# 論文 持続載荷を受けた遠心成形コンクリート柱のひび割れ特性の評価

鈴木 祥太\*1·伊藤 始\*2·工藤 尚孝\*3·竹中 寬\*4

要旨: 遠心成形されたコンクリートのひび割れ幅を予測することは、コンクリート柱およびヒューム管など の二次製品を点検・維持管理するために重要である。本研究では、遠心成形コンクリート試験体を用いて、 両引き引張試験、乾燥収縮試験、クリープ試験の3つの要素試験に加え、実製品であるコンクリート柱の持 続曲げ試験を行い、遠心成形コンクリートにおけるひび割れ間隔、収縮ひずみ、クリープひずみ、およびひ び割れ幅の算定式について検討を行った。その結果、実環境(屋外)におけるひび割れ間隔とクリープひず みに適応可能な算定式の構築と、ひび割れ幅の時間経過に伴う進展の傾向を捉えることができた。 キーワード:遠心成形、ひび割れ幅、ひび割れ間隔、乾燥収縮、クリープ

#### 1. はじめに

円筒形の形状を有するコンクリート柱およびヒュー ム管は、遠心成形により製造されることが多い。遠心成 形されたコンクリート(以下,遠心成形コンクリートと 記す)は、その製造過程で脱水・脱気効果があるため、 通常の現場打ちコンクリート(振動成形)に比べ、高強 度になること、骨材が外側に充填され、表面が緻密にな ることが知られている。遠心成形コンクリートの二次製 品がその性能を長期間保持し、安全に使用されるために は、そのコンクリートの長期的なひび割れ挙動を把握す ることが重要である。

通常のコンクリートでは、持続載荷を受けた時のひび 割れ幅の進展に関する研究が行われ、その算定式が構築 されている。一般的に曲げひび割れ幅は、ひび割れ間隔 に引張側の鉄筋ひずみとコンクリートの収縮ひずみの 差を乗ずることで算定できる。これらへの影響要因が荷 重に加え、収縮やクリープ、付着クリープであることが 確認されている。李ら<sup>11</sup>は鉄筋コンクリート(RC)部材 の長期曲げひび割れ幅を算定すべく、クリープや付着、 収縮の影響を考慮して算定式を構築している。しかしな がら、著者らが研究対象とした遠心成形コンクリートの 持続荷重下のひび割れ挙動について研究された事例は 少なく<sup>2)</sup>、その解明が求められている。

本研究では、遠心成形されたコンクリートにおけるひ び割れ幅進展式の構築を目的とし、両引き引張試験、乾 燥収縮試験、クリープ試験の3つの要素試験と実製品の コンクリート柱を用いた長期持続荷重による曲げ試験 (以降、実大試験と記す)を行い、それぞれの特性を検 討した。本論文は既発表の論文<sup>3)-6)</sup>やその論文に試験ケ ースやデータを追加し、その結果について評価したもの である。

#### 2. 研究フローと試験方法

### 2.1 研究フロー

遠心成形コンクリートにおけるひび割れ幅の算定式 は、図-1のようなフローで構築した。遠心成形によっ て製作した試験体を用いて、両引き引張試験、乾燥収縮 試験、クリープ試験の3つの要素試験を実施した。それ ぞれの要素試験では、ひび割れ間隔L、収縮ひずみε'sh、 およびクリープひずみε'ccの各特性を把握するとともに、 試験結果と土木学会コンクリート標準示方書2012年版 の式(土木学会式)の比較で普通コンクリートとの差異 や傾向について検討した。その結果を基に土木学会式を 遠心成形コンクリート用の算定式にそれぞれ修正した。 次に、実大試験の結果に基づき、各算定式の検証と修正 を行った。以上の検討からひび割れ幅の算定式として整 理し、実大試験のひび割れ幅と比較することで適用性を 検討した。

#### 2.2 両引き引張試験

ひび割れ間隔の算定式構築を目的に行った両引き引 張試験の試験方法の概要を示す<sup>3)</sup>。試験ケースは①鋼材 種類, ②コンクリート強度, ③芯かぶり, ④乾燥の度合 い, ⑤鋼材のゲージ貼付の有無をパラメータとする6ケ ースとした。試験体は遠心成形により円筒状に製作した



\*1 富山県立大学大学院 工学研究科 環境工学専攻 (正会員) \*2 富山県立大学 工学部 環境工学科 准教授 博(工) (正会員) \*3 東京電力(株) 技術開発センター 配電技術グループ \*4 東洋建設(株) 美浦研究所 主任研究員 博(工) (正会員)

後, 最高温度 70℃の蒸気養生を行い, 所定の寸法に切断 し製作した。試験は図-2のように、長さ600mm、断面 寸法を 42×48mm と 63×72mm とした 2 種類の試験体に 対して両側の鋼材に荷重を作用させることで行い、ロー ドセルと変位計、パイ型変位計を取り付け、荷重と両端 の変位、ひび割れ幅を測定した。

# 2.3 乾燥収縮試験

収縮ひずみの算定式構築を目的に行った乾燥収縮試 験の試験方法の概要を示す<sup>4),5)</sup>。試験は暴露環境を恒温 恒湿室(相対湿度 RH: 45% 60%)と屋外(降雨や日射 の有無)の2環境で実施した。試験ケースは①成形方法, ②養生方法,③鋼材種類,④乾燥面(体積表面積比:V/S) とし、同条件を含む全18ケースをパラメータとした。遠 心成形の試験体は,外径 200mm,高さ 300mm,厚さ 40mm と 53mm で両引き引張試験と同様に遠心成形と養生を行 い製作した。振動成形の試験体は、角柱として同配合で 製作した。材齢2日からそれぞれの環境下で乾燥を開始 し、「JIS A 1129-2 モルタル及びコンクリートの長さ変 化試験(コンタクトゲージ方法)」に準拠し測定を行った。 2.4 クリープ試験

クリープひずみとクリープ係数の算定式構築を目的 に行ったクリープ試験の試験方法の概要を示す<sup>4)</sup>。試験 ケースは①成形方法,②載荷材齢,③載荷応力をパラメ ータとする7ケースとした。試験体は乾燥収縮試験の厚 さ40mmのものと同様にして製作し、その後、恒温恒湿 室(20℃, RH60%)で静置した。設計基準強度に対する 応力度の比で 0.15 および 0.30 に相当する荷重を作用さ せ,ひずみゲージでコンクリートひずみを測定した。

#### 2.5 実大試験

実大試験はコンクリート柱の実製品を用いて、持続曲 げ荷重を作用させたものである<sup>の</sup>。試験ケースごとに1 本,計4本の材齢に対する載荷荷重の一覧を表-1に示 す。No.1 と No.2, No.4 は初期にひび割れを導入し,持 続載荷によるひび割れ進展を確認したケースである。 No.3 は初期にひび割れを導入せず、持続載荷でのひび割 れ発生を期待したケースである。No.1~3 は、ひび割れ 幅の進展状況に応じて段階的に荷重を増加した。最終の 荷重はすべてで 3.92kN とした。また、荷重を作用した試 験柱から温度変化や乾燥収縮に起因したひずみを補正 (除去) するため、載荷を行っていない管理用コンクリ ート柱(管理柱)として, No.5, No.6 を設置した。

試験体は遠心成形締固めにより製作し、成形後に最高 温度 70℃の蒸気養生を行った。次に図-3のようにコン クリート柱の底部を地中に 2,400mm 埋め込み, 鉛直に 設置した。試験体寸法は地際部から高さ11,000mm,地 際部の断面で外径 345mm, 厚さが 42mm とした。材齢 28日(一部29日)に、コンクリート柱頂部に作用する



図-2 両引き引張試験体の概要図

# 表-1 実大試験ケースの材齢ごとの載荷荷重

ケース No.	載荷荷重(kN)				
	初期	持続①	持続②	持続③	持続④
	[0]	[0-189]	[189-335]	[335-363]	[363-686]
1	4.90	1.96	_	2.94	3.92
2	4.90	0.98	3.63	-	3.92
3	1.96	1.96	_	2.94	3.92
4	3.92	3.92 [0-323]			
5	管理用コンクリート柱(ケース1, 2, 3用) 載荷なし				
6	管理用コンクリート柱(ケース4用) 載荷なし				

※材齢28.29日から載荷開始 []内:載荷開始からの日数(日)



荷重を徐々に増加させ(初期載荷),所定の荷重に達した 時点で荷重を保持した(持続載荷)。なお, No.1, No.2 で は、初期載荷終了後(ひび割れ導入後)に荷重を除荷し、 持続載荷を行った。各載荷時において、ゲージによるコ ンクリートひずみ、鉄筋ひずみの測定、クラックスケー ルやルーペ, 亀裂変位計によるひび割れ幅の測定, メジ ャーによるひび割れ間隔の測定などを適宜行った。

# 3. 各項の算定式の提案

#### 3.1 ひび割れ間隔

(1) 要素試験の結果

ケース名を以下のように定め試験結果を図-4 に示す。 A – NTW – N – GA



同図には土木学会式に準拠し、式(1)で後述される鋼材表 面形状の係数k1を1.3(普通丸鋼)とした計算値を併記し た<sup>7)</sup>。A-NTW-N-RD と A-NTW-H を除くケースのひび割 れ間隔は、ほぼ計算値の直線上に位置していることが確認できる。丸鋼相当( $k_1$ =1.3)とした計算値と試験値がおおむね一致した要因は、特殊鋼材の表面には節形状があるものの、凹凸が小さく付着性状が丸鋼に近いことが考えられた。

#### (2) 要素試験からの推定式の提案

試験結果から遠心成形コンクリートのひび割れ間隔 の算定式は、土木学会式を引用し、鋼材表面形状に関す る係数を1.3とし、平均ひび割れ間隔(*L<sub>av</sub>*)の算定式と して以下のように修正した。なお、特記がない係数は、 土木学会式の値を用いることとする。

 $L_{av} = k_1 k_2 k_3 \left( 4.0c + 0.7(c_s - \varphi) \right) \tag{1}$ 

ここに、 $k_1$ :鋼材表面形状に関する係数(遠心成形コン クリート:1.3)、 $k_2$ :コンクリート品質に関する係数、  $k_3$ :引張鋼材の段数に関する係数、c:かぶり(mm)、 $c_s$ : 鋼材の中心間隔(mm)、 $\varphi$ :鋼材径(mm)

# (3) 実大試験による推定式の評価

実大試験におけるひび割れ間隔の最大値と平均値の 関係を図-5に示す。同図に式(1)を用いて計算した計算 値を併記するが、すべてのケースで計算値の 120mm と ほぼ一致する結果であり、算定式の信頼性が確認できた。

土木学会式では、最大ひび割れ間隔L<sub>max</sub>に引張側の鉄 筋ひずみと収縮ひずみの差を乗じて、最大ひび割れ幅 W<sub>max</sub>を算出する。式(1)は平均ひび割れ間隔L<sub>av</sub>を導くも のであるため、W<sub>max</sub>を求めるにはL<sub>av</sub>をL<sub>max</sub>に変換する 必要がある。本検討ではひび割れ幅の照査で用いる最大 ひび割れ幅を算出するために、図-5の関係を用いた。 ひび割れ間隔の最大値が平均値の 1.66 倍程度であるこ とから最大ひび割れ間隔の算定式を以下とした。

$$L_{max} = 1.66 L_{av}$$

#### (1) 要素試験の結果

ケース名を以下のように定め試験結果を図-6 に示す。 <u>A-NN-32-60(気)</u> 養生方法 無印:蒸気養生,(気):気中養生 暴露条件 恒温恒湿室の環境:相対湿度(%), 屋外(外):0,屋外(内):1

 
 → 鋼材種類 NN:なし, NTW:非緊張, TW:緊張, MIX:混合

 → 成形方法 A:遠心成形(円筒試験体), B:振動締固め(角柱試験体)

同図には土木学会式に準拠し,各試験体の条件で計算し た結果を示した。ここで,収縮ひずみ(以下,長さ変化 率とも記す)とは乾燥収縮等による長さ変化率の負側の 増分量である。長さ変化率は,すべてのケースで計算値 より小さくなった。この結果から,土木学会式を直接適 用できないことが確認できた。また,A-NN-32-Oでは長



さ変化率の最終値が-110×10<sup>-6</sup>程度であり,降雨の影響が ある場合には乾燥収縮が抑制されることが確認できた。 各要因の影響について、図-7に乾燥面の違いによる 影響、図-8に成形方法および養生方法の影響を示す。 いずれも乾燥日数182日(湿度45%のみ147日)におけ る収縮ひずみで比較した。図は棒グラフとして縦軸左に 収縮ひずみ、線グラフとして縦軸右に収縮ひずみ比をと

った。ここで、収縮ひずみ比はケース間の収縮ひずみの 比(橙色に対する青色の比)である。乾燥面の影響では 湿度 45%の A-NN-18-45 と A-NN-32-45 のケースを除き V/S による収縮ひずみの差が見られず、湿度 60%で乾燥 開始から十分に時間が経過した場合、V/S による影響は

(2)

ほとんどないことが確認できた。また、成形方法および 養生方法の影響については、収縮ひずみが遠心成形では 振動成形の 0.93 倍程度, 蒸気養生では気中養生の 0.86 倍 であった。

#### (2) 要素試験からの推定式の提案

遠心成形コンクリートの収縮ひずみは、前述したとお り土木学会式を直接適用すると過大評価となるため、算 定式の補正を試みた。収縮ひずみは、蒸気養生によって 小さくなることが確認されている。これは蒸気養生で高 温履歴により収縮ひずみが低減されることや、コンクリ ート表面が緻密化し、湿気透過が抑制されることが要因 と考えられる<sup>8),9)</sup>。また、遠心成形により骨材分布が外 側表面へ偏るという特性からも、コンクリート表面がよ り緻密化され、乾燥が抑制されたことが考えられる。こ の乾燥抑制効果を考慮するために、算定式の湿度に 1.1 倍を乗じることとした。一方、遠心成形の特徴である脱 水の影響は、製造の実績により水セメント比で配合の 36%から約31%まで減少し、算定に用いる単位水量は約 14%減少することが確認されている。さらに、鋼材を鉄 筋比 1.3%混入した場合, コンクリートひずみが自由収 縮ひずみの約87%となる結果が確認されている。上記を 考慮し、収縮低減の係数として、AとBを*e*'shとRHにそれ ぞれ乗じ、脱水効果を考慮して単位水量Wに低減係数 0.85 を乗じたW'として用いた。以下に算定式を示す。

$$\varepsilon'_{sh}(t,t_0) = \frac{\frac{1-(RH\cdot B)/100}{1-60/100} \varepsilon'_{sh,inf} \cdot A \cdot (t-t_0)}{(d/100)^2 \cdot \beta + (t-t_0)}$$
(3)

ここに、 $\varepsilon'_{sh}(t,t_0)$ :部材の収縮ひずみ(×10<sup>6</sup>)、 $t,t_0$ : コンクリートの材齢および乾燥開始時材齢(日)、RH: 平均相対湿度(%)、d:有効部材厚(mm)、 $\varepsilon'_{sh,inf}$ :乾 燥収縮ひずみの最終値(×10<sup>-6</sup>)、 $\beta$ :乾燥収縮ひずみの経 時変化を表す係数、A:鋼材による収縮ひずみ抑制に関す る係数(PC 鋼材:0.87)、B:蒸気養生や遠心成形による 表面の緻密化に関する係数(蒸気養生と遠心成形:1.1)

# (3) 実大試験による推定式の評価

実製品は、恒温恒湿室の一定な環境下ではなく、屋外の環境下で使用され、温度や湿度の変動、日射、降雨な ど様々な影響を考慮して、収縮ひずみを算定しなければ ならない。コンクリート標準示方書では、大塚らの検討 結果を基に、屋外における収縮ひずみをおおむね固定値 として与えている<sup>10)</sup>。そこで、屋外における遠心成形コ ンクリートの収縮ひずみに関しても同様にして、要素試 験の図-6中のA-NN-32-0と実大の管理柱の収縮ひずみ の結果から固定値として与えることとした。

図-9 に実大試験の2本の管理柱におけるコンクリートひずみ(正:膨張)の経時変化を示す。このひずみは、 地際部から高さ100mm,800mm,1500mmのコンクリートゲージの測定値を温度補正(線膨張係数:10×10<sup>-6</sup>℃)



し、平均したものである。降雨や日射の影響によりばら つきが大きいため、最終測定日までの100日間の収縮ひ ずみを平均すると No.5 で-200×10<sup>-6</sup> 程度、No.6 で 50× 10<sup>-6</sup> 程度であった。また、乾燥収縮の要素試験において、 A-NN-32-O の試験値は、乾燥日数約260日で-110×10<sup>-6</sup> 程度であった。これらの平均値-90×10<sup>-6</sup> 程度を屋外環境 における収縮ひずみの固定値とした。

# 3.3 クリープひずみおよびクリープ係数

#### (1) 要素試験の結果

ケース名を以下のように定め結果を図-10に示す。

A - 28 - 015 載荷応力 015:0.15f'<sub>ck</sub>, 030:0.30f'<sub>ck</sub> 載荷材齢 28:28日, 91:91日

# — 成形方法 A:遠心成形,B:振動締固め

計算値は土木学会式(2007年版)に準拠し算出したもの を用いた。ここで、クリープのみ2007年版の土木学会式 としたのは、載荷開始材齢や載荷荷重の変化に伴うクリ ープひずみの変化量への影響を2012年版より精度良く 評価できたためである。また同図には、遠心成形におけ る結果について、載荷経過日数ごとに近似線を示した。 振動締固め(B)のクリープひずみは、土木学会式と近似 した値が測定された。遠心成形では、いずれのケースも 計算値より試験値の方が小さい傾向を示した。近似線か ら、クリープひずみは、土木学会式の6~7割程度のひず みとなることが確認できた。これは遠心成形によって外 側表面が緻密化することで、クリープの影響を受けやす いモルタル分の分布が外側に少ないことが要因である と考えられた。また、載荷応力が異なるケースにおいて は、載荷応力0.15f'cのクリープひずみが0.30f'cの5割 程度のひずみとなっており、載荷応力比に比例する、つ まりクリープ係数が同一となる結果を示した。上記から、 土木学会式に低減係数を乗じたもので推定できる可能 性が確認できた。

#### (2) 要素試験からの推定式の提案

クリープひずみは,要素試験で土木学会式の 6~7 割 程度であったことから,低減係数α=0.7 を乗ずることで 修正することとした。また,単位水量の項と RH の項は, 乾燥収縮と同様にそれぞれ係数を乗じた。上記から,算 定式の修正点を以下に示す。各項の説明について,前述 したものは省略した。なお,ここで求めたクリープひず みは,鉄筋ひずみを計算する際の有効ヤング係数として 使用する。

$$\varepsilon'_{cc}(t,t',t_0)/\sigma'_{cp} = (1 - \exp(-0.09(t-t')^{0.6})) \cdot \varepsilon'_{cr}$$
(4)
$$\varepsilon'_{cr} = (\varepsilon'_{bc} + \varepsilon'_{dc}) \cdot \alpha$$
(5)

$$\varepsilon'_{dc} = 4500 (C + W')^{2.0} (W'/C)^{4.2} \left( log_e \left( \frac{V/S}{10} \right) \right)^{-2.2}$$

 $\cdot (1 - (RH \cdot B)/100)^{0.36} t_0^{-0.30}$  (6) ここに、 $\varepsilon'_{cc}(t,t',t_0)/\sigma'_{cp}$ :単位応力当たりのクリープひ ずみ (×10<sup>-10</sup>/ (N/mm<sup>2</sup>))、 $\varepsilon'_{cr}$ :単位応力当たりのクリー プひずみの最終値(同)、 $\varepsilon'_{bc}$ :単位応力当たりの基本ク リープひずみの最終値(同)、 $\varepsilon'_{dc}$ :単位応力当たりの乾 燥クリープひずみの最終値(同)、C:単位セメント量 (kg/m<sup>3</sup>)、V/S:体積表面積比(mm)、t,t'およびt<sub>0</sub>:乾 燥開始時、載荷時および載荷中のコンクリートの材齢 (日)、 $\alpha$ : クリープひずみの低減係数(遠心成形:0.7)

# (3) 実大試験による推定式の評価

提案した算定式を用いて,実大試験におけるクリープ ひずみとの比較を行った。No.2の結果を図-11に示す。 試験値は持続載荷開始時または持続荷重の変動直後か らの増分ひずみである。計算値は経過日数ごとの単位応 力あたりのクリープひずみに,断面のつり合い計算で得 られた応力を乗じることで算出した。載荷荷重の変動点 や変動点以降のクリープひずみは,それぞれの応力下で 生じたクリープひずみの総和として表現した<sup>11)</sup>。

提案した算定式によるクリープひずみの経時変化は, 実大試験の試験値と比較すると,最終値で±50×10<sup>6</sup>程



度の差と精度が高い。また,経時的な変化においても, 実測値をよく捉えた結果であった。

#### 4. ひび割れ幅算定式の構築

#### 4.1 算定式の提案

3 章の算定式からひび割れ幅は以下のように得られる。 なお、鉄筋ひずみε<sub>s</sub>はクリープを考慮するために、クリ ープ係数から算定した有効ヤング係数を用いた断面の つり合い計算により算出する。

$$W_{av} = L_{av}(\varepsilon_s - \varepsilon'_{sh}) \tag{7}$$

 $W_{max} = L_{max}(\varepsilon_s - \varepsilon'_{sh}) \tag{8}$ 

ここに、 $W_{av}$ :平均ひび割れ幅 (mm)、 $L_{av}$ :平均ひび割 れ間隔 (mm)、 $\varepsilon_s$ :鉄筋ひずみ (×10<sup>-6</sup>)

## 4.2 実大試験のひび割れ幅との比較

実大試験の平均ひび割れ幅の試験値と提案式により 算出した平均ひび割れ幅の計算値の経時変化を図-12 に示す。実大試験の試験値は、ひび割れ幅の測定範囲(高 さ:3,000mm 程度)のうち,高さ1,500mm以下において 選定した4点の試験値をケースごとで平均したものを示 した。また、初期載荷から持続載荷へ荷重を除荷した際、 地際部からの高さ約75mmのひび割れに設置した亀裂変 位計の結果では0.02~0.05mmを示したが、目視による 確認は困難であったため、No.1とNo.2の持続載荷初期 のひび割れ幅は0mmとした。計算値の鉄筋ひずみは有 効ヤング係数を用いて、載荷日数ごとに随時断面のつり 合い計算で算出し、それぞれの値を式(7)に代入し平均ひ び割れ幅を算出した。

試験値と計算値を比較すると、いずれも計算値の方が 大きい結果であるものの、載荷日数の経過に伴うひび割 れ幅の進展については、おおむね同様の傾向であった。 試験値と計算値の差異は 0.05~0.10mm 程度の差異が見 られた。この要因としては以下の3つが考えられる。

1つ目は試験値が4測点を対象に検討したことである。 試験体の高さ3,000mmの範囲内において各ケース20本 前後のひび割れがみられ,すべての履歴を追えていない ため,計算値との差異が生じた可能性が考えられた。

2 つ目に,鉄筋とコンクリートの付着損傷によるひび 割れ幅への影響である。李ら<sup>1)</sup>の研究では付着損傷がひ び割れ幅に影響を与えることを確認し,その影響を考慮 したひび割れ幅の算定式を提案している。本研究では, 付着損傷の影響を考慮できていないが,実大試験の試験 体に用いた異形鉄筋が丸鋼に近いことから計算のひび 割れ幅が小さくなる方向に経時変化する可能性がある。

3 つ目に、収縮ひずみの項についてである。屋外環境 での乾燥収縮試験の実施本数は限られ、試験体ごとのば らつきも見られるため、今回提案した固定値の収縮ひず みが大きい可能性があった。図-12の収縮ひずみの項を 0 とした場合のひび割れ幅は、計算値で 0.01mm 程度小 さくなる。-90×10<sup>-6</sup>とした場合に比べ実測値との差異が 小さくなり、実測値に漸近する傾向となるがその変化量 は小さく、上記2つの要因が卓越したものと推察される。

最後に、遠心成形コンクリートの一般的な特性につい ては、本研究とこれまでの研究によりおおむね明らかに できた。今後、上記に示した要因を検討し、算定式に考 慮することで、より精度の高いひび割れ幅の算定式を提 案することができると考える。

# 5. まとめ

本研究において得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 各要素試験の結果から遠心成形コンクリートにおけるひび割れ間隔,収縮ひずみ,クリープひずみおよびクリープ係数の算定式を提案した。この算定式は本試験の範囲内で適用可能である。
- (2) 提案したひび割れ間隔とクリープひずみの計算値は、実大試験の試験値とおおむね一致することが確認できた。
- (3) ひび割れ幅の計算値は、実大試験の試験値に比べ 0.05mm 程度大きいものの、時間経過に伴う進展の 傾向を捉えることができた。

# 謝辞

本研究の実施にあたり、ご協力頂きました日本コンク リート工業(株)の菊広樹氏に厚く御礼を申し上げます。



図-12 実大試験のひび割れ幅の経時変化

#### 参考文献

- 1) 李振宝,大野義照,馬華:鉄筋コンクリート部材の長期曲げひび割れ幅算定法,日本建築学会構造系論文集,第 565 号,pp.103-110,2003
- 2)丸山武彦,土田伸治,河野清:シリカフュームコンク リートの諸性質に関する実験的研究,コンクリート 工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.105-110, 1990
- 3)伊藤始,松井淳史,馬渕裕之,宮田真人,竹中寛,水 谷征治:遠心成形コンクリートのひび割れ分散性に関 する実験的研究,土木学会第66回年次学術講演会講 演概要集,V-427, pp.853-854, 2011
- 4)水谷征治,末岡英二,宮田真人,伊藤始:遠心成形されたコンクリートの収縮・クリープおよびひび割れ特性,コンクリート工学年次論文集,Vol33, No.1, 2011
- 5) 鈴木祥太,伊藤始,工藤尚孝,竹中寛:屋外暴露した 遠心成形コンクリートの乾燥収縮特性に関する検討, 土木学会第69回年次学術講演会,V-335,pp.669-670, 2014
- 6) 鈴木祥太,伊藤始,工藤尚孝,竹中寛:持続載荷を受けた遠心成形コンクリート柱のひび割れ挙動,コンクリート工学年次論文集,Vol.36,No.1, pp.544-549,2014
- 7) 土木学会:コンクリート標準示方書・設計編, 2012
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書・改訂資料, 2012
- 9)田中佑二郎,菅一雅:蒸気養生後の遠心成形高強度コンクリートの収縮特性に関する実験的研究(その3.実験概要,ペースト・モルタル・コンクリートの乾燥収縮試験),日本建築学会大会学術講演梗概,2009
- 10) 大塚歩, 三浦千佳子, 浅本晋吾, 睦好宏史: 屋外暴 露されたコンクリートの収縮性状に対する日射およ び降雨の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008
- 田辺忠顕:初期応力を考慮した RC 構造物の非線形 解析法とプログラム,技報堂出版, pp.54-55, 2004