

論文 高強度太径鉄筋の強度性状に及ぼす腐食の影響に関する研究

内田 祐介^{*1}・橘高 義典^{*2}・松沢 晃一^{*3}

要旨：鉄筋コンクリート中に使用される種々な異形棒鋼，特に高層建築や大型構造物などの多くに使用されるSD490 や D41 などの高強度太径鉄筋について，電食，塩水噴霧による腐食促進試験を行い，レーザー変位計を用いた断面積測定装置により 3 次元的に腐食領域の形状，断面積減少率を把握し，引張試験によって荷重-変位曲線を得た。その強度試験結果を基にそれぞれの腐食方法毎の鉄筋の見かけの降伏点残存率，引張強さ残存率およびヤング係数残存率を求め，鉄筋の腐食領域の形状ならびに断面減少率との関係を考察した。

キーワード：高強度太径鉄筋，断面積減少率，降伏点残存率，引張強さ残存率，ヤング係数残存率

1. はじめに

従来，鉄筋コンクリート構造物は耐久性に優れているとされてきたが，近年，塩害，アルカリ骨材反応，中性化などの様々な要因による構造物の劣化現象が報告されている^{1),2)}。コンクリート構造物の中には，海洋構造物，取水構造物など海水と接する環境下のものがある。また，一般の構造物も中性化や飛来塩化物の影響を受け，鉄筋が腐食する場合がある。このような様々な要因によるコンクリート構造物中の鉄筋の腐食は，鉄筋コンクリート部材の構造性能に大きな影響を及ぼすと考えられ，鉄筋腐食と鉄筋の強度性状の把握は構造物の耐久性の観点から極めて重要である。特に近年大型構造物に使用されるSD490 や D41 などの高強度，太径鉄筋の腐食が力学的性能に及ぼす影響についてのデータは少ない³⁾。

本研究では，SD490 や D41 などの高強度，太径鉄筋を含む，種類および径の異なる異形鉄筋が種々の方法で腐食した場合の断面形状を回転式レーザー変位計により鉄筋軸方向に沿って測定し，腐食領域の形状ならびに断面減少率を把握するとともに，鉄筋の力学的性質との関係について明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

表-1 および表-2 に実験の要因と水準，表-3 に鉄筋の種類毎の機械的性質，表-4 に鉄筋の径毎の寸法や質量を示す。鉄筋種類は，異形棒鋼として JIS G 3112 に規定されている SD295A，SD345，SD390，SD490 とし，SD295A は D13，SD345 および SD390 は D13，D19，D29，D41，SD490 は D19，D29，D41 について試験を行なった⁴⁾。供試体長さは 600mm のねじ節鉄筋とし，腐食対象領域以外をシリコン樹脂および防水性ビニールテープで保護した。図-1，写真-1 に供試体を示す。また，腐食方法は電食試験

および塩水噴霧試験の 2 種類，腐食長さは長手方向 50mm の 1 水準，電食による目標断面減少率は，腐食長さの平均腐食断面減少率を基に 0～30.0% の 9 水準とした。塩水

表-1 実験の要因と水準(電食試験)

要因	水準
鉄筋種類	SD295A, SD345, SD390, SD490
鉄筋の径	D13, D19, D29, D41
腐食方法	電食
腐食長さ(mm)	50
腐食による目標断面減少率(%)	0, 2.5, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 25.0, 30.0

表-2 実験の要因と水準(塩水噴霧試験)

要因	水準
鉄筋種類	SD295A, SD345, SD390, SD490
鉄筋の径	D13, D19, D29, D41
腐食方法	5%NaCl, 温度 35℃の塩水噴霧
腐食長さ(mm)	50
腐食による目標断面減少率(%)	0, 2.5, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0

表-3 鉄筋の種類毎の機械的性質

鉄筋種類	公称値	
	降伏点または 0.2%耐力(N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
SD295A	295 以上	440～600
SD345	345～440	490 以上
SD390	390～510	560 以上
SD490	490～625	620 以上

*1 (一財)建材試験センター (正会員)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域 教授 工博 (正会員)

*3 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域 助教 修士(工学) (正会員)

表-4 鉄筋の径毎の寸法・質量

呼び名	公称寸法			外径 ϕD (mm)	基形部寸法 ϕV (mm)	節の寸法 P (mm)
	直径 (mm)	断面積 (mm ²)	単位質量 (kg/m)			
D13	12.7	126.7	0.995	14.1	12.1	7.0
D19	19.1	286.5	2.25	21.5	18.2	8.0
D29	28.6	642.4	5.04	32.1	27.4	14.0
D41	41.3	1340	10.5	46.3	38.9	16.0

噴霧試験による目標腐食断面減少率は電食試験と同様の平均腐食断面減少率を基に、0～20.0%の6水準とした。所定の段階まで腐食促進を行い、断面積測定、引張試験を行った。

2.2 電食試験

電食試験は、供試体の腐食対象領域を3%NaCl水溶液に浸し、鉄筋を陽極、銅板を陰極として直流安定化電源により30V一定の通電を行なった(図-2)。腐食期間は、鉄筋の目標断面減少量が2.5～30%の設定した水準値になるまでとし、所定の腐食を終えた供試体を取り出した。

2.3 塩水噴霧試験

写真-2、図-3に試験で使用した塩水噴霧劣化促進試験機の概要を示す。試験機内部の棚は5段組みで、1段100kgまで供試体を設置することが可能である。また、供試体を設置しても、噴霧した塩水が炉内にいきわたるように棚は格子状となっている。

本試験では、35℃に炉内温度を設定し5%NaClの塩水を噴霧する条件下で供試体を炉内に設置した。

2.4 断面積測定試験

図-4に断面積測定に回転式3次元レーザー変位測定機を示す。本測定機は両脇のチャックにより供試体を固定し、供試体を回転させながら、レーザー変位計を任意の軸に移動させることで、供試体の表面変位を3次的に計測する装置である。本装置は装置本体、制御ユニット、センサコントローラから構成されており、供試体の測定位置およびピッチは制御装置から設定する。なお、本装置で計測可能な被測定物は長さ400～700mm、重量70kgまでであり、径は $\phi 10\text{mm}$ ～ $\phi 50\text{mm}$ 程度までである。また、計測可能範囲は長手方向100mmまで0.5～5.0mmピッチ、円周方向0.36°である。

腐食前の健全な鉄筋の断面積測定開始点と測定終了点にポンチを打ち断面積測定範囲を設定した。その後、回転式3次元レーザー変位測定機で、腐食試験前の健全な鉄筋の断面積を測定した。所定の腐食を終えた供試体を、20℃の10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液に48時間浸漬した後、乾布で拭き取り錆を除去後、断面積の測定を行った。断面積測定の際は、腐食の前後で、断面積

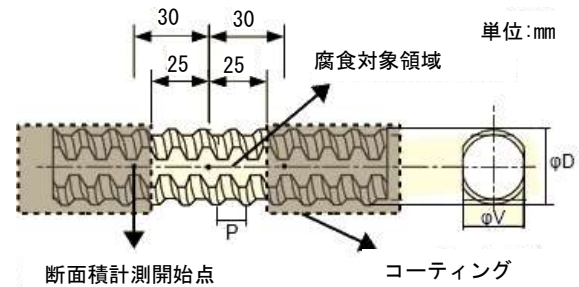


図-1 供試体概要



写真-1 供試体外観

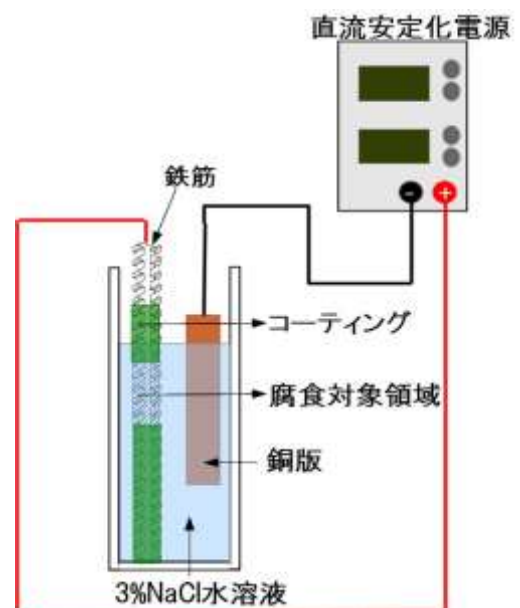


図-2 電食試験概要図

測定の開始点を揃えて行った。

2.5 断面積測定方法

図-5 に断面積測定方法の概念図を示す。本研究では測定範囲を、試験体の長手方向が腐食部分 50mm、腐食部分の両端の健全部分 5mm ずつの 60mm とし、測定間隔は Z 軸方向 1mm とした。また、図-6 に示すように円周方向では 0.36° 間隔で回転させデータを測定した。以上の条件で任意の供試体断面を測定すると、次式(1)のようなデータが得られる。

$$P = (r, \theta) \quad (1)$$

この時、 r は半径を表し、 θ は回転角を表す。得られた極座標より式(2)を積分し断面積を求めた。

$$dS = \frac{1}{2} r^2 d\theta \quad (2)$$

2.6 引張試験

供試体の断面積の測定後、万能試験機（容量 1000kN）を用いて引張試験を行なった。試験区間を 120 mm とし、試験前には鉄筋と試験機のチャックとのすべりを防ぐため、試験体に防水の目的で巻きつけたビニールテープやシリコンを除去した。試験の際には、図-6 に示す変位測定治具を用いて変位を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 断面積測定結果

図-7 に電食試験により 5%～30% まで断面減少した SD490-D41 の同一測定点の断面積の形状を、健全部分の断面積と合わせて示す。電食試験によって断面減少した際、0% と 30% を比較すると、多少の凹凸が生じながらも、概ね一様に断面積が減少していることがわかる。また、図-8 に電食により腐食した鉄筋(SD345-D41-5%腐食)の断面積減少率を示し、図-9 に塩水噴霧により腐食した鉄筋(SD345-D41-5%腐食)の断面積減少率を示し写真-3 に電食試験により腐食した様子と塩水噴霧試験により腐食した様子を示す。

ここでの断面積減少率は、健全な鉄筋と腐食した鉄筋の断面積測定開始点を同じ地点から開始し、節は節、節と節の間の部分は節と節の間の部分というように連続的に、腐食後の断面積を対応する地点の腐食前の断面積で除いた値としている。

これより、電食試験によって腐食した鉄筋は節や腹等の部分で断面減少の特徴的な傾向は見られないが、それに対し塩水噴霧試験により腐食した鉄筋は、節の頂点部分ではあまり腐食が進まず、節と節の間の部分で腐食が進むという傾向が見られた。これは節と節の間に塩水がたまり、節の頂点部分より塩分が付着しやすいため節と節の間の部分がより腐食により断面減少を起こしたものだと考えられる。



写真-2 複合劣化促進試験機(塩水噴霧)

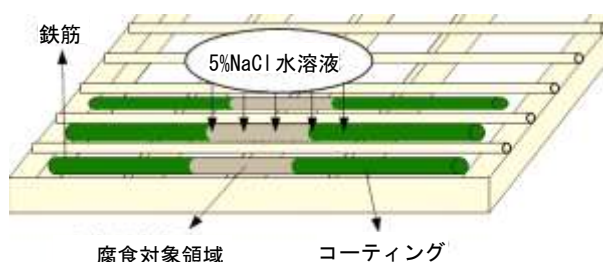


図-3 塩水噴霧試験概要図

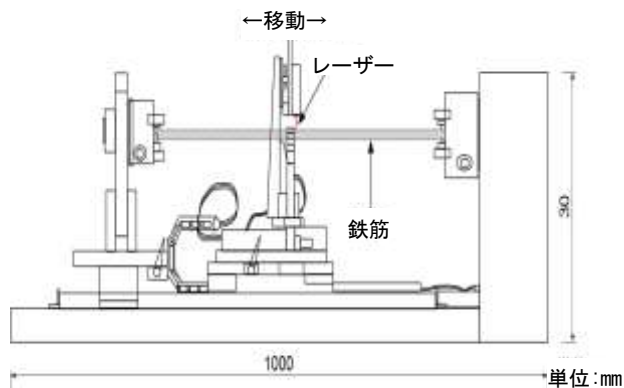


図-4 回転式 3 次元レーザー変位測定機

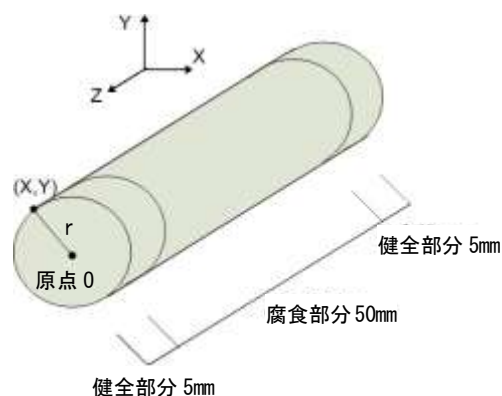


図-5 断面積測定概念図

少に伴う引張強さ残存率の低下が大きいことが明らかとなり、引張強さ残存率は鉄筋の種類や径によらず断面減少率と同様の割合で低下していく傾向にあった。これは降伏点残存率の時と同様の傾向である。

3.4 ヤング係数残存率

図-14 に電食試験により腐食した鉄筋の平均腐食断面減少率と見かけのヤング係数残存率の関係を示し、図-15 に塩水噴霧試験により腐食した鉄筋の最大腐食断面減少率と見かけのヤング係数残存率の関係を示す。

実験では、試験区間 120 mm のうち、腐食部分は 50 mm としている。そこで、腐食部分の見かけのヤング係数は、試験で得られた荷重－変位曲線の関係から、腐食していない健全部分のヤング係数を 205kN/mm^2 とし、次式(7)により求めた。

$$E_2 = l_2 / (S \times \Delta l / \Delta P - l_1 / E_1) \quad (7)$$

ここで、 S は鉄筋の公称断面積、 E_1 、 E_2 は健全部分のヤング係数及び腐食部分の見かけのヤング係数、 l_1 は試験区間における健全部分の長さ、 l_2 は腐食部分の長さ、 ΔP は荷重－変位曲線における降伏点の 1/3 および 2/3 時の荷重の差、 Δl は降伏点の 1/3 および 2/3 時の変位の差を示す。

電食試験において腐食した鉄筋の見かけのヤング係数残存率を線形に低下していると仮定して、次式(8)のような 1 次直線で回帰した。

$$y_e = 100 - 1.30x \quad (8)$$

この時、 y_e はヤング係数残存率(%)を表し、 x は平均腐食断面減少率(%)を表す。

また塩水噴霧試験において腐食した鉄筋は電食試験同様、見かけのヤング係数残存率を線形に低下していると仮定して、次式(9)のような 1 次直線で回帰した。

$$y_e = 100 - 2.55x \quad (9)$$

鉄筋のヤング係数は一般的に鉄筋種類にかかわらず 205kN/mm^2 として用いられるが、腐食した鉄筋の断面積は不均一であり、その結果として応力集中で全体の伸びが小さくなっている。従って健全な鉄筋に対して、同じような変形を生じさせる荷重が腐食した鉄筋では小さくなるため、見かけのヤング係数は小さくなることが考えられる。従って、腐食による断面減少率が大きいものほど、見かけのヤング係数は小さくなる傾向にあった。電食試験で腐食した鉄筋と塩水噴霧試験で腐食した鉄筋の見かけのヤング係数残存率を比較すると、塩水噴霧試験によって腐食した鉄筋は、電食試験で腐食した鉄筋より見かけヤング係数の低下が大きくなった。

ヤング係数残存率が、降伏点残存率及び引張強さ残存率と比較して、データの分布にばらつきが多く生じているのは、見かけのヤング係数残存率は腐食による断面減少率と同程度の割合で減少していない為であり、それは

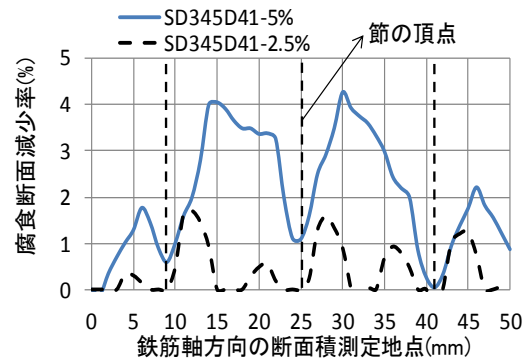


図-9 腐食断面減少率(塩水噴霧試験)



写真-3 5%腐食鉄筋(左：電食，右：塩水噴霧)

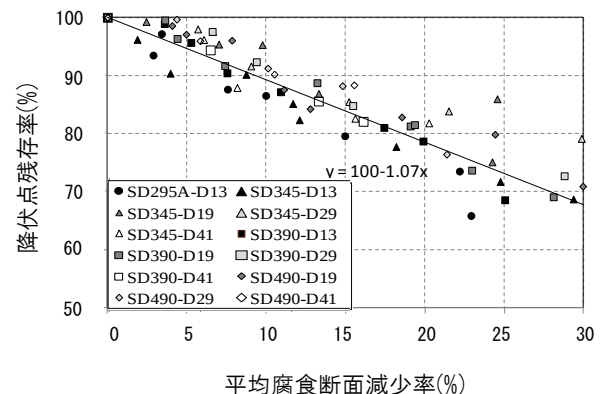


図-10 降伏点残存率(電食試験)

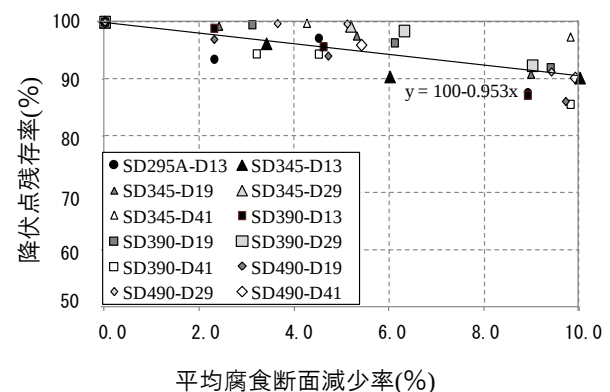


図-11 降伏点残存率(塩水噴霧試験)

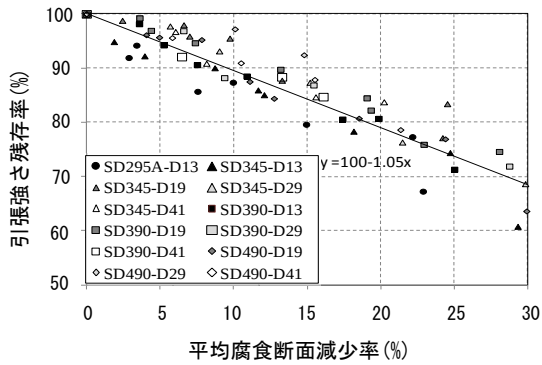


図-12 引張強さ残存率(電食試験)

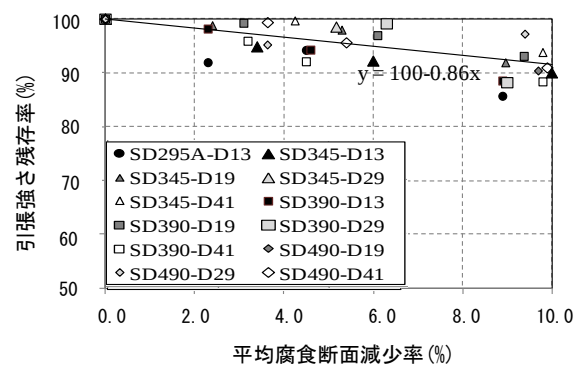


図-13 引張強さ残存率(塩水噴霧試験)

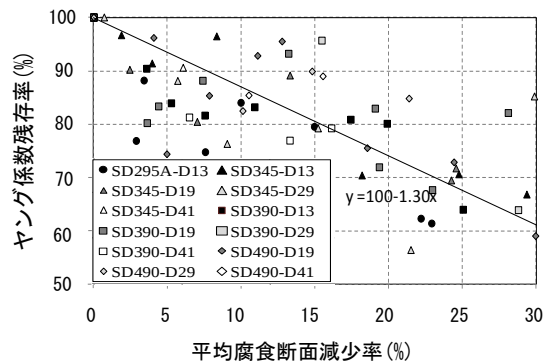


図-14 ヤング係数残存率(電食試験)

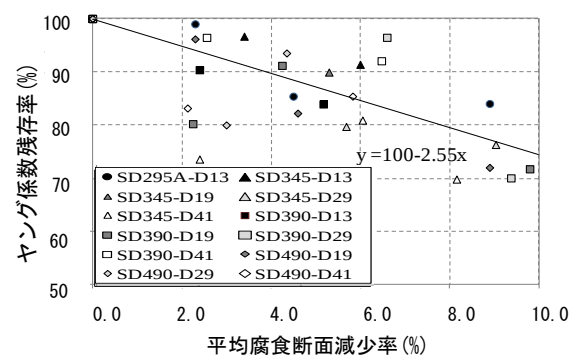


図-15 ヤング係数残存率(塩水噴霧試験)

ΔP 及び ΔI が一定に低下していないことが理由であると考えられる。

4. まとめ

SD490 や D41 などの高強度及び太径鉄筋を含める種々の降伏強度や径を持つ鉄筋コンクリート用異形棒鋼について、電食試験、塩水噴霧試験等の腐食促進試験を行い、回転式 3 次元レーザー変位計による断面積測定装置により、3 次元的に腐食領域の形状、断面積減少率を把握し、引張試験によって強度性状を得た結果以下の知見が得られた。

- (1) 電食試験によって腐食した鉄筋と塩水噴霧によって腐食した鉄筋の断面減少率を比較すると、異なる傾向を示し、塩水噴霧試験によって腐食した鉄筋は節の部分と比べて腐食断面減少が少ない。
- (2) 回転式 3 次元レーザー変位測定機による断面積の測定では、断面減少の分布を詳細に把握することができる。
- (3) 腐食に伴う降伏点残存率、及び引張強さ残存率は種類や径によらず線形に低下し、腐食した断面減少率に比例する強度低下を示す。
- (4) 腐食に伴う見かけのヤング係数残存率は断面減少が生じると低下した。また、降伏点残存率や引張強さ残存率と異なり、見かけのヤング係数残存率は

断面減少率より多くの割合で低下する。

- (5) 電食試験と塩水噴霧試験を比較すると電食試験によって腐食した鉄筋のほうが降伏点残存率、および引張強さ残存率の低下が大きい。

謝辞

本研究を実施するにあたり、東京鉄鋼(株)ならびに日本ペイント((株))に多大なるご協力を頂きました。記して謝意を表します。本研究は、原子力規制委員会「高経年化技術評価高度化事業」の補助のもとに行いました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会:鉄筋腐食・防食及び補修に関する研究の現状と今後の動向 コンクリート委員会腐食防食小委員会報告, 1997
- 2) 社団法人日本コンクリート工学協会:複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告書, 2001
- 3) 金蚩来, 野口貴文, 長井宏憲:腐食形態を考慮した腐食鉄筋の力学的性能評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 73, 第 624 号, pp. 181-186, 2008
- 4) 日本工業規格 JIS G 3112, 鉄筋コンクリート用棒鋼