

[81] 鋼繊維補強コンクリート短柱の耐力および変形能力に関する研究

正会員 ○板橋 裕治 (横浜国立大学大学院)
 正会員 壁谷沢 寿海 (横浜国立大学工学部)
 正会員 末永 保美 (横浜国立大学工学部)
 正会員 坂井 正美 (日本鋼管技術研究所)

1. 序

鋼繊維補強コンクリート(SFRC)の材料性状として、引張曲げ強度が高いこと、さらに靱性・ひび割れ抵抗性についても優れていることは、諸研究¹⁾から明らかである。本研究では、鋼繊維を鉄筋コンクリート短柱に混入し、構造部材として用いられた場合の力学的挙動・特性を定量的に把握することを目的としている。今回は剪断破壊を起こすRC短柱に、4種類の鋼繊維あるいは鉄筋で補強を施し、それらの比較実験を行なった。さらに、塑性理論に従った解析により、実験結果の検討を加えた。

2. 実験の概要

2. 1 実験計画及び試験体

表1に全試験体(10体)の一覧を示す。試験体は、腰壁・たれ壁付きの短柱を想定し、シアスパン比(M/QD)が1.0、1.25の2種類を選定した。(以下、M/QD=1.0のものをシリーズI、1.25のものをシリーズIIと称する。)また軸方向応力度を、シリーズIで $1/8 F_c$ 、シリーズIIで $1/5 F_c$ とし、引張鉄筋比は、0.34%とした。剪断補強筋は、部材の両端曲げ降伏時における剪断力が荒川min式による剪断耐力と等しくなる帯筋比を基準に決定した。またI-PWは、鋼繊維による補強効果を明らかにするため、鋼材体積率でほぼ同率に相当する剪断補強筋を施した試験体であり、PX試験体は、主筋をX形に配置することで靱性向上を期待したものである。鋼繊維混入量は、コンクリート部分の体積率で1%とした。試験体名のPはプレーン、Fはファイバー、Dは異形繊維、XはX配筋を有することを意味する。柱断面は全て $25 \times 25 \text{ cm}$ の正方形であり、高さは50cmと62.5cmの2種類である。試験体の配筋詳細の一例を図1に示す。

2. 2 使用材料の性質と試験体の製作

図2に、コンクリートの材料特性(曲げ試験)を、表2に鉄筋の機械的性質を示す。鋼繊維のサイズは、 $0.5 \times 0.5 \times 30 \text{ mm}$ 、 $0.5 \times 0.5 \times 40 \text{ mm}$ (試験体名でLのついたもの)の2通りで、形状や引張強度の異なるもの合計4種類を用いた(表1参照)。試験体の製作は、10体を一度に打設、全て横打ちとした。鋼繊維は、ミキサー車よりコンクリートを傾胴式のコンクリートミキサーに移

表1 試験体一覧

Specimen	Shear span ratio M/QD	Axial unit stress N/bD (kg/cm ²)	Tensile reinforcement ratio P _t (%)	Web reinforcement ratio P _w (%)	Concrete compressive strength F _c (kg/cm ²)	Volume of fibers V _f (%)	Fiber tensile strength (kg/mm ²)
I-P	1.0	26.25	0.34	0.45	273.2	0	—
I-F4	1.0	26.25	0.34	0.45	295.4	1.0	40
I-F4D	1.0	26.25	0.34	0.45	267.9	1.0	40
I-F7D	1.0	26.25	0.34	0.45	277.2	1.0	70
I-F11DL	1.0	26.25	0.34	0.45	265.4	1.0	110
I-PW	1.0	26.25	0.34	1.02	304.2	0	—
I-PX	1.0	26.25	0.91*	0.45	304.2	0	—
II-P	1.25	42.0	0.34	0.43	289.9	0	—
II-F11DL	1.25	42.0	0.34	0.43	265.4	1.0	110
II-PX	1.25	42.0	0.91*	0.43	289.9	0	—

P : Plane F : Fiber D : Deformed * Ag/bD

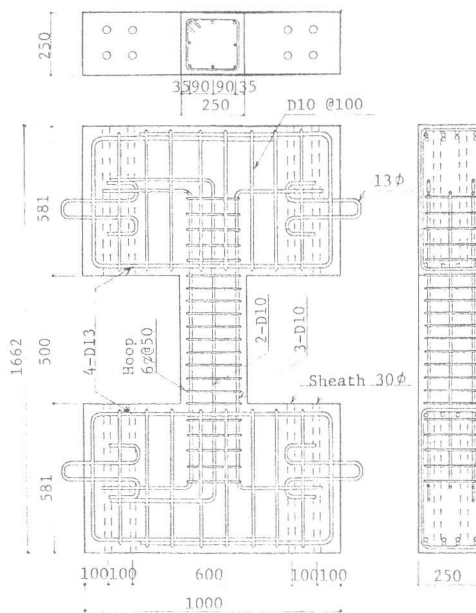


図1 試験体の配筋詳細

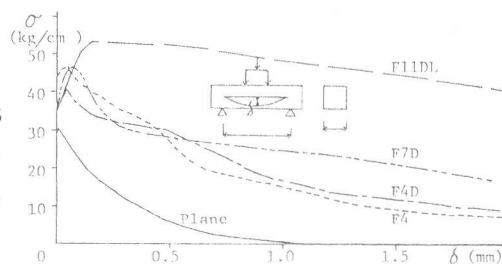


図2 コンクリートの材料特性(曲げ試験)

した後、直接手で投入した。鋼繊維混入により、ワーカビリティは低下したが、混和材は使用していない。打設後の養生は、室内の自然放置とした。

2. 3 加力方法と測定箇所

加力方法としては、図3に示すような試験体に定軸力と逆対称モーメントを与える加力治具を用いた。すなわち、試験体の左右2本のオイルジャッキ（容量50 ton）で等しい軸力を与え、水平力を50 ton アクチュエータにより試験体中央高さ位置に加えた。その際一定軸力および水平を保つように、軸力は随時微調整している。加力履歴の制御方法は、表3に示す変形角を設定し、正負繰り返し加力を行った。測定変位は、柱頭・柱脚間の水平相対変位、柱中央部の剪断変形量を計測するための対角線変位、柱上下端の鉛直変位である。また、主筋・帯筋、合計20箇所にWSGを貼布し、歪を測定した。

3. 実験結果とその考察

3. 1 実験結果と計算値

既応略算式による計算値と実験値を比較して、表4に示す。曲げ剪断ひび割れ耐力、剪断ひび割れ耐力から明らかのように、ブレンコンクリートの試験体に比べ、鋼繊維混入のものは、いずれも実験値が計算値を上廻っており、鋼繊維による剪断ひび割れ抵抗効果がよくあらわれている。鋼繊維混入により終局耐力が上昇し、破壊形式も剪断破壊型から曲げ剪断破壊型になった。さらにシリーズIの混入したもので比較すると、とくにI-F11DL試験体の曲げ耐力がかなり上昇しており、これは鋼繊維の長さや強度の影響と思われる。この試験体の場合、骨材最大粒径(20mm)の2倍となっており、補強効果・施工性等を考えると1つの目安となる値である。また鋼繊維の形状による差や強度の違いによる差は、F11DL以外顕著にあらわれず、それらについての効果は判断できない。

3. 2 ひび割れ・破壊状況

図4に、代表的な試験体の亀裂状況を示す。I-P試験体は、曲げ亀裂・剪断亀裂発生後、変形角1/100 rad 時に対角線亀裂を生じ、耐力が低下した。その後も対角線亀裂の影響が大きく、1/25 rad時には主筋が座屈、コンクリートも大きく剥落し、軸力の保持が不可能となった。I-F4試験体は、変形角1/50 radで対角線亀裂が生じたが、急激な耐力低下はみられず、曲げ亀裂が支配的であった。最終時(1/12.5 rad)には、対角線亀裂が大きくなり、耐力も低下したがコンクリートの剥落はほとんどなかった。また、亀裂面では、鋼繊維の引き抜けた状況は多く見ら

表2 鉄筋の機械的性質

Diameter (mm)	Sectional area (cm ²)	Yielding Point (kg/cm ²)	Tensile strength (kg/cm ²)	Elongation (%)	Elastic modulus (kg/cm ²)
D-10	0.71	4077	5893	18.0	1.85×10 ⁶
9φ	0.64	3290	4570	31.5	1.99×10 ⁶
6φ	0.28	3610	4630	33.1	2.01×10 ⁶

表3 加力履歴

Deflection(rad)	1/400	1/200	1/100	1/50	1/25	1/12.5
Cycle	±1	±2	±2	±2	±2	+1

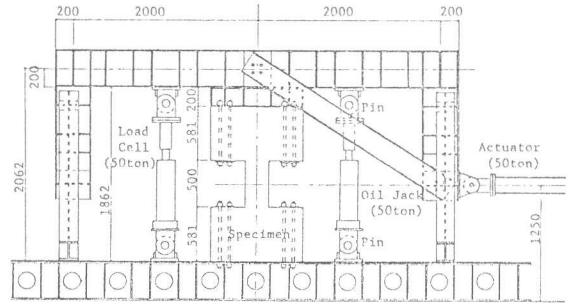


図3 加力状況

表4 実験結果一覧

Specimen	At flexure cracking load		At flexure shear cracking load		At shear cracking load		At maximum load			Failure mode
	Test	Test/Qb	Test	Test/Qbs	Test	Test/Qs	Test	Test/sQu	Test/hQu	
I-P	4.0	0.62	12.0	0.86	15.3	1.18	17.1	1.04	1.03	S
I-F4	6.0	0.91	16.0	1.11	20.0	1.49	20.1	1.18	1.27	F-S
I-F4D	6.0	0.94	16.0	1.15	19.5	1.51	19.6	1.20	1.24	F-S
I-F7D	6.0	0.93	16.0	1.13	15.0	1.15	19.6	1.18	1.24	F-S
I-F11DL	4.0	0.63	14.0	1.01	17.7	1.37	23.5	1.43	1.49	F-S
I-PW	8.0	1.20	13.0	0.90	14.0	1.03	19.3	0.97	1.22	F-S
I-PX	4.0	---	11.8	---	12.0	0.88	18.4	0.92	---	F-S
II-P	4.0	0.61	11.7	0.91	13.0	1.01	18.2	1.21	1.16	S
II-PX	4.0	---	13.0	---	15.0	1.16	18.6	1.24	---	F
II-F11DL	3.0	0.47	15.3	1.22	18.0	1.45	20.0	1.38	1.28	F

Notes

$Qb = 2Mbc/h, Mbc = 1.8\sqrt{Fc}Ze + ND/6, h$: 柱の内法高さ, Ze : 等価断面係数
 $Qbs = 0.265bd\sqrt{Fc} + Mbc / (M/Q - d/2)$ (Sozen式)
 $Qs = 0.971\sqrt{Fc}bD(1 + \alpha/1.8\sqrt{Fc})^{0.411} / (M/QD)^{0.605}$ (広沢式)
 $sQu = (0.092KuKp(180 + Fc) / (M/QD + 0.12) + 2.7\sqrt{Fcs\bar{y}} + 0.1N/bd)bj$
 bQu : 深田浜原等の式 "建築耐震設計における保有耐力と変形性能" 日本建築学会
 F: Flexure S: Shear

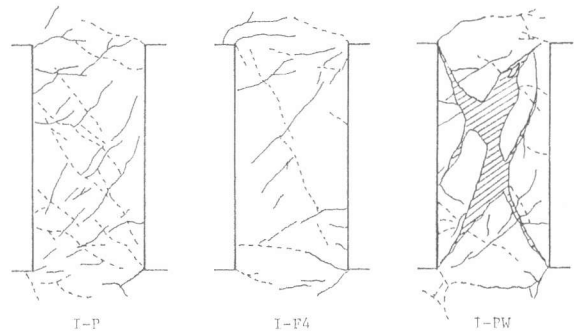


図4 亀裂状況(変形角1/25 rad)

れたが、破断したものはあまり認められなかった。他の鋼繊維入り試験体も同様である。I-PW試験体は、細かい亀裂が多く入ったがI-F4試験体とほぼ同じ過程をたどり、靱性は十分に確保された。

3. 3 荷重-変形関係

図5に、荷重-変形関係を示す。シリーズIでは、いずれの試験体も変形角 $1/200$ rad で引張側鉄筋が降伏しているが、その後I-P試験体が剪断破壊型となったのに対し、鋼繊維混入試験体は曲げ破壊先行型になった。これは鋼繊維の亀裂発生後の引張抵抗効果とコンクリートの剥落阻止能力によるものと思われ、また履歴吸収エネルギーの面からも高い靱性を期待できることが確認された。I-PX試験体は配筋の関係上単純な比較はできないが、両者の中間的破壊性状を示し、I-PW試験体は鋼繊維補強によるものと同様の履歴ループを描いた。シリーズIIでは、剪断破壊型のI-P試験体が、共に曲げ破壊型の柱(II-F11DL、II-PX)に改善された。

3. 4 帯筋の歪状況

帯筋の歪状況の変化についてみるため、横軸に柱の部材角、縦軸に帯筋の歪をとってプロットしたものが図6である。I-P試験体の場合、小さい変形角の間は、曲げ剪断亀裂の影響で柱端部側の歪が大きいが、対角線亀裂発生時には、中央の帯筋が一挙に降伏値に達しており、急激な耐力低下の裏付けとなっている。鋼繊維入りの試験体に関して、対角線亀裂発生時変形に向かって帯筋の歪が上昇する傾向はみられるが、I-P試験体よりゆるやかでかつ、降伏値に達するの遅い。これは、コンクリートに亀裂が入っても、剪断力が帯筋のみならず鋼繊維にも負担されているためと考えられる。

3. 5 対角線亀裂の考察

I-PX試験体を除くシリーズIに関して、対角線亀裂発生時の荷重とそのときの変形角をとり上げ、表5に

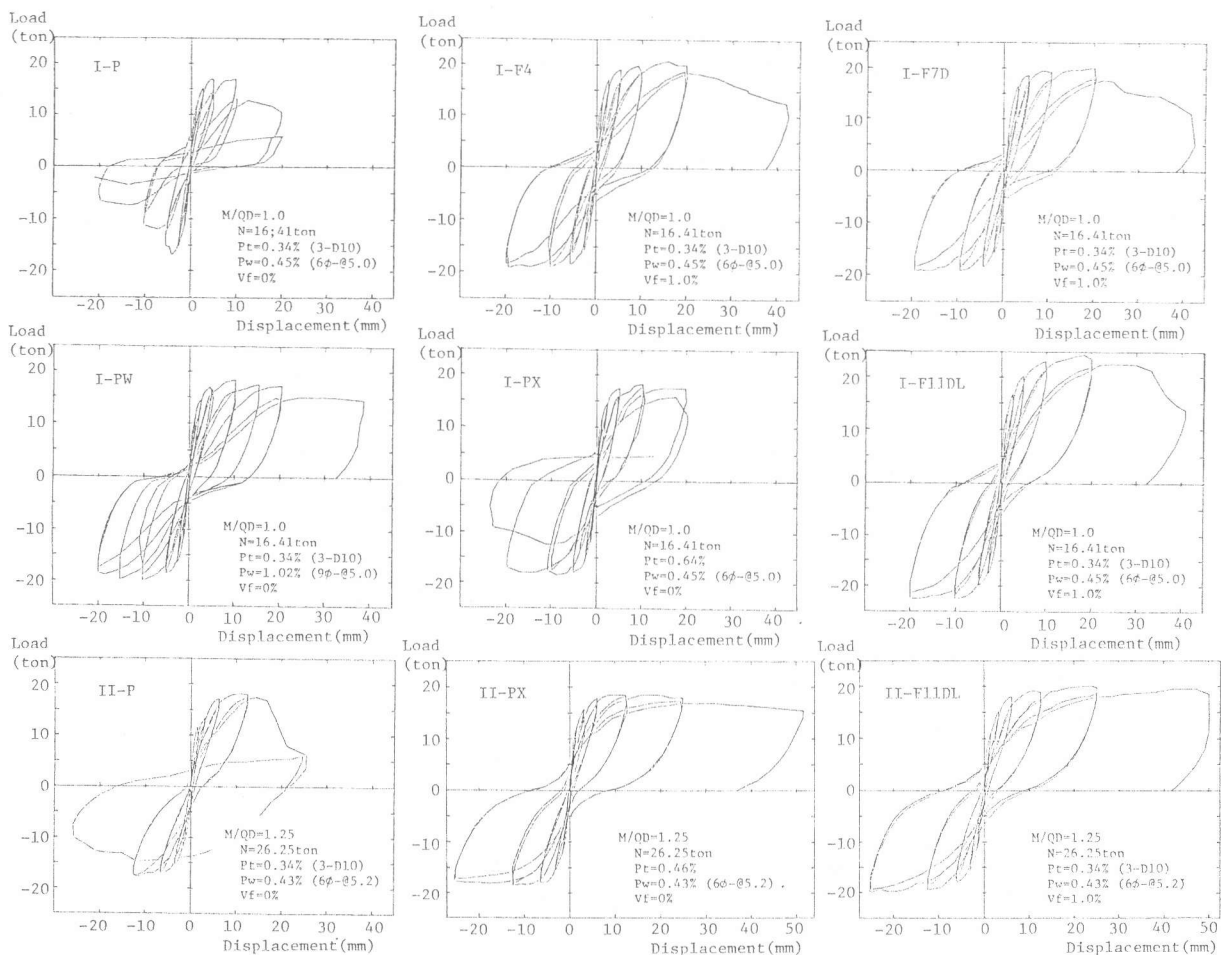


図5 荷重-変形関係

まとめた。これを見ると補強された試験体は I-F4D 試験体を除き、変形角が I-P 試験体の約 2 倍となっていることがわかる。I-F4D は鋼繊維の引張強度が低く、伸び能力の小さいことの影響と思われる。

4. 解析的検討

4.1 くさび理論

くさび理論²⁾とは、コンクリートの剪断抵抗機構のうちのアーチ機構に着目したもので、コンクリートの圧裂を縦割れの現象としてモデル化し、これを柱の対角線部分に

適用している点に特徴がある。計算結果を表 5 に示す。理論値が上界値を与えることを考慮すると、I-P および I-PW 試験体はほぼ満足できる解を与えているが鋼繊維入りの試験体については、理論の修正が必要である。なお鋼繊維混入コンクリートの引張強度としては、複合則に基づいた文献³⁾による提案式を用いている。

4.2 Collins 等のトラス理論

Collins 等のトラス理論⁴⁾は、亀裂発生後の RC 部材も連続体として扱えるよう、平均応力・歪の考えに立脚していること、またそれぞれモールの応力円・歪円から釣合条件・適合条件を導き、得られる主圧縮応力方向と主圧縮歪方向が一致すると仮定していることに特徴がある。また剪断破壊は、部材の圧縮ゾーンの応力度が最大剪断歪から定まる圧縮応力度に達したとき起こると考えている。理論に基づいた結果を図 7 (a) に示す。プレーンコンクリートの試験体については、最大耐力はやや低かったが曲線の追従性としては比較的よいものであった。鋼繊維混入の試験体に関しては、亀裂発生後の鋼繊維の引張抵抗力を等価なコンクリートの引張応力として与える。すなわち、コンクリートの引張側ヤング係数を $E_c' = E_s A_s / A_c$ (E_s : 鋼繊維のヤング係数、 A_s : 鋼繊維の有効断面積、 A_c : コンクリートの断面積) として算入したところ図 7 (b) に示すような、よい近似を示す曲線が得られた。

5. 結び

本実験を通して、以下のことが明らかになった。

(1) 1 本の鋼繊維の混入により、剪断破壊型の柱を曲げ破壊先行型の高い靱性のもに改善でき、またその履歴特性は、帯筋で補強した柱とほぼ等しいことが認められた。(2) 柱の部材角と帯筋の歪関係や、対角線亀裂に関する考察から、鋼繊維の混入で破壊過程を遅延させることが可能と思われる。(3) Collins 等のトラス理論により、マクロ的に柱の剪断破壊性状を捉えられることが確認された。とくに鋼繊維混入試験体については、引張強度を考慮することで実験値を追跡できた。

<謝辞> 実験に御協力いただいた、日本鋼管技術研究所 中村信行氏、横浜国立大学 藤原英雄氏に感謝致します。

<参考文献>

- 1) 日本建築学会材料施行委員会：「スチールファイバーの実用化に関する調査研究」昭和 57 年 4 月
- 2) 木永・石丸：「組み合わせ応力を受けるコンクリート材の動力学的解析」日本建築学会論文報告集、220、221 号、昭和 49 年
- 3) 岸谷・平居：「建築材料としての無機複合材料に関する研究」日本建築学会論文報告集、259 号、昭和 52 年 9 月
- 4) M. P. Collins：「Towards a Rational Theory for RC Members in Shear」Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 104, Apr. 1978

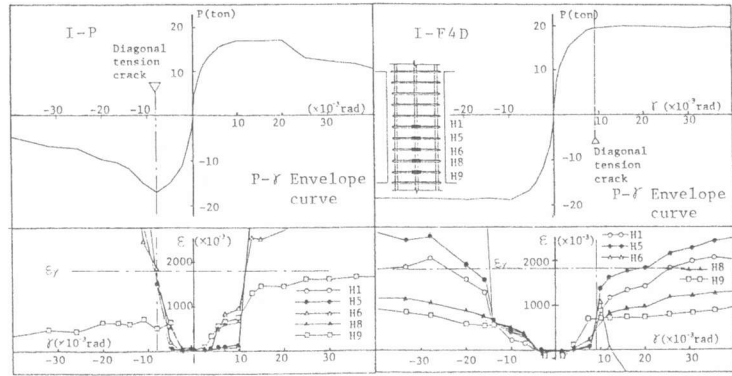


図 6 帯筋の歪度と部材角の関係

表 5 くさび理論との比較

Specimen	Diagonal tension crack		Wedge theory (ton)
	Load (ton)	Deflection ($\times 10^3$ rad)	
I-P	-17.0	- 8.14	18.1
I-F4	19.0	21.6	19.0
I-F4D	19.6	9.64	18.0
I-F7D	19.4	19.0	18.3
I-F11DL	23.2	19.8	17.9
I-PW	-20.1	-20.3	20.8

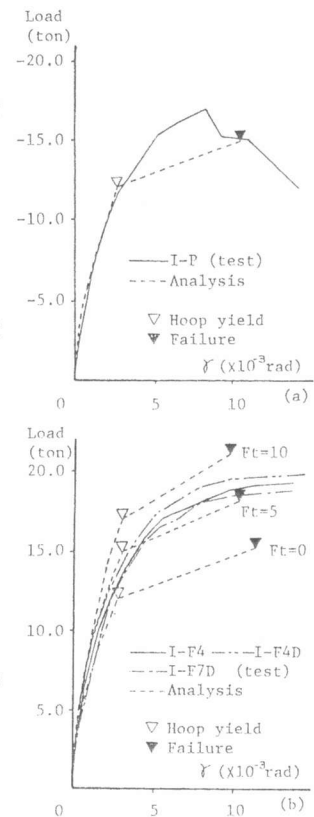


図 7 トラス理論との比較