

論文 鉄筋腐食が正負交番载荷した RC はりの力学特性に及ぼす影響

松尾豊史*1・松村卓郎*1・金津 努*1・岡市明大*2

要旨:本研究は、鉄筋を腐食させたRCはり試験体の正負交番曲げ载荷試験を行い、鉄筋腐食が鉄筋コンクリートの力学特性に与える影響について検討したものである。今回の検討の範囲では、①腐食量 5Wt%の範囲までは、鉄筋腐食が鉄筋コンクリートはりの力学特性に与える影響は小さいこと、②耐力は鉄筋の腐食量増加に伴って低下するが、腐食による鉄筋の断面減少のみを考慮すれば概ね良好に評価可能であること、③コンクリートの圧壊以降に関しては、正負交番载荷と鉄筋腐食が圧縮側主筋の座屈に与える影響は大きく、RCはり部材の変形性能を大きく低下させる可能性があることが分かった。

キーワード:鉄筋腐食, 力学特性, 正負交番载荷, RCはり, 電食試験

1. はじめに

現在、各機関で、性能設計体系への移行に対応する研究が精力的に進められている。一般に、コンクリート構造物の構造設計は、耐久性が確保されることを前提に行われる。しかし、供用期間中の経年劣化については、劣化の程度と構造性能の関係、劣化の進行と経過時間の関係などについて十分に明らかにされているとは言い難いため、安全側の設計にならざるを得ない。今後、構造性能と耐久性の両者の統合評価を視野に入れた、より合理的な性能設計体系を構築していくためには、経年劣化と構造性能の関係を明らかにし、劣化を考慮した評価方法を構築していくことが必要である。特に、構造設計上重要となる耐震性能と耐久性の関係については、ほとんど研究されていないのが現状である。

そこで、本研究は、劣化を促進させるために電食試験により鉄筋を強制的に腐食させ、载荷は地震を想定した正負交番载荷とし、鉄筋腐食したRCはり試験体の正負交番曲げ载荷試験を実施して、鉄筋腐食が鉄筋コンクリートの力学特性に与える影響について検討したものである。

2. 実験の概要

2.1 試験体の仕様

試験体の仕様を図-1に示す。試験体のせん断スパン高さ比は 3.43 であり、主鉄筋量は片側 1.135(%)である。試験体上下面のかぶり厚は純かぶり厚で 42(mm)、側面は純かぶり厚で 32(mm)となっている。

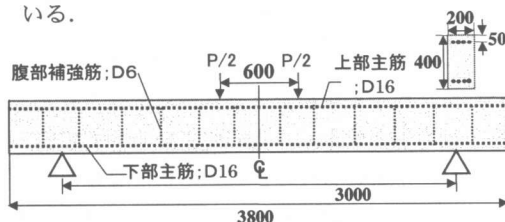


図-1 試験体の仕様

2.2 試験体の腐食手法

塩害、中性化などによる鉄筋腐食を再現するために、電食試験を実施した。電食試験は、鉄筋に電流を流すことにより、比較的短期間に鉄筋を効率よく腐食させることが出来る。但し、かぶりコンクリートにひびわれ発生後は、水が浸透し易く、錆が溶け出すなど塩害等の腐食形態とやや異なる部分も存在する。電食試験の概略図を図-2に示す。試験体の等モーメント区間である中央 60cm を腐食区間として、容器を作成して、3% NaCl 溶液を満たし、試験体の鉄筋をプラス(+)極、鋼

*1 (財)電力中央研究所我孫子研究所 構造部 (正会員)

*2 関西電力(株) 土木建築室 (非会員)

製エキスバンドメタルをマイナス(-)極とし、直流電流 10A を通電した。

腐食量の測定は、『コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)』¹⁾に準拠した。試験後の鉄筋を取り出して 10% クエン酸二アンモニウム溶液 (60℃) に 24 時間浸漬後、腐食生成物を除去して鉄筋の重量を測定し、健全な鉄筋との重量差を腐食量とした。主筋の腐食量は、等モーメント区間 60cm の平均値とし、上下主筋計 8 本の腐食量を計測した。

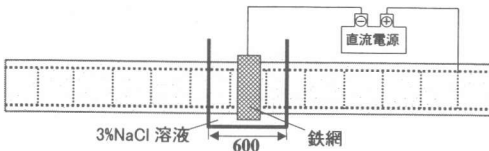


図-2 電食試験の概略図

2.3 実験ケース

実験ケースは表-1 に示す通りである。主な試験パラメータは腐食程度と荷重方法である。腐食程度は 4 段階とし、それぞれ通電時間を、18 時間、36 時間、72 時間、144 時間とした。荷重方法は、正負交番荷重を基本として、比較用として単調荷重も行った。正負交番荷重した試験体は、正方向荷重で下部鉄筋を降伏させた後に、負方向に荷重し、そのまま負方向で終局に至らせた。各腐食程度においては、2 体の試験を実施したが、試験体の上主筋、下主筋で腐食量とひびわれ状況が若干異なる場合もあったため、2 体目の試験体は、試験体の上下面を逆にして荷重することとした。2 体目の荷重パタ

表-1 実験ケース

ケース名	腐食程度	荷重方法
A 1	健全	交番荷重
A 2	健全	交番荷重 2
A 3	通電時間 36 時間	交番荷重
A 4	通電時間 36 時間	交番荷重 2
A 5	通電時間 72 時間	交番荷重
A 6	通電時間 72 時間	交番荷重 2
B 1	健全	単調荷重
B 2	健全	交番荷重 2
B 3	通電時間 18 時間	交番荷重
B 4	通電時間 72 時間	単調荷重
B 5	通電時間 144 時間	交番荷重
B 6	通電時間 144 時間	交番荷重 2

※ 交番荷重 2 はコンクリート圧壊確認後、逆方向に荷重した。

ーンについては、試験体上部のコンクリートの圧壊を確認した後、さらに逆方向に荷重することとした。なお、コンクリートの圧壊は、試験体上面の剥離状況の目視と、コンクリートケージの圧縮ひずみ値の低下をもって判断した。

2.4 材料試験結果

表-2 に鉄筋の引張試験結果、表-3 にコンクリートの強度試験結果を示した。

表-2 鉄筋(SD295A)の材料試験結果

鉄筋径	降伏強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	弾性係数 (N/mm ²)
D16	344	1818	1.94 × 10 ⁵

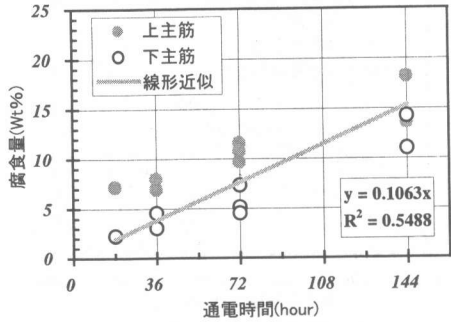
表-3 コンクリートの材料試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
A1~A6	40.0	3.01 × 10 ⁴	3.4
B1~B6	50.5	3.10 × 10 ⁴	4.0

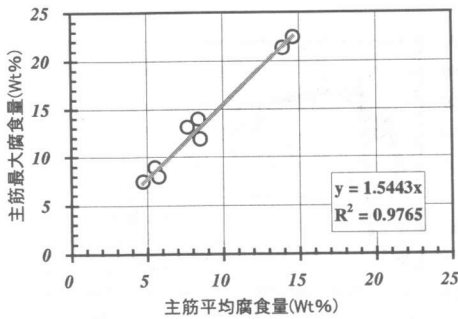
3. 実験結果および考察

3.1 電食試験による鉄筋腐食量

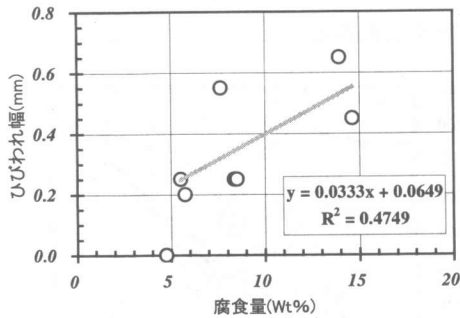
図-3 (a) には、通電時間と腐食量の関係を示した。主筋の腐食量は、上鉄筋の方が下鉄筋よりも腐食量が大きくなる傾向にあった。これは、上部下部における若干のかぶりの違いやブリージングなどによるコンクリートの品質に起因していると考えられる。主筋の腐食量は、上部と下部で若干異なるものの、その平均値については、通電時間と比較的良好な線形関係にあった。図-3 (b) には、主筋の腐食量の平均値と最大値の関係について示している。電食試験においては、主筋の腐食量の平均値と最大値はほぼ線形関係にあり、最大値は平均値の約 1.5 倍程度であった。図-3 (c) には、主筋の腐食量と最大ひびわれ幅の関係について示した。ある腐食量に達すると、表面にひびわれが発生し、その後は、腐食量が増加するに従ってひびわれ幅も増加する傾向にあることが分かる。主筋平均腐食量 5wt% 以上で表面に主筋にそったひび割れが確認されたことから、今回用いた試験体の場合は、約 5wt% がひびわれ発生鉄筋腐食量と考えられる。



(a) 通电時間と腐食量:主筋平均



(b) 主筋の平均腐食量と最大腐食量



(c) 主筋の平均腐食量と最大ひびわれ幅

図-3 電食試験結果

3.2 荷重試験結果

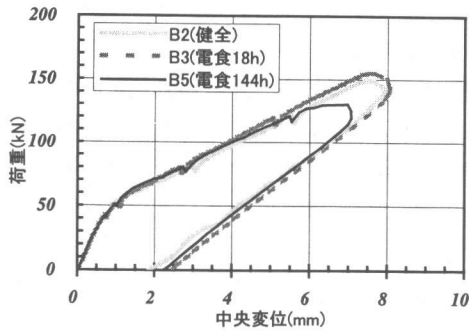
図-4 (a)は、鉄筋降伏レベルにおける荷重-変位関係について腐食量の影響を比較したものである。電食試験18時間では耐力の低下はほとんどないが、電食144時間程度で約2割程度降伏耐力が低下している。耐力の低下は鉄筋断面の欠損に起因すると考えられるが、図-4 (b)の荷重-中央鉄筋ひずみ関係から電食144時間では、鉄筋とコンクリートとの付着力もかなり低下している様子が見られる。なお、鉄筋ひずみゲージ

はコーティングしており、貼付位置については鉄筋腐食が非常に軽微であった。

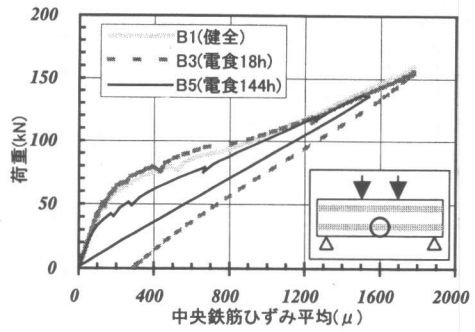
図-5は、荷重パターンと腐食量が荷重変位関係に与える影響について示したものである。コンクリートの圧壊以降単調荷重した試験体については、腐食量が増加するほど耐力はやや低下する傾向にあるものの、塑性率で30程度の高い変形性能があることが分かる。これは、鉄筋降伏後に逆方向に単調荷重したもので、初期から単調荷重したもので、大きな差は認められない。従って、鉄筋降伏レベルの交番荷重がその後の耐力、変形性能に及ぼす影響は小さいものと考えられる。一方、コンクリートの圧壊確認後に逆方向に荷重した試験体については、腐食量が大きいほど耐力、変形性能ともに低下する結果となった。単調荷重した試験体については、コンクリート圧壊後も十分に圧縮鉄筋が圧縮力を分担して、圧縮鉄筋がなかなか座屈しにくいものに対して、コンクリート圧壊以降に逆方向に荷重した試験体では、正方向荷重時の残留ひずみがあり、腐食ひびわれによってかぶりコンクリートによる拘束力が小さくなるために、圧縮鉄筋が座屈し易くなり、耐力および変形性能が著しく低下したものと考えられる。

図-6は、荷重上面のコンクリート圧縮ひずみおよび圧縮側の鉄筋ひずみと中央変位との関係について示している。この図より、鉄筋が腐食するとコンクリートの圧縮ひずみが低下する変位が小さくなる傾向にあること、コンクリートの圧壊以降、圧縮側鉄筋に徐々に圧縮力が作用していく様子が見られる。

図-7は、鉄筋降伏(+1δy)時の健全な試験体と鉄筋が腐食した試験体のひびわれ状況を示したものである。腐食によるひびわれがあると、その付近では、荷重によるひび割れは発生しにくく、ひびわれの分散性が悪くなることが分かる。また、主筋にそった試験体側面のひびわれは、かぶりコンクリートの剥落を誘発する可能性があるため、特に重要と考えられる。

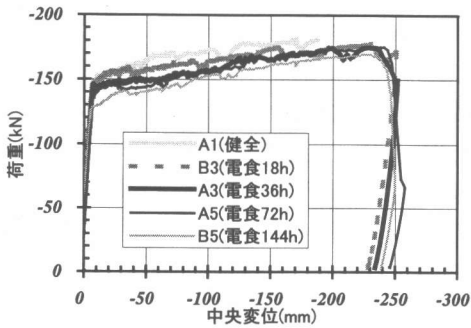


(a) 荷重変位関係

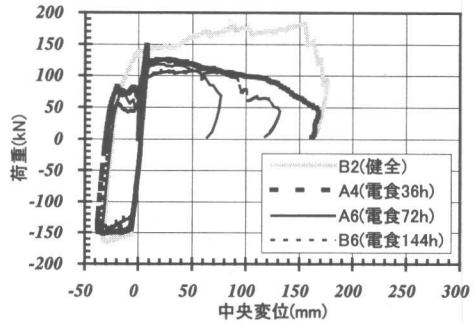


(b) 引張側中央鉄筋ひずみ

図-4 載荷試験結果(鉄筋降伏レベル)

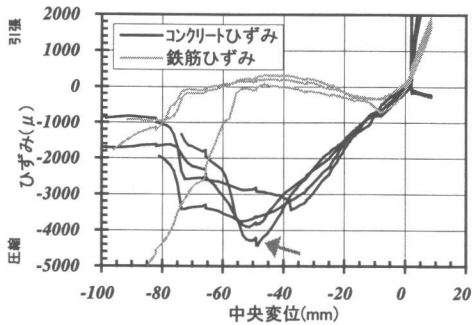


(a) 腐食量の変化

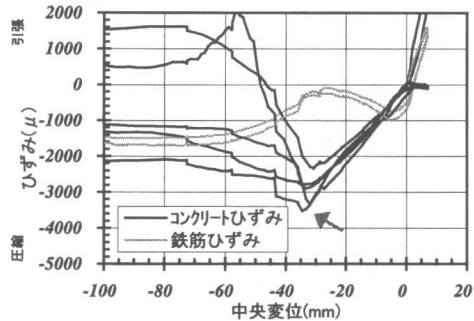


(b) 腐食量の変化2: 圧壊以降逆方向載荷

図-5 載荷試験結果(荷重変位曲線全体)

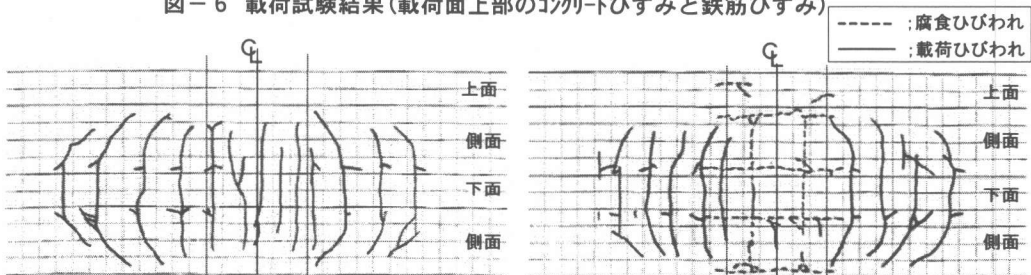


(a) A1試験体(健全)



(b) B5試験体(電食144h)

図-6 載荷試験結果(載荷面上部のコンクリートひずみと鉄筋ひずみ)



(a) B2(健全); 鉄筋降伏(+1δy)時

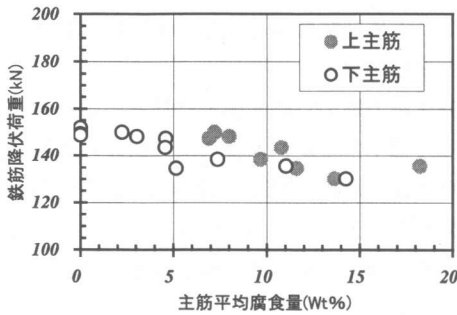
(b) A6(電食72h); 鉄筋降伏(+1δy)時

図-7 ひびわれ状況比較

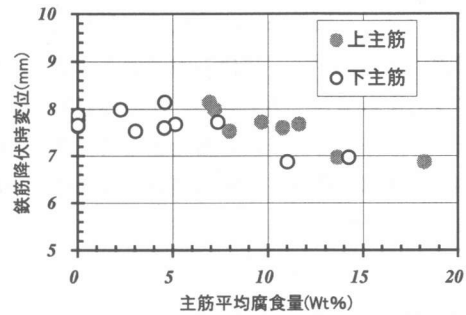
3.3 腐食が力学特性に与える影響

図-8に、主筋の平均腐食量と力学特性の関係を示す。鉄筋降伏荷重およびコンクリート圧壊時荷重は主筋平均腐食量とほぼ線形関係にあることがわかる。鉄筋降伏変位については、平均腐食量5~8Wt%まではほとんど低下していないが、平均腐食量8Wt%以降では徐々に低下している。基本的には、鉄筋が腐食すると鉄筋とコンクリートとの付着力は低下するものと考えら

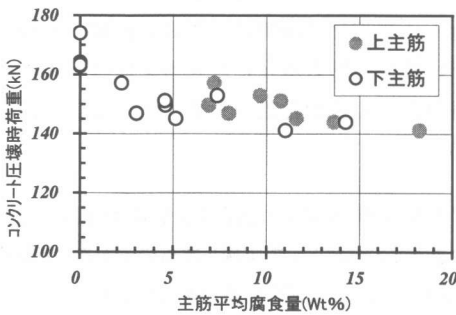
れるが、ひびわれが表面に表れるまでは、鉄筋腐食による膨張圧により、逆に付着力は増大する傾向にあること²⁾、および付着力が低下することにより局部的に発生するひずみは緩和される傾向にあると考えられる。コンクリート圧壊時の変位については、鉄筋が腐食すると低下する傾向にあるものの、ひびわれ発生腐食量と考えられる約5Wt%以降はほとんど変わらない。鉄筋比の高いRC部材は、鉄筋腐食により、かぶりコ



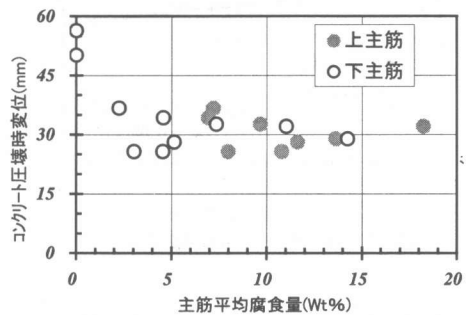
(a) 主筋平均腐食量と鉄筋降伏荷重



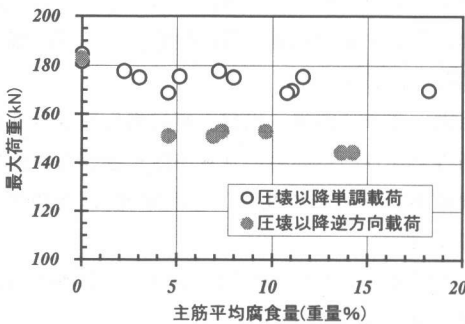
(b) 主筋平均腐食量と鉄筋降伏時中央変位



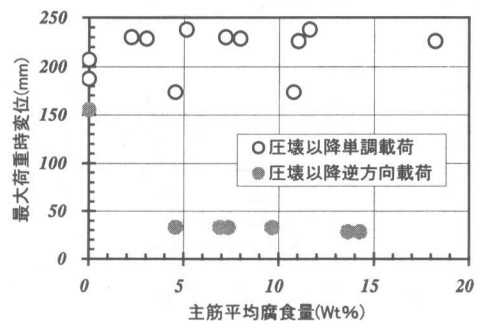
(c) 主筋平均腐食量とコンクリート圧壊時荷重



(d) 主筋平均腐食量とコンクリート圧壊時中央変位



(e) 主筋平均腐食量と最大荷重

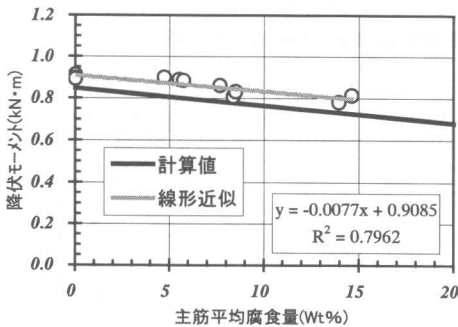


(f) 主筋平均腐食量と最大荷重時中央変位

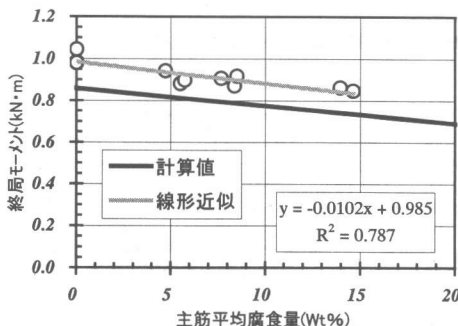
図-8 主筋平均腐食量と力学特性

ンクリートが鉄筋配置面にそって剥落しやすくなり、複鉄筋の場合は、圧縮側のかぶりコンクリートがはがれ易いことにより、荷重面上部のコンクリート圧縮ひずみの低下も早くなると考えられる。最大荷重および最大荷重時変位については、コンクリート圧壊以降の荷重方法および腐食量が大きく影響する結果となった。特に、コンクリートの圧壊以降では、交番荷荷が終局変形性能に与える影響は大きい。

図-9には、腐食による断面減少のみを考慮して、コンクリート標準示方書³⁾に示されている断面計算手法を用いて、降伏モーメントと終局モーメントを計算し、実験結果と比較検討したものを示す。降伏耐力、終局耐力ともに、鉄筋の腐食量 15Wt%の範囲まで概ね良好に評価可能であることが分かる。



(a) 主筋平均腐食量と降伏耐力の関係



(b) 主筋平均腐食量と終局耐力の関係

図-9 耐力と計算式の関係

4.まとめ

本研究で得られた主な結果をまとめると次の通りである。

- (1) 腐食量 5Wt%の範囲までは、鉄筋腐食が鉄筋降伏変位に与える影響は小さい。
- (2) 鉄筋を密に配置したRCはり部材では、鉄筋腐食によって鉄筋配置面にそったひびわれが入り易い。複鉄筋の場合は、圧縮側の鉄筋配置面にそった腐食ひびわれは、コンクリート圧壊時の変形性能を低下させる傾向にあるが、ひびわれが表面に発生する鉄筋腐食量と考えられる 5Wt%以降はほとんど変化がない。
- (3) 降伏耐力および終局耐力は鉄筋の腐食量増加に伴って低下するが、腐食による鉄筋の断面減少のみを考慮すれば、鉄筋の腐食量 15Wt%の範囲までは、現行のコンクリート標準示方書設計編に示されている計算手法を用いて、概ね良好に評価可能である。
- (4) 鉄筋降伏域では、交番荷荷がRCはり部材の耐力、変形性能に与える影響は小さいが、コンクリート圧縮破壊以降では、正負交番荷荷と鉄筋腐食が圧縮側主筋の座屈に与える影響は大きく、RCはり部材の変形性能を大きく低下させる可能性がある。

謝辞：本研究は電力9社と日本原子力発電(株)による電力共通研究の一部として実施したものである。本研究の関係各位にはここに記して謝意を示します。

参考文献：

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)，1987.4
- 2) 西内，金津，石田，松村：塩害劣化を受ける鉄筋コンクリートの力学基本特性－ひびわれ発生機構および付着特性－，電中研報告 U92060，1993.3
- 3) 土木学会：[平成8年制定]コンクリート標準示方書・設計編，1996.3