

論文 大きな変動軸力を受ける柱の崩壊を防止する補強方法

大杉 泰子*1・壁谷澤 寿海*2・田才 晃*3・五十嵐 俊一*4

要旨: 既存柱を想定したRC造柱試験体にシート補強を施し、変動軸力下で水平載荷実験を行った。無補強試験体では脆性的な破壊挙動を示し崩壊に至ったのに対して、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た。また、シートの接着にエポキシ樹脂を用いた場合は最大水平耐力の向上が見られた。

キーワード: ポリエステル繊維補強, 変動軸力, 靱性能, 軸力支持能力, ファイバーモデル

1. はじめに

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、大地震時に鉛直荷重を支持できなくなって崩壊する建物被害が数多く報告されている。これらの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、鋼板による巻きたて、炭素繊維補強、アラミド繊維補強など多くの方法^{例えは}が提案、実施され、いずれも十分な補強効果を発揮するが、いずれも施工コストが高価、工事が大掛かりという理由から、世界的に広く耐震補強を普及させる上で障害になっている。

これらの補強方法に替わる新たな補強方法として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補強の有効性が認められた。

本研究では、昨年度の研究よりさらにコンクリート強度が低い柱を対象として、シートの補強方法にも改良を加えて変動軸力下での補強の有効性を検証した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

柱試験体概要を表-1および図-1に示す。試

験体は実大の1/3スケールを想定した断面寸法、高さ、主筋量、せん断補強筋量を同一(断面寸法=300×300mm, 内法高さ=900mm, シアスパン比=1.5, 全鉄筋比=1.12%)とする合計5体である。そのうち2体はコンクリート強度が $F_c=13.5\text{MPa}$, 残り3体は $F_c=18.0\text{MPa}$ で、それぞれ1体を無補強試験体とし、残りを補強試験体

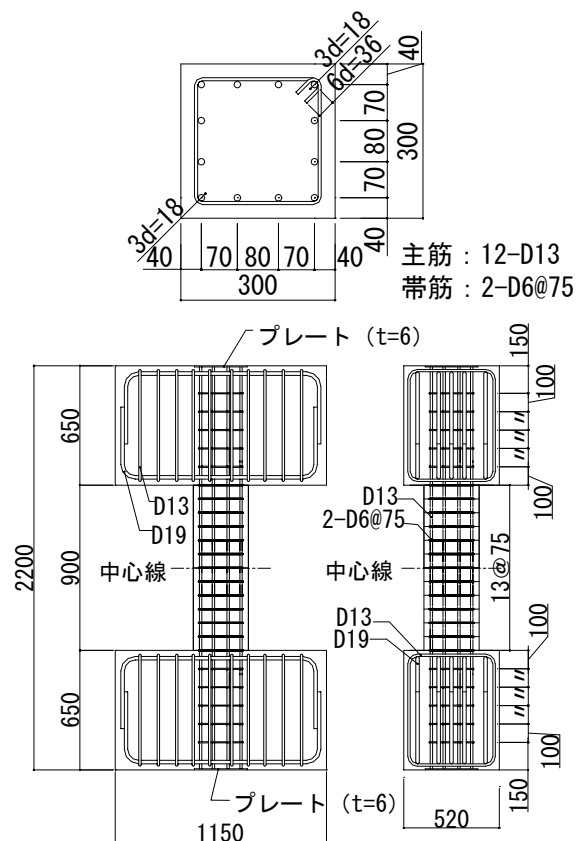


図-1 柱試験体概要

*1 構造品質保証研究所(株) 修士(工学) (正会員)
 *2 東京大学地震研究所 教授 工博 (正会員)
 *3 横浜国立大学 工学研究院 助教授 博士(工学) (正会員)
 *4 構造品質保証研究所(株) 工博 (正会員)

表-1 柱試験体諸元

No.	Fc(Mpa)	p _g (%)	p _w (%)	変動軸力	補強方法	最大水平耐力(kN)		最大耐力時部材角(rad.)	
						正	負	正	負
6	13.5	1.12	0.28	0.2bDFc+4.5Q	無補強	203.94	-102.09	2/400	-6/400
7					SRF	195.79	-109.89	2/400	-16/400
10	18.0	(12-D13;SD345)	(D6-75;SD345)	0.15bDFc+4.5Q	無補強	262.12	-104.34	2/400	-8/400
11					SRF	255.76	-125.22	2/400	-48/400
14					SRF'	276.97	-126.99	2/400	-48/400

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

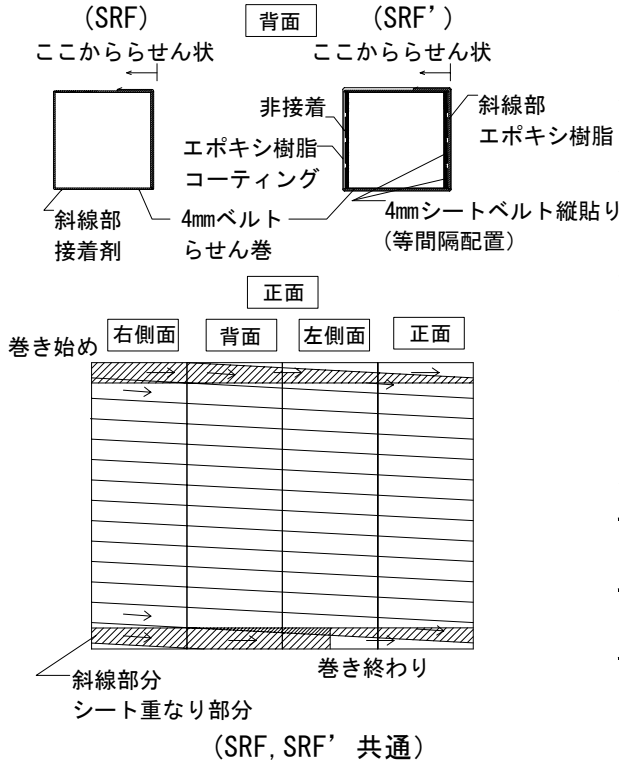


図-2 SRF(断面左), SRF'(断面右) 補強要領とした。補強方法は、ポリエステル製シートベルト(幅64mm, 厚さ4.7mm)を人力で緊張しつつらせん状に巻き付けていき, 柱とシートベルトの間は, 双方が破壊しない程度の接着力を有する接着剤で接着する方法(以下SRF)と, シートベルトの接着にエポキシ樹脂を用い, シートベルトをらせん状に巻く前に柱の内法高さと同長のシートベルトを加力面にそれぞれ接着し, その後シートベルトをらせん状に巻いてエポキシ樹脂でコーティングする方法(以下SRF')の2種類を試み, Fc=13.5MPaの試験体ではSRFのみ, Fc=18.0MPaの試験体では両方の補強について検討を行った。SRFの補強方法概要を図-2に示す。

2.2 使用材料

コンクリートは設計基準強度 Fc=13.5MPa と Fc=18.0MPaの普通コンクリートを用いた。主筋

表-2 材料試験結果

(a) Fc=13.5MPa

供試体	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (×10 ⁴ MPa)	負剛性 (×10 ⁴ MPa)
材令			
28日	12.98	1.95	-2.51
41日	14.39	-	-
56日	14.68	-	-

(b) Fc=18.0MPa

供試体	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (×10 ⁴ MPa)	負剛性 (×10 ⁴ MPa)
材令			
28日	19.96	1.98	-2.32
45日	22.29	-	-
75日	24.40	-	-

(c) 鉄筋

材料名	ヤング係数 (×10 ⁵ MPa)	降伏応力度 (MPa)	降伏歪 (%)
D13(SD345)	1.82	343.94	0.246
D6(SD345)	1.91	373.09	0.395*

*0.2%オフセット法による

表-3 シートベルトの特性

	厚さ (mm)	幅 (mm)	弾性係数 (×10 ³ 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	1.25	412.61	26.10

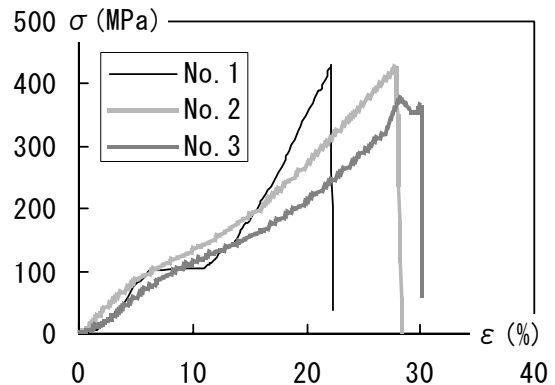


図-3 シートベルト引張試験結果

は全試験体共通でD13(SD345)を用い, せん断補強筋には全試験体共通で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

表-4 接着剤接着強度

	接着強度(MPa)
接着剤	1.007
エポキシ樹脂	0.737

の引張試験結果を表-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8450mm²)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。

2.3 加力方法

柱試験体の载荷には図-4に示すような逆対称加力装置を用い正負交番漸増繰り返し载荷とした。水平方向の载荷履歴は、部材変形角1/400rad.を1回繰り返し返した後、2/400,3/400,4/400,6/400,8/400rad.をそれぞれ2回ずつ、その後16/400,24/400,32/400,64/400rad.を1回ずつ繰り返し返す、最後に正方向にのみ200/900rad.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、水平力(Q)に比例させて変動させた。NとQの関係を式(1)、式(2)に示す。ここでbは柱幅、Dは柱せいである。

$$N=0.2bDFc+4.5Q \quad (\text{Aタイプ}) \quad (1)$$

$$N=0.15bDFc+4.5Q \quad (\text{Bタイプ}) \quad (2)$$

変動軸力は正方向载荷時に増加、負方向载荷時に減少とした。

最後まで水平载荷に耐えた試験体(補強試験体)については、水平载荷終了後変位を中立に戻して軸圧縮载荷を行った。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

無補強試験体No.6, No.10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

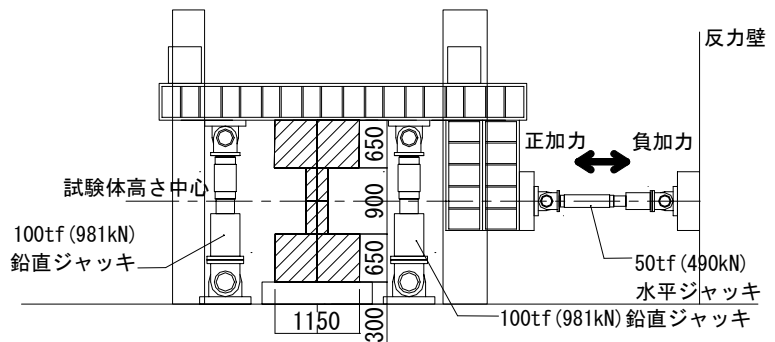
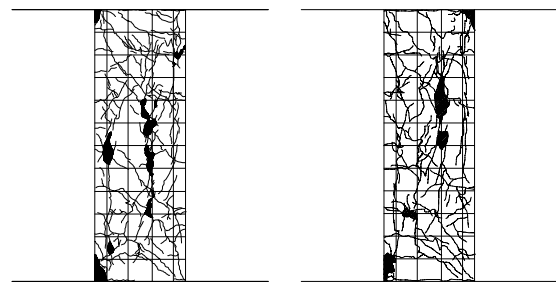


図-4 加力装置図



試験体 No. 6
R=8/400rad.

試験体 No. 10
R=-16/400rad.

図-5 無補強試験体破壊状況



試験体 No. 6

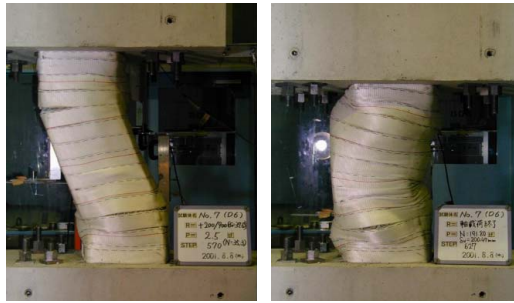
試験体 No. 10

写真-1 無補強試験体最終破壊状況

なくなり最終破壊に至った。カバーコンクリート剥落前の付着ひび割れ幅はNo.6が最大4.0mm, No.10が最大20.0mmに達し、このひび割れは除荷時も殆ど閉じなかった。

補強試験体No.7とNo.14の最大水平変形時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8/400rad.程度では外見的には殆ど変化が現れず、No.7で-24/400rad., No.11, No.14では16/400rad.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载荷を終えることができ、その後の軸圧縮载荷



試験体 No. 7



試験体 No. 14

(左が最大水平変形時, 右が軸圧縮終了時)

写真-2 補強試験体最終破壊状況

でもシートベルトが破断することなく鉛直ジャッキの限界まで達し、その時点で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。補強試験体No.7と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いてシートベルト間の隙間が開くのに対し、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。

3.2 水平力-水平変位関係

表-1に各試験体の最大耐力値、図-6に各試験体の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。Fc=13.5MPaの無補強試験体No.6は正方向では+2/400rad., 負方向では-6/400rad.で、Fc=18.0MPaの無補強試験体No.10は正方向では+2/400rad., 負方向では-8/400rad.で最大耐力に達し、その後加力を進めて行くと正方向では+8/400rad.で最大耐力の約50%に、負方向では-16/400rad.で急激に耐力が低下した。それに対して補強試験体では、正方向では最大耐力に達する変形角, および最大耐力は無補強試

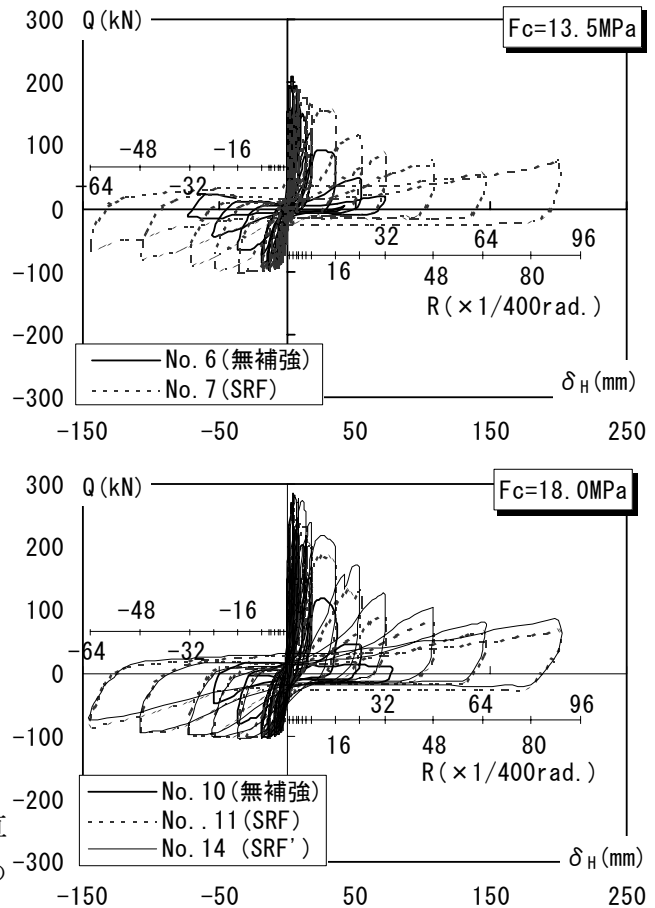


図-6 水平力-水平変位関係

験体と殆ど変わらなかったが、最大耐力後の耐力低下の度合いは無補強試験体より緩やかであった。負方向では最大耐力に達する変形角, および最大耐力とも無補強試験体に比べて大きくなり、水平載荷中殆ど耐力低下することがなく、正方向よりも顕著に水平耐力が改善された。

3.3 軸方向変位

図-7に各試験体の水平変位-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、補強試験体ではR=48/400rad.の大変形でも軸変形は部材長に対して1%未満であり、補強により軸方向の変位の進行が有効に防止されていた。

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

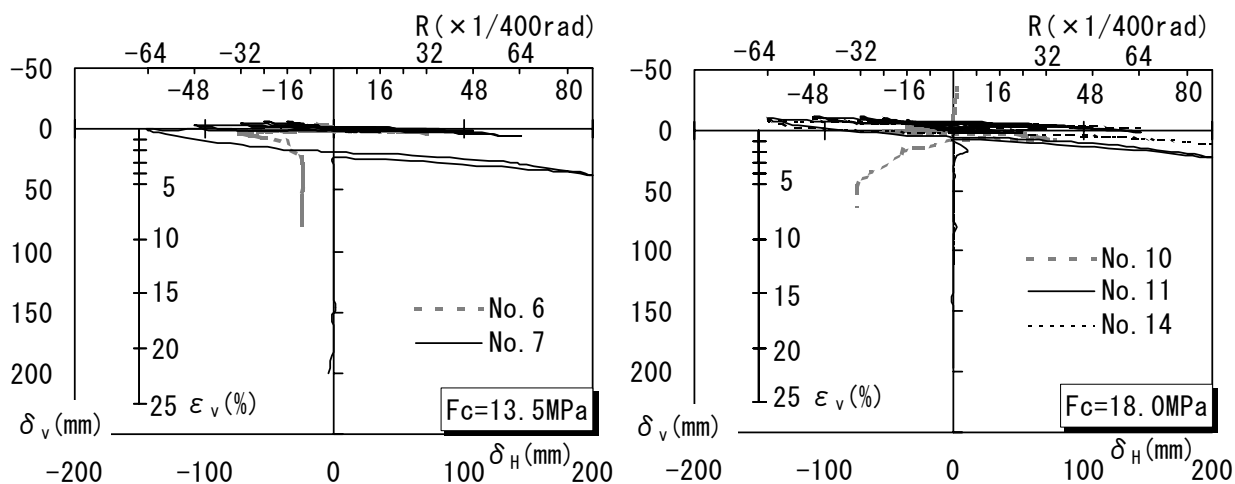


図-7 水平変位 - 軸方向変位関係

表-4 解析対象断面諸元

試験体	コンクリート			鉄筋	
	No.7	No.11	No.14	共通	
F_c (MPa)	13.5	18.0	18.0	主筋	12-D13
E_c ($\times 10^4$ MPa)	1.95	1.98	1.98	E_s ($\times 10^5$ MPa)	1.82
σ_B (MPa)	16.49	21.32	23.46	σ_y (MPa)	343.94
ϵ_B (%)	0.423	0.596	0.718	ϵ_y (MPa)	0.189
E_{neg} ($\times 10^3$ MPa)	-2.51	-2.32	-2.32	$\epsilon_y = \sigma_y / E_s$ として求めた	
σ_{min} (MPa)	5.84	7.98	9.93	*各記号については 図-9参照	
ϵ_{min} (%)	4.444	4.185	5.365		
E_{pos} (MPa)	300.0	347.5	347.5		
σ_{max} (MPa)	48.64	56.48	38.64		
ϵ_{max} (%)	38.90	37.43	30.66		

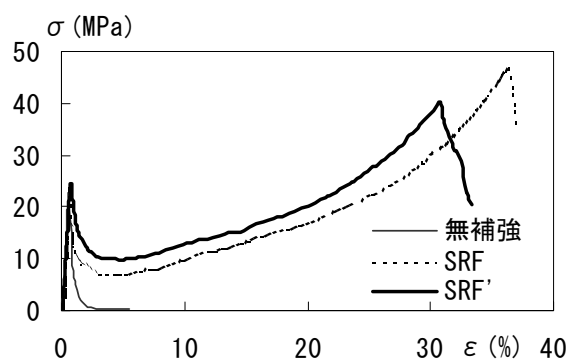


図-8 プリズム試験結果

壤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。

4.1 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柱実験と並行して行った同等の方法で補強した無筋コンクリート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。補強コンクリートの一軸圧縮特性は、図-8に示したように圧縮強度に達すると共に荷重を支えきれなくなった無補強コンクリート試験体とは異なる挙動を示し、圧縮強度(σ_B)に達した後一時的に強度は低下するが、軸縮みが進み周歪の増大につれ強度低下は止まり、ある強度(σ_{min})をしばらく保持した後再度強度が上昇し、最大強度(σ_{max})に達する。これを実験結果をもとにモデル化したものをコンクリートの応力度-ひずみ度関係に用い

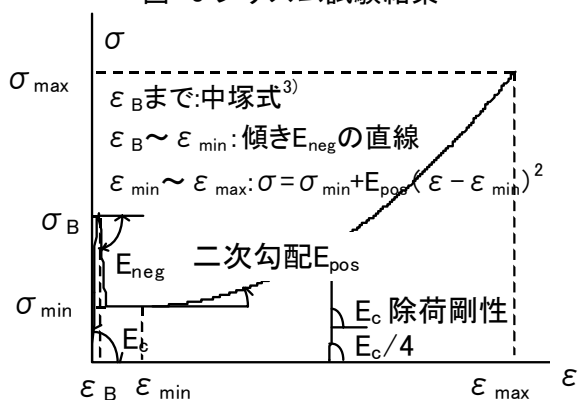


図-9 コンクリートの応力度 - 歪度関係モデル

た。このモデルを図-9に示す。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-ひずみ度関係にはBilinearモデルを用いた。また、各変形での曲率は平石らの提案する曲率と部材角の関係式⁴⁾から求めた。

4.2 断面曲げ解析結果

4.1で示した方法で最大曲率振幅を実験と同様に変化させ、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-10に示す。図によると正載荷方向については変

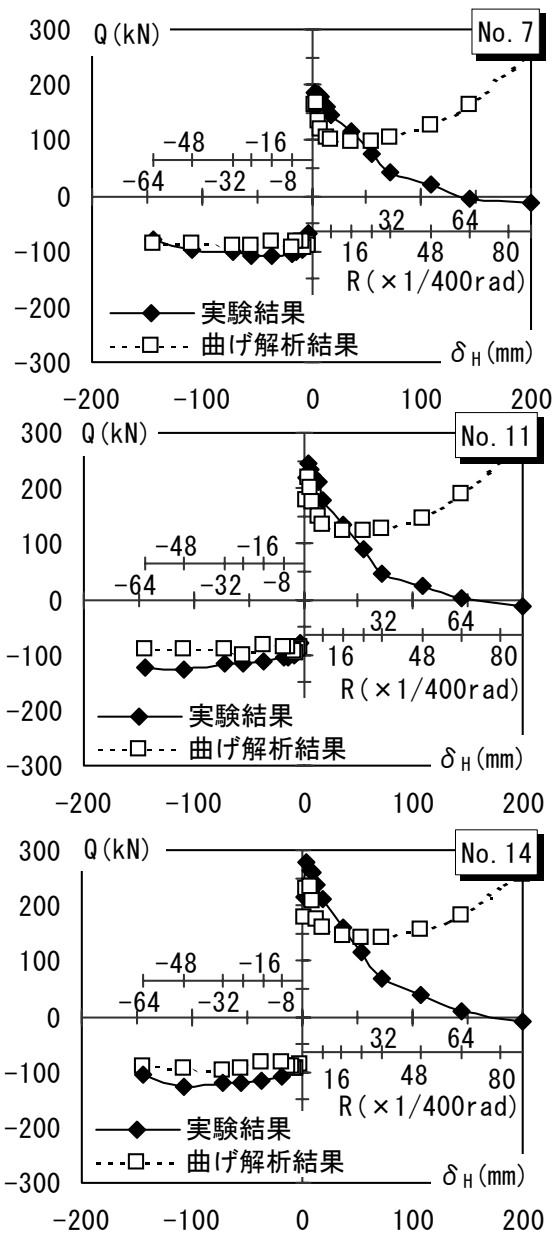


図-10 曲げ解析結果と実験値の比較

形角 $R=+16/400\text{rad}$ まで、負荷荷方向については $R=-64/400\text{rad}$ まで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、正載荷方向において $R=+16/400\text{rad}$ 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

既存柱を想定した柱試験体にシート補強(SRF)を施し変動軸力下で水平載荷実験を行った結果、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て、新しいシート補強手法の有効性、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) プリズム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。
- 3) シートベルトの接着にエポキシを用いた試験体は水平耐力の上昇が見られた。

謝辞：実験および実験データの整理は、OUSALEM Hassane (東京大学大学院)、田辺大地、田村玲、蔦壁潤一郎、丹羽貴子(横浜国立大学大学院)、鎌野賢吾(芝浦工業大学) 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.553-554, 1986
- 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, No.1, pp937-942, 2001.7
- 3) 中塚 侑, 小牟禮 建一, 田垣 欣也:炭素繊維シートを用いたコンファインドコンクリートの軸応力度-軸ひずみ度特性, コンクリート工学論文集, vol.9, No.2, pp.65-78, 1998.7
- 4) 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