# 論文 継手部を有する格子状 CFRP を用いた RC はりの下面増厚補強効果

山中 辰則\*1·辻 幸和\*2·栗原 貢介\*3

要旨:性能が低下した RC 床版の補強工法として,吹付け下面増厚補強工法がある。本研究では,実施工では不可欠な継手部を有する炭素繊維の格子状連続繊維補強材(以下,CFRPと略称する。)を使用した場合の下面増厚補強効果を検討するために,CFRPの補強長さ,下面増厚に用いるポリマーセメントモルタル(以下,PCMと略称する。)の力学的特性を変化させた実験結果を報告する。CFRPの補強長さが長いものでは,補強材を有効に使用することができ,補強効果が十分に発揮された。また,高強度・高弾性のPCMは低弾性のPCMに比べ,コンクリート躯体との付着が良好であり,平均ひび割れ幅の値も小さくなることが示された。キーワード:格子状CFRP,CFRPの継手,ポリマーセメントモルタル,補強長さ,ひび割れ幅

#### 1. はじめに

我が国の RC 構造物には、高度経済成長期に建設され たものが多く, 耐久性能が低下している構造物が見られ る。特に、大型車交通量の増加、平成5年11月の車両制 限令による車両総重量の規制緩和および道路構造令に よる設計荷重の増加に伴い、橋梁上部工の RC 部材の劣 化が進行している。そのため、RC 構造物の耐荷性能の 向上には、これまで様々な工法が提案されている。その 中で、軽量で耐腐食性に優れ、引張強度が大きい連続繊 維補強材を用いた補強工法に関する研究開発が多く実 施されている。既往の研究 1)~3)においても, 道路橋床版 の補強を目的として、RC はりを用いた炭素繊維の格子 状連続繊維補強材(以下, CFRP と略称する。)による下面 増厚補強実験を実施してきた。実施工においては、CFRP が一体で用いられることは少なく、複数の CFRP を既設 RC 床版に設置し、継目部をもう一枚の継手用 CFRP で 補った重ね継手による補強がなされることが多い。そう した重ね継手による補強が下面増厚補強効果に及ぼす 影響については、これまでほとんど報告されておらず未 解明な部分が多い。

本研究では、 CFRP の継手の有無、下面増厚に用いる

吹付けポリマーセメントモルタル(以下, PCM と略称する。)の力学的特性および CFRP の補強区間の長さの違いが,下面増厚補強に及ぼす影響を主として検討をする。

### 2.実験概要

#### 2.1 供試体の概要

RC はり供試体の一覧を表-1に、形状寸法を図-1に それぞれ示す。補修・補強が必要な道路橋床版を主な対象とし、その一部を切り出したはりを模擬している。高さを 220mm、幅を 500mm とし、補強長さの違いにより S(1,600mm)、M(2,200mm)、L(2,800mm)の 3 シリーズとし、継手の有無、PCM の種類を変化させた合計 9 体のはり供試体を作製した。供試体名の第 1 項は、供試体の補強長さにより「S」、「M」、「L」シリーズとし、第 2 項では継手を有する供試体を「J」、継手がない一体型の CFRPで補強した供試体を「N」、CFRP による補強のない供試体を「O」とする。また、高強度・高弾性 PCM で吹き付けた供試体には、第 3 項で「H」を付記した。

コンクリートの目標圧縮強度を 20N/mm<sup>2</sup> とし, コンクリートの材齢が 28 日に達した後, これまでの供用で過大な損傷生じたことを模擬して, 引張鉄筋の応力度が

						-	
シリーズ名	供試体名	支点間隔 (mm)	補強の 有無	継手の 有無	補強長さ (mm)	補強材CFRPグリッド	吹付け材
Sシリーズ	S-J S-N	2,000	あり	あり なし	1,600	CMR10-100p	低弾性
	S-O		なし	_			_
Mシリーズ	M-J M-J-H	2,600	あり	あり	2,200	CMR10-100p	低弹性 高強度·高弹性
	M-O		なし	_		1	_
Lシリーズ	L-J L-N	3,200	あり	あり なし	2,800	CMR10-100p	低弾性
	L-O		なし	_	_	_	_

表-1 RC はり供試体一覧

<sup>\*1</sup> 群馬大学大学院 工学研究科博士前期課程社会環境デザイン工学専攻 (正会員)

<sup>\*2</sup> 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻 教授 工学博士 (正会員)

<sup>\*3</sup> 東日本旅客鉄道 (株) 高崎土木技術センター (正会員)

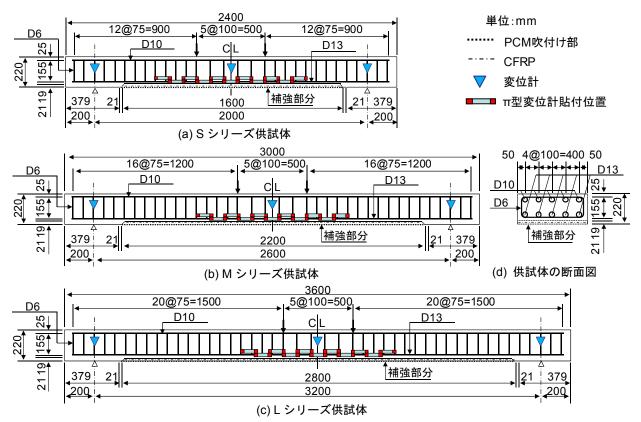


図-1 供試体の形状寸法および計測位置

300N/mm²となるまで1次載荷した。1次載荷によりひび割れを発生させたRCはりには、PCMとの付着が良好となるように、供試体底面にサンドブラストを用い粗骨材が見えるまで削り、凹凸を設けた状態にした。RCはりの底面に噴霧器で水を散布することで湿潤状態にした後、CFRPをアンカーで固定し、PCMを吹き付けた。アンカーは、直径が4.8mm、全長が35mm、埋込み長が25mmのリベットを用い、補強長さ1m(幅は50cmで一定)あたり10本設置した。継手用CFRPは2枚の主CFRPとそれぞれ4節ずつ重なるように800mmの範囲に配置した。

吹付け終了後,28日間の湿布養生を行い,その後,終 局時まで2次載荷試験を行った。載荷試験方法は,等曲 げモーメント区間を500mmとする2点集中載荷とした。

### 2.2 使用材料

表-2に PCM の,表-3に鉄筋および CFRP の力学的特性をそれぞれ示す。表-2の付着強度は、母材と補修材との付着面の強さであり、建研式接着力試験方法で求めたものである。PCM は高機能性特殊粉末樹脂および特殊短繊維をプレッミクスした特殊無機系パウダーで構成されており、高いひび割れ抵抗性、優れた施工性、耐久性、付着性能を有している。高強度・高弾性 PCM の圧縮強度は 66.3N/mm²、弾性係数は 2.51×10⁴N/mm² であり、低弾性 PCM の圧縮強度は 38.2N/mm²、弾性係数は 1.45×10⁴N/mm² であった。

引張鉄筋に D13, 圧縮鉄筋に D10 をそれぞれ 5 本ずつ

表-2 ポリマーセメントモルタルの力学的特性

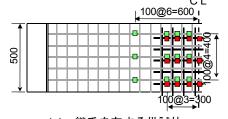
係数付着強度	静弾性係数	曲げ強さ	圧縮強度	PCM	
m <sup>2</sup> N/mm <sup>2</sup>	N/mm²	$N/mm^2$	$N/mm^2$	POW	
10 <sup>4</sup> 5.3	$2.51 \times 10^4$	11.5	66.3	高強度•高弾性	
10 <sup>4</sup> 3.7	$1.45 \times 10^4$	7.9	38.2	低弾性	
10 <sup>4</sup> 3.	$1.45 \times 10^4$	7.9	38.2	低弾性	

表-3 鉄筋および CFRP の力学的特性

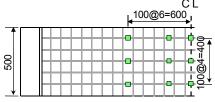
鉄筋	降伏応力度	引張強度	静弾性係数
<b>CFRP</b>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
D13	366	525	$19.0 \times 10^{4}$
D10	377	517	$18.7 \times 10^{4}$
D6	375	528	18.9 × 10 <sup>4</sup>
CFRP	_	1794	18.1 × 10 <sup>4</sup>

■ 主CFRP貼付用ワイヤストレインゲージ

■ 継手用CFRP貼付用ワイヤストレインゲージ



(a) 継手を有する供試体



(b) 一体型供試体 図-2 CFRPのひずみ計測位置

-1358-

			表一4 各種	荷重・最大曲げモ-	-メントおよび砺	<b>坡</b> 壊形式	
シリーズ名	供試体名	補強長さ	吹付け材	ひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大曲げモーメント (kN・m)	破壊形式
	S-J	(mm)		8.9	187.5	70.3	ピーリング破壊
Sシリーズ		1,600	低弾性	10.7	237.1	88.9	せん断破壊
32.7—7	S-0	_		4.8	135.6	50.9	世が破壊
	M-J		低弾性	9.6	136.7	71.8	
Mシリーズ		2,200	高強度·高弾性	9.3	158.5	83.2	ピーリング破壊
	M-O	_	——————————————————————————————————————	5.5	93.8	49.2	曲げ破壊
Lシリーズ	L-J	0.000	/rt 724 hd	7.6	123.5	83.4	<u>ーー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</u>
	L-N	2,800	低弾性	9.0	135.3	91.3	CFRP破断
	L-O	_	_	3.8	70.6	47.7	曲げ破壊
使用し、せん断補強鉄筋には D6 を用いた。せん断補強 鉄筋は、せん断スパンでは 75mm 間隔、等曲げモーメン ト区間では 100mm 間隔で配置した。曲げ引張破壊耐力 を約 1.5 倍に増加させることを目標に、CFRP は格子間隔 が 100mm×100mm、筋 1 本当たりの公称断面積が 39.2mm <sup>2</sup> のものを用いた。				最大曲げモーメント(kN・m) 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	継手の 補強の有無 有無 あり なし なし 本 あり ■ □		
		マントル	図 りにラナト	るたけく	0 -		
<b>CFRP</b> のひずみの測定には <b>、図-2</b> に示すようにワイ ヤストレインゲージを貼付して計測を行った。継手を有					1500 2000 2500 3000 3500 支点間隔(mm)		
オス世紀休の主 CEDD ではスパン中央からの距離が					図ー3 支点間隔と最大曲げモーメントの関係		

する供試体の主 CFRP ではスパン中央からの距離が ±100mm, ±200mm, ±300mm, ±600mm の位置に, 継手 用 CFRP ではスパン中央からの距離が 0mm, ±100mm, ±200mm, ±300mm の位置に貼付した。一体型の供試体で は, 0mm, ±200mm, ±600mm の位置に貼付した。CFRP のひずみは、各位置に貼付した3つのワイヤストレイン ゲージの平均値とした。

鉄筋のひずみ測定は、引張鉄筋のスパン中央部にのみ ワイヤストレインゲージを貼付して, 引張鉄筋のみ測定 を行った。ひび割れ幅の測定には、供試体側面の引張鉄 筋位置に貼付した測定長が 100mm の π 型変位計を用い て測定を行った。変位の測定には変位計を用い、支点位 置の片面とスパン中央の両面に配置して測定を行った。

# 3.最大曲げモーメントおよび破壊形式

表-4 に各種荷重・最大曲げモーメントおよび破壊形 式を、図-3 に支点間隔と最大曲げモーメントの関係を それぞれ示す。CFRP で補強した供試体は継手の有無に かかわらず、CFRP 無補強の供試体に比べ、最大曲げモ ーメントが増加し、CFRP による補強効果が確認できた。 継手がない一体型 CFRP 供試体 S-N, L-N では、補強 長さの違いによる最大曲げモーメントの差は小さく、補 強長さによる影響は小さいことが確認された。継手を有 する供試体では、補強長さが長い供試体 L-J は供試体 S-J, M-J に比べ、最大曲げモーメントが 20%程度増加してい る。これは、補強区間の長さが長くなったことにより、 主 CFRP から継手用 CFRP への引張応力度の伝達がスム ーズになされたことによると考えられる。

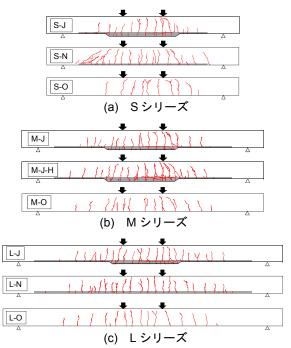


図-4 終局時におけるひび割れ状況

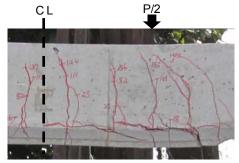


写真-1 供試体 M-J-H のピーリング破壊状況

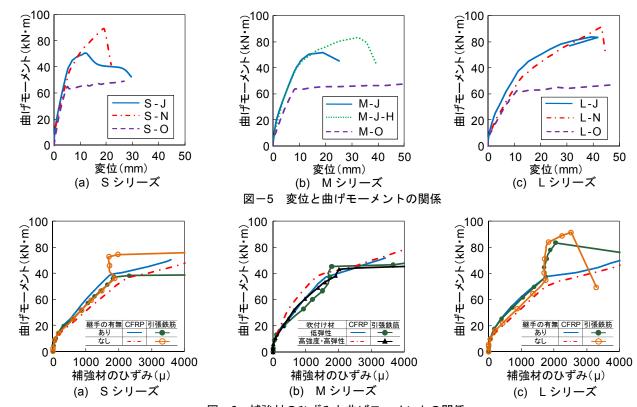


図-6 補強材のひずみと曲げモーメントの関係

また、Mシリーズの供試体において、いずれもピーリング破壊をしたが、高弾性 PCM を吹き付けた供試体 M-J-Hは、低弾性 PCM を吹き付けた供試体 M-Jに比べ、最大荷重が 15%程度増加した。

図-4 に各供試体の終局時におけるひび割れ状況を示す。CFRP により補強した供試体に発生した曲げひび割れは、その間隔が均等であり、CFRP の格子交差部の位置に発生した。また、ひび割れ本数も多く、ひび割れの分散性が良好であることが認められる。

継手を有する供試体 S-J, M-J, M-J-H, L-J の場合では、まず曲げひび割れが発生した後、ひび割れは進展していき、斜めひび割れが発生した。斜めひび割れの発生後は、載荷点に向かって伸びていくがせん断破壊をする前に増厚部の剥離が起こり破壊した。これは、載荷点側に発生した曲げひび割れと斜めひび割れが介在してブロック化したコンクリート片によって増厚部が下方に押し下げられるピーリング作用によるものである。(写真-1)

CFRP 無補強の供試体は曲げひび割れが発生した後, 圧縮側にひび割れが進展し,曲げ引張破壊をした。また, CFRP が一体型の供試体では,供試体 S-N がせん断圧縮 破壊,供試体 L-N が CFRP の破断といった脆性的な破壊 をしている。

高強度・高弾性 PCM で吹き付けた供試体 M-J-H では, 写真-1 に示したように, ピーリング破壊時にコンクリート躯体を一緒に剥がしていることから, 界面の付着が良好であると考えられる。

#### 4.変位と曲げモーメントの関係

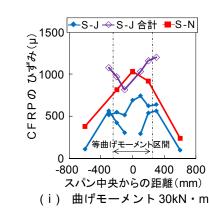
変位と曲げモーメントの関係を図-5に示す。補強長さの短いSシリーズでは、継手の有無による差はほとんど生じていない。しかし、補強長さの長いLシリーズでは、一体型CFRP供試体は継手を有する供試体に比べ、剛性が小さく、変位が少し増加する傾向が認められる。

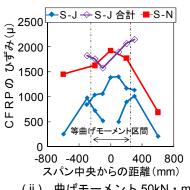
高強度・高弾性 PCM を吹き付けた供試体 M-J-H と低 弾性 PCM を吹き付けた供試体 M-J では、PCM の力学的 特性による影響は小さいことが確認できた。

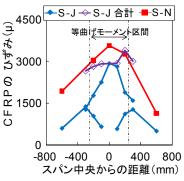
# 5.補強材のひずみ

図-6 に引張鉄筋および CFRP のひずみと曲げモーメントの関係を示す。 CFRP のひずみは、引張鉄筋と同位置のスパン中央の値とした。

Lシリーズでは、引張鉄筋の降伏まで、継手の有無にかかわらず、引張鉄筋が CFRP より少し小さいひずみ値かほぼ同じ値を示しており、はり高さ方向のひずみの大小関係がほぼ保持されている。しかしながら、引張鉄筋の降伏後は、CFRP が引張鉄筋に作用する応力を主体的に負担してひずみの増加が大きくなっているものの、引張鉄筋の引張ひずみの急増が生じていない。この現象は、継手の有無にかかわらず認められる。引張鉄筋が降伏する際に、コンクリート躯体と PCM 吹付け材の界面の付着が弱まり、CFRP がタイとなり、コンクリート躯体がアーチのリブとして機能する、いわゆるタイドアーチに耐荷モデルが移行されたと考えられる。そして、継手の

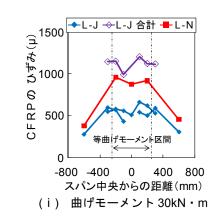


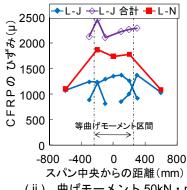


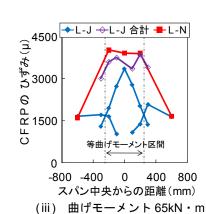


(ii) 曲げモーメント 50kN・m (a) S シリーズ

(iii) 曲げモーメント 65kN・m







曲げモーメント 50kN・m (b) Lシリーズ

図-7 CFRP のひずみ分布

無いはりではタイの CFRP が破断し、継手を有するはり では、破断する前の荷重により継手部がピーリング破壊 したものと推測できる。

Sシリーズでは、継手のない一体型の供試体 S-N のみ、 引張鉄筋の降伏後にタイドアーチに移行して, 引張鉄筋 のひずみが増加しない荷重段階が生じ,降伏後の荷重の 増加が引張鉄筋に作用するであろう応力までを CFRP が 負担していることが認められる。しかし、継手を有する 供試体 S-J では、CFRP の方が引張鉄筋よりもひずみが大 きくならずに小さくなっている。そして、引張鉄筋の降 伏後も、引張鉄筋のひずみが急増するためか、CFRP の ひずみは小さくなっている。コンクリート躯体と PCM 吹付けとの界面の付着は小さいものの, タイドアーチへ の耐荷機構への移行が不十分なままになっており、最終 的にピーリング破壊したと考えられる。

M シリーズにおいて、高強度・高弾性 PCM では引張 鉄筋が降伏した後にひずみが大きく増加している一般 のはりの性状を示している。しかし、低弾性 PCM では、 コンクリート躯体との付着力が小さいため, L シリーズ と同様な引張鉄筋の降伏後にひずみが急増しないタイ ドアーチの耐荷機構へ移行した現象が現れている。

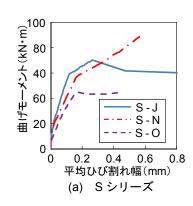
以上のことから, 一体型供試体では補強長さにかかわ らず、引張鉄筋の降伏後、引張鉄筋のひずみが増加しな いタイドアーチの耐荷機構が認められ、CFRP が引張鉄

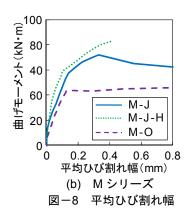
筋の応力を負担していることが認められる。しかしなが ら,継手を有する供試体では、補強長さの違いにより引 張鉄筋の降伏後に、 引張鉄筋のひずみが増加しないタイ ドアーチの耐荷機構へ移行したと考えられる現象に差 が現れている。すなわち、補強長さが長いほど CFRP の 引張応力の負担分が大きくなるという, 補強長さによる 影響は大きいことが認められる。

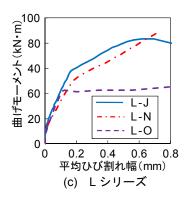
# 6.CFRP のひずみ分布

曲げモーメントが 30, 50, 65kN・m それぞれ作用し た時における各シリーズの供試体の CFRP のひずみ分布 を,図-7 に示す。CFRP のひずみ分布は,スパン中央 からの距離とする。図には、継手を有する供試体の主 CFRP と継手用 CFRP の同位置におけるひずみの合計値 を併記した。各シリーズの継手を有する供試体において、 等曲げモーメント区間での主 CFRP のひずみは、端部の スパン中央に近づくに従って減少し、その減少分は継手 用 CFRP のひずみが増加し、スパン中央で最大に達する ことが認められる。また、主 CFRP と継手用 CFRP のひ ずみの合計した値は、継手のない CFRP のひずみの値に ほぼ一致していくことも認められる。

引張鉄筋が弾性域の曲げモーメントが 30kN・m 作用 した時では、継手部での継手用 CFRP と主 CFRP のひず みのこのような現象は補強長さが短いSシリーズ供試体







で顕著である。

引張鉄筋が降伏直前の曲げモーメントが  $50kN \cdot m$  作用した時でも,ほぼ同じ性状を示している。ただ,L シリーズの主 CFRP のひずみが,S シリーズに比べて大きい。一方で,継手用 CFRP のひずみはその分,L シリーズの方が S シリーズより小さくなっている。

引張鉄筋が降伏した後の曲げモーメントが 65kN・m 作用した時では、継手を有する供試体の継手用 CFRP と 主 CFRP のひずみの合計が、一体型の供試体の CFRP の ひずみに近くなり、継手用 CFRP と主 CFRP での引張応力の分担が明瞭にされている。また、引張鉄筋はすでに 降伏しており、一体型 CFRP および継手用 CFRP の応力負担分が急増して、ひずみが大きく増加していることが確認できる。

これらのことより、一体型供試体では補強長さに関わらず引張鉄筋が降伏した後、一体型 CFRP が引張応力を負担することが認められ、はり型式の耐荷機構が別なタイドアーチの耐荷機構に移ったことが示唆される。また、継手を有する供試体では、補強長さが短いものでは引張鉄筋の降伏前から、下面側に配置された CFRP の方が引張鉄筋よりも小さなひずみを生じるが、補強長さが長くなると、引張鉄筋の降伏後は、一体型と同様な耐荷機構に移行することが推測される。

# 7.平均曲げひび割れ幅

図-8 に平均ひび割れ幅と曲げモーメントの関係を示す。高強度・高弾性 PCM を吹き付けた供試体 M-J-H は,低弾性 PCM を吹き付けた供試体 M-J に比べ,平均ひび割れ幅は抑制されることが認められる。また,継手を有する供試体は一体型の供試体に比べ,平均ひび割れ幅は小さい値を示している。これは,継手を有する供試体では継手用 CFRP の長さだけ一体型 CFRP に比べ,引張縁に近い位置に配置されているため,ひび割れ幅が小さくなったと考えられる。

#### 8.まとめ

CFRP を下面増厚補強したはり供試体を用いて、載荷

実験を行った結果,以下の知見が得られた。

- 1) 一体型 CFRP で補強した場合は、補強長さが異なって も最大曲げモーメントにはほとんど差はないが、継手 を有する CFRP で補強した場合では、補強長さの長い ものでは、最大曲げモーメントが 20%程度増加するこ とが認められた。
- 2)高強度・高弾性 PCM で吹き付けた供試体は低弾性 PCM で吹き付けた供試体に比べ、コンクリート躯体と PCM 吹付けの界面の付着性状が良好であり、荷重が 15%程 度増加した。
- 3)一体型供試体では補強長さにかかわらず引張鉄筋が降 伏した後,継手の無い CFRP が引張応力を負担してい る現象が認められ,はり型式の耐荷機構が別な機構に 移ったことが示唆される。継手を有するはり供試体で は,補強長さが長いと,引張鉄筋の降伏後は,一体型 と同様な耐荷機構に移行することが示唆されたが,補 強長さが短いはりではタイドアーチへの移行が十分 でないといった,補強長さの相違の影響が認められた。
- 4)継手を有する供試体は一体型供試体と比べ、平均ひび割れ幅は小さな値を示す。また、高強度・高弾性 PCM を吹き付けた供試体は低弾性 PCM を吹き付けた供試体に比べ、平均ひび割れ幅は抑制されることが認められる。

謝辞:本研究は、FRP グリッド工法研究会との共同研究の一環として実施したものである。供試体の作製および 載荷実験に際しては、ドーピー建設工業(株)関東工場に 多大なご協力をいただいた。付記して、厚くお礼申し上 げる。

# 参考文献

- 1) 小田切芳春, 辻幸和, 岡村雄樹, 小林朗: 継手部を有する連続補強材により下面増厚補強した RC はりの疲労性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1915-1920, 2003
- 2) 辻幸和,小田切芳春,岡村雄樹,佐藤貢一:継手部を有する連続繊維補強材を用いた RC はりの下面増厚補強効果,土木学会論文集,No.788, pp.67-80,2005.5