

論文 収縮低減剤の添加が繊維補強無孔性コンクリートの破壊力学特性に与える影響

千代延 聖^{*1}・柳田 龍平^{*2}・岸良 竜^{*3}・河野 克哉^{*4}

要旨: 繊維補強無孔性コンクリート (PFC) は極めて大きな圧縮強度を有する材料であるが、自己収縮が大きくなることから、異形鋼材を内部に配置するとその収縮が拘束されひび割れが生じる可能性がある。自己収縮の抑制には、収縮低減剤の添加が有効であり、超高強度繊維補強コンクリートの場合、その添加により力学特性が改善されることが明らかになっている。そこで、収縮低減剤を添加した PFC 供試体を製作し、各種材料試験を行うことでその力学特性を評価した。その結果、収縮低減剤の添加によって、引張破壊エネルギーが 2 割ほど増大するなど引張特性の向上が示唆された。

キーワード: 繊維補強無孔性コンクリート、収縮低減剤、引張破壊エネルギー、繊維とマトリックスの付着特性

1. はじめに

近年、セメント系材料の高強度化が著しく、2015 年には 300N/mm² 以上の圧縮強度を有する無孔性コンクリート (以下、PFC) が開発され、その構造物への適用が期待されている。PFC は脆性的な破壊を防ぐため、繊維補強を前提としており、繊維混入率の増大によって圧縮特性や引張特性といった力学特性を向上できることが明らかにされてきた¹⁾。これまでに繊維混入率を最大で 3.5vol.% とした研究²⁾を行ってきたものの、練混ぜ直後の流動性が低下するなど、ワーカビリティの低下が生じ、単に繊維混入量を増やすことだけでは力学特性の向上に限界があると考えられる。また、PFC は従来の超高強度繊維補強コンクリート (以下、UFC) と同様に極めて低い水結合材比で製作されることから、自己収縮が増大しやすい材料である。このような材料に異形鋼材を組み合わせると、コンクリートの自己収縮が鋼材で拘束されることによってひび割れが生じることもある。これを防止する観点から、内部に鋼材を直接配置せずに、予め埋設したシース孔に鋼材を配置しグラウト充填するなどの配慮が必要となる。コンクリートの自己収縮を抑制するためには収縮低減剤 (以下、SRA) の添加が有効であるが、UFC を対象とした場合、SRA の添加によって引張特性が向上することも報告されている^{3,4)}。そこで、PFC においても SRA の添加により引張特性を向上させることができれば、繊維混入率をむやみに増やすことなく、その力学特性を効率的に向上できるものと思われる。そして、PFC の RC 部材への適用範囲を拡大することができるなど、その実用化に向けて知見の蓄積が可能になる。よって、本研究では SRA の添加が PFC の圧縮強度やひび割れ発生強度、

引張破壊エネルギーなどの破壊力学特性に与える影響を実験的に明らかにすることを目的に各種材料試験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

本研究で使用した材料とその配合を表-1 と表-2 にそれぞれ示す。使用材料は専用のプレミックス結合材 (B)、高強度砂 (S)、鋼繊維 (F)、高性能減水剤 (SP)、消泡剤 (DF)、および収縮低減剤 (SRA) である。SRA 以外の材料は既報⁵⁾で用いられているものと同様のものであり、SRA は低級アルコール系のものを使用した。配合は収縮低減剤を添加しない PFC と添加する PFC_SRA の 2 つの水準とした。繊維混入率は 2.0vol.% として細径の鋼繊維を外割で混入した。練混ぜの結果、いずれの水準でも約 260mm 程度のフロー値を得ることができ、SRA の添加によるフレッシュ性状の大きな違いは確認されなかった。供試体は脱型直後に、PFC 内部に不足する水分を供給する脱気吸水処理を行い、48 時間の 90℃ 蒸気養生ならびに 48 時間の 180℃ 加熱養生を順に行うことで製作した。

2.2 材料試験概要

圧縮試験を JIS A 1108:2018 に準じて行った。供試体寸法は ϕ 50×100mm の円柱供試体として、3 体用意した。また、ヤング係数は JIS A 1149 に準じて算出した。割裂引張試験は ϕ 100×100mm の円柱供試体を 3 体用いて行った。ただし、ひび割れ発生強度を確認するため、供試体の両端面中央の位置に載荷方向と直角になるようにひずみゲージを貼付した。

*1 金沢大学 自然科学研究科 地球社会基盤学専攻 (学生会員)

*2 金沢大学 理工学域 地球社会基盤学系 助教 (正会員)

*3 太平洋セメント (株) 中央研究所 研究開発推進部 高機能コンクリートチーム 主任研究員 (正会員)

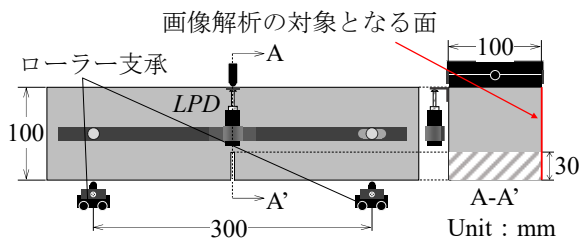
*4 太平洋セメント (株) 中央研究所 研究開発推進部 高機能コンクリートチーム リーダー (正会員)

表－1 PFC の使用材料

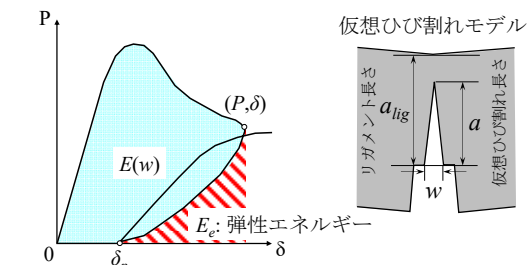
種類	名称	略号	物性
水	練混ぜ水	W	上水道水
結合材	PFC 結合材	B	最密粒度粉体, 密度 2.98 g/cm ³
細骨材	珪砂	S	最大寸法 0.3mm, 密度 2.62 g/cm ³
補強繊維	鋼繊維	F	直径 0.2 mm, 長さ 15 mm, 直線型, 密度 7.84 g/cm ³
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	消泡剤	DF	ポリグリコール系
	収縮低減剤	SRA	低級アルコール系 アルキレンオキシド付加物

表－2 PFC の配合とフロー試験結果

供試体	単位量(kg/m ³)						繊維混入率 v_f	落下振動なしの フロー値(mm)
	W	B	S	SP	DF	SRA		
PFC	194	1384	896	B×1.40%	B×0.2%	0	外割 2.0vol. %	264
PFC_SRA				B×1.45%		12	外割 2.0vol. %	267



図－1 切欠きはりの3点曲げ試験の概要



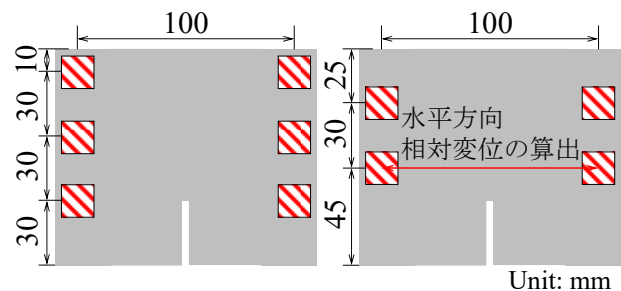
図－2 拡張J積分法において考慮する実現象

2.3 切欠きはりの3点曲げ試験概要

供試体の寸法は 100×100×400mm の角柱供試体とし、硬化後にコンクリートカッターを用いて、深さ 30mm の切欠きを導入した。また、供試体は各水準で 4 体ずつ用意した。曲げ試験の概要を図－1 に示す。試験方法は 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法」を参考に行ったが、後述する引張軟化曲線の推定のため、供試体側面の片側にはたわみを測定するための治具を取り付けた。もう一方の側面はデジタル画像相関法 (DIC) による画像解析を行うため、対象面をランダムな白黒パターンに塗装し、高解像度カメラを用いてひび割れ性状を撮影した。また、試験では最大荷重以降の軟化域において 10 回程度の除荷と再載荷を繰り返した。ただし、用意した 4 体の供試体のうち一部の供試体では、曲げひび割れ発生後から最大荷重に到達するまでの間にも、除荷と再載荷を繰り返した。なお、すべての載荷試験において、急激な荷重の低下や供試体の変形挙動などを把握するため、1 秒間に 10 回のデータを測定した。

2.4 引張軟化曲線の推定方法

曲げ試験によって得られた荷重 (P) - たわみ曲線 (δ) から引張軟化曲線を推定する手法はいくつか提案されており、FEM を用いた逆解析によって実験結果の P-δ 曲線を再現できるように軟化曲線を決定する逆解析法と、エネルギーバランスに基づき軟化応力を決定する J 積分



図－3 デジタル画像相関法によるひび割れ幅の取得

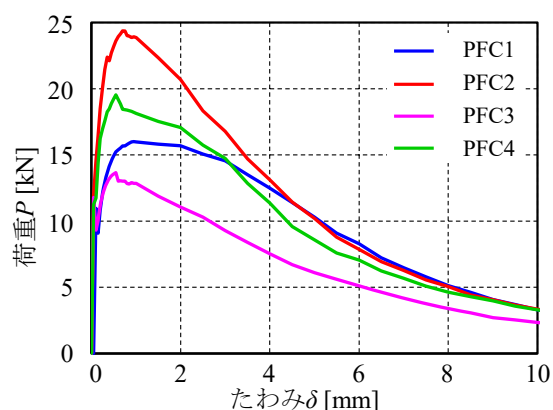
系などが挙げられる。逆解析法は比較的簡便に軟化曲線を推定できるものの、実験の P-δ 曲線のみから推定をするため、実際に生じたひび割れ性状などに関する現象的な知見を得られないことが指摘されている。一方で、二羽ら⁵⁾によって提案された拡張 J 積分法は引張軟化応力を式(1)によって推定する。そのため、図－2 に示すように、供試体に生じる仮想ひび割れの長さやひび割れ部以外に蓄えられる弾性エネルギーの解放といった実現象を考慮し引張軟化曲線を推定することができる。

$$\sigma(w) = \frac{1}{ba} \left[2 \frac{dE(w)}{dw} + w \frac{d^2 E(w)}{dw^2} \right] \quad (1)$$

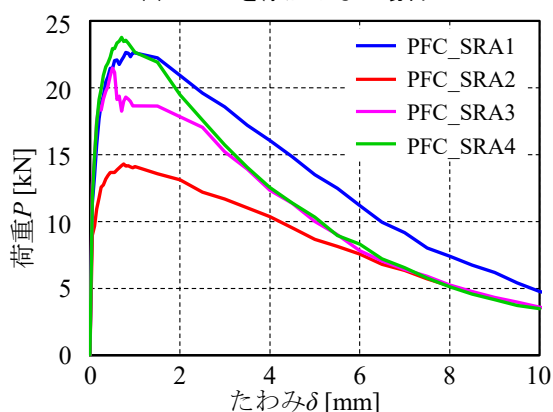
ここに、w:ひび割れ幅 (mm), $\sigma(w)$:ひび割れ幅 w のときの引張軟化応力 (N/mm²), b:供試体幅 (mm), a:仮想ひび割れ長さ (mm), E(w) ひび割れ幅 w に到達するまでに消費されるエネルギー (N・mm)

表－3 材料試験結果

供試体	圧縮強度 f_c' (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (kN/mm ²)	ひび割れ発生強度 f_{cr} (N/mm ²)
PFC	324 (8.65)	55.0 (0.71)	11.2 (0.85)
PFC_SRA	310 (9.03)	54.0 (1.07)	12.0 (0.88)



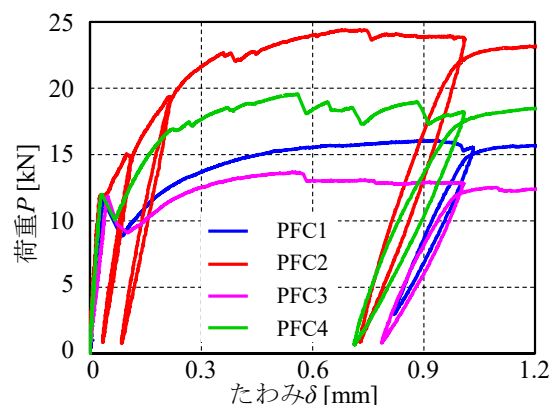
(a) SRA を添加しない場合



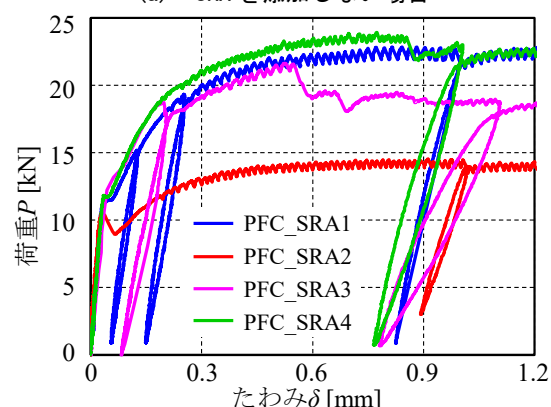
(b) SRA を添加した場合

図－4 荷重－たわみ曲線

本研究では拡張 J 積分法による引張軟化曲線の推定を行うものとし、J 積分系による引張軟化曲線の推定に関する詳しい説明は既報⁹⁾を参照されたい。また、本実験の載荷試験では、ひび割れ幅を計測するための変位計を付けていないため、図－3 に示すような画像解析を行うことでひび割れ幅の算出を行った。撮影した供試体画像に供試体深さ方向に 5 段階に 15×15mm となるような画像解析の対象領域を設定し、DIC による画像解析を行った。画像解析によって得られた対象領域内すべての水平方向変位の平均値をその領域の水平方向変位とした。なお、画像解析によって得られる水平方向変位の精度は、事前に行った切欠き先端のひび割れ幅を π 型変位計と比較する試験の結果、 π 型変位計で 0.104mm, 0.913mm, 1.940mm の計測値に対して、画像解析値で 0.104mm, 0.874mm, 1.914mm となり、変位計測定値に対して 4% 以下の差の範囲内で計測可能であることを確認している。その後、各深さにおいて水平相対変位を求め、ひび割れ



(a) SRA を添加しない場合



(b) SRA を添加した場合

図－5 曲げひび割れ発生から最大荷重までの挙動

幅 w を算出することにした。また、仮想ひび割れ長さ a は得られた供試体深さ方向の 5 段階のひび割れ幅分布から、線形近似を行うことでひび割れ幅が 0 となる位置を求めることで算出した。

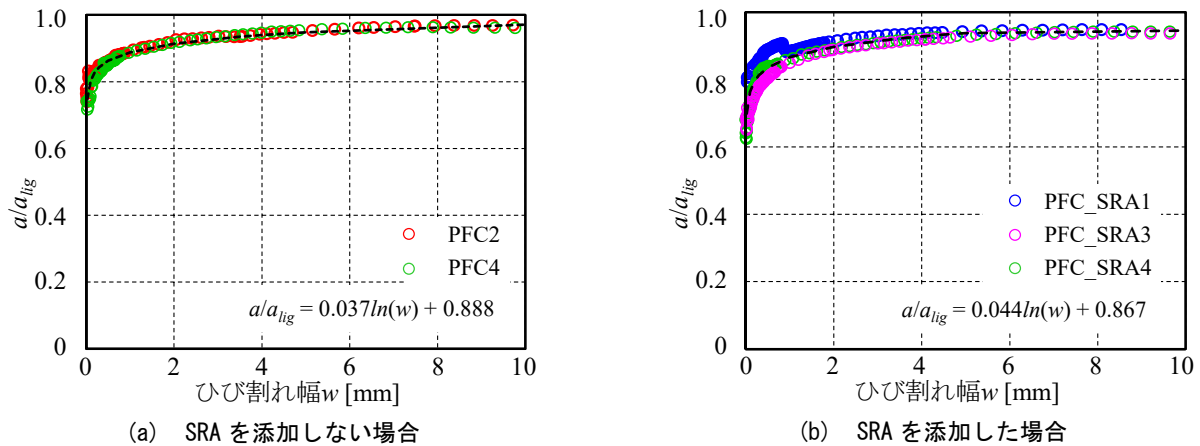
3. 実験結果

3.1 材料試験結果

材料試験の結果を表－3 に示す。示した値はそれぞれ、供試体 3 体の試験結果の平均値であり、括弧内に標準偏差の値を示す。材料試験の結果から、SRA を添加することにより、圧縮強度はわずかに低下したが、その差は 1 割にも満たないものであることから、SRA の添加が圧縮特性に与える影響はほとんどないと考えられる。一方で、ひび割れ発生強度に関して、川口ら³⁾が行った UFC を対象とした場合では、SRA の添加によってひび割れ発生強度が 2 割ほど増大したことが報告されている。しかし、PFC を対象とした本実験では SRA の添加により、ひび割れ発生強度はわずかに向上したものの、顕著な増大は確認できなかった。

3.2 切欠きはりの 3 点曲げ試験結果

切欠きはりの 3 点曲げ試験によって得られた $P-\delta$ 曲線を図－4 に示す。ただし、各供試体の挙動が明瞭となるように、試験中に行った除荷と再載荷のデータは省い



図－6 仮想ひび割れの進展評価

ており、軟化曲線の推定が十分にできる程度のデータ数に絞っている。SRA を添加しない PFC の同一寸法供試体の曲げ試験は既報¹⁾でも行われており、約 20~25kN で最大荷重となり、軟化が進行することが明らかになっているが、本実験で得られた P- δ 曲線の最大荷重には大きなばらつきが確認された。また、曲げひび割れ発生から最大荷重までの P- δ 曲線を図－5 に示す。ここでは、測定したデータ数の削減などは行わず、実験により得られた生データを示している。全ての供試体において、曲げひび割れ発生荷重は 11~12kN となり、先述した材料試験の結果で得られたひび割れ発生強度の値にほとんど差が無かったことと合わせて考慮すると、SRA の添加がひび割れ発生強度に与える影響はないものと考えられる。また、PFC1、PFC3、PFC_SRA2 はひび割れ発生後に急激に荷重が低下し、その後の曲げ剛性が著しく低下した。これらの供試体では、ひび割れ面を架橋する繊維の本数が少なかったことにより不安定な破壊が生じた可能性があるため、以後の検討から除外した。なお、PFC4 は荷重の低下は確認されるものの、その後の曲げ剛性は PFC2 と同程度であり、補強繊維の効果が十分に発揮されたと考えられるため除外していない。また、SRA を添加することによって、曲げひび割れ発生後から荷重の低下と増加を細かく繰り返しながら変形が進んでいることが確認できる。これは曲げひび割れ発生後から確認されることから、マトリクスから繊維が徐々に引き抜けることに起因していると考えられる。よって、SRA の添加は繊維とマトリクスの付着特性に影響したことが推察されるため、付着特性に関する考察を 4 章で行うことにする。

3.3 仮想ひび割れの進展評価

2.4 に示した手法に基づいて画像解析を行った結果を図－6 に示す。 a/a_{lig} の値はリガメント長さ a_{lig} に対する仮想ひび割れの長さ a を表しており、 $a/a_{lig}=1.0$ に近づく

ほどひび割れがリガメント全域に進展することを意味する。ひび割れ進展評価の結果から、SRA を添加しない全ての供試体ではひび割れ発生時にリガメントの 7~8 割程度のひび割れが生じ、ひび割れの開口とともに、徐々にひび割れ先端位置がはり上縁に進展していく挙動であることが確認できる。一方で、SRA を添加した場合、PFC_SRA1 では、ひび割れ発生時に 8 割程度の長さのひび割れが生じ、はり上縁に進展していく挙動となった。その他の 2 つの供試体は、リガメントの 6~7 割程度のひび割れが生じ、ひび割れの開口に伴い、ひび割れが進展していく挙動となったことから、SRA の添加によってひび割れ進展にやや違いが見られることが明らかとなった。また、図－6 には各水準で、最小二乗法を用いた対数近似によって得られた a/a_{lig} とひび割れ幅 w の推定式を破線で示しており、これを引張軟化曲線の推定に用いることにした。

また、画像解析により得られた最大荷重時のひずみコンターを図－7 に示す。最大荷重時におけるひび割れ性状を確認すると、SRA を添加した場合にはひび割れが概ね一本に集中している傾向があるのに対し、SRA を添加しない場合はひび割れが複数に分散する傾向が見られた。黒田ら²⁾の SRA を添加しない PFC の実験によれば、微細ひび割れの本数が増えると、曲げ試験によって得られる最大荷重は大きくなる傾向にあることを確認している。本実験においても、SRA を添加しない場合には、ひび割れ本数の多い PFC2 の方が PFC4 よりも最大荷重が大きいことが確認できる。このひび割れが複数生じた場合に曲げ強度が増大するのは、破壊進行領域が大きく、エネルギー吸収性能が大きくなるためであると考えられる。一方で、PFC_SRA 供試体は PFC 供試体に比べ、生じているひび割れ本数は少ないにもかかわらず、同程度の曲げ強度を有することから、ひび割れ一本当たりのエネルギー吸収性能が高い可能性が考えられる。

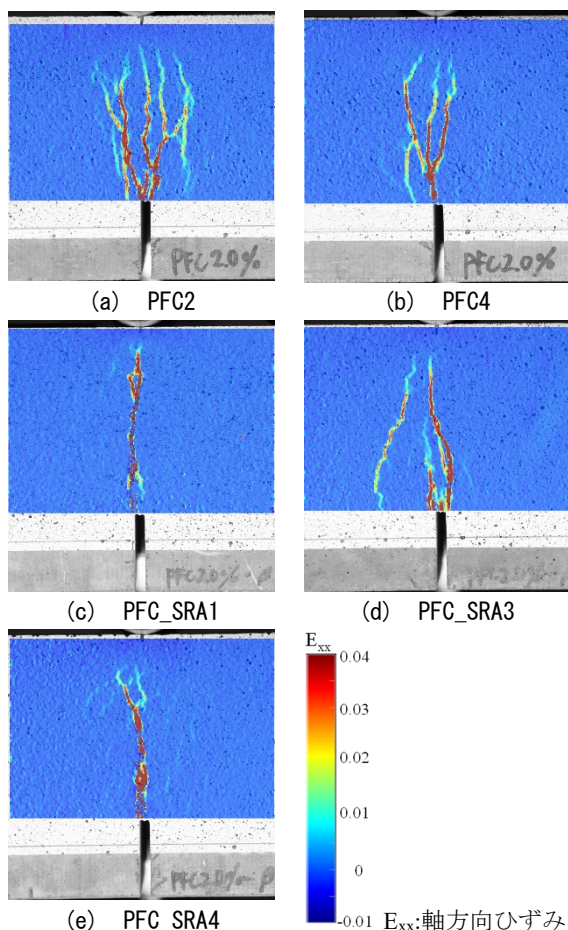


図-7 最大荷重時におけるひび割れ性状

3.4 供試体に蓄えられる弾性エネルギー

2.4 に示したように、拡張 J 積分法で引張軟化曲線を推定するにはひび割れ部で消費されるエネルギーを考慮する必要があり、供試体に与えられた全エネルギーから弾性エネルギーを控除する必要がある。ここでの弾性エネルギーとして考えられるものとしては、ひび割れが生じていない部分に蓄えられるエネルギーやひび割れを架橋している繊維に蓄えられるエネルギーなどが挙げられる。これらのエネルギーは試験中に除荷をすることにより解放され、その大きさは図-2 に示す除荷曲線下の面積を求めることで算出されるものである。ここでは、軟化域における供試体ごとのばらつきの影響をなくすため、除荷曲線を台形積分することで得られる弾性エネルギーの値を除荷開始時の荷重とたわみの値で除すことで無次元化した。なお、本研究では荷重が 0kN になる前に除荷を止めて再載荷を開始したため、完全除荷時の残留たわみは除荷曲線の最後の 2 点のデータから直線近似により算出した。図-8 から、弾性エネルギーはたわみの増大に伴い、小さくなっていく傾向が確認された。得られた結果から、最小二乗法を用いた累乗近似によって弾性エネルギーの推定式を算出した結果、SRA の添加により弾性エネルギーがやや低下した。この理由として、SRA の添

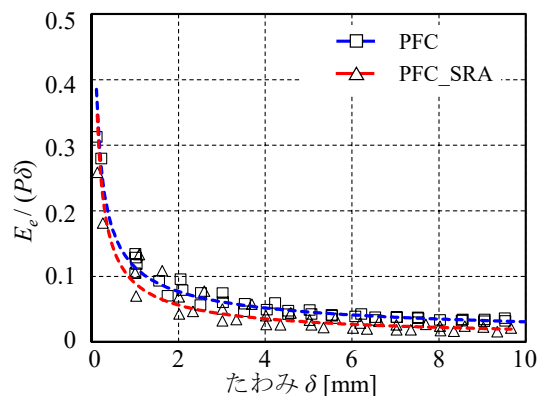


図-8 弾性エネルギーの解放分

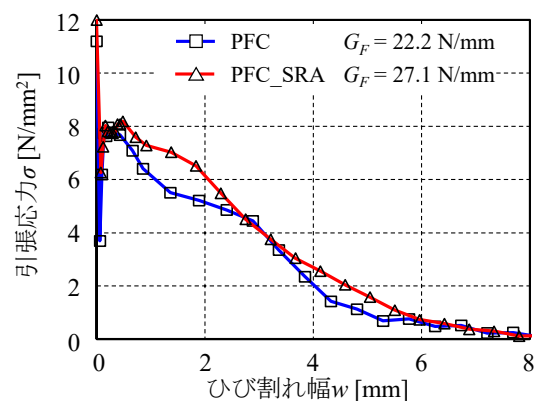


図-9 推定された引張軟化曲線

加によって圧縮強度やヤング係数がやや低下し、それによりひび割れ部以外の PFC に蓄えられた弾性エネルギーが低下したこと、あるいは図-7 に示すようにひび割れ分散性が変化したことによって、除荷時に解放される繊維に蓄えられた弾性エネルギーの大きさが変化したこと、などが考えられる。

3.5 引張軟化曲線に基づく引張特性の評価

ここまでの仮想ひび割れの進展評価と弾性エネルギーの解放分の結果を用いると、図-9 に示す引張軟化曲線が推定された。ただし、不安定な破壊となったと判断した PFC1, PFC3, PFC_SRA2 を除外し、それ以外の P-δ 曲線を SRA 添加のありなしそれぞれで平均化したうえで引張軟化曲線の推定を行った。ここでは、引張軟化曲線下の面積を引張破壊エネルギーとし、その大きさを引張特性を評価することにした。その結果、SRA を添加した場合に、引張破壊エネルギーが 2 割ほど増大することが確認され、SRA の添加が PFC の引張特性を向上させる可能性が示唆された。ただし、先述のように本実験で得られた P-δ 曲線は供試体ごとの曲げ強度のばらつきが大きかったため、試験体数を増やし検討を進めることが今後の課題であるといえる。

4. 繊維とマトリクスの付着に関する考察

本実験の結果から、SRA の添加により引張特性が向上

する可能性が示唆されたが、これは収縮低減剤の添加により繊維とマトリクスの付着特性に何らかの影響が与えられたためであると考えられる。そこで、本研究で用いたものと同様の直線型の繊維を 2.0vol.% 混入した UFC を対象として行われた既往文献の結果を参考にして、繊維とマトリクスの付着特性に関する考察を行うことにした。

はじめに、河野ら⁴⁾は圧縮強度が約 200N/mm² の UFC を対象に切欠きはりの 3 点曲げ試験を行い、SRA の添加によって、本研究と同様に破壊エネルギーが増大することを確認し、これがマトリクスと繊維の界面付着の改善に起因していると論じている。また、繊維混入の有無をパラメータとした収縮ひずみの計測を行うことで、繊維を混入すること自体がコンクリートの収縮低減効果に寄与することも明らかにしている。一方で、Yoo ら⁶⁾は繊維とマトリクスの付着特性を明らかにするため、単繊維引抜試験を行った。その結果、SRA の添加によりマトリクスの自己収縮が小さくなることから繊維への拘束圧が低減し、繊維の引抜強度が低下することを確認している。さらに、Park ら⁷⁾も同様に単繊維引抜試験を行い、SRA を添加することで繊維の引抜強度が低下することを確認している。

以上のように、SRA の添加が繊維のマトリクスからの引抜強度の低下に影響することが実験的に確認されているものの、実際に SRA を添加した PFC では、破壊エネルギーの増大が確認された。本研究では、PFC マトリクスと繊維の界面付着について Yoo ら⁶⁾のような実験的な結果は得られていないものの、3.3 で前述のように、SRA の添加によりひび割れ 1 本あたりのエネルギー吸収性能が高いことが示唆されたため、SRA によって繊維と PFC の界面付着が改善されていた可能性もある。これについては Yoo ら⁶⁾や Park ら⁷⁾と同様に PFC を対象とした単繊維の引抜試験を行い、PFC マトリクスと鋼繊維の付着特性を明らかにすることが今後の課題といえる。また、河野ら⁴⁾の実験のように繊維混入による収縮低減と SRA の添加による収縮低減の相乗効果が期待されることから、異なる繊維混入率の PFC に対して SRA を添加した場合の力学特性への影響について検討することが今後必要になると考えられる。

5. 結論

本研究は収縮低減剤の添加が繊維補強無孔性コンクリートの破壊力学特性に与える影響を明らかにした。得られた成果をまとめると以下のとおりである。

- (1) SRA の添加による圧縮強度およびヤング係数に与える影響は小さいことが確認された。
- (2) SRA の添加によって、ひび割れ発生強度はわずかに

増加したが、切欠きはりの 3 点曲げ試験によって得られた曲げひび割れ発生荷重に大きな差は見られなかったことから、ひび割れ発生強度に与える影響はほとんどないことが確認された。

- (3) 切欠きはりの 3 点曲げ試験の結果を用いて推定された引張軟化曲線から、SRA を添加することにより引張破壊エネルギーが 2 割ほど増大することが確認された。
- (4) SRA の添加によりマトリクスと繊維の界面付着が改善される可能性が示唆されたが、既往の研究で UFC を対象とした単繊維引抜試験からは SRA の添加によって繊維の引き抜け性能は低下することも明らかとなっており、今後、SRA を添加した PFC の単繊維引抜試験を行うことで、破壊エネルギーの向上のメカニズムを再検証することが必要である。

参考文献

- 1) 柳田龍平, 黒田拓海, 千代延聖, 河野克哉: 繊維補強 PFC の引張軟化曲線の評価と梁部材のせん断耐力, プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol31, pp.43-48, 2022.10
- 2) 黒田拓海, 柳田龍平, 小亀大祐, 河野克哉: 鋼繊維を多く混入した無孔性コンクリートの力学特性, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集 Vol21, pp.319-324, 2021.10
- 3) 川口哲生, 河野克哉: 収縮低減剤を添加した超高強度繊維補強コンクリートのひび割れ特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol37, No.2, pp.1111-1116, 2015.7
- 4) 河野克哉, 川口哲生, 森香奈子, 田中敏嗣: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた RC はりのせん断特性に及ぼす高級アルコール系収縮低減剤の効果, コンクリート工学年次論文集, Vol34, No.2, pp.1273-1278, 2012.7
- 5) 二羽淳一郎, Taweechai Sumranwanich, 松尾豊史: コンクリートの引張軟化曲線決定に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 606/V-41, pp. 77-88, 1998.11
- 6) Doo-Yeol Yoo, Su-Tea Kang, Joo-Ha Lee, Young-Soo Yoon: Effect of shrinkage reducing admixture on tensile and flexural behaviors of UHPFRC considering fiber distribution characteristics, Cement and Concrete Research, Vol54, pp.180-190, 2013.9
- 7) Jun Kil Park, Seung Hun Park, Dong Joo Kim: Effect of matrix shrinkage on rate sensitivity of the pullout response of smooth steel fibers in ultra-high-performance concrete, Cement and Concrete Composites, Vol94, pp.226-237, 2018.11