

# 論文 アラミドロッドとビニロン繊維および膨張材による腐食しやすい鋼材を使用しないコンクリート梁部材の提案

原 勝哉\*1・近藤 真一\*2・橋本 親典\*3・渡邊 健\*4

**要旨**：2050年カーボンニュートラル実現のために、セメント量を低減した環境配慮型コンクリートの開発が進められているが、セメント量の低減は中性化の進行による鉄筋コンクリートの鋼材腐食発生が懸念される。本研究では、アラミドロッドとビニロン繊維および膨張材を使用したコンクリート梁部材を作製し、鉄筋コンクリート梁部材と剛性の比較を行った。その結果、ビニロン繊維混入率を4%とすることで、鉄筋コンクリート梁部材と同程度の最大曲げ荷重と初期剛性を得ることができた。また、アラミドロッドの本数を増すことにより曲げひび割れ後の二次勾配を鉄筋コンクリート梁部材に近づけられる可能性があることがわかった。

**キーワード**：非鉄部材, アラミドロッド, ビニロン繊維, 曲げ試験

## 1. はじめに

2050年カーボンニュートラル実現のために、環境配慮型コンクリートの研究・開発が進められている。環境配慮型コンクリートのうちセメントを産業副産物に置き換える技術は、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ、シリカフュームなどの産業副産物の特性を考慮し、配合の最適化を図ることによってセメントの使用量を低減するものである。

従来の鉄筋コンクリート構造物は、コンクリート中のアルカリ成分により鋼材の表面に緻密な不動態被膜が形成されることで、鋼材を腐食から保護している。しかしながら環境配慮型コンクリートは、セメント量を低減しているため、中性化が進行しやすくなり鋼材表面の不動態被膜が破壊されることによる鋼材腐食が懸念される。今日多くの構造物に使用されている鉄筋コンクリート部材は、鉄筋とコンクリートの組み合わせが互いに良い影響を与え、強度や耐久性を向上させている。脱炭素社会の構築に向けコンクリートの特性が変わろうとしている中、引張材としての軸方向補強材も最適な材料を選定する必要がある。今後、環境配慮型コンクリートの構造物としての社会実装を実現するためには、セメント量を低減するという観点に見合った技術の確立が必要である。すなわち、鋼材腐食が起こらないコンクリート構造物の開発である。

本研究では、鉄筋コンクリート部材を非鉄化することを念等に、軸方向補強材としての鉄筋をアラミドロッド（AFRP 組紐ロッド）に置き換えた非鉄部材を考える。アラミドロッドは、アラミド繊維を組紐として組み、エポキシ樹脂を含ませた連続繊維補強材であり、塩害対

策等、コンクリート構造物の耐久性向上のために使用されている。アラミドロッドを鉄筋の代替として使用する場合、構造部材としての使用法の1つはアラミドロッドに所定の緊張力を導入することである。また、RC部材のかぶりコンクリート部にアラミドロッドを埋設する工法も提案されている<sup>1)</sup>が、主鉄筋の代替とする報告は少ない。

本研究では、アラミドロッドを主鉄筋の代替材料とした、短繊維補強コンクリートによるせん断補強鉄筋を使用しない非鉄梁部材の開発を目的とする。本研究では、鉄筋は降伏点を有するがアラミドロッドは明確な降伏点を有しないことを踏まえ、曲げひび割れ発生前の初期剛性と曲げひび割れ発生後の二次剛性の観点から、鉄筋コンクリート梁とアラミドロッドを使用した短繊維補強コンクリート梁の挙動の違いを検討する。両者の比較により鉄筋コンクリート部材と同等の初期剛性と二次剛性を有する非鉄梁部材開発の可能性について考察する。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

表-1に使用材料を、表-2に配合表を示す。結合材は普通ポルトランドセメントとし、短繊維補強材と膨張材を混入することで剛性の向上を期待した。短繊維補強材には、ビニロン繊維を用いた。ビニロン繊維の混入率は1, 2, 4%の3水準とした。配合上の工夫として、電気炉酸化スラグを細骨材の50%容積置換とした。繊維を混入した配合では、通常混入率1.5%程度でファイバーボールが発生するが、電気炉酸化スラグは普通細骨材に比べて粒形が丸いため、流動性の確保が可能となる。電気炉

\*1 三井住友建設（株）土木本部 土木設計部 プロジェクト設計グループ（正会員）

\*2 ファイベックス（株）代表取締役 博(工)

\*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 教授 工博（正会員）

\*4 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 准教授 博(工)（正会員）

表-1 使用材料

材料		特性値	記号
セメント	普通ポルトランドセメント	密度：3.16g/cm <sup>3</sup> ，比表面積：3340cm <sup>2</sup> /g	C
混和材	フライアッシュⅡ種	密度：2.22g/cm <sup>3</sup> ，比表面積：3420cm <sup>2</sup> /g	FA
	デンカパワー-CSA タイプS	密度：3.08g/cm <sup>3</sup> ，比表面積：3920cm <sup>2</sup> /g	E
細骨材	兵庫県産砕砂	密度：2.58g/cm <sup>3</sup> ，粗粒率：2.85，吸水率：1.66%，実積率：57.5%	S
	電気炉酸化スラグ5-0.3	密度：3.59g/cm <sup>3</sup> ，粗粒率：3.25，吸水率：0.42%	EFS
粗骨材	徳島県産砕石1505	密度：2.57g/cm <sup>3</sup> ，粗粒率：6.42，吸水率：1.62%，実積率：59.4%	G1
	徳島県産砕石2010	密度：2.68g/cm <sup>3</sup> ，粗粒率：6.68，吸水率：0.41%，実積率：59.9%	G2
繊維	ビニロン繊維 φ0.66×30mm	密度：1.30g/cm <sup>3</sup> ，繊維長：30mm，直径：0.66mm	VF
アラミドロッド	AFRP組紐ロッドRA7	密度：1.45g/cm <sup>3</sup> ，単位質量：58g/m，直径：7.8mm	AR
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系	SP
	AE剤	変性ロジン酸化陰イオン界面活性剤	AE

表-2 配合表

配合名	繊維混入率 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )										SP (%)	AE (%)
				W	P			S	EFS	G1	G2	VF			
					C	E	FA								
VF-0	0.0	50	48	157	314	0	70	401	602	560	389	—	0.2	0.003	
VF-1	1.0	50	48	200	400	0	100	344	538	504	350	13	0.2	0.03	
VF-2	2.0	50	48	200	400	0	100	344	538	504	350	26	0.2	0.03	
VF-4	4.0	50	83	200	400	0	100	628	931	165	114	52	0.7	0.04	
VF-2-30	2.0	50	48	200	370	30	100	344	538	504	350	26	0.7	0.02	
VF-4-20	4.0	50	83	200	380	20	100	628	931	165	114	52	0.7	0.02	

表-3 軸方向補強材の機械的性質

項目	単位	鉄筋	アラミドロッド
仕様	—	SD295-D13	RA7
公称直径	(mm)	12.7	7.8
公称断面積	(mm <sup>2</sup> )	126.7	47.8
単位重量	(g/m)	995	58
最大引張荷重	(kN)	53.24	67.08
ヤング係数	(N/mm <sup>2</sup> )	200,000	63,000

酸化スラグの使用により，本研究では，ビニロン繊維の混入率は最大4%であった。また，電気炉酸化スラグの混入により比重が重くなるためフライアッシュを使用して材料分離を防止した。膨張材の添加量は，ビニロン繊維混入率2%では30kg/m<sup>3</sup>，ビニロン繊維混入率4%では20kg/m<sup>3</sup>とした。

フレッシュ性状は，目標スランプ：12±2.5cm，目標スランプフロー：45±7.5cm，目標空気量：4.5±1.5%とした。各配合でフレッシュ性状の目標値を満たした後，円柱供試体（φ100×200mm）と後述する梁試験体を作製した。

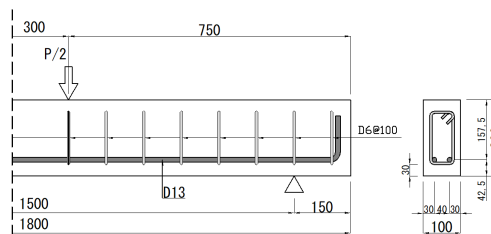
## 2.2 コンクリートの練り混ぜ

コンクリートの練り混ぜは，強制2軸ミキサを使用した。練り混ぜ手順は，はじめに，セメント・フライアッシュ・膨張材・細骨材を5秒間空練りした後，水と混和剤を加えて60秒間練り混ぜながらビニロン繊維を少量ずつ加えた。その後，粗骨材を加えて60秒間練り混ぜた。ミキサ停止後，混和剤の効果が発揮されるよう5分間静置し，さらに30秒間練り混ぜを行った。

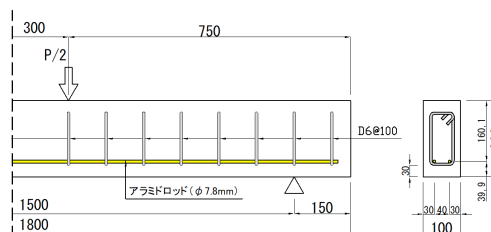
## 2.3 梁試験体

図-1に本研究で用いた試験体を示す。梁の寸法は幅100mm，高さ200mm，長さ1800mmとした。試験体は検討項目にあわせて4種類とした。本論文で用いる「試験体」という用語は，配筋が異なる梁部材を意味する。表-3に，使用した鉄筋とアラミドロッドの機械的性質を示す。鉄筋はSD295-D13を，アラミドロッドはφ7.8mmのものを使用した。

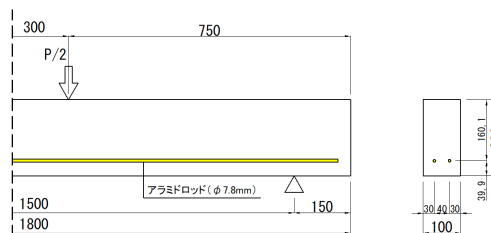
試験体1：最大荷重に対し，曲げ破壊先行型となるよう断面の下縁にD13軸方向鉄筋(SD345)を2本配置し，



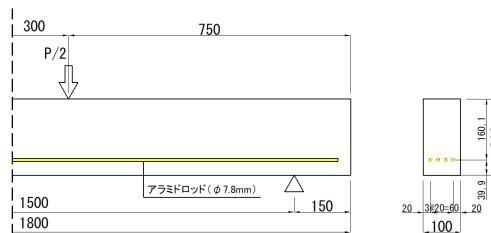
試験体1：RC (VF-0)



試験体2：VF-0



試験体3-1：VF-1，2，4，VF-2-30，4-20



試験体3-2：VF-4-20

図-1 梁試験体寸法

表-4 フレッシュ性状・硬化性状

配合名	スランブ (cm)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度/ 圧縮強度	試験体 番号
VF-0	13	—	4.0	51.7	4.2	1/12	1, 2
VF-1	—	43×42	4.0	39.5	3.4	1/12	3-1
VF-2	—	48×44	3.0	38.6	4.2	1/9	3-1
VF-4	14.5	—	6.0	38.7	5.6	1/7	3-1
VF-2-30	—	48×50	3.5	41.9	4.8	1/9	3-1
VF-4-20	9.5	—	5.0	40.0	5.5	1/7	3-1, 3-2



VF-0：試験体2（アラミドロッド+スターラップ有）



VF-1：試験体3（アラミドロッド）



VF-2：試験体3（アラミドロッド）



VF-4：試験体3（アラミドロッド）

写真-1 曲げ試験結果

スターラップ D6 で補強したものを基準の梁（以降、RC と称す。）として作製した。

試験体2:軸方向鉄筋をアラミドロッド2本に置換え、スターラップ D6 で補強した梁を作製した。

試験体 3-1: 軸方向鉄筋をアラミドロッド 2 本に置換え、スターラップを配置しない梁として作製した。アラミドロッドは、試験体 1 より、D13 鉄筋の引張強度と同程度の引張荷重となる本数を配置した。

試験体 3-2: 軸方向鉄筋をアラミドロッド 4 本に置換え、スターラップを配置しない梁として作製した。

#### 2.4 試験体製作

型枠を組立て、鉄筋、アラミドロッドを所定の位置に配置し、表-2 配合のレディーミクストコンクリートを試験体の上面から打設した。打設後、湿布養生を行い、28 日間実験室内に静置した。

#### 2.5 曲げ試験

曲げ試験は、荷重スパン 300mm の 2 点荷重とし、試験機には容量 200t の万能試験機を用いた。試験体に均等に荷重をかけるため、荷重治具とロードセルの間に球座を設置して荷重した。軸方向補強材となる鉄筋、アラミドロッドにひずみゲージを取り付けひずみ量を計測した。

また、コンクリートのひずみは試験体上縁から 20mm の位置にひずみゲージを取り付け計測した。なお、軸方向鉄筋をアラミドロッド 4 本に置換え、スターラップを配置しない梁（試験体 3-2）のアラミドロッドに添付したひずみゲージは接着不良のため引張ひずみを計測できなかった。

### 3. フレッシュ性状・硬化性状

表-4 に試験体のフレッシュ性状および硬化性状を示す。全ての配合で目標値を満足する結果となった。繊維混入率 4.0%となる VF-4, VF-4-20 はスランブ 13~14.5cm であり、VF-1, 2 と VF-2-30 はスランブフロー 42~50cm であった。繊維混入率 2%までの配合はスランブフローで流動性を確認できるが、繊維混入率 4%以上になると流動性が低下しスランブでの確認となった。

圧縮強度は、VF-0 が 51.7N/mm<sup>2</sup>であり、VF-1, 2, 4 と VF-2-30, VF-4-20 は概ね 40N/mm<sup>2</sup>程度であり、繊維混入率の違いによる強度低下等の影響はなかった。一方、引張強度は、繊維混入率の増加に従い大きくなった。また、膨脹材の添加による圧縮強度、引張強度の変化は見られなかった。引張強度/圧縮強度を比較すると繊維を混入

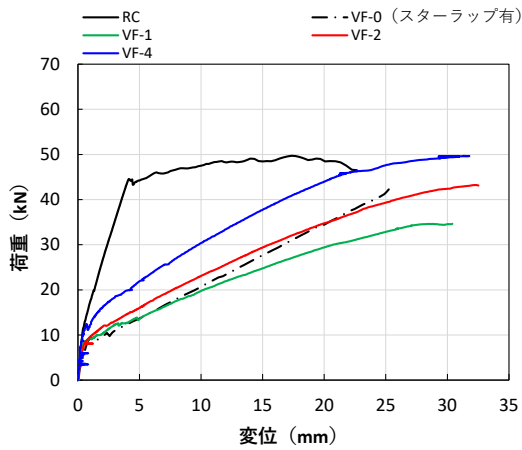


図-2 荷重-変位（繊維混入率の影響）

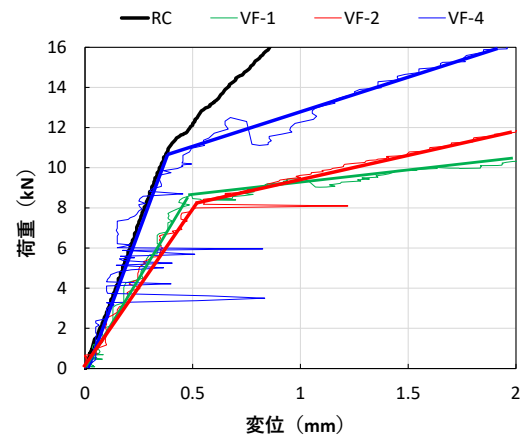


図-3 荷重-変位（曲げひび割れ発生付近）

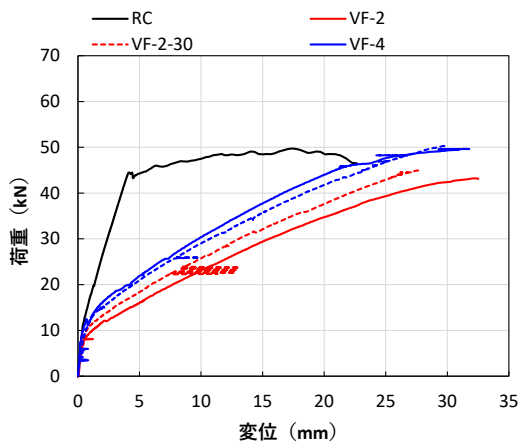


図-4 荷重-変位（膨張材添加量の影響）

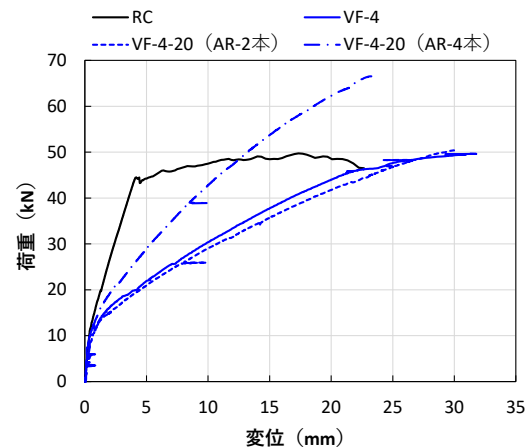


図-5 荷重-変位（アラミドロッド本数の影響）

することにより増加する結果となった。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 曲げ試験結果

写真-1に、梁の曲げ試験後のVF-0, 1, 2, 4のひび割れ発生状況を示す。VF-0は、アラミドロッドとスターラップを配置した試験体2のひび割れ発生状況である。軸方向補強材にアラミドロッドを使用した場合でもスターラップを配置することでせん断ひび割れの発生を抑制していることがわかった。VF-1, 2, 4は、アラミドロッドを2本配置した試験体3-1のひび割れ発生状況である。VF-1は、せん断ひび割れが発生し、せん断破壊となった。VF-2は、繊維混入率の増加によりせん断耐力が増加したため、曲げ破壊となり、ひび割れの発生状況はVF-0と同程度であった。軸方向補強材にアラミドロッドを使用した場合、繊維混入率2.0%以上でスターラップと同等の性能を有することがわかった。VF-4は、VF-2に比べてひび割れの発生が少なかった。繊維混入率の増加による、剛性の増加が考えられる。

##### 4.2 荷重-変位

荷重-変位曲線の挙動より、繊維混入率、膨張材の添

加量、アラミドロッドの本数が、梁部材の剛性に与える影響について考察する。

##### (1) 繊維混入率の影響

図-2に、繊維混入率の違いによる荷重-変位曲線を示す。繊維混入率が増加するに従い、VF-0（スターラップ有）の挙動に近づき、繊維混入率2%で同程度となった。繊維混入率4%となるVF-4では、VF-0（スターラップ有）を完全に上回る結果となった。

最大荷重は繊維混入率の増加に従い大きくなり、VF-4は、RCと同程度の最大荷重となることがわかった。また、RCとVF-1, 2, 4を比較すると終局に至るまでの挙動が異なる。RCは、曲げ降伏後、大きな荷重増加は起こらず、変位量が増えていくが、VF-1, 2, 4は、終局まで荷重と変位が弾性変形的に増加していくことがわかる。これは、軸方向材の鉄筋とアラミドロッドの性質の違いである。

図-3に、図-2における、曲げひび割れ発生までの荷重-変位曲線を示す。データロガーの不具合により、一部計測結果にノイズが生じたが、全体の計測結果より問題無いと判断した。図中の太線はVF-1, 2, 4のノイズを除去して直線を仮定して引いたものである。この太線

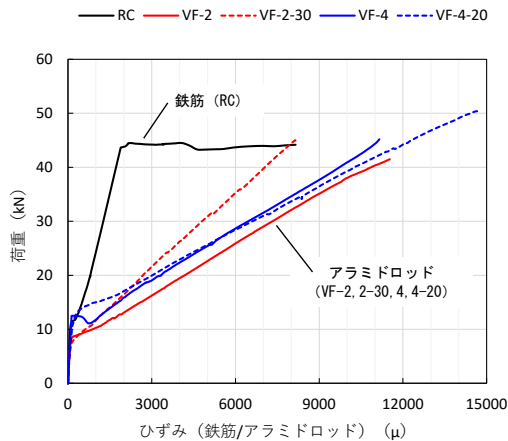


図-6 荷重-ひずみ (鉄筋/アラミドロッド)

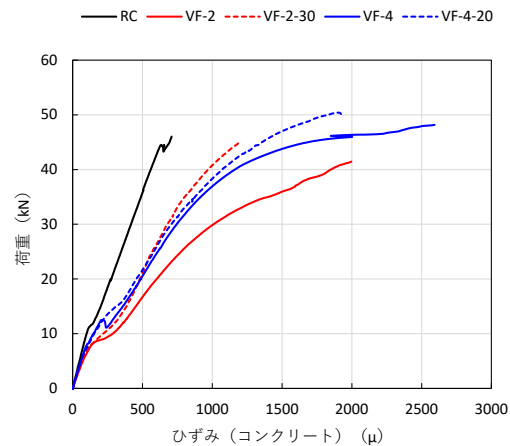


図-7 荷重-ひずみ (コンクリート)

を見ると、RCの曲げひび割れ発生荷重は、11kN程度であるが、VF-4はRC部材とほとんど同じである。曲げひび割れ発生前の初期剛性という点でみるとVF-4はRCと同等といえる。

### (2) 膨張材の影響

図-4に、膨張材の添加量の違いによる荷重-変位曲線の違いを示す。図-3より、繊維混入率の増加による初期剛性は鉄筋コンクリート梁と同程度になったが、曲げひび割れ発生後の二次剛性が得られなかったため、膨張材を添加し、コンクリートの膨張を繊維が拘束することで、梁の剛性が向上することを期待した。

VF-2とVF-2-30を比較すると膨張材の添加による剛性の向上を確認した。VF-4とVF-4-20を比較すると、最大荷重は同程度であるが、全体的な挙動で見ると膨張材の添加による曲げひび割れ発生後の二次剛性の向上は見られなかった。膨張材の使用は剛性の向上に一定の効果があるが、繊維混入率と膨張材量には効果的に働く適正値があると考えられる。

### (3) アラミドロッド本数の影響

図-5に、アラミドロッド本数の違いによる荷重-変位曲線を示す。試験体3-1と3-2の比較である。

アラミドロッドの断面積を鉄筋の断面積に近づけることで梁の二次剛性は著しく上昇し、最大曲げ荷重が大きく増加する結果となった。VF-4-20でアラミドロッドを2倍にすることで剛性が大きく増加した。剛性の増加は、アラミドロッドの断面積を増やしたことで曲げ変形が小さくなり、繊維と膨張材によるプレストレスと相乗効果を発揮した結果であると考えられる。ヤング係数が鉄筋に比べて小さいアラミドロッドであってもその本数を増すことにより、曲げひび割れ後の二次剛性を鉄筋使用のRCに近づけられる可能性が見られる。鉄筋に比べて高強度のアラミドロッドを軸方向材に用いると相対的にその量が少なくても高い曲げ耐荷性能が得られると考ええる。

### 4.3 荷重-ひずみ

RCとVF-2, 4, VF-2-30, 4-20の配合を使用した試験体の荷重-ひずみ曲線の比較により、ビニロン繊維とアラミドロッドを用いた梁の破壊形態について考察する。VF-4-20はアラミドロッドを2本使用した試験体3-1の結果である。

図-6に、梁の荷重-鉄筋/アラミドロッドのひずみ曲線を示す。アラミドロッドは、降伏域を持たないため、ひずみ量は、荷重増分に対して比例増加する。鉄筋ひずみ8000 $\mu$ に対して、アラミドロッドのひずみは、8100 $\mu$ ~15000 $\mu$ となる。アラミドロッドの引張力-ひずみの関係は終局まで線形を示すため<sup>2)</sup>、コンクリートのひずみ量とあわせて破壊形態を考察する必要がある。

図-7に、梁の荷重-コンクリートのひずみ曲線の曲線を示す。コンクリートのひずみは、梁上縁から20mmの位置で計測したものであり、圧縮ひずみを示す。コンクリートのひずみは、RCに比べてビニロン繊維を混入した梁の方が大きく、繊維混入率が多くなるほど大きくなる傾向にある。また、膨張材を混入した方が、ひずみ量が小さくなる傾向にある。ひずみ量は、1200 $\mu$ ~2500 $\mu$ 程であり、アラミドロッドのひずみ量と比較すると中立軸は圧縮縁側に移動していると考えられる。また、梁の破壊時点における、試験体上縁から20mmの位置に貼り付けたコンクリートの圧縮ひずみとアラミドロッドの引張ひずみの線形関係より求めたVF-2, 4, VF-4-20の圧縮縁ひずみは、3500 $\mu$ 程度となることより、ビニロン繊維とアラミドロッドを用いた梁の破壊形態は、曲げ破壊であると判定できた。今回の実験の範囲では、アラミドロッドの引張限界ひずみの到達よりもコンクリートの圧縮限界ひずみ到達が先であったため、曲げ圧縮破壊であるといえる。この破壊形態が成立する前提は、せん断破壊しないことが条件である。本研究の範囲では、ビニロン繊維4%と膨張材20kg/m<sup>3</sup>の組み合わせが最もコンクリートのせん断耐力が大きく、曲げ破壊耐力を上回ったと

考えられる。

今回の実験では、少なくとも 70kN の曲げ荷重までせん断破壊しなかった。したがって、せん断力  $V=P/2$  から、 $V=35\text{kN}$  以上となる。本研究で比較する RC のせん断耐力<sup>3)</sup>を以下の式(1)より求める。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} \quad (1)$$

ここに、

$V_{yd}$  : せん断耐力

$V_{cd}$  : せん断補強材を用いない部材のせん断耐力

$V_{sd}$  : せん断補強鋼材により受け持たれるせん断耐力

せん断耐力を求めると、 $V_{yd}=V_{cd}(15.3\text{kN})+V_{sd}(23.3\text{kN})=38.6\text{kN}$  である。 $V$  と  $V_{yd}$  は、ほぼ同程度の大きさである。アラミドロッド 4 本の軸方向補強材によるせん断耐力(斜めひび割れ発生時のせん断耐力)とビニロン繊維膨張コンクリートのせん断耐力の総和は、比較する RC はりのせん断耐力と同程度と考えられる。

#### 4.4 荷重変化に伴う中立軸の変化

引張鉄筋あるいはアラミドロッドの引張ひずみとコンクリートの圧縮ひずみから荷重の変化に伴う中立軸を求めることが可能である。図-8 に、荷重変化に伴う中立軸の変化を示す。ただし、試験体 3-2 はアラミドロッドの引張ひずみのデータがないため、計算できなかった。

どの試験体も曲げひび割れが発生するまでは、中立軸は断面の中心である 100mm 近傍であった。荷重レベルが大きくなるにしたがって、中立軸がコンクリート圧縮縁に近づくため、小さくなった。

アラミドロッド 2 本の試験体は、荷重レベルが小さい段階から中立軸が小さい。アラミドロッド 4 本の試験体のデータはないが、引張力が同一であれば、補強材の断面が大きいほど、引張ひずみは小さくなる。よって、コンクリートの圧縮ひずみが同じであれば、RC 梁に近い挙動になり中立軸が小さくはならないと考えられる。

ビニロン繊維混入率に着目すると、繊維混入率の増加に従い、中立軸位置が 100mm から圧縮縁に移動する荷重レベルが大きくなる。これは、断面内の繊維量が多くなることで引張側のコンクリートが、引張り力に抵抗しているためと考えられる。また、VF-2、VF-4 とともに荷重変化に伴う中立軸の変化に、膨張材の影響は見られなかった。

#### 5. まとめ

本研究では、鉄筋コンクリート部材と同等の剛性を有する部材の開発を目的に、繊維補強材と膨張材、アラミドロッドを用いた梁試験体を作製し、曲げ試験を行った。得られた知見を以下に示す。

(1) ビニロン繊維混入率を 2%以上とすることで、スターラップを有する梁と同程度の剛性を得ることができ

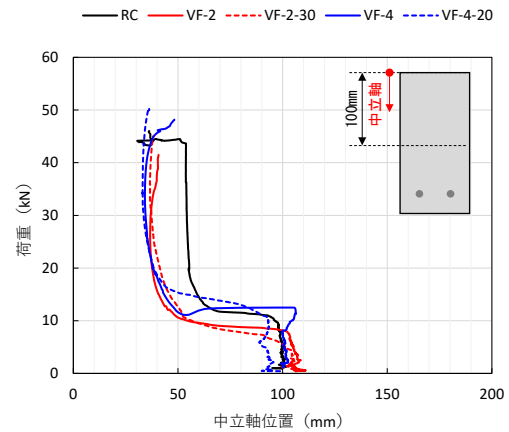


図-8 荷重—中立軸位置

る。

- (2) ビニロン繊維混入率を 4%とすることで、鉄筋コンクリート梁と同程度の最大曲げ荷重を得ることができる。
- (3) ビニロン繊維混入率 4%のアラミドロッド梁の曲げひび割れ発生荷重は、鉄筋コンクリート梁と同程度であり、初期剛性は同じである。
- (4) 本研究の範囲でのアラミドロッド梁の破壊形態は、せん断破壊しない曲げ圧縮破壊であった。
- (5) アラミドロッド梁は、鉄筋コンクリート梁に比べて、荷重レベルが小さい段階から中立軸が小さい。

以上の知見より、本研究の範囲では、繊維混入率を増やすことで初期剛性が鉄筋コンクリート梁と同等となり、アラミドロッド本数を増やすことで、曲げひび割れ発生後の二次剛性が鉄筋コンクリート梁に近づくことが分かった。

**謝辞**：本研究を遂行するにあたり、ファイベックス(株)、(株)星野産商、四国総研(株)、(株)クラレ、(株)デンカから多大なご支援をいただきました。坂本達也氏(清水建設(株))の徳島大学大学院創成科学研究科理工学専攻修士課程社会基盤デザインコース 2024 年 3 月修了の修士論文の実験データを参考にさせていただきました。また、技術的支援を受けました。ここに付記して謝辞の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 岸徳光, 三上浩, 栗橋祐介, 田村富雄: AFRP ロッドを埋設した RC 梁の曲げ耐力性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.1783-1788, 2003
- 2) 土木学会: 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー 88 号, 1996
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2022