

鉄筋腐食による部材の力学性能低下に及ぼすコンクリート品質の影響

コンクリート研究室 小林 豊
 主指導教員 下村 匠

1. はじめに

近年、鉄筋腐食に代表される劣化した鉄筋コンクリート(RC)構造物の構造性能に関する実験が各所で精力的に行われている¹⁾。しかし、現実の構造物の劣化に及ぼす影響因子はあまりに多く複雑であり、現実の問題の解決に有効な情報を得るためには、着目点を明確に設定した適切な実験を実施する必要がある。本研究では、数多く存在する鉄筋腐食の影響因子の中で、ブリーディングによる鉄筋周辺のコンクリートの初期欠陥およびそれらと曲げひび割れとの相互作用に着目し、鉄筋腐食形態ならびに腐食後の部材の力学性能に及ぼす影響を検討することとした。

一般に、ブリーディングにより鉄筋周辺のコンクリートが空疎であると、水分や塩分等の鉄筋腐食物質の移動が容易となり、腐食が促進されるといわれている。本研究室で過去に実施された赤インク含浸試験により、ブリーディングが著しい場合、曲げひび割れより侵入した外来物質が、鉄筋到達後に鉄筋周辺の空隙に沿って移動することが確認されている²⁾。このように、物質移動の観点からはブリーディングによる欠陥はたしかに悪影響をもたらすといえるが、鉄筋腐食ならびに腐食後の部材の力学性能への影響については、必ずしも確認されたわけではない。

本研究では、以上の問題に対する基礎実験として、コンクリートのブリーディング量、打設方向、曲げひび割れの有無を実験パラメータとした、劣化 RC はりの曲げ載荷試験を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体諸元

供試体の形状および寸法を図 - 1 に示す。供試体は、80×140×1460mm の小型 RC はりとした。軸方向腐食分布の耐荷性能への影響を明瞭にすることを目的として、軸方向鉄筋は D13 (SD345) 鉄筋を 1 本とした。

本実験では部材の力学性能として曲げ耐荷性状に着目するため、確実に曲げ破壊が先行するように、せん断補強筋として D6 (SD295A) 鉄筋を 100mm 間隔で配置した。また組立て筋として 6mm の木材を使用した。

以上の供試体諸元は、実験結果の相互比較に便利のように、既往の研究^{3),4)}における鉄筋腐食 RC はり供試体の曲げ共通試験に用いられたものと同一諸元とした。

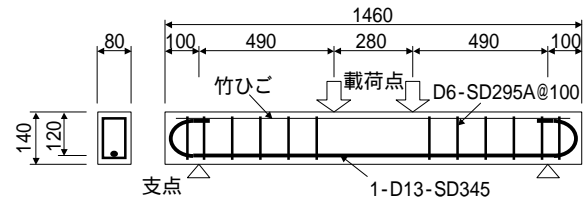


図 - 1 供試体形状・寸法

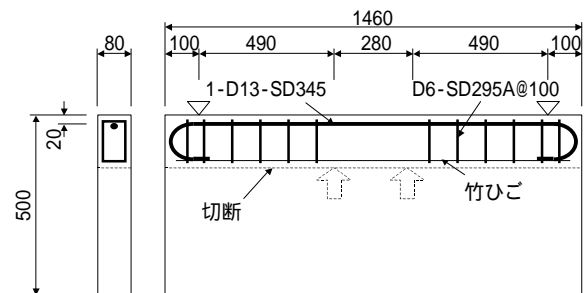


図 - 2 供試体形状・寸法 (ブリーディング大)

表 - 1 供試体一覧

試験体名	コンクリートの種類	供試体高さ (mm)	ひび割れの有無・種類	質量減少率 (%)
N-0	N	140	無	0(健全)
N-3				3
N-10				10
N-30				30
NC-0	B	500	載荷	0(健全)
NC-3				3
NC-10				10
NC-3-V		140(縦打ち)		3
NP-3			ろ紙	3
H-0	H	140	無	0(健全)
H-3				3
H-10				10
HC-3			載荷	3
HC-10				10
HP-3				ろ紙

2.2 実験要因

(1) 腐食の程度

表 - 1 に作製した供試体一覧を示す。腐食の程度を表す指標として、軸方向鉄筋全長の平均質量減少率を用い、目標値を 0% (健全供試体), 3%, 10%, 30% の 4 水準とした。

(2) ブリーディングによる欠陥

コンクリートは普通コンクリート(N), ブリーディングが顕著となるように単位水量を大きく設定した普通

コンクリート（B）、および高強度コンクリート（H）の3種類を用いた。

コンクリート（B）用いる場合には、鉄筋周辺のブリーディングがさらに顕著になるように、コンクリート打設時には図-2に示すように軸方向鉄筋が上側になるように配置して供試体高さを500mmとして作製し、硬化後に下部をコンクリートカッターで切断した。

また、コンクリート（B）を用いたシリーズでは、コンクリートのブリーディング性状は同じであっても部材中においてブリーディングによる欠陥が導入されない場合を試験するために、打設方向を部材軸方向に一致させた供試体も1体作製した。

(3) 曲げひび割れの有無

曲げひび割れ部にて生じる局所的な鉄筋腐食を再現するため、腐食を導入する前にあらかじめ曲げひび割れを導入した供試体を作製した。曲げひび割れの導入方法として、健全供試体の降伏荷重の約7割まで荷重を行いひび割れを導入するもの、また既往の研究^{1),5)}を参考に、コンクリート打設時に紙を挟み込むことで、模擬的にひび割れを再現したものの2種類を用いた。

2.3 実験方法

(1) 鉄筋腐食方法

鉄筋を腐食させる方法として電食を用いた。電食試験の概要を図-3に示す。電食の対象区間は両端のフックを含めた軸方向鉄筋全長とした。せん断補強筋は腐食させないように、主鉄筋とせん断補強筋の接合部には自己癒着テープを用いて絶縁処理を施した。

既往の研究⁶⁾で提案されている、電食試験における鉄筋の腐食量と積算電流量との関係を表す実験式を用いて目標とする質量減少率を得るために必要な通電電流量および通電時間を設定した。

電食終了直後の供試体下部に発生する腐食ひび割れについて、50mm間隔でクラックスケールを用いて腐食ひび割れ幅の計測を行った。

(2) 載荷試験方法

載荷試験方法および計測項目の概要を図-4に示す。等曲げ区間280mm、せん断スパン490mmとして一方向二点単調載荷を行った。載荷時の計測項目は載荷荷重、供試体中央変位、載荷点変位、支点変位、および供試体中央のコンクリート上縁ひずみとした。

(3) 腐食量測定方法

載荷試験終了後に供試体から軸方向鉄筋をはつり出し、除錆後に重量の測定を行った。ここで得られた重量を、健全時の主鉄筋の重量で除することで平均質量減少率を求めた。同様に250mm間隔で軸方向鉄筋を切断した試験片についても、試験片毎の質量減少率を求めた。

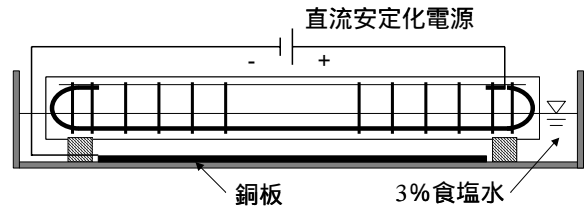


図-3 電食の概要

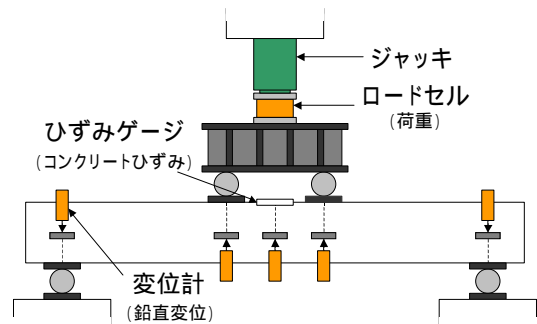


図-4 載荷試験方法および計測項目

3. 鉄筋の腐食分布に関する考察

3.1 鉄筋腐食量の制御

載荷試験後の供試体からはつり出した鉄筋より実測された腐食量は、全供試体において概ね目標値を満足しており、積算電流量を用いた腐食量の制御は有効であったといえる。本実験ではスターラップに通電しないことを目標としたが、N-30、HC-10 供試体において大きく腐食したスターラップが確認された。しかし、結果としてせん断破壊により終局した試験体はなかったことから、スターラップが腐食したことによる耐荷性状への影響は小さかったと思われる。

3.2 質量減少率および断面減少率

図-5に鉄筋重量より算出した質量減少率とノギス鉄筋径より算出した断面減少率の関係を示す。図中の実線は質量減少率と平均断面減少率が等しいことを示す。断面減少率は、250mmに切断した各試験片5箇所得られた値の平均値を用いている。図-5より、質量減少率とノギス鉄筋径より算出した平均断面減少率は、腐食量が10%程度以下であるとき概ね等しいが、腐食量が大きくなるに伴い、平均断面減少率が質量減少率を上回る傾向が見られた。これは断面内において腐食が一樣に生じていないことが原因と考えられる。鉄筋の断面形状が円形から遠ざかると、腐食後の断面積を実際よりも過小に評価することとなる。本実験では高強度シリーズの供試体において、主鉄筋の下部のみ集中的に腐食が生じるケースがあった。腐食鉄筋の断面は扇形に近い形状となることが目視でも確認でき、このような場合には鉄筋の残存断面積を明らかに過小評価していると思われる。

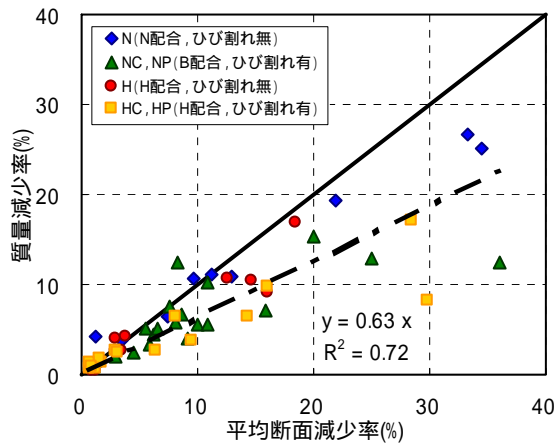


図 - 5 質量減少率と平均断面減少率の関係

3.3 鉄筋軸方向の断面減少率分布

本実験では電食により腐食を導入しているため、鉄筋腐食のメカニズムが自然環境における外来物質の侵入による腐食とは異なる。そのため、本実験で得られた鉄筋腐食の傾向が、ただちに実構造物における腐食傾向を表しているわけではないが、鉄筋に沿った欠陥や曲げひび割れの影響は実環境における場合と何らかの相関があると考え、実験で得られた腐食分布を検討する。

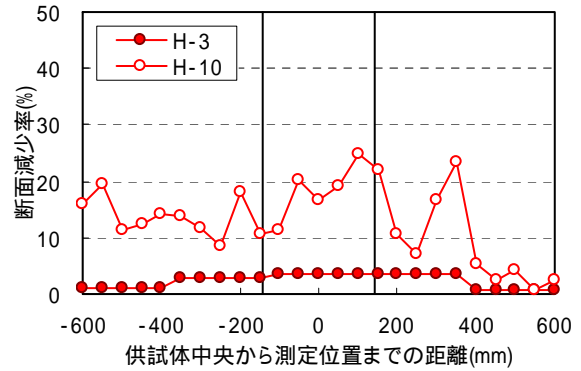
(1) 曲げひび割れの影響

各シリーズの供試体毎に、供試体軸方向の断面減少率分布を図 - 6 に示す。まず図 - 6(a) に示す H シリーズ (高強度コンクリート、ひび割れ無し) の実験結果を見ると、供試体全長に渡り同程度の断面減少率が得られている。かぶりコンクリートに欠陥が存在しないことから、供試体全長に渡り均一な腐食が生じる結果となった。これに対して、図 - 6(b) に示す HC シリーズ (高強度コンクリート、荷重によるひび割れ) の実験結果では、供試体中央部において断面減少率が大きくなる傾向が見られた。これは、曲げひび割れが比較的多く存在する等曲げ区間に腐食が集中したためと考えられる。

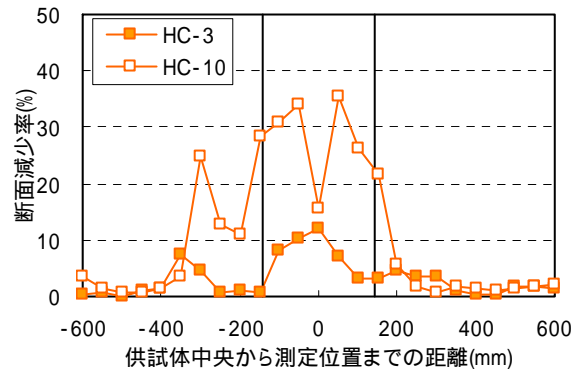
以上の実験結果より、かぶりコンクリートにひび割れが存在することで、鉄筋腐食の局所化が生じることが確認された。

(2) ひび割れ幅の影響

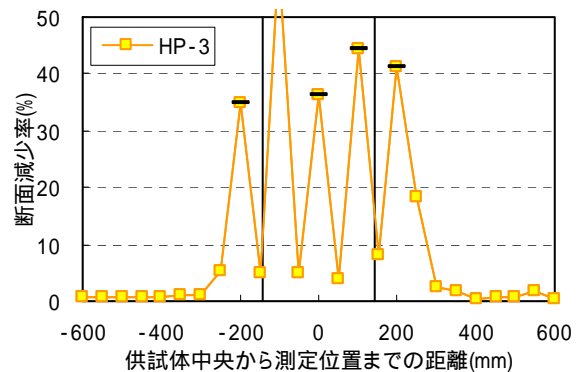
次にひび割れの導入方法の違いについて検討する。先ほど示した HC シリーズの実験結果と図 - 6(c) に示す HP シリーズの結果を比較する。これらの供試体では同一配合のコンクリートを使用し、ひび割れの導入方法のみ変化させて試験を行った。HP シリーズの実験結果を見ると、供試体中央部において断面減少率が大きくなっている。また、マークで示すひび割れ位置においてはとくに腐食量が大きくなっており、腐食の局所化がより明確に見て取れる。



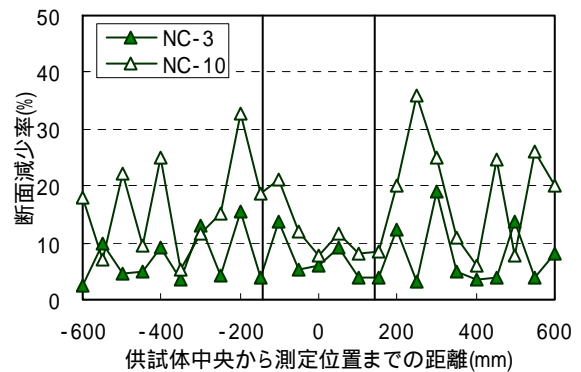
(a) H シリーズ (高強度、ひび割れ無し)



(b) HC シリーズ (高強度、荷重)



(c) HP シリーズ (高強度、ろ紙)



(d) NC シリーズ (フリーディング大、荷重)

図 - 6 供試体軸方向の断面減少率分布

載荷によって曲げひび割れを導入する場合、鉄筋降伏以前に除荷することから、残留するひび割れ幅は0.05mm以下と微小なものとなる。これに対して、ろ紙により模擬ひび割れを導入する場合、1mm程度の比較的大きなひび割れが導入される。実験結果では、ろ紙による模擬ひび割れを導入したHPシリーズにおいて腐食の局所化が明確となったことから、腐食の局所化の程度はひび割れ幅の影響を受けると考えられる。

(3) プリーディングによる欠陥の影響

NCシリーズの供試体では、単位水量が多い普通コンクリート（B配合）を用い、供試体高さを500mmとすることで、プリーディングによる欠陥を導入した。これらの供試体では、プリーディングに起因する鉄筋周辺の空隙の存在により、曲げひび割れが存在しても供試体全長の広い範囲で腐食が生じることが予想された。図-6(d)に示す実験結果によると、NCシリーズの供試体では、鉄筋軸方向の各位置により多少のばらつきが見られるものの、この予想通り、供試体全長にわたり同程度の腐食が生じている。

(4) コンクリート打設方向の影響

打設方向を部材軸方向に一致させたNC-3-V供試体では、プリーディングが著しいB配合のコンクリートを用いつつ、プリーディングによる鉄筋周辺の空隙が存在しない場合を試験した。この供試体では、打設方向を縦打ちとしたことによりコンクリートの締め固めが困難となり、供試体数箇所においてジャンカが生じてしまった。その結果、得られた腐食分布ではジャンカ部において腐食が集中する結果となり、載荷によって導入した曲げひび割れ位置における腐食の局所化は見られなかった。このため、打設方向により、プリーディングによる欠陥の影響が異なるかどうかは、本実験で確認することはできなかった。なお、本研究質において過去に実施された赤インク含浸試験²⁾では、打設方向を鉄筋軸方向に一致させると、鉄筋に沿った物質移動が生じにくくなることが確認されている。

鉄筋の腐食分布に関して、以上の定性的な検討結果を表-2にまとめる。

3.4 腐食量と腐食ひび割れ幅の関係

図-7に50mm間隔で測定した腐食ひび割れ幅と同位置でのノギス鉄筋径より算出した断面減少率の関係を示す。鉄筋の軸方向に沿ったある位置の腐食量が大きくなるほど、その直上の腐食ひび割れ幅も大きくなる傾向が見られることから、腐食ひび割れ幅は、構造物中の鉄筋の腐食状況を知るための大まかな目安になると思われる。しかし、その関係はばらつきが大きく、必ずしもひび割れ幅が大きい位置の内部鉄筋の腐食量が大きくなっているとは限らない。これは、腐食ひび割れ幅対

して直下の腐食量のみでなく、計測位置近傍の腐食状況が影響していることが原因と考えられる。そのため、腐食ひび割れに関する整理を行う場合、ある区間の平均値を用いることで、傾向を明確にすることができると思われる。

表-2 鉄筋腐食分布の定性的な傾向

		曲げひび割れの有無・種類		
		無	有	
			載荷 ひび割れ幅:小	ろ紙 ひび割れ幅:大
コン クリ ート 強 度	普通強度 N・B配合	鉄筋全長で 均一な腐食	鉄筋全長で 均一な腐食	ひび割れ 周辺に 腐食が集中
	高強度 H配合	鉄筋全長で 均一な腐食	ひび割れ 周辺に 腐食が集中	ひび割れ 位置でのみ 腐食発生

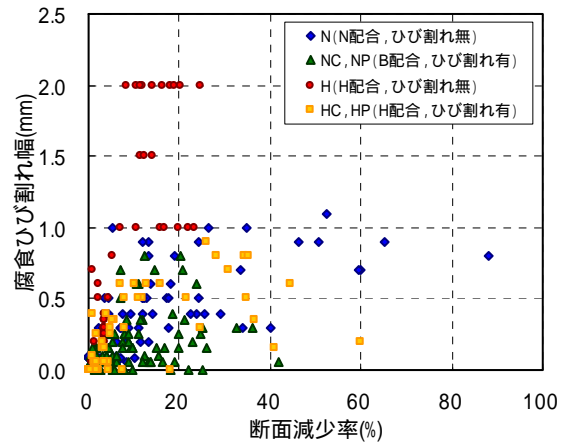


図-7 腐食ひび割れ幅と断面減少率の関係

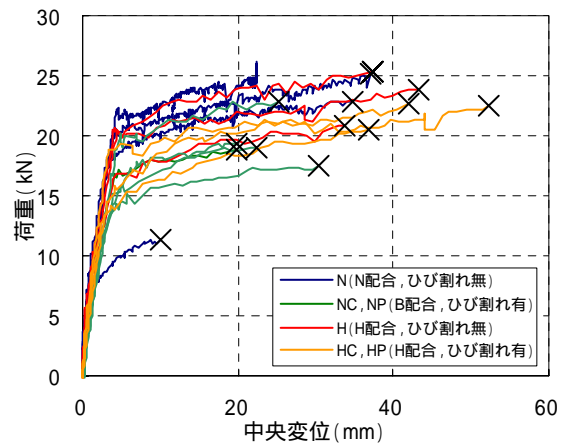


図-8 荷重 - 中央変位関係

4. 部材の曲げ耐荷性能に関する検討

4.1 荷重変位関係

図 - 8 に載荷試験を行った結果得られた荷重 - 中央変位関係を示す。最終破壊モードは、目標質量減少率が30%の N-30 供試体が鉄筋降伏後の鉄筋破断、それ以外の供試体は鉄筋降伏後にはり中央部上縁のコンクリートの圧壊で荷重が低下する曲げ引張破壊であった。全供試体を通じて、鉄筋の質量減少率が大きくなるに伴い、健全試験体と比較して降伏荷重および終局荷重が低下した。鉄筋腐食に伴い降伏前の部材剛性が低下することが予想されたが、降伏荷重および終局荷重の低下ほど明確な差は見られなかった。また終局時の変位に関しては、腐食量との間に相関は見られなかった。

4.2 質量減少率、断面減少率と降伏荷重比

図 - 9 に等曲げ区間の質量減少率と降伏荷重比の関係を示す。降伏荷重比は、各腐食供試体の降伏荷重を健全供試体の降伏荷重の実験値で除して求めた。一部の供試体で降伏荷重が特定しにくい場合があったが、健全供試体と比較して剛性が変化する点を降伏点とすることで統一して整理を行った。図中に示す実線は、軸方向鉄筋の断面減少のみを考慮して RC 断面の一般的な曲げ計算方法に則り、降伏荷重を求めた計算値である。質量減少率については、曲げ耐荷性能への影響が大きいことから、等曲げ区間より得られた値を用いて整理を行った。

実験結果では、全体的な傾向として、計算値以上に降伏耐力が低下する結果となった。これは、鉄筋の降伏が等曲げ区間内の最小断面において生じることが原因として考えられる。そのため、平均的な腐食量を表す指標である質量減少率を用いて整理を行った場合、部材の残存耐力を過大評価する可能性がある。

実験要因毎に考察してみる。コンクリートの品質が高く、かぶりコンクリートの欠陥が存在しない H シリーズの実験値は、比較的計算値に一致する傾向が見られる。それに対して、曲げひび割れを導入した NC, NP シリーズおよび HC, HP シリーズの供試体では、実験値が計算値を下回る傾向が強く見られる。これは先に示した鉄筋の腐食分布のばらつきが影響していると思われる。H シリーズの供試体では、鉄筋全長に渡り均一な腐食分布が得られた。そのため、等曲げ区間の腐食量の平均値を用いた場合であっても、比較的实验値と計算値が一致したと考えられる。しかし、曲げひび割れ部において局所的な鉄筋腐食が生じた供試体では、腐食のばらつきが大きくなっていることから、腐食量の平均値に対して最大値が大きくなっていると思われる。そのため、質量減少率を用いた整理では、曲げひび割れを導入した供試体において、見かけ上耐力低下が大きくなる。

次に等曲げ区間の最大腐食量を表す指標である、最大

断面減少率を用いて、降伏荷重比の整理を行う。両者の関係を図 - 10 に示す。先ほどの整理と比較して、計算値と実験値が一致する結果が得られた。HP-3 供試体の結果のみ計算値より乖離しているが、これについては、ノギスを用いて計測された最小鉄筋径より断面積を算出する際に、断面を円形と仮定していることが原因として考えられる。そのため、鉄筋の断面減少率を正確に計測することで、実験値と計算値が一致する可能性がある。なお、本研究で用いた供試体では、等曲げ区間外に腐食量が大きくな箇所が存在した場合、先行して主鉄筋が降伏する可能性がある。実際に NC-3-V 供試体においては、等曲げ区間外のジャンカ部が存在し、局所的な腐食が生じた。載荷試験時にてその箇所曲げひび割れが卓越したことから、等曲げ区間外にて鉄筋が降伏していた可能性がある。しかし、図 - 10 に示すように、今回の実験では等曲げ区間での降伏を仮定した計算で概ね降伏耐力を評価できている。これは、供試体の質量減少率が比較的小さかったことから、降伏箇所の影響が小さかったためと考えられる。

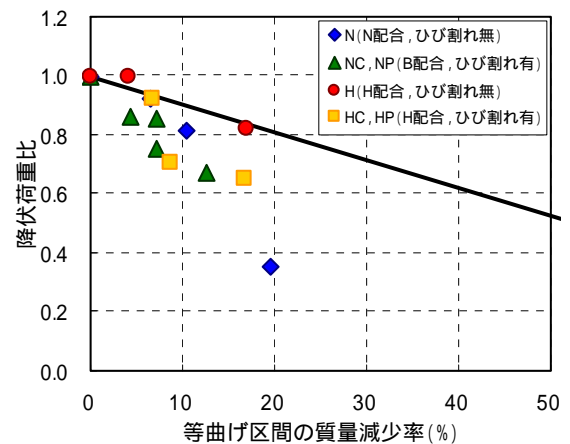


図 - 9 降伏荷重比と質量減少率の関係

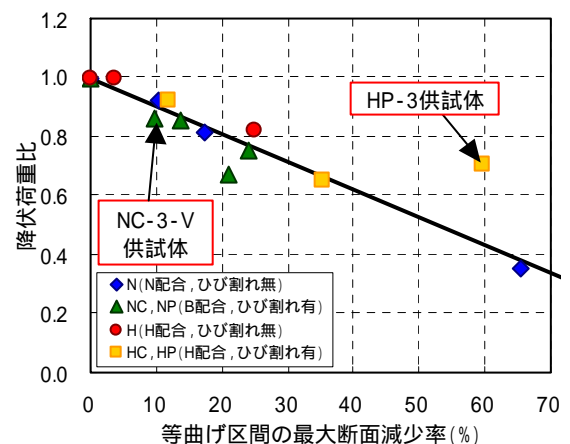


図 - 10 降伏荷重比と最大断面減少率の関係

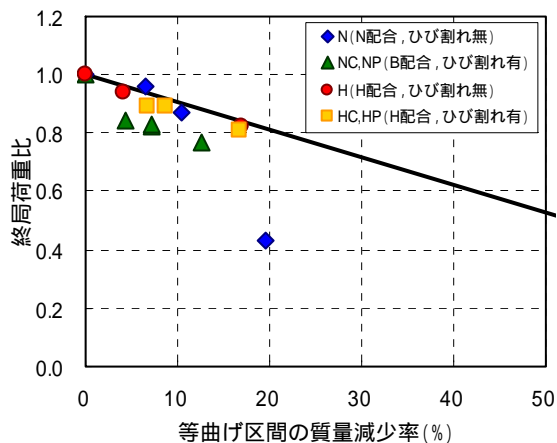


図 - 11 終局荷重比と質量減少率の関係

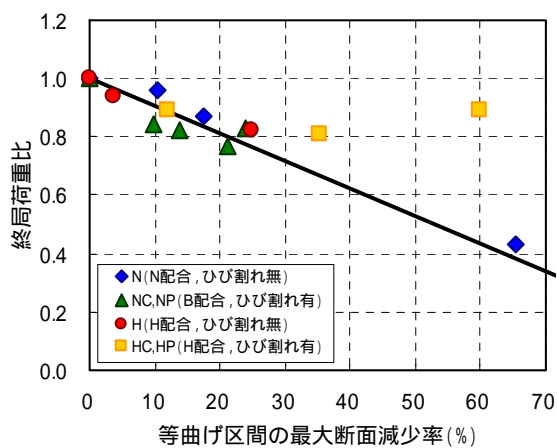


図 - 12 終局荷重比と最大断面減少率の関係

4.3 質量減少率，断面減少率と終局荷重比

図 - 11 に等曲げ区間の質量減少率と終局荷重比の関係を、図 - 12 に等曲げ区間の最大断面減少率と終局荷重比の関係を示す。各整理方法は降伏荷重比と同様である。

全体的な傾向は、降伏荷重の場合と似ている。ただし、等曲げ区間の最大断面減少率を用いて部材の終局荷重を整理した場合に、降伏荷重の場合よりも計算値が実験値と近づく傾向が見られた。これは、終局荷重の計算において鉄筋のひずみ硬化を考慮していないことが原因と考えられる。

4.4 コンクリートの品質の影響に関する考察

本実験結果によると、N、NC、NP、H、HC、HP シリーズの区別なく、部材の降伏荷重比、終局荷重比ともに等曲げ区間の最大断面減少率により評価することができた。このことは、これらブリーディングによる鉄筋周辺の欠陥や曲げひび割れに起因した腐食の不均一性があったとしても、それらの部材降伏荷重への直接の影響はないことを示している。つまり、構造的観点からは、ブリーディングによる欠陥や曲げひび割れによる影響

に比べて鉄筋の腐食状況の影響の方が大きく、腐食状況が同じであれば、同一視できる可能性があるといえる。

ただし、実環境下では、これらブリーディングによる欠陥や曲げひび割れは腐食の進行状況には影響を及ぼすと思われることは、従来の知見²⁾からも明らかである。したがって今回の実験結果と考え合わせると、ブリーディングによる欠陥や曲げひび割れの存在は、腐食物質の侵入などを通じてコンクリート中の鉄筋腐食の進行を促進することにより間接的に影響すると考えるのが適当である。

5. まとめ

本実験を行った結果、得られた知見を以下にまとめる。

- 曲げひび割れ部において腐食の局所化が生じる場合がある。また腐食の局所化の程度は、ひび割れ幅の影響を受けることが推察される。
- ブリーディングによる欠陥により、鉄筋の腐食範囲が拡大する可能性がある。
- 以上のような鉄筋腐食分布の不均一性があったとしても、等曲げ区間の最大断面減少率を用いることで部材の曲げ耐力を評価することができる。

参考文献

- 1) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物構造性能，コンクリート技術シリーズ 71，2006
- 2) 下村匠，藤田徹，小山和雄：かぶりコンクリートの初期欠陥が鋼材促進腐食物質の侵入に及ぼす影響，土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集，V-146，pp291-292，2003.9
- 3) 山本貴士，大屋戸理明，濱田洋志，宇野洋志城，国枝稔：鉄筋腐食 RC はり供試体に関する共通試験による鉄筋腐食量分布の検討，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 8 巻，pp.319-324，2008.10
- 4) 三方康弘，中村英佑，小林孝一，黒田一郎，下村匠：鉄筋腐食 RC はり供試体に関する共通試験による曲げ耐荷特性の検討，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 8 巻，pp.383-390，2008.10
- 5) 宮里心一，大即信明，木村勇人，水流徹：モルタルの欠陥部に生じる塩害あるいは中性化による鉄筋腐食の形態と速度，土木学会論文集，No.690/V-53，pp83-93，2001.11
- 6) 田森清美，丸山久一，小田川昌史，橋本親典：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.2，pp505-510，1988