

超高強度繊維補強モルタルの作成

土井 至朗*¹・松岡 茂*²
唐沢 智之*¹・川又 篤*¹

概 要

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

PRODUCTION OF SUPER-STRONG FIBER-REINFORCED MORTAR

Shiro DOI*¹ Shigeru MATSUOKA*²
Tomoyuki KARASAWA*¹ Atsushi KAWAMATA*¹

Abstract

Super-strong fiber-reinforced mortar was produced with varying water-to-cement ratios. Its performance was excellent both in fresh properties and strength after curing. Aimed at determining the size effect in bending this mortar, compressive, tensile and bending tests were conducted. Referring to the compressive and tensile test results, a constitutive law was established. Taking the softening property into consideration, sectional equilibrium was calculated. This study simulated the size effect in bending very well.

Keywords: super-strong mortar, fiber reinforcement, size effect

*1 Material / Structure Group, Engineering Technology Center, Engineering Division

*2 Deputy General Manager, Technology Center, Engineering Division

超強度鋼繊維補強モルタルの作成

土井 至朗*¹・松岡 茂*²
唐沢 智之*¹・川又 篤*¹

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 を超えるような超強度の鋼繊維補強モルタルの作製を目標とした。本報は、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. フレッシュ性状

超強度繊維補強モルタルのフレッシュ性状

表-2 フレッシュ性状試験結果

	W/B (%)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)
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

を確認するため、水結合材比を変化させた3配合を用意した。配合を表-1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、以下の手順で行った。

- 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

繊維混入後のフレッシュ性状の試験結果を表-2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できた。

表-1 配合

	目標 空気量	目標 スランプフロー	W/C (%)	水	セメント	シリカ フェーム	膨張材	細骨材		鋼繊維	高性能 AE減水剤
	(%)	(cm)						S1	S2		
シリーズ1	6.0±1.5	55.0±15.0	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 エンジニアリング本部 技術センター 材料・構造グループ

*2 エンジニアリング本部 技術センター 副所長

3. 強度特性

圧縮強度の発現状況を図-1に示す。養生方法は標準養生とし、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3800～4000μ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荷重試験を行った。図-2に荷重と試験体中央のたわみ関係の曲線を示す。荷重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。

次に既往の研究¹⁾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に示す。

図中の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のみ、鋼繊維(SC)とPE繊維の2種類を混合したものである。また、圧縮強度はそれぞれRPC(繊維混入率2.0%)が200N/mm²、ハイブリッド型(繊維混入率SC1.5%+PE1.5%)が100N/mm²、SFRM(繊維混入率4.0%)が50N/mm²程度であった。同図を見ると、シリーズ3は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。



写真-1 スランプフロー試験

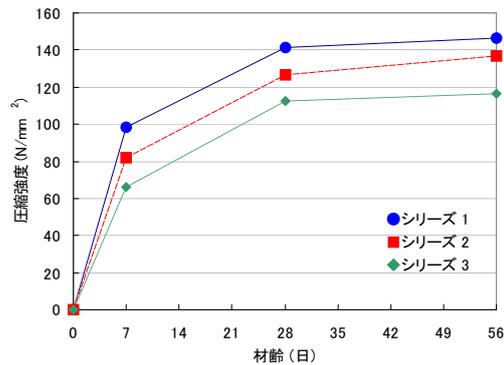


図-1 圧縮強度の発現状況

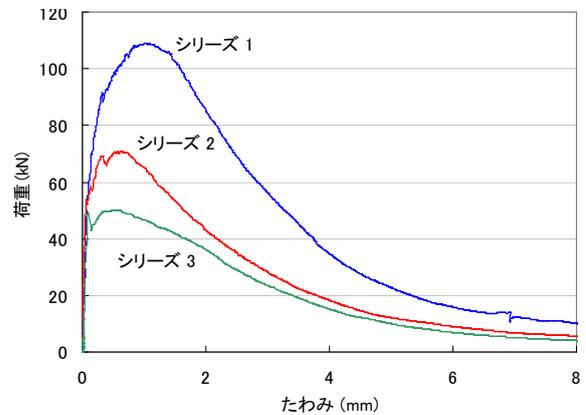


図-2 荷重-たわみ曲線

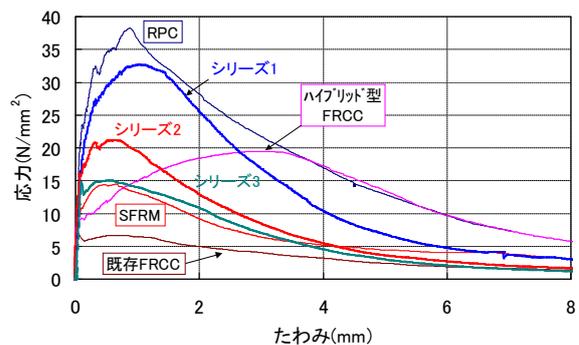


図-3 既往繊維補強モルタル/コンクリート

4. 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-3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。

4.1 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。圧縮応力-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。圧縮強度に達するまでの曲線は「コンクリート標準示方書[構造性能照査編]」を参照して二次曲線とし、それ以降はひずみのみが増加し応力は維持するものとした。

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

表-3 供試体寸法

(mm)		
L	B	H
400	100	100
		75
		50
		33
		25

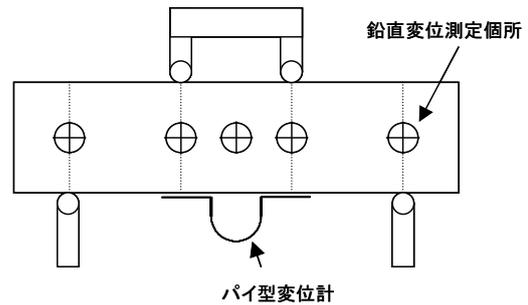
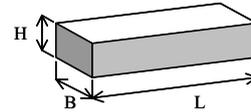


図-4 曲げ試験概要

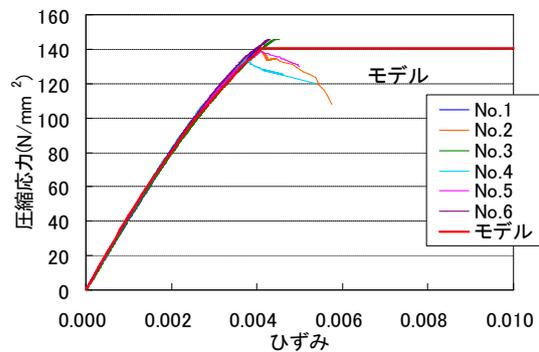


図-5 圧縮応力-ひずみ曲線のモデル化

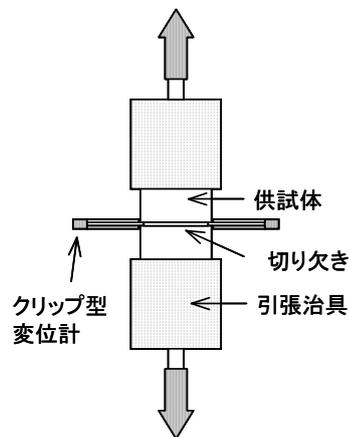


図-6 直接引張試験

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。

4.2 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、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。

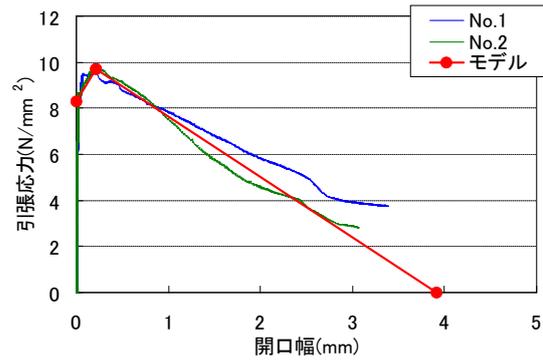


図-7 引張軟化曲線のモデル化

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

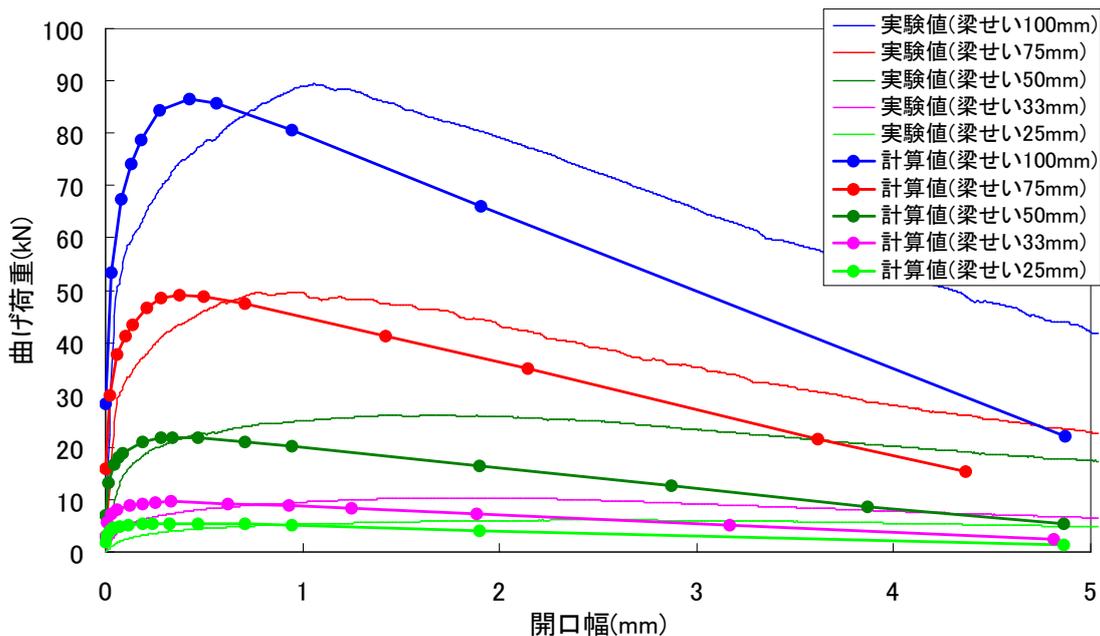


図-8 曲げ挙動の実験値と計算値の比較

て荷重が低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局所化が早いと言える。

次に梁せいが 25~600mm 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-11に曲げ強度 f_b を引張強度 f_t で除した f_b/f_t 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 f_b/f_t 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。

5. 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 of 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、圧縮靱性、曲げ靱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。今後、圧縮強度試験の圧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。

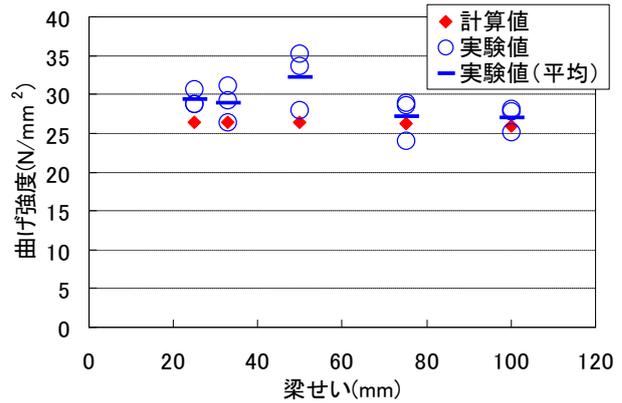


図-9 曲げ強度と梁せいの関係

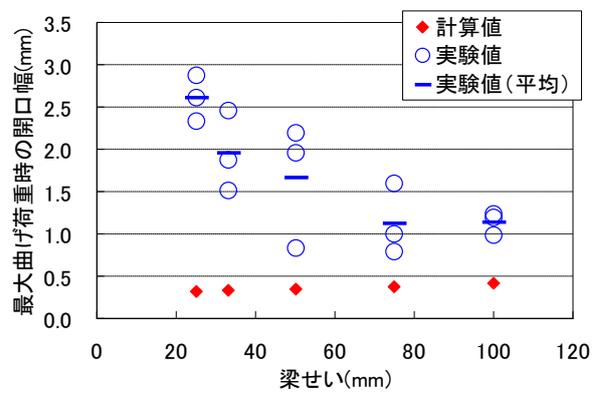


図-10 最大曲げ荷重時の開口幅と梁せい

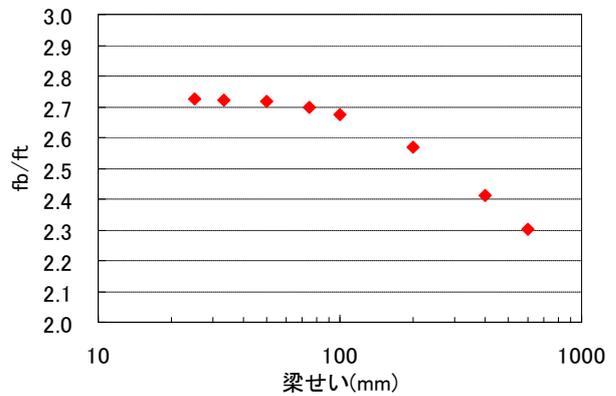


図-11 100mm を超える梁せいの曲げ強度

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う 高靱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