

正会員 谷川 恭雄 (名古屋大学)

同 ○ 山田 和夫 (同)

同 畑中 重光 (同)

1. まえがき 鋼繊維補強コンクリートの優れた靱性性能を活用して、これを耐震構造部材に適用することの有用性が指摘されているが¹⁾、そのためには、塑性域をも含む鋼繊維補強コンクリートの力学性質を正確に把握しておくことが必要不可欠である。一般に、試験体内部の損傷度が比較的小さい応力上昇域では、材料の力学性質は、構造鈍感性に属する弾性定数に大きく依存するため、試験体内部の微視的破壊の影響は、残留ひずみ度や吸収エネルギーなどで表わされる平均的損傷度に関連するパラメータによってほぼ評価できるものと思われる。しかし、巨視的なクラックが支配的となる応力下降域では、試験体の耐荷能力は、局所的な損傷度、すなわち試験体の内部構造に顕著に影響されるため、塑性域をも含む変形性質について論ずる際にも、強度の場合と同様に、確率統計論的な観点からの検討が極めて重要となる。特に、鋼繊維補強コンクリートの場合、鋼繊維の混入量、分散・配向性などが確率統計性質に影響を及ぼすものと考えられ、プレーンコンクリートの場合よりも、確率論的な考察が一層重要である。そのため、本報では圧縮応力を受ける鋼繊維補強コンクリートの強度性質およびひずみ領域に至るまでの変形性質について、確率統計論的な立場から一連の検討を行うことにした。

2. 実験方法 実験の概要を Table 1 に示す。実験には、 $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}$ 、 $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}$ 、 $15 \times 15 \times 30 \text{ cm}$ の角柱試験体および $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱試験体を使用し、圧縮載荷時の力学性質に及ぼす水セメント比 ($W/C = 50, 60$ および 70% の 3 種類)、鋼繊維の体積混入率 ($V_f = 0, 0.75$ および 1.5% の 3 種類) 並びに試験体寸法の影響を調べた。試験体は、普通ポルトランドセメント、川砂 (最大粒径: 5 mm)、川砂利 (粒径: $5 \sim 10 \text{ mm}$) および鋼繊維 (フック付せん断ファイバー、断面: $0.4 \times 0.7 \text{ mm}$ 、長さ: 30 mm) を用いて製作し、材令 2 日目に脱型後試験材令 28 日目まで空中養生を行った。試験体個数は、各要因毎に 20 個、合計 400 個である。角柱試験体の載荷には、100 t 万能試験機を使用した。

Table 1 Outline of experiment

Notation of specimen	W/C (%)	V _f (%)	Size of specimen (cm)
C-1.5-50	50	1.5	5 x 5 x 10
C-0-60	60	0	
C-0.75-60	60	0.75	10 x 10 x 20
C-1.5-60	60	1.5	15 x 15 x 30
C-1.5-70	70	1.5	φ10 x 20

[Notes] W/C: Water-cement ratio by weight, V_f: Volume fraction of steel fiber.

一方、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 円柱試験体の載荷には、100 t 高剛性圧縮試験機を使用し、ひずみ速度を約 $1700 \mu/\text{mm}$ の一定としてひずみ度が 2000μ に至るまでの応力度-ひずみ度曲線 (以下、 $\sigma - \epsilon$ 曲線と略記) を測定した。ひずみ度の測定には、試験体の両端間 (測定長: 18 cm) に鋼製枠を介して取り付けられた 2 個の差動トランスによって行った。 $\sigma - \epsilon$ 曲線の統計

Table 2 Test results obtained by prism specimen

Notation of specimen	Size of specimen (cm)	Slump test		Specific gravity		Strength	
		Slump (cm)	Spread (cm)	Average	C.V. (%)	Average (kg/cm ²)	C.V. (%)
C-1.5-50	5 x 5 x 10 10 x 10 x 20 15 x 15 x 30	12.0	25 x 26	2.21	0.82	264	10.76
				2.24	0.52	306	3.81
				2.24	0.47	322	3.62
C-0-60	5 x 5 x 10 10 x 10 x 20 15 x 15 x 30	15.5	32 x 24	2.27	1.22	271	10.98
				2.26	0.45	264	9.18
				2.26	0.40	263	4.35
C-0.75-60	5 x 5 x 10 10 x 10 x 20 15 x 15 x 30	15.1	30 x 27	2.25	1.13	238	12.84
				2.24	0.62	274	6.09
				2.23	0.33	265	5.19
C-1.5-60	5 x 5 x 10 10 x 10 x 20 15 x 15 x 30	13.9	25 x 26	2.16	1.07	175	10.35
				2.19	0.95	254	8.89
				2.17	0.66	239	4.92
C-1.5-70	5 x 5 x 10 10 x 10 x 20 15 x 15 x 30	11.9	25 x 25	2.19	1.35	193	9.59
				2.17	1.03	212	7.11
				2.17	0.64	210	4.65

[Notes] C.V.: Coefficient of variation.

解析用データとしては、X-Y レコーダに自記記録させた $\sigma - \epsilon$ 曲線から $\Delta \epsilon = 200 \mu$ 毎に読み取った応力度を用いた。なお、本実験では、 $\phi 5 \times 10 \text{ cm}$ および $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ 円柱試験体についても $\sigma - \epsilon$ 曲線を測定したが、これらの結果は、紙数の都合で省略する。

3. 実験結果とその考察 3.1 強度

性質 : Table 2 は、角柱試験体によって得られた実測結果の一覧を示したものである。表からわかるように、プレーン

コンクリートの圧縮強度は試験体寸法が大きくなるほど低下するが、鋼繊維補強コンクリートの場合、一般に、 $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}$ 試験体による圧縮強度が最大となり、 $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}$ 試験体が最も小さな値を示す。 $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}$ 試験体の場合、鋼繊維の混入が強度低下を招いているが、この原因としては、 $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}$ のように試験体寸法が小さい場合、鋼繊維が欠陥材として作用することが考えられる。

Fig. 1 は、非破壊確率の2重対数 $\ln(-\ln(1-P))$ と強度の対数 $\ln(F)$ との関

係で表わした場合の確率分布を示した一例である。ただし、図中には、筆者らが先に提案した理論式²⁾：

$$P = 1 - \exp\left\{-\frac{Lm}{(\beta+1)\delta} F^{\beta+1}\right\} - \left\{\frac{(\beta+1)\delta}{Lm}\right\}^{\theta/(\beta+1)} F^{-\theta} \Gamma\left(\frac{\theta}{\beta+1} + 1, \frac{Lm}{(\beta+1)\delta} F^{\beta+1}\right) \quad (1)$$

最小値確率論に基づくWeibull分布式³⁾：

$$P_w = 1 - \exp\left\{-\frac{Lm}{(\beta'+1)\delta} F^{\beta'+1}\right\} \quad (2)$$

およびSwamyらの提案したPareto分布式⁴⁾：

$$P_p = 1 - (F/F_0)^{-\theta'} \quad (3)$$

による値も併示してある。ここに、 P ：破壊確率、 θ ：欠陥指標、 L ：材料の内部構造および環境条件に関係する値、 m ：試験体の大きさに比例する値、 β および β' ：材料定数、 δ ：载荷速度、 F ：破壊応力、 F_0 ：破壊の開始応力。図によれば、鋼繊維補強コンクリートの強度の確率分布は、先に報告⁵⁾したセメントペースト、モルタルおよびコンクリートと同様に、やや上に凸な形状を示すが、その傾向はプレーンコンクリートの場合ほど顕著ではなく、比較的直線すなわちWeibull分布に近い形状を示す。

Fig. 2 は、本実験で得られた鋼繊維補強コンクリートの β (式(1)参照)の値と試験体寸法 (S) との関係を示したものである。なお、図中には既に報告⁵⁾したモルタル試験体の β の値も併示してある。図によれば、 β の値は、プレーンコンクリートと同様に試験体寸法の増大とともに増大するが、鋼繊維の影響はそれほど明確でない。これは、 β の値が主として試験体寸法と骨材寸法との相対的な大きさに依存するためと考えられる。Fig. 3 は、欠陥指標 θ と試験体

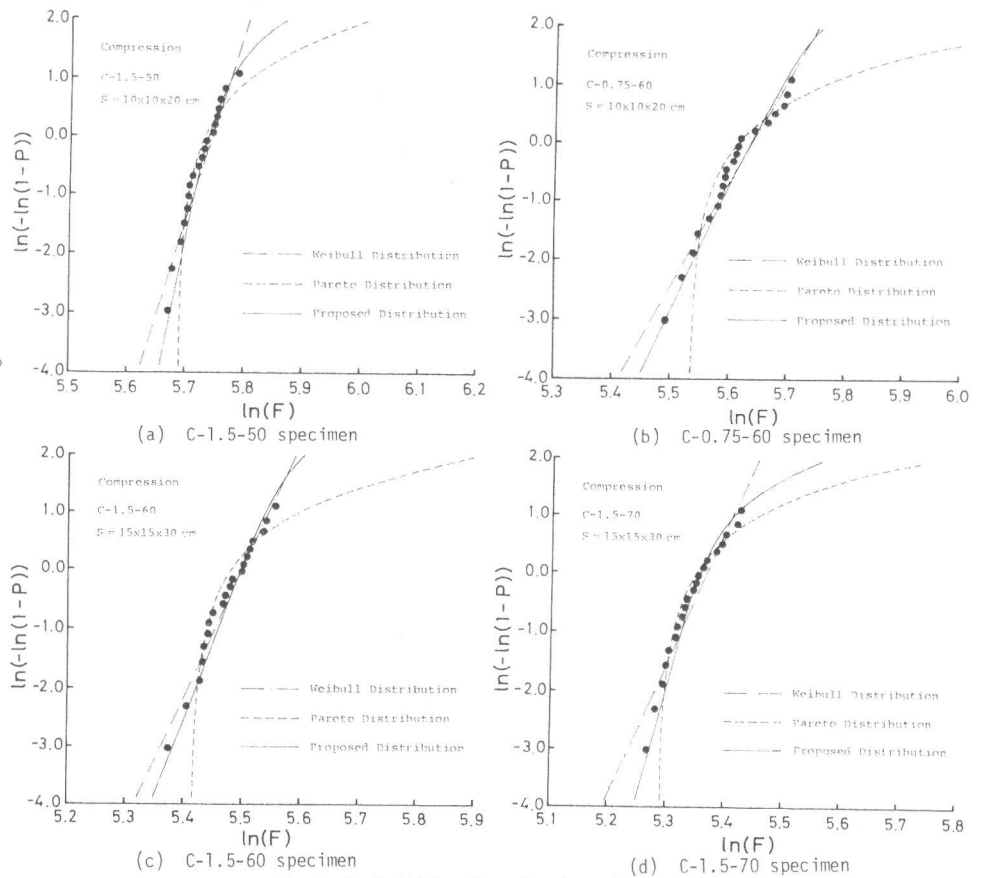


Fig.1 Probability distribution of strength

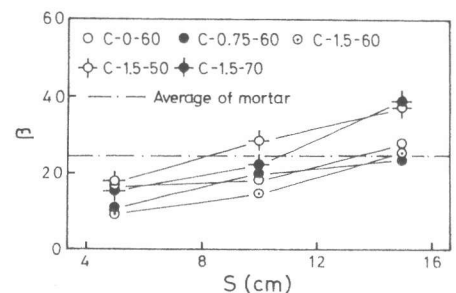
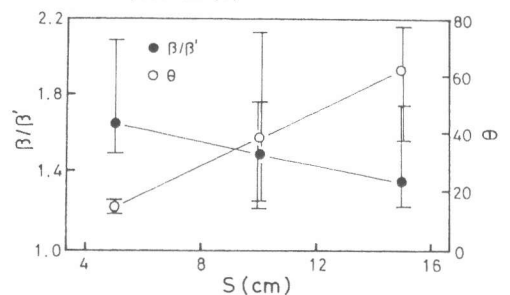
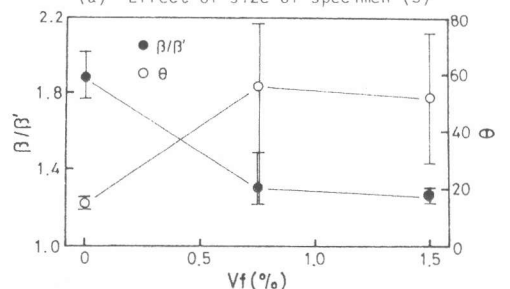


Fig.2 Relation between value of β and size of specimen (S)



(a) Effect of size of specimen (S)



(b) Effect of volume fraction of steel fiber (V_f)

Fig.3 Effect of some factors on value of θ and β/β'

Table 3 Test results obtained by $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ specimen

Notation of specimen	F_c		ϵ_m		E		K_{ms}		δ		m	
	Average (kg/cm ²)	C.V. (%)	Average ($\times 10^{-6}$)	C.V. (%)	Average (kg/cm ²)	C.V. (%)	Average (kg/cm ²)	C.V. (%)	Average	C.V. (%)	Average	C.V. (%)
C-1.5-50	310	5.63	3990	14.80	1.76×10^5	15.12	0.361×10^5	58.76	2.36	15.86	4.44	16.13
C-0-60	209	8.64	1977	13.72	2.07×10^5	25.51	0.712×10^5	39.38	1.81	14.95	4.05	12.75
C-0.75-60	223	9.29	3453	13.63	1.71×10^5	16.17	0.200×10^5	24.58	2.81	15.23	5.00	14.13
C-1.5-60	227	10.12	4211	13.20	1.50×10^5	15.08	0.186×10^5	42.76	3.01	17.57	4.54	11.52
C-1.5-70	187	8.11	4274	21.40	1.34×10^5	16.80	0.108×10^5	43.97	3.30	12.88	4.71	15.55

[Notes] F_c : Compressive strength, ϵ_m : Strain at $\sigma = F_c$, E: Secant modulus at $\epsilon = 0.4 \times 10^{-3}$, K_{ms} : Maximum slope of $\sigma - \epsilon$ curve in descending portion, δ : Ratio of strain at $\sigma = 2F_c/3$ in descending portion to ϵ_m , m: Ratio of strain energy at $\epsilon = 20 \times 10^{-3}$ to that at ϵ_m , C.V.: Coefficient of variation.

寸法 (S) および鋼繊維混入率 (Vf) との関係を示したものである。一般に, θ の値は, 試験体寸法および鋼繊維混入量が多くなって破壊過程がより漸進的になるほど増大する性質をもつ。また, θ の値が大きくなるほど, 強度の確率分布は Weibull 分布に近い形状を示し²⁾, 式 (1) 中の β の値と式 (2) 中の β' の値の比 (β/β') は小さくなる (ただし, $\beta/\beta' > 1$)。なお, β/β' と θ との関係は, 変動係数によって相違するため, 必ずしも 1 対 1 には対応しない。図によれば, 実験結果は, これら理論的に説明される傾向とほぼ一致し, 鋼繊維補強コンクリートの強度の確率分布がモルタルやコンクリートに比べて Weibull 分布に近い形状を示すことが理解できる。

3.2 変形性質: 鋼繊維補強コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線に関する確率統計性質について考察する前に, $\sigma - \epsilon$ 曲線の形状について簡単に検討しておく。本実験によって得られた $\sigma - \epsilon$ 曲線および剛性 (コードモジュラス) - ひずみ度曲線 (以下, $K - \epsilon$ 曲線と略記) の一例を Fig. 4 に示す。また, 圧縮強度 (F_c), 最大強度時のひずみ度 (ϵ_m , 以下, 最大ひずみ度と略記), 弾性係数 (E), 応力下降域での最大負剛性 (K_{ms}), 靱性 (δ) および相対ひずみエネルギー (m) に関する統計解析結果を, Table 3 に示す。表からわかるように, コンクリート中に鋼繊維が混入されると, 靱性は格段に改善され, その改善率は鋼繊維混入率および水セメント比が大きいほど大きい。例えば, 鋼繊維が 1.5% 混入されると, ϵ_m , δ および m の値はそれぞれブレンコンクリートの約 2.1 倍, 1.7 倍および 1.2 倍となる。Fig. 5 (a) および (b) は, それぞれ $K - \epsilon$ 曲線に及ぼす鋼繊維混入率 (Vf) および水セメント比 (W/C) の影響を示したものである。ただし, 縦軸は比較を容易にするために初期剛性 (K_i) で除して無次元化してある。図によれば, 最大ひずみ度に至るまでのひずみレベル ($K/K_i \geq 0$) では, ひずみ度の増大に伴う剛性の低下率は, 鋼繊維混入率が大きいほど小さく, コンクリート中のクラックの生長・伝播がコンクリートと鋼繊維との付着力によってかなり阻止されることが推察される。また, この範囲では鋼繊維補強コンクリートの剛性変化曲線は, 一般に下に凸な形状を示す。一方, 応力下降域 ($K/K_i < 0$) における最大負剛性は, 鋼繊維混入率および水セメント比の増加に伴って小さくなり, $K - \epsilon$ 曲線および $\sigma - \epsilon$ 曲線は全体にわたって滑らかな形状となる。

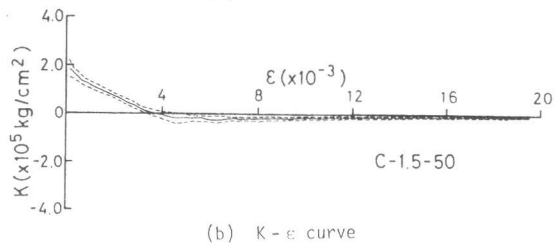
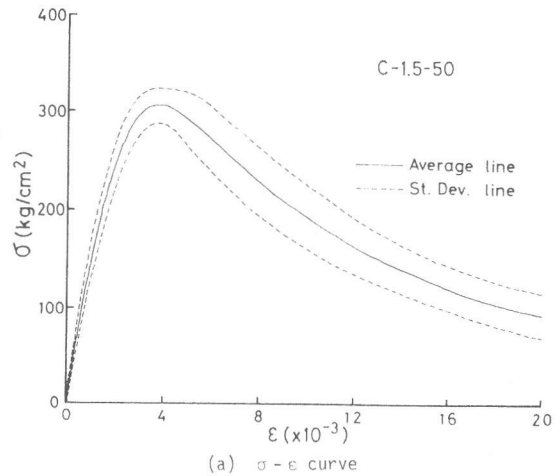


Fig.4 Example of $\sigma - \epsilon$ curve and $K - \epsilon$ curve

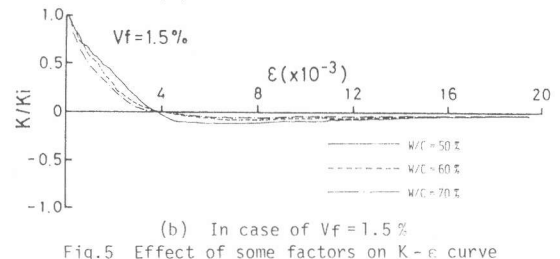
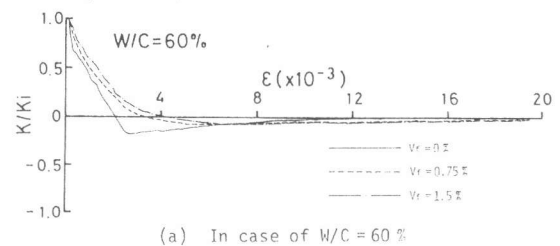


Fig.5 Effect of some factors on $K - \epsilon$ curve