

# 論文 鉄筋腐食させたRC梁の残存曲げ耐荷力特性に関する実験的研究

村上 将也\*1・山本 佳士\*2・黒田 一郎\*3・古屋 信明\*4

**要旨:** 本研究では、電食により劣化促進した RC 梁を対象として、超音波伝播速度等の非破壊検査で把握した劣化の程度と、曲げ載荷実験により実測した残存耐荷力との関係性を評価した。その結果、電食前後における超音波伝播速度の低下率ならびに腐食ひび割れ幅と、鉄筋直径の減少率の間に良好な相関があること、また、鉄筋の腐食率と残存曲げ耐力の間にも強い相関性があることを確かめた。その上で、非破壊検査結果から推定される最大曲げ耐力推定値と、その実測値との比較検討も行った。

**キーワード:** 鉄筋腐食, 電食, 腐食率, 非破壊検査, 超音波伝播速度, 曲げ耐力

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の老朽化に伴う劣化から生じる危険性や、将来的な安全性について定量的に評価する必要性がますます高まってくることは論を待たない。そこで、既存 RC 構造物に対し非破壊検査を行うことにより性能の変化を察知し、耐久性を把握する技術の確立が必要不可欠である。

現在、従来の目視検査に加えて超音波伝播速度等の各種非破壊検査法が実用化され、もしくはされつつある状況にある。しかし、これらの非破壊検査によってコンクリート構造物内部の劣化性状に関する情報を知ることはできても、得られた情報を基に、構造物に残存している耐荷力を推定する手法は未だ確立されていない。

そこで、本研究では、鉄筋腐食させた RC 梁の残存曲げ耐荷力に注目し、非破壊検査を伴う実験的検討を行ったものである。具体的には、電食で鉄筋の腐食量を変化させた RC 梁部材に、超音波伝播速度計測等の各種非破壊検査を実施して劣化状況を調査した後、RC 梁部材の曲げ載荷実験を行うことで、劣化状況と残存曲げ耐力の関係性を調べる。さらに、非破壊検査結果から推定した鉄筋腐食率および最大耐力推定値と、それらの実測値との比較検討も試みるものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

供試体の寸法および配筋を図-1 に示す。外形寸法は L1460mm×B80mm×H140mm、有効高さは 113.5mm であり、鉄筋は異形鉄筋（D13, SD345）を引張側のみに 1 本配置した。主鉄筋比は 1.40% である。さらに、せん断補強筋（D6, SD295A）を支点付近のみ 50mm、その他は 100mm 間隔で配筋した。

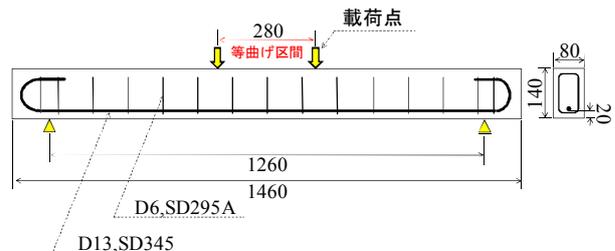


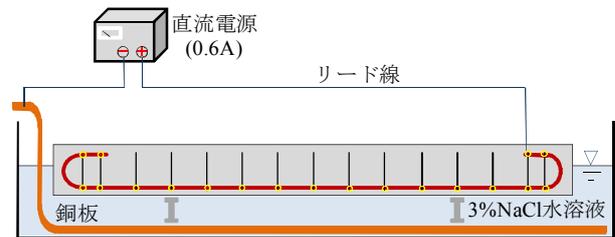
図-1 供試体概要

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 G <sub>max</sub> (mm)	水セメント比 W/C (%)	スラブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AE剤 (cc)
20	60	10	6	40.5	175	292	680	1060	93.4

表-2 鉄筋の物性

鉄筋		降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
呼び径	鋼種		
D13	SD345	367	534
D6	SD295A	320	504



○:せん断補強筋と引張鉄筋の接触箇所は絶縁処置を実施

図-2 電食概要

コンクリートの配合を表-1に、鉄筋の物性値を表-2に示す。また、実測されたコンクリート強度（平均値）は表-3に示す。

### 2.2 鉄筋腐食方法

鉄筋腐食方法には、鉄筋を電氣的に腐食させる方法（以下、電食）を用いた。

\*1 防衛大学校 理工学研究科 土木環境工学専攻 (正会員)  
 \*2 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科助教 工修 (正会員)  
 \*3 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科准教授 工博 (正会員)  
 \*4 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科教授 工博 (正会員)

供試体の底面側を図-2に示すように3%塩化ナトリウム水溶液へ浸漬し、引張鉄筋を直流電源の正極側、銅板を負極側に接続した後、直流電流0.6Aを通电した。

目標とする引張鉄筋の腐食率（腐食により失った鉄筋重量の腐食前の鉄筋重量に対する比率）を3%、10%、30%とした。目標腐食率への調整は既往の研究<sup>1)</sup>を参考とし、通电時間を変化（3%は約105hr.、10%は約351hr.、30%は約1048hr.）させることで行った。また、直流電流0.6Aを保持するため1日2回の電流調整を行った。

各腐食率に対して3体の劣化供試体を作製し、比較用として腐食率0%の健全供試体もシリーズ毎に1体用意した。本実験で使用する各供試体の番号と目標腐食率等を表-3に示す。なお、スターラップは引張鉄筋と絶縁しており、腐食させないようにした。

### 2.3 非破壊検査

電食後の劣化状況を把握するために超音波伝播速度、分極抵抗、および腐食ひび割れ幅を計測した。超音波伝播速度と分極抵抗については、相対的な劣化の程度を把握するために電食前にも計測した。また、コンクリートの含水率が計測値に影響するから、養生後および電食水槽から取り出した直後に、計測点を湿潤に保った状態で計測した。各検査の計測点（P1～P10）を図-3に示す。

#### (1) 超音波伝播速度

超音波伝播時間の測定はJCI規準<sup>2)</sup>に準拠して、飽和増幅方式にて実施した。測定機器は、印加電圧1000V、公称周波数28kHz、探触子20φのものを使用した。探触子をあてる位置は、図-3に示すように主鉄筋に沿う形とし、各計測箇所において底面へ探触子を並べて配置する表面法、側面からは探触子で挟み込む対称法の2通りで計測を実施した。これは、伝播経路の異なる2計測法を用いることにより劣化の程度を多角的に把握するためである。

また、探触子間隔を伝播時間で除すことで超音波伝播速度を算出する。なお、算出された伝播速度は探触子中間位置（計測点）での速度と定義した。

評価には、各計測箇所のコンクリート内部状況（骨材のばらつき、空隙形状、含水量等）による影響を打ち消すため、次式(1)に示す伝播速度比を用いることにした。

$$\text{伝播速度比} = \frac{\text{電食後の伝播速度 (m/s)}}{\text{電食前の伝播速度 (m/s)}} \quad (1)$$

#### (2) 分極抵抗

鉄筋表面における腐食の発生および進展状況を評価するため、電食前後において供試体底部の各計測点へ参照電極を設置して、分極抵抗を計測した。

表-3 供試体番号と目標腐食率

供試体番号	シリーズ	目標腐食率 (%)	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
			圧縮	引張
1	B1	3	28.4	2.8
2				
3				
4	B2	10	32.8	2.6
5				
6				
7	B3	30	35.5	2.7
8				
9				
10	0	0	0	0
11				
12				

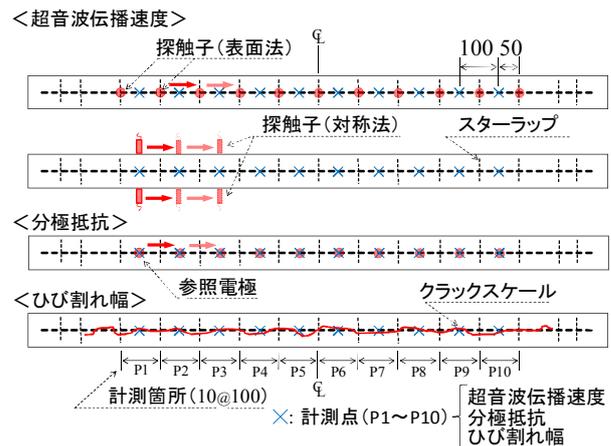


図-3 非破壊検査計測点及び探触子配置（供試体底部）

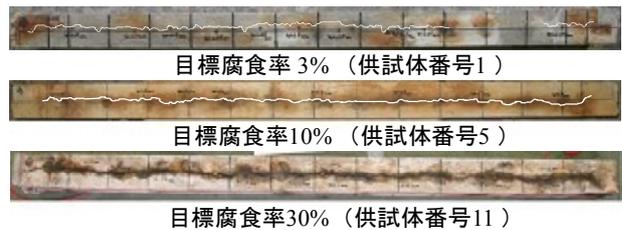


写真-1 電食後の供試体底部劣化状況

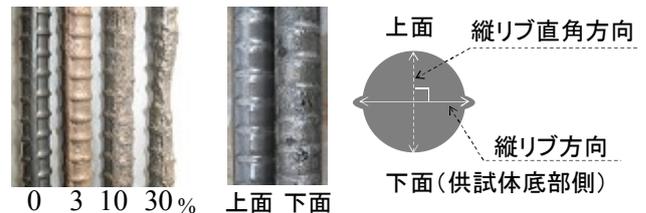


写真-2 鉄筋腐食状況等

表-4 引張鉄筋の腐食率と最大耐力

目標腐食率 (%)	3			10			30		
シリーズ	B1			B2			B3		
供試体番号(NO)	1	2	3	5	6	7	9	10	11
腐食率 (%)	鉄筋全体								
	2.3	2.4	2.8	14.2	13.9	13.4	25.3	26.1	31.6
	等曲げ区間								
	3.1	3.4	5.0	15.8	19.0	12.0	24.0	28.2	30.3
最大耐力(KN)	22.7	23.5	20.3	21.1	20.5	19.6	16.4	15.0	10.6

### (3) ひび割れ幅

電食後に発生する供試体底部の各計測点での腐食ひび割れ幅を、クラックスケール（0.05mm～2.0mm）を用いて計測した。

### 2.4 荷重実験

荷重実験は、図-1に示したように荷重点間隔280mm、支点間距離1260mmとした静的2点曲げ荷重を行った。荷重は荷重点2点の合計、変位量は荷重点の鉛直変位を平均したものとする。各供試体の最大耐力を表-4に示す。

## 3. 電食結果

### 3.1 供試体の劣化状況

各目標腐食率における供試体底部の状況を写真-1に示す。電食後の全供試体において、底面梁軸方向へ引張鉄筋に沿ったひび割れが生じていた。3%、10%についてはひび割れ幅が1mm未満と微小なため、ひび割れを白線で表示する。供試体側面および上面には表面上の損傷は見られなかった。ただし、30%の各供試体において、1、2箇所は、スターラップに沿った微小なひび割れが上面および側面の一部に発生していた。これは、引張鉄筋とスターラップ間の絶縁被膜が長期の電食により劣化し、スターラップの一部が腐食したために発生したものと考えられる。

### 3.2 鉄筋の腐食状況

荷重実験後に鉄筋をはりだし、10%クエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬後、腐食生成物の除去を行った。

目標腐食率の増加に伴う腐食状況、鉄筋表面の腐食形態および鉄筋径計測断面を写真-2に示す。腐食率の増加に伴い、鉄筋断面の減少がみられ、さらに一律に劣化せず局所的な劣化が進む傾向にあった。

また、鉄筋上面よりも下面において腐食が進行する傾向が全ての供試体において見られた。これは、鉄筋下面のかぶりが一番小さく、また電極の負極側に近かったことや、ブリーディングによる鉄筋下面の水膜が影響したと考えられる。

#### (1) 腐食率

除錆後の引張鉄筋全体および等曲げ区間の重量を測定することで、各供試体の腐食率を求めた。各供試体の腐食率を表-4に示す。

B1、B3 シリーズについては、目標腐食率にほぼ近い値となったが、B2 シリーズは目標腐食率よりもやや高めとなった。各シリーズ内でのばらつきは最大で2割程度であった。

#### (2) 鉄筋径

引張鉄筋中央から左右へ50mm間隔で計25箇所、縦リブ方向と縦リブ直角方向の寸法をノギスにより計測

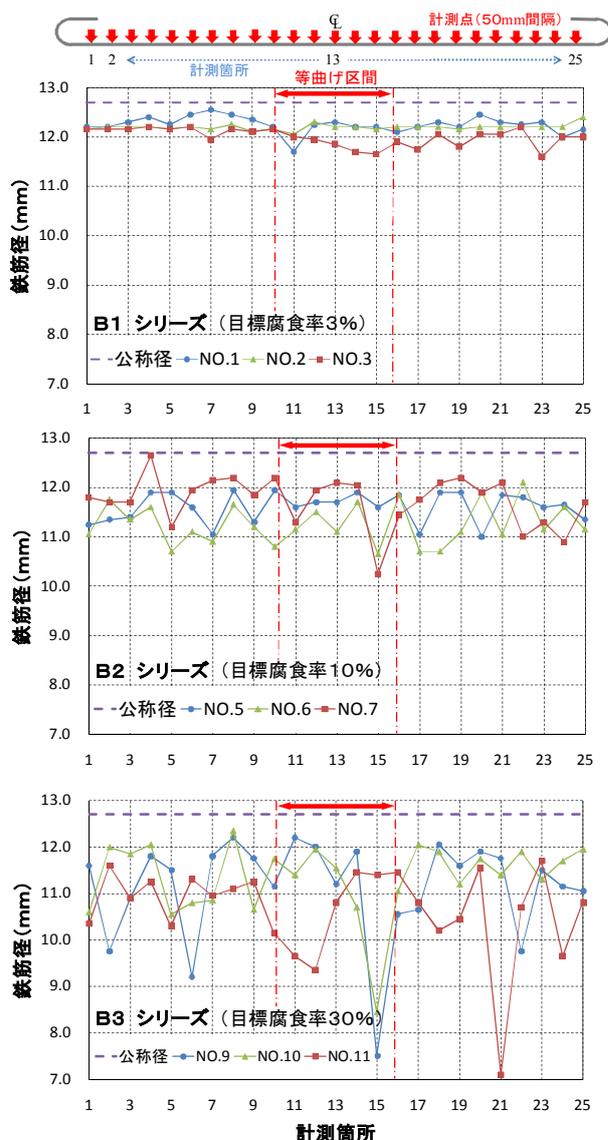


図-4 腐食率と鉄筋径

した。この直交した2寸法の平均値を計測点における鉄筋径とし、シリーズごとに図-4に示す。電食が進むにつれて、全体的な鉄筋径の減少および腐食の局所化が進行する傾向にある。

## 4. 鉄筋径比と非破壊検査結果の相関

電食後の鉄筋径を公称径で除したものを鉄筋径比と定義した。これと事前の非破壊検査の結果との相関を検討する。各供試体において、図-3に×印で示した10箇所の非破壊検査計測点での鉄筋径比と各種非破壊検査値の関係を図-5(a)～(c)に示す。

超音波伝播速度比には、表面法と対称法による計測値の間に相関性が認められたことから両計測値の平均値を用いた。図-5(a)に示すとおり超音波伝播速度比が小さくなるに従い、鉄筋径比も小さくなる傾向にある。これは、電食に伴い発生した腐食生成物の体積が鉄筋の

体積減少分より大きいため、内圧が生じて、周囲のコンクリートに微細なひび割れを発生させ、弾性波を回折させるためである。回帰直線による推定値と鉄筋径比（実測値）との相関係数は 0.528 である。超音波伝播速度比を計測することで、RC 構造物内部の鉄筋腐食量を定量的に把握できる可能性が指摘できる。

次に、分極抵抗との関係を図-5 (b) に示す。電食停止後の測定にもかかわらず、鉄筋腐食速度が大きく劣化が激しい箇所では、分極抵抗が小さくなる傾向にある。しかし、回帰直線による推定値と鉄筋径比（実測値）との相関係数は 0.348 と小さめであった。これは、供試体の含水量や計測箇所表面のひび割れ形状の違い等が影響していると考えられる。計測対象の含水率を一定に保つことは現実的には難しく、分極抵抗のみで RC 構造物内部の劣化状況を定量的に把握するのは困難であろう。

最後に、腐食ひび割れ幅との関係を図-5 (c) に示した。腐食ひび割れ幅が大きくなるにつれ、鉄筋径比も小さくなる傾向がみられる。また、回帰直線による推定値と鉄筋径比（実測値）との相関係数が 0.580 であり、鉄筋径比と腐食ひび割れ幅の間には、鉄筋径比と超音波伝播速度比の間と同程度の相関関係が認められる。

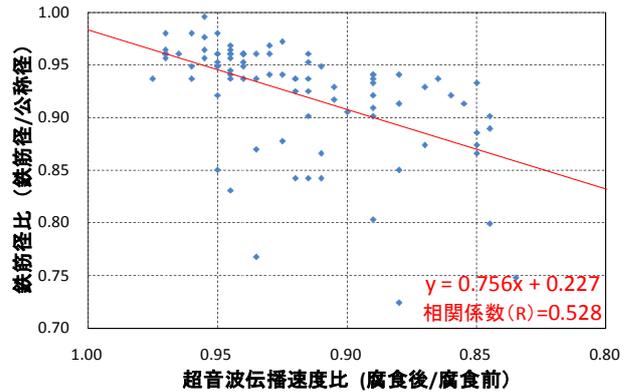
ここで、鉄筋径比と相関が強かった腐食ひび割れ幅と超音波伝播速度比の関係を図-6 に示す。両者の相関係数は 0.775 であり、良好な相関関係にある。

### 5. 曲げ載荷実験結果

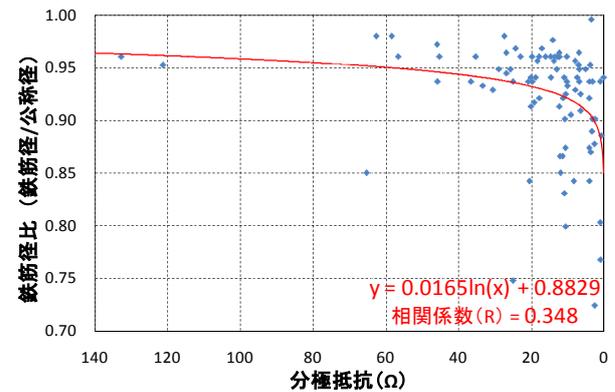
各供試体の荷重と変位の関係を図-7 (a) ~ (c) に示す。図中の×印は鉄筋破断を表している。また、凡例中の NO は表-3, 4 の供試体番号であり、それに続く括弧内の数値は鉄筋の等曲げ区間の腐食率(表-4)を表す。

すべての供試体は鉄筋降伏後に最大荷重に達し、等曲げ区間の梁上縁コンクリートの圧壊が始まるとともに荷重を減じていった。最終的な破壊モードは、鉄筋を腐食させていない供試体と目標腐食率 3% の供試体のすべてが曲げ圧縮破壊に至り、目標腐食率 10% の供試体全 3 体の内 2 体が曲げ圧縮破壊で、残る 1 体が鉄筋破断による曲げ引張破壊であった。そして、最も目標腐食率の大きい 30% の供試体は 3 体ともすべて鉄筋破断による曲げ引張破壊であった。なお、鉄筋破断に至った供試体はすべて等曲げ区間での破断であった。このように、腐食させていない、もしくは腐食の少ない供試体では曲げ圧縮破壊を示していたのに、腐食が激しくなるに従って曲げ引張破壊へと移行する傾向が顕著に現われている。

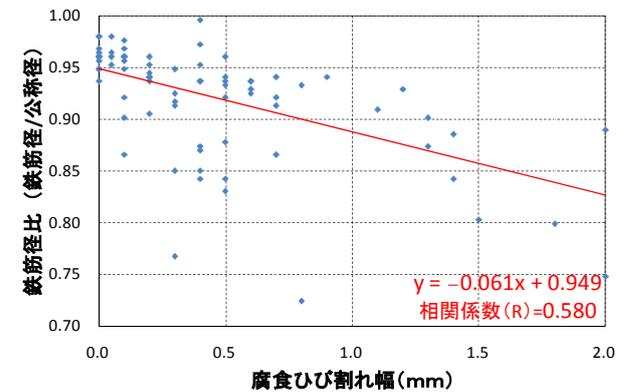
最大耐力に着目するならば、鉄筋の腐食率が大きくなるほど最大耐力が小さくなっていることがわかる。そこで、各供試体の最大耐力および降伏荷重実測値を腐食させていない健全梁（腐食率 0%）の最大耐力および降伏



(a) 超音波伝播速度比



(b) 分極抵抗



(c) 腐食ひび割れ幅

図-5 鉄筋径比と非破壊検査結果の関係

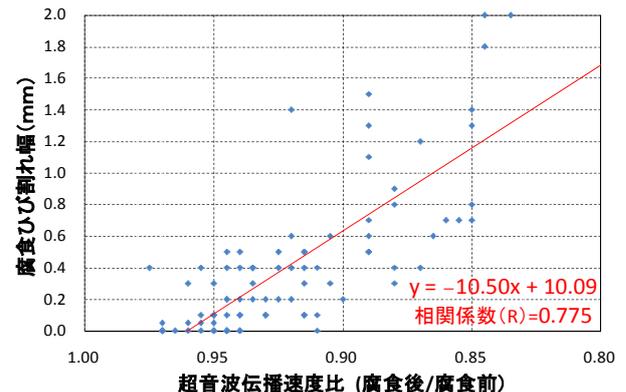


図-6 腐食ひび割れ幅と超音波伝播速度の関係

荷重実測値で除し、最大耐力比および降伏荷重比を算出し、等曲げ区間の実測腐食率との関係として図-8に示す。コンクリート上端の圧壊、鉄筋破断ともにすべて等曲げ区間で生じたことから、これ以降の考察においては鉄筋の腐食率として、等曲げ区間の腐食率を用いることとする。図-8において最大耐力比（実測値）-腐食率（実測値）関係の分布を直線回帰し、その回帰直線による推定値と最大耐力比（実測値）との値の相関係数を求めたところ0.906と極めて高い数値を示しており、次の回帰式(2)を得た。

$$y = -0.0132x + 1 \quad (2)$$

ここで、yは最大耐力比、xは腐食率(%)である。

一方、降伏荷重比（実測値）-腐食率（実測値）関係も同様に直線回帰すれば、相関係数は（偶然にも同じ）0.906となった。このように、腐食率との強い相関性を示した最大耐力比と降伏荷重比であるが、鉄筋が断面積を失ったのと同じ割合でこれらが減じているわけではないことに注意しなければならない。例えば、腐食率30%の位置でこれらの回帰された直線を参照すれば、30%減じた値ではなく、最大耐力比で約0.6（約40%減）、降伏荷重比で約0.4（約60%減）の値が得られており、鉄筋断面積の減少よりも最大耐力比、降伏荷重比の低下率の方が大きくなっている。前述したはつり後の鉄筋径計測では、腐食率の大きい場所に鉄筋径が極端に小さくなる部位が重なるという結果が示されており（図-4）、最大耐力や降伏強度が鉄筋径の最も小さな部位の影響を受けると考えるならば、腐食率以上に最大耐力比や降伏荷重比が低下するというこの傾向は説明できる。

## 6. 非破壊検査結果と最大耐力比

これまでの検討から、超音波伝播速度比ならびに腐食ひび割れ幅が、はつり後に実測された鉄筋径比と相関性を持つことが明らかとなった（図-5(a)および(c)）。また、腐食率と最大耐力比も強い相関性を持ち、本実験の供試体について両者の直線回帰式も得られた（式(2)）。

そこで、これらの相関性を応用して超音波伝播速度比や腐食ひび割れ幅から腐食率推定値  $x_n$  を求め、はつり後に計測された腐食率実測値  $x_d$  との比較を試みる。次の段階として、超音波伝播速度や腐食ひび割れ幅から求めた腐食率推定値  $x_n$  を用いて式(2)から求めた最大耐力比非破壊推定値  $y_n$  と、はつり後（破壊後）に計測された腐食率実測値  $x_d$  を用いて式(2)から求めた最大耐力比破壊推定値  $y_d$ 、ならびに載荷試験によって得られた最大耐力比実測値  $y_{ex}$  の3者の比較検討を試みる。

まず、腐食率推定値  $x_n$  と実測値  $x_d$  との比較を図-9(a), (b)に示す。白抜きのマーカーがはつり後に計測

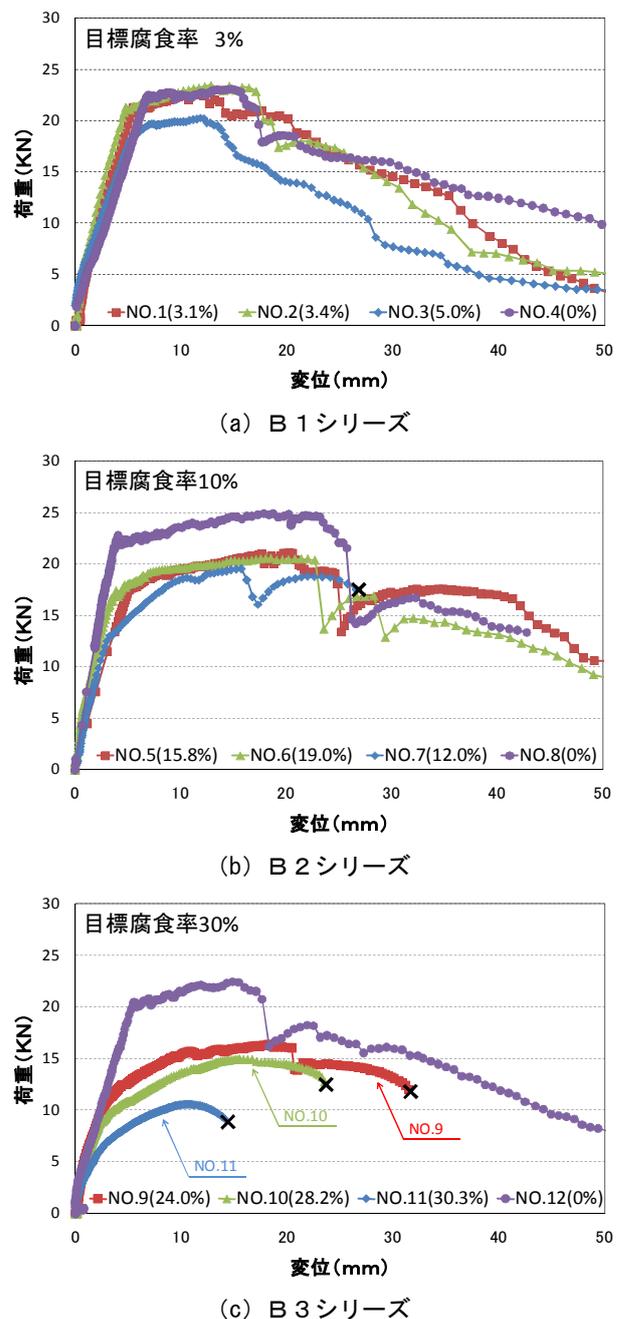


図-7 荷重-変位関係

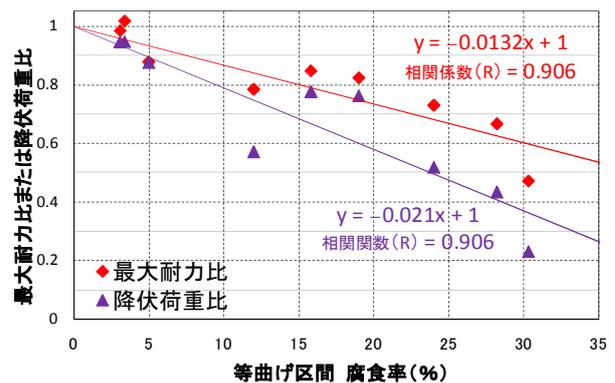


図-8 最大耐力比、降伏荷重比と腐食率の関係

した実測値  $x_d$  であり、●が非破壊検査から図-5(a), (c)の相関関係によって推定した推定値である。非破壊検査結果として、超音波伝播速度比、腐食ひび割れ幅のいずれを採用した場合であっても、腐食率推定値  $x_n$  は実測値  $x_d$  と比べて、B1 シリーズ(目標腐食率 3%)では過大に、B2 シリーズ(目標腐食率 10%)ではほぼ妥当に、B3 シリーズ(目標腐食率 30%)では過小に推定することとなり、目標腐食率 10%までは安全側の推定値を得ることができている。

次に、最大耐力比非破壊推定値  $y_n$ 、最大耐力比破壊推定値  $y_d$ 、最大耐力比実測値  $y_{ex}$  の比較を表-5に示す。目標腐食率 3%、10%での  $y_d$  は  $y_{ex}$  と良好な一致を示しているが、目標腐食率 30% (NO.11) では  $y_d$  は  $y_{ex}$  よりかなり大きな値を示し、危険側の推定となっている。一方、 $y_n$  は、目標腐食率 3%では  $y_{ex}$  を下まわる安全側の値(緑)を呈しているが、目標腐食率 10%ではいくつかのケースで  $y_{ex}$  を上まわる危険側の値(赤)を示し、目標腐食率 30%ではすべて  $y_{ex}$  を上まわっており危険側の評価となっている。これらの推定値を実測値により近づけるためには、図-5(a), (c)に示される非破壊検査結果と実際の腐食性状との関係や、式(2)に示されるような腐食率と最大耐力比の関係式をより精密に把握することが必要であるが、そのためには、測定値のばらつきや信頼性についての更なる検討の積み重ねが欠かせない。また、腐食率すなわち鉄筋断面積の減量だけでなく、付着特性を始めとする他の因子の影響も加味する必要性が指摘できるが、これらについては今後の検討課題としたい。

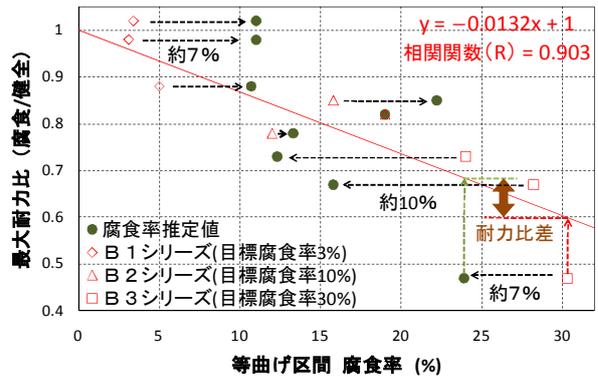
## 7. 結論

本研究では、各種非破壊検査結果と鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存耐力との関係について評価をおこなった。これにより得られた知見を以下に示す。

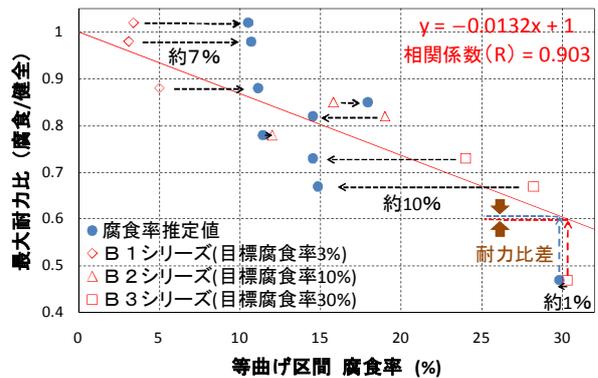
- (1) 非破壊検査における超音波伝播速度比と腐食ひび割れ幅のデータと鉄筋径比に相関を確認した。
- (2) 腐食率が高くなるにつれ、破壊モードが曲げ圧縮破壊から鉄筋破断による曲げ引張破壊へ移行した。
- (3) 本研究では、腐食率 10%以下の劣化供試体において非破壊検査から求めた腐食率推定値をもとに推定した最大耐力推定値は、腐食率実測値によって求めた最大耐力推定値および載荷実験から得た最大耐力実測値より、安全側に評価できた。

## 謝辞

本研究の実施に際しては、土木学会コンクリート委員会「材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能小委員会」(委員長：下村匠 長岡技術科学大学准教授)



(a) 超音波伝播速度比



(b) 腐食ひび割れ幅

図-9 腐食率推定値と実測値の比較

表-5 非破壊検査結果の評価

目標腐食率 (%)	NO	最大耐力比			
		実測値 ( $y_{ex}$ )	破壊推定値 ( $y_d$ )	非破壊推定値 ( $y_n$ )	
				超音波伝播速度	ひび割れ幅
3	1	0.98	0.96	0.85	0.86
	2	1.02	0.96	0.85	0.86
	3	0.88	0.93	0.86	0.85
10	5	0.85	0.79	0.71	0.76
	6	0.82	0.75	0.75	0.81
	7	0.78	0.84	0.82	0.85
30	9	0.73	0.68	0.84	0.81
	10	0.67	0.63	0.79	0.80
	11	0.47	0.60	0.68	0.61

の委員諸氏に多大なご協力、ご尽力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 田森清美ほか：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
- 2) 日本コンクリート工学協会：超音波パルス伝播時間の標準測定方法(試案)，JCI 基準集，pp.269-276，2004.4
- 3) 村上裕貴ほか：鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存曲げ耐力性状に関する研究，コンクリート工学論文集，第 17 巻第 1 号，pp.61-74，2006.1