

論文

[1134] 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

松永 尚凡*1・山川 哲雄*2・伊良波 繁雄*3・森永 繁*4

1. 序

本研究は亜熱帯の塩害環境下における沖縄において、鉄筋腐食がRC部材の耐震性能（剛性，耐力，じん性，エネルギー吸収量）に及ぼす影響を明らかにしようとする一つの試みである。その第一ステップとして、鉄筋のかぶり厚さが小さく，かつ腐食面積が大きい耐力壁を実験の対象に採用し，1992年度から実験を開始し，1993年度にも耐力壁の補充実験を行った。実験は電食試験と自然暴露試験による鉄筋腐食試験や，それにとまなうコンクリートのひび割れ状況を調べる材料試験と，これらの試験体を用いた一定軸圧縮力下の正負繰返し水平加力実験から構成されている。ただし，自然暴露試験は長い期間を必要とするので，現在壁筋に鉄筋を用いたRC造耐力壁試験体3体と，壁筋に連続繊維補強筋（FRP筋）を用いた耐力壁3体の合計6体を東シナ海に面した沖縄の海岸で1992年12月10日以降暴露中である[1]。本研究は電食実験用試験体6体に限定し，かつ1993年度に行った補充実験（3体）と1992年度にすでに行った実験（3体）をまとめて整理，総括したものである。試験体6体のうち，2体は基準試験体としての健全試験体であり，残りの4体が電食により壁筋を腐食させた電食試験体である。

2. 試験体

試験体の形状，寸法及び配筋図を図-1に示す。耐力壁の横筋が1992年度は非閉鎖形であったのに対して，1993年度に実験を行った補充試験体では横筋を帯筋のように閉鎖形にして，かつアンカーしていることである（図-1参照）。電食試験体は再現試験体として同一断面，同一配筋を2体ずつ用意した。そのほか，スタブの断面形状に若干の差異があるものの，基本的な実験変数は共通である。せん断スパン比（ M/QD ）は1.425であり，壁筋（D6-SD295A）は縦横10cmピッチで，壁

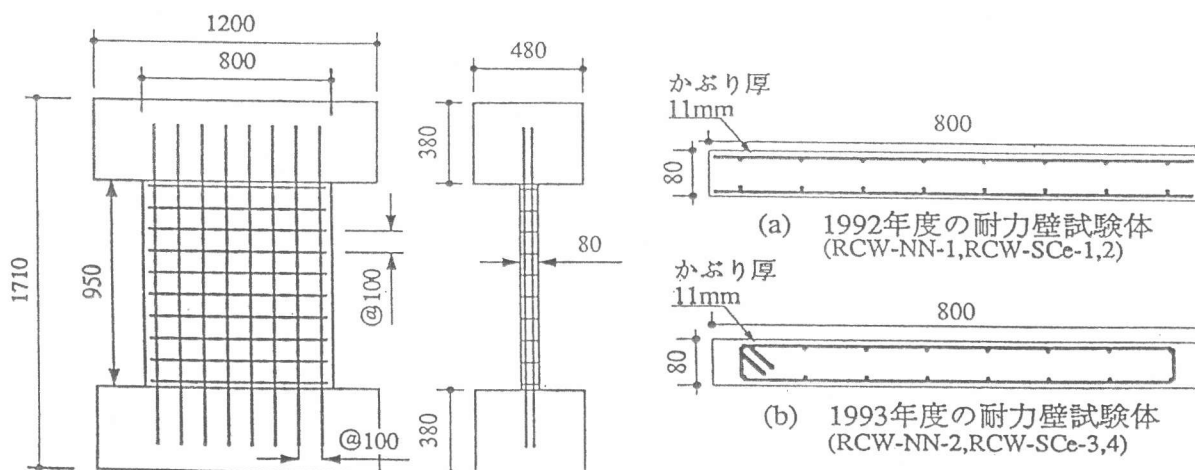


図-1 試験体の形状，寸法，壁配筋図，水平断面詳細図

*1 琉球大学大学院 工学研究科建設工学専攻（正会員） *2 同助教授 工学部環境建設工学科，工博（正会員）
*3 同助手 工学部環境建設工学科，工博（正会員） *4 九州東海大学教授 工学部建築学科，工博（正会員）

厚8cmにダブル配筋($P_s=0.8\%$)してある。壁筋のかぶり厚は1.1cmである。電食による腐食鉄筋の腐食減量と力学的性質を検討するために、図-1の耐力壁の壁板から水平方向に500mmの幅で切り出したものに相当する材料試験片(500×800×80mm)を、モニター用試験体として採用した。表-1に耐力壁試験体一覧を、表-2,3に使用材料の力学的性質を示す。

3. 電食試験

電食試験は図-2にその概略図を示すように、金網をゼラチン状の寒天で包み込んだ電極板(壁板と同じ広さ)を壁にあて、もう一方の電極である壁筋の間に一定な直流電流を流した。耐力壁試験体と同様に材料試験用モニター壁板にも同様に腐食面積に比例させて電食した。電食後の材料試験用モニター壁板から取り出した腐食鉄筋(6本の平均値)の腐食減量、及び力学的性質を表-4に示す。腐食鉄筋の断面積には腐食前の公称断面積(0.32cm²)を用いたので、表-4の降伏応力 $sc\sigma_y$ は見かけ上の応力を示すことになる。電食終了後の耐力壁試験体壁面のひび割れ状況を表-5に示す。

4. 測定及び載荷方法

変位計を用いた測定概略図を図-3に示す。壁脚部固定、壁頂部自由の片持ち柱タイプで、かつ一定軸圧縮力(壁板の圧縮応力 $\sigma=2\text{MPa}$)下の正負繰り返し水平加力実験装置を図-4に示す。水平加力はひび割れが発生するまで

表-1 耐力壁の試験体一覧

試験体名	健全試験体	電食用試験体			
	RCW-NN-1 RCW-NN-2	RCW-SCe-1	RCW-SCe-2	RCW-SCe-3	RCW-SCe-4
総積算電流量(Ah)	-	923	1595	855	832

表-2 鉄筋(D6)の力学的性質

	a (cm ²)	s σ_y (MPa)	s ϵ_y (%)	s σ_u (MPa)	sE (GPa)
鉄筋(D6-SD295A)	0.32	429.2	0.21	559.3	200.6

注) s σ_y :降伏点応力, s σ_u :引張強度, s ϵ_y :降伏点ひずみ, sE:ヤング係数

表-3 コンクリートの力学及び材料的性質

試験体名	c σ_B (MPa)	c ϵ_1 (%)	cE (GPa)	スランブ (cm)	
健全試験体	RCW-NN-1	24.6	0.154	25.3	16.5
	RCW-NN-2	22.1	0.205	24.5	17.0
電食試験体	RCW-SCe-1	24.9	0.298	23.6	18.5
	RCW-SCe-2	22.9	0.254	23.3	18.5
	RCW-SCe-3	23.9	0.230	24.7	17.0
	RCW-SCe-4	23.2	0.242	24.0	17.0

注1) c σ_B :シリンダー強度, cE:割線ヤング係数

2) c ϵ_1 はc σ_B 時のひずみ, 全試験体のc σ_B 体の平均値は23.6MPa

表-4 腐食鉄筋の腐食減量と力学的性質

種別	W ₀ (g)	W (g)	W/W ₀ (%)	sc σ_y (MPa)	sc $\sigma_y/s\sigma_y$ (%)	sc ϵ_y (%)
RCW-SCe-1	110.1	102.1	93	365.7	85	0.185
RCW-SCe-2	111.3	95.4	86	286.7	66	0.156
RCW-SCe-3	107.7	96.6	90	341.0	80	0.172
RCW-SCe-4	107.9	97.5	91	349.5	82	0.176

注1) W₀:腐食前の質量, W:腐食後の質量

2) sc σ_y :腐食鉄筋の降伏力を公称断面積で除した降伏応力

3) sc ϵ_y :腐食鉄筋の降伏応力時のひずみ

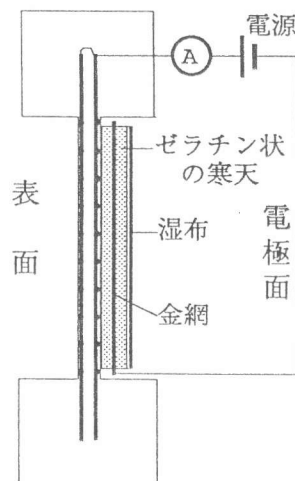


図-2 電食試験の概略図

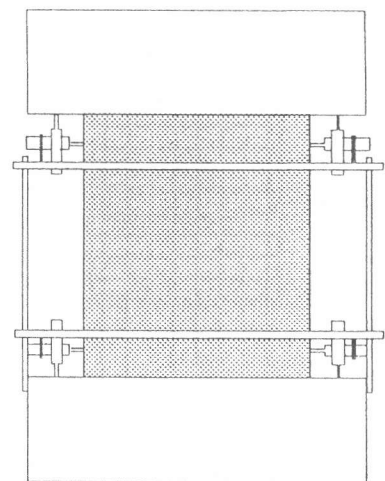
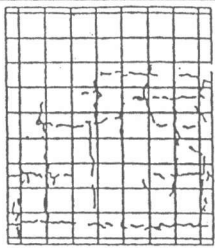
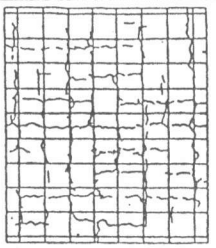
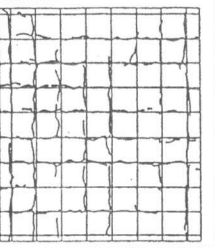



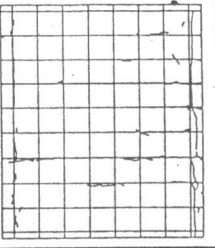
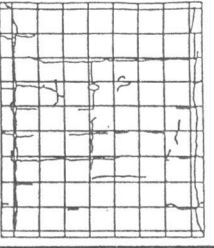


図-3 変位計による測定

表-5 電食後の耐力壁壁面のひび割れ状況

試験体名	RCW-SCe-1	RCW-SCe-2	RCW-SCe-3	RCW-SCe-4
総積算電流量	(932Ah)	(1595Ah)	(855Ah)	(832Ah)
表面				
電極面				

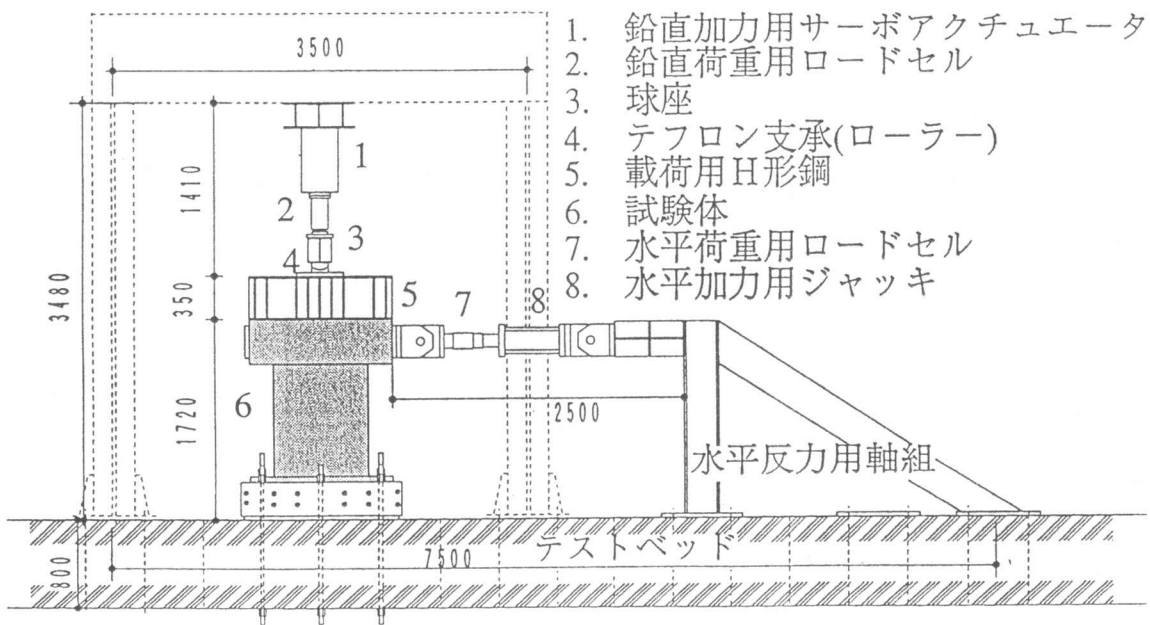


図-4 加力装置と耐力壁試験体取り付け状況

は荷重制御により行い、ひび割れ発生後は変位制御により壁板部分の層間変形角を0.25%ずつ増大させながら、同一振幅で2サイクルずつ正負水平加力が可能なところまで繰り返した。

5. 実験結果と考察

表-6に各耐力壁試験体の層間変形角 $R \approx 0.25, 0.5, 0.75, 1\%$ 時で、かつ2サイクル終了後のひび割れと、最終層間変形角時のひび割れ状況を示す。耐力壁試験体は鉄筋腐食のない健全な試験体であれば曲げひび割れが先行し、この曲げひび割れがせん断ひび割れに進展していくタイプである。しかし、電食により鉄筋腐食が進行し、かつ層間変形角が大きくなると壁脚部のカーブコンクリートが広範囲にわたり剥落し、縦筋が全面的に座屈し、耐力が急激に低下し、かなり不安定な状

表-6 耐力壁の各層間変形角と壁板(電極面)のひび割れ進展状況

試験体名		層間変形角				
		0.25%	0.50%	0.75%	1.00%	最終層間変形角
健全試験体	RCW-NN-1					
	RCW-NN-2					
電食試験体	RCW-SCe-1 (923Ah)					
	RCW-SCe-2 (1595Ah)					
	RCW-SCe-3 (855Ah)					
	RCW-SCe-4 (832Ah)					

態になる。表-7に各耐力壁のせん断力 Q と層間変形角 R の関係である $Q-R$ 曲線に関する実験結果と、鉛直方向の伸縮変形を壁板の内り高さで除した平均伸縮ひずみ ϵ_v と部材角 R の関係である実験結果も合わせて示す。表-7より壁筋が腐食すると、なかでも横筋を非閉鎖型にした1992年度の試験体(RCW-SCe-1,2)では層間変形角が進展すると、明らかに耐力が低下し、じん性が劣化している。また、 ϵ_v-R 曲線をみても健全試験体(RCW-NN-1,2)に比較すると、電食試験体はその復元力特性が明瞭に喪失しつつあることがわかる。表-7から求めた実験結果のスケルトンカーブに関する比較を図-5に示す。初期剛性を比較するために、表-7の $Q-R$ 曲線から処女載荷曲線を $R=0.15\%$ までを拡大して描いた $Q-R$ 曲線を図-6に示す。また、各耐力壁の累積ひずみエネルギー吸収量 W ($kN \cdot cm$)と層間変形角 R (%)の関係を図-7に示す。これらの図表より、電食により鉄筋が腐食しコンクリートにひび割れが生じるとじん性は劣化する傾向にあるが、初期剛性、エネルギー

表-7 各耐力壁のQ-R曲線, 伸縮ひずみ曲線

	Q-R 曲線	ϵ_v -R 曲線	
健全試験体	RCW-NN-1		
	RCW-NN-2		
電食試験体	RCW-SCe-1 (923A h)		
	RCW-SCe-2 (1595A h)		
	RCW-SCe-3 (855A h)		
	RCW-SCe-4 (832A h)		

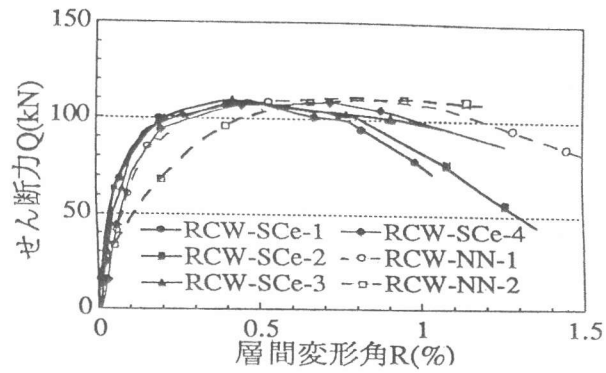


図-5 スケルトンカーブの比較

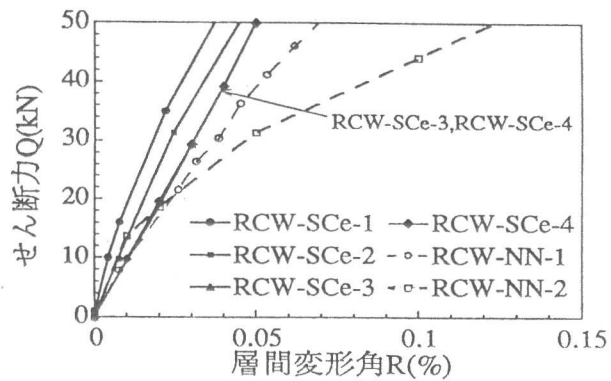


図-6 初期剛性の比較

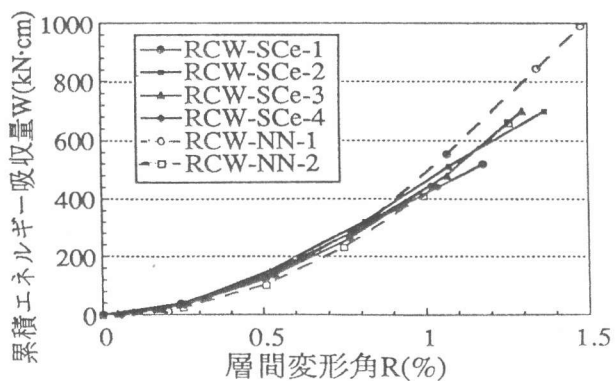


図-7 累積エネルギー吸収量の比較

ギー吸収量は初期の段階でやや増大し、耐力は変化しないという傾向にある。これらの理由としては鉄筋が腐食することにより膨張圧がコンクリート内に蓄積され、かつ一時的に付着強度が改善されることにより、プレストレス効果と錆による噛み合い効果が初期の段階で生じたためだと解釈される[2]。しかし、電食試験体は一般に表-6に示すように層間変形角が大きくなると壁脚部のカバーコンクリートが全面的に剥落し、かなり危険な状態になったことを実験では確認している。次に耐力壁試験体の水平断面を多段配筋された長方形断面とみなし、fiberモデルによる通常の弾塑性解析を試み、実験結果と比較した。解析にあたりコンクリートの構成則には表-3の $c\sigma_B$ を各試験体ごとに用い、横筋の横拘束効果は期待できないので従来からの e 関数を用いた。ただし、電食に伴うコンクリートの劣化に関しては解析上一切無視している。一方、縦筋(D6-SD295A)に関してはその材料定数を健全な試験体 (RCW-NN-1,2) に対しては表-2より与え、電食試験体 (RCW-SCe-

表-8 M- ϕ ·I'における勾配Sと高さ方向に沿った曲率分布の仮定

M- ϕ ·I' 曲線の勾配	高さ方向の曲率分布仮定
$S > 0.9S_0$	
$0.9S_0 > S > 0.2S_0$	
$0.2S_0 > S$	

注) h:耐力壁の壁脚部から水平荷重点までの高さ,
 h':壁板の内法高さ, ϕ_y :最外縁壁筋降伏時の曲率,
 S:M- ϕ ·I'曲線の勾配, S_0 :M- ϕ ·I'曲線の初期勾配,
 I':壁板の内法長さ, ϕ :曲率

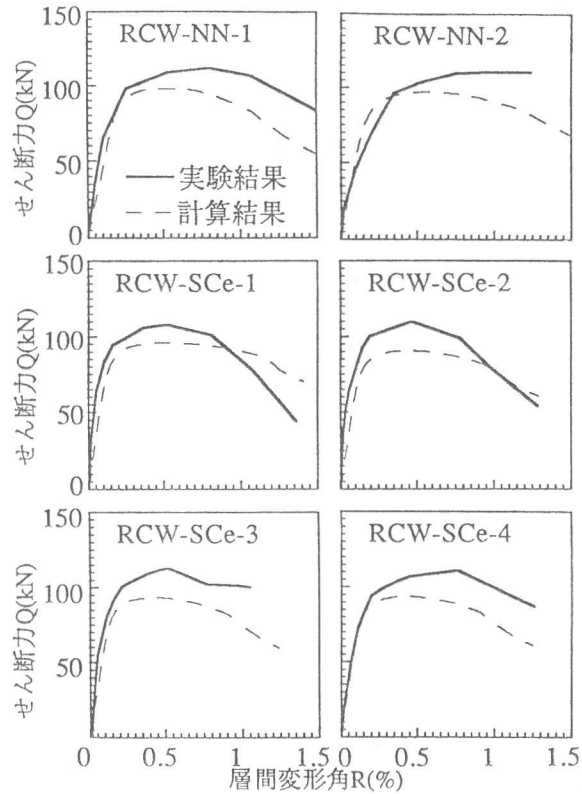


図-8 スケルトンカーブ(正側)に関する実験結果と計算結果の比較

1,2,3,4) に対しては表-4よりそれぞれ与え, かつ完全弾塑性を仮定した. また曲げ変形の計算にあたっては, 耐力壁試験体の高さ方向の曲率分布を表-8のように仮定した. ただし, 断面の曲げモーメントM-曲率 ϕ ·I' (I'は壁板の内法長さ) 曲線における勾配をSとし, その初期勾配を S_0 とする. 曲率の集中幅は内法長さI'の1/5と仮定した. さらに弾性時のせん断変形と, 軸力によるP- δ 効果も考慮した. このようにして求めた耐力壁試験体のせん断力Qと部材角Rの関係を図-8に示す. 図-8より, このような簡単な計算でも計算結果は実験結果をほぼとらえているようである.

6. 結論

耐力壁では健全な試験体と電食した試験体の間には耐力に関してはほとんど差異が認められないが, 初期剛性, じん性やエネルギー吸収量に差異が生じている. その中で, 電食試験体のじん性は確かに劣化するが, 初期剛性やエネルギー吸収量は初期の段階でやや増大する傾向にある. 鉄筋の腐食が進行し, コンクリートの損傷がひどい場合は, 層間変形角が大きくなると壁脚部のカバーコンクリートが剥落し, 縦筋の座屈が壁脚部で全面的に生じ, 耐力が急激に低下し, 危険な状態になる. 今後, 塩害により鉄筋が腐食した耐力壁の耐震, 耐久性能の劣化限度に関する鉄筋の許容腐食量などの究明にさらに取り組む予定である.

謝辞: 本研究に1993年度の卒論生として琉球大学4年生の比嘉雅貴君(三井建設(株))が参加した.

参考文献:

- [1]山川哲雄, 森永繁, 藤崎忠志 他2名: "亜熱帯の塩害環境下における耐力壁の耐震性と耐久性に関する実験的研究 その1-その3", 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.269-274, 1993年9月
- [2]山田義智: "塩害を受けたRC部材の鉄筋とコンクリート間の付着性状に関する研究", 日本建築学会研究報告九州支部第33号・1(構造系), pp.181-184, 1992年3月