

# トンネル覆工の力学挙動に関する基礎的研究

朝倉俊弘\*・小島芳之\*\*・安東豊弘\*\*\*・  
佐藤 豊\*\*\*\*・松浦章夫\*\*\*\*\*

変状対策や近接施工におけるトンネル覆工の力学的健全度評価法を確立することを目的として、覆工模型実験及び骨組解析によるシミュレーションを行った。地盤と覆工の相互作用が表現でき、3次元実験が簡易に行える実験装置を開発し、これにより種々の比較実験を行った。本論文では、各種のパラメータがトンネル覆工の変形挙動に与える影響について述べる。

**Key Words:** tunnel lining, tunnel model test, ground-structure interaction, earth pressure, crack

## 1. はじめに

120年の歴史を有する我が国の鉄道においては、戦前に建設されたトンネルも多く、老朽化が進み、中には供用後変状が生じて対策を要するトンネルも少なくない。このような変状トンネルの維持管理は、鉄道事業者にとって非常に重要な課題である。

また、近年土地の高度利用化に伴い、これまで例のなかったような大規模な、あるいは非常に接近した、既設トンネルへの近接工事が急増している。

このような状況の中、変状対策工を設計する際、あるいは近接工事の影響評価を行う場合に、対象となる既設トンネル覆工の力学的健全度を的確に評価することは非常に重要である。しかしながら、現状では、覆工の健全度評価法は確立されておらず、特にひび割れの生じた覆工の挙動評価は技術的に困難であり、研究事例もほとんどないため、結局経験の豊富な専門家の経験的判断に頼らざるを得ないことが多い。

このような状況に鑑み、トンネル覆工の力学的健全度評価法を確立することが、本研究の最終目標であり、その過程として、各種の土圧及びトンネル覆工の構造要因が、覆工の変形挙動特性に与える影響を明らかにすることが本論文の目的である。

研究は、模型実験と骨組解析を用いた数値解析を行っている。トンネル覆工の模型実験については、例えば斉藤ら<sup>1)</sup>が約1/4模型で、H型支保工の効果、巻厚の効果、

空隙の存在の影響等について成果を得ている。また、今田ら<sup>2)</sup>は1/2模型で覆工の耐力、鉄筋効果、二重巻き覆工、ブロック覆工、鉄筋効果等について成果を得ている。

これまでの模型実験はいずれも大型の実験であり、また2次元的な実験であったが、覆工と周辺地盤の相互作用が考慮でき、3次元実験も可能な小型のトンネル覆工模型実験装置を開発した。

本論文は、実験装置の概要を紹介するとともに、土圧及び覆工構造をパラメータとした基礎的な2次元の比較実験の結果について述べる。また、実験結果の骨組解析によるシミュレーション及び若干のパラメトリック解析結果について述べることにより、各種要因のトンネル覆工の変形挙動特性に与える影響について報告する。

## 2. 模型実験

### (1) 実験装置

トンネル覆工の模型実験は、地盤を介して荷重を覆工供試体(以下、供試体という)に作用させる間接載荷実験と供試体に直接載荷する直接載荷実験に大別できる。筆者らは、①トンネル周辺地盤との相互作用、②ひび割れの進展が表現でき、作用土圧に対して供試体が直接的に応答し、解析方法が比較的簡便である骨組解析をイメージした実験装置で、かつ、③3次元的な覆工挙動も表現できる実験装置を開発した。

模型実験装置は、写真-1、図-1に示す新幹線複線トンネルの標準断面を想定した縮尺1/30の装置<sup>3)</sup>と写真-2、図-2に示す在来線鉄道トンネルの単線1号型断面を想定した縮尺1/20の装置<sup>4)</sup>を製作した。両装置とも前述の①~③の3項目が表現でき、かつ、土圧の作用位置、覆工構造、地盤の剛性等をパラメータとすることのできる機能を有しており、載荷板で供試体を直接押し込む変位制御方式の実験装置である。供試体は、供試

\* 正会員 工修 (財) 鉄道総合技術研究所 トンネル研究室 主任研究員 (〒185 東京都国分寺市光町 2-8-38)

\*\* 正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 トンネル研究室 研究係長

\*\*\* 正会員 東日本旅客鉄道(株) 秋田支社 工務部施設課 主席

\*\*\*\* 正会員 工修 (財) 鉄道総合技術研究所 (JR 東日本 向中)

\*\*\*\*\* 正会員 工博 金沢工業大学 土木工学科 教授



表-1 実験ケース

No	断面	地盤ばね	不連続面	載荷位置	脚部拘束条件	背面空洞		
1	複線	円筒形ゴム	無 (順巻)	鉛直 [⑥]	可動(1/ハ-ト無)	無		
2				斜め [⑥]				
3				横片側 [⑥]				
4				横 両 側	固定(1/ハ-ト有)			
5				[②、⑩]				
6				可動(1/ハ-ト無)	有 [⑥]			
7	単線	皿 ば ね	無 (順巻)	鉛直 [⑥]	可動(1/ハ-ト無)	無		
8				斜め [⑥]				
9				横片側 [⑥]				
10				横 両 側	固定(1/ハ-ト有)			
11				[②、⑩]				
12				可動(1/ハ-ト無)	有 [⑥]			
13				有 (逆巻)	鉛直 [⑥]		可動(1/ハ-ト無)	無
14					斜め [⑥]			
15					横片側 [⑥]			

【注1】 下図に示すように、[ ] 内は載荷位置を示す。

【注2】 不連続面は、S.L (スプリングライン) 部とする。

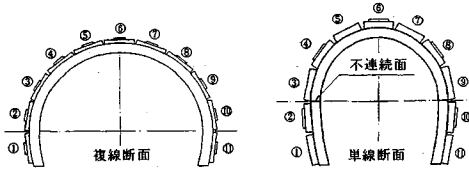


表-2 実験材料の物性

種 別	実験材料	材 料 物 性
覆工供試体	モルタル	複線 一軸圧縮強度 $\sigma_c = 21 \text{MPa}$ 変形係数 $E = 1.5 \times 10^4 \text{MPa}$
		単線 一軸圧縮強度 $\sigma_c = 36 \text{MPa}$ 変形係数 $E = 1.7 \times 10^4 \text{MPa}$
地盤ばね 模 擬 材	硬質円筒 形 ゴム	ばね定数 $K_1 = 0.08 \text{kN/mm}$ (変位置 4.0mm までは 0.11kN/mm)
	皿 ば ね	ばね定数 $K_1 = 1.9 \text{kN/mm}$ (変位置 0.4mm までは 1.1kN/mm)
脚部ばね材	板 ゴム	ばね定数 $K_2 = 0.55 \text{kN/mm}$ (変位置 2.0mm までは 0.4kN/mm)

によりウォームギア (A), (B) を回転させ、磁気センサーを利用して自動的に載荷及び除荷あるいは地盤ばね反力を導入できる。

これらの実験装置により、トンネル軸方向に載荷板 1 枚分  $L=6.0 \text{ cm}$  の供試体を用いる 2 次元実験あるいはトンネル軸方向の載荷板全列分の供試体を用いる 3 次元実験が可能である。

(2) 実験概要

a) 実験ケース

実験は、① 載荷方向、② 側壁脚部の拘束条件、③ 天端背面空洞、④ 覆工構造 (順巻、逆巻)、⑤ 載荷形態 (部分荷重、分布荷重)、⑥ 地盤剛性、等をパラメータとした 2 次元実験を行った。

本論文では、表-1 に示すように①~④をパラメータとした 15 ケースについてのみ述べる。

b) 実験材料

実験に用いた材料を表-2 に示す。供試体はモルタル造とし、地盤ばね材には複線装置に沖積層程度の地盤剛

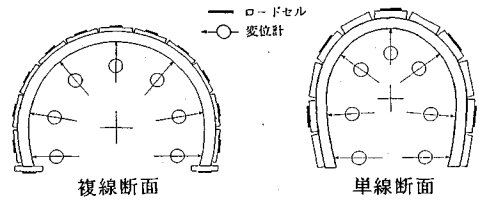
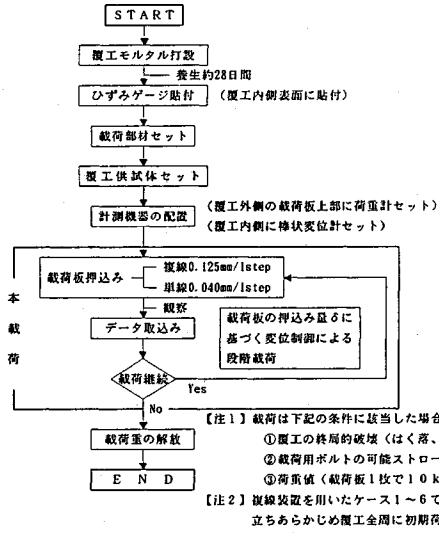


図-3 計測位置



【注1】 載荷は下記の条件に該当した場合に終了する。  
① 覆工の終局的破壊 (はく落、せん断破壊等)  
② 載荷用ボルトの可能ストロークの限界  
③ 荷重値 (載荷板 1 枚で 10 kN)  
【注2】 複線装置を用いたケース 1~6 では、本載荷に先立ちあらかじめ覆工全周に初期荷重を導入した。

図-4 実験手順

性に相当する硬質円筒形ゴム、単線装置に洪積層程度の地盤剛性に相当する皿ばねを用いた。通常の山岳トンネルとしては地盤が軟らかいが、覆工の変形挙動を強調するためにこのような材料を用いた。なお、複線と単線は同じ供試体配合としたが、モルタル打設時期の違いにより結果的に異なる物性値となった。

c) 計測項目

図-3 に示すように、載荷重あるいは地盤反力は、載荷板・反力板の外側に設置した小型ロードセルにより測定し、供試体内面の法線方向変位量は棒状小型変位計により測定した。また、覆工内面のひび割れ発生の判定に利用するために、覆工内面の周方向にひずみゲージを貼付し併せて測定した。

d) 実験手順

図-4 に示すように実験は以下の手順で行った。① 型枠を用いて供試体を作製し、28 日間以上養生する。型枠脱型後、供試体内面にひずみゲージを貼付する。② 供試体を実験装置内にセットし、小型ロードセル、棒状小型変位計の測定機器をセットする。③ 載荷は、載荷板の押し込みによる変位制御方式の段階載荷とする。なお、載荷板押し込み量は、複線装置は 0.125 mm/1 step、単線装置は 0.040 mm/1 step とする。④ 載荷後、目視による観察をしながら 2 分間放置し、その後、載荷重及

表一三 実験結果整理記号

使用記号	内容
○、△、◇、□	引張ひび割れ
●、▲、◆、■	圧ざ(圧縮破壊)
○、△、◇、□	せん断ひび割れ
A、B、C……	ひび割れ発生順序
$\delta$	載荷板押し込み量(mm)
$u$	載荷位置での覆工内面の法線方向変位量(mm)
$P$	載荷位置での荷重(kN)
$p$	載荷位置での圧力(MPa)

び反力、覆工内面の法線方向変位量、覆工内面周方向ひび割れの計測データの読み込みを行う。⑤ 載荷終了の条件に該当するまで③、④を繰り返す。載荷は、1) 供試体に圧ざ部のはく落あるいはせん断破壊等の最終的な破壊の発生、2) 載荷用ボルトのストローク限界、3) 装置の許容値により定まる載荷重(載荷板1枚で10 kN)を超える場合、のいずれかに該当する場合に終了した。

ただし、複線の実験ケース1~6では、変状のない健全なトンネル覆工が自重あるいは周辺地山の緩み等により圧縮応力状態にあることを考慮して、あらかじめ地盤ばね材の硬質円筒形ゴムを約4.0 mm (60 kPa 程度の地圧に相当) 圧縮し、供試体セット後、地盤ばね材を解放し供試体全周に初期荷重として与え、その後局部的な載荷を本載荷として行った。しかしながら、実験結果の解釈や解析上の取り扱いが煩雑になるために、単線装置を用いた実験では初期載荷を導入しなかった。

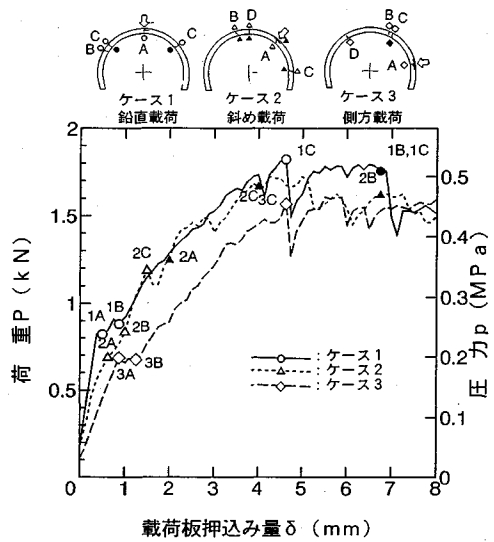
e) 相似則

相似則は構造物の変形、変位、応力について試験する場合、構造物の幾何学的相似の縮尺 $\alpha$ を満足させれば弾性範囲内において同一荷重強度に対し、変形及び変位は $1:\alpha$ 、応力は $1:1$ に対応する<sup>5)</sup>。そこで本実験では覆工モルタルの力学特性(強度、変形係数)を実物に合わせた。したがって、ひび割れが発生するまでの弾性的に挙動する範囲の変形・変位・応力についてはかなり厳密に相似則が成立する。しかし、ひび割れ発生後はひび割れの挙動が変形及び変位に大きな影響を与え相似則は大きく変化するので、実験結果の解釈は定性的な範囲に止めた。

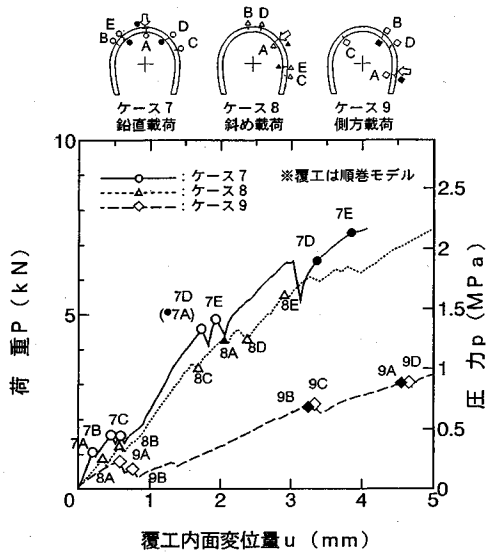
また、実験装置の縮尺が複線装置では1/30、単線装置では1/20と異なるため、両者の実験結果を定量的に比較する場合には幾何学的相似比を一致させ、かつ弾性範囲内で検討する必要がある。

(3) 実験結果

実験結果は表一三に示す記号を用い、図一五~図一十に示すように供試体のひび割れ進展及び載荷位置の荷重 $P$ 、及び荷重 $P$ を載荷板面積 $A$ で除した圧力 $p$ と供試体内面の法線方向変位量 $u$ との関係に着目して整理した。なお、複線実験では $u$ を変位計がひび割れ位置に当たり測定できないケースがあったため、やむをえず載



図一五 載荷位置での荷重(圧力)と載荷板押し込み量の関係(複線断面での載荷位置による違い)



図一六 載荷位置での荷重(圧力)と変位の関係(単線断面(順巻)での載荷位置による違い)

荷板押し込み量 $\delta$ で比較することにした。

以下に実験の全体的な傾向と前述の着目パラメータに関する比較結果について述べる。

a) 全ケースを通じた傾向

供試体の挙動は、初期ひび割れ発生までは弾性的に挙動し、ひび割れの発生により荷重が急激に低下し、変位が進行する。ひび割れ発生後の挙動においても引張ひび割れあるいはせん断ひび割れが発生するまでは、 $P$ と $u$ の関係はほぼ直線的に変化する。ただし、圧ざが発生した場合には圧ざ発生箇所の有効断面が徐々に変化することによって直線的な変化を示さない場合もある。ひび割

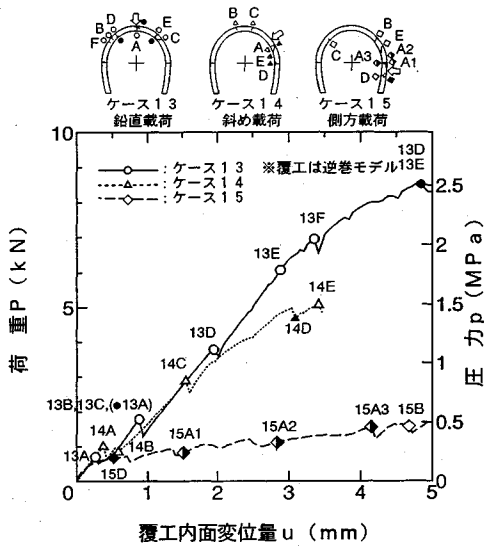


図-7 載荷位置での荷重(圧力)と変位の関係(単線断面(逆巻)での載荷位置による違い)

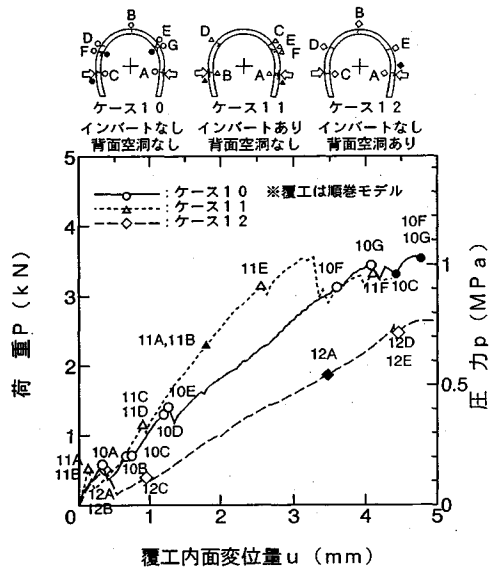


図-9 載荷位置での荷重(圧力)と変位の関係(単線断面での脚部拘束条件の違い及び背面空洞の影響)

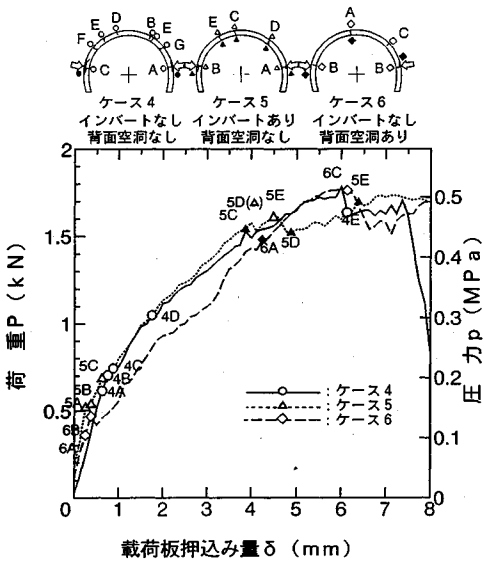


図-8 載荷位置での荷重(圧力)と載荷板押し込み量の関係(複線断面での脚部拘束条件の違い及び背面空洞の影響)

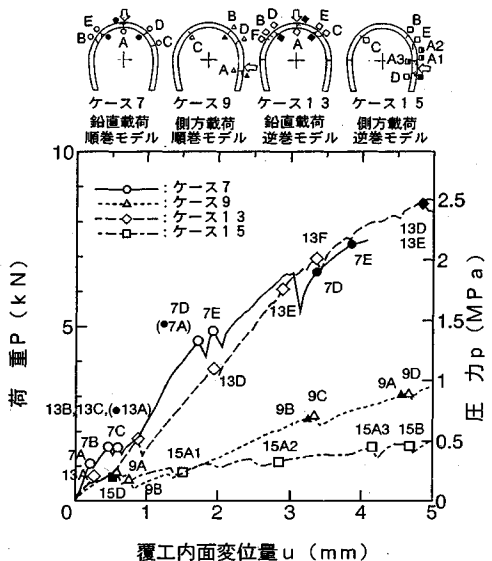


図-10 載荷位置での荷重(圧力)と変位の関係(単線断面での打ち継ぎ目(不連続面)の影響)

れの発生により供試体の構造系は変化し、新たなひび割れの発生や既に発生しているひび割れの閉合等が見られる。また、荷重の増加率はひび割れの進展に伴い若干低下するが、供試体全体の構造としての剛性あるいは耐力は、アーチ作用によりかなりの変形量まで保持される。

なお、荷重が変位制御方式であるため、載荷板押し込み直後からデータを読み込むまでの2分間に、覆工モルタルの応力緩和による若干の荷重低下やクリープによる変位の進行が見られ、荷重低下量及び変位の進行量はひび割れの発生あるいは進展に伴い増加する傾向にあっ

た。

b) 載荷位置の違いによる比較(図-5~図-7)

載荷位置の違いによる比較は、アーチ部と側壁部に不連続面のない、全断面工法で施工されたトンネルを模擬したケース1~3及びケース7~9の順巻モデルと、上半のアーチ部と下半の側壁部を別々に施工し、SL部に打ち継ぎ目の不連続面があるトンネルを模擬したケース10~12の逆巻モデルで行う。なお、荷重方向は、鉛直、斜め、側方の3方向とし、1載荷板からの部分的な荷重とした。ただし、複線断面のケース1~3においては、

初期荷重を供試体全周に載荷後、局部的な荷重を加えている。

順巻モデルの複線・単線断面の場合には、弾性的な供試体挙動を示す初期ひび割れ発生前、及び初期ひび割れ発生後を通じて載荷方向が鉛直に近いほど変形しにくいので、載荷が鉛直に近いほど供試体の耐力が大きいといえる。また、SL部に不連続面のある逆巻モデルにおいても、載荷により供試体に軸力が十分発生し不連続面の摩擦が大きくなった場合には、順巻モデルと同様の供試体挙動を示すため、鉛直に近いほど供試体耐力が大きいといえる。

#### c) 脚部拘束条件の違いによる比較 (図-8, 図-9)

側壁両側から部分的な荷重を作用させ、インパルトなしを模擬したケースとインパルトがある場合を模擬したケースを比較しインパルトの効果を確認する。初期ひび割れ発生までの供試体挙動は、断面形状によらずインパルトを模擬したケースの方がインパルトのないケースより当然のことではあるが変形しにくい。しかし、初期ひび割れ発生後においてはインパルトの有無による大きな差異は生じていない。実験のような荷重状態では、初期ひび割れ発生まではインパルトを設置することによる変形抑制効果は非常に大きいですが、ひび割れが進行するにつれて、ひび割れ発生前のような大きなインパルト効果は見られない。ただし、実トンネルにおいては、地圧の作用形態が実験とは必ずしも一致せず、インパルト効果については今回の限られた実験結果だけから結論を出すことはできない。

#### d) 背面空洞の影響 (図-8, 図-9)

山岳トンネルの在来工法に比較的好く見られる覆工天端部の背面空洞の影響を確認するために、供試体天端部の背面空洞のないケースと供試体天端部に地盤ばね材の反力が伝達しないように地盤ばねや載荷板等を1箇所取り付けない背面空洞のあるケースを比較する。背面空洞の有無による差異は、初期ひび割れ発生まではほとんど見られないが、初期ひび割れ発生後に背面空洞がある場合には供試体耐力の大幅な低下が見られる。即ち、供試体天端部の背面空洞は初期ひび割れ発生までは供試体剛性にあまり影響を与えないが、初期ひび割れ発生後に供試体剛性を大幅に低下させるような悪影響を与えることがわかる。したがって、ひび割れ等が発生した変状トンネルでは、地盤反力を覆工に伝達でき、ある程度覆工の変形を抑制できるような裏込注入等の対策工の必要性、あるいは重要性を示唆しているものと考えられる。

#### e) 打ち継ぎ目の影響 (図-10)

SL部の打ち継ぎ目を不連続面で表現した逆巻モデルでは、供試体に軸力があまり生じていない載荷直後の供試体挙動は不連続面の摩擦に大きく影響されるが、載荷が継続され供試体に軸力が十分導入され、不連続面がほ

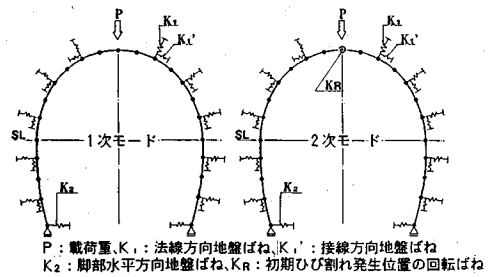


図-11 骨組解析モデル (ケース7)

ぼ全圧縮状態となった場合には不連続面の影響はほとんど見られず、不連続面のない順巻モデルと同様の挙動を示す。したがって、軸力が十分生じた場合の逆巻モデルにおいては、載荷位置が鉛直に近いほど変形しにくく、供試体耐力も大きいといえる。側圧が作用した逆巻モデルにおいては、不連続面での目違いや不連続面端部のせん断ひび割れが発生し、順巻モデルとの比較においても明らかに供試体剛性の低下が見られる。

また、実験においては打ち継ぎ目を欠損がないものとして表現したが、実トンネルにおいては打ち継ぎ目の迫めの施工が不十分であることが多く、打ち継ぎ目の不連続性による側壁の押し出し等の影響及び覆工耐力の低下はさらに大きくなると考えられる。

### 3. 数値解析

トンネル覆工模型実験の数値解析は、供試体を梁、地盤をばねでモデル化する骨組解析と供試体を有限個のファイバーの組み合わせでモデル化し1つの梁要素とみなすファイバーモデルにコンクリートのひび割れ処理を組み合わせ解析を行う複合部材解析を行った。

#### (1) 骨組解析

骨組解析は、(財)鉄道総合技術研究所所有の骨組解析プログラム SAP<sup>®</sup>を用いて実施した。

##### a) 解析モデル

解析モデルは、供試体を線形弾性梁、地盤ばねを表-2に示す地盤ばね材のばね特性を考慮してバイリニアの非線形弾性とした。ただし、接線方向地盤ばねは物性試験により算出した法線方向地盤ばねの $1/3^{7)}$ とした。また、覆工供試体の曲げ引張強度 $f_{bk}$ は、一軸圧縮強度 $f'_{ck}$ から $f_{bk}=0.42f'_{ck}^{2/3}$ の式を用いて推定した<sup>8)</sup>。

解析は図-11に示すように、弾性的な挙動を示す初期ひび割れ発生までの1次モード解析と初期ひび割れを弾性回転ばねで表現し、新たに2番目のひび割れが発生するまでの2次モード解析について行った。なお、逆巻モデルの不連続面は、弾性ヒンジとして表現し解析を行うこととした。

##### b) シミュレーション解析方法

図-6の実験直線に解析値を加筆した図-12により、



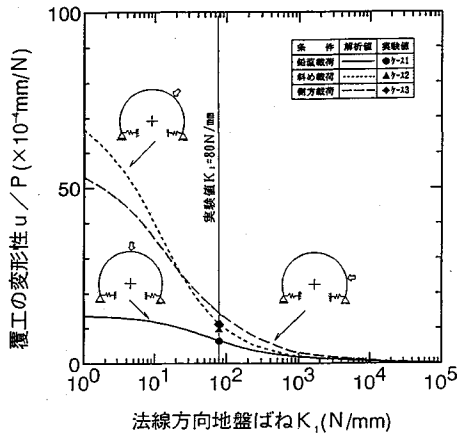


図-15 覆工の変形性と地盤ばねの関係 (複線断面での載荷位置による違い)

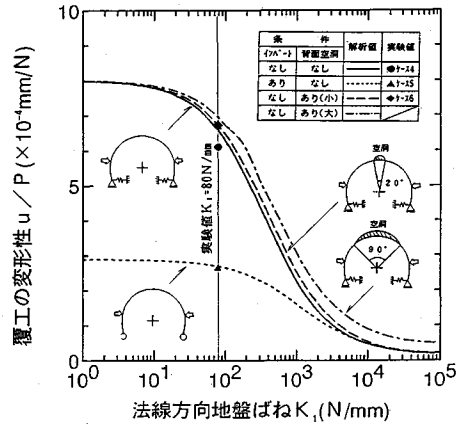


図-17 覆工の変形性と地盤ばねの関係 (複線断面でのインバート効果及び背面空洞の影響)

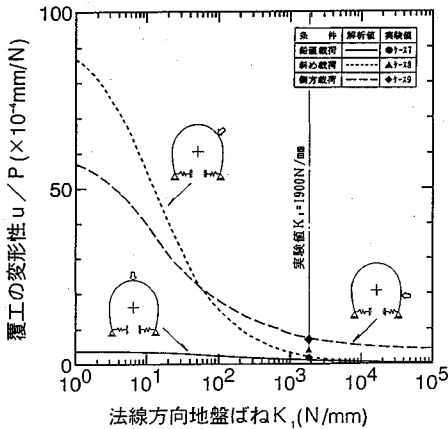


図-16 覆工の変形性と地盤ばねの関係 (単線断面での載荷位置による違い)

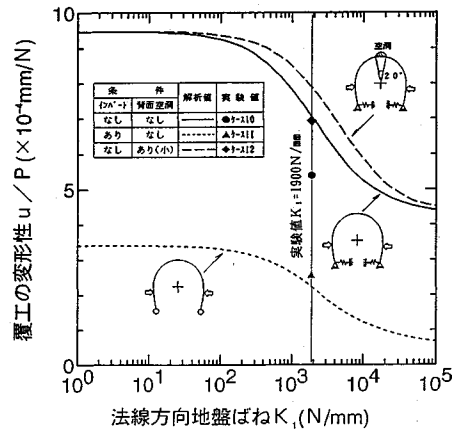


図-18 覆工の変形性と地盤ばねの関係 (単線断面でのインバート効果及び背面空洞の影響)

程度の場合には、ひび割れは数箇所が生じているが供試体自体として耐力は十分残存している。また、実験での荷重と供試体内面変位量の関係によれば、初期ひび割れ発生以降の実験曲線の勾配はほぼ初期ひび割れ発生前の勾配と同様の傾向を示すことにより、以下のパラメトリック解析は弾性的な挙動を示すひび割れ発生前の1次モードでの覆工の変形性に着目することとした。覆工の変形性は載荷位置の法線方向の供試体内面変位量  $u$  を荷重  $P$  で除したものであり、数値が大きければ覆工が変形しやすいことを示し、数値が小さければ変形しにくいことを示す。

図-15～図-19は、上述の覆工の変形性  $u/P$  と法線方向地盤ばね定数  $K_1$  との関係を示し、併せて実験での一次モードの  $u/P$  を記載している。当然のことではあるが各ケースとも  $K_1$  が増加すれば、覆工は変形しにくくなる。

図-15は複線断面において、載荷位置をパラメータとした場合の解析結果である。載荷位置が鉛直に近いほ

ど覆工は変形しにくくなり、即ち鉛直に近いほど覆工耐力が大きいといえる。また、 $K_1$  の増加に伴い載荷位置による変形性の差異は小さくなる。

図-16は単線断面において、載荷位置をパラメータとした場合の解析結果である。単線断面の場合も複線断面と同様に、載荷位置が鉛直に近いほど覆工が変形しにくく、覆工耐力が大きいといえる。複線断面と異なる点は、 $K_1$  が増加してもアーチ部に載荷したケースと側圧を作用させたケースの変形性の差異はほとんど変化しないことにある。この違いは、単線断面は複線断面に比べ縦長の形状であり、かつ側圧の作用位置が側壁のほぼ中央と高かったためと考えられる。

図-17は複線断面において、インバートの有無と背面空洞の大きさをパラメータとした場合の解析結果である。インバートの変形抑制効果は地盤強度が低いほど大きく、また、覆工天端の背面空洞の影響は空洞範囲が大きいほど変形しやすく悪影響を及ぼすことがわかる。

図-18は単線断面において、インバートの有無と背



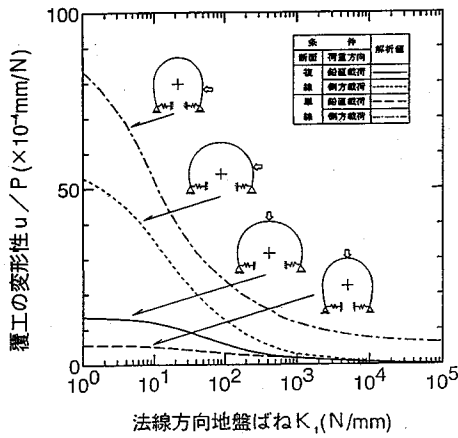


図-19 覆工の変形性と地盤ばねの関係  
(複線断面と単線断面での荷重位置による違い)

面空洞の有無をパラメータとした場合の解析結果である。単線断面の場合も複線断面と同様のことがいえるが、インパートの効果は初期ひび割れ発生までの1次モードでは複線断面に比べ非常に大きいことがわかる。

図-19は複線及び単線の断面形状による差異を比較するため、単線断面のパラメトリック解析結果を複線断面の縮尺1/30に合わせたものである。単線断面のパラメトリック解析結果は、相似則により覆工の変形性  $u/P$  を1.5倍し、法線方向地盤ばね定数  $K_1$  は0.67倍したものである。縦長の単線断面が複線断面に比べ、鉛直荷重に対し変形しにくく側圧に対し変形しやすいことがわかる。

(2) ファイバーモデル解析

a) 解析手法

供試体のひび割れ進展を連続的に解析するために、複合部材解析プログラムFBSP-3D<sup>®</sup>を用いた。本プログラムは、部材を有限個のファイバーの組み合わせでモデル化し、1つの梁要素とみなすアルゴリズムにコンクリートのひび割れ処理を組み合わせるものである。

ファイバーモデルでは、要素の断面はファイバーの集まりとして表現され、各ファイバーはそれぞれの断面内の座標と物性値を持っており、これらの値からモデルと等価な梁要素の断面積、弾性係数、断面2次モーメントを計算する。軸力と曲げ変形によって各ファイバーは軸方向の応力を持つことになり、これが与えられた圧縮・引張強度に達したとき、そのファイバーは塑性または破断したと判断する。本プログラムでは、ひび割れ発生と判断されたファイバーについて、① ファイバーの剛性を低下させ、応力を0とする、② 解放応力を軸力及びモーメントとして両端の節点に荷重する、③ 新たに定まったファイバーの剛性から中立軸を移動させる、④

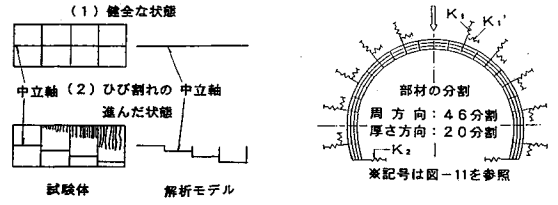


図-20 ひび割れ進展に伴うモデルの変化

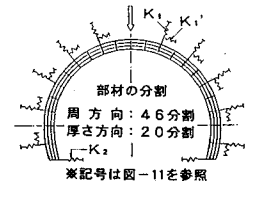


図-21 ファイバーモデル (ケース1)

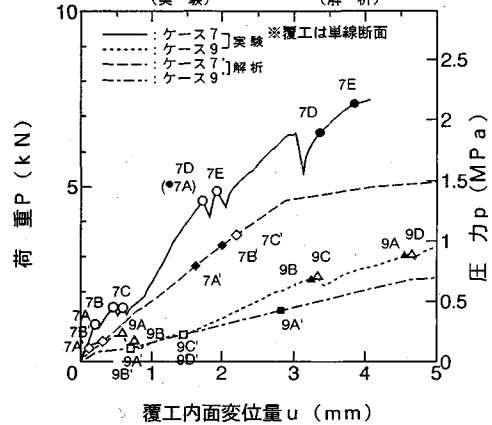
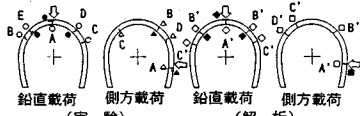


図-22 ファイバーモデル解析結果 (ケース7, ケース9)

図-20に示すように中立軸の不連続を表すため要素を両端に剛域を持ったコの字型の要素に変形させる、といった処理を繰り返して計算により実施して、ひび割れ進展をシミュレーションする。

図-21に示すように複線・単線断面ともトンネル周方向を46分割、覆工巻厚を20のファイバーに分割してモデル化し、1ステップ0.1 kN ずつ段階的に荷重した。

b) シミュレーション解析

解析結果を図-22に示す。図-22から実験結果の傾向をよく表しているといえる。特に、圧縮の進行により  $P-u$  曲線の勾配が変化している点が骨組解析では表現できない特徴といえよう。

(3) 各解析手法の適用性

模型実験が骨組解析モデルをイメージして開発したものであり、ひび割れが多数発生するまでは骨組解析が簡便にかつ正確にシミュレーションが可能である。ただし、連続的なひび割れ進展解析ができないこと、曲げによる圧縮が生じた場合、解析が続行できなくなること、等の短所がある。

ひび割れ進展を連続的に解析できるという点ではファイバーモデル解析がすぐれている。ただし、せん断破壊が卓越する場合については今後検討の余地がある。

今後、両解析手法の実問題への適用性について、FEM解析手法を含めて検討を行いたい。

#### 4. 結 論

トンネル覆工の力学的健全度評価法の確立を目的とし、その第一歩として模型実験と解析による覆工の力学挙動特性について検討を行った。

得られた結果は以下のようにまとめられる。

(1) 覆工と地盤の相互作用が表現でき、3次元実験が可能な新しい覆工模型実験装置を開発した。これにより地盤条件、土圧条件、覆工構造等をパラメータとした各種比較実験が容易に行えるようになった。

(2) 覆工の力学挙動の特徴として従来の経験的知識を確認するとともに新しい知見を得た。

① トンネル覆工は鉛直圧に対して変形性・耐力にすぐれ、側圧に弱い。特に単線トンネルは側圧に弱い。

② インパートの効果は、今回の実験における荷重条件では十分に確認できなかった。特に、単線トンネル側壁部への部分荷重に対して効果が見られないという結果になった。

③ 背面空洞の存在は、覆工の変形性・耐力に悪影響を与えるが、地盤剛性によって差があり地盤剛性が大きいほど空洞の影響はより大きい。

④ 逆巻覆工は、迫め部の欠陥がなく側壁に十分な軸力が発生していれば問題はないが、軸力が発生しておらず側圧が作用した場合には重大な欠陥となる。

(3) 骨組解析及びファイバーモデル解析はともに、実験結果を的確にシミュレートするが、骨組解析は弾性的領域における再現性にすぐれ、ファイバーモデル解析はひび割れ進展の再現性にすぐれる。

(4) トンネル覆工は構造欠陥がない場合、ひび割れが生じてからも構造全体として粘りを持ち、建築限界を支障する以前に崩落等の状況が生じにくい。このことは、変状トンネル覆工の内空変位測定による管理の重要性を表している。

今後、欠陥のある覆工の挙動評価、対策工の効果等実

務的な問題について、本論文と同様の手法により検討を継続していきたい。

謝辞：最後に、模型実験装置の製作に御協力いただいた上智大学機械工学科(元鉄道総研)高橋美德氏、(財)鉄道総合技術研究所試作センター西山幸夫氏、実験の実施に御協力いただいた(株)ダイヤコンサルタント東京支店川上義輝氏、ファイバーモデル解析に御協力いただいた(株)富士総合研究所解析技術部伊東淳氏、山本晃司氏に深甚なる謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 斉藤徹・白井慶治・飯塚全・高木盛男・土屋敬・岩井徳雄：模型実験によるトンネル覆工の耐力に関する研究、鉄道技術研究報告, No.779, 1971.
- 2) 今田徹ほか：トンネル覆工の強度に関する実験報告(1)、土木研究所資料第921号, 1974.：同(2)、第922号, 1974.：同(3)、第991号, 1975.：同(4)、第1100号, 1976.
- 3) 朝倉俊弘・小島芳之・安東豊弘：トンネル覆工の力学挙動解析—複線トンネル覆工模型実験のシミュレーション—、トンネル工学研究発表会論文・報告集第1巻 pp.183~188, 1991.
- 4) 朝倉俊弘・安東豊弘・小島芳之・川上義輝：トンネル覆工の力学挙動解析—単線トンネル覆工模型実験のシミュレーション—、トンネル工学研究発表会論文・報告集第2巻 pp.51~58, 1992.
- 5) 江守一郎・D.J. シューリング：模型実験の理論と応用、技報堂, 1973.
- 6) 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.
- 7) 日本国有鉄道：建造物設計標準解説—基礎構造物、抗土圧構造物一, 1986.
- 8) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説—コンクリート構造物一, 1992.
- 9) 朝倉俊弘・安東豊弘・小島芳之・伊東淳・山本晃司：トンネル覆工のひび割れ進展シミュレーション、第25回岩盤力学に関するシンポジウム pp.66~70, 1993.

(1993.6.14 受付)

## FUNDAMENTAL STUDY ON STATIC DEFORMATION BEHAVIOR OF TUNNEL LINING

Toshihiro ASAKURA, Yoshiyuki KOJIMA, Toyohiro ANDO, Yutaka SATO and Akio MATSUURA

Tunnel model test and simulation analysis are performed to establish the soundness evaluation method for a countermeasure for the tunnel lining with adjacent construction and deformation.

We have successfully developed tunnel lining test units that can express the ground-lining interaction and three-dimensional behaviors, then various model tests were carried out. We discuss about effects of the various parameters on the tunnel lining model deformation behavior in this paper.