

平成 22～24 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「耐震補強を主目的とした多軸織物を使用した高速成形技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 25 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 サカイ産業株式会社

目次

第1章 研究開発の概要	3
1. 背景・研究目的及び目標	3
2. 研究体制	4
3. 成果概要	6
4. 当該研究開発の連絡窓口	7
第2章 本論	8
【1】樹脂材料の開発	9
【1-1】新樹脂の開発	9
【1-2】新樹脂の物性確認	10
【1-3】繊維表面の前処理の検討	11
【1-4】繊維加工条件の検討	11
【2】組み合わせる材料の開発	12
【2-1】材料開発	12
【2-2】ブレンド樹脂の物性確認	14
【3】成形条件の開発	15
【3-1】成形条件の開発	15
【3-2】成形条件検証	16
【3-3】貼付・接着条件開発	17
【4】耐震基材の開発	18
【4-1】耐震基材の設計・選定	18
【4-2】耐震基材の検証	20
第3章 全体総括	23

第1章 研究開発の概要

1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

現在、建設して50年が経過した構造物（トンネル、橋梁等）は全体の8%であるが、2030年には53%になると予想されており、構造物の老朽化による維持・修繕および更新費の急激な増加が見込まれている。建築物の耐震補強、橋梁補強やトンネル壁補強・補修工事には、他工法と共に高機能繊維織物による施工方法が採用され、高機能耐震補強シート市場は年間100万㎡で推移している。主に使用される高機能繊維（ガラス繊維、アラミド繊維、カーボン繊維）2軸織物基材は、たて糸とよこ糸を交錯して織っていることから、タテヨコ方向の引張強度に比べて斜め方向の強度が大幅に弱い。

補強するコンクリートは多方向に亀裂が生じるため、タテ・ヨコ方向だけの織物では補強効果が十分に得られない。そのため、多方向に繊維を配向した高機能繊維多軸織物を製織する技術開発のニーズの高まりに加え、作業の効率化・短縮化を図る軽量で強度の向上した織物が求められている。

さらに、織物を補強面に固定する際に使用する熱硬化性樹脂は硬化時間が長く、作業の効率化が図れていないことから、この部分での改善も求められている。

鉄道関連構造物の補修・補強工事には、高機能繊維を熱硬化性樹脂で硬化させる工法が多く使われているが作業時間が終電から始発までの数時間内に限られており、迅速な対応ができないことから工事期間が長くなるため、工事費用が一般的な工法に比べ、非常に高価になっているのが現状である。さらに、熱硬化性樹脂が硬化する前に車両が通過することから、補強シートをアンカーなどで物理的に保持することも必要となっている。アンカー等での補強は繊維を途中で切断することにもなり強度的に不利になると共にコスト的にも無駄な作業となっている。

これらの状況から熱硬化性樹脂の硬化時間短縮・制御は、施工業者を含めた関係者の課題及び要請（ニーズ）となっている。

研究開発の目標

・耐震補強用速硬化樹脂の開発

耐震補強に使用する熱硬化性樹脂において、硬化時間の短縮をするとともに、作業性を上げる事によりコスト削減を達成するための新たな樹脂を開発し、短時間で効率の良い耐震補強方法を開発する。短時間硬化の方法として熱硬化性樹脂と近赤外線放射物質を組み合わせ、近赤外線照射による加熱効果と添加する近赤外線放射物質が吸収と自然励起で赤外線放射を繰り返す連鎖反応の加熱効果で硬化時間の短縮を目指す。

・耐震補強用多軸織物の開発

タテとヨコで構成される二軸の高機能繊維45度の角度でナナメ糸2本が交錯する繊維を挿入して強度と寸法安定性の良好な多軸織物を開発する。多軸織物の製織は織布システムと織構造について検討し、高強度多軸織物を完成する。

2. 研究体制

事業管理機関 サカイ産業株式会社
 研究実施機関 サカイ産業株式会社
 再委託先 ファイベックス株式会社(FBX)
 静岡県工業技術研究所 浜松工業技術支援センター

研究内容

実施内容		サカイ	FBX	浜工技
研究テーマ	サブテーマ	◎ 主担当		
(1) 樹脂材料の開発	1-1 新樹脂の開発	◎	○	○
	1-2 新樹脂の物性確認	◎	○	○
	1-3 繊維表面の前処理の検討	○		◎
	1-4 繊維加工条件の検討	○		◎
(2) 組み合わせる材料の開発	2-1 材料開発	◎		○
	2-2 ブレンド樹脂の物性確認	◎		○
(3) 成形条件の開発	3-1 成形条件の開発	◎		○
	3-2 成形条件検証	◎		○
	3-3 貼付・接着条件開発	◎	○	◎
(4) 耐震基材の開発	4-1 耐震基材の設計・選定	◎	○	○
	4-2 耐震基材の検証	◎	○	○
(3) プロジェクトの管理・運営 研究開発推進委員会 技術部会		研究開発推進委員会 22, 23, 24 年度 技術部会 23, 24 年度		

研究開発推進委員会

氏名	所属・役職	備考
塚口 道弘	サカイ産業株式会社 繊維事業部 技術課 参事	PL
佐野 広道	サカイ産業株式会社 複合材事業部 部長	SL
鈴木 義昭	サカイ産業株式会社 常務取締役	
中川 裕孝	サカイ産業株式会社 管理部 執行役員 部長	
牧田 理敬	サカイ産業株式会社 繊維事業部 執行役員 部長	
天野 順弘	サカイ産業株式会社 繊維事業部 部長	
小林 美智男	ファイベックス株式会社 名古屋工場 製造課長	
鈴木 一之	静岡県工業技術研究所 浜松工業技術支援センター 繊維高分子材料科 科長	
伊藤 彰	静岡県工業技術研究所 浜松工業技術支援センター 繊維高分子材料科 主任研究員	
稲垣 訓宏	国立大学法人静岡大学 名誉教授	アドバイザー
鈴木 秀治	三遠南信クラスター推進会議 地域連携マネジャー	アドバイザー
関 寛之	株式会社ナショナルマリンプラスチック 取締役 福島工場長	アドバイザー
加藤 駿	クボタリサーチジャパン株式会社 代表取締役社長	アドバイザー
他	サカイ産業株式会社 研究員	

指導・協力

氏名	所属・役職	指導協力事項
幾田 信夫	学校法人湘南工科大学 工学部 理事	繊維表面処理に関する指導・協力
仲井 朝美	国立大学法人岐阜大学 工学部 機械システム科工学科 教授	繊維表面処理に関する指導・協力

サカイ産業 研究員

氏名	研究内容
塚口 道弘	【1】 【2】 【3】 【4】
佐野 広道	【1】 【2】 【3】 【4】
鈴木 義昭	【1】 【2】 【3】 【4】
牧田 理敬	【1】 【2】 【3】
池谷 忠彦	【1】
増田 和孝	【1-2】 【1-3】 【2】 【4】
石田 真吾	【1-3】 【2】
児玉 芳章	【1-3】 【2】
渡辺 敏宏	【1-2】 【1-3】 【2】 【4】
石田 江梨子	【1】 【2】 【3】
萩原 靖史	【4】

3. 成果概要

『耐震補強を主目的とした多軸織物を使用した高速成形技術の開発』をテーマに下記の研究開発を実施した。

【1】樹脂材料の開発

炭素繊維およびアラミド繊維などの強化繊維を使用した補強用樹脂について、日本道路公団、鉄道総合技術研究所等の規格を利用して、文献調査を行った。

その結果、補修・補強分野において最も多く使用され、連続繊維補強材による補修補強工法基準類で定められている接着含浸樹脂の強度規格を満たすエポキシ樹脂を選定した。

選定したエポキシ樹脂において作業性等の比較のため粘度の違う樹脂を3種類選定し物性を確認した。さらに、選定した樹脂に近赤外線放射物質を混合して近赤外線を照射して樹脂を硬化させたものについても物性を確認した。また、硬化時間に関しては短縮できることが確認できた。3種類の樹脂において物性値、硬化時間の差がないことから、作業性が良い1種類を選定した。

また、樹脂の開発と併せて繊維－樹脂の接着を良好にするための繊維表面処理剤の検討も行った。

エポキシとウレタン表面処理剤を選定しアラミド繊維に付着させる試験で条件を変えて実施し、表面処理剤の効果は曲げ試験、マイクロドロップレット試験などの結果から判断すると、接着力は10%程度増加することがわかった。開発した多軸織物で表面処理を行い効果としての確認を押抜き試験〔JHS 424 (NEXCO)〕で評価したところ押抜き最大荷重が30%向上する結果となった。しかし、表面処理を実施すると剛軟度が硬くなり施工性が落ちることが解った。このため実用化に向けては、施工性に考慮した接着界面の改善方法を進めていく必要がある。

【2】組み合わせる材料の開発

【1】で選定した樹脂を使いより速硬化できるようにするために硬化剤を常温硬化型の付属のものから加熱硬化型の硬化剤に変更することを試みたが、近赤外線照射装置の照射温度とアラミド繊維に含まれる水分が問題となり実用化できるような条件を見出せなかった。そこで、組み合わせる近赤外線放射物質を変更し近赤外線照射装置の照射温度を段階的に上昇させることで、従来の硬化剤のままでも8分という短時間で硬化することと接着含浸樹脂に求められる物性を十分に満たすことが確認できた。

ブレンド樹脂の物性確認

ブレンド樹脂の規格値・要求性能の物性測定を実施。

ブレンド樹脂の物性値を把握することを行った。

物性測定項目は以下の通り。

- ① 引張強度
- ② 曲げ強度
- ③ 引張せん断強度
- ④ はく落防止押し抜き荷重
- ⑤ コンクリートとの接着強度

近赤外線を照射したブレンド樹脂の物性は規格を満足し、従来の樹脂と同等であることが確認できた。

【3】成形条件の開発

近赤外線照射器移動装置を製作し、実際のコンクリート補強面を模したコンクリートパネル面に施工することでより大きな範囲で施工できる実用的な条件の確立を行った。前年度の近赤外線照射条件で施工を行ったが照射器が移動することによりコンクリート面の状況が変化するので照射条件を再検討し最適な硬化条件を得ることができた。

最適な樹脂の硬化条件を使って今まで検討してきたウレタン処理した多軸織物を使用して施工条件の確認を行った。

樹脂の硬化はウレタン前処理多軸織物を使っても確立した近赤外線照射条件で近赤外線を照射すれば800mm×2000mmの施工面を74分で硬化出来ることが確認できた。

また、被補強面へ織物とエポキシ樹脂で耐震補強するに当たって加圧バッグによる加圧加工を想定した検討を行った。

バッグに使用する材料は近赤外線を照射して樹脂の硬化を促進する事を考えているため近赤外線の透過性の良好な材質の選定を行った。

透過率の高いフィルムを使用した加圧バッグを製作し加圧の有無によって被補強面への接着が向上したかどうかの確認を行った。加圧バックの有無による押し抜き試験では加圧バック有りの方が最大荷重の数値が大きいことが判った。

さらに、模擬コンクリート面に使う加圧バック、バックサポートフレームを設計・製作し模擬コンクリート面での加圧バックの検討を行った。

サポートフレームを用いて加圧バッグをトンネル補強模擬パネルに設置し、確立した近赤外線照射条件で照射・移動を行い加圧バッグ使用時の所要時間を求めた。加圧バックがあることで本来の近赤外照射量が減少し、また同時に発生する熱も伝わりにくいことから接着含浸樹脂の硬化時間が大幅に伸びる事も考えられたが広い施行範囲を短時間で硬化させることができることが確認できた。またバック自体も変色等の変化がないことから繰り返し使用でき、施工性が良好であると判断した。

【4】耐震基材の開発

耐震基材の開発を行う為、現在使用されているトンネル剥落基材の規格、要求性能を調査した。基材としての基本物性は引張試験、接着試験、重ね継ぎ手試験が基準値を満たし、トンネル剥落防止の要求性能はNEXCO JHS424 規格 押し抜き試験 規格値 1.5KN 以上であった。開発にあたり二軸の比較用基材、耐力 49KN/m 98KN/m の2種を選定し実力値を確認した。同目付（質量）の織物では多軸織物に優位性があることが分かり、原料コストを削減するため、多軸基材 タイプA、タイプB 各2種を設計し、押し抜き試験を実施した。

タイプBについては想定通りの強度結果となったが、タイプAの試験値は予想と反する結果であった。要因として多軸基材を製作する前の糸加工にあると推測し、加工方法（カバーリング）を改善した結果、番手が異なる糸及び複数本数引き揃える場合は加工方法を改善することで、効果があることが分かった。

施工性の確認において、R部分の接着面に於いて基材が剥がれやすく、施工困難となった。この原因は基材の接着面積が少ない為と考え、接着面積増加させるためにたて糸を増やした組布加工、不織布のステッチ加工、ガラスのステッチ加工、モール糸仕様、プレス加工品を試作した。その基材を施工性、硬さ、コストを総合的に判断し、糸幅を広げて接着面積を増やしたプレス加工品がトンネル剥落防止基材として最も適した基材と判断した。プレス加工品の耐震基材としての基本物性、引張試験、接着試験、重ね継ぎ手試験の規格を満たし、要求性能である押し抜き規格が満たされる事を確認した。

4. 当該研究開発の連絡窓口

サカイ産業株式会社

鈴木義昭

TEL 0547-35-2727

FAX 0547-35-0015

E-mail yoshiaki-suzuki@sakai-grp.co.jp

第2章 本論

【1】樹脂材料の開発

【1-1】新樹脂の開発

耐震補強における樹脂の規格を調査した。

各指針に定められている含浸接着樹脂の共通の品質規格を表1に示す。

表1 含浸接着樹脂に求められる共通の品質規格

項目	規格値	試験方法
引張強度	29N/mm ² 以上	JIS K7113
曲げ強度	39N/mm ² 以上	JIS K7171
引張せん断強度	9.8N/mm ² 以上	JIS K6850

新樹脂を開発するにあたり以上の値を指標とし、物性を確認した。

さらに、連続繊維シート（FRP）としての評価として、連続繊維シートの引張強度試験（JIS A1191）、コンクリートとの接着試験（JSCE-E 545-2000（土木学会））、はく落防止の押抜き試験（JHS 424（NEXCO））を行い、新樹脂が耐震補強用樹脂として十分な性能をもつことを確認した。また、耐水性試験および、耐侯性試験についても試験を行った。

1) 樹脂の選定

現在、補修・補強分野において最も多く利用されており、かつ連続繊維補強材による補修補強工法基準類で定められている接着含浸樹脂の強度規格を満たすために本研究ではエポキシ樹脂を選定した。また、近赤外線吸収放射物質を組み合わせる樹脂として、粘度の違うエポキシ樹脂の3種類とした。

2) 比較対象樹脂の物性確認

比較対象樹脂と比較して近赤外線吸収放射物質を混合した樹脂の物性が劣ることがないことを確認するために、まず現行樹脂の物性を確認した。

- ・ 引張強度：規格値を上回ることが分かった。
- ・ 曲げ強度：規格値を上回ることが分かった。
- ・ 引張せん断強度：規格値を上回ることが分かった。
- ・ 連続繊維シートの引張強度：規格値を上回ることが分かった。
- ・ 連続繊維シートとコンクリートとの接着強度：各樹脂の値に大きな差はなく、破壊形態がコンクリート破壊であることから、十分にコンクリートと接着していることが分かった。
- ・ はく落防止の押抜き試験：各荷重時すべてにおいて 23mm 以下であり合格となる。また、はく落防止性能で求められている基準値最大荷重 1.5kN をすべて十分に超えている。
- ・ 耐水性試験：引張強度および接着強度に関して浸漬による強度低下は見られなかった。接着強度については浸漬期間が長くなるほど増加傾向にあるのは、浸漬中に硬化が進行している可能性が考えられる。
- ・ 耐侯性試験：促進暴露試験後に 1 割程度の強度低下が見られるが、試験後においても規格値 2.06kN/mm² を上回っていることが確認できた。

3) まとめ

物性試験の結果より3種のエポキシ樹脂は近赤外線吸収放射物質と組み合わせることに問題ないと考えられたので樹脂と近赤外線吸収物質を混合し近赤外線照射装置で硬化させて物性の比較を行った。

【1-2】新樹脂の物性確認

1) 近赤外線吸収放射物質及び近赤外線照射装置について

近赤外線照射装置で近赤外線を照射することで、樹脂内に含まれる近赤外線吸収放射物質が近赤外線を吸収して励起し、中・遠赤外線を放射して周囲の樹脂分子を加熱すると同時に近赤外線を放出するため連鎖反応が起ることで硬化を促進させる。近赤外線照射装置（図 1）は温度と時間によるプログラムで制御して近赤外線を照射する。各樹脂に近赤外線吸収放射物質を 0.1vol%入れ樹脂として使用する。



図1 近赤外線照射装置

2) 0.1vol%近赤外線吸収放射物質入り樹脂の物性確認

近赤外線を照射する前に近赤外線吸収放射物質入り樹脂が比較対象樹脂と比較して物性が劣ることがないことを確認するため、比較対象樹脂と同様の試験により物性確認を行った。

【1-1】項で行った物性試験を実施し同等であることを確認した。

3) 近赤外線照射後 樹脂の物性確認

近赤外線照射プログラムを検討・作成した。

近赤外線を照射することで樹脂を硬化させた場合の物性について確認した。

実際の施工時と同じ連続繊維シート状での硬化状態を確認しながら、照射のプログラム条件を決めた。温度を急激に上昇させると硬化の際に発泡してしまうため、硬化条件を多段階に分けて検討した結果 短時間で問題なく硬化させるプログラムを得ることが出来た。事前調査において樹脂表面温度が高温時のエポキシ樹脂の硬化時間と樹脂の内部温度を測定した際に、樹脂表面温度が 130℃以上ではエポキシ樹脂が焦げてしまうことを考慮して第 1 段階は 130℃以下とした。一度ゲル化してしまえば、温度を上昇しても発泡することはないので、130℃以下でゲル化してから、130℃以上で近赤外線を照射して硬化させた。

次に上記条件にて近赤外線を照射して硬化したものの物性の確認を行った。

【1-1】項で行った物性試験を実施し同等であることを確認した。

4) 施工性の確認

近赤外線照射システムを利用して 90° 方向および 180° 方向にて連続繊維シートとコンクリートとの接着を実施し、実際の施工において支障がないか確認した。

5) まとめ

近赤外線照射システムを利用した新樹脂が、耐震補強用土木資材に使用されているエポキシ樹脂 3 種類の物性と比較して同等の物性を持つことが確認できた。また、近赤外線照射システムを利用することで、硬化を速めることは確認できた。

【1-3】 繊維表面の前処理の検討

1) 研究の目的

本事業では、繊維強化複合材料をトンネルの耐震補強用資材への製品展開を目指している。アラミド繊維を表面処理剤で加工することで、アラミド繊維とエポキシ樹脂の接着強度を現行よりも向上させ、サイジング効果にも優れた加工法の開発を目標とする。

2) 表面処理剤によるアラミド繊維の加工

表面処理剤として水分散エマルジョンを使用することとした。今回はエポキシ樹脂を使用した場合に接着性の向上がみられるエポキシエとウレタンの処理剤を検討した。

表面処理剤の固形分の濃度を10%、5%、1%に調整して、アラミド繊維の表面加工を行い、未処理のアラミド繊維および表面処理剤付与後のアラミド繊維を用いて以下の試験をした。

引張試験、曲げ試験、ショートビーム試験、衝撃試験、マイクロドロップレット試験

3) 試験結果及びまとめ

接着力と含浸性の向上を目的として、アラミド繊維の表面を処理した。曲げ試験、マイクロドロップレット試験などの測定結果から判断すると、エポキシとアラミド繊維の接着力は10%程度増加した。含浸性は、現状とあまり変わらないことが確認された。

アラミド繊維をウレタンで処理することによって、エポキシ処理とは異なる曲げ試験の荷重曲線を得ることができた。

【1-4】 繊維加工条件の検討

1) 研究の目的

アラミド繊維による1軸FRPでの前処理効果の確認により、エポキシ樹脂やウレタン樹脂で前処理することで機械特性に違いがでることが確認された。そこで、エポキシやウレタンを用いて多軸織物の絞り圧調整装置による前処理方法について検討した。前処理状態の確認は、付着量の重量変化と走査型電子顕微鏡で表面状態を観察した。

2) 試験方法

多軸織物をアセトンに数分間浸漬して風乾し、絞り圧調整装置で固形分濃度10%に調製した前処理剤に多軸織物を浸漬させながら、圧力かけて絞った後、乾燥機で乾燥した。

前処理した表面処理剤の付着状況は、処理前後の重量の変化から前処理剤付着量を算出した。また、処理前後のアラミド織物の表面を走査型電子顕微鏡で観察して表面処理剤の付着状態を確認した。

3) 実験結果

多軸アラミド織物への前処理剤の付着量(重量%)はエポキシの加工で9.59%、ウレタンの加工では7.94%付着していることを確認した。走査電子顕微鏡で繊維表面を観察した結果、処理剤の繊維表面への付着状態は、エポキシ及びウレタンのいずれの処理品も前処理剤の付着が不均一であることが確認された。

4) まとめ

多軸織物と接着樹脂の接着性の向上を目的に、アラミド多軸織物に前処理を行い種々の試験により特性を評価した。エポキシ樹脂では前処理による機械特性の向上は認められなかったが、ウレタン樹脂で前処理した多軸織物は引張試験の最大点応力が未処理より低下したが、曲げ試験では最大点応力を超えても亀裂を生じることがなかった。また、押抜き試験においては押抜き最大荷重が30%向上する結果となった。しかし、ウレタン樹脂の前処理では、処理液の固形分濃度を増加して繊維表面への付着量を増加させると織物の剛軟度が硬くなり施工性に悪影響を及ぼすことが解った。このため実用化に向けては、施工性に考慮した接着界面の改善方法を進めていく必要がある。

【2】 組み合わせる材料の開発

【2-1】 材料開発

1) 研究の目的

【1-2】 項では粘度の異なる 3 種類のエポキシ樹脂で検討していたが、耐震補強における樹脂に求められる物性の差はほとんどなく、すべて規格値を満たしていた。そこでは、3 種類のうち扱い易い中粘度の 1 種類に絞った。

また、より短時間で硬化させる条件を確立するために、近赤外線照射器が近赤外線を照射すると同時に熱を発生することを利用して、室温では硬化が遅いため作業性がよく、熱が加わることで硬化が進むような組み合わせる材料（硬化剤や促進剤）を検討した

2) 硬化剤および促進剤の選定

エポキシ樹脂の硬化剤について調査した。

酸無水物系およびフェノール樹脂系の硬化剤は、吸湿の影響を受けやすい特性を持っている。屋外の環境で使用することを考えるとこれらは本研究には不向きである。そこでアミン系のもので加熱硬化型の硬化剤が一番適切ではないかと判断し、検討する硬化剤として選定し硬化確認を行った。

3) 硬化剤・促進剤の検討

選定した硬化剤での硬化時間の確認を行った。

表 2 硬化確認の結果

硬化剤	硬化剤A		硬化剤B	
温度 (°C)	100	150	100	150
硬化時間 (分)	25	15	180	50
発泡の有無	無	有	無	無

硬化剤Bよりも硬化剤Aの方が、硬化時間が短いですが 150°Cでは発泡してしまった。

硬化剤Bに促進剤を加えて硬化の検討を行った。

エポキシ樹脂に硬化剤Bと促進剤の混合硬化剤を加え、更に促進剤を 1~5 部加えた樹脂をアラミド織物に含浸させて近赤外線を照射させた時の硬化状態を確認し、促進剤の添加量の影響を調べた結果を表 3 に示す。

表 3 促進剤の添加量と硬化時間の関係 (n=4) 硬化温度：150°C

促進剤添加量 (部)	1	2	3	4	5
硬化時間 (分)	6	4	3	3	3
発泡の有無	有	有	有	有	有

促進剤の添加量が多いほど硬化時間が短くなるが、3 部以上からは硬化時間は短くならなかった。発泡の有無においてアラミド繊維がない樹脂のみの箇所には発泡は見られなかったことから、アラミド繊維の水分が発泡の原因になっているのではないかと考えた。そこで、アラミド織物を前もって乾燥してから同様の試験を行ってみることとした。

アラミド織物を乾燥させた後、シリカゲルの入ったチャック付きのポリ袋で保管しておき、同様に試験を行った。

表4 乾燥後の促進剤の添加量と硬化時間の関係 (n=4)

促進剤添加量 (部)	1	2	3	4	5
硬化時間 (分)	5	3	3	3	3
発泡の有無	無	無	無	無	無

アラミド織物を乾燥させることで発泡しなくなったことから、やはり発泡にはアラミド繊維の水分が関係していることが分かった。

3) 硬化条件・照射条件の検討

硬化剤・促進剤の検討においてアラミド繊維クロスを乾燥しないと発泡してしまうことが判明したために、照射温度を1段階ではなく、段階的に上昇させることで硬化時間の短縮化を図ることとした。

また、近赤外線吸収放射物質は、より少ない量で速硬化が期待できるものに変更した。30～50%硬化までもっていき、一気に照射温度を上げて硬化させることを目指し、硬化剤についてはもう一度今まで試した硬化剤すべてを単体で確認することとした。

エポキシ樹脂にそれぞれの硬化剤を加えた樹脂、また必要に応じてさらに促進剤加えた樹脂をアラミド織物に含浸させて近赤外線を照射することで硬化させ、30分以内に発泡せずに硬化できるような近赤外線照射プログラム条件を検討した。装置の設定温度は熱電対を使用して測定した実測温度と比較すると設定に対してオーバー気味に温度がかかるので、このことを考慮してプログラムの条件を決めていき、その結果を表5に示す。

表5 各硬化剤の発泡しない硬化条件

各条件	促進剤添加	プログラム条件
硬化剤の種類 従来硬化剤	なし	低温2分、中温5分、高温1分 計8分
硬化剤A	なし	低温1分、中温1分、高温10.5分 計12.5分
硬化剤B	あり	低温1分、中温12分、高温10分 計23分
硬化剤C	あり	低温1分、中温12分、高温12分 計25分で発泡はしないが硬化せず

近赤外線照射器の照射温度に段階を踏ませたところ、加熱硬化型の硬化剤を使用しても発泡しなかった。さらに、従来硬化剤においては、最短硬化時間8分で硬化させることができた。そのため、従来硬化剤から別の硬化剤に変更する予定だったが、アラミド繊維の水分の影響および、最終的に近赤外線照射プログラム条件の設定温度を段階的に上げることで従来硬化剤が最短で硬化できたために、従来硬化剤+新近赤外線照射物質で進めることとした。

【2-2】ブレンド樹脂の物性確認

1) 研究の目的

【1-2】項で物性確認した樹脂と比べると近赤外線吸収放射物質は同じものではなく、より少ない量で速硬化が期待できるものに変更した。さらに近赤外線プログラム照射条件についても検討を行ったことから再度物性について確認することとした。

2) 試験項目

【1-2】項で行った試験を行うこととした。

但し、適切な品質管理を行うために明らかとするとされている物性については、近赤外線照射システムを利用する際に近赤外線吸収放射物質を従来の樹脂に混ぜているが、

【1-2】項の結果から近赤外線照射システムを利用していない従来の樹脂のままの物性とほぼ同じだったことがわかっている。そのため、接着含浸樹脂に求められる規格のみを試験した。また、はく落防止用途として求められるはく落防止の押抜き試験（JHS 424(NEXCO)）の規格値およびコンクリートとの接着性が十分にあることを確認するために連続繊維シートとコンクリートとの接着試験方法（案）（SCE-E545-2000）（土木学会）の基準を満たすかどうかを確認した。

さらに、本研究における施工時間とは安全性の観点から作業が終了した時間ではなく補強施工したことによる効果を発現するまでの時間と定義付けたことから、今までの樹脂の硬化状態を指触にて確認するといった主観的な方法から定量的に判断するべくDSC測定を行うこととした。

- ・引張強度：規格値を上回っていることがわかった。
- ・曲げ強度：規格値を上回っていることがわかった。
- ・引張せん断強度：規格値を上回っていることがわかった。
- ・DSC測定：近赤外線照射システムを利用した場合の1日目は常温硬化の5日目に相当する硬化状態といえる事が測定結果よりわかった。7日経過後は近赤外線照射システムを利用した場合も常温硬化の場合も同程度の硬化状態であることがわかった。また、近赤外線照射システムを利用することは7日間までにおいては常温硬化の場合よりも硬化が進んでいることもわかった。
- ・はく落防止の押抜き試験：規格値を上回っていることがわかった。

近赤外線照射システム利用後にその日のうちに（照射後2時間～4時間程度経過後）試験を行なったとき、平均最大荷重が規格値1.5kN以上を十分に上回っていることがわかった。

本研究において施工時間とは、作業時間が終了した時間ではなく施工したことの効果を発現するまでの時間なので、この結果から近赤外線照射システムを利用することは施工時間の短縮、さらに安全性が保証されることになるかと考える。

3) まとめ

物性試験の結果全ての規格値を上回ることがわかった。

また、DSC測定結果から常温硬化の場合も近赤外線照射システムを利用して硬化した場合も、通常の物性確認に必要とされる養生期間1週を経過したとしても完全硬化していないことが判明した。しかしながら、近赤外線照射システムを利用して硬化後、数時間のうちにはく落防止の押し抜き試験を実施した結果、その基準を十分に満たしていたことから近赤外線システムを利用後の場合は施工したことの効果が発現できているといえる。

【3】成形条件の開発

【3-1】成形条件の開発

1) 研究の目的

耐震補強資材の成形状態を良好かつ短時間に施工できるよう、加圧バッグによるフレキシブル加圧加工法を考案した。平滑面と非平滑面における貼付け、接着効果に差が生じないこと。また、バッグの上から近赤外線照射を行っても樹脂の硬化に問題ないこと、加圧バックが繰り返し移用できる等の検証を行った。

2) 素材の近赤外線透過率測定

近赤外線照射加工では、波長 1100nm を中心とした近赤外線を放出する。樹脂と混合された近赤外線吸収放射物質は近赤外線を吸収・発熱して樹脂を硬化させる。これを繰り返すことで、樹脂を短時間で硬化させることができる。しかし加圧バッグが、1000～2000nm の波長帯に吸収がある場合は、バッグの素材が近赤外線を吸収してしまい、効率が低下してしまう。そこで複数の素材について波長 1000～2000nm の透過率を測定して、加圧バッグの素材選択を行った。透過率測定の結果材質としては塩ビ、ナイロン、ウレタン等がよく透過することが確認できた。

3) 近赤外線照射装置の温度測定確認

近赤外線照射装置付属の非接触赤外線温度計が検体前にフィルムバッグを入ったとき、検体の温度を正しく測れているか検証した。測定方法は室温 22℃において近赤外線照射装置で検体を 100℃に十分に保ち、照射を切り、数秒以内に検体の前 100mm の位置に各フィルム 1 枚を置き、付属温度計の数値を確認した。

付属温度計は検体の温度を正しく測定していない。また基本的に輻射熱によりフィルムが暖められるため厚みの薄い方が高い測定温度となる傾向があることがわかった。

4) 加圧バック試作

素材はウレタンとし加圧バックを図 2 のように試作した。近赤外線照射が照射されると空気が膨張することを考え空気抜きを製作した。空気が入るとバックが形状を保持できないため、一定の形状を保持できるようにバック内に内壁を設けるようにした。



図 2 加圧バック試作品

試作バックにて近赤外線照射してバック表面の温度と検体の温度を測定したところ数十度の差があることが

わかった。加圧バックを使用するときには近赤外線照射条件を変更する必要があることがわかったので加圧バック有りの条件で近赤外線照射条件を検討した。

5) 近赤外線照射試験結果

加圧バック試作品を使い近赤外線を照射して樹脂の硬化を実施した結果以下のことがわかった。

- ・ 加圧バック内壁とその他の部分でフィルムの厚みが変わってくることから樹脂の硬化に差が出てしまった。
- ・ 近赤外線照射により内壁と本体の融着部分が取れてしまった。
- ・ 近赤外線照射条件はフィルム表面温度と検体の温度を測定することにより適切な照射条件を得ることが出来た。

6) まとめ

加圧バックを使用すると剥落防止性能が高くなる傾向が見られるが、バッグ形状、材質について引き続き検討していく必要がある。

【3-2】成形条件検証

1) 研究の目的

これまで、近赤外線照射器のエミッターがある範囲内（600mm×1000mm）でしか近赤外線を照射することがなかったために【2-2】で得た硬化条件を元にして実際のコンクリート補強面を模したコンクリートパネル面に施工することでより大きな範囲で施工できる実用的な条件を確立する。

2) 近赤外線照射器移動装置検討

トンネル壁面に近赤外線を照射するために照射器を移動させる装置と繰り返し施工試験を行えるようにトンネルコンクリート面を模したパネルを設置できる設備を開発した。（図3）コンクリート模擬パネルそれぞれの場所で設定時間停止でき、任意の区間で設定回数移動できる仕様とした。

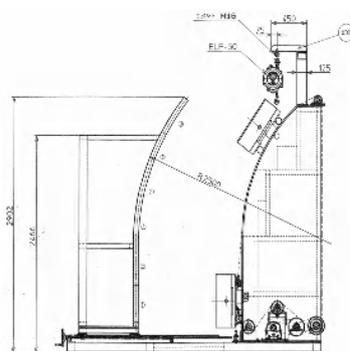


図3 近赤外線照射器移動装置とコンクリート模擬パネル

3) 近赤外線照射条件検討

【2-1】項で得た照射条件結果を元に、コンクリート模擬パネルにプログラム条件で各8分間近赤外線の照射を行えば硬化できると仮定して進めてみたが、温度設定80℃の時点で白煙が出たために途中で中止した。80℃にする際の照射出力が大きいために硬化剤のアミンが気化し、今回施工面積が大きい分、煙も多く出ているのではないかと考える。トンネル内で作業する際には視界の妨げになるうえ、常温硬化時より硬化反応が悪いことが予想されることから、近赤外線の照射条件を再検討した。

再検討の結果、電圧が急激にかかることによる煙の発生がないこととし、近赤外線照射器のダイヤル出力および照射距離を変え、比較試験を行った。（表6）

表6 比較した照射条件

	照射出力 (ACV)	照射距離(mm)	煙
①	中	300	×
②	高	200	○
③	中	200	○

この結果から、照射出力：中で照射距離300mmが適切と判断した。

通常の硬化では11時間かかるのに対して、図3のコンクリート模擬パネル①から⑥を一定速度で移動し、照射出力：中、照射距離300mmとする条件で近赤外線照射システムを利用すると800mm×2000mmの施行範囲を120分以内で硬化できる。

4) まとめ

近赤外線照射システムを利用することにより耐震補強用連続シートの接着含浸樹脂の硬化時間を短縮することができ、現場施工に要する時間を現行の方法の1/5程度に短縮できると考える。また、通常の常温硬化型の接着含浸樹脂を使用する場合、外気温が低ければ樹脂の硬化時間はさらに伸びるが、本研究で確立した成形条件であれば外気温が低い冬場での硬化時間短縮による施工期間の短縮の効果は大きいと考える。さらに、従来でのトンネル補強施工の場合連続繊維シートの貼付け作業が終了すれば、樹脂が硬化する前でも車等の通行止めは解除される。実際、樹脂が硬化するまでは、施工による補強効果は発揮されていない。しかしながら、近赤外線照射システムを利用することは作業が終了すると同時に施工による補強の効果が発揮でき、安全性が確保される利点もあると考える。

【3-3】 貼付・接着条件の開発

1) 研究の目的

【3-1】 項で検討した加圧バッグを使ってコンクリート模擬パネルへの施工を検討する。

2) 接着治具の検討

【3-1】 項での研究において簡易加圧バッグのシートが上下面にあることおよび内壁があることで近赤外線の透過を妨げているのか、あるいは照射と同時に発生している熱が伝わりにくいために施工面側の温度が上がらないことが原因で起こりうる接着含浸樹脂の硬化不良が発生しており、まずはこの硬化不良の改善が必要となった。そのため、内壁のない簡易加圧バッグが適すると考えたが、内壁が無い場合バッグ中心部が大きく膨れ上がる形状になってしまう。

そこで、コンクリート模擬パネルに施工後加圧する際に加圧バッグをバーで挟みバッグの形状は均等な厚みに保持できるように固定できるサポートフレームを考案し、加圧バッグは【3-1】 項で検討したウレタンを使用して内壁の無いものとした。(図4)



図4 簡易加圧バッグ 2kPa で加圧しながら照射

簡易加圧バッグがあることで本来の近赤外照射量が減少し、また同時に発生する熱も伝わりにくいことから大幅に硬化時間が伸びることが予測されたが、照射距離 300mm、照射出力中、照射器移動速度一定の条件で近赤外線照射システムを利用すると 120 分以下で 800mm×2000mm の施行範囲を硬化させることができる。またバック自体も変色等の変化がないことから繰り返し使用できる施工性は良好であると判断した。

3) まとめ

近赤外線照射システムを利用すると同時に加圧バッグを使用するためには、近赤外線を透過し、さらに同時に発生する熱がうまく施工面に伝わるかどうかは課題となっていたが、サポートフレームを作製することによって内壁がない簡易加圧バッグでも使用できるようになり、照射出力中、照射距離 300mm、一定速度で移動する近赤外線照射条件で近赤外線を照射することで部分的に未硬化になる箇所が発生することを抑制することができた。但し、今回簡易加圧バッグを使用することでの接着効果が強化されることを期待したがその効果は最終的な試験結果からは現われなかった。しかしながら、強度アップには加圧している圧力が影響していると考えられるため今後さらに検討していく必要がある。

【4】 耐震基材の開発

【4-1】 耐震基材の設計・選定

現在使用されている基材の主流はタテ糸とヨコ糸が交錯した二軸の織物であり規格値、要求性能を調査した。剥落防止用基材としての基本物性は引張試験、接着試験、重ね継手試験があり、要求性能は押し抜き試験が 1.5kN 以上であることが分かった。

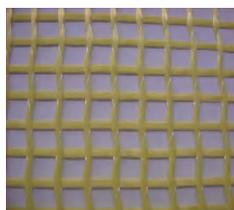
表 7

引張試験	C F	3.40kN/mm ²
	アラミド1	2.06kN/mm ²
	アラミド2	2.35kN/mm ²
接着試験	基準値：—	
	供試体の破壊形態の分類	
重ね継手試験	母材破断し、個々の試験結果が指針に示されている引張強度の特性以上	
押し抜き試験	規格値：1.5kN以上 NEXCO JHSに準拠	

多軸基材の設計を行うにあたり現状使用されている二軸基材を選定し、実力値を調べた。

『耐力 49kN/m の二軸基材』

使用糸	: アラミド3160dt
タテ糸本数	: 3.5本/25mm
ヨコ糸本数	: 3.5本/25mm
織組織	: からみ織
目付	: 90g/m ²



『耐力 98kN/m の二軸基材』

使用糸	: アラミド3160dt
タテ糸本数	: 7本/25mm
ヨコ糸本数	: 7本/25mm
織組織	: 平織
目付	: 180g/m ²



表8 二軸基材の基本物性の実力値

試験名	規格	耐力49kN/m		耐力98 kN/m		結果
		タテ	ヨコ	タテ	ヨコ	
引張試験	規格 2.06kN/mm ²	3.18	2.99	3.44	2.99	○
接着試験	破断部は全てコンクリート部	3.94		3.16		○
重ね継手試験	破断箇所継ぎ手部以外	3.52		3.10		○

表9 二軸基材の押し抜き試験の実力値

試験名	規格	0.7kN時	0.8kN時	1.1kN時	最大荷重	破断状況	結果
押し抜き試験	1.5kN以上	(mm)	(mm)	(mm)	(kN)		
	耐力49kN/m	2.77	3.13	3.83	3.93	基材破断	○
	耐力98kN/m	1.77	2.05	2.68	4.11	剥がれ	○

二軸織物の実力値が分かった為、この値を基本に多軸織物を検討した。

22年度に300mm幅の二軸基材と同目付の多軸基材を作成し、引張試験を実施した。多軸基材は等方性強度に優れていることが分かった。

表10

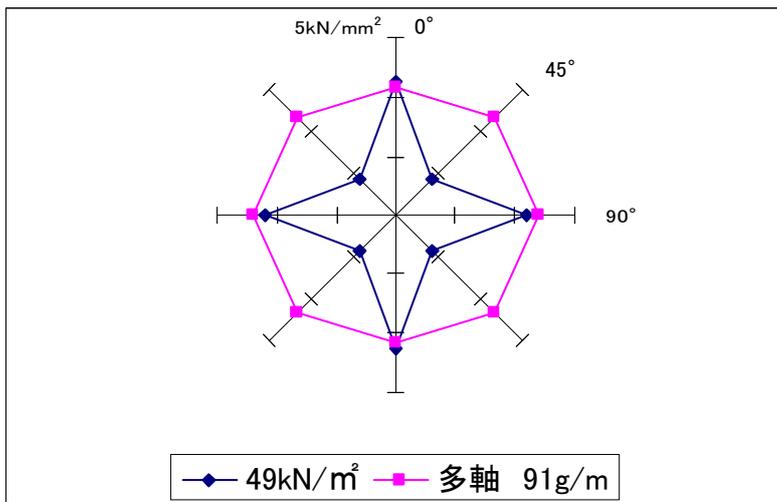
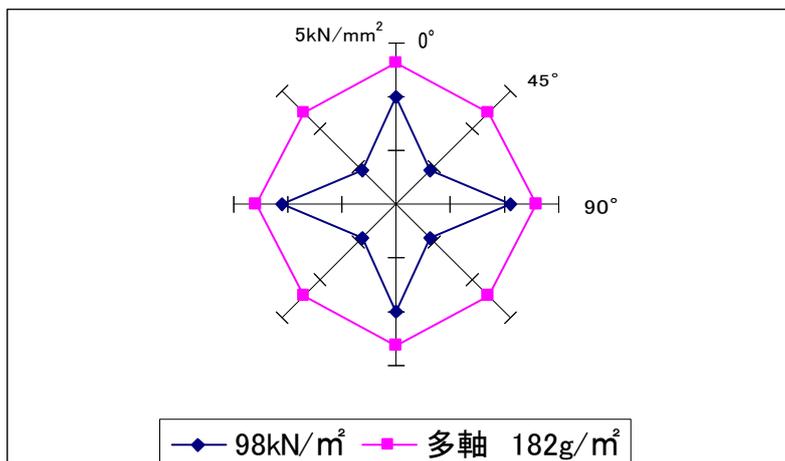


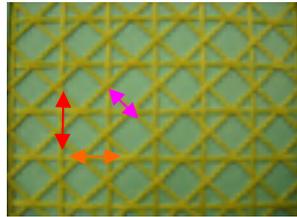
表11



【4-2】 耐震基材の検証

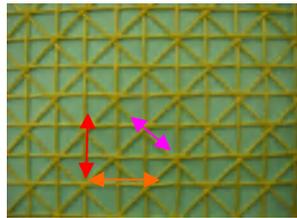
23年度に既存設備にヨコ糸挿入システムを組み込み、バイアス糸を交錯させる機構を開発した。この機構で幅1000mmのタイプAとタイプBの2種の織物を作製した。

タイプA	
タテ	1本/19.05mm (赤色矢印が19.05mm)
ヨコ	1本/19.05mm (橙色矢印が19.05mm)
バイアス	1本/13.47mm (桃色矢印が13.47mm)



タイプA

タイプB	
タテ	2本/19.05mm (赤色矢印が19.05mm)
ヨコ	2本/19.05mm (橙色矢印が19.05mm)
バイアス	1本/13.47mm (桃色矢印が13.47mm)



タイプB

同目付では多軸基材が二軸基材に比べて優位性があることが確認でき、原料コスト削減する為、糸量を減らした新たな2タイプの多軸基材を設計し、押し抜き試験を実施した。

表12 スペック表

	同目付		同強度	
	タイプA	タイプB	タイプA	タイプB
耐力49 k N/m用	アラミド3160dt	アラミド1270d=2	アラミド3160dt	アラミド1270d=2
耐力98 k N/m用	アラミド6300dt	アラミド1270d=4	アラミド3160dt アラミド1270dt	アラミド1270d=3

※目止めのためアラミド繊維に低融点ナイロンをカバーリング加工

図5 耐力98kN/m相当押し抜き試験比較

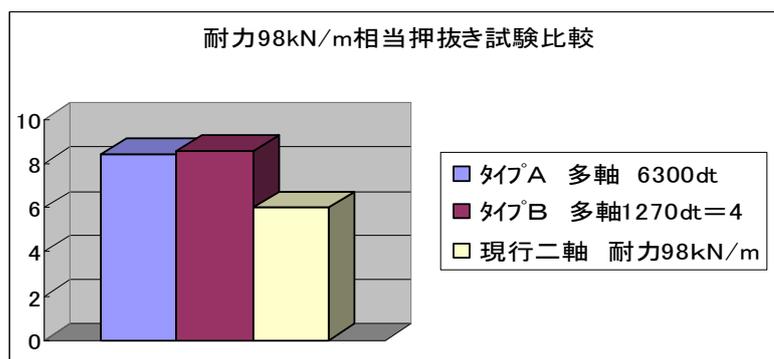
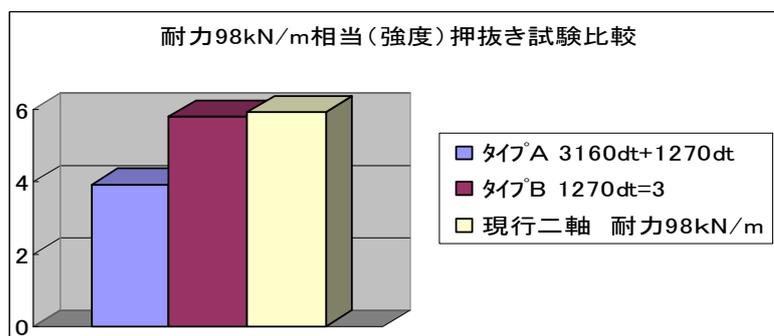


図6 耐力98 kN/m糸量減 押し抜き試験比較



タイプBは想定通りの強度が得られたがタイプAは約2kN下回った。原因を追求した結果、製織前の糸加工方法（カバーリング）を改善することで解決でき、糸番手の異なる糸及び複数本数引き揃える場合は加工方法を改善することで、効果があることが分かった。

図7 耐力98kN/m カバーリング改善押し抜き比較試験

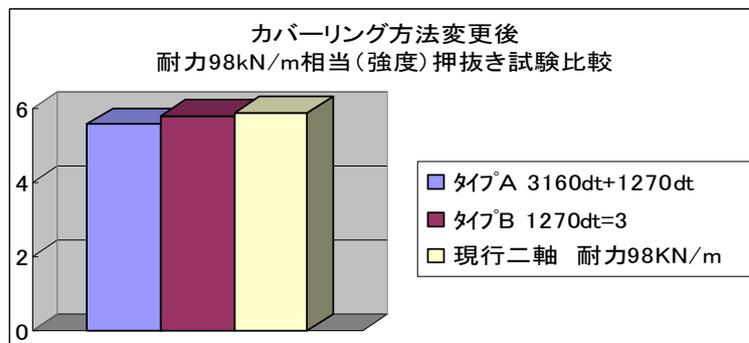


表13 糸量減率一覧

	現行二軸基材		多軸 (タイプA)		多軸 (タイプB)	
	目付 (g/m ²)	対二軸 (%)	目付 (g/m ²)	対二軸 (%)	目付 (g/m ²)	対二軸 (%)
耐力49kN/m二軸基材	90g/m ²	-	80g/m ²	89%	91g/m ²	101%
耐力98kN/m二軸基材	180g/m ²	-	112g/m ²	62%	137g/m ²	76%

施工性の確認

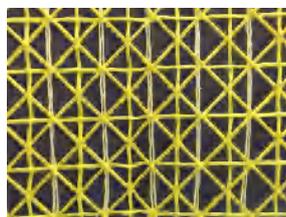
現行二軸基材に対し糸量を減らし、同強度になった多軸基材の施工性の確認を実施した。タイプBについては問題無く接着することが可能であった。

一方、タイプAについては地面に対して90°部分については問題無かったが、トンネルを想定したR部分に対して非常に困難であった。タイプAが接着が困難であった理由は、現行二軸基材やタイプBに対してコンクリート面との接着面積が少ないためと考えた。タイプAについては接着面積を増やす改善を検討し、接着性を向上させるための基材の改良を実施した。

組布加工、他基材とのステッチ加工2種、モール糸仕様の4種を検討した。

① 組布加工

多軸基材のタテ方向に耐アルカリ性ガラス繊維を張り合わせた。

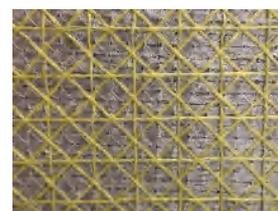


② ステッチ加工

不織布とガラスクロス
多軸基材にステッチ加工を行った。



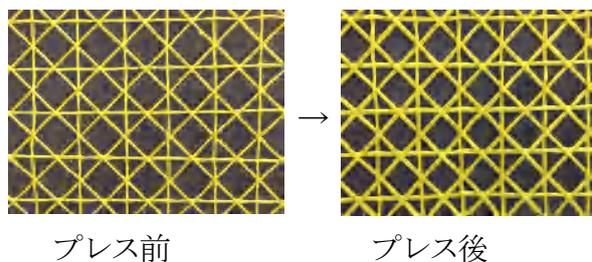
不織布ステッチ



ガラスクロスステッチ

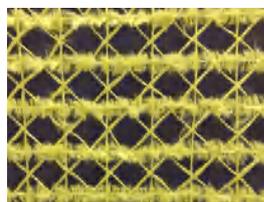
③ プレス加工

多軸基材に加圧し糸を扁平状にした。
右がプレス後の基材で、接着面積が
1.6倍となる。



④ モール糸仕様

多軸基材に使用する糸自体に加工をした。
接着面積を増大させる為、
モール状の糸をヨコ糸に挿入した。



施工確認試験

作製した4品種の基材を模擬トンネルにて施工確認試験を行った。樹脂の含浸性、接着性
基材の剛軟度、コストを検討した結果、プレス加工品が最も優れていた。

表 14 施工確認結果

	施工性	基材硬さ	コスト	備考	総合評価
組布加工	△	◎	◎	・多軸ユニットの改良で同時加工可能。 ・施工性改善はされたが現行品には劣る。	○
ステッチ加工 (不織布)	○	○	△	・樹脂含浸しにくい。 ・多軸ユニットにて同時加工は不可。	△
ステッチ加工 (ガラスクロス)	◎	○	△	・多軸ユニットの改良で同時加工は不可。	○
プレス加工	◎	◎	◎	・多軸ユニットの改良で同時加工可能。	◎
モール糸	○	△	△	・糸改良必要。	△

プレス加工品の物性試験

プレス加工品の基本物性、引張試験、接着試験、重ね継手試験及び押し抜き試験を実施した
結果、トンネル剥落防止基材としての規格を満たしていた。

現状の二軸基材に比べて優れている多軸基材を作製することが出来た。またカバーリング
方法の変更など糸加工の条件を変更することで、発現率の良い基材が可能になった。今回の
施工条件の検証にプレス加工品を使用した。より優れた基材改良も期待でき、今後の課題
とする。今回は剥落防止用途に絞込み基材の検討・設計・作製・検証を行ってきたが、今後は
他用途にも水平展開出来る基材を考え進めていく。

第3章 全体総括

3-1 複数年の研究開発成果

本研究開発は、軽量で強度に方向性がない多軸織物の補強シートを開発するとともに高機能繊維を短時間で固定できる硬化時間の短い樹脂を開発することで、高強度・高効率な耐震補強の工事を可能にし、急増する社会インフラのメンテナンス性を向上させるべき以下のテーマを設定して研究開発を進めた。

1. 樹脂材料の開発

開発するコンクリート補強面と補強資材を固定する熱硬化性樹脂は、①コンクリートとの接着性や②耐水性、③耐候性などの物性が現行と同じかそれ以上で硬化時間の短時間化を図るために添加する赤外線吸収放射物質との組み合わせの最適化を図る。

2. 成形条件の開発

近赤外線照射移動設備を開発し、熱硬化性樹脂を30分以内に硬化して多軸織物をコンクリート面へ接着・貼付する最適な条件の確立と平滑面と非平滑面の貼付、接着効果に差が生じない接着治具（簡易加圧バック）の開発。

3. 耐震基材の開発

300mm幅で試作した基材の試験データ（引っ張り試験、接着試験等）を基に、現行の補強基材と比較して寸法安定性や生産性、コスト、施工性に優れた基材と加工条件を確立する。また、押し抜き試験で得られる最大荷重と糸本数などの相関性を確認して、耐震基材として最適な多軸織物のスペック及び製織条件（織物設計）を確立する。さらに、ヨコ糸挿入ユニットシステムを開発し、多軸基材連続生産のための新たな製織機構や製造工程等について検討した。

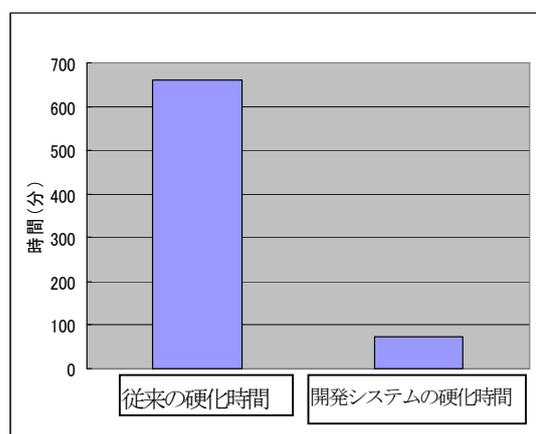
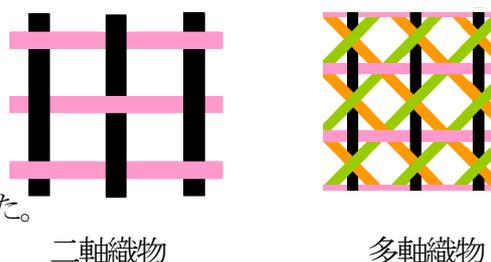


図7 硬化時間比較

本事業の研究開発の結果、

○近赤外線吸収・放射物質と樹脂を組み合わせた開発樹脂の強度などの物性に変化がないことを確認するとともに、硬化時間を短縮するための近赤外線照射条件を検討した結果、作業性の向上とコスト削減の達成に必要な十数分で硬化する新たな樹脂を開発し、短時間で耐震補強が完工する新たな補強工事法を開発した。また、加圧圧着治具を試作して模擬トンネル施工試験面で想定していたトンネルコンクリート面の補強施工試験を行い施工に問題の無いことを確認した。

○従来のタテとヨコ糸で構成される二軸の高機能繊維に45度の角度で斜め糸2本が交錯する繊維を挿入して強度と寸法安定性の良好な多軸織物とするため、多軸織布システムと織構造について検討し、高強度多軸織物を完成した。



開発した多軸織物は幅 1000 mmのアラミドメッシュで、剥落防止基材の引張、接着、重ね継ぎ手の基本強度規格を満たしただけでなく目標としていた NEXCO の JHS424 規格の基準値を上回った。さらに、二軸の織物と同質量の多軸織物を製織し、押し抜き強度試験を行った結果、多軸織物の優位性を確認した。

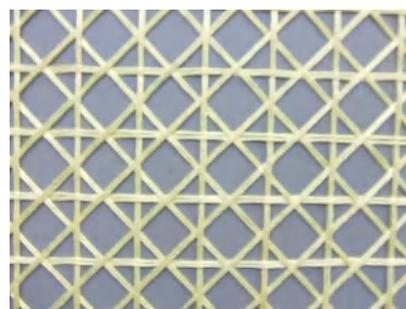


写真 多軸織物

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

3-2-1 課題

実際のトンネル剥落防止の工事現場は環境や施工面が試験条件とは異なり、作業環境温度によってコンクリートに奪われる熱量で樹脂の硬化時間が変化すると想定され、施工環境に応じた近赤外線照射条件を開発する必要がある。

アラミド繊維の表面加工については、ウレタン処理品は多軸織物の剛性度が硬くなり、設定したトンネル剥落防止基材としては施工性に問題が生じたが、アラミド繊維の界面接着性に関する研究が少なく、今後のアラミド繊維の需要を考慮すると更なる研究が必要である。

加圧バックを使用することで、剥離防止機能が高くなる傾向が見られるが、バック形状や材質について引き続き検討していく必要がある。

開発した多軸設備は現行二軸品 2 種を製織する専用機であり、製織性能に制限があることから高目付、高メッシュ、耐震基材全種に対応する為には製織の自由設計が可能な設備導入が必要となる。

3-2-2 事業化展開

本事業で開発した多軸織物はトンネル剥落防止だけでなく多用途な耐震補強基材として有効であり、多軸織物と速硬化樹脂を使用した工法が今後の耐震補強やコンクリート補修に使用されれば強度、作業面で大きな技術革新となる。今後は性能だけでなく、施工実績を積み上げていくことが事業展開には必要である。この事業の 2 つの開発テーマ、短時間硬化樹脂と多軸織物は単体としても水平展開できる分野が多数あり、耐震補強だけでなく優位性が売り込める市場へ展開していく。