

論文 電食試験により腐食した RC 柱の弾塑性挙動に関する実験的研究

中山耕一*1・山川哲雄*2・伊良波 繁雄*3・枇杷田篤*4

要旨：塩害により損傷を受けた鉄筋コンクリート部材の耐震性能(水平剛性，水平耐力，靱性，エネルギー吸収能力)を検討する目的で，電食試験法により鉄筋を強制的に腐食させたRC柱の一定軸圧縮応力下($0.35c\sigma_B$ ， $c\sigma_B$:シリンダー強度)の正負繰り返し水平加力実験を行なった。その結果，本実験では鉄筋が電食により腐食してもRC柱の耐震性能の劣化はほとんどなく，むしろ増大する傾向すらでてきた。電食試験体に関するこのような耐震性能の向上は腐食にともなう膨張圧による横拘束力の増大と，テンションステイフニング効果を考慮した力学モデルによってある程度説明できることがわかった。

キーワード：RC柱，電食試験，水平加力実験，横拘束力，テンションステイフニング効果

1. 序

塩害等により鉄筋が腐食するとその体積が膨張し，これらの膨張により周囲のコンクリートにひび割れを生じさせる。ひび割れが生じると，さらに水と空気が多量に供給されやすくなり，腐食が加速されることになる。このようなRC部材の弾塑性挙動は，まず靱性が低下し，次に腐食の進展にともない耐力が低下すると一般に言われている[1]。このことは，著者らの電食試験により鉄筋を強制的に腐食させたRC耐力壁の一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平加力実験によっても一部確認されている[2]。しかし，RC柱になると鉄筋の腐食が進行し，かぶりコンクリートにひび割れが生じてRC耐力壁とは異なり靱性，耐力ともに劣化の兆しが見られなかった。このことも同様な方法による著者らの実験ですでに確認されている[3]。このように前回までの実験により耐力壁と柱では相反する実験結果が得られたので，鉄筋の腐食にともなう劣化はRC柱の場合，本当にありえないのかどうかをさらに検証するために，電食試験により鉄筋を強制的に腐食させたRC柱の追加実験を計画した。本実験と前回の実験[3]との差異は軸圧縮応力を基本的に $0.22c\sigma_B$ から $0.35c\sigma_B$ に増加させたことである。

2. 試験体

試験体の形状，寸法及び配筋図を図-1に示す。試験体はせん断スパン比 (M/QD) がすべて1.5であり，かつ曲げ破壊先行である。しかも，試験体の製作にあたって，一部電食する必要から海水相当のNaCl 2.87重量%水溶液を混練水として用いる。試験体の総数は4体である。なお，試験体の記号及び番号は前回の試験体と同じ記号を用い，かつ続き番号を用いる。表-1, 2に使用材料の力学的性質を示す。

3. 電食試験

電食は金網をゼラチン状の寒天で包み込んだ電極板を上下のスタブを除いた柱の表面 (250×250×750mm) に4面ともあて，もう一方の電

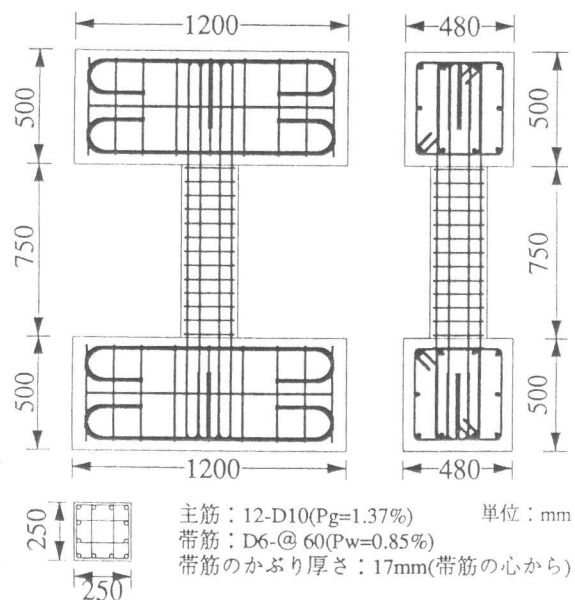


図-1 RC柱の試験体の形状，寸法及び配筋図

*1琉球大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2同教授 工学部環境建設工学科，工博 (正会員) *3同助教授，工博 (正会員) *4三井建設 (株)

表-1 コンクリートの力学的性質

| 試験体 | | $c\sigma_B$ (MPa) | ϵ_{11} (%) | σ_t (MPa) | E (GPa) |
|-----|-----------------------------|----------------------|------------------------|---------------------|--------------|
| 基準 | RCC-SN-3 (0.5 $c\sigma_B$) | 23.9 | 0.20 | 2.2 | 25.7 |
| | RCC-SN-4 | 25.1 | 0.20 | 2.6 | 26.3 |
| 電食 | RCC-SCe-4(1500Ah) | 26.0 | 0.28 | 2.1 | 22.6 |
| | RCC-SCe-5(3000Ah) | 29.7 | 0.29 | 2.7 | 23.6 |

注) $c\sigma_B$: シリンダー強度, ϵ_{11} : $c\sigma_B$ 時のひずみ, σ_t : 割裂強度,
 E : ヤング係数, Ah: 総積算電流量

表-2 鉄筋の力学的性質

| 鉄筋 | a (cm ²) | $s\sigma_y$ (MPa) | $s\epsilon_1$ (%) | $s\sigma_u$ (MPa) | E (GPa) |
|---------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| D10-SD345(主筋) | 0.71 | 421 | 0.21 | 575 | 194 |
| D6-SD295A(帯筋) | 0.32 | 437 | 0.24 | 559 | 195 |

注) a: 断面積, $s\sigma_y$: 降伏点強度, $s\epsilon_1$: 降伏点ひずみ,
 $s\sigma_u$: 引張強度, E : ヤング係数

表-3 電食終了後の柱試験体におけるひび割れ状況

| | RCC-SCe-4 (1500Ah) | | RCC-SCe-5 (3000Ah) | |
|-------------|--------------------|--------|--------------------|--------|
| | WEB | FLANGE | WEB | FLANGE |
| ひび割れ図 | | | | |
| 最大ひび割れ幅(mm) | 0.2 | 0.3 | 0.25 | 0.3 |

注1) WEB: 水平加力方向面, FLANGE: 水平加力と直交面
注2) Ah: 総積算電流量

試験体から得られた腐食鉄筋(主筋D10)の腐食減量と力学的性質を表-4に示す。腐食鉄筋の降伏応力は降伏時の引張力を腐食前の公称断面積で除して求めた。表-4より、鉄筋が腐食すると降伏応力に関する減少が質量に関する減少よりも大きい。これは、電食により鉄筋の一部に生じた孔食のため断面積が局所的に減少し、かつその部分で降伏応力が支配されるが、質量の減少は鉄筋全体(検長約500mm)にわたって平均化される。なお、電食試験体の曲げ強度の計算にあたってはいずれの減少率を採用するかによって、おのずと計算結果は異なってくる。本論文では質量の減少率を採用した(5節参照)。

表-4 腐食鉄筋(主筋D10)の腐食減量と力学的性質

| モニター用電食試験体 | 総積算電流(Ah) | 腐食前の質量 W(g) | 腐食後の質量 W'(g) | 腐食前の降伏点強度 $s\sigma_y$ (MPa) | 腐食後の降伏点強度 $s\sigma_y'$ (MPa) | W'/W | $s\sigma_y'/s\sigma_y$ |
|------------|-----------|-------------|--------------|-----------------------------|------------------------------|------|------------------------|
| RCC-SCe-4 | 1000 | 270 | 252 | 421 | 355 | 0.93 | 0.84 |
| RCC-SCe-5 | 2000 | 269 | 240 | | 321 | 0.89 | 0.76 |

極である主筋の間に一定の直流電流(3A~4A)を流した。これらの総積算電流量は表-1,3を参照されたい。表-3に電食終了後、すなわち加力実験直前の柱部分のひび割れ状況と最大ひび割れ幅を示す。ひび割れは主筋に沿ったひび割れが多く、帯筋に沿ったひび割れは少ない。この原因として主筋はD10で帯筋はD6であるので、太い主筋の腐食による膨張圧が大きいことに加えて、柱の鉛直方向には自重による圧縮応力が生じているが、柱の水平方向には圧縮応力が生じていないからと推定される。総積算電流量が増加することによりひび割れ本数は増えるが、ひび割れ幅に大きな差異は見られないようである。鉄筋が腐食すると膨張圧が発生し、コンクリートにひび割れが生じる。コンクリートにいったんひび割れが生じると、直流電流が主筋や帯筋から柱の表面にあてた電極板に向かって流れるので、鉄のイオンが溶出しやすくなり、膨張圧の増大につながらないからと思われる。したがって電食試験は鉄筋の腐食による質量の減少や孔食の進展による降伏力の減少に影響を与えやすくなると思われる(表-4参照)。柱試験体における主筋の腐食状況を推測するために、同一断面で同一配筋を有する高さ500mmのモニター用材料試験体を製作し、表-1,3の総積算電流量に柱の高さ比(500/750=0.67倍)を比例させた電流を流した(表-4参照)。これらのモニター用

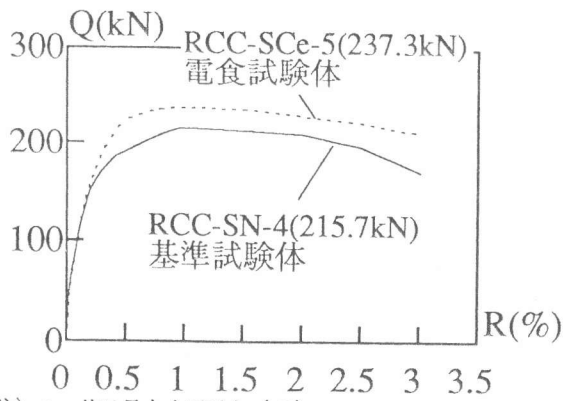
4. 加力実験

変位計で水平変位成分（曲げせん断変形）と鉛直変位成分（伸縮変形）を測定した。建研式加力装置を用いて一定軸圧縮力（ $0.35, 0.5c\sigma_B$ ）と正負繰り返り水平力を加えた。水平加力はひび割れが発生するまでは荷重制御により行い、ひび割れ発生後は柱の部材角 R を 0.5% づつ増分させながら、同一振幅で3サイクルづつ正負繰り返りの変形制御で3%まで行った。

一定軸圧縮応力が $0.5c\sigma_B$ の試験体（RCC-SN-3）は付着割裂破壊しているが、それ以外の試験体は一部付着割裂ひび割れを生じながらも曲げ破壊の様相を示している（表-5参照）。特に電食試験体では健全試験体（RCC-SN-4）に比較して、そのQ-R曲線が改善されているような実験結果となっている。電食試験体では健全試験体と異なり、部材角の増大がひび割れ幅の増大やひび割れ本数の増加にそれほど寄与していない。軸圧縮応力が前回の実験[3]と比較して大きいので、柱の高さ方向の平均ひずみ ϵ_v （柱の伸縮量を柱の高さで除したもの）が部材角 R のいかんにかかわらず圧縮ひずみになっている。さらに、部材角を増大させながら正負繰り返すごとに、柱の圧縮ひずみが増大している（表-5参照）。このことが、部材角の増大につれてP- δ 効果とともに、水平耐力の緩やかな減少につながっているものと思われる。水平耐力（図-2参照）、初期剛性（図-3参照）、および水平力と増分変位量の積で計算したひずみエネルギー吸収量（図-4参照）は、電

表-5 ひび割れ状況、Q-R曲線及び材軸伸縮ひずみ ϵ_v -R曲線（実験結果）

| 試験体 (有塩) | 各部材角終了時のひび割れ状況 | | | | Q-R曲線 | ϵ_v -R曲線 |
|-------------|--|--------|----------|--------|-------|-------------------|
| | R=0.5% | | 最終部材角(%) | | | |
| | WEB | FLANGE | WEB | FLANGE | | |
| 基準試験体 | RCC-SN-3 ($0.5c\sigma_B$) | | | | | |
| | RCC-SN-4 ($0.35c\sigma_B$) | | | | | |
| 電食試験体 | RCC-SCe-4 ($0.35c\sigma_B$) 総積算電流量 (1500Ah) | | | | | |
| | RCC-SCe-5 ($0.35c\sigma_B$) 総積算電流量 (3000Ah) | | | | | |



注) () 値は最大水平耐力 (kN)

図-2 スケルトンカーブ (実験結果)

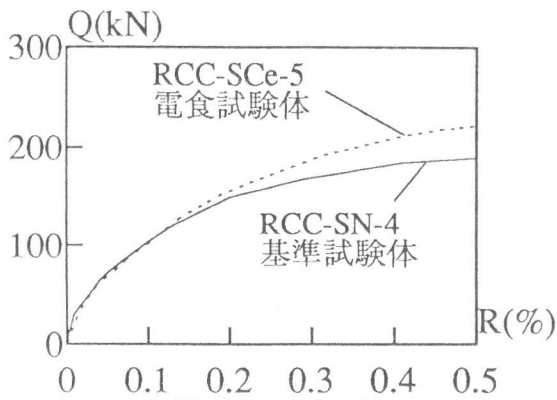


図-3 初期剛性の比較 (実験結果)

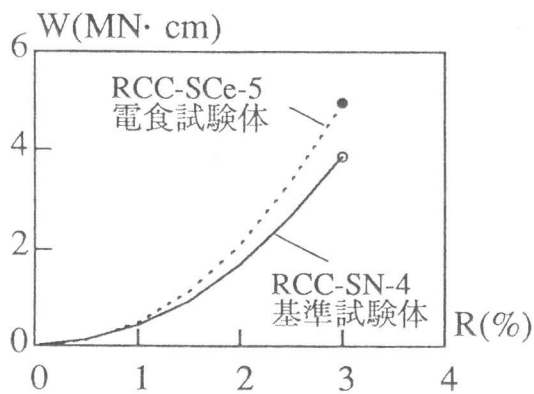


図-4 累積エネルギー吸収量 (実験結果)

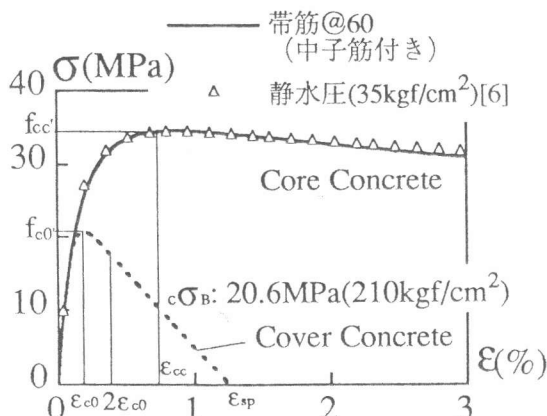


図-5 コンクリートの構成則の一例

食試験体が健全な試験体より高い傾向にある。このことは前回低い軸圧縮応力 ($0.22c\sigma_B$) 下で行った実験においても観察されたが[3], 今回の高い軸圧縮応力 ($0.35c\sigma_B$) 下ではこの傾向が一段と明白になった。しかし, 高軸圧縮応力下の腐食した試験体では部材角が大きくなると, 表-5からも読みとれるように, 軸圧縮ひずみが増大し不安定になりやすくなることも考えられる。少なくとも今回の実験で部材角が約2%までは, 電食試験体が基準試験体より水平剛性, 水平耐力およびエネルギー吸収能力などの耐震性能においてやや優れているといえよう。部材角が2%という値は設計限界変形 (大地震の弾塑性応答変形) として, 建物の層間変形角を1%程度想定していることを考えると実用的に十分な値といえる[5]。

5. 電食試験体の力学モデル

fiberモデルによるRC柱断面の弾塑性解析を行い, 実験結果と比較する。解析にあたり, 次の仮定を用いた。

1) 帯筋による横拘束効果 (帯筋の腐食による影響は無視) を考慮して, コアコンクリートにはManderらによるコンファインドコンクリートの構成則[4]を用い, 一方カバーコンクリートには同じManderらによるプレーンコンクリートの構成則[4]を適用する。さらに, 静水圧[6]の例も含めた構成則の一例を図-5に示す。コンクリートの σ - ϵ 曲線は表-1の $c\sigma_B$ を各試験体ごとに用い, 電食にともなうコンクリートのひび割れや劣化に関しては解析上一切無視する。

2) 電食試験体の主筋は表-4にしたがって, 降伏点応力が健全試験体のそれと一致するように主筋の断面積を質量の減少率 (表-4参照)

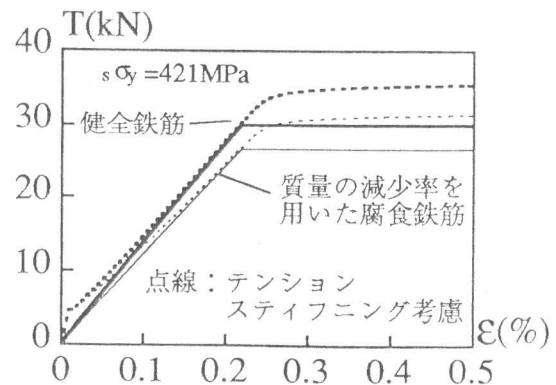


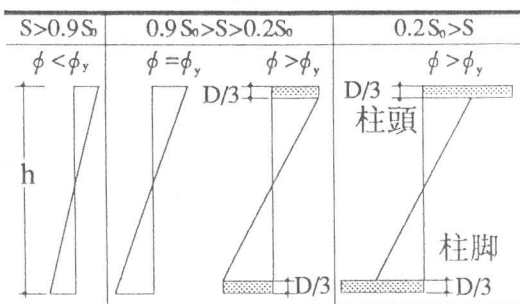
図-6 計算に用いた鉄筋のT(引張力)-ε関係

にしたがって見かけ上減少させ、かつ完全弾塑性を仮定する。

3) 柱試験体の材軸方向の曲率分布を表-6のように仮定して曲げ変形を算出する。ただし、表-6で $0.2S_0 > S$ の場合は従来からの慣用的仮定を用いて柱頭、柱脚の $D/3$ の領域に曲率が集中するとみなし、 $M-\phi$ 曲線にしたがい平面保持仮定のもとで曲率が無限に大きくなってでも制限を設けない。しかし、部材角 R が3%に達したら計算を終了する。さらに、弾性域のせん断変形と軸力によるP- δ 効果も合わせて考慮する。

4) 主筋の腐食によって能動的な横拘束による付着強度の改善や錆による噛み合い効果により、テンションステイフニング効果[5]をより多く期待できる。テンションステイフニングに関しては吉川・田辺の方法[5]にしたがう。ただし、引っ張りコンクリートの有効面積の考え方が必ずしも明らかではない[7]。したがって本論では計算の容易さから腐食の有無にかかわらず主筋1本当たりコンクリートの有効面積を主筋径の倍率で表した円形断面積とし、とりあえず主筋径の4倍と仮定する。図-6では計算に用いた鉄筋の T (引張力) - ϵ 関係を示す。

表-6 柱の高さ方向の曲率分布の仮定



注) $M-\phi-d$ 曲線の勾配を S とし、その初期勾配を S_0 とする。
注) D : 柱の全せい, h : 柱の高さ, ϕ : 曲率, ϕ_y : 降伏曲率

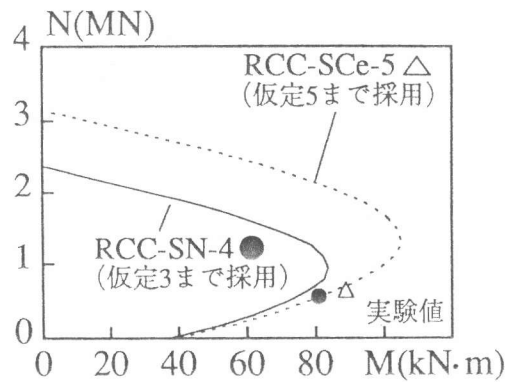


図-7 N-M相関曲線

— 実験結果 — (仮定3) - - - (仮定4) ····· (仮定5まで採用) ; 計算結果

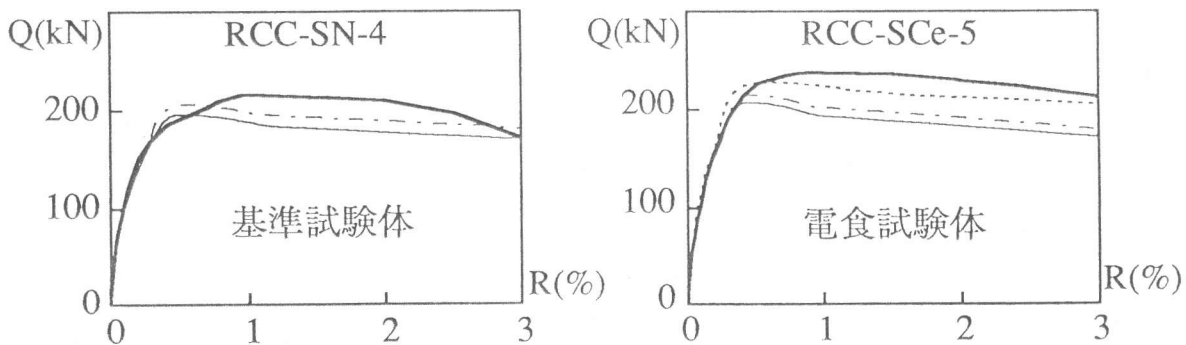


図-8 基準及び電食試験体のスケルトンカーブに関する実験結果と計算結果の比較

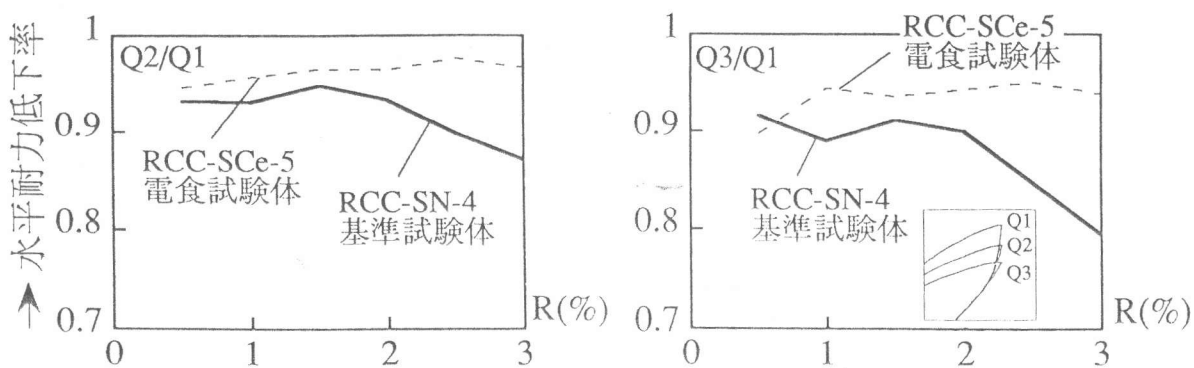


図-9 正負繰り返し载荷による水平耐力低下率 (実験結果)

5) 主筋の腐食による膨張圧によって能動的な横拘束力を受けたコアコンクリートの σ - ϵ 曲線が、コンファインドコンクリートとしてさらに改善される。Manderらの帯筋による横拘束力のほかに、主筋の腐食にともなう横拘束力を静水圧として常時加算する。本計算ではRichartらの静水圧による実験式を用いて、 $k\sigma_r(k=4.1)$ の側圧 σ_r に能動的な拘束力として 35kgf/cm^2 を仮定する[6]。

図-5でシリンダー強度が 210kgf/cm^2 のコンクリートの場合、コアコンクリートの圧縮強度は中子筋付き帯筋(60mmピッチ、 $P_w=0.85\%$)による横拘束効果のため 142.5kgf/cm^2 さらに上昇する。この上昇分と同じだけ主筋の腐食により、帯筋からの反作用としてコアコンクリートが静水圧に相当する横拘束圧を受けると仮定すると、その値は 35kgf/cm^2 となる。さらに、多量の帯筋で($P_g=0.85\%$)横拘束下におかれている主筋が腐食しているので、付着強度が錆のためにさらに上昇しているものと思われる。このように特に主筋の腐食に伴う横拘束圧と付着強度の上昇は、コンファインドコンクリートとしてコアコンクリートの強度上昇と靱性の増大、さらにはテンションステイフニングのさらなる増大に寄与するものと期待される。一方、主筋が腐食すると主筋の断面積が一般に減少し、実際的にも降伏力が低下する(図-6参照)。このことは表-4に示したように、腐食鉄筋の見かけ上の降伏点強度や質量が健全鉄筋のそれに比較して、いずれも減少している試験結果によって裏づけられている。このような関係にありながらも、一定軸圧縮力下で正負繰り返し曲げせん断力を受けた試験体は、表-5及び図-9にも見られるように、3回正負繰り返ししたにもかかわらず、耐力低下はあまり見られない。それどころか、4節で述べたように剛性、耐力、靱性及びエネルギー吸収能力など耐震性能全般にわたって電食試験体が健全な基準試験体よりやや優れている。したがって、主筋の腐食にともなう降伏力の減少より、多量の帯筋のもとで能動的な横拘束圧と付着強度の上昇が上まわっていることを実験結果は示唆している。このことは、図-8に示したRCC-SCe-5の実験結果と解析結果を比較することにより、ある程度説明できることがわかる。しかし、これらの力学モデルは上記の仮定の上に成立したものであり、その仮定の基礎となっている多量の帯筋のもとでの主筋の腐食にともなう能動的な横拘束圧と付着強度の上昇は、いずれ実験的にも検証する必要がある。

6. 結論

RC柱でコンファインド効果を期待できるほど密に帯筋が配筋されておれば、鉄筋の腐食がかなり進展しない限り耐震性能の劣化は生じないものと考えられる。この理由として本論では鉄筋の腐食による能動的な横拘束圧力の発生と、テンションステイフニング効果の増大を指摘した。耐力壁にはコアコンクリートやコンファインドコンクリートの概念が適用できないので、壁筋の腐食が一部テンションステイフニング効果をともなって耐力壁の初期剛性を少し上昇させるものの、結果的には靱性やひずみエネルギー吸収能力など重要な耐震性能を劣化させていると言えよう。ただし、電食試験による方法が実際の鉄筋の腐食やコンクリートのひび割れ、および耐震性能を表現しているかどうかは、現在続けている暴露試験とそれに続く加力実験結果を待たなければならぬ。これらは今後の継続した研究課題である。

参考文献:

- 1)宮川豊章, 外2名:塩分雰囲気中におけるコンクリートの構造物の寿命予測と耐久性設計について, コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.26-33, 1988. 4
- 2)松永尚凡, 山川哲雄, 伊良波繁雄, 森永繁: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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.811-816, 1994
- 3)山川哲雄, 外3名:電食試験により腐食した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.16, No.1, pp.805-810, 1994
- 4)J.B. Mander, M.J.N. Priestley and R.Park: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.144, No.8, pp.1804-1826, Aug.1988
- 5)吉川弘道, 田辺忠顕:ひびわれを有する鉄筋コンクリート板の平面応力場における構成方程式, コンクリート工学Vol.24, No6, pp.93-110, 1986. 6
- 6)F.E.Richart et al.: A Study of the Failure of Concrete Under Combined Compressive Stresses, Univ. of Illinois Eng. Experimental Station, Bulletin No.185, 1928
- 7)田辺忠顕, 外3名:コンクリート構造, 朝倉書店, pp.47-54, pp.76-79, 1992. 6