

論文 繰返し荷重を受ける RC はりの曲げ耐力に及ぼす鉄筋腐食の影響

加藤 絵万^{*1}・岩波 光保^{*2}・伊藤 始^{*3}・横田 弘^{*4}

要旨：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、腐食によるはりの耐荷性およびじん性の低下は、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、せん断補強筋の腐食と繰返し載荷によるコアコンクリートの拘束効果の低下が原因であることが考えられた。また、主筋およびせん断補強筋の腐食が力学性能に及ぼす影響について検討し、それぞれの鉄筋腐食が RC はりのじん性に及ぼす影響とその機構について考察した。

キーワード：鉄筋腐食，正負交番載荷，耐荷性，じん性

1. はじめに

海洋環境下に建造される鉄筋コンクリート (RC) 構造物において、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。このような材料劣化の進行に応じて、構造物の耐荷性、じん性といった構造性能は低下する¹⁾。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²⁾。

本研究は、鉄筋腐食による構造性能の低下をより定量的かつ高精度に評価する手法を確立するための研究の一環として、電食により主筋およびせん断補強筋の腐食程度を変化させた RC はりの正負交番載荷試験を実施し、鉄筋腐食が耐荷性およびじん性に及ぼす影響について実験的検討を行った。

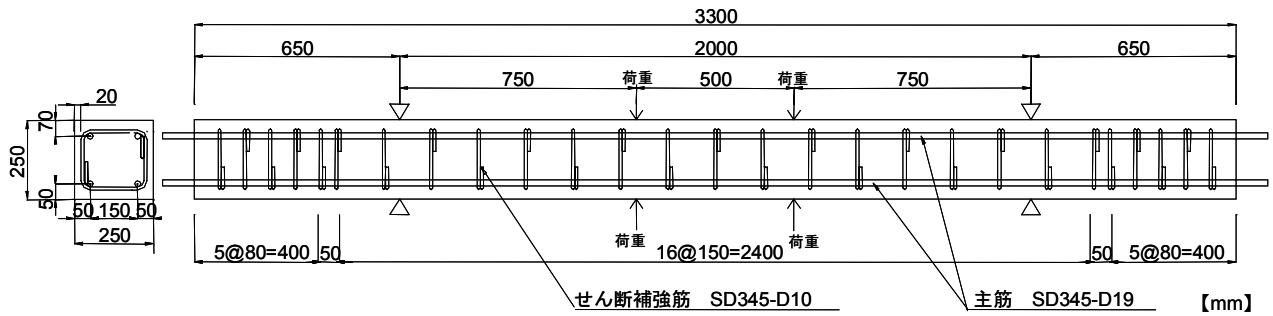
また、せん断補強筋は、主筋と比較して一般にかぶりが小さいため、より激しい腐食が生じることが考えられる。そこで、主筋、せん断補強筋のそれぞれにエポキシ塗装鉄筋を用いた RC はりも作製し、それぞれの鉄筋腐食が RC はりの耐荷性およびじん性に及ぼす影響についてあわせて検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1 に試験体とした RC はりの概要を示す。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。主筋のかぶりは上主筋で 60mm，下主筋で 44mm である。また、主筋またはせん断補強筋のそれぞれの腐食が、RC はりの曲げ耐力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 はりもあわせて製作した。表-1 にコンクリートの配合、表-2 に載荷試験時のコンクリートの物性値、表-3 に鉄筋の物性値を示す。

*1	独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造強度研究室	博 (工)	(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 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 (前田建設工業株式会社)	工修	(正会員)
*4	独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造強度研究室長	博 (工)	(正会員)



図－1 試験体概要

表－1 コンクリートの配合

G _{max}	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	SP
20	56.5	43.3	160	284	790	1080	0.57

C:普通ポルトランドセメント, S:川砂, G:碎石, SP:AE減水剤

表－2 コンクリートの物性値

圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
37.6	2.8×10^4

表－3 鉄筋の物性値

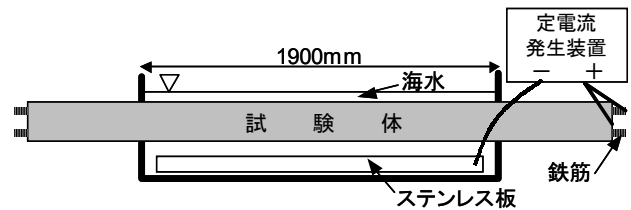
種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
D19	366	561	1.9×10^5
D10	401	535	—

2.2 電食方法

図－2 に RC はりの電食方法を示す。海水中に浸せきした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/m^2 である。主筋にエポキシ塗装鉄筋を用いた 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 正負交番载荷試験

RC はりの正負交番载荷試験は、支点間距離を 2000mm、せん断スパンを 750mm とした 2 点载荷により行った。スパン中央のたわみが、主筋の初降伏時のたわみ δ_y に対して、整数倍に達した後に除荷する正負交番载荷を各 3 回ずつ繰



図－2 電食方法

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、载荷を終了した。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、初期载荷において、たわみが急激に増加した点を初降伏点とした。

载荷途中で RC はりが破壊した場合については、その時点で試験を終了した。载荷中は、支点、载荷点およびスパン中央の鉛直変位、および载荷荷重を計測した。

2.4 鉄筋腐食の評価方法

载荷試験終了後、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、それぞれの腐食量を測定した。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

表－4 鉄筋の断面減少率

試験体No.		N－0		N－1		N－2		EP－M		EP－S	
		正側	負側	正側	負側	正側	負側	正側	負側	正側	負側
主筋	位置	0.0		13.0	8.8	16.7	19.2	0.0		9.1	10.0
	最小			24.4	15.7	23.1	25.6			13.7	19.2
	最大			16.1	12.9	20.8	20.0			10.9	13.7
せん断補強筋	位置	0.0		30.0	21.3	6.7	0.0		0.0		
	最小			100.0	100.0	14.0					
	最大			38.0	69.2	10.7					

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。

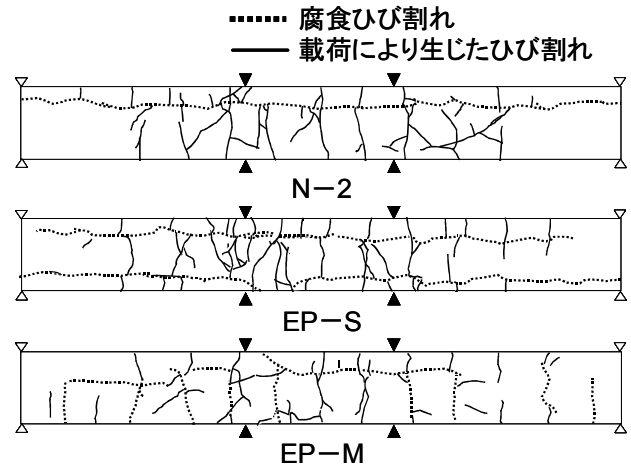
3. 実験結果および考察

3.1 電食試験による鉄筋腐食状況

電食試験終了後、RC はりの両側面に主筋に沿った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はりでは、図－3 に示すように、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。

表－4 に鉄筋の平均断面減少率を示す。表中の位置は、正側が図－1 における下主筋、負側が上主筋を示す。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。また、電食を施さなかった N－0 で使用した鉄筋、および EP－S、EP－M で使用したエポキシ塗装鉄筋を観察した結果、腐食の発生が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。

表－4 より、主筋およびせん断補強筋の断面減少率を比較すると、腐食性状が各 RC はりで様ではなかったことが分かる。既往の報告⁹⁾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、表－4 に示した平均断面減少率で荷重試験結果を整理した。断面減少率のばらつきに関する評価と、それが構造性能に及ぼす影響に

図－3 ひび割れ発生状況（ $3\delta_y$ 終了時）

については、今後の検討課題である。

3.2 繰返し荷重による RC はりの破壊性状

図－3 に $3\delta_y$ までの荷重終了時のひび割れ発生状況の一例を示す。いずれの RC はりも、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、断面減少率が最大である N－2 においては、 $3\delta_y$ 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終局に至った。

電食を施した RC はりにおいては、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。

図－4 に主筋の断面減少率とひび割れ分散性の関係を示す。縦軸は、N－0 試験体に生じた曲げひび割れ本数 n_{N-0} に対する、 $3\delta_y$ までの載

荷終了時において発生した各 RC はりの曲げひび割れ本数 n の比である。同図より、断面減少率が大きくなるほど、ひび割れ分散性が低下したことが分かる。これは、鉄筋腐食により RC 部材として期待される鉄筋とコンクリートの一体性が失われ、鉄筋とコンクリート間の付着力が低下したためと考えられる¹⁾。

3.3 鉄筋腐食が RC はりの耐荷性に及ぼす影響

図-5～7 に主筋の断面減少率と鉄筋初降伏荷重、降伏変位、最大荷重の関係を示す。各図の縦軸は N-0 の降伏荷重 $P_{y, N-0}$ で各はりの鉄筋降伏荷重 P_y を、N-0 の降伏変位 $\delta_{y, N-0}$ で各はりの降伏変位 δ_y を、また、N-0 の最大荷重 $P_{max, N-0}$ で各はりの最大荷重 P_{max} をそれぞれ正規化したものである。主筋の断面減少率が大きいほど、降伏荷重比、降伏変位比および最大荷重比は低下する傾向となった。さらに、図-5 および図-7 には、腐食による鉄筋断面積の減少を考慮して、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計算した結果を実線で示した。また、前出の報告¹⁾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鉄筋の力学的性質が低下するとされている。そこで、表-4 に示した最大断面減少率を用いるとともに、文献 1) と同様に鉄筋の力学的性質の低下を考慮して降伏荷重比および最大荷重比を算定し、破線で示した。

図-5 より、鉄筋降伏荷重については、平均断面減少率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、本研究では、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と考えられる³⁾。

一方、図-7 に示した最大荷重に関して、平均断面減少率のみを考慮した計算値は、図-5 と比較して評価精度が低くなった。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、はりの曲

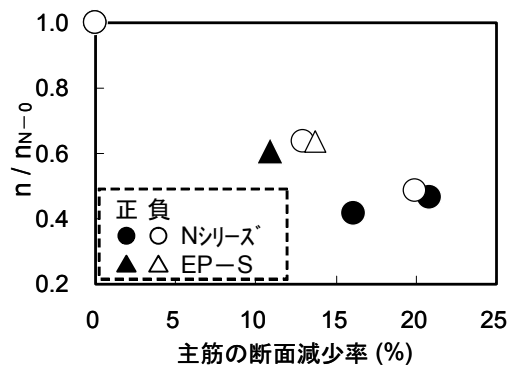


図-4 断面減少率とひび割れ分散性の関係

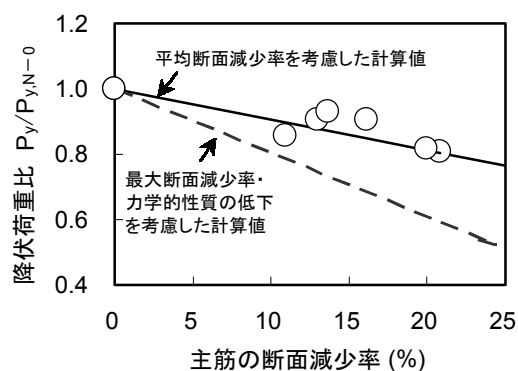


図-5 断面減少率と降伏荷重の関係

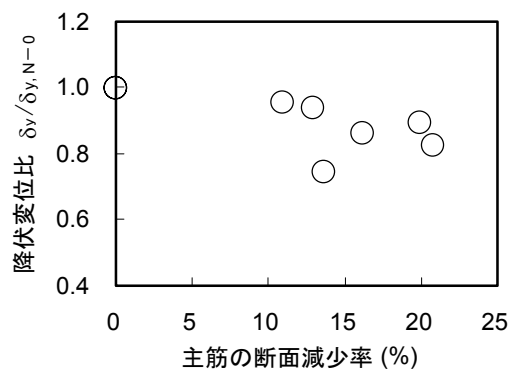


図-6 断面減少率と降伏変位の関係

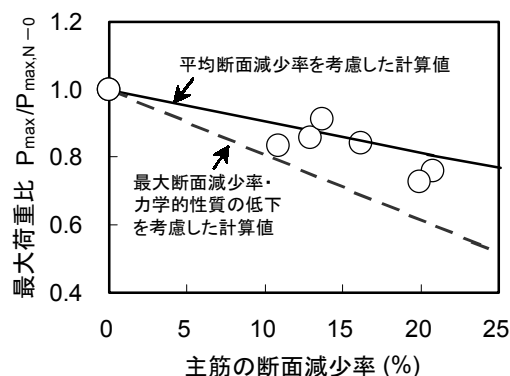


図-7 断面減少率と最大荷重の関係

げ変形が局所的に進行したことが理由として考えられる³⁾。また、これより、はりの終局荷重は、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。以上の検討より、終局耐力の評価には、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を考慮することが必要であることが確認された。

3.4 鉄筋腐食が RC はりのじん性に及ぼす影響

図-8 に正負交番載荷試験より得られた荷重－変位関係の包絡線を示す。同図より、主筋およびせん断補強筋ともに断面減少率の大きいほど、終局変位の低下が顕著に見られる。なお、本研究では、終局変位 δ_u は降伏荷重 P_y を下回らない荷重での最大の変位としている⁴⁾。終局変位の低下の理由は、鉄筋とコンクリートの一体性が付着力の低下により失われ、両者間で応力が有効に伝達されなかったためと考えられる。さらに、せん断補強筋の腐食と繰返し載荷により、コアコンクリートを拘束できなくなったために、N-0 と比較して、終局変位が低下したことが考えられる。

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ているため（表-4）、それぞれの鉄筋腐食が RC はりのじん性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た EP-S、および EP-M の荷重－変位関係の包絡線を、N-0 とあわせて図-9 に示す。

主筋のみが腐食した EP-S では、正載荷の場合、N-0 と比較して耐力の低下が認められた。しかし、負側主筋の断面減少率は正側主筋よりも大きいにもかかわらず、負載荷の耐力は N-0 とほぼ同等であった。本研究では、それぞれ一挙一落の結果であるため、この理由については、今後の追加実験により明らかにしたい。せん断補強筋のみが腐食した EP-M では、N-0 と比較して耐力の低下は見られなかったが、正・負載荷ともに終局変位は小さくなった。以

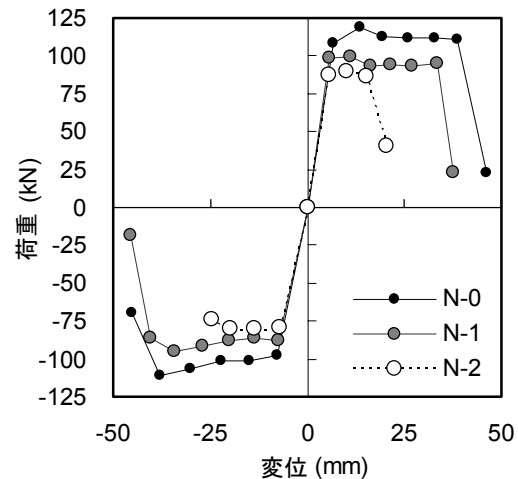


図-8 荷重－変位関係の包絡線（N シリーズ）

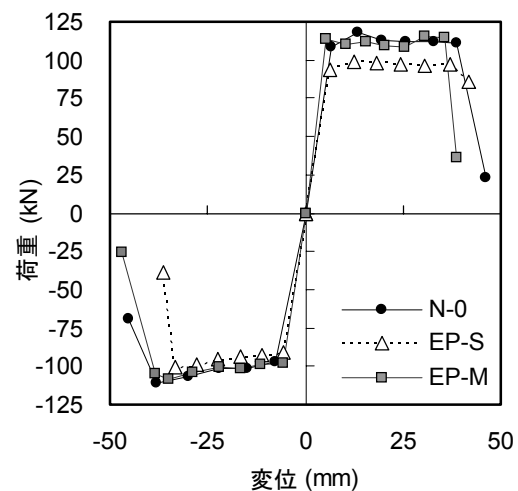


図-9 荷重－変位関係の包絡線の比較

上の実験結果より、主筋の腐食は耐力性に、せん断補強筋の腐食はじん性に影響することが考えられる。

次に、鉄筋腐食がじん性に及ぼす影響を明らかにするため、主筋の断面減少率とじん性率の関係を図-10 に、せん断補強筋の断面減少率とじん性率の関係を図-11 に示す。じん性率は、主筋の断面減少率が 15%程度、せん断補強筋の断面減少率が 40%程度に達すると著しく低下した。ここで、N シリーズにおいては、主筋と同様にせん断補強筋も腐食を生じていることから、EP シリーズに着目し、主筋およびせん断補強筋の腐食が、RC はりのじん性に及ぼす影響について考察を進める。

まず、3.2 における検討より、主筋の腐食は

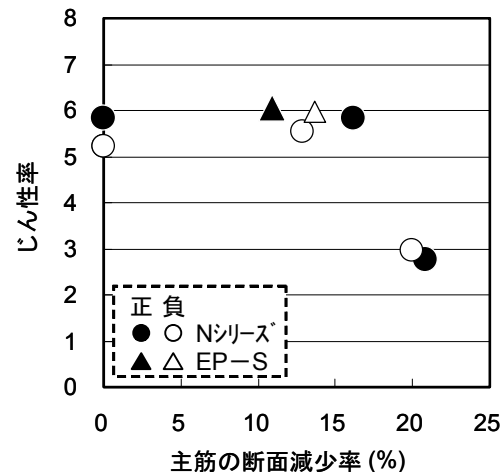
断面減少と鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下により、じん性の低下を招くことが考えられる。そして、本研究の範囲では、EP-S における結果より、断面減少率が 10～15%程度を越えると、じん性に顕著に影響することが予測される。一方、せん断補強筋の腐食は、腐食によるじん性低下に加えて、コアコンクリートの拘束作用の減少に影響することが考えられる。

今回の検討では、EP-S における主筋の断面減少率は、結果として、じん性の低下が開始する付近の値であった。また、EP-M におけるせん断補強筋の断面減少率は、せん断補強筋がじん性に及ぼす影響を検討するには小さい値であった。さらに、EP-M の初期降伏変位が N-0 より小さかったため、そのじん性率は、計算上、腐食が生じていないものよりも大きな値となった。これは、エポキシ塗装鉄筋の付着性状が通常の鉄筋と異なるためと考えられる。以上の理由より、RC はりのじん性に与える主筋、およびせん断補強筋の腐食の寄与率を定量的に評価することは不可能であった。今後、同様の手法により、主筋ならびにせん断補強筋の腐食がじん性に及ぼす影響について、引き続き検討を行う予定である。

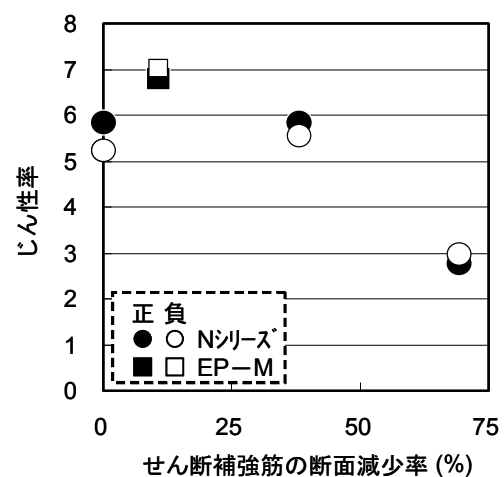
4. まとめ

鉄筋腐食が RC はりの耐荷性・じん性に及ぼす影響について検討を行った。特に、主筋の腐食は耐荷性に、せん断補強筋の腐食はじん性に影響した。主筋の腐食に関しては、断面減少だけでなく、鉄筋とコンクリートの一体性が付着力の低下により失われ、応力の伝達が有効になされなかったことによる。また、せん断補強筋の腐食に関しては、コアコンクリートの拘束力が低下することに起因すると考えられた。

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



図－10 断面減少率とじん性率の関係（主筋）



図－11 断面減少率とじん性率の関係（せん断補強筋）

参考文献

- 1) 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
- 2) 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, 沿岸開発技術センター, pp.95－973, 1999
- 3) 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, pp.1501－1506, 2002
- 4) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書－耐震性能照査編, 2002