

繊維強化ポリマー (FRP) のコンクリート構造物への適用に関する設計・施工指針について

睦好 宏史*1・村田 慎*2

RC および PC 構造物においては、経年劣化や疲労などによる構造物の性能低下が顕在化しつつあり、既設コンクリート橋の更新や補修・補強がますます増大していくことが考えられる。しかしながら、塩化物イオンによる環境作用が大きい箇所や接合部などでは鋼材腐食が発生することが懸念されている。

プレストレストコンクリート工学会では、「更新用プレキャスト PC 床版技術指針」において、鋼材位置での塩化物イオン濃度が高く鋼材が腐食するおそれがある構造物は、繊維強化ポリマー (FRP: Fiber Reinforced Polymer) を使用する必要があることを明記しており、この材料を使用する場合は、土木学会の「連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針 (案)」(コンクリートライブラリー第 88 号、1996 年) を参照することとなっている。しかしながら、当該指針が発刊されてから 20 年以上経過していること、繊維強化ポリマーの研究開発・技術が当時から進展していることなどから、新たな知見を取り入れた指針を整備する必要性が増してきている。このような情勢に鑑み、本工学会では繊維メーカー 5 社からの委託を受け、「繊維強化ポリマーのコンクリート構造物への適用に関する委員会」を 2017 年に設置し、指針の作成活動を行ってきた。本指針は、24 年前に刊行された土木学会の指針に基づいて、わが国および欧米の最新の研究成果および本工学会から刊行された「コンクリート構造技術規準 - 性能創造による設計・施工・保全 -」を新たに取り入れたものである。本文は本指針の概要について述べるものである。

キーワード：プレストレストコンクリート構造物、繊維強化ポリマー、設計、保全

1. はじめに

炭素、アラミド、ガラス、バサルト繊維に樹脂を含浸させて硬化した補強材 (以下、繊維強化ポリマーまたは FRP (Fiber Reinforced Polymer) という) は建設分野において、1990 年代に登場し、多くの研究開発が行われるとともに、実コンクリート構造物にも適用されてきた。繊維強化ポリマーは鋼材と比較して高強度、軽量、腐食しないなどの利点を有している。当時、鉄筋あるいは PC 鋼材の腐食によるコンクリート構造物の耐久性が大きな問題となっていた。このことから、繊維強化ポリマーは鉄筋あるいは PC 鋼材に替わる補強材として注目を集めてきた。1996 年に土木学会において、「連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針 (案)」¹⁾ (以下、「土木学会指針」という) が刊行された。土木学会指針は繊維強化ポリマーをコンクリート構造物に適用するための設計・施工法および試験法を示したもので、世界で初めての指針であった。その後、ACI (アメリカコンクリート工学会) から 2001 年に “Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars” が、また fib (国際コンクリート連合) から 2007 年に fib Bulletin 40 “FRP Reinforcement in RC Structures” がそれぞれ出版され、その活動は今日まで活発に行われている。一方、わが国では上述した土木学会指針以降は改訂作業は行われておらず、24 年前に作成された土木学会指針が現在でも使用されているのが現状で

ある。

2017 年に刊行された道路橋示方書 - I 共通編 - の 6 章 (橋の耐久性に関する基本的事項と照査) の 6.2 (耐久性確保の方法と照査) では、腐食が生じない材料の使用が明記されている。また、高速道路の大規模更新にプレキャスト PC 床版が用いられているが、鋼材位置での塩化物イオン濃度が高く、鋼材が腐食するおそれがある場合は、炭素繊維やアラミド繊維を使用した繊維強化ポリマーを使用するものと規定している (更新用プレキャスト PC 床版技術指針、2018 年、プレストレストコンクリート工学会 (以下、「PC 工学会」という))。

以上のように、近年コンクリート構造物の耐久性を向上させる目的で、腐食が生じない繊維強化ポリマーを鉄筋あるいは PC 鋼材の代替材料として適用する動きが再燃してきている。今回刊行された「繊維強化ポリマー (FRP) のコンクリート構造物への適用に関する設計・施工指針」(以下、本指針という) は、24 年前に刊行された土木学会指針に基づいて、わが国および欧米の最新の研究成果および本工学会の関係規準類を新たに取り入れたものである。

本文は本指針の概要について述べるものである。

2. 委員会の構成

本委員会は、委員長 1 名、副委員長 1 名、委員および委員兼幹事 20 名、委託委員 5 名からなり、表 - 1 に示す構成となっている。

*1 Hiroshi MUTSUYOSHI : 埼玉大学名誉教授・客員教授

*2 Makoto MURATA : 八千代エンジニアリング(株) 事業統括本部 海外事業部 交通基盤部

表 - 1 委員会の構成

役 職	氏 名	所 属
委 員 長	睦好 宏史	埼玉大学名誉教授・客員教授
副 委 員 長	熊谷紳一郎	中日本高速技術マーケティング(株)
委 員	齊藤 成彦	山梨大学大学院 教授
委 員	服部 篤史	京都大学大学院 准教授
委 員	原田 哲夫	長崎大学大学院 教授
委 員	牧 剛史	埼玉大学大学院 教授
委 員	渡辺 博志	(国研)土木研究所
委 員	亀井 与志	(株)建設技術研究所
委 員	安里 俊則	西日本高速道路(株)
委 員	新井 恵一	東日本高速道路(株)
委 員	柴崎 晃	(株)高速道路総合技術研究所
委 員	角田 敦	(一社)強化プラスチック協会
委員兼幹事長	村田 慎	八千代エンジニアリング(株)
委員兼幹事	内堀 裕之	三井住友建設(株)
委員兼幹事	大山 博明	(株)ピーエス三菱
委員兼幹事	酒井 秀昭	中日本高速道路(株)
委員兼幹事	國富 康志	(株)安部日鋼工業
委員兼幹事	左東 有次	(株)富士ビー・エス
委員兼幹事	星加 益朗	(株)大林組
委員兼幹事	村田 裕志	大成建設(株)
委員兼幹事	渡瀬 博	オリエンタル白石(株)
委員兼幹事	渡邊 有寿	鹿島建設(株)
委員(委託側)	岡村 脩平	帝人(株)
委員(委託側)	幸田 英司	東京製綱(株)
委員(委託側)	荒添 正棋	日鉄ケミカル & マテリアル(株)
委員(委託側)	近藤 真一	ファイベックス(株)
委員(委託側)	高見 肇	樋屋ティスコ(株)

旧委員：芦塚憲一郎：西日本高速道路(株)
 豊田 雄介：西日本高速道路(株)
 長尾 千瑛：(株)高速道路総合技術研究所

3. 本指針の適用範囲と他規準との関係

本指針は、FRP を補強材、または緊張材として用いたコンクリート構造物、PC 構造物の設計、施工および保全に適用する。なお、本指針で取り扱う FRP は炭素、アラミド、バサルト各繊維を樹脂で含浸させた棒材である。

PC 工学会では、図 - 1 に示すように、近年の PC 技術の急速な発展に対応して各種の構造物や構造形式の規準化を進めてきた。2019 年に「コンクリート構造技術規準」²⁾ (改訂版) を発刊し、コンクリート構造物のライフサイクルと性能に関して包括する基本的な規準を定めている。また、2015 年に「PC 構造物耐久化ガイドライン」³⁾ にて PC 構造物の耐久化および標準的な保全を行うにあたっての指針を示した。

本指針はこれらの規準、ガイドラインを上位として、FRP という新材料を用いたコンクリート構造物および PC 構造物の設計、施工、保全を行ううえでの指針として作成された。

コンクリート構造技術規準 (2019.10 月改定)

PC 構造物高耐久化ガイドライン

[構造系を主とした各論]

- ・複合橋設計施工規準
 - ・外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工規準
 - ・PC 斜張橋・エクストラードード橋設計施工規準
- など

[保全を主とした各論]

- ・更新用プレキャスト PC 床版技術指針
 - ・プレキャスト PC 床版による道路橋更新設計施工要領
- など

[材料を主とした各論]

- ・高強度コンクリートを用いた PC 構造物の設計施工規準
 - ・高強度鉄筋緊張 PRC 構造設計指針 (案)・同解説
 - ・繊維強化ポリマー (FRP) のコンクリート構造物への適用に関する設計・施工指針
- など

図 - 1 PC 工学会発刊の主な規準との関係

4. 本指針の概要

4.1 指針の構成

本指針は土木学会指針を基に、前項に示した PC 工学会の上位規準であるコンクリート構造技術規準の思想を踏まえた構成としている。

また、本指針では設計者および管理者向けの有益な情報を具体的に提供するため、本編以外に参考資料として ① FRP 適用が想定される構造物を対象にした試設計および本結果を基にしたライフサイクルコスト (以下、LCC という)、② FRP 材料に対する品質規格・性能試験、③ 繊維、樹脂の組合せが異なる各 FRP 材料の具体的な材料特性・構造細目・施工事例などを掲載している。

本指針の章構成を表 - 2 に示す。

表 - 2 本指針の構成

章番号	タイトル
1 章	総則
2 章	設計、施工、保全の基本事項
3 章	材料
4 章	作用
5 章	性能照査
6 章	終局限界状態に対する検討
7 章	供用限界状態に対する検討
8 章	疲労限界状態に対する検討
9 章	耐久性に関する検討
10 章	耐震に関する検討
11 章	構造細目
12 章	施工
13 章	保全
参考資料 1 章	試設計例 (※ LCC 含む)
参考資料 2 章	品質規格・試験法
参考資料 3 章	技術資料 (※ 5 つの FRP 材料を掲載)

4.2 本指針の概要

(1) 1章 総則

1章では、適用の範囲、設計の基本理念、構造物の要求事項、用語の定義、記号、関連規準について記述している。本指針の適用範囲として、土木学会指針と同様に鉄筋やPC鋼材の一部もしくは全体をFRPに置き換えたコンクリート構造物を対象としている。

(2) 2章 設計, 施工, 保全の基本事項

2章では、本工学会の上位規準に準じた設計、施工、保全の基本事項として、設計供用期間のほか性能照査の方法などについて記述している。

(3) 3章 材料

3章では、コンクリート構造物の要求性能を確保するために必要な基本事項およびFRPについては強度、ヤング係数、リラクセーション率などの機械的特性を設定するための試験方法や各FRP材料の設計値を示している。

FRPは芯材の繊維と繊維に含浸させて一体化するポリマー（樹脂）からなる複合材料であるため、火災等による高温時にはポリマーの軟化による付着低下を生じる可能性があることに留意が必要である。

(4) 4章 作用, 5章 性能照査

4章では各限界状態を考慮する作用の種類とその組合せを、また5章では性能照査の項目と構造解析について記述している。各限界状態に対する検討、照査方法については6章以降に詳述している。

(5) 6章 終局限界状態に対する検討

6章では、FRPを用いたコンクリート構造物の性能照査のうち終局限界状態における曲げモーメント、せん断力、ねじりに対する安全性の検討について記述している。

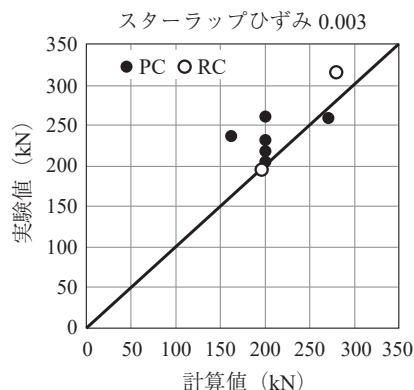
曲げモーメントに関して、FRPを用いたコンクリート部材の破壊形式は、塑性域を示さないぜい性的なものとなる特徴を有する。ここで、曲げによる終局破壊形式には、コンクリートの圧縮破壊と繊維強化ポリマーの破断による破壊に大別されるが、本指針では対象構造形式のほか、作用の種類、FRPの種類、経済性などを考慮して適切な破壊形式を定めるものとしている。

せん断力に関して、土木学会指針発刊以後、海外では継続的な研究や実験が行われており、AASHTOではCFRPを用いた場合の終局限界状態のせん断補強筋ひずみが規定されている。ミシガン州運輸局（MDOT）では実橋を模擬した実験が行われ、AASHTOのひずみが適用できることが確認されている。本指針では、上記の実験結果を検証して（図-2）、①土木学会指針の算定式のほかに②実験で確認された値も選択肢として追加した。

(6) 7章 供用限界状態に対する検討

7章では、FRPを用いたコンクリート構造物の性能照査のうち供用限界状態における応力度、ひび割れ、変位・変形、振動に対する安全性の検討について記述している。

ひび割れに関してFRPは鋼材と異なり水の浸入による腐食の問題はないため、この観点からひび割れ幅の限界値は必要ない。このため最新の海外規準も参考に、外観や水密性などを考慮のうえ定めるものとしている。



解説) 海外実験の条件を用い、AASHTO等を参考にスターラップひずみを0.0035程度として本指針のせん断耐力式により試算して、実験値との対比を行った。左図はひずみを0.003とした結果で、計算値は実験の下限値付近を示す。

図-2 せん断耐力の実験値に対する検証

(7) 8章 疲労限界状態に対する検討

8章では、FRPを用いたコンクリート構造物の性能照査のうち疲労限界状態における安全性について記述している。外ケーブル構造にFRPを用いる場合、定着部の緊張材変動応力を基とした疲労試験による耐久性照査のほか、FRPは一般に母材より定着部の疲労強度が小さくなる傾向から、定着部の性能確認が必要となる。

(9) 9章 耐久性に関する検討, 10章 耐震に関する検討

9章では、FRPが耐久性を有する塩化物イオン以外の劣化因子として考えられる水、アルカリ、紫外線のコンクリート構造物に対する検討事項について記述している。このうちアルカリの作用に対しては、高温状態で長期間影響を受ける条件で劣化による引張荷重の低下が懸念される場合には、最大荷重保持率を設計に考慮するものとしている。

10章では、FRPを用いた耐震設計における留意事項について記述している。

(10) 11章 構造細目

11章では、FRPを補強材、緊張材で用いる場合のかぶり、必要鋼材量、配置、形状、定着などの設計上必要な構造細目などについて記述している。FRPを内ケーブルや外ケーブルの緊張材として用いる場合、曲線部で強度低下することが確認されているため、実験等により確認する必要がある。また外ケーブルの採用は事例も少なくFRP表面形状も種類ごとに多様であるためフィレットの影響など事前の確認が必要としている。

(11) 12章 施工, 13章 保全

12章では、FRPを用いた構造物の施工計画から施工中の品質管理、完成後の検査に至るまでに必要となる基本事項について記述している。FRPは施工面で軽量という利点があるが、紫外線による影響や被覆樹脂の損傷に注意が必要となる。

13章では構造物完成後の維持管理、診断時の方法や留意点について記述している。FRPは鋼材のような錆が発生しないため、腐食を原因とした劣化に対する調査は不要となるが、保全の基本的な方法は事例もまだ少ないことから通常のコンクリート構造物と同じとしている。

4.3 参考資料の記述内容

(1) 1章 FRP を用いた構造物の試設計

本章では、FRP の採用が想定される表 - 3 に示す PC 構造物を対象に従来材料と FRP を用いた場合の試設計比較を実施している。また本結果を基に LCC の優位性についても試算している。

表 - 3 FRP を用いた試設計ケース

構造形式	幅員 (W) / 橋長 (L)	FRP 種別*
① プレキャスト PC 床版	W=11.70 m	AFRP
② プレテンション単純スラブ桁橋	W=12.0 m, L=11.56 m	AFRP
③ プレテンション単純スラブ桁橋	W=12.0 m, L=20.70 m	CFRP
④ ポストテンション T 桁橋	W=12.0 m, L=31.00 m	CFRP

※ AFRP：アラミド繊維，CFRP：炭素繊維を示す

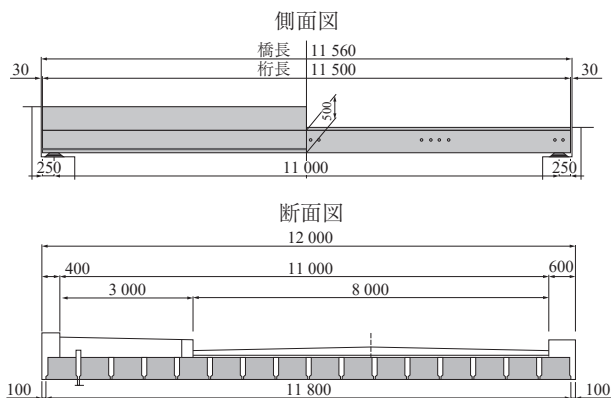


図 - 3 従来材料と FRP の試設計例 (表 - 3 ②)

LCC では、初期建設費と維持管理費・更新費の合計として、建設費の上昇、社会的割引率についても考慮して算定している。表 - 3 に示す各構造物に対して試算したもののうち、上図に示すプレテン単純スラブ桁橋に対する供用期間 100 年の LCC 比較結果を表 - 4 に示す。厳しい塩害環境下では、予防保全としてすべての鉄筋を FRP で代替の方が (ケース 2)、従来材料を用いて 1 回以上の更新をする場合より優位になる結果となった。

表 - 4 LCC 試算例 (② プレテンション単純スラブ桁橋)

ケース	適用方法	新設工事	更新	
			1 回	2 回
1	すべて従来鋼材*	1.00	1.76	2.61
2	鉄筋のみ AFRP で代替	1.66	-	-
3	PC 鋼材も AFRP で代替	2.48	-	-

※鉄筋はエポキシ樹脂塗装鉄筋を想定

(2) 2章 品質管理・試験

本章では、補強材、緊張材として用いる FRP の品質規定について、主に設計で必要となる項目について土木学会指針から見直しを行っている。品質確認試験については JIS 認定試験への更新のほか本指針で新たに表 - 5 に示す 3 つの品質確認試験を規定している。

表 - 5 本指針で追加した品質確認試験

試験 ①	試験名	曲げ成形繊維強化ポリマーの引張試験方法 (案)
	目的	FRP を補強材として用いる場合の曲げ成形部での最大引張荷重の低下程度を確認
試験 ②	試験名	繊維強化ポリマーの耐アルカリ性能評価方法 (案)
	目的	長期耐アルカリ性能として、推定式を用いた供用期間 100 年後の性能を評価
試験 ③	試験名	コンクリート養生時の温度条件に対する繊維強化ポリマーの耐アルカリ性能評価方法 (案)
	目的	蒸気養生も含む養生時の温度条件に対する耐アルカリ性能を評価

(3) 3章 技術資料

本章では、表 - 6 に示す各 FRP 材料について製品仕様、力学特性、耐久性試験、構造細目、実績等について整理するとともに、材料諸元・各種特性値について横並びの一覧表を掲載している。

表 - 6 技術資料掲載 FRP 材料

No.	FRP 種類	繊維	樹脂
1	CFRP ケーブル・ロッド	炭素	エポキシ樹脂
2	CFRP 格子筋	炭素	ビニルエステル樹脂
3	AFRP 異形ロッド	アラミド	ビニルエステル樹脂
4	AFRP 組紐ロッド	アラミド	エポキシ樹脂
5	BFRP 異形ロッド	バサルト	ビニルエステル樹脂

5. おわりに

本指針は、既往の土木学会指針をベースに、これまでに発刊された FRP に関する国内および海外規準を参考にし、最新の研究成果、技術を取り入れている。FRP の特徴を踏まえ本材料を広く採用するためには、FRP 材料に対する実験や解析結果を蓄積し、設計から維持管理手法に至る一連の規定に対する定期的な改定が必要であると考えている。本指針が、今後の FRP を用いたコンクリート構造物および PC 構造物の発展に資することを期待するものである。

最後に、本指針の策定にあたり、委員、幹事各位に貴重なご意見を賜るとともに多大なご努力を賜った。また、本学会の事務局の各位には会議室の確保や資料整理、予算調整などに多大なご協力を賜った。ここに深甚の謝意を表する次第である。なお、この委員会の活動は表 - 1 に示す委託委員の所属する 5 社からの業務委託費によって賄われた。

参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会：連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針 (案)，1996.9
- 2) 公益社団法人プレストレストコンクリート工学会：コンクリート構造技術規準，2019.10
- 3) 公益社団法人プレストレストコンクリート工学会：PC 構造物高耐久化ガイドライン，2015.3

【2020 年 8 月 7 日受付】