

論文 鉄筋と短繊維補強コンクリートのひび割れ特性に関する基礎的検討

竹山 忠臣*1・佐々木 亘*2・篠崎 裕生*3・内田 裕市*4

要旨：本研究では、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鉄筋とコンクリートのひび割れ特性を検討した。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コンクリート構造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

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混入させる目的の一つには、ひび割れ幅の抑制が挙げられる。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/mm²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)、一般的なコンクリートと同程度の圧縮強度のコンクリートに鋼繊維を混入し、せん断耐力、変形性能の向上を期待した、鋼繊維補強コンクリート²⁾などが挙げられる。

コンクリート中に混入させた短繊維が効果を発揮するのは、ひび割れ発生後である。一般に短繊維は、コンクリート部材に引張力が作用し、ひび割れが発生した後に、ひび割れ面を架橋することで、引張力を受け持つことができる。UFC³⁾であれば、引張軟化曲線の開口変位を等価検長で除すことで、引張応力-開口変位関係から引張応力-ひずみ関係にすることができるため、繊維の架橋効果を考慮した部材耐力を引張軟化特性から算定することができる。しかし、短繊維補強コンクリートは一部の限定的な材料以外、使用状態でのひび割れの発生を許容されていない。ひび割れ発生後の繊維の架橋効果を考慮した部材設計を行うことができれば、より経済的、合理的

な部材設計ができるものと考えられる。

本検討では、短繊維補強コンクリートのひび割れ発生後の繊維の架橋効果として引張軟化特性⁴⁾を考慮したコンクリート部材の引張性能の評価を行うことを目的とした。そして本検討では、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、鉄筋と短繊維補強コンクリートの両引き試験を行うことで、繊維の架橋効果およびひび割れ特性を検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1 に試験体を示す。1 辺が 120mm の正方形断面の中心に D19 の異形鉄筋(竹節)を配置し、試験体の長さ は 1500mm とした。鉄筋のかぶり厚は 50mm とした。D19 の鉄筋の両端には D25 のネジ節鉄筋をエンクローズド溶接で接合した。鉄筋の材質はいずれも SD345 とした。また、鉄筋応力を測定するために、鉄筋にひずみゲージ(ゲージ長さ 5mm)を設置した。本検討では、鉄筋とコンクリートの附着性能に与える影響を小さくするため、鉄筋のひずみ計測位置は試験体中央の一箇所のみとした。異形鉄筋の縦リブの黒皮を断面欠損が生じない程度に削り、ひずみゲージを設置し、縦リブに沿わせてリード線を固

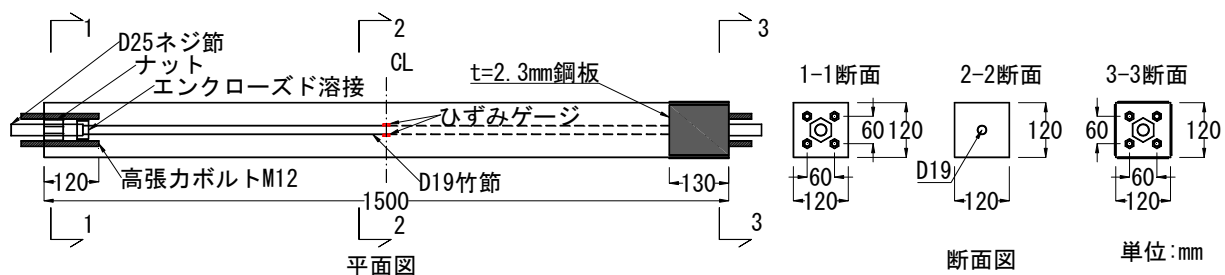


図-1 試験体

*1 三井住友建設(株) 技術研究所 土木構造グループ 工修 (正会員)

*2 三井住友建設(株) 技術研究所 建設材料グループ 博(工) (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究所 土木構造グループ 博(工) (正会員)

*4 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 博(工) (正会員)

定し、試験体端部の打設面から引出した。また、ひずみゲージの防水対策として、ひずみゲージ接着後、防水テープを薄く設置し、その上から2液混合型のエポキシ樹脂を異形鉄筋の節とコンクリートの付着を阻害しないように塗付した。本検討では、試験体の側面（型枠面：図-1の断面図中、左右）に異形鉄筋の節が向くように配置した。

試験体の端部には、SCM435、M12の全ネジボルトを4本埋込み、埋込み長さは120mmとした。試験体端部の割裂破壊を防止する目的で、エポキシ樹脂を用い、厚さ2.3mmの鋼板を試験体の4面に接着した。ひずみゲージのリード線を引出すために、上面の鋼板にはφ15mmの穴を設けた。試験体数は、一水準で2体とした。

2.2 試験パラメータ

本検討で実施した試験体一覧および試験パラメータを表-1、図-2に示す。本検討では、圧縮強度と引張軟化特性をパラメータとし検討を行った。圧縮強度は、試験時の目標圧縮強度を40、80N/mm²の2水準、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、A、B（AよりもBが引張軟化特性は優れている）の2水準を設定した。目標圧縮強度80N/mm²の試験体では、B水準よりも引張軟化特性の優れたC水準も採用し、A、B、Cの3水準とした。目標圧縮強度40と80N/mm²のプレーンコンクリート（PL）も採用した。

いずれも予備試験練りを実施し、A、B、Cの水準は圧縮強度が異なっても、それぞれで引張軟化特性は同程度になるように繊維混入量を調整した。

2.3 配合表

表-2に本検討で使用した配合を示す。目標圧縮強度40N/mm²のシリーズは、水セメント比を55%、目標圧縮強度80N/mm²のシリーズは、水結合材比を40%とし、繊維は外割で混入した。セメントは早強ポルトランドセメント（密度3.13g/cm³）、細骨材は栃木県産砕砂（密度

表-1 試験体一覧

試験体名	試験パラメータ		
	目標圧縮強度 (N/mm ²)	目標引張軟化特性	
		引張軟化水準	繊維混入量 (vol.%)
40-PL	40	PL(プレーン)	-
40-A		A	0.5
40-B		B	1
80-PL	80	PL(プレーン)	-
80-A		A	0.35
80-B		B	0.75
80-C		C	1.5

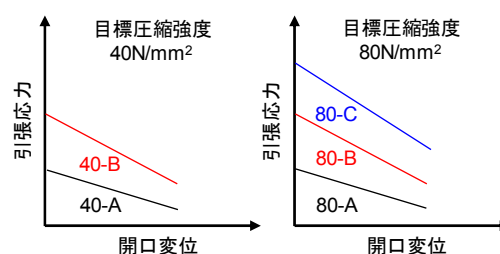


図-2 試験パラメータ



写真-1 使用繊維

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 フェューム SF			細骨材 (砕砂) S
40-PL	55.0	70.5	-	175	318	0	1315	530	-
40-A			0.5						39.3
40-B			1.0						78.5
80-PL	40.0	69.0	-	175	438	44	1224	530	-
80-A			0.35						27.5
80-B			0.75						58.9
80-C			1.5						117.8

2.70g/cm³), 粗骨材は栃木県産砕石 1505 (密度 2.63g/cm³) を用い, 目標圧縮強度 80N/mm² のシリーズには, シリカフェーム (密度 2.25g/cm³) を用いた。目標圧縮強度 40N/mm² のシリーズは打込み時のスランプと空気量の目標値を 8.0cm, 4.5%とし, 高性能 AE 減水剤, AE 剤および消泡剤の使用量により調整した。目標圧縮強度 80N/mm² のシリーズは, 打込み時の空気量の目標値を 3.5%とし, 高性能 AE 減水剤, 消泡剤の使用量により調整した。

繊維は, 繊維長 30mm, 繊維径 0.62mm, アスペクト比 48, 密度 7.85g/cm³, 引張強度 1100N/mm² で両端にフック加工が施された鋼繊維 (写真-1) を使用した。

2.4 養生方法

目標圧縮強度 40N/mm² の試験体は, 打込み後, 材齢 3 日まで湿布養生を行った後, 脱枠を行い, 実験室に静置した。目標圧縮強度 80N/mm² の試験体は, 打込み完了後, 4 時間まで前置き養生を行った後に 15°C/hr で昇温し, 50°C56 時間の蒸気養生を行い, 7.5°C/hr で降温した。蒸気養生後, 脱枠を行い, 試験材齢まで実験室に静置した。

2.5 事前ひび割れ導入

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, 引張荷重を計測することで, 繊維の架橋力を検討することができる。試験の前に, ひび割れ発生位置を特定することができないため, ひずみゲージを貼り付ける位置を増やすことができれば, ひび割れがひずみゲージを設置した位置に発生する確率が高くなるが, ひずみゲージを設置する位置を増やすことは困難であり, また鉄筋とコンクリートの付着を低下させる可能性がある。このため, 本検討では, ひずみゲージを設置する位置は, 試験体中央の 1 箇所のみとした。そこで, 写真-2 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丸鋼を介して割裂引張力を与えてひび割れを導入することで, ひび割れ面における鉄筋の引張力を求めた。

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でオフセットした。なお, ひび割れ導入後, 残留した鉄筋ひずみは 100~400μ 程度, ひび割れ幅は 0.005~0.100mm (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

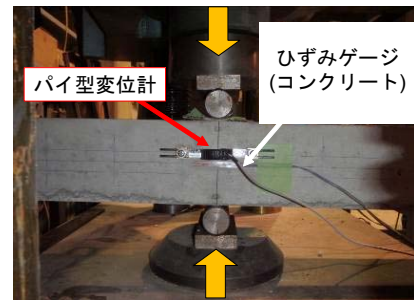


写真-2 事前ひび割れ導入状況

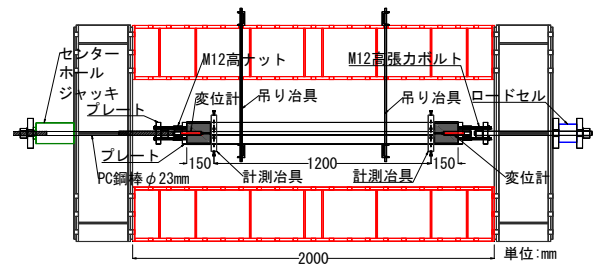


図-3 試験装置

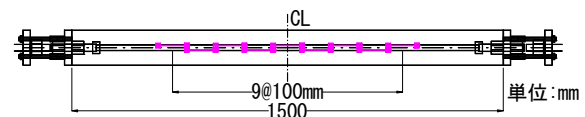


図-4 計測位置図 (開口幅)

(型枠面) に設置し, 万力で挟み込んで固定し, 載荷試験まで静置した。

2.6 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, φ23mm の PC 鋼棒とセンターホールジャッキを用い, 載荷した。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。計測項目は, 荷重, 変位, 鉄筋ひずみ, パイ型変位計による開口幅とした。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。

3. 実験結果

3.1 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。ひび割れ発生強度は, 割裂引張強度試験で供試体の端面

表-3 強度試験結果

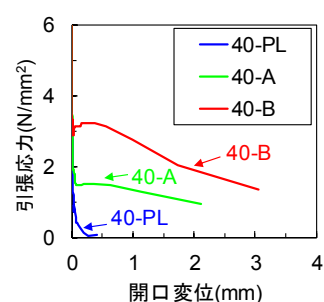
試験体名	圧縮強度試験結果		割裂引張強度試験結果		曲げ試験結果	
	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ひび割れ 発生強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	曲げタフネス T _{cmod4} (N・mm)
40-PL	59.0	37.8	5.12	4.79	5.14	-
40-A	65.6	37.3	-	3.89	6.21	1.91
40-B	67.4	37.5	-	5.30	9.49	3.75
80-PL	92.6	41.9	4.77	4.49	4.72	-
80-A	91.7	41.6	-	4.98	5.46	1.63
80-B	94.0	42.0	-	4.86	7.62	2.66
80-C	94.9	44.2	-	5.74	12.99	4.69

に荷重方向と垂直になるようにひずみゲージを設置し、計測値が不連続となったときの荷重から求めた³⁾。引張軟化曲線は、JCI 試験方法に⁵⁾に準じ、100×100×400mmの角柱供試体を用いた切欠きはりの3点曲げ荷重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算出した。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。引張軟化特性は、40-A, 40-Bの引張軟化曲線を比較すると、同一ひび割れ幅の時、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、同一ひび割れ幅(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。40シリーズと80シリーズの目標引張軟化特性の同一水準のAとBを比較すると、80シリーズの方が、開口変位が4mmまでの曲げタフネス、同一ひび割れ幅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、圧縮強度が異なっても、引張軟化特性は同程度になっていると言える。

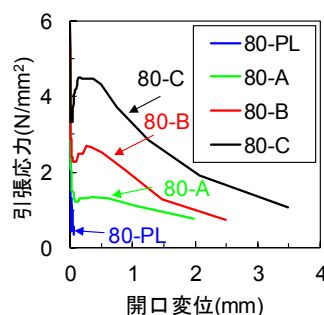
3.2 両引き試験結果

本研究で使用した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



a) 40シリーズ



b) 80シリーズ

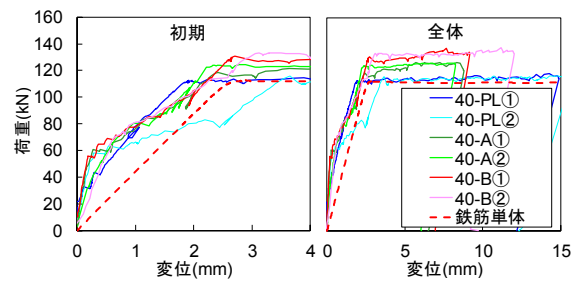
図-5 引張軟化曲線

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の変位として表わした結果を示す。実験は、パイ型変位計で計測された開口幅が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。荷重開始後、いずれも事前に導入した試験体中央のひび割れが拡幅し、新たなひび割れ発生した後は、中央のひび割れ、もしくはその他のひび割れが拡幅した。40-PLと80-PLは、鉄筋降伏後も複数のひび割れが拡幅した。短繊維補強コンクリー

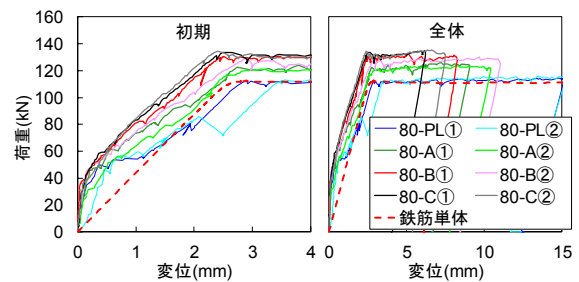
トの試験体は、鉄筋降伏後、鉄筋降伏前に発生したひび割れの本数ないし数本のみが拡幅する傾向が見られた。特に引張軟化特性が高くなるにつれて、この傾向は強く見られた。40-PL と 80-PL の赤色に着色したひび割れと短繊維補強コンクリートの試験体のひび割れを比較すると、短繊維補強コンクリートの試験体はプレーンコンクリートの赤色のひび割れとほぼ同じ位置にひび割れが発生し、そのひび割れのごく近傍に複数のひび割れが発生している。ひび割れが複数発生する傾向は、引張軟化特性が高くなるにつれて強くなっているが、複数本のひび割れを大きく1本のひび割れとしてまとめると、本検討で実施した試験体のひび割れの発生位置に大きな差がないことが分かる。

既往の研究⁶⁾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。本検討では、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器具の位置にひび割れが発生し、荷重-変位関係が鉄筋単体の同一変位の荷重よりも小さくなっているが、変位が3mm程度から荷重-変位曲線は鉄筋単体に漸近している。40シリーズは、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器具の位置にひび割れが生じたためである。80シリーズは、引張軟化特性が高くなるにつれて、鉄筋降伏前のテンションスティフニングおよび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、40と80シリーズ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と、ひび割れ状況に大きな差がないことから、本検討の範囲の短繊維補強コンクリートの圧縮強度では、コンクリート部材の引張性能に与える影響は小さく、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。なお、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、本検討における開口幅(ひび割れ幅)は、検長100mm区間の変位であり、1本ないし複数本のひび割れを含んだ値である。図より、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。



a) 40 シリーズ



b) 80 シリーズ

図-6 両引き試験結果

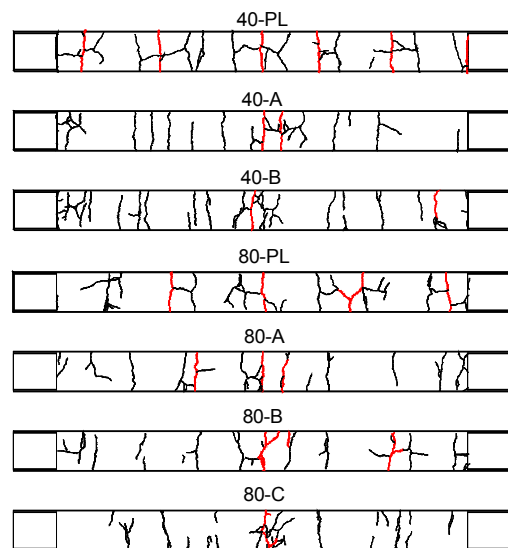


図-7 ひび割れ図 (試験終了後)

ここで、鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅⁷⁾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中には、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を示す。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⁶⁾で、鉄筋とたわみ硬化型⁸⁾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。本検討では、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⁸⁾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、本検討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、従来のかぶりの4倍に依存すると思われる。

本検討では、鉄筋と短繊維補強コンクリートの両引き試験を行い、一軸引張応力下でひび割れ特性を検討した。一方、曲げを受ける状態では、ひずみ軟化型の短繊維補強コンクリート⁹⁾でもひび割れが分散し、ひび割れ間隔が小さくなる場合もあると思われるため、今後の課題としたい。

4. まとめ

本検討では、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、圧縮強度と引張軟化特性を変化させた場合に、鉄筋とコンクリートのひび割れ特性を鉄筋と短繊維補強コンクリートの両引き試験により検討した。本検討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、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い。
- (2) 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と思われる。

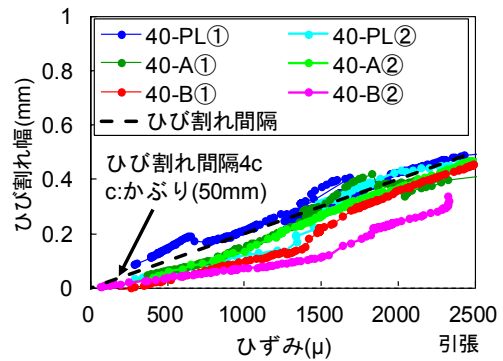
本検討では、鉄筋と短繊維補強コンクリートのひび割れ特性に関する検討を行ったが、コンクリートの収縮による初期応力、鉄筋比を変化させた場合などの鉄筋とコンクリートの付着特性に関する検討が不十分であるため、今後十分な検討を行っていく必要があると考えている。

謝辞

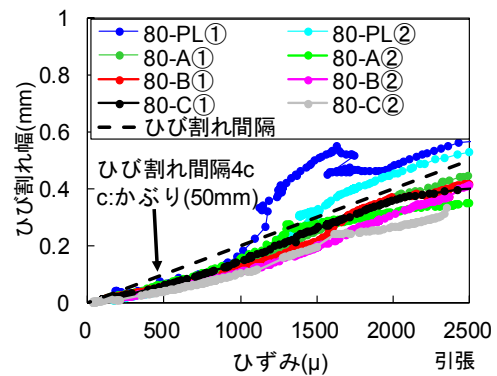
本検討を実施するにあたりご協力をいただきました岐阜大学大学院の黒田宗之氏、他の研究室の皆様へ厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 武者浩透, 大竹明朗, 児玉明彦, 小林忠司: 超高強度コンクリート系新素材「ダクタル」を用いた PC 橋梁の設計・施工—酒田みらい橋—, プレストレストコンクリート, Vol.45, No.2, pp.40-48, 2003



a) 40 シリーズ



b) 80 シリーズ

図—8 鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係

- 2) 土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計施工指針(案), コンクリートライブラリー, No.97, 1999
- 3) 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
- 4) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳治: 曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測, 土木学会論文集, No.426/V-14, pp.203-212, 1991
- 5) JCI 基準: 切欠きはりを有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
- 6) 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
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2012
- 8) 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
- 9) 例えば, 鬼塚由佳, 金久保利之: DFRCC の曲げ性能に及ぼす繰返し載荷の影響の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.1315-1320, 2009