

論文 鉄筋腐食の空間的不均一性が鉄筋コンクリート部材の耐荷性状に及ぼす影響

村松 真伍^{*1}・小林 豊^{*2}・下村 匠^{*3}

要旨: 実験的に作製した部材中における軸方向鉄筋の腐食の分布が一樣でない RC はりの曲げ載荷試験を行い、鉄筋腐食の空間的不均一性が部材の耐荷性状に及ぼす影響について検討した。あわせて、コンクリート打設前にあらかじめ腐食させた鉄筋を用いることにより、腐食による付着劣化の影響を排除した試験体を作製し、曲げ載荷試験を行った。それらの結果、空間的不均一性がある場合でも、部材断面における主鉄筋総断面積を考慮することで曲げ耐力を概ね評価できることがわかった。また、付着劣化はひび割れ分散性に影響を及ぼすものの、主鉄筋端部の定着が保たれている場合、曲げ耐力への影響は小さいことがわかった。

キーワード: 鉄筋腐食, RC はり, 付着劣化, 曲げ耐力, 電食試験

1. はじめに

近年、鉄筋腐食による RC 構造物の力学性能の低下を定量化する研究が精力的に行われている。特に、引張主鉄筋が腐食した RC はり部材の静的な曲げ耐荷性状に関する研究は数多く行われている。その結果、腐食の程度が著しくはなく、定着部破壊、鉄筋破断のおそれがない場合は、鉄筋降伏荷重、曲げ耐力等の腐食後の部材の耐荷性状は、主鉄筋の平均断面減少量を考慮することで概ね評価ができることが知られている¹⁾。しかし、多くの既往の研究では、理想化された条件下での室内実験の結果に基づき論じられている。鉄筋腐食は実環境下の複雑な条件下で生じるので、今後それらの影響を検討してゆかなければならない。

本研究では、部材中における鉄筋腐食の空間的不均一性の影響に着目する。既往の研究では、単鉄筋の RC はり供試体に一樣な腐食を導入したことが多いが、実構造物においては複数の鉄筋が配置されており、部材位置や環境によっては鉄筋が部分的に腐食することが考えられるためである。

あわせて、本研究では、コンクリート中の鉄筋の腐食が RC 部材の力学性状に影響を及ぼす因子のうち、鉄筋の断面積減少と付着劣化の影響を独立に検討する実験を行った。通常のコンクリート中の鉄筋の腐食では、腐食による鉄筋断面積の減少と、腐食生成物や腐食ひび割れによる付着劣化（場合によっては腐食膨張圧による付着の増大）は同時に生じるので、それぞれの影響を独立に検討することは難しい。本研究では、コンクリート打設前に腐食を導入した鉄筋を用いることにより、腐食による付着劣化の影響を排除した腐食 RC はり試験体を作製した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

RC はり試験体の形状と寸法、配筋を図-1に示す。標準試験体は D13 鉄筋を 50mm 間隔で 3 本配置した。主鉄筋本数の影響を検討するため、主鉄筋総断面積を同程度とする D22 鉄筋を 1 本配置した試験体も加えて用意した。電食により腐食を導入するのは軸方向鉄筋のみとし、せん断補強筋には通電しないよう軸方向鉄筋とせん断補強鉄筋が触れる箇所には絶縁テープを巻き、組立筋に木材棒を使用した。(N シリーズ)

P シリーズは、腐食によるコンクリートと鉄筋との付着劣化の影響を検討するためのシリーズである。あらかじめ、鉄筋単体に電食による腐食を導入し、腐食生成物

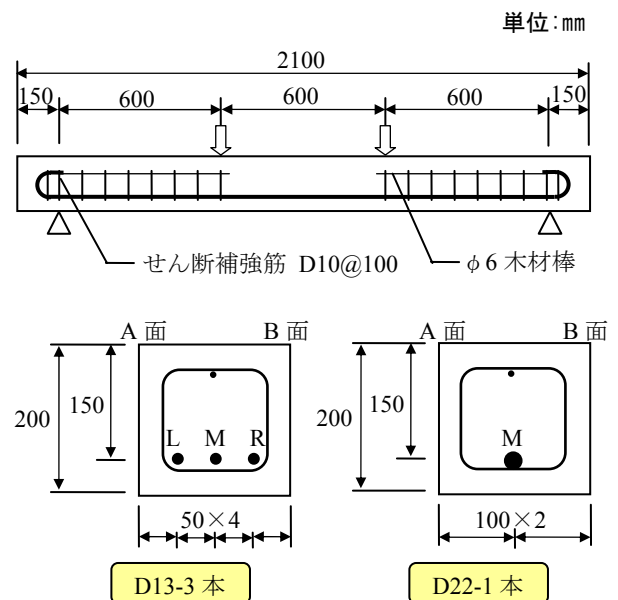


図-1 試験体形状・寸法

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科修士課程建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学大学院 工学研究科修士課程建設工学専攻 (正会員)

*3 長岡技術科学大学 環境・建設系 准教授 (正会員)

表-1 実験に使用したコンクリートの配合

試験体	粗骨材 最大寸法 Gmax (mm)	水セメント 比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単用量(kg/m ³)						備考
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水 剤	AE剤	
					W	C	S	G	ad1	ad2	
下記以外	25	53	4.5	40.9	140	264	774	1175	0.79	0	生コン使用
P13-15	20	50	6	45.0	165	330	797	1014	3.30	1.32	
P13-10, P13-30	20	50	6	45.0	165	330	800	1014	3.30	0	
N13-10-2	20	50	6	45.0	165	330	796	976	3.30	0	早強セメント使用

を取り除いた後にこれを軸方向鉄筋として用いて、Nシリーズと同寸法・形状の試験体を作製した。図-2に実験の作業順序を示す。実験に使用したコンクリートの配合を表-1に、曲げ載荷試験時のコンクリートおよび鉄筋の物性値を表-2に示す。N13-10-2の圧縮強度が他より高いのは、早強セメントを用いて追加で作製した試験体であるためである。

表-2 コンクリートと鉄筋の物性値

試験体	コンクリート		鉄筋		
	圧縮強度	弾性係数	種類	降伏強度	弾性係数
	N/mm ²	kN/mm ²		N/mm ²	kN/mm ²
N13-0	47.5	36.5	D13	394.2	188.1
N13-10-1	50.7	37.1			
N13-10-2	66.4	35.8			
N13-30	53.2	42.5			
N22-10	51.9	36.8	D22	406.2	180.6
P13-10	54.2	31.7	D13	394.2	188.1
P13-30	57.0	38.5			
P13-15	45.8	30.1			

2.2 電食試験

腐食の導入は、鉄筋ごと腐食量を調整できることから電食を用いた。その概要を図-3に示す。腐食量の調整法は、既往の研究²⁾により得られた積算電流量と腐食量の関係式を参考に通電時間を決定した。また、印加する電流は既往の研究^{3,4)}と同程度に、電食対象鉄筋の表面積に対して8.7[A/m²]とした。

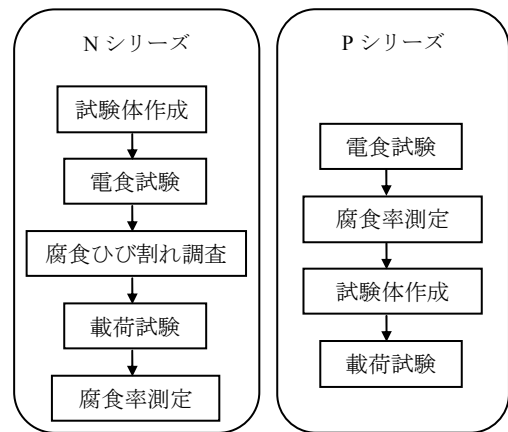


表-3に各試験体の目標腐食量を示す。軸方向鉄筋の3本の平均腐食率を10%とし、3本の鉄筋が10%ずつ腐食したケース(N13-10-1, N13-10-2, P13-10)と1本の主鉄筋のみ30%腐食したケースを(N13-30, P13-30)設定した。試験体N13-10-2は、N13-10-1の追試験である。また、P13-15のみ平均腐食量を15%としているのは特に意味はなく、試験的に行ったケースだからである。

図-2 実験の作業順序

試験体名は、シリーズ名(N, P)、主鉄筋径(13, 22)、部材中の目標腐食率が最も大きい値(10, 30)を続けた。

2.3 腐食ひび割れ調査

電食による所定の腐食導入後、Nシリーズの試験体の側面(A面, B面)と下面において、腐食ひび割れ状況の観察を行った。また、クラックスケールを用いて、これら3面に発生した腐食ひび割れ幅を軸方向に50mm間隔で測定した。なお、測定は軸方向に伸びる腐食ひび割れを対象に行い、同一面に複数の腐食ひび割れがある場合、ひび割れ幅の大きい方の値を用いた。

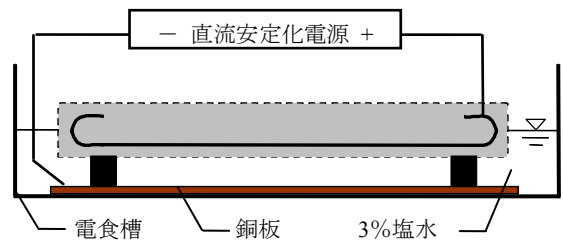


図-3 電食試験概要

2.4 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験は図-1に示すよう、等曲げスパン600mm, せん断スパン600mmとする2点載荷を行った。計測は、荷重, 変位, コンクリート圧縮縁のひずみについて行い、変位は等曲げモーメント区間において5ヶ所(150mm間隔), 支点2カ所を片面(B面)から測定した。N13-30とP13-30は、A面の中央変位, 載荷点変位の計3箇所も測定した。

表-3 目標腐食量

試験体	電食環境	目標腐食率(%)			
		L	M	R	平均
N13-0	コンクリート中	0	0	0	0
N13-10-1		10	10	10	10
N13-10-2		10	10	10	10
N13-30		30	0	0	10
N22-10		10			10
P13-10	鉄筋単体	10	10	10	10
P13-30		30	0	0	10
P13-15		15	15	15	15

2.5 腐食率調査

載荷試験後、軸方向鉄筋をコンクリート中よりはつり出し、10%クエン酸水素二アンモニウム溶液に数日間浸漬し腐食生成物を取り除いた。電食前後の重量測定から、質量減少率を算出した。また、ノギスを用いて主鉄筋の最小径を支点間において50mm間隔で測定し、鉄筋断面が円形であると仮定して健全鉄筋の最小径を基準に断面減少率を算出した。なお、測定位置は腐食ひび割れ幅測定位置に対応する。

表-4 腐食量の測定結果

試験体	鉄筋位置	質量減少率 (%)	断面減少率(%)		
			平均	最大	標準偏差
N13-10-1	L	10.8	8.2	21.0	3.9
	M	11.7	8.2	26.1	5.5
	R	12.6	12.4	33.1	7.8
N13-10-2	L	5.1	5.7	10.9	2.1
	M	7.7	12.7	23.0	5.0
	R	4.9	5.3	11.2	1.6
N13-30	L	27.8	29.8	54.1	12.8
	M	2.8	5.0	7.8	1.5
	R	2.7	4.2	8.1	1.4
N22-10	M	6.6	7.2	23.5	4.3
P13-10	L	11.2	7.0	18.9	3.1
	M	11.1	6.9	17.5	3.4
	R	11.3	7.8	13.9	2.7
P13-30	L	30.5	28.9	45.5	7.8
	M	-	-	-	-
	R	-	-	-	-
P13-15	L	15.5	10.3	20.4	4.3
	M	15.4	9.7	16.3	3.8
	R	14.7	11.5	18.0	3.7

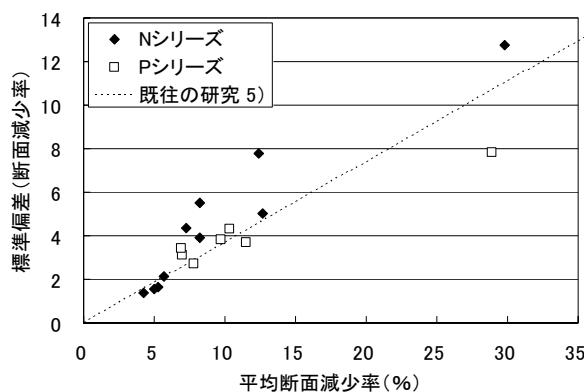


図-4 平均断面減少率と標準偏差

3. 電食試験結果および考察

3.1 鉄筋の腐食状況

表-4 に腐食量の測定結果を示す。質量減少率は主鉄筋全長の値であり、端部フックも含むものである。表中には断面減少率の平均値、最大値に加え、標準偏差を示した。また、断面減少率の平均値と標準偏差の関係を図-4 に示す。既往の研究⁵⁾では、限られた実験条件範囲の電食による腐食の結果であるが、鉄筋軸方向に沿った

腐食量分布のばらつきの程度を表す変動係数は腐食量の平均値によらずほぼ一定である結果が得られている。図中の直線はこの結果を表したもので、変動係数(直線の傾き)は0.37である。

本研究の実験結果においても同様に、平均値と標準偏差に比例関係が認められる。ただし、Nシリーズの方がPシリーズよりも若干変動係数が大きいようである。これは、コンクリート中では、コンクリートの品質の空間分布や腐食ひび割れの発生により、裸鉄筋の場合よりも腐食の不均一性が助長されたためであると考えている。

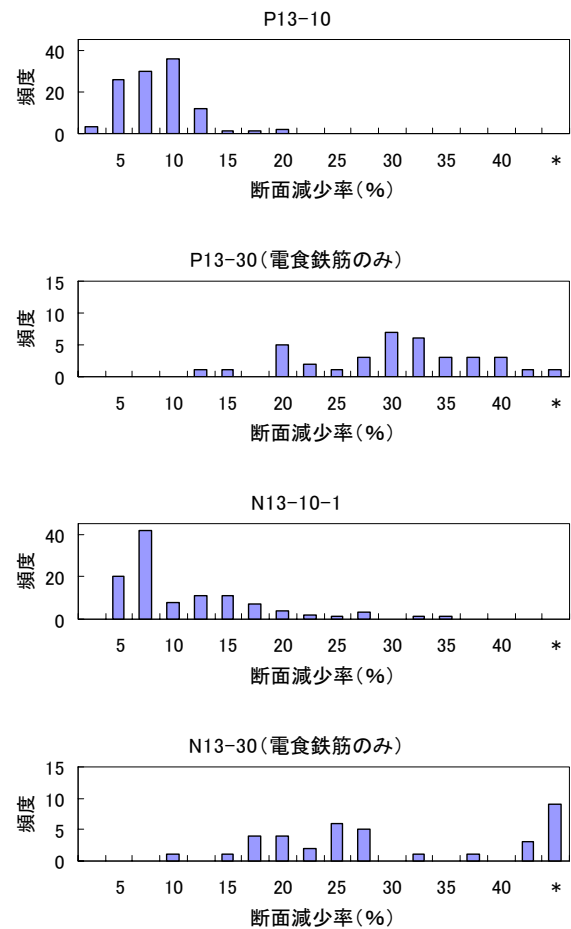


図-5 鉄筋断面減少率の頻度分布

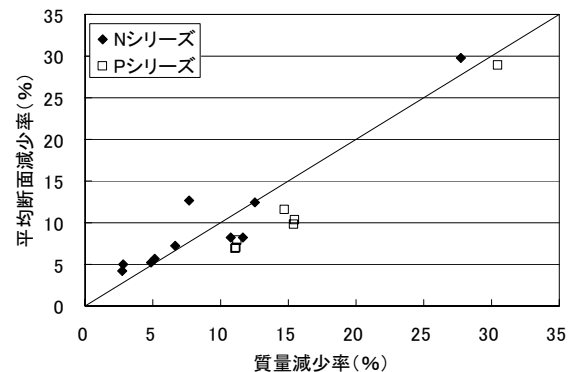


図-6 質量減少率と支点間の平均断面減少率

図-5 に鉄筋の断面減少率の頻度分布を示す。目標腐食率 30% (N13-30) で最も頻度が高いのは、断面減少率が 42.5%以上の部分 (*) であり、たとえば表-4 に示したよう断面減少率が 54.1%の箇所もある。これらは、コンクリート中では、腐食ひび割れ発生位置においてさらに腐食が進行したためと考えられる。一方、P シリーズは正規分布に近い断面減少率分布を示している。

図-6 に、重量測定により得られた質量減少率とノギスによる鉄筋最小径の実測より得られた断面減少率の平均値の関係を示す。断面減少率の平均値は、質量減少率とほぼ等しい結果となった。ただし、P シリーズは質量減少率がノギス測定による断面減少率よりやや大きい傾向がみられた。鉄筋径の測定は最小径を測定するため、節を避けて行っており、P シリーズは N シリーズに比べ鉄筋の節が腐食する傾向が強かったためと思われる。本論文では、以後、ノギス測定による断面減少率を測定位置の腐食率として扱う。

3.2 腐食ひび割れに関する検討

N シリーズすべての試験体において、腐食ひび割れは側面 (A 面, B 面) と下面のすべてまたはいずれかに発生しているため、軸方向の各断面における 3 面のひび割れ幅の合計値を用いて検討する。

図-7 に軸方向の各断面における断面減少率と腐食ひび割れ幅の関係を示す。図中には、単鉄筋の RC はり試験体を用いて著者らが行った既往の実験結果³⁾も示した。既往の実験結果も軸方向に 50mm 間隔で測定したものである。いずれのデータも、各位置における断面減少率と腐食ひび割れ幅の関係はばらつきが大きく明瞭な関係は得られなかった。

図-8 に、図-9 と同じ試験体の測定結果より得られた連続した 150mm 区間の断面減少率の平均値と腐食ひび割れ幅の平均値の関係を示す。断面減少率、腐食ひび割れ幅ともに、軸方向の連続 3 測定点の値を平均したものである。このデータ処理により 2 つの傾向が現れた。

まず、単鉄筋はりを用いた既往の実験データでは、断面減少率と腐食ひび割れ幅の間に概ね線形関係がみられた。次に、断面減少率と腐食ひび割れ幅の比率 (原点からの傾き) は、N13 の 3 体が同程度、次いで N22-10、既往の実験データの順に小さくなった。ここに、試験体のかぶりが N13 の 3 体は 44mm、N22-10 は 39mm、既往の実験データは 20mm である。これらより、鉄筋腐食量と腐食ひび割れ幅の関係にはかぶりの影響が認められることがわかる。

ここでの最も重要な知見は、複数鉄筋が配置された RC 部材であっても、同一断面内の複数の鉄筋の腐食量の平均値 (または合計値)、側面・下面のひび割れ幅の平均値 (または合計値)、およびそれらの軸方向の一定区間

(ここでは 150mm) の空間平均値を定量化の対象とすることにより、明瞭な関係が現れたことである。このことは、鉄筋腐食により RC 部材に導入される事象を定量化する際には、ある程度の大きさの空間領域 (コントロールボリューム) を構成単位として考え、その領域内における平均物理現象を対象に定量化を行うことが有効であることを示唆している。

なお図-8 に見られた傾向は、測定点 5 点 (250mm 区間) の平均値を用いても大きく変わることはなかった。また、支点間の平均値を用いて、試験体一体につき 1 づ

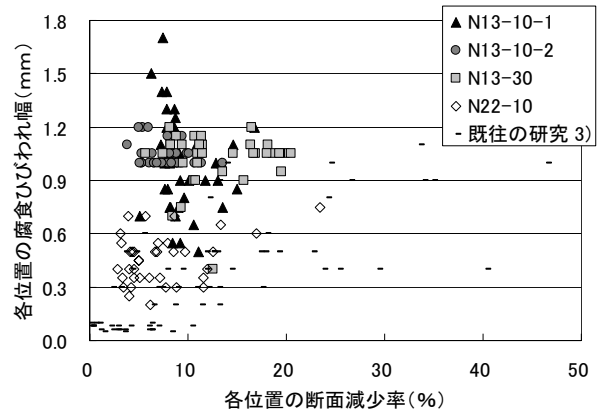


図-7 同一断面における断面減少率と腐食ひび割れ幅

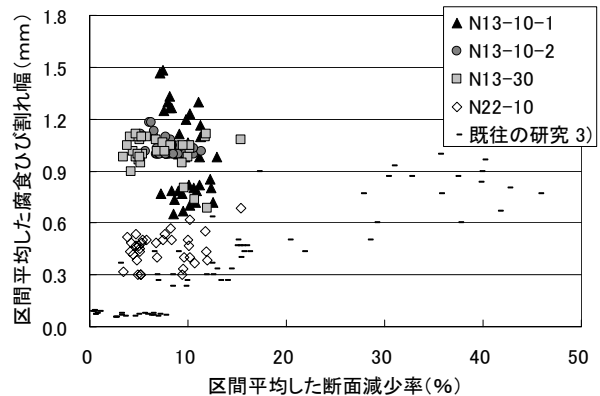


図-8 区間平均を用いた断面減少率と腐食ひび割れ幅

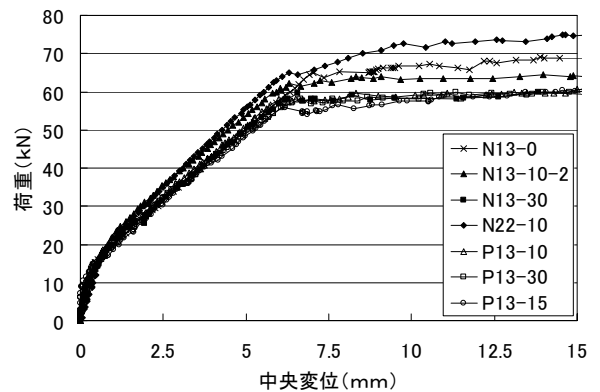


図-9 荷重と中央変位

ロットとした場合についても同様であった。これらのことから、鉄筋腐食量と腐食ひび割れ幅の関係に関する限り、軸方向には 150mm 以上の大きさの空間領域を定量化の構成単位と考えることが有効であると思われる。

4. 載荷試験結果および考察

4.1 耐荷性に関する検討

図-9 に荷重と中央変位の関係を示す。すべての試験体において剛性の明らかな違いは見られなかった。また、すべての試験体において降伏荷重は明確であった。なお、N13-10-1 はミスによって載荷データが無い。

表-5 に載荷試験結果一覧を示す。降伏荷重比は、各試験体の降伏荷重を健全試験体 N13-0 の降伏荷重で除して求めた。また、最大荷重比も同様に求めた。

破壊モードは、すべての試験体が曲げ引張破壊であった。また、N13-30 および P13-30 の荷重比は他の試験体と同様に 0.9 程度であった。これより、降伏荷重や最大荷重などの力学性能に対しては、部材断面内の各鉄筋の腐食量の違いの影響は小さく、部材断面の鉄筋の平均腐食量（または総腐食量）を考慮すればよいことがわかる。ただしこれは、腐食後も軸方向鉄筋の端部定着が確保され、鉄筋破断が生じない程度の腐食量である本研究の条件範囲においていえることである。

図-10 に軸方向鉄筋全長の質量減少率とはり試験体の降伏荷重の関係を示す、図-11 に軸方向鉄筋全長の質量減少率とはり試験体の最大荷重の関係を示す。図-11 においては比較のため、既往の研究⁴⁾のデータを追記した。ここで、図中の直線は、質量減少率分主鉄筋断面積を減少させ、腐食の程度に関わらず付着が健全であるとして RC 理論により降伏荷重、最大荷重を計算し、荷重比を求めたものである。

両荷重比の実験値は、計算値と概ね一致する結果であり、N シリーズと P シリーズを比較しても明らかな違いが見られなかった。これらから、端部定着が確保されている条件下では、耐荷性に対する腐食による付着劣化の影響は小さいことがわかった。また、既往の研究のデータ⁴⁾の分布に本研究のプロットが収まっており、再現性を有していることが確認できる。

なお、N22-10 は比較的計算値との差が大きく、健全試験体を上回る荷重比が得られた。N22-10 は他の試験体と同様 N13-0 の試験体で除した荷重比を用いているためと考えている。

4.2 載荷に伴うひび割れの検討

表-6 に載荷に伴うひび割れ発生範囲と本数、ひび割れ間隔を示す。付着の程度に関する検討に用いる指標として、ひび割れ間隔が一般的であるが、等曲げ区間と載荷区間のひび割れ間隔が異なる傾向があったので、ここ

ではひび割れ間隔に加えてスパン中央を中心とした載荷によるひび割れの発生範囲を指標として検討する。

P シリーズは健全試験体 N13-0 と概ね同傾向を示しており、腐食導入後にコンクリートを打設することにより付着劣化の影響を排除することに成功していることがわかる。N13-10-1 と N22-10 は載荷によるひび割れ発生範囲が小さい。N13-10-1 は載荷試験中に等曲げ区間のかぶり一部剥落するほどであり、両側面に発生した腐食ひび割れによる付着劣化が大きく影響したと思われる。また、N22-10 は腐食の影響だけでなく、鉄筋径が大きく 1 本であることが影響していると思われる。

表-5 載荷試験結果一覧

試験体	降伏荷重	最大荷重	降伏荷重比	最大荷重比
	kN	kN		
N13-0	65.0	74.3	1.00	1.00
N13-10-2	62.2	70.5	0.96	0.95
N13-30	59.5	64.3	0.92	0.87
N22-10	65.8	78.0	1.01	1.05
P13-10	57.8	70.2	0.89	0.94
P13-30	56.3	68.7	0.87	0.92
P13-15	56.0	64.0	0.86	0.86

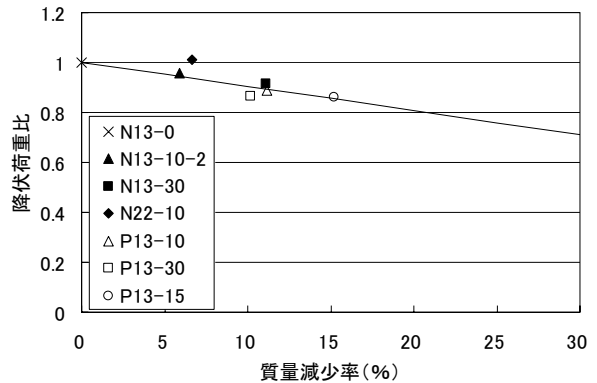


図-10 質量減少率と降伏荷重比

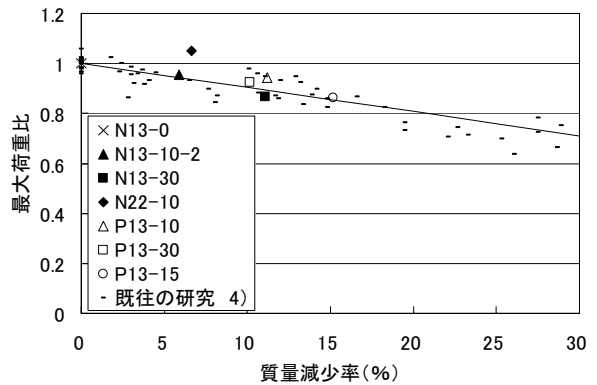


図-11 質量減少率と最大荷重比

表-6 荷重に伴うひび割れ状況

試験体	発生範囲	発生本数	発生間隔
	cm	本	cm
N13-0	140	12	12
N13-10-1	70	8	9
N13-10-2	110	11	10
N13-30	110	9	12
N22-10	70	5	14
P13-10	130	12	11
P13-30	130	11	12
P13-15	110	12	9

一方、N13-30 はひび割れ発生範囲が大きく、付着劣化の程度は小さいと判断できる。N13-30 の M、R に位置する鉄筋は電食時に通電していない。約 3% の質量減少率がみられたが、付着を損なうほどではない。これより、N13-30 は軸方向鉄筋 3 本中 2 本の付着が十分であったため、全体としてのコンクリートと鉄筋の一体性が保たれたと思われる。

4.3 たわみに関する検討

図-12 に N13-30 の変位分布を示す。N13-30 と P13-30 は、断面内の 3 本の軸方向鉄筋のうち端の 1 本のみが腐食しているため両側面の変位に差が生じることが予想された。しかし、両側面の変位差は小さく、健全試験体 N13-0 に生じる変位差と同程度であった。

図-13 にモーメントと曲率の関係を示す。曲率は、等曲げモーメント区間内 5 箇所の変位を用い、2 次 3 項の最小二乗近似より算出した。N13-10-2 と N13-30、両シリーズ間に明らかな傾向はみられず、腐食鉄筋の偏在や付着状態が曲げ耐力に及ぼす影響は小さいと思われる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 電食を用いた腐食鉄筋において、鉄筋軸方向の腐食量分布は、平均腐食量とその標準偏差に比例関係が認められた。
- (2) 鉄筋腐食量と腐食ひび割れ幅の検討において、軸方向 150mm の区間における鉄筋腐食量の平均値と腐食ひび割れ幅の平均値を用いることで、両者の関係が明瞭となった。これより、鉄筋腐食量や腐食ひび割れ幅などの部材中の劣化指標はある程度の領域の空間平均値を定量化の構成単位として考えることが有効であると思われる。
- (3) 部材断面内の各鉄筋の腐食量の違いが力学性能に及ぼす影響は小さく、部材断面の鉄筋の平均腐食量または総腐食量を考慮することで概ね曲げ耐力を予測できる。
- (4) 主鉄筋端部の定着が保たれている場合、付着劣化はひび割れ分散性に影響を及ぼすものの、曲げ耐力への影響は小さい。

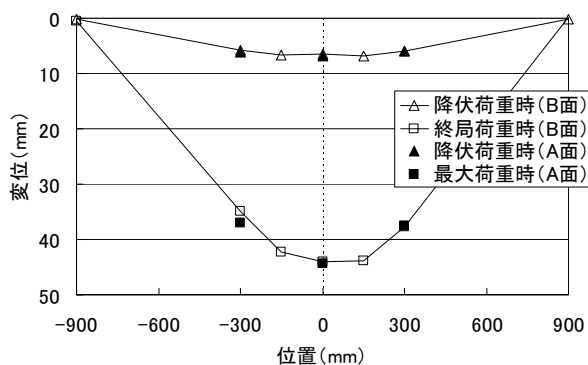


図-12 変位分布 (試験体 N13-30)

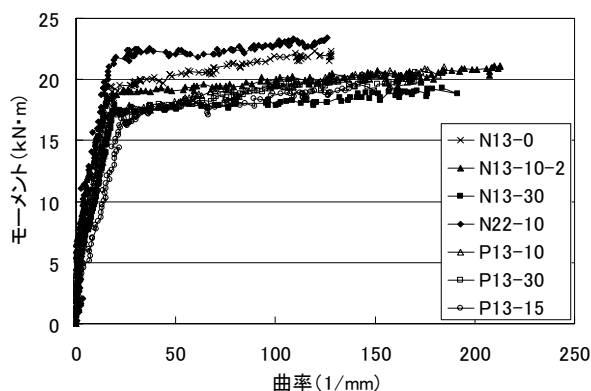


図-13 等曲げ区間の曲げモーメント-曲率関係

謝辞

本研究を実施するにあたり、土木学会 331 委員会の共通試験を参考にさせて頂いたこと、同委員会の皆様よりご助言頂いたことに深く感謝いたします。

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 71，2006.9
- 2) 田森清美：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，長岡技術科学大学修士論文，pp.87-95，1988.2
- 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) 岡崎雅弘：内部鋼材の腐食形態が鉄筋コンクリート部材の力学性能に及ぼす影響，長岡技術科学大学修士論文，2003.3