

論文 鋼繊維補強高強度モルタルの力学的性状

佐川 康貴*¹・松下 博通*²・鶴田 浩章*³, 下山 善秀*⁴

要旨: 本研究では超高強度, 高靱性, 高流動性, 高耐久性が得られる新しい無機系複合材料を用いた高強度・高靱性無機系複合材料の基礎的な力学的性状を把握することを目的とし, 養生条件を変化させた場合の圧縮強度, 曲げ強度について検討を行った。その結果, 養生時, 特に初期材齢における水分の供給は強度発現に重要であること, 圧縮時の応力-ひずみ関係は圧縮強度が高いほど弾性的な挙動を示すこと, 曲げ強度は圧縮強度の 1/3 倍程度であること等の知見が得られた。

キーワード: 超高強度, 高靱性, 高流動, 鋼繊維補強, 蒸気養生

1. はじめに

コンクリート構造物の高層化, 高スパン化, 薄肉化に伴い, 高ピーライト系セメントやシリカフェームを用い, 設計基準強度が 60N/mm^2 を超える高強度コンクリートを使用する施工事例¹⁾が増加している。また, 100N/mm^2 を越える超高強度コンクリートも使用され始めている。高強度コンクリートは高性能減水剤の使用により水セメント比を著しく低くすることが可能なため, 普通強度コンクリートに比べその組織が緻密になり, 中性化, 塩害および凍結融解に対して高い耐久性を有しており, 長寿命化, ミニマムメンテナンスが求められる中で高強度コンクリートを使用した施工が今後一層増加するものと考えられる。

一方, コンクリート柱部材等への靱性付与, トンネル等におけるコンクリート片落下の防止を目的とし, 鋼繊維や有機繊維を混入した繊維補強コンクリートの適用事例も増加している。

本研究では 200N/mm^2 を超える圧縮強度の発現が可能なセメント系粉体および靱性向上を目的とした鋼繊維を用いたモルタルの基礎的な

力学的性状を把握することを目的とし, 養生条件が圧縮強度, 曲げ強度に与える影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 配合

本研究で使用したモルタルの配合を表-1に示す。本研究で用いた粉体はセメントを基材とし, 珪砂, 反応性微粉末等をあらかじめ混合したものの(プレミックス)である。低水粉体比における流動性を確保するため, 専用の液状の高性能減水剤を使用した。練混ぜ時にはあらかじめ減水剤を水に混ぜて使用した。また, 引張応力および曲げ応力作用時における靱性向上を目的とし, 直径 0.2mm , 長さ 15mm の鋼繊維 (0.2% 耐力 2500N/mm^2) を体積比で全体の 2% 混入した。

表-1 配合表

単位量 (kg/m^3)			
水	プレミックス	鋼繊維	減水剤
140	2264	157	40

*¹ 九州大学大学院助手 工学研究院建設デザイン部門 修士(工学)(正会員)*² 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 工博(正会員)*³ 九州大学大学院講師 工学研究院建設デザイン部門 博士(工学)(正会員)*⁴ 太平洋セメント(株)中央研究所 ダクトル開発グループリーダー 工博(正会員)

表-2 養生方法および試験時材齢

シリーズ	脱型(材齢3日)までの養生方法		蒸気養生の有無	脱型から試験時までの養生方法	強度試験材齢(日)	
	圧縮試験用供試体	曲げ試験用供試体			圧縮強度	曲げ強度
S-W	水中養生	封緘養生(ガラス板)	有り	水中養生	5, 7, 28, 91	5, 7, 28, 91
N-W			無し	水中養生	3, 5, 7, 28, 91	7, 28, 91
N-W7A			無し	材齢7日まで水中養生, 以降気中養生	28, 91	-
N-W3A			無し	気中養生	7, 28, 91	-
N-A			封緘養生(ビニール)	無し	気中養生	3, 5, 7, 28, 91

2.2 供試体

練混ぜには容量 50 リットルの水平 2 軸型ミキサを使用し、1 バッチ当たりの練り量は 25 リットルとした。練混ぜは温度 20 ± 2 °C、湿度 60% に保たれた恒温恒湿室内で行った。ミキサーにプレミックスおよび減水剤を混合した水を投入し、12 分間練混ぜを行った。練混ぜ開始直後は粒状であったが、練混ぜ開始から 5 分程度経過すると次第に粘性が増し、流動性に富む状態へと変化した。練混ぜ後に鋼繊維を投入し、さらに 4 分間練混ぜを行った。練上がり時のモルタルの温度は 25.0 °C であった。

供試体は $\phi 5 \times 10$ cm の圧縮強度試験用および $4 \times 4 \times 16$ cm の曲げ強度試験用の供試体を作製し、表-2 に示すように養生条件を 5 通りに変化させた。供試体は各要因、各材齢につき 3 本ずつ作製した。練り混ぜ開始時をゼロ点とし、材齢 3 日 (72 時間) の脱型時まで S-W, N-W, N-W3A, N-W7A シリーズは水中養生を、N-A シリーズは封緘養生を行った。圧縮強度試験用のモルタルは金属製軽量型枠に流し込み、テーブルバイブレーターで気泡抜きを行い、成型した。本実験におけるモルタルは粘性が高く、水中における分離抵抗性が高く、成形直後に 20 °C の水槽内に投入した。なお、N-A シリーズはビニールで型枠を覆い、水分の供給を停止させた。曲げ強度試験用供試体は JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) に規定される鋼製型枠を用いて作製した。圧縮強度試験用供試体と同様に気泡抜きを行った後、全てに対してガラス

板を乗せ、材齢 3 日まで湿布で覆った。脱型後、S-W シリーズは蒸気養生を、N-W, N-W7A シリーズは水中養生を、N-W3A, N-A シリーズは温度 20 ± 2 °C、湿度 60% の環境で気中養生を行った。なお、N-W7A シリーズは材齢 7 日以降は気中養生とした。蒸気養生は目標昇温速度 15 °C/hr で 90 °C まで昇温させた後、90 °C を 48 時間保持した。降温速度は 20 °C/hr を目標とした。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

JIS R 5201 に規定されるフローコーンを用い、鋼繊維投入前および投入後におけるフロー値を測定した。鋼製平板上に置いたフローコーンにモルタルを 1 層に詰め、表面をならした後、直ちにフローコーンを引き上げた。なお、測定時に振動は加えず、フローコーンの内側に付着したモルタルはへらを用いてかき落とした。鋼繊維投入前、投入後のフロー値はそれぞれ 242, 239 で、鋼繊維混入によるフロー値の低下は見られなかった。

JIS A 6204 (コンクリート用化学混和剤) 付属書 1 で規定される方法により凝結時間の測定を行った。なお、貫入抵抗が 2.0 N/mm^2 までは貫入針に別途取り付けられたロードセルで貫入抵抗の測定を行った。測定の結果、始発時間および終結時間はそれぞれ 48 時間 15 分、52 時間 25 分であった。本実験では減水剤に含まれる凝結遅延成分の影響で凝結が非常に遅れる結果

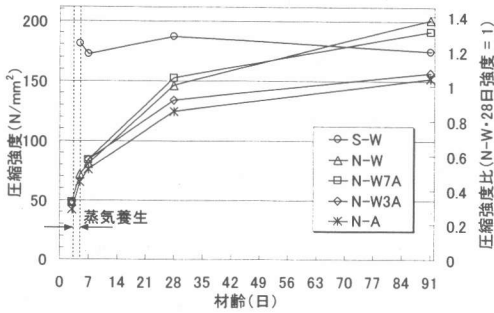


図-1 材齢と圧縮強度の関係

となった。

3.2 圧縮強度

材齢と圧縮強度の関係を図-1に示す。圧縮強度は3本の供試体の試験値の平均値である。図-1の右縦軸は各材齢における圧縮強度をN-Wシリーズの28日強度で除した比(圧縮強度比)を示したものである。脱型まで水中養生を行うことにより約 50N/mm^2 の強度が得られ、その後 90°C で48時間の蒸気養生を行ったS-Wシリーズは、蒸気養生後において強度が約 180N/mm^2 まで向上するが、蒸気養生後における強度の増加は見られない。一方、蒸気養生を行わなかった供試体は材齢の増加に伴い強度が増加している。試験時まで水中養生を行ったN-Wシリーズおよび材齢7日まで水中養生を行ったN-W7Aシリーズはほぼ同等の強度が得られており、N-W3AシリーズあるいはN-Aシリーズよりも長期強度が高いことから、強度発現には水分の供給、特に初期材齢における水分の供給が重要であることが分かる。

図-2は供試体の圧縮強度と単位容積質量との関係を示したものである。配合物の各成分の密度を測定し、算出した計算上の密度は 2.60g/cm^3 であるが、本実験で作製した供試体の単位容積質量の平均値は 2.55g/cm^3 、標準偏差は 0.03g/cm^3 であり、ほぼ最密充填に近いと言える。

本研究で使用した材料は蒸気養生を行った場合、 200N/mm^2 を超える圧縮強度が得られるものであるが、本研究において 180N/mm^2 しか

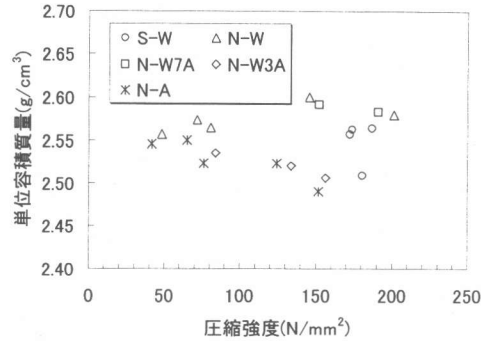


図-2 圧縮強度と単位容積質量の関係

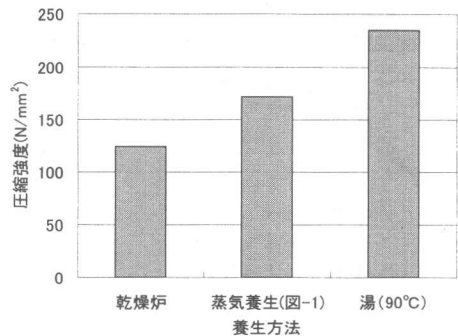


図-3 蒸気養生時の湿度と圧縮強度の関係

得られなかった。荷重時の端面研磨は十分に行っており、また、N-Wシリーズの結果より水和反応は十分行われており、練り混ぜに問題はないものと考えられる。これらのことより、所要の強度が得られなかった原因として蒸気養生時の湿度の不足が考えられたため、蒸気養生時の湿度の影響について検討を行った。 90°C の湯の中、すなわち湿度100%で養生を行った場合と 90°C に設定した乾燥炉の中、すなわち湿度が0%に近い環境で養生を行った場合の圧縮強度を測定した。試験時の材齢は7日とした。図-3に結果を示す。 90°C の湯の中、乾燥炉で蒸気養生を行った供試体の圧縮強度はそれぞれ 235N/mm^2 、 124N/mm^2 であり、乾燥炉、蒸気養生、湯中の順に強度が高く、絶乾状態に近い加温のみの養生では本来の強度が発現できないことが分かる。この結果より、養生時には十分な水分が必要であることが分かる。

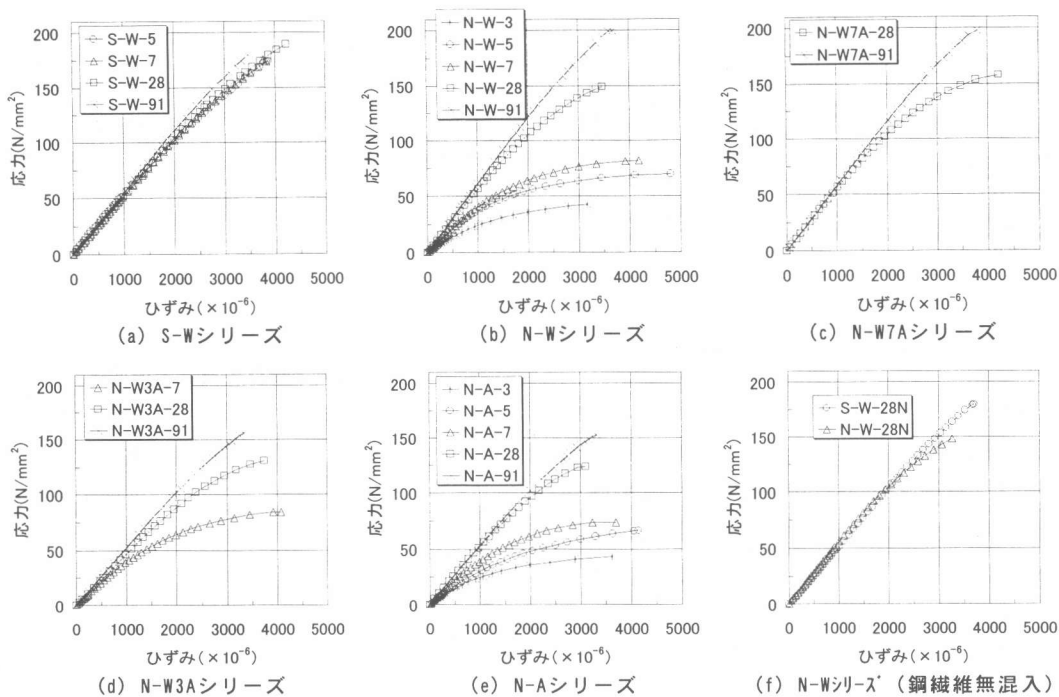


図-4 応力-ひずみ関係

3.3 応力-ひずみ関係

圧縮強度の測定を行った3本の供試体のうち、2本に対してひずみゲージを貼付し、ひずみを測定した。図-4にシリーズ毎に応力-ひずみ関係を示す。凡例においてシリーズ名の後に記す数字は材齢を表す。最大応力に達した直後、供試体に斜め方向あるいは荷重軸方向のひび割れが入り、ひずみの測定が不能となった。試験時の材齢が大きくなるほど、また、圧縮強度が高くなるほど、最大応力に達するまでの応力-ひずみ関係が直線的になり、弾性的な挙動を示している。

図-4(f)には鋼繊維を無混入とした供試体(S-W-28N, N-W-28N)の応力-ひずみ曲線を示す。ただし、養生方法はそれぞれS-Wシリーズ, N-Wシリーズと同じで、試験時の材齢は28日である。繊維無混入の供試体は最大応力に達した直後に爆裂破壊を起こした。繊維を混入したS-W-28(図-4(a))と繊維無混入のS-W-28Nを比較すると両者はほぼ同じ応力-ひずみ関係を描いており、繊維の有無は圧縮

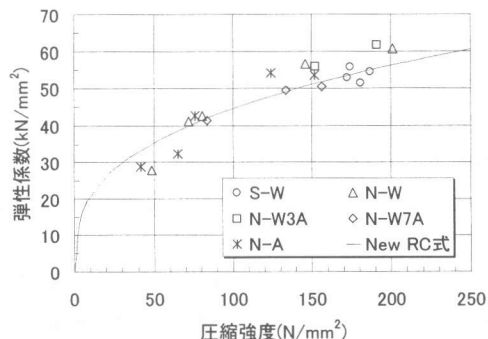


図-5 圧縮強度と弾性係数との関係

強度に至るまでの応力-ひずみ関係に影響を及ぼさないことが分かる。

3.4 弾性係数

図-5に圧縮強度と弾性係数との関係を示す。弾性係数は応力が圧縮強度の1/3の点とひずみが 50×10^{-6} の点とを結ぶ直線の勾配とし、2本の供試体から得た値の平均値とした。図中には高強度コンクリートを対象とするNew RC式²⁾による弾性係数の推定式(式(1))を示してある。単位容積質量 γ を $2.55t/m^3$ 、係数 k_1 および k_2 にはそれぞれ1.0を用いた。

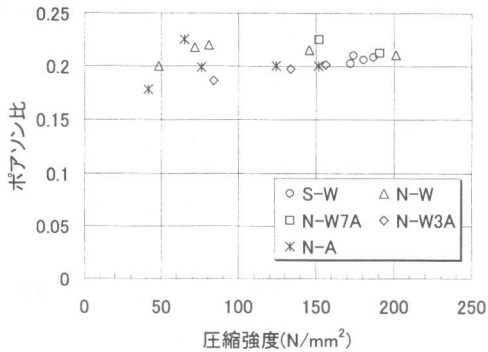


図-6 圧縮強度とポアソン比との関係

$$E = k_1 \cdot k_2 \cdot 33500 \cdot \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \cdot \left(\frac{f_c}{60}\right)^3 \quad (1)$$

式(1)は 50N/mm² 付近で過大評価しているものの、弾性係数をほぼ予測できると言える。

3.5 ポアソン比

図-6に圧縮強度とポアソン比との関係を示す。ポアソン比も弾性係数と同様、2本の供試体から得た値の平均値とした。図-7よりポアソン比は圧縮強度に依らずほぼ一定であることが分かる。ポアソン比の平均値は0.21であった。

3.6 曲げ強度

曲げ強度は 4 × 4 × 16cm の供試体をスパン 10cm で中央 1 点荷重により測定した。また、万能試験機のヘッド間距離を高感度変位計により測定し、スパン中央のたわみとした。

曲げ応力-たわみ関係の模式図を図-7に示す。曲げ応力-たわみ関係の勾配が変化する点を初期ひび割れ強度、曲げ応力の最大値を曲げ強度とし、それぞれの値は3本の供試体から得た値の平均値とした。図-8に材齢と初期ひび割れ強度および曲げ強度の関係を示す。材齢と共に初期ひび割れ強度と曲げ強度は大きくなる傾向が読み取れるが、N-A シリーズは 91 日強度の伸びが小さい。

また、圧縮強度と初期ひび割れ荷重および曲げ強度との関係を図-9に示す。圧縮強度が高いほど初期ひび割れ強度および曲げ強度は大き

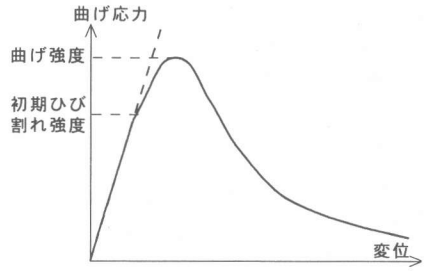


図-7 応力-たわみ関係模式図

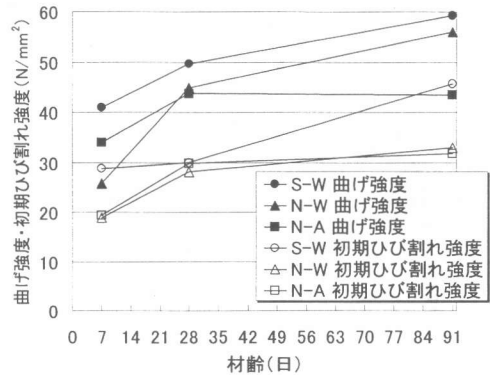


図-8 材齢と初期ひび割れ強度および曲げ強度との関係

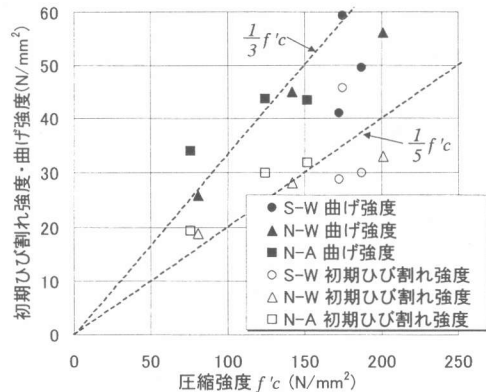
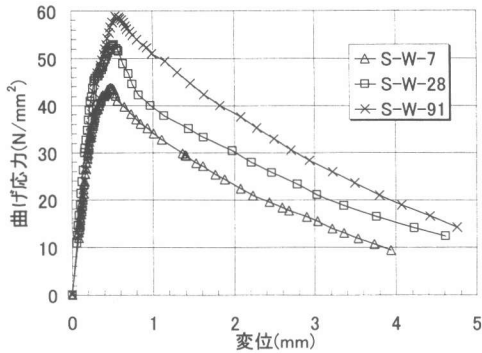
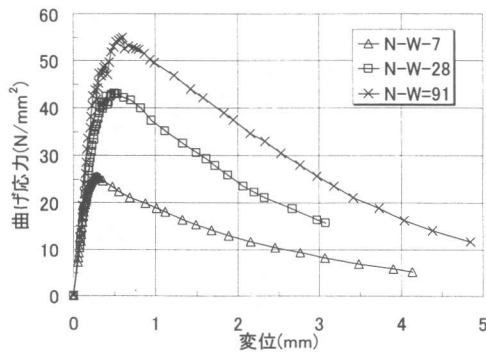


図-9 圧縮強度と初期ひび割れ強度および曲げ強度との関係

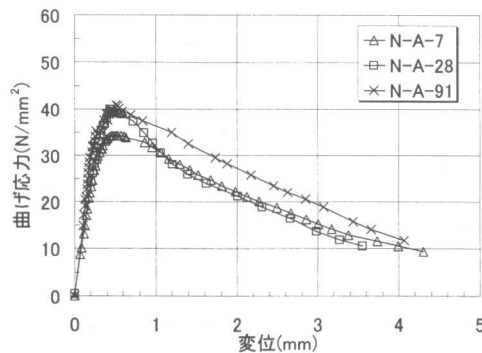
く、それぞれ圧縮強度の 1/5、1/3 程度であるが、圧縮強度との関係の定式化にはさらなるデータの蓄積が必要である。また、S-W シリーズにおいて、材齢 91 日の圧縮強度は材齢 28 日よりも低くなっているが、初期ひび割れ強度および曲げ強度は材齢 91 日の方が大きくなっている。この原因は本研究の範囲内では明らか



(a) S-Wシリーズ



(b) N-Wシリーズ



(c) N-Aシリーズ

図-10 曲げ応力-たわみ関係

にすることができない。さらなるデータの蓄積が必要であると言える。

図-10に各シリーズの曲げ応力-たわみ関係を示す。曲げ強度に達した以降は応力の緩やかな下降域が見られ、高い変形性能を有することが分かる。本実験では試験機の都合上たわみが最大 5mm までしか試験を行うことができなかったが、N-W-7 供試体を除き、たわみが 4mm

の時点においても 10N/mm^2 以上の曲げ耐荷性能を有しており、本実験で用いた材料は非常に靱性に富む材料であると言える。

4. 結論

本研究で使用した鋼繊維補強無機系複合材料の力学的性質について、本研究の範囲内で得た知見を以下にまとめる。

- (1)養生中、特に材齢初期における水分の供給が強度発現に重要な影響を及ぼす。
- (2)弾性係数は高強度コンクリートを対象とした New RC 式でほぼ推定できる。
- (3)圧縮強度試験における応力-ひずみ関係は圧縮強度が高いほど直線的で弾性的な挙動を示す。
- (4)繊維混入の有無は圧縮強度試験時における最大応力までの応力-ひずみ関係には影響しない。
- (5)圧縮強度が高いほど曲げ試験における初期ひび割れ強度および曲げ強度は大きく、値はそれぞれ圧縮強度の 1/5, 1/3 程度である。
- (6)曲げ応力作用時は鋼繊維補強により高靱性を示し、たわみ 4mm で 10N/mm^2 以上の曲げ耐荷性能が確認された。

参考文献

- 1)例えば、平弘毅ほか：高さ 130m のダイアフラム形式 CFT 柱への高流動コンクリートの充填施工、コンクリート工学, Vol.38, No.3, pp.35-41, 2000
- 2) (財)国土開発技術研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」平成 4 年度高強度コンクリート分科会報告書, 1993