

論文

[1219] あばら筋を低減した鋼繊維補強鉄筋コンクリート梁の変形能に関する実験的研究

正会員 永坂具也 (東海大学工学部)

正会員○近藤 悟 (東海大学大学院)

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材に鋼繊維を混入することにより曲げ降伏後の変形能を期待する場合について、文献<sup>1)</sup>では慣用のせん断補強筋を現行のRC規準<sup>2)</sup>による下限値条件として検討された。本報では、鋼繊維と併用されるせん断補強筋量を0.1%に低減した梁材について、曲げ降伏後の変形能に与える鋼繊維の補強効果を、梁の曲げ耐力レベルの異なる2シリーズの模型実験を行うことにより検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の概略を図-1に例示する。試験体は実在の1/3スケールを想定したものであり、図-2に示す荷重条件を前提とするために梁部分の両端にスタブを有する。試験体の内訳を表-1に示す。試験体は、曲げ補強筋が4-D16 ( $p_t = 1.25\%$ )の17体と4-D13 ( $p_t = 0.80\%$ )の12体からなり、せん断補強筋比  $p_w$  (0, 0.1, 0.2%) と鋼繊維の体積混入率  $V_f = (0, 0.75, 1.0, 1.5\%)$  との組合せを変えている。使用された鋼繊維はフラット状ストレート形の  $0.5 \times 0.5 \times 30\text{mm}$  のものである。鋼繊維補強コンクリートの調合を表-2に示す。粗骨材には最大粒径15mmの砕石を用いている。これらによる圧縮強度は、試験体ごとのテストピース3体分の平均値として表-3中に示されている。他方、鉄筋の力学的特性を表-4に示す。

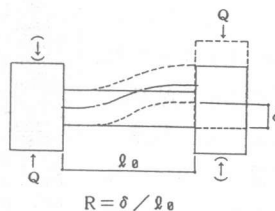


図-2 荷重条件

表-1 試験体の内訳

試験体名	あばら筋		主筋	V <sub>f</sub> (%)		
	p <sub>w</sub> (%)	種類 間隔 (mm)				
B100-871	0.1	4φ 160	4-D16 P <sub>t</sub> = 1.25%	0		
B200-871	0.2	4φ 80				
B600-871	0.6	D6 70				
B175-871	0.1	160	4-D16 P <sub>t</sub> = 1.25%	0.75		
B175-872						
B275-871	0.2	80		4-D16 P <sub>t</sub> = 1.25%	1.0	
B275-872						
B110-871	0.1	160			4-D16 P <sub>t</sub> = 1.25%	1.5
B110-872						
B210-871	0.2	80	4-D16 P <sub>t</sub> = 1.25%			0
B210-872						
B015-871	0	-		4-D13 P <sub>t</sub> = 0.80%		1.5
B015-872						
B115-871	0.1	4φ 160			4-D13 P <sub>t</sub> = 0.80%	1.0
B115-872						
B115-881	0.1	160	4-D13 P <sub>t</sub> = 0.80%			1.5
B115-882						
B100*881	0.2	80		4-D13 P <sub>t</sub> = 0.80%		0
B110*881						
B210*881	0.1	160			4-D13 P <sub>t</sub> = 0.80%	1.0
B210*882						
B115*881	0.2	80	4-D13 P <sub>t</sub> = 0.80%			1.5
B115*882						
B115*883	0.1	160		4-D13 P <sub>t</sub> = 0.80%		0
B100*891						
B200*891	0.2	80			4-D13 P <sub>t</sub> = 0.80%	1.0
B210*891						
B110*891	0.1	160	4-D13 P <sub>t</sub> = 0.80%			1.5
B115*891						

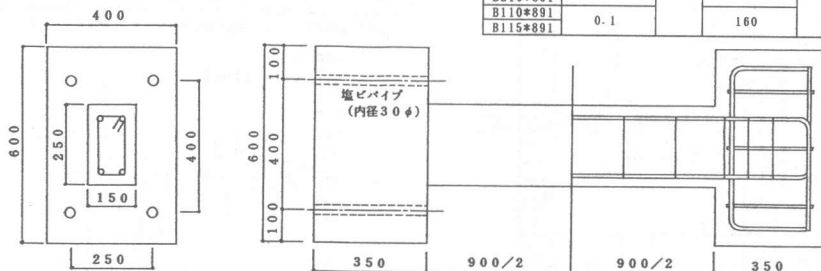


図-1 試験体の概略

## 2. 2 載荷・測定方法

試験体への載荷は左右スタブ間90cmの区間に逆対称の曲げモーメント分布を与えるために、図-3の載荷装置により梁軸を鉛直にして両スタブの回転を終始拘束して水平荷重を加えた。水平載荷の過程は図-4に示すように、繰り返し載荷の振幅は変位量9mm(部材角1/100)の倍数とし、繰り返しは $p_t=1.25\%$ は2.5サイクルで $p_t=0.80\%$ については3サイクルとした。データの測定は正負載荷、正負除荷において、荷重0.5t、変位量1mmのいづれかを満たしたときに行った。ひび割れ観測は、正負載荷時においてはデータ測定毎に行いそれ以後は各変位振幅について行った。L型アタッチメントを西側に動かした時を正の方向とし、東側に動かした時を負の方向とし、そのとき入ったひび割れをマジックで書き込み同時に荷重値もしくは変位量を書き込んで行った。

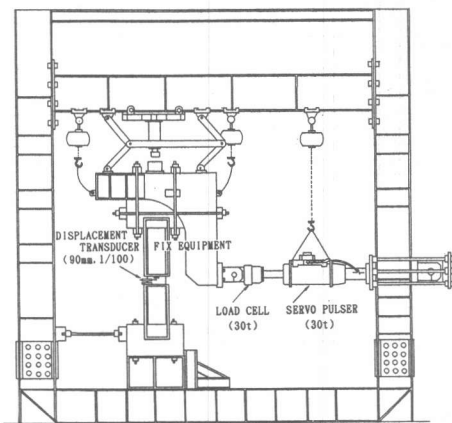


図-3 載荷装置

表-3 試験体耐力

試験体名	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	最大耐力 Q <sub>max</sub> (t)	曲げ耐力 Q <sub>bu</sub> (t)	せん断耐力 Q <sub>su</sub> (t)	Q <sub>su</sub> Q <sub>bu</sub>	限界振幅 R <sub>u</sub> * (×10 <sup>-3</sup> )	破壊モード
B100-871	315	4.7	6.3 (1.340)	6.2	0.98	10 (1)	b
B200-871	352	7.0	6.4 (0.914)	7.4	1.16	10 (2)	b
B600-871	433	7.2	6.5 (0.903)	10.2	1.57	40 (3)	c
B175-871	337	7.0	7.0 (1.000)	8.6	1.23	20 (1)	b
B175-872	352	7.5	7.1 (0.947)	8.7	1.23	10 (2)	b
B275-871	359	7.3	7.1 (0.973)	9.7	1.37	30 (1)	b
B275-872	353	7.5	7.1 (0.947)	9.7	1.37	30 (1)	b
B110-871	345	7.4	7.1 (0.959)	9.0	1.27	20 (1)	b
B110-872	353	7.2	7.1 (0.986)	9.1	1.28	20 (1)	b
B210-871	385	7.0	7.2 (1.029)	10.3	1.43	30 (1)	b
B210-872	389	7.3	7.2 (0.986)	10.3	1.43	20 (3)	b
B015-871	424	7.7	7.5 (0.974)	8.1	1.08	20 (2)	a
B015-872	367	7.7	7.3 (0.948)	7.6	1.04	20 (1)	b
B115-871	365	7.0	7.3 (1.043)	9.8	1.34	30 (2)	b
B115-872	415	7.6	7.4 (0.974)	10.2	1.38	30 (2)	b
B115-881	398	7.4	7.2 (0.973)	10.0	1.39	30 (1)	b
B115-882	359	7.3	7.1 (0.973)	9.7	1.37	30 (2)	b
B1004881	327	5.0	4.2 (0.840)	5.9	1.40	10 (2)	c
B1104881	357	5.2	5.1 (0.981)	8.8	1.73	40 (3)	c
B2104881	339	5.1	5.0 (0.980)	9.5	1.90	40 (2)	c
B2104882	374	5.0	5.1 (1.020)	9.8	1.92	30 (1)	c
B1154881	328	5.7	5.2 (0.912)	9.1	1.75	40 (3)	c
B1154882	340	5.6	5.2 (0.929)	9.2	1.77	40 (2)	c
B1154883	369	5.3	5.3 (1.000)	9.4	1.77	40 (2)	c
B1004891	394	4.5	4.1 (0.911)	6.3	1.54	10 (1)	c
B2004891	286	4.3	3.9 (0.907)	6.4	1.64	20 (3)	b
B2104891	341	5.0	4.8 (0.960)	9.5	1.98	30 (3)	c
B1104891	321	4.8	4.8 (1.000)	8.4	1.75	40 (2)	b
B1154891	387	5.3	5.0 (0.943)	9.4	1.88	40 (2)	c

[注1] 曲げ耐力・せん断耐力は計算値を示す。

[注2] 限界振幅の( )内は設定振幅の何サイクル目に達したかを示す。

[注3] 曲げ耐力の( )内は最大耐力に対する比を示す。

[注4] 破壊モードによる分類 a:対角せん断破壊, b:せん断付着割裂破壊, c:せん断圧縮破壊

表-2 鋼繊維補強コンクリートの調合

V <sub>r</sub> (%)	W/C (%)	S/A (%)	重量調合 (kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	S	G	SF	A d m
0	60	60	238	397	1019	711	—	1.613
0.75			236	394	1011	706	59	1.601
1.0			236	393	1009	704	79	1.597
1.5			234	391	1004	700	119	1.589

表-4 鉄筋の力学的特性

鉄筋種別	断面積 A cm <sup>2</sup>	ヤング係数 E <sub>s</sub> t/cm <sup>2</sup>	降伏強度 σ <sub>y</sub> kg/cm <sup>2</sup>	引張強度 σ <sub>max</sub> kg/cm <sup>2</sup>	伸び ε <sub>max</sub> %
D16	1.99	1804	3640	5470	15.6
D13	1.27	1855	3599	5340	31.4
D13'	1.27	1850	3378	4971	25.2
D6	0.32	1762	2932	4458	30.1
4φ	0.124	2136	3078	3822	18.1

[注] 鉄筋のD13'は試験体名の添字89に適用すること示す。

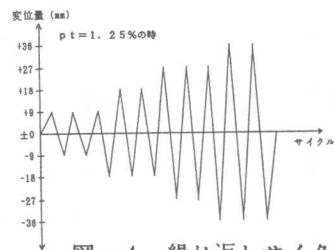


図-4 繰り返しサイクル

### 3. 実験結果

#### 3-1 破壊状況

最終ひび割れ状況を図-5に例示する。

$p_t=1.25\%$ の曲げ耐力レベルの梁の試験体は材端と中央の間にせん断ひび割れが発生し、繰り返し荷重の過程で徐々に細かい付着割裂が伸展していき、やがて曲げ補強筋沿いの一本のひび割れとなった。他方、その間で材端と中央部との間に発生したせん断ひび割れには大きな変化が見られなかった。その後、付着割裂が両端のせん断ひび割れとつながり繰り返し荷重の過程でそれらのひび割れが開きだした時点で耐力が大きく低下した。 $p_t=0.80\%$ の曲げ耐力レベルの試験体は、せん断ひび割れが発生してから繰り返し荷重の過程で付着割裂はほとんどの試験体で発生しなかった。鋼繊維を混入した試験体と混入していない試験体を比較すると、混入していない試験体の方が繰り返し荷重の過程でひび割れ幅が大きく開き耐力が低下した。

#### 3-2 荷重-変位曲線

荷重-変位曲線を図-6に例示する。 $p_t=1.25\%$ の曲げ耐力レベルの梁において、鋼繊維を混入した試験体と混入していない試験体を比較すると、鋼繊維を混入していない試験体は処女荷重時に耐力の低下が見られるが鋼繊維を混入している試験体は耐力の低下は見られない。 $p_w=0.1\%$ の試験体では $V_f=0.75\%$ と $1.0\%$ の同一変位振幅による耐力低下は部材角 $20 \times 10^{-3}$ で現れ、特に変わりはないように見えるがグループの面積は $V_f=1.0\%$ の方が $0.75\%$ より優っている。 $V_f=1.5\%$ とすれば部材角 $20 \times 10^{-3}$ では耐力の低下は見られず、部材角 $20 \times 10^{-3}$ 以上の変形能力を有することがわかる。 $p_w=0.2\%$ の試験体では、 $V_f=0\%$ では部材角 $10 \times 10^{-3}$ の2サイクル目で耐力の低下が現れるのに対し、 $V_f=1.0\%$ とすれば部材角 $20 \times 10^{-3}$ 以上の変形能力を有することがわかる。 $p_w$ と $V_f$ の組合せによる比較で

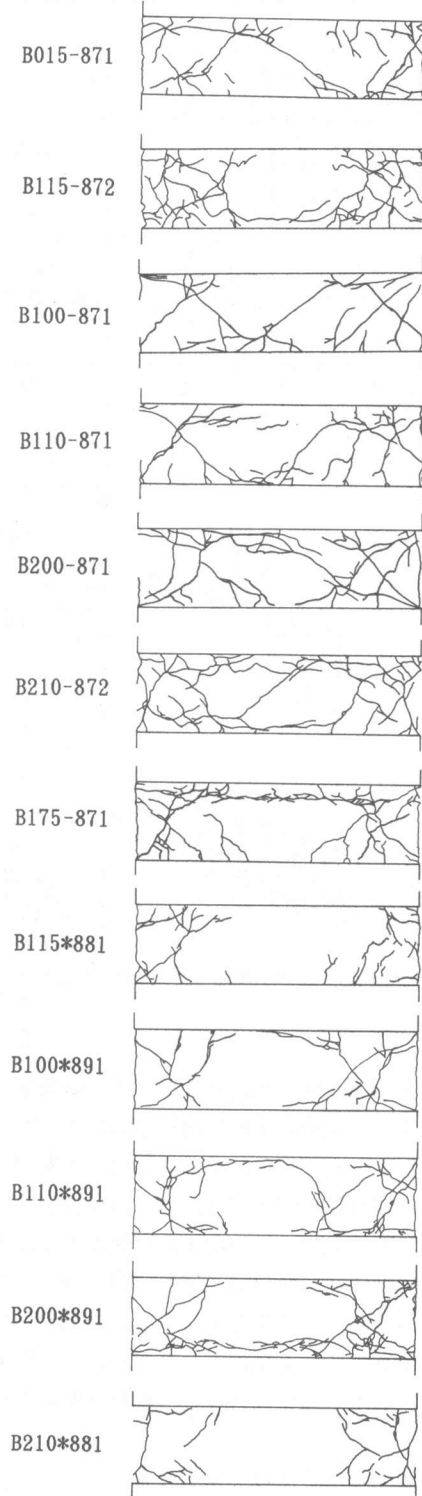


図-5 最終ひび割れ状況

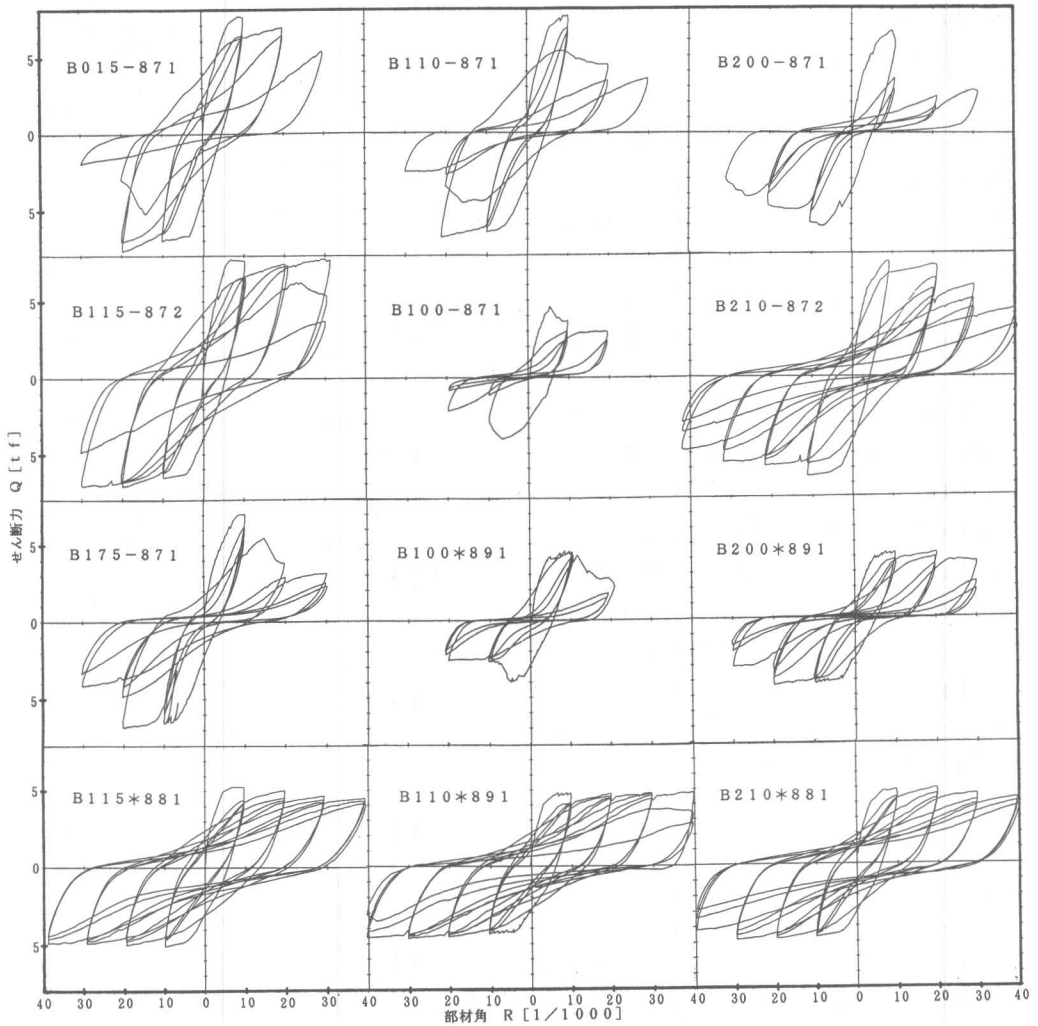


図-6 荷重-変位曲線

は、 $p_w=0.1\%$ で $V_f=1.5\%$ のせん断補強による試験体の方が $p_w=0.2\%$ で $V_f=1.0\%$ のせん断補強による試験体よりも繰り返しによる耐力低下、同一振幅内による耐力低下という観点から見て優れている。すなわち、変形能力を有する。 $p_t=0.80\%$ の曲げ耐力レベルの梁において、 $p_w=0.1\%$ の試験体では $V_f=0\%$ は処女載荷時に耐力の低下が見られるが、 $V_f=1.0\%$ と $1.5\%$ の試験体では部材角 $40 \times 10^{-3}$ 前後の変形能力を有することがわかる。 $p_w=0.2\%$ の試験体では、 $V_f=0\%$ の試験体は部材角 $30 \times 10^{-3}$ で耐力の低下がみられるが、 $V_f=1.0\%$ では部材角 $40 \times 10^{-3}$ 前後の変形能力を有することがわかる。 $p_w$ と $V_f$ の組合せによる比較では、 $p_w=0.1\%$ で $V_f=1.5\%$ のせん断補強による試験体の方が $p_w=0.2\%$ で $V_f=1.0\%$ のせん断補強による試験体よりも同一振幅のループの面積の大きさ、繰り返しによる耐力低下という観点から優れている。

### 3-3 あばら筋のひずみ分布

図-7は初曲げひび割れ時、初せん断ひび割れ時、初付着割裂ひびわれ時、最大耐力時のひずみ分布を表したものである。(  $p_t=0.80\%$ の曲げ耐力レベルの梁では、最大耐力が正処女載荷、す

なわち変位振幅9mmまでに発現した。) 図から、鋼繊維を混入した試験体の方が混入していない試験体よりも各ひび割れ時や最大耐力時のひずみが小さいことがわかる。これは、鋼繊維を混入していない試験体において、コンクリートが引張力に抵抗できなくなるのに対し、鋼繊維補強コンクリートがひび割れを拘束していると伺える。

### 3-4 変形性能

曲げ降伏前にせん断破壊した試験体はB100-871のみであり、その他はすべて曲げ降伏の先行を経た後、耐力を失った。各試験体の最大耐力 $Q_{max}$ および曲げ耐力 $Q_{bu}$ とせん断耐力 $Q_{su}$ の計算値を梁のせん断力の値として、表-3に示す。曲げ耐力は文献<sup>3)</sup>の解析で用いられたパソコンプログラムによるものを示し、せん断耐力は文献<sup>4)</sup>による提案式を用いて算定したものである。曲げ耐力の最大耐力に対する比の値は0.90から1.05で2つの結果

(B100-871, B100\*881)を除けば、かなり一致している。また、同表に示されている限界振幅は、変位振幅内で発現される耐力の最大値が最大耐力の8割以下になり始めた振幅を部材角で示したものであり、各値の( )内の数字はこの耐力低下がその振幅の何サイクル目の繰返し中に生じたかを示している。図-8は各変位振幅とその変位内の履歴吸収エネルギー量の関係を示したものである。曲げ補強筋のレベルにかかわらず鋼繊維混入率を0.75, 1.0, 1.5%と増すにつれ大きな変形能力が得られる。図-9はせん断耐力の曲げ耐力に対する比の値と限界変形角との関係を示したものである。同図の限界変形角 $R_u$ は、表-3の $R_u^*$ と( )内の繰返し数を $n$ として、以下の式から求められたものである。

$$R_u = R_u^* + 10 \times 10^{-3} \times (n - 3) / 3$$

他方、最大耐力は曲げ耐力を示すことから、耐力比の算定にこれを用いる方がより直接的ではあるが、実験値には繰返し変形の与え

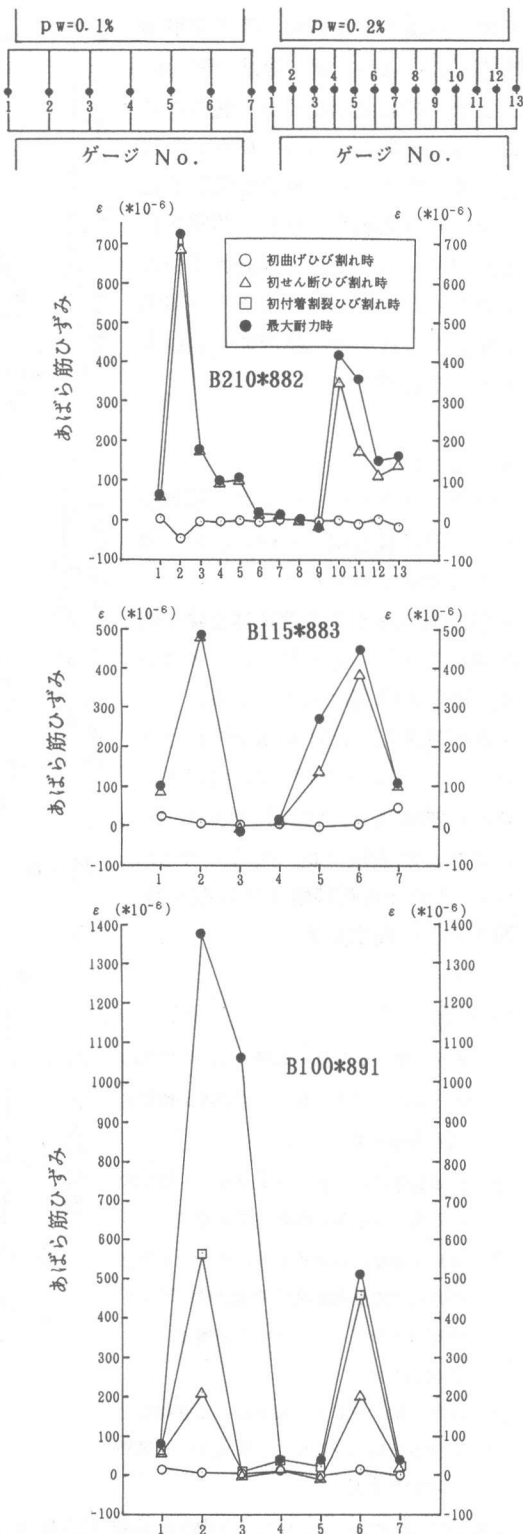


図-7 あばら筋のひずみ分布

方等が反映されるので、限界変形の指標としては一方向単調載荷時の耐力を示す計算値の比の方が適切と考えたものである。この図から、限界変形角は曲げ・せん断の計算耐力比とかなりの相関性を示し、相関係数は0.73である。また、鋼繊維補強コンクリート梁についても、その耐力比が大きい程一般に限界変形角は大きくなると言える。

#### 4. まとめ

鉄筋コンクリート梁のせん断補強として鋼繊維を用いた場合、以下のような知見が得られた。

- ・鋼繊維が無混入の供試体を除いて計算耐力比 ( $Q_{su}/Q_{bu}$ ) が大きい程、限界変形角は大きくなる。

- ・曲げ補強筋の曲げ降伏を先行させた上で、 $p_w=0.1\%$  で  $V_f=1.5\%$  のせん断補強は  $p_w=0.2\%$  で  $V_f=0\%$  のせん断補強や  $p_w=0.2\%$  で  $V_f=1.0\%$  のせん断補強よりせん断補強としての効果がある。

#### [参考文献]

- 1) 岡本 他：SFR C部材のせん断補強に関する研究（その12），学会大会梗概集，昭和60年10月
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，昭和63年7月
- 3) 永坂：鋼繊維補強鉄筋コンクリート部材の終局耐力と鋼繊維の補強機構に関する研究（その1），学会大会梗概集，昭和62年10月
- 4) 永坂 他：SFR C部材のせん断補強に関する研究（その20），学会大会梗概集，昭和61年8月

[謝辞] 本実験に際して、川崎製鉄株式会社より鋼繊維の供与を得た。また論文の作成にあたり卒研究生、伊東直康、松野秀則両君の協力を得た。ここに謝意を表します。

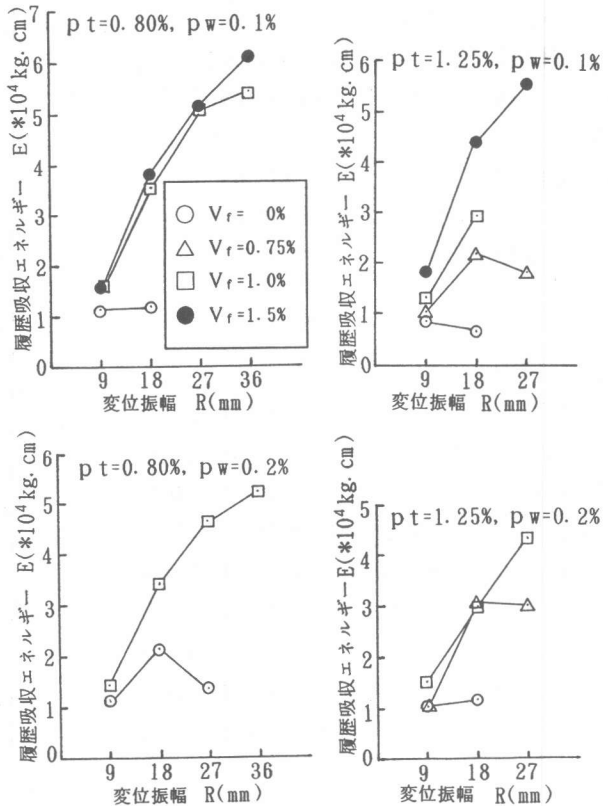


図-8 変位振幅 R と履歴吸収エネルギー量 E の関係

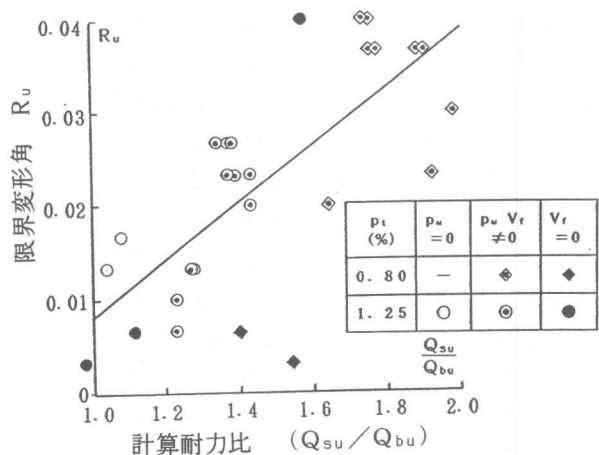


図-9 計算耐力比 ( $Q_{su}/Q_{bu}$ ) と限界変形角  $R_u$  との関係