論文 自然暴露で損傷したRC柱の耐震加力実験と解析

仲程 陽香^{*1}・山川 哲雄^{*2}・山田義智^{*3}

要旨:本論文は,東シナ海に面した沖縄の海岸で自然暴露試験を行ない,塩害が引き起こ す鉄筋の腐食や,それに伴うひび割れがRC柱の耐震性能に及ぼす影響に関して実験的に検 討したものである。その結果,孔食の発生により腐食した鉄筋の強度と伸び能力が大幅に 低下することによって,補強筋が破断しやすくなり,帯筋が破断した場合には,脆性的な せん断破壊が容易に生じる。一方,主筋が破断すると,せん断スパン比がやや小さいRC柱 であっても曲げ破壊モードになり,耐力が低下しながらもある程度の変形性能を維持した。 キーワード:自然暴露,塩化物イオン,腐食,耐震性能,RC柱,靱性,水セメント比

1. はじめに

塩害により損傷を受けた RC 柱の耐震性能を 検証するために,自然暴露試験体を用いて一定 軸圧縮力下の正負繰り返し水平加力実験を行っ てきた。その結果,鉄筋の腐食が進むと強度と 伸び能力が著しく低下して破断しやすくなり, 靱性に富んだ曲げ破壊性状を有する RC 柱でさ えも,帯筋の破断によりせん断破壊性状に変化 しやすいことが明らかになった¹⁾。

そこで,本研究では塩害により腐食した主筋 と帯筋の劣化が,曲げ強度およびせん断強度の 低下にどのような影響を及ぼすのかを検証する ことを目的に,1999年より東シナ海に面した沖 縄の海岸で自然暴露試験を開始した。塩害によ りひび割れが生じ,鉄筋の腐食が進行した自然 暴露試験体の耐久性能を照査し,正負繰り返し 加力実験を行い,耐震性能の劣化について検討 することが,本研究の目的である。

2. 試験体概要

1999年9月より,沖縄の西海岸で自然暴露試 験を開始した。試験体は,せん断スパン比1.5の RC柱試験体が4体である。なお,1体は現在も 同じ場所で暴露中である。本暴露試験体は一定 軸力下の正負繰り返し実験で主筋が破断してい るが,文献1)で発表した暴露試験体は帯筋が破 断した。なお,この試験体は1997年7月より自 然暴露試験を開始し,2001年9月に加力実験を



Table 1 Sound and exposure test RC column specimens

*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助教授 博士(工学) (正会員)

行った。この主筋の破断と帯筋の破断の差異が できた原因を検討するために,既発表の文献1) から,基準試験体(非暴露試験体)C01L-NC0と, 暴露試験体C01L-NC1の結果も引用する。試験 体一覧をTable1に示す。Table2には材料の力 学的特性を示す。ここで既発表の試験体を,C01 シリーズと呼称し,今回実験したC02/03Mシ リーズと区別する。なお,C02/03Mシリーズは 同一配筋で,同一日に同じコンクリートで打設 された試験体である。

これらの試験体の配筋は,主筋が12-D10(Pg=1.36%)で,帯筋がD6-@30(Pw=0.85%) と全て共通であるが, C01L シリーズは M/(VD) = 2.0, C02/03M シリーズは M/(VD) = 1.5 とせん 断スパン比が異なる。C01L および C02/03M シ リーズのかぶり厚さは,それぞれ25mmと17mm である。また,水セメント比が63%と83%で, コンクリート強度が 35.8~38.3MPa に対して, 22.9~23.1MPaと大きく異なる。C01Lシリーズの 方が C02/03M シリーズより,水セメント比が小 さく,コンクリート強度,かぶり厚さが大きい ため,比較的腐食が進行しにくい試験体である。 83% という高い水セメント比を用いた理由は, 1971年以前のRC造建物を想定した耐震補強実 験を行うために,コンクリート強度を 20MPa 程 度に抑えるためである。また 63% の水セメント 比は,実際に多く使用されているRC造建築物の 水セメント比として採用した。今回は,これら の試験体シリーズで製作したRC柱試験体を,塩

害実験用の自然暴露試験体として使用した。

3. 自然暴露試験

C02/03Mシリーズは,1999年9月から2002年 7月および2003年8月までの3年から4年間,沖 縄の東シナ海に面した海岸で自然暴露試験を

Table 2 Properties of reinforcement

							_
		M/(VD)	a(cm ²)	σ _y (MPa)	E y(%)	σu(MPa)	Es(GPa)
Rebar	D10	1.5	0.71	411	0.21	579	197
		2.0		389	0.23	548	181
Ноор	D6	1.5	0.32	466	0.21	524	223
		2.0		388	0.22	536	184

Notes : $a = cross section area, \sigma y = yield strength of steel,$ $\epsilon y = yield strain of steel, \sigma u = tensile strength of steel,$ Es = modulus of elasticity.







Fig. 2 Chloride content in monitor column

行った。基準試験体は室内(実験棟内)に保存した。以下に自然暴露を行った試験体の耐久性能に関する実験結果を示す。Fig.1に暴露期間中に生じたひび割れの経年変化の状況を,各試験体ごとに示す。図中の塗り部分はコンクリートに錆汁が発生している箇所を表している。

C01Lシリーズは,経年変化とともにひび割れ が進行しているが,C02/03Mシリーズはひび割 れはほとんど発生せず,錆汁が流れ出ているだ けである。これは,C02/03Mシリーズ(W/C = 83%)のほうが,C01Lシリーズ(W/C = 63%)に 比べて水セメント比が高く,疎なコンクリート であるため,腐食成生物が外部に染み出しやす く,そのため腐食成生物による膨張圧が高くな らず,ひび割れ発生に至らないためだと考えら れる。しかし,外部からの腐食を促進する酸素 や水分は,コンクリート内部まで到達しやすく なるため,水セメント比の低いC01Lシリーズよ り鉄筋の腐食は大きいということがわかる²⁾。

各自然暴露試験体に対応させた,材料用の暴 露無筋モニター試験体 (250 × 250 × 500mm)か らコンクリートコア (1000 × 250mm)を採取し, 含有塩分量を全塩分量で測定した。Fig.2にその 結果を示す。C02M-NC1,C01L-NC1 は海側,陸 側ともに塩分がコンクリート内部に浸透してい るが,コンクリート表面より約70~90mm 以上深 くなると塩分の影響は少なくなっている。しか し,その値は塩分量総量規制値(Cl = 0.3kg/m³)³ を,わずかに上回っている値となっている。 C02M-NC1より暴露期間が1年長いC03M-NC2 は,コンクリート内部でも塩分量が約5.0 ~ 8.0kg/m³とかなり大きく,1年間の暴露期間の差 異が含有塩分量に大きな影響を与えている。こ れは水セメント比が83%と大きいことが原因す るためなのか,今後検討していく必要がある。

塩害による鉄筋の腐食が鉄筋の力学的性能に およぼす影響を調べるために,各自然暴露試験 体と対応した同一配筋の暴露有筋モニター試験 体(250×250×500mm)から腐食した鉄筋(主筋: D10,長さ42cm)をはつりだし,腐食グレード, 質量の減少率,降伏点強度,引張強さ,伸び率 などを測定した。腐食グレードの測定はTable 3 に示す鉄筋の腐食グレードの判定基準³⁾に沿っ て行った。すべての鉄筋には孔食が生じており, 腐食グレードはC02/03Mシリーズは と , C01Lシリーズについては と であった。腐食 すると降伏点強度が下がるだけでなく,降伏点

Table 3 Standard of corrosion grade of steel bar³⁾

グレード	·····································					
	腐食がない状態。または表面にわずかな点錆が生じて					
	いる状態。					
	表面に点錆が生じている状態。					
	点錆がつながって面錆となり,部分的に浮きが生じて					
	いる状態。					
	浮き錆が広がって生じ,コンクリートに錆が付着し,断					
	面積で20%以下の欠損が生じている箇所がある場合。					
	厚い層状の錆が広がって生じ,断面積20%以上を超え					
	る著しい欠損を生じている箇所がある状態。					



Fig. 3 Remaining ratio vs. weight reduction ratio of corroded steel bars

が明確に現れなくなる。したがって降伏点強度 は0.2%の伸びの点から最初の直線の勾配に対し て平行線を引き,これと曲線の交わった点を降 伏応力とした。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である。Fig.3は これらの試験結果を腐食鉄筋の質量減少率と腐 食グレード,降伏点残存率,引張強さ残存率,伸 び残存率との関係について整理したものである。 各残存率は健全な2本の鉄筋の試験結果を,腐 食した鉄筋の試験結果で除した値である。グラ フ中には,腐食鉄筋に関する材料試験結果の傾 向を表示するために,回帰式をのせた。質量減 少率は全体的な平均値を表すため, 各残存率に ばらつきが生じるので,指数関数と1次式で回 帰した。Fig.3より降伏点強度,引張強さ,伸び 能力ともに質量減少率に対応して低下している ことが分かる。その中でも伸び能力は約6割か ら8割低下しており,劣化が著しい。

4. 耐震加力実験結果及び考察

加力実験はすべて一定軸力比0.2のもとで,正 負繰り返し水平加力実験を建研式加力装置で 行った。部材角 R=0.5% から0.5%の増分で3回 ずつ繰り返し,3.0%まで強制変形を与えて,そ れでも靭性能が期待できる場合には R=4.0% か ら5.0%を1回ずつ正負繰り返した。Fig.4に加 力実験により進展した各試験体のひび割れ状況 と,加力実験終了後に観察した鉄筋の破断・座 屈箇所を示す。Fig5には試験体のせん断力 Vと 部材角 R,および柱材軸の平均伸縮ひずみ ε、と 部材角 Rの関係を示す。

C02/03M シリーズのうち,健全な基準試験体 C02M-NC0 は主筋に沿って付着ひび割れ,およ び曲げひび割れを生じ,部材角1.5%で最大耐力 に至った。その後,緩やかに耐力が低下し,最 終段階では柱頭部付近のかぶりコンクリートが 剥落して曲げ破壊した。3年間暴露試験を行った C02M-NC1 は,部材角1.5%で最大耐力に達し, 部材角3.0%に到達する途中で柱頭のコーナー部 の主筋が1本破断した。その後耐力が低下した ものの,部材角 5.0% まで変形を維持した。加力 実験によるひび割れは,柱頭と柱脚に集中して いる。 ε_v -R曲線はC02M-NC0よりも引張側に立 ち上がっている。これは,主筋が破断しながら も曲げ挙動を示していることを意味している。4 年間暴露試験を行ったC03M-NC2は,部材角 1.5% で最大耐力に達した。部材角 2.5% に達す る前に柱脚のコーナー部で主筋が1本破断し, 耐力が低下した。その後,3.0% に到達する前に 柱頭のコーナー部で主筋が2本破断し,さらに 耐力は低下していった。加力実験によるひび割



Fig. 4 Crack patterns, fracture / buckling of rebars by cyclic loading test



Fig. 5 Measured V-R and Ev-R relationships

れは C02M-NC1 と同様,柱頭部と柱脚部にのみ 集中している。ε_v-R 曲線も C02M-NC0 より引張 側にシャープに立ち上がっているが,これも C02M-NC1 と似た現象が生じているためだと考 えられる。

一方,C01Lシリーズのうち,健全なC01L-NC0 は部材角1.0%で主筋が降伏し,最大耐力に達し た。その後,耐力は少しずつ低下し,部材角5.0% まで典型的な曲げ降伏挙動を示している。ε,-R 曲線も引張側にシャ - プに立ち上がり, 靱性に 富んだ曲げ降伏挙動を示している。4年間暴露 試験を行った C01L-NC1 は,部材角-2.0% で主 筋が座屈した。部材角-2.5%に達する直前に柱 脚部の帯筋が破断した。その後,主筋の座屈が 顕著になり,帯筋が次々と柱脚の方から破断し てせん断破壊した。C01L-NC1 については帯筋 の破断箇所が正確に記録されていなかったため, Fig. 4 には破断の確認がとれた場所のみをのせ た。M/(VD) = 1.5の試験体では主筋の破断によ り曲げ破壊, M/(VD) = 2.0の試験体では帯筋の 破断により, せん断破壊が生じるという現象が 見られた。

5. 解析的検討

せん断強度と曲げ強度を AIJ 式⁴⁾ で求める。暴

露試験体に関しては,鉄筋の腐食量や降伏点強 度が正確に把握できない。そこで,モニター試 験体(250×250×500mm)からはつりだした鉄 筋(主筋:D10,長さ42cm)の腐食減少率を用い, 断面欠損を推測した。断面欠損の起きた腐食し た鉄筋の断面積は,腐食した鉄筋の最も低い降 伏点強度と,健全な降伏点強度との比に公称断 面積を乗じて決定した。本論文では,1.0から上 記の降伏点強度比を差し引いた値を,腐食減少 率と定義する。

Fig. 6に各試験体のスケルトンカーブ(実験結 果)と,せん断および曲げ強度に関する計算結 果を示す。ただし,前述のように試験体 C02M-NC1 と C03M-NC2 では主筋が破断した後も加力 がR = 5.0%の最後まで継続され,C01L-NC1 で は帯筋が破断した後,部材角が負側でせん断破 壊した(4節参照)。鉄筋の腐食の影響により,せ ん断および曲げ強度は計算上,共に低下してい る。C02/03M シリーズでは計算上のせん断強度 が,部材角の増大とともに計算上の曲げ強度を 下回ってくる。したがって,Fig.6によれば部材 角 3.0% 前後で,計算上せん断破壊が予想され る。しかし,加力実験ではせん断破壊が生じて いない。この理由は加力実験で帯筋が破断せず 主筋が破断したので,曲げ強度が低下したもの



Note : Values within the brackets are corrosion reduction ratio of steel bar. Fig. 6 Comparison of measured skeleton curves and calculated results

の, せん断強度が計算値ほどに低下しなかった からと推測される。なお, 試験体 C02M-NC1 と C03M-NC2 で主筋の破断を考慮しても Fig. 6 に 示した曲げ強度より,大きく低下しない。C01L シリーズにおいては,帯筋の腐食減少率を用い て実験結果を説明できないが,加力実験で見ら れた帯筋の破断を考慮すると,計算上のせん断 強度は Fig. 6 に示すように低下し,実験結果と ほぼ整合した。

6. まとめ

- (1)水セメント比の差異が自然暴露試験体の鉄筋 の腐食によるひび割れ性状に,大きな影響を 与える。
- (2)腐食により鉄筋の力学的性能は低下し,その 中でも伸び能力の低下は著しい。特に,局部 的な孔食の発生している場所では応力が集中 し,その部分での鉄筋の破断が起きる。
- (3)自然暴露試験の結果,帯筋の破断により靱性 に欠けたせん断破壊だけでなく,主筋の破断 による曲げ強度の低下現象も起こることが明 らかになった。
- (4)同一配筋で, せん断スパン比の異なる試験体

で,主筋と帯筋の破断の相異から全く異なる 破壊性状が見られたのは,水セメント比が 83%と63%と大きく異なること,コンクリー ト強度,かぶり厚さの違いによるものなのか さらに検討していく必要がある。

謝辞:自然暴露試験体の運搬などについて, (有)榮商店(社長・伊禮榮)に厚く感謝します。

参考文献:

- 新里洋基,山川哲雄,森下陽一,玉寄幸直:自 然暴露により損傷した 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.25,No.2,pp.259-264,2003
- 2) 桝田佳寛ほか: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
- 3)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,1997.4
- 4)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,日本建築学 会,1999