

論文 局所的に生じた腐食が鉄筋の力学的性質に及ぼす影響

濱田 洋志^{*1}・加藤 絵万^{*2}・岩波 光保^{*2}・横田 弘^{*3}

要旨：既存構造物の保有性能評価を精度良く行うためには、RC 構造物の重大かつ重要な劣化機構であり、構造性能低下に及ぼす影響が大きい鉄筋腐食について、その腐食性状と力学的性質の関係を精度良く評価する必要がある。本研究では、実構造物から採取した 2 種類の異形鉄筋 D13, D22 について、レーザ変位センサを用いた形状測定により腐食による断面減少の局所化を正確に把握し、局所的腐食が鉄筋の力学的性質に及ぼす影響について検討した。その結果、鉄筋の腐食による力学的性質の低下は、その鉄筋の最大断面減少率を考慮することで精度良く評価できることが分かった。

キーワード：鉄筋の力学的性質、局所的腐食、質量減少率、最大断面減少率

1. はじめに

海洋環境下における鉄筋コンクリート (RC) 構造物は、塩化物イオン等の劣化因子が容易に供給される苛酷な環境に曝されているため、コンクリートや鋼材等の構成材料の劣化進行に伴って構造物全体の性能が低下することが考えられる。そのため、構造物全体の性能を供用中確保するためには、効率的かつ効果的な維持管理を行っていくことが重要となる。このためには、図-1 に示すように、点検により劣化・変状を的確に把握し、その劣化・変状が使用材料の耐久性および構造物の性能に及ぼす影響について適切に評価・予測しなければならない¹⁾。現在、安全側の評価として、材料劣化の観点から維持管理の限界状態を定め、これに基づいて維持管理を行うことが一般に行われている。しかしながら、性能が失われていくメカニズムを明らかにし、かつその進行状況を定量的に評価することができれば、より効率的かつ効果的な維持管理を行うことができると考えられる。

材料劣化による構造物の構造性能低下を評価する手法は多々提案されている。特に、鉄筋腐食は海洋環境下に設置される RC 構造物において重大かつ重要な劣化機構であり、また、構造性能低下に及ぼす影響も大きいため、精力的に研究されている分野のひとつである。しかしながら、鉄筋の腐食性状と構造物の構造性能低下の関係は未だ十分に定量的に評価されていない。これは、腐食した鉄筋の腐食性状とその力学的性質の関係に多くの見解があることがひとつの理由である²⁾。

鉄筋の平均的な断面減少率を表す指標として鉄筋の質量減少率が多用されている³⁾。しかし、これは、鉄筋の平均的な腐食量を表す指標であり、孔食のような局所的な腐食を表現することができない。したがって、腐食した鉄筋の力学的性質は精度良く捉えられていないことが

考えられる。ここで、大屋戸らは、非接触レーザ方式による 3D スキャナを用いた鉄筋の断面積分布の測定方法を提案し、局所的腐食を模擬した鉄筋試験片における腐食性状と力学的性質の関係を精度良く評価しているが⁴⁾、実際の鉄筋腐食に対する検討はなされていない。

そこで、本研究では、実構造物から採取した 2 種類の異形鉄筋について、レーザ変位センサを用いて腐食による断面減少の局所化を正確に把握した。また、引張試験により得られた結果より局所的腐食が鉄筋の力学的性質に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 部材概要

研究の対象とした鉄筋は、1964～1966 年に建設され、約 40 年間供用された栈橋上部工に用いられた 2 種類の異形鉄筋 (D13 および D22) である。採取した部材は、目視調査により劣化度 a～c と判定された RC はりおよび RC 床版である⁵⁾。D13 鉄筋は 3 体の RC 床版の腐食が進

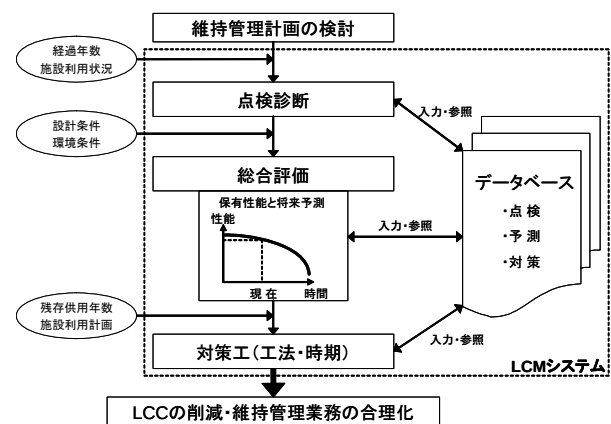


図-1 港湾構造物の LCM システム¹⁾

*1 独立行政法人 港湾空港技術研究所 LCM 研究センター 依頼研修員 (東亜建設工業 (株)) (正会員)

*2 独立行政法人 港湾空港技術研究所 LCM 研究センター 主任研究官 博 (工) (正会員)

*3 独立行政法人 港湾空港技術研究所 LCM 研究センター長 博 (工) (正会員)

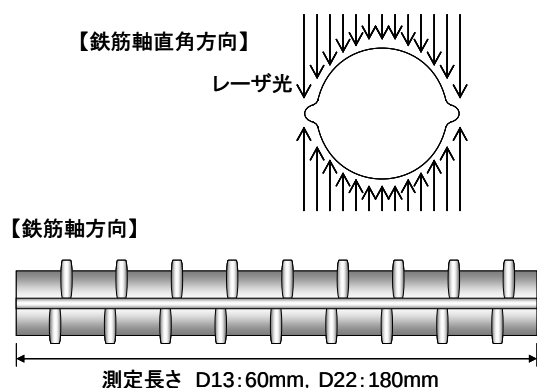


図-2 レーザ変位センサを用いた形状測定の概要

行っている箇所から 36 本、D22 鉄筋は同様に RC はりの軸方向鉄筋から 8 本採取した。

2.2 鉄筋断面積の測定

採取した鉄筋は、サンドブラスト処理および 10% クエン酸水素二アンモニウム水溶液 (60℃) に浸せきし、腐食生成物を除去した。除錆後、レーザ変位センサを用いた形状測定を行い、軸直角方向の照射距離を積分することにより断面積を求めて、断面積の軸方向分布を算出した。図-2 に形状測定の概要を示す。鉄筋のリブを基準に上面および下面に分けて測定を行い、両者のデータを合わせることで鉄筋の断面積とした。測定長さは、D13 鉄筋では 60mm、D22 鉄筋では 180mm である。測定間隔は、約 40 年間供用された栈橋上部工から採取した丸鋼φ22 と異形鉄筋 D13 を用いた予備測定に基づいて決定した。

2.3 引張試験

鉄筋の断面積測定後、引張試験を実施し、降伏点、引張強さおよび伸びを測定した。伸びは、標点間距離 (鉄筋径の 4 倍) の変化から算出した。

2.4 質量減少率の算定

引張試験後に、チャックによるつかみ部を取り除いた鉄筋の質量を測定し、腐食による質量減少率を算出した。質量減少率は、目視で発錆が見られなかった鉄筋の単位長さ当りの質量を基準値とし、基準値から各鉄筋の単位長さ当りの質量を差し引いたものを基準値で除して求めた。したがって、ここで測定した質量減少率は D13 鉄筋では 60mm、D22 鉄筋では 180mm の区間の鉄筋の平均断面減少率と等価であると考えられる。

3. 鉄筋腐食の局所化の評価

3.1 鉄筋断面積の測定間隔の設定

鉄筋腐食の局所化を表現するには、できるだけ密な間隔で断面積の測定を行うことが望ましいが、時間と労力を必要とする。そこで、まず実用的な観点で、どの程度の間隔で測定すれば腐食の局所化を精度良く表現できる

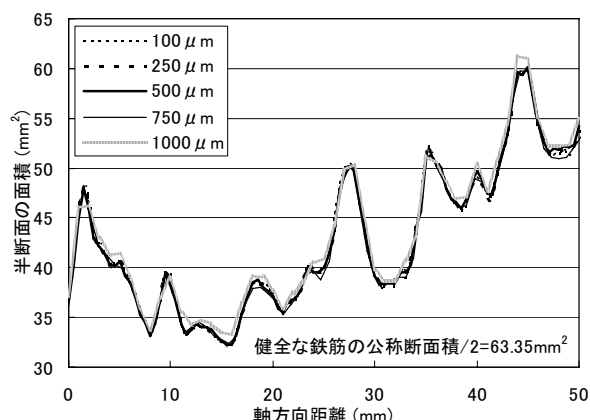


図-3 鉄筋軸方向の断面積分布 (D13 鉄筋)

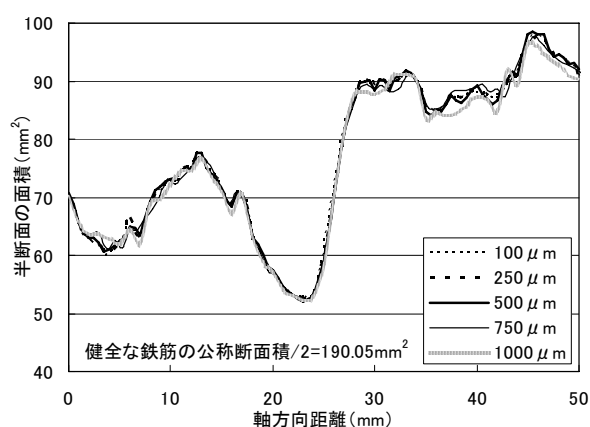
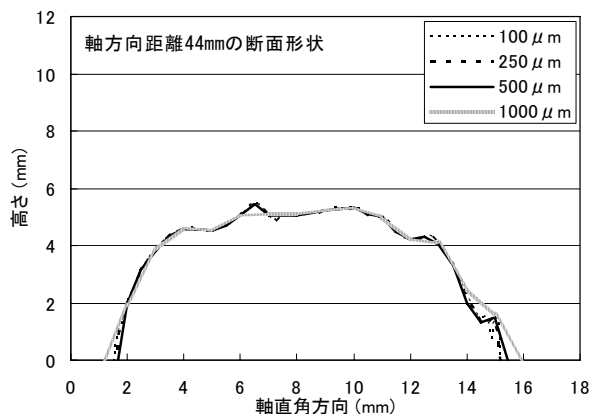


図-4 鉄筋軸方向の断面積分布 (φ22 鉄筋)

のかを検討した。

図-3 および図-4 にそれぞれ D13 鉄筋および φ22 鉄筋の鉄筋軸方向の断面積分布を示す。ここで断面積は、リブを軸として著しい腐食が見られた半断面の面積を示しており、実際の鉄筋断面積の半分程度の値となるものである。測定に用いた D13 鉄筋は、節による凹凸が見られないほど著しく腐食していた。また、表-1 に各鉄筋の半断面における最小断面積と平均断面積の測定値および測定誤差を示す。測定誤差は、測定間隔を 100μm とした場合の計測値を基準値とし、基準値から各測定間隔の計測値を差し引いたものを基準値で除したものである。これより、D13 鉄筋では測定間隔が 750μm より密であれば、測定誤差は最大で -0.63% であり、最小断面積および平均断面積に変化はほぼ見られなかったが、1000μm では最小断面積の測定誤差は +2.69%、平均断面積の測定誤差は +1.12% となり、最小断面積、平均断面積共に若干大きくなる結果となった。また、図-3 に示すように、500μm より密な場合、断面積分布は測定全域においてそれぞれほぼ同じ結果を示したが、750μm、1000μm の場合では、これらと値が異なる箇所が見られた。図-5 に示すよう



図－5 鉄筋軸直角方向の測定高さ分布（D13 鉄筋）

に、大きく値が異なる箇所（図－3 中、軸方向距離 44mm の断面）の軸直角方向の鉄筋の形状は、測定間隔が 1000μm の場合は孔食による表面の凹凸を捉えておらず、断面積に+2.17%の誤差が生じた。

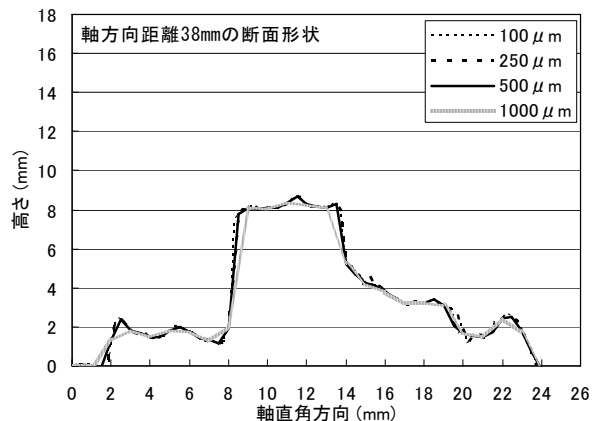
φ22 鉄筋では、750μm の場合、最小断面積の測定誤差が+2.28%となったが、それ以外は最小断面積、平均断面積共に大きな変化は見られなかった。しかしながら、図－4 に示すように、測定間隔 750μm および 1000μm の場合の鉄筋軸方向の断面積分布は、測定間隔 500μm 以下の場合と値が異なる箇所が見られた。図－6 に大きく値が異なる箇所（図－4 中、軸方向距離 38mm の断面）の軸直角方向の鉄筋の形状を示す。これより、測定間隔が 1000μm の場合は、断面積に-3.07%の誤差が生じ、D13 鉄筋と同様に孔食による表面の凹凸を捉えていないことが分かった。

以上の結果より、検討の対象とする D13 鉄筋および D22 鉄筋の軸方向および軸直角方向の測定間隔を 500μm と設定し、鉄筋の腐食性状を評価することとした。

3.2 鉄筋腐食の局所化の程度

図－7 に D13 鉄筋および D22 鉄筋における鉄筋軸方向の断面積分布の測定結果の一例を示す。平均断面減少率は、採取した鉄筋のうち目視で発錆が見られなかった鉄筋の除錆後の平均断面積を基準値として求めた断面減少率を測定区間全長で平均したものである。また、最大断面減少率は、同様にして求めた断面減少率の最大値である。実際の鉄筋の腐食した写真と比較すると、鉄筋の節や局所的腐食の形状を精度良く捉えられている。D22 鉄筋の測定結果では、健全な上側の節と腐食により凹凸が小さくなった下側の節の違いが断面積に精度良く再現できた。

図－8 に D13 鉄筋および D22 鉄筋における平均断面減少率と最大断面減少率の関係を示す。これより、平均断面減少率に対する最大断面減少率の増加の程度は、D13

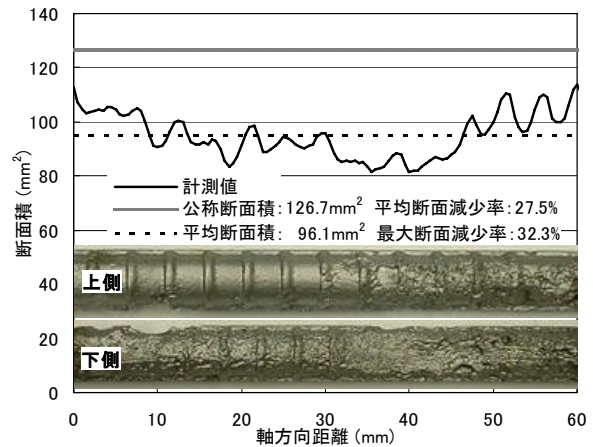
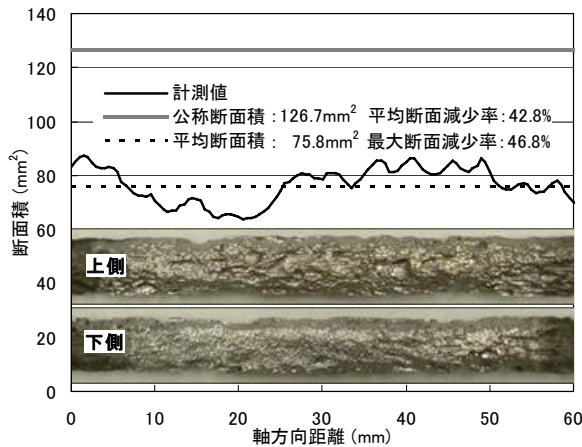


図－6 鉄筋軸直角方向の測定高さ分布（φ22 鉄筋）

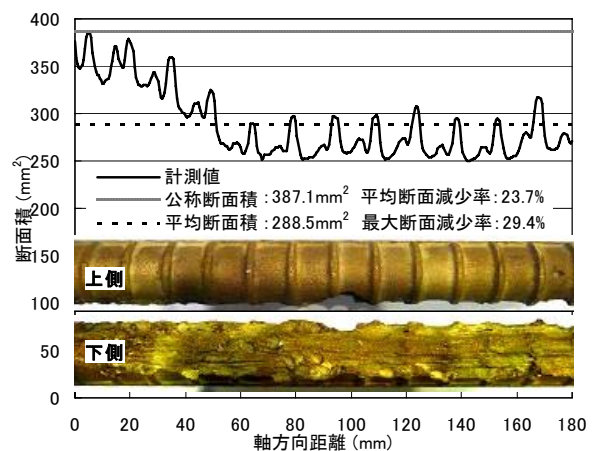
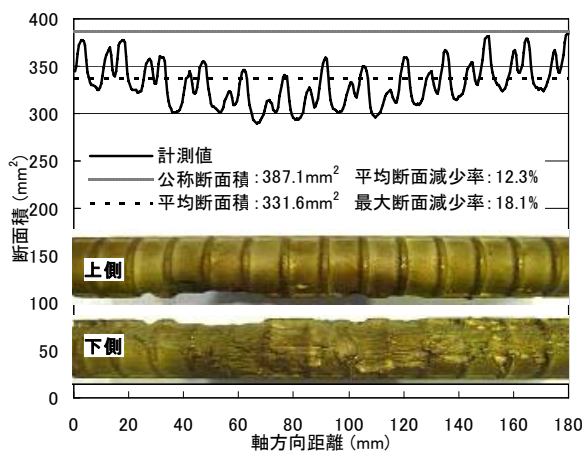
表－1 各鉄筋の最小断面積と平均断面積

鉄筋径	測定間隔 (μm)	最小断面積		平均断面積	
		計測値 (mm ²)	測定誤差 (%)	計測値 (mm ²)	測定誤差 (%)
D13	100	32.36	0.00	42.99	0.00
	250	32.22	-0.43	42.82	-0.40
	500	32.25	-0.34	42.84	-0.35
	750	32.35	-0.03	42.72	-0.63
	1000	33.23	+2.69	43.47	+1.12
φ22	100	52.16	0.00	76.81	0.00
	250	52.36	+0.38	76.81	0.00
	500	52.09	-0.13	76.82	+0.01
	750	53.35	+2.28	76.77	-0.05
	1000	52.20	+0.08	76.08	-0.95

鉄筋、D22 鉄筋共に腐食が進行するにつれて大きくなった。また、その増加の割合は D13 鉄筋では 1.11 倍、D22 鉄筋では 1.33 倍であり、D22 鉄筋の方がより局所的に腐食が生じたことを示している。D22 鉄筋の方がより局所的に腐食した要因のひとつとして、鉄筋径の影響が考えられる。コンクリート内に浸透する塩化物イオンは表面に近いほどその量が多いため、鉄筋径が大きいほどかぶり深さ方向における塩化物イオン量の差が大きく、同一断面でマクロセルが生じやすくなることが考えられる。また、D22 鉄筋は RC はり、D13 鉄筋は RC 床版から採取したものであることから推測すると、海水面からの距離の違いが腐食機構に影響を及ぼしていることも考えられる。RC 床版と比較すると RC はりの方が海水面に近く、塩化物イオンが多く供給されることから⁶⁾、同一断面でのマクロセルの発生が D22 鉄筋のほうが顕著であった。さらに、隅角部付近は 2 方向から塩化物イオンが浸透するため、同じかぶり深さであると考え、平板である RC 床版よりも塩化物イオンが多く供給されることとな



【D13 鉄筋】



【D22 鉄筋】

図-7 鉄筋軸直角方向の断面積分布の測定結果の一例

る。以上より、鉄筋径、部材の形状および海水面からの距離等の違いがD22鉄筋およびD13鉄筋の腐食進行機構に影響を及ぼしたと考えられる。

4. 局所的腐食が鉄筋の力学的性質に及ぼす影響

4.1 質量減少率を用いた力学的性質の評価

図-9および図-10にD13鉄筋およびD22鉄筋の質量減少率と降伏点率および引張強さ率の関係を示す。降伏点率および引張強さ率は、目視で発錆が見られなかった鉄筋の降伏点および引張強さの実験値を基準値とし、各鉄筋の降伏点および引張強さを基準値で除したものである。また、腐食の有無に関わらず全て健全な鉄筋の公称断面積を用いている。同図中に示す破線は、既往の研究⁷⁾における異形鉄筋D16の質量減少率と降伏点率の関係を示している。これより、D13鉄筋では質量減少率に対する降伏点率および引張強さ率の低下の傾きはそれぞれ-1.05および-1.16となり、腐食が進行するほど強度低下の割合が大きくなった。また、D16鉄筋の降伏点率の低下の傾きは-1.17、D22鉄筋の降伏点率および引張強さ率

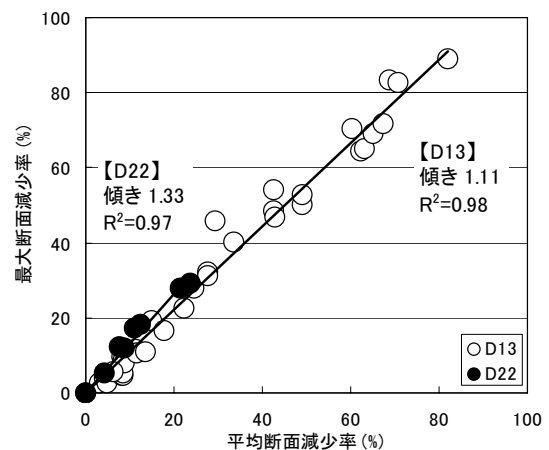


図-8 平均断面減少率と最大断面減少率

の傾きは-1.66および-1.45となり、鉄筋径が大きくなるほど低下の割合が大きくなった。質量減少率は、鉄筋の腐食性状を平均的に表すものであり、局所的な腐食を評価することはできない。また、公称断面積を用いて腐食鉄筋の降伏点等を求める場合、見掛けの降伏点および引張強さは質量減少に伴って低下し、その傾きは鉄筋径に

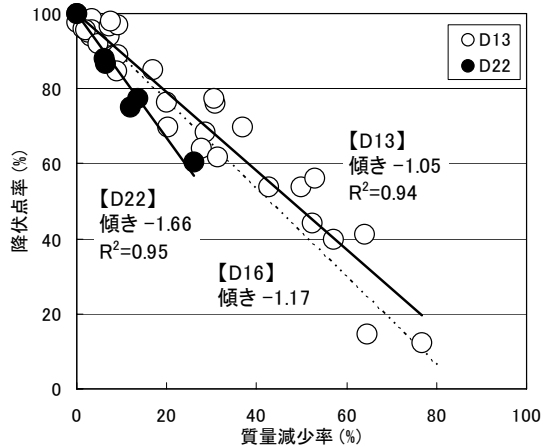


図-9 質量減少率と降伏点率

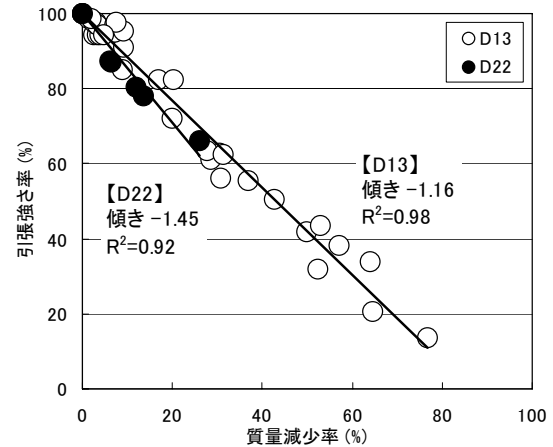


図-10 質量減少率と引張強さ率

よらず一定となるはずであるが、実際は鉄筋径によってその傾きが異なった。つまり、D22 鉄筋は腐食による断面積の局所化の程度が D13 鉄筋よりも大きかったため、腐食の進行に伴う降伏点および引張強さの低下の程度が見掛け上大きく表現されたものと考えられる。

図-11 に D13 鉄筋および D22 鉄筋における質量減少率と伸び率の関係を示す。伸び率は、目視で発錆が見られなかった鉄筋の伸びを基準値とし、各鉄筋の伸びを基準値で除したものである。同図中に示す破線は、既往の研究⁸⁾により得られた異形鉄筋 D10 の質量減少率と伸び率の関係を示す。これより、質量減少率が 10%以下では伸びの低下の程度は既往の研究とほぼ同じ傾向を示したが、質量減少率が 10%より大きくなるにしたがってばらつきが大きくなった。これは、前述の降伏点および引張強さの結果と同様、鉄筋腐食の局所化による影響であることが考えられる。腐食により鉄筋の断面形状がいびつになった場合、断面内での引張応力の分担が均一な状態とならないことが考えられる。これが鉄筋の伸びに影響し、特に、質量減少率が 10%より大きくなった場合にその影響が顕著であったと推測される。また、既往の研究によると、健全な鉄筋においても伸びのばらつきは大きい傾向を示す³⁾。これより、腐食した鉄筋に対しても鉄筋径の影響が卓越したことが考えられる。

4.2 最大断面減少率を用いた力学的性質の評価

図-12 および図-13 に D13 鉄筋および D22 鉄筋における最大断面減少率と降伏点率および引張強さ率の関係をそれぞれ示す。質量減少率と平均断面減少率の関係は等価であること、また、質量減少率は測定が簡便であることを考慮して、ここでは、図-8 に示した関係を用いて質量減少率から換算した最大断面減少率により考察を行う。

最大断面減少率に対する降伏点率および引張強さ率の低下の傾きは、図-9 および図-10 に示す質量減少率を

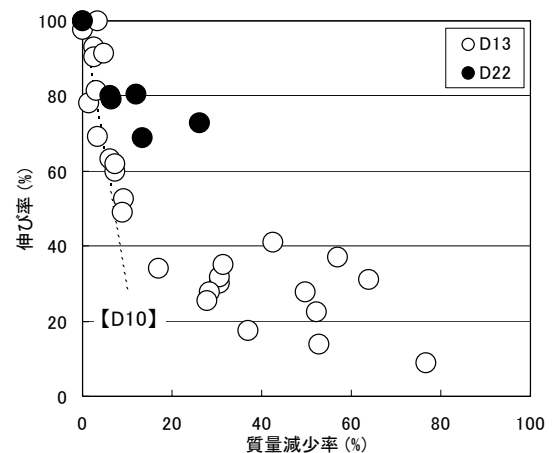


図-11 質量減少率と伸び率

用いた場合と比較して D13 鉄筋、D22 鉄筋共に傾きが-1.0 に近づく結果となった。これより、鉄筋の降伏点および引張強さは、質量減少率から換算した最大断面減少率を用いることにより精度良く評価できると考えられる。

図-14 に D13 鉄筋および D22 鉄筋の最大断面減少率と伸び率の関係を示す。伸び率は、目視で発錆が見られなかった鉄筋の伸びを基準値として、各鉄筋の伸びを基準値で除したものである。また、最大断面減少率は、前述のとおり質量減少率から換算した。これより、最大断面減少率を用いて鉄筋腐食の局所化を評価した場合においても、ばらつきは低減しなかった。したがって、4.1 で述べたように、D13 鉄筋と D22 鉄筋に生じた伸びのばらつきは、局所的腐食の影響よりも鉄筋径の影響のほうに卓越していたことが考えられる。

5. まとめ

本研究では、実構造物から採取した鉄筋を対象に、局所的に生じた腐食が鉄筋の力学的性質に及ぼす影響について考察した。本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) 鉄筋軸方向および軸直角方向において、レーザ変位セ

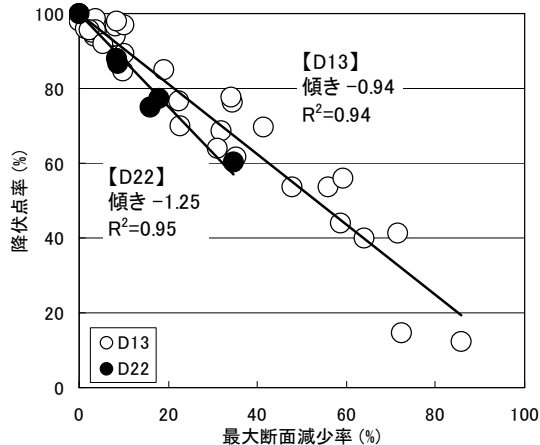


図-12 最大断面減少率と降伏点率

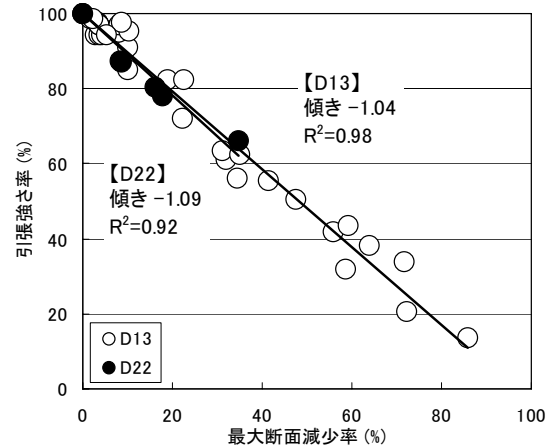


図-13 最大断面減少率と引張強さ率

ンサを用いて断面積および断面積分布を 500 μ m 以下の間隔で測定することにより、鉄筋の局所的腐食を精度良く捉えることができた。

- (2) D13 鉄筋, D22 鉄筋共に、腐食が進行するほど平均断面減少率に対する最大断面減少率が大きくなった。また、その増加の程度は D22 鉄筋のほうが大きかった。その要因として、鉄筋径、部材の形状および海水面からの距離等の違いが D22 鉄筋および D13 鉄筋の腐食進行機構に影響を及ぼしたことが考えられる。
- (3) 腐食による鉄筋の降伏点および引張強さの低下は、その鉄筋の最大断面減少率を考慮することで精度良く評価することができた。
- (4) 伸びは、最大断面減少率を用いて鉄筋腐食の局所化を評価した場合においても、ばらつきは低減しなかったことから、D13 鉄筋と D22 鉄筋に生じた伸びのばらつきは、局所的腐食の影響よりも鉄筋径の影響のほうが卓越していたことが考えられる。

謝辞

実構造物を対象とした本研究は、国土交通省九州地方整備局のご協力により実施が可能となったものである。ここに記し、関係者各位に深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 港湾空港技術研究所編著：港湾の施設の維持管理技術マニュアル，沿岸技術研究センター，2007
- 2) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ 71，2006
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書，1998
- 4) 大屋戸理明，金久保利之，山本泰彦，佐藤勉：鉄筋

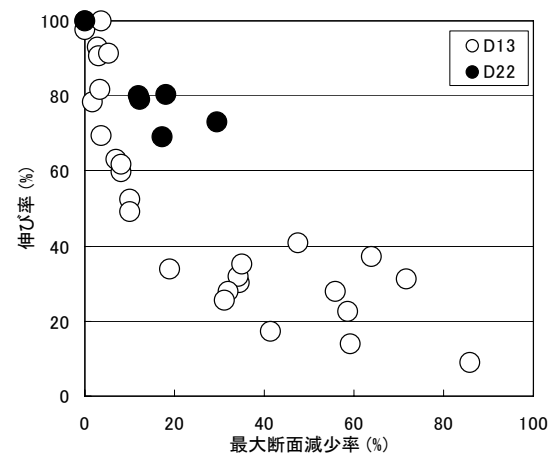


図-14 最大断面減少率と伸び率

の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響，土木学会論文集，Vol.62，No.3，2006

- 5) 加藤絵万，岩波光保，山路徹，横田弘：建設後 30 年以上経過した栈橋上部工から切り出した RC 部材の劣化性状と構造性能，港湾空港技術研究所資料，No.1140，2006
- 6) 網野貴彦，羽瀧貴士，守分敦郎：構造条件や波浪条件の違いが栈橋上部工内の空間的な腐食環境に及ぼす影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 7 巻，2007
- 7) 柏原茂，谷村幸裕，泉並良二，木村元哉：実構造物から採取した腐食鉄筋の引張降伏強度推定に関する一考察，土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集，V-358，pp.716-717，2000
- 8) 小林孝一：塩害により劣化した RC 部材の耐震性に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.16，No.2，pp.49-59，2005