

# 論文 多軸炭素繊維シートによるコンクリート部材の補強に関する基礎的研究

堀本 歴<sup>\*1</sup>・星野 章仁<sup>\*2</sup>・宮里 心一<sup>\*3</sup>

**要旨**：繊維の配列方向を任意に設定でき、引き揃えた繊維層を最大4層積層して一枚の繊維シートとすることができる「多軸繊維シート」を使用した。本研究では、多軸炭素繊維シートの基礎的な補強効果を検討することを目的とし、編成条件の異なるシートによる鉄筋コンクリート梁部材に対するせん断補強効果を検討した。ここでは、3タイプの繊維シートに関して、貼付け方法を変化させたせん断試験を行った。以上の結果、編成条件の違いが特徴的な補強性能として現れることを明らかにした。

**キーワード**：炭素繊維, 多軸繊維シート, せん断補強

## 1. はじめに

連続繊維シートによる既設鉄筋コンクリート構造物の補修・補強方法に関しては、せん断補強、靱性補強などについて多くの研究がなされており、適用事例も多くみられる<sup>1)</sup>。繊維シートによる補強の利点については先人らの研究から多く挙げることができるが、強度に方向性があることが長所でもあり短所にもなり得ると考えられる。

筆者らは、配列する繊維の方向をある程度任意に設定することができ、さらに任意の角度に設定して引き揃えた繊維層を2層以上積層して一枚の繊維シートとして編成することが可能な、「多軸繊維シート」によるコンクリート部材の補強に関して基礎的な研究を行い、「多軸繊維シート」の特徴的な補強効果を見出してきた<sup>2),3)</sup>。

本研究では、多軸炭素繊維シートの基礎的な補強効果を確認することを目的とし、編成条件の異なるシートによる鉄筋コンクリート梁部材に対するせん断試験を行い、編成条件の違いがせん断補強性能に及ぼす影響を確認した。

## 2. 実験概要

### 2.1 多軸繊維シート

多軸繊維シートの概念図を図-1に示す。この例は、 $0^\circ$  方向に繊維を引き揃えた層を基準として、 $90^\circ$ 、 $+45^\circ$ 、 $-45^\circ$  の4層を積層して一枚の繊維シートとしたものである。本研究で用いた繊維シートの編成条件を表-1に示す。本研究では、炭素繊維を用いた。また、繊維シートの編成角度は、梁部材の主鉄筋に平行する角度を $90^\circ$ として表記する。なお、*Sheet 90/+45/-45* については、 $90^\circ$ 層がコンクリート面に接するように貼り付けた。目付量に関して、繊維シート製造上の制限により、 $90^\circ$ 方向を $220\text{g/m}^2$ 、 $+45^\circ$ 及び $-45^\circ$ 方向を $222\text{g/m}^2$ とした。

### 2.2 供試体

コンクリートの示方配合を表-2に示す。普通ポルトランドセメント、最大寸法20mmの粗

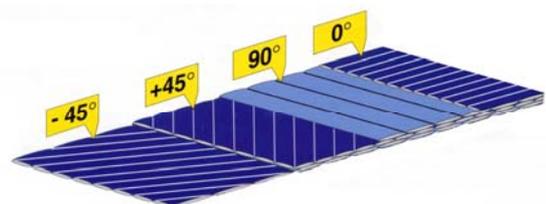


図-1 多軸繊維シート概念図

\*1 倉敷紡績(株) 技術研究所 工修 (正会員)

\*2 金沢工業大学 工学部土木工学科

\*3 金沢工業大学 環境・建築学部環境土木工学科 助教授 工博 (正会員)

表-1 繊維シート編成条件

Name	編成条件 (角度・目付)
Sheet 90	90° (220 g/m <sup>2</sup> )
Sheet +45/-45	+45° (222 g/m <sup>2</sup> )/-45° (222 g/m <sup>2</sup> )
Sheet 90/+45/-45	90° (220 g/m <sup>2</sup> )/+45° (222 g/m <sup>2</sup> )/-45° (222 g/m <sup>2</sup> )

骨材を用い、W/Cを50%とした。なお、スランプは3.5cm、空気量は2.0%であった。28日間の水中養生の後、試験に供した。繊維シート貼付けに際し、グラインダーによる表面研磨処理の後、エポキシ樹脂系プライマーを塗布した。翌日まで静置養生の後、エポキシ樹脂により繊維シートを貼り付けた。さらに7日間の養生の後、載荷試験を行った。

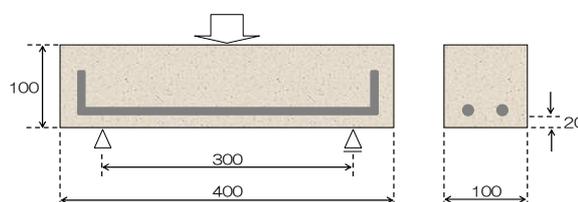
図-2 に供試体の形状寸法と配筋を示す。(a) 供試体は、せん断破壊先行型として繊維シートを貼り付けない場合にせん断破壊により終局させるため、主鉄筋のみを配筋した。鉄筋はD13mmとし、かぶり厚20mmで配筋した。(b) 供試体は、繊維シート補強しない場合に曲げ破壊で終局するよう、D6mmスターラップを25mm間隔で配筋した。補強筋比は2.53%とした。また、(c)に示すように変位計、ひずみゲージを取り付け、変位量とひずみの測定を行った。ひずみゲージは、繊維シート貼付け養生後、載荷試験直前に貼り付けた。また、ひずみゲージは主鉄筋に平行に貼り付けており、Sheet +45/-45、Sheet 90/+45/-45では最外層の繊維方向とひずみゲージは45°の角度をなしている。載荷試験は、2等分中央点載荷にて実施した。

### 2.3 実験ケース

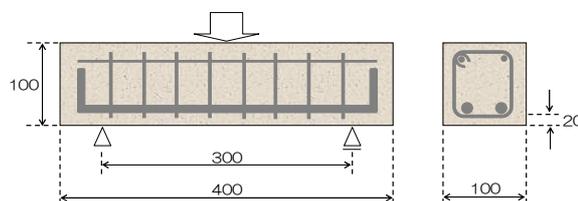
繊維シートの貼付け位置を図-3に示す。主鉄筋のみ配筋した(a)供試体では、載荷スパン内側面にのみ貼り付けたケースと、載荷スパン内にU字巻きしたケース、さらに側面と底面を分けて貼り付けたケースの3水準について試験を行った。一方、スターラップを配筋した(b)供試体については、載荷スパン内側面に貼り付けたケースのみ試験を行った。

表-2 コンクリート示方配合

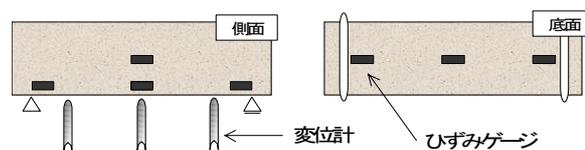
Gmax (mm)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
20	50	44.85	180	360	782	970



(a) せん断破壊先行型供試体



(b) 曲げ破壊先行型供試体



(c) 変位計・ひずみゲージ取付け位置

図-2 供試体概要図

ここで、本実験において使用した各材料の機械的性質を表-3に示す。本研究では、比較的強度の高いコンクリートの場合でも多軸繊維シートの斜め方向の繊維配向の効果が現れることを期待した。

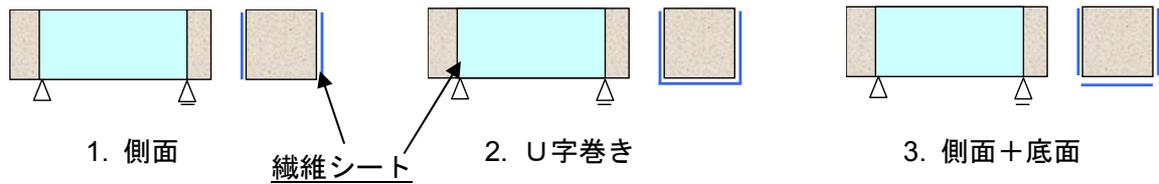


図-3 繊維シート貼付け位置

表-3 使用材料の機械的性質

炭素繊維	引張強度	引張弾性率
	$4.1 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$	$235 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$
鉄筋	引張強度	降伏強度
	$457 \text{ N/mm}^2$	$330 \text{ N/mm}^2$
コンクリート	圧縮強度	弾性係数
	$56.0 \text{ N/mm}^2$	$33.1 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$

表-4 せん断破壊先行型供試体試験結果

シート貼付け位置	シート Name	試験結果	
		最大荷重 (kN)	最大荷重時中央変位 (mm)
側面	<i>Sheet 90</i>	102.2	1.67
	<i>Sheet +45/-45</i>	90.4	1.23
	<i>Sheet 90/+45/-45</i>	99.0	1.19
U字巻き	<i>Sheet 90</i>	100.7	1.94
	<i>Sheet +45/-45</i>	115.1	2.10
	<i>Sheet 90/+45/-45</i>	127.0	2.07
側面 + 底面	<i>Sheet 90</i>	103.0	2.72
	<i>Sheet +45/-45</i>	106.2	2.15
	<i>Sheet 90/+45/-45</i>	105.6	1.70
未補強 (基準)		70.2	1.05

### 3. 結果と考察

#### 3.1 せん断破壊先行型供試体

##### (1) 載荷試験結果

載荷試験の結果を表-4に示す。いずれのケースも繊維シートの剥離により終局に至ったが、繊維シートの編成条件やシート貼付け位置により、特徴ある結果となった。以下に各実験ケースの比較検討を述べる。

##### (2) 繊維シート側面貼り付け

繊維シートを側面にのみ貼り付けた供試体の載荷試験により得られた荷重-変位曲線を図-4に示す。また、載荷試験後の供試体の破壊状況を写真-1に示す。未補強供試体がせん断破壊で終局に至るのに対し、繊維シート補強供試体は曲げひび割れと推測されるひび割れの発生が確認できた。また、*Sheet 90*では、剥離が支点近傍から発生し、その後供試体が急激に耐力を失うに十分な面積となるまで一気に広がる様子が観察された。一方、*Sheet +45/-45*では、供試体中央下部から剥離が発生し、それが徐々に進展する様子がみられた。これは荷重-変位曲線にも現れており、剥離の進展に伴い荷重が徐々に低下したことがわかる。

供試体中心に貼り付けたひずみゲージより得られた荷重-ひずみ曲線を図-5に示す。*Sheet 90*

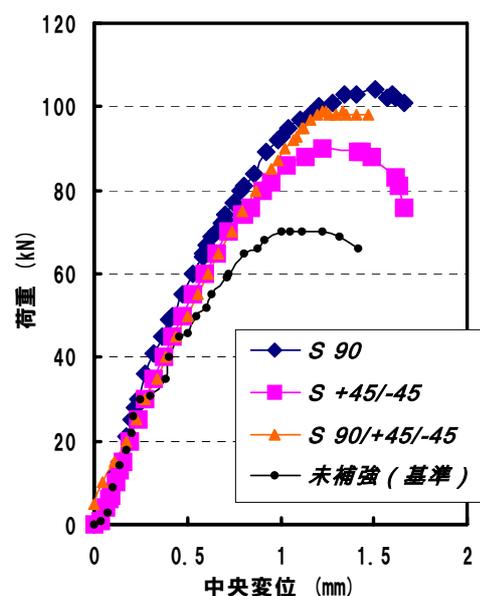


図-4 繊維シート側面貼付け供試体の荷重-変位曲線

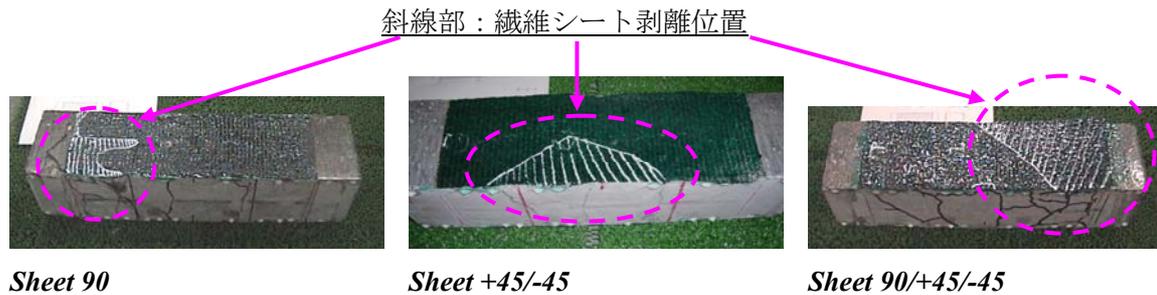


写真-1 繊維シート側面貼付け供試体の載荷試験による破壊状況

と *Sheet +45/-45*, *Sheet 90/+45/-45* を比較すると、繊維を斜め方向に編成したケースではひずみ量が大きいことがわかる。このことは、供試体下端に発生した引張応力が、繊維を通じて中立軸まで伝達していることを示していると考えられる。

### (3) 繊維シート貼付け位置の影響

繊維シートの貼付けを「側面」、「U字巻き」、「側面+底面」とした場合の各繊維シートの特徴について比較する。図-6 にそれぞれの供試体の載荷試験により得られた荷重-変位曲線を示す。

*Sheet 90* は繊維編成が一方向であり、主鉄筋と平行にのみ配置されているため、「U字巻き」と「側面+底面」ではほぼ同様の傾向を示した。「U字巻き」と「側面+底面」は、底面側の繊維シートが曲げ補強にも寄与すると考えられたが、「側面」と大差ない荷重で終局となった。ここで、「U字巻き」ケースの載荷試験後の破壊状況を写真-2 に示す。なお、ひび割れの様子を観察するために、側面側の繊維シートを剥がしている。底面にも繊維シートを貼ることで曲げ耐力が向上し、結果せん断破壊により終局に至ったと考えられる。

*Sheet +45/-45* では、「U字巻き」と「側面+底面」で繊維の連続性に違いがでてくる。すなわち、「側面+底面」ではそれぞれの繊維シートの連続性が失われていることになる。したがって、荷重-変位曲線において、変位約 1.3mm 付近からほぼ荷重一定となっているが、これは底面の繊維シートが影響して変位が伸びているものと考えられる。一方、「U字巻き」の場合は、「側面」の場合で荷重低下する付近で一旦降伏した後、再び荷重が上昇している。これは、側面側の繊維と底面側

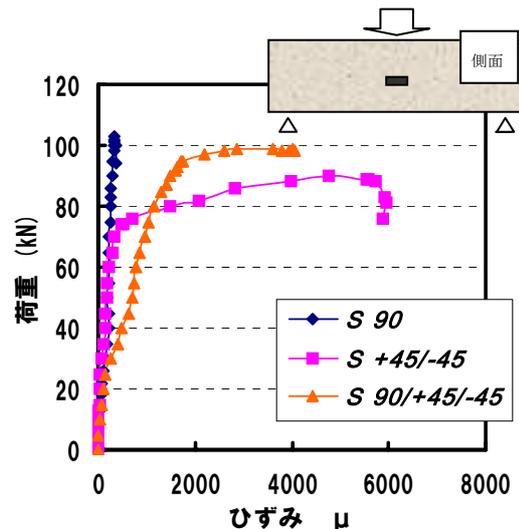


図-5 繊維シート側面貼付け供試体の荷重-ひずみ曲線

の繊維の連続性が保たれていることの特徴と考えられる。

同様に、*Sheet 90/+45/-45* でも特徴的な荷重-変位曲線が得られた。繊維の連続性については前述の通りであるが、「側面+底面」で脆性的な破壊となっている点が *Sheet +45/-45* と異なる。既往の実験において“90° 方向に繊維を配したケースでは斜め方向のみの繊維の場合よりも脆性的な破壊となる”ことを見出しており<sup>4)</sup>、本研究でも同様の傾向になったと考えられる。一方、「U字巻き」で最大荷重が高くなっている。これは、曲げ補強に寄与する底面側の 90° 方向繊維が連続性の保たれた+45°、-45° 方向繊維で定着されていることによると考えられる。両ケースの載荷試験後の供試体の破壊状況を写真-3 に示す。荷重-変位曲線では差異がみられたが、繊維シートの剥離性状においては有意な差は認められなかった。

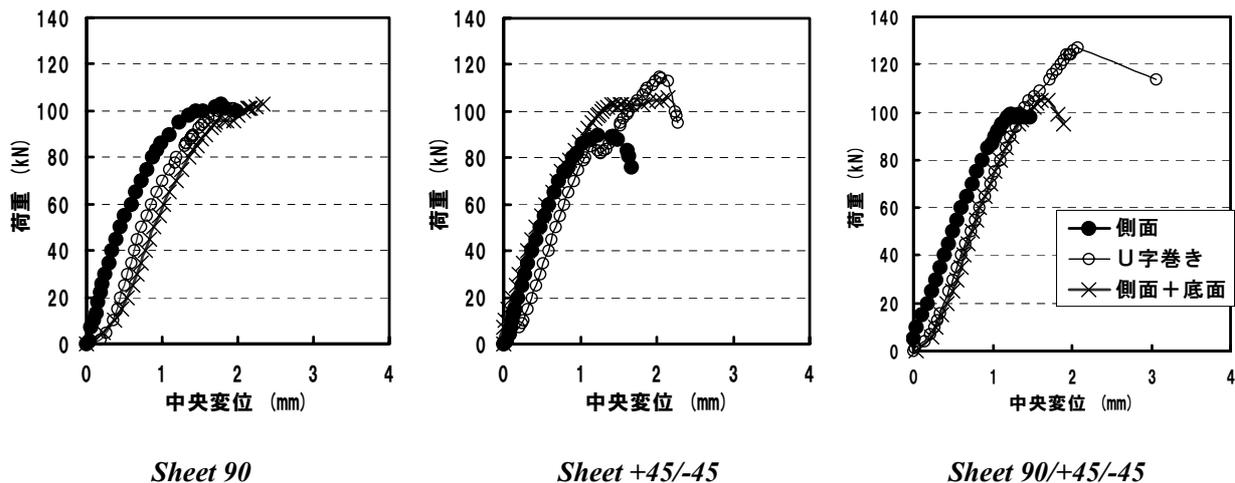


図-6 各実験ケースの荷重-変位曲線

図-7に「U字巻き」の *Sheet 90*, *Sheet +45/-45*, *Sheet 90/+45/-45* の比較として、荷重-ひずみ曲線を示す。ひずみは、側面の支点近傍に貼り付けたゲージより取得したデータを用いた。この図によれば、荷重 20kN 付近までは何れも直線的な伸びを示すことが認められた。しかしながら、*Sheet +45/-45* と *Sheet 90/+45/-45* ではさらなる負荷により著しい伸びが計測された。これは、*Sheet 90* よりも靱性のある破壊となっていることがひずみにも現れている結果と考えられる。ただし、ひずみゲージと繊維の方向が一致していないことも一因と思われる。

なお、本研究では繊維方向が 90° 方向のみの場合と斜め方向にも配向した場合について、補強効果の違いを検討することを主眼においており、設計耐力の算出までには至っていない。既往の設計評価方法や指針などに基づく補強評価が今後の課題と考える。

### 3.2 曲げ破壊先行型供試体

スターラップを配筋した供試体の載荷試験結果を表-5に示す。せん断破壊先行型供試体と同様に、繊維シートの剥離により終局に至った。ただし、繊維シート補強することで最大荷重の上昇は認められたが、最大荷重時中央変位について繊維シート補強供試体と未補強供試体を比較すると、せん断破壊先行型のような著しい伸

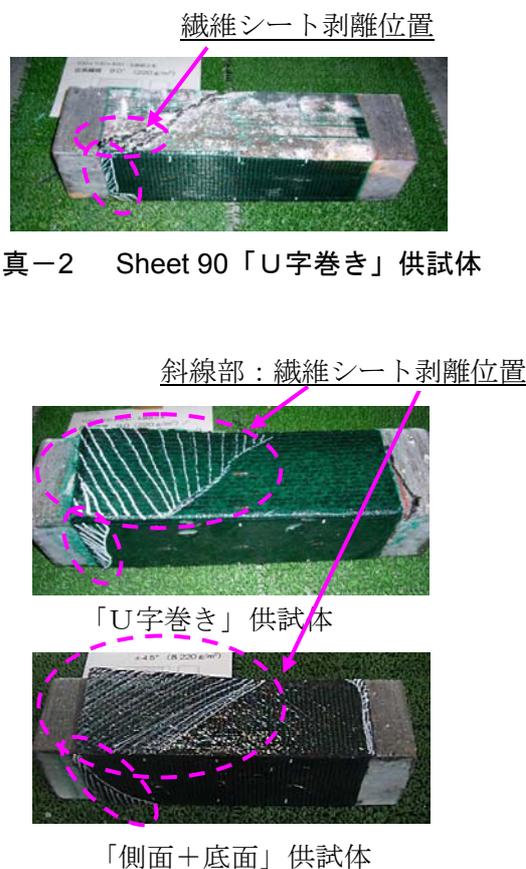


写真-3 破壊性状(*Sheet 90/+45/-45*)

びは見られなかった。載荷試験により得られた荷重-変位曲線を図-8に示す。繊維シート補強することで耐力増加しているが、*Sheet 90* と *Sheet +45/-45* で差は見られなかった。すなわち、スターラップの配筋により、せん断補強と

して側面にのみ貼り付けたケースでは繊維シートの特徴が現れにくいものと思われる。

本実験においても、既往の評価方法などによる設計耐力の算出などを多軸繊維シートによる補強方法に適用し、検討を行うことが課題と考える。

#### 4. まとめ

本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) せん断破壊先行型供試体において、多軸繊維シート補強することで、耐力が上昇し曲げ破壊により終局する。
- (2) 曲げ破壊先行型供試体に関しても、せん断補強することで耐力が上昇する。
- (3)  $+45^\circ$ 、 $-45^\circ$  の斜め方向に編成したシートでは、繊維の連続性を保った「U字巻き」として貼り付けることで特徴的な補強効果を示し、さらに曲げ補強に寄与する  $90^\circ$  方向の繊維を押さえ込む効果により、補強効果は向上する。
- (4) 多軸繊維シート補強による設計せん断耐力の算出など、定量的な検討が今後の課題である。

#### 参考文献

- 1) 村橋久弘ほか：連続繊維による補修・補強—炭素繊維・アラミド編一，理工図書，2000
- 2) 堀本 歴，宮里心一，保倉 篤：多軸繊維シートによるコンクリート部材の補強に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.343-348，2005
- 3) 堀本 歴，宮里心一，保倉 篤：炭素繊維／有機繊維複合シートによるコンクリート部材の補強に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.425-430，2006
- 4) 堀本 歴，宮里心一，保倉 篤：多軸繊維シートによるコンクリート梁の曲げ補強に関する基礎的研究，土木学会第 60 回年次学術講演会，pp.1039-1040，2005

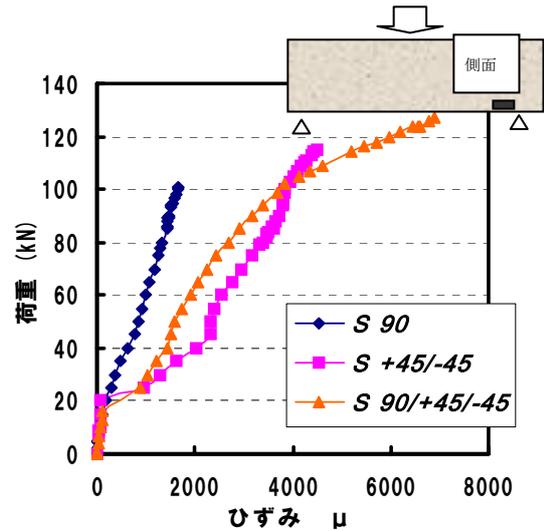


図-7 「U字巻き」供試体の荷重—ひずみ曲線

表-5 曲げ破壊先行型供試体試験結果

シート貼付け位置	シート Name	試験結果	
		最大荷重 (kN)	最大荷重時中央変位 (mm)
側面	Sheet 90	116.8	1.54
	Sheet +45/-45	116.2	1.25
未補強 (基準)		91.4	1.38

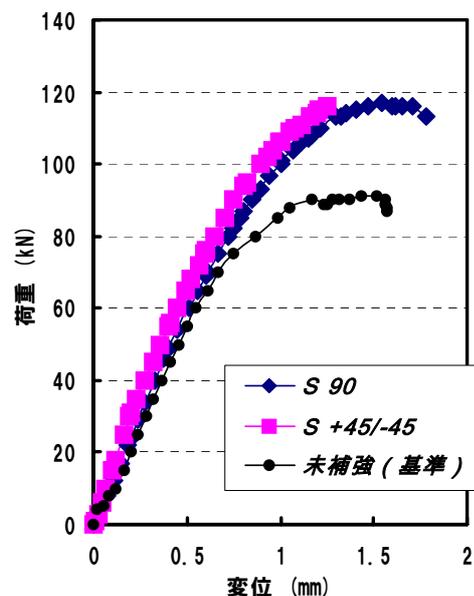


図-8 曲げ破壊先行型供試体の荷重—変位曲線