-3. 解析モデル

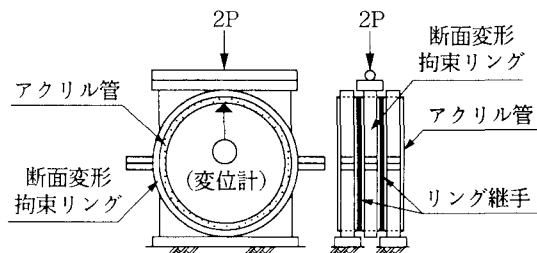


図-4. リング継手のせん断試験概要

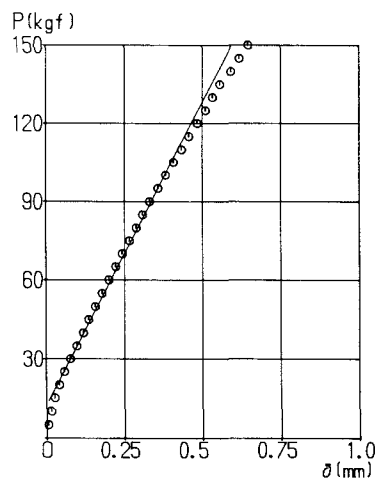


図-5. リング継手のせん断試験結果

工間の相互作用を評価するばねのばね定数 K_y および二次覆工の継目部分のばね定数は以下に示す方法により定めた。

(2) リング継手を評価するばねのばね定数

a) せん断ばねのばね定数 K_{s1}

リング継手を評価するばねのせん断ばね定数 K_{s1} は、図-4に示すリング継手のせん断試験により求めた。その概要は以下のとおりである。

幅30mmのアクリル円管3体の間に天然ゴム円管を接着し試験体を作成した。アクリル円管3体には、それぞれ断面変形拘束リングを装着し、支点および載荷点とした。支点は曲げモーメントによる回転が生じないように固定し、中央リングに鉛直荷重を作用させ、載荷リングの鉛直変位量を測定した。図-5は Model I に対するせん断試験における荷重と中央リングの変位量との関係を示した代表例である。図より、求めたせん断ばねのばね定数は、 $K_{s1} = 2.24 \times 10^3 \text{ kgf/cm}$ であった。また、同様の試験による Model II の場合のせん断ばね定数は、 $K_{s1} = 1.28 \times 10^3 \text{ kgf/cm}$ であった。この相違は、使用した天然ゴムシートの材質の相違によるものである。

b) 回転ばねのばね定数 $K_{\theta 1}$

リング継手を評価するばねの回転ばね定数 $K_{\theta 1}$ は、天然ゴムシートの弾性係数を用いて求めたばね定数 $K_{\theta 11}$ と図-8に示す試験（以下リング継手の曲げ試験と呼ぶ）から求めたばね定数 $K_{\theta 12}$ がほぼ同じ値となったため平均した値を採用した。

①天然ゴムシートの弾性係数を用いて求めた回転ばねのばね定数 $K_{\theta 11}$

アクリル円管に接着されたゴム継手に純曲げが作用するとアクリル円管の剛性はゴム管の剛性より高いのでゴムの断面は図-6に示す変形状態となると考えられる。したがって、回転ばねのばね定数 $K_{\theta 11}$ はゴムの弾性係数 E_g を用いて次式で示される。

$$K_{\theta 11} = \frac{E_g \cdot I_g}{\ell_g} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 I_g はゴム断面の断面二次モーメント、 ℓ_g は天然ゴムシートの厚さである。

なお、天然ゴムシートの弾性係数 E_g は、2体のアクリル円管の間にゴムを接着し、軸方向圧縮試験を行い

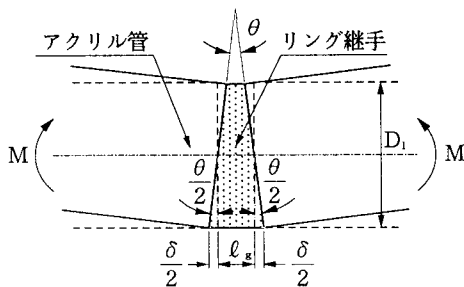


図-6. リング継手の変形状態

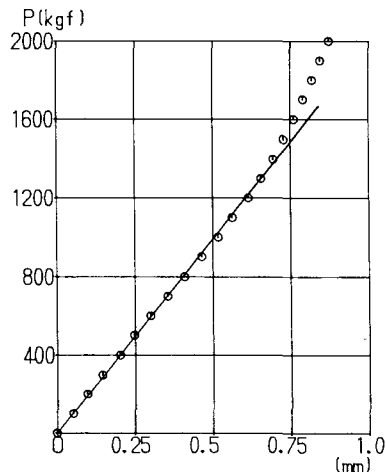


図-7. リング継手の圧縮試験結果

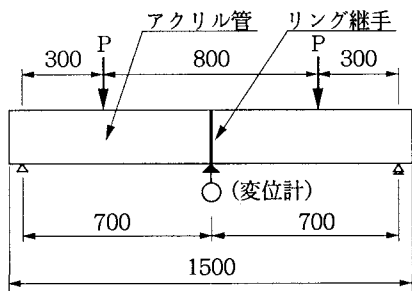


図-8. リング継手の曲げ試験概要 [単位: mm]

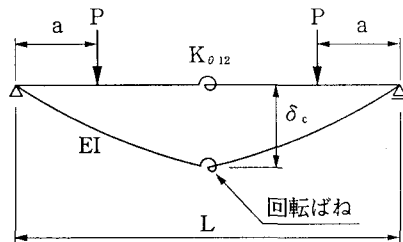


図-9. 回転ばねを有する梁の変形

求めた。図-7は、Model Iにおけるゴム断面に作用した圧縮力とゴムの変形量との関係を示した荷重変形図の一例である。この試験よりリング継手の弾性係数は $E_g = 1.62 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ であった。したがって、回転ばねのばね定数 $K_{\theta 11}$ は、式(1)より $K_{\theta 11} = 8.77 \times 10^3 \text{ kgf} \cdot \text{cm/rad}$ であった。

②リング継手の曲げ試験から求めた回転ばねのばね定数 $K_{\theta 12}$

図-8はリング継手の曲げ試験概要図である。2本のアクリル円管の間にリング継手としての天然ゴム円管を接着し、リング継手に純曲げを作用させたときの支間中央点下縁の変位を測定した。図-9に示すように、梁の中央に回転ばね(回転ばね定数 $K_{\theta 12}$)を有する単純梁に両支点から a 離れた点に対称2点集中荷重 $2P$ を作用させた場合の回転ばね定数 $K_{\theta 12}$ と支間中央点の変位 δ_c との関係は、梁の曲げ剛性を EI 、支間距離を L とすると、

$$K_{\theta 12} = \frac{6EI \cdot PaL}{24EI \cdot \delta_c - Pa(3L^2 - 4a^2)} \dots \dots \dots (2)$$

となる。Model Iでは、 $P = 25 \text{ kgf}$ のときの支間中央点の変位 δ_c は、 $\delta_c = 0.471 \text{ mm}$ であったので、式(2)より回転ばねのばね定数 $K_{\theta 12}$ は $K_{\theta 12} = 9.69 \times 10^3 \text{ kgf} \cdot \text{cm/rad}$ であった。以上の結果から、Model Iにおける回転ばねのばね定数は両者を平均して、 $K_{\theta 1} = 9.23 \times 10^3 \text{ kgf} \cdot \text{cm/rad}$ とした。また、同様の試験によりModel IIでは、リング継手の回転ばねのばね定数は $K_{\theta 1} = 7.66 \times 10^3 \text{ kgf} \cdot \text{cm/rad}$ とした。

図-10は、Model Iにおける一次覆工模型のみの曲げ実験結果である。実験方法は図-1に示す方法と同様である。実験結果は荷重と鉛直変位との関係を荷重の代表値 $P = 25 \text{ kgf}$ に対して整理した。図中、丸印は実験値を、実線は図-3に示す解析モデルの一次覆工部分を用いて上述のばね定数の値を代入し計算した解析値を示す。実線が支点と荷重点との間のリング継手の位置で不連続になっているのは、リング継手のせん断変

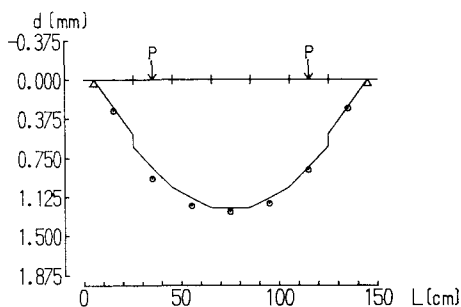


図-10. 一次覆工模型の曲げ実験結果

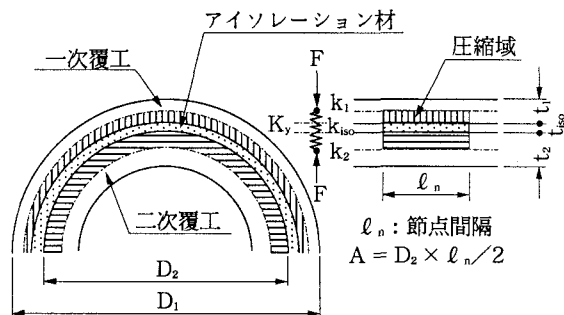


図-11. 覆工間ばねの圧縮域

形の影響である。実験値は解析値と良く符合している。以上のことより、リング継手を評価するばね部材の各種ばね定数の定め方は概ね妥当であるといえる。

(3) 覆工間ばねのばね定数 K_y

二次覆工が直打ちされた場合のトンネル模型の曲げ実験では、一次覆工と二次覆工との軸線間の圧縮変形を考慮した覆工間ばねを用いることによりその挙動を明らかにすることができた⁹⁾。したがって、アイソレーション材が覆工間にある場合にも同様の考え方にしたがってそのばね定数を定めるものとする。

アイソレーション材が覆工間にあるシールドトンネルがトンネル軸方向に曲げを受けると、両覆工の軸方向圧縮域およびそれらにはさまれたアイソレーション材は、覆工の厚さ方向にも互いに圧縮される。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1¹⁰⁾とし、アイソレーション材の厚さを t_{iso} とすると図-11よりそれぞれの半径方向のばね定数 k_1 、 k_2 および k_{iso} は、

$$k_1 = \frac{2E_1 \cdot A}{t_1}, \quad k_2 = \frac{2E_2 \cdot A}{t_2}, \quad k_{iso} = \frac{E_{iso} \cdot A}{t_{iso}} \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここで、 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、 E_{iso} は荷重方向と直角な方向を拘束した状態での圧縮試験によるアイソレーション材の弾性係数を表す。また、 A は図-3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、覆工間ばね定数 K_y はこれらのばねを直列につないだものと考えて次式のようになる。

$$K_y = \frac{k_1 \cdot k_{iso} \cdot k_2}{k_1 k_{iso} + k_{iso} k_2 + k_2 k_1} \dots\dots\dots (4)$$

なお、用いた細砂の比重は $G_s = 2.62$ 、密度は $\gamma_s = 1.44 \text{ gf/cm}^3$ 、間隙比は $e = 0.82$ 、弾性係数は $E_{iso} = 108 \text{ kgf/cm}^2$ であった。また、シリコンゴムの弾性係数は、 $E_{iso} = 413 \text{ kgf/cm}^2$ であった。

(4) 二次覆工継目のばね定数

二次覆工の継目部分に曲げモーメントが作用すると、シールドトンネル模型は図-12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 $K_{\theta 2}$ 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ることができる。

まず、すでに明らかにされているシールドトンネル2リング分の立体構造モデル⁸⁾の先端に曲げモーメントが作用した場合のリング継手部の挙動が、(2)節で定めた棒-ばねモデルのリング継手部の挙動と同様になるように、立体構造モデルのリング継手部一箇所当りの軸ばね定数 k_{u1} を定める。ここで、実際のシールドトンネルの挙動を解析する際には、軸ばねに圧縮力が作用する場合のばね定数は無限大と考えるが、本実験ではリング継手にゴムを用いたため、軸ばねのばね定数はゴムの弾性係数を用いて計算した値を採用する。次に、図-13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た時の載荷断面の中心位置の鉛直変位 δ_1 および δ_2 を求める。ここで、二次覆工の継目部分の軸ばね定数 k_{u2} は、圧縮に対しては無限大

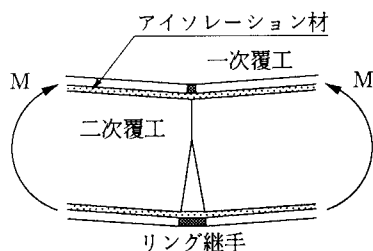


図-12. 二次覆工継目の変形状態

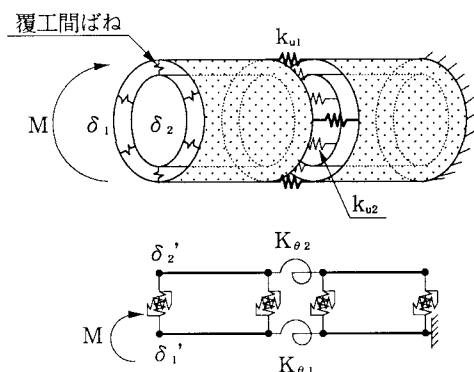
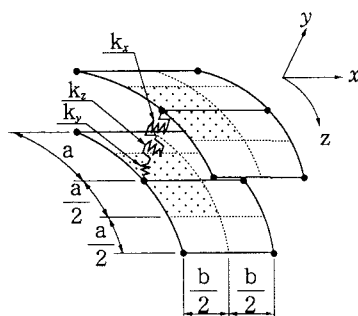


図-13. シールドトンネル2リング分の
立体構造モデルと並列梁モデル



a : 二次覆工シェル要素のy方向の長さ

b : 二次覆工シェル要素のx方向の長さ

$$A = a \times \frac{b}{2}$$

図-14. 立体構造モデルにおけるシェル要素

とし、引張に対しては零とする。最後に、シールドトンネル2リング分の並列梁モデルにおいて、両覆工の荷重点の鉛直変位 δ_1' および δ_2' が δ_1 および δ_2 と等しくなるように回転ばね定数 $K_{\theta 2}$ を定める。立体モデルにおける覆工間のばねは、図-14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を射影面積とし、両覆工の厚さの2分の1の変形領域とアイソレーション材の厚さの変形領域をもつ圧縮ばね k_y (y方向) またはせん断ばね k_x および k_z (xおよびz方向) として、(3)節に示す方法と同様の方法により求める。なお、二次覆工継目の変形状態が図-12のようであると考えられ圧縮域ではせん断変形が起りにくいことと鉛直変位の実験結果(図-17～20)から実験値が滑らかに変化しているため、二次覆工継目部分のせん断ばね定数 K_{s2} は無限大とした。

4. 実験結果とその考察

実験結果は、荷重と鉛直変位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 $P = 25\text{kgf}$ に対して整理した。

(1) 鉛直変位

図-15～20は、6種類の実験のアクリル円管(一次覆工)の鉛直変位図である。図中、丸印は図-1に示す変位計測位置での実験値を、実線は図-3に示す解析モデルを用いた解析値を示す。図-15および図-16は、TYPE I およびTYPE II の変位図である。実験値と解析値とは良く符合している。図-17～19は、TYPE III、TYPE IV およびTYPE V の変位図である。実験値は解析値よりもやや大きな値を示しているもののその傾向は概ね符合している。図-20はTYPE VI の変位図である。実験値と解析値とは概ね符合している。図-21は、Model I の5種類の実験における純曲げ区間の曲げモーメント M と支間中央点の変位 d との関係を示したものである。図から明らかのように、二次覆工に継目を設けることでトンネルの変形は継目がないものに比べて極端に大きくなることわかる。また、継目の数が多くなるほど変形は大きくなっている。このことは、トンネル軸方向の検討に際して考慮すべき外的要因が地盤の変位で与えられる場合が多いことを考えれば、二次覆工に

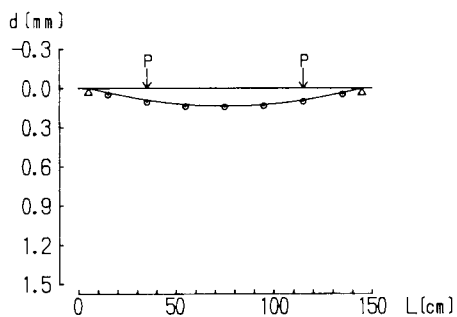


図-15. 鉛直変位図 (TYPE I)

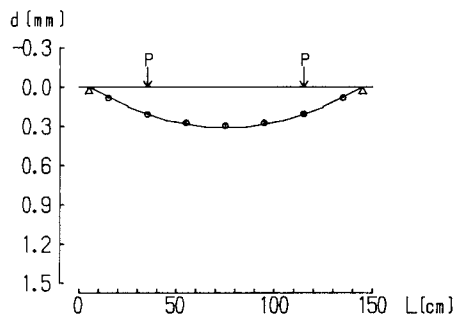


図-16. 鉛直変位図 (TYPE II)

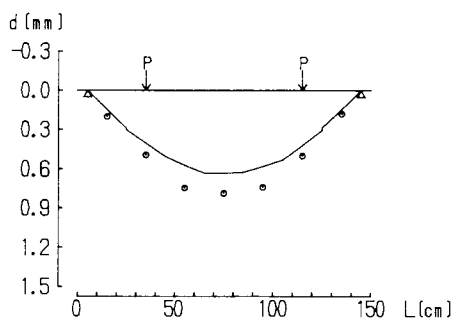


図-17. 鉛直変位図 (TYPE III)

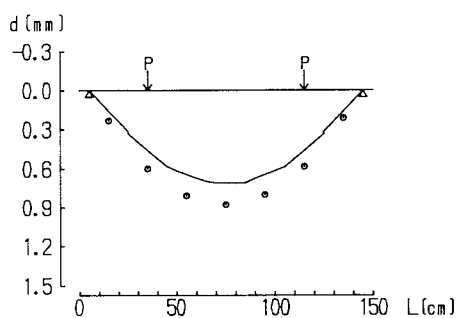


図-18. 鉛直変位図 (TYPE IV)

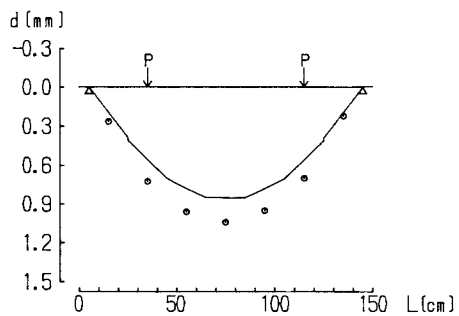


図-19. 鉛直変位図 (TYPE V)

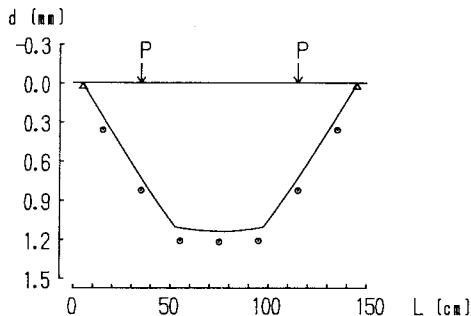


図-20. 鉛直変位図 (TYPE VI)

継目を多く設けるほど、トンネルは地盤変位に追随しやすくトンネルに発生する曲げモーメントを低減できる可能性を示している。

(2) 曲げひずみ

図-22~27は、各実験の一次覆工と二次覆工の曲げひずみ分布図の代表例である。これらの図に示した断面は、図-1に示す一次覆工と二次覆工それぞれのひずみ計測断面を表し、丸印は実験値、実線は解析値を示す。解析値は、図-3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-22はTYPE Iのひずみ分布図である。実験値のひずみ分布はアクリル円管も塩化ビニル円管も直線的であり、解析値と良く符合し

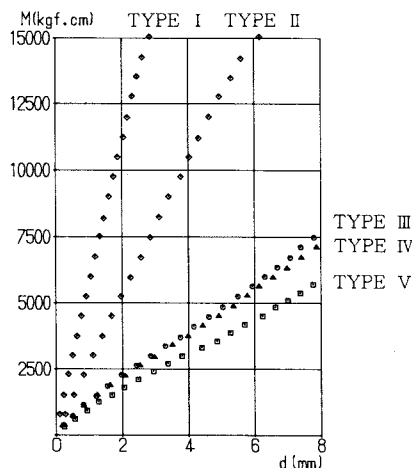


図-21. 曲げモーメントと支間中央点の変位との関係 (Model I)

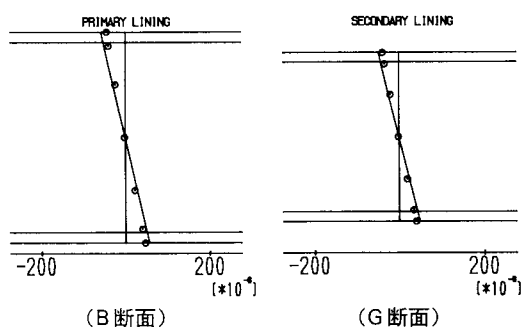


図-22. 曲げひずみ分布図 (TYPE I)

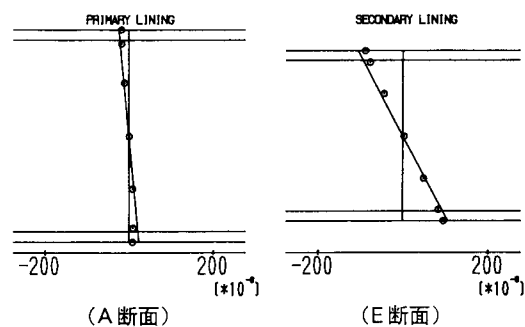


図-23. 曲げひずみ分布図 (TYPE II)

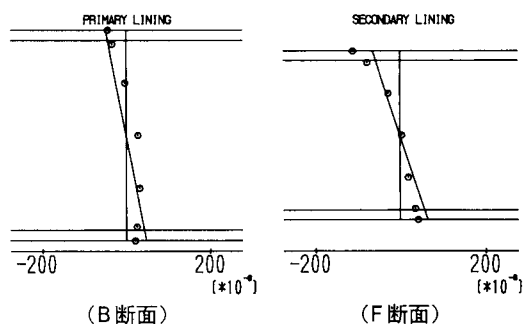


図-24. 曲げひずみ分布図 (TYPE III)

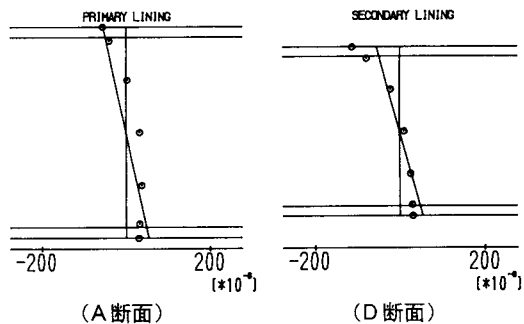


図-25. 曲げひずみ分布図 (TYPE IV)

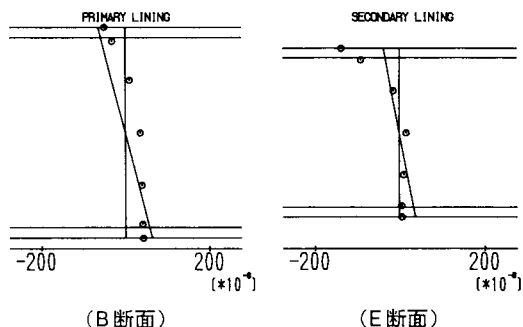


図-26. 曲げひずみ分布図 (TYPE V)

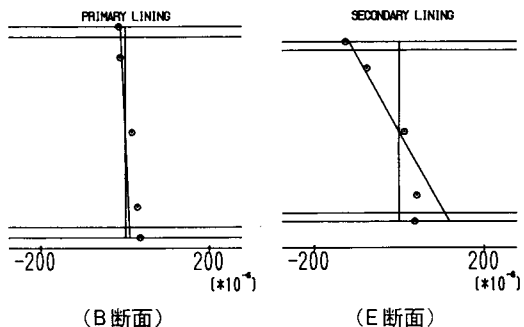


図-27. 曲げひずみ分布図 (TYPE VI)

ている。図-23はTYPE IIのひずみ分布図である。実験値と解析値は良く符合している。また、TYPE Iに比べ、一次覆工の曲げ剛性が小さいため二次覆工が負担する曲げモーメントの割合が大きくなっている。図-24～27は、TYPE III、IV、VおよびVIのひずみ分布図である。一次覆工および二次覆工におけるひずみの実験値は直線分布ではないがその傾向は解析値と概ね符合している。これらのことは、二次覆工として用いた管の継目の変形が図-12に示すような状態になっており部分的に応力集中が発生しているためと、アイソレーション材をはさんでいるので一次覆工と二次覆工とが重ね構造的に挙動しているためと考えられる。

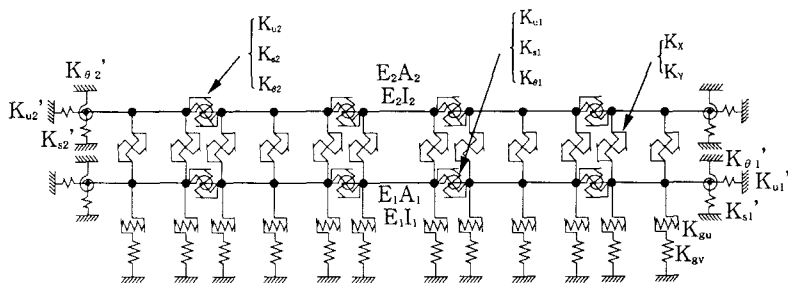


図-28. 実トンネルへ適用する場合の解析モデル

以上、アイソレーション材が覆工間にあるシールドトンネル模型の曲げ実験で得られた要点を列挙すれば以下の通りである。

- ① 模型の変形については、実験値と解析値とが概ね符合し、提示した解析モデルを用いてアイソレーション材が覆工間にあるシールドトンネル模型の挙動を明らかにすることができたものと考えられる。
- ② 曲げひずみ分布については、二次覆工に継目がある場合に部分的に応力集中が発生し、また、アイソレーション材の存在により両覆工が重ね構造的に挙動しているため、ひずみの実験値は直線分布とはならないが、その傾向は解析値と概ね符合したため、解析モデルの妥当性が確認できたものとする。
- ③ 変形状態が同じ場合には、二次覆工に適切な間隔で継目を設けることにより両覆工が負担する最大曲げモーメントの低減が可能である。

②曲げひずみ分布については、二次覆工に継目がある場合に部分的に応力集中が発生し、また、アイソレーション材の存在により両覆工が重ね構造的に挙動しているため、ひずみの実験値は直線分布とはならないが、その傾向は解析値と概ね符合したため、解析モデルの妥当性が確認できたものとする。

③変形状態が同じ場合には、二次覆工に適当な間隔で継目を設けることにより両覆工が負担する最大曲げモーメントの低減が可能である。

5. 模型実験結果の実トンネルへの適用

覆工間にアイソレーション材を用いた地上におけるシールドトンネル模型の実験結果を実トンネルに適用するにあたって、図-3に示す解析モデルを拡張して図-28に示す解析モデルを考えている。図中 K_{su} および K_{sv} は地盤ばねで、 K_{su} はトンネル軸方向の、 K_{sv} はトンネル軸に直交する方向の地盤の抵抗を示すばねである⁸⁾。また、 K_{u1} 、 K_{s1} および $K_{\theta 1}$ ⁸⁾と K_{u2} 、 K_{s2} および $K_{\theta 2}$ は立坑との接合部の剛性を評価したばねである。この解析モデルの節点に荷重を作用させるかあるいは地盤ばねの先端に強制変位を与えることによりトンネル縦断方向の検討を行うことができると考えている。なお、本研究は、模型の弾性範囲内における挙動について言及したものであるので、文献8)における継手板が離間していない状態について検討したものと考えている。実際のトンネルについて検討する場合には、解析モデルの一次覆工の継手部分のばね定数(K_{u1} 、 K_{s1} および $K_{\theta 1}$)は、その変形状態に応じて、ボルト位置で継手板が離間していない状態および離間した後の状態の2つの状態のいずれかが用いられると考えている。

上述の考え方を鉄道単線断面シールドトンネルの耐震検討に適用したところ、構造体としてのアイソレーション材の効果はそれほど顕著には現れなかった¹⁾。これは、本論文の中で述べられている式(3)および式(4)の覆工間ばねの考え方に基づけば、現在のところ、実際に用いられているアイソレーション材が薄く、弾性係数が大きいためであると考えられる。アイソレーション材に防水の役割ばかりでなく、構造体としての役割も期待するとすれば、アイソレーション材を厚くし弾性係数の小さなものを用いることが有効であると考えられる。さらに、アイソレーション材として一樣厚さのシートを用いる代りに、アイソレーション材自身が容易に変形できる構造(たとえばコルゲート形状のシート)にすることも有効な方法であると考えられる。

6. おわりに

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模型の地上における弾性的挙動は、両覆工を2本の並列した梁-ばねモデルに置換し、アイソレーション材を含めた両覆工間の相互作用をばねで評価する解析モデルを用いて把握することができた。

なお、二次覆工の継目は完全なヒンジとはならず、ある程度曲げモーメントに対して抵抗するが、継目を多く設けることにより二次覆工がフレキシブルになるため地盤の急変部や立坑との取付け部において地盤の変動に追従することが可能となり、継目が少ない場合より断面力を軽減できることが明らかになった。

筆者らは、二次覆工が直打ちされた場合の実験も行い⁹⁾ 本研究に示した考え方と同様な解析方法でその挙動を検討しており、今後、アイソレーション材の効果も含めてさらに研究を進めて行きたいと考えている。また、本文では、地上における実験により構造モデルの妥当性について考察を行ったが、土中における実験も行い¹²⁾ 地盤との相互作用も含め二次覆工されたシールドトンネルの挙動について検討中である。最後に、本研究を行うにあたり実験およびデータ整理等に協力して頂いた村上研究室の卒業生および大学院生に感謝する次第です。

参考文献

- 1) 千野 彰・荻野幸男・堀川洋一郎：防水シートを用いたシールドトンネルの2次覆工、トンネルと地下、Vol. 20、No. 4、pp. 49～55、1989年4月。
- 2) 水野光晴：コンクリートパネルを用いたシールドトンネルの二次覆工、日本鉄道施設協会誌、Vol. 28、No. 4、pp. 60～65、1990年4月。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 高松伸行・村上博智・蔵品 稔・小泉 淳・赤石沢総光：二次覆工されたシールドトンネルの軸方向挙動について（その2）、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-21、pp. 78～79、1990年9月。
- 7) 蔵品 稔・村上博智・小泉 淳・赤石沢総光・高松伸行：二次覆工されたシールドトンネルの軸方向挙動について（その3）、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-22、pp. 80～81、1990年9月。
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 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、土木学会論文集、No. 296、pp. 73～86、1980年4月。
- 11) 高松伸行・荻野竹敏・村上博智・小泉 淳：二次覆工されたシールドトンネルの地震時における挙動について、第21回地震工学研究発表会講演概要、No. 107、pp. 409～412、1991年7月。
- 12) 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。

(1991年9月30日受付)