

論文 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

長嶺希*¹・山川哲雄*²

要旨：沖縄の海岸で約4年間にわたり自然暴露試験を行い、鉄筋の腐食によるかぶりコンクリートのひび割れなど損傷をきたしたRC柱の耐震性能を検証する一つの方法として、一定軸圧縮応力が零に近い ($0.02\sigma_B$) 状態で正負繰り返し水平加力実験を行った。その結果、暴露RC柱試験体は鉄筋の腐食により鉄筋の伸び能力に欠け、一部の鉄筋が引っ張り破断し、じん性能力がやや低下する傾向にあることは否定できない。しかし、鉄筋腐食によるひび割れ状況から推察されるほどには耐震性能上の劣化は思ったほどみられないこともわかった。
キーワード：自然暴露試験, 腐食, 塩分量, 耐震性能, 耐久性能, 横拘束効果

1. はじめに

塩害により損傷をうけたRC造建築物の耐震性能を検証することを目的に、最も重要な耐震要素の一つである柱に関して電食試験体や自然暴露試験体を用いて一定軸圧縮力下 ($0.35\sigma_B$) の正負繰り返し水平加力実験を行い、その比較を一部発表したり。その結果、いずれの試験法であれ、耐久性能上憂慮されるRC柱試験体でも耐震性能上の劣化は軽微か、試験体によってはむしろ向上する場合もあった。このような実験結果が、中子筋付き帯筋を多めに配筋し、しかも高軸力の影響で横拘束効果が増大したことに起因しているかどうかを検証するために、同じ配筋で横拘束効果がほとんど期待できない場合の加力実験を行うことも必要かと思われる。

そこで、耐久性能上憂慮されるような損傷をきたした類似のRC柱試験体を製作するために、同一の形状及び配筋で1993年から沖縄の海岸で約4年間にわたり自然暴露試験を行った。これらの自然暴露RC柱試験体を用いて、帯筋による横拘束効果がほとんど期待できず、塩害により腐食した主筋の力学特性が引っ張り鉄筋としてRC柱の復元力特性に直接反映されやすい軸圧縮力が0に近い状態（加力装置の自重のみで $0.02\sigma_B$ ）で正負繰り返し水平加力実験を行い、

耐震性能の劣化の有無について検討する。

2. 自然暴露試験

1993年より、より現実に近い腐食を起こさせるために東シナ海に面した沖縄の海岸で約20体のRC柱試験体の自然暴露試験を開始した。その中で今回用いたRC柱試験体 ($250 \times 250 \times 750\text{mm}$) の詳細は、せん断スパン比 $M/VD=1.5$ 、主筋比 $P_g=1.37\%$ 、帯筋比 $P_w=0.85\%$ である (Table 1 参照)。ただし、自然暴露試験体の中には腐食を促進させるためにコンクリート打設時に練り混ぜ水に $\text{NaCl}=3.0$ 重量% 水溶液を用いた試験体も含まれており、これは 1m^3 当たりのコンクリートに含まれる塩分量 $\text{NaCl}(\%)$ に換算すれば約 0.25% となる。暴露試験体は暴露1年後にひび割れを補修し、塗膜した後さらに暴露を続けており、これらの詳細はTable 1に示すとおりである。Table 1には暴露試験体の耐震性能を比較検証するために用意した基準となるべき健全なRC柱試験体も併せて示す。

自然暴露試験体については暴露期間中に観察したひび割れ図をFig.1に示す。コンクリート打設時に鉄筋の腐食を促進させるために食塩を含有させたRC柱試験体のひび割れが、その本数や幅ともに大きい傾向にある。また、暴露1年後に

* 1 琉球大学大学院 工学研究科環境建設工学専攻 (正会員)

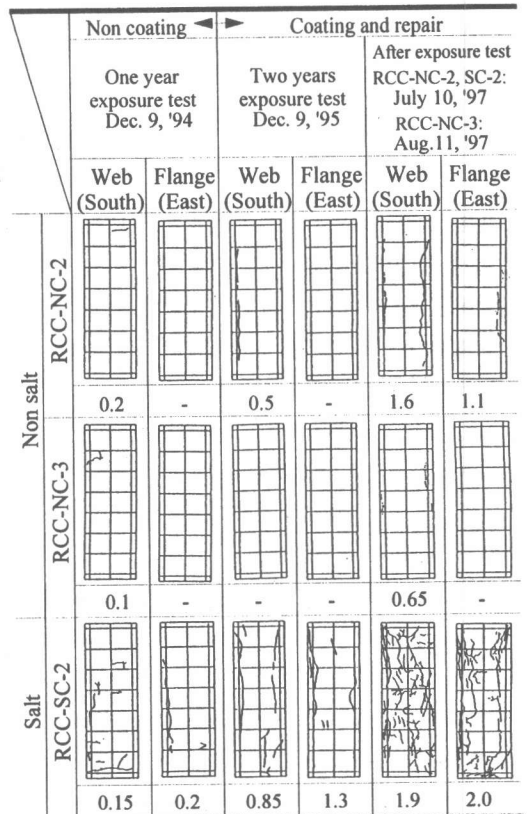
* 2 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 工博 (正会員)

Table 1 Column specimens

Specimen	Sound specimen	Exposure test specimens		
		Starting date of exposure test Dec.10,1993		
750	RCC-NN-7	RCC-NC-2	RCC-NC-3	RCC-SC-2
		Non salt	Salt	
Casting date	Jun.6,1997	Oct.23,1993		Oct.28,1993
Repair and coating date Dec.10, 1994	—	Blast furnace slag paste after injection of lithium nitrite	— No cracks	Injection of epoxy resin paint
Coating	—	(A)Lithium nitrite + urethane resin paint (B)Urethane resin paint	(A)Lithium nitrite + silicone-acrylic copolymer emulsion paint (B)Silicone-acrylic copolymer emulsion paint	(A)Lithium nitrite + fluorocarbon resin paint (B)Fluorocarbon resin paint
Exposure test finish date	—	July 10, 1997	Aug.11, 1997	July 10, 1997
4 weeks cylinder strength σ_B (MPa)	34.9	31.3		31.6
Cylinder strength σ_B at loading test (MPa)	40.7	43.3		45.1
Loading test date	Aug.9, 1997	Aug.6, 1997	Aug.12, 1997	Aug.5, 1997
Section	Longitudinal reinforcement:12-D10, $P_g = 1.37\%$ Sound test : ($f_y = 389$ MPa, $E_s = 180.9$ GPa) Exposure test : ($f_y = 396$ MPa, $E_s = 176.3$ GPa) Transverse reinforcement :D6 -@60, $P_w = 0.85\%$ Sound test : ($f_y = 388$ MPa, $E_s = 184.1$ GPa) Exposure test : ($f_y = 388$ MPa, $E_s = 177.1$ GPa)			

ひび割れを補修し、塗膜しても、1年以上の暴露期間が経過するとまたひび割れが生じ、かつ拡大する傾向にあるが、その中でもRC柱試験体RCC-NC-3(無塩)のみは含有塩分量が比較的多いにもかかわらず(Fig.2参照)、Fig.1に示すようにひび割れが最も少なかった。これは塗膜材料の種類にも影響を受けていることを示す。

耐震加力実験終了後、RC柱試験体の上部スタブの海側と陸側の2面から、直径100mmのコンクリートコアを抜き出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。海側と陸側では含有塩分量にほとんど差がなく、これらは飛来塩分によるものと推定される。また、飛



Note : Arabic numerals denote maximum crack width (mm)

Fig.1 Crack patterns under exposure test

来塩分の影響が主筋の配筋位置(コンクリート表面から主筋の中心まで28mm)まで十分に及んでいることがわかる。しかし、コンクリート表面から内側に向かって約70mmを超えると、無塩RC柱試験体RCC-NC-2, 3の含有塩分量は総量規制値の0.3kg/m³や、鉄筋腐食危険ラインといわれている0.03%以下に収束し、有塩RC柱試験体RCC-SC-2の塩分含有量は初期塩分含有量にはほぼ等しくなっている²⁾。試験体は生コン会社に発注したコンクリートを用いて製作しているので、このことにより、コンクリートにおける塩分規制が沖縄でも現在は十分守られていることがわかる。

加力実験終了後にAII方式²⁾に基づいて目視により観察した暴露試験体の鉄筋の腐食グレードは、有塩試験体RCC-SC-2がグレードIVとVの混在であったのに対し、無塩試験体RCC-NC-2, 3はコンクリート打設時に腐食促進剤として

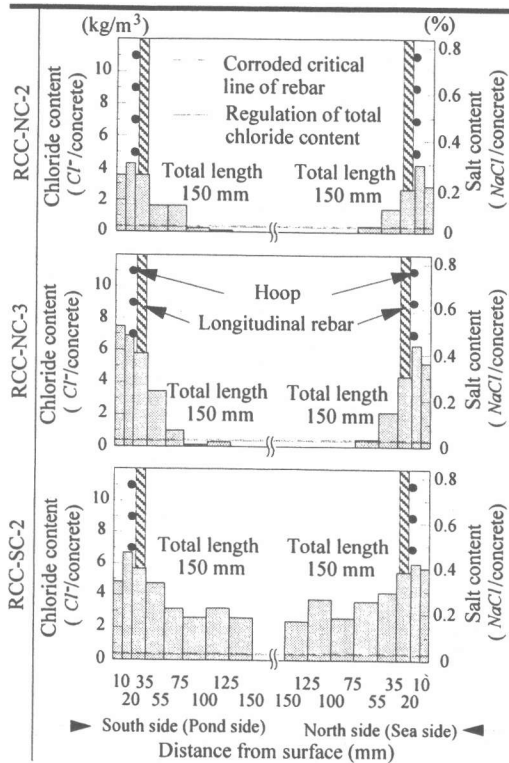


Fig.2 Chloride and salt contents of exposure specimen

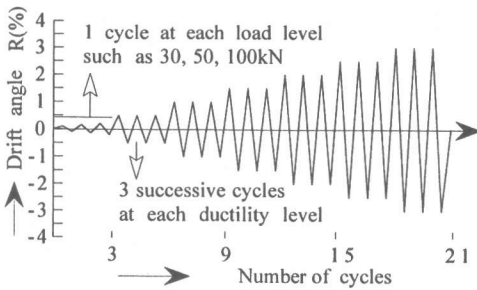


Fig.3 Loading program

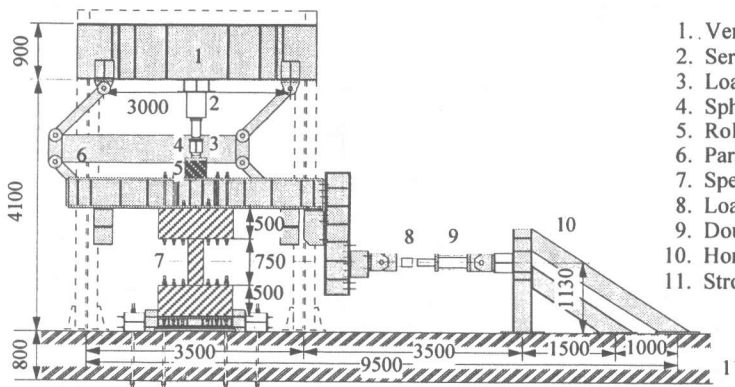


Fig.4 Details of test setup

食塩が混入されていない上に、暴露1年後の補修と塗膜による影響からか、グレードIIIと一部IVが含まれている程度であった。

3. 耐震加力実験

加力装置に建研式加力装置を用い、一定軸圧縮応力が加力装置の自重のみ ($0.02\sigma_b$) の場合について、部材角 $R=3.0\%$ 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 (Fig.3, 4 参照)。

Fig.5に各試験体の加力実験によるひび割れ進展状況を示す。腐食の有無に関わらず柱頭、柱脚に曲げひび割れが発生し、柱中央へのひび割れの進展はなく、曲げ降伏による塑性ヒンジが形成された。加力実験中、又は加力実験終了後に観察された主筋と帯筋の破断や座屈箇所を Fig.6に示す。Fig.6より、塩害により鉄筋の腐食が進行し、かつ孔食などの断面欠損が生じると鉄筋の破断が容易に生じることがわかる。ただし、軸力が零に近くなるほど主筋に生じる曲げモーメントによる引っ張り力が大きくなるので、破断のほとんどは主筋に生じている。しかし、健全なRC柱試験体RCC-NN-7は主筋の座屈こそ生じるものの、鉄筋の破断は本加力実験では一切みられなかった。また、自然暴露試験体は鉄筋の腐食レベルや腐食分布がまちまちであり、そのために鉄筋の破断や座屈位置も対称性がくずれている。その結果、Fig.7に示したV-R曲線

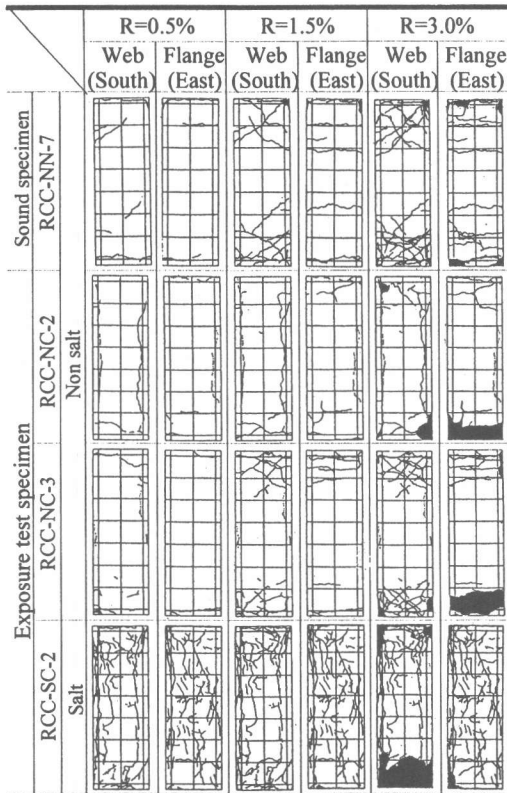
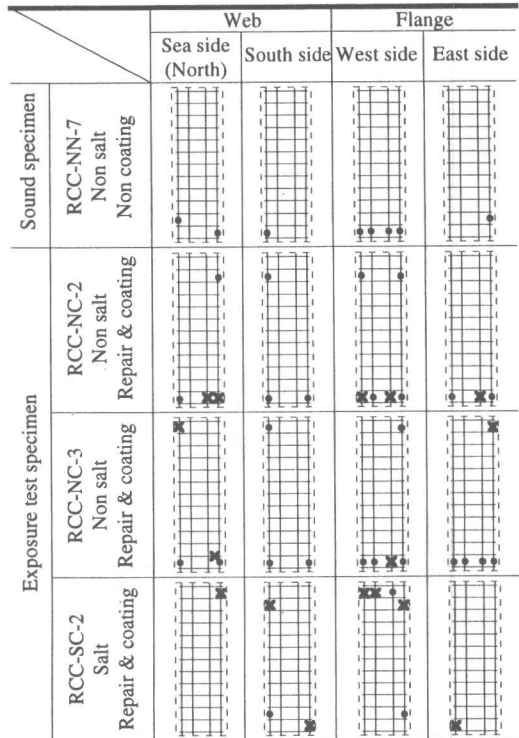


Fig.5 Crack patterns under loading test

や ϵ_v -R曲線で正側加力時と負側加力時の水平耐力や平均軸ひずみに試験体によっては差異を生じている。特に本加力実験では軸力比が小さいため、柱の弾塑性挙動が主筋に支配されやすくなるので、この差異が顕著になってくる。このような腐食レベルや腐食分布の非対称性が、腐食により損傷したRC柱の耐震性能評価をいっそう複雑化し、かつ困難にしている。なお、 ϵ_v は柱材軸上の平均伸縮ひずみである。本加力実験の場合、軸圧縮力が加力装置の自重のみで済ませて小さいので、 ϵ_v はすべて引っ張りひずみとなり、部材角Rが3%の段階で1%（柱材軸方向に7.5mmの伸び）程度の引っ張りひずみが見かけ上生じている（Fig.7参照）。

Fig.8にファイバーモデルを用いて求めた計算結果と実験によって得られたスケルトンカーブとを併せて示し、Fig.9に累積エネルギー吸収量の比較を示す。累積エネルギー吸収量で比較する限りでは、損傷を受けた暴露試験体が健全な



Note: x = fracture, • = buckling

Fig.6 Observations on rebars after loading test

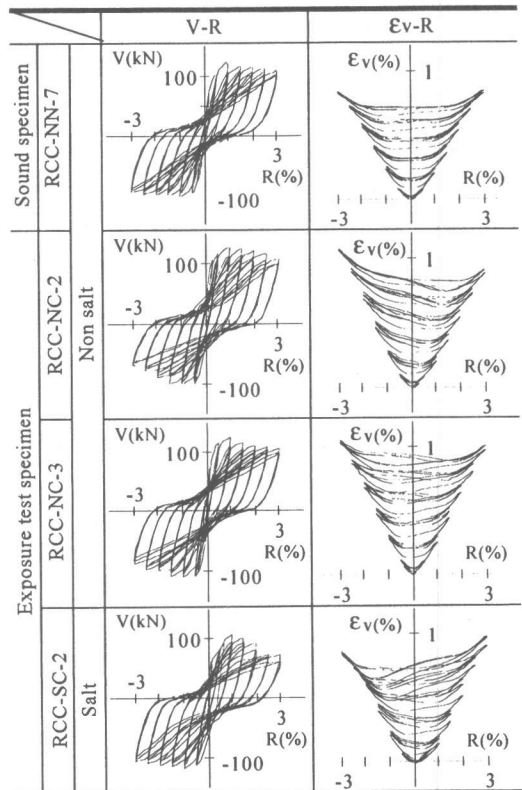


Fig.7 Measured V-R, ϵ_v -R relationships

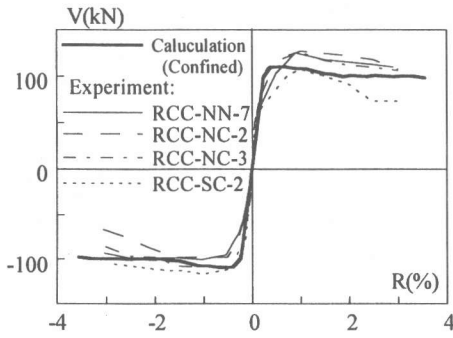


Fig. 8 Measured skeleton curves

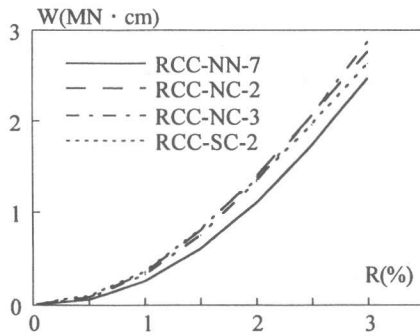


Fig. 9 Accumulated energy absorption

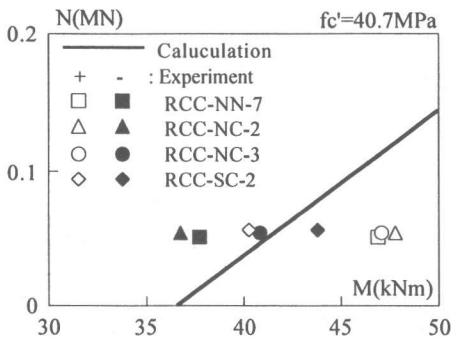


Fig. 10 Calculated N-M interaction diagram and experimental results

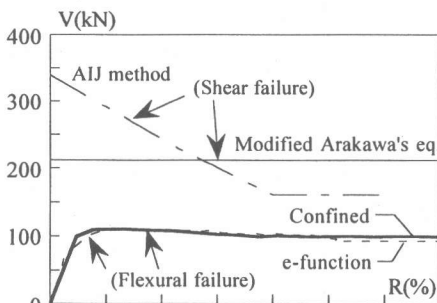


Fig. 11 Comparison on shear strength

基準試験体より耐震性能がやや上回っている。しかし、暴露RC柱試験体は鉄筋の腐食により、鉄筋の伸び能力に欠け、一部の鉄筋が引っ張り破断し、じん性能力がやや低下する傾向にある。

腐食した主筋の力学的性質が直接反映されやすい本実験結果から総括すると、腐食した鉄筋の一部が引っ張り破断し、その結果じん性能力が若干低下する傾向にあるものの、明白な耐震性能上の劣化はほとんど見られないことがわかった。特に部材角が2%以内では鉄筋の破断も皆無であり、暴露RC柱試験体の耐震性能は同じかやや向上するという電食試験結果¹⁾とほぼ同じような傾向にある。腐食した鉄筋が部材角2~3%程度で引っ張り破断しない腐食グレードであれば、すなわちAIJ方式²⁾のグレードIII以下で一部IVが含まれている程度であれば、耐震性能の劣化は無視できるものと思われる。すなわち文献²⁾によれば、ひび割れが生じるレベルは鉄筋の腐食がグレードIV以上と記述されているが、その初期状態までは耐震性能上の劣化はほぼ無視できるものと思われる。

4. 理論的検討

ファイバーモデルを用いてN-M相関曲線やV-R曲線などを求める。一方、せん断強度は修正荒川式やAIJ式⁴⁾で求める。なお、これらの計算法の詳細については文献³⁾を参照されたい。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、健全な基準試験体RCC-NN-7のそれをそのまま用いて計算する。

Fig. 10より、水平耐力に関する実験値は計算値をはさんで多少ばらついているが、これは軸力が小さいため水平耐力が主筋の引っ張り強度で支配され、その主筋の腐食グレードにばらつきが存在するからである。Fig. 11より曲げ強度はせん断強度よりはるかに小さく、計算上曲げ破壊先行が保証されていると言える。

暴露試験体ではFig. 8より、じん性に一部欠けたり、正側と負側でスケルトンカーブに大きな差異がみられる場合もあるので、Fig. 12に示す

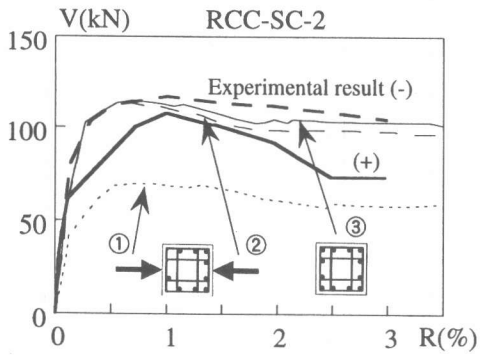


Fig.12 Calculated V-R relationships and experimental results

ように主筋の破断を考慮して、一部主筋を欠損させた簡便計算をファイバーモデルで行った。特に自然暴露試験体 RCC-SC-2 の鉄筋の破断が著しかったので (Fig.6 参照), RCC-SC-2 について検討を行った。Fig.12 から分かるように、実験結果は部材角 R が 2% のあたりから正側加力時の耐力が著しく低下しており、大部分の主筋の破断は部材角 R が 2% のあたりで起こったものと考えられる。よって、この簡便モデルに基づいて求めた計算結果は部材角 R が 2% 以降の実験結果と比較する。ただし、この簡便計算はプログラム上柱頭から柱脚まで同じ配筋になっており、実際の鉄筋の破断状況とは異なる。そのため、実際の実験結果は破断を考慮した場合の加力時 (Fig.12 ① 参照) と、健全なままの加力時 (Fig.12 ③ 参照) との平均値に近くなるのではないと思われる。以上のことを考慮すると、正負加力時の耐力の差異について、この簡便モデルに基づく計算結果は実験結果と一致こそしていないが、その傾向を示していることがわかる。また、主筋が破断すると耐力が低下することから、鉄筋の腐食グレードが IV 及び V と進展している場合には、鉄筋の孔食により破断が容易に起こるため、部材角 R が 2% を超えるような大変形時には注意が必要であると言える。

5. 結論

暴露 RC 柱試験体は、鉄筋の腐食が一様でない

ため、正負側の加力で弾塑性挙動に差異が生じやすい上に、鉄筋の腐食により鉄筋の伸び能力に欠け、一部の鉄筋が引っ張り破断し、じん性能能力がやや低下する傾向にあることは否定できない。しかし、鉄筋の腐食によるひび割れ状況から推察されるほどには耐震性能上の劣化はそれほどみられないこともわかった。ただし、鉄筋の腐食グレードが IV 及び V と進展している場合には、鉄筋の孔食により鉄筋の破断が容易に生じ、耐力が低下するため、部材角 R が 2% を超えるような大変形時には注意が必要である。

また、鉄筋の腐食によりコンクリートにいったんひび割れが生じると、腐食の進展にともないひび割れが容易に増加、拡大しやすくなるので、早めに補修をほどこし、鉄筋の腐食の進展防止とひび割れの拡大防止に努める必要がある。ただし、補修・塗膜してもしばらく時間が経過するとひび割れが再発し、鉄筋腐食が進展するおそれがあるので、補修後の維持・保全にも十分配慮する必要がある。

謝辞：暴露 RC 柱試験体の補修及び塗膜に関しては水谷ペイント (株) と、地元沖縄の特殊防水 (株) にお世話になりました。ここに、関係者各位に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 宮城純子, 山川哲雄, 伊良波繁雄, 太田達見: 沖縄で自然暴露した RC 柱試験体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.19, No.1, pp.895-900, 1997.6
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断及び補修指針 (案)・同解説, 日本建築学会, pp65-99, 1997.4
- 3) 中山耕一, 山川哲雄: FIBER モデルを用いた RC 柱の弾塑性解析に関する一検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.337-338, 1994.9
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 日本建築学会, pp.106-121, 1990.11