

報告 供用 RC 構造物における鉄筋の腐食性状の評価に関する一考察

元濱 浩人*¹・渡辺 健*²・大野 又稔*¹・轟 俊太郎*¹

要旨: 本研究では、供用構造物で鉄筋腐食量を計測することを念頭に、2次元スキャンが可能なレーザー変位計を用いて、鉄筋を採取することなく、鉄筋の断面形状、および鉄筋断面積が計測可能な鉄筋断面計測装置を開発した。対象とする鉄筋径に応じて「細径用」(直径:約 10~18mm)、および「太径用」(直径:約 10~32mm)を製作し、断面積が既知の鉄筋に対し、それぞれ高い精度で断面積を計測できることを確認した。また、開発した鉄筋断面計測装置を用いて供用構造物調査を実施し、腐食した鉄筋の断面形状および断面積を数値情報として取得した。

キーワード: 鉄筋腐食, 鉄筋断面計測装置, はく離・はく落, 断面減少率

1. はじめに

供用中の鉄筋コンクリート (RC) 構造物の性能を評価するためには、使用されている材料の状態を適切に把握することが必須である。特に、補強鋼材として使用されている鉄筋が腐食すると、断面積の欠損やコンクリートとの一体性の低下、かぶりのはく落による周辺への被害を引き起こすため、配慮すべき項目の一つである。

腐食により変化した鋼材の状態を把握するために、腐食速度¹⁾や熱力学解析法²⁾などを用いた手法が報告されている。それぞれ簡便さや精度について特徴があるが、構造物の周辺環境や部位に依存して複雑に変化する鉄筋の腐食の進行程度について、対象時点における評価を行うには、現状では、構造物の調査法を確立することも有効である。このような視点から、一般的な構造物の場合、鉄筋の腐食はかぶりの破壊³⁾を引き起こすことに着目し、かぶりの状態から内在する鉄筋の状態を簡易に判断することを目的とした検討も報告されている⁴⁾。

本研究は、供用中の RC 構造物に焦点をあて、従来法^{5) 6)}と異なり、使用されている鉄筋を採取することなく断面形状、断面積および腐食量を計測できる装置を開発した。そして、供用中の RC 構造物における鋼材の腐食状況とかぶりの損傷状況について比較した。そして、断面内で異なる腐食状態を計測するとともに、断面減少率や鉄筋断面の腐食方向について考察した。

2. 鉄筋断面計測装置の開発

2.1 装置の概要

図-1 に開発した鉄筋断面計測装置の概要を、図-2 に装置の状況を示す。鉄筋断面計測装置はセンサ部、反射鏡、および計測中に鉄筋を保持する鉄筋固定治具で構成され、パソコンでこれを操作する構成である。センサには、距離を直線状で計測可能なレーザー変位計を使用した。計測する鉄筋の径に対して、照射範囲が異なる

2種類のレーザー変位計を用意した。図-3 に、それぞれの計測原理を示す。すなわち、φ10~18mm を対象とした「細径用」(照射距離:152~248mm, 公称精度:0.002mm, 照射幅:最大 73mm)、および 10~32mm を対象とした「太径用」(照射距離:57~103mm, 公称精度:0.001mm, 照射幅:最大 39mm)である。いずれも反射鏡を使用することで、鉄筋の全周を一度に計測するものである。図-3(a)では、2台のレーザー変位計が鉄筋の断面の1/4ずつ計測でき、センサ部を盛り替えることでさらに残りの断面を計測する仕組みである。一方、図-3(b)では、表側は直接、裏側は反射鏡によりレーザーを照射すること

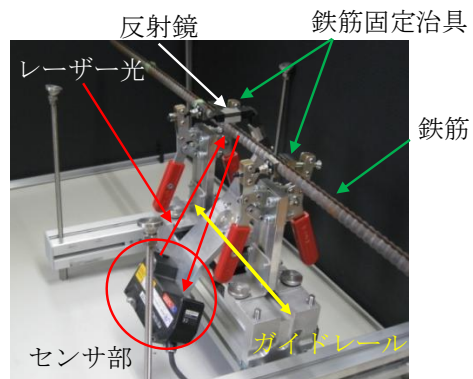


図-1 鉄筋断面計測装置の概要

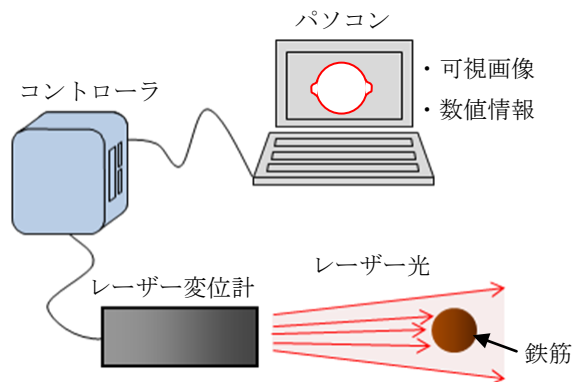


図-2 鉄筋断面計測装置の状況

*1 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 修士 (工学) (正会員)

*2 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士 (学術) (正会員)

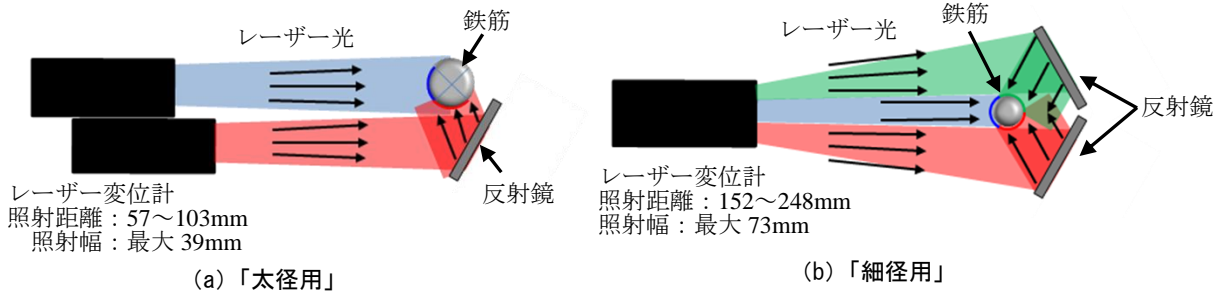


図-3 計測原理

で、1 台のレーザー変位計で、一度に鉄筋の断面全周を取得できるものである。

センサ部および反射鏡は、ガイドレールにより鉄筋軸方向に一体的に可動することで、任意の間隔での計測が可能である。なお、この可動長さは、供用中の RC 橋りょう構造物における鉄筋の間隔を考慮して約 200mm とした。

2.2 計測方法

計測手順を示す。はじめに、コンクリートを除去し計測対象とする鉄筋を露出させる。除去する範囲は、鉄筋軸方向に約 220~420mm、直角方向に約 200mm (「細径用」) または 300mm 程度 (「太径用」)、深さ方向に鉄筋位置から約 40mm である。鉄筋の表面の腐食生成物を除去した後、計測対象の鉄筋に取付治具を固定し、センサ部および反射鏡をガイドレールに沿って移動させることで、必要とする位置で鉄筋の断面形状を計測する。なお、レーザーの受信精度を高めるために、外環境から遮光する。計測結果はレーザーが鉄筋に照射した箇所ごとに分割して得られるため、図-4 (b), (c) に示すように x y 方向に計測結果の位置を調整して合成することで、鉄筋の断面形状を表示するものである。なお、合成の際には、あらかじめ鉄筋ごとに直径を把握しておくことや、図-4 (a) に示す通り、計測断面の任意の 2 点 (直径) をノギスなどで計測しておくことで、より精度を高めることが可能となる。



(a) ノギス計測状況

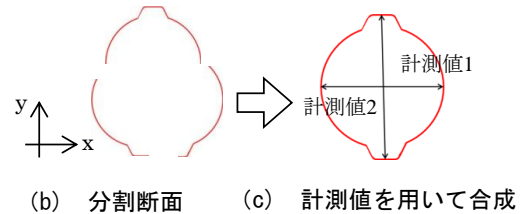


図-4 ノギスによる計測値を用いた合成

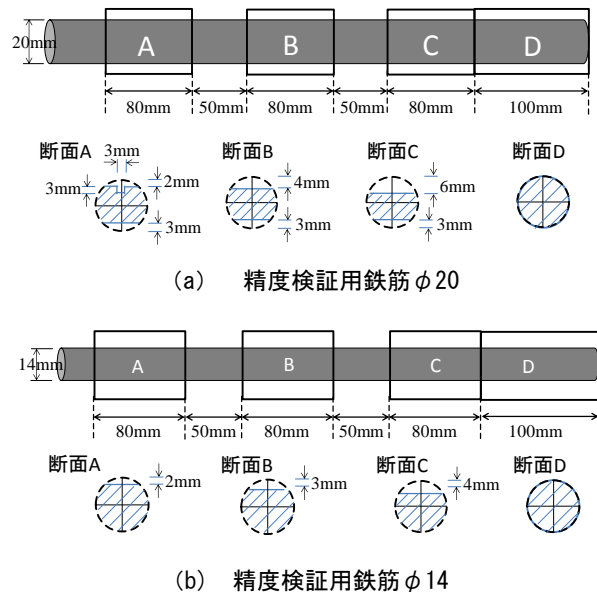


図-5 精度検証用鉄筋

3. 精度の検証

開発した鉄筋形状計測装置による、断面形状の計測精度を検証するため、寸法形状が明確な、加工した丸鋼棒の断面形状および断面積を計測した。

検証に用いた丸鋼棒は、 $\phi 20\text{mm}$ 、 $\phi 14\text{mm}$ (一部加工) である。図-5 に、鉄筋の断面形状寸法を示す。断面 D では丸鋼棒の断面を保持しているが、断面 A, B, C では人工的に切欠を設けることとした。なお、計測の際には、図-6 に示すように、センサ部に対する鉄筋の加工部の位置について検討するために、 $\phi 20$ 鋼棒では鉄筋中心から加工部に下ろした軸が、水平軸に対して 45° および 90° 、 $\phi 14$ 鋼棒では 30° および 90° で計測した。

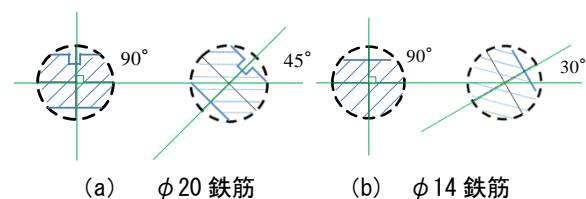


図-6 計測角度

表-1 精度検証結果（太径用）

角度	断面	計測値	基準値	誤差	図-7
		(mm ²)	(mm ²)	(%)	
-	D	312.21	314.16	-0.62	図-7(a)
45°	A	259.11	259.26	-0.06	図-7(b)
	B	240.27	239.88	0.16	
	C	204.66	205.34	-0.33	
90°	A	260.28	259.26	0.39	図-7(c)
	B	238.24	239.88	-0.68	
	C	207.13	205.34	0.87	

表-1, 表-2 に, 計測結果を示す。なお, 表-1, 表-2 に示す値は, 図-5 に示した各断面形状を座標から算出した値を基準値とし, 各計測値からの差を基準値で除したものを誤差としてとして算出したものである。計測した断面積は, 「太径用」では断面形状から算出した基準値に対して-0.68%~+0.87%, 「細径用」では-0.30%~+2.05%であった。「太径用」および「細径用」で違いがみられたが, 概ね1%程度の誤差であった。

また, 図-7, 図-8 に断面の計測結果を示す。概ね図-5 に示した形状を再現しているが, 図-7(c) では, 溝の上部角部分により照射されるレーザーが遮られたために死角が生じたことで, 溝の底部の形状を正確に捉えることができていない。ただし, 図-7(b) に示す通り, 直接レーザーが到達する角度に溝があれば, 高い精度で計測可能であることがわかる。したがって, 局部的に顕著に腐食するなど形状が顕著に変化した鉄筋は, 誤差が増加する可能性がある。

4. 供用構造物調査

4.1 A 高架橋の RC 高欄

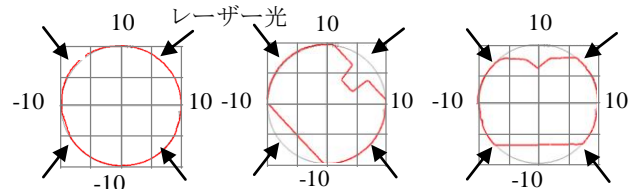
竣工から36年が経過した桁式高架橋(橋脚高さ:10.0m, 海岸からの距離:250m)の場所打ち高欄の内側(交通側)において, かぶりが剥落した箇所の鉄筋の断面形状を, 鉄筋形状計測装置を用いて計測した。なお, 高架橋周辺では, 夏季(6~8月)の平均気温は25.1℃, 湿度は82%, 冬季(12~2月)の平均気温は7.5℃, 湿度は64%である。

図-9, 図-10 に, 計測箇所および計測状況を示す。露出した鉄筋の長さは110mm, 剥落の幅は最大で約140mmである。鉄筋はD10, かぶりは20mmである。この鉄筋が露出していた露出部, および鉄筋がコンクリートに埋設され表面にはひび割れが観察されなかった埋設部に区分けするものの, 同一の鉄筋を計測することとした。これは, 腐食していない鉄筋の断面積を計測し比較することで, 断面減少率を把握することを目的としたものである。また, 異形鉄筋の場合, 節の影響で長手方向の断面が随時変化するが, 計測時には節間で, 鉄筋の全周が腹となる断面(図-11)に絞り計測した。

計測には「細径用」を使用し, 6.6mm 間隔(1 節分), 長さ125mm の範囲で計測した。はつり直後, および経

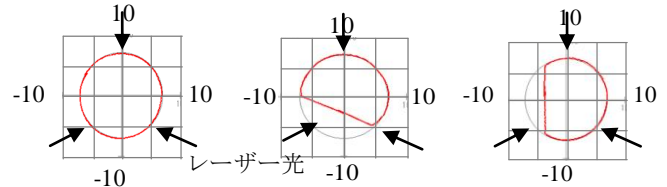
表-2 精度検証結果（細径用）

角度	断面	計測値	基準値	誤差	図-8
		(mm ²)	(mm ²)	(%)	
-	D	156.09	153.93	1.40	図-8(a)
30°	A	141.92	140.45	1.05	
	B	130.67	129.75	0.71	図-8(b)
	C	118.97	117.65	1.12	
90°	A	142.25	140.45	1.28	
	B	132.41	129.75	2.05	
	C	117.3	117.65	-0.30	図-8(c)



(a) 断面 D (b) 断面 A(45°) (c) 断面 A(90°)

図-7 精度検証結果（太径用）(単位: mm)



(a) 断面 D (b) 断面 B(30°) (c) 断面 C(90°)

図-8 精度検証結果（細径用）(単位: mm)

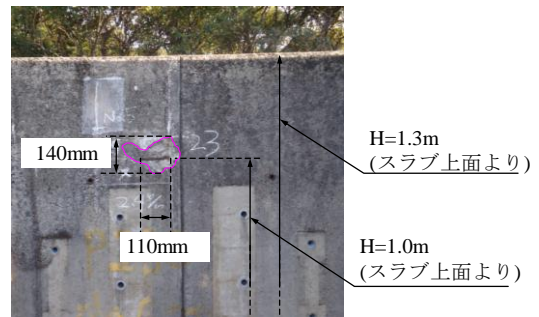


図-9 計測箇所



図-10 計測状況

時変化を捉えるために1年間暴露した鉄筋のケレン前後でそれぞれ計測を実施した。なお, 以下では計測方法や計測装置を改良して計測した暴露後の計測結果を示す。

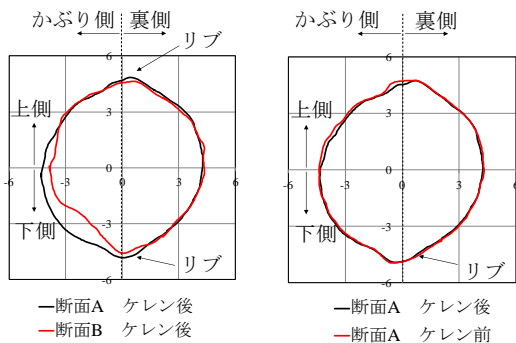
鉄筋のケレンは, かぶり側には線径0.27mmのディスクサンダー用ワイヤブラシを用い, 鉄筋背面には線径0.30mmの木柄ワイヤブラシを用いて鉄筋表面に光沢が

認められるまで行った。なお、事前に作業性を確認し、木柄ワイヤブラシを用いて鉄筋背面のケレンを実施した場合にもディスクサンダー用を用いる場合と同程度のケレンが可能であることを確認した。

図-12 に計測した箇所における、(a) かぶりの状況、(b) コンクリートを除去した後 1 年間放置した鉄筋、および (c) さびを除去した鉄筋を示す。目視観察の結果、埋設部においても、鉄筋に腐食した箇所もみられた。ただし、節やリブといった異形鉄筋に特徴的な形状が明確に認められ、腐食は比較的軽微である。一方、露出部では節やリブが認められず、特にかぶり側で腐食による断面欠損が顕著であった。

図-13 に、ケレン前後の断面積の計測結果、およびその差分を示す。ケレン後の断面積は、埋設部における平均値が 61.9 mm^2 、露出部における平均値が 56.3 mm^2 であり、露出部は埋設部と比較し 9.1% の断面積が減少していた結果となった。また、計測箇所における断面積の最大値に対する断面の減少率を算出すると、露出部は平均で 14.0% であった。埋設部においても腐食が進行していることを考慮すると、本計測箇所における腐食による断面減少率はそれ以上である可能性がある。

図-14(a) に、断面 A (埋設部)、断面 B (露出部) のケレン後の断面形状を示す。なお、図-14 の断面 A、B は図-12、図-13 の断面 A、B に対応している。断面 A ではリブの形状を捉え、また鉄筋の裏側は円形に近い形状を有している。一方、かぶり側ではやや凹凸が生じている。この計測箇所ではかぶり 20mm に対し、中性化深さは 40mm であり、コンクリートの表面にひび割れなどは観察されなかったものの、先に中性化が進んだかぶり側から腐食が進行したものと考えられる。一方、断面 B では、かぶり側が大きく断面欠損している様子を捉えていることが分かる。これは、かぶりのはく落後に露出したかぶり側から鉄筋が急速に腐食し、その結果、断面が大きく欠損したと考えられる。一方で、鉄筋の裏側は、埋設部である断面 A と比較して大きな差異は認められない。この計測結果は目視観察の傾向と一致しており、鉄筋の腐食がかぶり側から進行することや、断面欠損が認



(a) 断面 A、B ケレン後の比較 (b) 断面 A ケレン前後
図-14 形状測定結果

められる程度に腐食が進行しても、コンクリートと接している鉄筋裏側では腐食が軽微であることを示している。これらを定量的に把握するため、腐食深さをそれぞれ

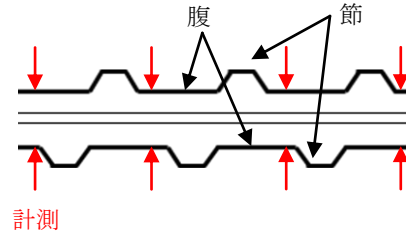


図-11 節-節間計測箇所

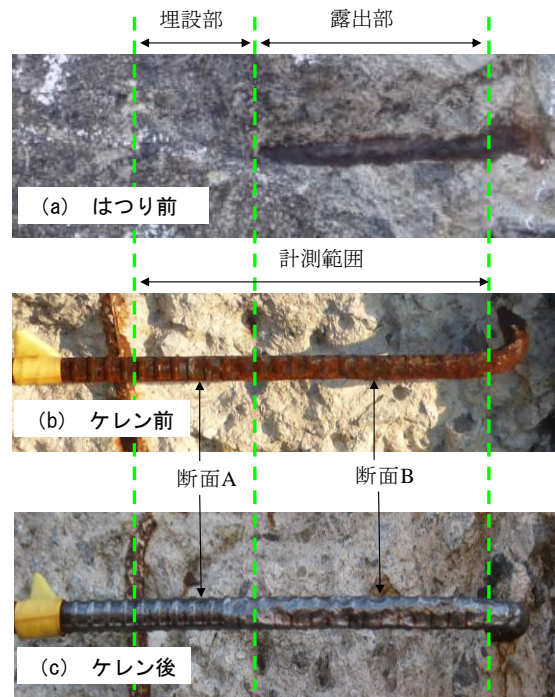


図-12 計測鉄筋の状況

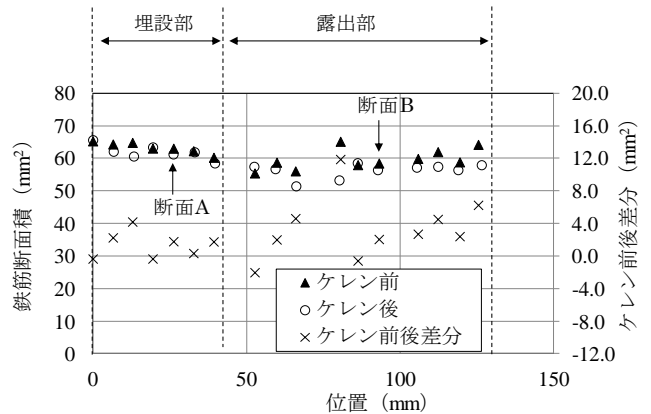


図-13 断面積計測結果

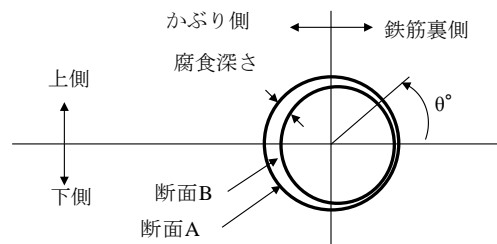


図-15 腐食深さの概念

の方向において算定した。ここでは鉄筋中心から、鉄筋表面までの距離に関して断面A,Bの差分を腐食深さとした。図-15に、腐食深さの概念を、図-16に腐食深さの円周方向の分布を示す。なお、断面Aの断面積は 61.9mm^2 であり、埋設部の平均断面積と一致している。その結果、鉄筋裏側では 0.049mm （上側平均）、 0.017mm （下側平均）に対し、かぶり側では 0.089mm （上側平均）、 0.722mm （下側平均）、となり、最大で 1.17mm であった。これは、全周分の平均値 0.235mm に対し、かぶり下側ではその3.1倍断面減少が進行していることを示している。

図-14 (b)に、断面Aにおけるケレン前後の形状を示す。断面Aでは、腐食生成物が鉄筋の全周にわたり発生しており、ケレン後は各位置で断面が減少している様子を捉えている。ケレン前後の断面積を比較すると、それぞれ平均値は、ケレン前： 61.1mm^2 、ケレン後： 58.6mm^2 であり、ケレン前後の断面積の差分は、 2.5mm^2 である。暴露した鉄筋の腐食速度が $0.008\text{mm}/\text{年}^1$ であると仮定すると、1年間の腐食量は 0.24mm^2 になるが、これを用いると、腐食による鉄筋の膨張率は10.4倍という計算になる。膨張率については、腐食生成物に依存した見解が報告されており⁷本計測結果から得た10.4倍という倍率は、これらの値と比較して大きいものの、今後、経時的に計測を行うことで、対象とした構造物における腐食速度や膨張量に対する見解が得られると考える。また、その結果を用いることで、腐食膨張解析時の適切な膨張量の与え方や、FEM解析のモデル化等に活用できるものとする。

4.2 計測データの蓄積

表-3(a)に示す4箇所で、計測を実施し、表-3(b)に示す鉄筋断面計測結果を得た。調査箇所は、図-17(a)

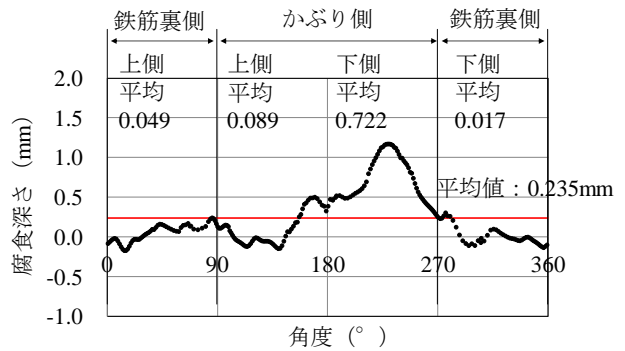
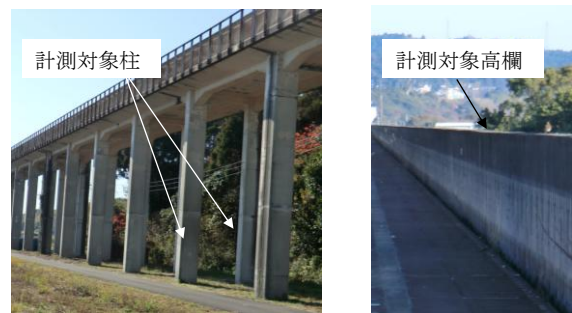


図-16 腐食深さの分布



(a) ラーメン高架橋柱 (b) 桁式高架橋高欄

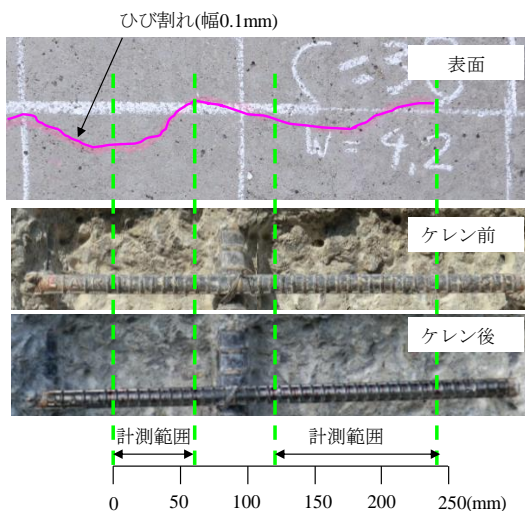
図-17 計測対象構造物

表-3(a) 計測箇所概要

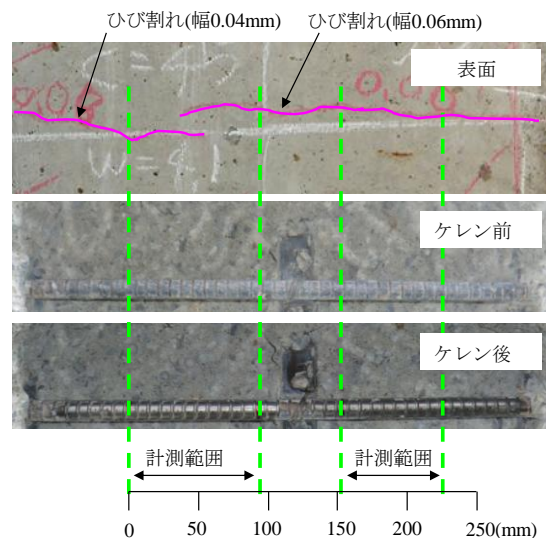
No.	計測箇所	鉄筋径	かぶり(mm)	ひび割れ幅(mm)	計測範囲長(mm)
1	柱	D13	37	0.1	182.2
2	柱	D13	53	0.04~0.06	166.5
3	高欄	D13	61	0.3	254.9
4	高欄	D13	65	0.2	145.1

表-3(b) 鉄筋断面計測結果

No.	平均値(mm^2)	標準偏差	変動係数(%)	平均断面減少率(%)
1	115.5	2.9	2.5	3.8
2	114.4	1.5	1.3	2.1
3	107.7	1.9	1.8	2.3
4	107.8	2.0	1.8	3.2



(a) No. 1 の状況



(b) No. 2 の状況

図-18 計測箇所の状況

に示すラーメン高架橋、柱の2箇所、および図-17(b)に示す4.1にて対象とした桁式高架橋における高欄の2箇所である。ただし、いずれの計測箇所についても、コンクリート表面に0.04~0.3mmの幅を有するひび割れが観察されたが、はく落は発生しておらず、鉄筋が露出していない箇所を選定したという点で、4.1の選定箇所と特徴が異なる。なお、No.1はNo.2に、No.3はNo.4に近接した箇所であり、海岸からの距離、他の部位からの水分供給条件などに大きな差異はないと考える。

図-18にNo.1, No.2のコンクリート表面、ケレン前後の鉄筋の状況を示す。No.1, No.2では柱の帯鉄筋(D13)を計測した。計測箇所におけるかぶり厚は37mm(No.1), 53mm(No.2)、直交する主鉄筋はD25が175mm間隔で配置されている。表面には柱の帯鉄筋(D13)直上付近に、それぞれ幅0.1mm, 幅0.04~0.06mmのひび割れが確認された。鉄筋を露出させたところ、かぶり側に軽微な腐食が認められたが、鉄筋の長手方向に断面内における腐食の分布に変化はみられなかった。

図-19にNo.1の断面積が最小となる断面C、最大となる断面Dの形状を併せて示す。目視では明確な違いは見られなかったものの、断面Cでは断面Dと比較してかぶり側の断面が平均して0.323mm減少しているという結果であった。これは、目視では認められない程度に鉄筋が腐食していた可能性のほか、鉄筋製作時の誤差や、計測装置の誤差の影響を含んでいる可能性がある。

図-20に、断面積の計測結果を鉄筋方向の分布として示す。なお、横軸は図-18中の計測始点からの距離とし、計測ができない直交方向鉄筋との交差箇所は表示していない。断面積の計測値はNo.1では109.0~120.3mm²(平均値:115.5mm²)、No.2では111.4~117.5mm²(平均値:114.4mm²)であった。上位3つの計測値の平均値を基準とし、これに対する各断面における断面積の差が、腐食により欠損した断面積と仮定すると、元の断面積に対する断面減少率の平均値は、それぞれ3.8%, 2.1%となった。同様に、No.3, No.4の断面減少率を算定すると、それぞれ2.3%, 3.2%という結果を得た。今後、開発した鉄筋計測装置を用い、はく落、ひび割れ幅といったコンクリート表面の状態が異なる部位について、計測結果を蓄積することで、近い環境や諸元を有するRC部材における鉄筋状態の評価が可能になると考える。

5. まとめ

- (1) 鉄筋形状および断面積の計測が可能で、レーザー変位計を活用した鉄筋断面計測装置を開発した。
- (2) 精度を検証した結果、断面積が既知の鉄筋に対し、「太径用」を用いた計測では-0.68%~+0.87%、「細径用」を用いた計測では-0.3%~+2.05%の精度で結

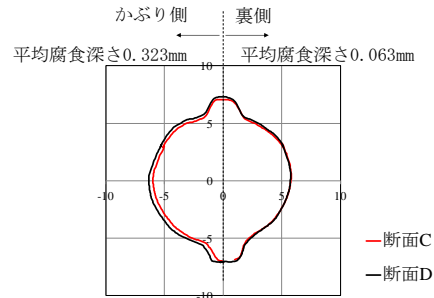


図-19 断面形状の比較

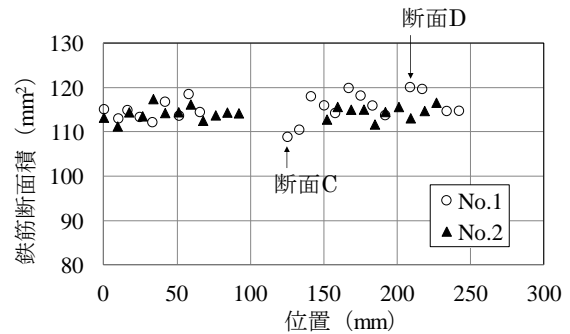


図-20 断面積計測結果

果が得られることを確認した。

- (3) 開発した鉄筋断面計測装置を用いて、供用中のRC構造物を調査した結果、断面内で均一に発生せず、かぶり側から進行することを定量的に把握した。

参考文献

- 1) 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(コンクリート構造物) 鉄道総合技術研究所編, 丸善株式会社, 2007
- 2) Koichi Maekawa, Tetsuya Ishida and Toshiharu Kishi: Multi-scale Modeling of Concrete Performance, Journal of Advance Concrete Technology, Vol.1, No.2, pp.91-126, July, 2003
- 3) 堤知明, 松島学, 村上祐治, 関博: 腐食ひび割れの発生機構に関する研究, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.159-166, 1996.2
- 4) Qi Lukuan, 関博: 鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況およびひび割れ幅に関する研究, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.161-171, 2001.2
- 5) 大屋戸理明, 金久保利之, 山本泰彦, 飯島亨: 実構造物の調査結果に基づく腐食鉄筋の力学性状の評価, 土木学会論文集, Vol.63, No.1, pp.143-155, 2007.
- 6) 濱田洋志, 加藤絵万, 岩波光保, 横田弘: 局所的に生じた腐食が鉄筋の力学的性質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1107-1112, 2008.
- 7) 須田久美子, MISRA. Sudhir, 本橋賢一: 腐食ひび割れ発生限界腐食量に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.751-756, 1992