

# 報告 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

水谷 征治<sup>\*1</sup>・末岡 英二<sup>\*2</sup>・宮田 真人<sup>\*3</sup>・伊藤 始<sup>\*4</sup>

要旨：本研究では、遠心成形されたコンクリートの収縮・クリープ特性ならびにひび割れ発生間隔などの特性を明確にする目的で、遠心成形により製作したコンクリート試験体の乾燥収縮ひずみ、クリープひずみの計測、および両引き引張試験を行った。この結果、遠心成形コンクリートの収縮・クリープ特性は、一般的な振動成形のコンクリートを対象とした既往の収縮ひずみやクリープひずみの算定式による計算値よりも小さい値を示すことが確認できた。また、両引き引張試験では、ひび割れ間隔に対するかぶりの影響は、振動成形コンクリートで得られた既往の知見とほぼ同様な傾向を示すことを確認した。

キーワード：遠心成形，乾燥収縮，圧縮クリープ，ひび割れ間隔

## 1. はじめに

コンクリート二次製品のコンクリート柱、杭、管などは、そのほとんどが遠心成形により製造されている。また、それらの製品は、古くから様々な場所に数多く用いられてきた。遠心成形されたコンクリートは、製造過程で遠心力により脱水および脱気されるため、一般に現場打ちされるコンクリート（以下、振動成形と称す）に比べ高強度なコンクリートが得られることやコンクリート断面内の骨材分布などに偏りが生じることが知られている。しかし、遠心成形されたコンクリートの収縮・クリープ特性やひび割れに関する特性などについて研究された事例はほとんど無く、あまり知られていない。

昨今、コンクリート構造物に対しては経済的な制約や環境に対する負荷といった観点から、長寿命化や維持管理が叫ばれる中、二次製品においても避けられない課題になると考えられる。そこで、屋外に曝露される遠心成形されたコンクリート二次製品を対象としたひび割れ幅の経年変化などを予測することを目的として、これに寄与する基本特性について実験的に検討を行った。

本論文では、遠心成形されたコンクリート試験体を用いて乾燥収縮試験、クリープ試験および両引き引張試験を行い、振動成形されたコンクリートを対象として確立された算定式による計算値と比較した結果を報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

コンクリートの使用材料を表 - 1 に、配合を表 - 2 に示す。なお、表 - 2 に示す配合は、遠心成形前の単位量を示している。

表 - 1 使用材料

使用材料	物理的性質など
セメント(C)	普通ポルトランドセメント 密度:3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3,340cm <sup>2</sup> /g
細骨材(S)	茨城県岩瀬産砕砂(硬質砂岩) 密度:2.63g/cm <sup>3</sup>
粗骨材(G)	栃木県鹿沼産砕石(硬質砂岩) 密度:2.62g/cm <sup>3</sup> , G <sub>max</sub> :13mm
混和材(Add)	高強度混和材(主成分:CaO) / 密度:2.9 ~ 3.0g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:5,000 ~ 6,000cm <sup>2</sup> /g
混和剤(Ad)	高性能減水剤

表 - 2 コンクリートの配合

配合	f' <sub>ck</sub> <sup>1</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	スラブ <sup>o</sup> (cm)	W/B <sup>2</sup> (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )		
				W	C	Add
1	63.7(74.6)	20 ± 2	36.3	178	490	-
2	78.5(88.2)	22 ± 2	31.7	173	546	

1: ( ) 内数値は材齢 28 日の圧縮強度試験結果を示す。  
2: W/B の値は, W/(C+Add) の値を示す。

### 2.2 乾燥収縮試験

#### (1) 試験ケースおよび試験体形状

試験ケースを表 - 3 に、試験体形状を図 - 1 に示す。円筒試験体は遠心成形により、角柱試験体は振動成形により、2 体ずつ製作した。

また 乾燥条件は、D1 および D4 については全面曝露、D2, D3 については円筒試験体の側面(曲面)のみ曝露、D5 については上下面のみ曝露させた。非曝露面については、アルミテープにより養生を行った。

\*1 東洋建設(株) 美浦研究所 主任研究員 (正会員)

\*2 東洋建設(株) 美浦研究所 副所長 博(工) (正会員)

\*3 東京電力(株) 技術開発研究所 主任 修(工)

\*4 富山県立大学 工学部 環境工学科 准教授 博(工) (正会員)

表 - 3 試験ケース（乾燥収縮試験）

No.	配合	成形方法	試験体形状	鋼材配置	乾燥条件(V/S)
D1	配合 1	遠心	円筒試験体	無し	17.6mm
D2				有り	32.0mm
D3				有り	32.0mm
D4	配合 1	振動	角柱試験体 1	無し	22.2mm
D5			角柱試験体 2	無し	32.0mm

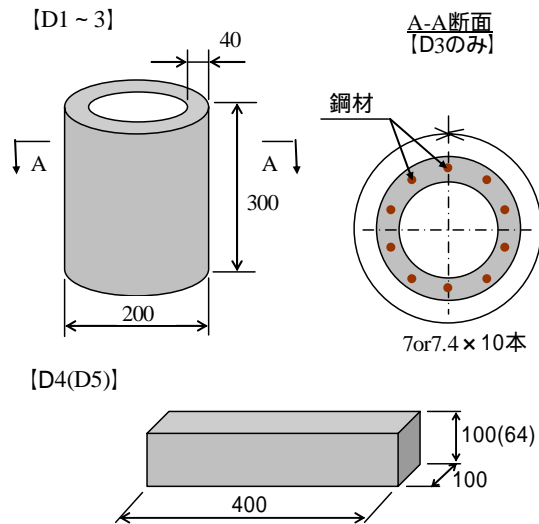


図 - 1 試験体の形状寸法

(2) 試験体の製作方法

D1～3 試験体の製作は、鋼製の円形型枠内に配合 1 のコンクリートを投入し、最大加速度 28G、総遠心時間 5 分で遠心成形を行った。また、D4、D5 試験体の製作は、鋼製の角柱型枠内に配合 1 のコンクリートを投入し、振動締め固めにより成形した。成形後は全ての試験体で最高温度 70 の蒸気養生を行った。なお、蒸気養生後は直ちに脱型し、ビニールシートにより 3 日間封緘養生を行った。

D3 の円筒試験体のみ、二次製品で一般的に使用されている直径 7mm および 7.4 mm の異形鋼材を図 - 1 に示すように合計 10 本配置した。

(3) 計測方法

材齢 3 日で封緘養生撤去後直ちにゲージプラグを評点間距離 200mm で設置し、設置完了後直ちにひずみの初期値をコンタクトストレインゲージにより計測した。また、合わせて試験体の質量も計測した。

曝露環境は 20℃、60%RH とし、ひずみおよび質量の計測は、乾燥開始後 1,2,3,4,8,13 週に行った。

2.3 クリープ試験

(1) 試験ケースおよび試験体形状

試験ケースを表 - 4 に示す。試験体形状は図 - 1 に示

表 - 4 試験ケース（クリープ試験）

No.	配合	成形方法	荷重レベル	荷重材齢
C1	配合 1	遠心	$f'_{ck} \times 0.15$	28 日
C2			$f'_{ck} \times 0.30$	
C3		振動	$f'_{ck} \times 0.15$	

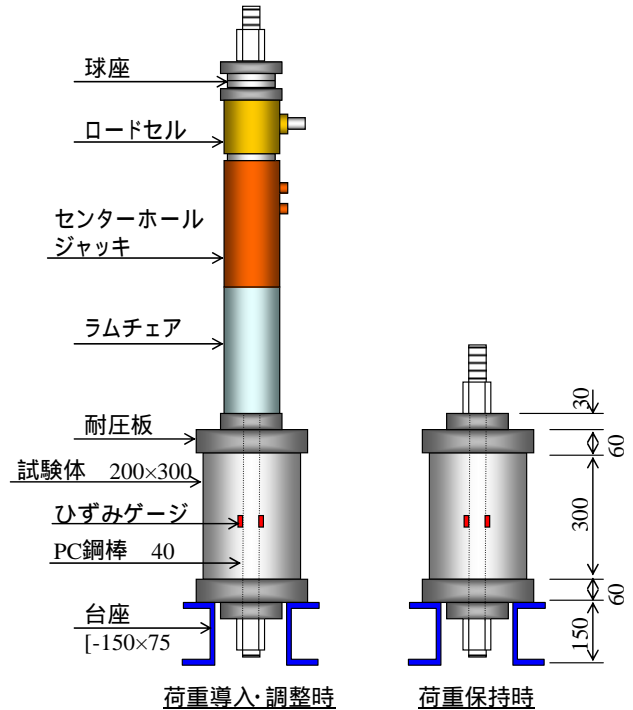


図 - 2 クリープ試験の荷重方法

した D1 試験体と同形状とし、各ケース共、2 体ずつ製作した。

(2) 試験体の製作方法

C1 および C2 試験体の製作は、乾燥収縮試験の D1 試験体と同配合、同法により製作した。

C3 試験体の製作は、鋼製の円形型枠内に円筒のボイド管を設置し、鋼製型枠とボイド管の間に配合 1 のコンクリートを投入し、振動締め固めすることで成形を行った。何れの試験体も成形後、最高温度 70 で蒸気養生を行った。

(3) 荷重方法

荷重重の導入は、表 - 4 に示す荷重レベルまで図 - 2 に示す荷重治具により連続荷重で行った。

導入荷重は、試験体の円筒内に挿入した PC 鋼棒に貼付したひずみゲージの値により管理し、計測期間中は荷重レベルの ±2% となるように荷重調整を行った。

(4) 計測方法

コンクリートのひずみは、試験体の向かい合う 2 側面にひずみゲージを貼付して計測を行った。ひずみの計測は「JIS 原案 コンクリートの圧縮クリープ試験方法（案）」<sup>1)</sup> に準じて表 - 5 に示す頻度で荷重後 70 日まで行った。試験体の曝露環境は、20℃、60%RH とした。

表 - 5 クリープひずみ計測頻度

载荷材齢	計測時期
0~1日	0,1,3,24h
~1週	毎日1回
~2週	隔日1回
~4週	毎週1回
~8週	隔週1回
~10週	毎月1回



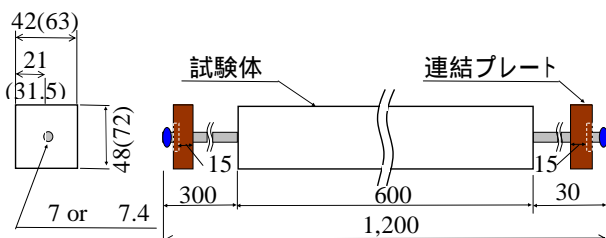
写真 - 1 使用鋼材 (左: 異形, 右: 丸鋼)

表 - 6 両引き引張試験の試験ケース

No.	配合	かぶり	乾燥条件	鋼材種類
T1	配合 1	標準	全面	異形 7.4
T2			1面のみ	
T3		標準×1.5	全面	丸鋼 7
T4	配合 2	標準		
T5	配合 1			



写真 - 2 载荷状況



連結プレート詳細

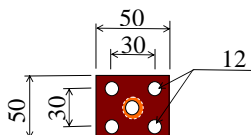
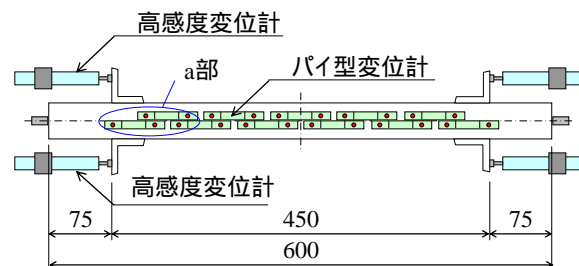


図 - 3 試験体の形状寸法



a部詳細図

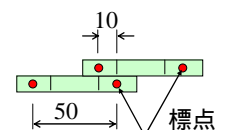


図 - 4 変位計の配置図

## 2.4 両引き引張試験

### (1) 試験ケースおよび試験体形状

試験ケースを表 - 6 に示す。試験体形状を図 - 3 に示す。各ケース共、試験体は 2 体ずつ製作した。

### (2) 試験体の製作方法

試験体は、直径 600mm の円筒試験体を製作し、材齢 15 日で所定の寸法に切断して製作した。なお、直径 600mm の円筒試験体は、配合 1 もしくは配合 2 のコンクリートを直径 600mm の円筒型枠内に投入し、最大加速度 28G、総遠心時間 5 分で遠心成形を行い、最高温度 70 で蒸気養生を行った。蒸気養生後は、直ちに脱型し、室内に曝露した。

T2 試験体は、切断翌日に円筒外面以外の曝露面をアルミテープにより養生し、乾燥を抑制した。その他試験体は、载荷まで全面曝露とした。

また、試験体内に配置した鋼材は、T1~T4 試験体については二次製品で一般的に使用している異形鋼線 7.4

(降伏応力 1,267N/mm<sup>2</sup>)、T5 試験体については表面が平滑な丸鋼 7 (降伏応力 401N/mm<sup>2</sup>) を用いた (写真 - 1 参照)。

### (3) 载荷方法

荷重の载荷は、材齢 28 日程度で写真 - 2 に示す载荷治具により、油圧ジャッキの最緩速で行った。T1~T4 では鋼材の降伏荷重の 90% 程度、T5 では 100% 程度まで連続载荷した。

### (4) 計測方法

载荷重はロードセルをジャッキ横に、試験体のひずみ (平均ひずみ) は高感度変位計を試験体端部に、ひび割れ幅はパイ型変位計を試験体表面に、鋼材のひずみはひずみゲージをコンクリートで被覆されていない箇所それぞれ設置・貼付して計測した。

また、高感度変位計およびパイ型変位計の配置を図 - 4 に示す。

### 3.計測結果

#### 3.1 乾燥収縮試験結果

##### (1) 質量変化率

計測開始時の質量に対する質量変化率（2体の平均）の経時変化を図-5に示す。

遠心成形コンクリートのD1～D3を比較した場合、質量減少の大小関係は、 $D1 > D2 = D3$ の順となった。振動成形のコンクリートと同様、V/Sが小さい程、質量減少が大きくなる傾向を示した。

振動成形コンクリートのD4とD5を比較した場合、V/Sの小さいD4の質量減少が大きい結果を示した。

また、V/Sが同じで成形方法が異なるD2とD5を比較した場合、遠心成形で製作したD2が振動成形で製作されたD5よりも質量減少が小さい結果を示しており、遠心成形により脱水され実質の単位水量が減少したことや、同材齢の強度が大きいことが影響したと考えられる。

##### (2) 乾燥収縮ひずみ

各ケースの収縮ひずみ（2体の平均）の経時変化を図-6に示す。なお、図中の点・破・鎖線は、配合（D1～3は遠心成形前のもの）や曝露した環境条件をもとにコンクリート標準示方書<sup>2)</sup>に示されている収縮ひずみの算定式による計算値を示す。

遠心成形コンクリートのD1～D3を比較した場合、収縮ひずみの大小関係は、 $D1 > D2 > D3$ の順となった。振動成形のコンクリートと同様、V/Sが小さい程、鋼材の配置が少ない程収縮ひずみが大きくなる傾向を示した。

振動成形コンクリートのD4とD5を比較した場合、V/Sの小さいD4の収縮がやや大きい結果を示した。

V/Sが同じで成形方法が異なるD2とD5を比較した場合、質量変化ほど顕著には見られなかったが、遠心成形で製作したD2が振動成形で製作したD5よりもやや収縮が小さい結果を示しており、質量変化と同様に遠心成形により脱水され、実質の単位水量が減少したことや同材齢の強度が大きいことが影響したと考えられる。

また、コンクリート標準示方書の収縮ひずみの算定式による計算値と比較した場合、何れのケースも実測値が計算値の6割程度であった。この結果は、算定式の精度が $\pm 40\%$ 程度であること<sup>3)</sup>のみでなく、蒸気養生により強度発現が一般のコンクリートよりも大きかったことや遠心成形コンクリートについては、成形時に脱水されたことによるものと考えられる。

#### 3.2 クリープ試験結果

各ケースのクリープひずみ（2体の平均）の経時変化を図-7に示す。なお、図中の破・鎖線は、配合（D1～3は遠心成形前のもの）、強度試験結果および曝露した環境条件をもとにコンクリート標準示方書<sup>2)</sup>に示されているクリープひずみの算定式による計算値を示す。

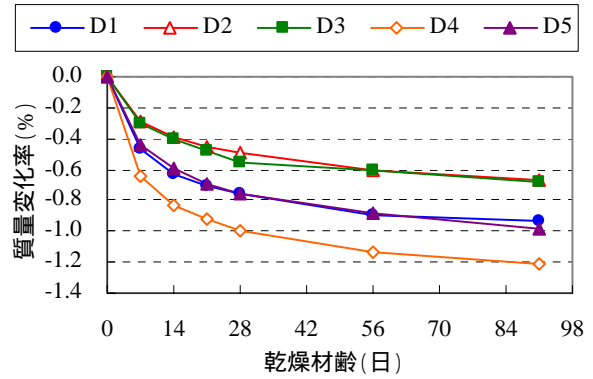


図-5 質量変化率の経時変化

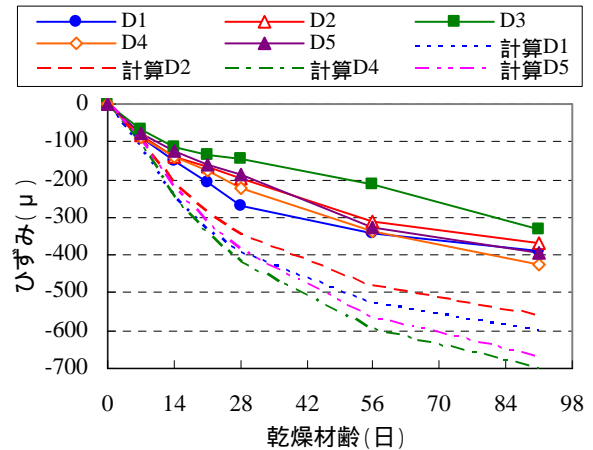


図-6 収縮ひずみの経時変化

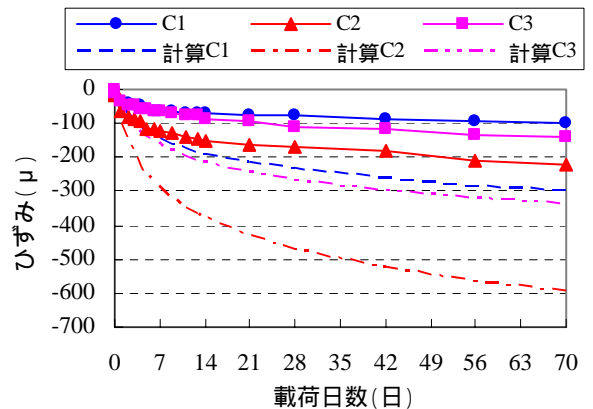


図-7 クリープひずみの経時変化

荷重レベルが異なるC1とC2を比較した場合、荷重レベルがC2の5割であるC1のクリープひずみがC2の4～5割程度となっており、本実験の荷重レベルではクリープひずみは応力強度比に比例すると考えられる。

成形方法の異なるC1とC3を比較した場合、遠心成形で製作したC1が振動成形で製作したC3に比べクリープひずみが3割程度小さい結果を示した。この結果も乾燥収縮と同様、遠心成形に起因するものと考えられる。

また、コンクリート標準示方書の算定式による計算値と比較した場合、遠心成形で製作したC1およびC2につ



いては、実測値が計算値の 3~4 割程度、振動成形で製作した C3 については、実測値が計算値の 4~5 割程度であった。この結果は、算定式の精度が  $\pm 40\%$  程度であること<sup>3)</sup>のみでなく、蒸気養生により初期強度の発現が一般のコンクリートよりも大きかったことや遠心成形コンクリートについては、成形時に脱水されたことによるものと考えられる。

### 3.3 両引き引張試験結果

#### (1) ひび割れ発生荷重

コンクリートの乾燥条件、鋼材のかぶり、コンクリート強度および鋼材の種類を変えた場合の荷重と平均ひずみの関係をそれぞれ図 - 8 ~ 図 - 11 に、ひび割れ発生荷重（1 本目のひび割れが発生した荷重）を表 - 7 に示す。また、表 - 7 には、鋼材周囲のコンクリートがヤング係数比で全断面有効に引張荷重を分担するものとして算定したひび割れ発生荷重の計算値を併せて示した。なお、算定に用いた各特性値および形状寸法は、同ロット材料で実施した強度試験結果および試験体の寸法計測結果に基づき設定した。

何れのケースも荷重と平均ひずみの関係によると、ひび割れ発生まではコンクリートが引張荷重を分担し、鋼材のみで分担した場合のひずみよりも小さい値を示し、ひび割れ発生後はひび割れの進展と共に鋼材のみで分担した場合のひずみに近づいていく傾向を示した。また、ひび割れの発生状況は、全試験体で遠心成形の内側に相当する脆弱な面から先行して発生した。

乾燥条件を変えたケースの比較（図 - 8）では、切断後の乾燥を抑制した T2 が T1 に比べひび割れ発生荷重が大きくなる結果を示した。この結果は、乾燥を抑制することで、強度発現が大きくなった可能性が考えられるが、養生期間が短いことから、この影響のみに起因するとは考えにくく、更に検証が必要と考えられた。

鋼材のかぶりを変えたケースの比較（図 - 9）では、かぶりを大きくした T3 が T1 に比べひび割れ発生荷重が大きくなる結果を示した。また、T3 については、最大荷重載荷時においても平均ひずみが鋼材のみで分担した場合のひずみよりも小さい値を示しており、最大荷重載荷時においてもコンクリート断面が一部荷重を分担していたものと考えられた。

コンクリート強度を変えたケースの比較（図 - 10）では、T4 が T1 に比べややひび割れ発生荷重が大きい結果を示した。この結果は、強度の違いが計算値と同様現れたものと考えられる。

鋼材の種類を変えたケースの比較（図 - 11）では、ひび割れ発生荷重に顕著な差は見られなかったが、T5 のひび割れ発生後の平均ひずみの伸びが T1 に比べて大きい結果を示した。この結果は、コンクリートの強度特

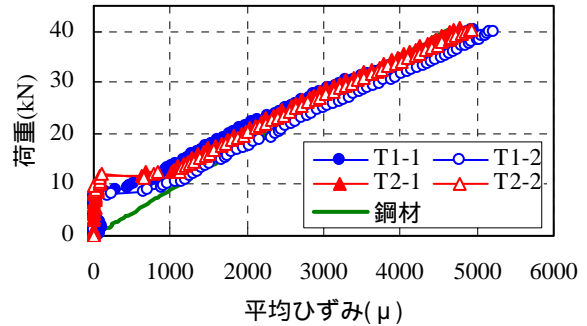


図 - 8 荷重と平均ひずみの関係（乾燥条件の影響）

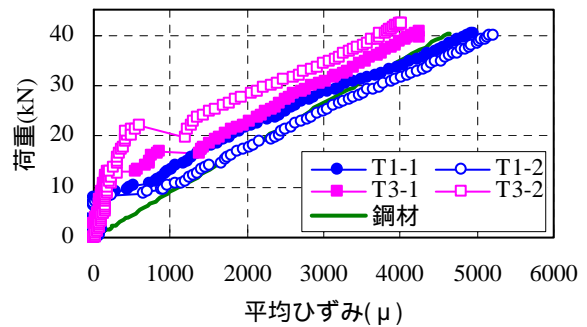


図 - 9 荷重と平均ひずみの関係（かぶりの影響）

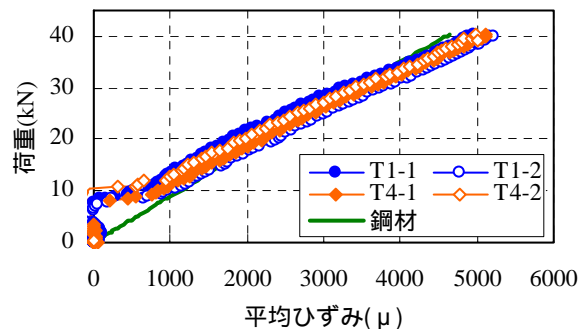


図 - 10 荷重と平均ひずみの関係（強度の影響）

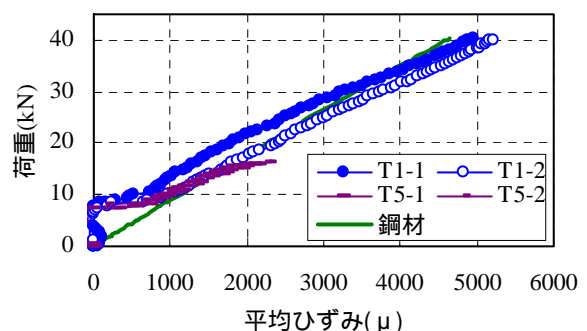


図 - 11 荷重と平均ひずみの関係（鋼材種類の影響）

表 - 7 ひび割れ発生荷重 (kN)

No.		T1	T2	T3	T4	T5
実測値	1	7.8	11.6	13.1	8.3	7.2
	2	8.0	11.5	21.4	10.8	7.4
計算値	1	9.5	9.6	20.4	10.9	9.1
	2	9.5	9.3	20.5	10.7	9.4

性が同等であるため同程度の荷重でひび割れが発生したが、その後の鋼材とコンクリートの付着切れが鋼材表面の平滑な T5 で早かったためと考えられた。

また、T2 以外のケースでは、やや計算値より小さい荷重でひび割れが発生し、T3 および T4 では、2 体の値のばらつきが大きかった。これらの結果は、遠心成形により試験体断面が不均質となることで、遠心成形の内側に相当する脆弱な面で早期にひび割れが発生したり、値のばらつきの要因となったりした可能性が考えられた。

#### (2) ひび割れ間隔

各試験体に発生したひび割れの本数および間隔を表 - 8 に示す。表中の数値は各試験体に発生した全ひび割れ間の距離の平均値を示す。また、表 - 8 に示す計算値は、コンクリート標準示方書に示される曲げひび割れ幅算定式<sup>2)</sup>の鉄筋のひずみの項を除いたものにより算定した値を示す。なお、算定に用いたコンクリート強度や各寸法は、同材料・同配合のコンクリートで実施した圧縮強度試験結果、および試験体の実測値を、鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を考慮した係数は、何れのケースも普通丸鋼、PC 鋼棒の値を用いて算定した。

T1 およびかぶりを大きくした T3 のケースについては、ひび割れ間隔の計算値と比較的良く一致したが、T2、T4、T5 のケースについては、計算値よりもひび割れ間隔が大きく、算定式や既往の研究<sup>4)</sup>で得られた結果と異なる傾向を示した。

T2 は乾燥条件を抑制し、T1 と比較すると強度は大きくなる傾向にあるケースで、T4 は T1 と比較してコンクリート強度を大きくしたケースである。また今回の実験で用いた配合は 50N/mm<sup>2</sup> 以上の比較的高強度領域のコンクリートであったため、既往の研究での傾向と合致していれば強度の増大に伴いひび割れ分散性が向上し、ひび割れ間隔は小さくなると考えられる。

また、T5 については、鋼材表面が平滑な丸鋼を用いたケースであり、若干鋼材表面にくぼみがある鋼材を用いた T1 と比較してひび割れ間隔が大きくなる傾向は既往の知見と合致する。しかし、ひび割れ間隔の算定に用いた鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を考慮した係数は普通丸鋼の場合に用いて良いとされる 1.3 を用いて計算値を算定しているが、これよりも大きな値となった。

これらの計算値や既往の研究と異なる結果となった要因としては、今回用いた試験体の寸法が小さかったことが影響した可能性が考えられた。

表 - 8 ひび割れ発生本数および間隔

No.		T1	T2	T3	T4	T5	
発生本数 (本)	1	4	3	2	3	2	
	2	4	3	2	3	2	
間隔 (mm)	実測	1	101.3	181.0	175.0	188.5	196.0
		2	120.0	163.0	253.0	163.5	217.0
	計算	1	128.8	127.4	202.2	125.8	128.2
		2	126.4	129.8	198.1	123.8	128.5

#### 4. まとめ

本実験で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 遠心成形されたコンクリートの乾燥に伴う質量減少や収縮ひずみは、同一配合の振動成形されたコンクリートに比べて小さい。また、収縮ひずみに関しては、コンクリート標準示方書に示される算定式による計算値よりも小さいと考えられる。
- (2) 遠心成形されたコンクリートのクリープひずみは、同一配合の振動成形されたコンクリートに比べて小さく、コンクリート標準示方書に示される算定式による計算値よりも小さいと考えられる。
- (3) 圧縮強度が 70 ~ 90N/mm<sup>2</sup> 程度、かぶりが 30mm 程度までの遠心成形されたコンクリートにおいては、コンクリートの強度およびかぶりの増加に伴いひび割れ発生荷重が増大することを確認した。
- (4) 圧縮強度が 70 ~ 90N/mm<sup>2</sup> 程度、かぶりが 30mm 程度までの遠心成形されたコンクリートにおいては、かぶりの増大に伴いひび割れ間隔が増大することを確認した。

#### 参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート工学，pp.55-56，Vol.23，No.3，1995.3
- 2) (社)土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書 設計編，pp.45-53，pp.102-105，2008.3
- 3) (社)土木学会：コンクリートのクリープおよび乾燥収縮，コンクリート技術シリーズ 39，pp.1-11，2000.11
- 4) 五角 亘，下村 匠，丸山久一：コンクリートの品質が RC 部材のひび割れ幅に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.1333-1338，2001.7