

土木学会平成24年度全国大会
研究討論会 研-23 資料

FRPによる構造物の補強設計の将来像 —これからのより良い設計法を探る—

座長	佐藤 靖彦	北海道大学
話題提供者	上原子 晶久	弘前大学
	Jian-guo DAI	The Hong Kong Polytechnic University
	金久保 利之	筑波大学
	小林 朗	(株)新日鉄マテリアル
	中村 一史	首都大学東京

日時	平成24年 9月7日(金) 12:40~14:40
場所	名古屋大学 東山キャンパス
教室	全学教育棟本館1階 C13 (会場名: I-1)

複合構造委員会

FRPによるコンクリート構造の補強設計小委員会

目 次

FRP による構造物の補強設計の将来像 -これからの良い設計法を探る-	1
北海道大学 佐藤 靖彦	
土木学会 複合構造委員会 FRP によるコンクリート構造の補強設計研究小委員会の活動について	3
弘前大学 上原子 晶久	
INTRODUCTION OF THE GUIDELINE FOR THE STRENGTHENING OF CONCRETE STRUCTURES USING FRP COMPOSITES IN HONGKONG	5
The Hong Kong Polytechnic University Jian-guo DAI	
コンクリート補強用 FRP 材料に関する ISO の動向	7
筑波大学 金久保 利之	
FRP によるコンクリート構造物の補強設計の動向	9
新日鉄マテリアルズ (株) 小林 朗	
FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の現状と課題	11
首都大学東京 中村 一史	

1. はじめに

土木学会コンクリート委員会は、当時の先端技術を集結し、「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」(以下「土木学会指針」)を 2000 年に発刊した。その後、欧州、北米、アジアでの議論が活発化し、独自の補強設計指針がとりまとめられてきた。そして今、これら指針の比較・検証の時期にある。

近年、FRP を鋼桁などの補修・補強に活用する事例が増えてきている。鋼構造物の補強設計法に関する議論が進められているが、同時に、コンクリート構造物の補修補強設計法との共通項目の抽出と体系化が必要ではないだろうか。

本研究討論会では、このような認識を持って、FRP による構造物の補強設計の将来像について議論したい。

2. 指針概観

将来を語る場合、過去と現在を整理する必要があることは言うまでもない。

表-1 に土木学会指針の目次を示す。性能照査を意識した構成であり、6 章の中に、既設コンクリート構造物中の材料の設計強度、安全係数、各種性能(安全性、使用性、復旧性)の照査法が示されている。また、シートによる塩化物イオンの侵入抑制効果の照査法が示されている点は特筆に値する。

表-2 に ACI のガイドライン (Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures) の目次を示す。ACI ガイドラインは 2002 年に作成され、2008 年に改訂されている。使いやすさを意識した補強目的別の構成になっている。環境作用の考慮の方法として、引張強度の低減係数(表-3)が用意されている。

表-4 にオーストラリアのデザインハンドブック (Design handbook for RC structures retrofitted with FRP and metal plates: beams and slabs) の目次を示す。FRP 補強材と鋼板が対象とされている。FRP の引張強度に関しては、表-3 に示した ACI の考え方がそのまま採用されている。

表-1 土木学会指針の構成¹⁾

1 章	総則
2 章	補修補強の基本
3 章	材料
4 章	荷重作用と環境作用
5 章	既設コンクリート構造物の詳細点検
6 章	補修補強されたコンクリート構造物の性能照査
7 章	補修補強の施工
8 章	工事記録
9 章	補修補強されたコンクリート構造物の維持管理

表-2 ACI ガイドラインの構成²⁾

1 章	Introduction and scope
2 章	Notation and definition
3 章	Background information
4 章	Constituent materials and properties
5 章	Shipping, storage, and handling
6 章	Installation
7 章	Inspection, evaluation, and acceptance
8 章	Maintenance and repair
9 章	General design consideration
10 章	Flexural strengthening
11 章	Shear strengthening
12 章	Strengthening of members subjected to axial force or combined axial and bending
13 章	FRP reinforcement details
14 章	Drawing, specifications, and submittals
15 章	Design examples
16 章	References

キーワード FRP, 鋼板, 補修補強設計, 指針

連絡先 〒060-8628 札幌市北区北 1 3 条西 8 丁目 北海道大学大学院工学研究院 TEL010-706-6219

fib model code 2010 には、PART II: Design Input Data の Chap. 6 Interface characteristics の中に、FRP 接着補強材の付着応力 - すべり関係と付着・定着強度に関する記述があるが、補強部材の設計法に関する記述は見当たらない。

3. 将来の設計法とは？

今後の補強設計法を考えた場合、以下に関する議論が必要であると考えられる。

- ・ FRP 補強材のはく離（非接着を含む）を許容する概念
- ・ 部材の性能に及ぼす樹脂（層）の評価法
- ・ 時間の概念（耐久性）の直接的考慮の方法
- ・ 解析法に応じた適切な付着モデル
- ・ 対象とする工法の拡大

4. おわりに

複合構造委員会では、今回の研究討論会を糧として、FRP による補修補強設計の議論を深化させる予定である。具体的には、コンクリート構造に関しては、著者が委員長を務める「FRP によるコンクリート構造の補強設計小委員会」において、鋼構造に関しては、首都大学東京 中村一史准教授が委員長を務める「FRP と鋼の接合方法に関する調査研究小委員会」において調査・研究を展開する。また、海外との技術交流も深めていきたい。

参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維シート接着工法を用いたコンクリート建造物の補修補強指針，コンクリートライブラリー101，2000
- 2) ACI：Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R-08, 2008
- 3) Standard Australia：Design handbook for RC structures retrofitted with FRP and metal plates: beams and slabs, 2008

表- 3 暴露条件に応じた環境低減係数

Exposure conditions	Fibre type	Environmental reduction factor C_E
Interior exposure	Carbon	0.95
	Glass	0.75
	Aramid	0.85
Exterior exposure(bridges, piers, and unenclosed parking garages)	Carbon	0.85
	Glass	0.65
	Aramid	0.75
Aggressive environment (chemical plants and wastewater treatment plants)	Carbon	0.85
	Glass	0.50
	Aramid	0.70

表-4 オーストラリアハンドブックの構成³⁾

1 章	Introduction
2 章	Bonded plates
3 章	Generic stress resultants and capacities
4 章	Generic debonding mechanism in adhesively bonded plates
5 章	Generic debonding mechanisms in mechanically fastened plates
6 章	Longitudinal shear plane capacities
7 章	Plate buckling resistances
8 章	Flexural strengthening design philosophies -longitudinal plates
9 章	Generic ductility principles
10 章	Design safety factors

土木学会 複合構造委員会 FRP によるコンクリート構造の 補強設計研究小委員会の活動について

弘前大学 上原子 晶久

1. はじめに

土木学会 複合構造委員会内に設置された FRP によるコンクリート構造の補強設計研究小委員会は、2010年6月より活動を開始して、2012年7月に1期目の活動を終えた。小委員会設置の目的は以下の通りである。

- ・ 将来の FRP による鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート構造の補強設計指針の作成に資する調査研究活動を行う。具体的には、以下を行うことを目的とする。
 1. 国内外の既存の補強設計法における問題点の抽出・整理
 2. 近年開発された新材料により補強された部材の力学性能に関する調査研究
 3. 補強部材の耐久性（環境作用と疲労）に関する調査研究
 4. はく離検知技術の整理

本稿では、小委員会の活動について報告する。

表-1 委員構成

委員長	佐藤 靖彦	北海道大学
幹事長	上原子 晶久	弘前大学
幹事	小林 朗	新日鉄マテリアルズ(株)
	山口 浩平	九州大学
委員	安保 知紀	鉄建建設(株)
	岩下 健太郎	名城大学
	大谷内 伸夫	東レ(株)
	子田 康弘	日本大学
	佐々木 一成	(株)大林組
	塩畑 英俊	東日本高速道路(株)
	竹内 一博	(株)さとうベネック
	武田 三弘	東北学院大学
	田代 晃一	日本国土開発(株)
	立神 久雄	ドーピー建設工業(株)
	富山 禎仁	(独)土木研究所
	中村 智	(株)さとうベネック
	野村 泰稔	立命館大学
	久部 修弘	三菱樹脂(株)
	堀本 歴	倉敷紡績(株)
	三田村 浩	(独)土木研究所 寒地土木研究所
渡辺 忠朋	北武コンサルタント(株)	

2. 小委員会の概要

委員の構成を表-1に示した。委員会活動を円滑に運営するために、以下の3つの作業部会(WG)を設置した。

- ・ 構造設計 WG：主査 久部 修弘 委員を含めて10名の委員で構成
- ・ 耐久設計 WG：主査 富山 禎仁 委員を含めて6名の委員で構成
- ・ 点検検査 WG：主査 武田 三弘 委員を含めて4名の委員で構成

3. 小委員会活動の内容

各WGで検討した項目は以下の通りである。

- ・ 構造設計 WG：既往の補強設計法における留意点・問題点の抽出と整理、コード化されていない補強技術の調査とコード化の可能性に関する検討
- ・ 耐久設計 WG：FRP 補強後の耐久性に関する知見の集約
- ・ 点検調査 WG：既往の FRP 構造のはく離検知技術と補強後 RC 構造への適用性に関する検討

構造設計 WG で実施した検討では、既存の補強設計指針が抱える課題として、耐荷力の算定に用いる係数や破壊モードに関して統一的な見解を示す必要があること、及び設計における FRP の定着・付着に関しては適用

キーワード FRP, 補強設計, 耐久性, はく離, 検査技術

連絡先 〒036-8561 青森県弘前市文京町3 弘前大学大学院 理工学研究科 TEL0172-39-3620

範囲を明らかにする必要があることが明らかとなった。さらに、コード化されていない補強技術(例えば、炭素繊維やアラミド繊維等を工場でプレートやグリッド状に加工して現場での連続繊維への樹脂含浸工程を省力化した工法など)をコード化するためには、補強量などの適用範囲を明らかにして現状の課題を克服する必要があることを提言した。

耐久設計 WG で実施した検討では、FRP 補強後、10 年以上を経過した構造物が増加して、耐久性に関する検討が必要とされていることを明らかにした。さらに、既存構造物の調査や実験事実の整理などを行い、海外での事例を参考にしながら補強設計指針へ耐久設計を取り入れる枠組みを示す必要があることを提言した。

点検調査 WG で実施した検討では、FRP 単体の構造物で利用している FRP はく離の検査技術の文献調査を行い、各検査技術の特徴を整理した。その結果を踏まえて、既存の検査技術が FRP 補強後の RC 構造物で適用できる可能性について検討する必要があることを明らかにした。

さらに、小委員会 1 期目の成果報告を公表する意味で、2012 年の第 67 回土木学会年次学術講演会にて共通セッション(FRP によるコンクリートおよび鋼構造物の補強(1)～(3))を開催した。あわせて、同講演会にて研究討論会(FRP による構造物の補強設計の将来像—これからのより良い設計法を探る—)を企画した。小委員会の成果の一部は、共通セッションで講演予定である。

4. おわりに

本小委員会は、複合構造委員会で活動の継続が認められた。それを受けて 2012 年下半年に 2 期目の活動を開始する予定である。1 期目の活動では、小委員会設立の目的に沿って RC 構造物への補強指針指針に資する情報と課題の整理などを実施することができた。一方で、コード化されていない補強技術や FRP 補強後の耐久性、さらには FRP はく離の検査技術に関しては、補強設計に取り入れるために克服する課題が多いことが明らかになった。小委員会 2 期目の活動では、1 期目の成果を最大限に活用しながら、より良い成果を提示できるように委員一同尽力する所存である。

INTRODUCTION OF THE GUIDELINE FOR THE STRENGTHENING OF CONCRETE STRUCTURES USING FRP COMPOSITES IN HONGKONG

DAI Jian-Guo, Email: cejgdai@polyu.edu.hk

1. INTRODUCTION

Strengthening of concrete structures using fibre reinforced polymer (FRP) composites has become very popular around the world as the technology offers durable and cost-effective strengthening solutions. However, the practical application of this new technology has so far been rather limited in Hong Kong, due to the lack of a local design guideline that is built within the framework of Hong Kong's structural design codes, particularly the Hong Kong Code for the Structural Use of Concrete. This incompatibility involves many issues, including differences in the design methods for conventional concrete structures, in material testing standards, and in the specification of partial safety factors. Such incompatibility is also a well-known reason for different countries/regions to develop their own guidelines and codes. With the above background, a project was launched under the support of the "Innovation and Technology Fund" of Hong Kong SAR Government in 2009, to develop a Hong Kong guideline for the strengthening of concrete structures using FRP composites and a software package that supports the use of the guideline. The project team consisted of all the active researchers in the field of FRP composites for construction in Hong Kong. Prof J.G. Teng from The Hong Kong Polytechnic University coordinated this project.

2. CONTENTS OF THE GUIDELINE

2.1 Chapters 1 to 3: Introduction; Materials; and General Design Considerations.

The first chapter addresses the needs for strengthening in Hong Kong, the advantages of the FRP strengthening technology and the potential practical applications. The second chapter describes the methods of manufacture of FRP products, the types of fibres and resins, the mechanical characterization tests (i.e. tensile properties of FRP, surface flammability of FRP, pull-off strength, cure of resins) and the effect of environmental exposure on material properties. An appendix containing the FRP products and systems available in Hong Kong is provided to this chapter. The third chapter describes the basic of design (i.e. design aim, design philosophy, strengthening limits, minimum concrete substrate strength, design professionals, workmanship, assessment of existing structure and performance-based approach), design for long-term performance and fire resistance, which are two extremely important issues in Hong Kong, loading and material properties. The guide is based on the limit state design method, according to the Hong Kong Concrete Code (Building Department 2004) but accommodates performance-based design approaches.

2.2 Chapter 4: Flexural Strengthening with Externally Bonded FRP

This chapter covers four different strengthening schemes (unstressed FRP plate; pre-tensioned FRP plate; U-jacket anchorage; additional mechanical anchors). Different failure modes [conventional flexural failure; intermediate crack (IC)-induced debonding failure; plate-end debonding failure which includes critical diagonal crack (CDC)-induced debonding, CDC debonding with cover separation, concrete cover separation and plate-end interfacial debonding (Teng et al. 2002)] are illustrated in details and different end anchorage measures for bonded FRP plated are provided. Formulas for the characteristic IC debonding strength and the strength check against plate end debonding considering the shear-flexure interactions are provided in this chapter for the ultimate state design. The serviceability limit states considered in this guide includes: (1) crack control; (2) deflection control; (3) stress limitation; and (4) fatigue.

2.3 Chapter 5: Shear Strengthening of RC Beams

This chapter deals with the shear strengthening of RC beams with externally bonded FRP reinforcement. It covers strengthening schemes, modes of failure, design provisions, and detailing requirements of FRP shear strengthening systems. The shear strengthening schemes include a) side bonding in which the FRP strips are bonded to the beam sides only; (b) U-jacketing in which U-shaped FRP jackets are bonded to both sides and the tension face of the beam; and (c) complete wrapping in which FRP jackets are wrapped around the entire cross section of the beam. The shear failure modes include FRP tensile rupture and FRP debonding. The stress distribution factors are used to consider the non-uniform stress distribution characteristics of FRP for the above two failure modes. In addition to that, the effect of interaction between steel and FRP shear reinforcement is also well considered.

2.4 Chapter 6: Strengthening of Columns

This chapter deals with the strengthening of circular and rectangular RC columns using confining FRP jackets. The shape modification of rectangular sections, confinement limit, slenderness upper limit for effective strengthening, stress-strain model of FRP-confined concrete in compression, strength of FRP-confined RC columns under eccentric

Keywords: Guideline, Strengthening, Concrete structures, FRP composites, Hong Kong

Contact address: Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Hong Kong, Kowloon, Hong Kong, Tel: +852-2766-60262

compression considering the slenderness effect, the shear resistance of FRP-strengthened rectangular and circular columns are specified in this chapter.

2.5 Chapter 7: Flexural Strengthening of Members with NSM FRP Systems

This chapter deals with the strengthening of RC members with near-surface-mounted FRP reinforcement. Various NSM FRP strengthening systems are first described, followed by an examination of the anchorage of NSM FRP reinforcement. Design recommendations are next provided. The provisions of this chapter are limited to the flexural strengthening of RC beams and slabs. The shear strengthening of RC members is beyond the scope of this document.

2.6 Chapter 8: Fire Resistance of FRP-Strengthened RC members

This chapter presents performance-based approaches for use in the design of bonded FRP systems to ensure that the fire safety of FRP-strengthened concrete structures complies with the requirements of the “Code of Practice for Fire Resisting Construction in Hong Kong” (Building Authority 1996). The fire safety of FRP-strengthened RC structures is recommended to be designed with one of the following three scenarios: (1) FRP-strengthened RC structures without fire insulation; (2) FRP-strengthened RC structures with fire insulation for the protection of the FRP strengthening system; and (3) Fire insulation for the protection of original RC structures.

2.7 Chapters 9 and 10: Installation and Acceptance Procedures; and Inspection, Maintenance and Repair

Chapter 9 describes the quality control and workmanship of the FRP installation process, including the following factors: (1) Competency of contractors; (2) Substrate conditions; (3) Material conformity; (4) Control of site conditions; (5) Installation process; and (6) Inspection and acceptance criteria. Chapter 10 consists of four major parts, which are Inspection and assessment, Maintenance and repair, Long-term monitoring, and Records.

3. DESIGN SOFTWARE PACKAGE AND DESIGN MANUAL

A software package is attached to the guideline to support its use in engineering practice. The software package also facilitates the use of other international codes (i.e. China, British and USA). The user interface is seen in Fig.1. In addition, a design manual is also provided to show examples of design the flexural strengthening, shear strengthening and column confinement. Detailed procedures are provided in the design manual.



Fig.1 User Interface of the design software package

4. CONCLUSIONS

The guideline for the strengthening of concrete structures using FRP composites in Hong Kong has been developed on the basis of the latest research findings and a critical assessment of existing guidelines/codes developed by other countries/organizations. Some new research has also been conducted to extend the existing research to cater for local conditions. The guideline will not only facilitate the wide local application of this technology to enable the cost-effective maintenance of a sustainable infrastructure for Hong Kong but will also allow Hong Kong engineers and companies to play a leading role in the strengthening market and to export their services in the region.

REFERENCES

- Building Department (1996). *Code of Practice for Fire Resisting Construction in Hong Kong.*, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, Hong Kong, China.
- Buildings Department (2004). *Code of Practice for Structural Use of Concrete*, Second Edition, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, Hong Kong, China.
- Teng, J.G., Chen, J.F., Simth, S.T., and Lam, L. (2002). *FRP-strengthened RC Structures*, John Wiley & Sons, UK.

コンクリート補強用 FRP 材料に関する ISO の動向

筑波大学 金久保 利之

1. はじめに

国際標準化機構 (ISO : International Organization for Standardization) では、工業分野の様々な国際規格 (IS : International Standard) の策定が行われるが、具体的な IS の案作成や各国からの投票は、ISO 中の技術委員会 (TC : Technical Committee) で取りまとめられる。コンクリートに関する TC としては TC71 (Concrete, Reinforced Concrete and Prestressed Concrete) が活動しており、さらに TC の中に分科会 (SC : Sub Committee) が組織され各種検討を行っている。TC71/SC6 は、FRP などのコンクリートの新しい補強材 (Non-Traditional Reinforcing Materials for Concrete Structures) を取り扱う SC として、2000 年から活動を開始した。本稿では、現在までに TC71/SC6 において検討されている内容を紹介する。なお、TC71/SC6 の幹事国は日本であり、議長 (Chairperson) は魚本健人氏、幹事 (Secretary) は金久保が務めている。

2. TC71/SC6 で制定された国際規格 (FRP 材料の試験方法)

TC71/SC6 の SC 名称は Non-Traditional Reinforcing Materials for Concrete Structures であり、広義に取れば、従来鉄筋ではないコンクリート用補強材全般を扱うことになる。2000 年に JCI がホストとなって東京で行われた SC6 第 1 回会議では、FRP 材料とともに短繊維補強コンクリート、エポキシ塗装鉄筋についても議論が行われたが、後者 2 件については、他の TC や欧州標準化委員会 (CEN : Comité Européen de Normalisation) においても検討がなされており、調整が必要となることから、その後あまり深い議論がなされないままとなっていた。SC6 で継続的に審議され、現在までに IS に制定された規格は、コンクリート補強用 FRP 材料の試験方法を定めた次の 2 つである (ISO 10406 シリーズ)。これらの規格の目次を表-1 に示す。

- ISO 10406-1:2008 Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – Test methods – Part 1: FRP bars and grids, 繊維強化ポリマー (FRP) によるコンクリートの補強 – 試験方法 – 第 1 部 : FRP バー及びグリッド
- ISO 10406-2:2008 Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – Test methods – Part 2: FRP sheets, 繊維強化ポリマー (FRP) によるコンクリートの補強 – 試験方法 – 第 2 部 : FRP シート

表-1 ISO 10406 シリーズの内容

ISO 10406-1:2008 Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – Test methods – Part 1: FRP bars and grids	ISO 10406-2:2008 Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – Test methods – Part 2: FRP sheets
1 Scope 2 Normative references 3 Terms, definitions and symbols 4 General provision concerning test pieces 5 Test method for cross-sectional properties 6 Test method for tensile properties 7 Test method for bond strength by pull-out testing 8 Test method for performance of anchorages and couplers 9 Test method for long-term relaxation 10 Test method for tensile fatigue 11 Test method for alkali resistance 12 Test method for creep failure 13 Test method for transverse shear strength 14 Test method for flexural tensile properties 15 Test method for the coefficient of longitudinal thermal expansion by thermo-mechanical analysis	1 Scope 2 Normative references 3 Definitions and symbols 4 General provision concerning test pieces 5 Test method for determining tensile properties 6 Test method for overlap splice strength 7 Test method for determining bond properties of fibre-reinforced polymer (FRP) sheets to concrete 8 Test method for direct pull-off strength of FRP sheets with concrete 9 Test method for freeze/thaw resistance 10 Test method for exposure to laboratory light sources 11 Test method for durability

キーワード 国際規格, FRP 補強材, 試験方法, 設計法, 品質規格

連絡先 〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1 筑波大学システム情報工学研究科 TEL 029-853-5059

ISO 10406 シリーズの制定には、SC6 の活動開始から 9 年の年月を要した。幹事国が日本であったことから、ISO 10406 シリーズの原案作成は日本コンクリート工学会 ISO/TC71 対応国内委員会が主体となって行っており、当時主要なリファレンスであった文献 2) および 3) に基づく内容がほとんどである。同時期に JIS 規格も整備されたが、現在も有効な JIS 規格は FRP シートの引張試験法 (JIS A 1191:2004, ISO 10406-2:2008 の 5 に対応)、FRP 棒材の引張試験法 (JIS A 1192:2005, ISO 10406-1:2008 の 6 に対応) および FRP 棒材の耐アルカリ試験法 (JIS A 1193:2005, ISO 10406-1:2008 の 11 に対応) の 3 つである。その他に JIS の標準仕様書 (TS) として発行された項目 (シートの付着試験法、接着試験法、重ね継手試験法、耐久性試験法) があるが、現在はすべて廃止されている。JIS としては不要となったものが、IS として残っている状況であるともいえる。なお、2011 年に ISO 10406 シリーズの定期見直し投票が行われ、2012 年 6 月に行われた SC6 会議で同 IS の更新 (編集上のわずかな修正あり) が議決された。

3. TC71/SC6 で審議中の国際規格 (FRP を用いたコンクリート構造の設計法・FRP シートの品質規格)

TC71/SC6 が組織された当初から、FRP 材料の品質規格や FRP を用いた構造物の設計に関する話題は採り上げられていたが、具体的なアクションにはなかなか結びつかなかった。2008 年 3 月に行われた SC6 会議において、設計指針 (Design standard) としての位置づけの規格作成は難しいが、ガイドライン (Guidelines for design) としての位置づけであれば可能であろうという結論に至り、それ以降、設計ガイドラインが審議されている。2011 年に国際規格案 (DIS : draft International Standard) の投票が行われ、12 カ国の投票のすべてが賛成票で、2012 年 6 月の SC6 会議で IS として発行することが議決された。DIS 段階での規格 (DIS 14484) の目次を表-2 に示す。本規格は新設構造物および既存構造物の補修補強の両者に対応できるように配慮されており、また、コンクリート構造物全般に関わる内容には言及せず、FRP を用いる際に考慮すべき事項のみが記述された、アンブレラコード的な内容となっている。2012 年中もしくは 2013 年には IS として発刊される。

FRP 材料の品質規格策定に関しては、ISO/TC71 対応国内委員会内部においても意見が分かれていた。FRP 材料は多種多様であり、品質規格を制定することによって、逆に新たな FRP 材料の使用の足枷になることが危惧される。現状では FRP 棒材の規格を統一化することは無理であること、シートであれば製品としての流通があり、少なくとも規格値の定義を統一することには意義が見いだせることから、2011 年の SC6 会議で新業務項目 (NP : new work item proposal) として FRP シートの品質規格の提案をすることが議決された。現在 NP 投票中で、締切は 2012 年 8 月である (この原稿が出される頃には結果が判明しているはずである)。すでに ISO/TC71 対応国内委員会で作業原案 (WD : working draft) を作成済みで、その内容を表-3 に示す。具体的な数値を記載することはせず、例えば引張強度であればばらつきを考慮した下限値を示すこと、弾性係数であれば、試験結果の平均値を示すこと、などを規定している。

参考文献 1) ISO/TC71 第 8 回総会報告、コンクリート工学, Vol.38-12, 2000.12 2) 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), コンクリートライブラリー-88, 1996 3) 建設省大臣官房技術調査室監修 : 連続繊維補強コンクリート<諸性質と設計法>, 技報堂出版, 1995

表-2 DIS 14484 の内容

DIS 14484 Performance guidelines for design of concrete structures using fibre-reinforced polymer (FRP) materials
1 Scope
2 Normative reference
3 Terms and definitions
4 Design basics
5 Properties of materials
6 Structural analysis
7 Serviceability limit states
8 Ultimate limit states
9 General structural details

表-3 シート規格 WD の内容

JCI 対応委員会内原案 Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement for concrete structures—Specifications of FRP sheets—
1 Scope
2 Normative references
3 Definitions and symbols
4 Mechanical properties
4.1 General
4.2 Characteristic value of tensile strength
4.3 Characteristic value of Young's modulus
4.4 Characteristic value of fracture strain
4.5 Other properties
5 Appearance and dimensions
5.1 Appearance
5.2 Dimensions
6 Test
6.1 Sampling
6.2 Appearance
6.3 Dimensions

FRPによるコンクリート構造物の補強設計の動向

新日鉄マテリアルズ(株) 小林 朗

1. はじめに

我が国では1990年代初頭より炭素繊維シートやアラミド繊維シートなど連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補強の研究開発が活発に行われるようになり、1995年の阪神淡路大震災を機にRC橋脚の耐震補強に本格的に採用されるようになった。近年では、道路橋のRC床版など橋梁上部工の補強にも数多く採用されている。この間、土木学会では諸外国にさきがけて2000年に「連続繊維シートによるコンクリート構造物の補強設計指針」を発刊した。また建設省土木研究所(当時)、日本道路公団(当時)、鉄道総合技術研究所など構造物の管理者も各種の連続繊維シート補強に関する設計基準類を作成・発刊している。これらの設計基準類では対象となる構造物や補強目的が異なることなどから、性能評価の方法や評価式が異なるものもある。一方、近年では連続繊維シート以外のFRPプレート、FRPグリッドやFRPロッドなどのFRP材料がコンクリート構造物の補強に使用される例が増えて来ている。本稿では、これからのFRPによるコンクリート構造物の補強設計法を探る上で、既往のFRPによるコンクリート構造物の補強設計指針と適用状況および今後の課題について論ずる。

2. 連続繊維シートによるコンクリート構造物の補強設計指針類と利用分野

調査した主な指針類を表1に示す。土木学会が発刊したaは、土木構造物一般を対象として性能照査型の指針として発刊され、安全性と使用性に対して曲げ、せん断、じん性、疲労、押抜きせん断疲労耐力や地震に対する安全性、応力度やひび割れ幅などの照査方法を示しており、主として道路・鉄道構造物以外の上下水道施設などのコンクリート構造物で利用されている。b,cは、鉄道橋の主としてラーメン橋脚を対象に曲げ、せん断、じん性補強に関して、dは地下鉄開削トンネルの高軸力を受けるRC中柱を対象にせん断、じん性補強について規定している。eは、道路橋のRC橋脚の耐震補強を対象としたものであり、その前身は1995年2月に日本道路公団試験研究所から「炭素繊維による鉄筋コンクリート構造物の補強工法 設計・施工要領(案)」として発刊され、数次の改訂が行われてきた。高速道路をはじめとする道路橋のRC橋脚の耐震補強に広く利用されている。当初は、炭素繊維シートによるRC橋脚の段落し部の曲げ補強、せん断補強を対象としていたが、その後、橋脚基部のじん性補強や補強材料としてアラミド繊維シートやロープが加えられている。fは、道路橋上部工のコンクリート桁の曲げ、せん断補強に加えてRC床版の輪荷重による疲労に対する補強方法について規定している。ACIのgは、補強材として連続繊維シート以外にFRPプレート、FRPロッドを加え、曲げ、せん断、じん性、軸圧縮や純引張について記述している。hは建築構造物の柱、梁、スラブを対象に、曲げ、せん断、じん性について規定している。

表-1 FRPによるコンクリート構造物の補強設計指針類

記号	名称	発行者	発行年月
a	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	土木学会	2000.7
b	炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針	鉄道総合技術研究所	1996.7
c	アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針	鉄道総合技術研究所	1996.11
d	炭素繊維シートによる地下鉄RC柱の耐震補強-設計・施工指針-	鉄道総合技術研究所	1997.8
e	設計要領 第二集 橋梁保全編	東日本・中日本・西日本高速道路	2011.7
f	コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(Ⅲ) -炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート構造物の補修・補強に関する設計・施工指針(案)-	建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室・炭素繊維補修・補強工法技術研究会	1999.12
g	Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP System for Strengthening Concrete Structures	ACI Committee 440	2008.7
h	連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案	日本建築学会	2002.3

キーワード FRP, 補強設計, コンクリート構造物, 性能照査, 連続繊維シート

連絡先 〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3-8 新日鉄マテリアルズ(株) TEL 03-5623-5558

3. 各指針類の照査法の特徴と比較

(1)設計体系：性能照査型設計法の土木学会 **a** および限界状態設計法の **b,c,d,g** は部分安全係数を用いているのに対して、**e,f,h** は原則として許容応力度設計法に準じて材料の許容応力度を規定している。

(2)曲げ補強：各指針とも、RC 部材に準じた平面保持を仮定した耐力や応力度の算定法を用いている。**b~g** は、必要な定着長を確保することで FRP とコンクリートの完全付着を仮定しているのに対して、**a** および **h** は剥離を想定した補強後の曲げ耐力の算定法も示している。

(3)付着・定着：連続繊維シート接着工法による曲げ補強では、機械的定着を用いない場合は連続繊維シートとコンクリートの付着で定着を確保する必要がある。**b,c,e,f** では、平均着応力度が許容付着応力度を超えることのないように必要定着長を確保することとしている。一方、連続繊維シートとコンクリートの付着試験によれば、接着長がある一定値以上に長くしても剥離荷重が増加せず有効付着長が存在し、剥離の指標として界面破壊エネルギーが有効であることがわかっている。土木学会の **a** では、この界面剥離破壊エネルギーを用いて剥離の有無を判定している。**g** と **h** では、剥離に対して連続繊維シートのひずみの限界値を規定している。**f** は梁、**h** は梁および柱のせん断補強でスラブ、壁など閉鎖型巻立てができない場合の連続繊維シートの機械的定着部についても述べている。

(4)せん断：いずれの指針でも FRP の負担せん断力については、低減係数を乗じる、設計引張強度を低減する、有効ひずみを用いるなどの手法で FRP の引張強度から算定される負担せん断力より低減した設計値を算出している。

a,b,c は、FRP の設計引張強度から算定される負担せん断力にせん断補強効率 **K** を乗じて設計せん断力を算定しているが、土木学会の **a** では連続繊維シート種類によらず物性値からせん断補強効率 **K** を算定しているのに対して **b** は炭素繊維に対して 0.8、**c** はアラミド繊維に対して 0.4 とせん断補強効率 **K** を規定している。**g,h** では、FRP の有効ひずみから負担せん断力を算定しているが、有効ひずみは **g** では 0.4% 以下に、**h** では 0.5~0.9% となっている。

(5)じん性：補強後のじん性の評価方法としては **e** と **f** のように FRP の拘束効果を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係により終局変位を求める手法と **a,b,c,d,h** のように補強後のせん断余裕度からじん性率を算定手法がある。**a** の土木学会式については、補強前 (RC 部材のみ) のせん断余裕度に補強後 (RC+FRP) のせん断余裕度を乗じた値とじん性率の関係から評価式を導いている。これは炭素繊維、アラミド繊維両方の実験データから得られた式であり、補強材料の種類によらず 1 つの式で評価するために提案されている。一方、**b,c** は材料の違い (炭素繊維とアラミド繊維) によって異なった係数を用いているが、評価式の構成は材料にかかわらず同じである。

(6)材料劣化：国内の指針類では、FRP の材料劣化が起こらないように適切な保護塗装を行うことを前提して環境作用による材料劣化に対する低減係数は示されていない。一方 ACI の **g** では環境作用による材料の劣化を表す環境低減係数を材料の種類と環境条件に応じて設定し FRP の強度、ひずみ、ヤング係数をそれぞれ低減している。環境低減係数は炭素繊維で 0.85~0.95、アラミド繊維で 0.70~0.85、ガラス繊維で 0.50~0.75 としている。

4. 今後の課題

連続繊維シート接着工法では、曲げ補強については耐力や応力度の算定手法は概ね同じ評価手法が用いられているが、指針により付着・定着の評価手法が異なっており、同じ補強条件でも指針によって補強の可否、必要補強量や定着長が異なる可能性があり安全性を確保するとともに精度の高い評価手法が望まれる。せん断、じん性については、指針および FRP の種類により評価式や低減係数が異なっており、補強前の構造物の影響や補強材料の種類の影響を評価式に組み込むことにより FRP の種類によらず統一的に評価できる手法の開発が期待される。また炭素繊維アンカーなどによる定着構造が開発されており、これらの定着構造を考慮した設計手法の構築も課題である。補強後の構造物を適切に維持管理していくうえで、また LCC を合理的に算定するためには、FRP および接着界面の環境作用による経時変化・劣化を簡便に精度よく評価する手法の開発が望まれる。

また、FRP プレート接着工法、FRP プレート緊張接着工法、FRP ロッド埋め込み工法 (NSM 工法) や FRP グリッドを用いた増厚工法など連続繊維シート以外の適用も増えつつあり、諸外国ではこれらの材料・工法を連続繊維シートと共に設計コードに取り入れているものもある。今後、我が国においてもこれらの新しい材料・工法を取り入れた設計指針の作成も期待される。

1. はじめに

軽量で、現場でのハンドリングに優れる繊維強化プラスチック（Fiber Reinforced Plastic, 以下 FRP とよぶ）を用いた接着工法は、既設鋼構造物の補修・補強技術の一つとして注目され、近年、実構造物に適用され始めている。このような動向を受け、土木学会 複合構造委員会に設立された「FRP による鋼および複合構造の補修・補強小委員会（H205, 鈴木博之委員長（明星大学 教授）」では、2006 年 10 月から 3 年間にわたり、国内における施工事例および研究開発事例の情報収集を中心に調査研究が行われた。また、それらの取りまとめは、2011 年 1 月に発足した「FRP と鋼の接合方法に関する調査研究小委員会（H211）」に引き継がれ、2012 年 6 月に報告書が出版されている¹⁾。さらに、H211 小委員会では、FRP 接着工法のガイドライン等の整備に向けて、接着接合部の評価方法について調査研究を実施している。

本稿では、FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術について、文献 1)を参考に、実構造物への適用事例および研究開発の動向を紹介するとともに、設計法の整備に向けた課題について述べる。

2. 既設鋼構造物への適用事例

鋼構造物を対象とした FRP 接着工法の研究開発は、国内では 2000 年頃から開始され、2002 年に、我が国では初めて、設計荷重の変更にともなう耐荷力の向上を目的として、炭素繊維プレート接着によるトラス橋横桁の補強工事が行われた²⁾。その後も、各所で研究開発が活発に行われ、鋼橋をはじめとする既設鋼構造物への適用事例が報告されるようになってきた。ただし、FRP と鋼部材の接着接合に関する標準的な設計法がないため、接合部の安全性や、FRP の適用による効果を実験的に検証しながら、施工が行われているのが現状である。これまでの調査研究によれば、FRP 接着による補修・補強の事例（試験施工を含む）は、作用力、補修・補強に応じて、表-1 のように分類することができる¹⁾。また、それらの施工事例を図-1 にそれぞれ示す。

曲げモーメントを受ける部材に対しては、設計荷重の変更に伴う補強や、腐食による断面欠損の補修を目的として実施されている。鋼桁に曲げ剛性を効果的に付与する必要があることから、積層された炭素繊維プレートが適用されている。定着は、曲げモーメントによる作用応力が小さくなる端部に設けることが基本となる。

軸力を受ける部材に対しては、腐食によって断面欠損した引張部材の補修を目的として実施されている。部材全長に軸力が作用するため、作用力の小さい位置での定着が困難であることから、補強量に対して接着面積が確保できる、シート状の FRP が適用されている。FRP の必要数量は、欠損した断面の引張剛性と同等以上を確保することを基本としている。断面欠損量に応じて、ヤング係数の大きい炭素繊維シートあるいは炭素繊維

表-1 作用力、補修・補強により分類した施工事例¹⁾

作用力による分類	補修・補強の分類	対象構造物	FRP の種類
① 曲げモーメントを受ける部材	設計荷重の変更に伴う補強	トラス橋の横桁 鉸桁橋（4 例）	炭素繊維プレート
	腐食による断面欠損の補修	工場建屋における小ばり	
② 軸力を受ける部材	腐食による断面欠損（引張部材）の補修	トラス橋の下弦材	炭素繊維シート
		トラス橋の斜材 アーチ歩道橋の吊材	炭素繊維ストランドシート
③ 地震力を受ける鋼製橋脚（耐震補強）	レベル 2 地震動に対する補強	円形鋼製橋脚	炭素繊維シート
④ 繰返し荷重を受ける部材（疲労耐久性の向上）	疲労き裂の補修	標識柱基部（試験施工）	炭素繊維シート
		鉄道橋（試験施工）	炭素繊維シート ガラス繊維シート



図-1 施工事例¹⁾

キーワード 鋼構造物, 鋼橋, 補修・補強, FRP, 接着接合, はく離

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL 042-677-2783 E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

維ストランドシートを積層し、端部に段差を設けて接着されている。

耐震補強については、1例のみであるが、円形鋼製橋脚のレベル2地震動に対する補強を目的として実施されている。曲げ剛性の増加を抑えつつ、変形性能の改善を目的として、炭素繊維シートの繊維方向を周方向として接着されているのが特徴といえる。

疲労対策としては、標識柱基部や鉄道橋の桁端部等から発生した疲労き裂の補修を目的として、炭素繊維シートやガラス繊維シートが適用されている。いずれも試験施工として実施されており、標識柱基部へ適用した事例では、約2年間の経過観察後に撤去されたが、き裂の進展は見られず、損傷もなかったと報告されている。

このように、種々の荷重作用を受ける既設鋼構造物の補修・補強に、FRP接着工法が適用できるといえる。また、国内では約10年から実施されているものの、主要な施工事例は12件であり、実績はまだ少ないのが現状である。これらの施工事例は、軽量で現場でのハンドリングがよいことが高く評価され、狭隘部や高所における現場施工や、工期短縮に効果的であったと報告されている。一方、接着接合の品質管理に関する適切な評価手法がないことなどが、課題として挙げられている。

3. 研究開発の動向

前述したように、国内では2000年頃から研究開発が行われてきたが、2011年までの12年間で、100編を超える論文（フルペーパーのみを対象）が発表されている。研究対象の内訳を図-2に示す¹⁾。図より、軸力を受ける部材に対する検討が半数近くを占めるが、これは鋼板とFRPの接着継手の強度評価に関する基本的な検討が多いためである。鋼製橋脚に関する検討は、比較的早くから検討が行われていたが、計7編であり、全体的に少ない状況にある。最近では、10編以上の論文が毎年発表されており、研究開発が活発に行われている。

また、接着端部からのはく離に対する抵抗強度を改善するために、段差（図-3）やテーパなど、FRPの端部処理に関する研究も行われている。最近では、プレストレス導入に関する研究開発も進められている。これによれば、死荷重などによる応力の低減も図ることが可能となるため、その活用が期待される。

さらに、鋼とFRPとの線膨張係数差によって生じる熱応力、接着剤のクリープ変形、鋼と炭素繊維との異種金属接触腐食（ガルバニック腐食）に関する検討も行われ、それらの対策も示されつつある。例えば、熱応力対策については、鋼板より線膨張係数が大きいアルミニウム合金板を炭素繊維プレートと積層接着することで、熱応力の影響を低減させる方法が提案されている（図-4）。接着剤のクリープについては、クリープ変形を生じさせない持続荷重に関する研究やクリープ変形が生じにくい接着剤の開発が行われている。ガルバニック腐食については、炭素繊維は、樹脂を用いて接着され、接着層で鋼部材と電氣的に絶縁されることから、基本的に問題ないとされているが、ガラス繊維シートの樹脂層への挿入や、防食塗料によるガルバニック腐食防止法（図-5）に対する成果も報告されている。

このように多くの研究が実施されており、設計法の整備に活用できる成果が蓄積されつつある。特に、接着剤に生じる応力の計算式も、種々の荷重条件、境界条件に対して提案され、実験結果との比較が行われており、接着接合部の評価に有用である。

4. 設計法の整備へ向けた課題

FRP接着による鋼構造物の補修・補強に関するガイドライン等は、欧米を中心に策定されてきている^{3)~6)}。一方、我が国では、鋼製橋脚を対象とした耐震補強⁷⁾や、炭素繊維シートによる補修工法⁸⁾などが基準化されたものの、施工対象や適用材料が限定されており、設計法が完全に確立されていないのが現状である。ここでは、設計法の整備に向けた課題について述べる。

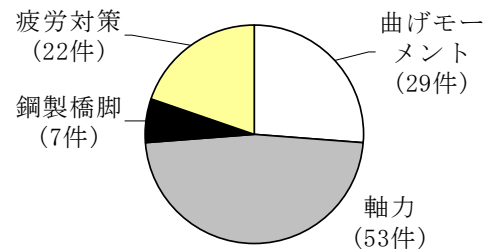


図-2 国内文献の研究対象の内訳



図-3 段差処理の一例



図-4 熱応力対策の一例

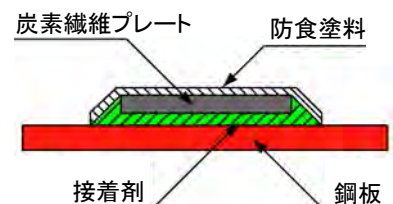


図-5 ガルバニック腐食対策の一例

補修・補強設計では、FRP が接着された鋼部材の断面を、完全に一体化された合成断面と考え、作用力に応じて引張剛性あるいは曲げ剛性を算出して、着目部位の応力や変位が、所定の値まで低減されているかどうかを照査する。鋼と FRP からなる断面の剛性は、通常の合成断面の考え方で容易に算出することができる。

図-6 に、FRP 接着による鋼部材の補修・補強の概念図を、軸力および曲げモーメントの作用力別にそれぞれ示す。補修・補強対象の区間は、FRP と鋼部材が完全に一体化された、合成断面の仮定が成立する区間である。また、定着長は、鋼部材の作用力の一部が、接着剤を介して FRP に伝達される区間であり、この区間では、完全な合成断面とはならず、鋼部材に作用する応力も計算通りには低減されないことに留意する必要がある。したがって、設計では適切な定着長を確保しなければならない。特に、FRP を積層接着した場合には、段差の設計を含めて検討する必要があるが、前述した研究成果を活用すれば定着長および段差長の基本的な設計ができると考えている。

さらに、FRP の端部は、断面の急変部であるため、その端部付近の接着剤には、図-6 (a) に併記したように、せん断応力 τ と、ピール応力とよばれる垂直応力 σ が作用する。これらの応力が接着剤の終局強度に達するとはく離する。したがって、FRP 接着による補修・補強設計では、接着端部からのはく離に対して十分な配慮が必要となる。図-7 に、終局時における典型的な接着接合部の破壊形態の模式図を示す。コンクリート部材と FRP の接着接合における破壊形態と大きく異なる点は、被着体である鋼部材の内部での破壊がないことである。載荷実験などでは、接着剤内部の破壊である、凝集破壊や、鋼部材と接着剤の界面はく離がしばしば観察されるが、複数の破壊モードが混在するケースもあるため、破壊形態の評価には難しい側面がある。特に、はく離に対する抵抗強度(接着接合部の限界値)を適切に設定するためには、多くの実験データの蓄積が不可欠であり、この方面の研究開発に期待したい。これまでの研究成果より、接着剤に生じる応力の算出が可能であることから、接着接合部の終局限界状態として、凝集破壊を仮定すれば、接着接合部の評価が可能になるとと思われる。

5. おわりに

近年、FRP 接着による補修・補強が鋼構造物へも適用されつつあるが、その普及を図るためには、設計、施工に関するガイドライン等の整備が望まれている。前述したように、接着接合のはく離に対する評価が重要であることから、H211 小委員会では、それらの調査研究を実施しているところである。既往の研究成果を参考に分析を加え、FRP と鋼の接着接合部の評価方法に関する報告書を取りまとめる予定である。

参考文献

- 1) 複合構造委員会 FRP と鋼の接合方法に関する調査研究小委員会編：FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端，土木学会，複合構造レポート 05，2002。
- 2) 板垣一也，渡邊憲市，鈴木博之：炭素繊維強化樹脂板（カーボン板）による鋼橋補強の事例，第 8 回鋼構造物の補修・補強技術報告会論文集，日本鋼構造協会，pp.49-54，2002。
- 3) S. S.J. Moy, Editor: FRP Composites - Life Extension and Strengthening of Metallic Structures, ICE Design and Practice Guides, 2001.
- 4) J. M. C. Cadei, T. J. Stratford, L. C. Hollaway and W. G. Duckett: Strengthening Metallic Structures Using Externally Bonded Fibre-Reinforced Polymers. CIRIA, C595, 2004.
- 5) D. Schnerch, M. Dawood, S. Rizkalla, E. Sumner: Proposed Design Guidelines for Strengthening of Steel Bridges with FRP Materials, Construction and Building Materials, Vol.21, Issue 5, pp.1001-1010, 2007.
- 6) [National Research Council: Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures - Metallic Structures, 2007.](#)
- 7) 池田尚治 編：炭素繊維シートによる鋼製橋脚の補強工法ガイドライン（案），土木研究センター，2002。
- 8) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社 編：設計要領第二集，橋梁保全編，2011。

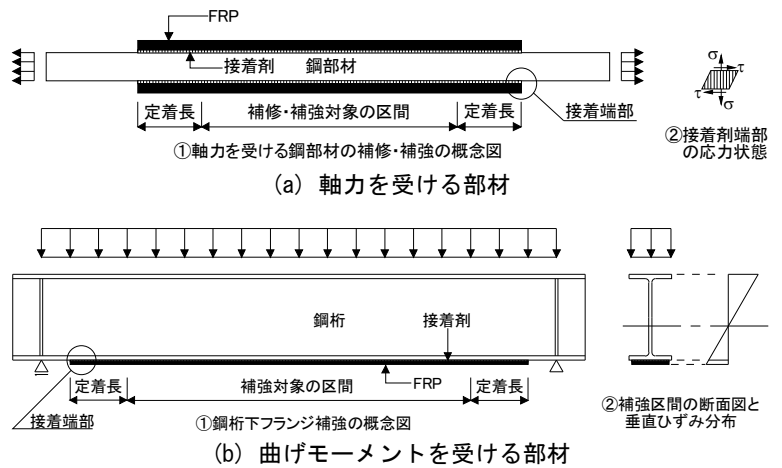


図-6 FRP 接着による鋼部材の補修・補強の概念図¹⁾

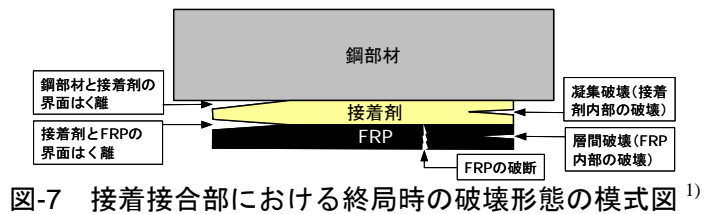


図-7 接着接合部における終局時の破壊形態の模式図¹⁾