

論文 コンクリート柱のシート補強による過大軸変形時の圧縮靱性発現効果

田辺 大地*1・大杉 泰子*2・田才 晃*3・壁谷澤 寿海*4

要旨:本研究では、トルコ地震を背景に安価で容易な補強方法を提案し、実験を行った。断面形状の異なる3種類の無筋プリズム試験体にポリエステル繊維で編んだ土木用シートで簡易補強を施し単調一軸圧縮試験を行い、この補強方法の有効性を検討した。その結果、過大軸変形時において高い靱性発現効果が得られた。

キーワード:簡易補強, ポリエステル製繊維シート, 圧縮靱性, 軸耐荷能力, 残存軸耐力

1. はじめに

1999年8月のトルココジャエリ地震において多くの鉄筋コンクリート造建築物が被害を受けた。被害率は中高層の建物で高く、地域によっては半数以上の建物が倒壊または大破し、地震時あるいは直後に鉛直荷重による軸力を保持しきれずに崩壊して多くの人命が失われた。

古い鉄筋コンクリート造建物の柱の破壊を防止するための既往の耐震補強方法には、新たな帯筋とコンクリートによる増打ち、鋼板による巻き立て、炭素繊維補強などがあり、いずれも十分な余裕をもって補強効果を発揮しうが、高価で工事も大掛かりであり、世界的な視野で見ると、広く耐震補強を普及する上で障害になっている。

既往の耐震補強方法に代わる簡便で経済的な補強方法として、コンクリート柱にポリエステル製繊維シートを巻き付ける方法が考えられる。ポリエステル製繊維シートは引張りに対し強靱性であるため、コンクリート圧壊後の飛散脱落を防ぎ、過大軸変形後も軸耐力を保持しうると予測できる。本研究では、この方法を用いて無筋コンクリートプリズム試験体に簡易補強を施し、単調一軸圧縮試験を行い、試験体の断面形状や、補強量の違いによる軸耐荷能力の差異を比較、分析し、この耐震補強方法の有効性を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

補強にはポリエステル繊維で編んだ土木用シート(以下シート)を使用した。このシートは補強材として次のような利点がある。

1. 柔軟性・屈曲性に優れ施工し易い
2. 軽量である
3. 安価である
4. 破断伸び率が高い
5. 二方向に強度を発現する

実験には厚さによって強度が異なるA, B, C

表-1 シートの材料特性

シート記号	規格値				実験値	
	厚さ(mm)	重量(g/m ²)	引張強度(N/mm)	伸び率(%)	引張強度(N/mm)	伸び率(%)
A	0.5	310	105	15	90	11
B	0.9	550	183	15	164	14
C	1.2	860	278	15	263	21

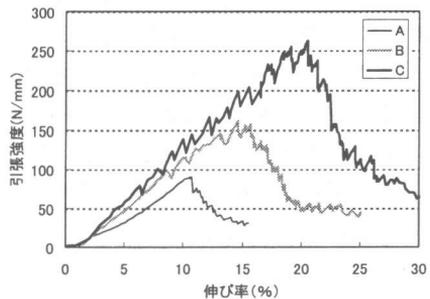


図-1 シートの引張試験結果

*1 横浜国立大学 大学院 工学研究科計画建設学専攻 (正会員)

*2 東京大学 大学院 工学系研究科建築学専攻

*3 横浜国立大学 助教授 工学部 建設学科 博(工) (正会員)

*4 東京大学地震研究所 教授 工博 (正会員)

3種類のシートを使用した。シートの材料特性を表-1に示す。引張強度は単位幅当りの値である。

図-1にシートの引張試験結果を示す。シートの引張試験は100tfアムスラー型万能試験機を用い、シートの上下を直接チャックで挟んで行った。どのタイプのシートも伸び率が3%あたりまではシートが張りきらないため応力の増加は少ない。シートが張りきってから最大応力に達するまではシート伸度と応力が比例して直線的に増加することから、シートは概ね弾性であると言える。シートB、Cにおいて、応力が微妙に上下しているが、これはシートの繊維の一部が切れたためである。引張強度が規格値よりやや低くなったのは、シートがチャック部分から破断したためだと思われる。

また、コンクリートの材料特性を表-2に示す。

2.2 試験体

試験体は無筋コンクリートプリズム試験体で、長方形断面（以下Rタイプ）、正方形断面（以下Sタイプ）、円形断面（以下Cタイプ）の3種類である。断面寸法はそれぞれ210mm×75mm、150mm×150mm、直径150mm、高さは3種類同一で300mmとした。それぞれの試験体に、シートA（2、3、4層）、B（2、3層）、C（2層）を巻きつけ载荷を行った。また、シートによる補強は以下のように行った。なお、シートの巻き付けに際してプリズム隅角部の面取りは行っていない。

- (a) 巻き付けを開始するシート端部を試験体の側面（Rタイプは長辺方向）に両面テープで固定した。
- (b) シートを一周巻き、へらでエポキシウレタン系接着剤を塗布し、シートを貼付する（接着幅はRタイプが100mm、Sタイプが75mm、Cタイプが60mmとした。）
- (c) 同様に一層ごとに接

着剤を塗布し、試験体ごとの層数を巻きつける。

- (d) 余剰分のシートは両面テープで貼付する。

例として4層の補強を施した試験体を図-2に、試験体一覧および試験結果を表-3に示す。

2.3 加力および測定方法

加力は200tfアムスラー型万能試験機を用い、単調一軸圧縮载荷とした。軸方向荷重はロードセルにより測定し、軸方向変位は大きな軸歪に追従できるように加力端板間をストローク50mmの試験変位計4台で測定しその平均をとった。試験体の周長はワイヤー式の変位計を試験体の中央高さ部分に水平に巻きつけて測定した。载荷はシートが破断した後、軸方向力が安定するか、過大な軸縮みにより変位計での測定が不可能になるまで行った。

3. 実験結果

3.1 破壊経過

試験前および試験終了後の試験体の一例を写真-1に、応力度（ σ ）-歪度（ ϵ ）関係を図-3に示す。いずれの試験体も ϵ が0.3~0.7%のときに σ が一回目のピーク（peak 1）に達しコンクリートが圧壊した。無補強試験体は ϵ が3~4%に達すると軸力を支えきれなくなり σ が0付近まで低下したため载荷を終了した。補強を施した試験体では圧壊後、 σ は急激に低下したが、軸縮みが進み試験体が膨張するにつれて再び緩やかに上昇し

表-2 コンクリートの材料特性

コンクリート種類	呼び強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	粗骨材料最大寸法 (mm)	セメント種類
普通	18	21.4	20	N

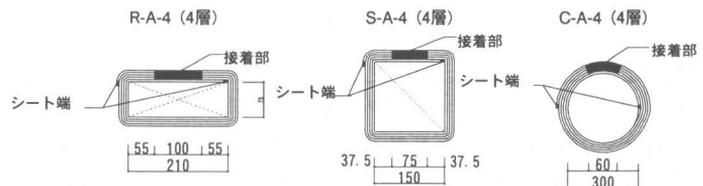


図-2 試験体断面図

表-3 試験体一覧及び実験結果

試験体タイプ	試験体名称	断面寸法 (mm)	高さ (mm)	補強の有無	シートの種類	巻きつけ層数	σ_1	σ_2	σ_2/σ_1	ε_1	ε_2	ε_3					
							(N/mm ²)	(N/mm ²)		(%)	(%)	(%)					
R-type (長方形断面)	R-0-1	210×75	300	無	/	/	16.9	/	/	0.62	/	/					
	R-0-2						20.4	/	/	0.34	/	/					
	R-A-2-1						A	2	19.9	5.9	0.30	0.46	27.32	16.14			
	R-A-2-2								19.0	5.5	0.29	0.43	11.34	4.56			
	R-A-3-1							3	18.8	11.0	0.59	0.49	14.18	5.17			
	R-A-3-2								22.0	8.9	0.41	0.46	16.01	2.54			
	R-A-4-1						4	24.9	10.7	0.43	0.66	26.67	9.23				
	R-A-4-2							23.3	13.3	0.57	0.54	30.92	10.24				
	R-B-2-1						B	2	21.1	23.1	1.10	0.61	41.06	14.90			
	R-B-2-2								16.9	12.8	0.76	0.43	26.02	7.18			
	R-B-3-1						3	3	24.8	19.6	0.79	0.39	31.99	11.05			
	R-B-3-2								20.2	19.0	0.94	0.52	27.02	8.96			
	R-C-2-1						C	2	24.6	19.2	0.78	0.33	28.67	10.12			
	R-C-2-2								19.2	21.4	1.11	0.43	35.41	11.86			
	標準偏差						/	/	/	/	/	2.72	6.08	0.29	0.10	8.73	4.03
平均	/	/	/	/	/	20.9	14.2	0.67	0.48	26.38	9.33						
S-type (正方形断面)	S-0-1	150×150	300	無	/	/	23.5	/	/	0.49	/	/					
	S-0-2						23.3	/	/	0.36	/	/					
	S-A-2-1						A	2	19.9	7.4	0.37	0.37	11.71	6.23			
	S-A-2-2								19.3	8.5	0.44	0.51	15.94	9.33			
	S-A-3-1							3	21.3	12.2	0.57	0.53	16.33	5.78			
	S-A-3-2								22.0	11.1	0.50	0.36	18.45	10.54			
	S-A-4-1						4	18.7	17.4	0.93	0.46	20.39	7.70				
	S-A-4-2							21.2	18.5	0.87	0.46	18.48	8.38				
	S-B-2-1						B	2	13.0	13.9	1.07	0.95	16.67	8.53			
	S-B-2-2								23.6	17.5	0.74	0.47	25.05	12.47			
	S-B-3-1						3	3	16.7	22.0	1.32	0.39	29.87	13.98			
	S-B-3-2								20.5	19.7	0.96	0.72	25.39	12.04			
	S-C-2-1						C	2	19.3	19.0	0.99	0.51	24.94	11.65			
	S-C-2-2								22.3	18.2	0.81	1.31	22.33	10.77			
	標準偏差						/	/	/	/	/	2.91	4.71	0.28	0.27	5.17	2.55
平均	/	/	/	/	/	20.3	15.4	0.80	0.56	20.46	9.78						
C-type (円形断面)	C-0	φ150	300	無	/	/	22.7	/	/	0.32	/	/					
	C-A-2-1						A	2	23.1	15.0	0.65	0.71	9.28	9.94			
	C-A-2-2								24.4	12.7	0.52	0.29	7.76	8.78			
	C-A-3-1							3	25.1	14.6	0.58	0.30	9.05	9.71			
	C-A-3-2								21.6	19.6	0.91	0.60	11.71	10.12			
	C-A-4-1						4	23.4	23.7	1.02	0.49	13.45	11.94				
	C-A-4-2							25.0	21.7	0.87	0.62	12.11	11.04				
	C-B-2-1						B	2	24.6	22.6	0.92	0.52	13.70	13.33			
	C-B-2-2								24.2	23.7	0.98	0.46	16.89	13.96			
	C-B-3-1						3	3	22.2	31.0	1.39	1.09	16.96	14.61			
	C-B-3-2								22.9	33.5	1.46	1.09	19.03	16.21			
	C-C-2-1						C	2	24.4	29.3	1.20	0.73	17.25	14.23			
	C-C-2-2								24.6	24.3	0.99	0.66	13.62	11.98			
	標準偏差						/	/	/	/	/	1.13	6.52	0.29	0.26	3.61	2.32
	平均						/	/	/	/	/	23.7	22.6	0.96	0.61	13.40	12.15

σ_1 : peak1応力度, σ_2 : peak2応力度, ε_1 : peak1歪度, ε_2 : peak2歪度, ε_3 : peak2シート伸び率

た。 σ が2回目のピーク(peak 2)に達すると同時にシートは軸方向に裂けはじめた。(RタイプとSタイプは隅角部から破断した。)この時、シート内部の粉碎されたコンクリートが噴出した試験体(Cタイプ全てとR,Sタイプの一部)は σ は低下してだけで再び上昇することはなく、しばらくすると安定したため載荷を終了した。コンクリートが噴出しなかった試験体は σ がやや低下した後、コンクリートが噴出するまで再び σ は上昇した。

3.2 軸応力度と軸歪度の関係

図-4はコンクリート圧壊後の σ の最小値(σ_{min})と σ_{min} の時の ε の値(ε_{min})の関係プロットしたものである。それぞれの σ_{min} の平均値はRタイプが3.9N/mm²,Sタイプが6.5 N/mm²,Cタイプが10.5 N/mm²となっており、断面が円形に近いほど σ_{min} が大きくなるのが分かる。どのタイプの試験体も軸圧縮が進むにつれて膨張断面が円形に近付いていくが、Cタイプはもともと円形の断面であるためシートの張力が軸応

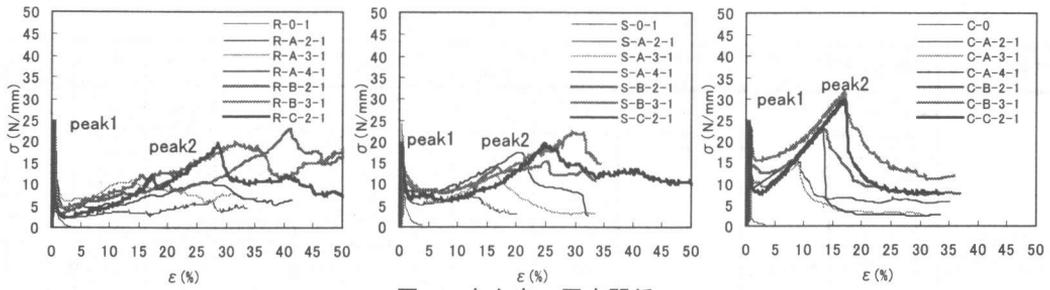


図-3 応力度-歪度関係

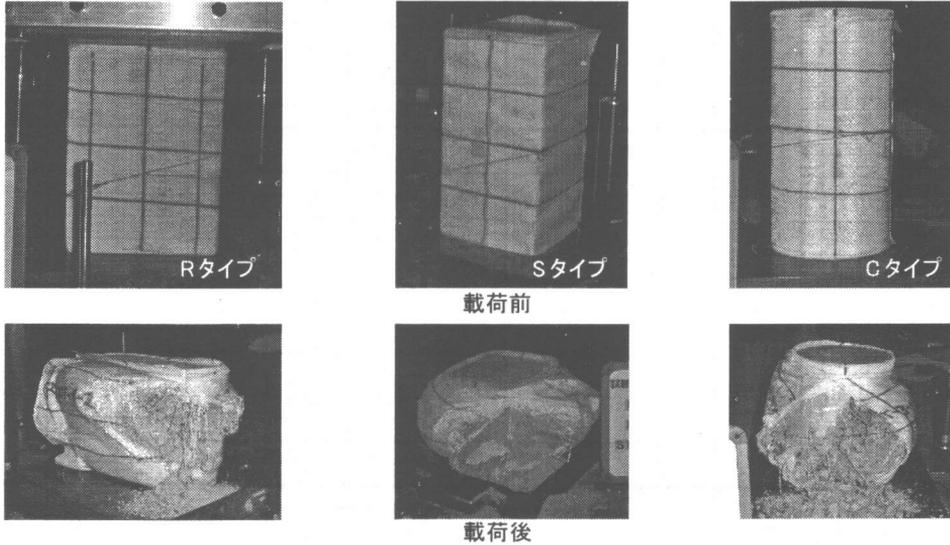


写真-1 試験体写真

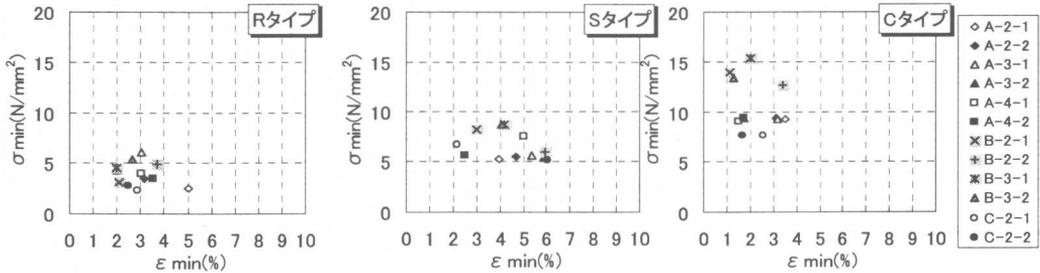


図-4 σ_{min} - ϵ_{min} 関係

力へ及ぼす影響が早く表れると思われる。各試験体の中で、 σ_{min} の値にばらつきがあるが補強量による傾向は見られなかった。

図-5はpeak 2における軸応力度 (σ_2) と軸歪度 (ϵ_2) の関係をプロットしたもので、図中の直線はその回帰線を示す。どのタイプの試験体も回帰線が原点付近を通る比例関係にあり軸歪度が大きくなるほど軸応力度も大きくなっている。また、直線の傾きはRタイプが0.54, Sタイプが

0.81, Cタイプが1.73と断面が円形に近いほど大きくなる傾向がある。Rタイプにおいて値が回帰線からばらついているのは試験体ごとに破壊挙動が異なっていたことが原因だと思われる。

3.3 軸応力度と補強量の関係

図-6はpeak 1における軸応力度 (σ_1) と補強量の関係をプロットしたものである。補強量はシートの引張強度(規格値)に巻きつけたシート

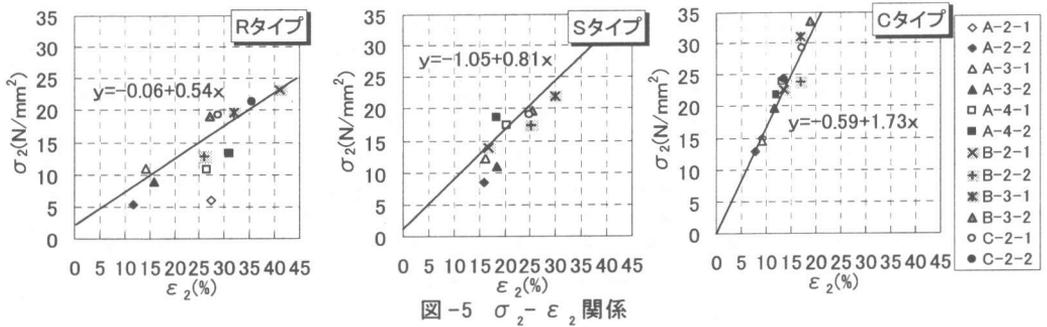


図-5 $\sigma_2 - \epsilon_2$ 関係

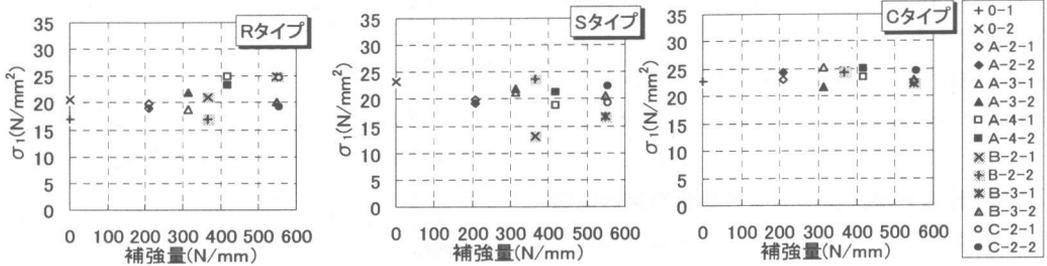


図-6 σ_1 - 補強量関係

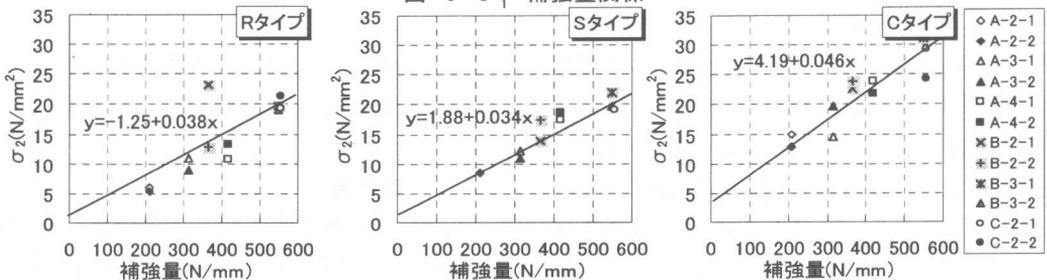


図-7 σ_2 - 補強量関係

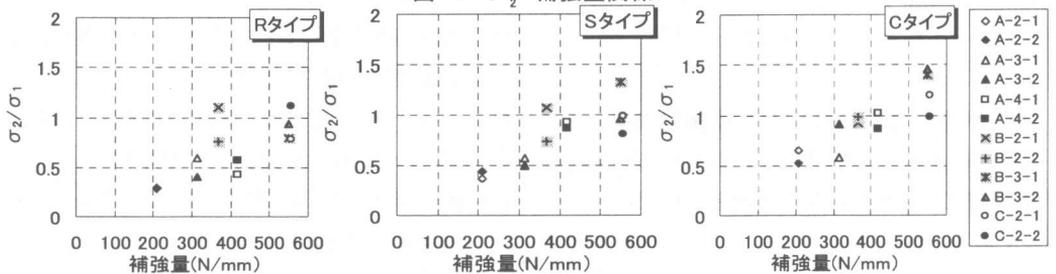


図-8 σ_2 / σ_1 - 補強量関係

の層数をかけたものである。どのタイプの試験体も多少 σ_1 の値にばらつきはあるが、補強量による差は見られなかったことから、 σ_1 はコンクリートの圧縮強度で決まると言てよい。

図-7は σ_2 と補強量の関係をプロットしたもので図中の直線は回帰線を示す。どのタイプも応力度と補強量には比例関係があると言える。またシートAの4層とシートBの2層、シートBの3

層とシートCの2層は補強量がほぼ同じであるが、応力度にはほとんど差がないことから、応力度は巻いたシートの層数ではなく補強量で決まると言える。また、試験体のタイプ別で見ると、同一の補強量の場合RタイプとSタイプでは σ_2 の値はほぼ同一になるが、CタイプはRタイプとSタイプの平均に対して1.5~1.6倍の値が得られた。

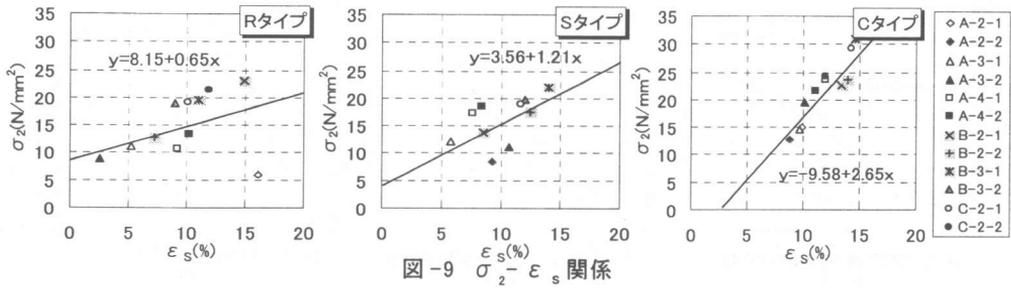


図-9 $\sigma_2 - \epsilon_s$ 関係

図-8は σ_2 / σ_1 と補強量の関係をプロットしたものである。 σ_2 / σ_1 の値は最低で0.3, 補強量の多い試験体では1を超える, つまりコンクリート強度より応力度が大きい試験体もみられた。

3.4 軸応力度とシート周方向伸び率の関係

図-9は σ_2 とシート伸び率(ϵ_s)の関係をプロットしたものである。RタイプとSタイプは多少のばらつきがあるものの, シートが伸びるほど軸応力が高くなる傾向が見られ, Cタイプは概ね比例関係にあると言える。ただし, RタイプとSタイプは膨張断面が必ずしも試験体の中央部ではなかったため, 変位計での測定が最大周長を測れなかったことから, 最大周長を測っていたならばCタイプと同様の結果が予想できる。シートは概ね弾性であることから, シートが伸びるほど, コンクリートを拘束する力が増すと言える。

4. 水平加力時に推定される補強効果

図-10は水平力を受けたせん断卓越型柱の水平力, 水平変位, 残存軸耐力の関係を模式化したものである。渡辺らの研究¹⁾により柱の残存軸耐力はせん断ひび割れが発生するまでは一定値 N_{max} を保ち, せん断ひび割れ発生後急激に低下し, その後, 水平変位が進むにつれて徐々に低下していくことが明らかになっている。無補強の柱では残存軸耐力が常時支えている鉛直荷重に相当する軸力(定軸力: N_L)まで劣化すると軸力保持能力を失う。しかし, 本補強を施した柱は3.2で述べた特性により, N_L まで軸耐力が低下することなく, あるいは軸耐力が N_L 以下に落ちたとしても, そのまま軸力保持能力を失う(図の点線)こ

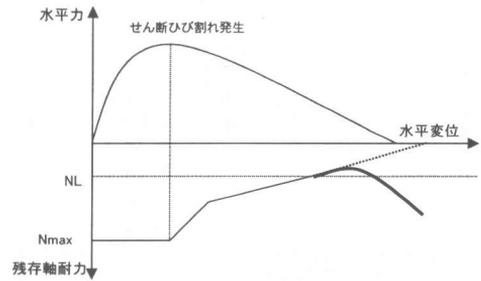


図-10 水平力-水平変位-残存軸耐力模式図

となく, ある程度変形を生じた後図中の太線のように軸耐力が再び上昇すると推定できる。

5. まとめ

コンクリート柱をポリエステル製繊維シートで簡易補強し, 単軸圧縮試験を行った結果, 以下のことが明らかになった。

- (1) 簡易補強を施してもコンクリートの圧縮強度に影響は及ぼさなかった。
- (2) 2回目のピークの応力度 σ_2 は軸歪度, 補強量, シート伸度按比例して増加した。
- (3) 断面形状が円形に近いほど補強効果が早く, 顕著に表れた。
- (4) 簡易補強を施すことにより, 過大軸変形時の圧縮靱性が大幅に改善することが確認できた。

【謝辞】本研究は構造品質研究所(株)五十嵐俊一氏の発案により実現し, 多大なる協力をしていただきました。ここに深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 渡辺篤史, 田才晃: 柱のせん断劣化過程における残存軸耐力と損傷修復性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp. 337-342, 1999. 6