

鉄筋腐食の空間的分布が鉄筋コンクリート部材の耐荷性状に及ぼす影響

コンクリート研究室 村松 真伍

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様でない 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。

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、定着部破壊、鉄筋破断のおそれがない場合は、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⁾。

多くの既往の研究では、実験室内における理想的な実験が行われている。健全な RC 部材の力学性能を論じる場合とは異なり、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 はり供試体に一様な腐食を導入した場合が多いが、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。本研究では、電食によって RC はり試験体内の複数の軸方向鉄筋の腐食の程度を独立に制御することで、腐食が空間的に不均一なはり試験体を作製し、曲げ載荷試験を行い、その耐荷性状を検討した。

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 異形鉄筋を 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 異形鉄筋を 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、せん断補強筋には絶縁処理を施した。(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。

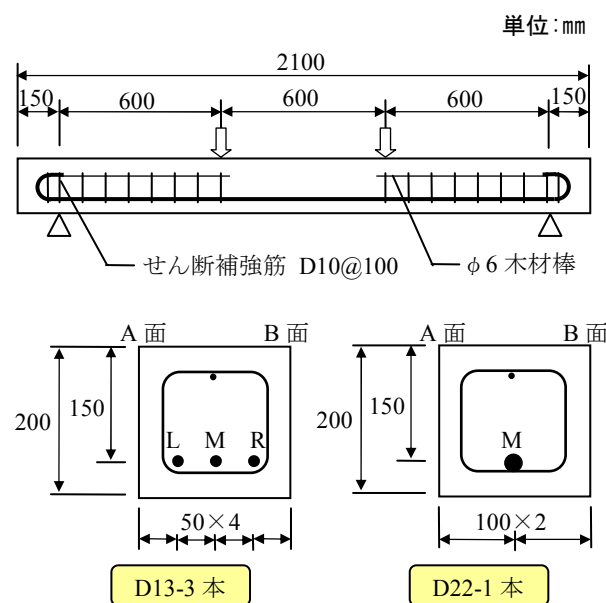


図-1 試験体形状・寸法

図-2 に両シリーズの作業順序を示す。また、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-1 に示す。

2.2 電食試験

腐食の導入方法は、鉄筋ごと腐食量を調整できることから電食を用いた。電食試験の概要を図-3 に示す。直流安定化電源を用い、3%塩水に浸漬したコンクリート中の主鉄筋および鉄筋単体に直流電流を流した。腐食量の調整については、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。

表-2 に各試験体の目標腐食量を示す。軸方向鉄筋の部材断面方向3本の平均腐食率を10%で一定とし、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。

試験体名は、コンクリート中の鉄筋を腐食させるNシリーズおよびコンクリート打設前に鉄筋単体を腐食させるPシリーズ、それに軸方向筋径(13, 22)、部材中の目標質量減少率が最も大きい値(10, 15, 30)を続けた。なお、N13-10-1とN13-10-2は同一ケースである。

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、ひび割れ幅が大きい値を用いた。

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ヶ所を片面(B面)から測定した。加えて、不均一な腐食を導入したN13-30とP13-30は、両側面の変位に差が生じることが考えられるため、A面の中央変位、載荷点変位の計3箇所も測定した。

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

表-1 材料試験結果

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			

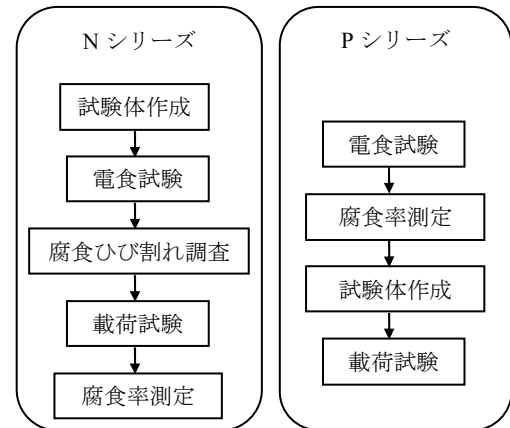


図-2 両シリーズの作業順序

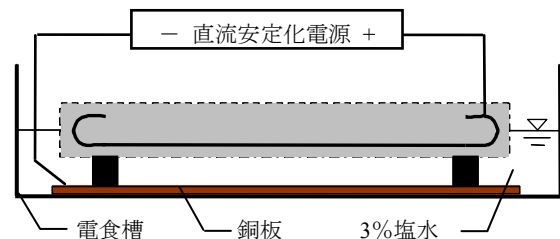


図-3 電食試験概要

表-2 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

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。

表-3 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

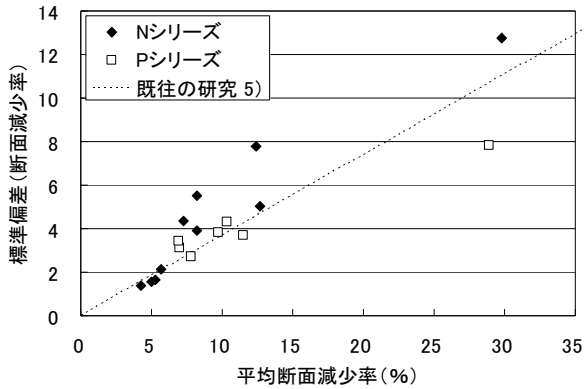


図-4 平均断面減少率と標準偏差

3. 電食試験結果および考察

3.1 鉄筋の腐食状況

表-3 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、限られた実験範囲の電食の結果であるが、鉄筋軸方向の腐食量分布のばらつきを度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、変動係数は0.37である。本研究において得られた実験結果においても同様に、平均値と変動係数に比例関係が認められる。しかしながら、Nシリーズ（コンクリート中において電食）とPシリーズ（鉄筋単体を電食）の変動係数は若干異なるようである。かぶ

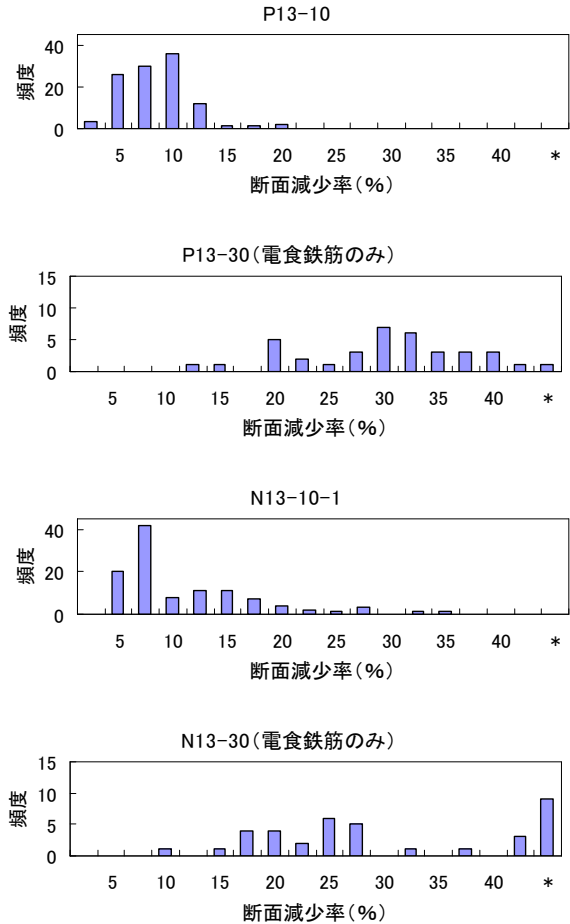


図-5 鉄筋断面減少率の頻度分布

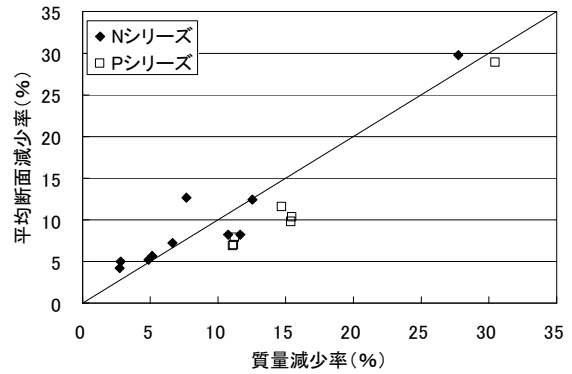


図-6 質量減少率と支点間の平均断面減少率

りコンクリートの有無が腐食の不均一性に影響を及ぼしたと考えられる。

図-5 に鉄筋の断面減少率の頻度分布を示す。目標質量減少率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-2 に示したよう断面減少率が54.1%の箇所もある。一方、Pシリーズはきれいな分布を示してい

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。

図-6 に、質量減少率と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断面積減少率をやや過大評価する傾向がみられた。これは、鉄筋径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、断面減少率を、測定位置の腐食量として扱う。

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-8 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、著者らが行な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-9 に、図-8 と同じ試験体の測定結果より得られた連続した150mm区間(3測定点)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。このデータ処理により、2つの傾向が現れた。

まず、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。すなわち、鉄筋腐食による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

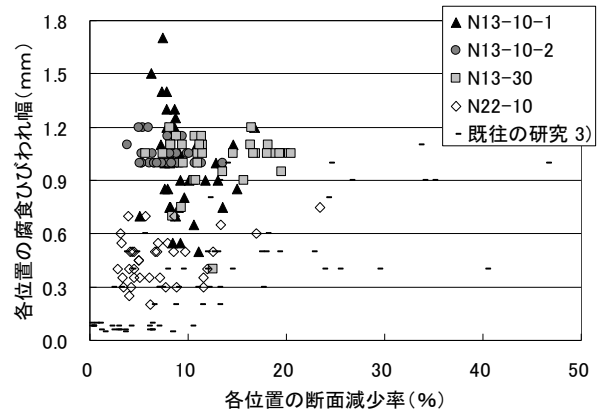


図-8 同一断面の断面減少率と腐食ひび割れ幅

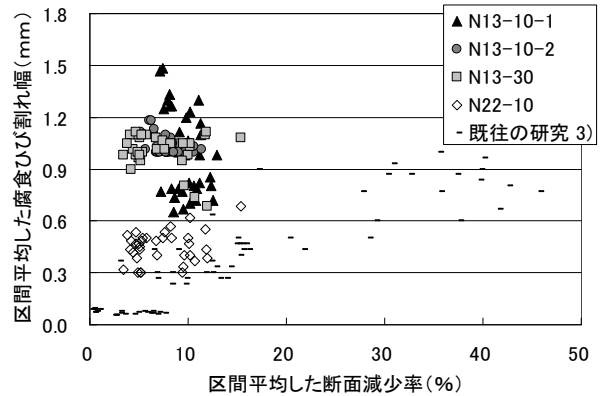


図-9 区間平均した断面減少率と腐食ひび割れ幅

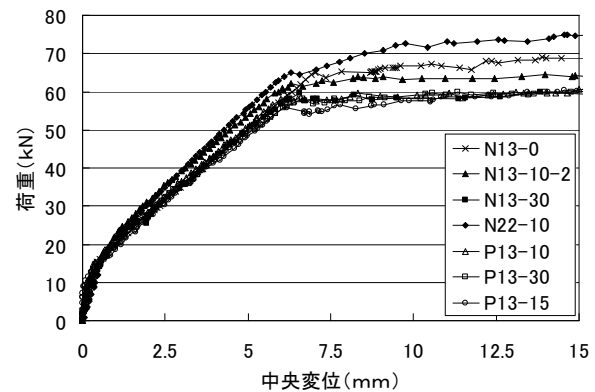


図-10 荷重と中央変位

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-9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プ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-10 に荷重と中央変位の関係を示す。なお、N13-10-1 はミスによって載荷データが無い。表-4 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、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範囲においていえることである。

図-11 に質量減少率と降伏荷重の関係を示す。図-12 に質量減少率と最大荷重の関係を示す。図-12 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、両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。ここで、N22-10 は他の試験体と使用鉄筋が異なっているが、他の試験体と同様 N13-0 の試験値で除した荷重比を用いている。N22-10 と同一諸元の健全試験体を作製し、これを基準に荷重比を算出した場合、図-11 と図-12 においてプロットは下方に移動し、より計算値に近づくものと思われる。

表-4 載荷試験結果一覧

試験体	降伏荷重 kN	最大荷重 kN	降伏荷重比	最大荷重比
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

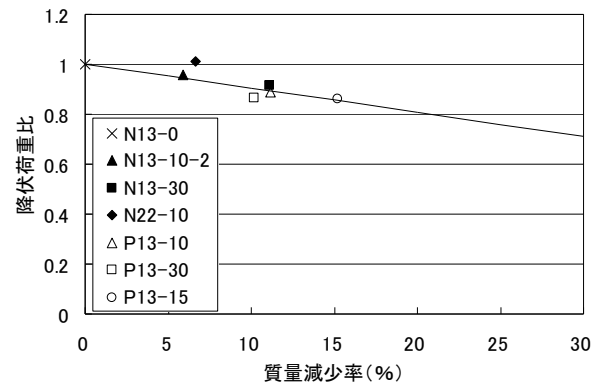


図-11 質量減少率と降伏荷重比

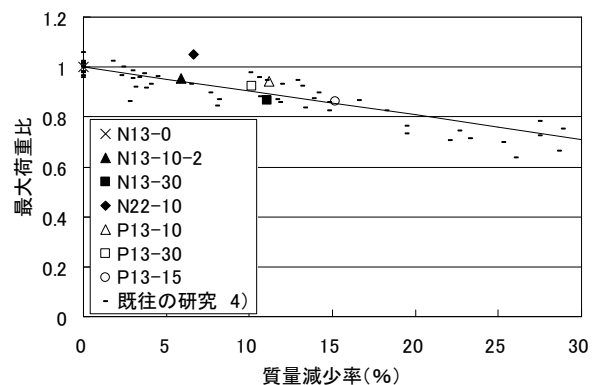


図-12 質量減少率と最大荷重比

表-5 載荷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
	cm	本		
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	

4.2 荷重に伴うひび割れの検討

表-5 に荷重に伴うひび割れの発生範囲と本数、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、等曲げモーメント区間と荷重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荷重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 は荷重によるひび割れ発生範囲が小さい。N13-10-1 は荷重試験中に等曲げモーメント区間のかぶりが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軸方向鉄筋が1本であるため、付着面積が小さいことが影響していると思われる。

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。したがって、腐食による付着劣化に関しては、断面内の鉄筋の腐食量の平均値（または合計値）で決まるのではなく、健全な鉄筋の存在の影響を受けることが示唆される。

4.3 たわみに関する検討

図-13 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 と同程度であった。図-14 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。

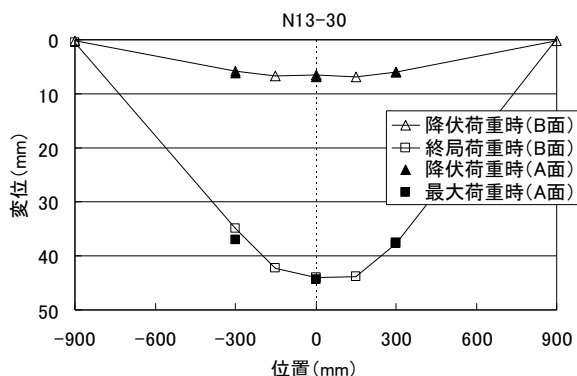


図-13 変位分布

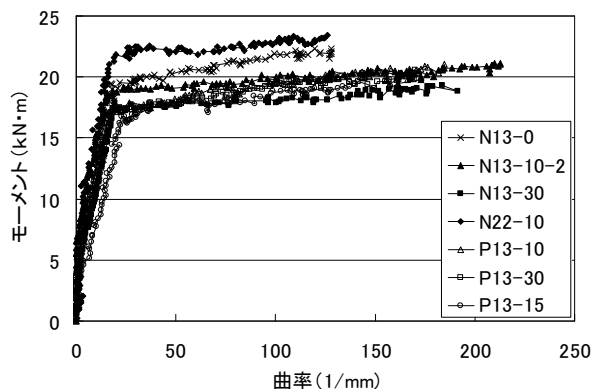


図-14 等曲げ区間の曲げモーメントー曲率関係

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指標として考えることが有効と思われる。
- (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) 付着劣化はひび割れ分散性に影響を及ぼすものの、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。