

論文 PVA 繊維を用いた高靱性 FRC による吹付け材料の鉄筋錆び膨張モデル実験

齊藤 忠*¹・関田 徹志*²・坂田 昇*³・平石 剛紀*⁴

要旨：補修材料のひび割れ発生後の特性に焦点をあてて、PVA 短繊維混入高靱性モルタル（高靱性 FRC）と既存のポリマーセメントモルタルとを比較した。鉄筋腐食膨張モデル実験の荷重-変位の推移において高靱性 FRC は初期ひび割れ発生以降も大きな変位に至るまで高い荷重を示した。さらに、この過程においてひび割れが分散し多数の微細な幅に抑制される現象が認められた。これらの結果から高靱性 FRC は剥落に対する抵抗性が高く、また、有害物質の侵入抑制に優れている可能性が見出された。

キーワード：補修、ひび割れ、靱性、繊維補強、PVA 繊維

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造の補修材料については、材料単体の力学性能や耐久性および既存コンクリートとの付着性能に関して既に多くの研究がなされている。しかし、補修を受けた構造物が供用中にひび割れが再度発生した場合、外部物質の侵入によるコンクリートの劣化や鉄筋腐食が促進され、その結果として既存コンクリートや補修部分の剥落に至る可能性がある。このひび割れ発生後の特性については、十分な検討がなされているとは言えないのが現状である。

このひび割れ後の力学特性が通常モルタルと大きく異なる材料として、近年研究が進んでいる短繊維混入高靱性セメント複合材（以下、高靱性 FRC）が注目されている^{1),2)}。これは適切に材料設計されたモルタル中に高強度の短繊維を 1~2%程度混入させた材料であり、引張応力が加えられると微細な複数のひび割れを発生させて、擬似ひずみ硬化と呼ばれるひずみの増大とともに応力が増大するという性能を示し、高い靱性を発現することを特徴とする。

本研究では高靱性 FRC を補修材料として吹

付けできる材料に改良し、そのひび割れ発生後の特性、とりわけ剥落に対する抵抗性に優れた補修材料の開発を目的として実験的検討を行った。この剥落抵抗性の評価を行うため、鉄筋腐食膨張に起因するかぶりの剥落メカニズムを想定したモデル実験を考案し、高靱性 FRC および既存のポリマーセメントモルタルを対象として実験を行った。

2. 実験計画

2.1 試験方法

(1) 試験方法の考案

剥落に対する抵抗性の評価方法については例えば既存コンクリートとの界面の付着力を測定する方法は開発されているが、鉄筋腐食膨張に起因するひび割れ抵抗性およびかぶりの剥落に対する抵抗性の評価方法は未だ確立されていない。そこで、本研究では、鉄筋腐食膨張に起因するかぶりの剥落を想定するモデル実験として、鉄筋に見立てたテーパピンを加工して製作したくさびを供試体のくさび挿入口に押し込むことによって鉄筋腐食膨張を模擬する試験方法を考

* 1 (株)クラレ 東京産資開発部部員 工修 (正会員)

* 2 鹿島 技術研究所 建築技術研究部 生産・材料グループ 主任研究員 Ph.D. (正会員)

* 3 鹿島 技術研究所 土木技術研究部 材料・LCE グループ グループ長 工博 (正会員)

* 4 鹿島 技術研究所 土木技術研究部 材料・LCE グループ 研究員 (正会員)

案した。本研究では、この試験方法をくさび試験と称する。

(2) 試験装置

試験装置の概要を図-1に示す。同図にあるように、受け台の中央を穿孔し、くさびと受け台が干渉しない構造とした。くさびは、JIS B 1352-1988 に規定されるステンレス製テーパピンを型枠への固定および載荷板への取付けのため図-1に示すように加工したものである。テーパピンの呼び径は16mm、呼び長さは200mm、テーパは1/50である。

2. 2 供試体

(1) 調合 (配合)

高靱性FRCは表-1に示す調合 (配合) とし、繊維種類としては価格と供給性の点で有利なPVA繊維 (PVA: Polyvinyl Alcohol) のビニロンを採用した。調合 (配合) 上の空気量を外割りで15%と高くすることによって圧送性を高めた。比較用の補修材料は実績の多いポリマーセメントモルタルとし、市販されている吹付け用のプレミックスタイプのもの (以下、モルタルA) を対象に加え、重量比でプレミックスモ

ルタル/SBR系液体ポリマーディスパージョン/水=100/3.7/13の調合 (配合) で練り混ぜた。練混ぜは、高靱性FRCはオムニミキサ (容量70L) を用いて50L/バッチのスケールで、モルタルAはパン型ミキサ (容量200L) を用いて約50L/バッチのスケールで行った。

(2) 成形および養生

試験体の成形は、くさびを固定した図-2に示す型枠の内部に上部より吹付けガンによって材料を吹付けることによって行った。吹付けガンまでの材料の圧送はスクィーズ式ポンプを用いて行った。吹付けは間隔をおいて数層に分けて行い、試験体表面をこてにより仕上げた。

吹付け成形後、材齢2日でくさびを抜き取るとともに脱型して、20℃の水中にて養生した。試験の直前に、コンクリートカッターにて図-3に示す形のくさび試験供試体 (縦10cm×横10cm×厚さ5cm) を試験体より切り出した。この際、試験体をくさびの方向に平行にカットするとともに、厚さ方向の切断位置はくさびの先端部分が埋め込まれていた側のモルタル端から5cmの位置とした。各材料について3個ずつ、

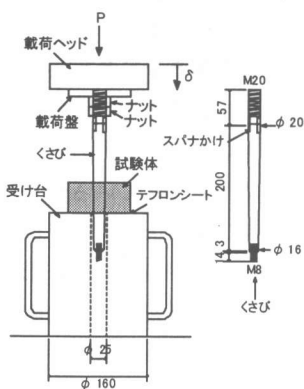


図-1 くさび試験装置

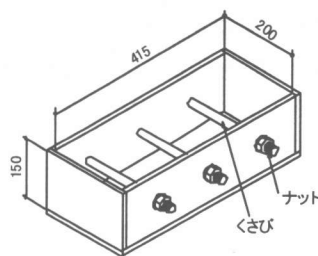


図-2 型枠

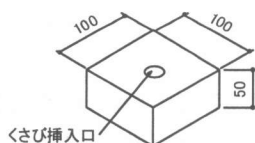


図-3 くさび供試体

表-1 高靱性FRCの調合 (配合)

水結合材比 W/B	砂結合材比 S/B	単位水量 W (kg/m ³)	繊維体積率 ¹⁾ V _f (%)
0.32	0.41	382	2.1

1) 繊維: 繊維長12mm, 直径0.04mm
引張弾性率40GPa, 引張破断強度1600MPa

くさび供試体を作製して材齢 50~52 日の時点で試験に供した。全 6 個の供試体の縦、横、厚さ、くさび挿入口の大きい方および小さい方の直径をノギスを用いて各々 2 箇所測定した。全測定値の変動係数は各々 0.34%, 0.52%, 1.2%, 0.64% および 0.46% であった。

なお、くさび供試体の作製と平行して圧縮供試体 (JIS A 1108)、ダンベル型直接引張供試体³⁾および曲げ供試体 (JIS A 1106) も型枠に直接材料を吹付けることによって作製した。くさび供試体と同様に水中養生した後、くさび試験時に各々の試験に供した。

2. 3 試験手順

試験は次の手順で行った。まず、脱型時に一旦抜き取ったくさびに潤滑用のグリースを塗っておき、供試体の中空部 (くさび挿入口) に再

表-2 材料のフレッシュ性状

材料	モルタルフロー (mm)	空気量 (%)	練上がり温度 (°C)
高靱性FRC	178	20	25.6
モルタルA	195	20	16.0

表-3 材料の力学試験結果

材料	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張終局ひずみ (%)	曲げ強度 (N/mm ²)
高靱性FRC	59	5.80	4.4	11.6
モルタルA	53	3.74	0.016	5.24

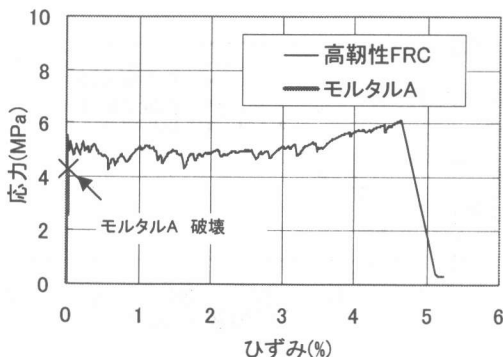


図-4 引張試験における応力-ひずみ曲線

び手で挿入した。荷重は油圧式の圧縮試験機を用いて、くさびを 2mm/min の速度で供試体に押し込むことで行った。計測はくさびの押込量(以下、くさびの変位と呼ぶ)と荷重をデータロガーで連続的に記録した。さらにひび割れ幅についても二つの方法で計測を行った。第一の方法では、初期ひび割れが発生した時点で一旦加力を停止し、CCD マイクロスコープを用いて供試体側面の当該ひび割れの長さ方向のほぼ中央の幅を計測した。ここで初期ひび割れとは最初に発生したひびわれを指す。加力を再開してからは 2.5mm あるいは 5mm のくさびの変位ごとに初期ひび割れの幅を計測した。第二の方法では、すべてのひび割れの幅をクラックスケールを用いて同様に計測した。以上の計測を荷重が大きく低下するまで行った。

3. 実験結果と考察

3. 1 フレッシュ性状および力学試験

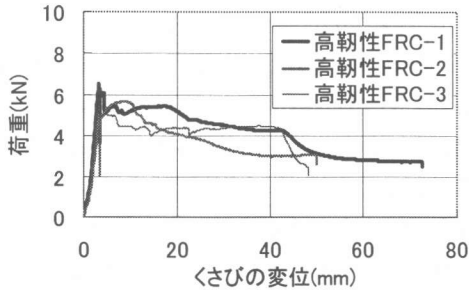
材料のフレッシュ性状を表-2 に示す。いずれの材料も問題なく吹付けることが可能であった。練上がり時点で 20% と高かった空気量は吹付け後には 8~9% にまで低下していた。養生後の材料の力学試験結果を表-3 に示す。直接引張試験における応力-ひずみ曲線を図-4 に示す。表-3 からは高靱性 FRC は引張試験において終局ひずみが約 4% にも達していること、また図-4 からは擬似ひずみ硬化現象を示していることがわかる。ここでいう終局ひずみとは連続的な応力の低下が始まる時点におけるひずみを指す。これに対してモルタル A は通常のモルタルと大きく変わるものではなく、高靱性 FRC との変形能力の差は顕著であった。また曲げ強度についても高靱性 FRC はモルタル A の約 2 倍に達した。

3. 2 くさび試験

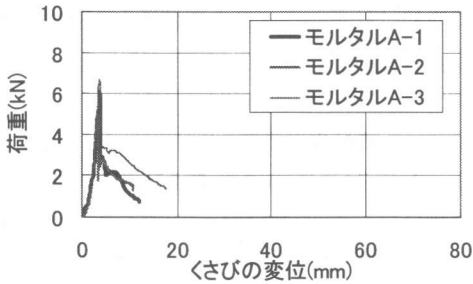
(1) 荷重-変位曲線

くさび試験の荷重-変位曲線を図-5 に示す。初期ひび割れが発生する応力は高靱性 FRC とモルタル A とは同等で 6kN 程度であった。しか

し、高靱性 FRC はモルタル A と異なり、初期ひび割れが発生した後も大きなくさびの変位に至るまで高い荷重を示した。ここでくさびを押し込んでいくにつれて、すなわちくさびの変位



(a) 高靱性 FRC



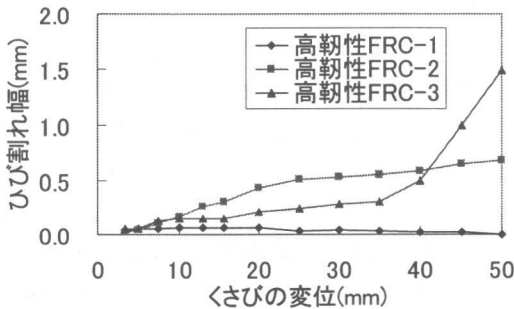
(b) モルタル A

図一五 くさび試験における荷重—変位曲線

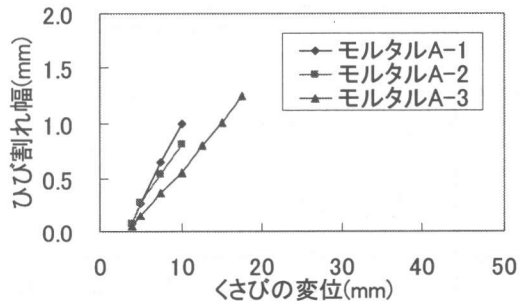
表一四 初期ひび割れ幅

(単位:mm)

材料	試験体1	試験体2	試験体3	平均
高靱性FRC	0.034	0.024	0.049	0.0357
モルタルA	0.078	0.073	0.050	0.0670



(a) 高靱性 FRC



(b) モルタル A

図一六 初期ひび割れ幅の変化

が大きくなるにつれて供試体下面のくさび挿入口は次第に拡大していく。たとえば変位 7.5mm における供試体下面のくさび挿入口の直径は試験開始前のそれと比べて計算上 0.9%拡大していることになる。このくさび挿入口の拡大度合いは直接引張試験におけるひずみと直接的に関連付けられるものではない。しかし、鉄筋の腐食膨張状態を表現する代用特性としてはわかりやすいものであると考える。前述のくさびの変位 7.5mm における両者の荷重の平均値は高靱性 FRC/モルタル A=5.1/2.3 (kN) と明らかな差が認められた。くさび試験における初期ひび割れ以後の荷重はひび割れ界面の応力伝達を反映しているものと考えられる。また、一般にかぶりのセメントモルタルが剥落するのは、ひび割れ界面で伝達可能な応力がかぶり部分の自重による応力より低い場合であると考えられ、高靱性 FRC の剥落に対する抵抗性はモルタル A より高いと考えられる。

(2) 初期ひび割れ

マイクロスコープを用いて計測した初期ひび割れ (最初に発生したひび割れ) 幅を表一四に示す。表一四によれば、高靱性 FRC の初期ひび割れ幅は 0.024~0.049mm とモルタル A のほぼ 1/2 に過ぎないことがわかる。

図一六は、初期ひび割れ幅の変化をくさびの変位 (くさびの押込量) に対して示したものである。モルタル A においては早期に初期ひび割れ幅が増大したのに対して高靱性 FRC におい

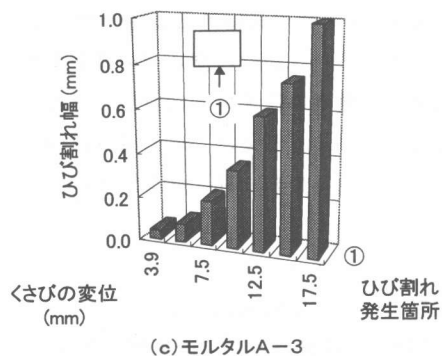
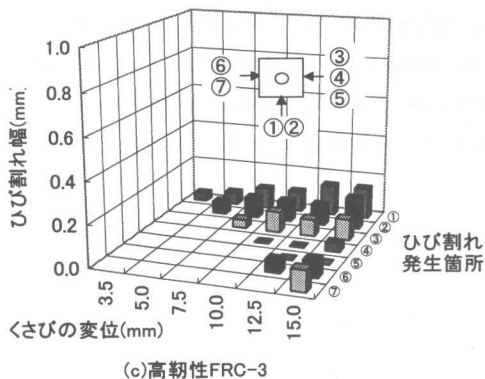
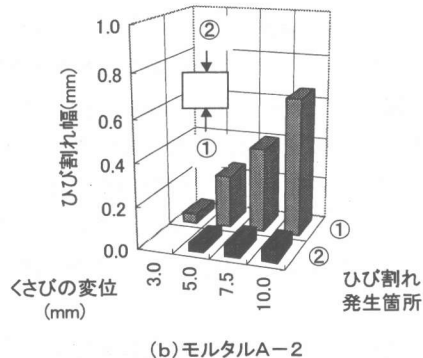
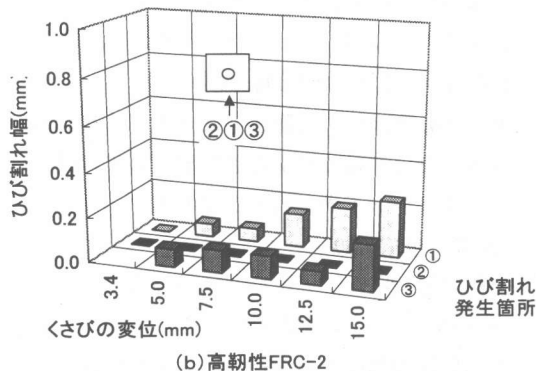
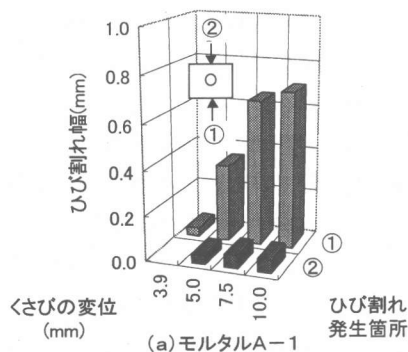
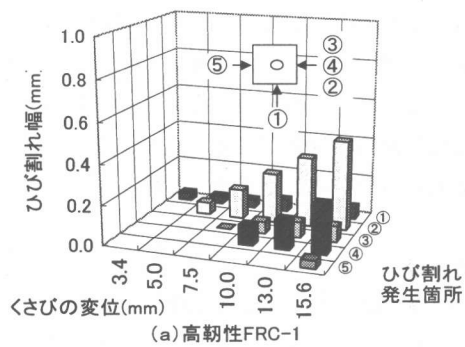


図-7 くさびの変位とひび割れ幅の関係
(高靱性 FRC)

図-8 くさびの変位とひび割れ幅の関係
(モルタル A)

ては増大が遅いことが図から読み取れる。これは、後述するように、高靱性 FRC の場合には微細な複数のひび割れに分散して発生するためである。

(3) 複数ひび割れの発生

各供試体に発生したすべてのひび割れについて発生箇所毎に、くさびの変位とひび割れ幅との関係を図-7 および図-8 に示す。図中の丸数字は発生したひび割れの識別番号であり、そ

の数字は発生した順序を表す。供試体上面から見た場合の側面におけるひび割れ発生箇所を図中に示した。図-7 から明らかなように、高靱性 FRC の場合にはくさびを変位 15mm まで押込む過程において新たなひび割れが次々と発生し、そのひび割れ幅は一部の例外を除けば最大のもので概ね 0.2mm 程度にとどまっている。このように高靱性 FRC の場合、初期ひび割れ幅のみならず第 2、第 3 と続く新たなひび割れの

幅も抑制されると考えられる。ここで、くさびの押込みは鉄筋の腐食膨張を模擬しているのであるが、くさびの変位が15mmの時点においては供試体下面のくさび挿入口は試験前に比べて計算上1.9%拡大していることになる。くさび供試体のかぶりに相当する部分の厚さはおよそ $C=42\text{mm}$ であり、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕による一般の環境の場合の許容ひび割れ幅は、 $0.005 \times C = 0.21\text{mm}$ となり、高韌性FRCのひび割れ幅は上記許容ひび割れ幅を概ね下回っている。それに対してモルタルAの場合は、図-8に示すようにくさびの挿入につれて初期ひび割れが次第に拡大していき、いずれの供試体の場合も最大ひび割れ幅は0.6mmを超えるに至った。新たなひび割れの発生は1本のみしか認められないか、あるいは全く認められなかった。

水の浸透量はひび割れ幅の3乗に依存すると報告⁴⁾もあり、この実験結果は高韌性FRCの微細な複数のひび割れがひび割れ幅の低減を果たし、水や有害物質の流入抑制に貢献できる可能性を示唆している。例えば、塩分浸透に対する抵抗性等について今後、明らかにしたい。

4. まとめ

本報告で提案した鉄筋腐食膨張モデル実験を用いて、吹付け補修材料としての高韌性FRCをポリマーセメントモルタルと比較した結果、次のことが明らかになった。

- ①初期ひび割れ発生以降、大きなくさびの変位に至るまで荷重は低下せず、かぶりの剥落に対する抵抗性が高い。
- ②鉄筋膨張に伴って多数のひび割れが発生することでひび割れ幅を大きく低減する。

以上の結果から、補修材料としての高韌性FRCは補修後のひび割れが生じた後での特性において他の材料に比べて優れている可能性があると考えられる。

今後の課題として、本研究で提案したモデル実験と実際の鉄筋腐食膨張との関係を明らかに

する必要がある。また、ひび割れ幅抑制による耐久性の向上について、定量的な検証を今後行う予定である。本材料の使用によって社会的基盤の補修間隔の延長が可能となり、維持コストの低減につながることを期待される。

参考文献

- 1) 閑田徹志ほか：PVA繊維を用いた高韌性FRCによる短スパンはりのせん断挙動に関する実験的研究，コンクリート工学年次大会論文集，Vol.22, No. 3, pp. 193-198, 2000
- 2) 笠原美幸ほか：高韌性型セメント系複合材料を用いた柱部材の構造性能に関する実験研究，コンクリート工学年次大会論文集，Vol.22, No. 3, pp. 385-390, 2000
- 3) 秋濱繁幸ほか：ビニロン繊維補強コンクリート(VFRC)の実験的研究(その1) - ビニロン短繊維で補強したVFRCの力学的性能について，鹿島技術研究所年報，Vol. 33, pp. 123-128
- 4) Tsukamoto, M., Tightness of Fiber Concrete, Darmstadt Concrete, Annual Journal on Concrete and Concrete Structures, Vol. 5, pp. 215-225, 1990