

論文 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

山川哲雄*1・宮城純子*2

要旨：鉄筋を電食試験により強制的に腐食させ、ひび割れを多数生じさせた耐久性能上憂慮されるRC柱であっても、耐震性能上の劣化はあまり無いという実験結果が得られた。そこで、暴露試験体でも電食試験体と類似した耐震性能を発揮できるかどうかを検証するために、RC柱試験体の自然暴露試験を1993年12月より3～4年間東シナ海に面した沖縄の海岸で行ってきた。その結果、最大4mmのひび割れ幅などから耐久性能上憂慮される試験体であっても、一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平加力実験を行ってみると、電食RC柱による加力実験結果と同様に耐震性能上の劣化は憂慮されるほどの状況にはなかった。

キーワード：塩分量、靱性、耐久性能、耐震性能、破断、ひび割れ、腐食グレード

1. はじめに

1992年より電食試験で鉄筋を強制的に腐食させ、ひび割れなど損傷を起こさせたRC造耐力壁と柱の一定軸圧縮応力下の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を行ってきた¹⁾⁴⁾。その結果、耐力壁のようにせん断補強筋の横拘束効果が期待できないRC部材では、鉄筋が腐食し、コンクリートにひび割れが生じると耐震性能の劣化が靱性(ねばり)とエネルギー吸収能力に顕著に反映された。しかし、帯筋の密な配筋により横拘束効果が期待できるRC柱においては、鉄筋の腐食グレード(Table 1 参照)がⅢ以下で一部Ⅳ⁵⁾が含まれていても、鉄筋の腐食が耐震性能の劣化に及ぼす影響はきわめて小さいか、むしろやや改善される傾向すら観察された。

そこで、このような電食試験に基づく実験結果が自然暴露RC造試験体でもそのまま言えるかどうかを検証するために、1992年から東シナ海に面した沖縄の海岸で耐力壁の自然暴露を開始し、1993年から柱の自然暴露を順次開始した。そのうちRC柱に関しては1996、7年から耐震加力実験を開始し、これらの実験結果について本論文は整理したものである。

2. これまでの研究経過

2.1 電食RC耐力壁の耐震加力実験^{1),2)}

1992年に電食試験を行ったRC造耐力壁(80×800×950mm)のせん断スパン比は1.425、壁筋(D6-SD295)は縦横10cmピッチで、壁厚8cmにダブル配筋($p_w = 0.8\%$)とし、壁筋のかぶり厚は1.1cmである。また、試験体3体(電食試験体2体、基準試験体1体)の横筋は非閉鎖形で、残りの3体(電食2体、基準1体)は帯筋のように閉鎖形にしてフックを付けている。電食試験体の壁筋の腐食レベルはⅢ～Ⅴ(Table 1 参照)、壁面の最大ひび割れ幅は0.15～0.8mmであった。これら電食試験体4体(総積算電流量832～1595Ah)と健全な基準試験体2体について、一定軸圧縮応力下(約 $0.1\sigma_b$)の正負繰り返し水平加力実験を片持ち柱タイプで行った。その中から代表的な各1体の実験結果をFig. 1に示す。こ

Table 1 Corrosion grade of rebar by AIJ

Grade	State of rebar corrosion
I	Initial stage on starting to rust
II	Partially corroded
III	Completely corroded but non-pitting corrosion
IV	Completely corroded and under 20% loss in section area
V	Completely corroded and over 20% loss in section area

*1 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 工博(正会員)

*2 (株)国建(元琉球大学大学院学生) 工修

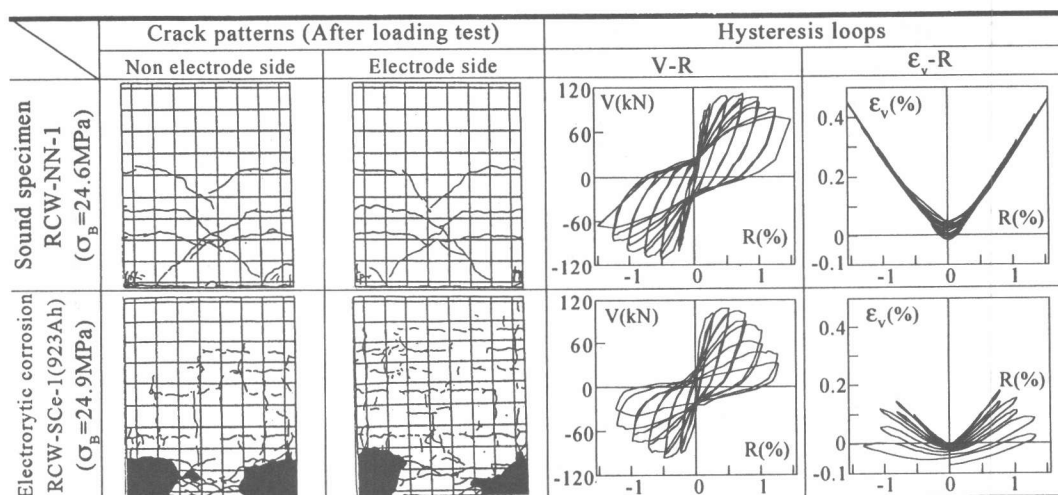


Fig. 1 V-R and ϵ_v -R relationships of RC structural wall by electrolytic corrosion

の図より、電食試験体RCW-SCe-1 (923Ah) の水平耐力は健全な基準試験体RCW-NN-1とほぼ同じであったが、靱性やエネルギー吸収能力などの耐震性能は腐食によりかなり低下したことがわかる。これは非閉鎖形の壁筋がせん断補強筋のみの役割で、横拘束効果を發揮できないからであると推定される。なお、横筋が閉鎖形の耐力壁試験体においても、腐食にともなう耐震性能の劣化は同様に顕著であった^{1), 2)}。

2.2 電食 RC 柱の耐震加力実験^{3), 4)}

1993 年より RC 柱を電食試験によって強制的に損傷させ（総積算電流量 623～3200Ah）、一定

軸圧縮応力下（ $0.22\sigma_B$ と $0.35\sigma_B$ ）で正負繰り返し水平加力実験を建研式加力装置を用いて行ってきた。これら柱試験体（ $250 \times 250 \times 750\text{mm}$ ）のせん断スパン比は 1.5，主筋は 12-D10（ $p_g=1.37\%$ ），帯筋（中子付き）が D6-@60（ $p_w=0.85\%$ ）であり、軸力比が小さい場合は曲げ破壊先行の柱である。電食試験体における鉄筋の腐食グレードはⅢ～Ⅴであり、最大ひび割れ幅は $0.2 \sim 0.4\text{mm}$ 程度であった。軸力比が 0.22 ではどちらも靱性に富んだ曲げ破壊の様相を呈し、差異がほとんど見られなかったが、軸力比が 0.35 に高くなると電食試験体 RCC-SCe-4（1500Ah）が基準試験体 RCC-SN-4 よりやや耐

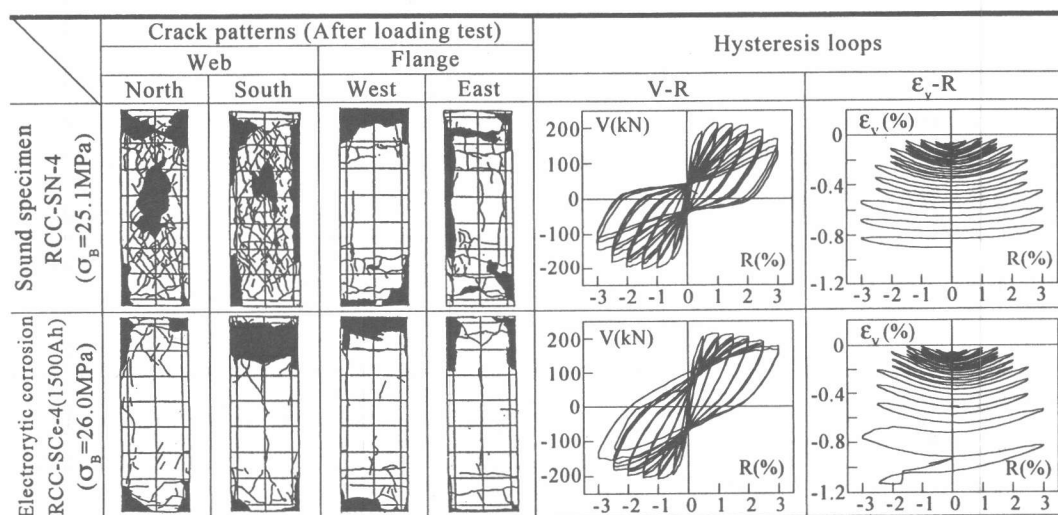


Fig. 2 V-R and ϵ_v -R relationships of RC column ($N/(bD\sigma_B)=0.35$) by electrolytic corrosion

震性能がよいという予想と反した実験結果が得られた (Fig. 2 参照)。ただし、柱の部材角が3%程度になると電食試験体の主筋や帯筋が、孔食の進んだ位置で破断する現象も一部観察された。

3. 自然暴露 RC 柱試験体

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。その中で今回の実験に用いた試験体を Table 2 に示す。試験体の断面形状や高さ (250 × 250 × 750mm) と配筋は全く同一で、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。この健全な基準RC柱試験体がどのような弾塑性挙動を示すかを計算結果^{8), 9)}として Fig. 3 に示す。自然暴露試験体のなかには、腐食

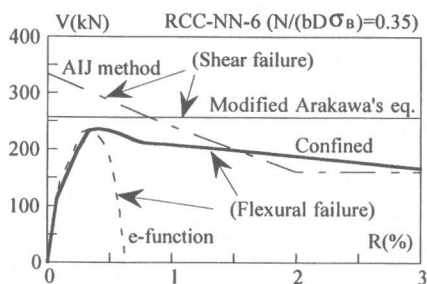


Fig. 3 Comparison on shear strength

Table 2 Column specimens

	Sound	Exposure test		
		Starting date of exposure test: Dec. 10, 93'		
	RCC-NN-6	RCC-NC-1	RCC-SC-1	RCC-SC-3
Specimen (mm)				
	Non salt	Salt		
	Non Repair and coating			Repair and coating
	Casting date: Jun. 6, 97'	Oct. 23, 93'	Oct. 28, 93'	
Cylinder strength σ_g	37.5 (MPa)	36.3	38.3	45.1
Loading test date	July 21, 97'	Oct. 28, 96'	Oct. 30, 96'	Aug. 13, 97'
Section (mm)		Longitudinal reinforcement: 12-D10 ($p_g = 1.36\%$, $f_y = 396\text{MPa}$) Transverse reinforcement: D6-@60 ($p_w = 0.85\%$, $f_y = 388\text{MPa}$)		

Note: RCC-SC-3: Repair and coating date: Dec. 10, 94'

Repair: Blast furnace slag paste after injection of lithium nitrite, Coating: (A) Lithium nitrite + silicone solvent type, (B) Silicone solvent type

を加速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 あたりのコンクリートに含まれる塩分量 $\text{NaCl}(\%)$ に換算すると 0.25% となる。その他に暴露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た試験体もあり、これらの詳細は Table 2 に示す。また、暴露試験体の耐震性能を比較検証するための健全な基準試験体も併せて示す。

暴露期間中に観察したひび割れ図を Fig. 4 に示す。塩分を含有させた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年後にひび割れを補修し、塗膜したRC柱試験体でも、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。しかし、電食試験体は前述のようにひび割れ幅が自然暴露試験体のそれより一般的に小さいようである。

耐震加力実験終了後、RC柱試験体に上部スタブから、直径100mmのコンクリートコアを抜き

	One year exposure test Dec. 9, 94'		Two years exposure test Dec. 9, 95'		After exposure test NC, SC-1: Oct. 21, 96' SC-3: Aug. 11, 97'	
	Web	Flange	Web	Flange	Web	Flange
RCC-NC-1						
	-	0.4	0.3	1.3	0.55	1.3
RCC-SC-1						
	1.0	0.5	1.8	1.3	4.0	1.7
RCC-SC-3						
	0.5	1.0	1.4	0.2	2.5	0.9

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

Fig. 4 Crack patterns under exposure test

出し含有塩分量を全塩分量で測定した。特に暴露1年後にひび割れを補修し、塗膜したRC柱試験体については、海側と陸側の2面からコアを抜き出し含有塩分量を測定した。飛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Fig. 5よりわかる。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、無塩及び有塩試験体の元来の含有塩分量にそれぞれがほぼ収束している。加力実験終了後に目視により観察した暴露試験体の鉄筋の腐食グレード⁵⁾において、有塩試験体RCC-SC-1、SC-3はグレードIVとVであったのに対し、無塩暴露試験体RCC-NC-1はグレードⅢに加えてⅣが一部混在し、腐食レベルはやや低かった。なお、主筋と帯筋の腐食レベルに関しては顕著な差異は見られなかった。

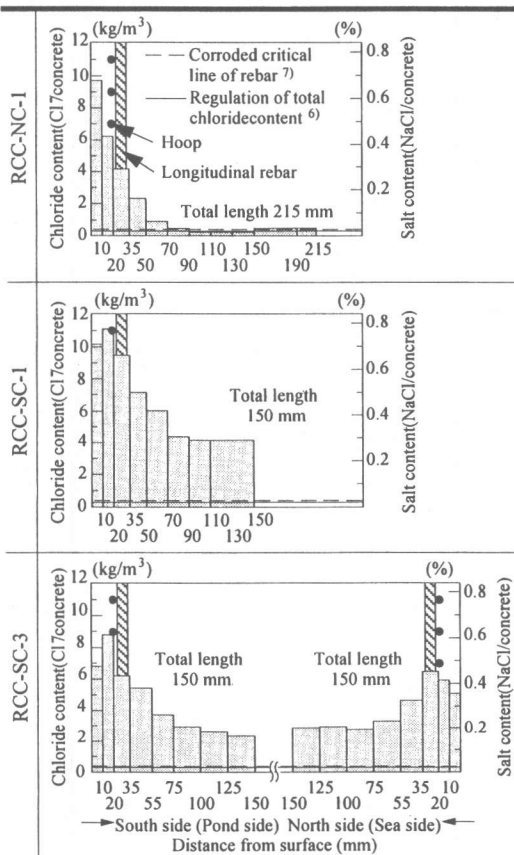


Fig. 5 Chloride or salt content of exposure specimens

4. 耐震加力実験とその検討

加力装置に建研式加力装置を用い、一定軸圧縮応力が $0.35\sigma_b$ の比較的高い場合について、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。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。

Fig. 6に各試験体の加力後のひび割れ状況を示す。試験体RCC-NN-6は主筋に沿った付着割裂ひび割れが顕著に進展し、部材角が3%の最終段階では損傷を受けたかぶりコンクリートが剥落した。塩害により鉄筋が腐食し、ひび割れなど損傷を受けた暴露試験体のうち、無塩試験体であるRCC-NC-1は、加力によるひび割れが柱頭、柱脚に集中し、それ以上の進展はほとんど見られなかった。また、有塩暴露試験体であるRCC-SC-1、RCC-SC-3は、塩害によって生じたひび割れが加力によって進展してひび割れ幅が増大し、部材角が1.5%の段階からかぶりコンク

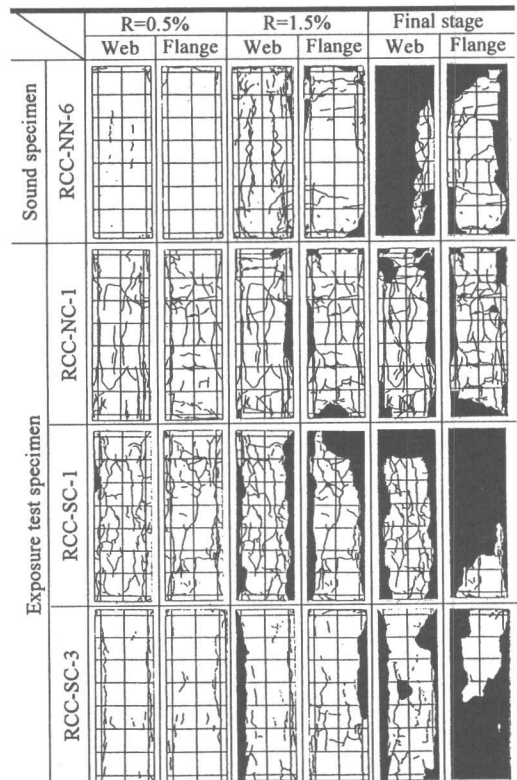


Fig. 6 Crack patterns under loading test

リートの剥落がみられた。特にRCC-SC-3は、部材角2.5%で大部分のかぶりコンクリートが剥落して主筋の座屈と帯筋の破断が起こり、耐力が急激に低下して実験を終了した。

加力実験中、また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. 7 に示す。Fig. 7 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を示している。ただし、本加力実験の場合軸圧縮力が高いため横拘束力による帯筋の破断が多い。その点、健全なRC柱試験体RCC-NN-6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見られなかった。また、同じ柱試験体でも鉄筋の腐食レベルや腐食分布もまちまちであり、腐食によるひび割れは、柱端部より柱中央部により多く発生している傾向にある (Fig. 4 参照)。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。Fig. 8 に加力実験によって得られた V-R 曲線や ϵ_v -R 曲線を示す。なお、 ϵ_v は柱材軸上の平均伸

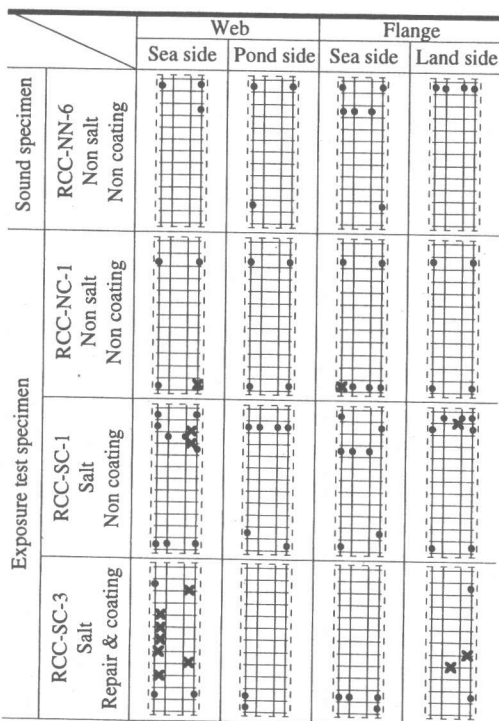


Fig. 7 Observations on steel bar after loading test

縮ひずみである。健全な基準試験体 RCC-NN-6 で圧縮ひずみ ϵ_v が $R=3.0\%$ で大きく増大している理由は、かぶりコンクリートの全面的な剥落 (Fig. 6 参照) と、主筋の座屈によるものと推定される。

Fig. 3 に示した計算結果とともに実験で得られたスケルトンカーブを Fig. 9 に示す。Fig. 10 が累積エネルギー吸収量の比較である。これらの加力実験結果より、損傷を受けた暴露試験体が健全な基準試験体より耐震性能が劣っていると一概には言えないようである。特に無塩暴露試験体 RCC-NC-1 は健全な基準 RC 柱試験体 RCC-NN-6 より耐震性能は明らかに向上している。一方、変形が部材角 $R=2\%$ を超えると腐食鉄筋の破断等により耐震性能が劣化する有塩暴露試験体 RCC-SC-1, SC-3 もある。しかし、腐食していない健全な試験体 RCC-NN-6 でも、鉄筋の破断こそ生じていないが、主筋の座屈は生じ (Fig. 7 参照), Fig. 8, 9 に見られるように $R=2\%$ を超

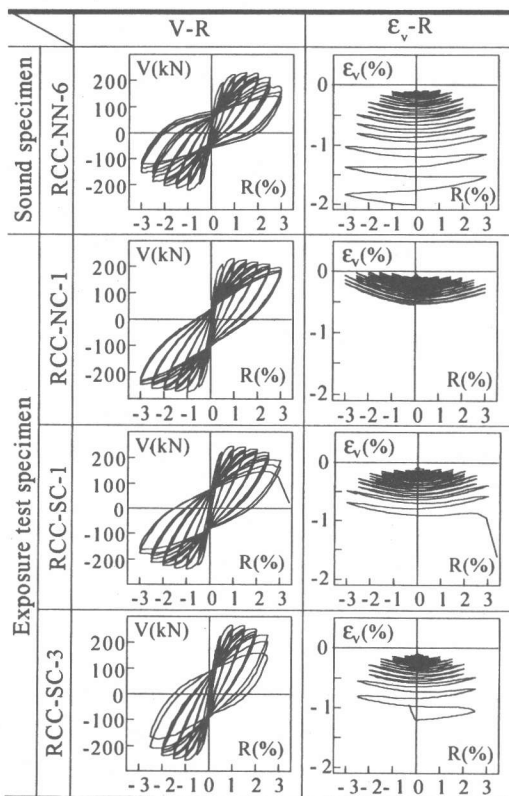


Fig. 8 Measured V-R and ϵ_v -R relationships

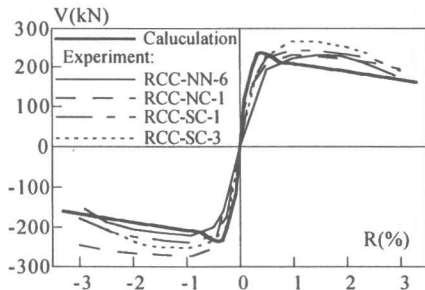


Fig. 9 Measured skeleton curves

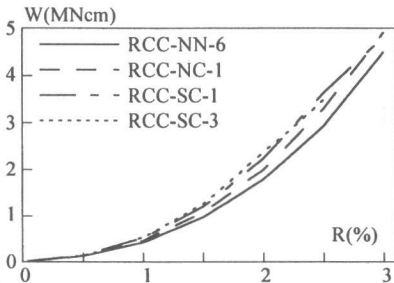


Fig. 10 Accumulated energy absorption

えるあたりから耐力の低下が顕著になっている。

実験結果から総括すると、横補強筋が十分配筋された曲げ破壊先行のRC柱の場合、鉄筋の腐食が日本建築学会方式⁵⁾でグレードⅢに一部Ⅳが含まれている程度であれば、耐震性能が同じか、やや向上するという電食試験結果^{3), 4)}とはほぼ同じような傾向であることがわかった。しかし、ⅣのほかにⅤが含まれ、変形が大きくなってくると軸力比が高い場合腐食した帯筋の破断が見られるようになり、靱性の低下が明白になるので注意が必要である。

5. 結論

暴露試験により、かぶりコンクリートにひび割れが生じ、鉄筋の腐食グレードがⅢ及び部分的にⅣという耐久性上憂慮されるRC柱試験体であっても、正負繰返し水平加力実験を行ってみると、電食RC柱による加力実験結果と同様に、ひび割れ状況から推察されるほどにその耐震性能は劣化していないように観察された。しかし、鉄筋の腐食がⅣ及びⅤと進展している場合には、鉄筋の伸び能力が低下し、かつ鉄筋の破断が容易に生じやすくなる。その結果、柱で

は靱性能力の低下をきたすので、部材角 $R=2\%$ を超えるような大変形時には注意が必要である。また、耐力壁に関しては、横筋に柱における帯筋のような横拘束効果を期待できないため、鉄筋の腐食が即耐震性能の劣化を意味する。

参考文献

- 1) 松永尚凡, 山川哲雄, 伊良波繁雄, 森永繁: 電食試験により腐食したRC耐力壁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.16, No.1, pp. 811-816, 1994.6
- 2) 山川哲雄: An Experimental Study on Deterioration of Aseismic Behavior of R/C Structural Wall Damaged by Electrolytic Corrosion Testing Method, Concrete under Severe Conditions, pp. 1521-1530, 1995.8
- 3) 山川哲雄, 伊良波繁雄, 玉城康哉, 太田達見: 電食試験により腐食したRC柱の耐震性能に関する実験的研究, 日本コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 805-810, 1994.6
- 4) 中山耕一, 山川哲雄, 伊良波繁雄, 枇把田篤: 電食試験により腐食したRC柱の弾塑性挙動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.17, No.1, pp. 883-888, 1995.6
- 5) 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. 65-99, 1997.4
- 6) 日本建築センター: コンクリートの塩化物総量の規制とアルカリ骨材反応対策—建築省住宅局建築指導課長通達の解説—1986年版, 日本建築センター, pp. 46-82, 1986
- 7) 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
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建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
- 9) 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