

論文 曲げおよび引張試験によるポリプロピレン繊維補強モルタルの繊維補強効果の評価

山本 基由^{*1}・六郷 恵哲^{*2}

要旨：繊維補強セメント系複合材料の曲げおよび引張試験の際に途中で除荷して、ひび割れを架橋した繊維により変位が回復する荷重-変位関係を測定した。繊維の長さ、断面寸法などの寸法や物性、混入率などを変えたポリプロピレン繊維を混入して作製した供試体を比較した。その結果、繊維の特徴に応じて曲げ、引張除荷曲線の傾きが変化し、除荷曲線の傾きの持つ情報を用いて繊維の補強効果を評価することができることを示した。また、曲げにより貫通する初期ひび割れを生じさせた後に引張試験を行った結果から、繊維群による補強効果を観察する簡便な引張試験方法としての有効性が示された。

キーワード：FRCC, ポリプロピレン, 繊維補強, 除荷, 引張, 曲げ

1. はじめに

セメント系材料の脆性的な特徴を補う目的で使用されている短繊維は、色々な品種が提案されており、使われる目的、用途、状況に合わせ適宜選択されている。中でもポリプロピレン繊維は汎用な材料として使用されることが多い。建材などの分野では、170℃程度のオートクレーブ養生に耐える繊維材料として多く使用されている。さらにコンクリート用には、高架橋下部の剥落防止用、割れ欠けの予防用、さらに補強以外では高強度コンクリートの爆裂の低減用などへの利用が広がっている。

セメント系材料に対する繊維の補強性能は、マトリックスとの付着性能、繊維の弾性係数、強度などに影響されると考えられるが、ポリプロピレンはその化学構造から疎水性のために付着力が低く、かつ弾性係数や強度も他の素材と比べて高いとは言えない。しかし、ポリプロピレン繊維の中でも、インフレーション法で作られる繊維は、その製法から高い強度と弾性係数を得やすく、比較的、使用し易いことが特徴である。また、フィルムから短冊形状に切り裂いて製造されることから、同一材料から長さだけでなく幅を選択することができることも特徴の

一つである。これまで、筆者らはこの繊維を使用した繊維補強セメント系複合材料（以降FRCC）のオートクレーブ養生における特性を述べた¹⁾。本研究では、養生条件を水中養生に統一し、繊維の長さ、幅、弾性係数、マトリックスの強度、混入率に注目して補強効果にどのような影響を与えるかについて検討を行った。

本研究では繊維の補強特性を観察することを主な目的とし、マトリックスに複数ひび割れが生じない歪み軟化型の配合とした。補強効果の評価には、曲げ試験と引張試験を行った。いずれも、載荷途中で除荷し、ひび割れを架橋した繊維により変位が回復する荷重-変位関係について測定を行った。繊維とマトリックスの界面特性としての付着特性は繊維一本もしくは複数本をマトリックスから引き抜く方法が多数提案されている²⁾。本研究では供試体の両面から曲げ試験と同様の方法にて一本の貫通するひび割れを生じさせた後、引張試験に供した。実験ではひび割れ部に集中して起こる変位と、繊維が引き抜ける際の荷重を測定した。橋高らは、繊維の特性によって現れる引張り時の除荷曲線の違いについて検討している³⁾。本研究では、繊維の寸法、物性やマトリックスの強度の違いが除荷

*1 株式会社テザック 産業資材グループ 農修 (正会員)

*2 岐阜大学工学部 社会基盤工学科 工博 教授 (正会員)

表-1 使用材料

項目	記号	種類/緒言
セメント	C	早強ポルトランドセメント:密度 3.14, 比表面積 4550cm ² /g
細骨材	S	愛知県西加茂郡陸砂粉砕品:密度: 2.62, 比表面積: 5330cm ² /g
水	W	水道水
繊維	PPF	ポリプロピレン繊維
高性能減水剤	SP	ナフタリン系
消泡剤	D	高級多価アルコール系

表-2 PP短繊維の諸物性表

繊維名	A220	A590	B220
長さ(mm)	3,6,9,12	3,6,9,12	6,12
平均断面寸法 (10 ⁻³ mm)	40×220	40×590*	40×220
平均径(dtex)	80	214*	80
原料フィルム	A	A	B
伸び(%)	<8	<8	<10*
引張強度(N/mm ²)	560	560	500*
弾性係数(kN/mm ²)	13.5	13.5	11.5*

*A220を基準とし、異なる値について斜体文字で示す。

曲線の傾きに及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

供試体の作成に使用した材料を表-1に示す。マトリックスを密実にするために、細骨材をボールミルで粉砕した物を使用した。また、水セメント比を下げるために減水剤を、空気巻き込みを低減するために消泡剤を使用した。

使用したポリプロピレン(PP)短繊維の諸物性表を表-2に示す。繊維はインフレーション法で作られたフィルムを切断した長方形断面のものを使用した。繊維は素材として2種類、各サイズに切断されたものを供試体作成に使用した。

作成した供試体の実験水準について表-3にまとめる。供試体の名前について、例えばAフィルム-平均幅220×10⁻³mm-長さ3mmの場合にはA220-3と表示する。また、繊維量が0.5Vol.%の場合、マトリックスの配合が55N/mm²の場合

表-3 調合表

配合名 (圧縮強度より)	単位量(g/L)						
	W/C (%)	W	C	S ^{*1}	SP	D	PPF
80N/mm ² 配合	35	354	1071	643	11	11	9.1* ²
55N/mm ² 配合	50	382	780	780	0	8	9.1

*1 記載のSは乾燥質量

*2 表-4の水準13),14)ではPPFを4.6とした。

表-4 実験水準

水準	内容		
	繊維名称	繊維混入率 (Vol.%)	マトリックスの配合
1)-4)	A220-3,6,9,12	1.0	80N/mm ²
5)-8)	A590-3,6,9,12	1.0	80N/mm ²
9),10)	A220-6,12	1.0	55N/mm ²
11),12)	B220-6,12	1.0	80N/mm ²
13),14)	A220-6,12	0.5	80N/mm ²

も名前に明記した。

作製した供試体の調合を表-3に示す。マトリックスの強度を変えるため2種の配合を採用した。JSCE F 506に準じて供試体を作製し14日材齢で圧縮試験を行った結果から、配合の名前として表示した。

2.2 実験水準

実験を行った水準について表-4にまとめた。水準1)-4)では繊維長の違い、以降水準1)-4)と比較して水準5)-8)では繊維幅の違い、水準9),10)ではマトリックスの違い、水準11),12)では繊維物性の違い、水準13),14)では繊維混入率の違い、について検討を行った。

2.3 試験体の製作

練り混ぜには5Lのオムニミキサーを使用した。早強ポルトランドセメント、細骨材、PP繊維を投入し、60秒間混合した。次に水、減水剤(80N配合のみ)、消泡剤を投入して120秒間練り混ぜを行った。

練り混ぜ後、300×300×10mmの型枠に流し込み、振動を加えながら成形し、表面をこてで仕上げた。材齢1日まで20℃で封緘養生した。そ

の後離型した板を、ダイヤモンドカッターを使用して、曲げ試験用に $125 \times 50 \times 10\text{mm}$ 、引張試験用に $125 \times 20 \times 10\text{mm}$ に切り出した。その後、材齢 14 日まで 20°C の恒温水中で水中養生を行った。引張試験用の供試体は、図-1の方法（幅 20mm ）で供試体の両面から曲げ载荷にて初期ひび割れを発生させた。ただし、载荷時には供試体の下側に高感度変位計ではなく引張試験時に使用すると同じ π 型変位計を取り付けて下縁部の変位を測定した。ひび割れ発生直後の下縁部の変位 0.20mm 、裏返して反対側の変位 0.15mm までたわみを与え、貫通ひび割れを生じさせた。試験後の顕微鏡観察により、貫通するひび割れを確認し、その残留ひび割れ幅を測定したところ約 0.02mm であった。

2.4 試験方法

(1) 曲げ試験

図-1に曲げ試験の方法を示す。変位は载荷点直下に設置した高感度変位計で測定した。制御はクロスヘッドの変位制御とし、速度 $1\text{mm}/\text{min}$ とした。クロスヘッドの移動距離 $0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0\text{mm}$ で除荷し、その際の除荷曲線についても測定を行った。測定した荷重に変位計のバネ荷重が付加されるため、測定荷重から差し引いた。実験は6体で行い、最も平均値に近い試験体を表示した。

(2) 引張試験

図-2に引張試験の方法を示す。変位は試験体側面に取り付けた π 型変位計で測定した。使用した π 型変位計は標点間距離 50mm 、測定可能変位 2mm であるため、変位が 2mm に達すると変位計を取り外した。 2mm 付近ではクロスヘッド移動距離変化率と変位計の変位変化率は近似しているため、それ以降はクロスヘッドの移動距離を変位とした。本実験では原点から $0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0\text{mm}$ で除荷し、その際の除荷曲線についても測定を行った。また、測定した荷重に変位計のバネ荷重が付加されるため、測定荷重から差し引いた。実験は6体で行い、最も平均値に近い試験体を表示した。

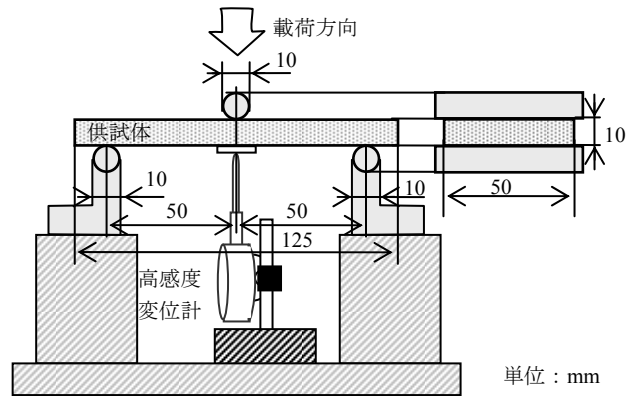


図-1 曲げ試験方法

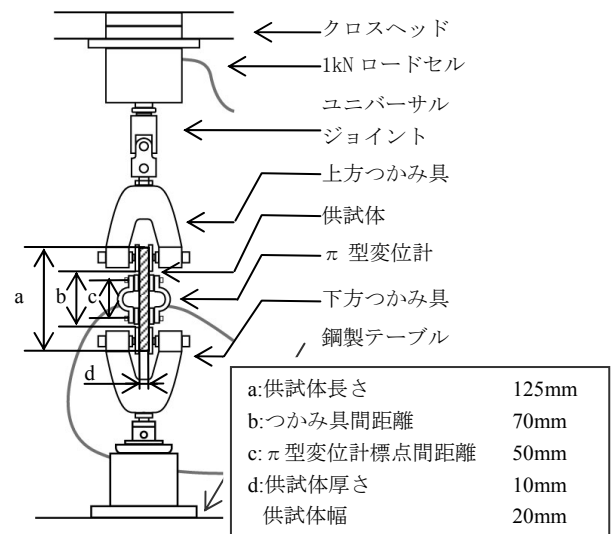


図-2 引張試験方法

3. 実験結果および考察

3.1 強度試験結果

(1) 繊維長と繊維断面寸法の比較

曲げ試験の結果を図-3に、引張試験の結果を図-4に示す。比較のため、曲げ試験の場合、繊維長 3mm の場合に変位のゼロ点を起点とし、繊維長が 3mm 増すごとに起点をずらして表示した。また、引張試験の場合も 2mm ずつずらして表示した。また、荷重変位曲線を積分して求めたエネルギーについても表示した。除荷-再载荷の繰り返しによる曲げ試験、引張試験を行った結果、どの供試体についても除荷-再载荷後にほぼ元の位置に戻り、連続性のある曲線を描いた。図-3(a)より、繊維長の増加と共に初期ひび割れ後の最大荷重が徐々に増加するのが観察された。またエネルギーも同様に増加した。

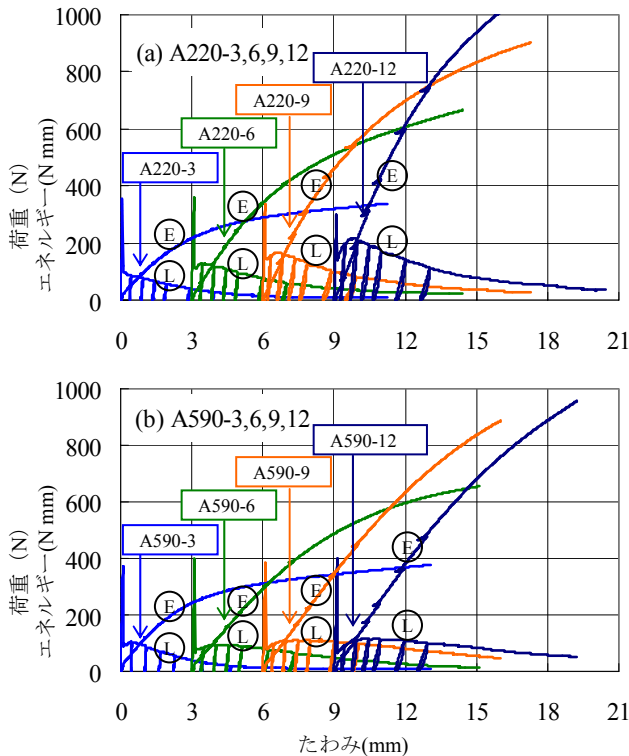


図-3 各供試体の曲げ荷重-たわみ曲線(L) および曲げエネルギー-たわみ曲線(E)

これに対応する引張試験図-4 (a)も、繊維長の増加に伴ってピークが増加し、概ね繊維長の1/2程度で発生する荷重がなくなった。繊維断面寸法が大きい場合の図-3 (b)より、繊維長の増加につれて、ひび割れ後のピークはあまり増加しなかった。しかし、変位に伴う荷重の低下が少なく、A220-9とA590-9を例に比較するとたわみ3mm以降にはA590-9はA220-9より高い荷重が生じた。図-4 (a)と図-4 (b)を比較すると特に繊維長9mmと12mmでは、変位0.5mmから荷重の低下が低く抑えられる傾向が見られた。このことは曲げ試験と対応していた。

(2) マトリックス強度、繊維物性、混入率の比較

以下、曲げ試験は図-3 (a)との比較、引張試験は図-4 (a)との比較とする。マトリックスの強度が小さい場合の図-3 (c)では、初期ひび割れ後の曲げ荷重が同じかもしくは若干向上していた。また、図-4 (c)の引張試験の結果もそれに対応するように若干向上していた。繊維の強度と弾性係数を下げた場合の図-3 (d)より、ひび割れ発生直後の荷重が下がっており、曲線全体も若干低下していた。また、図-4 (d)の引張

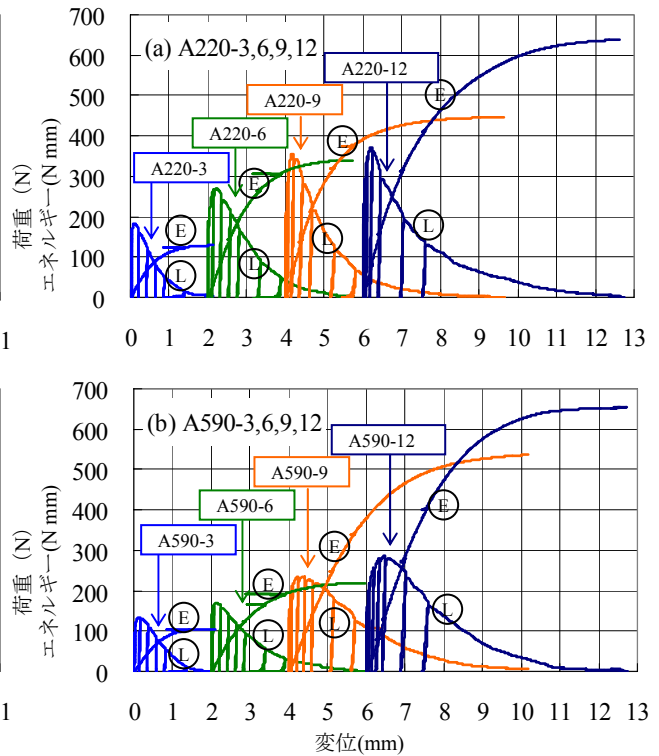


図-4 各供試体の引張荷重-変位曲線(L) および引張エネルギー-変位曲線(E)

試験の結果もそれに対応するように若干低下していた。図-3 (e)の混入率0.5Vol.%の初期ひび割れ後の曲げ荷重は、混入率1.0Vol.%の場合のほぼ半分となり、繊維の混入率との高い相関を示す結果となった。図-4 (e)の引張試験においてもそれに対応し同様の結果となった。

(3) 引張試験の有効性について

本研究で行った引張試験は、引張試験前に曲げによりひび割れを生じさせる事によって、ひび割れを架橋する短繊維が引き抜ける際に発生する荷重をFRCCの板状の供試体のままで測定することを可能にした。曲げ試験だけでFRCCの繊維補強効果を評価しようとした場合、圧縮域の挙動が含まれてしまう。また、曲げ荷重がゼロとなる点に分かりにくく、破壊に要するエネルギー(曲線下の面積)も求めにくい。さらに、事前に生じさせたひび割れが無い一般の引張試験の場合、ひび割れが発生した直後に破壊が急激に進行し易く、コントロールが難しい。本研究で行った引張試験方法は、これらの問題を解決し、FRCCが完全に二分されるまでの挙動を簡便に測定することを可能にした。

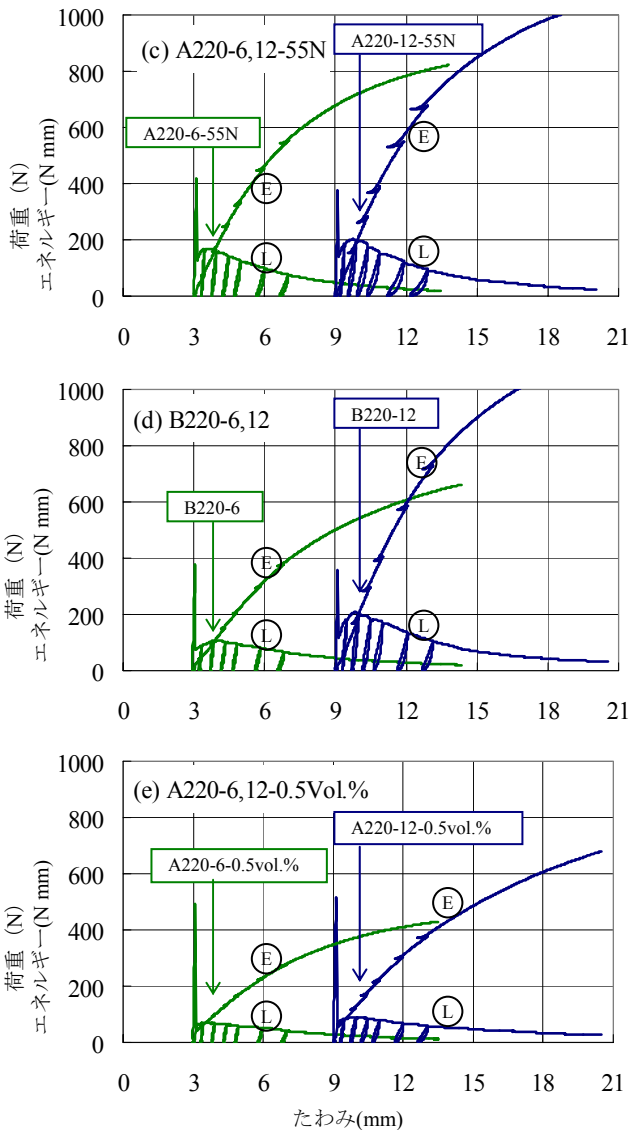


図-3 各供試体の曲げ荷重-たわみ曲線(L)および曲げエネルギー-たわみ曲線(E) (続き)

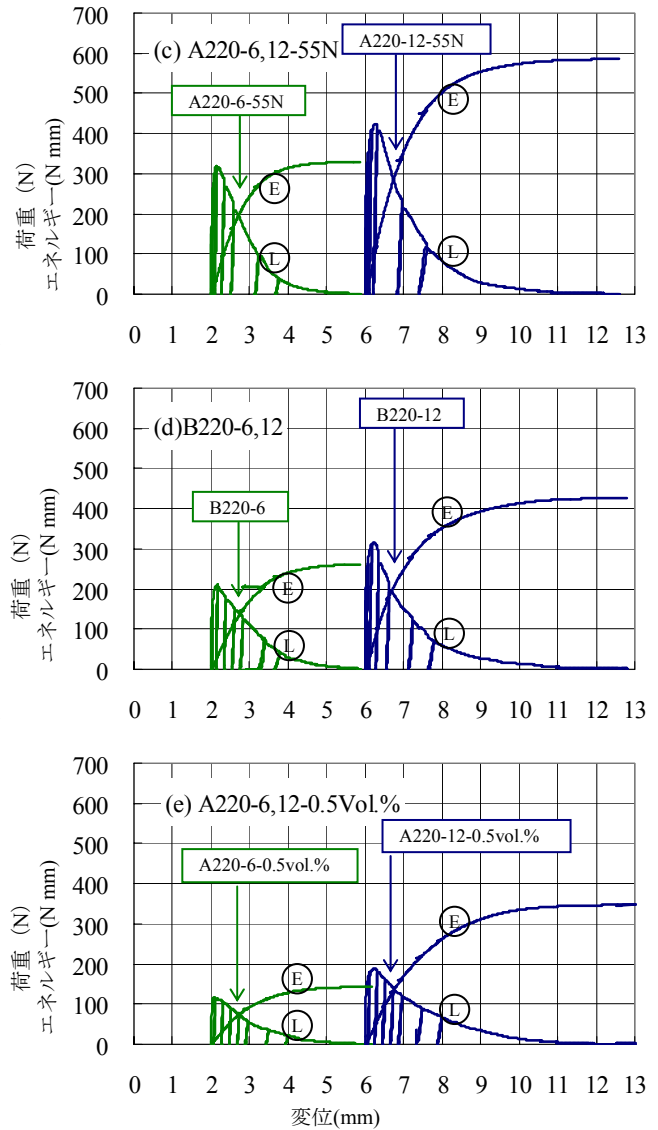


図-4 各供試体の引張荷重-変位曲線(L)および引張エネルギー-変位曲線(E) (続き)

(4) 除荷曲線

図-5に曲げ除荷近似線の延長線を引いた例(A590-3)、図-6に引張除荷近似線の延長線を引いた例(A220-12)を示す。曲げ除荷曲線は繊維長の約1/2たわみの区間を超えると傾きが小さくなり、交点から外れる傾向が見られた。曲げの場合、繊維の抜け出し長さが不均一のため本研究では引張除荷近似線で議論することとする。引張試験の除荷近似線は概ね良く1点に交わるが、中でもずれの少ない4本目までの除荷近似線の交点を図-7にまとめた。同じ実験水準では原点と交点を結んだ同一直線上の近い範囲に集まる傾向が見られた。繊維混入率を減らすとその傾きが緩くなることから、繊維補強効

果が高い程、傾きが大きくなると思われる。

また、交点は、繊維長が長い方が、繊維径が細かい方が原点に近づく傾向が見られ、繊維把持力を示すものと考えられる。5)~8) A590の各水準においてはばらつきが多かったが、原点と交点を結ぶ直線上に概ね集まる傾向が確認できた。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 繊維長が長いほど、混入率が多いほど、曲げひび割れ導入後の供試体を用いた引張試験における荷重-変位曲線のピークは大きくなり、その面積であるエネルギーも大きくなる傾向が見られた。

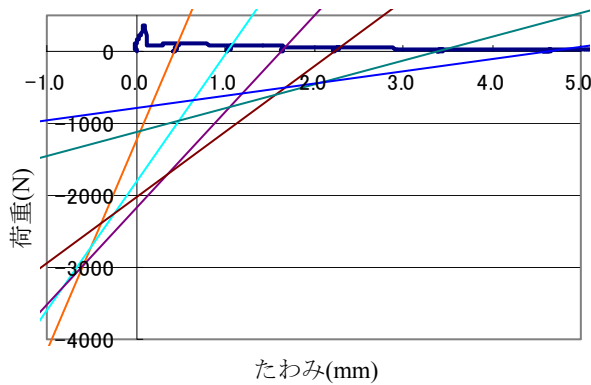


図-5 曲げ除荷近似線の延長線を引いた例(A590-3)

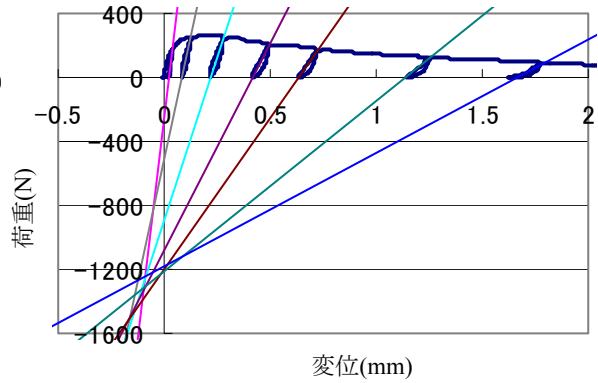


図-6 引張除荷近似線の延長線を引いた例(A220-12)

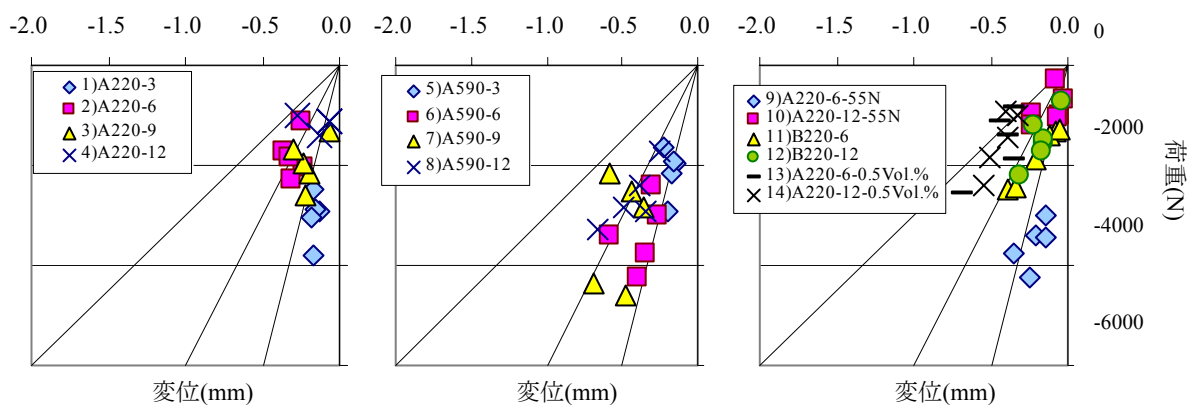


図-7 引張除荷近似線の交点

- (2) 同じ繊維混入率における、繊維断面寸法の増加は初期ひび割れ後の荷重の低下を生じるが、変位の増加にともなう荷重低下の割合が少ないため、エネルギー量では断面寸法の小さな繊維とあまり変わらなかった。
- (3) 低い弾性係数の繊維の曲げ試験では、ひび割れ直後の荷重の低下と、初期ひび割れ後の最大荷重時変位の増加が見られた。
- (4) 曲げおよび引張除荷近似線を延長すると1点で交差した。引張除荷近似線の点を集計した結果、同じ実験水準では原点と交点を結んだ同一直線上の近い範囲に集まる傾向が見られた。繊維混入率を減らすとその傾きが小さくなることから、繊維補強効果の大小の判断に用いることができると考えられる。
- (5) 交点は、マトリックスが繊維を把持する力が大きいほど（繊維長が長い場合や、繊維が細い場合など）原点に近づく傾向が見られた。

- (6) 曲げにより貫通する初期ひび割れを生じさせ、その後引張試験を行った今回の実験では、簡便な引張試験方法としての有効性が示された。

参考文献

- 1) 山本基由, 山田寛次: オートクレーブ養生温度を変えたP P短繊維補強セメント材料の曲げ挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, 2002
- 2) 真嶋光保, 幸左賢二, 大野定俊: 繊維補強セメント/コンクリート複合材料, 技報堂出版, pp.43, 1994
- 3) 橘高義典, 高橋仁智: 破壊力学手法によるひび割れ分散を考慮した繊維補強軽量コンクリートパネルの曲げ破壊解析, 日本建築学会構造系論文集, No.541, pp.37-42, Mar., 2001