

## 論文 繊維補強超高強度モルタルの動的力学特性に関する基礎的研究

石川 信隆\*<sup>1</sup>・原田 耕司\*<sup>2</sup>・中村 秀三\*<sup>3</sup>・田中 秀明\*<sup>4</sup>

**要旨：**本研究は、鋼繊維の形状および混入率等の条件を変えた繊維補強超高強度モルタルの動的圧縮実験を行い、その動的圧縮特性について検討を行ったものである。今回の実験の範囲では、繊維補強超高強度モルタルには破壊時の爆裂現象が見られず、特に、丸線タイプの鋼繊維を4%混入したものが、動的圧縮特性に優れていることがわかった。

**キーワード：**繊維補強, 鋼繊維, 超高強度モルタル, 動的圧縮実験

## 1. はじめに

近年、高性能 AE 減水剤等の技術開発により、圧縮強度が  $100\text{N/mm}^2$  程度の高強度コンクリートが比較的容易に製造できるようになり、さらに圧縮強度が  $150\text{N/mm}^2$  を超えるような超高強度コンクリートも製造可能になってきた。超高強度コンクリートは、耐力的には非常に優れるものの、耐力アップに比べじん性等の変形性能が期待できず、この問題を解決するために、繊維を混入することが有効であると考えられている。

一方、鋼繊維を混入した超高強度コンクリートは、橋梁や高層ビル等の一般構造物より、耐衝撃性が重要視される抗たん施設や放射性廃棄物貯蔵用のキャスク等、動的荷重が負荷される構造物への適用が望ましいと考えられている。しかし、鋼繊維を混入した超高強度コンクリート（コンクリートの圧縮強度が  $150\text{N/mm}^2$  以上のもの）の動的力学特性に関する研究は、未だ行われていないのが現状である。

そこで本研究では、鋼繊維を混入した超高強度コンクリートの動的力学特性を研究する前に、まず、鋼繊維を混入した超高強度モルタル（以

下、繊維補強超高強度モルタルと呼ぶ）の動的圧縮特性に関する検討を行った。具体的には、鋼繊維の形状および混入率を変えた供試体を対象に高速載荷実験を行い、供試体の破壊モードおよび応力～ひずみ関係を求め、鋼繊維の形状および鋼繊維の混入率が破壊モードや動的圧縮特性に及ぼす影響について検討を行った。

## 2. 実験概要

## 2.1 高速載荷実験と供試体の設置方法

今回の実験では、写真-1に示すような動的物性評価装置（水平高速載荷、最大荷重容量  $980\text{KN}$ 、最大載荷速度  $3\text{m/sec}$ ）を用いて、静的 ( $0.5\text{mm/min}$ )、中速 ( $1\text{cm/sec}$ ) および高速 ( $3\text{m/sec}$ ) 載荷実験を行った。動的物性評価装置は、アキュミュレーターに蓄圧された高圧の油を一気に開放することにより高速載荷を可能としている。なお、写真-1に示すように供試体を水平にして圧縮実験を行った理由は、超高強度モルタルを取り扱うため、荷重容量の大きな動的物性評価装置を用いる必要があったためである。

供試体は水平に保持するために、図-1に示

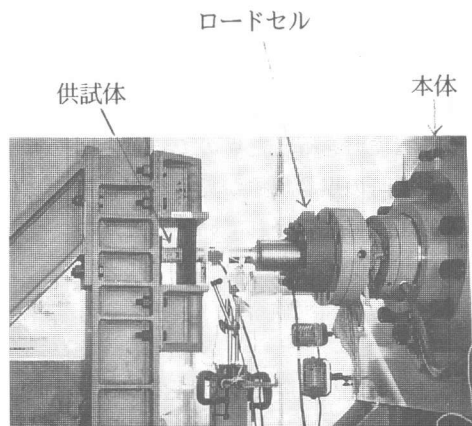
\*1 防衛大学校教授 土木工学科 工博（正会員）

\*2 西松建設（株）技術研究所技術部土木技術課主任 工修（正会員）

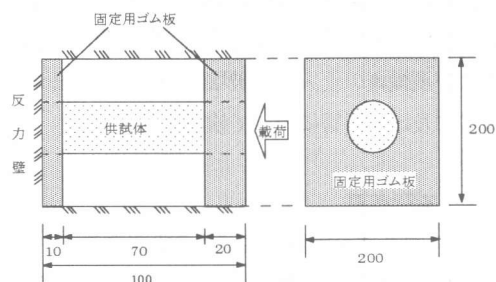
\*3 太平洋セメント（株）研究本部佐倉研究所イノベーション・コンクリートグループリーダー（正会員）

\*4 防衛庁技術研究本部第4研究所築城研究室長（正会員）

すように2枚のゴム板を円形に切り抜いて、その中に供試体を差し込んで設置した。



写真一 動的物性評価装置



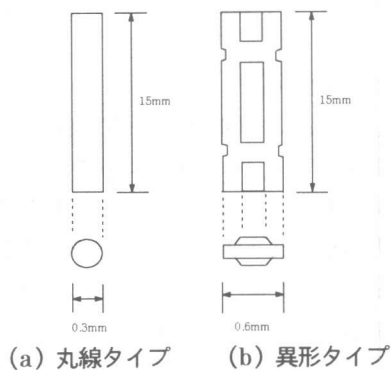
図一 供試体の設置方法

## 2.2 供試体の種類

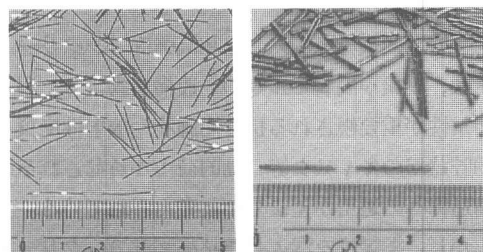
供試体は直径 5cm、長さ 10cm の円柱を採用した。マトリックスの種類としては、超高強度モルタル（圧縮強度約  $150\text{N}/\text{mm}^2$ ）と比較基準となる普通強度モルタル（圧縮強度約  $50\text{N}/\text{mm}^2$ ）の2種類を用意した。表一に示すように超高強度モルタルは、不純物が少な

く品質の安定性に優れる珪砂を使用した。また、粗骨材を省略することおよび粉体量を増すことにより、鋼繊維が分散して均一に混ざるようにした。

鋼繊維の形状は、図二および写真二に示すように長さ 15mm の丸線タイプと異形タイプの2種類とし、鋼繊維混入率は供試体の体積に対してそれぞれ0%、2%、4%の3種類とした。なお、表二にマトリックスの使用材料の主な性質を示す。



図二 鋼繊維の形状



写真二 使用鋼繊維

表一 配合（鋼繊維を混入していないもの）

マトリックスの種類	W/C (%)	W/P*1 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			セメント C	水*2 W	細骨材 (珪砂)	高性能 AE 減水剤	シリカフェーム SF
普通強度モルタル	52	52	910	473	1282	0	0
超高強度モルタル	21	17	1019	213	1026	48.7	199

\*1 :  $P = C + SF$

\*2 : 水量は高性能 AE 減水剤を含む

表一 2 使用材料

材 料	主な性質
セメント	普通強度：普通ポルトランドセメント (比重：3.15) 超高強度：中庸熟セメント (比重：3.20)
珪砂	最大寸法：300 $\mu$ m, 比重：2.63
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系
シリカフェーム	比重：2.53

2.3 供試体の作製方法

繊維補強超高強度モルタルの練混ぜは、5 $\ell$ のホバートミキサーを使用して、まず、セメント、水、高性能 AE 減水剤、シリカフェームを投入して低速で約 30 秒練り混ぜ、次に砂を 30 秒練り混ぜながら投入、以降 3 分間高速撹拌を行い最後に鋼繊維を投入して手練りで約 3 分の練混ぜを行った。なお、手練りにした理由は、鋼繊維の折れ曲がりを防ぐためである。

養生方法は、普通モルタルは練混ぜ後 1 日で脱型して約 80 $^{\circ}$ C で 72 時間蒸気養生を行い、超高強度モルタルは練混ぜ後 1 日で脱型して約 90 $^{\circ}$ C で 72 時間蒸気養生を行った。

2.4 実験ケース

実験ケースは、表一 3 に示すようにマトリックスの種類を普通強度モルタルおよび超高強度モルタルの 2 種類、鋼繊維の形状を丸線タイプ、異形タイプの 2 種類、鋼繊維の混入率を 2%、4% の 2 種類および鋼繊維なしの場合、また載荷速度を静的載荷、中速載荷および高速載荷の 3 種類として、合計 30 種類、各ケース 3 体ずつ合計 90 体の供試体について実験を行った。

表一 3 実験ケース

マトリックス種類	鋼繊維形状	混入率 (%)	載荷速度
・普通強度モルタル	・丸線タイプ	・0	・静的 ・中速 ・高速
	・異形タイプ	・2	
・超高強度モルタル		・4	

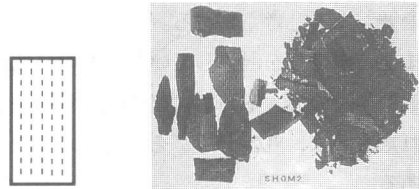
2.5 測定項目

荷重は写真一 1 のロードセル (最大荷重容量 980KN) により、ひずみは供試体の中央部縦方向に長さ 30mm のひずみゲージを貼付し測定した。

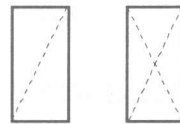
3. 実験結果

3.1 破壊モード

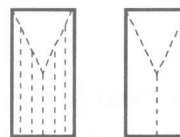
図一 3 に破壊モードを示す。破壊モードは、(a)の脆性的な割裂型、(b)のせん断型、(c)のせん断と割裂の混在型に分類できる。鋼繊維が入っていない超高強度モルタルでは、(a)の写真のように破壊後の破片が細かい (静的、中速、高速ともほぼ同じ破壊モード) のに対して、繊維補強超高強度モルタルでは、(b) および (c) の写真のように細かい破片が見られない。つまり、繊維補強超高強度モルタルは、鋼繊維で補強されているため、超高強度モルタル特有の爆裂破壊を防ぎ、耐衝撃性に有効であることがわ



(a)割裂型



(b)せん断型



(c)混在型

図一 3 破壊モード

かる。

### 3.2 応力～ひずみ関係

#### (1) 普通強度モルタルの場合

図-4は、静的および高速荷重における普通強度モルタルの応力～ひずみ関係（中速荷重は静的と高速のほぼ中間に位置する）を示したものである。

最大応力は、すべての条件で静的荷重より高速荷重の方が大きくなっており、ひずみ速度効果が確認できる。終局ひずみ（最大応力に対応するひずみ）は、異形タイプを4%混入したものの以外静的荷重より高速荷重の方が高くなっているが、その増加に傾向らしきものが確認できない。これは、今回の実験では供試体中央部縦方向に長さ30mmのひずみゲージを貼付してひずみを測定したことが影響していると考えられる。すなわち、破壊の位置が変動することによる誤差が各供試体に生じたためと考えられ、高速荷重実験を行う時は、その点を十分考慮する必要があると考えられる。

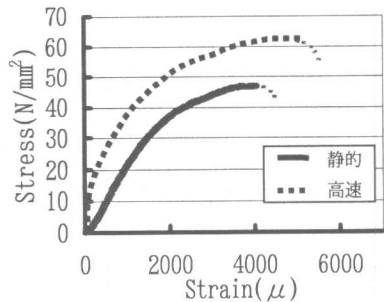
また、鋼繊維を混入していないものに比べて高速荷重時の最大応力および終局ひずみが最も優れたものは、丸線タイプを4%混入したものである。

#### (2) 超高強度モルタルの場合

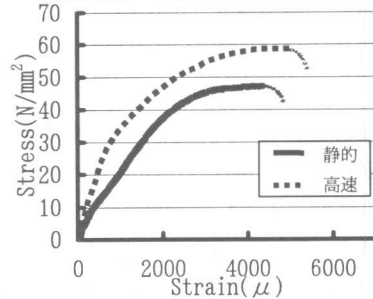
図-5は、静的および高速荷重における超高強度モルタルの応力～ひずみ関係（中速荷重は静的と高速のほぼ中間に位置する）を示したものである。

最大応力は、普通強度モルタルと同様に静的荷重に比べ高速荷重の方が増加しており、ひずみ速度効果が確認できるが、その増加の割合が普通強度モルタルに比べ少なくなっている。なお、この増加割合に関する詳細な検討結果は次節に述べる。

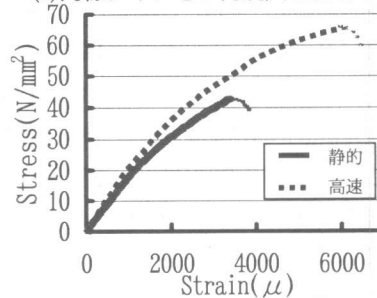
(a) に示す鋼繊維を混入していないものの終局ひずみは、静的荷重に比べ高速荷重の方が著しく低くなっており脆性的な破壊を示している。これは、写真-3の鋼繊維を混入していない普通強度モルタルおよび超高強度モルタルの



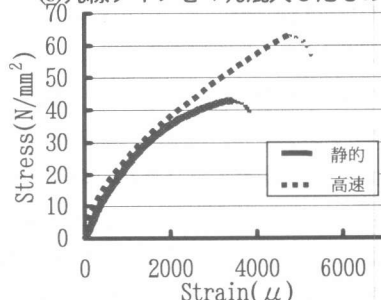
(a) 鋼繊維を混入していないもの



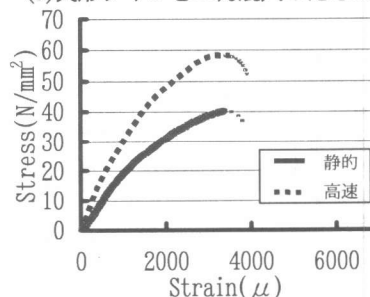
(b) 丸線タイプを2%混入したもの



(c) 丸線タイプを4%混入したもの



(d) 異形タイプを2%混入したもの

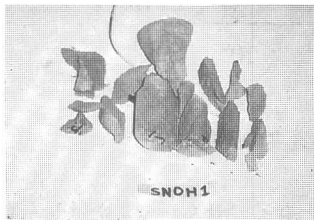


(e) 異形タイプを4%混入したもの

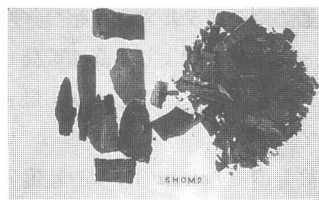
図-4 普通強度モルタルの応力～ひずみ関係

試験後の状況に示すように、同じ荷重条件であっても超高強度モルタルの方が普通強度モルタルに比べ細かい破片が多く、爆裂による破壊が生じたためだと考えられる。以上により、鋼繊維による補強効果は、普通強度モルタルより超高強度モルタルの方が高いことがわかる。

また、鋼繊維を混入していないものに比べて高速荷重時の最大応力および終局ひずみが最も優れたものは、丸線タイプを4%混入したものである。



(a) 普通強度モルタル



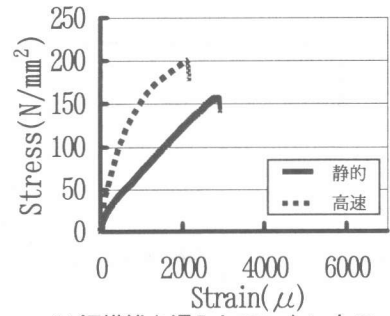
(b) 超高強度モルタル

写真—3 高速荷重時の破壊状況  
(鋼繊維なしの場合)

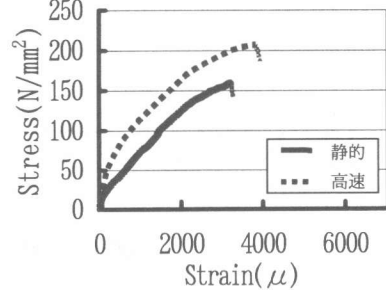
### 3.3 ひずみ速度効果

ひずみ速度は、ひずみ～時間関係の最大ひずみ ( $\epsilon_1$ ) と、最大応力の  $1/3$  を示した時のひずみ ( $\epsilon_2$ ) の差をその時間差 ( $\Delta t$ ) で割った値 (ひずみ速度 =  $(\epsilon_1 - \epsilon_2) / \Delta t$ ) とした。図—6は、圧縮強度増加率 (動的圧縮強度 / 静的圧縮強度) とひずみ速度の関係を示したものである。これより超高強度モルタルの場合は普通強度モルタルに比べて、ひずみ速度の増大とともに圧縮強度増加率は約 10~20%低下していることが認められる。

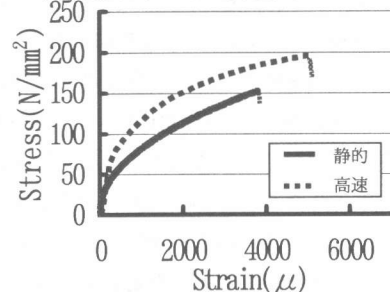
また今回の実験の範囲では、超高強度モルタルの圧縮強度増加率は、高速荷重 ( $10^{-1} \sim 10^0$  / sec) では、高橋の式<sup>1)</sup>や Soroushian の式<sup>2)</sup>



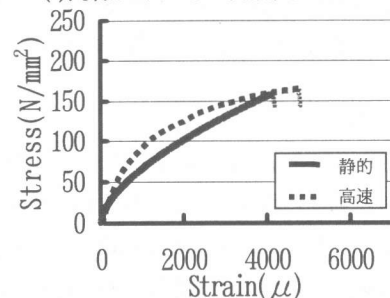
(a) 鋼繊維を混入していないもの



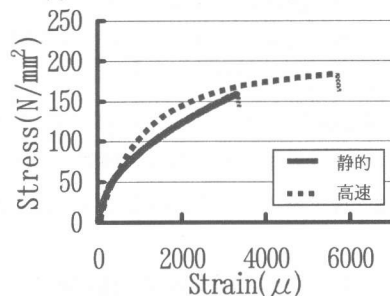
(b) 丸線タイプを2%混入したもの



(c) 丸線タイプを4%混入したもの

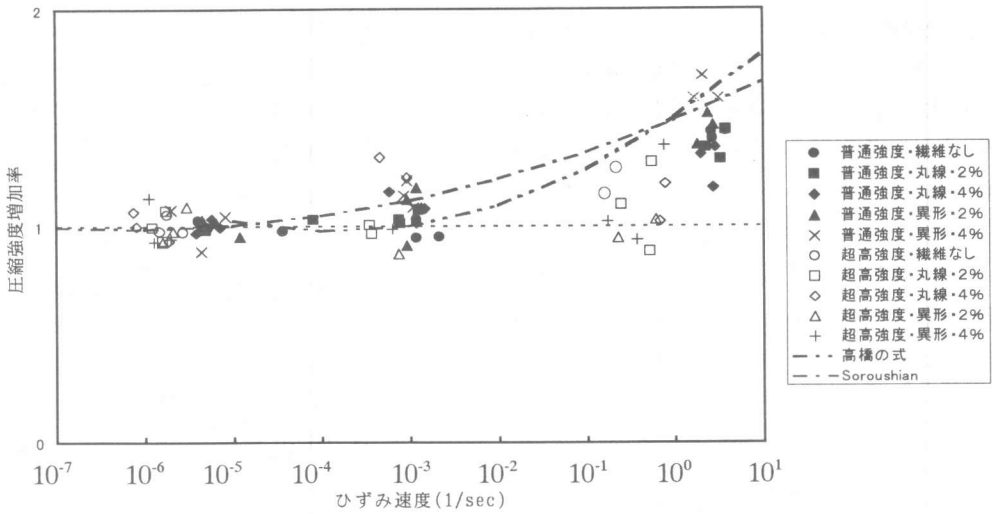


(d) 異形タイプを2%混入したもの



(e) 異形タイプを4%混入したもの

図—5 超高強度モルタルの応力～ひずみ関係



図一六 圧縮強度増加率とひずみ速度の関係

の値に比べやや小さくなったが、静的載荷 ( $10^{-6} \sim 10^{-5} / \text{sec}$ ) や中速載荷 ( $10^{-3} / \text{sec}$ ) ではこれらの式の値とほぼ一致することが認められた。その理由は、超高強度コンクリートの場合表一の配合に見られるように、W/P が普通強度モルタルより小さく密に締まっているため、高速におけるひずみ速度効果は期待できず、そのため高速の場合は普通強度モルタルに対する式<sup>1) 2)</sup> に比べやや小さくなり、中速と静的ではほぼ一致したものと思われる。

#### 4. 結論

本研究では実験上の制約があり、より精度の高い繊維補強超高強度モルタルの動的力学特性を求めるためには、さらに高速載荷装置を水平型から通常の垂直型へ変えることや載荷方法の工夫また供試体の均一性など詳細な検討を進める必要があると考えられるが、今回の実験の範囲では以下のことが確認できた。

(1) 鋼繊維を混入していない超高強度モルタルは、超高強度モルタル特有の爆裂現象が見られ、破壊後の破片は粉々に細くなり割裂破壊した。

(2) これに対し、繊維補強超高強度モルタルは、丸線タイプ、異形タイプのいずれも爆裂破

壊することなく、せん断型またはせん断と割裂の混在型となることが示された。

(3) 普通強度モルタルおよび超高強度モルタルの応力～ひずみ曲線より、高速載荷した場合丸線タイプを4%混入したものが、最も補強効果が優れていた。

(4) 超高強度モルタルのひずみ速度効果は、ひずみ速度  $10^{-1} \sim 10^0$  の範囲で普通強度モルタルの場合に比べ約 10~20%程度低下することが認められた。

謝辞：本研究を行うにあたり、実験からデータ整理まで協力して頂いた防衛施設庁名古屋防衛施設支局の伊藤敦志氏に対して、心から感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 高橋芳彦：高速載荷試験による鉄筋コンクリートはりおよび鋼板・コンクリート合成はりの耐衝撃性評価に関する基礎的研究，九州大学学位請求論文，pp.3~36，1990.12
- 2) Soroushian, P., Choi, K-B. and Alhamed, A. Dynamic Constitutive Behavior of Concrete, ACI Journal, No.83-26, pp.251-259, 1986.3-4.