

# 欠陥を有するトンネル覆工の変形挙動と内面補強工の効果

朝倉俊弘\*・安東豊弘\*\*・小俣富士夫\*\*\*  
若菜和之\*\*\*\*・松浦章夫\*\*\*\*\*

従来のトンネル工法で施工されたトンネルの覆工は、施工上の理由から、天端部の巻厚不足と背面空洞の存在という構造的欠陥を有することが多い。このような欠陥が覆工の力学挙動に与える影響と、裏込注入工及び鋼板接着・炭素繊維シート接着による内面補強工の効果を模型実験と骨組解析により検討した。

**Key Words :** tunnel lining, tunnel model test, frame analysis, backfill grouting, inner reinforcement

## 1. はじめに

老朽化したトンネル、あるいは供用開始後、土圧の作用により変状の生じたトンネルは少なくない。

しかしながら、そのような変状トンネル覆工の対策工を設計しようとする際、あるいは近年急増している既設トンネルに対する近接工事を計画する場合の影響評価の際、トンネル覆工の健全度、すなわち応力状態を判断する定量的手段がないため、的確な設計に支障をきたす場合が少なくない。

また、トンネル覆工には、コンクリート打設時の硬化収縮や地圧作用によるひび割れが若干なりとも生じていることが一般的であり、さらに、鋼製支保工と木矢板による、いわゆる在来工法によるトンネルでは、コンクリート打設技術に起因してアーチクラウン部に巻厚不足や背面空洞が存在することが一般的である。このような構造的欠陥が、覆工の健全度評価をさらに困難なものとしている。

本研究は、トンネル覆工の力学的な健全度評価法の確立と、変状対策工の設計基準を作成することを最終目的としているが、本論文では、特に上述したような巻厚不足、背面空洞といった構造的欠陥が、覆工の変形挙動特性に与える影響を把握することと、裏込注入、内面補強工といった変状対策工の効果を把握することを目的としている。

本論文では、構造的欠陥を有するトンネル覆工の挙動

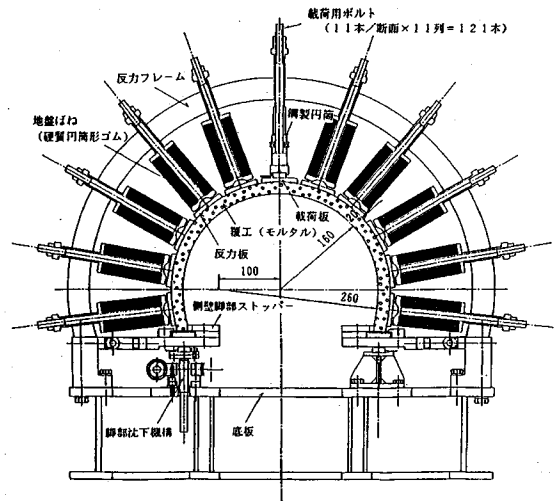


図-1 実験装置の概要 (断面図)

と変状対策工の効果に関する模型実験結果、実験結果の骨組解析によるシミュレーション、若干のパラメトリック解析結果、および得られた知見について報告する。

## 2. 模型実験

### (1) 実験装置

実験装置は、図-1に示すように、新幹線複線トンネル標準断面を想定した直接載荷方式の模型実験装置(縮尺1/30)<sup>1),2)</sup>で、載荷用部材(載荷板、反力板、地盤ばね材(硬質円筒形ゴム)、二重ねじ構造の載荷用ボルト等)、反力フレーム、側壁脚部ストッパー、脚部沈下機構、底板等により構成されている。

載荷用部材は覆工供試体(以下、供試体と呼ぶ。)を取り囲むように、供試体断面の法線方向に11本設置されている。載荷用ボルトは二重ねじ構造になっており、内側のボルトにより円筒形ゴムの圧縮、解放を行うこと

\*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 東日本旅客鉄道(株) 秋田支社 工務部施設課 主席

\*\*\*正会員 ショーボンド建設(株) 土木研究所 課長

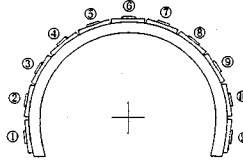
\*\*\*\*正会員 工修 ショーボンド建設(株) 土木研究所 研究員

\*\*\*\*\*正会員 工博 金沢工業大学教授 土木工学科

表一 実験ケース

実験ケース番号	載荷位置	覆工天端厚	背面空洞	裏込注入	内面補強	実状種別	実験種別
1	鉛直 〔⑥〕	20mm	無	無	無	健全	健全
2					鋼板		
3					炭素繊維		
4	横両側 〔②④〕	20mm	無	無	無	健全	健全
5		10mm					
6		15mm					
7		10mm	60°	軟質材	無	欠陥	
8			100°				
9		60°	硬質材	硬質材	健全	対策工	

注) 載荷位置の〔〕内の数字は載荷板番号を示す。(下図参照)



が可能で、ゴムの弾性力により地盤反力を表現している。載荷箇所は、円筒形ゴスを鋼製の中空円筒に交換し、外側のボルトをねじ込むことにより載荷板を介して供試体に直接変位を与える。また、載荷用部材は供試体の軸方向にも11列並んでおり(装置全体では、11個/断面×11列=121個)、3次元モデルの実験も行える構造となっていることが大きな特徴である。

側壁脚部は、鋼製またはゴム製の脚部ストッパーを着脱することにより、インパートの有無、道床碎石等による支持などの水平内側拘束条件を設定できる構造となっている。

また、脚部沈下機構を備えており、既設トンネルの下部に新設トンネルが通過する場合などの脚部沈下を模擬した実験も行うことができる。

(2) 実験概要

a) 実験ケース

覆工欠陥(天端巻厚不足)、天端背面空洞、変状対策工(裏込注入工、鋼板接着、炭素繊維シート補強)の有無をパラメータとして、表一に示す9ケースについて、トンネル軸方向に載荷板1枚分の長さ(L=60mm)を持つ2次元モデルを用いて実施した。

なお、今回の実験は打継ぎのない順巻モデルで、インパートがある場合を想定して行っている。

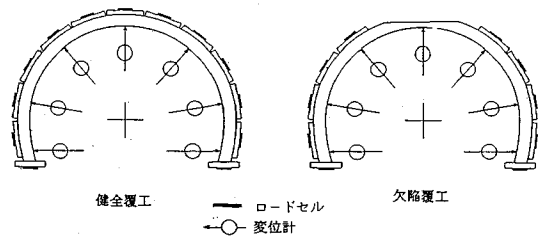
また、荷重については、ケース1~3はトンネル施工後のゆるみ進行による鉛直地圧を、ケース4~9はトンネル周辺地山が塑性化した場合で卓越した側圧を、それぞれイメージして決定した。

b) 実験材料

供試体はセメントモルタルにて作製し、地盤ばね材は、覆工の変形挙動を強調する目的で、沖積層程度に相当す

表二 実験材料の諸物性

種別	実験使用材料	材料物性
覆工 模型	モルタル	一軸圧縮強度、 $\sigma_c = 31 \text{ MPa}$ 圧縮弾性係数 $E_c = 1.6 \times 10^4 \text{ MPa}$
地盤ばね材	硬質円筒形ゴム	ばね定数 $K_i = 0.080 \text{ kN/mm}$ (変位量 4.0mm までは 0.11 kN/mm)
裏込注入 軟質材	板ゴム	圧縮弾性係数 $E_g = 3.0 \text{ MPa}$
裏込注入 硬質材	エポキシ樹脂	圧縮弾性係数 $E_r = 890 \text{ MPa}$
鋼板接着工	ブリキ板	板厚 $t = 0.3 \text{ mm}$ 引張弾性係数 $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$
炭素繊維 シート 補強	炭素繊維シート	炭素繊維量 $F.A.W = 50 \text{ g/m}^2$ 引張弾性係数 $E_{ca} = 4.1 \times 10^4 \text{ MPa}$



※欠陥覆工に裏込注入を施工するケースは、施工後は健全覆工の配置。

図一 計測位置

る硬質円筒形ゴスをを用いた。裏込注入工には軟質材として板ゴム、硬質材としてエポキシ樹脂を用い、鋼板接着工にはブリキ板  $t=0.3 \text{ mm}$ 、炭素繊維シート補強には炭素繊維量  $50 \text{ g/m}^2$  のシートをそれぞれ使用しエポキシ樹脂で接着した。また、使用した炭素繊維シートは、2次元モデルの実験であることを考慮して、繊維方向をトンネル円周方向の1方向のみとしている。使用材料の諸物性は、表二に示すとおりである。

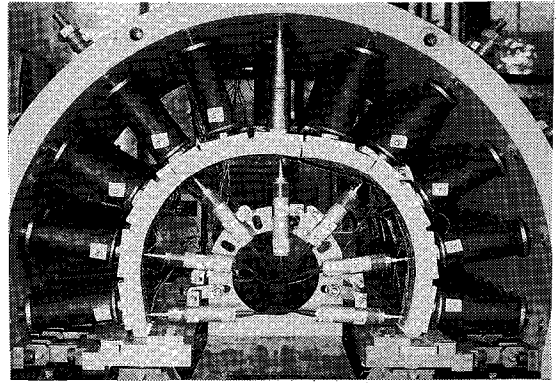
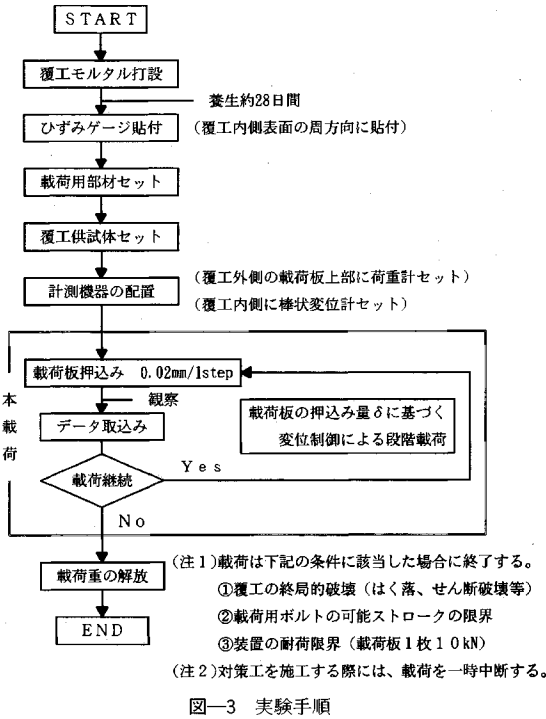
供試体は、図一の装置断面図に示す寸法で作製した。覆工の欠陥については、天端巻厚(基本巻厚  $t=20 \text{ mm}$ )が  $t=10 \text{ mm}$ 、 $t=15 \text{ mm}$  の供試体を作製した。背面空洞は円筒形ゴムの地盤ばね材をセットせずに反力が発生しない状態にすることにより表現した。

c) 計測項目

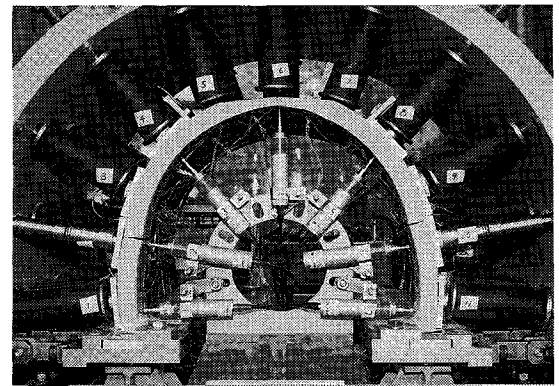
計測は、載荷重および反力を小型ロードセルにて、法線方向の覆工内面変位量を棒状型変位計により図二に示す位置について実施し、目視観察により覆工変状の発生を随時記録した。また、ひび割れ発生の判定に利用するために、覆工内面の周方向にひずみゲージを貼付し計測した。

d) 実験手順

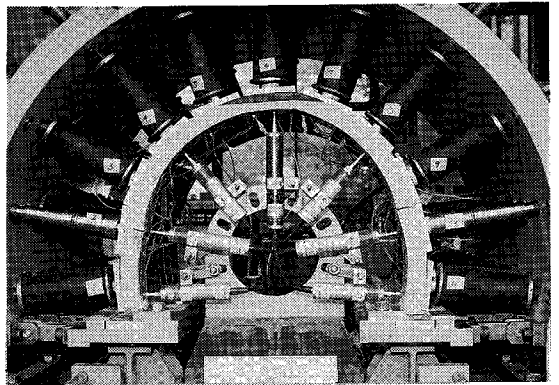
実験の手順は、図三に示すとおりである。実験装置に供試体をセットし、計測機器を配置し実験を行った。



写真—1 載荷終了時の供試体変形状況 (ケース3)



写真—2 載荷終了時の供試体変形状況 (ケース5)



写真—3 載荷終了時の供試体変形状況 (ケース8)

載荷は載荷板押込み量  $\delta=0.02\text{ mm}$  ごとの変位制御の段階載荷とし、載荷終了条件である、①覆工の終局的破壊、②載荷用ボルトのストローク限界、③装置の耐荷限界、のいずれかを満たすまで継続し、載荷中はひび割れの発生・進展を随時観察記録し、各荷重段階ごとに載荷重、反力、覆工内面変位量、覆工内面ひずみを計測した。

変状対策工の施工については、供試体を無対策の状態  
で載荷し、ひび割れなどの変状が発生したら載荷を一時  
中断し、その状態を保持したまま対策工を施して載荷を  
再開した。

e) 相似則

構造物の変形、変位、応力について実験する場合は、  
弾性範囲内で構造物の幾何学的相似 (縮尺  $\alpha$ ) を満足さ  
せると、同一荷重強度に対して変形および変位は  $1:\alpha$ 、  
応力は  $1:1$  に対応する<sup>3)</sup>。

本実験においては、ひび割れが発生するまでの弾性的  
に挙動すると想定される範囲については相似則が適用で  
きる。しかしながら、ひび割れ発生後はひび割れの挙動  
が変形および変位に大きな影響を与えるため相似則が大  
きく変化する。このため、実験範囲内での比較検討は行  
うことはできるが、実験結果から実現象を評価する場合  
には、十分な注意が必要である。

(3) 実験結果

実験終了時の供試体変形状況例を、写真—1~写真—3  
に示す。

実験結果については、ケースごとに覆工のひび割れの

進展過程、載荷位置の覆工内面の法線方向変位量  $u$  と  
荷重  $P$ 、および荷重  $P$  を載荷板断面積  $A$  で除した圧力  
 $p$  の関係について整理し、表—3に示す着目パラメータ  
ごとにまとめ、検討を行った (図—4~図—7)。図中の  
記号の意味は、表—4に示すとおりである。

a) 全体的な変形挙動の傾向

初期ひび割れ発生までは覆工は弾性的な挙動を示し、

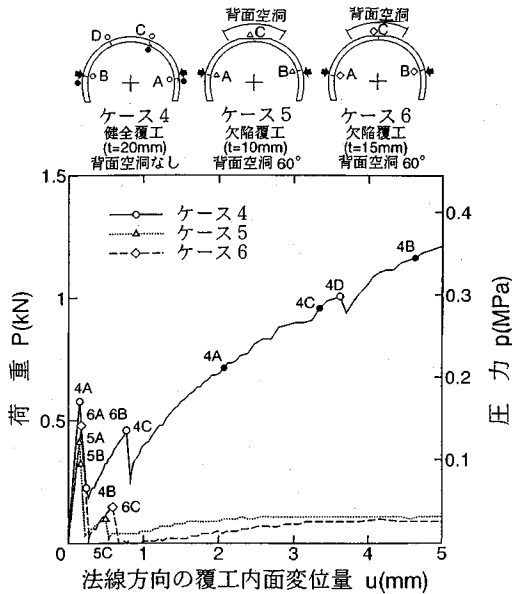
表—3 実験での着目パラメータ

着目点	実験パラメータ	比較ケース
構造的欠陥の影響	覆工の天端巻厚	4(20mm)、5(10mm)、6(15mm)
	背面空洞範囲	5(60°)、7(100°)
対策工の効果	裏込注入工の有無	5(無)、8(軟質材)、9(硬質材)
	内面補強工の有無	1(無)、2(鋼板)、3(炭素繊維)

表—4 実験結果整理記号

整理記号	内 容
○、△、◇	引張りひび割れ
●、▲、◆	圧ざ(圧縮ひび割れ)
×	内面補強材の剥離
1、2、3..	実験ケース番号
A、B、C..	無対策および対策工施工前のひび割れ発生順序
①、②、③..	対策工施工後のひび割れ発生順序
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 (N)
p	載荷位置での圧力 (MPa)

注) 1A、1①などの最初の1は、ケース番号を示している。

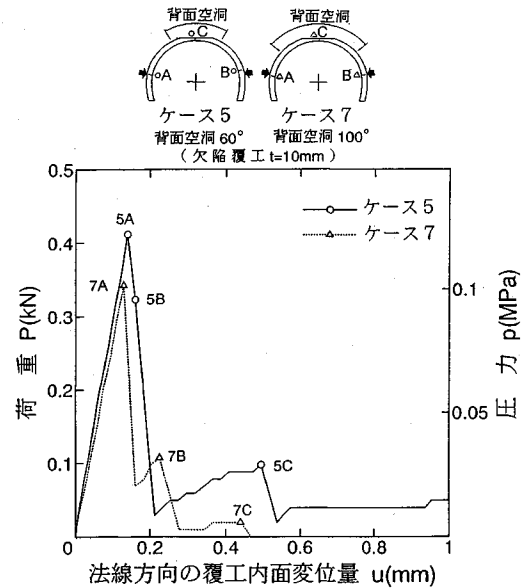


図—4 載荷位置での荷重(圧力)と変位の関係—天端巻厚不足、背面空洞の影響—

初期ひび割れ発生後は構造系が変化し、新たなひび割れの発生やひび割れの閉合が見られる。引張りひび割れ、せん断ひび割れ、内面補強材の剥離が発生すると、載荷位置で急激な荷重低下および大幅な変位の増加が生じるので、発生時期を特定することができるが、圧ざの場合は著しい荷重低下は認められず、発生時期を特定できない場合があった。

b) 構造的欠陥の影響 (図—4, 図—5)

覆工耐力に対する構造的欠陥の影響について、横両側



図—5 載荷位置での荷重(圧力)と変位の関係—天端背面空洞範囲の影響—

から側壁に載荷した場合のケース4~7を比較する。

図—4に示すように、構造的欠陥のない健全な覆工のケース4の場合では、ひび割れの発生に伴い構造系が変化しながらもアーチ作用により、かなりの変形量まで覆工耐力を維持している。それに対して、既設の山岳トンネルの多くに発生していると考えられる天端覆工巻厚不足、覆工背面空洞といった構造的欠陥を有するケース5~7の場合は、脆性的な破壊性状を示し、初期ひび割れ発生時にピーク荷重が発生し、その後は覆工耐力をほとんど失ってしまった。

覆工天端巻厚不足の影響をケース5(t=10mm)とケース6(t=15mm)により比較すると、初期ひび割れ発生までの実験曲線の勾配(覆工の初期の剛性)およびひび割れ発生後の挙動についてはほとんど差異は見られないが、初期ひび割れ発生荷重に若干の差異が見られ、天端巻厚不足度合いが、初期ひび割れ発生荷重(覆工耐力)に少なからず影響を与えることが分かる。

次に、覆工背面の空洞範囲の影響について、60°範囲の狭いケース5と100°範囲の広いケース7にて比較したのが図—5である。初期ひび割れ発生までの実験曲線の初期勾配にはほとんど差異は見られないが、初期ひび割れ発生荷重は空洞範囲が拡大すると若干低下する。大きな差異があるのは初期ひび割れ発生後の挙動で、どちらの場合も荷重(覆工耐力)は著しく低下するが、空洞範囲が狭い場合は外力に対して若干の抵抗力を残しているのに対して、広い場合にはほとんど抵抗なく変形し、剛性を失っていることがわかる。すなわち、覆工背面の空洞範囲が拡大すると地盤反力が期待できず、覆工耐力

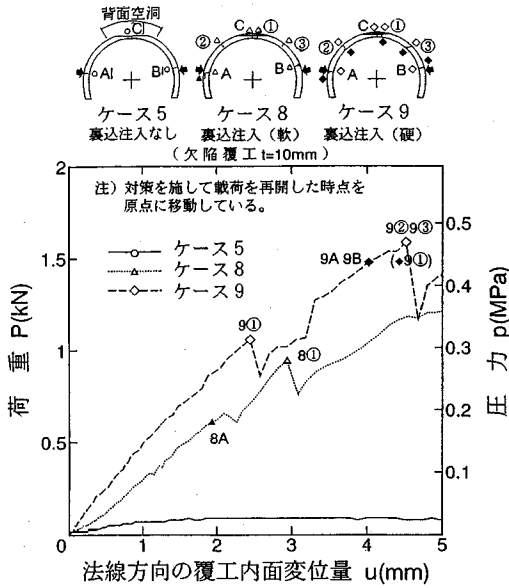


図-6 荷重位置での荷重(圧力)と変位の関係  
—背面空洞への裏込注入工の効果—

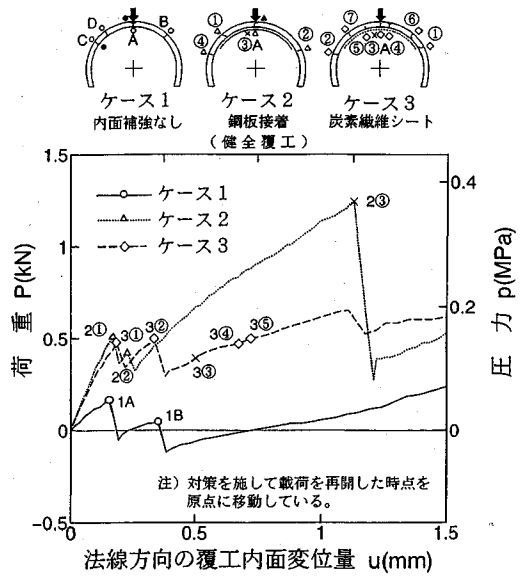


図-7 荷重位置での荷重(圧力)と変位の関係  
—内面補強工の効果—

を維持できないことを示している。

c) 裏込注入工の効果 (図-6)

裏込注入工の効果について、天端巻厚が不足 ( $t=10$  mm) しており  $60^\circ$  範囲の背面空洞が存在している供試体を横両側から側壁に荷重したケースのうち、無対策の場合のケース5、軟質材(板ゴム)による裏込注入工を施した場合のケース8、硬質材(エポキシ樹脂)による裏込注入工を施した場合のケース9について比較する。裏込注入工の施工としては、変状が生じているトンネルへの対策工をイメージし、欠陥供試体を無対策の状態を横両側より荷重し、荷重位置の覆工内側、天端覆工外側に引張り割れが発生した後に、あらかじめ空洞の形状に作製した裏込注入材を設置し、地盤ばね材をセットして反力が発生するようにして荷重を続行した。なお、図-6は対策を施して荷重を再開した時点の原点を移動している。

図-6から分かるように、裏込注入工を施したケース8、9は、無対策のケース5に比べて、変位が進むにつれ荷重が大幅に増加している。つまり、裏込注入工を施したことにより覆工剛性が大幅に回復し、覆工耐力が強化されたことが分かる。

また、裏込注入材の剛性の違いによる効果の差は、材料剛性が大きいと若干荷重が大きくなり裏込注入工の効果も大きいと考えられるが、顕著な効果の差があるとは言えない。これより、地盤が軟質な場合、背面空洞への裏込注入工は覆工耐力の強化に大きな効果を生ずるが、その効果の程度は注入材料の剛性に大きくは左右されなことが分かる。

d) 内面補強工の効果 (図-7)

覆工内面の引張領域に補強材を接着する内面補強工の効果については、図-7に示した、構造欠陥のない供試体を天端から鉛直に荷重したケースで、無対策の場合のケース1、鋼板接着(プリキ板  $t=0.3$  mm)を施した場合のケース2、炭素繊維シート補強(繊維量  $50$  g/m<sup>2</sup>)を施した場合のケース3について比較する。内面補強工の施工方法は、裏込注入工の場合と同様に、変状が生じているトンネルへの対策工をイメージし、無対策の供試体を鉛直荷重し、荷重位置の覆工内側に引張りひ割れが発生した後に荷重板押し込み量  $\delta=0.14$  mm だけ荷重を続行し、荷重状態を保持したまま内面補強工を施し、接着剤硬化のための一定の養生時間が経過した後に荷重を再開した。なお、図-7は対策を施して荷重を再開した時点の原点を移動したものである。

図-7より、内面補強工を施したことにより、無対策の覆工の耐力を大きく上回る覆工耐力が得られることが確認できる。また、覆工は内面補強工により変形しにくくなり、補強材の剛性の高い鋼板接着の方が変形抑制効果はより大きいことが分かる。つまり、内面補強工は、その剛性に依りて、覆工の変状進行抑制に高い効果を期待できると言える。しかし、ひび割れ進展過程図より分かるように、内面補強工の施工箇所端部に応力集中が起こり、新たな弱点となり得るので注意が必要である。

また、剛性の高い鋼板を接着したケース2は、鋼板剥離による急激な荷重低下が起こり、脆性的な挙動を示した。これに対して、鋼板より剛性の低い炭素繊維シートを接着したケース3は、炭素繊維の剥離、破断が徐々に

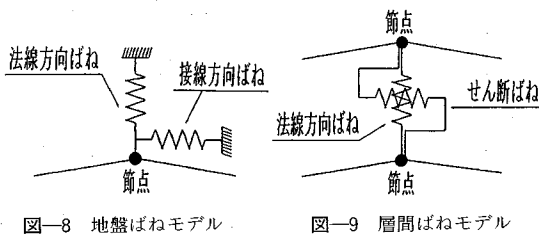


図-8 地盤ばねモデル

図-9 層間ばねモデル

発生するため、急激な荷重低下は発生せず、延性的な破壊挙動を示した。これより、過大な剛性の補強材を用いると変形抑制効果が大い反面、急激な破壊挙動を示すので、対策工の設計においては、内面補強工の剛性をいわずらに大きくするのではなく、予想される土圧、許容できる変位を考慮して、適切な補強材剛性および補強範囲を決定する必要がある。

### 3. 数値解析

実験結果のシミュレーションを、覆工材料、裏込注入材料、内面補強材料などの材料特性は線形弾性とし、地盤ばねはバイリニアな材料特性(表-2参照)を考慮した非線形弾性として、梁・ばねモデルによる2次元骨組解析により行った。また、そのシミュレーション結果をもとに、覆工の変形性に与える各種パラメータの感度解析も行ったので、その結果について述べる。

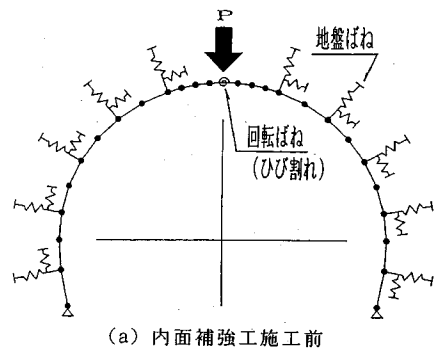
#### (1) 骨組解析プログラムの機能

シミュレーションには、(財)鉄道総合技術研究所所有の骨組解析プログラム「SAP」<sup>1)</sup>を使用した。このプログラムは、覆工を多角形の梁材とし、地盤を節点集中のばね材(図-8)とした梁・ばねモデルを解析することができる。梁材と梁材の結合条件は相対回転角に応じて曲げモーメントを伝達する回転ばねにて表現できるようになっており、この機能を用いて覆工のひび割れ発生位置に回転ばねを配置してモデル化すれば、ひび割れ発生後の挙動についても解析が可能となる。

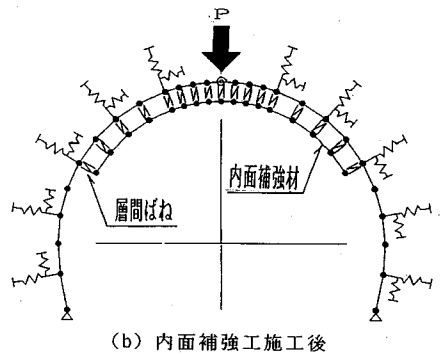
さらに、このプログラムは二重巻覆工を別構造系の多角形の梁材としてモデル化し、1次と2次の覆工間に働く力を節点間に作用させた層間ばね(法線方向ばね、およびせん断ばね;図-9参照)で表現した二重巻覆工モデルの解析もできるものとなっている。また、二層構造モデルの解析では、1次構造系モデルで解析を行い、解析途中で2次構造系モデルを付加した状態で解析を継続することができる。この特徴を利用して、研究目的のひとつである変状対策工効果を、裏込注入材や内面補強材を梁部材としてモデル化して、覆工との二層構造でシミュレートした。

#### (2) シミュレーション

対策を施さないケースについては、初期ひび割れ発生後に別のひび割れが発生するまで、つまり、2個目のひ



(a) 内面補強工施工前



(b) 内面補強工施工後

図-10 骨組解析モデル(ケース2の場合)

び割れが発生するまで、裏込注入あるいは内面補強工の対策を施すケースについては、初期ひび割れ発生後に対策工を施してから新たなひび割れが発生するまでについてシミュレーションを実施した。

#### a) 解析モデル

図-10に示している例は、ひび割れ発生後に鋼板接着による内面補強工を施したケース2の解析に用いた梁ばねモデルである。(a)は内面補強工施工前の解析モデルで、覆工を線形弾性梁材、地盤ばねを地盤ばね材(硬質円筒形ゴム)の材料特性を考慮した非線形弾性の特性を有する節点集中の法線方向ばねと法線方向ばねの1/3<sup>2)</sup>の接線方向ばねで表現し、載荷位置に発生したひび割れは弾性回転ばねを配置することでモデル化した。(b)は内面補強工施工後の解析モデルで、内面補強材(鋼板)を線形弾性梁材、内面補強材の接着による拘束力を層間ばねでモデル化し、(a)の解析モデルに付加したものである。

#### b) 層間ばねの選定

層間ばねは、基本的には供試体の梁モデル化により決定した1次および2次の構造系の節点間の材料の圧縮変形、せん断変形により算出する。しかしながら、内面補強工の場合、数種類の材料が層を形成しているので、ばね定数がどの層(材料)に依存するのか、どの層を合成すれば良いのかが明確でない。

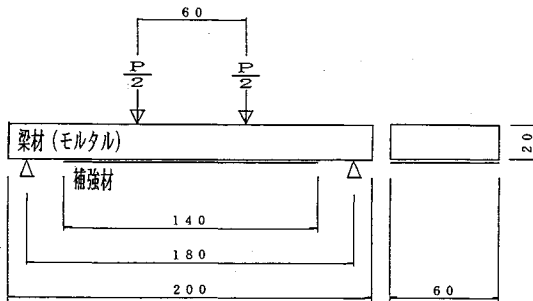


図-11 梁供試体および梁曲げ試験方法

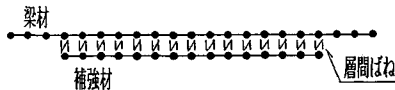


図-12 梁供試体解析モデル

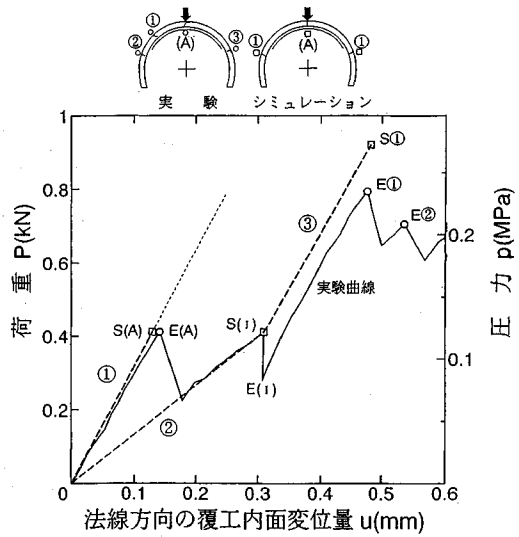
表-5 梁曲げ試験および解析結果

試験ケース	実験結果	解析結果			
		層間ばね算出にて合成した材料			
		モルタル	接着剤	モルタル + 接着剤	モルタル + 接着剤 + 補強材
無補強	1.9	1.9			
鋼板接着	1.3	1.2	1.2	1.3	
炭素繊維シート	1.7	1.7	1.7	1.7	

注) 表の値は、梁部材スパン中央のたわみ量  $u$  と荷重  $P$  の関係を示す変形性  $u/P$  ( $\times 10^{-4}$  mm/N) である。  
表に示されるように、層間ばねのばね定数は、 $u/P$  の値に対して影響が小さいことがわかる。

そこで、図-11 に示すような、供試体と同寸の断面を有するセメントモルタル造の梁部材 (20×60×200 mm) を作製し、その梁部材に鋼板接着や炭素繊維シート補強を施したものの曲げ試験を行った。また、その梁部材を図-12 に示すように梁・ばねモデル化し、層間ばね定数を算出するのに合成する材料要素を変化させて、シミュレーションを実施し、曲げ試験結果と比較検討を行った。結果の整理は、梁部材スパン中央のたわみ量  $u$  と荷重  $P$  の関係、すなわち変形性 ( $u/P$ ) にて行った。

試験およびシミュレーションの結果を表-5 に示す。当初、層間ばね値はセメントモルタル、接着剤、補強材のうちで強度的に弱いと考えられるセメントモルタルに依存すると考えていたが、SAP による解析結果は、ばね定数算出において合成する材料要素を変化させても大きく変動せず、どの場合も実験値とかなり近い値を示した。これより、ばね定数算出にあたっては、層を形成している材料全てを合成して行うこととした。また、内面補強工の実験において、接着剤がセメントモルタルをつかんだ形で剝離を生じたので、法線方向ばねの引張限界 (引張限界を超えるとばねが作用しなくなる) をセメントモルタルの引張強度により決定することとした。



- 凡例
- E(A) : 実験での(A)のひび割れ発生位置
  - E(1) : 実験での内面補強後の載荷開始位置
  - E① : 実験での①のひび割れ発生位置
  - E② : 実験での②のひび割れ発生位置
  - S(A) : 解析での(A)のひび割れ発生位置
  - S(1) : 解析での内面補強後の載荷開始位置
  - S① : 解析での①のひび割れ発生位置
  - S② : 解析での②のひび割れ発生位置
  - E(1)~S(1) : 実験での応力緩和の解析直線 (但しばね定数  $K_R = \infty$ )
  - ① : 初期ひび割れ発生までの解析直線 ( $K_R = 330$  kN-mm/rad)
  - ② : 内面補強施工前の解析直線 ( $K_R = 330$  kN-mm/rad)
  - ③ : 内面補強施工後の解析直線 ( $K_R = 330$  kN-mm/rad)

図-13 シミュレーション方法 (ケース2の場合)

c) シミュレーションの手順

図-13 は、ケース2の実験およびシミュレーションの荷重  $P$  と載荷位置での覆工内面の変位量  $u$  の関係を示したもので、これを例としてシミュレーション手順の説明を行う。

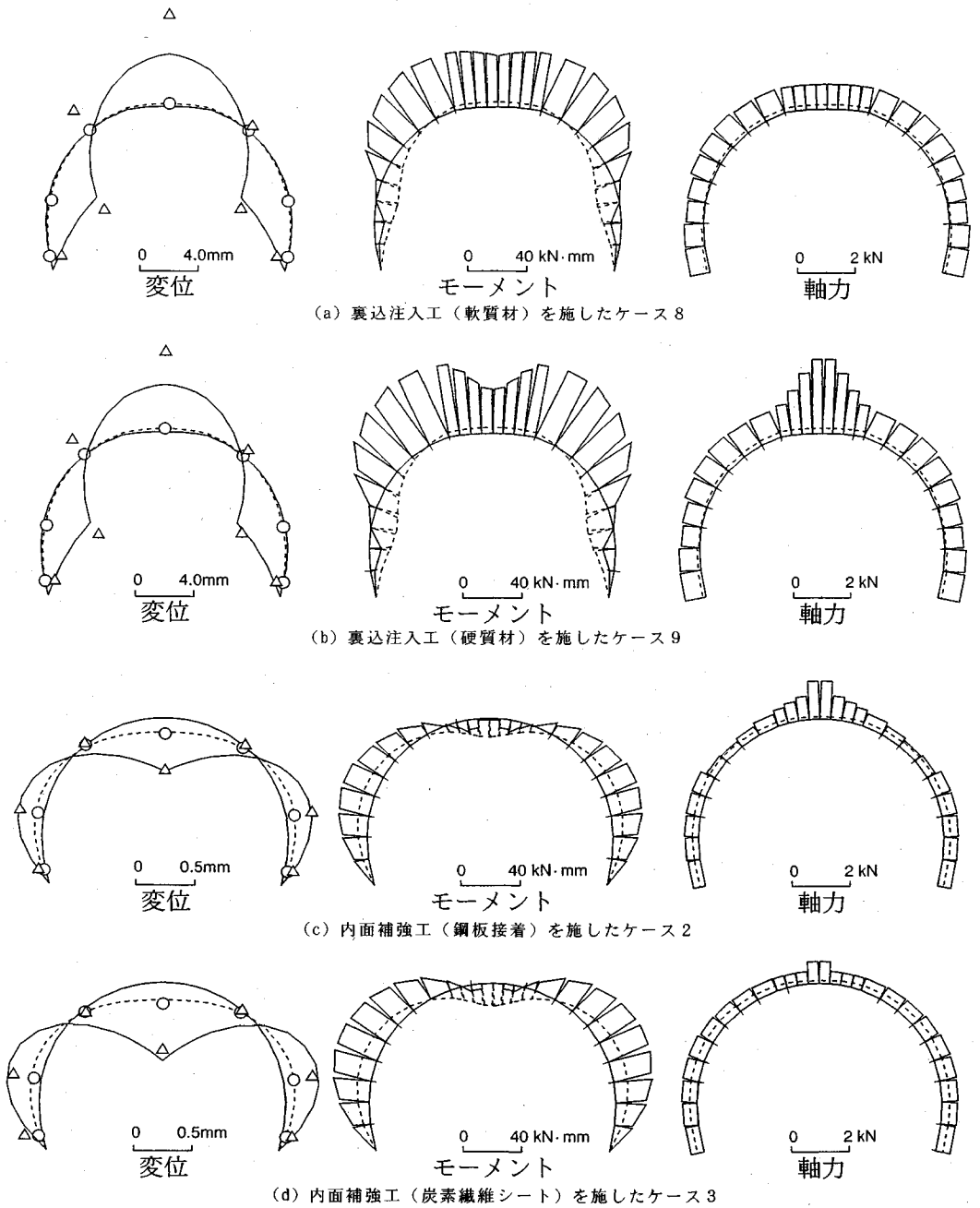
初期ひび割れ発生までは弾性回転ばね  $K_R$  を無限大 (剛結合) として解析する。(解析直線①)

次に、初期ひび割れが発生して、載荷板押込み量  $\delta = 0.14$  mm だけ載荷した後の内面補強工を施すために載荷を中断した時点 S(1) に一致するような弾性回転ばね  $K_R$  を逆解析により算出する。算出した  $K_R$  を用いて S(1) の段階まで解析を実施し (解析直線②),  $K_R$  はそのまま内面補強材、層間ばねを付加し、対策後の載荷再開時点 E(1) から新たなひび割れ発生時点 E①までの増加分の荷重を加えて解析を継続する。(解析直線③)

図-13 から、解析直線①~③の勾配が実験値を良くシミュレートできていることがわかる。ただし、解析では、実験での内面補強工の施工・養生のための時間経過に伴い発生する応力緩和 (S(1)~E(1)) を表現できないので、S(1) が内面補強工施工後の載荷 (解析) 再開時点となる。

d) シミュレーション結果

対策工モデルについて、シミュレーションにより得ら



シミュレートした段階	シミュレーション荷重 (kN)			
	ケース 8	ケース 9	ケース 2	ケース 3
初期ひび割れ発生時	0.34	0.41	0.41	0.50
対策後の新たなひび割れ発生時	0.99	1.1	0.92	1.0

- : 実験での初期ひび割れ発生時の変位量
- △ : 実験での対策後の最初のひび割れ発生時の変位量
- ..... : 解析での初期ひび割れ発生時の変形状況、断面力
- : 解析での対策後の最初のひび割れ発生時の変形状況、断面力

図-14 シミュレーション結果



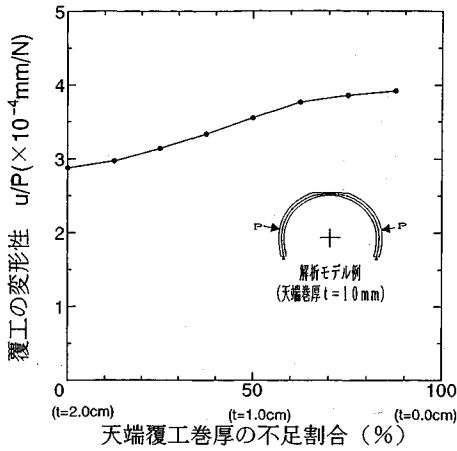


図-15 パラメータ感度解析結果  
—天端覆工巻厚不足の影響—

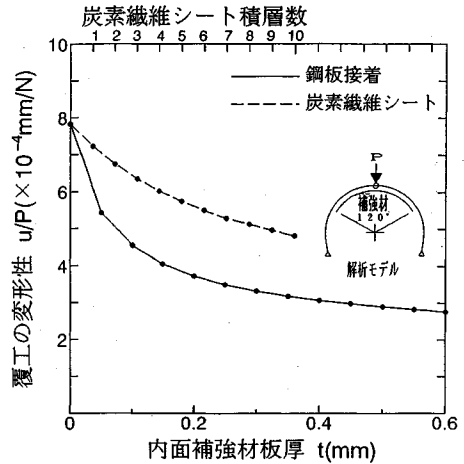


図-17 パラメータ感度解析結果  
—内面補強材厚（剛性）の影響—

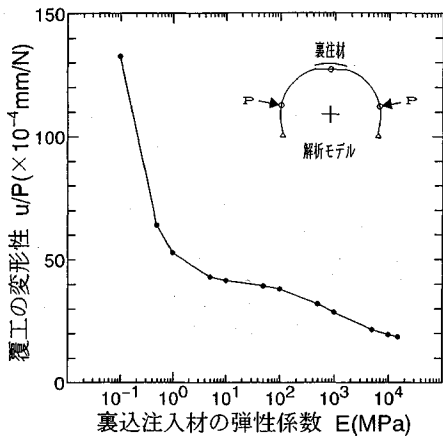


図-16 パラメータ感度解析結果  
—裏込注入材の剛性—の影響—

れた、初期ひび割れ発生時点、対策工施工後に新たにひび割れが発生した時点の各モードでの覆工変形状況、モーメント、軸力、および実験における変位量を図-14に示す。

裏込注入を施工したケースでは天端覆工変位に若干の差異が見られるが、全体的には対策工を施した場合の覆工の変形状況を良くシミュレート出来たと言える。

### (3) パラメトリック解析

天端覆工巻厚、裏込注入材の剛性、内面補強材の板厚のそれぞれのパラメータが覆工の変形にどのような影響を与えるかについて感度解析を行い、弾性的挙動を示す初期ひび割れ発生まで、あるいは対策工施工後に新たにひび割れが発生するまでの覆工の変形性  $u/P$  (数値が大きいと変形しやすく、小さいと変形しにくいことを示す) に着目して、結果を整理した。なお、対策前に発生していると仮定したひび割れはピンにて表現し解析を実

施している。

#### a) 天端覆工巻厚不足の影響

図-15に示すように、天端覆工巻厚が薄くなると覆工は変形しやすくなる。また、図から分かるように、巻厚不足割合が67%付近にひとつの変化点があり、これより不足割合が大きくなると、変形に対する抵抗力の減少度合いが少なくなり、一定値に近づく傾向があるのが特徴的である。

#### b) 裏込注入材の剛性の影響

図-16に示すように、裏込注入材の剛性が大きければ覆工の変形性は小さくなり、対策効果が向上することが分かる。しかしながら、ある程度以上は材料剛性を大きくしても顕著な変形抑制効果の向上は得られないことが分かる。これは、覆工模型実験結果から得られた傾向と一致している。

なお、この感度解析は、実験と同様に、かなり軟質な地盤を対象としているため、地盤の剛性が大きい場合については、別途検討が必要である。

#### c) 内面補強材厚の影響

図-17に示すように、内面補強材厚を厚くすれば、覆工変形の抑制効果は大きくなる。鋼板の場合は、材料自体の剛性が大きいため、板厚が比較的薄い範囲では、対策を施すことによる変形抑制効果は板厚増加に伴い顕著に大きくなるが、 $t=0.2\text{ mm}$ 程度を境にして、板厚を厚くしても効果は顕著には大きくなる。これに対して、炭素繊維シートは、鋼板に対して剛性が比較的小さいので、補強量(積層シート枚数)増加に伴い、変形抑制効果がほぼ比例関係で増加していく傾向がある。

## 4. 結 論

トンネル覆工の構造的欠陥がその変形挙動特性に与える影響、および変状対策工の効果の把握を目的として、

模型実験および解析を行った結果、いくつかの知見を得ることができたので、以下にまとめる。

(1) 覆工模型実験装置を用いた実験結果の比較により、覆工の構造的欠陥(天端巻厚不足、背面空洞)が、覆工剛性および耐力の低下に顕著に関与していること、変状対策としての裏込注入工や内面補強工は十分な効果を発揮することが確認できた。

(2) 天端が巻厚不足で背面空洞が存在すると、天端の地盤反力が得られないので、側圧に対する覆工の剛性、耐力を著しく低下させ、初期ひび割れが発生した後は、ほとんど剛性を失ってしまう。また、空洞範囲が大きいと地盤反力がより期待できなくなるので、耐力の低下へとつながる。

(3) 背面空洞に裏込注入工を施すと、覆工に地盤反力を伝達することができ、覆工の剛性、耐力を回復することができる。また、裏込注入工の効果は、注入材の剛性にはあまり依存しないことが、実験結果およびパラメータ感度解析結果より確認できた。これより、軟質な地盤においては、地盤反力のある程度伝達できる材料であれば、裏込注入工の効果を十分発揮することを示唆していると言える。

(4) 曲げ引張作用により変状が起こした覆工に内面補強を施すと、変形の抑制効果が大きく、大幅な剛性の回復、または健全覆工を上回る耐力を得ることが確認できた。ただし、内面補強工施工箇所の端部に応力が集中し、新たな弱点となる場合があるので注意が必要である。

(5) 今回の実験では、鋼板接着の場合は使用した材料の剛性(補強量)が大きく、覆工の変形抑制効果が過剰であったので、脆性的な破壊形態を示した。これに対して、剛性の小さい炭素繊維シート補強の場合は、急激な破壊形態を示さず、延性的な破壊形態を示した。また、パラメータ感度解析からは、剛性が小さい(板厚が薄い)

場合は変形抑制効果の改善度合いがある程度比例的に現れるが、ある一定の補強量を越えると変形抑制効果の改善が顕著に現れなくなる傾向が把握できた。

(6) (5)の知見から、内面補強工を施す場合は、材料剛性をいたずらに大きくするのではなく、予想土圧、許容変位を考慮した適切な剛性および接着範囲を設計することが必要である。

今後も、覆工の構造欠陥および対策工に関する実験および解析を継続し、最終目的である健全度評価法の確立と変状対策工の設計基準の作成を達成したいと考えている。

謝辞：最後に、実験の実施にご協力いただいた(株)ダイヤモンドコンサルタント東京支店の川上義輝氏、炭素繊維シート補強の実験にご協力をいただいた(株)東燃総合研究所の斉藤誠氏、田中良典氏に深甚なる謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 朝倉俊弘・小島芳之・安東豊弘・佐藤 豊・松浦章夫：トンネル覆工の力学挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.493/III-27, pp.79~88, 1994.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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—, 1986.

(1993.6.14 受付)

## BEHAVIOR OF STRUCTURALLY DEFECTIVE TUNNEL LINING AND EFFECTIVENESS OF INNER REINFORCEMENT

Toshihiro ASAKURA, Toyohiro ANDO, Fujio OMATA,  
Kazuyuki WAKANA and Akio MATSUURA

Most of existing tunnels have structural defects, such as lack of the thickness in the crown and presence of an opening behind the lining on account of its construction. We have carried out a model test and a frame analysis of influence of the defects on the lining behavior and effects of the inner reinforcement and backfill grouting on the tunnel lining.