

V-1

炭素繊維による桁補強の検討

日本道路公団 正会員 安藤 博文
 日本道路公団 正会員 松田 哲夫
 日本道路公団 正会員 緒方 紀夫
 大林組 正会員 岡野 素之
 大林組 正会員 小嶋 克朗

1. まえがき

現在の道路橋では、過積載車などによる車重の増加に伴い、桁部材に設計値以上の荷重が載荷される場合があり、今後その補強が必要であると思われる。そこで、昨年度まで橋脚補強として検討してきた炭素繊維を上部工へ適用することを考えた。上部工では長期にわたり継続的かつ繰り返し、荷重が載荷されるため、炭素繊維の疲労荷重下での耐久性を検討する必要がある。本研究では、炭素繊維を貼り付けて補強した梁に対して曲げ疲労試験と、その後破壊までの静的載荷試験を実施した。

2. 試験概要

2.1 試験体

試験体の一覧を表-1に、形状寸法と配筋を図-1にそれぞれ示す。なお、No.2～5試験体はあらかじめ設計荷重までの曲げ載荷でひびわれを発生させた後、幅20cm、厚さ約0.1mmのシート状炭素繊維（炭素繊維素材断面積 0.23cm^2 ）を2層貼り付けて補強した。設計荷重とは、鉄筋が許容引張応力度（ $=1800\text{kgf/cm}^2$ ）に達する値とした。補強範囲は、当初両支点から10cm内側までの下面全域としたが、No.2試験体で静的載荷時に炭素繊維とコンクリートの界面で剥離したため、No.3～5試験体は貼り付け部の端部に炭素繊維で重ね部を設け、梁の部材端部まで補強範囲を拡張した。

表-1 試験体の一覧

No.	炭素纖維補強	補強前載荷	構造形式	載 荷		
1	—	—	PC	靜 的		
2	補 強	載 荷		疲 勞	設計荷重	
3					鉄筋降伏	
4					降伏×90%	
5			RC			

表-3 引張試験結果

種類	材質	降伏強度 (kgf/cm^2)	破断強度 (kgf/cm^2)	ヤング係数 $\times 10^6$
鉄筋	D10 (SD295)	3785	4533	1.98
	D19 (SD345)	4319	6210	1.94
	PC鋼材 C種1号	12100	13210	2.08
炭素繊維	PAN系	—	25000*	2.45*

*：炭素繊維素材自身の断面積（ $1.15\text{mm}^2/\text{cm} \cdot \text{ply}$ ）で計算

表-2 コンクリートの試験結果

設計基準強度 (kgf/cm^2)	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)
240	20	5
材令		
項目	28日	試験時
圧縮強度 (kgf/cm^2)	390	363～411
ヤング係数 (kgf/cm^2)	2.05×10^5	2.06×10^5
引張強度 (kgf/cm^2)	26.2	29.9～32.9

表-4 疲労載荷荷重の設定

No.	上限荷重		下限荷重	
	荷重 (t)	引張鉄筋応力度 (kgf/cm^2)	荷重 (t)	引張鉄筋応力度 (kgf/cm^2)
3	11.0	約1800	3.0	約0*
4	13.5	約3900		約0*
5	7.3	約3400		約600

*：プレストレスによる応力を考慮

2.2 使用材料

コンクリート、鉄筋、PC鋼材及び炭素繊維の材料試験結果を表-2、3にそれぞれ示す。

2.3 試験方法

疲労載荷：No.3～5試験体に関し3～4 Hzで200万回を目標に疲労載荷試験を実施した。疲労載荷は、試験体の主鉄筋の応力度に着目し、表-4に示すような上限、下限荷重で管理した。

静的載荷：疲労載荷終了後、一方向漸増繰り返し荷重で静的載荷試験を実施した。

また、測定項目は、荷重、変位、及びひずみとした。

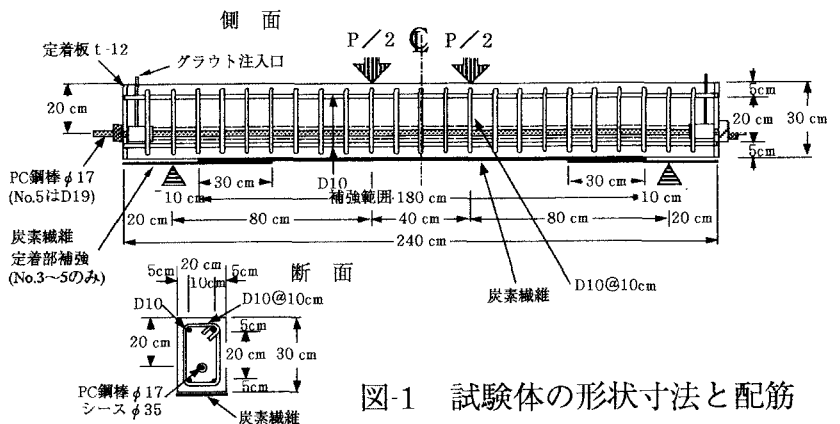


図-1 試験体の形状寸法と配筋

3. 試験結果と考察

試験結果の一覧を表-5に示す。計算値は材料試験の結果を用いて計算したものである。

3.1 破壊状況

疲労载荷：上限荷重を設計荷重としたNo.3、引張鉄筋降伏の90%としたNo.5試験体は、炭素繊維の剥離、破断等は見られなかった。一方、上限荷重を降伏荷重としたNo.4試験体は約2万8千回で炭素繊維が剥離し、荷重が低下した。No.4試験体はこの時点で疲労载荷を終了した。疲労载荷中におけるひびわれの様子は、無補強の試験体の場合、試験体下面のひびわれ幅が最も大きく開くのに対し、補強を行った試験体は下面のひびわれがほとんど開いていなかった。試験体下面全域に炭素繊維を貼り付けたことにより、試験体下面のコンクリートが拘束され、ひびわれの開きを抑制していると思われる。

静的载荷：No.2試験体は18.7tfまで载荷した段階で、試験体中央部分から左側にかけて、貼り付けた炭素繊維が剥離し荷重が大きく低下した。剥離した炭素繊維を見ると、下面のコンクリートが付着しており、下面のコンクリートが付着しており、付着界面におけるコンクリートの劣化状況や引張強度、せん断強度が炭素繊維の剥離を決める大きな要素になっていると思われる。また、No.3～5試験体については、いずれも炭素繊維が途中で剥離したが、炭素繊維が支点両端で定着されているため、いわゆるアンボンドの状態では荷重に抵抗し、最終的には炭素繊維が破断し破壊に至った。

表-5 試験結果の一覧

No.	疲労載荷			静的載荷				破壊状況
	上限荷重 (tf)		所見	降伏荷重 試験値 (tf)	試／計	最大荷重 試験値 (tf)	試／計	
				降伏荷重 計算値 (tf)		最大荷重 計算値 (tf)		
1	—	—	—	12.9 13.1	0.98	14.5 15.0	0.97	曲げ圧壊
2	—	—	—	14.5 15.1	0.96	18.7 20.5	0.91	18.7tfで剥離
3	11.0	設計荷重	異常なし	14.1 15.1	0.94	20.9 20.5	1.02	20.9tfで剥離発生・荷重低下・ 17.9tfで炭素繊維破断
4	13.5	降伏荷重	2.8万回で剥離	— 15.1	—	14.9 20.5	0.77	剥離発生の状態で静的載荷・ 14.9tfで炭素繊維破断
5	7.3	降伏の90%	異常なし	8.0 8.0	1.00	15.5 16.4	0.95	15.5tfで剥離発生・荷重低下・ 15.4tfで炭素繊維破断

3.2 変位性状

疲労载荷後の静的载荷試験における荷重と梁中央部での変位との関係を図-2に示す。No.3試験体は疲労载荷後も強度、変位ともにNo.1（無補強）を大きく上回っている。No.2（疲労载荷無し）と比較すると、ひびわれ発生荷重（7tf）から設計荷重付近（11tf）にかけて若干変位が大きくなっており、疲労による影響をうかがわせるが、炭素繊維の剥離はほぼ同じ変位で起きており、最大荷重値もほぼ同等であることから、問題は無いと思われる。No.5（RC）は最大荷重に達する少し前から炭素繊維の剥離が発生したが急激な荷重の低下も見られず、最大荷重は計算値とほぼ同等であり、終局変位も伸びている。

3.3 ひずみ性状

図-4にNo.3試験体における静的载荷時の梁中央断面でのひずみ分布を示す。疲労载荷後も、ひずみはほぼ平面保持の仮定が成り立っており、荷重の低い段階から炭素繊維が荷重を負担していることがわかる。

4. まとめ

以上の結果より、本試験の範囲内において、炭素繊維は実用レベルでの損傷はみられず、補強材として有効であり、疲労試験後も補強効果を期待できるといえる。また、部材の強度は従来からの計算手法（RC換算）で推定できる。今後、試験中に発生した剥離に対する検討や、有効な端部の定着方法等の検討を行う予定である。

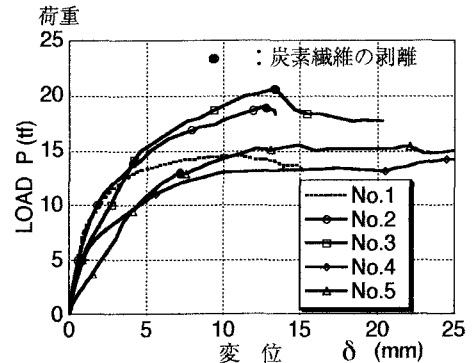


図-2 荷重-変位関係

はり上面からの距離

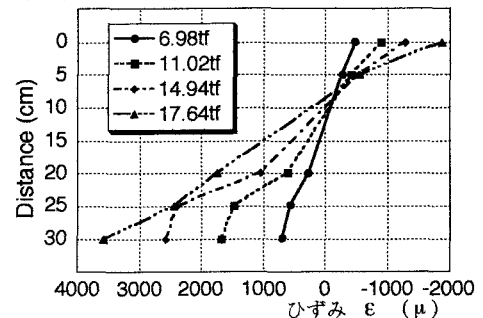


図-3 断面のひずみ分布 (No.3：静的)