

論文 塩害を受けた栈橋上部工の劣化状況のばらつきに関する考察

加藤 絵万^{*1}・岩波 光保^{*2}・横田 弘^{*3}・守分 敦郎^{*4}

要旨：本研究は，塩害を受けた既存 RC 構造物を対象に，部材内に発生する鉄筋腐食のばらつき，および腐食による鉄筋の力学的性質の低下とそのばらつきを実験的に把握した。その結果，腐食による鉄筋の質量減少率は，コンクリートに生じた欠陥の影響によってばらつきが大きくなるものの，かぶりの増加にしたがって低下する傾向であった。また，腐食による平均断面減少率が大きくなるほど，断面積の変動係数は大きくなった。さらに，腐食した鉄筋の強度および伸び能力は，断面形状の不均一性により引張力の作用状態が異なるために，ばらつきが大きくなった。

キーワード：塩害，鉄筋腐食，孔食，断面減少率，強度，伸び，ばらつき

1. はじめに

RC 構造物をより長く安全に使用するためには，適切な維持管理が重要であることが技術者の共通認識となっている。そして，既設構造物の保有性能の評価，性能の将来予測，また，それらに基づいた適切な対策の実施といった維持管理が適切に遂行されることが強く求められている。しかし，実際には，各種要因により RC 構造物に生じる劣化現象は多様性に富み，同一構造物内，同一部材内においても様々な様相を呈する。今後，RC 構造物の維持管理を効率的に行うためには，環境的要因や材料的要因等の劣化現象に関わる不確定要因を工学的に処理しながら，精度良く性能評価および予測を行う手法の開発が必要である。これに対して，近年種々の研究がなされている¹⁾。

本研究では，塩害を受けた既存 RC 構造物を対象に，部材内の鉄筋腐食のばらつき，および腐食による鉄筋の力学的性質の低下とそのばらつきを実験的に把握した。鉄筋腐食をより精緻に評価することは RC 構造物の性能評価に不可欠であり，その不確定要因の提言に資する情報を提供することを目的としている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

調査対象とした RC 部材は，日本海側に位置する栈橋上部工から切り出した RC 床版である。1965 年に供用が開始されたものの，底面にひび割れやかぶりの剥落等の劣化が認められたことから，2004 年に撤去された。使用材料やコンクリートの配合に関する情報は不明である。丸鋼（ $\phi 13$ ）が 2 段に配筋されているが，上縁コンクリートと上段鉄筋は，供用中に一部が撤去され，その部分はアスファルトにより舗装されていた。

調査対象とした床版 A および B の底面には，打設時に使用したと考えられるアスファルトルーフィングが付着しており，その一部にひび割れや剥離が確認された。図 - 1 にアスファルトルーフィングを除去した RC 床版底面の状況と下段鉄筋の配筋を示す。床版 A のコンクリート底面では，アスファルトルーフィング上にひび割れの発生が認められた箇所以外にも多数のひび割れが存在し，特に鉄筋に沿ったひび割れが認められた。床版 B では，広範囲にジャンカが認められたほか，鉄筋に沿ったひび割れ，およ

*1 独立行政法人 港湾空港技術研究所 LCM 研究センター 博（工）（正会員）

*2 独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造強度研究室 博（工）（正会員）

*3 独立行政法人 港湾空港技術研究所 LCM 研究センター長 博（工）（正会員）

*4 東亜建設工業（株） シビルリニューアル事業室長 博（工）（正会員）

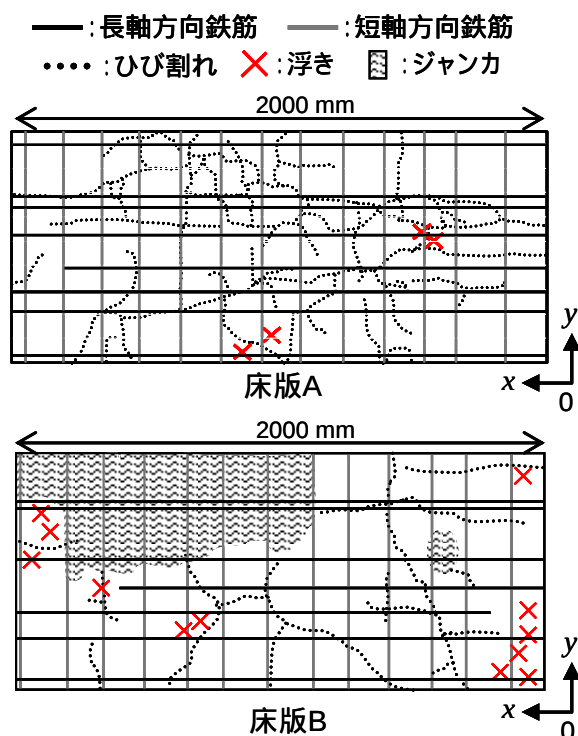


図 - 1 床版底面の劣化状況と配筋

び一部に浮きが確認された。

床版 A および B のコンクリート健全部から採取したコアにより求めたコンクリートの圧縮強度および実効拡散係数を表 - 1 に示す。圧縮強度は直径 75mm のコア各 5 本の平均値である。また、実効拡散係数は、JSCE-G571-2003²⁾に準拠した電気泳動試験により測定した直径 100mm のコア各 3 本の平均値である。

2.2 鉄筋腐食に関する調査

(1) 鉄筋の質量減少率の測定

各床版の下段長軸および短軸方向鉄筋をはつり出し、腐食による鉄筋の質量減少を測定した。鉄筋は約 100mm に切断し、1 次処理としてサンドブラスト処理を、2 次処理として 10% クエン酸水素二アンモニウム水溶液への浸せきを行い、腐食生成物を除去した。本研究では、発錆が目視で確認されなかった試験片については、健全な鉄筋であると判断し、質量減少率を 0.0% と評価した。除錆した試験片と健全と判断された試験片の質量から、試験片の質量減少率を算出した。基準とした健全試験片の単位質量は、腐食鉄筋と同様の除錆処理を行い測定した。各床版

表 - 1 コンクリートの物性

測定項目	床版 A	床版 B
圧縮強度 (N/mm ²)	42.9	42.1
実効拡散係数 (cm ² /年)	5.8×10^{-1}	6.1×10^{-1}

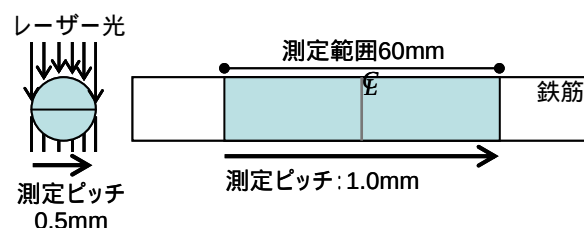


図 - 2 形状測定の概要

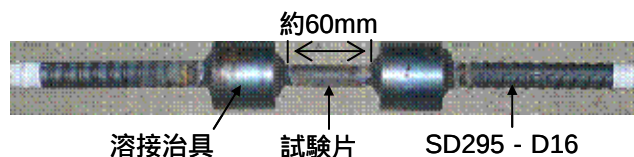


写真 - 1 引張試験用試験体

の長軸方向鉄筋には、一部に折曲げ加工を施した鉄筋が認められたが、これについては検討から省くこととした。したがって、質量減少率を調査した試験片数は、床版 A では長軸方向鉄筋 8 本と短軸方向鉄筋 13 本からの計 265 片、床版 B では長軸方向鉄筋 7 本と短軸方向鉄筋 13 本からの計 249 片である。

(2) 鉄筋断面積の測定

質量減少率 0.0% の試験片を含めた除錆後の試験片 27 本について、レーザー変位センサを用いた形状測定を行った。測定概要を図 - 2 に示す。形状測定は各試験片の床版底面側および上面側について行い、試験片長手方向中心を基準に 60mm の範囲を対象とした。測定ピッチは鉄筋断面方向で 0.5mm、長手方向で 1.0mm である。測定データである鉄筋断面方向の照射距離を積分し、試験片両面のデータを合わせることで、試験片の長手方向の断面積分布を算出した。ここで用いた形状測定方法は、測定対象とする鉄筋表面の大部分に対してレーザー光が垂直に照射されないため、孔食等の複雑な形状を有する試験片の真の鉄筋断面積は把握できないおそ

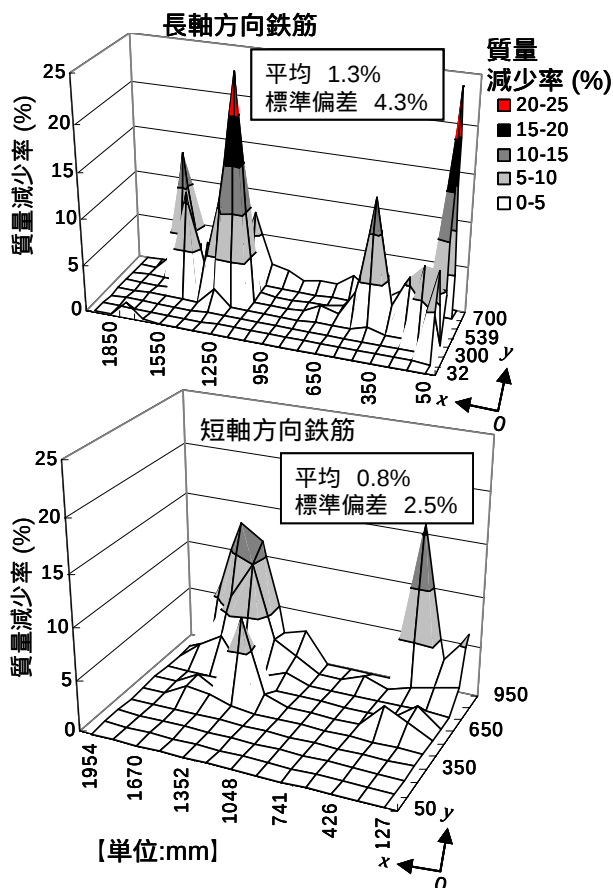


図 - 3 床版 A の鉄筋の質量減少率分布

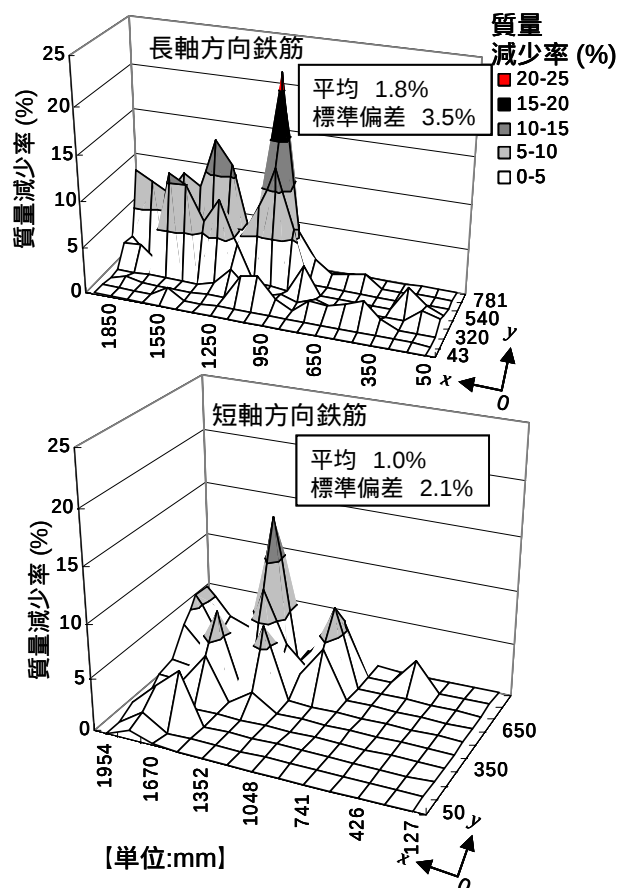


図 - 4 床版 B の鉄筋の質量減少率分布

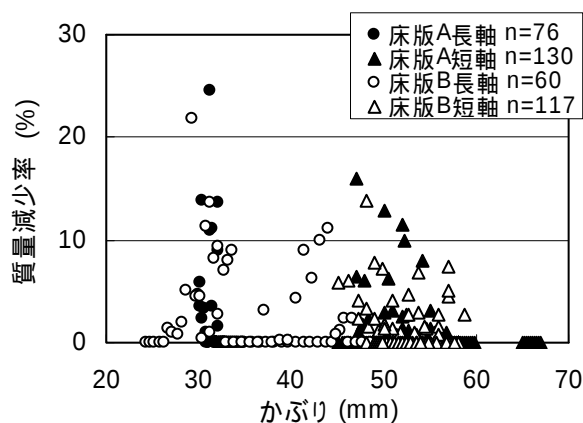


図 - 5 かぶりと鉄筋の質量減少率の関係

れがある。しかし、本研究では、ここで得られた断面積を腐食による断面減少を考慮した鉄筋断面積として取り扱うこととする。

(3) 鉄筋の引張試験

断面積を測定した試験片について引張試験を行った。引張試験用試験体の概要を写真 - 1 に示す。長さ約 150mm の SD295 - D16 を、治具を用いて試験片端部約 20mm の区間に溶接した。

溶接部を除いた試験片の長さは約 60mm である。試験片の床版底面側、上面側、およびそれらの中間に位置する治具端部計 4 点の距離を標点間距離 (約 70mm) として引張試験を行い、降伏強度、引張強度および破断時の伸び率を測定した。なお、破断時に溶接部分が破断・抜け出した試験片 3 本については、鉄筋の力学的性質に関する検討から省くこととした。

3. 鉄筋腐食のばらつきに関する検討

3.1 部材中の質量減少分布

床版 A および B の鉄筋の質量減少率分布を図 - 3 および図 - 4 にそれぞれ示す。図中の x および y 軸の方向は、図 - 1 で示したとおりである。床版 A では、長軸方向鉄筋に沿ったひび割れが観察された部分が最も質量減少率が高く、このひび割れにより短軸方向鉄筋の腐食が促進されたことが考えられる。床版 B では、ジャン力が確認された箇所において、長軸・短軸方向

鉄筋ともに腐食していた。図 - 5 に各床版における鉄筋のかぶりと質量減少率の関係を示す。ここで、各鉄筋試験片のかぶりは、各床版の 4 側面から確認された長軸・短軸方向鉄筋のかぶりを測定し、それらが直線的に配置されたとして補間した値である。折曲げ部を有する鉄筋については除外した。これによれば、ジャンカやひび割れ等の欠陥の影響によってばらつきが大きくなったことが考えられるものの、かぶりが大きくなるとともに概ね質量減少率が低下する傾向が見られた。これは既往の実構造物の調査結果³⁾と同様の傾向であり、これより、RC 構造物の耐久性を確保するには、かぶりの十分な確保が重要であることが再確認された。

3.2 鉄筋の断面減少分布

図 - 6 に鉄筋断面減少分布の一例を示す。腐食した鉄筋の断面減少は一様ではないことが分かる。図 - 7 に各試験片の床版底面および上面側の平均断面減少率の関係を示す。ここで、底面および上面の平均断面減少率は、それぞれの鉄筋断面減少の 2 分の 1 に対して求めた割合である。これより、試験片全体の断面減少には、床版底面側の断面減少が支配的であるといえる。これは、従来からの知見どおり、かぶりが小さいことに加え、ブリーディングにより鉄筋下面に形成された空隙による影響であることが考えられる⁴⁾。

図 - 8 に平均断面減少率と最大断面減少率の関係を示す。直線近似の結果、最大断面減少率は平均断面減少率の 2.3 倍となり、既往の研究で示された両者の関係⁵⁾よりも、より厳しいものとなった。これは、既往の研究では異形鉄筋を用いて検討していること、および塩分を予め混入した RC 試験体中の鉄筋であることから腐食形態が本研究とは異なることが影響していると考えられる。ここで、図 - 9 に平均断面減少率と断面減少の変動係数の関係を示す。変動係数は各試験片の断面減少の標準偏差を平均断面減少で除したものである。平均断面減少率が大きくなるほど、断面減少の変動係数は大きくなる傾向を示した。

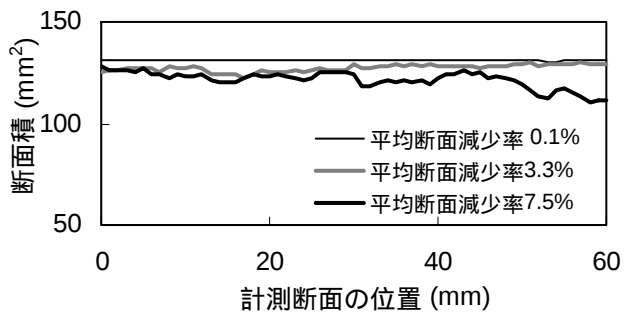


図 - 6 鉄筋断面減少分布の一例

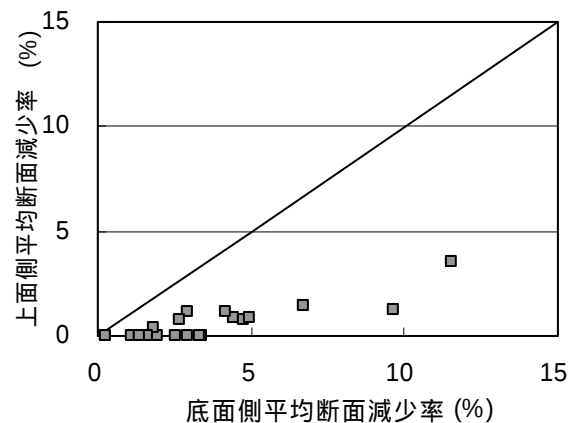


図 - 7 鉄筋上下面の平均断面減少率の比較

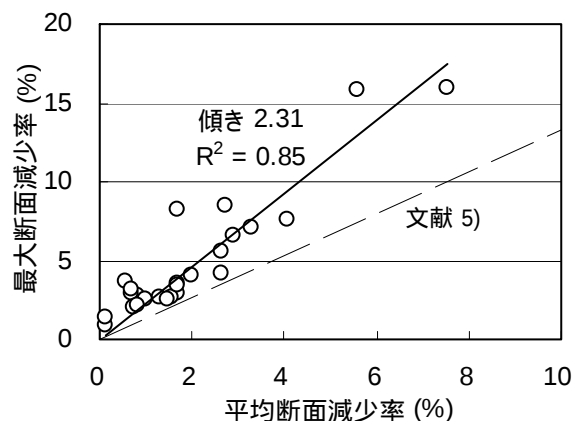


図 - 8 平均断面減少率と最大断面減少率

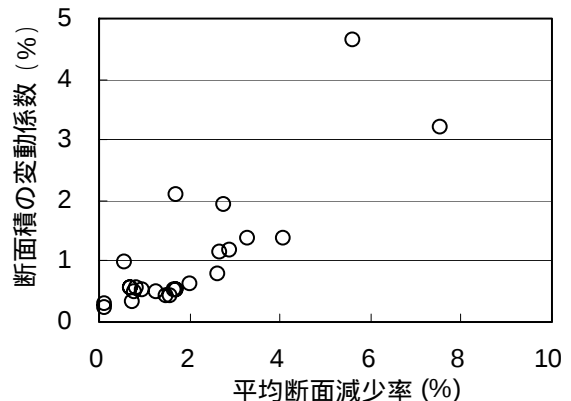


図 - 9 平均断面減少率と断面減少の変動係数

4. 鉄筋腐食が鉄筋の力学的性質に及ぼす影響

既往の研究⁶⁾では、数値として求めやすいことから、任意の区間における鉄筋の質量減少率を用いて腐食した鉄筋の力学的性質について検討している。しかし、図 - 6 に示したように、腐食した鉄筋の断面積は一樣ではなく、平均的な劣化指標である質量減少率は、劣化指標として十分ではないと考える。そこで、本研究では3.2 で示した断面減少率を劣化指標として、腐食した鉄筋の力学的性質の検討を行うこととした。

図 - 10 に平均断面減少率と降伏強度および引張強度の関係を示す。各強度は試験時の降伏・最大荷重を健全な鉄筋の断面積、試験片毎の平均断面積および最小断面積で除して求めた。図中の直線は、健全試験片の各強度を切片として最小二乗法により求めた近似線を示し、破線は近似値から $\pm 20\%$ の範囲を示している。表 - 2 に近似直線の傾き、つまり平均断面減少率に対する強度減少率を示す。強度比に対する強度減少率は、各強度を正規化した場合の傾きを表す。これより、降伏・引張強度ともに考慮する断面積が小さくなるほど、つまり局所的な断面減少を評価するほど、近似直線の傾きは小さくなった。また、強度比に着目すれば、降伏・引張強度ともに傾きはほぼ同じであり、鉄筋の腐食が強度に与える影響は両者で変化しなかった。しかし、最大断面減少を考慮しても強度は一定にはならず、また、平均断面減少率が2.0%以下の場合、特に強度のばらつきが大きい。これらのことから、断面減少以外の要因が腐食した鉄筋の強度特性に影響を及ぼしていることが考えられる。

図 - 11 に平均および最大断面減少率と破断時の伸びの関係を示す。図中の直線は小林⁷⁾により得られた腐食減量と伸び残存率の関係である。ここで、本研究では腐食減量を平均断面減少率と置き換えて伸び能力を算出した。破断時の伸びは腐食が進行するほどに低下し、その影響は強度に与えるものよりも大きいという既往の知見と一致した。しかし、破断時の伸びは強

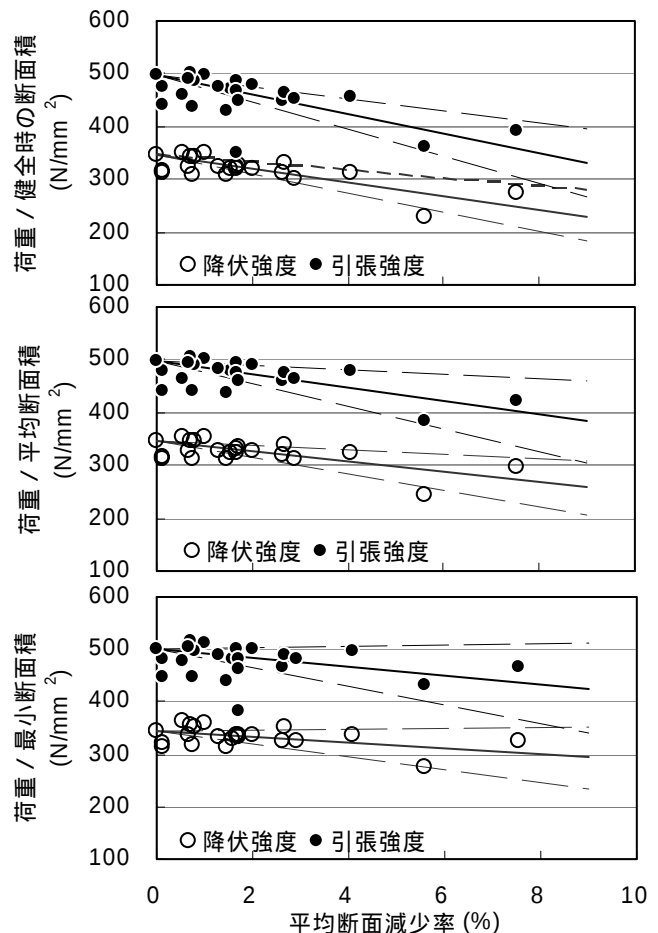


図 - 10 鉄筋平均断面減少率と強度の関係

表 - 2 平均断面減少率に対する強度減少率

		断面減少率		
		考慮せず(健全)	平均	最大
降伏	強度	-12.8	-9.8	-5.8
	強度比	-3.7×10^{-2}	-2.8×10^{-2}	-1.7×10^{-2}
引張	強度	-18.7	-13.0	-8.2
	強度比	-3.7×10^{-2}	-2.6×10^{-2}	-1.6×10^{-2}

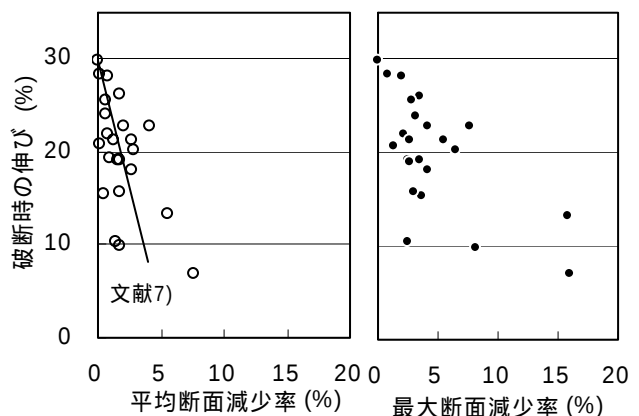


図 - 11 断面減少率と伸びの関係



健全 平均 0.8% 平均 1.7%
最大 2.0% 最大 8.2%

写真 - 2 鉄筋の破断面の一例

度よりもばらつきが大きく、特に、文献 7) で検討された以上の断面減少率（平均 4%以上）においてばらつきが顕著であった。

写真 - 2 に鉄筋の破断面の一例を示す。写真下の数値はそれぞれの平均および最大断面減少率を示す。健全な鉄筋では破断面の形状に偏りがなく、全断面に対して引張力が均一に作用したことが窺える。しかし、腐食が軽微である場合においても、腐食した鉄筋の破断面に対称性は見られない。守分ら⁸⁾は、腐食した鉄筋の疲労寿命を予測する手法を検討しており、腐食に伴ういびつな断面形状が応力部に亀裂を発生させ、その亀裂の進展により鉄筋の疲労寿命が決定されると結論づけている。作用させた荷重の性状は異なるが、引張試験時にも同様の現象が生じていることが考えられる。つまり、腐食した鉄筋の力学的性質は、腐食による断面形状に依存し、最小断面における孔食の発生状況により引張力の作用状態が異なる。特に、本研究で用いた試験片は床版底面側の腐食が支配的であったことから作用力の偏りが顕著となり、文献 5) や 7) と比較してより強度のばらつきが見られたと考えられる。さらに、最大断面減少率を考慮した場合の強度減少率が 0 とならなかったことについても、鉄筋の断面形状に起因する作用力の偏りの影響が考えられる。そして、特に引張強度時から破断時までの間、この作用力の偏りが顕著になるため、伸び能力のばらつきが大きくなったと推測される。

5. まとめ

(1) 部材中の腐食による鉄筋の質量減少率は、

コンクリートに生じた欠陥の影響によってばらつきが大きくなるものの、かぶりの増加にしたがって低下する傾向であった。

- (2) 腐食した鉄筋の断面減少率は、床版底面側の断面減少に支配される。
- (3) 腐食による平均断面減少率が大きくなるほど、断面積の変動係数は大きくなった。
- (4) 腐食した鉄筋の力学的性質は、断面形状の不均一性により引張力の作用状態が異なるために、ばらつきが大きくなった。

参考文献

- 1) 網野貴彦ほか：塩害劣化を受けた実橋の劣化の推移と各種要因の不確定性を考慮した劣化予測との比較検討，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 5 巻，pp.253-258，2005.10
- 2) 土木学会：コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向，コンクリート技術シリーズ No.55，2003
- 3) 堤知明ほか：塩害劣化に関する影響要因の実データに基づく定量評価，土木学会論文集，No.544 / V-32，pp.33-41，1996.8
- 4) 審良善和ほか：鉄筋とコンクリート界面の空隙が鉄筋腐食に及ぼす影響，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 5 巻，pp.1-6，2005.10
- 5) 大屋戸理明ほか：鉄筋が腐食したコンクリート部材の曲げ耐力の評価，鉄道総研報告，Vol.19，No.12，pp.21-26，2005.12
- 6) JCI：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，pp.43-46，1998
- 7) 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，JCI 論文集，Vol.16，No.2，pp.49-59，2005.5
- 8) 守分敦郎ほか：塩害を受けた鉄筋コンクリート部材の疲労寿命の推定に関する検討，JCI 年次論文報告集，Vol.18，No.2，pp.1529-1534，1996