

短繊維補強コンクリートのひび割れ間隔に関する基礎的検討

Fundamental Study on Cracking Interval of Fiber Reinforced Concrete with Reinforcing

技術研究所 竹山 忠臣 TADAOMI TAKEYAMA

技術研究所 恩田 陽介 YOSUKE ONDA

技術研究所 佐々木 亘 WATARU SASAKI

技術研究所 篠崎 裕生 HIROO SHINOZAKI

技術研究所 三上 浩 HIROSHI MIKAMI

本報では、鉄筋と短繊維補強コンクリートを併用し、コンクリートの圧縮強度および引張軟化特性を変化させた場合のコンクリートのひび割れ間隔を検討した。その結果、圧縮強度と引張軟化特性を変化させても、ひび割れ間隔は従来の普通コンクリートとほぼ同程度であった。また、鉄筋と短繊維補強コンクリートを併用する場合も普通コンクリートと同様、ひび割れ面における鉄筋ひずみを把握することで、ひび割れ幅を求めることができる。

キーワード：短繊維補強コンクリート、架橋効果、引張軟化特性、異形鉄筋、ひび割れ間隔

This paper describes the test results of the cracking interval at the test specimens which were made from fiber reinforced concrete with reinforcing bars in various conditions. The results showed that the compressive strength and tension softening property of the concrete didn't affect to the cracking interval and that interval was similar to that of in the conventional concrete structure. Besides, the crack width in the structure with fiber reinforced concrete and reinforcing bars can be calculated by using the strain of the reinforcing bars.

Key Words: Fiber Reinforced Concrete, Bridging Effect, Tension Softening Property, Reinforcing Bar, Cracking Interval

1. はじめに

短繊維補強コンクリートは、古くから研究が実施されており、コンクリート中に短繊維を分散させることで、せん断耐力の向上、ひび割れ幅の抑制などの効果が得られる。国内で実用化されている短繊維補強コンクリートの代表的な例として、圧縮強度が 150N/mm^2 以上、鋼繊維を 2vol.%程度混入した超高強度繊維補強コンクリート¹⁾ (以下、UFC と略記) が挙げられる。

コンクリート中に混入した短繊維が効果を発揮するのは、ひび割れ発生後である。しかし、設計では短繊維補強コンクリートは SHCC²⁾ (ひずみ硬化型セメント系複合材料) のような一部の材料を除いて、設計荷重レベルの作用する使用状態でひび割れ発生後の繊維の架橋効果を考慮されていないのが現状である。そのため、ひび割れ発生後の繊維の架橋効果を考慮することができれば、より合理的な部材設計ができるものと考えられる。部材

設計をする上でひび割れ面におけるひび割れ間隔とひび割れ幅の関係を把握するのは重要となる。

本報では、鉄筋と短繊維補強コンクリートを併用した部材を対象とし、圧縮強度と引張軟化特性をパラメータとした鉄筋と短繊維補強コンクリートを併用した部材の両引き試験を行うことで、ひび割れ間隔とひび割れ面における鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係を検討した。

2. 実験概要

(1) 試験体

図-1 に試験体を示す。寸法は $120 \times 120 \times 1500\text{mm}$ とし、断面中央に D19 の異形鉄筋 (竹節) を配置した。鉄筋のかぶり厚は 50mm である。D19 の両端には D25 のネジ節鉄筋をエンクローズド溶接で接合して端部鋼板にナット定着した。鉄筋の材質はいずれも SD345 とした。鉄筋応力を測定するために、鉄筋にひずみゲージを設置した。

本報では、ひずみゲージ設置による鉄筋とコンクリートの付着性能に与える影響を最小限に抑える目的で、鉄筋のひずみ計測位置は試験体中央の一箇所、表裏のみとした。ひずみゲージ設置に際し、貼付け位置の異形鉄筋の断面欠損が生じない程度に削り、リード線は縦リブに沿わせて配線し、試験体端部の上面から引き出した。

試験体端部には、M12の全ネジボルトを4本埋込み、試験体端部の割裂破壊を防止する目的で、厚さ2.3mmの鋼板を試験体の4面にエポキシ樹脂を用いて接着した。試験体数は1水準あたり2体とした。

(2) 実験要因およびコンクリートの配合

本報では短繊維補強コンクリートの圧縮強度と引張軟

化特性を実験要因とし、試験時の圧縮強度の目標値を40, 80N/mm²とした。引張軟化特性は、目標圧縮強度40N/mm²の水準の試験体を基準としてPL, A, B (AよりもBが引張軟化特性は優れている)の3水準を設定し、目標圧縮強度80N/mm²の水準の試験体では、B水準よりも引張軟化特性が優れたC水準を追加し、PL, A, B, Cの4水準とした。表-1に使用材料、表-2にコンクリートの配合を示す。目標圧縮強度40N/mm²の試験体の水セメント比は55%、目標圧縮強度80N/mm²の試験体の水結合材比は40%とした。繊維混入量は、図-2に示すように、圧縮強度が異なっても各水準での引張軟化特性が同程度になるように決定した。なお、短繊維は外割で混入した。

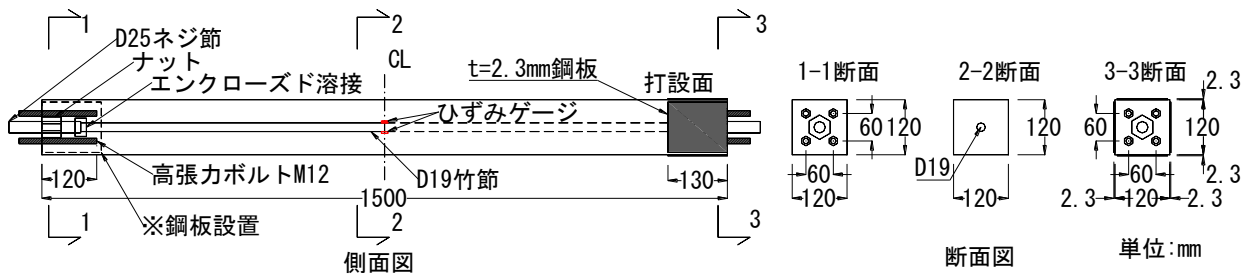


図-1 試験体

表-1 使用材料

材料	種類,物性など	
水	上水道水	
結合材	セメント	早強ポルトランドセメント,密度3.23g/cm ³
	混和材	エジプト産シリカフューム,密度2.25g/cm ³
細骨材	砕砂,栃木県産石灰砕砂,密度2.73g/cm ³	
粗骨材	砕石1505,栃木県産硬質砂岩,密度2.64g/cm ³	
短繊維	鋼繊維,密度7.85g/cm ³ ,繊維径0.62mm,繊維長30mm,引張強度1100N/mm ² ,両端フック付	
化学混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系
	消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体

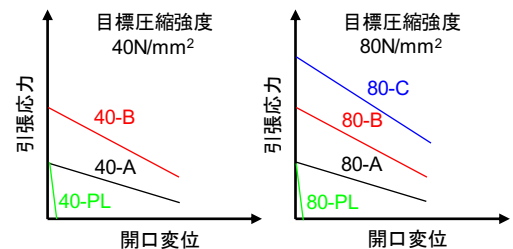


図-2 試験パラメータ (圧縮強度, 引張軟化特性)

表-2 配合表

試験体名	W/B (%) ※40-PL,A,B はW/C	s/a (%)	繊維混入量 Vf (vol.%)	単位量(kg/m ³)					
				水 W	結合材B		粗骨材 G Gmax 15mm	短繊維 Fb	
					セメント C	シリカフューム SF			細骨材 (砕砂) S
40-PL			-						
40-A	55.0	70.5	0.5	175	318	0	1315	530	39.3
40-B			1.0						78.5
40-C			1.5						117.8
80-PL			-						
80-A	40.0	69.0	0.35	175	438	44	1224	530	27.5
80-B			0.75						58.9
80-C			1.5						117.8

(3) 試験体の製作

コンクリートは容量 100 リットルの強制二軸ミキサーにより練混ぜ、フレッシュ性状の確認後直ちに型枠内へ打込んだ。打込みは、型枠振動機を併用して型枠端部より片押しで打込み、突き棒で締固めを行った。目標圧縮強度 40N/mm^2 の試験体は、打込み後 3 日間の湿布養生の後、脱枠を行い、試験材齢まで実験室に静置した。目標圧縮強度 80N/mm^2 の試験体は蒸気養生を行った。蒸気養生条件は、前置きが注水後 4 時間、昇温速度 15°C/hr 、最高温度 50°C 、保持時間を 56 時間、降温速度 7.5°C/hr である。蒸気養生終了後に脱枠を行い、試験材齢まで実験室に静置した。

(4) 強度試験

強度試験として圧縮強度試験、割裂引張強度試験、切欠きはりの 3 点曲げ試験を行った。割裂引張強度試験では、供試体端面に荷重方向と垂直になるようにひずみゲージを設置し、測定値が不連続になったときの荷重からひび割れ発生強度¹⁾を求めた。切欠きはりの 3 点曲げ試験は、JCI 試験方法²⁾に準じ、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用いた曲げ試験によって得られた荷重-開口変位曲線を逆解析することで引張軟化曲線を算出した。

(5) 事前のひび割れ導入

短繊維補強コンクリートの引張性能を検討する場合、ひび割れ発生後の繊維の架橋効果を把握する必要がある。鉄筋と短繊維補強コンクリートを併用した両引き試験を行う場合、ひび割れ面における鉄筋の引張力、引張荷重を計測し、引張荷重から鉄筋の引張力を差し引くことで繊維の架橋力を検討することができる。しかし、試験の前に、ひび割れ発生位置を特定することは困難である。このため、写真-1 に示すように、載荷試験前に試験体の中央のひずみゲージを設置した位置にひび割れを導入し、ひび割れ面における鉄筋の引張力を算出できるようにした。

事前のひび割れ導入には、容量 1000kN の万能試験機を用い、測定項目は、荷重、コンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、開口幅（ひび割れ幅）とした。ひび割れ導入後、一度荷重を除荷し、鉄筋ひずみなどが安定して測定できる荷重（ 10kN 程度）まで再度加力した段階での値を両引き試験の初期値とした。なお、ひび割れ導入前から初期値測定まで、残留した鉄筋ひずみは $100\sim 400\mu$ 程度、残留ひび割れ幅は $0.005\sim 0.100\text{mm}$ （両面のパイ型変位計の平均で 0.05mm 以下）程度であった。ひび割れ導入後、ひび割れが開閉しないように、幅 38mm 、厚さ 9mm 、長さ 600mm の鋼板を試験体の両側面に設置し、万力で

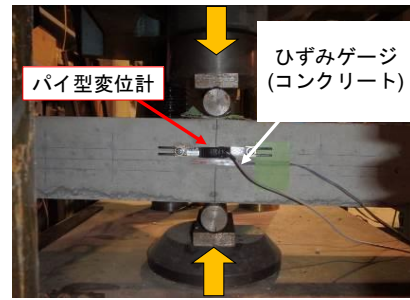


写真-1 事前ひび割れ導入状況

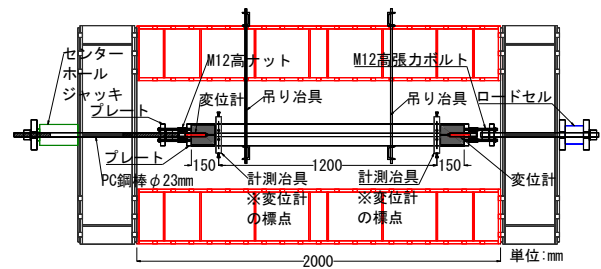


図-3 試験装置（荷重、変位測定位置図）

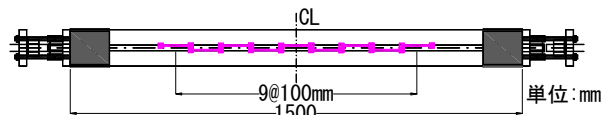


図-4 計測位置図（開口幅）

挟み込んで固定し、載荷試験まで静置した。

(6) 両引き試験

両引き試験に使用した試験装置を図-3 に示す。試験体端部に埋め込んだ全ネジボルトを高ナットで延長し、プレートを介し、 $\phi 23\text{mm}$ のPC鋼棒とセンターホールジャッキを用い、加力した。吊り治具と試験体の接する面にはテフロンシートを2重で設置し、摩擦の影響を除外した。図-3、4 に計測位置図を示す。測定項目は、荷重、変位、鉄筋ひずみ、パイ型変位計による開口幅（ひび割れ幅）とした。荷重の検出には容量 300kN のロードセルを用いた。変位は、試験体端部より 150mm の位置に変位計を設置して測定し、試験区間は 1200mm とした。載荷側は容量 50mm 、固定側は容量 25mm の高感度変位計を用いた。開口幅は、検長 100mm 、容量 5mm のパイ型変位計を試験体側面の試験体軸方向に沿って千鳥に片面9台ずつ、計18箇所測定した。本報における開口幅（ひび割れ幅）は、検長 100mm 区間の変位である。

3. 実験結果

(1) 強度試験結果

表-3 に強度試験結果、図-5 に引張軟化曲線を示す。

表-3 強度試験結果

試験体名	圧縮強度試験結果		割裂引張強度試験結果		曲げ試験結果	
	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ひび割れ発生強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	曲げタフネス T _{emod4} (N・mm)
40-PL	59.0	37.8	5.12	4.79	5.14	-
40-A	65.6	37.3	-	3.89	6.21	1.91
40-B	67.4	37.5	-	5.30	9.49	3.75
80-PL	92.6	41.9	4.77	4.49	4.72	-
80-A	91.7	41.6	-	4.98	5.46	1.63
80-B	94.0	42.0	-	4.86	7.62	2.66
80-C	94.9	44.2	-	5.74	12.99	4.69

40-PL, 40-A, 40-B の圧縮強度は、目標圧縮強度 40N/mm² に対して 20N/mm² 程度上回る結果となったが、3 水準の間で、圧縮強度はほぼ同程度であった。80-PL, 80-A, 80-B, 80-C の圧縮強度は、目標圧縮強度 80N/mm² に対して、10N/mm² 程度上回る結果となったが、ほぼ目標値の範囲内の結果であった。ひび割れ発生強度は、いずれも若干のバラつきがあるが、4.00～5.50N/mm² 程度であった。40-A, 40-B の引張軟化曲線を比較すると、同一開口変位の時、引張応力は 2 倍程度になっている。80-A, 80-B, 80-C の引張軟化曲線も同様に、同一開口変位 (0.3～0.5mm 程度) の時、引張応力は 80-B は 80-A の 2 倍程度、80-C は 80-A の 3 倍程度になっている。目標引張軟化特性が同一水準である 40-A と 80-A, 40-B と 80-B を比較すると、40-B よりも 80-B の方が、開口変位が 4mm までの曲げタフネス、同一開口変位の時の引張応力も若干低い結果となっている。しかし、ひび割れ発生後の引張応力のピークを比較すると、40-A と 80-A, 40-B と 80-B の差は 0.5N/mm² 以下であり、引張軟化特性は圧縮強度が異なっても同程度であり、当初計画を満足することができた。

(2) 両引き試験結果

本報で使用した D19 異形鉄筋 (試験区間の鉄筋) の力学特性は、鉄筋単体の引張試験から、降伏点が 389N/mm², 引張強度 573N/mm², 弾性係数 184kN/mm², 試験体端部の D25 ネジ節鉄筋は 393N/mm², 引張強度 567N/mm², 弾性係数 191N/mm² であった。

図-6 に両引き試験で得られた荷重-変位関係、図-7 に両引き試験体 2 体の内 1 体の試験終了後の試験体側面のひび割れ図を一例として示す。図-6 中には、鉄筋単体の引張試験結果より得られた荷重-ひずみ関係の平均曲線から試験区間 1200mm の変位として表した結果も併せて示す。加力は、パイ型変位計で計測された開口幅が

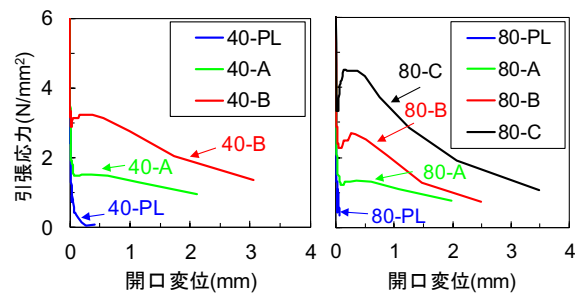
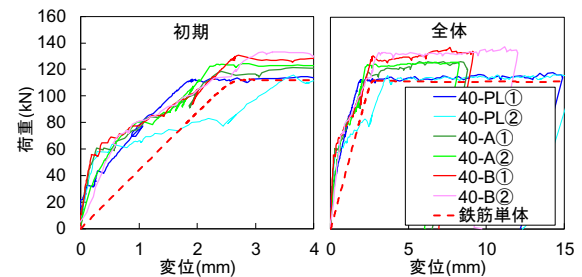
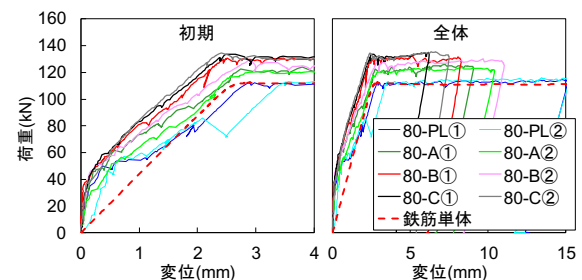


図-5 引張軟化曲線



a) 目標圧縮強度 40N/mm² の試験体



b) 目標圧縮強度 80N/mm² の試験体

図-6 両引き試験結果

4mm を超える、もしくは新たなひび割れが発生しなくなり定常状態になったと判断されるまで行った。図-7 では、試験終了後、試験体を観察し、2.0mm 以上に拡幅しているひび割れを赤色で示してある。載荷開始後、いずれも事前に導入した試験体中央のひび割れが拡大した。

新たなひび割れが発生した後は、事前に導入したひび割れを含むそれ以前に発生した全てのひび割れがほぼ均等に拡大した。40-PL と 80-PL は、鉄筋降伏後も複数のひび割れが拡大したのに対して、短繊維補強コンクリートの試験体は、鉄筋降伏後、鉄筋降伏前に発生したひび割れの一本ないし数本のみが拡大する傾向が見られた。特に引張軟化特性が高くなるにつれて、この傾向は強く見られた。40-PL と 80-PL の赤色に着色したひび割れと短繊維補強コンクリートの試験体のひび割れの発生状況を比較すると、短繊維補強コンクリートの試験体はプレーンコンクリートの赤色のひび割れとほぼ同じ位置にひび割れが発生し、そのごく近傍に複数のひび割れが発生している。ひび割れが複数発生する傾向は、引張軟化特性が高くなるにつれて強くなっているものの、複数本のひび割れを大きく 1本のひび割れとしてまとめると、本報で実施した試験体の断面を貫通するレベルのひび割れ幅の大きいひび割れの発生位置に大きな差がないことが分かる。

既往の研究⁵⁾で、鉄筋とコンクリートの両引き試験を行う場合、コンクリートの収縮による初期応力の影響が大きいことが知られている。本報では、事前に試験体にひび割れを導入していることから、初期応力が部材性能に与える影響を考慮できていない。40-PL、80-PLの2体の内の1体は、試験体の変位を測定している計測治具の位置にひび割れが発生し、荷重-変位関係において、加力初期の領域では鉄筋単体の同一変位の荷重よりも小さくなっている領域があるが、変位が 3mm 程度を超える領域では鉄筋単体との差が小さくなっている。目標圧縮強度が 40N/mm²の試験体は、鉄筋降伏前のテンションスティフニングおよびひび割れ発生後の繊維の架橋効果に大きな差は見られなかった。これは、変位を測定していた計測治具の位置にひび割れが生じたためである。目標圧縮強度が 80N/mm²の試験体は、引張軟化特性が高くなるにつれて、テンションスティフニングと繊維の架橋効果に差が見られ、引張軟化特性が高くなるにつれて、同一変位における荷重-変位関係の荷重が高くなった。鉄筋降伏後は、目標圧縮強度が 40N/mm²と 80N/mm²の試験体ともに引張軟化特性の A, B, C の順に荷重は高くなっている。ここで、圧縮強度が異なっても、引張軟化特性が同じ水準であれば、最大荷重は同程度になっていること、ひび割れの発生状況に大きな差がないことから、本検討範囲での短繊維補強コンクリート部材の引張性能は、圧縮強度の影響は小さく、引張軟化特性に依存すると思われる。

図-8 に試験体中央で測定されたひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係を示す。本報における開口幅（ひび割れ幅）

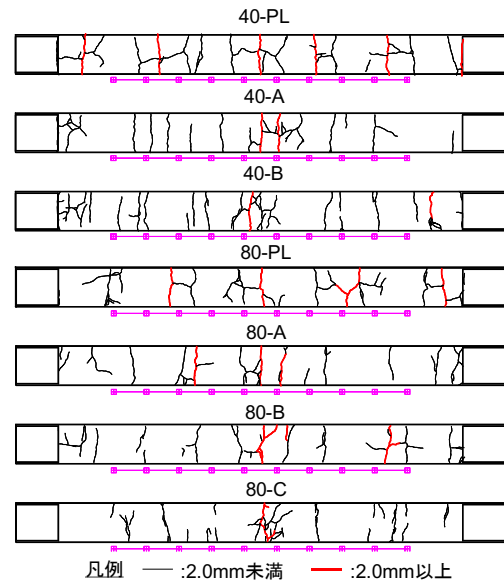
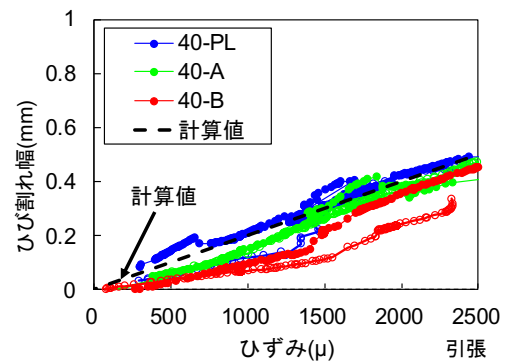
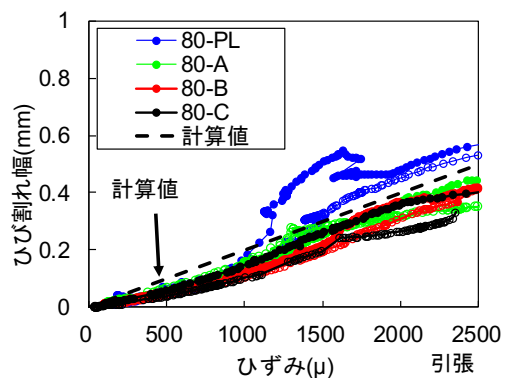


図-7 ひび割れ図（試験終了後）



a) 目標圧縮強度 40N/mm²の試験体



b) 目標圧縮強度 80N/mm²の試験体

図-8 鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係

は、検長 100mm 区間の変位である。図-7 に示したように、事前に導入した試験体中央のひび割れの近傍に新たなひび割れが発生している試験体もあるため、開口幅（ひび割れ幅）は 1本ないし複数本のひび割れを含んだ値である。図-8 より、鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係

には線形的な関係があり、鉄筋ひずみに比例してひび割れ幅が増加している。これは、引張軟化特性が異なっても同様の傾向があることが認められる。

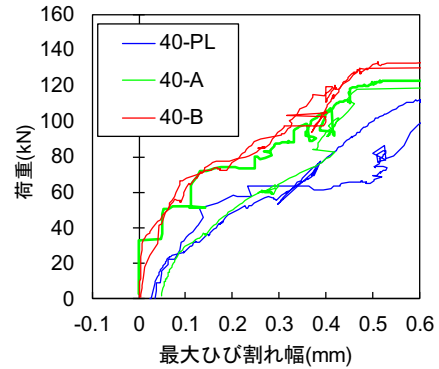
一般的に、鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅⁴⁾は、式(1)より求めることができる。

$$w = l(\varepsilon_s - \varepsilon_c) \quad (1)$$

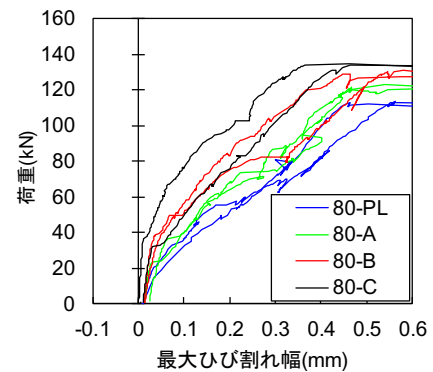
ここに、 w ：ひび割れ幅(mm)、 l ：ひび割れ間隔(mm)、 ε_s ：鉄筋の平均ひずみ、 ε_c ：コンクリート表面における平均ひずみ

図-8中に、ひび割れ間隔 l をかぶり c の4倍としてコンクリートのひずみを無視した場合の計算値⁴⁾を併せて示すが、計算値と実験値はほぼ一致していることがわかる。既往の研究⁵⁾で、鉄筋とたわみ硬化型⁶⁾の短繊維補強コンクリートを併用した場合に、ひび割れ間隔に鉄筋の平均ひずみを乗ずることで、平均ひび割れ幅を求めることができるとの知見がある。本報では、鉄筋と短繊維補強コンクリートの併用構造を対象としているため、主にひずみ軟化型⁶⁾の短繊維補強コンクリートを検討しているが、ひずみ軟化型の短繊維補強コンクリートでも、たわみ硬化型の短繊維補強コンクリートと同様に、ひび割れ間隔に鉄筋ひずみを乗ずることで、ひび割れ幅を求めることができると言える。また、本報の範囲の短繊維補強コンクリートでは、引張軟化特性がひび割れ間隔に与える影響は小さく、既往の研究のかぶりの4倍に依存すると思われる⁴⁾⁷⁾。なお、たわみ硬化型の短繊維補強コンクリートとは、UFC¹⁾のように引張軟化曲線の引張応力のピークがマトリクスのひび割れ発生強度と同程度ないし、それ以上に上昇する短繊維補強コンクリートである。これは、ひび割れ発生後、ひび割れ面における繊維の架橋効果が高く、一定の変形量まで微細なひび割れが発生し、荷重-変位関係が増加するものである。また、ひずみ軟化型の短繊維補強コンクリートは引張軟化曲線の引張応力のピークがマトリクスのひび割れ発生強度に達することなく、荷重-変位関係が軟化していくものである。

図-9に試験体側面で測定していたパイ型変位計の最大値と荷重の関係を示す。いずれの試験体も同様に、引張軟化特性が高い水準ほど、同一荷重時の最大ひび割れ幅は小さくなっているのが分かる。特に、目標圧縮強度 80N/mm^2 の試験体は引張軟化特性が高くなるにつれて、同一荷重時の最大ひび割れ幅は顕著に小さくなっているのが分かる。これより、鉄筋と短繊維補強コンクリートを併用する場合、ひび割れ面における繊維の架橋効果によりコンクリート部材の最大ひび割れ幅を低減することができる。



a) 目標圧縮強度 40N/mm^2 の試験体



b) 目標圧縮強度 80N/mm^2 の試験体

図-9 最大ひび割れ幅

4. まとめ

本報では、鉄筋と短繊維補強コンクリートを併用した構造を対象として、圧縮強度と引張軟化特性を変化させた場合に、コンクリートのひび割れ間隔を鉄筋とコンクリートの両引き試験により検討した。本報で得られた知見を以下に示す。

①鉄筋とひずみ軟化型の短繊維補強コンクリートを併用した場合、本報の範囲の短繊維補強コンクリートの圧縮強度と引張軟化特性がひび割れ間隔に与える影響は小さく、普通コンクリートと同程度である。

②鉄筋とひずみ軟化型の短繊維補強コンクリートを併用した場合、本報の範囲においては、圧縮強度がひび割れ幅に与える影響は小さいが、引張軟化特性が高くなるほど最大ひび割れ幅およびひび割れ面における鉄筋ひずみは小さくなる。

③鉄筋と短繊維補強コンクリートを併用した場合も普通コンクリートと同様、ひび割れ面における鉄筋ひずみを把握することができれば、ひび割れ幅の算定は可能となる。

本報では、鉄筋と短繊維補強コンクリートを併用した

場合のひび割れ間隔に関する検討を行った。しかし、コンクリートの収縮による初期応力、鉄筋比を変化させた場合などの鉄筋とコンクリートの付着特性に関する検討が不十分であるため、今後十分な検討を行っていく必要があると考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー，No.113，2004
- 2) 例えば，林承燦，閑田徹志，水野勇，六郷恵哲：ひび硬化型高靱性セメント複合材料で作製した部材の引張性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1525-1530，2004
- 3) JCI 基準：切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法 JCI-S-002-2003
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，2012
- 5) 例えば，塩永亮介，佐藤靖彦，Walraven,J.C.：高性能繊維補強モルタルを適用した RC 部材の一軸引張挙動に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.66，No.4，pp.366-379，2010
- 6) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 106，繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会成果報告書，2015.8
- 7) 角田与史雄：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，pp1-9，Sept. 1970