

論文 持続荷重を受けた遠心成形コンクリート柱のひび割れ挙動

鈴木 祥太*1・伊藤 始*2・工藤 尚孝*3・竹中 寛*4

要旨: 遠心成形されたコンクリートの長期的なひび割れ挙動を把握することは、コンクリート柱等の二次製品の性能を保持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の持続荷重によるひび割れ挙動を把握する試験を行い、ひび割れの発生や進展、加えて、持続荷重下のひび割れ幅に与える要因である収縮と温度、荷重、圧縮クリープ、および付着クリープの影響度合いについて検討を行った。その結果、荷重と付着クリープによる影響が大きく、乾燥収縮と温度や圧縮クリープの影響は小さいことが明らかとなった。

キーワード: 遠心成形, ひび割れ幅, コンクリート柱, 鉄筋ひずみ, 持続荷重

1. はじめに

円筒形の形状を有するコンクリート柱、ヒューム管、およびポールは、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も記す）は、その製造過程で脱水と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。遠心成形されたコンクリート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、対象となる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、持続荷重を受けた時のひび割れ幅の進展に関する研究が行われ、ひび割れ幅への影響要因が荷重に加え、収縮や圧縮クリープ、付着クリープであることが確認されている。李ら¹⁾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。また、氏家ら²⁾は持続荷重を与えた RC 曲げ部材の長期間の実験結果をもとに、時間経過に伴って増大するひび割れ幅の挙動等について評価している。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³⁾、その解明が求められている。

本研究では、遠心成形コンクリート柱の持続的な荷重によるひび割れの発生や進展等の挙動を明らかにすることを目的とし、実験的検討を行った。加えて、持続荷重下のひび割れ幅に与える要因として、荷重、乾燥収縮、圧縮クリープ、および付着クリープの影響度合いを検討した。これにより、温度や湿度を含めた環境作用を考慮したひび割れ幅の進展を予測して点検を行うことで、効率的かつ経済的な維持管理を行うことができると考えている。

2. 試験概要

2.1 試験の流れ

試験では、まずコンクリート柱を遠心成形締めにより製造した。次に図-1のようにコンクリート柱の底部を地中に埋め込むことで鉛直に設置した。材齢 28 日（一部 29 日）において、コンクリート柱頂部に作用する荷重を徐々に増加させ（初期荷重）、所定の荷重に達した時点で荷重を保持した（持続荷重）。なお、一部の試験体では初期荷重後に所定の荷重まで除荷を行い持続荷重とした。初期荷重と持続荷重では、作用荷重やコンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、ひび割れ幅等を計測した。

2.2 試験ケース

試験ケースごとの材齢に対する載荷荷重の一覧を表-1に示す。ケース 1~3 の載荷からの日数は 420 日であり、ケース 4 の日数は 70 日である。管理用コンクリート柱（以下、管理用と記す）として設けたケース 5 はケース 1~3 と同時に設置し、ケース 6 はケース 4 と同時に設置した。

ケース 1 とケース 2 は、ひび割れを発生させた後にひび割れ発生荷重程度でひび割れ挙動を計測するケースであり、一時的に 4.90kN まで荷重を作用させ、所定の荷

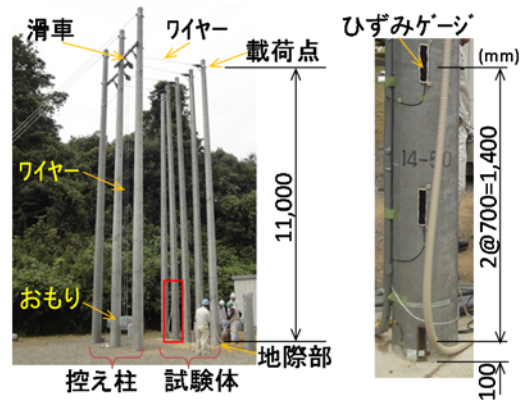


図-1 コンクリート柱の載荷状況

*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)

重まで除荷したケースである。ひび割れ発生荷重が1.96kN程度と計算されたため、4.90kNを作用させ、持続荷重を1.96kNまたは0.98kNとし、ひび割れ本数を定常状態にしてひび割れ進展に着目したケースである。ケース3は持続荷重中にひび割れの発生を期待したケースであり、初期のひび割れを導入していないケースである。すなわち、乾燥収縮やクリープによるひび割れの発生や進展に着目したケースである。また、ケース1～3は載荷開始から、約半年から1年経過し、ある程度ひび割れの変化が見られなくなったため、載荷荷重を変化させている。ケース4は、初期からひび割れ発生荷重を超える荷重を持続するケースであり、初期からひび割れを定常状態とし、その後のひび割れ挙動に着目したケースである。ケース5とケース6は、荷重作用を除く作用による挙動、つまり乾燥収縮や温度変化等の影響を検討するためのケースであり、載荷を行っていないケースである。

2.3 使用材料

試験体に用いたコンクリートの配合を表-2に示す。使用材料はセメントを普通ポルトランドセメント、細骨材を茨城県岩瀬産砕砂、粗骨材を栃木県鹿沼産砕石とした。材料試験より得られたケース1～3、5のコンクリートの圧縮強度とヤング係数(材齢28日)は、79.4 N/mm²と39.6 kN/mm²であり、ケース4と6の値は、それぞれ77.5 N/mm²と39.2 kN/mm²であった。なお、別途行った圧縮強度試験で、材齢28日から91日の圧縮強度の伸びは3%と小さかった。鉄筋は異形鋼線で、非緊張鋼材NTW(φ7.4, 降伏応力1.080N/mm²)、緊張鋼材TW(φ7.0, 降伏応力1.325 N/mm²)の2種類である。

2.4 試験体の製作方法および形状寸法

試験体は遠心成形締固めにより製作後、最高温度70℃の蒸気養生で約8時間の養生を行い、その後、試験開始材齢まで屋外で保存した。試験体の形状と寸法を図-1と図-2に示す。試験体の地表面部分(地際部)は外径345mm、内径261mm、厚さ42mmとした。鋼材は非緊張鋼材と緊張鋼材を合計20本配置し、円周方向に48mm間隔で配置した。地際部における鋼材のリラクセーション、コンクリートの乾燥収縮とクリープを考慮した有効プレストレスは約5N/mm²と設定した。試験体の底部は高強度基礎で固定し、表面近傍を巻立てコンクリートで固定した。試験体は地中に2400mm埋め、地際部から試験体頂部までの距離が11600mmとなるようにした。

2.5 載荷方法および計測方法

載荷は図-1のように試験体に対面する位置の控え柱に滑車を取り付け、試験体の頂部に取り付けたワイヤーに滑車を介し、おもりとなる鉄板を載せることで行った。計測項目は荷重、変位、鉄筋ひずみ、コンクリートひずみ、ひび割れ間隔、およびひび割れ幅とした。荷重は、

表-1 試験ケースごとの材齢ごとの載荷荷重

ケース	載荷荷重(kN)				
	初期 [0]	持続① [0-189]	持続② [189-335]	持続③ [335-363]	持続④ [363-420]
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	—	—	—
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)

表-2 コンクリートの配合

配合	f' _{ck} (N/mm ²)	スランプ (cm)	W/C (%)	単体量(kg/m ³)	
				W	C
	63.7	20±2	36.3	178	490

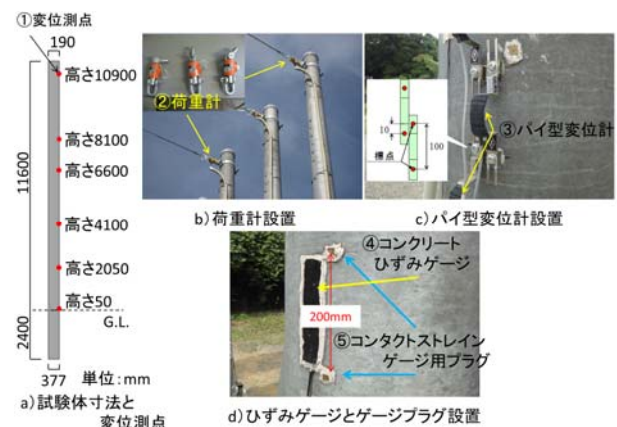


図-2 試験体の形状寸法と計測位置

図-2に示すように、荷重計を試験体頂部に設置し計測した。変位は、図-2に示す変位測点を6点設置し、トータルステーションを用いて計測をした。

鉄筋ひずみは、載荷の際に引張側となる面で、地際部からの高さ100, 800, 1500mmのNTW, 同100, 800mmのTWにそれぞれ試験体製作前にあらかじめ貼りつけたひずみゲージにより計測した。コンクリートひずみはNTWの計測位置と同様の高さで、載荷の際に圧縮側となる面に図-2のようにひずみゲージを貼り、計測した。

ひび割れ幅の計測には、コンタクトストレインゲージとパイ型変位計を用いた。コンタクトストレインゲージでは図-2のようにコンクリート表面に各ひずみゲージと対応する位置の引張側と圧縮側に、標定距離200mmとしてゲージプラグを取り付け、長さ変化率を計測した。また、パイ型変位計を地際部からの高さ25~1450mmの間に、図-2のように標定距離100mmで、隣り合うものが10mm重なる形で設置した。データロガーにより自動計測される項目の計測は、随時行い、それ以外の項目の計測は1週間ごとに実施した。

管理用のケース5とケース6ではコンクリートひずみと長さ変化率、コンクリート表面と鉄筋位置の温度を計測し、ケース5のみで鉄筋ひずみを計測した。

3. 初期荷重における計測結果

3.1 変位

初期荷重におけるコンクリート柱の変位を図-3に示す。図の縦軸に地際部からの高さ（以下、単に高さとして記す）、横軸に変位を取った。載荷荷重が4.90kNと大きいケース1とケース2の変位がケース3やケース4の値に比べて大きくなった。また、地際部でたわみ角が大きくなっており、作用モーメントに対応した典型的な変位分布となった。載荷荷重が同一のケース1とケース2の最上部の変位には50mm程度の差があった。この要因として、ケース1のひび割れ本数が多いため引張側の変形が大きくなったことが影響したと考えられた。

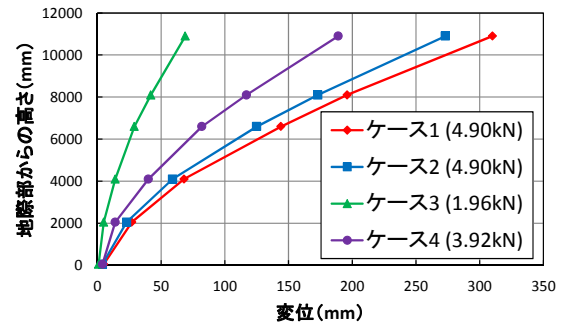


図-3 変位分布（初期荷重）

3.2 ひび割れ幅分布

各ケースのパイ型変位計から得られたひび割れ幅（変位）の分布を図-4に示す。各パイ型変位計の測点間には、ひび割れが1本もしくは発生していない状態であった。ひび割れ幅は荷重の増加に伴い増加し、十分にひび割れが発生したケース1においては、最大値が荷重4.90kNで約0.23mmとなった。荷重4.90kNにおいて等間隔の測点でひび割れ幅が0.15mmを超えており、ひび割れがほぼ等間隔に発生したことが分かる。ケース2とケース4でも、おおむね等間隔にひび割れが発生していることが分かる。一方で、ケース3は、初期荷重が1.96kNと小さいため、ひび割れがほとんど発生していない。以上より、十分な荷重を載荷したケースにおいては、ひび割れ幅分布も変位と同様に典型的な挙動となった。

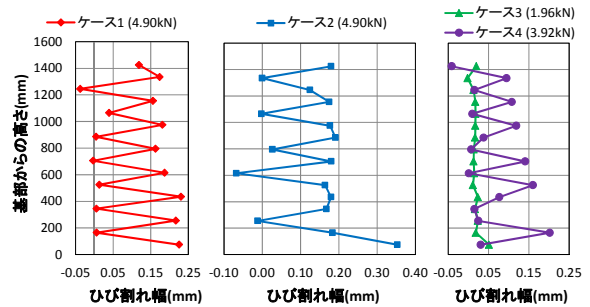


図-4 ひび割れ幅分布（初期荷重）

3.3 ひずみ

ケース1におけるコンクリートひずみと鉄筋ひずみの結果を図-5に示す。縦軸に載荷荷重、横軸にひずみを取った。同図に鉄筋ひずみ（W）とコンクリートひずみ（Con）の計算値をあわせて示す。計算値はコンクリート柱の地際部からの高さ100mmの断面を対象に、前述の強度物性値をもとにRC断面におけるつり合い計算⁴⁾により算出した。TWとNTWは鋼材種類ごとの鉄筋ひずみを表し、100, 800, 1500は計測位置を表す。

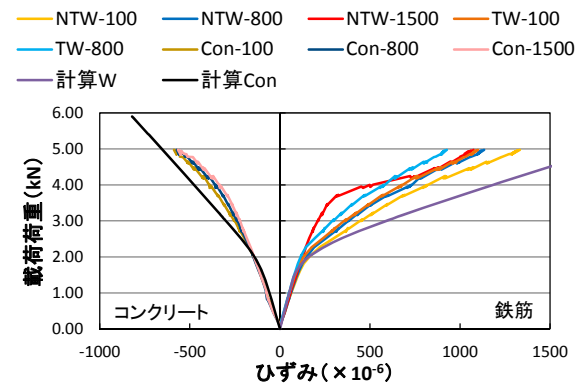


図-5 ケース1の荷重とひずみの関係（初期荷重）

計測位置100mmの鉄筋ひずみとコンクリートひずみにおいて、2.00kN付近でひび割れが発生したことで傾きの変化が見られた。NTWの3つの鉄筋ひずみを比較すると、作用モーメントの大きいNTW-100の傾きが変化し、次にNTW-800、最後にNTW-1500の傾きが変化した。計算値と比較すると、ひび割れ発生前後の傾きやひび割れ発生時の荷重とひずみはおおむね整合していた。

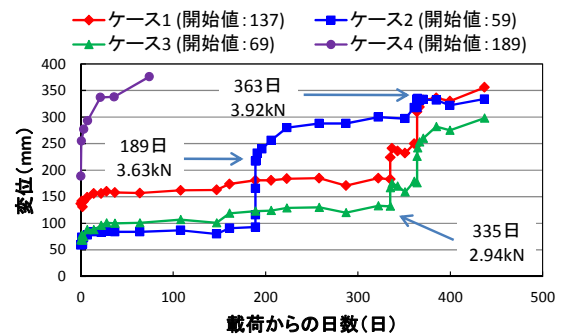


図-6 変位の履歴（持続荷重）

4. 持続荷重における計測結果

4.1 変位

ケース1~4の最頂部の測点（図-2、高さ10900mm）における変位の時刻履歴を図-6に示す。すべてのケー

スにおいて、載荷荷重を変化させた直後に変位の増加が大きい傾向にあり、その後の変位の増加は徐々に緩やかになった。また、ケース3の載荷荷重3.92kNにおける変位がケース1とケース2に比べ小さかった。これはケース3が初期荷重で十分にひび割れを入れていないため、変位が他の2ケースに比べ大きくならなかったと考える。一方で、初期荷重時から3.92kNを作用させたケース4

の変位は、他の3ケースの値に比べて短期間で大きく増加する結果となった。

ケース1の持続荷重の日数による変位分布の変化を図-7に示す。荷重1.96kNの持続荷重では、荷重からの日数が経過するにつれて、変位が徐々に大きくなった。その中で荷重からの日数0日から208日までの変位は安定して大きくなっているが、208日から322日の変位は変化が小さくなった。すべての日数において変位分布はおおむね相似形となっており、局所的な塑性変形は発生していないことが確認できる。

4.2 ひび割れ幅（長さ変化率）

ひび割れ幅の変化の指標として、コンタクトストレインゲージによる引張側表面の長さ変化率の変化を図-8に示す。各測点間にはひび割れが1本入っている状態であった。ケース1~3の長さ変化率は、初期の持続荷重1.96kNまたは0.98kNの荷重直後にほとんど変化しなかった。これはケース1とケース2でひび割れが閉じており、ケース3でひび割れが発生していなかったためと考えられた。荷重荷重を2.94kN以上に変化させた直後で長さ変化率は $100\sim 200 \times 10^{-6}$ 程度増加するものの、それ以降の増加が小さく、一部では減少した。ケース4の長さ変化率は、初期に持続荷重3.92kNを作用させたため、その直後に大きく増加した。各ケースの荷重荷重が異なるにもかかわらず、持続荷重下の長さ変化率の増加が小さく一部で減少が見られた要因は、乾燥収縮と温度変化の影響が考えられた。

4.3 ひずみ

ケース1~3の高さ100mmの鉄筋ひずみの履歴を図-9に示す。この値は、乾燥収縮と温度変化によるひずみも含んだ値（以下、実ひずみと記す）である。いずれのケースにおいても荷重荷重の増加に伴い鉄筋ひずみが増加し、その後の日数の経過に伴い鉄筋ひずみが増加する傾向が見られた。なお、ひび割れ断面からひずみゲージまでの距離は、ケース1で10mm、ケース2で20mm、ケース3で50mm、ケース4で54mmの位置であった。

ケース1~3の高さ100mmのコンクリートひずみの履歴を図-10に示す。ここで、コンクリートの圧縮強度に対する圧縮応力度の比はケース1で0.105(=8.32/79.4)、ケース2で0.059(=4.67/79.4)、ケース3で0.075(=5.98/79.4)、ケース4で0.214(=16.6/77.5)となった。ここでの圧縮応力度は、持続荷重開始時のコンクリートひずみと前述のヤング係数の積で算出した。コンクリートひずみは、荷重荷重の変化に伴い負側に大きくなり、時間経過にともない徐々に大きくなった。コンクリートひずみは、鉄筋ひずみに比べて変化が小さいことが確認できた。これらの挙動については5章で詳述する。

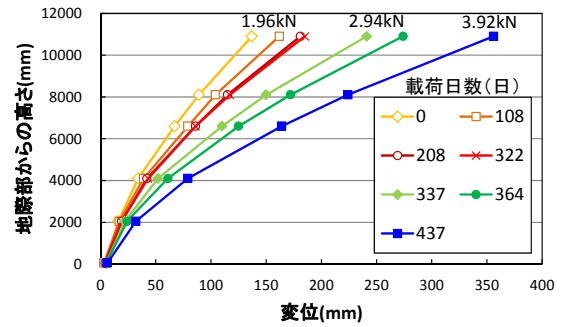


図-7 ケース1の材齢ごとの変位分布（持続荷重）

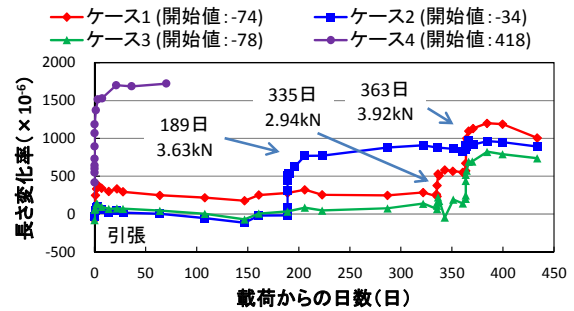


図-8 長さ変化量の履歴（持続荷重）

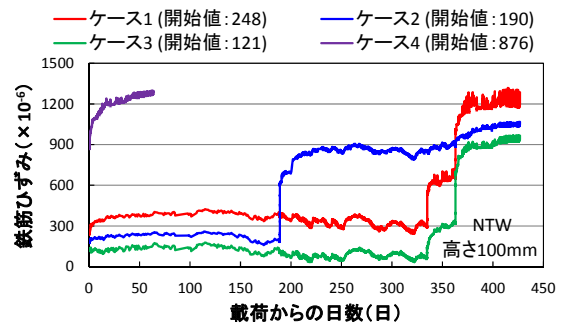


図-9 鉄筋ひずみの履歴（持続荷重）

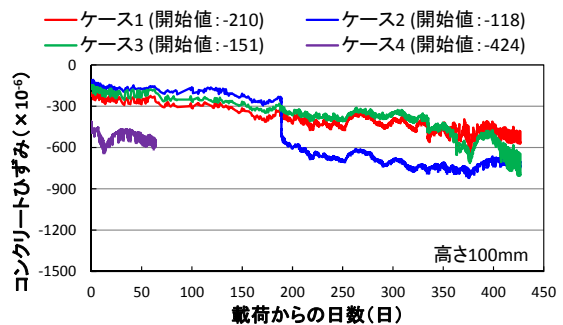


図-10 コンクリートひずみの履歴（持続荷重）

5. 各種要因がひび割れ幅に与える影響

RC部材のひび割れ幅は、鉄筋ひずみとコンクリートひずみの差にひび割れ間隔を乗じて求められる⁵⁾。コンクリートひずみの変化は①乾燥収縮と温度変化（環境作用）、②鉄筋とコンクリートの付着クリープが影響する。鉄筋ひずみの変化は③荷重、④圧縮側コンクリートのクリープが影響する¹⁾。ここでコンクリート柱の持続荷重試験で得られたひずみとひび割れ幅をもとに、これらの要因の影響度合いを検討した。

5.1 乾燥収縮と温度変化

乾燥収縮および温度変化の要因は荷重を行っていない管理用のケース5とケース6の挙動を用いて検討することができる。ここではケース5の高さ100mmにおけるコンクリートひずみの履歴を図-11に示す。同図には、ケース1の同条件の計測値と補正值をあわせて示す。補正值とは乾燥収縮や温度変化の影響を考慮することを目的に、測定されたコンクリートひずみから管理用のケース5のコンクリートひずみを差し引いたコンクリートひずみである。なお、ケース1の320日以降での変動が大きい理由は、荷重増加に伴い、滑車とワイヤーの摩擦抵抗が大きくなり、日射の影響が出やすくなったためであると考えられる。

ケース5のひずみは、乾燥収縮や温度変化の影響を受けて負側に増加し、400日で -100×10^{-6} 程度となった。荷重からの日数が100日程度までの範囲において、ケース1とケース5のひずみは温度の日変化により細かく変動している。これに対して、それらの差である補正值では変動が少なくなった。以降の検討では、荷重による影響のみに着目するために補正值を用いた。また、ケース4については、管理用のケース6によって、同様の補正を行った。

5.2 荷重

各ケースの高さ100mmにおける鉄筋ひずみ (NTW) をもとに、荷重要因の影響を検討した。持続荷重開始時および荷重荷重の変更時における鉄筋ひずみと荷重の関係を図-12に示す。同図には、3.3節と同様に、RC断面におけるつり合い計算により算出した鉄筋ひずみ (W) の計算値をあわせて示す。

ケース1とケース2は荷重初期に荷重4.90kNを作用させたことで、鉄筋ひずみが計算値よりも大きくなったと考えられた。これらの傾向があるものの、すべてのケースで、鉄筋ひずみは荷重の増加とともに増加し、計算値に近い値を示した。この結果から、荷重による鉄筋ひずみの変化は、RC断面におけるつり合い計算によりおおむね算定できることが確認できた。

5.3 圧縮側コンクリートのクリープ

圧縮側コンクリートのクリープが鉄筋ひずみに与える影響を検討した。図-13に時間経過に伴うコンクリートひずみの増分 $\Delta \epsilon_c$ を持続荷重開始時のひずみ ϵ_{c0} で除した値 $\Delta \epsilon_c / \epsilon_{c0}$ を示す。なお、ここでのコンクリートひずみは補正值を使用した。ケース1の持続荷重① (荷重1.96kN) の200日~300日で $\Delta \epsilon_c / \epsilon_{c0}$ は、0.3~0.4程度の値を示した。ケース4の地際部からの高さ800mmと1500mmの値は、0.55~0.7程度の値を示した。

クリープによる鉄筋ひずみの増分は、これらの値をクリープ係数 ϕ として有効ヤング係数 $E_{ce} (= E_0 / (1 + \phi))$ 、 E_0 :

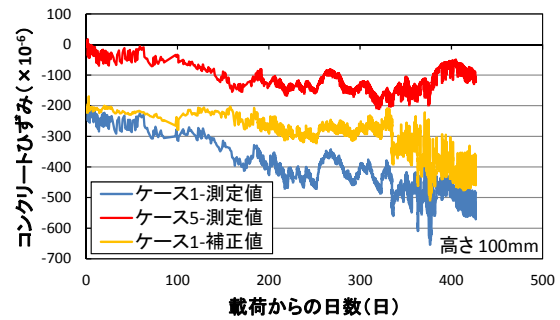


図-11 環境作用とコンクリートひずみの関係

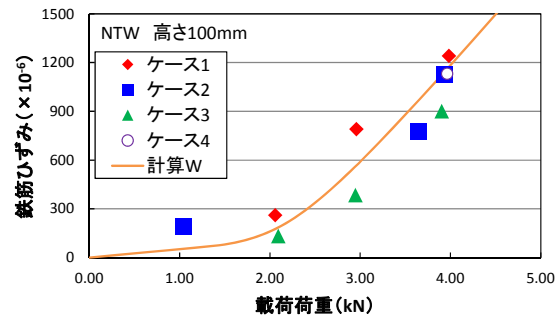
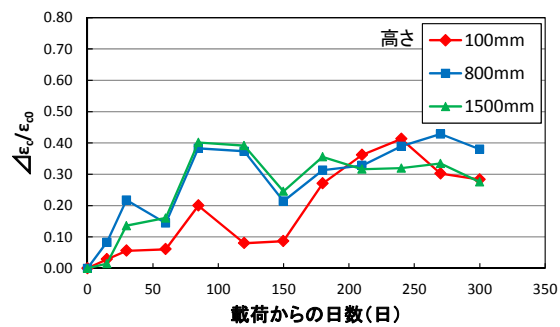
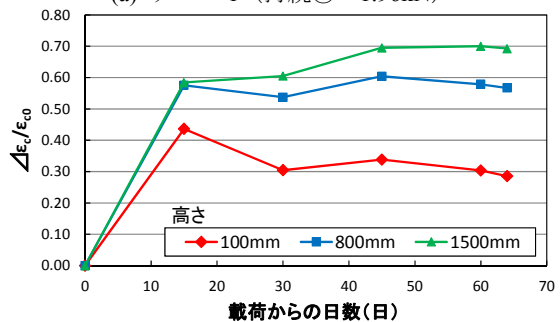


図-12 初期荷重時の荷重と鉄筋ひずみの関係



(a) ケース1 (持続① 1.96kN)



(b) ケース4 (持続① 3.92kN)

図-13 基準化したクリープひずみの増分

ヤング係数) を考慮した断面のつり合い計算で求めた。4) ケース1のクリープ係数を0.4とした鉄筋ひずみ増分は計算上 0.3×10^{-6} であった。ケース4のクリープ係数を0.7とした鉄筋ひずみ増分は計算上 5.6×10^{-6} であった。各ケースにおいて、圧縮側コンクリートのクリープが鉄筋ひずみに与える影響は小さいことが確認できた。

5.4 付着クリープ

図-14に時間経過に伴う鉄筋ひずみの変化を示す。鉄筋ひずみの増加は、主に鉄筋とコンクリートの界面におけるコンクリートの付着クリープにより発生すると考

える。なお、この鉄筋ひずみには、ひび割れ進展による間接的な要因を若干含むと考えられる。凡例にはひずみゲージからひび割れ断面までの距離を示す。図-14 (a) に示すケース 1 の鉄筋ひずみは、持続荷重開始後 20 日までに 100×10^{-6} 程度と大きく増加し、20~300 日までに 100×10^{-6} 程度と比較的緩やかに増加した。ひび割れからゲージまでの距離による鉄筋ひずみの差異は見られなかった。図-14 (b) に示すケース 4 の鉄筋ひずみは、64 日で 500×10^{-6} 程度と大きく増加し、荷重が大きいとき、付着クリープによる影響が顕著であった。

5.5 各種要因の影響度合いとひび割れ幅の検討

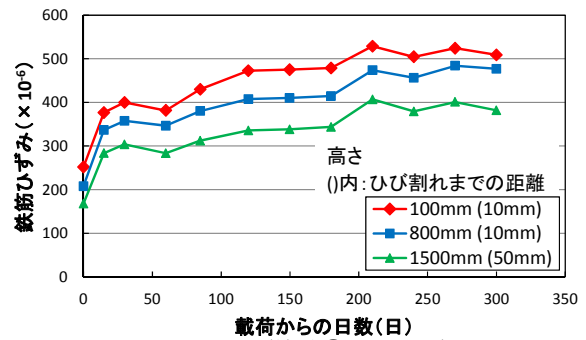
今回の実験では、圧縮クリープと乾燥収縮等による影響が小さく、付着クリープと荷重の影響が大きくなった。付着クリープが大きくなった要因は、鉄筋の表面形状の影響が考えられた。鉄筋には異形鋼線を用いているものの、表面形状は丸鋼に類似し、付着クリープが発生しやすかったと推察された⁶⁾。

最後に、ひび割れ幅について検討した。試験体の高さ 2500mm 程度までの平均ひび割れ間隔は、ケース 1 (載荷開始 420 日時点) で 141mm、ケース 4 (同 64 日時点) で 218mm であった。前述の鉄筋ひずみの補正值に平均ひび割れ間隔を乗じてひび割れ幅 (計算値) を図-15 のように計算した。鉄筋ひずみの補正值は、ケース 1 およびケース 4 の鉄筋ひずみの実測値とコンクリートの体積変化のみを計測したケース 5 およびケース 6 の実測値との差異であり、見掛け上、鉄筋ひずみとコンクリートひずみの差異になるため、ひび割れ幅の計算に使用した。同図には、長さ変化率にゲージブラグの基長 200mm をかけて算出したひび割れ幅 (実測値) をあわせて示す。

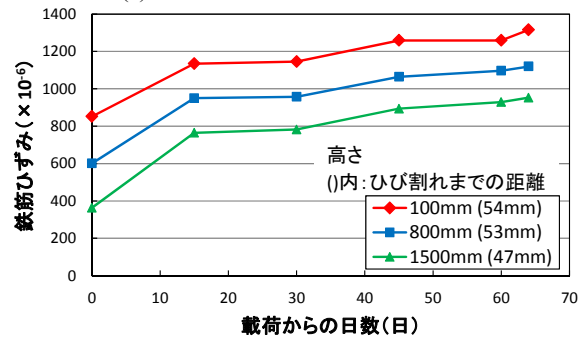
ケース 1 の計算値は、実測値とほぼ同一の値となった。ケース 4 の計算値は、実測値に比べ 0.8mm 程度小さくなった。両者の傾向はおおむね一致しており、ひび割れ幅に係わる 2 つの計測値の妥当性を示すことができた。

6. まとめ

- (1) 初期荷重の結果から、遠心成形コンクリート柱の変位、ひび割れ挙動、およびひずみは、通常の曲げを受ける RC 部材の挙動と同様なものであった。
- (2) 持続荷重時の荷重の影響の検討から、荷重分のひずみは、RC 断面におけるつり合い計算により、おおむね算定できることが確認できた。
- (3) 持続荷重時の付着クリープによる鉄筋ひずみの増加は、載荷開始後 20 日ごろまでに大きくなった。
- (4) 遠心成形コンクリート柱のひび割れ幅に与える各種要因の影響度合いについて、荷重と付着クリープが大きく、乾燥収縮と温度、圧縮クリープが小さいことが明らかになった。



(a) ケース 1 (持続① 1.96kN)



(b) ケース 4 (持続① 3.92kN)

図-14 時間経過に伴う鉄筋ひずみの変化

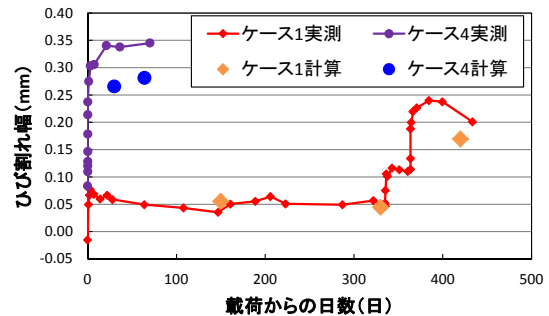


図-15 ひび割れ幅の計算値と実測値の関係

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, 安斎慎介: 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集, Vol.22, No.1, pp.463-468, 2000
- 3) 丸山武彦, 土田伸治, 河野清: シリカフェ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
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書・設計編, 2012
- 5) 中村光, 内田裕市, 伊藤睦, 木全博聖: コンクリートを学ぶ・構造編, 理工図書, pp.39-50, 2010
- 6) 松井淳史, 伊藤始, 宮田真人, 竹中寛: 遠心形コンクリートのひび割れ分散性に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.341-346, 2011