

超低収縮超高強度繊維補強コンクリート梁の曲げとせん断に関する実験的検討

三井住友建設(株)	正会員	工修	○ 三加 崇
三井住友建設(株)	正会員	工修	野並 優二
三井住友建設(株)		博(工)	松田 拓
三井住友建設(株)	正会員	博(工)	篠崎 裕生

Abstract : It is possible to make members thinner by increasing the strength of concrete, but the problem of shrinkage cannot be avoided, and there are also cases where cracks occur due to restraints such as rebar. We developed ultra-high strength and ultra-low shrinkage fiber reinforced concrete. This concrete, which does not use Portland cement, is an environmental concrete that achieves strength with only the admixture with latent hydraulic property and the alkali stimulant, and achieves low carbon consumption. The bending test of PC beams and the shear test of RC beams were carried out to study the application to members. As a result of the experiment, it was confirmed that both bending strength and shear strength of ultra-low shrinkage and high strength fiber reinforced concrete can be reasonably evaluated by the conventional calculation method.

Key words : Ultra-low shrinkage, High strength, Bending test, Shear test

1. はじめに

近年、構造物の長寿命化への取り組みが行われているが、コンクリート構造物の長寿命化を阻害する要因の一つとして、コンクリートは収縮する材料であり、内外の拘束によりコンクリートに引張力が生じることでひび割れが発生する場合がある。ひび割れから侵入した水分等によって鋼材が腐食すると構造性能が低下することが想定される。また、コンクリートを高強度化することで、部材を薄くすることや導入するプレストレス量を大きくすることが可能であり、構造物の軽量化が図れる。しかしながら、高強度コンクリートの場合にはセメントの使用量が多くなることで、収縮が大きくなることが考えられる。

著者らは粉体および細骨材に産業副産物を使用することで、超高強度でありながら収縮が小さい繊維補強コンクリートを開発した（以下、超低収縮超高強度繊維補強コンクリート）。本コンクリートは、ポルトランドセメントを用いておらず、潜在水硬性を有する混和材とアルカリ刺激材のみで強度を発現するものであり、炭素の発生を抑えた環境にやさしいコンクリートである。これまでに、材料特性を確認するために各種検討¹⁾を行ってきた。

本論文では、超低収縮超高強度繊維補強コンクリートを部材へ適用するにあたり、コンクリート構造物のさらなる長寿命化を目的として、腐食しないアラミドFRP緊張材を用いたプレテンションPC梁による曲げ試験を実施した。また、本コンクリートのせん断特性を把握するために、RC梁によるせん断試験を実施し、超低収縮超高強度繊維補強コンクリートを用いた部材の構造特性について検討を行った。

2. 試験体

2.1 コンクリート

コンクリートに使用する材料を表－1、配合を表－2に示す。配合A～配合Cが超低収縮超高強度

表－１ コンクリートの使用材料

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
	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
結合材	フライアッシュ	密度2.40 g/cm ³ , IIS 1種相当品, 比表面積5,540 cm ² /g	FA
	シリカフェーム	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
			B
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 , 実積率59.0%	G1
	硬質砂岩	表乾密度2.63 g/cm ³ , 砕石2005, 実積率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 コンクリートの配合

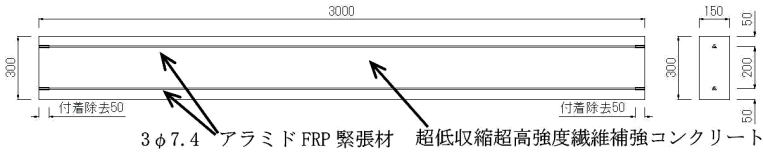
配合	配合指標							単位量 [kg/m ³]											
	W/B [%]	s/a [%]	空気量 [%]	短繊維 混入率 Vf [vol. %]	結合材の質量割合			W	B					S1	S2	G1	G2	Fb	
					BF	FA	SF		C	BF	FA	SF	EX						
A	12.0	62.8	3.5	1.0	55	30	15	100	833	－	447	244	122	20	－	1004	－	526	78.5
B	12.0	63.1	3.5	0.5	55	30	15	100	833	－	447	244	122	20	－	1019	－	526	39.3
C	12.0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

コンクリートでセメントを使用していない。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の4種類とした。また、配合Aが鋼繊維の短繊維を混入率1.0%としたコンクリートであり、配合Bは混入率を0.5%、配合Cは短繊維を混入していない。

2.2 プレテンションPC梁

曲げ試験に用いるプレテンションPC梁の試験体形状を図－１に示す。試験体は、高さ300mm、幅150mm、長さ3000mmの矩形形状とした。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3φ7.4アラミドFRP緊張材を2段配置しており、その他に鋼材は使用していない。試験体は、配合A、配合Bのコンクリートを用いた2種類とした。

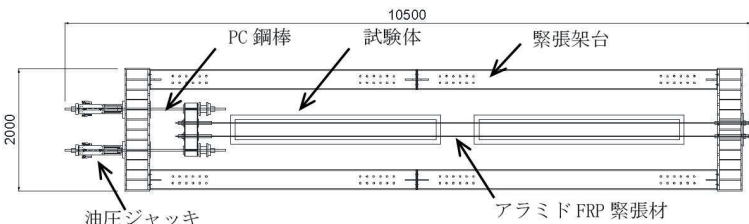
アラミドFRP緊張材は、両端に鋼管を用いた付着定着具を使用し、図－２に示す緊張架台によりアラミドFRP緊張材1本あたりの緊張力を157kN(付着定着具を用いたアラミドFRP緊張材の保証耐力224kN)で緊張した。このとき、試験体は横にして製作した。緊張後、コンクリートを打設して蒸気養生を実施した。蒸気養生は、35℃で1日間の養生を行った後に脱枠を行い、90℃で3日間の養生を実施した。養生終了後に試験体にプレストレスを導入した。なお、アラミドFRP緊張材



図－１ PC 梁（曲げ試験用）

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



図－２ 緊張架台



写真－１ 試験体製作状況

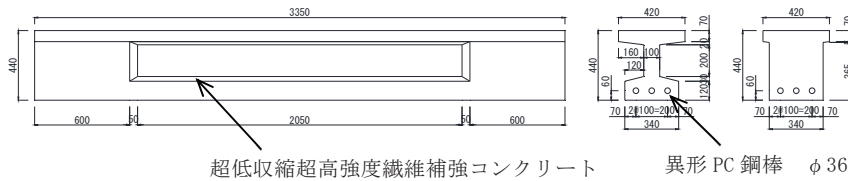


図-3 RC梁（せん断試験用）

表-4 試験体種類

試験体	配合	試験方法
A-M	A	曲げ試験
B-M	B	
A-S	A	せん断試験
B-S	B	
C-S	C	
D-S	D	

の試験体端部は、プレストレス導入時にコンクリートの割裂破壊を防止するため、コンクリート端部から50mmの区間にビニールテープを巻き付けて付着を除去した。



(a) 曲げ試験体（PC梁）



(b) せん断試験体（RC梁）

2.3 RC梁

せん断試験用のRC梁の試験体の形状を図-3に示す。高さ440mm、幅420mm、長さ3350mmのT型梁とした。支点間の断面は、ウェブの厚さを100mmとし、支点外は中実断面とした。せん断破壊を先行させるため、曲げ補強材としてφ36mmの異形PC鋼棒を3列配置した。異形PC鋼棒以外の鋼材は配置していない。試験体コンクリートの配合は、配合A～Dのコンクリートを用いた4種類とし、試験体A～Cについては、曲げ試験体のPC梁と同一の蒸気養生を実施した。曲げおよびせん断試験体の種類を表-4に示す。

写真-2 試験体

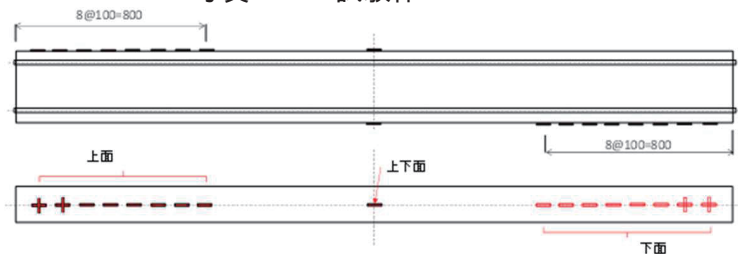


図-4 プレストレス導入時計測位置図

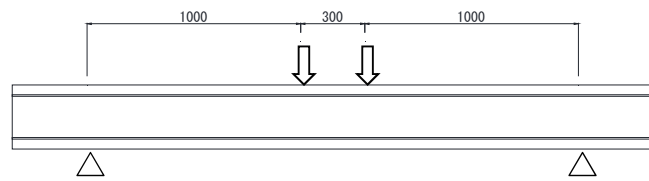


図-5 曲げ試験方法

3. 試験方法

3.1 プレテンション導入試験

アラミドFRP緊張材を用いてプレストレスを導入したときの定着性能を確認するために、荷重計による緊張材の張力とプレストレス導入によるコンクリートひずみの測定を行った。計測位置を図-4に示す。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。

3.2 曲げ試験

載荷方法を図-5に示す。4点曲げ載荷として支間長2,300mmで等曲げ区間が300mmである。載荷は、ひび割れ発生後に一度除荷を行い、ひび割れ発生箇所パイ型変位計を設置した。これは、ひび割れの挙動を確認することで残存プレストレスを推定するためである。その後、単調載荷で破壊まで実施した。計測位置を図-6に示す。計測項目は、載荷荷重と鉛直変位、アラミドFRPロッドのすべり、コンクリートのひずみとπ型変位計による下面のひび割れ測定を行った。

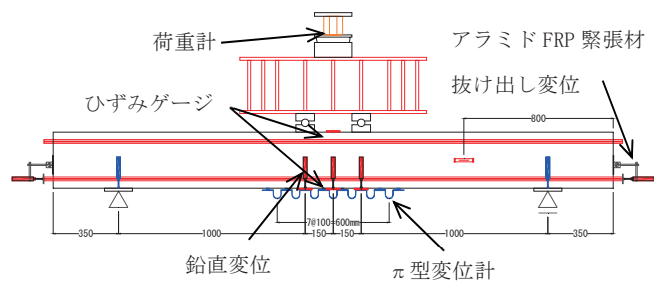


図-6 計測位置図（曲げ試験）

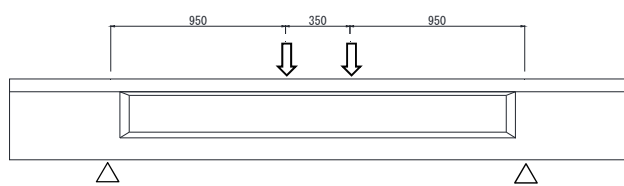


図-7 せん断試験方法

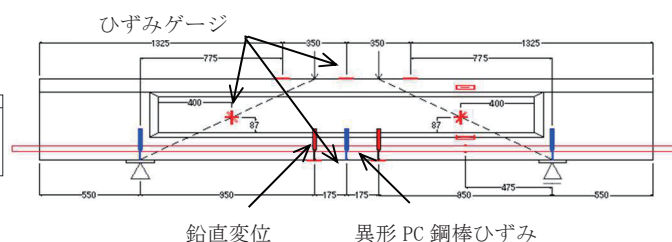


図-8 計測位置図 (せん断試験)

3.3 せん断試験

載荷方法を図-7に示す。4点曲げ載荷として支間長2250mm、等曲げ区間が350mmでせん断スパン比が2.5である。載荷は単調載荷で破壊まで実施した。計測位置を図-8に示す。計測項目は、載荷荷重と鉛直変位、異形PC鋼棒のひずみとコンクリートのひずみの測定を行った。

表-5 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

4. 試験結果

4.1 材料特性

載荷試験時の材料試験結果を表-5に示す。本試験で使用した超低収縮超高強度繊維補強コンクリートの圧縮強度は、配合A～配合Cで144.3N/mm²～154.6N/mm²であった。普通コンクリートの配合Dと比較して圧縮強度が約2.6倍、弾性係数が約1.5倍、ひび割れ発生強度が約1.8倍大きいコンクリートである。

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算出した引張軟化曲線を図-9に示す。繊維混入量の違いにより、引張軟化曲線では、配合Aが高い引張強度を有している。

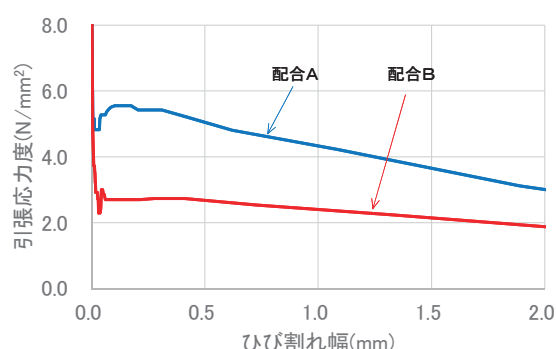


図-9 引張軟化曲線

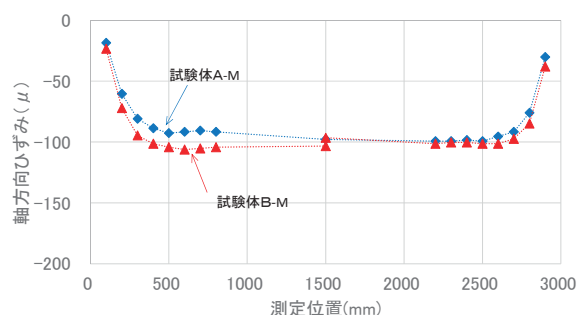


図-10 軸方向ひずみ分布

4.2 アラミドFRP緊張材の定着性能

プレストレス導入によるコンクリートのひずみ分布を図-10に示す。導入時のアラミドFRP緊張材1本当たりの張力は、試験体A-Mが128.1kN、試験体B-Mが128.4kNであった。コンクリートのひずみ分布は、試験体A-M、試験体B-Mともに端部から400mm程度で中央と同等程度のひずみとなる。アラミドFRP緊張材は、コンクリート端部から50mmの付着を除去していることから定着長は350mm程度であり、過去の文献¹⁾と比較しても同等程度であった。

4.3 残存張力

曲げ試験により、載荷前のアラミドFRP緊張材によるプレストレス量から、残存張力を推定した。推定方法は、最初にデコンプレッションモーメントの測定を行った。曲げ載荷によって桁下段のアラミドFRP緊張材を跨ぐ程度の曲げひび割れを発生させてπ型変位計を設置した。除荷するとひび割れ箇所はプレストレスによって閉塞し、圧縮力が作用する。再度、載荷を行うと、圧縮力が作用しているため初期は弾性挙動をするが、載荷によって圧縮力がなくなりひび割れ箇所の開口変位の増加量が大きくなる。このときの変化点が、ひび割れ箇所でアラミドFRP緊張材によって作用している圧縮応力と載荷荷重と自重によって作用する引張応力が釣り合った状態となる。このときの載荷荷重から、載荷

前に作用しているプレストレス量を算出し、アラミドFRP緊張材の残存張力を算出した。1本当たりの残存張力は、試験体A-Mが130kN、試験体B-Mが124kNとほぼ同程度であり、初期緊張力157kNに対してそれぞれ0.792, 0.825であった。

4.4 曲げ特性

載荷荷重とたわみの関係を図-11に示す。計算値は、断面分割法を用いてコンクリート断面を60分割とし、コンクリートの材料物性は、表-5および図-9の配合Aの材料試験結果を用いた。補強材は、表-3で示したアラミドFRPロッドの有効断面積と弾性係数を用いており、コンクリートとアラミドFRPロッドは完全付着とし算出した。

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、計算値が53kNで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。破壊形態も実験、計算ともにアラミド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。また、配合Bは配合Aと比較して繊維混入量が半分であることから、繊維による架橋効果が小さく、写真-3に示すように等曲げ区間でひび割れが試験体B-Mの方が局所化したため試験体A-Mより若干たわみが大きい傾向であった。

4.5 せん断特性

載荷荷重と中央たわみの関係を図-12に示す。せん断耐力は、繊維を混入した試験体A-S、試験体B-Sについては式(1)²⁾、繊維がない試験体C-S、試験体D-Sはコンクリート標準示方書³⁾に基づいて算出した。

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

$$V_{rpd} = 0.18(f'_{cd})^{1/2} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \quad (2)$$

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

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である。

載荷試験による最大荷重は、試験体A-Sが1199.0kN、試験体B-Sが880.6kN、試験体C-Sが423.0kN、試験体D-Sが364.2kNであった。

写真-4に破壊状況を示す。短繊維がない試験体D-Sのせん断ひび割れが載荷点と支点の間で各1

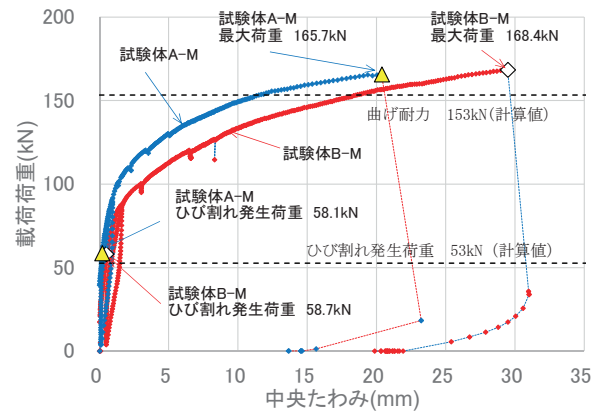
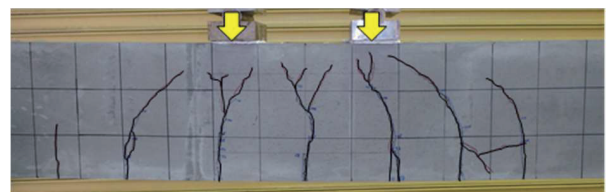
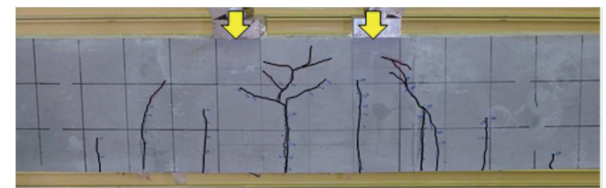


図-11 載荷荷重と中央たわみの関係 (曲げ試験)



(a) 試験体 A-M



(b) 試験体 B-M

写真-3 破壊状況 (曲げ試験)

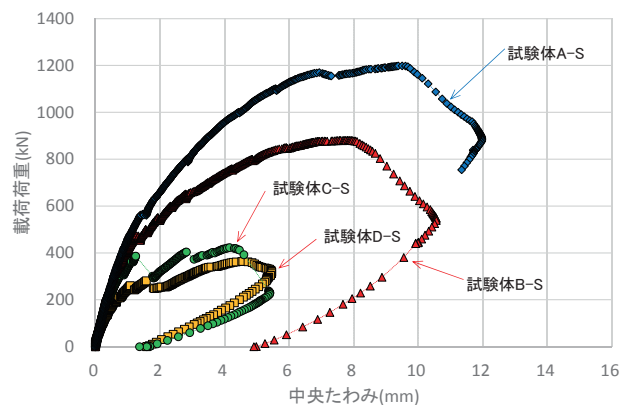
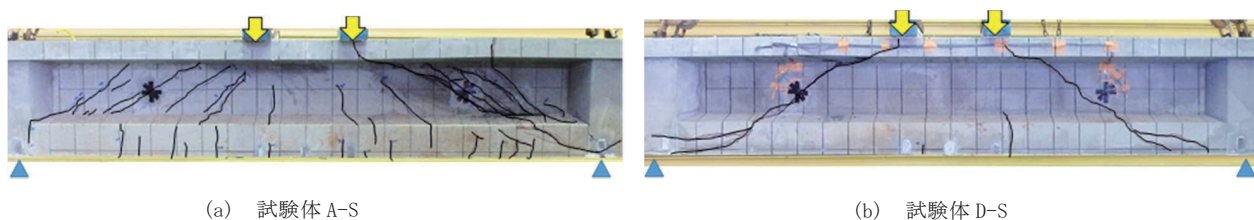


図-12 載荷荷重と中央たわみの関係 (せん断試験)



写真－4 破壊状況（せん断試験）

本であるのに対して、短繊維を 1.0%混入した試験体 A-S では、短繊維の補強効果によってせん断ひび割れが 4～6 本程度に分散しており、短繊維混入率の増加に応じてせん断耐力と最大荷重時のたわみ量が増加していると考ええる。

表－6 に、せん断耐力の実験値と計算値を示す。計算値は、式 (1) およびコンクリート標準示方書によるせん断耐力算定式の安全係数を 1.0 として表－5 に示す材料試験結果を用いて算出した。繊維を混入していない C-S 試験体の実験値は計算値に対して 2.57 倍であるが、試験体 A-S で 1.80 倍、試験体 B-S で 1.44 倍と小さい。これは、式(1)が 2%vol の短繊維を用いた実験結果を基に構築されたせん断耐力式であり、試験体 A-S が 1.0%vol、試験体 B-S が 0.5%vol と短繊維混入率が少ないためであると考えられる。ただし、実験値は、全試験体で計算値を上回る結果であり、超低収縮超高強度繊維補強コンクリートを用いた梁のせん断耐力の算出は、式 (1) で算出することで安全側に評価できることが分かった。

表－6 最大荷重の実験値および推定値

試験体	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	1.80
B-S	880.6	440.3	306.4	1.44
C-S	423.0	211.5	82.2	2.57
D-S	364.2	182.1	56.0	3.25

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異形PC鋼棒を曲げ補強材に使用したRC梁のせん断試験から以下の知見が得られた。

- ・超低収縮超高強度繊維補強コンクリートにプレテンションによるアラミドFRP緊張材の定着性能は、定着長350mmであり、これまでの既往の研究と同等程度であった。
- ・曲げによるひび割れの発生およびアラミドFRP緊張材による破断における耐力は、断面分割法で推定できることがわかった。
- ・せん断耐力は、短繊維混入率の増加に応じて大きくなり、既存の評価式では安全側に評価できることがわかった。

現在、同一製作した試験体の長期暴露を実施中であり、収縮やクリープによる長期的性状、曲げやせん断特性への検討を進めていく。

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