

論文

[2178] 長繊維補強コンクリート梁のせん断耐力に及ぼす繰返し加力の影響

杉廣 邦夫<sup>\*1</sup>・永坂 具也<sup>\*2</sup>・岡本 直<sup>\*3</sup>・椎野 暢朗<sup>\*4</sup>

1. はじめに

炭素、アラミド、ガラスなどの連続繊維を樹脂で棒状に固めた長繊維筋を補強筋としたコンクリート部材において、曲げ耐力に関しては降伏点をもたない鉄筋代替の考え方で評価可能とされる反面、せん断耐力については、降伏せず弾性破断するといった長繊維筋の特性上、いまだ不明の点を内包しており、実験によっても1方向単調加力で検討されたものがほとんどである。そこで、本研究では正負交番繰返し加力を主体とした実験を行い、せん断耐力に関して検討してみた。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、中央部に逆対称曲げモーメント分布を与えることを前提とし、せん断破壊を先行させるものとして設定された。図-1に示すように、断面は一律に25cm×30cmの長方形断面 (b×D) で有効スパンはすべて90cmとした。主筋はすべて16φ相当の表面砂付き組紐状アラミド繊維筋で、あばら筋は8φ相当の組紐状炭素繊維筋および組紐状アラミド繊維筋をスパイラル筋として用いている。試験体の総数は7体で、主な実験因子は表-1に示すように、あばら筋の材種 (炭素・アラミド)、あばら筋比 (p<sub>w</sub>=0.5%, 1.0%, 1.5%)、単調加力時の破壊モード (あばら筋破断・せん断圧縮)、加力方法 (単調・繰返し) である。なお、表-1中の単調加力時の破壊モードとは過去の筆者らの実験[1]、[2]によって単調加力時に示された破壊モードを表している。用いた長繊維筋の特性を表-2に、コンクリートの調合を表-3に示す。

2.2 加力・測定

図-2の加力装置を用いて、試験区間に逆対称荷重を与えた。加力方法は単調加力と正負交番繰返し加力との2通りである。繰返し加力の加力ルールを表-4および図-3に示す。全試験体

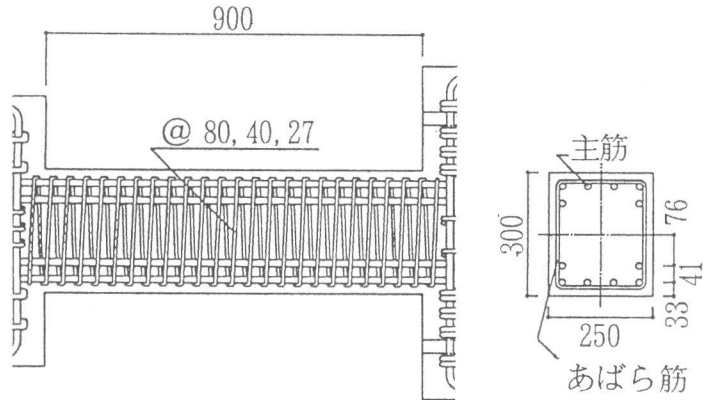


図-1 試験体の概略

表-1 試験体一覧

試験体名	材料種別		p <sub>w</sub> (%)	L <sub>0</sub> (cm)	単調加力時の破壊モード	加力方法	
	主筋	あばら筋					
C05MC-93	アラミド	炭素	0.5	90	あばら筋の破断	繰返し	
C05MM-93			1.0			単調	
C10MC-93		アラミド	0.5			せん断圧縮	繰返し
C10MM-93			1.0				単調
A05MC-93	炭素	炭素	0.5		せん断圧縮	繰返し	
C10LC-93			1.0			繰返し	
C15LC-93			1.5	繰返し			

\*1三菱建設 (株) 設計部構造設計グループ (正会員)

\*2東海大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

\*3三井建設 (株) 技術開発本部技術開発推進部主席研究員 (正会員)

\*4大成プレハブ (株)

とも第1振幅 (+A-①~③、-A-①~③) においては一定の荷重を基準に加力方向を反転させる荷重制御を行ったが、第2振幅 (+B-①) 以降においては、C05MC-93、C10MC-93については一定の部材角を基準に加力方向を反転させる変位制御を行い、A05MC-93、C10

LC-93、C15LC-93については、変位制御と荷重制御を併用して行った。変形に関しては、試験区間両端の相対変位を高感度変位計 (検長50mm・1/500) を用いて測定した。また、箔ひずみゲージ (ゲージ長さ2mm) を補強筋の表面に貼りつけ、主筋、あばら筋の各部のひずみについても同時に測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 ひび割れ・破壊性状

各試験体の終局状態のひび割れ図を図-4に、最大耐力および破壊モードを表-5に示す。同表には、筆者らが過去に実験を行った5体の試験体 (C05MM-90、C10MM-90、A05MM-90、C10LM-91、C15LM-91) [1], [2]についても同時に示している。C05M

C-93、C05MM-93、およびC10MM-93ではあばら筋が曲げ加工部付近で破断し、急激に耐力が低下した。A05MC-93では-B-①サイクルの途中で耐力が上がらなくなりコンクリートの圧潰の進展と

表-2 長繊維筋の力学特性

用途	補強筋種別	断面積 (mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	曲げ加工部引張強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び率 (%)
曲げ	組紐状アラミド繊維筋(K256S)	200	5740	132		2.3
せん断	組紐状炭素繊維筋(C64)	50	11450	131	92	1.1
	組紐状アラミド繊維筋(K64)	50	6170	140	83.8	2.2

表-3 コンクリートの調査

目標コンクリート強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位重量(kgf/m <sup>3</sup> )				混和剤 (Q/m <sup>3</sup> )
					水	セメント	細骨材	粗骨材	
360	15	22.5	44.9	46.2	171	381	829	969	5.525
210	15	19.0	61.5	46.7	171	278	850	1010	0.695

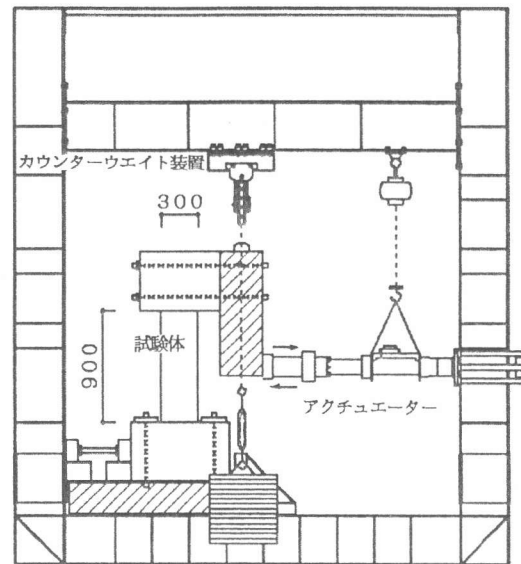


図-2 加力方法

表-4 加力ルール

試験体名	加力方向の反転する荷重(tf)又は部材角(rad)					
	+A	-A	+B	-B	+C	-C
C05MC-93	①					
	②	+0.7Q <sub>u</sub>	-0.7Q <sub>u</sub>	+20/1000	-20/1000	+30/1000
	③					
C10MC-93	①					
	②	+0.7Q <sub>u</sub>	-0.7Q <sub>u</sub>	+20/1000	-20/1000	+30/1000
	③					-30/1000
A05MC-93	①					
	②	+0.7Q <sub>u</sub>	-0.7Q <sub>u</sub>	+20/1000	+B-①最大耐力	
	③					
C10LC-93	①					
	②	+0.7Q <sub>u</sub>	-0.7Q <sub>u</sub>	+20/1000	+B-①最大耐力	+40/1000 <sup>*1</sup>
	③			+B-①最大耐力	+B-①最大耐力	+C-①最大耐力
C15LC-93	①					
	②	+0.7Q <sub>u</sub>	-0.7Q <sub>u</sub>	+20/1000	+B-①最大耐力	+35/1000 <sup>*2</sup>
	③			+B-①最大耐力	+B-①最大耐力	+C-①最大耐力

※Q<sub>u</sub>: せん断耐力計算値

\*1-B-③の頂点で-30/1000をこえてしまったため+30/1000を中止して+40/1000を目標頂点とした。

\*2-B-③の頂点で-30/1000をこえてしまったため+30/1000を中止して+35/1000を目標頂点とした。

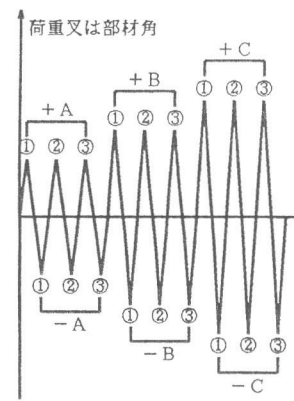


図-3 加力ルール

表-5 ひび割れ耐力・最大耐力・破壊モード

試験体名	あばら筋種	P <sub>w</sub> (%)	σ <sub>B</sub> <sup>1</sup> (kg/cm <sup>2</sup> )	加力方法	単調加力時の破壊モード	破壊モード	ひび割れ耐力(tf)			最大耐力(tf)
							曲げ	せん断	付着割裂	
C05MC-93	炭素	0.5	495	繰返し	あばら筋の破断	あばら筋破断	2.2	7.0	6.0	19.0
C05MM-93			452	単調		あばら筋破断	4.0	7.7	5.5	18.1
C05MM-90 <sup>1</sup>			295	単調		あばら筋破断	1.5	5.5	6.0	20.8
C10MC-93		1.0	522	繰返し		主筋破断	2.0	8.0	6.0	23.9
C10MM-93			456	単調		あばら筋破断	2.8	8.0	5.5	26.0
C10MM-90 <sup>1</sup>			295	単調		あばら筋破断	2.0	5.0	7.0	28.2
A05MC-93	77ミト	0.5	496	繰返し	せん断圧縮 <sup>*2</sup>	せん断圧縮 <sup>*2</sup>	3.0	7.5	7.0	18.5
A05MM-90 <sup>1</sup>			341	単調		あばら筋破断	1.0	6.5	5.5	20.5
C10LC-93	炭素	1.0	275	繰返し	せん断圧縮	主筋破断	1.4	7.0	6.0	17.2
C10LM-91 <sup>1</sup>			240	単調		せん断圧縮 <sup>*2</sup>	3.8	6.5	13.0	21.1
C15LC-93		1.5	280	繰返し		主筋破断	2.6	7.0	8.0	21.1
C15LM-91 <sup>1</sup>			230	単調		せん断圧縮	1.7	4.6	11.7	22.6

\*:筆者らが過去に実験を行った試験体

\*1: 3~6本のテストピースによるコンクリートの圧縮強度の平均値

\*2: コンクリートの圧潰後、あばら筋が破断

ともに、変位のみが大きく進んだところであばら筋が曲げ加工部で破断し耐力が低下した。C10LC-93および、C15LC-93では、サイクルが進むにつれてコンクリートの圧潰が顕著となり、部材端部の主筋が破断して耐力が低下した。これらは繰返し加力を行う過程でコンクリートの圧縮力に対する耐力が低下する一方、主筋に圧縮力と引張力が交互に作用することで主筋自体の強度が低下したものと推測される[3]。C10MC-93については、主筋の破断箇所においてコンクリートの顕著な圧潰は観察されなかったが、部材端部の主筋が破断したことで耐力が低下した。なお、顕著なせん断ひび割れの傾斜角は45°に近いものがほとんどであった。

### 3. 2 変形状

繰返し加力を行った試験体の荷重-変位曲線を図-5に、包絡線を図-6に示す。同図より、繰返し加力を行った試験体における最大耐力時の変位は、単調加力を行った試験体の最大耐力時の変位に比べて小さくなっていることがわかる。

### 3. 3 あばら筋のひずみ分布

図-7は単調加力時の破壊モードがあばら筋の破断となったあばら筋の材種が炭素、あばら筋比が0.5%の試験体について最大耐力時付近(18.0tf)でのあばら筋の材軸方向のひずみ分布を例示したものである。図-8に各試験体の最大耐力時に測定したあばら筋の平均ひずみ値ε<sub>0</sub>に対する、あばら筋の最大ひずみ値ε<sub>max</sub>の比を示す。それぞれの図より、単調加力時の破壊モードがあばら筋の破断となったものについては、繰返し加力を行うことによって、あばら筋のひずみ値が平均化される傾向がうかがえる。

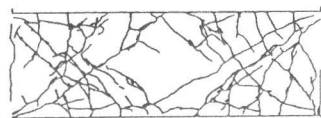
### 3. 4 最大耐力

[単調加力時の破壊モードがあばら筋の破断の場合]

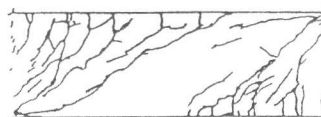
図-6(a)において、あばら筋が炭素繊維筋であばら筋比が0.5%のC05MC-93とC05MM-93を比較すると、両試験体ともあばら筋の破断により耐力が定まっているが、繰返し加力によるC05MC-93の



C05MM-93



C05MC-93



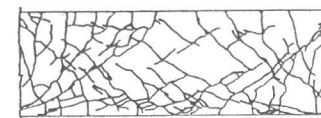
C10MM-93



C10MC-93



A05MC-93

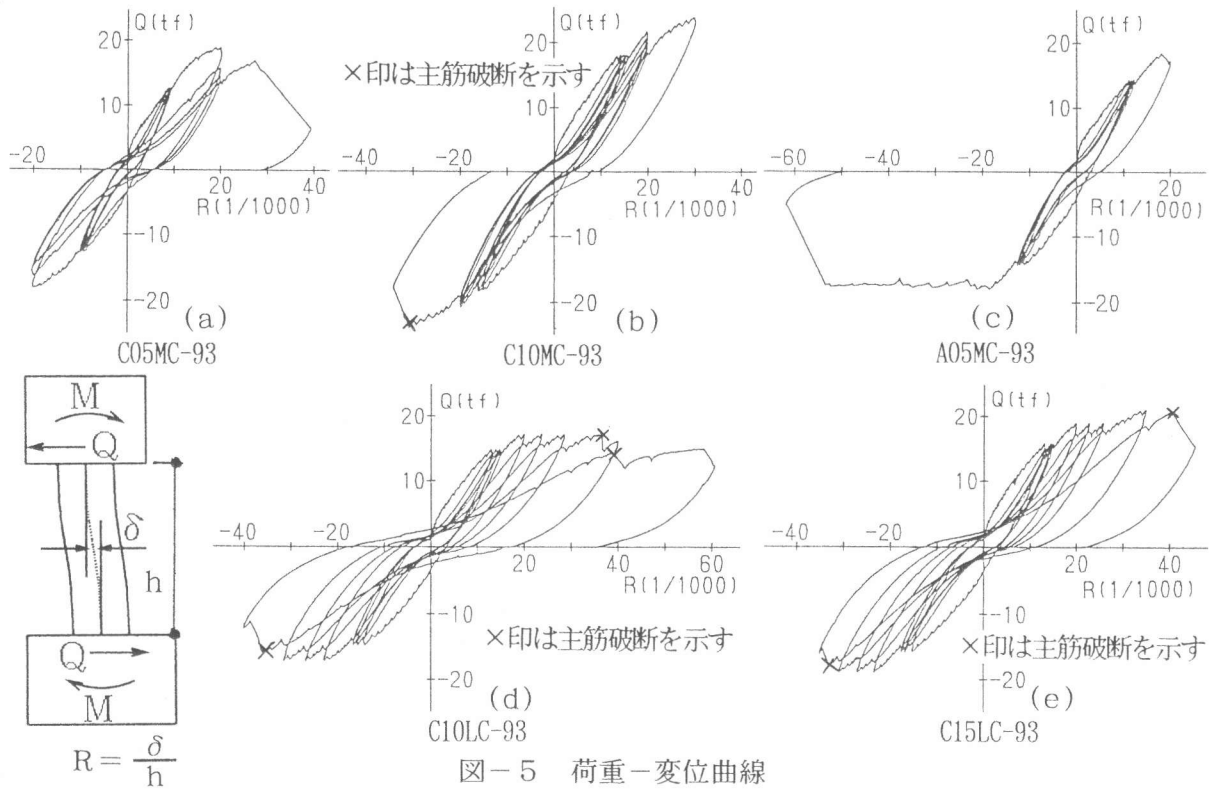


C10LC-93



C15LC-93

図-4 ひび割れ図



方が単調加力によるC05MM-93よりも最大耐力の値が大きくなっている。これは、図-7、図-8で示されるように、繰返し加力を行うことで梁を2分するせん断ひび割れに横断されるあばら筋の応力分布が平均化されることであばら筋の補強効率が高まったためと考えられる。一方、図-5(c)、図-6(c)において、あばら筋がアラミド繊維筋であばら筋比が0.5%のA05MC-93とA05MM-90を比較した

場合、破壊モードがあばら筋の破断となった単調加力によるA05MM-90に対し、繰返し加力を受けたA05MC-93ではコンクリート強度が高いにもかかわらず、コンクリートの圧潰により耐力が定まった。この理由としては、繰返し加力を受けたことによって、前述のようにあばら筋の補強効率が上がる一方、単調加力時よりもひび割れが広範に進展してコンクリートとしての一体性が損なわれ、圧縮耐力が低下し、あばら筋の強度が発

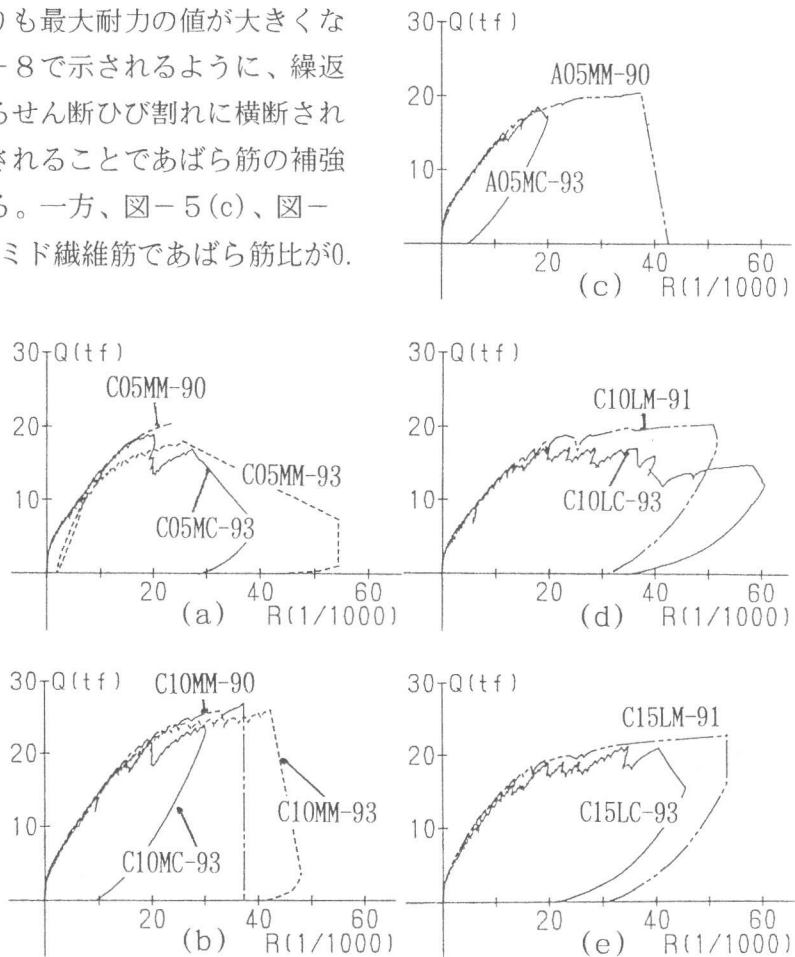


図-6 包絡線

揮される前にコンクリートが圧縮耐力に達したものと考えられる。また、あばら筋比の大きい1.0%のC10MC-93とC10MM-93においては、C10MC-93が主筋の破断により耐力が決定したため、直接せん断耐力の比較をする事はできないが、同試験体においても、前述のようなあばら筋の応力分布の平均化が見られることと、コンクリートの圧潰状況が顕著でなかったことから、主筋が破断しなければ、単調加力を行った試験体よりも耐力が上がると思われる。[図-6(b)参照] 他方、あばら筋比の大きいC10MC-93はC05MC-93よりも大きな加力レベルで繰返しを受けていることから、3.1で指摘したように主筋の耐力が低下した結果と考えられる。

[単調加力時の破壊モードがコンクリート圧潰の場合]

繰返し加力を行ったC10LC-93、C15LC-93がいずれも主筋の破断により耐力が定まったため、せん断耐力としての直接的な比較はできないが、両試験体とも単調加力を行ったC10LM-91、C15LM-91よりもコンクリートの損傷が大きかったことから、C10LC-93、C15LC-93ともに主筋が破断しないで耐力が定まったとしても、単調加力時の最大耐力を超えることは難しいと考えられる。[図-6(d), (e)参照]

### 3.5 せん断耐力の評価

大野・荒川式を修正して[4]あばら筋が破断するとして算定される耐力 $Q_{su1}$ （あばら筋の強度に表-2中の曲げ加工部引張強度を使用）とコンクリートが圧潰するとして算定される耐力 $Q_{su2}$ と実験値を表-6に、計算値と実験値との関係を図-9に示す。同図より、 $Q_{su2}$ は実験値とかなりよい対応を示し、すべての実験値は単調・繰返しの加力方法の別なく、 $Q_{su2}$ による計算値のおよそ90%以上となった。一方、 $Q_{su1}$ による計算値によれば単調加力を行った試験体に限ると、実験値はすべて計算値の80%

以上となったのに対し、繰返し加力を行った試験体についてはC10LC-93を除けばおおよそ実験値は計算値の80%以上となったが、範囲を見ると79~84%となっており、全体的に実験値が計算値よりも低くなる傾向を示した。以上より $Q_{su2}$ の計算値を10%低減すれば、ほぼすべての実験値は安

い。

表-6 せん断耐力の実験値と計算値

試験体名	加力方法	破壊モード	$\sigma_{n1}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	せん断耐力 $Q_{su}$ ( $Q_u/Q_{su}$ )		実験値 $Q_u$ (tf)	曲げ耐力 <sup>*)3</sup> $Q_{bu}$ (tf)
				$Q_{su1}$ (tf)	$Q_{su2}$ (tf)		
C05MC-93	繰返し	あばら筋破断	495	23.6(0.81)	20.9(0.91)	19.0	38.1
C05MM-93	単調	あばら筋破断	452	22.7(0.80)	20.1(0.90)	18.1	36.4
C05MM-90		あばら筋破断	295	19.6(1.06)	16.9(1.23)	20.8	28.9
C10MC-93	繰返し	主筋破断	522	28.3(0.84)	24.6(0.97)	23.9	39.1
C10MM-93	単調	あばら筋破断	456	27.0(0.96)	23.2(1.12)	26.0	36.5
C10MM-90		あばら筋破断	295	23.8(1.18)	20.0(1.41)	28.2	28.9
A05MC-93	繰返し	せん断圧縮 <sup>*)2</sup>	496	23.1(0.80)	18.7(0.99)	18.5	38.0
A05MM-90	単調	あばら筋破断	341	20.0(1.03)	15.6(1.31)	20.5	31.1
C10LC-93	繰返し	主筋破断	275	23.4(0.74)	19.6(0.88)	17.2	28.1
C10LM-91	単調	せん断圧縮 <sup>*)2</sup>	240	22.7(0.93)	18.9(1.12)	21.1	25.7
C15LC-93	繰返し	主筋破断	280	26.7(0.79)	22.1(0.95)	21.1	28.3
C15LM-91	単調	せん断圧縮	230	25.7(0.88)	21.1(1.07)	22.6	25.0

\*)1: 3~6本のテストピースによるコンクリートの圧縮強度の平均値

\*)2: コンクリートの圧潰後にあばら筋が破断

\*)3: コンクリートの圧潰(圧潰ひずみ=0.004)により定まる曲げ耐力の計算値(断面解析による)

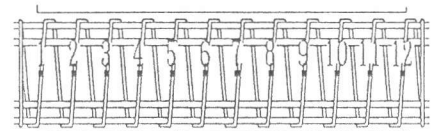
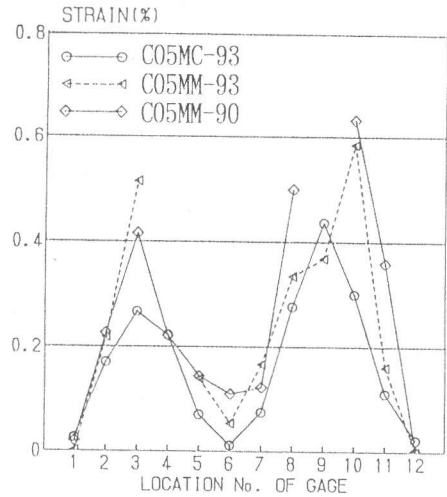


図-7 あばら筋のひずみ分布

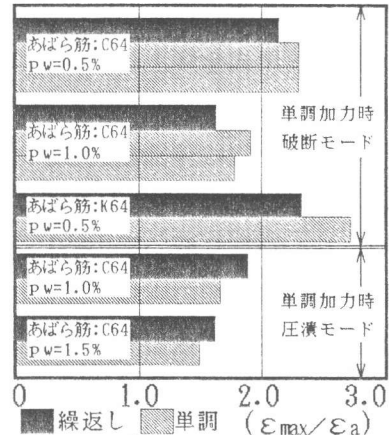


図-8 最大耐力時の  $\epsilon_{max}/\epsilon_a$

全側に評価される。

#### 4. まとめ

本実験の範囲で得られた結果を以下に示す。

- 1) 単調加力時の破壊モードがあばら筋の破断となった試験体に繰返し加力を行うと、あばら筋が炭素繊維筋の場合には破壊モードが変化

せずにせん断耐力の上昇する結果が得られた。また、あばら筋がアラミド繊維筋の場合には逆に破壊モードがコンクリートの圧潰により耐力が低下した。ただし、これらの結果には繰返しによるあばら筋の補強効率の増大とコンクリートの劣化の両者が影響すると考えられ、一律に判定することはできないが、せん断耐力を実験的に確認する場合、繰返し加力によることが必ずしも安全側の評価とはならないことを意味する。

- 2) 大野・荒川式を修正して得られたコンクリートが圧潰するとした場合のせん断耐力式による計算値は実験値とよく一致し、この計算値を10%低減すれば加力方法によらず、ほぼすべての実験値を安全側に評価できる。
- 3) 長繊維棒材を補強筋に用いたコンクリート梁部材に繰返し加力を行った結果、計算上の曲げ耐力よりもかなり低い耐力時に主筋の破断が早期に生じる場合がみられた。

最後に、本研究の実験全般にわたって多大の協力をいただいた三井建設（株）技術研究所谷垣正治氏に深く感謝致します。なお、実験実施を進めるにあたり協力してくれた東海大学卒研究生の阿部友幸・武岡茂・津田剛直・山本直樹の4君に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 永坂具也・近藤悟：長繊維棒材で補強されたコンクリート梁のせん断挙動に関する研究（その1）、（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集C構造Ⅱ、pp. 849-852、1991. 9
- 2) 永坂具也・亀井隆：長繊維棒材で補強されたコンクリート梁のせん断挙動に関する研究（その3）、日本建築学会大会学術講演梗概集C構造Ⅱ、pp. 145-146、1992. 8
- 3) 園部泰寿ほか：連続繊維補強筋を用いたはり部材の繰返し曲げせん断応力下の曲げ性状（その1）、（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集C構造Ⅱ、pp. 141-144、1992. 8
- 4) Nagasaka, T., et al. : Shear Performance of Concrete Beams Reinforced with FRP Stirrups, International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures, ACI, Vancouver, pp. 789-811, March. 1993
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1988

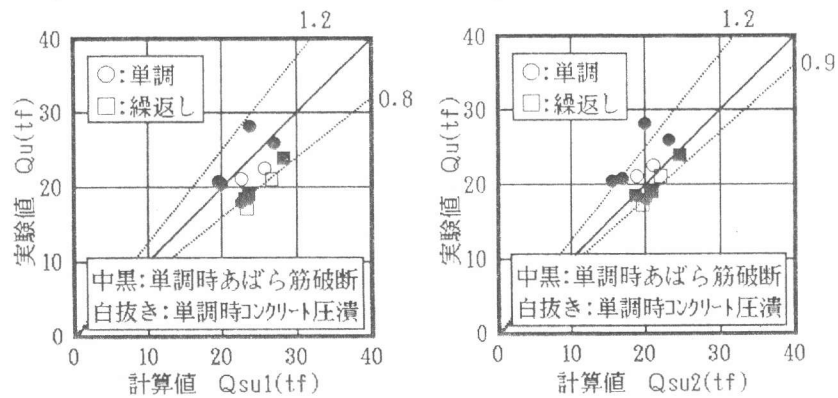


図-9 せん断耐力の実験値と計算値との関係