

論文 鉄筋腐食の不均一性が RC 梁部材の残存曲げ耐荷性能に及ぼす影響

村上 祐貴*1・董 衛*2 鈴木 修一*3・大下 英吉*4

要旨: 本研究では、荷重作用により発生した曲げひび割れに起因して梁軸方向に腐食が不均一に発生した RC 梁部材の曲げ耐荷性能を明らかにすることを目的として、曲げひび割れの間隔やひび割れ幅の異なる RC 梁部材に対して促進腐食試験を実施し、曲げひび割れ性状が軸方向鉄筋の腐食性状に及ぼす影響評価を行った。また、載荷実験により、主鉄筋軸方向の腐食の不均一性が曲げ耐荷性能に及ぼす影響に関して検討した。その結果、曲げひび割れ性状によって鉄筋腐食の不均一性の程度は異なるとともに、不均一性の程度が著しい場合、局所的な鉄筋の腐食性状が曲げ耐荷性能に支配的な影響を及ぼすことが明らかとなった。

キーワード: 鉄筋腐食, 腐食の不均一性, 曲げ耐荷性能, 変形の局所化

1. はじめに

既存の鉄筋コンクリート構造物において、鉄筋腐食は構造体として機能する鉄筋量を減少させるとともに、腐食膨張によってかぶりコンクリートに腐食ひび割れが発生し、鉄筋コンクリートの付着応力性能を低下させる等、耐荷性能に様々な影響を及ぼすことが知られている。そのため、鉄筋腐食に起因した種々の劣化性状と鉄筋コンクリート部材の構造性能との関係を明らかにすることは既存の RC 構造物の維持管理活動を行う上で非常に重要となる。特にわが国においては高度成長期に建設された大量の社会資本ストックが、近い将来、建設から 50 年経過することとなり、その解明は急務の課題である。

このような背景から、近年では鉄筋腐食を生じた RC 部材の構造性能に関して、各方面で精力的に研究がなされており、組織的な活動も行われている¹⁾。既往の研究において、鉄筋腐食を生じた RC 部材の構造性能評価に関する知見や評価手法の多くは、梁全長にわたり鉄筋腐食が均一に発生した状態において検討がなされている。この場合、曲げ耐力に関しては、梁全長あるいは等曲げ区間における主鉄筋の平均的な断面減少を考慮した曲げ理論により、曲げ耐力をある程度評価可能であることが報告されている^{2), 3)}。しかしながら、実構造物においては、外部環境が一樣ではないため、鉄筋腐食は場所ごとに異なる。また、外部環境が仮に一樣であったとしても、乾燥収縮や温度応力による初期ひび割れ、自重や外力作用に起因して曲げひび割れが発生した箇所では、塩化物イオンが鉄筋まで容易に供給されるためひび割れ箇所では鉄筋腐食が局所的に進行する。特に、海洋環境下のような過酷な環境下におかれた RC 構造物ではひび割れ部における鉄筋の局所的な腐食は、構造物全体の

性能を著しく低下させる恐れがある^{4), 5)}。

このような曲げひび割れの発生による鉄筋腐食の不均一性が曲げ耐荷性能に及ぼす影響について検討した研究はほとんどないことに加えて、曲げひび割れの幅や、間隔といった曲げひび割れ性状が腐食鉄筋の腐食性状に及ぼす影響力についても明らかにされておらず、実環境化における RC 構造物の残存耐荷性能評価を行う上でこの種の検討は重要な位置づけにあると考えられる。

そこで、本研究では、曲げひび割れの幅や間隔といった曲げひび割れ性状が鉄筋腐食性状に及ぼす影響評価を行うとともに、曲げひび割れに起因した鉄筋腐食の不均一性が RC 梁部材の曲げ耐荷性能に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状および寸法を図-1に示す。試験体は 200 × 240 × 2100mm の RC 梁部材である。主鉄筋には D16(SD295A)を使用し、主鉄筋比は 1.55%である。せん断補強筋には D6(SD295A)を使用し、せん断補強筋間隔は示方書の規定に基づき、有効高さの 1/2 間隔(80mm)とした⁶⁾。

コンクリートの配合は表-1、鉄筋の材料試験結果は表-2に示す通りである。なお、コンクリートの練り混ぜ水は腐食を促進させるため 5%NaCl 水溶液とした。

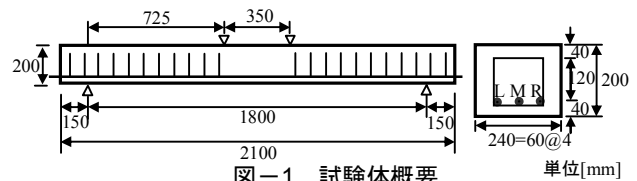


図-1 試験体概要

単位[mm]

*1 中央大学 理工学部土木工学科助教 工博 (正会員)

*2 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 工修 (正会員)

*3 東電設計株式会社 土木本部 (正会員)

*4 中央大学 理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

表-1 試験体配合

Gmax (mm)	W/C (%)	Sl (cm)	Air (%)	単体量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	混和剤
20	60	10	5.0	168	280	826	996	2.80

表-2 鉄筋の材料試験結果

鉄筋径	規格	公称断面積 (mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
D16	SD295A	1.98 × 10 ²	369	523	2.00 × 10 ⁵
D6		3.17 × 10 ²	438	557	2.00 × 10 ⁵

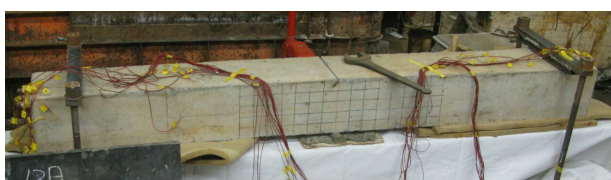


図-2 曲げひび割れ発生状況

2.2 腐食試験方法

試験体は、材齢 28 日の時点で荷重により曲げひび割れを発生させた。荷重は図-2 に示すように H 鋼と試験体を PC 鋼棒で締め付けることにより行った。その後、曲げひび割れを開いた状態で、電食により腐食を促進した。本研究においては、鉄筋腐食の評価指標として、腐食率、すなわち試験前後の鉄筋の質量減少率を用いることとした。主鉄筋の腐食率は主鉄筋を 50mm 間隔に切断し、一本あたり 42 ヶ所を計測した。なお、配筋した 3 本の主鉄筋を識別するため、両外側鉄筋を L, R 鉄筋、中央鉄筋を M 鉄筋と称することとする(図-1 参照)。

2.3 実験パラメータ

実験パラメータは表-3 に示すように、等曲げ区間に発生する曲げひび割れの間隔とそのひび割れ幅である。ひび割れ間隔の制御は、梁下縁にスリットを設け、所定の位置において曲げひび割れを誘発させることで行った(図-2 参照)。ひび割れ間隔の水準は 3 水準であり、それぞれ、0mm(スパン中央)、175mm(スパン中央と荷重点直下)および、87.5mm 間隔(スパン中央と荷重点直下およびその中間)である。試験体名称は、初めの数字がひび割れ間隔を表し、1 が 0mm, 3 が 175mm, 5 が 87.5mm に対応する。その次の数字は曲げひび割れ幅の目標値、末尾の数値は主鉄筋の目標腐食率である。なお、試験体 L0-0.00-0 および試験体 L0-0.00-5 は曲げひび割れを導入しない試験体である。両試験体は既往の研究において既に報告した試験体であるが、比較のため実験パラメータとして記載した³⁾。

ひび割れ幅の目標値は 0.1mm~0.5mm の間で設定し、PC 鋼棒の締め付け力を調整して制御した。ただし、PC 鋼棒の締め付け力の上限は鉄筋降伏前までとし、その制

表-3 実験パラメータ

シリーズ	試験体名	設定腐食率 (%)	導入ひび割れ幅(mm)	ひび割れ間隔幅(mm)	積算電流量 (hr·A)	圧縮強度 (N/mm ²)
L0 ¹⁾	L0-0.00-0	-	-	-	-	27.0
	L0-0.00-5	-	-	-	-	29.6
L1	L1-0.50-5	5	0.50	中心	1728	24.9
	L1-0.25-5		0.20			29.0
	L1-0.15-5		0.15			28.5
	L1-0.15-5		0.25			28.7
L3	L3-0.25-5	5	0.15	175	1728	23.4
	L3-0.15-5		0.15	87.5		23.2
L5	L5-0.15-5	5	0.15	87.5	1728	23.2

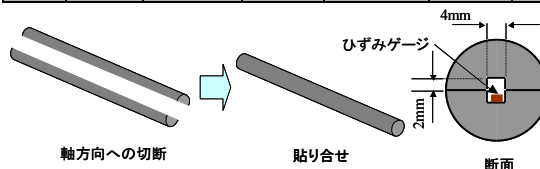


図-3 貼合せ鉄筋概要

表-4 各試験体の曲げひび割れ幅

シリーズ	試験体名	設定腐食率 (%)	導入ひび割れ幅(mm)	ひび割れ本数		ひび割れ幅			
				L側	R側	L側		R側	
						平均	最大	平均	最大
L1	L1-0.50-5	5	0.50	4	4	0.19	0.40	0.23	0.45
	L1-0.25-5		0.20	3	4	0.20	0.25	0.16	0.25
	L1-0.15-5		0.15	3	4	0.11	0.15	0.11	0.15
L3	L3-0.25-5	5	0.25	5	4	0.19	0.25	0.16	0.25
	L3-0.15-5		0.15	3	3	0.12	0.15	0.15	0.15
L5	L5-0.15-5	5	0.15	3	2	0.10	0.10	0.10	0.10

御は鉄筋に貼付けたひずみゲージによって行った。主鉄筋の目標腐食率は梁全長の平均で 5%とした。

2.4 荷重試験および測定項目

荷重は変位制御 (0.5mm/min) で行い、図-1 に示したように荷重点間隔 350mm, 支点間距離 1800mm の静的 4 点曲げ荷重試験である。せん断スパン比は 4.53 である。

測定項目は、鉄筋の腐食率、腐食ひび割れ幅、スパン中央部のたわみおよび鉄筋の軸方向ひずみである。スパン中央部のたわみは、1/100mm 変位計を荷重点直下に 2 点、試験体中央に 1 点設置して測定した。鉄筋ひずみは、既往の研究と同様に、図-3 に示す貼合せ鉄筋を中央鉄筋に用いて計測した。なお、測定点数は 3D 間隔(3 × 16mm=48mm)の計 45 箇所である。

3. 腐食劣化状況

3.1 鉄筋の腐食状況

(1) 曲げひび割れ発生状況

表-4 に各試験体の等曲げ区間におけるひび割れ幅を示す。ひび割れ本数は、L 鉄筋および R 鉄筋側の側面において等曲げ区間に発生したひび割れ発生本数を示している。曲げひび割れは、スリットを設けていない位置からもひび割れが発生したものの、いずれの試験体もスリットを設けた位置にひび割れ幅は最大値を示した。

(2) 曲げひび割れ性状と鉄筋腐食の不均一性

表-5 に各試験体の主鉄筋の平均腐食率を示す。ここで、平均腐食率とは 50mm 間隔に鉄筋を切断する前に計測した鉄筋全長の質量から算出した 3 本の主鉄筋の腐食率の平均値である。

曲げひび割れを事前に導入した試験体シリーズは等曲げ区間における主鉄筋の平均腐食率は梁全長にわたる平均腐食率に比べて著しく大きくなっている。また、図-4には各腐食試験体の等曲げ区間における主鉄筋の腐食率分布の一例を示したものであるが、曲げひび割れが最大値を示した領域近傍の腐食率が非常に大きくなっている。また主鉄筋の腐食率を著しく進行させるひび割れ幅は0.15mm以上であり、ひび割れ幅が0.1mmの箇所では腐食の著しい進行は確認されなかった。

現行のコンクリート標準示方書においては、腐食に関する許容ひび割れ幅は過酷な腐食性環境下において0.0035Cmm(C:かぶり厚)と規定されている。この場合、本試験体における許容ひび割れ幅は0.1mmとなり、現行の規定が妥当であることが示された。

3.2 腐食ひび割れ状況

図-5に各腐食試験体の腐食ひび割れ性状を示す。まず、底面に関してはいずれの試験体も主鉄筋軸に沿って腐食ひび割れが梁全長にわたり発生した。試験体側面に関しては、曲げひび割れを導入していない試験体L0-0.00-5は梁上縁から下縁に向かってせん断補強筋に沿った腐食ひび割れが発生したことに對して、曲げひび割れを導入した試験体においては、そのようなひび割れは定着領域近傍において若干生じているのみである。これは曲げモーメントを作用した状態で電食試験を行った

表-5 各試験体の平均腐食率

シリーズ	試験体名	設定腐食率(%)	主鉄筋全体(%)				等曲げ区間(%)				最大腐食率(%)
			L	M	R	平均	L	M	R	平均	
L0	L0-0.00-5	5.0	3.7	3.5	4.0	3.6	5.8	5.4	6.3	5.8	8.3
L1	L1-0.50-5		3.7	1.8	3.2	2.9	12.2	8.2	9.4	9.9	26.7
	L1-0.25-5		2.5	1.7	3.4	2.5	10.1	7.5	14.3	10.6	26.9
	L1-0.15-5		0.9	0.2	0.0	0.4	6.7	3.7	5.3	5.2	13.0
L3	L3-0.25-5		0.0	1.7	3.1	1.6	4.6	7.7	8.4	6.9	15.6
	L3-0.15-5		1.3	2.4	2.0	1.9	10.0	11.0	13.9	11.6	16.9
L5	L5-0.15-5		2.8	1.1	3.0	2.3	6.9	4.9	7.0	6.3	6.5

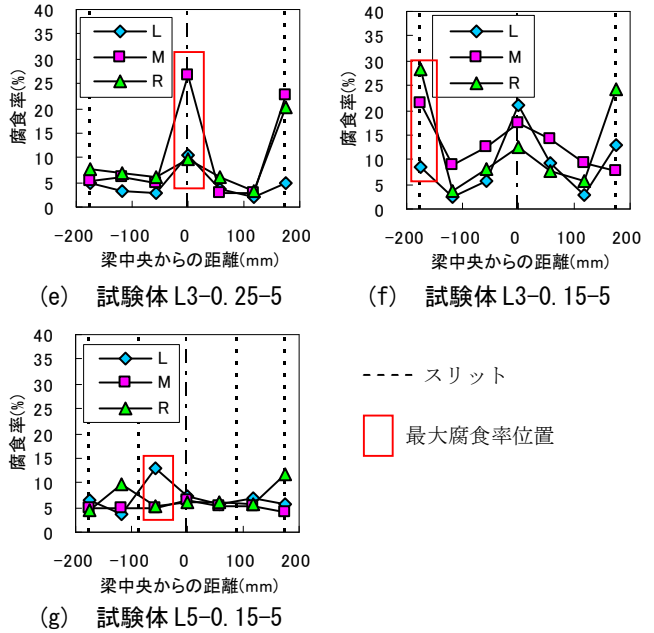
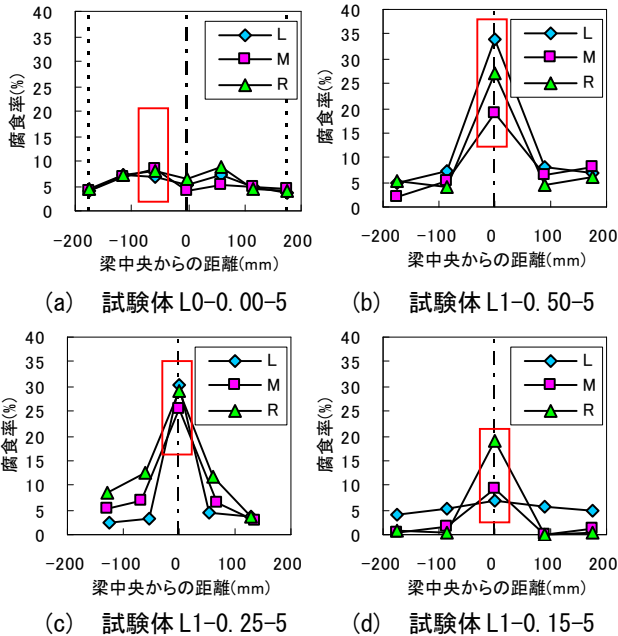


図-4 等曲げ区間の腐食率分布

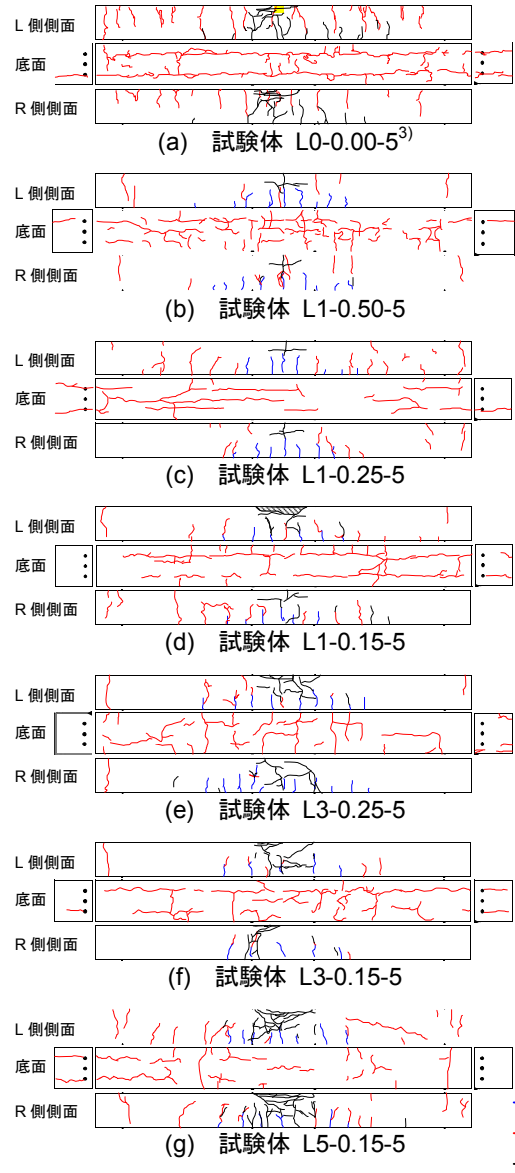


図-5 ひび割れ性状

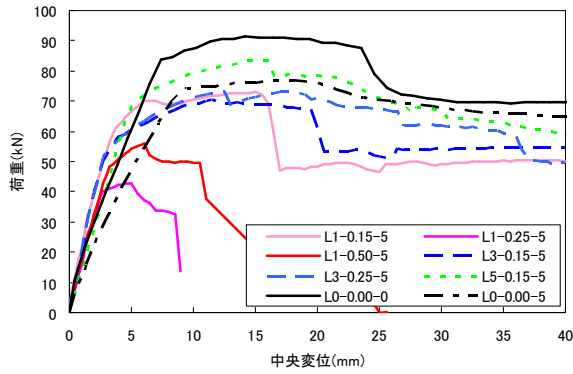


図-6 荷重と中央変位

たことが要因として考えられる。すなわち、腐食促進の過程において、梁上縁は圧縮応力状態であり、せん断補強筋の腐食膨張圧に対して拘束力として作用したものと考えられる。

4. 載荷試験結果

4.1 破壊性状

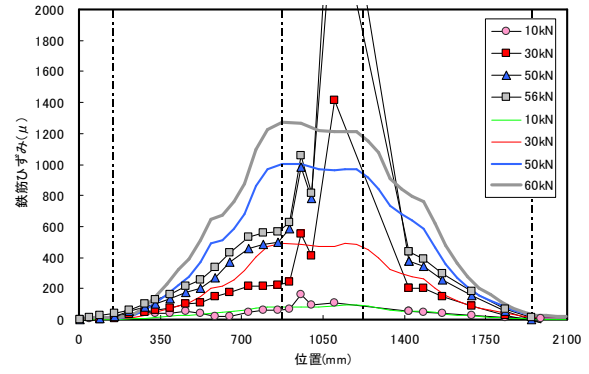
前掲図-5 に載荷試験終了時における各試験体の破壊ひび割れ性状を示す。同図に示すように、いずれの試験体においても新たに発生した曲げひび割れはほとんど無く、事前に導入した曲げひび割れが進展するのみであった。

4.2 変形状

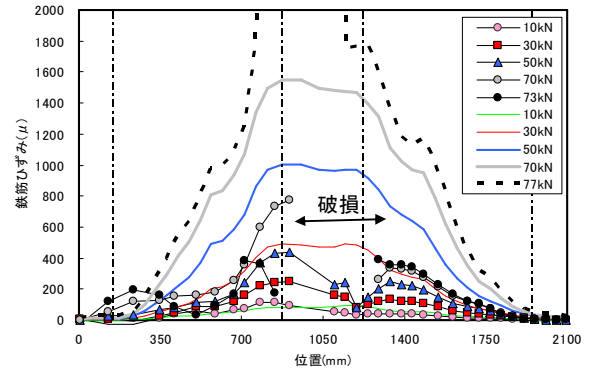
図-6 に各腐食試験体の荷重と中央変位の関係を示す。まず、L1シリーズに関しては、曲げひび割れを導入していない試験体 L0-0.00-5 と比較すると、曲げ耐力が大幅に低下するとともに、全ての主鉄筋が破断し、脆性的な破壊性状を示した。L3シリーズ試験体に関しては、最終的に鉄筋破断を生じたものの、L1シリーズに比べて破壊は延性的であった。L5シリーズ試験体に関しては、鉄筋破断は生じず、圧壊により破壊に至った。

図-7 に各試験体の各荷重レベルにおける主鉄筋のひずみ分布性状を示す。なお、試験体 L1-0.25-5、および試験体 L1-0.15-5 は、電食に伴いひずみゲージが破損したため、鉄筋ひずみのデータがない。また、各図には比較のため曲げひび割れを導入していない試験体 L0-0.00-5 のそれを実線で示した。

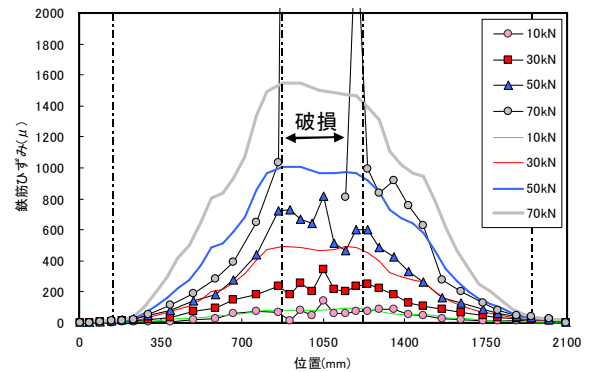
まず、L1シリーズ試験体のひずみ分布に着目すると、荷重の載荷に伴って等曲げ区間の一部の領域においてひずみが局所的に増加しており、等曲げ区間の限られた領域において変形が集中して発生していることが確認される。一方、L5シリーズに関しては、L1シリーズとは異なり、等曲げ区間のひずみはほぼ一様であり、発生した曲げひび割れ幅や間隔によって変形の集中の有無やその程度は異なることが明らかとなった。L3シリーズに関しては等曲げ区間のひずみデータが少なく、局所化の有無は判断出来なかった。また、曲げひび割れを導入



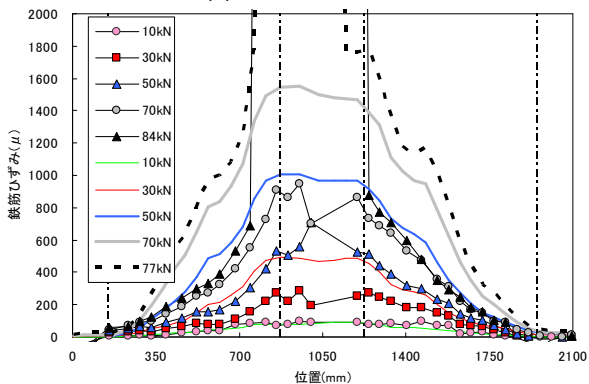
(a) 試験体 L1-0.50-5



(b) 試験体 L3-0.25-5



(c) 試験体 L3-0.15-5



(d) 試験体 L5-0.15-5

図-7 鉄筋ひずみ分布

した試験体のひずみ分布性状は、いずれも同一荷重における試験体 L0-0.00-5 に比べて全体的に小さい値を示している。このことから判断すると、曲げひび割れを事前に導入した試験体は、曲げひび割れの発生により載荷当初から、中立軸が圧縮縁に近い位置にあると考えられる。したがって、曲げひび割れ導入した試験体は試験体

L0-0.00-5 に比べてモーメントアーム長が長く、同一荷重レベル時におけるひずみが全体的に小さくなったものと考えられる。また、腐食試験体の鉄筋のひずみ分布を鑑みれば、腐食試験体の剛性が非腐食試験体よりも大きいことも裏付けられる。

4.3 耐力力

図-8 は、等曲げ区間内の平均腐食率を用いて耐力比の関係を整理したものである。同図には既報の結果を合わせて示している^{2),7)}。また、鉄筋の断面減少と降伏応力の低下を考慮し、曲げ理論に基づいて算出した耐力比を実線で示した³⁾。理論値を算出する際の応力中心間距離は腐食率によって異なるが、非腐食時においては146mmである。ここで耐力比とは、鉄筋が非腐食時における曲げ耐力を1として正規化した値である。同図に示すように、ひび割れ間隔が大きくなるに従い、耐力比が理論値に比べて著しく低下しており、梁中央にひび割れを集中的に発生させた L1 シリーズ試験体においては、曲げ理論に比べて単位腐食率あたりの低下量は著しい。このことは、図-7 に示したひずみ分布性状からも分かるように、局所的に腐食の進行した領域において主鉄筋の変形が集中し、この領域における主鉄筋の腐食率が曲げ耐力に支配的になるためであると考えられる。これに対して、ひび割れを分散して発生させた L5 シリーズにおいては、主鉄筋の腐食の不均一性は比較的軽微であることから、図-7 に示したように等曲げ区間にわたり、主鉄筋が降伏した。そのため、等曲げ区間の平均腐食率を用いて算出した曲げ理論と実測値は比較的良好な一致を示したものと考えられる。

図-9 は等曲げ区間における主鉄筋の最大腐食率と耐力比の関係を示したものである。ここで、最大腐食率とは、検長 50mm あたりの平均腐食率であり、厳密に破断或いは局所的に著しく主鉄筋が変形した箇所の腐食率ではない。同図に示すように最大腐食率で整理した場合、いずれの試験体シリーズにおいても理論値と曲げ耐力は比較的良好な一致を示していることが分かる。

すなわち、主鉄筋の腐食率を 50mm 程度の間隔毎に計測し、その最大腐食率を示した位置において、主鉄筋の材料劣化を加味した曲げ理論から、耐力はある程度評価可能であると言える。しかしながら、このことは主鉄筋の定着が十分に確保された状態で言えることであり、定着不良が生じた場合には、主鉄筋の抜出しにより、破壊モードが曲げからせん断或いは付着割裂破壊へ遷移する場合もある³⁾。また、実構造物において主鉄筋の腐食率を本実験のように詳細に計測することは物理的、経済的に困難であり、曲げひび割れ幅やその発生間隔から、腐食の不均一性の程度を予測し、曲げ耐力性能を評価する必要があると考えられる。

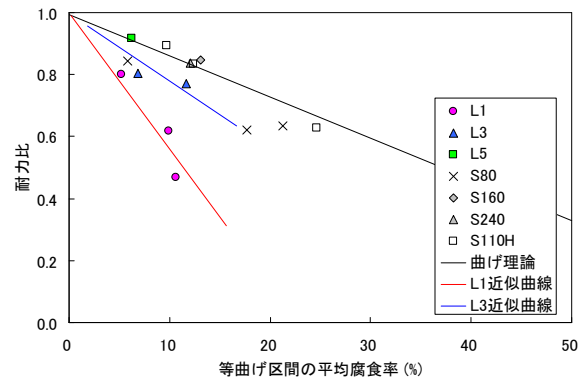


図-8 耐力比と主鉄筋の平均腐食率(等曲げ)

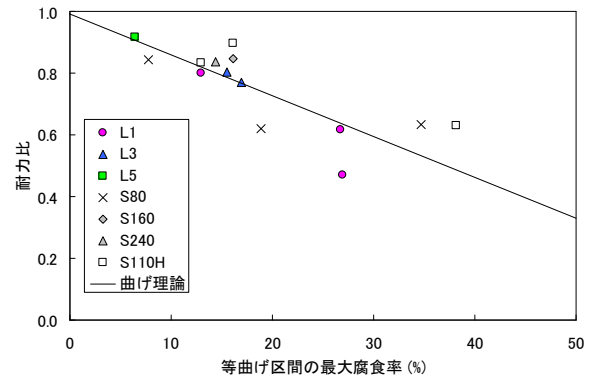


図-9 耐力比と主鉄筋の最大腐食率

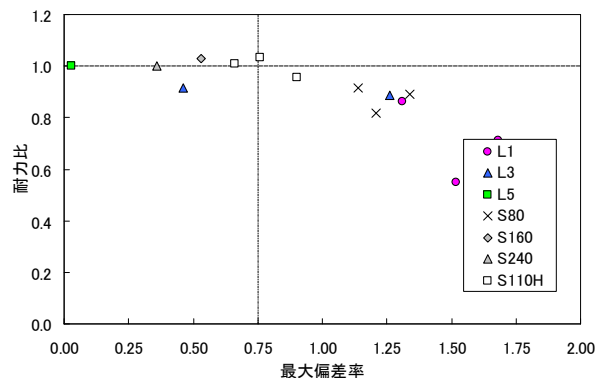


図-10 耐力比～最大偏差率

4.4 鉄筋腐食の不均一性が曲げ耐力性能に及ぼす影響

上述したように、局所的に腐食が進行した RC 梁部材においては、その領域において部材の変形が集中的に発生し、曲げ耐力は著しく腐食した領域の腐食率によって決定されることとなる。実構造物においても詳細な主鉄筋の腐食率を調査することが可能であれば、現有の曲げ耐力をある程度評価可能であると思われるが、詳細検査には様々な制約が課せられ、その実施は通常困難となる。したがって、ある程度広い領域における平均的な腐食率から、曲げひび割れの幅や間隔といった腐食率よりも、取得が容易であるこれらの情報を用いて、局所的な腐食率を予測し、曲げ耐力を評価することが現実的であり、その評価を試みることにする。

本研究においては腐食の不均一性を、式(1)に示す偏差率を指標とした。

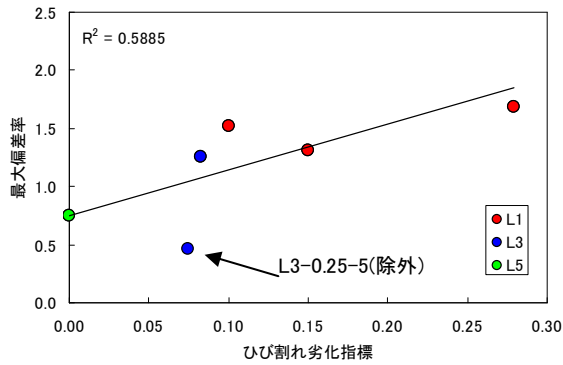


図-11 ひび割れ劣化指標～最大偏差率

$$k = (\alpha - \alpha_{avg}) / \alpha_{avg} \quad (1)$$

ここで、 k :偏差率、 α :主鉄筋の局所的な腐食率、 α_{avg} :等曲げ区間における主鉄筋の平均腐食率である。

図-10 は各試験体の最大偏差率と耐力比の関係を示したものである。同図には既往の研究において報告した、試験体の結果も併せて示している^{3),7)}。同図より、最大偏差

率が0.75以下では、等曲げ区間における平均的な主鉄筋の腐食率を用いて算出した曲げ耐力と実測の曲げ耐力に差異はほとんどない。最大偏差率が0.75以上の場合では、理論値に比べて実測値の耐力は小さくなる傾向を示しており、このことから本実験の範囲内では腐食の不均一性が曲げ耐力に影響を及ぼす最大偏差率の閾値は約0.75であることが分かる。また、理論値と実測値の差異は、最大偏差率の増加に従い、ほぼ線形的に低下しており、等曲げ区間の最大偏差率を評価することによって、現有の曲げ耐力を予測できる可能性がある。

図-11 は式(2)に示すひび割れ劣化指標と各試験体の等曲げ区間の最大偏差率との関係を示したものである。

$$D = l_{rto} \times k_{rto} \times w_{max} \quad (2)$$

$$l_{rto} = (l_m / n) / l_m \quad k_{rto} = (w_{max} / w_{avg})$$

ここで、 l_{rto} :等曲げ区間に対する平均ひび割れ間隔比、 k_{rto} :等曲げ区間の最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の比、 w_{max} :等曲げ区間の最大ひび割れ幅、 l_m :等曲げ区間、 n :等曲げ区間のひび割れ本数である。

なお、腐食ひび割れ幅が0.1mm以下のひび割れは除外した。また、図-11において、劣化指標Dがゼロ、すなわち、0.1mm以上のひび割れが生じていない場合においては、最大偏差率を閾値の0.75とした。

同図に示すように試験体 L3-0.25-5 を除き、腐食劣化指標と最大偏差率は比較的良好な相関関係を有することが分かる。このように、本実験の範囲内ではあるが、曲げひび割れに起因した鉄筋腐食の不均一性が曲げ耐力に及ぼす影響は、曲げひび割れ幅や間隔を指標としたひび割れ劣化指標によりある程度評価可能あり、部材外観に生じるひび割れ性状から、現有の曲げ耐荷性能を評価することが可能であるものと考えられる。

5. 結論

本研究では、曲げひび割れの幅やその間隔といった曲げひび割れ性状が鉄筋腐食性状に及ぼす影響評価を行うとともに、曲げひび割れによって鉄筋軸方向に腐食の不均一性を有する RC 梁部材の曲げ耐荷性能について検討を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 曲げひび割れが発生した RC 梁部材の鉄筋腐食の不均一性の程度は、発生した曲げひび割れの間隔およびその幅によって大きく異なり、ひび割れ幅およびひび割れ間隔が大きいほど、腐食の不均一性は著しく生じる。
- (2) 等曲げ区間のように作用モーメントの大きい領域において、局所的に主鉄筋の腐食が著しく進行した箇所があるような状態では、等曲げ区間の平均的な腐食を用いて算出した曲げ耐力は危険側の評価となる。
- (3) 腐食の不均一性が著しく生じた RC 梁部材の曲げ耐力は局所的に腐食が進行した領域の腐食率を用いて曲げ耐力をある程度評価可能である。
- (4) 曲げ耐力に及ぼす腐食の不均一性の程度は、等曲げ区間における偏差率によってある程度評価可能である。本実験の範囲内では、等曲げ区間の最大偏差率が約0.75以上の場合、局所的に腐食が進行した領域の腐食率が曲げ耐力に支配的な影響となった。
- (5) 腐食の不均一性の程度を曲げひび割れ幅や曲げひび割れ間隔との関連付けを行い、本実験の範囲内ではあるが、曲げひび割れ性状から、腐食の不均一性の影響をある程度評価可能とした。

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の構造性能，コンクリート技術シリーズ 71,2006
- 2) 村上祐貴，大下英吉ら：鉄筋腐食した RC 部材の残存曲げ耐力に及ぼすせん断補強筋の影響評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.727-732，2006
- 3) 村上祐貴，大下英吉ら：鉄筋腐食した RC 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
- 4) 濱田洋志ら：局所的に生じた鉄筋腐食が RC はりの構造性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.1729-1734，2007
- 5) 花岡大伸ら：鉄筋コンクリート梁の腐食形態と腐食量が曲げ性状に及ぼす影響，土木学会論文集，vol.63，No.2，pp.300-312
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書，2002
- 7) 若林泰光，大下英吉ら：鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存耐力性状に及ぼすせん断スパン比の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.727-732，2008