

# 論文 電食と塩分による鉄筋の腐食が鉄筋の腐食形状に与える影響の比較

佐藤 孝史\*1・疋田 雅也\*2・倉知 星人\*3・小林 孝一\*4

**要旨:** 電食と塩分による鉄筋の腐食が RC 部材の鉄筋の腐食形状に与える影響について検討するため、作製時に塩分を混入して鉄筋を腐食させた供試体と電食により鉄筋を腐食させた供試体を作製した。この供試体に曲げ載荷試験を実施した後に鉄筋を取り出し、その質量減少率や物理的形状の測定を実施した。その結果、鉄筋の質量減少率が小さな段階では、電食の場合は平均的に断面積が減少している傾向にあるのに対して、塩分による腐食の場合は、断面の減少が若干局所的であるような傾向にあった。

**キーワード:** 鉄筋腐食, 塩害, 電食, 質量減少率, ばらつき

## 1. はじめに

現在、劣化した鉄筋コンクリート（以下 RC）構造物の残存性能の評価が課題となっており、なかでも劣化の進行が速い塩害劣化において鉄筋腐食が RC 構造物に与える影響を明確にする必要がある。

従来から、実構造物における鉄筋腐食を再現する方法として、実験室レベルでは電食が採用されることがあった。しかし、塩化物イオンの作用により不動態被膜が破壊される塩害と、電荷を強制的に移動させる電食とでは、鉄筋の腐食のメカニズム、進行過程が異なる。また、鉄筋が腐食した際の表面形状、あるいは断面積の分布は、その力学的特性に大きな影響を与える。特に降伏強度や引張強度は、その鉄筋の最小となる断面積に依存するが、破断までの応力とひずみ関係や伸び能力は断面積の分布により決定されることが示されている<sup>1)</sup>。しかし、塩害と電食の違いが RC 構造物の耐荷性能に与える影響については十分に明らかにされているとは言い難い。

昨年度本研究グループにおいて、塩害劣化させた RC はり部材について曲げ載荷試験を行った。また内部の鉄筋をはつりだし、鉄筋の腐食調査を行った<sup>2)</sup>。

本研究では、この研究と同寸法の供試体を電食により劣化させ、同条件の試験を行い、電食と塩分による鉄筋の腐食がそれぞれの鉄筋の形状に与える影響の違いを明らかにし、RC はり部材の耐荷性能に与える影響について比較検討することとした。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

本研究で用いた供試体を図-1に示す。断面が180mm×120mm、全長1600mmのRCはりとし、圧縮側には組立筋としてFRPの樹脂棒を2本使用した。ただし、塩害劣化させたRCはり部材についてはφ6の鉄筋を使用した。引

張鉄筋にはD10 (SD295) を2本配置し、かぶりは15mmで配置した。せん断補強筋にはD6 (SD295) を使用し、かぶりが9mmになるよう配置した。電食供試体については、引張鉄筋とせん断補強筋は絶縁テープにより絶縁し、電食によるせん断補強筋の腐食を防いだ。

塩害劣化シリーズ供試体は塩化ナトリウムを混入した供試体（以下CL供試体）6体（CL-1～6）と塩化ナトリウムを混入していない健全供試体（以下N供試体）2体（N-1, 2）の合計8体である。電食シリーズ供試体は電食により鉄筋の質量減少率を0%, 3%, 6%, 10%にしたものをそれぞれ3体、合計12体作製した。

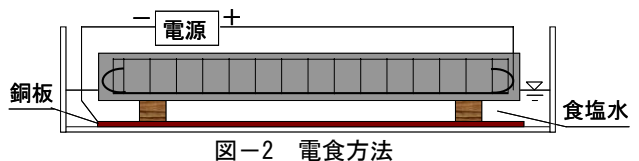
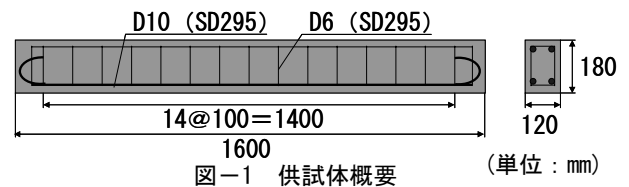
### 2.2 腐食方法

塩害劣化シリーズの RC はりは 20.5 (kg/cm<sup>3</sup>) の塩化ナトリウムを混入し、4年間大学内の屋外に曝露した。

電食シリーズの RC はりは、電食により腐食を促進させた。電食方法を図-2に示す。電食には電解液に3%の塩化ナトリウム水溶液を用い、引張鉄筋を陽極、供試体の底面に置いた銅板を陰極とした。質量減少率が3, 6, 10%になるように通電時間を定め、供試体内の引張鉄筋を腐食させた。目標腐食量から通電時間を逆算するには式(1)を用いた<sup>3)</sup>。

$$W = 0.766 \times IT \quad (1)$$

ここで  $W$ : 腐食量 (g),  $IT$ : 積算電流量 (A・h) である。



\*1 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

\*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科

\*3 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

\*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 准教授 博(工) (正会員)

### 2.3 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験の概要を図-3 に示す。等モーメントスパン 300mm, せん断スパン 550mm の 2 点載荷とし, 1 方向単調載荷試験を行なった。計測項目は荷重, 変位, とし, 荷重はロードセルにより検出し, 変位は支点, 載荷点および等モーメントスパン内に等間隔で 5 箇所を設置した高感度変位計によって検出した。なお, 載荷は荷重の急落まで続けた。

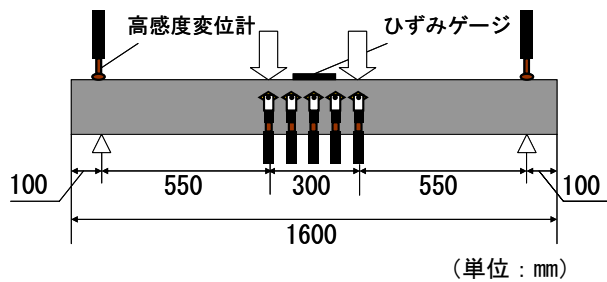


図-3 曲げ載荷試験概要

### 2.4 質量減少率計測

曲げ載荷試験後に破砕機により, 引張鉄筋をはつりだし, その後, 鉄筋を載荷点と支点上で切断してせん断スパンの引張鉄筋(供試体 1 体につき 4 本)を取り出した。

また, JCI-SC1<sup>4)</sup>に従い, 60°C に保った 10% のクエン酸二アンモニウム水溶液に鉄筋を 24 時間浸し, 錆を除去した。除去しきれなかった錆はピックで取り除いた。質量減少率の算出には式 (2) を用いた。

$$C = \frac{m \times l_c - m_e}{m \times l_c} \times 100 \quad (2)$$

ここで,  $C$ : 質量減少率(%),  $m$ : 錆除去後の健全な鉄筋の長さ 1cm あたりの質量(g),  $m_e$ : 錆除去後の腐食鉄筋の質量 (g),  $l_c$ : 腐食鉄筋の長さ (cm) である。

### 2.5 腐食鉄筋の最小断面積計測

#### (1) ノギスによる測定

引張鉄筋の腐食が最も激しい部分, つまり鉄筋径が最小であると目視により判断した部分の鉄筋の最小直径, およびその直交方向の直径を測定した。腐食後の鉄筋の断面形状が楕円形であると仮定し, これらの測定値を式 (3) に代入し, 断面積  $A$  (以下, ノギス断面積) を算出した。

$$A = \frac{\pi}{4} \times R_1 \times R_2 \quad (3)$$

ここで,  $R_1$ : 鉄筋の最小直径,  $R_2$ : 直交方向の直径である。

#### (2) 3D スキャナーによる測定

レーザー式非接触型 3D スキャナーを用いて, 鉄筋の表面形状を長さ方向に 0.4mm ピッチ, 回転方向 0.36° ピッチでスキャンし, ノギスで最小直径を測定した断面から前後 50mm の区間の断面積の分布を求めた。

## 3 実験結果および考察

### 3.1 鉄筋の性状

腐食のない鉄筋に引張試験を実施して得られた材料特性値を表-1 に, また, 供試体の一覧, および, 鉄筋の質量減少率と耐荷力に関する結果の概要を表-2 に示す。なお, ここでの鉄筋の質量減少率はせん断スパンの鉄筋 4 本の平均値である。結果の詳細については以下に述べる。

表-1 鉄筋の材料特性値

	降伏強度	引張強度
電食	409.57	553.72
塩分	394.95	532.06

(単位: N/mm<sup>2</sup>)

表-2 質量減少率と耐荷力

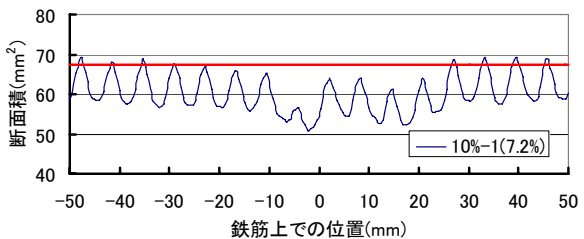
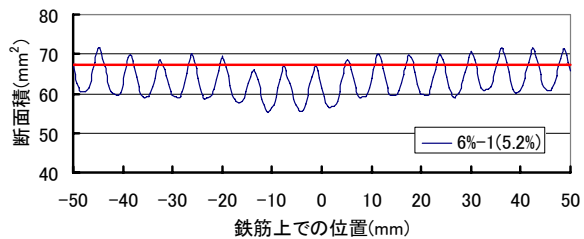
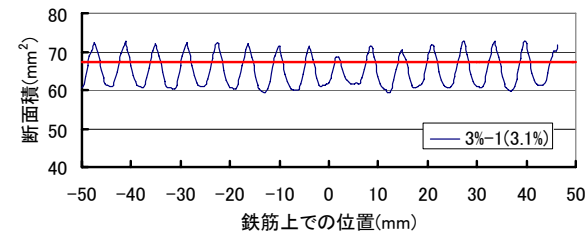
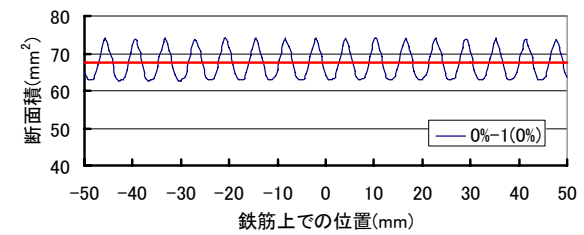
電食	質量減少率 (%)	耐荷力 (kN)	塩分	質量減少率 (%)	耐荷力 (kN)
0%-1	0.0	31.8	N-1	0	33.5
0%-2	0.0	32.6	N-2	0	33.0
0%-3	0.0	33.4	Cl-1	5.7	28.4
3%-1	3.0	34.1	CL-2	4.7	28.1
3%-2	3.2	34.1	CL-3	2.6	29.3
3%-3	2.4	34.3	CL-4	4.1	30.5
6%-1	5.2	32.5	CL-5	6.3	29.2
6%-2	4.3	33.2	CL-6	2.9	30.0
6%-3	5.4	32.5			
10%-1	10.8	29.5			
10%-2	9.2	30.7			
10%-3	8.5	30.7			

#### (1) 断面積分布

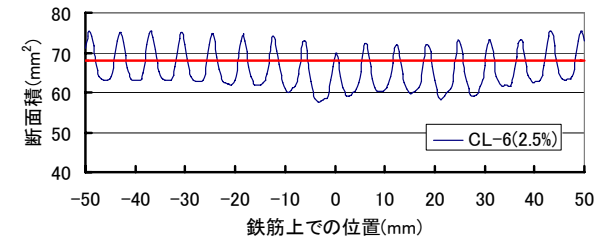
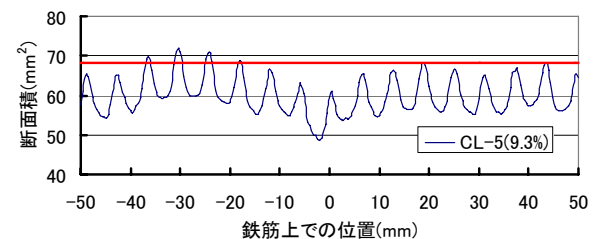
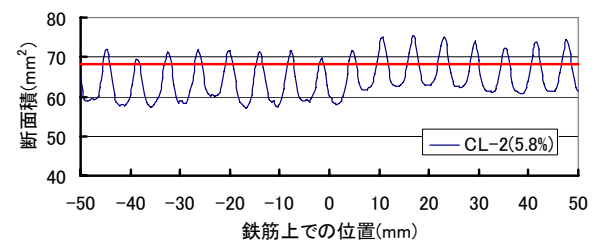
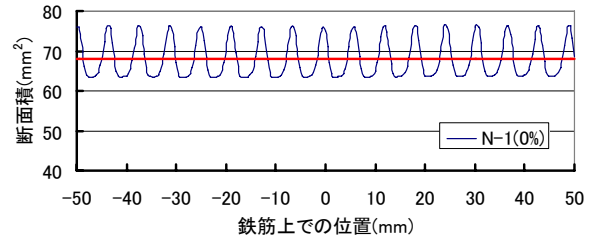
3D スキャナーにより得られた鉄筋の断面積の分布を図-4 に示す。今回使用した鉄筋は異形鉄筋のため, 腐食のない場合の断面積分布は規則的な波状となっている。また, 図中に示されている供試体名の後の括弧内はその鉄筋の質量減少率を表し, 直線は健全な鉄筋の平均断面積である。

電食, 塩分による腐食のいずれの場合でも腐食の生じた鉄筋の断面積は減少している。また, 腐食量が多い場合は鉄筋全長にわたって断面積の減少が生じているが, 最小断面積付近 (0mm) では, 局所的な断面の欠損が生じていることがわかる。ただし, 腐食量が 3% 程度のものを比較すると, 電食の場合は, 測定範囲全長にわたって平均的に断面積が減少している傾向にあるが, 塩分による腐食の場合は, 最小断面積付近 (0mm) のみ断面積の減少が大きく, 断面の減少が若干局所的であるような傾向にあった。このような傾向は腐食量が多い場合には観察されなかった。

これは, 劣化の初期には鉄筋全体に強制的に電荷を与える電食と塩化物イオンによる孔食に端を発生する塩分腐食との間で腐食形態に差が生じたのに対して, 腐食が進行するとかぶりに軸方向ひび割れが発生して, 鉄筋



(電食)



(塩分)

図-4 断面積分布

全長が外環境に直接にさらされ、腐食が全体で進行したためだと考えられる。

また特に、今回の実験では供試体に曲げひび割れが発生していない状態で劣化を促進させたため、局所的な腐食の進行が発生しにくかったものと考えられる。

## (2) 鉄筋の断面積、質量減少率

3D スキャナーで測定した測定範囲における断面積の最小値とノギスで測定したノギス断面積との関係を図-5 に示す。ノギスで測定する場合、孔食している部分に関しては、正確に直径を測定できない。また、3D スキャナーは一方向のレーザーを照射し、対象物がターンテーブル上で回転することにより測定するため、腐食が激しい部分に関してはレーザーの照射できない陰が生じ、測定ができなかったところもある。そのため、ノギスと 3D スキャナーによる測定値はある程度の誤差が生じると考えられたが、本研究の結果においては、ノギス断面積と 3D スキャナーによる断面積の最小値には高い相関関係がある。したがって、非常に簡易なノギスによる測定によっても、鉄筋の残存断面積をある程度の高い精度で推定可能であるといえる<sup>1)</sup>。

スキャナー測定結果より算出した平均断面減少率と質量減少率の関係を図-6 に、最大断面減少率と質量減少率の関係を図-7 示す。ここで、平均断面減少率 (%) とは (健全な鉄筋の平均断面積 - 平均断面積) / 健全な鉄筋の平均断面積 × 100 であり、最大断面減少率 (%) とは (健全な鉄筋の平均断面積 - 最小断面積) / 健全な鉄筋の平均断面積 × 100 である。平均断面減少率と質量減少率および最大断面減少率と質量減少率の関係において、両者ともに多少のばらつきはあるがかなり良い相関関係が見られる。平均断面積と質量減少率関係では、電食、塩分共に傾きが 1 に近い値となった。これは、質量減少率と平均断面減少率が精度よく測定できたことを示している。

また、質量減少率が増加すると最大断面減少率は増加し、電食の場合、最大断面減少率は質量減少率の約 3.7 倍となり、塩分の場合は約 3.4 倍となっている。したがって、従来は腐食鉄筋の評価方法として、鉄筋の腐食減量、すなわち、ある区間の平均断面減少率が用いられてきたが、腐食鉄筋の強度は最小断面積によって決定されるため<sup>1)</sup>、質量減少率による評価では RC 部材の耐荷力

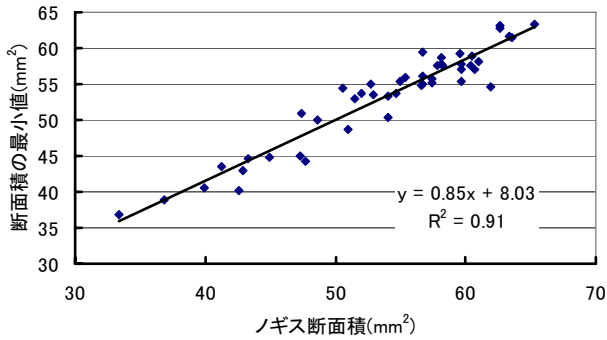


図-5 スキャナー測定による断面積の最小値とノギス断面積の関係

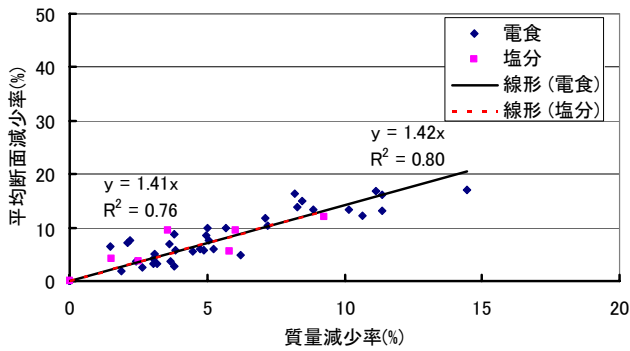


図-6 平均断面減少率と質量減少率の関係

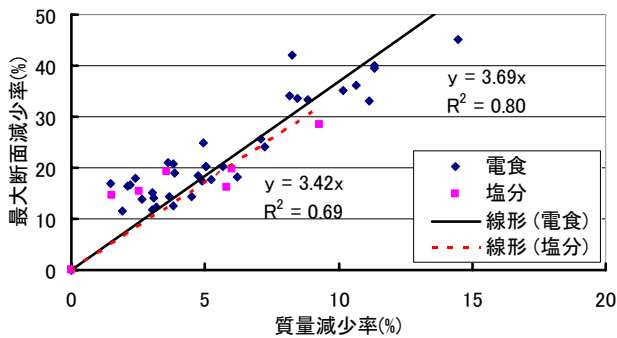


図-7 最大断面減少率と質量減少率の関係

を大幅に大きく見積もってしまう可能性があることになる。

また、電食と塩分腐食の相違については、後ほど検討する。

3Dスキャナーによって鉄筋長手方向に0.4mmピッチで測定した断面積の頻度分布を図-8に、各鉄筋の断面積の標準偏差と質量減少率の関係を図-9に示す。ここで頻度分布に関しては代表的なもののみを示し、括弧内の数字はその鉄筋の質量減少率を示している。図-9によると塩分の腐食の場合には、質量減少率が増加しても、断面積分布のばらつきを表す標準偏差の値にほとんど変化が見られない。電食の場合にも質量減少率が6%以下の場合には同様の結果である。一方、電食で質量減少率がそれ以上になると、標準偏差の値は増大し始める。これは異形鉄筋の場合、腐食量が小さな段階では腐食に

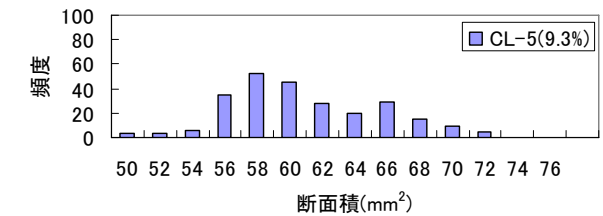
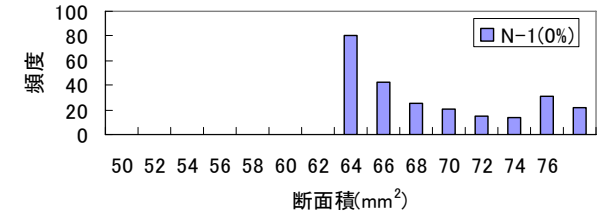
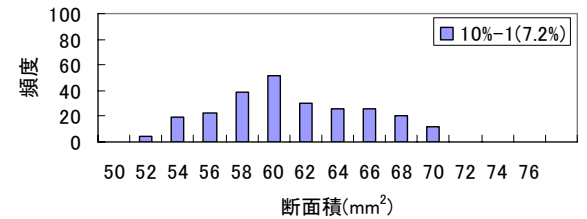
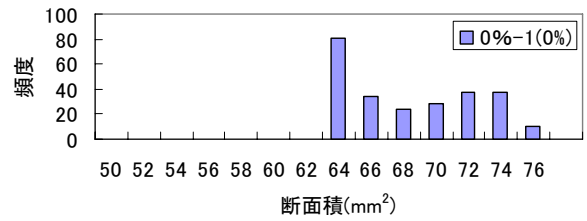


図-8 頻度と断面積の関係

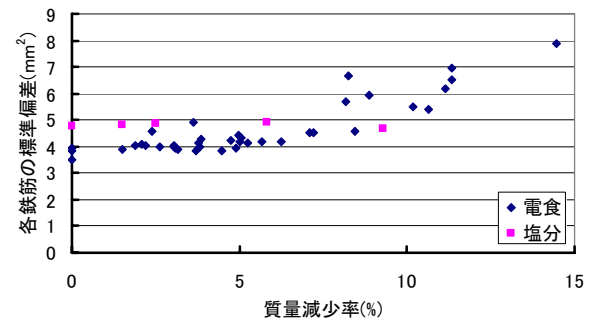


図-9 標準偏差と質量減少率の関係

よる断面積の分布の影響を横リブの存在による断面積の分布の影響が卓越するためだと考えられる。

しかし(1)で述べたように、電食と塩分による腐食とでは、断面欠損の進行の様子が若干異なると考えられたため、さらに詳細な統計的分析を実施する必要があるものと考えられる。

### 3.2 はり部材の曲げ載荷試験

曲げ載荷試験により得られた荷重とたわみ関係の例を図-10に示す。ここでの鉄筋の質量減少率はせん断スパンの鉄筋4本の平均値である。

ほとんどの供試体では、圧縮側コンクリートに圧壊が

生じたが、鉄筋の質量減少率が6%程度を超えていた10%-1（質量減少率10.8%）とCL-5（同じく6.3%）については破壊モードが鉄筋破断に移行した。これは、鉄筋の質量減少率が6%程度を超えると、腐食による局所的な断面欠損を生じ、鉄筋の最小断面積の部分に応力集中が生じて、鉄筋の伸び能力が減少したためだと考えられる<sup>り</sup>。

耐荷力と質量減少率関係を図-11に示す。電食、塩分による腐食とともに概ね質量減少率が増加すると、耐荷力が減少する傾向にあった。RCはりにはコンクリートと引張鉄筋により曲げモーメントに抵抗しているが引張鉄筋の断面積が減少することにより、引張鉄筋の見かけの引張強度が低下したためだと考えられる。

また、電食、塩分による腐食とでは、劣化に伴う耐荷力の低下の程度に若干の差が生じた。これは既往の研究<sup>5)</sup>では塩分による腐食の場合、孔食による影響で鉄筋強度の低下が顕著になると報告されており、ここでの部材の耐荷力に関する検討においても同様の傾向が明らかになった。さらに、本研究ではほとんどの供試体で圧壊が生じており、単純に鉄筋の力学的性状のみで部材の耐荷性状が決定されているわけではないが、電食の供試体と塩分混入の供試体では引張鉄筋の引張強度が異なることに付け加え、本研究では塩分混入した供試体については圧縮側の組立て筋に鉄筋を用いており、この鉄筋の腐食により圧縮側のかぶりにひび割れが発生していたため、劣化の影響をより受けやすかったこともあったと考えられる<sup>6)</sup>。

本研究の範囲では、電食と塩分による腐食がRC部材の耐荷性能に与える影響は、それほど顕著ではなかった。しかし、図-9に示したように、鉄筋の腐食減量率が6%程度以上となると、異形鉄筋の腐食分布に与える影響が、横リブの影響よりも顕著になる。現在、塩分による劣化を引き続き進行させているRC部材もあるため、今後、さらに腐食量が大きな領域での検討を実施する予定である。

#### 4.まとめ

本研究ではコンクリート作製時に塩分を混入してRC部材中の鉄筋を腐食させた供試体と電食によりRC部材中の鉄筋を腐食させた供試体に対して曲げ荷重試験を実施した後に、はつりだした鉄筋の断面積分布や質量減少率の測定を行い、電食と塩分による鉄筋の腐食がRC部材の鉄筋の腐食形状および部材の耐荷性状に与える影響について検討した。得られた結果を以下に示す。

(1) 質量減少率が3%程度のものを比較すると、電食の場合は平均的に断面積が減少している傾向にあるのに対して、塩分による腐食の場合は、断面の減少が若

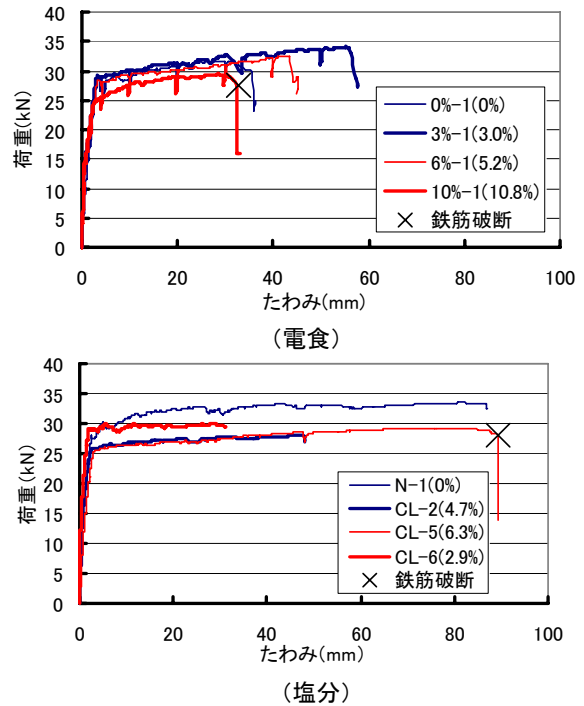


図-10 荷重とたわみの関係

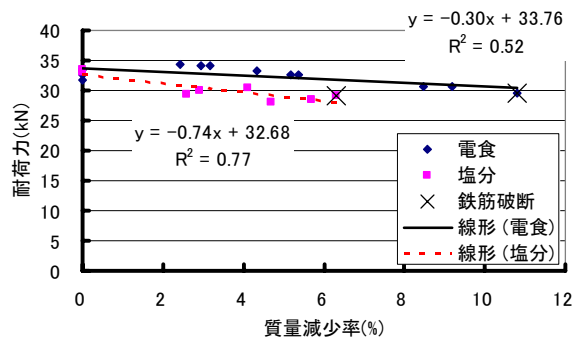


図-11 耐荷力と質量減少率の関係

干局所的であるような傾向にあった。

- (2) 鉄筋の断面積を測定する際、ノギスで測定することによっても、適切な評価ができた。
- (3) 質量減少率が6%程度までは鉄筋の断面積の頻度分布の標準偏差に対して電食と塩分による腐食が与える影響の差は小さかった。
- (4) 曲げ荷重試験において、質量減少率が6%程度では電食、塩分による腐食の形状が、耐荷性能に与える影響が、若干ではあるが認められた。

#### 参考文献

- 1) 小林孝一, 松岡慎一郎:鉄筋の塩害による腐食が力学的性状に与える影響, コンクリート工学論文集, Vol. 19, No.3, pp.31-40, 2008
- 2) 倉知星人, 佐藤孝史, 小林孝一, 六郷恵哲:塩害による鉄筋の性能低下がRCはり部材の耐荷性能に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 30, No.1, pp.819-824, 2008

- 3) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親典:鉄筋の発錆によるコンクリートのひびわれ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 10, No.2, pp.505-510, 1988
- 4) JCI-SC1 コンクリート中の鋼材の腐食評価方法, 1987
- 5) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, 1998.10
- 6) 小林孝一:塩害により劣化したRC部材の耐震性に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol. 16, No. 2, pp. 49-59, 2005