

## 論文 鉄筋腐食がRCはりの耐荷性能に及ぼす影響

岩波 光保\*<sup>1</sup>・横田 弘\*<sup>2</sup>・佐藤 文則\*<sup>3</sup>

**要旨**：コンクリート構造物において、鉄筋腐食はその構造性能に多大な影響を及ぼすが、その程度については未だ定量的に整理されていない。そこで本研究では、RCはり内部の鉄筋腐食がその耐荷性能に及ぼす影響について実験的な検討を行った。この際、はりの劣化方法として、電食、温海水中における乾湿繰返しおよび海水噴霧をとりあげた。これらのRCはりの載荷試験により、腐食による鉄筋断面積の減少率とはりの鉄筋降伏荷重および最大荷重の関係を明らかにした。また、促進劣化の方法と鉄筋腐食性状の関係とその耐荷性能への影響などについても考察した。

**キーワード**：海洋環境、RCはり、腐食、耐荷性能、鉄筋断面減少率、促進劣化

### 1. はじめに

四方を海で囲まれ、陸地の大半を急峻な山岳地帯が占める我が国では、海沿いの狭隘な地域が国民生活や社会経済活動の拠点となっており、そこには膨大な社会基盤施設がストックされている。しかしながら、社会基盤施設の大部分を構成するコンクリート構造物にとって、海洋環境は極めて苛酷なものであり、主にコンクリート内部の鉄筋が腐食することで、構造物の保有性能が供用期間中に次第に低下していく<sup>1)</sup>。

しかし現時点では、鉄筋の腐食程度と構造物の諸性能の関係については未解明の部分が多く残されており、結果的に的確な補修・補強対策が行えない状況となっている。特に、補修・補強計画を策定する上で不可欠な構造性能と鉄筋腐食の関係については、研究者によって見解が異なる場合もあり、明確な方向性が示されていない<sup>2)</sup>。

そこで本研究では、海洋環境下にあるコンクリート構造物の保有性能を定量的に評価することを目的として、鉄筋腐食がRCはりの耐荷性能に及ぼす影響を実験的に調べた。実験では、RCはり内部の鉄筋を腐食させるために、促進劣化を施した。本研究ではその方法として、電

食、温海水中における乾湿繰返し、ならびに海水噴霧をとりあげた。これらにより劣化したRCはりの曲げ載荷試験を行うことで、鉄筋の腐食程度とはりの耐荷性能の関係を明らかにした。鉄筋の腐食程度は、載荷試験終了後に鉄筋をはつりだし、腐食減量を測定することで定量化した。さらに、促進劣化と実際の海洋環境下での劣化の相違について調べるため、実海洋環境下に23年間にわたって暴露したRCはり試験体の実験結果<sup>1)</sup>との比較を行った。また、はりの曲げ理論に基づいた解析を行い、実験結果の妥当性を検証した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体概要

本研究で用いた試験体は、著者らが過去に実施した実海洋環境暴露試験<sup>1)</sup>に用いたRCはりと同じとした。すなわち、断面が200×300mm、長さが2400mmのRCはりであり、コンクリートのW/Cは0.68とした。材齢1.5年経過後に、後述の促進劣化を施した。

配筋については、引張鉄筋として、3本のSD345-D16をかぶり42mmで配置し、圧縮鉄筋として、SR295-φ6を2本用いた。またせん断補

\*1 独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造強度研究室 研究官 工博 (正会員)

\*2 独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造強度研究室長 工博 (正会員)

\*3 前田建設工業 (株) 技術研究所 (正会員)

強筋として、SR295-φ6のスターラップを100mm間隔で10本配置した。

曲げひび割れの存在が鉄筋の腐食性状に及ぼす影響を検討するため、一部のRCはりに対して事前荷重を行った。後述する曲げ荷重試験と同一の方法で、曲げひび割れの最大幅が許容ひび割れ幅（かぶりの0.0035倍、0.15mm）に達するまで荷重を加えた。これ以降、事前荷重を行っていない試験体の総称をUシリーズ、事前荷重を行ったものをCシリーズと呼ぶ。

## 2.2 促進劣化方法

RCはり内部の鉄筋を腐食させるため、以下の3種類の促進劣化をUシリーズおよびCシリーズの試験体に施した。促進劣化を行う期間は、RCはり外観の劣化状況をモニタリングすることで、異なる劣化方法間の比較が行えるように決定した。これに加えて、耐荷性能の基準となる比較用の健全試験体も用意した。

### (1) 電食作用

図-1に示すように、定電流発生装置を用いて、海水中に浸漬したRCはり内部の鉄筋に直流電流を印加した。印加電流密度は、引張鉄筋表面に対して、 $8.5A/m^2$ とした。

鉄筋の腐食程度を変化させるため、通電期間を0.5Q、1Q、2Q、4Qおよび8Qと変化させた。ここで、Qは、Uシリーズの試験体において、鉄筋腐食により試験体軸方向にひび割れ（縦ひび割れ）が発生するまでの通電期間である。本実験の場合、Qは32時間となった。なお、縦ひび割れの発生は、印加電圧の急激な低下によって確認した。

### (2) 温海水中における乾湿繰返し作用

試験体を60℃の海水中に3.5日間浸漬し、その後3.5日間大気中にて乾燥させた。これを1サイクルとして、9、34および60サイクルまで継続した。乾湿繰返し中におけるコンクリート物性の変化を調べるため、φ100×200mmのコンクリート円柱を同一条件下に暴露した。

### (3) 海水噴霧作用

港湾空港技術研究所内にある海水噴霧施設に

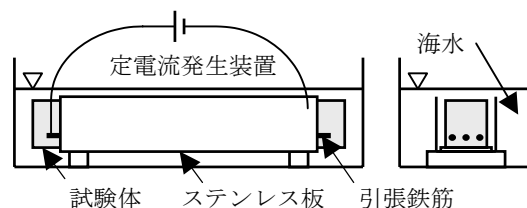


図-1 電食試験方法

試験体を暴露した。本施設では、約3時間の海水噴霧が12時間おきに、1日に2回、自動的に行われる。暴露に際しては、引張鉄筋の腐食を促進させるため、はり底面を鉛直上方に向けた。暴露期間は1.5年および2.5年とした。暴露中のコンクリート物性の変化を調べるため、φ100×200mmのコンクリート円柱を同一条件下に暴露した。

## 2.3 曲げ荷重試験

所定の促進劣化を施したRCはりに対して曲げ荷重試験を行い、はり部材としての耐荷性能を調べた。試験では、支点間隔を2100mmとした3等分2点荷重を行った。荷重中には、荷重荷重、スパン中央点変位、荷重点変位、曲げひび割れ幅および圧縮縁コンクリートひずみを5kNごとに計測した。

## 2.4 鉄筋の腐食性状評価

### (1) 鉄筋断面減少率の評価

荷重試験が終了した試験体を解体し、引張鉄筋を取り出した後、サンドブラストおよび10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液浸漬により腐食生成物を完全に除去した。この除錆した鉄筋の単位長さあたりの質量を測定し、腐食していない健全な鉄筋の値と比較することで、鉄筋断面積の減少率（これ以降、鉄筋断面減少率と呼ぶ）を算出した。なお、この測定は、引張鉄筋のうち曲げスパン部分を100mm程度に切断した7本のそれぞれの試験片に対して行った。

### (2) 腐食した鉄筋の力学的性質の評価

腐食した鉄筋の力学的性質（降伏点、引張強度および弾性係数）を調べた。荷重試験が終了したRCはりからは取り出したせん断スパンの引張鉄筋のうち、荷重による損傷が生じていな

い部分を試験片として引張試験を行った。弾性係数は、試験片に設けた2つの標点間の距離(128mm)の変化から算出した。引張試験終了後に、標点間の鉄筋を切り出し、(1)と同様に、鉄筋断面減少率を算出し、腐食した鉄筋の力学的性質との関係を調べた。したがって、標点間以外で破断した試験片のデータは除外している。

表-1 コンクリートの力学特性

ケース		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )
健全		26.6	24.0
電食		26.6	24.0
乾湿繰返し (cycle)	9	37.6	31.5
	34	38.9	31.7
	60	40.0	33.7
海水噴霧 (年)	1.5	35.2	33.9
	2.5	35.2	33.9

表-2 外観の目視観察結果と劣化度判定

劣化方法：電食 (Uシリーズ)					
電食期間	1Q	2Q	4Q	8Q	
縦ひび割れ	あり	あり	あり	あり	
上記幅(mm)	0-0.04	0.04-0.1	0.15-0.35	0.3-0.9	
錆汁	なし	点状	やや多し	多し	
劣化度	I	II	III	III	
劣化方法：電食 (Cシリーズ)					
電食期間	0.5Q	1Q	2Q	4Q	8Q
縦ひび割れ	なし	なし	あり	あり	あり
上記幅(mm)	—	—	0.04-0.1	0.1-0.2	0.3-0.7
錆汁	なし	なし	点状	やや多	多し
劣化度	O	I	II	III	III
劣化方法：乾湿繰返し・海水噴霧 (Uシリーズ)					
サイクル or 暴露期間	9	34	60	1.5年	2.5年
縦ひび割れ	あり	あり	あり	あり	あり
上記幅(mm)	0-0.04	0.1-0.65	0.1-2.0	0-0.2	0.2-0.5
錆汁	なし	点状	多し	点状	点状
劣化度	I	I	III	I	II
劣化方法：乾湿繰返し・海水噴霧 (Cシリーズ)					
サイクル or 暴露期間	9	34	60	1.5年	2.5年
縦ひび割れ	なし	あり	あり	あり	あり
上記幅(mm)	—	0.1-0.7	0.1-2.0	0.1-0.15	0.15-0.6
錆汁	なし	点状	多し	点状	やや多し
劣化度	O	I	III	I	II

### 3. 結果および考察

#### 3.1 コンクリート物性の変化

表-1に、促進劣化終了時、すなわち、曲げ載荷試験実施時におけるコンクリートの力学特性を示す。乾湿繰返しおよび海水噴霧を施した場合には、水分の供給が長期間継続したため、未水和のセメントが反応し、圧縮強度および弾性係数が増加した。このコンクリートの物性変化がRCはりの耐荷性能に及ぼす影響については後述する。

#### 3.2 外観変状の観察結果

促進劣化終了時点でのRCはりの外観変状を、「港湾構造物の維持・補修マニュアル<sup>3)</sup>」に基づいて目視観察した。その結果を表-2に示す。同マニュアルに基づいて判定されたRCはりの劣化度はO~IIIであり、事前載荷による初期ひび割れの有無は、劣化度に反映されなかった。

表-3 鉄筋断面減少率の測定結果

劣化方法：電食 (Uシリーズ)					
電食期間	1Q	2Q	4Q	8Q	
断面減少率	1.37	3.41	5.79	8.29	
変動係数(%)	55.0	26.6	32.7	17.5	
劣化方法：電食 (Cシリーズ)					
電食期間	0.5Q	1Q	2Q	4Q	8Q
断面減少率	1.49	1.19	1.60	4.31	9.80
変動係数(%)	81.4	116.0	71.5	19.0	12.2
劣化方法：乾湿繰返し・海水噴霧 (Uシリーズ)					
サイクル or 暴露期間	9	34	60	1.5年	2.5年
断面減少率	1.63	3.31	5.59	1.01	1.87
変動係数(%)	69.9	73.9	37.7	119.2	77.9
劣化方法：乾湿繰返し・海水噴霧 (Cシリーズ)					
サイクル or 暴露期間	9	34	60	1.5年	2.5年
断面減少率	1.09	2.21	7.88	1.17	1.49
変動係数(%)	77.2	80.0	30.4	116.6	102.8

断面減少率の単位：%

#### 3.3 鉄筋の腐食性状評価

表-3に、鉄筋断面減少率の測定結果を示す。表中には、3本の引張鉄筋の曲げスパン内の部分の全測定値の平均値とその変動係数を各試験体ごとに示した。事前載荷による初期ひび割れの存在と鉄筋の腐食程度の間には明確な対応関

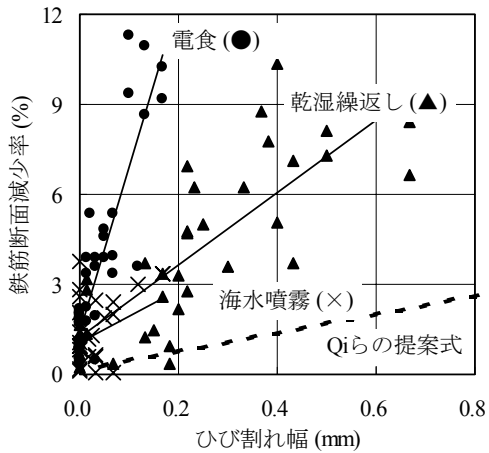


図-2 鉄筋断面減少率とひび割れ幅の関係

係は認められなかったが、腐食程度が小さい場合には、Cシリーズの方が変動係数が若干大きいようである。これは、初期ひび割れの存在により腐食が局所化したためと考えられる。しかし、腐食程度が顕著になると変動係数の値は急激に小さくなり、腐食が鉄筋表面で平均的に進行したことを示している。また同一腐食レベルで比較すると、促進劣化の方法によらず、変動係数は概ね同程度となった。以上より、一部で変動係数が大きいケースも存在するが、これ以降は、鉄筋腐食程度を曲げスパン内における鉄筋断面減少率の平均値で評価することとした。

図-2に、鉄筋断面減少率と縦ひび割れ幅の関係を示す。この図は、長さ100mmに分割した鉄筋に対する断面減少率の各測定値と、同一箇所における縦ひび割れ幅との対応を調べたものである。なお、図中のひび割れ幅は、引張鉄筋1本あたりの値に換算するため、ひび割れ幅の実測値を鉄筋本数の3で除したものである。図中の直線は、促進劣化方法ごとの回帰直線を表している。これによれば、乾湿繰返し作用と海水噴霧作用による腐食の場合は同様の傾向を示したが、電食作用を受けた場合、同一腐食レベルで比較すると、ひび割れ幅が著しく小さくなった。これは、RCはりを海水中に没した状態で電食を施したため、腐食生成物が鉄筋周囲に蓄積せず海水中に溶出し、結果的に腐食による膨張圧が減少したためと考えられる。これ

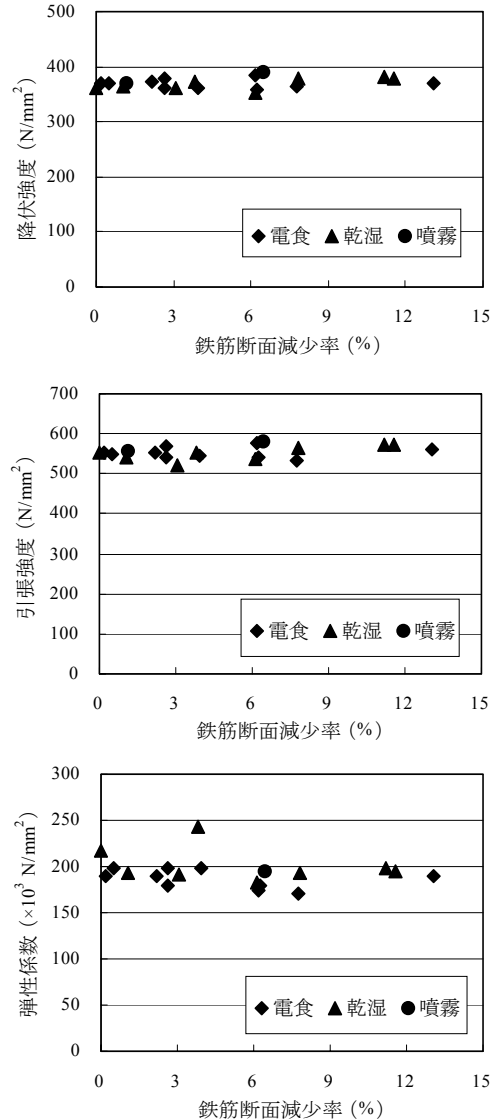


図-3 腐食した鉄筋の力学的性質

より、電食作用を受けたRCはりでは、他の場合と比較して、鉄筋とコンクリートの付着劣化の程度が相対的に低いことが推測される。

また参考までに、Qiらによる提案式<sup>4)</sup>に基づく鉄筋断面減少率とひび割れ幅の関係を同図中にプロットした。この提案式はひび割れ拘束筋がない場合に対するものであるため、本実験結果よりもひび割れ幅が著しく大きくなった。したがって、鉄筋断面減少率とひび割れ幅の関係を検討する際には、ひび割れ開口に対する拘束筋の影響を適切に考慮しなければならない。

### 3.4 腐食した鉄筋の力学的性質の評価

腐食した鉄筋の引張試験により、その力学的性質と鉄筋断面減少率の関係を調べた結果を図

— 3に示す。降伏強度，引張強度および弾性係数の算出にあたっては，腐食による断面減少分を考慮した実断面積を用いた。この図によれば，腐食による断面減少を考慮した鉄筋断面積を用いて評価すれば，鉄筋の力学的性質にほとんど変化がないことがわかる。また，このことは促進劣化の方法によらず同様に認められた。

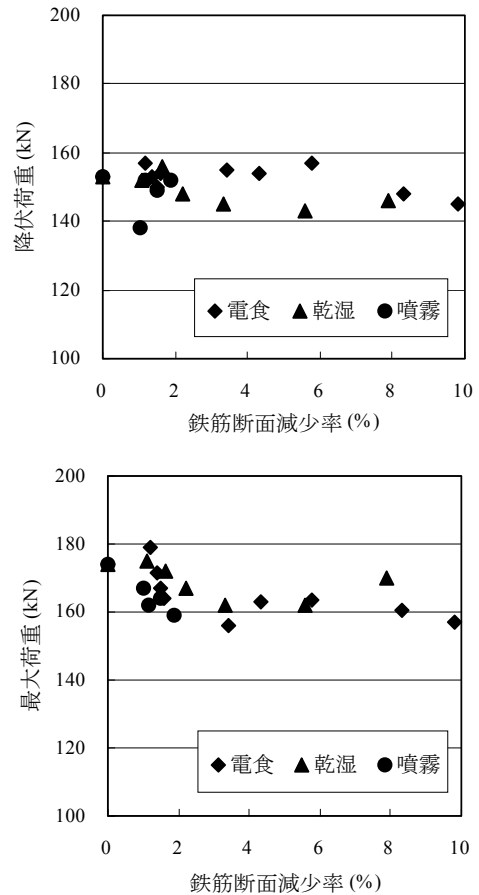
既往の報告<sup>2)</sup>によれば，孔食による応力集中などの影響により，腐食による断面減少分以上に力学的性質が低下するとされており，本実験結果とは異なっている。これは，鉄筋径の違いによるものと考えられる。すなわち，孔食による応力集中の影響は鉄筋径が小さいほど顕著であり，既往の報告は主にD6やD10の実験結果に基づいているため，その影響が大きかった。一方，本研究ではD16を対象としたため，既往の報告ほどは孔食の影響が大きくなかった。以上より，腐食による鉄筋の力学的性質の低下を検討する際には，鉄筋径の影響を十分に考慮する必要があることがわかった。なお本研究ではこれ以降，腐食した鉄筋の力学的性質の変化は，断面減少分のみとして解析・検討を行った。

### 3.5 RC はりの耐荷性能

促進劣化したRCはりの鉄筋降伏荷重および最大荷重と表— 3に示した曲げスパン内における平均的な鉄筋断面減少率の関係を図— 4に示す。このように，促進劣化の方法によらず，曲げスパン内の引張鉄筋の平均的な断面減少率を用いることで，鉄筋腐食とRCはりの耐荷性能の関係を整理できることがわかる。なお，試験体の破壊モードはすべて曲げ引張破壊であった。

図— 4によれば，鉄筋腐食が進行しても耐荷性能が著しく低下することはなかったが，鉄筋降伏荷重および最大荷重とも若干の低下傾向がみられた。事前荷重による初期ひび割れの存在は，前述のように鉄筋の腐食性状にあまり反映されなかったため，耐荷性能にもほとんど影響を及ぼさなかった。よって，これ以降は，両者を区別することなく検討を行うこととした。

本研究では鉄筋腐食による耐荷性能変化のみ



図— 4 RC はり試験体の荷重試験結果

に着目するため，表— 1に示したコンクリート物性の変化による耐荷性能の変化分は，はりの曲げ理論に基づいて補正した。このような補正を行った劣化したRCはりの鉄筋降伏荷重および最大荷重を健全試験体の値で基準化した結果を図— 5に示す。図中には，実際の海洋環境下（酒田港）に23年間暴露したRCはりの実験結果<sup>1)</sup>もあわせて示してある。この結果は，促進劣化を受けたRCはりの実験データと同様な範囲にプロットされた。

さらに図— 5には，腐食により鉄筋断面積が減少したことを考慮して，はりの曲げ理論に基づいて鉄筋降伏荷重および最大荷重を解析した結果も示した。これより，鉄筋降伏荷重の実験値は解析結果とほぼ一致しており，鉄筋の断面減少を考慮することではりの鉄筋降伏荷重が解析可能であることがわかった。また，促進劣化の方法の違いは，鉄筋降伏荷重にあまり影響しなかった。

一方、最大荷重についてみると、ほとんどの実験値が解析値を下回った。これは、鉄筋が腐食したことで、鉄筋とコンクリートの付着劣化が生じたためと考えられる。すなわち、鉄筋腐食によりコンクリートとの付着性能が低下すれば、鉄筋応力の分布が一様に近づく<sup>5)</sup>。その結果、コンクリートに応力が有効に伝達しなくなり、コンクリートのテンションスティフニング効果が失われる。そのため、はりの曲げ変形が局所的に進行し、コンクリートの圧縮負担が大きくなり、最大荷重が増加しなかったものと考えられる。したがって、鉄筋が腐食したRCはりの最大荷重を評価するためには、鉄筋の断面減少だけでなく、鉄筋とコンクリートの付着劣化も考慮しなければならない。

促進劣化の方法による違いに着目すると、電食を受けたはりよりも、乾湿繰返しおよび海水噴霧を受けたはりの方が最大荷重の低下が顕著であった。これは、3.3でも述べたように、乾湿繰返しおよび海水噴霧を受けた方が、電食を受けた場合と比較して、鉄筋とコンクリートの付着劣化が顕著であったことに起因するものと考えられる。このことから、鉄筋腐食が生じたRCはりの最大荷重を検討する際には、どのような条件下で鉄筋が腐食したのかを十分に把握しておく必要があることがわかる。

#### 4. まとめ

鉄筋腐食を生じたRCはりの耐荷性能に及ぼす鉄筋腐食の影響を調べた。その結果、鉄筋腐食を曲げスパン内の引張鉄筋の平均的な断面減少率で評価することで、鉄筋降伏荷重および最大荷重との関係を整理できた。また、促進劣化の方法により鉄筋とコンクリートの付着劣化状況が異なり、結果的に最大荷重の低下傾向に差違が生じた。今後は、鉄筋とコンクリートの付着劣化の影響を適切な形で解析に取り込むことで、鉄筋腐食を生じたRC部材の構造性能を的確に評価できる手法を構築していきたい。

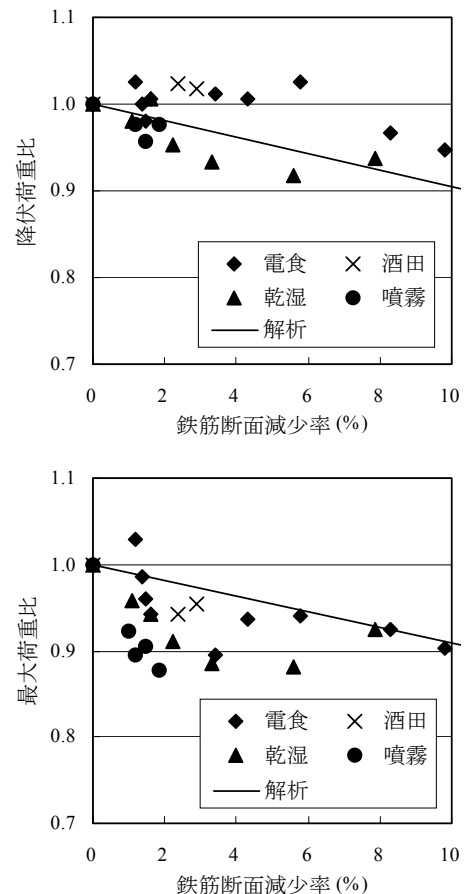


図-5 RC はりの耐荷性能に及ぼす鉄筋腐食の影響

#### 参考文献

- 1) 横田弘ほか：海洋環境（酒田港20年）に暴露したコンクリート梁の材料劣化が梁の力学性能に及ぼす影響，港湾技術研究所報告，Vol.38, No.2, pp.169-222, 1999
- 2) 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
- 3) 運輸省港湾技術研究所編著：港湾構造物の維持・補修マニュアル，沿岸開発技術研究センター，pp.95-97, 1999
- 4) Qi, L., 関博：離散ひび割れモデルに基づく鉄筋腐食によるひび割れ幅に関する解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.2, pp.1033-1038, 1999
- 5) 青山敏幸ほか：塩害により鉄筋が腐食したRC部材の曲げ性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.2, pp.883-888, 1998