

論文 構造物表面における腐食ひび割れ発現の遅延に関する検討

小池 耕太郎^{*1}・OMAR Isas Gomez^{*2}・木沢 敬太^{*3}・下村 匠^{*4}

要旨：コンクリートのブリーディングにより鉄筋周囲に空隙が存在する場合の腐食ひび割れ発生の遅延現象およびコンクリートのかぶり厚と鉄筋あきが腐食ひび割れの形成順序に及ぼす影響について検討した。電食実験および数値解析の結果、ブリーディングにより鉄筋周囲に空隙が存在する場合、同じ腐食量に対して腐食ひび割れ発生は遅れる可能性があること、かぶり厚が鉄筋あきよりも大きいと内部ひび割れの連結が先行することにより表面ひび割れの発生が遅れることが明らかとなった。

キーワード：腐食ひび割れ、表面ひび割れ、内部ひび割れ、かぶり厚、鉄筋あき、ブリーディング

1. はじめに

コンクリート中の鉄筋腐食は、鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の最も一般的な劣化要因である。鉄筋が腐食した構造物の保有性能を評価するためには内部の鉄筋の腐食状況を知る必要がある。最も簡便な方法は外観から推定する方法であり、構造物表面の腐食ひび割れの有無が有効な情報となる。表面の腐食ひび割れ幅と内部の鋼材の腐食量の関係には多くの要因が影響するため、精度の良い定量関係を導き出すことは困難であることが知られている^{1),2)}。腐食ひび割れ幅から内部鋼材の腐食程度や状況を推定する方法を実用化するには、ばらつきや不確実性の原因について明らかにし、精度を上げなければならない。

堤ら³⁾、河村ら⁴⁾は鉄筋腐食に伴う内部ひび割れ進展挙動に関して、かぶり厚や鉄筋径の違いによってひび割れパターンが異なることを示している。しかし、これらは単鉄筋のみの検討に留まっており、複数鉄筋を配置した場合の内部ひび割れ進展挙動について検討した例⁵⁾は少ない。

一方、内部の鋼材が腐食しているにも関わらず、表面のひび割れの発生を遅らせたり、同一腐食時のひび割れ幅を小さくする影響因子については、危険側の推定をもたらすことになるので、特段に検討が必要である。

本研究では、コンクリートのブリーディングによる鉄筋周囲の空隙の存在により腐食ひび割れ発生が遅れること、かぶり厚が大きく鉄筋間隔の小さい配筋の場合に内部ひび割れが先行し表面ひび割れが現れにくいことに着目し、これらの現象を実験的に再現するとともに数値解析により確認し、表面ひび割れ幅と腐食量の関係への影響を検討した。

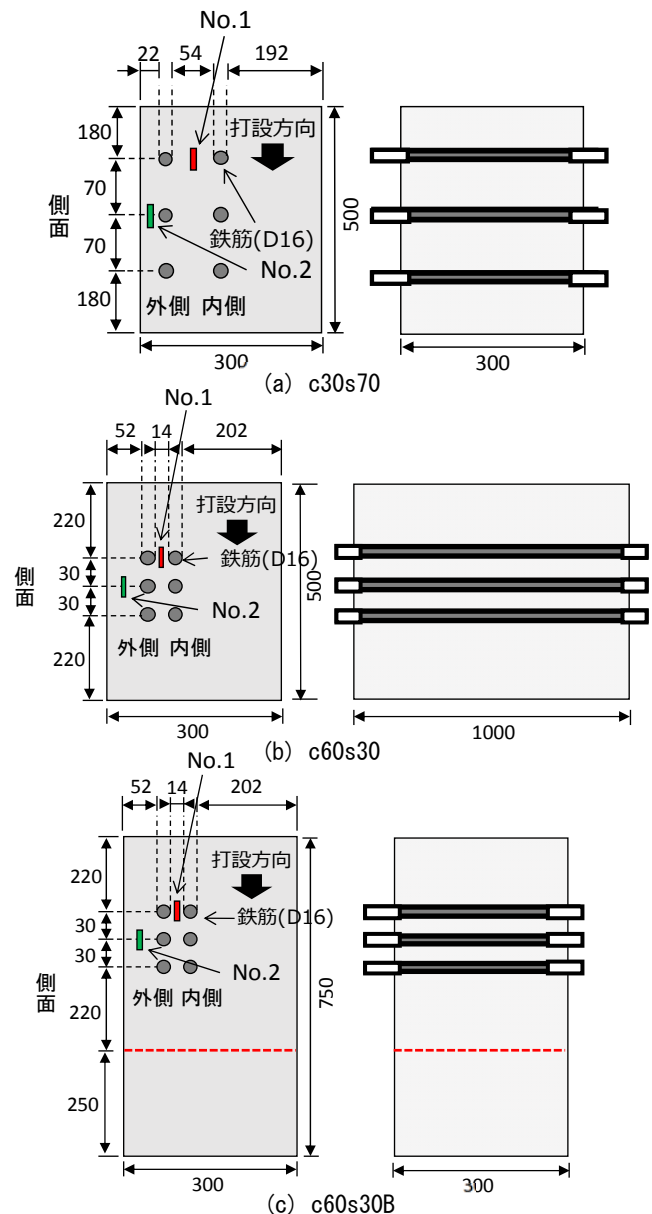


図-1 RC 供試体形状および寸法

2. 実験概要

^{*1} 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 環境社会基盤工学専攻 (学生会員)

^{*2} 前田建設工業株式会社 土木事業本部 (非会員)

^{*3} 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 環境社会基盤工学専攻 (学生会員)

^{*4} 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

2.1 供試体の概要

図－1 に、実験に用いた RC 供試体の形状および寸法を示す。c30s70 と c60s30 は、かぶり、鉄筋あきが内部ひび割れ、表面ひび割れの発生に及ぼす影響を検討するための供試体である。c60s30 は c30s70 と比較してかぶりを大きく、鉄筋あきを小さく設定した。なお、今回対象としているかぶりは、側面からのかぶりである。c60s30B は鉄筋軸方向の供試体の寸法を 1000mm と長くし、軸方向のひび割れの影響を確認する役割も担っている。c60s30B は c60s30 とかぶり、あきが同じで、ブリーディングによる鉄筋周囲の空隙の影響を検討するための供試体である。c60s30 の下部に 250mm 追加して高さ 750mm とし、ブリーディングが多く発生するようにした。鉄筋は D16 を用いた。また、かぶり部および鉄筋間におけるひび割れの発生を検知するために、ゲージ長 50mm の埋込型ひずみゲージを図－1 に示す箇所に埋設した。鉄筋間に配置したゲージを No.1、かぶり部に配置したゲージを No.2 と呼称する。表－1 に各供試体の寸法を示す。圧縮強度は材齢 28 日の強度である。実験に使用したコンクリートの配合は、表－2 に示す通りである。

2.2 電食実験の概要

図－2 に、電食実験装置の概要図を示す。供試体は側面のかぶり厚が小さい方を下にし、3%塩化ナトリウム水溶液中に浸漬させ、鉄筋を陽極、銅板を陰極に接続した。鉄筋 6 本を並列に接続し、電流の合計値が 0.5A となるように、材齢 28 日から 30 日間通電した。鉄筋の腐食量は既往の研究⁹⁾を参考にし、ファラデーの法則に基づいて積算電流より算出した鉄筋の腐食量が 15% (0.0035g/mm^2) となるように通電時間を設定した。

2.3 測定値

電食実験期間中、10 分毎にコンクリートのひずみを自動測定した。電食実験終了後、目視にて 50mm 間隔で表面ひび割れを測定した後、コンクリートカッターを用いて供試体を切断し、内部ひび割れ性状を観察した。c60s30 は端部から 250mm 毎、c30s70 および c60s30B は端部から 150mm の箇所を切断した。ひび割れ性状を観察した後、供試体から鉄筋をはつり出し、10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液 (60℃) に 24 時間浸漬させて腐食生成物を除去し、鉄筋の質量減少量を測定した。

3. 実験結果

3.1 鉄筋の腐食減量

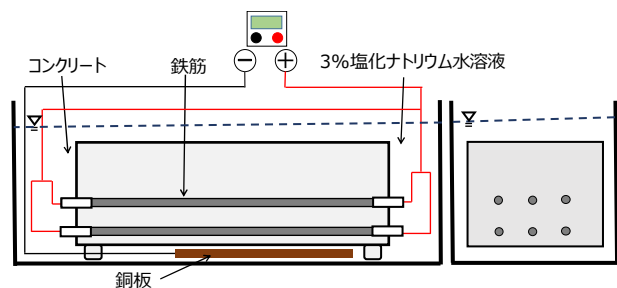
図－3 に、電食実験終了後の各供試体の鉄筋位置における平均腐食減量を示す。側面のかぶり厚が小さい方を外側、対をなす方を内側としている。外側 3 本の鉄筋と内側 3 本の鉄筋を比較すると、内側鉄筋の平均腐食減量は外側鉄筋の 4 割程度であることが確認された。

3.2 表面ひび割れと内部ひび割れの発生・進展に及ぼす配筋の影響

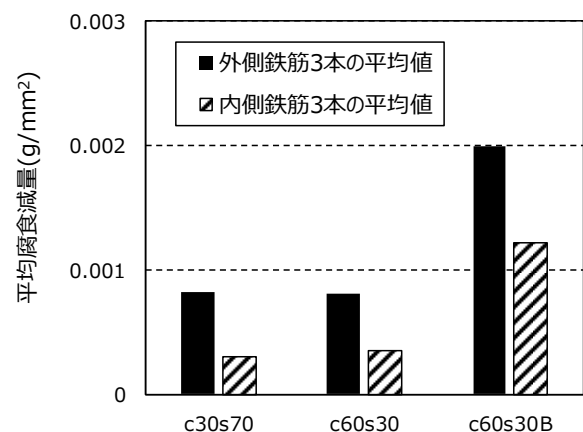
図－4 に、各供試体のゲージによるひずみ測定値および電食実験終了後の内部ひび割れ性状を示す。図中のひずみが 100μ の点線は、その位置においてひび割れが発

表－1 圧縮強度および供試体寸法

シリーズ	圧縮強度 (N/mm^2)	鉄筋間隔 (mm)	かぶり (mm)	幅 (mm)	高さ (mm)	全長 (mm)
c30s70	35.7	54	22	300	500	300
c60s30	33.7	14	52	300	500	1000
c60s30B	35.7	14	52	300	750	300



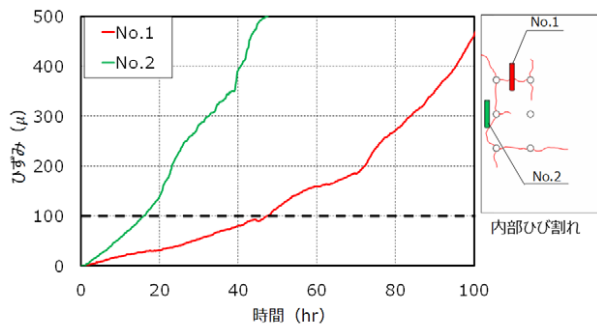
図－2 電食実験装置



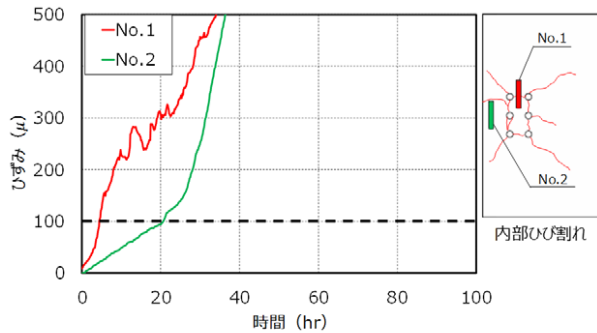
図－3 各供試体の鉄筋位置における腐食減量

表－2 コンクリート配合表

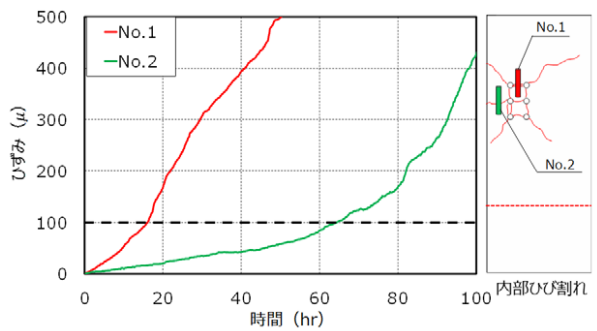
水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位(kg/m^3)						
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	塩化ナトリウム NaCl	高性能AE減水剤 AE	減水剤 WRA
60	45	175	292	792	1005	5	0.88	0.88



(a) c30s70



(b) c60s30



(c) c60s30B

図ー4 各供試体のゲージ位置によるひずみ

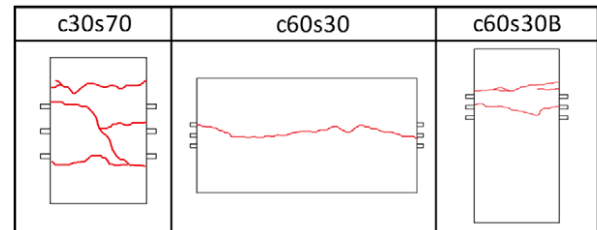
生したと判定する目安である。c30s70 では、早い段階でコンクリートのかぶり部にひび割れが発生したことが確認され、鉄筋間での内部ひび割れの発生は表面ひび割れに比べて遅いことがわかる。一方で、c60s30 および c60s30B では鉄筋間の内部ひび割れが表面ひび割れに先行して発生したことが確認できる。これらの結果より、かぶりと鉄筋あきが表面ひび割れと内部ひび割れの形成順序に影響を及ぼすことがわかる。

3.3 表面ひび割れ状況

図ー5 に、電食実験終了後の各供試体の表面ひび割れの状況を示す。また、表ー3 に各供試体の軸直角方向中央部に確認されたひび割れ幅を計測し、その合計値を示す。いずれの供試体も、軸方向の表面ひび割れは同じ傾向が見られたことから、供試体寸法が軸方向のひび割れ性状に影響を及ぼさなかった。c30s70 は、3 本の表面ひび割れが確認された。c60s30 では軸方向に 1 本のひび割れが観察された。c60s30 のひび割れ幅は c30s70 と比較す

表ー3 表面ひび割れの合計

シリーズ	ひび割れ 本数	ひび割れ幅 (mm)			合計 (mm)
c30s70	3	1.6	0.5	0.2	2.30
c60s30	1	3.52			3.52
c60s30B	2	1.5	1.9		3.40



図ー5 表面ひび割れ状況

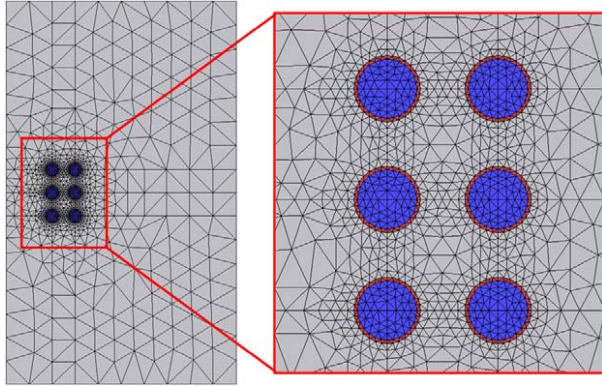


図ー6 ブリーディングにより生じた空隙の例

ると大きく、c30s70 のひび割れ幅の合計値よりも c60s30 の 1 本のひび割れ幅の方が大きい結果となった。c60s30B も同様に表面のひび割れ本数は少なく、個々のひび割れ幅が大きい結果となった。これらの結果より、コンクリートのかぶりが大きく、鉄筋あきが小さい場合、表面に発生するひび割れの本数は少ないが、ひび割れ幅が大きくなる傾向にあるといえる。

3.4 ブリーディングが腐食ひび割れの形成に及ぼす影響

図ー4 の c60s30 および c60s30B を比較すると、最終的な内部ひび割れ性状は同じ傾向がみられたことから、本実験の範囲内では供試体の軸方向の寸法の違いが腐食ひび割れの形成に及ぼす影響が小さいと判断した。しかし、c60s30B は c60s30 よりも表面ひび割れ、内部ひび割れともに発生が遅れることが確認された。これは、供試体高さが大きい c60s30B はブリーディングにより鉄筋周囲に空隙が形成され、まず鉄筋周囲の空隙を腐食生成物が満たしてから、コンクリートに腐食膨張圧が作用し始めるためであると推察される。図ー6 に、別の供試体 7 ではあるが、マイクロスコープを用いて撮影したブリーディングによる鉄筋周囲の空隙の例を示す。



図－7 解析供試体の要素分割の例 (c60s30B)

4. 有限要素解析による検討

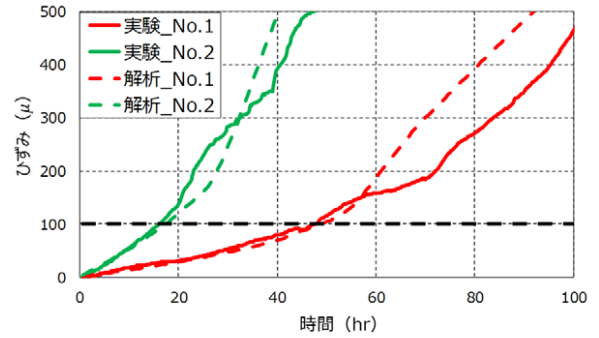
4.1 再現解析の概要および解析条件

実験結果に対する考察の妥当性を検証するために3次元非線形有限要素解析プログラム ATENA を用いて実験結果の再現解析を行った。コンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮側の上昇曲線は CEB-FIP Model code⁸⁾ に準拠し、圧縮軟化は直線形状、引張軟化は指数関数とし、せん断に対する軟化則は KOLMAR 則⁹⁾ を用いた。コンクリートの引張強度と破壊エネルギーは、CEN-EN Eurocode 2¹⁰⁾ に準拠し、圧縮強度試験の結果から推定した。図－7 に、解析対象供試体の要素分割の一例 (c60s30B) を示す。解析供試体の断面形状および寸法は、実験で用いた供試体を模したが、解析は断面内の配筋の影響やブリーディングによる鉄筋周囲の空隙の影響に着目するので、供試体の厚さは 30mm と薄くしている。なお、ブリーディングを誘発するため高さを大きくした供試体 c60s30B も c30s70 および c60s30 と同様に鉄筋周辺の断面 500×300mm の領域を解析対象としている。境界条件は、解析モデルにおける奥行き方向への面外変形を拘束している。また、それ以外の境界は表面力を 0 としている。

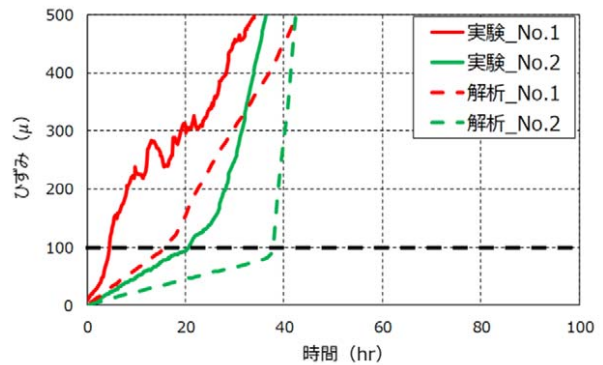
本解析では、既往の研究^{11),12)}を参考に、腐食膨張を鉄筋の温度膨張による体積変化として与えている。鉄筋の温度膨張による体積変化は、1 計算ステップにおける鉄筋径の増分を 0.0002mm、最終膨張量を 0.03mm とするよう設定した。

実験より、内側鉄筋の最終腐食減量は外側鉄筋の 4 割程度であったため、解析においても内側鉄筋に与える膨張量は外側鉄筋の 4 割に設定している。

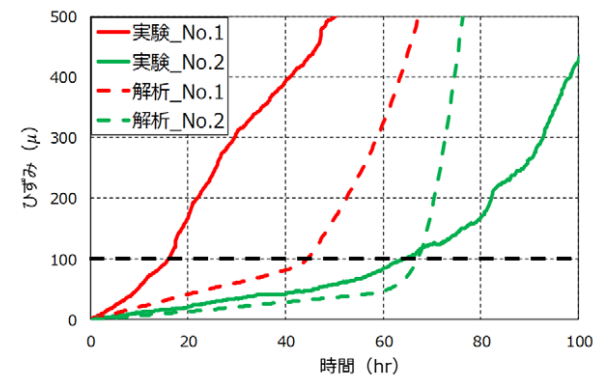
また、c60s30B においては、ブリーディングによる鉄筋周囲の空隙を再現するため、鉄筋要素の周囲に厚さ 1mm の弾性体要素を設けた。この要素は、弾性係数をコンクリートの 1/100 とした。なお、c60s30B は実験で得られた鉄筋の最終腐食減量が c30s70 および c60s30 と比較



(a) c30s70

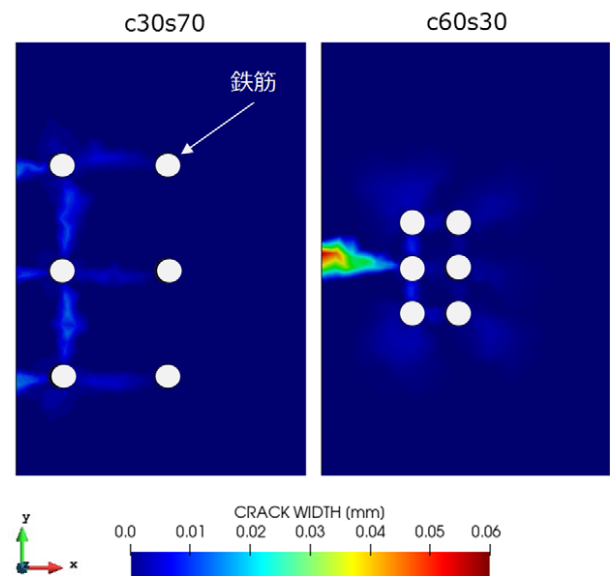


(b) c60s30



(c) c60s30B

図－8 実験結果および解析結果の比較



図－9 100hr 時点でのひび割れ状況

して約2.5倍であったため、与える膨張量も同様に2.5倍にしている。

4.2 再現解析の結果

図-8に、各供試体の実験結果および解析結果の比較を示す。解析における鉄筋の最終膨張量は、c30s70を対象としたパラメータスタディを行い、電食実験の100hr時点を概ね再現できる膨張量とした。すなわち、解析上での腐食速度は体積膨張に伴う鉄筋径の増加速度0.0003mm/hr(c60s30Bのみ0.00075mm/hr)で表される。なお、かぶりおよび鉄筋あきの中心位置における要素のひずみが概ね100 μ を境にひずみの勾配が変化しているため、解析も実験と同様に100 μ を超えた時点でひび割れが発生したとみなしている。

すべての供試体において表面ひび割れと内部ひび割れの発生順序に関する実験結果および解析結果は一致した。

c30s70とc60s30との比較から、かぶりが大きく鉄筋あきが小さいと表面ひび割れに先行して内部ひび割れが生じる傾向が解析により再現されていることが確認できた。また、c60s30とc60s30Bとの比較から、鉄筋周囲に空隙を模した弾性係数の小さい層を設定すると、表面ひび割れ、内部ひび割れともに発生が遅れる傾向が再現できている。このことから、ブリーディングによる鉄筋周囲の空隙が腐食ひび割れの発生を遅らせることがあるとの仮説が妥当であることが確認できる。これはすなわち、表面ひび割れの情報のみで内部の鉄筋腐食を推定する場合、危険側の推定をもたらすことになる。

図-9に、100hr時点でのひび割れ発生状況を示す。図-4に示している電食実験後の各供試体の内部ひび割れ性状と比較すると、いずれの解析モデルでも実験結果に近いひび割れ性状であることが確認できる。また、図-5および表-3と比較すると、かぶりが小さい供試体では複数のひび割れが表面まで進展し、かぶりの大きい供試体では表面まで進展するひび割れの本数は少ないが、ひび割れ幅は大きくなっていることも解析により再現されている。

4.3 かぶりと鉄筋あきが表面ひび割れと内部ひび割れの発生に及ぼす影響のパラメータスタディ

(1) 解析条件

かぶりと鉄筋あきの組み合わせが表面ひび割れの発生に及ぼす影響について一般的な傾向を把握するため、実験した条件を補完する範囲で系統的な数値解析を行った。表-4に解析供試体の水準、図-10にかぶりと鉄筋あきの位置関係を示す。なお解析モデルの寸法、鉄筋径、境界条件、物性値および腐食速度は4.1で行った再現解析と同一としている。また、パラメータスタディにおいても内側鉄筋に与える膨張量は外側鉄筋の4割とした。

表-4 解析供試体の水準

シリーズ名	かぶり c (mm)	鉄筋あき s (mm)	c/s
c30シリーズ	30	20, 30, 40, 50, 60	1.5, 1.0, 0.8, 0.6, 0.5
c40シリーズ	40		2.0, 1.3, 1.0, 0.8, 0.7
c50シリーズ	50		2.5, 1.7, 1.3, 1.0, 0.8
c60シリーズ	60		3.0, 2.0, 1.5, 1.2, 1.0

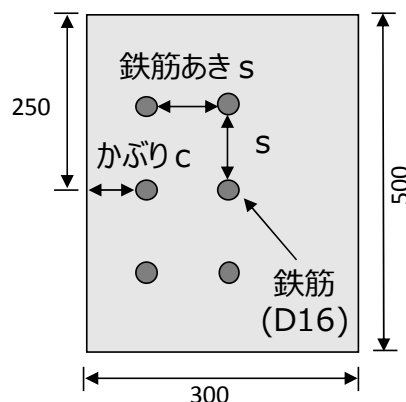


図-10 かぶりと鉄筋あきの位置関係

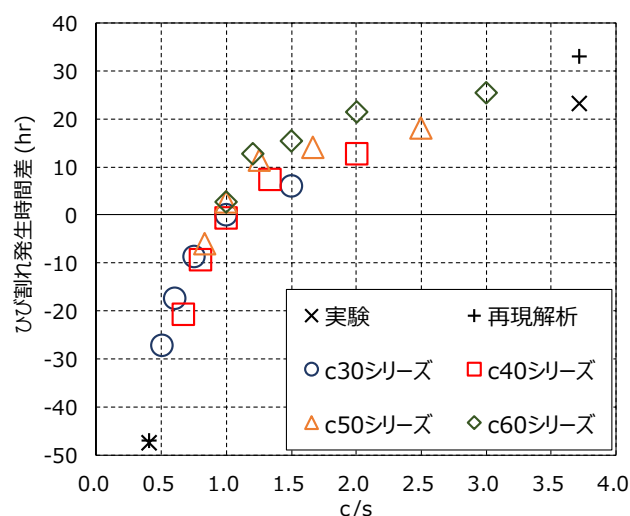


図-11 パラメータスタディの結果

(2) 解析結果

図-11にパラメータスタディの結果を示す。縦軸の時間差とは、かぶり部のひずみが100 μ に達した時間（表面ひび割れ発生時）と鉄筋あきのひずみが100 μ に達した時間（内部ひび割れ発生時）の差である。時間差が正だと内部ひび割れ先行、負だと表面ひび割れ先行となる。図より、かぶり、鉄筋あきの値によらず、両者の比c/sが1.0を境に表面ひび割れ先行と内部ひび割れ先行が入れ替わること、c30s70とc60s30の実験結果もその傾向の中にあることが確認された。

このことから、かぶりが大きい部材では、表面に腐食ひび割れが現れたときには腐食がかなり進行し、内部ひ

び割れが連結している場合があることが考えられる。そのため、目視点検による外観性状からの情報のみでは内部鉄筋の腐食程度を見誤る可能性がある。

今回、構造物表面への腐食ひび割れ到達を遅延させる因子として、ブリーディングの影響および鉄筋のかぶりとあきの比の影響を考えた。今回の結果は同一鉄筋径で得られたものであるため、今後これらのパラメータに鉄筋径を加え、より広範な条件下での実験および解析による検討を行う必要があると考えている。

5. まとめ

本研究で得られた結果より、以下がいえる。

- (1) ブリーディングにより鉄筋周囲に空隙が形成された場合、腐食ひび割れが発生しにくくなる可能性がある。表面ひび割れの様態から内部の鉄筋の腐食を推定する際に、腐食を少なく見積もることになるので注意を要する。
- (2) かぶりと鉄筋あきの比は腐食ひび割れの形成順序に影響を及ぼし、かぶりが鉄筋あきよりも大きいと内部ひび割れが先行し、表面ひび割れの発生が遅れる傾向にある。かぶりが大きい部材では、表面に腐食ひび割れが現れたときにはすでに腐食が進行し、内部ひび割れが連結していることがあるので、点検においては表面ひび割れの目視だけで内部の鉄筋腐食を検知するのではなく、たたきなど他の方法を併用することが望ましい。
- (3) かぶりが大きいと、発生する表面ひび割れは、本数は少ないが、個々のひび割れ幅が大きくなる傾向がある。

謝 辞

本研究は総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理法人：科学技術振興機構）の助成を受けて行った。実験の実施にあたっては山口貴幸技術職員の支援を受けた。各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 村松真伍, 小林 豊, 下村 匠: 鉄筋腐食の空間的不均一性が鉄筋コンクリート部材の耐荷性状に及

ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, No.1, 2009

- 2) 土木学会: 続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, コンクリート技術シリーズ 85, 2009.5
- 3) 堤知明, 松島学, 村上裕治, 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, 159-166, 1996.2
- 4) 河村圭亮, Tran Khoa Kim, 中村光, 国枝稔: 鉄筋腐食に伴うコンクリートの表面および内部ひび割れ進展挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010
- 5) 西内達雄: コンクリート表面のひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定手法, 電力中央研究所報告, No.08024, 2008
- 6) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親典: 鉄筋の発錆によるコンクリートのひびわれ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.505-510, 1988
- 7) Thi Hien NGUYEN, 大原涼平, 下村 匠: Influence of interfacial void around reinforcement due to bleeding on chloride ingress and its interaction with flexural crack: コンクリート工学年次論文報告集, Vol39, No.1, pp.781-786, 2017
- 8) CEB: CEB-FIP MODEL CODE 1990 DESIGN CODE < Tomas Telford Service Ltd., 1993
- 9) Kolmar W: Beschreibung der Kraftuebertragung under Risse in nichtlinearen Finite-Element-Berechnungen Von Stahlbetontragwerken, Dissertation, T.H. Darmstadt, p.94, 1986
- 10) ATENA: PROGRAM DOCUMENTATION ATENA Science Tutorial & Manuals 2013
- 11) 小西裕一郎, 関 博, 松井邦人, 松島 学: 鉄筋の腐食膨張によるコンクリートひびわれの有限要素解析, 土木学会第 42 回年次学術講演会, V-184, pp.406-407, 1987
- 12) 木村哲史, 丸山久一, 濱田 宏: RC 部材における鉄筋腐食の定量的評価方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.771-776, 1996