

論文 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実験

栗林健一*1・岡野法之*2・仲山貴司*3・小島芳之*4

要旨：鋼板や繊維シートなどの対策材料の取り付けにあたっては、あと施工アンカーや接着剤などを用いる。これらは、コンクリート覆工の対策において多くの実績を持ち、その設計耐力の評価方法として母材強度を用いた設計式が提案されている。しかしレンガ覆工においてはそれら設計耐力の評価法について検証を行った報告はない。そこで本研究では、実構造物の物性を把握した上で、定着や接着に関する室内実験および現地実験を行った。実験結果から、レンガ積み覆工においても、コンクリートと同様に、母材強度を指標とする設計式を適用することで、その定着および接着を評価できることが明らかとなった。

キーワード：レンガ, トンネル, 対策工法, 定着, 接着, 母材強度, 設計式, 維持管理

1. はじめに

J R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。その多くは明治から大正時代に建設され、経年劣化等の変状が確認され、何らかの対策を行う必要がある。

覆工内面の対策工法は、その取り付け方法により、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）

これらの工法は、コンクリート覆工で多くの実績を持ち、母材強度を指標とする設計式（以下既存式^{1) 2)}）が用いられている。レンガ覆工においてもアンカー工法や接着工法により対策が行われているが、それらの適用性について検証を行った報告はない。

そこで本研究では、レンガ強度をパラメータとした実験（室内実験・現地実験）を行い、レンガ覆工における対策工法の定着および接着に関する評価法について検証を行った。

2. 既往の設計思想

母材強度より求まる金属拡張式アンカー1 本

表-1 工法種別と具体的な工法

| | |
|--------|------------------|
| アンカー工法 | 当て板工法, ネット・金網工法 |
| | PC板による内面補強工法 |
| 接着工法 | 吹付け工法, 繊維シート接着工法 |
| | 断面修復工法, 鋼板接着工法 |

あたりの許容引抜耐力 P (N) は、式 (1) が提案¹⁾ されている。

$$P = 0.03 \cdot \sqrt{\sigma_c} \cdot \pi \cdot L \cdot (L+D) \quad \cdots \text{式 (1)}$$

ここに、

D : 削孔径 (mm)

L : 埋め込み長 (mm)

σ_c : 母材強度 (N/mm²) JIS R 1250

また、接着材料とコンクリートの付着強度は、式 (2) に示すコンクリートの終局限界状態の設計引張強度²⁾ により表すことができる。

$$f_{tk} = 0.23 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad \cdots \text{式 (2)}$$

ここに、

f_{tk} : 終局限界状態の引張強度 (N/mm²)

f_{ck} : 設計基準強度 (N/mm²)

*1 ショーボンド建設株式会社 補修工学研究所 (元 鉄道総合技術研究所) (正会員)

*2*3 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル 工修

*4 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル 工博

3. 既設レンガ積み覆工の母材強度

3.1 既設レンガ積み覆工の母材強度

図-1 に、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）より採取した試験体の圧縮強度と吸水率の関係³⁾を示す。また、明治 34 年・明治 44 年のそれぞれのレンガの品質管理規格（現行の 3 種相当）^{4) 5)}も示す。同図より、既設レンガ積み構造物を構成するレンガ母材は、圧縮強度 (JIS R 1250) で 5~15N/mm²、吸水率で 10~20%の範囲にあるものが多いことがわかる。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-2 に、既設レンガ積み覆工（トンネル）のアーチ部と側壁部から採取した試験体、また母材の表層（1 層目）と 2 層目以深から採取した試験体のそれぞれについて、圧縮強度と吸水率の関係³⁾を示す。同図より、レンガ積み覆工の物性値はその部位の違いによって大差はないことがわかる。例外は想定されるが、レンガ積み覆工の健全度診断や対策設計にあたって、サンプリングにより覆工全体を評価できると思われる。

3.2 実験で用いた試験体材料

図-1 に、3 および 4 で述べる実験で使用した材料（表-2）の物性値 (JIS R 1250) を併記した。同図より、レンガ A は既設レンガ積み覆工を代表する値を有することが確認された。

表-2 試験体材料の種類

| | |
|---------|--------------------------------------|
| レンガ A、B | 建築などの装飾用レンガ |
| レンガ C | JIS レンガ (2種相当) |
| コンクリート | $f_c = 40\text{N/mm}^2$ (JIS A 1108) |

3.3 試験体材料の静弾性係数測定

表-2 に示した材料について、載荷試験 (JIS R 1250 参考) を行い、圧縮ひずみの測定を行った。各材料の応力-ひずみ曲線を図-3 に示す。同図より、圧縮強度 (図-1 に示す) が大きいほど静弾性係数 (グラフの傾き) が大きいことがわかる。またコンクリートは 2000 μ を越えたあたりから

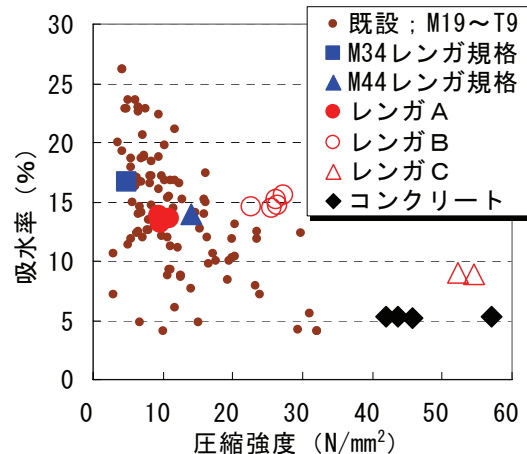


図-1 圧縮強度-吸水率の関係

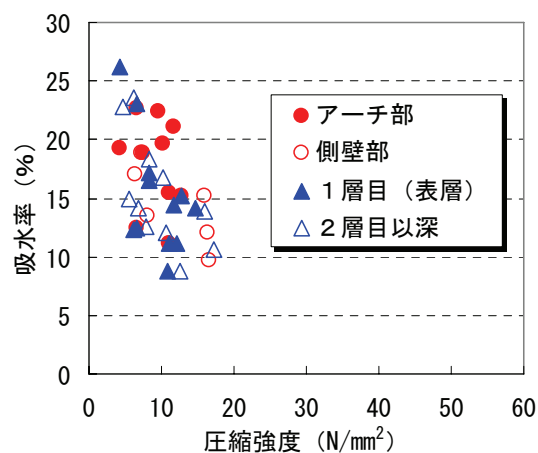


図-2 部位別の物性値

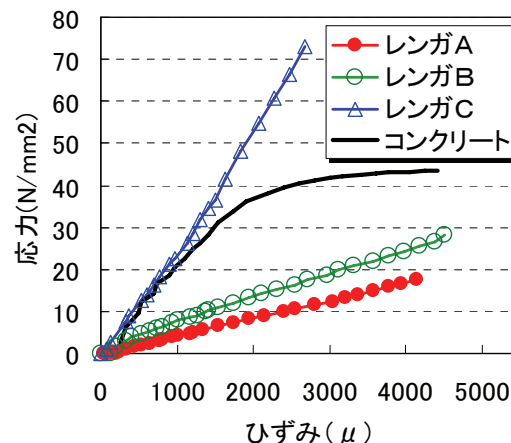


図-3 応力-ひずみ曲線

軟化するのに対し、レンガはその種別に関わらず最大荷重まで線形的な挙動を示した。

4. 定着に関する実験

4.1 室内実験

(1) 実験概要

油圧ジャッキを用いて、試験体に定着したア

ンカーの引抜試験を行った。また、レンガ覆工の組積構造を模擬するため、単体試験（母材のみ；210×100×60mm）に加え、組積試験（母材＋目地；650×480×210mm）を行った。

図-4に組積試験体の引抜試験概要図を示し、表-3に組積実験パラメータを示す。

また、使用したアンカーは、金属拡張式アンカーと樹脂アンカーに加え、それらを組み合わせた複合アンカーを用いた。なお、穿孔用のドリルは、実施工と同じ軽量タイプの回転・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。

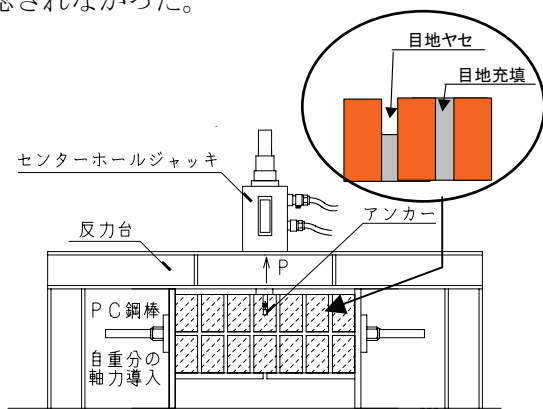


図-4 試験装置概要図

表-3 組積試験パラメータ

| | |
|------------|-------------------------------------------------|
| アンカー (M12) | 金属拡張式、樹脂、複合 |
| 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 | 充填、ヤセ (高さの半分50mm) |
| 目地強度 | 低強度：10N/mm ² ,高強度25N/mm ² |
| 目地材質 | 普通セメント、配合1：3モルタル |
| 母材の応力状態 | 軸力の有・無 (15kN) |

(2) 実験結果

(a) 破壊形態

破壊形態は、母材種別によって差は確認されなかったが、アンカー種別によって異なる結果となった。樹脂アンカーによる破壊は、樹脂と母材の付着せん断破壊となり、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であった。また複合アンカーによる

破壊は、両者の特徴を併せ持つ破壊であった。

(b) 母材強度と引抜荷重

図-5に、単体試験体の圧縮強度 (JIS R 1250) と最大引抜荷重 (樹脂アンカー) を示す。また図中の設計引抜耐力は、既存式¹⁾より算出したものである。同図より、母材種別にかかわらず、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。

(c) 目地の状態と引抜荷重

図-6に、目地の充填度合いおよび目地強度をパラメータとした組積実験結果を示す。なお、実験では、2層目に複合アンカーを定着した。同図より、「①目地ヤセ」の引抜耐力は、「②目地充填」の場合に比べて、小さかった。既存の実験結果¹⁾によれば、破壊面が大きくなるにしたがいアンカー耐力も大きくなる。目地ヤセによって破壊面が十分に確保できなかったため、引き抜き耐力が小さかったと考えられる。

また、「③高強度目地 (母材強度より高い)」の引抜耐力は、「②低強度目地 (母材強度と同程度)」の場合に比べて、その最大引抜耐力は小さかった。破壊形態を確認したところ、「②低強度目地」の場合、破壊面が目地を跨いで大きく形成されたのに対し、「③高強度目地」の場合、目地材と母材の界面に破壊面が形成され、その大きさは小さいものであったため、本実験においては、引抜耐力が小さくなったと考えられる。

(d) アンカー種別と引抜荷重

図-7に、アンカーの種類を条件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) は同じである。同図より、いずれのアンカーにおいても設計引抜耐力を上回った。また、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ち、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。

(e) 室内実験のまとめ

室内実験により、目地の状態やアンカーの種別によって引抜荷重に差が生じたものの、母材

強度を指標とする既存式¹⁾を用いてアンカーの最大荷重を評価できることが確認された。

4.2 現地実験

(1) 実験概要

明治43年に建設された鉄道レンガトンネルにおいて、表-4に示す現地実験パラメータについて引抜試験を行い、実構造物での既存式の検証を行った。

(2) 実験結果

レンガ積み覆工より採取した試験体を用いての圧縮強度試験(JIS R 1250)を行った。その圧縮強度は $13\text{N/mm}^2 \sim 20\text{N/mm}^2$ とバラツキを有するものであったが、室内試験で使用したレンガAと同程度の強度を有するものであった。

図-8に、アンカー種別ごとに、室内実験と現地実験のそれぞれにおいて、設計引抜耐力に対する最大引抜荷重の比を示す。また設計引抜耐力は、既存式¹⁾より算出を行ったものである。

同図より、金属拡張式アンカーの1 caseを除いて、最大引抜荷重は設計耐力を上回ったことから、実構造物においても、母材強度を指標とする既存式¹⁾を用いてアンカーの最大荷重を評価できることが確認された。

表-4 現地実験パラメータ

| | |
|------------|--------------|
| アンカー (M12) | 金属拡張式、樹脂、複合 |
| 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 (乾燥面、湿潤面) |

表-5 単軸垂直引張試験のパラメータ

| | | |
|------|----------------|----------------|
| 対策工 | 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 |
| 母材のみ | レンガABC, コンクリート | |

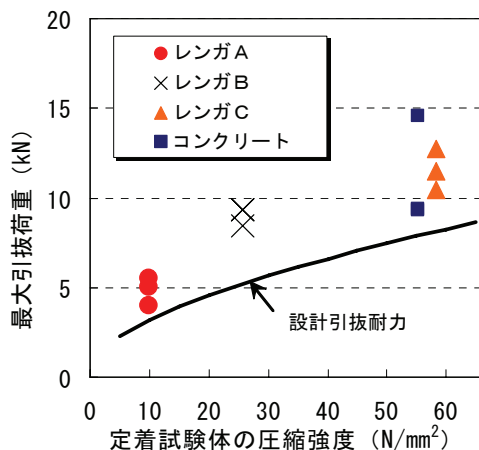


図-5 圧縮強度と引抜荷重 (樹脂アンカー)

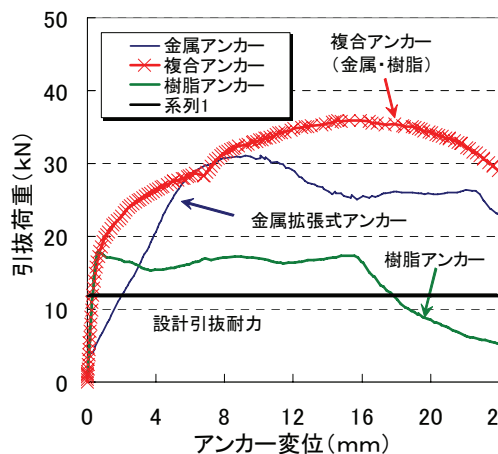


図-7 アンカー種別と引抜荷重

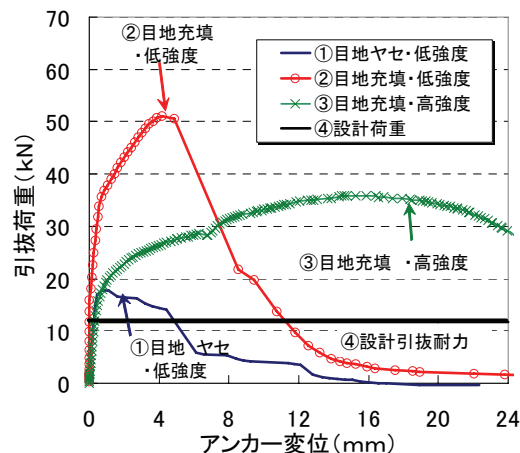


図-6 目地状態と引抜荷重 (複合アンカー)

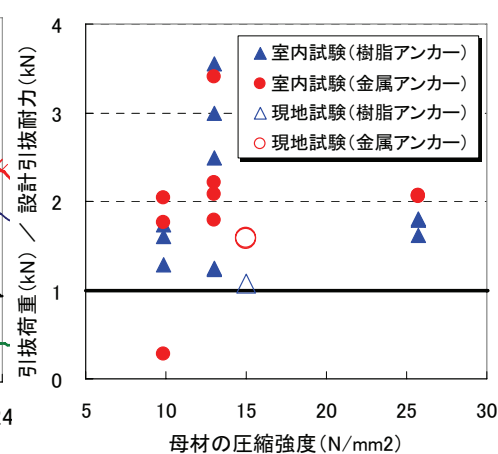


図-8 室内実験と現地実験

5. 接着に関する実験

5.1 室内実験

(1) 単軸垂直引張試験

表-5に示す単体試験体 ($105 \times 100 \times 60\text{mm}$) に鋼製端子を取り付け、その付着強度の測定を行った。試験にあたっては、母材に対策材料を接着したケースに加え、母材の引張強度を確認するために、母材のみを引っ張る試験も行った。

試験結果を図-9に示す。また図中に示す設計引張強度は、終局限界状態における母材の引張強度を表す既存式²⁾より算出を行った。

同図より、対策材料の種別にかかわらず、その母材強度と付着強度は相関を示し、それぞれの値は既存式²⁾により算出を行った引張強度と同等もしくはそれ以上の値であった。

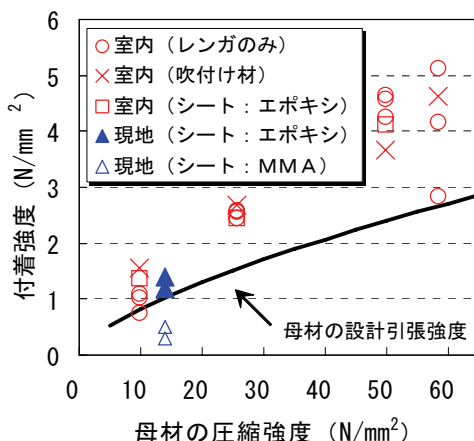


図-9 圧縮強度と付着強度

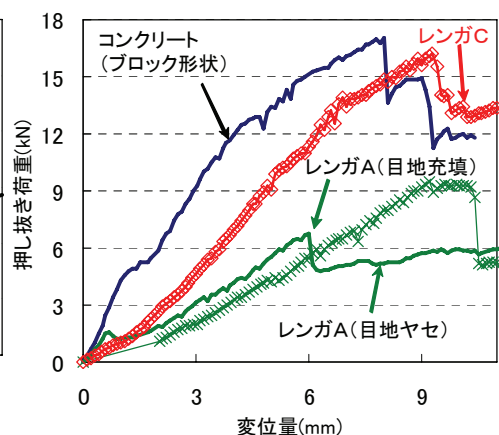


図-11 押し抜き試験結果

(2) 押し抜き試験

ブロックと目地を組み合わせた組積試験体(610×380×100mm)を用いて繊維シートの押し抜き試験を行った。

荷重方法や荷重速度などについては、筆者らが提案^{6) 7)}した手法で行った。表-6に実験パラメータを示し、試験状況を図-10に示す。

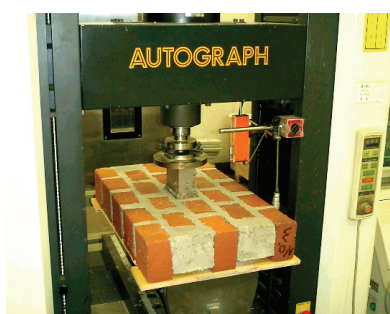


図-10 押し抜き試験状況

表-6 押し抜き試験パラメータ

| | |
|------|--------------------------------------------|
| 母材種別 | レンガA、B、C コンクリートブロック：24N/mm ² |
| 母材状態 | 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 | $f_c = 10\text{N/mm}^2$ |

破壊形態は、全ケースにおいて、試験体の端部までシートが剥離することなく、シートの破断であった。

図-11に押し抜き試験結果(母材：乾燥)を示す。同図より、母材の圧縮強度(図-1)および静弾性係数(図-3)が大きくなるにしたがい、荷重-変位曲線の初期勾配が高く、最大押し抜き荷重が大きくなることが確認された。

また、目地部の充填度合いによっても荷重-変位曲線の初期勾配は異なる結果となった。図-11より「目地やせ」に比べ、「目地充填」の荷重-変位曲線の初期勾配は大きいことがわかる。この理由としては、目地部が完全に充填されていることによって、繊維シートの接着面積が、「目地やせ」に比べ、大きかったことが考えられる。目地部の充填度合いによって異なる挙動を示したが、「目地やせ」の場合においても、繊維シートの破断まで良好な付着を確保できることが確認された。

(3) 室内実験のまとめ

接着(付着強度)は、対策材料種別にかかわらず、レンガにおいても、母材強度を指標とする既存式²⁾により評価できることが確認された。

また、目地やせの度合いが50mm程度であれば、シートの破断まで良好な付着を確保できたことから、レンガ構造物の剥落対策に繊維シートの適用は可能であると考えられる。

5.2 現地実験

(1) 実験概要

鉄道レンガトンネル(定着の実験と同トンネル)において現地実験を行い、既存式²⁾の検証を行った。表-7に現地実験パラメータを示す。

(2) 試験結果

レンガ覆工(湿潤面)にプライマーの異なる繊維シートを貼り付け、単軸垂直引張試験を行った結果を図-9(図中▲印・△印)に示す。同図より、MMA樹脂プライマーを用いた場合、母

材の引張強度を下回る結果となった。エポキシ樹脂プライマーを用いた場合は、湿潤面においても、設計引張強度を上回るものであった。

現地実験においても、母材強度を指標とする既存式⁷⁾を用いて付着強度を評価できることが確認された。

表-7 現地実験パラメータ

| | |
|---------|------------------------|
| 対策材料 | 繊維シート (アラミド) |
| シート接着層 | 乾燥面、湿潤面 |
| プライマー種別 | エポキシ樹脂+ウレタン樹脂 MMA樹脂 |

6. まとめ

レンガ積み覆工における対策工法の定着および接着に関する評価法について検証を行うため、実際のレンガ覆工の物性値を把握した上で、室内実験および現地実験を行った。その結果、レンガ積み覆工においては、コンクリートと同様に、母材強度を指標とする既存式を適用することで、その定着および接着を評価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 既設レンガ積み覆工の母材物性値は、圧縮強度 (JIS R 1250) で5~15N/mm²であることが確認された。また覆工部位による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Aを選定し、それをを用いて基本的な物性値 (圧縮強度・弾性係数) の把握を行った。
- ③ 定着 (アンカー引抜荷重) は、十分な定着長さを確保すれば、目地の状態にかかわらず、母材強度を指標とする既存式¹⁾を用いて評価することができる。
- ④ 1層目に目地ヤセが生じている場合の定着は、2層目以深に定着を行うことで、既存式¹⁾により算出された設計引抜耐力を満足する。
- ⑤ 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ち、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。

⑥ 接着 (付着強度) は、対策材料種別にかかわらず、レンガにおいても、既存式²⁾により算出される終局限界状態における母材の引張強度で評価することができる。

⑦ エポキシ樹脂プライマーを用いた繊維シートは、目地ヤセ部や湿潤面においても、良好な付着を確保できたことから、レンガ構造物の剥落対策に適用できると考えられる。

7. おわりに

現在、レンガ積み覆工の調査方法や、レンガ積み覆工の劣化やその対策についても研究を進めており、その成果は別稿にて報告したいと考えている。これらは、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、東日本旅客鉄道 (株) テクニカルセンター田村隆志様・八王子土木技術センター四宮卓夫様 他には、現場実験をはじめとする多大なご協力を頂いた。また実験にあたって、KFC竹本恭啓様、日鉄コンポジット (株) 斉藤誠様のご協力を得た。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所 あと施工アンカー工法設計施工の手引き 1987.9
- 2) 土木学会 コンクリート標準示方書[構造的な性能照査編], pp21-22, 2002.
- 3) 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・第2報), 鉄道技術研究所速報 No.59-261 1959.9
- 4) 高架橋鉄道用並形煉化石仕様書, 1901.10
- 5) 並形煉化石仕様書, 1911.7
- 6) 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 2003.3
- 7) 小島芳之, 吉川和之, 六車崇司, 小林朗, 若菜和之, 松岡茂, 朝倉俊弘, 呉智深: 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/vi-62,101-116 2004.3