論文 圧縮鉄筋の腐食範囲が RC はりの曲げ性能に与える影響

久川かおり*1・桑野 仁成*2・近藤 拓也*3・横井 克則*4

要旨: 圧縮鉄筋の腐食範囲が RC はりの曲げ性能に与える影響を確認するため,電食範囲を変化させた RC は りを作製し,曲げ試験を行った。試験結果より,はりの圧縮鉄筋全長を腐食させた供試体においては,直径減 少量の増加に伴い曲げ剛性が大きく低下した。曲げ耐荷力に関しては,等曲げ区間を腐食させた供試体が低 下しているのに対して,全長を腐食させた供試体は健全供試体と差はない傾向を示し,曲げ抵抗メカニズム の変化を示唆する結果となった。

キーワード: 圧縮鉄筋,鉄筋腐食,腐食範囲,曲げ剛性,曲げ耐荷力

1.はじめに

日本では沿岸部には重要構造物が多く存在しており, このような環境下では塩害が進行している可能性がある。 これらの現状から, RC 構造物の維持管理手法の構築が ますます重要になると考えられる。

RC部材の曲げ性能は、引張鉄筋の健全度に依存する ことが既往の研究において明らかになっているため¹⁾, RC部材の曲げ性能を支配する引張鉄筋の健全度を把握 することが非常に重要である。そのため、塩害などによ り引張鉄筋が腐食した RC 構造物の曲げ耐力算定法や推 定法については、維持管理の実務に展開できるまで研究 が進行している²⁾。

一方で、圧縮側の応力は主としてコンクリートが負担 するため, 圧縮鉄筋の腐食による鉄筋断面積の低下は曲 げ耐力に大きく影響しないと考えられる。そのため、圧 縮鉄筋が腐食した RC 構造物の曲げ性能に関する研究事 例については,引張鉄筋の場合と比較して多く存在しな い。しかし、圧縮鉄筋が腐食した場合、腐食ひび割れの 発生やかぶりコンクリートの剥落が生じるため、圧縮部 コンクリートの断面積の減少や,腐食ひび割れによる圧 縮強度またはヤング係数の低下などが生じると考えられ、 それらが RC 構造物の性能を低下させることが懸念され る。そのため、圧縮鉄筋が腐食した RC はりの曲げ性能 について検討を行っている。國元,桑野ら 3/4)は,等曲げ 区間の圧縮鉄筋について電食を行い, RC はりの曲げ性 能に与える影響について検討を行ってきた。その結果、 圧縮鉄筋の腐食により曲げ耐力は低下するものの低下率 は引張鉄筋腐食より小さく, 靭性能に与える影響も小さ いことを確認した。しかし、上述のようにこれらの検討 は等曲げ区間のみ電食を行った検討事例である。実構造 物における RC はりの腐食は様々な形態が存在する。特 に変形性能ははり全長の曲げ剛性に支配されるため、腐

表-1 コンクリートの配合

W/C	s/a	Gmax	単位量(kg/m³)							
(%)	(%)	(mm)	W	С	S	G	Ad			
50	43.8	20	162	328	433	356	3.47			

表-2 コンクリートの材料特性

圧縮強度	引張強度	ヤング係数			
(N/mm^2)	(N/mm^2)	(kN/mm ²)			
53.1	3.3	28.5			

食区間と腐食量の関係を把握することは,残存性能を評価するうえで重要となる。

そのため本論文では, 圧縮鉄筋の腐食範囲を変化させた RC はりを作製し, 腐食範囲が RC はりの曲げ性能に 与える影響について検討を行う。

2.実験概要

2.1 使用材料

(1) コンクリート

使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。水セメント比は 50%とした。セメントは早強ポルトランドセメント,細骨材は硬質砂岩砕砂,粗骨材は硬質砂岩砕石,混和剤として変性ロジン酸化合物系の AE 剤を使用した。 スランプは 12±4.5cm とし,空気量は 4.5±1.5%とした。 また,粗骨材最大寸法 Gmax は 20mm とした。

材齢28日に実施した圧縮試験,引張試験の結果を表-2に示す。供試体は,打込み翌日に脱型を行い,材齢7日 まで湿布養生を行った。その後,室内に存置した。なお, 試験結果は試験体3体の平均値とした。はり理論による

*1 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科まちづくり防災コース (学生会員) *2 高知工業高等専門学校 専攻科建設工学専攻 (学生会員)

*3 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 教授 博士 (工学) (正会員)



図-1 供試体概要図

	表−3 供	:試体一覧		_				~	・スボン	ジ				/~	、ボン
供試体名	腐食範囲	積算電流	供試体数] 는	\leq		塩水	Z i	词板	<u>]</u> [_	76	N)	Lay	L
	(mm)	量(hr・A)								」∟					_
S-0	健全	0	2			-		-			L				
S ₁ -75	全長	75	2				200mn	n				(-			
S ₁ -100		100	2			(a)	寺田け	区间	۰ =	- ~)王云	ξ	
S ₂ -125	等曲げ	125	1					図-	-2 谓	『筤回	路롅	式図			
S ₂ -150	-	150	2							CL					
S ₂ -175		175	2	1					•	_					
	•	•	•	-											

表−3	供試体一覧
-----	-------

曲げ耐力等の算定にはこの実測値を用いた。

(2) 鉄筋

本試験では、圧縮鉄筋に D10(SD295A), 引張鉄筋に D13(SD345), スターラップに Φ6(SS400)を使用した。は り理論による曲げ耐力の算定には JISG 3112 に示す下限 値を使用した。

2.2 供試体概要

供試体の概要図を図-1 に示す。供試体の寸法は 100mm×200mm×1800mmの矩形断面はりとした。打込み 翌日に脱型を行い、材齢7日まで湿布養生を行った。そ の後、室内に存置した。

せん断補強筋量及びせん断スパンは, せん断耐力比 Vvd/Vmu(Vvd: せん断耐力, Vmu: 部材が曲げ耐力に達する時 のせん断力)を参考に設計した。圧縮鉄筋の腐食が曲げ性 能に与える影響を確認するため,曲げ破壊先行 Vvd/Vmu> 1.0 となるよう, Vyd/Vmu=1.45 とした。

供試体一覧を表-3 に示す。本研究の目的は, RC はり の圧縮鉄筋の腐食範囲が曲げ性能に与える影響について 検討することである。そのため、パラメータは健全、等 曲げ区間のみ電食で積算電流量 125hr・A, 150hr・A, そ して175hr・Aの3種類,そして圧縮鉄筋全長を電食し, 積算電流量 75hr・A と 100hr・A の 2 種類,計6 種類の 供試体を各2本ずつ作成した。S2-125はデータの不備に

より供試体数を1体とした。

健全供試体以外は腐食を模擬するため、図-2のように 電食を実施した。電食試験体には、あらかじめ圧縮鉄筋 にリード線をはんだ付けした。また,鉄筋被覆状況を図



金網

図-3 被覆による電食防止図

-3に示す。図中のオレンジ部分に示すように、圧縮鉄筋 及びせん断補強筋にはビニールテープを全面に被覆し電 食防止を行った。尚、ビニールテープの被覆による鉄筋 とコンクリート間の付着に影響はあると考えられるが、 今回は考慮しないものとした。

等曲げ区間のみ電食を行う S2シリーズについては,等 曲げ区間内中央100mm間の試験体上面に φ6 の穴を数か 所あけた銅板をコンクリート面に設置した。その上側に 塩水を含めたスポンジを置き、電食を行った。通電電流 量は 0.1A とし, 目標の積算電流量に到達するまで通電を 行った。全長電食を行う S1シリーズについては、はり全 長にわたり供試体上面に亜鉛メッキ金網を敷き、その上 側に塩水を含めたスポンジを設置し、電食を行った。通 電電流量は0.3Aとし、目標の積算電流量に到達するまで 通電させた。なお、電食は材齢7日以降から行った。

2.3 試験方法

電食終了後,腐食ひび割れ発生状況を観察し,測定 を行った。電食完了後の腐食ひび割れ幅を精度 0.02mm のクラックスケールにて測定した。事前に供試体表面に 50mm間隔で線を引き,100mm間隔でひび割れ幅の測 定を行った。

曲げ載荷試験概要図を図-4 に示す。スパン 1600mm に

対して,等曲げ区間 200mm, せん断スパン 700mm の対称 2 点一方向漸増繰返し載荷を行った。最大荷重 Pmax 到達まで 5kN 毎の漸増繰返し載荷を行った。

両側面支間中央および両支点には変位計(感度 0.005mm)を設置した。曲げひび割れ発生荷重を特定する ために、図-5に示すように等曲げ区間底面にひずみゲー ジ(ゲージ長:60mm)を5枚貼り付けた。また、等曲げ区





間内における高さ方向のひずみ分布を測定するため,図 -4に示すように支間中央から50mm離れた位置に,はり 高さ方向25mm間隔にひずみゲージ(ゲージ長:60mm)を 貼り付けた。さらに供試体表面のひび割れの影響を考慮 して,ひび割れの影響を受けない供試体の上面中央に, 図-6に示すようにひずみゲージを貼り付けた。また,電 食を行った供試体では,軸方向にひび割れが生じている ため,ひび割れを避けてひずみゲージを貼り付けた。引 張鉄筋降伏荷重の測定を目的として,支間中央の引張鉄 筋にひずみゲージ(ゲージ長:2mm)を貼り付けた。

載荷試験後に供試体の圧縮部コンクリートをはつり, 等曲げ区間の圧縮鉄筋を切断し取り出した。切断した鉄 筋は JCI-SC1 法に従い,60℃のクエン酸水素二アンモニ ウム 10%溶液中に8時間浸漬し,除錆を行った。その後, 各鉄筋のリブ 10 カ所の直径をノギスにて測定した。リ ブでの計測は,直径測定を正確に行えるためである。全 長電食を行った供試体については,圧縮鉄筋を 200mm ご





供試体名	腐食	積算電流量	直径減少率	最大腐食ひび 中立軸高さ		曲げ剛性	最大荷重	
	範囲	(hr • A)	(%)	割れ幅(mm)	(mm)	$(kN \cdot mm^2)$	(kN)	
S-0-1	健全	0	0	0 8		23.5	40.1	
S-0-2			0	0	108.7	20.1	39.3	
S1-75-1	全長	75	11.2	1.2	107.9	23.4	39.1	
S1-75-2			8.2	1.4	87.1	21.2	40.1	
S ₁ -100-1		100	15.1	1.4	97.2	7.3	40.6	
S ₁ -100-2			17.3	4.0	105.6	10.6	39.8	
S ₂ -125	等曲げ	125	10.5	1.5	102.2	21.2	35.6	
S ₂ -150-1	区間	150	11.0	1.1	113.6	19.2	39.0	
S ₂ -150-2			13.5	0.9	121.2	24.3	38.6	
S ₂ -175-1		175	8.3	1.0	99.5	15.7	36.1	
S ₂ -175-2			10.2	0.8	108.8	17.3	37.3	

表-4 試験結果一覧

とに切断し、上記作業を実施した。直径変化量を健全供 試体直径で割った百分率を直径減少率とした。

3 実験結果及び考察

3.1 電食結果

電食後の鉄筋直径を図-7,本試験の結果一覧表を表-4 に示す。ここで、曲げ剛性は曲げひび割れ発生以前の曲 げ剛性とする。積算電流量の増加とともに、直径減少率 およびひび割れ幅が概ね増加する傾向を示した。圧縮鉄 筋を全長電食した S₁-100-2 については、ひび割れ幅が他 の供試体と比較して大きくなったが、電流がひび割れ発 生箇所に集中した可能性が考えられる。

3.2 曲げ載荷試験結果

(1) ひずみ分布および中立軸

等曲げ区間内ではり高さ方向に貼り付けたひずみゲージを利用して得た,はり高さ方向のひずみ分布を図-8に示す。それぞれの結果より,大きく3種類のひずみ分布が確認された。(1)は健全な供試体であるため,平面保持の仮定が成立しており,ほぼ直線的なひずみ分布を示している。電食を行った供試体では,腐食ひび割れより下部のひずみゲージでは線形が保たれている。しかし,腐食ひび割れより上部ではひび割れ下部と直線関係が示されていない。

(2) および(4)の供試体では,圧縮鉄筋の腐食により断 面内に水平方向の貫通ひび割れが発生したものと考えら れる。よって,腐食ひび割れの上下で応力伝達がされて おらず,重ねばりのような挙動を示したものと考えられ る。対して,(3) および(5)の供試体では,(2)や(4)で示 される重ねばり挙動を明確には示していないが,はり上 部に向かうとともにひずみが低下する状況を示した。こ れは,腐食ひび割れ部分の骨材のかみ合わせにより,ひ び割れ下面からの応力が伝達されているものの,ひび割 れ上部では異なる挙動を示しているために,力が抜けた ような挙動を示したと考えられる。しかし,電食区間に よりこれら挙動パターンは分類できなかったため,実施 した水準の範囲では,曲げせん断区間の腐食状態と高さ 方向のひずみ分布には明確な相関がみられなかった。

直径減少率と曲げひび割れ発生時の中立軸高さとの関係を図-9,腐食ひび割れ幅と曲げひび割れ発生時の中立 軸高さとの関係を図-10に示す。中立軸高さは、図-8に 示すひずみ分布の近似直線より得られる切片の平均値で 求めた。ここで、 S_1 -100-1のデータについては、測定ひ ずみゲージの不調により、データを省略した。健全供試 体の中立軸位置がばらついているものの、圧縮鉄筋の腐 食量、そして腐食ひび割れの発生に伴い、中立軸が下縁 側に移動する傾向がある。圧縮鉄筋腐食による軸方向ひ び割れの発生により、圧縮合力が低下し、低下した圧縮











合力を補うために中立軸が引張側に移動したと考えられ る。しかし、腐食範囲で比較しても、中立軸高さに大き な差はない。等曲げ区間のみの腐食では、曲げせん断区 間が健全であるため、軸方向の応力伝達により中立軸が



図-10 最大ひび割れ幅と中立軸高さの関係

移動することが推定されるが、今回の結果では、曲げせ ん断区間からの応力伝達の影響は受けにくいと考えられ る。

(2) 曲げ剛性

直径減少率と曲げひび割れ発生以前の曲げ剛性の関係を図-11,最大腐食ひび割れ幅と曲げひび割れ発生以前の曲げ剛性の関係を図-12に示す。曲げ剛性は荷重-変位関係の傾きとして求めた。

はり全長にわたって電食を行った供試体では,直径減 少率,最大腐食ひび割れ幅いずれの指標においても,増 加とともに曲げ剛性が低下している状況が確認できる。 一方で,等曲げ区間のみ電食を行った供試体では,いず れの指標が増加しても大きな低下を示さなかった。これ は,はりの変形は式(1)に示すように,はりの変形は軸方 向でのその地点における曲げモーメントを積分する形で 求めることができる。

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI}$$

M:曲げモーメント(N・mm)

E:ヤング係数(N/mm²)

I:断面二次モーメント(mm⁴)

そのため、等曲げ区間のみ電食を実施した供試体は、 はり全長の約8割の区間が健全であるため、曲げ剛性に 影響が表れなかったと考えられる。はり全長にわたって



電食を行った供試体における,積算電流量の違いによる 曲げ剛性の変化であるが,コンクリートのヤング係数 E とはりの断面二次モーメント I がともに寄与した可能性 が高い。ヤング係数については,ASR の事例ではあるが 久保らが示したように⁵),内部ひび割れの増加により低 下することが示されている。また,積算電流量が小さい 間は,2本の圧縮鉄筋間に貫通ひび割れは生じていない ものの,電食の進行とともに,断面内の貫通ひび割れが 進展したため,はり全長にわたってはり断面が分断され た可能性がある。

ただし、コンクリートのヤング係数とはりの断面2次 モーメントの低減寄与割合については、今回の検討では 不明であるため、今後の検討課題となる。

(3) 曲げ耐荷力

直径減少率と最大荷重の関係を図-13,最大腐食ひび 割れと最大荷重の関係を図-14 に示す。はり全長にわた って電食を行った供試体は,健全供試体の最大荷重とほ ぼ同じ値を示した。しかし,等曲げ区間のみ電食を行っ た供試体については,耐荷力が減少する傾向を示した。

等曲げ区間を腐食させた供試体においては、圧縮部分 の腐食ひび割れの発生により、曲げ耐荷力の算定に必要 なfedが低下していると考えられる。そのため、健全供 試体と比較して等曲げ区間を腐食させた供試体は曲げ耐 荷力が低下したものと考えられる。しかし全長を腐食さ せた供試体においても状況は同じであるため、最大荷重 は低下することが想定されるものの、その傾向は示さな かった。

載荷試験後のひび割れ図の例を図-15 に示す。全長を 腐食させた供試体については、ひび割れ幅が増加すると 曲げひび割れ発生本数が減少する傾向を示していた。こ れは、全長を腐食させた供試体では、はり機構よりアー チ機構が卓越する曲げ抵抗メカニズムが形成された可能 性がある。しかし、これについては不明な点が多いため、 今後詳細に検討する必要がある。

今回の試験範囲では、はりの腐食区間の変化により大 きく変化したのは変形性能である。曲げ耐力については、 従来通り検討断面で照査を行うことにより残存性能を確 認できる可能性が高い。一方で、曲げ剛性については腐 食範囲により大きく変化する可能性が高いため、これら 影響範囲や低下割合については詳細に検討を行っていく 必要がある。また、今回の整理では最大ひび割れ幅を使 用したが、局所的な値のため明確な関係を示すことが難 しかった。そのため、検討手段についても今後改良する 必要がある。

4.結論

本研究では,圧縮鉄筋の腐食範囲を変化させた RC は りを作製し,腐食範囲が RC はりの曲げ性能に与える影 響について検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 圧縮鉄筋の腐食範囲は,等曲げ区間内における中立軸 高さに大きな影響を与えない。
- (2)全長を電食させた供試体においては、健全供試体や等 曲げ区間のみを電食させた供試体と比較して、曲げ剛 性が大きく低下した。
- (3)等曲げ区間を腐食させた供試体は、健全供試体やはり 全長を電食させた供試体と比較して、曲げ耐荷力が低 下する傾向を示した。

参考文献

- 日本コンクリート工学会四国支部:塩害劣化を受けた コンクリート構造物の耐力評価委員会報告書,2015.5
- 日本コンクリート工学会:既存コンクリート構造物の 性能評価指針 2014, 2014.11
- 國元陸登,桑野仁成,近藤拓也,横井克則: 圧縮鉄筋の腐食が RC はりの曲げ耐荷性能に与える影響,コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.1393-1398,2019.7
- 4) 桑野仁成,國元陸登,近藤拓也,横井克則:圧縮鉄筋の腐食量とRCはりの曲げ耐荷性能に関する研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.42,No.2,pp.1237-



1242, 2020.7

- 5) 久保善司,上田隆雄,黒田保,野村倫一:アルカリ骨 材反応による膨張がコンクリートの力学的性能に与 える影響,コンクリート工学年次論文集,Vol.28, No.1, pp.1691-1696, 2006.7
- 6) 南里卓洸,中村光,三浦泰人,山本佳士:初期ひび割 れを有するコンクリートの圧縮強度・破壊エネルギー に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.115-120, 2016.7