報告 超高強度繊維補強モルタルの曲げ特性における寸法効果

土井 至朗*1・川又 篤*2・唐沢 智之*1

要旨:水結合材比の異なる配合で超高強度繊維補強モルタルを作成した。フレッシュ性状お よび硬化後の強度特性について良好な性能を得ることが出来た。さらに、この超高強度繊維 補強モルタルの曲げにおける寸法効果を把握するために、圧縮、引張および曲げ試験を行っ た。圧縮および引張試験結果を使用して構成則を定めて軟化特性を考慮した断面の釣り合い 計算を行った結果、曲げにおける寸法効果をシミュレートすることが出来た。 キーワード:超高強度モルタル、繊維補強、寸法効果、

1. はじめに

近年、コンクリート技術の発展に伴い、用途 に応じて様々なコンクリートを作ることが可能 になってきている。高強度化や繊維補強を施す ことで今まで以上の断面の薄肉化や、スパンの 増大化,またせん断補強鉄筋量を減らすことな どが期待される。コンクリートやモルタルに繊 維を混入する場合、最近では有機化合物系の繊 維の研究が盛んであるが、有機化合物系の繊維 ではマトリックスの強度が高くなると、マトリ ックスと繊維との付着強度が繊維の引張強度を 上回ってしまい,繊維による補強効果が十分に 発揮できない場合がある。また、既往の研究で は圧縮強度が 200N/mm² 以上のコンクリートを 使用した鋼繊維補強コンクリートの例もあるが, 本研究では一般的な材料を用いて練混ぜ可能な, 圧縮強度が 100N/mm² を超えるような超高強度 の鋼繊維補強モルタルの作製を目標とした。本

報告は、そのようなモルタルを作製し、強度特 性を確認した結果と、さらに寸法効果を把握す ることを目的に、計算によるシミュレーション を試みた結果を報告するものである。

2. 強度特性の把握

2.1 フレッシュ性状

超高強度繊維補強モルタルのフレッシュ性状 を確認するため,水結合材比を変化させた3配

表一1 使用材料

セメン	ント	低熱ポルトランドセメント 密度 3.22g/cm ³					
混 和	材	シリカフューム 密度 2.20g/cm ³					
膨 張	材	密度 3.16g/cm ³					
高性能AE	減水剤	ポリカルボン酸エーテル系 密度 1.05g/cm ³					
鋼 繊	維	径 0.16mm 長さ 13mm 密度 7.86g/cm ³					
細骨材	S1	木更津産陸砂 表乾密度 2.56g/cm ³ 吸水率 2.24% 粗粒率 2.47					
50:50	S2	岩船産砕砂 表乾密度 2.60g/cm ³ 吸水率 1.75% 粗粒率 3.23					

表一2 配合

	目標	目標	W/C	水	セメント	シリカ	か -ム 膨張材	細骨材		分别分开分析	高性能
	空気量	スランプフロー				フューム		S1	S2	亚凹利以术田	AE減水剤
	(%)	cm	(%)				(kg/m^3)				$(C \times \%)$
シリーズ1	6.0 ± 1.5	5 550 \pm 150	15	221	1302	145	29	349	349	157.2	1.5
シリーズ2			18	221	1081	120	29	452	452	157.2	1.5
シリーズ3			21	221	923	102	29	526	526	157.2	1.5

*1 鉄建建設(株)技術センター 材料・構造グループ (正会員)

*2 鉄建建設(株)技術センター 材料・構造グループ 博士(工学) (正会員)

合を用意した。使用材料を表-1に、配合を表 -2に示す。鋼繊維の混入率は外割で 2.0vol.% とした。また、使用セメント量が多く発熱が懸 念されるため、セメントは低熱ポルトランドセ メントを使用した。

練混ぜはパン型ミキサーを用い, 1)砂とセメントを投入→15 秒攪拌 2)水を投入→90 秒練混ぜ 3)かきおとし→90 秒練混ぜ

4)繊維投入→20 秒練混ぜ

5)かきおとし→60 秒練混ぜ

の手順で行った。繊維混入後のフレッシュ性状 の試験結果を表-3に示す。いずれの配合も材 料分離もなく良好な流動性を確認できた。また, 目視での確認ではあるが,写真-1に示すよう に鋼繊維はファイバーボールになることはなく, 良好な分散性状を得ることが出来た。

2.2 強度特性

繊維補強モルタルの強度特性を確認するため 圧縮強度試験,曲げ試験を行った。

圧縮強度の発現状況を図-1に示す。材齢56 日で116.5~146.6N/mm²の圧縮強度を得ること が出来た。最大荷重時におけるひずみは3800~ 4000 μ と普通コンクリートよりも大きい値とな り,破壊時にも爆裂することはなく,鋼繊維に よる効果が現れていた。

曲げ試験は 100×100×400mm の角柱供試体 で三等分点載荷試験を行った。図-2に荷重と 試験体中央のたわみ関係の曲線を示す。載荷後 しばらくして細かなひび割れが複数発生しなが ら荷重は上がり,その後ひび割れの局所化とと もに荷重はピークを迎え徐々に落ちていった。 マトリックス強度が高くなっても急激な荷重低 下は見られず,いずれのシリーズでも良好な曲 げ靱性を得ることが出来た。また,同一シリー ズ内では試験結果に大きなばらつきは見られず, モルタル内の繊維が均一に分散していたことが 伺える。写真-2に最終的なひび割れ発生状況 を示す。同写真から複数の小さなひび割れが曲 げスパン内にほぼ均等に分布して発生している

表-3 フレッシュ性状試験結果

	W/B	スランプフロー	空気量
	(%)	(cm)	(%)
シリーズ1	15	66.0	6.1
シリーズ2	18	63.0	6.8
シリーズ3	21	49.0	7.0



写真-1 スランプフロー試験



図-1 圧縮強度発現状況



ことが確認できる。

次に既往の研究 いにおける鋼繊維補強モルタ ルとの比較を行ったものを図-3に、またその 圧縮強度や繊維径などを一覧にしたものを表-4に示す。図表中に記した繊維補強モルタルは すべて鋼繊維を使用しているが、ハイブリッド 型 FRCC は鋼繊維 (SC) と PE 繊維の2種類を 混合したものである。図-3の縦軸は曲げモー メントを断面係数で除し公称応力として算定し たものである。同図を見ると、シリーズ3は繊 維混入率4%の SFRM と比べると圧縮強度では 2倍ほど出ているが、曲げ強度と靱性は同程度 であった。また、シリーズ1では超高強度鋼繊 維補強モルタル (RPC) よりも若干低い曲げ強 度と靱性となった。

以上に示したように,一般的な材料を用いて フレッシュ性状が良好なモルタルを練ることが 出来,硬化後の強度特性についてもひび割れ分 散性能に優れ,曲げ靱性の高いモルタルを作る ことが出来た。

3. 寸法効果の確認

圧縮強度 140N/mm² クラスの超高強度鋼繊維 補強モルタルの曲げにおける梁せいの寸法効果 を評価することを目的に, **表**-5に示すように 梁せいの異なる供試体を使用して三等分点曲げ 載荷試験を行った。支承点間の距離, 載荷点間 の距離はいずれも 300mm, 100mm で共通とした。 曲げ試験の概要を図-4に示す。支承点と載荷 点,供試体中央の鉛直変位を高感度変位計によ り測定し,曲げスパンに発生するひび割れの開 口幅をパイ型変位計により測定するものとした。

3.1 材料モデル

曲げ挙動を計算でシミュレートするためには 材料の圧縮,引張の特性を把握しなければなら ない。その材料特性のモデル化をするために圧 縮,引張試験を行った。圧縮応カーひずみ曲線 のモデル化については,圧縮強度と圧縮強度時 のひずみを実験結果の平均値を用いて図-5の ようにモデル化した。なお,圧縮強度に達する



写真-2 ひび割れ状況



図-3 既往繊維補強モルタル/コンクリート

			圧縮強度	繊維径	繊維長	混入率	W/B	
			(N/mm^2)	(mm)	(mm) (mm)		(%)	
ĺ	RPC		223.7		-	2		
	ハイブリッド型	SC	100.8	0.416	32	1.5	32	
	FRCC	PE	100.8	0.034	15	1.5		
ĺ	SFRM 既存FRCC		56.3	0.6	30	4	38	
				0.6	30	1	50	
ĺ	シリーズ1		146.6				15	
ĺ	シリーズ2		136.8	0.16	13	2	18	
	シリーズ3		116.5				21	

表-4 既往繊維補強モルタル/コンクリート

表-5 供試体寸法



までの曲線は「コンクリート標準示方書[構造性 能照査編]」を参照し,式(1)の様に定めた。

また, 圧縮強度試験では圧縮強度到達後, 試 験体が爆裂することはなかったものの, 圧縮強 度以降の試験機の制御が困難であり, 破壊後の ひずみがうまくとれなかったために, モデルで はひずみのみが増加し, 圧縮強度を保持するも のとした。

引張軟化曲線についてもモデル化するため, 図-6に示すように,ひび割れを誘発させるた めに切り欠きを設けた試験体で直接引張試験を 行った。その試験で得られたひび割れ開口幅と 荷重の関係から,モデルは図-7に示すような, ひび割れ発生後に荷重が伸びる擬似ひずみ硬化 を伴うバイリニア型とした。モデル化するにあ たり,引張軟化始発応力および引張強度は実験 結果の平均値とし,引張強度時の変位および限 界開口幅は,引張強度以降の軟化曲線を直線近 似することにより求めた。その直線の傾きは, 開口幅が 2.7mm 付近で傾きが変化するまでの 傾きの平均とした。また,開口するまでの弾性 域については, 圧縮試験から求めた弾性係数に よる直線とした。

3.2 計算結果

以上のようにモデル化した材料特性を元に断 面力の釣り合い計算を行った。曲げ試験結果と その計算により得られた曲げ荷重-開口幅の関 係を図-8に示す。最大曲げ荷重に関しては, いずれの梁せいも実験結果とほぼ同程度の数値 が得られたが,最大荷重時の開口幅に関しては, 計算値は実験値よりも大幅に小さな値となった。 梁せいの高い試験体については,最大曲げ荷重 以降の傾きに関して実験と比較的近い結果を得 ることが出来た。これは前述の写真-2に示し たように,最大荷重に達した後はひび割れは1 本に局所化し,そのひび割れが大きく開いてい







図-8 曲げ挙動の実験値と計算値の比較

くために,計算では比較的近い結果が得られた ものと思われる。。

最大曲げ荷重から算出される曲げ強度の実験 値と計算値の比較を図-9に示す。同図を見る と実験値のほうが若干大きいものの、実験結果 を反映した圧縮および引張の材料モデルを使用 して断面力の釣り合い計算を行うことにより良 好に曲げ強度を評価できることがわかった。次 に最大曲げ荷重時の開口幅の実験値と計算値の 比較を図-10に示す。最大曲げ荷重時の開口幅 の実験値は、計算値よりも大幅に大きな値とな り、また、梁せいが低いほうがより大きな値と なった。これは、計算では一つのひび割れ断面 を対象としているのに対し、この曲げ試験では 試験体底面に設置したパイ型変位計(標点間距 離 100mm) により開口変位を測定しているため, 複数ひび割れが発生した場合は、その合計を測 定しており,見掛けの開口幅が増加したためと 考えられる。また、同図は梁せいが低い場合に は、ひび割れの本数がより多くなることを示し ている。一般に,最大曲げ荷重を越えて荷重が 降下し始めるとひび割れの局所化が顕著になる。 そのため、梁せいが高い場合には、小さな開口 幅で最大曲げ荷重に到達するためにひび割れの



図-10 最大曲げ荷重時の開口幅と梁せい

局所化が早いと言える。

次に梁せいが 25~600mmn の場合において, 断面力の釣り合い計算を行って曲げ強度を算出 した。図ー11 に曲げ強度 fbを引張強度 ftで除し た fb/ft と梁せいの関係を示す。同図より,梁せ いが 200mm 程度を越えると fb/ft が急激に低下す ることがわかる。

上記のことから、十分なかぶりを確保してい れば、耐久性上の劣化因子の進入を回避するた めには梁せいは低い方が有効である可能性があ る。

4. まとめ

以上で述べた実験および計算結果をまとめる と次のようになる。

- (1) 水結合材比 18%程度のモルタルに鋼繊維を 混入し、材料分離もなく、繊維の分散性も良 好な繊維補強モルタルを作ることが出来た。
- (2) 硬化後の特性についても,ひび割れ分散性能, 圧縮靭性,曲げ靭性に優れたものであること が確認できた。
- (3) 圧縮試験,引張試験からそれぞれの特性をモ デル化することにより,曲げ強度を適切に評 価することが出来た。
- (4) 最大曲げ荷重時のひび割れ開口幅について は,実験値と合う結果にはならなかった。今



図-11 100mm を超える梁せいの曲げ強度

後, E縮強度試験のE縮強度以降のモデル化 や, 曲げ試験でのひび割れ開口幅の測定方法 なども含め評価方法を検討する必要がある。 また, 今回の実験では1種類の鋼繊維のみ使 用したが, 今後の研究として, 別の鋼繊維によ る検討や, 別の種類のファイバーとの組み合わ せによる検討, またマトリックスモルタルの改 良などを行う予定である。

参考文献

 日本コンクリート工学協会:高靭性セメント 複合材料を知る・作る・使う 高靭性セメン ト複合材料の性能評価と構造利用研究委員 会報告書, pp.102-109,2002.