

論文 大きな破断ひずみを有する連続繊維シートによる耐震補強

中井 裕司^{*1}・佐藤 英樹^{*2}・ANGGAWIDJAJA Dhannyanto^{*3}・上田 多門^{*4}

要旨：本論は、大きな破断ひずみと小さいヤング率を有している連続繊維シートを用いて耐震補強した柱の正負交番載荷試験の結果を紹介する。用いた繊維は汎用品のポリエステル繊維である。ポリエステル繊維シートで補強された柱は、塑性ヒンジ部に生じる大きな変形にシートが追随しながら拘束し、コンクリートの劣化を制御することにより、耐荷力を保ち大きな変形性能を有することがわかった。この試験結果をもとに本手法で補強された部材の骨格曲線を提案した。

キーワード：耐震補強，PET 繊維シート，破断ひずみ，正負交番載荷

1. はじめに

柱の耐震補強工法は、巻立て工法が主流である。アラミド繊維シート巻立て工法は、繊維の伸度が比較的大きく耐屈曲性が高いが故に、じん性補強の分野で秀でた性能を発揮している。しかしながら補強量が少ない場合、柱の軸方向筋のはらみ出す終局期にシートに求められる伸度が不足していたため、シートが破断して耐力を失うことがあった¹⁾。結果、アラミド繊維シート巻立て工法は多量の補強量が必要となり、鋼板巻立て工法に比較してコスト高を招いている。

新保らは、ポリエステル繊維シート(以下:PET 繊維シート)で耐震補強した柱の正負交番載荷試験を行っている。結果、せん断余裕度 0.73 の基準供試体のじん性率 1.3 に対して、PET 繊維シート補強供試体はじん性率 20 以上とアラミド繊維シート補強供試体より高い補強効率を得たが、想定する塑性ヒンジ区間外でも大きなせん断変形が生じた²⁾。

本研究では、図-1 に示すようにせん断補強区間にアラミド繊維シートを、じん性補強区間に大きな破断伸度を有する連続繊維シートを用いる方法による柱部材の耐震補強工法を提案す

るものである。

対象とした構造は、鉄道高架橋の柱である。塑性ヒンジ区間においては、高伸度繊維シートが、曲げ変形モードからせん断変形モードに移行し

ない程度の横拘束を与え、軸方向鉄筋のはらみ出し後に生じるコンクリート塊の崩壊を受動的に高い伸度で横拘束する機能を与える。その他の区間においては、アラミド繊維シートが、せん断ひび割れの進展を抑え、変形モードを曲げモードにとどめる機能を与えると考えた。

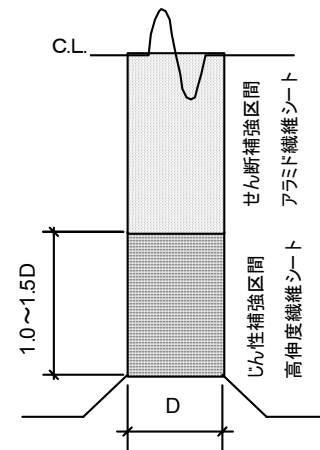


図-1 工法の概要

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した連続繊維シートと鉄筋の特性値を表-1, 2 に示す。じん性補強区間の補強に用い

*1 三井住友建設(株) 土木技術部 (正会員)

*2 北海道大学 工学部土木工学科

*3 北海道大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻

*4 北海道大学 大学院工学研究科社会基盤工学教授 工博 (正会員)

た繊維シートの素材は、高強度型アラミド(A2)、ポリエステル(PET)、ポリエチレンナフタレート(PEN)で、破断伸度はそれぞれ4.1%、13.8%、4.5%である。PET 繊維シートの破断伸度は他に比較して極めて大きい、引張弾性率は1桁小さい。その他の区間のせん断補強には、高弾性型アラミド(A1)を用いた。

コンクリートの圧縮強度は、SP.1~4、5~12がそれぞれ29.5、31.7N/mm²であった。

表-1 連続繊維シートの特性値

	アラミド1 高弾性型 A1	アラミド2 高強度型 A2	ポリエス テル PET	ポリエチ レン ナフタレ ート PEN
単位質量	1.45	1.39	1.39	1.36
引張強度 N/mm ²	2,670	3,246	923	1,028
引張弾性率 N/mm ²	1.22E+05	7.95E+04	6.70E+03	2.26E+04
破断伸度 %	2.2	4.1	13.8	4.5

表-2 鉄筋の特性値

		SP.1-10	SP.11-12
軸方向鉄筋の降伏強度	fly N/mm ²	D19 394	D25 371
軸方向鉄筋のヤング率	Els N/mm ²	1.76E+05	1.83E+05
降伏ひずみ		2.20E-03	2.03E-03
帯鉄筋の降伏強度	fvy N/mm ²	D6 383	D10 361
帯鉄筋のヤング率	Evs N/mm ²	1.91E+05	1.85E+05

2.2 供試体の形状および諸元

実験のパラメータを表-3に示す。供試体は、断面が□400×400と600×600、せん断スパン比が3~4、軸方向鉄筋比が2.15~2.87%、せん断余裕度が0.8~1.3の12体である。SP.1~4供試体は、各種の高伸度シートのパラメータを調べた。SP.5~12は、PETシートに着目し各種のパラメータによる性能を比較した。なお、表中の補強前のせん断耐力はコンクリート標準示方書³⁾に、補強

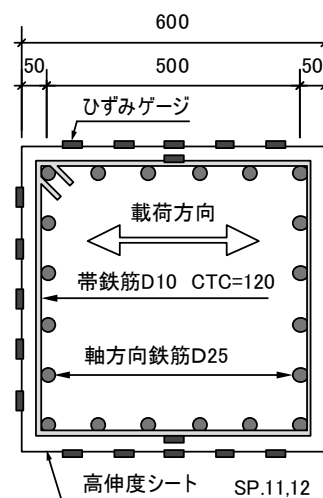


図-2 供試体の断面例

表-3 実験のパラメータ

供試体の諸元		SP.1	SP.2	SP.3	SP.4	SP.5	SP.6	SP.7	SP.8	SP.9	SP.10	SP.11	SP.12		
断面	mm	400*400										600*600			
載荷点高さ	mm	1150				1500				2200					
せん断スパン比		3.1				4.0				4.0					
軸方向応力	N/mm ²	1.0													
軸方向鉄筋		5@D19								6@D19		4@D19		6@D25	
軸方向鉄筋比	%	2.87								3.59		2.15		2.82	
せん断補強筋		D6 Ss(せん断補強鉄筋の配置間隔)=100mm										D10 Ss=120mm			
せん断補強筋比	%	0.16													
降伏曲げモーメント	kNm	271				272				330		216		836	
終局曲げモーメント	kNm	331				334				401		265		1018	
曲げ耐力	kN	288				290		223		267		177		463	
Vc	kN	151				155				169		151		318	
Vs	kN	79				79				79		79		206	
せん断耐力	kN	230				234				248		230		524	
せん断余裕度		0.80				1.05				0.93		1.30		1.13	
せん断補強 (A1sheet)	kN/m	Non.	400	400	400	200	100	100	Non.	100	Non.	200	Non.		
補強範囲		1.0xD													
シートの種類		Non.	A2	PEN	PET				Non.	PET					
シートの貼り方			1layer600	2layer300	2layer300	1layer300	1layer200	1layer100		1layer200	1layer100	2layer300	1layer300		
シートの厚さ (1面分)	mm		0.252	0.764	0.748	0.374	0.249	0.125		0.249	0.125	0.748	0.374		
シートの耐力 (2面分)	kN/m		1636	1538	1410	690	460	231		460	231	1381	690		
補強せん断耐力	kN	0	213	201	184	90	60	30	0	60	30	264	132		
補強後のせん断耐力	kN	230	443	431	414	324	294	264	234	308	260	788	656		
補強後のせん断余裕度		0.80	1.54	1.50	1.44	1.11	1.32	1.18	1.05	1.15	1.47	1.70	1.42		
終局部材角															
補強前の計算値		0.042				0.042		0.044		0.040		0.046		0.043	
実験値		0.039	0.064	0.064	0.060	0.057	0.067	0.060	0.054	0.064	0.071	0.069	0.061		

後のせん断耐力は土木学会「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針(案)」に従った。じん性補強区間は全ての供試体で連続繊維シートのせん断補強効率を示す K は 0.4 となる。

じん性率の計算値は、せん断破壊しないものと仮定して、コンクリート標準示方書⁴⁾にしたがい、「部材の降伏変位は、部材断面内の鉄筋に発生している引張力の合力位置の鉄筋が降伏するときの変位」「部材の終局変位は、部材の荷重-変位関係の骨組み曲線において、荷重が降伏荷重を下回らない最大の変位」と定義される限界値を用いた。なお安全率は全て 1.0 を用いている。

2.3 荷重方法および計測項目

荷重は、 $1\text{N}/\text{mm}^2$ の一定軸力のもとで柱頭部付近を荷重点として静的水平交番荷重を行った。初降伏変位 (以下 δ_{yo}) は、柱下端付近の軸方向引張鉄筋ひずみが降伏ひずみに達する変位の平均値として定義し、以後 δ_{yo} の整数倍を片振幅とした正負交番荷重を行った。各変位段階における繰返し回数は 1 回とした。

計測項目は、軸方向鉄筋と帯鉄筋のひずみ、

じん性補強区間シートの荷重面とせん断面のひずみをひずみゲージで、供試体の変位、軸方向鉄筋の抜け出しによる変位を変位計で、本論ではふれないが塑性ヒンジ区間の変形詳細を特殊ジグで測定した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状と骨格曲線について

図-3 に SP.1~12 供試体の包絡線と計算値を示す。包絡線中の○印は、順に降伏時・最大耐力時・目視で確認された軸方向鉄筋の座屈時を示している。計算値は、コンクリート標準示方書⁴⁾による無補強状態の骨格曲線と PET 繊維シートで補強した場合の提案式を示している。縦軸は軸力による偏心モーメントを考慮した作用曲げモーメント、横軸は荷重点変位をせん断スパンで除した部材角である。

部材の損傷進行は、連続繊維シートでじん性補強されていない SP.1 と SP.8 を除いて、ほぼ同一であった。SP.1 は曲げ降伏後にせん断破壊した。SP.8 は、軸方向鉄筋の座屈後、急激に耐力

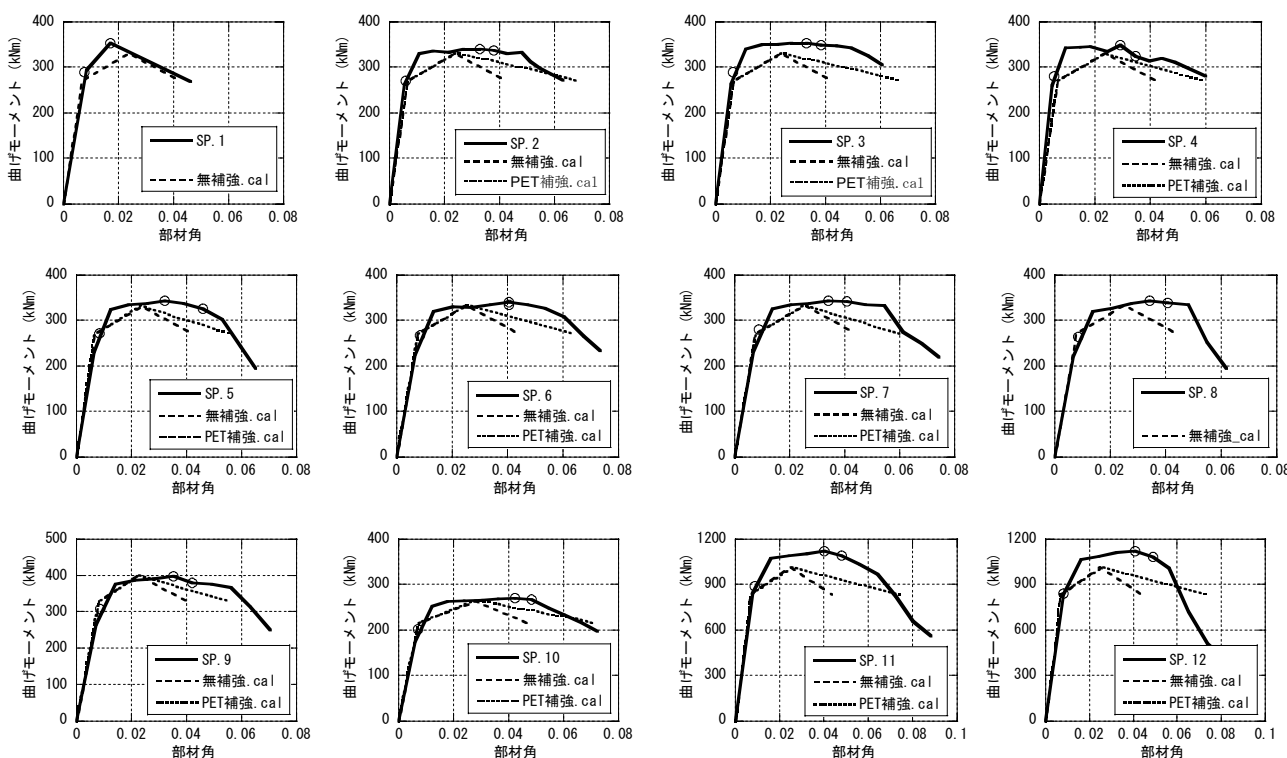


図-3 各供試体の包絡線と計算値の比較

を失った。連続繊維シートで補強した供試体は、最大耐力時まで安定した履歴ループを示し、次ループで軸方向鉄筋の座屈が観察され、耐力が徐々に低下した。終局時には軸方向鉄筋に相当のはらみ出しが生じているが、シートが破断して耐力を急激に失うことはない。

SP.2~4 は、シートの種類をパラメータとしている。包絡線やじん性率に大きな差異はなく、一定量の補強量が有ればシートの引張剛性が部材のじん性補強に積極的に影響していないことがわかる。ただし、SP.2 の A2 シートは一部破断した。したがって、本実験では、以後のじん性補強に安価な PET シートを用いることとした。

シート補強された供試体の終局部材角は無補強の計算値の平均 1.5 倍を示している。PET シートでじん性補強された SP.4~12 は、シート補強量が多い方が、補強前のせん断余裕度が大きい方が、大きな終局部材角を得ている。

3.2 せん断面の補強材のひずみ

図-4 に、せん断面で測定したシートおよび帯鉄筋の平均ひずみと部材角の関係の代表例を示す。凡例中の数字はフーチング上面からの距離を表している。1 プロットは、シートひずみが 10 測点の平均値で、帯鉄筋のひずみが 2 測点の平均値である。なお、破線したゲージの値は除いている。せん断破壊した SP.1 は、終局時に帯鉄筋ひずみが 1.8% 程度を示していた。

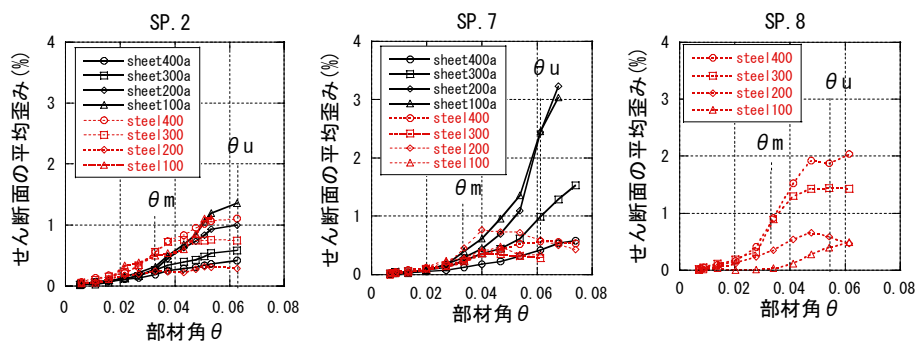
無補強の SP.1 と 8 は、帯鉄筋のひずみが他の補強供試体より大きく、最大耐力時に 1%、終局時には 2% 程度のひずみが生じている。つまり、せん断力により大きな変形が生じ塑性ヒンジ内のコンクリートが緩んでいることが想像される。

引張剛性の大きいシートで補強した SP.2 と 3 は同一の傾向を示し、最大耐力時から終局に到るまでシートと帯鉄筋

のひずみは一致して漸増し、終局時にシートと帯鉄筋に 1% 程度のひずみが生じている。

一方、PET シートで補強した供試体は、最大耐力以降の軸方向筋の座屈が生じる時点からシートのひずみが卓越するようになる。これは載荷面のはらみ出しをせん断面の PET シートが抑制しているために生じていると考えられる。引張剛性の大きいシートの場合は負担するせん断力によるシートの張力で軸方向鉄筋のはらみだし変形に対する反力を負担できるが、PET シートの場合はさらに歪む必要があるためと考えられる。この損傷の進行にしたがって増加するシートの引張力と破断しないことが最大耐力以降に穏やかな軟化勾配で終局に到る要因と考える。

図-5 に、最大耐力時と終局時における、コンクリートの負担したせん断力の計算値に対する割合とシートの換算面積比 (PET シートのヤング率で基準化) との関係を示す。コンクリートの負担したせん断力は、作用せん断力からトラス理論を用いて帯鉄筋とシートの負担したせん断力を差し引いたものである。終局時において、塑性ヒンジ部における載荷面のはらみ出しにより補強材は引張ひずみを受けるが、コンクリートにはシートのひずみ相当分の圧縮力が導入されるためトラス理論は成立すると考えた。コンクリートの負担したせん断力は、(a)の最大耐力時において、シートがほとんど負担することなく、コンクリートが計算値と同等程度の値を負担しており、コンクリートがダメージを受けていないことが分かる。(b)の終局時において、



(θ_m : 最大耐力時の部材角 θ_u : 終局時の部材角)

図-4 せん断面のシートと帯鉄筋のひずみと部材角の関係 (SP.2,7 & 8)

コンクリートの負担したせん断力は計算値に対する割合がシートの平均ひずみ，最大ひずみに対してそれぞれ平均 58%，36%であり，アラミド繊維シートで補強した場合と同程度の劣化割合と考えられる⁵⁾。

3.3 荷重面のひずみ

図-6に，荷重面のシートの平均ひずみと部材角の関係を示す。凡例中の数字はフーチング上面からの距離を表している。1プロットは，□400断面と□600断面でそれぞれ6測点と10測点の平均値である。

傾向は，せん断面と異なり，最大耐力時までひずみはほとんど生じない。最大耐力後，軸方向鉄筋の座屈に伴いひずみが急増する。平均ひずみが3%を超えると増加傾向が小さくなるが，これはひずみゲージの破線が生じるために増分が見かけ上減少していると思われる。鉄筋の座屈後は，シートひずみはほぼ線形に増大している。つまり，軸方向鉄筋の座屈を拘束力で押さえ込めない場合には，拘束体の平均ひずみは終局時に3%~4%以上になると考えられる。

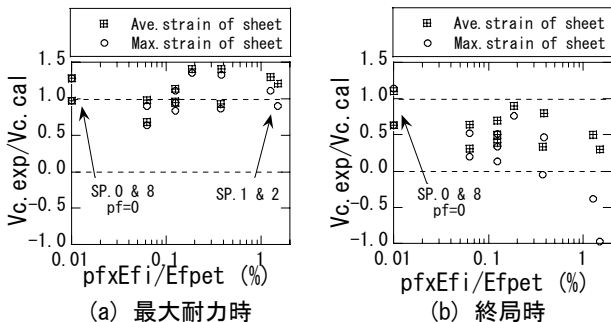


図-5 コンクリートの負担するせん断力とシートの引張剛性の関係（最大耐力時と終局時）

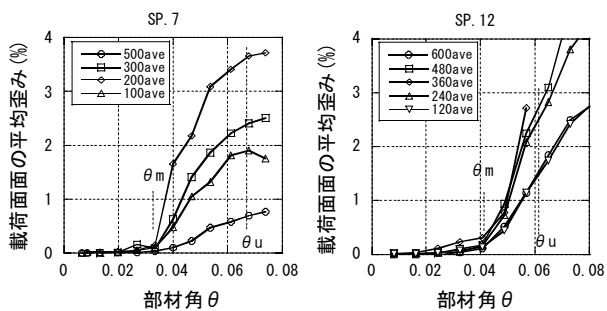


図-6 荷重面のシートの平均ひずみと部材角の関係 (SP.7 & 12)

鋼板巻立て工法で補強した場合も軸方向鉄筋の座屈を抑制することはできない。したがって，塑性ヒンジ部の巻立て系の拘束体に求められる性能は，大きな破断ひずみを有している必要がある。鋼板巻立て工法は鋼板がコーナで破断しないこと，シート系巻立て工法は，受動的に受け止めるしかなく，大きな平均ひずみに耐えるシートが必要であると考えられる。

3.4 シートの平均ひずみと最大ひずみの関係

図-7に，塑性ヒンジ内におけるシートの平均ひずみおよび最大ひずみと部材角の関係を示す。1プロットは，せん断面の□400断面，荷重面の□600断面でそれぞれ40測点の平均値である。図中には平均ひずみとその2および3倍値も示している。

ここで，平均ひずみ，最大ひずみは，それぞれ，最大耐力以降の部材の力学特性に關与する物理量，シートの破断に対する物理量と考えている。せん断面，荷重面に關わらず，シートのひずみは均一でなく，最大ひずみは平均ひずみに対して2~3倍の値が生じていることが分かる。この例では，最大ひずみはせん断面で3%，荷重面で9%生じている。シートが負担するせん断力に対応するひずみや鉄筋の座屈を受動的に抑制するのに必要なひずみは未知であるが，部材の求める限界値に対してシートが破断することは避けなければならない。終局ひずみの大きなPETシートをじん性補強に適用するメリットは，上記のような大きなひずみに対して余力を有することである。

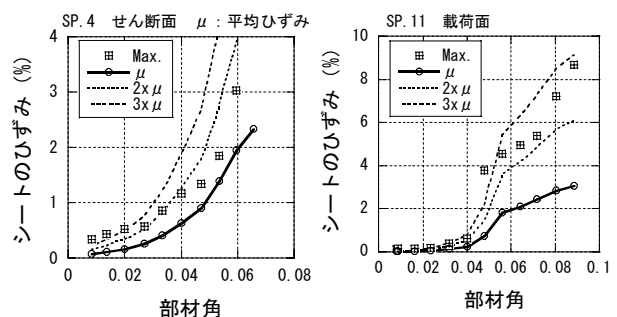


図-7 塑性ヒンジ内におけるシートの平均ひずみおよび最大ひずみと部材角の関係 (SP.4 & 11)

4. 補強工法に対する考察

大きな破断ひずみを有する連続繊維シートで補強した柱の変形性能とせん断面および載荷面のシートと帯鉄筋のひずみ特性を観察し、補強が骨格曲線に与える影響を考察する。

大きな破断ひずみを有する連続繊維シートで補強された柱は、最大耐力時において、シートは骨格曲線に影響を与えるほどのひずみが生じていない。終局時において、シートはせん断力を弾性的に負担し軸方向鉄筋の座屈により大きなひずみが生じながら、コンクリートの崩壊を制御する作用がある。この結果、**図-8**に示すように、終局部材角はシート補強量が増えるほど補強前のせん断余裕度が大きいほど増大する。

すると、大きな破断ひずみを有する連続繊維シートで補強された柱の特徴は、最大耐力時から終局時に到る軟化が通常の RC 部材より穏やかになると考えられる。補強された RC 部材の骨格曲線の実験式を以下の仮定の元に得ることができた。

- (1) 最大耐力時の部材角は、コンクリート標準示方書 耐震性能照査編⁴⁾に従う。
- (2) 軟化勾配は、シートのじん性補強量と補強前せん断余裕度をパラメータとする。
- (3) 補強前のせん断耐力余裕度を表す物理量として、軸方向鉄筋比とせん断スパン比を用いる。

本実験の範囲内で、終局部材角は式(1)で、軟化勾配は式(2)で表すことができた。式(1)で表せる骨格曲線は、**図-3**に示している。式(2)の提案した軟化勾配と実験値との関係を**図-9**に示す。

$$\theta_u = \theta_m + \eta_{pet_sheet} \cdot \left(1 - \frac{M_y}{M_u}\right) \quad (1)$$

$$\eta_{pet_sheet} = 0.093 \cdot \frac{L_a}{d} \cdot \frac{(K_{pet_sheet})^{0.15}}{\rho_L^{0.64}} \quad (2)$$

- ここに、 θ_u : 終局時の部材角
 θ_m : 最大耐力時の部材角
 η_{pet_sheet} : シートで巻立てた柱の軟化勾配
 d : 柱の有効高さ (m)
 L_a : せん断スパン (m)

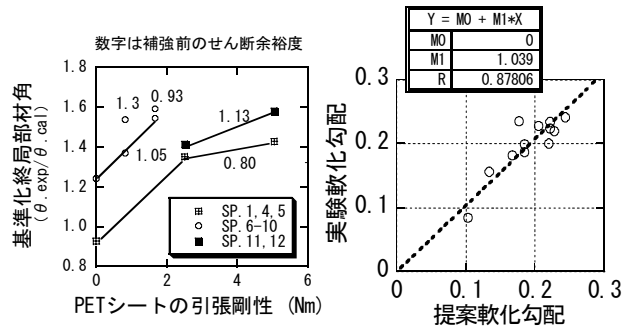


図-8 終局部材角と PET シート剛性の関係 **図-9** 提案した軟化勾配と実験値の関係

ρ_L : 軸方向鉄筋比($100 \cdot A_s / b / h$) (%)

K_{pet_sheet} : シートの引張剛性 (Nm)

5. まとめ

本実験の範囲内で下記の結論を得た。

- (1) 連続繊維シートで補強された柱は、シートに破断が生じなければ、最大耐力時から終局時に到る軟化が通常の RC 部材より穏やかになる。
- (2) 軸方向鉄筋の座屈後、塑性ヒンジ部の連続繊維シートには 10%程度のひずみが観測された。
- (3) 連続繊維シートで補強された柱の軟化勾配を式(2)で評価できることを示した。

参考文献

- 1) 勝木太ほか: アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱のじん性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.19.No.2, pp.1569-1574, 1997.6
- 2) 新保学幸ほか: 連続繊維シート補強 RC 柱部材のじん性予測に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23.No.1, pp.883-888, 2001.6
- 3) 土木学会: 2002 年制定 コンクリート標準示方書, 構造性能照査編
- 4) 土木学会: 2002 年制定 コンクリート標準示方書, 耐震性能照査編
- 5) 中井裕司ほか: 連続繊維シートで補強した柱のせん断耐荷機構, コンクリート工学年次論文集, Vol.24.No.2, pp.1363-1368, 2002.6