

論文 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

宮城純子*1・山川哲雄*2・伊良波繁雄*3・太田達見*4

要旨：約3年間にわたって沖縄の海岸で自然暴露試験を行い、鉄筋の腐食によりひび割れなど損傷をきたしたRC柱試験体の耐震性能を検証するため、一定軸圧縮応力下（軸圧縮応力度 $0.35f_c'$ ）のもとで正負繰返し水平加力実験を行った。この実験結果を検証するために、既発表の損傷した電食RC柱試験体と健全な基準RC柱試験体の実験結果も参考までに掲載した。その結果、暴露試験体は電食試験体に比較して大きなひび割れが生じているにもかかわらず、その耐震性能はほとんど劣化していないように観察された。

キーワード：塩分量，自然暴露試験，耐震性能，電食試験，腐食，横拘束効果

1. 序

電気で強制的に鉄筋を腐食させ、かぶりコンクリートにひび割れを生じさせたRC柱の一定軸圧縮力下の正負繰返し水平加力実験を行ってきた [1, 2]。その結果、曲げ破壊先行（付着割裂ひび割れも含む）でかつ横補強筋が十分配筋されたRC柱では、耐久性上憂慮されるRC柱であっても耐震性能上の劣化はほとんど見られなかった。このような弾塑性挙動は電食試験体ゆえに生じる特有な現象であるかどうかを検証するために、1993年12月より沖縄の海岸で、電食試験体と同じ配筋、寸法のRC柱試験体（有塩，無塩の2種類）の自然暴露試験を1996年10月まで約3年間継続して行ってきた。腐食を加速させるために、最初から塩分を含有させた有塩暴露試験体のひび割れは電食試験体のそれよりかなり大きい。鉄筋を同じように腐食させても暴露試験と電食試験では、特にRC柱のひび割れ幅に顕著な差異が見られるようである。暴露試験体を電食試験体と同じ一定軸圧縮力比 0.35 のもとで、正負繰返し水平加力実験を行い、暴露試験体の弾塑性挙動を検証することが本論の主たる研究目的であり、ついで暴露試験体と電食試験体の間に耐震性能上の違いが見られるかどうかを参考までに検証する。なお、本研究は近年社会的関心が高い耐震診断における経年指標の評価にも、1つの参考資料として利用できる可能性があると思われる。

2. 試験体一覧

表-1に試験体一覧及びコンクリートの力学的性質を示す。柱試験体の主筋量は $p_g=1.36\%$ で、帯筋量は $p_w=0.85\%$ である。図-1に試験体の配筋図を示す。柱の寸法は $250 \times 250 \times 750\text{mm}$ であり、柱のせん断スパン比 (M/VD) は 1.5 である。柱は付着割裂破壊しやすいプロポーションではあるが、全て計算上曲げ破壊先行となっている。コンクリート強度は当初通常の 25MPa 程度を目標にしたが、暴露試験体に関しては無塩，有塩とも4週強度でそれぞれ $31.3, 31.6\text{MPa}$ もあり、暴露終了後の柱試験体のコンクリート強度はさらに高くなった（表-1参照）。したがって、5体の試験体の比較にあたっては、特に暴露試験体のコンクリート強度が高いことに留意する必要がある。コンクリート強度が最も小さい基準試験体RCC-SN-4は、参考程度にとどめておく。暴露試験体

*1 琉球大学大学院 工学研究科建設工学専攻（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 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科，博士（工学）（正会員）
 *4 清水建設（株）技術研究所研究員，工修（正会員）

表-1 RC柱試験体一覧

Specimen			Reinforcement	C_e (A·h)	f'_c (MPa)	E_c (GPa)
Normal test	RCC-SN-4	Salt	12-D10	-	25.1	26.3
Exposure test	RCC-NC-1	Non Salt	$p_g=1.36\%$	-	36.3	31.1
	RCC-SC-1	Salt		-	38.3	31.1
Electrolytic corrosion test	RCC-SCe-4	Salt	D-6@60	1500	26.0	22.6
	RCC-SCe-5	Salt	$p_w=0.85\%$	3000	29.7	23.6

Note: f'_c =cylinder strength of concrete, C_e =product of current and elapsed time
 E_c =modulus of elasticity of concrete, p_g =ratio of total longitudinal reinforcement
 p_w =shear reinforcement ratio

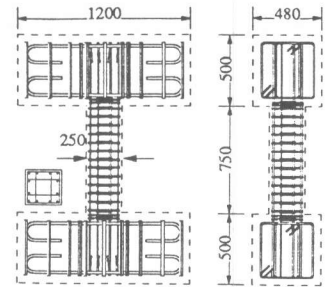


図-1 RC柱試験体の配筋図

RCC-SC-1には混練水として海水相当のNaCl=3.0重量%水溶液を用い、基準試験体RCC-SN-4及び電食試験体RCC-SCe-4, 5にはNaCl=2.87重量%水溶液を用いた。これらの値は現行の塩分総量規制値である0.3kg/m³を約10倍以上上回っていることになる [3, 4]。なお、暴露試験体RCC-NC-1はコンクリート打設時に塩分が混入されていない無塩試験体である。

3. 自然暴露試験と電食試験

暴露及び電食終了時のひび割れ状況と最大ひび割れ幅を図-2に示す。全体的にひび割れは主筋に沿って多く入り、帯筋に沿ったひび割れは少ない。暴露試験体は有塩試験体RCC-SC-1の方が無塩試験体RCC-NC-1よりもひび割れ本数も多く、かつひび割れ幅もかなり大きい。電食試験体に関しては総積算電流量 C_e の多い方がひび割れ本数は増えるが、幅には大きな差異は見られないようである。加力実験終了後に暴露試験体スタブからコンクリートコアを採取し、全塩分を測定した結果を図-3に示す。暴露試験体は塩化物量 (Cl^-) 規制値の0.3kg/m³及び鉄筋腐食危険ラインである塩分量 (NaCl) 0.03%をはるかに上回っている [3, 4]。有塩試験体の塩分量が無塩試験体よりも、主筋近傍 (帯筋までのかぶり厚さは17mm) までは上回っているが、表面より70mm以上の内部ではほぼ一定値に塩分量が収束し、両者の差はコンクリート打設時に混入した塩分量にほぼ等しくなる。

柱試験体における鉄筋の腐食状況を推測するために、図-2 暴露及び電食終了時のひび割れモニター試験体を各試験体に対応させて製作した。ただし、試験体の配筋は図-4に示すように暴露用のモニター試験体のみ異なる。健全鉄筋の力学的性質と、モニター試験体から取り出した鉄筋の腐食減量 (平均) について表-2, 3に示す。表-3より、鉄筋が腐食すると降伏応力に関する減少が質量に関する減少よりも大きい。これは、鉄筋の一部に生じた孔食のため断面積が局所的に減少しその部分で降伏応力が支配されるが、質量の減少は鉄筋全体にわたって平均化されるからである。なお、腐食鉄筋の降伏応力は降伏時の引張力を腐食前の公称断面積で除して求めた。

加力実験終了後に目視により観察した暴露柱試験体の鉄筋の腐食グレードは、有塩試験体RCC-SC-1がグレードIVであり、無塩試験体RCC-NC-1がグレードIIIとIVが混在しており [4]、モニター試験体 (有塩, 無塩ともグレードIIIとIVが混在している) に比べて腐食がかなり進展していた。こ

Exposure test			
RCC-NC-1		RCC-SC-1	
Web	Flange	Web	Flange
0.55	1.3	4.0	1.7
Electrolytic corrosion test			
RCC-SCe-4		RCC-SCe-5	
Web	Flange	Web	Flange
0.25	0.3	0.28	0.3

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

表-2 鉄筋の力学的性質

Specimen		Reinforcing bar	a (cm^2)	f_y (MPa)	ϵ_y (%)	E_s (GPa)
Normal test	RCC-SN-4	Longitudinal reinforcement D10	0.71	421	0.21	194
Exposure test	RCC-NC-1			409		183
	RCC-SC-1					
Electrolytic corrosion test	RCC-SCe-4		421	194		
	RCC-SCe-5					
Normal test	RCC-SN-4	Transverse reinforcement D6	0.32	437	0.24	195
Exposure test	RCC-NC-1			398	196	
	RCC-SC-1					
Electrolytic corrosion test	RCC-SCe-4		437	0.24	195	
	RCC-SCe-5					

Note: a =nominal area of bar

f_y =specified yield strength of reinforcement

ϵ_y =yield strain corresponding to f_y

E_s =modulus of elasticity of steel

表-3 鉄筋の腐食減量 (モニター試験体より)

Specimen		C_e (A·h)	W_o (g)	W (g)	$sc f_y$ (MPa)	$\frac{W}{W_o}$	$\frac{sc f_y}{f_y}$
Exposure test	RCC-NC-1	-	253	246	362	0.97	0.89
	RCC-SC-1	-	251	244	373	0.97	0.91
Electrolytic corrosion test	RCC-SCe-4	1500	270	252	355	0.93	0.84
	RCC-SCe-5	3000	269	240	321	0.89	0.76

Note: C_e =product of current and elapsed time

W_o =weight before corrosion, W =weight after corrosion

$sc f_y$ =nominal yield strength after corrosion

の原因として、暴露モニター試験体の配筋が暴露柱試験体に比較して粗であるからと推定される。したがって、暴露モニター試験体における鉄筋の腐食レベルは暴露柱試験体における鉄筋の腐食レベルより小さく、それを適切に評価しているとは言えないので、参考程度にとどめておく。なお、電食試験体に関しては柱及びモニター試験体とも、鉄筋の腐食レベルはすべてグレードIVであった。

4. 実験結果

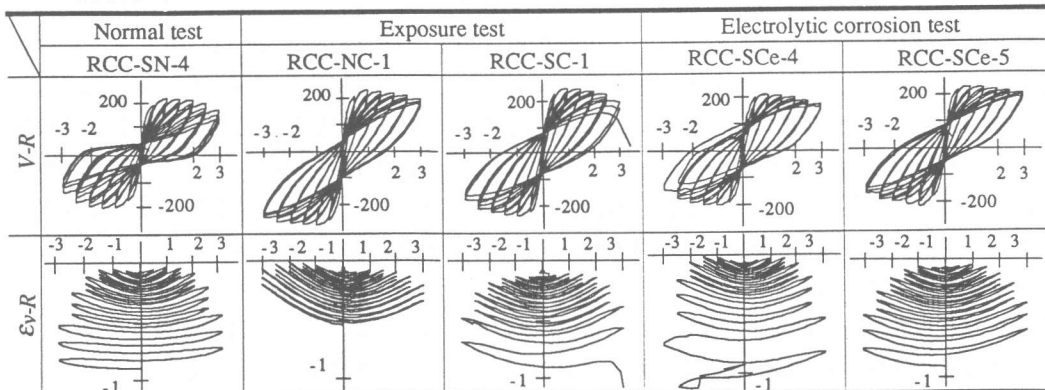


図-5 各RC柱試験体のV-R曲線と ϵ_v -R曲線

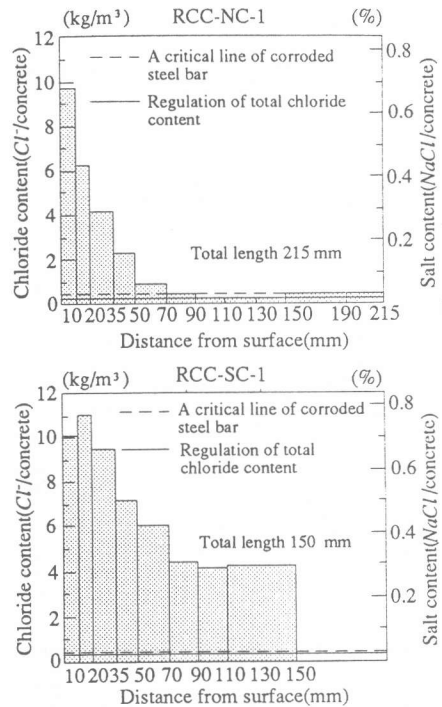


図-3 暴露RC柱試験体の塩分量

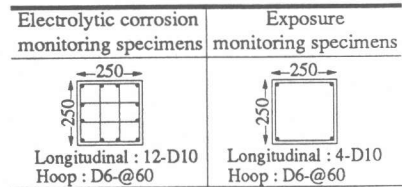


図-4 モニター断面 (材長500mm)

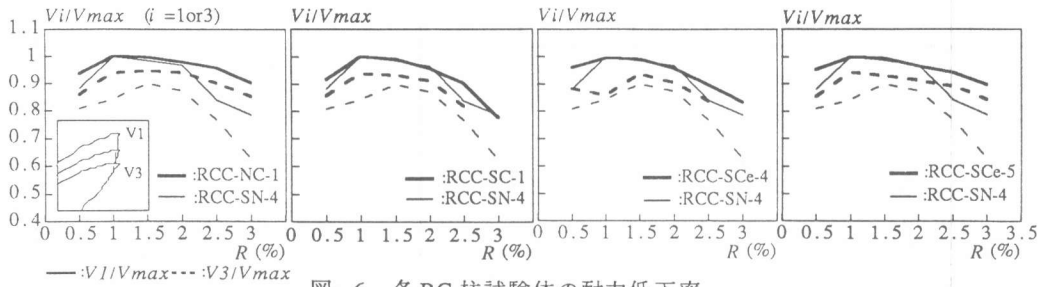


図-6 各RC柱試験体の耐力低下率

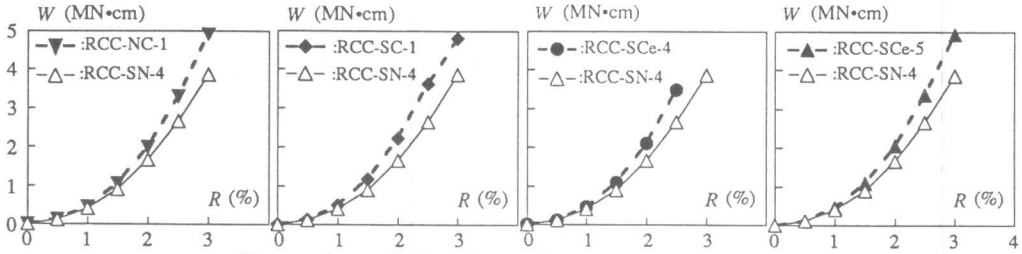


図-7 各RC柱試験体の累積エネルギー吸収量

	Normal test		Exposure test				Electrolytic corrosion test			
	RCC-SN-4		RCC-NC-1		RCC-SC-1		RCC-SCe-4		RCC-SCe-5	
	Web	Flange	Web	Flange	Web	Flange	Web	Flange	Web	Flange
R=0.5%										
R=3.0%										

図-8 各RC柱試験体の実験時のひび割れ状況

加力装置に建研式加力装置を用い、一定軸圧縮応力下 ($N/(A_g f_c') = 0.35$) のもとで部材角 $R=3.0\%$ 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のものについては、その時点で実験を終了した。図-5に各試験体の $V-R$ 曲線及び ϵ_v-R 曲線を示す。なお、 ϵ_v は柱材軸上の平均伸縮ひずみである。この図からわかるように暴露試験体 RCC-NC-1、SC-1 と電食試験体 RCC-SCe-4、5 はともに鉄筋の腐食による損傷をかなり受けながらも (図-2、表-3 参照)、 $V-R$ 曲線が紡錘形に近い状況に改善されるような実験結果となっている。それは図-6に示す水平耐力の低下率や、図-7に示す累積エネルギー吸収量などからも推定される。ただし、基準試験体 RCC-SN-4 はコンクリート強度が最も小さい。なお、有塩暴露試験体 RCC-SC-1 と電食試験体 RCC-SCe-4 は、部材角 $R=3.0\%$ の3、2サイクル目の途中で、圧壊のため加力実験を終了している。軸圧縮力が大きいので部材角のいかに関わらず

表-4 各RC柱試験体の計算結果と実験結果

Specimen	Cylinder compressive strength f'_c (MPa)	Lateral capacity(kN)								Failure mode			
		Flexural strength				Shear strength				Experiment			
		Confined flexural strength (C)	e-function (e)	(C) (e)	Modified Arakawa Eq. (A)	(A) (C)	AIJ method (AIJ)	(AIJ) (C)	(+)	(-)	Calculation	Experiment	
Normal test	RCC-SN-4	25.1	198.3	181.9	1.09	218.6	1.10	330.5	1.67	215.8	202.0	F	FB
Exposure test	RCC-NC-1	36.3	244.5	231.4	1.06	258.2	1.06	365.2	1.49	232.3	273.4	F	F
	RCC-SC-1	38.3	252.7	240.7	1.05	266.1	1.05	368.5	1.46	245.0	239.1	F	F
Electrolytic corrosion test	RCC-SCe-4	26.0	200.6	183.9	1.09	211.8	1.06	324.2	1.62	215.8	206.9	F	F
	RCC-SCe-5	29.7	209.3	196.2	1.07	236.5	1.13	359.4	1.72	237.3	220.7	F	F

Note:F=flexural failure mode, FB=flexural and bond-splitting failure mode

柱の伸縮ひずみは、常に圧縮ひずみとなっている。図-8に各試験体の実験時及び実験終了時のひび割れ図を示す。基準試験体RCC-SN-4は付着割裂破壊と曲げ破壊（柱端部の主筋の降伏をひずみゲージから確認済み）が混在したひび割れが生じ、部材角が増大するにつれてひび割れ本数とひび割れ幅の増大が見られたのに対し、自然暴露試験体と電食試験体はともにひび割れ本数はあまり増加せず、部材角の増大とともに曲げひび割れを原因とするカバーコンクリートの剥離が見られた。V-R, ϵ_v -R 曲線及び実験時のひび割れに関しては、暴露試験体と電食試験体に大きな差異は見られなかった。表-4に各試験体の実験結果と計算結果を示す。

5. 実験結果の比較、検討

平面保持を仮定したFiberモデルによるRC柱断面の弾塑性解析を行い、実験結果と比較しつつ理論的検討を行う。解析にあたり、次の仮定を用いた。

- 1) 電食に伴うコンクリートのひび割れや劣化、鉄筋の腐食に伴い期待される能動的な横拘束圧と付着強度の上昇などに関しては解析上一切無視する。
- 2) 帯筋による受動的横拘束効果（帯筋の腐食による影響は無視する）を考慮して、コアコンクリートにはManderらによるコンファインドコンクリートの構成則を用い、カバーコンクリートにも同じManderらによるプレーンコンクリートの構成則を適用する [5]。コアコンクリートに横拘束を考慮しない場合はコア、カバーコンクリートのいかに関わらず、コンクリートの構成則に一律に梅村のe関数を用いた [6]。
- 3) 暴露、電食試験体の主筋は、降伏力が基準試験体のそれと一致するように、主筋の断面積を質量の減少率（表-3参照）にしたがって減少させる。なお、鉄筋のひずみ硬化は考慮しない。

図-9は帯筋による受動的横拘束効果 [5] に加え、暴露及び電食試験体については更に主筋の腐食による欠損断面積を両方同時に考慮して作成したN-M相関曲線である。

図-10は実験時の軸圧縮力比0.35で横拘束効果が曲げ耐力に及ぼす影響を、計算結果と実験結

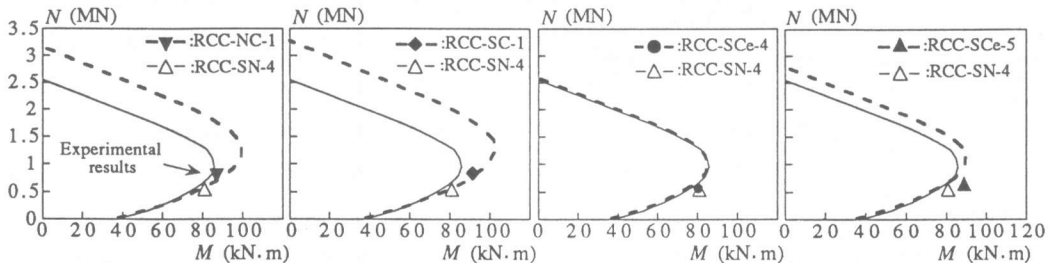


図-9 各RC柱試験体のN-M相関曲線

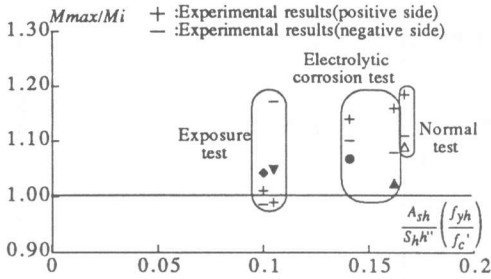


図-10 曲げ耐力増大比

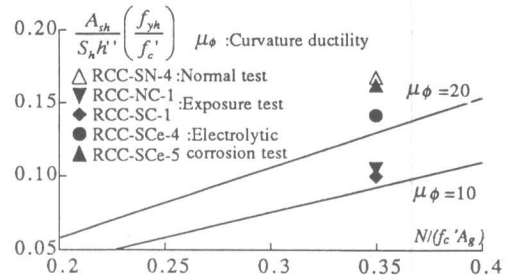


図-11 横拘束効果と軸力比、靱性率の関係

果から検討したものである。図-10の M_{max} は実験値、または帯筋による横拘束効果と腐食試験体（暴露と電食）にあつては主筋の欠損断面積を同時に考慮して計算した曲げ強度を示し、 M_i は横拘束効果も欠損断面積も一切考慮しないで、従来の e 関数による曲げ強度をそれぞれ示す。実験結果は正側 (+ 印) と負側 (- 印) で異なるが、一般的には電食試験体は計算値より大きくなっているが、暴露試験体については実験値が計算値より一部高いものもあるが、大部分は小さくなっている。図-2からも分かるように、暴露試験体は電食試験体に比べひび割れがかなり進展しているため腐食によって生じる能動的横拘束効果が、あまり期待できなくなったおそれがある。そのために、暴露試験体には曲げ耐力の上昇があまり期待できない。

Paulayらが提案した帯筋による横拘束効果と軸力比がRC柱の靱性に与える影響を図-11に示す[7]。基準試験体RCC-SN-4と電食試験体RCC-SCe-4, 5は曲率による靱性率 $\mu\phi=20$ を確保しているが、暴露試験体RCC-NC-1, SC-1は $\mu\phi=10$ を確保しているもののコンクリート強度が高いため、上記の試験体に比べ靱性が計算上低くなっている。しかし、実験結果では図-5に示す履歴曲線や図-6, 7に示す耐力低下率とエネルギー吸収量からも分かるように、暴露試験体は電食試験体とほとんど変わらない結果となっている。

6. 結論

鉄筋の腐食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またはⅣという耐久性上憂慮されるRC柱試験体（自然暴露試験体RCC-NC-1, SC-1及び電食試験体RCC-SCe-4, 5）であっても[8]、一定軸圧縮応力度 $0.35f_c'$ のもとで正負繰り返し水平加力実験を行ってみると、ひび割れ状況から推察されるほどにその耐震性能はほとんど劣化していないように観察された。ただし、本実験では各試験体にコンクリート強度の差異がかなり見られるものもあるので、可能な限りコンクリート強度を統一し、さらに実験と検討を重ねる予定である。

- 参考文献：[1] 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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.2, pp.805-810, 1994.6
 [2] 中山耕一，山川哲雄，伊良波繁雄，枇杷田篤：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
 [3] 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
 [4] 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
 [5] Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. : Theoretical Stress - Strain Model for Confined Concrete, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.144, No.8, pp.1804-1826, 1988.8
 [6] 黒正清治：鉄筋コンクリート部材の終局強度（2），（3），コンクリート・ジャーナル，Vol.5, No.10, No.11, pp.58-65, pp.48-53, 1967.10, 11
 [7] Paulay, T. and Priestley, M.J.N. : Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, John Wiley & Sons, Inc., pp.95-148, 1992
 [8] 森永繁：鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究，東京大学学位請求論文，pp.8-1~8-22, 1986.1