

# 変状対策としての内面補強工の効果に関する実験的研究

## Experimental Study on the Effect of Inner Reinforcement for Deformed Tunnels

朝倉俊弘\*・安東豊弘\*\*・中田雅博\*\*\*・佐野信夫\*\*\*・若菜和之\*\*\*\*

Toshihiro ASAKURA, Toyohiro ANDO, Masahiro NAKATA, Nobuo SANO, Kazuyuki WAKANA

In an effort to establish a standard to evaluate the soundness of deformed tunnel lining, studies have been conducted using model experiments with analysis. For the purpose of modeling, we developed test units by which we can analyze the interaction between ground and lining in both two- and three-dimensional experiments. Based on experiments and subsequent analysis, the following conclusions have been drawn. 1) The effect of inner reinforcement applied to tensile strain area of lining is remarkable. 2) Brittle failure follows stress concentration at the ends of inner reinforcement when it is applied to narrow area. Research results will be implemented in "Design Manual of Countermeasures for Deformed Tunnel".

Keywords: tunnel lining, model experiment, inner reinforcement

### 1. はじめに

変状トンネル覆工の力学的評価、健全度の診断は、経験豊富な専門家の「診断」に頼らざるを得ず、また、対策工の設計・施工法の計画も類似条件下での経験・実績を参照しながら行わざるを得ない状況にある。これに対し、実験・解析・現地試験等によってトンネル覆工の力学的な挙動特性、及び対策工の効果を明らかにし、変状トンネル対策工の設計、近接施工に対する影響評価・防護工の設計、あるいは崩落地山における建設時の覆工補強工の設計等を合理的に行えるような「対策工の設計マニュアル」を作成することが本研究の目的である。

これまでの研究では、小型トンネル覆工模型実験装置を用いて、1) 複線トンネル覆工の挙動特性<sup>1)</sup>、2) 単線トンネル覆工の挙動特性<sup>2)</sup>といった基本的なトンネル覆工の力学特性<sup>3)</sup>、3) 筒体としてのトンネル覆工の3次元的な挙動特性<sup>4)</sup>を明らかにし、さらに、巻厚不足・背面空洞といった欠陥を有する覆工の力学特性と対策工の効果<sup>5)</sup>について検討を加えてきた。

本論文では、これらの研究の一環として、変状対策工としての内面補強工（鋼板、炭素繊維シート）の剛性、補強範囲をパラメータとした比較実験・解析を行った結果について報告する。

### 2. 実験

#### 2. 1 実験装置

実験装置は、図-1に示すように、新幹線標準断面（高速道路2車線断面に相当）を想定した直接載荷方式の立体模型実験

---

\* (財) 鉄道総合技術研究所 トンネル研究室  
\*\* 東日本旅客鉄道株式会社 秋田支社 工務部 施設課  
\*\*\* 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室  
\*\*\*\* ショーパント建設株式会社 土木研究所

装置（縮尺1/30）である。この装置は、載荷用部材（載荷板、反力板、地盤ばね材（硬質円筒形ゴム）、二重構造ボルト）、反力フレーム、側壁脚部ストッパー、脚部沈下機構、底板等からなる。載荷用部材は、覆工模型断面の法線方向に11組設置され、これらが軸方向にも11列配置されており、3次元モデルの実験もできる構造となっている。ボルトは2重構造となっており、内側のボルトによりゴムの圧縮・解放を行うことが可能で、ゴムの弾力により地盤反力を表現できる。載荷箇所は、円筒形ゴムを鋼製円筒管に交換して外側のボルトをねじ込むことにより載荷板を介して直接覆工に変位を与える。側壁脚部は、脚部ストッパー（鋼製またはゴム製）の着脱により水平内側方向の拘束条件（インバートの有無、道床碎石による支持）を設定できる構造となっている。

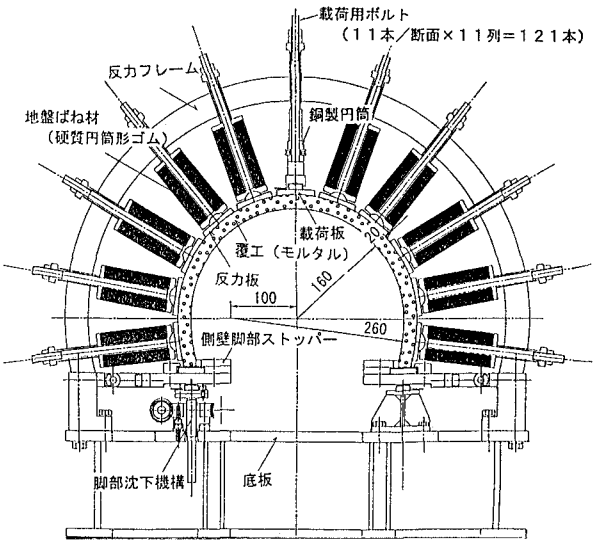


図-1 覆工模型実験装置

2.2 実験ケース及び実験材料

表-1に実験ケースを示す。今回の実験は、内面補強工（鋼板及び炭素繊維シート）の効果を明らかにするために行ったものであり、2次元モデル（軸方向に載荷板1枚分60mmの奥行きをもつ覆工模型）を用いてアーチ天端部より鉛直載荷を行ったケースである。なお、鋼板モデルとしては、極薄厚（0.15mm）の鋼板の入手が難しく、等価な剛性をもつりん青銅板を用いた。各実験ケースは、内面補強工を施さない場合（ケース1）を基本ケースとして、以下の点に着目して行った。

①補強範囲が覆工挙動に及ぼす影響（ケース2～5（りん青銅板）、ケース6～8（炭素繊維シート））

②内面補強工の剛性が覆工挙動に及ぼす影響（ケース3、7、9）

実験に用いた材料とその物性は、表-2に示すとおりである。

2.3 実験手順

予め作成した覆工模型（覆工内面及び側面にひずみゲージ貼付け済）を実験装置にセットし、計測機器（小型ロードセル、棒状変位計）を配置した上で実験を行った。載荷は、変位制御によるステップ載荷とし、覆工の終局的破壊、載荷用ボルトのストローク限界、装置の載荷限界、の3つの載荷終了条件のいずれかに達するまで載荷を行った。内面補強工の施工にあたっては、初期ひび割れが発生後に載荷を一時中断し、その状態を保持したまま補強材をエポキシ樹脂系接着材で貼付け、養生後、載荷を再開した。

2.4 実験結果

実験結果は図-2～図-4に示すように、覆工のひび割れ進展、載荷位置の覆工内面の法線方向変位 $u$ と荷重 $P$ の関係について、内面補強工の補強範囲、補強材剛性の比較パラメータごとにとまとめ、表-3に示す記号を用いて整理した。なお、荷重-変位曲線図は、内面補強工の効果を比較するために、内面補強工を施した時点を原点に移動している。また、初期ひび割れ発生まで、2次ひび割れ発生（無対策の場合）または内面補強後新たなひび割れが発生するまでのそれぞれについて、載荷位置の覆工内面の法線方向変位 $u$ を荷重 $P$ で除した値で

表-1 実験ケース

| 実験番号 | 内面補強工の材質                      | 対策範囲 $\theta$ (度) |
|------|-------------------------------|-------------------|
| 1    |                               |                   |
| 2    | りん青銅板 (厚さ0.30mm)              | 30                |
| 3    |                               | 60                |
| 4    |                               | 120               |
| 5    |                               | 180               |
| 6    | 炭素繊維シート (20g/m <sup>2</sup> ) | 30                |
| 7    |                               | 60                |
| 8    |                               | 120               |
| 9    | りん青銅板 (厚さ0.15mm)              | 60                |

表-2 実験材料及びその物性

| 種別    | 使用材料    | 物性                                                 |
|-------|---------|----------------------------------------------------|
| 覆工模型  | モルタル    | 一軸圧縮強度 $\sigma_{lc}=270\text{kgf/cm}^2$            |
|       |         | 圧縮弾性係数 $E_{lc}=1.5\times 10^5\text{kgf/cm}^2$      |
| 地盤ばね材 | 硬質円筒形ゴム | ばね定数 $K_t=80\text{kgf/cm}$<br>(変位量4mmまでは110kgf/cm) |
| 内面補強材 | りん青銅板   | 厚 $t=0.30\text{mm}, 0.15\text{mm}$                 |
|       |         | 引張弾性係数 $E_{st}=1.2\times 10^5\text{kgf/cm}^2$      |
|       | 炭素繊維シート | 炭素繊維量 $F.A.W=20\text{g/m}^2$ *                     |
|       |         | 引張弾性係数 $E_{CFt}=4.2\times 10^5\text{kgf/cm}^2$     |

注\*)  $F.A.W=20\text{g/m}^2$  : 実寸での300g/m<sup>2</sup>のシート2層分に相当

表-3 実験結果整理記号一覧表

| 使用記号等      | 内容                                                  |
|------------|-----------------------------------------------------|
| $u$        | 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 (kgf)                                      |
| $p$        | 載荷位置での圧力 $P/33.8\text{cm}^2$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| ○△▽□◇      | 引張りひび割れ                                             |
| ●▲▼◆       | 圧さ (圧縮ひび割れ)                                         |
| ①△▽□◇      | せん断ひび割れ                                             |
| ⊗⊗⊗⊗       | 内面補強材の剥離・破断                                         |
| A B C D .. | 無対策および対策前のひび割れ発生順序                                  |
| ①②③④ ..    | 対策後のひび割れ発生順序                                        |

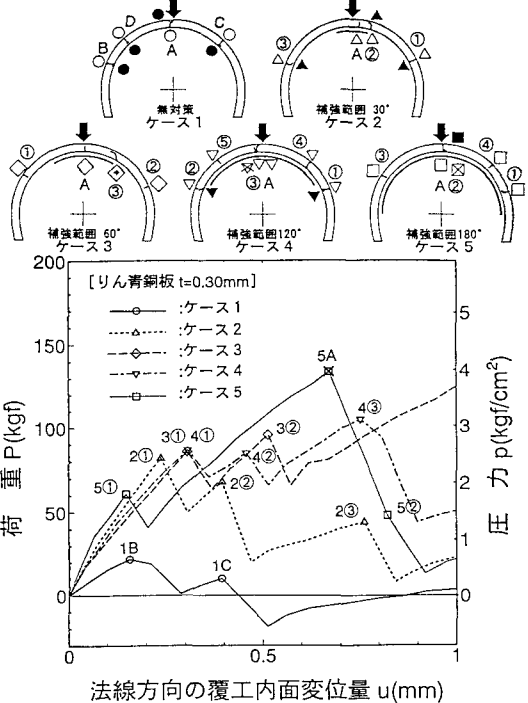
ある「覆工の変形性 $u/P$ 」を表-4～表-6に示す。覆工の変形性は値が大きければ覆工が変形しやすく、小さければ変形しにくいことを示す。表中の「変形性比」とは、対策後の覆工の変形性を対策前（ひび割れなし）の覆工の変形性で除した値で、対策工効果を示す指標であり、値が大きければ補強効果が小さく、小さければ補強効果が大いことを表す。

(1) 覆工挙動の全体的な傾向

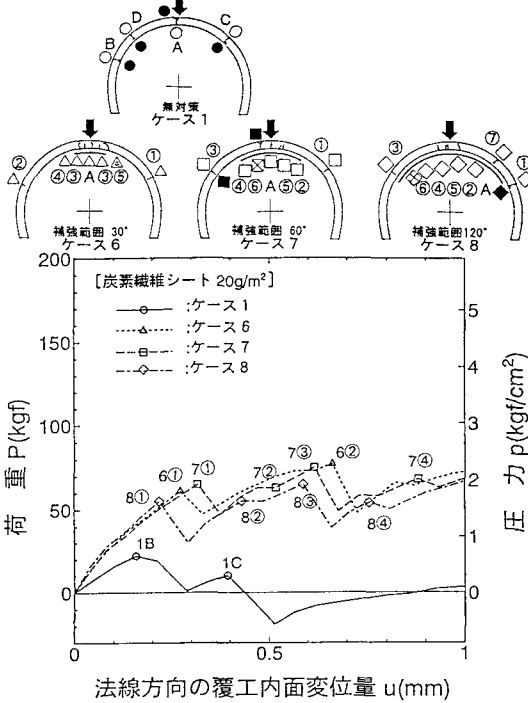
初期ひび割れ発生までの範囲内においては、覆工は弾性的な変形挙動を示し、初期ひび割れ発生後は、新たなひび割れが発生するごとに構造系が変化し、既存のひび割れの閉合が見られることもあった。初期ひび割れ、せん断ひび割れ、内面補強材の剥離は急激な荷重低下により発生ステップを特定することができたが、圧力は引張りひび割れの進展により徐々に有効断面積が減少しながら発生するため、荷重の急激な低下は示さず発生ステップを特定することができない場合が多かった。

(2) 内面補強工の補強範囲が覆工挙動に及ぼす影響

内面補強材として、りん青銅板 $t=0.30\text{mm}$ 、炭素繊維シート $20\text{g/m}^2$ を用い、補強範囲を変化させた場合の実験結果を図-2、図-3に示す。



法線方向の覆工内面変位量  $u(\text{mm})$   
図-2 載荷位置での荷重と変位の関係  
[補強範囲の影響 (りん青銅板 $t=0.30\text{mm}$ ) ]



法線方向の覆工内面変位量  $u(\text{mm})$   
図-3 載荷位置での荷重と変位の関係  
[補強範囲の影響 (炭素繊維シート $20\text{g/m}^2$ ) ]

表-4 覆工変形性 $u/P$   
[補強範囲の影響 (りん青銅板 $t=0.30\text{mm}$ ) ]

| ケース番号 | 補強範囲 | 覆工の変形性 $u/P$<br>( $\times 10^{-3}\text{mm/kgf}$ ) |     | 変形性比 |
|-------|------|---------------------------------------------------|-----|------|
|       |      | 対策前                                               | 対策後 |      |
| 1     | 無対策  | 3.6                                               | 8.5 | 2.36 |
| 2     | 30°  | 3.8                                               | 2.9 | 0.76 |
| 3     | 60°  | 4.0                                               | 3.5 | 0.88 |
| 4     | 120° | 4.2                                               | 3.5 | 0.83 |
| 5     | 180° | 3.1                                               | 2.5 | 0.81 |

表-5 覆工変形性 $u/P$   
[補強範囲の影響 (炭素繊維シート $20\text{g/m}^2$ ) ]

| ケース番号 | 補強範囲 | 覆工の変形性 $u/P$<br>( $\times 10^{-3}\text{mm/kgf}$ ) |     | 変形性比 |
|-------|------|---------------------------------------------------|-----|------|
|       |      | 対策前                                               | 対策後 |      |
| 1     | 無対策  | 3.6                                               | 8.5 | 2.36 |
| 6     | 30°  | 3.5                                               | 4.5 | 1.29 |
| 7     | 60°  | 3.5                                               | 4.9 | 1.40 |
| 8     | 120° | 3.3                                               | 4.0 | 1.21 |

注) 「対策前」とは初期ひび割れ発生まで、「対策後」とは、無対策のケースは2次ひび割れ発生まで、内面補強工を施すケースは施工後に新たなひび割れが発生するまでを示す。「変形性比」とは、対策後の変形性を対策前の変形性で除した値である。

1) りん青銅板 $t=0.30\text{mm}$ を接着した場合(図-2、表-4)：表-4に示すように、内面補強工を施したケース2～5は、無対策のケース1に比べ、当然のことながら変形しにくくなっている。変形性比が各ケースとも1以下になっていることより、ひび割れが内面補強材により拘束され、ひび割れのない健全な覆工よりも変形しにくくなっていることが確認でき、内面補強工による十分な変形抑制効果があることがわかる。補強範囲の違いによる覆工の変形性は大きくは異ならない。しかしながら、破壊形態を見ると、補強範囲の覆工内側には新たな引張ひび割れの発生は見られず、最終的には、補強範囲が $30^\circ$ 、 $60^\circ$ と狭い場合は補強材端部の覆工にせん断ひび割れが発生し、 $120^\circ$ 、 $180^\circ$ と広い場合は載荷点付近に補強材の剥離が生じた。

2) 炭素繊維シート $20\text{g}/\text{m}^2$ を接着した場合(図-3、表-5)：りん青銅板と同様に、内面補強工を施したケース6～8は、無対策のケース1に比べて、変形しにくくなっている。変形性比を見ると1を超えていることから、ひび割れなしの状態までの回復には至っていないが、無対策のケースの変形性比2.36に比べると小さな値を示しており、補強量としては比較的小さい炭素繊維シート $20\text{g}/\text{m}^2$ でも既存のひび割れの開口を拘束することができ、変形抑制効果があると言える。補強範囲の違いによる影響は、りん青銅板の場合と同様に、覆工の変形性は大きくは異ならないが、破壊形態は、どのケースとも補強範囲内の覆工内面に新たなひび割れがいくつか発生し、最終的には、補強範囲が $30^\circ$ と狭い場合は補強材端部の覆工にせん断ひび割れが発生し、脆性的な破壊挙動を示したのに対し、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ と広い場合は補強材の剥離や破断が徐々に生じ、延性的な破壊挙動を示した。

### (3) 内面補強材の剛性が覆工挙動に及ぼす影響

内面補強材の剛性(材質)を変化させた場合の実験結果を図-4に示す。なお、補強範囲は $60^\circ$ である。

内面補強材として使用したものは3種類で、剛性の順序は以下の通りである。

りん青銅板 $t=0.30\text{mm}$ (ケース3)>りん青銅板 $t=0.15\text{mm}$ (ケース9)>炭素繊維シート $20\text{g}/\text{m}^2$ (ケース7)

表-6に示すように、内面補強工を施したケースは無対策のケースに比べて変形性比がかなり小さくなっている。また、剛性の大きさ順に変形性比もなっており、十分な補強効果を發揮していることがわかる。破壊形態を見ると、剛性の大きいりん青銅板 $t=0.30\text{mm}$ の場合は、補強範囲内の覆工内面には新たなひび割れの発生は見られず、補強材端部の覆工にせん断ひび割れが発生した。りん青銅板 $t=0.15\text{mm}$ の場合は、補強範囲内に分散したひび割れが徐々に発生し、載荷点下の補強材が剥離した。剛性の小さい炭素繊維シート $20\text{g}/\text{m}^2$ の場合は、補強範囲内に分散したひび割れが発生し、補強材の剥離、破断が徐々に発生した。

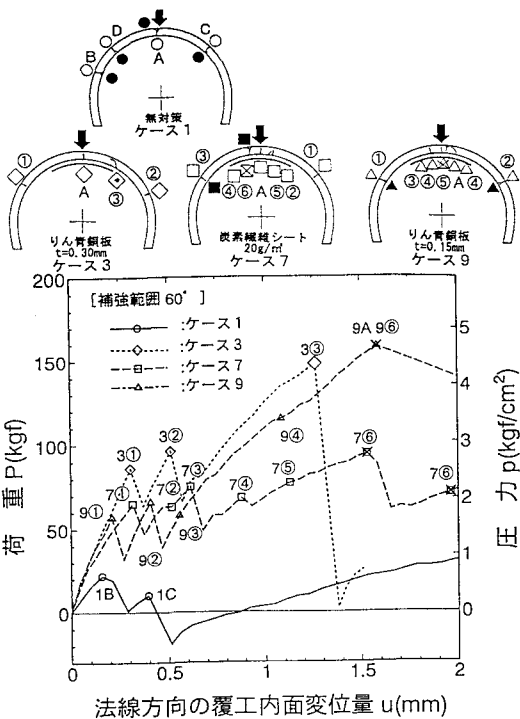


図-4 載荷位置での荷重と変位の関係

〔補強材剛性の影響(補強範囲 $60^\circ$ )〕

表-6 覆工変形性 $u/P$

〔補強材剛性の影響(補強範囲 $60^\circ$ )〕

| ケース番号 | 補 強 材                           | 覆工の変形性 $u/P$<br>( $\times 10^{-3}\text{mm}/\text{kgf}$ ) |     | 変形性比 |
|-------|---------------------------------|----------------------------------------------------------|-----|------|
|       |                                 | 対策前                                                      | 対策後 |      |
| 1     | 無対策                             | 3.6                                                      | 8.5 | 2.36 |
| 3     | りん青銅板 $t=0.30\text{mm}$         | 4.0                                                      | 3.5 | 0.88 |
| 7     | 炭素繊維シート $20\text{g}/\text{m}^2$ | 3.5                                                      | 4.9 | 1.40 |
| 9     | りん青銅板 $t=0.15\text{mm}$         | 3.6                                                      | 3.7 | 1.02 |

注) 「対策前」とは初期ひび割れ発生まで、「対策後」とは、無対策のケースは2次ひび割れ発生まで、内面補強工を施すケースは施工後に新たなひび割れが発生するまでを示す。「変形性比」とは、対策後の変形性を対策前の変形性で除した値である。

- (3) 内面補強工の補強範囲については、補強範囲を変化させても実験誤差（覆工モルタルのバラツキ等）を上回るほどの変形性比の大きな差は生じず、覆工の変形抑制効果の改善は確認できなかった。
- (4) 内面補強工の補強範囲が狭いと、補強材端部付近の覆工にせん断ひび割れが発生して脆性的な破壊挙動を示した。

### 3. 解析

模型実験の解析は、実験に使用した材料の物性試験結果より、覆工および内面補強材は線形弾性、地盤ばねは非線形弾性な材料特性を持つものとして、(財) 鉄道総合技術研究所所有の2次元骨組解析プログラム「SAP」<sup>⑧</sup>を用いて行った。このプログラムは覆工を梁材、地盤を節点集中ばねで表現した梁・ばねモデルを解析することができる。また、二重構造の覆工についても重ね梁で表現でき、1次と2次覆工の節点間に作用させた層間ばねによって力を伝達させることができる。さらに、1次覆工モデルで解析を開始し、途中で2次覆工を付加して解析を継続する事ができる特長を持っている。この機能を利用して、内面補強材を梁としてモデル化し接着層の拘束力を層間ばねで表現して解析を行った。以下に、シミュレーション結果とパラメータ解析結果について述べる。

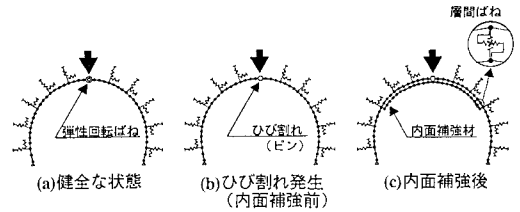


図-5 骨組解析モデル（ケース4の場合）

#### 3. 1 シミュレーション解析

無対策のケースは初期ひび割れ発生時、2次ひび割れ発生時について、内面補強工を施したケースは初期ひび割れ発生時、対策工施工後の新たなひび割れ発生時について、それぞれシミュレーションを行った。

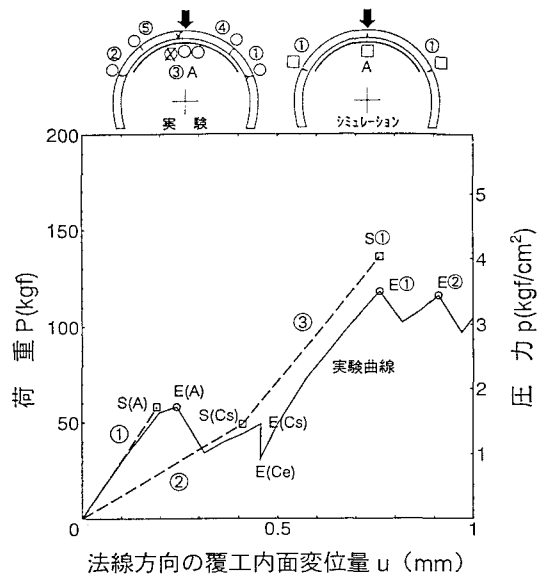
##### (1) 解析モデル

図-5に示しているのが、りん青銅板 $t=0.30\text{mm}$ にて $120^\circ$ の範囲で内面補強工を施工したケース4の解析モデルである。(a)はひび割れのない健全な状態のモデルで、(b)は載荷点下にひび割れが発生した状態のモデル（内面補強工を施工する前のモデル）で、引張ひび割れはピンで表現した。なお、接線方向の地盤ばね定数は、法線方向の地盤ばね定数の $1/3^{⑦}$ とした。(c)は内面補強工施工後のモデルで、内面補強材を梁、接着層を層間ばねとして(b)のモデルに付加したものである。

##### (2) シミュレーション手順

図-6は、ケース4の実験およびシミュレーションでの載荷位置の荷重 $P$ と覆工内面変位 $u$ の関係を示したものである。シミュレーション手順としては、

- ① 初期ひび割れ発生 $E(A)$ までは弾性回転ばねを無限大（剛結合）として、 $S(A)$ までの解析を行う。（解析直線①）
- ② 縁応力が最大引張応力となる点を初期ひび割れ発生位置とし、その点の弾性回転ばね定数を0（ピン結合）にして、内面補強工を施すために載荷を中断した時点 $E(Cs)$ までの解析を実施する。（解析直線②）
- ③ そのままの状態の内面補強材、層間ばねを付加し、対策



| 凡 例                |                                               |
|--------------------|-----------------------------------------------|
| $E(A)$             | : 実験での A のひび割れ発生                              |
| $E(Cs)$            | : 実験での内面補強工施工開始                               |
| $E(Ce)$            | : 実験での内面補強後の載荷開始                              |
| $E(①)$             | : 実験での ① のひび割れ発生                              |
| $E(②)$             | : 実験での ② のひび割れ発生                              |
| $S(A)$             | : 解析での A のひび割れ発生                              |
| $S(Cs)$            | : 解析での内面補強後の載荷開始                              |
| $S(①)$             | : 解析での ① のひび割れ発生                              |
| $E(Cs) \sim E(Ce)$ | : 実験での応力緩和                                    |
| ①                  | : 初期ひび割れ発生までの解析直線<br>(回転ばね定数 $K_R = \infty$ ) |
| ②                  | : 内面補強施工前の解析直線<br>(回転ばね定数 $K_R = 0$ )         |
| ③                  | : 内面補強施工後の解析直線<br>(回転ばね定数 $K_R = 0$ )         |

図-6 シミュレーション方法（ケース4の場合）

後の載荷再開時点E (Ce)から新たなひび割れ発生時点E①までの荷重の増分を用いて解析を継続する。(解析直線③)  
 図-6からわかるように、解析直線①～③の勾配が実験値とほぼ同じ勾配を示しており、かなりの精度でシミュレートできていると言える。ただし、実験での内面補強工の施工作業・接着剤養生に伴う時間経過による荷重低下 (E (Cs)ーE (Ce))を解析上では表現できないので、S (Cs)が解析上の内面補強工施工後の載荷 (解析) 再開時点となる。

### (3) シミュレーション結果

図-7に、無対策のケース1の初期および2次ひび割れ発生時点、内面補強工を施したケース4の初期ひび割れ発生時点および内面補強後に最初のひび割れが発生した時点の、覆工の変形状況、内外面縁応力を示す。なお、覆工の内面・外面縁応力の実験値は、覆工側面に貼付けたひずみゲージの測定値に覆工モルタルの圧縮弾性係数を乗じて算出したものである。引張ひび割れ発生時には、材料の非線形性により、 $\mu$ を超える大きなひずみが発生するが、これに初期接線弾性係数を乗じたために、応力値としてはかなり大きな値となっている。図-7実験結果とシミュレーション結果は全体的によく一致していることが分かる。

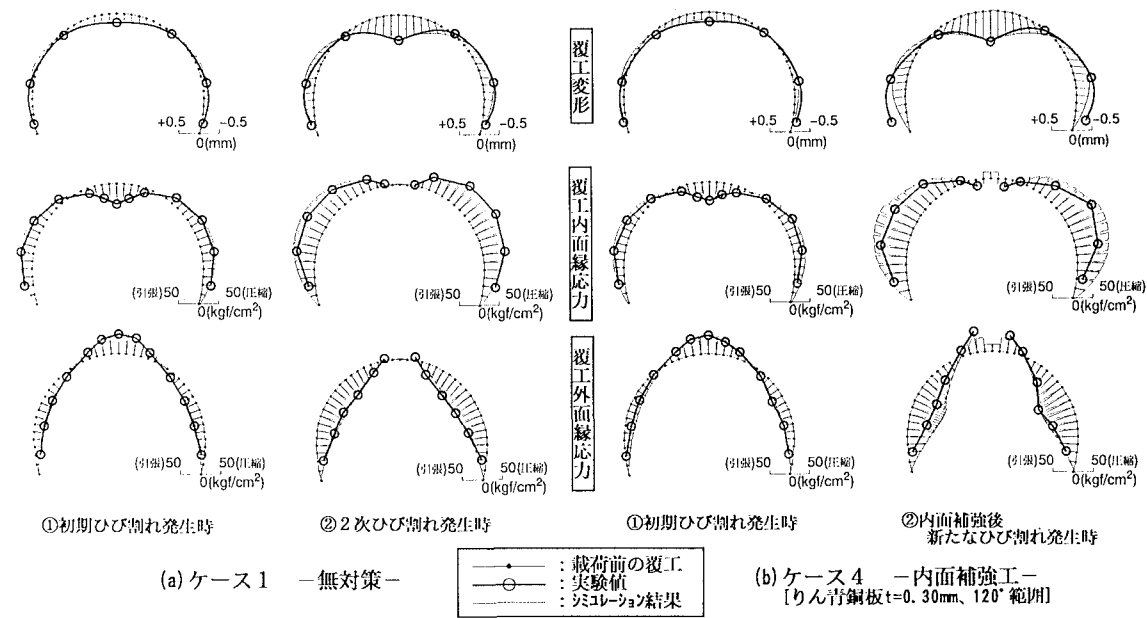


図-7 シミュレーション結果

### 3. 2 パラメータ解析

内面補強材厚 (剛性)、内面補強範囲をパラメータとして、表-7に示す範囲で変化させ、覆工の変形性に着目した感度解析を行った。解析モデルは覆工模型実験サイズで鉛直載荷とし、内面補強工施工前に発生していると仮定した載荷点下のひび割れはピンで表現した。なお、地盤ばねは、表-7に示した地盤弾性係数 $E_G$ から求めたばね定数を用いており、覆工弾性係数 $E_L=1.5\times 10^5\text{ kgf/cm}^2$ にて除した $E_G/E_L$ にて各項目ごとに整理した。

#### (1) 内面補強材厚 (剛性) が覆工挙動に及ぼす影響

図-8に示すのは内面補強範囲を $60^\circ$ として鋼板板厚を変化させた場合である。鋼板厚 (剛性) を大きくすれば、覆工の変形性は小さくなり、変形抑制効果が向上している。しかしながら、板厚 $t=0.20\text{mm}$ 程度を境として変形抑制効果の顕著な向上は認められない。また、周辺地盤が軟らかいと地盤による覆工変形抑制力が小さいため、鋼板厚を変化させることにより変形性の差が顕著に表れるが、周辺地盤が硬いと地盤によって覆工変形が抑制されるので、鋼板厚を変化させても変形性の大きな変化は起こらない。

表-7 解析パラメータ

| 解析パラメータ           | 範 囲                                                                               |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 鋼 板 板 厚           | 0.05 ~ 0.50mm<br>(弾性係数 $E=2.0\times 10^6\text{ kgf/cm}^2$ )                       |
| 炭素繊維シート積層数        | 1 ~ 10 層 (10 ~ 100 $\text{g/m}^2$ )<br>(弾性係数 $E=4.2\times 10^5\text{ kgf/cm}^2$ ) |
| 内 面 補 強 範 囲       | $30^\circ \sim 180^\circ$                                                         |
| 周辺地盤変形係数 $E_G$    | $1.5\times 10^1 \sim 1.5\times 10^6\text{ kgf/cm}^2$                              |
| 覆 工 弾 性 係 数 $E_L$ | $1.5\times 10^5\text{ kgf/cm}^2$                                                  |

注) 炭素繊維シートの弾性係数は硬化板としての値である。

図-9に示すのは内面補強範囲を $60^\circ$ として炭素繊維シート積層数を変化させた場合である。炭素繊維シートは鋼板に比べると、シート自体の剛性が小さいため、炭素繊維シート積層数を増やすことによる変形抑制効果の向上は認められるが、鋼板に比べると効果は小さい。しかし、積層数の増加に伴い、変形抑制効果がほぼ比例的に向上する。周辺地盤の影響に関しては鋼板の場合と同様の傾向が認められる。ただし、この傾向は周辺地盤が軟らかい場合についてであり、周辺地盤が硬いと変形性の大きな差は生じない。

(2) 内面補強範囲が覆工挙動に及ぼす影響

図-10に示すのは内面補強材として鋼板( $t=0.30\text{mm}$ )を使用して補強範囲を変化させた場合である。補強範囲が $90^\circ$ 程度までは変形抑制効果の向上はほとんど認められないが、補強範囲が $120^\circ$ を越えると変形抑制効果の向上が認められる。これは鋼板自体の剛性が大きいので、広い範囲を補強すれば覆工全体の剛性向上へ寄与しているためと考えられる。ただし、この傾向は周辺地盤が軟らかい場合についてであり、周辺地盤が硬いと変形性の大きな差は生じない。

図-11に示すのは、内面補強材として炭素繊維シート2層( $20\text{g/m}^2$ )を使用して補強範囲を変化させた場合である。補強範囲を変化させても、覆工の変形抑制効果の向上は認められない。炭素繊維シート補強はひび割れの開口拘束力はあるが、覆工剛性の向上に寄与するほどのシート剛性はないので、補強範囲を広げても変形抑制効果の向上が發揮されないものと考えられる。

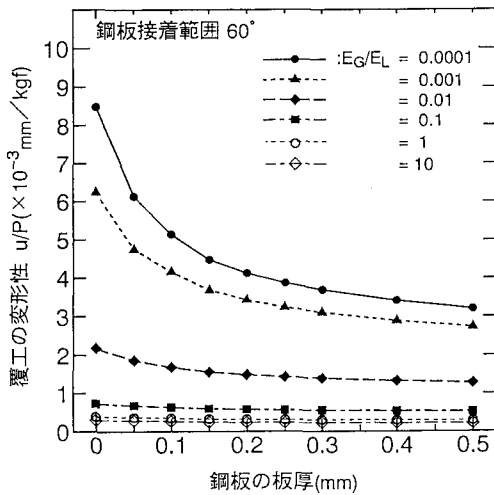


図-8 パラメータ解析結果

[補強材(鋼板)剛性の影響(補強範囲 $60^\circ$ )]

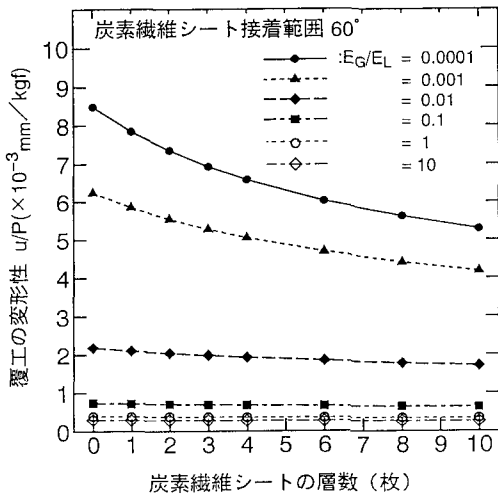


図-9 パラメータ解析結果

[補強材(炭素繊維シート)剛性の影響(補強範囲 $60^\circ$ )]

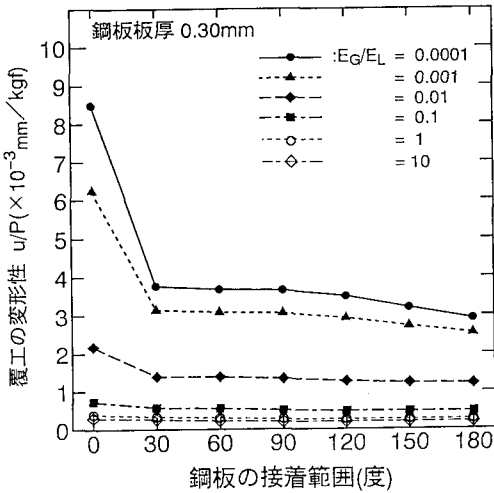


図-10 パラメータ解析結果

[補強範囲の影響(鋼板 $t=0.30\text{mm}$ )]

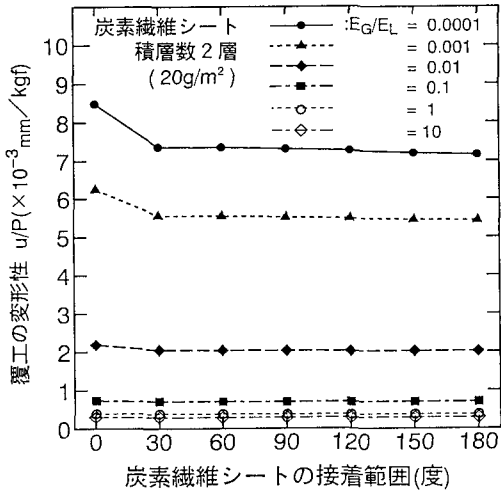


図-11 パラメータ解析結果

[補強範囲の影響(炭素繊維シート $20\text{g/m}^2$ )]

## 4. まとめ

### 4. 1 結論

比較実験の結果、さらに、実験結果のシミュレーションを経て、パラメータ解析を行った結果、以下のような興味深い結果が得られた。

- (1) 内面補強工は、覆工内側の引張応力部分に施工すれば、覆工の変形性を抑制し、その補強効果は顕著である。
- (2) 内面補強工の施工範囲が狭い場合には、その端部で剛性の急変による応力集中が生じ、せん断ひび割れが発生して脆性的な破壊挙動を示す。逆に施工範囲が広い場合には、補強材の剥離や破断が徐々に生じ、延性的な破壊挙動となる。その傾向は、補強材の剛性が高いほど顕著である。
- (3) 内面補強工の剛性が小さい範囲では、その剛性を増せばそれだけ変形性の抑制効果が得られるが、ある程度以上の剛性になると、剛性の増加に対応した補強効果は得られなくなる。

これらの結果を変状対策の設計実務に反映させるためには、以下のような配慮が必要と考えられる。

- (1) 内面補強工の剛性は、覆工の変形性の抑制という観点からは想定される地圧の大きさによって決定される。なお、内面補強工には、覆工破壊挙動を延性的に改善する効果も期待できる。
- (2) 内面補強工の施工範囲は、想定される地圧の作用範囲だけでなく、補強工端部の応力集中についても検討を要する。
- (3) 地圧規模が大きい場合には、内面補強材としてあまり厚い鋼板を使用することは得策でなく、内面補強工と鋼製支保工やロックボルトとの併用、あるいは、内巻等の代替工法を検討すべきである。
- (4) 逆に、地圧規模が小さい場合には、内面補強工に変形抑制効果を期待しなくてもよいので、覆工片の落下防止も兼ねて、薄い炭素繊維シートを施工することが適当と考えられる。

### 4. 2 今後の課題

これまでの検討は、実験および解析に基づくものであり、今後現地における内面補強工の施工性に関する実験工事、あるいは効果確認のための実験工事を実施すべく、計画中である。さらに、ひび割れの覆工全体挙動に及ぼす寸法効果、骨組み解析以外の解析手法の適用性についても、あわせて検討を深度化したいと考えている。最終的には、これらの研究成果は「変状トンネル対策工の設計マニュアル（仮題）」として集約する予定である。

## 5. おわりに

トンネル変状対策工としての鋼板や炭素繊維シートを用いた内面補強工の効果について、覆工模型実験および骨組み解析による検討結果について述べた。前項でも述べたように、現地試験等を経て、今後さらに検討を深度化していきたいと考えている。なお、本研究は、(財) 鉄道総合技術研究所と日本道路公団試験研究所、およびショーボンド建設(株)の3者の共同研究の成果をとりまとめたものである。最後に、本研究にご協力頂いた(財) 鉄道総合技術研究所小島芳之氏、佐藤豊氏、日本道路公団中野清人氏、ショーボンド建設(株)小俣富士夫氏、近藤悦郎氏、松尾伸二氏、東燃(株) 斉藤誠氏、ダイヤコンサルタント(株) 川上義輝氏に深甚なる謝意を表し、結びとする。

#### [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、1991.12
- 2) 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(2)－単線トンネル覆工模型実験とシミュレーション－、トンネル工学研究発表会論文・報告集第2巻、1992.10
- 3) 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, 1994.6
- 4) 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解析(3)－トンネル覆工の3次元挙動－、トンネル工学研究発表会論文・報告集第3巻、1993.11
- 5) 朝倉俊弘、安東豊弘、小俣富士夫、若菜和之、松浦章夫：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、土木学会論文集 No.493/Ⅲ-27, 1994.6
- 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－、1986