

論文 炭素繊維プレートにより補強されたRCはりの破壊挙動

佐藤 靖彦^{*1}・小林 朗^{*2}・高橋 義裕^{*3}

要旨: 炭素繊維プレートにより曲げ補強された鉄筋コンクリートはりの破壊性状と耐力に関する実験的研究を行った。実験変数は、接着枚数 (1枚, 2枚, 3枚), 接着の仕方 (積層と並列), 接着長を変えることによる端部でのプレート剛性の低減の有無である。プレートを積層接着すると付着応力が増加し、はく離破壊が早期に発生すること、プレートを2もしくは3枚並列に接着すると、積層する場合よりも耐力が増加するものの、プレートを1枚だけ接着した場合の耐力を下回る可能性があることを明らかにした。また、はく離破壊を支配する端部の付着強度は、剛性が大きいほど増加するが、上限値が存在する可能性を示した。

キーワード: 炭素繊維プレート, はり, はく離破壊, 付着強度

1. はじめに

この10年、炭素繊維やアラミド繊維などの連続繊維よりなるシートやプレートを用いたはりの曲げ挙動に関する研究が数多くなされ、はく離破壊を予測することの重要性が指摘されてきた。しかし、はく離破壊機構の解明は終わっていない。

プレートの適用方法として、緊張力を導入する方法と導入しない方法がある。本研究は、プレートのはく離機構の解明に資する基礎データの蓄積を目的とし、緊張力を与えない炭素繊維プレートの挙動に着目する。

炭素繊維プレートによるはりの曲げ補強に関する既往の研究成果として、井上ら¹⁾, 木村ら²⁾, 井上ら³⁾, 久部ら⁴⁾の報告がある。これらの研究では、炭素繊維プレートを1枚接着した場合の曲げ補強効果とアンカー材やシートによる端部のはく離抑制効果に関する検討がなされている。

今回、著者らは、炭素繊維プレートの接着枚数、接着の仕方 (重ね接着と横並び接着)、端部剛性の低減の有

無に着目した、炭素繊維プレート補強鉄筋コンクリートはりの曲げせん断試験を行った。ここに、その結果を報告し、破壊耐力と付着性状に関して議論する。

2. 実験概要

2.1 使用材料実験供試体

(1) 実験供試体

本研究において、8体のはり供試体を用意した。供試体の側面図と断面図を図-1に示す。供試体の一覧を表-1に示す。

供試体 PL0 は、炭素繊維プレート (以下単に「プレート」と言う) により補強されていない基準供試体であり、引張鉄筋比は1.1%, せん断補強筋比は0.78%である。その他の7体は、この基準供試体にプレートが接着されたものである。供試体 PL1 には、プレートが1枚接着されている。供試体 PL2-O と PL2-P には、プレートが2枚、供試体 PL3-O と PL3-P には、プレートが3枚接着されている。その違いは接着の仕方である。供試体 PL2-O と

表-1 供試体一覧

供試体名	枚数	補強方法	接着長 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	終局荷重 (kN)	破壊形式
PL0	0	—	—	39.5	182.4	曲げ降伏
PL1	1	—	1500	36.2	234	はく離
PL2-O	2	積層	1500	45.2	233	はく離
PL2-P	2	並列	1500	37.5	271.6	はく離
PL3-O	3	積層	1500	33.8	215.7	はく離
PL3-P	3	並列	1500	39.5	240.3	はく離
PL2-O2	2	積層	1100+1500	31.9	222.6	はく離
PL3-O3	3	積層	700+1100+1500	40.1	238.3	はく離

*1 北海道大学大学院 工学研究科環境創生工学専攻准教授 博士 (工学) (正会員)

*2 日鉄コンポジット (株) 技術部担当部長 工修 (正会員)

*3 北海学園大学 工学部環境社会工学科教授 工学博士 (正会員)

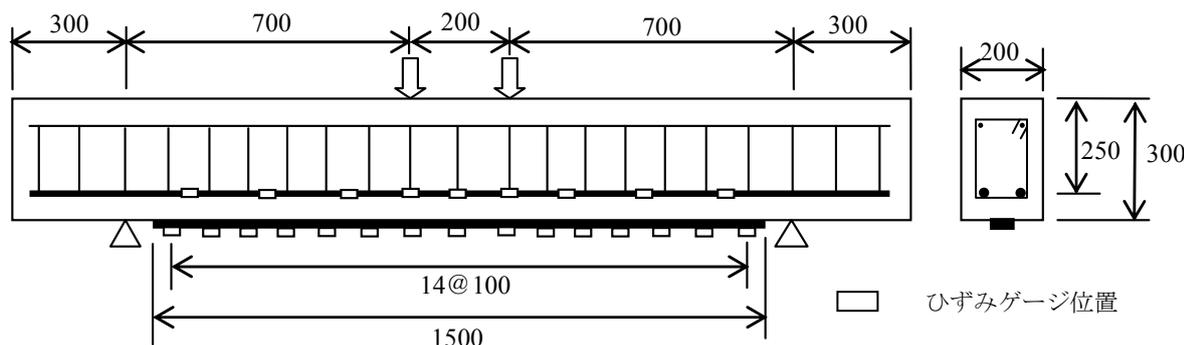


図-1 実験供試体

表-2 補強材の力学特性

炭素繊維 プレート		厚さ (mm)	2
		幅 (mm)	50
		ヤング係数 (kN/mm ²)	170
		引張強度 (N/mm ²)	2707
		破断ひずみ (μ)	15920
鉄 筋	引張鉄筋 D19 (SD345)	降伏強度 (N/mm ²)	396
		引張強度 (N/mm ²)	570
	せん断補強筋 D10 (SD295A)	降伏強度 (N/mm ²)	377
		引張強度 (N/mm ²)	537
		ヤング係数 (kN/mm ²)	—

PL3-Oには、プレートが積層されて接着されており、供試体 PL2-Oと PL3-Oには、プレートが並べて接着されている。なお、両供試体において、プレートは隙間を設けず中心によせて接着されている。一方、供試体 PL2-O2と PL3-O3には、それぞれ2枚と3枚のプレートが積層されて接着されているが、端部でのプレートの剛性を低減するために、各層の長さを変えられている。すなわち、供試体 PL2-O2には、1500mmのプレートの上に、1100mmのプレートが接着され、供試体 PL3-O3には、1500mmのプレートの上に1100mmのプレートが、その1100mmのプレートの上に700mmのプレートが接着されている。なお、すべての供試体において、はりの下面がディスクサンダーでケレンされた上で接着されている。また、使用した接着剤は、2液混合常温硬化型エポキシ樹脂（圧縮弾性係数 2568N/mm²）である。

(2) 使用材料

使用した鉄筋とプレートの力学的特性値を、表-2に示す。

セメントにはポルトランドセメントを使用した。目標強度を 40N/mm²に設定し、水セメント比 45%を、細骨材率 38%としてコンクリートを打設した。実際の圧縮強度は表-1に示されている。

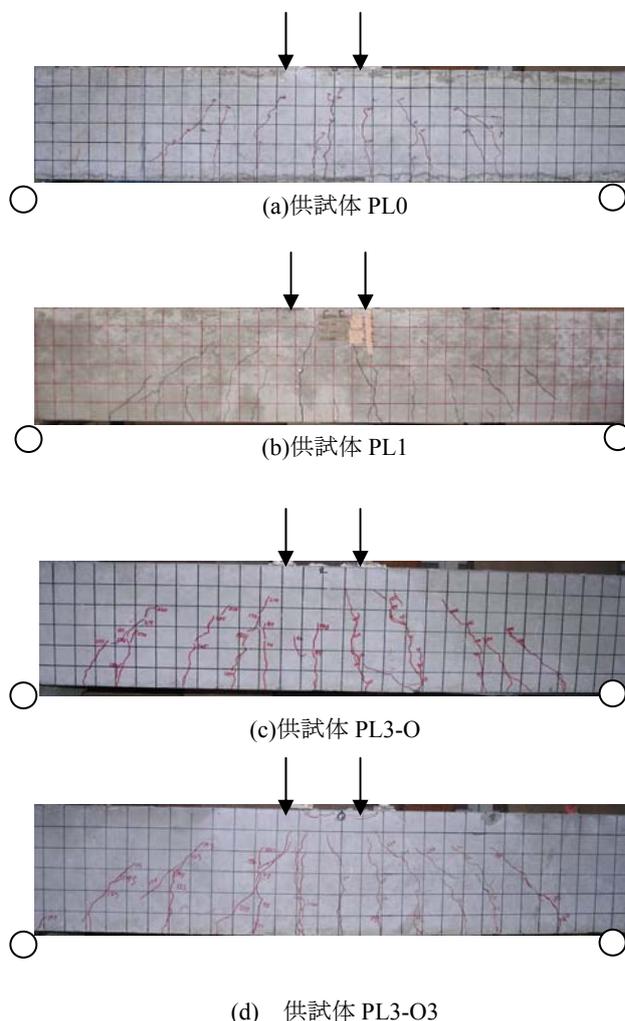


図-2 ひび割れ性状

2.2 実験方法と測定

(1) 実験方法

供試体は単純支持され、2点集中荷重が与えられた。荷重は単調に増加され、供試体は破壊に至らしめられた。

(2) 測定項目

すべての供試体において、荷重、中央点の変位、引張鉄筋のひずみ、プレートひずみが測定された。鉄筋とプレートのひずみ測定位置は図-1に示されている。一部の供試体においては、はり中央断面の圧縮域（上縁から20, 40, 60, 80mmの位置）のコンクリートのひずみが測定されている。また、プレートが重ねて接着された供試体では、はりの中央位置で、プレート層間にひずみゲージが接着された。なお、コンクリートには検長70mmの箔ゲージが、鉄筋とプレートには5mmの箔ゲージが使用された。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ性状と破壊性状

供試体 PL0 は、引張鉄筋降伏後に曲げ圧縮破壊を起こした。プレートを接着した全ての供試体において、端部でのプレートのはく離が発生し、荷重が急激に低下した。それゆえ、以後、プレート補強したはりの終局荷重をはく離耐力とすることにする。

図-2に供試体 PL0, PL1, PL3-O, PL3-O3 の試験後のひび割れ性状を示す。プレートが接着されていない供試体 PL0 よりも、プレートが接着された供試体 PL1, PL3-O, PL3-O3 の方がひび割れ分散性が良く、支点に近い位置にもひび割れが発生している。この傾向は、プレートを接着した他の供試体にも見られたが、プレートにより補強された供試体間のひび割れ性状には、特に大きな違いは見られなかった。

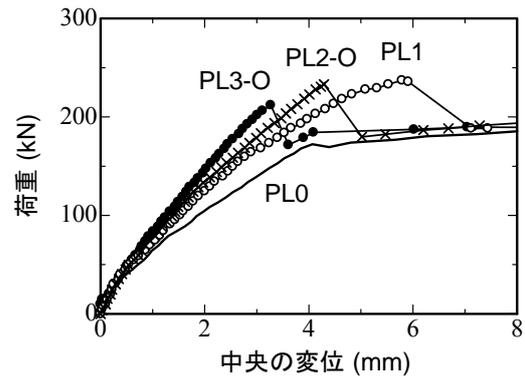
3.2 最大耐力の比較

荷重と中央点の変形量との関係を図-3に示す。この関係より、剛性とはく離耐力に関して考察する。

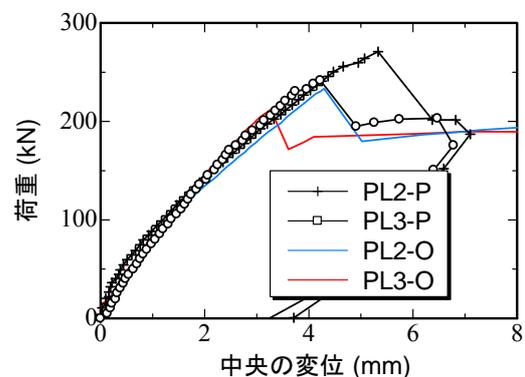
図-3(a)は、供試体 PL0, PL1, PL2-O, PL3-O の荷重-変位曲線を示す。接着枚数を増やすほど、剛性が大きくなっている。しかし、はく離耐力は、接着枚数を増やすほど低下している。

図-3(b)は、複数のプレートが並べて接着された供試体 PL2-P と PL3-P の荷重-変位曲線を示す。比較のため、重ねて接着された供試体 PL2-O と PL3-O の結果も併せて示す。並べて接着する場合と重ねて接着する場合に剛性の差は見られない。しかし、はく離耐力は、枚数によらず並べて接着した場合の方が大きい。

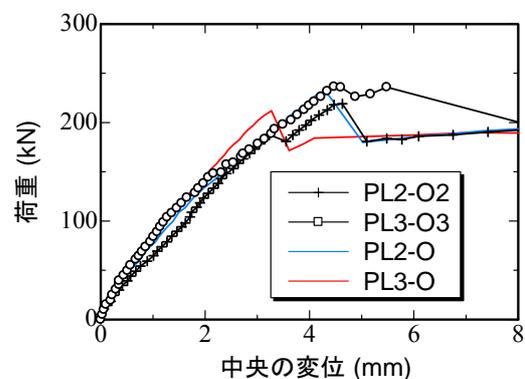
図-3(c)は、プレートの長さを変え、端部の剛性を小さくした供試体 PL2-O2 と PL3-O3 の荷重-変位曲線を示す。比較のため長さが変えられていない供試体 PL2-O と PL3-O の結果も示されている。まず、供試体 PL3-O3 と供試体 PL3-O を比較する。供試体 PL3-O3 の剛性は約150kN以降、供試体 PL3-O よりも小さくなっているが、はく離耐力は約10%程度増加している。次に、供試体



(a)積層接着した場合



(b)並べて接着した場合



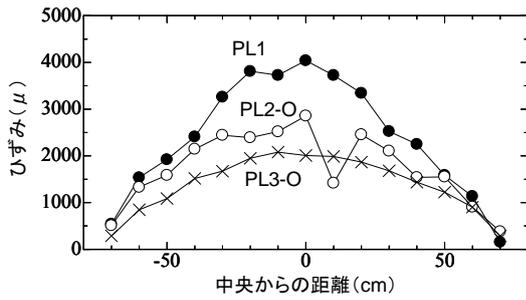
(c)端部の剛性を低減した場合

図-3 荷重-変位曲線

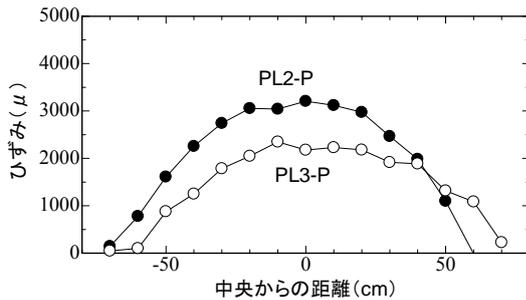
PL2-O と供試体 PL2-O2 を比較する。供試体 PL2-O2 においては約190kNで荷重が若干低下し、その後の変位が供試体 PL2-O よりも大きくなっているが、両者のはく離耐力はほぼ等しい。

3.3 プレートのひずみ分布の比較

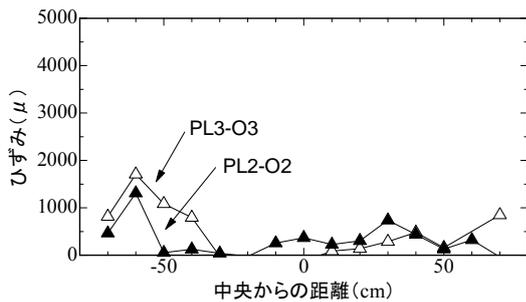
ここで、最大荷重直前のプレートのひずみ分布について考察する。なお、各供試体の最大荷重は表-1に示されている。



(a)積層接着した場合



(b)並べて接着した場合



(c)端部の剛性を低減した場合

図-4 プレートのひずみ分布

図-4(a)は、供試体 PL1, PL2-O, PL3-O のひずみ分布を示す。最大ひずみは、順に約 4000 μ , 約 3000 μ , 約 2000 μ であり、破断ひずみよりかなり小さい。

図-4(b)に、供試体 PL2-P と PL3-P のひずみ分布を示す。最大ひずみは、順に約 3200 μ と約 2200 μ である。はく離耐力が積層化した場合よりも大きかった、プレートを一列に接着した供試体においても、その最大ひずみは、破断ひずみに比べかなり小さい。

図-4(c)は、供試体 PL2-O2 と PL3-O3 のひずみ分布を示す。等曲げ区間のひずみがほぼゼロになっている。これは、接着長が短いプレートが層間でまず剥離したことによる。すなわち、供試体 PL2-O2 においては約 190kN に、供試体 PL3-O3 においては、最外縁のプレートが約 130kN, 中間のプレートが約 160kN に、層間はく離を起



図-5 プレート層間のはく離性状

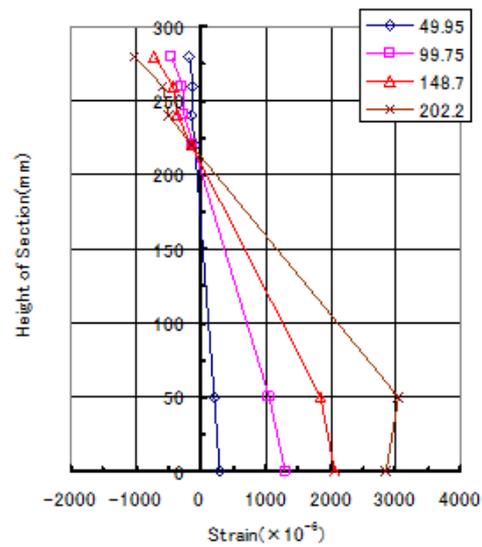


図-6 中央断面でのひずみ分布

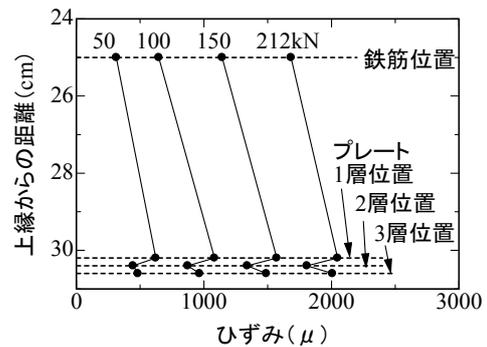


図-7 プレート各層のひずみ

こした後、コンクリート面に接着されていたプレート 1 枚だけが引張力を担っていた。ここで言う層間はく離の状況は図-5 に示しておく。

3.4 断面内のひずみ分布

ここで、はり中央断面の高さ方向のひずみ分布について考察する。

図-6 は、プレートを 1 枚接着した供試体 PL1 のひずみ分布を示す。作用荷重が小さい段階 (50 及び 100kN)

では、ほぼ平面保持の仮定が成り立っていると考えることができる。しかし、作用荷重が150kN時及び終局時には、平面保持が成り立っていない。この結果は、接着層の変形もしくは破壊に伴う、プレートとコンクリート接着面との間にずれ変形が生じていた可能性を示す。

図-7は、プレートを3枚積層接着した供試体 PL3-O の鉄筋とプレートのひずみ分布を示す。この供試体においては、スパン中央の各プレートにひずみゲージが接着されている。プレート層間では、ひずみの直線性は成り立たず、一体となって挙動していないことが明らかである。ただ、この非一体性が、はく離破壊性状や耐力評価にどの程度の影響を及ぼすものであるか現時点で説明できない。今後の課題である。

3.5 付着応力

ここで局部付着応力に関する考察を行う。局部付着応力 (τ) は、隣接するひずみゲージから次式を用いて求めた。

$$\tau = tE \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta x} \quad (1)$$

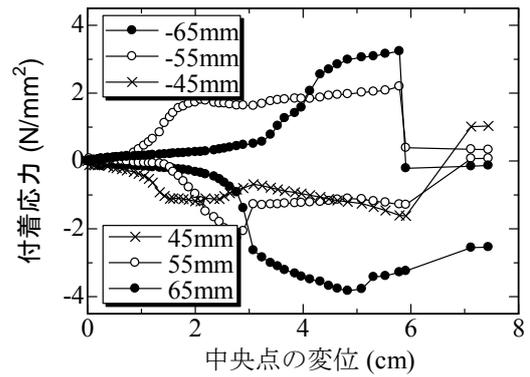
ここで、 t はプレートの厚さ、 E はプレートの弾性係数、 $\Delta \varepsilon$ はプレートのひずみ増分、 Δx はひずみゲージの間隔 (100mm)、である。なお、コンクリート強度が、供試体間で若干ばらついているが、その差は考慮していない。これは、シートの付着性状と同様に、コンクリート強度の影響がそれほど大きくはない⁵⁾と考えていることによる。

図-8は、供試体 PL1-O と PL2-O と PL3-O の付着応力の変化を示している。図中の数値は、中央からの距離を示している。いずれの場合も、せん断スパン中央付近 ($\pm 45\text{cm}$ と $\pm 55\text{cm}$) の付着応力がまず増加する。しかし、最終的には、端部 ($\pm 65\text{cm}$) の付着応力が増加し、その位置での付着が低下した後荷重が低下している。すなわち、端部での付着破壊が部材としての耐力を決定づけていた。この過程は他の供試体でも観察された。

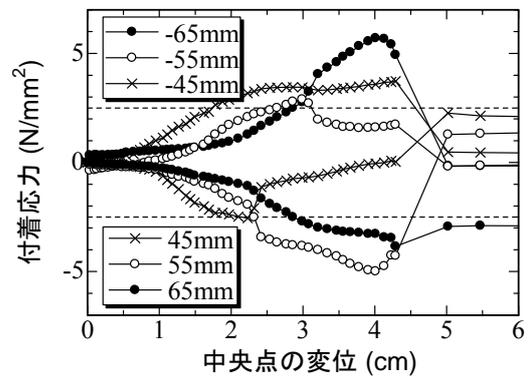
4. はく離破壊に関する考察

各供試体の付着強度 (付着応力の最大値) を図-9 に示す。すべて端部の付着強度である。積層数が増えることにより最大値が増加している。シート同様、剛性が大きくなると、付着強度が増加するが、その強度には上限値が存在する⁵⁾可能性がある。

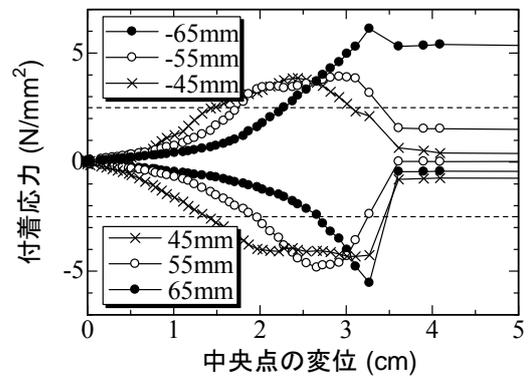
プレートを並べて接着するとはく離耐力が増加することを先に述べた。しかし、供試体 PL2-P と PL3-P の付着強度は、プレートを1枚だけ接着した場合の端部の付着強度よりも小さくなっている。これは、接着幅の影響



(a)PL1



(b)PL2-O



(c)PL3-O

図-8 付着応力-変位曲線

が表れたものと考えられる⁵⁾。すなわち、コンクリートの付着抵抗領域は、プレートの幅と同じではなく若干広く、本実験のように、隙間を設けずにプレートを接着した場合には、プレート1枚当たりの有効な付着抵抗幅が低下し、見かけ上、付着耐力が低下したと考えることができる。

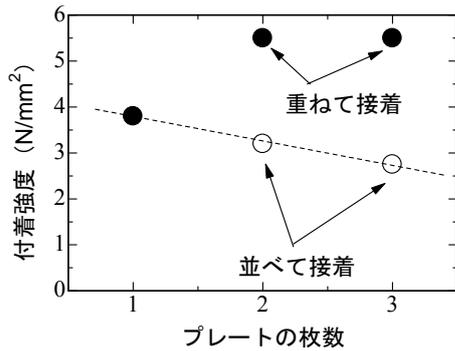


図-9 付着強度

5. まとめ

本実験の範囲で得られた結論を以下に示す。

- (1) 炭素繊維プレート補強 RC はりの曲げ耐力は、炭素繊維プレートの接着の仕方の影響を大きく受ける。しなわち、プレートを重ねて接着する場合、枚数が増えるほどはく離耐力が低下する可能性が高い。
- (2) はりのはく離耐力は、接着枚数や接着の仕方によらず、端部でのプレートの付着破壊によるものと考えられる。

- (3) プレートの端部の付着強度は、プレートの剛性が大きいほど大きくなるものの、上限値が存在すると思われる。

参考文献

- 1) 井上正一, 西林新蔵, 吉野公, 小俣富士夫, CFRP 板で補強した RC はりの変形性状と静的および疲労強度, Vol.19, No.2, pp.267-272, 1997
- 2) 木村耕三, 小島克朗, 平田亮, 土屋好男, CFRP 板による RC 補強部材の曲げ挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.2, pp.267-272, 1997
- 3) 井上真澄, 鈴木研二, 高木宣章, 児島孝之, 炭素繊維プレートで補強した RC はりの曲げ特製に関する研究, 土木学会論文集, No.746/V-61, 165-179, 2003
- 4) 久部修弘, 諸星克敏, 大塚浩司: 高弾性 CFRP プレートの継手性能と RC はりにおける曲げ補強効果および疲労耐久性, コンクリート工学年次論文報告集, Vo29, No.1, pp.471-476, 2007
- 5) 佐藤靖彦, 浅野靖之, 上田多門, 炭素繊維シートの付着機構に関する基礎研究, 土木学会論文集, No.646/V-47, pp.71-87, 2000