

# 鉄筋コンクリート高架橋のかぶりはく落現象の評価

渡辺 健\* 轟 俊太郎\* 大野 又稔\*  
岡本 大\* 曾我部 正道\*\*

## Evaluation of Cover Spalling Behavior at Reinforced Concrete Viaducts

Ken WATANABE Shuntaro TODOROKI Yuto OHNO  
Masaru OKAMOTO Masamichi SOGABE

The fracture of the cover concrete at the reinforced concrete (RC) structures was caused by the expansion of reinforced-bar corrosion. In order to understand the mechanism of the fracture of the cover concrete, the cross-section shape of a corroded rebar was evaluated by using the proposed equipment. The measured data indicated that the fracture of the cover concrete by the corrosion of rebars was expressed by one-directional loading on the rebar at cover concrete. Finally, we conducted an experiment and non-linear finite element analysis in order to evaluate the effect of the rebar spacing and the cover concrete thickness on the shape of cover concrete fracture and the amount of corrosion.

キーワード：鉄筋コンクリート，かぶり，鉄筋間隔，ひび割れ発生限界腐食量，収縮，クリープ

## 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、コンクリートとの一体性の低下や、かぶりはく落を引き起こす。かぶりはく落は RC 部材の変形性能の低下や、美観を損ねるのみならず、公衆被害を引き起こす可能性があるため、配慮すべき項目の一つである。同時に、かぶりのひび割れ、はく離・はく落は、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、発生機構の解明や、発生時期の予測が求められ、これまでに様々な研究が報告されている<sup>1)</sup>。この種の研究では、腐食による鉄筋の膨張を如何に再現するかが鍵となっており、これまでに静的破砕剤や弾性体の膨張、鉄筋の電食などを利用した実験<sup>2)</sup>、および非線形有限要素解析 (FEM)<sup>3)</sup>、剛体バネモデル (RBSM)<sup>4)</sup> による解析を用いた研究成果が報告されている。

本研究では、鉄筋腐食による変状としてかぶりのひび割れ、はく落に着目し、これらが発生する際に生じている鉄筋の腐食による膨張変位を明確にし、はく落時の鉄筋腐食量の評価を行うことを目的としている。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可搬型鉄筋形状測定装置を開発し、供用中の RC 構造物における鉄筋の腐食状況の実態調査を行った。そして、かぶりのひび割れおよびはく離を引き起こすのに必要な鉄筋の腐食量（以下、限界腐食量）について言及するために、これらの現象を簡易に再現可能な載荷試験方法を開発し、これを用いてかぶりの破壊性状について実験的に捉えた。最後に、FEM による数値実験を行い、鉄筋の間隔、かぶり厚、およびコンクリートの収縮・クリープが、かぶりの破壊形状や発生時の膨張変位に及ぼす効果について検討した。

## 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による腐食の評価

図 1 に、供用中の RC 高欄のはく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<sup>5)</sup> (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。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。計測した結果、図 1 (b) に示す通り、

\* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

\*\* 鉄道力学研究部

特集：構造物技術

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、部材において腐食した鉄筋が膨張することを考慮し、図1(c)に示す荷重方法を設定し、図1(d)に示すように、腐食による変位と荷重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。したがって、腐食生成物は鉄筋の体積の2倍に膨張すると仮定すると、鉄筋腐食深さは、概ね腐食による膨張変位、すなわち荷重に計測される変位と等しくなる。

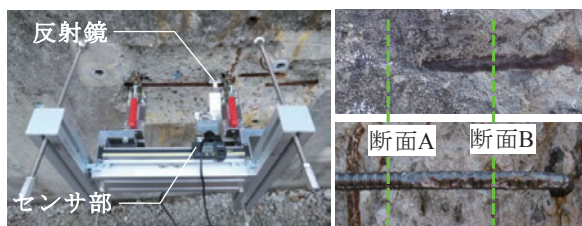
2.2 押し抜き試験による検証

図2に、試験において想定した対象と供試体の概要を示す。供試体寸法は、長さ200mm×幅50mm×高さ100mmである。これは、RC高欄の現地調査<sup>6)</sup>より得られたはく落長さの最大値である180mm以上の長さを有し、供試体の曲げ変形を極力小さくする高さとしたものである。また、幅は、荷重中、丸鋼が曲げの変形を発生しないように極力小さくしつつ、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倣している。試験パラメータは表1に示すように、丸鋼のかぶりを5, 10, 20, 30mmとした。

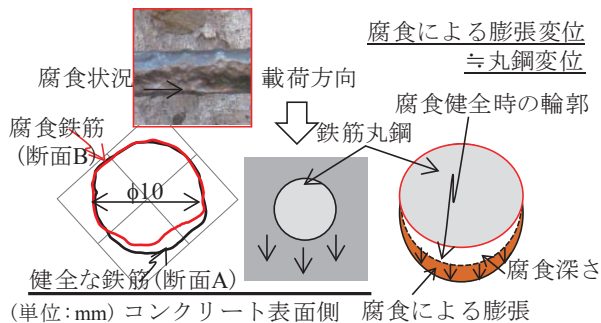
図3に、荷重試験の状況を示す。試験では、背面の鉄筋にて供試体を試験機に固定し、丸鋼に荷重を鉛直下方向に荷重した。丸鋼と荷重治具の接着面は、回転を許容できる構造となっている。荷重中、荷重、供試体上面中央および丸鋼の試験機に対する変位を計測した。なお、かぶり $c$ に対する丸鋼の相対変位は、丸鋼の変位から供試体上面中央の変位を差し引くことで、試験体の曲げおよび背面の鉄筋の抜きを除去することで算出した。

表1にはく落直前のひび割れ状況を、図4に荷重-変位関係を示す。なお、図表には、3.で検討するFEMの結果を併せて示している。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、斜めひび割れ箇所がかぶりのはく落した。

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、荷重が一度低下した。その後、再び荷重が増加し、水平方向および斜めひび割れが丸鋼側から発生し、荷重が低下した。その後は、丸鋼直下のひび割れおよび水平方向のひび割れが進展・開口し、最終的には丸鋼直下のひび割れ



(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

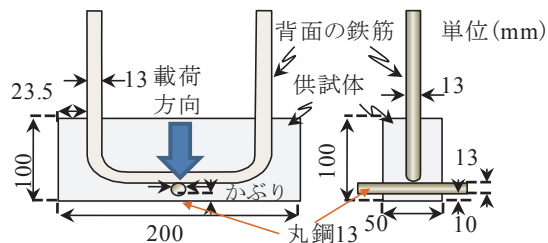
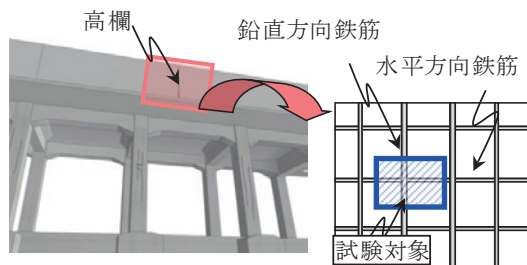
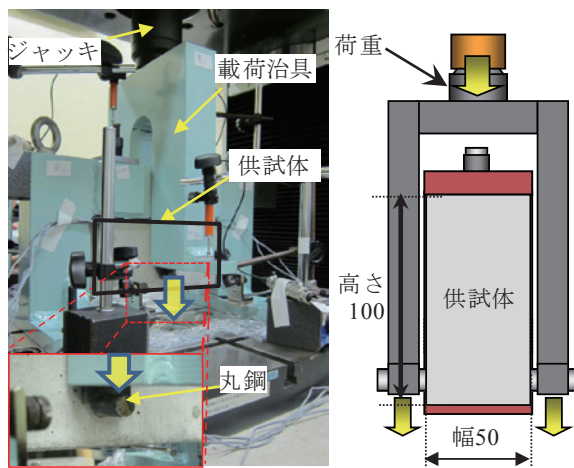


図2 対象としたRC部材と試験体形状



(a) 荷重試験装置 (b) 断面図(単位mm)

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.	$c$	$c/\phi$	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		

● 鉄筋周辺にひび割れ発生  
▲ 表面にひび割れ到達

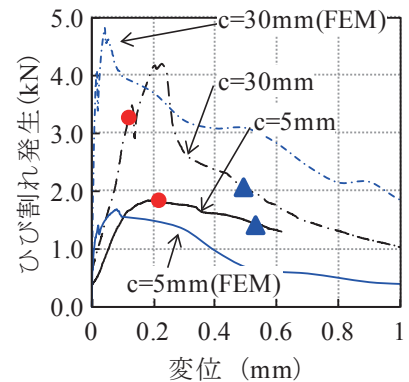


図4 鉄筋の荷重－変位関係

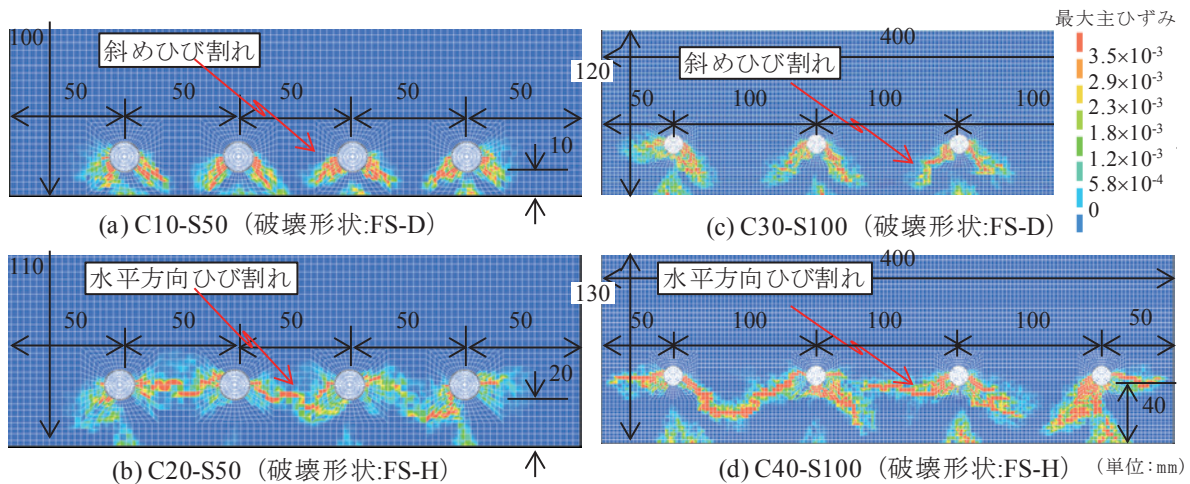


図5 鉄筋間隔およびかぶりに応じたひび割れの形状（最大主ひずみ分布）

と水平方向のひび割れが開口した。実験の結果、かぶり  $c$  と鉄筋径  $\phi$  の比  $c/\phi = 2.3$  未満では、はく離につながるひび割れが発生した。

### 3. 数値実験によるかぶり破壊の評価

#### 3.1 解析概要

2. で示した供試体を2次元にモデル化し、上面全体の鉛直・水平方向を固定し、丸鋼に変位を与えることで荷重試験を再現した。構成則として、コンクリートには固定ひび割れモデルを使用し、ひび割れ後のせん断剛性低減係数  $\beta = 0.05$  とした。応力－ひずみ関係として Thorenfelt モデルに圧縮破壊エネルギー  $G_c$  を適用したモデル、および Hordijk モデルを用いた。圧縮強度は  $f_c = 23\text{N/mm}^2$ 、引張強度  $f_t = 1.8\text{N/mm}^2$  である。要素寸法は  $1.4\text{mm}$  とした。なお、本解析には構造解析汎用コード DIANA9.4.4 を用いた。

表1に、荷重が低下した際の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。また、図4に荷重－変位関係を比較して示す。初期剛性について試験結果と比較して解析結果が大きくなり、試験における丸鋼や供試体の変形が、微小な変位であった計測結果に含まれていた可能性が考えられた。この影響は腐食による膨張変位を議論する際に懸念される可能性があるが、いずれも荷重の最大値は概ね一致していること、それ以降の軟化剛性は概ね一致していること、丸鋼と周辺コンクリートの相対変位を検討する上では3.2以降の解析の検討には大きく影響しないと判断されたため、この条件で感度解析を進めることとした。

#### 3.2 ひび割れ形状に関する感度解析

ひび割れ発生時の鉄筋の腐食量を推定するため、FEMによる感度解析を実施した。特に、鉄筋が複数配置されたことによる効果を考慮に入れるために、かぶり

特集：構造物技術

cおよび鉄筋間隔sを変数とした。なお、解析ケースには、かぶり-鉄筋間隔-クリープ収縮考慮、を反映させた名称を用いた。クリープ収縮のモデルについては後の3.3.2に示す。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。それぞれの鉄筋中心に、鉛直下方向に変位制御で載荷した。

図5にC10-S50, C20-S50, C30-S100, およびC40-S100において、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、後に示す表2と一致しており、斜めひび割れ形状(FS-D)、横方向のひび割れ形状(FS-H)、端部鉄筋と内側鉄筋で異なるひび割れ形状(FS-H/D)、に分類したものである。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、連結した。

3.3 ひび割れ発生限界量に関する解析結果

3.3.1 荷重の最大値および変位

図6に、各ケースに配置した4本の鉄筋のそれぞれにおける荷重の最大値を示す。なお、3.2に示した解析結果も併せて示す。同一の鉄筋間隔であるケースを比較すると、かぶりの増加に伴い荷重の最大値は単調に増加した。ただし、同一の破壊形態で比較するために、表2において斜めひび割れ(FS-D)が発生したケースを対象として示している。

図7に荷重が最大値に達した際の変位を、かぶりの関数として示す。配置した4本の鉄筋のうち荷重の最大値が最も小さかった鉄筋の変位を採用している。なお、4本のばらつきは、0.01mm程度であった。斜めひび割れ形状(FS-D)を示したケースは、変位が0.03mm程度となり、かぶりおよび鉄筋間隔の違いによる変位の増加傾向はみられなかった。横方向のひび割れを示したケースにおいても、かぶりと変位に相関はみられないが、鉄筋間隔が狭いほど、変位が小さくなる傾向となった。これは、隣接した鉄筋とひび割れが連結した時点で荷重の最大値に達したと考えられる。

3.3.2 コンクリート表面の最大主ひずみおよび変位

コンクリート表面において、載荷中にひずみが急増した際の変位に着目した。すなわち、斜めひび割れが発生するケースでは、図8(a)に示すように、斜めひび割

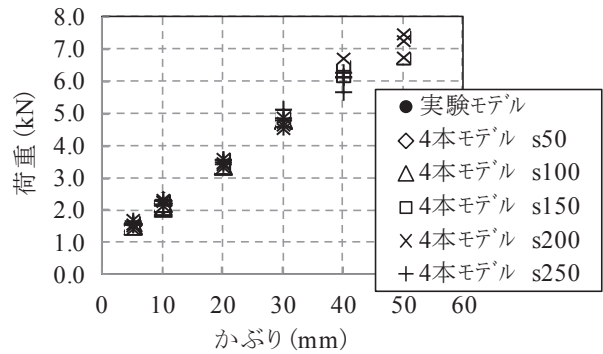


図6 かぶりに依存した荷重の最大値

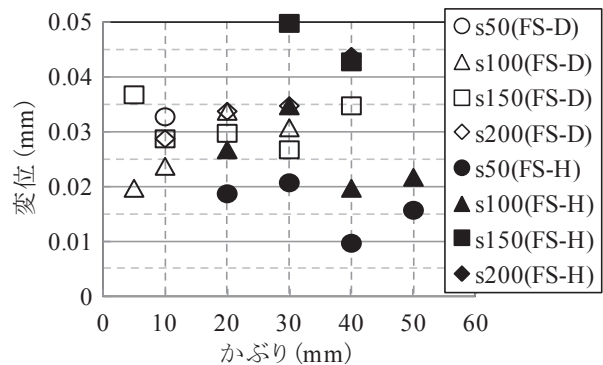
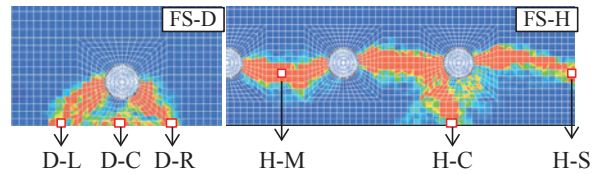


図7 荷重が最大に達した変位



(a) 斜めひび割れ (b) 水平方向および鉄筋直下  
図8 ひずみの着目位置

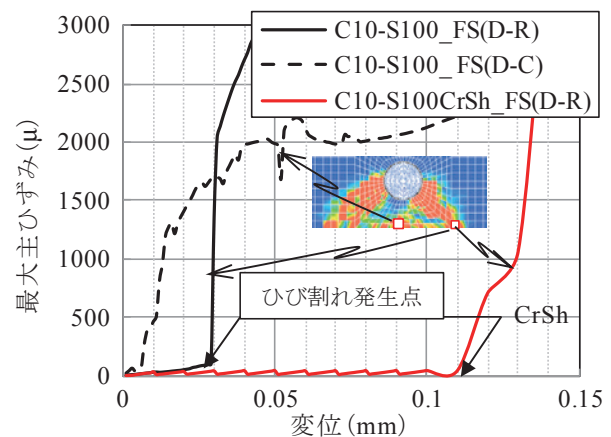
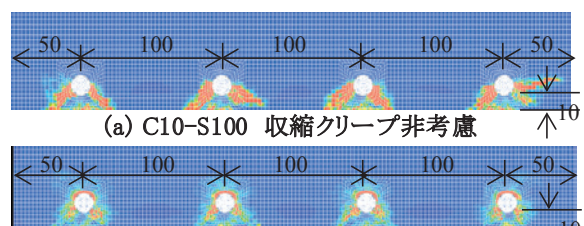


図9 コンクリートのひずみ変化 (FS-D)



(a) C10-S100 収縮クリープ非考慮  
(b) C10-S100 収縮クリープ考慮(単位:mm)  
図10 ひずみ形状 (変位0.1mm)

れの到達位置、および鉄筋直下の要素に着目した。一方、ひび割れが水平方向となるケースでは、図8(b)に示すように、内側に配置した2本の鉄筋の中間位置、端部鉄筋の直下および水平方向のかぶり表面においてひずみが早期に増加する要素に着目した。

図9に、斜めひび割れが発生するC10-S100におけるコンクリート表面の要素の、载荷に伴い増加する最大主ひずみを示す。斜めひび割れが最終的に到達する、鉄筋の右側の要素FS(D-R)では、鉄筋の変位が0.03mmに達した以降、ひずみが急激に増加した。一方、鉄筋直下の要素FS(D-C)のひずみは载荷直後に増加するが、特徴的な増加傾向はみられなかった。破壊形態が一致する他のケースをみると、ひずみが急増する変位にばらつきはあるものの、この傾向は同様であった。

なお、ひずみ変化の感度解析では、さらにコンクリートの収縮・クリープの影響について検討した。コンクリートの収縮・クリープモデルは、CEB-FIP<sup>7)</sup>モデルコード1990を使用し、最初の5年はコンクリートに収縮・クリープのみが発生し、その後は2年間の収縮・クリープ、および鉄筋の载荷を交互に作用させた。この荷重の作用開始時期と作用速度は、既存の腐食速度などに照らし合わせて決定する必要があるが、ここでは変位0.1mmまでは0.01mmごと、変位0.1mm以降は0.1mmごとに2年経過したとして、40年で1mmの変位に到達するように設定した。これは、腐食量に換算すると膨張率2.0倍と仮定して、380mg/cm<sup>2</sup>に相当するものである。

図10にC10-S100を対象にコンクリートの収縮・クリープの有無について、鉄筋の変位が0.1mmに達した際の最大主ひずみの分布を示す。ひび割れの形状は、いずれも斜めひび割れで一致したが、図9に併記したとおり、コンクリートの収縮・クリープを考慮することで、コンクリート表面のひずみが急激に増加する際の鉄筋の変位は増加していることがわかる。

図11に、横方向にひび割れが進展するC20-S50について、鉄筋中間部、鉄筋直下および水平方向(側方かぶり側)のコンクリート表面の最大主ひずみの変化を示す。鉄筋の変位が約0.02mmに達した付近において、鉄筋中間部のひずみが急増し、隣接する鉄筋からのひび割れが連結する。次に、変位が約0.06mmでは、鉄筋直下のひずみが急増する。前述した斜めひび割れが発生するケースにおいても鉄筋直下において最大主ひずみは発生したが、変位に対する増加率は大きく異なる。また、水平方向のコンクリート表面のひずみは、変位が約0.1mmまで最大主ひずみの急激な増加は現れなかったが、変位が約0.2mmに達した時点で急激に増加した。

図12に、斜めひび割れが到達した要素において最大主ひずみが急増した際の鉄筋の変位を、鉄筋間隔ごとに示す。なお、膨張率を2.0倍と仮定して算出した腐食量

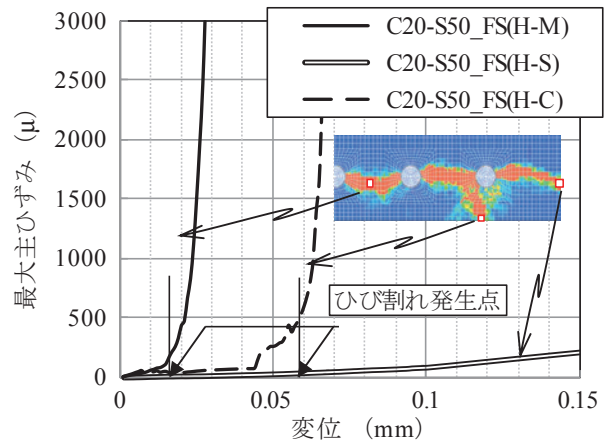


図11 コンクリートのひずみ変化 (FS-D)

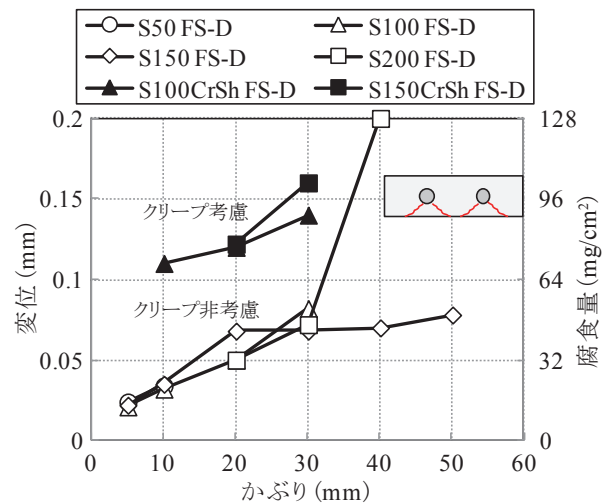





図12 荷重が最大に達した変位 (FS-D)

を併せて示す。いずれのケースにおいても、設置した4本の鉄筋うち、もっとも変位が小さい鉄筋の変位を表示している。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、鉄筋間隔の違いによる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。また、収縮クリープを考慮した変位量は、概ね2倍となりひび割れ発生時の腐食は大きくなる。傾きは同様の傾向にあった。

### 3.4 ひび割れ発生限界腐食量に関する感度解析

これまでの検討を踏まえ、表2にかぶりと鉄筋間隔に応じて変化するひび割れ形状と、かぶりの表面にひび割れが到達する時点として定義したひび割れ発生時の強制変位をまとめる。FEM解析では、かぶりと鉄筋径の比 $c/\phi$ が0.8以下では、鉄筋間隔に関わらず斜めひび割れが発生する。 $c/\phi$ が0.8~2.3では、鉄筋間隔が100mm以下でコンクリート内部の横方向ひび割れが隣接する鉄筋と連結し、端部の鉄筋直下ではなく離りつながらひび割れが発生する形状となった。また、斜めひび割れ形状 (FS-D)

表2 かぶりと鉄筋間隔に応じたひび割れ形状とひび割れ発生時の強制変位 (× 10<sup>2</sup>, mm)

破壊形状 (FS)		鉄筋間隔(s, mm)						
		50	100	150	200	250		
かぶり (c, mm)	5	2.4	2.1	2.2	2.2	2.2	 斜めひび割れ (FS-D)	
	10	3.4	3.2	3.5	3.5	3.5		 横/斜め (FS-H/D)
	20	2.1	5.0	6.8	5.0	5.0		
	30	2.0	6.0	6.8	7.2	7.2		
	40	2.0	5.5	7.0	10.0	7.8		
	50	2.0	5.0	7.8	1.5	1.5		 横ひび割れ (FS-H)

は、鉄筋の間隔に関わらず、かぶりの増加に伴いひび割れ発生時の強制変位は増加したが、鉄筋間隔の影響はほとんど見られなかった。鉄筋間隔が小さい100mmの場合、かぶりの増加に伴い破壊形状はFS-DからFS-H/D、FS-Hに変化し、ひび割れ発生時の強制変位量も増加するが、この強制変位量はかぶりが20-50mmに増加してもほとんど変化が見られない。

以上、鉄筋が腐食した際、かぶり厚および鉄筋間隔に依存して異なるかぶりのひび割れおよびはく離発生時期について、鉄筋の強制変位、すなわち鉄筋の腐食に伴う膨張量の観点から示した。従来、同一の鉄筋径の場合、かぶり厚のみに依存してひび割れ発生限界腐食量、はく離発生限界腐食量が設定されてきた経緯があるが<sup>8)</sup>、近接する鉄筋との相互作用を考えると、ひび割れ形状が変化するために、必ずしもかぶりに応じてひび割れ発生限界腐食量は増加しない。

#### 4. まとめ

- (1) 供用中のRC構造物において、鉄筋を切断することなく、形状および断面積を計測できる可搬型鉄筋形状計測装置を開発した。これを用いて供用中のRC構造物に発生している鉄筋の腐食量を計測した結果、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定量的に把握した。
- (2) 現地の計測結果に基づき、鉄筋の腐食によるかぶりの破壊現象を簡易に再現できる鉄筋押抜き試験装置を開発した。そして、かぶりの破壊につながる荷重および強制変位を定量的に把握し、鉄筋の腐食膨張に伴うかぶりの破壊シミュレーションに用いた2次元有限要素解析の妥当性を検証できた。
- (3) FEMによる数値実験の結果、一般の構造物に多い鉄筋間隔が100mm以上の場合では、 $c/\phi$ が2.3未満で、かぶりのはく落につながる斜めひび割れ形状を示した。すなわち、公衆安全性の確保に関して検討する場合、かぶりのはく落が発生する可能性が高い $c/\phi$ が2.3未満であるケースにおいて優先して検討するのがよい。

- (4) 鉄筋が近接して配置され100mm以下となる場合、 $c/\phi=0.8 \sim 2.3$ では、コンクリート内部の横方向ひび割れが隣接する鉄筋と連結し、端部の鉄筋直下ではく離につながるひび割れが発生する形状となった。従来、鉄筋径が一致する場合、かぶり厚のみに依存してひび割れ発生限界腐食量、はく離発生限界腐食量が設定されてきた経緯があるが、鉄筋が近接して配置されている場合(概ね100~150mm以下)、鉄筋との相互作用のためにひび割れの形状が変化するために、かぶりが増加してもひび割れ発生限界腐食量は増加しない。

#### 文献

- 1) 堤智明, 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.15-166, 1996.2
- 2) 荒木弘祐: かぶりコンクリート剥落による第三者損傷防止を目的として維持管理対策に関する研究, 京都大学学位論文, 2006.3
- 3) 元路寛, 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
- 4) Tran, K., Nakamura, H., Kawamura, K. and Kunieda, M.: Quantitatively Evaluation of Crack Propagation Due to Rebar Corrosion, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1043-1048, 2010
- 5) 元濱浩人, 渡辺 健, 大野又稔, 轟 俊太郎: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1291-1296, 2014.6
- 6) 轟俊太郎, 曾我部正道, 谷村幸祐, 松橋宏治: 鉄筋腐食によるかぶりコンクリート剥落の実態調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1103-1108, 2010
- 7) CEB-FIP: Model Code 1990, Comite Euro-International du Beton, pp.54-55, 1990.
- 8) 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