

論文 採取したコア供試体を用いたバサルト短繊維補強コンクリートの曲げタフネス評価

井戸 康浩^{*1}・田中 徹^{*2}・仁平 達也^{*3}・笹田 航平^{*4}

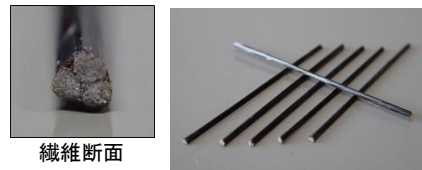
要旨：本報告は、バサルト短繊維を使用した短繊維補強コンクリートを対象に柱試験体からコア供試体を採取し、3等分曲げ強度試験を実施し、曲げ靱性係数を評価した。この結果、コア供試体を用いた曲げタフネス試験の荷重-変位曲線は、従来の角柱供試体と比較して、ひび割れ発生後に荷重が大きく増加する傾向にあり、荷重-変位曲線は異なることがわかった。また、供試体の破壊モードは曲げ破壊とせん断破壊が発生し、曲げ破壊で曲げ靱性係数を評価した場合は、実際より小さくなり安全側に評価していると考えられる。

キーワード：曲げタフネス 曲げ靱性係数 コア供試体 角柱供試体 バサルト短繊維

1. はじめに

短繊維補強コンクリートは、ひび割れ分散効果やはく落防止などを目的として様々な構造物に適用されている¹⁾。その中で一般的に鉄道構造物等に使用されている短繊維は、鋼繊維や有機繊維としてポリプロピレン繊維、ビニロン繊維が挙げられる。これらの短繊維は、それぞれ長所と短所を有しており、鋼繊維では錆びが発生すること、有機繊維では紫外線劣化する恐れがあるなどの課題がある。筆者らは無機系材料である玄武岩由来のバサルト繊維に着目し、これを原料としたバサルト短繊維補強コンクリートの開発を行っている²⁾ (写真-1 および表-1)。バサルト短繊維は、無機系繊維であることから腐食が生じない、紫外線劣化しにくいことが長所として挙げられるが、アルカリに対する抵抗性が低いという課題があった。その課題に対しては、被覆する樹脂を改良し、耐アルカリ性を向上させた短繊維を開発し、その結果について報告している³⁾。

バサルト短繊維補強コンクリートなどの繊維で補強したコンクリートは、ひび割れ分散の効果を期待して使用するため、その性能を評価する曲げ靱性係数が重要となる。曲げ靱性係数は、曲げタフネス試験 JSCE-G-552 では角柱供試体 (100×100×400mm) を用いて試験することで求められる。室内試験では、鋼製型枠等を使用できるが、施工後の実構造物で実施する場合、角柱供試体を切出すことは、配筋状況などを踏まえるとその採取や加工が容易ではない等、現実的でないと考えられる。また、繊維自体が長期間高アルカリ環境下に供されるため、繊維自体の引張性能の変化、例えば、架橋効果に及ぼす付着性能や引張強度等が変化している可能性も考えられる。



繊維断面

写真-1 バサルト短繊維

表-1 バサルト短繊維の物性

項目		物性等
被覆樹脂		エポキシ樹脂
繊維長	(mm)	40
換算断面積	(mm ²)	0.67
密度	(g/cm ³)	1.83
引張強度	(N/mm ²)	1103
引張弾性率	(kN/mm ²)	27.1
破断時伸び率	(%)	4.5

加えて幅の大きなひび割れの発生や進展等、想定しない変状が発生した場合、これらの原因を把握する必要がある。すなわち、既設構造物における短繊維補強コンクリートの性能評価方法を構築する必要があると考えられる。

そこで、前記したバサルト短繊維補強コンクリートをテストケースとして、実構造物の圧縮強度用試験体の採取方法として実績のあるコアコンクリートを用いて、円柱状のコア供試体を用いた曲げタフネス試験⁴⁾⁵⁾から、曲げ靱性係数の評価を試みた。本論文は、バサルト短繊維補強コンクリートの柱試験体を作製し、これからコア供試体を採取し、3等分曲げ強度試験を実施し、曲げ靱性係数の評価を検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 バサルト短繊維補強コンクリート

(1) 使用材料および配合

使用材料を表-2に示す。使用材料は、セメントを普

*1 戸田建設(株) 技術開発センター 社会基盤ユニット 社会インフラチーム 工修 (正会員)

*2 戸田建設(株) 技術開発センター 社会基盤ユニット 工修 (正会員)

*3 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼・複合構造 博士 (正会員)

*4 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼・複合構造 工修 (正会員)

通ポルトランドセメント，細骨材を陸砂と砕砂の混合とし，粗骨材は碎石とした。バサルト短繊維は，エポキシ樹脂で被覆した長さ 40mm，密度 1.83g/cm³ の繊維を使用した。コンクリート配合を表-3 に示す。配合は，水セメント比を 50%，単位水量を 175kg/m³，空気量を 4.5%，細骨材率を 52.0% とした。バサルト短繊維の添加率は 1.0vol.% とし，体積の外割添加とした。

(2) コンクリート製造

コンクリートは，実機ミキサにより製造し，1m³ を 2 バッチ（計 2m³）練り混ぜた。バサルト短繊維以外の材料をミキサへ投入しコンクリートを練り混ぜた後，ミキサ上部の投入口からバサルト短繊維を投入した。バサルト短繊維の投入は，1m³ 分の 18.3kg を 1 分間でファイバーボールが発生しないようにほぐしながら投入した。コンクリートは投入後 45 秒間練混ぜてから排出し，アジテータ車に積込み試験場所まで運搬した。

(3) 試験項目

試験項目を表-4 に示す。フレッシュ性状は，スランプ，空気量，コンクリート温度の試験に加えて，今回繊維を使用しているため，目視によりファイバーボール有無や繊維の分散性を確認した。硬化コンクリートは，圧縮強度，静弾性係数，割裂引張強度，曲げタフネス，コア強度およびコア供試体による曲げタフネスについて試験を実施した。曲げタフネスの供試体は，100×100×400mm の角柱とし，コア供試体による曲げタフネスは，φ100×400mm の円柱とした。供試体の養生は標準水中養生とし，各試験はいずれも材齢 28 日で実施した。

柱試験体を図-1 に示す。柱試験体の寸法は，鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物⁹⁾を参考に，ブリーディングの影響を受けるコンクリートの打込み高さ（高さ 300mm 以上）を考慮し，断面 800×800mm，高さ 1300mm とし，通常の打込み方法を想定して，写真-2 に示すようにパイプレータで適宜締固めを行い，2 層でコンクリートを型枠へ打込んだ。コア供試体は上側と下側の 2 箇所から水平方向に採取し，圧縮強度は φ100×200mm（上側 3 本，下側 3 本の計 6 本），曲げタフネス試験は φ100×400mm で上側 4 本，下側 4 本の計 8 本に切断し整形した。

表-4 試験項目

分類	試験項目	規格等	詳細
フレッシュ性状	スランプ	JIS A 1101	目標スランプ 18.0±2.5cm
	空気量	JIS A 1128	目標空気量 4.5±1.5%
	コンクリート温度	JIAA 1156	
	繊維分散性	目視	ファイバーボール等の有無を確認
硬化性状	圧縮強度	JIS A 1108	養生：標準水中，材齢：28 日
	静弾性係数	JIS A 1149	圧縮強度試験と同時に実施
	割裂引張強度	JIS A 1113	養生：標準水中，材齢：28 日
	曲げタフネス	JSCE-G 552	養生：標準水中，材齢：28 日，N=5
	コア強度	—	柱試験体を作製し，材齢 28 日でコア採取および強度試験を実施
	曲げタフネス（コア供試体）	—	柱試験体を作製し，材齢 28 日でコア採取および曲げタフネス試験を実施

表-2 使用材料

分類（記号）	使用材料
水（W）	上水道水（つくば市）
セメント（C）	普通ポルトランド（密度 3.15g/cm ³ ，住友大阪セメント製）
細骨材 1（S1）	陸砂（行方産，表乾密度 2.58g/cm ³ ，粗粒率 2.50）
細骨材 2（S2）	砕砂（佐野産，表乾密度 2.69g/cm ³ ，粗粒率 3.10）
粗骨材（G）	碎石（2005，つくば産，表乾密度 2.69g/cm ³ ，粗粒率 2.69，実積率 60%）
繊維（Fb）	バサルト短繊維（エポキシ樹脂被覆，長さ 40mm，密度 1.83g/cm ³ ）
混和剤（Ad）	高性能 AE 減水剤

表-3 配合表

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					Ad (C×%)	バサルト短繊維	
		W	C	S1	S2	G		添加率 (vol.%)	添加量 (kg)
50	52	175	350	630	280	863	1.3	1.0	18.3

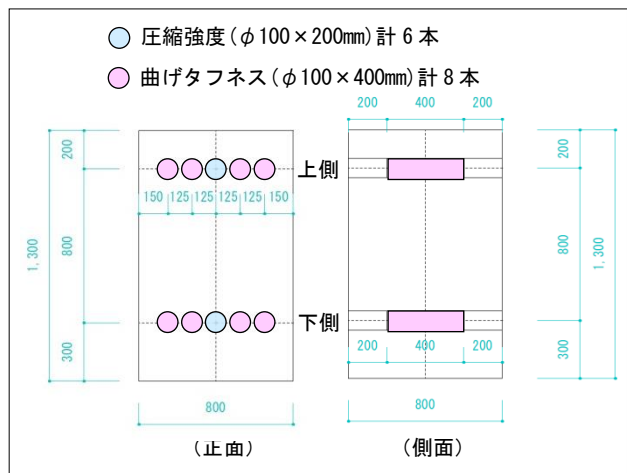


図-1 柱試験体



写真-2 柱試験体の打込み状況

2.2 コア供試体による曲げタフネス試験

コア供試体による曲げタフネス試験を図-2に、支点および荷重点の形状を図-3に、コア供試体による曲げタフネス試験の状況を写真-3に示す。コア供試体による曲げタフネス試験は、既往の文献^{4),5)}を参考に、供試体は直径100mm、長さ400mmの供試体を用いた。試験は、3等分点荷重試験とし、変位の測定点は、図に示した位置に変位計測用のターゲットの治具を接着剤で張り付けて、荷重と同時に変位を測定した。荷重点および支持点の形状は、既往の文献より90度とした。なお、その他の形状として、図-3に示すようにコア供試体の形状に合わせた半円の弧や、通常の棒状(180度)などが考えられるが、半円の弧の場合は、治具の作製が難しいことやコア採取の精度によっては治具に合わないこと、棒状の場合は、支点および荷重点で局所的な破壊が起こる場合があること、供試体が円柱であるため試験時に安定しないことから、90度とした。荷重速度は、JSCE-G-552に準拠し、ひび割れ発生までは荷重制御で毎秒 $0.06 \pm 0.04 \text{ N/mm}^2$ となるよう調整し、ひび割れ発生後は変位制御で毎分スパンの $1/500 \sim 1/3000$ の範囲とした。JSCE-G-552の曲げタフネス試験では、スパンの $1/150$ の2mmまでの変位を測定するが、今回は測定可能な範囲の8.0mmまで測定し、荷重-変位曲線を把握した。

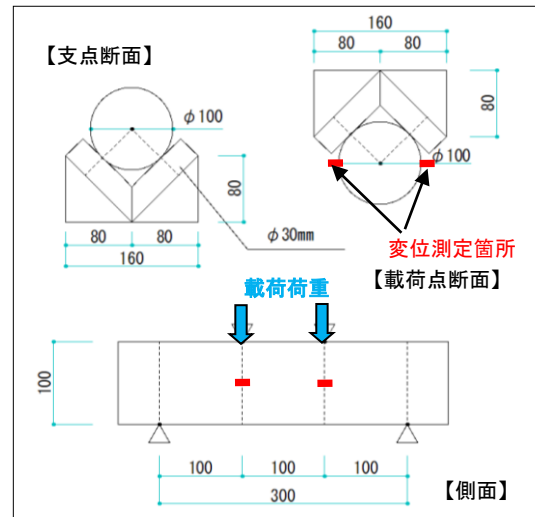


図-2 コア供試体による曲げタフネス試験

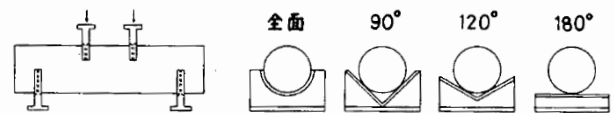


図-3 支点および荷重点の形状 (文献⁴⁾より抜粋)

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状および硬化性状

(1) フレッシュ性状

フレッシュコンクリート試験の結果を表-5に示す。試験結果はそれぞれ、スランプ20cm、空気量4.2%、コンクリート温度 23°C であり、いずれの目標値も満足する結果となった。短繊維は、定性的ではあるが目視によりファイバーボールも見られず、均一に分散していることを確認した。

(2) 硬化性状

各強度試験の結果を表-6に、コア強度試験の結果を表-7に示す。標準水中した供試体の材齢28日の圧縮強度は 49.4 N/mm^2 、静弾性係数は 29.1 kN/mm^2 に対して、コア強度は 34.0 N/mm^2 、静弾性係数は 26.4 kN/mm^2 となり、コアの方が強度は 15 N/mm^2 、静弾性係数は 3 kN/mm^2 程度が小さくなった。これは、柱打込み時期が11月であり、当日の気温が 17°C 程度であるなど、外気温が低く養生の影響を大きく受けたためと考えられる。コアの採取位置に着目すると、上側は 33.5 N/mm^2 、下側は 34.6 N/mm^2 、平均値で 34.0 N/mm^2 となった。柱試験体の上下による強度の差はほとんどなく、ブリーディングなどの影響による強度低下は確認されなかった。静弾性係数と密度も同様の傾向であった。このことから、養生条件により差は

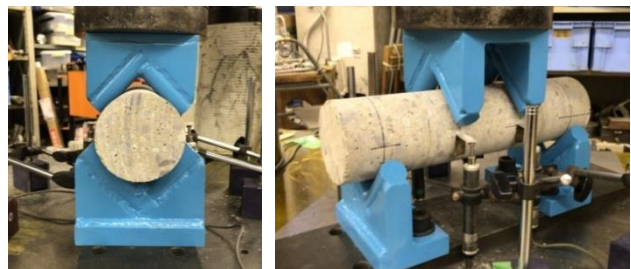


写真-3 コア供試体による曲げタフネス試験の状況

表-5 フレッシュコンクリート試験の結果

項目	試験値
スランプ (cm)	20.0
空気量 (%)	4.2
コンクリート温度 ($^\circ\text{C}$)	23 (外気温 17°C)
繊維分散性	均一に分散

表-6 各強度試験の結果

項目	試験値
圧縮強度 (N/mm^2)	49.4
静弾性係数 (kN/mm^2)	29.1
割裂引張強度 (N/mm^2)	3.62
曲げ強度 (N/mm^2)	5.62
曲げ靱性係数 (N/mm^2)	5.02

※ 養生方法：標準水中、試験材齢：28日

表-7 コア強度試験の結果

項目	上側	下側	平均値
コア強度 (N/mm^2)	33.5	34.6	34.0
静弾性係数 (kN/mm^2)	26.6	26.1	26.4
密度 (kg/m^3)	2306	2311	2309

見られるものの、バサルト短繊維補強コンクリートを打込んだ柱試験体内においては、高さ方向に対して、圧縮強度やヤング係数にほとんど差はなく、同等であることを確認した。

3.2 コア供試体による曲げタフネス試験

コア供試体による曲げタフネス試験の結果を図-4 および図-5 に、コア供試体の曲げタフネス試験状況を写真-4 に示す。比較対象として、角柱供試体の曲げタフネス試験の結果を図-6 に示す。

コア供試体の結果と角柱供試体を用いた結果を比較すると、角柱供試体では、15~20kN でひび割れが目視により確認された後、ややばらつきは見られるが、荷重は変位 2.0mm までほぼ横ばいに維持またはやや低下するのに対して、コア供試体では7~11kN 程度でひび割れが発生した後、12~22kN まで荷重が増加し、2.0~3.0mm をピークに荷重が低下する傾向にあった。これは、断面の形状の相違に起因する。角柱供試体と円柱供試体の模式図を図-7 に示す。短繊維コンクリートの引張性能が向上するのは、コンクリートにひび割れが発生し、ひび割れ箇所短繊維が架橋することに起因する。角柱の場合は断面が一様であるため、ひび割れの進展に関わらず繊維補強の効果は一定である。一方、円柱の場合は高さ方向に断面積が異なり、コア中心部の面積が大きく、上・下部の面積が小さい。そのため、ひび割れが発生した直後は、繊維補強の効果が小さく、載荷点の変位が大きくなり供試体の中心までひび割れが進展すると繊維補強の面積が大きくなるため、架橋する繊維の量が増加し、荷重が増加すると考えられる。

次に、コア供試体ごとで比較した。コア供試体を用いた曲げタフネス試験の結果を表-8 に、試験後の供試体破断状況および破断面を写真-5, 6 に示す。表中にコア供試体の破断位置の判定を示した。破断位置が純曲げ区間以外の箇所が発生した供試体は、上側-4, 下側-2, 3 であった。上側-4 においてひび割れ発生過程を観察すると、はじめに純曲げ区間でひび割れが発生し、ひび割れがある程度進展した後、荷重は大きく増加した。その後、純曲げ区間外にひび割れは発生し、荷重は大きく低下した。下側-2, 3 も同様な傾向を示し、純曲げ区間外にひび割れが複数本発生した。これは、バサルト短繊維の分布状況によるところが大きいと考えられ、写真-6 に示すようにバサルト短繊維は断面内に均一に分散していないため、純曲げ区間に発生したひび割れ発生箇所短繊維が多く配置されている場合には、繊維補強の効

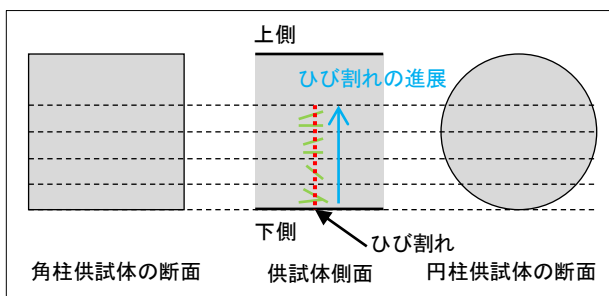


図-7 角柱供試体と円柱供試体の模式図

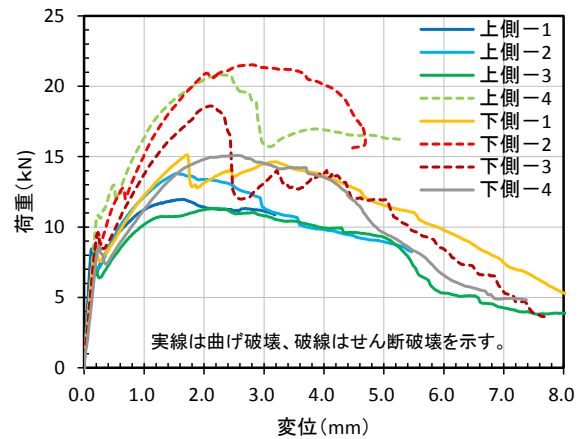


図-4 コア供試体による曲げタフネス試験の結果 (変位 8.0mm まで)

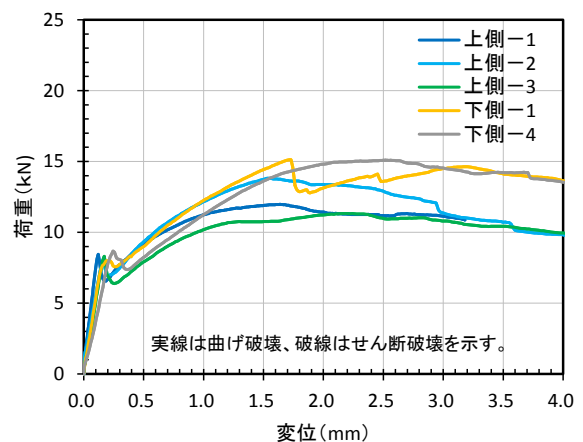


図-5 コア供試体による曲げタフネス試験の結果 (変位 4.0mm まで)

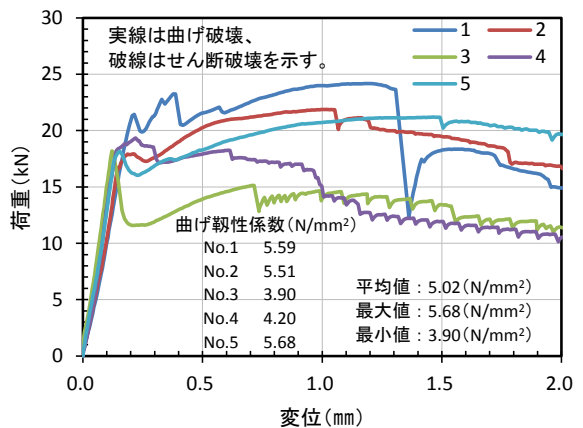


図-6 角柱供試体の曲げタフネス試験の結果



写真-4 コア供試体を用いた曲げタフネス試験状況

表-8 コア供試体を用いた曲げタフネス試験の結果

採取位置	No.	ひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	曲げ強度 (N/mm ²)		曲げ靱性係数 (N/mm ²)*2				破断位置判定 *1
				ひび割れ発生荷重時	最大荷重時	変位 2.0mm まで		変位 4.0mm まで		
						試験値	平均値	試験値	平均値	
上側	1	8.40	11.91	4.29	6.08	5.20	5.20	5.37	5.42	○
	2	7.88	13.77	4.02	7.03	5.67		5.80		○
	3	8.37	11.34	4.29	5.81	4.73		5.10		○
	4	10.85	20.81	5.55	10.65	(7.79)		(8.51)		×
下側	1	8.01	15.12	4.10	7.74	5.73	5.60	6.45	6.45	○
	2	9.55	21.50	4.88	10.98	(7.39)		(9.05)		×
	3	9.73	18.59	4.96	9.47	(6.73)		(6.93)		×
	4	8.69	15.10	4.44	7.72	5.46		6.44		○

※1 供試体の破断位置が純曲げ区間の場合は「○」、純曲げ区間外の場合は「×」。

※2 曲げ靱性係数の平均値は、破断位置判定が×の場合を除いた値。

果が大きくなり、純曲げ区間以外を含めた他の箇所にひび割れが複数発生すると考えられる。角柱供試体を用いた場合には、そのような傾向は見られることもあるが、本検討においては、コア供試体では8本のうち3本で発生していることから、円柱供試体の形状が結果に影響を与えている可能性がある。これらの供試体の荷重-変位曲線を見ると、その他の供試体と比較してひび割れ発生後の最大荷重が大きくなった。上側-4、下側-2、3は、写真-5に示すように、純曲げ区間外にひび割れが発生していることから、純曲げ区間での破壊（曲げ破壊）よりせん断スパン区間での破壊（せん断破壊）が卓越したと考えられる。

コア供試体の曲げ靱性係数の算定にあたり、曲げ強度は式(1)に示した一般的な弾性式により算出した。

$$\delta_b = \frac{16Pl}{3\pi d^3} \quad (1)$$

曲げ靱性係数を算出する上で、せん断破壊モードの結果を含めるのは適切ではないことから、曲げ破壊モードである試験体の結果から曲げ靱性係数を算出するのが適当であると考えられる。なお、破壊モードの差異は、配合条件や載荷条件、供試体の形状に起因すると考えられるため、今後、これらを踏まえた載荷方法を検討する必要もあると考えられる。曲げタフネスと曲げ靱性係数の算出は、JSCE-G-552と同様にスパンの1/150の変位2.0mmまでと、かつ荷重のピークを確認した以降の4.0mmまでの荷重-変位の面積から算出した。せん断破壊モードと判定された試験体は参考値として記載した。試験体数は少ないが曲げ靱性係数の平均値を見ると、変位2.0mmまでは上側は5.20N/mm²、下側は5.60N/mm²であり、変位4.0mmまでは上側は5.42N/mm²、下側は6.45N/mm²となり、最大20%程度の差が見られた。図-6の曲げ靱性係数のばらつきを考慮し、供試体個々のばらつきや、破壊モードの異なる供試体を踏まえると、柱試験体の高さ方向の曲げ性能は概ね同等であると推察される。また、曲

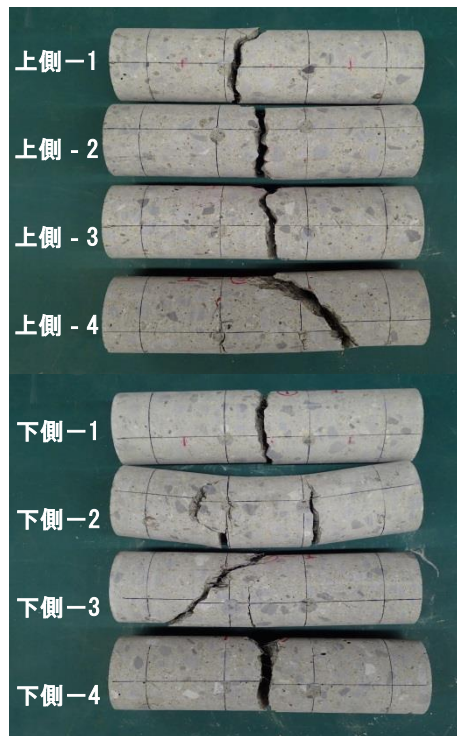


写真-5 試験後の供試体破断状況



写真-6 試験後の供試体破断面

げ破壊モードとなった曲げ靱性係数の最大値は、変位2.0mmで5.8N/mm²、変位4.0mmで6.5N/mm²程度であった。目視による評価ではあるが、ひび割れ発生荷重が大きい試験体はせん断破壊モードとなっていた。このことから、純曲げ区間とせん断スパン区間での繊維量の差異や分散状況が破壊モードに影響を及ぼす可能性があるといえる。

せん断破壊モードと判定されたコア供試体の荷重-変位関係(図-4の破線)は、ひび割れ発生荷重以降も、曲げ破壊モードと判定されたコア供試体の荷重-変位関係よりも同一変位における荷重値が大きくなっており、仮にせん断破壊モードとならず荷重が継続した場合、他の曲げ破壊モードのコア供試体よりも曲げ靱性係数が高くなることが推測される。そのため、せん断破壊モードのコア供試体の曲げ靱性係数を考慮していない、曲げ破壊モードのコア供試体のみでの平均値で算出した曲げ靱性係数は小さくなっていると考えられる。

また、断面形状の違いから、角柱試験体と荷重-変位関係が異なることが明らかとなった。そのため、短繊維補強コンクリートの性能の経時変化を評価する場合には、相対的な評価として角柱供試体から得られた曲げ靱性係数と直接比較することは困難であり、硬化後初期のコア供試体の測定結果を踏まえて評価する必要があると考えられる。

以上より、前記したバサルト短繊維補強コンクリートをテストケースとして、コアコンクリートを採取し、曲げタフネス試験により、短繊維補強コンクリートの引張特性を評価する手法について検討した。異なる破壊モードが混在するため、荷重条件や形状等に改良の余地はあると考えるが、短繊維補強コンクリートの引張特性を評価する手法の有効性が示唆された。

4. まとめ

バサルト短繊維補強コンクリートを用いて、コア供試体による曲げタフネス試験を実施し、曲げ靱性の評価を試みた結果、以下のことが明らかになった。

(1) コア供試体を用いた曲げタフネス試験は、従来の角柱供試体と荷重-変位曲線と比較し、ひび割れ発生後に荷重が大きく増加し、最大荷重時の変位が大きくなる傾向が見られ、角柱試験体とコア試験体の荷

重-変位関係が異なることが分かった。

(2) コア供試体の破断状況より、純曲げ区間で破壊したモードと、せん断スパン区間で破壊したモードが混在した。供試体軸方向の繊維量や分散状況が破壊モードを決定する可能性が考えられる。そのため、異なる破壊モードが混在している場合、純曲げ区間で破壊したモードの供試体から算出した曲げ靱性係数は、実際の値よりも小さな値となっている可能性があり、曲げ靱性係数を小さく評価していることが考えられる。

参考文献

- 1) 例えば、南邦明，下津達也，斉藤雅充：北陸新幹線第4千曲川橋りょう（連続合成桁）の架設，橋梁と基礎，pp.41-47，2012
- 2) 仁平 達也，田中 徹，田中 章，村井 和彦：バサルト短繊維を用いた短繊維補強コンクリートのひび割れ性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.1297-1302，2016
- 3) 仁平 達也，笹田 航平，田中 徹，井戸 康浩：バサルト短繊維の耐アルカリ性に関する一考察，土木学会第72回土木学会年次学術講演会，V-547，pp.1093-1094，2017
- 4) 森野 奎二，西野 昭：コンクリートの円柱供試体による曲げ強度試験方法について，愛知工業大学，愛知工業大学研究報告B 通号14，pp.243-253，1979
- 5) 天明 敏行，池水 貴史，林 俊斉，谷倉 泉，尾原 祐三：円柱供試体を用いた曲げ強度試験方法における強度評価式，材料，Vol.64，No.10，pp.815-821，2015.10
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，2004.4