

論文 沖縄の海岸で自然暴露した塩害損傷RC柱の耐震性能実験

上松 茂^{*1}・山川 哲雄^{*2}・仲程 陽香^{*3}・山田 義智^{*4}

要旨：本研究は東シナ海に面した沖縄の海岸でRC柱試験体の自然暴露試験を行い、塩害による鉄筋の腐食が引き起こすコンクリートのひび割れ、破断強度や破断ひずみの低下などが耐震性能の劣化に及ぼす影響を究明することを目的としている。暴露試験の結果、水セメント比が大きく、強度の低いコンクリートには塩分が浸透しやすく、補強筋の劣化も大きい。自然暴露試験で腐食した帯筋が耐震加力実験で破断すると、曲げ破壊先行試験体といえどもせん断破壊が生じやすくなる。そのために、鉄筋腐食の進行は耐震性能における強度の低下よりも靱性の低下を引き起こしやすいことがわかった。

キーワード：自然暴露，塩害，腐食，耐震性能，RC柱，耐久性能，水セメント比

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ために、沖縄の海岸で継続的に自然暴露試験を行い、塩害で損傷したRC柱試験体を用いて、一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平加力実験を行ってきた¹⁾。その目的とするところは、塩害による鉄筋の腐食の進行に伴い、耐震性能がどのように低下していくのかを解明することにある。

塩害により鉄筋の腐食が進むと、鉄筋の強度と伸び能力が著しく低下して破断しやすくなる。そのため、靱性に富んだ曲げ破壊性状を有するRC柱でさえも、帯筋の破断によりせん断破壊性状に変化し、変形能力を喪失しやすくなる。したがって、塩害による鉄筋腐食の進行が耐震性能の劣化にどのような影響を与えているかを明らかにすることは、RC構造物の耐久性の限界を耐震性の観点から論じる上で重要である。

そこで、本研究では塩害により腐食した主筋・帯筋の劣化とコンクリートのひび割れが、RC柱の水平耐力と靱性の低下にどのような影響を及ぼすのかを検証することを研究目的とする。ここでは、1999年より東シナ海に面した沖縄の西

海岸で自然暴露試験を開始した試験体(Lシリーズの3体)と、これと暴露場所および、試験体形状が同じ既発表の自然暴露試験体(NCシリーズの3体)¹⁾の合計6体の試験体を用いて、鉄筋腐食による鉄筋性能の劣化とその要因、耐震加力実験による耐震性能上の劣化、そして腐食による鉄筋性能の劣化と耐震性能上の劣化の相関関係を明らかにしようとするものである。

2. 試験体概要

Table 1には、試験体概要一覧を示す。ここで示すように、試験体は1辺が250mmの正方形断面を有するせん断スパン比2.0のRC柱試験体である。これらの試験体はLシリーズとNCシリーズからなり、暴露時期は異なるが暴露期間はほぼ同じである。両シリーズで大きく異なるのは水セメント比、コンクリート強度とせん断補強筋比である。Lシリーズは水セメント比は高く、コンクリートの強度も低い劣悪なコンクリートと言える。しかも、帯筋が最小帯筋量は満足するものの、曲げせん断破壊タイプで靱性をあまり期待できない柱試験体になっている。これに比較してNCシリーズはコンクリート強度も高

*1 琉球大学大学院 理工学研究科 研究生 (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 工博 (正会員)

*3 琉球大学大学院 理工学研究科 環境建設工学専攻 (正会員)

*4 琉球大学 工学部環境建設工学科助教授 博士(工学) (正会員)

Table 1 Sound and exposure test RC column specimens

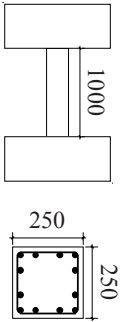
	L series			NC series			
	Sound specimen	Exposure test specimen		Sound specimen	Exposure test specimen		
Specimen	C02L-L0	C03L-L2	C04L-L3	C01L-NC0	C01L-NC1	C02L-NC2	
σ_B (MPa)(Test)	20.3	21.5	19.2	35.8	38.3	39.6	
Casting date	1999.8.12			1997.5.27			
Exposure period (year)	-	1999.9.15~ 2003.8.11 (3.9)	1999.9.15~ 2004.7.14 (4.8)	-	1997.7.11~ 2001.9.27 (4.2)	1997.7.11~ 2002.7.6 (5.0)	
Loading test date	2002.7.30	2003.8.27	2004.8.16	2001.9.28	2001.9.29	2002.7.27	
Common details	Hoop:3.7 ϕ -@41 ($p_w=0.21\%$) σ_B (4 weeks)=15.5MPa Cover thickness=19.3mm, W/C=83%			Hoop:D6-@30 ($p_w=0.85\%$) σ_B (4 weeks)=29.8MPa Cover thickness=17mm, W/C=63%			
	Rebar:12-D10 ($p_g=1.37\%$), M/(VD)=2.0,			N/(bD σ_B)=0.2			

Table 2 Properties of reinforcement

		a(cm ²)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	E_s (MPa)
L series	Rebar D10	0.71	411	0.21	197
	Hoop 3.7 ϕ	0.11	333	0.17	200
NC series	Rebar D10	0.71	389	0.23	181
	Hoop D6	0.32	388	0.22	184

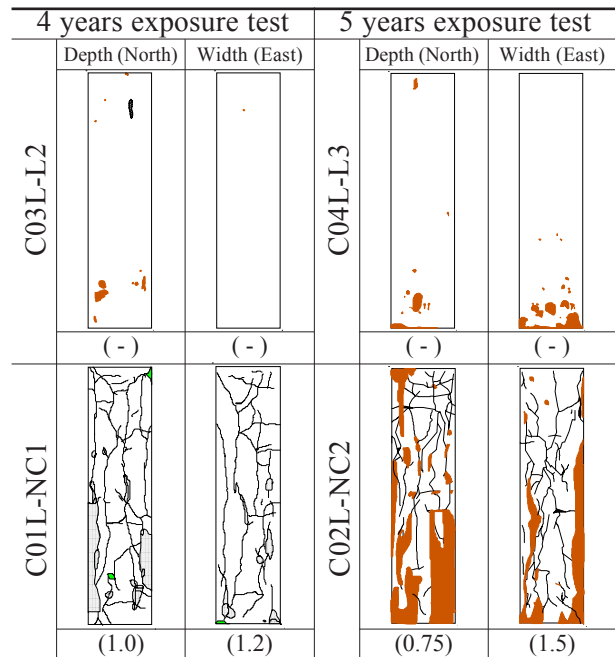
Notes: a=cross section area, σ_y =yield strength of steel, ϵ_y =yield strain of steel, E_s =modulus of elasticity.

く、水セメント比も通常の値に近い普通のRC柱試験体である。しかも、せん断補強筋比が大きく、曲げ破壊先行の試験体である。Table 2には健全時の鉄筋の形状および力学的特性を示す。

Lシリーズは水セメント比が83%と非常に高いため、水セメント比63%のNCシリーズに比べかぶり厚さはやや大きい、コンクリート強度が小さく、鉄筋の腐食が進行しやすい試験体である。水セメント比83%という高い水セメント比を用いた理由は、沖縄において1971年以前のRC造建築物を想定した耐震補強実験を行うために、コンクリート強度を20MPa程度に抑えるためである。また63%の水セメント比は、実際に多く使用されているRC造建築物の水セメント比として採用した。

3. 自然暴露試験

Lシリーズの暴露試験体は1999年9月から2003年8月および2004年7月までの約4年から5年間、沖縄の東シナ海に面した西海岸で自然暴露試験を行った。なお、既発表のNCシリーズ暴露試験体は1997年7月から2001年9月および2002年7月までの約4年から5年間、Lシリーズと同じ場所で自然暴露試験を行った。両シリーズの基準(健全)試験体は構造実験棟内に保存した。



Note: Values within the brackets are maximum crack width (mm).

Fig. 1 Crack patterns under exposure test

Fig. 1に暴露期間終了後に観察したひび割れの状況を、各暴露試験体ごとに示す。図中の塗り部分は、コンクリートに錆汁が発生している箇所を表している。

NCシリーズは経年変化とともにひび割れが進行しているが、Lシリーズではひび割れがほとんど発生せず、錆汁が流れ出ているだけである。これは、Lシリーズ(W/C=83%)のほうが、NCシリーズ(W/C=63%)に比べて水セメント比が高く、密実でないコンクリートであるため、腐食成生物が外部に染み出しやすく、そのため腐食成生物による膨張圧が高くなり、ひび割れ発生に至らないためだと考えられる²⁾。しかし、外部からの塩分浸透に関しては、Lシリーズ試験体がNCシリーズ試験体に比較して格段に大き

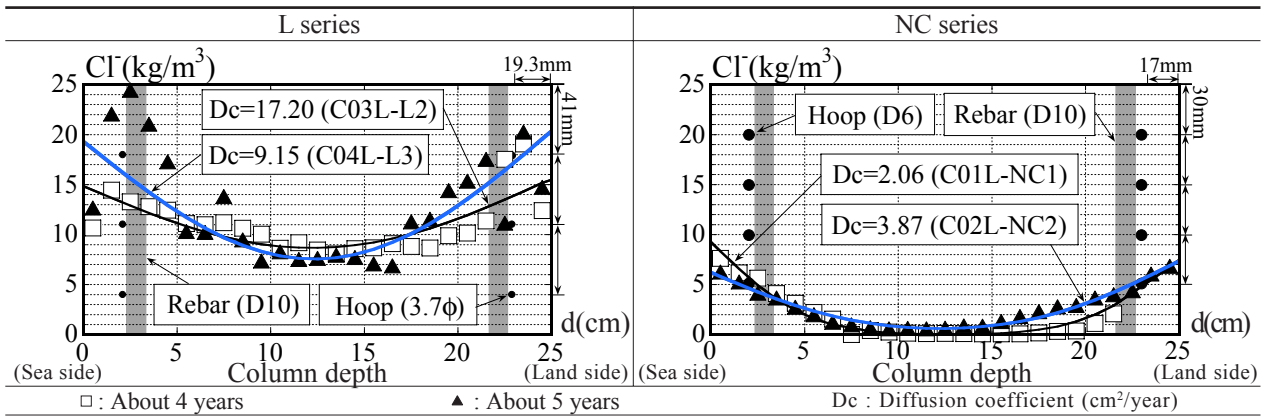


Fig. 2 Chloride content in monitor column

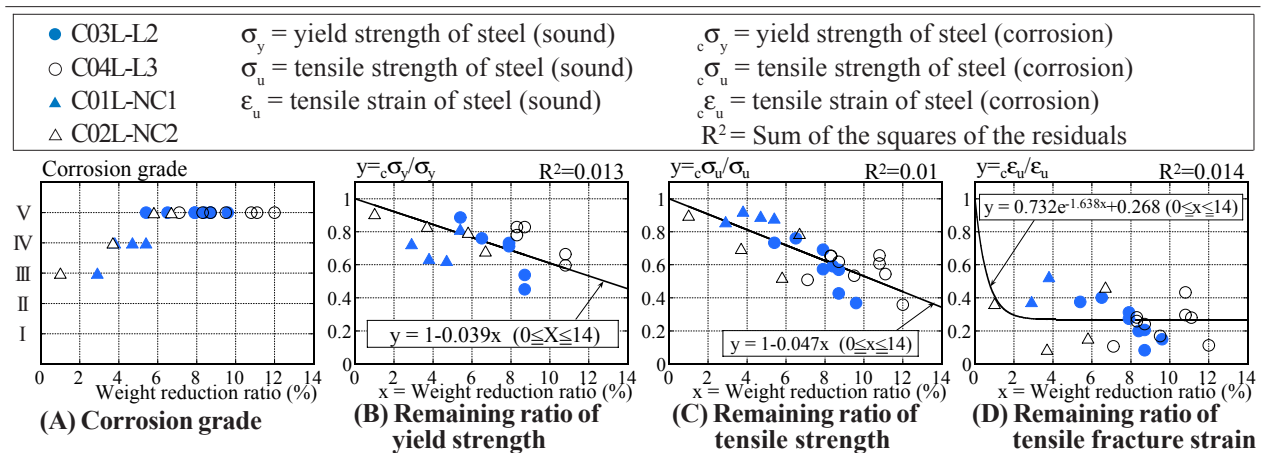


Fig. 3 Remaining ratio versus weight reduction ratio of corroded steel bars

Table 3 Corrosion grade of steel bar³⁾

グレード	評価基準
I	腐食がない状態。または表面にわずかな点錆が生じている状態。
II	表面に点錆が生じている状態。
III	点錆がつながって面錆となり、部分的に浮きが生じている状態。
IV	浮き錆が広がって生じ、コンクリートに錆が付着し、断面積で20%以下の欠損が生じている箇所がある場合。
V	厚い層状の錆が広がって生じ、断面積20%以上を超える著しい欠損を生じている箇所がある状態。

いことが、Fig. 2 よりわかる。

各自然暴露試験体に対応させた、材料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(100φ×250mm)を採取し、含有塩分量を全塩分量で測定した。Fig. 2にその結果を示す。通常のコンクリートを用いたNCシリーズ試験体では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70~90mm以上深くなると塩分の影響は少なくなっている。Lシリーズでは試験体内部でも塩化物総量規制値(Cl⁻ = 0.3kg/m³)³⁾の20倍から30倍程度の塩化物が含有されていることになって

いる。図中の各実線は拡散方程式⁴⁾により、試験体両表面の表面塩分濃度と見かけの拡散係数を未知数に、修正シンプレックス法⁵⁾にて逆解析を行った結果を用いて、実測値を近似したものであり、その際に得られた拡散係数および両表面塩分濃度を図中に示す。NCシリーズは表面濃度が6.2~9.3(kg/m³)であり汀線付近の値として文献4)に比べて妥当な値と判断される。また拡散係数も2.1~3.9(cm²/year)であり文献4)の計算式からも妥当と考えられる。一方、Lシリーズは水セメント比が大きいため表面塩分濃度、拡散係数ともNCシリーズに比べ高い値である。

塩害による鉄筋の腐食が鉄筋の力学的性能におよぼす影響を調べるために、各自然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)から腐食した鉄筋(主筋:D10,長さ42cm)をはつりだし、腐食グレード、質量の減少率、降伏点強度、引張強さ、破断時の伸び率などを測定した。腐食グレードの測

定は Table 3 に示す判定基準³⁾に沿って行った。すべての鉄筋には孔食が生じており、腐食グレードはNCシリーズはIII, IVとVであり, LシリーズについてはすべてVであった。腐食すると降伏点強度が下がるだけでなく、降伏点が明確に現れなくなる。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の勾配に対して平行線を引き、これと曲線の交わった点を降伏応力とした。また、引張強度は最大強度時の引張力を公称断面積で除した値である。

Fig. 3はこれらの試験結果を腐食鉄筋の質量減少率と腐食グレード、降伏強度残存率、引張強さ残存率、伸び(破断時ひずみ)残存率との関係について整理したものである。各残存率は腐食した鉄筋の試験結果を健全な2本の鉄筋の試験結果(平均値)で除した値である。グラフ中には、腐食鉄筋に関する材料試験結果の傾向を表示するために、回帰式をのせた。ここで、降伏強度および引張強さの残存率は質量減少率の1次式で回帰し、伸び残存率に関しては指数関数で回帰した。Fig. 3より降伏点強度、引張強さ、伸び能力ともに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は約6割から9割低下しており、劣化が著しい。

4. 耐震加力実験と解析的検討

加力実験はすべて一定軸力比0.2のもとで、正負繰り返し水平加力実験を建研式加力装置で行った。部材角R=0.5%から0.5%の増分で3回ずつ繰り返し、3.0%まで強制変形を与えて、それでも靱性能が期待できる場合にはR=4.0%から5.0%を1回ずつ正負繰り返した。Fig. 4に加力実験により進展した各試験体のひび割れ状況を示す。Fig. 5には試験体のせん断力Vと部材角R、およ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。

Lシリーズのうち、健全な基準試験体C02L-L0は曲げひび割れが最初に生じ、帯筋破断と同時にせん断ひび割れが生じた。暴露試験体はいずれも、帯筋が破断と同時にせん断ひび割れが生

じるとともに、せん断破壊している。その中でC03L-L2はR=1.5%の正負1回の繰り返しを終了後、2回目の正負繰り返しで負側の1.5%にむかう途中せん断破壊に至っている。しかし、さらに1年暴露期間が長いC04L-L3は最初のR=1.5%にむかう途中でせん断破壊している。

NCシリーズのうち、健全な基準試験体C01L-NC0は帯筋が多量($p_w=0.85\%$)に配筋されているので、靱性に富んだ曲げ破壊を示している。このことは、Fig. 5に示した ϵ_v -R曲線からもいえる。しかし、暴露期間が長くなるにつれて柱表面により近い帯筋が腐食のため破断して、せん断破壊が発生した。

加力実験で得られたV-R曲線に、AIJ靱性指数式⁶⁾で計算した曲げ強度とせん断強度を書きこむ(Fig. 5参照)。暴露試験体に関しては、鉄筋の腐食量や降伏点強度が正確に把握できないので、計算はすべて健全な基準試験体での材料試験結果を参考までに用いる。計算結果から暴露無しの基準試験体はLシリーズではせん断破壊

L series					
Sound specimen		Exposure test specimen			
C02L-L0		C03L-L2		C04L-L3	
Depth	Width	Depth	Width	Depth	Width
R=3.0%		R=1.5%		R=1.5%	
NC series					
Sound specimen		Exposure test specimen			
C01L-NC0		C01L-NC1		C02L-NC2	
Depth	Width	Depth	Width	Depth	Width
R=5.0%		R=-2.5%		R=-1.5%	

Fig. 4 Crack patterns by cyclic loading test

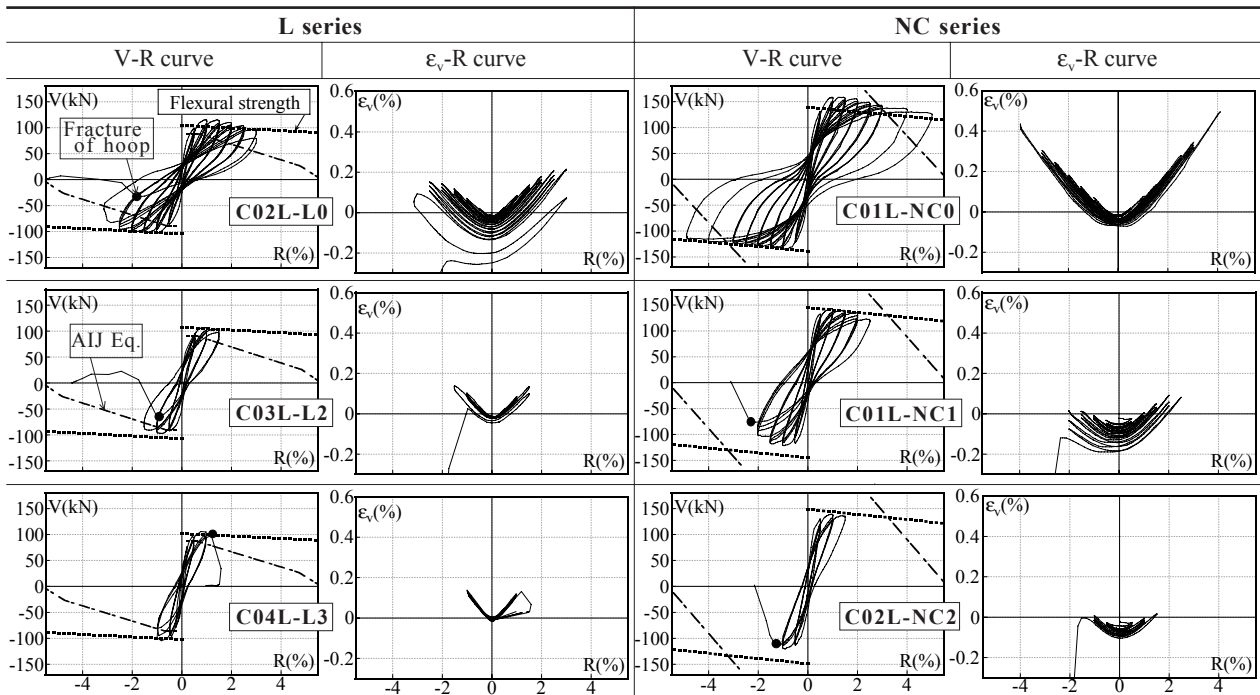


Fig. 5 Measured V-R and ε_v -R relationship

先行で、NCシリーズでは曲げ破壊先行試験体である。しかし、実験結果ではLシリーズが曲げ破壊先行のせん断破壊試験体である。NCシリーズは計算通り、実験でも曲げ破壊試験体である。

これらの試験体はいずれも鉄筋の腐食が進展すると、一定軸力下の正負繰り返し水平加力実験でコンクリート表面に近く、主筋より径が小さい帯筋が先に破断して、曲げ破壊先行試験体でもせん断破壊を起こす。これは Fig. 3 にも示したように、鉄筋が腐食すると伸び能力が極度に低下し、破断しやすくなるからである。せん断余裕度が大きく、曲げ破壊が完全に保証されたRC柱試験体でも帯筋の腐食破断により、突然せん断破壊に移行するので注意が必要であることを、これらの実験結果は示唆している。なお、NCシリーズの軸ひずみ ε_v が Fig. 5 に示す ε_v -R 曲線で、腐食が進行すると圧縮側に転じている理由はおそらくコンクリートの腐食ひび割れが大きく、コアコンクリートで軸力を支持していることになるからと思われる。

5. 耐久性能と耐震性能との関係

鉄筋の腐食進行と耐震性能との相関関係を図化し、検討する。

Fig. 6 は各試験体ごとに暴露期間と水平耐力 V_{max} 、靱性率 μ と累積エネルギー吸収量 W などの耐震指標との関係を示したものである。暴露期間の長短が靱性率や累積エネルギー吸収量などの靱性の低下に及ぼす影響が、強度の低下に及ぼす影響より、大きいことがわかる。すなわち、暴露時間の増加に伴う鉄筋腐食の進行はRC柱の耐震性能としての強度より、靱性の劣化に大きな影響を与える。しかし、Fig. 6 では暴露期間1, 2, 3年のデータが無いので、この間が直線補間できるのか、または途中で急激に変化するのかなどは今後の研究課題である。

Fig. 7 はRC構造物の耐震性能と腐食鉄筋の特性との関係を示す。

この図の横軸には、腐食鉄筋に関する耐久性能の指標として、健全な鉄筋重量に対する腐食鉄筋の重量比 (c_g/g)、健全な鉄筋強度に対する腐食鉄筋の強度 (c_σ/σ)、および健全な鉄筋の破断ひずみに対する腐食鉄筋の破断ひずみ ($c_{\varepsilon_u}/\varepsilon_u$) を採用する。なお、ここでは、Fig. 3 に示した腐食鉄筋のデータが同じ試験体のなかでも大きくばらついているので、その平均値を各試験体ごとに整理して用いている。一方、縦軸には、健全な基準RC柱試験体に対する暴露試験体の耐震

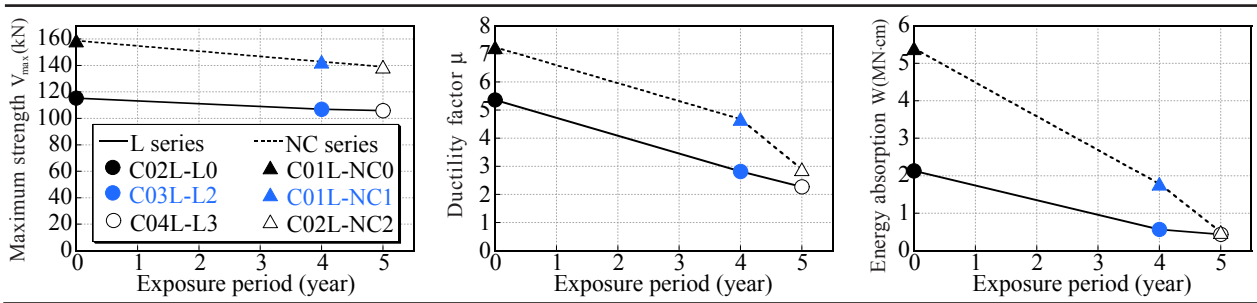


Fig. 6 Seismic performance versus exposure period

性能の指標として、Fig. 6と同様に柱の水平耐力 (cV_{max}/V_{max})、靱性率 ($c\mu/\mu$) および累積エネルギー吸収量 (cW/W) を各々採用する。Fig. 7でも Fig. 6と同様に、強度より靱性率や累積エネルギー吸収量の劣化が大きい。Fig. 7で、腐食量はLシリーズが若干大きいにもかかわらず、NCシリーズの耐震性能の劣化がLシリーズよりやや大きい理由は、カバークンクリートの損傷が大きいと考えられる。

6. まとめ

- (1) 水セメント比 83% の L シリーズは塩分が試験体内部に塩化物総量規制値 (0.3kg/m^3) の約 30 倍も浸透し、鉄筋の腐食グレードは全て V を示したがひび割れはほとんど生じなかった。一方、水セメント比 63% の NC シリーズは塩分が柱表面で塩化物総量規制値の約 20 ~ 30 倍浸透しているが、その量は内部にいくにしたがって少なくなっている。また、鉄筋の腐食グレードは III ~ V を示し、カバークンクリートのひび割れ幅は 0.75 ~ 1.5mm あった。
- (2) 腐食により鉄筋の力学的性能は低下し、中でも伸び能力の低下は著しく、最大で約 90% も低下する。自然暴露試験の結果、帯筋の破断が起きやすくなり、強度の劣化よりエネルギー吸収性能を含めて靱性の劣化が著しい。NC シリーズの基準試験体は計算上及び加力実験でも靱性に富んだ降伏と履歴曲線を示しているが、暴露試験体の加力実験では腐食した帯筋が破断し、 $R=1.5 \sim 2.5\%$ でせん断破壊した。

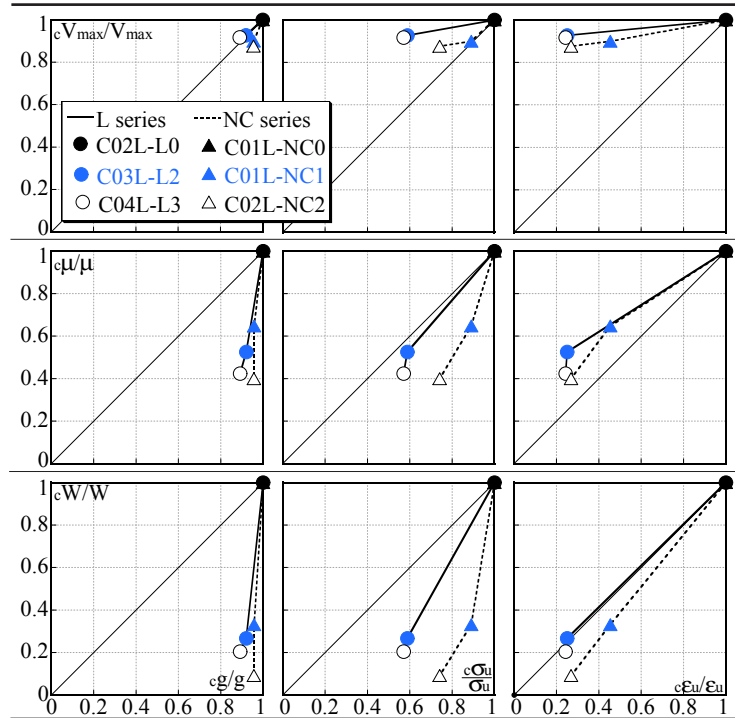


Fig. 7 Seismic performance versus deterioration of steel reinforcement

謝辞：自然暴露試験体の運搬などについて、(有) 榮商店（社長・伊禮榮）に厚く感謝します。

参考文献：

- 1) 新里洋基, 山川哲雄, 森下陽一, 玉寄幸直：自然暴露により損傷した RC 柱の耐震性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.259-264, 2003
- 2) 榊田佳寛ほか：塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する実験, 日本建築学会構造系論文報告集, No.435, pp.19-27, 1992.5
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性・診断および補修指針（案）・同解説, 日本建築学会, 1997.4
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書, 2002
- 5) 大野公一, 石田俊正：化学数学, マグロウヒル出版株式会社, 1992
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 日本建築学会, 1999