

論文 遠心成形コンクリート柱のひび割れ幅に及ぼす圧縮クリープの影響

伊藤 始*1・西田 悠介*2・竹中 寛*3・中田 将太郎*4

要旨: 遠心成形コンクリート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。遠心成形コンクリート柱の実大モデル実験を通して、圧縮側コンクリートのクリープひずみによるひび割れ幅の進展メカニズムを検討するとともに、その評価を実施した。その結果、持続荷重下におけるひび割れ幅の増加は、鉄筋ひずみの増加におおむね比例することが確認できた。加えて、鉄筋ひずみの増加量は、圧縮側コンクリートのクリープ係数を考慮した断面のつり合い計算でおおむね算定できることが確認できた。

キーワード: 遠心成形コンクリート, ひび割れ幅, 持続載荷, クリープ, 鉄筋ひずみ

1. はじめに

円筒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。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、その製造過程において、遠心力を用いて締固められることや脱水・脱気効果があることのために、通常の現場打ちコンクリート（振動成形）に比べ、骨材が外側に充填され、表面が緻密かつ高強度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を対象に、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てきた¹⁾²⁾。そのひび割れ幅の増加は、圧縮側コンクリートのクリープひずみ（圧縮クリープ）、引張側コンクリートの乾燥収縮ひずみ、引張側コンクリートと鉄筋との付着クリープであることが知られている。著者らは、実大モデルの載荷

実験を通して、遠心成形コンクリート柱では圧縮側コンクリートのクリープひずみによる影響が大きいこと³⁾を確認しており、本論文では、新たに実施した2形式の検討結果⁴⁾も含め、メカニズムの検討と評価を目的とした。

曲げを受ける鉄筋コンクリート部材では、圧縮クリープによって中立軸位置が変化し、引張側鉄筋ひずみが増加する。鉄筋ひずみの増加は、ひび割れ間隔とコンクリートの収縮ひずみを介して、ひび割れ幅に換算される。研究では、実大モデル実験の鉄筋ひずみとひび割れ幅の計測値の時間変化を分析することで、遠心成形コンクリート柱の持続荷重下における圧縮クリープの増加からひび割れ幅の増加までを検討した。

2. 実験概要

2.1 実験方法

実大モデル実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³⁾⁴⁾。実験は表-1

表-1 実験ケースと持続載荷荷重

形式 (設計荷重)	No.	初期 載荷	年月/No.1-3の載荷からの日数																	
			2012		2013				2014				2015				2016			
			7月	10月	1月	4月	7月	10月	1月	4月	7月	10月	1月	4月	7月	10月	1月	4月	7月	10月
			0	91	182	273	365	456	547	638	730	821	912	1003	1095	1186	1277	1368	1461	
14-50 (4.90)	1	○4.90	1.96	●				3.92	●											
	2	○4.90	0.98	●		3.63	●													
	3		1.96	●																
	4		0.00	●																
	5							3.92	●											
	6							0.00	●											
15-70 (6.86)	7													0.00	●					
	8	○6.86												5.49	●					
15-100 (9.80)	9	○9.80												7.84	●					
	10	○9.80												7.84	●					
	11													0.00	●					

* 表中の数字は載荷荷重(kN)を表す。

*1 富山県立大学 工学部 環境工学科 教授 博(工) (正会員)

*2 東京電力ホールディングス(株) 経営技術戦略研究所 配電技術G 副主任

*3 東洋建設(株) 美浦研究所 主任研究員 博(工) (正会員)

*4 富山県立大学大学院 工学研究科 環境工学専攻(学生会員)

に示すように、柱形式と荷重方法を変えた 11 体について実施した。形式は、実際の配電の使用実態を踏まえて 3 形式を選定した。表-2 に諸元概要を示す。鋼材種類の TW は PC を導入する緊張鋼材、NTW は非緊張鋼材を示す。コンクリートの設計基準強度は、14-50 形式で 63.7 N/mm²、15-70/15-100 形式で 78.5 N/mm² とした。荷重方法は、表-1 のように設計荷重の 80% の荷重を基本に、初期荷重の有無や持続荷重荷重、持続期間を変えて、設定している。14-50 形式では 2013 年から 2016 年までの 3 年間に、15-70/15-100 形式では 2015 年から 2016 年までの 1 年間に設計荷重の 80% の荷重荷重を継続しており、本報では、この期間を主な研究対象期間とした。なお、表中の荷重荷重 0.00kN の No.4, 6, 7, 11 は、荷重を行わず、環境作用のみによる変化を計測した実験ケースである。

荷重実験の概要を図-1 に示す。荷重はコンクリート柱頂部に取り付けたワイヤーを、滑車とおもりを使用して一定荷重で水平方向に引っ張ることで作用させた。実験では主に荷重、引張側の鉄筋ひずみ、圧縮側のコンクリートひずみ、ひび割れ幅を計測した。

鉄筋ひずみは、非緊張鋼材 NTW の地際部からの高さ 100mm、800mm、1500mm、緊張鋼材 TW の地際部からの高さ 100mm と 800mm で計測した。鉄筋ひずみは、各箇所計測した裏表のひずみを平均値で表した。凡例は、「5-N01」のように供試体番号 (1~11)、鋼材種類 (N : NTW, T : TW)、地際部からの高さ (01 : 100mm, 08 : 800mm, 15 : 1500mm) の順で表示した。

持続荷重中のひび割れ幅は、ルーペを用い 0.01mm 単位で計測した。

2.2 鉄筋ひずみの履歴

図-2 に No.5 (14-50) と No.9 (15-100) の実験ケースにおける 5ヶ所の鉄筋ひずみの履歴を示す。No.5 と No.9 のいずれの鉄筋ひずみも、日数の経過とともに増加する傾向にある。5-N01 のひずみは、日数 0 日付近で約 1100×10^{-6} であり、1000 日付近で約 1450×10^{-6} であった。同

一鉄筋種類において、地際部からの高さが小さい位置の鉄筋ひずみが大きくなった。これは後述のひび割れからひずみゲージまでの距離と作用モーメントの影響と考えられた。また、同一の地際部からの高さの値を比較すると、鉄筋種類 NTW の鉄筋ひずみが TW の値に比べて大きくなった。これは TW の鉄筋表面の節(凹凸)が NTW に比べて多く、コンクリートとの付着が良いことが影響したと考えられた。図-3 に荷重を荷重していない No.4 (14-50) の履歴を示す。夏季には収縮ひずみが増加し、冬季には小さくなり、全体的には収縮側に推移した。

図-2 の No.5 のグラフを見ると、100 日付近、450 日付近、および 800 日付近のいずれも冬季を頂点として上に凸のグラフとなった。これは冬季においてコンクリート柱の日射面とその裏面の温度差が夏季の温度差に比

表-2 コンクリート柱の諸元概要

形式	地際から 頂部まで の高さ (mm)	外径		部材 厚 (mm)	鉄筋本数	
		地際 (mm)	頂部 (mm)		TW (本)	NTW (本)
14-50	11,600	345	190	42	8	12
15-70	12,500	304	190	50	12	16
15-100	12,200	353	190	58	16	12

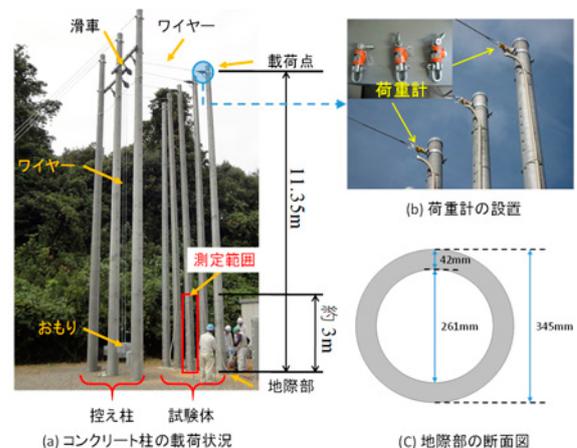
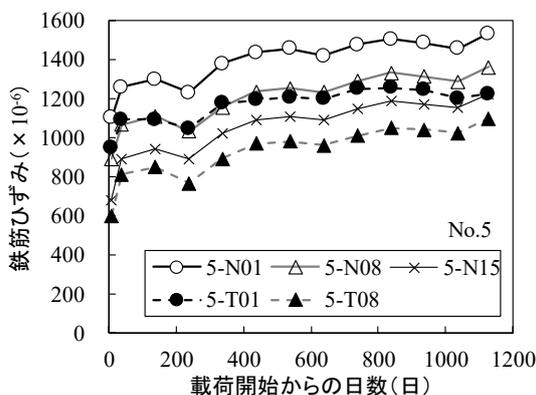
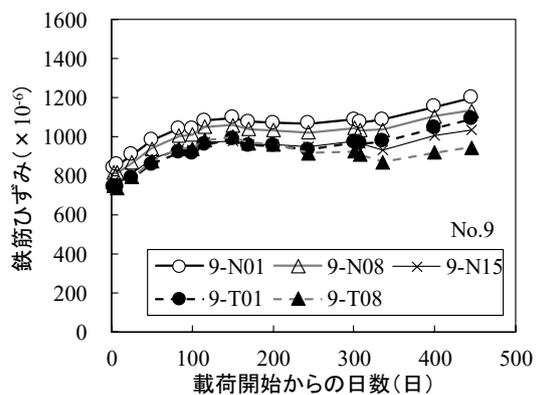


図-1 荷重実験の概要



(a) No. 5 (14-50)



(b) No. 9 (15-100)

図-2 鉄筋ひずみの履歴

べて大きいことが影響した。そのため、図-2 から荷重作用のないコンクリート柱の鉄筋ひずみデータを差し引くことで、環境変化成分を除いた鉄筋ひずみを図-4のように算定した。図-2 に比べて凹凸は小さくなり、増加傾向が明確になった。No.5 の2つのグラフを比較すると、0日付近の値と900日付近で同程度の値である。No.9 では、0~200日までで2つのグラフの差異は小さいが、それ以降では差異が大きくなった。

2.3 ひび割れ幅の履歴

図-5 に No.5 と No.9 におけるひび割れ幅の履歴を示す。No.5 では経過日数 1000 日程度までの増加傾向が明確であり、高さ 1453mm を除く 3 点のひび割れ幅は、日数 0 日付近で 0.05~0.10mm 程度であったことに対して、800 日を超えるあたりで 0.15~0.24mm となった。一方、No.9 では、日数 0 日付近ですべての測点で 0.08mm であった値が 150 日を超えるあたりで 0.08~0.10mm となり、微増または変化なしであった。なお、持続荷重後のひび割れ本数は、ほとんど増加しなかった。

3. 持続荷重における鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係

図-6 に 14-50 形式の 3.92kN の荷重を載荷し続けた時の鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係の時間変化を示す。また、図-7 に 15-70 形式と 15-100 形式にそれぞれ 5.49kN

と 7.84kN を載荷した時の関係の時間変化を示す。図中には、実測値（荷重+環境）および環境作用を差し引いた値（荷重のみ）のグラフを示した。加えて、ひび割れ幅 $w = \text{ひび割れ間隔 } L \times \text{鉄筋ひずみ } \epsilon_s$ の直線も示した。図中では、ひび割れ間隔 L にあたる傾きの目安として、既報^{3),4)}の実大モデル実験の結果を考慮して、14-50 形式では 120mm と 140mm、15-70/15-100 形式では 100mm と 120mm の破線を提示した。図中の D の値は、後述のひび割れからひずみゲージまでの距離を表す。

いずれの測点においても、鉄筋ひずみが増加することに伴って、ひび割れ幅が増加し、 $w = L \epsilon_s$ のグラフに沿

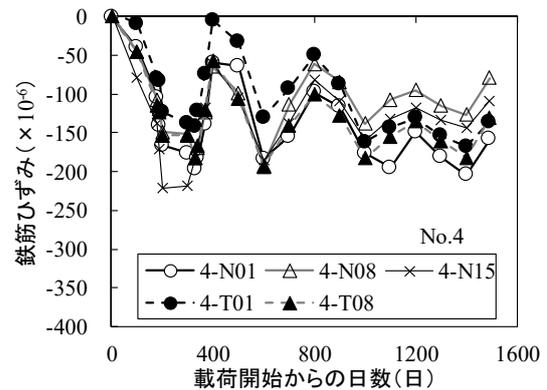
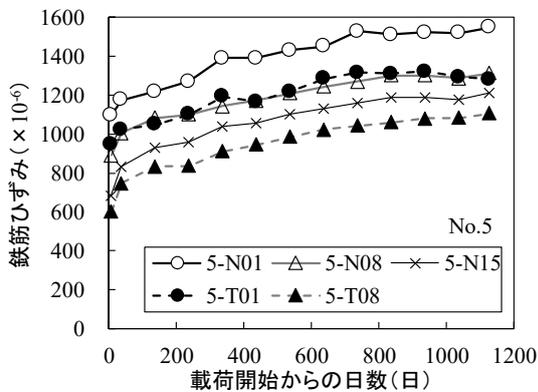
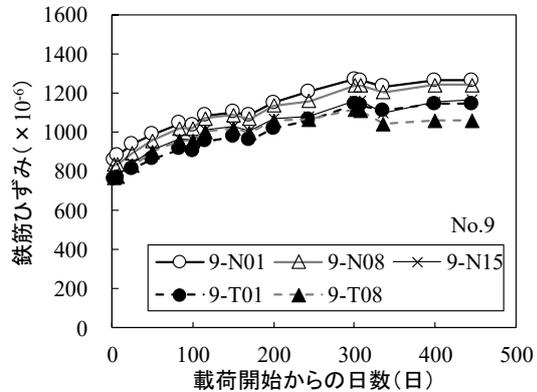


図-3 鉄筋ひずみの履歴 (No. 4)

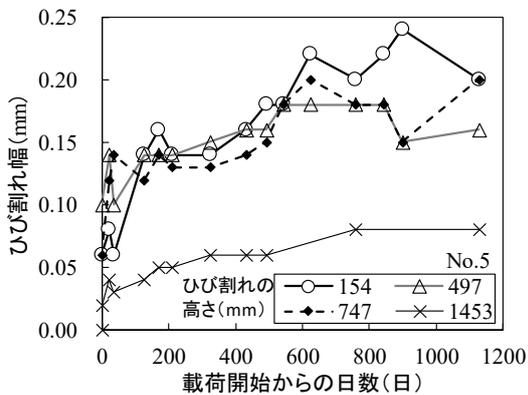


(a) No. 5 (14-50)

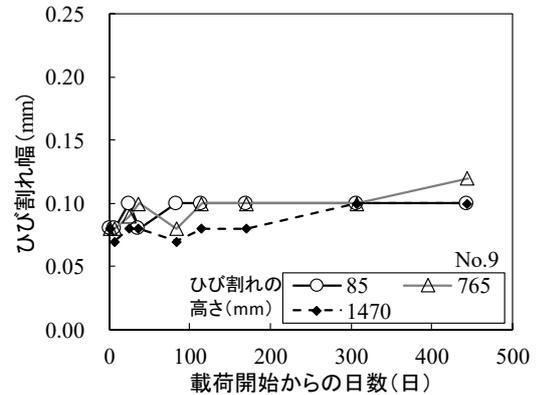


(b) No. 9 (15-100)

図-4 環境変化成分を除いた鉄筋ひずみの履歴



(a) No. 5 (14-50)



(b) No. 9 (15-100)

図-5 ひび割れ幅の履歴

って推移した。また、ほとんどの測点で、荷重のみの鉄筋ひずみが荷重+環境の値を上回っており、その差は約 150×10^{-6} が多く見られ、最大 242×10^{-6} であった。この差は収縮や温度等により変化するコンクリートひずみ (ϵ_c)^{5),6)}であり、図-3の荷重を作用させていないケースの鉄筋ひずみに類似した値であった。

これらのことから、遠心成形コンクリート柱の持続荷重下における鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係は、 $w = L(\epsilon_s + \epsilon_c)$ で説明できることが確認できた。この関係において、環境作用であるコンクリートの収縮や温度変化に起因した鉄筋ひずみの減少分を、式中で足し合わせることで、その影響を取り除いた関係としたものである。

4. 鉄筋ひずみの変化に関する検討

4.1 鉄筋ひずみの分布

図-8 にひび割れからの距離と鉄筋ひずみの関係を示す。ここでの鉄筋ひずみとはひずみゲージ（防水加工範囲：約±15mm）で計測された値であり、ひび割れからの距離とは、そのひずみゲージを貼付した測点とひび割れ発生位置の距離である。グラフには、荷重変化時または初期および長期のグラフを示す。ここでのグラフは、鋼材種類 NTW の荷重のみの値である。

14-50 (No.1,2,3) と 15-70/100 では、距離の増加とともに、鉄筋ひずみが小さくなる傾向が見られる。これは鉄筋とコンクリートの付着により、ひび割れから離れた部分ではコンクリートが分担する応力が大きく、ひび割れ

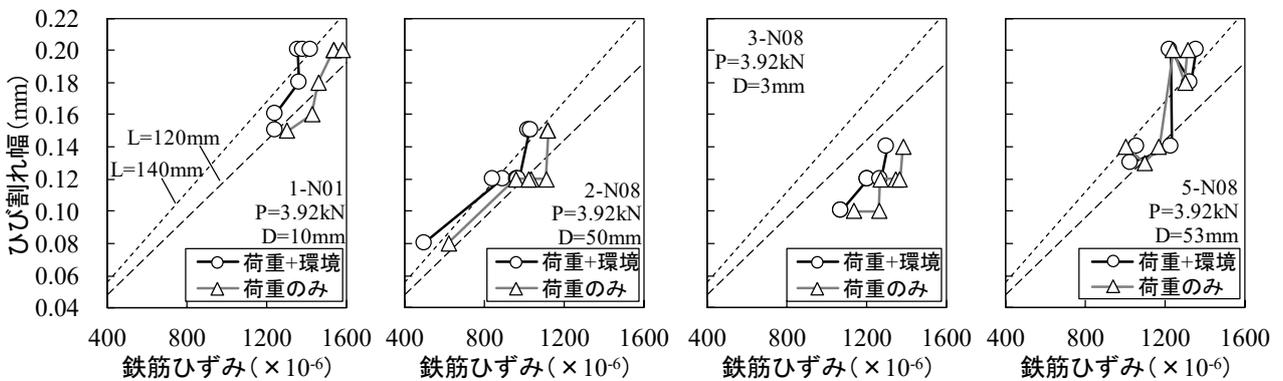


図-6 鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係の時間変化 (14-50 形式)

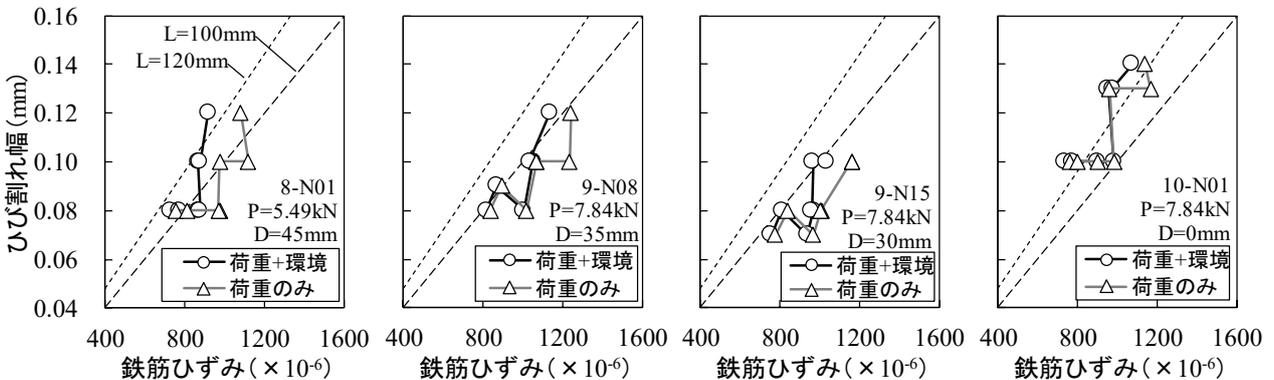


図-7 鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係の時間変化 (15-70, 15-100 形式)

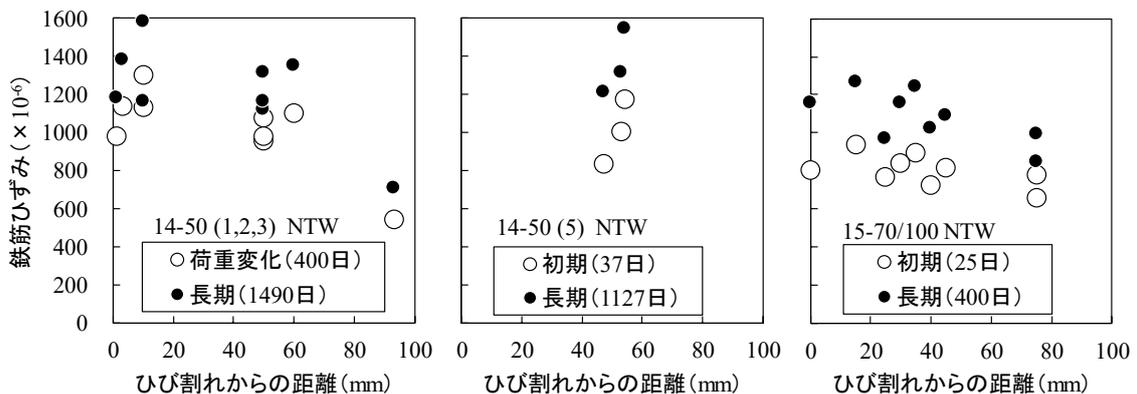


図-8 ひび割れからの距離と鉄筋ひずみの関係 (NTW)

付近ではコンクリートの応力が無いが、小さいことが影響していると考えられる。

また、各ケースの長期の鉄筋ひずみ (●印) は、荷重変化直後の値または初期の値 (○印) に比べて増加していることが分かる。この変化量を図-9 に示す。図には後述する鉄筋ひずみの増加量の計算値を併せて示す。増加量 50×10^{-6} を下回った 14-50 (No.1,2,3) の 2 点を除いて、 $150 \times 10^{-6} \sim 380 \times 10^{-6}$ の範囲にあり、14-50 (No.1,2,3) と 15-70/100 ではひび割れからの距離が大きいときに、鉄筋ひずみの増加が小さい傾向であった。

この増加の要因は、圧縮側コンクリートのクリープ (圧縮クリープ) と鉄筋とコンクリートの付着によるクリープ (付着クリープ) が考えられた。前者による増加はひび割れに近い位置で生じ、後者による増加はひび割れからの距離が大きい箇所に生じる。後者の付着ク

レプが生じると、ひび割れ付近と内部の鉄筋ひずみがほぼ一致するが、実験では距離による勾配があり、ひび割れ付近の増加量が大きいことから、付着クリープは小さかったと考えられる。

ここで、付着クリープがひび割れ幅に与える影響を計算する。図-10 (a) のように、ひび割れ間隔 L を 120mm と設定した³⁾ときに、ひび割れ付近 (0mm) の鉄筋ひずみを 1300×10^{-6} とし、中心 (60mm) の値を 1100×10^{-6} とし、簡単のために直線勾配で分布すると仮定した。このとき、図-10 (b) のように、ひび割れ付近でのすべり量が 0.072mm となる。一方、付着クリープが生じ、ひび割れ付近と中心の鉄筋ひずみが 1300×10^{-6} で一致するとき、すべり量が 0.078mm となる。ひび割れ幅の変化は、すべり量の差を 2 倍とすることで 0.012mm と計算される。

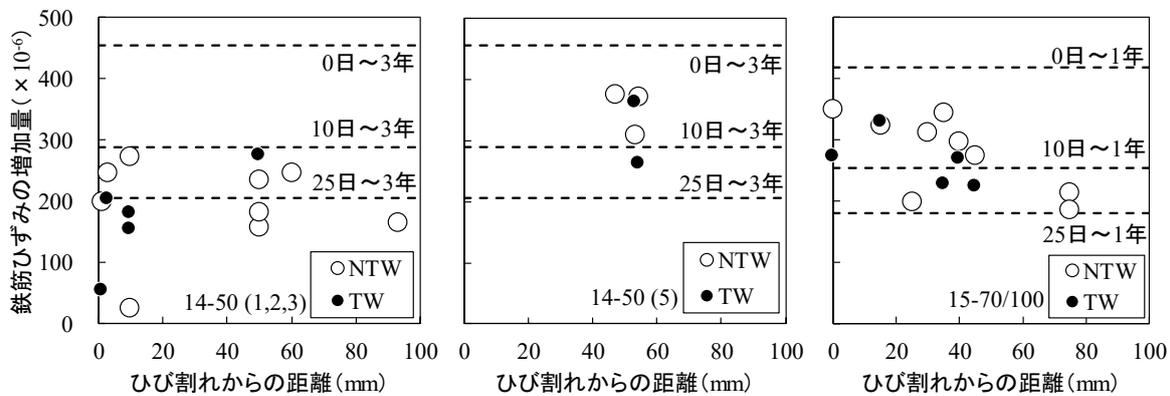
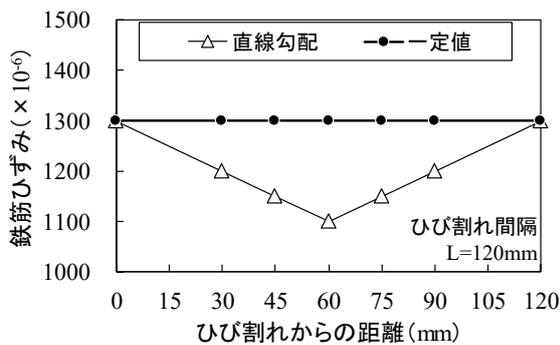
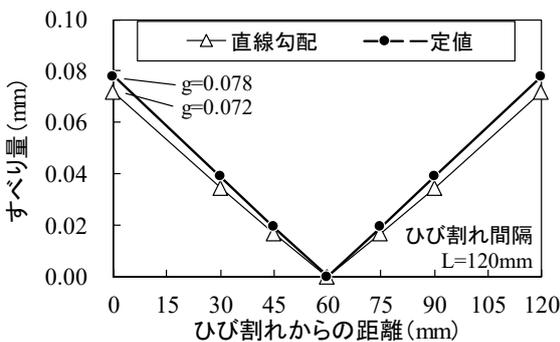


図-9 ひび割れからの距離と鉄筋ひずみの増加量の関係



(a) 鉄筋ひずみ分布の仮定



(b) すべり量

図-10 付着クリープにより生じるすべり量の試算

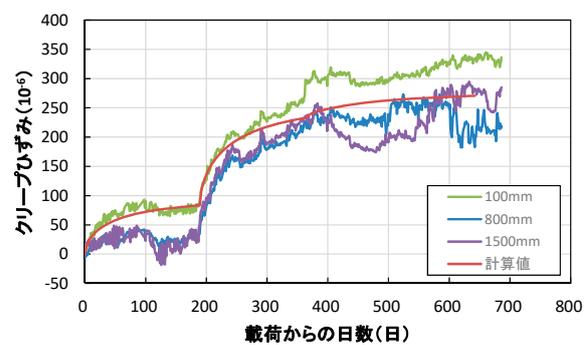


図-11 持続荷重による圧縮側コンクリートのひずみ

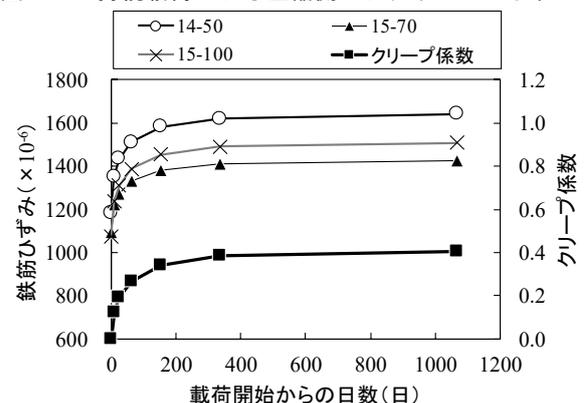


図-12 圧縮クリープを考慮した鉄筋ひずみの計算値

4.2 圧縮クリープによる鉄筋ひずみの増加

図-8の鉄筋ひずみの増加が圧縮クリープによることを検討した。本研究では、既報³⁾において要素試験を通して遠心成形コンクリートに適用可能な圧縮クリープの算定式を提案している。図-11にNo.2のコンクリートひずみの実験値と計算値の履歴を示す。実大モデル実験では、コンクリートひずみのばらつきが大きいものの、提案の算定式でおおむね傾向を捉えることができた。以降では、既報の算定式を使用して検討を進める。

図-12に圧縮クリープを考慮し、断面のつり合い計算で算出した鉄筋ひずみ(左軸)の履歴を示す。図には使用したクリープ係数(右軸)も併せて示す。圧縮クリープは、各時点のクリープ係数を有効ヤング係数に換算することで考慮した。グラフは今回実験した3種類の形式の地際部断面に関して、設計荷重の8割を作用させたときの算出結果である。配筋と断面形状による形式間の差を把握するために、強度物性は同一とした。

グラフでは、日数が経過し、クリープ係数が大きくなることに伴い、圧縮側コンクリートのひずみが増加するため、中立軸の位置が鉄筋側に移動することを受けて、鉄筋ひずみが大きくなった。鉄筋ひずみの増加は初期に大きく、半年を超えると緩やかであった。1年間の増加量と増加率は、14-50形式で 433×10^{-6} と36.5%、15-70形式で 315×10^{-6} と28.8%、15-100形式で 418×10^{-6} と39.0%であった。15-70形式で増加率が小さくなった。

図-9において、14-50形式では、載荷後0日・10日・25日～3年、15-70/100形式では載荷後0日・10日・25日～1年の鉄筋ひずみの増加量の計算値を破線で提示した。初期の鉄筋ひずみの変化が大きいため、起点を3日に設定した。

計算値の起点に依存するものの、計測の増加値と計算の増加値は同程度の値であり、鉄筋ひずみの増加には、付着クリープに比べ圧縮クリープが大きく影響することが確認できた。その中で、材齢398日(載荷開始370日)に載荷荷重を設計荷重の80%(3.92kN)に切り替えた14-50形式(1,2,3)では、25日～3年とおおむね一致した。一方、初期から設計荷重の80%を保持した14-50形式(5)と15-70/100形式では、鉄筋ひずみの増加量が大きくなり、10日～3年または10日～1年の直線よりも上側に多く分布した。

載荷材齢による鉄筋ひずみ増加量の差異の要因を考察する。既報³⁾における遠心成形コンクリートのクリープ係数の算定式は、振動成形コンクリートを対象とした土木学会の算定式に低減係数を乗じることで提案している。その基となる要素実験において、低減係数は材齢28日で0.67、材齢91日で0.59であり、材齢の増加により若干小さくなる傾向が見られた。これに対して、算定

式の低減係数は安全側に一定の0.70を用いており、本検討でも算定式に準じたことが差異の要因と考えられた。

以上より、持続荷重下の鉄筋ひずみの増加量は、載荷初期の大きな変化を適切に考慮すれば、圧縮側コンクリートのクリープ係数の増加を用いた断面のつり合い計算でおおむね算定できることが確認できた。

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) 遠心成形コンクリート柱の持続荷重下におけるひび割れ幅の増加は、鉄筋ひずみの増加におおむね比例することが確認できた。この関係において、収縮や温度変化による鉄筋ひずみへの影響は、鉄筋ひずみを割り増すことで取り除くことが可能であった。
- 2) 持続荷重下の鉄筋ひずみの増加に対して、圧縮側コンクリートのクリープの影響は大きく、鉄筋とコンクリートの付着によるクリープの影響は小さいことが確認できた。
- 3) 鉄筋ひずみの増加量は、載荷初期の大きな変化を適切に考慮すれば、圧縮側コンクリートのクリープ係数の増加を用いた断面のつり合い計算でおおむね算定できることが確認できた。

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) 氏家勲, 廣河和男, 佐藤良一, 安齋慎介: 鉄筋コンクリート部材の長期ひび割れ幅とかぶりコンクリートの損傷, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.1, pp.463-468, 2000
- 3) 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特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.403-408, 2015
- 4) 中田将太郎, 伊藤始, 西田悠介, 竹中寛: 曲げ載荷を受けた遠心成形コンクリート柱のひび割れ挙動に関する検討, 平成28年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, V-006, pp.447-448, 2016
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書・設計編, 2012
- 6) 青山尚, 古賀裕久, 渡辺博志, 竹内祐樹: PRC部材のひび割れ幅の長期変化に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.523-528, 2009
- 7) 田辺忠顕, 檜貝勇, 梅原秀哲, 二羽淳一郎: コンクリート構造, 朝倉書店, pp.44-58, 2004