

## RC構造物の鉄筋腐食によるかぶりの剥落評価手法

構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

副主任研究員 渡辺 健

### 1. はじめに

供用中の鉄筋コンクリート部材では、時間の経過とともに鋼材が腐食し膨張することで、かぶりの剥落や、構造物としての機能が低下する可能性が問題となっている。同時に、かぶりのひび割れ、剥離・剥落は、RC構造物を維持管理するうえで、鉄筋の腐食を早期に判断できる現象の一つでもある。そのため、かぶりの剥離・剥落の発生機構の解明や、発生時期の予測が求められている。ここでは、鉄筋の腐食によるRC部材の問題を実験的に捉え、評価する研究に焦点をあてた内容を紹介する。

### 2. 供用中のRC構造物の腐食状況の把握

#### 2.1. 可搬型鉄筋形状測定装置およびかぶり押抜き試験装置の開発<sup>1)</sup>

図1に、供用中のRC高欄の剥落箇所における計測状況を示す。開発した可搬型鉄筋形状測定装置(図1(a))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る。対象鉄筋の表側は直接、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。計測した結果、図1(b)に示す通り、コンクリート表面に近い領域が集中して断面が欠損していることを把握した。そこで、腐食した鉄筋が膨張することを考慮し、図1(c)に示す载荷方法を設定し、図1(d)に示すように、腐食による変位と载荷試験における丸鋼の鉛直下方向の変位が一致すると仮定した。

図2に、RC高欄の諸元および剥落した寸法を参考に決定した供試体の概要を示す。これは、载荷中、丸鋼が曲げの変形を発生しないように、供試体の幅を極力小さくしつつ、丸鋼の径より大きいかぶりを確保したものである。供試体幅中央に丸鋼を貫通して配置するとともに、異形鉄筋(以降、背面の鉄筋)を配置した。供用されているRC高欄を参考に、丸鋼および背面の鉄筋の径 $\phi$ は13mm、コンクリートの目標圧縮強度は24.0N/mm<sup>2</sup>、粗骨材最大寸法は20mmとした。なお、RCラーメン高架橋を例とすると、丸鋼は高欄における鉛直方向鉄筋、背面の鉄筋は水平方向鉄筋を模擬している。

図3に、かぶり押抜き試験装置による载荷試験の状況を示す。試験では、背面の鉄筋にて供試体を試験機に固定し、丸鋼に荷重を鉛直下方向に载荷した。载荷中、供試体上面中央および丸鋼の試験機に対する変位を計測した。なお、かぶり $c$ に対する丸鋼の相対変位は、丸鋼の変位から供試体上面中央の変位を差し引くことで、試験体の曲げおよび背面の鉄筋の抜出しを除去することで算出した。

表1に剥落直前のひび割れ状況を示す。実験の結果、用いた鉄筋の径は13mmであったが、かぶり $c=5\text{mm}$ では、丸鋼の端部から斜めひび割れが発生・進展することで荷重が最大値に達し、荷重の低下とともに最終的に斜めひび割れがコンクリート表面に到達した。その後、斜めひび割れ箇所をかぶりが剥落した。一方、かぶり $c=30\text{mm}$ では、荷重が最大値に達する前に、丸鋼直

下のコンクリート表面にひび割れが発生した後、水平方向および斜め方向のひび割れが丸鋼側から発生し、荷重が低下した。実験の結果、かぶり  $c$  と鉄筋径  $\phi$  の比  $c/\phi=2.3$  未満では、剥離につながるひび割れが発生した。なお、表 1 には非線形有限要素解析 (FEM) により算出した最大主ひずみの分布を示す。 $c=5\sim 20\text{mm}$  では斜めひび割れが卓越し、 $c=30\text{mm}$  では丸鋼直下のひび割れがコンクリート表面から発生するといった荷重試験の結果が、再現できている。

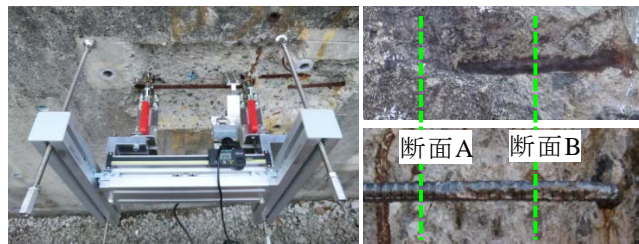
### 3. 数値実験によるかぶり破壊の評価

#### 3.1. ひび割れ形状に関する感度解析

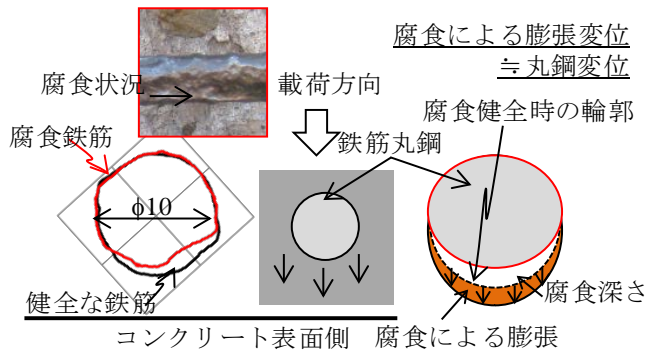
FEM による感度解析を実施した。なお、解析ケースには、かぶり (C) - 鉄筋間隔 (S), を反映させた名称を用いた。解析モデルは直径 13mm を有する鉄筋を 4 本配置し、上面全体を拘束した。このとき、横方向のかぶりは鉄筋間隔の 1/2 としたが、S50 モデルでは 50mm とした。

図 4 に、4 本の鉄筋が荷重の最大値に達した際の最大主ひずみの分布を示す。図中に示す破壊形状は、表 2 の概念図一致しており、斜めひび割れ形状および水平方向のひび割れ形状に区分したものである。C10-S50 では、斜めひび割れが鉄筋付近から発生しコンクリート表面に達した。ただし、C20-S50 では斜めひび割れが発生するものの、次第に隣接する鉄筋から進展したひび割れと連結し、水平方向のひび割れとなった。一方、C30-S100 では、内側の 2 本の鉄筋周辺に斜めひび割れが発生するが、端部の鉄筋の直下のコンクリート表面にひび割れが発生している。一方、C40-S100 では、斜めひび割れがコンクリート表面には到達せず、水平方向に進展し連結した。

これまでの検討を踏まえ、表 2 に示す通り、ひび割れ形状はかぶりと鉄筋間隔に応じて異なることを確認した。



(a) 供用RC高欄のはく落箇所における計測状況



(b) 計測結果 (c) 膨張方向 (d) 腐食量と変位の関係

図 1 供用RC高欄のはく落箇所における計測状況

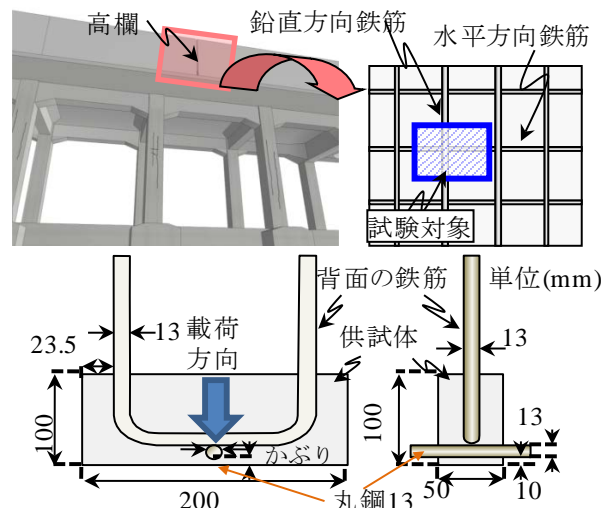


図 2 対象としたRC部材と試験体形状

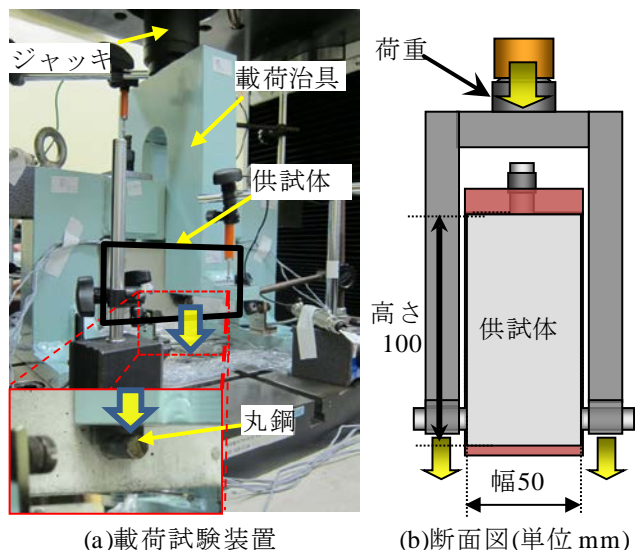


図 3 腐食状況を考慮したかぶりの荷重試験装置

表 1 かぶりに依存したひび割れ性状に関する実験およびFEM結果

No.	c	c/φ	ひび割れ状況	FEMによる最大主ひずみ
C5	5	0.4		
C10	10	0.8		
C20	20	1.5		
C30	30	2.3		

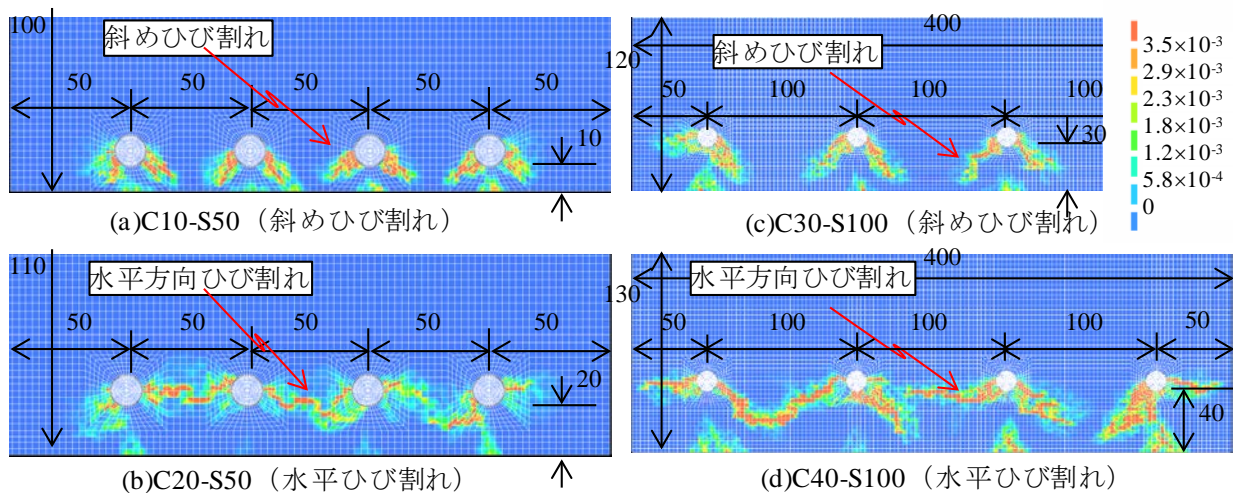


図 4 鉄筋間隔およびかぶりに応じたひび割れの形状(最大主ひずみ分布)

### 3.2. ひび割れ発生限界腐食量に関する感度解析

図 5 に鉄筋径 $\phi=13\text{mm}$ の斜めひび割れ形状を示したケースについて、ひび割れおよび剥離剥落発生時の変位を鉄筋間隔ごとに示す。いずれの鉄筋間隔においても、かぶりの増加に伴い変位も増加した。しかし、鉄筋間隔に依存した変位の違いはみられず、斜めひび割れが発生する事例では、相互の鉄筋の影響を受けにくいことがわかる。

図 1 に示したように、腐食による膨張率を仮定すると、ひび割れ、剥離剥落発生限界量を用いてひび割れ、剥離剥落が発生する限界腐食深さが算出可能となる。膨張率に関して様々な見解が報告されているが、ここでは、腐食生成物の体積が腐食する前の鉄筋の 2 倍になると仮定することで、腐食深さ ( $\Delta r$ ) は概ね腐食による膨張変位、すなわち感度解析によって得られた変位と同等であるとした。既往の結果を参考に<sup>2)</sup>、かぶり  $c$  と鉄筋径  $\phi$  を用いて、腐食深さ ( $\Delta r$ , mm) を算定できる定数  $\eta$  を算出した。

$$\Delta r = \eta(c/\phi) \times 10^{-3} \quad (1)$$

表 2 かぶりと鉄筋間隔に応じたひび割れ

鉄筋径 $\phi$	かぶり $c$	鉄筋間隔 (S) 単位:mm			
		50	100	150	200
13	10				
	20				
	30				
29	10				
	20				
	30				



水平ひび割れ



斜めひび割れ

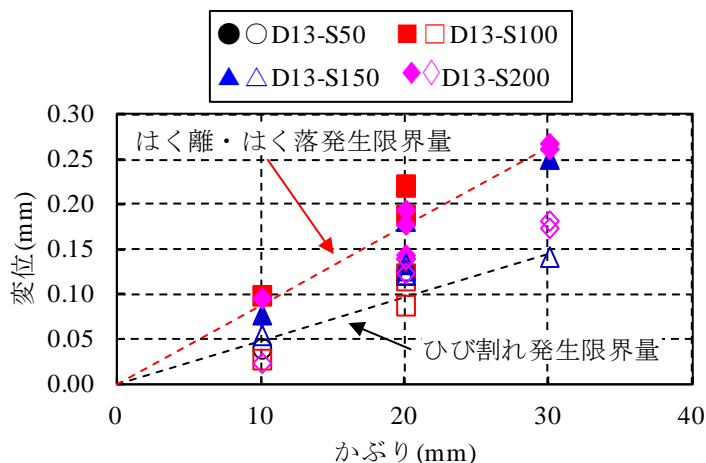


図 5 ひび割れおよびはく離はく落発生限界量 (D13)

ここで、ひび割れ発生時： $\eta = 62(\phi = 13\text{mm})$ ,  $= 114(\phi = 29\text{mm})$ , 剥離剥落発生時： $\eta = 232(\phi = 13\text{mm})$ ,  $= 307(\phi = 29\text{mm})$ , である。

定数  $\eta$  は鉄筋径が大きいほど、ひび割れ発生時および剥離剥落発生時の限界腐食深さは大きくなることを示している。すなわち、斜めひび割れ形状となる場合のひび割れおよびはく離はく落発生限界量は、鉄筋間隔に依存せず、かぶりおよび鉄筋径の増加とともに、限界腐食深さは増加する傾向となった。

一方、表 2 に示す横方向のひび割れ形状が発生するかぶりおよび鉄筋間隔の諸元では、構造物の点検の際、部材端部の鉄筋に注意する必要がある。特に、鉄筋間隔が 50mm と密に配置された構造物は、表面には現れず、目視では判断がつかない隣接する鉄筋間でひび割れが貫通している可能性があり、コンクリート表面に発生するひび割れ幅の進展が広範囲のはく離はく落到直結することを念頭に点検する必要がある。

#### 4. おわりに

鉄筋腐食によるかぶりコンクリートのひび割れ、剥離剥落メカニズムを解明するために、腐食による膨張変位を再現可能な鉄筋押し抜き試験を考案し、かぶりコンクリートのひび割れ性状や、ひび割れ時の鉄筋腐食深さに関する検討を行った。また、FEM 解析による感度解析によりかぶり、鉄筋径、鉄筋間隔がひび割れ形状およびひび割れ発生限界量におよぼす影響について明らかにした。さらに RC 構造物の健全度評価の高精度化を図るため、かぶりの破壊状況から鉄筋の腐食状況を推定する方法を提案し、ひび割れ性状の違いによるはく離はく落発生限界量を評価した。

#### 参考文献

- 1) 鬼頭直希, 渡辺 健, 大木裕久, 岡本 大: コンクリートの体積変化を考慮した破壊発生限界量の評価, 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, Vol.14, pp.639-646, 2014.10
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説 (構造物編) コンクリート構造物, 丸善株式会社, p224, 2007.1