

PC 道路橋への新素材の適用について

建設省土木研究所構造橋梁部 橋梁研究室 室長 藤原 稔

1. はじめに

塩害問題の顕在化を契機にコンクリート構造物の耐久性について関心が高まっている。こうした中、炭素繊維，アラミド繊維，ガラス繊維等の新素材からなる緊張材（以下、FRP 緊張材と略）の PC 構造物への利用に関する研究開発が活発となっている。

本文では、炭素繊維からなる緊張材を適用して建設された PC スラブ橋である新宮橋の概要を含め、FRP 緊張材の特性，FRP 緊張材を用いた PC 部材の耐荷特性等について紹介する。

2. 塩害対策と FRP 緊張材の利用

コンクリート橋の塩害による劣化損傷が昭和 56 年頃から北海道，東北，北陸地方の日本海沿岸地域および沖縄県を中心に顕在化したため、昭和 59 年 2 月には「道路橋の塩害対策指針（案）」が建設省より通達された。また、昭和 60 年度から 3 か年にわたって実施された建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」において、コンクリート構造物の塩害に関する検討が行われ、その成果物として「沿岸土木構造物の設計・施工指針（案）」、「塩害を受けた土木構造物の補修指針（案）」等が作成されている。

コンクリート構造物の塩害による劣化損傷は、コンクリート表面のひびわれやはくり，錆汁等の形で発見される。これらの劣化損傷はコンクリート中に塩分が浸入蓄積し、それによって鋼材が腐食するために生じる。したがって、これらの劣化損傷を防ぐには、鋼材に達する塩分を少なくしたり、鋼材自身を腐食しにくいものにしたたり、鋼材の代りに腐食を生じない材料を用いたりすることが必要となる。現在、コンクリート道路橋の塩害に対する対策としては、「道路橋の塩害対策指針（案）」に示されている、鋼材のかぶりの増加，コンクリートの品質の向上，あるいは塗装鉄筋の使用やコンクリート塗装が用いられている。これらの方法は、鋼材に達する塩分量の抑制を図るもので、適切に講じられた場合には塩害による劣化損傷を抑制できるものと期待されている。

一方、近年、PC 構造物の緊張材に FRP を利用するための技術の研究開発が進められている。FRP 緊張材は、鋼材の欠点である腐食を生じないことに加えて、従来の鋼材からなる緊張材と同等もしくはそれ以上の強度を有し、また軽量である等の特徴を有している。このような FRP 緊張材の特徴に着目し、石川県では、昭和 63 年度に炭素繊維からなる FRP 緊張材（以下、GFRP と略）を用いた PC スラブ橋である新宮橋の建設を国内で最初に行っている。また、建設省土木研究所では、平成元年度から 4 年度までの予定で建設省総合技術開発プロジェクト「建設事業への新素材・新材料の利用技術の開発」の一環として、PC 道路橋へ FRP 緊張材を利用するための検討を民間会社 10 社と共同で

進めている。

3. FRP 緊張材の開発過程

FRPの開発は、第2次世界大戦中に米国で軍用として開発されたガラス繊維からなるFRP(以下、GFRPと略)が最初であるとされている。これは、ガラス繊維を不飽和ポリエステル樹脂と複合化したものであった。

1960年以降になって、各種高強度繊維の開発と併せて高性能樹脂が開発され、FRPは飛躍的に多岐にわたる分野で実用化され始めた。今日では、スポーツ用具、レジャー用品、航空・宇宙分野等に広く利用されている。建設分野では、まずガラスの短繊維等をモルタルまたはコンクリートに混入した繊維補強コンクリートの実用化がなされ、その後カーテンウォール等のプレキャストコンクリート部材に用いられている。また、鉄筋の代替えとしてメッシュの形状で成形されたFRP材が実用化されており、トンネルの被覆補強材等に利用されている。

FRPをPC構造物の緊張材として利用する研究は、GFRPを対象に、1950年以降、米国、ソ連および英国で始められた。これは、当時においてGFRPがPC鋼材の2倍以上の強度を有していたからである。しかし、このGFRPについては、緊張材として用いた場合に時間の経過とともに緊張力がかなり減少するために、実用化には至らなかった。その後、1970年代になって英国で等断面のFRPを一定の張力を加えつつ線材に成形するプルトルージョン方式が開発された。FRP緊張材の実用化が可能となったのはこの方法により時間経過に伴う緊張力の減少が大幅に改善されたところが大である。

わが国では、塩害によるコンクリート構造物の劣化損傷に対する対策の一つとして、東京大学生産技術研究所を中心にFRP緊張材の本格的な研究が1980年以降始められている。その後、リニアモーターカーの高架橋や海洋構造物等への利用の期待も加わり、FRP緊張材の研究が活発に行なわれるようになってきている。

現在、FRP緊張材の研究開発は、炭素繊維、アラミド繊維およびガラス繊維を対象としたものが主流をなしている。これらの繊維からなるFRP緊張材の形状についてはストランド状、組紐状、ロッド状、異形ロッド状等があり、また各々のFRP緊張材に適した定着具の開発が進められている。

4. FRP 緊張材の材料特性

繊維を多数本束ね、樹脂等の結合材によって成形されるFRP緊張材の力学的特性は、繊維の性質、結合材の性質や容積混入率、緊張材の形状等によって、表-1に示すように大きく異なる¹⁾。図-1に代表的なFRP緊張材の応力-ひずみ関係を示す²⁾。その特性はいずれも直線的で、それぞれの引張強度はGFRPが150 kgf/mm²程度とPC鋼材に比べて若干小さいが、CFRPおよびAFRP(アラミド繊維からなるFRPの略称)では200 kgf/mm²程度以上と大きな値を示している。しかし、破断時の伸びはCFRPで2.0%程度、AFRPおよびGFRPで3.0~6.0%とPC鋼材のような伸びは期

待できない。また、弾性係数はGFRPおよびAFRPでPC鋼材の1/4～1/5程度、CFRPではPC鋼材の2/3から1/2程度の値である。

FRPの力学的特性は温度によってかなり変化
する。弾性係数については、いずれのFRPも温度が低くなるにつれて大きくなり、逆に温度の上昇に比例して低くなる傾向がある。引張強度については、AFRPおよびGFRPでは低温(-10℃)下において、それぞれ常温(20℃)での値に対して約25%および約10%大きくなり、逆に温度が上昇(60℃)すると、いずれも約10%小さくなる。CFRPの場合はやや異なる傾向を示し、常温での強度が最も大きく、-10℃で約10%、60℃で約20%それぞれ低下する。これらのFRPは、熱硬化性樹脂を結合材として使用したものであるが、温度依存性は結合材よりも繊維自体の特性によると考えられている³⁾。

PC緊張材としての重要な特性の一つにリラクセーション率がある。初期荷重をそれぞれFRP緊張材の引張強度の70～80%とした常温時の純リラクセーション率の計測結果によると、純リラクセーション率と時間の関係(対数表示)は直線的であり、この関係を30年後まで拡張して適用できると仮定した場合の純リラクセーション率は、AFRP、CFRPのいずれの場合でも14%程度になると報告されている³⁾。一般のPC鋼棒の純リラクセーション率が7%程度、PC鋼線の場合は15%程度であるので、FRP緊張材の純リラクセーションはPC鋼線とほぼ同じでPC鋼棒の2倍程度である。

5. FRP緊張材を用いたPC部材の耐荷特性

図-2は、静的な曲げ載荷試験により得られたCFRP緊張材を用いたPCげたの荷重-たわみ関係を示したものである。供試体は、緊張材として後述する新宮橋で使用されたCFRP(φ12.5)を用いたもの(以下、CFRPげたと略)と、PC鋼より線(φ12.4, SWPR7A)を使用したもの(以下、Sげたと略)の2体であり、いずれも新

表-1 各種FRP緊張材の力学的特性

緊張材の名称	AFRP	AFRP	CFRP	CFRP	PC鋼線	PC鋼
	ロッド状 (A社製)	ロッド状 (B社製)	ロッド状	ストランド状		ストランド状
呼径(mm)	8	8	8	12.4	7	12.4
実径(mm)	7.8	8.04	7.9	12.2	—	—
断面積(mm ²)	47.8	50.8	49.0	93.9	38.48	92.9
比重(g/cm ³)	64.5	65.1	76.9	144.0	302.2	729.0
比重大	1.35	1.28	1.57	1.53	7.85	7.85
強度(kg/mm ²) ¹⁾	159	147	186	126	165	175
破断荷重(kg) ¹⁾	7600	7400	9100	11800	6350	16300
弾性係数(kg/mm ²) ¹⁾	8250	5570	15150	10700	20400	19800
破断時の伸び(%) ¹⁾	1.9	2.6	1.2	1.1	4.5以上	6.5
実用強度(kg/mm ²)	146	138	153	112	165	175
実用破断荷重(kg)	7000	7000	7500	10500	6350	16300

1) 各緊張材にテーパー型、クサビ型(ロッド状)、樹脂充填型(ストランド状)の3種の定荷具を装着し測定した値(室温にて測定)

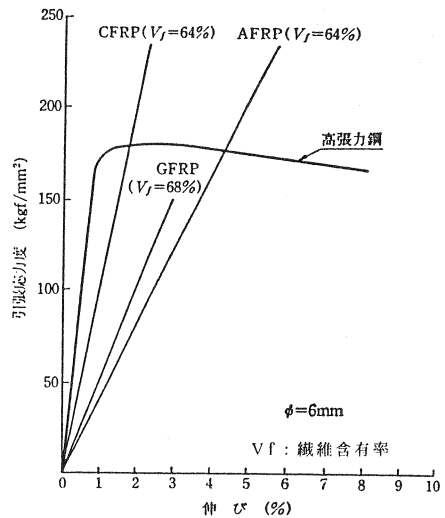


図-1 代表的なFRP緊張材の応力-ひずみ関係

宮橋の実げたの形状・寸法と同一であり、けた高が0.325m、けた長が6.06mのI断面のプレテンションげたである。載荷試験では供試体を単純支持し、支間中央から各0.5m離れた2点に静的に集中荷重を加えている。CFRPげたは、Sげたとほぼ同様の荷重-たわみ曲線を示しており、曲げひびわれが発生するまで直線的な荷重-たわみ関係であり、その後、たわみの増加が大きくなっている。表-2に、それぞれの供試体のひびわれ発生荷重と破壊荷重を示す。

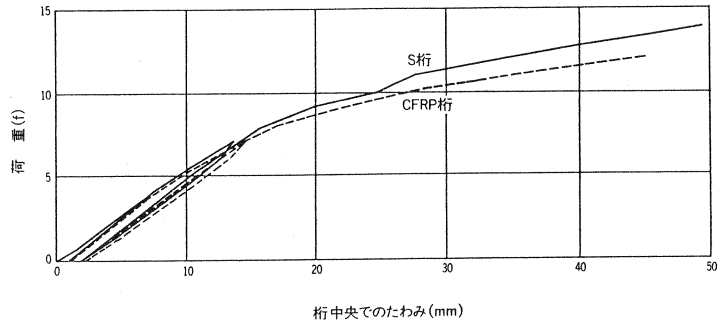


図-2 CFRPげた等の荷重-たわみ関係(けた中央)

表-2 CFRPげた等のひびわれ荷重と破壊荷重 (単位: kgf)

荷重	CFRP げた			S げた		
	実測値 P_m	理論値 P_t	P_m/P_t	実測値 P_m	理論値 P_t	P_m/P_t
ひびわれ荷重	7,200	6,970	1.03	9,190	6,480	1.40
破壊荷重	13,500	13,390	1.01	16,400	16,350	1.00

ひびわれ発生荷重の理論値は、コンクリートの曲げ引張強度にけた下縁の有効プレストレスを加えた値が荷重によるけた下縁の引張応力度に達した時に曲げひびわれが生じるとして求めたものである。また、破壊荷重の理論値は、「道路橋示方書Ⅲ コンクリート橋編」に示される方法に基づき、緊張材とコンクリートが一体として荷重に抵抗するとして求めたものである。Sげたのひびわれ発生荷重については、実測値が理論値を40%程度上回っているが、CFRPげたのひびわれ発生荷重ならびにSげたおよびCFRPげたの破壊荷重については、理論値と実測値がほぼ一致している。

このように、CFRPげたは通常のPCげたと同様な荷重-たわみ関係を有するとともに、通常のPCげたに用いられる方法で曲げひびわれ発生荷重および破壊荷重を求められることが理解される。

このほかでは、AFRP緊張材を用いたプレテンションPCばりの単調載荷実験の結果が報告されている⁴⁾。使用されたAFRP緊張材は組紐状に編まれたもので、付着性能の向上が図られている。この実験によって、AFRP緊張材を用いたPCげたにおいても、その破壊耐力は従来から用いられているPC鋼材を使用したPC部材に対する方法で精度よく計算できることが理解されている。

6. CFRP緊張材を用いたPCスラブ橋である新宮橋の概要

新宮橋は、一般国道249号の石川県羽咋郡富来町において旧橋(RCスラブ橋)の架替に伴い架設されたものである。この橋の架設地点(図-3参照)は、日本海に面した冬期におい

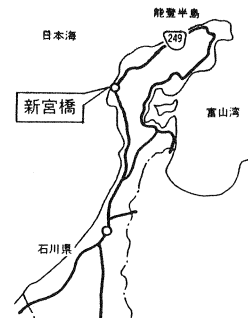


図-3 新宮橋の架設地点

て北西の季節風が強い位置である。このため、旧橋は鉄筋の腐食が生じコンクリートのはくりやひびわれが生じていた。

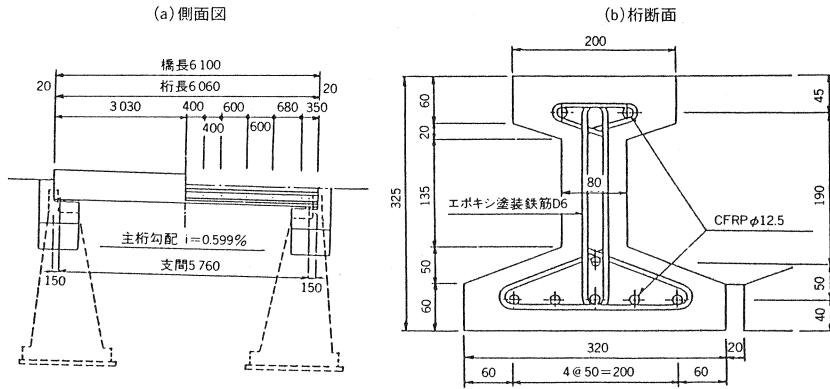


図-4に、 図-4 新宮橋の概要とけたの形状寸法 (mm)

新宮橋の諸元およびけたの断面を示す。橋格は一等橋であり、支間および幅員はそれぞれ5.76mおよび7.0mである。橋梁形式はプレテンション方式PCスラブ橋であり、その建設では、直径12.5mmで7本よりのCFRP緊張材が配置されたI断面のけたが24本用いられている。なお、主桁のスターラップには塩害対策として、直径6mmのエポキシ塗装鉄筋が使用されている。

表-3に、新宮橋の建設で使用されたCFRP緊張材の設計用諸値を示す。これらの諸値は、引張強度、リラクセーション等に関する試験の結果およびそれらの試験条件が考慮されるとともに、新宮橋が国内で最初のCFRP緊張材の適用例であることが考慮され、かなり安全側に設定されている。同表には、参考のため、「道路橋示方書I共通編」において規定されているPC鋼より線(SWPR7A)の設計用諸値を示している。なお、CFRP緊張材の線膨張係数の設計用値は $0.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ であり、温度変化によって緊張材に対して有効引張応力度の2~3%、コンクリートに対しては5kg/cm²程度の拘束応力が生じることになるため、新宮橋の設計計算においてこれらの拘束応力が考慮されている。

表-3 新宮橋の建設で使用されたCFRP緊張材の設計用諸値

項目		単位	CFRP緊張材	PC鋼より線
許容引張応力	プレストレッシング中	-	0.6σ _{pu}	0.8σ _{pu} or 0.9σ _{py}
		kgf	8,400	12,150
		kgf/mm ²	110	135
引張応力	プレストレッシング直後	-	0.55σ _{pu}	0.7σ _{pu} or 0.85σ _{py}
		kgf	7,700	11,410
		kgf/mm ²	101	127
使用状態(設計荷重作用下)		-	0.45σ _{pu}	0.6σ _{pu} or 0.75σ _{py}
		kgf	6,300	9,780
		kgf/mm ²	83	105
弾性係数	kgf/mm ²	1.4×10^4	2.0×10^4	
ポアソン比	-	-	0.3	
熱膨張係数	/°C	0.0×10^{-5}	10.0×10^{-5}	
見かけのリラクセーション率	%	5.0	5.0	

7. あとがき

以上、石川県でCFRP緊張材を適用して建設されたPCスラブ橋である新宮橋の概要を含め、FRP緊張材の特性、FRP緊張材を用いたPC部材の耐荷特性等について紹介した。既にFRP緊張材の材料特性やこれを用いたPC部材の耐荷特性についてはかなり

明確になってきているが、今後、①FRP緊張材を用いたPC部材のせん断力に対する特性，②ポストテンション方式PC部材にFRP緊張材を用いる場合の定着方法，③FRP緊張材の優れた耐腐食性を活かしてこれをアンボンドケーブルとして用いる場合のその疲労強度特性，④FRP緊張材の応力ひずみ関係を考慮したPC部材の設計手法，等の把握あるいは開発が主要な課題として挙げられる。現在、本文で述べたようにPC構造物へのFRP緊張材の利用に関する研究開発が活発となっており、これらの課題が解決されPC橋をはじめとする土木構造物へのその実用化が図られるものと期待される。本文が、PC構造物へのFRP緊張材の適用に関する今後の研究開発の参考となれば幸いである。

【参考文献】

- 1) 片脇，西崎：PC構造物への適用に関する研究，プレストレストコンクリート，
V o l . 3 0 , N o . 5 , S e p t . 1 9 8 8
- 2) 小林：PCと新材料，プレストレストコンクリート，V o l . 3 0 , N o . 1 ,
J a n . 1 9 8 8
- 3) 小林，魚本，趙：FRP緊張材を用いたプレストレストコンクリート構造，
プレストレストコンクリート，V o l . 3 0 , N o . 5 , S e p t . 1 9 8 8
- 4) 三上，林，田村：組紐状AFRPロッドのPCプレテンション部材への適用に関する
基礎的研究，プレストレストコンクリート，V o l . 3 0 , N o . 5 ,
S e p t . 1 9 8 8