

論文 持続載荷した遠心成形コンクリート柱の長期曲げ挙動に関する検討

中田 将太郎*1・伊藤 始*2・西田 悠介*3・竹中 寛*4

要旨：遠心成形されたコンクリートが持続載荷を受けた時のひび割れ幅やたわみなどの曲げ挙動を把握することは、その製品を長期間適切に維持管理するために重要である。本論文ではこれまで研究を行ってきた 1 形式に加えて、新たに 2 形式のコンクリート柱の実大試験を行った。その結果、追加 2 形式のひずみやひび割れ、変位は、既往 1 形式と同様に、鉄筋コンクリート部材の典型的な曲げ挙動であった。加えて、ひび割れ幅の指標となるひび割れ間隔は、ある程度のばらつきを考慮すれば固定値として扱えることが確認できた。

キーワード：遠心成形, 持続載荷, 曲げ挙動, ひび割れ幅, ひび割れ間隔

1. はじめに

現在、電柱やヒューム管、パイプ等に用いられる円筒形コンクリートの多くは、遠心成形によって製造されている。遠心成形コンクリートは、遠心締固めや蒸気養生により外側表面の高強度化や緻密化が図られ、一般的な振動成形コンクリートとは異なる特徴を持つことが知られている¹⁾。遠心成形コンクリートの二次製品を長期間適切に維持管理するためには、対象となるコンクリートが長期的な荷重を受けた際のひずみやひび割れ、変位などの曲げ挙動を把握することが重要である。

通常のコンクリートについては、持続載荷を受けた時の曲げ挙動に関する研究が多く行われ^{2), 3), 4)}、ひび割れや変位に影響する要因が荷重、乾燥収縮、クリープ等であることが明らかにされている。それに対して、本研究で対象とした遠心成形コンクリートが持続載荷を受けたときの曲げ挙動に関する研究事例は少なく、その解明が求められている。

本研究では、遠心成形された実製品のコンクリート柱を用いた長期持続載荷による曲げ試験（以降、実大試験と記す）を行い、そのひび割れの発生や進展の挙動を明らかにすることを目的として研究を進めてきた⁵⁾。これまで、実製品のコンクリート柱 1 形式（14-50 形式）のみを対象に実大試験を行い、ひび割れ幅の進展傾向を提案した。実験値と計算値には差異が生じたものの、時間経過に伴うひび割れ幅の進展傾向を捉えることができた。しかしながら、この 14-50 形式の曲げ挙動と他形式の曲げ挙動を同一に扱えるかどうかを検討する必要がある。

本論文では、他形式のコンクリート柱が持続曲げ載荷を受けたときのひび割れやひずみの力学的挙動や変位挙動を明らかにすることを目的に、新たに 2 形式のコンクリート柱の実大試験を行った。本検討では、新たに設置した 2 形式（15-70 形式, 15-100 形式）の初期載荷と

持続載荷の結果を記述し、ひび割れ幅、ひび割れ間隔、変位については、14-50 形式との比較も記述した。14-50 形式の詳細は、既報⁵⁾を参照されたい。

2. 実大試験方法

2.1 試験の流れ

本試験では、コンクリート柱を遠心成形締固めにより製造した。図-1 に示すように、試験に用いたコンクリート柱（試験柱）の底面を地中に埋め込み、鉛直に設置した。材齢 28 日（一部 29 日）に試験柱頂部に取り付けたワイヤーに水平方向荷重を作用させた。荷重は対面に設置した控え柱の頂部に取り付けた滑車を介して、ワイヤーにおもりとなる鉄板を載せることで作用させた。試験柱頂部に作用する荷重を徐々に増加させ、所定の荷重に達した時点で荷重を保持した（持続載荷）。持続載荷を開始する前に、一度、設計荷重まで荷重を作用させたケースを「初期載荷あり」のケースとしている。載荷中は、荷重、変位、鉄筋ひずみ、コンクリートひずみ、ひび割れ間隔、およびひび割れ幅を適宜計測した。

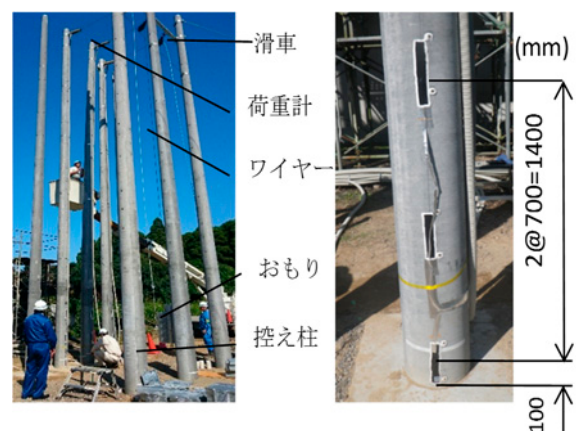


図-1 実大試験の概要

*1 富山県立大学大学院 工学研究科 環境工学専攻 (学生会員)

*2 富山県立大学 工学部 環境工学科 教授 博(工) (正会員)

*3 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

*4 東洋建設(株) 美浦研究所 主任研究員 博(工) (正会員)

2.2 試験ケース

本試験では既設の 14-50 形式に加え、15-70 形式、15-100 形式の 2 形式の試験柱を新たに設置した。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。No.1, No.2, No.8, No.9, および No.10 の 5 ケースは、初期載荷によりひび割れを導入し、持続載荷によってひび割れの進展を確認したケースである。No.3 と No.5 は、初期載荷を行わずひび割れを導入していないケースである。No.1~No.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。初期載荷では、十分にひび割れを導入するために設計荷重まで載荷を行った。持続載荷では、実環境で使用される時の最大荷重を想定して、設計荷重の約 8 割の荷重で載荷を行った。

2.3 使用材料

遠心成形コンクリートのセメントには、普通ポルトランドセメント、細骨材には砕砂、粗骨材には砕石を使用した。コンクリートの強度特性を表-2 に示す。14-50 形式の設計強度が 63.7N/mm² であり、15-70/15-100 形式の設計強度が 78.5N/mm² である。普通強度の圧縮強度と弾性係数は No.1~3 と同一バッチの試験結果である。高強度の値は同配合別バッチの結果を参考として提示する。

鉄筋の本数を柱形式別に表-3 に示す。使用した鉄筋は異形鋼線で、製造時にプレストレスを導入する緊張鋼材 TW と導入しない非緊張鋼材 NTW の 2 種類である。14-50 形式 (No.1, 2, 3, 5) には合計 20 本、15-70 形式 (No.8) には合計 28 本、15-100 形式 (No.9, 10) には合計 28 本の鉄筋を配置した。

2.4 コンクリート柱の製作方法および計測方法

コンクリート柱を遠心成形締固めにより製造し、成形後に蒸気養生を行った。コンクリート柱の基礎部は、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。その後、試験開始材齢まで屋外で静置した。各形式の寸法と変位測点位置を図-2 に示す。14-50 形式 (No.1, 2, 3, 5) の地際部断面 (図中 G.L.位置) は外径 345mm, 内径 261mm とした。15-70 形式 (No.8) の地際部断面は外径 303mm, 内径 203mm とし、15-100 形式 (No.9, 10) の地際部断面は外径 353mm, 内径 236mm とした。

作用荷重はコンクリート柱の頂部に取り付けたワイヤーの先端に荷重計を設置し、計測した。鉄筋ひずみはコンクリート柱の製作時にあらかじめ鉄筋に貼り付けたひずみゲージにより計測した。計測位置は、載荷の際に引張側となる面で、NTW が地際部からの高さ 100mm, 800mm, 1500mm の位置とし、TW が 100mm, 800mm の位置とした。コンクリートひずみは NTW の計測位置と同様の高さで図-1 に示すように載荷の際に圧縮側となる面にひずみゲージを貼り、計測した。

表-1 試験ケース

ケース	形式	載荷荷重(kN)				
		初期0日	持続1 0-189日	持続2 189-335日	持続3 335-363日	持続4 363-日
1	14-50	4.9	1.96	→	2.94	3.92
2		4.9	0.98	3.626	→	3.92
3		0	1.96	→	2.94	3.92
5		0	3.92	→	→	→
8	15-70	6.86	5.49	→	→	→
9	15-100	9.8	7.84	→	→	→
10		9.8	7.84	→	→	→

表-2 コンクリートの強度特性

ケースNo.	配合	設計強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
1, 2, 3, 5	標準	63.7	82.0	40.2
8, 9, 10	高強度	78.5	95.0	43.2

表-3 鋼材本数

ケースNo.	形式	鋼材本数		
		TW	NTW	合計
1, 2, 3, 5	14-50	8	12	20
8	15-70	12	16	28
9, 10	15-100	16	12	28

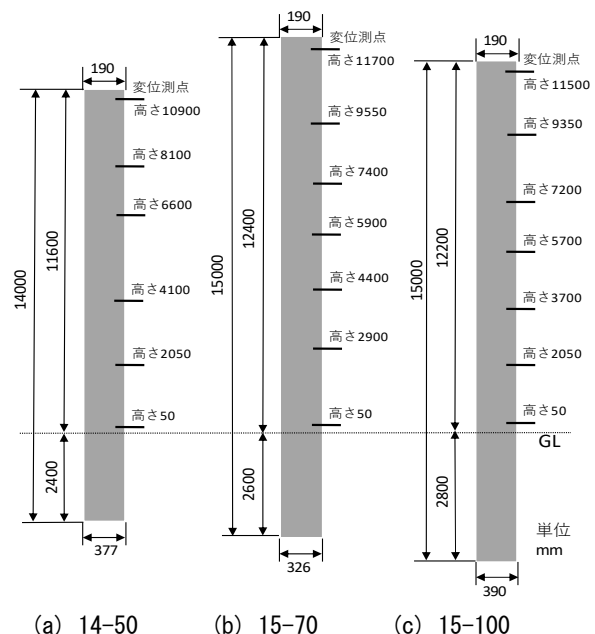


図-2 コンクリート柱の寸法と変位測点位置

ひび割れ幅はルーペで、ひび割れ間隔はメジャーで計測した。変位は図-2 に示す高さに変位測点を設置し、トータルステーションで計測した。14-50 形式では変位測点を 6 点設置し、15-70 形式と 15-100 形式では変位測点を 7 点設置した。データロガーで計測できるものは随時計測を行い、その他の値は適宜計測を行った。

3. 初期載荷結果

ここでは、追加した 15-70 形式と 15-100 形式の初期載荷の結果を示す。初期載荷での挙動は、載荷開始から設計荷重までの挙動、または設計荷重時点の挙動である。

3.1 鉄筋ひずみとコンクリートひずみの挙動

No.8 と No.10 のコンクリート（凡例：Con）と鉄筋（凡例：NTW, TW）の荷重-ひずみ関係を図-3 と図-4 に示す。縦軸に荷重、横軸にひずみを取った。凡例の 100, 800, 1500 は計測位置（mm）を表す。同図には各ひずみの計算値をあわせて示した。計算値はコンクリート柱の地際部を対象に、前述の強度物性値をもとに RC 断面のつり合い計算により算出した⁶⁾。引張側のひずみを正としている。

No.8 のすべての計測位置における鉄筋ひずみとコンクリートひずみでは、5.0kN 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。この実験のひび割れ発生荷重は、計算値と同程度となった。また、ひび割れ発生前後の傾きは計算値とおおむね整合していた。

No.10 において、鉄筋ひずみは 7.0kN 付近でひび割れが発生したことにより傾きの変化が見られた。NTW の 3 つに着目すると NTW-100, NTW-800, NTW-1500 の順で作用モーメントの大きいものから傾きが変化した。実験の鉄筋ひずみは計算値とおおむね整合していた。一方、実験のコンクリートひずみは、計算値に比べて小さくなったものの、ひび割れ発生前後の傾きは、おおむね整合していた。

以上より、遠心成形コンクリートのひずみは、通常のコンクリートの断面のつり合い計算でおおむね計算できることが確認できた。

3.2 ひび割れ幅の分布

No.8~No.10 のひび割れ幅の分布を図-5 に示す。高さが高くなるにつれて、作用モーメントに比例して、ひび割れ幅も減少した。地際部からの高さ 5m 以上の範囲におけるひび割れ幅はすべて 0.05mm 以下であり、高さ 7m 付近以上の範囲でひび割れが発生しなかった。設計荷重までの範囲では地際部から高さ 5m 程度までの範囲が曲げひび割れの点検上、着目すべき高さであることが確認できた。

ひび割れ幅の最大値が No.8 で 0.10mm, No.9 で 0.14mm, No.10 で 0.16mm であった。設計荷重時の最大ひび割れ幅は、補修や取替の基準に多く使用される 0.2mm を上回らないことが確認できた。次に高さ 0~3m の平均値が No.8 で 0.06mm, No.9 で 0.09mm, No.10 で 0.08mm であった。同形式である No.9 と No.10 の値は、同程度であり、再現性が得られた。また、平均値に対する最大値の割合は、順に 1.67, 1.56, 2.00 となり、通常の鉄筋コンクリートの 1.5 よりも若干大きくなった。

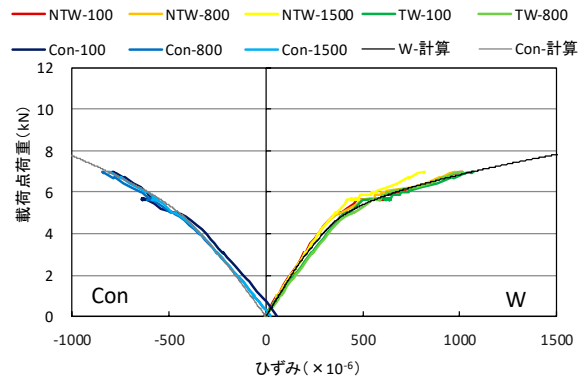


図-3 No. 8 のひずみ挙動

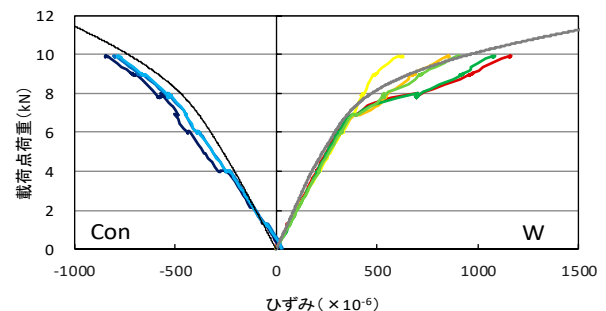


図-4 No. 10 のひずみ挙動

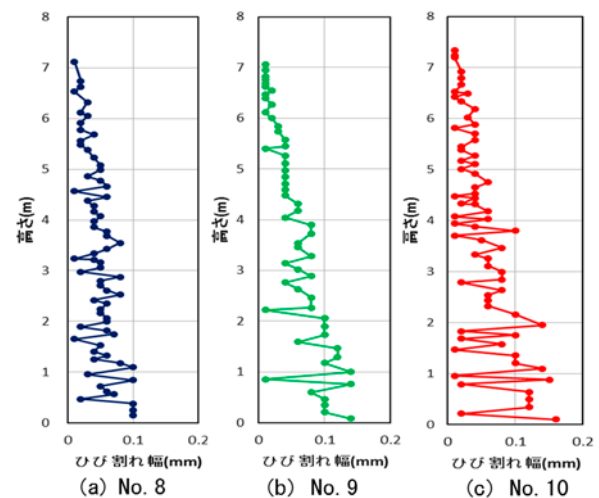


図-5 ひび割れ幅の分布

3.3 変位の分布

コンクリート柱の変位を図-6 に示す。縦軸に地際部からの高さ、横軸に変位を取った。いずれの曲線も鉄筋コンクリートの典型的なたわみ曲線となった。

No.9 と No.10 を比較すると頂部での変位には約 40mm の差が生じた。この差は No.10 のひび割れ本数が No.9 のひび割れ本数よりも多いことに起因したと考えられる。載荷荷重の小さい No.8 の変位が No.10 の変位と同程度となった要因は、No.8 の断面形状が細く引張側にかかる

応力が大きくなることや、ひび割れ本数が多いことが影響したと考えられた。

4. 持続載荷結果

ここでは、追加した 15-70 形式と 15-100 形式の持続載荷の結果を示す。ひび割れ幅、ひび割れ間隔、変位では 14-50 形式との比較も示した。なお、ひび割れ間隔とひび割れ幅は、15-70 形式と 15-100 形式では載荷からの日数が 450 日時点、14-50 形式では 1200 日時点の値である。

4.1 鉄筋ひずみの変化量の履歴

図-7 に No.8~No.10 の持続載荷による鉄筋ひずみの変化量の履歴を示す。図は NTW の高さ 100mm での履歴である。縦軸に鉄筋ひずみの変化量、横軸に載荷からの日数を取った。ここでの変化量は、温度ひずみ、乾燥収縮ひずみも含んだ値である。持続載荷開始時の鉄筋ひずみは、No.8 が 697×10^{-6} 、No.9 が 810×10^{-6} 、No.10 が 699×10^{-6} であった。3 ケースとも持続載荷開始から 90 日付近まで鉄筋ひずみが増加し、No.8 では $150 \sim 200 \times 10^{-6}$ 程度、No.9 と No.10 では $250 \sim 300 \times 10^{-6}$ 程度増加したところで変化量が小さくなった。

今回の実験条件において、1 年間での鉄筋ひずみの増加率は、15-70 形式で 25%程度、15-100 形式で 35%程度であった。後述のコンクリートひずみの変化に応じた変化が主要因であると考えられた。

4.2 コンクリートひずみの変化量の履歴

図-8 に No.8~No.10 の持続載荷によるコンクリートひずみの変化量の履歴を示す。図は高さ 1500mm での履歴である。縦軸にコンクリートひずみの変化量、横軸に載荷からの日数を取った。持続載荷開始時のコンクリートひずみは、No.8 が -667×10^{-6} 、No.9 が -618×10^{-6} 、No.10 が -619×10^{-6} であった。3 ケースとも持続載荷による影響で徐々に負側に増加した。

今回の実験条件において、1 年間でのコンクリートひずみの収縮側への増加率は、70~90%程度であった。この収縮側の増加は、主に圧縮クリープひずみと乾燥収縮ひずみで構成されている。

4.3 ひび割れ間隔の平均値と最大値

図-9 にひび割れ間隔の平均値と最大値を示す。ここでの値は、作用モーメントの大きさを考慮し、地際部からの高さ 0~3 m の範囲におけるひび割れを対象とした。また、同図にひび割れ本数も示す。左軸にひび割れ間隔を、右軸に測定結果の標準偏差を取った。

14-50 形式の No.1~No.3, No.5 のひび割れ間隔の最大値は 200 mm 程度、平均値は 120 mm 程度と同形式間での差が小さくなった。15-70 形式の No.8 の最大値は 140 mm 程度、平均値は 90 mm 程度と他の 2 形式よりも小さくなった。15-100 形式の No.9 と No.10 の最大値は 180

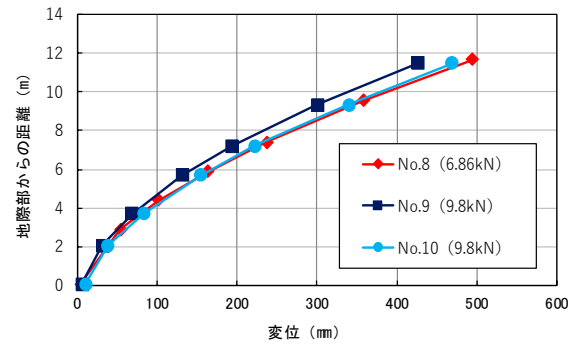


図-6 変位の分布

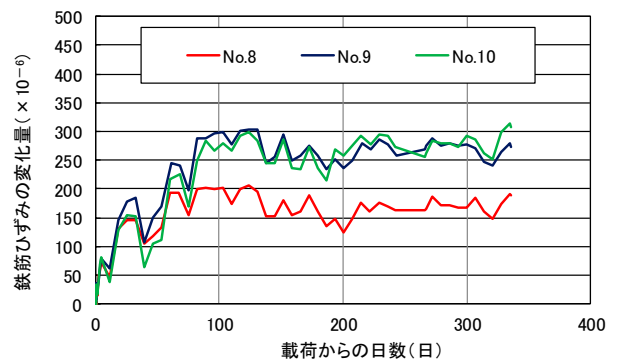


図-7 鉄筋ひずみの変化量の履歴

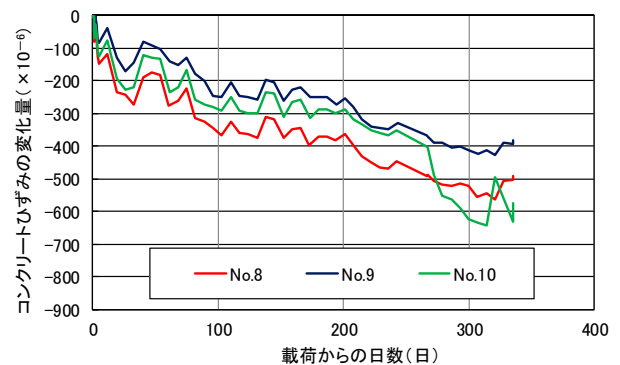


図-8 コンクリートひずみの変化量の履歴

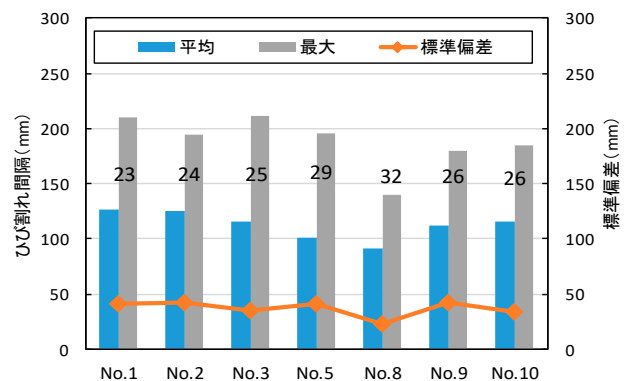


図-9 ひび割れ間隔の平均値と最大値

mm 程度、平均値は 110 mm 程度と同形式の 2 ケースでの差が小さくなった。

14-50 形式の標準偏差の平均が 40.2mm、変動係数の平均が 34.6%、15-70 形式の標準偏差が 22.4mm、変動係数が 24.5%、15-100 形式の標準偏差の平均が 38.0mm、変動係数の平均が 33.4%であることが確認できた。

この結果から、载荷から十分な時間が経過し、ひび割れ本数の増加が少なくなった場合には、同じ形式のコンクリート柱において、ひび割れ間隔には差異がほとんど生じなかった。また、ひび割れ間隔の変動係数は 30%前後であった。以上より、いずれの形式においてもある程度のばらつきを考慮すれば、ひび割れ間隔を上記の固定値として扱えることが確認できた。

4.4 ひび割れ幅の履歴

図-10 と図-11 に持続载荷によるひび割れ幅の履歴を示す。縦軸にひび割れ幅、横軸に持続载荷開始からの日数を取った。図中のひび割れ幅は、地際部からの高さ 100~1500mm の範囲内での 3 ヶ所のひび割れの平均値である。ひび割れ幅を計測した 3 ヶ所は、主に持続载荷開始時にひび割れ幅が大きかったものを選定した。

図-10 の 14-50 形式のひび割れ幅を見ると、No.1~No.3 において、持続荷重を変化させた直後にひび割れ幅の増加が見られた。荷重変化後の約 400~1200 日までのひび割れ幅の増加量は、3 ケースともに約 0.03mm で同程度となった。材齢初期の持続载荷荷重が最も大きい No.5 のひび割れ幅の増加は、持続载荷開始から約 30 日の期間に大きくなった。

図-11 の 15-70 形式と 15-100 形式の 3 ケースのひび割れ幅は緩やかに進展し、450 日までケース間の差がほとんど見られなかった。

载荷初期から設計荷重の 8 割を载荷している No.5 と No.8~No.10 のひび割れ幅進展を 450 日時点で比べると、No.5 のひび割れ幅が約 0.08mm 進展し、No.8~No.10 のひび割れ幅が約 0.03mm 進展した。この差異は、断面形状や配筋量、プレストレス量、設計圧縮強度の違いが影響したと考えられ、15-70 形式や 15-100 形式は、ひび割れ幅が進展しにくい構造形式であることが確認できた。

4.5 ひび割れ幅の平均値と最大値

図-12 に持続载荷を行ったケースの地際部からの高さ 0~3 m の範囲におけるひび割れ幅の平均値と最大値を示す。左軸にひび割れ幅を、右軸に測定結果の標準偏差を取った。ひび割れ本数は、図-9 に示したものと同一である。

14-50 形式のひび割れ幅は、最大値 0.14~0.20mm、平均値 0.06~0.10mm とケース間の差異が見られた。No.3 のひび割れ幅は、No.1 の値に比べて小さくなった。No.3 では初期载荷により設計荷重相当のひび割れを導入し

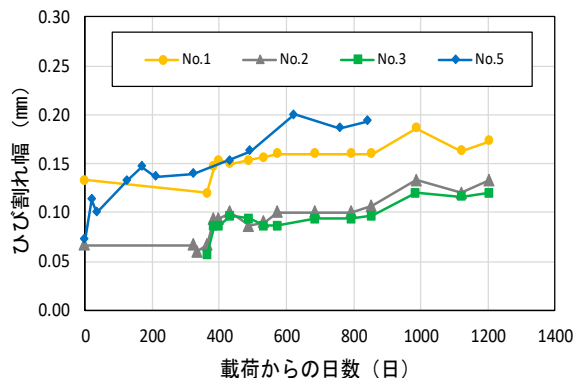


図-10 14-50 形式のひび割れ幅の履歴

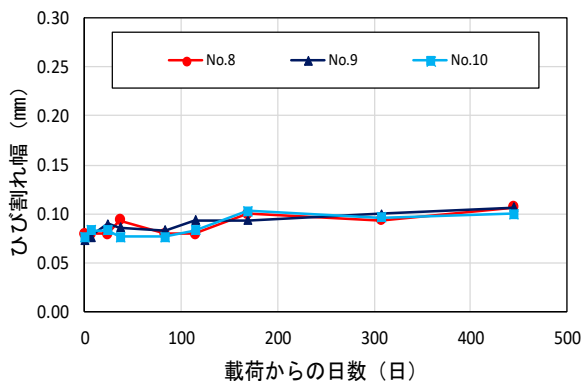


図-11 15-70・15-100 形式のひび割れ幅の履歴

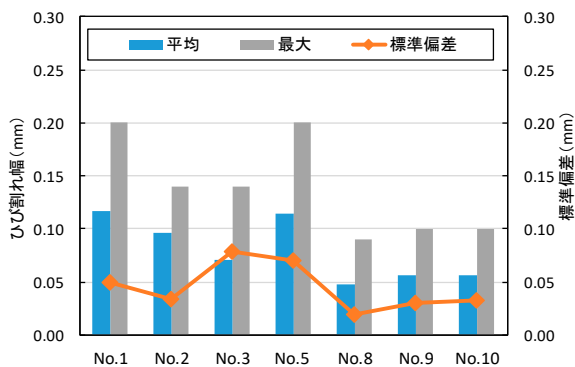


図-12 ひび割れ幅の平均値と最大値

ていないため、鉄筋とコンクリートの付着が健全な部分があり、ひび割れ幅が小さくなったと推察された。

No.8 のひび割れ幅は、最大値 0.09mm、平均値 0.05mm、No.9 と No.10 のひび割れ幅は、最大値 0.10mm、平均値 0.06mm であり、3 ケースともに同程度の値であった。

14-50 形式の標準偏差の平均が 0.06mm、変動係数が平均 62.4%、15-70 形式の標準偏差が 0.02mm、変動係数が 39.7%、15-100 形式の標準偏差の平均が 0.03mm、変動係数の平均が 55.6%であることが確認できた。ひび割れ幅の変動係数は、ひび割れ間隔の変動係数に比べて大きくなった。これはひび割れ幅が圧縮側コンクリートのクリ

ープと鉄筋とコンクリートの付着性状が影響するためと考えられる。そのため、遠心成形コンクリート柱のひび割れ幅の評価には、このばらつきの大きさを考慮することが必要である。

4.6 変位の履歴

载荷を行ったケースの頂部の測点における時間経過に対する変位の履歴を図-13 と図-14 に示す。縦軸に変位、横軸に载荷開始からの経過時間を取った。

すべてのケースにおいて、载荷を行った直後や、载荷荷重を変化させた直後に変位が大きく増加し、その後は緩やかに増加する傾向が確認できた。No.1～No.3 や No.8～No.10 の履歴を比較すると、持続载荷を継続し、変位が増加した場合でも初期载荷時や荷重変化時の変位の差が保たれた。これは、圧縮側コンクリートのクリープ挙動から引張側の鉄筋ひずみ、ひび割れ幅の進展に至る曲げ挙動のプロセスがコンクリート柱の全長にわたって安定していることを推察できた。

5. まとめ

本研究で新たに追加した2形式(15-70形式, 15-100形式)について、得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 新たな2形式の初期载荷実験におけるひずみ、ひび割れ、変位の挙動は、既往の14-50形式と同様に、鉄筋コンクリート部材の典型的な曲げ挙動であった。そのひずみは、RC断面のつり合い計算でおおむね計算できることが確認できた。
- 2) 設計荷重载荷時の初期ひび割れ幅は、地際部からの高さが5mを超えると0.05mm以下となり、曲げひび割れの点検上、着目すべき高さを確認できた。
- 3) 持続载荷期間におけるコンクリートひずみの収縮側への増加率は、主に圧縮クリープと乾燥収縮に起因して、70～90%程度であった。これに応じて鉄筋ひずみの増加率は25～35%程度であった。
- 4) ひび割れ間隔は、既往の14-50形式と同様に、载荷から十分な時間が経過したとき、ある程度のばらつきを考慮すれば固定値として扱えることが確認できた。
- 5) 新たな2形式は、既往の14-50形式と異なり、持続荷重によるひび割れ幅の増加量が小さく、ひび割れ幅が進展しにくい構造形式であることが確認できた。
- 6) 持続载荷時の変位から、コンクリート柱の全長にわたって、圧縮側コンクリートのクリープ挙動から引張側の鉄筋ひずみ、ひび割れ幅の進展に至る曲げ挙動のプロセスが安定していることを推察できた。

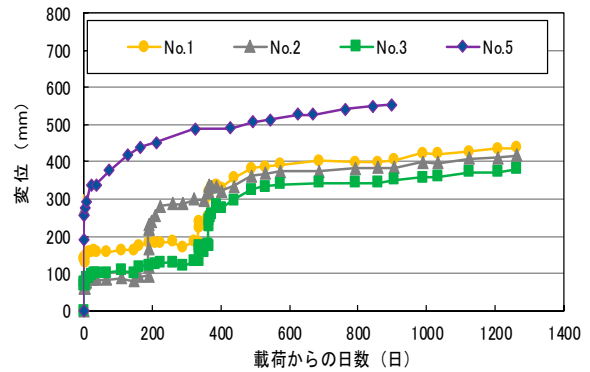


図-13 14-50形式の変位履歴

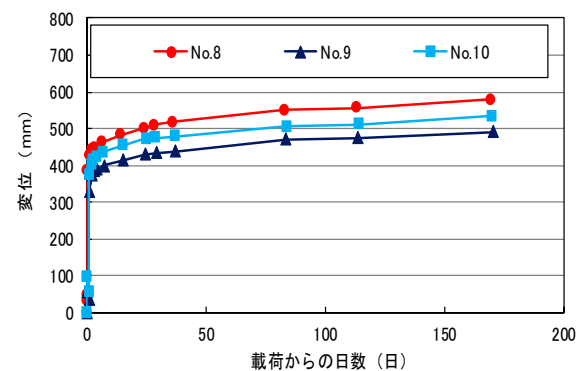


図-14 15-70, 15-100形式の変位履歴

参考文献

- 1) 船本憲治, 藤祐介, 古賀智博, 井上嘉雄: 遠心成形した高強度コンクリート製品の基本性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1541-1546, 2006
- 2) 竹内祐樹, 古賀裕久, 北野勇一, 渡辺博志: 持続载荷したPRC部材の長期的な挙動に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.535-540, 2008
- 3) 関友則, 櫻井哲哉, 下村匠: 鉄筋コンクリートのひび割れ幅の経時変化における乾燥収縮の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.211-216, 2010
- 4) 森田真由美, 竹内寿文, 中塚侑, 坂田博史: PRCおよびRC梁の曲げひび割れの間隔と幅に関する実験研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.475-480, 2010
- 5) 鈴木祥太, 伊藤始, 工藤尚孝, 竹中寛: 持続载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
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書・設計編, 2012