

低強度鉄筋コンクリート柱に対する シート補強の効果

大杉 泰子¹・壁谷澤 寿海²・田才 晃³・五十嵐 俊一⁴・田村 玲⁵
田辺 大地⁵・ウサレム ハッサン¹

¹ 東京大学大学院 工学系研究科 修士課程 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1 東京大学地震研究所)

² 工博 東京大学地震研究所 教授 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

³ 博(工学) 横浜国立大学工学研究院 助教授 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-1)

⁴ 博(工学) 構造品質保証研究所株式会社 (〒102-0073 東京都千代田区九段北1-11-5)

⁵ 横浜国立大学大学院 工学系研究科 修士課程 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-1)

A new method of strengthening RC columns using polyester fiber sheets, SRF, was improved and verified in various cases towards practical use in retrofit of existing buildings. The hysteretic behavior of the SRF column was compared with that of the same column without strengthening. Stability against axial load and lateral load resistance were improved remarkably by SRF, because the generation of shear cracks and the progress of axial displacement was prevented effectively by the confinement of the sheet. The behavior was also stable under constant axial load as well as under varying axial load up to very high compression. It is concluded that SRF is very effective, economical and ready for practical use in seismic strengthening.

Key Words: polyester fiber sheet strengthening, SRF, stability of axial load, ductility

1. はじめに

建物の大地震に対する第一義的な基本性能は安全性すなわち人命保護であり、このために必要な部材の性能は地震後の柱の鉛直荷重支持能力である。古い鉄筋コンクリート(RC)造建物では、柱のせん断補強筋量が少なく、鉛直荷重を支持できなくなってパンケーキ状に崩壊する建物被害が世界中の地震被害で報告されている。

これらの建物柱の破壊を防止するための既往の耐震補強方法には、鋼板による巻き立て、炭素繊維補強、アラミド繊維補強など多くの方法(例えば¹⁾)が提案、実施されいづれも十分な余裕をもって補強効果を発揮しうるが、いづれも施工コストが高価であったり、工事が大掛かりであり、世界的な視野で見ると広く耐震補強を普及させる上で障害になっている。

このような考えに基づき、昨年度からポリエステル製繊維シート(以下シート)による簡便で安価な補強方法の補強効果を検証する研究を行ってきた。昨年²⁾の研究では、定軸力下におけるシートによる補強の有効性が認められた。

本研究では、昨年度の研究からシート補強方法にも改良を加え、さらにコンクリート強度が低い柱が定軸力および変動軸力を受ける場合の補強の有効性を検証した。

2. 実験概要

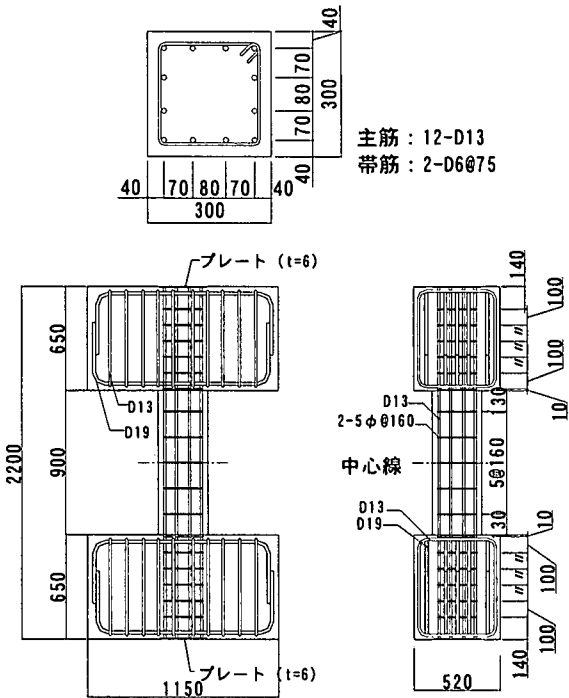
(1) 試験体概要

試験体は実大の1/3スケールを想定した断面寸法($b \times D$)、高さ(h)、主筋量を同一($b \times D = 300 \times 300 \text{ mm}$, $h = 900 \text{ mm}$, シアスパン比=1.5, 全鉄筋比(p_g)=1.12%)とし、コンクリート強度とせん断補強筋量が異なる3種類、合計14体である。14体の内訳は、コンクリート呼び強度(F_c)が13.5MPa, せん断補強筋比(p_w)が0.08%の試験体(No.1~No.3), $F_c = 13.5 \text{ MPa}$, $p_w = 0.28\%$ の試験体(No.4~No.7), $F_c = 18.0 \text{ MPa}$, $p_w = 0.28\%$ の試験体(No.8~No.14)である。試験体概要を図-1に示す。これら各々の試験体の中でさらに補強方法、軸力を変化させた。補強方法の詳細については(2)で述べる。実験パラメータを実験結果(最大荷重)と共に表-1に示す。

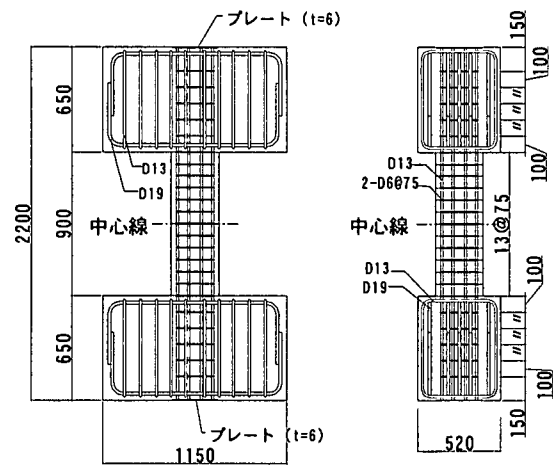
表-1 柱試験体諸元

No.	Fc (Mpa)	p _g (%)	p _w (%)	軸力	補強方法	最大荷重 (kN)	
						正	負
1	13.5	1.12 (12-D13;SD345)	0.08 (5φ@160 ; SR295)	定軸力	N	160.42	-142.99
2				(0.3bDFc)	D	174.79	-142.76
3					C	168.67	-161.21
4				定軸力	N	171.11	-162.52
5				(0.3bDFc)	A	183.23	-177.80
6				変動軸力	N	203.94	-102.09
7				(0.2bDFc+4.5Q)	A	195.79	-109.89
8	18.0	0.28 (D6@75;SD345)	0.28 (D6@75;SD345)	定軸力	N	233.02	-223.47
9				(0.3bDFc)	A	250.89	-251.37
10				変動軸力	N	262.12	-104.34
11				(0.15bDFc+4.5Q)	A	255.76	-125.22
12				定軸力	N	217.09	-214.88
13				(0.2bDFc)	A	220.88	-219.39
14				変動軸力 (0.15bDFc+4.5Q)	B	276.97	-126.99

Fc: コンクリート設計基準強度, p_g: 全鉄筋比, p_w: せん断補強筋比, Q: 水平力 N: 無補強



試験体 No. 1 ~ No. 3



試験体 No. 4 ~ No. 14

図-1 柱試験体概要

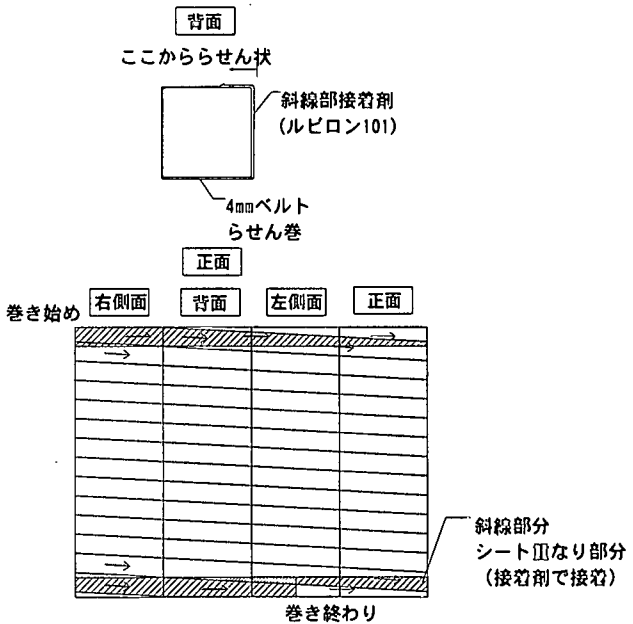


図-2 SRF 補強概要図

(2) 補強方法

補強方法は, No. 2 に施した補強を除いて昨年までの方法に改良を加えた共通の手法をベースにしている. ポリエステル製シートベルト (幅 64mm, 厚さ 4.7mm) を人力で緊張しつつらせん状に巻き付けていき, 柱とシートベルトの間は, 双方が破壊しない程度の接着力を有する接着剤で接着する方法で, 今後この方法を SRF と定義する. この SRF (補強方法 A) を基本に, 接着剤をエポキシ樹脂に変え, シートベルトをらせん状に巻く前に柱の内法高さと同長のシートベルトを加力面にそれぞれ接着し, その後シートベルトをらせん状に巻いてエポキシ樹脂でコーティングする方法 (補強方法 B), また SRF 補強を施した後, 柱の内法高さの幅のポリエステル製シート (トレシート 500T) をさらに上から 3 層巻きつける方法 (補強方法 C) の 3 種類を試みた. SRF の補強方法概要を図-2 に示す. さらに, No. 2 試験体にはトレシートのみの補強を施したもの (補強方法 D) も実験に供した.

表-2 材料試験結果

(a) コンクリート($F_c=13.5\text{MPa}$)			(b) コンクリート($F_c=18.0\text{MPa}$)			(c) 鉄筋			
供試体 材令	最大応力度 (MPa)	ヤング係数 ($\times 10^4\text{MPa}$)	供試体 材令	最大応力度 (MPa)	ヤング係数 ($\times 10^4\text{MPa}$)	材料名	ヤング係数 $\times 10^5$ (MPa)	降伏応力度 (MPa)	降伏歪 (%)
28日	12.98	1.95	28日	19.96	1.98	D13(SD345)	1.82	343.94	0.246
41日	14.39	-	45日	22.29	-	$\phi 5$ (SR295)	2.07	586.910	0.323
56日	14.68	-	75日	24.40	-	D6(SD345)	1.91	373.09	0.395

表-3 シートベルトの特性

	厚さ (mm)	幅 (mm)	弾性係数 ($\times 10^3\text{MPa}$)	引張強度 (MPa)	伸び率 (%)
規格値	4.0	65.5	-	484.27	13.83
実験値	4.7	65.5	1.61	412.61	26.10

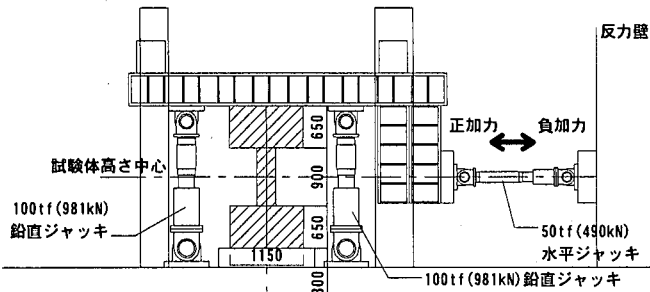


図-4 加力装置図

(3) 使用材料

コンクリートは呼び強度 $F_c=13.5\text{MPa}$ (No. 1～No. 7) と $F_c=18.0\text{MPa}$ (No. 8～No. 14) の普通コンクリートを用いた。主筋は全試験体共通でD13 (SD345) を用い、せん断補強筋は試験体No. 1～No. 3には $\phi 5$ (SR295)、試験体No. 4～No. 14にはD6 (SD345) を用いた。これらの材料試験結果を表-2に示す。

シートベルトはポリエステル製で、破断歪が大きく、概ね弾性の性質を有する。シートベルトの材料特性および引張試験結果を表-3および図-3に示す。

接着剤には市販の床用接着剤、エポキシ樹脂にはアラミド接着・含浸用樹脂を用いた。これらの接着強度は接着長さ130mm (接着面積 8450mm^2) で接着させたシートとコンクリートを引張り、シートが剥離した時の荷重を接着面積で除して求めた。その結果を表-4に示す。

(4) 加力方法

柱試験体の荷重には図-4に示すような逆対称加力装置を用い正負交番漸増繰返し荷重とした。水平方向の荷重履歴は、部材変形角 $1/400\text{rad}$ を1回繰返した後、 $2/400, 3/400, 4/400, 6/400, 8/400\text{rad}$ をそれぞれ2回ずつ、その後 $16/400, 24/400, 32/400, 64/400\text{rad}$ を1回ずつ繰返し、最後に正方向にのみ $200/900\text{rad}$ とした。

軸力は定軸力と変動軸力をかけた場合について行い、定軸力は軸力比0.2および0.3の2種類とした。変動軸力(N)は、10階建て2スパン建物の外柱を仮定して計画し、水平の復元力(Q)に比例させて変動させた。

表-4 接着剤の接着強度

	接着強度(MPa)
接着剤	1.007
エポキシ樹脂	0.737

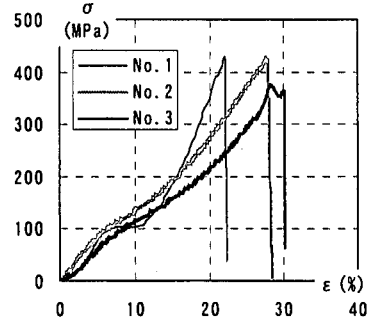


図-3 シートベルト引張試験結果

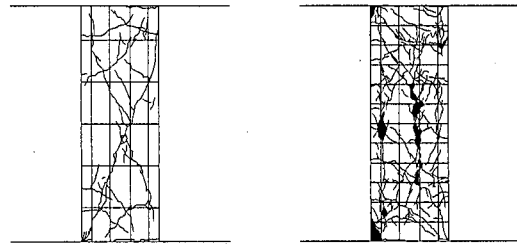


図-5 無補強試験体ひび割れ状況

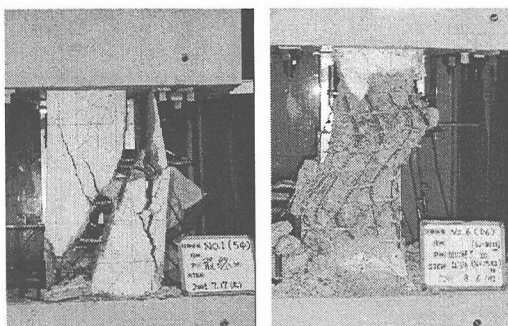
($N=N_0+4.5Q; N_0=0.2bDF_c$ (No. 1～No. 3), $N_0=0.15bDF_c$ (No. 4～No. 14)) 変動軸力は正方向荷重時に増加、負方向荷重時に減少とした。

最後まで水平荷重に耐えた試験体(補強試験体)については、水平荷重終了後変位を中立に戻して軸圧縮荷重を行った。

3. 実験結果

(1) 破壊性状

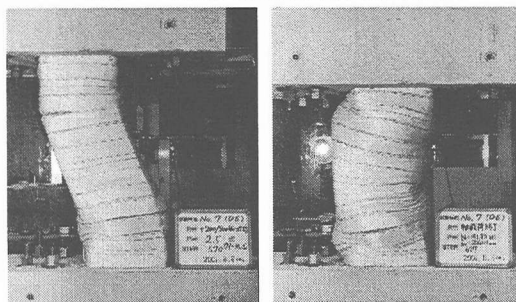
全ての無補強試験体を代表してせん断で破壊した無補強試験体No. 1のせん断破壊後のひび割れ状況と付着割裂により破壊した無補強試験体No. 6のコンクリート剥落前のひび割れ状況を図-5に、最終破壊状況を写真-1に示す。無補強試験体について、せん断補強筋の最も少ない試験体No. 1では部材中央部のせん断ひび割れ発生により急激に耐力低下し、軸力を保持できなくなった。その他の無補強試験体ではいずれも付着割裂破壊によりカバーコンクリートが剥落し、軸力を保持できなくなり最終破壊に至った。No. 1のせん断ひび割れやNo. 4, No. 6, No. 8, No. 10, No. 12のカバーコンクリート剥落前の付着ひび割れのひび割れ幅は非常に大きく、これらのひび割れは除荷時も殆ど閉じなかった。



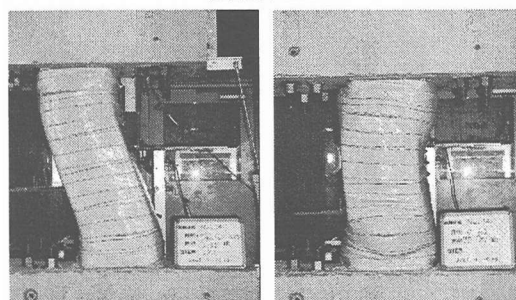
試験体 No. 1

試験体 No. 6

写真-1 無補強試験体最終破壊状況



試験体 No. 7

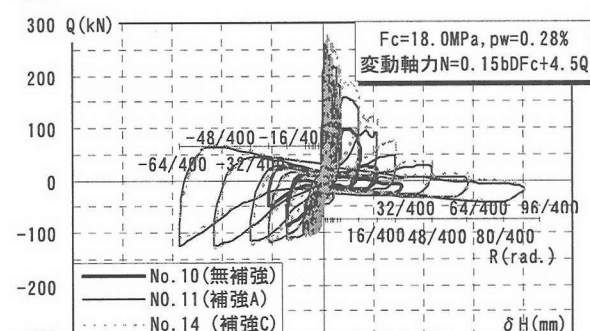
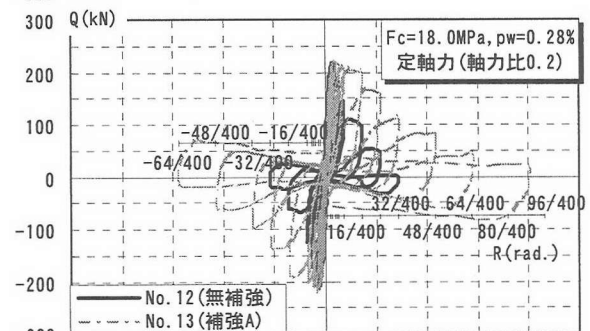
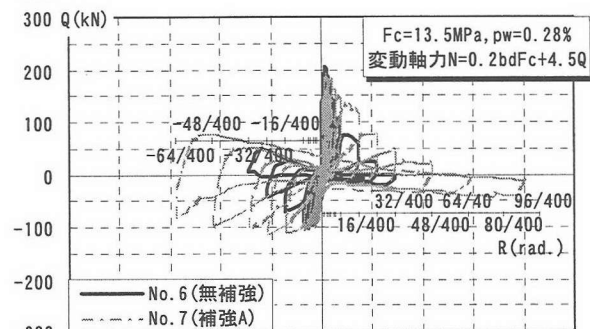
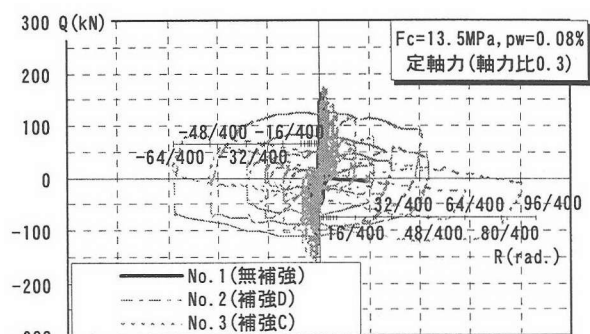


試験体 No. 14

(左が最大水平変形時、右が軸圧縮試験終了時)

写真-2 補強試験体最終破壊状況

補強試験体 No. 7 と No. 14 の最大水平変形時の破壊状況と軸圧縮終了時の破壊状況を写真-2 に示す。補強試験体はいずれも $8/400\text{rad.}$ 程度では殆ど外見上には変化が現れなかった。補強方法 A および補強方法 B で補強した試験体については、 $16/400\text{rad.} \sim 32/400\text{rad.}$ において柱の端部でコンクリートのひび割れが開くことにより生じるシートベルト間の隙間ができて始め、その部分の変形が進み軸方向に縮み始めた。しかし、軸力に対しては非常に安定な状態で最後まで水平荷重を終えることができ、その後の軸圧縮荷重でもいずれの試験体も軸力比に換算して 1.0 以上の軸耐力を示した。試験体 No. 11 と試験体 No. 14 の破壊性状の違いとしては、大変形時に No. 11 は柱端部のひび割れが開くのに対して、No. 14 では主にスタブと柱の間の曲げひび割れが開く傾向があった。これはシートベルトをらせん状に巻く前に加力面に縦方向に貼ったシートベルトにより柱部分のひび割れが開くのが抑制されたと考えられる。トレシートのみの補強を施した No. 2 試験体は、最大耐力到達直後急激に変位が進み水平耐力が低下し、せん断破壊を防止すること



-250 -200 -150 -100 -50 0 50 100 150 200 250

図-6 水平力-水平変位関係

はできなかったが、せん断破壊後も安定して軸力を保持し、崩壊することはなかった。

(2) 水平力-水平変位関係

図-6に代表的な試験体のP-Δ効果を補正した水平力Q-水平変位 δ_H の関係を示す。いずれの無補強試験体も水平荷重途中で軸力を支持できなくなり崩壊に至ったのに対し、補強試験体は安定に軸力を支持しながら最後まで水平荷重に耐えることができた。また最大耐力後の水平耐力の低下の度合いも改善された。特に変動軸力を

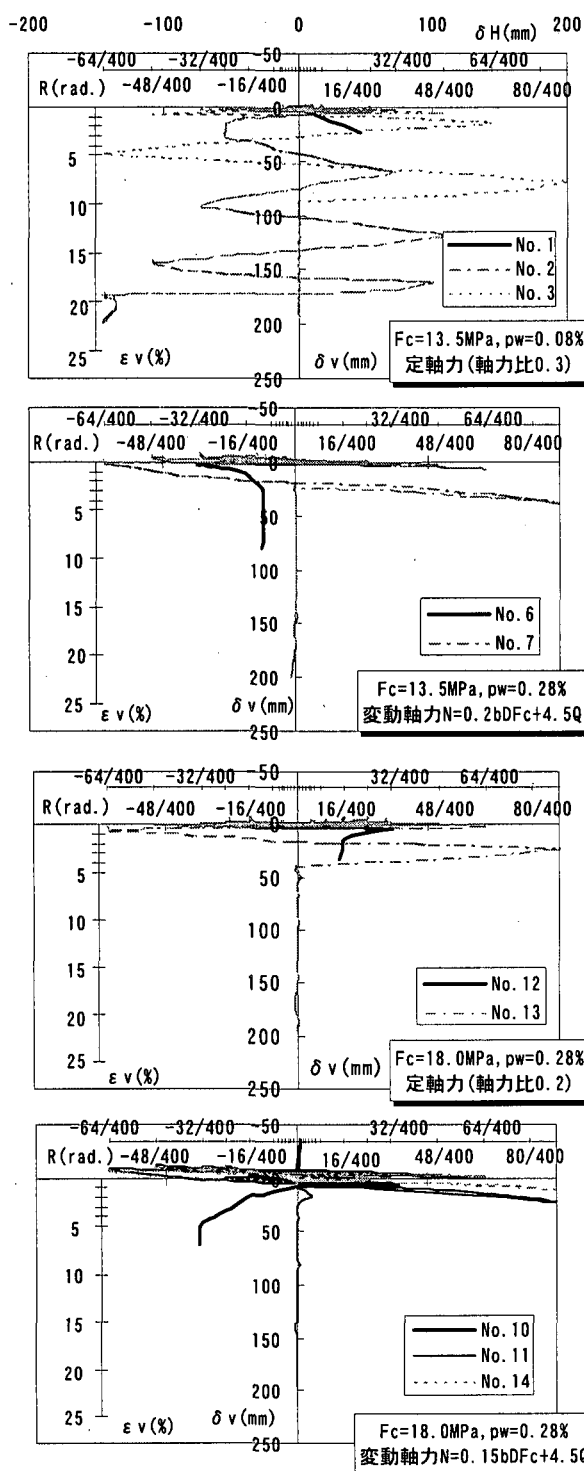


図-7 水平変位 - 軸変位関係

かけた場合の負方向(軸方向引張り側)の耐力の改善が著しかった。トレシートのみの補強とその他の補強では復元力特性に明らかな差が見られ、トレシートのみの補強では一旦水平耐力が低下後再び耐力上昇するのに対してSRF補強をベースにしたその他の補強では再び耐力上昇することはなかった。最大耐力直後の耐力低下の度合いはSRF補強をベースにした方が緩やかであった。補強方法Bで補強した試験体(No. 14)は、補強方法Aで補強した試験体(No. 11)に比べて最大水平耐力が上昇し、その他はほぼ同様の挙動を示した。

表-4 解析対象断面諸元

コンクリート			鉄筋	
F_c (MPa)	13.5	18.0	主筋	12-D13
E_c ($\times 10^4$ MPa)	1.95	1.98	E_s ($\times 10^5$ MPa)	1.82
σ_B (MPa)	16.49	21.32	σ_y (MPa)	343.94
ε_B (%)	0.423	0.596	ε_y (MPa)	0.189
E_{neg} ($\times 10^3$ MPa)	-2.51	-2.32	$\varepsilon_y = \sigma_y / E_s$ として求めた (材料試験結果採用せず)	
σ_{min} (MPa)	5.84	7.98		
ε_{min} (%)	4.444	4.185		
E_{pos} (MPa)	300.0	347.5		
断面 (mm)	300 $\times$ 300			

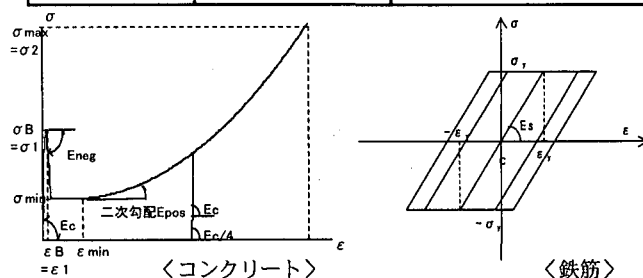


図-8 解析に使用した材料の応力度 - ひずみ度関係

(3) 軸方向変位

図-7に代表的な試験体の水平変位 - 軸変位関係を示す。いずれの無補強試験体も軸歪が1~2%を超えると軸力を保持できなくなり崩壊に至ったのに対し、No. 2, No. 3を除く補強試験体は極めて大きな水平変形でも軸変形は非常に小さく、補強により軸方向の変位の進行が抑制されていた。その後の軸圧縮でも軸変形が進むことにより非常に高い軸力に抵抗することができ、軸圧縮靱性の改善が認められた。補強試験体No. 2, No. 3では他に比べて水平変形時の軸変形は大きい、軸力は保持しており、軸圧縮靱性の改善が認められた。

4. 解析的検討

柱実験の結果から、補強試験体は曲げ柱のような挙動を示しており、補強により破壊モードがせん断破壊あるいは付着割裂破壊から曲げ破壊に移行したと考えられる。そこで、曲げ破壊による水平耐力低下について柱実験結果に対して平面保持を仮定したファイバーモデルによる断面解析を行い、検討を行った。

(1) 断面解析の方法

解析対象断面諸元を表-4に示す。コンクリートの特性値には材料試験結果および別途行った同等の方法で補強したプリズム要素の一軸圧縮試験結果を、鉄筋の特性値には材料試験結果を用いた。コンクリートの応力度 - ひずみ度関係にはプリズム試験結果をモデル化したものを用いた。なお、コアコンクリート、カバーコンクリートいずれにもこの関係を適用した。鉄筋の応力度 - ひずみ

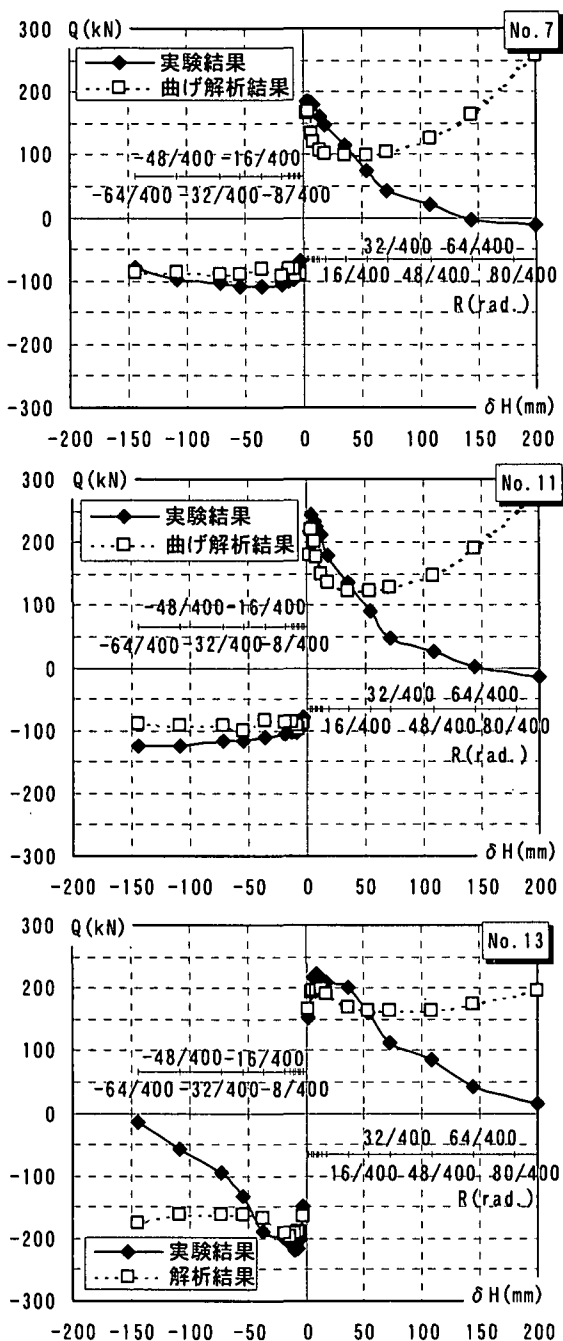


図-9 曲げ解析結果と実験値の比較

み度関係にはBilinearモデルを用いた。これらのモデルを図-8に示す。また、各変形での曲率は平石等の提案する曲率と部材角の関係式³⁾から求めた。

(2) 断面曲げ解析結果

(1)で示した方法で最大曲率振幅を実験と同様に变化させた解析によって補強試験体の水平力-水平変位関係を求めた。その結果を実験結果と共に図-9に示す。図によると定軸力をかけた試験体の正負とも変形角 $R=16/400\text{rad.}$ まで、および変動軸力をかけた試験体の負荷荷については、解析結果と実験結果はほぼ一致している。よって、補強によりこの程度の変形での破壊モードがせん断破壊から曲げ破壊に移行したといえる。しかしなが

ら、 $R=16/400\text{rad.}$ を超えたところでの水平耐力は曲げ解析では追うことができなかった。この原因として、シート内部でコンクリートの損傷が進み応力伝達能力が低下していること、コンクリートと鉄筋の付着力が減少あるいは喪失していること、主筋が座屈し、圧縮力を負担できなくなっていること、などが考えられる。

5. まとめ

13.5MPa程度の低強度コンクリートおよび普通強度コンクリートの既存柱を想定して、無補強およびシート補強した鉄筋コンクリート造柱の実験を行った結果、補強試験体では十分な水平耐力維持能力と極めて大きな軸力安定性が得られ、新しいシート補強法の有効性、実用性が確認された。詳細には以下のことが明らかとなった。

1. シート補強により極めて大きな靱性能の向上が見られた。無補強試験体では小さな塑性変形レベルで軸力支持能力を喪失して崩壊するのに対し、補強試験体は $R=200/900\text{rad.}$ の大変形まで軸力支持能力を喪失することなく安定した挙動を示した。
2. トレシートのみの補強では水平耐力が急激に低下した後再び耐力が上昇するのに対して、SRF補強では最大耐力後の耐力低下の度合いは緩やかであり、水平変形に伴う軸縮みも小さく、安定した挙動を示すことが確認された。
3. 要素試験による応力-ひずみ関係に基づいた曲げ解析により、安定した曲げ耐力を維持しうることを確認した。大変形域での水平力低下の要因はせん断、または付着の抵抗機構に基づいて検討する必要がある。

謝辞: 実験および実験データの整理は、鎌野賢吾(芝浦工業大学)、蔦壁潤一郎、丹羽貴子(横浜国立大学)各氏と共同で実施した。

参考文献

1. 勝俣 英雄ほか: 新素材による既存鉄筋コンクリート柱の耐震補強に関する研究(その1)炭素繊維による円形断面柱の補強実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp. 553-114, 1986年8月
2. 小泉 洋, 壁谷澤 寿海ほか: 鉄筋コンクリート柱の地震時軸圧縮破壊に対するシート補強に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23-1, pp. 937-942, 2001年7月
3. 吉川真次, 平石久廣ほか: 高軸力を受ける壁柱の面外方向の挙動に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp. 619-621, 1988年10月