

トンネル覆工の剥落対策における繊維シート接着工 の適用性について

APPLICABILITY STUDIES OF CONTINUOUS FIBER SHEET METHODS AS A COUNTERMEASURES FOR CONCRETE SPALLING FROM TUNNEL LINING.

小島芳之¹⁾・吉川和行¹⁾・六車崇司¹⁾・小林朗²⁾・若菜和之³⁾

Yoshiyuki KOJIMA, Kazuyuki YOSHIKAWA, Takashi MUGURUMA, Akira KOBAYASHI, Kazuyuki WAKANA

Recently, continuous fiber sheet (CFS) methods (mainly carbon fiber and/or aramid fiber) have been increasingly used for the prevention of concrete spalling from tunnel linings. However, no sufficient design criteria or countermeasure selection criteria have been established. So the establishment of rational design method has been desired for the application of CFS methods.

In this paper, series of punching shear tests of CFS retrofitted slabs were conducted, and an evaluation method of the effect of CFS was proposed as a mile stone to the establishment of design criteria. Also, the past concrete spalling accidents were analyzed and categorized in four levels according to their spalling scales, and selection criteria of the CFS methods were proposed.

Key Words : tunnel lining, fiber sheets, countermeasures for spalling

1. はじめに

最近、鉄道土木構造物からのコンクリート片の剥落対策として、炭素、アラミドなどの繊維材料をエポキシ樹脂等の含浸接着樹脂でコンクリート壁面に含浸接着させる工法（以下「繊維シート剥落対策工」という）が普及してきている。特に供用中のトンネルでは、内空余裕や施工時間の制限から、重機を使わず短時間で施工できほとんど内空断面を侵さず、金属製の材料を使用しないことから錆びない、本工法がその適用実績を着実に伸ばしている。

しかしながら、その工法の選定の考え方や設計方法は十分に整理されておらず、必ずしも合理的な設計がなされているとは言い難いのが実状である。

そこで筆者らは、①過去の剥落事例を調査し、剥落事例ごとの要因の分類とその特徴を考察した。②剥落対策工の中で最も代表的な繊維シート接着工に着目し、覆工コンクリートから繊維シートが剥離する形状や強さを把握するための押し抜き模型実験を行った。③繊維シート接着工における剥落対策工の室内耐久性試験や現場施工性試験を行い、繊維シート接着工のトンネル内における耐久性や施工性を概略の評価を行なった。

本稿では、上記の①および②に絞って繊維シート接着工の剥落対策工としての選定法および繊維シート接着工の効果の評価について報告する。③については、別途報告の予定である。

繊維シート接着工の剥落対策としての選定法に関しては、剥落対策工の現状調査の結果と押し抜き実験の結果を考慮して剥落形態を4段階に区分し、選定の大まかな考え方を整理した。繊維シート接着工の効果の評価に関しては、

1) 正会員 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル担当

2) 正会員 日鉄コンポジット株式会社

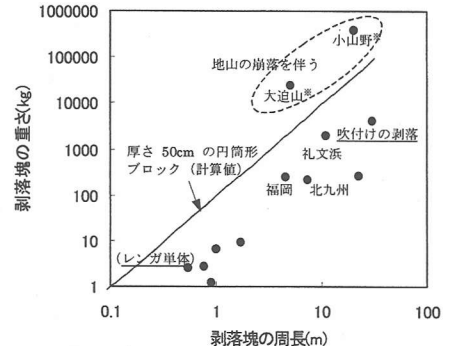
3) 正会員 ショーボンド建設株式会社

押抜き実験の結果や呉ら¹⁾による剥離破壊エネルギーの考え方から、繊維シート接着工の固有の剥離強度を求める方法を考案し、繊維シート接着工の剥落対策の効果を評価する方法を提案した。

2. トンネル覆工の剥落規模と要因

2.1 剥落実績の調査

図1は、鉄道トンネルにおける既往の剥落実績を剥落塊の重さと周長との関係を図上で整理したものである。なお、この図では、剥落の大部分を占める数 kg 程度までの小片の剥落は除外した。図より、トンネル覆工は無筋コンクリートの場合が殆どであるが、中には数百 kg～ton オーダーに及ぶものもあることが分かる。また、地山の崩落を伴う事例もあり、この場合には数十～数百 ton に達する。



●：平成 11～12 年度に新聞等で公表された鉄道トンネルの剥落事例、それ以前に文献で公表された事例(※)の調査結果より作成

図-1 鉄道トンネルにおける剥落実績

2.2 剥落要因と規模

(1) 剥落要因の分類

トンネル覆工の剥落事例の規模は図-1 に示すように多様であり、その要因は、次の 3 つに分けられる。

- ①施工時に起因する剥落：施工目地、コールドジョイント、乾燥収縮ひび割れ、脱型時のひび割れ等が閉合した剥落、ジャンカ等の豆板が分離する剥落、など
- ②材料劣化による剥落：RC における中性化等による被りコンクリートの剥落、凍害などによる表層コンクリートの剥落、など
- ③地圧等の外力による剥落：曲げ圧縮、圧縮せん断、押し抜きせん断破壊に伴う剥落

(2) 剥落要因毎の特徴

これらの要因毎に剥落の特徴を簡単に整理する。

①施工時に起因する剥落

平成 11 年度に生じた剥落事故の殆どは、山陽新幹線福岡トンネルの例(図-2 参照)²⁾をはじめとして施工時に生じた変状が主因であった。これらは、剥落に至るまで数年以上をかけてゆっくりと進行するので、全般検査で把握できることが明らかになっている。剥落の規模は、一般には表層部の細片が落下する場合(重さ数 kg まで)が殆どであるが、図 1 に示したように、時に数百 kg～ton オーダーに達することもあることが分かった。

②材料劣化による剥落

RC 構造で一般に見られる被りの剥落は、被り不足箇所における中性化による場合が多いことが知られている³⁾。JR 西日本が平成 11 年に山陽新幹線で行った一斉点検結果によれば、打音検査で「濁音」が生じた箇所数は、RC 覆工の方が無筋コンクリート覆工より多い傾向にあった⁴⁾。ただし剥落は小規模で、一般に数 kg のオーダーまでであると考えられる。トンネル覆工の殆どを占める無筋コンクリートの場合は、劣化要因(有害水、凍害等)が限られ劣化の進行性も緩慢であるが、①や③と競合すれば大規模な剥落が生じ得る。

③地圧等の外力による剥落

覆工の曲げ圧縮破壊(圧ざ)や圧縮せん断破壊による剥落が問題となるトンネルは、地圧の影響を受ける一部のトンネルに限られる。トンネルの補強が必要になるが、剥落規模としては①と同様であると考えられる。

押抜きに伴う剥落も一般には稀である。しかし、礼文浜トンネルに見られるように、時に 2ton に及ぶ規模の剥落を生じることが示された。また、クラウン部の覆工厚が特に薄く材質不良で背面空洞がある場合には、福塩線大迫山トンネルなど例に見られるように、上部地山の緩みに伴って大規模な崩落が生じることがあり、これらの事前防護はトンネルの変状対策として非常に重要である。

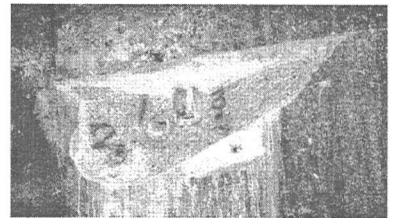


図-2 福岡トンネルの剥落事例

3. 繊維シート接着工の剥落対策効果

3.1 押抜き実験の概要

繊維シート接着工による剥落対策において、その耐荷荷重や剥離挙動および破壊モードを把握するために小型・大型の2タイプの押抜き実験を行った。小型の実験装置は、図-3に示すように供試体（コンクリート平板）の2辺を支持するスパン45cmのU型鋼製の架台部分とφ5cmの円筒形の圧子によって繊維シートを押抜く載荷装置から構成される。計測項目は、圧子によって強制的にFRPが引き剥がされる過程における押抜き荷重、載荷点変位、繊維シートの表面ひずみ等である。供試体には、中央に押し抜き圧子用の孔（φ5cm）を開けたW50cm×B50cm×T8cmの無筋コンクリート平板（ $\sigma_{ck}=10, 20\text{N/mm}^2$ の2種類を用意し、 σ_{28} はそれぞれ、11.3, 21.4N/mm²であった。）の下面に繊維シートを接着したものを用いた。コンクリート平板の表面は、下地処理ありの場合ではディスクサンダーを用いて行い、プライマーを塗布してパテで平滑化した。供試体の孔部に挿入する圧子は、孔径（φ5cm）より僅かに小さいコンクリート製の円筒形の圧子とし、供試体との摩擦を少なくするためテフロンシートを2枚重ねた。また、大型の実験については、繊維シート接着と覆工のアーチ部の曲率の影響を把握するため、大型平板（W230cm×B230cm×T15cmのコンクリート平板で、中央の孔はφ20cmである）による押抜き実験も合わせて行なった。なお、計測項目等は小型平板によるものと同様である。

3.2 実験ケース

(1) 小型実験

実験ケースを表-1に示す。接着する繊維シートは、市販されているものの中からビニロン（目付量44g/m²）を除き目付量200g/m²程度のものを採用した。

表-1 実験ケース

No.	繊維シート	下地処理	コンクリート強度 N/mm ²	接着剤 ^{※2}	設計厚さ mm	引張弾性係数 N/mm ²
1	1方向炭素	有	20	E	0.111	2.3×10^5
2	2方向炭素	有	20	E	0.0555	2.3×10^5
3	2方向アラミド ^{※1} 1	有	20	E	0.064	1.1×10^5
4	2方向アラミド ^{※1} 2	有	20	E	0.065	8.0×10^4
5	ガラス	有	20	E	0.038	1.3×10^5
6	ビニロン	有	20	E	0.034	縦: 2.85×10^3 斜: 2.53×10^3
7	ポリエステル	有	20	E	0.116	1.46×10^4
8	ナイロン	有	20	E	縦:0.097 横:0.061	縦: 2.14×10^3 横: 2.21×10^3
9	2方向炭素	有	20	M	0.0555	2.3×10^5
10	2方向炭素	有	20	H	0.0555	2.3×10^5
11	SMC ^{※1}	有	20	E A	1.4	8.01×10^3
12	2方向炭素	無	20	E	0.0555	2.3×10^5
13	2方向炭素	有	10	E	0.0555	2.3×10^5

※1 : Sheet Molding Compound

※2 : E : エポキシ樹脂, M : メチルメタクリレート (MMA)

H : 変性エポキシ樹脂, E A : エポキシアクリレート

(2) 大型実験

大型平板による押抜き実験では、覆工の曲率半径を R として新幹線断面 R=4750mm、在来線単線 R=2220mm、平板 r=∞の3ケースで実験を行い、接着する繊維シートについては全て2方向の炭素繊維シート（200g/m²）を用いた。

3.3 実験方法

圧子による供試体への載荷は、変位制御とし小型・大型平板とも剥離開始前までは0.2mm/minとし、剥離開始後は1.0mm/minとした。データの計測は、剥離開始前は押込み量0.05mm毎に剥離開始後は押込み量0.5mm毎に行ってその後の2分間で繊維シート接着工の状況を観察した。なお、剥離範囲の観察は、押込み量2mm毎に叩き検査を実施して、繊維シートの表面に剥離範囲をマーキングした。

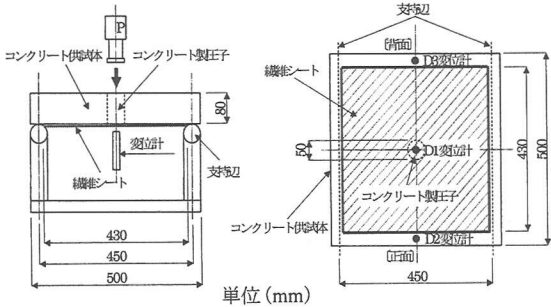


図-3 押抜き実験装置

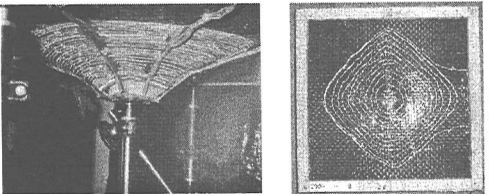


図-4 実験中、後の状況

3.4 実験結果

(1) 小型実験

図-4に、押抜き実験における圧子による繊維シートとの剥離状況と実験終了後の繊維シートの状況を示す。

図-5には、小型平板の押抜き荷重と押抜き量の関係を示す。表2に押抜き荷重と押抜き量、剥離周長の関係を示す。図-6には、押抜き荷重と剥離周長の関係を示す。同図より、小型平板の剥離が進行すると押抜き荷重は剥離周長に比例することが分かる。また、引張剛性（弾性率×単位断面積）が大きいものほど傾きが大きいことが分かる。

図-7には、小型平板押抜き実験における剥離角度と押抜き量との関係を示す。図より、剥離が進行すると剥離角度は一定となって剥離することが分かる。また、剥離角度は引張剛性が大きいものほど小さいことが分かる。

(2) 大型実験

図-8には、大型平板押抜き実験における押抜き荷重と押抜き量の関係を示す。図より初期の勾配は曲率半径の大小に係わらずほぼ一定の傾きであるが、二次勾配は曲率半径が小さくなると荷重の増加率が小さくなることが分かる。また、繊維シートの剥離は、トンネル軸方向に卓越する傾向にある（図-9参照）。

表-2 実験結果総括表

No.	最大荷重発生時		最大荷重発生時前後での極大荷重発生時		単位剥離強さ $sp_0(P1/L)$ (kN/mm)	実験終了要因 ※1	剥離形態 ※2
	荷重 P (kN)	変位 u (mm)	荷重 P1 (kN)	剥離周長 L (m)			
1	6.92	17.35	6.53	0.969	6.74	T	B
2	5.98	21.86	5.81	1.065	5.46	T	B
3	6.25	26.72	6.13	1.124	5.45	T	B
4	5.92	33.48	5.66	1.189	4.76	T	B
5	2.10	11.07	2.01	0.474	4.24	F	B
7	2.26	57.03	2.26	0.842	2.68	F	F
8	4.43	52.59	4.43	1.051	4.22	F	F
9	3.05	16.98	2.98	1.097	2.72	T	K
10	2.93	18.94	2.93	1.144	2.56	T	K
11	5.56	18.29	5.56	1.020	5.45	F	B
12	1.04	10.91	1.04	0.947	1.10	T	K
13	4.88	19.35	4.65	1.067	4.36	T	B

※1：実験終了要因；T：端部まで剥離，F：繊維シートの破断

※2：剥離形態；B：母材破壊，K：界面剥離，F：繊維シートと接着材の界面

※3：No6については、繊維目付け量が少なく実験がうまく行えなかったので省略。

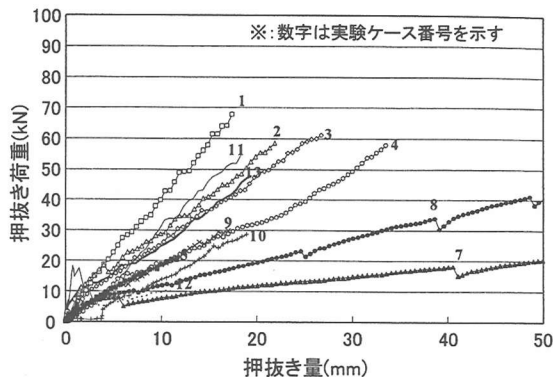


図-5 押抜き荷重と押抜き量の関係（小型平板）

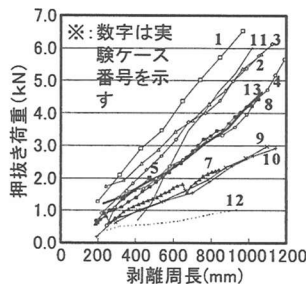


図-6 荷重－剥離周長（小型平板）

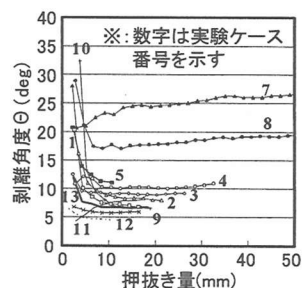


図-7 剥離角度－押抜き量（小型平板）

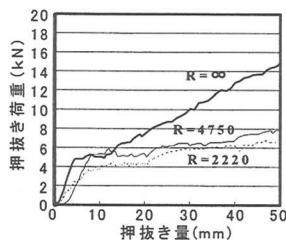


図-8 大型平板の押抜き実験の結果

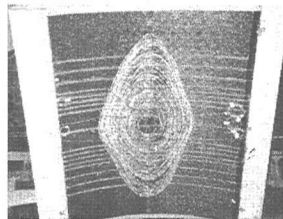


図-9 大型平板の実験後の状況（R=2220mm）

3.5 実験結果の考察

押抜き実験の結果から、以下のことが明かになった。

- (1) 剥離強さ Sp は、剥離周長 L にほぼ比例する（ $Sp = sp_0 \times L$ ； sp_0 は単位剥離強さ）。
- (2) sp_0 は、繊維シートの引張剛性、接着材の付着強度、コンクリート表面の引張強度、アーチ曲率により異なる。
- (3) 剥離角度も上記と同様に異なるが、剥離後は各繊維シート毎に一定となる。
- (4) 剥離形状は繊維の異方性に伴い菱形（連続繊維シート）または円形状（短繊維シート）になる。
- (5) 最大荷重は、繊維シートの破断強度あるいは接着長さのどちらかで規定される。
- (6) 覆工に曲率がある場合、繊維シート接着工の剥離はトンネル軸方向に卓越する。

4. 繊維シート接着工における剥落対策工の選定方法

剥落実績と押抜き実験結果より、剥落形態・規模に対応する繊維シート接着工の適用可能範囲を検討した。その結果を、剥落形態・規模を、①覆工細片（レンガ大まで）、②覆工片（レンガ大～1m 四方）、③覆工ブロック（1m 四方以上）、④地山崩落を伴うものの、の4種類に分類した。なお、以下に繊維シート接着工の選定の考え方と留意点を以下に示す。

- (1) 今回行った押抜き実験結果をもとに、繊維シート接着工（ただし繊維目付け量 200g/m² を想定）を単独の対策として行う場合の適用可能範囲は、上記の①、②と③の一部までである。ただし、地圧等の外力による剥落の場合は、地圧対策工を併せて考える必要がある。なお、③、④に対しては、他の工法との併用（セントル補強、ロックボルト補強等）が必要になるものと考えられる。
- (2) ①に分類されるものに対しては、繊維シート材料等の選定の自由度が高い。しかし、②、③に対しては、剥離強さについて十分に検討する必要がある。実験によれば、炭素繊維、アラミド繊維の剥離強さが他の材料に比較して優れる傾向にあるので、設計で想定する剥落重量が大きい場合には、これらの材料を選定するのが良いと考えられる。なお、炭素繊維は導電性があることから、鉄道トンネルの電化区間での使用には注意が必要となる。
- (3) 繊維シート接着工は、コンクリートに樹脂が十分に接着されることが前提である。したがって、本工法の採用にあたり、a) 漏水の除去、b) 脆弱な部位や汚損した部位の除去、c) 不陸の修正、が必須となる。事前に対策を講じてこれら影響が懸念される場合は、ネット工などの他の対策工を選定すべきものと考えられる。

5. 繊維シート接着工の剥落対策効果の評価

小型平板押抜き実験の結果を踏まえて、繊維シート接着工の剥落対策としての効果を評価するために、繊維シート接着工の固有の剥離強さ（ sp_0 ）を呉ら¹⁾の研究による方法で検討した。呉らの研究によれば、連続繊維シートをコンクリート表面に接着した場合、剥離強さは繊維シートの剥離角度と剥離長および引張剛性の関数となり、剥離角度は、エネルギー開放率から算定することができると示している。ただし、呉らの考え方には前提条件があり、剥離形態がコンクリートの母材破壊で剥離角度が一定となることである。これら条件は、表-2、図-7 より満足していることを確認した。以下に、呉らによる剥離破壊エネルギーの考え方に基いて小型平板押抜き実験結果（図-10 参照）から、剥離荷重を算定するための式を以下に示す。

$$P = 4 \cdot E \cdot A \cdot (r_0 + a) \cdot \beta \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \beta^2}} \right\} \quad \dots (1)$$

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{u}{a} = \tan \alpha, \quad L = 4\sqrt{2} \cdot (r_0 + a) \\ G &= E \cdot A \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \beta^2 + \frac{1}{\sqrt{1 + \beta^2}} - 1 \right) \\ &\quad - E \cdot A \cdot \frac{a}{a + r_0} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \beta^2 - \sqrt{1 + \beta^2} + 1 \right) \quad \dots (2) \end{aligned}$$

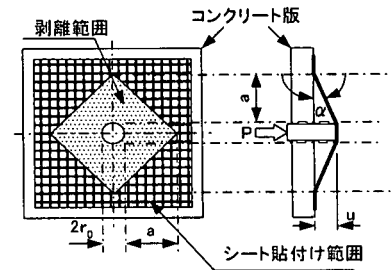


図-10 小型平板押抜き実験

P：押抜き荷重（N）、E：繊維シートの引張弾性係数（N/mm²）

A：繊維シートの単位長さにおける断面積（mm²/mm）

r_0 ：圧子の半径（mm）、a：剥離長（mm）

u：鉛直変位（mm）、G：エネルギー開放率（N/mm）

L：剥離周長（mm）

ここで、エネルギー開放率 G が剥離破壊エネルギー G_c と等しいと仮定し $G_c = 0.5 \text{ N/mm}^2$ とすると式(1)、式(2)より算出された剥離荷重と実験値（P）は図-11 のようになる。図より、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維の実験値は、

呉らによる計算値とほぼ同様な値となっている。

一方、MMA、速硬エポキシ、レイタンス面等は、本手法を適用するには、低減係数等を乗ずるなどの補正が必要であることが分る。ところで、押抜き実験結果によれば、押抜き荷重 (P) は剥離周長 (L) と比例関係にあることから、剥離荷重を剥離周長で割った単位剥離強さ (sp_0) は、繊維シートの材質すなわち引張剛性 ($E \cdot A$) のみで決まる。そこで、呉らによる方法で当てはまる炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維等の 5 ケースについて、呉らによる sp_0 と押抜き実験からの sp_0 について引張剛性 ($E \cdot A$) を変数とする回帰分析を行うと以下の式を得た。このときの相関係数は、各々 0.98, 0.95 であった。

呉らによる方法での回帰近似式

$$sp_0(N/mm) = 0.029 \cdot \sqrt{E \cdot A} + 2.59 \quad \dots (3)$$

実験値の回帰近似式

$$sp_0(N/mm) = 0.028 \cdot \sqrt{E \cdot A} + 2.38 \quad \dots (4)$$

以上の式 (3)、式 (4) より、繊維シート接着工の単位剥離強さの算出には、呉らによる方法も適切であることがわかる。

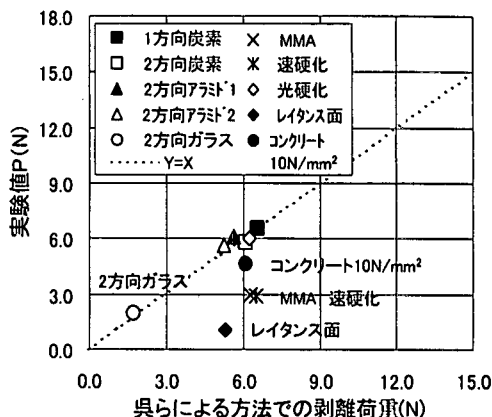


図-11 剥離荷重の計算値と実験値の比較 (押抜き実験, $G_c = 0.5N/mm$)

6. まとめ

剥落対策工の選定の考え方として、繊維シート接着工による剥落対策工の適用範囲を剥落事例等から剥落形態・規模に応じて、4 つに分類し繊維シートの材質毎にその適用範囲をおおまかではあるが区分した。また、適用性の評価については、押抜き実験等の結果を踏まえて繊維シート接着工の固有の剥落強さが繊維シートの引張剛性で表現可能であることを導き、簡易式を提案した。

7. おわりに

鉄道トンネル覆工の剥落に対する安全性向上の一助とすべく、近年適用実績が増大しつつある繊維シート接着工によるトンネル覆工コンクリートの剥落対策工について、選定および設計の考え方についてとりまとめた。なお、この研究の一部は国交省の補助金を得て実施したものであり、押し抜き実験をはじめ TSC 研究会の委員各位にご協力を戴きこの場を借りて謝意を表す。また、京都大学朝倉助教授、茨城大学呉教授には、研究計画の立案時より数々のご助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 呉智深, 朝倉俊弘, 吉澤弘之, 遠鴻, 小林朗, 高橋徹: 連続繊維シートの貼付によるコンクリート片の剥落防止効果に関する実験的・解析的研究, 土木学会論文集, No. 662, V-49, pp45~58, 2000. 11
- 2) 小島芳之, 野城一栄, 朝倉俊弘, 小山幸則: 鉄道トンネルの覆工剥落事故と原因推定, トンネルと地下, Vol. 31, pp63~70, 2000. 9
- 3) 山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会報告書, 2000. 7
- 4) 松田好史, 中村圭二郎, 村田一郎: 山陽新幹線トンネル安全総点検, トンネルと地下, pp65~75, Vol. 31, 2000. 5
- 5) トンネル安全問題検討会: トンネル安全問題検討会報告書一事故の原因推定と今後の保守管理のあり方, 平成 12 年 2 月 28 日
- 6) 鉄道総合技術研究所: 変状トンネル対策工設計マニュアル, 1998. 2
- 7) 吉川和行, 小島芳之, 六車崇司: FRP によるトンネル覆工剥落対策工への適用性評価, 鉄道総研報告, 第 16 巻, 第 3 号, 2002. 3