

炭素繊維プレートの定着特性および緊張工法による実橋への適用例

Anchoring characteristics of CFRP strips and application for an existing bridge with tensioned CFRP strip method

立石晶洋*, 小林朗*, 濱田譲**, 高橋輝光***, 安森浩***, 井上真澄****, 葛目和宏*****
A Tateishi, A Kobayashi, Y Hamada, T Takahashi, H Yasumori, M Inoue, K Kuzume

*工修, 日鉄コンポジット(株), 技術部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8)

**工博, ドービー建設工業(株), 技術センター (〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-16-6)

***工学, ドービー建設工業(株), 技術部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-16-6)

****工博, 立命館大学, COE 推進機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

*****工修, (株)国際建設技術研究所 (〒550-0005 大阪府大阪市西区西本町 1-7-7)

In order to evaluate the performance of both carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips and characteristics of anchoring devices which were used for the tensioned CFRP strip method, tensile tests were conducted. In the tests, the strength of several kinds of CFRP strips and the performance of anchoring devices were evaluated. The test results showed that CFRP strips has enough tensile strength and the anchoring devices are good enough. And also, application study of tensioned CFRP strip method to the bridge girders was introduced. In this application, on-site load test were conducted before and after the application. According to the test results, the tensioned CFRP strip method proved effective to reduce the deflection of the main girders, the stress in the reinforcing bars and crack widths.

Key Words : reinforcement, prestress, CFRP strip, Tensile test

キーワード: 補強, プレストレス, 炭素繊維プレート, 引張試験

1. はじめに

近年, 輪荷重の増加および重量化に伴い, 橋梁の床版, 桁などの劣化事例が多く見られる。橋梁の補修・補強工法として, 鋼板接着工法, 連続繊維シート接着工法, 上面増厚工法などが開発され, 供用されている。しかし, これらの工法では, 補強材は補強後に作用する活荷重に対してのみ荷重分担が可能であり, 既に劣化が進行し死荷重によるたわみが増加している橋梁に対しては, 補強量が多くなり適用が困難な場合がある。このような場合における補強工法としては, 外ケーブル工法などの部材へプレストレスを導入する緊張工法が有用ではあるが, 建築制限を受ける場合や強度の低いコンクリートを持つ部材への適用は困難である。

炭素繊維プレート緊張工法は, 高強度, 軽量で耐腐食性に優れた炭素繊維を用いて製造された炭素繊維プレートを緊張・定着し, 部材に接着する補強工法である。プレストレス導入による死荷重によるたわみと部材の剛性の回復, 平らな炭素繊維プレートを接着することにより直接ひび割れを拘束する効果もある。また, 補強材が非常に薄いので建築限界の制限を受けることがほとんどない。

本工法は, 鉄筋コンクリートの梁供試体を用いたプレストレス導入試験および静的曲げ載荷試験, 疲労曲げ載荷試験

試験¹⁾を実施し, 補強効果とコンクリートに対する安全性を確認し, 現在数橋での供用の実績を有する。本報では, 既往の研究^{1), 2)}で行われた炭素繊維プレートの定着特性を把握するための引張試験および導入緊張力の範囲を広げるための耐力を1.5倍増加させた炭素繊維プレートの引張試験, 実橋で供用例³⁾について示す。

2. 引張耐力 240 kN 級 CFRP 緊張材の開発

2.1 Case1 鋼管定着試験体の引張試験概要

引張試験は, 炭素繊維プレートの引張強度および定着具の安全性を確認するために行った¹⁾。

緊張材は, 高強度型炭素繊維と結合樹脂を引抜き成型により製造した炭素繊維プレートを使用した。炭素繊維プレートの仕様(理論値)を Table.1 に示す。プレートの定着

Table.1 Specifications of CFRP strip (theoretical values) in Case1

Width	(mm)	50
Thickness	(mm)	2
Volume fraction of fiber	(%)	62.2
Modulus of elasticity	(kN/mm ²)	148
Tensile strength	(N/mm ²)	3050

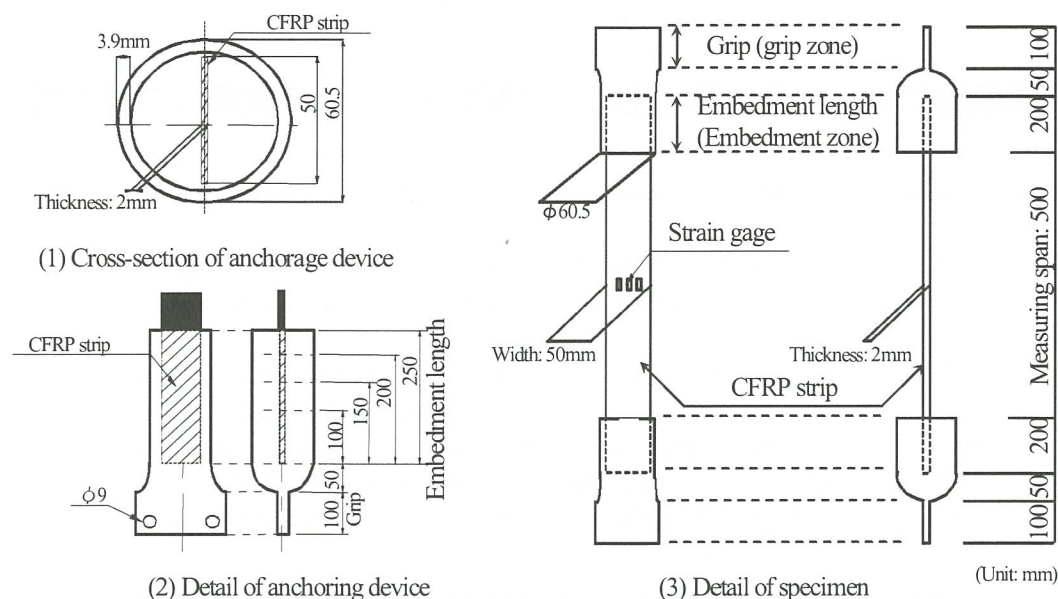


Fig.1 The specimen of tensile test (in Case1)

具は、圧力鋼管用炭素鋼鋼管を加工して製作した。定着具には規格膨張圧 30N/mm^2 (材齢 48 時間, 養生温度 20°C) の定着用膨張材を充填し、鋼管とプレートを一体化した。⁴⁾供試体は定着用膨張材の注入後、7 日間以上、恒温恒湿室 (温度 $20\pm 1^\circ\text{C}$, 湿度 $90\pm 5\%$) において気中養生し、その後引張試験を行った。

Fig.1 に、引張試験供試体の概要を示す。供試体の試験長は、プレート幅の 10 倍に相当する 500mm とした。軽量であるという連続繊維補強材の特徴を十分発揮させるためには、定着具も軽量化する必要がある。そこで、円形断面を有する定着部の長さを 100mm, 150mm, 200mm, 250mm の 4 水準とし、定着長が定着性能に及ぼす影響について検討した。

载荷試験は、供試体に偏心力が作用しないように、定着具の油圧装置つかみ部を試験機の上下のチャックに注意深く取り付けて実施した。ただし、定着用膨張材の膨張圧により油圧装置つかみ部をつかめない場合は、定着部をチャックで直接つかんで载荷した。測定項目は最大荷重および測定項目は最大荷重およびプレートひずみとし、目視により破壊状況を確認した。プレートひずみは、Fig.1 (3) に示すように、試験長中央の 3 ヶ所に一軸ひずみゲージを貼付して計測した。また、定着用膨張材の膨張状況を把握するために、定着用膨張材注入後から引張試験直前まで、定着具のひずみを計測した。

2.2 Case1 鋼管定着試験体の引張試験結果および考察

Table.2 に引張試験結果を示す。同じ定着長を有するプレートの最大荷重の平均値は、Table.1 に示す理論強度より算出した理論耐力に対する比率も示している。定着長 100mm, 150mm, 200mm の供試体は、全てプレートが定着具から抜出して破壊した。一方、定着長 250mm の供試体は、10 体中 8 体の供試体が片方もしくは両側の定着部

Table.2 Results of tensile tests (in Case1)

Specimen No.	Embedment length (mm)	Maximum load (kN)	Failure pattern
C10-1	100	136	S
C10-2	100	129	S
Average		132 (43%)	
C15-1	150	204	S
C15-2	150	182	S
Average		193 (63%)	
C20-1	200	254	S
C20-2	200	216	S
Average		235 (77%)	
C25-1#	250	245	F
C25-2#	250	269	F
C25-3#	250	265	F
C25-4	250	252	F
C25-5#	250	250	F
C25-6#	250	266	F
C25-7#	250	252	F
C25-8#	250	261	F
C25-9#	250	254	F
C25-10	250	259	F
Average		257 (84%)	

#: Directly gripping embedment zone of steel sleeve

Failure pattern S: Slipping of plate, F: Failure of plate

(): Maximum load/theoretical value (=305kN)

を直接チャックでつかんで試験を実施した。その結果、プレートの抜出しは観察されず、全てのプレートが破断して破壊した。最大荷重は定着長の増加と共に増加するものの、定着長 100mm および 150mm の場合、最大荷重は理論耐力よりかなり小さくなった。

Fig.2 に、各供試体の定着長と最大荷重の関係を示す。定着用膨張材を用いた定着具において抜出し破壊が生じ

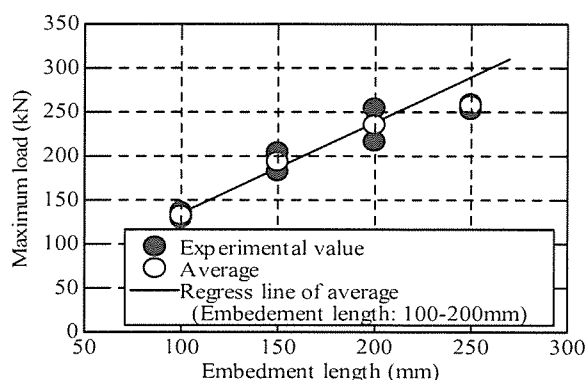


Fig.2 Relationship between embedment length and maximum load (in Case1)

Table.3 Specifications of CFRP strip (theoretical values) in Case2

Width	(mm)	50
Thickness	(mm)	2
Volume fraction of fiber	(%)	70
Modulus of elasticity	(kN/mm ²)	165
Tensile strength	(N/mm ²)	3395

ている場合、最大荷重と定着長の関係は、ほぼ直線で近似できることが報告されている。⁴⁾そこでFig.2には、抜出し破壊した定着長 100mm, 150mm, 200mm の供試体の最大荷重の平均値から最小二乗法で算定した回帰直線を定着長 250mm の範囲まで示している。定着長 250mm の供試体の最大荷重は、上述した回帰直線より外挿した最大荷重より全て小さくなった。これは、破壊形式が変化しているためである。定着長 250mm の供試体では、最大荷重の間に有意な差は認められなかった。したがって、定着長 250mm 以上の定着具を使用すれば、プレートの破壊形式は供試体のつかみ方に関係なくプレート破断となり、プレートの高強度を有効に活用できるものと考えられる。定着長 250mm 供試体の最大荷重の平均値は 257kN となった。また最大荷重の変動係数は 3.07% であり、最大荷重の平均値から標準偏差の 3 倍を減じて算定した保証耐力は 234kN となった。

また、炭素繊維プレートに貼付した 3 箇所の応力ひずみ関係より算出した弾性係数の平均値は、150kN/mm² となり、Table.1 の理論弾性係数 (=148 kN/mm²) とほぼ同じ値となった。

2.3 Case2 矩形定着体試験体の引張試験概要

定着具を円形断面から矩形断面にすることにより、緊張材と部材の距離が小さくなり、コンクリート部材のハツリ量もしくは緊張材の偏向角が小さくなり施工性、緊張ロスが少なくなる利点がある。本引張試験では、矩形断面を有する定着具を用いて引張試験を行った²⁾。

用いた炭素繊維プレートの仕様（理論値）を Table.3 に示す。炭素繊維プレートは、炭素繊維と結合樹脂を引抜き

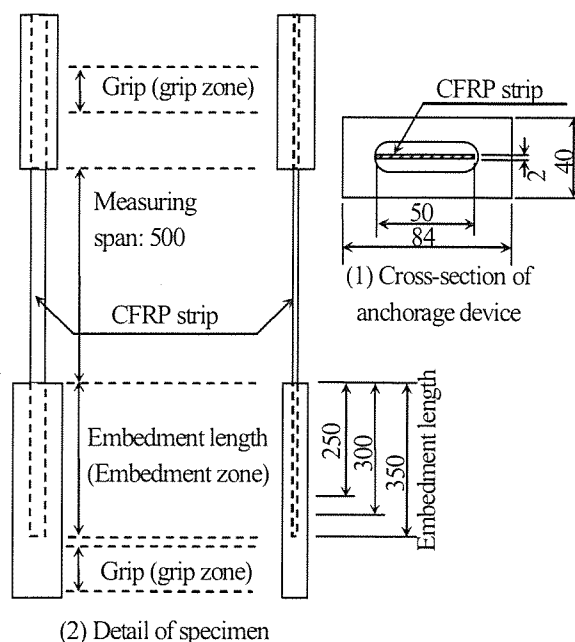


Fig.3 The specimen of tensile test (in Case1)

Table.4 Results of tensile tests (in Case2)

Embedment length (mm)	Maximum load (kN)	Modulus of elasticity (kN/mm ²)	Failure pattern
250	315	164	F
300	310	164	F
350	313	163	F

Average of five specimens

Failure pattern F: Failure of plate

成型により製造した緊張材である。

Fig.3 に引張試験供試体図を示す。また、炭素繊維プレートと定着具の結合材として独自に配合設計した膨張ペーストを用い、規格膨張圧を 10N/mm² 以上とした。Case1 を比べ膨張圧が低くしたため、炭素繊維プレートの表面には膨張ペーストとの付着を良好にする目的で珪砂を散布した。

実験変数は Case1 の実験同様定着長とし、緊張材の安全性を破断と考え、250mm, 300mm, 350mm とした。

引張試験は、Fig.3(2)に示す下側の定着具を定着部以外の位置をチャックでつかむことにより試験側とし、上側は定着部をチャックで直接つかんで行った。上側の定着具は、円形断面の定着具を用いた。

測定項目は、最大荷重と Case1 同様炭素繊維プレートの 3 箇所のひずみとした。

2.4 Case2 矩形定着体試験体の引張試験結果および考察

Table.4 に Case2 の引張試験結果を示す。最大耐力と弾性係数の値は、各変数 5 体の平均値を示している。定着長に関わらず、最大荷重および弾性係数は、ほぼ同程度の値を示し、全ての供試体で炭素繊維プレートが破断した。したがって、矩形定着体を用いた場合においても十分な定着性

Table.5 Specifications of CFRP strip (theoretical values)
in Case3

Width	(mm)	75
Thickness	(mm)	2
Volume fraction of fiber	(%)	66.5
Modulus of elasticity	(kN/mm ²)	156
Tensile strength	(N/mm ²)	3259

Table.6 Specifications of CFRP strip (theoretical values)
in Case4

Width	(mm)	75
Thickness	(mm)	3
Volume fraction of Carbon fiber	(%)	66.5
Modulus of elasticity	(kN/mm ²)	120
Tensile strength	(N/mm ²)	2435

能を有していると考えられる。

3. 引張耐力 360 kN 級の緊張材の開発

3.1 引張耐力 360 kN 級の緊張材引張試験概要

本節では、前述した Case1, 2 の炭素繊維プレートの 1.5 倍の引張耐力 360 kN を有する炭素繊維プレートの引張試験について示す。炭素繊維プレート緊張工法は、当初 50mm 幅 2mm 厚引張耐力 240kN の炭素繊維プレートを用いた緊張材の開発を行い、数橋の実績を持つ。しかし、緊張力が不足する場合もあるため、引張耐力を 1.5 倍の 360kN とした緊張材を開発した。

本引張試験では、2 種類の炭素繊維プレートを用いて行なった。1 つは炭素繊維と結合樹脂 (Case3)、もう一つは炭素繊維とその外層にガラス繊維マット、不織布を配置し、結合樹脂を含浸させ (Case4) 引抜き成型により製造した炭素繊維プレートを用いた。1.5 倍耐力の炭素繊維プレートは、幅を広くしたため引張力が幅方向に均等に作用しない可能性がある。そこで、Case4 の炭素繊維プレートでは、幅方向に応力伝達し、均等に引張力が作用することを目的に繊維をランダムに配置したガラス繊維マットを配置した。Table5, 6 に炭素繊維プレートの仕様 (理論値) をそれぞれ示す。Case3 の理論値は、炭素繊維の強度のみを考慮し結合樹脂を無視した。また Case4 では、炭素繊維とガラス繊維の強度のみ考慮し、不織布と結合樹脂を無視して算出した。

炭素繊維プレートの定着長は、供用時に用いている 350mm で引張試験を行った。引張試験の方法は Case2 と同様とし、供試体の試験長も Case1, 2 と同様に 500mm で行なった。

3.2 引張耐力 360 kN 級の緊張材引張試験結果と考察

Case3, 4 の引張試験結果をそれぞれ Table7, 8 に示す。Case3 では、全ての供試体においてプレート破断に至った。最大荷重の平均値の発現率は、84%であった。

Table.7 Results of tensile tests (in Case3)

specimen No.	Embedment length (mm)	Maximum load (kN)	Modulus of elasticity (kN/mm ²)	Failure pattern
350-1	350	427	—	F
350-2	350	419	167	F
350-3	350	424	—	F
350-4	350	384	154	F
350-5	350	401	160	F
Average		411 (84%)	160	

Failure pattern S: Slipping of plate, F: Failure of plate
(): Maximum load/theoretical value (=489kN)

Table.8 Results of tensile tests (in Case4)

specimen No.	Embedment length (mm)	Maximum load (kN)	Modulus of elasticity (kN/mm ²)	Failure pattern
350-1	350	489	127	S
350-2	350	493	114	F
350-3	350	443	125	F
350-4	350	497	112	F
350-5	350	507	127	F
Average		486 (89%)	121	

Failure pattern S: Slipping of plate, F: Failure of plate
(): Maximum load/theoretical value (=548kN)

一方 Case4 では 1 体プレートの拔出しによる破壊が見られた。しかし、他のプレート破断した供試体と比べ最大荷重に有意な差は見られなかった。また、最大荷重の平均値の発現率は 89%と Case3 に比べ高くなった。

また、弾性係数においては、Case3, 4 とともに理論値と同様の値となった。よって 1.5 倍耐力の炭素繊維プレートにおいても定着長 350mm での安全が確認された。

4. 実橋での適用例

本節では、前述 Case2 の引張試験において使用した緊張材を用いた炭素繊維プレート緊張接着工法で補強した例³⁾を示す。本適用例は、適用例だけでなく実橋において補強確認と安全性を確認した実橋載荷試験についても示す。

4.1 炭素繊維プレート緊張接着工法

本工法は、両端に鋼製定着体を定着した炭素繊維プレートの緊張材を緊張して定着体を、コンクリートにあらかじめ設置したベースプレートに機械的に定着し、同時に接着樹脂で炭素繊維プレートをコンクリート表面に接着する補強工法である。(Fig4)

本工法の長所は、プレストレス導入工法と同様に、プレストレスにより超過した荷重で発生した応力や変形を改善することが可能である。また、連続桁では不静定力を活用することで、上面の曲げモーメントを軽減し、桁上面の

補強が不要となる場合がある。また、緊張材によるプレストレスの導入量は有効時に約 140kN/本と小さいが、定着部に対する負荷が小さいため定着に伴う支圧、割裂、背面の引張応力に対する補強が基本的に不要である。CFRP プレートがコンクリート面に接着されているので、ひび割れの開口防止や終局曲げ耐力の向上が見込める。

4.2 工事概要

炭素繊維プレート緊張接着工法が適用された橋梁は、供用後 28 年経過した RC3 径間連続箱桁橋である。経年劣化

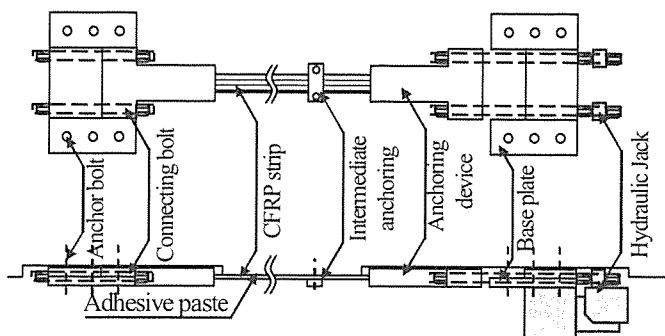


Fig.4 Tensioned CFRP strip Method

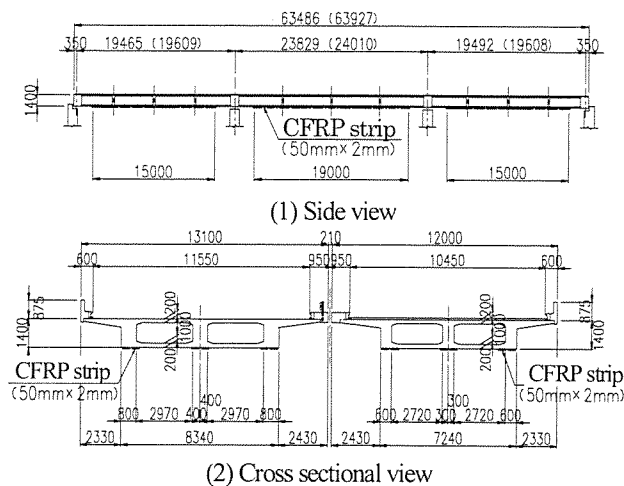


Fig.5 Allocation of CFRP strips

と近年の車両大型化に起因して、下床版に橋軸直角方向のクラックや漏水が多数発生していた。さらに交通車両による主桁のたわみも大きく、剛性低下が明らかであったため、耐荷力を向上するとともに、ひび割れを抑制して主桁の剛性を改善する必要があった。また、桁下に道路交差部があることによる建築限界、施工中の交通規制問題、強度の低いコンクリート部材への適用を満足する必要があった。

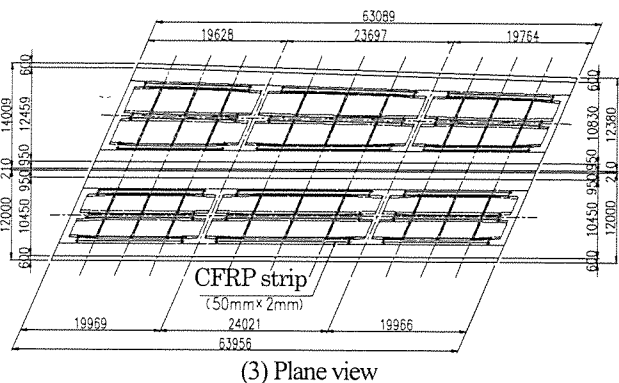
炭素繊維プレート緊張接着工法は、死荷重時からの応力や変形の改善で有効であり、本橋が抱える施工条件を満足し、経済性や工期短縮にも優れていることから採用された。

炭素繊維プレート緊張材の補強量は、死荷重と B 活荷重による曲げモーメントに、プレストレスによる軸力と偏心モーメントならびに不静定力を考慮し、鉄筋の引張応力度が許容値を満足するように決定した。

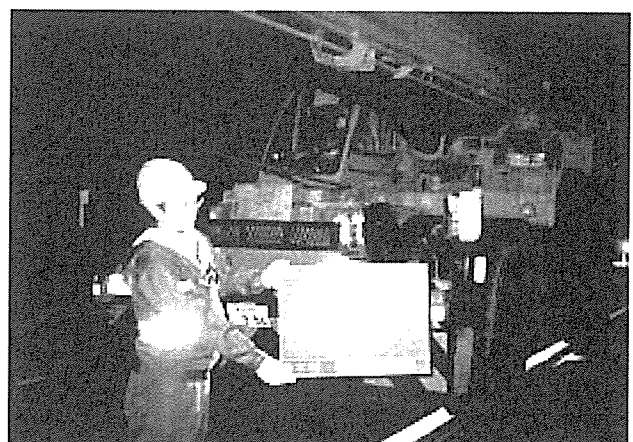
本橋では、炭素繊維プレート緊張材を各径間の主桁下縁に 6 本配置した。(Fig.5, photograph 1)

4.3 試験概要

本橋では、補強効果を確認する実橋載荷試験と炭素繊維プレート緊張材によるプレストレス導入効果ならびに定着部の安全性を確認するプレストレス導入試験を行った。



Photograph 1 Applied tensioned CFRP strip



Photograph 2 45-ton-weight vehicle

Table.9 Results of load test in center of the span

		Before reinforcing	After reinforcing
Stress of rebar	(N/mm ²)	9.8	7.8
Crack width	(mm)	0.226	0.188
Crack depth	(mm)	153	138
Deflection	(mm)	1.53	1.07

4.3.1 実橋載荷試験概要

実橋載荷試験は、正の曲げモーメントが最大になるように既知荷重車（45t ラフタークレーン、photograph 2）を支間中央に配置して載荷した。測定項目は、支間中央における橋軸方向の鉄筋のひずみ、コンクリートのひび割れ幅と深さ、たわみとした。測定は、炭素繊維プレート緊張材の補強前と補強後に行い結果を比較した。

4.3.2 実橋載荷試験結果および考察

Table.9 に載荷試験結果を示す。全て項目において改善が見られ、補強による効果が明らかとなった。特にたわみは、補強前と補強後で 1.53mm から 1.07mm に 30.1%減少しており、主桁剛性の改善は明らかである。この結果から炭素繊維プレート緊張工法が有効な補強工法であることが確認された。

4.3.3 プレストレス導入試験概要

プレストレス導入試験は、中ウエブに配置した炭素繊維プレート緊張材 2 本に対して実施した。炭素繊維プレート緊張材は、初期緊張力 160kN/本で緊張し、支間中央の鉄筋圧縮応力と定着部背面の橋軸方向のコンクリートのひずみを測定した。

4.3.4 プレストレス導入試験結果および考察

Table.10 に試験結果として、プレストレス導入による値の増分を示す。支間中央の鉄筋の圧縮応力は、2.4N/mm² となり FEM 解析値の 2.56N/mm² とほぼ一致した。これにより必要なプレストレスが導入されていることが確認された。

プレストレス導入後に定着部背面に発生したコンクリートの引張応力度は、最大で 0.44N/mm² であった。この計測値は、FEM 解析値の 1.4N/mm² やコンクリート標準示方書⁹⁾によるひび割れ発生限界の 1.9N/mm² と比較して、はるかに小さい値であり、ひび割れを誘発するような引張応力ではなかった。したがって、本工法の定着構造が、比較的強度が低く損傷したコンクリートに対して、十分安全なことを確認した。

Table.10 Results of prestress introducing test
(Increment value after introducing prestress)

	Observed	FEM
Compressive Stress of rebar* (N/mm ²)	2.4	2.56
Tensile stress of concrete** (N/mm ²)	0.44	1.44

*: Value in center of the span

**: Maximum value in vicinity of anchorage part

5. 結論

- 1) 50mm 幅 2mm 厚の炭素繊維プレートを用いた引張試験では、膨張定着材を利用した定着体を用いた定着長 250mm 以上の定着長をとることでプレート破断に至ることが分かった。
- 2) 75mm 幅の耐力 360kN 級の炭素繊維プレートにおいても新たに開発した定着体を用いた定着長 350mm とすることで十分な引張耐力を有することが確認された。また、ガラス繊維マットを炭素繊維の外層に配置した炭素繊維プレートでは、強度発現率が増加することが明らかになった。
- 3) 炭素繊維プレート緊張工法により補強した実橋において載荷試験を行った結果、主桁の剛性の改善が明らかとなった。また、プレストレス導入試験において定着部背面のコンクリートの安全性も確認できた。このことにより本工法が有効な補強工法であることを確認した。

謝辞

本研究の実験に協力していただいた立命館大学の学生の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 濱田譲, 井上真澄, 小林朗, 高木宣章, 児島孝之: 緊張した炭素繊維プレートによる既設コンクリート部材の補強に関する研究, 土木学会論文集 No.711/V-56, 27-44, 2002. 8.
- 2) 近藤哲也, 北出幸裕, 井上真澄, 高木宣章, 児島孝之: CFRP プレートの膨張ペーストによる定着特性, 第 59 回年次学術講演会講演概要集, 5-397, 2004.
- 3) 藤田真実, 松田義則, 高橋輝光, 井村正和, 駒田憲司: 調布高架橋のアウトプレート工法による補強工事と実橋載荷試験, 橋梁と基礎, 2004. 10.
- 4) 原田哲夫, 出光隆, Myo Khin, 福田孝一, 渡辺明: 定着用膨張材による連続繊維緊張材の定着方法に関する研究, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.77-90, 1999.
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 (構造性能照査編), 2002.