

論文 連続繊維シートを用いた RC 柱の耐震補強法に関する実験的研究

張 愛暉*1 山川 哲雄*2 岡 敬人*3 佐藤 元*4

要旨:連続繊維シートにより柱を横拘束する工法の補強効果を定量的に評価する式が未だ確立に至っていない。ここでは、評価式の提案に必要な基礎データを集めるために連続繊維シート補強柱の曲げせん断実験を行い、繊維横補強量が柱のせん断耐力及び靱性の改善に及ぼす影響について検討した。その結果、連続繊維横補強により柱のせん断耐力が高められ、柱がせん断破壊から曲げ破壊モードに移るが、拘束繊維量が不足する場合は柱が曲げ圧縮破壊となり、十分な靱性が確保できないこと、また、曲げ圧縮破壊する柱の靱性を改善するには補強繊維の膜剛性を増やすことが有効であることがわかった。

キーワード: RC 柱, 耐震補強, 連続繊維シート, 曲げ圧縮破壊, 靱性

1. はじめに

阪神・淡路大震災以来、既存不適格構造物に対する耐震補強が急務とされている。そのような社会的関心が高まる中で、既存構造物の RC 柱に対する耐震補強に関する研究は増えつつある。ここでは、連続繊維シートにより横補強された RC 柱の曲げせん断実験を行い、繊維横補強量が柱のせん断耐力及び靱性の改善に及ぼす影響について検討した。

2. 試験体

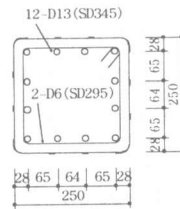
試験体は中低層建物の下層階柱を約 1/3 ~ 1/2 モデルに縮尺した柱である。補強なしの柱 1 体と連続繊維シートにより横補強された柱 7 体の計 8 体である。その中の幾つかは繊維種類、繊維巻き付け用接着剤の種類及び巻き方を実験要因とした試験体であるが、既報¹⁾ではそれら要因の影響が殆どない結論が得られた。それら要因の影響を無視すれば、実験要因は繊維補強量のみとなり、本実験と一致するため、既報の 5 体も本報告の検討対象とした。

すべての柱のせん断スパン比が 2 であり、形状及び配筋が同じである。補強前の柱は主筋量が $P_g=2.44\%$ と比較的多く、横筋比 $P_w=0.43\%$ あ

表-1 試験体一覧

試験体名	連続繊維シート補強方法	膜剛性 (GPa・mm)
CR97A-S0	繊維補強なし基準 RC 柱	—
CF1-2-97*	炭素繊維 1 層	25.6
CF4-1-97	炭素繊維 4 層	102.2
AF4-1-97	アラミド繊維 4 層	90.8
AF4S-2-97*	アラミド繊維 4 層	90.8
R98F-A11	アラミド繊維 1 層	22.7
R98F-A20	アラミド繊維 2 層(ヒンジ外補強なし)	45.4
R98F-A21	アラミド繊維 2 層(ヒンジ外1層)	45.4

- 1) *印柱は 2 液接着剤を用いた柱である。
なお、AF4S-2-97 柱の繊維はスパイラル巻きとしたが、定着を取るために、材端部で余分に繊維を平行に重ね合わせた。
- 2) ヒンジ領域は柱頭・柱脚部の 1.5D (375mm) とする。



共通事項:
せん断スパン比 $M/(VD)=2.0$
主筋: 12-D13 (SD345)
 $P_g=2.44\%$
帯筋: 2-D6@60 (SD295)
 $P_w=0.43\%$

表-2 コンクリートおよび鉄筋の力学特性

試験体名	σ_B (MPa)	主筋		帯筋	
		σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_{wy} (MPa)	ϵ_{wy} (%)
CR97A-S0	31.4				
CF1-2-97	33.5	360.9	0.21	388.2	0.22
CF4-1-97					
AF4-1-97					
AF4S-2-97					
R98F-A11	38.5	389.2	0.20	388.2	0.22
R98F-A20					
R98F-A21					
R98F-A21					

*1 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科, 学術博士 (正会員)
*2 琉球大学教授 工学部環境建設工学科, 工博 (正会員)
*3 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (正会員)
*4 横浜ゴム株式会社 BD 推進室担当課長

るが、軸力比が0.35と比較的高いので、曲げせん断破壊が予想される柱である。このような曲げせん断破壊柱に連続繊維横補強を行った。試験体の概要を表-1に示す。柱のヒンジ領域外でのコンクリート圧壊はヒンジ領域内に比べ顕著ではないことから、2体の柱についてヒンジ領域外の繊維補強量を減らした。

本実験に用いた材料の力学特性を表-2~3に示す。各試験体の実験時コンクリート圧縮強度に若干の差異があるが、結果に与える影響は小さいと思われる。また、連続繊維巻きの前に柱断面隅角部の面取りを行った。

実験は建研式水平加力装置を用いて、一定軸圧縮応力 ($N=0.35 \sigma_b b d$) 下の正負繰り返し水平加力で行った。柱の部材角Rを0.5%ずつ、同一振幅で3サイクルずつ繰り返しの变形制御で行った。

3. 実験経過

各試験体のせん断力V-部材角R関係を図-1に示す。補強なしの基準RC柱CR97A-S0では、R=0.5%のピーク時に主筋が圧縮降伏し、1%のピーク手前に主筋が引張降伏し、最大耐力を示した。R=1%レベルでの3回目の繰り返し加力で、柱のせん断劣化が進み、3回目のピーク時の耐力は1回目より約2割低下した。その後の加力では、せん断劣化が更に進み、部材角が大きくなるにつれ、急激に耐力が失われていく。部材角R=2%の3回目の荷重は最大耐力の約4割弱となり、実験を終了した。この柱の破壊モードは曲げ降伏後のせん断破壊である。

炭素繊維1層巻きにより横補強されたCF1-2-97柱では、補強なしのRC試験体と同じR=1%で主筋の引張降伏が生じたが、R=1%レベルの3回繰り返し加力でも、耐力の低下が少なく、安定した性状を示した。R=1.5%の正加力では、紡錘形のループ性状を示したが、その負加力では、ピークに達する前に、柱頭ヒンジ部の繊維に凸起が生じ、ピーク時荷重がR=1%の耐力を大きく下回った。その繰り返し加力で、凸起が更に顕

表-3 連続繊維シートの力学特性

連続繊維シート名	厚さ t (mm)	引張強度 σ_t (MPa)	破断時歪 ϵ_t (%)	ヤング率 E (GPa)	膜剛性 E · t (GPa · mm)
炭素繊維	0.111	3481.4	1.49	230.3	25.56
アラミド繊維	0.193	2059.4	1.80	117.7	22.71

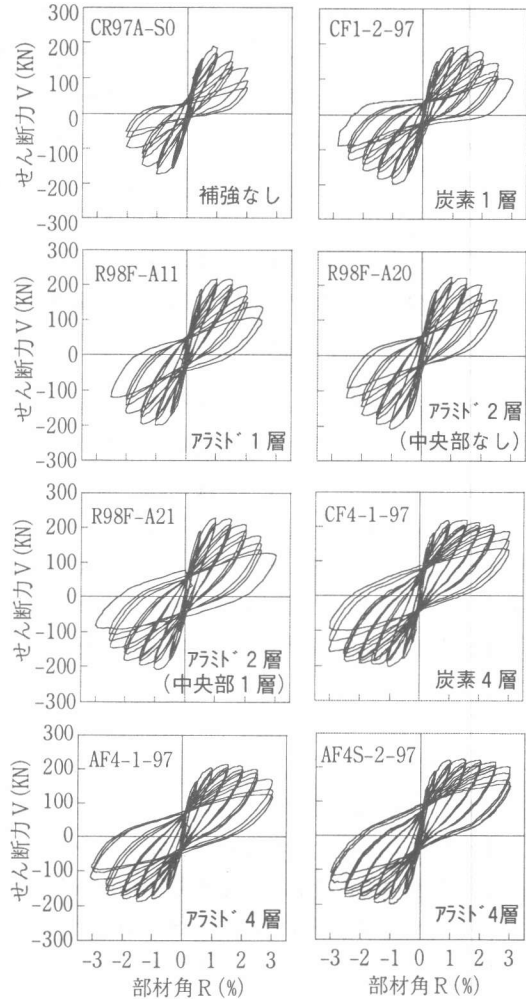


図-1 せん断力V-部材角Rの関係

著になり、ループ性状も逆S型に呈した。R=1.5%以後の加力では、柱頭ヒンジ部の4面がすべて膨れ上がり、その範囲が材軸方向に広がり、耐力が急激に低下した。R=3%の加力で、柱頭ヒンジ隅角部で繊維の破断が生じ、実験を終了した。この柱の主筋降伏が生じたものの、R=1.5%で安定したループ性状を示さなかったことから、柱の最終破壊モードは曲げ圧縮破壊と判断した。実験終了後に補強繊維を剥ぎ、殆ど

の主筋に座屈が生じ、ヒンジ部のコンクリートが粉状に圧壊したことが確認された。

アラミド繊維1層巻きR98F-A11柱では、炭素繊維1層柱と同様にR=1%までは安定した性状を示したが、R=1.5%で柱頭ヒンジ部の繊維凸起が生じた。R=1.5%の繰り返し三回目ピーク時荷重は一回目ピーク時荷重に比べ、顕著に低下したことから、柱頭ヒンジ部の圧壊がこの時点から生じ始めたと思われる。その後の加力では、コンクリートの圧壊による耐力低下が急激に進んだ。破壊モードは曲げ圧縮破壊と判断した。

ヒンジ領域内では同じくアラミド繊維2層であるが、ヒンジ領域外では繊維補強量が違う柱R98F-A21（ヒンジ領域外では繊維1層）とR98F-A20（ヒンジ領域外では補強なし）はほぼ同じ性状を示した。両柱ともにR=1.5%の繰り返し加力で、曲げ圧縮破壊が進み、急激に耐力が低下した。

炭素繊維及びアラミド繊維4層巻きで横補強された他の3試験体（CF4-1-97, AF4-1-97, AF4S-2-97）では、いずれもR=1.5%で最大耐力を示した。その後R=2.5%までの繰り返し加力でも、耐力の低下は少なく、安定したループ性状を示した。R=3%の加力では、柱頭ヒンジ部の凸起が顕著になり、繰り返し耐力も大きく低下した。これらの試験体はR=2.5%まで安定した性状を示したことから、破壊モードは曲げ破壊と判断した。

各試験体の部材角-平均軸ひずみ関係を図-2に示す。曲げ降伏後せん断破壊となったCR97A-S0及び繊維巻き数が2層以下の曲げ圧縮破壊となった柱では、部材角2%の時点で、軸ひずみが発散する傾向を示した。連続繊維4層巻きにより横補強され、曲げ破壊となった柱では、前述の曲げせん断性状と対応するように、R=2.5%まで軸ひずみが安定していた。

4. 考察

A) 包絡線の比較検討

各試験体の包絡線の比較を図-3に示す。

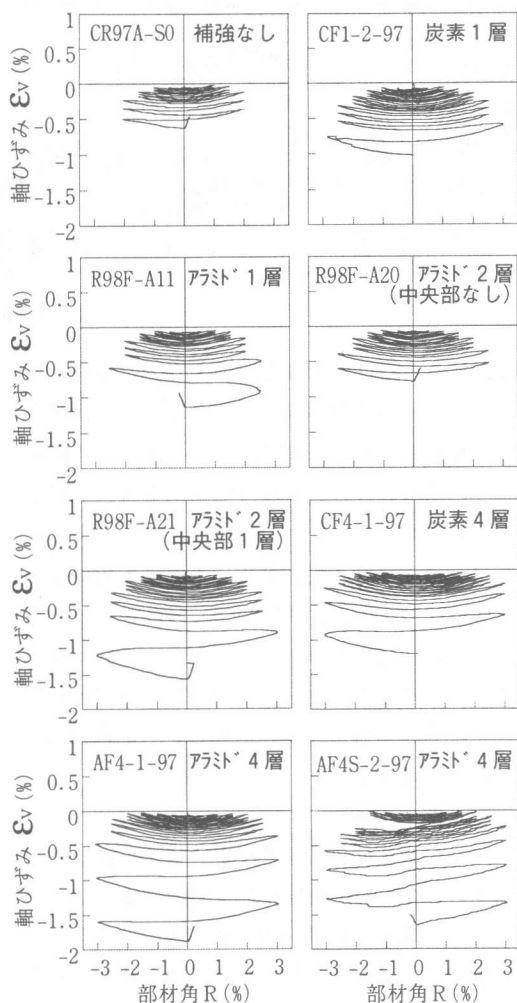


図-2 部材角-平均軸ひずみ関係

炭素繊維1層巻きのCF1-2-97試験体は部材角R=1%までは、補強なしのCR97A-S0試験体とほぼ同じ性状を示したが、CR97A-S0試験体がR=1.5%でせん断劣化し、耐力が低下したのに対し、CF1-2-97試験体は1.5%で最大耐力を示した。1.5%以後の加力で曲げ圧壊が顕著になったが、炭素繊維1層でもせん断破壊を防止できた。

アラミド繊維1層巻きR98F-A11柱の主筋強度は若干高いため、最大耐力は炭素繊維1層巻きCF1-2-97よりわずかに高いが、両者の最大耐力後の荷重低下性状はほぼ同じである。これは両者の繊維の膜剛性がほぼ同じだからである。

ヒンジ領域外の繊維巻き数が1層のR98F-A21

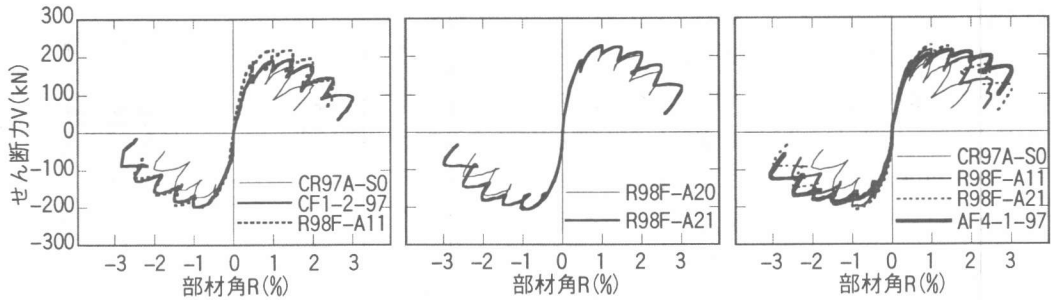


図-3 試験包絡線の比較

と、ヒンジ領域外繊維なしのR98F-A20柱では、両者はほぼ同じ性状を示した。これは両試験体の破壊性状がヒンジ領域のコンクリート圧壊により決まり、ヒンジ領域外の拘束効果に影響されないからである。

アラミド繊維1層、2層、4層柱の包絡線の比較により、巻き付け量つまり膜剛性が増えるとともに、柱の性状が改善されるが、図に示すように、大きな部材角でも荷重低下が少なく安定した性状を確保するためには、一定の膜剛性が必要と言える。

B) 耐力の検討

せん断余裕度と破壊モードの関係を図-4に示す。せん断余裕度は日本建築学会鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説²⁾式(以下靱性保証設計式と称す)と荒川MEAN式により評価した。柱せん断破壊時の繊維ひずみが破断ひずみを大きく下回り、柱のせん断耐力を計算する場合、繊維破断強度の代わりに低減した強度を用いることが提案されている。ここでは、上記の両式を適用する際、文献3に示した最小の低減係数1/3を用いた。

補修前の基準柱CR97A-S0のせん断余裕度は0.83(靱性保証設計式)と小さく、破壊モードはせん断破壊であることを示唆している。実験結果でも曲げ降伏後のせん断破壊となっており、このディテールの柱では、せん断に対して補強する必要があることが裏付けられた。

炭素繊維1層巻きにより補強されたCF1-2-97試験体のせん断余裕度が1.19であり、この試験体はせん断破壊しないことを示している。実

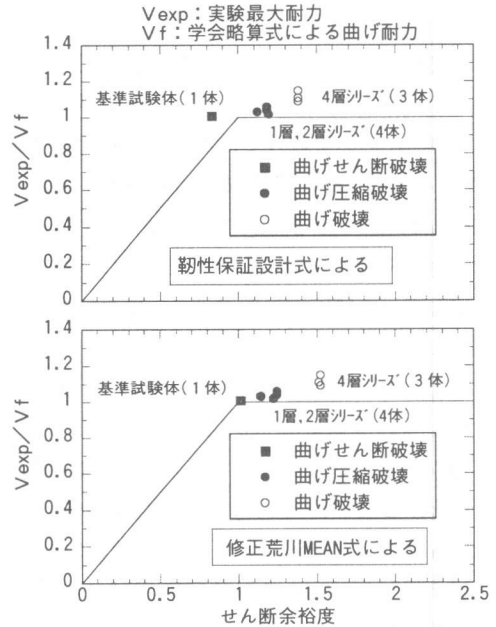


図-4 せん断余裕度-破壊モード関係

験でもこの試験体は曲げ圧縮破壊となり、連続繊維によりせん断耐力を高めることができた。

図-4に示すように、両式とも柱の破壊モードをほぼ予測できた。

C) 繊維の横ひずみ

コンクリートに対する横拘束が最も有効であった柱頭の繊維シートの横ひずみを図-5に示す。繊維2層巻き以下の場合では、部材角が低いレベルの繰り返し加力でも、繊維の横ひずみが増え続ける。これは、低い部材角レベルからコンクリートの圧壊が生じ、コンクリートが膨張し始めていることを意味する。繊維4層巻きの場合、部材角がR=2.5%以下では、繊維の横ひずみが殆ど増えない。しかし、部材角2.5%以

後では、繊維横ひずみが急激に伸び、柱の圧壊が顕著になった。

D) 曲げ圧壊の検討

連続繊維シート2層以下の柱では、柱のせん断破壊が防げたが、コンクリートの圧壊により十分な靱性が確保出来なかった。一方、連続繊維4層の柱では大変形までは安定したループ性状を示した。これは繊維拘束量が曲げ圧縮破壊に及ぼす影響が大きいことを意味している。そこで、平面保持仮定とした曲げ解析により曲げ圧縮破壊性状に関する検討を行った。

拘束コンクリートの応力-ひずみ構成則に川島らの提案式⁴⁾を用いた。川島式は炭素繊維拘束のみを対象としているが、ここでは、アラミド繊維拘束の場合でも炭素繊維の膜剛性に換算することにより川島式を準用することとした。また、川島式では、横拘束繊維が破断した場合、コンクリートが終局ひずみに達し、応力を負担しないとしているが、本実験では、繊維の破断はR=3%の繰り返しサイクルで生じ、解析では繰り返しの影響を対象としないので、解析には拘束コンクリートの終局ひずみを設定しないこととした。川島式による各種拘束状態下のコンクリートの応力-ひずみ関係を図-6に示す。柱の部材角は材軸方向の曲率を仮定することにより求めた⁵⁾。解析に用いた塑性ヒンジの長さは柱せいの1/2とした。曲げ解析結果と実験結果の比較を図-7に示す。なお、図中に学会略算式による復元力特性を併記した。

繊維1層巻きのCF1-2-97柱とアラミド繊維1層巻きのR98F-A11柱の解析では、ともに最大耐力後のコンクリート圧壊による耐力低下が激しく、十分な靱性を確保できない結果を示し、実験の最終破壊モードがほぼ裏付けられた。しかし、解析の耐力低下は実験より激しかった。これは、繊維量が少ない場合の拘束効果を過小評価しているからと思われる。

曲げ解析では、アラミド繊維2層のR98F-A20柱が1層巻きの柱に比べ圧壊による耐力低下性状がかなり改善されるものの、大変形時における

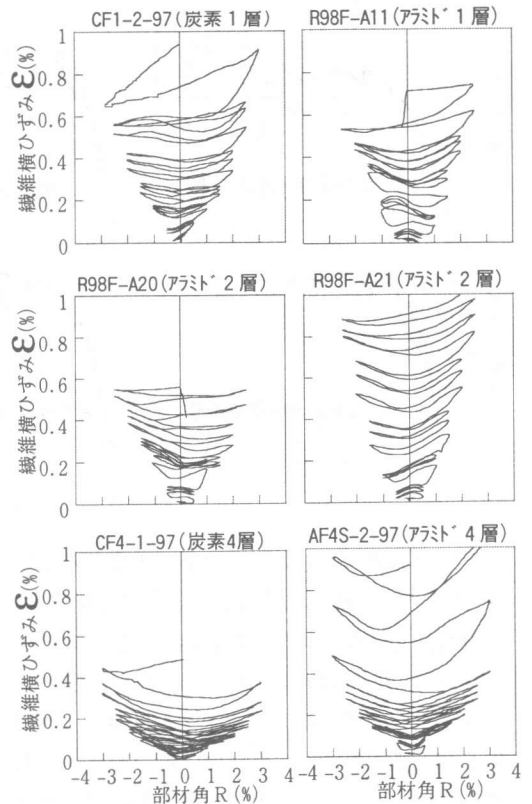


図-5 柱頭ウェブ面における補強繊維の横ひずみ

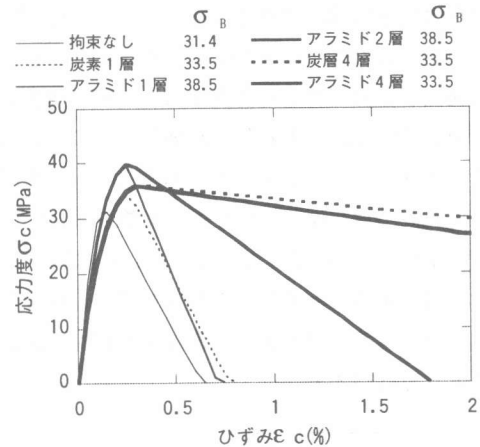


図-6 横拘束コンクリートの $\sigma_c - \epsilon_c$ 関係
コンクリートの圧壊を防止することが出来なかった。解析結果は実験の最終破壊モードと対応している。

繊維4層巻きの柱の解析では、実験結果と同様に曲げ解析の耐力低下は若干あるが、その低下は緩やかである。これらの解析結果は繊維シー

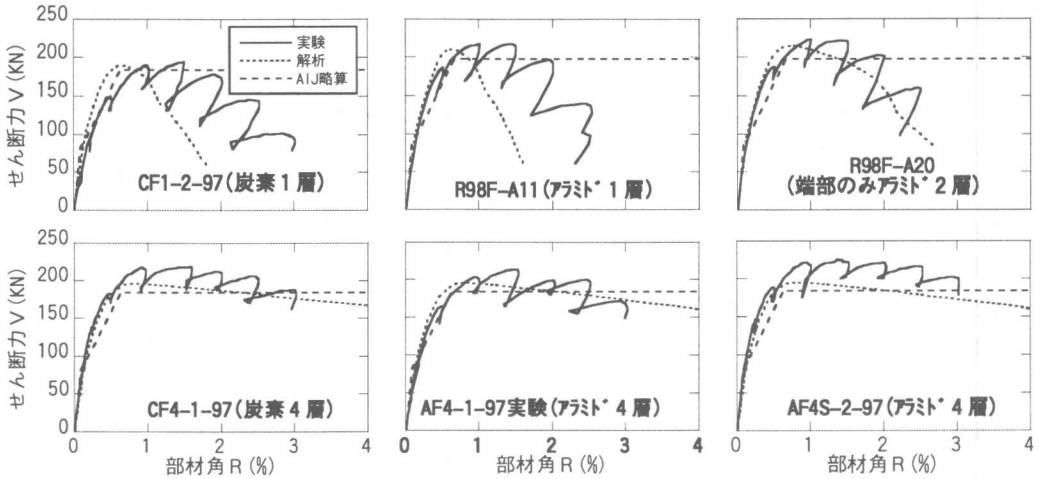


図-7 曲げ解析結果の比較検討

トを4層巻きにすれば、柱の曲げ圧壊が防止でき、靱性のある曲げ破壊となることを意味する。

膜剛性と靱性に関する検討結果を図-8に示す。図中に示す塑性率は以下のように定義した。実験において繰り返し3サイクル目のピーク荷重がAIJ略算式による終局曲げ耐力を上回る部材角レベルの中で、最大の部材角を終局部材角とし、その部材角と菅野式による柱の降伏時部材角の比を実験の塑性率とした。一方、曲げ解析の耐力線がAIJ略算式による終局曲げ耐力線と交差する点を終局部材角とし、実験の塑性率と同様に菅野式による降伏時部材角との比を解析の塑性率とした。図-8に示すように、本実験の範囲では、解析の塑性率は実験の塑性率より若干小さいが、良好な対応を示した。また、実験と解析両方とも膜剛性の増大に伴い、柱の塑性率がほぼ線形に増大し、膜剛性は靱性の改善に大きく寄与する。

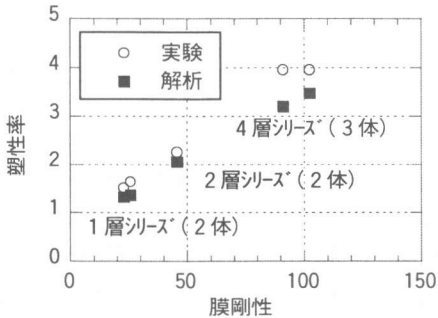


図-8 膜剛性と靱性の関係

5. まとめ

本実験により以下の知見が得られた。

- 1) 連続繊維横補強により、柱のせん断耐力が高められ、柱がせん断破壊から曲げ破壊モードに移る。しかし、横拘束量が不足している場合は柱が曲げ圧縮破壊となり、十分な靱性が確保できない。
- 2) 本実験の範囲において、本報告に用いた曲げ解析は柱の曲げ圧壊性状をほぼ捉えており、その解析による塑性率は実験の塑性率とほぼ一致している。
- 3) 補強繊維シートの膜剛性は柱の靱性の改善に大きく寄与する。

謝辞：本研究は琉球大学工学部環境建設工学科大村建君の1998年度の卒業研究である。

参考文献

- 1) 佐藤元, 山川哲雄, 張愛暉, 仲鵬, 渡嘉敷貴之: 連続繊維シートで横補強したRCの耐震性能に関する実験的研究 (その1, 加力実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州) 1998.9 pp.225-226
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針 (案)・同解説, 1997年
- 3) 連続繊維補強コンクリート研究委員会: 連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会 1997.7 pp.104-110
- 4) 細谷学, 川島一彦, 星隈順一: 炭素繊維シートで横拘束されたコンクリート柱の応力-ひずみ関係, 東京工業大学地震工学研究グループ, TIT/EERG 96-2, 1996.9
- 5) 中山耕一, 山川哲雄: FIBERモデルを用いたRC柱の弾塑性解析に関する一検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), 1997.9 pp.337-338