

FRP 帯板を用いたトンネル覆工の内面補強工法の開発

岡野 法之* 植村 義幸** 小島 芳之*

Development of Internal Reinforcement Method for Tunnel Lining by FRP Plate

Noriyuki OKANO Yoshiyuki UEMURA Yoshiyuki KOJIMA

A method to reinforce mountain tunnels for railways is indispensable for the following not to invade construction gauge, good workability, and other essential factors. We have developed a new internal reinforcement method satisfying the foregoing conditions. In order to study the effect on the method adaptable to deformation and loading characteristics, we performed loading tests for one-fifth scale tunnel and the simulation analysis. Consequent to the test, we obtained the following conclusion; the new internal reinforcement method was effective to compare with a conventional fiber-sheet reinforcement method and other pertinent factors.

キーワード：トンネル，覆工，内面補強，FRP，模型実験，数値解析

1. はじめに

1880年，我が国初の鉄道山岳トンネルである逢坂山隧道が供用されてから約130年が経過し，現在，JR各社で供用されている山岳トンネルは，約3,700本，総延長で約2,200kmにも及ぶ。そのうち半数以上は戦前に建設されており，覆工材質としては無筋コンクリートが大半を占めるものの，昭和初期まで用いられていた石・れんが・コンクリートブロックによるブロック積みも相当量存在する。また，外力により変形が生じているトンネルを始め，建築限界とトンネル覆工との離隔がほとんどないトンネルもある。

トンネル覆工に変状が発生した場合の対策工法の種類は多数存在するが，近年では，内面補強工（「繊維シート接着工法」，「鋼板接着工法」が該当¹⁾）のうち，鋼板接着工法に比較して施工性がよく，内空をほとんど支障しない繊維シート接着工法の施工事例が増加している。しかし，繊維シート接着工法は接着材硬化までに剥離する恐れがあり，湧水箇所や覆工表面の不陸が大きい箇所へは適用が困難である等の短所を有する。

そこで，筆者らはそれらの短所を克服できうるFRP製の帯板とネットやシートを用いた新しい内面補強工法（以下，「帯板接着工法」と呼ぶ）を考案し，その補強効果を明らかにすることとした。

鉄道総研では，これまで新幹線複線標準断面を想定した縮尺1/30の小型トンネル覆工模型実験装置²⁾を用いて，補強対策工の効果を検討し³⁾，変状対策工の設計法

の確立に役立ててきたが，今回は，補強効果をより定量的に評価できる縮尺1/5の大型トンネル覆工模型実験装置⁴⁾を用いて補強効果を明らかにしたので，本報で述べる。

2. 帯板接着工法の概要

帯板接着工法は図1に示すように，FRP製の帯板（場合によっては鋼材も可）と，必要によりネットや繊維シート等を組み合わせたものであり，覆工の耐力向上には帯板が，剥落防止には帯板およびその間に設置するネットや繊維シート等が寄与するものである。

提案工法は，鋼板接着工法ほどの補強効果はないものの，前述した繊維シート接着工法，鋼板接着工法の短所を補い，かつ，それらに比べ非常に施工性がよく，維持管理しやすいのが特徴である。

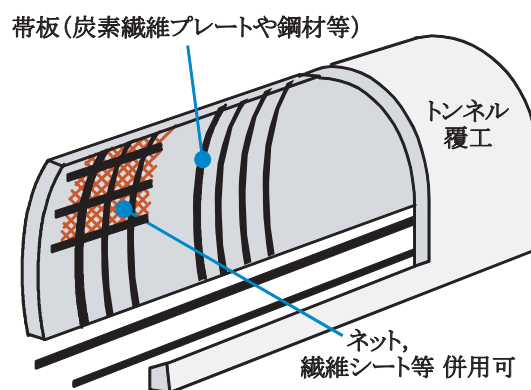


図1 帯板接着工法の概要

* 構造物技術研究部（トンネル）

** 構造物技術研究部（トンネル）現 鉄建建設株式会社

特集：構造物技術

3. 実験装置⁴⁾

荷重実験に用いた大型トンネル覆工模型実験装置を図2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、荷重用油圧ジャッキ、反力用油圧シリンダ等からなっている。供試体の周囲に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、荷重用油圧ジャッキで与えた供試体の変形負荷を皿ばねの変形で受けることにより、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。

- ・荷重用油圧シリンダ
 - 最大荷重圧：500kN（荷重板 5.6MPa）
 - ストローク：250mm
- ・反力用油圧シリンダ
 - 内径：φ 125mm，ストローク：200mm
- ・皿ばね
 - ばね定数：3000kN/m（皿ばね 20 枚/1ヶ所）
 - 地盤反力係数換算：26MN/m³（洪積層相当）

4. 実験条件

4.1 実験ケース

実験は無筋コンクリート覆工の補強なし⁴⁾を基本として、補強工法（繊維シート接着，帯板接着）とその仕様をパラメータとした表1に示す6ケースとした。

繊維シート接着工法のケースでは、構造物の補強に一般的に用いられているアラミド繊維1方向シート（以下、「AFS」と記す）を選定し、目付量が最少の280g/m²のもの2番目に多い623g/m²のもの各々1/5，すなわち、56g/m²および125g/m²とした。

帯板接着工法のケースでは、繊維プレートとして市販されている炭素繊維プレート（以下、「CFP」と記す）を選定した。市販のプレートの中で最も寸法の大きい幅50mm，厚さ2mmのものを50cm間隔に配置することを標準仕様として考えているので、プレートの断面積が(1/5)²=1/25の場合（Case4）とプレートの接着面積が1/5の場合（Case5），そして、プレートの断面積が1/25で覆工模型周方向300mmピッチにアンカーを用いたおさえを併用した場合（Case6）の3ケースについて実施した。

4.2 供試体の作製

実験に使用した無筋コンクリートおよびれんがの供試体の寸法を図3に示す。巻厚は150mm，内径は925mmで，奥行き方向は荷重板寸法と同じ300mm，スプリングラインから下は250mmとなっている。

コンクリート供試体は鋼製の型枠を用いて，両脚部からの高さが均一となるように，パイプで締固めながら設計基準強度18N/mm²のコンクリートを打設した。

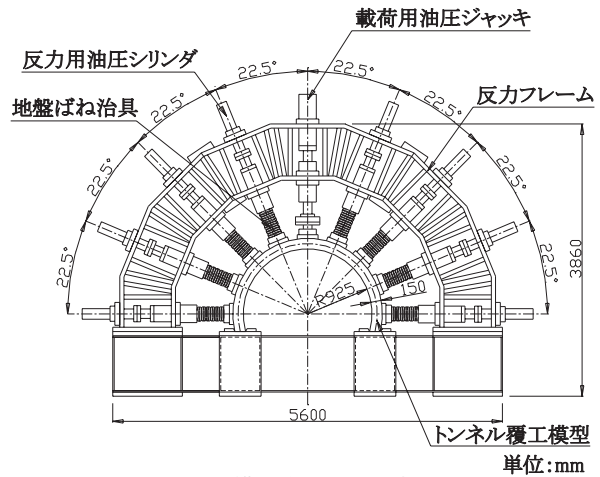


図2 模型実験装置の概要

表1 実験ケース

ケースNo.	覆工材質	補強工法	仕様
Case1	無筋 コンクリート	なし	—
Case2		繊維シート 接着	AFS 目付量 56g/m ²
Case3			AFS 目付量 125g/m ²
Case4		帯材接着	CFP幅4mm厚1mm×3本
Case5			CFP幅10mm厚1mm×3本
Case6			CFP幅4mm厚1mm×3本 +アンカー

※ AFS：アラミド繊維シート CFP：炭素繊維プレート

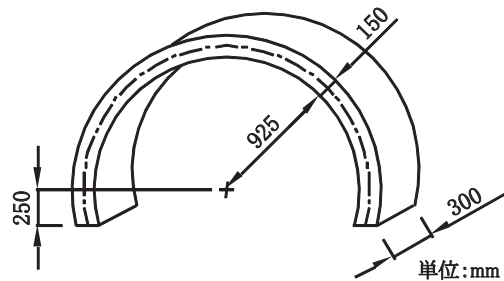


図3 覆工模型寸法

コンクリート供試体については供試体作成時に一軸圧縮試験用のテストピースを採取し，一軸圧縮強さの確認を行い，所定の強度が得られるまでの期間，型枠を付けたまま養生を行った。

補強を施すケース（図4参照）では，型枠脱型後，接着面をサンダーケレンにより下地処理し，プライマー処理をしたのち，アラミド繊維シートの場合はエポキシ系含浸接着材により，炭素繊維プレートの場合はエポキシ系パテ状接着材により補強材を接着した。そして，ケース6においては，鋼製のプレートおよび機械式アンカーにより押さえを施した。

4.3 荷重方法および計測項目

荷重は変位制御による天端からの鉛直荷重とし，覆工

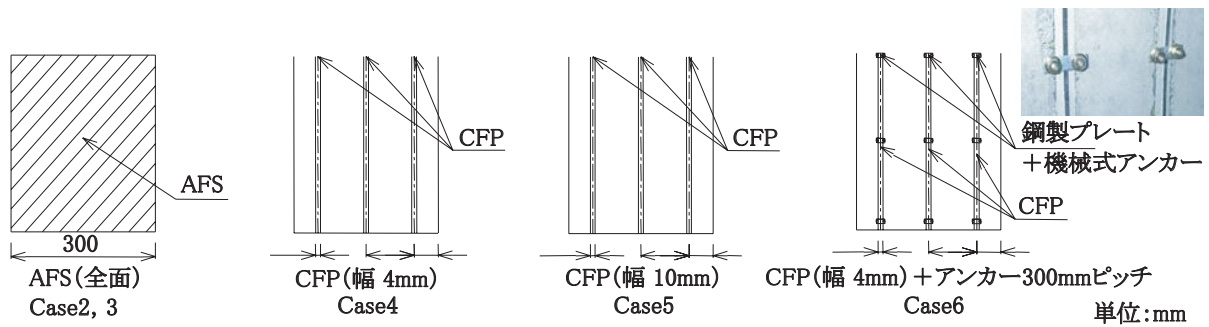


図4 各補強工法とその仕様の詳細（覆工模型内面の状況）

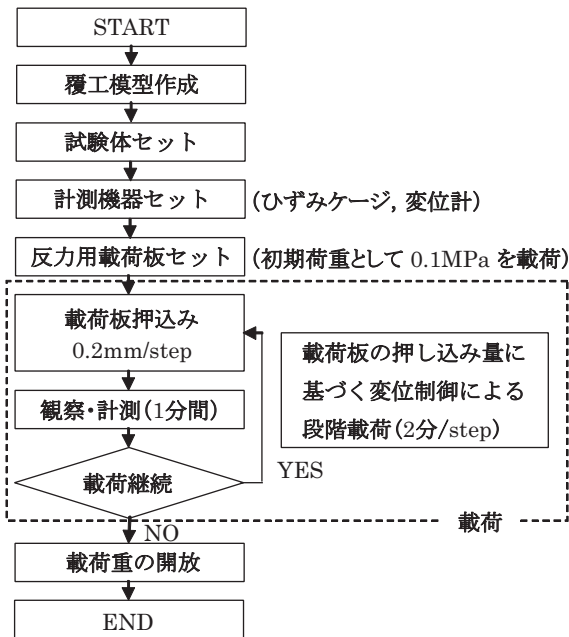


図5 載荷手順

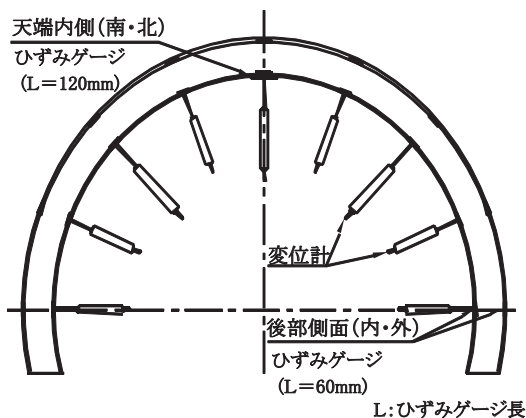


図6 計測機器の配置

模型は背面空洞および巻厚不足等の欠陥がなく、健全な状態とした。図5に載荷手順を示すが、載荷は載荷板押し込み量0.2mm/stepの変位制御に基づく段階載荷で行い、1分間載荷した後、載荷を停止して1分間観察・計測を繰り返し、載荷重がほぼ一定となるまで載荷した。

計測項目はトンネル内空変位9ヶ所、ひずみゲージ9ヶ所×内外＝18ヶ所および載荷荷重である。変位計、ひずみゲージの配置を図6に示す。

5. 実験結果

図7に各実験ケースの変状進展図を、図8および図9に天端載荷重と天端沈下量の関係（以下、「荷重－変位曲線」と記す）を示す。実験では天端沈下量60mm～80mm程度まで載荷を行っているが、いずれのケースにおいても圧縮の発生が確認され、実際のトンネルにおいて建築限界に支障すると考えられる天端沈下量35mm（実物換算175mm）までの結果を示している。

以下に、ひび割れ等の発生状況と耐荷・変形性能（載荷重－天端沈下量の関係）について考察する。

5.1 ひび割れ等の発生状況

各ケースのひび割れ発生状況を図7に示す。

無筋コンクリートの場合、いずれのケースもまず天端内側に曲げ引張ひび割れ（以下、「ひび割れ」と記す）が発生し、そののちアーチ肩部外側にひび割れが発生する。その後、圧縮せん断により破壊したCase3を除き、アーチ肩部外側のひび割れが増加していく中で、天端部外側、アーチ肩部内側の圧縮の発生へと進行していく。そして、アーチ肩部外側に発生するひび割れの数はだいたい3～4個であった。これを見る限り、補強の有無による顕著な違いは見られない。

5.2 耐荷・変形性能

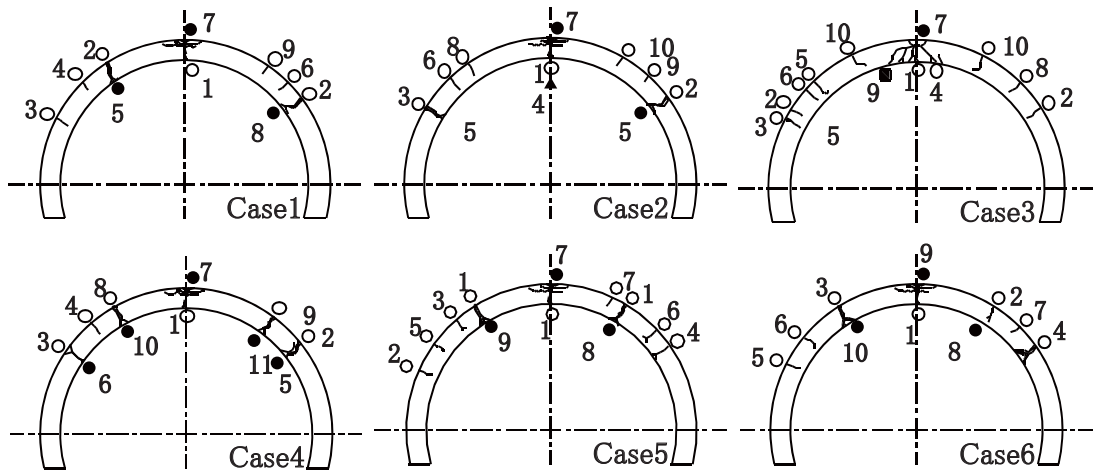
5.2.1 補強工法の補強効果の違い

ここでは、補強工法の補強効果の違いを明らかにすることを目的として、Case1, 2, 4および6を比較する。荷重－変位曲線を図8に示す。

いずれのケースも天端部の第1ひび割れが天端沈下量約0.5mm（Case1と2が0.4mm、Case4と5が0.5mm）で発生したが、第1ひび割れ発生までの荷重－変位曲線の傾き、すなわち剛性はほとんど同じであった。

補強なしのケース（Case1）では、第1ひび割れ発生後、荷重－変位曲線の勾配が緩くなり、第2ひび割れ発生後急激に荷重が低下し、その後、緩やかに荷重が増加している。

Case2では、第1ひび割れ発生後も荷重－変位曲線の勾配は変化せず増加を続けていることがわかる。また、



凡例 ○:引張ひび割れ, ●:圧ざ, ■:せん断破壊, ▲:補強材破断

図7 各ケースのひび割れ進展状況

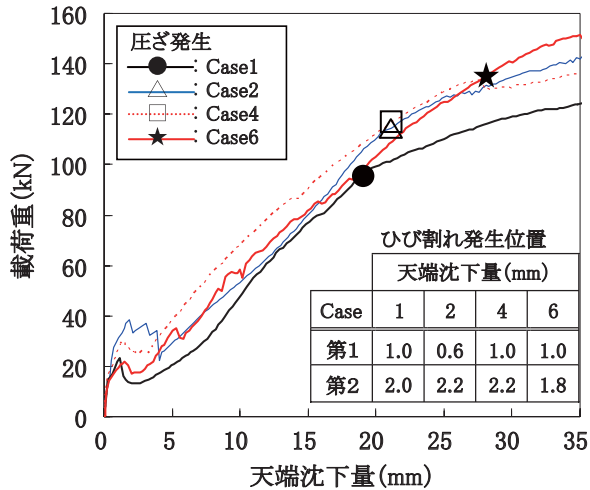


図8 荷重-変位曲線 (Case1, 2, 4, 6)

このケースで特徴的なのは天端沈下量約4mmでAFSが天端部で破断し、荷重が大きく低下していることである。

幅4mmのCFPを貼付けたケースCase4では、第1ひび割れ発生後、若干、荷重が低下するものの、Case1と比較すると低下の度合いは小さい。天端沈下量1.8mmの時CFPが剥離したが、その後の荷重-変位曲線の傾きはCase1とほぼ同様である。Case4の試験終了後のCFP剥離状況を図9に示す。

Case4にアンカーを追加したCase6を見ると、第1ひび割れ発生からCFPが剥離するまでの挙動はCase1に近いが、その後は天端沈下量35mmまでほぼ一定勾配で荷重が増加しており、耐荷力に優れていることがわかる。これは図10に示すように、アンカーによりCFPの剥離が抑制されているためであると考えられる。

次に、各ケースの圧ざ発生時の状況について考察する。無補強のケースに比べ、補強を施したケースは、圧ざ発生時の天端沈下量および載荷重はいずれも大きくなっている。特に、CFPをアンカーで押さつけたCase6は無補強のCase1に比べて、天端沈下量で約60%、載荷重で50%



図9 Case4のCFP剥離状況



図10 Case6の供試体破壊状況(天端部)

近くアップしており、圧ざの発生を遅らせる効果が非常に大きいことが確認された。

5.2.2 補強量の違いによる補強効果の違い

ここでは、補強量の違いによる補強効果の違いを明らかにすることを目的として、Case2, 3, 4および5を比較する。荷重-変位曲線を図11に示す。

Case2に対してAFSの目付量を約2.2倍に増加させたCase3の結果を見ると、初期の挙動はCase2とほぼ同様であるが、目付量が多いため破断はせず、荷重は低下することなく大きく増加している。しかし、天端沈下量15mm程度で荷重の増加が緩やかになり25mm程度で急激に荷重が低下している。これは、引張に対する拘束力が強すぎることにより、供試体天端部にせん断破壊が発生し、アーチ効果が失われたためである。

Case4に対してCFPの幅を5倍広くしたCase5の結果

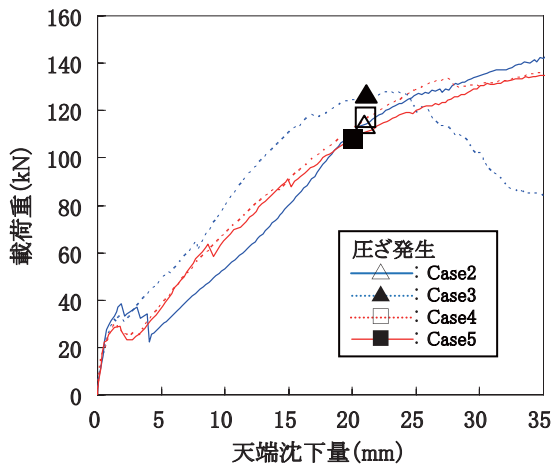


図 11 荷重－変位曲線 (Case 2, 3, 4, 5)

を見ると、荷重開始から天端沈下量 35mm まで Case 4 とほぼ同様の挙動を示している。接着面積が大きい Case 5 は CFP の剥離強度が大きくなるため、初期の耐荷特性に差が出るのではないかと考えていたが、実際は、剥離時期が Case 4 で天端沈下量 1.8mm、荷重 27.3kN に対し、Case 5 で天端沈下量 1.7mm、荷重 28.7kN とほぼ同じだったため、このような結果になったと考えられる。

6. シミュレーション解析

模型実験に関して FEM によるシミュレーション解析を実施し、内面補強工の補強効果を確認した。

6.1 解析手法の概要⁵⁾

本検討では、ひび割れの発生（引張破壊）による軟化挙動を考慮することのできるコンクリートの構成則を組み込んだ非線形 FEM モデル⁵⁾ を用いることとした。コンクリートを平面ひずみ要素、補強材を梁要素によりモデル化し、コンクリートの引張破壊および圧縮破壊については、それぞれ軟化を考慮した。

引張破壊（引張ひび割れ）については、最大主応力が引張強度を超える箇所での主応力の直角方向にひび割れが発生するものとし、ひび割れ部では応力の伝達が低下するものとした。引張破壊後は図 12 に示すように、ひび割れ発生時の応力を σ_{cr} 、ひび割れ発生時のひずみを ϵ_{cr} 、引張軟化係数を α として、指数関数により軟化するものとしてモデル化した。ここで、 α は一般的に用いられる 200 を用いた。

一方、通常の FEM 解析では曲げ圧縮破壊後のコンクリートの強度は期待しないものとして圧縮破壊をもって解析を終了することが多いが、曲げ圧縮破壊後も相応の強度を有していることから、本解析では曲げ圧縮破壊後のひずみ軟化特性も考慮することとした。本解析ではひずみ空間での構成則を用いることとし、圧縮破壊後のコンクリートは、図 13 に示すように、圧縮強度（圧縮破壊

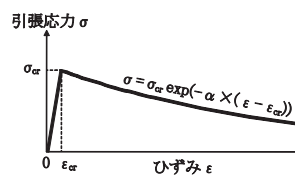


図 12 引張軟化特性

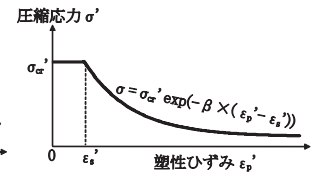


図 13 圧縮軟化特性

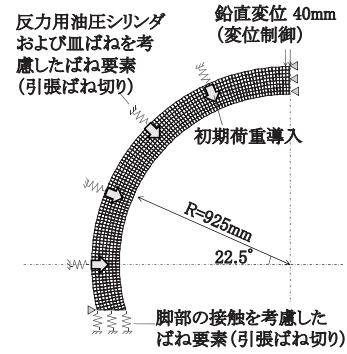


図 14 解析モデル

時の圧縮応力)を σ'_{cr} 、軟化開始時のひずみを ϵ'_s 、圧縮軟化係数を β として、指数関数により軟化すると仮定した。ここで、 β については文献⁵⁾ で示された軟化式と同程度の軟化を示すように 260 を、また、軟化開始時の塑性ひずみ ϵ'_s には 2,500 μ を用いた。

6.2 解析条件

解析モデルは簡単のため、2次元平面ひずみ状態を仮定した半割モデルとした。図 14 に解析モデルを示す。その他、反力用油圧シリンダおよび皿ばねをモデル化したばね要素、脚部の反力台との接触を考慮したばね要素を取り付け、天端部を実験と同様に鉛直下方に 35mm まで変位制御にて荷重した。

入力物性値については、覆工コンクリートの圧縮強度 σ'_{cr} 、弾性係数 E_c については一軸圧縮試験の結果に基づく実測値を用いた。覆工周囲の反力ばねについては、同定解析を行い実験と解析とで荷重が整合した 1,500kN/m を合成ばね値として用いた。

解析ケースは、補強工なし（実験 Case 1 を想定）と帯板接着あり（実験 Case 6 を想定：剥離を考慮せず）の 2 ケースとした。

6.3 シミュレーション解析結果

荷重重－天端沈下量の関係の比較を図 15 に示す。

無補強の Case 1、CFP 補強の Case 6 いずれの場合も実験結果は約 1mm の沈下量するとき、曲げ引張ひび割れの発生とともに荷重の低下が見られるが、解析結果は傾きが小さくなるものの荷重の低下は見られない。実験において荷重の低下がみられる理由としては、軸力が低い初期の段階でひび割れが発生することにより、反力板と模型の接触状態が変化すること等によるものと推察される。

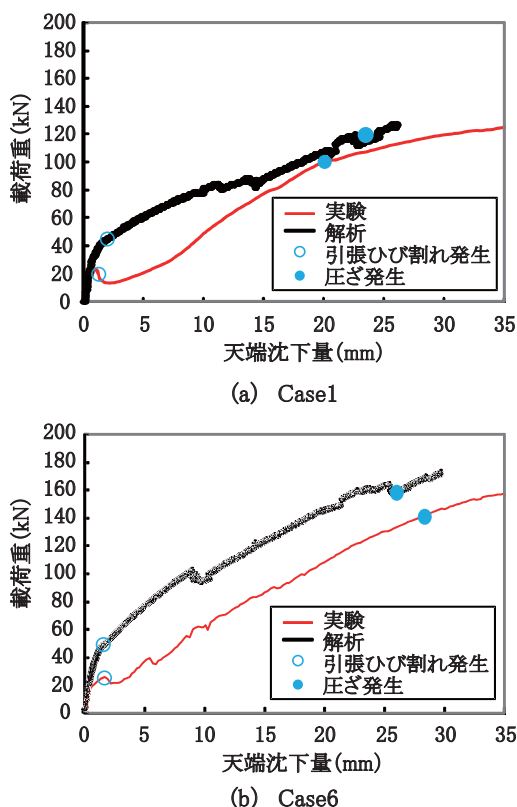


図 15 荷重－変位曲線の比較

このように、実験の荷重の低下はシミュレートできていないが、曲げ引張りひび割れ発生までの初期の傾き、発生時の天端沈下量、発生後の傾き等は比較的良好にシミュレートできているといえる。

覆工の肩部における圧縮発生時の天端沈下量に着目すると、実験および解析ともに、補強材のある方がより大きく、補強材の効果が表れているといえる。圧縮発生時の天端沈下量に着目すると、実験、解析ともにCFPで補強することにより、圧縮の発生を遅らせることができることを示している。

7. 結論

本研究により、山岳トンネルの変状対策の代表的な補強工法の一つである内面補強工のうち、現在使用実績が増加している繊維シート接着工法および筆者らが新たに考案した帯板接着工法について、無筋コンクリート覆工に対する補強効果を明らかにするために、模型実験およびシミュレーション解析を実施した。本研究より得られた結論を以下に示す。

- ・繊維シート接着工法、帯板接着工法ともに補強効果があり、耐荷・変形特性の向上が確認できた。特に、帯板接着工法においてアンカーによる押さえを施すことにより帯板の剥離を抑制すると、圧縮の発生を大きく遅らせることができる。

- ・最初のひび割れが発生するまでの荷重－変位曲線の傾きは、補強の有無、補強量に依らずほぼ等しい。これは繊維シート接着工法、帯板接着工法が、トンネル覆工の剛性向上にはつながらないことを示している。
- ・繊維シート接着工法における目付量の多いケースでは、繊維シートは破断しなかったものの、引張を拘束する効果が強すぎたため曲げ圧縮力が卓越し、せん断破壊を起こし、載荷重が他のケースでは低下しない領域で低下した。このことは曲げを受ける覆工に対し過度な引張補強を施すと、耐力上かえって危険側となることを示している。
- ・引張および圧縮軟化を考慮したFEM解析により、実験結果をシミュレートでき、補強効果を表現できることを確認した。

8. おわりに

今回、新しい内面補強工である帯板接着工法と従来からある繊維シート接着工法の補強効果に関する実験的検討結果を述べた。今後は現在進めている解析的検討の深度化や剥落に対する検討を行い、種々の内面補強工法の適用範囲を明確にし、設計法を確立していきたいと考えている。

謝辞

本実験における補強材の提供ならびに接着にご協力頂いた日鉄コンポジット株式会社の齊藤誠氏、加治木俊行氏、ならびに、実験作業にご協力頂いた株式会社ジェイアール総研エンジニアリングの川上義輝氏に甚大なる謝意を表する次第である。

文献

- 1) 財団法人 鉄道総合技術研究所：トンネル補修・補強マニュアル，2007
- 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研究，土木学会論文集，No.493，Ⅲ-27，pp.79-88，1994
- 3) 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，pp.89-98，1994
- 4) 岡野法之，植村義幸，小島芳之：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論文集，pp.909-914，2008
- 5) 野城一栄，小島芳之，新井泰，岡野法之，竹村次朗：圧縮破壊後の軟化を考慮した無筋コンクリート山岳トンネル覆工の数値解析手法に関する研究，土木学会論文集，2009