

論文 鉄筋の変位に着目したかぶりコンクリートのひび割れ性状評価

鬼頭 直希^{*1}・本田 翔平^{*1}・渡辺 健^{*2}・轟 俊太朗^{*3}

要旨：鉄筋腐食によるかぶりコンクリートのひび割れ，はく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，ひび割れ発生時の鉄筋腐食深さに関する検討を行った。その結果，かぶりが破壊する際に鉄筋から作用する荷重や変位を，実験により明らかにした。さらに FEM 解析による感度解析によりかぶり，鉄筋間隔，クリープ・収縮がひび割れ形状およびひび割れ発生限界腐食量におよぼす影響について明らかにした。

キーワード：鉄筋腐食，鉄筋押し抜き試験，ひび割れ形状，非線形有限要素解析，ひび割れ発生限界変位量

1. はじめに

鉄筋の腐食によるかぶりの剥落は，鉄筋コンクリート (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。そのため，発生機構を解明し，発生時期を予測することが求められることから，これまでも様々な研究が報告されている¹⁾。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²⁾，および非線形有限要素解析 (FEM)³⁾，剛体バネモデル (RBSM)⁴⁾ による解析を用いた研究成果が報告されている。

本研究は，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，これらの現象発生に必要な荷重と変位を，実験および FEM を用いて明らかにすることを目的としている。従来，実験的評価が困難であったかぶりの破壊における耐荷力や変位といった力学情報を，現地情報を踏まえて開発した，腐食による膨張変位を再現可能な鉄筋押し抜き試験 (以下，鉄筋押し抜き試験) で取得し，さらに FEM の結果の検証にも用いているところに特徴がある。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，かぶりの破壊に及ぼす効果について検討した。そして，かぶり表面にひび割れが到達するのに必要な変位量について明らかにした。

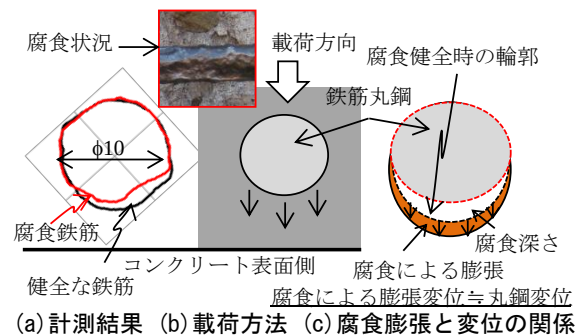


図-1 腐食状態と試験の荷重状況

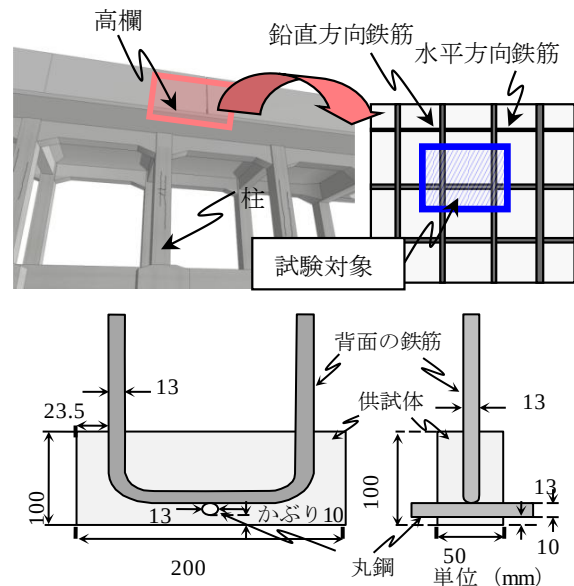


図-2 対象と供試体概要

2. 鉄筋押し抜き試験

2.1 試験の概要

供用中の RC 構造物において，かぶりのひび割れ，はく落が発生している箇所の鋼材の断面をレーザー変位計で計測した結果，図-1(a)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，腐食した部材において鉄筋が膨張することを考慮し，図-1(b)に示す荷重方法を設定し，図-1(c)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倍になると仮定すると，図-1(c)に示すように鉄筋腐食深さは，概ね腐食による膨

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造技術研究部 コンクリート構造 (正会員)

*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造技術研究部 コンクリート構造 博(学術) (正会員)

*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造技術研究部 コンクリート構造 工修 (正会員)

張変位，すなわち荷重に計測される変位と等しくなる。

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⁵⁾より得られた剥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，丸鋼が曲げの変形が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 ϕ は 13mm，コンクリートの目標圧縮強度は 24.0N/mm²，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，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。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拔出しを除去することで算出した。

2.2 試験結果

表-1に剥落直前のひび割れ状況を，図-4に荷重-変位関係を，図-5にかぶりが 5mm および 30mm である供試体のひび割れ進展状況を示す。図-4における実験値の変位は，丸鋼の相対変位である。なお，表-1 および図-4には，3章で検討する 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（図-4：A 点），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（図-4：B 点）。その後，斜めひび割れ箇所がかぶりが剥落した。

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（図-4：C 点）。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鉄筋側から発生し，荷重が低下した。その後は，鉄筋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と水平方向のひび割れが開口した（図-5：D 点）。実験の結果，かぶり c と鉄筋径 ϕ 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。

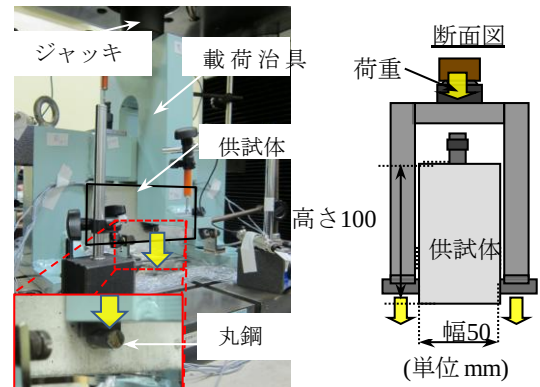


図-3 荷重試験状況

表-1 剥落直前のひび割れ状況と FEM 解析結果

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		

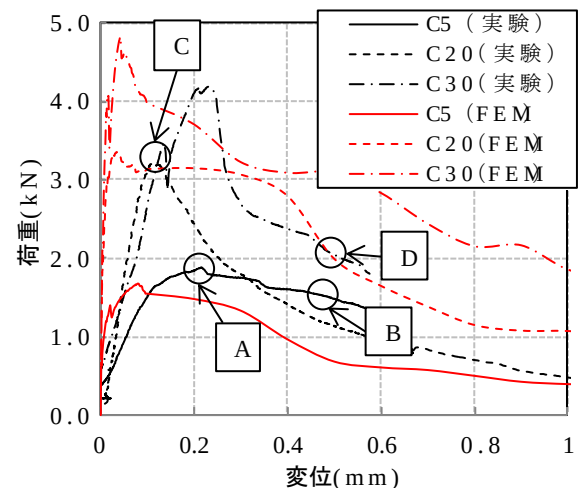


図-4 荷重-変位関係

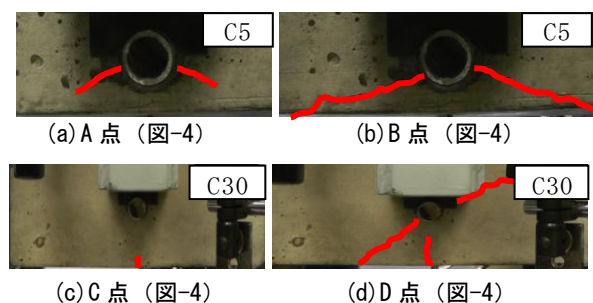


図-5 ひび割れ進展図

3. 再現解析による各指標の感度解析

3.1 解析概要

2章で示した供試体を2次元にモデル化し、上面全体の鉛直・水平方向を固定し、鋼棒に変位を与えることで載荷試験を再現した。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_{fc} 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 2.8mm 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。

3.2 試験結果との比較

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、 $c=30\text{mm}$ では鉄筋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載荷試験の結果が、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3.3節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。

3.3 ひび割れ発生限界量に関する感度解析

ひび割れ発生時の鋼材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、鋼材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 c および鉄筋間隔 S を変数とした。なお、解析ケースの名称は、これらを反映させてかぶり-鉄筋間隔-クリープ収縮考慮とした(例えばC10-S150, C10-S150CrSh)。クリープ収縮のモデルについては後の3.4節に示す。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-6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。また、図-7にC20-S50の最終的なひび割れの形状を示す。

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する。ひび割れが、鉄筋直下にもみられるが進展はしなかった。C10-S100, C10-S150でも同様の破壊形態であった。

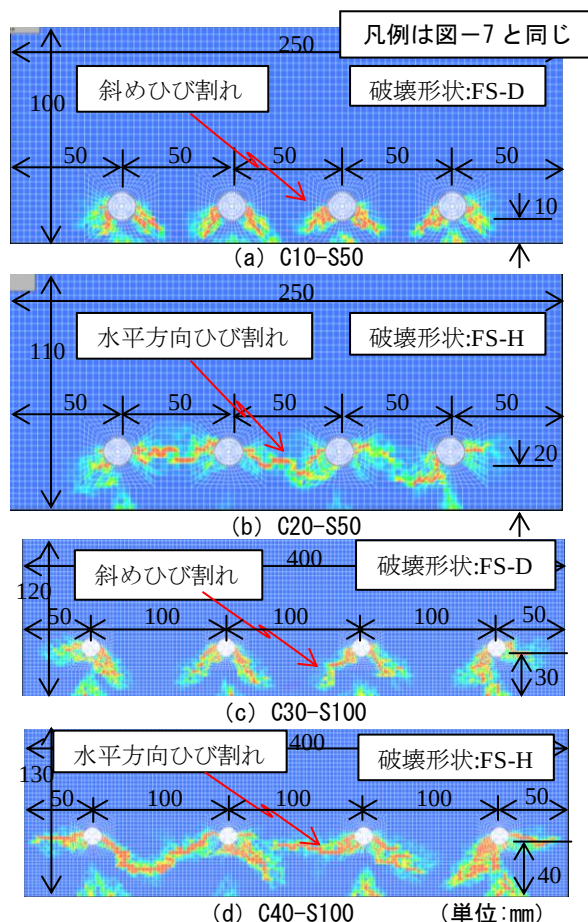


図-6 最大主ひずみの分布

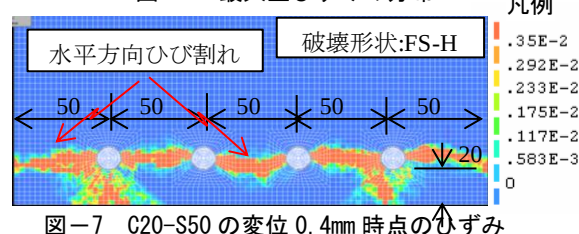


図-7 C20-S50の変位0.4mm時点のひずみ

C20-S50では、斜めひび割れが発生するが、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。最終的には、水平方向のひび割れのほか、図-7に示すように端部の鉄筋のみ鉄筋直下のひずみが卓越して発生した。なお、C20-S100, C20-S150では、隣接する鉄筋から進展するひび割れは連結しなかった。

C30-S100では、内側の2本の鉄筋周辺には斜めひび割れが発生するが、端部の鉄筋は直下にひび割れがコンクリート表面に発生した。なお、C30-S50では、C20-S50と同様、近接するひび割れが連結した水平方向のひび割れとなった。C30-S150では内側の鉄筋周辺の斜めひび割れ、および端部の鉄筋周辺では水平方向および鉄筋直下のひび割れが発生した。C30-S200, C30-S250では、斜めひび割れのみ観察された。

C40-S100では、斜めひび割れがコンクリート表面に達するというよりは、水平方向のひび割れが観察された。

以上、表-2 に示した通り、ひび割れの形状は鉄筋の間隔とかぶりに応じて異なることを確認した。なお表中の FS-D は斜めひび割れ形状、FS-H は横方向のひび割れ形状を示しており、FS-H/D は端部鉄筋と内側鉄筋で異なるひび割れ形状を示している。

3.4 ひび割れ発生限界量に関する解析結果

(1) 荷重の最大値および変位

図-8 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 節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。

また、図-9 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の結果を採用している。なお、4 本のばらつきは、 $1.0 \times 10^{-2} \text{mm}$ 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 $3.0 \times 10^{-2} \text{mm}$ 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。

(2) コンクリート表面の最大主ひずみおよび変位

次に、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-10(a) に示すように、斜めひび割れの到達位置、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-10(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-11 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、載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 $3.0 \times 10^{-2} \text{mm}$ 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) のひずみは載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-FIP⁶⁾ 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

表-2 かぶりと鉄筋間隔に応じたひび割れ形状
単位: mm

破壊形状 (FS)	かぶり (c)	鉄筋間隔 (S)				
		50	100	150	200	250
	5			斜めひび割れ (FS-D)		
	10					
	20					
	30					
	40	横ひび割れ (FS-H)				
	50			横/斜め (FS-H/D)		

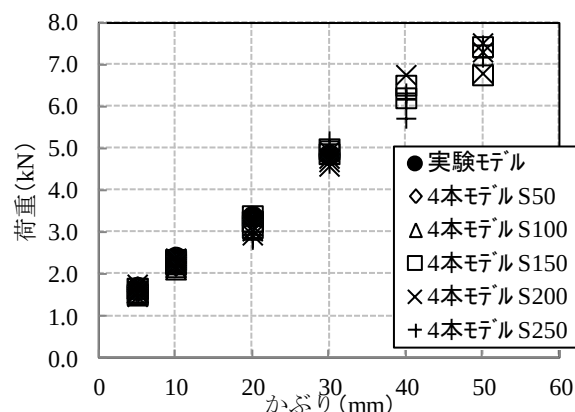


図-8 かぶりとともに呈する荷重の最大値

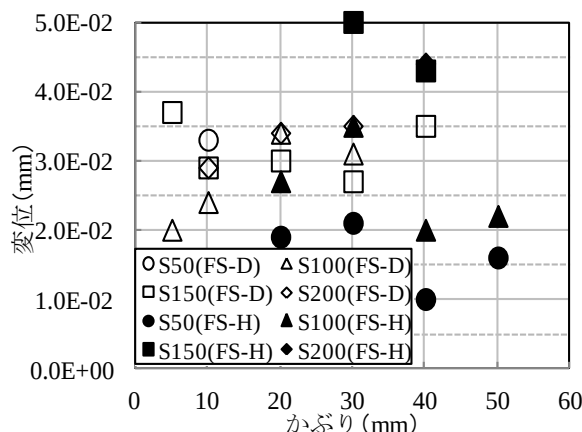


図-9 荷重が最大に達した変位

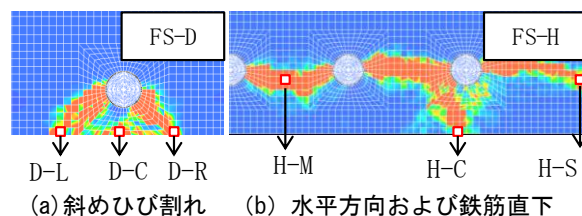


図-10 ひずみの着目位置

リープのみが発生し、その後は 2 年間の収縮・クリープ、および鉄筋の載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 $1.0 \times 10^{-2} \text{mm}$ 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^2 に相当するものである。

図-12 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-11 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-13 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 2.0×10^{-2} mm 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 6.0×10^{-2} mm 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-14 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、いずれのケースにおいても、設置した 4 本の鉄筋うち、最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。

3.5 ひび割れ発生時における鋼材腐食量の推定

図-1 に示したように、この鉄筋の変位が概ね腐食による鉄筋の腐食深さと概ね等しいと仮定すると、ひび割れが発生するのに必要な鉄筋の腐食量として定義されている腐食深さが算出できる。算出した結果を参考までに右縦軸に示している。さらに、既往の結果を参考に⁷⁾、かぶり c と鉄筋径 ϕ を用いて図-14 のうち最も小さい変位量に着目し、原点（かぶり 0mm，変位 0mm）を通る式で腐食深さ（ Δr ）を試算すると、式(1)となった。

$$\Delta r = 23(c/\phi) \times 10^{-3} \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

図-15 に横方向および鉄筋の直下にコンクリート表面からひび割れが発生したケースにおいて、最大主ひずみが急増した時点の鉄筋の変位を示す。かぶり 20mm では、鉄筋中間部、鉄筋直下、横方向かぶり側の順でひずみが増加している。かぶり 30mm の場合は、中間部と鉄筋直下のひずみが増加する変位はほぼ一致するが、側方かぶり側のひび割れ発生にはさらに大きな変位が必要で

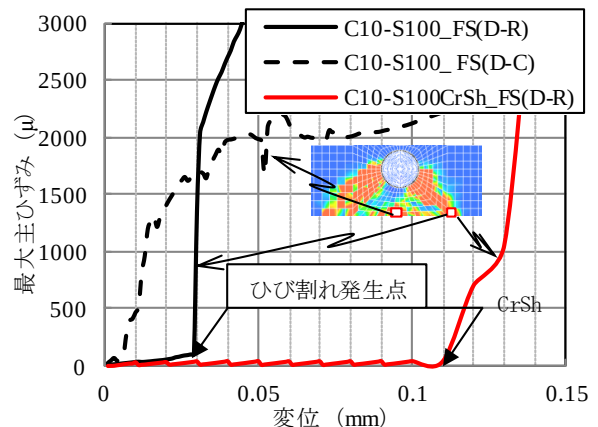


図-11 コンクリートのひずみ変化 (FS-D)

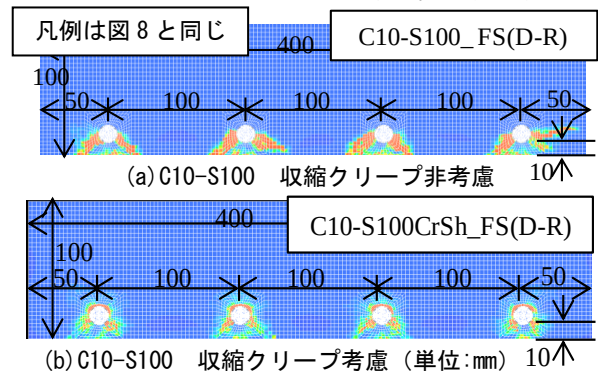


図-12 ひずみ形状 (変位 0.1mm)

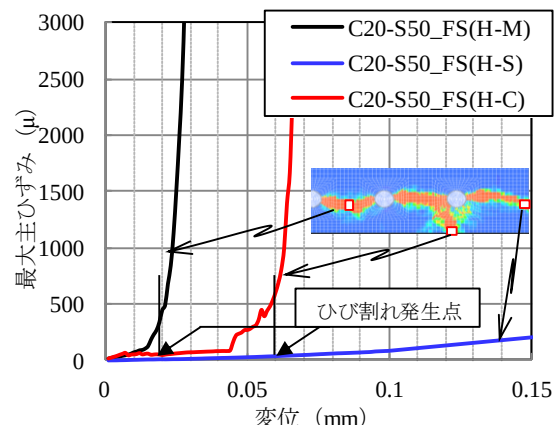


図-13 コンクリートのひずみ変化 (FS-D)

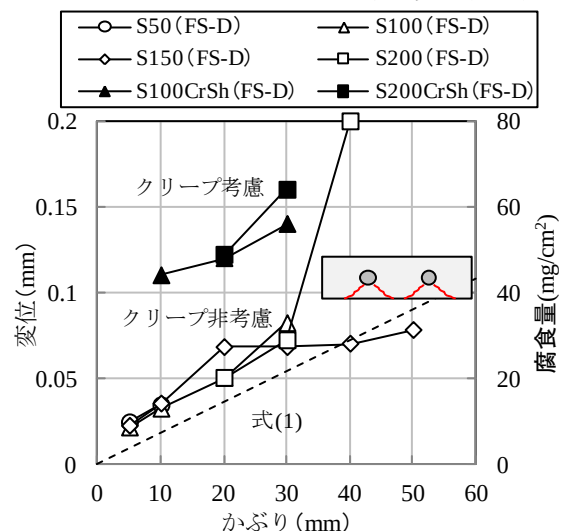


図-14 荷重が最大に達した変位 (FS-D)

ある。かぶりが 40mm 以上でも一致した傾向であった。鉄筋直下および中間部のひずみにおいて最大主ひずみが増加した時点の変位は、かぶりが同一で斜めひび割れ形状が発生するケースと比較して小さい値となっている。

図-16 に以上の結果をまとめ、表-2 に示すひび割れ形状ごとにひずみが急増した最も小さい変位を示した。ひび割れの形状は鉄筋径、かぶりの他に鉄筋間隔により形状が異なることがわかった。また、斜めひび割れ形状は鉄筋の間隔に関わらず、かぶりと変位の増加傾向には相関が得られた。鉄筋押し抜き試験結果を、ひび割れ発生時における鋼材腐食量と結びつけることで、第三者被害に繋がるかぶりのはく落の可能性を評価した。これは、かぶりの破壊状況から鉄筋の腐食状況を推定できる可能性を併せて示唆しているものであり、さらに、鉄筋の腐食に関する知見を併せて検討することで、時間軸の点で RC 構造物の健全度評価の高精度化が実現できると考えられる。

4. まとめ

本研究では、かぶりが破壊する際に、鉄筋から作用する荷重や変位を、鉄筋押し抜き試験により明らかにした。さらに FEM 解析による感度解析によりかぶり、鉄筋間隔、クリープ・収縮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。

- (1) 鉄筋押し抜き試験の結果から、かぶり c と鉄筋径 ϕ の比 c/ϕ が 2.3 未満では、鉄筋側から斜めひび割れが発生・進展し、2.3 ではかぶり表面側から鉄筋直下のひび割れが発生・進展するひび割れ形状となった。
- (2) 強制変位による FEM 解析では、かぶり c と鉄筋径 ϕ の比 c/ϕ 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/ϕ が 0.8~2.3 では、鉄筋間隔 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れひび割れが発生する形状となった。
- (3) 鉄筋に作用する荷重—変位関係から、荷重が最大値に達した際の変位に着目した結果、鉄筋直下のひび割れが斜めひび割れ形状に比べ、変位が小さくなる傾向となった。また、ひび割れ形状に関わらず、かぶりの増加による変位の増加は現れなかった。
- (4) コンクリート表面に発生する最大主ひずみの急増する点に着目した結果、斜めひび割れ形状になるケースでは、かぶりの増加に伴い鉄筋に作用する変位も増加した。また収縮・クリープの影響を考慮すると、本論文の条件では 2 倍程度となった。
- (5) 横方向および鉄筋直下のひび割れ形状では、斜めひび割れ形状に比べ、最大主ひずみが急増する変位は小さい傾向にあった。

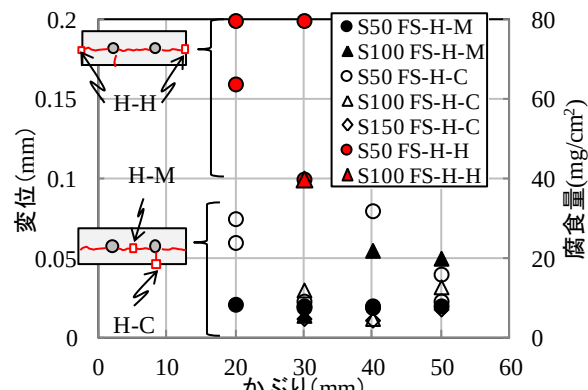


図-15 荷重が最大に達した変位 (FS-H)

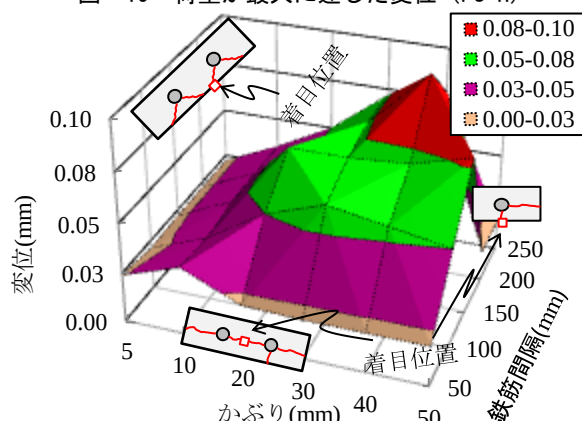


図-16 かぶり鉄筋間隔の呈した変位

参考文献

- 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) Khoa k.TRAN, Hikaru NAKAMURA, Keisuke KAWAMURA and Minoru KUNIEDA : 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) 轟俊太郎, 曾我部正道, 谷村幸裕, 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
- 6) CEB-FIP: Model Code 1990, Comite Euro-International du Beton, pp.54-55,1990
- 7) (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