

# 論文 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

船木 裕之<sup>\*1</sup>・中田 幸造<sup>\*2</sup>・山川 哲雄<sup>\*3</sup>・山田 義智<sup>\*4</sup>

**要旨:**塩害対策とフライアッシュの有効利用のため、フライアッシュを外割混合したコンクリートと普通コンクリートを用い、実大に近い断面積を有する大型RC柱の塩害環境における耐震性能と耐久性能の評価を材料と構造の両面より実施した。その結果、フライアッシュを混合したRC柱は、普通コンクリートを用いたRC柱に比べ、遮塩性能が高く、鉄筋の腐食が少なかった。5年間海岸で暴露したRC柱は鉄筋を腐食させ、コンクリート表面にひび割れを生じさせたが、主筋の平均質量減少率が1.1%程度なら、水平耐力や靱性などの耐震性能の劣化は少なく、RC柱の耐久性能の低下の方がはるかに大きいことが分かった。

**キーワード:** 暴露試験, 塩害, 大型RC柱, フライアッシュ, 耐震性能, 耐久性能

## 1. はじめに

沖縄は、高温・多湿の厳しい腐食環境であり、かつ台風被害を受けやすいなどの地理的条件のため、RC建物が塩害を受けやすい地域である。加えて、塩分総量規制以前の海砂を大量に使用したRC建物も数多く存在する。そのため沖縄県でのRC建物の塩害対策は喫緊の課題である。そこで、山川らは、塩害の実情把握とその対応策を模索するため、2004年から3種類のコンクリート調合を用い、実建造物のRC柱と同等のかぶり厚さ(30mm)を有する大型RC柱の暴露試験を沖縄の西海岸で開始した。使用したコンクリートは、普通コンクリート(Nシリーズ, W/C=61.5%)と水セメント比が大きいコンクリート(Lシリーズ, W/C=75.0%)、フライアッシュを混合したコンクリート(Fシリーズ, W/C=61.5%)である。塩害に強いフライアッシュの有効利用を行うことは、循環型社会の形成と地球環境問題解決に資することにつながるといえる<sup>1)</sup>。また、使用実績の少ないフライアッシュⅢ種を用いたコンクリートによる構造実験は、貴重な資料となる。同時に塩害環境におけるRC建物の耐久性能に関する研究は、大地震に対する安全で安心な社会を形成すると共に、RC建物の長寿命化を標榜する上で重要な研究である。

海岸での暴露期間が3年経過した2007年に、海岸で暴露した3種類のRC柱試験体と塩害の影響の少ない箇所と同期間存置した基準RC柱試験体を用いて水平加力実験等を実施し、塩害初期でのRC柱の耐震性能と耐久性能を調査した<sup>2)</sup>。その結果、海岸で3年間暴露したRC柱試験体は、海岸で暴露していない基準RC柱試験体に比べ飛来塩分(塩化物イオン)が深く浸透し、鉄筋を腐食させた。全シリーズにおいて、海岸で暴露したRC柱試験体の累積エ

ネルギー吸収量は、基準RC柱試験体よりわずかに上回っていた。2009年に5年の暴露期間を経たRC柱試験体のコンクリート表面のひび割れが目立つようになったため、2007年と同様に塩化物イオン浸透量試験、水平加力実験を実施した。本稿ではフライアッシュがRC柱の遮塩性能と耐震性能並びに耐久性能に与える影響について検証することとし、Lを除くNとFの2シリーズの比較を行った。

本研究の目的は、コンクリートのひび割れ、塩化物イオン浸透量と鉄筋腐食並びに耐震性能の関係を一定軸力下で行う正負繰り返し水平加力実験で検証することである。さらに、沖縄の西海岸で塩害損傷したRC柱の耐震性能及び耐久性能の暴露期間による変状の把握と、フライアッシュを混合したRC建造物の塩害に対する有効性を検討した。

## 2. 実験計画

表-1に実験で使用した鉄筋の健全時の力学的特性を、表-2、図-1に使用したコンクリートの調合表と試験体詳細図をそれぞれ示す。なお、表-1に示す主筋の力学的特性は、試験体製作時に保存しておいたものを2008年に引張試験した結果である。試験体は水平加力実験を行うRC柱試験体と、飛来塩分による塩化物イオン浸透量とそれによる鉄筋腐食及び力学的特性の関係を調査するモニター試験体で構成される。RC柱試験体とモニター試験体は、共通の柱断面(400×400mm)を有し、かぶり厚さは

表-1 健全な鉄筋の力学的特性

	a (mm <sup>2</sup> )	σ <sub>v</sub> (MPa)	σ <sub>u</sub> (MPa)	ε <sub>u</sub> (%)
主筋 (D19)	287	384	575	25.3
帯筋 (D10)	71	401	569	22.8

備考: a = 断面積 σ<sub>v</sub> = 降伏強度 σ<sub>u</sub> = 引張強度 ε<sub>u</sub> = 破断伸び率.

\*1 琉球大学大学院 理工学研究科 博士後期課程・修士(工学) (正会員)

\*2 琉球大学 工学部 助教・博士(工学) (正会員)

\*3 琉球大学 工学部 教授・工博 (正会員)

\*4 琉球大学 工学部 教授・博士(工学) (正会員)

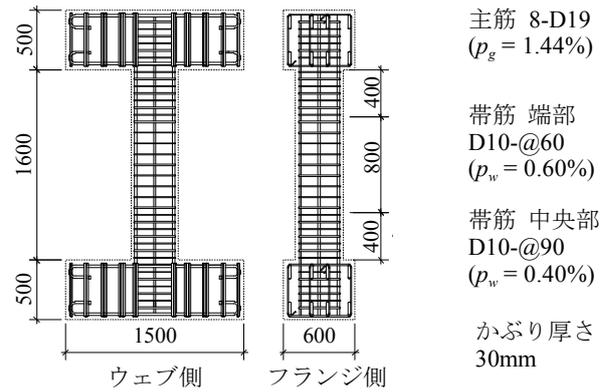
30mmである。試験体一覧を表-3に示す。

本研究では暴露期間によるRC柱の耐震性能や耐久性能の変状が重要な要素となる。そのため表-3には2007年に実験した塩害の影響の少ない琉球大学工学部で、試験体製作後約3年間存置した基準試験体C07C-N0及びC07C-F0と、海岸で3年間暴露した試験体C07C-N3及びC07C-F3も併せて示した<sup>2)</sup>。NとFシリーズは同じ水セメント比で、違いはフライアッシュ混合の有無である(表-2)。Fシリーズは、Nシリーズに細骨材代替品として、沖縄で採取されたフライアッシュⅢ種相当を、外割で60kg/m<sup>3</sup>加えた。既往の研究<sup>3)</sup>によると、フライアッシュⅢ種を外割混合したコンクリートは遮塩性能が向上すると報告されている。フライアッシュⅢ種は、強熱減量が大きく、コンクリートの品質変動が過大となる恐れが高いため、主たる結合材として使用するのに不安がある。本研究では、そのような性質をもつフライアッシュⅢ種であっても、外割混合で使用すれば内割に比べ、その影響が少なく材料の有効利用とRC建物の塩害対策になると考えて使用した。なお、暴露試験場は沖縄の西海岸にあり、風の強い日には試験体に海水がかかる場所である<sup>2)</sup>。また、全てのRC柱試験体とも $\sigma_B$ (呼び強度)を用い、曲げ破壊先行で設計した。

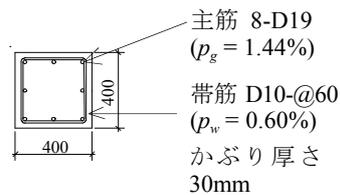
### 3. 自然暴露試験

#### 3.1 塩化物イオン浸透量試験

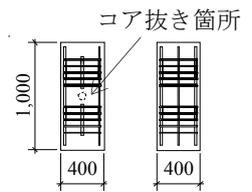
基準試験体のRC柱とモニター試験体並びに対応するシリンダーを琉球大学で3年、暴露試験体のそれらを暴露試験場<sup>2)</sup>で3年及び5年間存置した。RC柱への飛来塩分



(a)水平加力実験用RC柱試験体



(b)試験体共通断面



(c)モニター試験体

図-1 試験体詳細図

単位(mm)

の浸透量を検証するために用意していたそれぞれのRC柱試験体に対応したモニター試験体の中央部(図-1 (c))から、コンクリートコアを両ウェブ面(海側及び陸側)よりそれぞれ採取し、含有塩化物イオン量を測定した。なお、コア径は基準モニター試験体と3年暴露モニター試験体で $\phi 75$ mm、5年暴露モニター試験体では $\phi 100$ mmである。コア径が拡大した理由は、採取中のコア折損に考慮したためである。コア採取後、モニター試験体から主

表-2 コンクリート調査表

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種相当 外割
N	61.5	50.2	295	181	896	915	0.738	-
F		47.6	301	185	829	940	1.354	60

混和剤: AE 減水剤 遅延型 I 種

表-3 試験体一覧

	Nシリーズ			Fシリーズ		
	基準試験体	暴露試験体		基準試験体	暴露試験体	
	C07C-N0	C07C-N3	C09C-N5	C07C-F0	C07C-F3	C09C-F5
存置期間	3年			3年		
水セメント比 (W/C)	61.5%					
$\sigma_B$ (呼び強度)	21.0 MPa					
$\sigma_B$ (4週強度)	32.2 MPa			35.5 MPa		
$\sigma_B$ (3年強度)	36.9MPa	37.6MPa	-	43.9MPa	43.1MPa	-
$\sigma_B$ (5年強度)	-	-	37.9MPa	-	-	43.2MPa
打設日	2004.5.21			2004.6.4		
実験日	2007.10.2	2007.9.21	2009.9.8	2007.10.1	2007.9.26	2009.9.4
材令(日)	1229	1218	1936	1214	1209	1918
混和材	-			フライアッシュ Ⅲ種相当 外割 60kg/m <sup>3</sup>		
共通事項	主筋 = 8-D19 ( $p_g = 1.44\%$ ), 帯筋 端部 = D10 - @60 ( $p_w = 0.60\%$ ), 帯筋 中央部 = D10 - @90 ( $p_w = 0.40\%$ ), 軸力比: $N/(bD \sigma_B) = 0.2$ , せん断スパン比: $M/(VD) = 2.0$ , かぶり厚さ = 30mm.					

備考: $\sigma_B$  (呼び強度) = 工場発注時の呼び強度,  $\sigma_B$  (4週強度) = シリンダーの4週強度,  $\sigma_B$  (3年強度) = 琉球大学または海岸で3年間存置した試験体の水平加力実験直前のシリンダー強度,  $\sigma_B$  (5年強度) = 海岸で5年間暴露した試験体の水平加力実験直前のシリンダー強度,  $p_g$  = 主筋比,  $p_w$  = 帯筋比.

筋と帯筋を取り出し鉄筋の腐食グレード<sup>4)</sup>と鉄筋の質量減少率を求め、その後、鉄筋の引張試験を実施した。

図-2に各シリーズの海岸で3年及び5年間暴露したモニター試験体のコンクリート表面からの含有塩化物イオン量を示す。なお、全ての基準モニター試験体の含有塩化物イオン量は、塩化物イオン総量規制値( $Cl^- = 0.3\text{kg/m}^3$ )以下と微少であったため、図-2には掲載しない。図-2に示す点線は発錆限界塩化物イオン量 ( $Cl^- = 1.2\text{kg/m}^3$ )<sup>5)</sup>である。

同じ暴露期間で比較すると、Fシリーズの含有塩化物イオン量はNシリーズに比べ少ない(図-2)。NとFシリーズの含有塩化物イオン量は、暴露期間3年より5年の方がわずかに増加した。全てのモニター試験体で、帯筋の全体と主筋の一部の箇所は、発錆限界塩化物イオン量を上回り、鉄筋腐食が生じやすい状況であった。

図-3にモニター試験体からはつりだし、60°Cの10%クエン酸2アンモニウム溶液に24時間浸し、腐食生成物を取り除いて求めた主筋と帯筋の質量減少率と暴露期間の関係を示す。図-3に示す黒い塗りつぶしは各シリーズの平均値である。全ての試験体で主筋より、帯筋の腐食が激しい。主筋の質量減少率の平均値は、C07C-N3で質量減少率 0.6% (腐食量  $2.1\text{mg/cm}^2$ )、C09C-N5で質量減少率 1.1% (腐食量  $4.1\text{mg/cm}^2$ )、C07C-F3で質量減少率 0.7% (腐食量  $2.6\text{mg/cm}^2$ )、C09C-F5で質量減少率 0.6% (腐食量  $2.3\text{mg/cm}^2$ )である。帯筋の質量減少率は、C07C-N3で1.8% (腐食量  $3.1\text{mg/cm}^2$ )、C09C-N5で3.5% (腐食量  $6.0\text{mg/cm}^2$ )、C07C-F3で0.9% (腐食量  $1.5\text{mg/cm}^2$ )、C09C-F5で2.0% (腐食量  $3.5\text{mg/cm}^2$ )である。また、Nシ

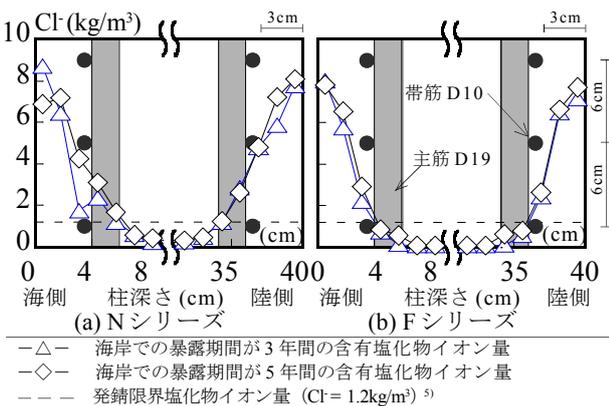


図-2 モニター試験体の塩化物イオン浸透量

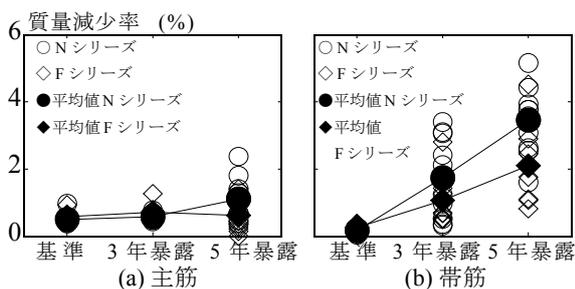


図-3 質量減少率と暴露期間の関係

リーズの主筋と帯筋並びにFシリーズの帯筋では、暴露期間の増加に伴い、質量減少率が増加する傾向にあった。Fシリーズの主筋の質量減少率に変化が少ないのは、主筋位置の塩化物イオン浸透量が小さかったためと推測する。

### 3.2 RC柱試験体のひび割れ調査と鉄筋の腐食状況

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-4に水平加力直前の海側と陸側(共にウェブ面)のひび割れ図と観測された最大ひび割れ幅及び水平加力実験後にかぶりコンクリートを取り除いた際の鉄筋の腐食状況と目視により判定した腐食グレード<sup>4)</sup>の最大値を示す。図-4中にある灰色の塗りつぶしは、暴露中に発生したさび汁箇所を示す。コンクリート表面のひび割れは、陸側が海面に比べて多く、幅も広い。陸側が日射を受ける南面であったため、乾

	N シリーズ		F シリーズ	
	海側	陸側	海側	陸側
基準RC柱試験体 (3年存置)	C07C-N0		C07C-F0	
幅	-	-	-	-
判	主筋：I，帯筋：I		主筋：I，帯筋：I	
3年暴露RC柱試験体	C07C-N3		C07C-F3	
幅	0.2 mm	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm
判	主筋：IV，帯筋：IV		主筋：III，帯筋：IV	
5年暴露RC柱試験体	C09C-N5		C09C-F5	
幅	0.2 mm	1.4 mm	0.25 mm	0.75 mm
判	主筋：IV，帯筋：V		主筋：IV，帯筋：V	

図-4 海岸での暴露実験が終了したコンクリートのひび割れと鉄筋の腐食状況(ウェブ面)

湿が繰り返されやすい状況であったためと推測する。また、基準RC柱試験体は、塩害によるひび割れが発生していない。3年暴露RC柱試験体のひび割れ幅は、凝視しなければ発見できない微細なものが多く、最大ひび割れ幅は0.2mmであった。鉄筋の腐食箇所とひび割れ箇所が近接しているため、ひび割れの原因は鉄筋腐食であると考えられる。5年暴露RC柱試験体のひび割れは、3年より拡大し一目してひび割れと判断できるものが目立つようになった。シリーズ毎に比較すると、NシリーズはFシリーズより激しくひび割れており、鉄筋腐食も大きい(鉄筋の最大腐食グレードは同じだが、**図-4**でRC柱全体の鉄筋腐食面積を目視で比較した結果である)。これはFシリーズの遮塩性能が、Nシリーズより高く、鉄筋が腐食しにくい状態であったためと思われる。フライアッシュを混合したコンクリートの遮塩性能は、文献<sup>3</sup>でも同様の傾向が得られている。

## 4 水平加力実験

### 4.1 加力方法

2009年に5年間の暴露試験を終了したC09C-N5とC09C-F5暴露RC柱試験体の正負繰り返し水平加力実験を実施した。実験は**図-5**に示す加力装置を用いた。2台のサーボアクチュエータ(合計2,000kN)により、軸力比0.2の一定鉛直荷重を載荷し、水平加力中はアクチュエータをテストベッドに対して常に平行に保つように制御した。5年暴露RC柱試験体の水平加力は部材角 $R = 0.125\%$ 、 $0.25\%$ を各1回、 $R = 0.5\%$ 、 $0.75\%$ 、 $1.0\%$ 、 $1.25\%$ を各2回、 $R = 1.5\%$ から $0.5\%$ 増分で2回ずつ $R = 3.0\%$ まで行い、可能であれば $R = 4.0\%$ 、 $5.0\%$ を1回ずつ繰り返した。5年暴露RC柱試験体は、最大耐力後の耐力低下を詳細に確認するため、2007年に実施した加力サイクルに $R = 1.25\%$ を新たに2回追加している。軸力比の計算には試験直前に圧縮試験した各試験体のシリンダー強度を用いた(**表-3**)。

### 4.2 実験結果

**図-6**に水平荷重 $V$ と部材角 $R$ の関係、柱の軸ひずみ $\varepsilon_r$ と部材角 $R$ の関係、RC柱試験体の最終ひび割れ図を両ウェブ面(海側、陸側)について示す。**図-6**の $V$ - $R$ 曲線の破線及び点線は、曲げ終局強度<sup>6)</sup>及びせん断強度<sup>7)</sup>計算値である。計算で使用した基準RC柱試験体と暴露RC柱試験体のコンクリート強度は、試験体の材令に対応したシリンダーの水平加力実験直前の圧縮強度である(**表-3**)。これらのシリンダー供試体は、対応する試験体の脇で同期間存置したものである。曲げ終局強度<sup>6)</sup>とせん断強度<sup>7)</sup>の計算には、健全な鉄筋の引張試験結果を用いた(**表-1**)。また、ひび割れ図の塗りつぶし箇所は、コンクリートの剥落箇所である。なお、RC柱の破壊性状と鉄筋の降伏の有無を確認するため、主筋と帯筋にひずみゲージを取り付けた(主筋3枚、帯筋2枚)。しかし、海岸での暴露に

- ①サーボアクチュエータ、②反力壁、③水平ジャッキ、  
④RC柱試験体

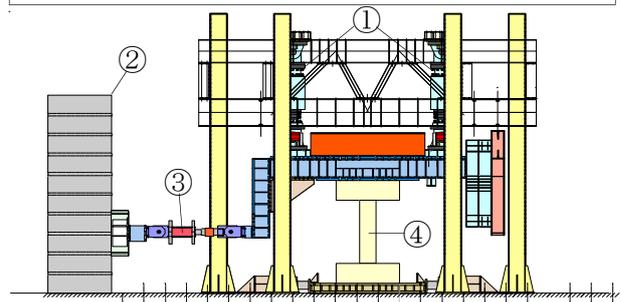


図-5 水平加力装置

より、ひずみゲージが腐食し、値が計測できないものや安定しないものがあつた。そのため、安定して取得できたC07C-F3以外の暴露RC柱試験体のひずみゲージの値は考察から除外した。

基準RC柱試験体C07C-N0は、 $R = 1.5\%$ の加力時に正負それぞれの最大耐力 $V = 387\text{kN}$ 、 $-413\text{kN}$ を計測した。正側の最大耐力時には、主筋の1本が降伏した。その後、 $R = 2.0\%$ では柱頭の帯筋が降伏し、実験予定の最終部材角 $R = 5.0\%$ まで行った(**図-6 (a)**)。

海岸で3年間暴露したRC柱試験体C07C-N3は、 $R = -1.0\%$ の加力時に柱頭部の曲げひび割れと付着ひび割れが生じ負側の最大耐力 $V = -410\text{kN}$ に達した。 $R = 1.5\%$ の加力中に正側の最大耐力 $V = 357\text{kN}$ に達する。その後、 $R = -5\%$ 加力中に( $R = -4.5\%$ 付近)でせん断破壊を起こし実験を中止した(**図-6 (b)**)。実験終了後の観察では、主筋及び帯筋の破断は確認されなかった。

海岸で5年間暴露したRC柱試験体C09C-N5は部材角 $R = -0.75\%$ の加力時に負側の最大耐力 $V = -413\text{kN}$ 、 $R = 1.0\%$ の加力時で正側の最大耐力 $V = 375\text{kN}$ に達した。加力実験は $R = -4.0\%$ の負側加力サイクル中のコンクリートの剥落により水平変位計のコードが切断され実験を終了した(**図-6 (c)**)。

フライアッシュを混合した基準RC柱試験体C07C-F0は、部材角 $R = 0.5\%$ の正側の加力中に主筋の1本が降伏した。 $R = 0.75\%$ の正負の加力中にさらに主筋が降伏し、最大耐力 $V = 408\text{kN}$ 、 $-437\text{kN}$ に至る。その後、部材角 $R$ の増加と共にせん断ひび割れと付着ひび割れが増加、拡大した。 $R = 5.0\%$ の正側の水平耐力が最大耐力の65%を下回ったため、安全を考慮して実験を中止した(**図-6 (d)**)。

海岸での暴露期間が3年でフライアッシュを混合したRC柱試験体C07C-F3は、 $R = 0.75\%$ の正側の加力時に主筋が降伏し、その後、 $R = 1.0\%$ の加力中に正負それぞれの最大耐力 $V = 411\text{kN}$ 、 $-418\text{kN}$ に達する。負側の $R = 4\%$ の加力中には、鉄筋の破断音を観測し、安全を考慮し実験を終了した。しかし実験終了後の観察では、主筋及び帯筋の破断は確認されていない(**図-6 (e)**)。

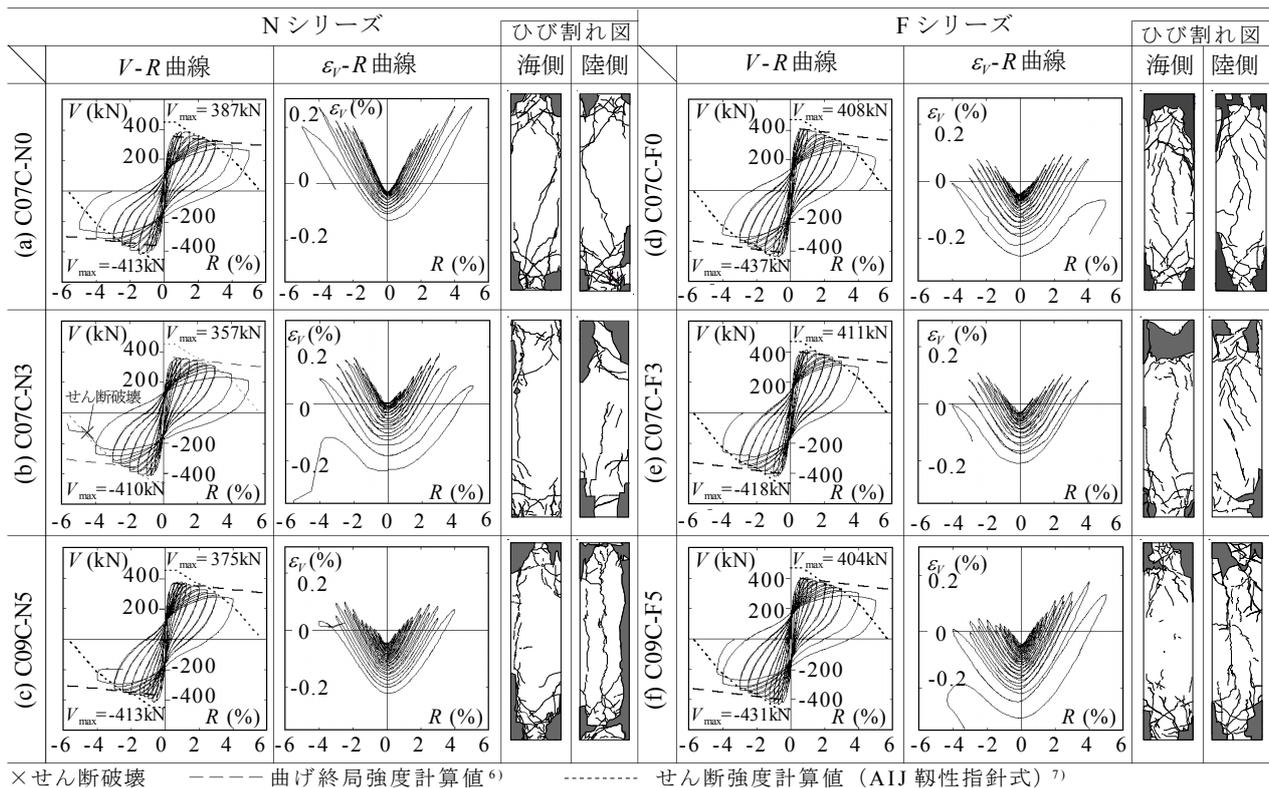


図-6 実験結果

海岸での暴露期間が5年間で、フライアッシュを混合したRC柱試験体C09C-F5は正負とも $R = 0.75\%$ で正負それぞれの最大耐力 $V = 404\text{kN}$ ,  $-431\text{kN}$ に達した。実験は $R = -5.0\%$ の負側の加力中 ( $R = -4.3\%$ 付近) に軸ひずみ $\varepsilon_r$ が大きく低下したため、実験を終了した (図-6 (f))。

全ての試験体の水平耐力は、最大耐力で、ほぼ曲げ強度に到達し、その後、せん断強度計算値<sup>7)</sup>に沿って低下した。

各RC柱試験体は、柱頭と柱脚やウェブとフランジ表面のひび割れの発生状況が異なり、正負側の最大耐力が異なるため、単純に最大耐力の比較のみで耐震性能の劣化を判断するのは難しい。そのため、RC柱試験体の正負側それぞれの実験値を曲げ耐力計算値で除し (以後、計算値到達度とする)、RC柱試験体の暴露期間による最大耐力の変化を確認した。図-7に各RC柱試験体の計算値到達度を示す。なお、この計算値も健全な鉄筋の引張試験結果と水平加力実験直前のシリンダー強度を用いた (表-1, 表-3)。図-7より各試験体とも計算値到達度の低下は、ほとんどない。

V-R曲線でも基準RC柱試験体と暴露RC柱試験体に大差はない。Nシリーズでは3年暴露RC柱試験体C07C-N3の履歴曲線が基準RC柱試験体よりわずかに膨らんでいる。5年暴露試験体C09C-N5では、C07C-N3の履歴曲線よりふくらみが小さくなった。Fシリーズは、暴露期間が増加するほど履歴曲線の膨らみが大きくなる。そこで履歴曲線を累積エネルギー吸収量 $W$ で評価することとした。図-8にNとFシリーズの累積エネルギー吸収量 $W$ と部材角 $R$ との関係を示す。なお、2007年に水平加力実験を実施した

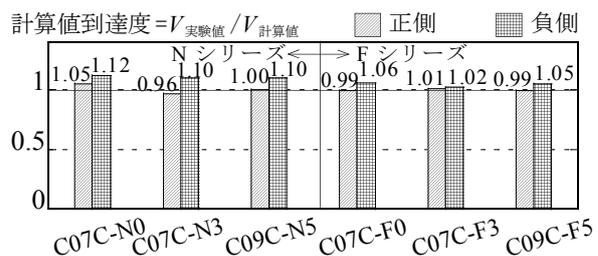


図-7 各試験体の計算値到達度 (実験値/計算値)

C07C-N0, C07C-F0, C07C-N3, C07C-F3は部材角 $R = 1.25\%$ の加力サイクルを実施していない。そのため図-8のC09C-N5とC09C-F5の累積エネルギー吸収量は部材角 $R = 1.25\%$ を除いたものとし、全RC柱試験体で実験値を得ることができた部材角 $R = 3.0\%$ までを示した。

Nシリーズの比較では、5年暴露RC柱試験体C09C-N5の累積エネルギー吸収量が、3年暴露RC柱試験体C07C-N3のそれより低下した。しかし、それでもC09C-N5の累積エネルギー吸収量は基準RC柱試験体C07C-N0を上回る (図-8 (a), 部材角 $R = 3.0\%$ 時点)。Fシリーズでは、基準RC柱試験体C07C-F0の累積エネルギー吸収量を3年暴露RC柱試験体C07C-F3がわずかに上回り、5年暴露RC柱試験体C09C-F5ではその差がさらに顕著に現れる (図-8 (b))。各シリーズの最大耐力付近の部材角 $R = 1.0\%$ での累積エネルギー吸収量も同様の傾向を示している。

暴露RC柱試験体の累積エネルギー吸収量が基準RC柱試験体のそれを上回るのは、錆による付着耐力の向上と鉄筋の錆による噛み合い効果、並びに鉄筋のプレストレ

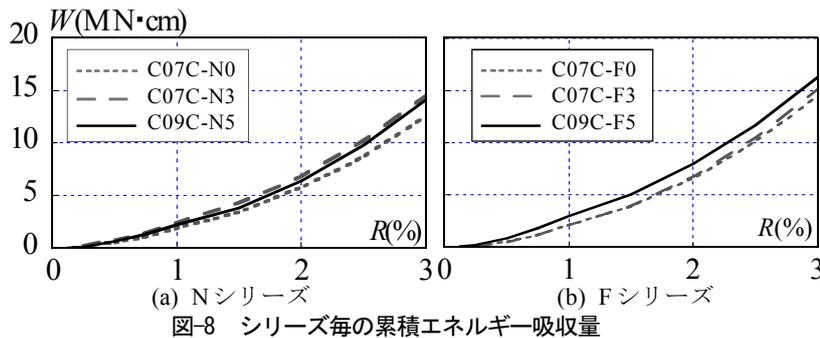
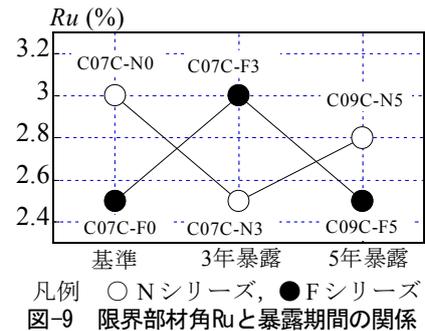


図-8 シリーズ毎の累積エネルギー吸収量



凡例 ○ Nシリーズ, ● Fシリーズ  
図-9 限界部材角 $R_u$ と暴露期間の関係

ス効果<sup>8)</sup>により主筋の付着力が増加したためと考える。文献8によれば「初期の付着剛性には、鉄筋の錆による噛み合い効果が大きく、鉄筋の腐食膨張によるコンクリートのひび割れ幅がある程度以内にあれば、初期剛性は大きくなる。同時に最大付着耐力に最も大きく影響しているのは、鉄筋の腐食膨張によってコンクリートに入るひび割れ幅で、初期ひび割れ幅の増加はコンクリートの拘束力を急激に低下し、最大付着応力を低下させる」とある。本稿における暴露モニター試験体の主筋平均腐食量は $2.1 \sim 4.1 \text{ mg/cm}^2$ の範囲にあり、文献8で最大付着応力を記録した腐食量 $3.4 \text{ mg/cm}^2$ の周辺にある。C09C-N5の累積エネルギー吸収量がC07C-N3より低下したのは、最大の初期ひび割れ幅が $1.4 \text{ mm}$ と大きかったためと推測する。また、C09C-F5の累積エネルギー吸収量は、C07C-F3に比べ増加したが、モニター試験体の主筋腐食量はC07C-F3に比べC09C-F5の方が、わずかに低下する結果となった(図-3(a))。しかし、かぶりコンクリートを取り除いたRC柱試験体のC07C-F3とC09C-F5の主筋の腐食量を比較すると(図-4)、C09C-F5の主筋腐食が激しいことがわかる。従って、C09C-F5の累積エネルギー吸収量の増加は、RC柱試験体の鉄筋腐食状況を勘案すると主筋の付着力が向上したためと推論できる。

本研究では、RC柱の最大耐力と共に、靱性にも着目した。図-9に各試験体の最大耐力側(負側)の限界部材角 $R_u$ を示す。限界部材角 $R_u$ は負側の最大耐力の80%を下回った時点の部材角を用いた。各試験体の限界部材角 $R_u$ は、多少のばらつきがあるものの大差はない。このことから主筋と帯筋の平均質量減少率がそれぞれ1.1%、3.5%程度であれば、RC柱の靱性に及ぼす影響は少ない。暴露期間の増加によりRC柱の累積エネルギー吸収量が低下したのもあったが、その値は基準RC柱試験体に比べ大きく、耐震性能の劣化よりコンクリート表面のひび割れや、鉄筋腐食などの耐久性の低下の方が、はるかに大きいことが分かった。

## 5. 結論

(1) 5年間の暴露試験の結果、フライアッシュを混合したFシリーズは、Nシリーズに比べ遮塩性能が高く、鉄筋

腐食とひび割れによる試験体の損傷は軽度であった。

- (2) RC柱試験体のひび割れは、暴露期間3年の微細なひび割れから、暴露期間5年で一目してひび割れと判断できるものが目立つようになった。
- (3) 5年暴露RC柱試験体C09C-N5の累積エネルギー吸収量は、ひび割れ幅が $1.4 \text{ mm}$ と拡大したため、3年暴露RC柱試験体に比べ低下したが、その値は基準RC柱試験体より多い。Fシリーズでは、RC柱試験体の主筋の腐食に伴い累積エネルギー吸収量が全体的に増加した。
- (4) 海岸での暴露によりコンクリート表面にひび割れが生じ、鉄筋が激しく腐食しているRC柱でも、主筋と帯筋の平均質量減少率がそれぞれ1.1%、3.5%程度であれば、RC柱の最大耐力と靱性等の耐震性能に及ぼす影響は少なく、鉄筋腐食やコンクリート表面のひび割れなどの耐久性能の低下の方が大きい。

## 謝辞

本研究は、平成21年度科学研究費補助金(若手研究(B)、研究代表者:中田幸造、課題番号:20760378)により実施された。ここに謝意を示す。

## 参考文献

- (1) 日本建築学会:フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説, 2007.
- (2) 船木裕之, 山川哲雄ほか: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, pp. 139-144, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, 2008.
- (3) 例えば, ソーン ウィーラほか:フライアッシュを細骨材の一部として代替したコンクリートの遮塩性評価, pp.17-25, 日本建築学会構造系論文集, 第560号, 2002.
- (4) 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, 1997.
- (5) 土木学会:コンクリート標準示方書 設計編, 2007.
- (6) 日本建築センター:構造設計指針・同解説, 1988.
- (7) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999.
- (8) 佐々木淳ほか:鉄筋の発錆が付着性状に及ぼす影響, pp. 139-144, コンクリート工学年次論文集, Vol. 13, No. 2, 1991.