

局所的な鉄筋腐食が RC はり部材の構造性能に及ぼす影響

長岡工業高等専門学校 学生会員 ○田村 棕
長岡工業高等専門学校 金子 生樹
長岡工業高等専門学校 正会員 村上 祐貴

1. はじめに

塩害による鉄筋腐食は、構造材として有意な鉄筋量の減少、鉄筋とコンクリート間の付着劣化を引起こし、RC 構造物の耐荷性能に影響を及ぼすことが多い。

鉄筋腐食を生じた RC 構造物の耐荷性能に関する研究は、各方面で精力的になされており、有用な知見が蓄積されつつあるが、局所的な鉄筋腐食が RC はり部材の耐荷性状に及ぼす影響について、検討した事例は少ない。実構造物に生じる鉄筋腐食は、単一部材の中でも、外部環境が場所によって異なることや、曲げひび割れ発生箇所より、塩化物イオンが容易に供給される等の理由で、局所的に発生、進行する場合が多い。

そこで、本研究では局所的な鉄筋腐食が RC はり部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、電食により主鉄筋に局所的な鉄筋腐食を導入した RC はり部材の載荷実験を行った。

2. 実験概要

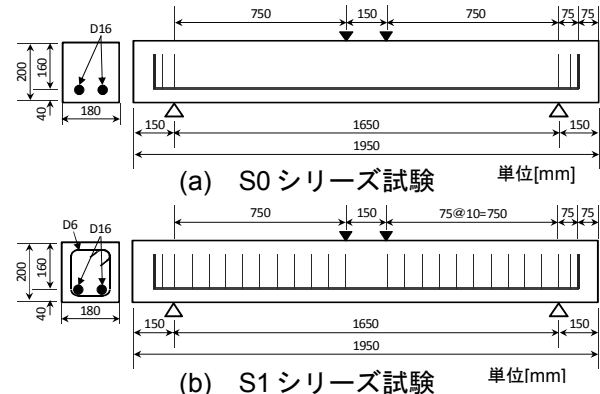
2.1 試験体概要および実験パラメータ

表－1 に実験パラメータ、図－1 に試験体概要を示す。試験体は曲げ破壊が先行する断面諸元であり、主鉄筋として、異型鉄筋 D16(SD295A)を 2 本配筋した。主鉄筋比は 1.41%である。主鉄筋端部は、90°折り曲げ直角フックとし、定着部に補強筋を配筋した。S0 シリーズ試験体は、せん断補強筋を有さない試験体シリーズであり、S1 シリーズ試験体は、せん断補強筋

として D6(SD295A)を 75mm 間隔で配筋した試験体シリーズである。

実験パラメータは主鉄筋の腐食率、腐食領域である。設定腐食率は 0%、10%、20%、40%の 4 水準である。腐食発生領域は 100mm とし、発生位置はスパン片側の支間中央より 375mm~475mmおよび675mm~775mm の 2 水準とした。腐食領域に作用するモーメントは、前者が等曲げ区間の 60%、後者が 20%である。

本実験では局所的な鉄筋腐食を再現するため、電食により、あらかじめ局所的に腐食を導入した主鉄筋を用いることとした。腐食領域には、コンクリートとの付着を断つ目的で、断面減少分を油粘土で埋め、グリスを塗布したビニールテープを巻き付け、アンボンド



図－1 試験体概要図

表－2 コンクリート配合表（設計基準強度:30N/mm²）

G _{max} (mm)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
		W	C	S	G	
25	60	169	282	810	1009	2.82

表－1 実験パラメータおよび実験結果

シリーズ	試験体名	腐食幅 (mm)	設定腐食領域 (mm)	設定腐食率 (%)	質量減少率 (%)	断面減少率(補正值) (%)		変動係数	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm ²)	破壊モード
						平均値	最大値					
S0	S0-0	—	—	—	—	—	—	—	60.0	66.5	30.0	曲げ引張
	S0a-10	100	支間中央より375mm	10	11.2	11.2	14.9	0.02	55.4	61.0	30.0	斜め引張
	S0a-20			20	20.6	20.4	26.6	0.04	52.5	53.0	27.5	斜め引張
	S0a-40			40	37.3	38.5	46.7	0.13	43.0	44.0	30.0	斜め引張
	S0b-40		支間中央より675mm		40.7	40.7	56.9	0.12	57.4	62.0	31.0	曲げ引張
S1	S1a-0	—	—	—	—	—	—	—	59.3	64.5	30.3	曲げ引張
	S1a-20*1	100	支間中央より375mm	20	25.6	22.5	31.7	0.06	62.5	65.0	30.9	曲げ引張
	S1a-40			40	45.8	41.6	57.7	0.14	46.8	61.5	31.0	破断

* 1 鉄筋ひずみ計測は未実施

キーワード 局所腐食 曲げ耐荷性状 ひずみ分布

連絡先 〒940－8532 新潟県長岡市西片貝町 888 番地 長岡工業高等専門学校 TEL0258－34－9276

処理を施した。

コンクリートの配合を表-2 に示す。なお、セメントには、早強ポルトランドセメントを使用した。

2.2 腐食試験手法

腐食手法は、設定した腐食率が比較的早期に得られ、その制御が容易な電食試験法を採用した。腐食対象領域のみを銅板で囲い、その他の領域は防食テープを巻き保護した上で、直流電流を印加し、対象領域のみ腐食を導入した主鉄筋を作製した。

鉄筋腐食の評価手法は、腐食試験前後における鉄筋の質量減少率および 3D レーザースキャンによる断面減少率を用いた。質量減少率は、電食試験終了後の鉄筋を除錆して質量を測定し、試験前後の質量差より算出した。断面減少率については、3D レーザースキャンを用いて載荷試験終了後の鉄筋の 3 次元形状を 0.4mm ピッチで測定した値と健全時の鉄筋の断面積より算出した。なお、健全時の鉄筋断面積は 3D レーザースキャンの計測長さに制限があるため、鉄筋の密度を 7.85g/cm^3 とし、質量から算出した。

2.3 載荷試験概要および測定項目

載荷試験は、図-1 に示すように載荷点間隔 150mm、支点間距離 1650mm の静的 2 点集中載荷による曲げ載荷試験とし、変位制御(0.5mm/min)で行った。

測定項目としては、支間中央部のたわみ、主鉄筋の軸方向ひずみである。支間中央部のたわみは、1/100mm 変位計を試験体中央に設置し測定を行った。主鉄筋の軸方向ひずみの測定に関しては、ひずみゲージ貼付け位置を鉄筋内部とした貼合わせ鉄筋を採用した¹⁾。鉄筋ひずみの測定は配筋した 2 本の主鉄筋のうち 1 本を対象とし、鉄筋ひずみの測定間隔は、等曲げ区間を 75mm 間隔、腐食領域および腐食端から載荷点方向 300mm を 50mm 間隔とし、その他の領域は 100mm 間隔とした。

3. 実験結果

3.1 鉄筋の腐食状況

図-2 に 3D レーザースキャンにより計測した腐食対象領域の鉄筋の平均断面積と質量減少率から算出した平均断面積との比較を示す。3D レーザースキャンの計測値は、質量減少率より算出した値に比べて約 4.0% 大きい値を示す傾向にあった。これは、腐食鉄筋の表面形状が滑らかではなく孔食や出張りがあり、そ

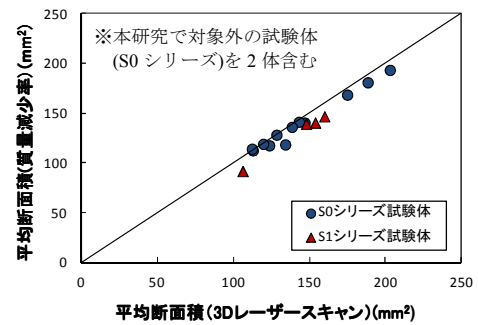
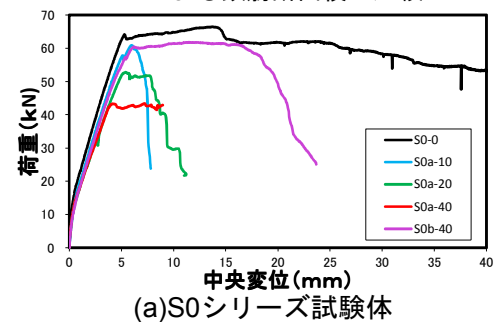
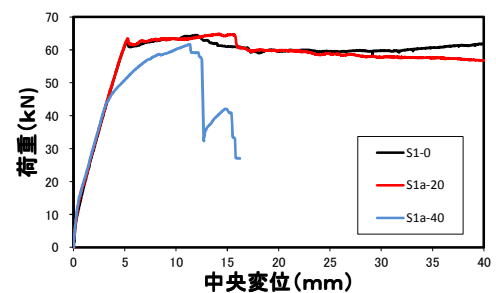


図-2 質量減少率および3Dレーザースキャンによる鉄筋断面積の比較



(a)S0シリーズ試験体



(b)S1シリーズ試験体

図-3 荷重と中央変位

の部分にはレーザー光が入射されず正確に計測できなかったことが要因として挙げられる。本実験では、質量減少率より算出した値が真の値であると仮定し、3D レーザースキャンの断面積の計測結果に補正係数 0.96 を乗じて、以降の検討を行うこととした。なお、これ以降の検討は、補正した断面積を用いて算出した断面減少率を腐食率として扱う。

3.2 載荷試験結果

(1)S0 シリーズ試験体

表-1 に載荷試験結果の一覧を示す。また、図-3(a)に荷重と中央変位の関係を示す。

まず、せん断補強筋を有しない S0 シリーズ試験体では、全ての試験体で非腐食試験体(S0-0 試験体)と比べ剛性の低下が確認され、S0a シリーズ試験体では鉄筋の腐食量が大きいほど、剛性低下が顕著に生じた。

図-4(a)~(d)に S0 シリーズ腐食試験体の各荷重時における主鉄筋のひずみ分布性状を実線で示す。各図に破線で示したひずみ分布は非腐食試験体の鉄筋ひ

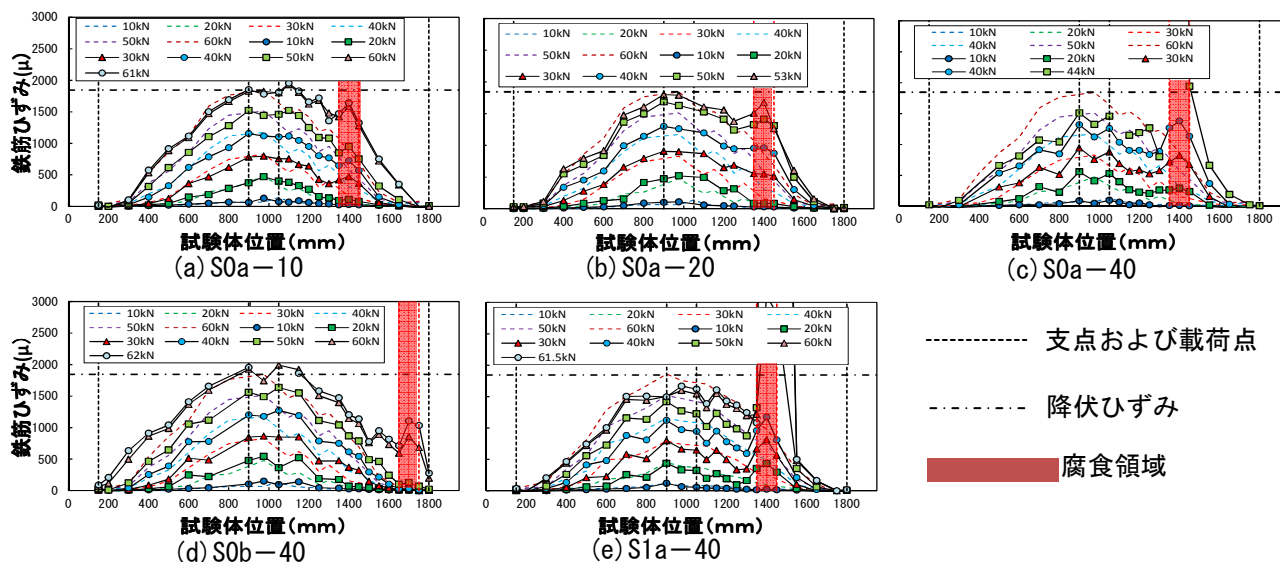


図-4 鉄筋ひずみ分布図

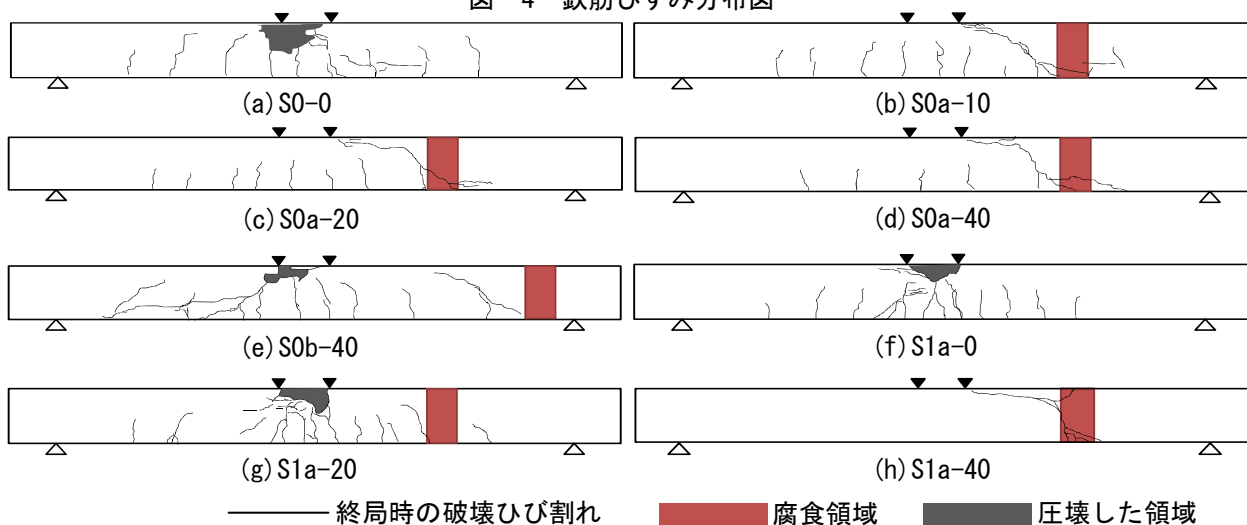


図-5 破壊ひび割れ性状図

ずみ布である。

全腐食試験体で、腐食領域の鉄筋ひずみが他の領域に比べて非常に大きく、腐食試験体の剛性低下の主たる要因である。

図-5(a)~(d)に S0 シリーズ試験体の終局時の破壊ひび割れ性状を示す。非腐食試験体である S0-0 試験体は、スパン広範囲に曲げひび割れが発生した後、等曲げ区間の主鉄筋が降伏し、最終的に等曲げ区間上縁コンクリートが圧壊し、破壊に至った。腐食試験体 S0a-10 試験体および S0a-20 試験体においても、S0-0 試験体と同様に、スパン内の広範囲に曲げひび割れが発生し、図-4 に示すひずみ分布より等曲げ区間において鉄筋降伏を生じていることが分かる。しかしながら、腐食領域に発生した曲げひび割れが、斜めひび割れを誘発し、このひび割れが卓越して進展、拡幅し、最終的に斜め引張破壊を呈した。腐食率の大きい S0a-40 試験体については、低荷重レベル時から腐食領

域のコンクリート腹部に発生した斜めひび割れが拡幅し、斜め引張破壊に至った。腐食領域が支点近傍である S0b-40 試験体については、腐食領域に作用するモーメントが小さいため、等曲げ区間において鉄筋降伏後、曲げ引張破壊を呈した。

以上のように、本実験の範囲内ではせん断補強筋を有しない RC はり部材では、せん断スパンの局所的な腐食の存在による破壊モードの変化が確認された。これは、局所的に腐食を生じた領域において、集中的に鉄筋ひずみが大きくなり、同領域において斜めひび割れが誘発されるとともに鉄筋量が少ないため、ダボ効果が低下し、斜め引張破壊を呈したと考えられる。

(2)S1 シリーズ試験体

S1 シリーズ試験体の荷重と中央変位の関係を図-3(b)に示す。まず、S1a-20 試験体においては、非腐食試験体である S1-0 試験体とほぼ同様の荷重変位関係を示しており、耐荷性状に及ぼす局所的な鉄筋腐食の

影響は認められなかった。S1a-40 試験体については、図-4(e)に示す鉄筋ひずみ分布より、荷重が約 50kN の時点で腐食領域の鉄筋が降伏したため、その時点から剛性が低下したが、その後も緩やかに荷重は増加し、耐力は非腐食試験体と同程度の値を示した。これは、腐食領域にて鉄筋が降伏した後、他の領域の付着が健全であるため、腐食領域の鉄筋が直ちにひずみ硬化域に達し、荷重が増加したと考えられる。前述した腐食領域の平均腐食率がほぼ同じであるせん断補強筋を有さない S0a-40 試験体では、荷重が約 44kN の時点において腐食領域の鉄筋が降伏したものの、破壊モードが斜め引張破壊に移行したため降伏以降の荷重増加は認められず、せん断補強筋が局部腐食によるせん断耐力低下に有効であることが確認される。

図-5(g), (h)に S1 シリーズ腐食試験体の破壊ひび割れ性状を示すように、S0 シリーズ腐食試験体と同様、腐食領域より発生した曲げひび割れが起点となり、腹部コンクリートに斜めひび割れが発生した。特に S1a-40 試験体では、このひび割れ以外のひび割れは発生していないが、上述したようにせん断補強筋によるせん断抵抗が有効に作用し、斜め引張破壊を生じることとはなかった。しかしながら、せん断補強筋は腐食領域における局所的な変形の集中の抑制には寄与せず、最終的に腐食領域の主鉄筋が破断して破壊に至った。

4. 局所的に鉄筋腐食した RC はり部材の耐力性

図-6に各腐食試験体の主鉄筋が降伏した時点における曲げモーメントを非腐食試験体の降伏曲げモーメントで正規化した降伏曲げモーメント比 ($M_{y_{cr0}}/M_y$) と最大腐食率の関係を示す。なお、降伏曲げモーメントは、鉄筋ひずみ分布から判断した鉄筋降伏時点の荷重/2 に、支点から腐食領域先端までの距離 (450mm) を乗じて算出した。なお、等曲げ区間において鉄筋が降伏した試験体については、この距離をせん断スパン長 (750mm) とし、その場合の腐食率は、等曲げ区間の鉄筋は非腐食のため 0% とした。また、図中には、鉄筋の断面減少を考慮し、曲げ理論に基づいて算出した降伏曲げモーメント比を実線で示す。

同図に示すように全体的な傾向としては、実験の降伏曲げモーメント比は、理論値と比較的良好な一致を示した。

等曲げ区間で、主鉄筋が降伏した S0a シリーズ腐食

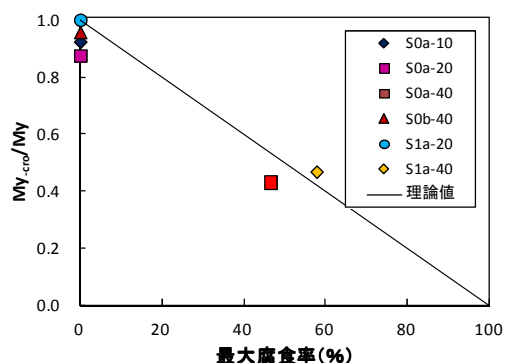


図-6 降伏曲げモーメント比と最大腐食率

試験体では、腐食領域に作用するモーメントが等曲げ区間の 60% であり、腐食対象領域の鉄筋の腐食率が 40% 以上にならないと、耐力に影響を及ぼすことはないと考えられる。しかしながら、試験体 S0a-10 および試験体 S0a-20 は図-4(a), (b)に示したように、等曲げ区間において鉄筋が降伏したものの、モーメント比が 1.0 より若干小さい値を示している。これは、腐食領域の変形が大きいことにより、等曲げ区間の曲率も影響を受け、非腐食試験体に比べて主鉄筋が早期に降伏したことが考えられるが、この原因については、今後さらなる検討が必要である。

5. 結論

以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 本実験の範囲内では、せん断補強筋を有しない RC はり部材において、せん断スパン内に局所的な鉄筋腐食を生じた場合、腐食領域への変形の集中により、破壊モードが斜め引張破壊へ移行する場合があった。また、耐力性能および変形性能は著しく低下した。
- (2) せん断補強筋は、局所的な腐食による斜め引張破壊を抑制するが、局所的な腐食を生じた領域に鉄筋の変形が集中し、鉄筋破断を生じる恐れがある。
- (3) 本実験の範囲内では、せん断スパン内において局所的な鉄筋腐食を生じた場合、鉄筋の最大腐食率を考慮した曲げ理論に基づき、主鉄筋降伏時のモーメントを、ある程度評価可能であった。

参考文献

- 1) 村上祐貴, 大下英吉, 鈴木修一, 堤知明: 鉄筋腐食した RC 梁部材の残存耐力性状に及ぼすせん断補強筋ならびに定着性能の影響に関する研究, 土木学会論文集 E, vol.64, No.4, pp.631-649, 2008.12.