

論文 鉄筋の腐食がその力学的性能の低下に及ぼす影響

李翰承^{*1}・友澤史紀^{*2}・野口貴文^{*3}

要旨：鉄筋が腐食したRC構造部材の耐力性能低下機構を有限要素法によって解析する時に必要な材料定数を得るために、腐食した鉄筋の力学的性能を実験的に求めた。種類が異なる鉄筋(SD 295 A, SD 390)を電食方法によって腐食促進させた後、鉄筋の引張試験を行った結果、積算電流量及びかぶりコンクリートのひびわれ幅は鉄筋の腐食減量率と非常に高い相関関係があること、腐食減量率を用いて腐食鉄筋の降伏点、引張強さ、伸び及び弾性係数を定量化できること、鉄筋腐食は伸び性能に最も大きく影響することがわかった。

キーワード：鉄筋腐食、腐食減量率、降伏点、引張強さ、弾性係数、伸び

1. はじめに

鉄筋コンクリート造構造物の劣化現象の中で最も重要なものは鉄筋腐食であり、鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート造構造物の補修・補強方法、耐久性診断及び劣化進行の予測などが大きな課題になっている。このような問題を解決するためには、鉄筋腐食が鉄筋コンクリート造構造物に与える影響を明確にする必要がある。

しかし、現状では鉄筋腐食による構造部材の耐力性能低下機構に関する実験的な研究は少なく、さらにこれを解析的に検討した研究はほとんどない。また、建築基準法に基づく鉄筋コンクリートの構造計算の規定では、鉄筋の材料強度及び短期許容応力度をJISで定められた最小の規格降伏点ないし、その1.1倍としていることから、構造設計上は鉄筋の腐食を全く規定していない考えを示している。

鉄筋腐食が鉄筋コンクリート造構造物の構造性能に及ぼす影響を定量的に把握するためには、まず、鉄筋腐食が鉄筋に要求される降伏点、引張強さ、弾性係数及び伸びなどの性能に及ぼす影響を明らかにする必要がある。さらに、鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ性状、鉄筋の力学的性能低下及びコンクリートと鉄筋の付着性能低下などの材料定数を求め、健全部材の構造解析手法である有限要素法(FEM)にこの材料定数を適用することにより、鉄筋が腐食したRC構造部材の耐力低下機構を解析的に明確にすることができると考えられる。

本研究では、鉄筋が腐食したRC構造部材の有限要素解析を行うために必要な腐食鉄筋の力学的性能を定量的に把握することを目的とし、鉄筋の腐食減量率と鉄筋の力学的性能との関係を実験的に検討した。

2. 実験概要

2. 1 実験因子および水準

鉄筋の腐食減量率と鉄筋の力学的性能との関係を把握するために、鉄筋の種類が異なる異形鉄

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻, 工修(正会員)

*2 東京大学教授 工学部建築学科, 工博(正会員)

*3 東京大学助手 工学部建築学科, 博士(工学)(正会員)

筋(SD 295A, SD 390)を電食によって数段階に腐食させた後、腐食した鉄筋の引張試験を行って腐食鉄筋の降伏点、引張強さ、伸び及び弾性係数を求めた。実験の因子及び水準を表-1に示す

2. 2 使用材料及びコンクリートの調合

鉄筋はJIS G 3112に規定するSD 295A、D13 (実降伏点 $\sigma_{sy}=346\text{N/mm}^2$)及びSD 390 D13 (実降伏点 $\sigma_{sy}=399\text{N/mm}^2$)の黒皮付き異形鉄筋を長さ45cmに切断した後、10%クエン酸二アンモニウム溶液で黒皮を洗って使用した。コンクリートには早強ポルトランドセメントを用い、粗骨材の最大寸法は10mm、水セメント比は65%である。コンクリートの調合を表-2に示す。

表-1 実験因子及び水準

| 実験因子 | 水準 |
|-------|--------------------------|
| 鉄筋の種類 | SD295A D13 SD 390 D13 |

表-2 コンクリートの調合

| W/C (%) | スラフ [°] (cm) | s/a (%) | 単位水量 (kg/m ³) | 単位重量(kg/m ³) | | |
|------------|--------------------------|------------|------------------------------|--------------------------|-----|-----|
| | | | | セメント | 砂 | 砂利 |
| 65 | 18 | 49 | 180 | 277 | 893 | 907 |

2. 3 試験体の形状及び試験方法

(1)試験体の形状

試験体は2種類で、積算電流量と腐食減量率との関係を求めるための試験体(試験体 a)は、かぶり厚さ10mmで鉄筋を1本配筋した後、コンクリートを打設した。試験体aの寸法は40×40×30mmで腐食区間が110mm(鉄筋の引張試験時の標点距離8Dに相当)である。また、電食試験体(試験体 b)は、かぶり厚さ10mmで鉄筋を3本ずつ配筋した後、コンクリートを打設した。試験体bの寸法は160×40×130mmで、腐食区間が110mmである。腐食区間以外の鉄筋部分には腐食を防ぐために、防錆塗料を塗った。図-1に試験体の形状及びひびわれ幅の測定位置を示す。

(2)電食方法

電食試験は鉄筋を陽極、試験体両側面に配置した銅板を陰極として、試験体別に通電時間を定め直流安定化電源により1.0A(ただし、電流の安定まで5~10分を要した)の定電流を流し、コンクリート内部の鉄筋を腐食させた。また、電解液として3%の塩化ナトリウム溶液(海水相当)を用いて鉄筋の腐食反応をより促進させた。電食方法の概要を図-2に示す。

(3)ひびわれ幅及び腐食重量減少率の測定方法

ひびわれ幅は、鉄筋に沿って発生したひびわれをルーペを用いて測定し、図-1に示したひびわれの測定位置3点の値を平均して求めた。また、腐食重量減少率は、鉄筋の錆を10%クエン酸二アンモニウム溶液に浸して錆を除去した後、その腐食減量を測定して式(1)に従って求めた。

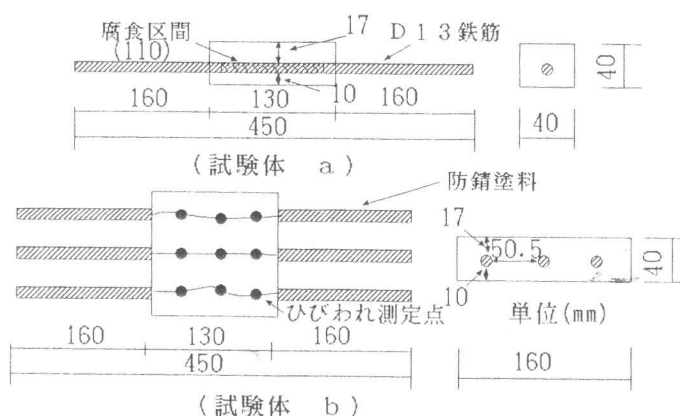


図-1 電食試験体の形状及びひびわれ測定位置

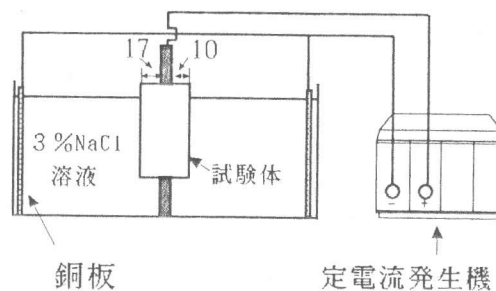


図-2 電食方法の概要

$$\text{腐食減量率(\%)} = \frac{\text{腐食区間の腐食減量(g)}}{\text{1cm当たりの鉄筋重量(g)} \times \text{腐食区間の長さ(mm)}} \times 100 \quad (1)$$

(4) 引張試験の方法

引張試験は、万能試験機を用いてJIS Z 2241「鋼材の引張試験」に従って、2号試験片の寸法で行い、鉄筋の降伏点、引張強さ、伸び及び弾性係数を測定した。万能試験機のヘッド間の変位から鉄筋上下端に設置した変位計で測定した鉄筋のすべり量を差し引いて鉄筋の変形を算出し、応力-ひずみ関係から弾性係数を求めた。

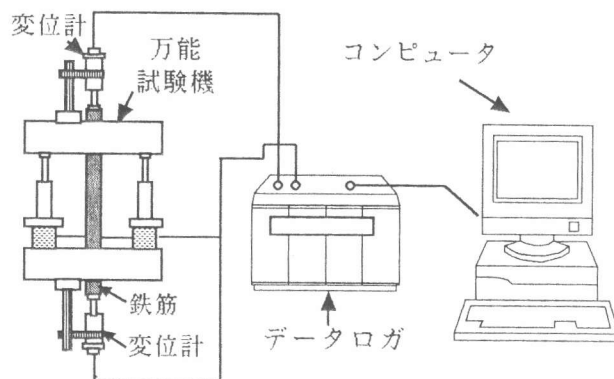


図-3 引張試験の概要

3. 実験結果および考察

3.1 鉄筋の性能規定

表-3は日本における鉄筋の性能規定である。日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」の規定は、鉄筋の短期許容応力度をJISの最小規定値で定めており、構造設計上は腐食を全く考慮していない。また、土木学会では各荷重条件に対して許容応力度は鉄筋の降伏応力に対して約0.6倍の安全率で規定している。しかし、市販されている鉄筋と実験に用いた鉄筋はJIS規定値に対して若干の余裕を持っており、これが腐食に対する許容幅と考えられる。従って、鉄筋が腐食すると鉄筋の力学的性能は各基準を満たさない恐れがあると考えられる。

表-3 鉄筋の性能規定

| 鉄筋種類 規 定 | SD 295 A | | | SD 390 | | |
|---------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------|-----------------------------|------------------------------|-----------|
| | 降伏点 (N/mm ²) | 引張強さ (N/mm ²) | 伸び (%) | 降伏点 (N/mm ²) | 引張強さ (N/mm ²) | 伸び (%) |
| 日本建築学会 の規定値 | 短期許容応 力度:295 | JIS 規定 | JIS 規定 | 短期許容応 力度:390 | JIS 規定 | JIS 規定 |
| JIS 規 定 | 295以上 | 440-600 | 16以上 | 390-510 | 560以上 | 16 以上 |
| 土 木 学 会 | 許容応力度 176 | JIS 規定 | JIS 規定 | 許容応力度 205 | JIS 規定 | JIS 規定 |
| 調査 研究* ¹ | 351-365 | 517-543 | 25.2-27 | - | - | - |
| 本 論 文 | 341-350 | 493-510 | 22.7-24 | 385-411 | 569-571 | 19.1-20.5 |

3.2 積算電流量と腐食減量率

図-4は3%NaCl溶液を電解液として使用した電食実験時の積算電流量と腐食減量率との関係を示したものである。試験体数は鉄筋種類別に各6個であるが、積算電流量と腐食減量（ここでは腐食減量率で表現）にはファラデーの法則に基づいた非常に高い相関関係が認められた。また、同一の積算電流量の場合、SD 390の腐食減量率はSD 295Aより小さいことから、同一積算電流量における腐食程度は鉄筋の種類によって異なると考えられる。

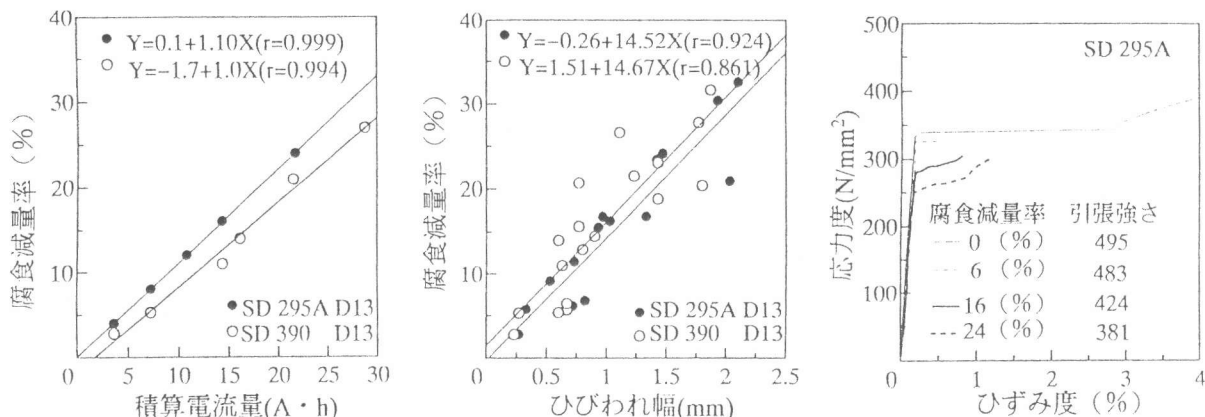
3. 3 ひびわれ幅と腐食減量率

図一5にかぶりコンクリートのひびわれ幅と腐食減量率との関係を示す。ひびわれ幅を測定した試験体の寸法は比較的小さく(図一1(b)参照)、ひびわれはかぶりが10mmの面のみで腐食区間全体に発生していることから、腐食量が大きいほどひびわれ幅が大きい結果となった。また、各ひびわれ測定点での差は非常に小さかったため、腐食の程度は腐食区間の平均的な腐食減量率で評価した。目視観察によるひびわれ発生時の腐食減量率は約1%(250mg/cm²)であり、ひびわれに接している鉄筋の部分の腐食が著しかった。

3. 4 腐食減量率と鉄筋の力学的性質

(1) 応力-ひずみ関係

図一6に鉄筋(SD 295A)の応力-ひずみ関係を示す。腐食した鉄筋を10%クエン酸二アンモニウムで洗った後、表面の腐食状態を目視で観察した結果、腐食面は全体的に凸凹の少ないなめらかな状態であり、このような現象は腐食減量率が大きくなるほど著しい。また、腐食鉄筋の応力-ひずみ関係は健全な鉄筋と異なる挙動を示し、健全な鉄筋は降伏点が明瞭で塑性域が長い、腐食が著しい鉄筋ははっきりした降伏点は見られなく、塑性域も短い。これは腐食鉄筋では、断面が一様でないため応力の集中力が生じ、降伏域が移動するためであると考えられる。



図一4 積算電流量と腐食減量率 図一5 ひびわれ幅と腐食減量率 図一6 鉄筋の応力-ひずみ関係

(2) 降伏点

鉄筋の降伏点と腐食減量率との関係に関して、実験値及び腐食減量率に比例した断面積から計算した値を図一7に示す。腐食減量率が大きいほど降伏点は小さくなるが、実験値は計算値より小さい値を示している。これは電食による鉄筋腐食が全面均一腐食ではなく不均一腐食であるため、平均断面欠損より大きい断面欠損の部分があるためだと考えられる。図一7の回帰式をY切片で除し、初期値に対する百分率に換算すると以下の式(2)になる。

$$Y=100-1.20X \text{ (SD 295A)}、Y=100-1.28X \text{ (SD 390)} \text{ (Y: 相対降伏点(\%)、X: 腐食減量率(\%)) (2)}$$

腐食減量率1%の減少による降伏点の低下率は、SD 295Aは1.2%、SD 390は1.28%であり、材質の強度が大きいほど降伏点に与える腐食の影響は大きかった。また、本実験でJISの降伏点の規定値を下回る腐食減量率はSD 295Aは12.81%、SD 390は0.52%であり、SD 390の腐食減量率が小さいのはJIS規定に比べ鉄筋の実際の強度にあまり余裕がないためである。また、本実験から求めた腐食重量減量率を用いて腐食による降伏点の低下を定量化することができ、腐食鉄筋の降伏点を鉄筋が腐食した構造部材の有限要素解析に適用することにより、より正確な解析が可能である。

うと考えられる。

(3) 引張強さ

鉄筋の引張強さと鉄筋の腐食減量率との関係を図-8に示す。鉄筋の腐食減量率と引張強さとの関係は非常に高い相関性があり、腐食減量率が大きくなるほど引張強さは小さくなる。

$$Y=100-1.11X \text{ (SD 30A)}, Y=100-1.03X \text{ (SD 390)} \quad (Y:\text{相対引張強さ}(\%), X:\text{腐食減量率}(\%)) \quad (3)$$

式(3)から引張強さは腐食減量率1%の減少によって、SD 295Aは1.11%、SD 390は1.03%減少し、降伏点に比べて腐食の影響は比較的少なかった。しかし、構造設計で限界状態設計法が採用されるなど材料の性能を限界まで生かす技術が用いられている状態では、腐食を生じさせないことが重要である。また、本実験でJIS規定値を下回る腐食減量率は、SD 295Aは11.35%、SD 390は1.92%である。

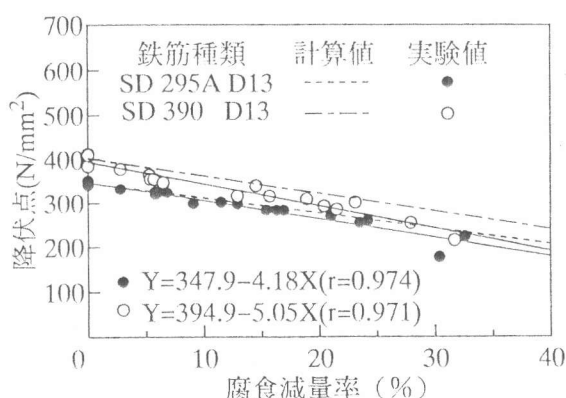


図-7 鉄筋の腐食重量減少率と降伏点

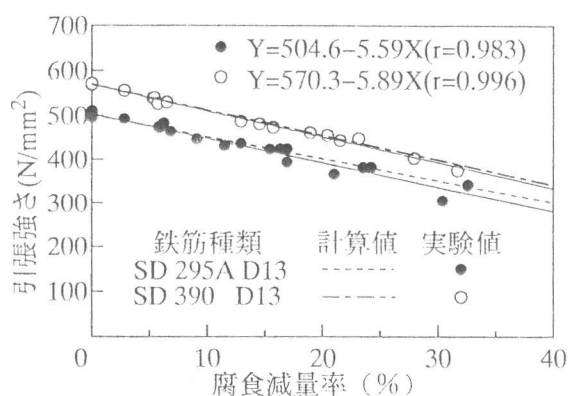


図-8 鉄筋の腐食減量率と引張強さ

(4) 伸び

図-9に腐食減量率と伸びとの関係を示す。腐食減量率が大きくなるほど伸びは小さくなり、式(4)のように腐食減量率1%の減少によって、SD 295Aは1.99%、SD 390は1.76%減少し、降伏点及び引張強さと比較して伸びに対する腐食の影響は最も大きかった。これは、鉄筋の破断の位置からわかるように、不均一腐食した部分の応力集中がその原因と考えられる。

$$Y=100-1.99X \text{ (SD 295A)}, Y=100-1.76X \text{ (SD 390)} \quad (Y:\text{相対伸び}(\%), X:\text{腐食減量率}(\%)) \quad (4)$$

また、本実験で伸びがJIS規定値を下回る腐食減量率は、SD 295Aは14.30%、SD 390は9.68%で、強度が小さいほど伸び性能に与える腐食の影響は大きかった。特に、降伏点、引張強さに比べて伸びの低下率が大きいため、応力集中の再分配、地震のような突発的な载荷における挙動及びRC構造物の脆性破壊に及ぼす腐食の影響を検討する必要がある。

(5) 弾性係数

鉄筋の弾性係数は鉄筋種類に関わらず $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ として用いられているが、腐食した鉄筋の場合は不均一腐食による応力集中で全体の伸びが小さく、同じ変形を生じさせるのに必要な荷重が小さくなるので見かけの弾性係数は減少すると考えられる。図-10に示すように腐食減量率が大きいほど弾性係数は小さくなり、式(5)のように鉄筋の強度が小さいほど弾性係数に及ぼす腐食の影響は大きい。

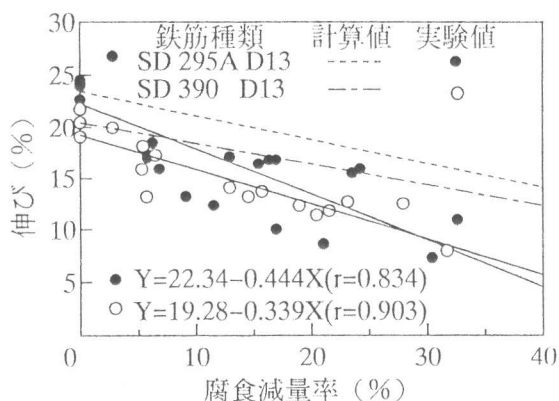
$$Y=100-0.95X \text{ (SD 295A)}, Y=100-0.40X \text{ (SD 390)} \quad (Y:\text{相対弾性係数}(\%), X:\text{腐食減量率}(\%)) \quad (5)$$

表一 5 腐食減量率1%の場合の各性能の低下率

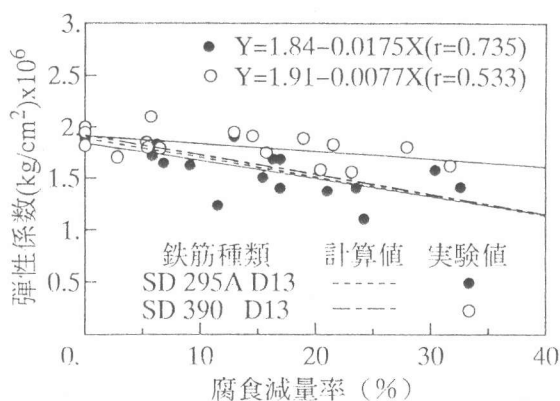
| 鉄筋の 種 類 | 降伏点 (%) | 引張強さ (%) | 伸び (%) | 弾性係数 (%) |
|------------|------------|-------------|-----------|-------------|
| SD 295A | 1.20 | 1.11 | 1.99 | 0.95 |
| SD 390 | 1.28 | 1.03 | 1.76 | 0.40 |

表一 6 JIS規定値を下回る腐食減量率

| 鉄筋の 種 類 | 降伏点 (%) | 引張強さ (%) | 伸び (%) |
|------------|------------|-------------|-----------|
| SD 295A | 12.81 | 11.35 | 14.30 |
| SD 390 | 0.52 | 1.92 | 9.68 |



図一 9 鉄筋の腐食減量率と伸び



図一 10 鉄筋の腐食減量率と弾性係数

4. まとめ

以上の実験結果により得られた知見を以下に示す。

- 1) 既往の研究と同様に、積算電流量が大きいほど鉄筋の腐食減量率は比例的に増加した。また、同一の積算電流量での腐食減量率は鉄筋の種類により異なる値が得られ、腐食減量率が高いほどひびわれ幅は大きくなった。そして、電食による鉄筋の腐食はひびわれに接している部分が著しかった。
- 2) 腐食減量率と腐食鉄筋の降伏点、引張強さ、伸び及び弾性係数は種類別に高い直線的な相関関係があり、この相関関係を利用することにより、腐食したRC構造部材の有限要素解析を行う場合に適用できる腐食鉄筋の材料定数を定量化することができた。
- 3) 本実験の範囲では、SD 295Aの場合、JIS規定を下回る腐食減量率は約12%である。

電食以外の塩害及び中性化による腐食に対しても研究が要求される。特に、鉄筋腐食による伸びの低下が著しいことから、鉄筋が腐食したRC構造部材の脆性破壊に関する研究が必要である。

謝辞：本研究は文部省科学研究費補助金一般研究(A) (課題番号：06402045、代表者：友澤史紀 東京大学教授)の一部として行ったものである。また、実験の際、大学院生陳庭君、栄井建二君、研究生朴起蓬君をはじめ、研究室の諸氏にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 田中礼治・西仁：鉄筋の機械的性質に関する調査研究, 日本建築学会構造系論文報告集, pp. 57-644, 1991. 4
- 2) 森永 繁：“鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究”, 東京大学学位論文, 1986. 11
- 3) 金子雄一、関博：コンクリート中における鋼材の腐食による引張耐力の経年変化について、土木学会第41回年次学術講演集, pp. 541-542, 1986. 11
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料, pp. 11-13, 1987. 9.