論文 コンクリートの初期欠陥が鉄筋腐食による部材の力学性能低下に及 ぼす影響

小林 豊^{*1}·村松 真伍^{*2}·下村 匠^{*3}

要旨:ブリーディングによる鉄筋周辺のコンクリートの欠陥および曲げひび割れが,鉄筋腐食後の RC 部材 の構造性能に及ぼす影響を実験的に検討した。コンクリートのブリーディング量,コンクリート打設方向, 腐食前の曲げひび割れの有無を変化させた RC はり供試体を作製し,電食により鉄筋腐食を導入し,曲げ載 荷試験を行った。その結果,ブリーディングによる鉄筋周辺のコンクリートの欠陥は,部材の降伏耐力,終 局耐力などの構造性能への直接の影響は小さいが,コンクリート中への腐食物質の侵入を通じてコンクリー ト中の鉄筋の腐食の進行を促進させることにより間接的に影響することが明らかとなった。 キーワード:ブリーディング,曲げひび割れ,初期欠陥,鉄筋腐食

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。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,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が,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。著者 らは、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 達後に鉄筋に沿う移動が促進されることを確認してい る¹⁾。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は、 必ずしも確認されたわけではない。とくに、ブリーディ ングによる欠陥により、腐食の総量は増加すると予想さ れるものの、鉄筋軸方向に沿った腐食の分布が局所的で はなくむしろ均一化されるために、部材の力学性能の観 点からは結局どのように作用するか未知である。

本研究では、こ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、RC はり試験体に電食に よりコンクリート中の鉄筋に腐食を導入後、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。また軸 方向鉄筋のかぶりは 20mm とし定着部には 180°フック を用いた。

本実験では部材の力学性能として主に曲げ耐荷性状に 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



図-2 供試体形状・寸法(ブリーディング大)

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)
*2 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)
*3 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系准教授 博士(工学) (正会員)

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なよ うに、既往の研究^{2),3)}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。

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。使用したコンクリートの示方配合を表 -2に示す。

コンクリート(B)を用いる場合には,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割まで載荷を行い ひび割れを導入するもの、また既往の研究^{1),4)}を参考に、 コンクリート打設時にろ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⁵⁾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(0%,3%,10%,30%)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。 最大で48日間通電を行った。

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。このとき、腐食ひび割れ部 において錆汁の漏出が見られ、腐食量が大きい程多量の 錆汁が漏出した。また、先行して導入された曲げひび割 れ部においては、腐食ひび割れ部と比較して、錆汁の漏 出が明瞭に見られなかった。

(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。



図-3 電食試験概要

試験体名	コンクリート	供試体高さ	ひび割れの	質量減少率					
	の種類	(mm)	有無·種類	(%)					
N-0				0(健全)					
N-3	N		<u>400.</u>	3					
N-10	N	140	兼	10					
N-30				30					
NC-0				0(健全)					
NC-3		500	載荷	3					
NC-10	В	500	单以14]	10					
NC-3-V		140(縦打ち)		3					
NP-3			ろ紙	3					
H-0				0(健全)					
H-3	н		無	3					
H-10		140		10					
HC-3			載荷	3					
HC-10			平7.1円	10					
HP-3			ろ紙	3					

表-2 使用したコンクリートの示方配合

	単位量(kg/m3)								
配合	水	セメント	高炉	細骨材	粗骨材	AE	AE	高性能	供去
			スラグ			減水剤	助剤	AE減水剤	调巧
	W	С	BB	S	G	ad1	ad2	SP	
N(普通配合)	168	280	-	848	996	2.80	-	-	
B(ブリーディング大)	175	292	-	799	1017	3.62	0.876	-	ブリーディング率:13.6%
H(高強度配合)	187	369	340	742	785	-	-	6.38	



図-4 載荷試験方法および計測項目



図-5 質量減少率と平均断面減少率の関係

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,除錆後に質量の測定を行った。ここで得られた質量 を,健全時の主鉄筋の質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(等曲げ区間のみ50mm 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。

また,軸方向鉄筋の軸方向 50mm 間隔で,ノギスを用 いて最小径の計測を行った。得られた鉄筋径の測定結果 から,腐食後も断面が円形であると仮定して断面積を算 出し,健全時の鉄筋の断面積で除することで断面減少率 を求めた。

3. 鉄筋腐食量調査結果

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に鉄筋質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箇所で得られ 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 非常に小さい場合には概ね等しいが、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様に生じてい 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。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。

3.3 鉄筋の軸方向腐食分布

(1) 普通コンクリートシリーズ

図-6 に部材軸方向の断面減少率分布を示す。普通コ ンクリート(N)を用いたシリーズの供試体については, 腐食量が大きくなるに伴い,鉄筋軸方向の腐食のばらつ きが大きくなる傾向を示した。

単位水量が多い普通コンクリート(B)を用い,高さ が 500mm の NC-3, NC-10 供試体では,ブリーディング により鉄筋に沿った欠陥のために,曲げひび割れが存在 してもひび割れ部における腐食の集中は緩和され,鉄筋 に沿った一様な腐食状態に近づくと予想された。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,全長にわたり同程度の腐食が生じている。

打設方向を部材軸方向に一致させたNC-3-V供試体で、 断面減少率が 40%程度と大きくなっている箇所がある が、これは供試体打設方向を縦打ちとしたことにより、 締固めが困難となり生じてしまった豆板部において腐 食が進行したためであると考えられる。NC-3-V供試体の 豆板部を図-7 に示す。このため、打設方向により、ブ リーディングによる欠陥の影響が異なるかどうかは本 実験では確認できなかった。なお、著者らが過去に行っ た赤インク含浸試験³⁾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。



図-6 鉄筋軸方向の断面減少率分布



図-7 縦打ち供試体の豆板部 (NC-3-V)

ろ紙による模擬曲げひび割れを導入した NP-3 供試体 は、供試体中央部のひび割れ付近に腐食が集中し、最も 大きな腐食が生じた箇所はひび割れ位置であった。載荷



図-8 断面減少率と腐食ひび割れ幅の関係

により曲げひび割れを導入した NC シリーズにおいては ひび割れ部における腐食の局所化が見られず,ろ紙によ る模擬曲げひび割れを導入した NP-3 供試体では見られ た理由は,ひび割れ幅の違いによると考えられる。NC シリーズは鉄筋降伏荷重の7割までしか載荷しておらず, また電食時には除荷していたので,残存している曲げひ び割れ幅は0.05mm以下とかなり小さい。一方, NP-3 供 試体は電食時も常にろ紙が挟み込まれたままであるの で,ひび割れ幅は1mm程度と大きい。

(2) 高強度コンクリートシリーズ

高強度コンクリートを用いた供試体では、曲げひび割 れを導入した HC シリーズの供試体において、曲げひび 割れが多く存在する部材中央の腐食量が大きくなって おり、せん断区間ではほとんど腐食が見られない。これ は普通強度シリーズにおける NP-3 供試体とほぼ同じ傾 向である。

3.4 腐食量と腐食ひび割れ幅の関係

図-8 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。鉄筋の軸方向にそ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 が見られるが,両者の関係はばらつきが大きい。また高 強度シリーズの供試体では,同程度の腐食でも腐食ひび 割れ幅が大きくなる傾向を示した。

4. 載荷試験結果

4.1 荷重変位関係

図-9 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



図-9 荷重-中央変位関係

する傾向がみられた。降伏前の部材剛性は,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-10 に等曲げ区間の平均質量減少率および最大質 量減少率と降伏荷重比の関係を,図-11 に等曲げ区間の 最大断面減少率と降伏荷重比の関係を示す。降伏荷重比 は各腐食試験体の降伏荷重を健全試験体の降伏荷重の 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。図中の実線は,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。

図-10,図-11の鉄筋腐食量の整理方法について比較 してみる。まず、図-10の等曲げ区間の質量減少率を用 いた場合では、質量減少率の最大値を用いて実験結果を 整理したほうが、平均値を用いた整理よりも計算値に近 くなった。これは主鉄筋の降伏が最小断面にて生じるこ とが原因として考えられる。しかし、平均値、最大値い ずれを用いた場合であっても、実験値のほうが計算値よ りも小さい傾向がみられた。これは、本実験にて確認さ れた腐食の局所化が、試験片の長さ 50mm より小さい範 囲で生じたことにより、鉄筋の残存断面積を正確に評価 できなかったことが原因と考えられる。

図-11 の等曲げ区間の鉄筋の最大断面減少率を用いた整理では、供試体 HP-3 を除いて、実験値と計算値が ほぼ一致する結果が得られた。最大断面減少率は質量減 少率と異なり、ある区間の平均値ではなくある断面での 腐食の状況を示す指標である。そのため、質量減少率を 用いた整理と比較して、より計算値に近い実験値が得ら れたと考えられる。また供試体 HP-3 の結果が乖離した のは、腐食の程度が大きい場合に、ノギス径による残存



断面積の評価精度が低いことが原因として挙げられる。

なお、等曲げ区間外に腐食量が大きな箇所が存在した 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、等曲げ区間外の豆板部が存 在し、局所的な腐食が生じた。載荷試験時にてその箇所 で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-11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。

4.3 質量減少率,断面減少率と終局荷重比

終局荷重比についても降伏荷重比の場合と同様の整 理を行った。全体的には,降伏荷重の場合と似た傾向の 結果となった。ただし,等曲げ区間の最大質量減少率, 最大断面減少率を用いて部材の終局荷重を計算した場 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。しかしこれは,計算では鉄筋のひずみ硬 化を考慮していないために終局時における鉄筋応力を 実際よりも低めに見積もることとなり,結果として降伏 荷重の場合よりも計算結果が実験結果に近づいただけ であると考えている。

4.4 ブリーディングによる欠陥および曲げひび割れの有 無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 区間の最大断面積減少率(または最大質量減少率)によ り一意的に表される結果となっている。つまり,ブリー ディングによる欠陥,曲げひび割れの有無の違いによら ず,鉄筋の腐食量の最大値により,部材の降伏荷重およ び終局荷重の健全時からの低下率が決定されている。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,構造性能の観点からは,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³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、鉄筋腐食後 の部材の構造性能に直接影響を及ぼさないが、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。 部材に曲げひび割れが存在した場合,その箇所で腐 食の局所化が生じる可能性がある。その場合,曲げ ひび割れ幅の影響を強く受ける。

- ノギス径を用いた断面減少率は鉄筋の腐食量を概 ね正確に評価可能であるが、腐食量が大きい場合に 残存断面積を過小評価する可能性がある。
- ブリーディングなどの初期欠陥は部材の構造性能
 に直接影響しないが、鉄筋の腐食性状が変化することで間接的に影響を及ぼす。

謝辞

本研究の実施にあたり、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研究小委員会(JSCE331 委員会)」の委員各位に助言いただいた。付記して謝意 を表す。

参考文献

- 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
- 2) 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
- 3) 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
- 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
- 5) 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