

# 論文 高流動繊維補強コンクリートの配合設計に関する実験的研究

上原 匠<sup>\*1</sup>・堀田新之介<sup>\*2</sup>・牛田 耕悟<sup>\*3</sup>・梅原 秀哲<sup>\*4</sup>

**要旨:** 繊維補強コンクリートは施工性等の改善のため、高流動化が試みられているが、その配合設計手法は確立されていない。本研究では、流動性に付与するモルタルを確保するため、鋼繊維の混入に対して、混入する鋼繊維の表面積に基づいて粗骨材を減量することで、高流動化を試みた。実験結果より、既存の高流動コンクリートの配合から簡便に鋼繊維補強コンクリートの高流動化を図ることが可能であり、本配合設計手法の有効性を明らかにした。

**キーワード:** 鋼繊維, 配合設計, 高流動コンクリート, 等価表面積置換

## 1. はじめに

繊維補強コンクリートは、繊維の持つ引張抵抗力がコンクリート全体に比較的均一に与えられ、引張や曲げ、せん断強度が向上し、ひび割れが生じにくい性能を有する。しかし、普通コンクリートに比べ施工性が劣るため、その高機能性に比べ一般には利用しにくい構造材料となっている。その改善策として高流動化が試みられているが、実際には経験的な知識を基に個々に配合等の検討がなされており<sup>1)</sup>、施工性の向上に基づいた合理的な配合設計手法は確立されていないのが現状である。したがって、製造と施工の合理化、繊維の均一な分布を可能とする繊維補強コンクリートの高流動化に対応すべく、高流動繊維補強コンクリートの配合設計手法を確立する必要がある。

そこで本研究では、混入する繊維表面積と置換する粗骨材表面積が等価となる置換方法を等価表面積置換と定義し、高流動コンクリートの粗骨材の一部を鋼繊維で置換(等価表面積置換)することによる高流動鋼繊維補強コンクリートの配合設計手法を提案するとともに、その有効性について実験を基に検討した。

## 2. 配合設計手法

繊維補強コンクリートは、繊維の混入により変形あるいは流動性に寄与すべきモルタルが繊維に付着するため、所定のコンシステンシーの確保が困難となる。繊維補強コンクリートの配合設計・製造に関する既存の文献<sup>2)</sup>は、一般的なスランプを有する繊維補強コンクリートを対象にしており、また、記載されている単位水量の基準値などのデータが現状では耐久性能を考慮すると適用が困難であると判断される。

そこで、高流動コンクリート(ベースコンクリート)を基本配合に、粗骨材の一部を鋼繊維で置換することで、ベースコンクリートと同等な所定のコンシステンシーを有する高流動鋼繊維補強コンクリートの製造を試みた。すなわち、投入する鋼繊維の総表面積と置換する粗骨材の総表面積が等しくなるように配合を検討する。図-1に配合設計手法の概念を示す。投入する鋼繊維の容積 $V_F$ と置換する粗骨材の容積 $V_G$ との関係は、鋼繊維を円柱形(半径 $r_F$ )、粗骨材を球形(半径 $r_G$ :粒度分布から算定)としてモデル化することで以下の関係式(1)で表される。

$$\Delta V_G = K_T \frac{2r_G}{3r_F} V_F \quad (1)$$

*1 名古屋工業大学助教授	工学部社会開発工学科	工博(正会員)
*2 名古屋工業大学大学院	工学研究科都市循環システム工学専攻	(正会員)
*3 名古屋工業大学大学院	工学研究科都市循環システム工学専攻	工修(正会員)
*4 名古屋工業大学大学院教授	工学研究科都市循環システム工学専攻	Ph.D.(正会員)

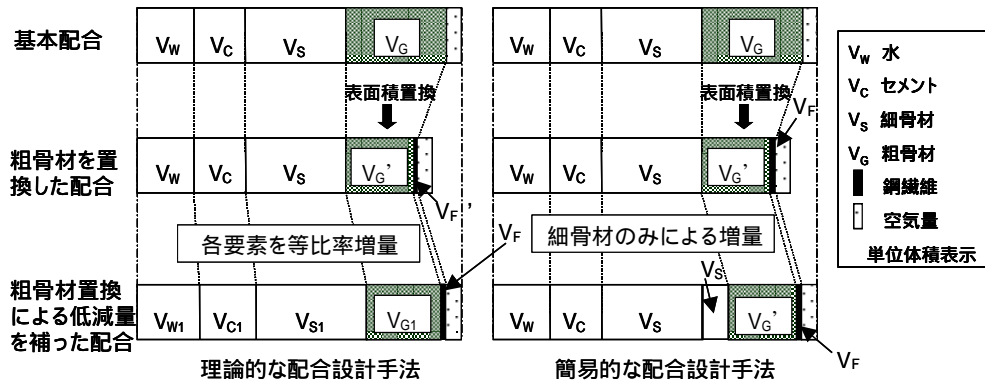


図 - 1 配合設計手法の概念

ただし、モデル化には  $r_G$  の算定方法、粗骨材や繊維の形状寸法、付着モルタル厚さ等の不確定因子が含まれ、また、繊維混入率によりその影響度合いが異なる。そこで、これらに影響係数  $K_T$  として纏めて表示し、任意の繊維混入率に対しても適用可能となるように、 $K_T$  の設定で粗骨材の置換量の調整を行うこととした。

粗骨材の置換容積は投入する鋼繊維の容積に比べ大きく、置換後の全体の容積は  $1\text{ m}^3$  を下回る。そこで、全体の容積を  $1\text{ m}^3$  に修正するために、置換後の各材料を等比増量する必要が生じる。この場合、 $1\text{ m}^3$  当りの鋼繊維の混入量も、所定の混入量  $V_F$  より大きな値となる。等比増量前の鋼繊維の混入量  $V_{F'}$  と目標とする混入量  $V_F$  との関係は、次式で表される。

$$V_{F'} = \frac{1000}{1000 + (\alpha - 1)V_F} V_F \quad \left( \because \alpha = K_T \frac{2\gamma_G}{3\gamma_F} \right) \quad (2)$$

目標とする繊維混入量と所定のコンシステンシーを有する高流動鋼繊維補強コンクリートの示方配合は、混入量  $V_{F'}$  を用いて算定した配合 ( $1\text{ m}^3$  未満) を等比増量することで求まる。等比率は次式で表される。

$$\beta = \frac{1000}{1000 - (\alpha - 1)V_{F'}} \quad (3)$$

以上の過程より、理論上、ベースコンクリートを基に同等のコンシステンシーを有し、所定の鋼繊維混入率を有する高流動鋼繊維補強コンクリートの配合設計が可能となる。以下、この配合設計手法を「理論配合」と呼ぶ。実際には、繊維投入による構造的な流動性低下が生ずるた

め、必要に応じて混和剤を増やす必要がある。

ところでこの場合には、単位水量がベースコンクリートの値より大きくなる。単位水量の増加は構造物の耐久性の観点から望ましくなく、空気量などの配合条件も満たしていないことになる。算定した  $1\text{ m}^3$  に満たない配合を基に、単位水量などが設計条件を満たすベースコンクリートの配合を逆解析で算定し、ベースコンクリートが所定のフレッシュ性状を有するように試験練りを実施して、ベースコンクリートの配合を再設計することも挙げられるが、ベースコンクリートの単位水量が  $160\text{ kg/m}^3$  程度となり、ベースコンクリートの配合選定作業が煩雑となり、簡易に高流動鋼繊維補強コンクリートの製造を可能とする目的を満足するとは言いえない。

そこで本研究では、配合条件に基づいて単位水量を遵守する修正手段として、単位粗骨材の減量に伴い全容積が  $1\text{ m}^3$  を下回ることに對しては、細骨材の増量で対応する簡易的な配合設計手法を考えた。以下単純に単位細骨材量を増やす配合を「簡易配合」とよぶ。この手法では、細骨材の増量  $V_s$  は以下の式で表される。

$$\Delta V_s = \left( K_s \frac{2\gamma_G}{3\gamma_F} - 1 \right) V_F \quad (4)$$

ただし、 $K_s$  は  $K_T$  のモデル化に起因する影響に加え、モルタルの物性の変化による影響を含む。簡易配合のモルタルがベースコンクリートと異なることから、実際の配合では、試験練りに基づいて混和剤の添加量、影響係数を決定することとなるが、本研究で提案する手法を用い

ることで目安となる粗骨材ならびに細骨材の単  
 位量が算定でき、簡易に所要の性能を有する高  
 流動鋼繊維補強コンクリートの配合が得られる。

本研究では、先ず、等価表面積置換による配  
 合設計手法（理論配合）の検証を行い、次にそ  
 の結果をふまえ簡易配合に対するその有効性  
 について実験を基に検討するとともに、影響係  
 数  $K_s$ 、 $K_T$  について目安となる値の把握を試みた。  
 なお、今回提案する配合設計手法では、単位粗  
 骨材容積がベースコンクリートに比べて大きく  
 減少することから、硬化後の物性についてベ  
 ースコンクリートとの比較を行った。

### 3. 使用材料および配合設計

表 - 1 に使用材料を示す。鋼繊維の繊維長は  
 30mm、換算直径は0.6mm、粗骨材の  $r_G$  は3.85mm  
 である。実験 1 では配合設計手法の検証を目的  
 に、理論配合を対象に実験を行った。配合を表  
 - 2 に示す。配合名は鋼繊維の混入率、影響係  
 数を表す。ベースコンクリートの配合は、単位  
 水量175kg/m<sup>3</sup>、水セメント比35%、単位粗骨材  
 容積0.31m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>である。所定のコンシステンシー

を得るための目標スランプフローは65cmに設  
 定した。高流動鋼繊維補強コンクリートの配合  
 は、粗骨材の置換量とフレッシュ性状の関係を  
 把握することを目的に影響係数  $K_T$  の値を1.00  
 と1.35の2水準とした。鋼繊維の混入率は1%  
 とした。使用した粗骨材の粒度分布を基に式(1)  
 から得られる鋼繊維混入率1%に対する粗骨材  
 の置換容積は0.08~0.11m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>程度である。配合  
 表中の値は、式(3)に基づいて算定した結果を示  
 す。実験 2 および 3 では簡易配合を対象に、粗  
 骨材の置換量、および鋼繊維の混入率に着目し、  
 簡易的配合の有効性について同様に実験を行っ  
 た。配合を表 - 3、4 に示す。簡易配合では、  
 理論配合に比べ細骨材量が多くなる。そこで、  
 簡易配合の有効性については表 - 3 に示すよう

表 - 1 使用材料

材料	種類(主成分等)
鋼繊維	両端フック付き結束型
セメント	早強ポルトランドセメント(密度:3.13g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	山砂(密度:2.56g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率2.83)
粗骨材	碎石(密度:2.69g/cm <sup>3</sup> 、最大寸法15mm、粗粒率6.45)
混和剤	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
	AE助剤(樹脂酸塩系陰イオン界面活性剤)

表 - 2 理論配合(実験 1)

	SF混入率 (%)	単位粗骨材 容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	影響係数 $k_t$	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					SP添加率 C×(%)	AE助剤 C×(%)
				W	C	S	G	SF		
BASE	-	0.310	-	175	500	794	834	0	1.4	0.008
1kt_1.00	1.0	0.248	1.00	188	538	854	667	78.5		
1kt_1.35		0.230	1.35	193	551	874	619			

表 - 3 簡易配合(実験 2)

	SF混入率 (%)	単位粗骨材 容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	影響係数 $k_s$	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					SP添加率 C×(%)	AE助剤 C×(%)
				W	C	S	G	SF		
BASE	0	0.310	-	175	500	794	834	0	1.5	0.0
1ks_0.73	1.0	0.250	0.73			922	673	78.5		
1ks_1.00		0.228	1.00			979	613			
1ks_1.35		0.199	1.35			1053	535			

表 - 4 簡易配合(実験 3)

	SF混入率 (%)	単位粗骨材 容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	影響係数 $k_s$	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					SP添加率 C×(%)	AE助剤 C×(%)	
				W	C	S	G	SF			
1ks_1.00	1.0	0.224	1.00	175	500	988	604	78.5	2.1	0.006	
1ks_1.35		0.199	1.35			1053	535				
1.25ks_1.30	1.25	0.171	1.30			1118	460	98.1			
1.50ks_1.00		1.5	0.182			1.00	1085				489
1.50ks_1.30			0.143			1.30	1182				386

に粗骨材の置換量に着目して $K_s$ の値を0.73, 1.00, 1.35の3水準設定した。ベースコンクリートに比べ単位粗骨材量が最大で約 $300\text{kg}/\text{m}^3$ 減, 単位細骨材量が最大で約 $200\text{kg}/\text{m}^3$ 増となる。なお, 混和剤の使用量は一定とした。鋼繊維混入率に対しては, 表 - 4 に示すように, 繊維混入率1.0, 1.25, 1.50%の3水準を設定した。混和剤の使用量は実験2の結果を考慮して設定した。

コンクリートの練り混ぜは, 容量50ℓのパン型強制練りミキサーを用い, モルタル製造後, 鋼繊維, 粗骨材の順で投入して行った。試験項目は, スランプフロー試験, 空気量試験, 圧縮強度試験, 弾性係数試験等である。

#### 4. 実験結果および考察

##### (1) 配合設計手法: 理論配合(実験1)

表 - 5 に実験結果を, 図 - 2 にスランプフロー試験結果を示す。表中の状態はスランプフロー試験結果に対する流動性の目視判断を表す。 $K_T=1.00$ の場合, 図 - 2 に示すようにスランプフローの中央にコンクリートが留まる結果となった。 $K_T=1.35$ の場合, スランプフローはベースコンクリートに比べ小さな値を示したが, フレッシュコンクリートの性状は, 十分満足できるものと判断される。図 - 3 にスランプフローおよび50cmフロー時間を示す。 $K_T=1.00$ の場合に流動性の不具合が見られたが, 高流動鋼繊維補強コンクリートとベースコンクリートとの差は小さく,  $K_T$ を大きく見積もることで簡易に鋼繊維補強コンクリートの高流動化が可能であることが明らかとなった。今回, 混和剤の使用量を一定としたが,  $K_T=1.00$ の場合には混和剤での調整も可能と考えられる。

図 - 4 に圧縮強度および弾性係数を示す。ベ



BASE 67.5 × 67.0cm



1kt\_1.00 68.0 × 67.0cm



1kt\_1.35 62.0 × 57.0cm

図 - 2 スランプフロー試験結果 (実験1)

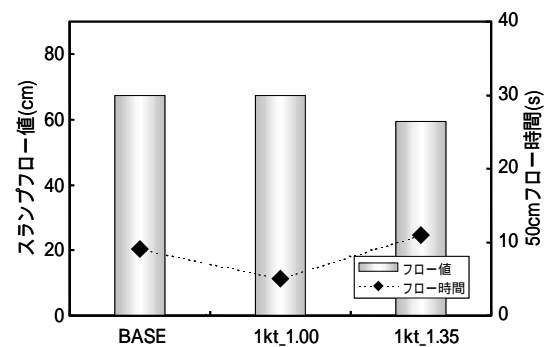


図 - 3 スランプフローおよび50cmフロー時間 (実験1)

表 - 5 実験1結果(配合設計手法)

	スランプフロー (cm)	スランプ (cm)	50cm フロー (s)	最終フロー (s)	空気量 (%)	単位容積質量 ( $\text{t}/\text{m}^3$ )	状態	圧縮強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	弾性係数 ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )
BASE	67.5 × 67.0	27.0	9	63	5.5	2.21	良好	63.1	34.5
1kt_1.00	68.0 × 67.0	25.0	5	51	5.0	2.34	不良	71.8	34.4
1kt_1.35	62.0 × 57.0	26.0	11	48	5.8	欠測	良好	70.2	36.3

ースコンクリートと高流動鋼繊維補強コンクリートとの差はほとんど見られず、単位粗骨材量の減少が圧縮強度ならびに弾性係数に及ぼす影響は小さいことが実験より明らかとなった。したがって、フレッシュ性状ならびに硬化後の強度等を含め、本研究で提案する等価表面積置換の妥当性が実験より明らかとなった。

(2) 粗骨材の置換量：簡易配合（実験2）

表 - 6 に実験結果を、図 - 5 にスランプフローおよび 50cm フロー時間を示す。単位細骨材量が多くなることから、理論配合に比べ全般にスランプフローが小さく現れた。K<sub>s</sub>が大きくなるにしたがいスランプフローは小さくなるが、コンクリートの状態は良好となり、K<sub>s</sub> = 1.35 の場合が目視判断で最もよい状態となった。粗骨材の置換量の算定に対しては、理論配合と同様に影響係数を大きく見積もる必要があることが実験より明らかとなった。今回の実験結果から、鋼繊維混入率 1% に対しては K<sub>s</sub> を 1.0 以上に設定する必要があり、細骨材量が増えることに対して、高性能 A E 減水剤量を増やすことで所定のスランプフローを得ることは可能と判断した。

図 - 6 に圧縮強度および弾性係数を示す。ベースコンクリートと高流動鋼繊維補強コンクリートとの差はほとんど見られない。単位粗骨材量の差が 300kg 程度であれば、圧縮強度ならびに弾性係数に及ぼす影響は小さいとの結果となった。したがって、簡易配合においてもフレッシュ性状ならびに硬化後の強度を含め、等価表面積置換の有効性が明らかとなった。

(3) 鋼繊維混入率：簡易配合（実験3）

表 - 7 に実験結果を、図 - 7 にスランプフロー

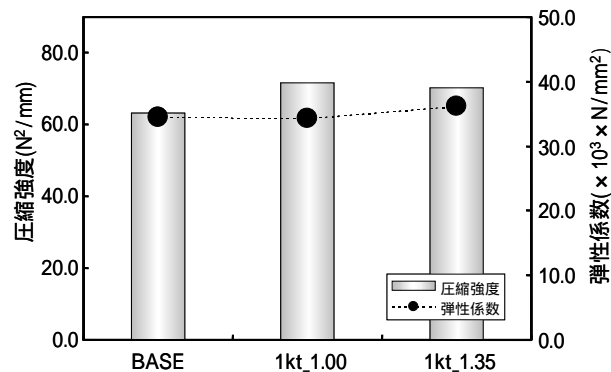


図 - 4 圧縮強度および弾性係数（実験1）

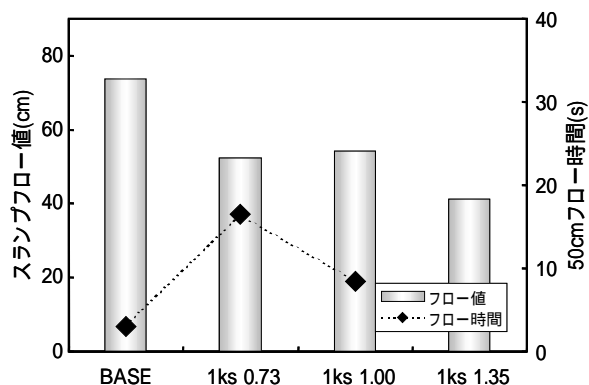


図 - 5 スランプフローおよび 50cm フロー時間（実験2）

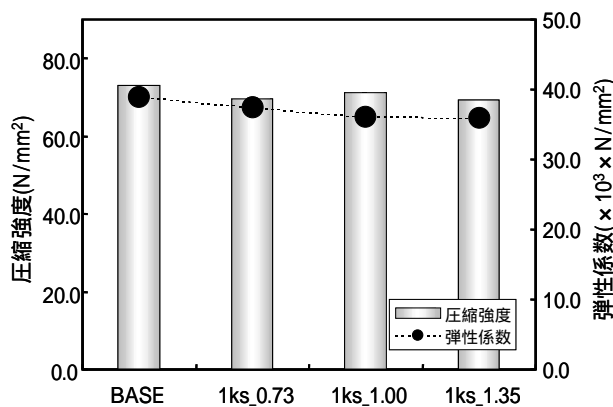


図 - 6 圧縮強度および弾性係数（実験2）

表 - 6 実験2結果（粗骨材の置換量）

	スランプフロー (cm)	スランプ (cm)	50cm フロー (s)	最終フロー (s)	空気量 (%)	単位容積質量 (t/m³)	状態	圧縮強度 (N/mm²)	弾性係数 (kN/mm²)
BASE	76.0 × 71.5	27.5	3	63	1.7	2.40	良好	73.1	39.0
1ks_0.73	54.5 × 50.0	23.5	16	56	3.8	2.39	不良	69.7	37.4
1ks_1.00	54.5 × 54.0	24	8	50	4.5	2.41	やや不良	71.2	36.1
1ks_1.35	41.5 × 41.0	13	-	-	5.6	2.36	良好	69.3	35.9

表 - 7 実験3結果（繊維混入率）

	スランブフロー (cm)	スランブ (cm)	50cm フロー (s)	最終 フロー (s)	空気量 (%)	単位容積 質量 (t/m <sup>3</sup> )	状態	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
1ks_1.00	68.0×65.0	26.5	9	62	5.0	2.39	良好	72.1	35.2
1ks_1.35	68.0×66.0	26.5	9	75	7.6	2.29	良好	64.2	34.4
1.25ks_1.30	64.0×60.0	26.5	10	82	4.2	2.39	やや不良	76.7	35.5
1.50ks_1.00	65.0×63.0	25.5	13	67	3.6	2.42	良好	78.3	37.4
1.50ks_1.30	58.0×55.0	26	15	63	4.2	2.40	やや不良	77.6	36.1

—および 50cm フロー時間を示す。1%の混入量に対してはコンクリートのフレッシュ性状は、 $K_s = 1.00, 1.35$  いずれの場合も所定のフレッシュ性状を満たす結果となった。すなわち、混和剤による調整により、簡易的な手法でも高流動鋼繊維補強コンクリートの製造が可能であることが明らかとなった。繊維混入率 1.25%ではスランブフローの中央に留まる傾向が見られた。1.5%では $K_s = 1.00$ の場合に所要の性状を満たしたが、 $K_s = 1.30$ の場合には目標スランブフローには達せず、スランブフローの中央に留まる傾向が見られた。繊維混入率が大きくなる場合には、影響係数と混和剤の調整によるコンシステンシーの制御が必要になると考えられる。しかし、通常要求される繊維混入率に対しては提案する配合手法を用いることで高流動化は可能と言えよう。図 - 8 に圧縮強度および弾性係数を示す。先の実験結果と同様にベースコンクリートとの差は見られず、単位粗骨材量の低減についてなんら問題ないことが明らかとなった。

### 5. まとめ

本研究では、簡便に高流動鋼繊維補強コンクリートの製造を可能にすることを目的に、投入する鋼繊維に対して粗骨材を等価表面積置換することを提案し実証するとともに、実用的な簡易配合設計手法を提示した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本研究で提案する等価表面積置換による高流動鋼繊維補強コンクリートの配合設計手法は、繊維混入率 1 ~ 1.5%において有効であり、簡便に鋼繊維補強コンクリートの高流動化が図れる。
- (2) 影響係数の設定は 1.00 ~ 1.35 程度を目安に、

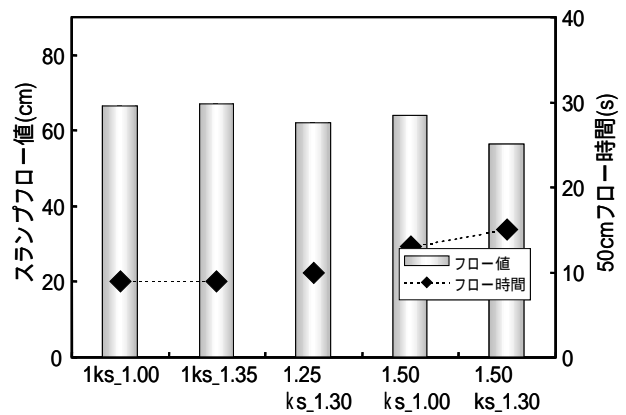


図 - 7 スランブフローおよび 50cm フロー時間（実験 3）

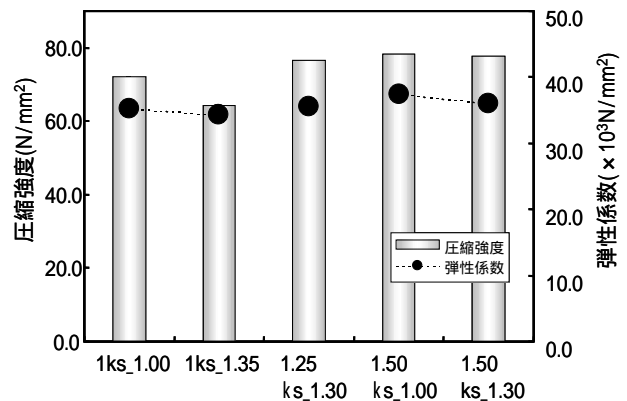


図 - 8 圧縮強度および弾性係数（実験 3）

混和剤の効果を考慮して繊維混入率ごとに検討する必要がある。

- (3) 粗骨材量の低減が圧縮強度および弾性係数に及ぼす影響はほとんど見られない。

### 参考文献

- 1) 栗田守朗他：鋼繊維を混入した高流動コンクリートのフレッシュ性状，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第5部門，pp538 ~ pp539，1998年10月
- 2) 小林一輔：繊維補強コンクリート，オーム社，1981年