

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.47 NO.1 March 2008

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第47巻 第1号 (Vol. 47, No.1), 2008年3月 (March 2008)

目 次 (CONTENTS)

Stability of Group Column Type DM Improved Ground under Embankment Loading Behavior of Sheet Pile Quay WallMasaki KITAZUME.....	3
(盛土荷重下の杭式深層混合処理地盤の安定性に関する研究)北詰 昌樹	
局所的に生じた鉄筋腐食がRCはりの構造性能に及ぼす影響加藤 絵万・濱田 洋志・岩波 光保・横田 弘.....	57
(Influence of Localized Corrosion of Steel Bars on Structural Performance of Reinforced Concrete BeamsEma KATO, Hiroshi HAMADA, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA)	

局所的に生じた鉄筋腐食が RC はりの構造性能に及ぼす影響

加藤 絵万*・濱田 洋志**・岩波 光保*・横田 弘***

要 旨

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可能性がある。特に、鉄筋の腐食は、構造物の耐荷性および変形性などの構造性能に及ぼす影響が大きいことが知られているが、鉄筋の腐食性状と構造物の構造性能の関係は未だ定量的に評価されておらず、その要因の一つとして、鉄筋腐食の局所化が挙げられる。

本研究では、より効果的な構造物の保有性能評価を目標として、局所的に生じた鉄筋腐食が鉄筋の力学的性質および RC はりの構造性能に及ぼす影響について、そのメカニズムの解明と評価手法の提案を目的とした実験的検討を行った。実構造物から採取した鉄筋の断面積測定と強度試験から、鉄筋の腐食による強度低下はその鉄筋の最大断面減少を考慮することで精度良く評価できることが分かった。また、局所的な鉄筋腐食が生じた RC はりの耐荷性として、降伏荷重は腐食発生位置、主鉄筋の径および本数に関わらず、鉄筋の最大断面減少率を指標として精度良く評価できるが、最大荷重はやはり軸方向の腐食発生箇所とその程度、鉄筋の径および本数に影響された。これは、腐食発生箇所や鉄筋の節の残存による断面力と応力伝達メカニズムの違いによるものであることが考えられる。さらに、RC はりの変形性は、その耐荷性よりも敏感に局所的に生じた鉄筋腐食の影響を受け、最大断面減少率を考慮することにより評価できる可能性があることが明らかとなった。

また、実験結果および既往の知見に基づいて、鉄筋の腐食程度やその発生箇所に着目した RC はりの構造性能評価手法を提案した。

キーワード：鉄筋の力学的性質，耐荷性，変形性，局所的腐食，構造性能評価

* LCM研究センター 主任研究官

** LCM研究センター 依頼研修員 (所属 東亜建設工業株式会社)

*** 研究主監, LCM研究センター長

Influence of Localized Corrosion of Steel Bars on Structural Performance of Reinforced Concrete Beams

Ema KATO*
Hiroshi HAMADA**
Mitsuyasu IWANAMI*
Hiroshi YOKOTA***

Synopsis

Port and harbor concrete structures are attacked by chloride ion in sea water, which may cause deterioration of materials. Therefore, it is essential to carry out rational and efficient maintenance to guarantee the required structural performance during the service period. Corrosion of steel bars embedded in concrete has a great influence on structural performance and durability of reinforced concrete (RC) structures. However, the relationship between the degree of steel bar corrosion and structural performance has not been made clear adequately. In particular, variation of corrosion including the localized corrosion has to be well understood for structural performance evaluation.

In this study, through measurement of the cross-sections of corroded steel bars taken from real structures, an influence of localized corrosion on mechanical properties of steel bar has been experimentally investigated. As a result, it was made clear that strengths of steel bars are estimated by using the maximum cross-sectional loss. Moreover, through flexural loading test, an influence of localized corrosion of steel bars on structural performance of RC beam has been experimentally investigated. The first yield load of RC beam was predicted by using the maximum cross-sectional loss of steel bars, even if steel bars showed localized corrosion. After the first yield, an influence of localized corrosion of steel bars on structural performance was varied depending on the diameter and number of steel bars and position of corrosion. Moreover, an influence of the localized corrosion on the deformability of corroded RC beams was much more sever than that on the load carrying capacities. To make clear the influence of the localized corrosion on deformability, it was necessary to take into consideration the mechanism of the bond deterioration between concrete and steel bar. Based on the experimental results and previous knowledge, finally, the concept of simplified assessment was proposed regarding the structural capacity of deteriorated RC members and structures.

Key Words: mechanical property of steel bar, load carrying capacity, deformability, localized corrosion, simplified assessment of structural capacity

* Senior Researcher of LCM Research Center for Coastal Infrastructures

** Trainee of LCM Research Center for Coastal Infrastructures (Toa Corporation)

*** Executive Researcher, Director General of LCM Research Center for Coastal Infrastructures

目 次

要 旨	57
1. まえがき	61
2. 局所的に生じた鉄筋腐食が鉄筋の力学的性質に及ぼす影響	61
2.1 実験概要	61
2.2 非破壊試験結果と鉄筋腐食の関係	62
2.3 鉄筋腐食の局所化の評価	63
2.4 局所的に生じた鉄筋腐食が鉄筋の力学的性質に及ぼす影響	65
3. 局所的に生じた鉄筋腐食がRCはりの構造性能に及ぼす影響	66
3.1 実験概要	66
3.2 RCはりの鉄筋腐食状況と破壊形態	68
3.3 局所的に生じた鉄筋腐食がRCはりの耐荷性に及ぼす影響	70
3.4 局所的に生じた鉄筋腐食がRCはりの変形性に及ぼす影響	73
4. RCはりの構造性能評価方法の提案	75
5. 結論	77
6. あとがき	77
謝辞	77
参考文献	77
記号	78
付録	79

1. まえがき

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。そのため、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。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、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構造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。現在、材料劣化を維持管理の限界状態とした構造物の性能評価方法が安全側の評価として取り入れられている¹⁾。しかし、構造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性能低下に関する評価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、構造性能の低下に及ぼす影響も大きい。最近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。その要因の一つとして、局所的に生じる鉄筋腐食が挙げられる。

本研究では、局所的に腐食した鉄筋の力学的性質および鉄筋腐食の局所化がRCはりの構造性能に及ぼす影響について検討した。実構造物から採取した2種類の異形鉄筋の腐食による断面減少の局所化をより正確に把握し、局所的腐食が鉄筋の力学的性質に及ぼす影響について考察した。また、電食により主鉄筋が局所的に腐食したRCはりの曲げ載荷試験を行い、はり軸方向およびはり軸直角方向における鉄筋腐食の発生位置がRCはりの構造性能(耐荷性および変形性)に及ぼす影響について考察した。あわせて、主鉄筋の径や本数が異なる場合の鉄筋腐食の発生位置がRCはりの構造性能に及ぼす影響についても検討した。

図-1に著者らが開発を進めている港湾構造物のLCMシステムの流れ²⁾を示す。本研究は、実構造物の総合評価のうち、保有(構造)性能評価技術の高度化に貢献するとともに、関連するデータベースの構築に活用される。

また、構造物の構造性能評価を行うためのフローを図-2に示す。まず鉄筋の腐食性状を把握するために、一般定期点検診断を行い、目視による劣化度判定から鉄筋の腐食状況を推定するとともに発生箇所および範囲を把握

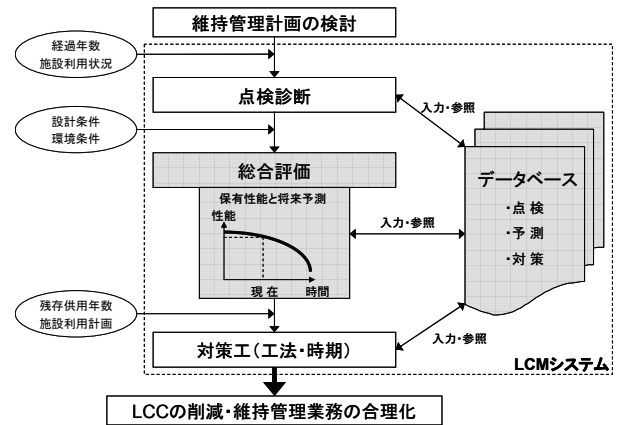


図-1 LCMシステムにおける本研究の位置付け

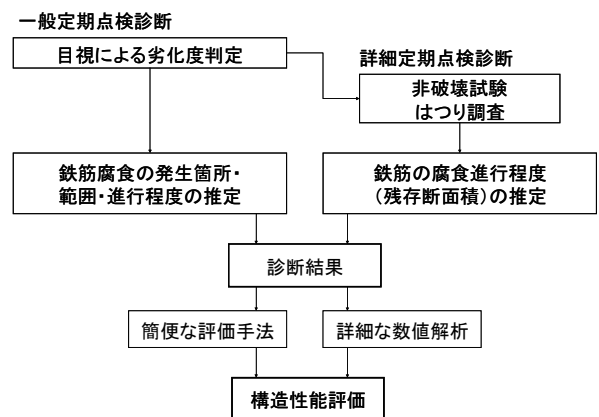


図-2 構造性能評価フロー

する。また、必要に応じて詳細定期点検診断を行い、鉄筋の腐食進行程度(残存断面積など)を非破壊試験などにより測定する。次に、これらの情報をもとに構造性能の評価を行うが、詳細な数値解析を行う場合と簡便な判定方法による場合が考えられる。前者の方法は、鉄筋の腐食状況を正確にモデル化して数値解析などを行う必要がある。このためには精緻な点検診断と鉄筋およびコンクリートに関する構成則の確定が不可欠である。一方、後者については確立された方法は存在しないが、何らかの評価手法が提示できれば実務上有用である。そこで本研究では、簡便な方法を提案することを目的として、前述の試験および考察を行っている。

2. 局所的に生じた腐食が鉄筋の力学的性質に及ぼす影響

2.1 実験概要

(1) 部材概要

検討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

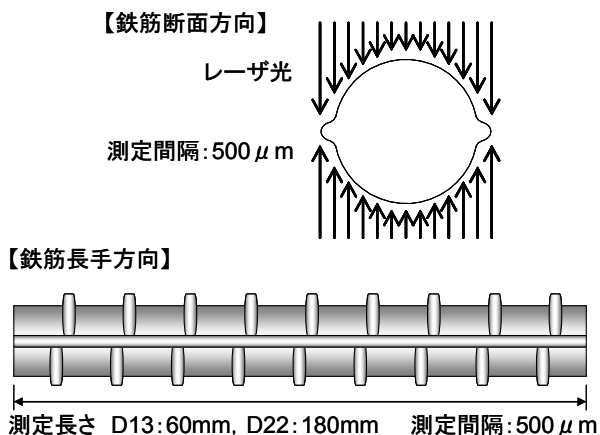


図-3 レーザ変位センサを用いた形状測定の概要

表-1 自然電位による鉄筋腐食の判定基準 (ASTM)

自然電位 E (mV vs CSE)	鉄筋腐食の可能性
$-200 < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-350 < E \leq -200$	不確定
$E \leq -350$	90%以上の確率で腐食あり

表-2 分極抵抗による鉄筋速度の判定 (CEB)

腐食電流 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	腐食速度	分極抵抗 ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$)
$< 0.1 \sim 0.2$	不活性	$130 \sim 260 <$
$0.2 \sim 0.5$	低～中速	$52 \sim 130$
$0.5 \sim 1.0$	中～高速	$26 \sim 52$
$1.0 <$	高速	< 26

形鉄筋 (D22およびD13) 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床板である。D13鉄筋は3体のRC床版から36本、D22鉄筋はRCはりの軸方向鉄筋から8本採取した。鉄筋の採取位置を一部付録Aに示しているが、比較的腐食が進行していると考えられる箇所を選定した。

(2) 自然電位および分極抵抗の測定

鉄筋を採取する前に、非破壊試験によりRCはりおよびRC床版の自然電位および分極抵抗の測定を行った。自然電位は、測定時における鉄筋腐食の可能性を推定する指標になるとされている。本研究では、電極に銀塩化銀電極を使用した。また、分極抵抗は、腐食速度と反比例の関係にあるとされている。本研究では、交流インピーダンス法に基づいて、高低2周波数による測定を行った。自然電位および分極抵抗を測定する前に、コンクリート表面の湿潤が確認できる程度まで散水し、24時間養生を行った。

(3) 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、鉄筋断面方向の照射距離を積分することにより断面積を求めて、鉄筋断面積の軸方向分布を算出した。図-3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。あらかじめ、最も正確かつ効率的な鉄筋断面方向および鉄筋軸方向の測定間隔を選定するため、丸鋼φ22と異形鉄筋D13を用いた予備測定を行った。

(4) 引張試験

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

(5) 鉄筋の質量減少率の算定

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。鉄筋の質量減少率は、鉄筋の平均的な断面減少率とほぼ等価であり、腐食による鉄筋の断面減少率を求めるための最も容易な方法の一つである。

2.2 非破壊試験結果と鉄筋腐食の関係

表-1に自然電位測定に基づく鉄筋腐食の判定基準例として、ASTMの判定基準³⁾を示す。また、表-2に分極抵抗測定に基づく鉄筋の腐食速度の判定として、CEBの判定例⁴⁾を示す。自然電位測定に基づく鉄筋腐食の判定方法は、測定時点における腐食の有無や腐食の可能性については評価できるが、腐食程度や腐食速度などの定量的な情報を得ることはできないとされている。付録Aに、鉄筋の非破壊試験結果および対応する鉄筋の質量減少率の一覧を示す。

図-4に鉄筋の質量減少率と鉄筋採取箇所における自然電位の測定値の関係を示す。ほぼ全ての鉄筋の自然電位が-350mVを下回り、90%以上の確率で腐食していることが推測され、実際の現象と一致していた。しかし、D13鉄筋では腐食の程度が大きくなるほど自然電位が小さくなるのに対し、D22鉄筋では自然電位が大きくなる傾向を示しており、最も質量減少率が大きい鉄筋では-350mVを上回る結果となった。したがって、自然電位法は、鉄筋

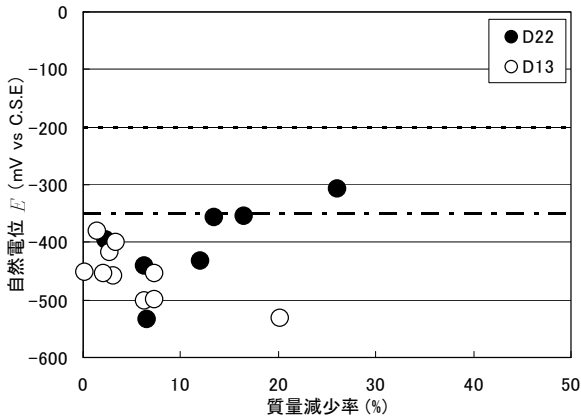


図-4 質量減少率と自然電位の測定値

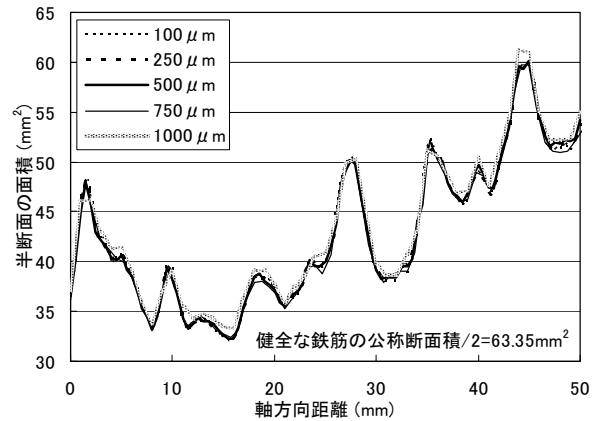


図-6 鉄筋軸方向の断面積分布 (D13 鉄筋)

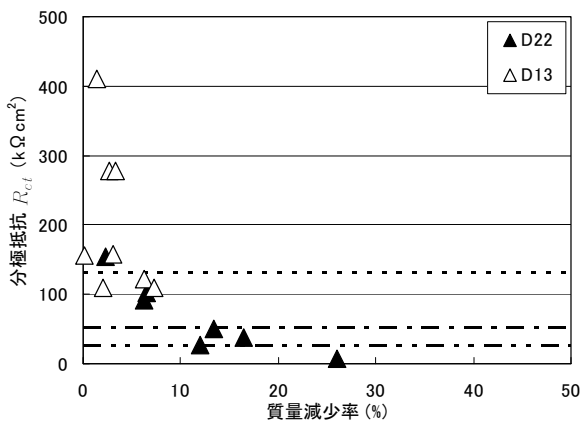


図-5 質量減少率と分極抵抗の測定値

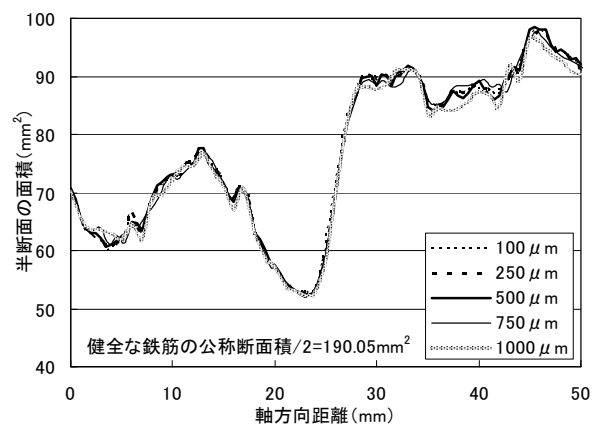


図-7 鉄筋軸方向の断面積分布 (φ22 鉄筋)

腐食の有無を確認する手段としては適用可能な測定方法であるが、前述のとおり、腐食進行の程度を推測する手段としては適用し難いことが再確認された。

図-5に鉄筋の質量減少率と鉄筋採取箇所における分極抵抗の測定値の関係を示す。ここで、本研究では、供用期間や構成材料など全て等しい構造物から鉄筋を採取している。前述のとおり、分極抵抗は測定時の鉄筋の腐食速度を推定するためのものであるが、ここでは時間的要素を取り除いて、分極抵抗と鉄筋の質量減少率との関係について考察する。これより、質量減少率が5%以下では分極抵抗が大きいものの、それ以上の質量減少率では分極抵抗が小さくなる結果となった。これより、分極抵抗は測定時の鉄筋腐食の程度を精度良く推定できるため、鉄筋腐食の定量的な評価に適用できる可能性が高いと考えられる。

2.3 鉄筋腐食の局所化の評価

(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、鉄筋軸方向にでき

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が表現できるのかを検討した。

図-6および図-7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-3に各鉄筋の半断面における最小断面積と平均断面積を示す。これより、D13鉄筋では、測定間隔が750μmより密であれば最小断面積および平均断面積に変化は見られなかったが、1000μmでは最小断面積、平均断面積共に若干大きくなる結果となった。また、断面積分布は、500μmより密であればほぼ同じ測定結果となったが、750μm、1000μmではこれらと異なる傾向を示す箇所が見られた。図-8に示すように、異なる傾向を示した箇所(図-6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500μmより粗い場合

表-3 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 (mm ²)	平均断面積 (mm ²)
D13	100	32.36	42.99
	250	32.22	42.82
	500	32.25	42.84
	750	32.35	42.72
	1000	33.23	43.47
φ22	100	52.16	76.81
	250	52.36	76.81
	500	52.09	76.82
	750	53.35	76.77
	1000	52.20	76.08

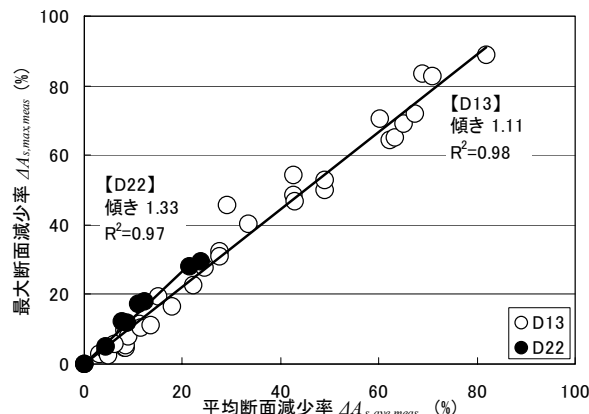


図-10 平均断面減少率 $\Delta A_{s,ave,meas}$ と最大断面減少率 $\Delta A_{s,max,meas}$

は、孔食による表面の凹凸を捉えておらず、断面積を精度良く評価できないことが考えられる。

φ22鉄筋では、すべての測定間隔において、最小断面積、平均断面積はほぼ同じ結果となった。しかし、測定間隔750μmおよび1000μmの断面積分布は、測定間隔500μm以下と異なる傾向を示す箇所が見られた。図-9に異なる傾向を示した箇所(図-7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、D13鉄筋と同様に、測定間隔が500μmより粗い場合は断面積を精度良く評価できないことが考えられる。

以上の結果より、鉄筋の軸方向および断面方向の測定間隔を500μmと設定することとした。

(2) 鉄筋腐食の局所化の程度

図-10にD13鉄筋およびD22鉄筋における平均断面減少率 $\Delta A_{s,ave,meas}$ と最大断面減少率 $\Delta A_{s,max,meas}$ の関係を示す。平均断面減少率 $\Delta A_{s,ave,meas}$ 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、基準値から各鉄筋の平均断面積を差し引き、基準値で除したものである。また、最大断面減少率 $\Delta A_{s,max,meas}$ は、健全な鉄筋の最小断面積から各鉄筋の最小断面積を差し引き、健全な鉄筋の最小断面積で除したものである。

これより、平均断面減少率 $\Delta A_{s,ave,meas}$ に対する最大断面減少率 $\Delta A_{s,max,meas}$ の増加の程度は、D13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、鉄筋径の大きい方がより局所的に腐食が生じたことを示している。これは、本研究に用いた鉄筋は、D22鉄筋はRCはり、D13鉄筋はRC床版から採取しており、鉄筋径の違いに加えて、部材の形状および海水面からの距離やかぶりなどの違いにより腐食進行機構が両者で異なっていたことによる影響と考えられる。

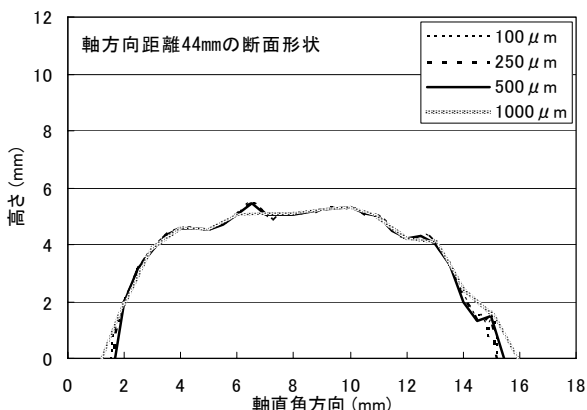


図-8 鉄筋断面方向の測定高さ分布 (D13 鉄筋)

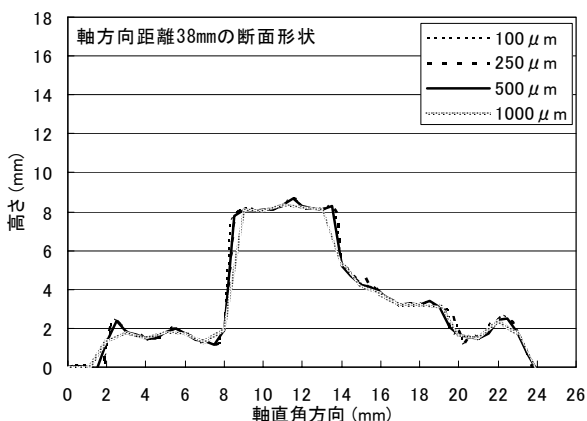


図-9 鉄筋断面方向の測定高さ分布 (φ22 鉄筋)

2.4 局所的に生じた鉄筋腐食が鉄筋の力学的性質に及ぼす影響

(1) 質量減少率を用いた鉄筋の力学的性質の評価

図-11および図-12にD13鉄筋およびD22鉄筋の質量減少率と降伏点比および引張強さ比の関係を示す。降伏点比および引張強さ比は、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て求めたが、腐食の有無にかかわらずすべ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⁵⁾における異形鉄筋D16の質量減少率と降伏点比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および引張強さ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、D22鉄筋のそれぞれの傾きは-1.66および-1.45となり、D13鉄筋よりも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するが、その傾きは、理論上は鉄筋径によらず一定となる。したがって、D13鉄筋、D22鉄筋共に質量減少率では、腐食した鉄筋の力学的性質を精度良く評価することは困難であると考えられる。また、これらのことから、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-13にD13鉄筋およびD22鉄筋における質量減少率と破断伸び比の関係を示す。破断伸び比は、目視で発錆が見られなかった鉄筋の破断伸びを基準値とし、各鉄筋の破断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⁶⁾により得られた異形鉄筋D10の質量減少率と破断伸び比の関係を示す。これより、質量減少率が0.1以下では破断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と考えられる。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。これが鉄筋の破断伸びに影響し、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ことが推測される。

(2) 最大断面減少率 $\Delta A_{s,max,cal}$ を用いた鉄筋の力学的性質の評価

図-14および図-15にD13鉄筋およびD22鉄筋における最大断面減少率 $\Delta A_{s,max,cal}$ と降伏点比および引張強さ比の

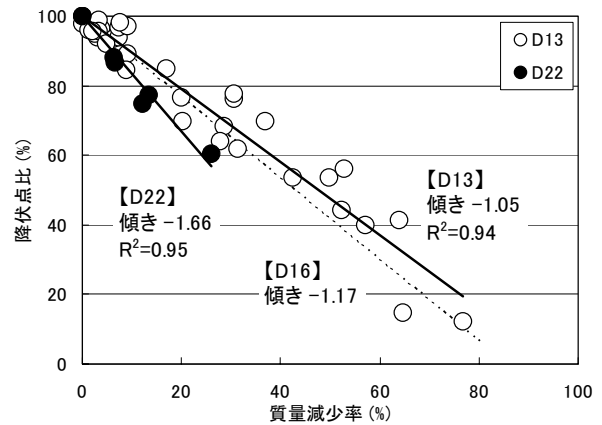


図-11 質量減少率と降伏点比

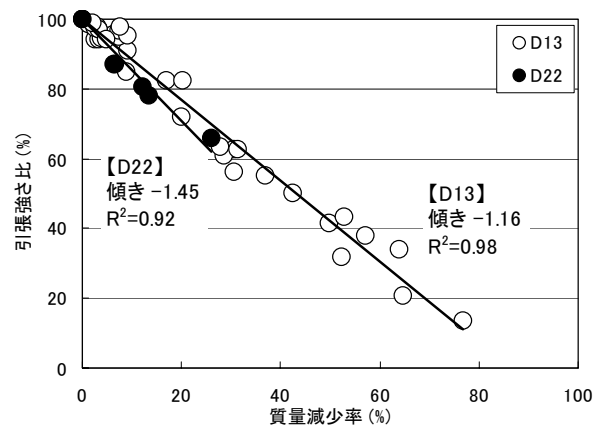


図-12 質量減少率と引張強さ比

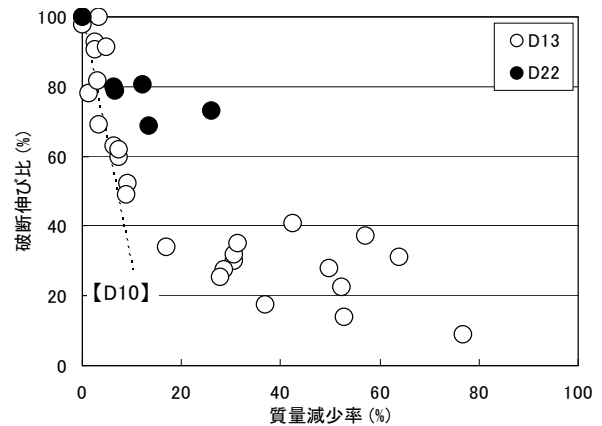


図-13 質量減少率と破断伸び比

関係をそれぞれ示す。ここで、図-10に示した平均断面減少率 $\Delta A_{s,ave,meas}$ と最大断面減少率 $\Delta A_{s,max,meas}$ の関係、および平均断面減少率 $\Delta A_{s,ave,meas}$ と質量減少率が等価であることから、最大断面減少率 $\Delta A_{s,max,cal}$ は、D13鉄筋で質量減少率の1.11倍、D22鉄筋で質量減少率の1.33倍と設定した。降伏点比および引張強さ比は、目視で発錆が見られなかつ

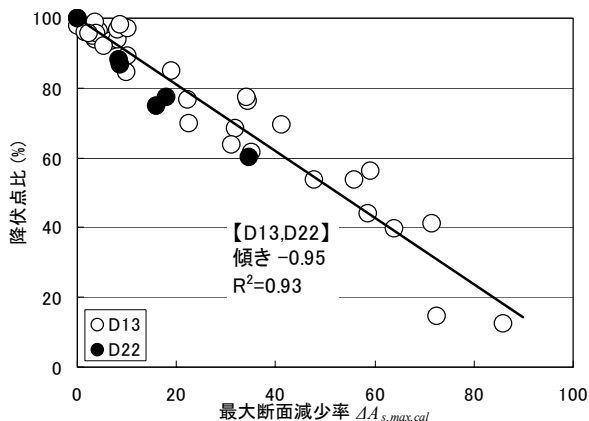


図-14 最大断面減少率 $\Delta A_{s,max,cal}$ と降伏点比

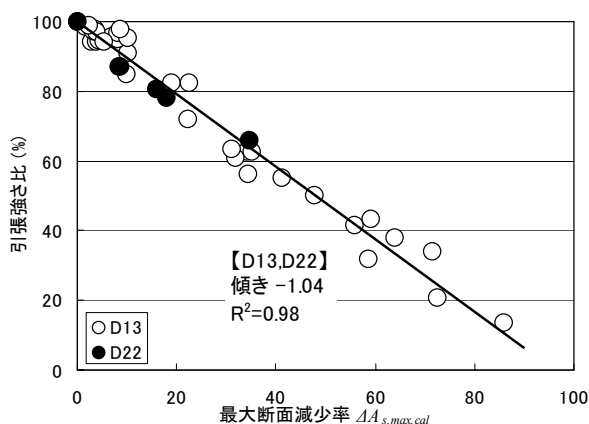


図-15 最大断面減少率 $\Delta A_{s,max,cal}$ と引張強さ比

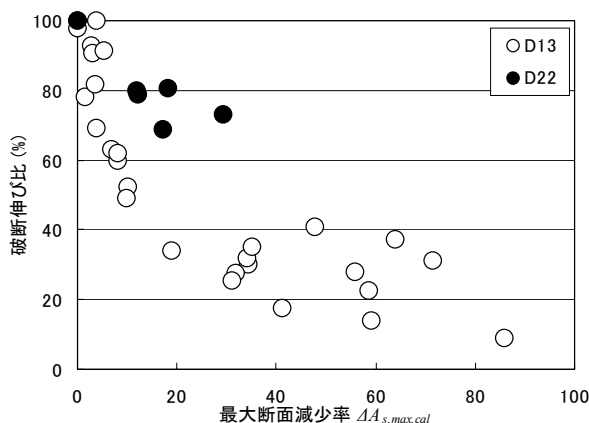


図-16 最大断面減少率 $\Delta A_{s,max,cal}$ と破断伸び比

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、各鉄筋の降伏点および引張強さは、引張試験で得られた降伏荷重および引張荷重を公称断面積で除したものである。これより、最大断面減少率 $\Delta A_{s,max,cal}$ に対する降伏点および引張強さの低下の傾きは、D13鉄筋と

D22鉄筋ともほぼ同じ値を示した。また、一様に断面が減少した鉄筋の場合、その傾きは-1.0になると考えられるが、本研究で用いた鉄筋の降伏点および引張強さの低下の傾きは、それぞれ-0.95および-1.04となった。これは、腐食に伴ういびつな断面形状により、鉄筋の最小断面において引張力が均等に作用しなかったために生じたばらつきによることが考えられる⁷⁾。以上の結果より、鉄筋の降伏点および引張強さは、腐食に伴う断面形状の変化によりばらつきが生じるものの、その程度は非常に軽微であることから、最大断面減少率 $\Delta A_{s,max,cal}$ 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-16にD13鉄筋およびD22鉄筋の最大断面減少率 $\Delta A_{s,max,cal}$ と破断伸び比の関係を示す。破断伸び比は、目視で発錆が見られなかった鉄筋の破断伸びを基準値として、各鉄筋の破断伸びを基準値で除したものである。また、最大断面減少率 $\Delta A_{s,max,cal}$ は、前述のとおり、D13鉄筋およびD22鉄筋のそれぞれ質量減少率の1.11倍、1.33倍とした。これより、破断伸び比については、最大断面減少率 $\Delta A_{s,max,cal}$ を用いてもばらつきを低減することができなかった。引張試験時に鉄筋ひずみを細かく測定し、ひずみ分布を求めることにより鉄筋の腐食と破断伸びの関係について何らかの傾向がつかめると考えられる。しかし、健全な鉄筋においても伸びのばらつきは大きいことから、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⁸⁾。

3. 局所的に生じた鉄筋腐食がRCはりの構造性能に及ぼす影響

3.1 実験概要

(1) RCはりの概要

図-17にRCはりの形状や寸法、配筋を示す。RCはりは、曲げ破壊が先行するように設計し、200mm×300mmの矩形断面に主鉄筋（異形鉄筋，SD295A）としてD16を3本配置したもの（B16シリーズ）と400mm×300mmの矩形断面に主鉄筋（異形鉄筋，SD295A）としてD16を6本配置したものの（B16-6シリーズ）、200mm×210mmの矩形断面に主鉄筋（異形鉄筋，SD295A）としてD13を3本配置したものの（B13シリーズ）、390mm×300mmの矩形断面に主鉄筋（異形鉄筋，SD295A）としてD22を3本配置したものの（B22シリーズ）を製作した。これらはほぼ同じ鉄筋比となるようにしている。また、主鉄筋のかぶりは50mmとした。せん断補強鉄筋（異形鉄筋，SD295A）は、D6およびD10を用いて図-17に示すように配置した。RCはりは、B16シリーズ

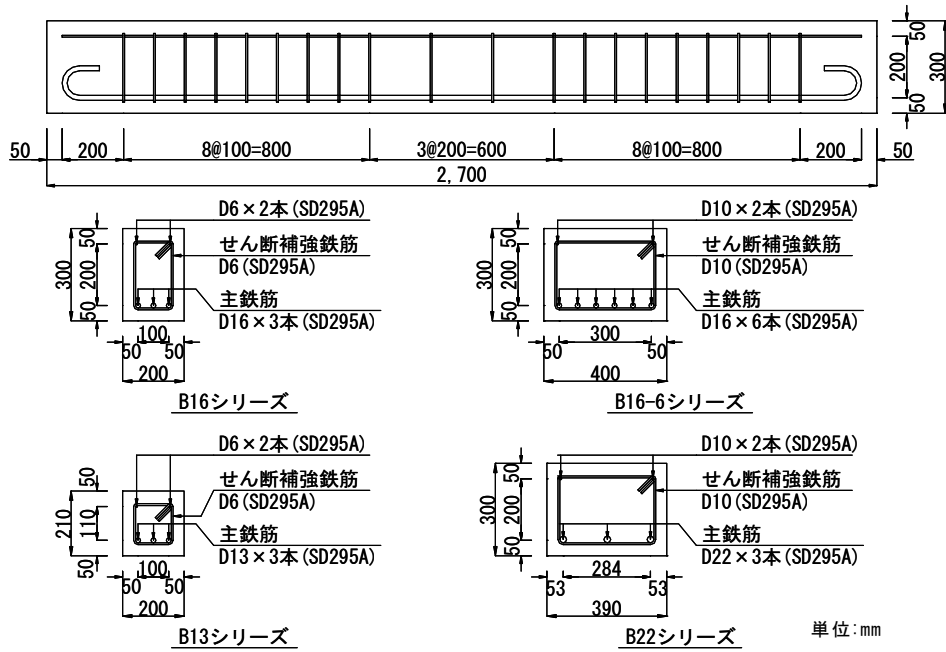


図-17 RCはりの概要

表-4 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	スランプ (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)
20	18	4.5	57.2	47.3
単位量 (kg/m ³)				
水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
179	313	839	964	3.3

表-5 コンクリートおよび鉄筋の物性値

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (N/mm ²)		
		43.0		3.0×10 ⁴	
鉄筋	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)		
	D22	413	560	1.8×10 ⁵	
	D16	366	528	1.8×10 ⁵	
	D13	364	508	2.0×10 ⁵	
	D10	377	498	1.7×10 ⁵	
	D 6	361	524	1.9×10 ⁵	

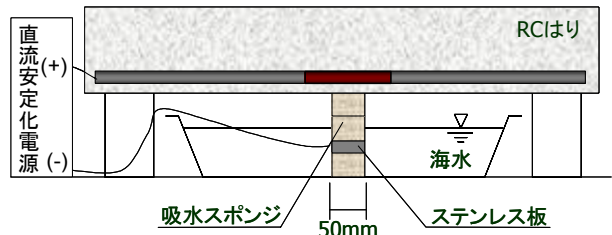


図-18 電食試験概要

表-6 鉄筋の腐食パターン

試験体 No.	腐食発生箇所	
B16	-0	腐食なし
	-1	スパン中央部腐食
	-2	スパン中央部腐食
	-3	荷点直下部腐食
	-4	せん断スパン部腐食
B22	-0	腐食なし
	-1	スパン中央部腐食
	-2	荷点直下部腐食
B13	-0	腐食なし
	-1	スパン中央部腐食
	-2	荷点直下部腐食
B16-6	-0	腐食なし
	-1	スパン中央部腐食
	-2	スパン中央部腐食
	-3	スパン中央部半断面腐食
	-4	荷点直下部半断面腐食
-5	せん断スパン部半断面腐食	

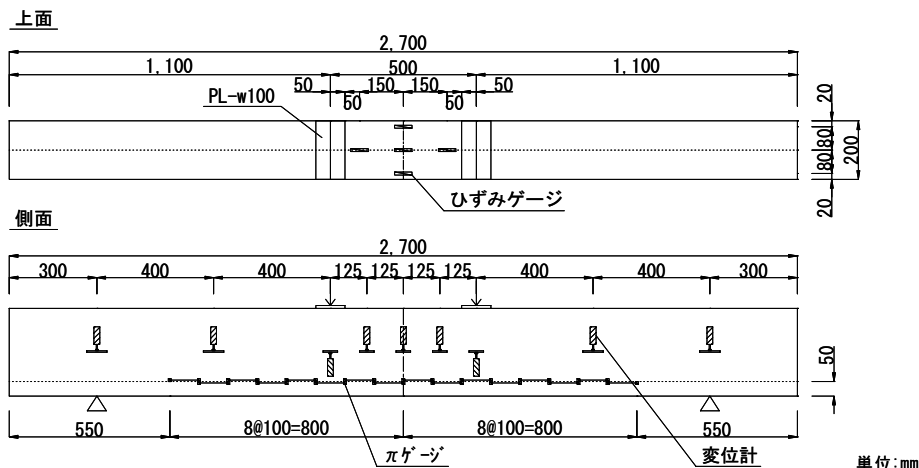


図-19 計測位置の例 (B16 シリーズ)

を5体, B16-6シリーズを6体, B13シリーズを3体, B22シリーズを3体の合計17体製作した. 表-4にコンクリートの配合, また表-5にコンクリートおよび鉄筋の物性値を示す.

(2) 電食試験

RCはりの鉄筋を腐食させるために行った電食試験の概要を図-18に示す. 電食は, 直流安定化電源を用いて, RCはりの鉄筋に直流電流を印加することにより行った. また, 陰極として使用したステンレス板の上に幅50mmの吸水スポンジを積み上げ, これをRCはり下面に密着させることにより, 所定の範囲に電流が流れるように制御した.

局所的な鉄筋腐食を生じさせるため, 表-6に示すようにはり軸方向およびはり軸直角方向に吸水スポンジの密着位置を変化させた. スパン中央部腐食は, 吸水スポンジをRCはりのスパン中央に設置し, はり軸直角方向全面に当てたものである. また, 載荷点直下部, せん断スパン部では, 吸水スポンジをそれぞれRCはりのスパン片側の載荷点直下, スパン中央から500mm離れた位置に設置した. 半断面腐食では, はり軸直角方向の半断面のみに吸水スポンジを設置した. 印加する電流量は, 鉄筋の初期表面積に対して500A・日/m²となるように印加電流とその期間を調整した.

(3) 曲げ載荷試験

RCはりの曲げ載荷試験は, 支点間隔を2100mm, 等曲げモーメント区間を500mm, せん断スパンを800mmとした対称2点載荷とした. 載荷点および支持点には幅100mm, 長さ400mm, 厚さ9mmの鋼板を設置した. 測定項目は, 荷重, 変位, コンクリート圧縮縁におけるひずみ, 曲げひび割れ幅およびひび割れ進展状況である. 図-19に測定位置の例を示す. 変位の測定位置は, スパン中央, 載荷

点, せん断スパン中央, 支点およびスパン中央と載荷点の中間点の計9箇所である. コンクリート圧縮縁のひずみは, RCはりの上面中央部の3箇所, 上面載荷点付近の2箇所にひずみゲージを貼り付けて測定した. 曲げひび割れ幅は, RCはり側面の主鉄筋の高さの位置にパイ形ゲージを設置し, スパン中央から両側に800mmの範囲で測定した. また, 載荷試験は荷重制御で行い, RCはりの降伏荷重は, 測定した荷重変位関係から推定した. また, コンクリート圧縮縁に目視で圧壊が確認された時点で載荷を終了した.

(4) 鉄筋の質量減少率の測定

載荷試験終了後, RCはりを解体し, 取り出した鉄筋に対して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℃) への浸せきを行い, 腐食生成物を除去した. この鉄筋を50mm毎に切断して, 単位長さ当たりの質量を測定し, 同等の処理を施した健全な鉄筋と比較することで質量減少率を算出した. なお, 目視で発錆が見られなかったものは質量減少率を0%として取り扱った.

3.2 RCはりの鉄筋腐食状況と破壊形態

(1) 鉄筋の質量減少率分布

表-7に吸水スポンジを設置した位置における各主鉄筋の質量減少率を示す. ここで, 鉄筋No.とは, はり軸直角方向における鉄筋の位置を示している. 図-20にシリーズ毎のはり軸方向における鉄筋の質量減少率の分布を示す. なお, 質量減少率は, 測定断面における各主鉄筋の質量減少率の平均値を示すものである. また, 付録Bに鉄筋の質量減少率の測定結果を示す. 吸水スポンジを密着させた位置を中心に腐食が確認された範囲は200~400mm

表-7 吸水スポンジ設置位置における主鉄筋の質量減少率（単位：％）

試験体 No.	鉄筋 No.			平均*	試験体 No.	鉄筋 No.			平均*	側面 A 鉄筋No. 1 2 3 側面 B
	1	2	3			1	2	3		
B16-1	65.8	57.7	49.7	57.7	B22-1	26.3	35.5	26.4	29.4	
B16-2	82.6	40.1	53.6	58.8	B22-2	52.0	20.5	29.8	34.1	
B16-3	45.4	46.3	37.7	43.1	B13-1	74.4	55.6	46.7	58.9	
B16-4	17.8	13.4	18.8	16.7	B13-2	49.9	69.8	69.0	62.9	

*：はり軸方向の最大質量減少率を示す。

試験体 No.	鉄筋 No.						平均*	側面 A 鉄筋No. 1 2 3 4 5 6 側面 B
	1	2	3	4	5	6		
B16-6-1	37.6	46.6	44.9	39.0	67.0	93.0	54.5	
B16-6-2	12.2	32.3	38.0	24.8	19.2	6.2	22.2	
B16-6-3	49.1	63.9	29.7	9.0	0.0	0.0	25.3	
B16-6-4	77.3	38.0	21.6	0.0	0.0	0.0	22.8	
B16-6-5	8.4	8.0	6.9	3.5	0.0	0.0	4.5	

*：はり軸方向の最大質量減少率を示す。

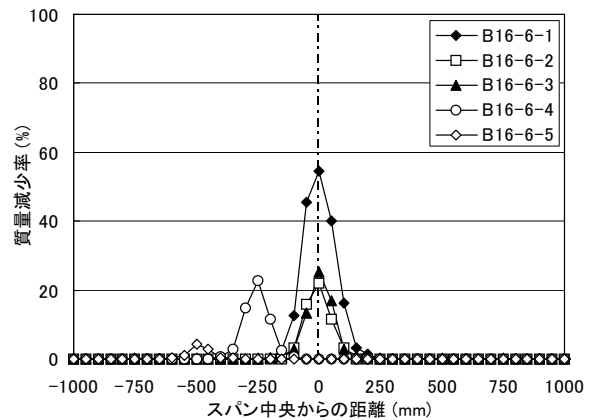
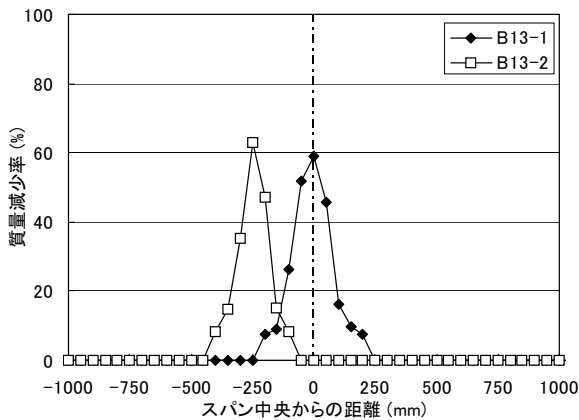
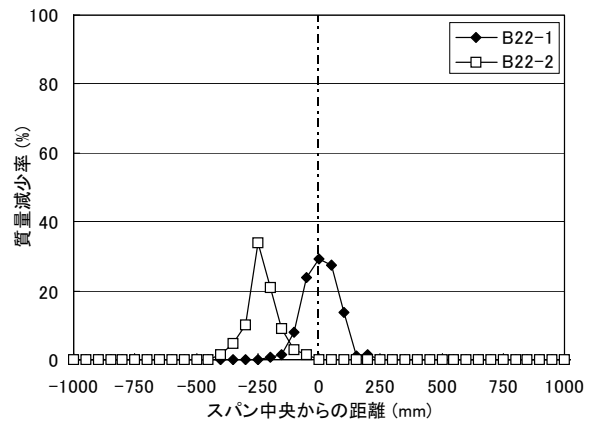
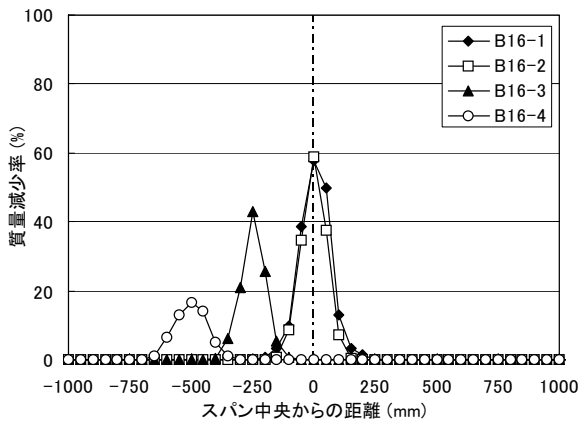


図-20 はり軸方向における鉄筋の質量減少率分布

程度であり、その内中心150mmの範囲の質量減少が大きく、それ以外の質量減少率は10%程度以下であった。また、B16-6シリーズのうち、吸水スポンジの設置範囲を半断面としたB16-6-3, 4, 5のRCはりでは、当初想定したとおり主鉄筋6本のうち片側3本はほとんど腐食していなかった。

(2) 荷重変位曲線および破壊形態

図-21に曲げ荷重試験により得られた各シリーズの荷

重変位曲線を示す。これより、腐食した全てのRCはりの降伏までの剛性は、健全なRCはりとはほぼ同等の結果となった。既往の研究⁹⁾において、はり軸方向の鉄筋がほぼ均一に腐食したRCはりでは、健全なRCはりと比較して降伏までの剛性が小さくなる傾向が見られた。しかし、本研究で用いたRCはりでは、局部的な鉄筋腐食が生じていたため、はり軸方向全般にわたってコンクリートと鉄筋の

付着がおおむね確保された状態とみなすことができ、結果として、鉄筋の腐食が部材降伏までのRCはりの剛性に及ぼす影響は小さくなったものと考えられる。

部材降伏以降、荷重点直下部を腐食させたRCはりでは、健全なRCはりと比較して荷重が上昇する傾向が見られた。また、B22, B16-6シリーズでは、スパン中央部を腐食させたRCはりにおいても同様の傾向が見られた。腐食程度の大きいRCはりにおいては鉄筋破断が生じたが、最終的に全てのRCはりにおいて、上部コンクリートの圧壊により終局に至った。

3.3 局所的に生じた鉄筋腐食がRCはりの耐荷性に及ぼす影響

(1) 平均断面減少率 $\Delta A_{w,ave}$ を用いたRCはりの耐荷性の評価

スパン中央部を腐食させたRCはりの鉄筋の等曲げモーメント区間における平均断面減少率 $\Delta A_{w,ave}$ と降伏荷重比および最大荷重比の関係を、それぞれ図-22および図-23に示す。ここで、本研究では電食により鉄筋を腐食させていることから、長さ50mmの範囲の鉄筋の腐食性状はほぼ一様であると判断し、質量減少率を断面減少率と等価とみなして以降の議論を進める。したがって、平均断面減少率 $\Delta A_{w,ave}$ は、図-20に示す各主鉄筋の質量減少率を平均した各測定位置での質量減少率の、等曲げモーメント区間500mmでの平均値を示す。

降伏荷重比および最大荷重比は、健全なRCはりの降伏荷重および最大荷重の実験値に対する各RCはりの降伏荷重および最大荷重の比を示している。また、実線は、はりの曲げ理論に基づいて算出した、等曲げモーメント区間の鉄筋断面積と降伏荷重比および最大荷重比の関係を示している。

既往の研究では、はり軸方向にほぼ均一に鉄筋が腐食したRCはりの耐荷性の検討が一般的であり、等曲げモーメント区間の主鉄筋の平均断面減少率を用いることでRCはりの耐荷性を概ね評価できるとされている⁹⁾。しかし、一様に腐食させたRCはり¹⁰⁾と比較すると、本研究で用いたRCはりでは降伏荷重の低下の程度が顕著であった。これより、局所的な鉄筋腐食が生じたRCはりについては、等曲げモーメント区間の平均断面減少率 $\Delta A_{w,ave}$ を用いて耐荷性を評価することは困難であると考えられる。

(2) 最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ を用いたRCはりの耐荷性の評価

前述のとおり、等曲げモーメント区間の平均断面減少率 $\Delta A_{w,ave}$ を用いて、局所的な鉄筋腐食が生じたRCはりの耐荷性を評価することは困難である。そこで、最大断面減少率

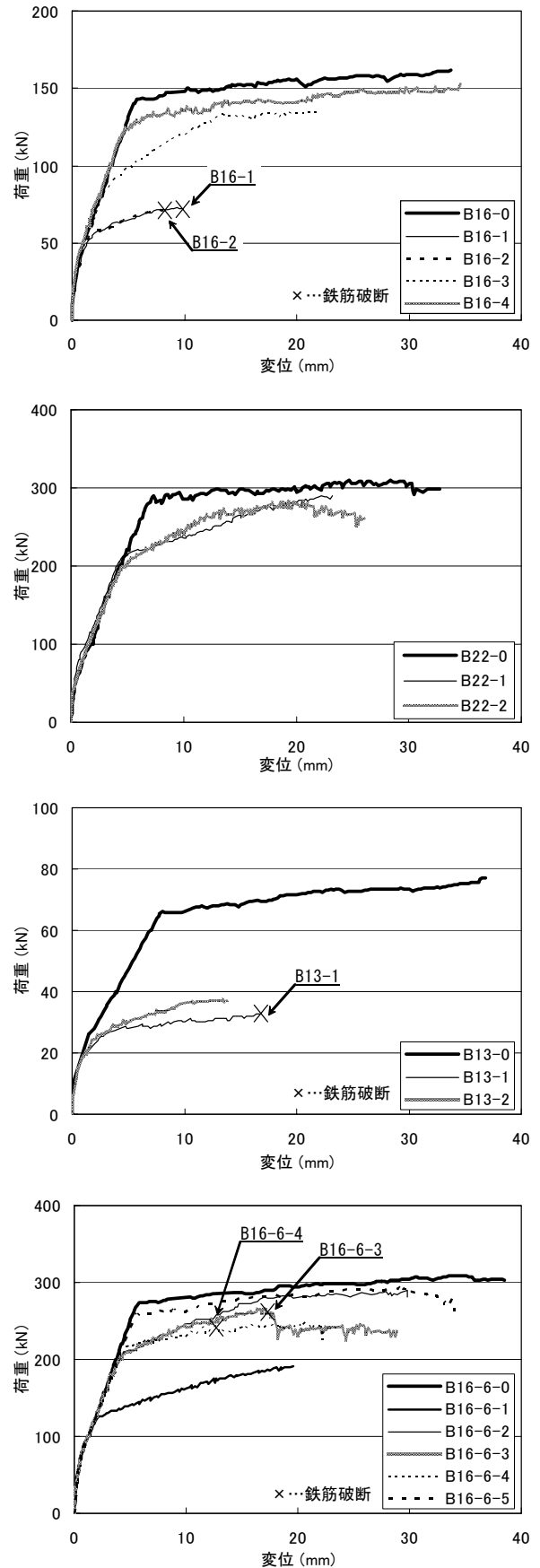


図-21 荷重変位曲線

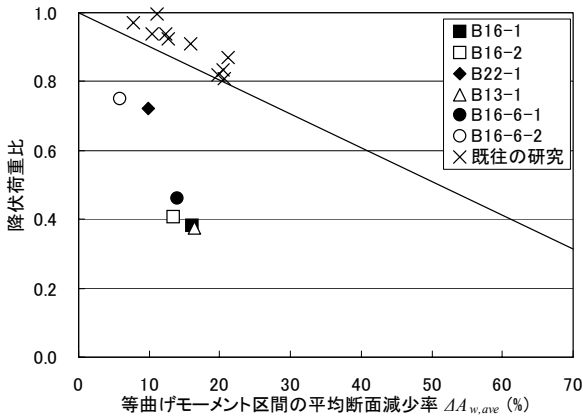


図-22 平均断面減少率 $\Delta A_{w,ave}$ と降伏荷重比

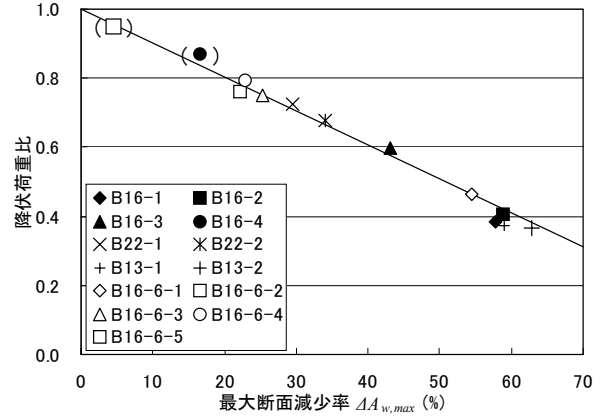


図-24 最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ と降伏荷重比

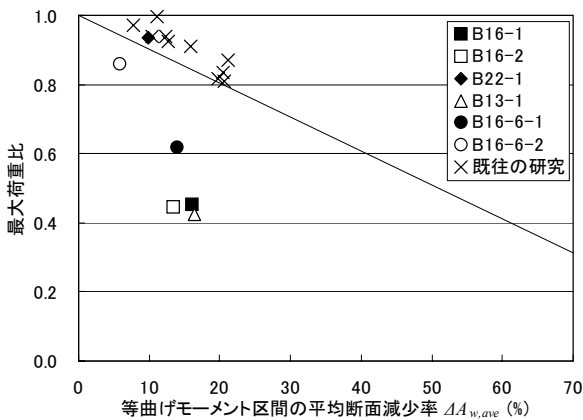


図-23 平均断面減少率 $\Delta A_{w,ave}$ と最大荷重比

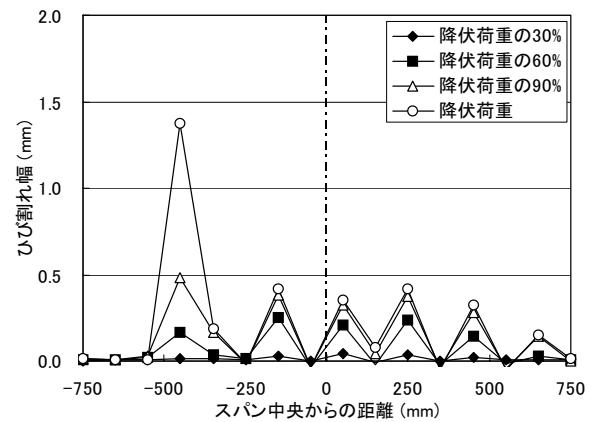


図-25 ひび割れ幅の推移 (B16-4)

少率 $\Delta A_{w,max}$ を用いた耐荷性評価について検討した。なお、ここでいう最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ は、表-7に示すように、吸水スポンジを設置した位置における平均質量減少率である。

a) 降伏荷重

図-24にRCはりの最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ と降伏荷重比の関係を示す。同図には、等曲げモーメント区間だけでなく、せん断スパンおよび載荷点直下の鉄筋を腐食させたRCはりの降伏荷重比も示している。また、実線は、はりの曲げ理論に基づき算出した等曲げモーメント区間の鉄筋断面積と降伏荷重比の関係を示す。これより、スパン中央部および載荷点直下部が腐食したRCはりでは、鉄筋の最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ を用いることにより、降伏荷重を評価することができた。また、各シリーズにおける降伏荷重の低下の程度がほぼ同じ傾向を示したことから、主鉄筋の径や本数が局部的な鉄筋腐食が生じたRCはりの降伏荷重に及ぼす影響は小さいことが考えられる。

ここで、せん断スパン部が腐食したRCはりでは、理論上、スパン中央部および載荷点直下部が腐食したRCはり

と同様に降伏荷重を評価することはできない。鉄筋の最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ が20%程度であることや、腐食発生箇所作用する曲げモーメントの大きさが等曲げモーメント区間の70%程度であることを考慮すると、腐食発生箇所の鉄筋の降伏によって部材降伏は決定されないことが考えられる。ここで、図-25にB16-4における部材降伏時の曲げひび割れ幅の推移を示す。これより、部材の降伏荷重の90%時に、腐食発生箇所の曲げひび割れ幅が卓越していたことから、腐食による付着劣化により鉄筋とコンクリート間で応力が十分に伝達されず、腐食発生箇所に応力が集中し、部材降伏以前に鉄筋が降伏していたことが考えられる。しかし、腐食発生箇所以外では鉄筋とコンクリート間の付着が確保されていたことから、腐食発生箇所の鉄筋降伏以降も荷重が増加し、等曲げモーメント区間の鉄筋の降伏により、部材の降伏荷重が決定されたことが考えられる。以上の機構により、せん断スパン部が腐食したRCはりは、健全なRCはりと比較して降伏荷重が低下したことが考えられるが、これは、腐食の発生箇所やその最大断面減少率、また、鉄筋とコンクリート間

の付着劣化の範囲などの影響を受けるため、本研究では、その影響を定量的に評価することはできなかった。

b) 最大荷重

図-26に各シリーズにおける最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ と最大荷重比の関係を示す。これより、B16とB13シリーズでは、載荷点直下部およびせん断スパン部が腐食したRCはりでは、スパン中央部が腐食したRCはりに対して最大荷重が大きくなった。ここで、図-27に示す最大荷重時のひび割れ状況を比較すると、スパン中央部が腐食したRCはりの方が、等曲げモーメント区間におけるひび割れ発生本数は少なかった。これは、腐食による等曲げモーメント区間の付着劣化に起因すると考えられる。一方、載荷点直下部およびせん断スパン部が腐食した場合は、等曲げモーメント区間の鉄筋-コンクリート間の応力伝達が確保され、区間全般にわたって応力が分担されたことから、最大断面減少率を示す箇所であっても、その部分が負担する応力が小さかったために、断面減少率に対する最大荷重の低下が顕著ではなかったことが考えられる。なお、既往の研究⁹⁾に示された解析結果でも同様の傾向が示されている。

B22とB16-6シリーズでは、スパン中央部が腐食したRCはりにおいても、B13およびB16シリーズのスパン中央部が腐食したRCはりと比較して、最大荷重の低下の程度が小さかった。これらは、他と比較して主鉄筋の径が大きい、あるいは主鉄筋の本数が多い。異形鉄筋は、径が大きくなるほど節の高さが大きくなるため、径が小さい鉄筋と比較すると、径が大きい場合の方がより鉄筋とコンクリート間の付着が良好となる。径が大きい場合、鉄筋が腐食し節が減少しても、小径の場合よりも鉄筋とコンクリート間の応力伝達が確保され、両者間ですべりが生じることなく一体となって変形することが考えられる。このため、等曲げモーメント区間に最大断面減少率を示す箇所があっても、B13およびB16シリーズよりも最大荷重が低下しなかったと考えられる。また、鉄筋本数が多い場合は、本数の増加に伴って節の総数も増加することとなる。このため、小径の鉄筋でも、節が残存する程度の腐食であれば、鉄筋-コンクリート間の応力伝達を確保することができると考えられる。しかし、B16-6とD22シリーズを比較すると、B16-6シリーズの方がその影響は小さく、特に、B16-6-4では最大荷重の低下の程度が大きかった。これは、主鉄筋6本のうち1本の主鉄筋の断面(質量)減少率が77.3%と大きく、部材降伏後、早期に鉄筋が破断したためと考えられる。これより、はり軸直角方向に局所的な鉄筋腐食が生じている場合は、はり軸直角方向に一樣な鉄筋腐食が生じている場合と比較して、RCは

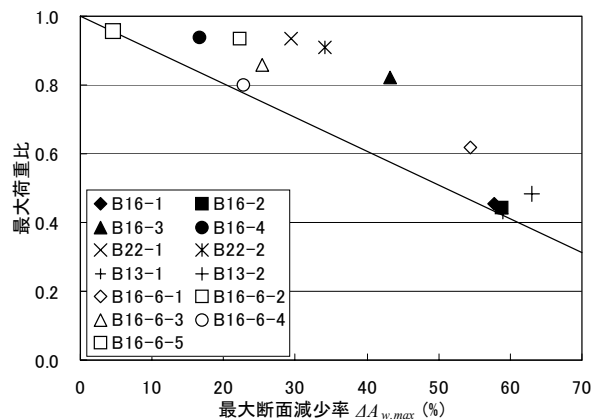


図-26 最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ と最大荷重比

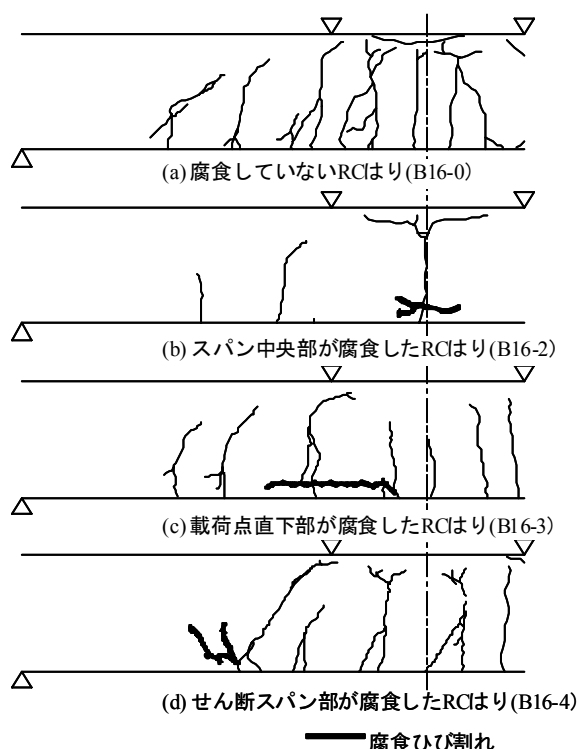


図-27 最大荷重時のひび割れ状況 (B16シリーズ)

りの最大荷重は低下する可能性があるといえる。

本研究の範囲では、せん断スパン部が腐食した場合、鉄筋腐食がRCはりの最大荷重に及ぼす影響は小さく、載荷点直下部が腐食した場合においても、スパン中央部が腐食した場合よりその影響は小さかった。また、主鉄筋の径が大きい、あるいは主鉄筋の本数が多いほど鉄筋とコンクリートの一体性を確保することができるため、主鉄筋の腐食が最大荷重に及ぼす影響は小さくなった。特に、両者を比較すると、主鉄筋の径を大きくした方がより一体性が確保されることが考えられる。また、鉄筋腐食の程度が大きくなるほど、腐食発生箇所および鉄筋の径、本数の影響は小さくなると考えられる。

3.4 局部的に生じた鉄筋腐食がRCはりの変形性に及ぼす影響

本研究では、局部的に生じた鉄筋腐食がRCはりの変形性に及ぼす影響について、RCはりの部材降伏時および最大荷重時の鉛直変位に着目して検討を行った。

B16-6シリーズのうち、はり軸直角方向に局部的な鉄筋腐食が生じているRCはり（B16-6-3～5）の部材降伏時および最大荷重時におけるはり軸方向の鉛直変位分布を図-28に示す。これより、腐食発生箇所（スパン中央部、載荷点直下部およびせん断スパン部）によらず、はり両側面の鉛直変位分布に大きな変化は見られなかった。表-7に示したように、はり軸直角方向における鉄筋腐食の局所化の程度は大きく、特に、B16-6-3とB16-6-4では、A側面の鉄筋の断面（質量）減少率が最大70%程度であるのに対して、B側面では全く腐食していなかった。この結果から、はり軸直角方向に局部的な鉄筋腐食が生じている場合でも、コンクリートやせん断補強筋の存在により、RCはりの軸直角方向、すなわちはり断面における一体性が確保されていたことが考えられる。したがって、以降の検討では、B16-6-3～5についても、表-7に示した鉄筋の平均断面（質量）減少率を用いて他のRCはりと同様に評価を行った。

図-29および図-30にB16シリーズの部材降伏時および最大荷重時におけるはり軸方向の鉛直変位分布および鉄筋の腐食状況を示す。部材降伏時のはり軸方向の鉛直変位分布は、腐食発生箇所に関わらず全てのRCはりで中央変位が最大となった。しかし、最大荷重時は、スパン中央部が腐食したRCはりでは中央変位を最大とした変位分布となったが、載荷点直下部が腐食したRCはりは腐食発生箇所に変位が最大となった。これは、部材降伏以降、はり軸方向に引張応力が分担されず、腐食発生箇所の鉄筋に集中したために、部材の集中変形が生じたと考えられる。一方、せん断スパン部が腐食したRCはりでは、他のRCはりと比較して断面減少率が小さかったことから、はり軸方向の鉄筋-コンクリート間の付着が健全なRCはりと同様に確保されていたために、鉄筋腐食が部材全体の変位分布に及ぼす影響が小さかったことが考えられる。さらに、D22およびB16-6シリーズのRCはりの鉛直変位分布がB16シリーズと同じ傾向を示したことから、主鉄筋の径や本数が上記の鉄筋腐食によるRCはりの変位分布に及ぼす影響は小さいことが推測される。

図-31および図-32に、鉄筋の最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ と部材降伏時および最大荷重時の変位比の関係を示す。変位比は、健全なRCはりにおける部材降伏時および最大荷重時のスパン中央部の変位に対する各RCはりの最大変位の

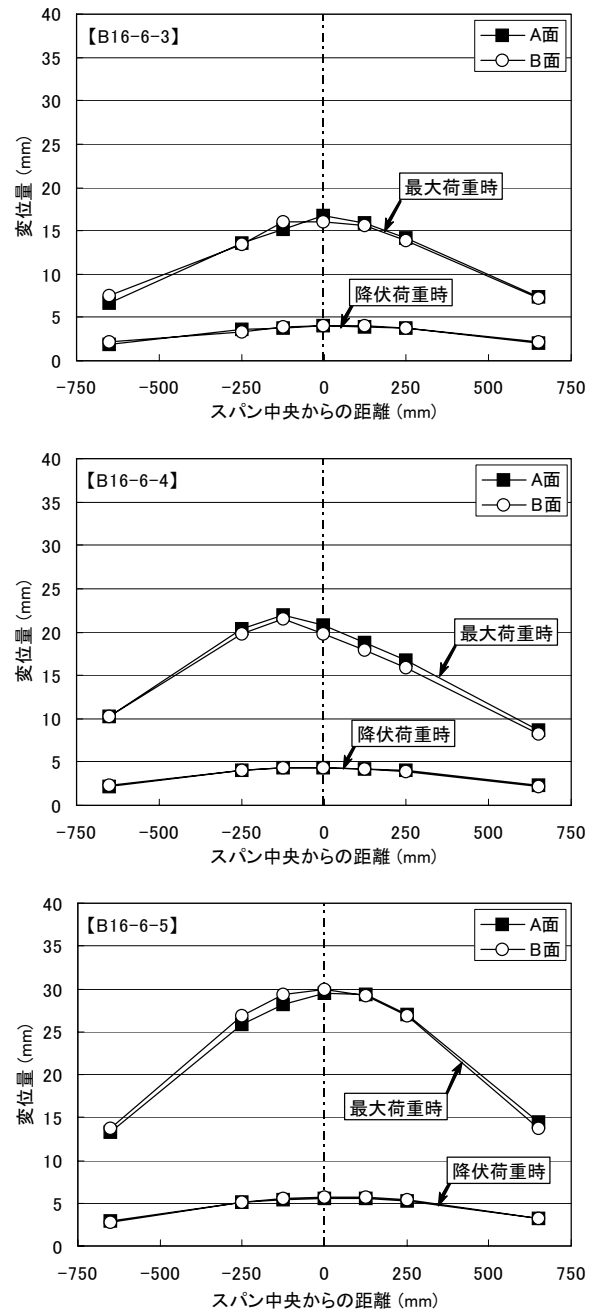


図-28 はり軸方向の鉛直変位分布（B16-6シリーズ）

比である。最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ は、表-7に示す吸水スポンジを設置した位置における平均質量減少率である。これより、部材降伏時は、最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ が大きくなるほど変位比が小さくなる傾向が見られ、その低下程度は、最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ が40%程度以下の場合、図-24に示した鉄筋腐食による降伏荷重の低下程度とほぼ同等であった。特に、最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ が40%程度以上であったスパン中央部腐食および小径の鉄筋を用いたRCはりの変位比の低下程度は、鉄筋腐食による降伏荷重の低

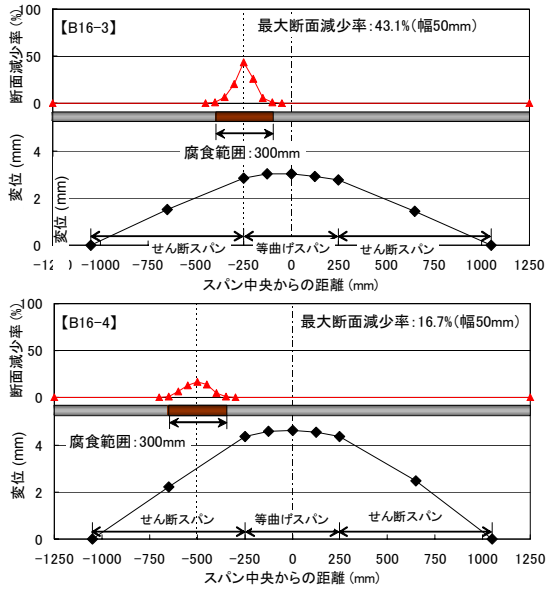
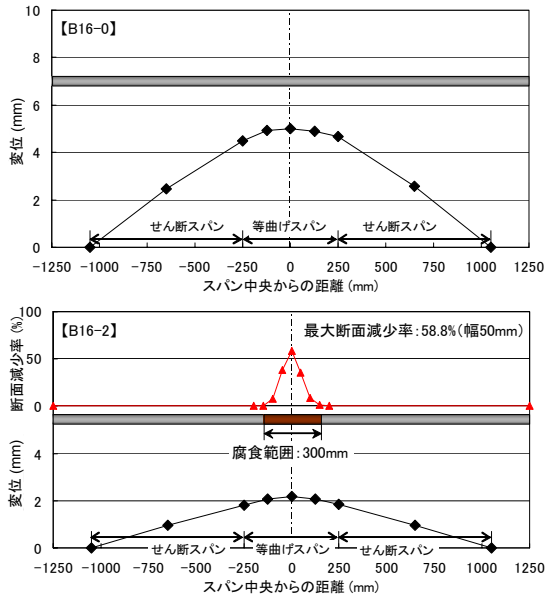


図-29 はり軸方向の鉛直変位分布および鉄筋の腐食状況（部材降伏時）

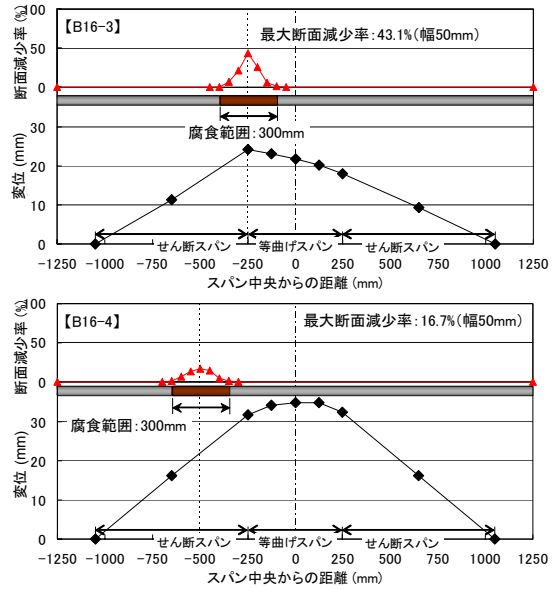
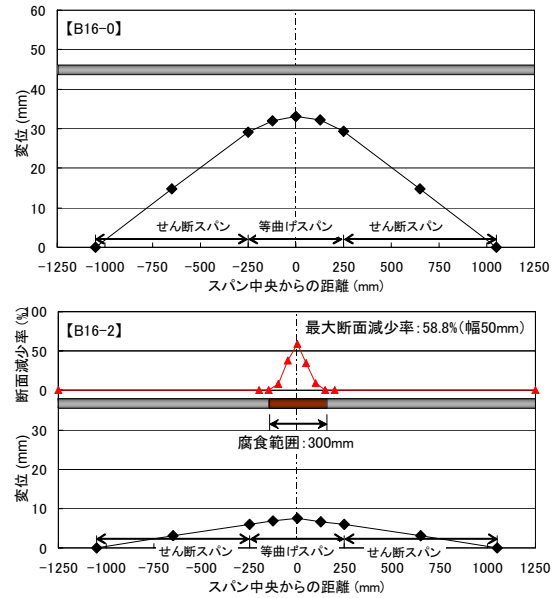


図-30 はり軸方向の鉛直変位分布および鉄筋の腐食状況（最大荷重時）

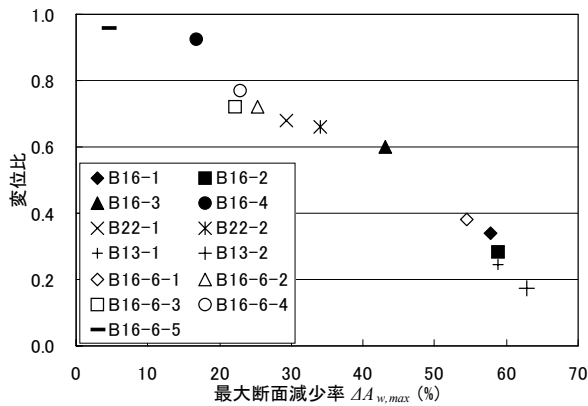


図-31 最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ と変位比（部材降伏時）

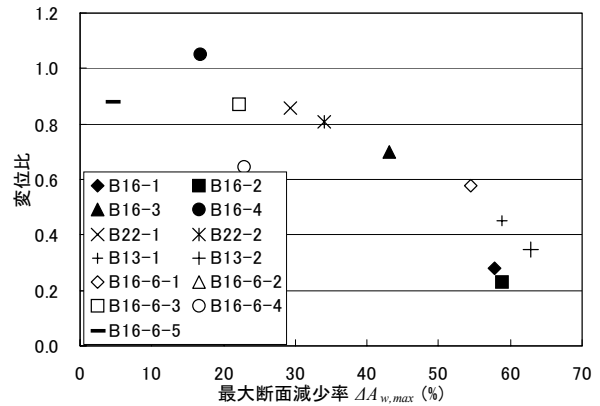


図-32 最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ と変位比（最大荷重時）

下程度よりも大きくなった。これは、局所的な腐食が生じたRCはりの部材降伏時の変形性が、耐荷性よりも敏感に等曲げモーメント区間内での応力集中による影響を受けることを示すものと考えられる。しかし、現時点では、その影響が顕著となる断面（質量）減少率や局所化の程度、また鉄筋の径および本数の効果は定かではないため、今後の検討が必要である。

最大荷重時においても、最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ が大きくなるほど変位比が小さくなる傾向が見られ、その低下程度は図-26に示した鉄筋腐食による最大荷重の低下程度よりも大きい。これより、RCはりの最大荷重時の変形性は、耐荷性よりも敏感に局所的な鉄筋腐食の影響を受けることが考えられる。

一般に、腐食による鉄筋とコンクリート間の付着劣化は、耐荷性よりも変形性に大きく影響するといわれている¹¹⁾。本研究では、局所的な鉄筋腐食が生じたRCはりの変形性は、最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ を用いることにより評価できる可能性があることを示した。しかし、鉄筋の腐食程度とその発生位置、鉄筋径および本数がそれに及ぼす影響を明らかにするためには、鉄筋とコンクリート間の付着劣化に着目した更なる検討が必要である。

4. RCはりの構造性能評価方法の提案

著者らはこれまで、目視点検による劣化度判定に基づいたRC部材の構造性能評価手法について検討を進めている⁷⁾。既報では、外観になんらかの劣化・変状が認められる場合、そのRC部材は供用開始時の構造性能を下回る可能性があることを示した。しかし、本研究の成果により、腐食発生箇所および腐食した鉄筋の節の残存により、鉄筋腐食がRCはりの耐荷性に及ぼす影響が異なること、また、RCはりの耐荷性および変形性は、主鉄筋の最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ を考慮することにより評価できる可能性があることが分かった。したがって、これらの要因を考慮しながら点検診断を実施することにより、より精緻なRCはりの構造性能評価が実現可能となることが期待される。

そこで、本研究の成果に基づいて、鉄筋腐食の発生箇所や腐食による最大断面減少率に着目したRCはりの簡便な構造性能評価方法を提案した。鉄筋腐食の発生箇所・範囲の判定を図-33に、鉄筋の最大断面減少率の判定を図-34に、構造性能低下の判定を表-8に示す。

ここで、港湾の施設の維持管理技術マニュアル²⁾では、施設の合理的な維持管理を目的として、日常点検で把握し難い構造物あるいは部材の細部を含めて、変状の有無や程度の点検を、部材の性能把握のための定期点検診断

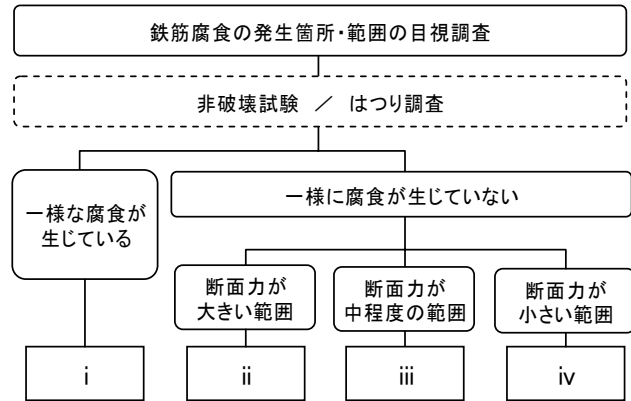


図-33 鉄筋腐食の発生箇所・範囲の判定

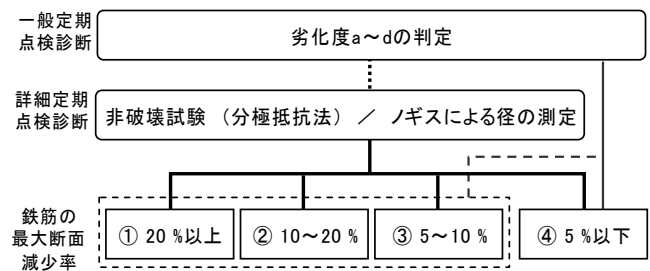


図-34 鉄筋の最大断面減少率の判定

表-8 構造性能低下の判定

腐食発生箇所・範囲の判定	鉄筋の腐食判定			
	①	②	③	④
i	高い	高い	やや高い	やや低い
ii	高い	やや高い	やや低い	低い
iii	やや高い	やや低い	低い	低い
iv	やや低い	低い	低い	低い

として行うこととされている。定期点検診断は、比較的短い間隔で主に目視調査により行う一般定期点検診断と、比較的長い間隔で高度な方法により行う詳細定期点検診断に区分される。本研究では、港湾の施設の維持管理技術マニュアルに示される一般定期および詳細定期点検診断に基づいた鉄筋腐食の発生箇所・範囲、および腐食程度の判定方法をそれぞれ提案する。

栈橋上部工RCはりでは、鉄筋軸方向に沿ったひび割れやかぶりの剥落、および錆汁の有無などの劣化・変状に着目した一般定期点検診断が行われる。構造性能評価における腐食発生範囲の判定は、一樣な鉄筋腐食が生じている場合と局所的な鉄筋腐食が生じている場合に区別して目視調査により行うことができる。特に、局所的な鉄筋腐食が生じている場合の判定基準は、図-26に示す実験

結果に基づいて、断面力毎に3段階に設定した。つまり、局所的に生じた鉄筋腐食がRCはりの構造性能の低下に及ぼす影響は、スパン中央部、載荷点直下部付近、せん断スパン部で異なることを鑑み、それぞれを断面力が高い、中程度、小さいと読みかえて、腐食の発生位置による構造性能の低下の程度を評価に取り入れた。なお、後述する詳細点検診断により、部材外観に劣化・変状が認められない場合でも、より詳細に鉄筋の腐食発生範囲を判定できる可能性がある。

また、一般定期点検診断では、部材外観の劣化・変状程度により、劣化度a～dが判定される。図-35に、RC部材の塩害による劣化進行過程と劣化度、および既往の研究¹²⁾から得られた各劣化度における鉄筋の腐食による断面減少率の関係を示す。これによれば、断面減少率1%程度でコンクリート表面にひび割れが生じ、断面減少率5%程度でさらなるひび割れの増加に伴いコンクリート表面に浮きやかぶりの剥落が見られることとなる。したがって、一般定期点検診断では、断面減少率5%以下とそれ以上の2段階の断面減少率が判定されることとなる。ただし、既往の研究¹²⁾は、鉄筋の腐食による平均質量減少率に基づいて定められたものであるため、一般定期点検診断に基づいて鉄筋の最大断面減少率を推定する際には、2章3節に示した鉄筋径毎の平均断面減少率と最大断面減少率の関係を考慮することが必要となる。

鉄筋の最大断面減少率は、鉄筋軸方向に沿ったひび割れやかぶりの剥落などの部材外観の劣化・変状から、工学的に設定することも可能であると考えられる。また、後述する詳細点検診断により、より精度よく鉄筋の最大断面減少率を判定できる可能性がある。

栈橋上部工RCはりの鉄筋の腐食程度に関する詳細定期点検診断項目としては、腐食の活性度推定のための自然電位測定と、腐食速度推定のための分極抵抗測定が挙げられている。ここで、両測定方法は、あくまで、測定時における鉄筋の腐食状況を把握するための手法であり、測定値には測定以前までの腐食進行の状況は含まれていない。しかしながら、本研究の範囲では、同一構造物から取り出した鉄筋の分極抵抗測定値と、測定時における鉄筋の最大断面減少率の関係は、表-2に示したCEBの判定例で整理が可能であった。このため、図-5の測定結果に基づいて、分極抵抗測定結果から、断面減少率0～5%、5%～10%、10%～20%、20%以上の4段階の鉄筋の最大断面減少率を判定することとした。

ここで、同マニュアル²⁾では、かぶりコンクリートを一部はつり落として、内部の鉄筋を露出させて鉄筋の状況を目視調査する手法が挙げられている。このとき、鉄筋

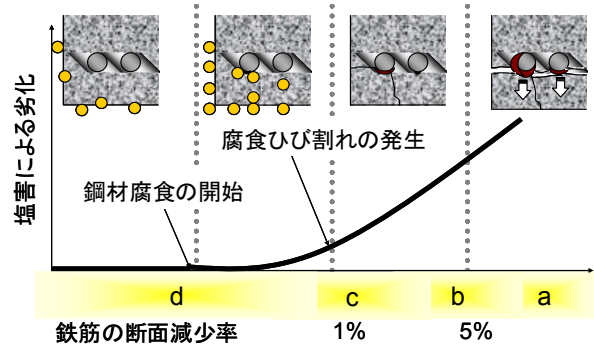


図-35 部材の劣化進行過程と鉄筋の断面減少率

表-9 構造性能低下の可能性

高い	健全時より 20%以上低下する可能性あり
やや高い	健全時よりもやや低下する可能性あり
やや低い	健全時と同等と考えられるが定かではない
低い	健全時と同様である

の残存径をノギス等により測定すれば、精度よく4段階の鉄筋の最大断面減少率を判定することができる。

以上の鉄筋腐食の発生箇所・範囲、および鉄筋の最大断面減少率の判定結果から、表-8に示す構造性能低下を判定する。表-9は、表-8の判定に対する構造性能低下の可能性の解釈であり、図-24および図-26に基づいて定めたものである。等曲げモーメント区間の鉄筋の断面減少を考慮した耐荷性の計算値、および局所的な鉄筋腐食が生じたRCはりの耐荷性に関する実験結果から、断面減少率が20%の場合、耐荷性は最大20%程度低下することが分かった。本研究では、部材の耐荷性が健全時よりも20%程度以上低下する可能性があるものを、表-8中で「高い」として設定している。また、次の段階については、構造性能低下の程度は表-8の「高い」ほどではないが、健全時よりも構造性能は低下する可能性があり、危険性は皆無ではないため、「やや高い」として設定している。「やや低い」「低い」については、同様に、鉄筋腐食の程度および断面力の大きさから、構造性能低下の危険性がごく小さいあるいは皆無と判断できるとして設定している。しかし、これらを含む全ての構造性能低下の可能性の判定を精度よく行うためには、鉄筋の腐食状況や部材の形状・寸法、支持条件、荷重条件等を正確にモデル化して数値解析などを行う必要がある。

ここで示したRCはりの構造性能評価フローは、本研究で対象とした範囲およびこれまでの知見から、前述のように簡便法を提案することを目的として作成したもので

ある。変形性評価および各種RC部材に対する精緻な構造性能評価手法については、鉄筋腐食がRC部材の構造性能に及ぼす影響に対する更なる実験および実構造物の分析が必要であることを付記する。

5. 結論

本研究では、実構造物から採取した鉄筋およびRCはり試験体を対象に、局所的に生じた鉄筋腐食が鉄筋の力学的性質およびRCはりの構造性能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まとめる。

- 1) 鉄筋の腐食による強度低下は、その鉄筋の最大断面減少率 $\Delta A_{s,max}$ を考慮することで精度良く評価することができる。
- 2) 局所的な鉄筋腐食が生じたRCはりでは、はり軸方向の鉄筋とコンクリート間の付着劣化の範囲が小さいため、部材降伏までは健全時と同程度の剛性を有する。
- 3) 等曲げモーメント区間近傍に局所的な鉄筋腐食が生じたRCはりの降伏荷重は、腐食発生箇所、主鉄筋の径および本数に関わらず、鉄筋の最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ を用いることにより精度良く評価できる。
- 4) 局所的な鉄筋腐食が生じたRCはりの最大荷重は、はり軸方向の腐食発生箇所とその程度、鉄筋の径および本数に影響される。これは、腐食発生箇所や鉄筋の節の残存による断面力と応力伝達メカニズムの違いによるものである。
- 5) RCはりの変位比は、その耐荷性よりも敏感に鉄筋腐食の局所化の影響を受ける。
- 6) 局所的な鉄筋腐食が生じたRCはりの変位比は、最大断面減少率 $\Delta A_{w,max}$ を用いることにより評価できる可能性があるが、鉄筋の腐食程度とその発生箇所、鉄筋径および本数がそれに及ぼす影響を明らかにするためには、鉄筋とコンクリート間の付着劣化に着目した更なる検討が必要である。
- 7) 実験結果および既往の知見に基づいて、鉄筋の腐食程度とその発生箇所に着目したRCはりの構造性能評価手法を提案した。

6. あとがき

本研究では、局所的な鉄筋腐食が生じたRCはりの構造性能の評価手法について検討した。しかし、実際の栈橋上部工は、杭に支持されたはりおよび床版が一体化した構造物である。構造物全体の構造性能評価を可能とするためには、各構成部材の性能低下が上部工全体の構造性

能に及ぼす影響について検討していく必要がある。今後、構造物の劣化性状とそれが構造物全体の構造性能に及ぼす影響について引き続きデータの蓄積を図り、精緻かつ効率的な実構造物の保有性能評価手法を構築することが必要である。

(2007年11月5日受付)

謝辞

実構造物を対象とした調査および試験は、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。本研究を実施するにあたりご助力頂いたLCM研究センター実務訓練生 村松真伍君（長岡技術科学大学）に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，2007.7.
- 2) 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，2007.10.
- 3) ASTM: Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, ASTM C876-77, 1977.
- 4) CEB Working Party: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion (draft 4), BBRI-CSTC-WTCB, 1997.
- 5) 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-358，2000，pp. 716-717.
- 6) 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.2，2005，pp. 49-59.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 加藤絵万，岩波光保，横田弘，中村晃史，伊藤始：繰返し荷重を受けるRCはりの構造性能に及ぼす鉄筋腐食の影響，港湾空港技術研究所資料，No.1079，2004.
- 11) 土木学会：地震作用に対するコンクリート構造物の性能照査型設計-設計と照査の現状と将来展望-，コ

ンクリート技術シリーズ67, 2006.

- 12) 古玉悟, 田邊俊郎, 横田弘, 濱田秀則, 岩波光保,
日比智也: 栈橋の維持補修マネジメントシステムの
開発, 港湾空港技術研究所資料, No.1001, 2001.

記号

$\Delta A_{s,ave,meas}$: 測定した断面積から算出した平均断面減少率

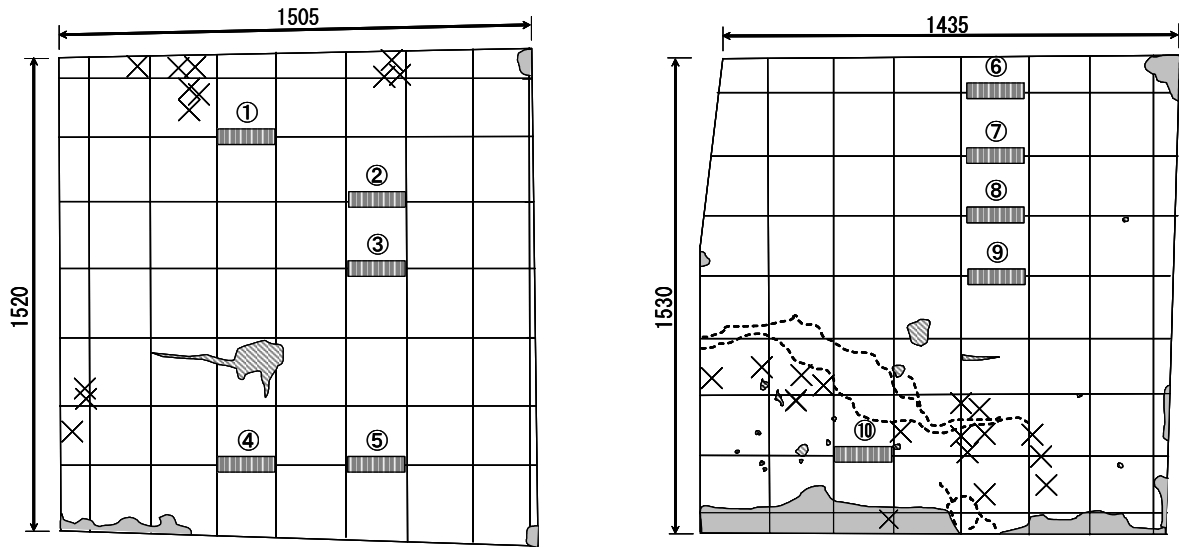
$\Delta A_{s,max,meas}$: 測定した断面積から算出した最大断面減少率

$\Delta A_{s,max,cal}$: 最大断面減少率であり, 質量減少率と平均断面
減少率 $\Delta A_{s,ave,meas}$ に対する最大断面減少率
 $\Delta A_{s,max,meas}$ の割合の積

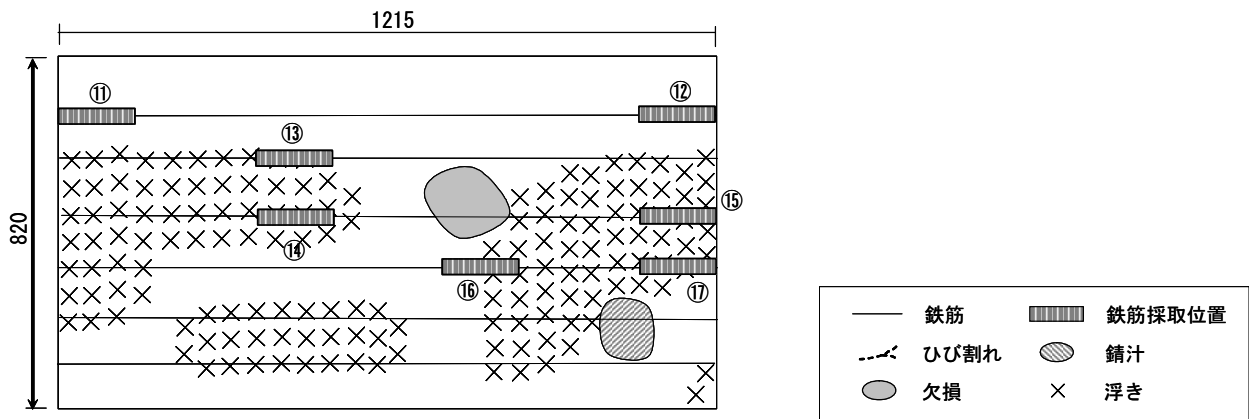
$\Delta A_{w,ave}$: 質量減少から算出した平均断面減少率

$\Delta A_{w,max}$: 質量減少から算出した最大断面減少率

付録A RC部材の劣化状況と破壊試験結果および鉄筋の平均質量減少率



床版底面の劣化状況と D13 鉄筋の採取位置

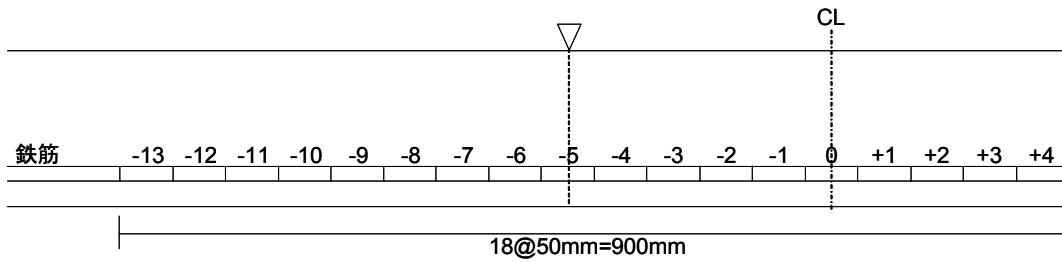


はり底面の劣化状況と D22 鉄筋の採取位置

自然電位、分極抵抗の測定値と鉄筋の質量減少率

採取位置	自然電位 E (mV vs CSE)	分極抵抗 ($k\Omega \cdot cm^2$)	質量減少率 (%)	採取位置	自然電位 E (mV vs CSE)	分極抵抗 ($k\Omega \cdot cm^2$)	質量減少率 (%)
①	-454	110	2.1	⑪	-441	91	6.2
②	-458	157	3.1	⑫	-395	155	2.3
③	-452	156	0.1	⑬	-534	102	6.5
④	-501	121	6.2	⑭	-431	27	12.0
⑤	-498	110	7.3	⑮	-307	7	26.1
⑥	-399	277	3.3	⑯	-356	50	13.4
⑦	-417	277	2.6	⑰	-353	37	16.4
⑧	-379	411	1.4				
⑨	-453	4200	7.3				
⑩	-531	4520	20.2				

付録B RCはりの鉄筋の質量減少率



鉄筋調査位置図

単位：%

【B16-1】

鉄筋	位置 No.																	
	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	4.8	16.4	59.5	65.8	45.3	9.5	3.0	0.6
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	2.6	7.9	35.3	57.7	48.8	11.4	2.0	1.9
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	3.8	12.1	35.2	49.7	41.2	10.8	3.2	1.9

※(位置 No.) × (測定幅 50mm) = 中心からの距離(mm)

【B16-2】

鉄筋	位置 No.																	
	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	11.3	40.9	82.6	36.4	9.4	1.3	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	7.2	28.6	40.1	35.6	5.6	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.8	34.9	53.6	40.8	6.7	0.0	0.0

※(位置 No.) × (測定幅 50mm) = 中心からの距離(mm)

【B16-3】

鉄筋	位置 No.																	
	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	8.8	21.8	45.4	27.3	8.5	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	20.4	46.3	25.9	4.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	4.8	20.2	37.7	23.5	3.8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

※(位置 No.) × (測定幅 50mm) = 中心からの距離(mm)

【B16-4】

鉄筋	位置 No.																	
	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
1	2.1	7.6	11.2	17.8	17.1	6.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1.4	5.6	12.8	13.4	13.4	6.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.1	6.3	15.0	18.8	12.1	2.8	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

※(位置 No.) × (測定幅 50mm) = 中心からの距離(mm)

単位：%

【B22-1】

鉄筋	位置 No.																	
	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	1.3	7.7	25.4	26.3	25.4	12.1	1.3	0.6
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	1.0	8.2	24.2	35.5	30.6	15.7	1.3	1.9
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	2.1	7.7	21.5	26.4	26.4	13.9	0.9	1.9

※(位置 No.) × (測定幅 50mm) = 中心からの距離(mm)

【B22-2】

鉄筋	位置 No.																	
	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	5.4	16.1	52.0	25.9	8.4	1.7	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	3.4	6.0	20.5	14.8	9.3	2.9	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	5.0	8.8	29.8	21.9	9.8	3.6	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

※(位置 No.) × (測定幅 50mm) = 中心からの距離(mm)

【B13-1】

鉄筋	位置 No.																	
	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	10.4	30.9	68.2	74.4	50.8	18.0	8.9	6.7
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	8.4	25.1	45.1	55.6	44.9	14.6	10.0	8.2
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.2	7.9	22.5	41.9	46.7	41.8	16.3	10.2	7.6

※(位置 No.) × (測定幅 50mm) = 中心からの距離(mm)

【B13-2】

鉄筋	位置 No.																	
	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.5	11.5	25.6	49.9	27.9	10.2	7.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	15.4	36.1	69.8	49.7	16.6	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.6	17.1	44.0	69.0	63.9	18.9	8.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

※(位置 No.) × (測定幅 50mm) = 中心からの距離(mm)

【B16-6-1】

鉄筋	位置 No.																	
	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	2.8	14.6	34.4	37.6	26.8	14.7	1.3	0.9
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	8.9	36.0	46.6	40.3	14.0	1.4	2.9
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.8	5.5	33.0	44.9	43.7	15.6	2.7	1.2
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	1.2	7.1	30.1	39.0	34.3	16.0	4.6	1.2
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	10.7	47.0	67.0	44.3	17.5	4.7	0.7
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	4.8	28.3	91.5	91.6	51.2	18.6	4.9	1.3

※(位置 No.) × (測定幅 50mm) = 中心からの距離(mm)

単位：%

【B16-6-2】

鉄筋	位置 No.																	
	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	8.9	12.2	8.8	3.1	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	16.9	32.3	18.9	4.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	26.4	38.0	17.8	3.1	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	21.2	24.8	11.5	3.6	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	14.5	19.2	9.5	2.7	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	7.0	6.2	3.8	2.9	0.0	0.0

※(位置 No.) × (測定幅 50mm) = 中心からの距離(mm)

【B16-6-3】

鉄筋	位置 No.																	
	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	6.1	25.9	49.1	37.8	7.6	1.2	1.2
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.6	3.9	29.2	63.9	39.3	4.1	1.3	1.1
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	3.6	18.5	29.7	18.1	4.2	1.9	0.8
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	2.7	2.7	6.7	9.0	6.3	2.4	3.2	2.1
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

※(位置 No.) × (測定幅 50mm) = 中心からの距離(mm)

【B16-6-4】

鉄筋	位置 No.																	
	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	8.6	45.0	77.3	37.3	7.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	4.3	29.5	38.0	20.2	4.3	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	3.8	13.5	21.6	11.1	4.2	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

※(位置 No.) × (測定幅 50mm) = 中心からの距離(mm)

【B16-6-5】

鉄筋	位置 No.																	
	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
1	0.0	0.9	1.8	8.4	5.8	1.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.5	1.4	8.0	4.7	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	1.6	2.8	6.9	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.8	3.5	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

※(位置 No.) × (測定幅 50mm) = 中心からの距離(mm)

港湾空港技術研究所報告 第47巻 第1号

2008.3

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 ニッセイエプロ株式会社

Copyright © (2008) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。