

レンガ積みトンネル覆工における対策材料の 定着および接着に関する設計法

The design method of fixing and adhesive bonding
to repair bricks worked tunnel lining

栗林健一¹・岡野法之²・仲山貴司³・小島芳之⁴・竹本恭啓⁵

Kenichi Kuribayashi, Noriyuki Okano, Takashi Nakayama, Yoshiyuki Kojima, Yukihiro Takemoto

^{1)~4)} 正会員 財) 鉄道総合技術研究所 トンネル (〒185-8540 国分寺市光町2-8-38)

⁵⁾ 株) ケー・エフ・シー 技術研究所 (〒347-0010 埼玉県加須市大桑1-19-1)

E-Mail¹⁾ ; kuririn@rtri.or.jp

A great number of railway tunnels in service is block masonry. Recently, the deformation due to the aged deterioration etc, has been ascertained, because these tunnels were constructed in Meiji Period or Taisyo Period. This paper studies test results. Also, it proposes the design method concerning to fixing and adhesive bonding.

Key Words : Brick work , The maintenance of bricks , The design method

1. はじめに

現在JR各社が所有する鉄道トンネル全数(新幹線除く)のうち約1/3は、レンガ等で組積されたブロック積みトンネルである。その多くは明治大正時代に建設され、経年劣化等の変状が確認されている。

これらの変状に対する覆工内面の対策工法は、その取付け方法により、あと施工アンカーを用いる工法(以下アンカー工法)と接着系材料を用いる工法(以下接着工法)に分けることができる(表-1)。

表-1 工法種別と具体的な工法

工法種別	具体的な工法
アンカー工法	当て板工法、ネット・金網工法 内面補強工(パネル)
接着工法	吹付け工法、繊維シート接着工法 断面修復、内面補強工(鋼板接着)

これらの工法は、コンクリート構造物の対策として数多くの実績を持ち、その定着や接着について設計法が提案されている。しかしレンガに対する設計法はなく、また定量的に評価を行った報告はない。

そこで本研究では、レンガ試験体を用いた各種実験を行い、レンガ積みトンネル覆工における対策材料の定着および接着に関する設計法を提案することを目的とする。表-2に実験項目を示す。

表-2 実験項目

	実験項目	実験方法
定着	単体試験体	アンカー引抜試験
	複合試験体	
接着	単体試験体	建研式引張試験
	複合試験体	押し抜き試験

2. 実構造物の物性値

(1) 実構造物の物性値

適切な対策設計を行うには、母材の物性値を把握することが重要である。そこで明治19年から大正9年に建設された鉄道レンガ構造物(トンネル・橋梁; 合計22構造物)より試験体採取し強度試験および吸水率測定を行った結果^{1) 2)}をもとに物性値の評価を行った。

図-1は、既設レンガ積みトンネルより採取を行ったレンガ試験体の物性値^{1) 2)}(JIS R 1250)を示す。また明治34年と44年、昭和62年のそれぞれにおいてのレンガの品質管理規格(現行の3種相当)³⁾^{4) 5)}も示す。同図より、既設レンガ積みトンネルの物性値は、圧縮強度(JIS R 1250)で5~15N/mm²、吸水率で10~20%であることが確認された。またそれらは、当時の規格とおおむね合致する値であった。

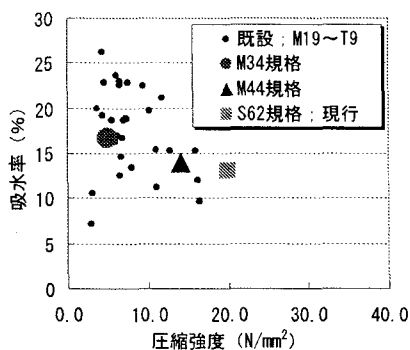


図-1 既設構造物の物性値とレンガ規格

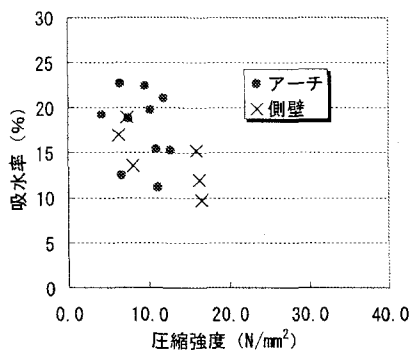


図-3 トンネルの部材ごとのレンガ物性値

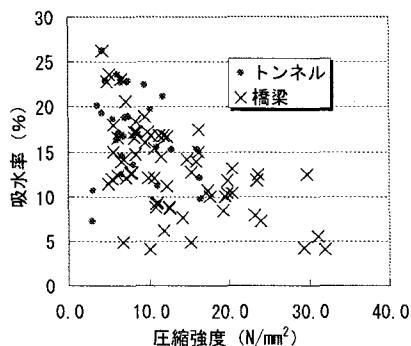


図-2 構造物種別によるレンガ物性値

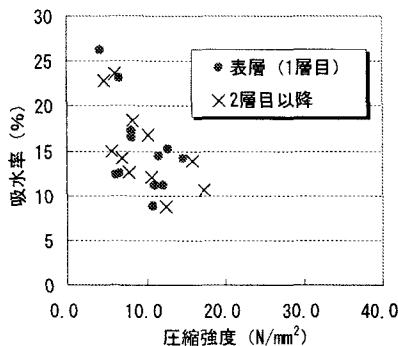


図-4 トンネルの層ごとのレンガ物性値

図-2は既設レンガ積みトンネルと既設橋梁より採取を行ったレンガ試験体の物性値^{1) 2)} (JIS R 1250、橋梁の一部は試験法が不明)を示す。トンネルで使用されたレンガは、橋梁に比べ、圧縮強度が低く、吸水率が高い傾向を示した。

図-3は既設レンガ積みトンネルの側壁とアーチでそれぞれ採取を行ったレンガ試験体の物性試験 (JIS R 1250) 結果^{1) 2)}を示す。同図より、試料数は少ないものの、側壁とアーチ部で使用されたレンガは、同程度の物性値を示す傾向が確認された。

図-4は既設レンガ積みトンネルの表層 (1層目) と2層以降について、それぞれより採取を行ったレンガ試験体の物性値^{1) 2)} (JIS R 1250)を示す。同図より、試料数は少ないものの、表層 (1層目) と2層目以降で使用されたレンガは、同程度の物性値を示す傾向が確認された。

図-3および図-4より、レンガ積みのトンネル部位によって、その物性値は大差がないことがわかる。そこで、例外については考慮する必要があるが、対策設計において、レンガ積みトンネルの一部でサンプリングされたレンガの物性値を用いて、そのトンネル全体を評価できるものとする。

(2) 試験体材料の選定

対策設計法の提案・評価を行うためには、既設レンガ積みトンネルの物性値を代表するレンガ試験体を使用する必要がある。そこで、本実験を行うにあたり、表-3に示す材料について物性値の把握を行った。

表-3 試験体材料の種類

名 称	具体的な種類
レンガA	建築などの装飾用レンガ 単位体積質量=19.1kN/m ³
レンガB	建築などの装飾用レンガ 単位体積質量=20.4kN/m ³
レンガC	JISレンガ (2種相当) 単位体積質量=21.7kN/m ³
コンクリート	$f_c=40\text{N/mm}^2$ (JIS A 1108) 単位体積質量=22.2kN/m ³

表-3に示す各材料の物性値と既設レンガ積みトンネルの物性値^{1) 2)}を図-5 (JIS R 1250)に示す。

同図より、レンガAは既設レンガ積みトンネルの物性値を代表する値であることが確認された。本研究では、主に、レンガAを用いて対策設計に関する評価実験を行った。

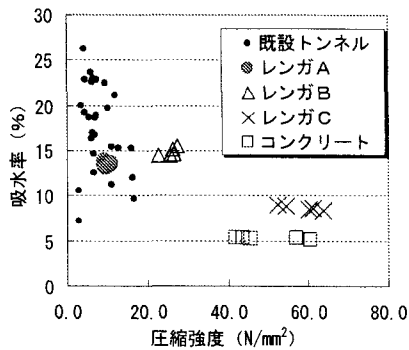


図-5 レンガ材料の選定

(3) 試験体材料の評価

まず、試験体材料の物性値の把握を行った。

載荷試験 (JIS R 1250 参考) を行い、圧縮ひずみの測定を行った。レンガ A とコンクリートの応力-ひずみ曲線を図-6 に示す。同図より、コンクリートは 2000 μ を越えたあたりから軟化するのに対し、レンガは最大荷重まで直線的な挙動を示した。

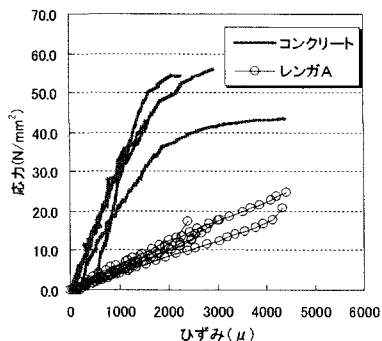


図-6 圧縮応力-ひずみ曲線

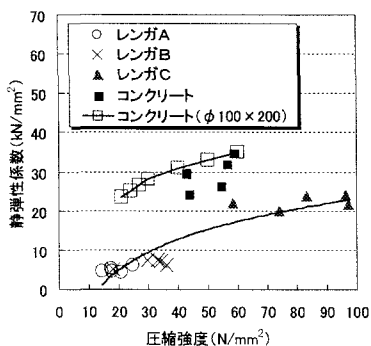


図-7 材料ごとの圧縮強度と静弾性係数の関係

図-7 に材料ごとの静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。なお静弾性係数は通常コンクリートで用いられている割線弾性係数とした。また図中に示すコン

クリート (φ100×200) は、コンクリート (JIS A 1108) の値を⁶⁾示す。

同図より、材料にかかわらず、圧縮強度と静弾性係数には相関が確認された。また圧縮強度が同程度の場合、コンクリートに比べて、レンガの静弾性係数は半分程度であった。また本実験におけるレンガの圧縮強度と静弾性係数の近似式を式1に示す。

$$y = 11.3 \log(e) x - 28.94 \quad (\text{式1})$$

x : 圧縮強度 (JIS R 1250) ; N/mm^2

y : 試験体の静弾性係数 ; N/mm^2

3. 定着に関する実験

3.1 既存のアンカー評価法

あと施工アンカーには、金属拡張式アンカー、樹脂アンカー、またそれらを組み合わせた複合アンカーなどがある。これらはコンクリート構造物に対して多くの実績をもち、アンカーの種類に応じた設計式が提案⁷⁾されている。設計式は、定着深さやアンカー径に加えて、母材の圧縮強度を指標とした関数として表されている。

3.2 単体試験体を用いた実験

(1) 実験概要

単体試験体 (210×100×60mm) にアンカーを定着し、油圧ジャッキを用いて引抜試験を行った。試験体には、2種類のレンガに加え、同形状のコンクリートも使用した。またアンカーは金属拡張式アンカーと樹脂アンカーの2種類を使用した。

また穿孔は、実施工で用いられている回転・打撃式のドリルでは、単体試験体に亀裂が生じる恐れがあったため、単体試験では回転式のドリルを用いた。

(2) 引抜試験結果

図-8 に破壊状況の一例 (金属拡張式アンカー、レンガ A) を示す。

金属拡張式アンカーによる破壊は、その底部の拡張部からのコーン状破壊となった。一方で、樹脂アンカーは樹脂材料の全面定着であるため、その破壊は、樹脂と母材の付着せん断破壊が支配的となった。これはレンガやコンクリートにかかわらず、同様な傾向を示した。

図-9 に試験体の圧縮強度 (JIS R 1250) と最大引

抜荷重（樹脂アンカー）を示し、図-10にアンカー種類ごとに、設計荷重に対する最大引抜荷重の比を示す。また図中の設計荷重は、コンクリート用に提案されている設計式⁷⁾より算出を行ったものである

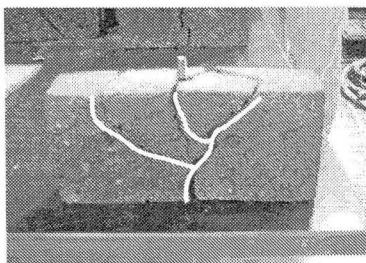


図-8 金属拡張式アンカーによる破壊状況

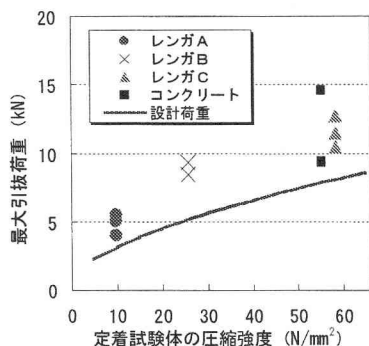


図-9 樹脂アンカーの最大引抜荷重

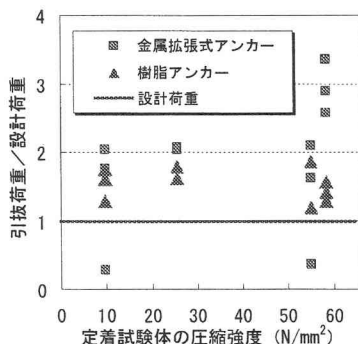


図-10 設計荷重に対する最大引抜荷重の比

図-9より、母材の種類およびアンカー種類にかかわらず、母材の圧縮強度が大きくなるにつれ、最大引抜荷重が増加することがわかる。

また図-10より、金属拡張式アンカーの一部のケースで設計荷重を下回る結果となったが、その他の多くは設計荷重を上回った。これらの結果より、母材の種類やアンカー種類にかかわらず、既存の設計式⁷⁾を用いてアンカーの最大荷重を十分安全側に評価できることが確認された。

図-10より金属拡張式アンカーの最大引抜荷重は、

樹脂アンカーに比べ、ばらつきが生じた。この理由としては定着の違いがあげられる。樹脂アンカーはアンカー全長にわたって定着されるが、金属拡張式アンカーの定着は、その底部の拡張部周辺のみに限定される。そのため拡張部周辺の状態によって、引抜荷重にばらつきが生じたと思われる。

3.3 複合試験体を用いた実験

(1) 実験概要

複合試験体（650×480×210mm）にアンカーを定着し、油圧ジャッキを用いて引抜試験（図-11）を行った。実験パラメータを表-4に示す。

また穿孔に用いたドリルは、実施工で用いられている軽量タイプの回転・打撃式ドリルを使用した。穿孔による母材の損傷は確認されなかった。

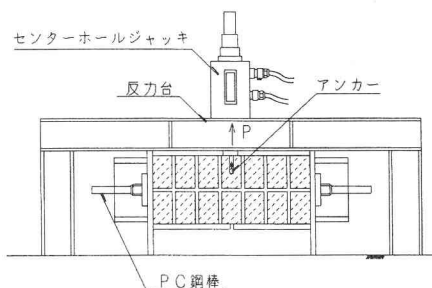


図-11 複合試験体を用いた引抜試験図

表-4 実験パラメータ

アンカー種類	金属拡張式、樹脂、複合（すべてM12）
アンカー定着層	表層（1層目）、2層目
アンカー定着部位	母材、縦目地、横目地
母材種別	レンガA、コンクリート版
目地深さ	目地充填 目地やせ（高さの半分50mm）
目地強度（JIS R 1250）	低強度 $f'_c = 10\text{N/mm}^2$ 高強度 $f'_c = 25\text{N/mm}^2$
母材の応力状態	軸力の有・無（15kN）

(2) 実験結果

a) 破壊状況

図-12に破壊状況写真を示す。この実験ケースは、レンガAと低強度目地を組み合わせた試験体に、複合アンカー（金属拡張式アンカーと樹脂アンカー）を定着させたときの破壊状況である。

破壊状況は、母材の種類によって差はなかったが、目地の強度によってその結果は異なった。目地強度が母材強度と同程度以下の場合、図-12に示すように、コーン状の破壊となった。一方、目地強度が母

材強度より大きい場合、目地に沿った破壊となった。

破壊断面は、単体試験体の結果と同様に、アンカーの種類によって異なる結果となった。金属拡張式アンカーによる破壊は、その底部の拡張部からのコーン状破壊となり、樹脂アンカーの破壊は、樹脂と母材の付着せん断破壊が支配的となった。これは母材の種類にかかわらず、同様な傾向を示した。

またこれらを組み合わせた複合アンカーは、図-13に示すように、その破壊断面も両方を組み合わせた結果となった。



図-12 破壊状況

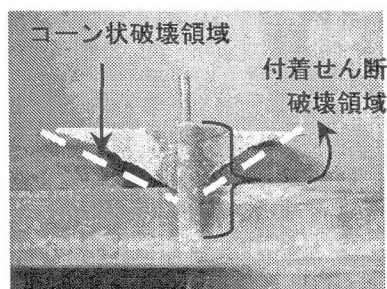


図-13 複合アンカーの破壊断面

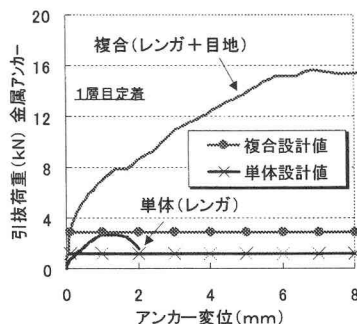


図-14 単体と複合試験体

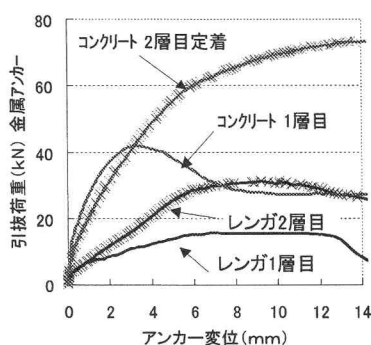


図-15 定着層および母材種別

b) 引抜試験結果

図-14にアンカー（金属拡張式アンカー）の引抜荷重と設計荷重の関係を示す。設計荷重は、コンクリート用に提案されている既存の設計式⁷⁾より算出を行ったものである。同図より、試験体の構成（単体・複合）にかかわらず、設計値に比べて、引抜荷重は大きな値を示した。とくに複合試験体においてはその度合いは大きいことから、目地ヤセのないレンガ構造物に設計式⁶⁾を適用した場合は、かなり安全側の設計となると考えられる。

図-15に定着深さと母材種類をパラメータとした実験結果を示す。それぞれ金属拡張式アンカーを使用した。同図より、定着深さに応じて引抜荷重が異なることも確認された。また母材がレンガの場合、コンクリートの場合に比べ、最大荷重および荷重-変位曲線の傾きは小さいことが分かる。この理由として、母材の強度と弾性係数の影響があげられる。

図-16にアンカーの種類をパラメータとした実験結果を示す。それぞれのアンカーの定着層（定着深さ）と径は同じである。同図より、複合アンカーの

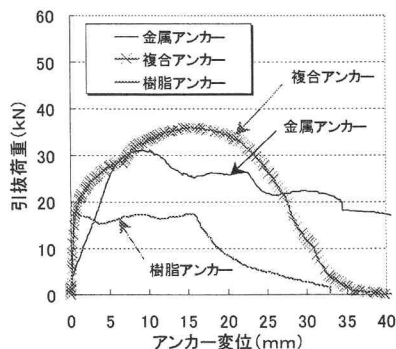


図-16 アンカーの種類

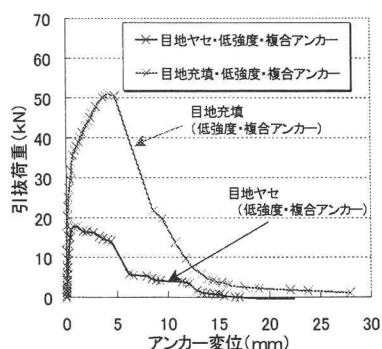


図-17 目地の充填具合

破壊挙動は、まず樹脂と母材の付着せん断破壊が生じた後、拡張式アンカーによる母材のコーン状破壊が生じると思われる。

図-13・図-16より、複合アンカーは、金属アンカーと樹脂アンカーの破壊挙動を併せ持つことから、最大荷重が大きく、バラツキが小さい特徴を有すると考えられる。

図-17に目地の充填度合いをパラメータとした実験結果を示す。複合アンカーを2層目に定着した。同図より、目地がヤセている場合、その引抜耐力は低下した。複合アンカーの特徴の一つである拡張式アンカーによるコーン状破壊が、目地ヤセによって、生じ得なかったと考えられる。

図-18に目地強度の違いをパラメータとした実験結果を示す。使用アンカーは複合アンカーを用いた。同図より、高強度目地（母材強度より高い）の場合、低強度目地（母材強度と同程度）に比べて、その引抜耐力は小さかった。これは目地強度が母材強度と同程度以下の場合、その破壊面（図-12）は目地をまたぐコーン状破壊となる。一方、目地強度が母材強度より大きい場合、破壊面は目地材と母材の界面に沿って形成されるため、その破壊面積は減少し、本結果では引抜耐力が小さくなったと思われる。

また図-17および図-18において、高強度目地において、アンカーの最大引抜荷重後も、その引抜荷重が低下しなかった。この理由としては、高強度目地の場合、最大引抜荷重後も目地に沿って破壊が進行しつづけたことがあげられる。

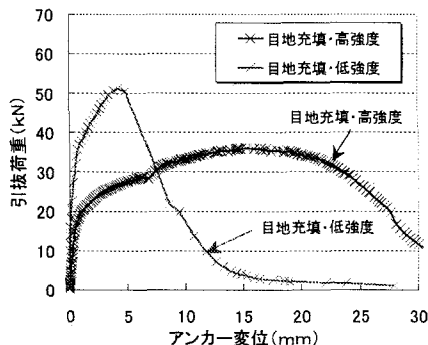


図-18 目地強度の違い

4. 接着に関する実験

4.1 既存の接着評価法

接着の対策材料には、樹脂系材料（繊維シートなど）や無機系材料（吹付けモルタルなど）、またそれらを組み合わせた複合材料（ポリマーセメントなど）があげられる。

コンクリート構造物への適用において、その設計の基本思想は、接着相手である母材の引張強度を付着強度と仮定し照査を行うことである。これは接着系材料すべてに共通する。この引張強度は母材の圧縮強度を指標とした関数⁸⁾として表されている。

この基本思想をもとに、材料ごとの設計法が整備されつつあり、その一つに、剥落対策である繊維シートにおいて、設計法が提案⁹⁾ 10) されている。

4.2 単体試験体を用いた実験

表-5に示すいくつかの接着系の対策材料を用いて、母材と対策材料の付着特性について把握を行った。

表-5 対策材料一覧

図中凡例	使用材料
母材のみ	レンガ A, B, C, コンクリート
接着樹脂	繊維シート、エポキシ樹脂
吹付け材	ポリマーセメントモルタル
含浸樹脂A	粘性樹脂、アクリル樹脂
含浸樹脂B	低粘性樹脂、アクリル樹脂

図-19に、母材に対策材料を接着し、単軸垂直引張試験（通称：建研式）結果を示す。試験方法は、鋼製端子を単体試験体（105×100×60mm）に接着し、これを引張り、その付着強度を測定した。また図中に示す引張強度は、母材の終局限界状態の引張強度を算出する既存の式⁸⁾より算出を行った。

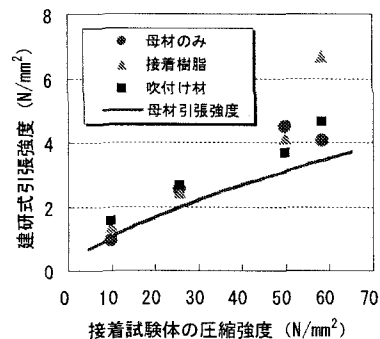


図-19 対策材料の付着強度

同図より、試験体の種類にかかわらず、その圧縮強度と引張強度（建研式）は相関を示し、その値は既存の式により算出を行った引張強度であらわすことができる。また対策材料の付着強度も、その種類にかかわらず、既存の式により算出を行った試験体の引張強度で、その値をあらわすことができる。

これらの結果より、母材や対策材料の種類にかかわらず、対策材料の付着強度は、母材の引張強度に支配され、それらは既存の式⁸⁾を用いて評価できることが確認できた。

図-20に、母材（レンガA）の含水状態の違いによる対策材料ごとの付着強度を示す。また湿潤状態は、試験体を水中に1週間以上浸漬したものを、用い、気中に取り出して、表面の水滴を拭いた後、5分以内に補修材の塗布等を行った。また処理後は、上端を1cm 気中に露出するように水中に浸漬し、湿気箱（密閉容器）中で24時間以上養生を行った。同図より、対策材料の種類によって試験結果が異なった。吹付け材の付着強度は、その湿潤の場合に比べ、低

下した。これは母材が対策材料に比べて乾燥している場合に生じるドライアウト現象と思われる。一方で含浸樹脂においては、含浸樹脂 (A) は、母材が湿潤状態の場合でも、付着強度が低下しなかったものの、含浸樹脂 (B) は低下した。

対策材料の適用にあたっては、その特性を把握した上で、母材の含水状態を考慮する必要がある。

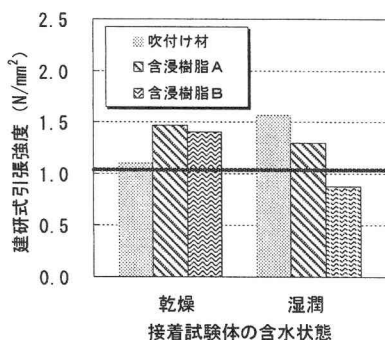


図-20 母材の含水状態による付着強度

4.3 複合試験体を用いた実験

(1) 実験概要

複合試験体を用いた繊維シートの押し抜き試験状況を図-21に示し、実験パラメータを表-6に示す。

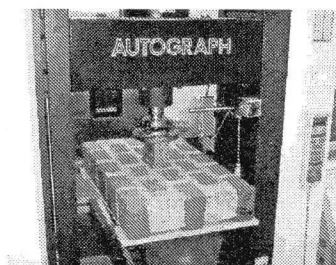


図-21 押し抜き試験状況

表-6 実験パラメータ

母材種別	レンガ A、B、C コンクリートブロック $f_c = 24 \text{ N/mm}^2$
含水状態	乾燥、湿潤
目地深さ	目地充填 目地やせ (高さの半分 50mm)
目地強度	$f_c = 10 \text{ N/mm}^2$

試験方法は、ブロックと目地を組み合わせた複合試験体 (610×380×100mm) を用いて、試験体中央部のハコ抜き部に試験速度 1 mm/min で載荷し、0.5kN毎に載荷を停止し、繊維シートが破断および剥離が端部に達するまで押し抜いた。

湿潤面用のエポキシ樹脂をプライマーとして使用し、アラミド繊維シートをアクリル樹脂にて含浸接着を行った。また湿潤状態については、単体試験体と同様の方法で行った。

(2) 実験結果

すべての試験体において、繊維シートの破断により試験が終了した。

母材の種類が異なる押し抜き試験結果を図-22に示す。ここで用いた複合試験体は、乾燥した母材と目地 (目地やせ) を組み合わせたものである。

同図より、母材の圧縮強度 (図-5) および静弾性係数 (図-7) が大きくなるにつれ、繊維シートの押し抜き荷重が大きくなることがわかる。

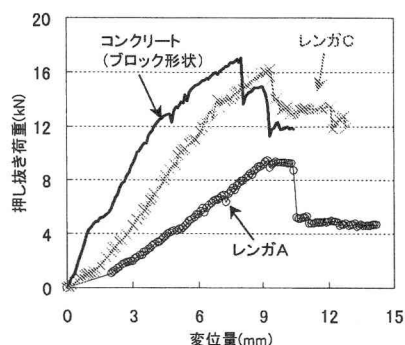


図-22 押し抜き試験状況

母材の含水状態および目地の充填度合いが異なる実験結果を図-23に示す。ここで用いた複合試験体は、レンガ A と目地を組み合わせたものである。

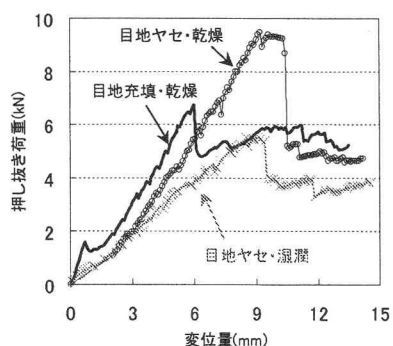


図-23 押し抜き試験状況

同図より、目地の充填度合いによって異なる試験結果となった。荷重-変位曲線の初期の勾配は、目地充填の効果により、目地やせに比べて大きな値を示した。一方でその押し抜き荷重は、目地やせの方が、大きな結果となった。本実験において、目地の充

填度合いによって押し抜き荷重に差が生じた理由として、繊維シートの剥離形状の違いがあげられる。目地ヤセの剥離形状は、図-24に示すように円形に近い形状であったが、目地ありの場合は目地に沿った長方形の剥離形状となった。円形の場合は剥離周長の全長において均一に押し抜き荷重を負担していたと思われ、長方形はそうでなかったと思われる。

また、母材の含水状態の違いによって、試験結果が異なった。湿潤状態の場合、乾燥状態の場合に比べて、押し抜き荷重が小さかった。

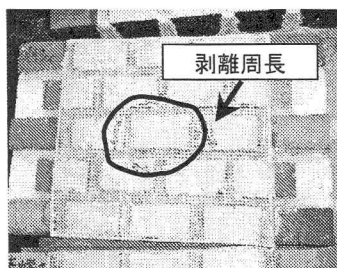


図-24 目地なしの剥離状況

パラメータによって異なる結果となったものの、シートが破断まで良好な付着を確保できたこと、また一般に想定される剥落荷重と本結果を比較すると、レンガ構造物の剥落対策に、連続繊維シートの適用は可能であると考えられる。

6. まとめ

レンガ積みトンネル覆工における対策材料の定着および接着に関する設計法を作成するため、実際のレンガ構造物の物性値を把握した上で、各種室内実験を行った。その結果、コンクリートに適用されている既存対策設計法がレンガ積み構造物においても適用できることが明らかとなった。以下に、得られた成果を示す。

- ① 既設レンガ積みトンネルの物性値は、圧縮強度（JIS R 1250）で5～15N/mm²、吸水率で10～20%であることが確認された。またトンネルの部位によって、レンガの物性値に大差はないことが確認された。
- ② 既設レンガ積みトンネルを代表するレンガを選定し、それを用いてレンガ物性値（圧縮強度・弾性係数）の把握を行った。
- ③ あと施工アンカー定着の設計は、目地ヤセ度合いに応じて十分な定着長さを確保すれば、目地強度にかかわらず、母材強度を指標とする既存設計式⁷⁾を用いて評価することができる。具体的

には、目地ヤセ生じている場合、表層（1層目）より深部の2層目に定着を行うことで、その目地強度に関わらず、既存設計式⁷⁾により算出された設計荷重を満足する。

- ④ 接着材料の設計において、その付着強度は、接着材料および母材の種類にかかわらず、既存の式⁸⁾により算出される母材の引張強度で評価することができる。また接着系材料の一つである繊維シートにおいて、母材の種類や目地の充填度合いにかかわらず、母材強度に応じてその押し抜き荷重は大きくなることが確認された。

7. おわりに

今後は、本実験で得られた設計法を検証するため、既設レンガ積みトンネルにおいて現地試験を行うよいである。また、レンガ積みトンネルの調査方法の提案や、レンガ構造物の劣化メカニズムの把握と劣化対策についても研究を進めているところである。

これらの成果は、レンガ積みトンネルの保守管理に有効活用され、より良い保守管理がなされるための有効な手段になるものと考えられる。

謝辞:本研究を行うにあたり、日鉄コンポジット㈱ 齊藤様・加治木様、電気化学工業㈱ 加藤様・藤間様のご協力を得た。ここに記して深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 三浦一郎，西郷勘治郎，早川留蔵：コンクリートコア及びレンガの試験（第1報），鉄道技術研究所速報 No.59-261 1959.9
- 2) 三浦一郎，西郷勘治郎，早川留蔵：コンクリートコア及びレンガの試験（第2報），鉄道技術研究所速報 No.59-299 1959.9
- 3) 高架橋鉄道用並形煉化石仕様書，1901.10
- 4) 並形煉化石仕様書，1911.7
- 5) JIS R 1250「普通レンガ」，1987
- 6) 土木学会 コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，pp28-29, 2002..
- 7) あと施工アンカー工法設計施工の手引き 鉄道総合技術研究所 1987.9
- 8) 土木学会 コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，pp21-22, 2002.
- 9) FRPによるトンネル覆工剥落対策マニュアル トンネル安全対策工法研究会 2003.3.25
- 10) 小島，吉川，六車，小林，若菜，朝倉 他：繊維シート接着工法による覆工コンクリートの剥落対策設計法 土木学会論文集 No.756/v-62,101-116 2004.3