

港湾空港技術研究所 資料

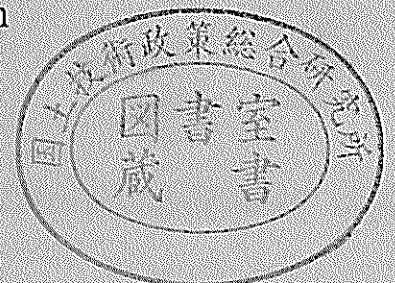
TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1079 June 2004

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

加藤 絵万
岩波 光保
横田 弘
中村 晃史
伊藤 始

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 実験概要	4
2.1 試験体概要	4
2.2 電食試験	4
2.3 正負交番載荷試験	4
2.4 鉄筋腐食の評価方法	4
3. 鉄筋の腐食状況	6
4. 鉄筋腐食がRCはりの耐荷性に及ぼす影響	6
5. 鉄筋腐食がRCはりの変形性に及ぼす影響	8
5.1 RCはりの破壊性状と荷重-変位関係	8
5.2 エネルギー吸収性能	9
5.3 鉄筋腐食がRCはりのじん性に及ぼす影響	9
6 結 論	11
参考文献	12
付 録	13

Influence of Rebar Corrosion on Structural Performance of RC Beams Subject to Reversed Cyclic Loading

Ema KATO*
Mitsuyasu IWANAMI**
Hiroshi YOKOTA***
Koji NAKAMURA****
Hajime ITO*****

Synopsis

The influence of rebar corrosion on the structural performance of RC beams has been experimentally studied by performing reversed cyclic loading tests. The corrosion of rebar was artificially generated by electrolytic techniques before load application, at which electric current was controlled by its period to obtain the targeted degree of corrosion. The experimental results were analyzed focusing on the load carrying capacity, ductility, and failure process of the RC beams.

Since the concrete cover to stirrups is generally smaller than that to main rebars, stirrups are exposed to severer corrosion environment. However, most of the past studies in this field focused on the corrosion of main rebars and/or of both main bars and stirrups simultaneously. Taking this condition into consideration, the effects of corrosion of main rebars and stirrups were distinguished on the structural performance of the RC beams.

Key Words: rebar corrosion, reinforced concrete beam, reversed cyclic loading, load carrying capacity, ductility

* Researcher of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Senior Researcher of Geotechnical and Structural Engineering Department

*** Head of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

**** Trainee of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 E-mail : katoh-c@pari.go.jp

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

加藤 絵万 *
岩波 光保 **
横田 弘 ***
中村 晃史 ****
伊藤 始 ****

要 旨

海洋環境下に構築される鉄筋コンクリート(RC)構造物において最も重大かつ重要な劣化原因は、コンクリート中の鉄筋腐食である。コンクリート中の鉄筋において腐食が開始すると、腐食生成物の膨張によりコンクリートにひび割れが生じ、やがてかぶりコンクリートの剥落や鉄筋の破断にまで至る。このような材料劣化の進行に応じて、構造物の耐荷性、変形性といった構造性能は低下する。しかし、鉄筋腐食程度と構造性能の低下の関係については未だ定量的な評価はなされておらず、目視観察結果に基づいた定性的かつ主観的な情報により、構造性能が間接的に判断されているのが現状である。

本研究では、構造性能の低下をより精緻に評価する手法を確立するための研究の一環として、鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の力学性能に関する基礎的知見を得るため、電食により腐食程度を変化させた RC はりの正負交番載荷試験を行った。その結果、鉄筋腐食によるはりの耐荷性の低下は、主筋の腐食による断面減少、および腐食に起因する鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下が影響することが分かった。また、鉄筋腐食による変形性の低下は、特に、せん断補強筋の腐食による断面減少が影響することが分かった。さらに、既往のじん性率評価式の鉄筋腐食が生じた RC はりへの適用性について考察を加えた。

キーワード：鉄筋腐食、鉄筋コンクリート部材、正負交番載荷、耐荷性、じん性

* 地盤・構造部構造強度研究室研究官

** 地盤・構造部主任研究官

*** 地盤・構造部構造強度研究室長

**** 地盤・構造部構造強度研究室依頼研修員

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 E-mail：katoh-e@pari.go.jp

1. まえがき

今、国民の高齢化と並んで、社会基盤施設の高齢化が問題となっている。特に、鉄筋コンクリート（RC）構造物は、トンネル内や高架橋下のコンクリート剥落事故が各地で発生するなど、予想を超える速さで老朽化が顕在化しつつある。RC構造物をより長く安全に使用するためには維持管理が欠かせないものであることは、技術者の共通認識となっており、既設構造物の保有性能の診断・評価、性能の将来予測、また、それらに基づいた補修・補強といった維持管理プロセスが適切に遂行されることが強く求められている¹⁾。

海洋環境下に建設されるRC構造物において、重大かつ重要な劣化原因は、塩化物イオンの侵入により引き起こされるコンクリート中の鉄筋腐食である。コンクリート中の鉄筋が腐食すると、腐食生成物の膨張によりコンクリートにひび割れが生じ、やがてかぶりコンクリートの剥落にまで至る。そして、これらはさらに鉄筋腐食を促進させることとなる。このような材料劣化の進行に応じて、構造物の耐荷性、変形性といった構造性能は低下する²⁾。しかし、鉄筋腐食程度と構造性能の低下の関係については未だ定量的な評価がなされておらず、目視観察結果に基づいた定性的かつ主観的な情報により、構造性能が間接的に判断されているのが現状である³⁾。

著者らはこれまで、塩害により劣化したRC構造物の保有性能評価および将来予測手法の確立を最終目標として、種々の検討を行っている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。本研究では、特に、鉄筋腐食によるRC部材の構造性能低下をより定量的かつ高精度に評価する手法を構築することを目的として実施した。鉄筋腐食が生じたRCはりの正負交番載荷試験結果について報告する。主筋およびせん断補強筋の腐食程度を電食により変化させたRCはりの正負交番載荷を実施し、鉄筋腐食が耐荷性および変形性に及ぼす影響について検討を行った。また、せん断補強筋は、主筋と比較して一般にかぶりが小さいため、より激しい腐食が生じることが考えられる。そこで、主筋またはせん断補強筋のどちらか一方の鉄筋が腐食したRCはりもあわせて製作し、それぞれの鉄筋腐食がRCはりの耐荷性および変形性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1にRCはり試験体の概要を示す。RCはりの寸法は250mm×250mm×3300mmであり、主筋にはD19を、せん

断補強筋にはD10を用いた。また、主筋またはせん断補強筋のそれぞれの腐食が、RCはりの耐荷性およびじん性に及ぼす影響を把握するために、どちらか一方にエポキシ塗装鉄筋を用いたRCはりも製作した。さらに、同様の目的で、主筋またはせん断補強筋のどちらか一方にステンレス鉄筋を用いたRCはりもあわせて製作した。

RCはり試験体は2種類あり、それぞれ、上下主筋のかぶりおよびせん断補強筋の定着方法が異なるが、今後の議論では特に両者を区別しないこととする。また、試験体製作時期により、配合およびコンクリート強度が若干異なる。表-1に全試験体の概要、表-2にコンクリートの配合、表-3に載荷試験時のコンクリートの物性値、表-4に鉄筋の物性値を示す。

2.2 電食試験

図-2にRCはりの電食試験の概要を示す。海水中に浸せきしたRCはり内部の鉄筋に直流電流を印加し、鉄筋の腐食程度を調整するため、はり毎に電食期間を変化させた。電流密度は鉄筋表面積に対して8.5A/m²である。主筋にエポキシ塗装鉄筋、またはステンレス鉄筋を用いたRCはりにおいては、せん断スパンにある10本のせん断補強筋を繋いだリード線を外部に露出させ、これを用いて電流を印加した。それ以外のRCはりについては、端部に露出させた4本の主筋に電流を印加した。

2.3 正負交番載荷試験

RCはりの正負交番載荷試験は、支点間距離を2000mm、せん断スパンを750mmとした2点支持2点載荷で行った。主筋の初降伏時のはりスパン中央の鉛直変位 δ_y を基本とし、鉛直変位がこの整数倍に達した後に除荷する正負交番載荷を各3回ずつ繰り返し、最大荷重が初降伏荷重を下回ったことを確認して載荷を終了した。なお、本研究ではRCはりに電食を施すことを考慮し、鉄筋にひずみゲージを貼り付けていない。したがって、初期載荷において、スパン中央の鉛直変位が急激に増加した点を初降伏点とした。載荷中は、支点、載荷点およびスパン中央の鉛直変位、および載荷荷重を計測した。

2.4 鉄筋腐食の評価方法

載荷試験終了後、電食による鉄筋の腐食状態を定量的に把握するために、等モーメント区間の主筋およびせん断スパン内のせん断補強筋をはつり出し、それぞれの質量減少量を測定した。まず、1次処理として、鉄筋にサンドブラスト処理を施し、付着した腐食生成物およびコンクリートを取り除いた。2次処理として、10%クエン酸水

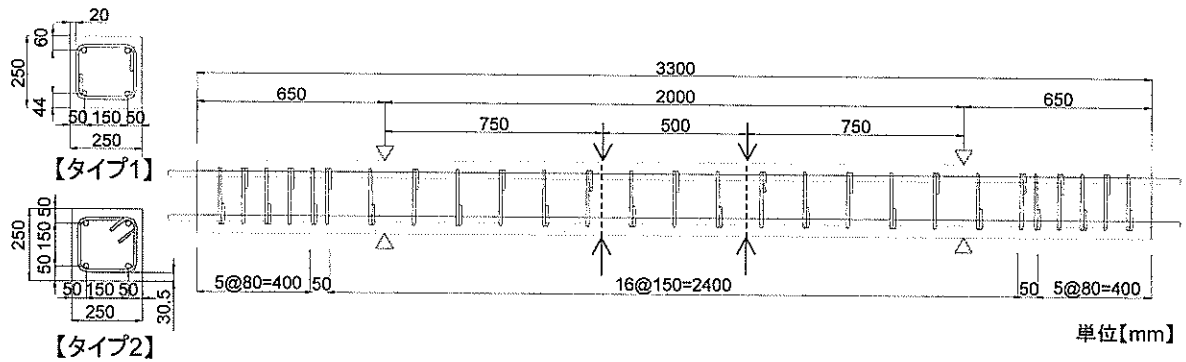


図-1 試験体概要

表-1 試験体概要

No.	配筋 (図-1)	配合 (表-2)	使用鉄筋 主筋/せん断 補強筋 (表-4)	電 食	正負 交番 載荷
N-01	1	1	A / a	-	○
N-02	1	1	A / a	-	○
N-03	2	2	B / b	-	○
N-1	2	2	B / b	○	○
N-2	1	1	A / a	○	○
N-3	1	1	A / a	○	○
N-4	1	1	A / a	○	○
N-5	1	1	A / a	○	○
EM-0	2	2	B / b	-	○
EM-1	1	1	A / a	○	○
EM-2	2	2	B / b	○	○
EM-3	2	3	C / c	○	○
ES-0	2	2	B / b	-	○
ES-1	1	1	A / a	○	○
ES-2	2	2	B / b	○	単調載荷
SM-0	2	2	D / b	-	○
SM-1	2	2	D / b	○	○
SS-0	2	2	E / d	-	○
SS-1	2	2	E / d	○	○

表-4 鉄筋の物性値

鋼材 No.	鋼材 種類	ふし 形状	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)
A	SD345	ネジ	362	418	1.9×10 ⁵
B	SD345	ネジ	401	474	-
C	SD345	異形	387	573	1.8×10 ⁵
D	SUS304	異形	323	636	2.0×10 ⁵
E	SD345	異形	385	596	1.9×10 ⁵
a	SD345	異形	401	474	-
b	SD345	異形	403	598	-
c	SD345	異形	379	550	-
d	SUS304	異形	434	625	-

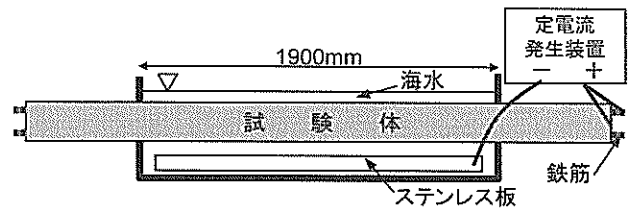


図-2 電食試験

表-2 コンクリートの配合

配合	G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	SP
1	20	57	43	160	284	790	1080	0.57
2	20	57	43	160	284	790	1080	0.57
3	20	58	47	168	290	635	976	3.77

C:普通ポルトランドセメント, S:砂, G:砕石, SP:AE減水剤

表-3 コンクリートの物性値

配合	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
1	36.5	2.6×10 ⁴
2	35.9	2.5×10 ⁴
3	33.7	-

素二アンモニウム水溶液に鉄筋を浸せきし、腐食生成物を完全に除去した。その後、主筋4本については、100mm毎に質量の減少量を測定し、この区間での鉄筋断面積の平均減少率を算定した。さらに、これらを平均することにより、上下主筋それぞれの等モーメント区間での平均断面減少率を求めた。せん断補強筋については、試験体両側面における折曲げ部を除いた直線部分約100mmについて質量減少量を測定し、平均断面減少率を求めた。このとき、腐食による破断が生じた鉄筋については、その区間の断面減少率を100%として取り扱った。

電食を施さなかった7体のRCはり試験体中の鉄筋、およびEMシリーズとESシリーズで使用したエポキシ塗装

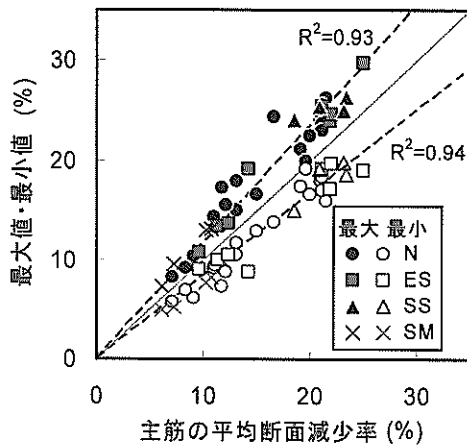


図-3 主筋の平均断面減少率と断面減少率の最大値および最小値の関係

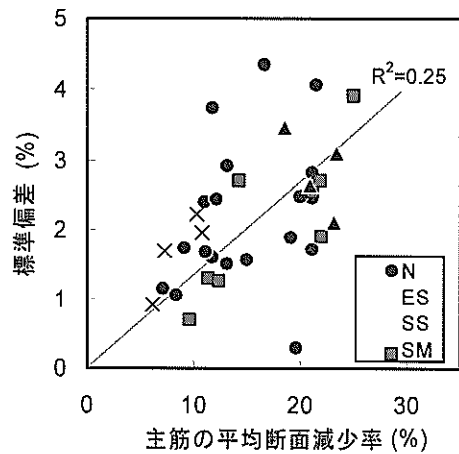


図-4 主筋の平均断面減少率と標準偏差の関係

鉄筋を観察した結果、腐食の発生はほとんど認められなかったため、これらについては断面減少率を0.0%とした。また、EMおよびESシリーズと同様の目的で製作したSMおよびSSシリーズについては、主筋、せん断補強筋ともに激しい腐食が生じたため、Nシリーズと同様に取り扱うこととした。

全RCはり試験体の主筋およびせん断補強筋の断面減少率の分布状況は付録Aに示した通りである。

3. 鉄筋の腐食状況

付録Bに、はり試験体の電食試験終了後の腐食ひび割れ発生状況を破線で示す。RCはり試験体N、ES、SS、SMシリーズの両側面には、主筋に沿った腐食ひび割れが確認された。ひび割れは、電食が施された区間のほぼ全域に発生していた。主筋にエポキシ塗装鉄筋を用いたEMシリーズでは、他のはりと比較して、せん断補強筋に沿ったひび割れの発生が顕著であった。

図-3に全試験体の主筋各4本の平均断面減少率と、断面減少率の最大値および最小値の関係を示す。これより、平均断面減少率が大きいほど、断面減少率の最大値および最小値は大きくなるのが分かる。平均断面減少率と断面減少率の最大値および最小値の関係は、それぞれ原点を通る直線で表すことができ、相関係数はどちらも1に近い値を示した。

図-4に主筋の平均断面減少率と標準偏差の関係を示す。これより、一部例外はあるものの、平均断面減少率が大きくなるほど標準偏差が大きくなる傾向が見られた。また、既往の研究⁷⁾と同様、両者の間には、大略的な比例関係が認められた。

ここで述べた鉄筋の断面減少率は、RCはり試験体の等モーメント区間500mm内の100mm毎の断面減少率を測定した結果であり、局所的な腐食を取り扱ったものではない。既往の報告²⁾によれば、腐食の著しい鉄筋コンクリート部材の耐荷・変形能力は、鉄筋の平均的な断面減少ではなく、局所的な断面減少に支配される場合がある。したがって、腐食程度の不均一性を適切に考慮することが必要となるが、本研究では簡便のため、主筋は等モーメント区間内の平均断面減少率、せん断補強筋は腐食による破断が生じた場合の断面減少率を100%として取り扱ったせん断スパン内の見かけの平均断面減少率を用いて議論を進める。

本実験では、コンクリート中の鉄筋に強制的に電流を印加して腐食を発生させたため、自然環境下におけるコンクリート中の鉄筋腐食とは性状が異なることが考えられる⁸⁾。また、自然環境下においては、ひび割れやコールドジョイント等のコンクリートの局所的欠陥が鉄筋腐食の不均一性を誘発することが考えられる⁹⁾。したがって、本研究でみられた傾向と実構造物における傾向は、今後、検証されなければならない。

4. 鉄筋腐食がRCはりの耐荷性に及ぼす影響

図-5および図-6に、主筋の平均断面減少率とRCはり試験体の降伏荷重比、および最大荷重比の関係を示す。降伏荷重比は、RCはり試験体N-02の初降伏荷重で各試験体の初降伏荷重を、最大荷重比は、N-02の最大荷重で各試験体の最大荷重を、それぞれ除したものである。表-1に示したように、本研究では、各RCはり試験体で、有効高さ、コンクリートおよび鉄筋の物性値が異なる。

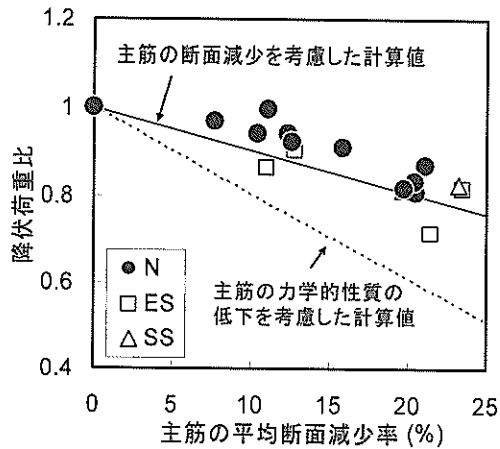


図-5 主筋の平均断面減少率と降伏荷重比の関係

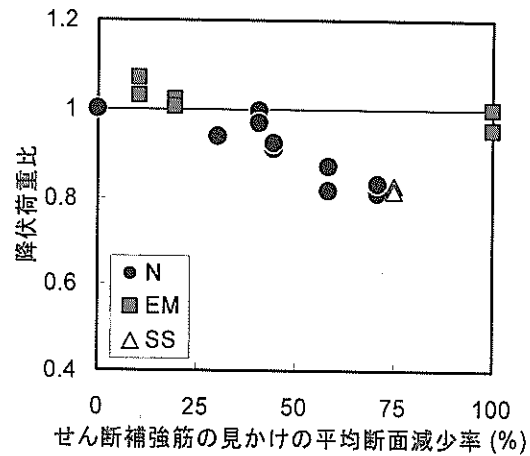


図-7 せん断補強筋の見かけの平均断面減少率と降伏荷重比の関係

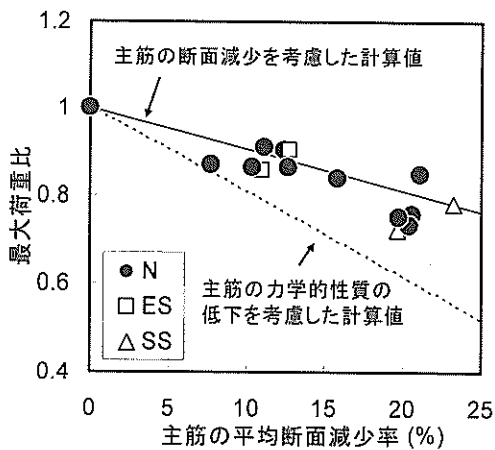


図-6 主筋の平均断面減少率と最大荷重比の関係

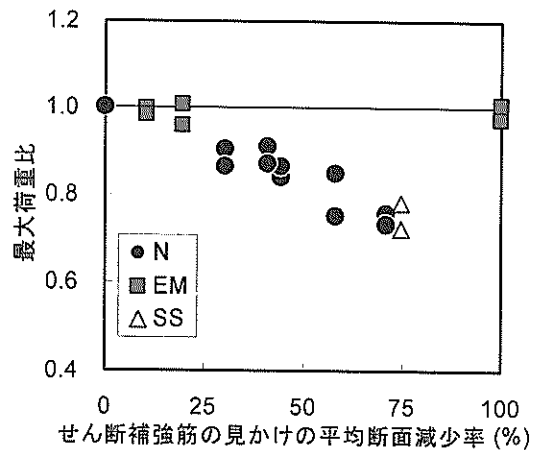


図-8 せん断補強筋の見かけの平均断面減少率と最大荷重比の関係

したがって、正規化にあたっては、これらを考慮して補正した降伏荷重および最大荷重を用いた。また、SMシリーズについては、主筋として用いたステンレス鉄筋の物理的性質が普通鉄筋と異なることから、考察から省くこととする。

図-5および図-6より、主筋の腐食による断面減少が大きいほど、降伏荷重比および最大荷重比は低下する傾向を示した。同図中に、鉄筋断面積の減少を考慮し、はりの曲げ理論に基づいて計算した降伏荷重比、および最大荷重比を実線を示す。また、既往の報告²⁾では、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鉄筋の力学的性質が低下すると報告されている。そこで、鉄筋の断面減少によりもたらされる鉄筋の力学的性質の低下を計算し²⁾、これをもとに計算された降伏荷重比および最大荷重比を破線で示した。

図-5より、降伏荷重比については、主筋の平均断面減

少率のみを考慮することで、鉄筋腐食の影響を評価することが可能であることが分かる。これは、本実験で用いた主筋が、D19と比較的太径であったために、局部的腐食の影響が顕著に表れなかったことに起因すると考えられる⁴⁾。

一方、図-6に示した最大荷重比では、実験値は主筋の力学的性質の低下を考慮した計算値を上回ったが、降伏荷重比の場合と比較して、平均断面減少率のみを考慮した計算値を下回るものが多かった。これは、鉄筋腐食による鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下により、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たために、RCはりの曲げ変形が局部的に進行したことが理由として考えられる⁴⁾。また、これより、RCはりの最大荷重は、降伏荷重と比較して、鉄筋の局所的な腐食に支配され易いことが考えられる。したがって、最大荷重の評価には、主筋の断面減少だけでなく、主筋とコンクリ

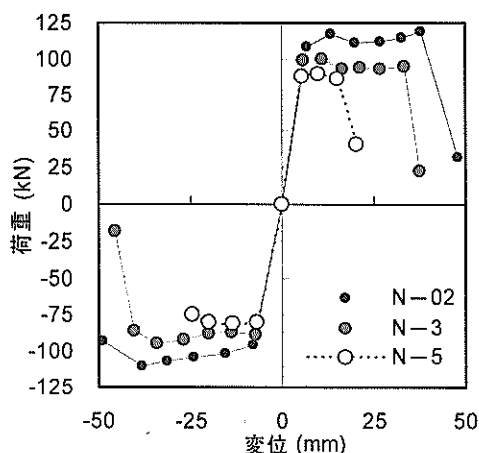


図-9 荷重-変位関係の包絡線
(主筋・せん断補強筋ともに腐食)

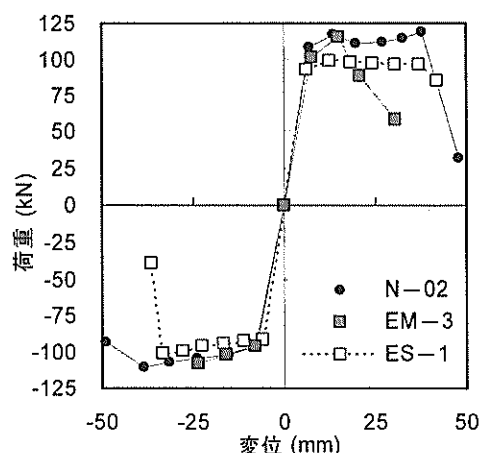


図-10 荷重-変位関係の包絡線
(主筋またはせん断補強筋の一方が腐食)

ートの付着劣化を考慮することが必要であるといえる。また、図-5および図-6中にあわせて示したESおよびSSシリーズの結果より、RCはりの耐荷性は、せん断補強筋の種類に依らず、主筋の腐食を考慮すれば評価可能であることが分かった。

図-7および図-8に、せん断補強筋の見かけの平均断面減少率とRCはり試験体の降伏荷重比、および最大荷重比の関係を示す。同図中に、主筋にエポキシ塗装鉄筋を使用し、せん断補強筋のみ腐食させた試験体EMシリーズの降伏荷重比および最大荷重比をあわせて示した。EMシリーズでは降伏荷重、最大荷重ともに低下は見られず、特に、せん断補強筋が全て腐食により破断していたEM-3においても、耐荷性は全く腐食が生じていない試験体N-02と同程度であった。これより、従来の理論通り、曲げ破壊するRCはりの耐荷性にはせん断補強筋の腐食はあまり関与しないことが確かめられた。

5. 鉄筋腐食がRCはりの変形性に及ぼす影響

5.1 RCはり試験体の破壊性状と荷重-変位関係

(1) 破壊性状

正負交番荷重 $3\delta_d$ 終了時のひび割れ発生状況を付録Bに示す。いずれのRCはり試験体も、主筋の降伏後にせん断スパンに斜めひび割れが発生し、コンクリートが塊状に剥落して破壊に至った。特に、主筋およびせん断補強筋の断面減少率が最大である試験体N-5およびSS-1、また、せん断補強筋の断面減少率が最大である試験体EM-3においては、 $3\delta_d$ までの繰返し荷重途中でかぶりコンクリートの剥落が顕著となり、その後、荷重が急激に低下して荷重を終了した。

電食を施したRCはり試験体においては、荷重により発生したひび割れが、主筋に沿った腐食ひび割れによって方向が変化する、あるいは、せん断補強筋に沿ったひび割れに見かけ上吸収されるといった現象が見られた。また、電食終了時点では観察されなかった腐食ひび割れが、繰返し荷重により表面に現れる現象も見られた。

(2) 荷重-変位関係

付録Cに、RCはり試験体の正負交番繰返し荷重における荷重-変位関係を示す。電食を施さなかったRCはり試験体N-01~03、EM-0、ES-0、SM-0、SS-0においては、特に、荷重が最大で安定した範囲が広く、変位を大きくしても、引き続き最大荷重に近い耐荷力を発揮した。一方、試験体N-5、SS-1およびEM-3では、荷重の安定範囲が小さく、他と比較して小変位域で破壊に至った。

図-9に正負交番荷重試験より得られた試験体N-02、N-3およびN-5の荷重-変位関係の包絡線を示す。これより、主筋およびせん断補強筋ともに断面減少率が大きいほど、荷重および終局変位の低下が顕著に見られた。なお、本研究では、終局変位は降伏荷重を下回らない荷重での最大の変位とする。荷重の低下は、4.で述べた主筋の腐食が影響したことが考えられる。また、終局変位の低下の理由として、鉄筋とコンクリートの一体性が鉄筋腐食に起因する付着劣化により失われ、両者間で発生応力が有効に伝達されなかったこと、また、せん断補強筋の腐食とコンクリート内部への腐食ひび割れ進展によるコアコンクリートの有効断面積の減少により、拘束効果が失われたことが考えられる¹⁰⁾。

ここで、Nシリーズにおいては、主筋の断面減少率が大きいほど、せん断補強筋の断面減少率も大きくなった

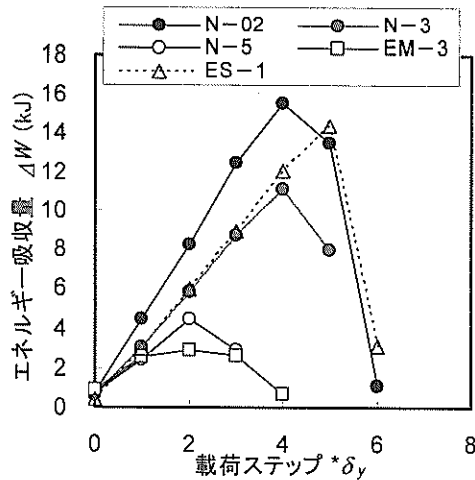


図-11 エネルギー吸収量と荷重ステップの関係

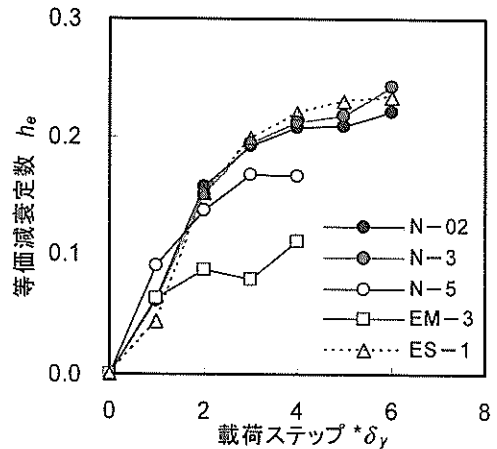


図-12 等価減衰定数と荷重ステップの関係

ため(付録A参照),それぞれの鉄筋腐食がRCはりの荷重-変位関係に及ぼす影響を区別することができない。そこで,主筋またはせん断補強筋にエポキシ塗装鉄筋を用い,せん断補強筋のみを腐食させた試験体EM-3,および主筋のみを腐食させた試験体ES-1の荷重-変位関係の包絡線を,試験体N-02とあわせて図-10に示す。

主筋のみを腐食させた試験体EP-Sでは,試験体N-02と比較して,耐荷力の低下が認められた。せん断補強筋のみを腐食させた試験体EM-3では,N-02と比較して耐荷力の低下は見られなかったが,終局変位は小さくなった。

以上の実験結果より,主筋の腐食は主として耐荷性に,せん断補強筋の腐食は,特に,変形性に影響することが考えられた。

5.2 エネルギー吸収性能

図-11に代表的な5試験体のエネルギー吸収量¹¹⁾の荷重ステップ毎の推移を示す。エネルギー吸収量は,腐食が生じていない試験体N-02で最も大きく,主筋およびせん断補強筋が著しく腐食していた試験体N-5,およびせん断補強筋のみ著しく腐食していた試験体EM-3においては,2 δ_y 以降,吸収量が低下した。また,主筋・せん断補強筋ともに試験体N-5の半分程度の腐食量である試験体N-3,および主筋のみ腐食している試験体ES-1は,4 δ_y まで同様のエネルギー吸収量を示し,いずれも試験体N-02と試験体N-5の中間に位置する結果となった。ここで,図-12に等価減衰定数の荷重ステップ毎の推移を示す。等価減衰定数 h_e は,動的荷重を受ける構造系が有する粘性減衰の大きさを示すものであり,式(1)で定義される。

$$h_e = \Delta W / W \cdot 1/2\pi \quad (1)$$

ここに, ΔW :エネルギー吸収量, W :試験体に加えられたエネルギー量である。

図-12より,試験体N-02,N-3,ES-1では,終局状態まで等価減衰定数が大幅に減少することなく,安定したエネルギー吸収性能を有していたことが分かる。特に,試験体ES-1では,主筋の断面減少が12%程度であったにもかかわらず,4 δ_y 以降の等価減衰定数は試験体N-02を上回る結果となった。しかし,試験体N-05,およびせん断補強筋のみ著しく腐食していた試験体EM-3において,等価減衰定数は大幅に減少した。試験体N-05におけるせん断補強筋の平均断面減少率は71.0%と他と比較して大きかったこと,また,主筋のみ腐食させた試験体ES-1とせん断補強筋のみ腐食させた試験体EM-3の比較から,特に,せん断補強筋の腐食はエネルギー吸収性能に影響を及ぼすという結果が得られた。

5.3 鉄筋腐食がRCはりのじん性に及ぼす影響

本実験では,表-1に示したように,各RCはり試験体で,有効高さ,コンクリートおよび鉄筋の物性値が異なる。したがって,以下の式(2)により求めたじん性率比 μ'/μ_0 を用いて,鉄筋腐食がじん性に及ぼす影響について議論する。

$$\begin{aligned} \mu'/\mu_0 &= \alpha_X \mu_X / \mu_{N-02} \\ &= \alpha_X (\delta_{uX} / \delta_{yX}) / (\delta_{u_{N-02}} / \delta_{y_{N-02}}) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに, μ_X :試験体Xのじん性率, μ_{N-02} :試験体N-02のじん性率, δ_u :終局変位(降伏荷重を下回らない荷重

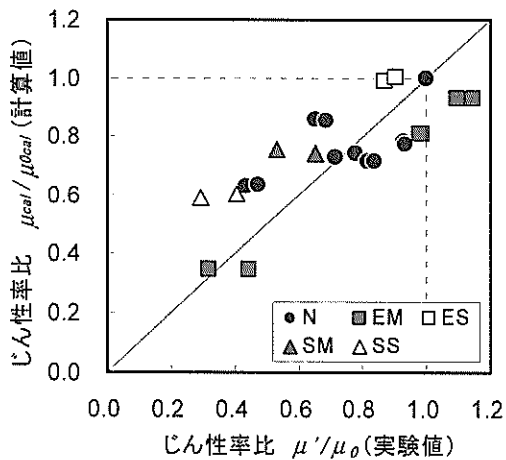


図-13 じん性率比の実験値と計算値の比較

での最大の変位), δ_y : 降伏変位, α_x : 試験体Xが腐食していない場合, じん性率 μ_x が試験体N-02のじん性率 μ_{N-02} と等しくなるよう定めた補正係数である。

図-13に, 各RCはり試験体のじん性率比と, じん性率比の計算値の関係を示す。計算値は, 主筋およびせん断補強筋の平均断面減少率を考慮し, 式(3)に示す曲げ降伏後にせん断破壊する部材のじん性率算定式¹²⁾から求めたじん性率を, 主筋およびせん断補強筋の平均断面減少率0.0%時のじん性率計算値にて正規化した値である。

$$\begin{aligned} \mu_{cal} &= (V_c + V_s - V_{my}) / (0.18V_c) + 3 & (3) \\ V_c &= 0.2(100p_w f'_c)^{1/3} (1000/d)^{1/4} (0.75 + 1.4(a/d)) b_w d \\ p_w &= A_w / (b_w d) \\ V_s &= A_w f_{wy} z / s_s \\ V_{my} &= P_{my} / 2 = M_y / a \end{aligned}$$

ここに, μ_{cal} : じん性率計算値, V_c : コンクリート負担せん断耐力¹³⁾, V_s : トラス理論(45度)を仮定したせん断補強筋負担せん断耐力¹⁴⁾, V_{my} : 降伏荷重時のせん断耐力, A_w : 区間 s_s におけるせん断補強筋の総断面積(mm²), b_w : 腹部幅(mm), d : 有効高さ(mm), f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²), f_{wy} : せん断補強筋の降伏強度(N/mm²), z : 圧縮応力と引張応力の合力の距離(mm), s_s : せん断補強筋の配置間隔(mm), M_y : 降伏時の曲げモーメント¹⁵⁾, a : せん断スパン長(mm)である。

図-13より, 式(3)は実験値を概ね評価することができた。しかし, 試験体N-2, N-5, SM-1およびSS-1において, 計算値は実験値より2割程度大きくなり, 危険側の評価となった。

主筋およびせん断補強筋, それぞれの腐食がじん性に

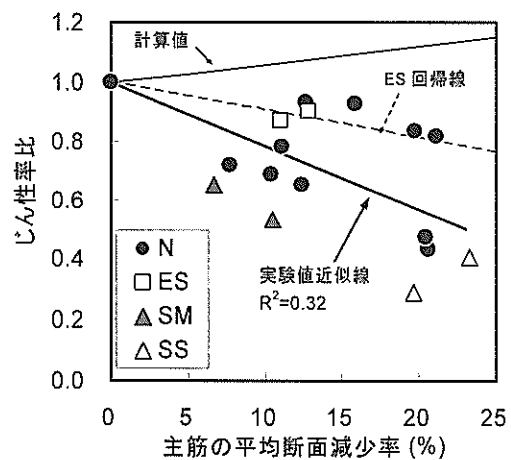


図-14 主筋の平均断面減少率とじん性率比の関係

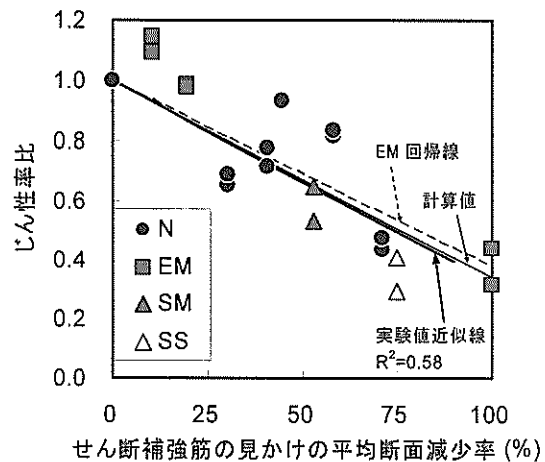


図-15 せん断補強筋の平均断面減少率とじん性率比の関係

及ぼす影響を明らかにするため, 主筋の平均断面減少率とじん性率比の関係を図-14に, せん断補強筋の平均断面減少率とじん性率比の関係を図-15に示す。図中の太線は, 平均断面減少率とじん性率比の実験値を直線近似した結果であり, 破線は, 図-14では, 切片を1.0として, 主筋のみ腐食した試験体ESシリーズのじん性率比と主筋の平均断面減少率の関係を直線近似したもの, 図-15では, 切片を1.0として, せん断補強筋のみ腐食した試験体EMシリーズのじん性率比とせん断補強筋の平均断面減少率の関係を直線近似したものである。また, 太線は, 図-14では, せん断補強筋の断面減少率を0.0%として式(3)により計算されたじん性率比, 図-15では, 主筋の断面減少率を0.0%として計算されたじん性率比を示す。

図-14より, 主筋の平均断面減少率が大きいほどじん

性率比は小さくなった。しかし、実験値はばらつきが大きく、じん性率比と主筋の平均断面減少率の相関は比較的小さい。また、式(3)では、主筋の断面減少率が小さいほど、降伏荷重時のせん断耐力 V_{my} が小さくなるため、じん性率比の計算値は、主筋の断面減少率が大きいほど大きくなる。このため、計算値は試験体ESシリーズの回帰線を評価できなかつた。以上のことから、鉄筋が腐食したRCはりのじん性は、4.で述べた耐荷力と異なり、主筋の腐食の考慮のみでは評価できないといえる。

一方、図-15より、鉄筋腐食によるじん性率比の減少は、主筋の平均断面減少率と比較して、せん断補強筋の平均断面減少率の方が精度良く評価できることが分かる。また、式(3)により計算されたじん性率比は、せん断補強筋のみ腐食させたEMシリーズのじん性率比を、精度良く評価することができ、実験値の近似線とほぼ同程度の値となった。檜貝ら¹⁶⁾は、せん断スパン比 a/d 、主鉄筋比およびせん断補強筋比を変化させた試験体の繰返し載荷実験より、曲げ降伏後にせん断破壊するRC部材においては、せん断補強筋比が小さいほど、せん断破壊時のじん性が減少する傾向があると述べている。EMシリーズの結果から、せん断補強筋のみが腐食した試験体においては、せん断補強筋比が小さくなった場合と同様の効果が働き、じん性率比が低下したことが考えられる。また、せん断補強筋の平均断面減少率のみを考慮したじん性率比の計算値が良好な結果を示したことから、せん断補強筋の鉄筋腐食の影響としては、腐食による断面減少が卓越し、せん断補強筋とコンクリート間の付着劣化など式(3)中に考慮されていない現象の影響は小さいことが考えられる。

以上のことから、本研究の範囲では、鉄筋腐食したRCはりのじん性率は以下の式(4)で評価できた。

$$\begin{aligned} \mu_{cal(corr)} &= (V_{c(corr)} + V_{s(corr)} - V_{my}) / (0.18 V_{c(corr)}) + 3 & (4) \\ V_{c(corr)} &= 0.2(100 p_{w(corr)} f'_c)^{1/3} (1000/d)^{1/4} 0.75 + 1.4/(a/d) b_w d \\ p_{w(corr)} &= A_w (1 - w_{corr}) / (b_w d) \\ V_{s(corr)} &= A_w (1 - w_{corr}) f_{wy} z / s_s \\ V_{my} &= P_{my} / 2 = M_y / a \end{aligned}$$

ここに、 $\mu_{cal(corr)}$: 鉄筋腐食したRCはりのじん性率、 w_{corr} : せん断スパン内のせん断補強筋の平均断面減少率(%), f_{wy} : 腐食が生じていない場合のせん断補強筋の降伏強度(N/mm²), M_y : 主筋が腐食していない場合の降伏曲げモーメントである。

ここで、図-13で危険側の評価となった試験体N-2, N-5, SM-1およびSS-1のじん性率比は、図-15にお

いてもせん断補強筋の断面減少のみ考慮した計算値を下回る結果となった。付録Aに示した鉄筋腐食状況によれば、主筋およびせん断補強筋ともに断面減少率が大きい試験体N-5および試験体SS-1では、電食によりせん断補強筋が破断した箇所が、全せん断補強筋の半数を占めた。一方、試験体N-2では、電食によりせん断補強筋が破断した箇所は一箇所であった。試験体SM-1においては、せん断補強筋の腐食による破断が一側面でのみ生じたため、試験体N-2と同様、局所的なせん断補強筋の損傷による影響が働いたことが考えられる。以上のことから、せん断補強筋が著しく損傷している場合、あるいは、局所的にせん断補強筋が損傷している場合、式(4)を用いた評価精度は低くなることが予測される。

今後、鉄筋腐食が生じたRC部材のじん性率を評価するにあたり、主筋およびせん断補強筋の平均断面減少率の式(4)に示した提案式に対する適用範囲を示す必要がある。また、4.で述べたように、主筋の腐食は耐荷性に多大な影響を及ぼす。今後、ますます増加することが予測される劣化した構造物の耐震性能を精度良く評価し、供用限界を定量的に示すためには、主筋の腐食による断面減少や付着劣化などの影響も考慮したじん性評価式の構築が必要と考える。

6. 結 論

本研究では、電食により腐食程度を変化させたRCはり試験体の正負交番載荷試験を行い、主筋およびせん断補強筋の腐食が、はりの耐荷性および変形性に及ぼす影響について検討した。本研究で得られた成果を以下に示す。

- 1) 主筋の腐食はRCはりの耐荷性を低下させることが確認された。はりの降伏荷重は主筋の平均断面減少のみで評価が可能であったが、最大荷重は断面減少に加えて鉄筋とコンクリートの付着劣化を考慮する必要がある。また、せん断補強筋の腐食は耐荷性に影響を及ぼさなかつた。
- 2) 鉄筋腐食はRCはりのエネルギー吸収性能を低下させた。主筋のみ腐食が生じたRCはり試験体と、せん断補強筋のみ腐食が生じたRCはり試験体の比較から、はりのエネルギー吸収性能には、特に、せん断補強筋の腐食が影響を及ぼすことが分かつた。
- 3) 鉄筋腐食はRCはりのじん性を低下させた。主筋のみ腐食が生じたRCはり試験体と、せん断補強筋のみ腐食が生じたRCはり試験体の比較から、はりのじん性には、特に、せん断補強筋の腐食による断面減少が影響を及ぼすことが分かつた。

- 4) 鉄筋腐食が生じたRCはりのじん性は、既往式を用いて概ね評価することができた。しかし、鉄筋腐食が生じたRC部材の耐震性能を精度良く予測するためには、既往式の適用範囲を示すこと、また、主筋の腐食による影響も考慮した評価式の構築が必要である。

(2004年2月10日受付)

謝辞

本研究を実施するにあたりご協力頂いた前依頼研修員佐藤文則氏(前田建設工業(株)),実務訓練生 佃有射氏,佐伯奈都美氏(長岡技術科学大学)に、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 [維持管理編]，2001年，182p.
- 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年，pp.1-110.
- 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，1999年，pp.95-97.
- 4) 岩波光保，横田弘，佐藤文則：鉄筋腐食がRCはりの耐荷性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，2002年，pp.1501-1506.
- 5) 佐藤文則，岩波光保，横田弘：鉄筋腐食が鉄筋コンクリート接合部の構造性能に及ぼす影響に関する研究，土木学会論文集，No.732/V-59，2003年，pp.63-76.
- 6) 加藤絵万，岩波光保，横田弘，伊藤始，佐藤文則：鉄筋とコンクリート間の付着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.1044，2003年，17 p.
- 7) 岡崎雅弘，下村匠，松尾洋：鉄筋軸方向の非一様性に着目したコンクリート中の鉄筋腐食と腐食ひび割れ幅に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，2003年，pp.857-862.
- 8) Yokota, H., Iwanami, M. and Sato, F.: Quantitative Evaluation of Structural Performance of Reinforced Concrete Beams Damaged by Rebar Corrosion, Proceedings of 6th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, ACI-SP-212-35, Thessaloniki, Greece, 2003, pp.555-570.
- 9) 塚原絵万，加藤佳孝，魚本健人：ひび割れを有するコンクリート中の塩化物イオン移動評価手法の提案，土木学会論文集，No.732/V-59，2003年，pp.109-120.
- 10) 李翰承，金仁秀，野口貴文，友澤史紀：横補強筋の腐食がコンクリートのコンファインド効果に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，1998年，pp.365-370.
- 11) 岩波光保，横田弘，鳥居和之，鈴木義晃，奥山和俊：アルカリ骨材反応により損傷したコンクリート部材の力学挙動と補修方法に関する提案，港湾空港技術研究所資料，No.994，2001年，60p.
- 12) 土木学会：コンクリート構造物の耐震性能照査技術－現状と将来展望－，コンクリート技術シリーズ48，2002年，pp.3-11.
- 13) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村甫：せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，1986年，pp.167-186.
- 14) 田辺忠顕，檜貝勇，梅原秀哲，二羽淳一郎：コンクリート構造，朝倉書店，1996年，pp.111-122.
- 15) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002年，pp.60-63.
- 16) 檜貝勇，二羽淳一郎，岡村雄樹：曲げ降伏後にせん断破壊するRC部材の破壊メカニズムに関する考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.2，1987年，pp.329-334.

付録A 主筋およびせん断補強筋の断面減少率データ

電食により鉄筋を腐食させたRCはり試験体の主筋およびせん断補強筋の断面減少率の分布状況を以下に示す。

表-A.1 主筋・せん断補強筋ともに SD345 を用いた RC はり試験体の鉄筋の断面減少率

(単位: %)

試験体No.		N-01	N-02	N-03	N-1		N-2		N-3		N-4		N-5		
主筋	正側 平均	0.0	0.0	0.0	11.1		12.4		15.8		21.1		20.6		
	最大 最小	—	—	—	14.5	9.2	18.0	9.2	24.4	13.0	24.8	17.1	23.1	16.7	
	負側 平均	0.0	0.0	0.0	7.7		10.4		12.6		19.8		20.4		
	最大 最小	—	—	—	9.2	5.8	17.4	6.2	15.1	8.8	26.3	16.1	25.6	19.2	
せん断補強筋 平均		0.0	0.0	0.0	40.9		30.5		44.5		58.3		71.0		
せん断補強筋の位置	スパン中央からの距離 (mm)	650	0.0	0.0	0.0	14.0	24.2	19.0	17.5	35.1	34.1	37.6	28.2	59.7	38.2
		500	0.0	0.0	0.0	27.2	43.0	26.5	34.3	35.6	33.0	38.7	39.7	21.3	39.0
		350	0.0	0.0	0.0	100.0	40.5	100.0	26.8	100.0	30.0	100.0	35.7	100.0	50.7
		200	0.0	0.0	0.0	32.1	100.0	27.2	28.0	37.3	40.8	38.6	49.9	100.0	48.2
		50	0.0	0.0	0.0	34.4	33.1	31.6	24.7	39.0	42.6	100.0	52.5	100.0	39.9
		50	0.0	0.0	0.0	40.1	29.1	29.5	31.4	34.9	42.4	100.0	46.7	41.4	100.0
		200	0.0	0.0	0.0	21.0	29.2	38.2	29.1	100.0	33.3	42.5	100.0	100.0	100.0
		350	0.0	0.0	0.0	27.7	40.6	28.2	12.9	36.5	56.8	40.0	100.0	55.3	100.0
		500	0.0	0.0	0.0	100.0	35.2	27.5	32.0	43.4	38.4	100.0	54.5	100.0	100.0
		650	0.0	0.0	0.0	23.4	23.3	21.1	23.8	33.8	43.8	32.9	29.0	26.2	100.0

表-A.2 一方にエポキシ塗装鉄筋, あるいはステンレス鉄筋を用いたRCはり試験体の鉄筋の断面減少率

(単位: %)

試験体No.		EM-0	EM-1	EM-2	EM-3	ES-0	ES-1	ES-2	SM-0	SM-1	SS-0	SS-1					
主筋	正側 平均	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0		23.5		0.0	23.3					
	最大 最小	—	—	—	—	—	13.7	9.1	29.9	19.1	—	26.5	18.7				
	負側 平均	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.8		21.5		0.0	19.7					
	最大 最小	—	—	—	—	—	19.2	10.0	25.5	17.3	—	25.5	15.1				
せん断補強筋 平均		0.0	10.5	19.5	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	52.9	0.0	74.9					
せん断補強筋の位置	スパン中央からの距離 (mm)	650	0.0	8.2	6.7	10.7	17.5	100.0	100.0	0.0	0.0	29.8	27.6	0.0	32.4	25.2	
		500	0.0	9.9	12.2	23.9	19.5	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	46.2	100.0	0.0	42.0	100.0
		350	0.0	10.7	11.1	20.9	23.0	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	40.0	100.0	0.0	100.0	100.0
		200	0.0	10.3	10.7	22.1	18.9	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	45.0	100.0	0.0	100.0	100.0
		50	0.0	12.4	12.1	18.8	20.7	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	28.4	35.3	0.0	100.0	100.0
		50	0.0	9.9	13.6	17.8	23.0	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	35.7	41.2	0.0	44.7	100.0
		200	0.0	11.4	11.2	23.0	21.4	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	39.4	37.9	0.0	100.0	45.2
		350	0.0	9.7	14.0	20.9	16.8	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	47.1	100.0	0.0	100.0	57.4
		500	0.0	10.5	9.9	17.6	22.0	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	45.5	100.0	0.0	100.0	100.0
		650	0.0	8.1	6.7	18.4	12.2	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	30.8	27.0	0.0	32.4	18.7

付録B 載荷前後の試験体のひび割れ発生状況

電食により鉄筋腐食を促進させたRCはり試験体の腐食ひび割れ発生状況（載荷前），および正負交番載荷 $3\delta_y$ 終了時のひび割れ発生状況を以下に示す。

- 腐食ひび割れ
- 載荷により生じたひび割れ
- △ 支点
- ↑ 載荷点
- //// 剥落

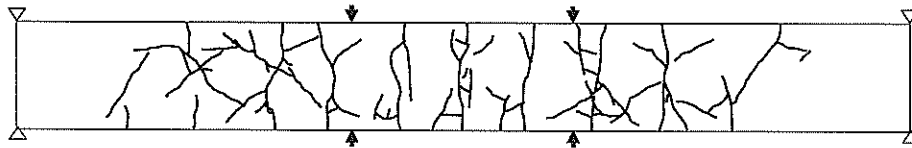


図-B.1 N-02

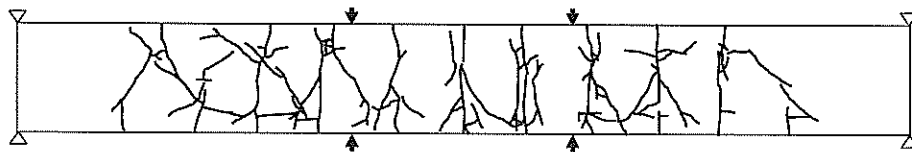


図-B.2 N-03

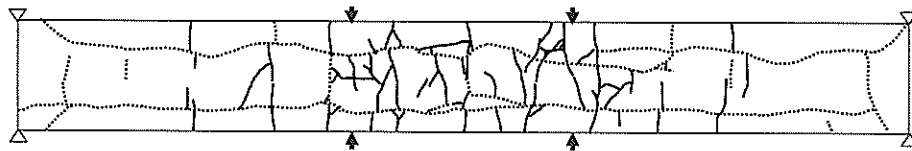


図-B.3 N-1

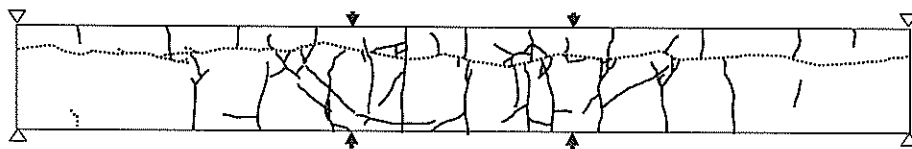


図-B.4 N-2

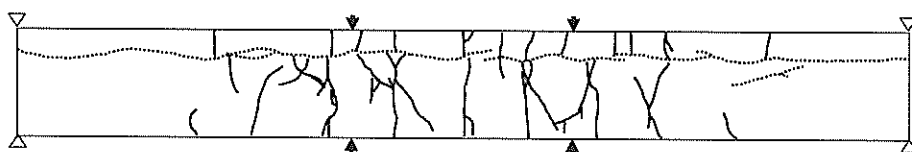


図-B.5 N-3

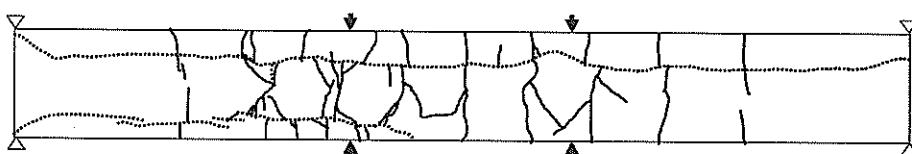


図-B.6 N-4

- 腐食ひび割れ
- 荷重により生じたひび割れ
- △ 支点
- ↑ 荷重点
- /// 剥落

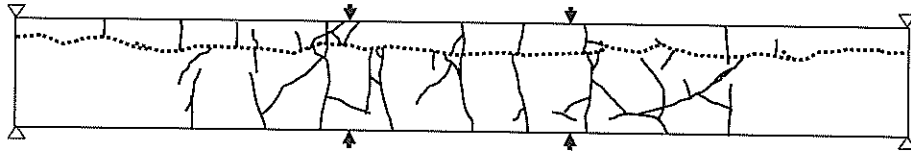


図-B.7 N-5

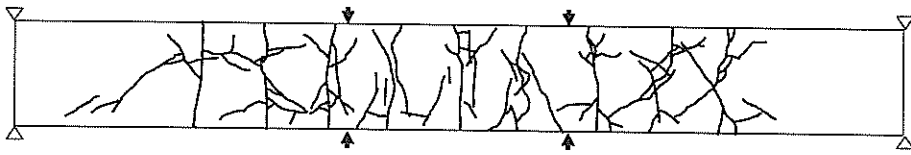


図-B.8 EM-0

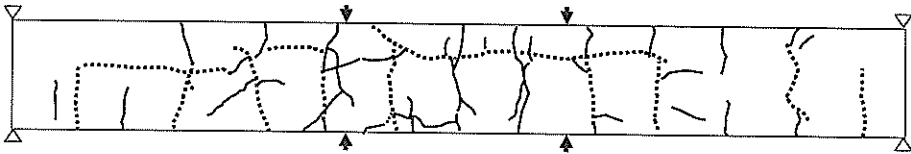


図-B.9 EM-1

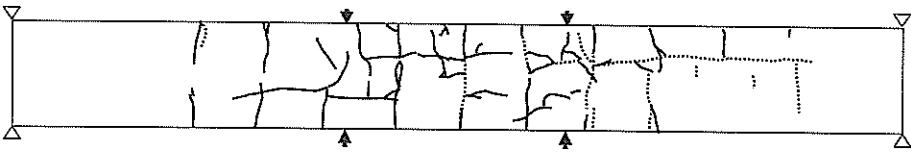


図-B.10 EM-2

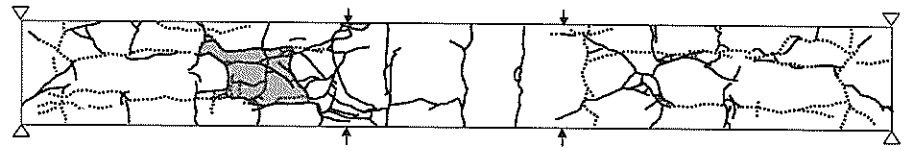


図-B.11 EM-3

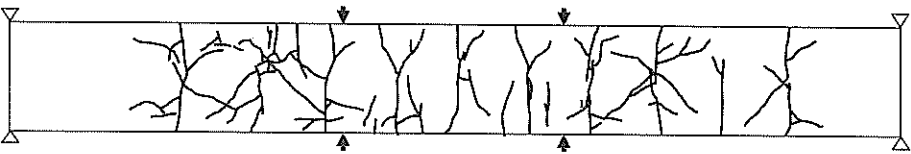


図-B.12 ES-0

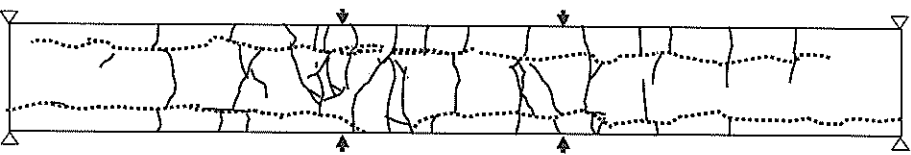


図-B.13 ES-1

- 腐食ひび割れ
- 載荷により生じたひび割れ
- △ 支点
- ↑ 載荷点
- /// 剥落

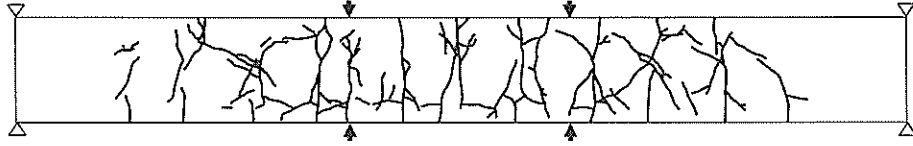


図-B.14 SM-0

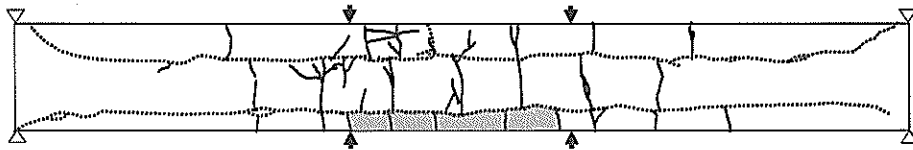


図-B.15 SM-1

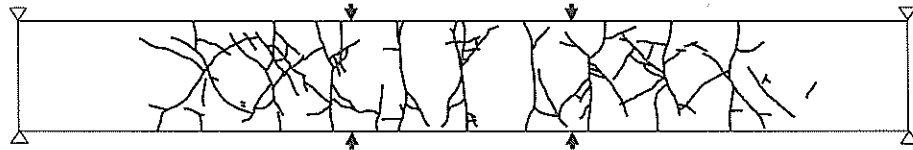


図-B.16 SS-0

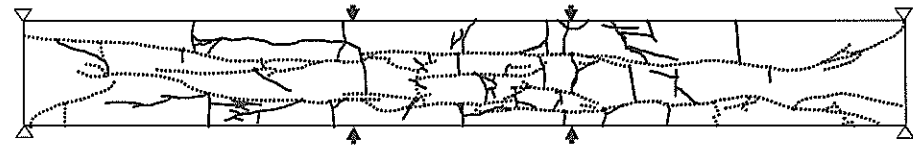
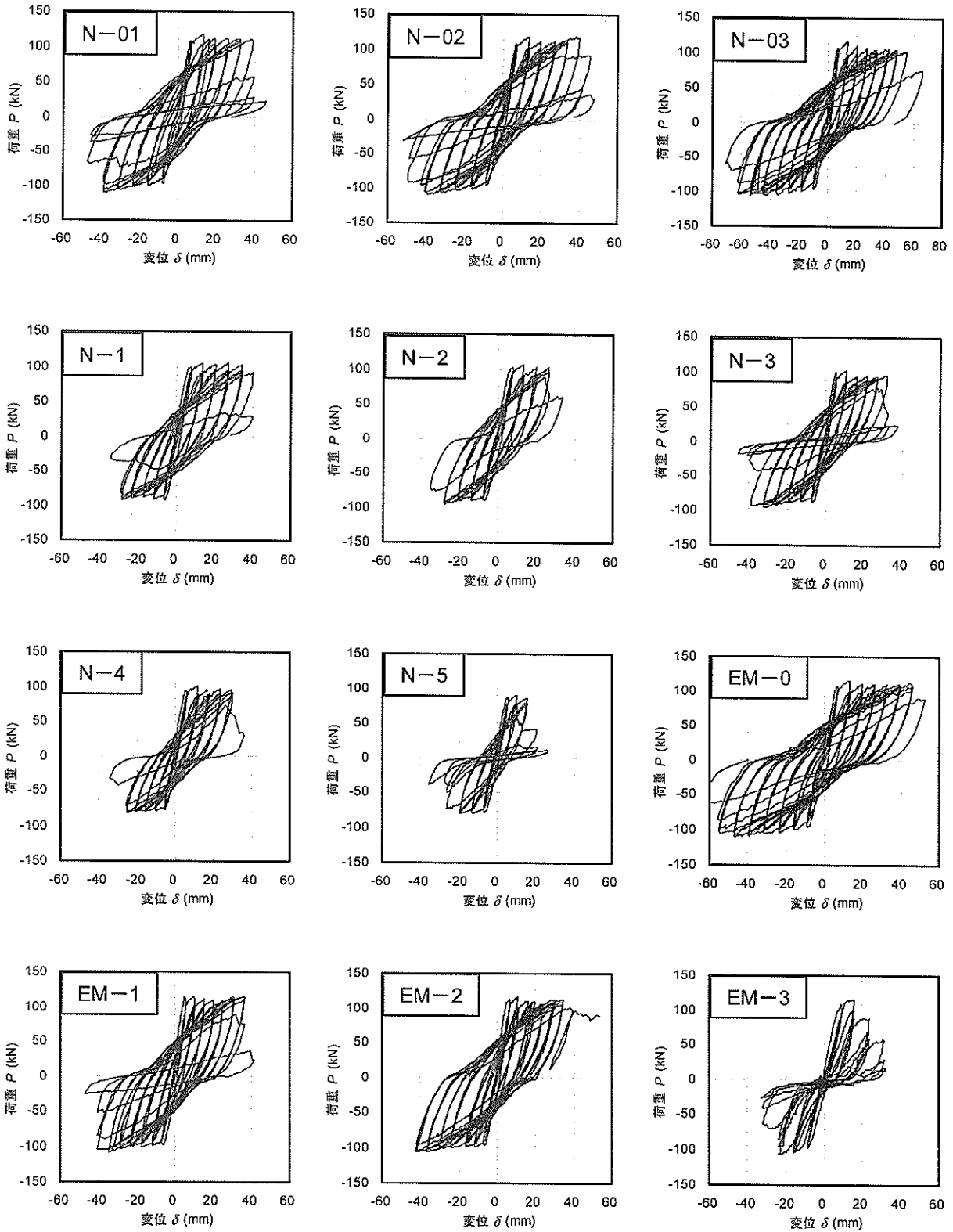
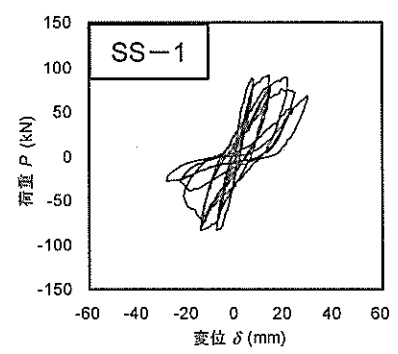
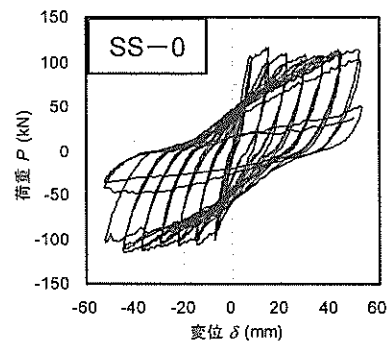
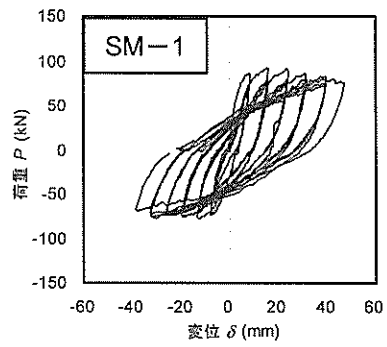
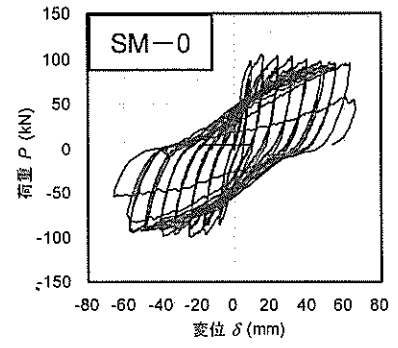
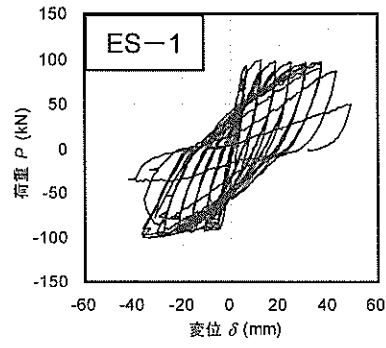
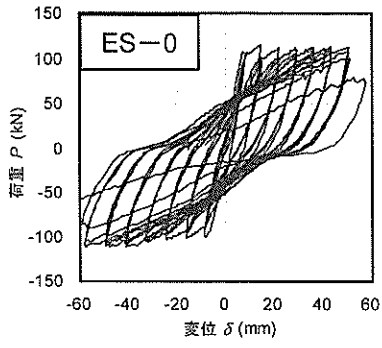


図-B.17 SS-1

付録C 各試験体の荷重－変位関係

RCはり試験体の正負交番繰返し載荷における荷重－変位関係を以下に示す。





港湾空港技術研究所資料 No.1079

2004.6

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 株式会社 シ ー ケ ン

Copyright © (2004) 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。