

論文 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

船木 裕之^{*1}・山川 哲雄^{*2}・山田 義智^{*3}・中田 幸造^{*4}

要旨: 沖縄の海岸で約3年にわたり実大に近い断面積を有するRC柱の自然暴露試験を行った。ここでは、塩害で生じたRC柱のひび割れ及び鉄筋の物理的性能の劣化が耐震性能に及ぼす影響と、フライアッシュを混入したRC柱の遮塩性能とコンクリート圧縮強度の増進による長期的な破壊性状の変化を究明するため、一定軸力下で正負繰り返し水平加力実験を行った。自然暴露試験の結果、フライアッシュの混入されたコンクリートの遮塩性能が大きいことがわかった。また、長期暴露試験中における3年間の自然暴露試験では、基準試験体に比べて暴露試験体の累積エネルギー吸収量がわずかに上回った。

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

1. はじめに

沖縄県は高温・多湿の亜熱帯環境という厳しい腐食環境下であり、加えて島嶼環境という地理的条件、及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やすい。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、山川らは沖縄の西海岸で自然暴露した実大の1/3程度の縮小試験体を用いて、塩害により損傷を受けたRC柱の耐震性能の研究を行ってきた¹⁾。しかしながら1/3程度の縮小試験体は、かぶり厚さも1/3となり、塩分の浸透量の観点から現状と異なる結果を導き出す恐れがある。つまり塩害を論じる際のかぶり厚さは、実物と同程度の絶対量が重要と思われる。そのため、塩害調査には実物に近い正方形断面柱を用いる必要がある。また、塩害によるRC柱の損傷を低減する手法を模索する観点から、塩害に強いといわれているフライアッシュを混入したRC柱の有効性について検討を行う。そこで2004年より沖縄の西海岸でフライアッシュを混入したコンクリート及び普通コンクリートを用いた実大に近いRC柱の自然暴露試験を開始している。

本研究の目的は、沖縄の西海岸で自然暴露された各種の実大に近いRC柱試験体を用い、コンクリートのひび割れ、及び鉄筋の損傷レベルと耐震性能の関係を、一定軸力下のもとで行う正負繰り返し水平加力実験により、検討することである。

2. 実験計画

試験体寸法をFig. 1に示す。試験体はRC柱試験体とモニター試験体の2種類で1組として構成されている。RC柱試験体は正負繰り返し水平加力実験で耐震性能の評価

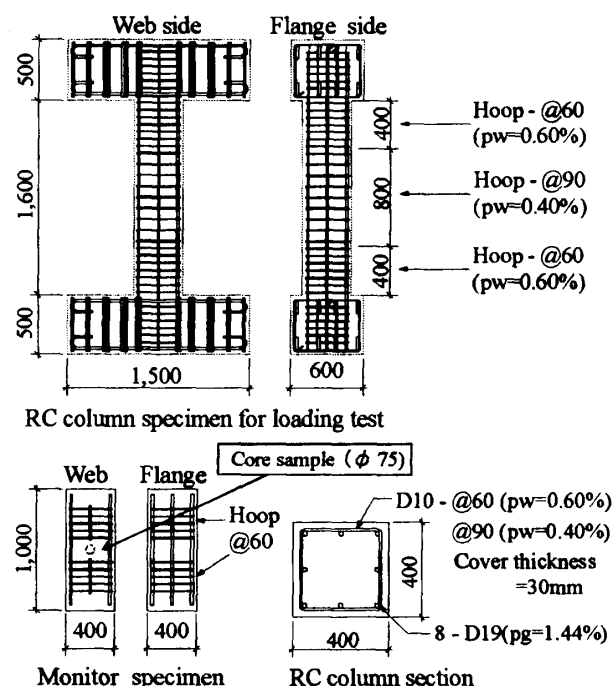


Fig. 1 Details of test specimens. (unit mm)

を行うために使用する。寸法は400×400mmの実物に近い柱断面であり、柱内法高さは1,600mm、せん断スパン比 2.0 である。主筋は8-D19 ($p_g=1.44\%$) を用い、帯筋は端部 60mm 間隔 ($p_w=0.60\%$)、中央部 90mm 間隔 ($p_w=0.40\%$) とし、曲げ破壊するように設計されている。端部は中央部の1.5倍の帯筋を配置している。かぶり厚さは建築基準法で定められている最少値 30mm である。また、モニター試験体は、飛来塩分の浸透量と腐食鉄筋の関係を調査するために使用し、寸法はRC柱試験体と同様の断面積 (400mm×400mm) を持ち、高さは1,000mmである。帯筋は60mm間隔 ($p_w=0.60\%$) で配筋し、RC柱試験体の柱頭、柱脚と同じ配筋である。Table 1 及び Table 2

*1 琉球大学大学院 理工学研究科 環境建設工学専攻 (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科 教授 工博 (正会員)

*3 琉球大学 工学部環境建設工学科 教授 博士(工学) (正会員)

*4 琉球大学 工学部環境建設工学科 助教 工修 (正会員)

に水平加力実験を行う実大RC柱試験体一覧と、実験に使用する鉄筋種類と健全時の力学的特性を示す。実験では、暴露期間の差異により塩害がRC柱の鉄筋に与える力学的特性の劣化とコンクリートのひび割れが、耐震性能に与える影響を明らかにする。試験体の製作から、暴露期間3年のちに1回目の水平加力実験を行い、以後、ひび割れの状況を調査しつつ次の水平加力実験までの暴露期間を決定していく。また、Table 1に示す各試験体シリーズの差異は、水セメント比とフライアッシュ混入の有無である。水セメント比の差異により、コンクリートの密実性が塩分の浸透性状に与える影響を確認する。また、フライアッシュの有無では、フライアッシュが混入されたコンクリートと普通コンクリートの遮塩性能が耐久性に与える影響を調べる。

Fig. 2は、Fig. 1に示すRC柱試験体のコンクリート強度 σ_B の変化による柱の曲げ終局強度²⁾とAIJ靱性指針式による柱のせん断強度³⁾計算値の推移である。Fig. 2よりコンクリート強度が増進すると、AIJ靱性指針によるせん断強度が曲げ終局強度を下回り、設計当初、曲げ破壊先行で計画されていたRC柱がせん断破壊先行に変化し、脆性的な破壊を起こす恐れがある。計算値では、コンクリート強度 $\sigma_B=13.5\text{MPa}$ (Lシリーズ)で計画されたせん断余裕度は1.05、 $\sigma_B=21\text{MPa}$ で設計された柱(N,Fシリーズ)のせん断余裕度は1.18となり、全試験体とも曲げ破壊先行で計画されていることとなる。しかし、コンクリート強度 $\sigma_B=49.7\text{MPa}$ では、AIJ靱性指針によるせん断強度が曲げ終局強度を下回り、せん断破壊先行に変化することが確認できる。特にフライアッシュの混入されたコンクリート強度は、長期的に増進するため⁴⁾、強度の増進量がRC柱の破壊性状に与える影響を検証することは重要である。

Table 1 RC column specimens.

	C07C-N series		C07C-L series		C07C-F series	
	specimen		specimen		specimen	
	B.M.	Exposure test	B.M.	Exposure test	B.M.	Exposure test
	C07C-N0	C07C-N3	C07C-L0	C07C-L3	C07C-F0	C07C-F3
Water cement ratio (w/c)	61.5%		75.0%		61.5%	
σ_B (nominal strength)	21.0 MPa		13.5 MPa		21.0 MPa	
σ_B (4 weeks)	32.2 MPa		24.3 MPa		35.5 MPa	
σ'_B (3 years)	36.9 MPa	37.6 MPa	29.7 MPa	25.5 MPa	43.9 MPa	43.1 MPa
Casting date	2004.5.21		2004.5.28		2004.6.4	
Exposure period (year)	2004/7/31~2007/7/30 (3 years)					
Loading test date	2007.10.2	2007.9.21	2007.9.27	2007.9.25	2007.10.1	2007.9.26
Age	3.4 years (1232 days)	3.4 years (1221 days)	3.3 years (1219 days)	3.3 years (1216 days)	3.3 years (1216 days)	3.3 years (1211 days)
Mineral admixture	-		-		Fly Ashes 60kg/m ³	
Common details	Rebar: 8-D19 ($p_g=1.44\%$), Hoop: D10-@60 ($p_w=0.60\%$) D10-@90 ($p_w=0.40\%$), Shear span to depth ratio:M/(VD)=2.0, Axial force ratio:N/(bD σ_B)=0.2, Cover thickness=30mm.					

Notes: σ_B (nominal strength)=nominal strength of concrete, σ_B (4 weeks)=cylinder strength of concrete, B. M. = Bench mark specimen, σ'_B (3 years)=cylinder strength of concrete before the loading test, p_g =ratio of total longitudinal reinforcement, p_w =shear reinforcement ratio.

以上の観点からRC柱試験体とモニター試験体は、N, L, Fの3シリーズで構成することとし、各シリーズ4体、合計12体を製作した。Nシリーズは呼び強度 $\sigma_B=21.0\text{MPa}$ (w/c=61.5%)の普通コンクリートを用い、中低層RC造建物の柱を想定した。Lシリーズは呼び強度 $\sigma_B=13.5\text{MPa}$ (w/c=75.0%)の低強度コンクリートである。Fシリーズは細骨材の代替としてJISⅢ種のフライアッシュを、外割で60kg/m³加えた。2004年7月31日より、沖縄の西海岸で暴露試験体(暴露RC柱試験体と暴露モニター試験体)12体のうち9体(3シリーズ×3体)と、各暴露試験体のシリンドラ供試体の暴露試験を開始した。Photo 1は暴露試験場の様子である。暴露試験場は、風が強いときには波しぶきがかかる場所である。また、暴露RC柱試験体との比較のために塩害の影響を受けにくい琉球大学工学部構造実験棟の隣の屋外で基準RC柱試験体3体(N0, L0, F0)の気中養生も同時期より開始している。2007年7月30日、

Table 2 Properties of reinforcement.

		a(mm ²)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_u (MPa)	E_s (GPa)
Rebar	D19	287	374	0.19	570	194
Hoop	D10	71	410	0.23	569	173

Notes: a = cross section area, σ_y = yield strength of steel, ϵ_y = yield strain of steel, E_s = modulus of elasticity.

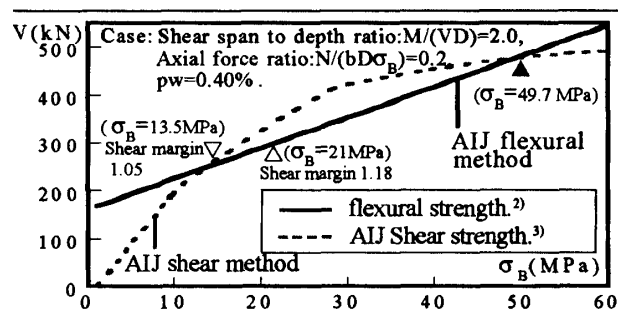


Fig. 2 Calculated lateral capacity corresponding to shear and flexural strength versus concrete cylinder strength.

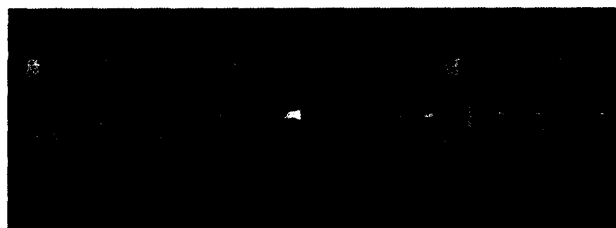


Photo 1 Exposure of RC column specimens in Okinawa seashore.

N3, L3, F3の暴露RC柱試験体及び暴露モニター試験体を各1体ずつと、暴露RC柱試験体の脇で気中養生されたシリンダー供試体を各3～5体ずつ、暴露試験場から琉球大学工学部に運びこんだ。基準試験体と暴露試験体及びシリンダー供試体は約3年の気中養生が終了している。

3. 実大RC柱の自然暴露試験

9体の暴露試験体は琉球大学工学部構造実験棟で製作後、約2ヶ月間の養生のち、2004年7月31日より沖縄の西海岸で自然暴露を行っている。暴露調査は目視によりひび割れの発生状況、ひび割れ幅、さび汁の有無の3項目について6ヶ月ごとに実施している。Fig. 3に水平加力実験前の海側に面したRC柱試験体の1面のひび割れ図と、水平加力実験終了後にかぶりコンクリートを除去した同面の鉄筋の腐食状況を、各試験体ごとに示す。Fig. 3のひび割れ図の黒色の塗りつぶしは、さび汁を表し、鉄筋の腐食状況の太線及び細線は、腐食場所、腐食状況を示す。太線は鉄筋の腐食グレードがⅢ又はⅣのいずれかの場合であり、細線はⅡ以下を示す。腐食グレードの判定は、目視により日本建築学会の「鉄筋の腐食グレードの判定基準」⁹⁾に準じて5段階評価で行った。

暴露RC柱試験体N3, L3, F3は、共に6ヶ月目である2004年12月の調査時よりさび汁が付着し、30ヶ月目(2006年12月)の調査では、N3及びF3に初めてひび割れが確認された。36ヶ月目(2007年6月)の調査では、N3, F3において帯筋、主筋に沿ってひび割れが進行していた。水平加力実験後、かぶりコンクリートを撤去し、目視調査した結果、N3は鉄筋の腐食が一番激しかった。これは、N3の上部のひび割れより酸素と水が供給され、更に鉄筋の腐食が促進したためと思われる。L3は、はつりだし後の内部の鉄筋調査で鉄筋の損傷が多く見られたが、表面にひび割れが発生せず、さび汁だけが流れ出していた。L3は水セメント比が大きく、密実でないため腐食生成物が外部に染み出しやすく、腐食生成物の膨張圧が高くなり、ひび割れにいたらなかったためと考える⁹⁾。基準RC柱試験体は、全試験体の帯筋及び主筋がグレードⅠで腐食は見られなかった。

実大RC柱への塩分の影響と腐食鉄筋の力学的性能を検証するために用意していた各RC柱試験体に対応した

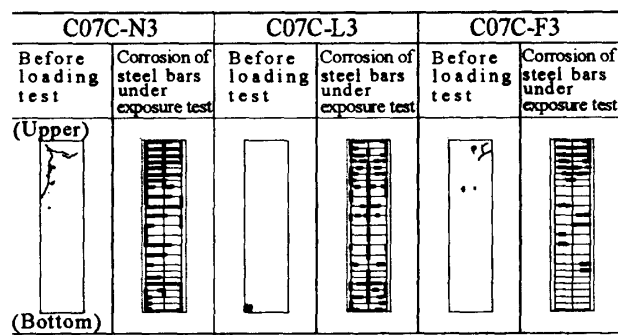


Fig. 3 Cracks of cover concrete and corrosion of steel bars in RC column specimen.

モニター試験体(400×400×1,000mm)の中央部(Fig.1参照)から、コアコンクリート(φ75mm)を海側及び陸側からそれぞれ採取し、含有塩分量を全塩分量で測定した。Fig. 4にその結果と誤差関数を用いた同定法によって求めた塩分の拡散係数Dcを示す。拡散係数Dcは、コンクリート表面付近の塩分が一時的に下がった値を除いて計算した。また、Fig. 4のハッチは発錆限界塩分量(CI'=1.2kg/m³)を超えた塩分量の箇所を示す。なお、各モニター試験体とも、コンクリート表面からの塩分含有量が常に変化しなくなった時点で塩分含有量試験を終了した。全ての基準モニター試験体からは塩化物総量規制値(CI'=0.3kg/m³)以下の値が検出された。西海岸で自然暴露を行った各シリーズの暴露モニター試験体は、基準モニター試験体より飛来塩分がコンクリート内部に浸透していた。暴露モニター試験体の飛来塩分の浸透深さは、L3が一番深く浸透しており、次にN3, F3の順である。拡散係数Dcも海側、陸側でそれぞれ同様の順序である。特に水セメント比が大きいL3は、3年の暴露期間で、コンクリート表面から約7.5cmの深さで、発錆限界塩分量を上回る塩分含有量が測定され、帯筋及び主筋の全体が腐食される可能性がある。N3は、コンクリート表面から6cmの位置で帯筋及び主筋全体が発錆限界塩分量に達し、F3は、約4.5cmの深さで帯筋の全体及び主筋の一部が発錆限界塩分量の範囲に入っていた。

また、塩害による鉄筋の腐食が鉄筋の力学的特性に及ぼす影響を検討するため、コア抜き作業終了後、各暴露モニター試験体から腐食した鉄筋(主筋:D19 帯筋:D10)をはつりだし、腐食グレード⁹⁾、質量減少量、降伏点強度、引張強さ、破断時の伸び率などを計測した。Fig. 5に腐食した主筋(D19)の質量低下率と腐食グレード、降伏強度残存率、引張強さ残存率、伸び(破断時ひずみ)残存率との関係を示す。各残存率は、腐食した鉄筋の試験結果を健全な鉄筋の試験結果の平均値で除した値である。なお、鉄筋は腐食すると降伏点強度が下がるだけでなく、降伏点が明確に現れなくなる。従って降伏点強度は0.2%の伸び点から最初の直線の勾配に対して平行線を引き、

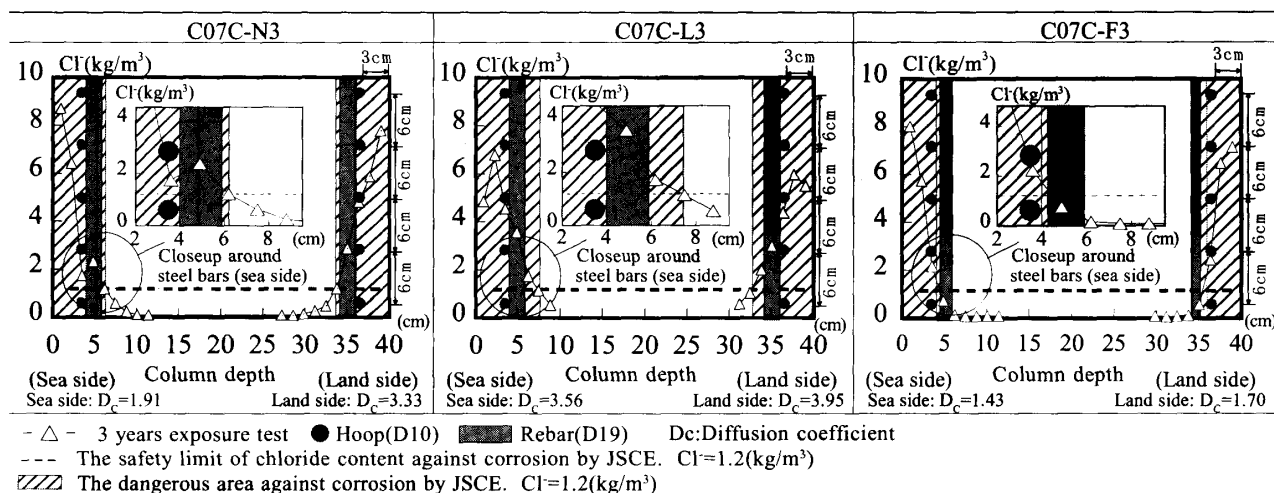


Fig. 4 Chloride content in monitor specimen.

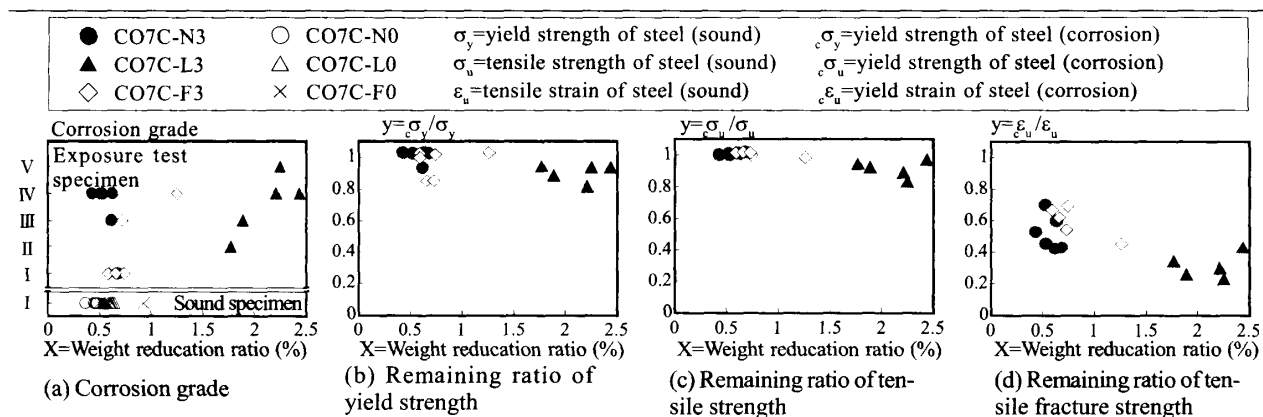


Fig. 5 Remaining ratio mechanical property versus weight reduction ratio of corroded steel bars.

これと交わった点を降伏点とした。また、引張強度は最大強度時の引張力を公称断面積で除した値とした。Fig. 5 (a)は上下に暴露モニター試験体と、基準モニター試験体から取り出したそれぞれの質量低下率を示している。基準モニター試験体の質量低下率が0.5%付近に集中しているため、暴露モニター試験体のN, Fシリーズの質量低下率の0.5%前後の値は誤差範囲であり、暴露が質量変化の起因でないと考えている。Fig. 5より自然暴露試験終了後の鉄筋は、降伏点強度、引張強さ、伸び能力ともに質量減少率の増加に対応してわずかながら低下していることがわかる。その中でも伸び能力は健全な鉄筋の平均伸び率の約2割から8割程度に低下しており、劣化が激しい。また、L3の主筋の質量減少率は、N3とF3の約3倍～4倍の値を示していたため、L3は鉄筋の腐食が激しい状況にあったと伺える。

4. 正負繰り返し水平加力実験

4.1 加力方法

3年間の暴露試験を終了した各シリーズの暴露RC柱試験体1体(N3, L3, F3: 計3体)及び基準RC柱試験体(N0, L0, F0: 計3体)の合計6体の正負繰り返し水平加力実験を実施した。実験はFig. 6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。水平加力は部材角 $R=0.125\%$, 0.25% を各1回、 0.5% から 0.5% 増分で2回ずつ3%まで行い、4%, 5%を1回ずつ繰り返した。

4.2 実験結果

Fig. 7に各試験体の水平荷重 V と部材角 R の関係を示す。Fig. 7の破線及び点線は、曲げ終局強度²⁾及びせん断強度³⁾計算値である。計算で使用した基準試験体及び暴露試験体のコンクリート強度は、これらの試験体を加力する直前に圧縮破壊した材齢3年のシリンダー圧縮強度である。基準試験体及び暴露試験体のシリンダー供試体は、これら試験体の脇で約3年間の気中養生を行った。鉄筋の引張強度は健全鉄筋の引張試験結果(Table 2)とした。

暴露を行っていない基準RC柱試験体(N0, L0, F0)の V - R 曲線を見ると、最大耐力はF0が大きく、次にN0, L0の順である。これはシリンダー圧縮強度の差異が原因と考える。Table 1に示す基準RC柱試験体の加力実験直前のシリンダー圧縮強度はF0が一番大きく($\sigma_b'=43.9$ MPa: 3 years), ついでN0($\sigma_b'=36.9$ MPa: 3 years), L0($\sigma_b'=29.7$ MPa: 3 years)である。Lシリーズは呼び強度が小さいた

め、シリンダー圧縮強度は一番小さい。NとFシリーズの呼び強度は同じである。Fシリーズはフライアッシュが混入されており、これがコンクリート強度の長期的な増進に明らかに影響を与えている。なお、この差は4週強度ですでに現れている(Table 1)。フライアッシュの混入されたコンクリート強度の増進は、Fig. 7に示す曲げ終局強度とせん断強度計算値にも影響を与えている。F0の場合、計画時のせん断余裕度は1.18 ($\sigma_b=21.0$ MPa: nominal strength) である。基準RC柱試験体と同条件の気中養生で、材齢3年まで養生されたシリンダー圧縮強度で計算したせん断余裕度は1.06 ($\sigma_b=43.9$ MPa: 3 years) となり、コンクリート強度の増進によりせん断余裕度が小さくなった。また、Fig. 2, 7より、N0に比べてF0のせん断余裕度は小さくなっていることから、フライアッシュを混入したコンクリート強度の長期的な推移は、柱の破壊性状に対して重要な検討項目であることが再確認できた。暴露RC柱試験体(N3, L3, F3)では、先に述べたシリンダー

圧縮強度の差により、基準RC柱試験体と同様、F3の最大耐力が一番大きい。暴露シリンダー供試体と基準シリンダー供試体の圧縮強度を比較すると、N, Fシリーズでは、ほぼ同じであるが、Lシリーズは暴露シリンダー供試体の方が小さい。この原因は明らかではない。基準RC柱試験体と暴露RC柱試験体のV-R曲線を比較すると、暴露RC柱試験体の正負側で、履歴性状に差が生じている。これはコンクリート表面のひび割れと鉄筋の腐食が一樣でないことが原因と考える。また、履歴曲線の形状はN3, L3の暴露RC柱試験体でやや膨れている。Fig. 8に各暴露RC柱試験体のウェブ面(海側)の実験終了後のひび割れ図を示す。L3を除くRC柱試験体は、柱頭及び柱脚に塑性ヒンジを形成し(Fig. 8)、曲げ降伏後のせん断強度の劣化が生じた。L3を除くV-R曲線が、部材角の進行に伴い、AIJ靱性指針のせん断強度計算値に沿って低下していることから曲げ降伏後のせん断強度の劣化であったことがわかる。N3は、海側のウェブ面にせん断ひび割れが少ないが、反対側のウェブ面には、水平加力実験による多数のせん断ひび割れを確認しているため、同様の破壊性状である。L3は曲げ破壊で実験を終了した。

Fig. 9に、各シリーズごとの正側のスケルトンカーブの比較を示す。正側の最大耐力を比較するとL, Fシリーズ

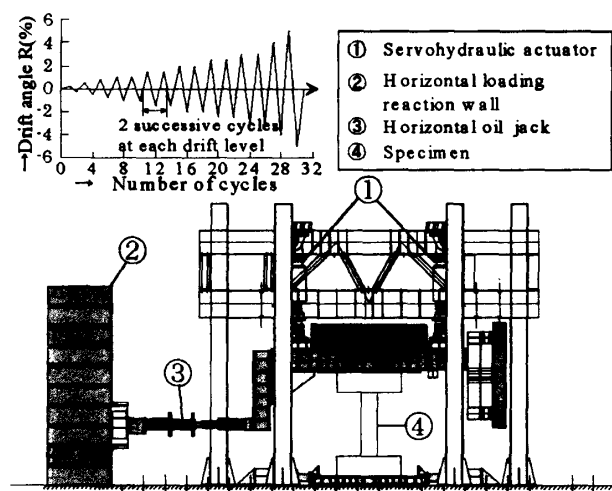


Fig. 6 Test setup and loading program.

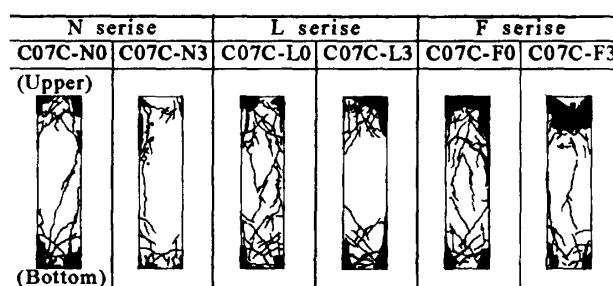


Fig. 8 Observed final cracking patterns of seaside face.

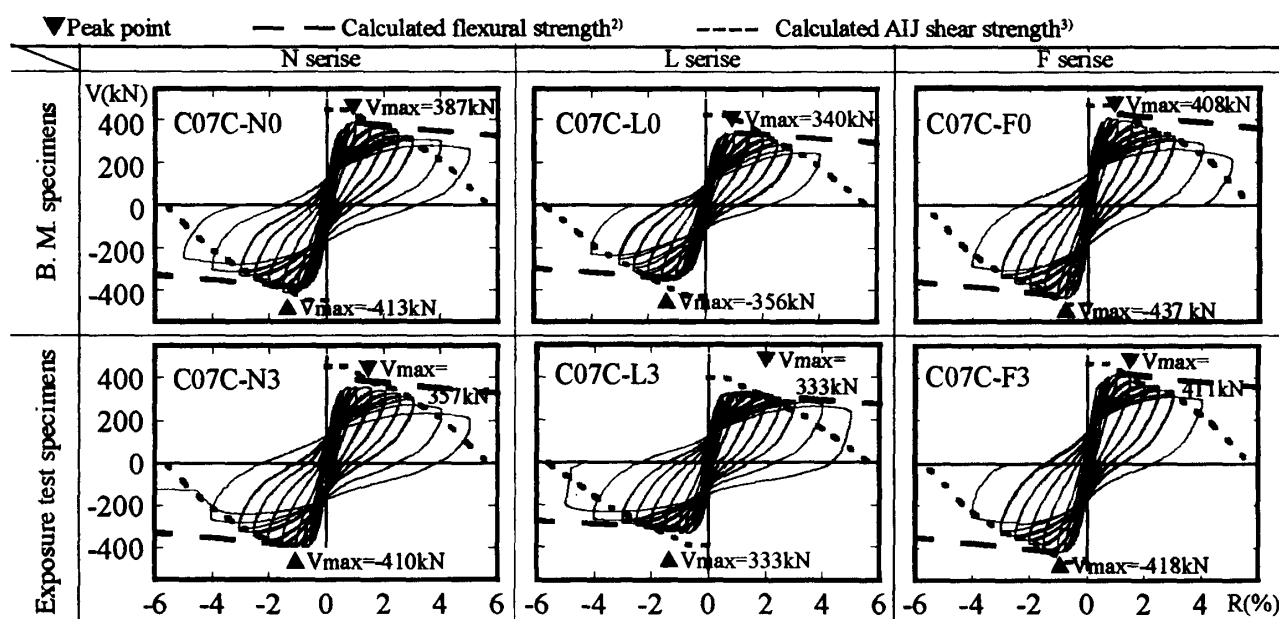


Fig. 7 V-R relationships.

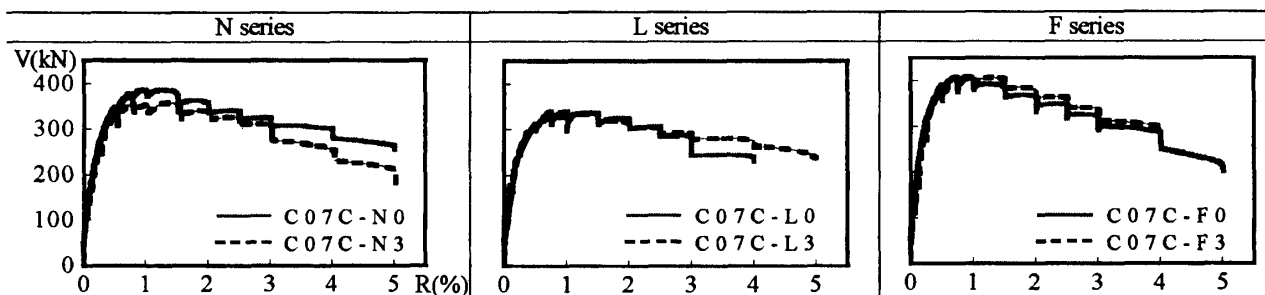


Fig. 9 Comparison of measured skeleton curves.

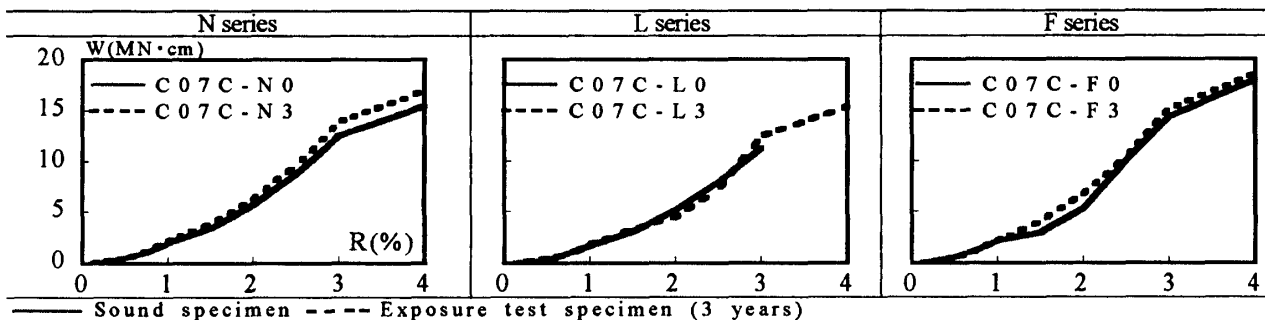


Fig. 10 Comparison of accumulated energy absorption.

は同等であるが、Nシリーズのみ暴露RC柱試験体が基準RC柱試験体を下回り、正側で30kNの差が出た。しかしL、Fシリーズは暴露RC柱試験体と基準RC柱試験体の負側の最大耐力で差があり (Fig. 7)、荷重・変形関係から基準RC柱試験体と暴露RC柱試験体の差は明確でない。そこでRC柱試験体の累積エネルギー吸収量で耐震性能の判断を行うこととした。

Fig. 10に、各シリーズごとのRC柱試験体の累積エネルギー吸収量の比較を示す。各シリーズとも層間変形角 $R=1\sim2\%$ から実験値に変化が見られ、 $R=3\%$ の時点では、暴露RC柱試験体の累積エネルギー吸収量が、わずかに基準RC柱試験体を上回っている。文献7)によれば、腐食膨張に伴うプレストレス効果、及びさびによる噛み合い効果で主筋の付着が改善されたためと解釈できる。

5. まとめ

- (1) 大きい水セメント比を用いた暴露試験体C07C-L3($w/c=75.0\%$, $\sigma_g=13.5\text{MPa}$)は、塩分総量がコンクリート表面より約7.5cmの地点において、発錆限界塩分量($Cl^-=1.2\text{kg/m}^3$)を上回り、鉄筋を腐食させた。しかし、コンクリート表面にひび割れを生じさせなかった。これは、水セメント比が大きく、密実でないため腐食生成物が外部に染み出しやすく、腐食生成物の膨張圧が高くならず、ひび割れにいたらなかったためである。
- (2) フライアッシュを外割で用いた暴露試験体C07C-F3は、暴露試験体L3、N3に比べて試験体内部への塩分の浸透量が最も少なかった。
- (3) フライアッシュを混入したRC柱試験体Fシリーズは、コンクリート長期強度の増進により、曲げ破壊先行で

設計を行っても時間経過に伴い、せん断破壊が生じる可能性が高いことが計算上明らかになった。

- (4) 自然暴露期間が3年を経た暴露RC柱試験体は、一部の暴露RC柱試験体(N3, F3)の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Ⅳという外観上、耐久・耐震性能の検討が必要であるRC柱となる。しかし、今回の実験では、暴露RC柱試験体の累積エネルギー吸収量は基準RC柱試験体に比べわずかに上回った。

<参考文献>

- 1) 上松茂, 山川哲雄, 中程陽香, 山田義智: 沖縄の海岸で自然暴露した塩害損傷RC柱の耐震性能実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No.2, pp. 1483-1488, 2005.
- 2) 日本建築センター: 構造設計指針・同解説, pp. 233, 1988.
- 3) 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, pp. 142-144, 1999.
- 4) SORN Vira, 山田義智ほか: フライアッシュコンクリート中への塩化物イオン浸透性に関する研究, コンクリート工学年次論文集: vol. 24, No.1, pp. 603-608, 2002.
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性・診断および補修指針(案)・同解説, 日本建築学会, 1997.
- 6) 梶田佳寛ほか: 塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する実験, 日本建築学会構造系論文報告集, No.435, pp. 19-27, 1992. 5.
- 7) 山田義智ほか: 損傷を受けた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(その2. 実験結果と付着性状について), 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 941-942, 1992. 8.