

# 覆工材料に着目した山岳トンネルの変形破壊挙動の評価

野城 一栄\* 岡野 法之\* 小島 芳之\*\*

## Evaluation of Deformation and Failure Behavior of Mountain Tunnel Linings on Their Materials

Kazuhide YASHIRO Noriyuki OKANO Yoshiyuki KOJIMA

Authors performed model tests of mountain tunnel linings which consist of various materials, and the following conclusions were obtained. The plain concrete lining does not show a decrease in the load until it receives quite large deformation, which means its good deformability, whereas compressive cracks occur on the inner side of the tunnel after it receives large deformation. The brick lining has smaller structural stiffness and bearing capacity than those of the plain concrete lining, and cracks occur between the two beds of bricks after it receives large deformation. The short-fiber-reinforced concrete lining has good unti-spalling ability, whereas its structural stiffness and bearing capacity are almost the same as those of the plain concrete lining. The reinforced concrete lining has the largest structural stiffness and bearing capacity, and it is able to support the load after the yielding of its rebars, whereas shear failure becomes easy to occur.

キーワード：山岳トンネル，覆工，模型実験，変形，破壊，覆工材料

### 1. はじめに

山岳トンネルは、地質などの条件によっては地圧の作用や地震による影響を受けることがある。これまでの研究(例えば<sup>1)</sup>)により山岳トンネルの覆工は大きな変形に耐えられることが知られている。一方で、実務においてはアーチ構造を有する山岳トンネルの特性がまだ十分に考慮できておらず、例えば、設計の実務においては引張りひ割れの発生や鉄筋降伏の発生などを指標として、維持管理の実務においてはひび割れ幅や内空変位速度などを代替的な指標として<sup>2)</sup>、安全性が評価されているのが実情である。

上記の問題は山岳トンネル覆工の限界状態が明確に定義されていないことに起因すると考えられる。ここで、限界状態の定義が困難である理由として、山岳トンネルは地山に囲まれたアーチ構造物であり、軸力と曲げが変形に応じてそれぞれ増加するため、変形破壊挙動が複雑であること、覆工の仕上がりが施工に依存しがちであり巻厚不足や背面空洞なども多くのトンネルで存在していることなどが考えられる。

その他に、覆工の限界状態を考える際の難しさとして、覆工材料の多様性がある。図1に山岳トンネルの覆工材料の変遷を示す。図より、れんが、コンクリートブロック、場所打ちコンクリートとさまざまな素材の材料が用いられていることがわかる。明治時代の覆工には主にれんがや石材が用いられていた。大正時代より場所打ち

コンクリートが徐々に用いられるようになるが、当時の場所打ちコンクリートは人力作業による練り混ぜ、打設が中心であり、確実に巻厚を確保できるコンクリートブロックが一時的に用いられた。昭和に入ると場所打ちコンクリートが一般的に用いられるようになった。

その他、覆工は地質条件、地形条件に応じて補強がなされる場合がある。図2に山岳トンネルにおける無筋コンクリート/RCの使い分けの例を示す。安定した地山に建設される場合は通常は無筋コンクリートとなるが、坑口部、小土被り部、不良地山部では、将来的な荷重の作用の可能性を考慮してRC構造とする場合がある。また、最近では、繊維補強コンクリートを採用する例もある。

本研究では、このような背景を踏まえ、山岳トンネル覆工の限界状態を明らかにし、安全性の評価の一助とすることを目的として、無筋コンクリート、れんが、短繊維補強コンクリート、RCなど様々な材料を用いた覆工について、変形破壊挙動に着目して1/5スケール模型実験を行った。以下、実験結果<sup>3)</sup>について示すことにする。

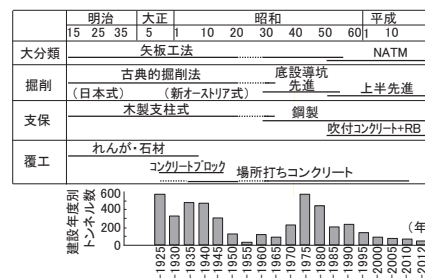


図1 トンネルの覆工材料の変遷と建設年度別箇所数

\* 構造物技術研究部 トンネル研究室

\*\* 構造物技術研究部

特集：構造物技術

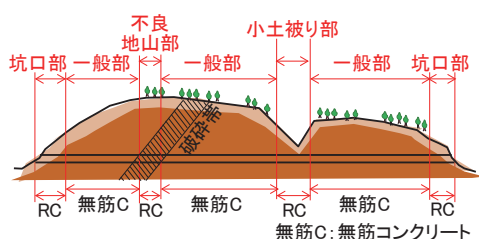


図2 山岳トンネルにおける無筋C/RC使い分けの例

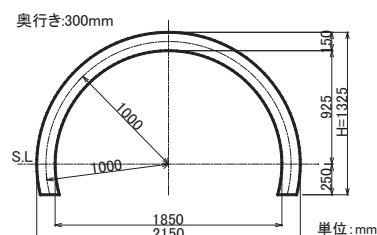


図4 トンネル覆工模型の寸法

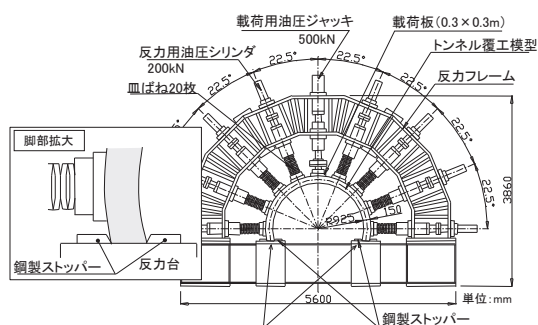


図3 覆工模型実験装置<sup>4)</sup>

表1 覆工模型実験装置の諸元

構成部材	項目	諸元
載荷用油圧ジャッキ	最大載荷重	500kN
	最大載荷圧	5.6MPa
	ストローク	250mm
反力用油圧シリンダ	ストローク	200mm
	ばね係数	3,000kN/m
皿ばね	地盤反力係数	16MN/m <sup>3</sup> (洪積層相当)

表2 実験ケースと呼称

No	呼称	基本材料	仕様
1	無筋	コンクリート	無筋
2	れんが	れんが	れんが2層文献 <sup>5)</sup>
3	PPF	コンクリート	ポリプロピレン繊維0.05vol%補強(左) ポリプロピレン繊維0.1vol%補強(右)
4	SF	コンクリート	鋼繊維0.5vol%
5	RC	モルタル	鉄筋補強

2. 実験方法

2.1 模型実験装置

実験には大型トンネル覆工模型実験装置<sup>4)</sup>(図3)を用いた。実験装置の縮尺は実物(新幹線複線標準断面)の1/5相当である。実験装置は、載荷用油圧ジャッキ、反力用油圧シリンダ、反力フレームなどで構成され、覆工模型の周囲に皿ばねが配置されており、覆工と地盤との相互作用を模擬することができる。覆工模型実験装置の諸元を表1に示す。本実験装置は、縮尺を1/5とすることにより実験装置を比較的規模の小さいものに抑えて実験の負担を減らしつつ、材料については実際のトンネルで使われているものと同じものが使えるようにし、実

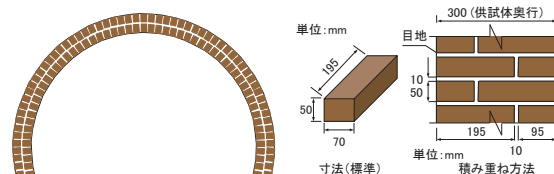


図5 れんがの組積図(ケース2)

物に近い変状が模型に生じるように工夫がしてある。

2.2 実験ケース

実験ケースは、覆工材料による変化を調べるため表2に示す5ケースとした。模型の寸法を図4に示す。巻厚は矢板工法による新幹線トンネル(巻厚70cm)を想定して150mmを標準とし、奥行きは300mmとした。

ケース2は文献5)に示されているれんが覆工の実験である。れんがについては、明治時代に建設されたトンネルに用いられているものに近い物性を有する市販のオーストラリアれんがを用い、図5に示すように奥行き方向に千鳥組とし、モルタルによる目地を用いて半径方向に2層積層することにより作成した。

ケース3, 4は短繊維補強コンクリートに着目したものである。ケース3はポリプロピレン短繊維(PPF)とし、RC構造物のかぶりコンクリートの剥落防止を目的として用いられている仕様<sup>6)</sup>に準拠してPPFをコンクリートに混合し、山岳トンネルの覆工に用いた時に剥落防止効果を有するかどうかに着目した。ここでケース3ではPPFは混入量が少なく耐荷性能に与える影響はほとんどないと考えられたため、繊維混入量による剥離抑制効果の差に着目し、供試体の左右で繊維の混入率を変えて実施した。ケース4は鋼繊維(SF)を用い、曲げじん性の向上効果が期待できる混入率0.5Vol%として、繊維の種類や混入量の影響について比較した。

ケース5はRC覆工を模擬したものである。ただし、今回はモルタルを使用した。ここで、矢板工法時代のトンネルにおいては覆工をRC構造とする際の設計基準が定められていなかったことから、実際に供用されている鉄道トンネルにおける配筋例(D22, 鉄筋間隔@150mm程度)を参考に複鉄筋として図6の様に配筋した。せん断補強筋については、RC構造物の基準<sup>7)</sup>を参考に丸鋼であることを考慮して鉄筋比0.22%として

表3 材料の諸元

項目	強度・仕様
コンクリート	粗骨材寸法:20mm, 強度:24N/mm <sup>2</sup> (28日強度)
モルタル	1:5 モルタル, 強度: 22N/mm <sup>2</sup> (28日強度)
れんが	オーストラリアれんが, 目地: 1:3 モルタル
鋼繊維	鋼繊維 (φ 0.7mm × 43mm), 混入率:0.5vol%
ポリプロピレン繊維	ポリプロピレン繊維 (φ 64.8μm × 12mm) 混入率: 0.05vol% および 0.1vol%
鉄筋	複鉄筋 鉄筋種: SD345 主筋: D6@27.2mm (鉄筋比 1.55%) スターラップ: φ 3 × 5本@60mm (鉄筋比 0.22%)

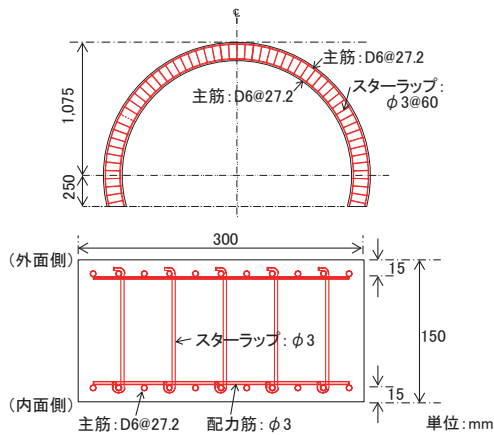


図6 配筋図(ケース5)

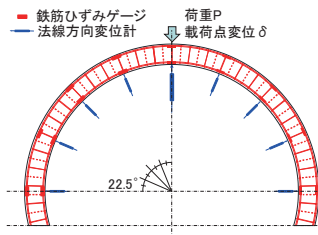


図7 計測項目

配筋した。材料の諸元を表3に示す。

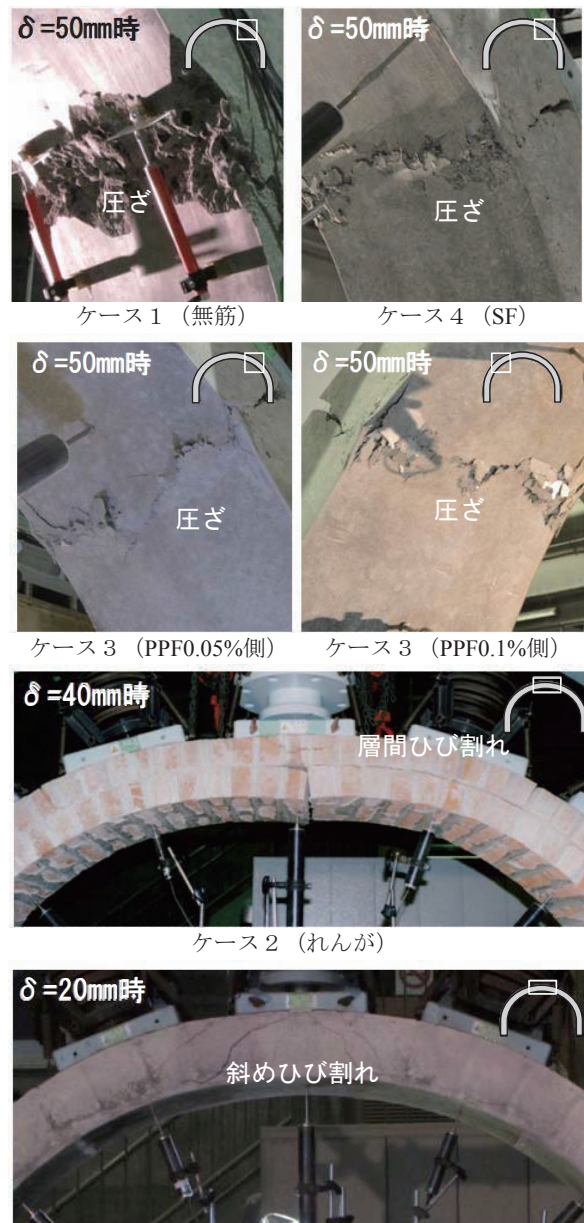
実験は、天端部の荷重用油圧ジャッキを変位制御により鉛直下向きに50mmまで(ただし、ケース2は40mmまで)圧縮・荷重することにより行った。

図7に計測項目を示す。荷重中は、荷重荷重、荷重点変位、覆工内面の法線方向変位(9箇所)を計測した。また、ケース5(RC)においては、上記法線方向変位計測を行った角度において、鉄筋のひずみを計測した。

### 3. 実験結果<sup>3)</sup>

#### 3.1 破壊形態

破壊形態は大きく分けて3種類に分類でき、曲げ引張ひび割れがいくつか発生した後、ケース1(無筋)、ケース3(PPF)、ケース4(SF)では曲げ圧縮破壊(圧ざ)、ケース2(れんが)では層間ひび割れ、ケース5(RC)では斜めひび割れが発生した。



ケース5 (RC)  
図8 破壊状況

コンクリートを用いたケース1(無筋)、ケース3(PPF)、ケース4(SF)においては、まず $\delta=2\text{mm}$ 程度で曲げ引張ひび割れが天端内側と左右肩部外側に発生して3ヒンジアーチ状態となった後、 $\delta=20\text{mm}$ 前後で左右肩部内側で圧ざが発生する破壊形態となった。繊維の有無や種類の違いに着目すると、ひび割れ進展状況は同様であったが、 $\delta=50\text{mm}$ 時における圧ざ発生箇所の破壊状況(図8)を比較すると、ケース1(無筋)では掌大の塊状の剥落が発生したのに対し、ケース3(PPF)、ケース4(SF)では最大でも粗骨材(20mm程度)の剥落で収まった。繊維量や種類による大きな差はなく、少量の繊維混入量(PPF 0.05Vol%)とした場合にも剥落防止効果が得られた。これは、閉合するようなひび割れが入った場合でも、モルタル分を介して繊維がコンクリート小片の落下を抑

特集：構造物技術

制したことによると考えられる。

ケース2（れんが）では、同様に $\delta=2\text{mm}$ 程度で曲げ引張りひび割れが天端内側と左右肩部外側に発生して3ヒンジアーチ状態となった後、 $\delta=20\text{mm}$ 程度で天端においてれんが1層目と2層目の間の目地に層間ひび割れが発生する破壊形態となった。荷重が進んでも肩部内側の圧ぎは発生せず、その代わりに $\delta=32\text{mm}$ 程度から天端部の層間ひび割れが急に拡大して肩部両側に広がった（図8）。ケース1（無筋）、ケース2（れんが）により材料の違いに着目すると、どちらも3ヒンジアーチ状態となったが、ケース2は目地を有することで覆工全体が均一な構造となっていないことから、変形に伴うれんが1層目と2層目の曲率の差によって、層間目地部にせん断力が作用して目地切れが発生したものと考えられる。

ケース5（RC）では、 $\delta=3\text{mm}$ 程度で、天端部内側に複数の引張りひび割れ、斜めひび割れが発生した。その後、アーチ肩部からスプリングラインにかけての外側に引張りひび割れが複数発生し、斜めひび割れは幅が徐々に広がった。 $\delta=25\text{mm}$ 程度より、斜めひび割れは急激に幅が広がった。しかし、天端内側、アーチ肩部からスプリングラインにかけての外側の引張りひび割れはほとんど発達せず、せん断ひび割れの様相を呈した（図8）。ケース1（無筋）と比較して天端部や肩部に発生する曲げ引張りひび割れの幅や深さは小さくなり、肩部内側の圧ぎも発生しなかった。これは、主鉄筋を配置したことで、曲げに対する抵抗力が向上したことによるものと考えられる。

3.2 荷重～変位曲線

図9に各ケースの荷重 $P$ と載荷板変位 $\delta$ の関係（以下、荷重～変位曲線）を示す。

主たる材料にコンクリートを用いたケース1（無筋）、3（PPF）、4（SF）では、 $\delta=2\text{mm}$ 程度で引張りひび割れが発生して3ヒンジアーチ状態となった際に荷重が一旦低下した。繊維による違いについては、繊維の種類や混入量による差はあまり見られないが、ケース4（SF）は、3ヒンジアーチとなった以降の荷重の低下がケース1、3よりも小さく、 $\delta=20\text{mm}$ 以下の荷重はケース1、3よりも大きい。これは繊維材料、繊維量、繊維の幾何学的形状、繊維の長さの違いが影響し、総合的に、曲げひび割れ発生後の曲げ剛性の低下が抑えられたためと考えられる。ただしある程度変形が進んだ $\delta=20\text{mm}$ 程度以降は荷重はほぼ同じになった。なお、天端において圧ぎが発生したのを境に剛性が若干低下している。

ケース2（れんが）は他のケースと比較して荷重が小さくなった。これは、目地による多数の不連続面を有することや、れんがが単体での弾性係数がコンクリートと比較して小さいことから、剛性が小さくなったためと考えられる。

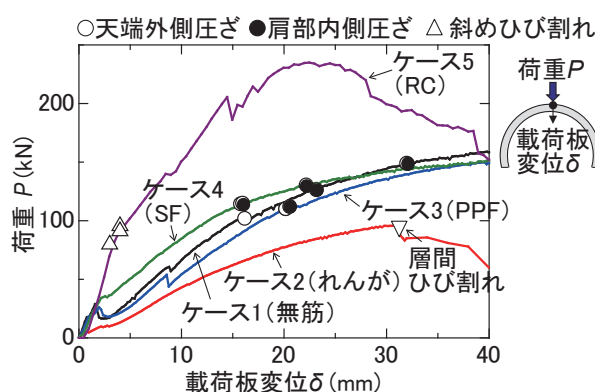


図9 荷重～変位曲線

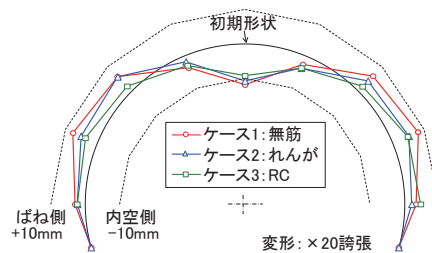


図10 トンネルの変形（ $\delta=10\text{mm}$ 時）

ケース5（RC）は剛性、最大荷重が最も大きくなっている。ケース1、3、4で見られた $\delta=2\text{mm}$ 付近での引張りひび割れの発生に起因するそれ以降の剛性の大きな低下は見られず、 $\delta=3\text{mm}$ 付近、 $\delta=14\text{mm}$ 付近で剛性が低下し、 $\delta=22\text{mm}$ 付近で荷重がピークとなり、 $\delta=27\text{mm}$ 付近より急激に荷重が低下した。ここで、ケース5では、脚部に作用する荷重が増加したため、供試体の鋼製ストッパーが破壊され、 $\delta=20\text{mm}$ に至るまでに脚部が左右それぞれ10mm程度外側に移動した。なお、 $\delta=20\text{mm}$ 以降は脚部の移動は見られなかった。

図10にケース1、2、5について、 $\delta=10\text{mm}$ 時の変形の状況を示す。なお、ケース3、4については、ケース1と概ね同様の分布となったため記載を省略した。図より、全体的に、荷重点直下はトンネルの内空側に変位し、一方で、左右肩部はばね側に変位していることがわかる。左右肩部のばね側への変位の大きさはケース1（無筋）>ケース2（れんが）>ケース5（RC）の順となっている。ケース1（無筋）は、3ヒンジアーチとなっており、ヒンジ部での曲げ剛性が大きく低下したが、肩部がちょうどこのヒンジ部にあたるため、肩部でのばね側への変位が最も大きくなったものと考えられる。ケース2（れんが）は、無筋と異なり目地を有する構造で曲げ剛性が初めから小さく、荷重変位を載荷箇所周囲だけで吸収したため肩部でのばね側への変位は無筋より小さくなったものと考えられる。ケース5（RC）は最も変位が小さい。これは、補強鉄筋により曲げ剛性が向上したことによるものと考えられる。

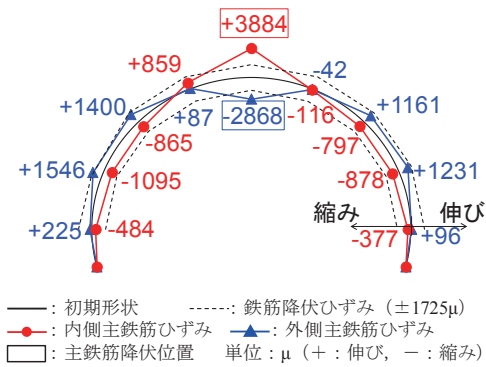


図 11 鉄筋のひずみ分布 (ケース 5:RC) ( $\delta=10\text{mm}$  時)

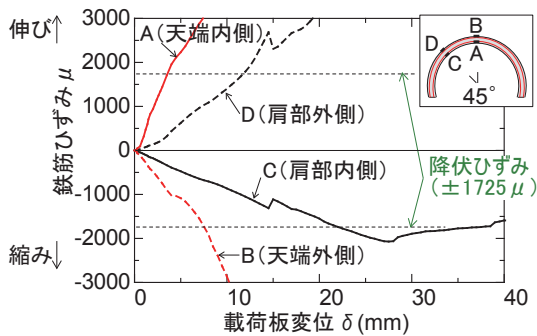


図 12 変位～鉄筋ひずみ関係 (ケース 5: RC)

### 3.3 鉄筋のひずみ

ケース 5 (RC) について、図 11 に  $\delta=10\text{mm}$  における主鉄筋のひずみ分布を、図 12 に変位～鉄筋ひずみ関係を示す。図 11 より天端、両肩部で鉄筋のひずみが大きい傾向であり、図 12 より、 $\delta=3\text{mm}$  で位置 A (天端内側鉄筋) に引張降伏が、 $\delta=8\text{mm}$  で位置 B (天端外側鉄筋) に圧縮降伏が、 $\delta=12\text{mm}$  で位置 D (肩部外側鉄筋) に引張降伏が、 $\delta=22\text{mm}$  で位置 C (肩部内側鉄筋) に圧縮降伏が発生した。図 9 によると  $\delta=3\text{mm}$ 、 $14\text{mm}$  付近で剛性の低下が起きているが、 $\delta=3\text{mm}$  は位置 A (天端内側鉄筋) の降伏に、 $\delta=14\text{mm}$  は位置 D (肩部外側鉄筋) の降伏に起因したものと考えられる。さらに、 $\delta=22\text{mm}$  で荷重の増加が止まっているが、これは位置 C (肩部内側鉄筋) の降伏により 3 ヒンジアーチとなったことに起因したものと考えられる。

### 3.4 耐荷性能および変形性能

ここでは、各ケースについて耐荷性能と変形性能について整理する。

図 13 に各ケースの最大荷重  $P_{\text{max}}$  (耐荷性能) と破壊時の載荷板変位  $\delta_d$  (変形性能) をまとめる。ここで、ケース 1, 3, 4 は、図 9 でみられるように、 $\delta=40\text{mm}$  (実物  $200\text{mm}$  相当) という実際の変状ではほとんど生じない大きな変形を与えても荷重の低下には至らず、構造的な破壊を定義することができなかった。よって、安全性の

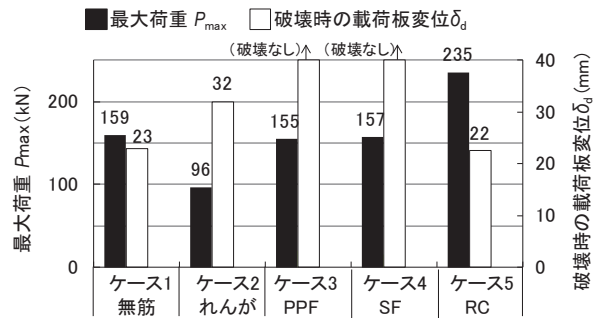


図 13 耐荷性能および変形性能

観点から、覆工内面に圧さによる剥離 (粗骨材サイズを超えるもの) が発生した時点をもって破壊相当と定義した。ケース 2 (れんが) は層間にひび割れが発生した時点をもって破壊相当と定義した。ケース 5 (RC) は、せん断ひび割れが生じて荷重が急激に低下した時点をもって破壊と定義した。

図 13 より以下のことがわかる。すなわち、ケース 2 (れんが) は、ケース 1 (無筋) と比較して  $P_{\text{max}}$  が小さく耐荷性能は劣るが、 $\delta_d$  が大きく変形性能は優れている。ケース 3 (PPF)、ケース 4 (SF) は、 $P_{\text{max}}$  (耐荷性能) はケース 1 (無筋) と同程度であるが、これに加え図 8 に示したように大きな剥落が生じないことから、変形性能も優れていると判断される。ケース 5 (RC) は、 $P_{\text{max}}$  が大きく耐荷性能は高いが、今回の実験の範囲においては、せん断破壊に伴う荷重の低下が比較的早い段階で発生したことにより、ケース 1 (無筋) と  $\delta_d$  は変わらなかった。以上から、RC に変更したとしても変形性能が大きく改善されたとはいえなかった。これは、アーチ状の構造物である山岳トンネルの覆工においては、ある程度の引張ひび割れは生じて問題とはならないため、RC 構造とすることによるじん性の向上効果が顕在化しなかったことによる面があると考えられる。

## 4. 材料による破壊挙動と耐荷性能の違い

山岳トンネルの覆工としての適用を想定して、変形性能、耐荷性能の違いについて考察することにする。なお、実際の山岳トンネルは、地山条件が多様であるほか、断面形状や構造が多岐にわたり、また、巻厚不足や背面空洞などの欠陥も多くのトンネルで存在している。以下の考察では、トンネルが下記の条件にある場合の傾向を示すものである。

- ・地盤のばね特性は、土砂地山ないし強度の小さな軟岩を想定しており、覆工は、曲げと軸力が両方バランスするような断面力の発生形態にある。
- ・覆工には、背面空洞や巻厚不足などの欠陥がない。

## 特集：構造物技術

## (1) 無筋コンクリート覆工

変形に伴いひび割れが発生し剛性が低下したが、比較的大きな変位まで荷重の低下がなく、アーチ構造の優位性が改めて確認された。ただし、最大荷重が発生するよりも前の段階で覆工内側に圧力が生じた。

山岳トンネルの覆工としては、一般的な地山（荷重の作用を想定する必要がなく、多少の余力を備えておけばよい条件下）であれば、適度な耐荷性能、変形性能を有する無筋コンクリートが適切と考えられる。ただし、変形に伴い圧力が生じるので、ひび割れがあり、変形しているトンネルでは、定期的な監視・計測を行い、変形量に応じて圧力（剥落）が生じないように剥落対策などを行う必要がある。

## (2) れんが覆工

コンクリート覆工と比較して剛性や耐荷性能が小さく、変形が大きくなると、層間ひび割れが生じることがわかった。曲げ剛性が小さいことに起因して、載荷箇所周囲の狭い範囲で変形が生じた。

山岳トンネルの覆工としては、多ヒンジ構造であるため、曲げ剛性が無筋に比べて小さく、耐荷性能が小さく、変形しやすい。また、積層構造であるため、変形しているトンネルでは層間での分離にも留意する必要がある。

## (3) 短繊維補強コンクリート覆工

一般的に用いられるような繊維、混入率においては、剛性や耐荷性能は無筋コンクリート覆工とほぼ同じであることがわかった。ただし、鋼繊維のケースは、無筋コンクリートと比べて、3ヒンジアーチとなった際にも変形が小さい範囲では荷重の低下が小さい。また、曲げ圧縮破壊により圧力を生じたとしても、覆工片が剥離しにくい、あるいは、剥離したとしても粗骨材程度で収まることわかった。また、この効果は、繊維混入率をかなり小さくしても見られた。

山岳トンネルの覆工としては、大変形時の耐荷性能は無筋と変わらないが、剥落防止の効果があり、変形性能が高いことから、地質不良箇所などで地震などにより将来的に変形が生じる懸念のある箇所、剥落対策として用いることが考えられる。また、変位が小さいときに限るが、繊維の種類や混入率によっては、曲げ引張作用時のひび割れの開口や変形の抑制に効果を発揮できる可能性がある。

## (4) RC 覆工

鉄筋の効果により、剛性や耐荷性能は無筋に比べて大きく改善されることがわかった。また、アーチ効果により、鉄筋が降伏した後も荷重が増加することが確認された。一方で、曲げ補強により曲げ耐力が大きくなった結

果、せん断破壊のモードとなりうることがわかった。

山岳トンネルの覆工としては、剛性、耐荷性能が最も高く、坑口部や小土被り部など高荷重が想定され高い耐荷性能が求められる場合に優位性がある。ただし、併せて、せん断補強の対策も十分な検討が必要である。

## 5. おわりに

山岳トンネル覆工の限界状態を明らかにし、安全性の評価の一助とすることを目的として、種々の材料からなる山岳トンネルの覆工について、変形破壊挙動に着目して1/5スケール模型実験を行った。また、山岳トンネルの覆工として適用されることを想定して、変形性能、耐荷性能の違いについて考察した。この結果、山岳トンネルの限界状態や耐荷性能、変形性能が明らかになったが、まだ限られた条件下での検討の結果である。実際の山岳トンネルは、周囲の地質が多様に変化に富むほか、断面形状や構造が多岐にわたり、また、巻厚不足や背面空洞などの欠陥も多くのトンネルで存在している。条件によっては上記考察が適用できない場合もあり得ることに留意が必要である。今後、様々な条件下での覆工の変形破壊挙動についても検討することが必要と考えられる。

## 文献

- 1) 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
- 2) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編) トンネル, 付属資料-13, 2007
- 3) 野城一栄, 平田亮, 岡野法之, 小島芳之: 種々の材料からなる山岳トンネル覆工の変形破壊挙動に関する研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.71, No.2, pp.78-94, 2015
- 4) 岡野法之, 小島芳之, 植村義幸: 大型覆工模型実験によるトンネル覆工の変形特性の再現, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演概要集, pp.909-914, 2008
- 5) 岡野法之, 植村義幸, 小島芳之, 西藤潤, 朝倉俊弘: 山岳トンネル覆工の内面補強に関する実験的研究, トンネル工学論文集, Vol.19, pp.69-76, 2009
- 6) 東日本旅客鉄道(株): 土木工事標準仕様書平成25年改訂版, 日本鉄道施設協会, 2013
- 7) 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), pp.220-222, 丸善, 2004