

超低収縮・超高強度繊維補強コンクリートを用いた梁の曲げ挙動とせん断耐力に関する実験的検討

Experimental Study on Shear Strength and Flexural Behavior of Beams Using Ultra-low Shrinkage and Ultra-high-strength Fiber Reinforced Concrete

技術研究所 三加 崇 TAKASHI SANGA
技術研究所 野並 優二 YUJI NONAMI
技術研究所 松田 拓 TAKU MATSUDA
技術研究所 篠崎 裕生 HIROO SHINOZAKI

著者らは、超高強度で収縮が極めて小さい超低収縮・超高強度繊維補強コンクリートを開発した。本コンクリートは、セメント使用量を抑え、粉体や細骨材に産業副産物を多量に用いた環境負荷低減に大きく貢献する環境コンクリートである。プレストレストコンクリート部材などへの適用を目的として、PC 梁の曲げ試験およびせん断耐力確認試験を実施した。試験の結果、本コンクリートの曲げ挙動やせん断耐力は、従来の高強度コンクリートと同様な方法を用いて評価できることを確認した。

キーワード：超低収縮，超高強度，繊維補強コンクリート，曲げ性状，せん断性状

Authors have developed ultra-low-shrinkage and ultra-high-strength fiber reinforced concrete. This concrete is an environmentally friendly concrete that does not use cement and achieves low carbon consumption. The bending loading experiment of PC beam with aramid FRP tendon and the shear failure experiment of RC beam were conducted to investigate those behavior and to use that concrete as structural members. As a result of those experiments, it was confirmed that both the flexural and shear properties of that concrete structure can be generally evaluated by the conventional calculation method.

Key Words: ultra-low-shrinkage, ultra-high-strength, fiber reinforced concrete, bending experiment, shear experiment

1. はじめに

プレストレストコンクリート（PC）部材において、コンクリートの乾燥収縮やクリープ変形は、プレストレストロスを生じさせる大きな要因である。PC 部材の設計では、10%程度の PC 鋼材の緊張力低減を考慮した設計が行われているのが現状である。このため、乾燥収縮やクリープの小さなコンクリートが実現できれば、より合理的な PC 部材が設計可能となる。

著者らは粉体および細骨材に産業副産物を多量に使用して、超高強度と超低収縮および低クリープ変形を同時に実現したコンクリート（以下、超低収縮コンクリート）を開発した。超低収縮コンクリートは、通常よりも単位水量が少なく、結合材にはセメント以外に高炉スラグ、フライアッシュ、シリカフェーム等の副産物を使用

するとともに、細骨材にフェロニッケルスラグや碎石をバランス良く配合している。この配合条件の範囲で結合材の混合比率や骨材の量を変化させることで、用途に応じて強度発現やフレッシュ性状をカスタマイズすることが出来るコンクリートである。セメントを使用しなくてもこれらの性能が発揮されるため、環境負荷の低減に大きく貢献するコンクリートである。

これまでに、材料物性の検討を行ってきたが、ここでは、PC 部材への適用を想定して、プレテンション梁の曲げ載荷試験と、RC 梁のせん断耐力試験を実施して、その構造性能について検討を行った。プレテンション梁については、別途長期保管用を製作し、PC 緊張材の定着長やプレストレストロスを計測した。

今回用いた超低収縮コンクリートは、環境負荷低減を追求しセメントを用いていない。また、生産性向上を

表-1 コンクリート使用材料

材料		物性他	記号
セメント	早強ポルトランドセメント	密度3.13 g/cm ³	C
結合材	高炉スラグ微粉末	密度2.88 g/cm ³ , 4000ブレン, 比表面積4,270 cm ² /g, SO ₃ : 2.06%	BF
	フライアッシュ	密度2.40 g/cm ³ , JIS I種相当品, 比表面積5,540 cm ² /g	FA
	シリカフューム	密度2.24 g/cm ³ , 比表面積17.0 m ² /g	SF
	膨張材	密度3.19 g/cm ³ , CaO系, 比表面積4,970 cm ² /g	EX
細骨材	砕砂	表乾密度2.70 g/cm ³	S1
	フェロニッケルスラグ	表乾密度2.98 g/cm ³ , 吸水率2.91%	S2
粗骨材	砕石	表乾密度2.63 g/cm ³ , 実績率59.0%	G1
	硬質砂岩	表乾密度2.63 g/cm ³ , 砕石2005, 実績率61.5%	G2
化学混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP
	消泡剤	エステル系	DF
短繊維	鋼繊維	密度7.85 g/cm ³ , φ0.2×15 mm, 引張強度2000 N/mm ² 以上	Fb

表-2 コンクリート配合

配合	配合指標					単位量 [kg/m ³]													
	W/B [%]	s/a [%]	空気量	短繊維混入率	結合材の質量割合			W	B						S1	S2	G1	G2	Fb
					BF	FA	SF		C	BF	FA	SF	EX						
A	12.0	62.8	3.5	1.0	55	30	15	100	833	-	447	244	122	20	-	1004	-	526	78.5
B	12.0	63.1	3.5	0.5	55	30	15	100	833	-	447	244	122	20	-	1019	-	526	39.3
C	12.0	62.8	3.5	0.0	55	30	15	100	833	-	447	244	122	20	-	1004	-	526	0.0
D	36.8	40.0	4.5	-	-	-	-	160	435	435	-	-	-	-	-	707	-	1036	-

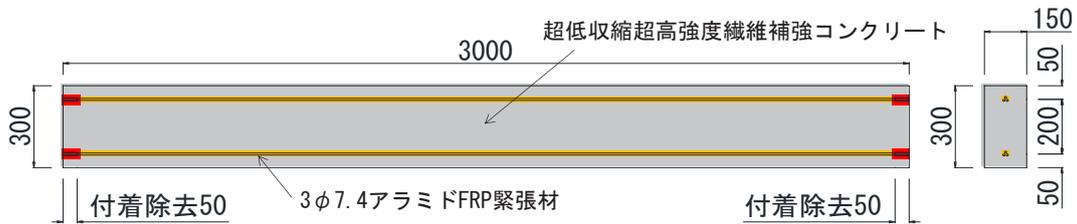


図-1 プレテンション PC 梁試験体

表-3 アラミド FRP ロッドの材料物性

呼称	公称断面積 (mm ²)	公称径 (mm)	公称周長 (mm)	有効断面積 (mm ²)	有効断面積に対する弾性係数 (kN/mm ²)	保証耐力 (kN)
φ7.4	48.8	7.88	24.8	42.4	53	81.4

意図してひび割れ防止鉄筋やせん断補強鉄筋の配置を不要にする鋼繊維入りの配合とした。なお、インフラの長寿命化が叫ばれている現状を踏まえて、PC 緊張材には腐食しないアラミド FRP ロッドを用いた。

2. 試験体

(1) コンクリート

コンクリート使用材料を表-1 に、配合を表-2 に示す。配合は4種類とした。配合A~配合Cは、超低吸縮コンクリートで鋼繊維の混入率を0.0%(C)~1.0%(A)まで0.5%刻みで変化させた。超低吸縮コンクリートの単位水量は100kg/m³, 水結合材比は12.0%とした。配合Dは比較用として設計基準強度 50N/mm²の普通コンクリートである。

(2) プレテンション PC 梁

プレテンション PC 梁試験体の形状寸法を図-1 に示す。梁は、高さ300mm, 幅150mm, 長さ3000mmの矩形形状である。PC 緊張材は、表-3 に示す物性を有するアラミド FRP ロッドを3本束ねたものを上下に配置しており、その他に鋼材は使用していない。試験体は、コンクリ



写真-1 試験体製作状況

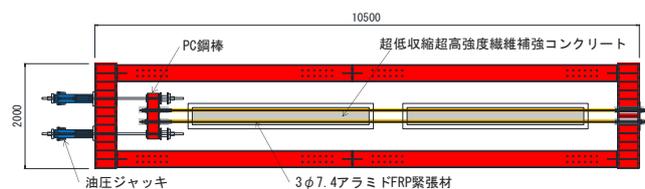


図-2 緊張架台

ートの配合AとBを用いた2体とした。

アラミド FRP 緊張材は、両端に鋼管とモルタルからなる付着定着具を付けて、図-2 に示す緊張架台を用いて緊張を行った。コンクリートは、梁の側面から打ち込

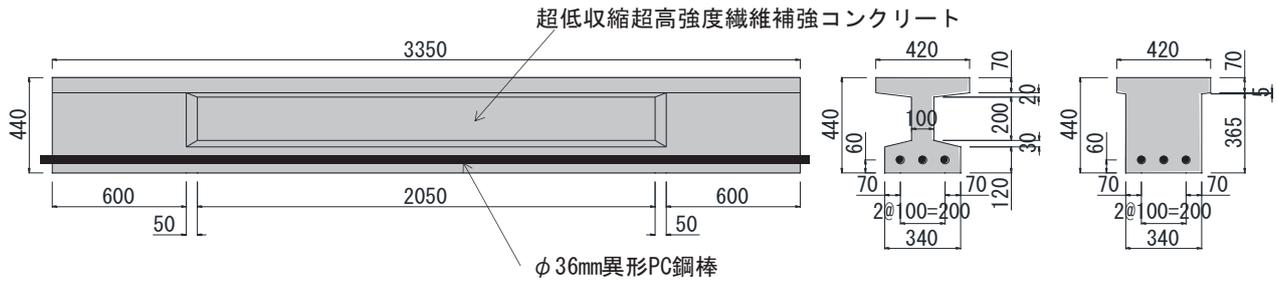


図-3 RC 梁試験体

んだ。アラミド FRP 緊張材 (3×φ7.4mm) の緊張力は 157kN で、これは、付着定着具を用いたアラミド FRP 緊張材の保証耐力 224kN の 0.7 倍である。緊張後、超低収縮コンクリートを打ち込み、蒸気養生を実施した。蒸気養生は、35℃で1日行った後脱枠を行い、その後90℃で3日間行った。蒸気養生終了後、コンクリート温度が十分低下したことを確認して緊張力を開放し、プレストレスを導入した。

(3) RC 梁

せん断試験用の RC 梁試験体の形状寸法を図-3 に示す。高さ 440mm、幅 420mm、長さ 3350mm の T 型梁とした。ウェブの厚さは 100mm で、両端部は矩形断面とした。せん断破壊するように、曲げ補強材として φ36mm の異形 PC 鋼棒を 3 本配置した。異形 PC 鋼棒以外の鋼材は配置していない。試験体は、コンクリートの配合 A～D の 4 体である。配合 A～C の試験体については、プレテンション PC 梁試験体と同様の養生条件である。蒸気養生後の試験体を写真-2 に示す。また、試験体名とコンクリート配合の関係をまとめて表-4 に示す。

表-4 試験体一覧

試験体	配合	試験体形状	試験方法
A-M	A	プレテンションPC梁	曲げ試験
B-M	B		
A-S	A	RC梁	せん断試験
B-S	B		
C-S	C		
D-S	D		



(a) PC 梁試験体



(b) RC 梁試験体

写真-2 試験体

3. 試験方法

(1) プレテンション導入試験

プレストレスを導入したときのコンクリートひずみの分布から定着長や導入プレストレス量を確認するために、図-4 に示す位置のコンクリート表面にひずみゲージを添付した。コンクリートのひずみは、端部から 100mm 間隔で 800mm の位置と中央断面において計測を行った。

(2) 曲げ試験

荷重方法および計測位置を図-5 に示す。等曲げ区間長 300mm の 4 点曲げ荷重である。ひび割れ発生時に一度除荷を行い、ひび割れ発生箇所パイ型変位計を設置した上で荷重を再開した。これは、ひび割れ再開時の荷重から、有効緊張力を推定するためである。有効緊張

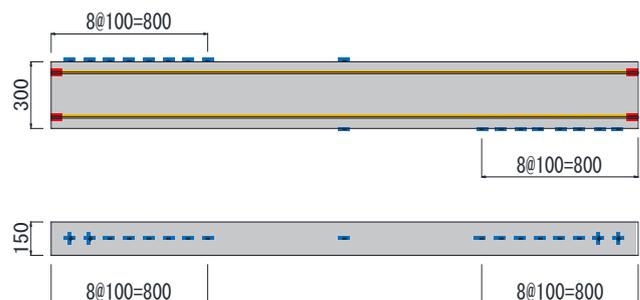


図-4 プレストレス導入時のひずみ計測位置図

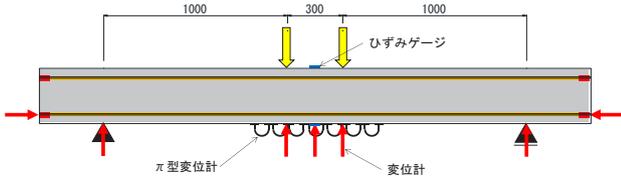


図-5 曲げ試験 荷重方法および計測位置図

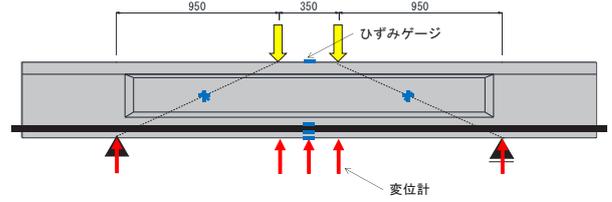


図-6 せん断試験 荷重方法および計測位置図

力は、緊張時の張力から緊張材のリラクゼーションとクリープ乾燥収縮によるロスを差し引いたものである。

(3) せん断試験

荷重方法および計測位置を図-6 に示す。等曲げ区間長 350mm の 4 点曲げ荷重である。せん断スパン比は 2.5 である。単調で破壊まで荷重した。荷重荷重と鉛直変位、異形 PC 鋼棒のひずみと上下縁および荷重点と支点を結んだ中央の 3 軸方向のコンクリートひずみの計測を行った。

表-5 コンクリート材料試験結果

配合	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	曲げひび割れ 発生強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
A	154.6	52.6	12.8	10.9	17.8	9.2
B	151.0	53.9	11.6	10.4	18.5	8.0
C	144.3	54.9	9.5	8.6	12.4	8.0
D	57.3	35.6	-	-	9.5	4.6

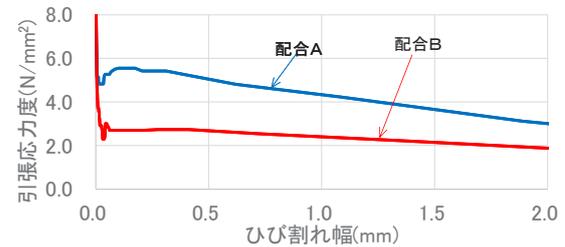


図-7 引張軟化曲線

4. 試験結果

(1) コンクリートの材料特性

荷重試験時のコンクリートの材料試験結果を表-5 に示す。超低収縮コンクリートの圧縮強度は 144.3N/mm²~154.6N/mm²、弾性係数が 52.6kN/mm²~54.9kN/mm²、曲げひび割れ発生強度が 8.6N/mm²~10.9N/mm²、せん断強度が 12.4N/mm²~18.5N/mm²であった。普通コンクリートの配合 D と比較すると、圧縮強度が約 2.6 倍、弾性係数が約 1.5 倍、ひび割れ発生強度が約 1.8 倍である。

配合 A および B について、切欠き梁を用いたコンクリートの破壊エネルギー試験から求めた引張軟化曲線を図-7 示す。繊維混入量が多い配合 A の方が、ひび割れ後も高い引張応力を示している。

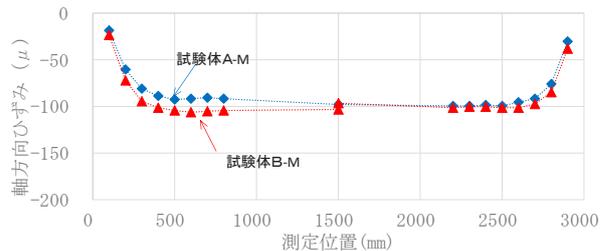


図-8 コンクリートひずみ分布

(2) アラミド FRP 緊張材の定着性能

PC 梁試験体の緊張時のコンクリートひずみ分布を図-8 に示す。ひずみ分布から、試験体 A-M、試験体 B-M とともに端部から 400mm~500mm で一定値となっていることが分かる。

アラミド FRP 緊張材は、コンクリートひずみの測定面から 50mm の深さにあること、また、コンクリート端部から 50mm で付着を除去している（付着割裂ひび割れを防止するため）ことを考慮すると、定着長は上記の範囲から 100mm を差し引いた 300mm~400mm であることが想定される。これは、過去の文献²⁾と同等の値であり、超低収縮コンクリートも一般の高強度コンクリートと同等の定着長を考慮すれば良いと考えられる。

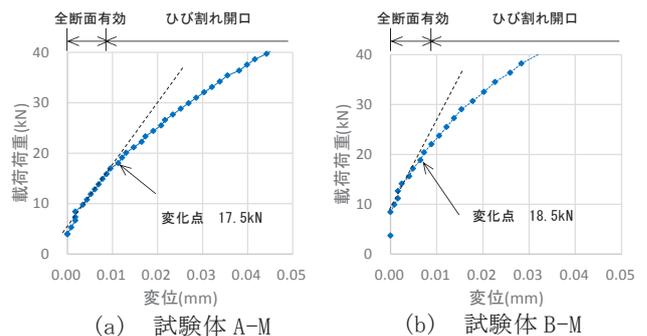


図-9 ひび割れ幅の変化

(3) アラミド FRP 緊張材の有効緊張力

曲げ荷重試験時のひび割れの挙動から、荷重時のアラミド FRP 緊張材の有効緊張力を推定した。初期荷重で曲げひび割れが桁下段のアラミド FRP 緊張材を跨ぐ程度まで荷重した後、除荷を行うとひび割れはプレストレスによって閉じて圧縮力が作用することとなる。再度、荷重を行うと、初期はプレストレスによる圧縮力が残っ

表-6 曲げ試験結果

No.	製作時		載荷試験				破壊形態
	AFRP緊張材緊張力		曲げひび割れ発生		最大荷重時		
	導入時 (kN)	載荷時 (kN)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	
A-M	128.1	130.0	58.7	0.2	165.7	20.4	AFRPロッド破断
B-M	128.4	124.0	58.1	0.5	168.4	29.5	AFRPロッド破断

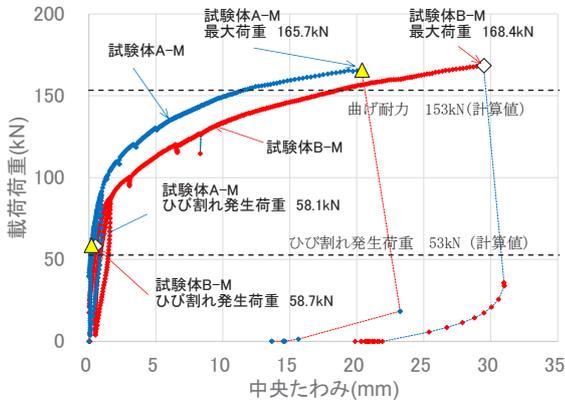


図-10 荷重と変位の関係 (曲げ試験)

表-7 せん断試験結果

No.	載荷試験				せん断耐力 (kN)
	せん断ひび割れ発生		最大荷重時		
	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	
A-S	566.2	1.5	1199.0	9.5	599.5
B-S	430.8	1.1	880.6	7.9	440.3
C-S	301.4	1.8	423.0	4.2	211.5
D-S	281.1	1.6	364.2	4.5	182.1

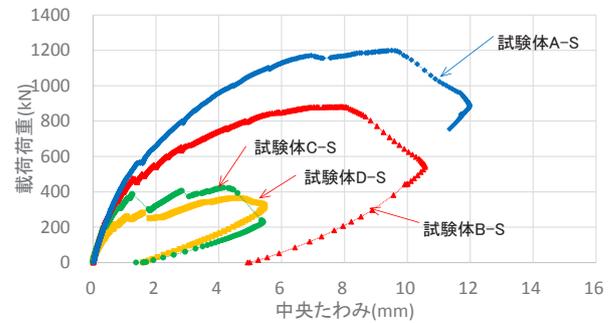


図-11 荷重と変位の関係 (せん断試験)

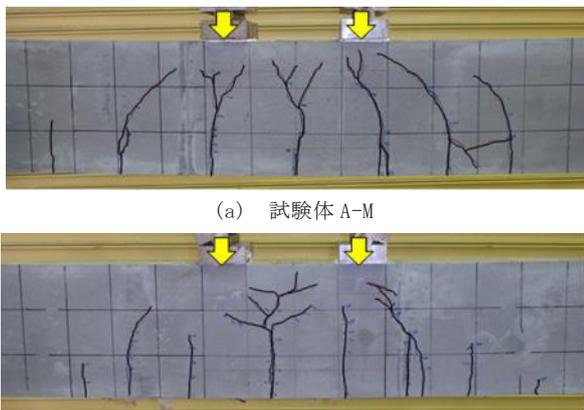


写真-3 試験後のひび割れ状況 (曲げ試験)

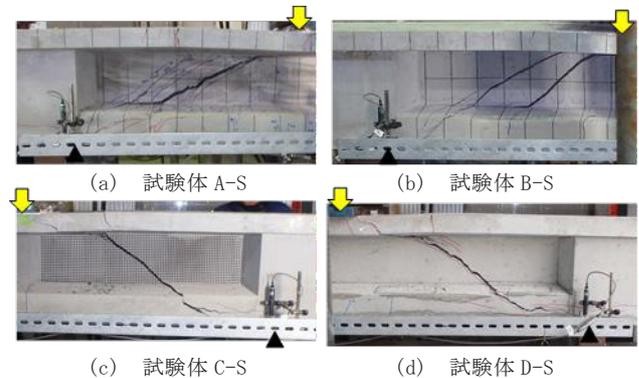


写真-4 試験後のひび割れ状況 (せん断試験)

ているためひび割れの無い断面のように挙動するが、梁下縁から圧縮力は消失し始めひび割れが再開する。ひび割れの開口幅は、この時点から急増する傾向を示すため、この時の載荷荷重から緊張材の張力を計算することができる。

図-9 にひび割れ幅と載荷荷重の関係を示す。図に示した位置でひび割れ幅の増加傾向が変化していることが分かる。本試験は鋼繊維入りのコンクリートを用いており、ひび割れが再開した後も鋼繊維が引張力を負担するため、勾配の変化点が明瞭ではないが、図示した点で求めた有効緊張力は、1本当たり、試験体 A-M が 130kN、試験体 B-M が 124kN となった。

試験体表面に添付したひずみゲージの値から予想されるアラミド FRP 緊張材 1 本当たりの張力は、緊張時で試験体 A-M が 128.1kN、試験体 B-M が 128.4kN であるので、概ねこの方法で有効緊張力が推定できることが分かった。プレストレス導入時の緊張力に対する低下割合

は、それぞれ 1.015、0.966 であり、張力の低下は極めて小さいことが分かる。

(4) 曲げ特性

曲げ試験結果を表-6、載荷荷重とたわみの関係を図-10 に示す。ひび割れ発生荷重は、試験体 A-M が 58.1kN、試験体 B-M が 58.7kN とほぼ同じであった。材料試験結果を考慮した断面分割法による計算結果は 53kN であり、計算値と実験値がほぼ同じであった。

最大荷重は、計算値が 153kN に対して試験体 A-M が 165.7kN、試験体 B-M が 168.4kN であった。破壊形態も計算結果、実験ともにアラミド FRP 緊張材の破断であり、断面分割法により耐力の推定が可能であることがわかった。

試験後のひび割れ状況を写真-3 に示す。ひび割れ間隔、本数はほぼ同等程度であるが、試験体 B-M では、圧縮縁近傍まで発生しているのが 2 本に対して試験体 A-M では、5 本程度発生している。試験体 B-M は試験体 A-M と比較して短繊維混入量が半分であるため、短繊維

表-8 セン断耐力の実験値と計算値

No.	最大荷重 実験値 (kN)	せん断耐力		
		実験値 (kN)	計算値 (kN)	実験値 / 計算値
A-S	1199.0	599.5	333.9 ^{※1}	1.80
B-S	880.6	440.3	306.4 ^{※1}	1.44
C-S	423.0	211.5	82.2 ^{※2}	2.57
D-S	364.2	182.1	56.0 ^{※2}	3.25

※1: 式(1), ※2: 文献4)

維による架橋効果が小さく、ひび割れが局所化していることで、たわみが大きい傾向であったと考えられる。

(5) セン断特性

せん断試験結果を表-7、載荷荷重とたわみの関係を図-11、せん断破壊側の状況を写真-4 に示す。繊維を混入していない試験体 C-S は試験体 D-S と比較すると、耐力低下の要因である斜めひび割れがほぼ同じ位置に1本生じている点は同じであるが、コンクリート強度が異なるため、試験体 C-S の最大荷重が大きくなっている。

鋼繊維の混入率が0.5%の試験体 B-S では、2本のひび割れが大きく開いており、繊維による分散効果と考えられる。混入率 1.0%では、耐力低下の要因となった斜めひび割れの周辺に細かいひび割れが多数発生していた。せん断耐力は、繊維の混入率が大きいほど高くなる傾向が見られた。これは、ひび割れ面における繊維の架橋効果に加えて、斜めひび割れが複数本に分散して生じることも影響していると考えられる。

せん断耐力の評価方法を検討した。短繊維を混入した試験体 A-S、試験体 B-S および短繊維がない超高強度の試験体 C-S については式(1)³⁾、試験体 D-S はコンクリート標準示方書⁴⁾に基づいて算出した。

$$V_{yd} = V_{rpsc} + V_{fd} \quad (1)$$

$$V_{rpsc} = 0.18\sqrt{f'_{cd}} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \quad (2)$$

$$V_{fd} = (f_{vd} / \tan\beta_u) \cdot b_w \cdot z / \gamma_b \quad (3)$$

ここに、 b_w :腹部の幅、 d :有効高さ、 f'_{cd} :超高強度繊維補強コンクリートの設計圧縮強度(N/mm²)、 f_{vd} :超高強度繊維補強コンクリートの斜めひび割れ直角方向の平均引張強度(N/mm²)、 β_u :軸方向と斜めひび割れ面のなす角度、 γ_b :安全係数であり、一般的に1.3としてよい。

表-8 に、最大荷重の実験値と式(1)およびコンクリート標準示方書によるせん断耐力の算定式から計算した値を示す。なお、計算値は材料試験結果を参考に安全係数を1.0として算出した。また、超高強度繊維補強コンクリートの斜めひび割れ直角方向の平均引張強度は、式(4)に示す曲げ強度と引張強度の関係式⁵⁾から算出した。

$$f_{bd} = 2.59f_{vd} + 1.54 \quad (4)$$

ここに、 f_{bd} :超高強度繊維補強コンクリートの曲げ強度(N/mm²)

式(1)は、コンクリートの設計基準強度が180N/mm²、短繊維の混入率が2.0%の実験結果を基にせん断耐力式が構築されたものであるが、計算値に対して試験体 A-S の実験値が1.80倍、試験体 B-S で1.44倍と上回る結果であった。超低収縮・超高強度繊維補強コンクリートは、梁のせん断耐力の算出に式(1)を用いた場合でも安全側に評価できることが分かった。また、繊維を混入していない試験体 C-S、試験体 D-S についても安全側に評価できる結果となった。

5. まとめ

産業副産物を利用した超低収縮・超高強度繊維補強コンクリートとアラミド FRP 緊張材を用いたプレテンション PC 梁の曲げ試験および RC 梁のせん断耐力確認試験から以下の知見が得られた。

- ① 超低収縮・超高強度繊維補強コンクリートを用いたプレテンション梁におけるアラミド FRP 緊張材の定着長は300mm-400mmであり、既往の研究と同等であった。
- ② 曲げ試験の結果から、ひび割れ発生荷重およびアラミド FRP 緊張材が破断する荷重は、断面分割法で安全に推定できることがわかった。
- ③ セン断耐力は、繊維混入率に応じて大きくなり、既存の評価式で安全側に評価できることが分かった。

参考文献

- 1) 例えば、松田 拓, 松丸 真, 蓮尾 孝一, 野口 貴文: 実機ミキサによる超低収縮・超高強度コンクリートの製造およびその品質に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1449-1454, 2016.7
- 2) 池田 光次, 永井 淳一, 浅井 洋, 松元 香保里: アラミド緊張材を用いた外ケーブル定着ブロック工法, 連続繊維補強コンクリートに関するシンポジウム論文集, pp.163-168, 1998.5
- 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), 2004.9
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, 2017.3
- 5) サクセム研究会: サクセム設計・施工マニュアル(案), 2008.3