

接着層における水硬性樹脂の力学的特性が補強効果に及ぼす影響

芝浦工業大学	学生会員	小嶋洋範
東急建設株式会社	正会員	伊藤正憲
東京大学生産技術研究所	正会員	加藤佳孝
芝浦工業大学	フェロー会員	魚本健人

1. はじめに

兵庫県南部地震以後、その甚大な被害を鑑み、コンクリート構造物の耐震補強が進められ、首都圏の主要交通機関や緊急輸送道路の耐震補強はほぼ完了している。しかし、地震の規模によっては、倒壊等の大被害に至らないまでも中小被害を受ける構造物が、未だ多く存在している。損傷した構造物は、余震に対する安全性、構造物の機能性の確保を目的として応急復旧する必要があるが、既往の復旧技術は施工が大掛かりであり、また効果発現までに日数を要するものが多く、頻発する余震に対応できない可能性が高い。このような背景の下、被災後に迅速に対応ができ、安全でかつ簡易に施工可能な復旧工法の開発が望まれている。そこで、著者らは医療用ギブスをアイデアの起源とし、損傷したRC構造物に対し、水硬性樹脂が含浸された連続繊維シートを巻き立てた後、給水するだけで補修効果が得られる新しい迅速復旧工法を開発している(図-1)。

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、連続繊維シート巻き立て工法の含浸接着樹脂には使用された例はみられない。水硬性ポリウレタン樹脂および連続繊維シート(炭素、アラミド、ピニロン)を用いた補修効果検証実験¹⁾より、エポキシ樹脂を用いた従来工法と同程度の補修効果を発揮したことから、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、含浸接着樹脂として一層の改良が期待できる²⁾。

そこで本研究は、水硬性ポリウレタン樹脂が含浸接着樹脂として保有すべき物性を把握するため、エポキ

シ樹脂および性質が異なる2種類の水硬性ポリウレタン樹脂を用いて、樹脂の特性が補強効果に及ぼす影響について実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) 水硬性ポリウレタン樹脂

本研究で使用した水硬性ポリウレタン樹脂(35000 ~ 45000 mPa・s at20)は、一液硬化性樹脂であり、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。原液を直接使用すると、粘性が高いため扱いづらく、発泡し易いため、浮き・剥離の原因となる。そこで、予備実験より、水硬性樹脂 A はグリコールエーテル系溶剤により希釈し、水硬性樹脂 B は反応性希釈剤により希釈して使用した。

(2) 連続繊維シート

本研究ではアラミド繊維シート(公称値,目付量 280g/m², 設計厚さ 0.193mm, 引張強度 2060N/mm², 弾性係数 1.18×10⁵N/mm²)を用いて試験を行った。

2.2 接着試験

3種類の樹脂をそれぞれ含浸させたアラミド連続繊維シートとコンクリートの接着強度を把握するため、

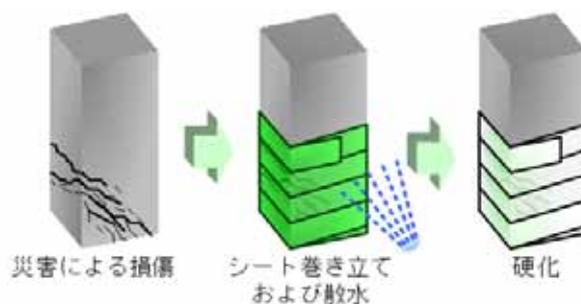


図 - 1 迅速復旧工法の施工概念図

キーワード 水硬性樹脂, 連続繊維シート, 接着強度, 付着強度

連絡先 〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5 芝浦工業大学 TEL03-5859-8359

JSCE-E 545-2007 に準拠し接着試験を行った。試験は図 - 2 に示すように、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、7日間養生後、鋼製治具(40mm×40mm)を接着し、試験を行った。接着強度 f_{au} は式(1)により算出した。

$$f_{au} = \frac{F_{au}}{A_s} \tag{1}$$

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)

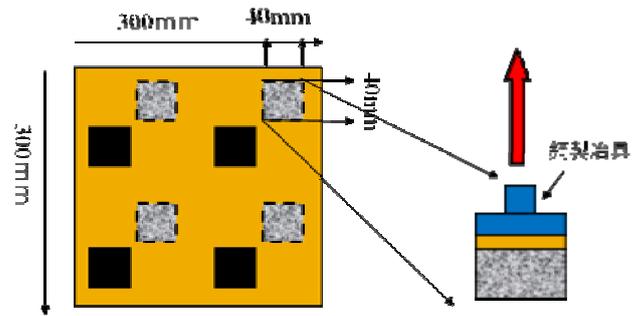


図 - 2 接着試験

2.3 付着試験

3種類の樹脂をそれぞれ含浸させた連続繊維シートとコンクリートの付着特性を把握するため、JSCE-E 543-2007 に準拠し付着試験を行った。形状・寸法は図 - 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 200mm となるように調整し貼り付けた。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。

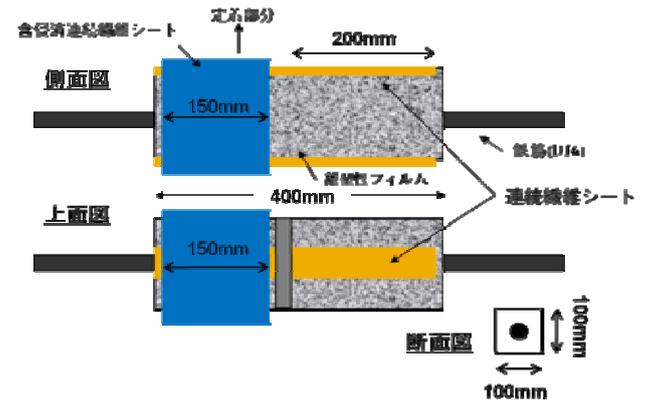


図 - 3 付着試験

付着強度 τ_u および界面剥離破壊エネルギー G_f はそれぞれ式(2)、(3)により算出した。

$$u = \frac{P_{max}}{2bl} \tag{2}$$

ここに、 τ_u ：付着強度(N/mm²)、 P_{max} ：最大荷重(N)、 b ：連続繊維シート幅の平均値(mm)、 l ：連続繊維シートの試験部における有効付着長(mm)

$$G_f = \frac{P_{max}^2}{8b^2 E_f t} \tag{3}$$

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)

2.4 補強効果検証実験

試験体寸法を図 - 4、試験体諸元を表 - 2、材料試験結果を表 - 3 に示す。実験は、連続繊維シートをせん断

表 - 1 材料試験結果

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)		弾性係数 (N/mm ²)
	No.1	32.5	
No.2	30.6		2.35×10 ⁴
No.3	33.5		2.45×10 ⁴
No.4	32.5		2.43×10 ⁴
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 SD490 D29	523	677
せん断補強筋 SD295A D6 (0.2%offset)	349	506	1.82×10 ⁵
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)
	アラミド 水硬性樹脂A	2460	1.43×10 ⁵
	目付量 280g/m ² 水硬性樹脂B	2660	1.46×10 ⁵
	エポキシ樹脂	2610	1.25×10 ⁵

スパンに1層巻き立て、梁上面にて 200mm の継手長を設け補強を行い、7日間養生した後、載荷した。

載荷方法は、2点集中の単調載荷とし、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移動および回転支持とした。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。

表 - 2 供試体諸元

試験体 No.	有効高さ d (mm)	スパン a (mm)	a/d	軸方向鉄筋		せん断補強筋		連続繊維シート種類	樹脂種類	
				材質 径	鉄筋比 (%)	材質 径	鉄筋比 (%)			
1	300	900	3		3.06		0.15	-	-	
2				SD490		SD295A		アラミド	水硬性樹脂A	
3				D29		D6				水硬性樹脂B
4										

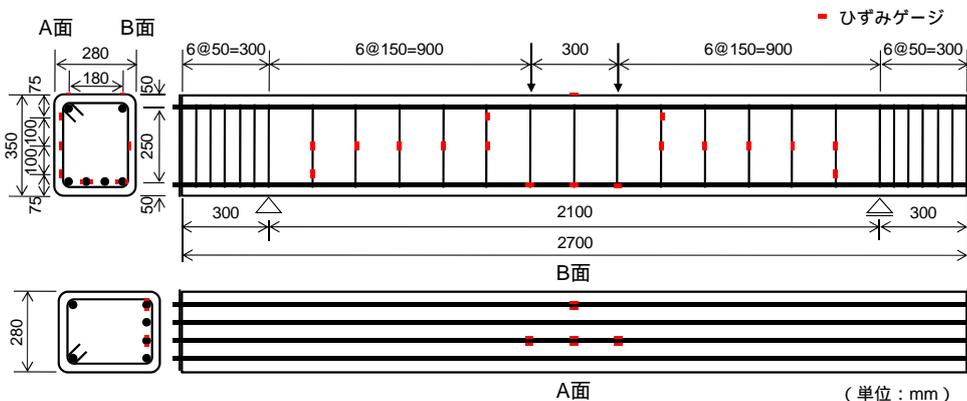


図 - 4 試験体寸法

3. 実験と考察

3.1 接着試験

実験結果を図 - 5 に示す。水硬性樹脂 A は 2.0 N/mm²，水硬性樹脂 B は約 3.0 N/mm²，エポキシ樹脂は 5.0 N/mm² という結果が得られた。水硬性樹脂 B は，水硬性樹脂 A と比較し 1.5 倍の強度を有しているが，エポキシ樹脂と比較すると 0.6 倍程度であった。水硬性樹脂 A，B の接着強度の差の主な要因として，水硬性樹脂 A は他の樹脂と比べ，給水により形成されるウレタン硬化物の塗膜が弱いことが考えられる。一方，水硬性樹脂 B は，ウレタン硬化物の塗膜が硬いことから鉛直方向の引張に対して強度が発現されたと考えられる。

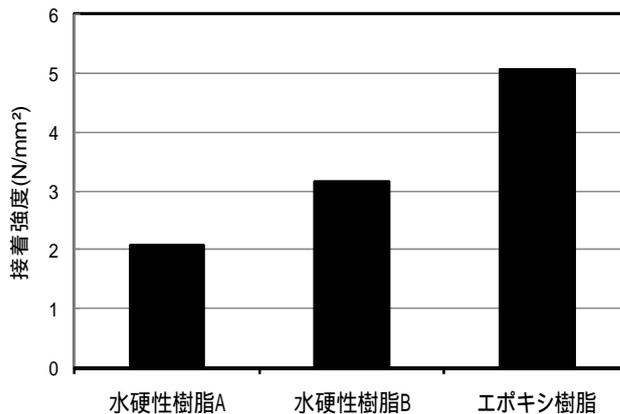


図 - 5 接着強度

3.2 付着試験

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 0.5 N/mm を用いてよいとされている³⁾。本実験での付着強度を図 - 6 に示し，界面剥離破壊エネルギーを図 - 7 に示す。水硬性樹脂 A およびエポキシ樹脂の場合，界面剥離破壊エネルギーは安全側の値を満たし，有効付着長も同程度の値を示した。水硬性樹脂 B の場合，付着強度についてはエポキシ樹脂と同程度の強度を発現したが，界面剥離破壊エネルギーは水硬性樹脂 A の 1/2 程度であった。これにより，最大付着応力と界面剥離破壊エネルギーの関係より，水硬性樹脂 A は相対変位が B より比較的大きい値とな

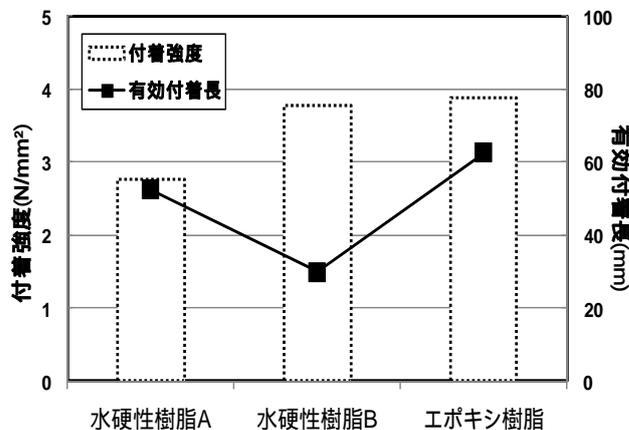


図 - 6 付着強度

るため、延性的な性質を有していると言える。一方、水硬性樹脂 B は他の樹脂と比べると有効付着長が小さく、相対変位も小さい値となるため、脆性的な性質を有していると言える。

3.3 補強効果検証

各試験体の計算値と実験値を表 - 3、荷重 - 変位関係を図 - 8 に示す。No.1 は無補強の試験体であり、補強後の耐力向上の比較基準とした。No.2(水硬性樹脂 A)は、計算値を上回り、最大耐力および最大変位の向上が確認された。No.3(水硬性樹脂 B)は、耐力の向上は確認できたが、計算値を下回る結果であった。No.4(エポキシ樹脂)は、計算値を大幅に上回り、最大耐力および最大変位の向上が確認された。これら実験結果より、No.2(水硬性樹脂 A)は、接着力は他の樹脂と比較しても低い値だが、付着試験の結果を踏まえると、延性的な性質を有しているため、その特性を効果的に発揮することで補強効果が得られたと考える。No.3(水硬性樹脂 B)については、接着力は高いが脆性的な性質を有するため、シートとコンクリートの界面の付着が弱く、連続繊維シートの効果を十分に発揮できなかったと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 水硬性樹脂 A を連続繊維シートに適用した場合、接着力は低いが、延性的な性質を効果的に発揮し、エポキシ樹脂と同等の補強効果を得られた。
- 2) 水硬性樹脂を連続繊維シートに含浸させた場合、樹脂の弾性力が付着特性に依存するため、含浸接着樹脂としては延性的な性質を有する必要がある。

謝辞

本研究は、平成 21 年度国土交通省建設技術研究開発助成制度(研究代表者:加藤佳孝)によるものである。また、樹脂を提供していただいたエムシー工業(株)山崎久史氏、研究実施において、東京大学生産技術研究所西村次男氏、東急建設(株)北沢宏和氏、小島文寛氏、芝浦工業大学大学院鈴木将充氏、(株)東京測器研究所、ならびに研究室各位の協力を得た。ここに記して、感謝の意を表す。

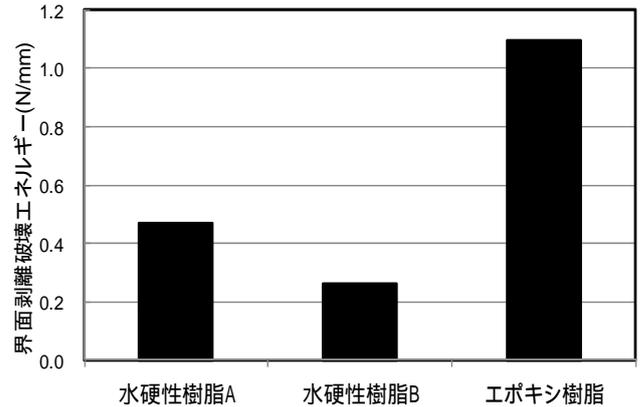


図 - 7 界面剥離破壊エネルギー

表 - 3 各試験体耐力

供試体No	種類	計算値(kN)	実験値(kN)
1	無補強	332.7	355.7
2	水硬性樹脂A	711.7	757.3
3	水硬性樹脂B	706.5	649.9
4	エポキシ樹脂	666	780.1

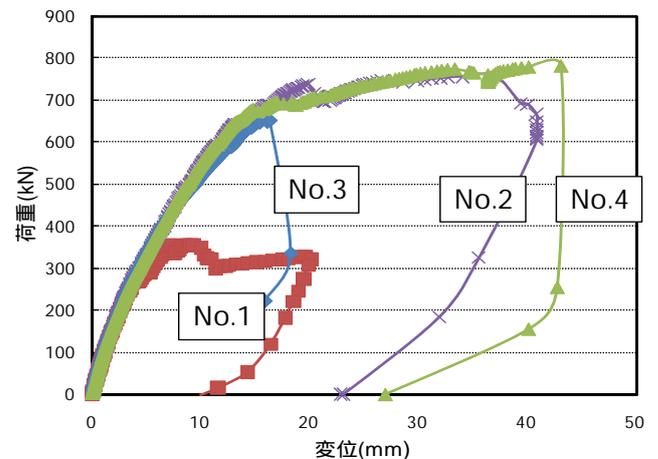


図 - 8 荷重-変位関係

参考文献

- 1) 笠倉亮太, 鈴木将充, 小島文寛, 伊藤正憲, 加藤佳孝, 牧剛史: 水硬性樹脂を含浸させた連続繊維シートを用いた迅速復旧工法の開発, コンクリート工学, Vo.47, No.12, pp.18-25, 2009.12
- 2) 日本ウレタン工業協会, <http://www.urethane-jp.org/>
- 3) 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