

論文 断面修復を考慮した RC はりの連続繊維シート補強効果

彭 丰^{*1}・森川 英典^{*2}・小林 秀恵^{*3}

要旨：塩害劣化 RC 橋を連続繊維シート接着工法で補強する場合，断面修復した上でシートを接着することが一般であり，また，実施工では，打ち継ぎ界面にプライマー塗布を行うため，本研究では，この視点に沿って，断面修復材 4 種，シート 2 種およびプライマー塗布の有無について，RC 部材を用いる曲げ載荷実験を行い，それぞれの影響について検討を行った。実験結果より，高弾性係数の補修材を用いる断面修復が補強効果に与える影響がほとんどなく，適していること，また，プライマー塗布の場合，事前に付着試験による接着性能の評価および良いプライマーの選択を行う必要があることを明らかにした。

キーワード：塩害劣化，断面修復，連続繊維シート補強，プライマー

1. はじめに

塩害劣化 RC 橋の維持管理では，補修・補強対策として，脆弱化したかぶりコンクリートをはり取り，ポリマーセメントモルタル（以下，PCM）などで断面修復した上，連続繊維シート（以下，シート）補強工法を適用することが一般である¹⁾。しかし，断面修復を施した上で連続繊維シート補強を行い，その効果を評価した研究はほとんど行われていないのが現状である。本研究では，塩害劣化橋梁を対象とし，PCM で断面修復を施した RC はり部材を連続繊維シート補強することにより，その補強効果について実験的に評価を行った。そこで，補修材 4 種，

シート 2 種および実施工を想定することによる打ち継ぎ界面にプライマー塗布の有無を検討要因とし，曲げ載荷試験を行うことで，断面修復による補修効果，また断面修復が連続繊維シート補強の補強効果に与える影響について検討した。

2. 試験概要

2.1 供試体概要および試験要因

試験で使用する部材供試体は，長さが 1800mm，断面（幅×高さ）が 150×200mm の RC はりで，スパン長は 1600mm とした。図-1 の概略図に供試体の寸法を示す。載荷方法は等

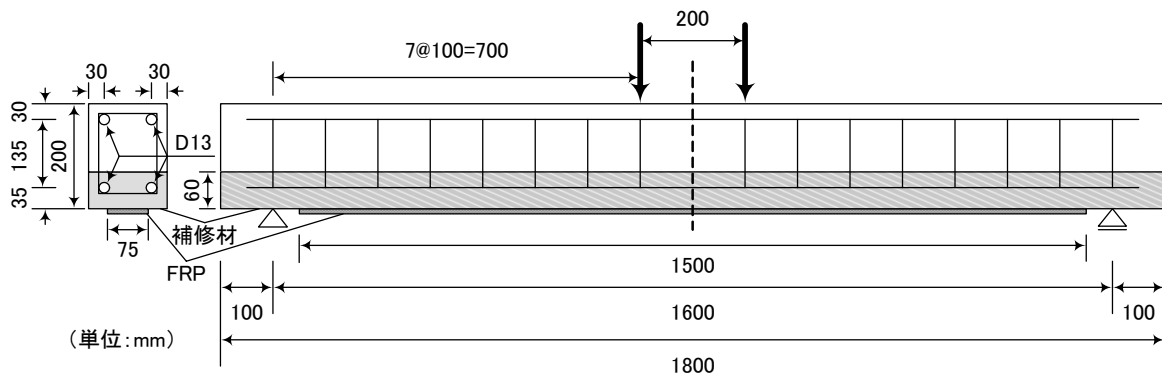


図-1 供試体概略図

*1 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (正会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻教授 工博 (正会員)

*3 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻技術職員 (正会員)

曲げ区間が 200mm の 4 点曲げで試験を行った。また、配筋は図に示すように、D13 鉄筋を引張側、圧縮側にそれぞれ 2 本配置し、D6 スターラップを 100mm 間隔で配置した。鋼材の機械的性質を表-1 に示す。

試験要因を表-2 に示す。試験要因は、断面修復の有無および補修材の違い(PCM の L, Ns1, Ns2 と Ns+水の 4 水準)、シート補強の有無およびシートの違い(炭素繊維シートとアラミド繊維シート)と打ち継ぎ界面にプライマー塗布の有無である。また、PCM が補強効果に及ぼす主要因を特定するために、接着界面状態を同様にするため、不陸修正材(以下、パテ)を用いて、全ての補強供試体にパテ施工を行った。

ここで、使用した PCM は L と NS であるが、L は特殊軽量細骨材とカーボンファイバーを配合した PCM であり、NS はコテ塗り工法および湿式吹付け工法に適応する PCM である。また、特殊なモルタルとする Ns は、材料特性の異なる 2 種類(Ns1 と Ns2)を用いた。補修材 PCM(Ns+水)というのは、普通の補修材 PCM(Ns)の硬化材を水で替えたものである。

供試体名について、2 つの項目で表す。第 1 項目は補修状況であり、最初のアルファベット P の有無が打ち継ぎ界面のプライマー塗布の有無を表し、2 番目のアルファベット C, L, N1, N2, W がそれぞれ断面修復なし(コンクリート)、補修材 PCM(L), PCM(Ns1), PCM(Ns2) と PCM(Ns+水)を表す。第 2 項目は補強状況であり、アルファベット N, C, A がそれぞれ無補強、炭素繊維シート(以下、CFRP)補強、アラミド繊維シート(以下、AFRP)補強である。

2.2 断面修復およびシートの施工方法
 実施工において断面修復を行う際、主鉄筋の裏側までコンクリートをはつり取るものと考えられる。そこで、RC はりの引張側で主鉄筋の裏まで補修部分の厚さを約 60mm と設定し、コンクリートを打設した。その後、打ち継ぎ処理を行い、PCM を打設した。また、シート施工方法は、全国上下水道エポキシ工事事業協会²⁾や阪神高速道路株式会社³⁾などが示している方法に準拠し、接着界面を研磨した後、プライマー塗布、パテ施工を順に行った上、シートを接着樹脂により含浸、接着した。ここで、接着樹脂の性質およびパテの性質を表-3 に示す。シート

2.2 断面修復およびシートの施工方法

の性質および接着樹脂を含浸させて行った引

表-1 鋼材の機械的性質

鋼材の種類	降伏点強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ(μ)
D13	320	496	1820
D6	323	496	1868

表-2 試験要因

供試体名	供試体の情報		
	プライマーの有無	補修有無or補修材の種類	補強有無or補強材の種類
C-N	なし	なし	なし
N1-N		Ns1	
L-N		L	
N2-N		Ns2	
PN2-N		Ns+水	
PW-N	あり	Ns+水	CFRP
C-C	なし	なし	
N1-C		Ns1	
L-C		L	
N2-C		Ns2	
PN2-C		Ns+水	
PW-C	あり	Ns+水	AFRP
PN2-A	あり	Ns2	
PW-A		Ns+水	
C-A	なし	なし	

表-3 接着樹脂・パテの性質

	圧縮強さ (N/mm ²)	圧縮弾性率 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	引張弾性率 (N/mm ²)
接着樹脂	92.8	3.20 × 10 ³	50.9	3.65 × 10 ³
パテ	71.9	5.18 × 10 ³	-	-

表-4 シートの性質および引張試験結果
(接着樹脂を含浸させた場合)

繊維の種類	炭素繊維	アラミド繊維
繊維目付(g/m ²)	300	415
設計厚さ(mm)	0.167	0.286
引張強度(N/mm ²)	4418	2471
引張弾性率(N/mm ²)	2.48 × 10 ⁵	1.25 × 10 ⁵
破断ひずみ(μ)	17751	19200

張試験結果を表-4に示す。

3. 試験結果および評価

3.1 コンクリートと補修材の材料性能

各材料の性能を表-5に示す。なお、養生条件は湿布養生であり、表の結果は載荷試験を行った材齢での結果である。表より、コンクリートに比べPCMのLとNs1の弾性係数はともに著しく低いが、PCM(Ns2)、PCM(Ns+水)の弾性係数はコンクリートとそれらとの中間的な値を示している。

3.2 断面修復効果の評価

断面修復による耐荷性能への影響は無補強供試体において評価した。表-6に試験結果を示す。無補修供試体C-Nに比べ、低弾性係数の補修材で断面修復を行った供試体N1-N、L-Nはともに部材降伏荷重、最大荷重が低いが、高弾性係数の補修材を用いる補修供試体N2-N、PN2-Nの部材降伏荷重がほぼ同様であり、最大荷重がやや低くなることがわかった。図-2に供試体C-N、N1-N、N2-Nの荷重-たわみ関係を示す。図より、補修供試体のほうが、部材降伏後の挙

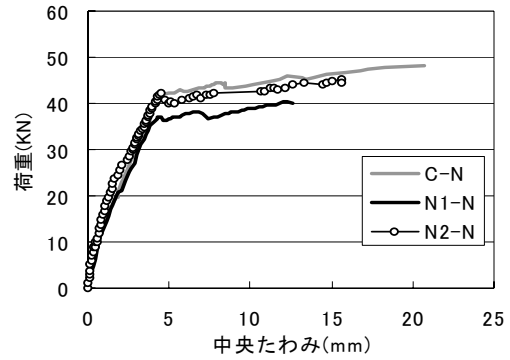


図-2 荷重-中央たわみ関係 1 (無補強)

動が低下しており、断面修復による影響が明らかである。また、供試体N1-N、N2-Nの間でも顕著な差異を生じている。材料性能での評価により、その差異を生じた要因は、補修材の弾性係数が異なることによるものと考えられる。

3.3 断面修復が補強性能に与える影響

(1) 低弾性係数の補修材を用いる断面修復における評価

まず、低弾性係数の補修材PCM(L)、PCM(Ns1)で断面修復を施した供試体のCFRP補強効果について考察を行った。図-3に供試体C-C、L-C、N1-Cの荷重-中央たわみ関係を示す。部材降伏まで、断面修復の有無に関わらず、3つの供試体はほぼ同様の傾向を示しているが、部材降伏以降の挙動に大きな差異が見受けられる。部材降伏後の挙動を見ると、部材降伏までは図-3および表-6より補修を行った供試体(L-C、N1-C)の部材降伏荷重、最大荷重、部材降伏後剛性が補修を行っていない供試体(C-C)に比べ低下していることがわかる。つまり、PCM(L)

表-5 材料性能

材料名	弾性係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
コンクリート	27.26 × 10 ³	34.75	3.02
PCM(L)	13.15 × 10 ³	36.64	2.67
PCM(Ns1)	12.96 × 10 ³	39.08	3.75
PCM(Ns2)	18.08 × 10 ³	49.46	3.45
PCM(Ns+水)	23.06 × 10 ³	61.57	3.40

図-6 試験結果

供試体名	試験結果					供試体名	試験結果				
	部材降伏荷重(KN)	耐力比 ¹⁾ (部材降伏時)	最大荷重(KN)	耐力比 ¹⁾ (最大荷重時)	部材降伏後 ²⁾ 剛性(KN/mm)		部材降伏荷重(KN)	耐力比 ¹⁾ (部材降伏時)	最大荷重(KN)	耐力比 ¹⁾ (最大荷重時)	部材降伏後 ²⁾ 剛性(KN/mm)
C-N	41.83		48.00			L-C	41.97	0.86	50.31	0.88	1.13
N1-N	36.98		40.52			N2-C	49.38	1.18	56.44	1.12	1.16
L-N	36.00		39.14			PN2-C	48.98	0.99	56.09	0.99	1.02
N2-N	42.27		45.26			PW-C	52.02	1.06	57.03	1.02	0.75
PN2-N	41.58		45.31			PN2-A	49.03	1.00	54.38	0.97	0.81
PW-N	41.78		42.71			PW-A	51.34	0.99	57.12	1.00	0.83
C-C	49.08	1.17	57.22	1.34	1.19	C-A	48.64	0.99	56.93	1.05	0.83
N1-C	42.46	1.02	48.94	1.15	0.71						

※1 無補強の部材降伏荷重および最大荷重はC-N、N1-N、L-N、N2-N、PN2-N、PW-Nのそれぞれのデータを使用

※2 部材降伏後剛性: (最大荷重-部材降伏荷重) ÷ (最大荷重時のたわみ-部材降伏時のたわみ)

※3 供試体C-C(補強)の曲げ耐力の計算値: 62.44KN⁴⁾

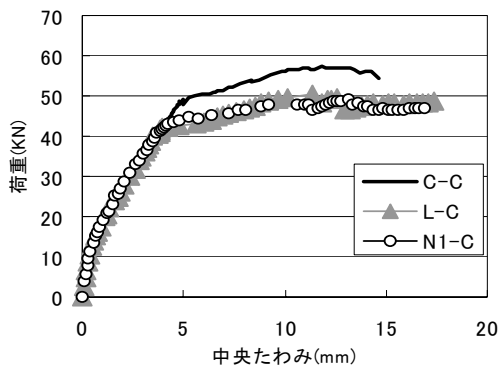


図-3 荷重-中央たわみ関係 2 (補強)

および PCM(Ns1)によって断面修復を行った場合、補強効果が低下するものと考えられる。補強効果が低下する要因としては、補修材の弾性係数が低いため、ひび割れが開口後、大きなひずみを生じやすくなることが補強効果を低下させる主要因であると考えられる。

図-4 に示したシートひずみ分布を観察すると、PCM (L) で補修を行った供試体 L-C の最大シートひずみと補修を行っていない C-C 供試体の最大シートひずみがほぼ同程度であることがわかる。さらに、供試体 L-C は、一部破断が生じ終局を迎えたことが試験後明らかとなった。しかし、それに関わらず、表-6 より、供試体 L-C は無補修供試体に比べ耐力が低下している。この要因について以下に考察する。

図-4 より C-C 供試体は最大荷重に至るとともに、シートひずみも最大に至ったが、L-PC 供試体は最大荷重に至った後、シートひずみの最大値が現れたことがわかった。一方、図-5 の供試体のひび割れ性状を見ると、補修を行っていない供試体 (C-C) に比べ、補修を行った供試体 (L-C, N1-C) はひび割れが直線的に生じている。補修を行うとひび割れが直線的に生じる要因としては、PCM が粗骨材を含まない供試体であるためだと考えられる。なお、C-C 供試体に比べ L-C 供試体はひび割れ数が少なく、ブロック化により PCM が剥落したことがわかった。しかし、通常、ひび割れが多い供試体でブロックが生じやすく、また既往の研究⁵⁾におい

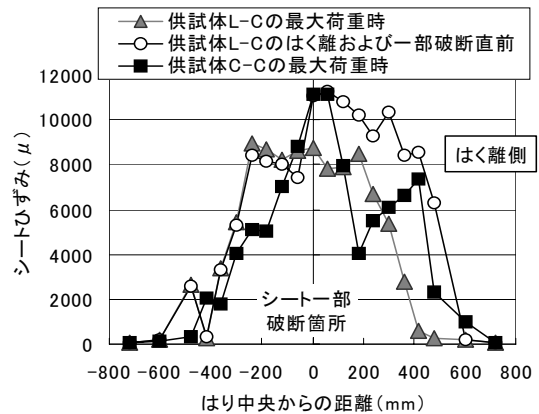


図-4 シートひずみ分布

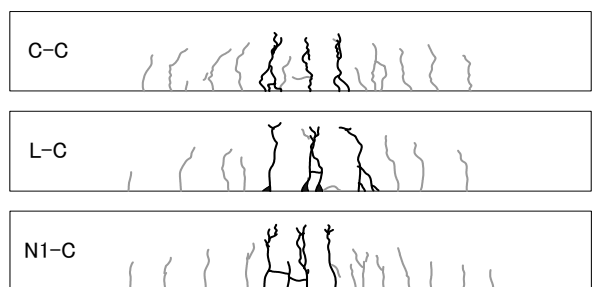


図-5 ひび割れ性状 1

て、ひび割れのブロック化およびコンクリートのはく落が顕著な供試体においても、ひずみ値が急激に増加したり、一部が破断したりするような傾向は得られなかった。すなわち、PCM で補修を行った場合、ひび割れの開口等によって局所的な応力が生じやすい可能性が考えられる。そして、そのような局所的な応力が生じる主要因としては、PCM が粗骨材を含まない材料であるとともに、コンクリートに比べ弾性係数が著しく低いためだと考えられる。つまり、粗骨材を含まないためひび割れが開口しやすだけでなく、弾性係数がコンクリートに比べ著しく低いため、部材剛性が低くなり、より大きなひずみが生じやすく、より顕著に局所的な応力が生じたものと推察される。

(2) 高弾性係数の補修材を用いる断面修復における評価

表-5 に示したように、弾性係数の高い補修材 PCM(Ns)と PCM(Ns+水)を用いて断面修復を施した CFRP 補強供試体の荷重-中央たわみ関係を図-6 に示す。図より、断面修復の有無に

関わらず、全ての供試体は同様な挙動を示している。表-6より、最大荷重時無補修供試体 C-C に比べ、補修を行った供試体 N2-C, PN2-C, PW-C は若干差異を生じるが、補強効果が認められる。同様な状況は、図-7 に示した AFRP 補強供試体の荷重-中央たわみ関係においても認められる。

(3) プライマー塗布の影響

鉄筋と PCM との付着特性を考察するために、RC はり供試体と同時期に鉄筋の引抜供試体を作成し、実験を行った。なお、引抜試験は土木学会基準 (JSCE-G503-1999) ⁶⁾ に従った。表-7 に試験要因を示す。補修材 PCM2 種 (N2 と Ns+水) とプライマー塗布の有無を組み合わせる 4 つのパターンに分けている。付着応力-すべりの関係を図-8 に示す。図より、プライマー塗布を行った 2 パターン供試体は、すべりの始まる時の付着応力はプライマー塗布なしの供試体に比べ高い傾向が見える。しかし、各補修材の 2 パターンの供試体を比較すると、すべりが始まった後、プライマー塗布を行った 2 パターン供試体は、すべり発生後、鉄筋の付着抵抗がほとんどなく、すべりが進展したことがわかった。つまり、プライマー塗布を行うと、鉄筋と PCM との初期付着剛性は大きくなるが、最終的な付着強度は小さくなる。

図-9 に、打ち継ぎ界面にプライマー塗布有りの補修供試体 PN2-N, PW-N と供試体 C-N, N2-N の荷重-中央たわみ関係を示す。部材降伏までいずれの供試体もほぼ同様な挙動を示しているが、部材降伏後、Ns2 で補修を行った供試体 N2-N, PN2-N の挙動が健全の供試体 C-N に比べ若干低下しており、最大荷重も低くなることがわかった。供試体間での差異が見られないため、プライマー塗布の影響がほとんどないと

表-7 鉄筋の引抜試験要因

供試体名	補修材料	プライマーの有無	供試体名	補修材料	プライマーの有無
N2	N2	なし	PN2	N2	あり
W	Ns+水		PW	Ns+水	

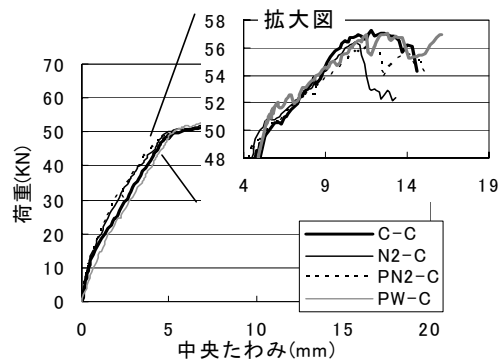


図-6 荷重-中央たわみ関係 3 (CFRP 補強)

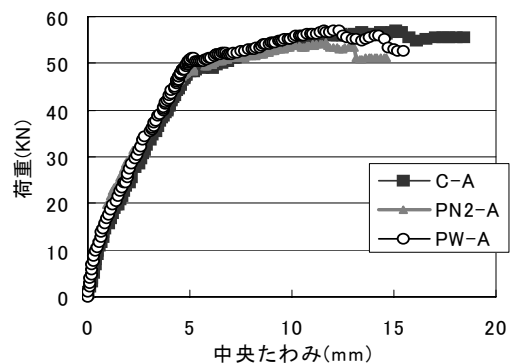


図-7 荷重-中央たわみ関係 4 (AFRP 補強)

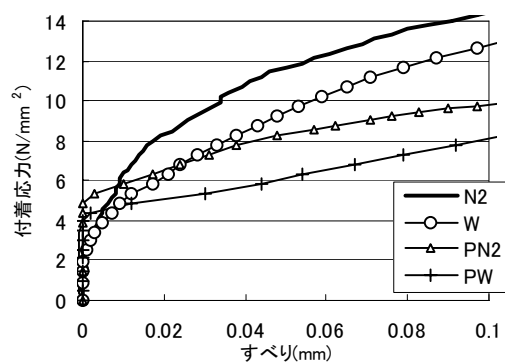


図-8 鉄筋の引抜試験結果

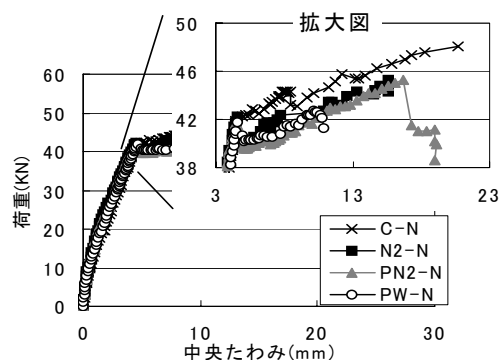


図-9 荷重-中央たわみ関係 5 (無補強)

考えられる。しかし、Ns2+水で補修を行った供試体 PW-N は部材降伏後の挙動が他の 3 つの供試体とかなり異なる。その 1 つの要因として、引抜試験結果から、鉄筋表面にプライマーを塗布すると、補修材 PCM(Ns+水)と鉄筋との付着が低下することが部材の耐荷性能に影響を与える可能性があると考えられる。

一方、表-6 より、CFRP 補強供試体 PW-C および AFRP 補強供試体 PW-A では、鉄筋と補修材との付着の低下による補強効果の低下が見受けられない。図-10 の供試体ひび割れ性状を観察すると、無補強供試体において、無補修供試体 C-N より補修供試体 PW-N はひび割れ数が少ない、終局時、供試体中央の一本のひび割れで破壊した特徴がある。また、CFRP 補強供試体において、供試体 PW-C はひび割れの本数が相対的に多く、ひび割れの分散性が高いことから、CFRP 補強により、供試体が拘束され、多数のひび割れを生じるため、ひび割れ幅が小さくなる。そして、ピーリング現象が起こりにくくなるとともに、シートが剥離しにくくなり、供試体の耐荷力が上がるものと考えられる。AFRP 補強供試体においても、同様な状況が見られた。しかし、PW 系の供試体の挙動を解明するためには、今後さらなる検討が必要である。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

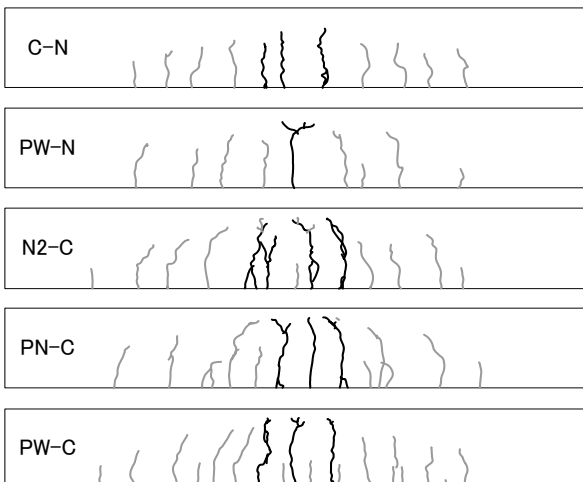


図-10 ひび割れ性状 2

- (1) 低弾性係数の PCM で補修を行うと、最大荷重および部材降伏後の剛性が低下するとともに、局所的な応力を生じることによるシートの剥離が早期に生じる可能性がある。
- (2) 高弾性係数の PCM を用いる断面修復の場合、補強効果における改善が認められた。
- (3) 高弾性係数の PCM で補修する際、シートの種類を問わず、ほぼ同様な結果となった。
- (4) プライマーを塗布すると、鉄筋と PCM との付着が弱くなる可能性があるため、実施工の場合、事前に付着試験による接着性能の評価およびプライマーの選択が重要である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、材料提供いただきましたコニシ（株）堀井久一氏、炭素繊維シートの引張試験にご協力いただきました日鉄コンポジット（株）小林朗氏に深く感謝いたします。また、実験に協力をいただいた本研究室の学部生野中秀一氏に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 梶田宏行ほか：断面修復を施した RC はりにおける炭素繊維シート補強の効果、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、第 5 巻、pp.73-80、2005.10
- 2) 全国上下水道エポキシ工事業協会：炭素繊維ライニング補強工法、1999.7
- 3) 阪神高速道路公団：CF シート用いた RC 床版補強要領（案）、pp.8-11、1999.3
- 4) 社団法人 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針、2000.7
- 5) 森川英典ほか：炭素繊維シート補強 RC はりのシートはく離特性の評価と分散ひび割れ型 FEM 解析への適用、土木学会論文集、No.802/V-69、pp.15-31、2005.11
- 6) 社団法人 土木学会：コンクリート標準示方書[規準編]、pp.199-202、2002