

# 論文 遠心成形コンクリートのひび割れ分散性に関する解析的検討

松井 淳史\*1・伊藤 始\*2・宮田 真人\*3・竹中 寛\*4

**要旨**：通常のコンクリートに関するひび割れ分散性は、以前より様々な側面から研究が行われており、多くの設計式が提案されてきた。しかし、遠心成形コンクリートのひび割れ分散性について、研究された事例はほとんどない。本研究は、遠心成形コンクリート部材の引張部でのひび割れ分散性を解析的に検討することを目的に、遠心成形コンクリート試験体の両引き引張試験を模擬した解析を行った。解析の結果、試験結果に近い値を示す付着モデルを選定した。加えて、遠心成形コンクリートの各種条件がひび割れ分散性に及ぼす影響について、解析的に把握した。

**キーワード**：遠心成形，ひび割れ分散性，両引き引張試験，FEM 解析，付着モデル

## 1. はじめに

コンクリート二次製品のうち、杭やヒューム管、ポールなどの円筒型の製品は、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は、製造過程で脱水されるため、一般の現場打ちコンクリートに比べて高強度なコンクリートが得られることや早期に脱型できることから、工場製品としてのメリットが大きい<sup>1),2)</sup>。

遠心成形コンクリートの多くは、節形状が通常の異形鉄筋と異なる特殊鋼材を用いた鉄筋コンクリート部材（一部、プレストレストコンクリート部材）である。また、通常のコンクリートに比べて鋼材かぶりが薄いため、耐久性やひび割れに関する設計上の配慮が必要である。

鉄筋コンクリート部材の設計では、曲げ耐力とせん断耐力を確保し安全面を考慮すると同時に、ひび割れの発生を把握し耐久面についても考慮する必要がある。通常のコンクリートに関するひび割れ分散性は、以前より様々な側面から研究が行われており、多くの設計式が提案されてきた<sup>3),4)</sup>。しかし、遠心成形コンクリートのひび割れ分散性について、研究された事例はほとんどない。

遠心成形されたコンクリートは、製造時に脱水されることや特殊鋼材が用いられること、鋼材かぶりが薄いことに加えて、コンクリート断面内の骨材分布や水セメント比に偏りが生じることが知られている。

本研究では、遠心成形コンクリート部材の引張部でのひび割れ分散性を解析的に検討することを目的に、遠心成形コンクリート試験体の両引き引張試験<sup>3),5)</sup>を模擬した解析を行った。解析では、別途行った実験の結果と解析結果を比較し、遠心成形コンクリートの特殊鋼材に使用可能な付着モデルの選定を行った。加えて、遠心成形コンクリートのひび割れ分散性に影響を与える鋼材か

ぶり（コンクリート断面積）、コンクリート強度、乾燥収縮の3項目についてのパラメータ解析を行った。

## 2. 研究フロー

本研究の研究フローを図-1に示す。はじめに、両引き引張試験を実施し、その結果と両引き引張試験を模擬した解析の結果を比較した。比較は、ひび割れ間隔に影響を与えるかぶり厚と部材厚に着目し、断面積の異なる2つの実験ケースを選定して行った。

次に、両引き引張試験の結果と解析結果の比較から、最適な付着モデルを選定した。比較項目は、荷重-変位関係やひび割れ間隔などとした。そして、選定した付着モデルを用い、コンクリート断面積、コンクリート強度、乾燥収縮（初期ひずみ）の3項目を3水準に変化させたパラメータ解析を行い、ひび割れ分散性に及ぼす影響を検討した。

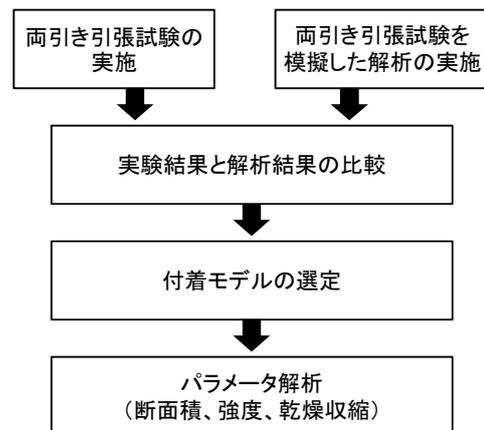


図-1 研究フロー

\*1 富山県立大学 短期大学部 環境システム工学専攻 (正会員)

\*2 富山県立大学 短期大学部 環境システム工学専攻 准教授 (工学部環境工学科 兼任) 博 (工) (正会員)

\*3 東京電力 (株) 技術開発研究所 主任 修 (工)

\*4 東洋建設 (株) 美浦研究所 主任研究員 博 (工) (正会員)

### 3. 解析に用いる付着モデルの選定

#### 3.1 両引き引張試験

##### (1) 試験方法

解析で模擬する遠心成形コンクリート試験体の両引き引張試験の概要を示す。試験は表-1に示す5ケース（各ケース2体）を実施した。加えて表-1には、各解析で用いた実験ケースについても表記した。試験体は、遠心成形によりφ600mmの円筒状に製作した後、所定の寸法に切断することで製作した。試験体の形状寸法を図-2に示す。円筒状の試験体は、蒸気養生した後、実験室内で保管し、材齢15日で切り出しを行った。切り出し後、切断面が平滑であることを確認するとともに寸法を測定し、想定寸法と誤差が少ないことを確かめた。ケースT2では、製品にしたときに外気に直接触れる箇所を考慮して、遠心成形時外側の1面を除きアルミテープで覆った。

試験体に使用した材料の物性値は、材料強度試験によ

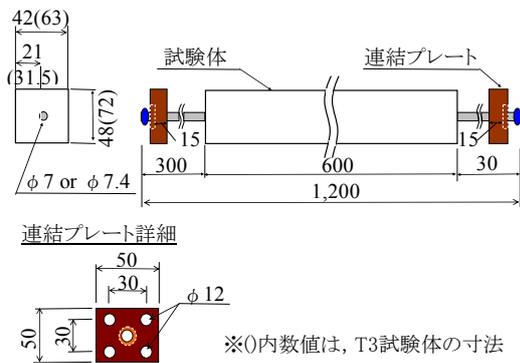


図-2 試験体の形状寸法

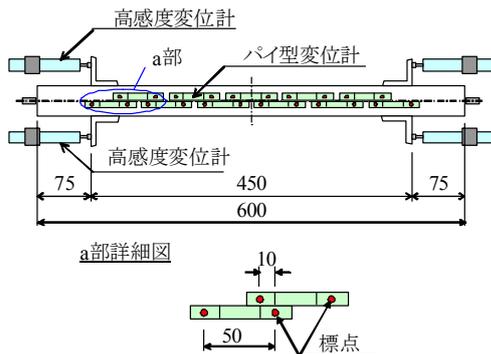


図-4 変位計の設置位置

って特定した。設計基準強度  $63.7 \text{ N/mm}^2$  のコンクリート（標準強度配合）は、圧縮強度  $74.6 \text{ N/mm}^2$ 、弾性係数  $36.1 \text{ kN/mm}^2$  であった。設計基準強度  $78.5 \text{ N/mm}^2$  のコンクリート（高強度配合）は、圧縮強度  $88.2 \text{ N/mm}^2$ 、弾性係数  $40.9 \text{ kN/mm}^2$  であった。

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φ7.4（降伏応力  $1,267 \text{ N/mm}^2$ ）、T5試験体については表面が平滑な丸鋼φ7（降伏応力  $401 \text{ N/mm}^2$ ）を用いた（図-3参照）。

両引き引張試験は、荷重治具に試験体をセットして、センターホール型の油圧ジャッキにより鋼材に引張荷重を載荷することで行った。変位とひび割れ幅の計測は、図-4のように行った。

##### (2) 試験結果

試験から得られたひび割れ発生荷重と平均ひび割れ間隔を表-1に示す。ひび割れ発生荷重はT3-2を除き10kN前後の値となった。平均ひび割れ間隔は試験ケースにより大きく異なる値となった。図-5に解析で主に比較対象とするケースT1とT3の荷重-変位関係を示す。各ケース2体ある試験体の結果は、ケースT1の場合、1\_1、1\_2と示し、ケースT3の場合、3\_1、3\_2と示した。



図-3 鋼材の表面状態（左：異形鋼線、右：丸鋼）

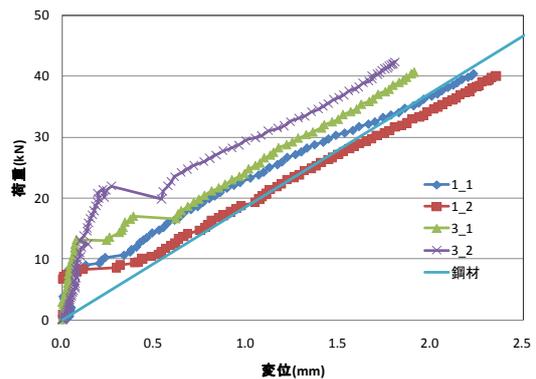


図-5 荷重-変位関係（試験、ケースT1、T3）

表-1 試験条件と試験結果

ケース	試験条件				試験結果				付着モデル 選定解析	パラメータ解析		
	強度	かぶり	乾燥条件	鋼材種類	ひび割れ発生荷重(kN)		平均ひび割れ間隔(mm)			強度	断面	初期 ひずみ
					1	2	1	2				
T1	標準	標準	全面	異形φ7.4	7.82	7.95	101.3	120	○	○	○	
T2			1面のみ		11.58	11.45	181	163			○	
T3		標準×1.5	全面		13.05	21.44	175	253	○	○		
T4	高強度	標準	全面		丸鋼φ7	8.25	10.75	188.5	163.5	○		
T5	標準			7.22		7.39	196	217	○	○		

### 3.2 解析方法

解析は、鉄筋コンクリートの静的非線形 FEM 解析プログラムを用いた<sup>6),7)</sup>。解析モデルは、図-6 のようにした。要素寸法は 10mm 程度を基本とした。鉄筋要素は、埋込鉄筋要素を使用し、鉄筋とコンクリートの付着応力-すべり量関係（以下、付着モデルと記す）は、CEB-FIP モデルに従った<sup>6),8)</sup>。解析モデルの両端の変位載荷部分に、高さ、幅がコンクリート部と同じで、長さが 50mm の弾性要素のプレートモデル化した。解法は、標準 Newton-Raphson 法を用いた。解析ステップは、変位増分によって表し、コンクリートに埋め込まれた鉄筋の両端のプレート部に、それぞれ逆方向に変位をかけた。変位は、プレート間の相対変位で 4.4mm まで試験体にかかる設定とした。変位は両引き引張試験に則して試験体の両端から中央方向に 75mm の位置で観測し、荷重は鉄筋反力として観測した。また、解析に用いたコンクリートと鋼材の力学特性を表-2 に示す。

### 3.3 解析ケース

解析は、両引き引張試験の結果に近い値を示す解析方法を選定することを目的として行った。ひび割れ発生性状に関する解析結果は、付着モデルに大きく依存するため、付着モデルを第一パラメータとした。また、断面の大きさに影響されず、適切な付着モデルを選定するため、断面積を第二パラメータとした。これらの解析ケースを表-3 に示す。

第一パラメータである付着モデルについて、実験に用いた PC 鋼材は、節形状が異形鉄筋と丸鋼鉄筋の中間の性質を持つ特殊な鋼材であった。そのため、CEB-FIP モデルが提示する異形鉄筋の付着モデルには一致しないと考え、異形鉄筋を対象とする付着モデルに加えて、丸鋼鉄筋を対象とする付着モデルについても解析を試みた。今回解析に用いた 3 種類の付着応力-すべり量関係を図-7 に示す。付着モデル[un-good]とは、異形鉄筋を対象とした拘束されていない部材 (unconfined concrete) の付着条件が良好なときのモデルである。[un-poor]とは、拘束されていない部材の付着条件が良好でないときのモデルである。[roll-good]とは、丸鋼鉄筋 (hot rolled bars) を用いた部材で付着条件が良好なときのモデルである。

第二パラメータの断面積は、両引き引張試験に則して、ケース T1 (42×48mm) とケース T3 (63×72mm) の断面寸法を代表値として採用した。

### 3.4 解析結果

#### (1) 荷重-変位関係

解析結果の荷重-変位関係を図-8 に示す。グラフには、解析結果のほか、両引き引張試験の結果と鋼材の荷重-変位関係を記載した。ケース T3 の付着モデル roll\_good の解析結果は、鉄筋とコンクリートの付着が切

れ、コンクリート部の変位が小さくひび割れが発生しない解析結果となったため、グラフには記載しなかった。

ケース T1 の解析結果においてひび割れは、付着モデルの違いに関係なく、荷重 9kN 付近で発生した。ひび割れ発生後は、荷重が低下し、その後再び荷重が増加し始めた。ひび割れ発生後の変位増加に対する荷重増加量は、un\_good と un\_poor でほぼ同様の値を示し、また鋼材の荷重増加量とも、ほぼ同じ値であった。roll\_good の荷重増加量は、他の 2 つの付着モデルと比較すると大きな値を示し、グラフの傾きが大きくなった。これは、変位をモニタリングしている対象がコンクリートであり、荷重をモニタリングしている対象が鋼材であることが理由である。ケース T1 の 1\_1, 1\_2 には、un\_good と un\_poor の付着条件で行った解析値と比較的近似する結果となった。

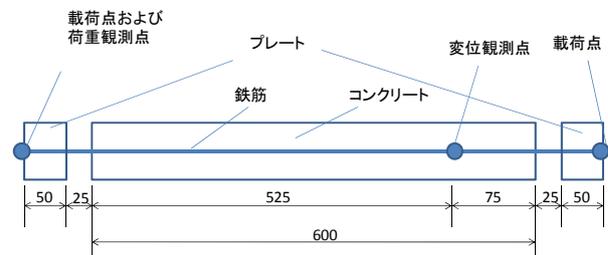


図-6 解析モデル

表-2 解析に用いたコンクリートと鋼材の力学特性

	種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 (-)
	コンクリート	標準	74.5	39.2	4.08
	高強度	88.2	42.7	4.56	0.20
		降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	直径 (mm)	
鋼材		1267	195.4	7.4	

表-3 解析ケース

	実験ケース	付着モデル		
		un_good	un_poor	roll_good
	ケースT1	●	●	●
	ケースT3	●	●	●

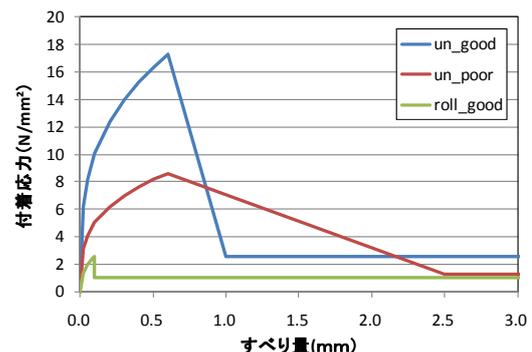


図-7 鉄筋とコンクリートの付着モデル

ケース T3 の解析結果において、ひび割れは付着モデルに関係なく、荷重 19kN 付近で発生した。ひび割れ発生後は、un\_good を用いた解析結果の場合、3\_2 の結果と近い値を示し、un\_poor を用いた解析結果の場合、3\_1 の結果と近い値を示した。そのため、2 つの解析結果に差異があったものの、どちらの付着モデルも実験結果に適すると評価した。

## (2) ひび割れ幅

図-9 は、解析結果から得られた最大ひび割れ幅と実験から得られた最大ひび割れ幅を示したグラフである。グラフは、引張荷重 40kN 時点のものである。ケース T1 の場合、付着強度が小さい付着モデルほど最大ひび割れ幅が大きくなった。実験値と比較すると 0.68mm および 0.84mm に対して、roll\_good の 0.78mm が最も近い値を示した。ケース T3 の場合、roll\_good では、ひび割れが発生しなかったため、最大ひび割れ幅を 0mm と表示したが、付着強度が小さい付着モデルほど最大ひび割れ幅が大きくなる傾向は見られた。また、実験値と比較すると、0.88mm に対して、un\_poor の 0.80mm が最も近い値を示した。

## (3) ひび割れ間隔

図-10 は、解析結果から得られた平均ひび割れ間隔と実験から得られた平均ひび割れ間隔を示したグラフである。ケース T3 の roll\_good は、ひび割れが発生しな

ったため、平均ひび割れ間隔は 300mm と表示した。最大ひび割れ幅と同様に、ケース T1 とケース T3 の両方において、付着強度が小さくなるのに伴い、平均ひび割れ間隔が大きくなった。実測値に最も近似する付着モデルは、ケース T1 とケース T3 の両方の場合、付着モデル un\_poor となった。

## (4) 付着モデルの選定

実験値と解析値の比較より、実験値に近い解析結果を示す付着モデルの選定を行った。実験値の±20%以内に収まる値を示した解析ケースを「適合」、±50%以内に収まる値を示した解析ケースを「おおむね適合」、それ以外を「適合せず」として、各解析ケースを評価した。加えて、各付着モデルの評価のうち、最も多い種類の評価水準を、その付着モデルの総合評価とした。その評価

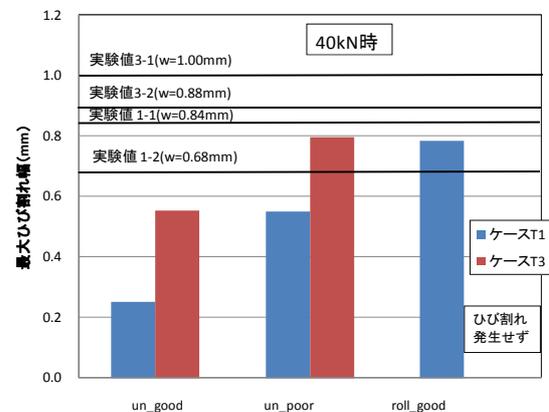


図-9 ひび割れ幅の比較

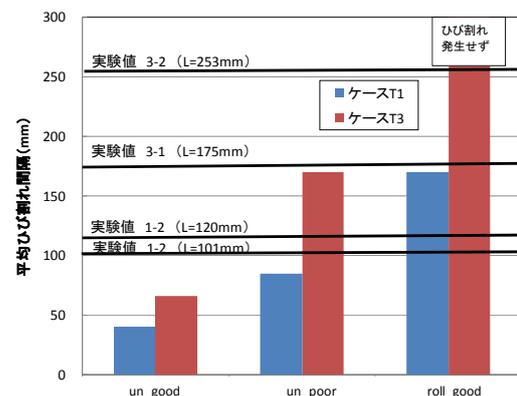
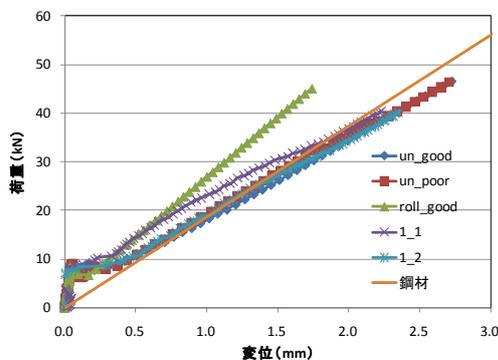
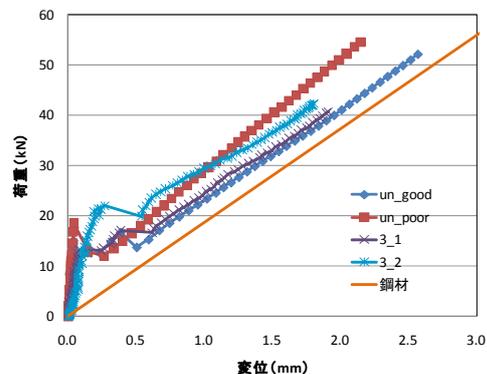


図-10 ひび割れ間隔の比較



(a) ケース T1



(b) ケース T3

図-8 荷重-変位関係の比較

表-4 付着モデルの評価結果

		荷重-変位関係		ひび割れ幅		ひび割れ間隔		総合
		ケースT1	ケースT3	ケースT1	ケースT3	ケースT1	ケースT3	
付着モデル	un_good	◎	◎	△	○	△	△	△
	un_poor	◎	◎	○	◎	◎	◎	◎
	roll_good	○	△	◎	△	○	△	△

◎:適合(±20%)、○:おおむね適合(±50%)、△:適合せず

結果をまとめたものを表-4 に示した。un\_poor の総合評価は「適合」、その他の un\_good と roll\_good は「適合せず」となった。したがって、両引き試験結果に近い値を示す付着モデルは un\_poor と判断した。

#### 4. パラメータ解析

付着モデルの選定により、「適合」と判断された un\_poor を用いてパラメータ解析を行った。パラメータとしては、断面積、コンクリート強度、乾燥収縮の 3 つを使用し、これらの値をそれぞれ 3 水準で変化させたときの傾向を調べた。

##### 4.1 断面積とひび割れ間隔の関係

断面寸法には実験ケース T1, T5 (48mm×42mm) とケース T3 (72mm×63mm) の寸法に加え、同じ割合で断面を小さくした、24mm×21mm の断面についても解析を行った。図-11 は、横軸をコンクリート幅とし、縦軸に解析結果から得られた平均ひび割れ間隔を示したグラフである。グラフ上には、実験値と土木学会が示す設計式をあわせて示した<sup>9)</sup>。土木学会の設計式を以下に示す。

$$L_{max}=1.1 k_1 k_2 k_3 (4c+0.7(c_s-\phi)) \quad (1)$$

$$k_1=1.0 \quad (\text{異形鉄筋の場合})$$

$$=1.3 \quad (\text{普通丸鋼, PC 鋼材の場合})$$

$$k_2=15/(f'_c+20)+0.7$$

$$k_3=5(n+2)/(7n+8)$$

ここに、 $c$  : かぶり (mm),  $k_1$  : 鋼材表面形状に関する係数,  $k_2$  : コンクリートの品質に関する係数,  $k_3$  : 引張鋼材の段数に関する係数,  $f'_c$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>),  $n$  : 引張鋼材の段数,  $c_s$  : 鋼材の中心間隔 (mm),  $\phi$  : 鋼材径 (mm)

土木学会の設計式で得られるひび割れ間隔は、最大ひび割れ間隔  $L_{max}$  であるため、以下の式を用いて平均ひび割れ間隔  $L_{ave}$  とした<sup>4)</sup>。

$$L_{ave}=L_{max}/1.5 \quad (2)$$

設計式は、異形鉄筋を対象としたものと丸鋼鉄筋を対象にしたものの 2 種類を示した。設計式は、試験体断面が大きくなると平均ひび割れ間隔が大きくなる傾向を示す。解析値と実験値は、この傾向と同様の傾向を示した。また、解析値は丸鋼鉄筋の設計式に近い値を示した。

##### 4.2 コンクリート強度とひび割れ間隔の関係

コンクリート強度には実験ケース T1, T5 (74.5N/mm<sup>2</sup>) とケース T4 (88.2N/mm<sup>2</sup>) の値を用い、加えてコンクリート強度 60N/mm<sup>2</sup> についても解析を行った。図-12 は、横軸をコンクリート強度とし、縦軸に解析から得られた平均ひび割れ間隔を示したグラフである。グラフ上には、実験値と土木学会が示す設計式をあわせて示した。設計式は、コンクリート強度が増加すると平均ひび割れ間隔が緩やかに減少する傾向を示した。一方、解析値と実験

値では、コンクリート強度が増加するのに伴って、平均ひび割れ間隔が増加し、設計式と異なる傾向を示した。コンクリート強度の増加は、引張強度と付着強度の増加につながるが、今回の特殊鋼材の付着条件では、付着強度の増加の影響が小さく、引張強度の増加の影響が大きかったため、ひび割れ間隔が大きくなる傾向を示したと考えられる。

##### 4.3 初期ひずみの違いによる荷重と変位の関係

乾燥収縮ひずみを解析で模擬するために、初期ひずみを解析モデルに与えた時の荷重-変位関係を図-13 に示した。この解析は、実験ケース T1 の条件で行った。

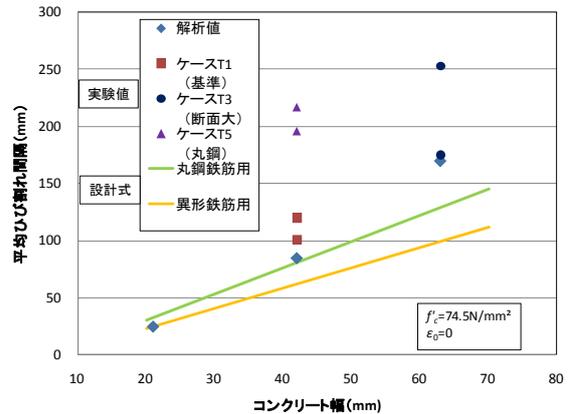


図-11 コンクリート幅と平均ひび割れ間隔の関係

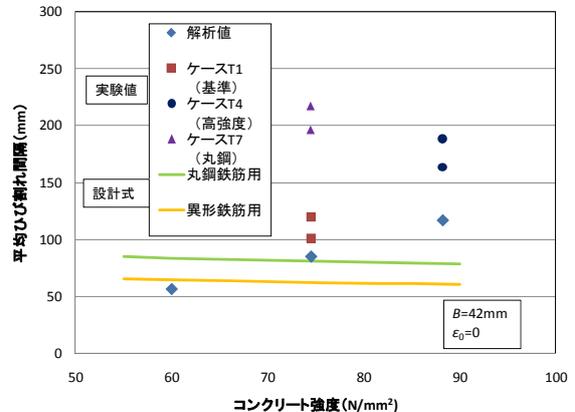


図-12 コンクリート強度と平均ひび割れ間隔の関係

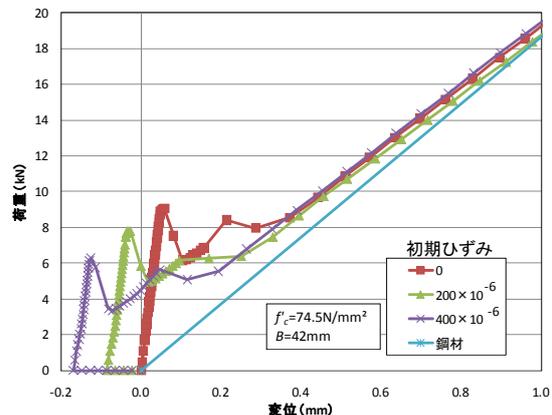


図-13 初期ひずみを与えたときの荷重-変位関係

初期ひずみは、実験に用いたコンクリートと同様のコンクリートの乾燥収縮試験より選定した。乾燥収縮ひずみは、材齢約100日で $400 \times 10^{-6}$ 程度となったため、初期ひずみは、乾燥収縮を考慮しないケースで $0 \times 10^{-6}$ 、乾燥収縮を考慮したケースで $400 \times 10^{-6}$ 、その中間値のケースで $200 \times 10^{-6}$ と設定した。

荷重が増加する点が負側の変位から始まった。また、初期ひずみが大きくなることに伴い、ひび割れ発生荷重が小さくなった。これは、コンクリートの収縮ひずみが鉄筋に拘束され、コンクリートに引張側の弾性ひずみが蓄積されたためである。初期の剛性（変位増加に対する荷重増加の割合）は、ひび割れ発生まで初期ひずみに関係なく同程度となった。ひび割れ発生後は鋼材の荷重－変位関係に漸近した。

それぞれのグラフの荷重が増加し始める点を原点に移動したものを図-14に示す。初期ひずみを与えた場合、鋼材のみの荷重－変位関係よりも同一荷重時の変位が大きくなるのが分かる。載荷試験や実構造物において、力学性能の評価には、コンクリートの初期ひずみの考慮が重要であることが確認できた。また、この考えから初期ひずみや乾燥状態が推定可能であることが確認できた。

## 5. まとめ

遠心成形コンクリートの両引き引張試験を模擬した解析に適用する付着モデルの選定とパラメータ解析から得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 鉄筋とコンクリートの付着応力－すべり量関係を変化させた解析の結果から、付着強度が小さくなることに伴い、最大ひび割れ幅と平均ひび割れ間隔が大きくなることが確認できた。
- 2) 両引き引張試験の結果に近い値を示す解析モデルは、CEB-FIPに示された、異形鉄筋を対象とした拘束されていない部材の付着条件が良好でないときのモデル(un\_poor)と判断できた。そのため、今回の検討範囲において遠心成形コンクリートの特殊鋼材には、この付着モデルを使用することが適切と考えられる。
- 3) パラメータ解析の結果、試験体の断面幅が増加することに伴い、平均ひび割れ間隔が増加する傾向が確認できた。この傾向は、実験値や土木学会の設計式の傾向と一致した。
- 4) パラメータ解析の結果、コンクリート強度が増加することに伴い、平均ひび割れ間隔が増加することが確認できた。この傾向は、実験値の傾向と一致したが、土木学会の設計式の傾向とは一致しなかった。
- 5) 初期ひずみを与えた解析の結果から、初期ひずみが大きいほどひび割れ発生荷重が低下すること、ひび割

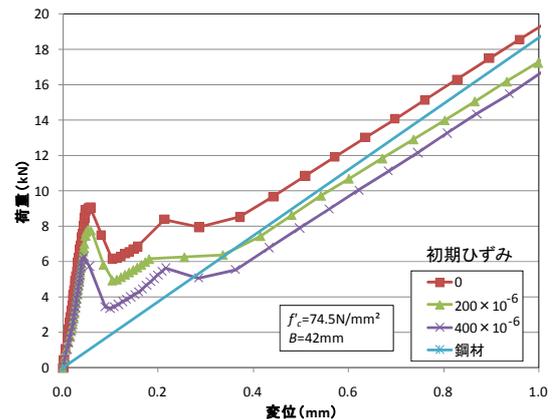


図-14 平行移動した初期ひずみあり荷重－変位関係

れ発生後には初期ひずみの違いによらず鋼材の荷重－変位関係に漸近することが確認できた。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、ご協力いただきました(株)計算力学研究センターの三輪健治氏に厚く御礼を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 日本工業規格：JIS 遠心成形コンクリート
- 2) 福澤公夫，沼尾達弥，川名信政，清田章二：遠心力締固めコンクリートの特性に及ぼす各種要因の影響，コンクリート工学年次論文集，pp.331-336，Vol.20，No.2，1998
- 3) 角田典史雄：鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅，コンクリートジャーナル，Vol.8，No.9，pp.1-10，1970.
- 4) 趙唯堅，丸山久一：鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ幅算定式の再評価，土木学会論文集，No.490/V-23，pp.147-156，1994.
- 5) 伊藤始，岩波光保，横田弘：PVA短繊維で補強したコンクリートのひび割れ分散性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1549-1554，2004.
- 6) ATENA 理論マニュアル，計算力学研究センター，2004
- 7) 土木学会コンクリート委員会・コンクリート構造物の非線形解析技術研究小委員会(322)：コンクリート構造物の非線形解析技術研究小委員会成果報告書，コンクリート技術シリーズ，土木学会，No.50，pp.18-34，93-100，207-234，2003.
- 8) CEB:CEB-FIP Model Code 1990，Bulletin d'Information，No.213/214，pp.437，1993.
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編，2007.