

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

村上博智*・小泉 淳**

本論文は二次覆工のコンクリートが耐荷能力を発揮できるようになった後に、トンネルに荷重が作用した場合を想定して、千鳥組されたセグメントリングとその内側に現場打ちされた二次覆工リングとの相互作用を実験的に検討し、これに理論的考察を加えたものである。

両覆工間にジベルを用いていないこの実験結果は両覆工を重ね構造とする構造モデルによって説明できることを明らかにしている。

Keywords : shield tunnel, segment, secondary lining

1. まえがき

セグメントを用いて構築されるシールドトンネルでは、セグメントによる一次覆工の内側に現場打ちコンクリートによる二次覆工を行う場合が多い。しかしながら、シールドトンネルに作用すると想定される最終的な荷重状態に対して一次覆工であるセグメントリングを設計し、二次覆工はトンネルの蛇行修正、防水、セグメントの防食および仕上げ工などの目的で用いられているのが一般的である。

トンネルに作用する荷重の最終状態に至るまでの経時変化が必ずしも明確でない現状では、設計に対する上述の考え方は合理的と思われるが、二次覆工のコンクリートリングが耐荷能力を発揮できるようになった後に、新たに荷重が累加されたり、除去されたり、トンネル内を圧力水が流れたり、またトンネルに近接して地中工事が行われる場合には、一次覆工であるセグメントリングと二次覆工であるコンクリートリングとは、協力して挙動するものと考えられる。

このような場合を対象としたシールドトンネルの挙動に関する研究は、近年になってようやく活発になってきたといえる^{1)~7)}。著者らも、セグメントリングが“いも継ぎ”に組まれた場合を対象としたこの種の研究成果を発表⁸⁾している。

本研究は二次覆工のコンクリートリングが耐荷能力を発揮できるようになった後に、トンネルに既知の荷重が作用した場合を想定して、“千鳥組”されたセグメントリングを対象として、一次覆工と二次覆工との相互作用を実験的に検討し、これに理論的考察を加えるとともにその結果を用いて二次覆工された千鳥組セグメントリン

グの設計法を提案しようとするものである。

2. 模型セグメントを用いた実験

(1) 実験の概要

図-1が実験装置の概要である。セグメントリングを想定した鋼管は、外径508mm、厚さ16mmで幅100mmである。この鋼管の外面には、幅3mmで深さ10mmの切欠きを中心角60°間隔に設けてセグメント継手を評価している。また、この鋼管にその厚さ方向の中央に内径4.5mmの円孔をうがち、外径4mmで長さ15mmの鋼製ピンを差し込んでリング継手を評価した。その配置は図-2に示すように、中心角15°間隔である。

セグメントリングを想定した鋼管を3リング千鳥組とし、その内側に厚さ60mmのモルタルを3リング分一体に打設して、二次覆工のコンクリートリングを評価した。なお、鋼管とモルタルとの間にはジベルのようなずれ止めは用いていない。

このトンネル模型を水平架台上に設置し、リングの一直径方向に集中荷重を載荷した。リングが変形する際にトンネル模型と水平架台との間の摩擦を少なくするよう、両者の間にはころを配した。

また、現実のトンネルにおける地盤反力を評価する目的で図-1に示すように、トンネル模型の外側に弾性支承用鋼管(外径101.6mm、厚さ3.2mm、幅300mm)をその中心角が30°間隔となるよう10個配置した。さらに、その外側には外径753.2mm、厚さ21mm、幅300mmの支持用鋼管を設けた。

実験に用いた千鳥組の種類は、現場における実情に照らして、2リング1サイクルのType Iと3リング1サイクルのType IIとの2種であり、それぞれ図-2に示すように千鳥組した。この図はAリング、Bリング、Cリングの半径を便宜上変えて、リングの組み方を平面上に示したもので、図中の丸印が各リングのセグメン

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

**正会員 工博 東洋大学助教授 工学部土木工学科

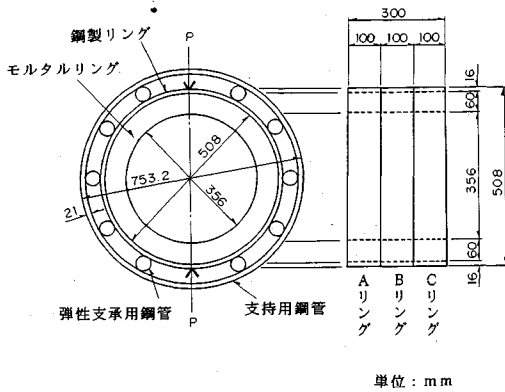
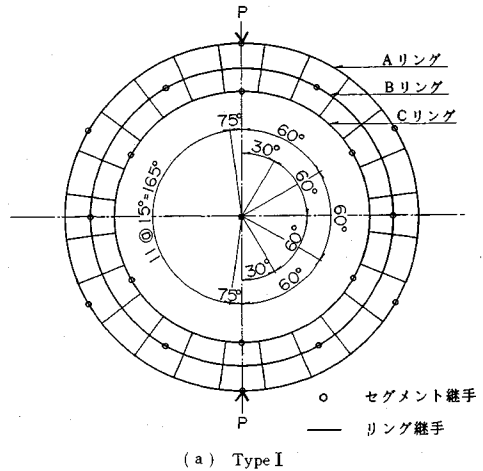
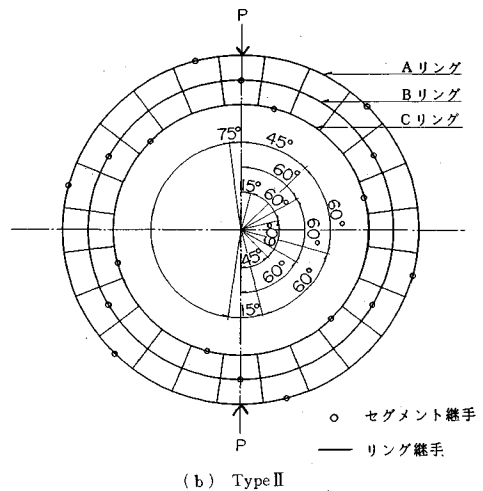


図-1 実験装置の概要



(a) Type I



(b) Type II

図-2 模型セグメントの組み方

ト継手位置を、また放射状に各リングを継ぐ直線がリング継ぎボルト位置を表している。

なお、説明の便のため三段重ねのリングは、上からA、BおよびCリングと呼ぶこととする。

実験に用いた鋼材はSS-41またはその相当品であり、二次覆工に用いたモルタルの配合は重量比で水：セメント：砂の比が1：2：5である。その材料特性は表-1に示すとおりである。

(2) 測定項目

測定項目は載荷した集中荷重の荷重方向およびこれに直交する方向の二次覆工リングの内面の直径変化量とAリング上面の12断面およびモルタルリングの上面の16断面における円周方向の表面ひずみおよび、それぞれの断面におけるリング内外側面における円周方向の表面ひずみである。

3. 実物セグメントを用いた実験

(1) 実験の概要

この実験は東京都下水道局において実施されたものである⁹⁾。

実験に用いられた実物の標準セグメントは外径5100mm、セグメント高さ200mmで幅900mmの鉄筋コンクリート平板形である。このセグメントを水平にリング(3A+2B+K)組みし、図-3に示すように、その上下に標準セグメントを二つ割りとした幅450mmのセグメントを2リング1サイクルの千鳥組に組んでセグメントリングを形成している。以降上段のリングをAリング、中央のリングをBリング、下段のリングをCリングと呼ぶ。

二次覆工のコンクリートは図-3に示すごとく、その厚さは225mmで、さらに一直径方向に厚さ425mmの隔壁を標準セグメント2リング分一体に打設して供試体を作製している。なお、セグメントリングと二次覆工の鉄筋コンクリートリングとの間にはジベルは用いていな

い。

この供試体を水平架台上に設置し、図-4に示すように隔壁に直交する直径方向の集中荷重を載荷した場合と隔壁で区切られた半月形空間の片側に等分布荷重を載荷した場合とを行っている。等分布荷重はこの半月形空間の中に反力フレームを組み、二次覆工コンクリートおよび隔壁と反力フレームとの間にゴムチューブを挿入し、チューブ内へ水を圧入することにより作用させている。

供試体の変形に際して、二次覆工されたセグメントリングと水平架台との間の摩擦をなるべく減ずるように、鋼製架台には硬質クロムメッキを施したうえで、さらにテフロンシートを敷き、その上に供試体を設置している。

セグメント継手の形状寸法は図-5に示すとおりで、継手板の材質はSS-41である。

また、セグメントおよび二次覆工に用いられたコンクリートの材料特性は表-2に示すとおりである。

表-1 モルタルの材料特性

圧縮強度	引張強度	曲げ強度	弾性係数	ポアソン比
421(41.3)	26(2.5)	67(6.6)	2.4×10^5 (2.4×10^4)	0.18

単位: kgf/cm^2 (MPa)

表-2 コンクリートの材料特性

	圧縮強度	引張強度	曲げ強度	弾性係数
セグメント	587(57.6)	51(5.0)	83(8.1)	3.7×10^5 (3.6×10^4)
二次覆工	271(26.6)	22(2.2)	32(3.1)	2.1×10^5 (2.1×10^4)

単位: kgf/cm^2 (MPa)

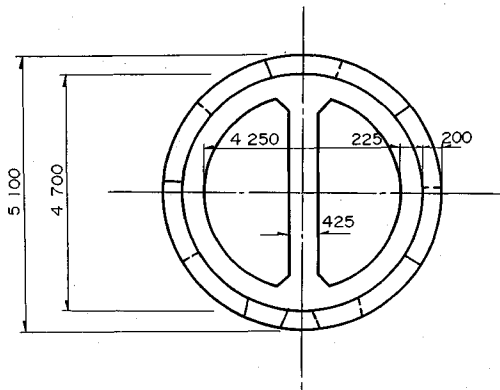
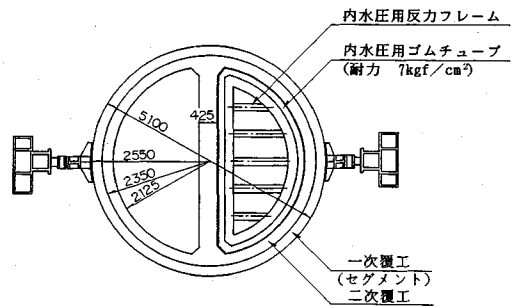
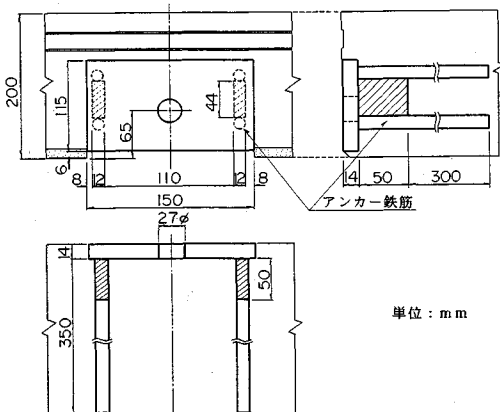


図-3 実験用リング



単位: mm

図-4 実験用リングの載荷方法



単位: mm

図-5 継手の形状寸法

(2) 測定項目

測定項目はBリングおよびCリングの中央水平断面のリング外側における半径方向変位とAリング上面および二次覆工コンクリート上面の9断面におけるコンクリートの表面ひずみである。

4. 解析モデル

“いも継ぎ”に組まれたセグメントリングに二次覆工を行った場合、両覆工間にジベルを用いなければ、両者は重ね構造として挙動する⁸⁾。その結果をふまえて、“千鳥組”されたセグメントリングに二次覆工を行った場合にも、両覆工間にジベルを用いてなければ、一次覆工のセグメントリングと二次覆工のリングは重ね構造として挙動するものと考えて、次に述べる2つの重ね構造モデルを用いて検討することとした。

(1) 等価剛性リングと剛性一様リングとの重ね構造モデル (Model I)

この解析モデルは一次覆工である千鳥組されたセグメントリングを、いわゆる慣用計算法で用いられているような、等価な剛性一様リングに置き換えて考え、これと二次覆工リングである剛性一様リングとを組み合わせた重ね構造モデルである⁸⁾。それに用いる曲げ剛性の有効率 η は、参考文献10)に基づき以下のようにして求めた。

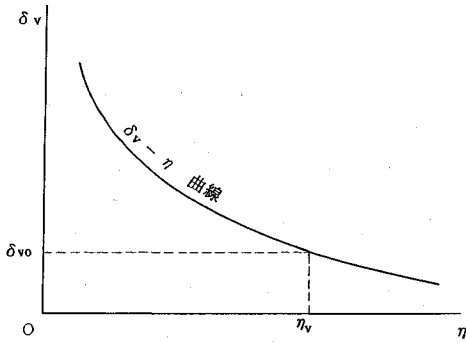


図-6 Δv - η 曲線

まず実験に用いたトンネルの支持条件のもとで千鳥組みされたセグメントリングの荷重方向直径変化量 Δv_0 を求める。次いで $\eta E_1 I_1$ ($E_1 I_1$ はセグメント単体の曲げ剛性) なる一様な曲げ剛性を有する同一条件下における同じ方向の直径変化量 Δv を、 η をパラメーターとして計算し図-6 に示す Δv - η 曲線を得る。この曲線と直線 $\Delta v = \Delta v_0$ との交点の値として η_v を求めれば、千鳥組されたセグメントリングは $\eta_v E_1 I_1$ なる一様な曲げ剛性を有するリングに置換することができる。

η_v はセグメントの継手位置と載荷位置との関係などによって多少変化することを考え、同様な方法によって荷重方向と直交する方向の直径変化量から η_h を求め、 η_v と η_h との平均値を曲げ剛性の有効率 (η) として定めれば、妥当な曲げ剛性の有効率が推定できるものと考えられる。

図-7 が Model I の解析モデルを示したものである。

図-7 (a) は二次覆工にひび割れが発生するまでの状態に対するものであり、図-7 (b) は荷重点直下にひび割れが発生した後の状態に対するものであって、ひび割れ発生位置をヒンジで表現している。

一次覆工リング ($\eta E_1 I_1$) と二次覆工リング ($E_2 I_2$) との間の相互作用は、図-7 に示すように、両リングの対応する節点間に設けた接線方向ばねと半径方向ばねとで評価している。両リングが接している面と両リングの軸線との間では、半径方向の圧縮変形や接線方向のせん断変形が生じると考えられるが、このような弾性変形は微小であると思われる。このため、半径方向で両リングがせり合う範囲では、両リングは半径方向にも接線方向にも離間せず、両者の軸線での変位差もほとんどないものと考え、それらのばね定数の値は数値計算上無限大に近い値を用いることとした。一方、両リングが離間する範囲では、これらの値を零としている。

また、地盤反力を評価するばねのばね定数は、図-1 に示した弾性支承用鋼管および支持用鋼管の剛性をもとに、これらの鋼管の予備的な実験結果を加味して求め

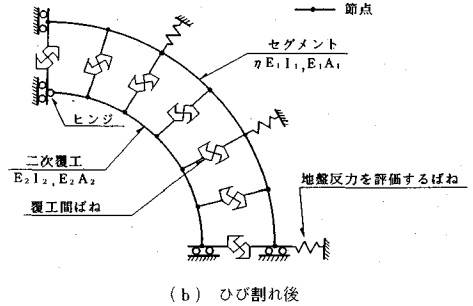
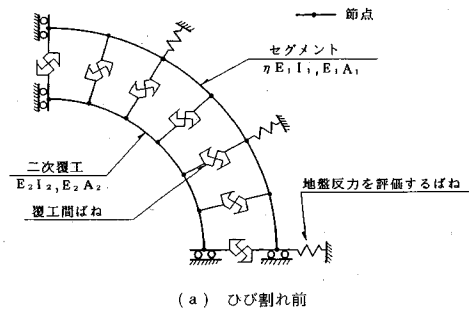


図-7 解析モデル (Model I)

た⁸⁾。その値は、 $K=1700 \text{ kgf/cm}^2$ (1.67 MN/m^2) である。なお、このばね定数は鋼製リングが内側に変位する場合には零としている。

数値計算はこれらのばねがすべての節点に付いた状態でスタートし、発生する変位に応じてばね定数を変え、構造系が収束するまで行っている。

実物セグメントを用いた実験の解析にあたっては、隔壁中心線と二次覆工リングの中心線の交点における半径方向変位は零として取り扱った。

(2) 千鳥組リングと剛性一様リングとの重ね構造リング (Model II)

この解析モデルは、一次覆工である千鳥組されたセグメントリングを、回転ばねとせん断ばねを有する円弧骨組構造モデル^{10), 11)} にモデル化し、これと二次覆工リングである剛性一様リングとを組み合わせた重ね構造モデルである。

図-8 はその概要を示した図であり、A, B および C リングはセグメントリングで、その内側に示すリングが二次覆工リングである。二次覆工にひび割れが発生した後については、図-8 に示す構造モデルの二次覆工リングのひび割れ発生位置にヒンジを設け、その影響を評価する。一方千鳥組されているリング間の継手は、リング継ぎボルト位置に付した接線方向および半径方向のせん断ばねで評価している。しかしながら、リング継ぎボルトとボルト孔との間のクリアランスおよびリング継ぎボルトのせん断変形を無視することは、セグメントの設計

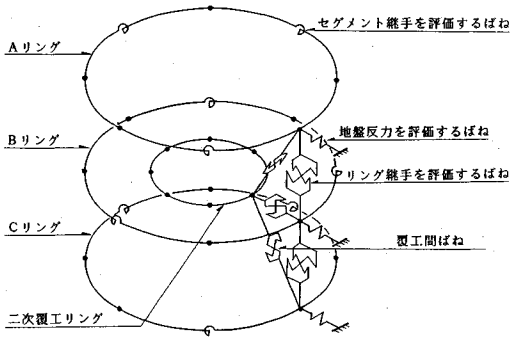


図-8 解析モデル (Model II)

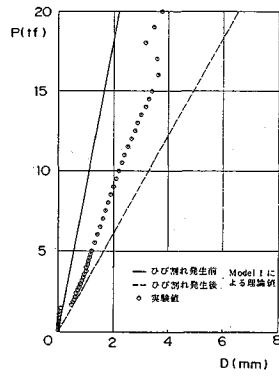


図-9 荷重とその方向の直径変化量との関係

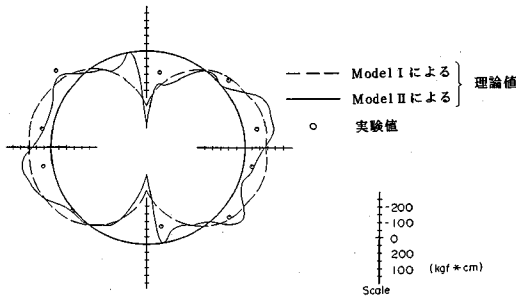


図-10 鋼製リングの曲げモーメント図 ($P=1500 \text{ kgf}$)

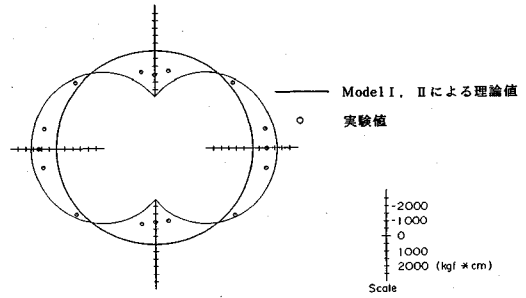


図-11 モルタルリングの曲げモーメント図 ($P=1500 \text{ kgf}$)

上安全側の考え方と思われるので、数値計算上これらのばね定数は無限大に近い値を用いることとした¹⁰⁾。

なお、セグメントリングと二次覆工リングとの相互作用を示すばねの取扱いは、Model Iにおけるものと全く同様である。

また、実物セグメントを用いた実験に対する解析においては、隔壁は、梁部材として二次覆工リングの剛性マトリックスに組み込んでいる。

5. 実験結果と解析結果との比較

(1) 模型セグメントリングを用いた実験

モルタルで二次覆工したトンネル模型の実験は、Type Iと Type IIとの2通りを行ったが、両者の挙動には根本的な差は認められなかった。そこで以下には Type IIについて、実験結果と解析結果との比較を示すこととする。

図-9は荷重と荷重方向の直径変化量との関係を示した図であり、図中の点は実験値を、また実線はひび割れ発生前の解析値を、破線はひび割れ発生後の解析値をそれぞれ表している。ひび割れは荷重 $P=1500 \text{ kgf}$ (14.71 kN)程度で、モルタルリングの荷重点の近傍において発生した。

なお、模型セグメントリングにおけるセグメント継手

表-3 曲げ剛性の有効率

Type	η_v	η_h	η
I	0.766	0.844	0.805
II	0.836	0.800	0.818

1か所当たりの回転ばね定数は、正および負の曲げモーメントに対して、ともに $K_\theta = 3.75 \times 10^5 \text{ kgf}\cdot\text{cm}/\text{rad}$ ($3.68 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{cm}/\text{rad}$)であり、Model Iにおける曲げ剛性の有効率は表-3に示すとおりである。

図-10から図-12は曲げモーメント図を示したものであり、図中の点は実験値を、また破線はModel Iによる解析値を、実線はModel IIによる解析値をそれぞれ表している。 $P=1500 \text{ kgf}$ (14.71 kN)、 $P=9000 \text{ kgf}$ (88.26 kN)というのは、ひび割れ発生前および発生後における荷重の代表値であり、得られたひずみの測定値をひび割れ発生前後で分け、それぞれ最小二乗を行ったうえで曲げモーメントを算出している。

図-10をみると、Model Iの解析値は滑らかな曲線を示すのに対して、Model IIは凹凸があり、リング継手による力のやりとりの影響がよく現れている。図-10および図-12をみると、実験結果との整合性はModel

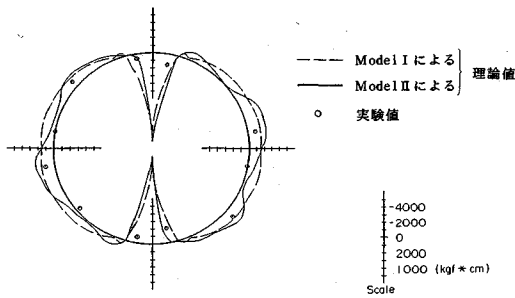


図-12 鋼製リングの曲げモーメント図 ($P=9\,000\text{ kgf}$)

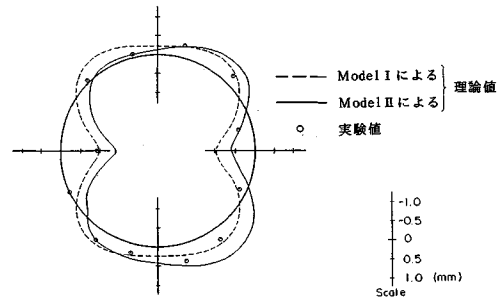


図-13 セグメントリングの変位図 ($P=40\text{ tf}$)

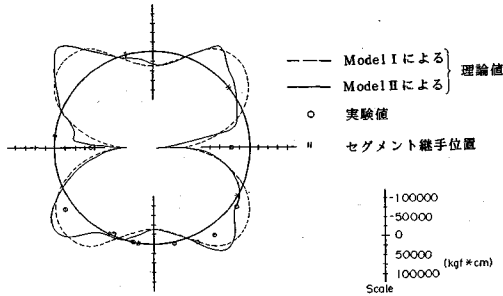


図-14 セグメントリングの曲げモーメント図 ($P=40\text{ tf}$)

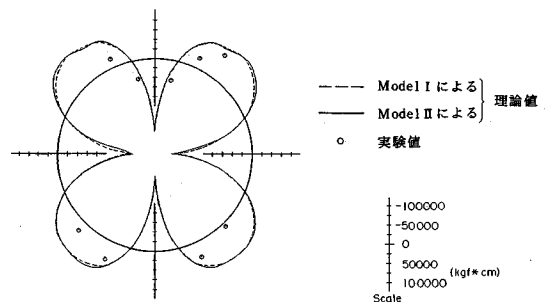


図-15 二次覆工リングの曲げモーメント図 ($P=40\text{ tf}$)

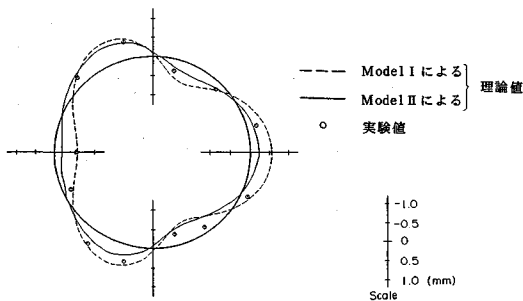


図-16 セグメントリングの変位図 ($p_w=1.0\text{ kgf/cm}^2$)

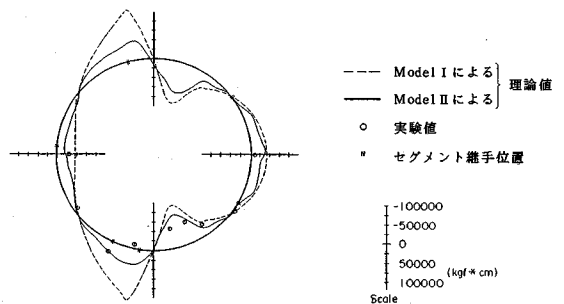


図-17 セグメントリングの曲げモーメント図 ($p_w=1.0\text{ kgf/cm}^2$)

IIの方が良さそうであるが、簡易的なモデルである Model I も、トンネル模型の平均的な挙動を表しており、ほぼ実験結果と符合していることがわかる。

なお、モルタルリングの曲げモーメント図においては両解析モデルによる差異は認められなかった。したがって、ひび割れ発生後の曲げモーメント図は省略した。

(2) 実物セグメントを用いた実験

実物セグメントのセグメント継手の回転ばね定数の理論値¹¹⁾は正の曲げに対しては $K_\theta = 2.10 \times 10^8\text{ kgf}\cdot\text{cm}/\text{rad}$ 、負の曲げに対しては $K_\theta = 4.72 \times 10^7\text{ kgf}\cdot\text{cm}/\text{rad}$ であり、解析にあたって Model I を適用する場合の曲げ剛性の有効率は $\eta = 0.804$ であった。

集中荷重を載荷した場合は荷重 $P=80\text{ tf}$ (784.54 kN) まで載荷を行っているが、荷重 $P=40\text{ tf}$ (392.27 kN) までは荷重と変形および曲げモーメントはほぼ比例関係

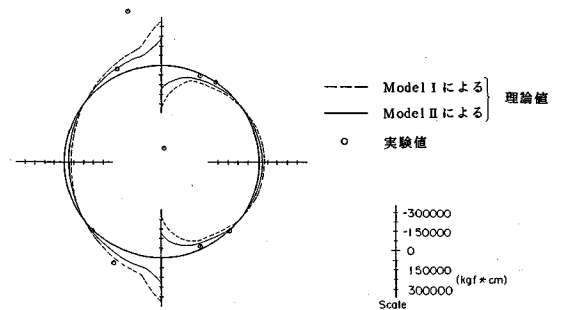


図-18 二次覆工リングの曲げモーメント図 ($p_w=1.0\text{ kgf/cm}^2$)

にあるため、最小二乗法を用いて荷重 $P=40\text{ tf}$ (392.27 kN) を代表値として結果を整理した。また分布荷重を載荷した場合は、隔壁の破壊(水圧 $p_w=3.3\text{ kgf/cm}^2$ (3.23 MPa)) まで載荷を行っているが、供試体の弾性範囲を

考慮したうえで同様に、水圧 $p_w = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ (0.98 MPa) を代表値として整理を行った。

図-13は集中荷重 $P=40 \text{ tf}$ に対するセグメントリングの変位図である。破線は Model I による解析値であり、実線は Model II による解析値である。解析的には荷重に直交する直径方向で二次覆工リングの半径方向変位を拘束しているため、この点ではセグメントリングは外側に変位して、両リングは離間していることを示している。

図-14はAリングの曲げモーメント図であり、図-15は二次覆工リングの曲げモーメント図である。

図-16から18は分布荷重 $p_w = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ に対する同様の図である。

(3) ま と め

以上、二次覆工された千鳥組みセグメントリングの挙動を模型セグメントおよび実物セグメントを用いて実験的に把握し、それらの実験結果を説明する構造モデルとして、Model I と Model II との2つの方法を提案した。その相違は千鳥組されたセグメントリングの取扱い方であって、Model I は等価な剛性をもつ一つのリングに置換する方法であり、Model II は千鳥組みの状況を忠実に表現したものである。セグメントリングと二次覆工との相互作用の取扱いについては両者間で異なることはない。

Model I と Model II との特徴的な相違は、たとえば図-14および図-17に示されているように、当然のことながら、Model II による解析値の方がセグメント継手の存在をより忠実に表現していることである。二次覆工リングの曲げモーメント図においては両者の差異はほとんど認められない。

しかしながら巨視的にみれば、いずれの構造モデルを用いても解析値は実験値を良く説明しているといえる。

6. 結 論

著者らは、千鳥組されたセグメントリングに重ね構造となるようジベルを用いずに二次覆工を行ったトンネル模型を用いて、二次覆工が耐荷能力を発揮できるようになった後の挙動を実験的に明らかにし、その結果を説明する解析モデルを提案した。

このモデルは、覆工間にジベルを用いない場合の現実のシールドトンネルにおいて、二次覆工コンクリートが

耐荷能力を発揮できるようになった後に荷重が累加されたり、除去された場合などに対するトンネルの設計に適用できると考えている。

数例であるが、すでにこれら2つの方法は現実のトンネルの試算に用いられている。

なお現在、覆工間にジベル効果が期待できる場合における同様な問題についても研究中である。

おわりにあたり、実験資料の一部を提供して下さった東京都下水道局の各位にお礼を申し上げます。

また、本論文をまとめるにあたって、その一部を修論や卒論として助力願った多くの卒業生に感謝する次第です。

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，鉄道技術研究所報告，No.1303，1985.
- 2) 村上・小泉ほか：二次覆工で補強されたシールドトンネルの挙動について，土木学会講演概要集，pp.845～846，1986；pp.626～627，1987；pp.878～879，1988；pp.164～165，1989.
- 3) 岡村光政：二次覆工を考慮したシールドトンネルの解析手法について，土木学会講演概要集，pp.608～609，1987.
- 4) 大田・山本・海保ほか：二次覆工と一体化鋼製セグメントの開発に伴う実験について，土木学会講演概要集，pp.461～462，1988.
- 5) 村上・小泉ほか：インパートを有する二次覆工で補強されたシールドトンネルの挙動について，土木学会講演概要集，pp.980～981，1988.
- 6) 大田・石田・海保ほか：二次覆工との一体化鋼製セグメントの解析モデルについて，土木学会講演概要集，pp.160～161，1989.
- 7) 大田・石田・海保ほか：二次覆工との一体化鋼製セグメントの継手部強度について，土木学会講演概要集，pp.162～163，1989.
- 8) 村上・小泉：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，1987.
- 9) 沼沢一馬：隔壁を有する大口径複断面管渠の実験，トンネルと地下，Vol.18，No.10，1987.
- 10) 村上・小泉：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.
- 11) 村上・小泉：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，第296号，1980.

(1990.10.15受付)

BEHAVIOR ON STAGGERED SEGMENT RING REINFORCED BY SECONDARY LINING

Hiroto MURAKAMI and Atsushi KOIZUMI

The subject of this paper is an experimental investigation and theoretical consideration of the interaction between a segment ring assembled with staggered joints and a corresponding secondary lining ring with it.

Two types of experiment were conducted. In the first, a staggered joint circular model was evaluated using a segment designed with notches. A mortar secondary lining ring was manufactured and placed inside, elastically supported by the surrounding material. A concentrated load was applied in a radial direction.

In the second experiment, an actual flat-type staggered joint concrete segment has been manufactured with a model reinforced concrete secondary lining containing a bulkhead across the inner diameter. Various methods of applying loads were used.

Since shear studs were not used in the linings in either experiment, the lining rings explain the experiment results through a structural model based on the properties of overlapping structures.
