

# 論文 長期暴露した鉄筋コンクリート梁の劣化性状と耐力

大屋戸 理明\*1 · 西脇 敬一\*2 · 長谷川 雅志\*3 · 永岡 高\*4

**要旨:** 大量に塩分を含有させて12年間長期暴露し、劣化させた鉄筋コンクリート部材を用いて、静的曲げ載荷試験と詳細な劣化状態の調査を実施した。その結果、腐食した引張鉄筋の見かけの降伏点は平均的な質量減少に比例して低下すること、部材の耐力は引張鉄筋の平均的な質量減少を用いて評価できること、劣化した部材のひび割れ性状や荷重-変位関係などは健全な部材と異なる場合があることを確認した。

**キーワード:** 暴露試験, 鉄筋腐食, 塩害, 質量減少率, 降伏点残存率, 耐力

## 1 はじめに

コンクリート構造物の耐久性を検討するにあたり、部材の化学的劣化と力学的性能の低下の関係把握することは重要な検討項目である。文献<sup>1)</sup>では、ある劣化の程度までは部材の耐力が鉄筋の断面減少により評価可能であることが示され、腐食した鉄筋とコンクリートとの付着劣化の影響や、著しい腐食が生じた場合の影響の評価などが課題として示されている。ただし、それらの知見はいくつかの特定の実験を根拠としているため、多様な現実の腐食形態と整合させるには、より幅広い条件下での研究を実施し知見を蓄積することが望まれる。

劣化した部材の実験研究においては、実験条件の違い、特に劣化した部材のモデル化の方法が結果に影響を及ぼすと考えられる。既往の研究では、最も一般的な手法は電食による促進劣化であり、ついで暴露試験による手法がよく実施されていると思われる。暴露による方法は、部材の劣化を最も現実に近い形で再現できると思われる点は有利であるが、実施期間が長くなり成果の蓄積が進みにくいことから、既往の研究では腐食の程度の大きいものは実施例が少な

い。電食による手法は通電量により腐食の程度を管理できることが有利であるが、暴露試験や実構造物の劣化との関係が十分に整理されているとは言えない。

このような背景のもと、筆者らは、暴露試験による知見の蓄積を目的に、大量に塩分を含有させて12年間長期暴露し劣化させた鉄筋コンクリート(RC)部材を用いて、静的曲げ載荷試験と詳細な劣化状態の調査を実施した。本報告はこの結果<sup>2)3)</sup>と新たに実施した鉄筋強度試験結果から、暴露20ヶ月時点での結果<sup>4)</sup>とあわせ、鉄筋やコンクリートの劣化が曲げ性能に与える影響について検討してまとめたものである。

## 2 試験の概要

### 2.1 試験体の概要

#### 2.1.1 試験体の形状と材料

本研究では、過去の研究<sup>4)</sup>の試験体と同時に製作された、同じ曲げ破壊型の梁部材3体を使用した。試験体の形状寸法を図-1に、コンクリートの配合を表-1に示す(文献<sup>4)</sup>参照)。なお、3体のうち試験体BおよびCは、劣化を促進させるために10kg/m<sup>3</sup>の塩分(NaCl)を添

\*1(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 副主任研究員 工修(正会員)

\*2 鉄建建設(株) 技術研究所 土木技術開発グループ

\*3(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 研究員(正会員)

\*4 鉄建建設(株) 技術研究所 土木技術開発グループ グループリーダー

加して溶解した練り混ぜ水を使用した。

### 2.1.2 試験体の暴露

暴露方法を以下に要約する（文献<sup>4)</sup>参照）。

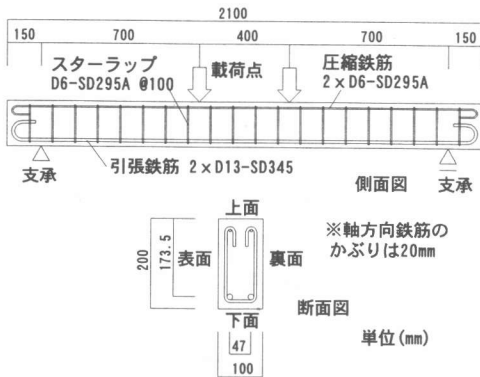


図-1 試験体の形状寸法

表-1 コンクリートの配合

空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )		
			水	セメント	粗骨材
4±1	65	50	165	245	932

※設計基準強度：24 (N/mm<sup>2</sup>)，スランプ：8±2.5 (cm)

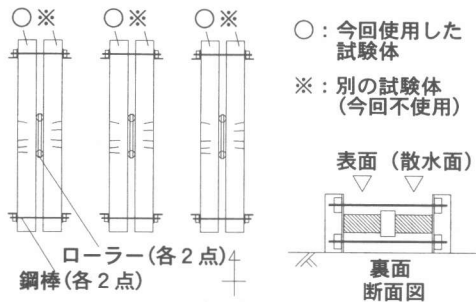


図-2 試験体暴露方法

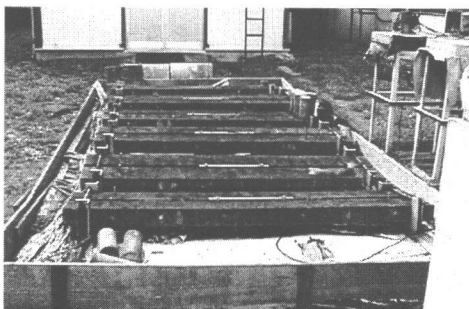


写真-1 試験体暴露状況

(1)暴露前に荷重により曲げひび割れを発生させた。(2)別の試験体と組み合わせ鋼棒で締め付けることで、曲げひび割れが開いたままとするように保持した（図-2）。(3)(2)の状態東京都国分寺市内に暴露した（写真-1，暴露期間は12年）。(4)暴露開始後17ヶ月間は、劣化を促進させるため、定期的に塩水を散水した。

## 2.2 劣化調査と荷重試験の概要

### 2.2.1 劣化調査

最初に、外観観察により試験体全体の劣化状態の確認を行った。荷重試験終了後は、荷重による影響のない箇所からコア（φ50×100mm）を各試験体につき3体ずつ採取し、コンクリート圧縮強度および静弾性係数を測定した。さらに、試験体を荷重点直下と支点直上の4断面で切断し、フェノールフタレイン法により10mmピッチで中性化深さを測定した。また、各試験体のせん断スパンにおいて、100×50×100mm程度の試料を採取し、表面から深さ方向に20mm毎に切断して、JCI-SC4に準拠した方法により、塩化物イオン量の表面からの深さ方向の分布を測定した。さらに、せん断スパン部分の引張鉄筋のはつり出しを行い、JCI-SC1に準拠した方法により、質量減少率（新たに入手した健全な同じ種類の鉄筋質量に対する、鉄筋の腐食による質量減少分の割合）を測定し、その後に鉄筋の引張試験を行った。

### 2.2.2 荷重試験

荷重試験は、図-1に示す位置を荷重点・支承位置として、静的曲げ荷重試験を行った。測定は、荷重、変位、ひび割れ幅開口量等について行った。なお、試験体の劣化程度から荷重が急激に変動すると思え、荷重は変位制御とした。

## 3 劣化状態調査

### 3.1 外観観察

試験体の外観の例を写真-2に示す。試験体は外観から判断して耐久性上寿命がきたと思われるほど劣化しており、表面は黒ずんで骨材が露出し、一部の鉄筋位置のかぶりコンクリー

トに浮き・剥落が見られた。浮き・剥落は特に表面で顕著であった。なお、暴露期間中鋼棒に作用していた荷重は、鋼棒切断時に測定されたひずみの戻りから推定すると1支あたりおよそ6kNであり、試験体は相応の剛性を有していることがわかる。

ひび割れ図を図-3に示す。これによると、(1)ひび割れはスターラップよりも引張鉄筋や圧縮鉄筋に沿ったものが本数も幅も大きいこと(引張鉄筋の最大ひび割れ幅は約5mm)、(2)錆汁は引張鉄筋や圧縮鉄筋の位置よりもスターラップの位置に多い(ひび割れの場所と一致しない)ことが確認できる。なお、暴露時に発生させた曲げひび割れ<sup>4)</sup>が確認できなかったが、これは曲げひび割れの間にコンクリートの遊離析出物が生成したためと思われる。

### 3.2 コンクリートの力学的性能

コンクリートの力学的性能試験結果を表-2に示す。これより、コンクリート強度は約30~40N/mm<sup>2</sup>程度と十分な強度を有していることが

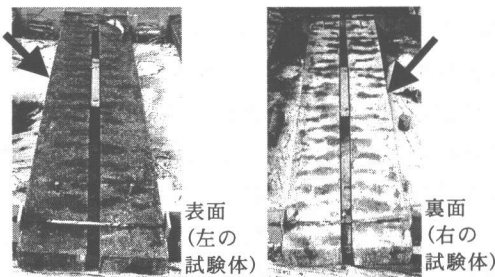
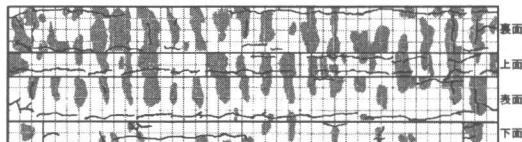


写真-2 試験体外観(試験体C)



注：網掛けは錆汁のある部分を示す。

図-3 ひび割れ図(試験体C)

表-2 コンクリートの力学的性質

試験体名	静弾性係数	圧縮強度
A	19700 N/mm <sup>2</sup>	28.5 N/mm <sup>2</sup>
B	31800 N/mm <sup>2</sup>	42.4 N/mm <sup>2</sup>
C	31800 N/mm <sup>2</sup>	38.6 N/mm <sup>2</sup>

注：試験は直径50mmのコアによる。

確認できる。なお、暴露20ヶ月時点では約25~30 N/mm<sup>2</sup>程度であった。

### 3.3 中性化深さ

コンクリートの中性化深さの測定結果(ひび割れ発生箇所を除いた平均値)を表-3に示す。これによると、(1)中性化深さは試験体や面による差が小さく、いずれも平均で5mm程度と比較的軽微なこと、(2)平均値は算定値<sup>5)</sup>と概ね一致することが確認できる。なお、鉄筋位置まで中性化が進行していた部分も見られたが、このような箇所には写真-3のように腐食ひび割れが生じていたことから、この部分の中性化は腐食ひび割れの割裂面を起点として進行したものと考えられる。以上から、本研究に用いた試験体では、中性化は鉄筋の腐食の主要な原因ではないことが推測できる。

### 3.4 塩化物イオン量

試験体Aの塩化物イオン量の調査結果を、暴露20ヶ月時点に測定した別の試験体の結果<sup>4)</sup>と併せ図-4に示す。これらの試験体はコンクリートの練り混ぜに塩分を混入していない。図より、塩水の散水により試験体が含有した全塩化物イオン量は、暴露20ヶ月時(5~10kg/m<sup>3</sup>)

表-3 中性化深さ(単位:mm)

試験体	表面	裏面	上面	下面	平均
A 平均	5.3	6.1	4.6	4.3	5.1
B 平均	3.3	3.1	2.0	3.6	3.0
C 平均	3.2	3.7	0.7	4.9	3.1

中性化深さ算定式<sup>5)</sup>:  $t = \alpha \beta \gamma \delta \varepsilon 5000C^2 / (x-38)^2$   
 $t$ : Cまで中性化する期間(年),  $x$ : 水セメント比(%),  
 $C$ : 中性化深さ(cm),  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ : 骨材, 混和剤,  
 セメント, 施工程度, 仕上げと室内外による係数  
 $t=12, x=65, \alpha=6.2, \beta=1.6, \gamma=\delta=\varepsilon=1$ のとき,  
 $C=0.42$ (cm)

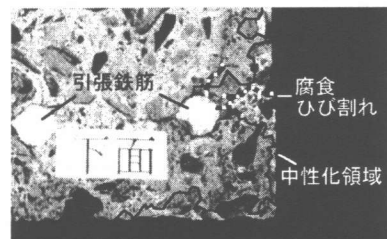


写真-3 中性化深さ測定断面

に比べ減少し、暴露12年で概ね  $4 \text{ kg/m}^3$  程度であることがわかる。これは暴露により塩分が流出したためと思われる。なお、今回の試験体では、**図-4**の暴露20ヶ月時点のように裏面側で塩化物イオン量が多い傾向は見られなかった。

### 3.5 鉄筋の腐食状況

鉄筋の腐食状況を**写真-4**に示す。これによると、スターラップの場合、同じ1本の鉄筋でも腐食の程度はかなりばらついており、健全に近い部分もある一方で、破断に至るほど極端な断面欠損が生じている部分もあることがわかる。一方、引張鉄筋にはそのような極端な欠損は見られなかったものの、腐食の著しい箇所では写真のような局所的な腐食が観察される。このこ

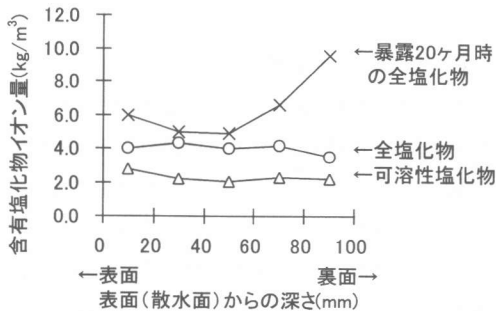


図-4 塩化物イオン量分布 (試験体A)



(左: スターラップ 右: 引張鉄筋)  
写真-4 鉄筋の腐食状況

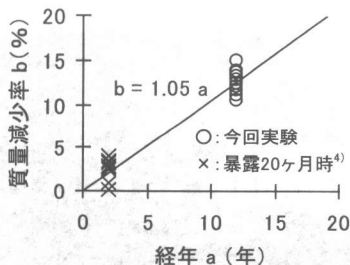


図-5 引張鉄筋の質量減少率

と、3.4の含有塩化物イオン量の調査結果を併せて考慮すると、鉄筋の腐食は塩害により生じたものと推定できる。

引張鉄筋の質量減少率を経年と比較して**図-5**に示す。今回の試験体は10~15%の鉄筋質量減少率であることがわかるが、これは暴露試験ではこれまで例の少ない、劣化の程度の大きい試験体であることがわかる。また、鉄筋の腐食速度は概ね1%/年(鉄筋径D13を用いて換算すると、12年間の平均の腐食速度はおよそ  $0.035 \text{ mm/年}$ )となるが、これは既往の研究<sup>6)</sup>で得られた塩害での腐食速度 ( $0.1 \text{ mm/年}$ )の1/3程度であり、本研究の腐食環境が既往の研究から著しく逸脱していないことがわかる。

### 3.6 腐食した引張鉄筋の力学的性能

引張鉄筋の静的引張試験結果を、質量減少率と比較して**図-6**に示す。図中、降伏点残存率とは、腐食した鉄筋の降伏点試験値の、健全な鉄筋(新たに入手した同じ種類の鉄筋の降伏点試験値  $374 \text{ N/mm}^2$ )に対する割合を示す。また、試験値は、健全・腐食に関わらず、試験時に得られた荷重を公称断面積 ( $126.7 \text{ mm}^2$ )で除して算出した見かけの降伏点である。図によると、降伏点残存率は質量減少率に比例して低下することがわかる。このことは、腐食した鉄筋の強度は最も腐食の進んだ部分で決まるとすると、試験区間における最小断面積の期待値は質量減少率と相関があることを示すと考えられる。なお、図中の直線回帰式の勾配 ( $-1.89$ )は、文献<sup>1)</sup>の値(実験によりばらつきがあるが、おおむね  $-2.17$ )よりやや小さい。

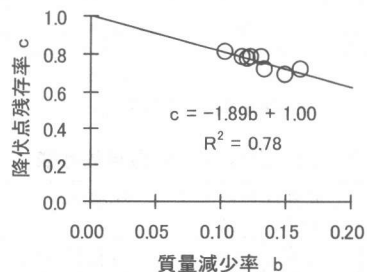


図-6 引張鉄筋の降伏点残存率

## 4 載荷試験

### 4.1 ひび割れ・破壊状況

静的曲げ載荷時では、全試験体とも引張鉄筋は破断せず、コンクリートの圧壊と圧縮鉄筋の座屈により破壊した。また、載荷によるひび割れの発生は少なく（最大荷重付近まで曲げひび割れが発生しなかった）、載荷初期における剛性低下もほとんど見られなかった。これらは暴露前にあらかじめ曲げひび割れを発生させたことが一因と思われる。

静的曲げ載荷後のひび割れ状況を図-7に示す。これによると、(1)曲げひび割れは等モーメント区間に集中し、せん断スパンにはほとんど見られないが、これは部材の変形が等モーメント区間に集中していることを示すと思われる。また、(2)引張鉄筋の腐食ひび割れを境に不連続な曲げひび割れがあるが、これはこの箇所での引張鉄筋とコンクリートとの付着が劣化したことを示している。また、(3)圧縮域におけるコンクリートの剥落が著しいが、コンクリートの表層部分の劣化(3.1参照)や、圧縮鉄筋の腐食・座屈によるはがれが一因と考えられる。

### 4.2 荷重-変位関係

荷重と部材中央部の変位の関係を図-8に示す。これによると、(1)最大荷重は、試験体C、B、Aの順に低下していること、(2)試験体Aは、部材の降伏変位(約3mm)と最大荷重時の

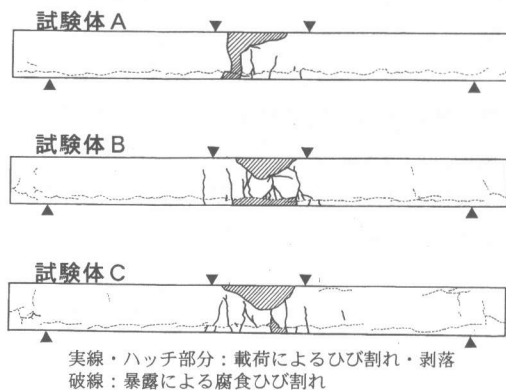


図-7 載荷時のひび割れ状況

変位(約8mm)が近接し、最大荷重時以降の変位増加に伴い荷重が低下していることが確認で変位(約8mm)が近接し、最大荷重時以降の変化する。(2)は、劣化の状況により変形性能が低下することを示唆する。この評価のためには、鉄筋の断面減少の他、腐食による鉄筋伸び能力の低下や、ひび割れの集中による変形の局所化、ならびに鉄筋腐食による付着の劣化等を考慮する必要があると思われる。

### 4.3 耐力

引張鉄筋の質量減少率と梁の耐力の関係を、20ヶ月暴露時の部材試験結果と併せて図-9に示す。なお、1つの試験体で複数の鉄筋試験片の質量減少率を測定しているが、図ではそれらの平均値を用いて評価した。これによると、梁の耐力は引張鉄筋の質量減少率に概ね比例して減少していることが確認できる。降伏点残存率が質量減少率に比例して低下する(3.6参照)ことを考慮すると、引張鉄筋の質量減少が耐力の低下に直接関係していると考えられる。

実験で得られた梁の耐力を、計算値と比較して図-10に示す。ここで計算値は、梁断面の

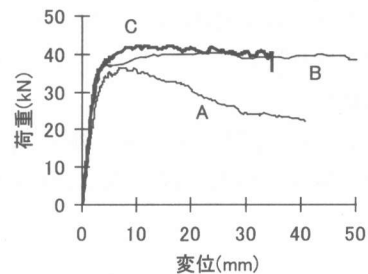


図-8 荷重-変位関係

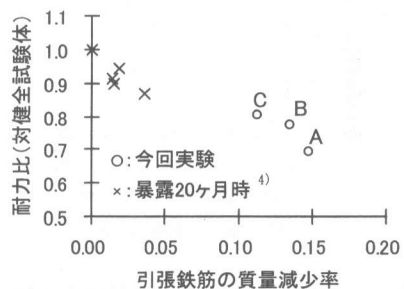


図-9 質量減少率と耐力の関係

応力分布にファイバーモデルを用い、鉄筋の降伏点に実験で得た見かけの降伏点（暴露20ヶ月時点<sup>4)</sup>においては、質量減少率から図-6の関係を用いて得た見かけの降伏点）を、コンクリート強度に実験で得られた実強度を用いて求めた。これによると、耐力は引張鉄筋の平均的な質量減少を用いても安全側に評価することができると言える。なお、鉄筋の見かけの降伏点、鉄筋の局所的な腐食の有無や分布などの腐食状況に大きく左右されると考えると、この結果の一般構造物への適用については別途検討が必要であると思われる。

## 5 まとめ

大量に塩分を含有させて12年間長期暴露し、劣化させたRC部材を用いて、静的曲げ荷重試験と詳細な劣化状態の調査を実施した。その結果、劣化と力学的性能の関係について、以下の知見が得られた。

- (1) 引張鉄筋の腐食減少量は10~15%程度であり、暴露試験ではこれまで例の少ない劣化の程度の大きいものであった。
- (2) 塩害により引張鉄筋に局所的な断面減少が生じて、鉄筋強度および耐力は引張鉄筋の平均的な質量減少を用いて評価することが可能であった。
- (3) 劣化したRC部材のひび割れ性状や、荷重-変位関係などは、健全なRC部材と異なる

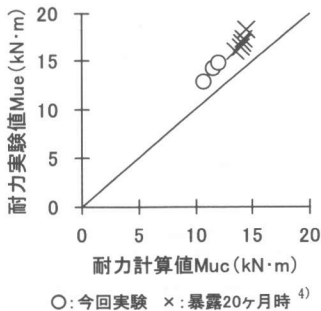


図-10 耐力実験値と計算値の比較

場合があることを確認した。特に荷重-変形関係の性状の違いは、地震時の部材変形性能への影響も懸念されるが、この評価のためには、腐食による鉄筋断面の減少の他、ひび割れの状況や付着劣化等を考慮する必要があると考えられる。

なお、本研究は前回研究を行った宮本征夫、佐藤勉の両氏、ならびに(財)鉄道総合技術研究所来海豊氏の指導のもとで実施されたことを付記する。

## 参考文献

- 1) 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、(社)日本コンクリート工学協会、p43およびpp.53~74、1998.10
- 2) 長谷川雅志、西脇敬一、大屋戸理明、永岡高、佐藤勉：長期暴露した塩分を含む鉄筋コンクリート梁の力学性状、土木学会第55回年次学術講演会講演概要集、V-360、2000.9
- 3) 西脇敬一、大屋戸理明、長谷川雅志、宮本征夫、来海豊：長期暴露した塩分を含む鉄筋コンクリート梁の劣化性状、土木学会第55回年次学術講演会講演概要集、V-363、2000.9
- 4) 山住克巳、宮本征夫、佐藤勉：鉄筋を腐食させたRCはりの劣化状態と耐力について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.557~562、1990.6
- 5) 岸谷孝一、西澤紀昭編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中性化、技報堂出版、pp.37~38、1986.8
- 6) コンクリート技術シリーズ40 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向(その2) -コンクリート委員会腐食防食小委員会(2期目)報告-、(社)土木学会、p198、2000.12