

覆工補強に用いる炭素繊維シートの接着特性に関する研究

A Study on the bonding characteristics of Carbon-Fiber Sheet to be used for
Inner Reinforcement Tunnel Lining.

佐野信夫*, 中田雅博*, 朝倉俊弘**, 松尾伸二***, 鈴木雅行****

Nobuo SANO, Masahiro NAKATA, Toshihiro ASAKURA, Shinji MATSUO and Masayuki SUZUKI

There is a method of reinforcing tunnel linings with carbon-fiber by gluing on the inside surface of the tunnel as a measure to reinforce cracked or deformed tunnels. The authors have made a study on the reinforcing effect of the carbon-fiber glued on the inside surface of the tunnel lining through experiments on tunnel lining models and analyses of the results.

By this thesis, the authors intend to present desirable characteristics of materials, particularly on the bonding characteristics of carbon-fiber materials of early ages, acquired through experiments on the materials of four(4) companies, among the laboratory tests and experiments in actual tunnels made on various bonding characteristics in gluing the carbon-fiber sheets to the cracked or deformed tunnel linings.

keywords: tunnel, inner reinforcement lining, carbon-fiber sheet, bonding characteristics

1. まえがき

ひびわれや変状が生じたトンネル覆工の補強対策として、トンネル内面に炭素繊維シートを接着させることで覆工を補強する炭素繊維補強工法がある。この工法は、1992年12月に上信越道日暮山トンネルで採用されて以来¹⁾、30数例報告されている²⁾。炭素繊維シートの補強効果、設計及び施工要領については、鉄筋コンクリート橋脚³⁾などで整備されつつあるが、トンネルに関してはいまだ確立されたものがなく、試行錯誤的に研究が進められている。

筆者らは、炭素繊維接着によるトンネルの補強効果について覆工の模型実験⁴⁾や解析的研究⁵⁾により、覆工の力学的特性と対策工の効果について検討を行ってきた。一方、炭素繊維シートを供用中のトンネルで施工するためには、炭素繊維シートを樹脂で覆工に接着後、樹脂を含浸させ硬化させることでCarbon Fiber Reinforced Plastic (以下CFRPと称す)として覆工と一体となって初めて効果を生じるにも関わらず、樹脂が含浸した炭素繊維シートの特性、特に品質に最も影響する若材令の付着特性に着目した材料からの研究は少ない。特に、炭素繊維シートの施工は、施工後早期に交通を解放する必要がある場合が殆どであり、さらに炭素繊維シートを施工する覆工の表面状態が水分や油膜の付着でどの程度一体化に影響するかについて十分検討されていない。

そこで、現在炭素繊維シートとして製品化されている3社材料を用いて共同して室内および実トンネルにおいて実験を行い、さらに1社分については後日、室内実験のデータが入ったので合わせて記載し、適用上の初期材料特性および施工上の留意点について検討を行った。

* 正会員 日本道路公団 試験研究所トンネル研究室
** 正会員 (財)鉄道総合技術研究所 技術開発事業本部構造物技術開発事業部
*** 正会員 ショーボンド建設(株)土木研究所
**** 正会員 (株)間組 土木統括本部 技術・設計第二部

2. 覆工補強対策としての炭素繊維シートの特性試験の概要

炭素繊維シート接着工法は炭素繊維シートが確実に接着ができ、炭素繊維に含浸した樹脂が十分に強度を発現すれば補強効果を発揮できる方法である。ただし、施工初期の段階で剥がれて未接着部が生じることや風圧により部分的に浮いたり剥がれを生じたりすることは、炭素繊維シートの補強効果を著しく低下させることになる。そこで、炭素繊維シートと樹脂の基本物性を把握することにより、確実な補強材として施工するための条件を把握する目的で各種試験を実施した。各種試験で検討する項目は以下の通りである。

- ・ 若材令時の炭素繊維シート接着特性（シート接着後硬化するまでに剥がれないこと）
- ・ 接着する覆工下地面の状態による接着特性（シート施工前の覆工下地条件別接着効果）
- ・ 接着後若材令時の車両による風速での剥離特性（シートが風速により剥がれないこと）
- ・ 接着後若材令時の車両による減圧剥離特性（覆工背面からの漏気による剥がれ特性）

3. 試験方法

炭素繊維シートの試験方法について材料の試験方法はあるものの、接着特性についての試験方法は建研式引張試験しかなく、特に若材令での試験方法がない。そこで、炭素繊維シートの各種試験方法については、JISに定める試験方法から、接着用テープの試験方法を表現できる試験方法^{9) 1)}を準用して試験項目を設定した。

室内試験として、各種接着特性については、①炭素繊維シート接着後の経過時間毎の接着性能を確認するための引剥し試験、（ピール試験、簡易ピール試験）②風速による剥がれの試験（耐風速試験）、③減圧容器内に炭素繊維シートを接着したコンクリート平板を置きシート背面からの漏気による剥がれ試験、④模擬覆工面が乾燥状態、湿潤状態、油面状態の各種条件下でのシートの接着性能試験を行った。

さらに、実際のトンネルに適用するための現場実験として、①若材令時での接着性能を確認するための引剥し試験、②下地条件別の接着性能試験結果の比較、③換気による強風下での若材令の剥がれの試験について、中央自動車道小仏トンネル下り線の天井板上部の覆工面において実施した。各種試験項目および方法について表-1に示す。

表-1 炭素繊維シート（CFRP）の試験項目および試験方法

確認項目	試験名	試験概要	CFRPの寸法	試験温度	試験時間(分)	試験方法
①CFRPの引剥し抵抗	引剥し試験 (Peel試験)	室内 水平に置いたコンクリート平板からCFRPを鉛直上向きに一定速度(20mm/分)で引剥す。(引剥しは定速で引剥し可能なPeel試験機で測定する)	50×500mm	23℃	30分、1、2、3、4、5、6	JIS Z 0218 初期粘着試験C準用
②CFRPの引剥し抵抗	簡易引剥し試験 (簡易Peel試験)	室内 簡易に引剥し抵抗を測定する目的で、測定は人力によりばね秤を用いて測定する	50×500mm	23℃	30分、1、2、3、4、5、6	同上
③CFRP施工後の風速による剥れ	風速試験	現場 覆工表面の下地条件として、①乾燥した布で拭く、②水洗い、③サンダーがけの3種類で簡易Peel試験を行う	50×500mm	13-15	30分、1、2、3、6	同上
④CFRP施工後の風速による剥れ	風速試験	室内 平板に接着した試験体に対して、CFRPの端部に45°方向からブロワーにて35m/秒の風速を1分間当てる	200×200mm	23℃	10分、2、3	
④CFRP施工後の減圧による剥れ	減圧試験	室内 トンネル内の換気ファンによって約7m/秒の風速で20分間送風する（最大風速の値が7m/秒であったため）	250×1,000mm	13-15	30分、1、3、6	
④CFRP施工後の減圧による剥れ	減圧試験	室内 減圧容器内にコンクリート平板（直径8mmの穴あき板）にCFRPを接着し、減圧箱で-230mmHgまで減圧し1分間保持する。変位が無い場合はさらに-300mmHgまで減圧し1分間保持する。減圧時に穴からの漏気によるCFRPの変位を観察する	200×200mm	23℃	2、3、4、5、6、24	
⑤下地条件の違いによる樹脂硬化後の接着強さ、破断の位置にどの程度影響するか	建研式引張試験	室内 コンクリート平板の下地条件を乾燥状態、湿潤状態（24時間水浸後表面の水分をふき取った状態）、油面状態（24時間油浸後表面の水分をふき取った状態）の3条件下でCFRPの引剥し抵抗を建研式引張試験で測定する	200×200mm	23℃	1日、3日、7日	建研式引張試験
		現場 3種の材料で覆工表面の下地条件として、①乾燥した布で拭く、②水洗い、③サンダーがけの3種類の条件下でCFRPの引剥し抵抗を建研式引張試験で測定する	250×1,000mm	13-15℃	2日	建研式引張試験

4. 試験材料

試験に用いた各種材料について、表-2に炭素繊維シートの物性値を、表-3に実験で用いた接着材(樹脂)の物性値を、表-4に下地面の処理に用いたプライマの物性値について示す。

また、実験にあたっては、コンクリート平板(歩道板: 30×30×厚さ 6cm)を模擬覆工とし、この表面をプライマ処理した後、炭素繊維シートを接着し各種実験を実施した。

表-2 炭素繊維シートの物性値

試験項目	単位	A	B	C	D	試験方法
引張強度	kgf/mm ²	350以上	355以上	350以上	350以上	JIS K 7073
引張弾性率	kgf/mm ²	24,000±2,000	24,500±2,500	20,000以上	20,000以上	JIS K 7073
繊維目付量	g/m ²	300±10	300±5	300:(0~25)	300:(0~25)	JIS K 7071
設計厚さ	mm	0.167	0.167	0.167	0.167	
繊維密度	g/cm ³	1.80±0.05	1.80±0.04	1.80±0.04	1.80±0.04	JIS K 7601

(注) 引張強度と引張弾性率はCFRPとしての物性値である

表-3 実験で使用した樹脂の物性値

試験項目	単位	A	B	C	D	試験方法
性状		無溶剤タイプ	無溶剤タイプ	無溶剤タイプ	無溶剤タイプ	
混合比(環:酸)		2:1	2:1	3:1	2:1	
曲げ強度	kgf/cm ²	560以上	400以上	400以上	600以上	JIS K 7203
引張強度	kgf/cm ²	290以上	300以上	300以上	350以上	JIS K 7113
圧縮降伏強度	kgf/cm ²	560以上	700以上	-	700以上	JIS K 7208
引張せん断強度	kgf/cm ²	-	100以上	100以上	100以上	JIS K 6850
可使時間	分	10~30	15以上	(50)	15以上	温度上昇法
粘度(混合物)	mPa・s	5,000±2,000	20,000以下	(8,500)	(2,000)	JIS K 6833
比重(硬化物)		1.1±0.05	1.17±0.05	(1.16)	1.15±0.05	JIS K 7112

表-4 実験で使用したプライマの物性値

試験項目	単位	A	B	C	D	試験方法
性状		無溶剤タイプ	無溶剤タイプ	溶剤タイプ	無溶剤タイプ	
接着強度	kgf/cm ²	15以上	20以上	20以上	20以上	建研式
可使時間	分	25~55	20以上	(480)	360以上	温度上昇法
比重(硬化物)		1.08±0.05	1.2±0.1	(0.92)	1.00±0.10	JIS K 6833

5. 実験結果

5.1 室内試験

(1) ピール試験および簡易ピール試験結果について

ピール試験結果を図-1に、簡易ピール試験結果を図-2に示す。ピール試験および簡易ピール試験結果は若材令での炭素繊維シートの引剥し強さを表すもので、A、B、Dは冬用の接着剤を用いているため強度の伸びが大きく、Cは標準的な接着剤を用いているため接着強さの伸びは低い状態である。

ピール試験結果と簡易ピール試験の結果を図-3に示す。この結果より、今後の適用にあたっては現場で簡易ピール試験を実施することで、今後の各種試験項目を評価することができると考えられる。

以上から、ピール試験結果を耐風速試験、減圧による漏風による剥がれの試験および下地条件別の接着性能試験についての評価指標として用いることとする。

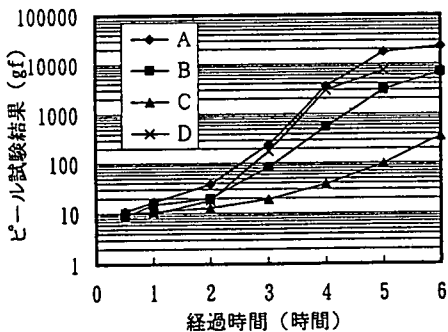


図-1 ピール試験結果

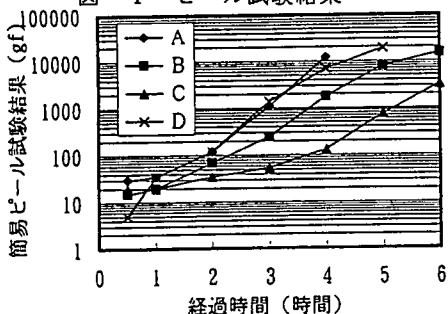


図-2 簡易ピール試験結果

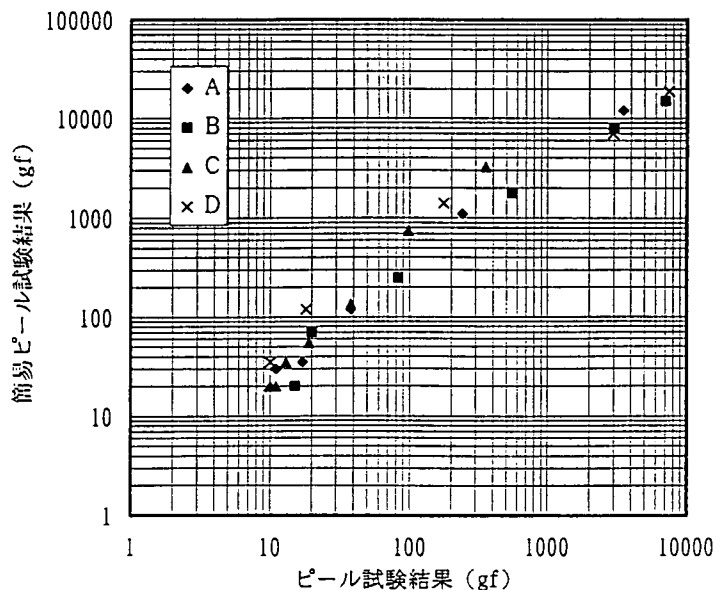


図-3 ピール試験結果と簡易ピール試験結果の関係

(2)耐風速試験結果について

耐風速試験結果を図-4に示す。全面接着の場合については、風の当たる方向が繊維の方向にかかわらず、張り付け後2時間経過したものは全て剥離しなかった。この時のピール試験結果の最小値は13gfであった。

端部未接着の場合については、繊維直角方向からの風速に対しては、ピール試験結果13~19gfのものが一部剥離が生じたが、20gf以上のものでは全て剥離しなかった。

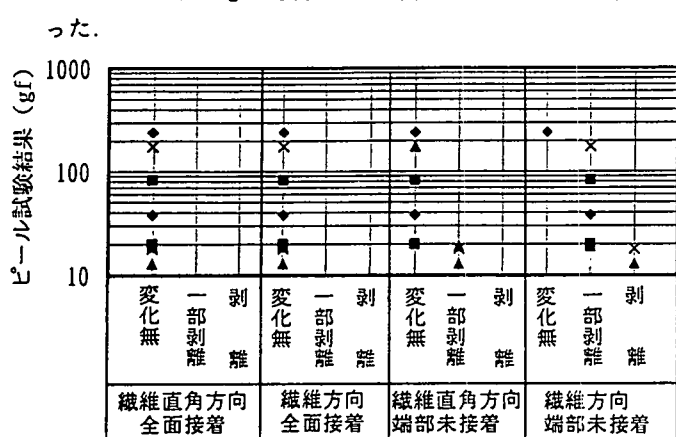
繊維方向からの風速については、ピール試験結果18gfのものまで完全剥離を起こしており、19~175gfまでのものが一部剥離をおこし、240gf以上のものは剥離しなかった。

以上から、炭素繊維シートを接着する際に端部まで確実に接着すれば剥れないといえる。特に施工後2~3時間後に交通解放する場合で炭素繊維シートに強風が作用する場合には、端部未接着部をなくすことが必要であり、炭素繊維シートの接着方向に注意する必要がある。

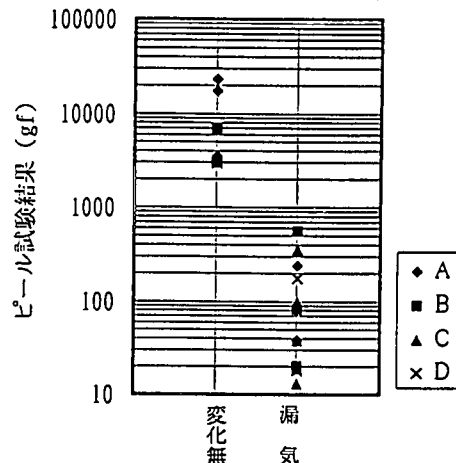
(3)減圧試験結果について

減圧試験は、炭素繊維シート施工後早期に交通を解放した場合に車両の通過により坑内が減圧し、覆工面のクラックから漏気が生じた場合の炭素繊維シートの剥がれの有無について試験を行った。減圧の大きさは230~300mmHgと鉄道トンネルの車両通過時を想定している事から、非常に厳しい状態を想定した試験である。試験結果を図-5に示す。

変状現象はシートの膨らみやシートの繊維間が切れる等の変化が見られる。変状の発生しないピール強度としては、3,000gf程度以上の強度であった。この強度以上の発現は、A、Dが4時間後、Bが5時間後であった。



炭素繊維シート接着条件および風に対する接着方向



減圧試験結果

図-4 風速試験結果とピール試験結果の関係

図-5 減圧試験結果とピール試験結果の関係

(4)各種下地条件の違いによる炭素繊維シート接着性能試験(建研式引張試験)結果について

下地条件として乾燥面、湿潤面、油面の3条件で接着性能の試験を行った結果を図-6に示す。

Aは3条件ともに大きな違いは見られず、これは湿潤面及び油面に対応したプライマを使用している事が考えられる。ただ油面の結果については、母材破壊で強度は出ているもののコンクリートの表面層付近での破壊であった。また、油面用のプライマに関しては効果は認められるものの、長期的な強度の維持という点でまだデータが十分でなく、耐久性についてはまだ未知数である。

Bは油面の状態が他に比べてかなり低いが、これは湿潤面用のプライマを使用しているためであると考えられる。Cも油面の状態が乾燥面及び湿潤面に比べて低い値が出ているが、これも標準的なプライマを使用しているためと考えられる。

Dは油面の強度が1、3日の値が若干低いものの、3条件ともに大きな違いは見られなかった。これは湿潤面及び油面にも対応したプライマを使用している事が考えられる。ただ油面の結果については、界面破壊であった。

以上のことから油面に対してはそのまま接着することはせずに、まず油分をサンダがけやウォータージェット等で除去し乾燥面に近い状態としてから施工することが望ましい。どうしても油分が残るようであれば、油面用のプライマの採用を考慮する。水による湿潤面に関しては、4種類とも接着効果が大きく損なわれてはいないが、水分の除去、拭き取りなどの作業を行い、湿潤面用のプライマなどを使用することが必要である。

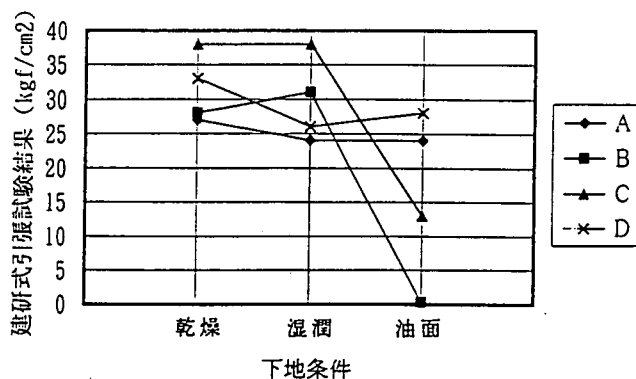


図-6 下地条件別炭素繊維シート接着強さ

5. 2 実トンネル試験

実際のトンネル覆工への補強工として採用する場合に、施工場所の温度、湿度、炭素繊維シート施工方向、および下地条件が大きく影響する。小仏トンネルにおいては、A、B、Cの3材料について試験を行い、その結果について以下に示す。

(1)簡易ピール試験結果について

下地条件別の簡易ピール試験結果を図-7に示す。

各材料とも下地処理の違いによる影響はあまり見られない。これは小仏トンネルの壁面にひび割れや劣化が殆どなく、状態がかなり良かったため、ドライ清掃しただけでも十分接着効果が出たと考えられる。このことから、接着する壁面状態によって下地処理を確実に行うことが重要であることを示している。

簡易ピール試験結果について、室内試験の結果に比べて低い値となっている。これは、接着性能は温度による影響が大きいためであり、室内試験の設定温度23℃に対し小仏トンネルでの試験が13℃～15℃とかなり低いため、強度の発現が遅くなったためと考えられる。

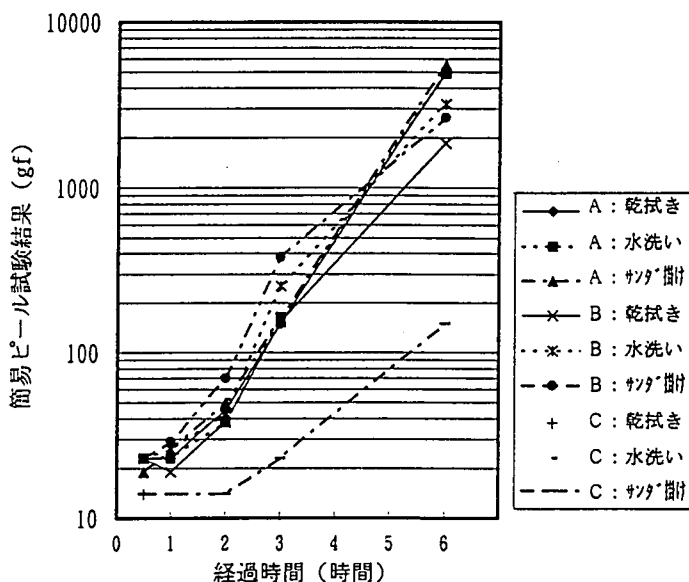


図-7 下地条件別簡易ピール試験結果

(2)耐風速試験結果について

実トンネルでの耐風速試験においては、トンネルの換気ファンを用いて行った。ファンを最大風速で稼働させたが、試験位置での風速は最大8～7 m/secであった。耐風速試験結果としては、全面接着したものに関しては接着後30分、1、3、6時間の全てのケースで剥離は生じず、良好な結果であった。

端部を20mm未接着にしたケースに関しては、まずAは30分後の繊維直角方向が2mm程めくれたものがあったが他は変化が見られなかった。Bは、30分後の繊維直角方向が2cm程、繊維方向が4～6cm程めくれたが、他は変化が見られなかった。Cは30分後の繊維直角方向と1時間後の繊維方向のものが全面剥離し、30分後の繊維方向が3～6cm程めくれたが、他は概ね変化が見られなかった。

以上のことから、まず炭素繊維シートを接着する際にシートの端部は完全に接着する事が必要である。また、各材料とも端部未接着でも3時間後に剥がれたものは無いことから、逆に炭素繊維シートを接着してから3時間経過する前に何らかの風の影響を考慮しなければならない場合は特に注意が必要である。

(3)各種下地条件の違いによる炭素繊維シート接着性能試験結果について

試験結果より、各シートとも全て母材破壊であり十分な強度が測定された。したがって、接着後に剥離や

浮き等が生じなければ炭素繊維シートの補強効果は十分得られることが判った。

6. 施工上の留意点

各種室内実験および実トンネルでの実験を行った結果に基づき、施工上の留意点について以下に示す。

炭素繊維シートの接着面の事前処理としては、接着面の汚れや油分などは確実に落とすことが重要である。また減圧試験の結果よりクラック等の亀裂面はパテ等で確実に充填する必要がある。

炭素繊維接着工法において樹脂の選定は重要であり、その接着強度も施工時の気温に大きく左右される。今回試験に用いた樹脂では十分な接着強度が得るまでは、23℃の状態において2～3時間程度かかったため、特に気温の低い冬期は強度発現が遅くなることから、所要の強度に達するまで長時間かかる。小仏トンネルでの試験ではAとBは冬期用の樹脂を使用したものであり、Cは標準用の樹脂を使用した。現場ピール試験においてCの試験片が接着後1時間半の間に30枚中16枚の試験片が自重で剥がれていることから、気温の低い時の施工では冬期用の樹脂を使用することが望ましく、標準的な樹脂を使用する場合には、樹脂の可使用時間と交通開放までの時間等を考慮して選定することが重要である。

炭素繊維シートの接着に関しては、炭素繊維シートの全面を接着する事、樹脂を十分に含浸させる事が基本である。樹脂を上塗りする際に塗布の有無の識別が難しいことがあるので、樹脂自体の色などで識別しやすいものが望ましい。

炭素繊維の接着後は指、へら等で炭素繊維の浮きが無いよう調べる必要がある。炭素繊維シートの接着後に風等による剥離については、全面接着であれば、小仏トンネルでの耐風速試験においては施工後30分経過すれば問題なく、端部未接着(20mm)の場合でも室内でのピール試験で20g程度の強度が得られれば剥離は見られず問題なかった。ただし、これは小仏トンネルでの試験の結果であり、他の現場で適用する場合は、①施工時の気温、②トンネル内壁面の状態、③風などの状態、④交通開放までの時間等に留意し、接着効果を十分発揮できる条件下で施工しなければならない。

7. おわりに

トンネルの補修・補強工事が増加するなか、炭素繊維シートによる補強対策は比較的容易に施工可能なことから、今後も施工例が増加するものと思われる。補強対策として炭素繊維シートを十分有効に作用させるためには確実な施工が必要であるため、今回検討した結果を十分活用し、必要な管理を行い施工することが必要である。なお、本研究は日本道路公団試験研究所と(財)鉄道総合技術研究所、およびショーボンド建設(株)の3者の共同研究の成果の一部をとりまとめたものである。

最後に、本研究の実験にご協力頂いた、日本道路公団試験研究所中野清人氏、日本道路公団東京第三管理局および八王子管理事務所、(財)鉄道総合技術研究所小島芳之氏、ショーボンド建設(株)若菜和之氏、小俣富士夫氏、日本技研コンサルタンツ(株)中村卓弘氏、大日本色材工業(株)細羽三千夫氏、染谷宏氏には研究および実験に協力していただいた。また、東レ(株)服部明生、東燃(株)斉藤誠氏、三菱化学(株)加藤寛氏、の3社には共同で実験に協力していただいた。日本石油(株)松本良雄氏、コニシ(株)杉田博氏については、同様の室内実験データを提供していただいた。以上の各氏に深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 中村、羽田、木曾：超膨張性泥岩を克服 上信越自動車道日暮山トンネル、トンネルと地下、vol. 24, no. 9, 1993.
- 2) 東燃株式会社、施工実績資料
- 3) 炭素繊維による鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領(案)、日本道路公団試験研究所技術資料第 615号。
- 4) 例えば、朝倉、安東、中田、佐野、若菜：変状対策としての内面補強工の効果に関する実験的研究、土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集第4巻、1994. 11.
- 5) 例えば、中田、佐野、朝倉、小俣、若菜：トンネル覆工の力学挙動評価への各種解析手法の適用性に関する研究、土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集第4巻、1994. 11.
- 6) JIS 20218-1975、ガムテープ接着力試験方法
- 7) JIS 20237-1991、粘着テープ、粘着シート試験方法