

V-15

鉄筋腐食によるひび割れ性状に与えるコンクリートかぶりと力学的性状の影響

北海道大学大学院 学生員 亀谷 英樹
 北海道大学工学部 正 員 佐藤 靖彦
 北海道大学工学部 正 員 上田 多門
 北海道大学工学部 正 員 角田與史雄

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性問題において、鉄筋の腐食によるかぶりのひび割れ、剥離等の損傷が取り上げられる。一般に、これらを制御・抑制するにはコンクリートのかぶり厚さを厚くすれば良いとされているが、ひび割れの制御・抑制に関する合理的な評価方法は見あたらない。現行のコンクリート標準示方書¹⁾においても腐食環境、鉄筋径、構造物の重要性等の要因に対しかぶり厚さを推奨しているが、その数値を与えた根拠は必ずしも明確に示されていない。本研究ではコンクリートのかぶり厚さ、コンクリートの材料力学的特性値を変数とした有限要素解析を行い、鉄筋の膨張率とかぶりひび割れ性状について検討する。

2. 解析概要

2.1 解析方法

本研究における解析対象構造物は、主鉄筋2本を矩形断面の中心線に対称に有したはり部材である(図1参照)。このはり部材の単位厚さ断面を抽出し平面ひずみ状態と仮定し有限要素法を適用する。実現象では腐食生成物が鉄筋とコンクリートの界面に生成し、その体積膨張によりコンクリートにひび割れを誘発させる。しかし、本研究では、予備解析により鉄筋の変形量はコンクリートの変形量に比較して十分に小さいと仮定できることが確認できたため、鉄筋要素および鉄筋要素とコンクリート要素間の腐食生成物を表現する要素は設けず、コンクリート要素に直接強制変位を与えることで鉄筋の腐食膨張を表現している(図1参照)。鉄筋膨張はブリージング等の影響を受けて、打設時における鉄筋の下面がその上面よりも腐食が著しいとされている²⁾。しかし、その形状、上面と下面の腐食比等についての研究報告が極めて少ないため、本解析では、鉄筋上面と下面の腐食比が等しいと仮定し、鉄筋膨張を等方膨張とした。また、本解析はコンクリート供試体の断面形状および配筋の供試体断面中心線についての対称性を利用し半断面について解析している。

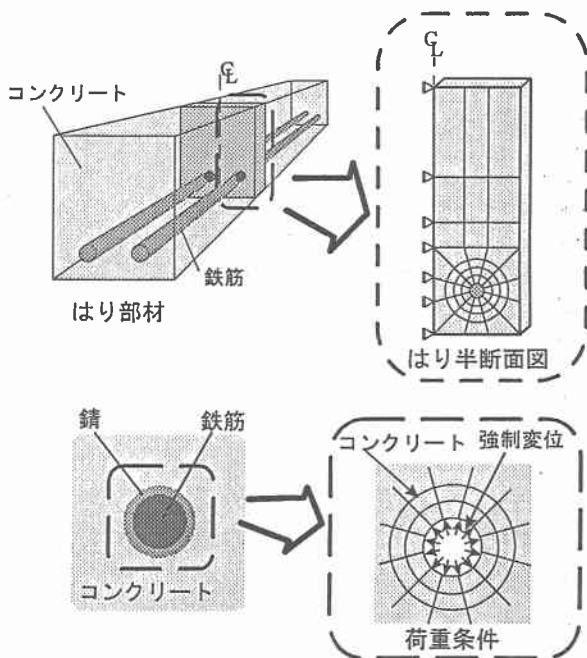


図1 解析概要図

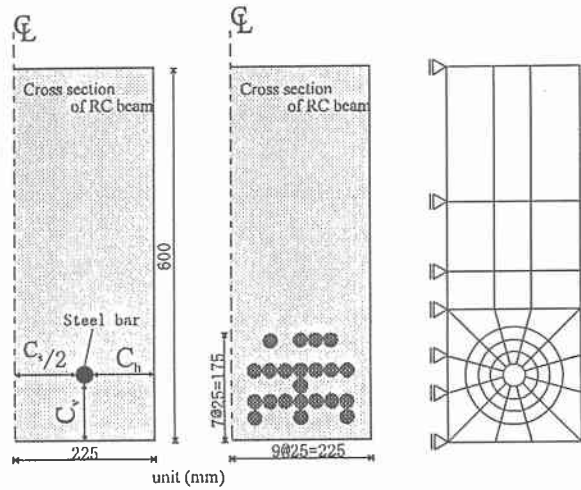
Influence of Cover and Material Property on Cracking Due to Corrosion of Reinforcement by Hideki KAMEYA, Yasuhiko SATO, Tamon UEDA and Yoshio KAKUTA

2.2 解析プログラム

本解析では、鉄筋コンクリートはり部材を対象とした非線形有限要素解析プログラム（平面応力問題）³⁾を平面ひずみ問題に拡張したものを使用した。本解析プログラムの概要は、文献4)に記載されている。

2.3 解析変数

かぶりひび割れの発生、進展に影響を与えると考えられる要因は、コンクリートおよび鉄筋の断面形状、断面寸法、コンクリート断面の鉄筋の配置位置（かぶり厚さ）等の幾何的な要因と、コンクリートの弾性係数、ポアソン比、圧縮強度、引張強度等の材料力学特性値の2種類に分類される。本研究において、鉄筋の直径を25mm、供試体断面を高さ600mm、幅450mmと一定のもので上述の影響因子を解析変数とした数値解析を行った。



(a) 半断面図 (b) 鉄筋の配置位置 (c) 要素分割図

図2 解析供試体図

2.3.1 幾何的要因に着目した解析供試体

側面かぶり厚さ (C_t)、下面かぶり厚さ (C_b)、あき長さ (C_s) の3つを解析変数とした (図2(a)参照)。各かぶり厚さを全て100mmとした供試体 (以下、基本供試体と呼ぶ) を基本に、各かぶり厚さ、あき長さを25mm単位で薄くあるいは厚くなる様に鉄筋位置を変化させた (図2(b)参照)。図2で黒丸は解析した鉄筋の位置 (22ケース) である。これらの幾何的変数をパラメータとした供試体のコンクリート材料力学特性値は全供試体で共通である (表1参照)。

表1 コンクリート材料特性値

圧縮強度	引張強度	弾性係数	ポアソン比
34.3 (MPa)	2.43 (MPa)	29.4 (GPa)	0.20

2.3.2 材料力学特性に着目した解析供試体

2.3.1の基本供試体を用いて鉄筋の位置 (各かぶり厚さ、あき長さが100mm) を変えずにコンクリート材料特性値のみを変数として解析を行った。解析変数はコンクリートの圧縮強度、引張強度、弾性係数、ポアソン比の4項目である。ここでは2つのSeriesに分け、上述の項目がひび割れ性状に及ぼす影響を明らかにする。すなわち、圧縮強度と弾性係数、引張強度には相関関係があることを考慮して、設定した圧縮強度を用いて示方書¹⁾に基づき弾性係数と引張強度を算出し、これら3つの材料特性値を連動して変化させて解析したもの (A-Series)、一方、個々の特性値の影響度を考察するために、これらに相関性を与えずそれぞれ1項目づつ独立変数として解析を行ったもの (B-Series) である (表2参照)。表2で着色部は基本供試体の材料力学特性値を表し、B-Seriesはこの値から1項目づつ特性値を表2のように変化させ解析を行った。

表2 コンクリート材料特性値

A-Series				B-Series			
圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
24.5	1.94	26.4	0.20	24.5	1.96	19.6	0.15
34.3	2.43	29.4		34.3	2.43	29.4	0.20
44.1	2.84	32.2		44.1	2.98	39.2	0.25

2.4 評価方法

コンクリート構造物の耐久性の評価において、かぶりコンクリートに貫通ひび割れが発生した時を限界状態とする考え方が一般的である⁶⁾。本研究でも、ひび割れがかぶりに達した時の鉄筋膨張率（以下、限界膨張率）とそのひび割れ性状を用いて各解析変数の影響について検討を行うものとした。ここで鉄筋膨張率とは、鉄筋と腐食生成物の増加断面積を健全な鉄筋断面積で除し百分率で表した次式により定義される。なお、増加断面積は強制変位量より求める。

$$\text{鉄筋膨張率 (\%)} = \frac{\text{鉄筋と腐食生成物の断面積変化量}}{\text{膨張前の鉄筋断面積}} \times 100$$

3. 解析結果

3.1 各かぶり厚さが限界膨張率とひび割れ性状に与える影響

全供試体において、鉄筋膨張率が低いレベルでは鉄筋周方向に高引張、半径方向に低圧縮応力場を形成し、ひび割れは鉄筋から放射状に等方に進展した。さらに膨張レベルが高くなると鉄筋の配置位置の違い、すなわち、各かぶり厚さの差異によって異なった方向にひび割れが卓越していくことが確認された。全てのかぶり厚さが等しい基本供試体は、あき方向と側面かぶりの斜め下方向にひび割れが卓越し、膨張率が0.240(%)であき方向にひび割れが貫通し、膨張率が0.320(%)で側面かぶりの斜め下方向にひび割れが貫通した。基本供試体の膨張率0.320(%)時のひび割れ性状を図3に示す。その他の解析供試体の貫通ひび割れ方向を図4に示す。図4で丸印は鉄筋配置位置を示す。矢印方向はその配置位置でのかぶり貫通ひび割れ方向を表している。さらに、丸印は矢印方向にひび割れが最初に貫通したことを表し、二重丸印は側面および下面かぶりに貫通ひび割れが発生する前にあき方向にひび割れが貫通していたことを示している。かぶりひび割れの貫通方向は、鉄筋が図4に示した4つの領域の何処に位置するかで決定される。領域Iに鉄筋が位置する時、かぶりひび割れはかぶり厚さが最も薄い側面方向にほぼ水平に貫通する。その時の貫通ひび割れ限界膨張率は側面かぶり厚さとあき長さの比に支配され、側面かぶりの比が大きい程限界膨張率は大きくなり貫通ひび割れは入りにくくなる。また、この領域での下面かぶり厚さの影響は見られなかった。領域IIに鉄筋が配置されている時、領域Iと同様にかぶりの最も薄い下面方向に貫通ひび割れが発生した。限界膨張率は下面かぶりが厚い程大きくなり、側面かぶり

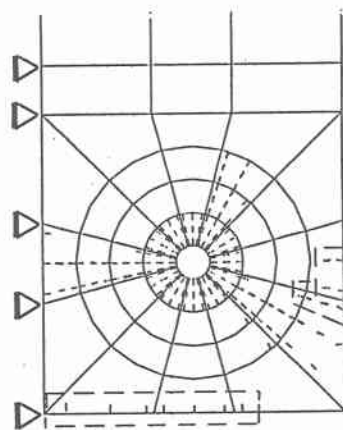


図3 ひび割れ性状
(基本供試体：膨張率0.320%)

厚さの影響は無いと言える。領域Ⅲではひび割れは下面かぶり方向に貫通する前にあき方向にひび割れが貫通し、その後、下面かぶり方向に貫通ひび割れが発生する。領域Ⅳは領域Ⅲと同様にあきにひび割れが貫通し、その後側面方向にかぶり貫通ひび割れが発生する。領域Ⅲ・領域Ⅳで、限界膨張率はひび割れ方向のかぶり厚さに支配される。ところで、これら4つの領域の境界上に鉄筋が位置する場合は、領域Ⅰと領域Ⅱ、領域Ⅲと領域Ⅳの境界上では、ひび割れは断面隅角部に進展し側面斜め下方向に貫通する。領域Ⅰと領域Ⅳの境界ではあき方向にひび割れが最初に貫通するが、外縁に貫通するひび割れ方向は側面である。領域Ⅱと領域Ⅲの境界上では領域Ⅲのひび割れ性状に一致する。

下面かぶり厚さを固定した時の、側面かぶり厚さと限界膨張率の関係を図5に、側面かぶり厚さが100mmでの下面かぶり厚さと限界膨張率の関係を図6に示す。図5および図6から同じ有効高さでも鉄筋の配置位置により貫通ひび割れ方向が変化し、それに伴って限界膨張率も変化することが明らかである。

角ら⁶⁾は、鉄筋が引き抜けることにより生じる割裂ひび割れを本解析と同様の手法で解析している。その解析結果によると、側面と下面のかぶり厚さが等しい場合かぶり貫通ひび割れはコンクリート隅角部に進展することを報告している。本解析においてもこの様なかぶり比の場合には隅角部にひび割れが進展することが確認できた。しかし、側面と下面かぶり厚さがともに25mmの供試体は、断面隅角部にひび割れが進展せず、側面と下面方向に同時に貫通ひび割れが発生した。この供試体において断面隅角部にひび割れが進展しない原因は、断面隅角部から鉄筋配置位置までの距離に起因していると考えられる。鉄筋が断面隅角部から十分遠い距離に位置する場合、鉄筋表面から側面（あるいは下面）と断面隅角部までの距離比は、1 : 2^{1/2}に近づく。これは、鉄筋と断面隅角部の距離が遠いため、鉄筋径の長さが上述の距離比に与える影響が小さいためである。これに対し、鉄筋と断面隅角部までの距離が短くなると、十分距離のある場合に比較して側面距離比が鉄筋径の影響を受けるため小

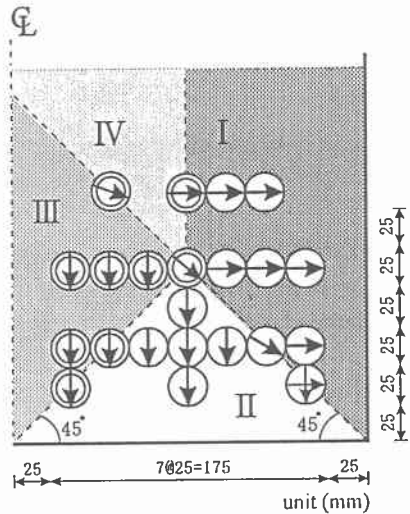


図4 かぶり貫通ひび割れ方向

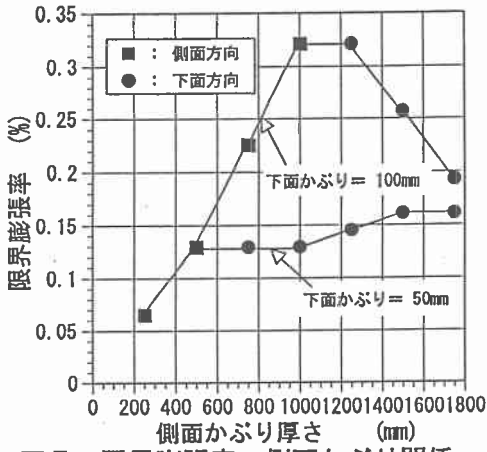


図5 限界膨張率—側面かぶり関係

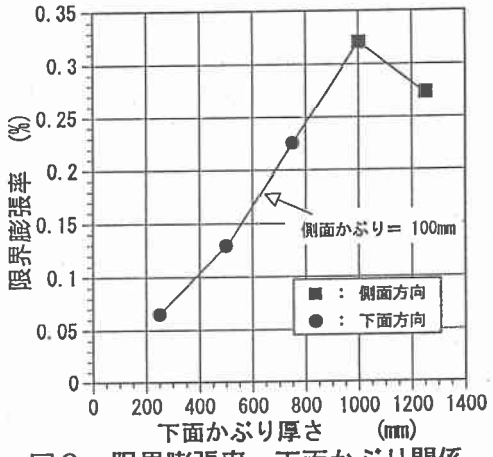


図6 限界膨張率—下面かぶり関係

さくなる。これにより、ひび割れが断面隅角部に進展せず、側面と下面に進展したと考えられる。また、側面と下面に同様にひび割れが進展し、同時にひび割れが貫通した理由は、鉄筋と断面隅角部の距離があまりに短いため、断面形状の影響による下面と側面の非等方向性が薄れたためと考えられる。また、角らにはかぶり厚さが薄い場合に「はり作用」と呼ばれるかぶり表面から断面内部へひび割れが進展することを報告しているが、本解析結果からも同様な傾向が確認できた（図3中の点線内のひび割れ）。

3.2 コンクリート材料力学特性値が限界膨張率とひび割れ性状に与える影響

コンクリートの材料力学特性値を解析変数とした解析において、すべての場合で、そのひび割れ性状は等しかった。すなわち、全供試体が基本供試体と同様にあき方向にひび割れが貫通した後、側面斜め下方向にひび割れが貫通した（図2参照）。ひび割れ性状には材料力学特性値の変化による差異は見られないが、限界膨張率については違いが確認された。A-Seriesについての圧縮強度と限界膨張率の関係を図7に示す。圧縮強度が24.5MPaから44.1MPaに80%増加したとき限界膨張率は10%程度の増加量でしかなく、圧縮強度の限界膨張率に与える影響は少ないと言える。一方、材料力学特性値を独立に変動させたB-Seriesの結果を図8から図11に示す。図8から、圧縮強度のみを変数とした場合、圧縮強度の80%の増加に対し、限界膨張率は10%の減少であり、この要因の限界膨張率に与える影響は少ない。しかし、図9から、引張強度の限界膨張率に対する感度は顕著である。引張強度の50%増加に対し限界膨張率は約30%程度の増加を示した。コンクリートの弾性係数が限界膨張率に与える影響は、弾性係数の100%の増加に対し限界膨張率32%の減少を示しその影響度は大きいと言える（図10参照）。これは本解析プログラムにおいて、ひび割れの発生を応力の大きさで判定している⁴⁾ためであり、弾性係数が高い場合、等しいひずみに対する応力が高く評価され、本解析プログラムではひび割れが発生し易くなるものと考えられる。

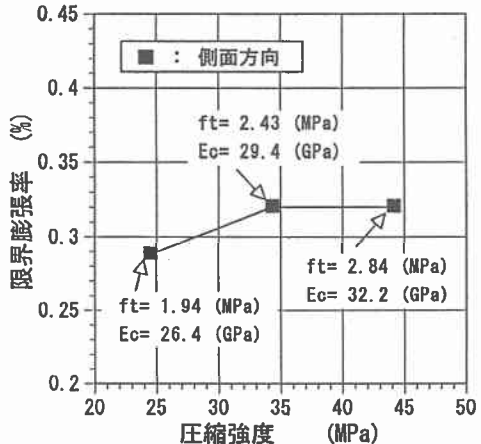


図7 A-Series 解析結果

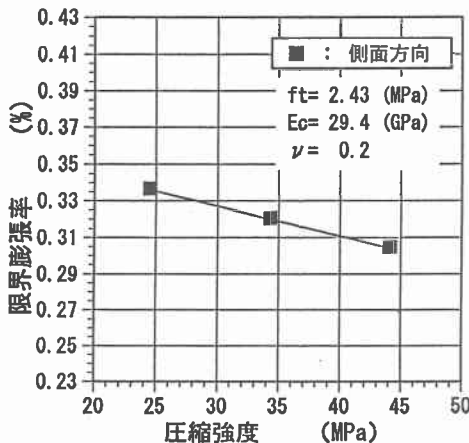


図8 B-Series 解析結果 (圧縮強度)

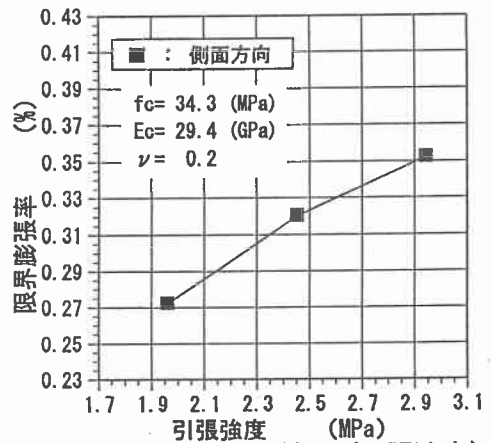


図9 B-Series 解析結果 (引張強度)

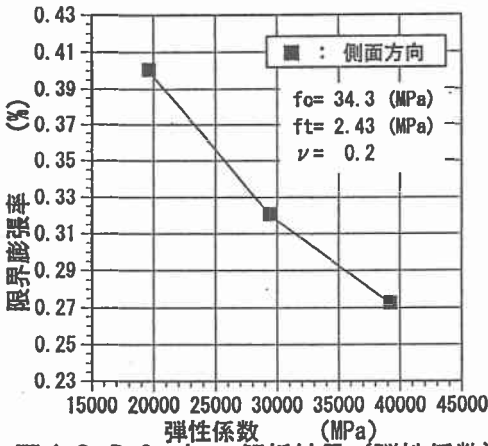


図10 B-Series 解析結果 (弾性係数)

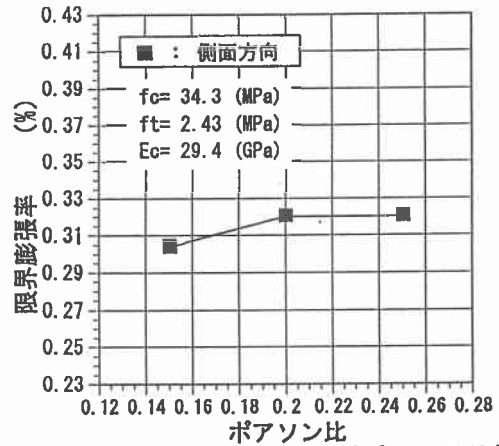


図11 B-Series 解析結果 (ポアソン比)

最後に、ポアソン比の影響はポアソン比67%増加に対し限界膨張率10%増加と小さいことが確認された (図11参照)。A-SeriesとB-Seriesの比較から、実際のコンクリートにおいては、コンクリート圧縮強度の変化に伴う引張強度の変化と弾性係数の変化とが与える限界膨張率への影響が互いに打ち消し合い、図7に示されているように圧縮強度の影響が小さくなると言えそうである。

4. まとめ

- 1) 本解析結果において、かぶり貫通ひび割れの発生方向は図4に示す4つの領域に分けて考えることができる。その限界膨張率は、ひび割れ貫通方向のかぶり厚さに依存し、領域I・IIでは特にその影響度は大きい。
- 2) コンクリートの圧縮強度がひび割れパターンに与える影響は小さい。引張強度と弾性係数が限界膨張率に与える影響が互いに打ち消し合い、コンクリートの圧縮強度の変化が限界膨張率に与える影響も小さいと言える。

<参考文献>

- 1) コンクリート標準示方書 (平成3年版) 設計編、土木学会、1991年9月。
- 2) 角本 周、梶川康男、川村満紀：コンクリート中の鉄筋腐食による膨張挙動の弾塑性解析とその適用性、土木学会論文集、第402号/V-10、pp. 151~159、1989年、2月。
- 3) 岡村 甫、前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版。
- 4) 名内慎助、佐藤靖彦、上田多門、角田與史雄：軸対称コンクリートスラブの有限要素解析、土木学会北海道支部論文報告集 第52号、平成8年2月。
- 5) 横関康祐、MISURA Sudhir、本橋賢一：腐食ひび割れ発生期間に関する解析的検討、土木学会第49回年次学術講演会、pp. 552~553、平成6年9月。
- 6) 角 徹三、山田 守：付着剥離作用を受けるコンクリートの応力解析、土木学会論文集第396号・V-9、pp. 159~168、1988年、8月。
- 7) Reinhardt, H., Cornelissen H. and Hordijk D. : Tensile Tests and Failure Analysis of Concrete, Journal of Structural Engineering, pp2462-2477, 1986.