

論文 炭素繊維シートを用いた RC 柱の剪断補強効果に及ぼす諸要因の影響

城 攻^{*1}・北野敦則^{*2}・後藤康明^{*3}・小林裕和^{*4}

要旨：阪神・淡路大震災を機に、RC柱の剪断補強及び補修が急務とされており、本研究では炭素繊維シートを用い、RC柱への剪断及び付着割裂破壊に対する効果について柱軸力比、シアスパン比、補強量を因子として実験的検討を行った。その結果、1)柱軸力比が増すにつれ炭素繊維シートの剪断耐力に対する効果は低くなる2)同様に補強量が多いほど効果は低くなる3)剪断終局耐力は広沢修正式に炭素繊維シートの効果を考慮して推定でき、RC指針式は補強材強度の上限を考慮しないと危険側になることが明らかとなった。
 キーワード：RC柱、補強、炭素繊維シート、シアスパン、軸力比、付着割裂、剪断

1. はじめに

我が国では世界的に見ても耐震性の高い建物が多く建設されており、その設計体系確立のための研究も盛んに行われてきた。ところが1995年1月におきた阪神・淡路大震災では、RC構造物において、主に新耐震設計法施行以前の旧建築基準法によって建てられた構造物の多くが柱の剪断破壊により全壊または半壊の被害を受けた。そのため、既存の建物の早急な耐震診断及び補強、補修が急務となっている。本研究は、RC構造物の補強及び補修材として近年注目されている炭素繊維シートを用い、RC柱の剪断における補強方法並びにその効果について実験的検討を行った。

炭素繊維シートの使用は既に、土木の分野では多くの実績があり、補強効果に対する研究も進んでいるが、建築構造物の場合にはシアスパンが短くなったり、壁の存在によって、部材の形状が土木構造物と比べて複雑となる場合が多く、これらに対応した補強方法や、剪断補強効果などについては十分に検討されていない。本研究では特にシアスパン比と柱軸力を実験変数として剪断耐力に及ぼす影響を実験的に検討したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 に試験体一覧、図-1 に試験体概要及び配筋図を示す。試験体は正方形断面(300mm×300mm)のRC柱を中心とする実寸の1/3~1/2の縮小I型模型で、柱高さが600mm(S)と900mm(M)を5体ずつ計10体作製した。実験変数は炭素繊維量(0,1層,3層)、柱軸力比(0,0.2,0.4)、破壊モードとした。配筋は、柱主筋にD16(無軸力試験体はSD345、他

表-1 試験体一覧

試験体名	実験変数	M/Qd	σ_0/σ_B	p_f (%)	σ_B (MPa)
CS2	無補強	1.12	0.2	0	28.7
CS2-A	低補強			0.0444	27.2
CS2-3A	中補強		0.1332	30.7	
CS0-3A	無軸力			0	32.9
CS4-3A	高軸力			0.4	24.0
CM2	無補強	1.68	0.2	0	29.9
CM2-A	低補強			0.0444	29.4
CM2-3A	中補強		0.1332	26.5	
CM0-3A	無軸力			0	27.9
CM3-3A	高軸力			0.3	28.3

注) p_f : 繊維シート量(5cm²/7φに幅3cmの繊維を一周巻くと0.04%)

はSD690)を、剪断補強筋に□-6φ@150(SD345)を使用し、軸筋比はS型3層巻きの3体が $p_g=2.21\%$ 、

- *1 北海道大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻、工博 (正会員)
- *2 北海道大学助教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻、工博 (正会員)
- *3 北海道大学助手 大学院工学研究科社会基盤工学専攻、工修 (正会員)
- *4 西松建設 工修 (非会員)

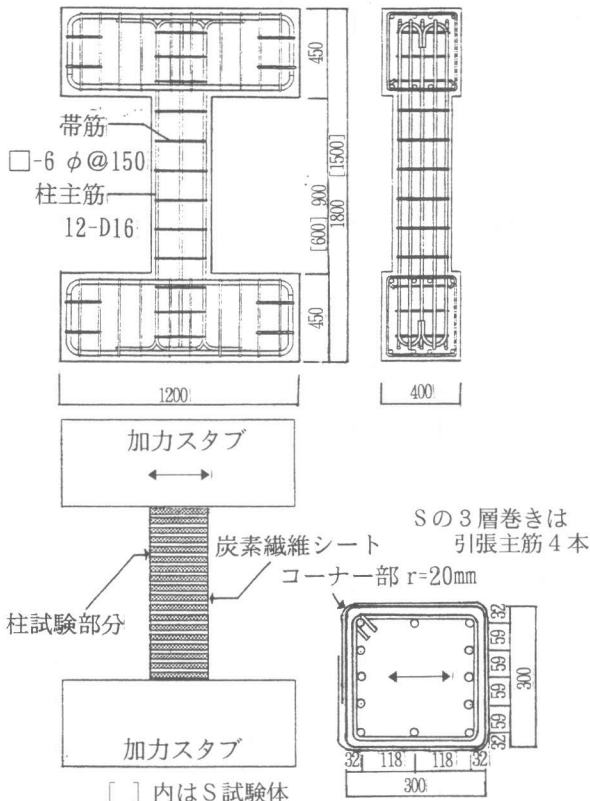


図-1 試験体概要および配筋 (mm)

表-2 炭素繊維シートの性能

繊維の種類	高強度カーボン
繊維目付 (N/m ²)	1.96
単位体積重量 (kN/m ³)	17.6
設計厚さ (mm)	0.111
引張強度 (N/mm幅)	382
設計強度 (MPa)	3480
引張弾性率 (N/mm幅)	25.4
設計弾性率 (GPa)	231
破断伸び度 (%)	1.5

品番: FTS-C1-20
 エポキシ樹脂: FR-E3P
 プライマー: FP-NS

表-3 鉄筋の機械的性質

使用鉄筋	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	E (GPa)
6φ	370	0.240	197
D16	403	0.223	169
D16	656	0.584	169

σ_y : 降伏強度 ϵ_y : 降伏歪度 E: ヤング係数

表-4 コンクリートの調合

調合強度 (MPa)	水 (kN/m ³)	セメント (kN/m ³)	細骨材 (kN/m ³)	粗骨材 (kN/m ³)
20	2.16	2.87	8.82	9.01

他の試験体 $p_s=2.65\%$ とし、剪断補強筋比は $p_w=0.124\%$ として全試験体共通である。表-2に材料特性を示す。炭素繊維シートは、試験体表面を研磨、柱コーナー部を $r=20\text{mm}$ に面取りした後、エポキシ系下地剤を塗布し、下地材定着後30mm幅の炭素繊維シートを50mmピッチで柱部分に巻き付けた。

2.2 加力および計測

図-2に加力装置概要図を示す。加力は、柱断面の一主軸方向への変位漸増正負繰り返し静的加力とし、所定の軸力比となるよう軸力を加えた後、水平方向アクチュエータにより水平加力を行った。加力プログラムは、層間変形角 $R=1/1000, 1/500\text{rad}$ で各1回、 $R=1/200, 1/100, 1/50, 1/33, 1/20\text{rad}$ で各2回繰り返し加力を行った。

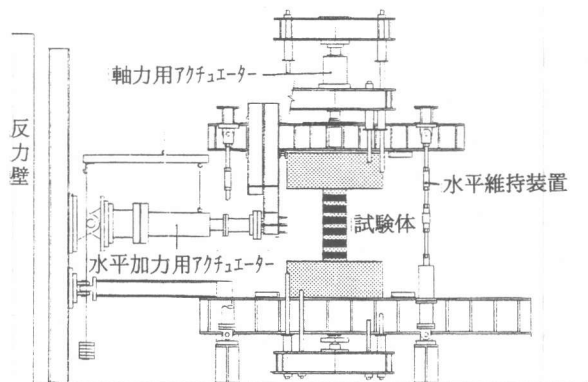


図-2 加力装置概要

但し、Sシリーズ試験体は1/1000を行わず、無補強試験体については、+4サイクル(ピーク時層間変形角 $R=1/100\text{rad}$)の加力途中で最大耐力に至り、耐力の急激な低下が見られたためその時点で除荷した。計測は、柱剪断力、柱軸力、柱層間変形、柱各部の水平方向変位、鉛直変位、剪断変形、軸方向変形と、柱主筋、剪断補強筋、炭素繊維シートの各歪度を随時計測し記録した。

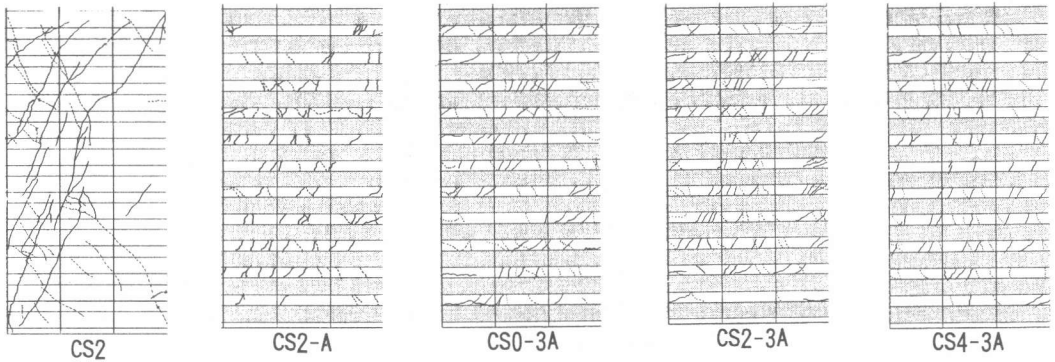


図-3 最終破壊状況

3. 破壊状況

3. 1 Sシリーズ試験体 (シラスpon比=1.12)

図-3に最終破壊状況を示す。無補強試験体は1サイクル目の $R=1/500\text{rad}$ (以降 R と rad を省略)に向かう途中で対角線剪断亀裂が発生し、横補強筋の降伏がないままに最大耐力に達して急激に耐力を失う斜張力破壊性状を示した。シート補強試験体は2サイクル目、約 $1/400$ で柱頭部に剪断初亀裂が発生し順次これに平行な斜め亀裂が柱高さ中央側に生じ、約 $1/300$ で対角線剪断亀裂が生ずる。この間に剛性は急激に低下するのに対し、耐荷力はシート3層巻きでは上昇し、1層巻きでは耐荷力を維持してこのサイクルの ピーク 変位 $1/200$ に達する。同時に、横補強筋は降伏して 10000μ まで急増し、対角線剪断亀裂発生以前では殆ど歪を生じていなかったシートは、1層巻き3層巻き共に 2000μ 程度になる。4サイクル目では、上述の剪断亀裂の間にさらに亀裂が発生しシート補強量に関係なく耐荷力が増大し $1/100$ で最大耐力に達する。6サイクル目で、1層巻きのシートが $1/75$ で破断して耐力を失うのに対して、3層巻きでは、コンクリートの剥落が開始してシートの歪上昇が止まり、シート破断は実験終了時まで生じなかった。8サイクル目の $1/33$ 以降は、変位増大に伴って加力方向のシートは柱幅の中央部でコンクリートから浮き上がるが、コーナー付近では接着している(図-4)。シート破断が生じる場合は、この屈曲に集中する事が多い。加力に直交するシートの接着は実験後も維持されていた。

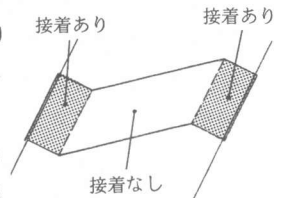
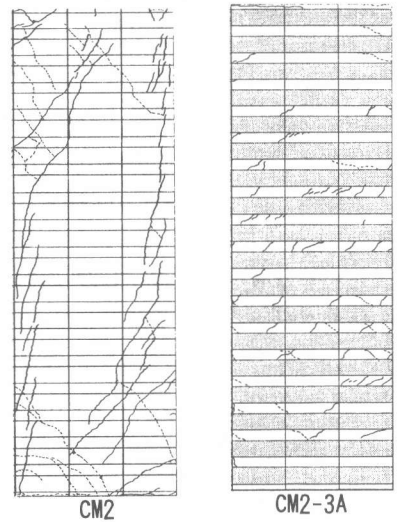


図-4 大変形時のシートの接着状況

3. 2 Mシリーズ試験体 (シラスpon比=1.68)

無補強試験体(CM2)及び補強試験体(CM2A, CM23A)に関しては、低サイクル時において亀裂の発生状況に大きな違いはみられず、1サイクル目に曲げ初亀裂、2サイクル目に剪断初亀裂が発生し、それ以降になると新たな亀裂が多数発生、伸展した。しかし、4サイクル目にCM2とCM2Aは明瞭な付着割裂亀裂が発生して最大耐力に至るのに対し、高補強されたCM23Aは $1/50$ に達して付着割裂亀裂と剪断亀裂が混在した破壊モードで最大耐力に至った。その後はシートの隙間からコンクリートが剥落し、CM2Aは柱spの上下約 $1/3$ 付近でシートが破断し始めた。しかし、高補強のCM23Aはシート破断を生じなかった。

4. 荷重変形関係

4. 1 炭素繊維補強量の影響

図-5～8に正側加力時の包絡線を示す。7.1.1の小さいCS2、CS2A、CS23Aを比較すると初期変形時はほぼ同じ推移を示している。又、どの試験体も $2\sim 5 \times 10^{-3}$ rad時に剪断亀裂によって剛性低下を示し、その後、耐荷力が若干低下する様相を示している。CS2はシート補強をしていないため、耐荷力の回復は見られないのに対して、補強したCS2A、CS23Aは耐荷力が回復し、最大耐力に達した後は補強量が多いほどCS2に比べて緩やかに耐荷力が低下している。補強試験体2体について最大耐力以後の変形性能を比較すると、CS2Aは $R=40 \times 10^{-3}$ radまでに $Q=70$ kN(8割減)まで低下するのに対し、CS23Aは $R=40 \times 10^{-3}$ rad時までに $Q=210$ kN(4割減)の低下に留まった。すなわちシートを多く巻くことで剪断破壊を生じても最大耐力以後の耐荷力の急激な低下を抑える効果が期待できる。これは低補強のCS2Aは変形の増大と共にシートが破断して急激に耐荷力が低下するのに対して、高補強のCS23Aは変形が増大してもシートの破断には至らず緩やかな耐荷力の低下を示したことによるもので、シート補強量の大小による破断の有無が変形性能に与える影響が大きいことがわかる。

7.1.1が大きいMシリーズについて、無補強のCM2、低補強のCM2Aが最大耐力に至った 5×10^{-3} rad時に柱主筋沿いの付着割裂によって急激に耐荷力が低下している。これに対し、高補強のCM23Aは付着割裂と剪断の混在する破壊によって剛性低下するが緩やかに耐荷力が上昇し、最大耐力以後も耐荷力の低下は激しくない。低補強のCM2Aは耐荷力低下後の $R=1/100$ rad以降からCM23Aに平行する低い荷重レベルの荷重変形関係を示している。

4. 2 柱軸力比の影響

7.1.1の小さいSシリーズのCS03A(無軸力)、CS23A(低軸力)、CS43A(高軸力)を比較すると、CS03Aは初期剛性が低いがCS23AとCS43Aはほぼ同じ初期剛性を示している。軸力が大きいほど剪断初亀裂発生荷重が増大する。凡そ $1/200$ radで対角線剪断亀裂により若干の耐荷力低下を生じるが、その後の変形で軸力が低いほど耐荷力は大きく上昇して最大耐力に達する。図-7では無軸力時の耐力が最も大きい、コンクリート強度の違いを考慮した後述の終局

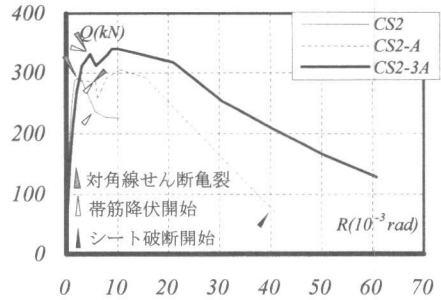


図-5 正側加力包絡線(M/Qd=1.12、補強量)

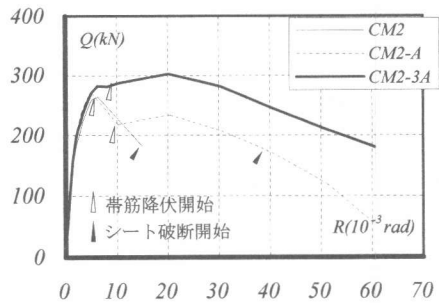


図-6 正側加力包絡線(M/Qd=1.68、補強量)

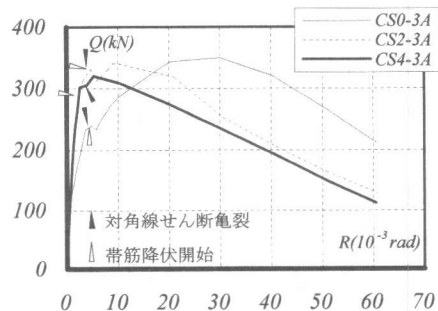
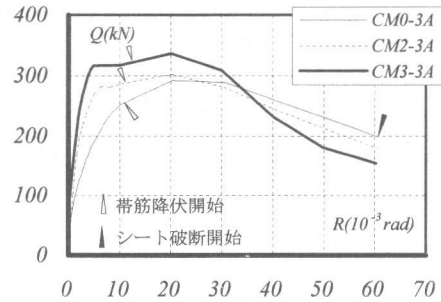


図-7 正側加力包絡線(M/Qd=1.12、軸力比)

剪断耐力計算値から3試験体の最大耐力はほぼ等しいと思われる。軸力が低いほど最大耐力時の層間変形角は大きい。最大耐力以降について、CS43Aは3試験体中で最も直線的に耐荷力低下するのに対して、CS03AとCS23Aは暫くは緩やかに耐荷力低下した後、低下勾配は急になる。

次にアスペクト比が大きいCM03A、CM23A、CM33Aを比較すると、軸力が高いほど剪断初亀裂発生が遅くなり、小変形時の剛性が高くなっている。CM23AとCM33Aは剛性急変時の耐力は異なるが、剛性低下後は概ね同様のQ-Rの推移を示しながら最大耐力に達する。CM03Aは層間変形角の増大と共に緩やかに耐荷力が上昇し最大耐力に達し、3試験体とも最大耐力時の層間変形角はほぼ一致している。最大耐力以降についてCM03Aは緩やかに耐荷力低下し、CM23A、CM33Aと軸力が高くなるほど耐力低下が急激である。

以上よりアスペクト比に関係なく、軸力が高いほど対角線剪断亀裂発生前の剛性が高く、軸力が低いほど最大耐力後の耐荷力低下が緩やかであることがわかる。



図—8 正側加力包絡線(M/Qd=1.68、軸力比)

5. 耐力

表-5に最大耐力の一覧を示す。最大耐力の計算として、終局剪断耐力には広沢修正式および、日本建築学会/終局強度型RC指針式、付着割裂耐力には柴田・桜井式を用いる。文献[1]や[2]を参考に、それぞれの式(順に(1),(2),(3)式とする)において、炭素繊維補強量 $p_f \cdot \sigma_f$ に有効係数 $\alpha=2/3$ を乗じたものを横補強鉄筋量に加えて求めた値を等価補強量 $p_e \cdot \sigma_e$ とした。但し、(2)式で等価補強量を求める際に、 $\sigma_e \leq 25 \sigma_B$ の制限を与えない場合の剪断耐力を Q_{su1} とし、考慮した場合の剪断耐力を Q_{su2} としている。いずれも $p_e \cdot \sigma_e \leq \nu \sigma_B / 2$ を満足している。

剪断破壊したSシリーズに関して、[1]や[2]では(1)式が炭素繊維シートの効果を過小評価するとして

表—5 終局耐力の実験値と(expQu)と計算値(Q_{su} , Q_{su1} , Q_{su2} , Q_{bu})の比較

試験体名	実験変数	σ_B (MPa)	expQu		R_u ($\times 10^{-3}$ rad)	Q_{su}		Q_{su1}		Q_{su2}		Q_{bu}		破壊モード
			正(kN)	($\times 10^{-3}$ rad)		正(kN)	正	正(kN)	正	正(kN)	正			
CS2	無補強	28.7	293	2.72	297	0.99	354	0.83	209	1.40	—	—	剪断	
CS2-A	低補強	27.2	305	10.4	319	0.96	377	0.81	229	1.33	—	—		
CS2-3A	中補強	30.7	340	8.92	369	0.92	484	0.70	308	1.10	—	—		
CS0-3A	無軸力	32.9	350	30.0	336	1.04	497	0.70	323	1.08	—	—		
CS4-3A	高軸力	24.0	320	5.29	364	0.88	429	0.75	259	1.24	—	—		
CM2	無補強	29.9	264	6.25	—	—	—	—	—	—	213	1.24	付着割裂	
CM2-A	低補強	29.4	271	5.08	—	—	—	—	—	—	233	1.16		
CM2-3A	中補強	26.5	302	20.1	291	1.04	451	0.64	201	1.51	265	1.14	付着割裂と 剪断が混在	
CM0-3A	無軸力	27.9	292	20.3	258	1.13	460	0.56	260	1.13	243	1.21		
CM3-3A	高軸力	28.3	336	20.1	319	1.05	468	0.72	262	1.28	288	1.17		

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.115k_w \cdot k_p (180 + \sigma_B)}{M/Qd + 0.12} + 2.7 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy} + \alpha \cdot p_f \cdot \sigma_f + 0.1 \sigma_B} \right\} \cdot b \cdot j \quad (1)式$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{su} &= b \cdot j \cdot p_e \cdot \sigma_e \cdot \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b \cdot D \cdot \nu \cdot \sigma_B / 2 \\ Q_{su1} &: p_e \cdot \sigma_e = p_w \cdot \sigma_{wy} + \alpha \cdot p_f \cdot \sigma_f \quad (\alpha = 2/3) \\ Q_{su2} &: p_e \cdot \sigma_e = p_w \cdot \sigma_{wy} + p_f \cdot \sigma_f \quad (\sigma_{wy}, \sigma_f \leq 25 \cdot \sigma_B) \end{aligned} \right\} (2)式$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{bu} &= \tau_b \cdot [0.95 + 0.0018 \sigma_0 - 0.066 (M/QD)] \cdot n \cdot \psi \cdot d \\ \tau_b &= [0.3 + 0.8C/\phi + 13\phi/(M/Q)] \cdot \sqrt{\sigma_B} + (a_w \cdot \sigma_y/x + \alpha \cdot a_f \cdot \sigma_f/x_f)/(11n \cdot \phi) \end{aligned} \right\} (3)式$$

(2)式を採用している。本実験の結果からは(2)式で $\sigma_r \leq 25\sigma_B$ の制限を与えると実験値は計算値を上まわり、考慮しないと危険側に評価する。これに対し、(1)式による計算値は実験値と比較的よく一致する。また、(1)式において軸力比が増すにつれて実験値は計算値より低くなる傾向が見られ、シート補強効果は軸力が高くなるほど低くなる傾向がわかる。同様に補強量が多いほど補強量に見合った補強効果は得られなくなり、有効係数 α は2/3よりも低減させる必要がある。(3)式についても同様の傾向が見られる。

6. 炭素繊維シートの歪度

図-9に最大耐力時における各試験体の炭素繊維シートの歪度分布を示す。先の表-5に最大耐力時の部材角 R_u をあわせて掲載したが、この R_u が大きいほどひずみが大きい。従って、耐力式においてシート補強量の有効係数を $\alpha = 2/3$ と一定値を与えるのは疑問が多い。また、加力方向の部分が大きく歪み、その直交方向はほとんど歪まない傾向がCS03Aを除くS試験体にみられ、M試験体にはみられない。これは付着割裂破壊では直交方向の壁面にも縦亀裂が発生し、この方向でもシートが効くためである。1層巻きのCM2Aの歪みは極めて小さいが、CS2Aは柱の中央部でもっとも歪み、10000 μ に達するほどである。このようにシートの効果は低減率 $\alpha = 2/3$ で評価できず、検討の余地がある。

7. おわりに

阪神・淡路大震災を契機に、旧基準で設計されたRC柱の剪断補強及び補修が急務とされている。本研究は、炭素繊維シートを用いたRC柱の剪断及び付着割裂破壊に対する補強効果について実験的検討を行った。その結果、①柱軸力比が増すにつれ炭素繊維シートの剪断耐力に対する効果は低くなる、②同様に補強量が多いほど効果は低くなる、③剪断終局耐力は広沢修正式に炭素繊維シートの効果を考慮して推定でき、RC指針式は繊維強度の上限値適用の有無による影響が大きいことが明らかとなった。今後は、柱に付帯する壁によって炭素繊維シートを閉鎖できない場合等、実際的な状況を想定した補強方法を検討する予定である。

参考文献 [1]MARS研究会「既存鉄筋コンクリート柱の炭素繊維シート耐震補強工法」pp4 H8.11
[2]大林組「FRP巻き付けによる既存鉄筋コンクリート柱の耐震補強工法」pp26 H8.9

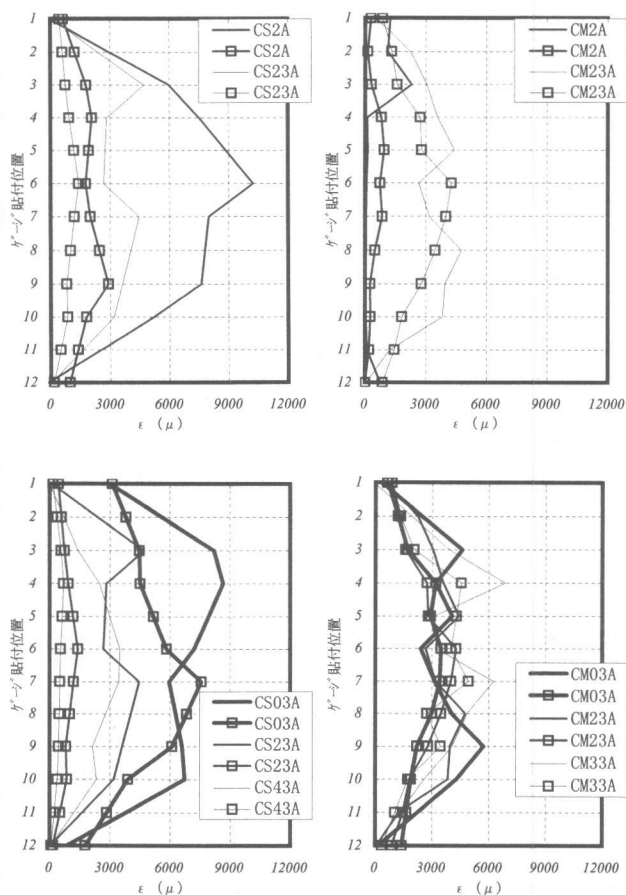


図-9 最大耐力時におけるシートの歪度分布
(□マークを付したものは加力と直交方向に位置するシートの歪度)