

論文 鉄筋の腐食膨張によるかぶりひび割れ性状の解析的検討

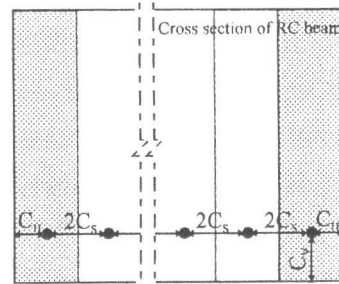
亀谷 英樹*¹・佐藤 靖彦*²・上田 多門*³・角田 與史雄*⁴

要旨: 本研究では、主鉄筋が複数一列に配置されたはり部材における鉄筋腐食によるかぶりコンクリートのひび割れの性状とその発生までに要する鉄筋膨張率について有限要素法を用いた解析的な検討を行った。その結果、かぶり厚さ及びあき長さの差異による腐食ひび割れの発生方向と限界膨張率との関係を明らかにした。

キーワード: かぶり、あき、腐食ひび割れ、限界膨張率、クリープ

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性において、鉄筋の腐食膨張によるかぶりコンクリートを貫通するひび割れ（以下、腐食ひび割れ）、剥離等の発生をその限界状態と捉える考え方が一般とされている。これらを制御・抑制するにはかぶりを厚く設計することとされているが、ひび割れがかぶりコンクリートを貫通する時の鉄筋の腐食とかぶり厚さとの関係は十分には明らかにされておらず、合理的な評価方法あるいは設計方法は見あたらない。また、現行のコンクリート標準示方書[1]においても、十分な検討がなされているとは言いがたい。既往の研究において、かぶりとあきの半分の短い方向にひび割れが発生すること、有限要素解析等の数値解析により、実験で観察されたひび割れパターンが概ね再現できることなどが明らかにされている。本研究では、かぶりおよびあきが変化した時、ひび割れがかぶりコンクリートを貫通するのに必要な腐食膨張によるコンクリート変形量を明らかにすることを目的とし、将来、設計式として取り入れる時に必要な情報を提示することを試みた。

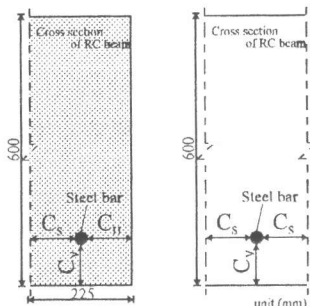


(a) はり部材断面図

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、矩形断面に直径の等しい主鉄筋が水平にかつ等間隔に複数配置されているはり部材である（図1(a)参照）。このはり部材を平面ひずみ状態と仮定し、その単位厚さ断面を抽出し有限要素法を適用する。本研究では、個々の鉄筋に着目し、鉄筋を取り囲むコンクリート断面形状の差異から、解析供試体を図1(b)、(c)に示す2つの断面に分類し、それぞれに対して腐食ひび割れ性状と鉄筋膨張率との関係を明らかにする。図1(b)に示す供試体は、断面隅角部分を対象としたものであり、図1(c)に示す供試体は、断面



(b) 隅角部供試体 (c) 内部供試体
図1 解析供試体断面図

内部を対象とした供試体である。実現象において鉄筋の腐食によるコンクリートのひび割れの発生、進展は、腐食生成物の体積膨張がコンクリートと鉄筋に力を与えることで生じるものである。本解析では、予備解析において鉄筋の変形量がコンクリートの変形量と比較して十

* 1 西松建設株式会社 関東支店 工修（正会員）
 * 2 北海道大学 助手 工学部土木工学科、工博（正会員）
 * 3 北海道大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）
 * 4 北海道大学 教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

分に小さいことが確認されたため、鉄筋要素と腐食生成物要素は設置せずコンクリート要素に直接強制変位を与えることで、コンクリートによる拘束下での鉄筋の腐食膨張を表現している。強制変位量と鉄筋周辺の応力状態を用いた弾性解析により、簡単に鉄筋と錆の変形量、腐食量等を計算することも可能であるが、本研究は、コンクリートの変形量を表す鉄筋膨張率とかぶり厚さとの関係に着目しているため、その事項については他の機会に検討する。腐食膨張の形状については、実際の腐食膨張の形状等についての研究報告が極めて少ないことから、本解析では鉄筋と同心円状に等方に腐食膨張が進行すると仮定した。また、一般に、鉄筋腐食問題は、数十年程度の長い期間を要するものであり、クリープの影響は無視することはできない。本研究では、線形クリープ則を用いた有限要素解析を行い、クリープ係数が解析結果に与える影響をも検討する。

表1 コンクリートの材料力学特性値

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

2.2 解析プログラム

本解析では、鉄筋コンクリートを対象とした2次元平面応力問題を対象とした非線形有限要素解析プログラム[2]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[3]に記載されている。

2.3 解析変数

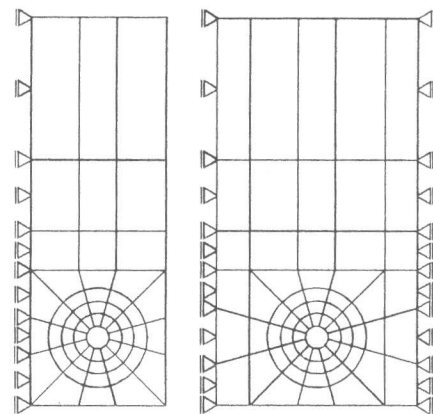
かぶりコンクリートのひび割れ発生、進展に影響を及ぼすと考えられる要因は、コンクリートおよび鉄筋の断面形状、寸法、かぶり等の幾何的要因と、コンクリート圧縮強度等の材料力学特性が考えられるが、コンクリートの材料力学特性がひび割れ性状と限界膨張率に与える影響は小さいことが既往の研究で明らかにされている[4]。そこで、本研究では、コンクリートの材料力学特性値を一定として(表1参照)、かぶり厚さとあき長さ等の幾何的変数を解析変数として解析を行う。なお、予備解析において解析供試体の高さの影響は無視できるほど小さいことが確認されたため、解析供試体の高さを600mmと全ての場合で一定とした。なお、2.1解析方法での説明のように、はり断面を供試体隅角部と内部に分けて考え、図2の要素分割図に示した様に解析供試体断面境界上には水平方向を拘束する境界条件を設けて解析を行った。

2.3.1 断面隅角部

はり断面の隅角部分を対象とした解析では鉄筋直径を25mm、断面底辺を225mmと固定し、側面かぶり、下面かぶり、あきを解析変数とした(図1(b)参照)。各かぶりとおきを全て100mmとした供試体(以下、隅角部基本供試体)を基本に各かぶり、あきを25mmピッチで薄くあるいは厚くなるように鉄筋配置位置を変化させた(図3(a)参照)。図3で黒丸は鉄筋配置位置(全31ケース)である。

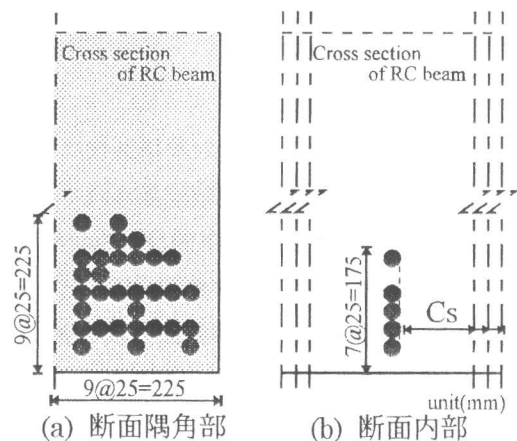
2.3.2 断面内部

はり断面内部をモデル化した供試体では、鉄筋直径を25mmと固定し、下面かぶりとおきを解析変数



(a) 断面隅角部 (b) 断面内部

図2 解析供試体要素分割図



(a) 断面隅角部 (b) 断面内部

図3 鉄筋配置位置

とした。あきと下面かぶりを 100mm とした供試体（以下、内部基本供試体）を基本に、断面隅角部と同様に下面かぶりを 25mm ピッチで薄くなるように鉄筋配置位置を変化させたものと下面かぶりを 150mm とした供試体のそれぞれについて、あき長さを 25,50,100,150,200,300,400mm と変化させた供試体（全 35 ケース）について解析を行った。

2.3.3 クリープ解析

コンクリート標準示方書[1]に記載されている線形クリープの適応範囲はコンクリート圧縮強度の約 40%以下とされている。本解析供試体で腐食ひび割れ発生時における全ての積分点での最大圧縮応力が上述の範囲内にあることが確認されたため、コンクリート標準示方書を参考にクリープ係数（ ϕ ）を 0.00,0.45,1.00,1.50 と 4 ケース設定し、コンクリート弾性係数を $1/(1+\phi)$ 倍に低減させ解析を行った。クリープ解析に用いた解析供試体は、上述の隅角部および内部基本解析供試体の 2 体とした。

2.4 膨張率の定義

本研究のような鉄筋腐食を問題としたコンクリート構造物の耐久性評価では、かぶりコンクリートを貫通する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。本研究でも、ひび割れがかぶりを貫通し、コンクリート表面に達した時（腐食ひび割れ発生時）の鉄筋膨張率とひび割れ発生方向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、鉄筋膨張率は下式で定義し、ひび割れがかぶりを貫通する時の膨張率を、特に限界膨張率と呼ぶこととした。

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

3. 腐食ひび割れ方向と限界膨張率の評価

3.1 断面隅角部

供試体断面隅角部を対象とした解析供試体の全てにおいて腐食膨張が小さ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が形成され、ひび割れは載荷点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、ひび割れは各供試体のかぶりの差異により異なった方向に非等方に進展していき、最終的にかぶりを貫通するひび割れの発生に至った。図 4 に各供試体における腐食ひび割れ発生方向を示す。図中において、丸印および二重丸印は鉄筋の配置位置を示し、矢印方向はその配置位置での外縁（下面あるいは側面方向）への腐食ひび割れ方向を表している。丸印は矢印方向に最初にひび割れが貫通したことを示し、二重丸印は外縁にひび割れが貫通する前

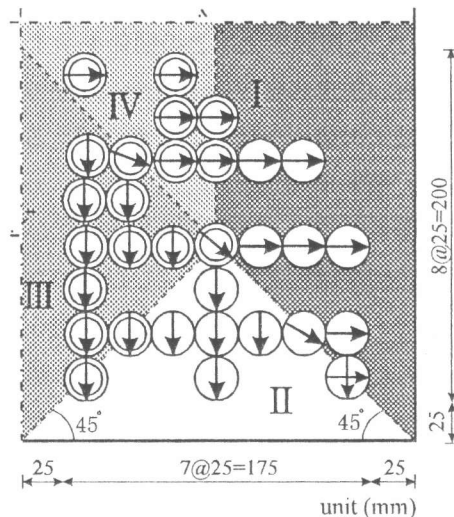


図 4 隅角部でのひび割れ方向

にあき方向にひび割れが貫通し、その後、矢印方向の外縁にひび割れが貫通したことを示している。各解析供試体のかぶりひび割れの貫通方向は、鉄筋の圆心位置が図 4 に示した 4 つの領域の何処に位置するかで決定され、その限界膨張率もこの領域別に整理することができる。

1) 領域 I

領域 I に鉄筋が位置する時、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。図 5 に領域 I に位置する鉄筋についての側面かぶりを鉄筋直径で正規化した C_H/D_s と限界膨張率との関係を示す。限界膨張率は側面かぶり厚さに支配され、側面かぶりが大きくなるにつれ、ほぼ直線的に限界膨張率は大きくなる。また、この領域での下面かぶりの厚さによる影響は見られなかった。

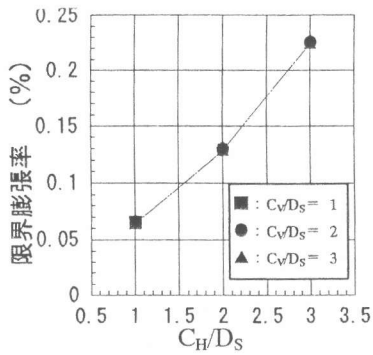


図5 限界膨張率と C_H/D_s の関係

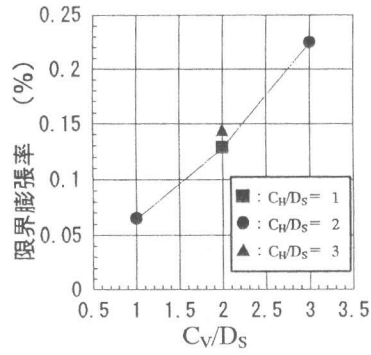


図6 限界膨張率と C_V/D_s の関係

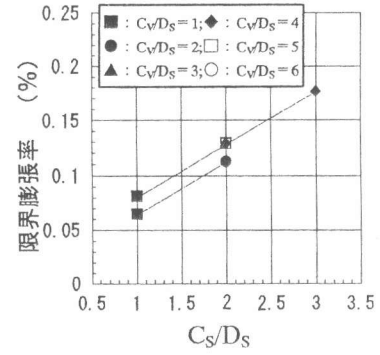


図7 限界膨張率と C_S/D_s の関係

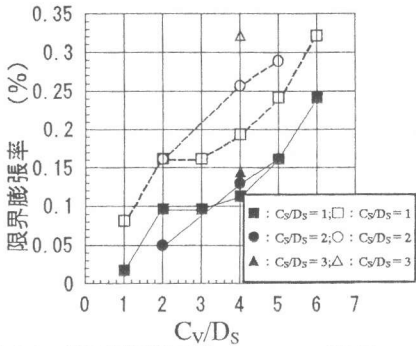


図8 限界膨張率と C_V/D_s の関係

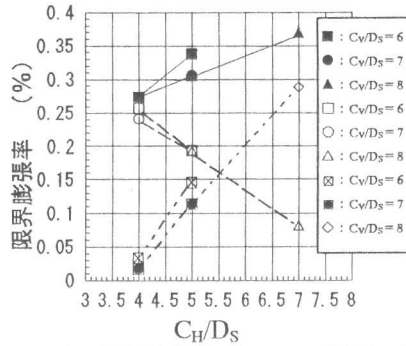


図9 限界膨張率と C_H/D_s の関係

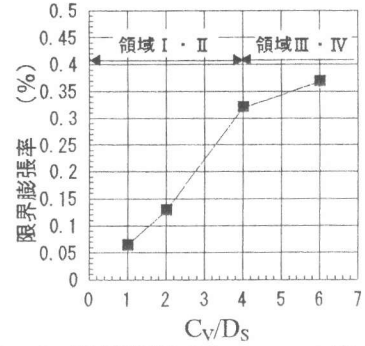


図10 限界膨張率と C_V/D_s の関係

2) 領域II

領域IIに鉄筋が配置されている場合、領域Iと同様にかぶりの最も薄い下面方向に腐食ひび割れが発生した。図6に領域Iと同様に領域IIに位置する鉄筋について、下面かぶりを鉄筋直径で正規化した C_V/D_s と限界膨張率との関係を示す。この領域においては側面かぶり厚さによる影響はないものと考えられ、限界膨張率は下面かぶりが厚い程大きくなり、両者の関係はほぼ線形である。また、その傾きは領域Iの値に一致していると言える。

3) 領域III

領域IIIでは、まず、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。図7は、あき方向にひび割れが貫通する時の膨張率と C_S/D_s との関係を示している。その関係は線形であり、膨張率の増加割合を図5及び図6と比較すると40%程度小さい。図8は、下面かぶりを貫通するに要した膨張率と C_V/D_s との関係である。図中で実線はあき方向にひび割れが貫通してから下面にひび割れが貫通するまでに要した膨張率と C_V/D_s との関係である。それらは、あき長さに関係なく概ね線形に分布しており、その増加割合は図5・6に示した領域I・IIのそれよりも40%程度小さい。また、同図中で、破線は腐食開始時点から、下面かぶりをひび割れが貫通するまでに要した膨張率と C_V/D_s との関係である。下面かぶりにひび割れが発生する膨張率は、あき方向にひび割れが貫通してから下面にひび割れが貫通するまでに要した膨張率(実線)に、あき方向にひび割れが貫通するまでに要した膨張率を加えることで表すことができる。

4) 領域IV

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。この領域でも、限界膨張率は C_V/D_s と C_H/D_s あるいは C_S/D_s で評価されると考えられる。図9に C_H/D_s と側面かぶりにひび割れが貫通する時の膨張率との関係を示す。図中で、破線はあき方向にひび割れが貫通するまでに要した膨張率と C_H/D_s との関係であり、 C_S/D_s と膨張率との関係で表すと、その増加割合は図7のそれに一致する。同図中で、一点鎖線は、あき方向にひび割れが貫通してから側面方向にひび割れが貫通するまでに要した膨張率と C_H/D_s との関係を示している。

び割れが貫通するまでに要した膨張率と C_H/D_S との関係であり、膨張率の増加割合は領域Ⅰ・Ⅱのそれとほぼ一致する。実線は、腐食開始時点から側面にひび割れが貫通するまでに要した膨張率と C_H/D_S との関係を示す。この関係は、側面とあき方向へひび割れが貫通するまでに要したそれぞれの膨張率の和で表され、その増加割合は領域Ⅰ・Ⅱのそれよりもあき方向にひび割れが貫通する膨張率分小さくなる。

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。その時の膨張率と C_V/D_S との関係を図10に示す。領域Ⅰと領域Ⅱ境界線から領域Ⅲと領域Ⅳの境界線への変わり目 ($C_V/D_S=4$) で、膨張率の変化は不連続になり、領域Ⅰと領域Ⅱ境界線上での膨張率の増加割合は領域Ⅲと領域Ⅳの境界線上での増加割合に比べ高いことが観察される。また、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し、膨張率も領域Ⅲでの傾向に一致する。

3.2 断面内部

断面内部を対象とした解析供試体でも断面隅角部と同様に膨張レベルが低い時はひび割れは等方に進展し、さらに膨張レベルが高くなるとかぶりとあきの長さ比により、あき方向と下面かぶり方向のどちらか一方方向にひび割れが進展し、あき、あるいは、下面かぶりを貫通するひび割れが発生する。あき方向にひび割れが先に貫通した場合、下面にひび割れは進展しなくなった。逆に、下面かぶりにひび割れが先に貫通する場合、あき方向にひび割れの進展が確認できた。

図11はあきを一定値とした時の、下面かぶりを鉄筋直径で正規化した C_V/D_S と限界膨張率との関係を示している。■印は下面方向へ貫通するひび割れを表し、●印はあき方向に貫通するひび割れを表している。ひび割れ方向が下面かぶり方向に貫通する場合、限界膨張率と C_V/D_S はほぼ線形関係と見なすことができ、その関係はあき長さの影響を受けないものと考えられる。一方、あき方向にひび割れが貫通する場合、各あき長さで一定の限界膨張率となり、その値はひび割れ方向が下面かぶりからあき方向に変化した時の値に一致すると言える。

図12は下面かぶりを一定値とした時、あきを鉄筋直径で正規化した C_S/D_S と限界膨張率との関係を示している。ひび割れがあき方向に貫通する場合、限界膨張率と C_S/D_S はほぼ線形関係と見なすことができ、その関係は下面かぶり厚さに影響されないことが明らかである。一方、下面方向に腐食ひび割れが発生する場合、あき長さの影響を受けず各下面かぶり厚さで概ね一定の限界膨張率となる。

以上から、本解析範囲内(あき長さ: $1D_S$ から $16D_S$ 、下面かぶり: $1D_S$ から $6D_S$)では、下面かぶりに腐食ひび割れが発生する場合、如何なるあき長さの供試体でも、限界膨張率は C_V/D_S を関数とした一つの線形関係により定義され、あきに腐食ひび割れが発生する場合、限界膨張率は C_S/D_S を関数とした一つの線形関係により定義できると言えそうである。これらの線形関係の成立する範囲は、腐食ひび

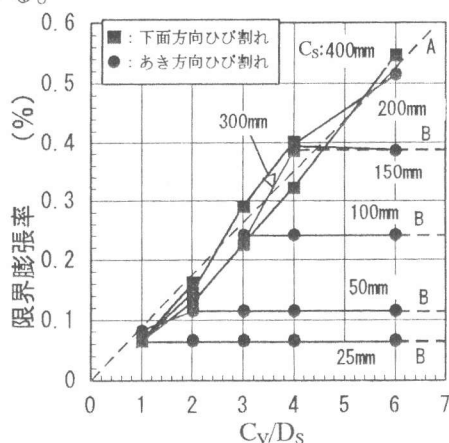


図11 限界膨張率と C_V/D_S 関係

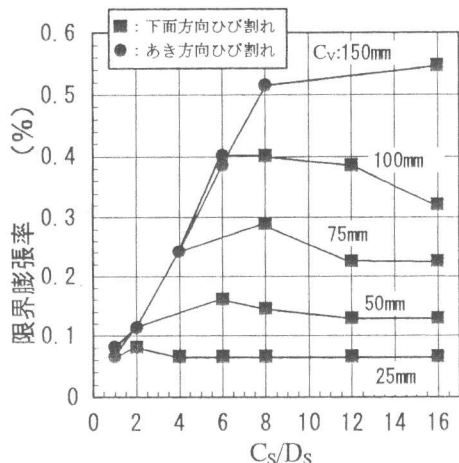


図12 限界膨張率と C_H/D_S 関係

割れのそれぞれの発生方向の遷移点までである。次に、各かぶりの遷移点について考える。図11で下面かぶ

表2 下面かぶりとあき長さ比 (C_v/C_s)

	50(mm)	100(mm)	150(mm)	200(mm)	平均値
C_v/C_s	0.597	0.640	0.683	0.683	0.651

り方向にひび割れが発生した全ての点について最小二乗法で線形補間した直線をAとする。また、図11であき方向にひび割れが発生した点を、各あき長さ別に限界膨張率の平均値を計算し下面かぶりによらず一定値とした直線をBとする。直線AとBの交点を算出することで、各あき長さ別の遷移点における下面かぶりとおきの比(以下、 C_v/C_s)を求めた結果を表2に示す。腐食ひび割れの遷移比は下面かぶりおよびあき長さに関わらずほぼ一定値と捉えることができる。

3.3 クリープを考慮した解析結果

クリープ係数を用いてコンクリートのクリープ変形を考慮した基本解析供試体において、そのひび割れ性状および腐食ひび割れ発生方向は、どのクリープ係数を用いた場合も、クリープを考慮しなかった解析供試体のそれにほぼ一致する結果が得られた。しかし、限界膨張率は各クリープ係数を用いた場合で差異が見られた。図13は、各クリープ係数に対する限界膨張率(R_{CR})をクリープ係数が $\phi=0.00$ の時の限界膨張率(R_0)で除したものとクリープ係数(ϕ)との関係を示している。

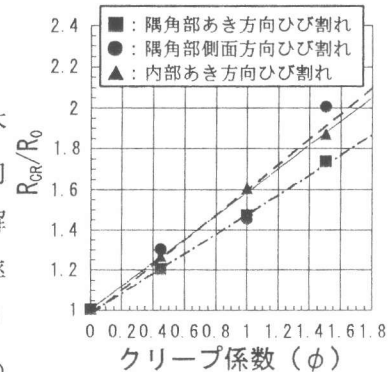


図13 クリープ係数と限界膨張率と関係

図13から、各供試体の各ひび割れ方向で、クリープ係数 ϕ が増加すると限界膨張率は線形に増加していることが分かる。また、隅角部基本供試体の側面方向と内部基本供試体のあき方向に対する膨張率の増加割合はほぼ一致している。それら2方向に比較して、断面隅角部基本供試体におけるあき方向に対する限界膨張率の増加割合はやや小さい。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- 1) 腐食ひび割れ発生方向は、断面隅角部では鉄筋図心が図4の4つの領域のどの位置に存在するかで決定され、断面内部では下面かぶり厚さとあき長さの比で決定されることが明らかとなった。
- 2) 限界膨張率は、鉄筋直径で正規化したかぶり厚さとあき長さにより、簡単な関数形により表すことができる。
- 3) コンクリートのクリープ変形を考慮した場合、クリープ係数と限界膨張率との関係には線形関係がある。ひび割れ性状はクリープを考慮しない場合と概ね一致する。

<参考文献>

- [1] コンクリート標準示方書(平成8年制定)設計編、土木学会、1991年9月。
- [2] 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。
- [3] 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。
- [4] 亀谷英樹、佐藤靖彦、上田多門、角田與史雄：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力学性状の影響、土木学会北海道支部論文報告集 第52号、平成8年2月。