

論文 バサルト繊維を用いた短繊維補強コンクリートのひび割れ性状

仁平 達也*1・田中 徹*2・田中 章*3・村井 和彦*4

要旨：開発したバサルト繊維を 1.0Vol%混入した短繊維コンクリートのひび割れ性状について、一軸引張試験により普通コンクリート、鋼繊維補強コンクリートと比較することにより検討した。その結果、曲げタフネスが鋼繊維と同等程度であること、鋼繊維に若干劣るものの、普通コンクリートよりも高いテンションステイフネス効果を有すること、ひび割れ発生荷重が普通コンクリートよりも小さいこと等に起因し、普通コンクリートよりも高いひび割れ分散効果が得られることが示唆された。また、実構造物の使用状態程度の鉄筋の引張ひずみ 700~1000 μ 時における最大ひび割れ幅が最も小さくなった。

キーワード：短繊維補強コンクリート、バサルト繊維、一軸引張試験、ひび割れ

1. はじめに

鋼繊維や有機繊維を用いた短繊維補強コンクリートの実構造物への適用事例は、近年、学協会等で多数報告され¹⁾、今後も一層の発展が見込まれる。このうち、普通コンクリート(圧縮強度 24~60N/mm²)における短繊維補強コンクリートは、はく落防止や、耐荷性向上、ひび割れ抑制等を目的とした適用事例が報告されている。

このうち、ひび割れ抑制については、合成床板等に、主として負曲げ区間の乾燥収縮によるひび割れ低減、これに伴う曲げひび割れ幅の低減、鋼材腐食の低減等を目的として実施されている。しかしながら、鋼繊維の場合、鋼繊維自体の腐食による錆汁の発生に伴う美観等の低下が懸念される。また、有機繊維の場合、ひび割れ発生箇所における有機繊維の紫外線による劣化等が懸念される。

さて、バサルト繊維は、玄武岩を融解して製造する新材料の無機繊維である。これまで、土木構造物においては、既設トンネル覆工の内面補強工法として、帯状に加工した補強プレートとして採用した実績²⁾があるものの、バサルト繊維を短繊維補強コンクリート用に用いた事例はほとんどなく、施工性等も含めて研究段階³⁾にある。

本研究では、このバサルト繊維に着目し、その力学的特性がひび割れ分散性状に及ぼす影響について、基礎的な検討を実施した。具体的には、鋼繊維補強コンクリートの施工実績⁴⁾を参考に、バサルト繊維と鋼繊維の短繊維補強コンクリートと普通コンクリートの、3種類の鉄筋コンクリートの試験体を用いて一軸引張試験を実施し、ひび割れ状況に関する検討を行った。

2. 開発した繊維の概要

バサルト繊維は、玄武岩を 1500℃程度で溶融押し出し

表-1 開発した繊維の原料

バサルト繊維	792 (tex) (264 (tex) を 3 本束ねた形状)
含浸樹脂	ビニルエステル樹脂

表-2 開発した繊維の基本的性質

長さ	40	mm	引張強度	882	N/mm ²
直径	0.9	mm	ヤング係数	30.1	kN/mm ²
密度	1.68	g/cm ³	—	—	—

※試験方法は、JIS K 6911 によった。



図-1 バサルト繊維の概形

(遠心) 紡糸し、得られた直径 13 μ mm の糸を束ねたものがバサルト繊維の原糸となる。しかしながら、この状態では繊維自体が解れてしまうため、ビニルエステル樹脂で含浸し、炭素繊維と同様に、繊維強化プラスチック (FRP) とした。なお、束ねる糸は、過去の検討結果等⁵⁾を参考に、792tex (1tex=単位長さ 1000m あたりの糸の重さが 1g) とし、繊維長は一般的な最大粗骨材寸法 (Gmax) の 2 倍である 40mm とした。表-1 に試験に用いた短繊維の原料を示す。表-2 に繊維の基本的性質を示す。図-1 にバサルト繊維の概形を示す。特に、ヤング係数は 30.1kN/mm²であり、鋼繊維の約 15%となっている。以降は、この開発した繊維をバサルト繊維とする。

*1 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士 (工学) (正会員)

*2 戸田建設株式会社 価値創造推進室 技術開発センター 工修 (正会員)

*3 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 工修 (正会員)

*4 戸田建設株式会社 価値創造推進室 技術開発センター 博士 (工学) (非会員)

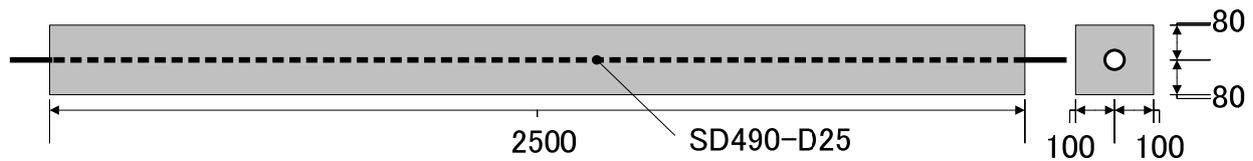
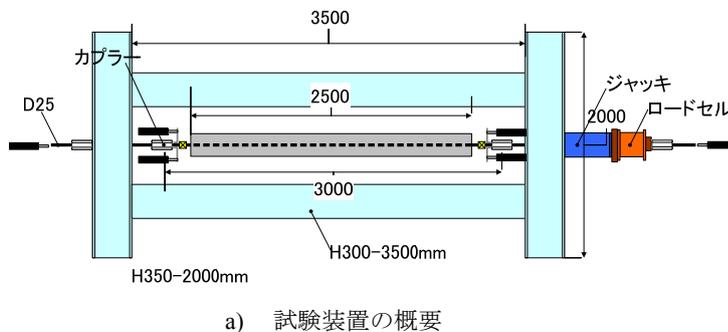


図-2 試験体の概形 (SD490, 鉄筋比=1.56%)



a) 試験装置の概要



b) 実験状況

図-3 測定状況の概要

3. 一軸引張試験結果および考察

3.1 試験概要

表-3 に試験体の概要を示す。試験体は 3 種類各 1 体とした。No.1 を普通コンクリート, No.2 を鋼繊維補強コンクリート, No.3 をバサルト繊維補強コンクリートとした。繊維混入量は No.2, No.3 とともに 1.0Vol%とした。繊維混入量は No.2, No.3 とともに 1.0Vol%とした。Gmax は 20mm, 水セメント比 (W/C) は 50%, 細骨材率 (s/a) は 60%とした。

図-2 に試験体の概形を示す。試験体の長さは、既往の文献^{6)・7)}を参考に 2500mm とした。試験体の断面寸法や鉄筋比は、実構造物の梁部材等の水平部材を想定した。すなわち、断面寸法は、打設時に短繊維のせき板効果が生じないように、短辺が繊維長の 4 倍以上を確保し $b \times h = 200 \times 160 \text{mm}$ とし、鉄筋は D25, 鉄筋比は 1.56%とした。使用した鉄筋は、SD490 のねじ節鉄筋とした。引張降伏強度は 523N/mm^2 , ヤング係数 200kN/mm^2 である。SD490 は、現状の実構造物において、SD345 や SD390 と比べて採用事例が少ないが、ひび割れ分散性状を把握するために、可能な限り鉄筋を引張ることによってひび割れの定常状態、すなわち、既往の実験⁷⁾と同様に貫通ひび割れが増加しない状態までデータを安定的に取得する目的で用いた。また、ねじ節鉄筋は、通常の異形鉄筋ではひずみゲージを添付する際に縦リブを削る必要があり、断面欠損が大きくなることが考えられるため、これを防ぐ目的で用いた。なお、本試験体は、短繊維補強コンクリートであるため、打設時においてバイブレーターは使用していない。打設後は試験体を湿布養生した。

図-3 に測定状況の概要を示す。試験体と荷重フレームは、平坦な床に平置きし、一端を荷重フレームに固定し、他端にセンターホールジャッキを設置した上で、引

表-3 試験体の概要

	試験体の種類	混入量
No.1	普通コンクリート	—
No.2	鋼繊維補強コンクリート (鋼繊維：フック付き鋼繊維)	1.0 (Vol%)
No.3	バサルト繊維補強コンクリート	1.0 (Vol%)

※Gmax : 20mm, W/C=50%, s/a=60%, 繊維長 40mm

張力を軸方向鉄筋が降伏するまで単調引張荷重した。その際、部材軸方向および部材軸直角方向の 2 方向にベアリングプレートを均等な位置に 5 つ配置し、摩擦を絶ち、試験体の変形を拘束しないようにした。測定は、引張荷重、鉄筋ひずみおよびひび割れ幅とした。鉄筋ひずみは、125mm ピッチに両面に添付したひずみゲージにより計測した。なお、ひずみゲージのリード線は、試験結果に影響を及ぼさないよう、束ねずに各々をコンクリートから取り出した。ひび割れ幅は、両端より鉄筋の定着長程度離れた区間 (150mm) より内側の範囲を π 型変位計 (PI-5-100 : 東京測器株式会社製) により測定した。これに伴い、材料試験を実施した。

3.2 材料試験

(1) 材料試験の概要

材料試験は、圧縮強度と曲げ変形試験を材齢 28 日で実施した。なお、一軸引張試験は試験準備等の関係で、No.1 は材齢 25 日, No.2 は材齢 27 日, No.3 は材齢 29 日で実施した。コンクリートのフレッシュ性状において、スランプ高さは、No.1 が 23.5cm, No.2 が 18cm, No.3 が 16cm となり、施工時にファイバーボールの発生は確認されなかった。

(2) 圧縮試験結果

表-4 に圧縮試験結果を示す。試験結果は 3 体の平均値

表-4 圧縮試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	供試体の密度 (g/cm ³)
No.1	50.9	27.8	2.32
No.2	50.6	27.0	2.35
No.3	49.5	25.9	2.30

表-5 曲げ強度, 曲げ靱性率

	曲げ強度 (N/mm ²)		曲げタフネス	
	測定値	平均値	測定値	平均値
No.1-1	5.54	6.20 (0.65)	—	—
No.1-2	6.42		—	
No.1-3	7.06		—	
No.1-4	5.95		—	
No.2-1	6.50	6.40 (0.16)	3.96	4.00 (0.15)
No.2-2	6.22		3.83	
No.2-3	6.49		4.13	
No.3-1	6.19	6.00 (0.57)	3.82	4.20 (0.26)
No.3-2	5.41		4.30	
No.3-3	5.21		4.32	
No.3-4	6.37		4.40	

※括弧内は標準偏差

である。圧縮強度とヤング係数は、No.3 のバサルト繊維補強コンクリートが最も小さくなり、ヤング係数はNo.1 に比べて 10%程度低下した。これは、表-2 に示すように、バサルト繊維のヤング係数が小さいことに起因すると思われる。また、供試体の密度が他の試験体よりも小さくなったのは同様の理由であると考えられる。

(3) 曲げ変形試験

曲げ変形試験は JSCE-G552「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法(案)」に基づいて行った。試験体は 4 体を基本とし (No.2 は測定不良により 3 体)、100×100×400mm の角柱供試体で行った。図-5 に試験状況を示す。表-5 に曲げ変形試験結果を示す。図-6 に No.2 (鋼繊維) の荷重-鉛直変位関係、図-7 に No.3 (バサルト繊維) の荷重-鉛直変位関係を示す。

表-5 より、曲げ強度の平均値は No.3 が最も小さくなった。この原因の一つとして、(2)の圧縮試験と同様に、バサルト繊維を混入した試験体は、普通コンクリートよりもヤング係数が小さいため、曲げ強度到達時において、応力をより負担しなかったことが考えられる。曲げタフネスは、試験体間のばらつきはみられるものの、No.3 の平均値は No.2 の平均値を 5%程度上回った。

図-6 と図-7 を比較すると、荷重の最大値において、No.3 は No.2 より小さくなっており、最大荷重時は No.2 よりも 10%程度低下した。この値は繊維の混入率の増減に伴って変動するものと考えられるが、本試験においては、圧縮強度の低下率と概ね同等となった。また、鋼繊維は最大荷重以降、荷重-変位関係において、緩やかに荷重が低下していく傾向が見られたが、バサルト繊維は、一旦荷重が低下し、その後凸型の曲線を描いた。この曲線形状は、バサルト繊維の弾性係数が鋼繊維と比べて小



図-5 曲げ変形試験の状況

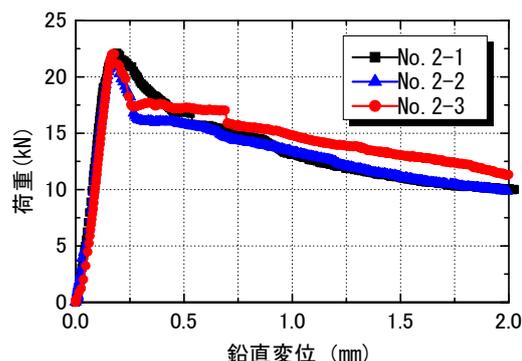


図-6 No.2 (鋼繊維) の荷重-鉛直変位 (最大荷重の平均値=21.7kN)

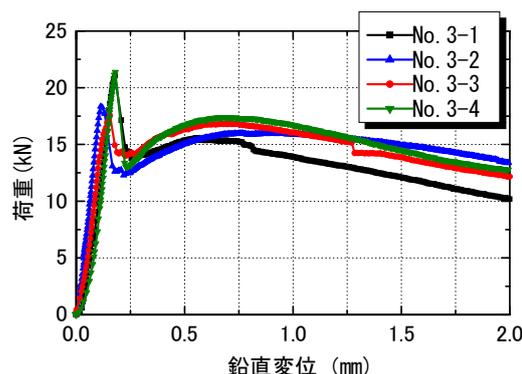


図-7 No.3 (バサルト繊維) の荷重-鉛直変位 (最大荷重の平均値=19.6kN)

表-6 破断面における引抜け本数と破断本数

	引抜け数 (本)	破断数 (本)	破断割合 (%)	
			測定値	平均値
No.2-1	64	12	15.8	14.3
No.2-2	57	9	10.0	
No.2-3	56	6	17.2	
No.3-1	63	4	5.2	7.1
No.3-2	74	14	15.6	
No.3-3	69	7	2.0	
No.3-4	77	3	5.4	

さいことや、既往の文献⁸⁾に示される表面が凹凸加工され付着性状が良好な短繊維補強コンクリートと同様に、引抜け時に繊維の破断が少なく、引き抜け挙動が卓越したことに起因すると思われる。これに関して、試験時の繊維自体の挙動を把握する目的で、簡易ではあるが、試験終了後更に鉛直変位を増加し、試験体を完全に破断させ、破断面における引抜けた繊維数と破断した繊維数

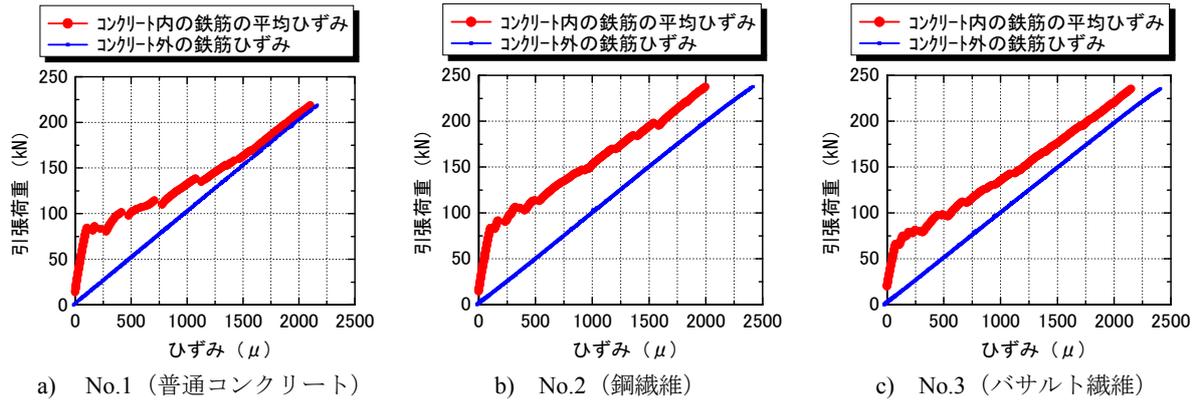


図-8 引張荷重-鉄筋の平均ひずみ

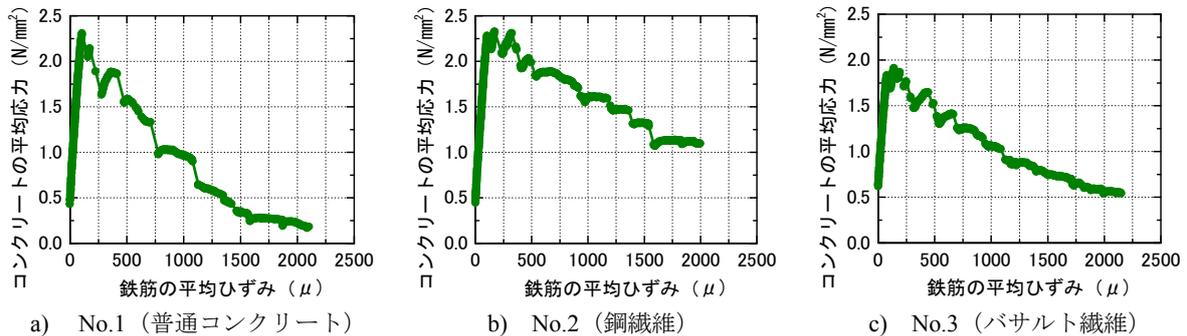


図-9 コンクリートの平均応力-鉄筋の平均ひずみ

の割合について検討した。表-6 の検討結果に示すように、No.3 (バサルト繊維) は、No.2 (鋼繊維) よりも引き抜けた割合が高くなる傾向が見られた。このことから、ひび割れ幅の増加に対してバサルト繊維自体が破断するのではなく、引抜ける挙動が卓越していたことを確認した。この結果、エネルギー吸収の指標である曲げタフネスが向上し、バサルト繊維は鋼繊維と同等程度になったものと考えられる。

3.3 一軸引張試験

(1) 鉄筋の平均ひずみとコンクリートの平均応力

図-8 に引張荷重と鉄筋の平均ひずみの関係を示す。図-9 にコンクリートの平均応力とひずみゲージから得られた鉄筋の平均ひずみの関係を示す。コンクリートの平均応力 ($\sigma_{c,ave}$) は、式 (1) により求めた。

$$\sigma_{c,ave} = (P - A_s \cdot E_s \cdot \varepsilon_{c,ave}) / A_c \quad (1)$$

ここに、

- P : 引張荷重, A_s : 鉄筋の断面積,
- E_s : 鉄筋のヤング係数, $\varepsilon_{c,ave}$: 鉄筋の平均ひずみ,
- A_c : コンクリートの断面積

なお、コンクリートの平均応力の検討では、載荷時点でのコンクリートの収縮による影響を考慮し、載荷開始前の鉄筋に作用した圧縮ひずみの測定値 (No.1=-24 μ , No.2=-15 μ , No.1=-23 μ) を加算して測定した。

図-10 にコンクリートの平均応力を引張強度で除した値 ($\sigma_{c,ave}/\sigma_{ct}$) と鉄筋の平均ひずみの関係を示す。梁部材

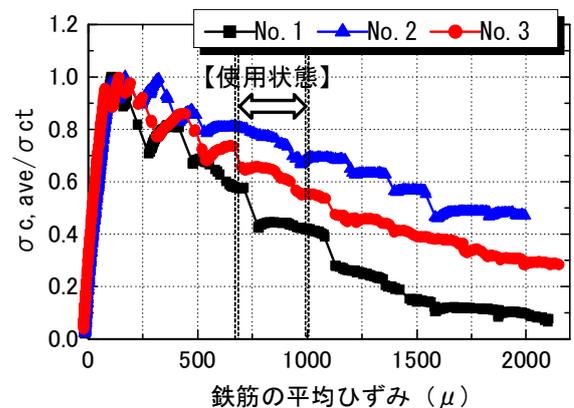
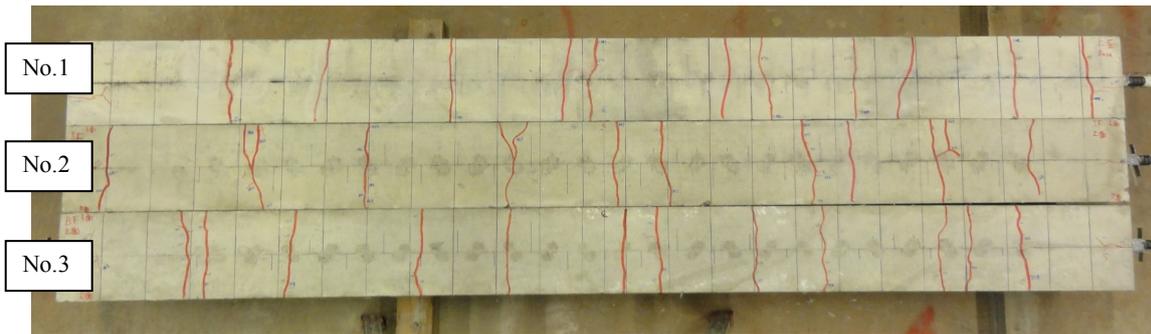


図-10 $\sigma_{c,ave}/\sigma_{ct}$ と鉄筋の平均ひずみ

等の水平部材の場合、鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物)⁹⁾において、鉄筋の弾性範囲内である使用状態では、永久作用における引張鉄筋の応力度の制限値は、供用される環境条件にもよるが、140N/mm²程度 (700 μ 程度)である。また、列車荷重等の変動作用における引張鉄筋の応力度は、標準的なRCラーメン高架橋の設計例¹⁰⁾においては、疲労破壊を考慮し、応力振幅の最大値が200N/mm²程度 (1000 μ 程度)となっている。これらを考慮し、本論文においては、鉄筋ひずみ700~1000 μ を使用状態の範囲として整理した。図に示すように、使用状態程度の鉄筋ひずみである700~1000 μ における $\sigma_{c,ave}/\sigma_{ct}$ の値は、No.1が0.4, No.2が0.7, No.3が0.6程度となった。試験体数は少ないものの、既往の文



※No.1：普通コンクリート，No.2：鋼繊維，No.3：バサルト繊維

図-11 試験体のひび割れ性状（鉄筋平均ひずみ 2000 μ 時）

表-7 ひび割れ本数とひび割れ間隔

	ひび割れ 本数 (本)	ひび割れ間隔 (mm)						
		L_{maxcal}	L_{maxexp}	L_{aveexp}	$\sigma(L_{aveexp})$	$Cv(\%)$	L_{maxexp}/L_{maxcal}	L_{maxexp}/L_{aveexp}
No.1	11	418.5	335	205	88	42.9	0.80	1.63
No.2	10	418.5	360	240	90	37.5	0.86	1.50
No.3	12	418.5	300	177	81	45.8	0.72	1.69

※ L_{maxcal} ：最大間隔の計算値（5.4C, C：平均かぶり）⁶⁾， L_{maxexp} ：最大間隔の実験値，
 L_{aveexp} ：平均間隔の実験値， $\sigma(L_{aveexp})$ ： L_{aveexp} の標準偏差， Cv ：変動係数

献⁷⁾等で普通コンクリートは概ね 0.4 程度であることを考慮すると，実験結果は概ね妥当であると考えられる。図-7 に示すように，No.3 のバサルト繊維を混入した場合は，引張強度は小さくなるものの，ひび割れ発生以降は，繊維が架橋することにより引張力を負担し， $\sigma_{c,ave}/\sigma_{ct}$ が普通コンクリートよりも高くなることが確認された。これらのことから，バサルト繊維を用いた場合は，鋼繊維よりも若干劣るものの，普通コンクリートよりも高いテンションステイフネス効果を有することが確認された。

(2) ひび割れ間隔

図-11 に鉄筋の平均ひずみ 2000 μ 時点でのひび割れ状況を示す。なお，鉄筋の平均ひずみ 2000 μ 以降は，貫通ひび割れの増加が収束し，定常状態になっていた。

表-7 にひび割れ本数とひび割れ間隔を示す。本試験体は，最大ひび割れ間隔と平均ひび割れ間隔の実験値との比較 (L_{maxexp}/L_{aveexp}) において，No.1, No.2 と No.3 はそれぞれ 1.63, 1.50, 1.69 となっており，変動係数 Cv も大きく異ならなかった。試験体数は少ないものの，同様のばらつきであったと考えられる。

ひび割れ本数は No.1 が 11 本，No.2 が 10 本，No.3 が 12 本となった。最大ひび割れ間隔は No.1 が 335mm，No.2 が 360mm，No.3 が 300mm となった。角田ら研究⁶⁾に示される最大ひび割れ間隔の計算値 (L_{maxcal}) と比較すると， L_{maxexp}/L_{maxcal} は No.2 は 0.86，No.3 は 0.72 となり，普通コンクリートで想定する最大ひび割れ間隔よりも小さくなった。一軸引張試験は，試験方法として結果にばらつきが生じやすいと考えられるものの，少ない試験体からの試験結果ではあるが，No.3 はひび割れ分散性が高く，普通コンクリートよりもその性状が高いと示唆される結

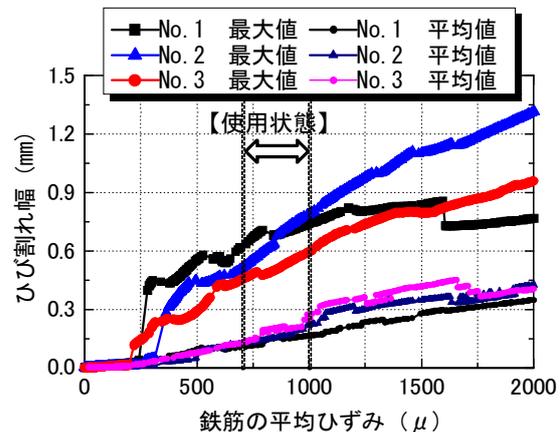


図-12 ひび割れ幅-鉄筋の平均ひずみ

果となった。この原因の一つとして，図-9 等に示すように，No.3 のひび割れ発生荷重が小さいことが起因していると考えられる。

(3) ひび割れ幅

図-12 に各試験体のひび割れ幅と鉄筋の平均ひずみの関係を示す。これらの図は，鉄筋の平均ひずみが 2000 μ 以下の場合について示した。

ひび割れ発生時の鉄筋ひずみは，No.3 が最も小さくなった。これは，No.3 の引張強度が最も小さいことに起因する。使用状態の範囲である 700~1000 μ の範囲においては，No.1（普通コンクリート）の最大ひび割れ幅は 0.65mm 程度，No.2（鋼繊維）は 0.7mm 程度，No.3（バサルト繊維）は 0.55mm 程度となった。また，平均ひび割れ幅にほとんど差異は見られなかった。これ以降，鉄筋ひずみが増加するにつれて，No.2 と No.3 は，No.1 よりも平均値の増加に比べて最大値が増加し，ひび割れ幅が局所的に増加する傾向が見られた。この原因として，

ひび割れ面に均等に短繊維が配されないこと等により、
 図-6 や図-7 に示す短繊維の引抜けに伴い、ひび割れ箇所に局所的なずれや曲げが発生した可能性が考えられる。本試験は、ひび割れ幅を試験体上面からのみ計測しており、短繊維補強コンクリートである No.2 と No.3 は、No.1 よりも局所的なずれや曲げによる影響がより加味された可能性が考えられる。これを考慮しても、No.2 と No.3 は No.1 と比べ、使用状態におけるひび割れ幅の抑制効果が確認され、特に、No.3 は、(2) に示すようにひび割れ分散効果の影響により、最大ひび割れ幅が小さくなることが確認された。

次に、No.1 を基準として、No.2 と No.3 は No.1 の鉄筋の平均ひずみ値到達時の荷重で整理した。すなわち、No.2 と No.3 は、No.1 の平均ひずみ値到達時における荷重値での、それぞれのひび割れ幅で検討した。図-13 に検討結果を示す。鉄筋の平均ひずみは 100μ ピッチで記した。No.1 が $700\sim 1000\mu$ の時点で、最大ひび割れ幅は 0.7mm 程度となるのに対して、No.2 と No.3 はほぼ同一の 0.5mm 程度となった。このことから、性能評価時に短繊維補強コンクリートの引張性能を考慮しない場合、最大ひび割れ幅の低減効果は鋼繊維とバサルト繊維は同等程度になると考えられる。一方、引張性能を考慮した場合、高いひび割れ分散効果を有するバサルト繊維は、鋼繊維よりも最大ひび割れ幅をより低減できる可能性が考えられた。

4. まとめ

開発したバサルト繊維を用いた短繊維補強コンクリートのひび割れ性状に関する検討を行うために、普通コンクリートと、鋼繊維、開発したバサルト繊維を混入した短繊維補強コンクリート試験体を用いた一軸引張試験を実施した。少ない試験体数からの実験結果からではあるが、本論文の範囲内で、以下の知見が得られた。

- (1) 開発したバサルト繊維は鋼繊維と同等程度の曲げタフネスを有する。
- (2) コンクリートの平均応力について検討した結果、開発したバサルト繊維を混入すると、鋼繊維に若干劣るものの、普通コンクリートより高いテンションステイフネス効果を有することが分かった。
- (3) ひび割れ間隔について検討した結果、開発したバサルト繊維は、普通コンクリートよりも高いひび割れ分散効果を有する。
- (4) ひび割れ幅について検討した結果、鉄筋の平均ひずみ $700\sim 1000\mu$ の使用状態程度において、開発したバサルト繊維は、鋼繊維、普通コンクリートと比べて、最大ひび割れ幅が最も小さくなる。

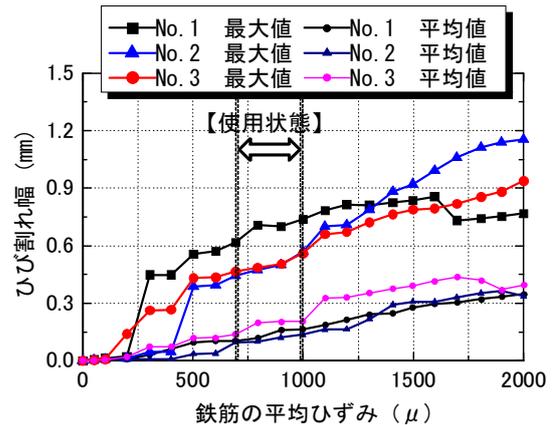


図-13 ひび割れ幅-鉄筋の平均ひずみ
 (No. 2 と No. 3 は No. 1 のひずみ値到達時の荷重)

謝辞: 本実験を実施するに際して、竹本油脂株式会社原田健二氏より貴重な助言を頂いた。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、土木学会：繊維補強コンクリート構造利用研究小委員会成果報告書 コンクリート技術シリーズ 106, 2015.8
- 2) 田中徹, 岡野法之, 小島芳之：バサルト繊維補強プレート帯板接着工法の開発と現場適用, 土木学会第 67 回年次学術講演会, VI-333, 2012.9
- 3) 例えば、石井靖洋 Ni Nyoman KENCANAWITI, 重石光弘, 小牧紳一：バサルトファイバーを用いた短繊維補強セメント複合材料に関する基礎研究, 土木学会第 64 回年次学術講演会, VI-408, 2009.9
- 4) 矢島秀治, 内田裕市, 六郷恵哲, 北園茂喜, 市川篤司：SRC 床版床組構造の鋼鉄道下路トラス橋の設計手法に関する考察, 土木学会論文集, I-74, pp.87-101, 2006.4
- 5) 田中章, 仁平達也, 田中徹, 田中孝：バサルト繊維の硬化したセメント中の引抜き特性に関する基礎的検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-633, 2015.9
- 6) 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, 1970.9
- 7) 岡本大：高強度材料を用いた鉄道コンクリート構造の性能照査法, 東京大学学位論文, 2012.10
- 8) 高木努, 田中徹：ポリプロピレン短繊維の表面加工に関する基礎実験, 土木学会第 62 回土木学会年次学術講演会, V-208, pp.415-416, 2007.9
- 9) 財団法人鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物), 丸善, 2004.4
- 10) 財団法人鉄道総合技術研究所：照査例ラーメン高架橋, 研友社, 2005.3