

論文 圧縮強度 400N/mm² の最密充填マトリクスを有する繊維補強コンクリートの力学特性

柳田 龍平*1・中村 拓郎*2・河野 克哉*3・二羽 淳一郎*4

要旨: 400N/mm² 以上の高い圧縮強度を有するセメント系材料を鋼繊維補強した際の力学特性を把握することを目的に、その圧縮、割裂引張および切欠きはりの3点曲げの各材料試験を実施した。結合材の構成を3成分系および2成分系とした2種類のマトリクスを対象とし、鋼繊維の混入率をパラメータとした各材料試験によって、それぞれの強度や静弾性係数、破壊エネルギーなどの材料特性値を明らかにした。加えて、切欠きはりの3点曲げ試験結果の逆解析によって、その引張軟化曲線を推定した。

キーワード: 超高強度, 鋼繊維, 破壊エネルギー, 引張軟化曲線

1. はじめに

コンクリート構造に使用するセメント複合材料の超高強度化により、その部材の薄肉軽量化、断面縮小を可能とし、施工期間短縮やコスト縮減、スパンの長大化等を図ることができる。近年、この種の材料の超高強度化における発展は目覚ましく、国内においては、超高強度繊維補強コンクリートの施工実績が数多く得られている¹⁾。

そのような超高強度化の過程において、464N/mm²の圧縮強度を有するセメント系材料が開発された²⁾。通常の流込み成型が可能なセメント系硬化体としては世界最高強度となるこの複合材料は、最密充填理論に基づき、理論的に最密充填構造となるように配合された最密充填セメント複合材料 (Closest Packed Cementitious Composite, 以下、CPC) である。その製造の過程で、脱型時に吸水処理と 200℃未満の熱養生を必要とするものの、コンクリート製品工場等の既存設備で作製可能となっている。この材料の構造利用を図るためには、超高強度コンクリートに特有の脆性破壊を抑制することが不可欠である。そこで、この材料を鋼繊維補強した際の力学特性を把握することを目的に、繊維混入率を変化させた各種材料試験を実施し、その圧縮・引張特性を確認することとした。

2. 試験概要

2.1 供試体の作製

(1) 使用材料ならびに配合

供試体の使用材料ならびに配合をそれぞれ表-1、表-2に示す。CPCの結合材(以下、B)の構成は、最密粒度となるようにFurnaceの最密充填理論³⁾から算出し、3成分系および2成分系の2種類とした。その混合割合は3成分系の場合にLC:Q:SF-A=6:3:1(体積比)、2成分系の

場合にMC:SF-B=8:2(体積比)とした。鋼繊維は、3成分系のCPC(以下、T-CPC)の場合、コンクリート体積に外割で1%ならびに2%混入し、2成分系のCPC(以下、B-CPC)の場合には、既存の超高強度繊維補強コンクリートの配合を参考にし、コンクリート体積に内割で1%ならびに2%混入した。

(2) T-CPCの作製方法

T-CPCは、各材料を容量30lのオムニミキサにて練り混ぜ、所定の型枠に打ち込んだ後、材齢48時間まで封緘養生を行った。その後、脱型した供試体は、すぐに密閉容器内に設置し、ポンプにて真空まで減圧した状態で上から水を注入して水没させてから30分間の減圧を継続することで、供試体内部まで水を供給した。この脱気吸水処理を行った供試体に対して、2段階の熱養生として、蒸気養生(最高温度90℃、最高温度保持時間48時間)ならびに加熱養生(最高温度180℃、最高温度保持時間48時間)を行った。熱養生を終えた供試体は、載荷試験に供するまで室温20℃、RH55±5%の恒温恒湿室に保管した。

(3) B-CPCの作製方法

B-CPCは、各材料を容量50lのパン型強制練りミキサにて練り混ぜ、所定の型枠に打ち込んだ後、材齢48時間まで封緘養生を行った。さらに、脱型した供試体に対して、蒸気養生(最高温度90℃、最高温度保持時間48時間)を行った。その後、T-CPCと同様に載荷試験に供するまで室温20℃、RH55±5%の恒温恒湿室に保管した。

2.2 載荷試験の概要

(1) 圧縮強度試験

φ50×100mmの円柱供試体を用い、図-1(a)に示すように供試体表面に検長30mmのひずみゲージを貼付し、JIS A 1108 および JIS A 1149 に準じて、容量1000kNの耐圧

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 修(工) (学生会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

*3 太平洋セメント株式会社 中央研究所 第2研究部 主任研究員 博(工) (正会員)

*4 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

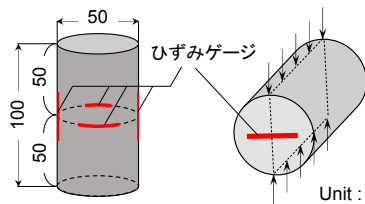
表-1 使用材料

種類	名称	略号	物性
結合材 (B)	低熱ポルトランドセメント	LC	比表面積 3330cm ² /g, 密度 3.24g/cm ³
	中庸熱ポルトランドセメント	MC	比表面積 3180cm ² /g, 密度 3.21g/cm ³
	石英微粉末	Q	密度 2.59g/cm ³
	シリカフェーム A	SF-A	比表面積 20m ² /g, 密度 2.29g/cm ³
	シリカフェーム B	SF-B	比表面積 13m ² /g, 密度 2.23g/cm ³
細骨材	珪砂	S	最大寸法 0.3mm, 密度 2.61g/cm ³
短繊維	鋼繊維	F	直径 0.2mm, 長さ 15mm, 密度 7.84 g/cm ³ , 引張強度 2800N/mm ² , 引張弾性率 210kN/mm ²
混和剤	高性能減水剤 A	SP-A	ポリカルボン酸系
	高性能減水剤 B	SP-B	ポリカルボン酸系
	消泡剤	DF	ポリグリコール系

表-2 配合

供試体名	単位量 (kg/m ³)										Flow* ² (mm)	Air* ³ (%)	
	W	B					S	F	SP-A* ¹	SP-B* ¹			DF* ¹
		LC	MC	Q	SF-A	SF-B							
T-CPC-1	199	876	-	347	102	-	927	78 (外割 1%)	B× 2.8%	-	B× 0.02%	266	3.9
T-CPC-2	199	876	-	347	102	-	927	157 (外割 2%)				259	3.8
B-CPC-1	182	-	1140	-	-	285	944	78 (内割 1%)		B× 1.2%	-	284	4.4
B-CPC-2	180	-	1128	-	-	284	934	157 (内割 2%)				272	5.0

*1 SP と DF は水の一部として計量, *2 練上がり後 90 秒にて落下振動無しで測定, *3 空気室圧力方法



(a) 圧縮強度試験 (b) 割裂引張強度試験

図-1 ひずみゲージ貼付位置

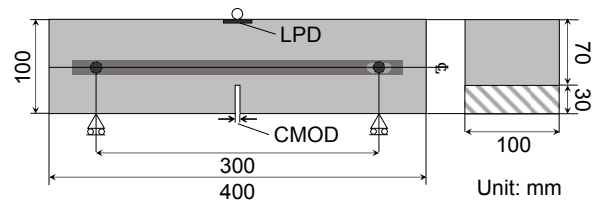


図-2 切欠きはりの3点曲げ試験

試験機によって圧縮強度試験および静弾性係数試験を実施した。試験は最大荷重に達するまでの載荷速度が毎秒 0.2N/mm² となるように荷重を制御した。

弾性範囲内でのポアソン比 μ は、得られた供試体軸方向ひずみ(以下、縦ひずみ)、供試体軸直角方向ひずみ(以下、横ひずみ)から、以下の式(1)によって算出した。

$$\mu = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) / (\varepsilon_1 - 50 \times 10^{-6}) \quad (1)$$

ここで、 ε_2 : 作用応力が圧縮強度の 1/3 に等しい時の横ひずみ、 ε_1 : 縦ひずみが 50×10^{-6} に達したときの横ひずみ、 ε_1 : 作用応力が圧縮強度の 1/3 に等しい時の縦ひずみである。従来のコンクリートにおけるポアソン比の測定は、本手法のようなひずみの測定によるもの⁴⁾と、縦波・横波伝播速度の測定によるもの⁵⁾とが知られており、圧縮試験中のひずみの計測による場合、弾性ひずみと圧縮クリープによるひずみが同時に発生する。しかしながら、例えば、超高強度繊維補強コンクリートでは 40N/mm² 程度の普通強度コンクリートの 5 分の 1 程度のクリープひずみになること⁶⁾や、載荷が短時間であることを考慮すると、CPC でも圧縮クリープの影響はごくわずかであると考え、本手法をポアソン比の算出に用いることとした。

(2) 割裂引張強度試験

図-1(b)に示すように $\phi 50 \times 100$ mm の円柱供試体を用いて試験を実施した。ただし、供試体のひび割れ発生強度を確認するため、超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)⁷⁾(以下、UFC 指針(案))におけるひび割れ発生強度の測定方法を参考に、載荷時に供試体端部中央の位置に載荷方向と垂直になるように検長 30mm のひずみゲージを貼付した。試験は最大荷重に達するまでの載荷速度が毎秒 0.03N/mm² となるように荷重を制御した。なお、本論文では、測定したひずみの値が不連続になった時の引張応力をひび割れ発生強度、最大荷重時の引張応力を割裂引張強度と定義する。

(3) 曲げ試験による破壊力学特性の試験方法

JCI-S-002-2003「切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法」にしたがい、切欠きはりを 3 点曲げ試験に供し、荷重-ひび割れ開口変位 (P-CMOD) 曲線、荷重-載荷点変位 (P-LPD) 曲線を求めた。供試体は 100×100×400mm の角柱供試体とし、その切欠きは、全ての熱養生が終了した後にコンクリートカッターによって部分的に導入した。試験中は、図-2 に示すように、切欠き下部に設置した容量 5mm のクリップ

表一三 圧縮・割裂引張試験における材料特性値

供試体名	繊維混入率 (vol.%)	圧縮強度 (N/mm ²)	ひび割れ発生強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
T-CPC-1	1.0	332.0	11.6	19.2	51.8	0.176
T-CPC-2	2.0	340.3	11.3	34.8	52.6	0.177
B-CPC-1	1.0	255.0	12.1	14.7	55.8	0.182
B-CPC-2	2.0	247.2	11.5	24.0	56.6	0.184

ゲージにより *CMOD* を、高感度変位計により *LPD* を測定し、*LPD* が 15mm に到達した時点を試験終了とし、その後は荷重 0kN まで除荷した。試験開始から終了まで、試験機の載荷板変位が 0.3mm/min となるように載荷速度を制御した。破壊エネルギー G_F は、得られた *P-CMOD* 曲線をもとに、JCI-S-001-2003「切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」にしたがい算出した。ただし、鋼繊維を混入していることから、曲げ試験において、供試体は最終的に破断しないため、本研究では、破壊エネルギーの算出に当たっては、供試体破断時のひび割れ開口変位 ($CMOD_c$) を 5mm と仮定した。

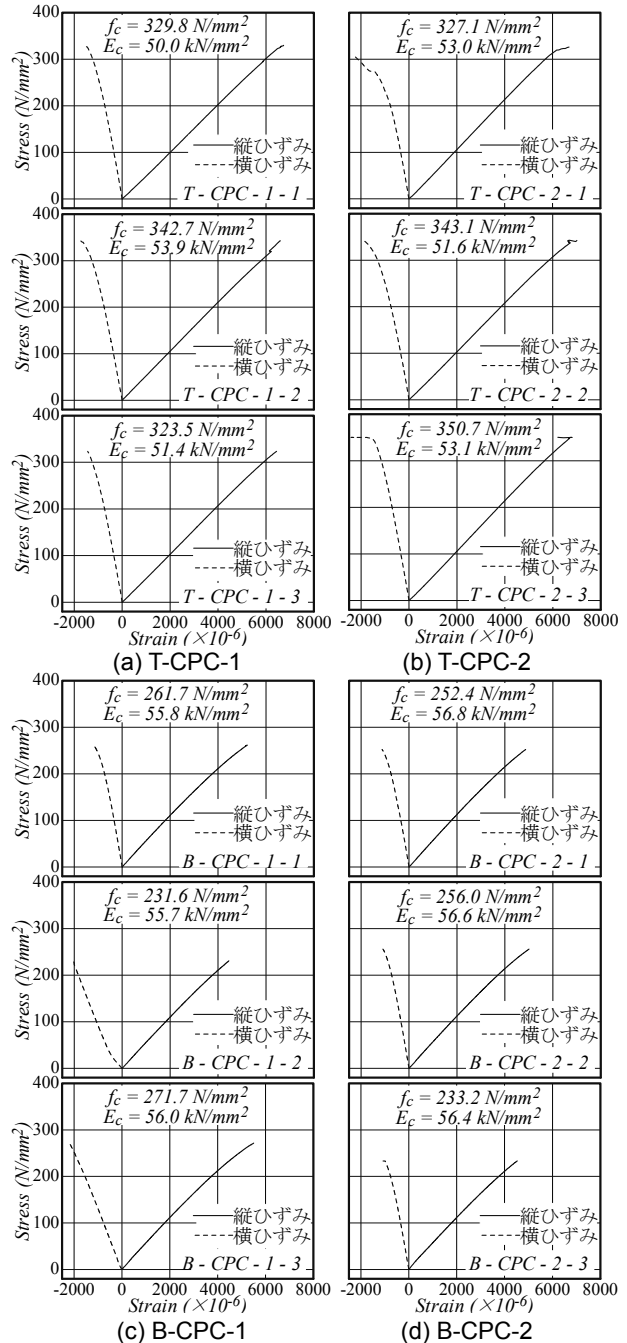
引張軟化曲線は、*P-LPD* および *P-CMOD* 曲線から、日本コンクリート工学会で推奨されている、供試体中央に仮想ひび割れモデルを組み込んだ FEM プログラム⁸⁾を用い、多直線近似法による逆解析によって推定した。

3. 実験結果と考察

3.1 圧縮強度

鋼繊維を混入していない T-CPC の圧縮強度は 411N/mm²であったが、表一三に示すように、繊維の混入によって、マトリクス強度と比べて T-CPC-1 で 19%、T-CPC-2 で 17%程度の強度の低下が認められた。一方、鋼繊維を混入していない B-CPC の圧縮強度は 252N/mm²であったが、繊維混入による圧縮強度の低下は B-CPC-2 の場合で 2%のみであった。T-CPC と B-CPC の圧縮強度を同一の繊維混入率で比較した場合、B-CPC に対して T-CPC-1 は 1.3 倍、T-CPC-2 は 1.4 倍の圧縮強度となった。一方でヤング係数においては、T-CPC のヤング係数はいずれも 50kN/mm² 以上となったものの、平均的には B-CPC より 7%程度低い値となった。T-CPC のヤング係数に対して、材料および養生方法が影響した可能性があり、今後の検討課題としたい。なお、T-CPC のポアソン比は 0.18 程度と、B-CPC と同等程度になった。

また、図一三に各供試体の圧縮応力-ひずみ曲線を、写真一1に圧縮破壊後の供試体の写真の一例を示す。なお、応力-ひずみ曲線は、圧縮を正、引張を負の値として整理している。T-CPC、B-CPC とともに、圧縮応力の増加に伴って線形的にひずみが増大し、B-CPC では、ひずみが 4000×10⁻⁶ 程度を境に、徐々にその勾配が緩やかに



図一三 圧縮応力-ひずみ関係

なる。一方で、T-CPC の場合、繊維の混入率によらず、ひずみが 6000×10⁻⁶ を超えて圧縮強度に至るまでほとんど線形的にひずみが増大した。また、T-CPC と B-CPC とともに、強度の 50%程度を境に供試体表面の剥離が始まり、圧縮強度に至る直前には剥離とそれに伴う破裂音が多く



(a) T-CPC-2 (b) B-CPC-2
写真-1 供試体の圧縮破壊性状の一例

発生した。CPCの最終的な破壊性状はいずれも急激に荷重が低下する脆性的な破壊性状であるが、特にT-CPCは繊維が混入されていたにも関わらず、一部の供試体は、圧縮強度に至ると同時に元の形状を維持できなくなり、架橋していた繊維が引き抜け、写真-1(a)のように分裂し、飛散した。一方、B-CPCの場合は、写真-1(b)のように繊維混入率によらず全て分裂することはなかった。圧縮応力-横ひずみ曲線は、T-CPC、B-CPCともに早い段階で徐々に勾配が緩やかになり、特にT-CPCの場合は、圧縮強度に至る直前の段階で横ひずみが大きく変化した。これらの段階は、供試体表面の剥離の開始を目視で確認した時期と、圧縮強度に至る直前に剥離に伴う破裂音が多く発生していた時期にそれぞれ重なる。

以上のことから、圧縮応力-縦ひずみ関係から明らかのように、結合材が3成分系で構成され、最密粒度とされたT-CPCは、2成分系のB-CPCと比べても、より高い圧縮強度を有するとともに、圧縮に対して一層弾性的に挙動することが明らかとなった。一般に、コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線は、最大荷重に近づくとき応力-ひずみ曲線の勾配が緩やかになるという非線形性⁹⁾を持つ。一方で、特に最密粒度となる3成分系の結合材で構成されたT-CPCはその均質性を極限まで高めた材料で

あるため、ある圧縮応力レベルに達した時点で急激にエネルギーが解放されたことで、このような急激な破壊が起きたと考えられる。

3.2 ひび割れ発生強度と割裂引張強度

表-3に示すとおり、ひび割れ発生強度に関しては繊維の混入率の影響が小さく、また、T-CPCとB-CPCで大きな差は認められず、いずれも 11N/mm^2 程度となった。一方で、割裂引張強度は繊維混入率の影響を受け、T-CPCとB-CPCのいずれも繊維混入率 $2\text{vol.}\%$ の方が高い値となり、T-CPCはB-CPCに比べてやや高い値となった。ひび割れ発生強度は繊維の影響を受けないマトリクスそのものの強度であるため、繊維混入率の影響はごく小さなものになると考えられ、妥当な結果と考えられる。一方で、T-CPCの圧縮強度はB-CPCに比べて1.3倍から1.4倍程度と大きな差があるにもかかわらず、ひび割れ発生強度については大きな差が認められない。このことは、 80N/mm^2 以上の高強度のセメント複合材料においては、圧縮強度に対して引張強度がほとんど頭打ちになるという一般的な傾向とも一致する。

3.3 曲げ試験における荷重-変位曲線と破壊エネルギー

図-4に各供試体の曲げ試験で得たP-CMOD曲線とP-LPD曲線を、表-4に後述する引張軟化曲線の推定結果とともに、P-CMOD曲線から算出した4体の供試体の破壊エネルギーの平均値を示す。P-CMOD曲線およびP-LPD曲線は各シリーズとも供試体4本の結果を示しており、同時にそれらの平均化曲線も示している。なお、平均化曲線は、同一変位(CMODまたはLPD)における荷重の値を平均化しプロットしたものである。そのため、平均化曲線の算出に当たっては、4供試体の変位のピッチを揃える目的で、CMODは 0.001mm 、LPDは 0.005mm の

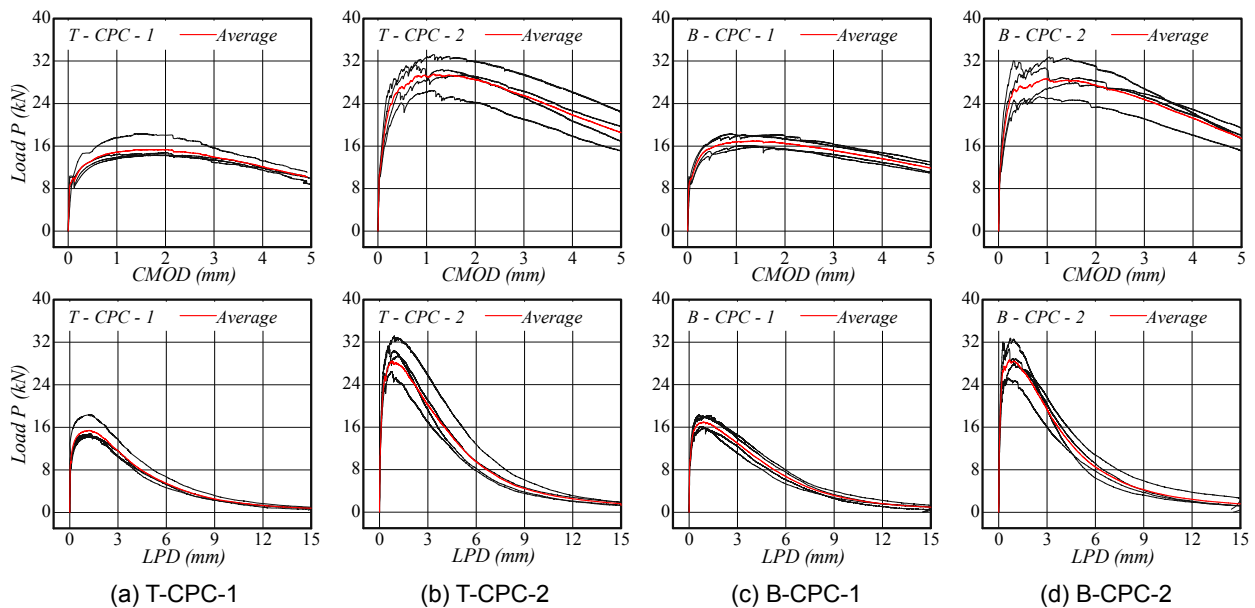


図-4 切欠きはりの3点曲げ試験結果

表-4 曲げ試験および引張軟化曲線における材料特性値

試験水準	最大荷重 P_{max} (kN)	破壊エネルギー G_F (N/mm)	平坦部の引張応力 (N/mm ²)	平坦部終点 w_1 (mm)	応力 0 点 w_2 (mm)
T-CPC-1	15.4	7.1	4.19	1.12	5.30
T-CPC-2	29.6	13.4	8.42	0.72	6.37
B-CPC-1	17.0	8.0	4.64	0.91	5.98
B-CPC-2	28.7	13.1	8.76	0.80	4.67

w_1 : ひび割れ後に一定応力を保持できる最大のひび割れ開口幅

w_2 : ひび割れ発生後に引張応力が 0 となるひび割れ開口幅

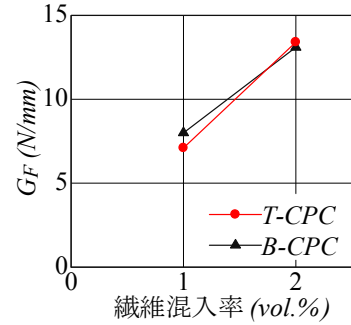
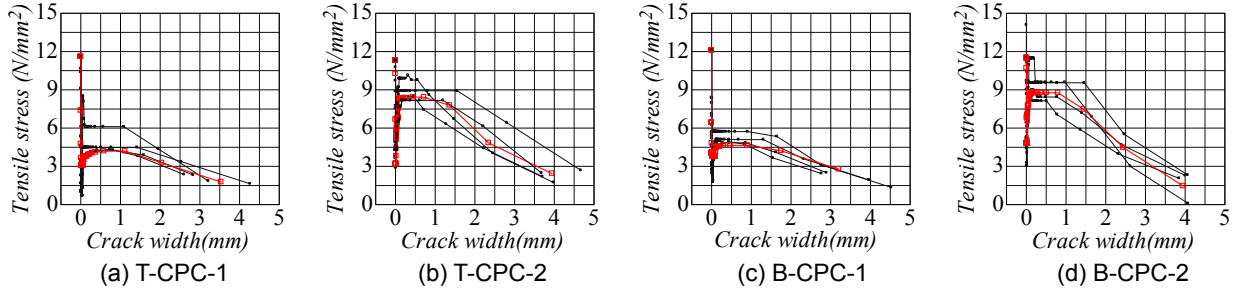
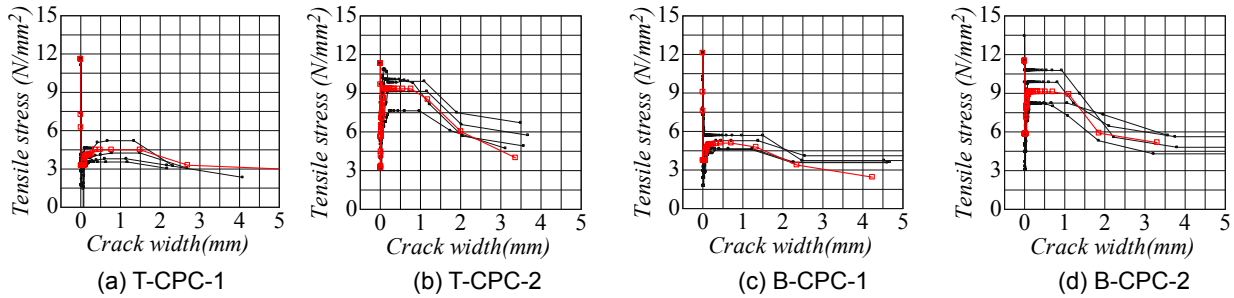


図-5 G_F —繊維混入率関係



— : 各供試体の引張軟化曲線 — : 平均化された P -LPD 曲線から求めた引張軟化曲線

図-6 P -LPD 曲線の逆解析によって得られた引張軟化曲線



— : 各供試体の引張軟化曲線 — : 平均化された P -CMOD 曲線から求めた引張軟化曲線

図-7 P -CMOD 曲線の逆解析によって得られた引張軟化曲線

ピッチになるように曲線を線形補完している。

P -LPD 曲線, P -CMOD 曲線ともに, 繊維混入率が同一の場合, その最大荷重, プレピーク, ポストピークにおける曲線の勾配に T-CPC と B-CPC で大きな差は認められなかった。

次に, 図-5 に破壊エネルギーと繊維混入率の関係を示す。これより, T-CPC, B-CPC ともに, 破壊エネルギーは繊維の混入率が大きくなると増大し, その増分は T-CPC と B-CPC でほとんど同程度であることがわかる。また, T-CPC と B-CPC は同等程度の破壊エネルギーを有していた。本研究では, 供試体が破断する際の $CMOD$ を 5mm と仮定して G_F を算出しているため, 真の破壊エネルギーはさらに大きくなることを考えると, 繊維を混入した T-CPC は, B-CPC と同様に非常に大きな破壊エネルギーを有しているといえる。

3.4 引張軟化特性

(1) 引張軟化曲線の推定

図-6 および図-7 に, 切欠きはりの 3 点曲げ試験に

よって得られた P -LPD 曲線および P -CMOD 曲線から多直線近似法による逆解析を行った結果を示す。なお, それぞれのグラフにおいて, 各供試体の P -LPD あるいは P -CMOD 曲線から推定した引張軟化曲線を黒線で, これらを平均化した曲線から推定した引張軟化曲線を赤線で示している。 LPD , $CMOD$ ともに, ひび割れ発生後に同程度の引張応力を保持しており, 概ね同様の引張応力—開口変位関係となっている。

以上より, これ以降の考察では, P -LPD 曲線から求めた引張軟化特性について述べることにし, 表-4 に, その P -LPD 曲線から逆解析により得られた引張軟化曲線の特性値として, 一定応力を保持する平坦部における引張応力, その平坦部終点におけるひび割れ開口幅 w_1 , および引張応力が低下して最終的に応力が 0 となった際のひび割れ開口幅 w_2 を示す。なお, 引張応力が 0 になる点まで引張軟化曲線を導くことができなかったため, UFC 指針 (案) における引張軟化曲線のモデルと同様に, 軟化開始以降は線形的に応力が低下すると仮定し, 曲線の

最終点とその直前の点の2点間の直線の傾きから、応力0点におけるひび割れ開口幅 w_2 を推定している。

(2) ひび割れ発生から平坦部終点までの引張軟化挙動

図-6より、繊維を混入したT-CPCは、B-CPCの引張軟化挙動とほぼ同様であり、ひび割れ発生後に一度応力が低下し、その後再び応力が増加し、一定の引張応力を保持する応力平坦部が確認された。このような挙動となる原因としては、ひび割れ発生によるマトリクス部の応力分担の一時的な低下、および鋼繊維の架橋効果による応力分担の増加に起因していると考えられる。また、表-4より、同一の繊維混入率でT-CPCとB-CPCを比較した場合、T-CPCの応力平坦部での引張応力はいずれもB-CPCと同程度となった。また、T-CPCとB-CPCそれぞれにおいて、繊維混入率が大きくなると、保持できる引張応力はT-CPCの場合で2.0倍、B-CPCの場合で1.9倍と、いずれも倍程度まで向上した。

以上のように、曲げ試験から算出した破壊エネルギーと引張軟化曲線から、T-CPC、B-CPCともに繊維の混入によって一定の引張応力を保持できるようになり、曲げ靱性を向上できることが明らかとなった。

(3) 応力平坦部終点から応力0点における引張応力

表-4より、平坦部終点でのひび割れ開口幅 w_1 については、T-CPC-1でB-CPC-1の1.2倍、T-CPC-2でB-CPC-2の0.9倍となっており、同一の繊維混入率で比較すると顕著な差は認められない。また、図-6より、平坦部の終点以降、T-CPC、B-CPCともに、開口変位の増加に伴い、徐々に引張応力が低下することが確認できた。試験後に繊維の破断は確認されなかったことから、このような引張軟化の挙動は、繊維の引抜けによる応力分担の低下に起因していると考えられる。

4. 結論

本研究では、3成分系および2成分系の結合材で構成された最密充填セメント系材料を鋼繊維補強した際の力学特性を確認した。得られた知見を以下にそれぞれ示す。

- 1) 最密粒度となる3成分系の結合材で構成されたT-CPCは、圧縮強度が繊維混入率1vol.%で332.0N/mm²、2vol.%で340.3N/mm²となり、一方、結合材を2成分系としたB-CPCでは1vol.%で255.0N/mm²、2vol.%で247.2N/mm²となった。
- 2) 結合材を3成分系で最密粒度としたT-CPC、2成分系としたB-CPCともに、ヤング係数は50kN/mm²以上の高い値を有し、ポアソン比は0.18程度となった。
- 3) CPCの応力-ひずみ曲線は、普通コンクリートで見られる非線形性をほとんど持っておらず、圧縮強度に至るまでほとんど弾性的に挙動した。特に、最密粒度となる3成分系の結合材で構成されたT-CPCの

場合で、その弾性的な挙動が顕著となった。

- 4) 割裂引張強度および破壊エネルギーは、T-CPC、B-CPCともに繊維混入率が大きくなると増大した。ただし、ひび割れ発生強度は繊維混入率によって大きな差は認められなかった。
- 5) 多直線近似法により推定したT-CPCおよびB-CPCの引張軟化曲線は、ともにひび割れ発生後に一度低下した引張応力が再度増加し、一定応力を保持した後、ひび割れ開口変位の増加に伴って徐々に引張応力が低下した。また、このひび割れ発生後の一定応力は、T-CPC、B-CPCともに繊維混入率が大きくなると増大した。

謝辞：太平洋セメント(株)の曾根涼太氏には供試体作製のご協力をいただきました。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 1) 例えば、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，pp.II-125，2015.8
- 2) 河野克哉，中山莉沙，多田克彦：通常流込み成型で460N/mm²の圧縮強度を発現する新規セメント硬化体，プレストレストコンクリート工学会第24回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.545-550，2015.10
- 3) 三輪茂雄：粉流体工学，朝倉書店，pp.140-145，1972
- 4) 例えば，五十嵐豪，丸山一平，寺本篤史，堀口直也：セメントペーストの極若材齢時におけるポアソン比の測定法，日本建築学会東海支部研究報告集(48)，pp.57-60，2010.2
- 5) 例えば，小山智幸，松藤泰典，山口謙太郎，濱崎仁：横波超音波の波動伝達関数解析によるコンクリートの物性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.17，No.1，pp.1169-1174，1995
- 6) 一宮利通，曾我部直樹，本田智昭，日紫喜剛啓：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部材の構造性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.505-510，2006
- 7) 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.113，2004.9
- 8) 日本コンクリート工学会：引張軟化曲線多直線近似解析ダウンロード用プログラム http://www.jci-net.or.jp/j/jci/study/jci_standard/kitsutaka_dl.html (最終検索日：2016年1月11日)
- 9) 三橋博三，六郷恵哲，国枝稔：コンクリートのひび割れと破壊の力学，技報堂出版，2010