

論文 大型供試体を用いた一軸拘束試験による収縮ひび割れに関する基礎的研究

稲津 貴和子*1・田村 隆弘*2・林 宏次朗*3

要旨: 大型供試体による一軸拘束試験を行い、収縮ひび割れに及ぼす鉄筋の影響について実験的に検証した。また、実験の再現解析により、ひび割れ指数を求め、現在提案されている鉄筋比とひび割れ指数の関係から表わされるひび割れ幅の算定式及び引張部材でのひび割れ幅算定式について検討した。実験からは、鉄筋によるひび割れ分散効果がみられ、鉄筋を用いた場合、ひび割れ幅が小さくなることが確認された。解析結果において、鉄筋の有無によるひび割れ指数の差はわずかであった。提案されている算定式より、最大ひび割れ幅を概ね評価することが出来た。

キーワード: 大型供試体, 一軸拘束試験, ひび割れ幅, ひび割れ指数, ひび割れ幅算定式, 補強鉄筋

1. はじめに

コンクリート構造物に発生するひび割れは、耐久性や美観の低下、漏水、劣化の要因になることから、ひび割れを抑制することが重要となっている。また近年では、鉄筋コンクリート構造物の長寿命化が重視されており、ひび割れ抑制に関する関心が高まりつつある。

マスコンクリートに発生するひび割れは、部材内外の温度差による表面ひび割れ（内部拘束ひび割れ）と、既設構造物により変形が拘束されることによって生じる貫通ひび割れ（外部拘束ひび割れ）に大分される。これらのひび割れは、セメントの水和反応の進行に伴う内部組織、物性値の変化、温度・湿度などの環境、拘束形態、拘束度などの影響を受けることから、その発生メカニズムは非常に複雑である。ひび割れの発生を防ぐことは技術的には可能であるが、実構造物で考えると、コストの面などから難しいといえる。そのため、対象構造物に要求される機能・性能によりある程度のひび割れを許容し、幅を制御することで耐久性を確保するという考え方がとられている。実用的なひび割れの抑制対策の一つとして、鉄筋によりひび割れを分散させ、各ひび割れ幅を制御する方法がある。著者らは、山口県のコンクリート工事のデータベース¹⁾より、実構造物において、鉄筋比が高いほど最大ひび割れ幅が小さくなる傾向があることを確認している²⁾。しかし、収縮ひび割れ幅は鉄筋量やひび割れ本数、ひび割れ間隔などにも影響することから、鉄筋によるひび割れ抑制効果については定量的に評価されるまでには至っていない。

建設現場では、ひび割れ幅を制限値以内に留めることが要求されており、ひび割れ幅やひび割れ間隔を容易に

求める算定式の確立が望まれている。本研究では、ひび割れ幅、ひび割れ間隔の予測式の誘導を最終目標とし、まず鉄筋と収縮ひび割れの関係について実験的に確認した。これまで多くの研究者によってひび割れに関する研究は行われており、JIS 原案「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法」³⁾に準拠した乾燥収縮、温度応力に関して部材を単純化した、一軸拘束試験体での鉄筋によるひび割れ分散効果は示されているが、これらは 1m 程度の供試体を用いたものである^{4,5,6)}。しかし、1m の供試体では実構造物におけるひび割れ間隔を検証することは困難である。そこで、従来の乾燥収縮試験とは異なる大型 (5m) の供試体による乾燥収縮試験を行うとともに、3次元有限要素法の温度応力解析による再現解析を行った。本稿では実験と解析、提案されているひび割れ幅の算定式から鉄筋量とひび割れ幅の関係について検討した。

2. 実験概要

2.1 実験条件

供試体条件を表-1に示す。両端を拘束した拘束収縮供試体を2体、両端を拘束しない自由収縮供試体を2体準備した。鉄筋による収縮ひび割れの分散効果を確認するため、拘束収縮供試体、自由収縮供試体ともに1体を無筋、もう1体には補強鉄筋としてD16を2本埋設し、計4パターンとした。

表-1 供試体条件

供試体番号	拘束	補強鉄筋		試験区間 (mm)
		種類(本数)	鉄筋比(%)	
4mRD00K	有	無筋	—	4,000
4mRD16-2K		D16(2)	1.0	4,000
2mRD00F	無	無筋	—	2,000
4mRD16-2F		D16(2)	1.0	4,000

*1 徳山工業高等専門学校 環境建設工学専攻 (正会員)

*2 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科 工博 (正会員)

*3 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科

2.2 使用材料及び配合

本実験では乾燥収縮によるひび割れを明瞭に表現するために、コンクリートよりも収縮量の大きいモルタルを使用した。配合を表-2、強度を表-3に示す。

2.3 供試体の形状・寸法

(1) 拘束収縮供試体

拘束収縮供試体は全長 5,000mm、高さ 200mm、幅 400mm で、補強鉄筋に異形鉄筋 D16 (SD295) を 2 本用いたものと無筋の 2 体である。拘束区間でのモルタル供試体の拘束鋼材への固定は、棒鋼 (M16 ネジ鉄筋) を両端に 2 本ずつ緊結し、さらに軸方向にアンカーボルト (M16) を両端に 4 本ずつ、棒鋼と交差させるように配置し、固定度を高めた (図-1(a)参照)。試験区間は断面 200mm×200mm、長さ 4,000mm である (図-1(b)参照)。試験区間の型枠底部には、供試体と鋼材の付着を防ぎ、また、変形時の摩擦を低減するために 0.1mm のテフロンシートを 2 重に敷いた。

(2) 自由収縮供試体

自由収縮供試体は、補強鉄筋に異形鉄筋 D16 (SD295) を用いたものと無筋の 2 体である。鉄筋を用いた供試体は、拘束収縮供試体の試験区間と同様で、全長 4,000mm、高さ 200mm、幅 200mm である。無筋の供試体は部材長さによらず、ひずみ量は一定と仮定し、全長は試験区間の 1/2 である 2,000mm、高さ 200mm、幅 200mm とした (図-1(c)参照)。2 体の供試体とも拘束収縮供試体と同様、型枠底部にテフロンシートを 2 重に敷いて下面での摩擦力を低減した。

2.4 実験方法

各供試体は打設後 3 日で脱枠し、扇風機による送風を行い、(JIS では 4 面乾燥とされているが³⁾) 3 面乾燥を開始した。設備の都合上、温度・湿度の管理を一定にすることが出来ないため、気温 22.1~39.1℃ (平均気温 27.8℃)、湿度 37.0~89.9% (平均湿度 73.3%) の環境下であった。収縮ひずみの測定は、脱枠時に供試体表面の上面及び側面に長さ 120mm のひずみゲージ、補強鉄筋には長さ 3mm のひずみゲージを図-1に示す位置に貼り付け、拘束鋼材の収縮ひずみは、ウェブ部分の長さ方向の中央、重心位置に貼り付けて、3 時間ごとに自動計測を行った。計測中の様子を写真-1に示す。発生したひび割れは、クラックスケール及び携帯式顕微鏡により測定した。

3. 実験結果

3.1 供試体のひずみの経時変化

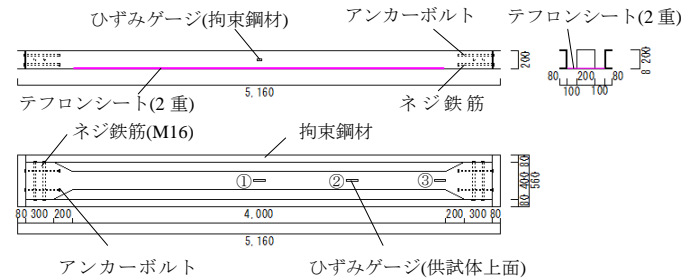
図-2に材齢 61 日目までの各供試体の乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。ここでのひずみは、図-1に示すひずみゲージ (供試体) の位置で測定した供試体上面

表-2 配合

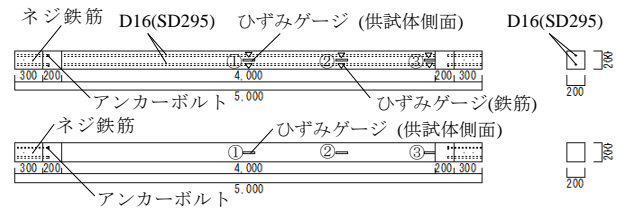
W/C (%)	単位量 (kg/m ³)		
	W	C	S
43	285	663	1037

表-3 強度試験結果

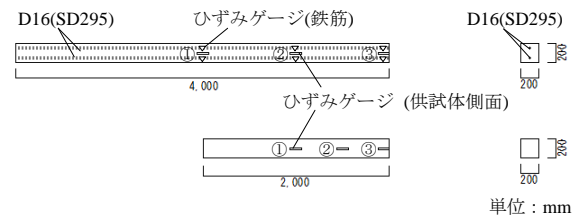
材齢 (day)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (KN/mm ²)
28	32.8	3.4	26.4



(a) 拘束鋼材の側面図及び平面図



(b) 拘束収縮供試体の側面図(4mRD00K, 4mRD16-2K)



(c) 自由収縮供試体(4mRD16-2F, 2mRD00F)

図-1 供試体の形状・寸法



写真-1 計測中の様子

及び側面のひずみを平均したもので、各断面位置でのひずみとした。拘束収縮供試体では、無筋の4mRD00Kの場合、鉄筋を用いた4mRD16-2Kに比べ、ひずみが断面②では約55%、断面③では約45%大きい。拘束収縮供試体の結果から分かるように、鉄筋を入れることで収縮が抑制されるため、無筋の場合より収縮量を低減すると考えられるが、自由収縮供試体では、鉄筋を用いた4mRD16-2Fのほうが、無筋の2mRD00Fより収縮ひずみが大きくなる結果となった。この原因として扇風機の位置の関係から、2mRD00Fにうまく送風出来ていなかったことなどが考えられる。また、今回はひずみ量は部材長さに影響を受けないと仮定し、自由収縮供試体無筋の場合を2mとしたが、部材長さについてもひずみ量に影響を与えた可能性がある。拘束収縮供試体では、4mRD16-2Kが材齢36日目に断面①のひずみゲージ内にひび割れが発生したため、その後の収縮ひずみ量は減少しているが、この点を除くと①、②、③のどの断面においてもひずみ量はほぼ一定である。それに対し、自由収縮供試体(2mRD00F)は、断面③のひずみが断面②、断面①に比べて大きく、4mRD16-2Fでは、供試体中央部から端部にいくにつれてひずみ量が大きくなる傾向がみられた。

3.2 ひび割れ発生状況

各供試体の材齢61日までに発生したひび割れの状況を図-3に示す。4mRD00Kでは、材齢17日目に1.3mmの貫通ひび割れが1本発生した。4mRD00Kに発生したひび割れはこの1本のみであったため、ひび割れ幅が大きくなっている。その後、材齢20日目に4mRD16-2Kに0.15mmのひび割れを1本、0.05mmのひび割れを2本確認した。0.15mmのひび割れは完全な貫通には至っていない。他の2本も、上面のみ、または上面及び一方の側面に発生しており、貫通はしていない。4mRD16-2Kはひび割れ発生本数は多いがその幅は小さく、貫通にまで至るものはなかった。自由収縮供試体(2mRD00F, 4mRD16-2F)についてはいずれの供試体においても各断面を横断するようなひび割れは確認されなかった。鉄筋の有無による最大ひび割れ幅を比較すると、無筋の4mRD00Kの最大ひび割れ幅は鉄筋を入れた4mRD16-2Kの約8.7倍であった。時間の経過とともに各供試体とも、表面に0.05mm以下の微細なひび割れ(図-3 ①~⑳)が4mRD16-2Fに2本、4mRD16-2Kに20本、4mRD00Kに5本発生しており、今後進展する可能性があるが、機能性・耐久性に影響は少ないと考える。この微細なひび割れの発生本数は4mRD00Kに比べ4mRD16-2Kのほうが圧倒的に多い。しかし、この微細なひび割れ幅を含めても、4mRD16-2Kの合計ひび割れ幅は0.7mm程度であり、4mRD00Kより小さい。

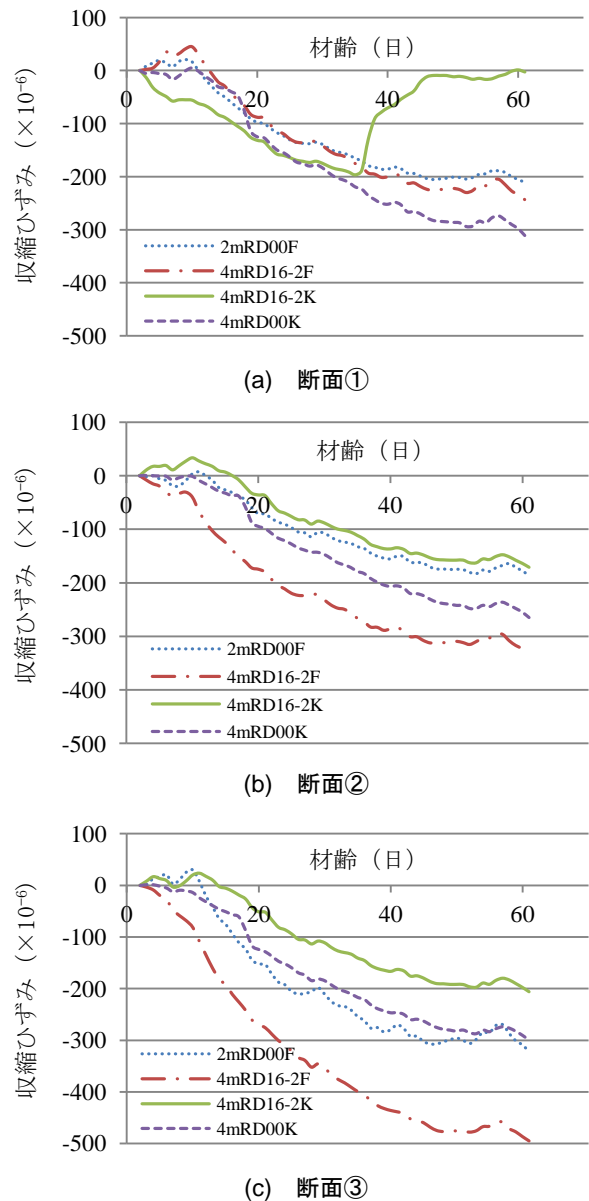


図-2 各供試体の乾燥収縮ひずみの経時変化

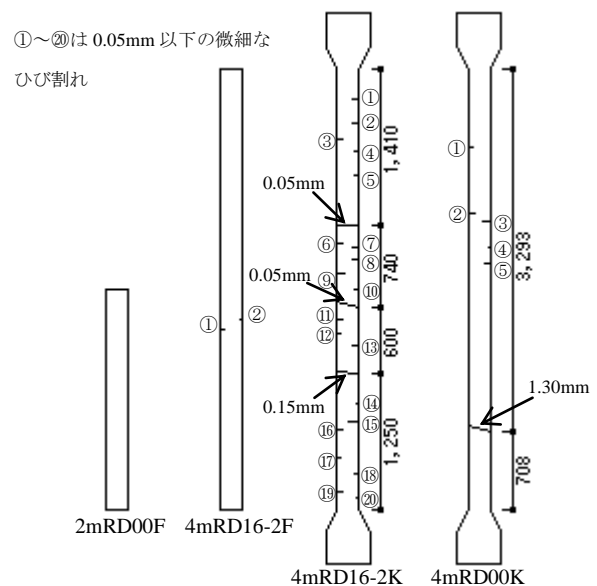


図-3 ひび割れ発生箇所

3.3 ひび割れ発生時の収縮応力

ひび割れ発生前の拘束鋼材のひずみからひび割れ発生直前のモルタルの換算応力度 (σ_c) を式(1)により算定した。結果を表-4に示す。

$$\sigma_c = \varepsilon_s \times E_s \times A_s / A_c \quad (1)$$

ε_s : ひび割れ発生までの拘束鋼材のひずみ

E_s : 拘束鋼材の弾性係数 (N/mm²)

A_s : 拘束鋼材の断面積 (mm²)

A_c : 供試体の破断面の断面積 (mm²)

4mRD00K では収縮応力が割裂試験による引張強度 (材齢 28 日時点) の 95%, 4mRD16-2K では 85%に達した時点でひび割れが発生した。

4. 温度応力解析による実験の再現解析

4.1 解析概要

コンクリート構造物の温度応力ひび割れ解析ソフト「ASTEAMACS」を用いて、本実験の拘束収縮供試体における鉄筋の有無によるひび割れ指数及びひび割れ幅の違いを検証する。解析モデルは、一軸部材を 400 の要素に分割、鉄筋は線要素でモデル化し、その間の付着は完全付着状態とした。また、ひび割れは試験区間 4000mm の間に 1000mm 間隔で 3 か所にバネ要素であるボンドリンク要素を設定し、表現する。その際のひび割れ幅は、ボンドリンク要素のひずみから算出される。図-4 に解析モデルの例を示す。赤線はモルタル供試体、青線は拘束鋼材である。気温はモルタル打込み時の外気温とし、モルタルの強度特性は、実験から得られた値とした。その他のモルタルと拘束鋼材の物性値を表-5に示す。これらの値は材齢とともに変化する非線形である。なお、本解析ではクリープは考慮しない。

4.2 ひび割れ指数の解析結果

解析によって得られたひび割れ指数の履歴を図-5に示す。凡例にある 1~5 の数字は図-4 の 1~5 の位置と対応しており、試験区間 4000mm の間に 1000mm 間隔で 5 か所の位置での部材断面中央部のひび割れ指数である。実験におけるひび割れが発生した材齢時のひび割れ指数を表-6に示す。実験において、4mRD00K は材齢 17 日でひび割れが発生し、解析によって得られたその時点でのひび割れ指数は 0.52 であった。この時点での 4mRD16-2K にはひび割れは生じていないが、ひび割れ指数は 4mRD00K と同様である。材齢 20 日での 4mRD00K , 4mRD16-2K のひび割れ指数も差はない。つまり、ひび割れ幅は鉄筋の有無による影響を受けるが、ひび割れが発生する確率は鉄筋の影響をほとんど受けないといえる。実験において、2 つの供試体のひび割れ発生材齢にあまり差がないのもひび割れ指数に差がないことと同一の理由と考えられる。

表-4 換算応力度

	換算応力度 σ_c (N/mm ²)	引張強度 f_t (N/mm ²)	σ_c / f_t
4mRD00K	3.17	3.40	0.93
4mRD16-2K	2.89		0.85

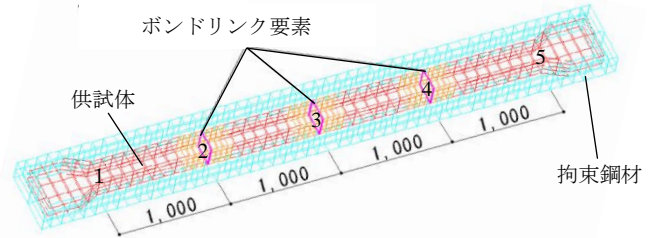


図-4 解析モデルのメッシュ分割

表-5 物性値

物性値	モルタル	拘束鋼材
熱伝導率	2.7W / m°C	51.3W / m°C
密度	2400kg / m ³	7850kg / m ³
比熱	1.2kj / kg°C	0.47kj / kg°C
断熱温度上昇量	JSCE固定値	-
初期温度	35°C	30°C
ヤング率	26.4GPa (実験値)	200GPa
圧縮強度	32.8N/mm ² (実験値)	400N / mm ²
引張強度	3.4N/mm ² (実験値)	400N / mm ²
ポアソン比	0.16	0.3
線膨張係数	10 μ / °C	12 μ / °C
乾燥収縮	JSCE実験式 ⁷⁾	-
自己収縮	JCI実験式 ⁷⁾	-
膨張ひずみ	Q(t)=Q _∞ (1-e ^{-t})	-

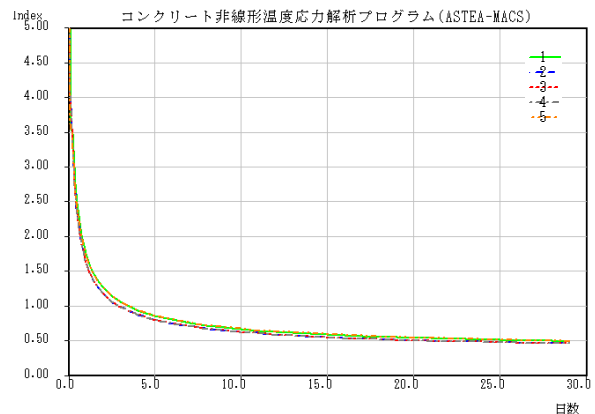


図-5 ひび割れ指数履歴 (4mRD16-2K)

表-6 ひび割れ指数

供試体番号	ひび割れ発生材令における最小ひび割れ指数	
	17日	20日
4mRD00K	0.52	0.50
4mRD16-2K	0.52	0.50

表-7 平均ひび割れ幅, 最大ひび割れ幅の比較

供試体番号	実験値		温度応力解析結果		万木らの式				丸山らの式			
	W'_{ave} (mm)	W'_{max} (mm)	W_{amax} (mm)	W_{amax}/W'_{max}	W_{ave} (mm)	W_{ave}/W'_{ave}	W_{max} (mm)	W_{max}/W'_{max}	W_{ave} (mm)	W_{ave}/W'_{ave}	W_{max} (mm)	W_{max}/W'_{max}
4mRD00K	1.30	1.30	0.72	0.55	0.24	0.19	0.36	0.28	—	—	—	—
4mRD16-2K	0.08	0.15	0.23	1.53	0.13	1.63	0.20	1.33	0.07	0.89	0.12	0.80

表-8 引張部材でのひび割れ幅算定式におけるひび割れ間隔と最大ひび割れ幅の比較

供試体番号	l'_{ave} (mm)	l'_{max} (mm)	l_{max} (mm)	l_{max}/l'_{ave}	l_{max}/l'_{max}	W'_{max} (mm)	W_{max} (mm)	W_{max}/W'_{max}
4mRD00K	—	—	—	—	—	1.30	1.29	0.99
4mRD16-2K	1,000	1,410	237	0.24	0.17	0.15	0.14	0.93

W'_{ave} : 平均ひび割れ幅(実験値) W_{ave} : 平均ひび割れ幅(理論値) W'_{max} : 最大ひび割れ幅(実験値) W_{max} : 最大ひび割れ幅(理論値)
 W_{amax} : 最大ひび割れ幅(解析値) l'_{ave} : 平均ひび割れ間隔(実験値) l'_{max} : 最大ひび割れ間隔(実験値) l_{max} : 最大ひび割れ間隔(理論値)

4.3 ひび割れ幅の解析結果と実験値の比較

解析によって得られた最大ひび割れ幅と実験値を比較した結果を表-7に示す。無筋(4mRD16-2K)の場合は約50%過小評価, 有筋(4mRD16-2K)の場合では約50%過大評価となった。

5. ひび割れ指数と鉄筋比の関係によるひび割れ幅算定式の検討

ひび割れ指数と鉄筋比の関係から, ひび割れ幅を求める式が提案されている。そこで, 4. の解析によって得られたひび割れ指数を用いて, これらの式により平均ひび割れ幅及び最大ひび割れ幅を算定し, 実験による実測値と式から得られた理論値を比較検討する。なお, ここでのひび割れ指数は, 実験においてひび割れが発生した材齢時における最小ひび割れ指数である(表-6参照)。

5.1 万木らの式⁸⁾

万木らの提案により, 平均ひび割れ幅は式(2)で与えられる。

$$W_{av} = 0.337 - 0.18F_s - 0.114p \quad (2)$$

F_s : 温度ひび割れ指数 p : 鉄筋比(%)

ACIでは, 平均ひび割れ幅の1.5倍を最大ひび割れ幅としているため, 式(2)で得た値を1.5倍し, 理論上の最大ひび割れ幅とした。

5.2 丸山らの式⁹⁾

丸山らの提案により, 最大ひび割れ幅は式(3)で与えられる。

$$W_c = (-0.071/p) \times (I_{cr} - 2.04) \quad (3)$$

p : 鉄筋比 I_{cr} : 最小ひび割れ指数

そのため, この式により得られた最大ひび割れ幅を1.5で除した値を理論上の平均ひび割れ幅とした。

5.3 実験値と理論値の比較

万木らの式及び丸山らの式により算定したひび割れ幅と実験値を比較した結果を表-7に示す。無筋

(4mRD00K)の場合, ひび割れは1本であるが, 有筋(4mRD16-2K)の場合, 供試体上面に横断して発生した3本のひび割れを対象として, 平均ひび割れ幅としている。万木らの式では, 有筋(4mRD16-2K)の場合, 平均ひび割れ幅は約60%, 最大ひび割れ幅は約30%過大評価となっている。しかし, 最大ひび割れ幅については, 本実験においてひび割れ幅の計測の際にも誤差が含まれている可能性がある。一方, 無筋(4mRD00K)の場合, 平均ひび割れ幅, 最大ひび割れ幅ともに過小評価となっている。今回, 式(2)の鉄筋比の項を0として算定したが, この式の対象は鉄筋コンクリート構造物であり, 無筋構造物を考慮していないためと考えられる。また, 丸山らの式も同様に, 無筋構造物を考慮していないため, 有筋(4mRD16-2K)の場合のみ比較したところ, 平均ひび割れ幅は概ね評価出来ているものの, 最大ひび割れ幅は約20%過小評価されている。この式は, 壁状構造物を対象に誘導しており, 本実験の供試体の形状と異なるため, このような結果になったと考えられる。

6. 引張部材のひび割れ幅算定式の検討

6.1 無筋の場合

単位当たりの変位量は式(4)で算定する¹⁰⁾。

$$\Delta L (= W_{max}) = \varepsilon \times L \quad (4)$$

ε : ひずみ L : 元の長さ

両端が完全に固定された無筋のコンクリート部材の場合, この変位量(ΔL)が最大ひび割れ幅に相当する。そのため, 4mRD00Kの最大ひび割れ幅は式(4)で算定し, 実験値と比較した結果を表-8に示す。ひび割れ発生時と, ひび割れの定常状態に入った段階でのひび割れ幅に変化がなかったことから, ここでのひずみは, ひび割れ定常時でのモルタルのひずみとする。理論値は実験値に近似しており, $W_{max}/W'_{max} = 0.99$ で適正に評価出来ている。

6.2 有筋の場合

引張力が作用する鉄筋コンクリート部材における最大ひび割れ間隔は式(5)、最大ひび割れ幅は式(6)によって与えられる¹¹⁾。

$$l_{max} = C_1 \cdot \phi \cdot f_t / (p \cdot \tau_{max}) \quad (5)$$

$$W_{max} = (l_{max} / E_s) \cdot [\sigma_{smax} \pm (C_2 \cdot f_t / p)] \quad (6)$$

l_{max} : 最大ひび割れ間隔 ϕ : 鉄筋の直径 p : 鉄筋比

f_t : コンクリートの引張強度

τ_{max} : 鉄筋の最大付着応力度

E_s : 鉄筋の弾性係数 ($E_s=200\text{GPa}$)

σ_{smax} : 鉄筋の最大応力度

C_1 C_2 : Brice の理論による付着分布係数

$4C_1 = 0.500$ $C_2 = 0.500$

式(6)は、細長い鉄筋コンクリート部材において、両端から鉄筋を引っ張ることで発生する付着応力に起因するひび割れ幅とひび割れ間隔の関係から導いたものである。この式は、引張力により部材全体が元の長さより伸びることを仮定しているが、本実験では、供試体が収縮することで引張力が生じ、部材は元の長さより縮んでいる。そのため、式(6)の土の項をプラスとして 4mRD16-2K の最大ひび割れ幅を算定した。しかし、この式は、鉄筋とコンクリートが同様に変形している状態に対して与えられているが、本実験ではモルタルの収縮ひずみが鉄筋に伝達されている状態であるため、鉄筋ひずみから得られる応力度より、実際にモルタルに発生している応力度の方が大きく、実験で得られる(鉄筋やモルタルの)ひずみから付着応力を求めることは困難である。そのため、ここでは鉄筋の付着応力度を $\tau_{max} = 0.28f'_{ck}{}^{2/3}$ により求めた。また、 σ_{smax} は、定常ひび割れ状態に入った時点における 2 本の補強鉄筋のひずみの最大値より求めた。ここで、 l'_{max} は、試験区間 4,000mm での最大ひび割れ間隔(実験値)、 l'_{ave} は、試験区間 4,000mm でのひび割れ間隔(実験値)の平均を示している。

算定式により得られた最大ひび割れ間隔、最大ひび割れ幅と実験値を比較し、表-8 に示す。式(5)によって得た最大ひび割れ間隔は 237mm で、実験値と比較すると、 $l_{max}/l'_{max}=0.17$ で過小評価となっている。しかし、乾燥により生じた微細なひび割れ(図-3 参照)を含めた平均ひび割れ間隔は 250mm であり、式(5)で得た最大ひび割れ間隔と近い値となっている。最大ひび割れ幅については、 $W_{max}/W'_{max}=0.93$ となり、概ね適正に評価出来ている。

7. まとめ

本研究では、大型供試体による一軸拘束試験及び温度応力解析を行い、鉄筋が収縮ひび割れに与える影響について検証した。そして、これまでに提案されているひび

割れ幅の算定式について検討した。結論を以下に示す。

- 1) 一軸拘束試験より、拘束収縮供試体では鉄筋を用いた場合に比べ、ひび割れ本数は多いが、1 本当たりのひび割れ幅が小さくなった。
- 2) 鉄筋を用いることでひずみ量を低減し、ひび割れを抑制する効果が確認された。
- 3) 温度応力解析において、鉄筋の有無によるひび割れ指数の差はなかった。
- 4) 引張部材の最大ひび割れ間隔の算定式では、微細なひび割れも含めた平均ひび割れ間隔と近い値となった。
- 5) 最大ひび割れ幅の算定式により、実験における最大ひび割れ幅を概ね評価することが出来た。

本実験においても、鉄筋によるひび割れ抑制効果を表現することが出来た。しかし、正確なひび割れ幅予測を確立するためには、今後、コンクリート強度や鉄筋量の影響、部材長さによるひずみ量の違い及び詳細な温度等の影響を明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 山口県建設技術センター：
<http://www.yama-ctc.or.jp/data/index.html>
- 2) 稲津貴和子，田村隆弘，澤村修司：山口県のコンクリート工事に関するデータベースを用いたひび割れ幅に関する統計的研究，コンクリート工学年次論文集，pp.1337-1342，2011
- 3) 日本コンクリート工学協会：JCI 規格集，2004
- 4) 大岡督尚，山本俊彦：乾燥収縮時における鉄筋のひび割れ幅抑制効果に関する実験的研究，コンクリート年次論文報告集，pp.145-150，1990
- 5) 中川隆夫，大野義照，山本純大，鈴木計夫：コンクリートの収縮ひび割れ性状に及ぼす初期養生，単位水量，鉄筋量の影響，コンクリート工学年次論文報告集，pp.745-750，1997
- 6) 劉 勇，大野義照，中川隆夫，林田都芳：コンクリートの収縮ひび割れ幅に及ぼす鉄筋量の影響，pp.751-756，2001
- 7) 土木学会：コンクリートの標準示方書[設計編]，2007
- 8) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力研究委員会 報告書，1992.9
- 9) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，2008.11
- 10) 吉川弘道：鉄筋コンクリートの解析と設計 限界状態設計法と性能設計法，丸善株式会社，2004
- 11) 岡田清，伊達和幸，不破昭，平澤征夫：[新訂]鉄筋コンクリート工学，鹿島出版会，2003