1. 課題番号 第16号

2. 研究課題名 「被災した構造物の安全・簡易・迅速復旧工法の開発」

3. 研究期間 平成20年度~平成21年度

4. 代表者及び研究代表者、分担研究者

代表者	加藤 佳孝	東京大学 生産技術研究所 准教授
研究代表者	加藤 佳孝	東京大学 生産技術研究所 准教授
分担研究者	牧 剛史	埼玉大学大学院 理工学研究科
		環境科学·社会基盤部門 准教授
分担研究者	伊藤 正憲	東急建設株式会社 技術研究所 土木研究室

5. 補助金交付総額 16,640千円

6. 研究・技術開発の目的

【研究の目的】

安全で安心して快適に生活できる社会の提供がより活発な経済活動につながることはい うまでもない。社会資本ストックが地震などの災害で損傷した時には、できるだけ早くそ の機能を回復し、被災者の生活を元の状態に戻すことが非常に重要である。兵庫県南部地 震以降,各地で耐震補強が進んではいるが,近年,各地で発生している地震の影響を見れ ば明らかなように、想定外の地域での地震発生、耐震補強の未完備などを理由として、地 震への事前対策が完全でないことがわかる。災害への対策は、事前の対策(耐震補強)が最 も効果的であるが、重要なのは災害の事前・事後を通して場面に応じた有効な対策手段を 保有することである。現在の我が国の状況を見ると、事前の対策である耐震補強に関する 技術開発は盛んに行われているが、残念ながら被災により損傷した構造物を迅速に復旧す る技術開発はあまり行われていない。本開発のターゲットはここにあり、本開発の目的達 成により災害復旧コストの縮減はもとより、安心して生活できる暮らしを実現することが 可能となる。たとえば、首都圏直下型の地震により112兆円の経済損失が見込まれ、東海地 震では37兆円の経済被害が想定されており、この様な被害予測の結果を参照すると、中小 被害の割合が膨大であることに気がつく。ここで「中小被害」は、機能支障には至らない 被害であり、余震による被害がなければ短期的には耐荷力に問題の無い損傷である。損傷 箇所数として中小被害は大被害の20~40倍となっており、中小被害について迅速に対応す ることで経済的な影響を最小限に止めることの波及効果の大きさが容易に想像できる。

本開発は,主にこの中小被害を対象とし,損傷した橋梁や高架橋,電柱などのコンクリート構造物を早期に,安全に再供用させることで,被災者の安全・安心を確保するとともに,経済的な損害を最小限にすることを目指している。

7. 研究・技術開発の内容と成果

【研究開発の概要】

本研究では、被災した構造物を安全・簡易・迅速に復旧できる工法の開発を目指し、ま ず、このような復旧工法が実現可能となる材料の開発を実施する。既存の類似技術を踏ま え、震災時に要求される災害損傷構造物の迅速復旧工法には、以下の要件が必要であると 考えている。(1)特殊機械などの重機を必要としないこと、(2)資機材が人力で運搬可能なこ と、(3)簡便に施工でき、熟練工を必要としないこと、(4)溶剤などを使用しないこと、(5) 電気、ガスなど火事につながるものを使用しないで施工できること。提案する水硬性樹脂 を含浸させた連続繊維シートを活用した復旧技術は、これらの要求を満足する技術である。 水硬性樹脂として、水硬性ポリウレタン樹脂を選定する予定であるが、硬化時間、付着性 能,施工性等を勘案して適切な材料を開発する。補強材として使用する連続繊維シートは, 補強材として適用実績のある炭素、アラミド、ビニロンを開発対象材料とする。実験的な 検討の裏付けおよびその後の設計手法の検討において、共同研究者が開発している解析コ ードを用い、非線形有限要素解析による検討を行う。これらの検討を総合的に実施し、試 験体に適用した結果および解析結果をフィードバックさせることにより、適切な樹脂およ び補強材を選定し、水硬性樹脂含浸型連続繊維シートのプロトタイプを完成させる。開発 したプロトタイプを用いて、大規模試験体での検証実験、解析的な検討、施工性の検討等 の検討を踏まえて、標準設計・施工マニュアルを作成し、開発工法の普及方法に関する検 討を実施する。

【研究開発の目標】

研究開発の全体目標は、災害により倒壊は免れたが被災した構造物の早期復旧および余 震による2次災害の抑止のための、安全・簡易・迅速復旧工法の開発である。なお、一般の 耐震工法への展開可能性もあわせて検討する。

研究開発の目標として下記の2項目を設定している。

- I. 小型試験体を用いた復旧工法の開発(中小被害の構造物の耐力を100%まで回復させる)
- II. 大型試験体を用いた復旧工法の妥当性の検証(耐力100%以上までの回復,施工時間50% 以上短縮(従来の類似技術比),施工後数時間で効果発現)

【個別研究開発項目】

前述の研究開発目標を達成するため個別研究開発項目を設定している。

- 1. 樹脂含浸型の連続繊維シートの開発
 - 検討内容
 - ・樹脂材料および連続繊維シートの基礎試験
 - ・試験体による検証
 - ・FEMによる解析的検討
- 2. 開発工法の実用化に向けた検討

検討内容

- ・大型試験体による検証
- 施工法の検討
- 最適設計手法の開発
- ・標準マニュアルの作成

【研究開発の成果】

研究開発成果を個別研究開発項目毎にまとめる。

1. 樹脂含浸型の連続繊維シートの開発

個別研究開発目標は,被災した構造物(倒壊していない構造物)を復旧可能な水硬性樹脂 含浸型の連続繊維シートのプロトタイプの開発である。

1.1 樹脂材料および連続繊維シートの基礎試験

提案する水硬性樹脂を含浸させた連続繊維シートを活用した復旧技術には,水硬性ポリ ウレタン樹脂を用いた。通常,水硬性ポリウレタン樹脂は,湿気硬化性の接着剤として用 いられているが,この場合,その硬化時間が問題となる。そのため,水と接触することで 短時間に硬化が期待できる樹脂を配合する必要がある。しかし,反応を促進させると発泡 量が多くなるため,補修効果が期待できる付着性能と硬化時間のバランスを考慮し,適切 な配合を決定した。連続繊維シートは,開発対象材料である炭素,アラミド,ビニロンを 使用し,繊維の種類,目付量を変化させて,樹脂の含浸状況,施工性を確認した。連続繊 維シートに水硬性ポリウレタン樹脂を含浸させ,硬化後に各種基礎試験を行うことで,補 修材料の基本性能(強度,弾性係数など)を把握した。

1.1.1 水硬性ポリウレタン樹脂の配合

(1) はじめに

ポリウレタン樹脂は、現代社会のあらゆる分野で使用されており、リサイクル技術も確 立されている。建設分野では、断熱材、止水材などで使用されているが、連続繊維シート 巻立て工法の含浸接着樹脂に使用された例はみられない。筆者らが過去に実施したガラス 連続繊維シートに水硬性ポリウレタン樹脂を含浸させた補修材料による補修効果検証試験 ¹⁾より、損傷前と同等以上に耐荷力が回復したことから、含浸接着樹脂への適用が可能で あると考えている。さらに、水硬性ポリウレタン樹脂は、樹脂設計の自由度が高く、ウレ タン硬化物の硬軟が調整可能であるため、保有すべき物性を把握すれば、含浸接着樹脂と して一層の改良が期待できる²⁾。そこで、樹脂の物理的性質が対極に位置する軟性および 硬性の水硬性ポリウレタン樹脂の作製を目的とした。なお、配合の選定は、施工性および コンクリートとの接着力を簡易に評価できることから接着試験により行った。

(2) 実験概要

a) 使用材料

・水硬性ポリウレタン樹脂

本研究で用いた水硬性ポリウレタン樹脂(ハイプレン AD-284)の概要を表-1.1.1.1 に示す。水硬性ポリウレタン樹脂は、一液硬化性であり、水と接触することで反応・ 硬化が始まり、それに伴い炭酸ガスを発生する。

表-1.1.1.1 水硬性ポリウレタン樹脂(ハイプレン AD-284)の組成, 成分情報

化学名	成分	濃度	粘度
イソシアネート混合物	ウレタン樹脂	70%	35000~45000
	ジフェニルメタンジイソシアネート	30%	mPa∙s at 25°C

連続繊維シート

接着試験で使用した連続繊維シートの物性値を表-1.1.1.2,連続繊維シートを図-1.1.1.1 に示す。炭素繊維シートは高強度,2方向クロスタイプ,アラミド繊維シート は1方向,ビニロン繊維シートは2方向クロスタイプである。なお,表-1.1.1.2 に示 す物性値は公称値である。

表-1.1.1.2 連続繊維シート物性値

連続繊維シート	目付量	引張強度	弾性係数	破断伸度
種類	(g/m²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)
炭素 1	200	3400	2.45×10 ⁵	1.5
炭素 2	300	3400	2.45×10 ⁵	1.5
アラミド1	280	2060	1.18×10⁵	1.8
アラミド2	415	2060	1.18×10 ⁵	1.8
ビニロン	285	2000	4.30×10 ⁴	4.8



図-1.1.1.1 炭素繊維シート、アラミド繊維シート、ビニロン繊維シート

b) 連続繊維シートとコンクリートとの接着試験

接着試験は、コンクリート平板(300mm × 300mm, 厚さ 60mm)に連続繊維シートを貼り 付け、試験毎の所定の期間気中(20℃, RH60%)養生後、表面にエポキシ樹脂を用いて鋼製 治具(40mm× 40mm)を接着し、JSCE-E 545-2007に準拠して試験を行った(図-1.1.1.2)。 接着強度 f_{au}は、式(1.1.1.1)により算出した。

$$f_{au} = \frac{F_{au}}{A_s} \tag{1.1.1.1}$$

ここに, f_{au}: 接着強度(N/mm²)

F_{au}:最大荷重(N)

 $A_s: 鋼製治具の面積(mm²)$



図-1.1.1.2 接着試験

c) 漏斗およびフロー試験

漏斗試験は,JSCE-F 512-2007(高流動コンクリートの漏斗を用いた流下試験方法(案))の 考えに基づき行った。試験は、図-1.1.1.3 に示す漏斗に樹脂を 50ml 流し込み,底蓋を開 けてから樹脂が全量流出するまでの時間を測定した(図-1.1.1.4)。

吐出部の平均流下速度 Vm は式(1.1.1.2)より算出した。

$$V_m = \frac{(Vol/A)}{t_o} \tag{1.1.1.2}$$

ここに, V_m : 平均流下速度(cm/s)

Vol:樹脂の容量(50cm³)

A: 吐出部の断面積(cm²)

 $t_o: 流下時間(s)$



図-1.1.1.3 漏斗の内部寸法および装置の外観





フロー試験は, JIS A 1150(コンクリートのスランプフロー試験方法)の考えに基づき行った。試験は,ガラス平板(200mm×200mm)の中心にコーン(φ50mm)を設置(図-1.1.1.5)し, コーン内に樹脂を50ml流し込み,コーンを引き上げてから150mmフロー到達までの時間 を測定した(図-1.1.1.6)。



図-1.1.1.5 測定器具の寸法



図-1.1.1.6 フロー試験状況

(3) 軟性型水硬性ポリウレタン樹脂の配合

本研究における軟性型水硬性ポリウレタン樹脂とは、反応により生成されるウレタン硬 化物がウレタン特有のゴム弾性を有していることを意味する。ゴム弾性を損なわずに粘度 を低くするには溶剤によって希釈するのが効果的であるが、樹脂濃度が高い場合、強度は 高いが発泡し、樹脂濃度が低い場合、発泡は抑制できるが強度は低くなる性質を有してい る。また、樹脂濃度の低下に伴い、単位量当たりの反応成分が少なくなるため、水との見 掛けの反応速度は速くなる。PMA(プロピレングリコールモノメチルエーテルアセテート) を希釈剤とし、樹脂濃度 80%を用いて実験を試みたが、発泡量が多く試験が行えなかった。 そこで、発泡が抑制可能な樹脂濃度 75%および 66%を選定した¹⁾。

軟性型の配合を選定する過程で,施工方法,連続繊維シートの種類および目付量の選定, 施工環境温度の影響についても検討した。

a) 施工方法の選定

・実験要因

試験条件を表-1.1.1.3 に示す。炭素 2(表-1.1.1.2)に樹脂濃度 66%または 75%の樹脂を含浸させた後,給水方法およびシート貼り付けから仕上げまでの時間を実験要因とし,材齢1日および7日で試験を行った。なお,給水方法の散水とはシート貼り付け後に霧吹きで給水する方法であり,浸漬とは貼り付け前にシートを水に漬けて給水する方法である。また本実験における仕上げとは,シートの浮き・剥離を防ぐ事を目的とし,ゴム製ワイパーを用いた脱泡・水切り作業のことである。

樹脂濃度	連続繊維シート 種類	給水方法	仕上げ時間 (脱泡・水切り)
66%	出まっ	散水	直後
75%	灰茶 2	浸漬	っか後 10 分後

表-1.1.1.3 施工方法選定試験条件

実験結果と考察

図-1.1.7 に材齢1日における接着強度を示す。給水方法が散水の場合は、樹脂濃度に関わらず仕上げ時間5分後の接着強度が最大となったが、樹脂濃度66%-直後は5分後と同程度まで強度を発現していた。樹脂濃度75%-直後は、樹脂濃度66%と比較し樹脂濃度が高いため、水との見掛けの反応速度が遅くなり、給水直後に仕上げを施すと硬化に必要な樹脂および水分が取り除かれ、シートとコンクリート表面の接着が確保されず、接着強度が発現しなかったと考えられる。水中浸漬した場合は、貼り付け前に、シートの接着面にウレタン硬化物の厚さが増加していくため、接着が確保されなかった。特に、樹脂濃度75%-5分、10分後においてはシートが浮いてしまい試験を行うことができなかった。また、全体的に強度は増加しているが、材齢7日(図-1.1.1.8)も同様の挙動を示していることが分かる。

以上の実験結果より、樹脂濃度 66%の場合は、散水直後および 5 分後に仕上げても 同程度の接着強度になったことから、なるべく迅速に作業を行うために散水直後に仕 上げることとした。一方、樹脂濃度 75%の場合は、散水から 5 分後に仕上げ作業を行 うこととした。





図-1.1.1.7 施工方法選定試験-材齢1日

図-1.1.1.8 施工方法選定試験-材齢7日

b) 樹脂濃度および連続繊維シートの選定

・実験要因

試験条件を表-1.1.1.4 に示す。施工方法選定試験より,水の供給方法および樹脂濃度による仕上げ時期を選定した。環境温度は 20℃(常温)および 2℃(低温)とした。また, 2℃環境下における鋼製治具の接着では,20℃環境下で使用したエポキシ樹脂が硬化しないためアクリル樹脂を用いたが,1日では硬化しなかったため樹脂材齢を2日とした。これにより,シートの養生期間は,20℃環境では1日および7日とし,2℃環境で は2日および7日とした。

表-1.1.1.4 連続繊維シート選定試験条件

樹脂濃度	連続繊維シート 種類	給水方法	仕上げ時間 (脱泡・水切り)
66%	炭素 1, 2	#/ 1.	直後
75%	アラミド 1,2 ビニロン	散水	5 分後

・実験結果と考察

20℃環境下材齢1日および7日における接着強度を図-1.1.1.9, 図-1.1.1.10に示 す。20℃環境下では、目付量が300g/m²程度の炭素2,アラミド1,ビニロンが安定し た強度発現を示しており,特にビニロンは高い接着強度が得られた。前述したように、 水硬性ポリウレタン樹脂は、水との反応過程においてウレタン硬化物および炭酸ガス を発生させ、これが、シートの浮きの原因となる。これにより、水硬性ポリウレタン 樹脂を含浸接着樹脂として用いた場合、連続繊維シートの目付量は、極力炭酸ガスを 内包せず、ウレタン硬化物の厚みも極力薄くすることができる300g/m²程度が適切で あると考えられた。

2℃環境下材齢2日および7日における接着強度を図-1.1.1.11,図-1.1.12に示 す。材齢2日では樹脂濃度による差があまり見られないが,材齢7日では,殆どの場 合で樹脂濃度66%における接着強度が高くなる挙動を示した。また,樹脂濃度75%の 接着強度が発現されない理由は,粘性増加によりシートとコンクリート界面のウレタ ン硬化物の厚みが増すことで炭酸ガスが抜けず,接着面積の減少を引き起こしたこと や,樹脂と水との見掛けの反応速度が遅くなったため接着強度の増加率が低下したと 考えられた。これにより,樹脂濃度66%は低環境下においても安定した接着強度を発 現することができると考えられた。

以上,これらの実験結果から,軟性型水硬性ポリウレタン樹脂の配合は,原液樹脂 を PMA により樹脂濃度 66%に希釈して用いることとした。また,水硬性ポリウレタ ン樹脂を含浸させる連続繊維シートの目付量は 300g/m²程度が適当である。



図-1.1.1.9 連続繊維シート選定試験-20℃-材齢1日



図-1.1.1.10 連続繊維シート選定試験-20℃-材齢7日



図-1.1.1.11 連続繊維シート選定試験-2℃-材齢1日



図-1.1.1.12 連続繊維シート選定試験-2℃-材齢7日

c) 設計強度発現時期の確認

・実験要因

補修後早期に補修効果を発現することが水硬性ポリウレタン樹脂に求められる重要 な性能の一つである。つまり,若材齢時における強度発現性状は極めて重要な特性と なる。そこで,軟性型水硬性ポリウレタン樹脂の設計強度発現時期を確認するため, 材齢1日,3日,5日,7日に接着試験を行った。なお,設計強度発現時期とは材齢7 日と同等の接着強度が発現した材齢とする。

実験結果と考察

材齢1~7日における接着強度の経時変化を図-1.1.1.13,各養生期間での接着強度 の増加率を表-1.1.1.5に示す。連続繊維シートの種類によらず,材齢5日までは接着 強度の増加率が高いが,5~7日にかけてはあまり増加しない結果が得られた。これは, 未反応の樹脂が少なくなり,反応が終結に近い状態にあるためと考えられる。

以上の実験結果より,軟性型水硬性ポリウレタン樹脂の設計強度発現時期は5日と 考えられる。



図-1.1.1.13 接着強度の経時変化

表-1.1.1.5	接着強度の増加率
表-1.1.1.5	接着強度の増加率

ご声 ターーターーターーー し 活 粘石	各養生期間の増加率(%)		
) 建枕桃桩 ンート 相知	1日~3日	3日~5日	5日~7日
炭素 2	36.4	44.7	8.4
アラミド 1	54.3	26.6	-3.4
ビニロン	22.4	29.7	10.7

(4) 硬性型水硬性ポリウレタン樹脂の配合

本研究における硬性型水硬性ポリウレタン樹脂とは、ウレタン硬化物が硬い塗膜を形成 し、ウレタン特有のゴム弾性を有していないことを意味する。硬い塗膜を形成し、溶剤を 一切使用しない樹脂を作製するため、反応性モノマーを用いて粘度を低くした。実験で用 いた2種類の反応性モノマー(コスモネート M200、コスモネート LK)の概要をそれぞれ表 -1.1.1.6、表-1.1.1.7 に示す。反応性モノマーは、ウレタンプレポリマー(例えば、ハイ プレン AD-284)を製造する際のイソシアネート基原料となる物質で、樹脂内の濃度が高く なると尿素結合により硬くなるが、多量に炭酸ガスを発生し発泡することで塗膜が脆くな るという特徴を有している。

そこで,樹脂が扱い易くなる反応性モノマー濃度を漏斗およびフロー試験により評価し, 選定した配合で施工した際の発泡性を観察した。

化学名	成分	濃度	粘度
ポリメチレンポリフェニル	ポリメチレンポリフェニル	100%	190
ポリイソシアネート	ポリイソシアネート	100%	mPa ⋅ s at 20°C

表-1.1.1.6 コスモネート M200の組成, 成分情報

表-1.1.1.7 コスモネート LK の組成,成分情報

化学名	成分	濃度	粘度
	メチレンビスジイソシアネート	68%	77
イソシアネート混合物	ジフェニルメタンジイソシアネート	2.3%	77
	ポリイソシアネート化合物	29	

a) 粘性および発泡評価

・実験要因

試験条件を表-1.1.1.8 に示す。樹脂内の反応性モノマー濃度は、供試体の全体質量 200gに対して 10%毎増加させ粘度を低下させた。原液樹脂との混合は、全体が均一に なるまで 2 分間以上攪拌した後、漏斗およびフロー試験を行った。また、発泡性を評 価するため、選定した配合を連続繊維シートに含浸させコンクリート平板に施工し、 24 時間後の状態を観察した。

司公冬州	ららせ エノマ 一番 粘	濃度	5(%)
	及心住モノマー性規	原液樹脂	反応性モノマー
No.1		90	10
No.2		80	20
No.3		70	30
No.4	コスモネート 101200	60	40
No.5		50	50
No.6		30	70
No.7		90	10
No.8		80	20
No.9		70	30
No.10	コスモネートLK	60	40
No.11		50	50
No.12		40	60
No.13		30	70

表-1.1.1.8 樹脂の配合条件

・実験結果と考察

各樹脂の平均流下速度を図-1.1.1.14に、150mmフロー到達時間を図-1.1.1.15に それぞれ示す。なお、比較対象とし、原液樹脂および水硬性ポリウレタン樹脂-軟性 の実験結果も合わせて記載している。各樹脂の平均流下速度は、反応性モノマー濃度 の増加に比例し、各樹脂の150mmフロー到達時間は、反応性モノマー濃度の増加に反 比例する結果が得られた。樹脂の粘度が低くなるにつれ、平均流下速度は増加し、 150mmフロー到達時間は減少する挙動を示すが、本実験においても同様の挙動を示し ていることから樹脂の粘度を正確に評価できていると考えられた。コスモネート M200 と LK を比較すると、LK を混合した樹脂の粘度の方が低くなっていることが分かる。 しかし、軟性型と比較すると、軟性型の粘度の方がより低いことが確認できる。これ により、反応性モノマーは溶剤ほど粘度を低くする性質を有しておらず、また、反応 性モノマーの種類によって粘度を低くする能力には差があると考えられた。

当初,樹脂が扱い易くなる反応性ポリマー濃度を把握することを目的としていたが, 前述したように反応性モノマーは溶剤ほど粘度を低くする性質を有しておらず,これ 以上反応性ポリマー濃度を増加させると塗膜が過度に脆くなり,また,原液樹脂濃度 の低下に伴い樹脂全体のウレタン樹脂割合が低くなるため含浸接着剤としての機能が 損なわれると考えられた。そこで,コスモネート M200,LK それぞれ設定条件内の最 大反応性モノマー濃度(M200:No.6,LK:No.13)の配合を用いて発泡評価を行った。 なお,比較対象として No.6 と同程度の粘度を示した No.11,発泡状態の観察基準とし て最大原液樹脂濃度(M200: No.3, LK: No.8)の配合をそれぞれ用いて同様に試験を行 った。





図-1.1.1.14 各樹脂の平均流下速度

図-1.1.1.15 各樹脂の 150mm フロー到達時間

図-1.1.1.16~図-1.1.1.20に各試験体の施工表面を示す。No.3(M200:30%)および No.8(LK:80%)は、施工直後より表面に薄いウレタンの膜が形成され、施工後24時間 ではシート自体が浮いた状態で、シート表面に大粒の発泡ウレタンが確認できる。こ の結果より、原液樹脂濃度が高いと発泡を抑制することは困難であることが再確認さ れた。No.6(M200:70%)は、施工後24時間でシート表面に少量の発泡およびシートの 浮きが確認された。No.13(LK:70%)は、シート表面に発泡やシートの浮きなどは確認 されなかった。また、No.11(LK:50%)は、シート間に若干の発泡はみられるが、シー トの浮きなどは確認されなかった。これらの結果より、M200により粘度を低下させ ても発泡および浮きを抑制する効果は期待できず、LKにより粘度を低下させること が発泡および浮きの抑制に効果的であると考えられた。以上より、反応性モノマーは コスモネートLKを用いることとし、施工性が確保できるLK濃度50%~70%の範囲で 接着試験を行うこととした。



図-1.1.1.1.6 施工直後~24 時間後施工表面(No.3)



図-1.1.1.17 施工直後~24時間後施工表面(No.8)



図-1.1.1.18 施工直後~24時間後施工表面(No.6)





図-1.1.1.19 施工直後~24 時間後施工表面(No.13)



図-1.1.1.20 施工直後~24 時間後施工表面(No.11)

b) 接着強度の比較

・実験要因

粘性および発泡評価試験より選定した LK 濃度 50~70%の範囲で, LK 濃度を 5%毎 に増加させた配合を試験に用いた。施工は, 1.1.1, (3), a)で選定した方法で実施し, 材齢 7日で試験を行った。

・実験結果と考察

図-1.1.1.21 に接着試験結果を示す。なお、比較のため、軟性型の接着強度を縦棒で示す。LK 濃度が 50%から 55%に増加するとそれに伴い接着強度も増加し、55%以上 LK 濃度を増加させると接着強度は低下していく挙動を示した。特に、60%から 65%に かけて接着強度が大幅に低下した。配合条件の中で、最も高い接着強度を発現したの は 55%の配合で、3.07N/mm²と軟性の 1.7 倍程度であった。

以上,これら実験結果より,軟性型水硬性ポリウレタン樹脂の配合は原液樹脂にコ スモネートLKを混合し,LK濃度 55%となるよう調整して用いることとした。



図-1.1.1.21 各 LK 濃度の接着強度

c) 設計強度発現時期の確認

・実験要因

軟性型と同様に,硬性型水硬性ポリウレタン樹脂の設計強度発現時期を確認するため,材齢1日~7日に接着試験を行った。なお,設計強度発現時期とは材齢7日と同等の接着強度が発現した材齢とする。

・実験結果と考察

材齢1~7日における接着強度の経時変化を図-1.1.1.22,各養生期間での接着強度の増加率を表-1.1.1.9に示す。接着強度は、1日~2日にかけて大幅に増加するが、2日~5日では増加率が小さくなり、5日~6日で再度大幅に増加し、6日~7日で強度が増加しなくなる挙動を示した。

以上の実験結果より,硬性型水硬性ポリウレタン樹脂の設計強度発現時期は6日と 考えられる。



図-1.1.1.22 接着強度の経時変化

表-1.1.1.9 接着強度の増加率

各養生期間の増加率	(%)
-----------	-----

1日~2日	2日~3日	3日~4日	4日~5日	5日~6日	6日~7日
43.2	-13.0	14.3	10.1	62.6	-7.9

(5) 水硬性ポリウレタン樹脂の配合のまとめ

本検討では,性質が異なる軟性型および硬性型の水硬性ポリウレタン樹脂の配合を選定 し,それぞれの強度発現時期を確認した。また,施工方法および連続繊維シートの選定を 行った。本検討で得られた知見を以下に記す。

- 1) 軟性型水硬性ポリウレタン樹脂の配合は, 原液樹脂 66%: PMA34% が適切であり, 設 計強度発現時期は材齢 5 日である。
- 2) 硬性型水硬性ポリウレタン樹脂の配合は,原液樹脂 45%:コスモネート LK55%が適切 であり,設計強度発現時期は6日である。
- 3) 水硬性ポリウレタン樹脂を用いる場合の施工方法は、散水により給水し、仕上げは給水直後に施すことと設定した。
- 4) 水硬性ポリウレタン樹脂を含浸させる連続繊維シートは、種類に限らず、目付量 300g/m²程度が適当である。

1.1.2 含浸接着樹脂の特性

(1) はじめに

連続繊維シートを用いてせん断補強する場合,含浸接着樹脂としてエポキシ樹脂を用い るのが一般的である。これは、エポキシ樹脂が高分子材料の中でも非常に高性能であるこ と、さらに、数多くの施工実績により信頼性が高いことによる¹⁾。そのため、これまでに 多くの研究機関で連続繊維シートを用いたせん断補強法やせん断補強効果に関する研究が 行われた^{2)~4)}が、エポキシ以外の含浸接着樹脂を用いた事例は少ない。既往の研究では、 解析的検討により、シートとコンクリート間の接着層の力学特性が構造特性に影響を及ぼ すことは明らかとされている⁵⁾が、含浸接着樹脂の特性がせん断補強に及ぼす影響を実験 的に検討した例はほとんど無い。そこで、含浸接着樹脂の特性を把握するため、連続繊維 シートを用いた補修補強指針に直接引用される試験⁶⁾を各種実施し、物性値の比較を行っ た。

(2) 実験概要

本研究で用いたエポキシ樹脂(粘度:20000 mPa·s at 20℃)は,二液混合型の連続繊維シート接着用である。試験に用いた連続繊維シートは,アラミド繊維シート(公称値,目付量 280g/m²,引張強度 2060N/mm²,弾性率 1.18×10⁵)で統一した。

a) 連続繊維シートの引張試験

供試体は,幅 12.5mm,全長 200mmの試験片に樹脂を含浸させ,7日間気中(20℃,RH60%) にて養生し作製した(図-1.1.2.1)。試験は,両端に長さ 50mm の鋼製のタブを接着し, JSCE-E 541-2007 に準拠して行った。

引張強度 f_uおよび弾性係数 E_fはそれぞれ式(1.1.2.1), (1.1.2.2)により算出した。

$$f_{fu} = \frac{F_u}{A} \tag{1.1.2.1}$$

ここに, *f_{fu}*:引張強度(N/mm²) *Fu*:最大引張荷重(N)

A:供試体の断面積(mm²)

$$E_f = \frac{\angle F}{\angle \varepsilon \cdot A} \tag{1.1.2.2}$$

ここに, E_f : 弾性係数(N/mm²)

△F:最大引張荷重の 20%と 60%における 2 点間の荷重の差(N)
 △ ε:同上 2 点間のひずみの差

A: 試験体の断面積(mm²)



図-1.1.2.1 供試体の形状

b) 連続繊維シートの継手試験

供試体の形状を図-1.1.2.2 に示す。寸法などは引張試験と共通であるが、継手長を 150mm, 200mm, 250mmの3種類とし, JSCE-E 542-2007に準拠して試験を行った。 継手強度 *f_{fus}* は式(1.1.2.3)により算出した。

$$f_{fus} = \frac{F_u}{A} \tag{1.1.2.3}$$

ここに, *f_{fus}*:継手強度(N/mm²)

F_u:最大引張荷重(N)

A:供試体の断面積(mm²)



図-1.1.2.2 供試体の形状

c) 連続繊維シートとコンクリートとの付着試験

付着試験は、JSCE-E 543-2007 に準拠して供試体の作製および試験を行った。供試体の 形状は図-1.1.2.3 に示すように分離型コンクリートブロック(100mm×100mm 長さ 400mm)を用いた。供試体は、定着ブロック(150mm)と試験ブロック(250mm)の中心軸が極 力合うよう突き合わせ、定着側には剥離防止のため連続繊維シートを周方向に巻き立てて 固定し、試験側に連続繊維シートの付着長が 200mm となるように調整し貼り付けた。施工 後7日間養生した後、両側の連続繊維シートにひずみゲージを 20mm 間隔で配置し、変位 制御(0.05mm/min)により載荷した。

界面剥離破壊エネルギー G_f および付着強度 τ_u はそれぞれ式(1.1.2.4), (1.1.2.5)により算出した。

$$G_{f} = \frac{P_{\max}^{2}}{8b^{2} \cdot E_{f} \cdot t}$$
(1.1.2.4)

ここに、G_f:界面剥離破壊エネルギー(N/mm) P_{max}:最大荷重(N) b:連続繊維シート幅の平均値(mm) E_f:連続繊維シートの弾性係数(N/mm²) t:連続繊維シートの厚さ(mm)

$$\tau_{u} = \frac{P_{\max}}{2b \cdot l}$$
(1.1.2.5)
ここに, τ_{u} : 付着強度(N/mm²)

b:連続繊維シート幅の平均値(mm)

1: 連続繊維シートの試験部分における有効付着長(mm)



図-1.1.2.3 供試体の形状

d) 連続繊維シートとコンクリートとの接着試験

1.1.1, (2), a)に前掲しているため図は省略するが, 説明および式は再掲する。

接着試験は、コンクリート平板(300mm × 300mm, 厚さ 60mm)に連続繊維シートを貼り 付け,試験毎の所定の期間気中(20℃, RH60%)養生後,表面にエポキシ樹脂を用いて鋼製 治具(40mm× 40mm)を接着し,JSCE-E 545-2007に準拠して試験を行った。

接着強度 fauは,式(1.1.2.6)により算出した。

$$f_{au} = \frac{F_{au}}{A_s}$$
(1.1.2.6)
ここに、 f_{au} : 接着強度(N/mm²)
 F_{au} : 最大荷重(N)
 A_s : 鋼製治具の面積(mm²)

(3) 実験結果と考察

a) 連続繊維シートの引張試験

引張強度を図-1.1.2.4,応力 - ひずみ関係を図-1.1.2.5 に示す。なお,樹脂の影響を把握するために,樹脂を含浸させずに連続繊維シートのみの試験も行った。各樹脂を含浸させた場合,引張強度はほぼ同様の結果が得られたが,弾性係数はエポキシと水硬性ポリウレタン樹脂で若干異なり,エポキシが低く,水硬性ポリウレタン樹脂が高くなることが確認された。アラミド繊維のみを試験した場合,樹脂を含浸させた場合と比較し,引張強度および終局ひずみは低下し,弾性係数は高くなる結果が得られた。これは、シート間に樹脂が存在しないことにより,繊維間の応力が不均一な状態で伝達され,局所的に繊維が破断したためと考えられる。また、この状況は図-1.1.2.6 より確認できる。これらの結果より,引張強度は連続繊維シートの性能に依存するが、弾性係数は樹脂の影響を受けると考えられた。







図-1.1.2.5 応力-ひずみ関係



図-1.1.2.6 アラミド繊維のみで試験した場合の破壊状況

b) 連続繊維シートの継手試験

継手長 200mmの継手強度を図-1.1.2.7,各継手長における継手強度を図-1.1.2.8 に示 す。エポキシは,破壊形態が全てシート破断(図-1.1.2.9)であるため,継手強度はほぼ連 続繊維シートの引張強度に等しい結果が得られた。軟性型の場合,継手強度は引張強度を 下回っているが,破壊形態はシート破断のものがほとんどであった(図-1.1.2.10)。一方, 硬性型の場合,継手強度は軟性型の 1/4 程度と極めて低く,破壊形態はすべて継手部破壊 であった(図-1.1.2.11)。また,水硬性ポリウレタン樹脂の継手長を 150mm から 250mm ま で変化させた場合,軟性型および硬性型ともに継手強度が横ばいであることが確認できる。

軟性型および硬性型の継手強度に大きな差がみられたため、継手界面の様子をマイクロ スコープで観察した(図-1.1.2.12)。軟性型は、繊維を一本ずつコーティングするように硬 化している様子が観察されたが、硬性型は、繊維束の表面に塗膜を形成し硬化しており、 それぞれ異なる様子が観察された。

これら実験結果より,軟性型はウレタン硬化物が比較的細かく結合しているため,シート間の界面に生じるせん断力に対して抵抗できる。一方,硬性型はシート間の界面に硬く 脆い塗膜が形成されるためせん断力に対する抵抗はほぼ期待できないと考えられた。



図-1.1.2.7 継手強度(継手長 200mm)







図-1.1.2.9 エポキシの破壊状況



図-1.1.2.10 軟性型の破壊状況



図-1.1.2.11 硬性型の破壊状況



図-1.1.2.12 破壊後継手部界面の状況(左:軟性型,右:硬性型)

c) 連続繊維シートとコンクリートとの付着試験

界面剥離破壊エネルギーを図-1.1.2.13,付着強度を図-1.1.2.14 に示す。土木学会の 指針⁶⁾では,界面剥離破壊エネルギーは試験によらない場合,安全側の値として *G_f* = 0.5 N/mm を用いてよいとされている。本実験では,エポキシと軟性型は安全側の値を満たし ているが,硬性型は安全側の値の約 1/2 程度であった。しかし,付着強度では,エポキシ と硬性型は同等であり,軟性型は他と比較し若干低い値であった。界面剥離破壊エネルギ ーは,単位面積の剥離が開始されるまでに,界面において消費されるエネルギーと定義さ れており,シートとコンクリートの付着応力と相対変位の関係より,付着応力-相対変位曲 線下の面積で表わされるが,軟性型は硬性型と比較して付着強度が小さく,界面剥離破壊 エネルギーが大きいことから,剥離開始時の相対変位は大きい値となる。一方,硬性型は 付着強度が大きく,界面剥離破壊エネルギーが小さいことから,剥離開始時の相対変位は 小さい値となる。これにより,シートとコンクリートの界面に生じるせん断力に対して, 軟性型は変形性能を有しており,硬性型は変形性能をあまり有していないと考えられた。



図-1.1.2.13 界面剥離破壊エネルギー



d) 連続繊維シートとコンクリートとの接着試験

接着強度を図-1.1.2.15 に示す。エポキシは約5 N/mm²と3種類の中では最大となり, 次いで硬性型の約3 N/mm²,軟性型の約2 N/mm²という結果が得られた。硬性型は軟性型 に比べ,硬い塗膜を形成するため,シートとコンクリートの界面における接着強度が高く なったと考えられた。



(4) 樹脂の特性比較

(3), a)~d)の試験より得られた物性値を簡易的にまとめたものを表-1.1.2.1 に示す。な お、エポキシは評価基準としたため全て「〇」としている。軟性型の場合,付着および接 着強度はあまり高くないが,せん断抵抗や変形性能を有している。硬性型の場合,硬い塗 膜を形成するため付着および接着強度は高いが,脆い塗膜でもあるためせん断抵抗や変形 性能を有していない。各試験結果より,軟性型および硬性型の物理的性質が対極に位置す ることが確認された。

種類 引張強度		継手強度	界面剥離破壊エネルギー	付着強度	接着強度
エポキシ	0	0	0	0	0
軟性型	0	0	\bigtriangleup	\bigtriangleup	\bigtriangleup
硬性型	0	×	×	0	0

表-1.1.2.1 含浸接着樹脂の特性

(5) 含新接着樹脂の特性のまとめ

本検討では、3種類の含浸接着樹脂の特性を把握するため、各種試験を実施し、物性値の 比較を行った。本検討で得られた知見を以下に記す。

- 軟性型水硬性ポリウレタン樹脂の特性として、物理的な強度はあまり期待できないが、 ウレタン特有の柔軟性を有している。
- エポキシ樹脂は、全ての試験で水硬性ポリウレタン樹脂よりも高い数値を示し、高分 子材料として高性能であることを定量的に確認できた。

1.2 試験体による検証

1.1で水硬性ポリウレタン樹脂の2種類の配合を決定し,各種試験により物性値の相違を 確認した。次に,水硬性ポリウレタン樹脂が含浸された連続繊維シートを補修材料とし, 梁試験体を用いて載荷試験を行った。試験は,各種連続繊維シートを用いた場合の水硬性 ポリウレタン樹脂の適用可能性を検討するとともに,水硬性樹脂の物性が連続繊維シート により補強された梁試験体のせん断耐力に及ぼす影響について実験的に検討した。

1.2.1 小型梁試験体による補修効果の検証

(1) はじめに

地震災害による損傷後の補修効果を検証するため、せん断破壊が先行するように設計した小型梁試験体を用いて2点集中載荷を行った。また、損傷度の影響、連続繊維シートの影響について検討し、エポキシ樹脂により補修した試験体を用いて従来工法との比較を行った。

(2) 実験概要

a) 試験条件

試験条件を以下に記す。No.1は、梁の挙動を確認するため無補修、無損傷で載荷した。 No.2, No.3, No.4は、1次載荷を行わず、無損傷のまま連続繊維シートを巻き付けて載荷し た。No.5, No.6, No.7は、1次載荷でせん断損傷(損傷度:小)を与えた後、補修を施し、 再載荷(2次載荷)した。No.8, No.9, No.10, No.11は、1次載荷でせん断損傷(損傷度: 大)を与えた後、No.8, No.9, No.10は水硬性ポリウレタン樹脂で補修を施し、No.11はエ ポキシ樹脂で補修を施し、再載荷(2次載荷)した。

- ◆ No.1:無損傷, 無補強(コントロール)
- ◆ No.2:無損傷,炭素,水硬性ポリウレタン樹脂
- ◆ No.3: 無損傷, アラミド, 水硬性ポリウレタン樹脂
- ◆ No.4:無損傷, ビニロン, 水硬性ポリウレタン樹脂
- ◆ No.5:損傷度:小,炭素,水硬性ポリウレタン樹脂
- ◆ No.6:損傷度:小,アラミド,水硬性ポリウレタン樹脂
- ◆ No.7:損傷度:小、ビニロン、水硬性ポリウレタン樹脂
- ◆ No.8: 損傷度: 大,炭素,水硬性ポリウレタン樹脂
- ◆ No.9:損傷度:大、アラミド、水硬性ポリウレタン樹脂
- ◆ No.10:損傷度:大,ビニロン,水硬性ポリウレタン樹脂
- ◆ No.11:損傷度:大,炭素,エポキシ樹脂(従来工法)

b) 試験体緒元

試験体諸元を表-1.2.1.1に示す。

=+ =+ /+	有効高さ スパン			軸方向鉄筋		せん断補強筋			油结丝	杜맘
乱験1本 No	d	а	a/d	材質	鉄筋比	材質	鉄筋比	損傷度	22 元秋和	倒加
NO.	(mm)	(mm)		径	(%)	径	(%)			作主大只
1									-	-
2								4000	炭素	
3								兼	アラミド	
4	120	120 300 2.5			2.8	2.8 SD295A D6	0.094		ビニロン	軟性型 水硬性 ポリウレタン
5			2.5	2.5 SD345 D13 2.8				小	炭素	
6									アラミド	
7									ビニロン	
8								×	炭素	
9									アラミド	
10									ビニロン	
11									炭素 2	エポキシ

表-1.2.1.1 試験体諸元

c) 試験体寸法

試験体寸法を図-1.2.1.1に示す。隅角部は、応力集中による連続繊維シートの破断の防止、施工性の向上を目的に面取りを施した。ひずみゲージは、軸方向鉄筋、せん断補強筋 に配置し、変位計は、中立軸線上の試験体中央、載荷点、支点にそれぞれ設置した。



d) 使用材料

連続繊維シートの物性値を表-1.2.1.2,使用材料を表-1.2.1.3,に示す。連続繊維シートは, 1.1.1, (3), b)で選定した目付量300g/m²程度の3種類を使用した。コンクリートは, レディーミクストコンクリート(24-12-20H)を用いた。

表-1.2.1.2 連続繊維シートの物性値

連続繊維シート 種類	目付量 (g/m ²)	引張強度 (N/mm²)	弹性係数 (N/mm ²)	破断伸度 (%)
炭素	300	3400	2.45×10 ⁵	1.5
アラミド	280	2060	1.18×10 ⁵	1.8
ビニロン	285	2000	4.30×10 ⁴	4.8

	圧縮 (N/n	静弾性係数 (N/mm ²)		
コンクリート	27	2.30×10⁴		
鉄筋	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	
軸方向鉄筋 SD345 D13	374	566	1.80×10 ⁵	
せん断補強筋 SD345 D6	310	462	1.69×10⁵	

表-1.2.1.3 使用材料の物性値

e) 補修方法

補修時および補修後の試験体を図-1.2.1.2に示す。補修方法は、1次載荷を行った後,連 続繊維シートをせん断スパンに一層巻き立て,梁上面に150mmの継手長を設け補修を行い、 6日間気中養生した。



図-1.2.1.2 補修時および補修後の試験体

f) 載荷方法

図-1.2.1.3に供試体設置時の様子を示す。載荷は50tアムスラー型万能試験機を使用し、 2点集中の単調載荷を行った。斜めひび割れ発生後、10kN毎にひび割れ進行の確認および 斜めひび割れ幅の測定を行った。載荷時は、荷重、鉛直変位、軸方向鉄筋ひずみおよびせ ん断補強筋ひずみを適宜測定した。



図-1.2.1.3 載荷および測定の様子

(3) 損傷度の設定

a) 損傷度:小

日本道路協会刊行「道路震災対策便覧(震災復旧編)」の被災度判定表¹⁾(表-1.2.1.4) より,被災度B:中被害における斜めひび割れ貫通(残留ひび割れ幅W<0.5mm)を再現する ため,斜めひび割れ発生後,せん断補強筋が初期降伏ひずみ1830µ(事前に鉄筋引張試験で 確認)に到達した時点で除荷し,残留ひび割れ幅から判定した。

b) 損傷度:大

被災度B:中被害における斜めひび割れ幅(残留ひび割れ幅0.5mm≦W<2mm)を再現する ため,最大荷重到達後も載荷を継続させ,最大荷重の80%に低下した時点で除荷し(図-1.2.1.4参照),残留ひび割れ幅から判定した。



表-1.2.1.4 被災度判定表¹⁾

注) Py:降伏耐力 Pu:終局耐力 δy:降伏変位 δu:終局変位 δ:最大履歷変位

(4) 実験結果と考察

各試験体の最大荷重,補修効果,および破壊形態を表-1.2.1.5 に示す。ここで、せん断耐力は、土木学会刊行「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針²⁾」に基づき式(1.2.1.1)~式(1.2.1.5)により算出した。なお、本実験では軸方向圧縮力を作用させないため、 V_c は二羽式³⁾により算出した。

$$V_{fy} = V_c + V_s + V_f$$
(1.2.1.1)

ここに、V_{fy}:連続繊維シートにより補修補強された棒部材のせん断耐力(kN) V_c: せん断補強鋼材および連続繊維シートを用いない棒部材のせん断耐力(kN) V_s: せん断補強鋼材により受け持たれるせん断耐力(kN) V_f: 連続繊維シートにより受け持たれる棒部材のせん断耐力(kN)

$$V_c = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{vc} \cdot b_w \cdot d \tag{1.2.1.2}$$

ここに,
$$f_{vc} = 0.2 \cdot \sqrt[3]{f'_c}$$
 (N/mm²) ただし, $f_{vc} \le 0.72$ (N/mm²)
 $\beta_d = \sqrt[4]{1000/d}$ ただし, $\beta_d > 1.5 \ bar{a}$ なる場合は 1.5 $\ bar{a}$ o
 $\beta_p = \sqrt[3]{100 p_w}$ ただし, $\beta_p > 1.5 \ bar{a}$ bar{a} bar{a} theorem (nm)
 $d: 有効高さ(mm)$
 $a: theorem (nm)$
 $p_w: 引張鉄筋比$
 $f'_c: = v / J J - F OEE 縮強度(N/mm2)$

$$V_s = \left[A_w \cdot f_{wv} \left(\sin \alpha_s + \cos \alpha_s\right) / s_s\right] \cdot z \tag{1.2.1.3}$$

ここに、A_w:区間 ss におけるせん断補強筋の総断面積(mm2)

- f_{wv} : せん断補強筋の引張降伏強度(N/mm²)
- α_s : せん断補強筋が部材軸となす角度(°)
- *s*_s: せん断補強筋の配置間隔(mm)
- z: 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材の図心までの距離で,一般に d/1.15 としてよい。

$$V_f = K \cdot \left[A_f \cdot f_{fu} \left(\sin \alpha_f + \cos \alpha_f \right) / s_f \right] \cdot z$$
(1.2.1.4)

$$R = \left(\rho_f \cdot E_f\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{f_{fu}}{E_f}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{f'_c}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad \text{for } \mathcal{E} \cup , \quad 0.5 \leq R \leq 2.0$$

- $\rho_f = A_f / (b_w \cdot s_f)$
- ここに、 A_f : 区間 s_f における連続繊維シートの総断面積(mm^2)
 - *s_f*:連続繊維シートの配置間隔(mm)
 - $f_{fu}: 連続繊維シートの引張強度(N/mm²)$
 - E_f : 連続繊維シートの弾性係数(kN/mm²)
 - a_f : 連続繊維シートが部材軸となす角度(°)
 - z: 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材の図心までの距離で,一般に d/1.15 としてよい(mm)

表-1.2.1.5内の補修効果は,補修後(2次載荷)の最大荷重を補修前(1次載荷)の除荷時荷重 で除した値である。曲げ耐力は,土木学会コンクリート標準示方書「設計編」⁴⁾に基づき算 出した。

	1 次載荷					2 次載荷		
試験体	試験体 計算値		実験値	残留		実験値	補修効果	広 歯 恥 能
No.	せん断耐力	曲げ耐力	除荷時荷重	ひび割れ幅	損傷度	是十古舌	(2 次載荷 / 1 次載荷)	吸收力忍
	(kN)	(kN)	(kN)	(mm)		取八何主		
1			120.1	-		-	-	せん断
2			-	-	400	156.6	-	曲げ
3	1		-	-	**	162.5	-	曲げ
4			-	-		140.5	-	せん断
5		84.5 114.6	126.7	0.15	小	153.1	1.21	曲げ
6	84.5		110.0	0.25		162.5	1.48	曲げ
7]		105.6	0.20		141.5	1.34	せん断
8	1		125.0	0.60	大	167.1	1.34	曲げ
9			136.1	0.60		161.4	1.19	曲げ
10			114.1	1.10		125.0	1.10	せん断
11			120.0	0.60		165.9	1.38	曲げ

表-1.2.1.5 各試験体の最大荷重および破壊形態

無補修,無損傷の試験体No.1の荷重-変位関係を図-1.2.1.4に示す。試験体No.1は,荷 重が64.5kNで斜めひび割れが発生し,せん断補強筋の降伏後も耐力が増加し,最大荷重は 120.1kNであった。破壊形態はせん断補強筋の降伏後のせん断破壊となった。



a) 損傷度の影響

・無損傷

No.2, No.3, No.4の荷重-変位関係を図-1.2.1.5, 破壊状況を図-1.2.1.6に示す。 無損傷であるNo.2~.4はいずれもNo.1と比較し,最大耐力が向上した。No.2, No.3の 破壊形式は曲げ破壊であり,主筋降伏後荷重が緩やかに増加し,コンクリート上縁が 圧壊したため変位25mmで試験を終了した。No.4の破壊形式はせん断破壊であり,主筋 降伏前に帯筋が降伏し,シートが剥離する前に,荷重が120kN程で破断した。



図-1.2.1.5 荷重-変位関係(No.2, No.3, No.4)


図-1.2.1.6 破壊状況(No.2, No.3, No.4)

・損傷度:小

No.5, No.6, No.7の荷重-変位関係を図-1.2.1.7, 破壊状況を図-1.2.1.8に示す。 損傷度:小に関しても全ての供試体において最大耐力が向上した。No.5, No.6の破壊 形式は曲げ破壊であり、コンクリート上縁が圧壊したため試験を終了した。これらは No.2, No.3と同様の挙動を示し、No.7の破壊形式はNo.4と同様に主筋降伏前にシート が破断し、せん断破壊となった。以上より、損傷度:小では無損傷と比較して、損傷 度の相違による影響はみられなかった。



図-1.2.1.7 荷重-変位関係(No.5, No.6, No.7)



図-1.2.1.8 破壊状況(No.5, No.6, No.7)

・損傷度:大

No.8, No.9, No.10の荷重-変位関係を図-1.2.1.9, 破壊状況を図-1.2.1.10に示す。 損傷度:大に関しても最大耐力は向上した。No.8, No.9の破壊形式は無損傷,損傷度: 小と同様の曲げ破壊であり, No.10はせん断破壊であった。以上より,炭素およびアラ ミドは曲げ破壊,ビニロンはシート破断によるせん断破壊であったが,損傷度の相違 による破壊形式への影響はみられなかった。また,炭素およびアラミドは,せん断補 修効果を有することが確認された。



図-1.2.1.9 荷重-変位関係(No.8, No.9, No.10)



図-1.2.1.10 破壊状況(No.8, No.9, No.10)

b) 連続繊維シートの影響

各損傷度の荷重-変位関係より、炭素とアラミドは同様の挙動を示していることから、同等の補修効果があると考えられる。No.4, No.7, No.10の補修材料であるビニロンは、表-2に示したようにシート自体の弾性係数が他のシートよりも低く、コンクリートとほぼ同等であるため、斜めひび割れ発生後、試験体の変形にシートが追従して破断に至り、補修効果が小さくなったと考えられる。ただし、表-1.2.1.5に示す補修効果(補修後の最大荷重を補修前の最大荷重で除した値)は、1.0を上回っており、耐荷力の回復効果はあると考えられる。

c) 従来工法との比較

連続繊維シートは炭素を使用し、水硬性ポリウレタン樹脂およびエポキシ樹脂にて接着 した試験体No.8,11の荷重-変位関係を図-1.2.1.11,破壊状況を図-1.2.1.12に示す。な お、いずれも損傷度は大である。両者とも破壊形態は曲げ破壊であり、軸方向鉄筋降伏後、 荷重が緩やかに増加し、コンクリート上縁が圧壊したため変位15mmにて試験を終了した。

両者を比較すると、2次載荷開始時の荷重増加の挙動が若干異なっているが、これはそれ ぞれの樹脂の硬度の相違が、補修された試験体の剛性に影響を及ぼしているためと考えら れる。しかし、表-1.2.1.5に示す補修効果(補修後の最大荷重を補修前の最大荷重で除した 値)では、No.8が1.34、No.11が1.38と本実験の条件下では両者とも同程度の補修効果を有し ていることが確認できた。



図-1.2.1.11 荷重-変位関係(No.8, No.11)



図-1.2.1.12 破壊状況(No.8, No.9, No.10)

d) 施工時間の比較

従来の工法(No.11)と本開発工法の施工工程を図-1.2.1.13に示す。損傷した試験体の補 修に要する施工時間を比較すると従来の工法は、約5時間費やしたのに対し、本開発工法は 樹脂を連続繊維シートに含浸させる工程を含めても約30分と1/10の時間で施工が終了でき、 被災後の迅速復旧工法として有効な工法であることが確認できた。



(5) 小型梁試験体による補修効果の検証のまとめ

本検討では、地震災害による損傷後の補修効果を検証するため、損傷度の影響、連続繊 維シートの影響について検討し、エポキシにより補修した試験体を用いて従来工法との比 較を行った。本検討で得られた知見を以下に記す。

- 炭素およびアラミドに水硬性ポリウレタン樹脂を含浸させて補修材料とした場合,損 傷度の大小に関わらず,エポキシ樹脂を用いた場合と同等の補修効果を有する。
- 2) 本実験の条件下では,損傷した試験体の補修に要する施工時間を従来工法の1/10に短縮可能である。

なお,以降の載荷試験においては,施工性等を考慮し連続繊維シートはアラミドを用い ることとした。

1.2.2 大型梁試験体による構造特性の把握

(1) はじめに

本項では、含浸接着樹脂の特性がせん断補強効果に及ぼす影響を把握するため、補強後 もせん断破壊が先行するように設計した RC 梁を用いて載荷試験を行った。連続繊維シー トが受け持つせん断耐力に含浸接着樹脂が及ぼす影響、付着特性が補強後のせん断耐力に 及ぼす影響、各種条件下におけるせん断補強効果の把握についてそれぞれ検討した。

(2) 実験概要

a) 試験条件

試験条件とその試験に用いた樹脂を以下に記す。

- ◆ No.1:無補強(コントロール)
- ◆ No.2:従来工法(エポキシ)
- ◆ No.3:連続繊維シートが受け持つせん断耐力の算定(軟性型)
- ◆ No.4:連続繊維シートが受け持つせん断耐力の算定(硬性型)
- ◆ No.5: 継手部補強(硬性型)
- ♦ No.6:無付着状態(軟性型)
- ◆ No.7:損傷の影響(軟性型)
- ◆ No.8: 早期材齢の影響(軟性型)
- ◆ No.9:巻立て方法の影響(軟性型)

b) 試験体諸元

試験体諸元を表-1.2.2.1 に示す。1.2.1 より,連続繊維シートはアラミド繊維シート(公称値,目付量 280g/m²,引張強度 2060N/mm²,弾性率 1.18×10⁵)を用いた。

≕睦は	劫胆	油結繊維	有効高さ	スパン		軸方向鉄筋		せん断補強筋	
武职1本 No.	種類	シート種類	d (mm)	a (mm)	a/d	材質 径	鉄筋比 (%)	材質 径	鉄筋比 (%)
1	-	-							
2	エポキシ								
3	軟性型		300		3	SD490	3.06	SD295A	0.15
4	硬性型	硬性型							
5				900					
6		7721				023		00	
7									
8	카르오								
9									

表-1.2.2.1 試験体諸元

c) 試験体寸法

試験体寸法を図-1.2.2.1,連続繊維シートのひずみゲージ位置を図-1.2.2.2,図-1.2.2.3 にそれぞれ示す。隅角部は、応力集中による連続繊維シートの破断の防止、施工性 の向上を目的に R=20mm の面取りを施した。ひずみゲージは、コンクリート圧縮縁、軸方 向鉄筋、せん断補強筋、連続繊維シートに適宜配置し、変位計は、中立軸線上の試験体中 央、載荷点、支点にそれぞれ設置した。



図-1.2.2.1 試験体寸法(配筋,変位計・ひずみゲージ位置)



図-1.2.2.2 巻き立て後のひずみゲージ位置図(No.2~No.8)



図-1.2.2.3 巻き立て後のひずみゲージ位置図(No.9)

d) 使用材料

・コンクリート

コンクリートは、レディーミクストコンクリート(21-12-20H)を用いた。示方配合を 表-1.2.2.2 に示す。強度試験用の供試体は、打設の際に作製し現場封緘養生を施した。 材齢 14日(No.2), 16日(No1, No.4), 26日(No.3), 49日(No.7, No.8, No.9), 56日(No.5, No.6)に、コンクリートの圧縮強度試験(JIS A 1108)、静弾性係数試験(JIS A 1149)、割 裂引張強度試験(JIS A 1113)をそれぞれ実施した。静弾性係数試験結果を図-1.2.2.4 に示す。

表-1.2.2.2 示方配合表

W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)							
(%)	(%)	W	С	S1	S2	G	AE		
60.5	46.8	175	290	630	210	974	2.61		



⁽S1: 砕砂, S2: 陸砂)

・鉄筋

鉄筋はJISA2241に準拠し引張試験を行った。試験結果を図-1.2.2.5に示す。なお, せん断補強筋 D6 では明確な降伏点が観察されなかったため, 0.2%オフセット法にて 降伏応力を算出した。



図-1.2.2.5 応力-ひずみ関係(鉄筋)

・連続繊維シート

連続繊維シートの引張試験はJSCE-E 541-2007に準拠して行った。詳細については, 1.1.2, (2), a)にて前述しているためここでは省略する。

・使用材料の物性値

使用材料の各物性値を表-1.2.2.3に示す。

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)	
No.1	32.5	3.04	2.43×10 ⁴	
No.2	30.6	2.91	2.35×10 ⁴	
No.3	33.5	3.17	2.45×10 ⁴	
No.4	32.5	3.04	2.43×10 ⁴	
No.5	38.1	3.53	2.42×10 ⁴	
No.6	38.1	3.53	2.42×10 ⁴	
No.7	35.9	3.31	2.54×10 ⁴	
No.8	35.9	3.31	2.54×10 ⁴	
No.9	35.9	3.31	2.54×10 ⁴	
A4 64	降伏応力	引張強度	弾性係数	
鉃筋	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	
軸方向鉄筋 SD490 D29	523	677	1.87×10 ⁵	
せん断補強筋 SD295A D6 (0.2%offset)	349	506	1.82×10⁵	
連続繊維シート	含浸樹脂	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	
	エポキシ	2610	1.28×10 ⁵	
アフミト 日付景 280g/m ²	軟性型	2460	1.44×10 ⁵	
口的重 200g/m	硬性型	2660	1.43×10 ⁵	

表-1.2.2.3 使用材料の物性値

e) 補強方法

標準的な補強方法は,連続繊維シートをせん断スパンに1層巻き立て,梁上面にて200mm の継手(定着)長を設け,7日間(No.8は24時間)気中養生した(図-1.2.2.6)。例外として, No.5 は継手部の上にさらに1層連続繊維シートをエポキシにて貼り付け継手部を補強(図 -1.2.2.7)し,No.6は,施工面を無接着状態にするため厚さ0.01mmのポリエチレンフィル ムを2層巻き立てた(図-1.2.2.8)。また,No.9は,連続繊維シートの配置間隔を標準の2 倍(ゼブラ巻き)にし,さらに2層巻き立てた(図-1.2.2.9)。



図-1.2.2.6 巻立て補強試験体



図-1.2.2.7 No.5 継手部補

図-1.2.2.8 No.6 無接着状態



図-1.2.2.9 2層ゼブラ巻き

f) 載荷方法

載荷は、100tfの万能試験機(図-1.2.2.10)を使用し、2 点集中の単調載荷(図-1.2.2.11) を行った。支点は試験体の回転変形および軸方向変形を拘束しないよう、支点板の間に厚 さ 2mm のテフロンシートを配置した移動支持および支点板を 2 枚重ねた回転支持とした (図-1.2.2.12)。また、目視によるひび割れの観察を行うとともに、荷重、鉛直変位、軸方 向鉄筋ひずみ、せん断補強筋ひずみ、連続繊維シートひずみを適宜測定した(図-1.2.2.13)。



図-1.2.2.10 万能試験機

図-1.2.2.11 載荷治具





図-1.2.2.12 支点板(上:移動支持,下:回転支持)

図-1.2.2.13 測定様子

(3) 実験結果と考察

表-1.2.2.4 に各試験体耐力の計算値および実験値を示す。なお,表-1.2.2.4 に示す計算値は,1.2.1 と同様に式(1.2.1.1)~式(1.2.1.5)により求めた。表-1.2.2.4 内の CAL は計算値を表し, EXP は実験値を表している。せん断耐力の計算値は,材料試験結果(本項(2), d))を用いて算出しており,棒部材のせん断耐力 V_{yCAL} は修正トラス理論に基づき V_{cCAL} と V_{sCAL} の和で表わしている。

=+ #4 /+			計算	算値(kN)			実験値(kN)	
<u> 訊</u> 験1本		t	せん断耐に	<u>ታ</u>		曲げ耐力	せん断耐力	破壊形態
	V_{cCAL}	V_{sCAL}	V _{yCAL}	V _{fCAL}	V _{fyCAL}	M _{uCAL}	$V_{fyEXP}(V_{yEXP})$	
1	255.9	76.8	332.7	-	-	726.2	355.7	
2	250.8	76.8	327.6	338.4	666	723.4	780.1	
3	258.5	76.8	335.3	376.4	711.7	727.6	757.3	
4	255.9	76.8	332.7	373.8	706.5	726.2	649.9	
5*	269.8	76.8	346.6	401	747.6	734.4	768.1	せん断
6*	269.8	76.8	346.6	395.6	742.2	734.4	734.5	
7*	264.5	76.8	341.3	386.8	728.1	731.2	767.1	
8*	264.5	76.8	341.3	386.8	728.1	731.2	759.8	
9	264.5	76.8	341.3	386.8	728.1	731.2	685.5	

表-1.2.2.4 各試験体耐力

*No.5~8 は特殊な条件を設定しているため、本来、連続繊維シートが受け持つせん断耐 力を算定できないが、比較のため通常条件と同様に算定し記載している。

a) 連続繊維シートが受け持つせん断耐力に含浸接着樹脂が及ぼす影響

含浸接着樹脂の種類が,連続繊維シートが受け持つせん断耐力 V_fに与える影響を把握するため,試験体 No.1~No.4の結果を用いて比較検討する。

・破壊性状および繊維シートひずみ

No.1~No.4 の終局時の破壊状況を図-1.2.2.14 に示す。No.1(無補強)は, 斜めひび 割れが圧縮縁に貫通した時点で荷重が低下した(図-1.2.2.21 参照)。その後も載荷を 継続したが, せん断補強筋のひずみのみが増加し始めたため変位 20mm にて試験を終 了した。



図-1.2.2.14 No.1~No.4の破壊状況

No.2(エポキシ)の繊維シートひずみ-変位関係を図-1.2.2.15,荷重-コンクリート・軸方向鉄筋ひずみ関係を図-1.2.2.16に示す。凡例で示す 300mm~900mm は試験体中央からの距離で,破壊したせん断スパン側のゲージ位置を表している。No.2 は,変位 20mm 付近より荷重曲線の傾きが変化するとともに,繊維シートのひずみが全体的に増加していることから,繊維シートが荷重を受け持ち始めたと考えられた。設計で用いるモデル化されたコンクリート圧縮縁の終局ひずみは 3500µ¹⁾だが,荷重 650kN付近で終局ひずみ 3500µ に達しているが荷重は低下せず,外観からも圧壊が観察されなかったため曲げ圧縮破壊は生じていないと考えられた。その後,荷重とともに繊維シートのひずみは増加し続け,変位 40mm を超えたところで爆裂と同時にシート破断した(図-1.2.2.14)。



図-1.2.2.16 荷重-コンクリート・軸方向鉄筋ひずみ関係(No.2)

No.3(軟性型)の繊維シートひずみ-変位関係を図-1.2.2.17,荷重-コンクリート・ 軸方向鉄筋ひずみ関係を図-1.2.2.18 に示す。No.3 は,変位 20mm 付近で一度荷重が 低下した際に、繊維シートのひずみが全体的に大きく増加し、荷重の持ち直しととも に繊維シートのひずみも緩やかに増加している。また、No.2 と同様に、荷重 650kN 付 近でコンクリート圧縮縁の終局ひずみ 3500µ に達しているが荷重は低下せず、外観か らも圧壊が観察されなかったため曲げ圧縮破壊は生じていないと考えられた。その後、 変位 37mm 付近から破断音とともに徐々にシートの破断がみられ、継手部の剥離と同 時に終局に至った(図-1.2.2.14)。No.2 と比較すると、繊維シートのひずみが増加し ていない点、爆裂せず徐々に破断した点など異なる挙動が観察されたが、これは 1.1.2, (4)、表-1.1.2.1 より付着および接着強度の強度差が供試体の拘束に影響を及ぼして いるためと考えられる。



図-1.2.2.18 荷重-コンクリート・軸方向鉄筋ひずみ関係(No.3)

No.4(硬性型)の繊維シートひずみ-変位関係を図-1.2.2.19,荷重-コンクリート・ 軸方向鉄筋ひずみ関係を図-1.2.2.20 に示す。No.4 は,変位 10mm 付近で繊維シート のひずみが全体的に増加しているが,変位 16mm で継手部が剥離破壊し終局に至った (図-1.2.2.14)。No.2 および No.3 と比較すると,変位が小さい段階で繊維シートのひ ずみが増加し始めているが,最大で 7000µ 程度と繊維シートの性能を充分に発揮でき ずに継手部破壊していることが確認できる。これは 1.1.2, (4),表-1.1.2.1 より界面 剥離破壊エネルギーおよび継手強度が低いことが要因であると考えられた。



図-1.2.2.19 繊維シートひずみ-変位関係(No.4)



図-1.2.2.20 荷重-コンクリート・軸方向鉄筋ひずみ関係(No.4)

荷重-変位関係

図-1.2.2.21にNo.1~No.4の荷重-変位関係を示す。無補強のNo.1と補強有のNo.2 ~4 を比較すると、大幅に最大耐力が向上していることが確認できる。No.2 と No.3 を比較すると、最大荷重および最大荷重時の変位に若干の差はあるが、ほぼ同様の挙 動を示していることが分かる。No.3 と No.4 を比較すると、最大荷重だけでなく、最 大荷重時の変位にも大きな差がみられる。



図-1.2.2.21 荷重変位関係(No.1~No.4)

・連続繊維シートが受け持つせん断耐力

表-1.2.2.5 に V_{fEXP} および V_f の実験値と計算値の比を示す。 V_{fEXP} は、修正トラス理 論に基づき No.2~No.4 のせん断耐力 V_{fyEXP} から無補強試験体 No.1 のせん断耐力 V_{fEXP} を差し引いた値である。No.1 のせん断耐力 V_{fEXP} を V_y として用いた理由は、No.2~No.4 の計算値 V_{yCAL} よりも高い実験値 V_{yEXP} を示しており、計算値を用いるよりも、より正 確に V_f を算定できると考えられたためである。また、計算値 V_{fCAL} との比で表わすこ とで V_{fEXP} を評価した。No.2 の場合、1.25 と計算値より安全側に評価できており、No.3 の場合も 1.07 と、No.2 と比較すると僅かではあるが計算値より安全側に評価できて いる。しかし、No.4 では 0.79 と計算値を下回る結果となった。これは、継手部破壊 により連続繊維シートの性能を充分に発揮できなかったためと考えられる。

これらの実験結果より、軟性型の様に、付着や接着強度が高くなくとも、継手強度 が引張強度に近い数値であれば計算値よりも安全側に評価できる。一方、硬性型の様 に、付着や接着強度が高くとも、継手強度が引張強度の 1/5 程度だと計算値を満足し ない結果が得られた。

試験体 No.	V _{fyEXP} - V _{yEXP} (kN) V _{fEXP}	実験値 / 計算値 / V _{fCAI}
2	424.4	1.25
3	401.6	1.07
4	294.2	0.79

表-1.2.2.5 連続繊維シートが受け持つせん断耐力

b) 付着特性が補強後のせん断耐力に及ぼす影響

前項より,硬性型は継手部が脆弱であったため連続繊維シートの性能を発揮できずに終 局に至った。そこで,硬性型の継手部を補強することにより終局状態および終局に至るま での挙動がどのように変化するか確認を行い,また,軟性型を用いて,継手による拘束の みが有効な状況下での挙動を確認することにより,せん断耐力に最も寄与する含浸接着樹 脂の物性を確認した。

・破壊性状および繊維シートひずみ

No.5, No.6の終局時の破壊状況を図-1.2.2.22に示す。



図-1.2.2.22 No.5, No.6の破壊状況

No.5(継手部補強)の繊維シートひずみ-変位関係を図-1.2.2.23,荷重-コンクリート・軸方向鉄筋ひずみ関係を図-1.2.2.24 に示す。No.5 は,変位 8mm 付近から 450mm および 600mmの繊維シートのひずみが増加し始め,変位 23mm で最大荷重となり,変位 26mm で継手部が剥離破壊し終局に至った(図-1.2.2.22)。継手部補強前の No.4 と比較すると,最大荷重時の繊維シートのひずみが 11400µ 程度となり,補強することで繊維シートの性能を発揮できるようになった。しかし,依然継手部が剥離破壊に至ったのは,補強を施しても大幅に継手強度は増加せず,他と比較しても継手強度が低いためと考えられた(図-1.2.2.25)。



図-1.2.2.23 繊維シートひずみ-変位関係(No.5)



図-1.2.2.24 荷重-コンクリート・軸方向鉄筋ひずみ関係(No.5)



No.6(無付着状態)の繊維シートひずみ-変位関係を図-1.2.2.26,荷重-コンクリート・軸方向鉄筋ひずみ関係を図-1.2.2.27 に示す。No.6 は、変位 5mm を超えてから 繊維シートのひずみが増加し始め、その後ほぼ線形に増加していき、変位 32mm で最 大荷重となり、変位 38mm から徐々にシート破断や継手部の剥離が発生し、変位 42mm で終局に至った(図-1.2.2.22)。他の条件と比較し、繊維シートのひずみがほぼ線形に 増加したのは、コンクリートとの付着が無い状態で拘束しているため、供試体の変形 の抑制に貢献できず、供試体の変形とともに繊維シートに引張荷重が作用したためと 考えられた。



図-1.2.2.26 繊維シートひずみ-変位関係(No.6)



図-1.2.2.27 荷重-コンクリート・軸方向鉄筋ひずみ関係(No.6)

・荷重-変位

図-1.2.2.28 に No.3~No.6 の荷重-変位関係を示す。継手部補強前の No.4 と継手 部補強後の No.5 を比較すると,最大荷重および最大荷重時の変位が大幅に増加してい ることが確認できる。接着有りの No.3 と接着無しの No.6 を比較すると,最大荷重お よび最大荷重時の変位に若干の差がみられる。また,250kN を超えてから曲線の傾き が大きな差が生じている。No.3, No.5, No.6 を比較すると,最大荷重にそこまで大き な差はみられないが,最大荷重時の変位には大きな差がみられる。



図-1.2.2.28 荷重変位関係(No.3~No.6)

・考察

継手強度がせん断補強効果に及ぼす影響について考察する。図-1.2.2.29 に継手強 度の影響を示す。図中赤枠で囲まれている領域は,硬性型を継手部補強したことによ り得られた効果を表している。硬性型継手部補強(No.5)と軟性型(No.3)の載荷結果を比 較すると,最大荷重は同程度であるが終局変位に大きな差がみられる。これは,硬性 型継手部補強の継手強度が軟性型の1/2.5 程度と低いことが要因であると考えられた。 つまり,青枠で囲まれている領域は,継手強度の差が荷重-変位関係へ及ぼす影響を 表していると考えられる。

次に、付着性能がせん断補強効果に及ぼす影響について考察する。図-1.2.2.30に 付着状態の影響を示す。なお、緑枠で囲まれる領域は付着状態の差を表す。付着の有 無で初期の領域に開きがみられるが、終局に近づくにつれ領域が狭まり、終局時には 最大荷重および最大荷重時の変位に大きな差はみられない。これにより、シートーコ ンクリート界面の付着がない状況下でも、最低限、継手強度さえ確保されていればせ ん断補強効果は得られると考えられた。 以上の実験結果より,継手強度が最もせん断補強効果に寄与しており,物性値とし て引張強度に近い強度を発現しているか確認することが,連続繊維シートを巻き立て てせん断補強する際の重要な判断材料になり得ると考えられた。



図-1.2.2.30 付着状態の影響

c) 各種条件下におけるせん断補強効果の把握

これまでの載荷結果より,硬性型と比較して軟性型の方が含浸接着樹脂として性能が高いことを把握できた。そこで,軟性型を用いて各種条件下における載荷試験を行った。

・損傷の影響

損傷後の補修効果を検証するため、1 次載荷によりせん断損傷を与え、連続繊維シ ートを巻立てて補修を行い、7日間気中養生後、2 次載荷を行った。与える損傷は、日 本道路協会刊行「道路震災対策便覧(震災復旧編)²⁾」の被災度判定表より、被災度 A: 大被害、斜めひび割れ幅 W≧2mm を再現するため、No.1 の載荷結果を基に、最大荷 重到達後も載荷を継続させ、最大荷重の 90%に低下した時点で除荷し、残留ひび割れ 幅から判定した。

1次載荷

1次載荷の荷重-変位関係を図-1.2.2.31, せん断補強筋ひずみを図-1.2.2.32 に示 す。1次載荷は, せん断補強筋降伏後(図-1.2.2.32)も荷重が増加し, 最大荷重 425.9kN でせん断破壊を生じた。その後, 最大荷重の約 90%で除荷し, 残留ひび割れ幅を測定 した結果, 幅 3.5mm と被災度 A: 大被害の条件を満たしていることを確認した(図-1.2.2.33)。



図-1.2.2.31 荷重-変位関係(No.7, 1次載荷)



図-1.2.2.32 せん断補強筋ひずみ(No.7, 1次載荷)



図-1.2.2.33 1次載荷終了時の状況

2次載荷

2 次載荷の破壊状況を図-1.2.2.34,繊維シートひずみ-変位関係を図-1.2.2.35, 荷重-コンクリート・軸方向鉄筋ひずみ関係を図-1.2.2.36 にそれぞれ示す。2 次載 荷は,載荷開始時から繊維シートのひずみが増加し始めているが,これはひび割れお よびせん断補強筋の降伏により初期から繊維シートにも荷重が分担されているためと 考えられた。その後,荷重とともに繊維シートのひずみは増加し続け,変位 39mm で 最大荷重,変位 42mm でシート破断により終局に至った。

荷重変位関係を図-1.2.2.37 に示す。なお,比較のため No.3 の結果も記載している。 1 次載荷の影響により,変位は多少異なるが,ほぼ同様の挙動を示していることが確 認できる。これは,損傷により斜めひび割れの拡大,せん断補強筋の降伏を受けたと しても,ひび割れは繊維シートと樹脂が拘束し,せん断補強筋は破断まで耐力に貢献 するため本実験の様な補修効果が得られたと推察された。

実験結果より,軟性型を含浸接着樹脂として用いた場合,被災度判定表²⁾で示される被災度 A:大被害(斜めひび割れ幅 W≧2mm)の損傷であれば補修効果が期待できると考えられた。



図-1.2.2.34 2次載荷の破壊状況



図-1.2.2.35 繊維シートひずみ-変位関係(No.7, 2次載荷)



図-1.2.2.36 荷重-コンクリート・軸方向鉄筋ひずみ関係(No.7, 2次載荷)



図-1.2.2.37 荷重-変位関係(No.7, 2次載荷)

早期材齢の影響

水硬性ポリウレタン樹脂を用いる最大の目的は,迅速復旧を可能にすることである。 そこで、早期材齢のせん断耐力の検証を行った。なお、本実験における早期材齢は、 施工後24時間と設定した。

終局時の破壊状況を図-1.2.2.38, 繊維シートひずみ-変位関係を図-1.2.2.39, 荷 重-コンクリート・軸方向鉄筋ひずみ関係を図-1.2.2.40 にそれぞれ示す。No.8 は, 変位 5mm から繊維シートのひずみが増加し始め, 変位 28mm で最大荷重となり, その 後, ゆっくりと継手部が剥離していきシート破断とともに終局に至った。

荷重-変位関係を図-1.2.2.41 に示す。なお、比較のため No.1 および No.3 の結果 も記載している。約 400kN を超えたところから曲線の傾きに差が生じているが、No.3 と最大荷重はほぼ同程度であった。最大荷重時の変位を比較すると、大きな差がみら れるが、これは図-1.2.2.42 に示されるように、施工後 24 時間では、まだ硬化途中で あり継手強度が材齢 7 日ほど発現されていないことが原因であると考えられた。

実験結果より,軟性型を用いて補強した場合,施工後24時間時点で耐力の向上は期待できるが,最大荷重時の変位は材齢7日時点ほど増加しないことが確認された。



図-1.2.2.38 No.8 の破壊状況



図-1.2.2.39 繊維シートひずみ-変位関係(No.8)



図-1.2.2.40 荷重-コンクリート・軸方向鉄筋ひずみ関係(No.8)



・巻立て方法の影響

連続繊維シートは高価であるため、対象構造物に応じて適切な巻立て方法、層数を 選定する必要がある。そこで、巻立て方法をゼブラ巻き、層数を2層としてそれぞれ の影響を検討した。なお、連続繊維シートの配置間隔を2倍にし、2層巻き立てたた め補強量は No.3 と同等である。

終局時の破壊状況を図-1.2.2.43, 繊維シートひずみ-変位関係を図-1.2.2.44, 荷 重-コンクリート・軸方向鉄筋ひずみ関係を図-1.2.2.45 にそれぞれ示す。No.9 は, 変位 5mm から繊維シートのひずみが増加し始め,変位 20mm で斜めひび割れが圧縮縁 に貫通し,変位 40mm を超えてから徐々に繊維シートが破断していき終局に至った。

荷重-変位関係を図-1.2.2.46 に示す。なお、比較のため No.3 の結果も記載してい る。変位 20mm で斜めひび割れが圧縮縁に貫通した時点で荷重が低下し、最大荷重お よび最大荷重時の変位に大きな差が生じた。これはゼブラ巻きの間隔が広く、ひび割 れの進行を抑制できなかったことが原因であると考えられた。また、2 層では継手部 の剥離が生じなかった。

2 層ゼブラ巻きで巻き立てた際の計算値 V_{fCAL} は 386.8kN だが, 実験値 (V_{fyEXP} - V_{yCAL}) V_{fEXP} は 344.2kN と計算値を下回る結果となった。これは、前述した通り、 ゼブラ巻きの間隔が広く斜めひび割れが圧縮縁に貫通したためと考えられた。

実験結果より,貼付方法をゼブラ巻きとする場合は配置間隔を考慮する必要があり, 本実験のようにシート間隔が広い場合は実験値が計算値を下回る可能性が高い。層数 を2層とした場合,継手部が補強され剥離は生じにくくなることが確認された。



図-1.2.2.43 No.9の破壊状況



(4) 大型梁試験体による構造特性の把握のまとめ

本項では,含浸接着樹脂の特性がせん断補強に及ぼす影響を把握するため,各実験要因 について検討を行った。本項で得られた知見を以下に示す。

- 樹脂の特性は異なるが、エポキシ樹脂と軟性型水硬性ポリウレタン樹脂はほぼ同様の 荷重-変位関係を示す。但し、終局時の破壊状況は樹脂の拘束効果が影響していると 考えられる。
- 2) 修正トラス理論に基づき、連続繊維シートが受け持つせん断耐力を算定した場合、軟 性型水硬性ポリウレタン樹脂は計算値より安全側に評価可能だが、硬性型水硬性ポリ ウレタン樹脂は継手強度が不足しているため計算値を下回る。
- 3)連続繊維シートを用いてせん断補強する場合、含浸接着樹脂として水硬性ポリウレタン樹脂のせん断抵抗および変形性能が重要な特性となる。特に、継手強度が最もせん断耐力に寄与しており、継手強度の保有すべき物性値の目安として引張強度と同程度であることを確認することが、せん断補強に用いる含浸接着樹脂選定の判断材料になり得る。
- 4) 軟性型水硬性ポリウレタン樹脂を含浸接着樹脂として用いた場合,被災度判定表²⁾で 示される被災度A:大被害の損傷であれば補修効果が期待できる。
- 5) 軟性型水硬性ポリウレタン樹脂を用いてせん断補強した場合,施工後24時間でせん断 補強効果は得られる。但し,最大荷重時の変位は材齢7日に及ばない。
- 6) 貼付方法をゼブラ巻きとする場合には、連続繊維シートの配置間隔に留意する必要が ある。また、層数を2層とした場合、継手部の剥離は生じ難い。

1.3 FEMによる解析的検討

1.3.1 解析の概要

(1) 解析の目的

水硬性樹脂が含浸された連続繊維シートによるせん断補強を施したRC梁の載荷実験の 再現解析を行い、モデル化の方法について検討した。また、今後の樹脂開発の参考とする ことを念頭に、コンクリートとの付着特性および継手部の定着特性がせん断耐力および靱 性能に及ぼす影響について検討する。

(2) 解析ケース

実験再現解析の対象ケースとして,1.2.2で実施した大型梁試験体のうち,No.1(無補強), No.2(エポキシ),No.3(軟性型),No.4(硬性型),No.5(硬性型+継手部補強),No.6(軟性型+ 無付着)の計6ケースを対象とした。また,継手特性の影響に関する検討は,No.4(硬性型) を基本ケースとして,継手特性(継手強度および継手剛性)を段階的に向上させ,付着・接 着特性の影響に関する検討は,No.3(軟性型)を基本ケースとして,付着・接着特性(強度お よび剛性)を段階的に低下させたパラメトリック解析を行った。

1.3.2 解析モデル

(1) 有限要素メッシュ

図-1.3.2.1に示すように、コンクリートおよび載荷板は20節点六面体要素、繊維シート は8節点平板要素でモデル化し、繊維シート要素とコンクリート要素の間に16節点接合要素 を配置した。解析対象の対称性を考慮して、梁の中央から片側スパンを対象とした1/2モデ ルとした。

シートの継手部は、図-1.3.2.2に示すようにシート端部間に6節点接合要素を配置するこ とによって再現した。要素の位置を試験体隅角部とし、継手部の剥離が直接的にシート剥 離に繋がるモデルとした。接合要素の幅(=シート端部間距離)は初期段階でゼロであり、 両側のシートに引張力が作用することによって、接合要素幅が開口していくものである。 したがって、シートーシート間で相対変位が生じることによる影響は、本接合要素によっ て表現できると考えられる。実験の継手試験結果に基づき、接合要素が負担できる引張応 力上限値を設定した。

載荷は支点プレート下面の節点変位を拘束した状態で,載荷プレート上面の節点に鉛直 強制変位を与えた。なお,実験におけるアムスラーベース変形分については,曲げたわみ の実験結果の方を補正して扱うこととし,解析では考慮していない。



(灰色:鉄筋コンクリート,緑色:載荷プレート,黄色:連続繊維シート) 図ー1.3.2.1 解析に用いた有限要素メッシュ(左:無補強,右:全面補強)



図-1.3.2.2 連続繊維シート継手部の要素配置詳細

(2) 材料構成則および材料特性値

a) 鉄筋コンクリート

コンクリートの構成則として、福浦らによる非直交多方向固定ひび割れモデル(分散ひび 割れ)、岡村・前川らによる弾塑性破壊モデル+Elkashifらによる圧縮軟化モデル、出雲・ 島・安らによる引張剛性モデル、李らによるせん断伝達モデル(軟化考慮)を用い、鉄筋の 構成則として、申・Hamed・福浦らによるバイリニア型モデルを適用した。コンクリート および鉄筋の応力を重ね合わせることによって鉄筋コンクリートの応力とした。また、圧 縮および引張軟化特性は、破壊エネルギーに基づき要素寸法と材料強度に応じて変化させ た。入力した特性値を表-1.3.2.1に示す。

b) アラミド繊維シート

一方向材料の応力-ひずみ関係をフィッティングした線形弾性体としてモデル化した。 解析で入力した特性値を表-1.3.2.2に示す。

c) アラミド繊維シートの付着・接着・継手部

シートーシート間の接合要素,継手部の接合要素ともに,線形弾性としてモデル化した。 シートーシート間については,面内せん断力が付着強度に達するか,開口方向引張応力が 接着強度に達した時に,全ての方向の剛性が消失するものとした。また,シート継手部に ついては,継手長を200mmと与えた上で,開口方向引張応力が継手強度に達した時に,全 ての剛性が消失するものとした。解析で入力した特性値を表-1.3.2.3に示す。

d) 載荷プレート・支点プレート

梁に対して十分な剛性を持つよう,弾性係数200GPaの線形弾性体としてモデル化した。 また,プレートと試験体の間は節点共有 (剛結)とした。

試験体	静弹性係数	圧縮強度	引張強度
No.	(kN/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)
1	24.3	32.5	3.04 (2.34)
2	23.5	30.6	2.91 (2.25)
3	24.5	33.5	3.17 (2.39)
4	24.3	32.5	3.04 (2.34)
5	24.2	38.1	3.53 (2.60)
6	24.2	38.1	3.53 (2.60)
	・引張強度の)()内は	JSCE示方書
備考	の式に		
	より圧縮強	i 度から算定	こした値

表-1.3.2.1 コンクリートおよび鉄筋の特性値

话哲	降伏強度	引張強度	弾性係数	
1里 決	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(kN/mm^2)	
主鉄筋	500	677	197 2	
SD490-D29	525	0//	187.5	
帯鉄筋	240	506	102.0	
SD295-D6	549	506	182.0	
	 D6の降伏 	、強度は0.2%	オフセッ	
備考	Ъ			
	強度			

表-1.3.2.2 アラミド繊維シートの特性値(樹脂含浸状態)

種類	引張強度 (N/mm ²)	弹性係数 (kN/mm ²)
シート単体	2130	153
シート+エポキシ	2610	128
シート+軟性型	2460	144
シート+硬性型	2660	143

表-1.3.2.3 繊維シートの付着・接着・継手の特性値

		シートーコンクリー			・ト間シートーシート間				
	付着	「特性(せん断方□	句)	接着特性(法線方向) 付着特性(せ			せん断方向)		
種類	付着強度 (N/mm ²)	界面剥離破壊 ^{エネルキ゛ー} (N/mm)	付着剛性 (N/mm ³)	接着強度 (N/mm ²)	接着剛性 (N/mm ³)	継手強度 (N/mm ²)	継手剛性 (N/mm ³)		
エポキシ	3.87	1.10	6.80	5.06	6.80	(2310)	5272.7		
軟性型	2.77	0.47	8.14	2.07	8.14	1840	5415.6		
硬性型	3.78	0.26	27.5	3.15	27.5	460 [968]	3343.8 [3729.6]		
備考	 ・ ・	は,付着応力-す エネルギーに一至 は付着剛性と同し 樹脂は継手試験で は,付着試験にお 脂のシート間付着 範性型樹脂の継手	べり関係を 数するものと ご 母 材 破 断 し い い は る 上 述 の 音 特 性 欄 の [手 長 を 200 mm	線形と仮定し 仮定して算 たため,(仮定から求め]内は,継 n, エポキシり	↓た際の弾性 定した。)内は参考値)られる最大 ≤を補強した組 による補強組	ひずみエネ/ (3000N/mm すべり変位を 試験体No.5k ミ手長を50mm	レギーが界面 ² と仮定して を用いて設定 こ適用した値 nとした線形		

1.3.3 解析結果

(1) 実験試験体の再現解析結果(解析A)

試験体合計6体の解析結果として,最大荷重(せん断耐力)の一覧を表-1.3.3.1に,荷重-変位関係を図-1.3.3.1にそれぞれ実験結果と併せて示す。

実験に対する解析の最大荷重の比は、No.2(エポキシ)を除き、いずれのケースも±10%の 範囲内におさまっており、最大荷重(せん断耐力)については概ね推定することが可能であ った。また、荷重-変位関係についても、たわみ20mm程度までは精度良く推定されたが、 No.2(エポキシ)やNo.3(軟性型)で観察されたような大きなたわみまでは再現されていない。 これらのケースでは、シートがコンクリートから剥離した後もコンクリートを十分に拘束 することによって、高い靭性能が得られたものと推定され、特に載荷点近傍の圧縮縁コン クリートには非常に高い拘束圧力が作用する。解析においては、このような高い拘束応力 下におけるコンクリートの応力・ひずみ特性が十分に再現されず、コンクリートの圧縮軟 化が変位20mm程度からの荷重の低下を招いたものと考えられる。特に、No.2(エポキシ)に ついては、実測された圧縮強度自体が他のケースに比べて低いことから、上記の傾向がよ り顕著に表れたものと考えられる。

(2) 各種影響要因の感度(解析B)

表-1.3.2.1に示したように、実験で実測されたコンクリート強度は、試験体間で若干差 があるため、解析Aの結果はコンクリート強度の相違の影響を含んでいる。そこで、前述 の結果を得た解析モデルをベースにして、試験体No.2~6の強度値を試験体No.1の強度に揃 えた解析を追加で実施し、コンクリート強度の影響を排除した、樹脂や補強方法の違いに よる影響を分析した。

6ケースの解析結果として,最大荷重(せん断耐力)の一覧を表-1.3.3.1に,荷重-変位関係を図-1.3.3.2にそれぞれ実験結果と併せて示す。これらの結果から,軟性型樹脂による 補強は硬性型樹脂に比べて約37%程度高い補強効果が得られていること,継手補強の効果 は10%弱程度であることが分かる。

き 略 仕い	最	:大荷重(k	解析A	補強効果	
武 缺 14 NO.	実験	解析A	解析B	/実験	(解析B)
No.1 (無補強)	355.7	372.9	372.9	1.048	—
No.2 (エポキシ)	780.1	630.6	653.3	0.808	280.4
No.3 (軟性型)	757.3	753.6	746.5	0.995	373.6
No.4 (硬性型)	649.9	644.5	644.5	0.992	271.6
No.5 (硬性型+継手補強)	768.1	699.1	668.5	0.910	295.6
No.6(軟性型+無付着)	734.5	787.6	731.6	1.072	358.7

表-1.3.3.1 解析における最大荷重の比較



図-1.3.3.1 荷重-変位関係(実験の再現解析)




(b) 継手・付着特性の影響

図-1.3.3.2 荷重-変位関係(コンクリート強度の影響を排除)

(3) 樹脂の継手特性の影響に関する検討

硬性型樹脂を用いて補強したNo.4の載荷実験では、継手の強度(あるいは靭性)不足によ り、シート破断前に継手部が剥離することによって終局に至った。解析においては、荷重 低下が継手部の剥離に起因することを明確に確認することはできなかったが、No.3(軟性型 樹脂)に比較して、低い荷重レベルで終局に至ったことから、継手部の強度がせん断耐力に 及ぼす影響を、解析によってある程度再現可能であるものと考えられる。継手部以外を全 く同じ諸元としたNo.5では、継手部の性能改善に伴い、せん断耐力が向上することが解析 でも確認できている。そこで、継手の強度および剛性がせん断耐力に及ぼす影響を検討す るために、さらなる解析検討を行った。No.4(硬性型)ケースを基本として、継手強度を1.0 倍、2.0倍、4.0倍の3パターン、継手剛性を1.0倍、0.5倍、2.0倍の3パターンに変化させ、合 計9ケースについて検討した。検討した解析ケースを表-1.3.3.2に示す。表にはNo.5(硬性 型+継手補強)、No.3(軟性型)の値も参考までに載せてある。No.5の()内の数値は、継手 長を他と同じ200mmに換算した値である。

解析結果を表-1.3.3.2および図-1.3.3.3に示す。各ケースの解析で得られた最大荷重お よびそれを断面幅と有効高さの積bdで除してせん断強度とし、さらにそれを圧縮強度で除 した正規化せん断強度を示した。この結果より、本解析の範囲では、継手の特性がせん断 耐力に及ぼす影響を明確に把握することは難しいものの、ある程度の剛性を確保した上で、 エネルギーが増大すれば、耐力も増加する傾向が見て取れる。

		継手	特性		実験	解	析	
ケース	継手強度 (N/mm ²)	継手剛性 (N/mm ³)	継手変位	エネルギー (N/mm)	E縮強度	最大荷重 (LNI)	(P/bd)/fc	備考
	(1\/11111)	(1\/11111)	(mm)	(1\/11111)	(1\/11111)	(KIN)		
A11	460	6687.6	0.069	15.82		620.2	0.227	強度x1.0 剛性x2.0
A12	460	3343.8	0.138	31.64		644.5	0.236	No.4 硬性型
A13	460	1671.9	0.275	63.28		668.3	0.245	強度x1.0 剛性x0.5
A21	920	6687.6	0.138	63.28		663.7	0.243	強度x2.0 剛性x2.0
A22	920	3343.8	0.275	126.56	32.5	656.8	0.241	強度x2.0 剛性x1.0
A23	920	1671.9	0.550	253.12		654.3	0.240	強度x2.0 剛性x0.5
A31	1840	6687.9	0.275	253.12		652.2	0.239	強度x4.0 剛性x2.0
A32	1840	3343.8	0.550	506.24		671.2	0.246	強度x4.0 剛性x1.0
A33	1840	1671.9	1.101	1012.48		637.5	0.234	強度x4.0 剛性x0.5
No.5 継手補強	968 (1210)	3729.6 (4662.0)	0.260	125.62	38.1	699.1	0.218	強度x2.6 剛性x1.4
No.3 軟性型	1840	5415.6	0.340	312.58	33.5	753.6	0.268	強度x4.0 剛性x1.6

表-1.3.3.2 継手の特性値を変化させた解析ケースおよび解析結果



Strength ratio







図-1.3.3.3 継手特性毎のせん断耐力および正規化せん断強度の比較

(4) 樹脂の付着・接着特性の影響に関する検討

シートーコンクリート間の付着・接着を除去したNo.6の載荷実験では、荷重-変位関係 における剛性は低下したものの、付着・接着を確保した試験体No.3に近いせん断耐力が得 られた。一方、解析においては、試験体No.6の剛性低下がうまく再現されていないが、樹 脂に求められる付着・接着性能について検討しておくことは、今後の樹脂開発において重 要であると言える。そこで、樹脂の付着・接着特性がせん断耐力に及ぼす影響を検討する ために、さらなる解析検討を行った。No.3(軟性型)ケースを基本として、付着・接着強度 を1.0(=3/3)倍、2/3倍、1/3倍の3パターン、付着・接着剛性を1.0(=3/3)倍、2/3倍、1/3倍の3 パターンに変化させ、合計9ケースについて検討した。検討した解析ケースを表-1.3.3.3 に示す。No.6(軟性型+無付着)の値も参考までに載せてある。

解析結果を表-1.3.3.3および図-1.3.3.4に示す。(3)と同様,各ケースのせん断強度を圧 縮強度で除した正規化せん断強度を併せて示した。この結果より,本解析の範囲では,剛 性よりも付着・接着強度の方がせん断耐力に影響を及ぼすとともに,十分なせん断耐力を 確保するための界面エネルギーは0.3 N/mm程度であることが分かる。

また、図-1.3.3.5に示すように最大荷重時のたわみおよび急激に荷重が低下する直前の たわみを解析結果から求め、これを界面エネルギーに対してプロットした結果を図-1.3.3.6に示す。これより、界面エネルギーが上述の0.3 N/mm程度以上を確保すれば最大荷 重時たわみは頭打ちとなるが、これ以上の界面エネルギーを付与することによって、最大 荷重後の靱性能が大幅に改善することが分かる。

		継手	特性		実験	解	析	
ケース	付着強度 (N/mm ²)	付着剛性 (N/mm ³)	エネルギー (N/mm)	接着強度 (N/mm ²)	压縮強度 (N/mm ²)	最大荷重 (kN)	(P/bd)/fc	備考
	(18/11111)	(18/11111)	(10/11111)	(18/11111)	(18/11111)	(KIN)		盐 ∉ v1/3
B11	0.92	8.14	0.052	0.69		688.4	0.245	强度 x1/3 剛性 x3/3
B12	0.02	5 / 3	0.078	0.60		712.2	0.253	強度x1/3
DIZ	0.92	5.45	0.078	0.09		/12.2	0.233	剛性x2/3
B13	0.92	2 71	0.156	0.69		747 9	0.266	強度x1/3
D15	0.72	2.71	0.150	0.09		/ 17.9	0.200	剛性x1/3
B21	1.85	8 14	0.210	1 38		772 4	0.275	強度x2/3
	1.00	0.11	0.210	1.50		,,2.1	0.275	剛性x3/3
B22	1.85	5 43	0.315	1 38	33.5	765.6	0 272	強度x2/3
022	1.05	5.15	0.515	1.50	55.5	705.0	0.272	剛性x2/3
B23	1.85	2 71	0.631	1 38		743 4	0 264	強度x2/3
B25	1.05	2.71	0.051	1.56		743.4	0.204	剛性x1/3
P 2 1	2 77	Q 1 <i>1</i>	0.471	2.07		753.6	0.268	No.3
D 51	2.11	0.14	0.471	2.07		755.0	0.200	軟性型
D22	2 77	5 4 2	0.707	2.07		759 6	0.270	強度x3/3
B32	2.77	5.45	0.707	2.07		/38.0	0.270	剛性x2/3
D22	2 77	2.71	1.416	2.07		747 (0.200	強度x3/3
Вээ	2.11	2./1	1.410	2.07		/4/.0	0.200	剛性x1/3
No.6	0.00	0.00	0.000	0.00	29.1	797 (0.246	強度x0/3
無付着	0.00	0.00	0.000	0.00	38.1	/8/.0	0.240	剛性x0/3

表-1.3.3.3 付着・接着特性を変化させた解析ケースおよび解析結果









図-1.3.3.4 付着・接着特性毎のせん断耐力および正規化せん断強度の比較



図-1.3.3.5 付着・接着特性が最大荷重時および終局時のたわみに及ぼす影響



図-1.3.3.6 付着・接着特性が最大荷重時および終局時のたわみに及ぼす影響

1.3.4 FEMによる解析的検討のまとめ

樹脂の種類やせん断補強効果に関する大型梁試験体の載荷実験を、3次元有限要素解析に よって再現し、解析モデルの提案を行うとともに、樹脂の特性を様々に変化させた感度解 析を行い、せん断補強効果の観点から見た樹脂の要求性能に関する検討を行った。その結 果、樹脂にある程度の剛性を確保した上で、剥離破壊エネルギー(ここでは応力-変形関係 の面積と定義した)を増加させることで、せん断耐力向上効果が得られることが明らかとな った。ただし、今回のモデル化では、樹脂特性を定義するにあたり幾つかの仮定を設けて おり、今後さらに検討を要する点を残している。

1.4 樹脂含浸型の連続繊維シートの開発のまとめ

個別研究開発目標である,被災した構造物(倒壊していない構造物)を復旧可能な水硬性 樹脂含浸型の連続繊維シートのプロトタイプの開発を行うため,樹脂材料および連続繊維 シートの基礎試験,試験体による検証,FEMによる解析的検討を行った。

各検討の結果,含浸接着樹脂は軟性型水硬性ポリウレタン樹脂,連続繊維シートは目付 量300g/m²程度のアラミドを補修材料として用いることとした。この補修材料を用いた場合, エポキシ樹脂と同様のせん断補強効果を発揮することが可能であり,また,連続繊維シー トが受け持つせん断耐力は従来の算定式(土木学会式)に基づくことで評価可能であること が確認できた。さらに,FEM解析結果より,水硬性ポリウレタン樹脂にある程度の剛性を 確保した上で,剥離破壊エネルギー(ここでは応力-変形関係の面積と定義した)を増加さ せることで,せん断耐力向上効果が得られることが明らかとなった。ただし,現時点では, どの程度の損傷まで復旧可能なのか適用限界を把握できていないため,適用範囲が明確で はない。

以上のことから,個別研究開発目標である,被災した構造物(倒壊していない構造物)を 復旧可能な水硬性樹脂含浸型の連続繊維シートのプロトタイプの開発は達成したといえる。

2. 開発工法の実用化に向けた検討

個別研究開発目標は,開発工法実用化のために,施工法・適用方法を考慮した標準施工 マニュアルを作成することである。

2.1 大型試験体による検証

1.2では、各種連続繊維シートを用いた場合の水硬性ポリウレタン樹脂の適用可能性およ び梁の構造特性に及ぼす影響について検討し、従来の算定式で評価可能であること、各種 条件下でもせん断補強効果が得られることを確認した。本節では、水硬性ポリウレタン樹 脂を含浸接着樹脂として用いる開発工法の、実構造物への展開可能性について、柱試験体 を用いて構造性能の観点から検討した。

2.1.1 柱試験体を用いた構造性能の確認

損傷後の補修効果を検証するため、柱試験体を用いて軸力を作用させずに正負交番載荷 を行った。また、エポキシにより補修された試験体を用いて従来工法との比較を行った。

(1) 実験概要

表-2.1.1.1 に試験体諸元,表-2.1.1.2 に使用材料,図-2.1.1.1 に試験体寸法を示す。 与える損傷は,被災度判定表¹⁾を参考とし,1 次載荷により残留ひび割れ幅 0.5mm≦W< 2mm(被災度 B:中被害)のせん断損傷を与え,変位 0mm でせん断スパンにシート幅 100mm のアラミド繊維を一層巻き立てて補修を行い,6日間養生した後,2 次載荷を行った。なお, 両試験体とも,アラミド繊維シートの継手長は 200mm とした。載荷点の境界条件は,下端 のみを固定し上端は自由端とした。載荷は部材角による変位制御で,部材角 1/1000, 1/500, 1/250, 1/100, 1.5/100, 2/100, 3/100…と破壊に至るまで順次変位を増加させた。なお,軸 方向鉄筋の降伏後は,各部材角で 3 回の繰り返し載荷を行った。また,目視によるひび割 れの観察を行うとともに,荷重,鉛直変位,軸方向鉄筋,せん断補強筋ひずみおよびアラ ミド繊維シートのひずみを適宜測定した。

試験体	破壊形態	有効高さ	スパン		軸方向]鉄筋	せん断	補強筋	宙結繊維
		d (mm)	a (mm)	a/d	材質 径	鉄筋比 (%)	材質 径	鉄筋比 (%)	シート種類
軟性型	பு	260	010	25	SD345	6.0	SD295A	0.072	マニンド
エポキシ	шı)	200	910	3.5	D22	0.0	D4	0.072	7 726

表-2.1.1.1 試験体諸元

	圧縮	強度	静弹性係数
	(N/n	(N/mm ²)	
コンクリート	29	2.58×10 ⁴	
鉄筋	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弹性係数 (N/mm ²)
軸方向鉄筋 SD345 D22	374	443	1.97×10 ⁵
軸方向鉄筋 SD490 D25	543	710	1.86×10 ⁵
せん断補強筋 SD295A D4 (0.2%offset)	320	488	1.84×10⁵

表-2.1.1.2 使用材料の物性値



(2) 実験結果と考察

表-2.1.1.3に試験体の最大耐力の計算値,実験値,および破壊形態を示す。なお,**表-**2.1.1.3に示す計算値は,梁部材と同様に式(1.2.1.1)~式(1.2.1.5)より求めた。

表-2.1.1.3 試験体の最大荷重および破壊形態

				1次載荷								
			†算値		実験値	産の		計算	筸値		実験値	
試験体	せん断耐力 (kN)		曲げ耐力	除荷荷重	ひび割れ幅	せん断耐力 (kN)				最大荷 重	破壊形態	
	V _{cd}	V _{sd}	V _{yd}	(KN)	(KN)	(((((((((((((((((((((((((((((((((((((((V _{cd}	V_{sd}	V _{fd}	V _{fyd}	(kN)	
軟性型	113.4	15.6	129.1	208.4	166.7 (-150.1)	0.5	-	15.6	139.2	154.8	229.9 (-221.5)	曲げせん断
エポキシ	113.4	15.6	129.1	208.4	172.8 (-160.1)	0.5	-	15.6	139.2	154.8	218.6 (-210.5)	曲げせん断

a) 1次載荷

図-2.1.1.2 に 1 次載荷による損傷状況を,図-2.1.1.3 に軟性型およびエポキシの 1 次 載荷の荷重-変位包絡線を示す。1 次載荷において,軟性型およびエポキシともに,ほぼ 同様な荷重-変位関係となった。両者ともに部材角が 1/250 のときに斜めひび割れが発生 し,部材角 1/200 でせん断補強筋が降伏した。部材角 1/100 の終了後の残留ひび割れが, 0.5mm となったことから,設定した損傷の条件を満たしたと判断し載荷を終了した。なお, 1 次載荷終了時点で軟性型およびエポキシの軸方向鉄筋のひずみは降伏直前であった。





図-2.1.1.2 1次載荷による損傷状況

図-2.1.1.3 荷重-変位包絡線(1次載荷)

b) 2次载荷

図-2.1.1.4 に終局時の破壊状況,図-2.2.1.5 に試験体の2次載荷の荷重-変位包絡線 を示す。なお,図-2.1.1.5 には各試験体の最外縁の軸方向鉄筋降伏時の荷重を破線にて示 す。エポキシは、軸方向鉄筋の降伏後、1 次載荷で発生した斜めひび割れ面を滑るように 変形が進行し、部材角±8/100 で耐力低下を生じた。その後正側のみ載荷を継続し、最終的 には部材角 10/100 を超えた後、アラミド繊維シートが隅角部より破断し終局に至った。軸 方向鉄筋降伏後も荷重増加が観察されるが、部材角±8/100 で急激な荷重低下が生じており、 終局時の破壊状況(図-2.1.1.4)においてもせん断変形が卓越していることから、破壊形態 は曲げ降伏後のせん断破壊であると考えられた。また、軟性型でも、軸方向鉄筋降伏後、1 次載荷で発生した斜めひび割れ面を滑るように変形が進行した。緩やかな荷重低下が± 4/100 から始まり、部材角±8/100 で降伏時の荷重を下回った。その後正側のみ載荷を継続 し、最終的には 10/100 を超えた後、アラミド繊維シートが隅角部から破断し終局に至った。 荷重低下開始時期は異なるが、破壊形態はエポキシと同様に、曲げ降伏後のせん断破壊で あると考えられ、せん断損傷を与えた柱部材に対して、従来工法を想定したエポキシと同 様の補修効果が確認された。



図-2.1.1.4 終局時の破壊状況



図-2.1.1.5 荷重-変位包絡線(2次載荷)

(3) 柱試験体を用いた構造性能の確認のまとめ

損傷した柱を補修した場合の補修効果を検証するため,柱試験体を用いて載荷試験を行 うとともに,エポキシ樹脂により補修された試験体を用いて従来工法との比較を行った。 その結果,軟性型水硬性ポリウレタン樹脂は,せん断損傷を与えた柱部材に対して,従来 工法を想定したエポキシ樹脂と同様の補修効果が確認された。

2.1.2 実大試験体による補強効果の確認

(1) はじめに

梁試験体を用いた載荷試験(1.2.2)では、軟性型水硬性ポリウレタン樹脂とアラミド繊維 シートの組み合わせによるせん断耐力の評価方法を明らかにした。また、地震により損傷 を受けたことを想定した柱試験体による載荷試験(2.1.1)では、軟性型水硬性ポリウレタン 樹脂とアラミド繊維シートによる補修効果が、従来のエポキシ樹脂とアラミド繊維シート を用いた場合と比較し、同様であることを明らかにした。そこで本項では、実大試験体に よる補強効果の確認を行った。

(2) 試験体諸元

a) 試験体

試験体は、実在する鉄道高架橋を模擬して作製した。また、本工法の補強効果を確認するため、軸方向鉄筋が降伏する前にせん断破壊するものを選定した。表-2.1.2.1に試験体の諸元を示す。図-2.1.2.1に示すように柱の断面形状は800×800mmの矩形断面図で、せん断スパンを2000mmとした。

断面	寸法	せん断	せん断	軸方向鉄筋 せん断補強			筋			
В	Н	スパン	スパン比	種類	径−本数	断面積	鉄筋比	種類	径−ピッチ	断面比
(mm)	(mm)	(mm)				(mm ²)	(%)			(%)
800	800	2000	2.74	SD345	D35-28本	26784.8	4.19	SR235	φ 9@300	0.159

表-2.1.2.1 試験体諸元



b) 使用材料

・コンクリート

コンクリートの配合は、フーチング部を27-12-20H, 柱部を18-12-20Hとした。表-2.1.2.2~表-2.1.2.4にコンクリートの圧縮強度試験の結果を示す。柱部のコンクリー トは実験時で32.4N/mm²であり、フーチング部は35N/mm²であった。

強度試験に用いた供試体は封緘養生とし、材齢はそれぞれ柱部が29日、フーチング 部が34日である。

供試体番号	最大荷重	直径平均	断面積	高さ 平均	体積	質量	見掛け 密度	圧縮強度	圧縮強度 (平均)	静弾性 係数	静弾性係 数(平均)
Щ·J	(kN)	(mm)	(mm ²)	(mm)	(mm ³)	(g)	(g/cm³)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/mm²)	(kN/mm²)
1	259.0	99.7	7806.9	199.0	1553188	3660.9	2.36	33.2		24.2	
2	252.0	99.8	7814.8	199.2	1556700	3679.3	2.36	32.2	32.4	26.3	25.0
3	246.9	99.7	7799.1	198.1	1544612	3660.4	2.37	31.7		24.5	

表-2.1.2.2 コンクリートの圧縮強度試験結果(柱部)

	~						1.000 I.H. 21		
供試体番号	最大荷重	直径平均	断面積	高 さ 平均	体積	質量	見掛け 密度	割裂引張 強度	割裂引張 強度 (平均)
щ·у	(kN)	(mm)	(mm ²)	(mm)	(mm ³)	(g)	(g/cm³)	(N/mm ²)	(N/mm^2)
1	92.2	99.7	7806.9	201.2	1570364	3694.6	2.35	2.93	
2	74.8	99.9	7830.4	201.1	1574309	3689.8	2.34	2.37	2.65
3	84.0	99.8	7814.8	202.0	1578191	3692.2	2.34	2.65	

表-2.1.2.3 コンクリートの割裂引張試験結果(柱部)

表-2.1.2.4 コンクリートの圧縮強度試験結果(フーチング部)

供試体 番号	最大荷重	直径平均	断面積	高さ 平均	体積	質量	見掛け 密度	圧縮強度	圧縮強度 (平均)
щ·J	(kN)	(mm)	(mm ²)	(mm)	(mm ³)	(g)	(g/cm ³)	(N/mm^2)	(N/mm^2)
1	284.2	99.7	7806.9	197.9	1544601	3539.6	2.29	36.4	
2	266.8	99.8	7814.8	198.8	1553574	3564.2	2.29	34.1	35.0
3	267.6	99.7	7799.1	199.0	1551631	3574.7	2.30	34.3	

・鉄筋

鉄筋の引張試験の結果を表-2.1.2.5に示す.

表-2.1.2.5 鉄筋の引張試験結果

研究の話題	N 0.	断面積	降伏強度	引張荷重	引張強度	伸び	降伏ひずみ	ヤング係数
政府の推規		(mm ²)	(N/mm ²)	(kN)	(N/mm ²)	(%)	(µ)	(N/mm ²)
	1		377	547.0	572	28.9	2228	1.95E+05
	2	956.6	373	554.0	579	26.6	2144	1.96E+05
SD345 D35	3		373	551.0	576	27.2	2029	1.99E+05
	平均		374		576	27.6	2130	1.97E+05
	1		362	30.8	484	-	1991	2.06E+05
	2	63.6	359	30. 7	483	_	1770	2.02E+05
οπζού φ9	3		363	30.9	486	—	1826	2.06E+05
	平均		361		484	_	1860	2.05E+05

・連続繊維シート

補強に用いたアラミド繊維シートの引張試験結果を表-2.1.2.6に示す。

		目付量	引張強度	ヤング係数
		(g/m^2)	(N/mm^2)	(kN/mm^2)
フニン 15 俳 姓 シー・1	公称值	200	2060	118
アフミト酸粧シート	実験値	200	2460	144

表-2.1.2.6 アラミド繊維シートの物性値

c) 補強量の算定

アラミド繊維シートの補強量を決定するために積層数を1~3層とした場合の計算結果を 表-2.1.2.7に示す。表中のコンクリートのせん断耐力は,通常,設計で用いられる棒部材 式¹⁾とa/dを考慮した二羽式²⁾を用い,表中のVydは,Vcd,Vsd,Vfの累加により算出した。 補強は曲げ破壊が先行するように,棒部材式により算出した補強後の設計せん断耐力Vyd と曲げ耐力に達する時のせん断力Vmuの比(Vyd/Vmu)が,1.0以上となるように補強量を決 定した³⁾。したがって,表-2.1.2.7より,必要なシートの積層数は3層となり,加力スタブ を除くせん断スパン全長を補強した。なお,シートが受け持つせん断耐力は土木学会が示 す式に準じて算出した⁴⁾。

	軸力N	Mmu	Vmu	Vcd	Vsd	Vf	Vyd	Vyd/Vmu
	(kN)	(kN・m)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	
無補強	1920	3538	1769	568	97	—	665	0.38
				(棒部材式)		—	963	0.54
アラミド-1層				866		482	1147	0.65
目付量280g/m ²				(二羽式)			1445	0.82
アラミド-2層						963	1628	0.92
目付量280g/m ²							1926	1.09
アラミド-3層						1333	1998	1.13
目付量280g/m ²							2296	1.30

表-2.1.2.7 補強量の算定

d) 補強方法

・連続繊維シートの割付

アラミド繊維シートは、せん断スパン全長を4段に分割して巻き立てた。図-2.1.2.2に示 すように、フーチング側を1段目とし、1段目から3段目は幅500mm、4段目は幅130mmに裁 断したシートをぞれぞれ3層巻き立てた。

図-2.1.2.3に各段のアラミド繊維シートの割付平面図を示す。せん断面の補強量を均等 にするため、シートは載荷面側に各段および各層の継手が重ならないよう配置し、継手長 は、300mmとなるよう施工した。

・連続繊維シートの巻立て方法

シートの貼り付け前に下地処理として、ディスクサンダーおよび研磨紙を用いて、表面 の脆弱層および凸部を除去し、平滑化した。1層分の施工方法は、必要な長さに裁断したシ ートにあらかじめ樹脂を含浸させ、一次散水した試験体に4段分を巻き立てた後、2次散水 を施し、スクイジーにより十分に脱泡・水切りを行い仕上げとした。なお、継手部分は下 層部分に散水を施し、脱泡・水切りを行った後に、上層部分を貼り付け、下層部分と同様 に施工し仕上げとした。仕上げ後は1時間以上放置し、表面の浮きなどがないことを確認し 次の層の施工を行なった。補強完了後、4日間気中養生した。



図-2.1.2.2 アラミド繊維シート割付図(側面図)



図-2.1.2.3 アラミド繊維シート割付図(平面図)

(3) 実験方法

a) 加力装置

試験体の載荷装置図を図-2.1.2.4に,載荷状況を図-2.1.2.5に示す。載荷は1920kNの軸 力導入のため3000kN鉛直ジャッキ,水平方向載荷のため3000kNアクチュータを使用した。



図-2.1.2.4 載荷装置図



図-2.1.2.5 載荷状況

b) 載荷パターン

載荷パターンを図-2.1.2.6に示す。載荷は正負交番載荷を行い,柱側面部のひび割れの 発生を確認しながら行うとともに,軸方向鉄筋のひずみを観察(LNW, LNE, LSW, LSE) しながら行った。軸方向鉄筋のひずみが材料試験結果の降伏ひずみを超えた時点での載荷 点水平変位を降伏変位と定義した。これ以降はこの変位を整数倍した変位を目標として変 位制御による載荷を行った。なお,載荷実験の終了は,軸方向鉄筋が降伏した荷重を下回 った時点とした。



図-2.1.2.6 載荷パターン

c) 計測方法

計測項目を表-2.1.2.8,変位計取付位置およびひずみ計測位置を図-2.1.2.7~図-2.1.2.9に示す。

表一2.1.2.8 計測項目

計測項目	計測器の種類	記号
軸方向圧縮力	内蔵ロードセル	-
水平方向荷重	内蔵ロードセル	-
水平方向荷重	CDP-200	DH1-200
	DP-500	DH1S-500
	DP-1000	DH2S-1000
抜け出し量	CDP-50	DSS, DNN
せん断変形	CDP-50	SSS
軸方向鉄筋ひずみ	ひずみゲージ(ゲージ長 2mm)	LNE, LNW, LSE, LSW
帯鉄筋ひずみ	ひずみゲージ(ゲージ長 2mm)	HE, HW
シートひずみ	ひずみゲージ(ゲージ長 30mm)	OE, OW



図-2.1.2.7 変位計取付位置



図-2.1.2.8 ひずみ計測位置(軸方向鉄筋および帯鉄筋)



図-2.1.2.9 ひずみ計測位置(シートひずみ)

(4) 実験結果

a) 荷重-変位曲線

荷重-変位曲線を図-2.1.2.10,破壊状況を図-2.1.2.11,シートの剥離と破壊状況を図 -2.1.2.12に示す。補強前のせん断耐力は棒部材式を用いた場合665kNに,二羽式を用いて 評価した場合963kNになる。実験の最大荷重は正側載荷で1647kN,負側載荷で1575kNであ り,これらは補強前の設計せん断耐力を大きく上回っており,本工法を適用することで最 大耐力を大きく改善できている。しかしながら,2δ以降は荷重が低下し,設計曲げ耐力に 達する前にシートの剥離とこれに伴うシート破断により荷重が低下した。







図-2.1.2.11 破壊状況



図-2.1.2.12 シートの剥離と破断状況

b) 軸方向鉄筋のひずみ分布

軸方向鉄筋のひずみ分布を図-2.1.2.13~図-2.1.2.16に示す。正側載荷の場合,主鉄筋 は荷重1518kNにおいて南面基部の軸方向鉄筋(LSW)の基部が,負側載荷の場合は北面基部 の軸方向鉄筋(LNW)が降伏に至っている。これ以降は柱基部を中心にひずみの増加が観察 された。



図-2.1.2.13 軸方向鉄筋のひずみ分布(LNE)







図-2.1.2.15 軸方向鉄筋のひずみ分布(LSE)



図-2.1.2.16 軸方向鉄筋のひずみ分布(LSW)

c) 帯鉄筋のひずみ分布

図-2.1.2.17および図-2.1.2.18に帯鉄筋のひずみ分布を示す。せん断面のE面とW面は, 共に基部からH = 750mmの位置の帯鉄筋が±1δyで降伏に至っている。軸方向鉄筋が降伏 する前にせん断破壊する試験体であることから,この時点で試験体には大きな斜めひび割 れが発生していたと推察される。



図-2.1.2.17 帯鉄筋のひずみ分布(HE)



図-2.1.2.18 帯鉄筋のひずみ分布(HW)

d) アラミド繊維シートのひずみ

アラミド繊維シートのひずみ分布を図-2.1.2.19および図-2.1.2.20に示す。荷重低下を 生じた時点でのシートのひずみは破断ひずみに達しておらず,その値は破断ひずみの公称 値の半分程度である。



図-2.1.2.19 シートのひずみ分布(E面)



図-2.1.2.20 シートのひずみ分布(W面)

e) 変形成分

図-2.1.2.21および図-2.1.2.22に変形成分を示す。特にシートの剥離が確認された-2 δ 以降は,全体変形の中でせん断変形の割合が急激に大きくなっている。通常,曲げ破壊を 生じる試験体は曲げ変形の割合が大きいので,大きいせん断ひび割れが発生していた可能 性が高い。









f) 軸方向鉄筋の抜け出し量

抜け出し量の計測結果を図-2.1.2.23および図-2.1.2.24に示す。図は最外縁軸方向鉄筋 位置における、フーチングからの抜出し量である。変形が進むにつれて、抜出し量が増え る傾向にある。







図-2.1.2.24 抜け出し量(南側主筋)

(5) 実大試験体による補強効果の確認のまとめ

a) 連続繊維シート巻立てによる補強効果

図-2.1.2.25に軸力補正後の荷重-変位関係を示す。軟性型水硬性ポリウレタン樹脂お よびアラミド繊維シートを用いてせん断補強を施すことで,設計せん断耐力が963kNの実 大試験体のせん断耐力を,設計曲げ耐力(1769kN)付近の1687kNまで改善することができた。

これまでの梁試験体および柱試験体による載荷試験(1.2.2, 2.1.1)から,水硬性ポリウレ タン樹脂を用いても土木学会式が適用できるとの成果が得られているが,本試験では,補 強後の設計せん断耐力に達する前に荷重低下に至った。このことから,軸方向鉄筋が降伏 する前にせん断破壊する試験体(曲げせん断耐力比: Vyd/Vmd = 0.38)のように,補強前の せん断耐力が著しく低い部材を補強する場合(シートの負担分が大きい場合)の補強量の算 定については,今後の検討課題といえる。

また,終局時に,載荷面に設けたシート継手部の剥離と2層目のシート破断を生じ,その後,荷重低下に至ったが,この理由として,次のようなことが考えられる。



図-2.1.2.25 荷重~変位関係(軸力補正後)

b) 連続繊維シートの積層による補強効果の低減

水硬性ポリウレタン樹脂は、水と反応して硬化する際に炭酸ガスを発生するという特異 な性質を有している。図-2.1.2.26にアラミド繊維シートを積層した場合のコンクリート との接着試験結果を示す。アラミド繊維シートが1層の場合の接着強度は2.05N/mm²である が、2層の場合は0.58N/mm²(約70%減少)、3層の場合は0.17N/mm²(90%以上減少)となり、ア ラミド繊維シートの積層数が増加するにつれ、接着強度は大幅に減少することが確認され た。この原因として、水硬性ポリウレタン樹脂と水との反応が完了する以前に積層するこ とで、本来(1層の場合)外部に抜けていた炭酸ガスがシートと躯体の界面およびシート間に 内包され、浮き・剥離が生じ、接着強度が低下したと考えられた。この現象は、載荷試験 の補強時においても同様に発生していた可能性が高く、シートの補強効果を低下させる原 因になると考えられたため、載荷前にシートの浮き・剥離調査を行った。



図-2.1.2.26 積層時の接着試験結果

図-2.1.2.27に載荷前に行ったシートの浮き・剥離調査の結果を示す。シートの浮き・ 剥離は、せん断面(E面, W面)では観察されなかったが、載荷面(シートの継手を設けたN面, S面)にて浮きが確認された。特に、継手部での浮きの発生が顕著であった。この原因とし て、継手部では、シートの積層数が4層となるため、3層の部位よりも炭酸ガスを内包し易 く、浮きが発生し易い環境下であったためと考えられる。また、図中青丸で示される浮き 発生箇所が、継手位置(破線四角)内に集中していることからも、継手部は浮きが発生し易 い環境下であった可能性が高い。

この載荷前のシートの浮き状況から、荷重の増加とともにひび割れが進展し、せん断面 のシートの剥離が進むことで、継手部に応力集中が生じ、荷重低下時に観察されたような 継手部のシート剥離と2層目シートの破断が生じたものと考えられる。



図-2.1.2.27 シートの浮き状況

さらに,継手部で破断した理由に,2段目のシートの付着性能が劣っていたことも考えら れる。載荷実験後にシートを取り除いてせん断面を観察したところ(図-2.1.2.28),多数の せん断ひび割れが生じており,所定のせん断補強効果が得られていない可能性も考えられ る。図-2.1.2.29に試験体より取り除いたシートの界面の状況を示す。これらより,特に2 段目のシートに躯体のコンクリートがほとんど付着しておらず,ひび割れの進展(拡大)を 拘束できていなかったと考えられる。



図-2.1.2.28 実験後のひび割れ発生状況



図-2.1.2.29 シート界面の状況

以上より、本試験体は付着性能が劣る2段目のシートが載荷時の早い段階から剥離し、施 工によって生じた浮きが存在し弱点となった継手部に負担がかかることで、継手部の剥離 を促進させる結果(破断した2段目の2層目の負担増)となり、2段目のシートの拘束効果が低 下した時点、すなわち、継手部の破断により耐力低下を生じたものと考える。やや乱暴な 考え方ではあるが2段目のシートは荷重低下時にはせん断補強に寄与しておらず、1段目と3 段目を補強しただけのゼブラ巻き補強(補強量が少ない場合を想定)であったと仮定してせ ん断耐力を計算するとVyd2 = 1685kNとなり、図-2.1.2.30内赤線で示すとおりとなる。図 -2.1.2.30より耐力だけで比較すると、計算値と実験値はほぼ近い値を示している。



図-2.1.2.30 ゼブラ巻き補強とした場合のせん断耐力

しかし、これらはあくまで推測であり、水硬性ポリウレタン樹脂を用いて積層補強する 場合は、その施工方法(特に、継手部)も含めて、今後の検討課題である。

2.2 最適設計手法の開発

最適設計手法の開発とは、部材および構造体を対象とした実験および解析的検討結果から、復旧レベルに応じた損傷構造物の最適設計手法を確立することを目的としている。具体的には、震災を受けた構造物の外観や簡易な非破壊検査から得られる情報をもとに、構造物の損傷程度、それに応じた復旧レベルを定めて補強量(連続繊維シートの目付量、巻立て層数など)を決定する手法、迅速復旧した構造物が設定した性能を満足するか照査する方法について検討することである。

1.2および2.1の結果より,設計方法は従来の算定式(土木学会式¹⁾)を適用することで評価 可能であることを確認している。しかし,1.4で前述しているように,現時点では,どの程 度の損傷まで復旧可能なのか適用限界を把握できていないため,適用範囲が明確ではない。 また,2.1.2で前述しているように,補強前のせん断耐力が著しく低い部材を補強する場合 (シートの負担分が大きい場合),および連続繊維シートを積層する場合の補強量の算定に ついては検討すべき点が残されている。

今後は、適用可能な損傷状態を(コンクリートの剥落,残留変位,表面状態など)検討す ることで、適用可能な損傷状態の一覧,損傷状態に適した施工方法(例えば,軽微な被害な らば継手部の処理だけ行うなど)およびその際の補強量の算定方法を把握することで,最適 設計手法の確立を目指していきたいと考えている。 2.3 施工法の検討

(1) 模擬実大柱を用いた施工性能の検証

実大断面を模擬した柱試験体を用いて施工性能の検証を行った。施工は,実施工時を想 定し,連続繊維シート巻立て工法の作業実績が豊富な専門業者が行った。

a) 実験概要

柱試験体を図-2.3.1 に示す。寸法は、断面 1000mm×1000mm, 高さ 1700mm である。施 工は,幅 500mmの連続繊維シートを試験体周方向に1層巻き立て,200mmの継手長を設 けることを 1 段とし、試験体上縁より下に向かって 3 段行った。よって、施工範囲は幅 1000mm×高さ 1500mm×4 面=6m² である。通常時の施工フローと迅速復旧時の施工フロー を図-2.3.2 に示す。迅速復旧時の施工フローは、表面処理工、断面修復工、シート巻立 て工である。迅速復旧を目的としているため、現段階で、補強効果が得られると判断され た必要最低限の手順とした。表面処理工では、付着が期待できなくとも継手部が確保でき ていれば補強効果は得られるため(1.2.2, (3), b))下地処理をする必要はないが、隅角部で のシート破断を防止するため隅角部の面取りを行う。断面修復工では、コンクリートの剥 離など断面欠損がみられる場合には、コンクリート間の応力伝達を目的に断面修復材で修 復を行う。しかし、一般的に用いられるエポキシ樹脂モルタルやポリマーセメントモルタ ルでは養生に24時間以上必要であるため,迅速復旧に適した断面修復材を今後検討する必 要がある。シート巻立て工は、補強効果を得るため通常と同様に施工する。なお、本実験 では既に断面処理工まで施しているため,施工はシート巻立て工のみである。作業手順は, 湿潤調整,樹脂含浸,シート巻き立て,給水および脱泡・水切りの順で行った。実験は, 作業員3名を従事させ、作業開始から終了までの時間を計測し、施工面積当たりの作業時 間の把握を行った。



図-2.3.1 柱試験体



図-2.3.2 施エフロー

b) 実験結果と考察

施工時間を表-2.3.1,各工程の作業の様子を図-2.3.3~図-2.3.8 に示す。湿潤調整は 施工面に散水し湿る程度に湿潤度を調整する作業だが、1 人が湿潤調整を行っている間に 残りの二人が樹脂含浸の作業が可能だったため、同一時間としている。また、給水および 脱泡・水切りも同様に、一人が給水した後に二人がシートの脱泡・水切り作業を順次行う ことが可能だったため、同一時間としている。段数毎の施工時間を比較すると、1 段目と2 段目はほぼ同様の施工時間を示しているが、3 段目は5 分程度作業時間が遅くなっている。 これは、3 段目が最下段であるため作業をするのに体勢を変えざるをえず作業し難い箇所 であったためと考えられた。これらの結果より、施工面積当たりの作業時間を算出すると、 5'49"/m²となる。

参考資料¹)を基に,従来工法との施工時間の比較を試みた。従来工法の施工時間は労務 歩掛より算出した。シート巻立て工は,日当たり施工量25m²/日(労務編成3名,1層)であ るため,日当たり標準労働時間8時間を用いて施工面積当たりの作業時間に換算すると, 19'12"/m²となる。両者の施工面積当たりの作業時間を比較すると,水硬性ポリウレタン樹 脂を用いた場合の方が作業時間を約1/3に短縮可能である。ただし,今回は,従来工法の プライマー塗布工を考慮せずに比較したため,あくまでもシート巻立て工のみの作業時間 である。なお,プライマー塗布工を考慮しなかった理由は,参考資料にプライマー塗布工 の乾燥時間など詳細な設定が記載されておらず,また,水硬性ポリウレタン樹脂を用いた 場合の施工規模などを設定しないため一概に比較できないと考えられたためである。
湿潤調整,樹脂含浸 給水, 脱泡・水切り 施工時間 合計施工時間 シート巻き立て 1段目 2' 25" 4' 40" 2' 50" 9' 55" 2 段目 2' 40" 3' 50" 3' 20" 9' 50" 34' 55" 3 段目 2' 20" 4' 50" 8' 00" 15' 10" 4' 43" 平均 2' 28" 4' 26" 11' 38"

表-2.3.1 施工時間



図-2.3.3 湿潤調整

図-2.3.4 樹脂含浸



図-2.3.5 シート巻き立て

図-2.3.6 給水



図-2.3.7 水切り・脱泡

図-2.3.8 施工完了

(2) 模擬実大柱を用いた施工性能の検証のまとめ

実大断面を模擬した柱試験体を用いて施工性能の検証を行った。その結果,軟性型水硬 性ポリウレタン樹脂を用いた場合,シート巻立て工の作業時間を従来工法の約1/3に短縮可 能である。ただし,従来工法におけるプライマー塗布工を考慮していないため,実質,更 に短縮可能である。

2.4 標準マニュアルの作成

開発工法を実用化するためには標準施工管理マニュアルが必要となる。2.3の試験を基に,施工手順,管理方法,施工後の検査方法について検討し,標準施工マニュアルを作成する。

(1) 施エマニュアル(案)の作成

水硬性ポリウレタン樹脂を用いた本開発工法は、従来の連続繊維シート巻立て工法を骨格としているが、水硬性ポリウレタン樹脂の特徴に適合させた方法で施工しているため、 特殊な施工方法と言える。そこで、実構造物への適用を目的に、1.1.1、(3)、従来工法の指 針や要領^{1)~3)}、専門業者の意見などを参考にし、施工マニュアル(案)を作成した(施工マニ ュアルの詳細に関しては巻末の付録を参照されたい)。しかし、迅速復旧に適した断面修復 材の選定、積層補強する場合の施工方法(2.1.2より)など検討すべき事項は残されており、 今後の検討課題である。以下に、専門業者の意見および今回の実験を通した気付きをまと める。

- □ 実構造物に施工する際の施工手順を検討できれば、より施工時間は短縮可能である。
- □ 不陸修正をしっかり行わないと施工がしづらく,発泡により浮きや剥離が生じやすい。
- □ 初めて施工する場合は、従来の施工方法と異なるためとまどう。
- □ 貼付け後,時間の経過とともに施工面から発泡してきたため,その都度脱泡を行った が,反応が落ち着いた時期にまとめて脱泡を行った方が効率的である。そこで,貼付 け後に脱泡を行う時間を明確にするべきである。また,いつまで発泡を観察するか時 間を決め,施工完了時間を明確にする。
- □ 仕上げ工は土木と建築で違うので、どちらにも対応できるのが望ましい。モルタルを 仕上げ塗装とする場合には、貼付け後、表面に砂を撒きモルタルとの付着がとれるよ う工夫しているのが一般的である。これにより、仕上げの種類によっては貼付け後、 発泡を観察する時間を削減できる可能性がある。
- □ 屋外で施工し風が出ていたためか、軟性型に含まれる PMA(プロピレングリコールモノメチルエーテルアセテート)の溶剤臭は、作業者としてはあまり気にならない。

2.5 開発工法の実用化に向けた検討のまとめ

個別開発目標である開発工法の実用化のために,施工法・適用方法を考慮した標準施工 マニュアルを作成するため,大型試験体による検証,施工法の検討,最適設計手法の開発, 標準マニュアルの作成を行った。

各検討の結果,構造性能は,損傷を受けた柱試験体に対し,エポキシ樹脂を用いた従来 工法と同様の挙動を示すことが確認できた。また,軸方向鉄筋が降伏する前にせん断破壊 する(曲げせん断耐力比:Vyd/Vmd = 0.38),構造条件が厳しい実大試験体に対し,せん断 補強を施すことで,せん断耐力向上効果を確認することができた。施工性能は,専門業者3 名を作業員として従事させて行い,シート巻立て工の作業時間を従来工法と比較して約1/3 に短縮可能であることを確認した。ただし,従来工法におけるプライマー塗布工を考慮し ていないため実質,更に短縮可能である。設計手法は,1.2および2.1の結果より,従来の算 定式(土木学会式¹⁾)を適用することで評価可能であることを確認している。これら実験結果 に加え,昨年度の実験結果,従来工法の指針や要領,専門業者の意見などを参考にし,施 工マニュアル(案)を作成した。

現状,課題は残されているが,上記のことから,個別開発目標である,開発工法の実用 化のために,施工法・適用方法を考慮した標準施工マニュアルの作成は達成できたといえ る。 【研究開発目標の達成状況】

- I. 小型試験体を用いた復旧工法の開発(中小被害の構造物の耐力を100%まで回復させる)
- →【研究開発の成果】1.2.1「小型梁試験体による補修効果の検証」より、1次載荷でせん断損傷を与えた後、本開発工法で補修を施し再載荷(2次載荷)することで評価した。 その結果、補修された全ての試験体(No.4~No.11)の耐力を100%以上まで回復させることができた。これにより、研究開発目標 I.は達成できたといえる。
- II. 大型試験体を用いた復旧工法の妥当性の検証(耐力100%以上までの回復,施工時間50% 以上短縮(従来の類似技術比),施工後数時間で効果発現)
 - →【研究開発の成果】1.2.2「大型梁試験体による構造特性の把握」,2.1.1「柱試験体を 用いた構造性能の確認」より、大型の梁および柱試験体を用いて検証した。検証方法 は、1次載荷でせん断損傷を与えた後、本開発工法で補修を施し再載荷することで評価 した。その結果、補修された大型の梁および柱試験体の耐力を100%以上まで回復させ ることができた。

【研究開発の成果】2.3「施工法・適用方法の検討」より、本開発工法の施工時間を検 討するため、柱試験体を用いて実験を行った。実験は専門業者3名を作業員として従 事させて行い、シート巻立て工の作業時間を従来工法と比較して約1/3に短縮可能で あることを確認した。ただし、従来工法におけるプライマー塗布工を考慮していない ため実質、更に短縮可能である。これにより、施工時間50%以上短縮(従来の類似技術 比)は達成できたといえる。

【研究開発の成果】1.2.2「大型梁試験体による構造特性の把握」より、早期材齢の影響について検討するため、施工後24時間で載荷した。その結果、最大荷重時の変位は 材齢7日ほど増加しないが、耐力は向上することが確認された。これにより、施工後24 時間でせん断補強効果が発現することを確認できた。

これらの結果より,研究開発目標Ⅱ.は達成できたといえる。

【研究開発全体目標の達成状況】

本研究(平成20年度~平成21年度)は、水硬性ポリウレタン樹脂を含浸接着樹脂として用 いる安全・簡易・迅速復旧工法の開発を目指し、検討を行ってきた。その結果、従来の算 定式で耐力評価が可能であること、各種条件下(例えば、災害損傷時)でもせん断補強効果 が得られること、従来技術と比較し施工時間が大幅に短縮可能であることを確認し、水硬 性ポリウレタン樹脂の特徴に適合させた施工マニュアル(案)を作成した。現状、実用化の 段階まで至ってはいないが、これまでの検討より、本提案工法は実構造物へ展開可能であ ると考えられた。

8. 研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名(雑誌の	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
ときは雑誌名、巻号数、論文			
名)			
第36回土木学会関東支部技	2009年3月	社団法人土木学会	山崎 孝史
術研究発表会講演概要集,			鈴木 将充
V-54,「迅速復旧工法開発の			笠倉 亮太
ためのTST-FiSHの基礎物性			小島 文寛
と補修効果の実験的検討」			伊藤 正憲
			加藤 佳孝
			勝木 太
生産研究, Vol. 61 No. 4,	2009年7月1日	東京大学生産技術研究所	山崎 孝史
pp. 641-644, 「迅速復旧工法			鈴木 将充
開発のためのTST-FiSHの基			笠倉 亮太
礎物性と補修効果の実験的			小島 文寬
検討」			伊藤 正憲
			加藤 佳孝
			勝木 太
コンクリート工学年次論文	2009年7月	社団法人日本コンクリー	鈴木 将充
集, Vol. 31, No. 1, pp.		ト工学協会	小島 文寬
2197-2202,「迅速復旧工法開			伊藤 正憲
発のためのTST-FiSHの基礎			加藤 佳孝
物性と補修効果の検討」			
土木学会第64回年次学術講	2009年9月	社団法人土木学会	鈴木 将充
演会講演概要集, pp. 805-806,			笠倉 亮太
「各種繊維材料を用いた			伊藤 正憲
TST-FiSHの補修効果の実験			加藤 佳孝
的検討」			牧 剛史
土木学会第64回年次学術講	2009年9月	社団法人土木学会	小島 文寛
演会講演概要集, pp. 677-678,			鈴木 将充
「迅速復旧工法開発のため			伊藤 正憲
の TST-FiSHの 基礎物性に関			加藤 佳孝
する検討」			牧 剛史
8th International Symposium	2009年10月	NEW TECHNOLOGIES	Masamitsu SUZUKI
on NEW TECHNOLOGIES		FOR URBAN SAFETY OF	Ryota KASAKURA
FOR URBAN SAFETY OF		MEGA CITIES IN ASIA	Masanori ITO
MEGA CITIES IN ASIA,			Yoshitaka KATO
Incheon, Korea, Experimental			
Examination on The Repair			

Effect of Emergency Rapid			
Retrofitting Method TST-FiSH			
コンクリート工学, VOL. 47,	2009年12月1日	社団法人日本コンクリー	笠倉 亮太
No. 12, pp18~25, 「水硬性		ト工学協会	鈴木 将充
樹脂を含浸させた連続繊維			小島 文寬
シートを用いた迅速復旧工			伊藤 正憲
法の開発」			加藤 佳孝
			牧 剛史
第37回土木学会関東支部技	2010年3月	社団法人土木学会	小嶋 洋範
術研究発表会講演概要集,			伊藤 正憲
V-55,「接着層における水硬			加藤 佳孝
性樹脂の力学的特性が補強			魚本 健人
効果に及ぼす影響」			

9. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の	出願年月日	取得年月日	権利者名
	種類、番号			
発明の名称	特許権	平成20年	未取得	国立大学法人
「補強シートの巻付け装置	出願番号	8月4日		東京大学
及びコンクリート構造物の	特願			加藤 佳孝
補強方法」	2008-2005624			東急建設株式会社
				伊藤 正憲
				早川 健司
				前原 聡
				小島 文寛
				渋沢 重彦

10. 成果の実用化の見通し

本研究期間(平成20年度~平成21年度)内で積み残した主な課題は,積層補強した場合の 付着特性および施工方法に関する検討,本開発工法の耐久性能の確認および表面被覆材の 検討などが挙げられる。また,これまでの検討に用いた軟性型水硬性ポリウレタン樹脂は, 有機溶剤により希釈しているが,社会的にVOC(揮発性有機化合物)排出対策が進められて おり,将来的にデメリットとなる可能性が高い。そのため,軟性型水硬性ポリウレタン樹 脂と同等以上の性能を持ちながらも低VOC化された水硬性ポリウレタン樹脂への改良も検 討課題として挙げられる。

上記の課題の克服から実用化に至るには、暴露試験など長期間の観察に加え、材料メー カーと協力し生産・管理方法について検討する必要がある。これらを踏まえた上で実用化 までには、概ね2年を要する見通しを立てている。 11. その他

参考文献

1. 樹脂含浸型の連続繊維シートの開発

- 1.1 樹脂材料および連続繊維シートの基礎試験
- 1.1.1 水硬性ポリウレタン樹脂の配合
- 鈴木僚,前原聡,伊藤正憲,加藤佳孝:災害損傷構造物の安全迅速復旧工法の開発(2) -材料の選定と材料の性質が補修効果に及ぼす影響-,生産研究, Vol. 60, No. 3, pp.200-203, 2008.
- 2) 日本ウレタン工業協会, http://www.urethane-jp.org/, 2010.1
- 1.1.2 含浸接着樹脂の特性
- 1) エポキシ樹脂技術協会ホームページ, http://homepage2.nifty.com/epoxygk/, 2010.1
- 2) 勝木太,丸山久一,睦好宏史,樋口昇:連続繊維シートで補強された部材のじん性率 照査式に関する検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.22, No.3, pp.1537-1542, 2000.
- 3) 上原子晶久,下村匠,丸山久一:連続繊維シート補強コンクリート部材のせん断耐力の評価法に関する研究,土木学会論文集,No.648, V-47, pp.217-226, 2000.5
- 4) 張広鋒,岸徳光,三上浩,澤田純之: AFRP シートせん断補強 RC 梁の耐荷性状に関す る実験的パラメータ研究,構造工学論文集, Vol.53A, pp.1040-1049, 2007.
- 5) 新保学幸,下村匠,丸山久一,上原子晶久:連続繊維シート補強部材のせん断耐力に 関する感度解析,コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.313-318, 2000.
- 6) 土木学会、コンクリートライブラリー101 連続繊維シートを用いたコンクリート構造 物の補修補強指針、2000.7
- 1.2 試験体による検証

1.2.1 小型梁試験体による補修効果の検証

- 1) 日本道路協会,道路震災対策便覧震災復旧編,2007.3
- 2) 土木学会、コンクリートライブラリー101 連続繊維シートを用いたコンクリート構造 物の補修補強指針、2000.7
- 二羽淳一郎、山田一宇、横沢和夫、岡村甫: せん断補強筋を用いない RC はりのせん 断強度式の再評価、土木学会論文集、第 372 号/V5, pp.167-176, 1986.8
- 4) 土木学会,2007年制定コンクリート標準示方書「設計編」,2008.3

1.2.2 大型梁試験体による構造特性の把握

- 1) 土木学会、コンクリートライブラリー101 連続繊維シートを用いたコンクリート構造 物の補修補強指針、2000.7
- 2) 日本道路協会,道路震災対策便覧震災復旧編,2007.3

- 2. 開発工法の実用化に向けた検討
- 2.1 大型試験体による検証
- 2.1.1 柱試験体を用いた構造性能の確認
- 1) 日本道路協会,道路震災対策便覧震災復旧編,2007.3
- 2.1.2 実大試験体による補強効果の確認
- 1) 鉄道総合研究所,鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物,2004.4
- 二羽淳一郎、山田一宇、横沢和夫、岡村甫: せん断補強筋を用いないRCはりのせん断 強度式の再評価、土木学会論文集、第372号/V5、pp.167-176、1986.8
- 3) 鉄道総合研究所,鉄道構造物等設計標準·同解説耐震設計, 1999.10
- 4) 土木学会、コンクリートライブラリー101連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針、2000.7
- 2.2 最適設計手法の開発
- 1) 土木学会、コンクリートライブラリー101連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針、2000.7
- 2.3 施工法の検討
- 1) 東燃株式会社, FORCA トゥシート技術資料, 1995.9
- 2.4 標準マニュアルの作成
- 1) 東燃株式会社, FORCA トゥシート技術資料, 1995.9
- 2) 土木学会、コンクリートライブラリー101 連続繊維シートを用いたコンクリート構造 物の補修補強指針、2000.7
- アラミド補強研究会、アラミド繊維シート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),1998.1

付録

付録として以下の項目を添付する。

- ・施工マニュアル(案)
- ・小型試験体による補修効果の検証ー試験体製作および試験状況写真集ー
- ・大型試験体による構造特性の把握ー試験体製作および試験状況写真集ー
- ・柱試験体を用いた構造性能の確認ー試験体製作および試験状況写真集ー
- ・実大試験体による補強効果の確認ー試験体製作および試験状況写真集ー
- ・施工法の検討ー補強道具および試験状況写真集ー