

論文 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

倉知 星人^{*1}・佐藤 孝史^{*2}・小林 孝一^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨: 塩害劣化した RC はり部材について、鉄筋の性能低下が RC はり部材の耐荷性能に与える影響を検討するため、健全な RC はり部材と塩害劣化させた RC はり部材を作製し、部材の曲げ載荷試験および鉄筋引張試験を行った。その結果、腐食により鉄筋の質量減少率が大きくなるほど、鉄筋の性能低下が進行した。そして、この鉄筋の性能低下と RC はり部材の耐荷性能には高い相関性があり、RC はり部材の耐荷性能は鉄筋の腐食状態に大きく影響されることが明らかになった。

キーワード: RC はり, 塩害, 鉄筋腐食, 耐荷性能, 質量減少率

1. はじめに

鉄筋コンクリート (以下 RC) は、コンクリートと鉄筋の複合材料であり、力学的には引張に弱いコンクリートを鉄筋で補強し、耐久性的には錆びやすい鉄筋をコンクリートで保護することにより互いに欠点を補った優れた構造体である。

この様に優れた構造体である RC 中の鉄筋が塩害や中性化などにより腐食した場合、鉄筋断面積の減少による強度の低下、かぶりひび割れ発生などが、RC 構造物全体としての耐荷性能低下に繋がる。特に近い将来に設計耐用年数を迎える RC 構造物が飛躍的に増大することから、維持管理の面からも鉄筋の劣化度を把握し、RC 構造物の健全性を推定することは重要である¹⁾³⁾など。

しかし、鉄筋の腐食による鉄筋自体の力学的性能低下が RC 構造物の耐荷性能低下に及ぼす影響については定量的な統一見解が得られていないのが現状である。

そこで本研究では、塩害劣化した RC はり部材について曲げ載荷試験を、また内部の鉄筋の腐食度調査と引張試験を実施することにより、鉄筋の性能低下が RC はり部材の耐荷性能に与える影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本実験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、引張鉄筋として D10 (SD295) を 2 本、および組立筋として φ6 を 2 本、かぶり 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 になるように配置した。

使用した粗骨材の最大寸法は 15mm、コンクリートの水セメント比は 60% とし、20.5kg/m³ の塩化ナトリウム

を混入した供試体 (以下 CL 供試体) 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) を作製した。CL 供試体 6 体 (CL-1~6)、N 供試体 2 体 (N-1, 2) の合計 8 体を、4 年間大学内の屋外に暴露した。載荷前の CL 供試体の外観上の劣化状況を写真-1 に示す。

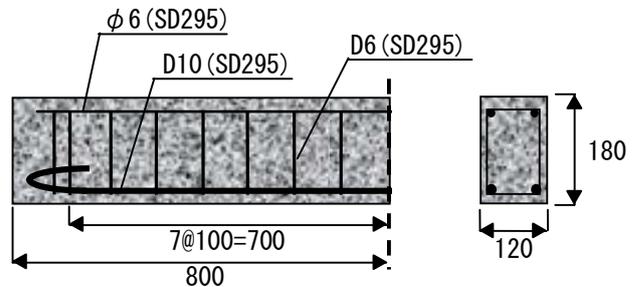


図-1 供試体概要 (単位: mm)



写真-1 CL 供試体劣化状況

2.2 腐食ひび割れ幅計測方法

腐食ひび割れ幅は引張鉄筋に沿って供試体底面に発生したひび割れ幅をクラックスケールにより計測した。腐食ひび割れ幅の計測は 100mm 間隔で、供試体一体当たり 32ヶ所ずつ計測した。

2.3 自然電位の測定

鉄筋の腐食状態を把握するために、自然電位の測定を行った。測定位置は供試体底面の引張鉄筋上、供試体端部から 400, 800, 1200mm の 6ヶ所計測した。なお、照合極には銀/塩化銀電極を用いた。

2.4 はり部材の曲げ載荷試験

曲げ載荷試験の概要を図-2 に示す。載荷は等モーメ

*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 (正会員)

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科准教授 博 (工) (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

ントスパン300mm, せん断スパン550mmの2点荷重とし、一方向曲げ荷重試験を行った。計測項目は荷重, 変位, ひずみとし, 荷重はロードセルにより検出し, 変位は支点, 荷重点および荷重点間に等間隔で3箇所を設置した高感度変位計によって検出した。また, 圧縮縁に貼り付けたひずみゲージよりコンクリートのひずみを検出した。ここで, 式 (1) を用いてモーメントスパン内の曲率 ϕ (1/mm) を算出した。

$$\phi = \frac{4}{l_0^2} (2\delta_B - \delta_A - \delta_C) \quad (1)$$

ここで, l_0 : モーメントスパン (mm), δ_B : スパン中央の変位 (mm), δ_A, δ_C : 荷重点の変位 (mm) である。なお, 荷重は荷重装置のストローク限界 (約 90mm), もしくは荷重の急落まで続けた。

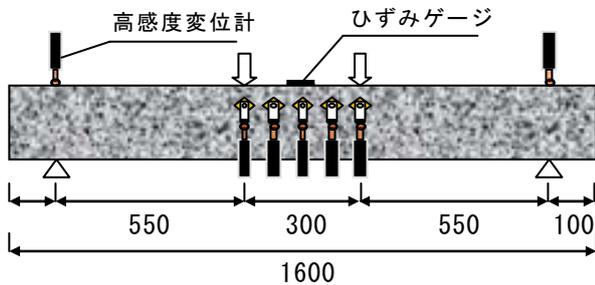


図-2 曲げ荷重試験概要 (単位: mm)

2.5 質量減少率算出方法

曲げ荷重試験後, コンクリートを破砕機ではつり, 荷重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, その質量と長さを測定した。なお, 鉄筋は質量と長さを測定する前に24時間, 60°Cに保った10%のクエン酸二アンモニウム水溶液に浸し, 腐食生成物を除去した⁴⁾。その後, 鉄筋を取り出し, 除去しきれなかった腐食生成物をピックで取り除き, 最後にたわしで素地を傷つけないように流水下で磨き, 全ての腐食生成物を除去した。ここで, 式 (2) を用いて質量減少率C (%) を算出した。

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

ここで, m : 健全な鉄筋のクエン酸二アンモニウム水溶液浸漬後の長さ1mm当たりの質量 (g), l_c : 腐食鉄筋の長さ (mm), m_c : 腐食鉄筋の腐食生成物除去後の質量 (g) である。

2.6 腐食鉄筋の最小断面積算出方法

(1) ノギス

上記のようにさび腐食生成物を除去した鉄筋について, 目視により最も小さいと判断される断面において, 図-3に示すように最も小さな径X,

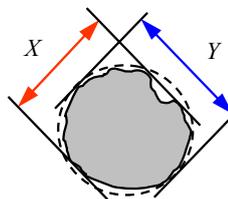


図-3 測定方法

その直角方向の径Yの2つを測

定した。このノギスによる測定値を式 (3) に代入し, 断面積A (mm²) (以下, ノギス断面積) を算出した。

$$A = \frac{\pi \cdot (\text{公称直径})^2}{4} \times \frac{\text{鉄筋径} X}{\text{公称直径}} \times \frac{\text{鉄筋径} Y}{\text{公称直径}} \quad (3)$$

(2) 3D スキャナー

非接触式レーザー3Dスキャナーを用いて長さ100mm範囲を長さ方向に0.4mmピッチ, 回転方向0.36°ピッチでスキャンし, 鉄筋の表面形状を測定した上でこの区間での最小断面積 (以下, スキャナー断面積) を求めた。

2.7 鉄筋引張試験

鉄筋の引張試験を行なった。2.6節で断面積を算出した部分, およびその前後2cmの位置にひずみゲージを貼り付けた。また, 標点間距離 (L=8D) を引張試験前後で測定し, 破断時の伸びを求めた。試験終了は鉄筋が破断するまでとした。

3. 実験結果

3.1 腐食ひび割れ幅

クラックスケールを用いて測定したことにより得られたCL供試体の腐食ひび割れ幅を図-4に示す。

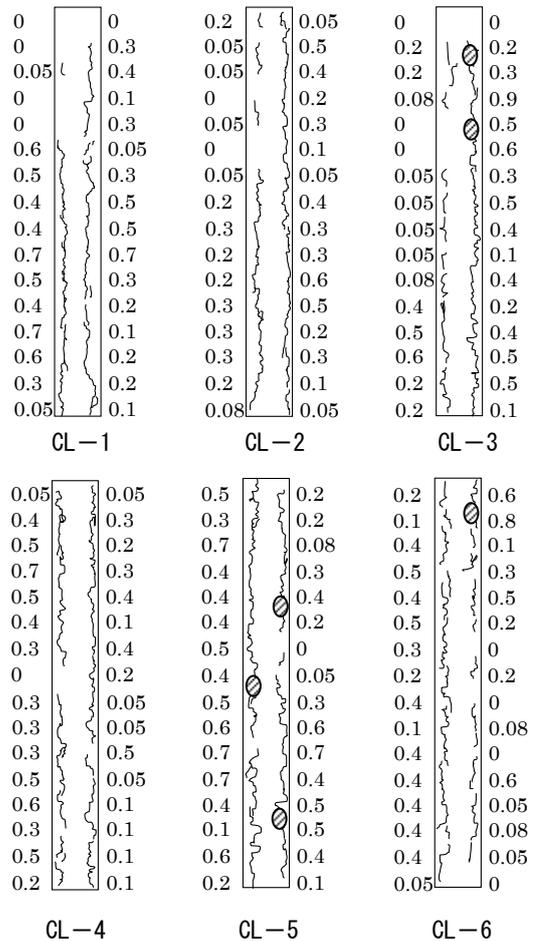


図-4 かぶり面の腐食ひび割れ幅状況 (単位: mm)

⊙: 剥離箇所

コンクリート打設時に塩化ナトリウムを混入した CL 供試体では全ての供試体で底面に加え、側面にも若干の腐食ひび割れが確認された。なお N 供試体では腐食ひび割れは発生しなかった。これらから、塩化ナトリウムを混入した CL 供試体は一部分にかぶりの剥離も見られたため、これらの供試体は塩害における劣化過程の加速期にあると判定される⁵⁾。

3.2 自然電位

自然電位の供試体上での分布の例を図-5に示す。なお、銀/塩化銀電極に対して、自然電位が-90mV以上では非腐食領域、-240mV以下では腐食領域、その間是不確定領域とASTM規格では規準化されている⁶⁾。ここでN供試体は2体とも全ての測定位置で非腐食領域、CL供試体はどの供試体も全ての測定位置で腐食領域となっており、塩化ナトリウムにより鉄筋が腐食したことが確認できる。また、いずれの供試体においても全ての測定位置で、2本の引張鉄筋の自然電位はほぼ同等の値を示している。2本の鉄筋はスターラップで接続されているため、それぞれの電位が相互に影響を与えたためであると考えられる。

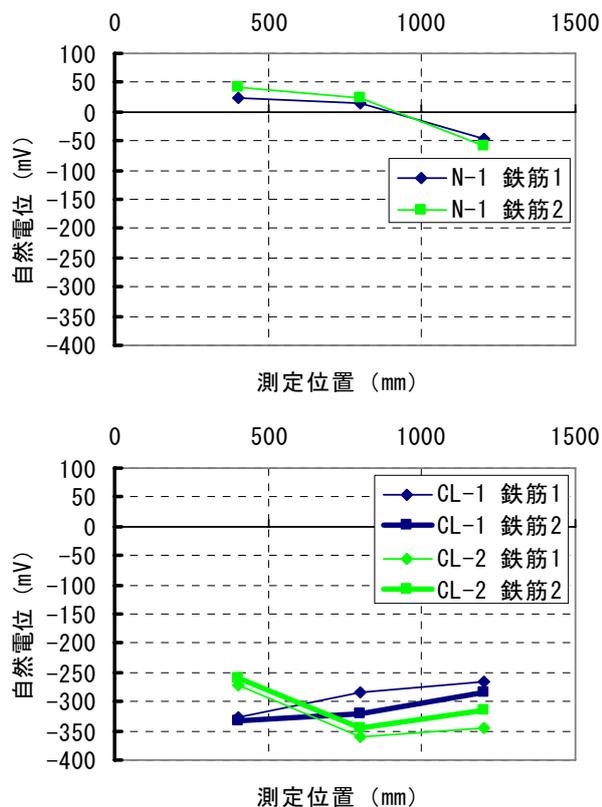


図-5 自然電位-測定位置関係の例

3.3 はり部材の曲げ載荷試験

(1) 荷重-たわみ関係

曲げ載荷試験により得られた荷重-たわみ関係を図-6に示す。また、モーメント-曲率関係を図-7に示す。

なおN供試体2体間の差、CL供試体6体間の差はほとんどなかったため、ここでは代表的な4体の結果を示す。CL-3のたわみが小さい段階で荷重が低下しているのは、引張鉄筋が破断したためである。なお、CL供試体6体中2体で鉄筋の破断が生じた。これは、載荷試験中に大きな音とともに荷重が急激に減少したことから判断したが、載荷試験後に鉄筋をはつり出し破断が生じていることを、目視でも確認した。鉄筋の腐食と伸びの低下の関係については3.5節で述べる。Nシリーズ平均の耐荷力とCLシリーズ平均の耐荷力を比較すると、CL供試体の方が12%程度小さくなっている。これは鉄筋の腐食により鉄筋の断面積が減少したためであると考えられる。そこで、以下に鉄筋の腐食と部材の耐荷性能の関係について検討した。

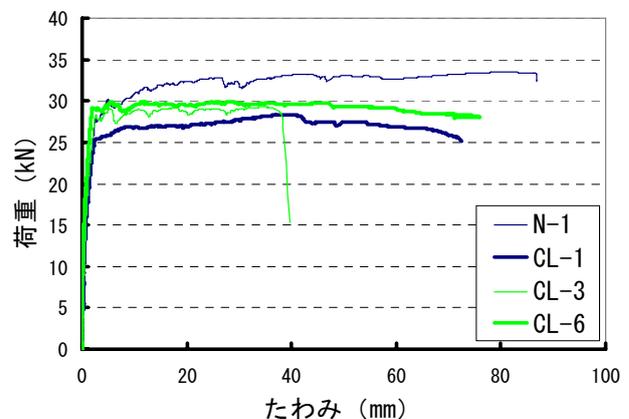


図-6 荷重-たわみ関係

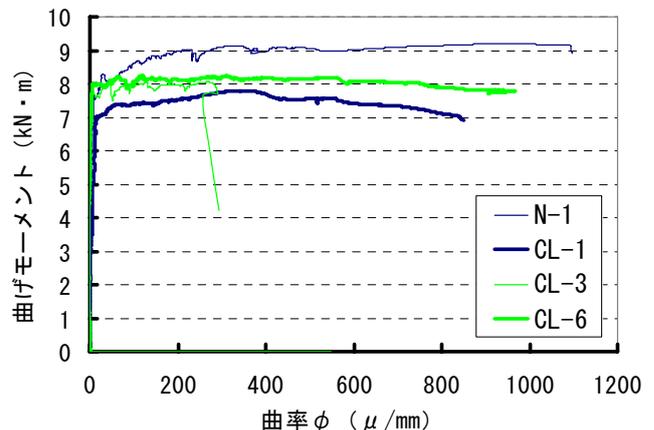


図-7 モーメント-曲率曲線

(2) 耐荷力-鉄筋質量減少率関係

鉄筋の質量減少率と部材の耐荷力を表-1に示す。また、耐荷力と鉄筋の質量減少率との関係を図-8に示す。ただし、本研究では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。質量減少率が5%で耐荷力は13%程度低下している。一般的に質量減少率が大きい供試体の方が、耐荷力は小さくなると考えられるが、本研究の結果も概ねそのような傾向を示している。これは、

等モーメントスパンの鉄筋には曲げ載荷試験後には大きな伸び変形が残留し、正確な質量減少率の測定が困難であると考えたためであるが、はり部材の曲げ耐荷性能は等モーメントスパン内の鉄筋の性状に大きく依存すると考えられる。したがって、ここでの質量減少率と耐荷性能との間には一対一の対応はないため、載荷試験後の質量減少率の測定方法については今後も検討が必要である。

表-1 鉄筋の質量減少率と部材の耐荷力

	質量減少率(%)	耐荷力(kN)
N-1	0.0	33.5
N-2	0.0	33.0
CL-1	5.7	28.4
CL-2	4.7	28.1
CL-3	2.6	29.3
CL-4	4.1	30.5
CL-5	6.3	29.2
CL-6	2.9	30.0

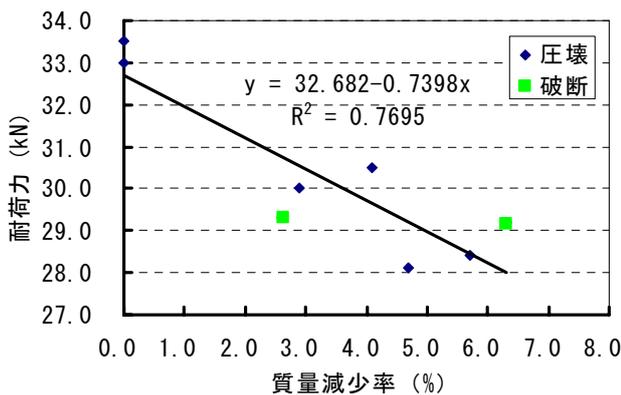


図-8 耐荷力と質量減少率関係

3.4 鉄筋の性状

(1) スキャナー断面積とノギス断面積の関係

スキャナー断面積とノギス断面積の関係を図-9に示す。なお、ノギスによる測定で断面積が最小であると判断された位置を中心に前後50mmを0.4mmピッチで3Dスキャナーを用いて測定し、0.4mmピッチごとに断面積を算出したところ、全ての鉄筋で測定区間のほぼ中央の位置で断面積が最小になったところから、ノギス測定による判断はほぼ正確であると考えられる。ノギスで測定する場合、孔食している部分に関しては、正確に測定ができない。また、3Dスキャナーは一方方向のレーザーを照射し、対象物が回転することにより測定するため、腐食が激しく凹凸が大きな場合には陰が生じて正確な表面形状が測定できなかったところもあった。しかし、ノギス断面積と、スキャナー断面積の差は小さく、ノギス測定から鉄筋断面積を求める方法は非常に簡易ではあるが、 $R^2=0.8758$ であることから、ある程度の信頼性があると

考えられる。

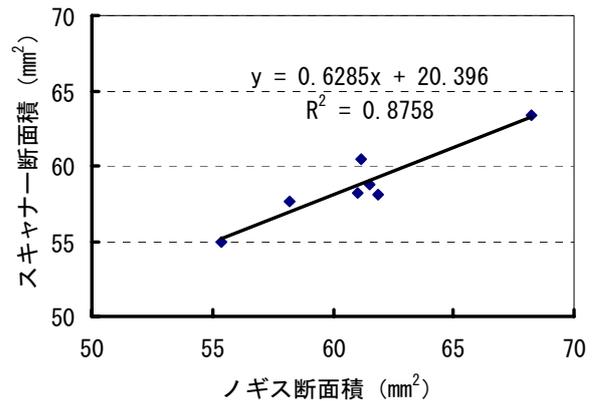


図-9 スキャナー断面積とノギス断面積関係

(2) 応力-ひずみ関係

鉄筋引張試験により得られたみかけの応力（荷重を公称断面積で除した値）-ひずみ関係を図-10に示す。なお、供試体ごとに取り出した4本のうち1本について試験を行った。また、N供試体の鉄筋2本間の差、CL供試体の鉄筋6本間の差はほとんどなかったため、ここでは例として鉄筋4本の結果を示す。なお、ひずみゲージはノギス測定にて最も小さいと判断された断面位置に貼り付けたが、前述のように、この位置は実際に最も小さい断面位置とほぼ一致していると考えられる。腐食により断面積が減少しているCLシリーズはN-1に比べて応力が低下し、破断時のひずみも小さくなっている。図-6に示した荷重-たわみ関係はここで示すような鉄筋の腐食による性能低下に大きく影響されていると考えられる。

また、応力（荷重を各鉄筋のスキャナー断面積で除した値）-ひずみ関係を図-11に示す。図-10の場合と比較すると、CL-1を除いて鉄筋の強度に与える腐食の影響は小さくなった。CL-1の強度のみが他と異なる傾向を示した理由については、今後さらに検討を加える必要がある。

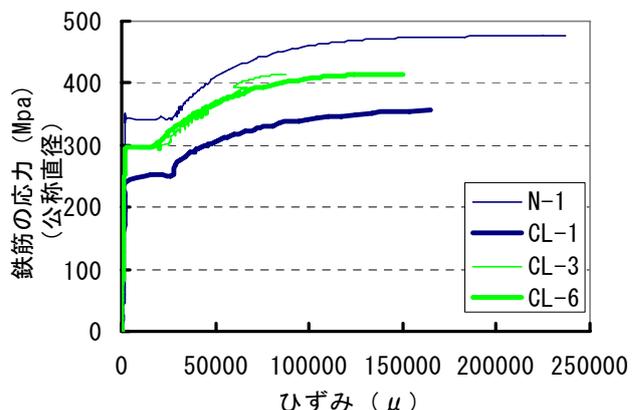


図-10 応力（公称断面積）-ひずみ関係

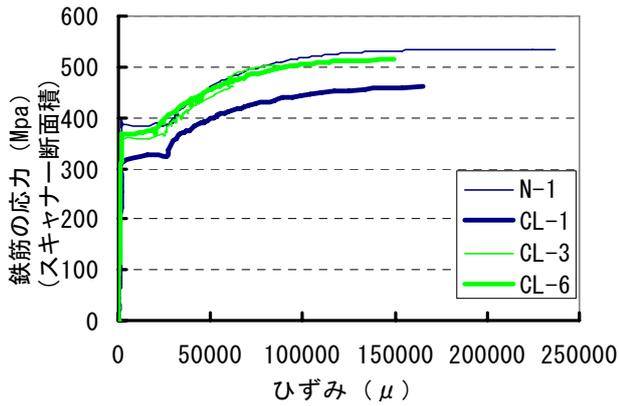


図-11 応力（スキャナー断面積）－ひずみ関係

(3) 引張強度－鉄筋腐食関係

鉄筋のみかけの引張強度（最大荷重を公称断面積で除した値）と質量減少率の関係を図-12に示す。引張強度と質量減少率の間には相関性があり、質量減少率が大きくなるほどみかけの引張強度は小さくなった。

また、みかけの引張強度（最大荷重を公称断面積で除した値）と最小断面積（スキャナー断面積）との関係を図-13に示す。この場合の両者の相関性はみかけの引張強度（最大荷重を公称断面積で除した値）と質量減少率のものよりも高く、最小断面積が小さくなるほど、引張強度は小さくなった。つまり、局部的に著しく腐食した部分が鉄筋の強度を決定し、さらにこの鉄筋が構成する部材の耐荷力を決定すると考えられる。

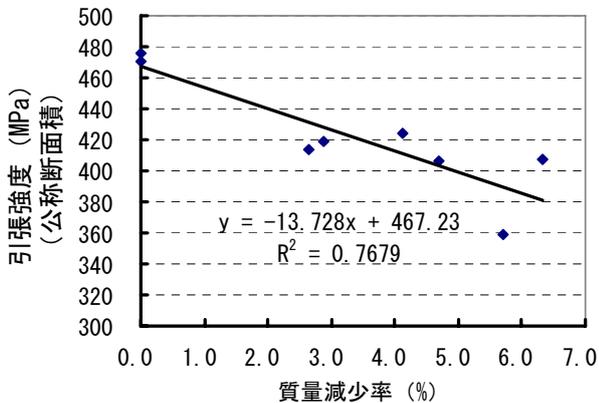


図-12 引張強度（公称断面積）と質量減少率関係

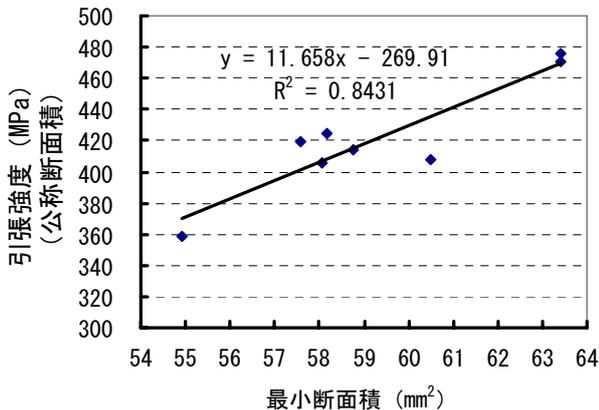


図-13 引張強度（公称断面積）と最小断面積関係

(4) 伸びと鉄筋腐食関係

鉄筋引張試験により得られた鉄筋の破断時の伸びを表-2に示す。また、伸びと質量減少率との関係を図-14に示す。なお、CL-2は標点間の外で破断してしまったため、伸びは測定できなかった。Nシリーズ2本の平均の伸びとCLシリーズ5本の平均の伸びを比較すると、CLシリーズはNシリーズより15%程度小さくなっており、鉄筋の腐食が伸び性能を低下させた。このような現象が生じた結果、図-6に示したように、鉄筋が腐食したRC部材の中でも鉄筋が破断したCL-3の変形性能が極めて小さくなったものと考えられる。また、伸びと質量減少率の間には相関性があり、質量減少率が大きくなるほど鉄筋の伸び性能は低下した。

伸びと最小断面積との関係を図-15に示す。この場合の両者の相関性は伸びと質量減少率のものよりも低い。これは、鉄筋の伸びは鉄筋のある区間全体の性状の積算現象であり、局部的な断面減少に加え、鉄筋全体の断面積の分布にも依存するためであると考えられる。

表-2 鉄筋の伸び

	標点距離 (mm)	試験後標点距離 (mm)	伸び (%)
N-1	80.1	101.9	27.2
N-2	80.0	103.2	28.8
CL-1	80.0	88.8	10.9
CL-2	78.8	86.8	
CL-3	79.3	90.1	12.5
CL-4	79.6	93.8	17.1
CL-5	79.6	88.6	10.6
CL-6	80.0	92.2	15.1

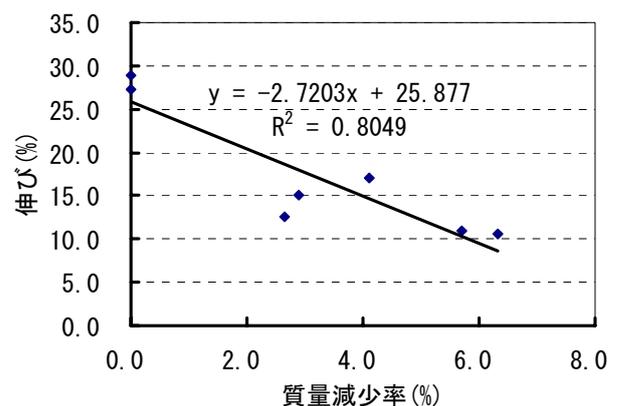


図-14 伸びと質量減少率関係

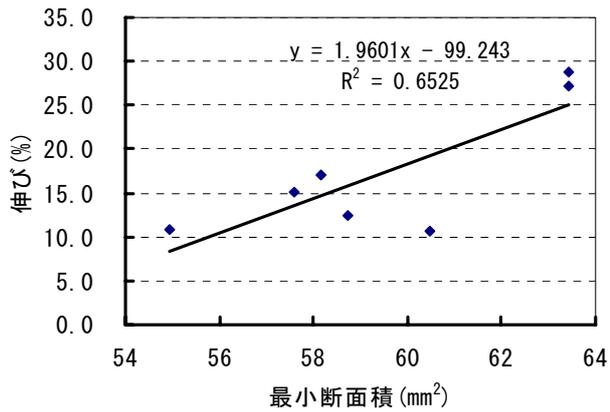


図-15 伸びと最小断面積関係

4. まとめ

本研究では塩害による鉄筋の腐食がRC部材の耐荷性能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) ノギス測定から腐食鉄筋の残存断面積を求める方法は、ある程度の信頼性があると考えられる。
- (2) 鉄筋の質量減少率が大きくなるほど、RC部材の耐荷力が小さくなり、鉄筋の引張強度と伸びが小さくなった。

- (3) 鉄筋の引張強度は鉄筋の最小断面積に大きく依存する。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート技術シリーズ 71-材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能-, 2006
- 2) 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
- 3) 小林孝一：塩害劣化したRCはり部材の曲げ耐荷性能に関する実験的研究, 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6巻, pp.231-236, 2006
- 4) JCI-SC1 コンクリート中の鋼材の腐食評価方法, 1987
- 5) 2001年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編], pp.108, 2001
- 6) ASTM C 876-91, Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Steel in Concrete, 1999