

論文 無機系材料による剥落防止工法のレンガ積み覆工トンネルへの適用性に関する実験的検討

藤倉 裕介^{*1}・吉川 和行^{*2}・岡野 法之^{*3}・津野 究^{*4}

要旨：本論文では、無機系のポリマーセメントモルタルと連続繊維シートを用いた剥落防止工法のレンガ積みトンネルへの適用性を確認する目的で、レンガ積み覆工を模擬した押し抜き実験、一次元の剥離実験、およびレンガ積み覆工モデルの載荷実験を実施した。その結果、押し抜き耐力や剥離耐力を十分に有するとともに、剥落防止工法の施工により、レンガ積み覆工の耐力向上、レンガ片の剥落防止効果が得られることを確認した。

キーワード：レンガ積み覆工, 剥落防止工法, ポリマーセメント, 連続繊維シート

1. はじめに

昭和20年代までに建設されたレンガや石材を用いたブロック積み覆工のトンネルでは、未だに供用中のものが多く存在し、その変状対策が必要なものも少なくない。そのため、ブロック積み覆工の力学的な挙動を把握するための実験が実施されるとともに、その対策工が検討されている¹⁾。一方、著者らは近年のトンネル覆工コンクリートや高架橋コンクリートの劣化による剥落防止対策として、無機系のポリマーセメントモルタルと連続繊維シートを用いた剥落防止工法を開発し、性能を確認するための基礎的な実験結果を示してきた²⁾。本論文では、無機系材料による剥落防止工法をレンガ積み覆工へ適用した場合の剥落防止効果と補強効果を確認する目的で実施した実験的検討について報告するものである。

2. 剥落防止工法の概要と使用材料の物性

2.1 工法の概要

本工法は劣化した構造部材の剥離片の落下を防止し、補修する対策工であり、ポリマーセメントモルタルをライニング材（厚さ 3.5mm）と

して、連続繊維シートを構造物壁面に貼付ける工法²⁾である。樹脂系接着剤を用いる剥落防止工法と比較して、コンクリート表面が湿潤であっても施工可能であること、無機系材料であるため、紫外線などに対する耐久性が高く、劣化対策を必要としないこと、などの利点がある。

2.2 使用材料

(1) 連続繊維シートの物性

本工法に使用する連続繊維シートは、アラミドとビニロンで構成される約 10mm 幅の格子状ネットにポリプロピレンの不織布を一体化させた立体網目不織布を用いている。また、本繊維シートには柔軟性があり、耐アルカリ性に優れ、さらに不織布の効果により、ライニング材に用いられるポリマーセメントモルタルのひび割れの発生を低減させる。繊維束の厚さは 0.1～0.2mm 程度である。繊維の物理量を示すものとして、密度や目付量があるが、これらの数値が明確でないため、表-1 示すように、繊維束の軸数や繊維束 1 本当たりの幅、幅 10mm 当たりの繊維束の本数などの形状の特徴を調べた。さらに、これらのシートの繊維束 1 本を採取し、引張試験を実施した。

*1 (株) フジタ 技術センター土木研究部 材料・構造グループ 工修 (正会員)

*2 (株) フジタ 技術センター土木研究部 土質・地盤グループ 工修 (正会員)

*3 (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 工修 (非会員)

*4 (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 工修 (非会員)

(2) ライニング材の物性

ライニング材として用いるポリマーセメントモルタルには、天井あるいは壁面へ施工可能な粘性を有すること、短時間で硬化し、十分な付着性能を持つことなど、現場への施工性をふまえた性能が要求される。そのため、フロー試験や回転粘度計を用いて流動性や粘度を検討し、モルタルの配合を決定している²⁾。また、ライニング材はプレミクスされた粉体（セメントと珪砂、硬化調整剤）と希釈されたポリマー混和液（エポキシ変成アクリル樹脂）を配合するだけで、簡単にライニング材として使用できるようにしてある²⁾。ちなみに、粉体1に対して混和液の基本的な配合比（重量比）は0.27としており、水セメント比は39.4%、ポリマーセメント比は10%である。また、材齢7日での圧縮強度は30.0N/mm²、付着強度は2.8N/mm²である。

3. 押し抜き実験

3.1 実験概要

コンクリート片の剥落防止性能を確認する実験としては、コンクリート板の中央部に、φ50mmあるいはφ100mmの円形圧子を設けた押し抜き実験^{3), 4)}がよく行われている。押し抜き実験では、試験板の母材表面の強度が重要となるため、本研究ではレンガ積み覆工への適用性を確認するために、60×210×100mmのレンガを用い、目地の幅を10mmとして、650×480mmの大きさに組み、背面をコンクリートで補強したレンガ積み試験板を作製した⁵⁾。**写真-1**に試験板の状況を示す。レンガおよび目地材は、既存のトンネルに使用されている物性^{6), 7)}に近い材料を使用した。レンガの圧縮強度は11.0N/mm²程度、吸水率は16.0%であり、目地材の材齢28日での圧縮強度は14.0N/mm²である。押し抜き圧子は、試験板中央に配置し、レンガ1個の大きさ(60×200mm)とした。圧子となるレンガの周辺には、剥落防止工の施工時に押し抜き圧子が動かない様にバックアップ材を仮止めした。このような試験板に対し、上記の剥落防止工を

表-1 連続繊維シートの物性

シートの種類	繊維束の幅 (mm)	繊維束本数 (本/10mm)	繊維束1本当りの引張耐力(N/本)
アラミド側	1.23	2.2	173
ビニロン側	1.20	2.2	120

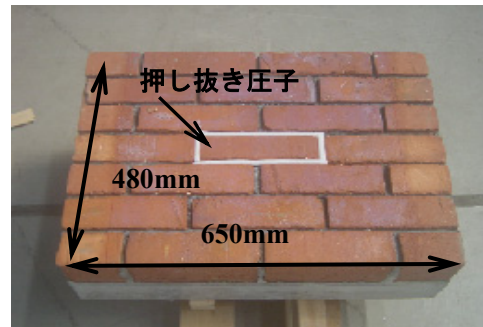


写真-1 レンガ積み試験板



写真-2 施工状況と繊維の方向

表-2 押し抜き実験のケース

実験ケース	試験板の種類		圧子の大きさ (mm)	圧子の周長 (mm)
	材料	圧縮強度 (N/mm ²)		
A	レンガ	11.0	60×200の長方形	520
B	コンクリート	9.0	φ100	314
C		13.0		
D		30.0	φ50	157
E			φ100	314
F			φ150	471
G			φ200	628

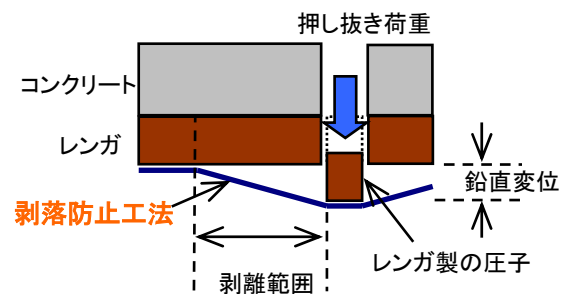


図-1 押し抜き実験の概念図

施工し、施工後の材齢7日にて押し抜き実験を実施した。施工状況および繊維の方向を**写真-2**

に示す。さらに、上記に示したレンガ積み試験板を用いた実験結果と比較するため、コンクリート製の試験板の強度や圧子の大きさを変えた場合の実験⁸⁾を実施した。押し抜き実験のケースを表-2に示す。押し抜き実験はアムスラー式万能試験機を用いて、中央部圧子に垂直方向に変位を与える方法²⁾で実施した。レンガ積み押し抜き実験の概念図を図-1に示す。実験時の荷重速度は剥落防止工法のライニング材の初期破壊が生じるまでは、1.0mm/minで荷重し、それ以降は5.0mm/minにて実施した。また、実験時の施工面の剥離の状況を観察した。

3.2 実験結果

図-2、図-3に押し抜き実験の結果の一例として、圧子の鉛直変位と荷重の関係を示す。図-2、図-3に示すように、初期にライニング材であるモルタルの破壊が生じた後、荷重は低下するが、鉛直変位の増加に伴って荷重は繊維束に負担され、再び荷重は増加した。さらに、鉛直変位が15~25mm程度に達した時点でアラミド繊維束の部分的な破断が生じ、徐々に荷重は低下した。その後、剥離の進行、繊維束の伸びや部分的な破断が生じるが、荷重が大きく増加することは無かった。押し抜き実験の終了後、剥離の最大周長をキルビメータで計測するとともに、剥落防止工の施工面に40×40mmの鋼製治具を貼り付け、建研式の引張試験を行って、付着強度を求めた。以上の試験結果を表-3に示す。 $\phi 100\text{mm}$ の大きさの圧子でコンクリート板を用いた実験ケースでは、母材の強度が小さく母材破壊で付着強度が決まるケース(B, C)は、母材の強度が十分でライニング材であるモルタル層内での破壊で付着強度が決まるケース(E)よりも、剥離周長が大きく、モルタル破壊および繊維束の破断時の荷重は小さくなる事が分かる。また、圧子の大きさに着目したケース(D~G)では、圧子が大きいくほどモルタル破壊と繊維束の破断時の荷重は大きくなり、剥離周長も大きくなる。一方、レンガ試験板の場合(A)は、母材の強度が小さく、付着強度が母材破壊で決ま

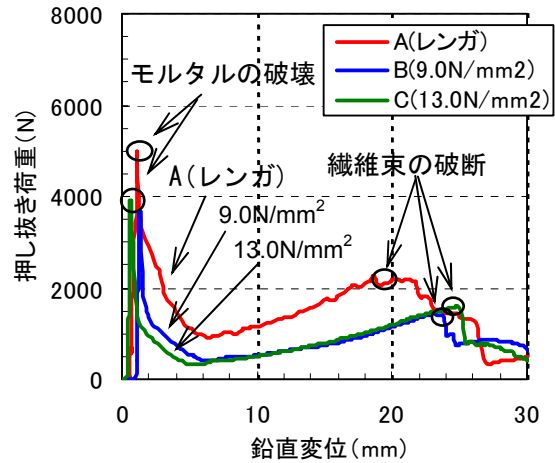


図-2 押し抜き荷重と圧子の鉛直変位の関係
(レンガ製および低強度のコンクリート製試験板の場合)

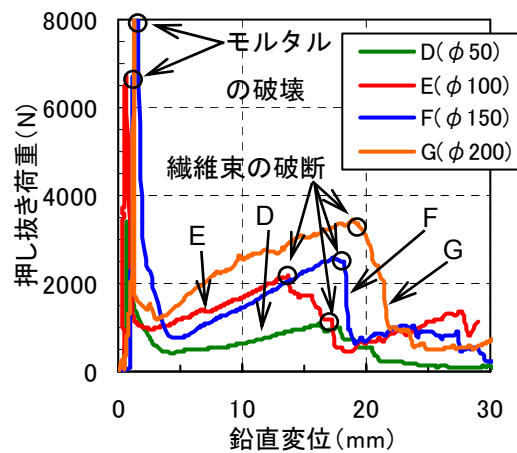


図-3 鉛直変位と押し抜き荷重の関係
(コンクリート試験板で圧子の大きさが異なる場合)

表-3 試験結果

実験ケース	モルタル破壊時の押し抜き荷重 (N)	繊維束破断時		付着強度 (N/mm ²)	
		荷重 (N)	剥離周長 (mm)		
A	5400	2356	810	1.45	母材にて破壊
B	3454	1560	800	1.53	
C	3886	1590	800	1.59	
D	4145	1080	462	2.80	モルタル層内で破壊
E	5536	2300	565		
F	6590	2511	760		
G	8020	3440	920		

るケース(B, C)と同様の傾向を示すと考えられるが、圧子の周長がほぼ同等のコンクリート板によるケース(F)と同様な剥離周長の値を示し、モルタル破壊と繊維束破断時の荷重についても、近い値を示す。これは、レンガ表面や目地部の不陸による影響で、剥離を生じる際に引っ掛り抵抗を生じるためであると考えられる。よって、

レンガ母材が低強度であっても、コンクリート板によるケースと同等な性能を有し、同じ実験方法により評価が可能であると考えられる。

4. 一次元の剥離実験

4.1 実験概要

押し抜き実験では、母材がレンガであってもコンクリート試験板による実験と同等な性能を有し、同じ実験方法による評価ができることを確認した。しかし、レンガ積み覆工では目地を有するため、その影響を調べる必要があると考えられる。そこで、レンガ積み覆工トンネルのアーチを模擬した一次元の梁型試験体を作製し、剥離実験を行った。試験体の概要と実験ケースを図-4に示す。試験体は、長さ1000mm、高さ200mmの梁型試験体で、奥行きは150mmとし、使用材料は押し抜き実験と同様とした。鉄道単線トンネルのアーチを模擬し、 $R=2280\text{mm}$ の曲率となるようにレンガを配置し、目地が健全の場合と目地が半分欠如（やせ）した場合を再現した。供試体の上面に上述の要領で剥落防止工法を施工し、試験体の目地部（健全および目地やせ）にライニング材が入り込まないようにバックアップ材を仮止めした。なお、連続繊維シートの方は、ビニロン側をトンネルの周方向（実際の施工では、トンネルの周方向を変形性能に優れたビニロン繊維側としている。）とした。

剥離実験は供試体の両端の2辺を支持し、载荷用の治具（鋼製の棒で $\phi 30\text{mm}$ ）をスパン中央部のあらかじめ穴が開けられたレンガ（周辺のコンクリートや目地と縁が切れている。）に挿入し、鉛直上方に载荷し、荷重と鋼製治具の鉛直変位を測定した。また、図-4中に示すように、レンガおよび直下のコンクリートの界面にクリップ型変位計を設置し、剥離実験により、母材であるレンガが上方へ変位するかどうかの有無を確認した。载荷速度はモルタルの破壊までは、 $1.0\text{mm}/\text{min}$ とし、それ以降は $2.0\text{mm}/\text{min}$ とした。剥落防止工法の施工後の材齢7日にて実験を実施し、剥離の状況を観察した。

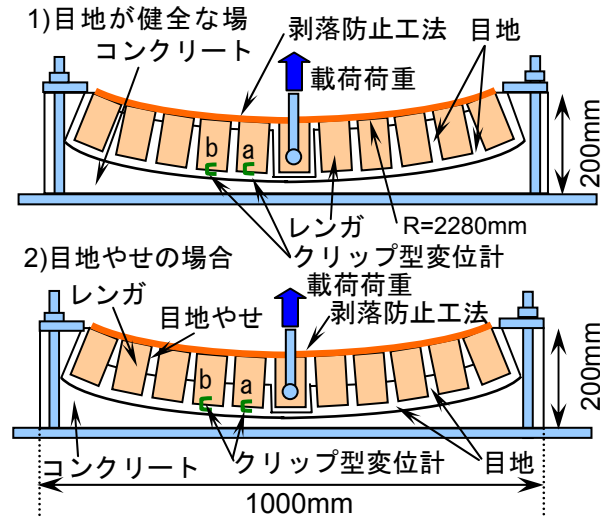


図-4 梁型試験体の側面図

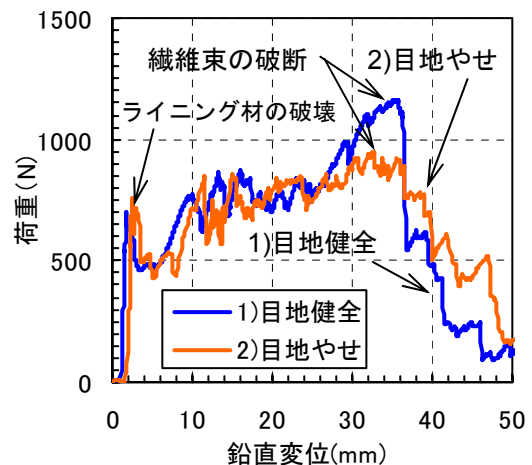


図-5 鉛直変位と剥離荷重の関係

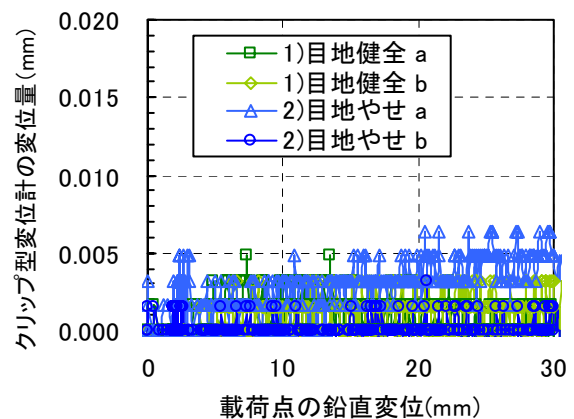


図-6 载荷荷重と変位計の変位量の関係

4.2 実験結果

図-5に鋼製治具の上方への鉛直変位と剥離荷重の関係を示す。図-2、図-3に示す押し抜き実験の結果と同様に、ライニング材の破壊が生じた後に荷重は低下するが、荷重は繊維束に

負担され、荷重は増加する。その後、鉛直変位が 35mm 程度で繊維束が破断して、荷重は低下した。鉛直変位と荷重の関係は、目地やせによる影響は、少ないことが分かる。これは、剥離挙動がレンガとライニング材との付着強度、繊維束の伸びに起因したものであり、目地の充填の程度が剥離耐力に与える影響が少ないためであると考えられる。また、母材レンガの変位をクリップ型変位計にて計測した結果を図-6 に示すが、レンガの変位はほとんど見られず、剥離荷重により、母材のレンガが剥落する挙動は生じないことが分かる。

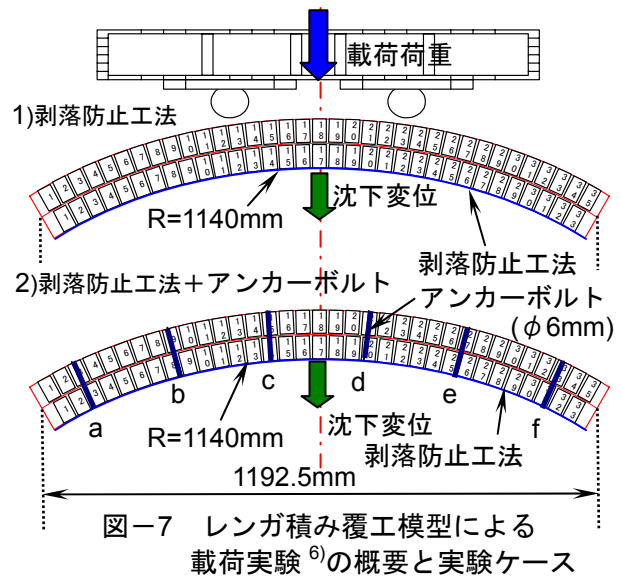


図-7 レンガ積み覆工模型による
載荷実験⁶⁾の概要と実験ケース

5. レンガ積み覆工模型載荷実験

5.1 実験概要

鉄道トンネルの 1/2 スケールのレンガ積み覆工に本剥落防止工法およびアンカーボルトによる補強対策を施工した載荷実験を実施し、対策施工のなされていない覆工のケース⁶⁾と比較した。実験の概要および実験ケースを図-7 に示す。押し抜き実験と同様のレンガと目地材を使用し、レンガを 1/2 スケールに加工し、目地幅を 5mm、奥行きを 200mm として 1/2 スケールのアーチ模型 (R=1140mm) を作製した。剥落防止工法については、1/2 スケールにすることは困難であるので、実物大の繊維シートおよびライニング材の厚さとして、アーチの内側に施工した。また、鋼製アンカーボルトの設置は、図-7 中に示すように 6 箇所とし、φ12mm のコンクリートドリルで覆工模型の奥行き方向の中央部に削孔した後挿入し、圧縮強度が 30.0N/mm² 程度のスラリー状のモルタルを注入して覆工模型とアンカーボルトとの隙間を充填した。

載荷方法の詳細は既往の実験方法に準じ⁶⁾、2 点載荷とし、レンガ積み覆工模型の両端支点はピン構造とした。実験は、載荷点とアーチ天端の沈下変位および載荷荷重を計測するとともに、レンガや剥落防止工法のモルタル表面とアンカーボルトにひずみゲージを貼付け⁶⁾、各挙動を計測した。

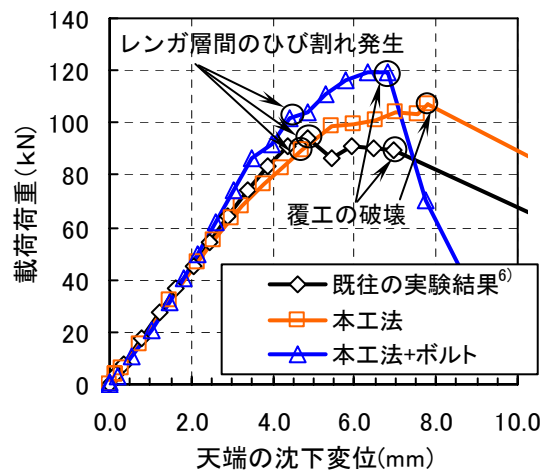


図-8 天端の沈下変位と載荷荷重の関係⁶⁾

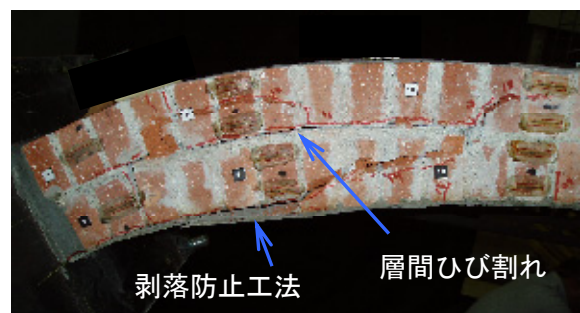


写真-4 試験後の破壊状況 (側面から)

5.2 試験結果

載荷点の鉛直変位と載荷荷重の関係を図-8 に示す。図-8 中には、対策施工がなされていないレンガ積み覆工模型を用いて行ったケース⁶⁾も併せて示す。目視観察によると、いずれのケースも沈下変位 4~5mm 付近で、載荷点と支点間のレンガ層間の目地に沿ってひび割れが発生した (写真-4 参照)。その後、この区間の覆工

母材にせん断破壊が生じて荷重が低下し覆工の破壊へと至るが、対策施工がなされていないケース⁶⁾では、レンガ層間のひび割れ発生後に荷重は減少し脆性的に破壊した。これに対し、対策工を施工した場合は、ひび割れ発生後も荷重は増加し、最終的には写真-4示すように、連続繊維シートは破断せず、覆工の破壊は脆性的には生じなかった。また、連続繊維シートにより、覆工片の落下を防ぐ効果も観察された。覆工の最大耐力は、剥落防止工法を施工した場合、3.5mmのモルタル厚と5mmの目地材の欠損部の埋合わせにより、ほぼ有効断面の増加分と同等に10%程度増加した。アンカーボルトを併用したケースでは、最大耐力は対策施工がなされていないケースと比較して、25%程度上昇した。図-9には、図-7に示されているa~cのアンカーボルトに貼り付けたひずみゲージのデータから算定した軸ひずみと覆工模型天端の沈下変位との関係を示す。図-9より、レンガと目地の層間にひび割れが生じた後に軸ひずみが発生しており、アンカーボルトが載荷荷重を負担し、補強効果を示していることが確認できる。

6. まとめ

無機系のモルタルと連続繊維シートを用いた剥落防止工法のレンガ積み覆工トンネルへの適用性を確認する目的で、押し抜き実験、次元の剥離実験および2点載荷実験を実施した。その結果、以下の事項が得られた。

- (1) レンガを母材とした試験板による押し抜き実験を実施し、レンガ母材が低強度であっても、コンクリート板によるケースと同等な性能を有し、同様の実験方法により評価が可能であることを確認した。
- (2) レンガ積み覆工の目地材が剥落防止効果に与える影響を調べる目的で次元の梁型試験板による剥離実験を実施した。その結果、目地材の強度が十分にあり、半分程度の目地を有すれば、レンガ片の剥落防止効果があることが分かった。

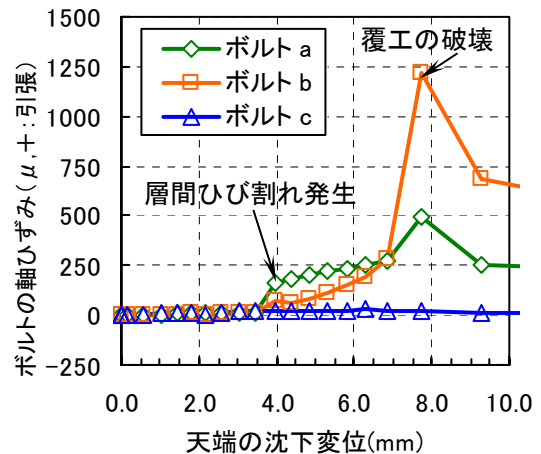


図-9 天端の沈下変位とアンカーボルトの軸ひずみの関係

- (3) 1/2スケールの覆工模型による載荷実験を実施し、剥落防止工法およびアンカーボルトの施工による補強効果により、覆工耐力が増加することを確認した。

参考文献

- 1) 岡野, 津野, 小島, 朝倉: ブロック積み覆工トンネルに関する実験的研究, トンネル工学研究論文報告集, Vol. 12, 2002.
- 2) 藤倉, 伊藤, 秩父: ポリマーセメントモルタルと連続繊維シートを用いた剥落防止工法に関する基礎実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, 2003.7
- 3) トンネル安全対策工法研究会: FRPによるトンネル覆工剥落対策マニュアル, 山海堂, 2003.5
- 4) 日本道路公団: はく落防止の押抜き試験方法 JHS 424
- 5) 藤倉, 伊藤, 秩父: 無機系材料による剥落防止工法のレンガ積み覆工トンネルへの適用性の検討, 第31回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 2004.3
- 6) 岡野, 小島, 津野, 朝倉: 煉瓦積みトンネルの覆工模型載荷実験, 土木学会第59回年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp.207-208, 2004.9
- 7) 栗林, 岡野, 仲山, 小島: 煉瓦積みトンネル覆工におけるあと施工アンカーの適用性に関する実験, 土木学会第59回年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp.731-732, 2004.9
- 8) 藤倉, 伊藤, 秩父: 無機系材料による剥落防止工法の押し抜き耐力の評価法, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, pp.1487-1492, 2004.7