

マイクロフィルム用資料

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
部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案)－

平成11年12月

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

Copyright © (1999) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

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 部材の補修・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

要 旨

現在、日本では橋長15m以上の道路橋が約13万橋供用されており、こうした膨大な数の道路橋を適切に維持管理していくことが重要な課題となっている。炭素繊維シート接着工法は、軽量で施工性に優れ、腐食を生じないといった特徴を有しており、この工法を橋梁上部工のコンクリート部材の補修・補強工法として用いることが検討されている。一方、炭素繊維シート接着工法は新しい工法であり、その適用方法に応じた補強効果の評価と設計・施工法が十分に明らかにされていない点が多い。

本研究は、建設省土木研究所と炭素繊維補修・補強工法技術研究会とが共同で、炭素繊維シートの材料特性の把握・鉄筋コンクリート床版の補強およびコンクリートげたの曲げ補強とせん断補強に関する効果を明らかにし、これに基づく設計・施工法の整備を目的として、平成8年度より3ヵ年にわたって、各種試験を行ったものである。

本報告書は、これらの試験結果をもとに炭素繊維シート接着工法を道路橋コンクリート部材の補修・補強に適用するための設計・施工指針(案)をとりまとめたものである。

キーワード：指針(案)、炭素繊維シート、補修・補強、鉄筋コンクリート床版、
コンクリートげた

共同研究者名簿

建設省土木研究所

岡原 美知夫	(構造橋梁部 部長)
藤城 泰行	(現 (社) 全国地質調査業協会連合会 技術顧問)
西川 和廣	(構造橋梁部 橋梁研究室 室長)
神田 昌幸	(現 建設省道路局 国道課 課長補佐)
内田 賢一	(構造橋梁部 橋梁研究室 研究員)
長屋 優子	(現 建設省土木研究所 企画部 国際協力推進室 国際係)
宮崎 和彦	(現 近畿地方建設局 大阪国道工事事務所 北大阪維持出張所)
松尾 伸二	(構造橋梁部 橋梁研究室 交流研究員)

炭素繊維補修・補強工法技術研究会

応用地質(株)	(株)大林組
(株)オリエンタルコンサルタンツ	鹿島建設(株)
(株)建設技術研究所	(株)コンステック
三信建設工業(株)	清水建設(株)
ショーボンド建設(株)	新日本製鐵(株)
大成建設(株)	(株)竹中工務店
(株)長大	(株)東邦アーステック
東レ(株)	日石三菱(株)
日鉄コンポジット(株)	日東紡績(株)
日本技術開発(株)	(株)ニューテック
ピーシー橋梁(株)	三菱化学(株)
三菱建設(株)	

ワーキンググループメンバー

(会社 50 音順)

古賀 政二郎	((株) 大林組)	
鈴木 巧	((株) 大林組)	
渡辺 英夫	((株) オリエンタルコンサルタンツ)	
鈴木 章夫	(鹿島建設 (株))	
後藤 和満	((株) 建設技術研究所)	
矢田 聡	((株) コンステック)	～平成 11 年 5 月
伊藤 功一	((株) コンステック)	平成 11 年 5 月～
小野 定	(清水建設 (株))	～平成 10 年 7 月
前田 敏也	(清水建設 (株))	平成 10 年 7 月～
江口 和雄	(ショーボンド建設 (株))	
佐野 正	(ショーボンド建設 (株))	
山田 寛次	(新日本製鐵 (株))	～平成 11 年 3 月
山崎 義人	(新日本製鐵 (株))	平成 11 年 3 月～
宇治 公隆	(大成建設 (株))	
堀 倫裕	(大成建設 (株))	～平成 11 年 3 月
堀口 賢一	(大成建設 (株))	平成 11 年 3 月～
堀川 道広	((株) 長大)	～平成 10 年 11 月
今門 宏之	((株) 長大)	～平成 11 年 3 月
並木 渉	((株) 長大)	平成 11 年 3 月～
服部 明生	(東レ (株))	
深川 英明	(東レ (株))	
鈴川 研二	(東レ (株))	
高木 秀敏	(日石三菱 (株))	平成 11 年 5 月～
森 悦栄	(日石三菱 (株))	平成 11 年 5 月～
小林 朗	(日鉄コンポジット (株))	
杉山 哲也	(日鉄コンポジット (株))	
遠藤 喜弘	(日東紡績 (株))	
常田 哲夫	(日本技術開発 (株))	
神内 隆行	((株) ニューテック)	

梅田 均	(ピーシー橋梁 (株))	
谷木 謙介	(三菱化学 (株))	
太田黒 博文	(三菱化学 (株))	～平成10年4月
藤田 崇	(三菱化学 (株))	平成10年4月～

炭素繊維補修・補強工法技術研究会 幹事長

星島 時太郎	(三菱化学 (株))
--------	------------

まえがき

近年の大型車交通量の増加、平成5年11月の車両制限令による車両総重量規制緩和および道路構造令による設計自動車荷重の増大にともない、道路管理の現場においては橋梁上部工のコンクリート部材の補修・補強工事が増加している。さらに、社会資本である既設橋梁の構造物は、我が国の経済状況下では、維持管理しながら、また必要によりリニューアルを施しながら延命を図り、長期間使用していくことが重要な課題となってきた。このような背景のもと、橋梁上部工のコンクリート造の主げたや床版の耐荷力ならびに疲労耐久性の向上を早期に図る必要が生じている。

炭素繊維シート接着工法は、コンクリート部材の耐荷力および疲労耐久性の向上を図る方法の一つとして、軽量で施工性に優れ、腐食しないという特長を有している。しかし、この工法を道路橋のコンクリート部材に適用する場合、その設計・施工についての基準が十分に整備されていないのが現状であり、基準の整備を望む声が高まっていた。

本研究は、こうした点を考慮して、建設省土木研究所と炭素繊維補修・補強工法技術研究会とが共同で、炭素繊維シート接着工法の特長を活かしたコンクリート部材の設計・施工法の整備を目的として、平成8年度より3ヶ年にわたって実施したものである。研究では、炭素繊維シートの材料特性の把握、鉄筋コンクリートげたおよびプレストレストコンクリートげたにおける曲げ補強ならびにせん断補強効果について検討を行った。また、鉄筋コンクリート床版における輪荷重走行試験機による疲労試験を実施し、疲労耐久性向上のための補強効果を検討した。

本設計・施工指針（案）は、炭素繊維シート接着工法が道路橋コンクリート部材の補修・補強に有効な工法として広く一般に普及することを目的として、上記の3年間に亘る共同研究の成果をもとにまとめたものである。したがって、本指針（案）は、今後、経験を積み重ねる中で随時改訂されるべきたたき台としての性格を有していることに留意されたい。また、本指針（案）では炭素繊維シート接着工法に限定して記述しているが、コンクリート部材の補修・補強には多種多様の工法があり、設計に際しては適切な工法を選定することが重要である。

最後に、本指針（案）が早期の実績の蓄積を促し、道路橋の長寿命化に寄与するよう念願してやまない。

目 次

I 共通編

1 章	総則	1
1.1	適用の範囲	1
1.1.1	指針(案)適用の範囲	1
1.1.2	適用工法の範囲	2
1.2	用語の定義	4
2 章	炭素繊維シート接着工法による補修・補強の適用方法	6
2.1	適用の目的	6
2.2	適用方法	6
2.2.1	基本的考え方	6
2.2.2	詳細調査	7
2.2.3	性能評価	8
2.2.4	コンクリート床版およびコンクリートげた等への適用方法	9
3 章	使用材料	10
3.1	原則	10
3.2	炭素繊維シート	10
3.3	プライマー	12
3.4	不陸修正材	13
3.5	含浸接着樹脂	14
3.6	その他の材料	14
4 章	補修・補強設計	16
4.1	原則	16
4.1.1	補修・補強設計の基本	16
4.1.2	補修・補強設計図に記載すべき事項	16
4.2	コンクリート部材の補修・補強設計	16
4.2.1	コンクリート床版の補修・補強設計	16
4.2.2	コンクリートげた等の補修・補強設計	17
4.3	CFRPシートの劣化および外衝からの保護	17
4.3.1	劣化からの保護	17
4.3.2	外衝からの保護	17

5 章	施工	18
5.1	原則	18
5.2	施工計画	18
5.3	施工順序	18
5.4	施工標準	18
5.4.1	準備工	18
5.4.2	断面修復工	19
5.4.3	ひび割れ処理工	19
5.4.4	下地処理工	20
5.4.5	プライマー工	20
5.4.6	不陸修正工	21
5.4.7	墨出し工	21
5.4.8	炭素繊維シート接着工	21
5.4.9	養生工	22
5.4.10	仕上げ工	22
5.5	品質管理および検査	22
5.5.1	使用材料の品質	22
5.5.2	材料の保管	22
5.5.3	CFRPシートの品質	23
5.5.4	検査	24
5.6	施工記録	24
5.7	安全管理	24
6 章	維持管理	25
6.1	原則	25
6.2	CFRPシートの健全度調査	25
6.2.1	外観調査	25
6.2.2	詳細調査	25
6.3	CFRPシートの機能維持を目的とする補修	25

Ⅱ コンクリート床版編

1 章	総則	27
1.1	適用範囲	27
1.2	用語の定義	28
2 章	調査	30
2.1	一般	30
2.2	調査	30
2.2.1	調査事項	30
2.2.2	橋梁の履歴、構造諸元の調査	30
2.2.3	床版の状況の調査	31
2.2.4	現場の外的条件の調査	31
3 章	使用材料	33
3.1	一般	33
3.2	特記事項	33
4 章	補修・補強設計	34
4.1	一般	34
4.2	材料の設計用値	36
4.3	補修設計	36
4.4	補強設計	36
4.5	構造細目	38
4.5.1	炭素繊維シートの貼付け	38
4.5.2	継手	39
5 章	施工	42
5.1	一般	42
5.2	特記事項	42
6 章	維持管理	44
6.1	一般	44

Ⅲ コンクリートけた編

1 章	総則	45
1.1	適用の範囲	45
1.1.1	本編の適用範囲	45
1.1.2	炭素繊維シート接着工法の適用方法	45
1.1.3	炭素繊維シートの選定	47
1.2	用語の定義	47
2 章	保有性能の調査と評価	48
2.1	基本的考え方	48
2.2	調査	48
2.2.1	資料調査	48
2.2.2	現地調査	50
2.3	保有性能の評価	54
2.3.1	原則	54
2.3.2	けた等を構成する材料が保有する性能の評価	54
2.3.3	けた等が部材として保有する性能の評価	55
2.4	保有性能の評価結果の適用	55
3 章	使用材料	57
3.1	一般	57
3.2	定着用材料	57
4 章	補修・補強設計	58
4.1	一般	58
4.2	材料の設計用値	58
4.2.1	CFRPシート	58
4.2.2	既存の鉄筋およびP C鋼材	58
4.2.3	既存のコンクリート	59
4.3	補修設計	59
4.3.1	基本方針	59
4.3.2	補修設計	60

4.4	曲げ補強設計	61
4.4.1	基本的考え方	61
4.4.2	鉄筋コンクリートげたの曲げ補強設計	61
4.4.3	プレストレストコンクリートげたの曲げ補強設計	64
4.4.4	構造細目	66
4.5	せん断補強設計	68
4.5.1	基本的考え方	68
4.5.2	コンクリートげた等のせん断補強設計	69
4.5.3	構造細目	71
5章	施工	73
5.1	一般	73
5.2	特記事項	73
6章	維持管理	74
6.1	一般	74
6.2	CFRPシートの健全度調査	74
6.2.1	外観調査	74
6.2.2	詳細調査	74
6.3	CFRPシートの機能維持を目的とする補修	74

付属資料

付属資料 1	炭素繊維シート接着工法の現状と動向	75
1.1	炭素繊維シートの種類	75
1.1.1	炭素繊維シートの強度特性	75
1.1.2	炭素繊維シートの構造	75
1.2	炭素繊維シートの適用分野と適用件数	77
1.3	他の補修・補強工法との比較	77
付属資料 2	使用材料とCFRPシート	79
2.1	付属資料 2 の目的	79
2.2	使用材料の性能	79
2.2.1	炭素繊維シート	79
2.2.2	プライマー	79
2.2.3	不陸修正材	80
2.2.4	含浸接着樹脂	80
2.2.5	その他の材料	81
2.3	本研究におけるCFRPシートの引張試験結果	83
2.3.1	引張試験の目的	83
2.3.2	引張試験方法	83
2.3.3	引張試験結果	85
2.3.4	引張試験結果の評価	86
2.4	CFRPシートの設計用値の設定	87
2.4.1	設計用値設定の目的	87
2.4.2	設計用値の策定	87
2.5	CFRPシートの耐久性に関する調査結果	89
2.5.1	調査の目的と調査方法	89
2.5.2	引張強度に関する耐候性	89
2.5.3	接着強度に関する耐候性	91
2.5.4	CFRPシートの耐水性	93
2.5.5	CFRPシートの耐海水性	94

付属資料 3	炭素繊維シート接着工法の施工方法と管理の目安	95
3.1	付属資料 3 の目的	95
3.2	各工種の施工方法と管理の目安	95
3.2.1	原則	95
3.2.2	施工計画	95
3.2.3	準備工	96
3.2.4	下地処理工	99
3.2.5	プライマー工	101
3.2.6	不陸修正工	102
3.2.7	墨出し工	103
3.2.8	炭素繊維シート接着工	103
3.2.9	施工記録・管理シート	106
3.2.10	安全注意事項	108
付属資料 4	炭素繊維シートで補強した鉄筋コンクリート床版の 輪荷重走行試験結果の概要	109
4.1	はじめに	109
4.2	試験方法および供試体	109
4.3	試験結果と考察	111
4.3.1	破壊荷重と破壊回数	111
4.3.2	補強前後のたわみ、ひずみ、ひび割れ幅	113
4.3.3	補強後のたわみ、ひずみ、ひび割れ幅	113
4.3.4	炭素繊維シート補強床版の疲労破壊メカニズムの検討	115
4.4	まとめ	118

付属資料5	コンクリートげたに関する評価試験結果の概要	121
5.1	CFRPシートの付着試験結果	121
5.1.1	試験の目的	121
5.1.2	付着試験方法	121
5.1.3	付着試験結果	122
5.1.4	付着試験結果の考察	123
5.2	CFRPシートの継手試験結果	129
5.2.1	試験の目的	129
5.2.2	継手試験方法	129
5.2.3	継手試験結果	130
5.2.4	継手試験結果の考察	131
5.3	鉄筋コンクリートげたの曲げ補強試験結果	132
5.3.1	試験の目的	132
5.3.2	試験概要	132
5.3.3	主鉄筋活荷重応力度および活荷重変位の 低減効果に関する考察	134
5.3.4	破壊抵抗曲げモーメントの向上効果に関する考察	136
5.4	プレストレストコンクリートげたの曲げ補強試験結果	140
5.4.1	試験の目的	140
5.4.2	検討対象モデル	140
5.4.3	試験概要	140
5.4.4	試験結果および考察	141
5.4.5	まとめ	143
5.5	鉄筋コンクリートげたのせん断補強試験結果	144
5.5.1	試験の目的	144
5.5.2	試験概要	144
5.5.3	試験結果の概要	147
5.5.4	せん断耐力向上効果に関する考察	148
5.5.5	まとめ	154

付属資料 6	コンクリートげたの補強に関する計算例	157
6.1	鉄筋コンクリートげたの曲げ補強に関する計算例	157
6.1.1	計算条件	157
6.1.2	現状断面の安全性照査	158
6.1.3	部材断面の応力度低減を目的とする補強	159
6.1.4	補強後のたわみ改善効果の推定	160
6.1.5	部材の破壊抵抗曲げモーメント向上を目的とする補強	161
6.1.6	補強計算のまとめ	163
6.2	プレストレストコンクリートげたの曲げ補強に関する計算例	164
6.2.1	計算条件	164
6.2.2	現在断面の安全度照査	166
6.2.3	炭素繊維シートによる補強計算方針	167
6.2.4	設計荷重作用時の補強設計手法 1) による補強計算	168
6.2.5	設計荷重作用時の補強設計手法 2) による 補強計算—その 1	170
6.2.6	設計荷重作用時の補強設計手法 2) による 補強計算—その 2	174
6.2.7	終局荷重作用時の安全性照査	176
6.3	プレストレストコンクリートげたのせん断補強に関する計算例	182
6.3.1	計算条件	182
6.3.2	せん断補強計算	184
6.3.3	定着部の検討	188

I 共通編

1 章 総則

1.1 適用の範囲

1.1.1 指針(案)適用の範囲

(1) 本指針(案)は、道路橋のコンクリート床版、または、コンクリートげた等を対象として行う、炭素繊維シート接着工法による補修・補強の設計・施工に適用してよい。

(2) 本指針(案)は、I 共通編、II コンクリート床版編、および、III コンクリートげた編で構成し、各編の適用範囲は、以下のとおりとする。

1) I 共通編

道路橋を対象として行う、炭素繊維シート接着工法による補修・補強の設計・施工に関して、IIおよびIII編に共通する事項

2) II コンクリート床版編

コンクリート床版に関する事項

3) III コンクリートげた編

コンクリートげた等に関する事項

(1) 建設省土木研究所と炭素繊維補修・補強工法技術研究会との共同研究である「コンクリート部材の補修・補強に関する研究」で実施した、鉄筋コンクリート床版の輪荷重走行試験機による疲労試験、および、鉄筋コンクリートげたとプレストレストコンクリートげたの繰返し載荷による疲労試験と静的載荷試験は、炭素繊維シート接着工法による補修・補強を施したそれぞれの部材が道路橋の主要部材として供用されることを前提に試験荷重とその載荷方法を設定して、それぞれの部材に対する補修・補強効果を確認する目的を持ったものであった。そして、それらの試験により、炭素繊維シート接着工法による補修・補強は、鉄筋コンクリート床版の輪荷重走行に対する疲労耐久性向上に、そして、鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリートげたの曲げとせん断耐力向上に、それぞれ効果を持つことを確認することができた。

したがって、これらの諸試験結果の評価を基に策定した本指針(案)は、道路橋の鉄筋コンクリート床版、または、鉄筋コンクリートげたおよびプレストレストコンクリートげたを対象とする炭素繊維シート接着工法による補修・補強の設計・施工に適用してよいこととする。

また、炭素繊維シート接着工法によるコンクリート部材の補修・補強は、これらのコンクリート部材に留まらず、道路橋を構成する他のコンクリート部材や道路橋以外のコンクリート部材などを対象とする幅広い適用の可能性を持つものである。したがって、本工法を道路橋の鉄筋コンクリート床版、または、鉄筋コンクリートげたおよびプレストレストコンクリートげた以外のコンクリート部材の補修・補強へ適用する場合は、その適用目的が補修である場合には本工法の施工条件と補修効果について、また、本工法の適用目的が補強である場合には本研究結果の適用性について、それぞれ十分な検討がなされることを前提に、本指針(案)

の適用を考えてよい。

なお、本指針(案)に規定していない事項については、道路橋示方書の関連規定、および、関連する技術基準や技術資料等を必要に応じて参考とし、それらの設定目的を十分に検討して適用することが望ましい。

(2) 2) ここで言うコンクリート床版とは、鋼およびコンクリート道路橋における鉄筋コンクリート床版、および、これと劣化・損傷機構が同じ場合のプレストレストコンクリート床版のことである。

3) ここで言うコンクリートげた等とは、道路橋の鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート造の主げた、横げた、縦げた等の、けたと見なし得るコンクリート部材のことである。

1.1.2 適用工法の範囲

本指針(案)を適用することができる炭素繊維シート接着工法は、含浸接着樹脂によって炭素繊維シート中の隣接する炭素繊維を結合しながら、このシートをコンクリート部材表面に接着してCFRPシート化することができる工法とする。

炭素繊維は、ポリアクリロニトリル(PAN)、レーヨン、石油または石炭ピッチ、フェノール樹脂などの原料を紡糸したものを不活性ガス中で2,000～3,000℃の高温で焼成、炭素化して製造される、軽量、高強度、高弾性、高耐食性、などの優れた特性を持つ高性能無機繊維であり、その原材料あるいは製造法などにより強度や弾性係数に特徴のある性質を示し、高強度型、高弾性型などに分類されている。現在利用されている炭素繊維の物理的特性は、おおむね、密度1.8～2.1g/cm³、引張強度2.0～7.0kN/mm²、ヤング係数250～800kN/mm²の範囲のものである。

炭素繊維の直径は、7～10μmと極めて細いものであり、これを6,000～24,000本程収束させたストランドが工業用に使用されている。炭素繊維シートは、このストランドを1m幅当たり数百本ならべてシート状にしたもので、繊維目付量200g/m²のシート1m幅当たりには炭素繊維の素線が約300万本含まれている。炭素繊維は、含浸樹脂と複合化してCFRPを形成し、構造材料として優れた引張性能を発揮する。

炭素繊維シート接着工法は、含浸接着樹脂を含浸させた炭素繊維シートをコンクリートに接着すると同時に現場でCFRPシートを形成し、既設のコンクリート部材を補修・補強する能力を持つ工法である。

炭素繊維シート接着工法は、以下の特徴を有している。

① 設計への適用性

- ・炭素繊維シートは、炭素繊維が主として一方向に配列され、炭素繊維の持つ優れた引張強度と弾性特性が最大限に発揮され、目的別に高い補強効果を得ることができる
- ・炭素繊維シートは、軽量で薄く、補修・補強によるコンクリート部材の断面寸法の増加、および重量増加が殆どない
- ・炭素繊維シート積層枚数の調整により、必要補強量に対応することができる

② 施工性

- ・炭素繊維シートを常温硬化型樹脂で接着するだけの作業であり、小人数かつ短い工期で施工できる
- ・手作業だけで施工が可能であり、重機が不要で、施工スペースの制約を受けない
- ・炭素繊維シートは、コンクリート部材の複雑な形状にも追従して貼付することができる

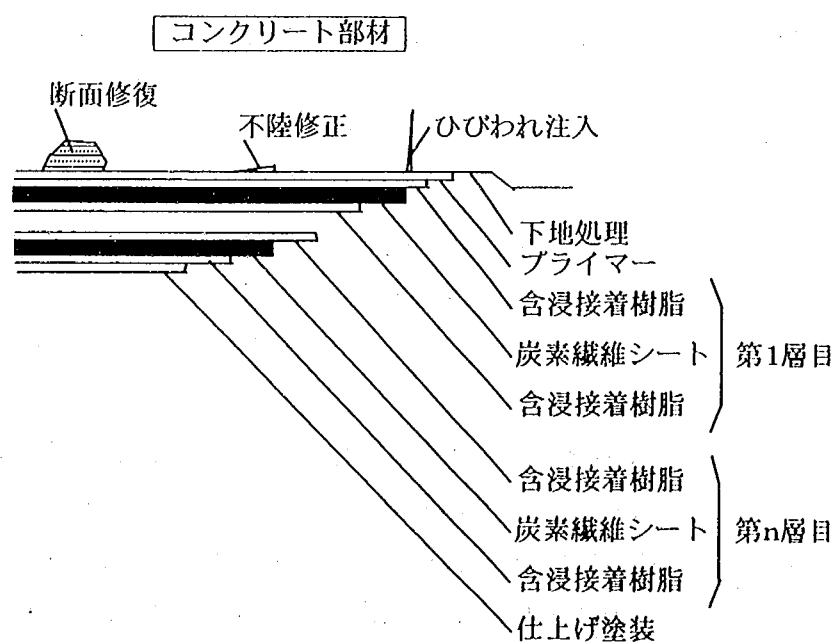
・使用材料は軽量で可搬性に優れ、狭隘部等の施工にも適している

③ 耐久性・耐食性

- ・使用材料が炭素繊維と樹脂だけであり、鋼材の様に錆を発生することが無く、耐久性に優れている
- ・樹脂による外的劣化要因の遮断効果により、コンクリートの劣化、コンクリート中の鋼材の発錆と腐食を抑えることができる

本指針(案)は、炭素繊維シートを、含浸接着樹脂を塗布したコンクリート部材表面に押し付けて、コンクリート部材表面のなだらかな凹凸に追随させつつ接着を確認しながら貼り付け、かつ、同時に、炭素繊維シートへの含浸接着樹脂の含浸を確認しながら作製したCFRPシートを用いて実施した諸試験結果の評価を基に策定したものである。したがって、本指針(案)を適用することができる工法の範囲は、本文に規定する工法であることとした。しかし、この規定は、例えば、任意の時期に含浸樹脂を含浸させた炭素繊維シートと、これをコンクリート部材表面のなだらかな凹凸への追随性と接着性を確保することができる性能を持つ接着樹脂とによるCFRPシートの作製技術が開発された場合等のように、新しい技術の適用を妨げるものではない。

炭素繊維シート接着工法により作製したCFRPシートの標準断面を 図一解 1.1.1 に示す。



図一解 1.1.1 炭素繊維シート接着工法によるCFRPシート標準断面図

1.2 用語の定義

本指針(案)の各編において共通して使用する用語を以下に定義する。

(1) コンクリート部材に関する用語

- 1) コンクリート床版 構造上、鉄筋コンクリートまたはプレストレストコンクリート造の床版と見なし得るコンクリート部材
- 2) コンクリートげた等 構造上、鉄筋コンクリートまたはプレストレストコンクリート造のけたと見なし得るコンクリート部材

(2) 補修・補強に関する用語

- 1) 健全度 築造時にコンクリート部材が保有していた物理・化学的、または力学的性能、および、供用上の機能性等、諸性能の残存度を示す指標
- 2) 損傷度 物理・化学的劣化、または耐荷力等の力学的性能の低下等、コンクリート部材が持つ諸性能の、築造時からの低下程度を示す指標
- 3) 補修 コンクリート部材が現在保有する諸性能の低下を防止し、かつ、その性能に耐久性を付与するために施す対策
- 4) 補強 コンクリート部材が現在保有する諸性能を向上させ、かつ、その性能に耐久性を付与するために施す対策
- 5) 耐久性 コンクリート部材が保有している諸性能の経時変化に抵抗する性質、または、その諸能力を継続的、永続的に維持し発揮する性質

(3) 炭素繊維に関する用語

- 1) 炭素繊維 炭素を主たる構成分子とした繊維状の結晶体
- 2) 炭素繊維シート 炭素繊維の素線を一方向に敷き並べ、または二方向に織ってシート状にしたものの
- 3) 繊維目付量 炭素繊維シート 1m² 当たりの炭素繊維の質量

(4) 樹脂に関する用語

- 1) プライマー コンクリートの表面に塗布し、浸透させてコンクリート表面を強化すると共に、コンクリートとCFRPシートとの接着性を向上させる機能を持つ樹脂
- 2) 不陸修正材 プライマー塗布後のコンクリート表面の凹凸や鋭角な段差等の修正・矯正を行う機能を持つパテ材
- 3) 含浸接着樹脂 炭素繊維シートに浸透し隣接する炭素繊維素線を結合してCFRPシート化する機能と共に、炭素繊維シートをコンクリート表面に接着する機能を持つ樹脂
- 4) 可使時間 樹脂に要求されている任意の機能を発揮させることができる取扱い時間
- 5) 指触乾燥 樹脂の塗布後、時間が経過して、樹脂が指先に付着しなくなった状態
- 6) 初期硬化 樹脂の硬化が進行し、樹脂表面に爪が立たない状態
- 7) 完全硬化 樹脂の硬化が終了し、それ以降、強度がほとんど増加しない状態

(5) 炭素繊維シートによる補修・補強工に関する用語

- 1) 断面修復工 コンクリートはく落等の断面欠損を補修材で原形へ戻す工程
- 2) ひび割れ注工 コンクリートのひび割れに充填材を注入し、ひび割れを閉塞する工程
- 3) 下地処理工 コンクリート表面の汚れ、および脆弱層を除去し、表面の凹凸や鋭角段差等を切削してなだらかにする工程
- 4) 不陸修正工 プライマー塗布後のコンクリート表面の比較的軽微な凹凸や鋭角な段差等に不陸修正材を塗布して、これをなだらかにする工程
- 5) 墨出し工 炭素繊維シートの接着位置をコンクリートの表面に原寸表示する工程
- 6) 炭素繊維シート接着工 含浸接着樹脂を塗布したコンクリート表面に炭素繊維シートを押し付けて、接着すると同時に樹脂の含浸を確認しながら貼り付ける工程
- 7) 養生工 含浸接着樹脂で含浸・接着した炭素繊維シートが所要の性能を発揮できるよう、含浸接着樹脂の硬化進行を妨害する要因から保護する工程
- 8) 保護工 CFRPシートが紫外線劣化や火災、車等の衝突などにより、所要の性能を損なうことのないよう、その表面に保護材料を施す工程
- 9) 仕上げ工 周辺環境との調和を図る等の目的で、CFRPシートまたは保護用材料の表面に処理を施す工程

(6) CFRPに関する用語

- 1) CFRP 樹脂を含浸させた炭素繊維で、樹脂が隣接する炭素繊維を結合し完全硬化した状態にあるもの
- 2) CFRPシート 樹脂を含浸させた炭素繊維シートで、樹脂が隣接する炭素繊維を結合し完全硬化した状態にあるもの
- 3) CFRPシートのはく離破壊 CFRPシートが引張力作用下でコンクリート表面からはく離し破壊する現象
- 4) CFRPシートの保証引張強度 CFRPシートとして保証される引張破断強度
- 5) CFRPシートの許容引張応力度 設計上CFRPシートに発生することを認める引張応力度の限度
- 6) CFRPシートのヤング係数 引張応力～ひずみ曲線の弾性限界範囲における直線部分(破断強度の20～60%部分)の平均勾配
- 7) CFRPシートの保証ひずみ CFRPシートの保証引張強度をCFRPシートのヤング係数で除した値

2章 炭素繊維シート接着工法による補修・補強の適用方法

2.1 適用の目的

炭素繊維シート接着工法は、コンクリート部材が現在保有する諸性能の一部、あるいは全部を対象として、その性能の低下を防止し、かつ、その性能に耐久性を付与することを目的とする補修に、また、その性能を向上させ、かつ、その向上結果に耐久性を付与することを目的とする補強に、それぞれ適用することができる。

炭素繊維シート接着工法の適用目的は、CFRPシートの優れた環境影響遮断性とその耐久性を利用した補修、および、CFRPシートとコンクリート部材との複合材としての優れた耐荷性とその耐久性を利用した補強の二つに分けることができる。

炭素繊維シート接着工法による補修は、本工法により作製するCFRPシートがコンクリート部材を構成する材料の外的な劣化要因の侵入を遮断する能力を持つ高耐久性材料であり、しかも、補修計画に、炭素繊維シート貼付けによるコンクリート部材の力学的抵抗力の向上を期待しないものの、コンクリート部材に発生するひび割れの分散とひび割れ幅の減少をもたらし、これにより、外的な劣化要因の侵入を遮断する効果を更に高めるといふ、他の補修工法にない特徴を有している。

したがって、炭素繊維シート接着工法による補修は、現在置かれている荷重作用あるいは環境作用下において、今後発生が予想されるコンクリート部材を構成する材料の劣化を未然に防ぐことによって、コンクリート部材として現在保有している諸性能の一部または全部に低下が発生することを防止し、あるいは、既に発生しているコンクリート部材を構成する材料の劣化の進行を阻止することによって、コンクリート部材に既に発生している性能低下の進行を阻止し、かつ、その性能に耐久性を付与することができる。

一方、炭素繊維シート接着工法による補強は、コンクリート部材が現在保有する諸性能の一部、あるいは全部を向上させ、その向上結果に耐久性を付与することを目的とする補強であって、これにより、対象コンクリート部材の劣化や損傷の有無に関わらず、現在供用中の荷重あるいは環境条件に耐え得ない部材の諸性能を所定の性能まで向上させ、また、今後可能性のある荷重作用の増加あるいは環境作用の過酷化に耐え得る諸性能を予め持たせた部材とすることができる。

2.2 適用方法

2.2.1 基本的考え方

炭素繊維シート接着工法によるコンクリート部材の補修・補強は、その部材が現在保有している諸性能、部材が現在置かれている、または、将来置かれる予定の荷重作用および環境作用などの供用条件から定まる要求性能、および、補修・補強と維持管理の費用などの経済性等を総合的に検討し、その適用の目的、方法、および、その施工時期を明確に定めることとする。

炭素繊維シート接着工法による補修・補強は、その対象とするコンクリート部材に関して行う諸調査結果からコンクリート部材が現在保有する諸性能の評価を行い、これを現在または将来においてコンクリート部材が置かれる荷重作用または環境作用などの供用条件から定まる要求性能と対比して、想定される補修・補

強とその後の維持管理に要する費用等を総合的に検討することによって、補修・補強の目的、その程度または内容、および、その施工時期を明確に決定して、これを適用することが望ましい。

2.2.2 詳細調査

(1) 炭素繊維シート接着工法によるコンクリート部材の補修・補強を計画するに当たっては、その対象とするコンクリート部材の置かれている現状を明確に把握することを目的とする、詳細調査を行わなければならない。

(2) 詳細調査は、資料調査および現地調査とから構成する。

(1) 建設省土木研究所「土木研究所資料第2651号、橋梁点検要領(案)、昭和63年7月」によれば、橋梁点検の種別は、通常点検、定期点検、異常時点検、耐震点検、追跡調査、詳細調査の6つとされ、通常点検や定期点検の結果を評価する損傷度の標準として、表一解 1.2.1 が定められている。

表一解 1.2.1 損傷度の標準

区分	一般的状態
I	損傷が著しく、交通の安全確保の支障となる恐れがある
II	損傷が大きく、詳細調査を実施し、補修するかどうかの検討を行う必要がある
III	損傷が認められ、追跡調査を行う必要がある
IV	損傷が認められ、その程度を記録する必要がある
健全	点検の結果から損傷は認められない

したがって、補修・補強を行うこととされたコンクリート部材は、区分ⅠまたはⅡに属する損傷により、現在の荷重作用または環境作用に対して何らかの不都合、例えば、部材を構成する材料の環境作用による劣化を原因とする部材の劣化・損傷、または、この劣化・損傷による耐荷性能の低下などの問題を抱えていることとなる。なお、コンクリート床板とコンクリートげた等とは、各損傷度区分に該当する具体的損傷内容が大きく異なっており、また、その損傷内容に対する補修・補強の方法と程度も大きく異なるものとなる。したがって、コンクリート床版およびコンクリートげた等の各損傷度区分に該当する損傷内容の目安は、それぞれ、Ⅱ および Ⅲ の各編に定めるものとする。

一方、劣化・損傷の認められない健全なコンクリート部材の補修・補強は、現在の荷重作用下または環境作用下において部材が保有する諸性能に発生する劣化・損傷を未然に防ぐことを目的とする補修、あるいは、今後可能性のある荷重作用の増大または環境作用の過酷化に耐え得る諸性能を予め持たせた部材とすることを目的とする補強が要求されていることとなる。

このようなコンクリート部材の補修・補強を計画するに当たっては、部材が現在保有している諸性能と、部材の置かれている荷重および環境作用の現状、あるいは、今後の荷重および環境作用の過酷化の程度を明確にして、対象とする部材の供用性、耐久性および経済性を十分に検討して、補修あるいは補強のいずれを目的とするか、また、その内容をどの程度にするか等を決定するための調査が必要となる。

(2) 詳細調査は、一般に資料調査と現地調査とから構成される。これらの調査は、コンクリート部材の諸性能の評価および補修・補強内容の決定に資する調査結果を得ることができる手法と内容であることが必要である。

資料調査は、補修・補強の対象とするコンクリート部材に関して、建設当時、あるいは建設の後に増設または補修・補強が行われている場合にはその時の諸資料、また、新たに補修・補強が必要とされるに至った通常点検から追跡調査までの経過資料等を調査し、その時々により必要とされた諸性能の種類とその程度を明確にし、現時点での評価法によりそれらを再評価するための基礎資料を得ることを目的とするものである。

現地調査は、これまで既に行われてきた通常点検と追跡調査の結果から補修・補強の検討が必要であると判定されたコンクリート部材を対象とすることから、主に点検機械・器具を用いて実施される詳細な現地調査によることとなる。現地調査は、調査対象とするコンクリート部材およびこれを構成する材料が現在保有する、諸性能の程度を評価するに有効な資料を得ることができる調査手法の選定が重要である。

2.2.3 性能評価

炭素繊維シート接着工法による補修・補強を計画するコンクリート部材の性能評価は、詳細調査結果をもとに、一般に、

- ① 部材を構成する材料が保有する物理・化学的あるいは力学的諸性能
- ② 部材が保有する物理・化学的あるいは力学的諸性能
- ③ その他、特別の目的を持って求められている性能など

について行うものとする。

炭素繊維シート接着工法による補修・補強を計画するコンクリート部材は、詳細調査で実施した資料調査および現地調査の結果をもとに、現在用いられている種々の性能評価手法により、部材を構成する材料および部材そのものが現在保有している諸性能の種類とその程度を評価する。

一般に、物理的性能は、物質の構造・熱・光・電磁波・電磁気・音などに関する性質であるとともに、長さ・面積・体積等の形や位置など、物質の状態に関する性能とされ、一方、化学的性能は、物質の電気化学的性質・分子構造および物質間の作用の変化などに関する性能とされている。また、機械的性能は、密度や粘度ならびに弾性に関する定数および引張強さや応力～ひずみの関係などの物性を示すものであり、力学的性能は、物理的性能の一つであり、物体の運動とそれに作用する力に関する性能とされている。

本指針(案)では、以上の性能表現をふまえ、物理的性能は長さ・面積・体積等の形や位置などの状態に関する性能を、化学的性能は物質を構成する分子間の電気的作用に関する性能を、力学的性能は密度や機械的物性に加え、荷重作用に抵抗する性能を、それぞれ意味するものとする。

したがって、ここにあげた ①～③ の性能には、

- ① について、セメント硬化体が持つ化学的な鋼材を保護する性能
コンクリートが持つかぶり等の物理的性能および圧縮強度等の力学的性能
鋼材が持つ断面寸法等の物理的性能および引張強度等の力学的性能
- ② について、コンクリートが持つ断面寸法等の物理的性能

構成材料の複合体として部材断面が持つ荷重作用に抵抗する力学的性能

③ について、特に要求される薬品抵抗性、環境抵抗性、特殊荷重抵抗性など
のようなものがあるといえる。

2.2.4 コンクリート床版およびコンクリートげた等への適用方法

炭素繊維シート接着工法によるコンクリート床版およびコンクリートげた等の補修・補強は、それぞれの部材が現在保有している諸性能の評価結果を踏まえて、「本章、2.2 適用方法、2.2.1 基本的考え方」に準拠して、その適用の目的、内容あるいは方法、および時期等を定めるものとする。

部材が現在保有している諸性能の評価結果は、これを建設当初に保有していたと推定される性能と比較することにより、各性能の健全度あるいは劣化・損傷度の把握に利用するとともに、劣化・損傷が認められた性能についてその劣化・損傷の原因解明と、その原因に対する抵抗性の検討に利用することが望ましい。

炭素繊維シート接着工法によるコンクリート床版およびコンクリートげた等の補修・補強は、「本章、2.2 適用方法、2.2.1 基本的考え方」に準拠して、総合的に評価した諸性能を、現在あるいは将来における荷重または環境作用などの供用条件と維持管理方法等、および、補修・補強と維持管理に要する費用などの経済性等を総合的に検討して決定される要求性能と対比することにより、その適用の目的等を定めなければならない。

3章 使用材料

3.1 原則

炭素繊維シート接着工法による、コンクリート床版やコンクリートげたなどの、コンクリート部材の補修・補強に使用する材料は、その使用目的および施工性から定まる要求性能を満足する性能を有していなければならない。

CFRPシートの性能は、強度、伸び能力、ヤング係数、温度特性、耐久性、物質遮断性、化学抵抗性などにより表される。一方、炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート床版やコンクリートげた等の補修・補強を行う場合、炭素繊維シートおよび樹脂含浸後のCFRPシートに要求される性能は、補修・補強の対象とする構造物に要求される性能の種類やその要求度により異なる。

炭素繊維シート接着工法の工事進捗に合わせて用いる材料は、一般に、

- ① ひびわれ補修材 ② 断面修復材 ③ プライマー ④ 不陸修正材 ⑤ 含浸接着樹脂
⑥ 炭素繊維シート ⑦ 表面仕上げ材

があり、これらの材料のうち、主要材料である③、④、⑤ および⑥ の個々の性能は、現場で形成されるCFRPシートの性能および構造物の補修・補強後の品質に影響を与える材料であり、その他の材料①、② および⑦ は、対象構造物の各種条件に応じて使用する材料である。

ここで使用する主要材料は、これらを組み合わせることによる複合材としての力学的性能および耐久性について、また、その他の材料は、それぞれの性能および耐久性が、使用目的から定まる要求性能を満足することが試験により確認されたものを用いるものとする。

また、全ての材料は、現場施工条件に適合した施工性を持つものでなければならない。

3.2 炭素繊維シート

本工法で使用する炭素繊維シートは、補修設計あるいは補強設計で要求される物理・化学的性能および力学的性能を満足するものでなければならない。

炭素繊維シートは、それが保有する繊維目付量などの物理的性能、引張強度あるいはヤング係数などの力学的性能が異なる、各種の製品が市販されているが、一般には高強度型、高弾性型に二分されている。しかし、本指針(案)では、設計の便宜上、高強度型と高弾性型の中間的な性能を持つものを中弾性型と区別することとした。高強度型、中弾性型、高弾性型の炭素繊維シートは、コンクリート床版およびコンクリートげた等の補修・補強の目的と要求性能、および、使用部位に応じて使い分けることができる。ただし、いずれの種類の炭素繊維シートも含浸接着樹脂との複合材料であるCFRPシートとして試験を行い、要求される物理・化学的性能と力学的性能とが確認されたものでなければならない。

補修・補強設計に適用される炭素繊維シートの一般的な性能を 表一解 1.3.1 に示す。

表一解 1.3.1 本工法に使用する炭素繊維シートの一般的性能

項 目	性 能	試験方法
繊維目付量	設計で用いた繊維目付量以上	JIS K 7071に準拠 JIS R 7602に準拠
引張強度	設計で用いた引張強度以上	JIS K 7073に準拠
ヤング係数	設計で用いたヤング係数の ±10%の範囲	JIS K 7073に準拠

JIS K 7071 炭素繊維およびエポキシ樹脂からなるプリプレグの試験方法

JIS R 7602 炭素繊維織物試験方法

JIS K 7073 炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法

炭素繊維シートの引張強度およびヤング係数を算定するための断面積 A_{cf} は、一般に炭素繊維のみの断面積を用いている。この断面積 A_{cf} は、炭素繊維シート単位幅当たりの断面積であり、炭素繊維シート1枚の単位断面積当たりの質量である繊維目付量 W_{cf} を炭素繊維の密度 ρ_{cf} で除した値である。

炭素繊維シートのヤング係数、繊維目付量、断面積、厚さの標準値は、表一解 1.3.2 に示した通りである。

表一解 1.3.2 炭素繊維シートのヤング係数および繊維目付量断面積、厚さの標準値

分 類	ヤング係数 E_{cf} (kN/mm^2)	繊維目付量 W_{cf} (g/m^2)	断面積 A_{cf} (mm^2/m)	厚さ t_{cf} (mm)
高強度	245 (2.5×10^6)	200	111	0.111
		300	167	0.167
中弾性	390 (4.0×10^6)	300	165	0.165
	440 (4.5×10^6)	300	163	0.163
高弾性	540 (5.5×10^6)	300	143	0.143
	640 (6.5×10^6)	300	143	0.143

() 内数値の単位は kgf/cm^2

設計計画時の便宜を図るため、現時点で商品化されている炭素繊維シートを、CFRPシートとしての保証引張強度およびヤング係数の平均値で分類して 表一解 1.3.3 に示す。

CFRPシートの引張強度は、炭素繊維シートと含浸接着樹脂の組合わせにより変化し、そのばらつきは鋼材に比べて大きいのが通常である。保証引張強度 $\sigma_{cf, \text{tok}}$ は、その分布が正規分布であると見なし、一般に、

平均引張強度 χ から標準偏差 σ_n の3倍を減じた $\sigma_{cfuk} = (\chi - 3\sigma_n)$ が用いられている。これは、保証引張強度が99.9%の信頼性を保有していることを示している。

また、ヤング係数は、土木学会基準「JSC-E131 連続繊維補強材の品質規格」および「JSC-E531 連続繊維補強材の引張試験方法」に定める引張弾性率測定法により求めた値である。表一解 1.3.3 に示したヤング係数は、一般に引張強度に比べばらつきが小さいことから、試験値の平均値を用いている。

表一解 1.3.3 炭素繊維シートの保証引張強度 σ_{cfuk} およびヤング係数 E_{cf} の平均値の分類表

分類	σ_{cfuk} (kN/mm ²) E_{cf} (kN/mm ²)	1.9 (20,000)	2.4 (25,000)	2.9 (30,000)	3.4 (35,000)
高強度	245 (2.5×10^6)			FTS-C0-20/30 トカロス 2方向300 MRK-M2-20S/30S	FTS-C1-20/30 トカロス 200/300 MRK-M2-20/30 TUKロス ST200/HIT300
中弾性	390 (4.0×10^6)		MRK-M4-30S	FTS-C5-30 MRK-M4-30 TUKロス HM300	
	440 (4.5×10^6)		トカロス HM30 MRK-M5-30 FTS-C5S-30 TUKロス HM300S		
高弾性	540 (5.5×10^6)	FTS-C7-30 TUKロス UHM300L			
	640 (6.5×10^6)	FTS-C8-30 MRK-M6-30 TUKロス UHM300			

()内数値の単位は kgf/cm²、FTS(A社品)、トカロス(B社品)、MRK(C社品)、TUKロス(D社品)

なお、本表の数値は、国際単位系へ換算後に、保証引張強度を有効数字2桁、ヤング係数を有効数字3桁で表示したものであり、各材料の保有性能値は、従来の重力単位系で表示した数値を満すものである。

3.3 プライマー

- (1) プライマーは、コンクリート表面にむらのない塗膜を形成し、コンクリート表層部へ浸透し、かつ、微細な凹部にも入り込むことができる粘度、および、コンクリートと含浸接着樹脂または炭素繊維シートとの接着性などの性能を有するものでなければならない。
- (2) プライマーは、その接着性について、十分な耐久性を有するものでなければならない。
- (3) プライマーは、対象構造物のおかれている施工環境条件下で適切な施工性を有するものでなければならない。

(1) プライマーの保有すべき性能を記述したものである。プライマーは、一般にエポキシ樹脂系の2液混合型のものが用いられている。コンクリート表面全体にむらなく塗布できるとともに、コンクリート表層部へ

浸透し、微細な凹部にも容易に入り込める適度な粘度を持つ必要がある。また、プライマーは、荷重作用等によってコンクリート表面に発生しているあらゆる方向のひずみをCFRPシートへ確実に伝達する力学的性能を持つべきものであるから、接着強度がプライマーに要求される重要な性能となる。

(2) 本工法によるコンクリート部材の補修・補強は、部材の延命化をその目的とする場合がある。したがって、プライマーは、この目的を達成するために、上記性能を満足するとともに、十分な耐久性をもつことが必要であることから、荷重作用および環境作用に対する耐久性を有することが確認されたものでなければならない。

(3) プライマーは、可使時間や粘度など、混合量や施工環境温度、また、塗布するコンクリート面の乾燥状態によって、浸透性、塗布性が変化する。したがって、プライマーは、各施工環境条件下で適用可能であり、かつ、良好な施工性を持つものでなければならない。

3.4 不陸修正材

(1) 不陸修正材は、コンクリート表面の小さい凹部や急な段差に充填してコンクリート表面をなだらかにするとともに、コンクリートとプライマーおよび含浸接着樹脂との接着性などの性能を持つものでなければならない。

(2) 不陸修正材は、プライマー、含浸接着樹脂との接着性について十分な耐久性を有するものでなければならない。

(3) 不陸修正材は、対象構造物のおかれている施工環境条件下で適切な施工性を有するものでなければならない。

(1) 不陸修正材は、CFRPシートと躯体コンクリートの一体化を図るため、含浸接着樹脂と同等の物理・化学的および力学的性能を保有する必要がある。特に、曲げ補強の場合は、曲げモーメントに対する抵抗力を得るため、コンクリート、プライマー、不陸修正材、CFRPシートそれぞれの間での部材軸方向せん断ひずみの伝達が確実に行われる接着力または付着力を持つ必要がある。また、コンクリート表面の小さい凹部や急な段差を容易に充填でき、かつ、たれ落ちることのない適度な粘性を併せ持つことも必要である。

(2) 不陸修正材は、施工面の平坦性の程度により、必ずしも必要であるとは限らないものの、その施工が部分的、または全面的のいずれであれ、プライマーと含浸接着樹脂の間に介在して、コンクリートからCFRPシートへの応力伝達を十分に果たす性能を保有すべきことから、CFRPシートの一部分としてコンクリート部材の補修・補強等の目的に十分な耐久性を持って適合することが確認されたものでなければならない。

(3) 不陸修正材は、環境温度の影響を強く受ける可使時間、粘度等、施工環境条件下で良好な施工性を発揮できるものでなければならない。

3.5 含浸接着樹脂

- (1) 含浸接着樹脂は、繊維結合材としてのCFRPシートの引張強度、ヤング係数、継手強度等、さらに、接着剤としての接着強度等、所要の品質を確保できるものでなければならない。
- (2) 含浸接着樹脂は、炭素繊維シートをCFRPシート化したときの力学的性能について、十分な耐久性を有していることが試験により確認されたものでなければならない。
- (3) 含浸接着樹脂は、対象構造物のおかれている施工環境条件下で、炭素繊維内への確実な含浸性と適切な施工性を有するものでなければならない。

(1) CFRPシートは、含浸接着樹脂が炭素繊維の間に良好に含浸することにより繊維相互を結合して応力伝達を行うことにより、所要の強度やヤング係数などの品質を有する複合材として機能する。したがって、含浸接着樹脂は、繊維結合材として、CFRPシートの引張強度、ヤング係数、継手強度など所要の品質を、また、同時にコンクリートとの接着剤として十分な接着性を確保できるものでなければならない。

(2) 含浸接着樹脂のプラスチック単体あるいはCFRPシートとしての耐久性は、使用目的に応じた部材試験および耐久性試験によりその性能を確認される必要があることとした。CFRPシートの耐候性、疲労特性などに関する耐久性は、促進暴露試験(引張、接着)、疲労試験(CFRPシート単体、部材)などにより確認しておくのがよい。

(3) 含浸接着樹脂は、炭素繊維シートへの良好な含浸性を有するとともに、貼付け時に確実にシートを保持する粘度が必要である。含浸接着樹脂は、特に、施工環境温度により可使時間、粘度、炭素繊維間への浸透度等が大きく変動する。したがって、含浸接着樹脂は各施工環境条件下で良好な施工性を発揮できるものでなければならない。

3.6 その他の材料

- (1) 断面修復材は、補修または補強の目的に応じた物理・化学的および力学的性能を有し、既存コンクリートとの接着性における十分な耐久性、および、コンクリート部材のおかれている施工環境条件下で適切な施工性を持つものでなければならない。
- (2) ひび割れ補修材は、ひび割れ深部まで浸透してひび割れ部を閉塞し、コンクリートを一体化するための十分な力学的性能を、また、ひび割れから浸透する水を遮断する性能を有するものでなければならない。
- (3) 仕上げ材は、コンクリート部材の補修・補強の目的に適合する性能を有するものを選定すると同時に、十分な耐久性を有していることが確認されたものでなければならない。

(1) 断面修復材は、補修・補強の対象とするコンクリート部材の、不陸修正材では修正できない比較的大きな断面欠損部分の修復に使用される。断面修復材は、コンクリート部材の既設部分と一体となって挙動することが必要であることから、コンクリート躯体に対し十分な接着性を有するもので、特に、補強を目的とする場合は、その線膨張係数、圧縮強度等の力学的性能がコンクリートと同等以上でなければならない。また、いずれも耐久性において問題のないことが確認されているものを用いるものとする。

(2) ひび割れ補修材は、エポキシ樹脂系のものやセメント系のものがあるが、ひび割れ幅の程度とひび割れ進行状況、および、漏水状況を検討の上、補修・補強の目的に適合した材料を選定しなければならない。

(3) CFRPシートにおける紫外線によるエポキシ樹脂層の劣化が、炭素繊維の紫外線遮蔽効果により、その最表層部のみに留まることから、仕上げ材は原則として不要である。しかし、仕上げ材は、単なる色調調整のための塗装から、外衝からのCFRPシートの保護まで、

- ① 周辺構造物または周辺環境との色調調和
- ② CFRPシート最表層部のエポキシ樹脂の自然劣化からの保護
- ③ CFRPシートの外部衝撃による損傷からの保護
- ④ CFRPシートの防火・耐火性向上のための被覆

のような種々の目的を持って使用される。

したがって、仕上げ材は、コンクリート部材の補修・補強等の目的に適合した性能の有無を確認の上選定されなければならない。

4 章 補修・補強設計

4.1 原則

4.1.1 補修・補強設計の基本

コンクリート部材の補修・補強設計は、その実施にあたって、補修・補強を行う部材のみでなく、その部材を含む構造物全体の強度、変形、安定などを検討し、適当な安全度を確保すると共に、補修・補強を行う部材を含む構造物の使用目的との適合性、施工および維持管理の容易さ、経済性、環境との調和等を考慮しなければならない。

コンクリート部材の補修・補強設計にあたっての基本理念を示したものであり、補修・補強設計の具体的な作業を進めるにあたっては、「本編、2章 炭素繊維シート接着工法による補修・補強の適用方法」および「本章 各項」を遵守しながら、ここに示す設計の基本理念に留意しなければならない。

4.1.2 補修・補強設計図に記載すべき事項

補修・補強設計図には次の事項を記載するものとする。

- (1) 路線名および架橋位置
- (2) 橋梁名
- (3) 補修・補強設計条件
- (4) 補修・補強工法名称
- (5) 補修・補強主要材料、および、その使用方法に関する特記事項
- (6) 設計・施工および維持管理上の特記事項
- (7) 補修・補強設計年月日
- (8) 補修・補強設計責任者

補修・補強設計図は、設計検討の結果と共に施工内容等を具体的に示すものであり、かつ、施工後の維持管理に必要なものであるから、それには必要かつ十分な情報を記載しておかなければならない。

なお、補修・補強設計は、「本編、5章 施工」および「付属資料3 炭素繊維シート接着工法の施工方法と管理の目安」に記載した施工標準を遵守した施工が行われることを前提に実施するが、その実施においてこれらの施工標準より高度な施工を要求する場合や施工標準の緩和を考慮してよい場合の仕様、また、既設コンクリート部分の修復程度と修復材の仕様、下地処理の程度などは、これを特記せねばならない。

4.2 コンクリート部材の補修・補強設計

4.2.1 コンクリート床版の補修・補強設計

道路橋におけるコンクリート床版の補修・補強設計は、「Ⅱ コンクリート床版編」の規定によることを原則とする。

本指針(案)に規定していない事項については、道路橋示方書に定められた規定および関連する技術基準等を必要に応じて参考とし、それらの設定目的を十分に検討して適用することが望ましい。

4.2.2 コンクリートげた等の補修・補強設計

道路橋におけるコンクリートげた等の補修・補強設計は、「Ⅲ コンクリートげた編」の規定によることを原則とする。

「本章、4.2 コンクリート部材の補修・補強設計、4.2.1 コンクリート床版の補修・補強設計、および解説」と同様である。

4.3 CFRPシートの劣化および外衝からの保護

4.3.1 劣化からの保護

CFRPシートは、必要に応じて塗装等による劣化防止措置を行うのがよい。

「本編、3章 使用材料 3.6 その他の材料、および、解説」の通りである。したがって、CFRPシートの紫外線劣化からの保護措置は、原則として不要である。しかし、最表層部の白化やけば立ちによる美観低下が問題となる場合は、塗装等による劣化防止措置を行うのがよい。

また、CFRPシート単体を対象として実施した促進暴露試験と繰返し載荷による疲労試験の結果、単独の試験後では強度低下がみられないものの、両者の複合作用後の引張試験では強度低下がみられたことから、このような環境条件のもとで長期的に高い引張応力度でCFRPシートを適用する場合は、設計計画時において、「付属資料2 使用材料とCFRPシート」に記載した試験結果等を参考に、塗装等による劣化防止措置を検討しなければならない。

4.3.2 外衝からの保護

CFRPシートは、必要に応じて、外衝からの保護を行うのがよい。

CFRPシートに含有される炭素繊維は、衝突荷重等により破断することが考えられる。したがって、補修・補強の対象とするコンクリート部材が、駐車場内や河川内に構築された柱や橋脚のように、頻繁に衝突荷重等の作用を受けることが予想される場合は、設計計画時にCFRPシート外面の保護措置を検討するのがよい。

しかし、衝突荷重等の作用が希れであり、CFRPシートが損傷を受けても簡単に補修を行うことができる場合は、維持管理時にCFRPシートの補修を検討してもよい。

5章 施工

5.1 原則

コンクリート部材の補修・補強に用いる炭素繊維シート接着工法の施工は、補修・補強設計によって特定の施工方法が定められた場合を除き、本章に定める規定を遵守しなければならない。

本章は、炭素繊維シート接着工法によるコンクリート部材の補修・補強を行うにあたり、原則として考慮すべき事項と各工種の施工標準を示したものである。したがって、特に、設計において要求度の高い施工方法、または、要求度を通常より緩和してよい施工方法等が定められる場合を除き、本章の規定を遵守しなければならない。なお、各工種における施工品質の目安は、「付属資料3 炭素繊維シート接着工法の施工方法と管理の目安」を参考としてよい。

5.2 施工計画

工事に先立ち、資機材の準備、材料の保管、施工箇所のコンクリート面形成、コンクリート面の下地処理、プライマーの塗布、炭素繊維シートの貼付け、養生、表面仕上げ、付属物の復旧等について細部にわたり十分に検討し、施工および工程の計画を立てねばならない。

炭素繊維シート接着工法の施工は、施工する時期や場所および周辺の環境等によって、それに用いる資材、工具の搬入や作業足場の確保などの制約を受けることがある。そのため、事前に十分な調査を行い、無理のない施工計画を検討・立案しておくことが重要である。施工計画書は、工事開始前に必ず作成し、設計で要求された必要事項および施工環境条件から定まる、施工上留意しなければならない点を明記しなければならない。また、施工は、作成された計画書にしたがって、CFRPシートが所定の品質となるように実施しなければならない。

5.3 施工順序

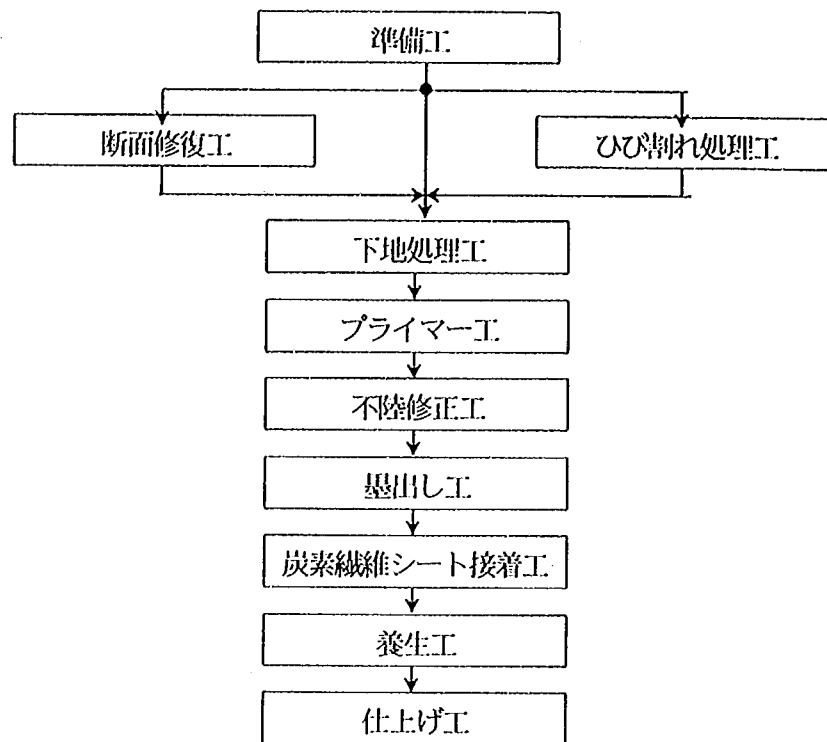
施工は、これを円滑に行い、かつ、要求される性能を確保するために、事前調査に基づいて作成された施工計画書で定められた施工順序にしたがって行わなければならない。

炭素繊維シート接着工法による補修・補強の施工順序は、原則として 図-解 1.5.1 の施工順序にしたがって行うのがよい。また、施工順序は、事前調査に基づき、躯体コンクリートの状況や周囲の環境条件に応じて、断面修復工や保護工の必要性およびその工法を十分検討し、施工計画策定時に決定しておくことを原則とする。

5.4 施工標準

5.4.1 準備工

施工に先立ち、使用材料の受け入れ、付属物の記録、写真撮影、資機材の準備、および、これらの確認等を行わなければならない。



図一解 1.5.1 施工順序図

施工を円滑に行うためには、各使用材料の数量や品質を出荷証明書や品質証明書あるいは試験成績書等で確認すると同時に、各施工段階で使用する資機材を準備しなければならない。

また、施工対象とするコンクリート面の損傷状態は、これを部位毎に写真に記録することが望ましい。なお、構造物に排水管、電気設備等の付属物があり、施工の障害となる場合は、これらの位置を記録して撤去し、施工後に必要に応じて元の位置に復旧しなければならない。

5.4.2 断面修復工

鉄筋の露出部、著しい断面欠損部、豆板等の不良部は、適切な断面修復方法で処理し、炭素繊維シートによる補修・補強効果が十分に発揮されるように、平坦性を確保しなければならない。

鉄筋の露出や著しい断面欠損、豆板等の不良部は、断面修復を施すものとし、その部分をはつり除去するとともに、鉄筋を防錆処理した後、原則としてコンクリート部材と同等以上の強度と付着強度等を有する断面修復材で復旧し、その表面を下地処理と同様に平坦に仕上げなければならない。

5.4.3 ひび割れ処理工

事前調査または設計で閉塞処理が必要と認められたひび割れは、CFRPシートに悪影響が生じないように、補修・補強の目的に適合した注入等の方法で処理しなければならない。

コンクリートのひび割れは、交通振動等により開閉し、その部分のCFRPシートに過大な応力が集中する等の悪影響を及ぼす可能性があるため、低圧樹脂注入工法やUカットコーキング等の補修・補強の目的に

適合した方法でひび割れを処理しなければならない。なお、注入を行う場合には、注入完了後注入材の硬化を確認し、ディスクサンダー等でシーリング材を撤去して平坦に仕上げる。

特に、遊離石灰や漏水が認められたひび割れは、ひび割れ内部に遊離石灰が詰まり、十分効果のある注入が期待できないことが多く、ひび割れに沿ってUカットし、漏水の防止を目的としたパテ材等による止水処理を行い、平坦に仕上げる方法を検討するのがよい。

5.4.4 下地処理工

コンクリート表面は、炭素繊維シート接着工法による補修・補強効果が十分に発揮されるように、適切な下地処理方法により、脆弱部分や汚れがなく、また、CFRPシートの強度に悪影響を及ぼすような凹凸のない平坦な状態にしなければならない。

炭素繊維シート接着工法は、含浸接着樹脂によるコンクリートとの接着耐久性によって、工法の信頼性、耐久性が確保されるものである。そのため、施工対象とするコンクリート表面の風化層やレイトンス層等の強度の低下した部分、または、汚れや型枠剥離剤層等は、これをディスクサンダー等の適切な下地処理方法により除去して、CFRPシートのはく離発生を助長しないようにすることが必要である。また、コンクリート面に突起や段差などの凹凸があるとCFRPシートに応力集中が生じてシートが破断する恐れがあるため、段差は出来る限り小さくし、出隅部は必要に応じた丸み付けを行わなければならない。なお、発生した埃は、エアブローまたはウェス等で除去しなければならない。

5.4.5 プライマー工

プライマー工は、施工時および養生時の温度、湿度等の施工環境条件を十分考慮し、コンクリート表層部分の強化とともに、コンクリートと炭素繊維シートとの接着性が確保できるように施工しなければならない。

プライマー工に使用する樹脂系材料の多くは、低温または高湿度環境下で硬化反応が遅延することがある。したがって、低温または高湿度環境下で施工する場合には、プライマーの硬化特性を十分確認し、施工方法を十分検討しなければならない。

特に、一般に使用されるエポキシ樹脂系プライマーは、低温環境下で硬化が著しく遅れ、塵埃等の付着、および気象の急変等による品質への悪影響を受けるのみならず、工期の遅れにつながることから、一般に、施工時の気温に合わせて可使時間や硬化時間等を調整した、夏用、冬用、春秋用のタイプがあり、施工環境条件に合わせて選択する必要がある。

また、エポキシ樹脂系プライマーは、コンクリート表面が結露している場合やコンクリート表面の含水率が高い場合、あるいは湿度が高い場合には、通常、硬化不良により十分な接着強度が発揮できない。

これらのことから、通常のエポキシ樹脂系プライマーを使用する場合の施工は、原則として、低温でなく、かつ、コンクリート表面が乾燥した状態で行わなければならない。低温またはコンクリート表面が乾燥していない条件下での施工を余儀なくされる場合には、施工箇所の保温養生や低温用のプライマー、または、湿润面用のプライマーの使用等を検討するのがよい。

5.4.6 不陸修正工

断面修復や下地処理時に修正できなかったコンクリート表面の小さな不陸は、プライマーの指触乾燥後、炭素繊維シートによる補修・補強効果が十分に発揮されるような平坦性を確保することを目的とした、適切な不陸修正方法で処理しなければならない。

下地処理工では平坦に処理することができない型枠目地の段差やハンチ隅角部等は、この部分での応力集中によりCFRPシートが早期に破断する恐れがあるため、エポキシ樹脂等のパテ材を用いて不陸修正を行い、段差等の悪影響を出来る限り小さくしなければならない。エポキシ樹脂系パテ材による不陸修正に当たっては、プライマー工と同様、施工時の気温や湿度を考慮する必要がある。

5.4.7 墨出し工

炭素繊維シートの貼付け位置は、設計図書および施工計画書中の割付け実施図に基づき、CFRPシートの正しい位置と炭素繊維の直線性が確保できるように、これをコンクリート表面に墨出ししなければならない。

補修・補強の対象とするコンクリート部材は、通常、設計図書上の構造寸法よりやや大きく造られている。したがって、施工計画作成時には、対象コンクリート部材の実寸法を計測し、設計者と協議の上で、補修・補強設計時の炭素繊維シートの割付け基本計画を修正した割付け実施図を作成しなければならない。

CFRPシートは、その位置が正しくなく、また、炭素繊維が蛇行したりして直線状ではない場合、所要の引張強度を発揮することができない。そのため、設計図書および施工計画書中の割付け実施図に基づき、炭素繊維シートの貼付け位置を正確にマーキングし、直線性を確保できるように墨出しする必要がある。

5.4.8 炭素繊維シート接着工

炭素繊維シート接着工は、施工時および養生時の温度や湿度、施工環境条件等を十分考慮し、炭素繊維シートへの含浸接着樹脂の含浸およびコンクリートとの一体化が確実に行われ、CFRPシートとして所定の力学的性能が十分発揮できるように施工しなければならない。

本工法は、炭素繊維シートと含浸接着樹脂からなるCFRPシートを形成するとともに、コンクリート面に接着して一体化することにより補修・補強効果を期待する工法である。したがって、この工法による補修・補強効果を十分発揮するためには、CFRPシートを形成するための含浸接着樹脂が炭素繊維シートに確実に含浸するとともに、コンクリート面との接着が確実に行われる必要がある。

含浸接着樹脂の使用に当たっては、プライマー工と同様、施工時の気温や湿度を考慮する必要がある。特に、炭素繊維シートへの含浸接着樹脂の含浸度合は樹脂の粘度により大きく影響を受けるため、気温による粘度の変化や可使時間には十分注意する必要がある。

また、やむを得ず低温下で施工する場合には、施工箇所の保温養生や低温用の含浸接着樹脂の使用等、そして、接着面が湿潤状態の場合には、ウェス等で水分を除去したり、湿潤面用の含浸接着樹脂の使用等を検討する必要がある。

5.4.9 養生工

炭素繊維シート接着工終了後、塗布した含浸接着樹脂の表面は、雨水や砂、埃等の付着が含浸接着樹脂の硬化に悪影響を及ぼさないように、必要に応じてビニールシート等で養生を行わなければならない。

炭素繊維シート接着工終了後、塗布した含浸接着樹脂が初期硬化するまでは、雨水や砂、埃等の付着を防止するとともに、気象の急変等による悪影響を受けないように、必要に応じてビニールシート等で養生を行わなければならない。

5.4.10 仕上げ工

仕上げ工は、仕上げ材が美観材や表面保護材等として、設計で要求された性能を十分満足するように施工を行わなければならない。

CFRPシートは、屋外暴露試験や促進暴露試験により複合材として耐久性に優れていることが確認されている。しかしながら、CFRPシートは促進暴露後の疲労荷重により引張強度の低下が見られること、また、含浸接着樹脂は紫外線やオゾンの作用により劣化し白化して美観を損なうこと、などにより劣化防止用の仕上げが要求され、さらに、炭素繊維の損傷防止のため、外衝からの防護が要求される場合がある。

仕上げ工として塗装等を行う場合は、ピンホールや色むらができないように設計図書に従って所定の厚さを確保し、施工・養生中に気象変化や埃等の付着が仕上げ材に悪影響をおよぼすことが予想されるときには、適切な養生を行わなければならない。また、外衝からの防護を施す場合は、CFRPシートへの穿孔が必要となることもあることから施工計画時には設計上の問題点の有無について検討が必要である。

5.5 品質管理および検査

5.5.1 使用材料の品質

各使用材料は、施工開始前に、その品質を確認するとともに、使用する機械および設備についても、その性能を確認しておかななければならない。

炭素繊維シート接着工法に要求される補修・補強効果を発揮させるためには、使用する材料が所要の性能を有していることをあらかじめ把握・確認しておく必要がある。したがって、各使用材料は、施工開始前にその品質を製造者発行の試験成績表等で確認しなければならない。また、使用する施工機械および設備が所定の性能を保有していることを確認しなければならない。

5.5.2 材料の保管

施工に使用する材料は、材料の品質を損なわないように、保管条件を満足する場所に保管しなければならない。

使用材料は、その品質を損なわないように、一般には直射日光、火気、湿気、雨水等を避け、通風の良い室内で温度条件、湿度条件を確保して保管する。また、保管に際しては関連する法令を遵守する。

5.5.3 CFRPシートの品質

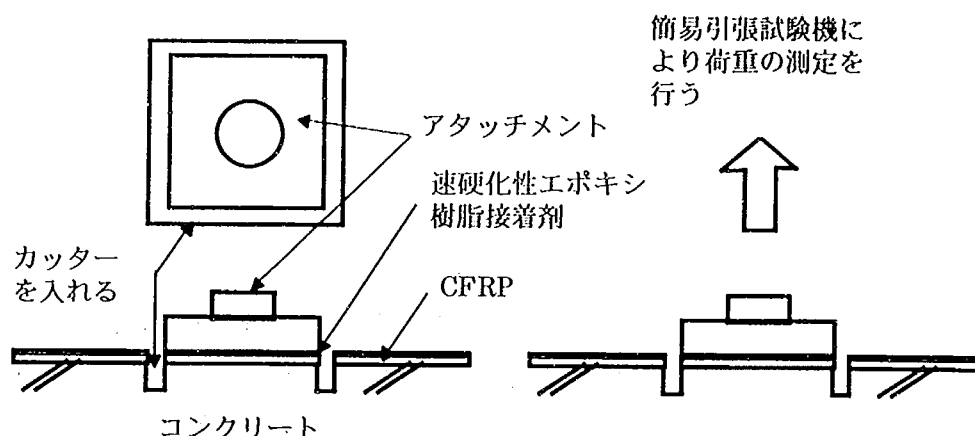
CFRPシートは、施工中1回以上の付着強度試験を行い、その品質を確認しなければならない。

CFRPシートは、品質管理試験により、所要の補修・補強効果を発揮するために要求されている品質を保有することを、確認しなければならない。

① 付着強度試験について

付着強度試験は、基本的に実構造物の施工箇所において実施する現場試験であり、この試験により、CFRPシートとコンクリート面との接着性能が確保されているか否か、また、含浸接着樹脂の含浸により均質なCFRPシート層が作られているか否かを判断することができる。試験概要を図一解 1.5.2 に示す。

しかし、この試験を施工箇所で実施した場合、試験後その場所のCFRPシートを原形に復旧するものの、CFRPシートに含まれる炭素繊維の連続性を絶つことになるため、強度低下の恐れがある。したがって、実施工のCFRPシートで付着強度試験を実施することが好ましくない場合は、実施工範囲以外の箇所、または、試験用コンクリートブロック等を利用して、同一仕様で炭素繊維シートを接着して試験することが望ましい。ただし、この場合には試験体のコンクリート強度等の試験条件を明確にしておく必要がある。



図一解 1.5.2 付着試験概要

試験は、JIS K 6309 に準拠し、 $40 \times 40 \times 10\text{mm}$ の鋼製アタッチメントを試験箇所に速硬化性エポキシ樹脂接着剤で貼り付け簡易引張試験機にて行う。品質確保の有無の判定は、対象コンクリート部材で行う試験の場合には破壊面がコンクリートであること、また、その他の場合には破壊強度が対象コンクリートの引張強度($0.2 \times f_{ck}^{2/3} \text{ N/mm}^2$ 、ここに、 f_{ck} はコンクリートの設計基準強度)以上であることにより行う。

② CFRPシートの引張強度試験について

CFRPシートの引張強度試験は、CFRPシートが保有する引張強度を確認する目的を持つ試験である。一般に、CFRPシートが保有する引張強度は、使用された炭素繊維および含浸接着樹脂の物性、そして、炭素繊維への樹脂の含浸状態と樹脂の硬化度により決定される。

したがって、施工されたCFRPシートが保有する引張強度は、メーカーの材料試験成績書による使用材料の品質確認、樹脂の含浸と硬化を確実なものとする施工標準の遵守と施工管理、そして、上記 ① の付着

強度試験による樹脂の含浸度と硬化度の確認とによって、十分評価することができる。以上のことから、ここでは、CFRPシートの引張強度試験を品質管理に適用しないこととした。

なお、引張試験を実施する場合には、「本編、3章 使用材料、3.2 炭素繊維シート」に規定された試験方法により引張強度が所定の強度以上であることを確認する。なお、引張強度試験では、通常試験体数が5程度と少なく、正確な標準偏差を得ることが困難であるので、各試験値が所定の強度以上であることが望ましい。

5.5.4 検査

炭素繊維シート接着工法の実施にあたっては、施工中および施工完了後、適宜、各使用材料の数量検査、出来高検査を行うとともに、炭素繊維シートの貼付け状況を目視により検査しなければならない。

本工法における検査は、施工完了後のみでは確認できない場合があるため、施工中においても適宜行うものとした。樹脂系各材料に関する施工中および施工完了後の数量検査は、各材料の空缶確認により行う。また、炭素繊維シートの出来高検査では、貼付け間隔、シート積層数を確認する。CFRPシートは、浮き、ふくれや接着不良等がある場合には、本工法に要求された性能を発揮することができないため、この部分に樹脂を注入するか貼り直すなどしてその処置を行わなければならない。

5.6 施工記録

作業の工程、天候、気温、湿度、材料の入出庫、施工方法、実施した検査や試験、その他特に必要な事項は、施工の全般を通じて記録に留めておかなければならない。

各施工工程での施工と品質管理状況を整理して残した施工記録は、その構造物の維持管理担当者が実態を把握し、適正な保守を実施していくために極めて重要であり、また、将来、同種または同様の工事を行う場合の資料となるばかりでなく、設計・施工方法の研究や改良のための重要な参考資料となる。したがって、出来得る限り正確で詳細な施工記録を作成することが重要であり、これらを長期間に亘り保存することが望ましい。

5.7 安全管理

本工法の施工においては、各使用材料、特に樹脂系材料の特徴を十分熟知するとともに、施工条件、作業環境条件に十分注意し、安全の確保に努めなければならない。

本工法の使用材料は、プライマー、含浸接着樹脂、炭素繊維シート、仕上げ材等、多岐にわたっている。したがって、施工を安全に行うために、各使用材料の特徴を十分熟知するとともに、施工条件、作業環境条件に十分注意し、労働安全衛生法等の関連法令を遵守した、安全管理を行わなければならない。

6章 維持管理

6.1 原則

炭素繊維シートを接着したコンクリート部材は、補修・補強の効果を長期にわたって維持させるため、定期的に健全度調査を行い、変状が発見された場合には適切な対策を施さなければならない。

炭素繊維シートを接着したコンクリート部材は、補修・補強の効果を長期にわたって維持させるため、定期的に行う健全度調査によって変状の有無を調査し、変状が発見された場合にはその内容を確認の上適切な補修対策を施さなければならない。健全度調査は、目視による外観調査のほか、たたき調査や荷重車による現位置載荷試験等の詳細調査が考えられ、必要に応じた調査法を適用して行うのがよい。

6.2 CFRPシートの健全度調査

6.2.1 外観調査

外観調査は、CFRPシートおよびCFRPシート周辺のコンクリートについて変状の有無を調査するために行う。

炭素繊維シートを接着したコンクリート部材の外観調査は、双眼鏡等による目視観察を主体とし、別途、管理者が定める点検方法と頻度に従って行うものとする。外観調査では、CFRPシートの浮き、ふくれ、はく離、端部のめくれ等の有無、また、仕上げ工が施されている場合にはその劣化状況を観察する。また、CFRPシート周辺でのコンクリート面のひび割れや漏水・遊離石灰の有無も観察する。

6.2.2 詳細調査

詳細調査は、外観調査で何らかの変状が発見された場合に実施する。

詳細調査は、外観調査でCFRPシート、および、周辺のコンクリート面に何らかの変状が発見された場合に行うものとする。詳細調査ではCFRPシートのたたき点検を行って変状の程度および範囲を確認し、対策を検討する。なお、炭素繊維シートを接着して補強したコンクリート部材に異常が発見された場合には、補強検討時の条件と荷重作用あるいは環境作用の現状とを対比するなど、その原因調査が必要である。

6.3 CFRPシートの機能維持を目的とする補修

詳細調査によりCFRPシートに変状が認められた部分は補修対策を施さなければならない。

詳細調査の結果、CFRPシートの浮き、ふくれ、はく離、端部のめくれ等、また、仕上げ工の変状やコンクリート面にひび割れや漏水等が認められた部分については、炭素繊維シート接着工法による補修・補強効果を維持させる目的で補修対策を施す必要がある。補修対策には、ひび割れおよび漏水部については樹脂あるいは無機系材料の注入工法が、また、浮きやはく離部分等については、その規模が小さい場合には注入処理する方法、大きい場合にはその部分のCFRPシートを撤去して新たに炭素繊維シートを接着する方法が考えられる。

Ⅱ コンクリート床版編

1 章 総則

1.1 適用範囲

(1) 炭素繊維シート接着工法によるコンクリート床版の補修・補強は、炭素繊維シートをコンクリート床版に接着し、床版耐荷力の増強を図るとともに、ひび割れの発生および進行を防止し床版の疲労による劣化を抑制することを目的とする。

(2) 炭素繊維シート接着工法によるコンクリート床版の補修・補強は、劣化症状が認められる床版はもとより、現状では損傷が小さい場合でも、設計当時に比べて作用荷重が大きく、将来、劣化が進行すると予想される床版にも適用する。

(3) 上記の目的で施工する場合、漏水、遊離石灰、顕著なひび割れ、断面の欠損、コンクリートの不良部、段差等はあらかじめ橋面防水工、止水処理工、断面修復工などの適切な処理を施した上で適用する。

(1)(2) 床版の設計法は、これまで何度も大きな改訂が行われている。たとえば、高強度鉄筋の普及により、昭和 39 年(1964 年) 鋼道路橋示方書(以下「S39 道示」と略す)では鉄筋の許容応力度がそれまでの $118 \text{ N/mm}^2 (1,200 \text{ kgf/cm}^2)$ から $177 \text{ N/mm}^2 (1,800 \text{ kgf/cm}^2)$ に緩和されたが、その後、早期の劣化が見られ、昭和 42 年(1967 年)には主鉄筋に対する配筋鉄筋の最少量の比をそれまでの 25% から 70% へ増加し、翌年の昭和 43 年(1968 年)には鉄筋の許容応力度を $138 \text{ N/mm}^2 (1,400 \text{ kgf/cm}^2)$ に低減している。さらに、床版の最小厚の規定や平成 5 年 11 月(1993 年)の車両制限令による車両総重量規制緩和および道路構造令による設計自動車荷重の増大を経て、現在の平成 8 年(1996 年) 道路橋示方書(以下「H8 道示」と略す)となっている。

鉄筋コンクリート床版は、一般に、疲労により破壊に至る。疲労損傷は、乾燥収縮ならびに荷重作用によるひび割れの発生、曲げモーメントによるひび割れの進展、橋軸直角方向の貫通ひび割れによる床版コンクリートの梁状化、床版コンクリートの押し抜きせん断破壊という過程で進行する。なお、橋面から浸透した水分は、すり磨き作用と合わさることで床版の劣化を著しく促進することが知られている。

床版の損傷は、そのまま路面の欠陥となり、交通にも危険を及ぼすものであるから、その損傷を早期に見し、損傷が過度に進行しない時点で適切な補修・補強対策を講ずることが重要である。また、現状で顕著なひび割れや劣化の現象が認められなくとも、将来的に劣化の進行が懸念される場合に事前対策を講じることが、床版の長寿命化の観点から有効である。

炭素繊維シート接着工法で作製した CFRP シートは、曲げモーメントにより生じる床版下面の引張力を既設床版の鉄筋とともに負担することで、既設床版に作用する鉄筋応力度を低減することができる。また、CFRP シートは、コンクリート面に接着されているために、鉄筋コンクリートとしての計算で求まる以上にひび割れの開閉を小さくすることから、すり磨き劣化を抑制する効果を持つことが多くの研究で明らかとなっている。しかし、CFRP シートは、その補強厚さが 1 層あたり約 1 mm と薄く、せん断耐力の向上に及

ばす効果は小さいと考えられる。すなわち、コンクリート床版の引張面に接着した炭素繊維シートは、曲げに対して補強効果を発揮するものであり、直接的に押し抜きせん断耐力を向上させるものではないことに留意しなければならない。したがって、過度に損傷が進行し床版コンクリートの押し抜きせん断耐力が著しく不足するような場合への炭素繊維シート接着工法の適用は、適切でない。

炭素繊維シート接着工法は、比較的新しい工法であり、近年、そのコンクリート床版への適用の研究が活発に行われ、その補強効果やメカニズムについて研究が進んでいるが、今後さらに解明すべき課題も多く有している。したがって、本指針(案)は、主として土木研究所で行った鉄筋コンクリート床版の試験体による輪荷重走行試験などの研究成果に基づいて作成したものであるが、今後さらに研究が進んで新たな補修・補強方法や設計法が開発された場合にはその適用を妨げるものではない。

また、本指針(案)は、主として鉄筋コンクリート床版を対象に炭素繊維シート接着工法の適用方法を述べているが、劣化機構が鉄筋コンクリート床版と同様であれば、ひび割れ開口(拡大)の抑制、曲げひび割れからせん断ひび割れへの進展防止を目的としたプレストレストコンクリート床版の補強にも適用できると推測される。ただし、プレストレストコンクリート床版の試験体による補強効果の確認試験は行っていないことから、期待される供用年数や交通量、荷重を設定し、これらと設計当時の荷重条件や設計図書、および「R8道示」との相違点等を考慮して適用の可否を判断すべきである。

なお、張り出し床版や床版の中間支点上などの負の曲げモーメントが作用している部材に対して、その上面に炭素繊維シートを接着することにより行う補強は、夏季供用中のCFRPシートの温度やアスファルトとの接着性についても十分な検討を行う必要がある。

また、飛来塩分や水分などを遮蔽して、コンクリートの劣化抑止を目的とする補修への炭素繊維シート接着工法の適用は、コンクリート床版の周囲の環境やコンクリートの劣化状況を十分に調査した上で行う。

(3) 橋面から浸透する水は、ひび割れ部のすり磨き作用を助長して床版の劣化を促進し、また、床版下面に滞水して炭素繊維シートとコンクリートの接着に悪影響を及ぼすことが考えられる。したがって、このような場合は、橋面防水工と併用することを基本し、漏水の経路となるひび割れに関しても適切な処置を施す必要がある。橋梁上の交通規制が困難で、橋面防水工が施工できない場合には、上面から浸透する水が内部に溜まらないように水抜きパイプ等の対策を考える必要がある。

さらに、欠損部、不良部位等については、炭素繊維シートとコンクリートの接着性を確保するため、接着前に適切な処置を施しておく必要がある。

1.2 用語の定義

(1) 床版主鉄筋	床版を梁として設計する場合の曲げモーメントに抵抗する鉄筋。配置方向は一般に橋軸直角方向となる。
(2) 床版配力鉄筋	床版主鉄筋に対して直角方向(一般には橋軸方向)に配置される鉄筋。
(3) CFRPシートの引張剛性	作用する引張力に抵抗するCFRPシートの引張剛性で、ヤング係数 E_f と断面積 A_f の積である $E_f \cdot A_f$ で表わす。

(4) 輪荷重走行試験

自動車荷重が床版上を移動して作用することを再現した試験方法である。鉄輪に鉛直荷重を作用させた状態で、試験体上を前後に繰り返して移動（往復）させる。載荷の方法としては、所定の荷重を所定回数移動載荷し、その後、荷重を増加して同様の載荷を行う方法と、荷重一定で移動載荷する方法とがある。

2章 調査

2.1 一般

事前調査は、炭素繊維シート接着工法を行うに当たり、橋梁の諸元、床版の状況、現場の外的条件などについて行い、補修・補強の設計・施工に反映させるものとする。

橋梁点検の結果等によって、炭素繊維シート接着工法で補修・補強を行うことが適切と判断された床版に対して、補修・補強の設計・施工に必要な諸事項を、既往の資料調査、現場調査等により把握する。

2.2 調査

2.2.1 調査事項

炭素繊維シート接着工法の設計・施工に先立ち、以下に示す事項を調査するものとする。

- (1) 橋梁の履歴、構造諸元
- (2) 床版の状況
- (3) 現場の外的条件

補修・補強の設計・施工に必要な調査事項は、条文に示すように(1)竣工年次、補修・補強履歴等の橋梁の履歴および寸法、構成材料等の構造諸元、(2)床版の施工程度や損傷度等の床版の状況、(3)現場の自然環境等の外的条件に大別できる。

2.2.2 橋梁の履歴、構造諸元の調査

補修・補強に必要な対象橋梁の履歴、構造諸元等は、竣工図書、現場調査などにより把握するものとする。

橋梁の履歴および構造諸元は、補修・補強設計に必要な調査事項であり、既往の竣工図書等で不明な内容は現場調査にて補足する。なお、これらによっても不明な材料強度等の内容は、竣工当時の設計基準などを参考に推定する。以下に基本的な調査内容を示す。

- 1) 竣工年次および適用基準
- 2) 橋梁構造形式
- 3) 幅員構成と支持げた配置
- 4) 床版構成寸法（床版厚、床版支間長、ハンチ形状、舗装厚等）
- 5) 材料強度（コンクリート、鉄筋）
- 6) 配筋状態（鉄筋配置、鉄筋径）

- 7) 補修・補強履歴
- 8) 交通の状況（交通量、大型車混入率）

2.2.3 床版の状況の調査

炭素繊維シート接着工法の設計・施工にあたっては、事前にコンクリート床版の劣化や損傷の程度等の状況を現場調査により詳細に把握する。

炭素繊維シート接着工法の設計にあたっては、調査結果に基づき、コンクリート床版の損傷度をコンクリート床版の疲労損傷メカニズムから評価する必要がある。また、炭素繊維シート接着工法の補修・補強効果を十分に発揮させ、かつ施工後の耐久性を維持させるために、炭素繊維シート接着前には、床版の不陸修正工、ひび割れ注工などの修復工事を行う必要がある。

このために、コンクリート床版の劣化や損傷の程度を詳細に調査し、コンクリート表面の劣化状況やひび割れの程度、漏水や遊離石灰の有無、断面欠損、豆板等の不良部を確認する。特に、ひび割れについては、ひび割れの方向、幅、間隔、開閉、漏水、遊離石灰やさび汁などについて詳細に調査を行う。これらの調査結果をもとに、断面修復、不陸修正、ひび割れ注入、止水、橋面防水などの適切な処置を検討する。

また、施工前の調査では、以下の各項目を行い施工計画に反映させる。

- 1) 型枠目地段差、鉄筋露出、著しい断面欠損、豆板等の不良部がある場合は、その箇所数、範囲、深さ等を調査する。
- 2) 幅 0.2mm 以上のひび割れ、または動きのあるひび割れが確認された場合には、その箇所数と延長、ひび割れ注入延長を調査する。なお、0.2mm のひび割れ幅は、補修材の注入可能な最小幅であり、死荷重状態におけるひび割れ幅を対象とする。
- 3) ひび割れから遊離石灰や漏水が認められる場合には、ひび割れ注入が実施できない場合が多い。その箇所数と延長を求め、Uカット等の延長を調査する。
- 4) コンクリートの品質をチェックする目的で、コンクリート表面強度を JIS K 6909 に準拠して測定し、表面のコンクリートと接着治具の接着強度が 1.4N/mm^2 以上であることを確認することが望ましい。
- 5) 炭素繊維シート接着面積の測量を行う。

2.2.4 現場の外的条件の調査

炭素繊維シートに影響を及ぼす自然環境等の外的条件について、現場調査により把握する。

炭素繊維シートの特徴を考慮し、これに影響を及ぼす橋梁現場の自然環境等外的条件の調査を行い、補修・補強に反映させる。以下に主な調査内容を示す。

- 1) 炭素繊維シートは耐久性に優れた材料であるが、炭素繊維シートの表面の樹脂は紫外線などにより劣化して白化し、美観を損ねることがある。したがって、直射日光の当たり方などの調査を行い、保護塗装の必要性を検討する。
- 2) 炭素繊維シート接着工法では、施工現場の温度、湿度などの環境が使用材料に適していない場合、施工が確実に行なわれないことがある。特に、低温では樹脂材料の硬化が遅延するなどの障害が生じることがある。したがって、現場の気温変化、結露の有無などの状態などを調査し、施工計画に反映させる。
- 3) 炭素繊維シート接着工法では可燃性の樹脂材料を用いることから、電気設備のショート等の火花、火気などの発生する可能性がある箇所との隔離、間隔を調査する。

3章 使用材料

3.1 一般

鉄筋コンクリート床版の補修・補強に使用する材料は、他に規定する場合を除き「I 共通編、3章 使用材料」に適合することを原則とする。

3.2 特記事項

床版の補修・補強に用いる含浸接着樹脂は、上向き作業に適した作業性を有するものでなければならない。

床版に炭素繊維シート接着工法を適用する場合、床版の下面に接着することから、炭素繊維シートの貼付けは、上向き施工となる。したがって、使用する含浸接着樹脂はだれ落ちることのない粘性と含浸作業に適した施工性を合わせ持つ必要がある。

4章 補修・補強設計

4.1 一般

炭素繊維シート接着工法による補修・補強設計は、既設コンクリート床版の点検結果に基づき、その損傷度を評価したのち、補修・補強後の床版の疲労耐久性を確保することを目的に行なうものとする。

鉄筋コンクリート床版の損傷度の評価は、建設省土木研究所「土木研究所資料、橋梁点検要領(案)、昭和63年7月」など、適切な方法によって行なう。炭素繊維シート接着工法では、その補修・補強効果がコンクリート床版の損傷メカニズムと密接な関係にあるので、損傷度の評価と補強量の算定は、鉄筋コンクリート床版の損傷メカニズムを十分に考慮して行なうものとした。

炭素繊維シート接着工法により既設鉄筋コンクリート床版の補修・補強設計を行なう場合には、現状の鉄筋コンクリート床版の損傷状況を基に、補修・補強の必要性の有無、炭素繊維シート接着工法の適用の可否、および補修・補強方法について検討するのがよい。二方向のひび割れが生じている鉄筋コンクリート床版は、いずれ損傷が進行して陥没に至る可能性が高く、早期に対策を施す必要があると判断される。一方、二方向のひび割れが発生していない比較的健全な鉄筋コンクリート床版は、この損傷がさらに重度な損傷に進行しない可能性もあり、引続き点検により損傷の進行の有無をモニタリングするか、または予防保全的に補修・補強を行なうなど適切な維持管理を行なうのがよい。

鉄筋コンクリート床版の損傷メカニズムを 表-解 2.4.1 に示す。表では、鉄筋コンクリート床版の損傷をそのメカニズムにしたがって損傷段階 ①～⑥ に分類した。また前記の「土木研究所資料、橋梁点検要領(案)」の損傷度との対応の目安も表中に示した。

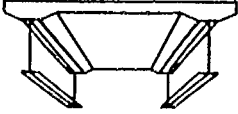
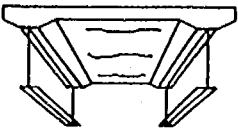
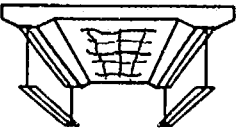
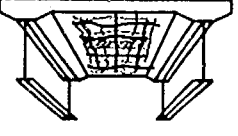
損傷段階 ③ の二方向のひび割れが生じた鉄筋コンクリート床版は、いずれ最終的な損傷である陥没に至る可能性が高い。損傷の程度が軽いものほど適用可能な対策工法が多く、また対策が遅れるほど同じ補強効果を得るのに必要なコストも増大することから、早期に対策を行うことが望ましい。損傷段階 ③ では、貫通クラックが少数で曲げに対する下面からの補強が可能であり、炭素繊維シート接着工法による補強は、曲げモーメントによるたわみや応力度の低減、コンクリートのひび割れの拘束に効果があり、鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性を向上させることが可能である。

損傷段階 ④ では、輪荷重によるねじりモーメントによって、床版上面には橋軸直角方向にひび割れが発生し、下面から発生したひび割れとつながり、貫通して並列の梁状になっている。このような損傷状態の鉄筋コンクリート床版は、版構造としての連続性を失い、重大な損傷に進行する可能性が高いので早急に対策を施す必要がある。土木研究所で行なった輪荷重走行試験では、損傷段階 ④ の状態に達した直後の鉄筋コンクリート床版は、炭素繊維シートを接着し補強することによって、疲労耐久性の大幅な改善が認められた。したがって、炭素繊維シート接着工法による補強は、損傷段階 ①から④ に対して有効であると考えられる。

さらに損傷が進んで貫通クラックが増加し、せん断耐力が低下した損傷段階 ⑤ の鉄筋コンクリート床版は、貫通したひび割れ面のすり磨きや浸透水による石灰分の流出により、ひび割れが拡大しせん断抵抗を失

う状態となる。損傷段階④を超える損傷状況については、現在のところ輪荷重走行試験機による確認試験が行なわれていないこと、炭素繊維シート接着工法のような下面からの補強だけでは鉄筋コンクリート床版のせん断耐力に対する十分な補強効果は期待できないことから、このような損傷状態の鉄筋コンクリート床版には、原則として炭素繊維シート接着工法単独での補強は行なわないものとする。④を超える損傷段階では、上面増厚工法などのせん断に対する補強が有効である。上面増厚工法を行なう場合でも、下面から炭素繊維シート接着工法を併用することにより下面からの曲げひび割れの進展を防止するため、補強効果をより確実にすることが可能である。また橋面からの漏水は、鉄筋コンクリート床版の損傷を加速するので床版上面の防水工が必要である。

表一解 2.4.1 床版の損傷段階と炭素繊維シート接着工法の適用

損傷 段階	損傷度の 目安	床版の損傷状況	炭素繊維シート接着 工法の適用
①	健全	[強靱な版構造] 	・基本的に補強の必要はないが、予防保全としての適用が可能
②	Ⅳ	[並列梁構造] 床版コンクリート硬化にともなう乾燥収縮により橋軸直角方向に貫通したひび割れが大きな間隔で発生する段階 	・基本的に補強の必要はないが、予防保全としての適用が可能
③	Ⅲ	[二方向曲げひび割れ] 輪荷重により縦横のひび割れが増加する段階 	・炭素繊維シートによる補強が可能
④	Ⅱ初期 (すり磨きが生じていない)	[ひび割れの細網化、貫通] 輪荷重によるねじりモーメントによって床版上面に橋軸直角方向にひび割れが発生し、下面に発生したひび割れとつながり貫通し、並列の梁状になる段階 	・炭素繊維シートによる補強が可能
⑤	Ⅱ	[サイコロ状] 貫通したひび割れ面のすり磨きや浸透水による石灰分の流出により、ひび割れが拡大し、せん断抵抗を失う段階 	・せん断強度が低下し単独では使用しない ・上面増厚工法との併用・応急対策
⑥	Ⅰ	[床版の陥没] 低下した押し抜きせん断強度を超える輪荷重により抜け落ちを生じる段階 	—

4.2 材料の設計用値

補修・補強に使用するCFRPシートの設計用値は、「Ⅰ 共通編、3章 材料」によるものとする。

炭素繊維シートのヤング係数、繊維目付量、引張強度は、「Ⅰ 共通編、3章 材料、3.2 炭素繊維シート」に準じて定め、また、炭素繊維シートの断面積および厚さは、同解説に示すように繊維目付量と炭素繊維の比重から算定するのが原則であるが、設計用値として、通常、表一解 1.3.2 および 表一解 1.3.3 の諸値を適用してよい。

4.3 補修設計

炭素繊維シート接着工法によるコンクリート床版の補修設計は、コンクリート床版の劣化状況、劣化原因を調査により把握し、補修の目的に適合した炭素繊維シートおよびその他の材料を選定するものとする。

炭素繊維シート接着工法は、コンクリート床版の耐久性を改善するために、炭素繊維シートを床版下面や張出し部などに接着することにより、ひび割れからの塩分や水分などの有害物質の侵入防止、コンクリート小片のはく落防止などを目的とする補修に適用することが可能である。補修は、劣化の状況やその原因、環境条件について調査し現状を的確に把握した上で行なう必要がある。

補修に使用する炭素繊維シートや含浸接着樹脂などの材料は、外部からの塩分や水分、炭酸ガスなどの有害物質のコンクリート中への侵入を防止する効果を持つが、コンクリート部材の劣化の原因が、塩分の飛来、中性化、アルカリ骨材反応等の外的要因によるものが多いことから、その環境条件下で十分な遮蔽性と耐久性を有するものでなければならない。

補修に使用する炭素繊維シートは、繊維目付量 200g/m^2 の高強度型炭素繊維シート 1 層を最小とし、その貼付け方向は、ひび割れに直交する方向など最も効果が得られる方向とする。

また、炭素繊維シート接着工法は、そのみではコンクリート床版内部のコンクリート自体の諸特性を改善する効果が期待できないため、劣化の状況によっては、ひび割れ注入、劣化コンクリートの除去・断面修復、鉄筋の防錆処理、脱塩や再アルカリ化などの電気化学的処理など、他の工法と適切に組合せて使用する。

4.4 補強設計

炭素繊維シート接着工法によるコンクリート床版の補強設計は、床版の構造諸元、交通の状況、床版の損傷状態を考慮して補強後の床版が所要の疲労耐久性を確保できるよう、炭素繊維シートの種類、積層数を決定するものとする。

鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性は、床版厚や鉄筋量および床版支間などの構造諸元や、当該橋梁の交

通量や大型車混入率などの交通状況、ひび割れなどの損傷状態に依存する。また補強の目的は、損傷の軽微な鉄筋コンクリート床版の予防保全、損傷の進行した鉄筋コンクリート床版の応急対策、車両の大型化に対応した恒久対策など種々あり、目的に応じて要求される補強の程度も異なる。

一般に、CFRPシートは、その引張剛性（CFRPシートのヤング係数×断面積）が大きなものほど補強効果が高くなると考えられるが、CFRPシートの引張剛性を大きくするために積層数を多くしすぎると不経済となったり、工事期間が長くなるなどの悪影響も考えられる。したがって、床版の構造諸元、交通の状況、床版の損傷状態を考慮して、補強後の床版が所要の疲労耐久性を確保できるよう、炭素繊維シートの種類、積層数を決定する必要がある。炭素繊維シートで補強した鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性は、輪荷重走行試験など、鉄筋コンクリート床版の疲労損傷メカニズムを考慮できる適切な方法により確認するのがよい。

しかしながら、個々の床版に対して実験により炭素繊維シートで補強した鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性を評価し補強後の耐用期間を照査することは困難である。一般に、「H8 道示」に準じて設計された鉄筋コンクリート床版（以下「H8 道示床版」と略す）は、鉄筋コンクリート床版としては最も高い疲労耐久性を有するものであり、炭素繊維シートで補強した鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性が「H8 道示床版」と同等であれば十分な疲労耐久性を有しているものと考えられる。

土木研究所で行なった輪荷重走行試験機を用いた疲労試験では、「S39 道示」で設計された鉄筋コンクリート床版（以下「S39 道示RC床版」と略す）に表一解 2.4.1 に示した損傷段階④の初期損傷を与えた後に主鉄筋方向、配力鉄筋方向に各2層の繊維目付量 300g/m^2 の高強度型炭素繊維シート〔引張強度 3.4kN/mm^2 、ヤング係数 245kN/mm^2 〕を接着した試験体は、「H8 道示床版」と同等の疲労耐久性を有することが確認された。なお、実験に使用した「S39 道示RC床版」は、昭和31年（1956年）鋼道路橋示方書（「S31 道示」）以降のTL-20 荷重で設計された床版としては最も配力鉄筋量の少ない床版であり、ひび割れ損傷が多く確認されているものである。

これより、「S31 道示」以降のTL-20 荷重で設計された鉄筋コンクリート床版では、その床版の損傷状態が表一解 2.4.1 に示す損傷段階①から④であれば、繊維目付量 300g/m^2 の高強度型炭素繊維シート〔引張強度 3.4kN/mm^2 、ヤング係数 245kN/mm^2 〕を主鉄筋方向、配力鉄筋方向に各2層接着することを標準補強量としてよいものとする。昭和40年（1965年）代より鉄筋コンクリート床版の設計基準が改定され、「S39 道示」に比べて「S39 道示」以降の新しい基準（たとえば昭和47年道路橋示方書）では鉄筋量や床版厚が増加している。したがって、「S39 道示」以降の設計規準で作成された鉄筋コンクリート床版に対しても、この標準補強量の炭素繊維シートで補強すれば、十分な補強効果が得られるものと考えられる。

炭素繊維シートは、「I 共通編、3章 使用材料」に示されるように、引張強度、ヤング係数、繊維目付量の異なる数種類のものがある。炭素繊維シート接着工法は、曲げひび割れの拘束効果、および、曲げ応力やたわみの低減などの補強効果を持つものである。これらの補強効果は、CFRPシートの引張剛性（ヤング係数 E_{cf} ×断面積 A_{cf} ）に大きく依存し、CFRPシートの引張剛性が同等であれば鉄筋コンクリート床版に対する補強効果も同等であると考えられる。CFRPシートの引張剛性 $E_{cf} \cdot A_{cf}$ (kN/mm) は、式一解 2.4.1 で表される。

$$E_{cf} \cdot A_{cf} = E_{cf} \times t_{cf} \times n \quad (\text{式一解 2.4.1})$$

ここに、 E_{cf} ：CFRPシートのヤング係数（ kN/mm^2 ）

A_{cf} ：CFRPシートの断面積（ mm^2/mm ）

t_{cf} ：CFRPシートの厚さ（ mm ）

n ：炭素繊維シートの積層数（層）

標準補強量〔繊維目付量 300g/m^2 、ヤング係数 245kN/mm^2 、主鉄筋方向・配力鉄筋方向各2層〕のCFRPシートの引張剛性は、各方向それぞれ 82kN/mm 幅となる。中弾性型や、高弾性型の炭素繊維シートなど異なる種類の炭素繊維シートを使用する場合は、CFRPシートのヤング係数と設計厚さから算定した引張剛性 $E_{cf} \cdot A_{cf}$ が上記の標準補強量 82kN/mm 幅に相当するようにするのがよい。繊維目付量 300g/m^2 の高強度型炭素繊維シート〔ヤング係数 245kN/mm^2 〕 $\times 2$ 層の引張剛性に比べ、繊維目付量 300g/m^2 の中弾性型炭素繊維シート〔ヤング係数 440kN/mm^2 〕 $\times 1$ 層の引張剛性は約10%低く、高弾性型炭素繊維シート〔ヤング係数 640kN/mm^2 〕 $\times 1$ 層の引張剛性は約10%高くなる。この程度の引張剛性を持つ炭素繊維シートで補強すれば、標準補強量で補強した炭素繊維シートと同等の補強効果が得られるものとしてよい。

土木研究所で行なった輪荷重走行試験では、損傷を与えた「S39 道示RC床版」に繊維目付量 300g/m^2 の高強度型炭素繊維シート〔引張強度 3.4kN/mm^2 、ヤング係数 245kN/mm^2 〕を主鉄筋方向、配力鉄筋方向にそれぞれ 1×1 層補強した場合でも、無補強の「S39 道示RC床版」に比べ高い疲労耐久性を示した。応急対策として鉄筋コンクリート床版の延命を図る場合や、軽微な損傷の鉄筋コンクリート床版に予防保全的に補強を行なう場合には、標準補強量より少ない炭素繊維シートで補強を行なうことも可能と考えられる。

4.5 構造細目

4.5.1 炭素繊維シートの貼付け

炭素繊維シートの接着範囲は、原則として床版パネル全面とする。

土木研究所で実施した輪荷重走行試験では、支点直近を除いて全面に炭素繊維シートを接着した試験体を用いて補強効果を確認していること、また炭素繊維シートの間隔を空けずに全面に接着した方が炭素繊維シートの高いひび割れ拘束効果が得られると考えられることから、ここでは床版パネル全面に炭素繊維シートを接着することを原則とした。また床版コンクリートの観察や水抜きのために、炭素繊維シートを一定の間隔を空けた格子状に接着した補強例もあるが、このような補強方法を妨げるものではない。このような貼付け方をする場合には、炭素繊維シートを接着していない部分が補強効果に与える影響や炭素繊維シートとコンクリートの付着強度および施工性などについて十分に検討して設計するのが望ましい。

輪荷重の走行位置は床版支間の中央とは限らないので、ハンチ入隅部からのひび割れ損傷を防止することを目的に主鉄筋方向の炭素繊維シートはハンチ部まで連続して接着するのがよい。ハンチ部まで炭素繊維シートを接着することで、ハンチ入隅部での応力の不連続を防止し、また繰返し荷重によるハンチ入隅部から

のひび割れの進展を拘束する効果が得られるものと考えられる。特にコンクリート橋などハンチの寸法が大きな床版では、ハンチまで炭素繊維シートを接着するのがよい。配力鉄筋方向の炭素繊維シートは、その応力の伝達方向がハンチの隅角部に平行する方向であるので、ハンチ部まで貼り付ける必要はない。

炭素繊維シート接着工法を漏水の激しい床版に適用することは不適當である。漏水は、鉄筋コンクリート床版の損傷を加速するので、補強時点で漏水が無いあるいは少ない床版でも、床版の上面の防水を行なうことが望ましい。橋面防水の施されていない床版の下面を炭素繊維シート接着工法で補強する場合には、下面の補強後に将来適当な時期に橋面防水を行うことが望ましい。

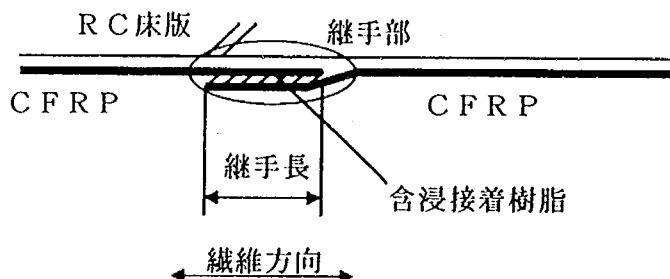
炭素繊維シートの貼付け順序は、鉄筋コンクリート床版のひび割れ状態などを考慮して決定する。炭素繊維シートは、一般に1層当たりの厚さが1mm以下と床版厚に比べて非常に薄く、積層順序の違いによる中立軸からの距離の差は無視できるので、貼付け順序による床版剛性あるいは鉄筋やコンクリートの応力度への影響はほとんど無い。しかしながら、コンクリート表面に炭素繊維シートを直接貼付けた方がひび割れ拘束効果が高いと考えられるので、一方向のひび割れが顕著である場合には、このひび割れに直交する方向を1層目としてコンクリート表面に接着するのがよい。

設計図書には、炭素繊維シートの種類（引張強度、ヤング係数、繊維目付量）、主鉄筋方向および配力鉄筋方向の炭素繊維シートの積層数、貼付け範囲、最小継手長さ、シートの貼付け順序を明記するものとする。

4.5.2 継手

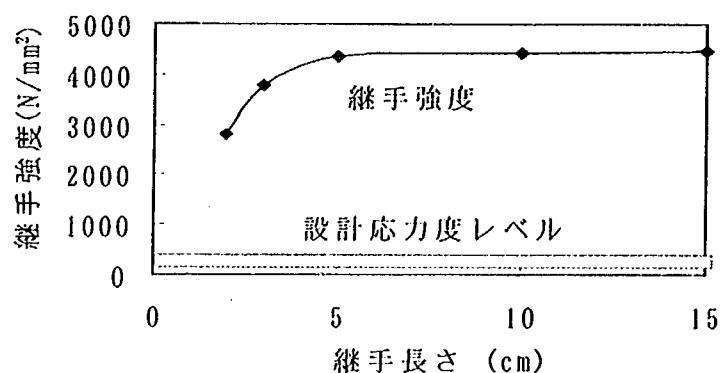
- (1) 炭素繊維シートの継手は、繊維方向の重ね継手とする。
- (2) 最小継手長さは、10cm とする。
- (3) 主鉄筋方向は原則として継手を設けず、やむをえず継手を設ける場合は、炭素繊維シートに最大引張応力が作用する位置を避けて設ける。
- (4) 継手は、継手部でCFRPシートの強度が低下しないように配置しなければならない。

(1) 炭素繊維シート間の継手は、図一解 2.4.1 に示すように、繊維方向に設け、含浸接着樹脂により、繊維方向に応力を伝達するものとする。繊維直角方向には、応力を伝達しないので原則として継手を設ける必要はない。



図一解 2.4.1 炭素繊維シートの継手

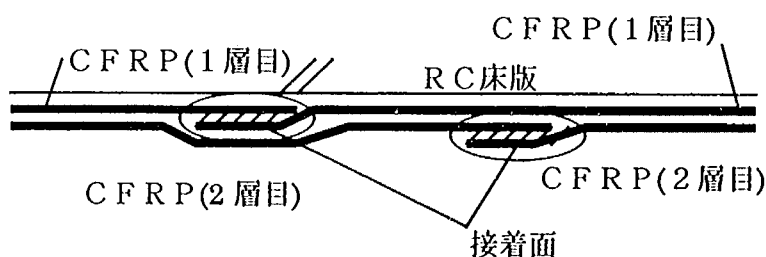
(2) 重ね継手の継手強度は、図一解 2.4.2 に示すように、継手長さが 5cm 以下の範囲では、継手長さに依存して急激に変化するが、継手長さが 5cm 以上では、ほぼ CFRP シートの引張強度に達して安定することが引張試験により確認されている。また、設計上、CFRP シートに生じる引張応力度は、CFRP シートの保証引張強度に比べて十分小さい。そこで、安定した継手強度を得るための最小重ね継手長さを 10cm とした。



図一解 2.4.2 炭素繊維シート(高強度型)の継手強度

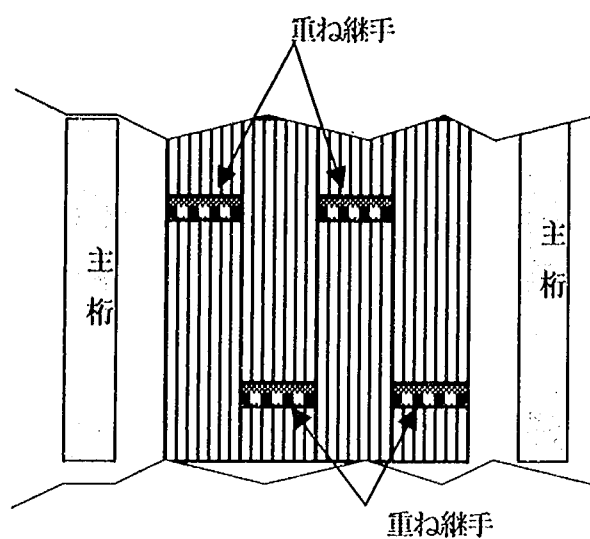
(3) 床版の支間長は一般に 3.5m 以下であり、主鉄筋方向に貼り付ける炭素繊維シートは継手を設けないのがよい。主鉄筋方向の炭素繊維シートに継手を設ける場合、原則として支間中央に配置するのを避ける。配力鉄筋方向に貼り付ける炭素繊維シートは、一般に接着長さが長く、継手を設けずに施工することが困難である。したがって、施工性を考慮して適切な長さの炭素繊維シートを重ね継手で接続しながら貼り付けてよい。

(4) 多積層の場合の重ね継手は、これを同一位置で設けると継手強度の低下、応力集中の原因となる。したがって、継手位置は、図一解 2.4.3 に示すように、30cm 程度以上ずらして千鳥に配置するのがよい。



図一解 2.4.3 多層積層の場合の重ね継手

また、平面内の隣り合う炭素繊維シートの継手配置は、図一解 2.4.4 に示すように、継手が同一線上にならないような配置とする。



図一解 2.4.4 配力鉄筋方向の継手の配置

5章 施工

5.1 一般

- (1) 炭素繊維シート接着工法により補修・補強を行う既設のコンクリート床版は、その材料健全性が本工法を適用し得る状態であることを確認しなければならない。
- (2) 炭素繊維シートの床版下面への貼付けは、補修・補強設計で示された貼付け範囲、積層数、継手位置等を遵守して適切に施工し、完成したCFRPシートが所要の性能を発揮するようにしなければならない。

(1) 炭素繊維シート接着工法による鉄筋コンクリート床版の補修・補強は、鉄筋コンクリート床版が本来保持している部材性能をそれ以上に発揮させるために行うものであり、引張部材である炭素繊維シートに対して、圧縮部材、または、せん断部材としてのコンクリート自体の健全性が損なわれている場合には、床版全体の耐力が増加しないことになる。したがって、調査において、現状の鉄筋コンクリート床版に損なわれている部分があれば、本来の目的である補修・補強工事着手前に、断面修復処理を施しておく必要がある。

(2) 炭素繊維シートの複数枚をそれぞれ橋軸方向(配力鉄筋方向)さらには橋軸直角方向(主鉄筋方向)の両方向に貼り付ける場合の具体的な貼付け順序は、補強必要量等を考慮して設計で定めることとし、施工においてはその設計図書の指示にしたがわなければならない。

ハンチ部内面は、炭素繊維シート接着時に折れ角が生ずることになり、局部的に応力集中が起こる、あるいは繊維の直線性が損なわれる等の可能性があり、コンクリート面を滑らかにする必要がある。この目安として、ハンチ部内面に不陸修正材を半径 100mm 程度以上盛付け、滑らかに成形するのがよい。

5.2 特記事項

- (1) 炭素繊維シート接着工法により床版の補修・補強を行う場合は、既設の鉄筋コンクリート床版上面の防水処理を事前に施しておくことが望ましい。
- (2) 床版下面に炭素繊維シートを貼り付ける場合には、含浸接着樹脂の硬化前にシート端部が垂れ下がり、はく離することのないように注意する必要がある。
- (3) 仕上げ工は、設計で定められた保護材の品質を確保するように念入りに施工する必要がある。

(1) 炭素繊維シート接着工法による鉄筋コンクリート床版の補修・補強は、床版下面に炭素繊維シートを貼り付けることになる。この作業中に降雨などにより水が接着面に伝わってくると含浸接着樹脂の硬化を妨げることになるので、適切な止水処理を施して炭素繊維シートの貼付け作業を行う。

(2) 床版下面への炭素繊維シートの貼り付けは、重力に逆らって貼ることになり、活荷重による振動、温度などの環境条件によっては、含浸接着樹脂の硬化前に浮きや部分的なはく離が発生する可能性がある。したがって、含浸接着樹脂の炭素繊維シートへの含浸を入念に行うとともに、施工中に浮きや部分的なはく離

が生じた場合には、再度すみやかに脱泡ローラーで押し付ける等の措置を講ずる必要がある。

(3) 床版下面は、直射日光による紫外線、温度変化等の影響が少ないこと、また美観が問われるような環境下にあることも少ないので、必要に応じた表面保護を行えばよい。

なお、表面保護として塗装を行う場合には以下に関して注意する必要がある。

塗装材料は受入時に設計で定める品質を満足していることを確認しなければならないとともに、塗装の施工は材料に適合した方法で行わなければならない。塗装を行う前には、塗装面の水分、付着油脂類、塩分など、塗装に悪影響を及ぼすものを除去しなければならない。また、塗装は各工程ごとに十分な施工管理を行うものとする。

6章 維持管理

6.1 一般

炭素繊維シートを接着したコンクリート床版は、補修・補強の効果を長期にわたって維持させるため、一般の点検時に健全度調査を行って変状を発見するとともに、変状が発見された場合には適切な対策を施さなければならない。

「Ⅰ 共通編、6章 維持管理」に準ずる。

Ⅲ コンクリートげた編

1 章 総則

1.1 適用の範囲

1.1.1 本編の適用範囲

本編は、炭素繊維シート接着工法による、道路橋のコンクリートげた等を対象として行う補修・補強の設計・施工に適用する。

「Ⅰ 共通編、1章、1.1 適用の範囲、1.1.1 指針適用の範囲」で述べた通りである。

ただし、本編で補修・補強の対象とするコンクリートげた等は、道路橋におけ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造の主げた、横げた、縦げた、および、けたとしての設計・施工手法を適用することが適当であるコンクリート部材とする。

したがって、道路橋に付設されている高欄、防護柵、地覆、落橋防止装置、点検施設、遮音施設等であっても、それらを構成するコンクリート部材の設計・施工にけたとしての手法を適用することが適当である場合は、これらをコンクリートげたと見なして取り扱ってよい。なお、ここで対象とする補強は、一般的な曲げとせん断が作用する部材を対象としており、道路橋のコンクリート造橋脚、あるいはコンクリート造ラーメン橋脚の耐震補強は、本指針(案)の適用外とする。

また、補修・補強の対象とするコンクリート部材が道路橋の構成部材ではない場合への本指針(案)の適用は、「Ⅰ 共通編、1章、1.1 適用の範囲、1.1.1 指針適用の範囲、および、解説(1)」の考え方に拠ってよい。

1.1.2 炭素繊維シート接着工法の適用方法

(1) コンクリートげた等が現在保有する諸性能の一部、あるいは全部を対象として、劣化・損傷の発生を防止し、あるいは既に発生している劣化・損傷の進行を阻止し、かつ、その性能に耐久性を付与することを目的とする炭素繊維シート接着工法による補修は、現在あるいは将来の荷重作用または環境作用と維持管理方法などの条件、および、補修と維持管理等の経済性を総合的に検討して決定する所要性能に応じて、その補修の程度を定めてよい。

(2) コンクリートげた等が、劣化・損傷の有無に関わらず、現在保有する諸性能の一部分、あるいは全部を対象として、性能を向上させ、かつ、その向上結果に耐久性を付与することを目的とする炭素繊維シート接着工法による補強は、現在あるいは将来の荷重作用の増加または環境作用の過酷化と維持管理方法などの条件、および、補強と維持管理等の経済性を総合的に検討して決定する所要性能に応じて、その補強の程度を定めてよい。

(1) (2) 「Ⅰ 共通編、2章、2.1 適用の目的、2.2 適用方法、および、解説」で述べた通りであり、これを整理、区分したものが表一解 3.1.1 である。この表によれば、炭素繊維シート接着工法による補修は、

対象とするコンクリートげた等が現在置かれている荷重作用あるいは環境作用下において、コンクリートげた等およびこれを構成する材料の諸性能を対象として、今後発生が予想される劣化・損傷を未然に防ぎ、あるいは、既に発生している劣化・損傷の進行を阻止して、かつ、その性能に耐久性を付与する場合のみに該当することとなる。

一方、炭素繊維シート接着工法による補強は、これ以外の場合に該当する。

表一解 3.1.1 物理・化学的、力学的性能等の補修または補強の区分

部材および部材構成材料の保有する諸性能の現状	補修、補強の区分	荷重作用または環境作用	
		現状のまま (荷重不変、環境不変)	将来悪化 (荷重の増大、環境の過酷化)
劣化・損傷がある	補修	物理・化学的、力学的性能の劣化・損傷の進行を阻止し、これに耐久性を付与する。	該当なし
	補強	物理・化学的、力学的性能を向上させ、これに耐久性を付与する。	物理・化学的、力学的性能を向上させ、これに耐久性を付与する。
劣化・損傷がなく、健全である	補修	物理・化学的、力学的性能の劣化・損傷の発生を防止し、これに耐久性を付与する。	該当なし
	補強	物理・化学的、力学的性能を向上させ、これに耐久性を付与する。	物理・化学的、力学的性能を向上させ、これに耐久性を付与する。

(1) コンクリートげた等は、けた等およびけた等を構成する材料が建設当初に保有していた諸性能を、荷重作用または環境作用を主要因として時間の経過と共に進行する劣化・損傷により低下させ、期待された耐用期間を満足することができなくなりがちである。

CFRPシートは、化学的作用に対する高い抵抗性と耐久性を持つことから、コンクリートげた等を諸環境条件から遮断することによって、そのけた等およびけた等を構成する材料の劣化・損傷の発生防止に、また、既に劣化・損傷が発生している場合はその進行阻止に利用することができる。

したがって、炭素繊維シート接着工法による補修設計は、CFRPシート積層数と、鉄筋の防錆処理、劣化コンクリートの除去と修復、コンクリートの再アルカリ化などの、けた等を構成する材料に対する健全性の回復処置等との併用を調節することにより、必要に応じた補修の程度を設定することができる。

(2) 炭素繊維シートは、コンクリートとCFRPシートとの複合体となったのち、コンクリートげた等の保有性能、特に、耐荷性能として一般に用いられている、① 部材断面のコンクリートおよび鉄筋の応力度、② 部材のたわみ、③ 部材断面の保有破壊耐力、を改善する効果を持つこと、そして、これらの効果は、炭素繊維の使用量に左右されることが明らかとなっている。

したがって、炭素繊維シート接着工法による補強設計は、たとえば道路橋示方書等に定める

- ① 設計荷重作用時の部材断面のコンクリートおよび鋼材の応力度を許容応力度以下とすること
- ② 部材の活荷重たわみを許容たわみ以下とすること
- ③ 部材の保有破壊耐力を終局荷重作用時部材力以上とすること

等を満たす炭素繊維量とその構造細目を決定する作業となるのが通常である。

しかし、道路橋示方書等に定められたこれらの耐荷性能は、一般に 50 年あるいはそれ以上の耐用期間を持つコンクリート部材からなる構造物を新しく建設するために設定された目標である。

したがって、既設コンクリートげた等の補強設計は、必ずしも新設時に要求される耐荷性能を満たす必然性はなく、現在の耐荷性能をある程度向上させることにより、その社会的重要度、補強および維持管理または更新等の経済性などを総合的に検討して設定される、例えば数年あるいは 10 数年の耐用期間に考えられる荷重作用あるいは環境作用に耐える性能とその性能に耐久性を持たせることを目的とする延命措置であるような、必要に応じた補強の程度とすることができる。

1.1.3 炭素繊維シートの選定

炭素繊維シート接着工法に使用する炭素繊維は、対象とするコンクリートげた等の現状、および、補修または補強後に目標とする挙動を十分検討の上、補修または補強目的への適合性、施工性、および、経済性等を総合的に評価して、その種類を選定するのがよい。

炭素繊維シート接着工法は、「本編、1 章、1.1 適用の範囲、1.1.1 本編の適用範囲、および、1.1.2 炭素繊維シート接着工法の適用方法」で述べたように、コンクリートげた等の補修・補強において幅広い適用分野で使用される可能性を持つ工法である。

コンクリートげた等を環境条件から遮断する目的を持つ補修の場合は、炭素繊維が一般に樹脂系プラスチックの劣化・損傷とひび割れの発生を防止し、またはその進行を阻止する機能を有することから、経済性にすぐれる炭素繊維シートを選定すればよい。

また、コンクリートげた等の内部に配置されている引張補強鋼材の発生応力度を低減させることを目的とする補強の場合は、応力度を分担する効果の高い、引張剛性($A_{cf} \cdot E_{cf}$)の大きい炭素繊維シートを、そして、コンクリートげた等の破壊耐力の向上を目的とする補強の場合は、破断耐力($A_{cf} \cdot \sigma_{cf,brk}$)の大きい炭素繊維シートを選定する等が必要となる。

一般に、高弾性型の炭素繊維シートは、応力度の分担に敏感ではあるが、破断耐力と終局ひずみが比較的小さく、ひび割れ開口の影響を受けやすいこと、一方、高強度型の炭素繊維シートは、破断耐力と終局ひずみが大きく、ひび割れ開口の影響を受けにくい反面、応力度の分担には比較的敏感ではないこと、そして、中弾性型の炭素繊維シートは、両者の中間的な特徴を持っている。

したがって、本工法に使用する炭素繊維シートは、対象とするコンクリートげた等の現状、および補修・補強後に目標とする挙動を十分検討の上、補修または補強目的への適合性、施工性、および、経済性等を総合的に評価し、その種類を選定するのがよい。

1.2 用語の定義

この編で使用する用語の定義は次の通りとする。

- (1) 機械式定着 曲げ補強またはせん断補強に用いる炭素繊維シートの端部を鋼板とアンカーボルト等によりコンクリート表面へ機械的に定着する方法

2章 保有性能の調査と評価

2.1 基本的考え方

炭素繊維シート接着工法による補修・補強の対象とするコンクリートげた等が保有する性能に関する調査と評価は、補修・補強計画の基本方針決定に用いるものであり、「Ⅰ 共通編、2章 炭素繊維シート接着工法による補修・補強の適用方法」に準拠して行うことを原則とする。

炭素繊維シート接着工法によるコンクリートげた等の補修・補強は、

- ① 工法を適用するコンクリートげたに関する資料調査および現地調査
- ② 調査結果を利用した、コンクリートげた等およびこれを構成する材料が現在保有する諸性能の評価
- ③ 現在と今後の荷重作用および環境作用をもとに、「Ⅰ 共通編、2章、2.2 適用方法、2.2.1 基本的考え方、および、解説」ならびに「本編、1章、1.1 適用の範囲、1.1.2 炭素繊維シート接着工法の適用方法、および、解説」の考え方による要求性能の設定
- ④ ②で推定・評価した保有性能と③で定められる要求性能との対比による、補修・補強の目的とその程度の決定
- ⑤ 補修・補強方法、および、その具体的内容の決定を行う設計の実施
- ⑥ 補修または補強の実施
- ⑦ 維持管理

からなる一連の体系である。

したがって、本章で定める保有性能に関する調査と評価は、補修・補強の目的とその程度の決定、その内容の設計、施工計画の策定、そして、補修・補強を実施するための重要な初期段階である。補修・補強に関する、これら一連の流れと相互の関連を図一解 3.2.1 に示す。

2.2 調査

2.2.1 資料調査

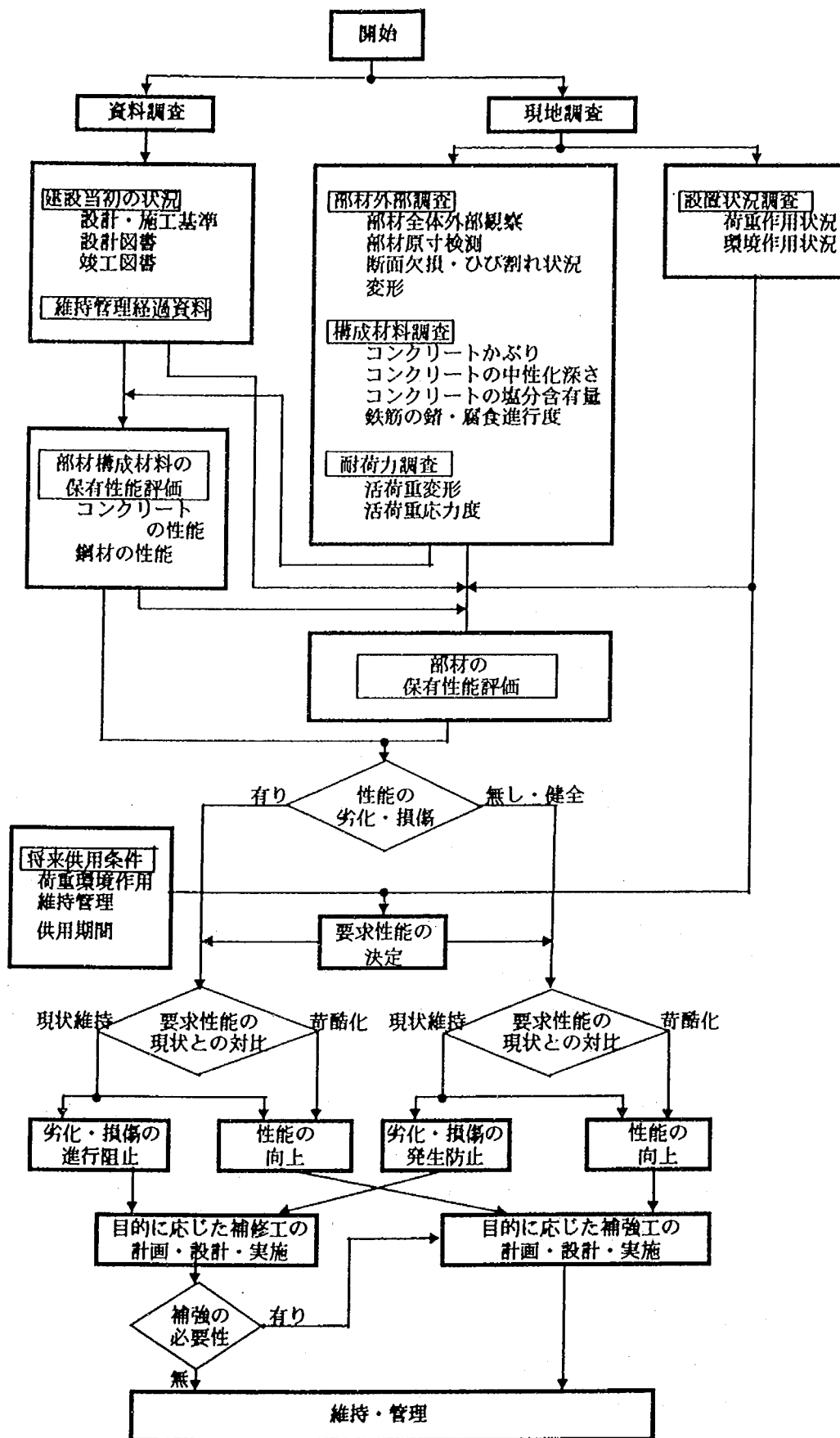
資料調査は、補修・補強の対象とするコンクリートげた等が建設当初等に保有していた性能の種類とその程度を評価する基礎資料を得ることを目的として行うものとする。

「Ⅰ 共通編、2章、2.2 適用方法、2.2.2 詳細調査、および、解説」で述べた通りである。

資料調査の対象となる資料には、一般に以下のものが考えられる。

- ① 建設当初に設計計画の前提となった設計基準、および、それに基づいて設定された荷重作用および環境作用条件の種類と程度に関する資料
- ② 設計成果である、設計図、構造検討書などの設計図書
- ③ 施工成果である、施工計画書、竣工図、検測報告書などの竣工図書
- ④ その他関連資料

建設当初の設計基準と設計計算書は、設計の基本となる設計荷重、設計計算手法、使用材料の種類および許容応力度と発生応力度を推定、あるいは、確認することができる資料である。また、設計図書や竣工図書、



図一解 3.2.1 コンクリートけた等の保有性能に関する
調査と評価および補修・補強の流れ

さらに検測報告書は、けた等の具体的な断面寸法および断面構成を、さらに、通常点検や追跡調査などの維持管理資料は、建設後に行われた補修・補強の内容を知ることができ、ひいては、保有性能の推定と評価を確実に行うことができる資料である。

2.2.2 現地調査

- (1) 現地調査は、荷重作用および環境作用の調査、コンクリートげた等を構成する材料が保有する性能の調査、そして、コンクリートげた等が部材として保有する性能の調査から構成するものとする。
- (2) 荷重作用および環境作用の調査は、補修・補強の対象とするコンクリートげた等に要求される保有性能の種類と程度を決定する基礎資料を得ることを目的として行うものとする。
- (3) コンクリートげた等を構成する材料が保有する性能の調査は、外観調査、物理的調査、化学的調査、および力学的調査で構成するものとする。
- (4) コンクリートげた等が部材として保有する性能の調査は、外観調査、物理的調査、および力学的調査で構成するものとする。

(1) 炭素繊維シート接着工法による補修・補強の対象とするコンクリートげた等に関する現地調査は、けた等が現在置かれている荷重作用および環境作用の実態、および、それらの作用がけた等およびこれを構成する材料にどのような影響を与え、その結果、どのような劣化・損傷となって現れているのかの実態を知り得る調査であり、資料調査では得ることのできない情報を得ることができる。

(2) 現在の供用状態におけると共に今後の供用期間における、荷重作用および環境作用の調査は、その結果を部材が保有する諸性能と直接比較することによって、工法適用の目的を補修あるいは補強のいずれとするか、また、その内容をどの程度とするか、等を決定する資料を得る重要な調査である。

現地調査で得られた現在の荷重作用は、対象とするコンクリートげた等に劣化・損傷がある場合はその原因の解明に、また、部材断面の保有する主として力学的性能の推定・評価、および、補修・補強の設計に利用する。一方、現在の環境作用は、対象とするコンクリートげた等の構成材料に劣化・損傷がある場合はその原因の解明に、また、補修・補強の検討時にはそれら材料が保有する物理的、化学的性能、または、力学的性能に与える影響の検討に利用する。

(3) 炭素繊維シートによる補修・補強の対象であるコンクリートげた等を構成する材料が保有する性能の調査は、けた等の表面に発生している劣化・損傷によって、けた等を構成する材料の保有する物理的性能と化学的性能の劣化・損傷の種類と程度を大略的に把握する外観調査、および、けた等を構成する材料そのものが保有する性能を直接対象として行う物理的調査、化学的調査、および、力学的調査から構成されるものとした。

外観調査は、上記の観点から、

- ① 設計図書との対比、および、記録されていない補修・補強の有無の調査
- ② その他、目的に応じた調査

などについて注意深く行うことが必要である。特に、設計図書と対比し、記録されていない補修・補強の有無を調査することは重要である。

けた等を構成する材料の物理的調査は、以下を行うことが望ましい。

- ① コンクリートの劣化・損傷による断面欠損の有無とその程度の調査
- ② 鉄筋の断面欠損の有無と断面欠損がある場合の有効断面積の調査
- ③ PC鋼材の断面欠損の有無と断面欠損がある場合の有効断面積の調査
- ④ その他、目的に応じた調査

コンクリートは、その断面に欠損がある場合には、欠損の発生位置、広がり、深さなどとともに鋼材の露出の有無なども調査し、それらの現象が化学的な原因と力学的な原因のいずれによるものかを検討することもある。また、鋼材は、発錆の有無、および、発錆のある場合の鋼材表面の腐食度や断面欠損の進行度等が問題となることから、コンクリートに大きなひび割れやはく離が見られる箇所では、かぶりコンクリートのはつり取りにより、これらを調査・確認することが望ましい。

けた等を構成する材料の化学調査は、けた等が置かれている環境作用下での経年により、構成材料に紫外線劣化、中性化、塩分含有量の増加、などが生じていることが考えられ、これらの有無とその程度を把握するために行うものである。化学調査には、

- ① コンクリートを対象とするものとして、フェノールフタレイン染色法による中性化進行度などの鋼材防錆能の調査と、コアサンプルによる塩分含有量などの調査
- ② 鋼材を対象とするものとして、自然電位分布測定による腐食度の調査
- ③ その他、目的に応じた調査

等があり、調査の目的、適用性、精度等を吟味して選定するのがよい。

コンクリートけた等を構成する材料の力学的調査は、コンクリートを対象として行うのが通常であり、コンクリートの強度等を推定するために行う調査方法として、

- ① シュミットハンマー法 ② 共鳴振動法 ③ 超音波法
- ④ 局部破壊法(引抜き法) ⑤ 組合せ法(超音波・シュミットハンマー法)

などが、また、部材外部からの調査だけでは把握困難な深部の調査方法として、

- ⑦ 欠陥調査法(弾性波法、超音波法、AE法、赤外線法、電磁波法、放射線法)
- ⑧ 形状推定方法(超音波法、電磁波法および電磁誘導法、放射線法)
- ⑨ コアボーリング法

などがあるが、それらの適用性、精度等を吟味し、調査目的に応じた適切な方法を選定するのがよい。

(4) コンクリートけた等は、建設後、経年に伴いけた等を構成する材料の物理的、化学的な劣化・損傷の進行によって、また、けた等そのものの物理的な劣化・損傷によって、部材として保有する力学的性能が低下している場合がある。したがって、このけた等が部材として保有する力学的性能を把握するために行う調査は、外観調査、物理的調査、および力学的調査で構成することとした。

外観調査は、以下を行うのが望ましい。

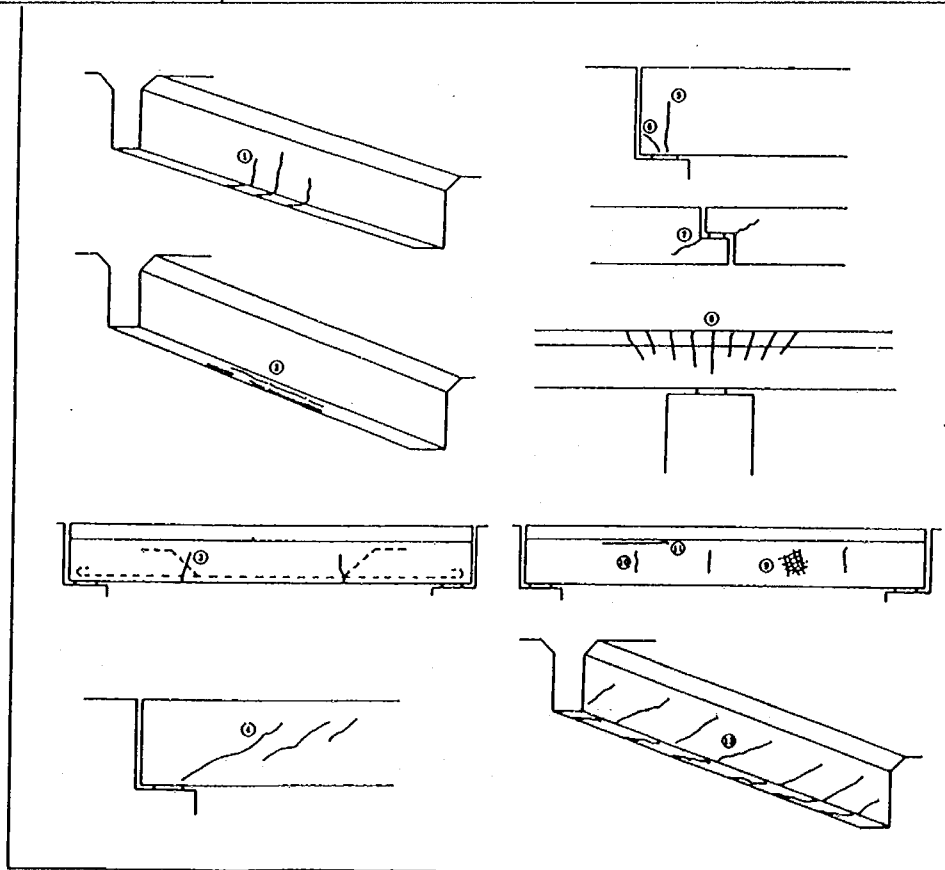
- ① 設計図書との対比、および、記録されていない補修・補強の有無の調査
- ② 物理的・力学的な原因による、断面の劣化・損傷の有無とその程度の調査
- ③ その他、目的に応じた調査

表一解 3.2.2 判定区分

X	Y	Z	2次部材	主部材	X	Y	Z	2次部材	主部材
大	大	大	Ⅱ	Ⅱ	小	大	大	Ⅱ	Ⅱ
		小	Ⅲ	Ⅱ			小	Ⅲ	Ⅲ
	中	大	Ⅳ	Ⅲ		中	大	Ⅳ	Ⅳ
		小	Ⅳ	Ⅲ			小	Ⅳ	Ⅳ
	小	大	健全	健全		小	大	健全	健全
		小	健全	健全			小	健全	健全

表一解 3.2.3 ひび割れの位置およびパターン（上部工 RC、PC共通）

位 置	ひび割れパターン
支間中央部	①主げた直角方向のけた下面および側面の鉛直ひび割れ ②主げた下面縦方向ひび割れ
支間1/4部	③主げた直角方向のけた下面および側面の鉛直ひび割れ
支点部	④支点付近の腹部に斜めに発生しているひび割れ ⑤支承上けた下面・側面に鉛直に発生しているひび割れ ⑥支承上から斜めに側面に発生しているひび割れ ⑦ゲルバー部のひび割れ ⑧連続げた中間支点部の上側の鉛直ひび割れ
その他	⑨亀甲状、くもの巣状のひびわれ ⑩けたの腹部に規則的な間隔で鉛直方向のひび割れ ⑪ウェブと上フランジの接合点付近の水平方向のひび割れ ⑫けた全体に斜め45°方向のひび割れ



2.3 保有性能の評価

2.3.1 原則

コンクリートげた等が現在保有する諸性能は、コンクリートげた等を構成する材料が現在保有する物理的・化学的あるいは力学的性能、および、これらの構成材料からなる複合材である部材として現在保有する力学的性能で評価するものとする。

「Ⅰ 共通編、2章、2.2 適用方法、2.2.3 性能評価、および、解説」に述べた通りである。

2.3.2 けた等を構成する材料が保有する性能の評価

(1) コンクリートげた等を構成する材料が現在保有する諸性能の評価は、資料調査結果および現地調査結果を基に、現在一般的に用いられている評価手法により、劣化・損傷の種類や程度、また、その分布状況等を総合的に判断して、行うものとする。

(2) 性能評価は、以下について行うものとする。

1) コンクリートについて

- ① 圧縮および引張に関する物理的および力学的性能
- ② 鋼材が発錆・腐食することからの保護に関する化学的性能

2) 鋼材について

- ① 引張に関する物理的および力学的性能

3) その他、設計上特に要求される性能

4) 上記 1)、2)、および 3) の性能の耐久性

(1)(2) 補修・補強の対象とされるコンクリートげた等は、それを構成しているコンクリートと鋼材の材料規格が不明である、劣化によるコンクリートが保有する諸性能の低下が予測される、さらには、腐食による鋼材断面の減少が見受けられる、等の状態にあることが多い。したがって、コンクリートげた等を構成する材料が現在保有する諸性能の評価は、対象とするコンクリートげた等から採取した試験片の物理・化学的および力学的な検査結果と劣化・損傷の種類や程度、また、その分布状況等を総合的に判断して行うことが原則である。しかし、供用中のコンクリートげた等の部材からコンクリートおよび鋼材等を試験片として採取することが困難であることが多く、その場合には設計図書から、また設計図書が既に失われている場合は、資料調査結果から建設当時に最も使用された可能性の高いコンクリートと鋼材の種別を推定し、「道路橋示方書、Ⅰ 共通編、および、Ⅲ コンクリート橋編」等を参考としながら、それぞれの材料が現在保有する諸性能を評価してよい。

ただし、けた等に大きなひび割れやはく離が見られる部分の構成材料は、コンクリートについては中性化と塩分含有の局部的進行度、および、鋼材については発錆の有無、発錆のある場合の鋼材表面の腐食度や断面欠損の進行度等により、それらの保有性能が大きく異なることから、かぶりコンクリートのはつり取りにより実施した外観検査および物理・化学的検査等の結果を参考とするのがよい。

2.3.3 けた等が部材として保有する性能の評価

(1) コンクリートけた等が部材として現在保有する諸性能の評価は、資料調査結果および現地調査結果を基に、けた等を構成する材料および部材としての劣化・損傷の種類や程度、また、その分布状況等を総合的に判断して、現在一般的に用いられている評価手法により、行うものとする。

(2) けた等の部材としての性能評価は、以下について行うものとする。

- 1) 曲げ性能
- 2) せん断性能
- 3) その他、設計上特に要求される性能
- 4) 上記 1)、2)、および 3) の性能の耐久性

(1)(2) 荷重作用および環境作用に対してコンクリートけた等が部材として持つ抵抗は、一般に、けた等を構成する材料が個別に保有する性能によって直接抵抗する場合、または、構成材料がその寸法と配置とを構成要素とする複合材である部材として保有する性能によって抵抗する場合とがある。しかし、けた等を構成する材料が保有する性能は、その個別かつ直接的な利用がコンクリートの摩擦抵抗性等の僅かなものに限られているのに対し、そのほとんどが複合材としての性能に利用されているといえ、その物理的・化学的および力学的性能に加え、その断面寸法と配置が、複合材であるコンクリートけた等の部材としての保有性能に大きい影響を与えている。

したがって、補修・補強の対象とするコンクリートけた等が部材として保有する諸性能の評価は、現地調査より得られた構成材料の物理的・化学的および力学的性能、ならびに、設計図書等を対象とする資料調査により得られた断面構成または断面配置とを基本として行われるのが原則である。

しかし、一般に、補修・補強の対象とされるコンクリートけた等は、その設計図書が既に失われて部材断面を構成する材料の配置が不明であることが多く、また、現地調査で部材の断面構成を知ることは殆ど不可能である。このような場合には、建設当時一般に使用されていた標準設計資料、建設省土木研究所「土木研究所資料第 2682 号、既設橋梁の耐久性評価・向上技術に関する調査研究 Ⅲ、昭和 63 年 12 月」、または、「道路橋示方書、Ⅲ コンクリート橋編」等を参考としながら、断面構成を推定することも止むを得ない。

なお、載荷試験によって得られた力学的諸性能は、部材断面の設計手法によって算出した力学的諸性能と大きく異なることが考えられ、力学的諸性能の全体的な評価、補強前後の載荷試験結果を比較することによる補強効果の程度とその持続性の評価等に利用することができる。

2.4 保有性能の評価結果の適用

(1) コンクリートけた等が保有する性能の評価結果は、炭素繊維シート接着工法を補修または補強へ適用することの決定、および、適用する場合はその内容の決定に、それぞれ反映させなければならない。

(2) 補修・補強の内容の決定は、「本編、4 章 補修・補強設計」に拠って行うことを原則とする。

(1) 本編、本章の各項に基づいて総合的に判断したコンクリートけた等が保有する性能の評価結果は、「Ⅰ 共通編、2 章 炭素繊維シート接着工法による補修・補強の適用方法、2.2 適用方法」と「本編、1 章 総則、1.1 適用の範囲、1.1.2 炭素繊維シート接着工法の適用方法、1.1.3 炭素繊維シートの選定」、および、これ

らの解説に述べたように、現在あるいは将来における荷重作用または環境作用などの供用条件と維持管理方法等および経済性を総合的に検討して決定される要求性能と対比することによって、補修あるいは補強の何れをその目的とするか、また、その程度、具体的内容、その施工方法等の詳細の決定に利用する。

(2) 炭素繊維シート接着工法による補修は、「本編、1章 総則、1.1 適用の範囲、1.1.2 炭素繊維シート接着工法の適用方法(1)」の考え方にもとづき、「本編、4章 補修・補強設計、4.3 補修設計」に拠り、その内容を決定することとする。

また、炭素繊維シート接着工法による補強は、「本編、1章 総則、1.1 適用の範囲、1.1.2 炭素繊維シート接着工法の適用方法(2)」の考え方にもとづき、「本編、4章 補修・補強設計、4.4 曲げ補強設計、および、4.5 せん断補強設計」に拠り、その内容を決定することとする。

3章 使用材料

3.1 一般

炭素繊維シート接着工法によるコンクリートげた等の補修・補強に使用する材料は、「I 共通編 3章 使用材料」に適合することを原則とする。

使用材料が有する性能の目安は、「I 共通編、3章 使用材料、および、解説」に準ずることとし、同時に「付属資料2 炭素繊維シートとCFRPシート」を参考とするのがよい。また、これらに定める以外の材料を用いる場合は、その性能が炭素繊維シート接着工法をコンクリートげた等の補修・補強に適用する目的から要求される性能を満たすことを確認しなければならない。

3.2 定着用材料

(1) 炭素繊維シートの機械式定着に用いる材料は、補修・補強設計で要求される品質を満たすものでなければならない。

(2) 定着用材料は、その表面に補修・補強設計で要求される処理を行ったものでなければならない。

(1) 炭素繊維シートの機械式定着に用いる鋼板、アンカーボルトなどの材料は、JIS適合品を用いることとする。

(2) 接着剤を用いてCFRPシートに接着する鋼材などの表面は、補修・補強設計で要求される処理を行ったものでなければならないが、設計図書等にその要求仕様が記載されていない場合は、「本編、5章 施工、5.2 特記事項」に定める標準仕様を適用してよい。

4章 補修・補強設計

4.1 一般

炭素繊維シート接着工法によるコンクリートげた等の補修・補強設計は、本章の規定によることを原則とする。

炭素繊維シート接着工法によるコンクリートげた等の補修・補強設計は、本章の規定に従って行うことを原則とするが、より妥当であると考えられる補修・補強設計法が別途存在する場合は、それによってよい。また、本章の規定を適用することが妥当ではなく、また、他に参考とする適当な基準類や資料がない場合は、追加実験を行って補修・補強の効果を確認することが望ましい。

4.2 材料の設計用値

4.2.1 CFRPシート

- (1) CFRPシートの設計に用いる引張強度は、保証引張強度とする。
- (2) CFRPシートの設計に用いるヤング係数は、ヤング係数の平均値とする。
- (3) CFRPシートの保証ひずみは、保証引張強度を設計用ヤング係数の平均値で除した値とする。
- (4) CFRPシートとコンクリートとの許容平均付着応力度は、 0.44N/mm^2 とする。

(1) (2) CFRPシートの保証引張強度とヤング係数の平均値は、「I 共通編、3章 使用材料、および解説」によるものとする。

(3) CFRPシートの保証ひずみは、「I 共通編、1章 総則、1.2 用語の定義」に示した通りである。

(4) CFRPシートとコンクリートとの付着応力度は、CFRPシートに作用する引張力をCFRPシートの接着面積で除して求めた平均付着応力度で評価するものとし、許容平均付着応力度は、一般に、 0.44N/mm^2 としてよいが、「付属資料5、5.1 CFRPシートの付着試験結果」を参考として、この値にコンクリート強度や炭素繊維シート種類の影響を考慮してもよい。

4.2.2 既存の鉄筋およびP C鋼材

補修・補強の対象とするコンクリートげた等に既に配置されている鉄筋およびP C鋼材の引張強度とヤング係数は、資料調査と現地調査の結果をもとに、「道路橋示方書 I 共通編」に定める値を、また、鉄筋およびP C鋼材の許容引張応力度は、「道路橋示方書 III コンクリート橋編」に定める値を、それぞれ参考として、補修・補強の目的に応じて定めてよい。

補修・補強の対象とされる古い道路橋は、その設計図書がすでに失われ、それに使用されているコンクリート部材の鉄筋やP C鋼材の種類と公称径およびその配置方法が不明である場合が多い。また、長期間供用されているコンクリートげた等に配置されている鉄筋やP C鋼材は、腐食によりその断面が減少している可能性もある。したがって、コンクリートげた等に配置されている鉄筋およびP C鋼材は、コンクリートげたから採取した試料の試験結果により引張強度を確認し、これをもとに許容引張応力度を設定することが望ましい。

しかし、供用中のコンクリートげた等から主引張補強鋼材等を試験片として採取することは、事実上困難である。したがって、コンクリートげた等に配置されている鉄筋およびP C鋼材は、資料調査結果から建設当時に使用された可能性の高い鋼材種別を推定すると共に、現地調査時にかぶりの部分破壊検査から得た外観と径とにより、「道路橋示方書 I 共通編」を参考としてそれぞれの引張強度およびヤング係数を、また、「道路橋示方書 III コンクリート橋編」を参考としてそれぞれの許容引張応力度を、補修・補強の目的に応じて定めてよいこととした。なお、引張強度とヤング係数は、建設当時に適用された示方書を参考とするのがよい。

4.2.3 既存のコンクリート

(1) 補修・補強の対象とするコンクリートげた等に既に使用されているコンクリートの圧縮強度および許容圧縮応力度は、資料調査と現地調査の結果をもとに、「道路橋示方書 III コンクリート橋編」に定める値を、また、そのヤング係数は、「道路橋示方書 I 共通編」に定める値をそれぞれ参考として、補修・補強の目的に応じて定めてよい。

(2) 炭素繊維シート接着工法による補修・補強の対象とするコンクリートげた等に使用されているコンクリートの圧縮強度は、 18N/mm^2 以上であることが望ましい。

(1) 補修・補強の対象とされる古い道路橋は、その設計図書がすでに失われ、それに使用されているコンクリートの設計基準強度が不明である場合が多い。また、長期間供用されているコンクリートは、劣化によりその強度が低下している可能性もある。したがって、コンクリートげた等に使用されているコンクリートは、けたから採取した試料の圧縮強度より設計基準強度を定め、これをもとに許容圧縮応力度を設定することが望ましい。

しかし、供用中のコンクリートげた等からコンクリートを試験片として採取することは、事実上困難である。したがって、コンクリートげた等に使用されているコンクリートは、資料調査結果から建設当時に使用された可能性の最も高い設計基準強度を推定し、「道路橋示方書 III コンクリート橋編」を参考として許容圧縮応力度を、また、「道路橋示方書 I 共通編」を参考としてヤング係数を、補修・補強の目的に応じて定めてよいこととした。また、この場合のヤング係数は、建設当時に適用された示方書を参考とするのがよい。

(2) 炭素繊維シート接着工法による補修・補強の対象とするコンクリートげた等に使用されているコンクリートの圧縮強度は、CFRPシートとコンクリートとの平均付着強度を 0.44N/mm^2 として両者間のはく離に対する安全性照査を行うこととしていることから、この付着強度を確実に発揮することが期待できる 18N/mm^2 以上であることが望ましいとした。

4.3 補修設計

4.3.1 基本方針

(1) 炭素繊維シート接着工法による補修設計は、コンクリートげた等が現在保有する諸性能の一部分あるいは全部を対象として、劣化・損傷の発生を防止し、あるいは既に発生している劣化・損傷の進行を阻止し、かつ、その性能に耐久性を付与することを目的として行うものとする。

- (2) 補修の程度は、現在あるいは将来の荷重作用または環境作用と維持管理方法などの供用条件、および、補修と維持管理等の経済性を総合的に検討して決定する所要性能に応じて定めてよい。
- (3) 補強設計で断面修復等の補修計画が必要となる場合は、この規定を適用してよい。

(1) (2) 「本編、1章 総則、1.1.2 炭素繊維シート接着工法の適用方法、および、解説」で述べた通りである。

(3) 補強設計で断面修復等の補修計画が必要となる場合は、補強で扱う断面修復が補修で扱う断面修復と同じであることから、この規定を適用してよいこととした。

4.3.2 補修設計

- (1) コンクリートげた等の断面修復は、そのけた等を構成する材料の保有する物理的、化学的および力学的性能と同等以上の性能を持つ断面修復材を用いて行うことを原則とする。
- (2) コンクリートげた等をそれが置かれている環境作用から遮断することを目的とする補修は、そのけた等の現状と遮断を行う環境作用の内容とを十分検討のうえ、目的に応じた炭素繊維シート、および、施工法の選定を行わなければならない。
- (3) 補修の目的を阻害するものの除去、および、その後の断面修復は、補修の目的とその程度に応じて、その必要性を検討するのがよい。
- (4) 一般的に補修に使用する炭素繊維シートは、繊維目付量 200g/m^2 のもの1枚を最少とし、その貼付け方向は、補修効果が最もよく現れる方向とする。

(1) 部材断面の修復は、主としてコンクリートの断面欠損を修復することにより、部材が現在保有する物理的、化学的および力学的性能の劣化・損傷が進行することを阻止する目的を持つ、断面形状の再生である。したがって、断面修復に使用されるコンクリート系材料等の修復材は、既存コンクリートの持つ鋼材防錆能としての物理的、化学的能力および圧縮・引張・付着の力学的能力が必要となる。

なお、鋼材に関しては、腐食の発生を防止し、または、腐食の進行を阻止する措置は補修となるが、腐食による断面欠損を補う断面修復措置は補強として検討することとなる。

(2) コンクリートげた等の劣化・損傷は、空気の浸透によるコンクリートの中性化、飛来塩分侵入による鋼材腐食、空気中からの水分供給によるアルカリ骨材反応の進行等、外的要因によるものが多い。特に、コンクリートのひび割れ部では、その傾向が著しい。したがって、環境条件からの遮断を目的とする補修の場合は、遮断性能を持つ樹脂系プラスチックの劣化・損傷、ひび割れ、はく離を防止する機能を持つ炭素繊維シートを選定するのがよい。このとき、CFRPシートで遮蔽されたコンクリートは、被覆されない場合のコンクリートほどの化学的性能を要求されないこととなる。

(3) 部材の劣化・損傷が無い場合の補修は、環境作用による劣化・損傷の発生を予防し、保有性能に耐久性を与えることを目的とすることから、CFRPシートによる環境作用の遮断が有効である。

しかし、既に劣化・損傷が有る場合の補修は、既にかぶりコンクリートへ劣化・損傷の外的要因が侵入していることから、CFRPシートによる環境作用の遮断のみで劣化・損傷の進行を阻止することの効果は少ないといえる。特に、飛来塩分の侵入によって鋼材を発錆から保護する役割を持つかぶりコンクリートの含

有する塩分濃度が高くなった状態では、鋼材へ電気防食を施すことが考えられ、この場合は導電性を持つ炭素繊維が電気防食の妨げとなることから、炭素繊維シート接着工法の適用を避けた方がよい。

したがって、飛来塩分が侵入した、また、空気中からの水分供給によるアルカリ骨材反応を起こした等の鋼材腐食を進行させる要因を持つコンクリートは、補修の目的とその程度に応じて、補修効果を阻害するものとして除去し、断面修復を検討することが望ましい。

(4) 一般の環境作用下で遮断性能のみを要求される場合の炭素繊維シートは、繊維目付量 200g/m^2 のもの1枚で十分な遮蔽効果を得ることから、これを最少量とした。

しかし、特別の目的を持つ補修の場合は、繊維目付量の大きいものの使用や積層枚数の増加を検討するのがよい。例えば、炭素繊維シート接着工法は、出隅部、施工目地部、またはコールドジョイント部等でのコンクリート片のはく落防止あるいは落下防止に有効であるとして適用されることが多くなってきている。この場合の炭素繊維シートは、はく落するコンクリートの重量を支える必要から、作用する引張力とはく離を起こそうとする力に抵抗し得る、繊維量、定着長、または機械式定着等の検討が要求される。

4.4 曲げ補強設計

4.4.1 基本的考え方

炭素繊維シートは、CFRPシート形成後に生じる軸方向力および曲げモーメントに抵抗することができる。

炭素繊維シートによる補強効果は、炭素繊維シートを貼付けて形成したCFRPシートが、軸方向力および曲げモーメントにより発生した引張応力に抵抗することによって発現する効果である。したがって、炭素繊維シートは、CFRPシート形成後の、荷重状態の変化、構造系の変化、断面の曲げ抵抗機構の変化等により生じる軸方向力および曲げモーメントに抵抗することができる。

なお、曲げ補強設計に必要な、検討すべき荷重状態、荷重の組み合わせ、断面力算出の原則、安全度の照査方法、有効断面の算出等は、原則として「道路橋示方書 Ⅲ コンクリート橋編」に準ずることとする。

4.4.2 鉄筋コンクリートげたの曲げ補強設計

(1) 部材断面の応力度

部材断面に生じるコンクリートおよび鋼材の応力度は、次の仮定により算出してよい。

- ① 維ひずみは中立軸からの距離に比例する。
- ② コンクリートの引張強度は無視する。
- ③ CFRPシートの圧縮強度は無視する。
- ④ 既存の鉄筋とコンクリートとのヤング係数比は15とする。
- ⑤ CFRPシートとコンクリートとのヤング係数比は、コンクリートのヤング係数を 13.3kN/mm^2 として求める。

(2) 部材断面の破壊抵抗曲げモーメント

- 1) 部材断面の破壊抵抗曲げモーメントは、次のうちの最小値とする。

- ① コンクリートが終局ひずみに達する時の抵抗曲げモーメント
 - ② CFRPシートが終局ひずみに達する時の抵抗曲げモーメント
 - ③ CFRPシートがはく離破壊する時の抵抗曲げモーメント
- 2) 部材断面の破壊抵抗曲げモーメントは、次の仮定により算出してよい。
- ① 維ひずみは中立軸からの距離に比例する。
 - ② コンクリートの引張強度は無視する。
 - ③ コンクリートの応力度-ひずみ曲線と終局ひずみ、および、鋼材の応力度-ひずみ曲線は、「道路橋示方書 III コンクリート橋編」に準ずる。
 - ④ CFRPシートの応力度-ひずみ曲線は、破断まで直線であるとする。
- 3) 破壊抵抗曲げモーメント算出時のCFRPシートひずみの限度は次の通りとする。
- ① CFRPシートの終局ひずみは、保証ひずみの0.80倍とする。
 - ② CFRPシートのはく離破壊時ひずみは、許容平均付着応力度から求まるCFRPシートの引張抵抗力から定めるものとする。

(3) たわみ

炭素繊維シート接着工法による鉄筋コンクリートげたのたわみの改善効果は、補強前後の換算断面2次モーメントの比により評価してよい。

(1) 炭素繊維シート接着工法で曲げ補強した鉄筋コンクリートげたのコンクリートおよび鋼材の応力度は、「本編、本章、4.1 曲げ補強設計、4.4.1 基本的考え方」によれば、補強前の部材断面に作用している軸方向力と曲げモーメントによる応力度、および、補強によるCFRPシート形成後の部材断面に作用している軸方向力と曲げモーメントによる応力度との合計として求めることとなる。

補強後の部材断面の応力度は、従来の鉄筋コンクリート断面の応力度計算方法に準じて算出してよいものとした。これは、従来の鉄筋コンクリート断面の応力度計算方法によって算出した主鉄筋応力度が、本研究で実施した鉄筋コンクリートげた曲げ試験において、B活荷重により実げたに発生する応力度に相当する応力度を試験げたに発生させる荷重での200万回繰返し載荷による疲労試験後の主鉄筋応力度よりも10~20%程度大きくなっており、計算結果が安全側であると判断したことによる。

ただし、CFRPシートは、1層の厚さが1mm程度以下と非常に薄く、圧縮力を受けるとはく離や座屈が生じ易く、殆ど圧縮力を負担できないと考えてよいことから、その圧縮強度を無視して部材断面の応力度を算出することとし、③の仮定をもうけた。しかし、実験等により、CFRPシートが有効に圧縮力を負担し得ることが確認された場合は、CFRPシートの圧縮強度を考慮してもよい。

また、鉄筋コンクリート断面の応力度算出は、一般に鉄筋とコンクリートとのヤング係数比を15として、ひび割れ発生による断面の剛性低下が考慮されていることから、CFRPシートとコンクリートとのヤング係数比にもこれを考慮することとし、コンクリートのヤング係数を(鉄筋のヤング係数)/15 = (200 kN/mm²)/15 = 13.3 kN/mm²の一定値として求めた比を使用することとした。

なお、補強後の部材断面について、CFRPシートの応力度照査は、これを行わなくてよいこととした。これは、TL-20で設計された道路橋の鉄筋コンクリートげた等では、B活荷重による鉄筋応力度の増加が

通常 100N/mm^2 未満であり、曲げ補強として用いた CFRP シートに生じるひずみ量が、かぶりを考慮しても $1,000\mu$ 程度以下であること、および、本研究で行った材料試験と鉄筋コンクリートげたの曲げ試験で、 $1,000\mu$ 程度のひずみを繰返し加えた疲労試験により、CFRP シートの疲労安全性を確認していることによる。ただし、CFRP シートに生じるひずみ量が $1,000\mu$ 程度を超える範囲で適用する場合には、別途試験等を行い安全性を確認する必要がある。

(2) 1) 炭素繊維シート接着工法で曲げ補強した鉄筋コンクリートげたの破壊は、①コンクリートの圧壊、②CFRP シートの破断、③CFRP シートのはく離破壊、の3形態が考えられ、断面設計条件により、いずれの破壊形態も採り得る。したがって、本工法で曲げ補強した鉄筋コンクリート部材断面の破壊抵抗曲げモーメントは、これら3つの破壊形態に達する時の曲げモーメントの最小値を採ることとした。

2) 破壊抵抗曲げモーメントの算出は、その計算方法、計算上の諸仮定、計算に用いるコンクリートと鋼材の応力度-ひずみ関係等、いずれも「道路橋示方書 III コンクリート橋編」に準じて行うこととした。ただし、CFRP シートの応力度-ひずみ関係は、実際には下にやや凸の曲線であるが、計算の便宜上、直線として扱うこととした。

3) コンクリートの圧壊による破壊は、コンクリートのひずみが「道路橋示方書 III コンクリート橋編」に定める終局ひずみに達した時に起こるものとする。

また、CFRP シートの破断による破壊は、CFRP シートのひずみが保証ひずみの 0.8 倍に達した時に起こるものとする。これは、本研究で行った鉄筋コンクリートげたの曲げ破壊試験において、CFRP シート破断で終局に達した試験体の終局曲げ耐力が、CFRP シートの終局ひずみ = 保証ひずみ $\times 0.8$ として算出した破壊抵抗曲げモーメントよりも 20% 程度大きくなり、計算による推定結果が安全側となったことによる。

さらに、CFRP シートのはく離破壊による破壊は、CFRP シートの付着破壊が CFRP シートとコンクリート表面との間に作用する平均付着応力度が許容値に達した時に起こるものとし、この時の CFRP シートひずみの限界値は、(式-解 3.4.1) により求まる CFRP シートの引張抵抗力 $T_r(N)$ を CFRP シートの断面積とヤング係数とで除して定めてよいこととした。

$$T_r = b \times L \times \sigma_b \quad (\text{式-解 3.4.1})$$

ここに、 b : CFRP シートの貼付幅 (mm)

L : CFRP シートの貼付長で、検討断面より CFRP シート端部までの長さの
最小値 (mm)

σ_b : 許容平均付着応力度で、 0.44N/mm^2 としてよい

(3) 炭素繊維シート接着工法によるたわみの改善効果は、本研究で行った実験によって、変位の低減割合が換算断面 2 次モーメントの増加割合より大きく現れることが確認された。これは、CFRP シートによるひび割れの拘束と分散効果により、補強後の断面剛性低下が補強前より小さくなったことによると考えられる。しかし、現段階では、CFRP シートによるこれらの評価方法が明らかになっていないため、ここでは、これらの効果を考慮しないこととし、鉄筋コンクリート断面の換算断面二次モーメントのみで評価することとした。

なお、換算断面2次モーメントの算出に用いる各材料のヤング係数は、コンクリートおよび鉄筋については「道路橋示方書Ⅲ コンクリート橋編」に、炭素繊維シートについては「Ⅰ 共通編、3章 使用材料」に、それぞれ掲げるものとする。

4.4.3 プレストレストコンクリートげたの曲げ補強設計

(1) 部材断面に生じるコンクリートおよび鋼材の応力度は、次の仮定により、以下の1)または2)に定める部材断面の取扱い方法により算出してよい。

① 縦ひずみは中立軸からの距離に比例する。

② 鋼材および炭素繊維シートとコンクリートとのヤング係数比は、「Ⅰ 共通編、3章、3.2 炭素繊維シート、および、表-解 3.2.2」、および、「道路橋示方書Ⅰ 共通編」に定めるヤング係数を用いて算出する。

1) コンクリートの全断面を有効とするプレストレストコンクリート断面として算出する。

ただし、設計荷重作用時に部材断面のコンクリートに引張応力が作用する場合は、引張応力が作用する部分に配置されている既設引張鉄筋(以下、引張補強鉄筋と称す)とCFRPシートがコンクリートに生じる引張応力の合力を負担するとして求めた断面積の炭素繊維シートを貼り付けるものとする。

2) プレストレス力による軸方向力と偏心曲げモーメントとが作用する鉄筋コンクリート断面として算出する。

ただし、この方法による補強を行う場合は、ひび割れを許容した鉄筋コンクリート部材として、供用条件に応じた維持管理を行う必要がある。

(2) 部材断面の破壊抵抗曲げモーメントは、「本編、本章、4.4.2 鉄筋コンクリートげたの曲げ補強設計、(2) 部材断面の破壊抵抗曲げモーメント」により算出してよい。

(3) たわみの改善効果は、コンクリートにひび割れが発生しない場合はけたの全断面を有効として、また、コンクリートの引張応力度が許容引張応力度を超えてコンクリートにひび割れが発生する場合はコンクリートの引張強度を無視した断面を対象として、「本編、本章、4.4.2 鉄筋コンクリートげたの曲げ補強設計、(3) たわみ」に準じて評価してよい。

(1) 「道路橋示方書Ⅲ コンクリート橋編」では、曲げモーメントが作用するプレストレストコンクリート部材断面の応力度は、コンクリートの全断面を有効として算出すること、コンクリートの引張応力度は、設計荷重作用時にひび割れが発生しないように、許容引張応力度以下とすること、そして、コンクリートに引張応力が生じる部材断面には、ひび割れ発生に備えるよう、引張鉄筋(以下、引張補強鉄筋と称す)を配置することが定められている。

したがって、炭素繊維シート接着工法によるプレストレストコンクリートげたの曲げ補強は、積載荷重の変更などによりコンクリートの引張応力度あるいは引張補強鉄筋の応力度がそれぞれの許容引張応力度を超えたことに対する、引張応力度低減を目的として計画されるのが通常である。

しかし、CFRPシートは、鉄筋と同等あるいはそれ以上のヤング係数と引張強度を有するものの、その

1枚当たりの厚さが炭素繊維シートでは0.1～0.2mm程度と非常に薄いことから、コンクリート部材全断面を有効として算出される引張応力度を低減するためには、非常に多くの積層枚数を必要とし、経済的な補強方法とはならないことが多い。

しかし、補強効果は、本研究で行ったひび割れが発生したプレストレストコンクリートげたを炭素繊維シートで補強した後のひび割れ発生前後の荷重を繰返し載荷した曲げ疲労試験において、コンクリートにひび割れが発生するまでの応力状態では、全断面が有効な部材断面として算定した応力度により、そして、ひび割れ発生後の応力状態では、プレストレス力による軸方向圧縮力と偏心曲げモーメントが作用する鉄筋コンクリート部材断面として算定した応力度により、それぞれ評価できることが確認された。

したがって、ここでは、補強に用いる炭素繊維シート量の算出は、1) または 2) の方法によってよいこととした。

1)の方法は、炭素繊維シートで補強した部材断面をプレストレストコンクリート断面としてコンクリートおよび鋼材の応力度を算出する方法である。しかし、ここで求めた応力度、特にコンクリートの引張応力度は、コンクリートに生じる引張応力の合力の算定に用いることを目的とするものであり、必ずしも許容引張応力度以下となることを必要としない。

補強に用いる炭素繊維シート量は、「道路橋示方書 Ⅲ コンクリート橋編」に規定されている引張補強鉄筋の算出方法に準じて算出することとし、(式一解 3.4.2) により求めてよい。

$$A_{cf} = \frac{T_c / \sigma_{sa} - A_s}{E_{cf} / E_s} \quad (\text{式一解 3.4.2})$$

ここに、 A_{cf} : 炭素繊維シートの断面積 (mm^2)

T_c : コンクリートに生じる引張応力の合力 (N)

A_s : 既設引張補強鉄筋の断面積 (mm^2)

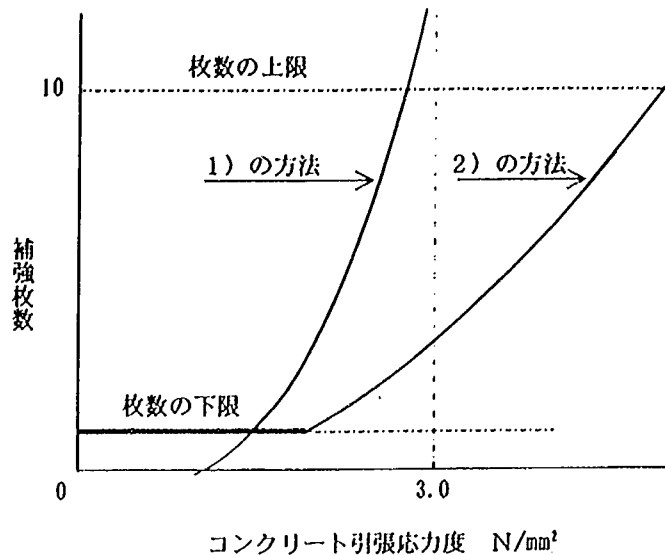
E_s : 既設引張補強鉄筋のヤング係数 (kN/mm^2)

E_{cf} : CFRPシートのヤング係数 (kN/mm^2)

σ_s : 既設引張補強鉄筋の許容応力度 (N/mm^2)

2)の方法は、CFRPシートで補強した部材断面を、プレストレス力による軸方向圧縮力と偏心曲げモーメントおよび設計曲げモーメントとが作用する、コンクリートの引張強度を無視した鉄筋コンクリート断面として扱い、圧縮側コンクリートおよび鋼材の応力度が目標値以内となるように、補強に用いる炭素繊維シート量を算出するものである。

部材断面を全断面有効とするプレストレストコンクリート断面として扱った結果、コンクリートの応力度が引張領域にあって許容引張応力度を超えて、炭素繊維シートによる補強が必要となった部材断面を対象として、1) および 2) の方法で求めた、補強に用いる炭素繊維シート必要積層枚数の概念を示したものが 図一解 3.4.1 である。



図一解 3.4.1 コンクリート引張応力度と補強枚数の概念図

一般に、1)の方法は、計算が簡単で、算出される炭素繊維シート必要積層枚数も安全側となるが、部材断面の大きさや設計上コンクリートに生じる引張応力度が大きい場合には、2)の方法に比べて積層枚数が多くなる傾向にある。したがって、部材断面に発生する引張応力度の「道路橋示方書 III コンクリート橋編」で推奨している 3.0N/mm^2 に対する超過度、許容応力度を超える原因となったB活荷重等の荷重作用の頻度や部材の重要度、一般的または苛酷下などの環境作用の程度、更に、供用条件と維持管理方法等の諸条件を検討の上、2)の方法で炭素繊維シート積層枚数を算出してもよい。

ただし、2)の方法により炭素繊維シート積層枚数を算出して補強を行う場合は、対象とする部材をプレストレストコンクリート部材としてではなく、ひび割れを許容した鉄筋コンクリート部材として、荷重作用および環境作用等の供用条件に応じた維持管理を行わなければならない。

(2) 部材断面の破壊抵抗曲げモーメントは、プレストレス力による軸方向圧縮力と偏心曲げモーメントが作用する鉄筋コンクリート部材として、「本編、本章、4.4.2 鉄筋コンクリートげたの曲げ補強設計、(2) 部材断面の破壊抵抗曲げモーメント」と同様に算出してよい。

4.4.4 構造細目

(1) 炭素繊維シートの積層枚数

曲げ補強を行う場合の炭素繊維シートの最低積層枚数は、繊維目付量 200g/m^2 のシートを1枚とする。また、最大積層枚数は繊維目付量 300g/m^2 のシート10枚までを原則とし、積層枚数がこれを超える場合は補強効果を確認して使用することとする。

(2) 継手

- 1) 炭素繊維シートの継手は、繊維方向での重ね継手とする。
- 2) 最小継手長さは20cmとする。
- 3) 継手の位置は、1ヵ所に集中しないように配置し、またCFRPシートに最大引張応力が作用する位置を避けて設ける。

(3) 定着方法

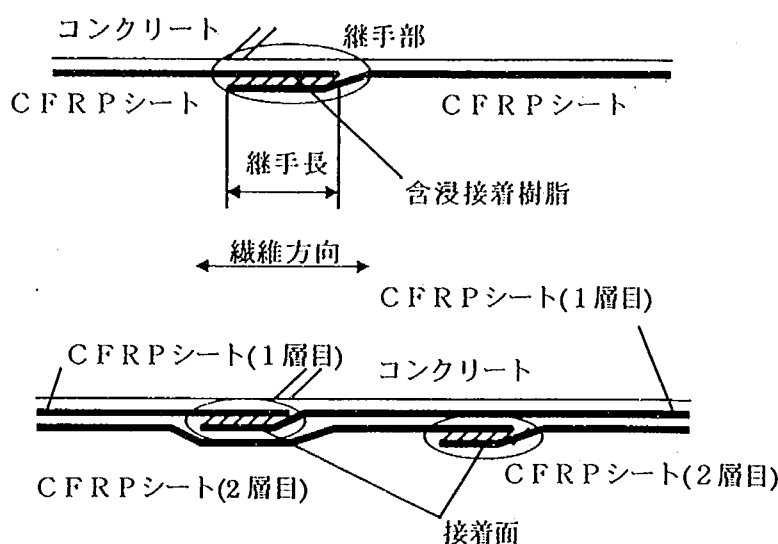
曲げ補強用炭素繊維シートの定着は、原則としてけた下面で行うものとし、最低1層はけた全長に亘って貼り付けるものとする。また、破壊抵抗曲げモーメントの向上を目的とした補強を行う場合は、定着能力の向上措置を講じることが望ましい。

(4) 出隅部の処理

出隅部は、半径 30mm 以上の面取りを行うこととする。

(1) 曲げ補強を行う炭素繊維シートは、計算上の補強枚数が1枚に満たない場合でも、最低一枚は貼り付けるものとする。また、多層積層する場合は、既往の実験で、最大10層まで積層してもCFRPシートの引張強度およびコンクリートとの付着強度の低下が無いことが確認されていることから、多積層の上限を10枚までとし、これ以上の枚数を貼り付ける場合は、実験等により曲げ補強効果を確認するのがよい。

(2) 炭素繊維シート間の継手は、これを繊維方向に設け、含浸接着樹脂の接着力により繊維方向に応力を伝達するものとする。継手の設置方法を 図一解 3.4.2 に示す。

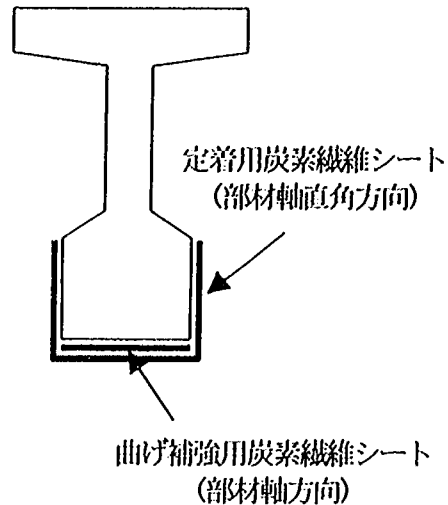


図一解 3.4.2 継手の設置方法説明図

重ね継手強度は、重ね継手引張試験により、継手長さが5cm以下では継手長さに依存して強度が急激に変化するが、継手長さが5cm以上あれば強度の低下が殆ど無く、10cmあれば十分な強度が得られることが確認されている。したがって、けたの曲げ補強が破壊抵抗曲げモーメントの向上も対象とすることから、2倍の安全度を考慮して最低継手長さを20cmとし、CFRPシートに最大引張力が作用する位置を避けて設けることとした。また、多積層の場合の継ぎ手は、これを同一位置で設けると継手強度の低下や応力集中の原因となることから、その位置を50cm程度以上ずらして配置するのがよい。

なお、繊維直角方向には応力を伝達しないので、設計上、継手を設ける必要はない。

(3) 曲げを受ける部材の引張側で炭素繊維シートを途中定着すると、定着端部近傍で応力集中を発生する可能性がある。したがって、十分な定着長が確保される場合においても最低1層はけた等の下面全長に貼り付けることを原則とした。



図一解 3.4.3 曲げおよび定着用炭素繊維シート貼付方法説明図

部材断面の破壊抵抗曲げモーメントの向上を目的とした曲げ補強を行う場合は、定着強度の向上を図ることが望ましい。定着強度を向上させる方法は、図一解 3.4.3 に示すような炭素繊維シートを部材軸方向に貼り付けた後にけた等の下面を跨ぎウェブまたは下フランジの側面までの範囲に部材軸直角方向に高強度型の炭素繊維シートを貼り付ける方法、鋼板とアンカーボルトで機械的にコンクリートへ定着する方法等が考えられ、部材軸方向の炭素繊維シートが使用される状態に応じて使い分けるのがよい。

なお、維持管理のために、けた側面のひび割れ進展の観察をする必要がある部材断面を対象として前者の方法をとる場合は、けた側面のひび割れ位置を避けるなど、定着用炭素繊維シートの貼付け方法を検討するのが望ましい。

(4) 定着強度の向上等を目的として炭素繊維シートをけた等の下フランジに巻き付ける場合、隅角部は、応力集中によるCFRPシートの破断を避けるため、半径30mm以上の曲面に面取りを行う必要がある。

4.5 せん断補強設計

4.5.1 基本的考え方

- (1) 炭素繊維シート接着工法によるせん断補強は、矩形、T形およびI形断面を持つコンクリートげた等への適用を原則とする。
- (2) CFRPシートは、設計荷重作用時には炭素繊維シート貼付け後に作用する荷重によるせん断力を、また、終局荷重作用時には全ての荷重によるせん断力を負担することができる。

(1) 炭素繊維シート接着工法によるせん断補強は、炭素繊維シートの貼付け方法が明確であり、また、実験でその補強効果が確認されている、鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート造の矩形、T形およびI形断面への適用を原則とした。なお、これらの組合せ断面である箱形断面など、せん断力の発生およびせん断破壊機構がこれらと類似であるもの、また、これ以外の断面であっても実験等によりせん断補強のための炭素繊維シート貼付け方法とそれによる補強効果が確認されたものは、適用を検討してよい。

(2) せん断力の照査に用いる荷重は、CFRPシートが炭素繊維シート貼付け後に作用する荷重のみを負担することができることから、設計荷重作用時においては、炭素繊維シート貼付け後に作用する荷重によるせん断力を、終局荷重作用時には全荷重を対象とする。なお、荷重の組合せは「道路橋示方書 III コンクリート橋編」による。

4.5.2 コンクリートげた等のせん断補強設計

(1) 炭素繊維シート接着工法で補強した斜めひび割れの発生していないコンクリートげた等において、設計荷重作用時の応力度照査に用いるコンクリートが負担できる平均せん断応力度および許容斜引張応力度は、「道路橋示方書 III コンクリート橋編」に定めるそれぞれの値を7%割り増したものとよい。

(2) 部材断面のせん断耐力は(式-3.4.1)により算出することを原則とする。

$$\Sigma S = S_c + S_s + S_p + S_{cf} \quad (\text{式}-3.4.1)$$

ここに ΣS : 棒部材のせん断耐力 (N)

S_c : コンクリートが負担できるせん断力 (N)

S_s : 斜引張補強鉄筋が負担できるせん断力 (N)

S_p : PC鋼材の引張力のせん断力作用方向分力 (N)

S_{cf} : CFRPシートが負担できるせん断力 (N)

このうち、CFRPシートが負担できるせん断力 S_{cf} は、炭素繊維シートを閉鎖型に巻きつける、または、炭素繊維シートの端部を鋼板とアンカーボルトなどで機械的に定着する等により、CFRPシートのはく離破壊が生じない場合について、(式-3.4.2)により求めてよい。

$$S_{cf} = A_{cf} \cdot \sigma_{cf} \cdot d \cdot (\sin \theta + \cos \theta) / 1.15 \quad (\text{式}-3.4.2)$$

ここに、 S_{cf} : CFRPシートが負担できるせん断力 (N)

A_{cf} : CFRPシートの断面積 (mm^2)

d : 部材断面の有効高 (mm)

θ : CFRPシートの炭素繊維方向が部材軸となす角度(度)

σ_{cf} : CFRPシートの引張応力度 (N/mm^2)で下記により求める。

設計荷重作用時 $\sigma_{cf} = \sigma_{sa} \times E_{cf} / E_s$

終局荷重作用時 $\sigma_{cf} = 0.8 \times \varepsilon_{cf} \times E_{cf}$

ここに、 σ_{sa} : 斜引張補強鉄筋の許容応力度 (N/mm^2)

E_s : 斜引張補強鉄筋のヤング係数 (N/mm^2)

E_{cf} : CFRPシートのヤング係数 (N/mm^2)

ε_{cf} : CFRPシートの保証ひずみ

(1) コンクリートげた等は、斜めひび割れ発生が先行したのち、せん断破壊へ進行する。実験では、無補強試験体に比して、鉄筋コンクリートTげたのウェブに炭素繊維シートをU字状に接着した場合で約22~41%、鉄筋コンクリートIげたのウェブに炭素繊維シートを短冊状に貼り付けた場合で65%、それぞれ、斜めひび割れ発生荷重を向上できることが確認できた。

したがって、まだ斜めひび割れの発生していない鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート造のコンクリートげた等に炭素繊維シートを貼り付けてせん断補強を施した場合、設計荷重作用時におけるせん断力の照査を行う際のCFRPシートによるせん断補強効果は、実験で得られた斜めひび割れ発生荷重の向上効果の最小値である22%に安全率3程度を考慮した7%を、コンクリートが負担できる平均せん断応力度および許容斜引張応力度に割り増しすることで評価してよいこととした。

(2) 部材のせん断耐力は、(式-3.4.1)に示すように、コンクリートの負担するせん断力 S_c 、斜引張補強鉄筋の負担するせん断力 S_s 、プレストレストコンクリート部材の場合はPC鋼材の引張力のせん断力作用方向分力 S_p 、およびCFRPシートが負担するせん断力 S_{cf} の和で表されることが一般的^{1)・3)}であり、ここでもこれを採用することとした。このうち、 S_c 、 S_s 、 S_p は、それぞれ「道路橋示方書 Ⅲ コンクリート橋編」に規定する通りである。また、CFRPシートが負担できるせん断力 S_{cf} は、斜引張鉄筋の分担 S_s の考え方と同様、(式-3.4.2)に示すように、CFRPシートのひずみから求める引張応力度に基づいて、トラス理論を適用して求めるものとした。

設計荷重作用時にCFRPシートが負担できるせん断力 S_{cf} について；

実験の結果、炭素繊維シートを貼付けて機械式定着を併用した試験体のスターラップ降伏荷重増加率は、無補強試験体に比べ、繊維目付量 200g/m^2 の炭素繊維シートを0.8層貼付けで約60%、1.6層貼付けで約75%であった。また、スターラップひずみ ε_s に対するCFRPシートのひずみ ε_{cf} の比 $\varepsilon_{cf}/\varepsilon_s$ は、スターラップ降伏荷重時には、繊維目付量 200g/m^2 炭素繊維シート0.8層貼付けの場合で0.75～1.0、1.6層貼付けの場合で0.25～0.5程度を示し、CFRPシートがひずみを有効に分担していることが確認できた。したがって、設計荷重作用時におけるCFRPシートが負担するせん断力 S_{cf} は、機械式定着を併用した場合、斜引張補強鉄筋が許容応力度に達した時のひずみと同じひずみをCFRPシートが負担できるものとして算出することとした。

終局荷重作用時にCFRPシートが負担できるせん断耐力 S_{cf} について；

実験の結果、炭素繊維シートを貼付けて機械式定着を併用した試験体のCFRPシートは、スターラップ降伏後、スターラップひずみの増加より遥かに大きいひずみを発生しながら載荷重を負担し、その負担の傾向は荷重増加に比例したものであった。また、CFRPシートが負担するひずみ増加の直線性が軸方向鉄筋降伏あるいは軸方向鉄筋降伏後曲げ破壊まで保たれており、CFRPシートは、機械式定着が有効な場合、その保証ひずみまで耐力を発揮することが可能であると評価することができた。

この結果に基づき、コンクリートげた等にCFRPシートを貼り付けて機械式定着を併用した場合に終局荷重作用時のCFRPシートの負担できるせん断力は、CFRPシートの保証ひずみに定着部における施工のバラツキなどを考慮した材料係数0.8を乗じて求めることとした。なお、この場合にCFRPシートの断面積を算定する際のボルト穴による欠損は、一般にボルト穴に相当する炭素繊維シートの断面積が僅かであり、また、材料係数0.8がこれらの要因を含んでいると考え、これを無視してもよいこととした。

4.5.3 構造細目

(1) せん断補強を目的とする炭素繊維シートの貼付け方法は、次の通りとする。

1) 入隅部には貼り付けてはならない。

2) 出隅部は半径30mm以上の面取りを設ける。

3) コンクリートげた等のウェブへの貼付け長 l_{cf} は、原則として、増加せん断力のうち斜引張補強鉄筋が負担できないせん断力によって生じるCFRPシートの引張力から求まる必要定着長 L_{cf} の、定着に機械式定着を併用する場合は1倍以上、また、定着に機械式定着を併用しない場合は2倍以上としなければならない。また、その貼付け範囲は、炭素繊維シートの必要範囲の両側に部材の有効高さ d を加えたものとする。

(2) 炭素繊維シート端部の機械式定着に用いる鋼板は、長さ100cm、幅15cm、かつ厚さ9mm以上、また、アンカーボルトは M-20 以上とする。

(1) 1) 炭素繊維シートは、これをコンクリート部材の入隅部を経由して貼り付けた場合、CFRPシートに働く引張応力によって、その部分で容易にはく離が生じ、その補強効果が損なわれる。したがって、入隅部には施工してはならないこととした。

2) コンクリートげた等の下フランジ底部に炭素繊維シートを巻き付けて貼り付ける場合、炭素繊維シートを折り曲げて接着した出隅部において応力集中などによりCFRPシートの強度低下が起こらないように、出隅部を曲面に加工しなければならない。曲面の半径は、既往の部材実験²⁾によれば、ヤング係数245kN/mm²で繊維目付量300g/m²の高強度型炭素繊維シートを用いた場合、半径30mm以上確保すれば強度発現に殆ど影響がないことが判明しており、これを確保することとした。

なお、高強度型以外の炭素繊維シートを用いる場合には、別途、試験を行い安全な曲率半径を求めねばならない。

3) この規定は、斜めひび割れがI型断面のウェブ中央から進展すると仮定した時、けたのウェブに貼付されたCFRPシートのひび割れ上下の定着長が、機械式定着の有無に応じた所要の長さを確保しておく必要があることから設けたものである。なお、図一解 3.4.4 に示す必要定着長 L_{cf} は、(式一解 3.4.3) により算定する。

$$L_{cf} = T_{cf} / (b_{cf} \times \tau_{cf}) \quad (\text{式一解 3.4.3})$$

ここに T_{cf} : 増加したせん断力のうちCFRPシートが受け持つせん断力による引張力(N)

b_{cf} : CFRPシートの幅(mm)

τ_{cf} : CFRPシートの許容付着応力度(0.44N/mm²)

A_{cf} : CFRPシートの断面積(mm²)

(2) 炭素繊維シートは、コンクリートげた等にせん断補強の目的でこれを施工する場合、閉鎖型に巻き付けることができない場合がほとんどである。この場合には、炭素繊維シートの定着に、図一解 3.4.5 に示すような鋼板とアンカーボルト等による機械式定着を併用する必要がある。

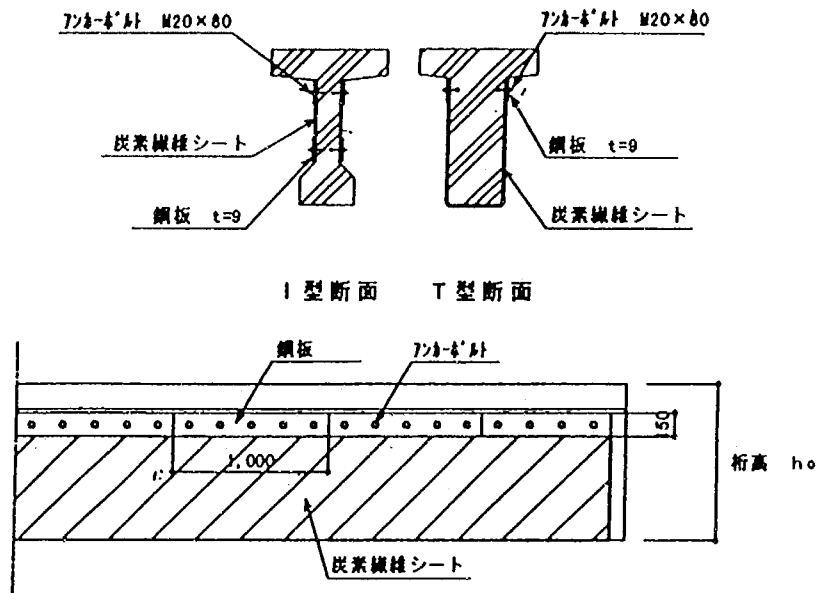
機械式定着は、実験等でその効果が確認されている方法で行うものとするが、繊維目付量200g/m²の高強

度型炭素繊維シート2層までを鋼板とアンカーボルトで定着する場合は、条文の最低値を用いてよい。

また、この場合の設計においては、CFRPシートに作用する引張力に対し、鋼板とCFRPシートの付着耐力、ボルトのせん断耐力、ボルトスリーブとコンクリートの支圧耐力など各部分の照査が必要であるが、鋼板で圧着されたCFRPシートとコンクリートとの付着耐力が、作用せん断力の一部を受け持つと考えてもよい。ただし、この場合の設計では、アンカーボルトの締付け力を指定する必要がある。



図一解 3.4.4 貼付け長 l_{cf} の考え方



図一解 3.4.5 炭素繊維シートの機械式定着方法の例 (単位mm)

[参考文献]

- 1) 鉄道総合技術研究所：炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強設計・施工指針、
附属資料3、P78、平成8年7月
- 2) 鉄道総合技術研究所：炭素繊維シート引張強度の隅角部処理方法による影響度試験報告書、
平成8年9月
- 3) 鉄道総合技術研究所：炭素繊維シートによる地下鉄RC柱の耐震補強工法設計・施工指針、
附属資料3、P68～69、平成9年1月

5章 施工

5.1 一般

炭素繊維シート接着工法によるコンクリートげた等の補修・補強に関する施工は、「I 共通編、5章 施工」および「本編、4章 各構造細目、および、本編、本章、5.2 特記事項」に従い、CFRPシートが所定の性能を満足するように行うことを原則とする。

なお、設計上、特別の施工方法等が指定された場合は、それによることとする。

5.2 特記事項

- (1) コンクリートげた等に生じているひび割れ上に炭素繊維シートを貼り付ける場合は、ひびわれ部の炭素繊維シートにしわを発生させてはならない。
- (2) 炭素繊維シートの定着に機械式定着を併用する場合、アンカーボルトの削孔は、コンクリートげた等の内部に配置されているPC鋼材、主鉄筋、および斜引張補強鉄筋に損傷を与えてはならない。
- (3) 炭素繊維シートに接着する鋼板の表面は、設計で定める場合を除き、標準的な処理を行ってよい。
- (4) 機械式定着に用いる鋼材は、必要に応じ、防錆処置を施すこととする。

(1) ひび割れ部の上面に炭素繊維シートを貼り付ける時は、特に1層目の養生時間の確保に留意する。万一、しわを生じた場合は、貼り直しを原則とする。ただし、しわの程度が軽微な場合は、しわの部分の切削した後、しわの両側各1mを同一繊維目付量の炭素繊維シートで増し貼りしてもよい。これらの施工技術で対応が不可能な場合は、設計で定めた炭素繊維シートの積層枚数に1.40を乗じたものを新たな積層枚数とみなし、追加分をしわの生じた炭素繊維シートが受け持つ区間全長に施工することが原則である。これは、本研究で行った鉄筋コンクリートげたの曲げ補強試験体において、終局曲げ耐力の計算時に部材安全係数を1.20程度と考えると、CFRPシートの保証ひずみに対する計算終局ひずみが、しわのない試験体では約80%、ひび割れ開口部でしわを生じた試験体では約57%で、両者の比が1.40となったことによっている。

(2) アンカーボルトの削孔位置は、既存図面などを参考に、コンクリートけた内部のPC鋼材および鉄筋の位置を電磁波レーダ法やX線法により探査し、これらの既存鋼材に損傷を与えない場所とする。あと施工アンカーの削孔と設置は、これらを定めた施工要領に準拠し正確に行わなければならない。

また、アンカーボルトの締付けは、炭素繊維シートに鋼板を押しつけ密着させる必要があるため、設計で定められた締付け力で、均等かつ十分に行うものとする。

(3) 鋼板の炭素繊維シートを接着する面は、樹脂により接着するため、予めサンドブラスト処理や荒目のサンドペーパーなどで付着効果が良くなる目荒らしを施した後、機械油脂等の油分を十分に除去して、接着性を良くしておかなければならない。また、鋼板と炭素繊維シートの間は、電気絶縁性を確保するための措置を講ずることが望ましい。

(4) 鋼材表面の仕上げは、防錆能など所要の品質が確認された材料を必要な塗布厚となるように塗布するものとする。一般に長曝型エッチングプライマーなどが用いられる。

6章 維持管理

6.1 一般

炭素繊維シートを接着したコンクリートげた等は、補修・補強の効果を長期にわたって維持させるため、定期的に健全度調査を行い、変状が発見された場合には適切な対策を施さなければならない。

「I 共通編、6章 維持管理、6.1 一般、および、解説」に述べた通りである。

6.2 CFRPシートの健全度調査

6.2.1 外観調査

外観調査は、CFRPシートおよびCFRPシート周辺のコンクリートについて変状の有無を調査するために行う。

「I 共通編、6章 維持管理、6.2 CFRPシートの健全度調査、および、解説」に述べた通りである。

ただし、コンクリートげた等のコンクリート面のひび割れや漏水・遊離石灰の有無の観察は、CFRPシートで覆われていない部分で行うこととなる。

6.2.2 詳細調査

詳細調査は、外観調査で何らかの変状が発見された場合に実施する。

「I 共通編、6章 維持管理、6.2 CFRPシートの健全度調査、および、解説」に述べた通りである。

6.3 CFRPシートの機能維持を目的とする補修

詳細調査によりCFRPシートに変状が認められた部分は補修対策を施さなければならない。

「I 共通編、6章 維持管理、6.3 CFRPシートの機能維持を目的とする補修、および、解説」に述べた通りである。

なお、仕上げ工についても、劣化・損傷状態を調査し、当初期待した機能の健全性が確保されていない場合は補修を施す必要がある。とくに、紫外線の影響を直接受ける耳げた側面等に炭素繊維シートが貼付され、紫外線による含浸接着樹脂の劣化対策として表面塗装を行っている箇所については、塗装の劣化状況に応じた再塗装を施すのがよい。

付 属 資 料

付属資料1 炭素繊維シート接着工法の現状と動向

1.1 炭素繊維シートの種類

1.1.1 炭素繊維シートの強度特性

炭素繊維は、ポリアクリロニトリル(PAN)、レーヨン、石油または石炭ピッチ、フェノール樹脂などの原料を紡糸したものを不活性ガス中で $2,000\sim 3,000^{\circ}\text{C}$ の高温で焼成、炭素化して製造される、軽量、高強度、高弾性、高耐食性、などの優れた特性を持つ高性能無機繊維であり、その原材料あるいは製造法などによりPAN系炭素繊維とピッチ系炭素繊維に分類され、また、それぞれ強度や弾性係数に特徴のある性質を示して、高強度型、中弾性型、あるいは高弾性型などと称されている。現在、土木建築用として利用されている炭素繊維の物理的および力学的特性は、概ね、密度 $1.8\sim 2.1\text{g/cm}^3$ 、引張強度 $2.0\sim 7.0\text{kN/mm}^2$ 、ヤング係数 $250\sim 800\text{kN/mm}^2$ の範囲のものである。

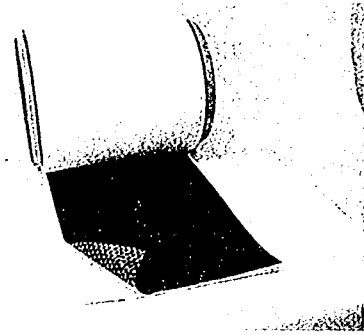
炭素繊維の直径は、 $7\sim 10\mu\text{m}$ と極めて細いものであり、これを $6,000\sim 24,000$ 本程収束させたストランドが工業用に使用されている。炭素繊維シートは、このストランドを1m幅当たり数百本ならべてシート状にしたもので、繊維目付量 200g/m^2 のシート1m幅当たりには炭素繊維の素線が約300万本含まれている。炭素繊維シートは、原材料の種別を問わず、含浸樹脂と複合化してCFRPシートを形成し、構造材料として優れた引張性能を発揮することから、設計施工上は原材料の区分ではなく、「I 共通編、3章 材料」で、表一解 1.3.2 および 表一解 1.3.3 に示したように、引張強度(kN/mm^2)とヤング係数(kN/mm^2)および繊維目付量(g/m^2)で区分して実用に供している。

1.1.2 炭素繊維シートの構造

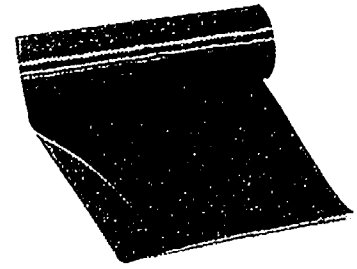
本共同研究に参加した炭素繊維補修・補強工法技術研究会の構成員のなかで、炭素繊維シートの製造者は、東レ(株)、日石三菱(株)、日鉄コンポジット(株)、三菱化学(株)の4社である。

これらの各社が製造している種々の炭素繊維シートのうち、現在、土木建築向けの炭素繊維シート接着工法に用いられている標準的な炭素繊維シートの構造は、付属図-1.1.1 に示した3種類があり、引張強度とヤング係数の発現性を高めるため、何れも炭素繊維が一方向に配列された一方向材(Uni Directional : UD)となっている。

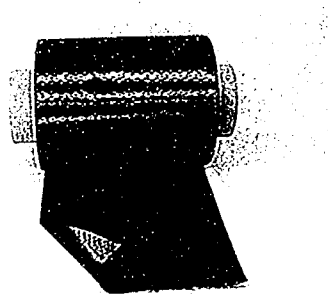
それぞれの炭素繊維シートは、外観形状面で若干の差異があるものの、補修・補強に用いた場合の効果、および基本的な施工方法には殆ど差がないと考えてよい。



(a) 炭素繊維束を少量の樹脂と保形メッシュにより
離型紙上で保形した炭素繊維シート



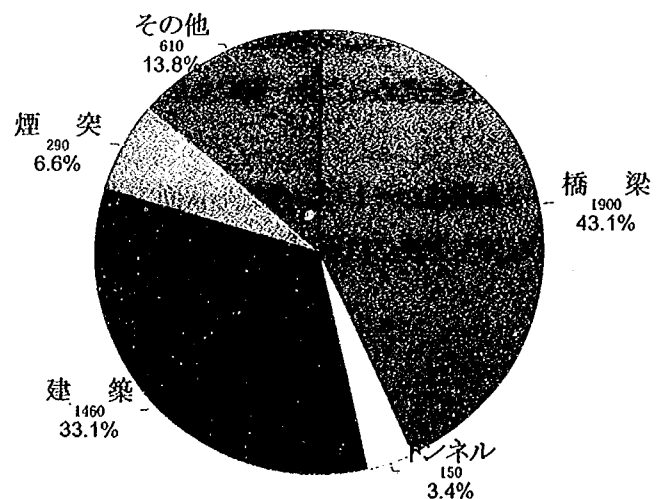
(b) 炭素繊維束をガラス繊維で保形した
炭素繊維シート



(c) 炭素繊維束の両面に接着剤付きの保形メッシュを配列して保形した炭素繊維シート

付属図-1.1.1 炭素繊維シートの構造

適用分野	件数
橋梁	1,900
トンネル	150
建築	1,460
煙突	290
その他	610
合計	約 4,500



(a) 施工件数 1987年～1998年

(b) 適用分野別の件数と百分率

付属図-1.2.1 炭素繊維シート接着工法実績（炭素繊維補修・補強工法技術研究会調べ）

1.2 炭素繊維シートの適用分野と適用件数

1995年1月17日の阪神淡路大震災までの土木建築分野での炭素繊維シートの適用は、(仮称)東海沖地震を想定した道路および鉄道構造物の耐震補強を目的とする研究がなされており、実用化に向けての試験施工による現場適用性の確認がおこなわれていた段階であった。しかし、阪神淡路大震災以後、その優れた施工性により、橋脚ならびに建築柱の耐震補強を目的として、施工件数および炭素繊維シートの使用量が急増した。さらに、近年の使用量は、炭素繊維シート接着工法の適用範囲が橋梁上部工へも広がり、床版補強、けた補強の他、新たな適用分野の拡大が図られており、漸増傾向にある。

炭素繊維シート接着工法の実績として、施工件数を 付属図-1.2.1(a) に、また、実適用分野別の施工件数とその百分率を 付属図-1.2.1(b) に、それぞれ示す。

1.3 他の補修・補強工法との比較

近年、道路構造物を対象として適用されている補修・補強工法は、以下のものがある。

- | | |
|--------------|--------------------------|
| ・炭素繊維シート接着工法 | ・アラミド繊維シート接着工法 |
| ・鋼板接着工法 | ・RC巻立て工法(橋脚、他) |
| ・下面増厚工法 | ・RC増打ち工法(けた側面、および床版上面増厚) |
| ・縦げた増設工法 | ・外ケーブルによるプレストレス導入工法 |

これら各工法の特徴は、付属表-1.3.1 に示す通りである。各工法ともそれぞれ長所、短所を有しており、適用する構造物が置かれている状況、すなわち、重要度、施工条件(交通規制、工期、作業安全対策、他)、経済性、補修・補強効果、長期耐久性の信頼度、維持管理の容易さ、等を考え合わせ、最適と判断される工法が選択されることになる。付属表-1.3.1 では、これらの考慮すべき項目についてもとりまとめた。

付属表-1.3.1 各種補修・補強工法の特徴

工法	施工性	経済性	耐久性	維持管理性
炭素繊維シート 接着工法	・手作業で施工可能 ・重機不要、施工スペース小 ・重量増加は無視できる ・コンクリート面の処理が重要 ・確実な接着が重要	・計算から求まる必要補強量で対応 ・施工枚数が多いと不経済 ・高橋脚は割安	・炭素繊維シートは高耐久性 ・錆の発生がない ・外的劣化因子を遮断 ・樹脂の耐久性試験実績あり	・損傷部は部分貼付けで可 ・樹脂の紫外線対策必要 ・内部の状態を確認する貼付方法必要
鋼板接着工法	・重量増加が小さい ・重機による施工が基本 ・溶接の確実性が重要 ・工期は短い	・RCに比べて割高 ・メンテナンス費用必要	・表面塗装が必要	・防食対策を定期的 to 実施 ・内部の状態は確認できず
RC巻立て工法	・通常と同じで慣れている ・工期がかかる ・重量増加大きい ・高橋脚は足場が難	・コストは他に比べ小さい ・高橋脚はコストアップ ・杭増打ちの場合コスト高	・鉄筋のかぶり度で耐久性を確保 ・塩害等受けやすい	・基本的にメンテナンス不要
RC増打ち工法	・既設コンとの一体性確保が重要 ・上面増厚の場合交通規制 ・けた施工では車両振動抑制	・コストは小さい	・耐久性は問題なし (普通コン、SFRC)	・基本的にメンテナンス不要
下面増厚工法	・既設コンとの一体性確保が重要 ・施工時の振動規制が必要	・鋼板接着に比べ割高	・振動条件下での付着疲労耐久性は不明	・浮きはタタキで調査
縦げた増設工法	・工期は短い ・鋼げた吊り用重機が必要 ・仮置き、重機スペース必要	・コストは高い ・メンテ費用がかかる	・表面塗装は必要	・防食対策を定期的 to 実施
外ケーブル工法	・既設コンと定着ブロックの一体性確保が重要	・コストは高い ・メンテ費用がかかる	・構造物のひび割れ幅低減 ・腐食防止対策が必要 ・新素材は腐食の心配なし	・鋼材は定期的メンテ必要 ・取り替え可能

付属資料2 使用材料とCFRPシート

2.1 付属資料2の目的

本指針(案)の「I 共通編、3章 使用材料」は、炭素繊維シート接着工法に使用する材料それぞれに要求される基本的な性能を示したものであるが、炭素繊維シートについては基本的な性能と同時に一般的な性能および設計の目安となる諸値を示したものの、その他の使用材料については基本的な性能を示すのみで性能の数値的目安を示すには至っていない。したがって、ここでは、補修・補強の計画および品質管理を行う上での便宜を図ることを目的として、これら炭素繊維シート接着工法で用いられる諸材料の性能の数値的目安を示すと共に、CFRPシートの基本的性質を併せて示すこととした。

付属資料2の「2.2 使用材料の性能」では、標準的な補修・補強の場合に適用してよい各材料の一般的な性能の目安を示した。「2.3 本研究におけるCFRPシートの引張試験結果」では、これまで公称値とされていた引張強度とヤング係数を、道路橋上部構造のコンクリート部材の設計へ適用する観点から評価を行った結果をまとめた。「2.4 CFRPシートの設計用値の設定」では、上記「2.3 …」で行った評価試験結果を踏まえ、新たに炭素繊維シートの保証引張強度およびヤング係数の区分を設定した経過を述べた。さらに、「2.5 CFRPシートの耐久性に関する調査結果」では、本研究では実施しなかったCFRPシートに関する基本的な性能の耐久性について既存の試験結果を整理した。

2.2 使用材料の性能

2.2.1 炭素繊維シート

「I 共通編、3章 使用材料、3.2 炭素繊維シート、および、解説」に示した一般的な性能および諸値の通りである。

2.2.2 プライマー

エポキシ樹脂系プライマーの一般的な性能の目安を 付属表-2.2.1 に示す。

付属表-2.2.1 エポキシ樹脂系プライマーの性能

項 目	性 能	試験方法
接着強度	対象コンクリートの圧縮強度を f_{ck} とした時、 $0.2 \times f_{ck}^{2/3}$ N/mm ² ($0.5 \times f_{ck}^{2/3}$ kgf/cm ²) 以上; または、対象コンクリート部材を使用した接着強さ試験で、躯体コンクリートと共に引き剥がれること	JIS A 6909準拠
粘度	(適宜)	JIS K 6833準拠
可使時間	(適宜)	温度上昇法

JIS A 6909 : 建築用仕上げ塗材

JIS K 6833 : 接着剤の一般試験方法、ただし、2液混合型の場合は混合物で行う

温度上昇法 : 250gの重量を対象として行う

2.2.3 不陸修正材

エポキシ樹脂系不陸修正材の一般的な性能の目安を 付属表-2.2.2 に示す。

付属表-2.2.2 エポキシ樹脂系不陸修正材の性能

項 目	性 能	試験方法
圧縮強度	対象コンクリートの設計基準強度以上	JIS K 7208 準拠
圧縮弾性率	1.0~4.0 kN/mm ² (1.02~4.08×10 ⁴ kgf/cm ²)	JIS K 7208 準拠
引張せん断強度	9.8N/mm ² 以上 (100 kgf/cm ² 以上)	JIS A 6850 準拠
接着強度	対象コンクリートの圧縮強度を f_{ck} とした時、 $0.2 \times f_{ck}^{2/3}$ N/mm ² ($0.5 \times f_{ck}^{2/3}$ kgf/cm ²) 以上、 または、対象コンクリート部材を使用した接着強さ 試験で、躯体コンクリートと共に引き剥がれること	JIS A 6909 準拠

JIS K 7208 : プラスチックの圧縮試験方法

JIS K 6850 : 接着剤の引張せん断接着強さ試験方法

JIS A 6909 : 建築用仕上げ塗材

2.2.4 含浸接着樹脂

エポキシ樹脂系含浸接着樹脂の一般的な性能の目安を 付属表-2.2.3 に示す。

付属表-2.2.3 エポキシ樹脂系含浸接着樹脂の性能

種 別	項 目	性 能	試験方法
CFRPシート	引張強度	炭素繊維シートに準ずる。	JIS K 7073 準拠
	ヤング係数		
	継手強度	10cm継手強度試験で保証引張強度以上	JIS K 7073 準拠
含浸接着樹脂	引張強度	29 N/mm ² 以上 (300kgf/cm ² 以上)	JIS K 7113 準拠
	曲げ強度	39 N/mm ² 以上 (400kgf/cm ² 以上)	JIS K 7203 準拠
	引張せん断強度	9.8N/mm ² 以上 (100kgf/cm ² 以上)	JIS K 6850 準拠
	接着強度	プライマーまたは不陸修正材と同様	JIS A 6909 準拠
	粘度	(適宜)	JIS K 6833 準拠
	可使時間	(適宜)	温度上昇法

JIS K 7073 : 炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法

JIS A 6909 : 建築用仕上り塗材

JIS K 7113 : プラスチックの引張試験方法

JIS K 6833 : 接着剤の一般試験方法

JIS K 7203 : 硬質プラスチックの曲げ試験方法

(2液混合型の場合は混合物で行う)

JIS K 6850 : 接着剤の引張せん断接着強さ試験方法

温度上昇法 : 250gの重量を対象として行う

2.2.5 その他の材料

(1) 断面修復材

断面修復材の一般的な性能の目安を 付属表-2.2.4 に示す。

付属表-2.2.4 断面修復材の性能

項 目	性 能	試験方法
圧縮強度	補修の場合 : 18N/mm^2 以上 補強の場合 : 対象コンクリートの設計基準強度以上	JIS K 7208準拠
接着強度	打継目の接着強度が既存コンクリートの引張強度である $0.2 \times f_{ck}^{2/3} \text{ N/mm}^2$ ($0.5 \times f_{ck}^{2/3} \text{ kgf/cm}^2$) 以上、ただし、接着剤等により接着力を増強してもよい	JIS A 6909準拠

ここに、 f_{ck} : コンクリートの圧縮強度

JIS K 7208 : プラスチックの圧縮試験方法

JIS A 6909 : 建築用仕上り塗材

断面修復材の一般的な性能の例を 付属表-2.2.5 に示す。

付属表-2.2.5 コンクリート補修に使用される断面修復材の性能の例

項 目	樹脂 (レジン) 系 モルタル および コンクリート	セメント系 モルタル および コンクリート	ポリマーセメントモルタル
圧縮強度 : N/mm^2	50~110 (510~1,100)	20~70 (200~710)	10~ 80 (100~820)
弾性係数 : kN/mm^2	0.5~20 (0.5~20)	20~30 (20~30 $\times 10^4$)	1~ 30 (1~30 $\times 10^4$)
曲げ強度 : N/mm^2	25~ 50 (250~510)	2~ 5 (20~50)	6~ 15 (60~150)
引張強度 : N/mm^2	9~ 20 (90~200)	1.5~3.5 (15~36)	2~ 8 (20~82)
破断時の伸び : %	0~ 15	0	0~ 5
線膨張係数 : $1/^\circ\text{C}$	25~ 30 $\times 10^{-6}$	7~ 12 $\times 10^{-6}$	8~ 20 $\times 10^{-6}$
浸漬後の吸水率 : %	25 $^\circ\text{C}$ 水中7日で0~1	25 $^\circ\text{C}$ 水中7日で5~15	25 $^\circ\text{C}$ 水中7日で0.1~0.5
最高使用温度 : $^\circ\text{C}$	載荷状態で0~80	300 $^\circ\text{C}$ 超は配合に依存	載荷状態で100~300
強度発現までの期間	20 $^\circ\text{C}$ 空気中で2~48時間	0 $^\circ\text{C}$ 空気中で1~4週間	20 $^\circ\text{C}$ 空気中で1~7日

() 内の数値の単位は、 kgf/cm^2

(2) ひび割れ補修用注入剤

炭素繊維シート接着工法の施工時に用いるひび割れ補修用注入剤は、ひび割れ幅の大きさ、開口の度合、炭素繊維シートの貼付け方法等を勘案して選定するのがよい。

ひび割れ補修用注入剤である硬質形エポキシ樹脂の性能の目安を 付属表-2.2.6 に示す。

付属表-2.2.6 硬質形エポキシ樹脂の性能 [JIS A 6024 建築補修用注入エポキシ樹脂]

試験項目		試験条件	低粘度形		中粘度形		高粘度形		
			一般用	冬用	一般用	冬用	一般用	冬用	
粘性	粘度mPa・s	23±0.5℃	100～1,000		5,000～20,000		—		
	キヤロト・ツインデックス	23±0.5℃	—		5±1		—		
	スランプ性	15±2℃	—		—		—	5以下	
		30±2℃	—		—		5以下	—	
接着強さ N/mm ²		標準条件	6.0以上		6.0以上		6.0以上		
		条件	低温時	—	3.0以上	—	3.0以上	—	3.0以上
			湿潤時	3.0以上		3.0以上		3.0以上	
			乾湿繰り返し時	3.0以上		3.0以上		3.0以上	
硬化収縮率 %		標準条件	3 以下		3 以下		3 以下		
加熱変化	質量変化率%	—	5 以下		5 以下		5 以下		
	質量変化率%	—	5 以下		5 以下		5 以下		
引張強さ N/mm ²		標準条件	15.0以上		15.0以上		15.0以上		
引張破壊伸び %		標準条件	10 以下		10 以下		10 以下		
引張強さ N/mm ²		標準条件	—		—		50.0以上		

(注) 土木補修用エポキシ樹脂注入剤 1 種も同等の性能を有する材料として使用できる。

(3) 仕上げ材

仕上げ材の使用目的と一般的な仕上げ材の分類例を 付属表-2.2.7 に示す。

付属表-2.2.7 仕上げ材の使用目的と例

仕上げ目的	仕上げ材の例
色調調整	一般塗料
エポキシ樹脂の劣化保護	耐候性塗料、薄付け仕上げ塗装
CFRPシートの損傷保護	モルタル塗布、厚付け仕上げ塗装
CFRPシートの耐火性向上	防火・耐火被覆材 (珪酸カルシウム板、モルタル塗布)

2.3 本研究におけるCFRPシートの引張試験結果

2.3.1 引張試験の目的

これまで、炭素繊維シートメーカーが公称値としていたCFRPシートの引張強度とヤング係数は、「JIS K 7073 炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法」に準じて、メーカー各社が個々に実施した引張試験結果を基に、それぞれの分類方法により定めたものであった。したがって、本研究の最終段階で作成する設計・施工指針(案)では設計と品質管理上の便宜性の観点より統一的なCFRPシートの区分または分類を定める必要があったことから、本研究を始めるにあたり、「コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(I)、第I編 炭素繊維シート材料特性に関する研究」に示したように、メーカー各社が独自に用いている引張強度とヤング係数の公称値を、それらの値が近似しているものを1つのグループとする幾つかのグループへの区分または分類を暫定的に行った。

しかし、この区分または分類に用いた引張強度とヤング係数は、メーカー各社が品質管理の一環として行った、CFRPシートの処女载荷による引張試験結果であり、本研究の対象である道路橋上部工のコンクリート部材の補修・補強へ適用するために必要となる、諸荷重作用および環境作用の履歴を受けたCFRPシートの引張試験結果ではなかった。

以上のことより、本研究で材料試験の一環として行うこととしたCFRPシート単体の引張試験は、処女载荷による静的引張試験、繰返し载荷による疲労または促進暴露の単独作用、および、両者の複合作用を受けたCFRPシートの引張試験で得られる引張強度とヤング係数とを明確にし、統一的な区分または分類を評価する目的を持つものであった。

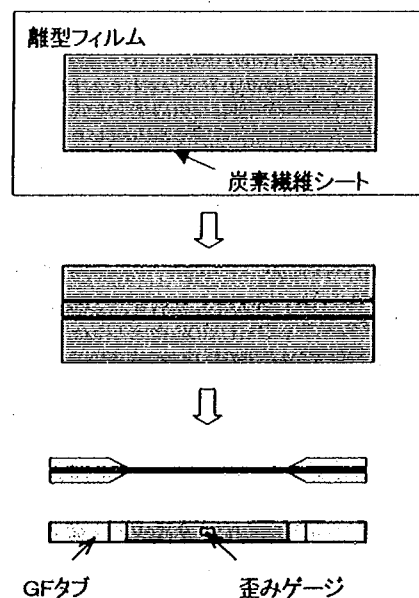
2.3.2 引張試験方法

(1) 試験体の作製

CFRPシートの引張試験用試験体は、JIS K 7073「炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法」に準拠して作成する。

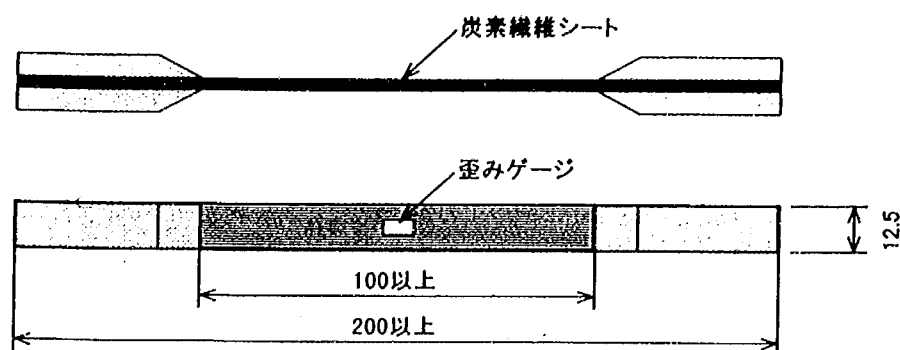
試験体の作成は、付属図-2.3.1に示すとおり、以下の要領で行う。

- ① 離型フィルム等の上で炭素繊維シートに含浸接着樹脂を含浸させCFRPシートを作製する。
- ② 室温にて養生後、離型フィルムより取り外し、繊維方向に幅12.5mmに切断する。
- ③ 両端にタブを取付け、中央繊維方向にひずみゲージを貼り付ける。



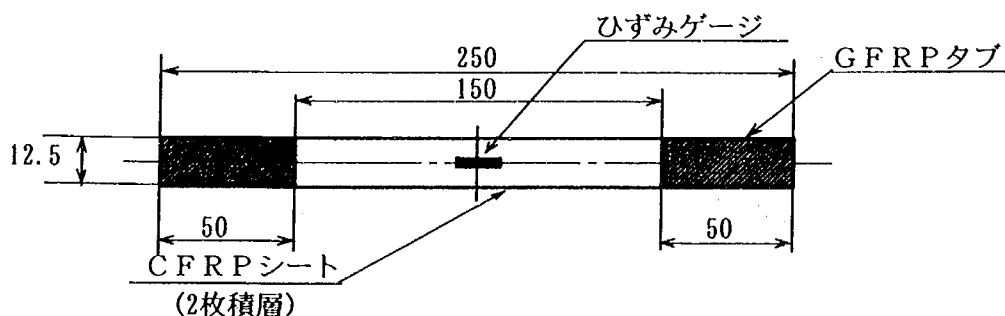
付属図-2.3.1 試験体作製要領

一般的に用いられる試験体の寸法は、付属図-2.3.2 に示す通りである。



付属図-2.3.2 引張試験体 (単位: mm)

本研究で用いたCFRPシートの試験体は、以上の一般的な作成方法に準じて作成することとし、その形状を 付属図-2.3.3 に示す通りとした。



付属図-2.3.3 CFRPシート単体の引張試験体形状 (単位: mm)

(2) 試験体の種類

試験体は、今後幅広い使用が可能となるように、メーカー公称ヤング係数 E_{cf} が $E_{cf} = 230, 390, 440, 540, 640 \text{ kN/mm}^2$ に該当する高強度型、中弾性型、高弾性型の炭素繊維シートを選び出し、繊維目付量 300 g/m^2 、積層数2層で、各メーカーの試験体ごとに試験個数を3として作成した。

引張試験は、処女载荷のもの、200 万回繰返し载荷による疲労を与えたもの、2,000 時間の促進暴露したもの、2,000 時間の促進暴露ののち 200 万回繰返し载荷による疲労を与えたもの、を対象として実施した。

繰返し载荷は、炭素繊維シートで補強した後にTL-20 またはTL-25 等の設計荷重によって既設引張補強鉄筋に発生する最大応力度が 200 N/mm^2 程度、および最大ひずみが $1,000 \mu$ 程度であることから、CFRPシートに発生する最大ひずみの目安を $1,000 \mu$ 程度として、最大応力度 σ_{cf} を上記のメーカー公称ヤング係数 E_{cf} に応じて、それぞれ $\sigma_{cf} = 245, 392, \text{---}, 441, 588 \text{ N/mm}^2$ 、最大と最少の応力比を $R = \sigma_{\max} / \sigma_{\min} = 0.1$ 、载荷速度を 10 Hz とした。また、促進暴露は、JIS K 5400 に準拠したサンシャインカーボンアーク灯による2000 時間暴露を日本塗料検査協会で行った。

(3) 引張試験

引張試験は、「JIS K 7073 炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法」に準じて、所定の載荷速度で載荷を行い、荷重とひずみを記録する。また、引張強度およびヤング係数は、土木学会規準「JSCE-E 531-1995 連続繊維補強材の引張試験方法（案）」で定められている、付属図-2.3.4 の考え方で算出することとした。

引張強度は、以下で求める。

$$\sigma_{cf} = \frac{P}{A_{cf}}$$

ここに、 σ_{cf} ：引張強度

P ：破断荷重

A_{cf} ：炭素繊維断面積

ヤング係数は、以下で求める。

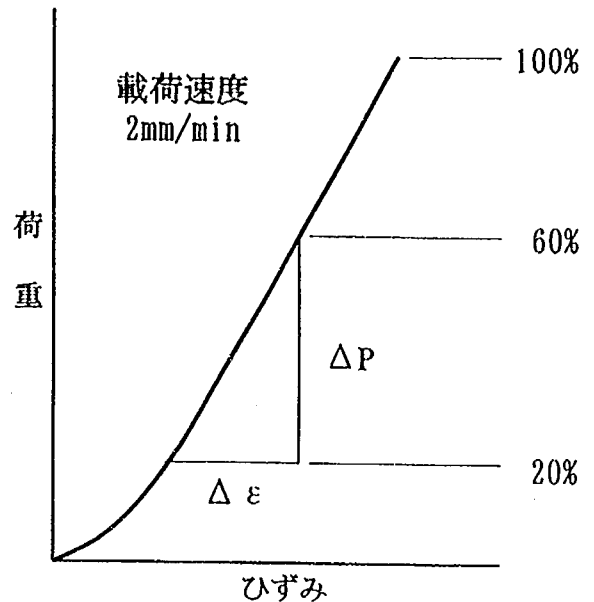
$$E = \frac{\Delta P / A_{cf}}{\Delta \varepsilon} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}$$

ここに、 E_{cf} ：ヤング係数

ΔP ：荷重増分（最大荷重の 20～60% 間）

$\Delta \varepsilon$ ：ひずみ増分

$\Delta \sigma$ ：応力増分



付属図-2.3.4 荷重-ひずみの関係

2.3.3 引張試験結果

CFRPシートを単体で引張試験した結果は、付属表-2.3.1 の通りである。

付属表-2.3.1 CFRPシート単体の引張試験結果（単位：kN/mm²）

材料 No.		メーカー 公称値		引張試験結果				促進暴露後の引張試験結果			
				静的試験 (n=3の平均)		200万回疲労後 の静的(n=1)		静的試験 (n=3の平均)		200万回疲労後 の静的(n=1)	
		ヤング 係数	引張 強度	ヤング 係数	引張 強度	ヤング 係数	引張 強度	ヤング 係数	引張 強度	ヤング 係数	引張 強度
A	1	230	3.43	256	4.099	—	—	—	—	—	—
	2	390	2.94	393	3.893	426	4.442	—	—	—	—
	3	540	1.96	564	3.128	571	3.275	—	—	—	—
	4	640	1.96	665	2.550	—	—	—	—	—	—
B	5	230	3.43	243	4.491	244	4.805	250	4.658	253	4.433
	6	440	2.45	438	3.246	—	—	—	—	—	—
C	7	230	3.43	230	5.060	—	—	—	—	—	—
	8	390	2.96	415	4.060	—	—	—	—	—	—
	9	640	1.96	642	2.579	693	2.805	627	2.501	637	2.197

CFRPシート単体の引張強度とヤング係数は、処女載荷による静的試験、200万回繰返し載荷による疲労作用後の静的試験、2,000時間促進暴露後の静的試験、および、2,000時間促進暴露後に200万回の繰返し載荷による疲労作用を与えた後の静的試験のいずれにおいても、処女載荷による静的試験結果と比較し、大きな低下が見られなかった。

ただし、高弾性型炭素繊維シートで作成したCFRPシート単体の促進暴露後に疲労作用を与えた後の引張強度は、処女載荷による静的試験結果と比較し、15%程度の低下が見られた。しかし、設計荷重作用時に発生する最大ひずみによる応力が 588N/mm^2 (大略的には、 $\sigma_{cl}=1,000\mu\times 640\text{kN/mm}^2=640\text{N/mm}^2$) と、引張強度の35%程度であることから、疲労作用の影響を大きく受ける設計荷重作用時に引張強度を低減する必要はなく、また、一般には、劣化に対する保護を目的とする塗装を施すことから、終局耐力に対する補強効果の耐久性に与える影響はほとんどないとする。

2.3.4 引張試験結果の評価

CFRPシート単体の引張試験で得られた引張強度は、各メーカーが選出した2～4種類の炭素繊維シートについて、それぞれの試験体数が3体の平均値であるとはいえ、これまでのメーカー公称値である引張強度を大きく上回った。しかし、このメーカー公称値が、これまでに得られていた引張強度の平均値 $\bar{x}$ から標準偏差 σ_n の3倍を減じた値 ($\bar{x}-3\times\sigma_n$) で99.9%の信頼性を持つもので、しかも、標準偏差が他の構造材料に比してやや大きいとされていることを勘案すると、今回の試験で得られた引張強度がこのメーカー公称値を大きく上回ることは、特に不可解なことではないといえる。

したがって、引張強度に関しては、これまでメーカー公称値であった引張強度を保証引張強度と称してよいものとする。

一方、今回の引張試験で得られたヤング係数の平均値は、ヤング係数が大きい中弾性型および高弾性型の炭素繊維シートの場合には炭素繊維メーカーの公称値に近いものとなったが、高強度型に分類されるヤング係数が小さい炭素繊維シートの場合にはメーカーの公称値を大きく上回ったものとなった。この原因は、今回用いたヤング係数の評価方法がこれまでの評価方法と異なることによると考えてよい。つまり、炭素繊維メーカーは、これまで、JIS K 7073 に準拠して求めた初期弾性係数を公称ヤング係数としていた。しかし、「土木学会規準 JSCE-E 531-1995 連続繊維補強材の引張試験方法(案)」によればヤング係数が荷重-ひずみ曲線における最大引張荷重の20%と60%の間の直線勾配で求めることとされ、CFRPシートについても、その用途が鉄筋の応力度低減と部材の終局耐力向上の両方に亘ることから、最近ではこのヤング係数評価方法が採用されつつある。

各メーカーが保有している最近のCFRPシート単体の引張試験結果でもこの傾向があり、設計計画時において、これまでのメーカー公称ヤング係数を設計基準値として用いると、荷重分担度が正しく評価されず、計算結果の信頼度が損なわれる可能性がある。従って、ヤング係数については、これまでのメーカー公称値を見直すことが必要である。

2.4 CFRPシートの設計用値の設定

2.4.1 設計用値設定の目的

炭素繊維シート接着工法をコンクリート部材の補修・補強へ適用するための設計計画の実施および施工における資材発注と資材納入時の品質確認の場合において、困惑し、かつ、品質間違いの原因となるのは、炭素繊維シートのメーカー毎に商品名と品質呼称が異なることである。これは、炭素繊維は勿論、炭素繊維シートについても、より良い品質で、より適用性が良く、より安価なものをとの目的から、製造技術の改善が継続して行われていることによる。

そこで、設計・施工の観点から炭素繊維シート分類の統一を行い便宜を図ることが望ましいことから、本研究の一環として、各メーカーがこれまで公称値としてきた引張強度とヤング係数を基に分類を行い、炭素繊維シートの設計用値を定めることとした。

2.4.2 設計用値の策定

炭素繊維シートは、そのヤング係数 E_{cf} を、 E_{cf} が 250kN/mm^2 程度の高強度型、 E_{cf} が 400kN/mm^2 前後の中弾性型、および、 E_{cf} が 500kN/mm^2 を超える高弾性型に大きく分類し、ヤング係数は平均値を示すものと $\pm 10\%$ 程度の範囲内に収まること、しかも、引張強度は平均値 χ から標準偏差 σ_n の3倍を減じた値($\chi - 3 \times \sigma_n$)を示すものとし 0.5kN/mm^2 ($5,000\text{kgf/cm}^2$) 刻みとすることを原則として、各メーカーが最近の引張試験結果から定めている公称値を洗い直ししながら仕分けることとした。また、この時、前記「2.3.4 引張試験結果の評価」で述べた高強度型のヤング係数も見直すこととした。

炭素繊維シートを以上の考え方で分類した結果が、付属表-3.4.1である。この表で用いた指標である保証引張強度とヤング係数の平均値を炭素繊維シートの設計用値と定めることにより、設計者および施工者は、これまでのPAN系やピッチ系などの炭素繊維の原料による分類、またはメーカー毎に異なる商品名と品質呼称等にとまどうことなく、希望の品質の炭素繊維シートを得ることができる。さらに、この分類は、各小分類の中で各メーカー毎に試験値の分布状態と標準偏差とが異なる点があるものの、既設鋼材の応力度低減あるいは終局耐力向上等の目的に応じた設計、さらには、破壊モード指定の設計など、多様な安全性照査方法への適用性を持つものである。

なお、本表中の指標は、その成り立ちから分かるように、保証引張強度が99.9%の信頼性を持つ引張強度を、ヤング係数が平均値を、それぞれ示している。

さらに、本表の数値は、重力単位系から国際単位系への換算時に、保証引張強度を有効数字2けたで、ヤング係数を有効数字3けたで表示したものであるが、各材料の保有する性能は、従来の重力単位系で表示した数値を満足するものである。

また、各炭素繊維シートの引張強度およびヤング係数の発生頻度分布等の詳細データが必要な場合は、各メーカーが準備する資料を参照することが可能である。

付属表-2.4.1 炭素繊維シートの保証引張強度 σ_{cfuk} およびヤング係数 E_{cf} の平均値の分類表

分類	ヤング係数 E_{cf} kN/mm ² (kgf/cm ²)	保証引張強度 σ_{cfuk} kN/mm ² (kgf/cm ²)			
		1.9 (20,000)	2.4 (25,000)	2.9 (30,000)	3.4 (35,000)
高強度	245 (2.5×10^6)			FTS-C0-20/3 トレカロス 2 方向 300 MRK-M2-20S/30S	FTS-C1-20/30 トレカロス 200/300 MRK-M2-20/30 TU クロス ST200/HT300
中弾性	390 (4.0×10^6)		MRK-M4-30S	FTS-C5-30 MRK-M4-30 TU クロス HM300	
	440 (4.5×10^6)		FTS-C5S-30 トレカロス HM30 MRK-M5-30 TU クロス HM300S		
高弾性	540 (5.5×10^6)	FTS-C7-30 TU クロス UHM300L			
	640 (6.5×10^6)	FTS-C8-30 MRK-M6-30 TU クロス UHM300			

FTS : 日鉄コンポジット(株)製
 トレカロス : 東レ(株)製
 MRK : 三菱化学(株)製
 TU クロス : 日石三菱(株)製

2.5 CFRPシートの耐久性に関する調査結果

2.5.1 調査の目的と調査方法

炭素繊維シート接着工法は、その設計・施工の有利性が理解され、適用範囲の拡大が見られているものの、新しい材料を用いる工法であることから、補修・補強のいずれの場合であっても使用材料の耐久性に関して種々の疑問が投げかけられることが多い。また、「I 共通編、4章、4.3 CFRPシートの劣化および外衝からの保護」で述べたように、劣化防止措置が必要となることもある。

したがって、ここでは、主として、CFRPシートと含浸接着樹脂の力学的性質が種々の環境作用に対して保有する耐久性についての資料を提供することを目的として、これまでに得られている諸実験結果を調査し、それを抜粋・整理することとした。

なお、抜粋・整理の対象とした資料は、炭素繊維補修・補強工法技術研究会の主要構成員が中心となって、財団法人・鉄道総合技術研究所へ研究委託した成果物である、

① 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、平成8年7月

② 炭素繊維シートによる地下鉄RC柱の耐震補強工法設計・施工指針、平成9年1月

の付属資料であり、これらの付属資料は、元来、炭素繊維シートのメーカー各社が長年に亘って蓄積した実験データを踏まえてまとめたものである。

2.5.2 引張強度に関する耐候性

(1) 暴露条件

1) 自然暴露試験

暴露期間：3年間暴露

2) 促進暴露試験

暴露時間：2,000時間、および、10,000時間促進暴露

試験方法：JIS A 1415「プラスチック建築材料の促進暴露試験方法」準拠

試験機：サンシャインウェザロメーター

試験条件：ブラックパネル温度 $63 \pm 3^{\circ}\text{C}$

スプレーサイクル 18分/120分

(2) CFRPシートの引張強度試験

試験方法：JIS K 7073「炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法」準拠

供試体数：自然暴露（3年） $n = 6$

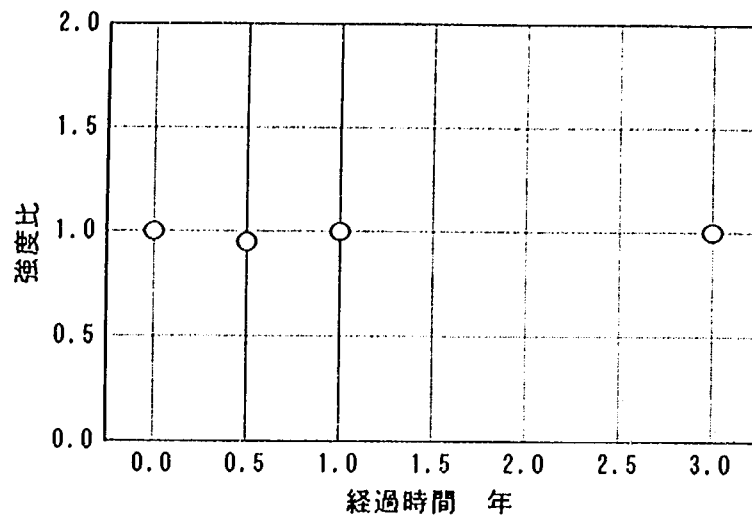
促進暴露（2,000時間） $n = 6$

（10,000時間） $n = 5$

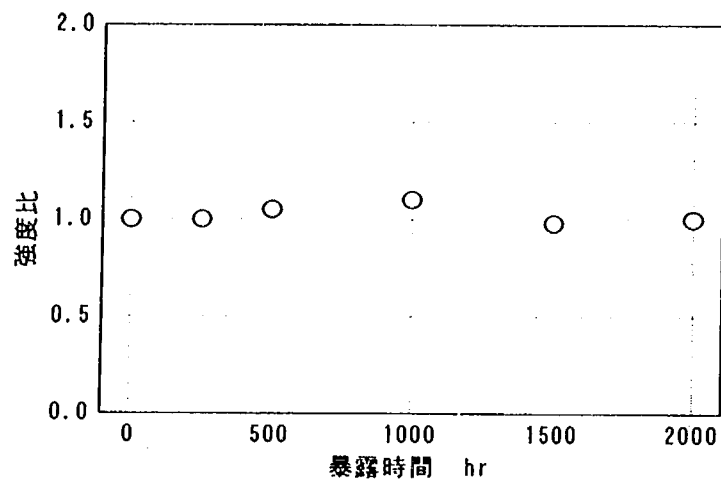
(3) 試験結果

自然暴露試験後および促進暴露試験後におけるCFRPシートの引張試験結果は、それらの暴露のない試験体の引張強度に比して、低下が見られなかった。

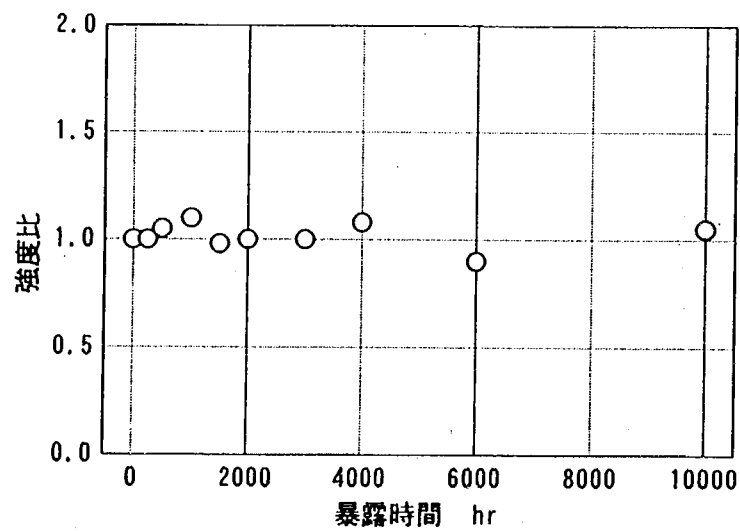
自然暴露試験前の引張強度に対する自然暴露試験後の引張強度の比の推移を 付属図-2.5.1 に、



付属図-2.5.1 自然暴露後の引張強度比の推移



付属図-2.5.2 2,000 時間までの促進暴露試験後の引張強度比の推移



付属図-2.5.3 10,000 時間までの促進暴露試験後の引張強度比の推移

促進暴露前の引張強度に対する 2,000 時間までの促進暴露試験後の引張強度の比の推移を 付属図-2.5.2 に、また、促進暴露試験前の引張強度に対する 10,000 時間までの促進暴露試験後の引張強度の比の推移を 付属図-2.5.3 に、それぞれ示す。これらの結果より、CFRP シートの引張強度は、十分な耐候性を有していると考えられる。

2.5.3 接着強度に関する耐候性

(1) 暴露条件

1) 自然暴露試験

暴露期間：3 年間暴露

2) 促進暴露試験

暴露時間：2,000 時間及び 4,000 時間促進暴露

試験方法：JIS A 1415「プラスチック建築材料の促進暴露試験方法」準拠

試験機：サンシャインウェザロメーター

試験条件：ブラックパネル温度 $63 \pm 3^{\circ}\text{C}$

スプレーサイクル 18 分/120 分

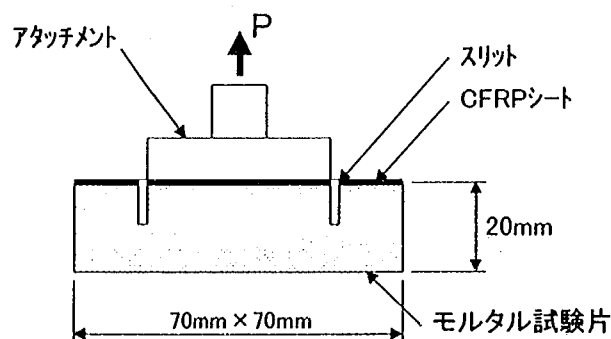
(2) CFRP シートの接着強度試験

試験方法：JIS A 6909「建築用仕上塗装材の付着強さ試験」準拠

供試体数：自然暴露（3 年） $n = 9$

促進暴露（2,000 時間） $n = 3$

（4,000 時間） $n = 3$



付属図-2.5.4 接着強度試験方法

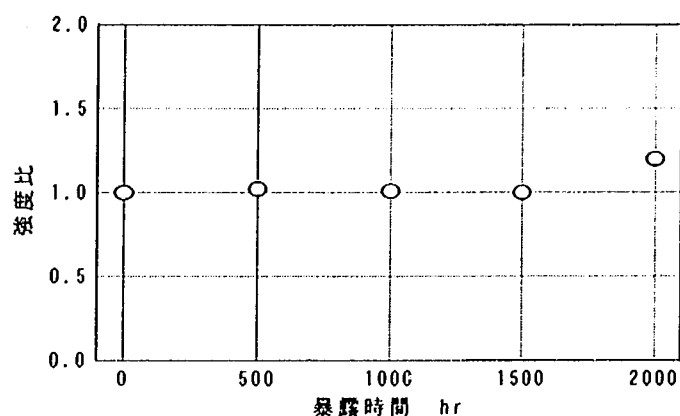
(3) 試験結果

自然暴露試験後および促進暴露試験後における CFRP シートの接着強度試験結果は、それらの暴露前の接着強度に比して、低下が見られなかった。

促進暴露試験前の接着強度に対する 2,000 時間までの促進暴露試験後の接着強度の比の推移を 付属図-2.5.5 に、4,000 時間までの促進暴露試験後の接着強度の推移を 付属表-2.5.1 に、また、自然暴露試験前

の接着強度に対する自然暴露試験後の接着強度の比の推移を 付属図-2.5.6 に、それぞれ示す。

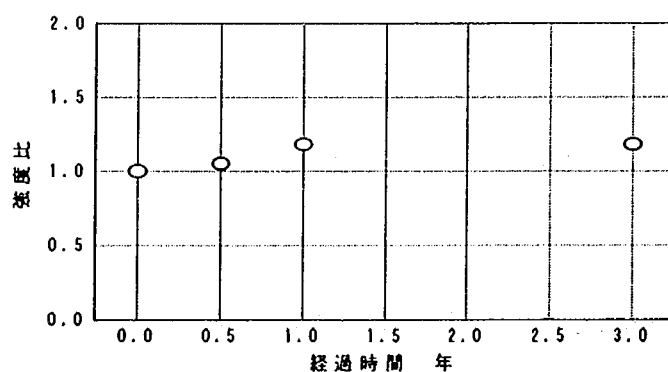
これらの結果より、含浸接着樹脂によるCFRPシートとコンクリートとの接着性は十分な耐候性を有していると考えられる。また、塗装のない供試体では500時間の促進暴露でCFRPシートの表面に白化現象が発生したのに対し、ウレタン塗装を施したものは4,000時間の促進暴露試験後でも良好な外観を保っていたことから、塗装被覆は含浸接着樹脂表面の耐候性向上に有効である。



付属図-2.5.5 促進暴露後の接着強度比の推移

付属表-2.5.1 CFRPシートの接着強度(N/mm²) および 外観経時変化

供試体	暴露時間	初期	500 hr	1,000 hr	1,500 hr	2,000 hr	3,000 hr	4,000 hr
CFRPシート + ウレタン塗装	接着強度	2.1	2.1	2.1	1.9	1.9	2.1	2.0
	破壊場所	母材	母材	母材	母材	母材	母材	母材
	外観	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好
CFRPシート + 塗装なし	接着強度	2.0	2.3	2.3	2.1	2.2		
	破壊場所	母材	母材	母材	母材	母材		
	外観	良好	白化					



付属図-2.5.6 自然暴露後の接着強度比の推移

2.5.4 CFRPシートの耐水性

(1) 試験目的

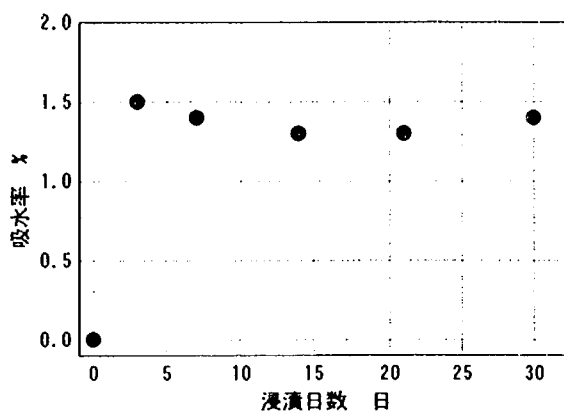
CFRPシートの耐水性は、含浸接着樹脂の吸水量の影響を多分に受ける。したがって、含浸接着樹脂の吸水量と吸水したCFRPシートの引張強度および継手強度の変化を調査することにより、CFRPシートの耐水性を評価する。

(2) 試験方法

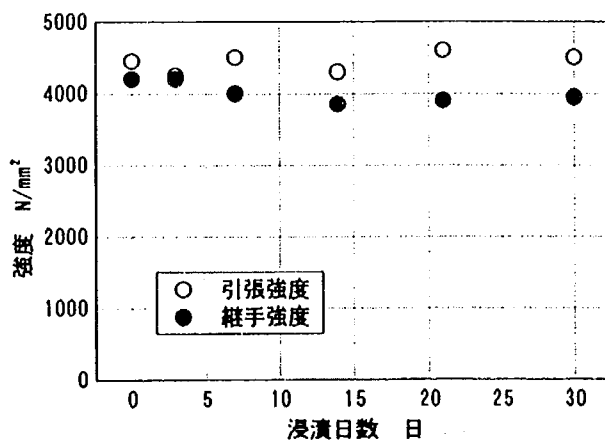
70℃の温水に30日間浸漬させた場合のCFRPシートの吸水率、引張強度、10cm 継手強度を、浸漬日数0～30日について7日ごとに測定する。

(3) 試験結果

温水浸漬後の吸水率の推移を 付属図-2.5.7 に、また、引張強度および継手強度の測定結果を 付属図-2.4.8 に、それぞれ示す。これらより、CFRPシートの引張強度および継手強度に低下が見られなかった。



付属図-2.5.7 浸漬日数と吸水率の推移



付属図-2.5.8 浸漬日数と強度の推移

含浸接着樹脂の吸水率は、3日程度で飽和の約1.5%に達し、その後ほとんど変化しない。また、CFRPシートは、引張強度および継手強度が試験開始から30日までほぼ一定であり、これらの試験結果より、十分な耐水性を有していると考えられる。

2.5.5 CFRPシートの耐海水性

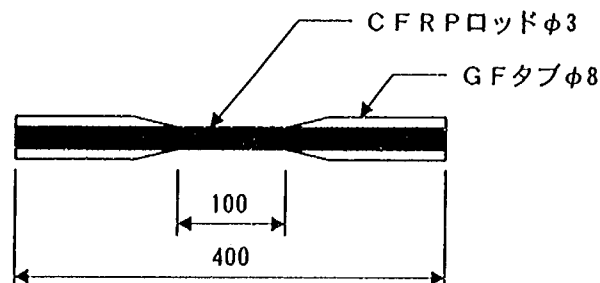
(1) 試験目的

塩水噴霧によるCFRPシートの暴露試験を実施し、暴露後の引張強度により、CFRPシートの耐海水性を把握することを目的とする。

(2) 試験方法

供試体は、付属図-2.5.9 に示すように、CFRPロッドφ3mmを使用し、供試体数を10本とする。

試験装置、試験条件を 付属表-2.5.2 に示す。



付属図-2.5.9 塩水噴霧試験片

付属表-2.5.2 耐海水性試験の方法と条件

試験名	塩水噴霧試験	引張試験
試験装置	ノズル方式塩水噴霧試験装置 JIS Z 2371 準拠	テンシロン電気式引張試験機
試験温度	35±2℃	23℃
試験時間	1年間	

(3) 試験結果

塩水噴霧後に行った引張試験結果を 付属表-2.5.3 に示す。これより、CFRPシートの引張強度に低下が見られなかった。

付属表-2.5.3 塩水噴霧試験結果

暴露期間	引張強度 (N/mm ²)	標準偏差 σ_n (N/mm ²)	残存率 (%)
初期	2,078	49	—
1年	2,097	39	100.9

塩水噴霧試験後におけるCFRPロッドφ3mm の引張強度に低下が認められなかったことから、CFRPシートは十分な耐海水性を有していると考えられる。

付属資料3 炭素繊維シート接着工法の施工方法と管理の目安

3.1 付属資料3の目的

本指針(案)「I 共通編、5章 施工」は、炭素繊維シート接着工法をコンクリート構造物の補強・補修に適用するにあたって必要となる、標準的な施工方法および施工管理の基本的考え方を示したものである。

一般に、炭素繊維シート接着工法は、使用される材料種類、施工順序および各工種における施工方法に大きな違いは無いと言ってよい。しかし、炭素繊維シート接着工法は、劣化・損傷から健全まで種々の状態にあるコンクリート部材を補修・補強の対象とし、しかも、その施工が極めて多様な環境条件下で行われることに特徴がある。したがって、使用される材料のうち特に樹脂系材料は、同一の種類であり施工完了時点で同じ性能を発揮するものであっても、施工環境下での施工性を配慮した粘度と可使用時間を持つようなものが独自に選択され、施工は、この選択された樹脂の取扱い仕様を遵守する実施方法によるなど、材料や施工内容等の細部は常に一定ではない。

本指針(案)「I 共通編、5章 施工」で、施工方法および施工管理の基本的考え方のみを示さざるを得なかったのは、このような理由によるものである。

しかし、実際に炭素繊維シート接着工法の施工を行う場合、各工種毎では具体的な施工手段と施工の精粗等について、また施工管理では管理目標について、それぞれの目安が必要であることから、本付属資料では、本指針(案)の本文や解説には述べていない、これら諸点の詳細を取り纏めることとした。

なお、これらの取り纏めにあたっては、炭素繊維補修・補強工法技術研究会を構成する各社等が、個々に、あるいは共同で作成して実用に供している施工マニュアルや施工管理基準を参考とさせていただいた。

3.2 各工種の施工方法と管理の目安

3.2.1 原則

(1) 炭素繊維シート接着工法によるコンクリート部材の補修・補強は、施工対象物に要求されるCFRPシートの性能を得ることができる施工によらなければならない。

特に、本工法で扱う諸材料は、そのほとんどが単独では目的を達し得ない素材であり、結合材により全材料が完全に複合化されて後にはじめて所定の性能を発揮させることができるものである。また、各使用材料は、その取扱いを誤ると求められた性能を発揮できなくなることから、その特性を熟知した上で取り扱う必要がある。

(2) 炭素繊維シート接着工法において実施される全ての施工は、その施工方法、品質管理、安全計画等が施工計画書またはこれに代わる書類に明確に記載され、かつ、その記載された方法によって実施されることを原則とする。

3.2.2 施工計画

(1) 施工計画書またはこれに代わる書類は、補修・補強の目的に適合する施工を実施するため、施工前に、設計図書・仕様書の内容等と当該構造物の現地調査結果とを対比・検討した上で、準備工から完成までの各

工程毎に、使用材料・施工方法・品質および工程管理・安全および防災対策等からなる構成で作成し、発注者の承認を得なければならない。

(2) 施工計画書作成上の留意点

① 設計図書内容と当該構造物の現地調査を対比・検討し、その結果に基づいて策定した仮設、環境対策、断面修復、割付実施図等を施工計画書中に反映させる必要がある。例えば以下の通りである。

1. 立地条件や周辺環境から施工時期・工事用資機材の搬入・搬出の経路や時間帯が制約され、また工事に伴う騒音、振動、粉塵、臭気、水質汚染等が問題になることもあるので、法規制や発注者、周辺住民の意向を踏まえ、適切な処置を講ずる必要がある。
2. 炭素繊維シートの基本割付計画の修正の要否を確認し、修正を要する場合は割付実施図を作成し、炭素繊維シートの切断寸法等の再設定をしなければならない。
3. 対象コンクリート構造物に新たに検出されたひび割れ等の不健全部は、適切な断面修復計画を策定する。

② 使用予定のプライマー、パテ、含浸接着樹脂のような常温硬化型エポキシ樹脂系材料は、粘度、可使時間、硬化時間等が気温や構造物の表面温度に左右されやすいので、その施工性が構造物の置かれている施工環境や施工時期に適合しているか否かを確認する必要がある。必要な場合は対象構造物を利用して試験施工を行い、その結果を施工計画書に反映させなければならない。

なお、一般に、常温硬化型エポキシ樹脂系材料は、下記の環境下での施工を避けなければならない。

1. 気温 5℃未満の環境…………… 低温では樹脂類の硬化の遅延や粘度上昇による含浸不良が発生する。
2. 雨天、高湿度下（相対湿度 85%以上）の環境… 樹脂の硬化不良が発生しやすい。
3. これらの環境下で施工せざるを得ない場合は、適切な養生を行うか、低温硬化型樹脂あるいは湿潤面対応樹脂等の使用を検討するのが望ましい。

③ 補修・補強の目的に適合させるための施工は、各工程毎に設定された管理項目と管理基準に基づいて、規定の方法により検査し、基準に適合していることを確認する必要がある。これらの品質管理方法は、「Ⅰ 共通編、5章 施工、5.5 品質管理および検査」を参考にして施工計画書に明記する。

④ 樹脂系材料、洗浄用溶剤及び炭素繊維シートの安全衛生管理・防災対策は、材料供給者の作成した「製品安全データシート(MSDS)」及び関連法規に従い、適切な施策をたてなければならない。

また、炭素繊維シートは導電性を有するので電気災害の防止対策も必要である。これら安全、防災対策は、作業員全員に周知徹底を図ることが重要であり、そのための教育指導等についても策定する。

⑤ 施工計画書は、施工の総ての基本となるので施工責任者を明記して発注者の承認を受けなければならない。

3.2.3 準備工

炭素繊維シート接着工法は、従来から実施されているコンクリート増打ち工法や鋼板接着工法等の補強工法とは異なる施工上の特徴を有している。したがって、仮設等の準備工は、この特徴を踏まえて、安全・品

質の確保はもとより、本施工の特徴が十分に活かされ、かつ、周囲の環境にも配慮した施工ができるように計画し、そのための準備をする。

(1) 仮設工事

- ① 作業足場 : 本工法の作業足場は、重量物を取り扱わないので塗装工事に準じたものとしてよい。また、構造物と足場との間隔は 30cm 程度確保すれば作業が可能である。
- ② 一般養生 : 樹脂系材料を多用するために、水分(結露を含む)や埃の付着を防止する養生が不可欠である。また、必要に応じて騒音、粉塵、臭気の発生に配慮した仮囲い、換気集塵設備の設置を行う。
- ③ 保温養生 : 周囲気温度は、樹脂系材料の可使用時間や粘度等の施工性やCFRPシートの品質に影響を与える。特に、冬期には粘度上昇による炭素繊維シートへの含浸不良や硬化遅延が起きやすくなる。このような環境下で施工する場合には、ヒーター等により作業場内を均一に保温できる養生設備を準備しなければならない。
- ④ 炭素繊維飛散防止養生 : 炭素繊維の飛散による電気施設の短絡事故が予想される工事場所においては、炭素繊維シートの加工・保管・貼付けにおいて、作業場所からの炭素繊維の飛散を防ぐことを考慮した養生が望まれる。
- ⑤ 材料保管場所 : 炭素繊維シートは水分、埃、直射日光を避けて、また、樹脂材料は材料供給者の定める保管要領に準じて、それぞれ保管する必要がある。
施工現場には以上の条件を満たす材料保管場所を準備する。足場上に材料保管場所を設ける場合は、足場の積載重量を考慮して保管する。
- ⑥ その他の仮設 : 電源やその他の仮設は、一般的な工事に準じて行う。

(2) 既存設備の移設、一時撤去

構造物に付属・近接している排水設備、電気設備等の添加物が炭素繊維シートの連続性を阻害したり、作業の障害となる場合は、これらの移設や一時撤去を行う。この時、それらの取付けボルトや埋設物の位置を確認記録し、復旧方法を施工計画書に記載するのがよい。

撤去できない設備によって炭素繊維シートの連続性が阻害される場合、また、施工後にアンカーボルト等によってCFRPシートの一部を切断する場合には、局部補強を行うのが原則であり、これを予め考慮した設計がなされていることの有無を設計者に確認すると共に、発注者と協議して補強細部を定めなければならない。

(3) 使用材料の受入、保管

- ① 使用材料は、発注者の定める品質規格あるいは設計図書、特記仕様に提示された規格を満たすものとし、使用前に発注者の承認を得て使用する事を原則とする。
- ② 使用材料の品質確認は、材料納入時に材料供給者から提出された納品書記載の各項目が材料注文時に記載された材料名、商品名、メーカー名、数量等と合致することの照合によることとし、確認の後受領

する。この時、上記 ① に適合する事を証明した試験成績書、品質証明書、あるいは取扱説明書等の書類と照らし合わせ、受け入れる材料が仕様に適合する事を確認する。

万一、納入材料が仕様に適合しない場合は、速やかに返却し、適合品と交換する。また、試験成績書等の書類に異常・不備がある場合は、内容の確認・修正を材料供給者に行わせると共に、必要に応じて再試験および再検査を行わせる。

③ 材料は、それぞれの品質を損なわないように(1) ⑤ 材料保管場所 に適合する場所に保管する。

④ 材料の入・出庫時は、「施工記録シート」及び「入・出庫・保管管理シート」に入・出庫年月日、数量、材料使用場所等の必要事項を記録し、それにより各使用場所における使用量を管理する。また、施工終了後は納入数量と残数量とにより全使用量を確認する。

(4) 標準使用する資機材

施工を円滑に行うために、各施工段階で使用する資機材を準備しなければならない。標準使用する資機材を 付属表-3.2.1 に示す。

付属表-3.2.1 標準使用資機材

工程	下地処理工	断面修復工、不陸修正工	ひび割れ注入工	
資機材	・コンクリート表面研削用具 (ディスクサンダー、コンクリートカンナ等) ・埃等除去用具 (ブローア、ウエス等) ・防塵マスク ・防護メガネ等	・プライマー ・断面修復材 (ポリマーセメントモルタル、樹脂モルタル) ・不陸修正材 (樹脂パテ材) ・混合用具(ミキサー・ヘラ) ・計量器具 ・保護マスク ・保護メガネ ・ゴム手袋等	・シール材 (樹脂系シール材) ・注入剤 (樹脂系、無機系注入材) ・注入ポンプ ・注入治具 ・混合用具(ミキサー・ヘラ) ・計量器具 ・保護マスク ・保護メガネ ・ゴム手袋等	
工程	プライマー工	炭素繊維シート接着工	養生工	仕上げ工
資機材	・プライマー ・塗布用具 (ローラー刷毛、刷毛) ・混合用具(ミキサー、ヘラ) ・計量器具 ・保護マスク ・保護メガネ ・ゴム手袋等	・炭素繊維シート ・含浸接着樹脂 ・塗布用具 (ローラー刷毛、刷毛) ・含浸用具 (ゴムベラ、含浸ローラー) ・混合用具(ミキサー、ヘラ) ・計量器具 ・保護マスク ・保護メガネ ・ゴム手袋等	・養生用具 (ビニールシート、算木等)	・塗料 ・シンナー ・塗装用具 (ローラー刷毛、刷毛) ・混合用具 (ミキサー、ヘラ) ・計量器具 ・保護マスク ・保護メガネ ・ゴム手袋等

3.2.4 下地処理工

(1) 断面修復工・ひび割れ処理工

炭素繊維シート接着工法は、既存コンクリート部材とCFRPシートが協力して作用力に抵抗する事を前提としている。したがって、既存コンクリートが健全な状態にあることが求められ、補強対象のコンクリート部材に、ひび割れ、脆弱部、ジャンカ、浮き、欠損、鉄筋腐食等の不健全な箇所がある場合には、下地処理工に先立って、適切な方法により断面修復工あるいはひび割れ注入工を行わなければならない。

① ひび割れの補修

ひび割れの補修は、既存コンクリート部材の健全性を回復させること、および、CFRPシートへの応力集中等の影響を防止する目的として、特記仕様または施工計画書に示された方法によって行う。

標準的な補修方法と留意点は、以下の通りである。

1. 部材耐力に影響を及ぼすひび割れは、コンクリートの一体性を回復させるために、充填性、接着性、強度発現性、耐久性に優れたエポキシ樹脂等の注入剤によって、ひび割れ幅に応じた注入剤の粘度を選択して入念な品質管理のもとで補修する。
2. 鉄筋の腐食膨張が原因であるひび割れは、次項 ② の方法により補修することを標準とする。
3. 乾燥収縮などが原因によるひび割れは、発注者と協議して適切な方法により補修する。

② 脆弱部、ジャンカ、浮き、欠損、鉄筋腐食部の修復

これらの劣化・損傷部は、はつり除去して既存コンクリートと同等以上の強度を有する材料によって断面を平坦に修復する。中性化や塩害等による鉄筋腐食が認められる場合には、鉄筋の錆を除去して、防錆対策を十分に考慮した工法と材料によって修復する。曲げ補強の場合には修復した材料が十分な付着力を発揮するように入念に品質を管理しなければならない。修復断面がかぶりコンクリートより深く及ぶ場合には、無収縮モルタル等の打設による断面修復も検討するのがよい。

(2) 下地処理工

CFRPシートが十分にその強度を発揮する条件として、含浸接着樹脂が炭素繊維シートに確実に含浸し硬化すること、炭素繊維が直線性を保っていること、応力集中を招く突起や段差のないコンクリートと一体化させること、が挙げられ、そのために応力集中や剥離が生じるような凹凸がないよう、下地処理工によってコンクリート部材表面を平坦な状態にしなければならない。

① 脆弱表面の除去、平坦化

炭素繊維シート接着工法はCFRPシートとコンクリートの接着によって応力が伝達されるため、コンクリート部材表面の研削やポリマーセメントモルタルの施工は入念な管理をしなければならない。

1. 突起、段差、脆弱層、汚れはディスクサンダー等で削り取る。
2. 平坦性を得るためにポリマーセメントモルタル等を塗り付ける場合は、コンクリートとの付着が十分に発揮されるようにコンクリート表面処理を行わなければならない。
3. 保護塗装(塗膜)は、これを研削等により除去することを標準とする。ただし、設計により別途定める場合は、それに拠る。
4. 平坦度の確認は定規を用いて行う。

② 隅角部の面取り

1. コンクリートげた等における出隅部の面取り(円弧加工)は、ディスクサンダー等による研削加工、または、コンクリートと同等以上の強度を持つモルタルをコテや面木で成形することによるものとし、面取り寸法は、「Ⅲ コンクリートげた編、4章 補修・補強設計、4.4 曲げ補強設計、4.4.4 構造細目、および、4.5 せん断補強設計、4.5.3 構造細目」に従う。
2. 既存のハンチが設けられている出隅部は、ハンチ両角を研削加工するか、または、ハンチ面にモルタルを盛り付けて成形する。
3. コンクリート床版における入隅部の面取り(円弧加工)は、コンクリートと同等以上の強度を持つ不陸修正材で成形することによるものとし、面取り寸法は、「Ⅱ コンクリート床版編、5章 施工、5.1 一般、および、解説」に従う。
4. 円弧の精度は、これをR定規で隅角部全長に亘って確認する。

③ 下地処理工における留意点

施工能力や経済性等を考慮して、サンドブラスト、高圧水洗浄、ドライアイスブラスト等の下地処理工法を採用する場合には、以下の点に注意しなければならない。

1. サンドブラスト

- ・他の処理工法と比較して粉塵の発生が多く、使用したサンドの処理に手間がかかる。
- ・コンクリート脆弱部の除去は完全に行えるが、処理後の不陸修正が必ず必要となる。

2. 高圧水洗浄

- ・洗浄水の回収、処理方法を考慮しなければならない。
- ・洗浄後、コンクリート表面の乾燥が必要である。

3. ドライアイスブラスト

- ・粉塵の発生が少なく、新しい処理方法として注目されているが、密閉空間で行う場合には、酸欠に注意しなければならない。

(3) 下地処理状態の検査

下地処理状態は、以下の項目について検査を行い、既定値または推奨値を満たす事を確認する。その値を満たしていない場合には改善措置を検討する。

① 断面修復完了状況

1. 断面修復箇所は、目視により断面欠損部やひび割れ部分の開口がすべて修復されているかどうかを検査し、下地処理管理シート等に検査結果を記録する。万一、修復洩れや修復が不完全な箇所は再度修復を行う。

② 表面の平坦度

1. 炭素繊維シートの貼り付け予定部となる下地処理後のコンクリート表面全面を目視により検査する。
2. 目視で不陸の状態が最も劣ると思われる箇所を1箇所選定し、1mの定規をその箇所のタテ・ヨコにあてて平坦度を確認する。

3. 平坦度は原則として1m間で凹部を5mm以下とし、かつ25cm間で部分的な凹凸が無いこととする。また型枠等の段差は1mm以内とし鋭角部がないようにする。
4. これらの値を下地処理のみで満足することが難しい場合は、不陸修正工においてパテ材により修正してもよい。

③ 隅角部の処理状況

1. 隅角部処理後の出来形は、上記(2)②に基づく半径R以上とする。
2. 隅角部辺長方向の直線性は1m間で±5mmの誤差以内とする。

3.2.5 プライマー工

プライマーは、コンクリート表層部分の強化および含浸接着樹脂のコンクリートとの接着性を向上させるために、これを塗布する。

一般的なエポキシ樹脂系プライマーによるプライマー工の標準的な施工手順と留意点を以下に示す。

(1) 施工環境条件

- ① プライマーは、雰囲気温度及びコンクリート表面温度が5℃以上で施工しなければならない。

低温時の施工は、施工性の悪化と品質不良及び硬化時間の大幅な遅延による施工工程への悪影響をもたらすことから、雰囲気温度やコンクリート表面温度が低い場合には作業場全体を保温養生して施工しなければならない。ヒーターを用いる場合には場内が均一に保温できるように留意する。保温は、これを途中で中断すると養生仮設内の構造物表面に結露を生ずることがあるため、プライマーが初期硬化するまで継続しなければならない。

- ② コンクリート表面が結露している場合、コンクリートの表面含水率が10%以上の場合、または、湿度が85%を超える場合は、プライマーの硬化不良により十分な接着強度が発揮できないため、施工してはならない。

- ③ ただし、これら①または②を遵守できない環境条件下での施工を余儀なくされる場合は、ヒーター等による施工場所の保温養生や低温用のプライマー、また、湿潤面用のプライマーの使用を検討してよい。

(2) コンクリート表面状態の確認

- ① コンクリート表面の粉塵等をエアブローやウエスで十分に清掃する。
- ② プライマー工に先立ち、高周波モルタル水分計にてコンクリートの表面含水率が10%以下である事を確認する。

(3) プライマーの練混ぜ

- ① 主剤と硬化剤の2液混合タイプである一般的なプライマーは、所定の混合比で計量し、低速電動攪拌機を用いて均一になるまで十分に攪拌する。
- ② 一回の調合量は、可使時間以内に使用し終える量とする。可使時間は、混合前の材料の温度によっても変動するので、当日使用する材料の保管場所の温度には配慮が必要である。

(4) プライマーの塗布

① 施工面にローラー刷毛を用いて、プライマーを均一にダレが生じないように塗布する。躯体への浸透によって塗膜ができていない箇所は再度塗布する。

プライマーは、施工環境条件やコンクリートの表面状態によって適用される商品も異なるため、その標準使用量が、 $0.10\sim 0.25\text{kg/m}^2$ と広い範囲に亘るのが通常である。また、プライマーは、その後に施工される不陸修正材や含浸接着樹脂との相性も必要となるので、その適否を材料メーカーへ問合わせ等々の配慮が必要である。

② 塗布作業は、材料供給者の示した可使時間を超過しないように注意し、硬化反応により温度上昇や粘度に異常が現れた材料は、たとえ可使時間以内であっても使用を中止して廃棄する。

③ プライマーに有機溶剤が含まれる場合には、これを吸引しないように十分に換気に配慮するとともに、使用現場内は火気厳禁とする。

④ 施工には保護具（保護マスク、保護メガネ、ゴム手袋等）を着用する。

(5) 養生

塗膜に爪が立たなくなる初期硬化状態まで、塗布作業中と同様の環境条件を保ち、雨や埃の付着や結露を生じないように養生する。

3.2.6 不陸修正工

下地処理工において修正できなかった凹部やピンホールは、不陸修正工により修正する。

不陸修正工に用いる材料は、エポキシ樹脂系パテが一般的である。したがって、その施工は、プライマー工と同様な施工環境条件や下地の状況、可使時間の管理等についての配慮が必要となる。

標準的な施工要領ならびに留意点を以下に示す。

(1) 施工環境条件

プライマー工と同様である。

(2) プライマー状態の確認

① 塗布されたプライマーが指触乾燥まで進み、その表面に埃や水分の付着が無いことを確認する。

② プライマー塗布後、不陸修正工までの間隔が1週間以上経過して表面の接着性に不良が考えられる場合には、接着性を良くするため、サンドペーパーで目荒しを施し、表面を清浄にする。

③ また、プライマーが初期硬化するまでに結露などの水分が付着して白化が生じた部分があれば当該部分を溶剤で拭き取るかサンドペーパーで除去する。

(3) パテの練混ぜ

① 主剤と硬化剤の2液混合タイプである一般的なパテは、所定の混合比で計量し、ヘラ等を用いて均一になるまで十分に混合する。

② 一回の調合量は、可使時間以内に使用し終える量とする。可使時間は、混合前の材料の温度によっても変動するので、当日使用する材料の保管場所の温度には配慮が必要である。

(4) パテ処理

① ゴムベラ、コテ等を用いてプライマー表面の凹部や孔、入隅にパテを充填して平坦に仕上げる。巣穴部分のパテが内部空気の膨張によって膨れた場合には膨れを削って再度パテを充填する。なお、硬化後にコテ跡等の凸部が残った場合は削り取って平坦にする。

② 平坦度は原則として1 m間で凹部を5 mm以下とし、かつ25 cm間で部分的な凹凸が無いこととする。

(5) 養生

塗膜に爪が立たなくなる初期硬化状態まで、パテ処理作業中と同様の環境条件を保ち、雨や埃の付着や結露を生じないように養生する。

3.2.7 墨出し工

(1) 構造物の実寸法を計測して炭素繊維シート基本割付計画の修正・補正を行い、実構造物に適合した割付実施図を設計責任者と協議の上作成し、発注者の承認を得る。

① 割付実施図は、貼付基準位置、継手位置、積層数を明記して、貼付け作業を正確に行うことができるようにする。

② 継手長さ及び継手位置は、設計図書に従うものとするが、継手位置は、隣接炭素繊維シート間で千鳥配置、かつ下層と上層の継手位置も千鳥配置とすることが原則である。

(2) 割付実施図を基に炭素繊維シートの直線性が確保できるように接着位置をコンクリート表面に墨出しする。含浸接着樹脂は着色されているため、墨は含浸接着樹脂の塗布後でも識別しやすい物を使用する。

3.2.8 炭素繊維シート接着工

炭素繊維シート接着工法は、炭素繊維シートに現場で樹脂を含浸させてCFRPシートを製作すると同時にコンクリートと一体化させる工法である。所定の位置、方向、積層数で炭素繊維シートを貼り付け、かつ、硬化したCFRPシートが所定の性能を発揮するように施工しなければならない。

炭素繊維シート接着工の標準的な施工手順と留意点を以下に示す。

(1) 施工環境条件

プライマー工と同様である。

(2) 炭素繊維シートの切断

① 炭素繊維シートは、水や埃の付着しない場所で、鋏やカッターナイフを用いて、割付実施図を基に所定の長さに切る。

② 切断した炭素繊維シートの保管、運搬等の取扱いは、繊維のほつれ、切れ、しわが生じないように、使用する炭素繊維シート製造者の取扱説明にしたがう。特に、含浸接着樹脂を予め少量含浸させたタイプの炭素繊維シートは、直射日光や高温を避けて保管しなければならない。

③ 炭素繊維は、導電性のため電力設備や電子機器の近傍では、繊維の飛散に注意する。

(3) プライマーおよびパテ材表面の確認

① 塗布されたプライマー、パテ材が指触硬化まで硬化が進み、その表面に埃や水分の付着が無いことを

目視・指触で施工範囲全体を確認する。

② プライマー塗布およびパテ処理後、炭素繊維シート貼付けまでの間隔が1週間以上経過して表面の接着性が懸念される場合には、接着性を良くするため、サンドペーパーで目荒しを施し、表面を清浄にする。

③ また、プライマーおよびパテが初期硬化するまでに結露などの水分が付着して白化が生じた部分があれば当該部分を溶剤で拭き取るかサンドペーパーで除去する。

(4) 含浸接着樹脂の混合

① 主剤と硬化剤の2液混合タイプである一般的な含浸接着樹脂は、所定の混合比で計量し、低速電動攪拌機を用いて均一になるまで十分に攪拌する。

② 一回の調合量は、可使時間以内に使用し終える量とする。可使時間は、混合前の材料の温度によっても変動するので、当日使用する材料の保管場所の温度には配慮が必要である。

(5) 含浸接着樹脂の下塗

① 含浸接着樹脂は、ローラー刷毛を用いて、可使時間内に炭素繊維シートを貼って含浸作業が終了し得る所定量を施工面に均一に塗布する。なお、標準使用量の範囲の例を 付属表-3.2.2 に示すが、実際の使用量は、炭素繊維シートやコンクリートの表面状態によって異なるため、十分な検討により決定する必要がある。

付属表-3.2.2 含浸接着樹脂の標準使用量の範囲の例

繊維目付量(g/m ²)	塗布別	標準使用量の範囲(kg/m ²)
200	下塗	0.30 ～ 0.40
	上塗	0.20 ～ 0.30
	合計	0.60
300	下塗	0.30 ～ 0.60
	上塗	0.20 ～ 0.30
	合計	0.80

(6) 炭素繊維シート貼付け、および含浸接着樹脂の上塗

① 含浸接着樹脂の下塗直後に炭素繊維シートを貼り付ける。炭素繊維シートの繊維方向の継手長および継手位置は割付実施図に従う。貼付けは、炭素繊維シートの端部から気泡やしわが残らない様に軽く押さえながら下地に密着させてゆく。

② 脱泡ローラーやゴムベラを使用し、空気溜りを除去するとともに確実に押さえ、含浸接着樹脂を十分に炭素繊維シートへ含浸させる。ハンチ部や隅角部は空気溜りが発生しやすいため、十分注意する。

③ 指触によって含浸接着樹脂が炭素繊維シートの表面に浸み上がったことを確認して、貼り付けた炭素繊維シートの上に、再度、含浸接着樹脂をローラー刷毛にて均一に塗布し、含浸接着樹脂の含浸を完全に行う。

④ 2層以上積層する場合には、(5) ① ～ (6) ③ の作業を繰り返す。

(7) 施工中の留意点

- ① 施工中に結露が発生した場合には、ウエス等で空拭きし、乾燥処理を行った後に施工する。
- ② 施工後にシートの積層数が目視で確認できるように、任意の場所を選択してシート端部をずらして貼付ける等の工夫を行う。
- ③ 施工時には保護具（保護マスク、保護メガネ、ゴム手袋等）を着用する。

(8) 炭素繊維シートの貼付け状態の検査

炭素繊維シートの貼付け施工中における検査は、以下の項目について実施し、規定値または推奨値を満たすことを確認する。その値を満たしていない場合は改善措置を検討する。

① 炭素繊維シートの貼付け位置の検査

炭素繊維シートは、墨出し位置に合わせて貼り付けるが、その墨出しの位置が割付実施図に記載された位置と相違がないことをスケール、水系、下げ振り等を使用して確認する。

② 炭素繊維シートの貼付け状態の検査

1. 炭素繊維シートの貼付け上塗り直後、および、翌日に目視による検査を行い、硬化前および硬化後の貼り付け状況を確認しなければならない。
2. 炭素繊維シート貼付け後は、浮き、はがれ、たるみ、しわ、およびエポキシ樹脂の含浸状況を確認するとともに、硬化後の積層間の接着状態やエポキシ樹脂の硬化状態を目視観察し、さらに打診により不良箇所の有無を検査しなければならない。
3. 検査による合否判定の目安を 付属表-3.2.3 に示す。

付属表-3.2.3 炭素繊維シート貼付け状態の合否判定の目安

浮き・膨れの大きさ	基準個数 /m ²	合 否	対 応
直径 10mm 未満	—	合 格	なし
直径 10mm から 30mm 未満	10 個未満	合 格	なし
	10 個以上	不合格	補修
直径 30mm 以上	すべて	不合格	補修
* 円形以外のものについては、短径と長径の平均を直径とみなす。 * 出典：炭素繊維補修・補強技術研究会 施工管理委員会 編集 「炭素繊維シート貼付け工事における品質管理マニュアル（案）」			

③ 炭素繊維シートの継手長さの検査

1. 重ね継手は、その継手位置が割付実施図に示された配置であること、また、その継手長さが割付実施図に示された長さ以上であることを確認する。
2. 継手位置の不良、または継手長さが不足している場合は、貼り直しを原則とする。

④ 炭素繊維シート積層数の検査

1. 炭素繊維シートの貼付け積層数は、設計図書または、割付実施図に記載された積層数を貼ること

は当然であるが、その積層数を後で確認、証明することが出来なければならない。

その方法は、積層毎の発注者または監理者の立会い検査確認で行うか、炭素繊維シートの端部を少しずつずらして、施工後でも確認出来るようにする方法がある。

2. 設計図書、または割付実施図に記載された積層数と照合し、積層数が不足の場合は、不足分の貼増し、または、貼直しを原則とする。

⑤ 含浸接着樹脂の塗布量等の検査

1. 含浸接着樹脂の塗布量は、総使用量の管理手法として「3.2.3 準備工 (3) 使用材料の受入、保管」に示した「入・出庫・保管管理シート」で記録した出庫時の管理数量から求まる使用量で管理することを原則とする。また、工事完了後は空缶数量を確認し記録する。
2. 塗布量の管理範囲は、炭素繊維シートの繊維目付量から定まる標準使用量の±15%以内とする。
3. 含浸接着樹脂の塗りむらは、塗布面を目視により検査し、塗りむらがないことを原則とする。

(9) 養生

上塗りした含浸接着樹脂は、爪が立たなくなる初期硬化状態まで、塗布作業中と同様の環境条件を保ち、雨や埃の付着や結露を生じないように養生する。

3.2.9 施工記録・管理シート

入・出庫・保管管理シートの参考例を 付属表-3.2.4 に、施工記録シートの参考例を 付属表-3.2.5 に、それぞれ示す。

付属表-3.2.4 入・出庫・保管管理シート (参考例)

材料名：

回	入庫				出庫				保管検査		備考
	入庫日 (月・日)	数量 (単位)	ミルシート (確認)	確認 者印	出庫日 (月・日)	数量 (単位)	在庫数 (単位)	確認 者印	保管 状況 (良・否)	担当 者印	
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

付属表-3.2.5 施工記録シート (参考例)

記入者

平成	年	月	日	天候	気温	℃	湿度	%
工事名称								
施工箇所								
作業内容				作業量		使用量		
				m ² /日	累積m ²	g/m ²	累計 g/m ²	
① 準備工								
② 下地処理								
③ プライマー塗布								
④ 含浸接着樹脂塗布 (下塗)								
⑤ 炭素繊維シート貼付け								
⑥ 含浸接着樹脂塗布 (上塗)								
⑦ 仕上げ工								
⑧ 後処理								
作業員氏名								
人員数	人/日		累計		人			
特記事項								

3.2.10 安全注意事項

炭素繊維シート接着工法の施工は、以下に示した注意事項を遵守して行わなければならない。

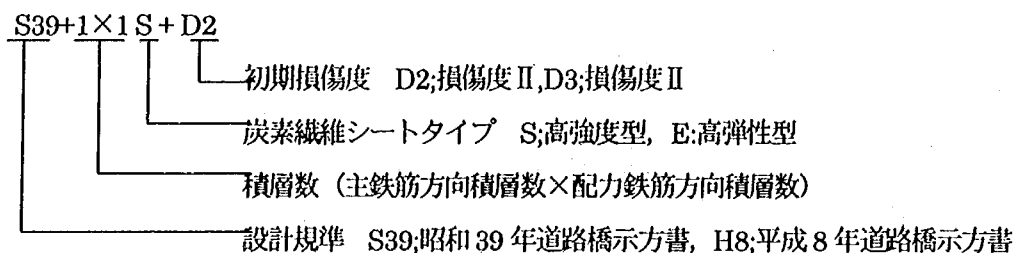
- (1) 材料の使用方法、保管方法および管理方法を十分確認の上、施工を行わなければならない。
- (2) 足場、路下状況、その他の作業環境を整備し、また、作業に応じて保護マスク、保護メガネ、保護手袋、安全帯等を着用しなければならない。
- (3) 有機溶剤を使用する場合には、特に、閉鎖空間での作業は換気に十分注意し、必要に応じて送風機やダクトによる強制換気を行わなければならない。特に、足場材や養生用シートによって閉鎖空間が作られる場合があるため、有機溶剤の吸引による事故を防止するように十分注意しなければならない。
- (4) プライマー、含浸接着樹脂、仕上げ材等が皮膚に付着した場合には、かぶれることがあるため、直ちに石鹸と水で洗い落とさなければならない。また、目に入った場合には、直ちに水で洗浄し、医師の指示を受けて適切な処置を取らなければならない。
- (5) 炭素繊維は導電性を有するため、飛散した炭素繊維が電動機器を短絡させる場合がある。そのため、電動機器の開口部はガムテープ等でシールし、配線等に炭素繊維が触れないようにしなければならない。
- (6) 世界各国の研究機関により、飛散した炭素繊維は人体に影響を及ぼさないことが証明されているが、安全のため、これを体内に吸い込まないように吸引装置の設置、防塵マスクの着用等の対策を講ずるのが良い。
- (7) 炭素繊維シートを取扱う場合、皮膚が刺激を受けることがあるため、保護手袋を着用するのが良い。
- (8) 炭素繊維シートの廃棄物は、産業廃棄物として処理しなければならない。
- (9) 火気には十分注意し、火気を取り扱う場合には安全な場所を選定し、また、現場には消化器具等を準備しなければならない。

炭素繊維シート補強する試験体では、補強前に輪荷重走行試験機により所定の損傷度になるまで 157 kN の一定荷重で走行・載荷を行なった。損傷の指標として、ここでは、床版下面中央のたわみを用い、損傷度Ⅱは載荷時たわみ 8mm・除荷時たわみ 4mm、損傷度Ⅲは載荷時たわみ 6mm・除荷時たわみ 3mm とした。所定のたわみに達した時点で載荷を中断し、除荷した状態で輪荷重走行試験機に床版試験体を設置したまま、炭素繊維シートを接着し 7 日以上室温養生した後、載荷試験を再開した。養生中の載荷の影響をみるために No12 供試体 S39+2×2S-D3-2 のみは、シート接着の翌日から 69 kN の荷重で輪荷重を走行させながら養生した。養生終了後、157kN の荷重で載荷を開始し、4 万回載荷するごとに荷重を 19.6kN ずつ増加させる階段載荷により、破壊まで試験を行い、載荷中に適時たわみ、鉄筋および炭素繊維シートのひずみ、ひび割れ幅を観測した。No11 供試体 S39+2×2S-D2-2 は補強後、196kN の一定荷重で 500 万回の載荷試験を行った。No2～No5 供試体は初期損傷度をⅡとし、高強度型の炭素繊維シートを用い積層数を主鉄筋方向、配力鉄筋方向ともに 1 層から 4 層まで変化させたもので、同様に No6, 7 供試体は高弾性型の炭素繊維シートを用い積層数をそれぞれ 1、2 層とし補強量の影響について検討したものである。No9、No10 供試体は、初期損傷度をⅢとし高強度型炭素繊維シートを主鉄筋方向、配力鉄筋方向に各 2 層接着したもので、No12 は養生中に載荷を行っている。No8 供試体 H8 は、平成 8 年道路橋示方書に準じて設計製作された鉄筋コンクリート床版試験体で、補強を行わずに階段載荷を行った。

付属表-4.2.1 試験要因

No.	記号	炭素繊維シートタイプ	積層数 (主鉄筋方向× 配力鉄筋方向)	試験 年度	初期 損傷度	載荷 方法	コンクリート圧 縮強度 (N/mm ²)
1	S39-1	—	—	H8		一定	26.9
2	S39+1×1S-D2	高強度	1層×1層	H8	Ⅱ	階段	34.0
3	S39+2×2S-D2	高強度	2層×2層	H8	Ⅱ	階段	29.0
4	S39+3×3S-D2	高強度	3層×3層	H9	Ⅱ	階段	31.9
5	S39+4×4S-D2	高強度	4層×4層	H8	Ⅱ	階段	26.4
6	S39+1×1E-D2	高弾性	1層×1層	H9	Ⅱ	階段	28.5
7	S39+2×2E-D2	高弾性	2層×2層	H9	Ⅱ	階段	23.6
8 ^{*1}	H8	—	—	—		階段	27.6
9	S39+2×2S-D3	高強度	2層×2層	H10	Ⅲ	階段	29.2
10	S39+2×2S-D3-2	高強度	2層×2層	H10	Ⅲ	養生中載荷 階段	28.4
11	S39+2×2S-D2-2	高強度	2層×2層	H10	Ⅱ	一定	34.1

*1 他の試験データから引用



付属表-4.2.2 炭素繊維シートの物理的性質

繊維種類	繊維目付量(g/m ²)	弾性係数(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)
高強度型炭素繊維シート	300	2.45×10^5	3400
高弾性型炭素繊維シート	300	6.4×10^5	1900

4.3 試験結果と考察

4.3.1 破壊荷重と破壊回数

各供試体の、破壊時荷重および破壊回数を付属表-4.3.1 および付属図-4.3.1 に示す。いずれの供試体も床版コンクリートの押し抜きせん断により破壊した。炭素繊維シートで補強した供試体では床版下面のコンクリートの陥没部の外周に炭素繊維シートとコンクリートの剥離を伴って破壊したが、試験後に床版コンクリートを切斷して断面観察を行なったところ、剥離部の炭素繊維シートにコンクリートが付着しており、接着部のコンクリート表層内が破壊しており、接着剤の内部または接着剤とコンクリートの界面での剥離はなかった。

S39 供試体は、57kN・27392 回で破壊したが、S39 道示床版を炭素繊維シートで補強した供試体はいずれもこれより高い荷重、多い走行回数で破壊し、S39 道示床版に初期損傷度Ⅱの損傷を与えた後に炭素繊維シートで補強することで鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性が大きく向上することが確認された。炭素繊維シートで補強した供試体では、高強度型炭素繊維シート 2×2 層補強した S39+2×2S-D2 が最も高い疲労耐久性を示したが、階段載荷による試験結果では、H8 床版（破壊荷重 274kN、破壊回数 255649 回）より低い荷重、少ない走行回数で破壊した。破壊回数は、損傷度Ⅱとしたもので比較すると $H8 > S39+2 \times 2S-D2 > S39+3 \times 3S-D2 > S39+1 \times 1E-D2 > S39+2 \times 2E-D2 > S39+4 \times 4S-D2 > S39+1 \times 1S-D2 > S39$ となった。ここで S39 と H8 は初期損傷を与えず健全な状態から試験を行なったものである。炭素繊維シートの補強量（引張剛性）についてみると S39+1×1S-D2 から S39+2×2S-D2 までは炭素繊維シートの補強量が増えると疲労耐久性が高くなり、S39+2×2S-D2 をピークとしてこれより補強量が増えると逆に破壊荷重、破壊回数ともに低下する傾向が見られた。一定荷重 196kN として試験を行った S39+2×2S-D2-2 は、500 万回載荷しても破壊しなかった。

補強前の初期損傷度をⅢとした S39+2×2S-D3 は、補強前の損傷度をⅡとして同じ仕様で炭素繊維シート補強をした S39+2×2S-D2 より 1 段階低い荷重 235kN で若干少ない載荷回数 197981 回で破壊した。S39+2×2S-D2 が荷重を 235kN から 255kN に増加させた直後に破壊しており、階段載荷による輪荷重走行試験の結果では、両者の疲労耐久性に大きな差異はないものと考えられる。

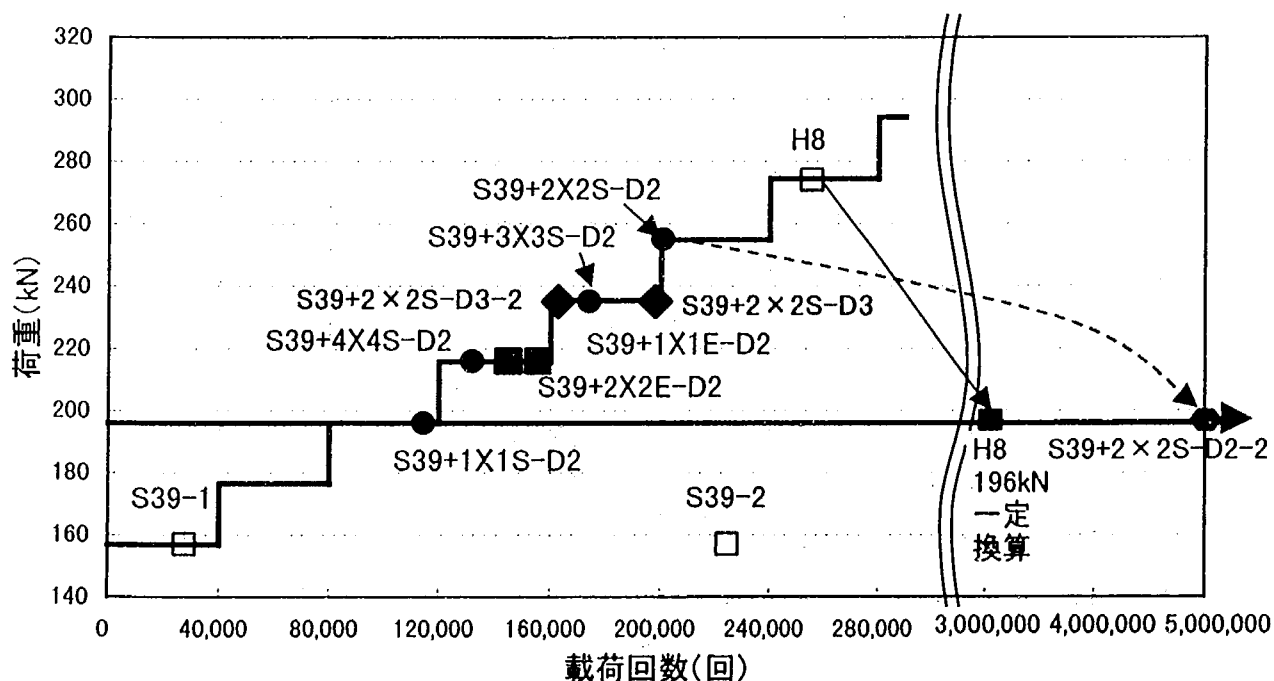
養生中載荷を行った S39+2×2S-D3-2 は、養生中載荷を行わなかった S39+2×2S-D3 と同じ荷重 235kN で破壊し、破壊回数は 162569 回と養生中載荷を行わなかった S39+2×2S-D3 より若干少なくなった。養生中載荷の間においても、炭素繊維シートの剥離やしわ、浮きの発生、破断などの変状は認められず、本試験の結果では養生中の載荷は、補強床版の疲労耐久性に悪影響を及ぼさないと考えられる。

付属表-4.3.1 各供試体の破壊回数および破壊時荷重

供試体名	炭素繊維シートタイプ	初期損傷度	積層数 主鉄筋方向×配力鉄筋方向	CFRPの引張剛性 N/m幅	CFRPの曲げ剛性 N・m ² /m幅	初期載荷回数	補強後破壊までの載荷回数	破壊時荷重 (kN)
S39-1	なし	OK	なし			(5005)	27392*	157
S39+1X1S-D2	高強度	II	1×1	4.15E+07	5.18	16010	114496	196
S39+2X2S-D2	高強度	II	2×2	8.30E+07	63.34	28014	200626	255
S39+3X3S-D2	高強度	II	3×3	1.25E+08	247.42	16010	173860	235
S39+4X4S-D2	高強度	II	4×4	1.66E+08	614.41	3511	132070	216
S39+1X1E-D2	高弾性	II	1×1	9.41E+07	4.63	50304	155210	216
S39+2X2E-D2	高弾性	II	2×2	1.88E+08	132.85	3512	144643	216
H8	なし	OK	なし				255649*	274
S39+2X2S-D3	高強度	III	2×2	8.30E+07	63.34	112010	197981	235
S39+2X2S-D3-2	高強度	III	2×2	8.30E+07	63.34	2808	162569	235
S39+2X2S-D2-2	高強度	II	2×2	8.30E+07	63.34	700011	500万回 未破壊	196

() S39 無補強 RC 床版では、157kN 一定荷重で損傷度 II に達するまでの載荷回数

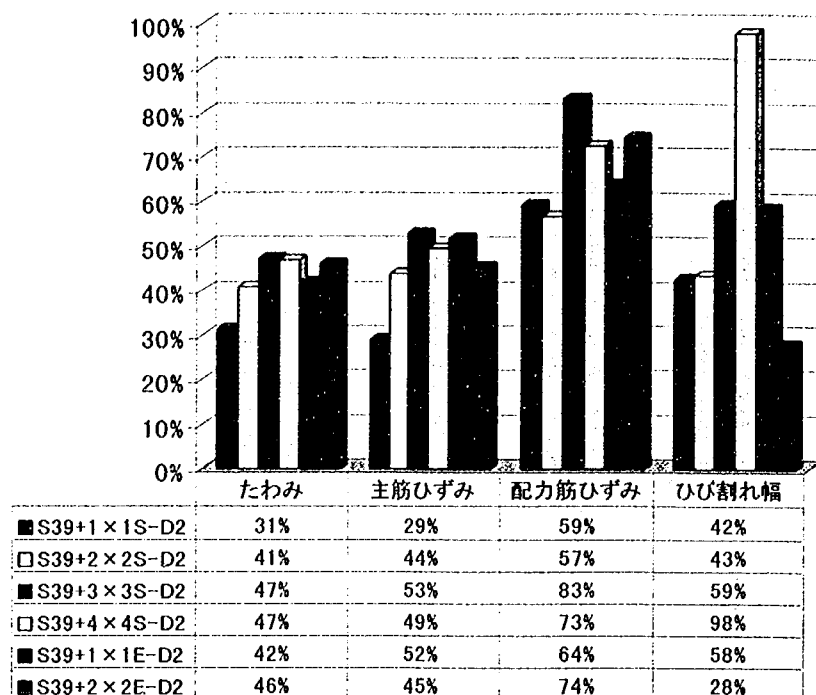
* 無補強床版の補強後破壊回数は、載荷開始からの破壊回数



付属図-4.3.1 疲労試験結果

4.3.2 補強前後のたわみ、ひずみおよびひび割れ幅

床版中央の活荷重たわみ、鉄筋の活荷重ひずみおよびひびわれ開閉量を初期載荷終了時の無補強時と値と補強後の値を比較して求めたそれぞれの低減率を付属図-4.3.2 に示す。それぞれの低減率は、概ね補強材の引張剛性 (EA) が大きくなるほど高くなり、静的な補強効果は補強材の引張剛性 EA に依存していることが分かる。



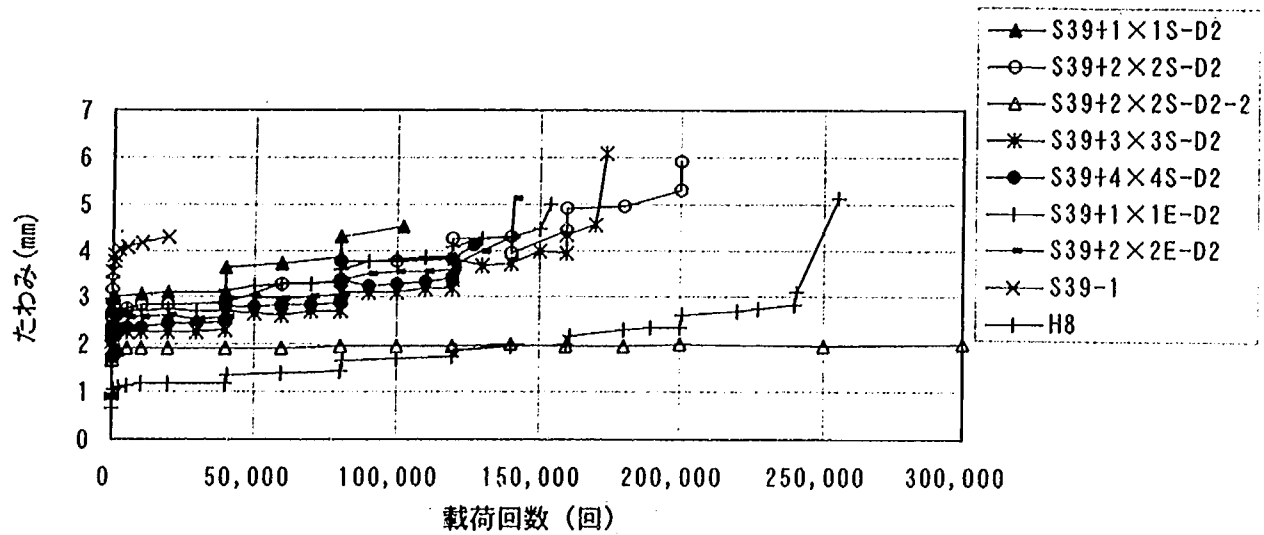
付属図-4.3.2 炭素繊維シートによるたわみ、ひずみ、ひび割れ幅の低減

4.3.3 補強後のたわみ、ひずみ、ひび割れ幅

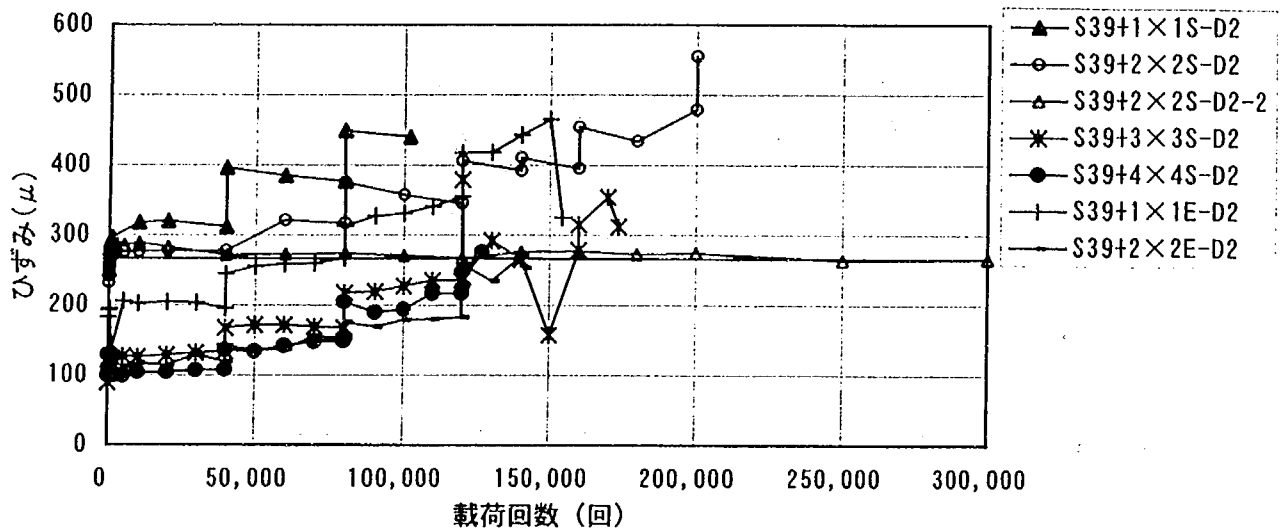
初期損傷度をⅡとした各供試体の載荷回数と床版中央の活荷重たわみの関係を付属図-4.3.3 に示す。床版の中央のたわみは載荷初期から概ね破壊の一段階前の荷重段階までは、補強材の引張剛性の大きなものほど小さな値を示している。破壊直前を除いて、補強直後と同様に炭素繊維シートのたわみの低減効果は炭素繊維シートの引張剛性の大きなもの程大きかった。また荷重を 196kN 一定とした S39+2×2S-D2-2 は、載荷初期から床版中央での活荷重たわみの増加が少なく、安定していた。

付属図-4.3.4 には、床版中央の配力鉄筋のひずみと載荷回数の関係を示す。配力鉄筋のひずみも、たわみと同様に、炭素繊維シートの引張剛性の大きな供試体ほど低い値を示している。

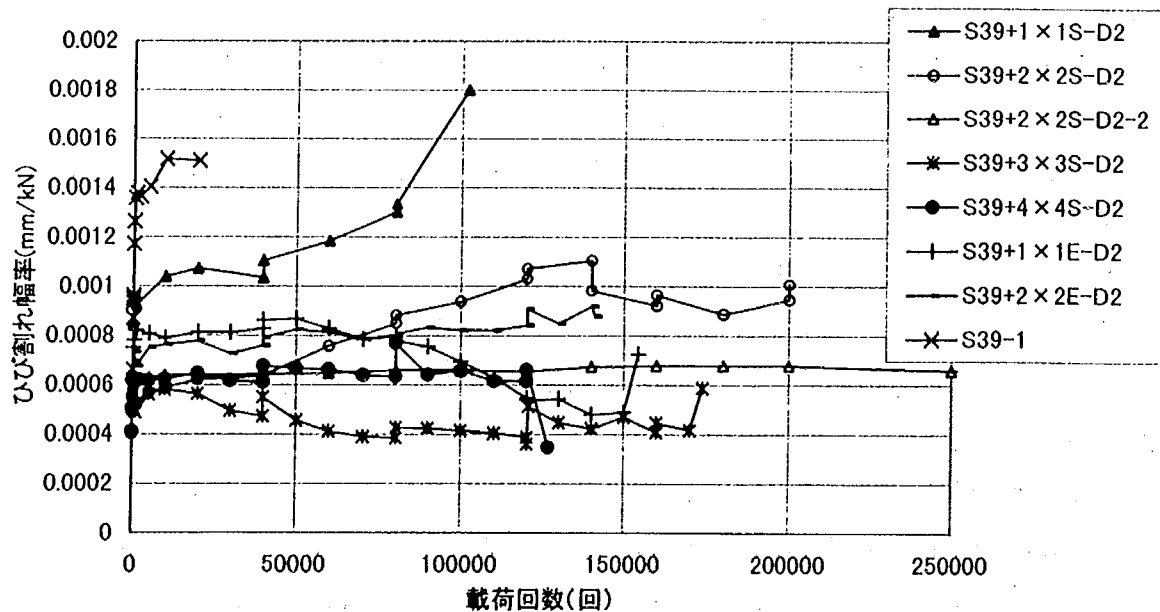
活荷重によりひび割れの開閉幅を荷重で除した値をひび割れ幅率¹⁾として、ひび割れ幅率と載荷回数の関係を付属図-4.3.5 に示す。無補強の S39 および補強量 (炭素繊維シートの引張剛性) の最も少ない S39+1×1S-D2 では、他の供試体に比べてひび割れ幅率の増加が顕著であり、繰返し載荷によりひび割れの開閉幅が大きくなり損傷が進行していることがわかる。S39+2×2S-D2 では荷重が増加するとひび割れ幅率も緩やかに増加しているが、荷重を 196kN 一定とした S39+2×2S-D2-2 ではひび割れ幅の変化がほとんどない。



付属図-4.3.3 補強後 床版中央の活荷重たわみ



付属図-4.3.4 補強後 床版中央の配力鉄筋のひずみ

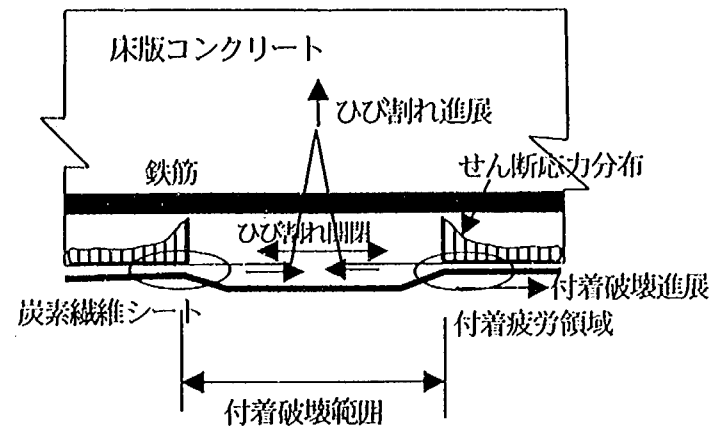


付属図-4.3.5 ひび割れ幅率の変化

S39+2×2S-D2 より補強量の大きな S39+3×3S-D2, S39+4×4S-D2, S39+1×1E-D2, S39+2×2E-D2 では、ひび割れ幅率の顕著な増加傾向はない。

4.3.4 炭素繊維シート補強床版の疲労破壊メカニズムの検討

付属図-4.3.6、付属図-4.3.7 には共同研究報告書(Ⅰ)で述べた付着疲労の概念図と補強量と疲労寿命の関係の概念図を示す。炭素繊維シートで補強した RC 床版は、コンクリートに炭素繊維シートを接着した複合構造であり、RC 床版自体の疲労破壊メカニズムと同時に炭素繊維シートと床版コンクリートの付着部の疲労破壊メカニズムについても考慮する必要がある。RC 床版下面のひび割れを跨ぐ炭素繊維シートとコンクリートの付着領域には高いせん断応力(付着応力)が作用し、ひび割れ近傍で炭素繊維シートとコンクリートの付着疲労破壊が進行するものと考えられる(付属図-4.3.6)。

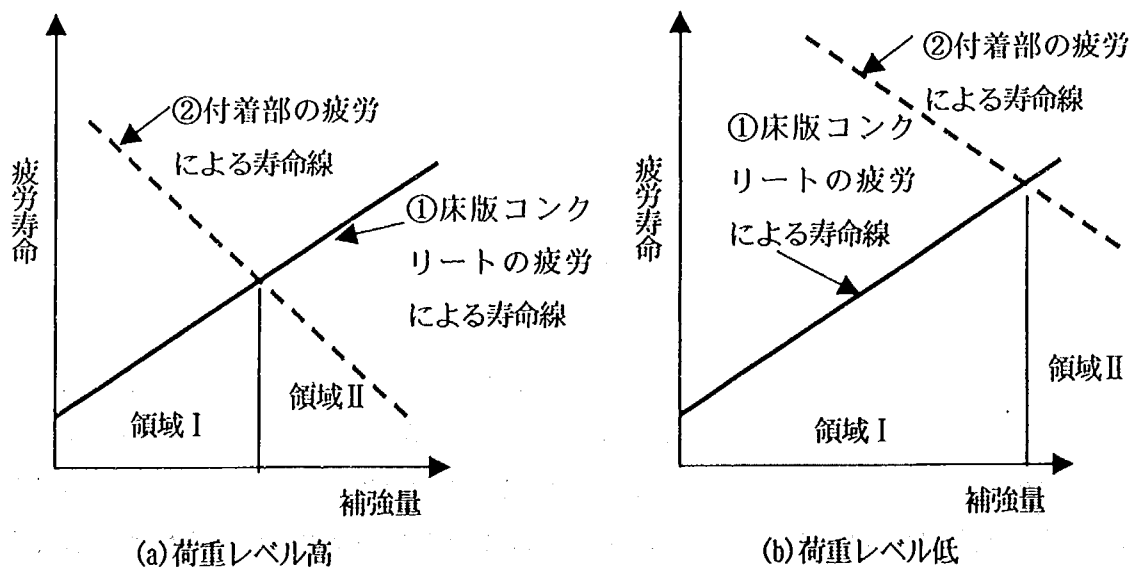


付属図-4.3.6 炭素繊維シート補強床版の疲労メカニズムの概念

炭素繊維シートで補強した RC 床版の疲労破壊は、次の二つの要因に依存すると考えられる。

- ① RC 床版自体(コンクリート)の疲労
- ② コンクリートと炭素繊維シートの付着部の疲労

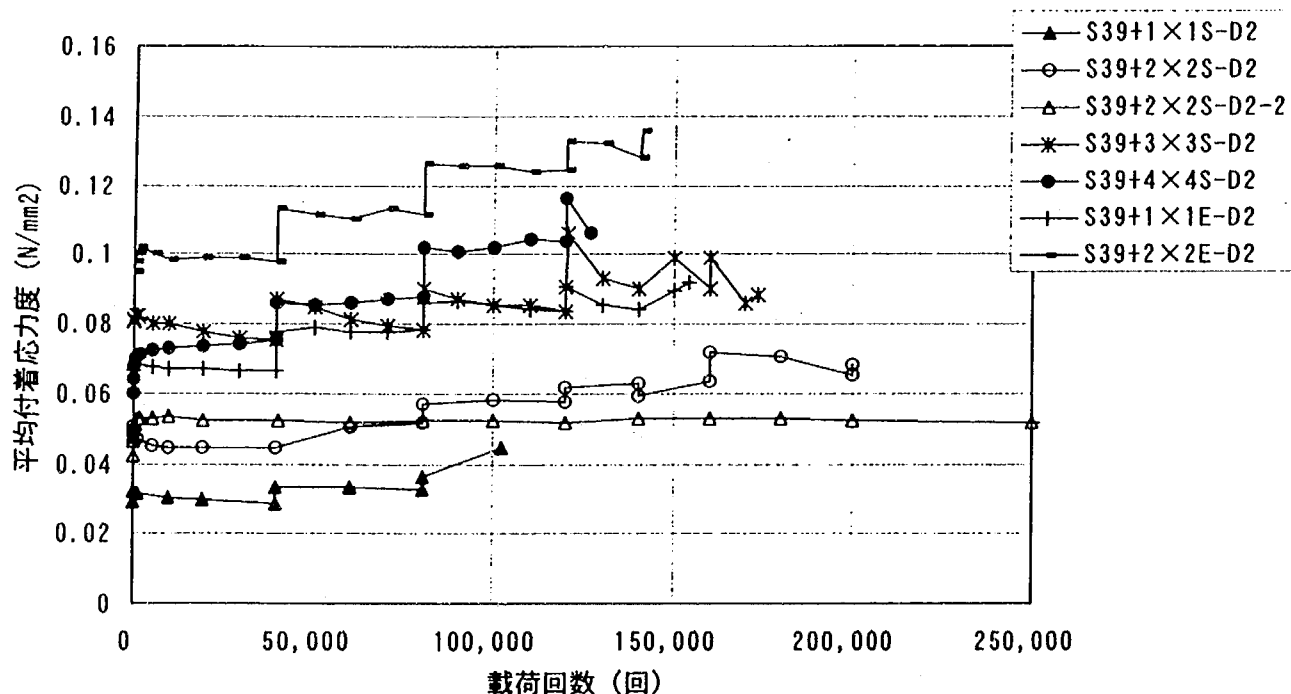
付属図-4.3.7 は、一定荷重下での RC 床版の疲労寿命と補強量との関係を、(a)荷重レベルが高い場合と(b)低い場合に分けて概念的に示したものである。荷重レベルが高い場合には、①の RC 床版自体の疲労に加え②の付着部の疲労の影響も考えられるため、①の要因で決まる寿命と補強量の関係を実線で示し、②の要因で決まる寿命と補強量の関係を破線で示す。荷重レベルが低い場合には、②の要因の影響は少なく、①の要因が主因と考えられる。



付属図- 4.3.7 補強量と疲労寿命の概念

補強量の少ない場合や、荷重が低く付着応力度の低い場合では、①の RC 床版自体の疲労が支配的であり、通常の RC 床版と同様にひび割れの動きにより床版コンクリートが疲労し、この領域Ⅰでは補強量が增大するのに伴い疲労寿命も増加する。補強量の高い領域や荷重が高く付着応力度が高い領域Ⅱでは、②の付着部の疲労破壊が支配的であり、この範囲では補強量が増加するのに伴い付着応力度が高くなり付着部の疲労破壊が進行し、これに伴いひび割れの拘束効果も低減し床版コンクリートの疲労も進展すると考えられる。

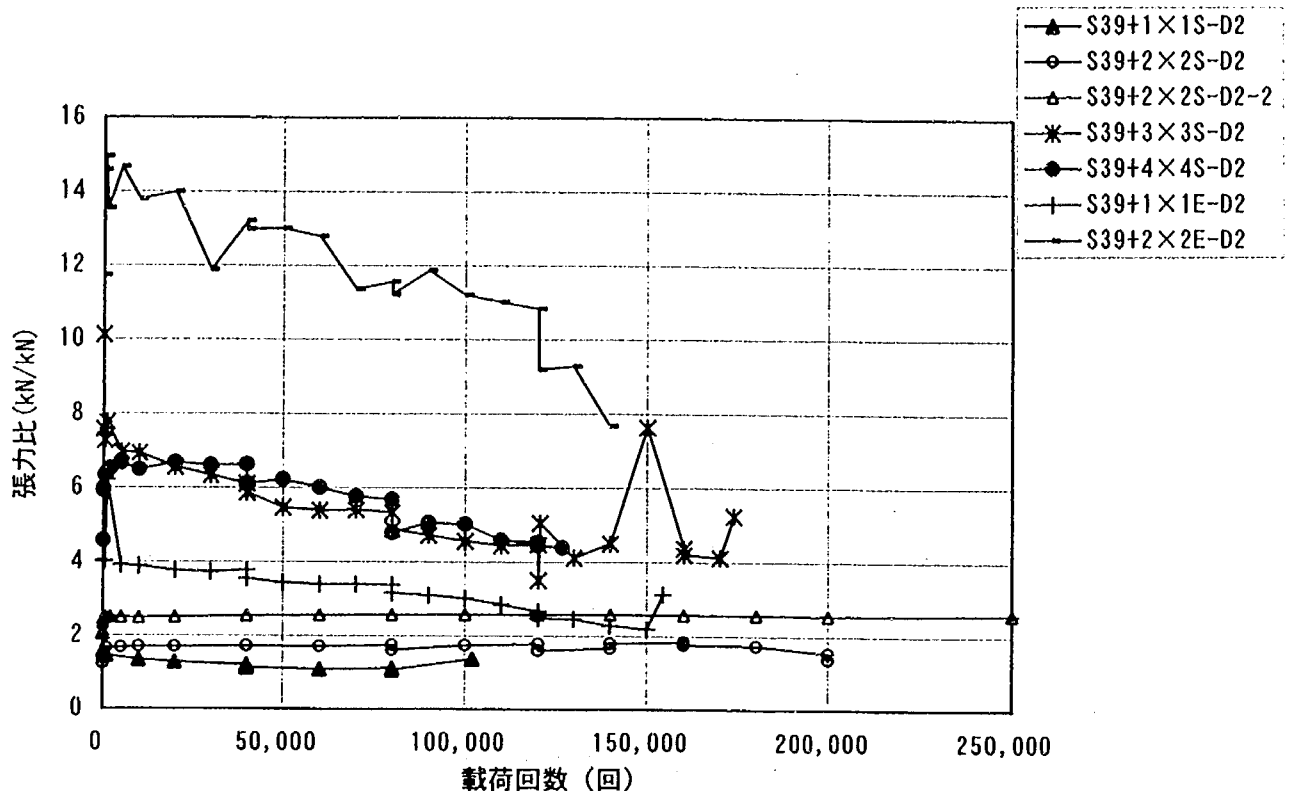
炭素繊維シートのひずみの測定値から求めた炭素繊維シートの張力より算定した平均付着応力度と載荷回数の関係を付属図-4.3.8 に示す。平均付着応力度は、S39+2×2S-D2 より補強量が大いな供試体では荷重 156kN 時に 0.06N/mm² 程度以上、載荷中の最大値は 0.1 N/mm² 程度と S39+1×1S-D2 や S39+2×2S-D2 より大いなる値を示しており、炭素繊維シートの補強量が大いいと炭素繊維シートとコンクリートの平均付着応力度も大いくなる傾向にある。荷重を 196kN と一定とした S39+2×2S-D2-2 は、載荷初期から約 0.052N/mm² でほぼ一定の値を示していた。補強量が同じ S39+2×2S-D2 では、階段載荷をしているために荷重の大いくなった載荷回数 80,000 回以降では、平均付着応力度は荷重一定とした S39+2×2S-D2-2 より大いくなり、最大値は 0.072N/mm² を示した。



付属図-4.3.8 主筋方向の炭素繊維シートとコンクリートの平均付着応力度 (活荷重時)

付属図-4.3.9 に、配筋鉄筋方向の鉄筋と炭素繊維シートが負担している引張力の比 (以下、張力比) と載荷回数の関係を示す。炭素繊維シートの付着破壊が進行すると炭素繊維シートの引張力の負担割合が減少し、この張力比が低下すると考えられる。補強量の少ない S39+1×1S-D2 と S39+2×2S-D2 では、載荷初期から破壊前まで張力比はほぼ一定の値で安定している。S39+2×2S-D2 より補強量の大いなる供試体では、載荷初

期は概ね補強量の大きなものほど高い張力比を示しているが、いずれも載荷回数が増加すると張力比は減少している。これは、炭素繊維シートの補強量が多いほど初期の炭素繊維シートの負担する引張力は大きくなるが、コンクリートとの間にはより大きな付着応力度が作用するために階段載荷による高い荷重下では付着破壊が徐々に進行しているものと推測される。



付属図—4.3.9 配力鉄筋と配力筋方向の炭素繊維シートの張力比（活荷重時）

本実験では、階段載荷により高い荷重で実験を行っており、S39+2×2S-D2 を境界としてこれより CFRP の補強量の少ない S39+1×1S-D2 は①の領域、これより補強量の多い S39+3×3S-D2, S39+4×4S-D2, S39+1×1E-D2, S39+2×2E-D2 は②の領域に相当するものと考えられる。

共同研究報告書 (I) ¹⁾6.8.2 における炭素繊維シートと鉄筋の荷重分担の検討では、補強量の多いものほど高い荷重レベルでは付着破壊の進行が顕著である傾向が見られた。階段載荷では、供試体によって異なるが荷重が 216kN を超えるような範囲では炭素繊維シートの張力比が低下する傾向が顕著であったのに対し、一定載荷の場合では階段載荷に比べて炭素繊維シートの荷重分担の低下が非常に緩やかであった。このように階段載荷による高い荷重による炭素繊維シートと床版コンクリートの付着疲労破壊が影響していたものと考えられる。階段載荷による輪荷重走行試験では、炭素繊維シートで補強した供試体はいずれも、H8 供試体への破壊荷重および回数に至らなかったが、これは炭素繊維シート接着工法ではその補強効果がコンクリートと炭素繊維シートの付着性能に依存しているためと考えられる。

付着破壊の影響が顕著でない荷重 196kN の一定載荷とした S39+2×2S-D2-2 と階段載荷による平成 8 年道示

に準じて設計製作した H8 供試体の疲労耐久性について比較する²⁾。H8 供試体は、階段載荷により載荷荷重 274kN、載荷回数 255649 回で破壊した。RC 床版にはマイナー則が適用できることが松井らにより報告されている。松井らの研究によると RC 床版の輪荷重走行試験による破壊回数は、荷重の 12.76 乗に比例する³⁾。これより階段載荷の破壊回数を、196kN の一定荷重に換算すると約 290 万回になる²⁾。一方、S39 床版を炭素繊維シートで補強して一定荷重 196kN で載荷した S39+2×2 S-D2-2 はこの 290 万回を大きく上回る 500 万回の載荷でも炭素繊維シートの部分的な付着切れはみられるものの破壊しなかった(付属図-4.3.1 参照)。また載荷回数が増加しても、活荷重たわみやひずみに大きな変化はなく、車両の走行に影響を与えるような変状や耐荷力の不足は生じていない。したがって、昭和 39 年道示に準じて設計製作し、初期損傷を与えた後に炭素繊維シート 2×2 層で補強した RC 床版は、平成 8 年道示に準じて設計製作した RC 床版と同等の疲労耐久性を持つと考えられる。

炭素繊維シートの引張剛性 EA がほぼ同じで炭素繊維のヤング係数が異なる高強度型炭素繊維シートの S39+2×2 S-D2 と高弾性型炭素繊維シートの S39+1×1 E-D2 では、S39+1×1 E-D2 の方が低い荷重、少ない載荷回数で破壊したが、両者のたわみやひび割れの低減効果は同等であり、S39+1×1 E-D2 の方が高い付着応力度を生じていたことから、S39+1×1 E-D2 は階段載荷による高い荷重で付着疲労破壊が支配的な要因である領域 II で破壊したものと推定される。したがって付着疲労破壊が支配的とならない荷重の高くない段階 (S39+2×2 S-D2-2 の一定荷重 196kN) では、高弾性型炭素繊維シートで補強した S39+1×1 E-D2 も高強度型炭素繊維シートで補強した S39+2×2 S-D2 と同等程度の疲労耐久性を保有するものと推定される。

4.4 まとめ

(1) 昭和 39 年鋼道路橋設計示方書に準じて設計された RC 床版を、炭素繊維シートで補強することにより疲労耐久性が向上することが確認された。主鉄筋方向・配力鉄筋方向に各 2 層の高強度型炭素繊維シートで補強した RC 床版 (S39 道示床版) の荷重を一定とした輪荷重走行試験の結果、H8 道示床版の階段載荷による結果をマイナー則により一定荷重に換算したものと同等の疲労耐久性を示し、本工法が損傷を受けた既設 RC 床版の補強工法として十分な効果を有していることが確認された。この炭素繊維シートの補強量は、平成 8 年道路橋示方書に準じて鉄筋の許容応力度を規準に設計された積層数よりも少ない積層数であるが、十分な疲労耐久性を有する結果であった。

(2) 炭素繊維シートの引張剛性 ($E \cdot A$) の増加に伴い、たわみ、鉄筋のひずみおよびひび割れの開閉幅は小さくなり、ひび割れの拘束や、たわみや鉄筋ひずみなどの低減効果は、炭素繊維シートの引張剛性 ($E \cdot A$) に依存する。しかしながら、階段載荷による輪荷重走行試験の結果では炭素繊維シートの引張剛性 ($E \cdot A$) がある値を超えると、疲労耐久性は補強量の増加とともに減少する傾向を示した。階段載荷の大きな荷重を受ける場合には、補強量が多くなるとシートが受け持つ引張力が大きくなり、コンクリートと炭素繊維シートの付着応力度が大きくなり付着疲労破壊の影響を受けていることが考えられる。

(3) 階段載荷は、各種床版の疲労耐久性を相対的に比較することが可能であるが、今回の一定載荷試験との比較により、コンクリートと炭素繊維シートの付着性能が重要な本工法では、実際の供用状態と比較して、高い載荷荷重で試験を行なう場合、補強効果が過小に評価されることになるため、注意が必要である。

(4) 炭素繊維シート補強前の初期損傷度(ⅡおよびⅢ)を変化させた結果、階段載荷による疲労耐久性に差異は見られなかった。従って炭素繊維シート接着工法は、損傷度Ⅲおよび損傷度Ⅱに達した直後の鉄筋コンクリート床版に対して有効であると考えられる。損傷度Ⅱ～Ⅰの初期損傷を与えた床版では確認実験を行っておらず、また鉄筋コンクリート床版のせん断耐力に対する補強効果は少ないと考えられるので、損傷度Ⅱ～Ⅰの床版への適用についてはさらに検討する必要がある。

(5) 炭素繊維シートで補強した後、養生中から載荷を行なった RC 床板の階段載荷による輪荷重走行試験を行なった。養生中の載荷により、炭素繊維シートの付着切れや破断などの損傷はせず、養生後の階段載荷による輪荷重走行試験では、養生中載荷を行なわなかった供試体と疲労耐久性に大きな差は無かった。

参考文献

- 1) 共同研究報告書 第 220 号「コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(Ⅰ)ー炭素繊維シート接着工法によるコンクリート部材の補強効果に関する研究ー」, 平成 11 年 3 月, 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
- 2) 共同研究報告書 第 230 号「コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(Ⅱ)ー炭素繊維シート接着工法によるコンクリート部材の補強効果に関する研究ー」, 平成 11 年 10 月, 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
- 3) 松井繁之、庄中憲、石井孝男、国原博司: 23 年間供用された鋼道路橋 RC 床版の疲労試験、土木学会第 48 回年次学術講演会、1993

付属資料5 コンクリートげたに関する評価試験結果の概要

5.1 CFRPシートの付着試験結果

5.1.1 試験の目的

炭素繊維シート接着工法で曲げを受けるコンクリート部材を補強する場合、部材軸方向に貼り付けられて引張力が作用する炭素繊維シートとコンクリートとの付着特性が問題となる。本留研究では、コンクリートに貼付けた炭素繊維シートの付着特性を確認することを目的として、繰返し載荷による疲労作用を受ける前後の試験体を対象として静的引張試験を実施した。試験の詳細は、「共同研究報告書(Ⅰ)、第Ⅰ編 炭素繊維シートの材料特性に関する研究、3. 付着試験」に譲ることとし、ここでは、試験方法および試験結果の概要、および、付着応力度に関する考察についてまとめた。

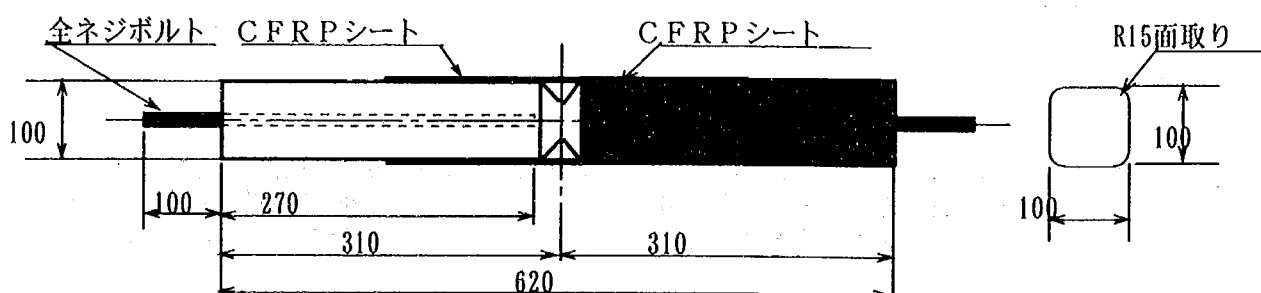
5.1.2 付着試験方法

試験変数は、炭素繊維シートの種類、コンクリート圧縮強度、および付着長さである。

試験体は、付属図-5.1.1 に示すように、断面が100mm角、長さが620mmで、試験体中央4面の部材軸直角方向に幅と深さが20mmのV型ノッチを有するコンクリートブロックの部材軸方向両面に、材料試験と同様、繊維目付量300g/m²の炭素繊維シート1枚を試験変数に応じた所定の長さで貼り付けたものである。

炭素繊維シートの種類は、引張強度とヤング係数との分類で性能上両極に位置する高強度型(メーカー公称 $E_{cf}=230\text{kN/mm}^2$ 、 $\sigma_{cfuk}=3.4\text{kN/mm}^2$)および高弾性型(メーカー公称 $E_{cf}=640\text{kN/mm}^2$ 、 $\sigma_{cfuk}=1.9\text{kN/mm}^2$)の2種類を選定した。コンクリート圧縮強度 σ_{ck} は、鉄筋コンクリート部材で用いられることが多い 4.5N/mm^2 、古い建設年またはコンクリート部材表面の劣化を意味する 14.7N/mm^2 、および場所打ちプレストレストコンクリート部材を意味する 34.3N/mm^2 を対象とし、また、炭素繊維シートの付着長さ L_{cf} は、付着切れ発生の有無、およびCFRPシートのひずみ分布を調査する目的で $L_{cf}=10$ 、20、30cmの3種とした。

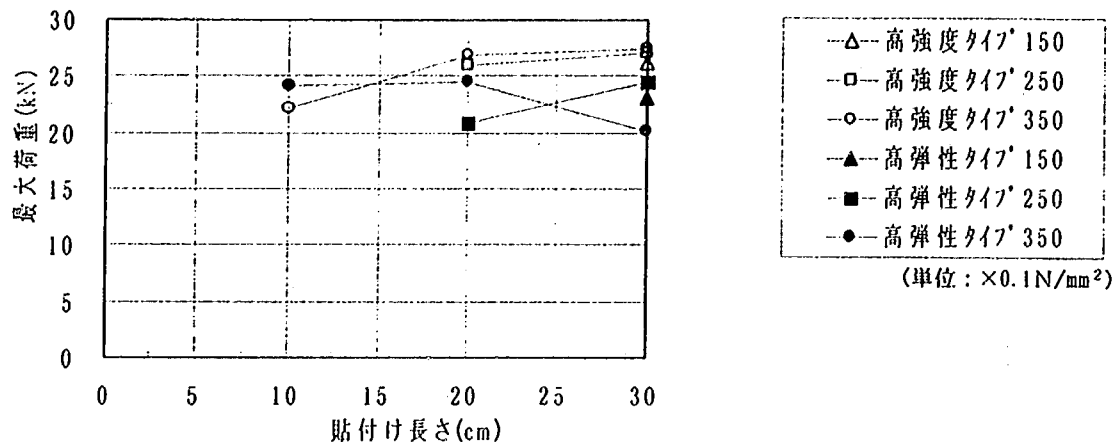
繰返し載荷重は、けた等、コンクリート部材の引張応力が発生する面に炭素繊維シートを貼り付けたとき、TL-20またはTL-25等の設計荷重作用時に既設の軸方向引張補強鉄筋に発生するひずみが $1,000\mu$ 程度であることから、CFRPシートに生じる最大応力 σ_{cfmax} を、高強度型で 245N/mm^2 ($2,500\text{kgf/mm}^2$)、高弾性型で 588N/mm^2 ($6,000\text{kgf/mm}^2$)程度と想定し、それぞれ40.9N(417.5kgf)、84.1N(858kgf)を最大荷重とし、応力比0.1、載荷速度2Hzで200万回載荷とした。



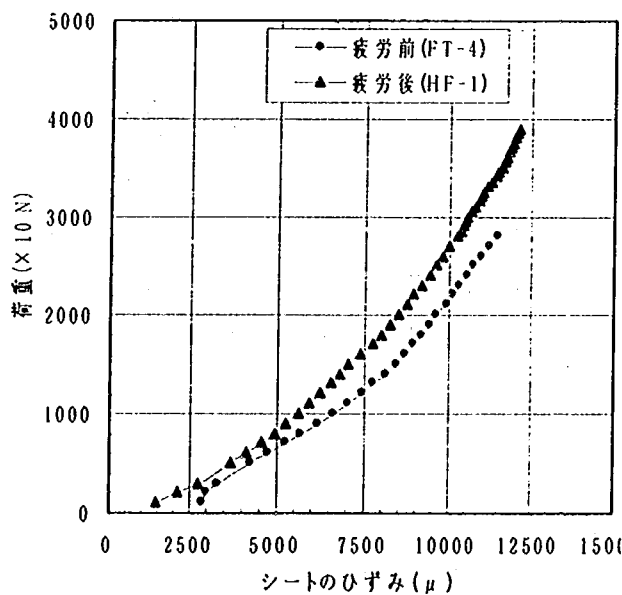
付属図-5.1.1 付着試験用試験体の形状 (単位:mm)

5.1.3 付着試験結果

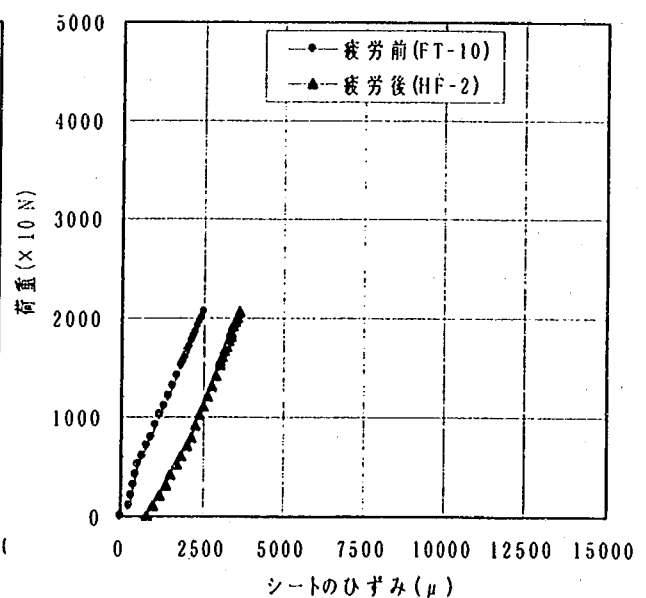
付着試験の全結果は 付属表-5.1.1 に、また、試験体のコンクリート圧縮強度と貼付け長さ、および最大荷重の関係は 付属図-5.1.2 に、そして、高強度型、高弾性型それぞれの疲労前後の静的載荷試験における荷重とCFRPシートひずみとの関係の代表例は、付属図-5.1.3 および 付属図-5.1.4 に、それぞれ示す通りである。



付属図-5.1.2 貼付け長さ、コンクリート圧縮強度と最大荷重の関係



付属図-5.1.3 付着試験体の疲労前後の CFRPシートひずみと荷重との関係
---高強度型、定着長さ30cm



付属図-5.1.4 付着試験体の疲労前後の CFRPシートひずみと荷重との関係
---高弾性型、定着長さ30cm

付属表-5.1.1 付着試験における最大荷重と平均付着応力度

試験体 No.	CFRP シート 型	付着 長さ cm	貼付 幅 cm	コンクリート圧縮強度		最大荷重 kN	平均付着 応力度 N/mm ²	破壊状況	備 考
				設計強度	実強度				
				N/mm ²					
FT-1	高 強 度	10	5	34.3	34.2	22.11	2.21	付着破壊	
FT-2		20	5			26.99	1.35	付着破壊	
FT-4		30	5			27.46	0.91	付着破壊	
FT-4再		30	5			26.96	0.90	付着破壊	
FT-3		20	5	24.5	22.6	26.04	1.30	付着破壊	
FT-5		30	5			27.00	0.90	付着破壊	
FT-6		30	5	14.7	15.3	26.13	0.87	付着破壊	
HF-1		30	5	34.3	34.7	38.66	1.29	付着破壊	疲労後
FT-7	高 弾 性	10	5	34.3	34.2	24.12	2.41	シート破断	
FT-8		20	5			24.55	1.23	シート破断	
FT-10		30	5			20.10	0.67	シート破断	
FT-9		20	5	24.5	22.6	20.92	1.05	シート破断	
FT-11		30	5			24.53	0.82	シート破断	
FT-12		30	5	14.7	15.3	23.03	0.77	シート破断	
HF-2		30	5	34.3	34.7	20.21	0.67	シート破断	疲労後

注1) CFRPシートの平均付着応力度は、最大荷重を付着面積で割って求めた値である。

これらの結果より、炭素繊維シートとコンクリートとの付着特性を次のように確認することができた。

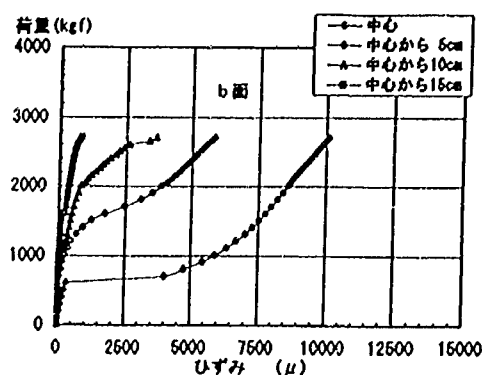
- ① 試験体の破壊は、高強度型炭素繊維シートを貼付けた場合が付着長さにかかわらず全て付着破壊であり、高弾性型炭素繊維シートを貼付けた場合が付着着長さにかかわらず全てシート破断であった。
- ② 付着特性に及ぼすコンクリート強度の影響は、高強度型炭素繊維シートではコンクリート強度の高いほうがやや高い付着性をみせた。一方、高弾性型炭素繊維シートでは同様な傾向が見られるもののその影響度が小さかった。
- ③ 疲労後の静的試験結果は、高強度型および高弾性型の両炭素繊維シートとも、疲労前の結果に比べて、疲労による付着性能低下等の影響はなく、破壊性状にも変化が見られなかった。

5.1.4 付着試験結果の考察

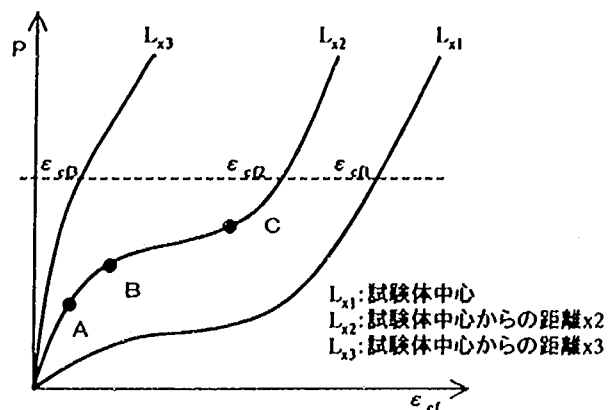
(1) 引張荷重下でのCFRPシート各部ひずみの特徴

付着試験によって得られた引張荷重 P とCFRPシート各点 x のひずみ $\varepsilon_{cf}(x)$ の関係は、「共同研究報告書(I)、第I編 炭素繊維シートの材料特性に関する研究、図 3.9(4) ~ 図 3.9(12)」の代表例として 付属図—5.1.5 に示すように、多くの特徴を表している。

つまり、実験によって得られた P と $\varepsilon_{cf}(x)$ の関係を参考としながら概念的に示した 付属図—5.1.6 の曲線 Lx2 では、その各部分が曲線の変曲点A、B、C、を境界として、



付属図-5.1.5 試験体FT-5の $P - \epsilon_{cf}$ 関係図



付属図-5.1.6 $P - \epsilon_{cf}$ 関係概念図

- ① O～A区間は、CFRPシートが試験体のコンクリート表面に完全に付着しており、コンクリートとの複合体としてひずみが発生している状態
- ② A～B区間は、CFRPシートとコンクリート表面との間の付着切れが部分的に発生し進行している状態
- ③ B～C区間は、付着切れがCFRPシート全幅に及び、引張荷重をCFRPシート全幅が負担しながら、はく離が部分的に発生し進行している状態
- ④ C以降の区間は、はく離がCFRPシートのほぼ全幅に亘って進行したものの、CFRPシートとコンクリート表面との間に摩擦力が働いている状態

にあることが考えられる。さらに、曲線 $Lx1$ 、 $Lx2$ 、 $Lx3$ の間には、

- ⑤ 曲線は、引張荷重作用位置からCFRPシートのひずみ測定点が遠くなるに従って、縦軸へ近づくと共に変曲点A、B、C、が縦軸上方へ移動しており、付着切れ発生とはく離の進行が遅れること
- ⑥ 各曲線は、CFRPシートのはく離が完全に発生した状態であっても、はく離破壊直前まで引張荷重作用位置に近いひずみ測定点の曲線と重なることがないことから、各測定点間には摩擦力の存在が考えられること

を見ることができる。

(2) CFRPシートの付着切れ発生ひずみの推定

P と $\epsilon_{cf}(x)$ の関係を示した 付属図-5.1.6 における曲線の変曲点Aは、CFRPシートがコンクリート表面から付着切れを起こし始めた点であるといえる。

高強度型炭素繊維シートで作製した試験体 FT-1～FT-6、および、高弾性型炭素繊維シートで作製した試験体 FT-7～FT-12 の引張試験で得られた $P - \epsilon_d(x)$ 曲線から読み取った変曲点Aのひずみを 付属表-5.1.2に示す。ただし、表中のひずみは、各試験体で得られたひずみを、CFRPシートのヤング係数、コンクリート強度、および試験体中心から測点までの距離が同じものでまとめ、それらを単純平均したものである。

付属表-5.1.2 CFRPシートの付着切れ発生時のひずみ ε_d 推定結果 (単位: μ)

CFRPシートの ヤング係数 kN/mm^2 (kgf/cm^2)	コンクリート 強度 N/mm^2	試験体中央から測点までの距離 (cm)						平均	
		5	10	15	20	25	30	コンクリート 強度別	ヤング 係数別
高強度型 230 (2.35×10^6)	34.2	98.3	87.5	75.5	54.8	40.0	—	71.2	57.8
	22.6	26.5	133.5	71.8	35.5	—	—	66.8	
	15.3	17.5	60.0	25.5	26.5	—	—	32.4	
高弾性型 640 (6.50×10^6)	34.2	49.2	40.3	47.5	30.0	—	—	41.8	42.3
	22.6	19.5	65.5	57.3	34.8	—	—	44.3	
	15.3	25.0	56.0	49.5	33.5	—	—	41.0	

付属表-5.1.2 から、以下の傾向を見ることができる。

- ① 高強度型炭素繊維シートで作製したCFRPシートの付着切れ発生ひずみは、
 - ・大略的に $30 \sim 70 \mu$ と幅があり、コンクリート強度に大きく影響を受けている。
 - ・試験体中央に近い程、大きいひずみを示しめている
- ② 高弾性型炭素繊維シートで作製したCFRPシートの付着切れ発生ひずみは、
 - ・大略的に 40μ 程度であり、コンクリート強度の影響が見られない
 - ・試験体中央からの距離の影響が見られない
- ③ CFRPシートの付着切れが発生するひずみは、
 - ・高弾性型は、高強度型に比して、約 75% と小さい値である
 - ・しかし、作用引張荷重は、高弾性型の方が

(ヤング係数比) $\times$ (ひずみ比) = $(650/230) \times (42/57) = 2.04$ 倍
程大きい値となっている

(3) CFRPシートとコンクリート表面との摩擦応力度

引張荷重 P と CFRP シート各点 x のひずみ $\varepsilon_d(x)$ の関係についての特徴の一つは、引張荷重作用時に発生する CFRP シート各点のひずみの差 $\Delta \varepsilon_d = \varepsilon_d(x_1) - \varepsilon_d(x_2)$ が、はく離破壊直前まで存在することである。

このひずみの差 $\Delta \varepsilon_d$ は、CFRP シートに作用している引張荷重を摩擦によりコンクリートへ伝達した力からもたらされるものである。したがって、ここでは、各引張荷重の段階で CFRP シートの各点に発生しているひずみから、各測定点間 $0 \sim 5\text{cm}$ 、 $5 \sim 10\text{cm}$ 、 $10 \sim 15\text{cm}$ 、 $15 \sim 20\text{cm}$ 、 $20 \sim 25\text{cm}$ 、 $25 \sim 30\text{cm}$ の、それぞれのひずみ差 $\Delta \varepsilon_d$ を求め、このひずみ差 $\Delta \varepsilon_d$ から、次式により各測定点間に働いている摩擦応力度 $\Delta \sigma_d$ を算出することとした。

$$\Delta P_{cf} = \Delta \varepsilon_{cf} \times E_{cf} \times A_{cf}$$

$$\Delta \sigma_{cf} = \Delta P_{cf} / (B_{cf} \times \Delta L_{cf})$$

ここに、 ΔP_{cf} ：各測定点間の摩擦により減少した引張力

$\Delta \varepsilon_{cf}$ ：各測定点間の摩擦により減少したCFRP シートのひずみ

E_{cf} ：CFRPシートのヤング係数

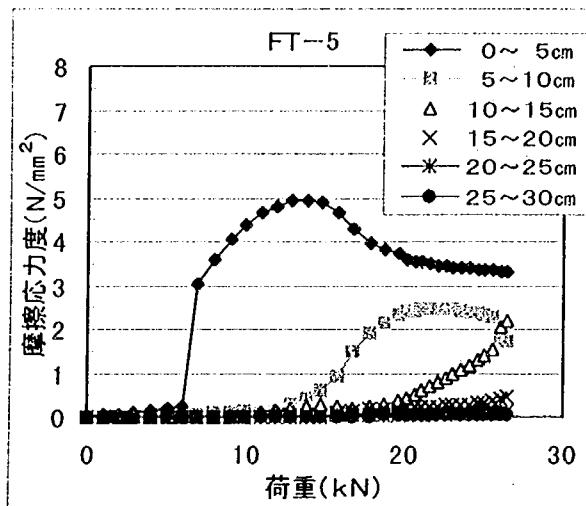
A_{cf} ：CFRPシート断面積

$\Delta \sigma_{cf}$ ：各測定点間で働いている摩擦応力度

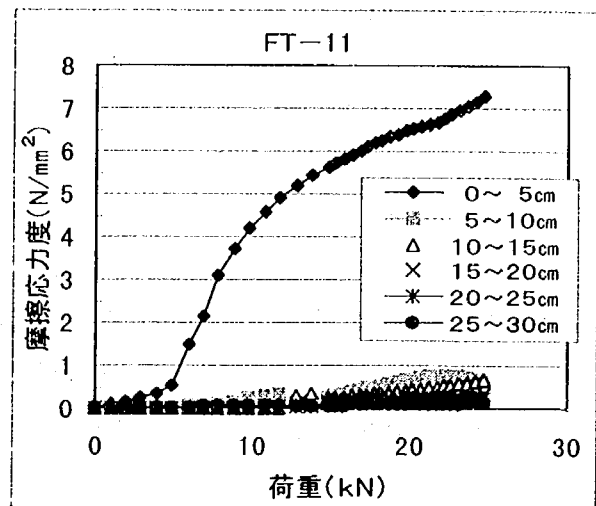
B_{cf} ：CFRPシート幅

ΔL_{cf} ：各測定点間のCFRP シートの長さ

この算出方法で得られた全試験体に関する引張荷重 P と摩擦応力度 $\Delta \sigma_{cf}$ の関係のうち、高強度型炭素繊維シートで作製した試験体の例としてFT-5に関するものを 付属図-5.1.7(a) に、高弾性型炭素繊維シートで作製した試験体の例としてFT-11に関するものを 付属図-5.1.7(b) に、それぞれ示した。



(a) 高強度型試験体 FT-5



(b) 高弾性型試験体 FT-11

付属図-5.1.7 引張荷重と摩擦応力度の関係図の例

また、全試験体について、各測定点間に働く摩擦応力度の算定結果を 付属表-5.1.3 に示す。なお、表中のA、B、Cは、付属図-5.1.6 に示した曲線の変曲点である。

これらの図および表より、以下を推定することができる。

① 一般的傾向について、付属図-5.1.7 によれば、

- ・摩擦応力度は、引張力の作用点に近い0～5cm区間で、付着切れが発生するひずみ以降大きく増加してCFRPシート全長のなかでも最大値を示している。
- ・摩擦応力度は、引張力の作用点から5～10、10～15cmと遠くなるにつれて、その値が小さくなる。

② 高強度型炭素繊維シートについて、

- ・摩擦応力度は、付属図-5.1.7 によれば、最大値を示した後に低下がみられる。この低下点付近がはく離終了からはくり破壊へ進行する所と考えられる。

付属表-5.1.3 摩擦応力度推定結果 (単位: N/mm²)

CFRP シートのヤング係数 kN/mm ²	コンクリート強度 N/mm ²	CFRP シート挙動状態	試験体中央からの測点間区分 (cm-cm)						平均	
			0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	コンクリート強度別	ヤング係数別
高強度型 公称 230	34.2	A~B	0.0-6.6	0.2-2.1	0.1-2.6	0.1-3.1	0.0-0.3	0.0-0.1	0.79-3.23	0.48-2.38
		B~C	1.8-6.6	0.4-2.7	0.8-2.6	1.1-2.9	0.3-1.7	0.0-0.1		
		C超~	3.1-6.1	1.3-2.9	0.0-1.8	1.2-2.8	0.3-1.7	0.0-0.1		
	22.6	A~B	0.1-4.9	0.0-2.7	0.0-2.6	0.0-1.3	0.0-0.1	0.0-0.1	0.44-2.28	
		B~C	0.3-4.9	0.4-2.7	1.0-2.8	0.3-1.3	0.0-0.1	0.0-0.1		
		C超~	2.7-4.3	0.5-2.5	1.0-2.8	0.4-1.3	0.0-0.1	0.0-0.1		
	15.3	A~B	0.1-4.3	0.0-2.2	0.0-2.0	0.0-0.4	0.0-0.3	0.0-0.1	0.20-1.62	
		B~C	0.4-4.3	0.1-2.8	0.0-2.0	0.0-0.4	0.0-0.3	0.0-0.1		
		C超~	2.9-4.3	0.1-2.8	0.0-2.0	0.0-0.4	0.0-0.3	0.0-0.1		
	平均	A~B	0.1-5.6	0.1-2.3	0.0-2.5	0.0-1.8	0.0-0.2	0.0-0.1		
		B~C	1.0-5.6	0.4-2.7	0.7-2.5	0.6-1.8	0.1-0.7	0.0-0.1		
		C超~	2.9-5.2	0.8-2.7	0.4-2.2	0.6-1.7	0.1-0.7	0.0-0.1		
高弾性型 公称 640	34.2	A~B	1.6-5.4	0.1-1.1	0.0-0.1	0.0-0.6	0.0-0.3	0.0-0.1	0.86-1.91	0.63-1.65
		B~C	4.0-5.5	0.5-2.3	0.0-0.1	0.0-0.6	0.0-0.3	0.0-0.1		
		C超~	4.3-5.7	0.7-2.4	0.0-0.1	0.0-0.6	0.0-0.3	0.0-0.1		
	22.6	A~B	0.2-3.9	0.0-0.7	0.0-0.3	0.0-0.3	0.1-0.3	0.1-0.1	0.54-1.47	
		B~C	1.5-5.1	0.5-1.0	0.2-0.4	0.1-0.3	0.1-0.3	0.1-0.1		
		C超~	4.7-6.7	0.5-1.8	0.2-0.9	0.1-0.4	0.1-0.3	0.1-0.1		
	15.3	A~B	0.2-6.3	0.0-1.1	0.0-0.0	0.0-0.5	0.1-0.2	0.1-0.1	0.49-1.56	
		B~C	2.0-6.5	0.1-0.9	0.0-0.0	0.0-0.5	0.1-0.2	0.1-0.1		
		C超~	5.0-8.3	1.0-2.0	0.0-0.6	0.0-0.5	0.1-0.2	0.1-0.1		
	平均	A~B	0.9-5.0	0.0-0.9	0.0-0.1	0.0-0.4	0.1-0.3	0.1-0.1		
		B~C	2.6-5.5	0.4-1.5	0.1-0.2	0.0-0.4	0.1-0.3	0.1-0.1		
		C超~	4.6-6.5	0.7-2.1	0.1-0.5	0.0-0.5	0.1-0.3	0.1-0.1		

・コンクリート強度は、付属表-5.1.3 によれば、摩擦応力度に影響を与え、コンクリート強度が大きいほど大きい摩擦応力度を発生する傾向にある。

③ 高弾性型炭素繊維シートについて、

・摩擦応力度は、付属図-5.1.7 によれば、CFRPシート破断時に、まだ増加傾向にあり、付着切れが発生しているものの、はく離が進行中で、見掛け上十分な付着耐力を発揮中であつたと考えられる。

- ・コンクリート強度は、付属表－5.1.3 によれば、コンクリート強度が大きい方がやや大きい摩擦応力度を発生する傾向にあるとおもわれるが、明確な影響を与えていない。

④ 高強度型と高弾性型の炭素繊維シートの対比について、

- ・摩擦応力度の分布は、付属図－5.1.7 および 付属表－5.1.3 によれば、高強度型が引張力作用点より遠くまで及び、また遠くへ及ぶにつれて最大摩擦応力度が低下するのに対し、高弾性型が引張力作用点の近くに集中し、高強度型に比して大きい摩擦応力度を示している。
- ・摩擦応力度の最大値は、高弾性型の引張力作用点近くに現れているが、全体の平均摩擦応力度は、高強度型の方が大きく、また、摩擦応力度のばらつきは、高強度型の方が大きい。
- ・各区分毎における摩擦応力度の単純平均の最低値は、高強度型で 0.48N/mm^2 、高弾性型で 0.63N/mm^2 であり、一般に、平均付着応力度の許容値として用いられている 0.44N/mm^2 に近い値となった。

このことから、許容平均付着応力度 0.44N/mm^2 は、付着切れが発生する段階での摩擦応力度に相当していると考えられ、コンクリートのせん断弾性係数を $G_c = 2\text{kN/mm}^2$ とすると、この時のコンクリート表面のひずみが、

$$\begin{aligned} & (\text{許容平均付着応力度}) / (\text{コンクリートのせん断弾性係数}) \\ &= (0.44\text{N/mm}^2) / (2\text{kN/mm}^2) = 220 \mu \end{aligned}$$

程度であると想定されることから、十分安全性のある許容値であるといえる。

(4) CFRPシートの任意点に働く引張力の推定方法

各測定点間に働く摩擦応力度を推定することにより、CFRPシートの任意点 x に働く引張力 $P_{cf}(x)$ は、次式で求めることができる。

$$P_{cf}(x) = P_{cf0} - (\sigma_{cf} \times L_{cf}(x) \times A_{cf})$$

ここに、 $P_{cf}(x)$: CFRPシートの任意点 x に働く引張力

P_{cf0} : CFRPシートの引張り端に働く引張荷重

σ_{cf} : CFRPシートとコンクリート表面に働いている摩擦応力度

$L_{cf}(x)$: 引張荷重作用位置から計算点 x までのCFRPシートの長さ

A_{cf} : CFRPシート断面積

なお、CFRPシートの任意点 x に働く引張力 $P_{cf}(x)$ の推定精度を上げるためには、CFRPシートを ΔL_{cf} に細分し、この細分長部分に働く摩擦応力度 $\Delta \sigma_{cf}$ を用いて、上式の $(\sigma_{cf} \times L_c)$ に替わり、 $\sum (\sigma_{cf} \times L_{cf})$ を適用すればよい。

5.2 CFRPシートの継手試験結果

5.2.1 試験の目的

炭素繊維シート接着工法で曲げを受けるコンクリート部材を補強する場合、繊維方向に連続した1枚の炭素繊維シートを貼り付けることができるとは限らず、一般には、継手を設けて貼り継ぐ施工を要求されることが多い。本研究では、コンクリート部材の曲げ補強を行う場合に貼り付ける炭素繊維シートの部材軸方向に継手を設ける際に必要な継手長さの確認と継手特性に与える疲労の影響を把握することを目的として、鉄筋コンクリートばりの下面に炭素繊維シートを貼った状態で、繰返し載荷による疲労作用を受ける前後の試験体を対象として静的曲げ試験を行った。

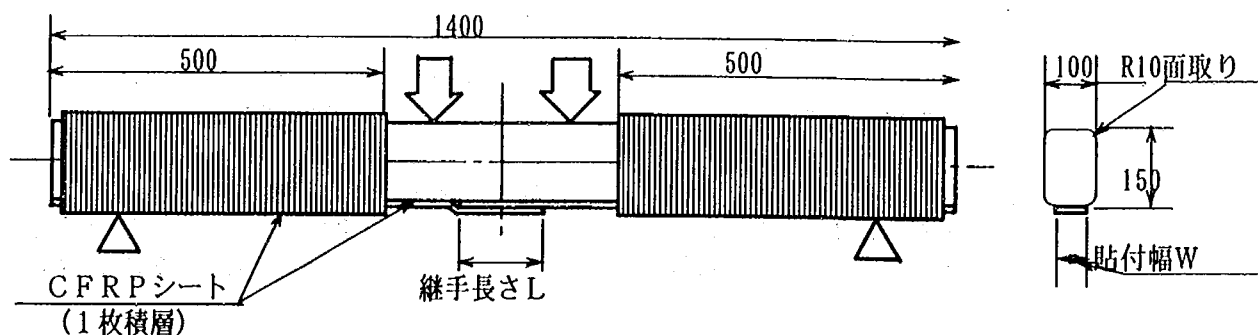
試験の詳細は、「共同研究報告書(I)、第I編 炭素繊維シートの材料特性に関する研究、4. 継ぎ手試験」に譲ることとし、ここでは、試験方法および試験結果の概要についてまとめた。

5.2.2 継手試験方法

試験体は、付属図-5.2.1に示すように、断面の幅が100mm、高さが150mm、長さが1,400mmで、D10の主筋を4本、φ6のスターラップを80mm間隔で配した鉄筋コンクリートばりの下面に、繊維目付量 300g/m^2 の炭素繊維シート1枚を試験変数に応じた所定の継手長さで貼り付けたものである。

試験変数は、炭素繊維シートの種類と継手長さとした。炭素繊維シートは、付着試験と同様、高強度型(メーカー公称 $E_{cf}=230\text{kN/mm}^2$ 、 $\sigma_{cf, \text{ult}}=3.4\text{kN/mm}^2$)および高弾性型(メーカー公称 $E_{cf}=640\text{kN/mm}^2$ 、 $\sigma_{cf, \text{ult}}=1.9\text{kN/mm}^2$)の2種類を選定した。炭素繊維シートの貼付幅は、既往の実験を参考に、高強度型で5cm、高弾性型で8cmとし、炭素繊維シートの継手長さ L_{cf} は、継手長による継手部での破壊発生の有無を調査する目的で $L_{cf}=0, 5, 10, 15\text{cm}$ の4通りとした。

繰返し載荷は、TL-20またはTL-25等の設計荷重作用時に既設の軸方向引張補強鉄筋に発生するひずみが $1,000\mu$ 程度であることから、けた等、コンクリート部材の引張応力が発生する面に炭素繊維シート1層を貼り付けたときCFRPシートに生じる最大応力 $\sigma_{cf, \text{max}}$ を、高強度型で 245N/mm^2 ($2,500\text{kgf/mm}^2$)、高弾性型で 588N/mm^2 ($6,000\text{kgf/mm}^2$)程度と想定し、それぞれ115N($1,170\text{kgf}$)、127N($1,300\text{kgf}$)を最大載荷重とし、応力比0.5、載荷速度3~5Hzで200万回載荷とした。



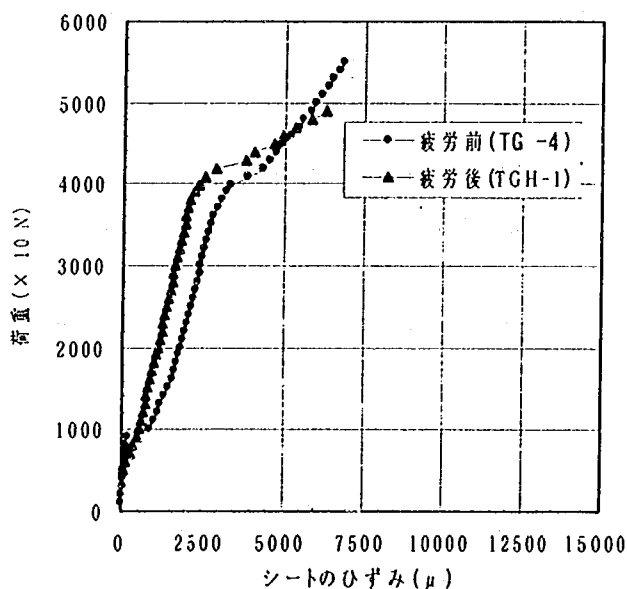
付属図-5.2.1 継手試験用試験体の形状 (単位:mm)

5.2.3 継手試験結果

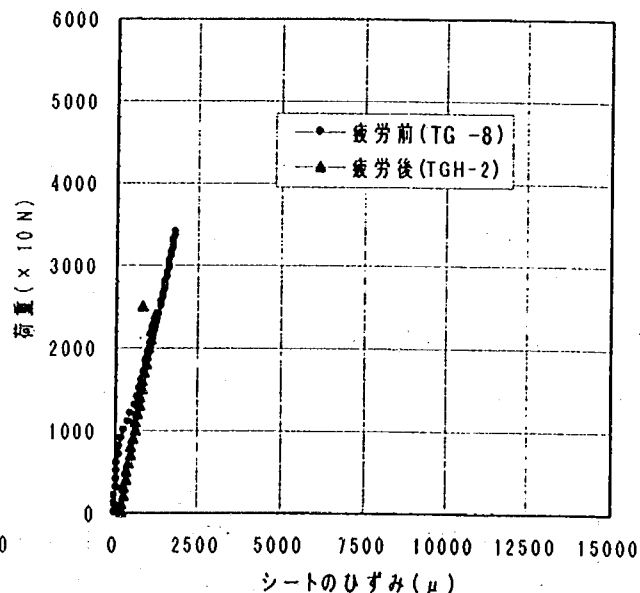
継手試験で得られた疲労前後のひび割れ発生荷重、最大荷重、CFRPシートの最大ひずみ、および破壊状況は、付属表-5.2.1の通りであり、また、高強度型、高弾性型それぞれの疲労前後の静的载荷試験によるCFRPシートひずみと荷重との関係の代表例は、付属図-5.2.2、および、付属図-5.2.3に示す通りである。

付属表-5.2.1 継手試験における疲労前後の静的試験結果

試験体 No.	炭素繊維シート型	継手長さ cm	貼付幅 cm	ひび割れ発生荷重 kN	鉄筋降伏荷重 kN	CFRPシート破断荷重 kN	CFRPシートの最大ひずみ μ	破壊状況
TG -1	高強度	0	5	13.73	38.25	52.89	14,027	シート破断
TG -2		5	5	10.79	38.25	53.90	11,754	シート破断
TG -3		10	5	10.79	40.21	53.98	15,810	シート破断
TG -4		15	5	9.81	40.21	53.82	14,647	シート破断
TGH-1		15	5	9.81	37.27	48.44	16,549	シート破断
TG -5	高弾性	0	8	13.73	降伏せず	31.36	2,664	シート破断
TG -6		5	8	13.73	降伏せず	37.71	2,530	シート破断
TG -7		10	8	11.77	降伏せず	24.54	1,359	シート破断
TG -8		15	8	11.77	降伏せず	33.32	2,283	シート破断
TGH-2		15	8	9.81	降伏せず	24.51	1,873	シート破断



付属図-5.2.2 継手試験体の疲労前後のCFRPシートひずみと荷重との関係
---高強度型、継手長さ15cm



付属図-5.2.3 継手試験体の疲労前後のCFRPシートひずみと荷重との関係
---高弾性型、継手長さ15cm

これらの結果より、継手の特性を次のように確認することができた。

- ① 試験体の破壊は、高強度型、高弾性型いずれの炭素繊維シートも、継手部以外の一般部のシート破断であった。
- ② また、いずれの場合にも継手部での異常は観測されなかった。
- ③ 高強度型炭素繊維シートの疲労前後の最大荷重、中央変位、およびシートの最大ひずみは、疲労前後で同様な値が得られ、疲労の影響を受けなかったと考えられる。
- ④ 高弾性型炭素繊維シートの疲労後の最大荷重およびシートの最大ひずみは、疲労前と比較して、20～30%程度小さな値で破断した。この理由は、試験体のバラツキ、ひび割れの影響の他に、高弾性型炭素繊維シートは、高強度型と比較し、ヤング係数が高い分だけ荷重負担度も大きいことから疲労作用の影響を多く受けたとも考えられる。

5.2.4 継手試験結果の考察

炭素繊維シートの継手試験は、高強度型および高弾性型の炭素繊維シートを貼付けた鉄筋コンクリートばりの静的曲げ試験によって、付着試験と同様に、継手長さを試験変数として実施した。

疲労载荷なしの静的曲げ試験では、継手性能は、高強度型および高弾性型の炭素繊維シートとも、継手長さの違いによる大きな違いは認められず、いずれも継手部以外での破壊であった。ただし、高弾性型については、ひび割れなどの要因を受けやすいことが判明した。

疲労後の静的曲げ試験では、高強度型の継手性能は、疲労なしの静的曲げ試験の結果とほぼ似たような結果が得られ、疲労载荷による継手部性能の低下などの影響を受けないことを確認することができた。

一方、高弾性型の継手性能は、疲労後の静的曲げ試験で、最大荷重、CFRPシートのひずみとも、疲労なしの静的曲げ試験結果と比べて、20～30%程度低い値で、しかも継手部以外の一般部での破断がみられた。これは、高弾性型の炭素繊維シートは、高強度型に比べ大きな荷重を負担することから、繰返し载荷中のコンクリートばりのひび割れの進展によりCFRPシートのひずみが限界値に到達して破断したことなど、疲労の進行により試験体そのものの性状が変化したことの影響を受けた可能性もあり、高弾性型の炭素繊維シートの使用に当たっては、これらを勘案した設計法を検討する必要があると考えられる。

5.3 鉄筋コンクリートげたの曲げ補強試験結果

5.3.1 試験の目的

炭素繊維シート接着工法による鉄筋コンクリートげた等の曲げ補強は、これまで、多くの実験結果より、炭素繊維シートを含浸接着樹脂で硬化させたCFRPシートが、引張補強鉄筋の応力度低減、たわみ低減、および終局曲げ耐力の向上等の曲げ補強効果をもつこと、また、その設計法が、従来の鉄筋コンクリート部材断面についての設計法を適用し得ること、等が明らかにされている。

しかし、炭素繊維シート接着工法を道路橋の主要コンクリート部材へ適用することを前提とした、大型の試験体を用いて現在供用中の道路橋での作用活荷重に相当する荷重の繰返し載荷による疲労耐久性を確認した上での補強効果の評価法は、これまで具体的に示されていない。

したがって、本研究では、炭素繊維シート接着工法を道路橋の鉄筋コンクリートげた等の曲げ補強へ適用することを目的として、曲げ疲労耐久性と補強効果の評価方法等を確認することとした。

なお、試験結果の詳細は、「共同研究報告書(I)、第Ⅱ編 炭素繊維シートによる鉄筋コンクリートげたの曲げ補強に関する研究」に譲ることとし、ここでは、試験結果のうち指針(案)を定める際に直接的な影響を与えた部分に焦点を絞り、その概要を述べる。

5.3.2 試験概要

(1) 試験体

試験体は、土木学会コンクリートライブラリー第3号に示されている「L-20 荷重で設計された一般的なRCT桁橋」を参考として計画し、実げたのほぼ1/2の規模とした。

試験体は、付属表-5.3.1に示す通り、無補強の基準試験体1体と、炭素繊維シート接着工法で補強した試験体3体の合計4体とした。

付属表-5.3.1 試験体一覧表

試験体	炭素繊維シート					
	種類	繊維 目付量 (g/m^2)	シート厚さ ($\text{mm} \times \text{層数}$)	メーカ公称 ヤング係数 (kN/mm^2)	引張剛性 $A_{cf} \cdot E_{cf}$ (kN/mm)	メーカ公称 引張強度 (kN/mm^2)
No. 1	—	—	—	—	—	—
No. 2	高強度型	300	0.167×8	230	307.28	3.40
No. 3	高弾性型	300	0.143×3	640	274.56	1.90
No. 4	高弾性型	300	0.143×6	640	549.12	1.90

No. 1 試験体は、設計計算上、TL-20 作用時相当荷重 201kN (20.5tf) 載荷での軸方向主鉄筋の応力度が $180\text{N}/\text{mm}^2$ (死荷重応力 905 + 活荷重応力 905 = 1,810 kgf/cm^2)、B活荷重作用時相当荷重 224kN (22.8tf) 載荷での鉄筋の応力度が $200\text{N}/\text{mm}^2$ (死荷重応力 905 + 活荷重応力 1,105 = 2,010 kgf/cm^2) となることを目標に計画した試験体である。

No. 2 試験体は、B活荷重作用時相当荷重 224kN 載荷時に主鉄筋応力度が許容応力度の 180N/mm^2 を満たすことを目標に、繊維目付量 300g/m^2 の高強度型炭素繊維シート 8 層を試験体下面に貼り付けた。

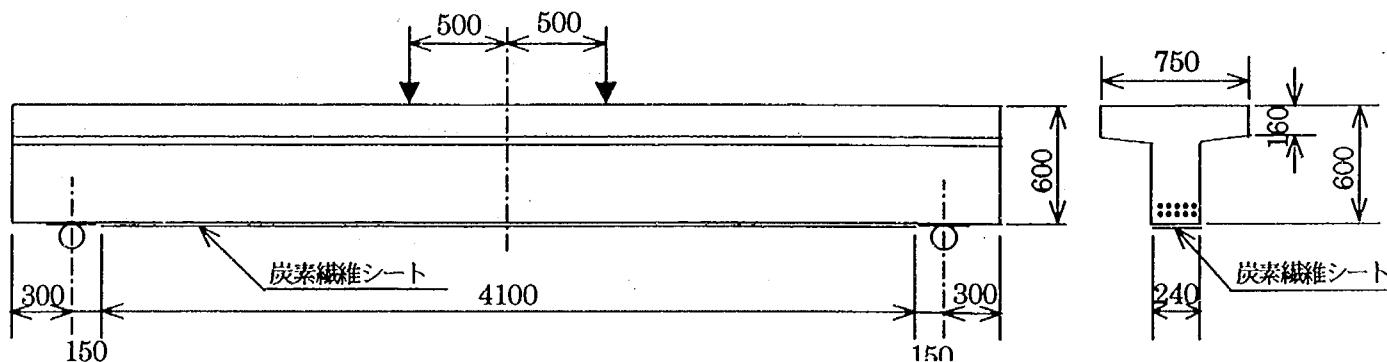
No. 3 試験体は、B活荷重作用時相当荷重 224kN 載荷時に主鉄筋応力度が許容応力度の 180N/mm^2 を満たすことを目標としたが、炭素繊維シートの引張剛性 ($A_{cf} \times E_{cf}$) が No. 2 試験体に近い値となるよう、繊維目付量 300g/m^2 の高弾性型炭素繊維シート 3 層を試験体下面に貼り付けた。

No. 4 試験体は、塩害等により鉄筋断面積が減少した場合を想定しており、製作試験体を変更することなく載荷重で鉄筋応力度を調整することとし、No. 1 ～ No. 3 試験体の約 5 割増である全載荷重 327kN (33.31t) を載荷した時の主鉄筋応力度が 250N/mm^2 程度になることを目標として、繊維目付量 300g/m^2 の高弾性型炭素繊維シートを No. 3 試験体の 2 倍である 6 層として、試験体下面に貼り付けた。

なお、この場合における疲労試験時の載荷振幅は、他の試験体の約 8 割増となる。

(2) 載荷方法

載荷は、付属図-5.3.1 に示すように、2 点集中荷重による曲げ載荷とした。



付属図-5.3.1 試験体の形状および載荷方法 (単位: mm)

各試験体の載荷方法は以下の通りである。

① No. 1 試験体: 始めに B 活荷重作用時相当荷重 224kN まで静的に載荷して曲げひび割れを発生させ、次に、B 活荷重作用時相当荷重 224kN を上限荷重、死荷重相当荷重 101kN を下限荷重として、載荷回数 $N=200$ 万回、載荷速度 $=2.5\text{Hz}$ の繰返し載荷による疲労試験を行った。最後に静的載荷試験により破壊に至らしめた。

② No. 2 および ③ No. 3 試験体: B 活荷重作用時相当荷重 224kN まで静的に載荷して曲げひび割れを発生させた後、死荷重相当荷重 101kN を載荷した状態で試験体下面の支間方向に炭素繊維シートを接着した。その後、エポキシ樹脂が完全に硬化するまでの 1 週間、T-20 相当荷重 172kN を上限荷重、死荷重相当荷重 101kN を下限荷重として、載荷速度 $=1\text{Hz}$ で繰返し荷重を加えた。次に、B 活荷重作用時相当荷重 224kN までの静的載荷試験を行った後、B 活荷重作用時相当荷重 224kN を上限荷重、死荷重相当荷重 101kN を下限荷重として、載荷回数 $N=200$ 万回、載荷速度 $=2.5\text{Hz}$ の繰返し載荷による疲労試験を行った。最後に静的載荷試験により破壊に至らしめた。

④ No. 4 試験体：割増したB活荷重作用時相当荷重 327kNまで静的に載荷し、曲げひび割れを発生させた後、死荷重相当荷重 101kNを載荷した状態で試験体下面の支間方向に炭素繊維シートを接着した。その後、エポキシ樹脂が完全に硬化するまでの1週間、T-20 相当荷重 172kNを上限荷重、死荷重相当荷重 101kNを下限荷重として、載荷速度=1 Hz で繰り返し荷重を加えた。次に、割増したB活荷重作用時相当荷重 327kNまでの静的載荷試験を行った後、割増したB活荷重作用時相当荷重 327kNを上限荷重、死荷重相当荷重 101kNを下限荷重として、載荷回数N=200 万回、載荷速度=2.5 Hz の繰り返し載荷による疲労試験を行った。最後に静的載荷試験により破壊に至らしめた。

5.3.3 主鉄筋活荷重応力度および活荷重変位の低減効果に関する考察

(1) 試験結果の取扱い方針

炭素繊維シートによるコンクリートげた等の設計荷重作用時における補強効果を明確にするため、死荷重相当載荷とB活荷重相当載荷との間の荷重変化に対する主鉄筋応力度および変位の変化量（すなわち、活荷重応力度および活荷重変位）について考察する。

なお、炭素繊維シートによる補強試験体No. 2～4は、炭素繊維シート貼付け後の養生期間である1週間の間、死荷重相当荷重 101kNとT-20 相当荷重 172kNの間で、載荷速度=1 Hz の繰り返し荷重を加えたのに対して、無補強試験体No. 1は、これに加えていないことから、試験体No. 1～4の試験結果を直接的に比較することは、適切ではない。しかるに、試験体No. 1の疲労試験において載荷回数が1万回段階での主鉄筋応力度と変位は、試験体No. 2～4における疲労試験前の値とほぼ同等となっている。したがって、試験体No. 1の疲労回数1万回における主鉄筋活荷重応力度と活荷重変位を比較の基準値として、試験体No. 2～4における炭素繊維シート補強の効果を考察することとした。

(2) 主鉄筋活荷重応力度の低減効果

B活荷重による支間中央部の主鉄筋活荷重応力度の計算値および実験値は、付属表-5.3.2 に示す通りである。なお、計算値の算出においては、以下の①～⑤を仮定した。

- ① 維ひずみは中立軸からの距離に比例する。
- ② コンクリートの引張強度は無視する。

付属表-5.3.2 B活荷重による支間中央の主鉄筋活荷重応力度 (単位: N/mm²)

項 目		試験体 No. 1	試験体 No. 2	試験体 No. 3
計 算 値		113.8	91.4	94.4
実 験 値	疲労試験前	94.2	76.1	78.7
	計算値/実験値	1.21	1.20	1.20
	200 万回疲労試験終了後	101.7	80.4	79.3
	計算値/実験値	1.12	1.14	1.19

注) 試験体 No.4 は、載荷荷重条件が大きく異なり、直接な比較が困難なため、上表に記載していない。

③ CFRPシートの圧縮強度は無視する。

④ 既存の鉄筋とコンクリートのヤング係数比は15とする。

⑤ CFRPシートとコンクリートとのヤング係数比は、コンクリートのヤング係数を 13.3kN/mm^2 として求める。

付属表-5.3.2 から以下のことがわかる。

① 疲労載荷を加える前のB活荷重による主鉄筋活荷重応力度に関する(計算値)/(実験値)は、無補強の基準試験体No. 1では1.21、炭素繊維シートで補強した試験体No. 2とNo. 3では両者共1.20となっている。したがって、B活荷重による主鉄筋活荷重応力度の計算による推定値は、いずれの試験体においても実験値より20%程度大きくなっており、同程度に安全側である。

② 200万回疲労試験終了後のB活荷重による主鉄筋活荷重応力度に関する(計算値)/(実験値)は、無補強の基準試験体No. 1では1.12、炭素繊維シート補強した試験体No. 2、No. 3では、それぞれ1.14、1.19となっている。したがって、B活荷重による主鉄筋活荷重応力度の計算による推定値は、いずれの試験体においても実験値より10~20%程度大きくなっており、安全側である。

また、主鉄筋活荷重応力度に関する(計算値)/(実験値)は、無補強の基準試験体No. 1の値よりも炭素繊維シートで補強した試験体No. 2、No. 3の方が大きくなる傾向があり、計算による推定は、炭素繊維シートで補強した試験体の方が若干安全側となっている。

以上のことより、補強計算における部材断面の応力度は、①~⑤の仮定のもとで算出してよいと考えられる。

(3) 活荷重変位の低減効果

B活荷重による支間中央部の変位について、実験値と換算断面2次モーメントの計算値を付属表-5.3.3に示す。なお、換算断面2次モーメントの算出の際に用いる各材料のヤング係数は、鉄筋およびコンクリートについては「道路橋示方書 Ⅲ コンクリート橋編」に、炭素繊維シートについては「本指針(案)、Ⅰ 共通編、3章 使用材料」にそれぞれ基づいており、ヤング係数比は真の値を用いた。

付属表-5.3.3 B活荷重による支間中央部の変位の実験値、および換算断面2次モーメントの計算値

試験体 換算断面2次モーメント $I (\times 10^9 \text{ mm}^4)$ 比 $I_1/I_{1\sim3}$		No. 1 $I_1 = 3.327$ $I_1/I_1 = 1.00$	No. 2 $I_2 = 3.878$ $I_1/I_2 = 0.86$	No. 3 $I_3 = 3.842$ $I_1/I_3 = 0.87$
活 荷 重 変 位	繰返し荷重1万回後	$\delta_0 = 2.35 \text{ mm}$ (基準値)	—	—
	炭素繊維シート補強後	—	$\delta_2 = 1.76 \text{ mm}$	$\delta_3 = 1.81 \text{ mm}$
	変位の比	—	$\delta_2/\delta_0 = 0.75$	$\delta_3/\delta_0 = 0.77$
	200万回疲労試験終了後	$\delta'_1 = 2.44 \text{ mm}$	$\delta'_2 = 1.96 \text{ mm}$	$\delta'_3 = 1.93 \text{ mm}$
	変位の比	$\delta'_1/\delta_0 = 1.04$	$\delta'_2/\delta_0 = 0.83$	$\delta'_3/\delta_0 = 0.82$

注) 試験体No. 4は、載荷荷重条件が大きく異り、直接の比較が困難なため、

上表には記載していない。

付属表-5.3.3 から以下のことがわかる。

- ① 炭素繊維シートで補強した試験体No. 2 およびNo. 3 の疲労荷重試験前におけるB活荷重変位と無補強試験体No. 1 の基準変位との比は、それぞれ0.75、0.77 である。一方、炭素繊維シートで補強した試験体No. 2、No. 3 の換算断面2次モーメントの計算値と無補強試験体No. 1 のそれとの比の逆数は、それぞれ0.86、0.87 である。したがって、実験による活荷重変位の低減の割合は、炭素繊維シートで補強した換算断面2次モーメントの計算上の増加割合よりも大きくなっている。
- ②炭素繊維シート補強した試験体No. 2 およびNo. 3 の200万回疲労試験終了後におけるのB活荷重変位と無補強試験体No. 1 の基準変位との比は、それぞれ0.82、0.83 である。一方、炭素繊維シートで補強した試験体No. 2、No. 3 の換算断面2次モーメントの計算値と無補強試験体No. 1 との比の逆数は、それぞれ0.86、0.87 である。したがって、200万回疲労試験終了後であっても、実験による活荷重変位の低減の割合は、炭素繊維シートで補強した換算断面2次モーメントの計算上の増加の割合よりも大きくなっている。

これらのことから、CFRPシート形成後に生じる曲げモーメントによるたわみの改善効果は、補強前後の換算断面2次モーメントの比により評価してよいと考えられる。

5.3.4 破壊抵抗曲げモーメントの向上効果に関する考察

(1) 保証ひずみ、および測定ひずみによる実験結果の評価

200万回疲労試験後に行った静的荷重試験における各試験体の終局破壊荷重の実験値と計算値は、付属表-5.3.4 に示す通りである。表中の計算方法1は、終局破壊時においてCFRPシートのひずみが保証ひずみに到達しているものと仮定して最大荷重を計算し、一方、計算方法2は、終局破壊時においてCFRPシートのひずみに最大荷重時の測定平均ひずみを用いて最大荷重を計算している。

付属表-5.3.4 200万回疲労試験後の破壊抵抗曲げモーメント

試験体	試験結果			計算方法1		計算方法2	
	破壊抵抗曲げモーメント (kN・m)	破壊状況	CFRPシートひずみ (μ)	計算値 (kN・m)	実験値 ／計算値	計算値 (kN・m)	実験値 ／計算値
No. 1：無補強	411.7	コンクリート圧壊	—	361.1	1.14	361.1	1.14
No. 2：高強度型8層	557.7	付着破壊	2,300	962.7	0.58	439.9	1.27
No. 3：高弾性型3層	435.1	CFRPシート破断	1,800	456.1	0.95	383.3	1.14
No. 4：高弾性型6層	616.8	CFRPシート破断	3,200	563.0	1.10	579.7	1.06

注) 計算方法1：CFRPシートのひずみが保証ひずみに到達しているものと仮定して計算

計算方法2：CFRPシートに生じているひずみに最大荷重時の測定平均ひずみを用いて計算

なお、本表は、「共同研究報告書(I)、第II編、ページII-40、表-5.1.4」に相当するものである。

しかし、表-5.1.4は計算処理時にデータ取扱いの不備があり、本表の数値が正である。

また、計算に際しては以下のことを仮定した。

- ① 縦ひずみは中立軸からの距離に比例する。
- ② コンクリートの引張強度は無視する。
- ③ コンクリートの応力度-ひずみ曲線と終局ひずみ、および、鋼材の応力度-ひずみ曲線は、「道路橋示方書 Ⅲ コンクリート橋編」に準ずる。
- ④ CFRPシートの応力度-ひずみ曲線は、破断まで直線であるとする。

なお、CFRPシートの保証ひずみとは、CFRPシートの保証引張強度をCFRPシートのヤング係数で除した値のことである。

付属表-5.3.4 から次のことが考察される。

計算方法1は、CFRPシートのひずみが保証ひずみに到達しているものと仮定して破壊抵抗曲げモーメントを計算しており、(実験値) / (計算値) の値が0.58~1.10 の範囲を得ている。

しかし、(実験値) / (計算値) の値が0.58 と小さくなった試験体No. 2は、その終局状態がCFRPシートのはく離による破壊であって、CFRPシートの破断による破壊ではないことから、CFRPシートが保証ひずみに到達しているものと仮定している計算方法1の適用が妥当ではないと考えられる。

一方、試験体No. 3および試験体No. 4は、CFRPシートが破断して終局を迎えたことから、計算方法1によった(実験値) / (計算値) の値が、0.95 および1.10 であり、ほぼ計算値と一致している。しかし、試験データの数が少ないため、炭素繊維シートによる補強効果を評価する設計計算においては、CFRPシートの設計用終局ひずみとして保証ひずみを適切に低減させた値を用いることが必要と考えられる。

また、試験体No. 3は、試験体No. 4 と比べてCFRPシート破断時のひずみがかなり小さくなっている。これは、試験体No. 3では、炭素繊維シート貼付け後の養生期間中に作用させた繰り返し荷重により試験体のひび割れ部分の炭素繊維シートに「しわ」が発生し、そのまま硬化してしまっており、これによってCFRPシート破断時のひずみがかなり小さくなったものと考えられる。

(2) CFRPシートの設計用終局ひずみの設定

CFRPシートの設計用終局ひずみは、保証ひずみをどの程度低減させれば所定の安全性を得ることが出来るかという観点から考察する必要がある。CFRPシートの破断が先行した試験体No. 3 および 試験体No. 4 について、CFRPシートの計算上の終局ひずみを保証ひずみに1.0、0.90、0.80、0.70、0.60、0.57、0.50 を乗じた値として、CFRPシートが破断するときの抵抗曲げモーメントを計算し、(実験値) / (計算値) の値を算出した結果は、付属表-5.3.5 に示す通りである。

試験体No. 4 は、炭素繊維シートにしわが発生せずに硬化し、載荷試験でもCFRPシート破断時のひずみが保証ひずみに達していたことから、計算上の終局ひずみを保証ひずみの1.0 倍としたときの抵抗曲げモーメントについての(実験値) / (計算値) の値が1.10 で、実験値が計算値よりも10%ほど大きくなっている。しかし、試験体の数が少ないことから、材料試験用の試験片と鉄筋コンクリートげた試験体との材料特性の差異、CFRPシートのひずみのばらつき、部材寸法のばらつき等によっては、(実験値) / (計算値) の値が1 よりも小さくなる可能性も十分に考えられる。

付属表-5.3.5 CFRPシートが破断するときの抵抗曲げモーメントの実験値と計算値の比較

試験体 計算上のひずみ	No. 3 試験体 (高弾性型3層、しわあり)			No. 4 試験体 (高弾性型6層、しわなし)		
	実験値 (kN・m)	計算値 (kN・m)	実験値 /計算値	実験値 (kN・m)	計算値 (kN・m)	実験値 /計算値
保証ひずみ×1.00	435.1	456.1	0.95	616.8	563.0	1.10
保証ひずみ×0.90		444.1	0.98		540.2	1.14
保証ひずみ×0.80		431.9	1.01		517.3	1.19
保証ひずみ×0.70		419.5	1.04		494.1	1.25
保証ひずみ×0.60		380.8	1.14		444.6	1.39
保証ひずみ×0.57		361.9	1.20		422.6	1.46
保証ひずみ×0.50		317.8	1.37		371.0	1.66

そこで、現時点では、しわが発生しないで硬化した場合であっても、計算上の終局ひずみを保証ひずみより低減させて用いるほうが望ましいと考えられ、指針(案)では、保証ひずみの0.80倍とした。試験体No. 4は、付属表-5.3.5では、計算上の終局ひずみを保証ひずみの0.80倍とした場合の抵抗曲げモーメントについての(実験値)/(計算値)の値が1.19となっており、部材係数1.20の採用と同程度の安全度を確保することになる。

養生期間中の繰り返し载荷中にしわが発生し、そのまま硬化した試験体No. 3は、計算上の終局ひずみを保証ひずみの1.0倍としたときの抵抗曲げモーメントについての(実験値)/(計算値)の値が0.95であり、実験値が計算値よりも5%程度小さくなっている。したがって、例えば養生中に、車両等による繰り返し荷重が加わり、ひび割れが開閉するなどの理由で炭素繊維シートにしわの発生する恐れのある場合は、CFRPシートの計算上の終局ひずみを保証ひずみの0.80倍よりもさらに低減する必要がある。試験体No. 3は、付属表-5.3.5では、計算上の終局ひずみを保証ひずみの0.57倍とした抵抗曲げモーメントについての(実験値)/(計算値)の値が1.20となる。したがって、養生中の炭素繊維シートにしわの発生する恐れのある場合、部材係数1.20の採用と同程度の安全度を確保するための計算上の終局ひずみは、保証ひずみの0.57倍程度とする必要がある。

(3) 許容平均付着応力度の設定

No. 2試験体は、はく離破壊しているため、付着応力度を踏まえた破壊抵抗曲げモーメントの検討が必要である。現在までに公表されている指針類によると、終局時の許容平均付着応力度は、 0.44 N/mm^2 (4.5 kgf/cm^2)と設定されているのが一般的である。そこで、No. 2試験体は、この値を用いて検討する。

No. 2試験体において、CFRPシート端部から曲げモーメントが最大となる荷重点までの距離1.55mを接着区間と考えると、CFRPシートに生じる引張応力度 σ_{cf} は、

$$\sigma_{cf} = (0.44 \text{ N/mm}^2 \times 1,550 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}) / (0.167 \text{ mm} \times 8 \text{ 層} \times 1 \text{ mm}) = 510.5 \text{ N/mm}^2$$

となる。この値を用いて、No. 2試験体のはく離破壊するときの抵抗曲げモーメントを計算し、実験値と比較した結果は、付属表-5.3.6に示す通りである。

表-5.3.6 CFRPシートが付着破壊するときの抵抗曲げモーメントの
実験値と計算値の比較

No. 2 試験体、高強度型8層		
実験値 (kN・m)	計算値 (kN・m)	実験値/計算値
557.7	436.0	1.28

許容平均付着応力度 0.44N/mm^2 を用いて計算した No. 2 試験体の抵抗曲げモーメントについての (実験値) / (計算値) の値は、付属表-5.3.6 のように、1.28 となり、設計計算に用いる許容平均付着応力度 0.44N/mm^2 は、安全側の結果を与えと考えられる。そこで、本指針(案)においても、CFRPシートがはく離破壊する時の抵抗曲げモーメントを計算する際に用いる許容平均付着応力度は、 0.44N/mm^2 でよいものとした。

5.4 プレストレストコンクリートげたの曲げ補強試験結果

5.4.1 試験の目的

炭素繊維シート接着工法は、コンクリート造曲げ部材の曲げひび割れ抑制、および曲げ耐力向上等の効果を持つことから、鉄筋コンクリート(以下、RCと略称する)構造の床版やけたに対して有効な曲げ補強方法として盛んに研究されているが、ひび割れを許容しないプレストレストコンクリート(以下、PCと略称する)構造物の曲げ補強については、部材全断面を有効とする許容応力度設計法に基づく計算手法では不経済な補強量となることが多く、また研究事例も少ない。しかしながら、炭素繊維(CFRP)シートは、コンクリートにひび割れが発生した後にも弾性的に引張力を負担することが可能であるため、PC構造物に対しても、RC構造物と同様の、ひび割れを許容する設計手法を採用すれば、経済的な補強量の計算が可能となるものと考えられる。

したがって、本研究では、PC橋の中で代表的なポストテンション方式PC単純Tげた橋を対象として、炭素繊維シート接着工法によるPCげたに関する、たわみ抑制および曲げ耐力の向上などの、曲げ補強効果の確認、および補強効果の評価方法の提案を目的として、実橋げたの1/2規模であるポストテンション方式PC造T型断面の試験体を用いた道路橋相当荷重の繰返し載荷による疲労試験、および終局破壊までの静的載荷試験を実施した。

なお、試験の詳細は、「共同研究報告書(Ⅱ)、第Ⅰ編 炭素繊維シートによるプレストレストコンクリートげたの曲げ補強に関する研究」に譲ることとし、ここでは、試験方法と試験結果の概要、および曲げ補強効果の評価方法の提案についてまとめた。

付属表-5.4.1 実橋PCげたの荷重別曲げ応力度

5.4.2 検討対象モデル

対象とする橋梁は、L-20 荷重で設計されたポストテンション方式PC単純Tげた橋で、支間30m、有効幅員9.5mである。この橋梁は、L-20 荷重およびB活荷重によってPCげたコンクリート下縁に発生する応力度が 付属表-5.4.1 に示す通りであることから、本来、死荷重作用時にはフルプレストレス状態、活荷重L-20 作用時にはパーシャルプレストレス状態で -0.7N/mm^2 の引張応力度発生を認めた設計がなされており、B活荷重作用時には、コンクリート下縁に -2.0N/mm^2 の引張応力度が発生することになる。

荷 重 区 分		発生応力度 N/mm^2	
		上 縁	下 縁
①	有効プレストレス	-2.7	18.7
②	死 荷 重	8.1	-14.2
③	活荷重 (L-20)	2.8	-5.2
④	活荷重 (B活荷重)	3.5	-6.5
①+② (死荷重)		5.4	4.5
①+②+③ (L-20)		8.2	-0.7
①+②+④ (B活荷重)		8.9	-2.0

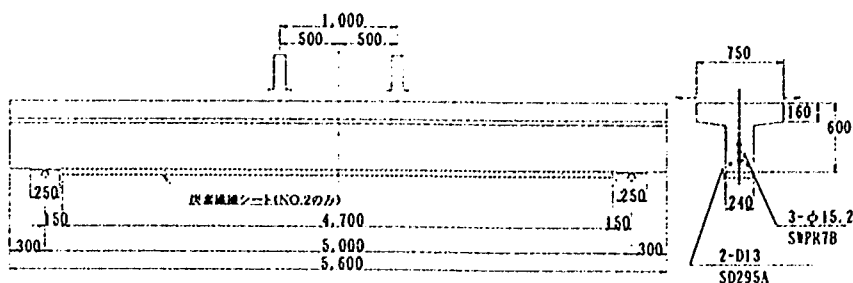
5.4.3 試験概要

(1) 試験体

試験体は、付属図-5.4.1 に示すポストテンション方式PC造Tげたとし、1体を無補強試験体(PC-No. 1)、他の1体を補強試験体(PC-No. 2)とした。補強に用いた炭素繊維シートは、繊維目付量300

g/m²の中弾性型(公称ヤング係数 $E_{cf}=390\text{kN/mm}^2$ 、引張強度 $\sigma_{cf}=2.9\text{kN/mm}^2$)とし、その補強枚数を、炭素繊維シートの断面引張剛性 $A_{cf} \times E_{cf}$ が、「付属資料 5.3 鉄筋コンクリートげたの曲げ補強試験結果、または、共同研究報告書(I)、

第II編 炭素繊維シートによる鉄筋コンクリートげたの曲げ補強に関する研究」に示した、RCげた No. 2試験体とほぼ等しくなるよう、4枚とした。



付属図-5.4.1 試験体の形状寸法 (単位: mm)

(2) 荷重試験

疲労試験は、実橋PCげたの設計応力度を参考として 付属表-5.4.2 に示すように、コンクリート下縁の応力度が $4.5 \sim 0.0\text{N/mm}^2$ の範囲である荷重レベル1と、 $4.5 \sim -3.5\text{N/mm}^2$ の範囲である荷重レベル2の、2段階の荷重レベルで実施することとした。各段階の荷重荷重は、予め各試験体に曲げひび割れを発生させ、ひび割れ発生荷重とコンクリートの材料試験で得た引張強度から試験直前のプレストレス力による圧縮応力度を推定する事により、決定した。

なお、補強試験体PC-No.

2は、ひび割れ発生後に死荷重相当荷重を荷重した状態で炭素繊維シートを貼り付け、エポキシ樹脂が完全に硬化するまで1週間荷重を保持した後に疲労試験を開始した。

一方、無補強試験体PC-No. 1は、PC-No. 2と載

荷条件を同じにするため、死荷重相当の荷重を1週間荷重・保持した後に試験に供した。

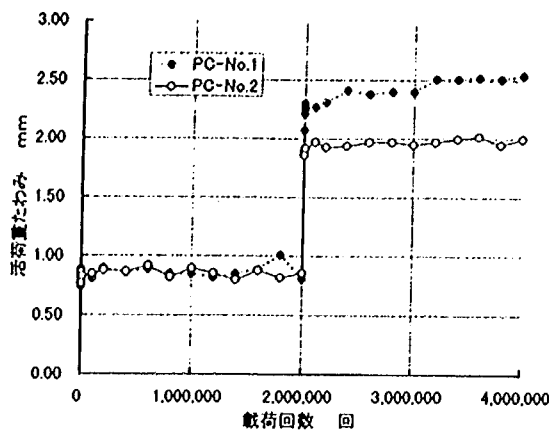
疲労試験は、その荷重速度を1~3 Hz、繰返し荷重回数を各荷重レベル段階で200万回づつの合計400万回とし、試験体の各部ひずみ、支間中央等のたわみ、および、ひび割れ幅を、適時、静的に測定した。

疲労試験実施後、静的荷重試験を実施し、各試験体の変形性能、および曲げ耐力を測定した。

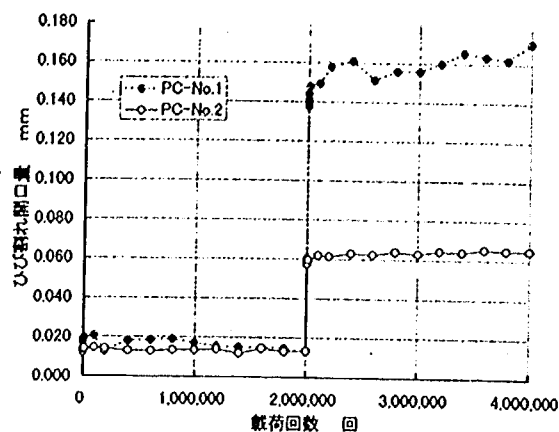
5.4.4 試験結果および考察

(1) 疲労試験

疲労試験実施中における上限荷重と下限荷重の差である活荷重たわみと、ひび割れ幅の推移は、付属図-5.4.2、および、付属図-5.4.3にそれぞれ示す通りである。活荷重たわみ、および、ひび割れ幅は、プレストレス力によりけたの全断面が有効に機能すると考えられる荷重レベル1では、無補強試験体PC-No. 1と補強試験体PC-No. 2との間で大きな差は見られなかった。荷重レベル2段階の荷重を荷重すると、PC-



付属図-5.4.2 載荷回数と中央部活荷重たわみの関係



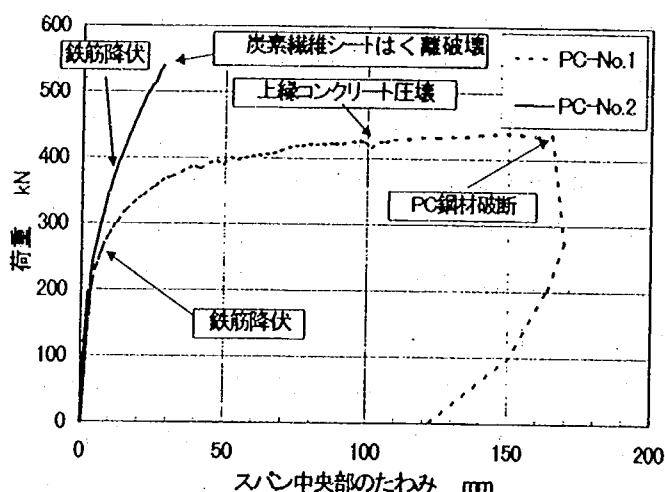
付属図-5.4.3 載荷回数と平均ひび割れ幅の関係

No. 1 の活荷重たわみ、および、ひび割れ幅は、10 回程度の載荷で急増し、その後も載荷回数とともに徐々に増加していく傾向が見られた。P C-No. 2 の活荷重たわみ、および、ひび割れ幅は、載荷初期とほぼ同じ値が疲労試験終了まで保持された。したがって、炭素繊維シートによる補強の効果は、ひび割れ発生相当の荷重を繰返し載荷した場合にも持続していることが確認された。なお、載荷レベル 2 による疲労試験終了時の P C-No. 2 の活荷重たわみは、同時点の P C-No. 1 の約 80% に低減されていた。

(2) 疲労試験後の静的載荷試験

疲労試験完了後に行った静的載荷試験で得られた各試験体の荷重とたわみの関係は、付属図-5.4.4 に示す通りである。

P C-No. 1 は、ひび割れ発生荷重 172kN を過ぎると曲げ剛性の低下が見られ、荷重 255 kN で引張鉄筋が降伏した後、更にその傾向を強め 427kN でコンクリートが圧壊を始めた。その後、荷重は殆ど増加せず、たわみが増加して 435kN で P C 鋼材が破断した。



付属図-5.4.4 疲労試験後の荷重-たわみ図

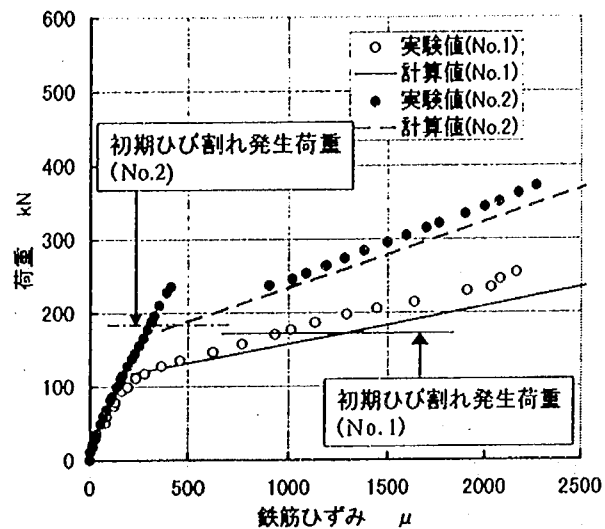
P C-No. 2 は、ひび割れ発生荷重までの荷重と変位の関係については無補強の P C-No. 1 との大きな差は見られなかったが、ひび割れ発生荷重 191kN 後の曲げ剛性の低下が P C-No. 1 より小さく、引張鉄筋の降伏荷重が 372kN と P C-No. 1 に比べ 46% 向上した。荷重は、引張鉄筋が降伏した後も増加し、538kN で炭素繊維シートがはく離破壊するまで増加し続けた。P C-No. 2 は、CFRP シートがはく離破壊を起こした際に変位計がはずれたため、そこで載荷試験を中止したが、その時点において、P C-No. 1 に比べ、最大耐力が 24% 向上し、載荷スパン中央部における炭素繊維シートのひずみが約 5,500 μ で

あった。

静的載荷試験で得られた載荷荷重と引張鉄筋のひずみの関係は、付属図-5.4.5 に示した通りである。ひび割れ発生荷重以降の鉄筋ひずみは、炭素繊維シート接着工法による補強により、補強前と比べて大幅に低減されていることが明らかである。また、図中の実線および破線は、各試験体の部材断面をプレストレス力による軸方向力と偏心曲げモーメントが作用するRC部材断面と仮定し、ヤング係数比に真の値を用いて、載荷荷重によって発生する鉄筋ひずみを算出したものである。計算値は、実験結果と良く一致し、この仮定により、炭素繊維シート工法で補強されたPCげたの、ひび割れ発生後の挙動を推測することが可能であることを示している。

5.4.5 まとめ

実げたの1/2規模のポストテンション方式PC造Tげたを炭素繊維シート接着工法により曲げ補強して、ひび割れが発生する荷重の繰返し200万回載荷による疲労試験を実施したところ、この工法は活荷重たわみの増加を抑制する効果を持つことが確認された。また、疲労試験終了後に行った静的載荷試験では、補強前に比して、このけたの鉄筋降伏荷重および最大曲げ耐力が増加し、ひび割れを許容したPCげたに対しても補強効果を持つことが確認された。さらに、ひび割れ発生以降の鉄筋のひずみは、プレストレス力による軸力と偏心曲げモーメントとが作用するRC部材断面と仮定することにより推定が可能であることがわかった。



付属図-5.4.5 荷重と鉄筋ひずみの関係

5.5 鉄筋コンクリートげたのせん断補強試験結果

5.5.1 試験の目的

既設の橋梁は、それに用いられているT型やI型断面の鉄筋コンクリート(以下、RCと略称する)造またはプレストレストコンクリート(以下、PCと略称する)造のけたに関して、通過車輛の大型化に伴う耐力の不足、あるいはスターラップの腐食等により、せん断補強の必要なものが増えつつある。これら橋梁のけたの補強は、軽くて施工性に優れている炭素繊維シート接着工法の適用が有効と考えられる。しかし、炭素繊維シートによるコンクリート部材のせん断補強は、柱や橋脚を対象に閉鎖型に巻き付けた場合には、その補強効果の把握が定式化等まで進んでいるのに対し、既設のコンクリート造Tげたを対象に炭素繊維シートをU字状等の部分的に貼り付けた場合、またはコンクリート造Iげたを対象に炭素繊維シートをウェブのみの部分的に貼り付けた場合については、その補強効果が明確になっていないのが現状である。

したがって、本研究では、実物大規模のRC造Tげた試験体のせん断スパンに炭素繊維シートをU字状に貼り付け、炭素繊維シートが含浸接着樹脂を含浸して硬化したCFRPシートによるせん断補強効果の確認、また、せん断破壊へ至る過程でのCFRPシートのはく離による破壊防止を意図するCFRPシート端部へのアンカーによる機械式定着がせん断補強に及ぼす効果の確認、そして、やはり実物大規模のRC造Iげた試験体のせん断スパン部ウェブのみに炭素繊維シートを短冊状に貼り付け、炭素繊維シートが含浸接着樹脂を含浸して硬化したCFRPシートによるせん断補強効果の確認、を目的として、静的載荷によるせん断試験を実施した。

なお、試験および結果の詳細は、「共同研究報告書(Ⅱ)、第Ⅱ編 炭素繊維シートによるコンクリートげたのせん断補強に関する研究」に譲ることとし、ここでは、試験結果の概要、およびせん断補強効果に関する考察についてまとめた。

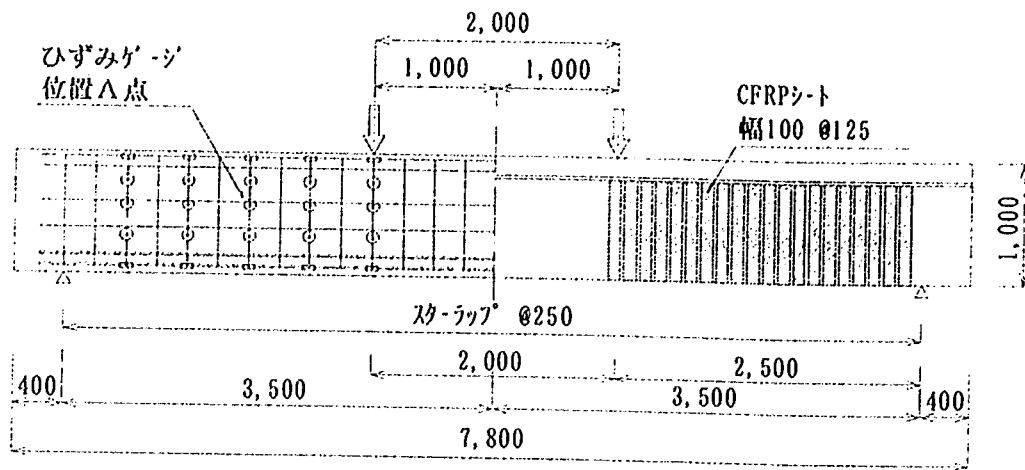
5.5.2 試験概要

(1) 試験体

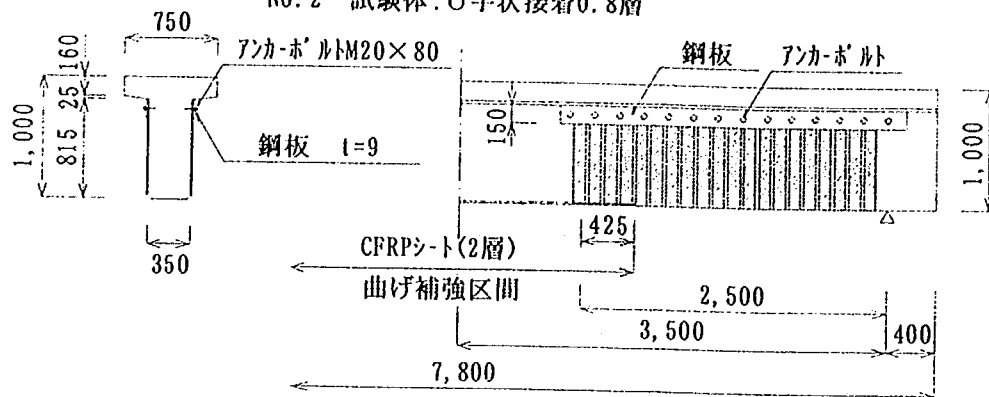
試験体のケースを 付属表-5.5.1 に、T型試験体の形状寸法を 付属図-5.5.1 に、I型試験体の形状寸法を 付属図-5.5.2 に、それぞれ示す。

付属表-5.5.1 試験体ケース一覧表

試験体 No.	試験体種類	試験体計画方針	炭素繊維シート の接着方法	試験 順序	備 考
1	RC- T型	無補強 ・無補強試験体のせん断耐力の確認 ・ひび割れ性状の確認	—	1	
2		CF補強(0.8層) ・CFシートのU型貼付のみによる補強効果の確認 ・ひび割れ抑制効果の確認	100mm幅のCFRP シートを縦幅125mm の中心間隔で 接着	2	
3		CF補強(0.8層) +鋼板アンカ-定着 ・同上 ・アンカー定着の効果確認		5	CFRPシートによる 曲げ補強 を実施
4		CF補強(1.6層) +鋼板アンカ-定着 ・CFシート補強量を2倍にし、 アンカー定着の効果確認		6	
5	RC- I型	無補強 ・無補強試験体のせん断耐力の確認 ・ひび割れ性状の確認	—	3	
6		CF補強(0.8層) ・CFシートをウェブに貼付時の、 補強効果確認	同上	4	



No. 2 試験体: U字状接着0.8層

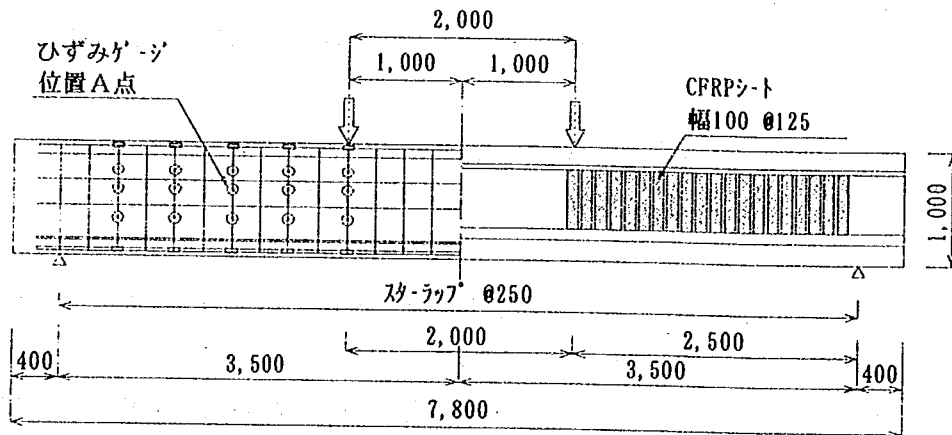


No. 3 試験体: U字状接着0.8層+アンカ定着

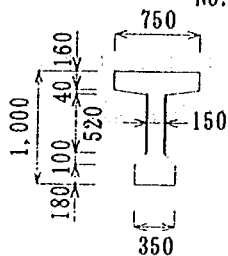
No. 4 試験体: U字状接着1.6層+アンカ定着

単位:mm

付属図-5.5.1 RC-T型試験体の形状寸法



No. 6 試験体: ウェブのみ短冊状接着0.8層



付属図-5.5.2 RC-I型試験体の形状寸法

単位:mm

試験体の基本寸法は、本試験の目的が、無補強試験体においては、斜めひび割れの進展状況とせん断耐力の把握、および、炭素繊維シートで補強した試験体においては、CFRPシートが斜めひび割れ進展に及ぼす効果と、CFRPシートに作用する引張力によるCFRPシートはく離がせん断耐力向上に及ぼす影響の確認であり、このためには、無補強および補強試験体が曲げの影響の少ないせん断スパン内でせん断破壊することが望ましいことから、試験体のせん断スパン比を2.5と設定し、さらに、CFRPシートの付着力を正しく反映するモデル化が必要であることから、試験体のけた高を実けたと同程度とすることとして、計画した。

RC-T型No. 1試験体は、無補強の基準試験体で、せん断スパン部分でのせん断破壊が支間中央部での曲げ破壊より先行するように設計し、コンクリートの設計基準強度を $\sigma_{ck}=24\text{kN/mm}^2$ 、スターラップをSD295のD10mm@250mm、軸方向主鉄筋をSD295のD35×8本、また、ウェブ内の軸方向補強筋をSD295のD13mm×4本@220mmとした。

RC-T型No. 2試験体は、No. 1試験体をせん断補強したもので、繊維目付量 200g/m^2 の高強度型炭素繊維シート(メーカー公称ヤング係数 $E_{cf}=230\text{kN/mm}^2$ 、本研究での評価後ヤング係数 $E_{cf}=245\text{kN/mm}^2$ 、保証引張強度 $\sigma_{cf}=3.4\text{kN/mm}^2$)1層を、けた底面を包むようにU字状に、また、コンクリートに発生する斜めひび割れの発生と進展を観察する目的で、幅100mmの炭素繊維シートを中心間隔125mmでウェブ上端まで、せん断スパン全長に貼り付けた。なお、本試験では、この貼付け方法による補強量を $100/125=0.8$ 層と称した。

RC-T型No. 3試験体は、No. 1試験体をNo. 2試験体と同様にせん断補強したもので、繊維目付量 200g/m^2 の高強度型炭素繊維シート0.8層を、けた底面を包むようにU字状に、せん断スパン全長に貼り付けた後、炭素繊維シート端部を鋼板150mm×9mmとアンカーボルトM-20×80mmで押さえる機械式定着を併用し、CFRPシートのはく離破壊防止を図った。また、No. 3試験体は、No. 1とNo. 2試験体のせん断試験結果の分析から、このせん断補強によるせん断耐力の向上により試験体中央部での曲げ破壊先行の可能性が考えられたため、繊維目付量 300g/m^2 の高強度型炭素繊維シート2層をけた底面の純曲げ区間部に貼り付け、曲げ耐力の向上を図った。

RC-T型No. 4試験体は、No. 3試験体のせん断補強量を2倍にしたもので、繊維目付量 200g/m^2 の高強度型炭素繊維シート1.6層を、けた底面を包むようにU字状に、せん断スパン全長に貼り付けた後、鋼板とアンカーボルトによる機械式定着を併用したものである。

RC-I型No. 5試験体は、無補強の基準試験体で、せん断スパン部分でのせん断破壊が支間中央部での曲げ破壊より先行するように設計し、コンクリートの設計基準強度を $\sigma_{ck}=24\text{kN/mm}^2$ 、スターラップをSD295のD10mm@250mm、軸方向主鉄筋をSD295のD35×6本、また、ウェブ内の軸方向補強筋をSD295のD13mm×4本@220mmとした。

RC-I型No. 6試験体は、No. 5試験体をせん断補強したもので、繊維目付量 200g/m^2 の高強度型炭素繊維シートを、ウェブ部分のみに、また、T型試験体と同様の目的で幅100mmの炭素繊維シートを中心間隔125mmの0.8層を短冊状に、せん断スパン全長に貼り付けた。

(2) 試験方法

載荷方法は、いずれの試験体も、試験体中央から外側1mの位置2ヶ所で、載荷点間隔を2mとする2点載荷とし、破壊に至るまでの静的単調載荷とした。

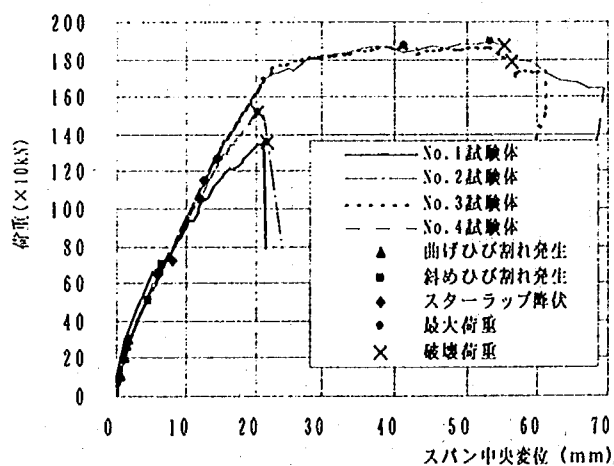
静的単調載荷試験中での測定項目は、荷重、変位、コンクリート・鉄筋・CFRPシートのひずみ、曲げひび割れと斜めひび割れの発生および進展の観察、および、破壊進行状況の観察とした。

5.5.3 試験結果の概要

試験結果の一覧を 付属表-5.5.2 に、T型およびI型各試験体の荷重とスパン中央相対変位との関係を、付属図-5.5.3 および 付属図-5.5.4 に、それぞれ示す。

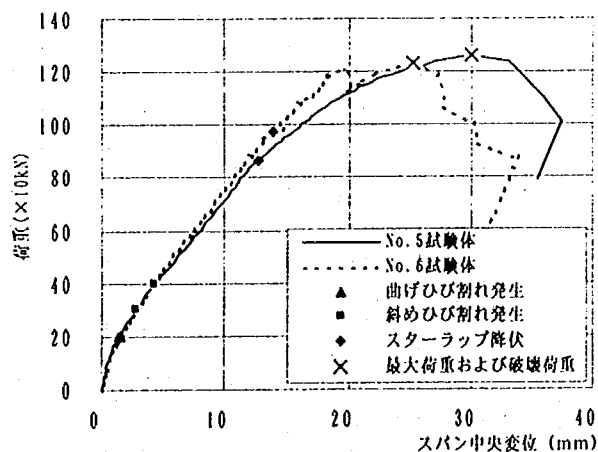
付属表-5.5.2 実験結果一覧表

試験体 No	曲げ ひび割れ 発生(目視)		斜め ひび割れ 発生(目視)		スターラップ 降伏		せん断補強シート 剥離発生			軸方向鉄筋 降伏		最大荷重		破壊荷重		破壊形態
	荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位	シート ひずみ	荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位	
	kN	mm	kN	mm	kN	mm	kN	mm	μ	kN	mm	kN	mm	kN	mm	
1	101	0.46	491	4.49	710	7.94	—	—	—	—	—	1,331	21.65	1,331	21.65	せん断破壊
2	198	1.16	639	6.24	1,038	12.00	1,234	15.51	4,483	—	—	1,481	20.17	1,481	20.17	せん断補強シート剥離を伴うせん断破壊
3	269	1.53	636	5.93	1,129	12.40	—	—	—	1,568	19.36	1,832	41.57	1,754	56.24	曲げ補強シート剥離を伴う曲げ破壊
4	293	1.76	686	6.49	1,249	14.50	—	—	—	1,567	19.27	1,858	53.23	1,837	55.18	曲げ補強シート剥離を伴う曲げ破壊
5	196	1.39	294	2.87	843	12.90	—	—	—	—	—	1,236	30.04	1,236	30.04	ウェブ圧壊
6	197	1.57	392	4.40	955	14.00	1,086	16.95	2,582	—	—	1,203	25.26	1,203	25.26	せん断補強シート剥離を伴うウェブ圧壊



付属図-5.5.3 T型試験体、

荷重～スパン中央変位の関係



付属図-5.5.4 I型試験体、

荷重～スパン中央変位の関係

試験体No. 1は、試験体計画時より大きいせん断耐力を示したものの、1,330kNでせん断破壊した。

試験体No. 2は、1,270kNでCFRPシート上端部にはく離が観察され、その後、斜めひび割れの進行と共にひび割れ上部のCFRPシートのはく離が接着面積の小さい順に進行し、1,480kNでCFRPシートが剥落、せん断破壊で終局に至った。

試験体No. 3は、1,570kNで軸方向鉄筋が降伏し、1,780kNで曲げ補強用CFRPシートの局部的にはく離と思われる音が観察され、載荷荷重の最大値1,830kNを経た後、1,720kNで曲げ補強用CFRPシートがはく離し終局に至った。

試験体No. 4は、No. 3と同様に、1,570kNで軸方向鉄筋が降伏し、載荷荷重の最大値1,860kNを経た後、1,650kNで曲げ補強用CFRPシートのはく離で終局に至った。

試験体No. 5は、294kNで斜めひび割れが発生し、843kNでスターラップが降伏、1,237kNでウェブコンクリートが圧壊し終局に至った。

試験体No. 6は、392kNで斜めひび割れが発生し、955kNでスターラップが降伏、1,087kN以降CFRPシートが徐々にはく離し、1,203kNでウェブコンクリートが圧壊し終局に至った。

5.5.4 せん断耐力向上効果に関する考察

(1) 斜めひび割れ発生荷重に与える効果

斜めひび割れ発生荷重は、付属表-5.5.2に示した荷重が斜めひび割れ発生を目視により認めた時点のものであり、実際の斜めひび割れが目視確認以前に発生している可能性があることから、ひび割れ進展状況観察図、およびスターラップのひずみ状況を再検討し、見直すこととした。

見直した斜めひび割れ発生荷重は、付属表-5.5.3に示す通りである。

付属表-5.5.3 斜めひび割れ発生荷重見直し値と荷重増加率

試験体 形状	No.	目視に よる荷重 kN (tf)	スターラップひずみに よる荷重見直し値 kN (tf)	ひずみ 発生 位置	コンクリート強度補正			補正後の 荷 重 kN (tf)	荷重比
					圧縮強度 N/mm ² (kgf/cm ²)	引張強度 N/mm ² (kgf/cm ²)	その比		
T型	1	491 (50.1)	442 (45.1)	ST-20	27.8 (283)	2.20 (22.4)	1.000	442 (45.1)	1.000
	2	639 (65.2)	492 (50.2)	ST-11	23.0 (235)	2.01 (20.5)	1.093	538 (54.9)	1.216
	3	636 (64.9)	489 (49.9)	ST-12	27.1 (276)	1.93 (19.7)	1.137	574 (58.5)	1.298
	4	686 (70.0)	576 (58.7)	ST-24	27.3 (278)	2.03 (20.7)	1.082	623 (63.5)	1.408
I型	5	294 (30.0)	270 (27.5)	ST-12	26.5 (270)	2.47 (25.2)	1.000	270 (27.5)	1.000
	6	392 (40.0)	404 (41.2)	ST- 8	29.3 (299)	2.25 (22.9)	1.100	444 (45.3)	1.648

T型試験体は、無補強の試験体No. 1の斜めひび割れ発生荷重442kN(45.1tf)で得られている斜めひび割れ位置のスターラップひずみ105 μ を基準とし、他のT型試験体でもこのスターラップひずみ105 μ の発生し

た時の載荷荷重が斜めひび割れ発生荷重であるとみなして、No. 2, No. 3, No. 4 試験体の載荷荷重とスターラップひずみに関する試験データより求めた。また、I 型試験体は、無補強の試験体 No. 5 の斜めひび割れ発生荷重 270kN (27.5tf) で得られている、ひび割れ図による最初の斜めひび割れ発生位置のスターラップひずみが 104 μ であり、このひずみに達した時の No. 6 試験体の載荷荷重を試験データより求めた。

さらに、付属表-5.5.3 では、各試験体のコンクリート強度のばらつきが斜めひび割れ発生荷重に影響を与えている可能性が強いことから、材料試験で得た実測引張強度を用いて、各試験体の斜めひび割れ発生荷重を補正した。

T 型補強試験体 No. 2 ~ No. 4 の無補強試験体 No. 1 に対する斜めひび割れ発生荷重の増分、およびその増加率は、付属表-5.5.3 に示したように、No. 2 試験体が 96kN (9.8tf) で 22%、No. 3 試験体が 132kN (13.4tf) で 30%、No. 4 試験体が 181kN (18.4tf) で 41% であった。また、I 型補強試験体 No. 6 の無補強試験体 No. 5 に対する荷重の増分、およびその増加率は、175kN (17.8tf) で 65% であった。

さらに、アンカーボルトによる機械式定着が斜めひび割れ発生荷重の増加に及ぼす影響は、0.8 層補強で機械式定着を伴わない No. 2 試験体の荷重増加率が 22%、0.8 層補強で機械式定着を併用した No. 3 試験体の荷重増加率が 30% であることから、機械式定着の効果として 8% 程度の荷重増加をもたらしていると推定される。

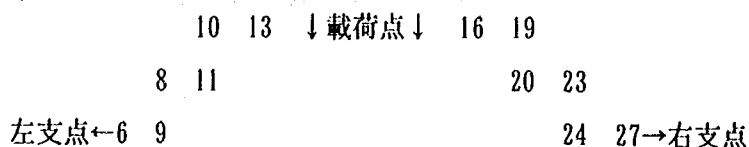
(2) スターラップ降伏荷重に与える効果

各試験体のスターラップ降伏荷重は、スターラップひずみが、試験体に用いたスターラップ D10mm の実測降伏点強度と実測ヤング係数とから求まるひずみ 1,867 μ を超えた時点の載荷荷重とした。炭素繊維シートによるせん断補強がスターラップの降伏荷重に及ぼす効果は、付属表-5.5.4 に示す通りである。

付属表-5.5.4 スターラップ降伏荷重と荷重増加率

試験体 形状	No.	スターラップ降伏荷重		増分荷重	
		荷重 kN (tf)	ひずみ発生位置	kN (tf)	%
T 型	1	710 (72.4)	ST-23	— (—)	—
	2	1,039 (105.9)	ST-8, -23	329 (33.5)	46
	3	1,130 (115.2)	ST-8	420 (42.8)	59
	4	1,249 (127.4)	ST-8	539 (55.0)	76
I 型	5	843 (86.0)	ST-5, 6, 12, 20, 23	— (—)	—
	6	955 (97.4)	ST-8	112 (11.4)	13

なお、付属表-5.5.4 に示した、スターラップ降伏荷重を定めるのに用いたひずみ計位置(ST-No.)は、付属図-5.5.1 および 付属図-5.5.2 に示したひずみゲージ位置 A 点付近である試験体の載荷点と支点とを結ぶ斜めひび割れ線上にあり、以下の位置関係にある。しかも、発生位置は、この中でも対称な位置関係にある ST-8 または ST-23 に集中していることを見ることができる。



T型補強試験体No. 2～No. 4の無補強試験体No. 1に対するスターラップ降伏荷重の増分、およびその増加率は、No. 2試験体が329kN (33.5tf)で46%、No. 3試験体が420kN (42.8tf)で59%、No. 4試験体が539kN (55.0tf)で76%である。

I型補強試験体No. 6の無補強試験体No. 5に対するスターラップ降伏荷重の増分、およびその増加率は、112kN (11.4tf)で13%であり、T型断面ほどの効果は得られていない。これは、この効果がCFRPシートのコンクリート面への付着性能に左右されると推定されることから、I型試験体のせん断補強用CFRPシートの定着長がT型試験体に比較して短いことに起因するものと考えられる。

また、機械式定着は、0.8層補強で機械式定着を伴わないNo. 2試験体の荷重増加率が46%で、これに対し0.8層補強で機械式定着を併用したNo. 3試験体の荷重増加率が59%であることから、機械式定着の効果は、スターラップ降伏荷重を13%増加させる効果を持つものであると推定できる。

(3) CFRPシートとスターラップの引張力分担度

CFRPシートおよびスターラップに発生しているひずみ ε_{cf} と ε_s から、両者に作用する引張力を推定した結果を 付属図-5.5.5 に示す。

引張力は、スターラップ配置間隔25cm幅を対象として推定することとし、CFRPシートの引張力 P_{cf} を、

$$P_{cf} = \varepsilon_{cf} \times A_{cf} \times E_{cf} \quad \text{ここに、} A_{cf} = \text{厚さ} 0.0111\text{cm} \times \text{幅} 25\text{cm} \times (0.8 \sim 1.6\text{層}) \times 2$$
$$E_{cf} : \text{本実験で実施した材料試験で得たヤング係数}$$
$$= 240 \text{ kN/mm}^2$$

また、スターラップの引張力 P_s は、

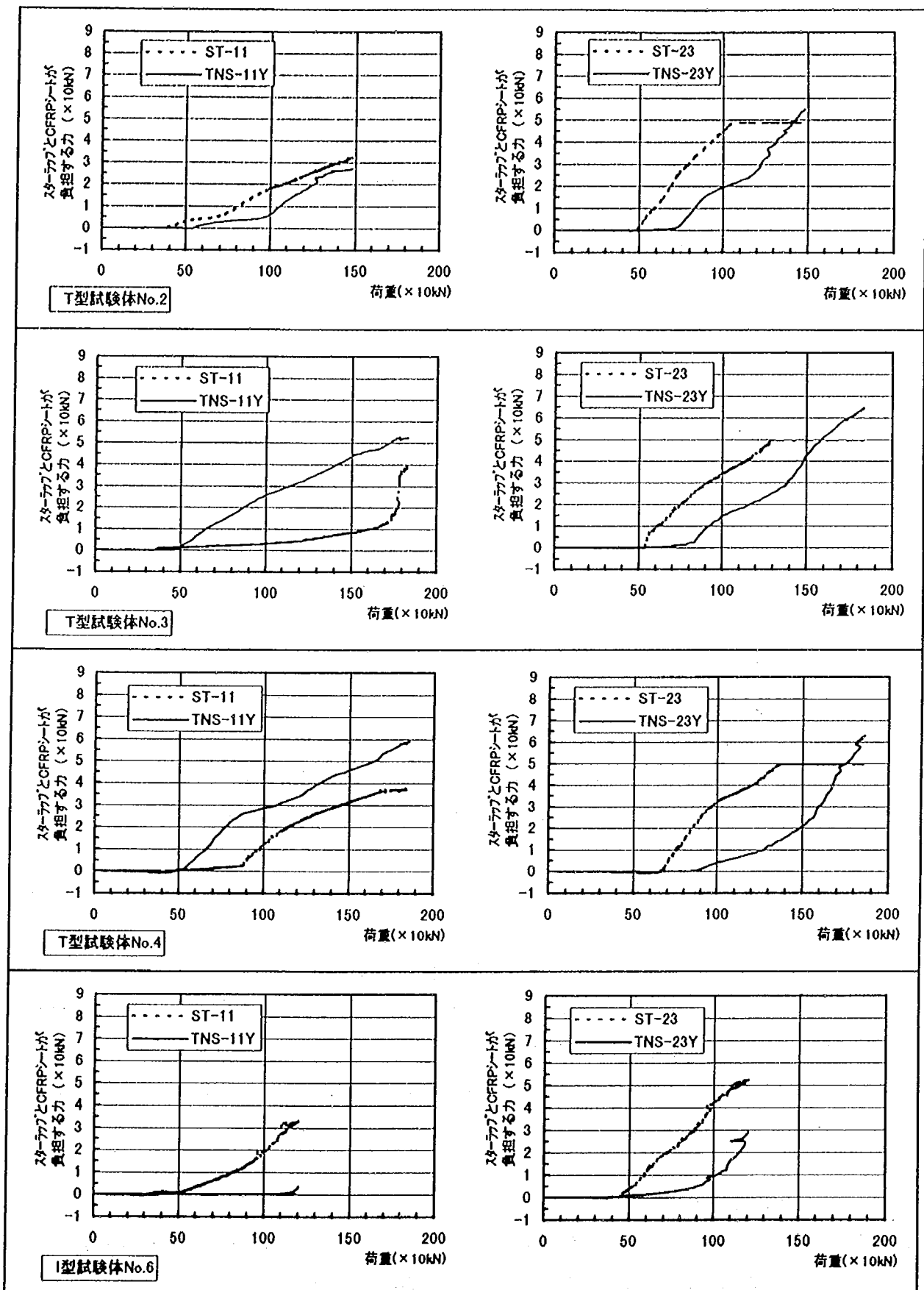
$$P_s = \varepsilon_s \times A_s \times E_s \quad \text{ここに、} A_s = 2 \times D10\text{mm} = 2 \times 0.7133\text{cm}^2$$
$$E_s : \text{本実験で実施した材料試験で得たヤング係数}$$
$$= 176 \text{ kN/mm}^2$$

で求めた。ただし、スターラップのひずみが降伏点ひずみ $1,867\mu$ 以上の場合は $1,867\mu$ とした。

なお、付属図-5.5.5 に示したスターラップひずみの計測点 ST-11とST-23 は、付属表-5.5.4 の説明で述べたように、計測点の ST-8とST-23、および ST-11とST-20 が、それぞれ対称位置にあることから、各対称点を代表するものとして選んだ。

CFRPシートとスターラップの引張力分担状況は次の通りである。

- ① スターラップが、降伏する少し前から増加荷重に対するせん断力分担効果が低下するにつれて、CFRPシートは、分担荷重を増加させ、スターラップ降伏後も載荷重の増加と比例してせん断力の負担を増加させていく傾向にある。
- ② CFRPシートは、スターラップ降伏後もせん断力負担を直線的に増加させており、CFRPシートが機械式定着により確実に定着されていれば、このせん断力負担傾向はせん断破壊に達するまで、継続していると考えられる。



付属図-5.5.5 CFRPシートとスターラップのせん断力分担状況

(4) 最大荷重に与える効果

各試験体がせん断破壊することを前提に材料試験結果を用いて計算により推定した最大荷重を、実験で得られた最大荷重と対比して、付属表-5.5.5 に示す。

付属表-5.5.5 最大荷重に関する計算値と実験値の対比

試験体 形状	No.	計算値		実験値			実験値 計算値	破壊形状
		せん断耐力 kN (tf)	最大荷重 kN (tf)	最大荷重 kN (tf)	増分 kN (tf)	増加率 (%)		
T 型	1	454 (46.37)	908 (92.54)	1,332 (135.8)	— (—)	—	1.47	せん断破壊
	2	1,000 (102.01)	2,000 (204.02)	1,482 (151.1)	150 (15.3)	11	0.74	シートはく離を伴う せん断破壊
	3	1,016 (103.63)	2,033 (207.26)	1,833 (186.9)	501 (51.1)	38	0.86	曲げ補強シートはく離時に最 大荷重を示したのち曲げ破壊
	4	1,582 (161.31)	3,164 (322.62)	1,859 (189.6)	527 (53.8)	40	0.58	曲げ補強シートはく離時に最 大荷重を示したのち曲げ破壊
I 型	5	306 (31.18)	612 (62.36)	1,237 (126.1)	— (—)	—	2.02	ウェブ圧壊
	6	884 (90.16)	1,768 (180.32)	1,204 (122.8)	-33 (-3.3)	-3	0.68	シートはく離を伴う ウェブ圧壊

また、付属表-5.5.5 には、実験で得られた各試験体の最大荷重の無補強試験体No. 1 の最大荷重に対する増分とその割合、および、計算値に対する実験値の比も示した。

炭素繊維シート0.8層を貼付けたT型補強試験体No. 2 の最大荷重が、せん断補強用CFRPシートのはく離破壊により、無補強試験体No. 1 に比して荷重増分で150kN (15.3tf)、増加率で11%に留まったのに対し、同じ補強量で機械式定着を併用したNo. 3 試験体は、破壊形態を曲げ破壊に移行させた時点で501kN (51.1tf) の荷重増分がみられ、荷重増加率が38%であった。炭素繊維シート補強量をNo. 3 の2倍である1.6層とし機械式定着を併用したNo. 4 試験体は、荷重増分が527kN (53.8tf) で荷重増加率が40%と、No. 3 と同程度であった。

一方、I型補強試験体No. 6 の無補強試験体No. 5 に対する荷重増分および増加率は、-33kN (-3.3tf) および-3%であった。

したがって、炭素繊維シート接着工法によるせん断補強は、最大荷重に対する補強効果を得るためには機械式定着が必要であることが明らかとなった。なお、機械式定着を併用した炭素繊維シート補強量1.6層のCFRPシートひずみが機械式定着を併用した同0.8層のCFRPシートひずみの50%程度であったことから、CFRPシート破断までには大きく余裕があり、機械式定着が有効な範囲で、その保証ひずみまで耐力を発揮することが可能と考えられる。

(5) せん断力負担構成の検討

最大せん断耐力等を、コンクリートが負担するせん断力 S_c 、スターラップが負担するせん断力 S_h 、CFRPが負担するせん断力 S_{cl} に区分して算出した結果を 付属表-5.5.6 に示す。

付属表-5.5.6 せん断力負担構成対比表

試験体 形状	No.	材料試験値から求めたせん断耐力の構成						実験時荷重から求めた負担力の構成					ひずみから求めた負担力の構成および[比]			
		コンクリート負担力			スラップ 負担力 Sh kN (tf)	CFRPシート 負担力 Scf kN (tf)	せん断 耐力 ΣS kN (tf)	載荷重 kN (tf)	最大 せん断力 ΣS kN (tf)	コンクリート 負担力 Sc kN (tf)	スラップ 負担力 Sh kN (tf)	CFRPシート 負担力 Scf kN (tf)	コンクリート 負担力 Sc kN (tf)	スラップ 負担力 Sh kN (tf)	CFRPシート 負担力 Scf kN (tf)	合 計 ΣS kN (tf)
		圧縮強度 σc N/mm ² (kgf/cm ²)	平均せん断 応 力 度 N/mm ² (kgf/cm ²)	Sc kN (tf)												
T 型	1	27.8 (283)	0.98 (10.02)	307 (31.30)	147 (14.97)	—	454 (46.27)	1,332 (135.8)	666 (67.90)	519 (52.93)	147 (14.97)	—	307 (31.30) [0.591]	147 (14.97) [1.000]	—	454 (46.27) [0.681]
	2	23.0 (235)	0.92 (9.42)	289 (29.43)	147 (14.97)	565 (57.61)	1,000 (102.01)	1,482 (151.1)	741 (75.55)	488 (49.77)	147 (14.97)	106 (10.81)	289 (29.43) [0.591]	147 (14.97) [1.000]	170 (17.29) [1.599]	605 (61.69) [0.817]
	3	27.1 (276)	0.97 (9.94)	304 (31.05)	147 (14.97)	565 (57.61)	1,016 (103.63)	1,833 (186.9)	916 (93.45)	515 (52.51)	147 (14.97)	255 (25.97)	304 (31.05) [0.591]	147 (14.97) [1.000]	200 (20.40) [0.786]	651 (66.42) [0.711]
	4	27.3 (278)	0.98 (9.96)	305 (31.11)	147 (14.97)	1,130 (115.23)	1,582 (161.31)	1,859 (189.6)	930 (94.80)	516 (52.61)	147 (14.97)	267 (27.22)	306 (31.11) [0.591]	147 (14.97) [1.000]	254 (25.85) [0.950]	705 (71.93) [0.759]
I 型	5	26.5 (270)	1.16 (11.79)	157 (16.00)	149 (15.18)	—	306 (31.18)	1,237 (126.1)	618 (63.05)	469 (47.87)	149 (15.18)	—	157 (16.00) [0.334]	149 (15.18) [1.000]	—	306 (31.18) [0.495]
	6	29.3 (299)	1.12 (12.20)	162 (16.56)	149 (15.18)	573 (58.42)	884 (90.16)	1,204 (122.8)	602 (61.40)	486 (49.55)	149 (15.18)	-33 (-3.33)	162 (16.56) [0.334]	149 (15.18) [1.000]	159 (16.18) [—]	470 (47.92) [0.780]

注) []は、(ひずみから求めた負担力)/(実験時荷重から求めた負担力)の値。

この表に示した、せん断耐力の構成、および、作用せん断力に対する負担力の構成の算出方法は、以下の通りである。

① 材料試験値から求めたせん断耐力

S_c : コンクリートの圧縮強度補正を行い、終局時の平均せん断応力度を用いて算出した

S_h : スターラップの降伏応力度を用いてトラス理論により求めた

S_{cf} : CFRPシートの引張強度が100%有効に働くものとしてトラス理論により求めた

② 実験時荷重から求めた作用せん断力に対する負担力

S_c : 補強試験体のコンクリートが負担したせん断力の推定値は、付属表-5.5.6 に示したように、無補強試験体で得られた計算値と実験結果の比である、 $52.93/31.30=1.691$ を、計算値 S_c に乘じたものとした

S_h : スターラップの降伏点応力度を用いてトラス理論により求めた

S_{cf} : $\Sigma S - (S_c + S_h)$ とした

③ ひずみから求めたせん断耐力

S_c : コンクリートの圧縮強度補正を行い、終局時の平均せん断応力度を用いて算出した

S_h : スターラップの降伏点応力度を用いてトラス理論により求めた

S_{cf} : 実験で得られている最大荷重時のCFRPシートの最大ひずみに、実測ヤング係数を乗じて求めた

①～③ の計算結果により以下のことが明らかになった。

- ・ 土木研究所資料3426号に示されているコンクリートが終局時に保有する平均せん断応力度の推定式に土木学会コンクリート標準示方書に定めるコンクリート強度補正を適用して、計算により求めたコンクリートが負担するせん断力 S_c は、実験時の作用せん断力から推定した S_c の約60%程度であった。
- ・ CFRPシート端部に機械式定着を併用した場合において、実験時に得られているCFRPシートのひずみを用いてトラス理論によって計算により求めた、CFRPシートが負担するせん断耐力 S_{cf} は、実験時の作用せん断力から推定した S_{cf} の79～95%であり、本実験の結果ではCFRPシートが負担するせん断力 S_{cf} をトラス理論により安全側の値として求めることができる。

5.5.5 まとめ

(1) RC-T型試験体に関する試験結果のまとめ

実物大のT型断面を有する鉄筋コンクリートげたの、無補強1体、補強3体、合計4体を対象に、炭素繊維シート接着工法によるせん断補強効果を静的単調載荷試験により確認した結果は、以下の通りであった。

① せん断補強した試験体の斜めひび割れ発生荷重は、無補強試験体に比して、炭素繊維シート0.8層補強の場合に約22%、0.8層補強量で機械式定着併用の場合に約30%、1.6層補強量で機械式定着併用の場合に約41%、それぞれ増加した。したがって、炭素繊維シート接着工法によるせん断補強は、補強を施すことが

斜めひび割れ発生荷重に対する補強効果を得ることとなる。

② せん断補強した試験体のスターラップ降伏荷重は、無補強試験体に比して、炭素繊維シート0.8層補強量の場合に約45%、0.8層補強量で機械式定着併用の場合に約60%、1.6層補強量で機械式定着併用の場合に約75%、それぞれ増加した。したがって、炭素繊維シート接着工法によるせん断補強は、炭素繊維シート量の増加と機械式定着の両者がスターラップ降伏荷重に対する補強効果を増加させる傾向にある。

③ せん断補強した試験体の最大荷重は、無補強試験体に比して、炭素繊維シート0.8層補強量の場合でCFRPシートのはく離破壊時に約11%、0.8層補強量に機械式定着併用の場合で曲げ破壊時に約38%、1.6層補強量に機械式定着併用の場合で曲げ破壊時に約40%の増加が確認された。したがって、炭素繊維シート接着工法によるせん断補強は、最大荷重に対する補強効果を得るためには機械式定着が必要である。そして、機械式定着を併用した場合の炭素繊維シート量の増加は、CFRPシートに発生するひずみを低減し、しかもCFRPシートは、機械式定着が有効な範囲でその保証ひずみまで耐力を発揮することが可能と想定することができる。

④ 機械式定着を併用した場合の載荷試験で得られたコンクリート、スターラップ、およびCFRPシートの負担するせん断力と合計せん断力に対する、材料試験結果と載荷試験時発生ひずみから求めたそれぞれの計算せん断力は、コンクリートが約60%、スターラップが100%、CFRPシートが約79~95%、合計が71~76%であった。したがって、機械式定着を併用した場合の炭素繊維シート接着工法によりせん断補強した試験体のせん断耐力推定は、道路橋示方書に定める既往のせん断耐力計算方法を適用して安全側に行うことができる。

(2) RC-I型試験体に関する試験結果のまとめ

実物大のI型断面を有する鉄筋コンクリートげたの、無補強1体、補強1体、合計2体を対象に、炭素繊維シート接着工法によるせん断補強効果を静的単調載荷試験により確認した結果は、以下の通りであった。

炭素繊維シート0.8層でせん断補強した試験体は、無補強試験体に比して、斜めひび割れ発生荷重を約30~40%、スターラップ降伏荷重を約10%向上させることができた。しかし、無補強と同程度の最大荷重でせん断補強用CFRPシートはく離の後ウェブ圧壊したため、せん断耐力向上効果は認められなかった。したがって、この場合のせん断補強効果は、CFRPシートの付着が確保された状態での斜めひび割れ発生荷重のみに限られるといえる。しかし、ウェブに貼付けた炭素繊維シートの上下端を機械式に定着することができる場合は、T型げたと類似の傾向が得られると想定される。

付属資料6 コンクリートげたの補強に関する計算例

6.1 鉄筋コンクリートげたの曲げ補強に関する計算例

6.1.1 計算条件

(1) 断面の条件

フランジ幅 $b = 2,050 \text{ mm}$

ウェブ厚 $b_w = 450 \text{ mm}$

けた高 $h = 1,250 \text{ mm}$

床版厚さ $t = 170 \text{ mm}$

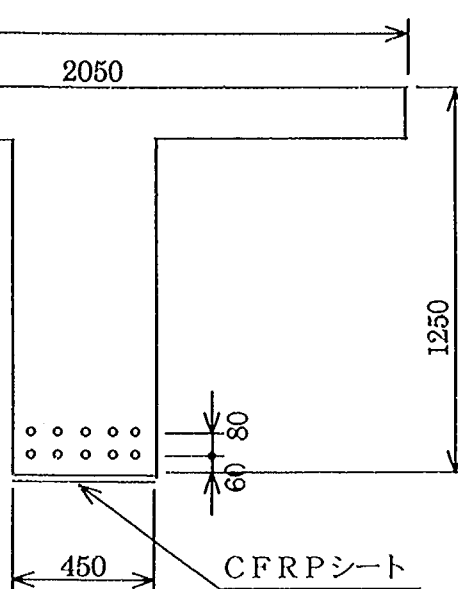
1 段目鉄筋位置 $d_1 = 1,190 \text{ mm}$

2 段目鉄筋位置 $d_2 = 1,110 \text{ mm}$

主鉄筋量 1 段目 $A_{s1} = 5 - D32 = 3.971 \text{ mm}^2$

2 段目 $A_{s2} = 5 - D32 = 3.971 \text{ mm}^2$

10-D32



(2) 材料および許容応力度

① 既存コンクリート

設計基準強度 $\sigma_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$

ヤング係数 $E_c = 25 \text{ kN/mm}^2$

許容曲げ圧縮応力度 $\sigma_{ca} = 7.8 \text{ N/mm}^2$

② 既存鉄筋 (SD30)

ヤング係数 $E_s = 200 \text{ kN/mm}^2$

降伏点応力度 $\sigma_{sy} = 295 \text{ N/mm}^2$

許容引張応力度 $\sigma_{sa} = 180 \text{ N/mm}^2$

③ 補強用の高強度型炭素繊維シート

保証引張強度 $\sigma_{cfuk} = 3.4 \text{ kN/mm}^2$

ヤング係数 $E_{cf} = 245 \text{ kN/mm}^2$

終局時の設計ひずみ $\varepsilon_{cf} = \text{保証ひずみ} \times 0.8 \text{ 倍} = (3.4/245) \times 0.8 = 0.0111$

④ 補強用の高弾性型炭素繊維シート

保証引張強度 $\sigma_{cfuk} = 1.9 \text{ kN/mm}^2$

ヤング係数 $E_{cf} = 640 \text{ kN/mm}^2$

終局時の設計ひずみ $\varepsilon_{cf} = \text{保証ひずみ} \times 0.8 \text{ 倍} = (1.9/640) \times 0.8 = 0.00238$

付属図-6.1.1 鉄筋コンクリートげたの断面形状 (単位: mm)

(3) B 活荷重作用時の設計曲げモーメント

死荷重モーメント $M_D = 695 \text{ kN} \cdot \text{m}$

活荷重モーメント $M_L = 845 \text{ kN} \cdot \text{m}$

合計モーメント $M_{DL} = 1,540 \text{ kN} \cdot \text{m}$

6.1.2 現状断面の安全性照査

(1) 照査方針

「道路橋示方書 Ⅲ コンクリート橋編」に示されている、軸力および曲げモーメントが作用する鉄筋コンクリート部材断面の安全性照査方法の考え方に従って、設計荷重作用時の応力度照査、および、終局荷重作用時の破壊抵抗曲げモーメントに対する安全度の照査を行う。

(2) 設計荷重作用時の応力度照査

圧縮縁から中立軸までの距離 x は、以下の式で求める。

$$\text{圧縮縁から中立軸までの距離 } x = \frac{-A + \sqrt{A^2 + b_w B}}{b_w}$$

$$\text{ここで、 } A = nA_{s1} + nA_{s2} + (b - b_w) \cdot t$$

$$B = 2nA_{s1} \cdot d_1 + 2nA_{s2} \cdot d_2 + (b - b_w) \cdot t^2$$

断面2次モーメント I は、以下の式で求める。

$$\text{断面2次モーメント } I = \frac{bx^3}{3} - \frac{(b - b_w)(x - t)^3}{3} + nA_{s1} \cdot (d_1 - x)^2 + nA_{s2} \cdot (d_2 - x)^2$$

これらの式より求めた値は、それぞれ、次の通りである。

$$\text{圧縮縁から中立軸までの距離 } x = 342.07 \text{ mm}$$

$$\text{断面2次モーメント } I = 1.02587 \times 10^{11} \text{ mm}^4$$

したがって、部材断面の応力度は、次の通りとなる。

$$\begin{aligned} \text{コンクリートの圧縮応力度 } \sigma_c &= M_{DL} \cdot x / I \\ &= (1,540 \times 10^6 \times 342.07) / (1.02587 \times 10^{11}) \\ &= 5.14 \text{ N/mm}^2 < 7.8 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{鉄筋の引張応力度 } \sigma_s &= n \cdot M_{DL} \cdot (d_o - x) / I \\ &= \{15 \times 1,540 \times 10^6 \times (1,190 - 342.07)\} / (1.02587 \times 10^{11}) \\ &= 190.94 \text{ N/mm}^2 > 180 \text{ N/mm}^2 \quad \text{NG} \end{aligned}$$

(3) 終局荷重作用時の破壊抵抗曲げモーメントの照査

終局荷重作用時の曲げモーメント $M_{\phi 0}$ は、「道路橋示方書 Ⅲ コンクリート橋編」により、次のようになる。

$$1.3M_D + 2.5M_L = 1.3 \times 695 + 2.5 \times 845 = 3,016.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$1.0M_D + 2.5M_L = 1.0 \times 695 + 2.5 \times 845 = 2,807.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$1.7(M_D + M_L) = 1.7 \times (695 + 845) = 2,618.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

したがって、照査に用いる終局荷重作用時の曲げモーメント $M_{\phi 0}$ は、上記の最大値 $3,016.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$ とする。

部材断面の破壊抵抗曲げモーメント M_{ur} は、以下の条件で算出する。

- ① コンクリートおよび鉄筋の応力度-ひずみ曲線は、「道路橋示方書 Ⅲ コンクリート橋編」に準ずるものとする。
- ② コンクリートの設計基準強度 σ_{ck} が 24N/mm^2 であることから、コンクリートの終局ひずみを 0.0035 とする。
- ③ 主鉄筋は、材質がSD30であるが現在の評価方法により、降伏点応力度を $\sigma_{sy} = 295\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数を $E_s = 200\text{kN/mm}^2$ とする。

「道路橋示方書 Ⅲ コンクリート橋編」に準じて行った計算結果は、次の通り。

終局荷重時の中立軸の圧縮縁からの距離 $x = 69.13\text{ mm}$

破壊抵抗曲げモーメント $M_{ur} = 2,627.0\text{ kN}\cdot\text{m} < 3,016.0\text{ kN}\cdot\text{m}\quad \text{NG}$

6.1.3 部材断面の応力度低減を目的とする補強

(1) 補強計算方針

上記6.1.2(2)で行った現状断面での応力度照査の結果、鉄筋応力度が許容応力度を超えているので、炭素繊維シート接着工法による補強を検討することとし、補強は、公称ヤング係数 $E_{cf} = 640\text{kN/mm}^2$ 、繊維目付量 300g/m^2 の高弾性型炭素繊維シート4層を、けた下面の部材軸方向全長に貼り付けることにより行うものとする。炭素繊維シートに関する諸値は、「本指針(案)、Ⅰ 共通編、3章、3.2 炭素繊維シート」を参照のこと。

炭素繊維は、炭素繊維シートが含浸接着樹脂による含浸・硬化により、CFRPシート形成後に生じる曲げモーメントに対して抵抗することができる。したがって、「本指針(案)、Ⅲ コンクリートげた編、4章、4.4 曲げ補強設計」に従って、CFRPシート形成前から生じている曲げモーメントに対しては補強前の断面で、CFRPシート形成後に生じる曲げモーメントに対しては補強後の断面で、それぞれ各部の応力度算出を行い、両者の計算結果を合計することにより、補強後の断面各部の応力度を算定する。

(2) CFRPシート形成前から生じている曲げモーメントによる応力度

死荷重による曲げモーメントを対象として応力度を求める。

圧縮縁から中立軸までの距離 $x = 342.07\text{ mm}$

断面2次モーメント $I = 1.02587 \times 10^{11}\text{ mm}^4$

コンクリート圧縮応力度 $\sigma_c = M_0 \cdot x / I$
 $= (695 \times 10^6 \times 342.07) / (1.02587 \times 10^{11})$
 $= 2.32\text{ N/mm}^2$

鉄筋応力度 $\sigma_s = n \cdot M_0 \cdot (d - x) / I$
 $= \{15 \times 695 \times 10^6 \times (1,190 - 342.07)\} / (1.02587 \times 10^{11})$
 $= 86.17\text{ N/mm}^2$

(3) CFRPシート形成後に生じる曲げモーメントによる応力度

活荷重による曲げモーメントを対象として応力度を求める。

CFRPシート形成後の断面諸値、および応力度は、次の通り。

$$\text{炭素繊維シート断面積} \quad A_{cf} = t_{cf} \times b_w \times \text{層数} = 0.143 \times 450 \times 4 = 257.4 \text{ mm}^2$$

$$\text{炭素繊維とコンクリートのヤング係数比} \quad n_{cf} = 640/13.3 = 48.1$$

$$\text{圧縮縁から中立軸までの距離 } x = \frac{-A + \sqrt{A^2 + b_w B}}{b_w}$$

$$\text{ここで、} \quad A = nA_{s1} + nA_{s2} + n_{cf}A_{cf} + (b - b_w) \cdot t$$

$$B = 2nA_{s1} \cdot d_1 + 2nA_{s2} \cdot d_2 + 2n_{cf}A_{cf} \cdot h + (b - b_w) \cdot t^2$$

$$\text{断面2次モーメント } I = \frac{bx^3}{3} - \frac{(b - b_w)(x - t)^3}{3} + A_{s1} \cdot (d_1 - x)^2 + nA_{s2} \cdot (d_2 - x)^2 + n_{cf}A_{cf} \cdot (h - x)^2$$

$$\text{圧縮縁から中立軸までの距離} \quad x = 362.08 \text{ mm}$$

$$\text{断面2次モーメント} \quad I = 1.12572 \times 10^{11} \text{ mm}^4$$

$$\begin{aligned} \text{コンクリート圧縮応力度} \quad \sigma_c &= M_L \cdot x / I \\ &= (845 \times 10^6 \cdot 362.08) / (1.12572 \times 10^{11}) \\ &= 2.72 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{引張鉄筋応力度} \quad \sigma_s &= n \cdot M_L \cdot (d - x) / I \\ &= \{15 \times 845 \times 10^6 \times (1,190 - 362.08)\} / (1.12572 \times 10^{11}) \\ &= 93.22 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

(4) 合計応力度

$$\text{コンクリート圧縮応力度} \quad \sigma_c = 2.32 + 2.72 = 5.04 \text{ N/mm}^2 < 7.8 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

$$\text{鉄筋応力度} \quad \sigma_s = 86.17 + 93.22 = 179.39 \text{ N/mm}^2 < 180 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

したがって、ヤング係数 $E_{cf} = 640 \text{ kN/mm}^2$ 、繊維目付量 300 g/m^2 の炭素繊維シート4層を、けた下面の部材軸方向全長に貼り付けることにより、鉄筋応力度を許容応力度以下に収めることができる。

6.1.4 補強後のたわみ改善効果の推定

炭素繊維シート接着工法による補強後の活荷重たわみ改善効果は、「本指針(案)、Ⅲ コンクリートげた編、4.4 曲げ補強設計」の方法で推定する。

なお、補強前と補強後の換算断面2次モーメントを計算するにあたり、鉄筋および炭素繊維シートのコンクリートとのヤング係数比は真の値を用いる。

$$\text{現状断面の換算断面2次モーメント} \quad I_1 = 6.19629 \times 10^{10} \text{ mm}^4$$

ヤング係数 640 kN/mm^2 、繊維目付量 300 g/m^2 の炭素繊維シート4層を桁下面の部材軸方向全長に貼

り付けた後の、換算断面2次モーメント $I_2 = 6.85082 \times 10^{10} \text{ mm}^4$

したがって、炭素繊維シート補強後のB活荷重載荷時における活荷重たわみの改善効果は、

$$(I_1 / I_2) = 6.19629 / 6.85082 = 0.9045$$

となる。

以上より、ヤング係数 $E_{cf} = 640 \text{ kN/mm}^2$ 、繊維目付量 300 g/m^2 の炭素繊維シート4層をけた下面の部材軸方向全長に貼り付けることにより、B活荷重によるたわみを約10%低減することができる。

なお、試算によれば、現状の部材断面でのB活荷重によるたわみ δ_1 が $\delta_1 = 11.92 \text{ mm}$ であることから、炭素繊維シートで補強した後の部材断面でのB活荷重によるたわみ δ_2 は、

$$\delta_2 = \delta_1 \times (I_1 / I_2) = 11.92 \times 0.9045 = 10.78 \text{ mm}$$

と推定することとなる。

6.1.5 部材の破壊抵抗曲げモーメント向上を目的とする補強

(1) 補強計算方針

現状の部材断面は、終局荷重作用時における部材断面の安全性を照査した結果、破壊抵抗曲げモーメント M_{ur} が終局荷重作用時の曲げモーメント M_{u0} よりも小さいため、補強が必要であり、炭素繊維シート接着工法による補強を検討する。

補強は、公称ヤング係数 $E_{cf} = 245 \text{ kN/mm}^2$ 、保証引張強度 $\sigma_{cfuk} = 3.4 \text{ kN/mm}^2$ 、繊維目付量 300 g/m^2 の高強度型炭素繊維シート2層を、けた下面の部材軸方向全長に貼り付けることとし、その炭素繊維断面積 A_{cf} を、 $A_{cf} = t_{cf} \times b_w \times \text{層数} = 0.167 \times 450 \times 2 = 150.3 \text{ mm}^2$ とする。

(2) 破壊抵抗曲げモーメントの計算

以下に、「本指針(案)、Ⅲ コンクリートげた編、4章、4.4 曲げ補強設計」の方法によって、補強断面の破壊抵抗曲げモーメント M_{ur} を算出した結果を示す。

① コンクリートが終局ひずみに達する時の破壊抵抗曲げモーメント

CFRPシートは、はく離破壊せず、かつ、その終局ひずみが無限大である、と仮定して計算を行った結果は、次の通り。

$$\text{中立軸の圧縮縁からの距離 } x = 109.29 \text{ mm}$$

$$\text{破壊抵抗曲げモーメント } M_{u1} = 4,212.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

② CFRPシートが終局ひずみに達する時の破壊抵抗曲げモーメント

CFRPシートがはく離破壊せず、かつ、コンクリートの終局ひずみが無限大である、と仮定して計算を行った結果は、次の通り。

$$\text{中立軸の圧縮縁からの距離 } x = 129.98 \text{ mm}$$

$$\text{破壊抵抗曲げモーメント } M_{u2} = 3,078.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ CFRPシートがはく離破壊する時の破壊抵抗曲げモーメント

コンクリート、およびCFRPシートの終局ひずみは、いずれも無限大である、と仮定して計算を

行うこととする。

また、CFRPシートがはく離破壊する時の破壊抵抗曲げモーメントは、炭素繊維シートの桁下面への貼付け長さが

$$\text{支間長 } 14.500\text{m} - (0.300\text{m} \times 2) = 13.900\text{ m}$$

であり、その1/2の長さが定着長であるとして、CFRPシートとコンクリート表面との許容平均付着応力度を 0.44N/mm^2 とすると、はく離破壊時に生じているCFRPシートの応力度 σ_{cf} を、

$$\begin{aligned}\sigma_{cf} &= \{(0.44\text{N/mm}^2) \times (13,900/2) \times 450\} / (0.167 \times 2 \times 450) \\ &= 9,156\text{N/mm}^2\end{aligned}$$

とする。計算結果は、次の通り。

$$\text{中立軸の圧縮縁からの距離 } x = 110.29\text{ mm}$$

$$\text{破壊抵抗曲げモーメント } M_{u3} = 4,241.0\text{ kN}\cdot\text{m}$$

破壊抵抗曲げモーメントは、以上①、②、③の M_{u1} 、 M_{u2} 、 M_{u3} の最小値であるから、

$$\begin{aligned}\text{破壊抵抗曲げモーメント } M_{ur} &= \min(M_{u1}, M_{u2}, M_{u3}) \\ &= 3,078.2\text{ kN}\cdot\text{m} > 3,016.0\text{ kN}\cdot\text{m} \quad \text{OK}\end{aligned}$$

となる。

したがって、ヤング係数 $E_{cf} = 245\text{kN/mm}^2$ 、保証引張強度 $\sigma_{cfuk} = 3.4\text{kN/mm}^2$ 、繊維目付量 300g/m^2 の炭素繊維シート2層を貼り付け可能な桁下面の部材軸方向全長に貼り付けることにより、破壊抵抗曲げモーメントを終局荷重作用時の曲げモーメントよりも大きくすることができる。

(3) CFRPシートのひび割れ部での破断に対する安全性の検討

コンクリートげた等の破壊抵抗曲げモーメントを向上させる補強は、終局荷重作用時の挙動を対象としていることから、CFRPシート貼付け部でひび割れ幅が拡大する可能性が大きい。ここでは、ひび割れ発生と同時に、この部分でのCFRPシートが破断しないことの確認を試みる。コンクリート部材で最大曲げモーメントが発生する場所でのひび割れ間隔が 300mm 程度であると仮定し、この部分のCFRPシートの引張応力度が保証引張応力度へ達するために必要な平均付着応力度 τ を求め、これを許容平均付着応力度 τ_a と比較する。

① 高強度型炭素繊維シート2層貼り付けの場合

$$\begin{aligned}\tau &= \{3,400\text{N/mm}^2 \times (1/0.8) \times 0.167\text{mm} \times 2\text{層} \times 1\text{mm}\} / \{300\text{mm} \times 1\text{mm}\} \\ &= 4.73\text{N/mm}^2 > 0.44\text{N/mm}^2\end{aligned}$$

② 高弾性型炭素繊維シート5層貼り付けの場合

$$\begin{aligned}\tau &= \{1,900\text{N/mm}^2 \times (1/0.8) \times 0.143\text{mm} \times 5\text{層} \times 1\text{mm}\} / \{300\text{mm} \times 1\text{mm}\} \\ &= 5.66\text{N/mm}^2 > 0.44\text{N/mm}^2\end{aligned}$$

計算結果は、いずれの炭素繊維シートの場合も $\tau > \tau_a$ となっており、ひび割れ近傍では、CFRPシートが終局ひずみに達する遙か前に、はく離が生じると考えられる。したがって、ひび割れ発生と同時にひび割れ部のCFRPシートが破断するようなぜい性的な破壊は起こらないと考えられる。

6.1.6 補強計算のまとめ

(1) 計算結果

部材各部の応力度低減を目的とする補強を 6.1.3 に、補強後、活荷重たわみの改善効果を目的とする補強を 6.1.4 に、それぞれ示したが、これらの目的に用いた炭素繊維シートは、ヤング係数 $E_{cf} = 640 \text{ kN/mm}^2$ 、保証引張強度 $\sigma_{cfuk} = 1.9 \text{ kN/mm}^2$ の高弾性型炭素繊維シートである。一方、部材の破壊抵抗曲げモーメントの向上を目的とする補強に用いた炭素繊維シートは、6.1.5 に示したように、ヤング係数 $E_{cf} = 245 \text{ kN/mm}^2$ 、保証引張強度 $\sigma_{cfuk} = 3.4 \text{ kN/mm}^2$ の高強度型炭素繊維シートである。ここでは、計算例を示すことが主目的であることから、このような計算を示した。

計算例で示し得なかった場合も含めて、炭素繊維シートの種類に応じて必要となる積層数の算出結果を、付属表-6.1.1 にまとめた。また、活荷重たわみの改善効果は、部材各部の応力度を許容応力度以下にする補強に必要な炭素繊維シート積層数を貼り付けた場合の活荷重たわみの低減割合を示した。

付属表-6.1.1 本例において必要となる炭素繊維シート積層数の一覧

補強目標 使用炭素繊維シート種類	部材各部の応力度低減を目標とする補強 (目標：許容応力度以下)	部材の破壊抵抗曲げモーメントの向上を目的とする補強 (目標：終局時の曲げモーメント以上)
高強度型、繊維目付量 300 g/m^2 ヤング係数 $E_{cf} = 245 \text{ kN/mm}^2$ 保証引張強度 $\sigma_{cfuk} = 3.4 \text{ kN/mm}^2$	積層数： 9 層 活荷重たわみの低減割合： 9.6 %	積層数： 2 層
高弾性型、繊維目付量 300 g/m^2 ヤング係数 $E_{cf} = 640 \text{ kN/mm}^2$ 保証引張強度 $\sigma_{cfuk} = 1.9 \text{ kN/mm}^2$	積層数： 4 層 活荷重たわみの低減割合： 9.6 %	積層数： 5 層

(2) 結果の検討

計算結果は、「本指針(案)、Ⅲ コンクリートげた編、1章、1.1.3 炭素繊維シートの選定」で述べた一般的傾向の通り、鉄筋等の応力度低減に効果を発揮するのは高弾性型の炭素繊維シートであり、破壊抵抗曲げモーメントの向上に効果を発揮するのは高強度型の炭素繊維シートであることを示している。

この設計例においては、応力度低減と曲げ耐力向上の両者を同時に満足させるためには、繊維目付量が 300 g/m^2 である、高強度型の炭素繊維シートを 9 枚、または、高弾性型の炭素繊維シートを 5 枚が結論となる。したがって、高弾性型の炭素繊維シートは、高強度型のそれに比して、単位面積当たりの材料費がやや高いものの 2 倍には至らず、また、施工枚数が半分であることから、経済性に優れていると言える。

6.2 プレストレストコンクリートげたの曲げ補強に関する計算例

6.2.1 計算条件

(1) 橋梁諸元

- ・構造種別 : プレストレストコンクリート道路橋
- ・構造形式 : ポストテンション方式単純T桁橋
- ・橋 長 : 30.800 m
- ・桁 長 : 30.700 m
- ・支 間 : 30.000 m
- ・有効幅員 : 1.500 m (左歩道) + 6.500 m (車道部) + 1.500 m (右歩道)
- ・斜 角 : 90°
- ・適用示方書 : 道路橋示方書 I 共通編、III コンクリート橋編 (昭和53年1月)

(2) 補強計算条件

- ・適用示方書 : 道路橋示方書 I 共通編、III コンクリート橋編 (平成8年12月)
- ・荷 重 : B活荷重

(3) 既存材料の種類および許容応力度

① コンクリート

- 設計基準強度 σ_{ck} : 40 N/mm²
- ヤング係数 E_c : 31 kN/mm² (道路橋示方書平成8年版より定めた)
- 許容曲げ圧縮応力度 σ_{ca} : 14 N/mm² (設計荷重時、同上)
- 許容曲げ引張応力度 σ_{ci} : -1.5 N/mm² (設計荷重時、同上)

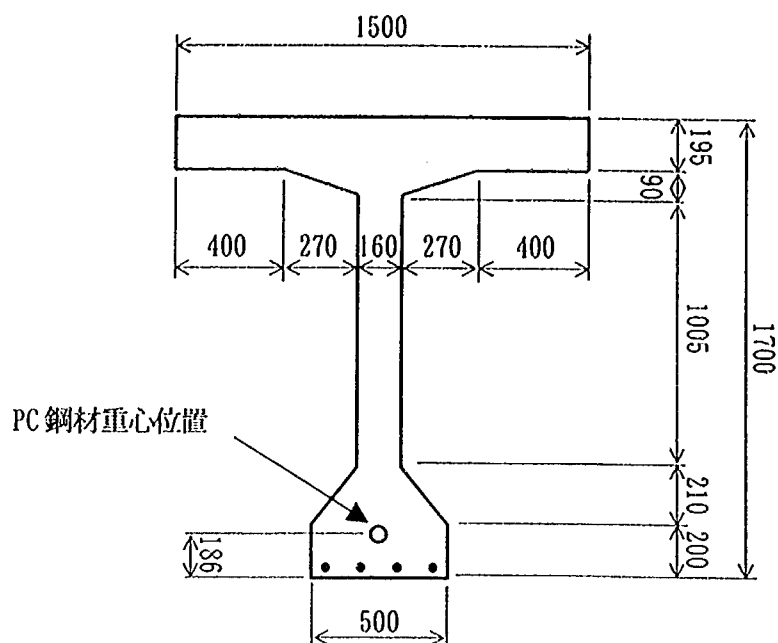
② PC鋼材

- 種 類 : SWPR1-12 ϕ 7 mm $\times$ 9 ケーブル
- 鋼材断面積 A_{ps} : 461.8 mm²/ケーブル
- シース径 ϕ : 45 mm
- ヤング係数 E_p : 200 kN/mm² (材料試験結果より)
- 許容引張応力度 σ_{ps} : 1,100 N/mm² (設計荷重時、
材料試験による降伏強度の60%で設定)

③ 鉄筋

- 種類と本数 : SD30-D13 $\times$ 4 本 (SD295 とみなす)
- 鉄筋断面積 A_s : 506.8 mm² = 4 $\times$ 126.7 mm²
- ヤング係数 E_s : 200 kN/mm² (道路橋示方書平成8年版より定めた)
- 許容引張応力度 σ_{sa} : 180 N/mm² (道路橋示方書平成8年版より定めた)

(4) 主げた中央断面の形状寸法



付属図-6.2.1 主げた中央断面の形状寸法 (単位: mm)

(5) 主げた中央断面の諸定数

主げた中央断面の諸定数を 付属表-6.2.1 に示す。

付属表-6.2.1 主げた中央断面の諸定数

断面名称 諸定数		支 間 中 央 断 面			
		総 断 面	純 断 面	PC鋼材 換算断面	場所打ち 換算断面
コンクリート断面積	$\times 10^5 \text{ mm}^2$	$A = 6.553$	$A_c = 6.410$	$A_{cl} = 6.647$	$A_{c2} = 7.419$
図心～上縁までの距離	mm	$y' = 642$	$y'_c = 623$	$y_{cl}' = 655$	$y_{c2}' = 596$
図心～下縁までの距離	mm	$y = -1,058$	$y_c = -1,077$	$y_{cl} = -1,045$	$y_{c2} = -1,104$
図心～PC 鋼材図心までの距離	mm		$e_c = -891$	$e_{cl} = -859$	$e_{c2} = -917$
断面2次モーメント	$\times 10^{11} \text{ mm}^4$	$I = 2.435$	$I_c = 2.324$	$I_{cl} = 2.505$	$I_{c2} = 2.728$
断面係数 $\times 10^8 \text{ mm}^3$	桁 上 縁	$W = 3.791$	$W_c = 3.731$	$W_{cl}' = 3.827$	$W_{c2}' = 4.578$
	桁 下 縁	$W = -2.302$	$W_c = -2.157$	$W_{cl} = -2.397$	$W_{c2} = -2.471$
	PC鋼材図心位置		$W_{cg} = -2.609$	$W_{clg} = -2.918$	$W_{c2g} = -2.973$

6.2.2 現在断面の安全度照査

(1) 設計荷重による主げた中央断面の断面力

設計荷重により主げた中央断面に発生する断面力は、付属表-6.2.2 に示す通りである。

付属表-6.2.2 主げた中央断面の断面力集計表

荷 重	曲げモーメント kN-m
主 桁 自 重	1,865
場所打ちコンクリート	344
地覆・高欄荷重	214
舗 装	804
死荷重 合 計 M_D	3,227
活 荷 重 (B 活 荷 重) M_L	1,601
合 計 $M_D + M_L$	4,828

(2) 有効プレストレスによるコンクリートの応力度

導入するプレストレス力による、コンクリートの応力度は、

$$\text{導入直後の全プレストレス力 } P_i = 4,004 \text{ kN}$$

$$\text{PC鋼材の偏心距離 } e_p = 891 \text{ mm}$$

より、純断面に関する定数を用いて、以下の通りとなる。

$$\begin{aligned}\sigma_{cl}' &= P_i / A_c + P_i \cdot e_p / W_c' \\ &= 4.004 \times 10^6 \times \{ 1 / 6.410 \times 10^5 + (-891) / (3.731 \times 10^8) \} \\ &= -3.32 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{cl} &= P_i / A_c + P_i \cdot e_{pc} / W_c \\ &= 4.004 \times 10^6 \times \{ 1 / 6.410 \times 10^5 + (-891) / (-2.157 \times 10^8) \} \\ &= 22.79 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{cpl} &= P_i / A_c + P_i \cdot e_{pc} / W_{cg} \\ &= 4.004 \times 10^6 \times \{ 1 / 6.410 \times 10^5 + (-891) / (-2.609 \times 10^8) \} \\ &= 19.92 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

したがって、有効プレストレスは、有効係数を $\eta = 0.819$ として、次の通りとなる。

$$\sigma_{cc}' = \eta \cdot \sigma_{cl}' = 0.819 \times (-3.31) = -2.72 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{cc} = \eta \cdot \sigma_{cl} = 0.819 \times 22.76 = 18.67 \text{ N/mm}^2$$

(3) 設計荷重作用時の曲げ応力度の照査

設計荷重作用時に中央断面のコンクリートに発生する曲げ応力度、および、その合成応力度は、付属表-6.2.3 に示す通りである。

付属表-6.2.3 設計荷重作用時のコンクリートの曲げ応力度合成表

荷 重 \ コンクリート応力度		上縁 (N/mm ²)	下縁 (N/mm ²)
1	有効プレストレス	-2.72	18.67
2	死 荷 重	8.13	-14.20
3	活荷重 (B活荷重)	3.50	-6.48
合 計		8.91	-2.01
許 容 値		$-1.5 < \sigma_c < 14.0$	

なお、各荷重による曲げ応力度は、各荷重載荷時に応じた断面定数を用いて算出したものである。

付属表-6.2.3 の合成応力度のうち、コンクリート下縁の引張応力度が許容値を超えることから、曲げ補強が必要である。

(4) 終局荷重作用時の曲げ破壊に対する安全度の照査

終局荷重作用時の曲げモーメント M_{uo} および破壊抵抗曲げモーメント M_{ur} は、後述する6.2.7 を参考とすると、それぞれ、

$$\begin{aligned}
 M_{uo} &= 1.7 \times (M_D + M_L) = 1.7 \times (3,227 + 1,601) \\
 &= 8,207.6 \text{ kN} \cdot \text{m} \\
 M_{ur} &= 10,602 \text{ kN} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

であり、当断面では、終局荷重作用時に破壊抵抗曲げモーメントの補強をする必要がない。

6.2.3 炭素繊維シートによる補強計算方針

(1) 炭素繊維シート種類の選定

炭素繊維シートは、一般に、高強度型、中弾性型、高弾性型の3種類に大きく分類されて、それぞれが力学的性能に特徴を持つことから、その選定は、使用目的に応じたものとする必要がある。

ここでは、① 計算手法を示すことを目的としているが、RCげたの曲げ補強に関する計算例で、既に高強度型と高弾性型の炭素繊維シートを紹介したこと、② ヤング係数 E_{cf} が高強度型より大きくて、応力度低減の効果が高強度型より優れること、③ 保証引張強度 σ_{cfok} が高弾性型より大きくて、耐力向上効果が高弾性型より優れること、等の理由から、中弾性型の炭素繊維シートを用いることとする。

(2) 設計荷重作用時の曲げ補強計算方針

一般に、PC部材を対象に「本指針(案)」の適用が必要となった場合、設計荷重作用時の曲げ補強は、「本指針(案)、Ⅲ コンクリートげた編、4章、4.4.3 PCげたの曲げ補強設計」に示したように、補強後の維持管理方法に応じて、設計手法1)または設計手法2)の何れかによって行えばよい。

ここでは、計算例を示すことを目的とすることから、両者の設計手法を示すこととする。

また、設計手法2)では、部材断面を鉄筋コンクリート断面と仮定して補強計算を行うこととなるが、部材断面に配置されているPC鋼材を引張補強材として考慮するか否かの判断も必要となる。一般には、PC鋼

材の断面積が引張補強鉄筋の断面積より遙かに大きいことから、これを考慮して、P C鋼材の増加応力度の照査を行っておく設計手法が得策である。しかし、これを考慮しなくても補強設計が可能である。したがって、ここでは、この両者を示すこととする。

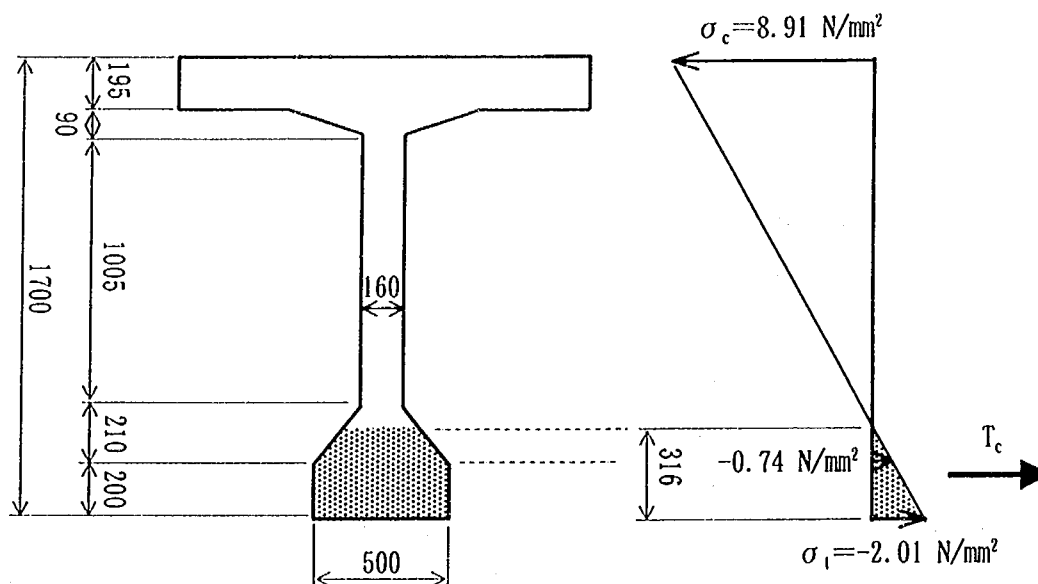
(3) 終局荷重作用時の曲げ補強計算方針

本計算例では、6.2.2(4)で述べたように、終局荷重作用時に破壊抵抗曲げモーメントの補強を行う必要がない。しかし、設計荷重作用時の応力度照査によって必要となった炭素繊維シート補強は、破壊抵抗曲げモーメントの向上をもたらすこととなる。この向上した破壊抵抗曲げモーメントの計算は、曲げ耐力不足を補強する場合と同様の計算方法であることから、ここでは、補強によって得られる破壊抵抗曲げモーメントの計算例を示すこととする。

6.2.4 設計荷重作用時の補強設計手法1)による補強計算

(1) コンクリートに発生する引張応力の合力

全断面が有効なP C部材断面として算出したコンクリートの応力分布は、付属図-5.2.2 に示す通りであり、これより、「道路橋示方書 Ⅲ コンクリート橋編」に従い、引張応力の合力を求める。



付属図-6.2.2 コンクリートに発生する引張応力の分布

コンクリートの引張応力の合力 T_c は、例えば、以下の方法で求めることができる。

$$\begin{aligned}
 T_c &= \int \sigma(x) dA = \int \sigma(x) \cdot w(x) dx \\
 &= \int_0^{200} \sigma(x) \cdot w(x) dx + \int_{200}^{316} \sigma(x) \cdot w(x) dx
 \end{aligned}$$

$$\bullet \int_0^{200} \sigma(x) \cdot w(x) dx = \frac{2.01 + 0.74}{2} \cdot 500 \cdot 200 = 137500 \quad \text{N}$$

$$\begin{aligned} \bullet \int_{200}^{316} \sigma(x) \cdot w(x) dx &= \int_{200}^{316} 2.01 \cdot \left(1 - \frac{x}{316}\right) \cdot \left(-\frac{34}{21}x + \frac{17300}{21}\right) dx \\ &= \frac{2.01}{21 \cdot 316} \int_{200}^{316} (5466800 - 28044x + 34x^2) dx \\ &= \frac{2.01}{21 \cdot 316} \left[5466800x - 14022x^2 + \frac{34}{3}x^3 \right]_{200}^{316} \\ &= \frac{2.01}{21 \cdot 316} \left[5466800(316 - 200) - 14022(316^2 - 200^2) + \frac{34}{3}(316^3 - 200^3) \right] \\ &= 18718 \quad \text{N} \end{aligned}$$

これより、コンクリートの引張応力の合力 T_c は、次の通り。

$$T_c = 137,500 + 18,718 = 156,218 \quad \text{N}$$

(2) 炭素繊維シート補強量の算定

炭素繊維シートの必要枚数 n は、既設の引張補強鉄筋と炭素繊維シートが共同して、コンクリートに発生する引張応力の合力を負担するものとして、次式より求める。

$$A_{cf} = \frac{T_c / \sigma_{sa} - A_s}{E_{cf} / E_s}$$

$$n = \frac{A_{cf}}{w \cdot t_{cf}}$$

ここに、 T_c : コンクリートに生じる引張応力の合力 (N)

A_s : 既設引張鉄筋の断面積 (mm^2)

E_s : 引張鉄筋のヤング係数 (N/mm^2)

σ_{sa} : 引張鉄筋の許容応力度 (N/mm^2)

A_{cf} : 炭素繊維シートの断面積 (mm^2)

E_{cf} : 炭素繊維シートのヤング係数 (N/mm^2)

w : 貼付け幅 (mm)

t_{cf} : 炭素繊維シートの厚さ (mm)

既存の引張補強鉄筋に関する諸値は、6.2.1 計算条件、(3)③ に示した通り、以下とする。

鉄筋断面積 $A_s = 506.8 \text{ mm}^2 = 4 \times 126.7 \text{ mm}^2$

なお、「道路橋示方書 III コンクリート橋編」によれば、PC鋼材とコンクリートの間に付着があり応力度に余裕がある場合は、これを考慮してもよいとされているが、ここでは考慮しないこととした。

ヤング係数 $E_s = 200 \text{ kN/mm}^2$

許容引張応力度 $\sigma_{sa} = 180 \text{ N/mm}^2$ (SD295 とみなす)

補強に用いる炭素繊維シートの種類と諸元は、「本指針(案)、Ⅰ 共通編、3章、3.2 炭素繊維シート」を参考として、以下の通りとする。

種 類	中弾性型炭素繊維シート
繊維目付量	$W_{cf} = 300 \quad \text{g/m}^2$
設計厚さ	$t_{cf} = 0.165 \text{ mm}$
ヤング係数	$E_{cf} = 390 \quad \text{kN/mm}^2$
保証引張強度	$\sigma_{cfuk} = 2.9 \quad \text{kN/mm}^2$

したがって、補強に用いる炭素繊維シートの断面積と積層枚数は、以下の通り。

$$\begin{aligned}
 A_{cf} &= (T_c / \sigma_{sa} - A_s) / (E_{cf} / E_s) \\
 &= (156,218 / 180 - 506.8) / (390 / 200) = 185.2 \quad \text{mm}^2 \\
 n &= A_{cf} / (w \cdot t_{cf}) \\
 &= 185.2 / (500 \times 0.165) = 2.24 \quad \text{枚以上}
 \end{aligned}$$

以上の計算結果より、炭素繊維シートの必要積層枚数は、3枚となる。

なお、貼り付け長さは、「本指針(案)、Ⅲ コンクリートげた編、4章、4.4 曲げ補強設計、4.5.3 構造細目」に従い、最低1層を支間部下面全長に貼り付け、その他を作用モーメント分布により定めるものとする。

6.2.5 設計荷重作用時の補強設計手法2)による補強計算—その1

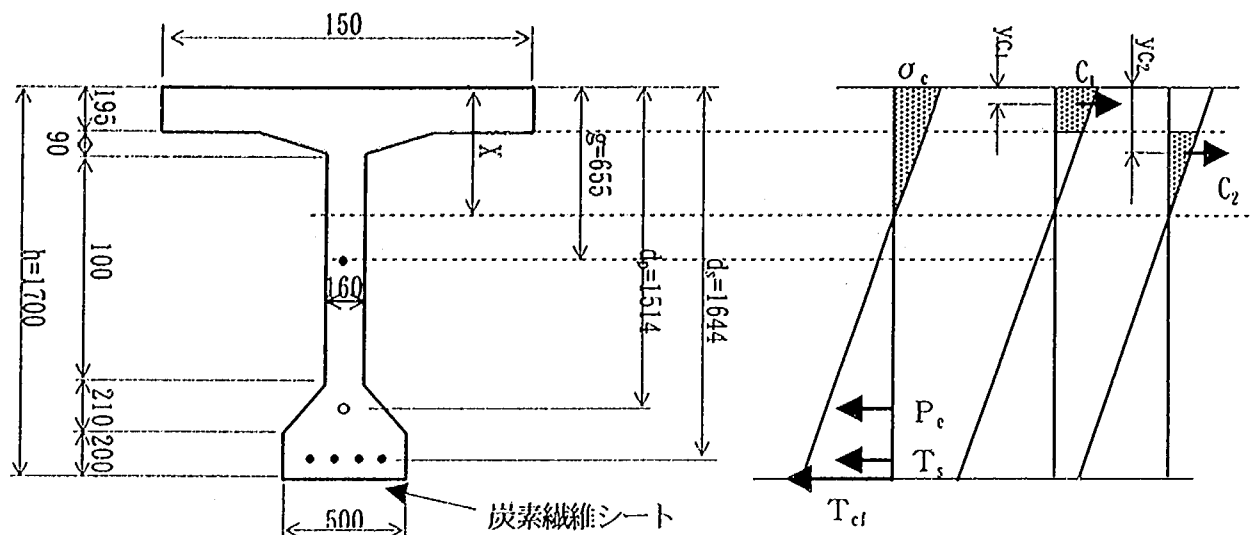
(1) 計算手法の概要

ここで行う補強計算は、設計荷重の増加によって、既に設計荷重作用時にコンクリートに引張応力が発生したために「道路橋示方書 Ⅲ コンクリート橋編」に従って配置されている引張補強鉄筋の引張応力度が許容引張応力度を超えたことから、その断面積の不足を補うに必要な炭素繊維シート補強量を、部材断面がプレストレス力による軸圧縮力と偏心曲げモーメントが作用する鉄筋コンクリート断面であると仮定して、求める方法を示すものである。

なお、ここでは、必要な炭素繊維シート補強量を求める上で安全側の計算を行うことを目的として、けたのPC換算断面で設計荷重を支えるものとし、部材断面に配置されているPC鋼材を引張補強材として考慮しないこととした。また、PC鋼材の増加応力度 $\Delta \sigma_p$ は、一般に僅かであることから、ここでは、その照査を省略した。

なお、6.2.6 設計荷重作用時の補強設計手法2)による補強計算—その2では、PC鋼材を引張補強材として考慮した計算例を示した。

炭素繊維シートで補強した部材断面がプレストレス力による軸圧縮力と偏心曲げモーメントが作用する鉄筋コンクリート断面であると仮定して、コンクリート、鉄筋、および炭素繊維シートの応力度を求める方法は、付属図-6.2.3 に示す断面構成および応力分布を参照して、以下の通りである。



C_1 : フランジ部コンクリート圧縮応力度の合力

C_2 : ウェブ部コンクリート圧縮応力度の合力

P_c : 有効プレストレス力

T_s : 鋼材の引張力

T_{cf} : 炭素繊維シートの引張力

A_s : 引張鉄筋の断面積

A_{cf} : 炭素繊維シート断面積

d_p : 圧縮縁からプレストレス作用位置までの距離

d_s : 圧縮縁から引張鉄筋までの距離

X : 圧縮縁から中立軸までの距離

g : PC鋼材換算断面の図心位置

y_{c1} : 圧縮縁からフランジ部に生じるコンクリート圧縮応力の合力作用点までの距離

y_{c2} : 圧縮縁からウェブ部に生じるコンクリート圧縮応力の合力作用点までの距離

b : 上フランジの幅

b_w : ウェブの幅

h : けた高

t : 上フランジの厚さ

σ_c : 圧縮縁のコンクリート応力度

σ_{cf} : 圧縮縁から t の位置のコンクリート応力度

付属図-6.2.3 軸力と偏心曲げモーメントを受けるRC断面の応力度分布

コンクリート、鉄筋、および炭素繊維シートの応力度の関係は、付属図-6.2.3 において、圧縮縁のコンクリートの応力度を σ_c 、圧縮縁から中立軸までの距離を X とし、ひずみが直線分布するものと仮定すると、それぞれ下式で表すことができる。炭素繊維シートの補強量は、この鉄筋の応力度が許容応力度等の目標値以下になるように繰返し試算により算出することとなる。

$$\text{鉄筋} \quad \sigma_s = n_s \cdot [(d_s - X) / X] \cdot \sigma_c$$

$$\text{炭素繊維シート} \quad \sigma_{cf} = n_{cf} \cdot [(h - X) / X] \cdot \sigma_c$$

ここで、 n_s 、 n_{cf} は、それぞれ鉄筋、炭素繊維シートのヤング係数比である

これより、鉄筋および炭素繊維シートの引張力は、次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{鉄筋} \quad : T_s = n_s \cdot A_s \cdot [(d_s - X) / X] \cdot \sigma_c \\ \text{炭素繊維シート} \quad : T_{cf} = n_{cf} \cdot A_{cf} \cdot [(h - X) / X] \cdot \sigma_c \end{array} \right\} \quad -①$$

ただし、圧縮縁から中立軸までの距離 X と、圧縮縁のコンクリート応力度 σ_c は、以下の(a)または(b)に示した、軸力および図心まわりのモーメントの釣合いを満足するように定めた値である。

(a) 中立軸がウェブ内にある場合 ($X > l$)

軸力の釣合いより、

$$C_1 + C_2 - T_s - T_{cf} - P_c = 0 \quad -②$$

図心まわりのモーメントの釣合いより、

$$C_1 \cdot (g - y_{c1}) + C_2 \cdot (g - y_{c2}) + T_s \cdot (d_s - g) + T_{cf} \cdot (h - g) + P_c \cdot (d_p - g) = M \quad -③$$

ここで、

$$\left. \begin{array}{l} C_1 = b \cdot l \cdot (\sigma_c + \sigma_{c1}) / 2, \quad C_2 = b_0 \cdot (X - l) \cdot \sigma_{c1} / 2 \\ \sigma_{c1} = \sigma_c \cdot (X - l) / X \\ y_{c1} = \{ \sigma_{c1} \cdot l^2 / 2 + (\sigma_c - \sigma_{c1}) \cdot l^2 / 6 \} / \{ \sigma_{c1} \cdot l + (\sigma_c - \sigma_{c1}) \cdot l / 2 \} \\ y_{c2} = l + (X - l) / 3 \end{array} \right\} \quad -④$$

したがって、式①、④を式②、③に代入して、 X 、 σ_c を求めることとなる。

(b) 中立軸がフランジ内にある場合 ($X \leq l$)

この場合は、式④で

$$C_1 = b \cdot \sigma_c \cdot X / 2, \quad C_2 = 0, \quad \sigma_{c1} = 0$$

$$y_{c1} = X / 3$$

とする。

(2) 現在断面の鉄筋コンクリート断面としての応力度照査

計算条件は、次の通りとする。

設計荷重作用時の設計曲げモーメント	$M = M_D + M_L = 4,828 \text{ kN} \cdot \text{m}$
有効プレストレス力	$P_c = 4,004 \times 0.819 = 3,276 \text{ kN}$
コンクリート:	ヤング係数 $E_c = 31 \text{ kN/mm}^2$
	許容応力度 $\sigma_{ca} = 14 \text{ N/mm}^2$ (PC部材として設定)
引張補強鉄筋:	種類と本数 $D13 \times 4$ 本 (SD295 とみなす)
	鉄筋断面積 $A_s = 506.8 \text{ mm}^2 = 4 \times 126.7 \text{ mm}^2$
	ヤング係数 $E_s = 200 \text{ kN/mm}^2$
	ヤング係数比 $n_s = 6.45 = 200/31$ とする
	許容引張応力度 $\sigma_{sa} = 180 \text{ N/mm}^2$

計算により求めた中立軸の位置 X 、およびコンクリートの圧縮応力度 σ_c は、以下の通り。

$$X = 450.9 \text{ mm} > t = 195 \text{ mm} : \text{中立軸はウェブ内にある}$$
$$\sigma_c = 14.11 \text{ N/mm}^2 > \sigma_{ca} = 14 \text{ N/mm}^2$$

これより、引張鉄筋の応力度は、次の通りとなる。

$$\sigma_s = n_s \cdot [(d_s - X) / X] \cdot \sigma_c$$
$$= 6.45 \times [(1,644 - 450.9) / 450.9] \times 14.11$$
$$= 240.8 \text{ N/mm}^2 > \sigma_{sa} = 180 \text{ N/mm}^2$$

よって、コンクリート、および引張鉄筋とも、許容応力度を超過しており、鉄筋コンクリート断面としても曲げ補強が必要と考えられる。

(3) 炭素繊維シートによる補強後の応力度照査

けた下縁に炭素繊維シートを貼り付けて曲げ補強した主げた中央断面のコンクリート、および引張鉄筋の応力度を照査する。

炭素繊維シートは、「指針(案)、Ⅲ コンクリートげた編、4章、4.4 曲げ補強設計、4.4.1 基本的考え方」に定めたように、CFRPシート化した後に生ずる断面力を負担することができる。しかし、PCげたは、死荷重のみの作用下ではコンクリート断面がフルプレストレス状態であって、コンクリートおよび引張鉄筋に圧縮応力が作用しており、その後、活荷重が作用する設計荷重下ではコンクリートに引張応力が発生する。このために、「本指針(案)」では、部材断面を、コンクリートに引張応力が作用し、ひび割れを許す状態で、鉄筋コンクリートとして補強設計することとしている。

したがって、検討対象断面は、上記の「指針(案)、4.4.1 基本的考え方」の解説に述べたように、フルプレストレス状態からひび割れを許す鉄筋コンクリートへと曲げ抵抗機構を変化させていることから、ここでは、検討対象とする鉄筋コンクリート断面に作用する設計荷重を、死荷重、および活荷重の合計とする。

計算条件は、次の通りとする。

設計荷重作用時の設計曲げモーメント $M = M_D + M_L = 4,828 \text{ kN} \cdot \text{m}$

既存の引張補強鉄筋 6.2.1 計算条件、(3) ③ に示した通り

補強に使用する炭素繊維シート：

種類と貼付け枚数		中弾性型炭素繊維シート 2枚
繊維目付量	$W_{cf} = 300$	g/m^2
断面積	$A_{cf} = 165$	$\text{mm}^2 = \text{設計厚 } 0.165 \times 2 \text{ 層} \times \text{幅 } 500$
ヤング係数	$E_{cf} = 390$	kN/mm^2
ヤング係数比	$n_{cf} = 12.58$	$= 390/31 \text{ とする}$
許容応力度	$\sigma_{cta} = 390$	$\text{N/mm}^2 \text{ (引張ひずみ } 1,000 \mu \text{ 相当)}$
貼付け幅	$w = 500$	mm (下フランジ幅)

計算より求めた中立軸の位置 X 、およびコンクリートの圧縮応力度 σ_c は、以下の通り。

$$X = 556.6 \text{ mm} > t = 195 \text{ mm} : \text{中立軸はウェブ内にある}$$

$$\sigma_c = 13.14 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{ca} = 14 \text{ N/mm}^2$$

したがって、引張鉄筋、および炭素繊維シートの応力度は、次の通り。

$$\begin{aligned} \text{引張鉄筋} \quad \sigma_s &= n_s \cdot [(d_s - X) / X] \cdot \sigma_c \\ &= 6.45 \times [(1,644 - 556.6) / 556.6] \times 13.14 \\ &= 165.6 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{sa} = 180 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{炭素繊維シート} \quad \sigma_{cf} &= n_{cf} \cdot [(h - X) / X] \cdot \sigma_c \\ &= 12.58 \times [(1,700 - 556.6) / 556.6] \times 13.14 \\ &= 339.6 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{cfa} = 390 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

したがって、炭素繊維シート2枚を貼り付けることで、コンクリート、および引張鉄筋の応力度を許容値以内に収めることができる。

6.2.6 設計荷重作用時の補強設計手法2)による補強計算—その2

(1) 計算手法の概要

ここで行う補強計算は、6.2.5 設計荷重作用時の補強設計手法2)による補強計算—その1と同様、けた下縁付近に配置されている引張補強鉄筋の断面積の不足を補うに必要な炭素繊維シート補強量を、部材断面がプレストレス力による軸圧縮力と偏心曲げモーメントが作用する鉄筋コンクリート断面であると仮定して、求める方法を示すものである。

ここでは、部材断面に配置されているP C鋼材を引張補強材として考慮して必要な炭素繊維シート補強量を求め、P C鋼材の応力度照査も行うこととする。

炭素繊維シートで補強した部材断面がプレストレス力による軸圧縮力と偏心曲げモーメントが作用する鉄筋コンクリート断面であると仮定して、コンクリート、鉄筋、P C鋼材、および炭素繊維シートの応力度を求める方法は、6.2.5 に示した 付属図-6.2.3 に示す断面構成および応力分布を参照して、以下の通りである。

設計荷重によって増加するP C鋼材の引張応力度と引張力の増加が

$$\Delta \sigma_p = n_p \cdot [(h - X) / X] \cdot \sigma_c$$

$$\Delta P_e = n_p \cdot A_p \cdot [(h - X) / X] \cdot \sigma_c$$

ここで、 n_p : P C鋼材のヤング係数比である

d_p : 圧縮縁からプレストレス作用位置までの距離

となる。したがって、

軸力の釣合い式 ② に $(-\Delta P_e)$

図心まわりのモーメントの釣合い式 ③ に $\Delta P_e \cdot (d_p - g)$

を、それぞれ追加すればよいこととなる。

(2) 現在断面の鉄筋コンクリート断面としての応力度照査

計算条件は、次の通りとする。

$$\text{設計荷重作用時の設計曲げモーメント } M = M_D + M_L = 4,828 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

コンクリート : 6.2.1 計算条件、(3) ①、または、

6.2.5 補強設計手法2)－その1、(2)に示した通り

PC鋼材 : 6.2.1 計算条件、(3) ②、

引張補強鉄筋 : 6.2.1 計算条件、(3) ③、および、

6.2.5 補強設計手法2)－その1、(2)に示した通り

計算結果は、以下の通りである。

$$\text{圧縮縁から中立軸までの距離 } X = 901.3 \text{ mm}$$

$$\text{コンクリートの圧縮応力度 } \sigma_c = 11.53 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{ca} = 14 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{PC鋼材の引張応力度 } \sigma_s = 838.6 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{sa} = 1,100 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{鉄筋の引張応力度 } \sigma_s = 61.3 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{sa} = 180 \text{ N/mm}^2$$

(3) 炭素繊維シートによる補強後の応力度照査

計算条件は、(2) 現在断面の鉄筋コンクリート断面としての応力度照査と同様である。ただし、炭素繊維シートに関しては、

炭素繊維シート : 6.2.5 補強設計手法2)－その1、(3)に示した通り

である。

計算結果は、以下の通りである。

$$\text{圧縮縁から中立軸までの距離 } X = 923.5 \text{ mm}$$

$$\text{コンクリートの圧縮応力度 } \sigma_c = 11.45 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{ca} = 14 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{PC鋼材の引張応力度 } \sigma_s = 836.2 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{sa} = 1,100 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{鉄筋の引張応力度 } \sigma_s = 57.6 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{sa} = 180 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{炭素繊維シートの引張応力度 } \sigma_{cf} = 121.1 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{cfa} = 390 \text{ N/mm}^2$$

(4) 計算結果の検討

設計荷重作用時の補強設計手法2)による補強計算のうち、部材断面に配置されているPC鋼材を引張補強材に考慮して応力度照査を行った結果は、以上の通りである。この結果によれば、各部の応力度すべてが現在断面のままでも許容応力度内に収まっており、曲げ補強の必要がないように見受けられる。

しかし、「本指針(案)」が適用されるPC部材断面は、何らかの理由により「道路橋示方書 III コンクリート橋編」等に定められている規定値を逸脱し、補強が必要とされたものである。

したがって、本検討断面の場合は、繊維目付量 200g/m^2 の中弾性型または高弾性型炭素繊維シート最低枚数1枚による補強を行うものとする。

6.2.7 終局荷重作用時の破壊に対する安全度照査

(1) 終局荷重作用時の曲げモーメント

終局荷重作用時の曲げモーメント M_{u0} は、「道路橋示方書 III コンクリート橋編」に従い、以下で求める。

$$1.3 \cdot M_D + 2.5 \cdot M_L = 1.3 \times 3,227 + 2.5 \times 1,601 = 8,197.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$1.0 \cdot M_D + 2.5 \cdot M_L = 1.0 \times 3,227 + 2.5 \times 1,601 = 7,229.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$1.7 \cdot (M_D + M_L) = 1.7 \times (3,227 + 1,601) = 8,207.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

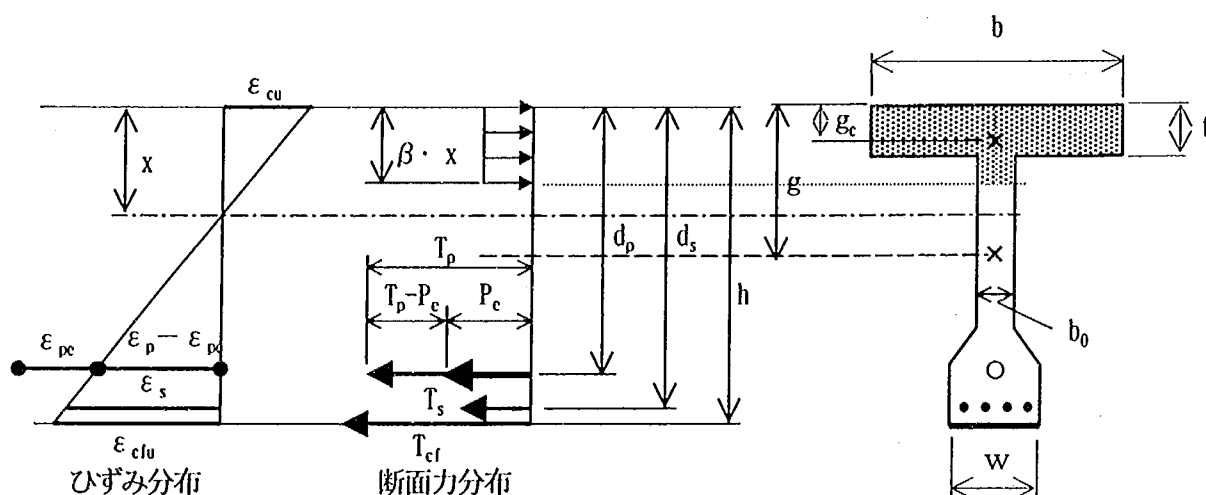
したがって、照査に用いる終局荷重作用時の曲げモーメント M_{u0} は、上記の最大値 8,207.6 kN・m となる。

なお、現在断面の破壊抵抗曲げモーメント M_{ur} は、別途、本項(3)に従って行った計算によれば、 $M_{ur} = 10,602 \text{ kN} \cdot \text{m}$ であり、終局荷重作用時の曲げモーメント M_{u0} を満足している。ここでは、設計荷重作用時の応力度照査で必要となった曲げ補強用の炭素繊維シートによって向上した破壊抵抗曲げモーメントの算出を行う。

(2) 破壊抵抗曲げモーメントの計算条件

1) 終局荷重作用時の部材断面のひずみ、および応力分布

終局荷重作用時の部材断面に発生するひずみ、および応力分布を、付属図-6.2.4 に示す。



T_p : PC鋼材の引張力

P_e : 有効プレストレス力

T_s : 引張鉄筋の引張力

T_{cf} : 炭素繊維シートの引張力

C : コンクリートの圧縮力

T : PC鋼材、引張鉄筋、炭素繊維シートの引張力の合力

h : 桁高

d_p : 圧縮縁からのPC鋼材の位置

d_s : 圧縮縁からの引張鉄筋の位置

g_c : コンクリートの圧縮力の作用位置

ϵ_p : PC鋼材のひずみ

ϵ_{pe} : 有効プレストレスによるPC鋼材のひずみ

ϵ_s : 引張鉄筋のひずみ

ϵ_{clu} : 炭素繊維シートの終局ひずみ

b : 上フランジ幅

b_0 : ウェブ幅

w : 下フランジ幅

g : PC鋼材換算断面図心位置

付属図-6.2.4 部材断面の破壊抵抗曲げモーメント算定用のひずみ、および応力分布

なお、当図において、コンクリートの応力度分布は、「道路橋示方書 III コンクリート橋編」により、等価長方形応力分布を用いることとした。

2) 有効プレストレス力

$$P_e = 3.276 \text{ kN} = 4,004 \times 0.819$$

3) 材料

① コンクリート

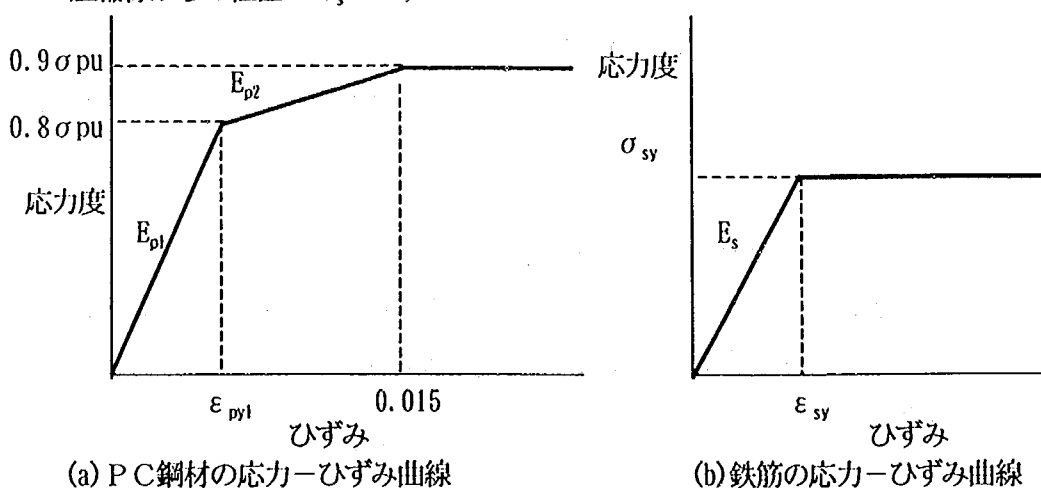
設計基準強度	$\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ 、応力-ひずみ関係は、「道路橋示方書 III」による
	$\beta = 0.8$ と設定する
終局ひずみ	$\varepsilon_{cu} = 0.0035$ と設定する

② PC鋼材

種類	12 ϕ 7 $\times$ 9、応力-ひずみ関係は、付属図-6.2.5 の通り
断面積	$A_p = 4,156.2 \text{ mm}^2 = 9 \times 461.8 \text{ mm}^2$
ヤング係数	$E_{p1} = 200 \text{ kN/mm}^2$ $E_{p2} = 23.3 \text{ kN/mm}^2$
	$\varepsilon_{py1} = 7,812 \text{ } \mu = (1,860 \times 0.84) / (200,000)$
引張強度	$\sigma_{pu} = 1,860 \text{ N/mm}^2$ (材料試験による破断強度)
圧縮縁からの位置	$d_p = 1,514 \text{ mm}$

③ 引張鉄筋

種類	SD295、D13 $\times$ 4 本、応力-ひずみ関係は、付属図-6.2.5 の通り
断面積	$A_s = 506.8 \text{ mm}^2 = 4 \times 126.7 \text{ mm}^2$
ヤング係数	$E_s = 200 \text{ kN/mm}^2$
降伏点強度	$\sigma_{sy} = 295 \text{ N/mm}^2$
降伏ひずみ	$\varepsilon_{sy} = 1,475 \text{ } \mu = 295 / 200,000$
圧縮縁からの位置	$d_s = 1,644 \text{ mm}$



付属図-6.2.5 鋼材の応力-ひずみ曲線

④ 炭素繊維シート：繊維目付量 300g/m²の中弾性型炭素繊維シート積層枚数 3 枚

設計厚み	$t_{cf} =$	0.165	mm
ヤング係数	$E_{cf} =$	390	kN/mm ² 、応力-ひずみ曲線は破断まで直線
保証引張強度	$\sigma_{clu} =$	2.9	kN/mm ²
終局時許容 ひずみ	$\varepsilon_{clu} = (2.9/390) \times 0.8 =$	5,949	μ
断面積	$A_{cf} = 0.165 \times 3 \times 500 =$	247.5	mm ²
許容平均付着応力度	$\tau_{cf} =$	0.44	N/mm ²
圧縮端からの位置	$h =$	1,700	mm

(3) 終局荷重作用時の破壊モードの検討

炭素繊維シートで補強した部材断面の終局荷重時の曲げ破壊は、以下の3つのモードが考えられる。

- ① コンクリートの圧縮破壊
- ② CFRPシートの引張破壊
- ③ CFRPシートのコンクリートからはく離破壊

以下に、中弾性型炭素繊維シートを下縁に3枚貼り付けた場合について、これら破壊モードの検討を行う。

1) CFRPシートがはく離破壊する時のCFRPシートのひずみ

CFRPシートのはく離破壊時にCFRPシートに発生するひずみは、支間長が $L=30,000$ mm であるからCFRPシートの定着長さを $L/2=15,000$ mm とし、許容平均付着応力度 τ_{cf} を $\tau_{cf}=0.44$ N/mm²とすると、次の通りとなる。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cf} &= \frac{T_{cf}}{n \times t_{cf} \times w} \times \frac{1}{E_{cf}} = \frac{(\tau_{cf} \times w \times L/2)}{n \times t_{cf} \times w} \times \frac{1}{E_{cf}} \\ &= (0.44 \times 500 \times 15,000) / (0.165 \times 3 \times 500 \times 390,000) \\ &= 34,190 \mu > \varepsilon_{clu} = 5,949 \mu\end{aligned}$$

したがって、CFRPシートは、はく離破壊時のひずみ 34,190 μ が、終局時許容ひずみ $\varepsilon_{clu}=5,949 \mu$ を超えるため、はく離破壊する前に破断することとなる。

2) コンクリート圧壊とCFRPシート破断の先行性比較

コンクリートの圧縮ひずみとCFRPシートの引張ひずみが、同時に終局ひずみに達すると仮定して、付属図-6.2.4 を参照しながら、圧縮端から中立軸までの距離 X を求める。

$$\varepsilon_{clu} / (h - X) = \varepsilon_{cu} / X$$

の関係から、

$$\begin{aligned}X &= h \cdot \varepsilon_{cu} / (\varepsilon_{clu} + \varepsilon_{cu}) = 1,700 \times 0.0035 / (0.005949 + 0.0035) \\ &= 629.7 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\beta \cdot X = 0.8 \times 629.7 = 503.8 > l = 195 \text{ mm} : \text{圧縮域がT形である}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_s &= \varepsilon_{cl} \cdot (d_s - \chi) / (h - \chi) \\ &= 0.005949 \times (1,644 - 629.7) / (1,700 - 629.7) \\ &= 5.638 \times 10^{-3} > \varepsilon_{sy} = 1.475 \times 10^{-3} : \text{引張鉄筋が降伏である}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_p - \varepsilon_{pc} &= \varepsilon_{cl} \cdot (d_p - X) / (h - X) = 0.005949 \times (1,514 - 629.7) / (1,700 - 629.7) \\ &= 4.915 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

となり、ここで、有効プレストレス力によるPC鋼材のひずみ ε_{pc} が、

$$\varepsilon_{pc} = (3.276 \times 10^6) / (4,156.2 \times 2.0 \times 10^5) = 3.941 \times 10^{-3}$$

であるから、次のひずみを得る。

$$\varepsilon_p = (4.915 + 3.941) \times 10^{-3} = 8.856 \times 10^{-3} > \varepsilon_{pyl} = 7.812 \times 10^{-3}$$

したがって、各部の引張りおよび圧縮力は、

$$\begin{aligned}T_p &= A_p \cdot \{ 0.84 \sigma_{pu} + E_{p2} \cdot (\varepsilon_p - \varepsilon_{pyl}) \} \\ &= 4,156.2 \times \{ 0.84 \times 1,860 + 2.33 \times 10^4 \times (8.856 - 7.812) \times 10^{-3} \} = 6,594,747 \\ &= 6,594.7 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T_s &= A_s \cdot \sigma_{sy} = 506.8 \times 295 = 149,506 \\ &= 149.5 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T_{cl} &= A_{cl} \cdot E_{cl} \cdot \varepsilon_{clu} = 247.5 \times 3.9 \times 10^5 \times 0.005949 = 574,227 \\ &= 574.2 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T &= T_p + T_s + T_{cl} = 6,594.7 + 149.5 + 574.2 \\ &= 7,318.5 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C &= 0.85 \cdot \sigma_{ck} \cdot \{ b \cdot t + (\beta \cdot X - t) \cdot b_o \} \\ &= 0.85 \times 40 \times \{ 1,500 \times 195 + (0.8 \times 629.7 - 195) \times 160 \} = 11,624,654 \text{ N} \\ &= 11,624.7 \text{ kN}\end{aligned}$$

となり、 $T \leq C$ であるため、CFRP (炭素繊維) シートの破断が先行する。

(4) 破壊抵抗曲げモーメント M_{ur} の計算

1) 中立軸の算出

終局荷重作用時の圧縮縁から中立軸までの距離 X を以下により算出する。

力のつり合い条件

$$C - T_p - T_s - T_{cl} = 0 \quad \text{-----①}$$

$$M_{ur} = C \cdot (g - g_c) + T_p \cdot (d_p - g) + T_s \cdot (d_s - g) + T_{cl} \cdot (h - g) \quad \text{-----②}$$

ひずみの適合条件

$$\frac{\varepsilon_{cfu}}{h-x} = \frac{\varepsilon_s}{d_s-x} = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_{pe}}{d_p-x}$$

したがって、各部の断面力は、

$$\left. \begin{aligned} & \begin{cases} T_s = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_s = E_s \cdot A_s \cdot \frac{d_s-x}{h-x} \cdot \varepsilon_{cfu} & (\varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy}) \\ T_s = \sigma_{sy} \cdot A_s & (\varepsilon_s \geq \varepsilon_{sy}) \end{cases} \\ & \begin{cases} T_p = \varepsilon_p \cdot E_p \cdot A_p \\ \quad = (\varepsilon_p - \varepsilon_{pe}) \cdot E_p \cdot A_p + P_t = E_{p1} \cdot A_p \cdot \frac{d_p-x}{h-x} \cdot \varepsilon_{cfu} + P_t & (\varepsilon_p \leq \varepsilon_{py1}) \\ T_p = A_p \cdot \left\{ 0.84 \cdot \sigma_{pu} + E_{p2} \cdot \left(\frac{d_p-x}{h-x} \cdot \varepsilon_{cfu} - \varepsilon_{py1} \right) \right\} & (\varepsilon_{py1} < \varepsilon_p < 0.015) \\ T_p = A_p \cdot 0.93 \cdot \sigma_{pu} & (0.015 < \varepsilon_p) \end{cases} \\ & T_{cf} = E_{cf} \cdot A_{cf} \cdot \varepsilon_{cfu} \\ & \begin{cases} C = 0.85 \cdot \sigma_{ck} \cdot b \cdot \beta x & (\beta x \leq t) \\ C = 0.85 \cdot \sigma_{ck} \cdot \{b \cdot t + b_0(\beta x - t)\} & (\beta x > t) \end{cases} \end{aligned} \right\} \text{---③}$$

と表わせる。したがって、式③を式①に代入して求めた中立軸の位置 X は、次の通り。

$$\text{中立軸の位置} \quad X = 180.1 \text{ mm}$$

したがって、

$$\beta X = 0.8 \times 180.1 = 144.1 \text{ mm} < t = 195 \text{ mm}$$

であるから、圧縮域が長方形であり、コンクリートの圧縮力の作用位置 g_c は、

$$g_c = \beta X / 2 = 72.1 \text{ mm}$$

また、圧縮端から断面の図心までの距離は、付属表-6.2.1 より、

$$g = 655 \text{ mm}$$

である。

2) 断面各部のひずみ、および断面力

断面各部のひずみは、以下のようになる。

$$\varepsilon_p - \varepsilon_{pe} = \varepsilon_{cf} \cdot (d_p - X) / (h - X)$$

$$= 0.005949 \times (1,514 - 180.1) / (1,700 - 180.1) = 5.221 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_p = (5.221 + 3.941) \times 10^{-3} = 9.162 \times 10^{-3} > \varepsilon_{py1} = 7.812 \times 10^{-3} : \text{PC鋼材第1降伏}$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cf} \cdot (d_s - X) / (h - X)$$

$$= 0.005949 \times (1,644 - 180.1) / (1,700 - 180.1)$$

$$= 5.730 \times 10^{-3} > \varepsilon_{sy} = 1.475 \times 10^{-3} : \text{引張鉄筋が降伏である}$$

したがって、各部の断面力は下記の通りとなる。

$$\begin{aligned} T_p &= A_p \cdot \{ 0.84 \cdot \sigma_{pu} + E_{p2} \cdot (\varepsilon_p - \varepsilon_{py1}) \} \\ &= 4,156.2 \times \{ 0.84 \times 1,860 + 2.33 \times 10^4 \times (9.162 - 7.812) \times 10^{-3} \} = 6,624,380 \\ &= 6,624.4 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_s &= A_s \cdot \sigma_{sy} = 506.8 \times 295 = 149,506 \\ &= 149.5 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{cf} &= A_{cf} \cdot E_{cf} \cdot \varepsilon_{cfu} = 247.5 \times 3.9 \times 10^5 \times 0.005949 = 574,227 \\ &= 574.2 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C &= 0.85 \cdot \sigma_{ck} \cdot b \cdot \beta X \\ &= 0.85 \times 40 \times 1500 \times 144.1 = 7,349,100 \\ &= 7,349.1 \text{ kN} \end{aligned}$$

3) 破壊抵抗曲げモーメント M_{ur}

$$\begin{aligned} M_{ur} &= T_p \cdot (d_p - g) + T_s \cdot (d_s - g) + T_{cf} \cdot (h - g) + C \cdot (g - g_c) \\ &= 6,624.4 \times (1,514 - 655) + 149.5 \times (1,644 - 655) \\ &\quad + 574.2 \times (1,700 - 655) + 7,349.1 \times (655 - 72.1) \\ &= 107,722,044 \text{ N} \cdot \text{mm} \\ &= 10,722.0 \text{ kN} \cdot \text{m} > 8,207.6 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

したがって、中弾性型の炭素繊維シートをけた下縁に3枚貼り付けた補強は、炭素繊維シートの引張破壊が先行し、この場合の破壊抵抗曲げモーメントが、補強前に比して約1%向上していることになる。

6.3 プレストレストコンクリートげたのせん断補強に関する計算例

6.3.1 計算条件

(1) 橋梁諸元

・構造種別	:	プレストレストコンクリート道路橋
・構造形式	:	ポストテンション方式単純T桁橋
・桁長	:	28.200m
・支間長	:	27.500m
・有効幅員	:	2.00m (左歩道) + 7.50m (車道部) + 2.00m (右歩道)
・斜角	:	90°
・適用示方書	:	道路橋示方書 I 共通編、III コンクリート橋編 (昭和53年1月)
・荷重	:	TL-20

(2) 補強設計条件

・適用示方書	:	道路橋示方書 I 共通編、III コンクリート橋編 (平成8年12月)
・荷重	:	B活荷重

(3) 材料および許容応力度

① 既存コンクリート

設計基準強度	σ_{ck}	:	40	N/mm ²
ヤング係数	E_c	:	31	kN/mm ² (道路橋示方書平成8年度版より定めた)
許容せん断応力度	τ_c	:	0.54	N/mm ² (設計荷重作用時平均値、同上)
			5.3	N/mm ² (終局荷重作用時最大値、同上)
許容斜引張応力度	σ_{ct}	:	1.0	N/mm ² (設計荷重作用時平均値、同上)

② 既存PC鋼材

種類	SWPR1	:	12φ7 mm × 9ケーブル
鋼材断面積	A_{ps}	:	461.8 mm ² /ケーブル
シース径	ϕ	:	45 mm
ヤング係数	E_p	:	200 kN/mm ²

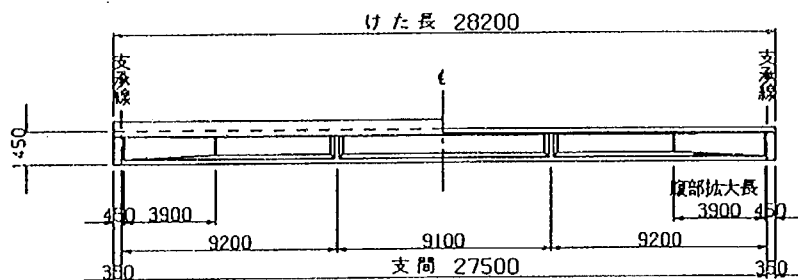
③ 既存鉄筋

種 類	:	S D 295とみなす	
ヤング係数	E_s	:	200 kN/mm ² (道路橋示方書平成 8 年度版より定めた)
許容引張応力度	σ_{ss}	:	180 N/mm ² (設計荷重作用時、同上)
降伏点強度	σ_{sy}	:	295 N/mm ² (終局荷重作用時、同上)

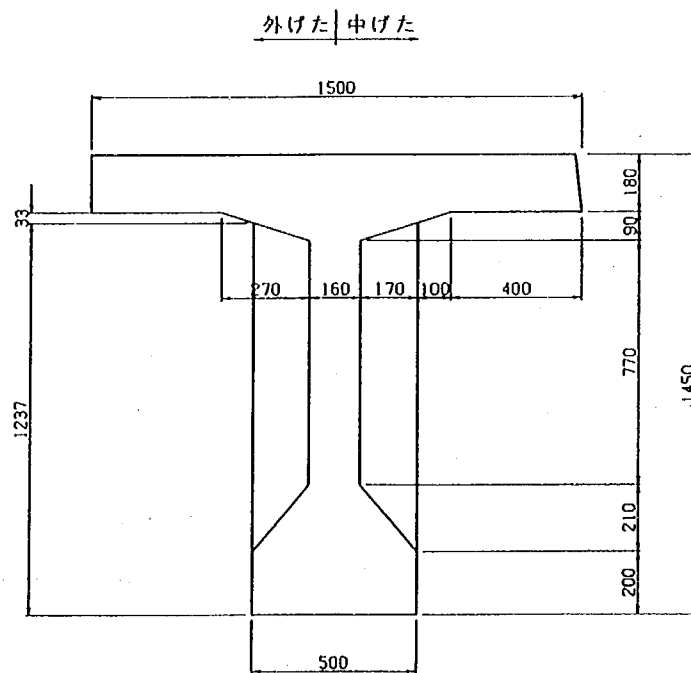
④ 炭素繊維シート

種 類	:	高強度型炭素繊維シート
繊維目付量	W_{cf} :	300 g/m^2
断面積	A_{cf} :	167 mm^2 /単位幅 1 m 当り
保証引張強度	σ_{cfuk} :	3.4 kN/mm^2 (本指針(案) I 共通編、3章 材料、より)
ヤング係数	E_{cf} :	245 kN/mm^2 (同上)
保証ひずみ	ε_{cfuk} :	0.014 = 3.4/245 (同上)

(4) 設計対象橋梁



(a) 側面図



(b) 主桁断面図

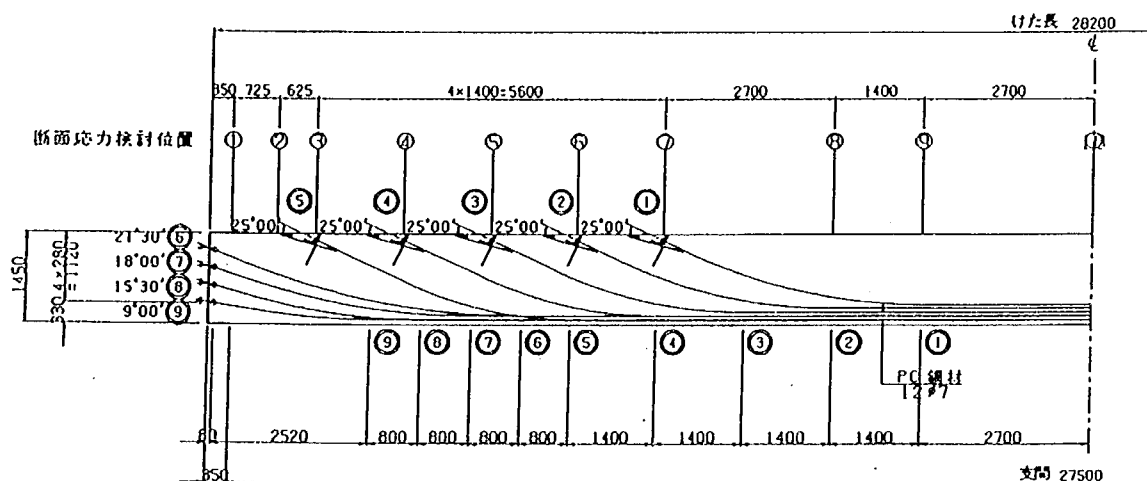
付属図-6.3.1 対象PCげた、形状寸法 (単位: mm)

6.3.2 せん断補強計算

本計算例は、TL-20荷重で設計された昭和43年制定の、標準設計-PC Tに、B活荷重を載荷した場合のせん断補強についての計算を行ったものである。

(1) 断面応力検討位置

断面応力の検討は、付属図-6.3.2 に示す、PC鋼材定着位置である④、⑤、⑥について行うものとする。



付属図-6.3.2 断面応力検討位置 (単位: mm)

(2) せん断応力度等の算出と照査

載荷荷重がTL-20、および、B活荷重の場合に発生するせん断応力度等、および、せん断応力度等の許容値との照査結果を、付属表-6.3.1 に示す。

付属表-6.3.1 において、設計荷重または終局荷重作用時のせん断応力度は、作用せん断力 S からプレストレス力のせん断力作用方向の分力 S_p を減じた、 $(S - S_p)$ をせん断断面積 $b \cdot w \cdot d$ で除した値である。また、斜め引張応力度は、 $(S - S_p)$ を作用力として「道路橋示方書 Ⅲ コンクリート橋編」に定める方法で算出した。そして、スターラップが負担すべきせん断力 S_h' は、終局荷重時の作用せん断力 S からプレストレス力のせん断力作用方向の分力 S_p とコンクリートが負担するせん断力 S_c を減じた、 $(S - S_p - S_c)$ の値である。

ただし、照査に用いたせん断応力度の許容値は、「本指針(案)、Ⅲ コンクリートげた編、4章、4.5 せん断補強設計」により、「道路橋示方書 Ⅲ コンクリート橋編」に定める許容値を7%割増した値である。

付属表-6.3.1 載荷荷重による応力度比較表

種 別			単位	T L - 2 0			B 活荷重		
				検討断面			検討断面		
				④	⑤	⑥	④	⑤	⑥
平均せん断応力度	設計荷重時	S	kN	497.6	448.1	398.6	562.3	508.4	454.4
		S _p	kN	247.8	224.5	192.1	247.8	224.5	192.1
		S _s	kN	249.8	223.6	206.4	314.5	283.8	262.3
		b _w	mm	266	160	160	266	160	160
		d	mm	1420	1420	1420	1420	1420	1420
		τ _m	N/mm ²	0.66 ＜0.59 O U T	0.98 ＜0.59 O U T	0.91 ＜0.59 O U T	0.83 ＜0.59 O U T	1.25 ＜0.59 O U T	1.15 ＜0.59 O U T
	終局荷重時	S	kN	892.5	815.1	737.8	1054.1	965.8	877.5
		S _p	kN	247.8	224.5	192.1	247.8	224.5	192.1
		S _s	kN	644.7	590.6	545.6	806.3	741.3	685.3
		b _w	mm	266	160	160	266	160	160
		d	mm	1420	1420	1420	1420	1420	1420
		τ _m	N/mm ²	1.71 ＜5.67* O K	2.60 ＜5.67* O K	2.40 ＜5.67* O K	2.13 ＜5.67* O K	3.26 ＜5.67* O K	3.02 ＜5.67* O K
斜引張応力度	S	kN	249.8	223.6	206.4	314.5	283.8	262.3	
	b _w	mm	266.0	160.0	160.0	266.0	160.0	160.0	
	Q	mm ³	1.526×10 ⁸	1.424×10 ⁸	1.424×10 ⁸	1.526×10 ⁸	1.424×10 ⁸	1.424×10 ⁸	
	I	mm ⁴	1.661×10 ¹¹	1.603×10 ¹¹	1.603×10 ¹¹	1.661×10 ¹¹	1.603×10 ¹¹	1.603×10 ¹¹	
	τ	N/mm ²	0.86	1.24	1.15	1.09	1.58	1.46	
	σ _c	N/mm ²	2.36	3.19	3.73	2.33	3.16	3.68	
	σ _i	N/mm ²	-0.28 ＜-1.07* O K	-0.42 ＜-1.07* O K	-0.32 ＜-1.07* O K	-0.43 ＜-1.07* O K	-0.66 ＜-1.07* O K	-0.51 ＜-1.07* O K	
スタールアップ	M _o	kN・m	1595.6	2084.8	2484.0	1595.6	2084.8	2484.0	
	M _d	kN・m	2317.3	3300.5	4151.2	2489.5	3554.5	4483.0	
	k	-	1.69	1.63	1.60	1.64	1.59	1.55	
	τ _a	N/mm ²	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	
	S _c	kN	344.1	199.8	195.7	334.4	194.3	190.3	
	S _{h'}	kN	300.6	390.8	349.9	471.9	547.0	495.0	

(3) 応力度照査結果

せん断応力度等の照査結果は、付属表-6.3.1 より、以下の通りである。

- ① 設計荷重作用時の平均せん断応力度は、TL-20およびB活荷重の作用下で、ともに許容平均せん断応力度 $\tau_{m1}^*=0.59\text{N/mm}^2$ を満足しておらず、また、その度合いは、TL-20作用時に比して、B活荷重作用時が大幅に大きくなっている。したがって、スターラップを増設する必要がある。
- ② 終局荷重時の平均せん断応力度は、許容最大せん断応力度 $\tau_{m2}^*=5.67\text{N/mm}^2$ を満足している。したがって、断面変更の必要はない。
- ③ 斜め引張応力度は、許容斜め引張応力度を超えていない。したがって、断面変更の必要はない。
- ④ 終局荷重作用時のスターラップが負担すべきせん断力 Sh' は、TL-20作用時に比して、B活荷重作用時が大幅に大きくなっている。したがって、スターラップを増設する必要がある。

(3) 炭素繊維シート補強量の算出

付属表-6.3.1 から荷重状態別にスターラップが負担すべきせん断力を抜粋し、まとめたものが、付属表-6.3.2 である。

付属表-6.3.2 補強せん断力一覧表

荷重 状態	せん断力 (kN)	断面番号 ④		断面番号 ⑤		断面番号 ⑥	
		TL-20	B活荷重	TL-20	B活荷重	TL-20	B活荷重
設計 荷重 作用時	S	497.6	562.3	448.1	508.4	398.6	454.4
	Sp	247.8	247.8	224.5	224.5	192.1	192.1
	Sc	204.0	204.0	122.7	122.7	122.7	122.7
	Sh'	45.8	110.5	100.9	161.2	83.8	139.6
	Sh'の増加	—	64.7	—	60.3	—	55.8
終局 荷重 作用時	S	892.5	1,054.1	815.1	965.8	737.8	877.5
	Sp	247.8	247.8	224.5	224.5	192.1	192.1
	Sc	344.1	334.4	199.8	194.3	195.7	190.3
	Sh'	300.6	471.9	390.8	547.0	349.9	495.0
	Sh'の増加	—	171.3	—	156.2	—	145.1

表中に示した Sh' の増加は、TL-20からB活荷重への設計荷重増加によって発生した、スターラップが負担すべき増加せん断力である。一般には、既設のスターラップにいくらかの余裕耐力が残っており、この余裕耐力に増加せん断力の一部を負担させることが可能である。しかし、ここでは、既設スターラップの持つ余裕耐力が不明であることから、スターラップが負担すべき増加せん断力 Sh' の全てを炭素繊維シートで補強するものとして、その必要断面積を算出する。

せん断補強に用いる炭素繊維シート量 A_{cf} は、「本指針(案)、Ⅲ コンクリートげた編、4章、4.5 せん断補強設計」に従い、以下の通り求めものとする。

$$A_{cf} = \frac{1.15 \cdot S h' \cdot a}{\sigma_{cf} \cdot d (\sin \theta + \cos \theta)}$$

ここに、 A_{cf} : CFRPシートの断面積 (mm^2)

$S h'$: 炭素繊維シートがCFRPシートとして負担するせん断力 (N)

a : 炭素繊維シートの貼付け間隔、一般に 1,000 mm とする

σ_{cf} : CFRPシートの設計用引張強度で以下により求める

設計荷重作用時 $\sigma_{cf} = \sigma_{sa} \times (E_{cf}/E_s)$ (N/mm^2)

終局荷重作用時 $\sigma_{cf} = 0.8 \times \varepsilon_{cfua} \times E_{cf}$ (N/mm^2)

ただし、炭素繊維シートの端部は、機械的に定着する。

ここに、 σ_{sa} : 斜引張補強筋の許容応力度 (N/mm^2)

E_s : フターラップのヤング係数 (kN/mm^2)

E_{cf} : CFRPシートのヤング係数 (kN/mm^2)

ε_{cfua} : CFRPシートの保証ひずみ

ここにおいて、CFRPシートの設計用引張強度 σ_{cf} は、

設計荷重作用時 $\sigma_{cf} = \sigma_{sa} \times (E_{cf}/E_s) = 180 \times (245/200) = 220.5 \text{ N}/\text{mm}^2$

終局荷重作用時 $\sigma_{cf} = 0.8 \times \varepsilon_{cf} \times E_{cf} = 0.8 \times 0.014 \times 245,000 = 2,744 \text{ N}/\text{mm}^2$

であるから、各断面番号で必要となる炭素繊維シートの断面積は、以下の通り。

設計荷重作用時；

断面 ④ $A_{cf} = (1.15 \times 64,700 \times 1,000) / (220.5 \times 1,300 \times 1.000) = 259.6 \text{ mm}^2/\text{m}$

断面 ⑤ $A_{cf} = (1.15 \times 60,300 \times 1,000) / (220.5 \times 1,300 \times 1.000) = 241.9 \text{ mm}^2/\text{m}$

断面 ⑥ $A_{cf} = (1.15 \times 55,800 \times 1,000) / (220.5 \times 1,300 \times 1.000) = 223.9 \text{ mm}^2/\text{m}$

終局荷重作用時；

断面 ④ $A_{cf} = (1.15 \times 171,300 \times 1,000) / (2,744 \times 1,300 \times 1.000) = 55.22 \text{ mm}^2/\text{m}$

断面 ⑤ $A_{cf} = (1.15 \times 156,200 \times 1,000) / (2,744 \times 1,300 \times 1.000) = 50.36 \text{ mm}^2/\text{m}$

断面 ⑥ $A_{cf} = (1.15 \times 145,100 \times 1,000) / (2,744 \times 1,300 \times 1.000) = 46.78 \text{ mm}^2/\text{m}$

これより、炭素繊維シートによる補強必要量は、

繊維目付量 $300\text{g}/\text{m}^2$ の高強度型炭素繊維シート1層

$A_{cf} = 167 \text{ mm}^2/\text{m} \times \text{けた両面} 2 = 334 \text{ mm}^2/\text{m}$

となる。

また、貼付け範囲は、炭素繊維シートの必要範囲の両側に有効高 d を加えたものとする。

6.3.3 定着部の検討

(1) CFRPシートの破断荷重

使用する炭素繊維シートを目付量 300g/m^2 、厚さ 0.167mm 、接着幅 200mm 、炭素繊維シートの保証引張強度を $3,400\text{N/mm}^2$ とすると、

$$\text{CFRPシートの破断張力 } T_{cfuk} = 0.167 \times 200 \times 3,400 = 113,560 \text{ N/枚}$$

$$\text{同上・終局荷重作用時張力 } T_{cfu} = 1/2 \times (55.22/1,000) \times 200 \times 2,744 = 15,152 \text{ N/枚}$$

$$\text{同上・設計荷重作用時張力 } T_{cfd} = 1/2 \times (259.6/1,000) \times 200 \times 220.5 = 5,724 \text{ N/枚}$$

である。

(2) CFRPシートとコンクリートとの付着による定着耐力

CFRPシートとコンクリートとの単純な付着強度を、設計上の平均付着強度として、 $\tau_b=0.44\text{N/mm}^2$ とすると、付着による耐力 R_{ub1} は、

$$R_{ub1} = 0.44 \times 200 \times 150 = 13,200 \text{ N} < T_{cfuk} = 113,560 \text{ N/枚}$$

また、鋼板で圧着されたCFRPシートとコンクリートとの付着強度を、コンクリート引張強度程度として、 $\sigma_c=2.5\text{N/mm}^2$ とすると、付着による耐力 R_{ub2} は、

$$R_{ub2} = 2.5 \times 200 \times 150 = 75,000 \text{ N} < T_{cfu} = 15,152 \text{ N/枚}$$

となる。したがって、機械式定着の必要性が首肯できる。

(3) 機械式定着部の定着耐力

機械式定着は、CFRPシートを接着させる鋼板、および鋼板をけたに定着するアンカーボルトとで構成する。機械式定着を構成する各部について、ボルト1本あたりに関わる抵抗力は、各々次のように考えることができる。

① CFRPシートと鋼板との付着耐力 R_{u1} :

CFRPシートと鋼板との付着強度を 2.5N/mm^2 、鋼板の幅を 150mm とすると、

$$R_{u1} = 2.5 \times 200 \times 150 = 75,000 \text{ N}$$

ただし、接着面はサンドブラスト処理および脱脂処理を施すものとする。

② 鋼板のせん断耐力 R_{u2} :

SS400の許容せん断応力度を 80N/mm^2 、鋼板の厚さを 9mm とすると、

$$R_{u2} = 80 \times 150 \times 9 = 108,000 \text{ N}$$

③ 鋼板とボルトの支圧耐力 R_{u3} :

ボルト径を 20mm 、鋼板(SS400)の許容支圧応力度を 240N/mm^2 とすると、

$$R_{u3} = 240 \times 20 \times 9 = 43,200 \text{ N}$$

④ ボルトのせん断耐力 R_{u4} :

ボルトM20の断面積を 314mm^2 /本、ボルト(SS400)の許容せん断応力度 80N/mm^2 とすると、

$$Ru4 = 80 \times 314 = 25,120 \text{ N}$$

⑤ ボルトスリーブとコンクリートとの支圧耐力 $Ru5$:

スリーブ径を25.4mm、スリーブ長を80mm、支圧強度をコンクリートの圧縮強度 40 N/mm^2 とすると、

$$Ru5 = 40 \times 80 \times 25.4 = 81,280 \text{ N}$$

従って、ボルト1本あたりに関わる各部耐力の最低値は、ボルトのせん断耐力 $Ru4$ である。

(4) 合計定着耐力

合計定着耐力 Tr は、つぎの通りとなる。

ただし、アンカーボルト間隔を200mmとして、幅200mmのCFRPシートに作用している引張力をその両側のアンカーボルト2本で負担するものとする。

$$\begin{aligned} Tr &= \text{CFRPシートとコンクリートとの付着による定着耐力 } Rub2 + \text{ボルトのせん断耐力 } Ru4 \times 2 \\ &= 75,000 + 25,120 \times 2 = 125,240 \text{ N/枚} > Tcfuk = 113,560 \text{ N/枚} \\ &> Tcfu = 15,152 \text{ N/枚} \end{aligned}$$

また、鋼板で圧着されたCFRPシートとコンクリートとの付着による耐力 $Rub2$ を期待するにあたっては、付着強度 $\sigma_i = 2.5 \text{ N/mm}^2$ を確実なものにするために、鋼板で圧着されたCFRPシートとコンクリートとの強い密着を図ることを目的として、アンカーボルトに

$$\begin{aligned} Tb &= \text{押付け圧力 } 0.25 \text{ N/mm}^2 \times \text{アンカーボルト間隔 } 200 \text{ mm} \times \text{鋼板幅 } 150 \text{ mm} \\ &= 7,500 \text{ N} \end{aligned}$$

程度の緊張力を与えておくものとする。

(5) 貼付け長の検討

必要定着長 Lcf は、「本指針(案)、Ⅲ コンクリートげた編、4章、4.5.3 構造細目」により、以下の通りである。

$$\begin{aligned} Lcf &= Tcfu / (\text{許容平均付着応力度 } \tau_s \times \text{付着幅 } bcf) \\ &= (15,152 \text{ N/枚}) / (0.44 \times 200) \\ &= 172 \text{ mm} < \text{貼付け長 } lcf = \text{ウェブ高さ } 770 \text{ mm} \end{aligned}$$