

論文 バサルト繊維補強プレート帯板接着工法に関する実験的研究

田中 徹^{*1}・岡野 法之^{*2}・小島 芳之^{*3}

要旨：既設トンネル覆工の内面補強工法の一つとして、帯状に加工した繊維補強プレート等を覆工内面に貼付ける帯板接着工法がある。筆者らはバサルト繊維補強プレートを用いた帯板接着工法の開発を行っている。本論文では、本工法の概要と耐荷、変形性能等の補強効果確認を目的に、大型トンネル覆工模型実験装置を用いた載荷実験を実施した結果について述べる。得られた結論は、本工法が補強なし試験体と比較して、圧ぎ発生を遅らせる効果や変形性能向上に効果があることを明らかにできたことである。

キーワード：トンネル覆工コンクリート、帯板接着工法、バサルト繊維補強プレート、補強効果

1. はじめに

老朽化した鉄道や道路、水路等のトンネル構造物が増大する中で、補修、補強を含めた維持管理を効率的に進めていく必要がある。

トンネル補修・補強工法選定においては、損傷の程度や原因、内空断面の確保や既設配線等の各種設備への影響、施工可能時間帯や車線規制の可否等の各種制約条件が考慮される。また、施工後の維持管理の容易さや、さらに補強材料の耐久性や経年劣化した場合の再施工の容易さなども重要な選定条件となる。

従来、トンネル覆工コンクリートの補強工法として、鋼板やプレキャストコンクリート板、繊維シート等による内巻や内面補強など様々な工法が開発され適用されている¹⁾。しかし、内空断面に余裕がない既設トンネルに対しては、鋼板やプレキャストコンクリート板の採用は困難となる。また、各種繊維（炭素繊維やアラミド繊維等）シートによる内面補強の場合は、漏水が多い箇所や覆工表面の不陸が大きい箇所への適用は難しい。さらに、これらの工法は覆工内面全体を覆うため、新たなひび割れ発生等の変状を目視確認できないという維持管理上の短所も挙げられる。

これに対して帯板状の繊維補強プレートを用いた内面補強工法²⁾（以下、帯板接着工法と呼ぶ）は、内空への支障が小さく、プレートを任意の間隔で接着することで、施工後も覆工内面の変状を目視確認可能であるなど、従来工法の問題を一部解決することができる。

筆者らは、この帯板接着工法の補強材としてバサルト繊維補強プレートを用いた新しい補強工法の開発を行っている。本文では本工法の概要と、本工法によって補強した試験体を用い、耐荷や変形性能等の補強効果確認を目的とした大型トンネル覆工模型実験装置による載荷実験を実施した結果を報告する。

2. 本補強工法の概要

図-1に本工法の概要を示す。

本工法は、帯板状に加工したバサルト繊維補強プレートを任意の間隔で覆工内面にエポキシ樹脂等の接着材で貼付けることで、耐荷、変形性能向上を目的とした補強工法である。

バサルト繊維プレートは、現在市販されている炭素繊維補強プレートと比較して引張強度および弾性係数は小さいものの、破断時までの伸び能力が高いことや、安価であることが特長として挙げられる。

バサルト繊維補強プレートは、幅50~100mm、厚さ1~2mmであり、設置間隔は500~1,000mmを想定している。施工は覆工内面を下地処理（高压洗浄機による洗浄とケレン）した後、エポキシ樹脂やポリマーセメントモルタル等を用いて貼付け、任意の間隔で鋼製プレートとあと施工アンカーを用いて固定するのみであるため、特殊な機械を必要とせず、簡易に実施することが可能である。また、覆工内面に漏水が多い場合はプレート貼付け位置以外に導水することで施工が可能となる。

覆工内面のコンクリート片の剥落やれんがの抜落ちが心配される箇所においては、プレート間にネットを設置することで防止することができる。



図-1 バサルト繊維補強プレート帯板接着工法の概要

*1 戸田建設(株) 土木本部 環境ソリューション部 土木リニューアル課 課長 工修 (正会員)

*2 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部トンネル研究室 主任研究員 工博

*3 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部トンネル研究室 室長 工博

3. 荷重実験の条件

3.1 実験装置と覆工模型の概要

図-2、図-3に荷重実験に用いた大型トンネル覆工模型実験装置の状況と概要、図-4に覆工模型の形状を示す。

実験装置は新幹線複線標準断面の縮尺 1/5 に対応した形状であり、トンネル天端部に荷重用油圧ジャッキ1基（最大荷重 500kN、荷重圧 5.6MPa、最大ストローク 250mm）を備え、円周方向 22.5° 毎に8基の反力用油圧シリンダー（内径 125mm、最大ストローク 200mm）付き皿ばねが配置されている。天端部の荷重用油圧ジャッキによる変形荷重を、円周方向に配置した地盤ばねを模擬した皿ばねの変形で受けることにより、覆工と地山との相互作用を模擬することが可能となっている。ここに、皿ばねは外径 200mm×内径 102mm×厚さ 12mm であり、ばね定数は 3000kN/m（皿ばね 20枚/1箇所）である。また、地盤反力係数は洪積層相当の 26MN/m³ である（1箇所のばねの受持範囲を 22.5° とし算出）。

覆工模型は厚さ 150mm、幅 300mm の無筋コンクリートである。スプリングラインの上半は半径 925mm であり、側壁部は 250mm となっている。

3.2 荷重実験ケース

(1) 実験ケース

表-1に実験ケースの一覧を示す。

試験体は無筋コンクリートの覆工模型に幅 4mm×厚さ 1.9mm および幅 8mm×厚さ 1.9mm に加工したバサルト繊維補強プレート（BFP）をそれぞれトンネル延長方向に 100mm 間隔で 3本貼付けた（後述図-5参照）。

なお、比較用試験体として以前鉄道総合技術研究所が実施²⁾した、補強なし試験体を「Case1」として、また、炭素繊維補強プレートで補強した試験体を「Case4」として引用する。Case4 は幅 4mm×厚さ 1mm の炭素繊維補強プレート（CFP）を 3本貼付けた試験体である。

(2) 補強材の物性

表-2に補強プレートの物性一覧を示す。

Case2、Case3 で使用したバサルト繊維補強プレートの引張強度は鋼材の 3 倍、炭素繊維プレートの 1/2.4 倍程度、弾性係数は鋼材の 2 倍、CFP の 1/3 倍程度であり、破断時の伸びは CFP の 3 倍程度である。

その他、バサルト繊維の線膨張係数はコンクリートと同等でありコンクリート構造物の補強材料として有効であると考えられる。また、電気的性質として絶縁性であることから、鉄道トンネル等の絶縁性が求められる構造物への適用が期待できる。

比較用として Case4 で使用した炭素繊維補強プレートは、引張強度 2,400N/mm²、弾性係数 156kN/mm² を有し、高強度、高弾性の材料である。



図-2 大型トンネル覆工模型実験装置の状況

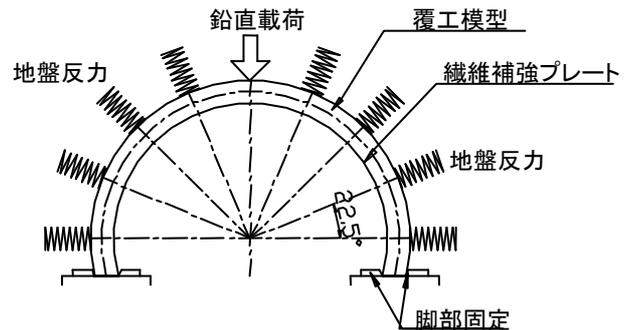


図-3 覆工模型実験装置の概要

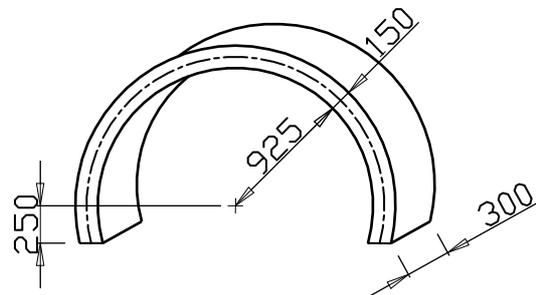


図-4 覆工模型の形状（単位:mm）

表-1 実験ケースの一覧

Case	補強工法	補強材質・形状
Case 1	なし	—
Case 2	帯板接着	BFP：幅 4mm×厚 1.9mm
Case 3		BFP：幅 8mm×厚 1.9mm
Case 4		CFP：幅 4mm×厚 1.0mm

表-2 補強プレートの物性一覧

補強材名	BFP	CFP
繊維補強材料	バサルト繊維	炭素繊維
引張強度(N/mm ²)	1,120	2,400
弾性係数(kN/mm ²)	45	156
破断時伸び(%)	3.0	1.0

3.3 覆工模型の製作

(1) 覆工模型コンクリートの性状

表-3に覆工模型コンクリートの荷重実験当日の物性一覧を示す。

覆工模型コンクリートは、設計基準強度 21N/mm^2 の生コンクリート (21-15-20N) を使用した。覆工模型は鋼製の型枠を用いて、バイブレータで締固めながらコンクリートを打設し、ひび割れや豆板、巻厚不足等の欠陥が無い健全な状態とした。荷重実験は管理用のテストピースを用いて、圧縮強度が 21N/mm^2 を超えた時点 (材齢 21 日前後) で実施した。なお、Case3 については養生温度が低く圧縮強度 21N/mm^2 未達のまま材齢 28 日以降実施している。

(2) 繊維補強プレートの設置

図-5に繊維補強プレートと固定金具の配置位置 (覆工内面展開図) を示す。

繊維補強プレート各3本は、覆工模型内面の延長方向 100mm 毎に接着面をサンダーケレンによって下地処理した後、プライマーを塗布し、エポキシ樹脂系パテ接着剤により貼付けた。また、円周方向に 300mm 毎に鋼製のプレートおよび機械式アンカー (M6-埋込み長 30mm) による固定金具を設置した (図-6 参照)。

3.4 荷重方法と測定項目

(1) 荷重方法

荷重方法は変位制御による天端からの鉛直荷重とした。荷重に先立ち、覆工模型を試験装置にセットした後、測定機器を設置し、試験体を安定させることを目的に反力用油圧シリンダー8本について、1本当たり初期荷重 0.1MPa (約 10kN) を与えた。

荷重は天端位置にある荷重用油圧ジャッキを用いて、荷重板押込み量 0.2mm/step の変位制御による荷重を行った。1step 毎の荷重時間は1分間とし、荷重終了後、荷重を停止して新たに発生したひび割れの長さや幅、繊維補強プレートの剥離状況等を1分間で観察するサイクルで行った。

(2) 測定項目

図-7に変位計およびひずみゲージの位置を示す。

荷重項目は荷重重とトンネル内空沈下量 9箇所 (D-1~D-9)、コンクリートひずみゲージ 9箇所×側面の内外 = 18箇所 (i-1~i-9、o-1~o-9) とした。また、繊維補強プレート (3本中の中央1本) にコンクリートひずみゲージの位置に合わせて9箇所 (c-1~c-9) 設置し計測した。

表-3 覆工模型用コンクリートの物性一覧

Case	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)	ポアソン比
Case 1	22.2	18.0	0.18
Case 2	22.5	17.7	0.22
Case 3	18.6	14.3	0.27
Case 4	23.8	20.2	0.18



図-6 固定金具の状況

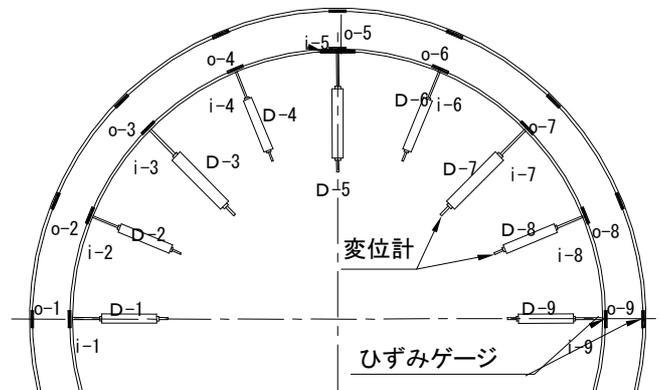


図-7 変位計およびひずみゲージ位置

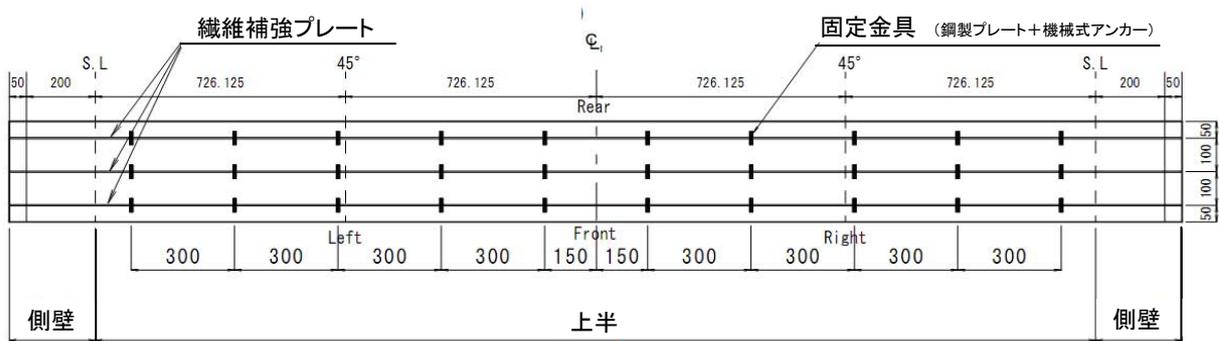


図-5 繊維補強プレートと固定金具の配置

4. 荷重実験の結果

4.1 初期ひび割れ発生と繊維補強プレート剥離状況

(1) 初期ひび割れの発生状況

図-8 に全実験ケースの荷重-天端沈下曲線および図-9 に荷重初期の荷重-天端沈下曲線を示す。表-4 には初期および第2 ひび割れの発生荷重とその時点での天端沈下量を示す。

いずれのケースにおいても荷重開始後、天端沈下量 0.5mm 前後で天端部内側に曲げ引張りひび割れ（以下、初期ひび割れと呼ぶ）が発生した。その後、アーチ肩部外側にひび割れが発生（第2 ひび割れと呼ぶ、図-10 参照）し、荷重が急激に低下する。

Case1 の補強なし試験体では、荷重 15.6kN で初期ひび割れが発生し、荷重 23.0kN で第2 ひび割れが発生した直後に荷重が減少していることが確認できる。また、荷重開始から初期ひび割れ発生までと、初期ひび割れから第2 ひび割れ発生まででは、勾配が変化していることが把握できる。なお、荷重開始から初期ひび割れ発生までの勾配は全てのケースで概ね同一となった。

初期ひび割れ発生荷重を比較すると、Case1 の補強なし試験体に対して、繊維補強プレートによって補強した Case2~Case4 の方が荷重および沈下量が大きくなる傾向となった。Case2 と Case3 の初期ひび割れの発生荷重は Case1 の 1.26~1.29 倍の荷重増加を示し、沈下量も同様な傾向となった。この理由として、繊維補強プレートを貼付けることで覆工コンクリート内面側の歪を拘束、分散し、結果として初期ひび割れの発生を遅らせたと考えられる。

第2 ひび割れ発生荷重について、補強なし試験体と補強した試験体の差は認められなかった。天端からの荷重の場合、繊維補強プレートを貼付けた内面は、天端部以外は圧縮域となるためアーチ肩部外側への補強効果は小さく、補強なし試験体と同等の第2 ひび割れ発生荷重になったと考えられる。

(2) 繊維補強プレートの剥離状況

初期および第2 ひび割れ発生から荷重が急激に低下する間に、繊維補強プレートの剥離が天端部付近で目視確認された。なお、この時点で繊維補強プレートが剥離した範囲は、初期ひび割れ発生箇所近傍の長さ 50mm 程度である。

剥離が目視確認された各ケースの天端沈下量は、Case2 および Case3 で 1.71mm, 1.82mm であった。炭素繊維補強プレートを用いた Case4 の 1.36mm と比較して、バサルト繊維補強プレートを用いた Case2 および Case3 の方が、剥離が発生する天端沈下量が大きい結果となった。これはバサルト繊維の伸び性能が高く、沈下に追従することで剥離時期を遅らせたと考えられる。

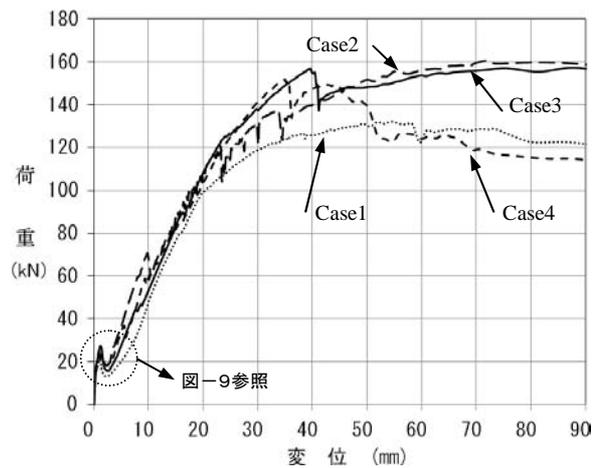


図-8 荷重-天端沈下曲線

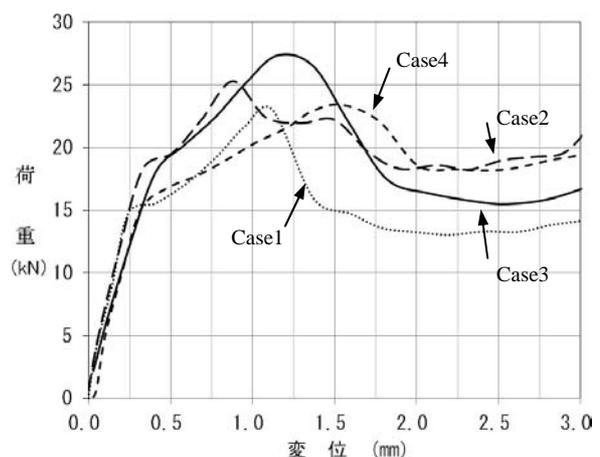


図-9 荷重初期時の荷重-天端沈下曲線

表-4 初期ひび割れと第2 ひび割れ発生時荷重

Case	初期ひび割れ発生時		第2 ひび割れ発生時	
	荷重(kN)	沈下(mm)	荷重(kN)	沈下(mm)
Case 1	15.6	0.41	23.0	1.12
Case 2	19.6	0.51	22.0	1.30
Case 3	20.2	0.58	26.5	1.37
Case 4	16.8	0.49	21.6	1.21



図-10 初期ひび割れと第2 ひび割れ発生位置

4.2 繊維補強プレートの発生応力

図-11に Case2~Case4 の繊維補強プレート天端部(歪ゲージ c-5)に発生した応力, 図-12に Case2 の繊維補強プレート各部 (c-3~c-7) に発生した応力を示す。

各試験体で初期ひび割れ発生後, 剥離した天端部の繊維補強プレートの引張応力 (c-5) は, その後, 大きく上下しながら推移していることが確認できる。

図-12より, 天端部の引張応力 (c-5) は, 初期および第2ひび割れ発生後, 一旦減少し, 天端沈下量 10mm 付近まで増加している。しかし, 固定金具で区切られた隣の区間の引張応力 (c-4) が上昇すると同時に天端部の引張応力は低下している。これは, 天端沈下量 10mm 付近で隣の区間のプレートが剥離したことで応力の再配分が生じ, 天端部の応力が一時的に低下したと考えられる。覆工表面から剥離したプレートは固定金具によって両端が固定され, 荷重を負担していると推察される (図-13参照)。ここに, 天端部の応力減少量 (c-5) と隣区間の応力増加量 (c-4) がほぼ同一の値となっている。

その後も剥離区間が広がると同時に応力の再配分が生じ, 引張応力の増加と減少を繰り返したと考えられる。

Case4 の炭素繊維プレートの発生応力は, Case2, Case3と比較して激しく変動している。これは Case2, Case3と比較して弾性係数や部材断面積の影響に加え, プレートの剥離が早く, 応力の再配分の回数が多くなったことが原因と考えられる。

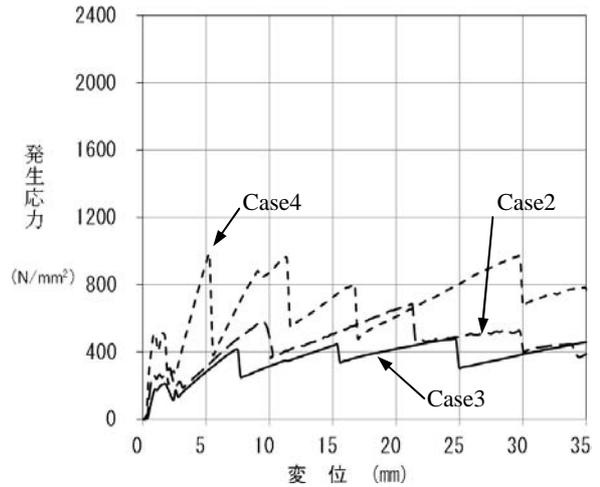


図-11 繊維補強プレート発生応力 (c-5)

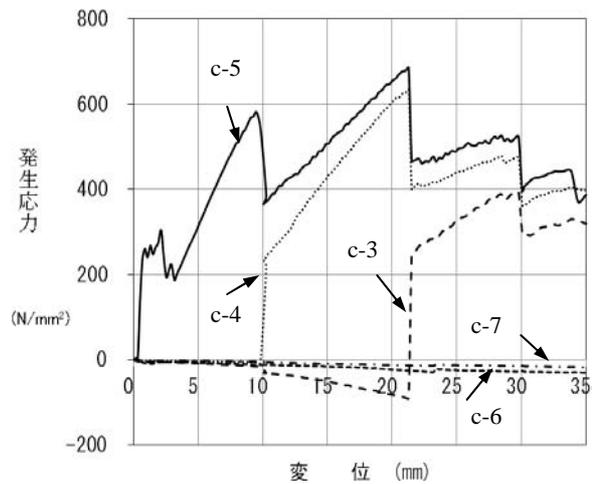


図-12 Case2 繊維補強プレート発生応力

4.3 耐荷, 変形性能

(1) 圧ぎ (曲げ圧縮破壊) 発生荷重

表-5に天端部における圧ぎ発生荷重と天端沈下量を示す。

図-8より, 初期および第2ひび割れ発生後, すべてのケースで荷重増大に伴うひび割れの進展, 繊維補強プレートの剥離と荷重の再配分を繰り返しながら, 天端部およびアーチ肩部に圧ぎが発生した。

補強なしの Case1 における圧ぎ発生荷重と天端沈下量は 100.8kN, 20.5mm である。これに対して, 繊維補強プレートで補強した Case2~Case4 の圧ぎ発生荷重は, Case1 の 1.25~1.47 倍, 変位量では 1.51~1.67 倍に増加しており, 圧ぎの発生を遅らせる効果が大いことを確認することができた。

(2) 最大荷重と最大変位量

表-6に最大荷重と天端沈下量を示す。

Case1 は圧ぎ発生後, 荷重-天端沈下曲線の勾配は緩やかになるものの, 荷重はその後増大し 132.2kN で最大荷重となった。最大荷重後は, 緩やかに荷重が減少し, 天端沈下量 90mm 程度まで天端およびアーチ肩部の圧ぎが進行しながら試験終了した。ここに, 天端沈下量 90mm

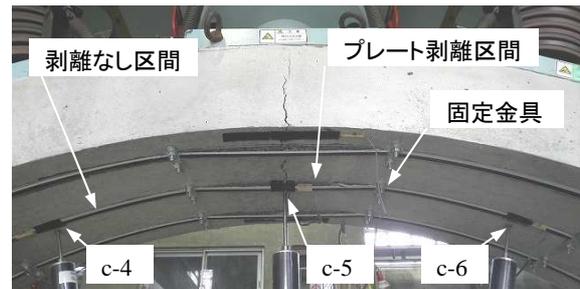


図-13 天端付近繊維補強プレート剥離状況

表-5 天端部圧ぎ発生時荷重と天端沈下量

Case	圧ぎ発生時	
	荷重(kN)	天端沈下量(mm)
Case 1	100.8 (1.00)	20.5 (1.00)
Case 2	125.6 (1.25)	34.3 (1.67)
Case 3	139.7 (1.39)	30.9 (1.51)
Case 4	147.8 (1.47)	32.6 (1.59)

() 内の値は Case1 に対する割合

は実物トンネルで換算すると、縮尺 1/5 より実天端沈下量=90×5=450mmである。

Case2, Case3については圧ぎ発生後、一時的に荷重低下するものの、緩やかに荷重増加を続け、最大荷重を示した。最大荷重時の天端沈下量は72.3mm, 87.4mmとなった。この天端沈下量はCase1の1.33倍, 1.61倍であり、変形性能向上に大きな効果があることを示した。この原因として、圧ぎ発生後も天端部内側のひび割れが大きく進展する中で、炭素繊維と比較して弾性係数が小さく適度な伸び性能を有するバサルト繊維プレートは破断することなく、固定金具によって両端が支持（拘束）されることで荷重分担する形となり、急激な荷重低下の発生を抑えたと考えられる（図-14参照）。

Case4については天端沈下量 35.0mm で最大荷重を示した後、天端沈下量 50mm 程度で急激に荷重が低下し、これ以降は、Case1の補強なし試験体と同様の傾向で推移した。この原因として、天端沈下量 35~50mm 付近で炭素繊維プレートの一部が固定金具のエッジ部で破断したことで、固定金具によって両端が支持され荷重分担する機能が働かなかったことが挙げられる。

表-7に最大荷重時の各繊維補強プレートに発生した引張応力(c-5)を示す。

各ケースにおいて、繊維補強プレートに発生した応力は引張強度に対して1/2.5~1/4程度であった。この結果から、バサルト繊維補強プレートの部材厚さを1/2にした場合にも同様の耐荷、変形性能が得られることを期待できる。

5. 結果のまとめ

バサルト繊維補強プレートを用いた帯板接着工法の耐荷、変形性能等の補強効果確認を目的に、大型トンネル覆工模型実験装置による載荷実験を実施した。

この結果、バサルト繊維補強プレートを用いた試験体は、本研究の範囲において、補強なし試験体と比較して、以下の効果があることを明らかにすることができた。

- (1) 初期ひび割れ発生の荷重および天端沈下量を大きくすることができる。
- (2) 圧ぎの発生の荷重および天端沈下量を増大させる効果を有する。
- (3) 最大荷重および最大荷重発生時の天端沈下量を増大させることが可能であり、靱性を付与する効果が高い。

また、炭素繊維補強プレート(Case4)試験体と比較して同等の補強効果を有することを把握した。

表-6 最大荷重と最大荷重時の天端沈下量

Case	最大荷重(kN)	天端沈下量(mm)
Case 1	132.2 (1.00)	54.4 (1.00)
Case 2	160.8 (1.22)	72.3 (1.33)
Case 3	157.2 (1.19)	87.4 (1.61)
Case 4	151.7 (1.15)	35.0 (0.64)

()内の値はCase1に対する割合

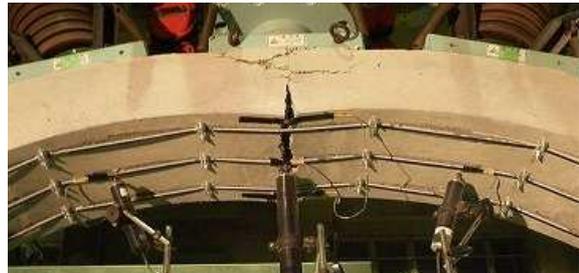


図-14 Case4天端沈下量80mmの状況

表-7 繊維補強プレートの最大荷重時の発生応力

Case	歪(μ)	発生応力(N/mm2)
Case 2	5058	228
Case 3	8993	405
Case 4	5027	784

6. おわりに

今回実験に用いたバサルト繊維補強プレートは、本研究の結果、トンネル覆工の帯板接着工法の材料として使用した場合、耐荷、変形性能向上効果を有することを確認した。今後も荷重条件等を変化させた性能確認実験を継続したいと考えている。

さらに、耐荷、変形性能向上について、固定金具設置の影響が大きいことを把握した。固定金具の配置間隔や形状等について検討を加える考えである。

最後に、本実験の試験体作成や計測作業にご協力頂いたコニシ株式会社の伊藤秀治氏、ならびに、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、他の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 公益財団法人 鉄道総合技術研究所：トンネル補修補強マニュアル, 2007.1
- 2) 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第19巻, pp69-76, 2009.11