

覆工材質の違いによる 変形性能に関する実験的研究

平田 亮¹・野城 一栄²・小林 俊彦³・長山 喜則⁴

¹正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:hirata@rtri.or.jp

²正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:kyashiro@rtri.or.jp

³正会員 西日本旅客鉄道(株) 構造技術室 (〒532-0011 大阪府大阪市淀川区西中島5-4-20中央ビル2F)
E-mail:toshihiko-kobayashi@westjr.co.jp

⁴正会員 西日本旅客鉄道(株) 構造技術室 (〒532-0011 大阪府大阪市淀川区西中島5-4-20中央ビル2F)
E-mail:yoshinori-nagayama@westjr.co.jp

現在, JR各社が供用する山岳トンネルの覆工材質は, ブロック積み覆工と場所打ちコンクリート覆工に分類される. このようなトンネル覆工において, 供用後の外力の変化や地山の劣化等により付加荷重が作用し, 覆工に変状が発生する事例も少なからずある. そこで, 覆工材質の違いが耐荷性能および変形性能に与える影響について, 大型トンネル覆工模型実験により検証した. その結果, 無筋コンクリート覆工と繊維補強コンクリート覆工は同程度の変形性能および耐荷性能を有していること, 繊維補強には剥落片の大きさを抑制する効果があること, ブロック積み覆工は無筋コンクリート覆工と比較して, 最大荷重は小さいが変形性能は優れていること, 鉄筋コンクリート覆工は耐荷性能は高いが, 十分なせん断補強が必要であること等の結論を得た.

Key Words : *lininng, unreinforced concrete, fiber reinforced concrete, reinforced concrete, brick*

1. はじめに

現在, JR 各社が供用する山岳トンネルの多くは矢板工法により施工されており, これらのトンネルで用いられている覆工材質は, れんがや石材, コンクリートブロック等で構成されるブロック積み覆工と場所打ちコンクリート覆工に分類される. 矢板工法により施工されたトンネルでは, 支保工と覆工が一体となって地山の荷重を支保する設計思想であるため, 地質不良区間や坑口部等では, 覆工巻厚の増加や鉄筋コンクリート覆工が用いられていることが多い. このようなトンネル覆工において, 供用後の近接施工の影響による外力の変化や, トンネル周辺環境の変化による地山の劣化等に起因して, 覆工に付加荷重が作用することで変状が発生し, 維持管理上の問題となる事例もある¹⁾.

これまで, このような外力に対する山岳トンネル覆工の破壊メカニズムや力学的挙動に関する実験的研究はいくつか行われている(例えば文献^{2)~5)}). これら既往の研究により, 覆工材質の違いや荷重条件の違いによる

トンネル覆工の耐荷特性等が明らかにされている. しかしながら, 大変形領域における変状の進展状況等の変形特性について整理されたものは少ない.

そこで本稿では, ブロック積み覆工と場所打ちコンクリート覆工について, 上載荷重の増加に対する変形性能および耐荷性能の違いを, 大型模型実験により検証した結果について報告する.

2. 模型実験装置

実験に用いた大型トンネル覆工模型実験装置⁴⁾を図-1に示す. 実験装置は新幹線複線標準断面の縮尺1/5であり, 反力フレーム, 載荷用油圧ジャッキ, 反力用油圧シリンダ等で構成されている. 覆工模型の周囲に軟岩地山相当の地盤ばねを模擬した油圧シリンダ付きの皿ばねを配置しており, 覆工模型が外側へ変形する場合, この皿ばねが地盤ばねとして作用することで覆工と地盤の相互作用を模擬している. 各装置の主な仕様を以下に示す.

- ・ 載荷用油圧ジャッキ
最大載荷圧：500kN（載荷板 5.6MPa）
ストローク：250mm
- ・ 反力用油圧シリンダ
内径：φ125，ストローク：200mm
- ・ 皿ばね
寸法：外径 200mm×内径 102mm×厚さ 12mm
ばね定数：3000kN/m（皿ばね 20 枚/1ヶ所）
地盤反力係数換算：16MN/m³（洪積層相当）

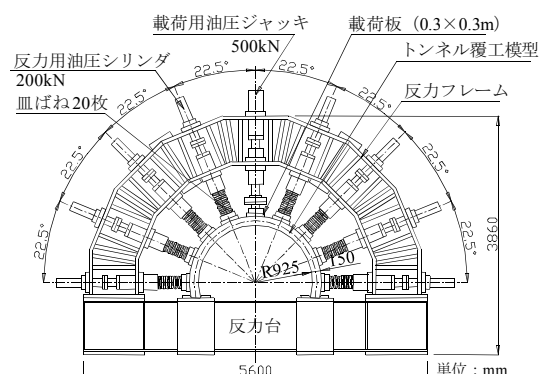


図-1 模型実験装置⁴⁾

3. 実験条件

実験ケースは、覆工材質をパラメータとして表-1に示す6ケースとした。図-2に示すように、全てのケースで巻厚は150mmとし、奥行き方向の延長は300mmとした。

無筋コンクリートのCase1（無筋）および繊維補強コンクリートのCase2（繊維）には、普通ポルトランドセメントで粗骨材寸法20mmのコンクリートを用いた。Case2（繊維）の繊維には、銅繊維（φ0.7mm×43mm）を用い、混入率は0.5vol%とした。鉄筋コンクリート（以下、RCとする）であるCase3～Case5には、1：5モルタルを用いた。図-3に各ケースの配筋図を示す。Case5は実トンネルを想定したスターラップ（以下、SRとする）量とし、Case3（SR：なし）およびCase4（SR：少）については、スターラップ量を変化させた。なお、主鉄筋にはSD345を用いた。ブロック積み覆工を想定したCase6（れんが）は、れんがを長手積みで積み上げ、目地部には1：3モルタルを用いた。

載荷は、天端部の載荷用油圧ジャッキを鉛直下向きに変位制御により行い、覆工模型周囲の反力用油圧シリンダは全てトンネル覆工模型に接触させた状態、すなわち背面空洞のない健全な状態で載荷を行った。

ケースNo.	覆工材質	強度・仕様
Case1	無筋コンクリート	21N/mm ²
Case2	繊維補強コンクリート	21N/mm ² 銅繊維 0.5vol%
Case3	鉄筋コンクリート	21N/mm ² (モルタル) スターラップ：なし
Case4	鉄筋コンクリート	21N/mm ² (モルタル) スターラップ：少 @150mm
Case5	鉄筋コンクリート	21N/mm ² (モルタル) スターラップ：多 @60mm
Case6	れんが	28N/mm ² (れんが単体) オーストラリアれんが 2 層

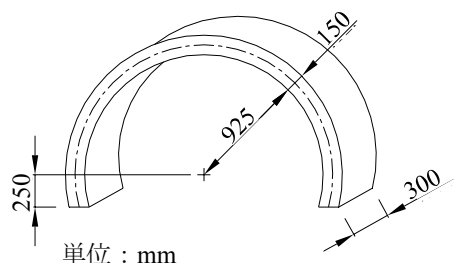


図-2 トンネル覆工模型寸法

	Case3 (SR：なし)	Case4 (SR：少)	Case5 (SR：多)
正面図			
断面図			
単位：mm			

図-3 配筋図（Case3～Case5）

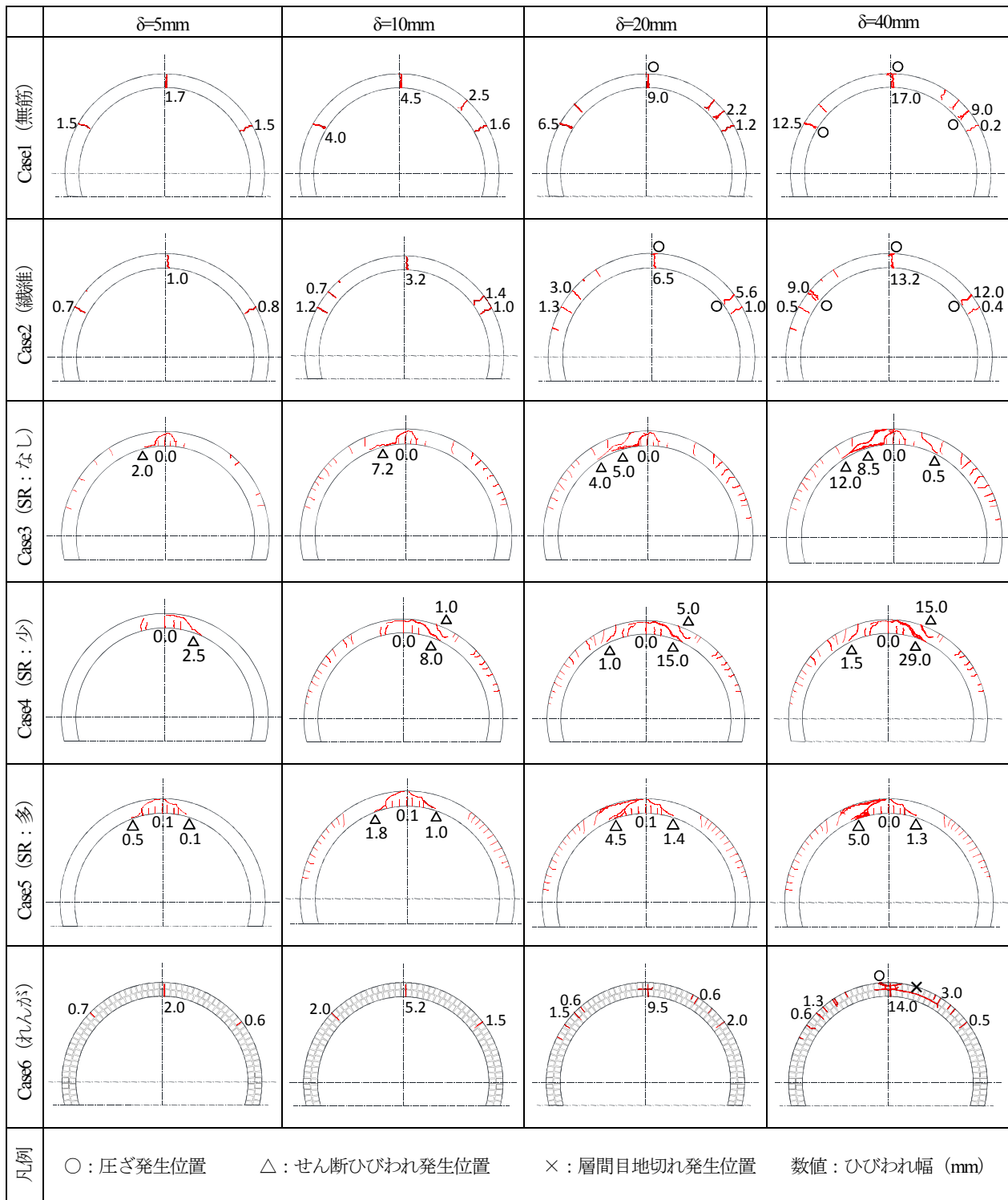


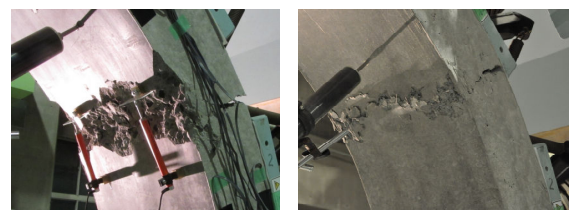
図4 ひびわれ進展状況

4. 実験結果

(1) ひびわれ進展状況⁶⁾

図4に載荷用油圧ジャッキ押し込み量 δ が5mm, 10mm, 20mm, 40mm時における各ケースのひびわれ進展状況を示す。

破壊形態は2種類に分類でき、Case1(無筋)、Case2(繊維)およびCase6(れんが)では、曲げ引張りひびわれが、まず天端内面側に発生し、その後両肩部外側に発



Case1 (無筋)

Case2 (繊維)

図5 剥落状況 ($\delta=50\text{mm}$ 時)⁶⁾

生する三点曲げの状態に変状が進展し、さらに δ の増加に伴い、大きく開口したひびわれの圧縮側に圧ぎが発生する破壊形態となった。

一方、RC である Case3 (SR : なし) , Case4 (SR : 少) , Case5 (SR : 多) では、他のケースのような曲げ破壊とは異なり、天端部にせん断ひびわれが発生し、 δ の増加に伴いこのせん断ひびわれ幅が広がり、せん断破壊する破壊形態となった。

Case1 (無筋) と Case2 (繊維) のひびわれ進展状況はほぼ同様であったが、図-5 に示す $\delta=50\text{mm}$ 時における両ケースの圧ぎ発生個所の剥落状況を比較すると、Case1 (無筋) では大きな塊状の剥落が発生したのに対し、Case2 (繊維) では最大でも粗骨材 (20mm) 程度の剥落となった。これは、鋼繊維の架橋効果により、剥落片の大きさが抑制されたためと考えられる。

RC である Case3 (SR : なし) , Case4 (SR : 少) , Case5 (SR : 多) では、他のケースと比較して天端部や肩部に発生する曲げ引張ひびわれの幅や長さは小さく、肩部内面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ためと考えられる。一方、 $\delta=5\text{mm}$ 付近で天端部にせん断ひびわれが発生し、その後せん断破壊が生じた。Case4 (SR : 少) および Case5 (SR : 多) のせん断ひびわれ内部を観察すると、スターラップフック部の抜けが確認された。今回用いたスターラップは丸鋼であり、片方のフック部の形状は直角フックであったため、変形が進むにつれて端部にすべりが生じ、せん断力に対し十分な抵抗力を発揮できなかったためと考えられる。

Case6 (れんが) は、Case1 (無筋) および Case2 (繊維) と同じく三点曲げの状態に変状が進展したが、Case1 (無筋) および Case2 (繊維) で発生した肩部内面側の圧ぎは発生しなかった。これは、多くの目地を有するブロック積み覆工は、一体構造のコンクリート覆工と比較して、トンネル全体として柔な構造であるといえ、内面側の圧ぎが発生しにくいという点では、外力に対する変形性能は高いと考えられる。一方、 $\delta=40\text{mm}$ 時には天端部から肩部にかけて、れんがの層間に沿って目地切れが発生した。これは、目地を有することで覆工全体が完全に一体構造となっていないことから、変形に伴う 1 層目と 2 層目の曲率の差やれんが個数の差によって、層間目地部に引張力が作用して目地切れが発生したと考えられる。

(2) 荷重－変位曲線^{6) 7)}

図-6 に Case1 (無筋) , Case2 (繊維) , Case6 (れんが) の載荷荷重と載荷用油圧ジャッキ押込み量 δ の関係 (以下、荷重－変位曲線とする) を示す。

Case1 (無筋) と Case2 (繊維) は、圧ぎ発生時の δ や

最大荷重はほぼ同じであったが、Case6 (れんが) の荷重は他のケースと比較して小さな値となった。これは、多くの目地を有することや、れん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、トンネル全体としての弾性係数が小さくなったためと考えられる。

図-7 に Case1 (無筋) , Case3 (SR : なし) , Case4 (SR : 少) , Case5 (SR : 多) の荷重－変位曲線を示す。

Case1 (無筋) では、 $\delta=3\text{mm}$ 程度で引張ひびわれの発生に伴う剛性の低下が見られるが、Case3 (SR : なし) , Case4 (SR : 少) , Case5 (SR : 多) は主鉄筋による曲げ補強により剛性の低下は見られず、 $\delta=18\text{mm}$ 程度までは Case1 (無筋) より大きな荷重を維持した。

Case3 (SR : なし) , Case4 (SR : 少) では、 $\delta=5\text{mm}$ 程度でせん断ひびわれの発生に伴い剛性が若干低下し、Case3 (SR : なし) では $\delta=18\text{mm}$ 程度で急激な荷重の低下が見られた。Case5 (SR : 多) は、せん断ひびわれ発生後も剛性を維持したが、 $\delta=20\text{mm}$ 程度でスターラップのフックの抜けが発生し、徐々に荷重が減少した。このように、主鉄筋を配置することでコンクリート覆工の剛性や耐荷性能は向上するが、スターラップの配置や仕様が十分でない場合には、脆性的な破壊が生じる危険性があると考えられる。

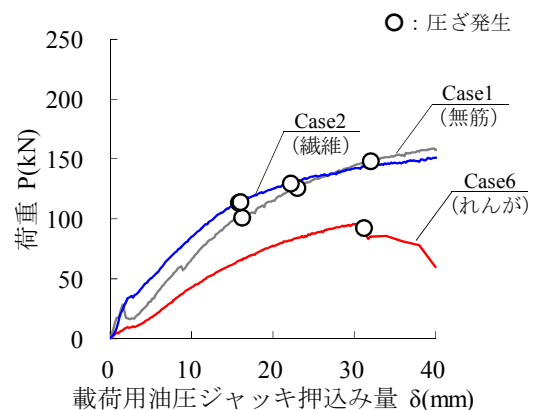


図-6 荷重-変位曲線 (Case1, Case2, Case6) ⁶⁾

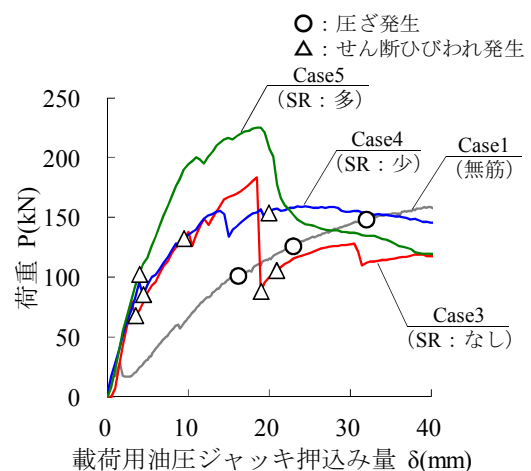


図-7 荷重-変位曲線 (Case1, Case3, Case4, Case5) ⁷⁾

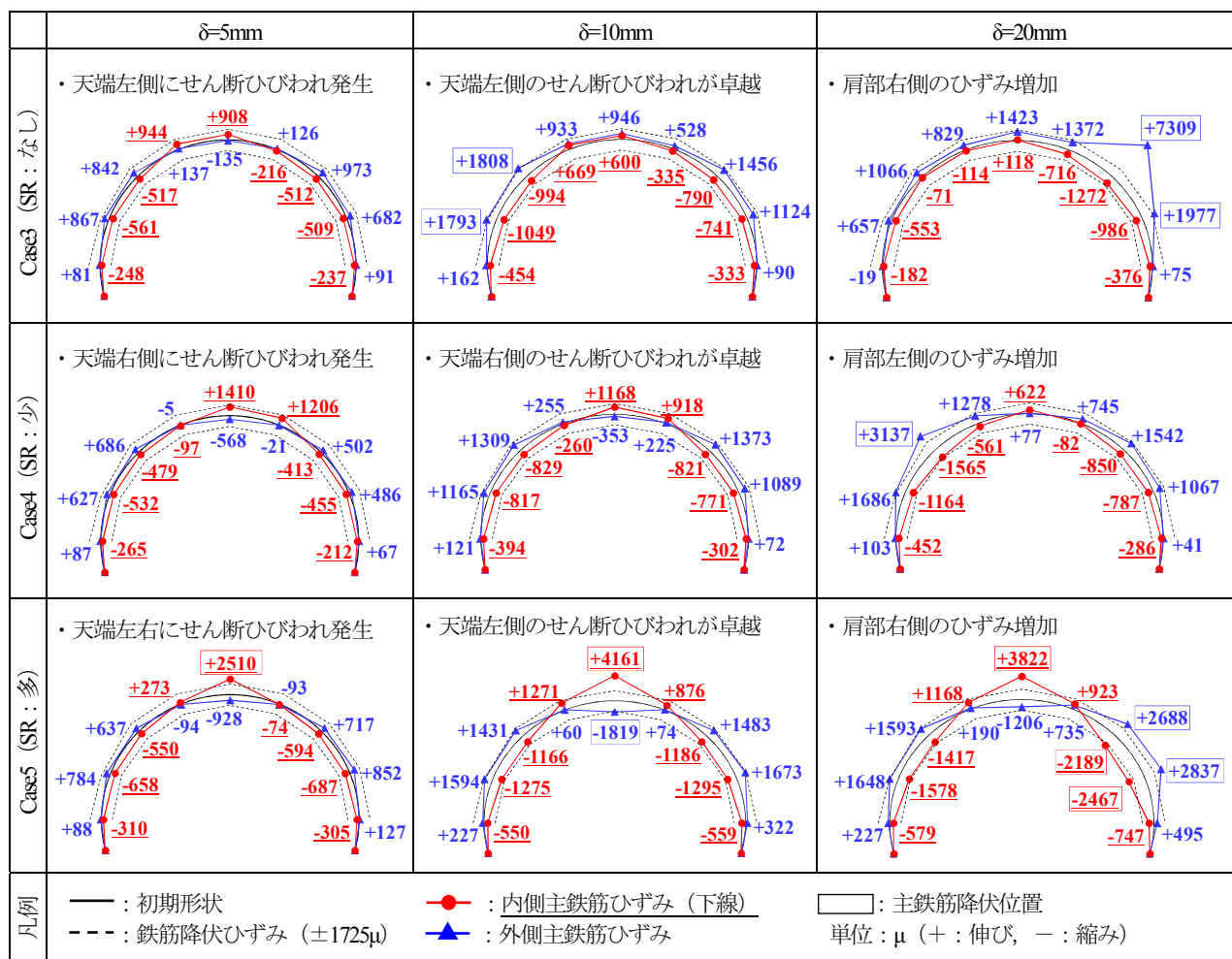


図-8 主鉄筋ひずみ分布

(3) 主鉄筋ひずみ⁷⁾

図-8 に Case3 (SR: なし), Case4 (SR: 少), Case5 (SR: 多) の $\delta=5\text{mm}$, 10mm , 20mm 時における主鉄筋のひずみ分布を示す。

初期の段階では、スターラップ量が多いほど、天端部の内側主鉄筋のひずみが大きくなる傾向があり、Case5 (SR: 多) では、天端部の内側主鉄筋に引張降伏が発生している。一方、Case3 (SR: なし) および Case4 (SR: 少) では、せん断ひびわれが発生した個所で局所的なひずみが発生している。このことから、スターラップ量の多い Case5 (SR: 多) は、 $\delta=10\text{mm}$ 時においても曲げによる変形形状を保持しているが、スターラップ量の少ない Case3 (SR: なし), Case4 (SR: 少) では、Case5 (SR: 多) よりも早い段階で押し抜きせん断破壊に至ったと推察される。

また、 δ が大きくなるにつれて、卓越したせん断ひびわれが発生した側ではひずみが減少し、その反対側ではひずみが増加する傾向がある。これは、大きく開口したせん断ひびわれを境に、覆工模型の一体性が損なわれ荷重が伝達されなくなったことで、載荷点側では片持ち梁のような状態で曲げによる破壊が生じ、もう一方ではひずみが減少したと考えられる。

(4) 変形および耐荷性能

図-9 に各ケースの最大荷重と破壊時の δ を示す。ここで、破壊時の δ とは、Case1 (無筋), Case2 (繊維), Case6 (れんが) については、天端部外側に圧ぎが発生した時点での δ , せん断ひびわれが生じた Case3 (SR: なし), Case4 (SR: 少), Case5 (SR: 多) については、荷重が急激に低下する点での δ とした。

Case1 (無筋) と Case2 (繊維) の最大荷重および破壊時の δ はほぼ同じであることから、その耐荷性能および変形性能に差はないと考えられる。ただし、図-5 に示したように Case2 (繊維) には剥落片の大きさを抑制する効果がある。

RC である Case3 (SR: なし), Case4 (SR: 少), Case5 (SR: 多) では、他のケースと比較して最大荷重は大きく耐荷性能は高いが、今回の実験の範囲においては、せん断破壊に伴う急激な荷重の低下が比較的早い段階で発生し、変形性能は高いとは言えない。なお、スターラップ量が十分であれば、耐荷性能は向上する。

Case6 (れんが) は、他のケースと比較して耐荷性能は劣るが、変形性能は優れている。

5. まとめ

本稿では、覆工材質をパラメータとして、上載荷重の増加に対する変形性能および耐荷性能の違いについて実験的検証を行った。得られた知見を以下に示す。

- ・無筋コンクリートおよび繊維補強コンクリート覆工は、同程度の耐荷性能および変形性能を有しており、大きな変位まで荷重の低下がないが、比較的早い段階で肩部内面側に圧が生じるためコンクリート片の剥落の危険性がある。
- ・繊維補強には剥落片の大きさを抑制する効果がある。
- ・鉄筋コンクリート覆工は、ブロック積み覆工や無筋コンクリート覆工と比較して、トンネルとしての剛性は高く、耐荷性能も高いが、せん断補強が十分でないと脆性的なせん断破壊が生じる危険性があるため、スターラップの配置や仕様には十分な検討が必要である。
- ・スターラップ量が増加する程、耐荷性能は向上する。
- ・ブロック積み覆工は、コンクリート覆工と比較して耐荷性能は劣るが、大きな変位が発生しても、天端部外側や覆工内面側に圧が発生しにくいという点では変形性能は優れている。

参考文献

- 1) 吉田竹治：トンネルの変状と活線改築(東北本線中山トンネル)，鉄道土木，Vol.13，No.7，pp.23-28，1971.7
- 2) 今田徹：コンクリート覆工の強度，トンネルと地下，Vol.8，No.9，pp.7-16，1997.9
- 3) 真下英人，日下敦，砂金伸治，木谷努，海瀬忍：トンネル覆工の破壊メカニズムと補強材の効果に関する実験的

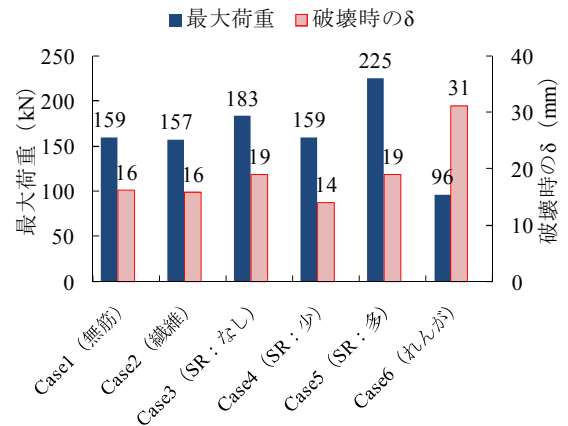


図-9 変形および耐荷性能

- 研究，土木学会論文集F，Vol.64，No.3，pp.311-326，2008.9
- 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，生駒末年馬，磯谷篤実：大型覆工模型実験による繊維補強コンクリート覆工の耐荷特性の把握，トンネル工学報告集，Vol.18，pp.143-148，2008.11
 - 6) 平田亮，野城一栄，松尾東：山岳トンネル覆工の変形性能に関する基礎的検討，土木学会第68回年次学術講演会講演概要集，pp.493-494，2013.9
 - 7) 小林俊彦，長山喜則，野城一栄：鉄筋コンクリート山岳トンネル覆工の変形破壊挙動に関する模型実験，土木学会第68回年次学術講演会講演概要集，pp.497-498，2013.9

(2013.9.2受付)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON DEFORMABILITY BY THE DIFFERENCE OF MATERIAL OF TUNNEL LINING

Ryo HIRATA, Kazuhide YASHIRO, Toshihiko KOBAYASHI,
and Yoshinori NAGAYAMA

We have verified the deformability by the difference of the material of tunnel lining by model experiments. As the result of model experiments, we got following conclusion; the deformability and the load-carrying performance of the unreinforced concrete lining and the fiber reinforced concrete lining are almost the same, the brick masonry lining is less likely to occur the compression failure at the tunnel shoulder as compared with unreinforced concrete lining, the load-carrying performance of the reinforced concrete lining is high but sufficient shear reinforcement is necessary, and so on.