

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 24 日現在

機関番号：18001

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008 年度 ～ 2011 年度

課題番号：20760378

研究課題名（和文）長寿命建築物のための大型 RC 柱の自然暴露試験と耐久・耐震性能に関する研究

研究課題名（英文）Experimental Investigations on Durability and Seismic Performance of Real-scale RC Columns Exposed to Marine Environment

研究代表者

中田 幸造（NAKADA KOZO）

琉球大学・工学部・助教

研究者番号：80347129

研究成果の概要（和文）：塩害で損傷した実規模相当 RC 柱の耐久性能と耐震性能を検証するため、2004 年から 2010 年にかけて沖縄の海岸で自然暴露試験を行った。暴露期間は 3 年、5 年、6 年であり、塩分浸透量調査と一定軸力下における水平加力実験を行った。6 年間暴露した RC 柱試験体は塩分浸透量が多くなり、耐震性能にも低下がみられた。塩害損傷を受けた RC 柱の曲げ強度とせん断強度を計算するため、鉄筋の質量減少率から求めた平均断面積を用いた結果、計算結果は実験結果を概ね予測することができた。

研究成果の概要（英文）：Real-scaled RC columns exposed at coastal area in Okinawa, since 2004 to 2010 to find out the durability and seismic performance of RC columns damaged by chloride attack. The RC columns were tested under reversed cyclic loading and constant axial force. As a result, the durability and seismic performance of RC columns exposed for six years decreased in comparison with the benchmark specimens kept in out-of coastal area conditions. In flexure and shear strength calculations of chloride-attacked RC columns, the weight reduction ratio method is used for the reinforcements, and the estimated calculations agree with the experimental results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	600,000	180,000	780,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：建築構造学

科研費の分科・細目：建築学，建築構造・材料

キーワード：耐久性能，耐震性能，大型 RC 柱，自然暴露，塩害，フライアッシュ，長寿命

## 1. 研究開始当初の背景

沖縄県は高温・高湿の亜熱帯環境という厳しい腐食環境下にあり、加えて島嶼環境という地理的条件および台風などによる飛来塩分により RC 造建物は塩害を受け易い。一方で、1972 年の沖縄県の日本復帰前後には、十分に洗浄されていない海砂が多量に使用

されたため、鉄筋腐食に伴う RC 造建物の塩害が懸念されている。上記の懸念を背景に、これまで琉球大学工学部山川研究室では、塩害を模擬した電食および沖縄の西海岸で自然暴露した縮小試験体を用いて塩害により損傷を受けた RC 柱の耐久性能と耐震性能の関係を解明することに注力してきた。これま

での研究では、(1) 塩害により鉄筋の腐食が進行すると、鉄筋の力学性能は低下し、特に伸び能力の低下が著しい、(2) 塩害により、帯筋の破断が生じ易くなり、曲げ設計された柱がせん断破壊モードに移行する、(3)「(1)」により、RC 柱の耐震性能は水平耐力の劣化より、エネルギー吸収性能を含めた靱性の著しい劣化をもたらす、等を明らかにしている。

他方、地球環境の維持・保全のため、持続可能な循環型社会の形成に向けて廃棄物のリサイクルが進んでおり、沖縄県内の火力発電所で産出される石炭灰（フライアッシュ）を有効活用した RC 構造物の施工報告が行われている。既往の研究によれば、フライアッシュをコンクリートに混入すれば、普通コンクリートに比べて優れた遮塩性能を示すことが材料的に明らかになっているが、実規模相当の RC 柱を使用して自然暴露を行い、材料および構造的に耐久性と耐震性能を同時に追求した研究は皆無である。また、沖縄県では木材の生産が極めて少ない上、台風と蟻害のために木造建築物が少なく、ほとんどが RC 造建物であり、加えて厳しい腐食環境下にあることから、普通コンクリートにフライアッシュを混入可能になれば、耐久性に優れた RC 造建物の供給が実現でき、ひいては建物の長寿命化・循環型社会形成へ貢献することができると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究での実験変数は、コンクリート強度（低強度、普通強度）、フライアッシュ混入の有無（細骨材の一部として代替された外割調合）および暴露期間であり、次の点を解明することを目的としている。(1) 実規模相当の RC 柱による暴露期間、コンクリート強度、塩分浸透性状の関係を明らかにし、併せてフライアッシュ混入の耐久性に対する有効性を示す。(2)「(1)」で行う耐久性の化学的調査と同時に、上記大型暴露試験体の耐震加力実験を行い、耐久性と耐震性能の関係を明らかにする。(3) フライアッシュコンクリートでは普通コンクリートに比べて長期強度増進が報告されているので、これが耐震性能に与える影響も明らかにする。

## 3. 研究の方法

### 3. 1 試験体

一般的にコンクリートへの塩分浸透性状は材料的に追及されるが、本研究では水平加力実験用の曲げ降伏先行設計された RC 柱試験体、塩分浸透性状を材料的に追及するモニター試験体を製作し、自然暴露に供する。また、RC 柱の耐久性を追求する場合、縮小試験体ではかぶり厚さや、主筋や帯筋などの鉄筋サイズも縮小されてしまうため、本研究では実際に模擬し、信頼性の高いデータを測定するため、実際に近いかぶり厚さ（30mm）および鉄筋サイズ（D19, D10）を採用した

実規模相当の RC 柱試験体と材料試験用モニター試験体を自然暴露と水平加力実験に用いる。試験体は 2004 年に製作しており、本研究では、暴露期間 3 年、5 年、6 年について塩分浸透量調査と、塩害で損傷した RC 柱の水平加力実験を行う。

製作した RC 柱試験体は、図 1 のように 1 辺が 400mm の正方形断面で、試験体の高さは 1600mm、せん断スパン比は 2.0 である。柱試験体の主筋は 8-D19（主筋比：1.44%）、帯筋は柱端部が D10-@60（帯筋比：0.6%）、中央部が D10-@90（帯筋比：0.4%）であり、曲げ破壊先行設計されている。柱試験体は、呼び強度が異なる 3 つのシリーズを各シリーズ 4 体ずつ、計 12 体製作した（表 1 参照）。ここで、L series は呼び強度 13.5MPa, N series と F series は呼び強度 21MPa であり、F series では細骨材代替としてフライアッシュ III 種を用いている。なお、柱試験体の製作に併せて、材料試験用のモニター試験体（400×400×1000mm）を各柱試験体 1 体に付き 1 つ製作し、コンクリートシリンダー（φ100×200mm）も製作した。モニター試験体からコンクリートコアを採取することで浸透塩分量を測定し、配筋された鉄筋をはつり出して腐食レベルを判定し、引張試験により力学性能の低下を調査する。なお、モニター試験体に配筋された主筋および帯筋は黒皮を除去し、あらかじめ重量を測定した。

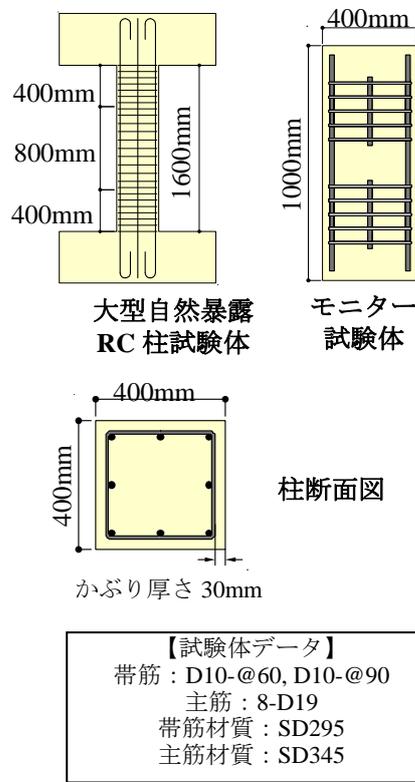


図 1 自然暴露 RC 柱試験体およびモニター試験体

表 1 試験体一覧

試験体		存置期間	水セメント比 (W/C)	4週強度 (MPa)	実験直前強度 (MPa)	打設日
Nシリーズ	基準	C07C-N0	3年	61.5%	32.2	36.9
	暴露	C07C-N3				37.6
		C09C-N5	5年			37.9
		C10C-N6	6年			36.6
Fシリーズ	基準	C07C-F0	3年	35.5	35.5	43.9
	暴露	C07C-F3				43.1
		C09C-F5	5年			43.2
		C10C-F6	6年			44.3
Fシリーズは、フライアッシュ III種 60kg/m <sup>3</sup> を混合してある。						
Lシリーズ	基準	C07C-L0	3年	75.0%	24.3	29.7
	暴露	C07C-L3				25.5
		C09C-L5	5年			26.6
		C10C-L6	6年			21.0

表 2 コンクリート調合表

シリーズ	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )					
			セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤	フライアッシュ III種 外割
N	61.5	50.2	295	181	896	915	0.738	—
F		47.6	301	185	829	940	1.354	60
L	75.0	52.4	246	184	951	891	0.615	—

3. 2 自然暴露計画

写真 1 に自然暴露試験場の様子を示す。2004年に製作した各シリーズ4体のRC柱試験体とモニター試験体はコンクリート打設後、約2ヶ月間琉球大学の工学部構内に存置した。その後、各シリーズの4体のうち3体(3シリーズ×3体:計9体)は沖縄の西海岸の自然暴露試験場に移動し、暴露試験体として存置した。各シリーズの残り1体は基準試験体(3シリーズ×1体:計3体)として、塩害の影響の少ない琉球大学工学部構造実験棟脇に存置した。自然暴露試験場は沖縄の西海岸に面し、強風の日には試験体に直接海水がかかる場所である。



写真 1 自然暴露試験場

4. 研究成果

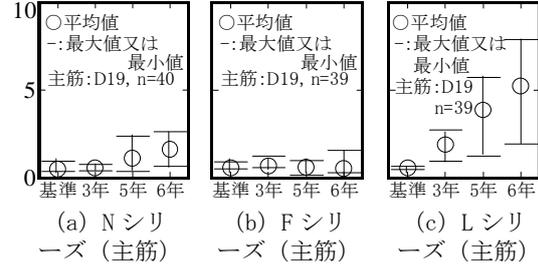
4. 1~4. 3では主な実験結果のみを記述し、4. 4に本研究で得られた結論を示す。

4. 1 鉄筋の質量減少率と暴露期間

モニター試験体からコアコンクリートを

採取後、主筋並びに帯筋をはつりだした。はつり出した鉄筋は目視による腐食グレードの判定を実施した後、JCI-SC1の「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に基づき60℃の10%クエン酸二アンモニウム溶液に24時間浸し、その後腐食生成物を取り除き質量減少率を求めた。図2に主筋と帯筋の質量減少率と暴露期間の関係をそれぞれ示す。図2中のnは、図中の試験体の総数を示す。質量減少率は同じモニター試験体から取り出した鉄筋でも、全て値が異なる。そこで図2では各モニター試験体でそれぞれの質量減少率の最大値、最小値並びに平均値を示した。基準モニター試験体の質量減少率にも有意な値が見られたが、それらの値は平均値で0.6%以下と微小で、暴露期間終了後に鉄筋をはつり出し、腐食鉄筋からコンクリートやわずかに残った黒皮を取り除く際に生じたものと考えている。暴露試験体の質量減少率は基準試験体より大きく、主筋と帯筋では帯筋の質量減少率が大きい。シリーズに着目すると、Lシリーズの腐食が大きく、次いでN、Fシリーズの順であった。また、NとLシリーズの主筋と帯筋、並びにFシリーズの帯筋は暴露期間が長いほど質量減少率(平均値)が増加した。

主筋の質量減少率(%)



帯筋の質量減少率(%)

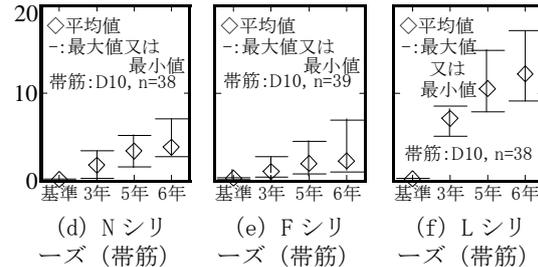


図 2 鉄筋の質量減少率

4. 2 RC柱試験体のひび割れ調査

自然暴露試験場に試験体を設置後、目視によりひび割れの発生状況、ひび割れ幅、さび汁の有無を1回目は4ヶ月後に、その後は約6ヶ月毎に調査した。図3に水平加力直前の海側と陸側(共にウェブ面)のひび割れ図とひび割れ幅の最大値、並びに鉄筋の腐食グレードの最大値を示す(基準、3年暴露、6年暴露)。図3の塗りつぶしは、暴露中に発生

したさび汁の箇所を示す。大学構内に3年間  
 存置した基準試験体では、塩害によるひび割れ  
 は見受けられない。3年暴露RC柱試験体の  
 ひび割れは、試験体を凝視しなければ発見で  
 きないものが多い。腐食鉄筋の膨張圧による  
 ひび割れが発生した後は、ひび割れから塩化  
 物イオンに加えて酸素と水が供給され、鉄筋  
 腐食がさらに進行したと考える。ウェブ面を  
 比較すると、海側より陸側のコンクリート表  
 面ひび割れと鉄筋腐食が激しい。陸面では、  
 主筋に沿ったひび割れが目立ち、ひび割れ幅  
 も大きい。これは陸側が南面に面していたた  
 め、コンクリート表面が海水による湿潤状態  
 と、日射による乾燥により乾湿が繰り返され  
 た状態であり、いわゆる濡れ回数が多かった  
 ため、ひびわれ損傷が進行したと推測する。  
 NとFシリーズのひび割れはLシリーズより  
 長く、幅も大きい。C07C-L3のように鉄筋腐  
 食が激しくとも、コンクリート表面にひび割  
 れが生じない場合があった。これはLシリー  
 ズ(W/C=75.0%)がN,Fシリーズに比べコ  
 ンクリートが密実でなく、腐食生成物の膨張  
 圧が分散しコンクリート表面にひび割れを生  
 じさせなかったためである。

	基準RC柱		3年暴露RC柱		6年暴露RC柱	
	C07C-N0		海側	陸側	海側	陸側
N シリーズ						
幅判	ひび割れなし 主筋I, 帯筋I		0.2mm 主筋IV, 帯筋IV	0.1mm 主筋IV, 帯筋IV	0.3mm 主筋V, 帯筋V	0.8mm 主筋V, 帯筋V
F シリーズ						
幅判	ひび割れなし 主筋I, 帯筋I		0.1mm 主筋III, 帯筋IV	0.1mm 主筋III, 帯筋IV	0.3mm 主筋IV, 帯筋V	2.0mm 主筋IV, 帯筋V
L シリーズ						
幅判	ひび割れなし 主筋I, 帯筋I		ひび割れなし 主筋III, 帯筋IV		0.8mm 主筋V, 帯筋V	0.5mm 主筋V, 帯筋V

幅：コンクリート表面の最大ひび割れ幅、判：最大腐食  
 グレード

図3 暴露試験後のひび割れ状況

#### 4. 3 水平加力実験結果

塩害で損傷したRC柱の耐久性能と耐震性  
 能を検証するため、一定軸力下で正負繰返し  
 水平加力実験を行った。加力装置は建研式加  
 力装置に準じており、2台のアクチュエータ  
 (合計2,000kN)を使用することで加力梁を  
 テストベッドに対して常に平行に制御でき  
 る。図4に水平荷重Vと部材角Rの関係を示  
 す。紙面の都合により、基準、3年暴露、6  
 年暴露を示している。図4より、暴露を行  
 わなかった基準試験体に比べて6年間暴露し  
 たNとLシリーズの試験体は曲げ降伏後にせん  
 断破壊した(図4(c), (i))。これらは履歴  
 性状が貧弱であることがわかる。一方、フ  
 ライッシュを混入して6年間暴露したFシ  
 リーズの履歴性状は(図4(f))、暴露したN  
 とLシリーズに比べて耐震性能の劣化は進ん  
 でいないことが伺える。

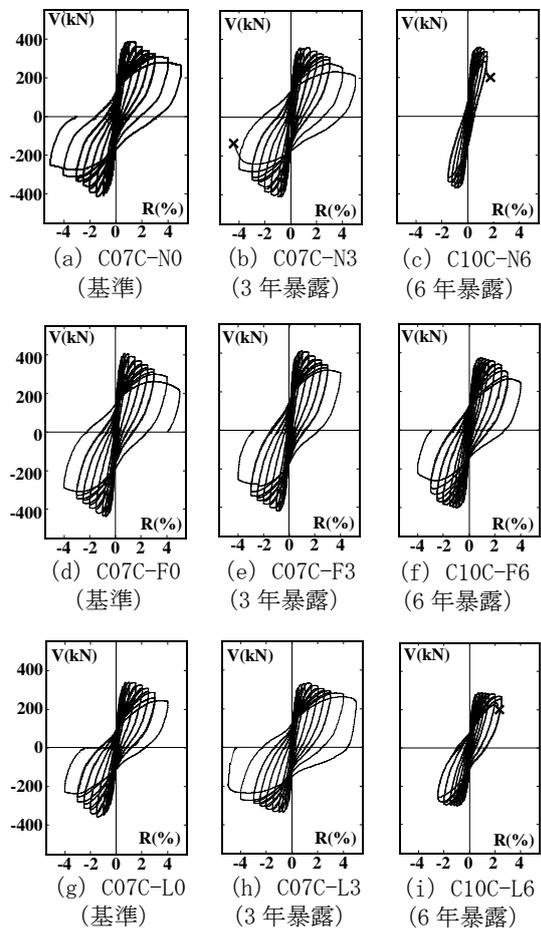


図4 水平加力実験結果

暴露期間が短いRC柱試験体では、水平加  
 力により柱中央に大きなせん断ひび割れが  
 生じた。一方、暴露期間が長く、鉄筋の腐食  
 量が多いRC柱試験体では、主筋に沿ったひ  
 び割れが生じた。加力時に生じるひび割れは、  
 暴露期間が長期間に渡るほど暴露試験時に  
 生じたひび割れに向かって進展し、その後繫

がる傾向があった。コンクリートの剥落は柱頭部と柱脚部に集中し、暴露期間が長い RC 柱試験体ほど広範囲にわたった。これは帯筋の腐食による膨張圧が大きくなり、かぶりコンクリートを柱面外に押しだしたためである。実験終了後にかぶりコンクリート取り除いて鉄筋の状態を確認したところ、N6 (図 4 (c)), L6 (図 4 (i)) の試験体では、柱頭の塑性ヒンジ箇所の帯筋がそれぞれの試験体につき 3 本ずつ破断していた。破断した帯筋は、コンクリートと帯筋の錆が一体化している状況であり、帯筋全体に大小の孔食が生じていた。

#### 4. 4 まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) 塩害で損傷した RC 柱の最大耐力と変形性能の予測には、質量減少率で求めた鉄筋の平均断面積を用いることが効果的であり、支障がないこともわかった。このことは、腐食した鉄筋の降伏荷重から求めた孔食箇所の断面積を用いた場合と比較検討することにより推定できた。

(2) 暴露期間が 6 年を経過した N と L シリーズの RC 柱では水平耐力の低下より、靱性指標や累積エネルギー吸収量の低下が大きい傾向にある。

(3) フライアッシュⅢ種を用いた RC 柱は塩化物イオンが浸透しにくく、その結果鉄筋の腐食劣化も進行が遅くなった。すなわち、耐久性能が普通コンクリートを用いた RC 柱より優れ、かつ耐震性能の劣化も遅延することが一定軸力下の正負繰り返し水平加力実験で明らかになった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 船木裕之, 山川哲雄, 中田幸造: 沖縄の西海岸で暴露した大型 RC 柱の耐久性能と耐震性能に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol. 76, No. 666, pp. 1479-1488, 2011
- ② 船木裕之, 中田幸造, 山川哲雄, 山田義智: 沖縄の海岸で 5 年間の暴露期間を経たフライアッシュ混合大型 RC 柱の水平加力実験, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 32, No. 1, pp. 827-832, 2010
- ③ Hiroyuki FUNAKI, Tetsuo YAMAKAWA, Kozo NAKADA and Yoshitomo YAMADA: Experimental Study on RC Columns Damaged under Exposure to the Marine Environment in Okinawa, the 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, 査読有,

Toronto, Canada, Paper ID 906, 2010

- ④ 船木裕之, 山川哲雄, 山田義智, 中田幸造: 沖縄で自然暴露により損傷した実大 RC 柱の正負繰り返し水平加力実験, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 30, No. 3, pp. 139-144, 2008

[学会発表] (計 2 件)

- ① 船木裕之, 中田幸造, 山川哲雄, 山田義智: 沖縄の海岸で 5 年間暴露した大型 RC 柱に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010 年 9 月 9 日, 富山大学
- ② 船木裕之, 山川哲雄, 山田義智, 中田幸造: 沖縄の海岸で 3 年間の自然暴露により損傷した RC 柱の実験的研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 2008 年 9 月 20 日, 広島大学

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

中田 幸造 (NAKADA KOZO)

琉球大学・工学部・助教

研究者番号: 80347129