

論文 自然暴露試験で損傷したRC柱の耐震補強法に関する実験

長嶺 希^{*1}・山川 哲雄^{*2}・与古田牧子^{*3}

要旨：本論文は自然暴露試験で損傷したRC柱の耐久性能と耐震性能の検討に加えて、これらの柱に耐震補強を施した後の耐震性能をさらに検討したものである。その結果、腐食鉄筋は伸び能力が大幅に低下することと、耐久性能上憂慮される試験体であっても耐震補強により耐震性能を上昇させることができることが明らかとなった。しかし、変形が進行すると、耐震補強の有無に関わらず腐食鉄筋の破断は避けられないことも事実である。

キーワード：自然暴露試験、腐食鉄筋、伸び能力、耐久性能、耐震補強

1. はじめに

塩害により損傷を受けたRC柱の耐震性能を検証することを目的に、電食試験体や自然暴露試験体を用いて一定軸圧縮応力下の正負繰り返し水平加力実験を行ってきた^{1),2),3)}。その結果、帯筋の密な配筋により横拘束効果が期待できるRC柱で、鉄筋の腐食が少ない場合はそれが耐震性能の劣化に及ぼす影響はきわめて小さいか、逆にやや改善される傾向すら観察された。しかし、鉄筋の腐食が進むと伸び能力が低下して破断しやすくなり、RC柱の韌性低下がさけられない。

そこで、本研究では鉄筋の腐食により損傷し

た自然暴露RC柱試験体の耐久性能を照査し、次いで耐震補強を施し、劣化したRC柱の耐震性能の向上について検証する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は曲げ破壊先行の試験体が4体、せん断破壊先行の試験体が4体の計8体である。試験体一覧をTable 1に示す。これらの試験体の寸法は $250 \times 250 \times 750\text{mm}$ 、せん断スパン比はM/(VD)=1.5である。なお、RCC-NN-6以外のRC柱試験体は腐食促進のためにコンクリート打設時に練

Table 1 Column specimens

Specimen	Flexural failure specimen				Shear failure specimen			
	Sound specimen	Exposure test specimen			Sound specimen	Electrolytic corrosion	Exposure test specimen	
	RCC-NN-6	RCC-SC-1	Seismic retrofit		RCC-SN-5	RCC-SCe-6	Seismic retrofit	
			DR98F-CO-PB	DR98F-CO-S22			DR98S-CO-PB	DR98S-CO-S22
			PC bars				Steel tube	
	Longitudinal reinforcement 12-D10 ($p_g = 1.37\%$)			Longitudinal reinforcement 12-D10 ($p_g = 1.37\%$)			Transverse reinforcement D6-@60 ($p_w = 0.85\%$)	
	Transverse reinforcement D6-@60 ($p_w = 0.85\%$)			Transverse reinforcement D6-@100 ($p_w = 0.26\%$)				
Exposure testing period	—	Dec.10.'93 ~ Oct.21.'96	Dec.10.'94 ~ Oct.3.'98		—	—	Dec.10.'94 ~ Oct.3.'98	
Loading test date	Jul.21.'97	Oct.28.'96	Oct.29.'98	Nov.5.'98	Sep.23.'94	Sep.30.'94	Oct.27.'98	Nov.3.'98
$\sigma_b(\text{MPa})$	37.5	38.3	30.4	31.8	25.7	27.8	30.7	33.5

* 1 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻（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 工学部環境建設工学科研究生

り混ぜ水に $\text{NaCl}=2.87$ 重量% 水溶液を用いている。これは 1m^3 当たりのコンクリートに含まれる塩分量 NaCl (%) に換算すると約 0.24% であり、海水の塩分量に相当する。

2.2 耐震補強方法

耐震補強は PC 鋼棒を用いてプレストレスを導入する方法と、鋼板による補強の 2 種類を採用した。耐震補強の詳細を Fig. 1 に、使用材料の力学的特性を Table 2 にそれぞれ示す。

PC 鋼棒による耐震補強は、柱中央部 (500mm) に 9.2ϕ の PC 鋼棒をブレース状に架け、かつブレースの支点位置で同じ 9.2ϕ の PC 鋼棒を帶筋のように配置した。導入したプレストレスは降伏点のひずみの約 70% の $4200-4400\mu$ (880MPa) 前後の緊張ひずみである。さらに柱頭・柱脚には柱四隅に配置したコーナーブロックを介して 3.2ϕ の PC 鋼棒を同一平面上に外周带筋のように配置し、降伏点ひずみ (約 6000μ) の約 $1/3$ 強の 2450μ 前後 (490MPa) のプレストレスを導入した。 9.2ϕ および 3.2ϕ の PC 鋼棒は実柱寸法でそれぞれ 22ϕ 、および 9.2ϕ の PC 鋼棒に相当する。

一方、鋼管を用いた試験体は板厚 2.3mm の鋼板を用い、柱表面と 6mm の隙間をあけ、セメント系無収縮グラウト材で充填した。グラウト材の圧縮強度は材令 1 週間で約 50MPa である。

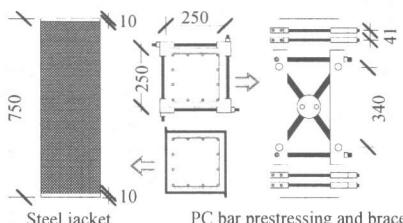


Fig. 1 Details of seismic retrofit for RC column

Table 2 Properties of steel bars, PC bars and steel plate

Type	$A(\text{cm}^2)$	$f_y(\text{MPa})$	$\epsilon_y(%)$	$E_s(\text{GPa})$	
Steel bar	D10 (SD345)	0.71	411 (SC-I 396) (SC-I 0.21) (NN-6 389) (NN-6 0.26) (NN-6 181)	0.18	223
	D6 (SD295A)	0.32	437 (SC-I 388) (SC-I 0.20) (SC-I 177) (NN-6 388) (NN-6 0.22) (NN-6 184)	0.24	195
PC bar	Φ3.8 (SBPR 930/1080)	0.11	1245	0.60	201
	Φ9.2 (SBPR 1080/1230)	0.66	1259	0.62	
Steel plate	2.3mm (SS41)	—	417	0.19	219.5

2.3 加力実験及び測定方法

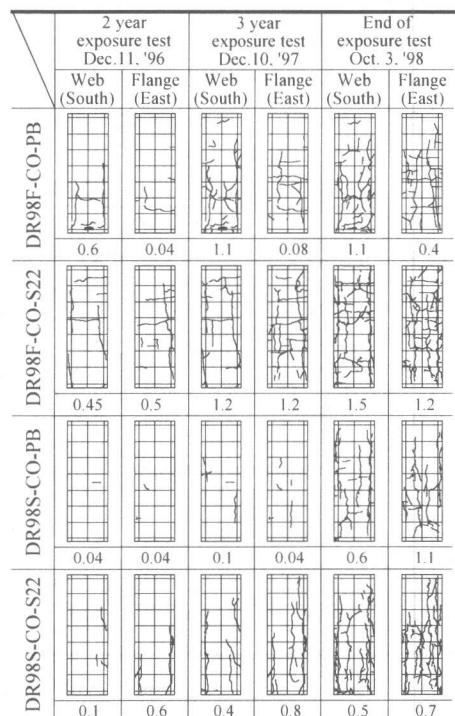
加力装置に建研式加力装置を用い、一定軸圧縮応力を $0.35\sigma_b$ として部材角 $R=3\%$ を目標に 0.5% ずつ増分させながら各ステージ 3 回の正負繰り返し水平加力を行った。ただし加力途中で試験体が破壊したものについては、その時点で加力実験を終了した。また、水平変形は上下スタブ間の相対水平変位を、鉛直変形は上下スタブ間の相対鉛直変位を高感度変位計を用いてそれぞれ測定した。

3. 自然暴露試験

今回加力実験を行った試験体（耐震補強用）は、1994年から1998年までの約4年間沖縄の海岸で自然暴露試験を行ったものである。以下にこれら耐震補強を施した自然暴露試験体4体の耐久性能に関する実験結果を示す。

3.1 ひび割れ状況

Fig. 2 に暴露期間中に生じたひび割れ状況を示す。いずれの試験体も、時間の経過とともに主筋



Note: Arabic numerals denote maximum crack width(mm).

Fig. 2 Crack patterns under exposure test

に沿ったひび割れが増加し、幅も拡大した。耐久性からみた場合、補修を必要とする許容ひび割れ幅の規定は0.4mmとされているが⁴⁾、暴露終了時の最大ひび割れ幅はいずれもその値を越えており、耐久性能上かなり劣化が厳しいと言える。

3.2 塩分量

各自然暴露試験体と対応させた材料試験用の暴露無筋モニター試験体(250×250×500mm)からコンクリートコアを採取し(250mm厚)、含有塩分量を全塩分量で測定した。**Fig. 3**にその結果を示す。海側、陸側ともに飛来塩分がコンクリート内部に浸透しているが、コンクリート表面より約70mm以上になると飛来塩分の影響は少なくなり、初期混入塩分量(0.24%)に近づいていく。今回の試験体は塩化物量総量規制値⁴⁾⁵⁾(0.3kg/m³)や鉄筋腐食危険ライン⁵⁾(0.03%)の約8倍の塩化物を打設時に混入しているが、暴露終了時には初期含有塩分量(0.24%)の最大4.7倍の塩分量が測定された。なお中性化試験も行ったが、その深さの平均は3から4mm程度で中性化が進展していない試験体もあった。

3.3 腐食鉄筋

加力実験終了後、自然暴露試験体の鉄筋の腐食グレードをAIJ方式⁴⁾に基づき目視により観察した。その結果、いづれの試験体もグレードⅢ、Ⅳ、Ⅴの混在であったが、曲げ破壊先行試験体の方が腐食が進んでいた。これは、配筋が密なため腐食が早まったものと考えられる。

塩害による鉄筋の腐食が鉄筋の力学的性能にどれほど影響するのかを調べるために、各自然

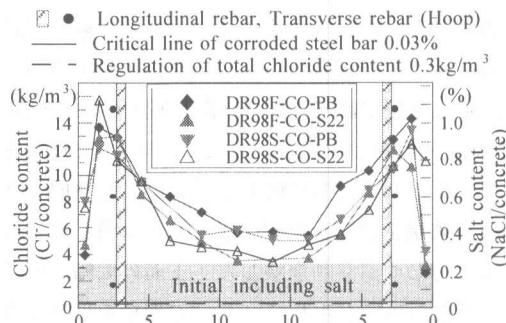


Fig. 3 Chloride or salt content of exposure specimens

暴露試験体と対応した同一配筋の暴露有筋モニター試験体(250×250×500mm)から腐食鉄筋(主筋)を抜き取り引張り試験を行った。これらの腐食鉄筋は孔食が生じており、腐食グレードはⅣとⅤの混在であった。鉄筋の腐食レベルは最も劣化の厳しい部分で判定したが、鉄筋の腐食分布は一様でないため、試験結果はこれらを分類して整理する。グレードⅤとⅣのそれぞれに対し、全体的に腐食しているものと部分的に腐食しているものの4種類に分類した。

Fig. 4にそれぞれの分類の代表的な引張り試験結果と健全な鉄筋の結果との比較を示す。このグラフより、腐食すると降伏点強度が下がるだけでなく、降伏点が明確にあらわれなくなることがわかる。したがって、降伏点強度は0.2%の伸びの点から最初の直線部分の勾配に対して平行線を引き、これと曲線の交点の応力とした。**Fig. 5**は、これらの試験結果を腐食鉄筋の質量減少率と降伏点残存率、引張り強さ残存率、伸び残存率とのそれぞれの関係について整理したものである。各残存率は健全な3本の鉄筋の試験結果の平均値を1とした時の腐食鉄筋の値である。

Fig. 5より降伏点強度、引張り強さ、伸び能力とともに腐食鉄筋の質量減少率に対応して低下していることが分かる。その中でも、伸び能力に関しては腐食グレードの区別に関わらず平均して6から8割程度低下しており、劣化が著しい。また、同じ腐食グレードでも、鉄筋全体にわたって腐食していれば、部分的に腐食している鉄筋に比べ低下が著しい。以上のことより、腐食により鉄筋の力学的性能は低下し、特に降伏点強度や引張強度など強度よりも、伸び能力の低下により影響を与えることがわかった。

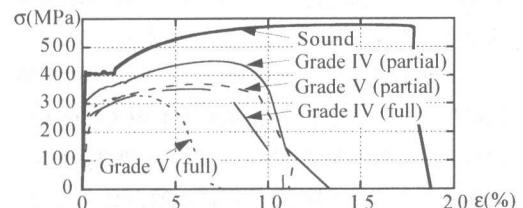


Fig. 4 σ - ϵ relationships for corroded steel bars

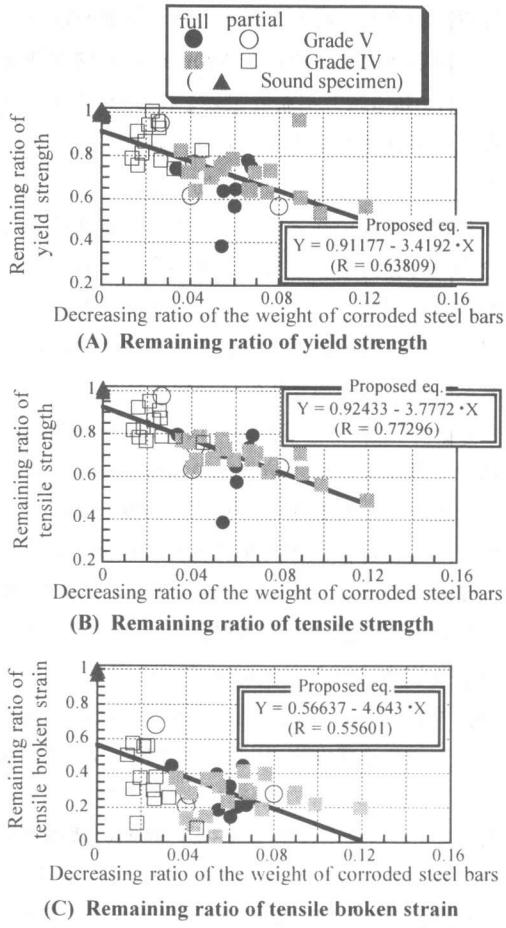


Fig. 5 Each remaining ratio versus decreasing ratio of the weight of corroded steel bars relationships

4. 加力実験結果及び考察

Fig. 6に加力実験により進展した各試験体のひび割れ状況と、加力実験終了後に観察した鉄筋の破断・座屈状況を示す。**Fig. 7**には試験体のせん断力 V と部材角 R 、及び柱材軸の平均伸縮ひずみ ε_v と部材角 R の関係を示す。

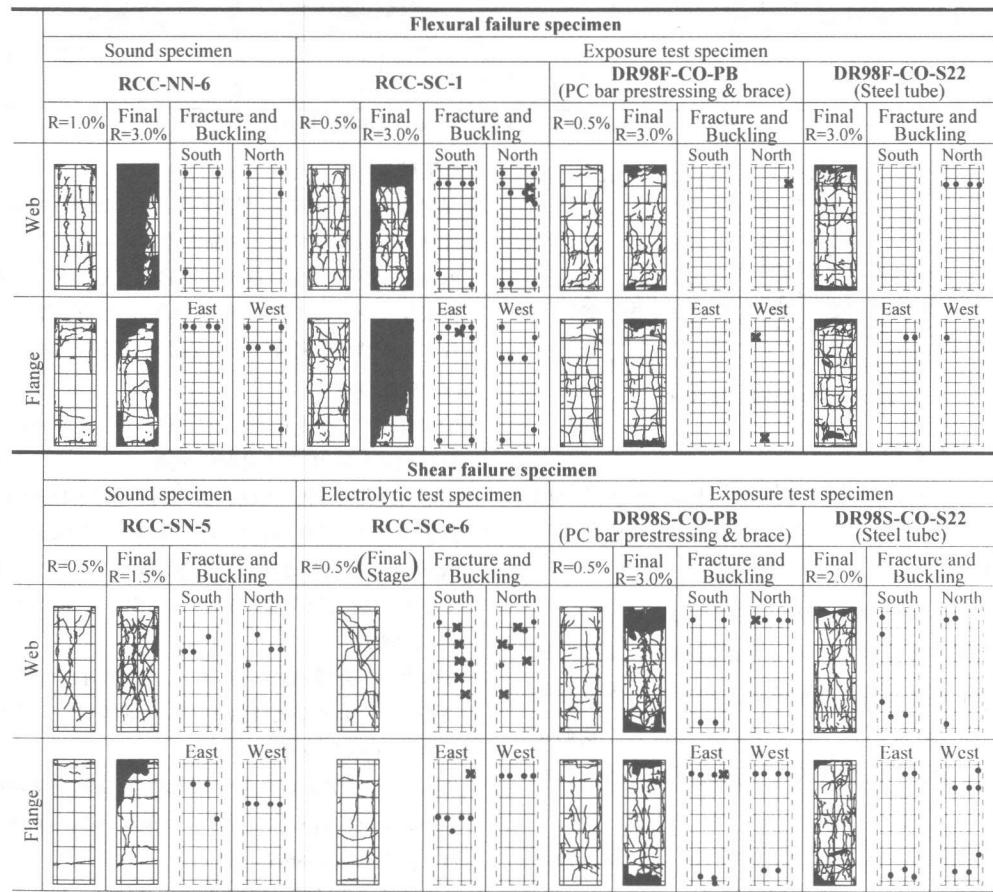
曲げ破壊先行試験体のうち健全な RCC-NN-6 は、主筋に沿った付着割裂ひび割れを生じ、 $R=1.5\%$ で最大耐力に至った後緩やかに耐力が低下し、最終段階では大部分のかぶりコンクリートが剥落して曲げ破壊した。柱頭主筋に座屈が生じている。自然暴露試験体 RCC-SC-1 は加力による新たなひび割れはあまり観察されず、腐食によるひび割れのひび割れ幅が拡大した。 $R=0.9\%$ で最大耐力に至った後 $R=1.5\%$ の段階か

らかぶりコンクリートが剥落し耐力が低下したが、健全な RCC-NN-6 よりも耐震性能は向上している。しかし、変形が大きくなると帶筋の破断や主筋の座屈により韌性が急激に低下している。変形が大変形領域に至る前に耐震性能が比較的安定している理由は、鉄筋の腐食によるさびのかみ合いから起こる付着の上昇と、中子筋による横拘束効果の増大に起因しているものと考えているが今後の検討課題である。PC 鋼棒を用いた耐震補強試験体 DR98F-CO-PB は $R=0.9\%$ で最大耐力に至り、 $R=1.0\%$ から柱頭・柱脚部のかぶりコンクリートの剥落が生じたが、 $R=3.0\%$ の最終段階でも中央のプレース部分へのひび割れの進展はほとんど見られなかった。柱頭・柱脚でそれぞれ主筋が1本破断した。V-R 曲線においては若干の付着滑りが生じているものの繰り返しによる耐力低下もほとんどなく、安定した性状を示している。このことは ε_v -R 曲線で $R=3\%$ の最終段階において柱材軸上の平均引っ張りひずみが増大していることからも分かる。鋼板補強試験体 DR98F-CO-S22 は $R=0.5\%$ の段階から Flange 面の柱頭部で鋼板の膨張が観察され、 $R=1.5\%$ で最大耐力に至った。DR98F-CO-PB とほぼ同等の耐震性を示しているが、 ε_v -R 曲線で柱の平均ひずみが圧縮ひずみとなっており、DR98F-CO-PB よりも若干耐震性は落ちている。加力実験終了後に鋼板を剥いで観察した結果、ひび割れは柱頭・柱脚部のみ進展し、主筋の破断はないものの、柱頭部で座屈が観察された。

一方、せん断破壊先行試験体のうち健全な RCC-SN-5 は、 $R=0.5\%$ で最大耐力に至り、せん断ひび割れが顕著に生じて $R=1.5\%$ で耐力が急激に低下し、せん断破壊した。鉄筋は柱中央部の主筋の座屈が観察された。電食試験体 RCC-SCe-6 は、せん断ひび割れが生じ、 $R=0.5\%$ で最大耐力に至った後急激に耐力が低下して脆性的なせん断破壊を起こしたが、最終的には軸圧縮力により押しつぶされ崩壊した。主筋の大幅な座屈と帶筋の破断が生じている。PC 鋼棒を用いた耐震補強試験体 DR98S-CO-PB は、柱中央部に主

筋に沿った付着割裂ひび割れを生じ、柱頭・柱脚部はかぶりコンクリートが剥落して主筋が座屈・破断した。R=0.97% 時の最大耐力以降耐力が徐々に低下し繰り返しによる耐力低下も顕著であるが、基準試験体と比較するとその耐震補強効果は明らかである。鋼板補強試験体DR98S-CO-S22はR=0.95%で最大耐力に至り、R=2.0%の最終段階でFlange面柱頭部の鋼板が膨張し、耐力が40%低下したため実験を終了した。DR98S-CO-PBと比較すると繰り返しによる耐力の低下が著しく、韌性に欠けている。加力実験終了後鋼板を剥いで観察した結果、ひび割れは柱中央部にも多数進展しており、主筋の破断ではなく、座屈が観察された。また、これらの結果より腐食鉄筋は伸び能力が低下し、大変形領域に入ると破断が生じやすいことが明らかになった。

最大耐力後、最大耐力の80%に耐力が低下した時点の部材角を限界部材角 R_t と定義した。この限界部材角 R_t を最大耐力に至る前の降伏部材角 R_y で除して求めたじん性率をFig. 8に示す。この定義は文献[6]によるものである。但し、せん断破壊したRCC-SN-5とRCC-SCE-6はじん性率を定義できないので、縦軸0にプロットしてある。この図より、腐食した試験体でも耐震補強を施すと拘束効果の影響で限界変形角が著しく増大することが分かる。ただし、前述したように腐食鉄筋の伸び能力の低下には注意が必要である。せん断破壊先行試験体でも耐震性能を改善可能であるが、鋼板補強においてはその板厚が不足しているものと思われる。これは、脆性的な破壊をするためより大きな拘束効果が必要となるからだと考えられる。



Note : Fracture : , Buckling :

Fig. 6 Crack patterns under loading test and failure patterns of steel bars after loading test

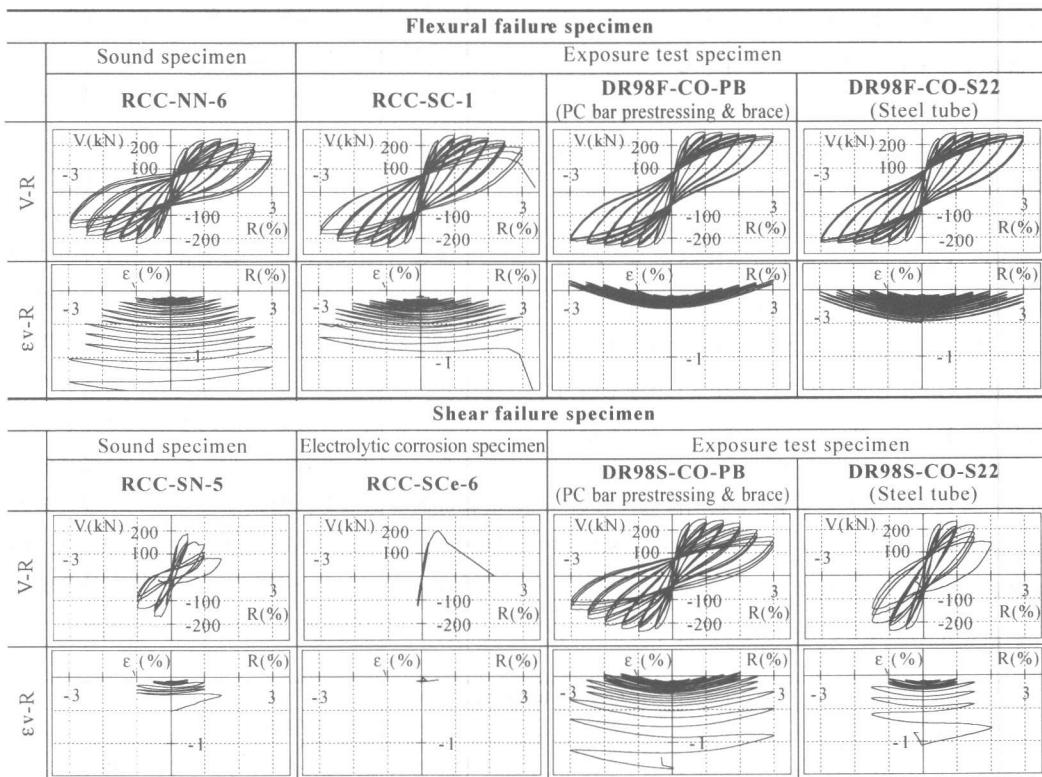


Fig. 7 Measured V-R and ϵ_{vR} relationships

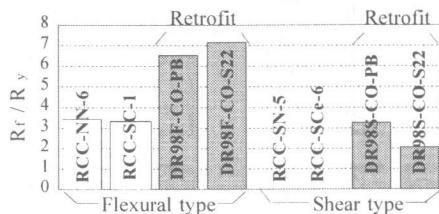


Fig. 8 Ductility factor

5.まとめ

- (1) 鉄筋の腐食は鉄筋の力学的性能、特に伸び能力を著しく低下させるため、鉄筋の破断が容易に起こることが明らかになった。
- (2) 塩害による劣化が厳しいRC柱であっても、PC鋼棒又は鋼板を用いた耐震補強によって横拘束効果を増大させることができ、耐震性能を向上させることができた。ただし、変形が進行すると腐食鉄筋の一部破断は避けられない。
- (3) 脆性的なせん断破壊をするRC柱に鋼板補強を行う場合は、その板厚等さらに検討していく必要がある。

参考文献：

- 1) 枇杷田篤、山川哲雄、伊良波繁雄、中山耕一、太田達見：電食試験により鉄筋を強制的に腐食させたRC柱の弾塑性挙動に関する実験的研究(その1 電食試験) (その2 加力実験) (その3 理論解析), 日本建築学会研究報告九州支部第35号・1, 構造系, pp.433-pp.444
- 2) 山川哲雄、宮城純子：沖縄で自然暴露により損傷した高軸力下のRC柱の弾塑性挙動, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.20 No.2, pp. 901-906, 1998.7
- 3) 長嶺希、山川哲雄：沖縄で自然暴露により損傷したRC柱の正負繰り返し水平加力実験, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.20 No.2, pp. 889-894, 1998.7
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説, 日本建築学会, pp 44-99, 1997.4
- 5) 岸谷孝一、西沢紀昭他編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ塩害 (I), (II), 技報堂出版, pp.103-111, pp.33-39, 1986.5, 1991.4
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の韌性保証型耐震設計指針(案)・同解説, pp.114-126, 1997.7