





# 博士論文

## 炭素繊維シートを用いた鋼橋桁端部の 腐食部補修法に関する研究

平成 27 年 9 月

長岡技術科学大学 大学院工学研究科  
博士後期課程 材料工学専攻

奥 山 雄 介



## 炭素繊維シートを用いた鋼橋桁端部の腐食部補修法に関する研究

<b>第1章 緒 論</b>	<b>1</b>
1.1 研究の背景	1
1.2 FRP 接着による補修・補強技術	2
1.2.1 鋼構造物への適用事例	2
1.2.2 炭素繊維シート接着工法の概要	2
1.2.3 既往の設計手法	3
1.3 本研究の目的	5
1.4 本論文の構成	5
参考文献	6
<b>第2章 炭素繊維シート接着工法の鋼橋桁端部への適用に向けた基礎検討</b>	<b>9</b>
2.1 緒 言	9
2.2 FRP 接着鋼板の一軸圧縮試験	9
2.2.1 試験概要	9
2.2.2 試験結果と考察	14
2.3 FRP 接着鋼板の弾性座屈強度評価手法	18
2.3.1 計算手法	18
2.3.2 計算結果と考察	20
2.4 結 言	22
参考文献	22
<b>第3章 鋼橋桁端部腹板の力学挙動に関する検討</b>	<b>25</b>
3.1 緒 言	25
3.2 健全な鋼桁を用いたせん断座屈試験	27
3.2.1 試験概要	27
3.2.2 試験結果と考察	31
3.3 断面欠損を有する鋼桁を用いたせん断座屈試験	38
3.3.1 試験概要	38
3.3.2 試験結果と考察	42
3.4 合理的な補修方法の確立に向けたせん断座屈試験	46
3.4.1 試験概要	47
3.4.2 試験結果と考察	50
3.5 炭素繊維シートで補強した鋼桁のせん断強度評価式	55
3.5.1 Basler 式に準じた強度評価	55
3.5.2 弾性せん断座屈強度	55

3.5.3	数値計算結果と考察	59
3.6	結 言	61
	参考文献	62
<b>第4章</b>	<b>鋼橋支点部の力学挙動に関する検討</b>	<b>65</b>
4.1	結 言	65
4.2	十字断面柱の圧縮試験	66
4.2.1	試験概要	66
4.2.2	試験結果と考察	70
4.3	腐食を模擬した桁支点部の圧縮試験	74
4.3.1	試験概要	74
4.3.2	試験結果と考察	78
4.3.3	FEAによる検証	80
4.4	結 言	81
	参考文献	82
<b>第5章</b>	<b>炭素繊維シートを用いた鋼橋桁端部の腐食部補修法の提案</b>	<b>83</b>
5.1	結 言	83
5.2	設計法	83
5.2.1	使用材料	83
5.2.2	せん断力を受ける部材の設計	85
5.2.3	支点反力を受ける部材の設計	90
5.3	施工法	92
5.3.1	施工手順	92
5.3.2	施工時の留意点	93
5.4	実物大試験体による検証実験	94
5.4.1	試験概要	94
5.4.2	試験結果考察	96
5.5	結 言	97
	参考文献	97
<b>第6章</b>	<b>結 論</b>	<b>99</b>

謝 辞

本研究に関連する著者の発表論文・口頭発表一覧

- 図・表リスト -

第 1 章の図・表

図-1.1 建設後 50 年が経過した橋梁数の推移	_____	1
図-1.2 炭素繊維を使用した補修・補強材料	_____	3
図-1.3 炭素繊維シートによる補修工法の概略図	_____	4
図-1.4 研究のフロー	_____	6
表-1.1 各種材料を用いた補修・補強工法の比較	_____	4

第 2 章の図・表

図-2.1 試験体形状	_____	10
図-2.2 試験体の断面構成	_____	11
図-2.3 試験方法	_____	13
図-2.4 曲げ剛性の増加率と強度増加率の関係	_____	14
図-2.5 CS の終局状態	_____	16
図-2.6 繊維シートが接着された梁 (1/2 モデル)	_____	19
図-2.7 繊維シートの接着長と弾性座屈荷重の関係	_____	21
図-2.8 繊維シートの接着長と座屈モード形	_____	21
図-2.9 弾性座屈荷重予測 (CASE 1)	_____	21
図-2.10 弾性座屈荷重予測 (CASE 2)	_____	21
表-2.1 繊維シートの物性値	_____	10
表-2.2 試験ケース	_____	11
表-2.3 最大荷重および強度増加率	_____	15
表-2.4 破壊時の中央変位と破壊形態	_____	17

第 3 章の図・表

図-3.1 腹板のせん断座屈	_____	25
図-3.2 桁端部腹板に生じる腐食損傷例	_____	25
図-3.3 炭素繊維シートによる補修工法	_____	26
図-3.4 試験体形状	_____	27
図-3.5 炭素繊維シート貼り付け形状	_____	29
図-3.6 Basler による斜張力場の形成領域	_____	30
図-3.7 試験状況	_____	30
図-3.8 荷重－鉛直変位関係	_____	33
図-3.9 腹板の面外変形状況	_____	33
図-3.10 荷重－面外たわみ関係	_____	34
図-3.11 残留たわみ分布	_____	35
図-3.12 試験体の終局状態 (G1 シリーズ)	_____	36
図-3.13 試験体の終局状態 (G2 シリーズ)	_____	37
図-3.14 炭素繊維シートの破断角度	_____	38

図-3.15	断面欠損の形状	39
図-3.16	炭素繊維シートの貼り付け形状	41
図-3.17	試験状況	41
図-3.18	荷重－鉛直変位関係	43
図-3.19	荷重－面外たわみ関係	43
図-3.20	残留たわみ分布	44
図-3.21	終局状態	45
図-3.22	部分貼り工法における補修領域	47
図-3.23	試験パネルの形状	48
図-3.24	炭素繊維シートの貼り付け形状	49
図-3.25	試験状況	49
図-3.26	試験終了後の試験体状況 (1/2)	50
図-3.26	試験終了後の試験体状況 (2/2)	51
図-3.27	荷重－変位関係	54
図-3.28	積層板の断面構成	56
図-3.29	純せん断を受ける積層板	56
図-3.30	弾性せん断座屈強度とせん断強度の関係	60
図-3.31	簡易法と厳密法によるせん断強度の比較	61
表-3.1	試験ケース	28
表-3.2	炭素繊維シートの物性値	28
表-3.3	最大荷重および強度増加率	32
表-3.4	試験ケース	39
表-3.5	炭素繊維シートの物性値	39
表-3.6	最大荷重と強度改善効果	43
表-3.7	試験ケース	48
表-3.8	最大荷重および強度改善効果	53
表-3.9	数値計算結果	59

#### 第4章の図・表

図-4.1	支点部垂直補剛材の局部座屈	66
図-4.2	支点部下端への炭素繊維シート接着方法	66
図-4.3	試験体形状	67
図-4.4	炭素繊維シートの貼り付け方法	68
図-4.5	ひずみ計測位置	69
図-4.6	試験状況	69
図-4.7	試験終了後の試験体状況	70
図-4.8	荷重－ひずみ関係 ( $P - \varepsilon^2$ 関係)	72
図-4.9	試験体形状	75
図-4.10	炭素繊維シートの貼り付け形状	77
図-4.11	試験状況	77



図-4.12	試験終了時の試験体状況 (1/2)	78
図-4.12	試験終了時の試験体状況 (2/2)	79
図-4.13	解析モデル	80
図-4.14	荷重－鉛直変位関係	81
表-4.1	試験ケース	67
表-4.2	終局荷重の評価	71
表-4.3	終局荷重一覧	73
表-4.4	強度改善効果	74
表-4.5	試験ケース	76
表-4.6	最大荷重と炭素繊維シートの破壊荷重	79

#### 第5章の図・表

図-5.1	炭素繊維シート	84
図-5.2	せん断強度に影響する腐食領域	87
図-5.3	炭素繊維シートの貼り付け範囲	87
図-5.4	全面貼り工法の炭素繊維シート貼り付け領域	89
図-5.5	炭素繊維シートの割り付け例	91
図-5.6	炭素繊維シートの貼り付け領域	91
図-5.7	施工手順	93
図-5.8	試験体形状 (単位 : mm)	95
図-5.9	荷重－変位関係曲線	97
表-5.1	炭素繊維シートの材料特性	84
表-5.2	樹脂材料の品質規格	86
表-5.3	樹脂材料の標準使用量	94
表-5.4	試験ケース	96
表-5.5	試験結果一覧	96



## 第1章

## 緒 論

## 1.1 研究の背景

現在、我が国で使用されている道路、鉄道、上下水道、通信施設などの社会基盤の多くは、高度経済成長期に整備されたものであり、人びとの生活になくってはならない存在となっている。なかでも、橋梁についてみると、橋長が15mを超える道路橋は約16万橋が供用されている<sup>1-1)</sup>。これらの橋梁がこのまま高齢化すると、20年後には全体の約半数が橋齢50年を迎えることとなる(図-1.1)。そのため、すでに建設されている構造物を延命化させるためには、構造物に期待される性能、機能を考慮したうえで、計画的に維持管理していくことが重要である。

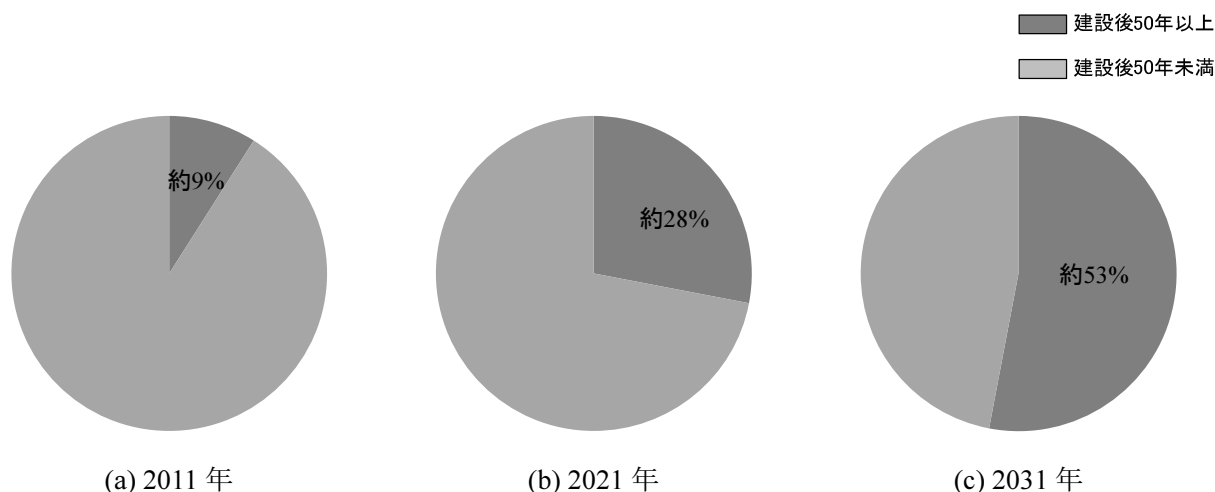


図-1.1 建設後50年が経過した橋梁数の推移<sup>1-1)</sup>

鋼構造物の代表である鋼橋に目を向けると、機能向上対策以外の理由で架け替えとなるものの大部分の理由が鋼材の腐食となっている。鋼橋の腐食は、冬季に路面に撒かれる凍結防止剤の飛散や、伸縮装置や床板打継目などからの局所的な漏水が原因で部分的に生じることが多い<sup>1-2), 1-3)</sup>。特に伸縮装置からの漏水に起因するものが顕著であり、桁端部での腐食損傷事例が多数報告されている。鋼橋の形式として広く普及している鈹桁橋を考えると、桁端部腹板の断面欠損はせん断強度の低下に、また、支点部の断面欠損は橋梁の支持機能の低下に結び付く。そのため、腐食による断面欠損を生じた鋼桁のせん断強度や支点部の残存耐力の把握を目的とした研究がこれまでに行われている<sup>1-4) - 1-8)</sup>。これらの研究では、腐食量と耐荷力の関係を実験的あるいは解析的に把握することに主眼が置かれている。

一方、上記した腐食損傷に対する補修・補強には、鋼材を用いた当て板や部材交換が一般的に用いら

れている。これらの工法では、ボルト孔による断面欠損や溶接入熱による熱影響が生じることや、専用の架設機材や専門技術が必要となるなど、様々な制約を受けるため、損傷に対して応急的な処置を施すことが難しいと考えられる。そのため、腐食損傷事例数に対して、補修・補強を行った事例数が少なく、特に損傷が軽微な段階での補修はほとんど行われていない。この主な要因は、補修範囲が局部的であっても、一定の架設機材が必要となることや、品質管理のための専門技術者や施工に橋梁特殊工が必要となることから、補修費用が著しく割高になるためと考えられる。そのため、鋼構造物の補修・補強対策として、大掛かりな設備や特殊技能を必要としない、さらに、小規模な対策であっても補修費用が割高とならない簡易な工法の開発が強く望まれている。

## 1.2 FRP 接着による補修・補強技術

鋼構造物の補修・補強材料として、繊維強化樹脂材料（Fiber Reinforced Polymer, 以下 FRP と記す）が注目されており、この FRP のなかでも、炭素繊維に樹脂を含浸硬化させた炭素繊維強化樹脂材料（Carbon Fiber Reinforced Polymer, 以下 CFRP と記す）の適用を検討した事例が多数報告されている<sup>1-9) ~ 1-15)</sup>。CFRP は高強度、高弾性、高耐久性、軽量といった特徴を有する材料であり、樹脂を用いて構造物表面に接着するだけであり、従来の当て板工法や部材交換法に比べて施工が容易である。すでにコンクリート構造物の分野では CFRP が盛んに活用されており<sup>1-16) ~ 1-18)</sup>、一般的な工法として認識されている。しかしながら、鋼構造物への適用にあたっては、高応力下や座屈変形時において、接着層の付着切れによる剥離が生じるなどの問題から、適用事例は依然として少ない現状にある。これらの課題を解決することで、鋼構造物に対する新たな補修・補強技術が確立でき、従来の当て板や部材交換に比べて、効率的かつ合理的な予防保全が可能となる。

### 1.2.1 鋼構造物への適用事例

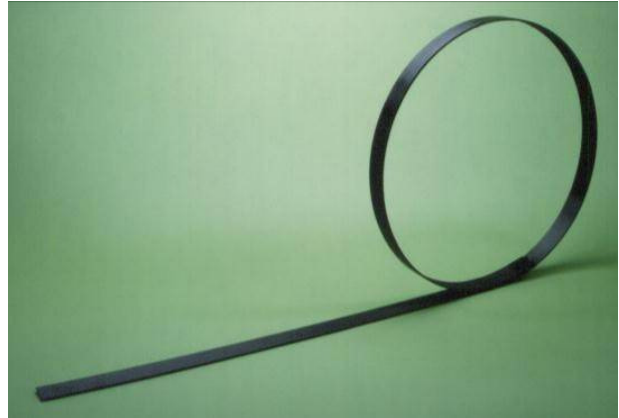
本研究で対象とする FRP 接着工法は、腐食による損傷を受けた鋼部材に対して、FRP を接着し設計当初の断面性能の回復あるいは、設計荷重の変更により要求される耐荷力の向上を図るものである。本論文では、劣化した鋼部材の機能回復を「補修」、鋼部材の機能の向上を「補強」と定義する。これまでに、FRP 材料を用いた鋼構造物の補修・補強方法として、要求される補強量や対象とする部位に応じて、いくつかの工法が提案されている。必要補強量が比較的大きい場合には、炭素繊維シート数層分を板状に引抜成型した炭素繊維プレートを鋼部材に接着する工法が提案されており、近年の交通量の増大および活荷重の大型化に伴う TL-14 から B 活荷重へ対応するための補強対策事例<sup>1-19)</sup>や腐食により断面欠損を生じた工場建屋小ばりの補修対策事例<sup>1-20)</sup>などがある。また、鋼製橋脚の耐震補強では、部材軸方向または橋脚周方向に繊維シートを巻き立てて接着することで所定の変形性能を確保することが行われており、炭素繊維シート巻き立てによる損傷鋼管補修の試みがなされている<sup>1-21)</sup>。さらに、炭素繊維プレートにプレストレスを導入して補強する工法がコンクリートの分野で確立されており<sup>1-22)</sup>、鋼構造物においても 2006 年に千葉県の子倉橋において適用されている<sup>1-23)</sup>。

### 1.2.2 炭素繊維を用いた工法の比較

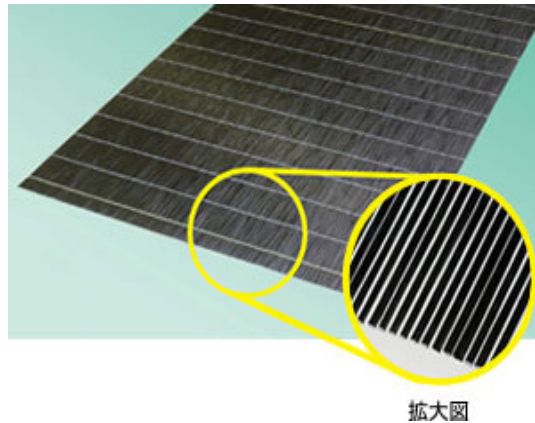
本研究で対象とする炭素繊維シート接着工法は、炭素繊維シートを断面欠損量に応じて必要層数貼り付けることで断面性能の回復を図ることを目的としている。炭素繊維シートには、用途に応じて高強度



(a) 炭素繊維シート



(b) 炭素繊維プレート



拡大図

(c) 炭素繊維ストランドシート

図-1.2 炭素繊維を使用した補修・補強材料

型、中弾性型、高弾性型などを原料として製造されるものであり、繊維目付量や幅など種々のものが提供されている。炭素繊維を使用した FRP 材料としては、炭素繊維に樹脂を含浸・硬化させ工場プレート状に成型された炭素繊維プレートや、炭素繊維束に樹脂を含浸・硬化させた直径 1 mm 程度の炭素繊維ストランドを横糸でシート状に連結した炭素繊維ストランドシートなどがある。これらの炭素繊維材料の外観を図-1-2 に示す。また各工法によるメリット・デメリットを表-1.2 に示す。

本研究で対象とする桁端部では、腐食形状に合わせた施工が必要となってくる。そのため、現場でのハンドリングが良好で、任意の形状にカットすることが容易な炭素繊維シートを用いることが望ましいと考え、炭素繊維シートを補修材料として用いることとした。

### 1.2.3 既往の設計手法

FRP 接着工法の補修・補強設計では、FRP が接着された鋼部材の断面を、完全に一体化された合成断面と考え、着目する部位の応力が所定の値まで低減されているかどうかを照査している。図-1.3 に FRP 接着による鋼部材の補修・補強の概略図を示す。補修・補強の対象とする区間は、FRP と鋼材が完全に一体化した合成断面としての仮定が成立する区間である。定着長とは、鋼部材に作用する力が接着剤を

表-1.1 各種材料を用いた補修・補強工法の比較

	炭素繊維シート	炭素繊維プレート	炭素繊維 ストランドシート
工法の概要	現場でドライシートに樹脂を含浸させ、FRP 形成と同時に鋼部材に接着する工法	工場で生産された炭素繊維プレート（幅 5 cm, 厚さ 2 mm）を現場にて鋼部材に接着する工法	工場で生産された炭素繊維ストランドを現場にて鋼部材に接着する工法
メリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>・全面接着が可能</li> <li>・付着性がよい</li> <li>・任意の形状での施工が可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・全面接着が可能</li> <li>・現場での含浸作業がないため、工期短縮</li> <li>・補強量が多い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・付着性がよい</li> <li>・現場での含浸作業がないため、工期短縮</li> <li>・補強量が多い</li> </ul>
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高目付化が困難</li> <li>・施工者の技量に依存（浮きや膨れの発生）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・複雑な形状に対応できない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・複雑な形状に対応できない</li> <li>・剥離に対する抵抗性が低い</li> </ul>

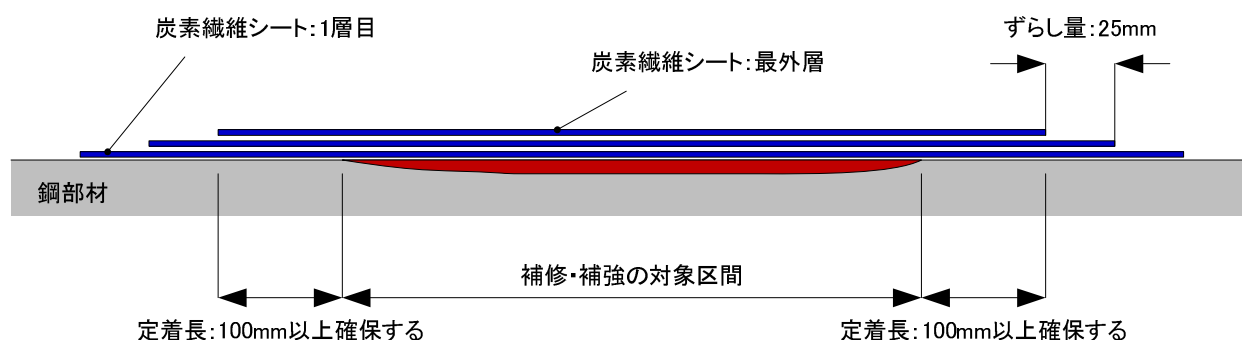


図-1.3 炭素繊維シートによる補修工法の概略図

介して FRP に伝達する区間であり、この区間では完全な合成断面とはならず、鋼板に作用する応力も計算通りには低減しないことに注意が必要である。軸力および曲げを受ける部材に対しては、定着長を 100 mm 以上確保することで対象区間の応力が一定になることが明らかとされている<sup>1-24)</sup>。さらに、FRP の接着端部には、断面が急変することによる応力集中が生じることとなる。この時に発生する応力はピール応力と呼ばれ、この応力が接着剤の終局限界強度に達すると FRP が剥離することとなる。そのため、接着端に生じる応力集中を緩和するための方法として、1 層ごとに 25 mm 以上のずらしを設けて積層する方法<sup>1-24)</sup>や FRP の端部にテーパを設けて施工する工法<sup>1-25), 1-26)</sup>、などが提案されている。

### 1.3 本研究の目的

本研究は、鋼橋桁端部に生じた腐食損傷を対象とした炭素繊維シートを用いた補修・補強工法の適用性を明らかとし、その設計法、施工法を確立することを目的とする。具体的には、桁端部に生じる腐食損傷を「桁端部腹板における損傷」と「支点部垂直補剛材における損傷」の大きく2つに分類し、それぞれについて、炭素繊維シート積層数の決定方法ならびに貼り付け方法に関する検討を行う。これらの実験を通して、以下の点を明らかとする。

- 1) 桁端部に生じた腐食損傷は、桁端部腹板では板厚減少に伴うせん断強度の低下を、垂直補剛材では橋梁の支持機能の低下に結びつく。従来の引張や曲げを受ける部材では、炭素繊維シートを貼り付けることで板厚を回復させ、設計当初の強度まで機能を回復させている。そこでは、炭素繊維シートの厚さを鋼換算し、減少分を回復できるように炭素繊維シートの積層数を決定する方法が用いられており、本研究で対象とするせん断力や軸圧縮力を受ける部材に対しても、同様の方法で設計できるか検討する必要がある。
- 2) 端部腹板では、せん断力の卓越により終局時にせん断座屈を、垂直補剛材では、局部座屈が発生することが懸念される。これらのように、終局時に大変形を伴う部位に炭素繊維シートを貼り付ける場合、変形に追従できずに炭素繊維シートが剥離してしまうことが考えられる。先述したとおり、これまでも剥離に対する抵抗性を向上させるための方法は検討されているが、より簡易かつ効果的に剥離を防止できる貼り付け方法について検討する必要がある。
- 3) 実構造物への適用を想定した炭素繊維シートの接着方法について検討するために、鋼桁を用いた試験を実施し、対象とする部材の力学的挙動を明らかとする。たとえば、腐食損傷による強度低下や、炭素繊維シートによる補修効果などである。

以上の検討結果を踏まえて、本工法における補修設計法ならびに施工法を整理し、実構造物への適用に際して必要となる情報をまとめる。

### 1.4 論文の構成

本論文は全6章で構成されており、**第1章**では、社会基盤設備としての鋼構造物を取り巻く現状から、従来工法に代わる新たな設計施工法の確立が重要な課題であること説明し、本研究で対象とする炭素繊維シート接着工法の概要について述べるとともに、適用範囲を広げるための諸課題について示した。そして、これらの諸課題を解決するために設定した研究目的を明示した。**第2章**以下の各章の研究内容は以下のとおりである。また、**図-1.4**には各章の関係をフローで示す。

**第2章**では、種々のFRPシートを貼り付けた鋼材の一軸圧縮試験を実施した<sup>1-27)</sup>。ここでは、各種繊維の補修効果を明らかにするとともに、座屈変形に対して効果的なFRPの貼り付け方法について検討する。具体的には、鋼板とFRPの間に低弾性かつ伸びの大きいパテ材を挿入する方法である。さらに、FRPが接着された鋼板の弾性座屈荷重を評価する手法を提案する。

**第3章**では、鋼橋桁端部の腹板を対象とした炭素繊維シートによる補修効果を検証するために、鋼桁のせん断座屈試験を実施した<sup>1-28)-1-30)</sup>。ここでは、まず、健全な鋼桁の腹板に炭素繊維シートを

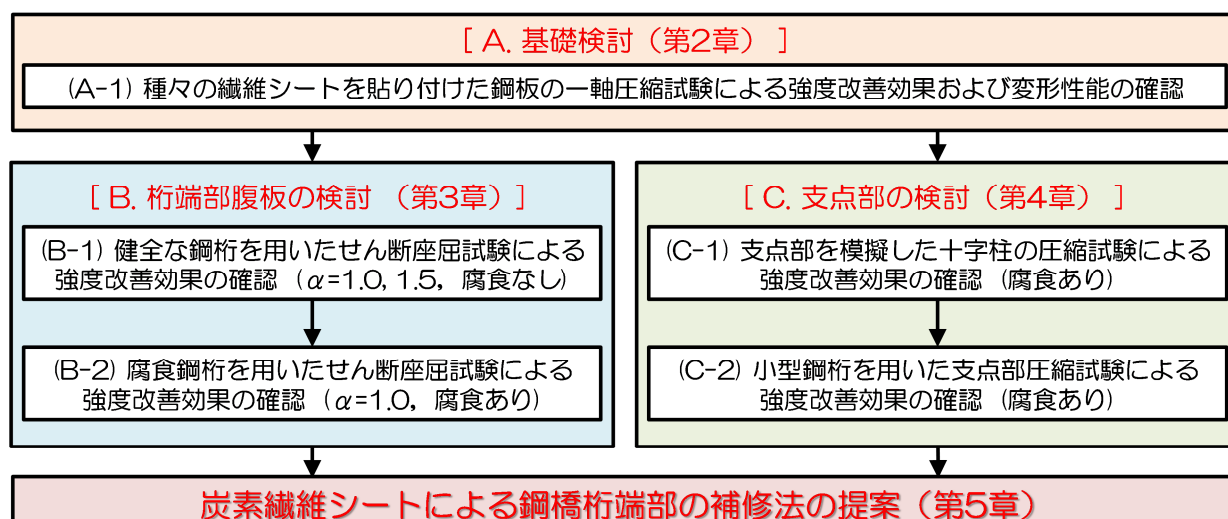


図-1.4 研究のフロー

貼り付けて試験を行い、炭素繊維シートによる強度増加率を明らかとし、次いで、腐食を模擬した断面欠損を鋼桁腹板に与え、ここに炭素繊維シートを貼り付けることによる強度回復効果を明らかとする。また、炭素繊維シートの貼り付け方法として欠損部に部分的に貼り付ける「部分貼り工法」と腹板全面に貼り付ける「全面貼り工法」の2種類の工法を提案し、両者の補修効果を検討する。

**第4章**では、支点部直上の垂直補剛材を対象とした炭素繊維シートによる補修効果を検討するために、十字断面柱の圧縮試験および鋼桁の支点部圧縮試験を実施した<sup>1-31)</sup>。まず、十字断面柱の圧縮試験により、軸圧縮力を受ける部材に対する炭素繊維シートの補修効果を明らかとする。次いで、支点部周辺の垂直補剛材および腹板が損傷した場合を想定した桁の圧縮試験を実施し、炭素繊維シートの貼り付け方法およびその補修効果について検討する。

**第5章**では、第4章までに得られた知見を基に、炭素繊維シートを用いた鋼橋桁端部の腐食部補修法について、具体的な設計手法および施工法を示す。

最後に**第6章**では本論文の結論を述べている。

## 参考文献

- 1-1) 国土交通省：道路統計年報 2013.
- 1-2) 名取暢，西川和廣，村越潤，大野崇：鋼橋の腐食損傷事例調査とその分析，土木学会論文集，No.668/I-54，pp.299-311，2001.
- 1-3) (独) 国土技術政策総合研究所：鋼道路橋の局部腐食に関する調査研究，ISSN 1346-7328，国総研資料第 294 号，2006.
- 1-4) Vo Tanh Hung，佐々木栄一，市川篤司，三木千壽：腐食を模擬した模型桁のせん断耐力に関する実験および解析，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1099-1105，2002.
- 1-5) 海田辰将，藤井堅，原孝志，中村英治，上野谷実：腐食鋼板のせん断耐力とその評価法，構造工学論文集，Vol.50A，pp.121-130，2004.
- 1-6) 下里哲弘，玉城喜章，有住康則，丸山直人，矢吹哲哉，小野秀一：腐食劣化した鋼 I 桁のせん断



- 耐荷力実験（その1），土木学会第66回年次学術講演会概要集，pp.1045-1046，2011.
- 1-7) Vo Tanh Hung, 永澤洋, 佐々木栄一, 市川篤司, 名取暢：腐食が原因で取り替えられた実鋼橋支点部の載荷実験および解析，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.141-151，2002.
- 1-8) 白倉誠, 金銅晃久, 山口隆司, 畠中彬, 三ツ木幸子, 橋本国太郎, 杉浦邦征：鋼道路橋の腐食した桁端の耐力特性とその設計法に関する2,3の考察，構造工学論文集，Vol.56A，pp.722-732，2010.
- 1-9) 鈴木博之, 永崎央陽, 遠藤勇一, 池田圭一：き裂を有する材の炭素繊維強化樹脂板による補強，鋼構造年次論文報告集，第8巻，pp.683-688，2000.
- 1-10) 大倉一郎, 福井唯夫, 中村圭吾, 松上泰三：炭素繊維シートによる鋼板応力の低下とはく離せん断応力，土木学会論文集，No.689，I-57，pp.239-249，2001.
- 1-11) 中村一史, 諸井敬嘉, 鈴木博之, 前田研一, 入部孝夫：溶接継手に発生した疲労き裂の積層CFRP板による補修効果，鋼構造年次論文報告集，第13巻，pp.89-96，2005.
- 1-12) 石川敏之, 大倉一郎, 西田貴裕, 横田季彦, 斎藤誠：CFRP板付着端近傍への低弾性接着剤の使用による剥離せん断応力の低減，土木学会構造工学論文集，Vol.54A，pp.842-849，2008.
- 1-13) 杉浦江, 小林朗, 稲葉尚文, 本間淳史, 大垣賀津雄, 長井正嗣：鋼部材腐食損傷部の炭素繊維シートによる補修技術に関する設計・施工法の提案，土木学会論文集F，Vol.65，No.1，pp.106-118，2009.
- 1-14) 石川敏之, 北根安雄：断面欠損を有する鋼板の接着補修に必要なCFRP板の長さおよび板厚の決定方法，応用力学論文集，pp.911-920，2010.
- 1-15) 野阪克義, 石川敏之, 小林朗：部分的にプレテンションされたCFRP板接着鋼板におけるはく離せん断応力，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1026-1033，2010.
- 1-16) 上原子晶久, 下村匠, 丸山久一, 西田浩之：連続繊維シートとコンクリートの付着・剥離挙動の解析，土木学会論文集，No.634，V-45，pp.197-208，1999.
- 1-17) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補強技術研究委員会報告書，2003.
- 1-18) 岸徳光, 三上浩, 張広鋒：FRPシート曲げ補強RC梁に関するシートの剥離挙動解析，土木学会論文集V，Vol.725，V-58，pp.255-272，2003.
- 1-19) 佐々木克尚, 板垣一也, 渡邊憲市, 鈴木博之：炭素繊維強化樹脂版（カーボン板）による鋼橋の補強，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，V-384，2000.
- 1-20) 玉井宏章, 高松隆夫, 原伸幸, 灰谷徳治, 服部明生：連続繊維プレートによる鋼構造物の補強に関する基礎的研究，鋼構造年次論文報告集，第12巻，pp.239-246，2004.
- 1-21) 小野紘一, 杉浦邦征, 三木亮二, 小牧秀之, 若原直樹：炭素繊維シート巻き立てによる損傷鋼管の補修効果に関する検討，鋼構造年次論文報告集，第10巻，日本鋼構造協会，pp.225-230，2002.
- 1-22) 井上真澄, 高木宣章, 濱田譲, 小林朗：緊張した炭素繊維プレートによる既設コンクリート部材の補強に関する研究，土木学会論文集，No.711，V-56，pp.1-13，2002.
- 1-23) 村上英樹, 安森浩, 小林朗, 立石晶洋：鋼部材に対する炭素繊維プレートを用いた緊張力導入に関する実験的研究，プレストレスコンクリート技術協会，第15回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.359-362，2006.
- 1-24) 杉浦江, 小林朗, 大垣賀津男, 稲葉尚文, 富田芳男, 長井正嗣：鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究，土木学会論文集A，Vol.64，No.4，pp.806-813，2008.
- 1-25) Reza Haghani, Mohammad Al-Emrani, Robert Kliger: Interfacial stress analysis of geometrically modified

adhesive joints in steel beams strengthened with FRP laminates, Construction and Building Materials, Vol.23 (3), pp.1413-1422, 2009.

- 1-26) 石川敏之, 宮下剛: 一軸引張を受ける CFRP 板接着鋼板に対する段差の設計法, 土木学会論文集 A1, Vol.67, No.2, pp.351-359, 2011.
- 1-27) 奥山雄介, 宮下剛, 緒方辰男, 藤野和雄, 大垣賀津雄, 秀熊佑哉, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼桁腹板の合理的な補修・補強方法の確立に向けた FRP 接着鋼板の一軸圧縮試験, 構造工学論文集 Vol.57A, 10-10, pp.735-746, 2011.
- 1-28) 奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 小出宜央, 秀熊佑哉, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼橋桁端部腹板の腐食に対する CFRP を用いた補修工法の実験的研究, 構造工学論文集 Vol.58A, 10-11, pp.710-720, 2012.
- 1-29) 奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 小出宜央, 小林朗, 秀熊佑哉, 堀本歴, 長井正嗣: 腹板を CFRP 補強した鋼桁のせん断座屈試験と強度評価法, 土木学会論文集 A1, Vol.68 (No.3), pp.635-654, 2012.
- 1-30) 奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼橋桁端部腹板の腐食に対する炭素繊維シートを用いた補修・補強法の最適設計方法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.541-553, 2014.
- 1-31) 奥山雄介, 宮下剛, 長井正嗣, 若林大, 小出宜央, 小林朗, 秀熊佑哉, 堀本歴: CFRP を用いた鋼橋支点部の腐食部補修法に関する実験的研究, 土木学会第 68 回年次学術講演会, pp.685-686, 2013.

## 第2章

### 炭素繊維シート接着工法の鋼橋桁端部への適用に向けた基礎検討

#### 2.1 緒言

腐食損傷が生じた箇所では、板厚の減少に伴い、部材に座屈が発生するなど、橋梁性能の低下に結び付く。第1章で述べたように、鋼橋に生じる腐食損傷は、桁端部腹板や支点部近傍の垂直補剛材に多く見受けられる<sup>2-1)</sup>。これは、床板のひび割れ損傷部や打継不良部などからの漏水や、伸縮装置や床版端部、排水装置からの漏水に起因するものである。これらの部位は、死荷重や活荷重を支える重要な部位であり、腐食の進行は橋梁の支持機能の低下を招くこととなるため、早急な対策が必要となる。さらに、終局時には、端部腹板はせん断力の卓越によりせん断座屈を、支点部では軸圧縮力により板厚減少部での局部座屈が発生することが懸念される。このような部位に炭素繊維シートを接着して補修・補強を行う場合、シートが大変形に追従できずに鋼材から剥離し、補修効果を維持できないといった問題が生じる。

これまでに、鋼構造部材の圧縮補強に対して、CFRPを適用した事例としては、山型鋼ブレース材に炭素繊維プレートを接着した圧縮試験<sup>2-2)</sup>やT型に成型したFRP補剛材を鋼桁腹板に接着し、その補強効果を検討した研究<sup>2-3)</sup>はあるものの、いずれも補強効果が期待されるとの報告のみであり、大変形に追従させる貼り付け方法や終局時の挙動までは明確にされていない。また、炭素繊維シートを貼り付けて補修・補強を行うという研究事例は報告されていない。

そこで本研究では、鋼橋桁端部に生じた腐食損傷に対して、炭素繊維シートによる合理的な補修・補強方法を確立することを最終目的とし、その基礎検討として、FRP接着鋼板の一軸圧縮試験を実施した。ここでは、種々のFRPを貼り付けた鋼材の一軸圧縮試験を実施し、補修効果の高いFRPの選定を行うとともに、座屈変形に対する追従性を向上させるための貼り付け方法についても検討する。

#### 2.2 FRP接着鋼板の一軸圧縮試験

##### 2.2.1 試験概要

###### (1) 試験体

本研究で使用する鋼材は、鋼種SM490Y(降伏応力は材料試験結果より428MPa)、寸法は長さ800mm、板幅60mm、板厚9mm、の平鋼板である。この鋼板の両面に繊維シートを貼り付け圧縮試験を実施する。使用した繊維シートは、高弾性型炭素繊維シート(CE)、高強度型炭素繊維シート(CU)、炭素繊維ストランドシート(CS)、ガラス繊維シート(G)、高強度ポリエチレンシート(P)、ハイブリッド繊維シート(H)の6種類である。各種繊維シートの物性を表-2.1に示す。ここで、炭素繊維ストランドシートとは、繊維ストランド1本ずつに樹脂を含浸させたFRP素線をすだれ状にシート化したものであり、現場での樹脂含浸作業がないため施工性に優れ、また工場生産のため品質が良い

表-2.1 繊維シートの物性値

繊維シートの種類	記号	厚さ [mm]	弾性係数 [GPa]	
			設計値	実測値
高弾性型炭素繊維シート	CE	0.116	640	780
高強度型炭素繊維シート	CU	0.121	240	279
炭素繊維ストランドシート	CS	0.286	640	745
ガラス繊維シート	G	0.123	74	102
高強度ポリエチレンシート	P	0.108	88	93
ハイブリッド繊維シート	H	0.121	383	501

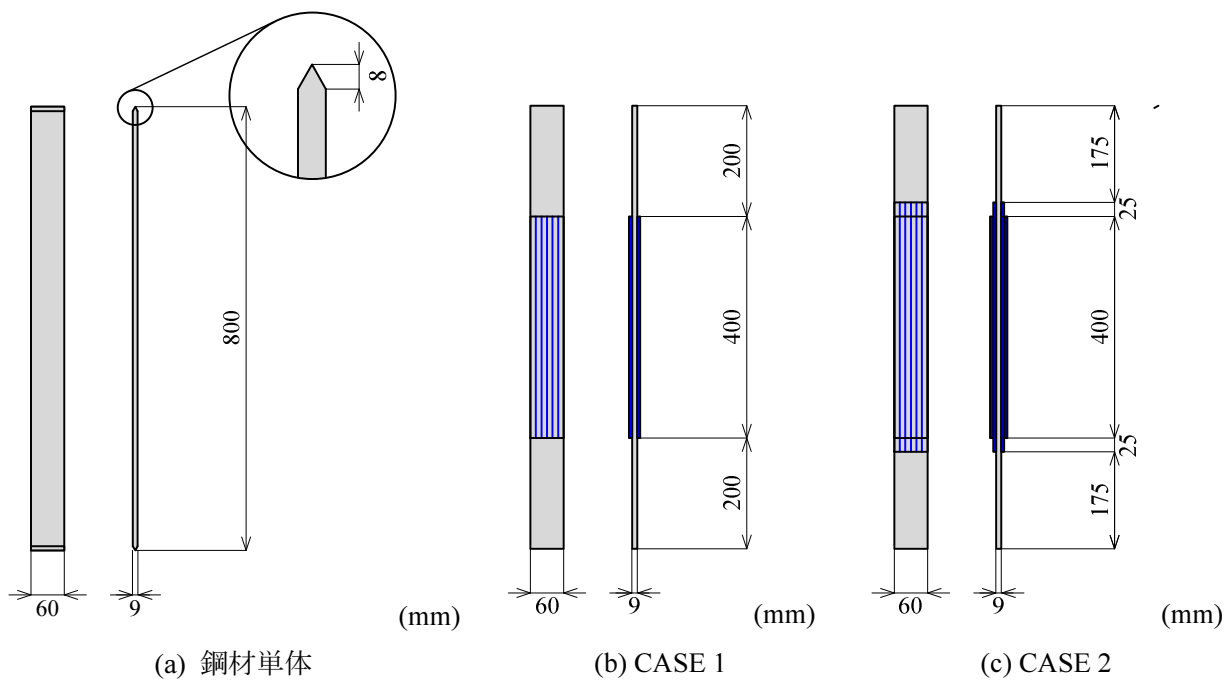


図-2.1 試験体形状

という特性を持つ。さらに、1層あたりの補強効果はCEの3層分に相当する<sup>2,4)</sup>。ハイブリッド繊維シートは、炭素繊維とガラス繊維を1対1の割合で配合したシートである。いずれの繊維シートについても、一方向繊維を用いており、繊維方向を鋼材の長手方向に合わせて接着を行っている。

(2) 試験ケース

試験ケースを表-2.2に基づいて説明する。試験ケースは接着する繊維シートの積層数によってCASE1とCASE2に分かれる。CASE1は繊維シートを鋼板の片面に1層、両面で2層貼り付けた場合であり、鋼材長800mmに対してシートの接着長を400mmとした。CASE2は繊維シートを鋼板の片面に2層、両面で4層貼り付けた場合であり、鋼材長800mmに対して1層目(鋼材直上)のシートの接着長を450mm、2層目(最外層)のシートの接着長を400mmとした。CASE2において、1層目と2層目に25mm

表-2.2 試験ケース

CASE	試験体番号	炭素繊維シートの種類		シート長		高伸度弾性パテ材の有無
		1層目	2層目	1層目	2層目	
1	CE-N	CE	-	400	-	×
	CE-U					○
	CU-N	CU				×
	CU-U					○
	CS-N	CS				×
	CS-U					○
	G-N	G				×
	G-U					○
	P-N	P				×
	P-U					○
	H-N	H				×
	H-U					○
2	GCE-N	G	CE	450	400	×
	GCE-U					○
	PCE-N	P				×
	PCE-U					○
	CECE-N	CE				×
	CECE-U					○

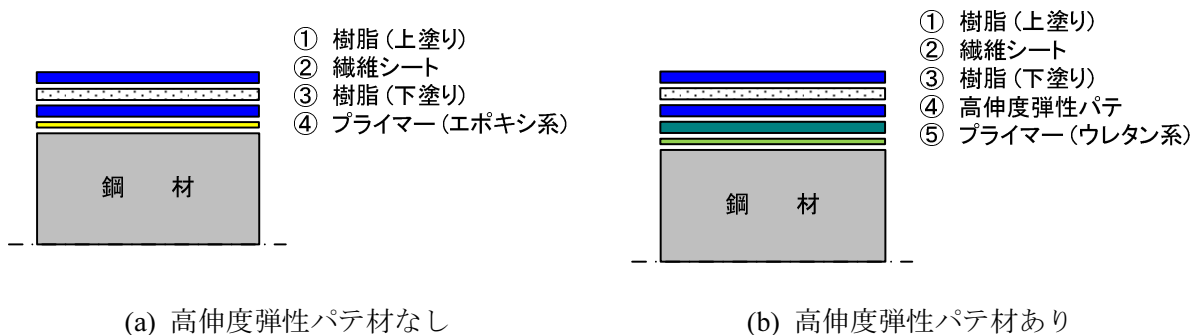


図-2.2 試験体の断面構成

のずらしを設けており、これによりシート端部に生じる応力集中を緩和することができる<sup>2-5)</sup>。試験体形状および寸法を図-2.1に示す。さらに、座屈変形に対する追従性を向上させる方法として、鋼板と炭素繊維シートの間弾性係数が小さく伸び率の高い樹脂材料（以下、高伸度弾性パテ材と記す）を挿入することで剥離防止を図ることとした。ここで、高伸度弾性パテ材の弾性係数が大きい場合、鋼板の変形に対してFRPが十分に追従できない。一方、弾性係数が低すぎると、鋼板からの応力伝達効率が下が

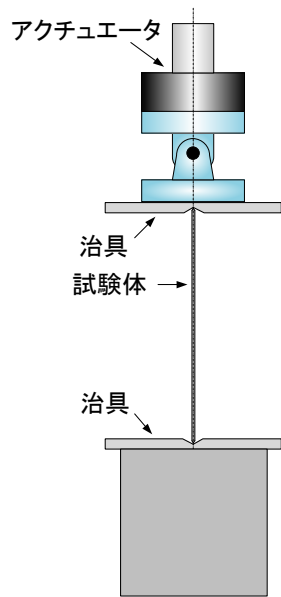
ってしまい、十分な補強ができないといった問題が生じる。さらに、伸び率が低い場合には、鋼材が大きく変形した際にパテ材に破断が生じ、FRPの剥離を引き起こすこととなる。そこで、本試験では、弾性係数 60 MPa、伸び率 360 %のポリウレタ樹脂を使用することとした。

以上より、シートの組み合わせ、高伸度弾性パテ材の有無をパラメータとして、全 18 ケースについて試験を行った。なお各ケース 3 体の試験を実施している。

試験体の作製方法については、まず、鋼板表面の繊維シート貼り付け面をディスクサンダーによりケレンする。ここでは、現場での適用性を考慮して二種ケレンを用いることとした。次いで、アセトンによる脱脂後、ケレン部にプライマーを塗布する。高伸度弾性パテ材を挿入する試験体に対しては、高伸度弾性パテ材用プライマーを塗布する。プライマー乾燥後、高伸度弾性パテ材を塗布し常温で一晩養生させたのち、繊維シート 1 層目の含浸樹脂材を下塗りし、シートをセットしてローラーによる脱泡、1 層目含浸樹脂材の上塗りを行う。繊維シートを 2 層接着させる場合は、この 1 層目の上塗り含浸樹脂材が 2 層目含浸樹脂材の下塗りとなる。2 層目以降は同様の貼り付け作業を繰り返す。その後、試験実施まで常温で 7 日間養生する。図-2.2 に試験体の断面構成を示す。

### (3) 試験方法

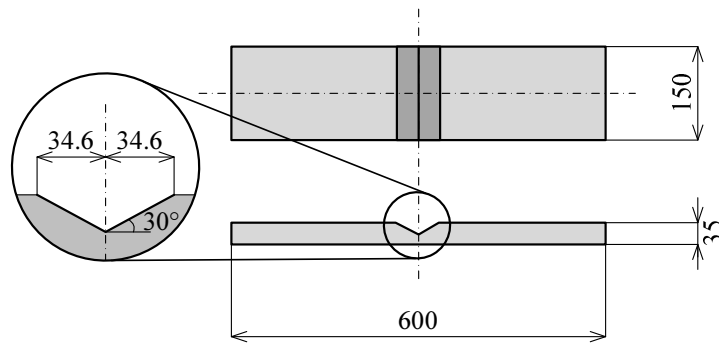
試験方法を図-2.3 に示す。本試験では、載荷容量 500kN のアクチュエータを使用して載荷を行った。本試験では単純支持条件を満足させるために、図-2.1(a)に示したように鋼板の両端に切削加工を行っており、試験時には図-2.3(c)に示す治具を使用して載荷を行った。ここでは、炭素繊維シート表面（試験体中央部）および鋼材コバ面（上部 2 点、下部 2 点の計 4 点）でひずみを計測し、さらに試験体の上部、中央部、下部の 3 点で水平方向の変位（面外たわみ）を計測した。鋼材コバ面に設置したひずみゲージの値から、試験体が均等に圧縮されていることを確認できるまで試験体の位置を調整し、予備載荷として弾性範囲内で 2~3 回繰り返し載荷を行った後、本載荷を実施した。試験体の荷重-変位関係が線形となる区間については荷重制御で行い、線形性が失われてからは変位制御により計測を行った。



(a) 試験概略図



(b) 試験状況



(c) 荷重治具

図-2.3 試験方法

### 2.2.2 試験結果と考察

#### (1) 最大荷重と強度増加率

本試験で得られた最大荷重を基に、各繊維シートによる強度増加率について検討する。ここでは、強度増加率を次のように定義する。

$$\text{強度増加率 } Re = \frac{P_{\max} - P_E}{P_E} \times 100 \quad (\%) \quad (2.1)$$

ここで、 $P_{\max}$  は試験により得られた最大荷重、 $P_E$  は鋼材単体でのオイラー座屈荷重である。オイラー座屈荷重の算出に当たっては、実測した鋼材寸法を使用した。

試験により得られた最大荷重および式(2.1)で求めた強度増加率の一覧を表-2.3に示す。さらに、各試験ケースの強度増加率と鋼材と繊維シートからなる合成断面としての曲げ剛性 ( $EI$ ) の関係をプロットした関係図を図-2.4に示す。合成断面としての曲げ剛性は以下の式より求められる。

$$(EI)_{S+FRP} = E_S \cdot \frac{1}{12} \cdot b_S \cdot \left( t_S + \frac{E_{FRP}}{E_S} \cdot t_{FRP} \cdot n \right) \quad (2.2)$$

ここで、 $E_S$ ,  $t_S$ ,  $b_S$  はそれぞれ鋼材の弾性係数、板厚、幅、 $E_{FRP}$ ,  $t_{FRP}$ ,  $n$  はそれぞれ繊維シートの弾性係数、厚さ、積層数を示している。

図-2.4では、縦軸が強度増加率、横軸が繊維シートを貼り付けたことによる曲げ剛性の増加率を示し、赤丸が各試験により得られた強度増加率を示し、実線はこれらの回帰直線である。これより、繊維シートを接着した場合の強度増加率は、曲げ剛性の増加に比例すると言える。よって、弾性係数の大きい繊維シートほど強度増加率が高いということが確認された。

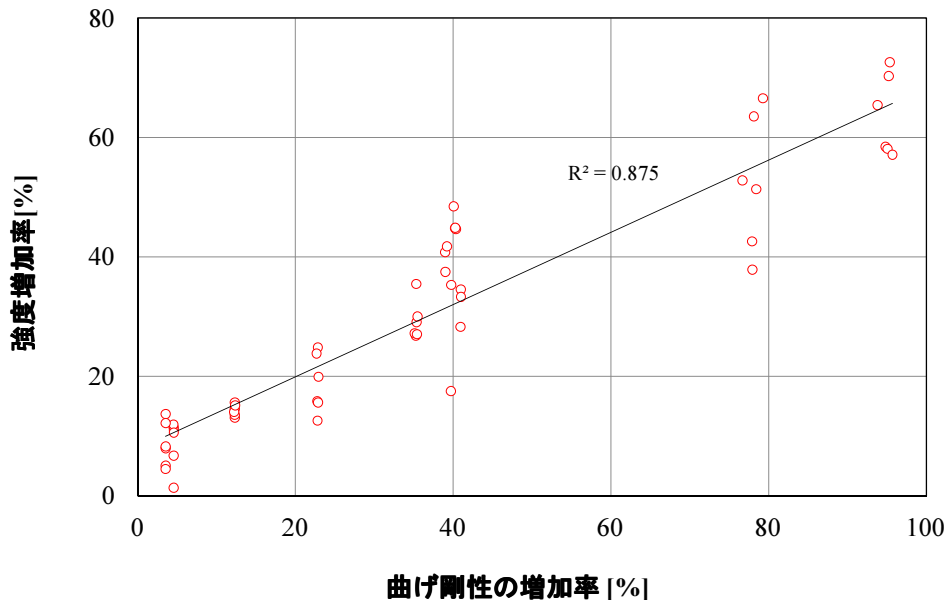


図-2.4 曲げ剛性の増加率と強度増加率の関係



表-2.3 最大荷重および強度増加率

(a) 最大荷重

CASE	試験体 番号	繊維シートの種類		パテ材の 有無	最大荷重 [kN]			
		1層目	2層目		1体目	2体目	3体目	平均値
1	CE-N	CE	-	×	12.13	12.29	12.28	12.23
	CE-U			○	12.32	12.03	12.90	12.42
	CU-N	CU		×	10.82	11.06	10.93	10.94
	CU-U			○	10.96	11.18	10.91	11.02
	CS-N	CS		×	16.44	16.47	16.31	16.41
	CS-U			○	15.34	15.15	14.81	15.10
	G-N	G		×	10.77	10.62	10.93	10.77
	G-U			○	9.86	10.36	10.50	10.24
	P-N	P		×	10.05	10.36	10.24	10.22
	P-U			○	10.13	10.76	10.71	10.53
	H-N	H		×	11.96	11.35	10.85	11.39
	H-U			○	11.21	12.07	11.03	11.44
2	GCE-N	G	CE	×	14.48	12.82	12.65	13.32
	GCE-U			○	14.41	14.49	12.24	13.71
	PCE-N	P		×	11.15	13.80	13.82	12.92
	PCE-U			○	12.86	14.07	13.99	13.64
	CECE-N	CE		×	13.25	15.64	13.69	14.19
	CECE-U			○	15.33	15.27	14.27	14.96

(b) 強度増加率

CASE	試験体 番号	繊維シートの種類		パテ材の 有無	強度増加率 [%]			
		1層目	2層目		1体目	2体目	3体目	平均値
1	CE-N	CE	-	×	26.77	29.06	30.02	28.61
	CE-U			○	27.2	27.04	35.45	29.9
	CU-N	CU		×	13.07	15.61	13.56	14.08
	CU-U			○	14.58	14.05	15.14	14.59
	CS-N	CS		×	65.4	72.58	70.26	69.42
	CS-U			○	58.42	58.07	57.1	57.87
	G-N	G		×	11.41	10.99	11.91	11.44
	G-U			○	1.31	6.71	10.57	6.2
	P-N	P		×	5.03	7.93	8.25	7.07
	P-U			○	4.49	13.69	12.17	10.11
	H-N	H		×	24.82	19.91	12.58	19.1
	H-U			○	15.84	23.81	15.61	18.42
2	GCE-N	G	CE	×	44.79	34.51	33.3	37.53
	GCE-U			○	44.65	44.85	28.27	39.26
	PCE-N	P		×	17.52	37.49	48.45	34.49
	PCE-U			○	35.3	40.77	41.73	39.26
	CECE-N	CE		×	37.85	63.49	42.59	47.98
	CECE-U			○	66.55	52.79	51.31	56.88

(2) 座屈変形に対する追従性

CASE1 では、ほとんどのケースで、引張側中央部の繊維シートが破断するという結果になった。しかし、CS についてのみ、引張側端部で剥離が発生するケースが見られた。図-2.5 に、CS の終局状態を示す。図より、CS-N では、試験体の変形が小さい段階で、繊維シートの端部で剥離が生じた。CS-N では、3 体共に変形量の小さい段階で剥離が生じた。

これに対し、CS-U では、端部でわずかに剥離が生じたものの、高伸度弾性パテ材の効果により、変形が進んでからも、剥離が進行することはなかった。



図-2.5 CS の終局状態

表-2.4 には、試験時に繊維シートに剥離あるいは破断が生じた際の試験体中央の水平変位と破壊形態を示す。なお、本試験では、中央の水平変位が 100 mm になるまで载荷を行っている。繊維シートの剥離および破断については、試験時に発生した音と、ひずみゲージの値が急変した点とした。

表より、各種繊維シートを鋼板の両面に 1 層貼り付けた CASE1 では、CU, G, P といった弾性係数の小さい繊維シートほど変形に対する追従性が高く、CE や CS といった弾性係数の大きい繊維シートでは、変形に対する追従性が低いことが確認できる。さらに、鋼板の両面に繊維シートを 2 層貼り付けた CASE2 では、1 層目に G や P といった弾性係数の小さいシートを貼り付け、2 層目に弾性係数の大きい CE を積層したケースについては、ほぼ同程度の変形性能を有していることが確認された。

ここで、高伸度弾性パテ材の使用による剥離防止効果についてみる。GCE や PCE といった 1 層目に低弾性のシートを設けたケースについては、高伸度弾性パテ材の有無による影響はほとんど確認されない。これは、高伸度弾性パテ材を挿入した場合も挿入していない場合も、1 層目に設けた低弾性のシートが変形を吸収しているためであると考えられる。これに対して、1 層目、2 層目ともに高弾性の CE を設けたケースでは、高伸度弾性パテ材を挿入していないケースに比べて、高伸度弾性パテ材を挿入したことによって変形性能が向上していることが確認できる。さらに、破壊形状についてみると、ほとんどの試験体で破断が先行することが確認されたが、高伸度弾性パテ材を挿入していないケースでは、破断を生じたのち、変形が進行するにしたがって、破断部からシートの剥離が発生することが確認されたが、高伸度弾性パテ材を挿入したケースについては、変形が進行しても、破断部から剥離が進行することはなかった。以上のことから、高弾性の繊維シートを多層に積層する場合には、高伸度弾性パテ材を挿入することによって、変形性能が向上し、十分な補強効果を発揮できると言える。

表-2.4 破壊時の中央変位と破壊形態

(a) 中央変位

CASE	試験体 番号	繊維シートの種類		パテ材の 有無	破断および剥離時の中央変位 [mm]		
		1層目	2層目		1体目	2体目	3体目
1	CE-N	CE	-	×	43.65	52.60	49.65
	CE-U			○	33.35	38.90	33.05
	CU-N	CU		×	98.00	-	91.50
	CU-U			○	80.35	94.10	94.35
	CS-N	CS		×	23.80	23.05	33.90
	CS-U			○	40.20	22.00	38.45
	G-N	G		×	-	-	-
	G-U			○	-	-	-
	P-N	P		×	-	-	-
	P-U			○	-	-	-
	H-N	H		×	45.65	49.80	45.25
	H-U			○	25.00	41.15	26.06
2	GCE-N	G	CE	×	43.40	46.05	52.05
	GCE-U			○	44.80	46.60	54.90
	PCE-N	P		×	50.70	43.95	49.65
	PCE-U			○	57.40	51.25	53.40
	CECE-N	CE		×	35.15	34.40	39.60
	CECE-U			○	75.95	62.00	62.40

(b) 破壊形態

CASE	試験体 番号	繊維シートの種類		パテ材の 有無	破壊形状		
		1層目	2層目		1体目	2体目	3体目
1	CE-N	CE	-	×	破断	破断	破断
	CE-U			○	破断	破断	破断
	CU-N	CU		×	破断	-	破断
	CU-U			○	破断	破断	破断
	CS-N	CS		×	端部剥離	端部剥離	端部剥離
	CS-U			○	端部剥離	端部剥離	破断
	G-N	G		×	-	-	-
	G-U			○	-	-	-
	P-N	P		×	-	-	-
	P-U			○	-	-	-
	H-N	H		×	破断	破断	破断
	H-U			○	破断	破断	破断
2	GCE-N	G	CE	×	破断	破断	破断
	GCE-U			○	破断	破断	破断
	PCE-N	P		×	剥離	破断	破断
	PCE-U			○	破断	破断	破断
	CECE-N	CE		×	端部剥離	端部剥離	端部剥離
	CECE-U			○	破断	端部剥離	端部剥離

## 2.3 FRP 接着鋼板の弾性座屈強度評価手法

本節では、繊維シートを接着した鋼板の一軸圧縮試験における弾性座屈荷重を予測する手法について検討する。繊維シートを接着していない鋼板単体の場合については、オイラー座屈荷重により次式で与えられる。

$$P_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2} \quad (2.3)$$

ここに、 $E$ は鋼材の弾性係数、 $I$ は断面2次モーメント、 $l$ は有効座屈長である。本研究では、このオイラー座屈荷重式を用いてFRP接着鋼板の弾性座屈荷重を算出する方法と、微分方程式から算出する2種類の方法について検討を行う。前者については、繊維シートの接着長を考慮できないが、後者については、接着長を考慮できる。

### 2.3.1 計算手法

#### (1) 繊維シートの接着長を考慮しない場合

鋼材とFRPが完全に一体化した合成断面としてのオイラー座屈荷重を次のように定義する<sup>2-6)</sup>。

$$P_{E(S+FRP)} = \frac{\pi^2 \cdot E_S \cdot I_{(S+FRP)}}{l^2} \quad (2.4)$$

$$I_{(S+FRP)} = \frac{1}{12} \cdot b_S \cdot \left( t_S + \frac{E_{FRP}}{E_S} \cdot t_{FRP} \cdot n \right) \quad (2.5)$$

ここで、 $E_S$ 、 $t_S$ 、 $b_S$ はそれぞれ鋼材の弾性係数、板厚、幅、 $E_{FRP}$ 、 $t_{FRP}$ 、 $n$ はそれぞれ繊維シートの弾性係数、板厚、積層数を示している。ただし、この評価方法では、FRPが鋼板の全長にわたって接着していることが仮定される。

#### (2) 繊維シートの接着長を考慮する場合

図-2.6に示すようなbeam  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) において、変位  $w_i$  に関する微分方程式は次のように表すことができる。

$$\frac{d^4 w_i}{dx^4} - \alpha_i^2 \frac{d^2 w_i}{dx^2} = 0 \quad (2.6)$$

ここで、

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{P}{(EI)_i}} \quad (2.7)$$

ただし、 $N$ は考慮する梁の総数、 $L_i$ は梁の長さ、 $(EI)_i$ は曲げ剛性、 $P$ は荷重である。

式(2.6)の一般解は、次のように与えられる。

$$w_i = C_{1i} \sin \alpha_i x + C_{2i} \cos \alpha_i x + C_{3i} x + C_{4i} \quad (2.8)$$

ただし、 $C_{ji}$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) は未定係数である。

次に、beam  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) に対して、式(2.6)を立てると、未定係数の総数は $4N$ 個となる。未定係数に対する条件式は、 $x = 0$ における境界条件、 $x = x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N-1$ ) における変位、回転角、せん断力、

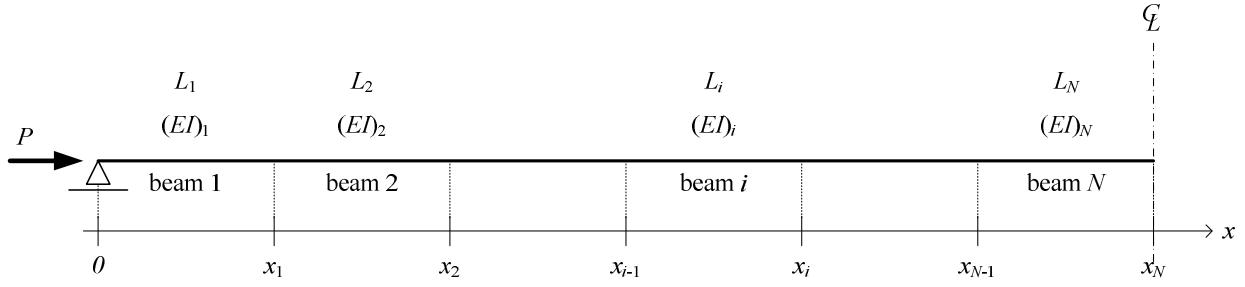


図-2.6 繊維シートが接着された梁 (1/2 モデル)

曲げモーメントに対する連続性条件,  $x = x_N$  における対称性条件から与えられる. これらの式の総数は,  $2 + 4(N-1) + 2 = 4N$  となり, 未定係数の総数と等しい. このとき, 未定係数に対する条件式は, 次のような形となる.

$$[B]C = 0 \quad (2.9)$$

$C$  は未定係数をまとめたベクトルである. 式(2.9)が自明でない解をもつための条件は,

$$\det[B] = 0 \quad (2.10)$$

であり, 式(2.8)を満たす最小の  $P (\neq 0)$  が, 図-2.6 における弾性座屈荷重を与える. 式(2.9)の計算は,  $N$  が大きくなると解析解を求めることが難しくなることから, 数値計算により行う.

座屈モード形は, 式(2.9)より求める. 具体的には, まず, 値が決定する係数以外を, 1つの係数を未定として, 残りの係数を未定係数で表す. 次に, 未定係数の値を1として, 座屈モード形を表す. 最後に, 座屈モード形の絶対値が最大となる値で, 正規化する. 本手法の特徴としては, 簡易な数値計算により厳密解が得られることが挙げられる. 例として,  $N=2$  について式(2.9), 式(2.10), 未定係数ベクトル  $C$  をそれぞれ式(2.11), 式(2.12), 式(2.13)に示す.

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(EI)_1 \alpha_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin(\alpha_1 x_1) & \cos(\alpha_1 x_1) & x_1 & 1 & -\sin(\alpha_2 x_1) & -\cos(\alpha_2 x_1) & -x_1 & -1 \\ \alpha_1 \cos(\alpha_1 x_1) & -\alpha_1 \sin(\alpha_1 x_1) & 1 & 0 & -\alpha_2 \cos(\alpha_2 x_1) & \alpha_2 \sin(\alpha_2 x_1) & -1 & 0 \\ -\alpha_1^2 (EI)_1 \sin(\alpha_1 x_1) & -\alpha_1^2 (EI)_1 \cos(\alpha_1 x_1) & 0 & 0 & \alpha_2^2 (EI)_2 \sin(\alpha_2 x_1) & \alpha_2^2 (EI)_2 \cos(\alpha_2 x_1) & 0 & 0 \\ -\alpha_1^3 (EI)_1 \cos(\alpha_1 x_1) & \alpha_1^3 (EI)_1 \sin(\alpha_1 x_1) & 0 & 0 & \alpha_2^3 (EI)_2 \cos(\alpha_2 x_1) & -\alpha_2^3 (EI)_2 \sin(\alpha_2 x_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_2 \cos(\alpha_2 x_2) & -\alpha_2 \sin(\alpha_2 x_2) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_2^3 (EI)_2 \cos(\alpha_2 x_2) & \alpha_2^3 (EI)_2 \sin(\alpha_2 x_2) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_{11} \\ C_{21} \\ C_{31} \\ C_{41} \\ C_{12} \\ C_{22} \\ C_{32} \\ C_{42} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} & \alpha_1 \cos \alpha_1 x_1 \cos \alpha_2 x_1 \cos \alpha_2 x_2 + \alpha_1 \cos \alpha_1 x_1 \sin \alpha_2 x_1 \sin \alpha_2 x_2 \\ & - \alpha_2 \cos \alpha_2 x_1 \sin \alpha_1 x_1 \sin \alpha_2 x_2 + \alpha_2 \cos \alpha_2 x_2 \sin \alpha_1 x_1 \sin \alpha_2 x_1 = 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$C_{21} = C_{41} = C_{32} = 0 \quad (2.13a)$$

$$\begin{bmatrix} \sin(\alpha_1 x_1) & x_1 & -\sin(\alpha_2 x_1) & -\cos(\alpha_2 x_1) \\ \alpha_1 \cos(\alpha_1 x_1) & 1 & -\alpha^2 \cos(\alpha_2 x_1) & \alpha_2 \sin(\alpha_2 x_1) \\ -\alpha_1^2 (EI)_1 \sin(\alpha_1 x_1) & 0 & \alpha_2^2 (EI)_2 \sin(\alpha_2 x_1) & \alpha_2^2 (EI)_2 \cos(\alpha_2 x_1) \\ 0 & 0 & -\alpha_2^3 (EI)_2 \cos(\alpha_2 x_2) & \alpha_2^3 (EI)_2 \sin(\alpha_2 x_2) \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} C_{11} \\ C_{31} \\ C_{12} \\ C_{22} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} C_{42} \quad (2.13b)$$

式(2.13b)では、 $C_{42} = 1$  として  $C_{11}$ ,  $C_{31}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{22}$  を求める。

### 2.3.2 計算結果と考察

#### (1) 座屈モード形

ここでは、2.3.1 (2) の方法により、FRP 接着長と弾性座屈荷重の関係について考察する。式(2.9)の計算で使用する物性値は、鋼材の弾性係数は 200GPa、繊維シートは表-2.1 の設計値（厚さ、弾性係数）とする。図-2.7 に、繊維シートを鋼材の両面に 1 層貼り付けた場合について、各種繊維シートの接着長と弾性座屈荷重の関係を示す。

図-2.7 では、繊維シートの接着長が 0 mm のときは、鋼材単体の座屈荷重を与えている。繊維シートの接着長が 800 mm のときは、鋼材の全長にわたり繊維シートが貼り付けられた場合の座屈荷重を与えている。これより、貼り付け長さが長くなるとともに座屈荷重が上昇することがわかる。また、その上昇率は繊維シートの弾性係数が大きくなるほど大きい。

さらに、図-2.8 には、CE ( $N=2$ ) について、代表的な繊維シート接着長と座屈モード形の関係を示す。縦軸の左側と右側がそれぞれ座屈モード形とその曲率を表す。 $L_2 = 0$  mm あるいは 400 mm 以外のとき、 $x = x_1$  は座屈モード形の曲率が急変する点となっている。

#### (2) 強度評価精度

式(2.4)と式(2.10)により計算された FRP 接着鋼板の弾性座屈荷重値を予測値に対する実験の最大荷重値から予測値を引いた割合として整理した図を、CASE1 と CASE2 のそれぞれについて、図-2.9 と図-2.10 に示す。

まず、CASE1 と CASE2 の両方について、FRP 接着長を考慮しない弾性座屈評価方法と FRP 接着長を考慮した弾性座屈評価方法を比較すると、後者の方が、予測精度が向上している。次に、CASE1 については、概ね安全側で評価されているものの、CS-U（ストランドシート、高伸度弾性パテ材あり）の評価誤差が-5.0%と危険側で最も大きい。この理由を以下に述べる。CS は 1 層で CE（高弾性炭素繊維）3 層分の効果があるため、他の FRP と比較して、引張剛性が高い。また、接着層の弾性係数が低いことから、鋼材から FRP への接着層を介しての応力伝達に必要な定着長は長くなる。しかし、実験では、鋼板の途中で FRP を定着しているため、完全合成と仮定した場合よりも定着長が不足して曲げ剛性が小さくなる。特に、パテ材を入れた場合、せん断応力の伝達に対する影響がより強くなっているものと考えられる。また、FRP の剛性が高い場合は、FRP 端部でせん断応力の伝達に対するロスが生じて、合成断面と仮定した曲げ剛性を発現せず、有効に機能している FRP の長さは実際の貼り付け長さより短くなる。それに対して、解析では FRP 端部から完全合成としているので、解析の方が弾性座屈荷重を高く評価することとなる。このように、FRP を鋼材の途中で定着して補強する場合は、必要補強範囲と必要定着長を検討することが、設計においては重要となる。CASE2 では、2 層の CE を貼り付けた場合に関して、パテ材を用いたケース（CECE-U）の評価精度が向上している。

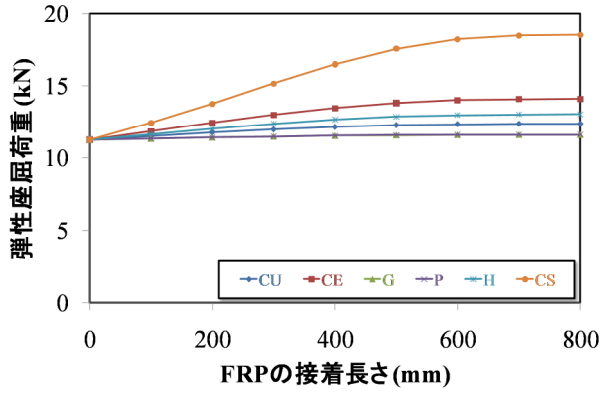


図-2.7 繊維シートの接着長と弾性座屈荷重の関係

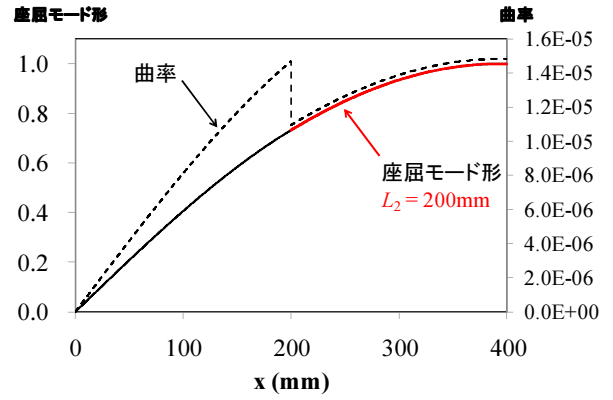
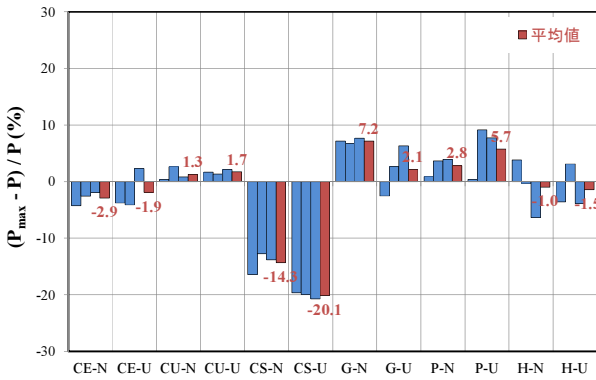
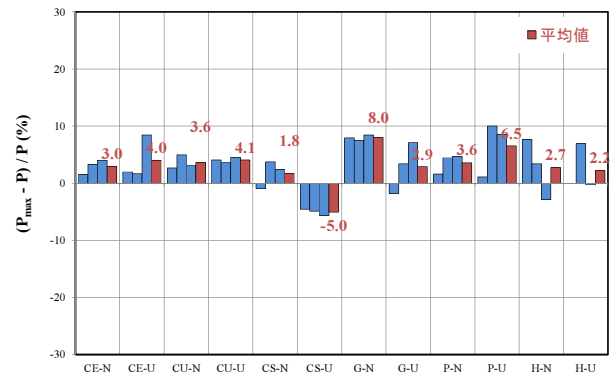


図-2.8 繊維シートの接着長と座屈モード形

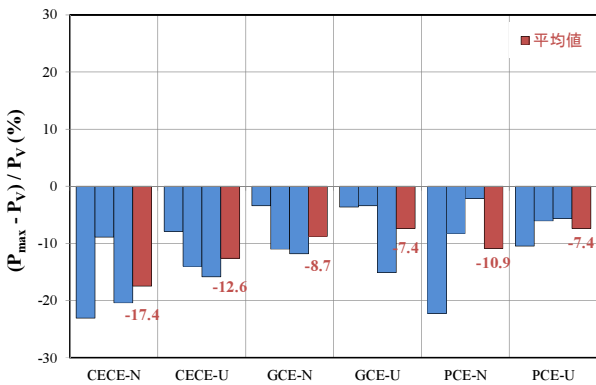


(a) 繊維シートの接着長を考慮しない場合

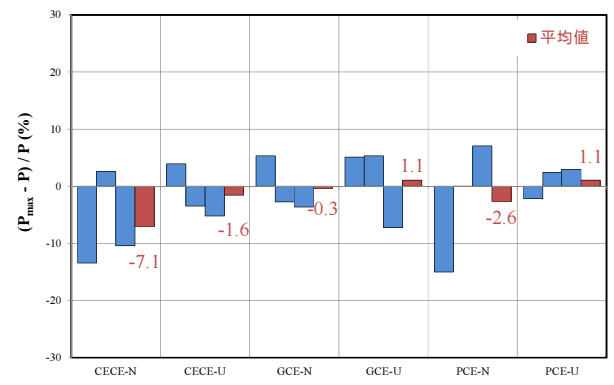


(b) 繊維シートの接着長を考慮する場合

図-2.9 弾性座屈荷重予測 (CASE 1)



(a) 繊維シートの接着長を考慮しない場合



(b) 繊維シートの接着長を考慮する場合

図-2.10 弾性座屈荷重予測 (CASE 2)

## 2.4 結 言

本章では、鋼桁端部の腹板腐食に対する合理的な補修・補強工法を確立するための基礎研究を行った。具体的には、座屈変形に追従し、補強効果が得られる繊維シートを選定するために、種々の繊維シートを接着した鋼板の一軸圧縮実験を実施した。また、繊維シートを大変形に追従させ、十分な補強効果を発揮させるために、鋼板と繊維シートの間に高伸度弾性パテ材を挿入したケースについて検討を行った。最後に、繊維シートを接着した鋼板の弾性座屈荷重を予測する方法について検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 繊維シート接着鋼板の弾性座屈荷重は、繊維シートを貼り付けたことによる曲げ剛性の増加に比例して増加することが確認された。
- 2) 高強度ポリエチレンシート (P) やガラス繊維シート (G) といった弾性係数の小さい繊維シートほど変形に対する追従性が高いことが確認された。
- 3) 鋼板と繊維シートの間に挿入した高伸度弾性パテ材には、高弾性型炭素繊維シート (CE) や炭素繊維ストランドシート (CS) といった弾性係数が大きい繊維シートを大変形に追従させ、剥離を抑制し、補強効果を十分に発揮させることが確認された。
- 4) 繊維シート接着鋼板の弾性座屈荷重を、繊維シートの接着長を考慮して評価する方法を提案した。CASE 1については、CS-U (炭素繊維ストランドシート、高伸度弾性パテ材あり) の評価誤差が-5.0%と最も大きくなったものの、それ以外は、安全側で概ね良好な予測精度が得られた。CASE 2については、約-7.0%の予測誤差となった。誤差の原因としては、提案手法ではモデル化されていないパテ材の影響と考える。

以上より、鋼桁端部の腹板腐食に対する合理的な補修・補強工法として、大変形を伴う座屈変形に追従させるための積層方法としては、鋼材と繊維シートの間に高伸度弾性パテ材を挿入する方法が効果的である。さらに、補強効果を高めるために、弾性係数の大きい、高弾性型炭素繊維シートや炭素繊維ストランドシートを補修・補強材料として用いるのがよい。

## 参考文献

- 2-1) 玉越隆史，中洲啓太，石尾真理，武田達也，水津紀陽：鋼道路橋の局部腐食に関する調査研究，国総研資料，第294号，2006。
- 2-2) 櫻庭誠，玉井宏章，高松隆夫，灰谷徳治，服部明生，原伸幸：炭素繊維プレートによる鋼構造物の長寿命化に関する研究（その2 山形鋼部レース材の圧縮強度について），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp603-604，2005。
- 2-3) Ayman M. O., Yilmaz B. and Md. Rubiat F. : Novel Technique for Inhibiting Buckling of Thin-Walled Steel Structures Using Pultruded Glass FRP Sections, J. Compos. for Constr. Vol.13, No.6, pp. 547-557, 2009.
- 2-4) 秀熊佑哉，小林朗，長井正嗣，宮下剛，和久井讓：FRPシート接着による鋼部材の補修に関する研究，土木学会第3回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム，pp.91-96，2009。
- 2-5) 杉浦江，小林朗，大垣賀津雄，稲葉尚文，富田芳男，長井正嗣：鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究，土木学会論文集A, Vol.64, No.4, pp.806-813, 2008。
- 2-6) 酒井修平，緒方辰男，藤野和雄，長井正嗣，宮下剛，下鳥雄萌，小林朗，小森篤也，大垣賀津雄，



堀本歴：鋼桁腹板の腐食部補修に向けた FRP シート接着鋼板の一軸圧縮座屈試験，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，CD-ROM，2010.



## 第3章

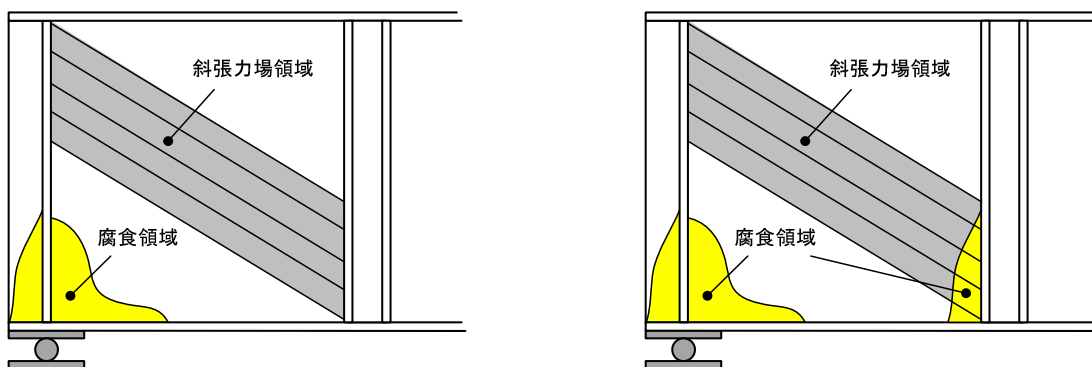
### 鋼橋桁端部腹板の力学挙動に関する検討

#### 3.1 緒言

せん断力が卓越する鋼橋桁端部では、終局時に図-3.1に示すようなせん断座屈に伴う面外変形が生じる。このような部位に対して炭素繊維シート接着工法を適用する場合には、変形に対してシートが剥離することなく強度を発揮することが求められる。そこで、第2章で提案したように、鋼材と炭素繊維シートの上に低弾性かつ伸び率の高いポリウレタ樹脂（以下、高伸度弾性パテ材と記す）を挿入することで剥離を抑制し、シートの破断まで強度を発揮できるようにシートを貼り付ける方法を検討する。桁端部に生じる腐食形状は、大きく2種類に分類される。一つは、図-3.2(a)に示すように腐食領域が腹板の斜張力場に及ばない場合である。このとき、せん断強度の低下は生じず、支点部の柱としての強度低下



図-3.1 腹板のせん断座屈



(a) 腐食領域が斜張力場に及ばない場合

(b) 腐食領域が斜張力場に及ぶ場合

図-3.2 桁端部腹板に生じる腐食損傷例

が懸念される<sup>3-1)</sup>。このような腐食形状に対する補修方法については、第4章において検討する。もう一つは、**図-3.2(b)**に示すような腐食領域が斜張力場に及ぶ場合である。この場合、せん断強度が低下することが明らかとされている<sup>3-1)</sup>。本章では後者の腐食形状を対象とした炭素繊維シートによる補修方法について検討する。

ここで、炭素繊維シートによる桁端部腹板の腐食部補修法として、部分貼り工法と全面貼り工法の2種類の方法について検討する。

部分貼り工法は、**図-3.3(a)**に示すように腐食領域に対して部分的に炭素繊維シートを貼り付ける工法である。ここでは、腐食により減少した板厚を回復させるために、炭素繊維シートの厚さを鋼換算して積層数を決定する従来の設計手法<sup>3-2)</sup>を用いることとした。全面貼り工法は、**図-3.3(b)**に示すように腹板全面に炭素繊維シートを貼り付け、残存する腹板の面外剛性を増加させることで強度の回復を図る工法である。また、B活荷重対応としての補強対策としての使用も念頭に置いた工法である。

本章では、鋼桁を用いたせん断座屈試験を実施し、以下の3項目について検討する。

#### A) 炭素繊維シートによる強度増加率の把握（健全な鋼桁を対象）

全面貼り工法における強度増加率について検討するために、健全な鋼桁を対象としたせん断座屈試験を実施する。ここでは、腹板のアスペクト比が異なる2種類の鋼桁を用いることとする。

#### B) 炭素繊維シートによる強度回復率の把握（断面欠損を有する鋼桁を対象）

部分貼り工法および全面貼り工法におけるせん断強度回復率を明らかとするために、腐食を模擬した断面欠損を与えた鋼桁を対象として、せん断座屈試験を実施する。ここでは、欠損量の異なる2種類の鋼桁を用いる。欠損を与えた腹板に対して炭素繊維シートを貼り付け、その補修効果について検討する。

#### C) 合理的な補修方法の確立

ここでは、最適な補修範囲および補修量の検討を目的としたせん断座屈試験を実施する。具体的には、欠損の幅および高さが強度低下率に与える影響を検討し、腐食形態に応じた最適な補修範囲を明らかとするためのせん断座屈試験を実施する。

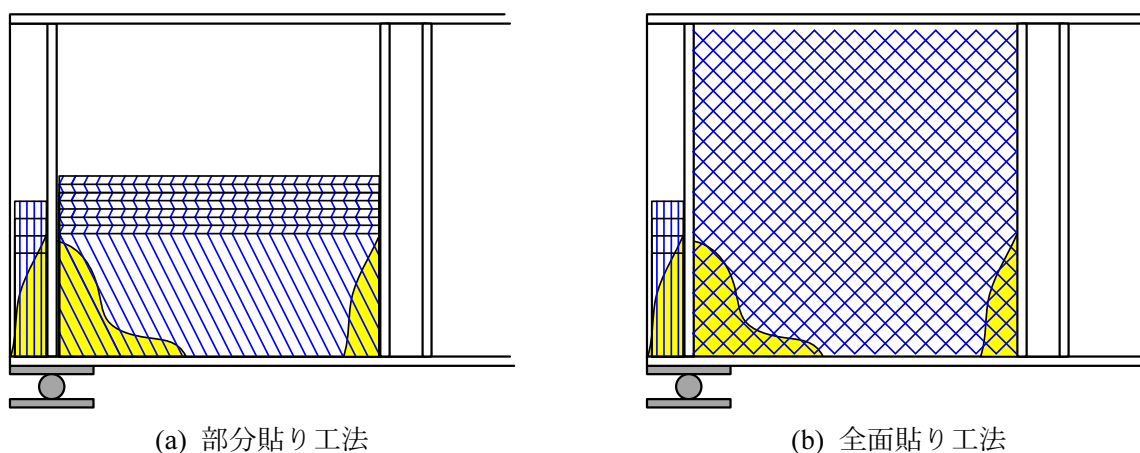


図-3.3 炭素繊維シートによる補修工法

## 3.2 健全な鋼桁を用いたせん断座屈試験

### 3.2.1 試験概要

#### (1) 試験体

本試験では、腹板のアスペクト比が異なる2種類の鋼桁を用いる。試験体の形状を図-3.4に示す。腹板のアスペクト比が1.0の試験体をG1シリーズ、アスペクト比が1.5の試験体をG2シリーズと名付ける。使用した鋼材はいずれの試験体も鋼種SS400とし、材料試験結果より、腹板の降伏応力はG1シリーズで383 MPa、G2シリーズで310 MPaである。次に各試験シリーズの寸法について説明する。G1シリーズでは、桁長2,700 mm、腹板高さ800 mm、腹板板厚6 mmとし、G2シリーズでは桁長4,800 mm、腹板高さ1,000 mm、腹板板厚6 mmとした。いずれの試験体においても、試験体端部の腹板を着目する試験パネルとし（図-3.4の着色した部分）、ここにせん断力を作用させて終局強度を評価する。

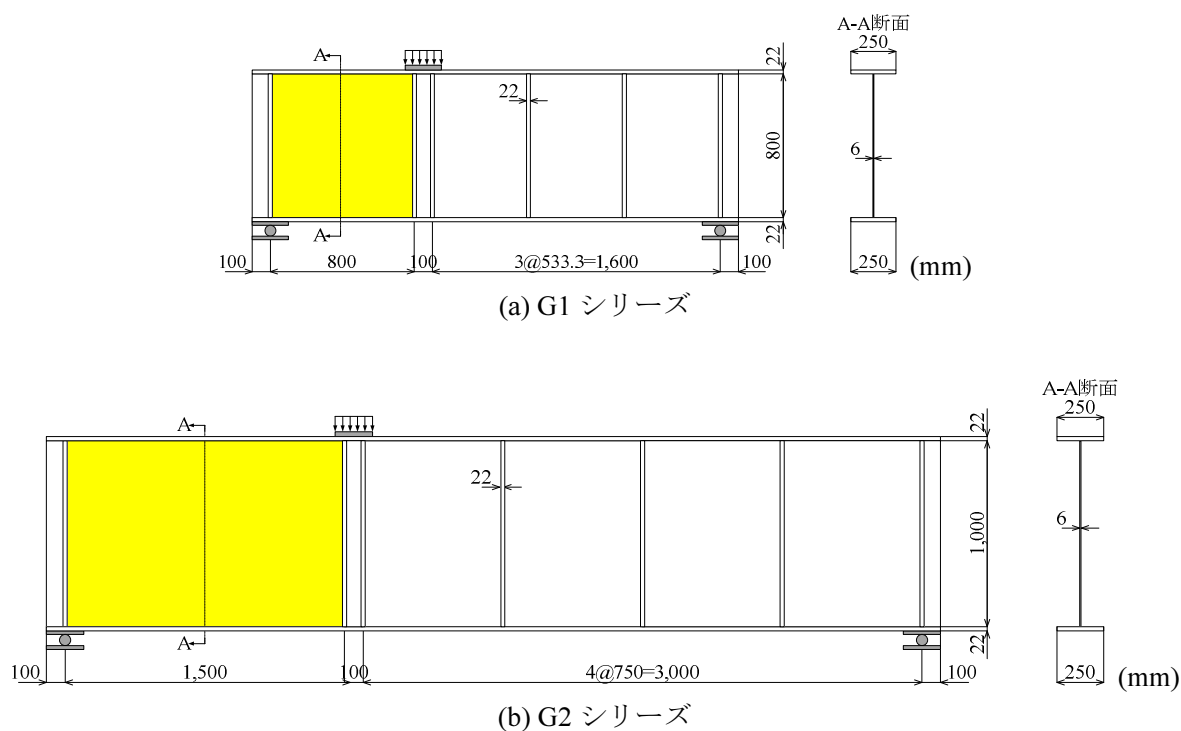


図-3.4 試験体形状

#### (2) 試験ケース

試験ケースを表-3.1に基づいて説明する。試験は全7ケースについて行う。まず、G1シリーズでは、3ケースの試験を実施する。一つは鋼桁単体のケース（G1-1）、残りの2つは炭素繊維シートを試験パネルに貼り付けて補強したケース（G1-2、G1-3）である。次にG2シリーズについては、一つは鋼桁単体のケース（G2-1）、残りの3つは炭素繊維シートを試験パネルに貼り付けて補強したケース（G2-2、G2-3、G2-4）である。炭素繊維シートで補強したケースについては、いずれも腹板全面に炭素繊維シートを貼り付けて補強を行っている。

ここで、本試験で使用した炭素繊維シートについて説明する。本試験では、第2章で実施した一軸

表-3.1 試験ケース

試験体 番号	腹板高さ	腹板幅	アスペクト比	炭素繊維シート	
				種類	繊維方向
G1-1	800 mm	800 mm	1.0	-	-
G1-2				B-1	腹板の対角方向 (±45 度方向)
G1-3				A-1	腹板の対角方向 (±45 度方向)
G2-1	1,000 mm	1,500 mm	1.5	-	-
G2-2				B-2	±45 度方向
G2-3				B-3	腹板の対角方向 (±33.7 度方向)
G2-4				A-2	腹板の対角方向 (±33.7 度方向)

表-3.2 炭素繊維シートの物性値

種類	シートの種類	目付量 [g/m <sup>2</sup> ]	設計厚 [mm]	弾性係数 [GPa]	
				設計値	実測値
A-1	一方向繊維シート	150	0.0715	640	743
A-2		300	0.1430		687
B-1	バイアスシート	300	0.1430		751
B-2		300	0.1430		662
B-3		300	0.1430		697

圧縮試験の結果から、強度増加率の高い高弾性型炭素繊維シートを用いることとした。使用した繊維シートの物性値を表-3.2 に示す。ここでは、高弾性型炭素繊維をベースとした一方向繊維シートと炭素繊維を2層積層して1枚としたバイアスシートの2種類のシートを使用した。

次に炭素繊維シートの貼り付け方法について説明する。G1-2 では、腹板の対角方向 (±45 度方向) に積層した炭素繊維バイアスシートを試験パネル全面に貼り付けた。このとき、1層目 (腹板直上) の繊維方向を引張力が作用する方向に合わせて貼り付け、2層目の繊維方向を圧縮力が作用する方向とした。G1-3 では、一方向繊維シートを試験パネル全面に貼り付けた。ここでは、積層方向の影響について検討するため、G1-2 とは逆になるように貼り付けた。つまり、1層目の繊維方向を圧縮力が作用する方向、2層目の繊維方向を引張力が作用する方向とした。また、炭素繊維目付量と強度増加率の関係についても検討するため、G1-2 では 150 g/m<sup>2</sup>、G1-3 では 300 g/m<sup>2</sup> の炭素繊維シートを用いることとした。ここで、炭素繊維目付量とは、炭素繊維シート 1 m<sup>2</sup> あたりの炭素繊維の質量のことであり、値が大きいシートほど炭素繊維使用量が多く補強効果が高くなるが、樹脂の含浸性が低下するため、施工には注意が必要である。

G2-2 では、±45 度方向に積層した炭素繊維バイアスシートを試験パネル全面に貼り付けた。G2-3 では、腹板の対角方向 (±33.7 度方向) に積層した炭素繊維バイアスシートを試験パネル全面に貼り付けた。G2-4 では、貼り付ける炭素繊維シートの面積を最小化することを目的として、一方向繊維シートを Basler 式の導出で仮定される斜張力場領域の幅で各対角線方向に1層ずつ X 字に貼り付け

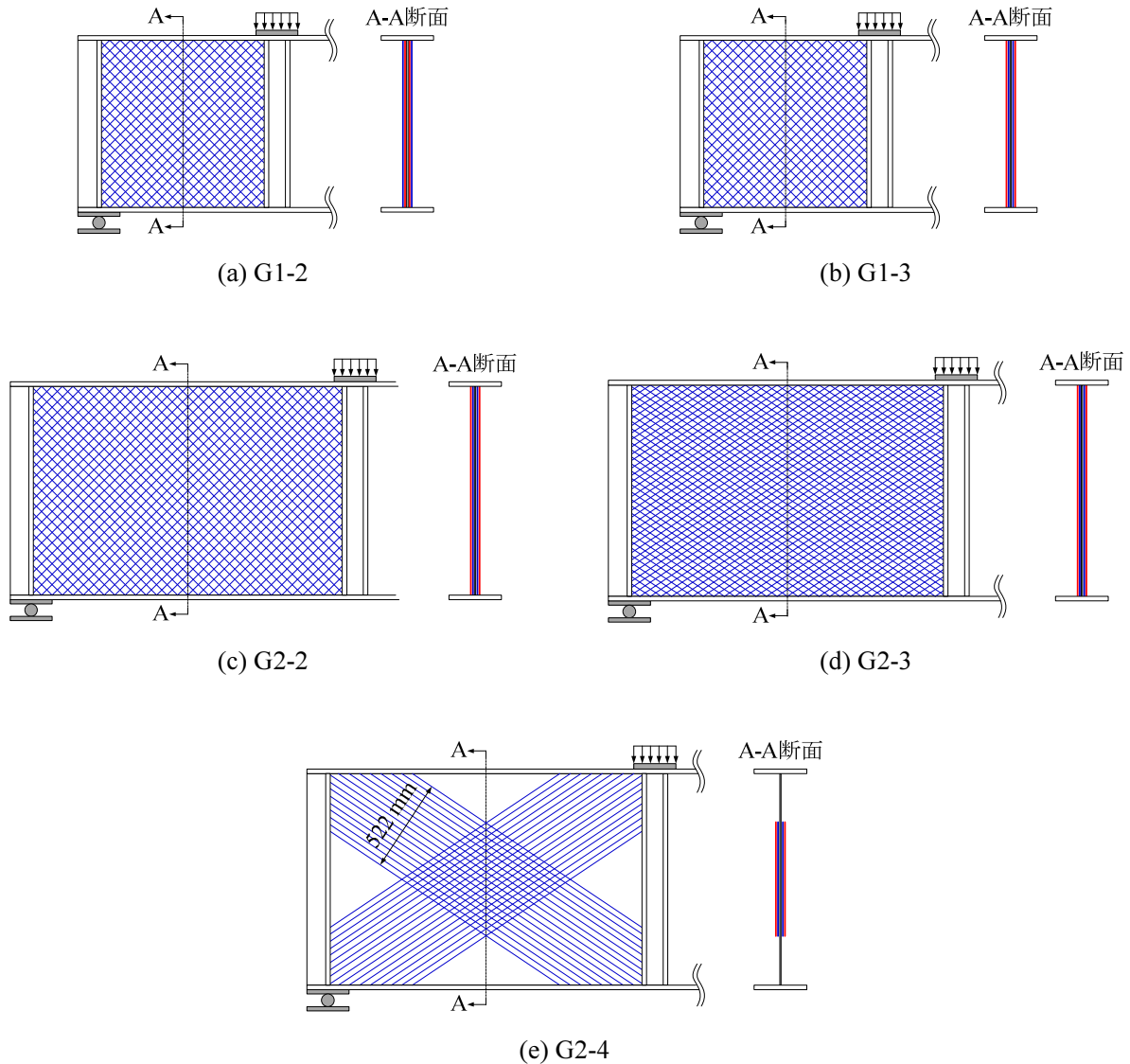


図-3.5 炭素繊維シート貼り付け形状

た．各試験体の繊維シート貼り付け形状を図-3.5 に示す．図中の赤線と青線は，斜張力場が形成された際に，腹板に圧縮力が働く方向，引張力が働く方向に貼りつけた炭素繊維シートであることを意味している．

ここで，G2-4 の一方向繊維シートの貼付け幅については次のように考える．Basler によると斜張力場は図-3.6 に示すような領域で発生するとされる．ここで，斜張力場領域の幅  $S$  は次式により求めることができる．

$$S = h \cos \theta - b \sin \theta \quad (3.1)$$

ここで， $h$  は腹板高さ， $b$  は腹板幅， $\theta$  は斜張力場の方向である．また，以下の関係が成立する．

$$\cos \theta = \left[ s \sqrt{1 + \alpha^2} \left( \sqrt{1 + \alpha^2} - \alpha \right) \right]^{-1/2} \quad (3.2)$$

$$\sin \theta = \left[ \frac{\alpha}{4} \sqrt{1 + \alpha^2} \right]^{1/2} \quad (3.3)$$

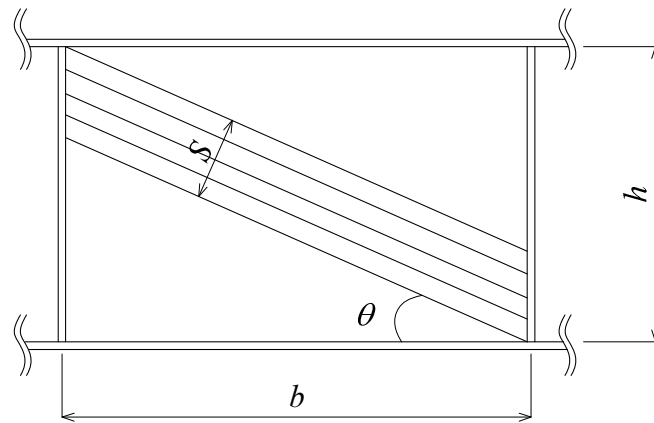


図-3.6 Baslerによる斜張力場の形成領域

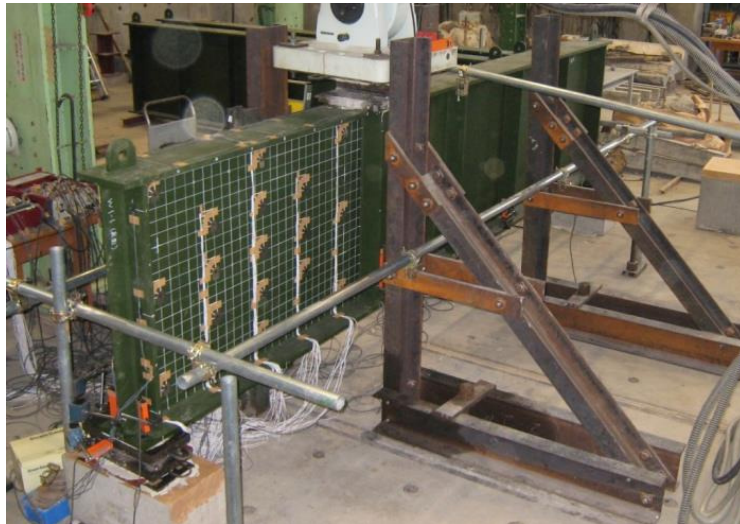


図-3.7 試験状況

$$\alpha = b/h \quad (3.4)$$

いま、G2シリーズについて式(3.1)から斜張力場領域の幅  $S$  を計算すると次のようになる。

$$S = h \cos \theta - b \sin \theta = 1,000 \times 0.957 - 1500 \times 0.290 = 522 \quad (3.5)$$

よって、炭素繊維シートの貼付け幅を斜張力場領域を覆う最小の幅である 522 mm とした。ただし、図-3.5(e)に示したように G2-4 では、図-3.6 に示す斜張力場領域とは、貼付け領域が異なる。これは斜張力場に起因する腹板のせん断座屈変形が対角線を挟んでその両側に発生するため、座屈変形を抑制するためには、この領域を覆う必要があるためである。また、いずれの試験体についても、腹板と炭素繊維シートの上に第2章で提案した高伸度弾性パテ材を挿入し、剥離の防止を図っており、貼り付けの手順については、2.2.1(2)で示した方法と同様とする。



(4) 試験方法

荷重は容量 2,000 kN のアクチュエータを使用し、3 点荷重とした。弾性域での予備荷重を 2~3 回繰り返した後、本荷重を行い終局まで荷重を漸増させた。なお、荷重システムの制御は、荷重-変位関係における初期勾配の線形性が失われるまでは荷重制御とし、それ以降は、変位制御により行った。いずれの試験においても、桁端部はテフロン板を用いたすべり支承で支持している。試験の状況を図-3.7 に示す。

3.2.2 試験結果と考察

(1) 最大荷重と強度増加率

せん断座屈試験から得られた最大荷重を表-3.3 に示す。表には Basler 式から得られる無補強桁のせん断強度の理論値も併せて示す。さらに、本研究では、無補強桁に対する強度の比を強度増加率として、以下の式より算出した。

$$\text{強度増加率 (\%)} = \frac{\text{補強桁の最大荷重} - \text{無補強桁の最大荷重}}{\text{無補強桁の最大荷重}} \times 100 \quad (3.6)$$

はじめに G1 シリーズについて述べる。表-3.3 より、炭素繊維目付量 150 g/m<sup>2</sup> の炭素繊維シートを用いた G1-2 では、強度増加率が 6.2 % となり、炭素繊維目付量 300 g/m<sup>2</sup> の炭素繊維シートを用いた G1-3 では、強度増加率が 12.4 % となった。このことから、強度増加率は炭素繊維目付量に比例して増加するということがわかる。また、G1-2 と G1-3 では、炭素繊維シートの積層順序が異なるが、強度増加率には影響を与えていないことがわかる。これは、炭素繊維シート 1 層あたりの厚さが薄いため、積層方法による影響が現れなかったものと言える。

次に、G2 シリーズについて述べる。G2 シリーズでは、炭素繊維の配向角が与える影響について検証した。この結果、炭素繊維の配向角を±45 度とした G2-2 では強度増加率が 27.8 % となり、炭素繊維の配向角を±33.7 度とした G2-3 では強度増加率は 29.2 % となった。この結果から、繊維の配向角が強度増加率に与える影響は少ないということがわかる。さらに、炭素繊維シートの貼り付け範囲を最小とすることを目的とした G2-4 では強度増加率が 26.6 % となり、他の 2 体と同程度の強度増加率を発揮した。このことから、Basler による斜張力場形成領域を覆うように炭素繊維シートを積層させる方法を用いることで合理的な強度増加が可能となる。

また、本試験では、第 2 章で提案した高伸度弾性パテ材をすべての試験体に用いている。本試験の結果からは、高伸度弾性パテ材が強度増加率に与える影響を定量的に評価することは難しい。しかし、鋼板の一軸圧縮試験と同様、高伸度弾性パテ材を挿入することにより、炭素繊維シートが腹板から剥離することなく強度を発揮していたものと考えられる。Basler 式の精度についてみると、試験パネルのアスペクト比が 1.0 とした G1 シリーズでは -2.8 % であり、試験パネルのアスペクト比を 1.5 とした G2 シリーズでは -6.3 % となった。いずれの試験ケースも Basler 式は実験値よりもわずかに大きい値を示す結果となったが、これは既往の研究結果<sup>3-4)</sup>と同様の結果となっている。

表-3.3 最大荷重および強度増加率

試験体番号	アスペクト比	せん断強度 [kN]		強度増加率 [%]	Basler 式の精度 [%]
		Basler 式	実験値		
G1-1	1.0	1,216	1,182	-	-2.8
G1-2			1,255	6.2	-
G1-3			1,328	12.4	-
G2-1	1.5	980	918	-	-6.3
G2-2			1,173	27.8	-
G2-3			1,186	29.2	-
G2-4			1,162	26.6	-

(2) 変形特性

a) 試験体の鉛直変位

載荷点直下の鉛直変位と荷重の関係を図-3.8 に示す。図中の青の破線は Basler 式によるせん断強度の理論値，赤の破線はせん断と曲げを考慮した鉛直たわみの理論値である。鉛直たわみの理論値は，以下の式より算出した。

$$w = \frac{a^2 \cdot b^2}{3EI \cdot L} P + \frac{a \cdot b}{GkAL} P \quad (3.7)$$

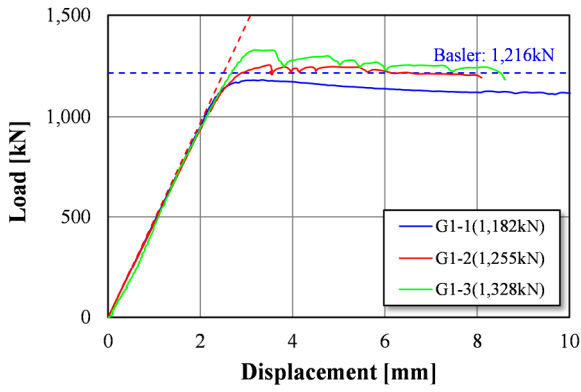
ここで， $a, b$  は各支点から載荷点までの距離， $P$  は載荷荷重， $L$  は支間長， $E, I, G, A$  はそれぞれ鋼桁の弾性係数，断面 2 次モーメント，せん断弾性係数，断面積， $k$  はせん断補正係数である。せん断補正係数は，I 桁の場合，断面積を  $A$ ，腹板の断面積を  $A_w$  とすると  $k = A_w / A$  で与えられる。また，計測した載荷点直下の鉛直変位は支点部の沈下量を考慮して補正した値を用いている。

図-3.8 より，G1 シリーズ，G2 シリーズともに鉛直変位は最大荷重に達するまでほぼ線形に上昇しており，その傾きは炭素繊維シートの有無によらず理論値と一致していることがわかる。また，炭素繊維シートを貼りつけた試験体では，最大荷重に達した後に断続的に荷重が低下する現象がみられるが，これは炭素繊維の破断によるものである。

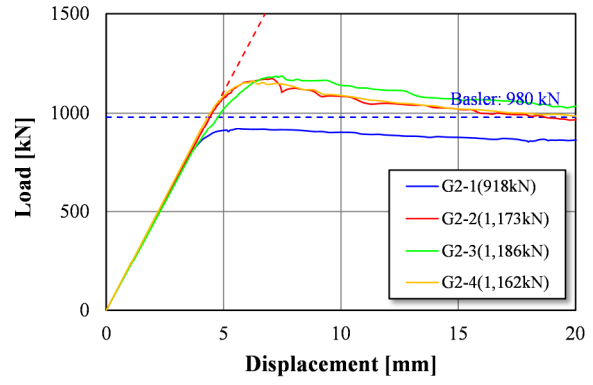
b) 腹板の面外方向変位

G1 シリーズにおける腹板の変形状態を図-3.9 に示す。ここで，面外変位の計測位置は腹板の中央断面から 150 mm 離れた点の値を用いている。また，計測したたわみ量は，腹板の初期たわみに付加された相対的な量である。荷重レベルは弾性 500, 750, 1,000, 最大荷重, 1,000 (座屈変形後) kN の 5 点を代表値とした。これより，炭素繊維シートを貼り付けた G1-2, G1-3 とともに，無補強である G1-1 に比べて低荷重レベルでの変形量が小さくなっており，炭素繊維シートを貼り付けることによって，面外方向の剛性が増加していることがわかる。

さらに，図-3.10 には，荷重と腹板中央の面外たわみの関係を示す。腹板の変形は凸側の変形を正としてプロットしている。これより，G1 シリーズでは，G1-1 と G1-2 の腹板の変形量に差はほとんど見られないが，G1-3 では，腹板の変形量が小さくなっていることがわかる。これは，G1-2 と G1-3 では炭素繊維目付量が異なり，G1-3 の方が補強量が多く，腹板の面外剛性が高かったためと考えら

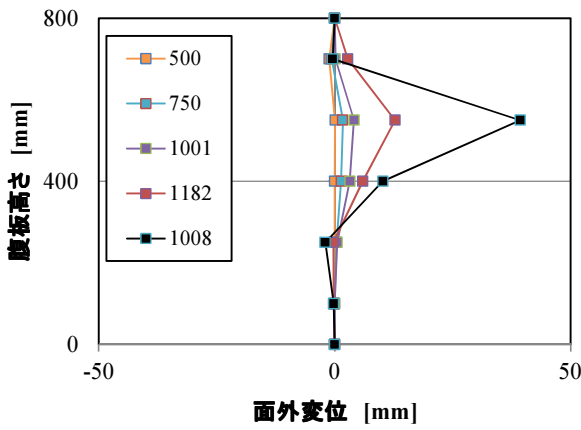


(a) G1 シリーズ

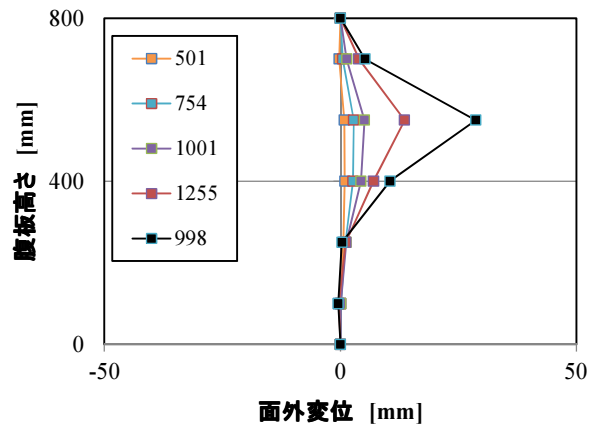


(b) G2 シリーズ

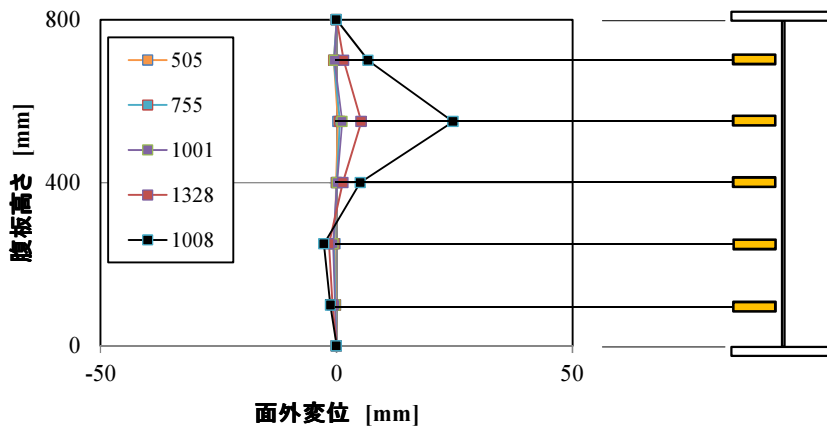
図-3.8 荷重—鉛直変位関係



(a) G1-1



(b) G1-2



(c) G1-3

図-3.9 腹板の面外変形状況

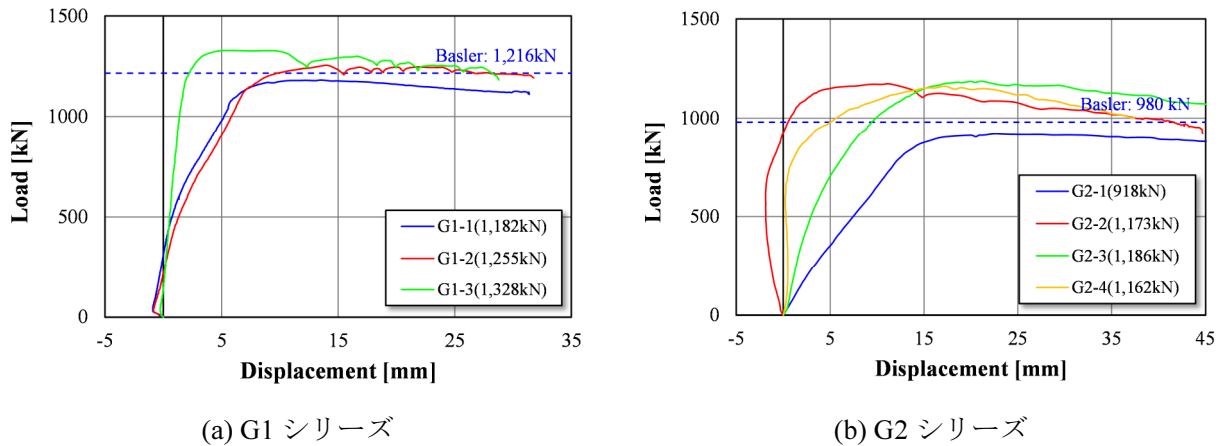


図-3.10 荷重一面外たわみ関係

れる。G2 シリーズでは、CFRP で補強したすべての供試体で、無補強鋼桁よりも変形量が小さくなっていることが確認できる。

c) 試験終了後の残留たわみ

図-3.11 には、試験終了後の試験パネルの残留たわみの測定結果を示す。G1 シリーズについては 100 mm 四方、G2 シリーズについては 200 mm 四方のメッシュを試験パネルに描き、この交点で残留たわみを測定した。測定方法は、垂直補剛材の間に水平器を渡し、水平器から試験パネルまでの距離をノギスにより測定する。測定された距離から、各点でのたわみ量を算出する。さらに測定した結果を幅ならびに高さ方向を空間的に 100 分割し、計測点を通るように 2 次元の線形補完を行い、残留たわみの分布図を作成した。これより、G1 シリーズ、G2 シリーズともに、腹板の対角線方向に斜張力場が形成されていることが分かる。

(3) 終局挙動

試験体の崩壊形態を図-3.12, 3.13 に示す。すべての試験体で試験パネルの AD 方向に引張力が発生し、BC 方向に圧縮力が生じる。これにより、AD 方向を稜線とする面外たわみが発生し、荷重の増加とともに変形が進行し終局に至ることを確認した。

炭素繊維シートの破壊状況については、試験パネルの変形に伴い、いずれの試験体でも、せん断座屈による面外たわみの曲率が大きくなる試験体上部 (A 点付近) で破断が発生した。さらに荷重の増加に伴い、引張力が作用する方向に貼りつけた炭素繊維シートでは破断が進行し、圧縮力が作用する方向に貼りつけた炭素繊維シートでは圧縮による破壊 (以下、圧壊と記す) が発生した。ここで、炭素繊維の配向角が異なる G2-2 と G2-3 のパネル中央部の拡大図を図-3.14 に示す。図より、炭素繊維シートに生じた破断は炭素繊維の配向角に沿う形で発生していることが確認できる。

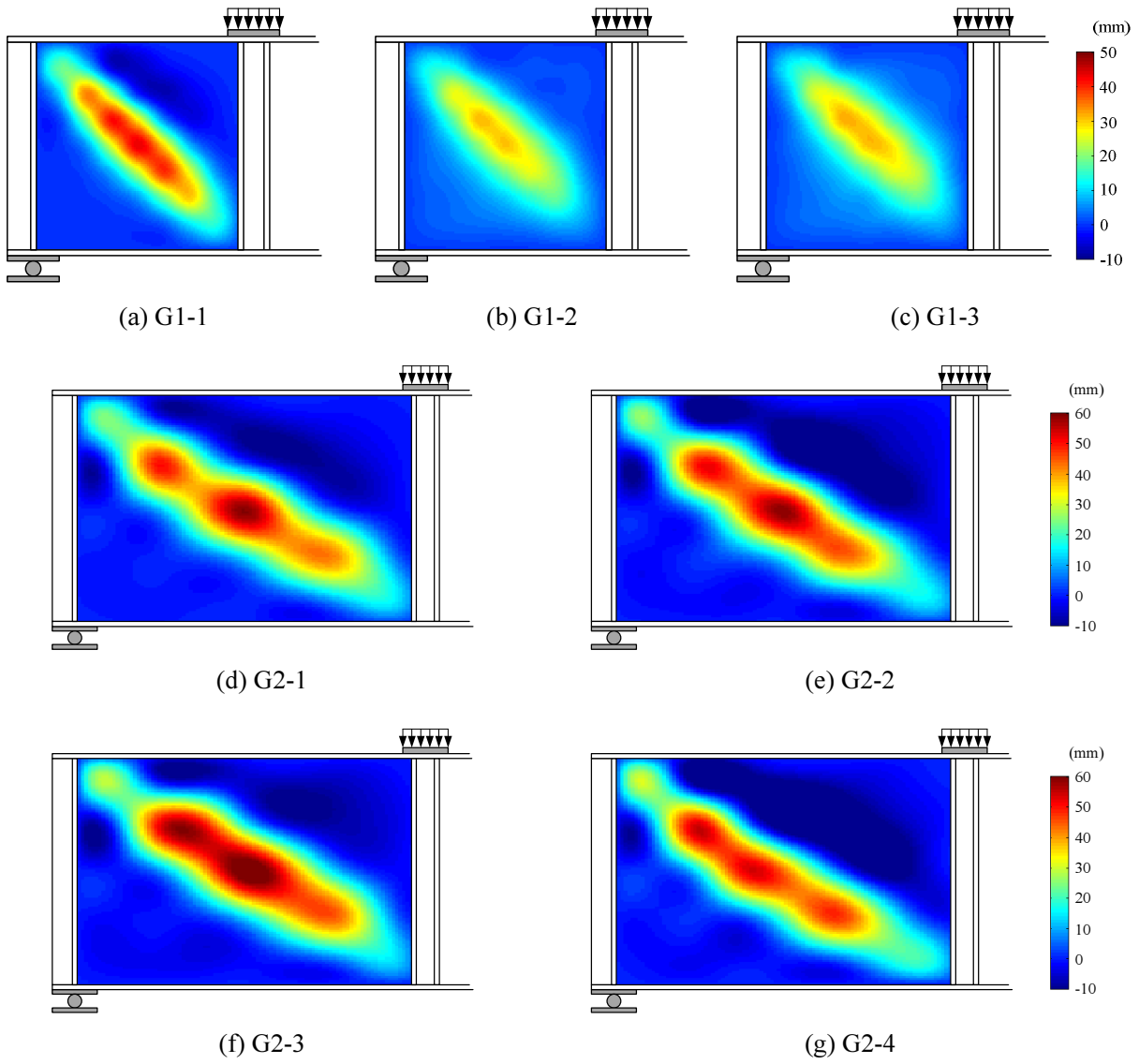
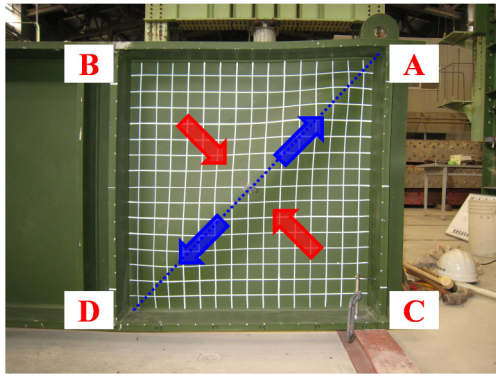
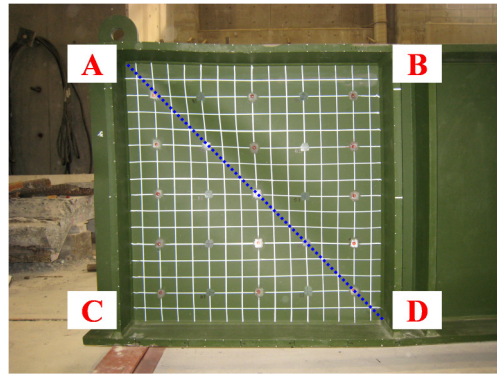


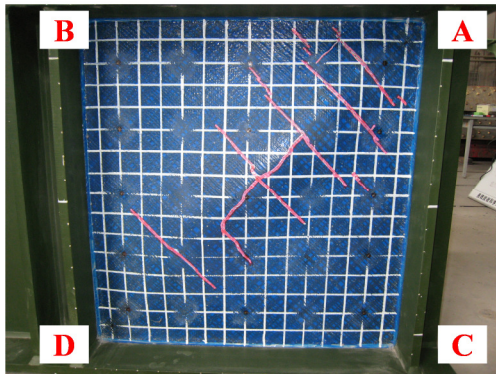
図-3.11 残留たわみ分布



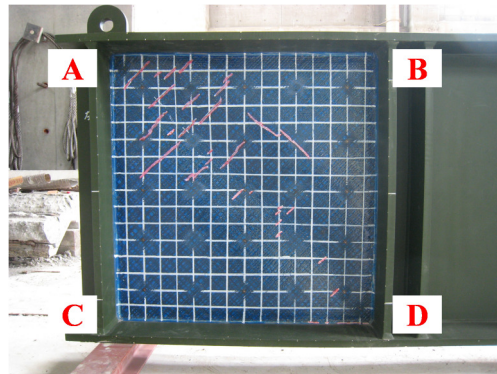
(a) G1-1 (凸側)



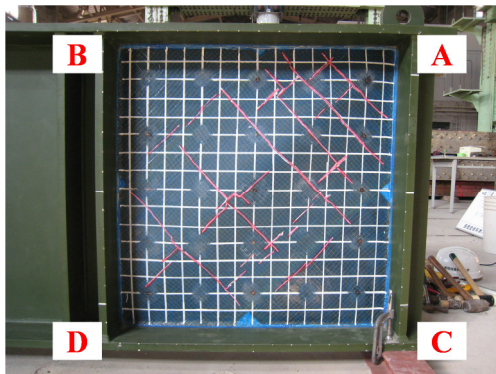
(b) G1-1 (凹側)



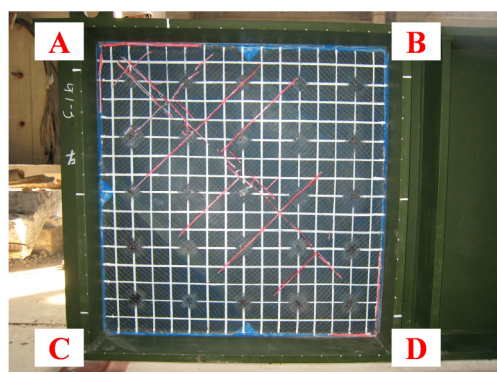
(c) G1-2 (凸側)



(d) G1-2 (凹側)

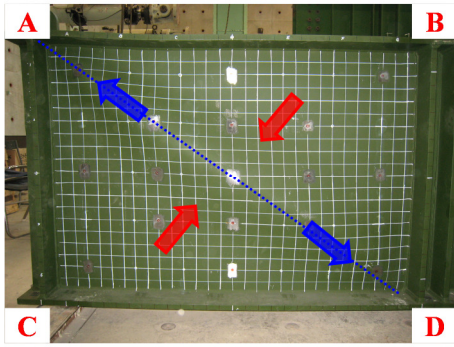


(e) G1-3 (凸側)

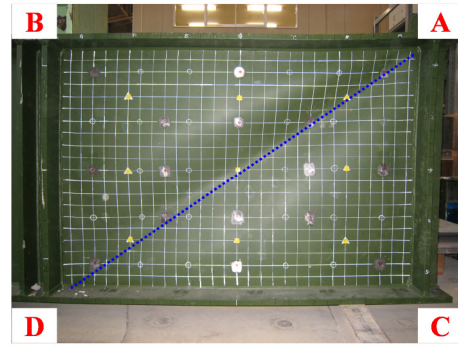


(f) G1-3 (凹側)

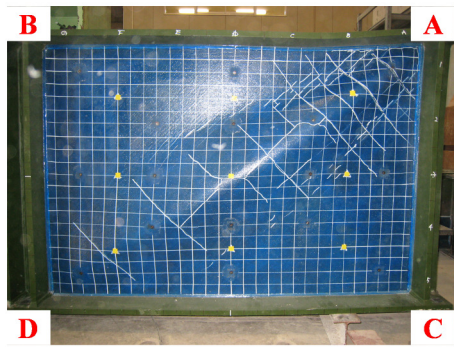
図-3.12 試験体の終局状態 (G1 シリーズ)



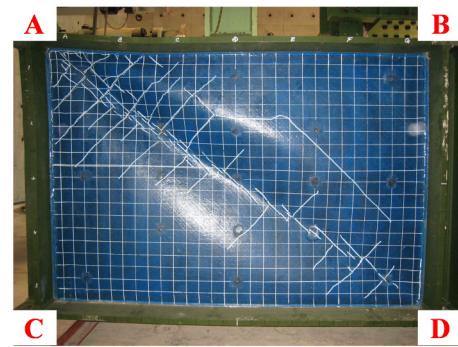
(a) G2-1 (凸側)



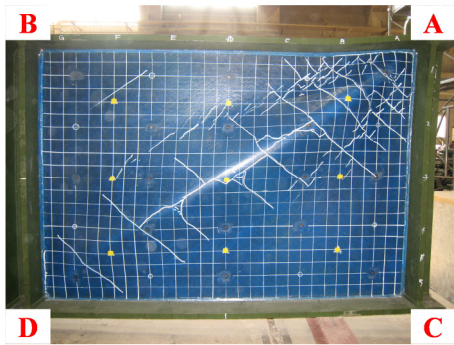
(b) G2-1 (凹側)



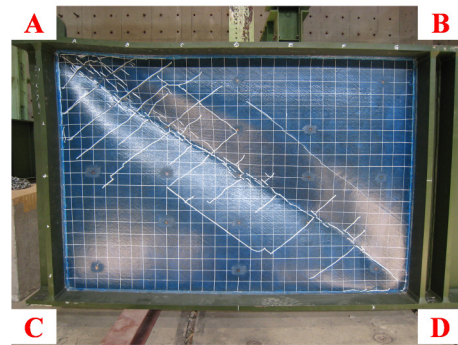
(c) G2-2 (凸側)



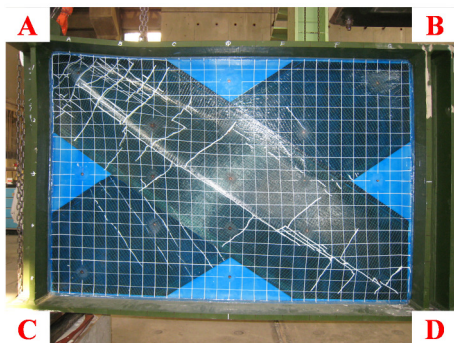
(d) G2-2 (凹側)



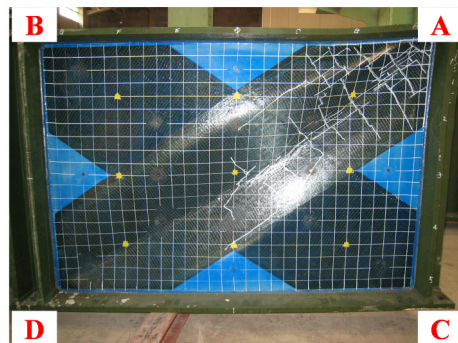
(e) G2-3 (凸側)



(f) G2-3 (凹側)



(g) G2-4 (凸側)



(h) G2-4 (凹側)

図-3.13 試験体の終局状態 (G2 シリーズ)

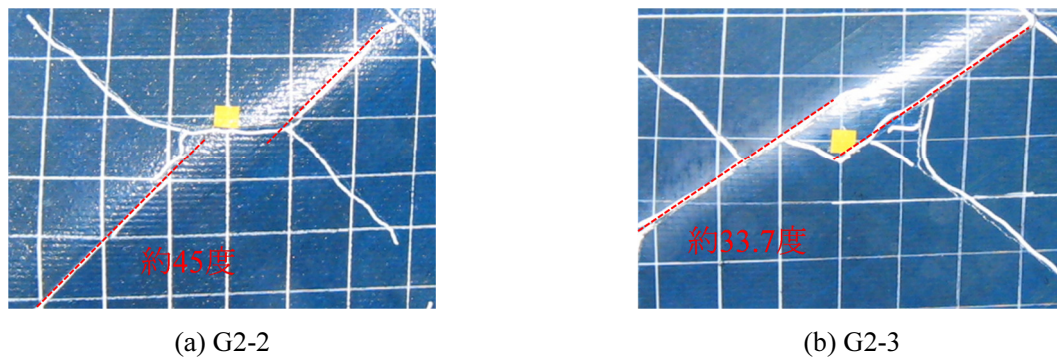


図-3.14 炭素繊維シートの破断角度

### 3.3 断面欠損を有する鋼桁を用いたせん断座屈試験

#### 3.3.1 試験概要

##### (1) 試験体

本試験で使用した試験体の形状はG1シリーズと同様、桁長 2,700 mm、腹板高さ 800 mm、腹板板厚 6 mm とした。使用した鋼材は鋼種 SS400、材料試験結果より腹板の降伏応力は 322 MPa である。本試験では、図-3.15 に示すように、試験パネルに対して、腐食を模擬した断面欠損を与える。具体的には腹板下端から 50 mm の高さで試験パネルの板厚を 50 %減少させたケースと 100 %減少させたケースである。板厚を 50 %としたケースでは、腹板の両面の板厚減少量が等しくなるようにザグリ加工を施し、板厚を 100 %減少させたケースでは貫通孔を設けた。前者を G3 シリーズ、後者を G4 シリーズと名付ける。なお、試験体の作製に当たっては、腹板に加工を施した後に溶接を行っているため、実際の橋梁における応力の再分配については考慮されていない。

##### (2) 試験ケース

試験ケースを表-3.4 に基づいて説明する。G3、G4 シリーズともに、無補修のケースが 1 体、炭素繊維シートで補修したケースが 2 体の試験を実施する。ここで、炭素繊維シートによる補修方法について説明する。前節で行った試験の結果から、腹板に発生する斜張力場領域を炭素繊維シートで覆うことで強度が改善されることが確認されている。この結果を踏まえて、腹板の前面に炭素繊維シートを貼り付けて強度を回復させる方法について検討する。一方で、腹板に生じる腐食は局所的であることが多く腹板全面に炭素繊維シートを貼り付けることは合理的ではない場合がある。そこで、断面欠損部の板厚減少量を補うように、部分的に炭素繊維シートを貼り付ける方法についても検討することとした。本研究においては、前者を「全面貼り工法」、後者を「部分貼り工法」と名付ける。

次に、全面貼り工法と部分貼り工法における補修量の決定方法について説明する。まず、部分貼り工法における炭素繊維シートの積層枚数は、シート 1 層あたりの厚さ（設計厚）を鋼換算し、鋼板の板厚減少量を補うように積層枚数を決定することとした。さらに、決定した積層枚数を斜張力場の形成方向とそれに対して直角となる方向の 2 方向に対して交互に貼り付けることとした。本試験ケースにおいては、炭素繊維の配向角を ±45 度となるように貼り付けた。



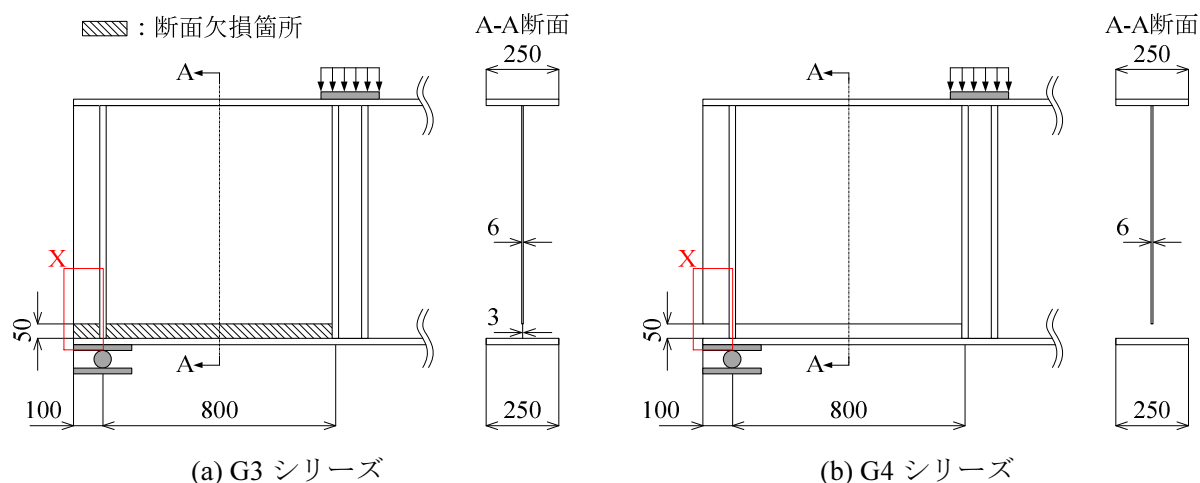


図-3.15 断面欠損の形状

表-3.4 試験ケース

試験 ケース	腹板の断面欠損			補修方法/ シートの種類	炭素繊維シート積層枚数※	
	幅	高さ	板厚		引張方向	圧縮方向
G3-1	全幅 (100%)	50 mm (6.25%)	ザグリ (50%)	-	-	-
G3-2				全面貼り/B	1	1
G3-3				部分貼り/A	4	4
G4-1			貫通孔 (100%)	-	-	-
G4-2				全面貼り/A	1	1
G4-3				部分貼り/A	7	7

※腹板の片面あたりに貼り付ける枚数

表-3.5 炭素繊維シートの物性値

種類	シートの種類	目付量 [g/m <sup>2</sup> ]	設計厚 [mm]	弾性係数	
				設計値 [GPa]	実測値 [GPa]
A	一方向繊維シート	300	0.1430	640	689
B	炭素繊維バイアスシート	150	0.0715	640	676

G3, G4 シリーズにおける炭素繊維シートの貼り付けパターンを図-3.13 に示す。ここで、両工法における炭素繊維シート積層枚数の決定方法について具体的に説明する。まず、部分貼り工法について説明する。本試験で使用した炭素繊維シートの物性値を表-3.5 に示す。これより、炭素繊維シート1層あたりの鋼換算厚さは、 $640 / 200 \times 0.143 = 0.4576 \text{ mm}$  となる。したがって、G3 シリーズでは腹板片面あたりの欠損量が 1.5 mm であるから、 $1.5 / 0.4576 \approx 4$  枚（小数点以下繰り上げ）の炭素繊維シートが必要と

なる。これを斜張力場の形成方向とそれと直角となる方向のそれぞれに対して貼り付けるため、合計で8枚の炭素繊維シートを貼り付けることとなる。同様に、G4シリーズでは、腹板片面あたり3mmの欠損であるから、 $3.0 / 0.4576 \approx 7$ 枚（小数点以下繰り上げ）の炭素繊維シートが必要となり、斜張力場の形成方向とそれと直角となる方向のそれぞれに対して貼り付けるため、合計で14枚の炭素繊維シートを貼り付けることとなる。最外層のシート長は、断面欠損高さ（50mm）と必要定着長（100mm）<sup>3-5)</sup>を足し合わせた150mmとした。また、層間における応力集中を緩和するため、1層あたり10mmのずらしを設けて積層することとした。これは、同一方向に貼り付けた炭素繊維シート間のずらし量が25mm<sup>3-5)</sup>を満足するように決定している。

次に全面貼り工法について説明する。ここでは、有限要素解析（以下、FEAと記す）と第3章で提案したせん断強度評価式に基づいて炭素繊維シートの積層枚数を決定することとした。具体的には、まず、健全時および断面欠損時のFEAを実施し、強度低下率を算出する。次いで、せん断強度評価式を用いて炭素繊維シート接着による強度増加率を計算する。この結果がFEAによる強度低下率を上回るように炭素繊維シート積層枚数を決定する。この結果、強度低下率がG3シリーズでは3.4%、G4シリーズでは11.3%となった。これに対して、炭素繊維目付量150g/m<sup>2</sup>の炭素繊維シートを腹板の片面あたり1層（引張方向1層、圧縮方向1層）貼り付けることで強度増加率が5.1%、炭素繊維目付量300g/m<sup>2</sup>の炭素繊維シートを腹板の片面あたり1層（引張方向1層、圧縮方向1層）貼り付けることで強度増加率が13.2%となることから、G3シリーズでは150g/m<sup>2</sup>目付の炭素繊維シートを1層（引張方向1層、圧縮方向1層）、G4シリーズでは300g/m<sup>2</sup>目付の炭素繊維シートを1層（引張方向1層、圧縮方向1層）貼り付けることとした。炭素繊維の配向角については、前節と同様、腹板の対角方向（±45度）となるように積層することとした。なお、せん断強度評価式を用いた計算では、腹板の断面欠損はないものとして計算を行っている。

部分貼り工法、全面貼り工法ともに、1層目の繊維方向を斜張力場の形成方向とし、2層目の繊維方向を斜張力場の形成方向に対して直角となる方向とする。積層枚数が3層以上となる場合はこれを交互に積層する。また、部分貼り工法では、**図-3.16**に示すように炭素繊維シート端部にR（=50mm）を設けて積層し<sup>3-6)</sup>、下フランジに定着させた。これに対して全面貼り工法では、下フランジへの定着を設けていない。これは、部分貼り工法では、断面欠損部の修復を目的としているのに対して、全面補修では、残存している腹板の耐力増加を目的としているためである。また、桁端部の欠損部（**図-3.15**のXの箇所）に対しては、300g/m<sup>2</sup>目付の炭素繊維シートを部分補修の場合と同様にシート枚数を決定する。そして、端部での応力集中を避けるために、シート端部を25mmずつずらしながら鉛直方向に貼りつけた。

なお、実橋梁では、腹板の中心線に対して非対称な腐食形状となることが想定される。このような場合には、腹板中心からの欠損量を測定し、腹板の片面あたりの補修量をそれぞれ計算し、欠損量に応じた積層数で施工する必要がある。

### (3) 試験方法

試験方法については、3.2.1(4)と同様、荷重は容量2,000kNのアクチュエータを使用し、3点荷重とした。弾性域での予備荷重を2~3回繰り返した後、本荷重を行い終局まで荷重を漸増させた。なお、荷重システムの制御は、荷重-変位関係における初期勾配の線形性が失われるまでは荷重制御とし、それ以降は、変位制御により行った。いずれの試験においても、桁端部はテフロン板を用いたすべり支承で支持している。試験の状況を**図-3.17**に示す。

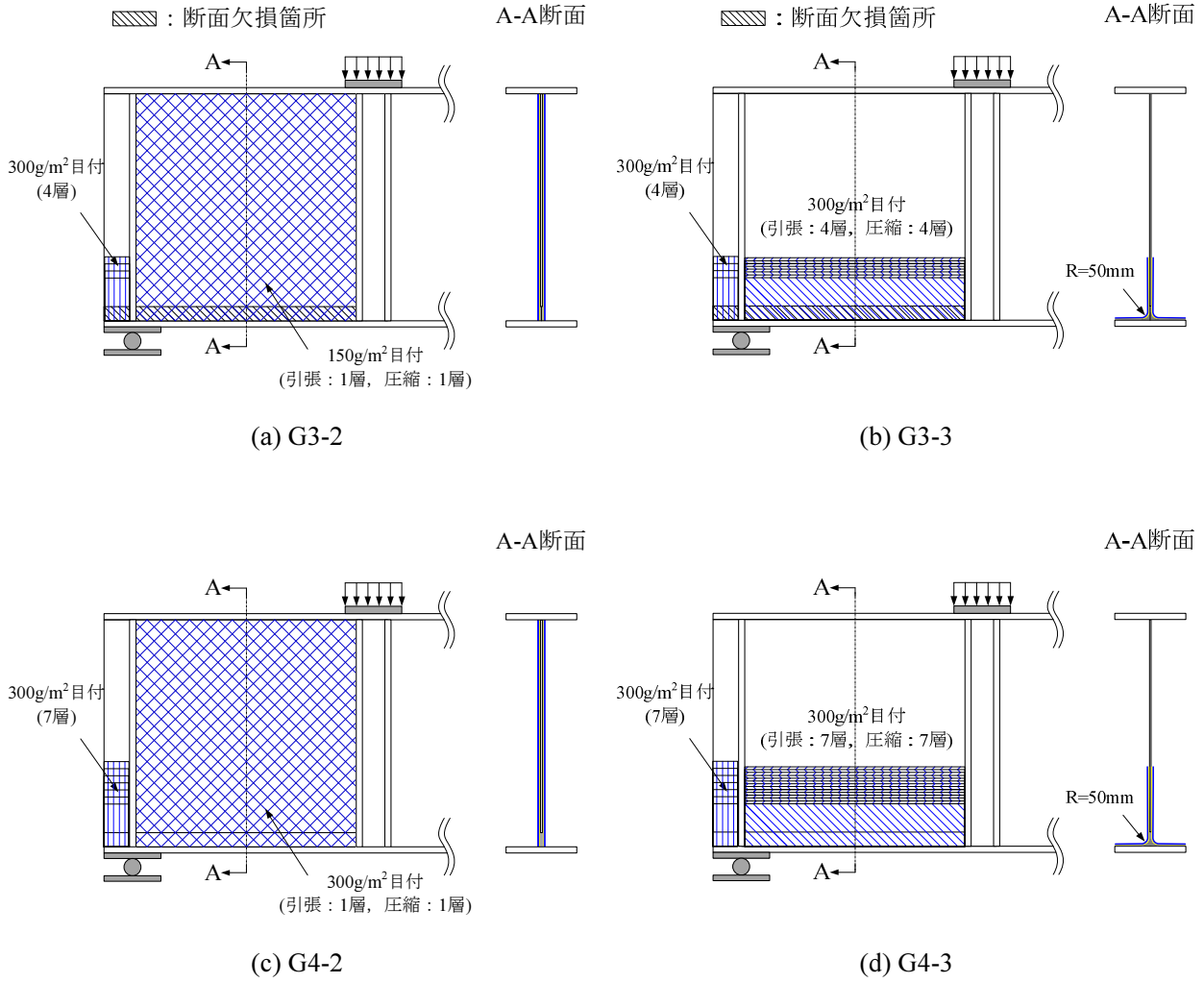


図-3.16 炭素繊維シートの貼り付け形状



図-3.17 試験状況

### 3.3.2 試験結果と考察

#### (1) 最大荷重と強度改善効果

表-3.6 に本試験で得られた最大荷重の一覧を示す。本試験では、損傷がないケースでの試験を実施していないため、腐食損傷による強度低下を定量的に評価することができない。そこで、Basler 式により健全時のせん断強度を算出し、この値を基準値として耐力の低下率および炭素繊維シートによる強度改善効果を評価することとした。炭素繊維シートによる強度改善効果については、以下の式を用いて計算する。

$$\text{強度改善効果 (\%)} = \frac{\text{補修桁の最大荷重}}{\text{Basler式による理論値}} \times 100 \quad (3.8)$$

表-3.6 より、炭素繊維シートによる補修を行っていない G3-1 および G4-1 では、それぞれ 10.4 % と 21.0 % の強度低下がみられた。ここで、シートの貼り付け枚数を決定する際に行った FEA と比較すると、強度低下率が FEA よりも大きくなっている。これは、試験体作製時における初期たわみや残留応力、試験時の境界条件など、解析では考慮していないものの影響であると考えられる。

G3 シリーズについてみると、全面貼りで補修した G3-2 で 100.8 %、部分貼りで補修した G3-3 で 104.5 % の強度改善効果となった。また、G4 シリーズでは、全面貼りで補修した G4-2 で 96.9 %、部分貼りで補修した G4-3 で 96.8 % の強度改善効果となった。

#### (2) 変形特性

載荷点直下の鉛直変位と荷重の関係を図-3.18 に示す。図中の青の破線は Basler 式によるせん断強度の理論値（健全時）、赤の破線はせん断と曲げを考慮した鉛直たわみの理論値（健全時）である。

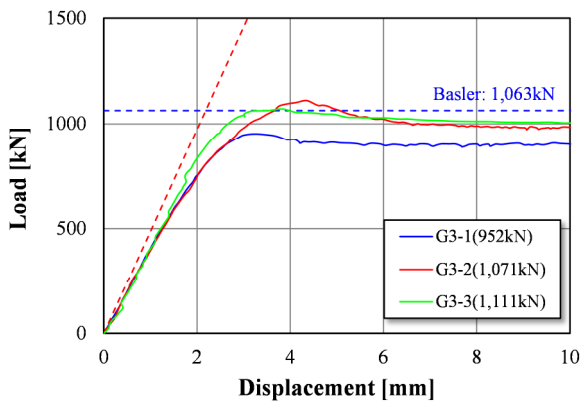
図-3.18 より、G3 シリーズ、G4 シリーズともに、健全時の理論値と比較すると、剛性が低下していることが確認できる。特に、貫通孔を設けた G4-1 では、その低下が顕著である。これに対して炭素繊維シートを貼り付けた G4-2 と G4-3 では、剛性が回復していることが確認できる。このことから、腹板に貫通孔が存在している場合には、桁の剛性が大きく低下するものの、本工法による補修を行うことで、剛性の回復も可能となることがわかる。

また、図-3.19 には、試験パネル中央の面外変位と荷重の関係を示す。これより、炭素繊維シートを貼り付けたいずれのケースについても、最大荷重に達するまでの腹板の変形が小さく抑えられていることがわかる。ここで、G4-1 のみ他のケースとは異なる挙動を示した。これは、腹板下端に貫通孔があるため、下端でのはらみだしが大きくなり、腹板中央の変形状態が他のケースとは異なっていたことが原因であると言える。これについては 3.3.2 (3) で述べる。

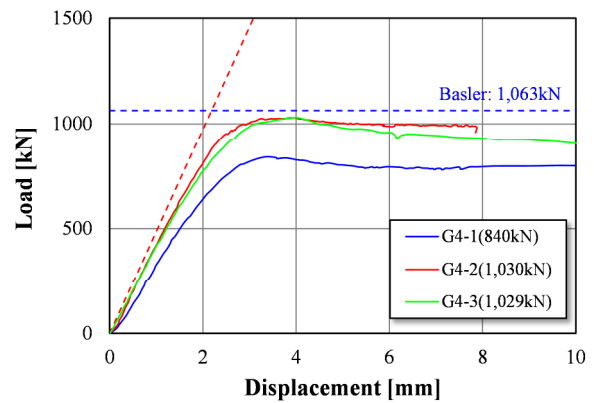
さらに、図-3.20 には、試験終了時の試験パネルにおける残留たわみの測定結果を示す。測定の方法については、3.2.2 (2) と同様の方法を用いている。これより、G3 シリーズではいずれのケースでも、試験パネルの対角線方向に斜張力場が形成されていることが確認できる。これに対し、G4 シリーズでは、G4-1 と G4-2 で斜張力場の形成方向が上部に移動していることがわかる。G4-1 では、腹板下端に貫通孔を設けているため、腹板の支持条件が 4 辺単純支持から 3 辺単純支持へと変化し、これにより斜張力場におけるアンカー位置が上部へ移動したものと考えられる。一方、炭素繊維シートを試験パネル全面に貼り付けた G4-2 では、せん断強度の回復は見られたものの、終局時の変形は G4-1 と同様の形状となった。これは、最大荷重に達した後、試験パネルの面外変形の増加に伴って、下端での付着切れが生じたため、G4-1 と同様の破壊形態となったものと言える。

表-3.6 最大荷重と強度改善効果

試験 ケース	最大荷重 [kN]	強度低下率 [%]	強度改善効果 [%]	備考
G3-0	1,063	-	-	Basler 式
G3-1	952	-10.4	-	50 %欠損 (無補修)
G3-2	1,071	-	100.8	50 %欠損 (全面貼り)
G3-3	1,111	-	104.5	50 %欠損 (部分貼り)
G4-1	840	-21.0	-	100 %欠損 (無補修)
G4-2	1,030	-	96.9	100 %欠損 (全面貼り)
G4-3	1,029	-	96.8	100 %欠損 (部分貼り)

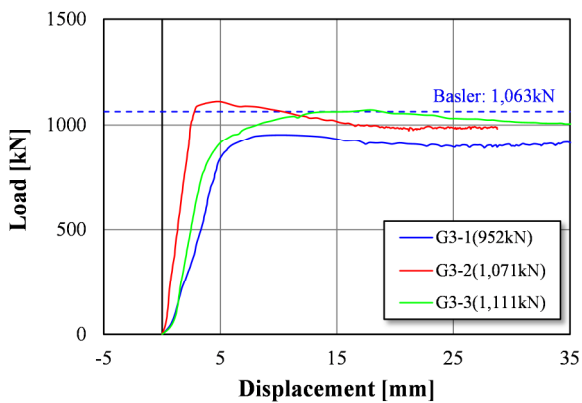


(a) G3 シリーズ

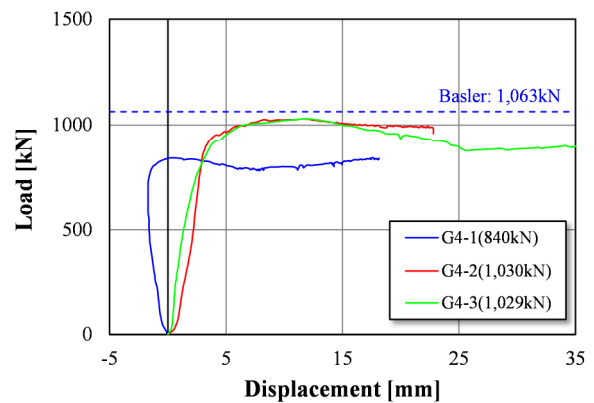


(b) G4 シリーズ

図-3.18 荷重—鉛直変位関係



(a) G3 シリーズ



(b) G4 シリーズ

図-3.19 荷重—面外たわみ関係

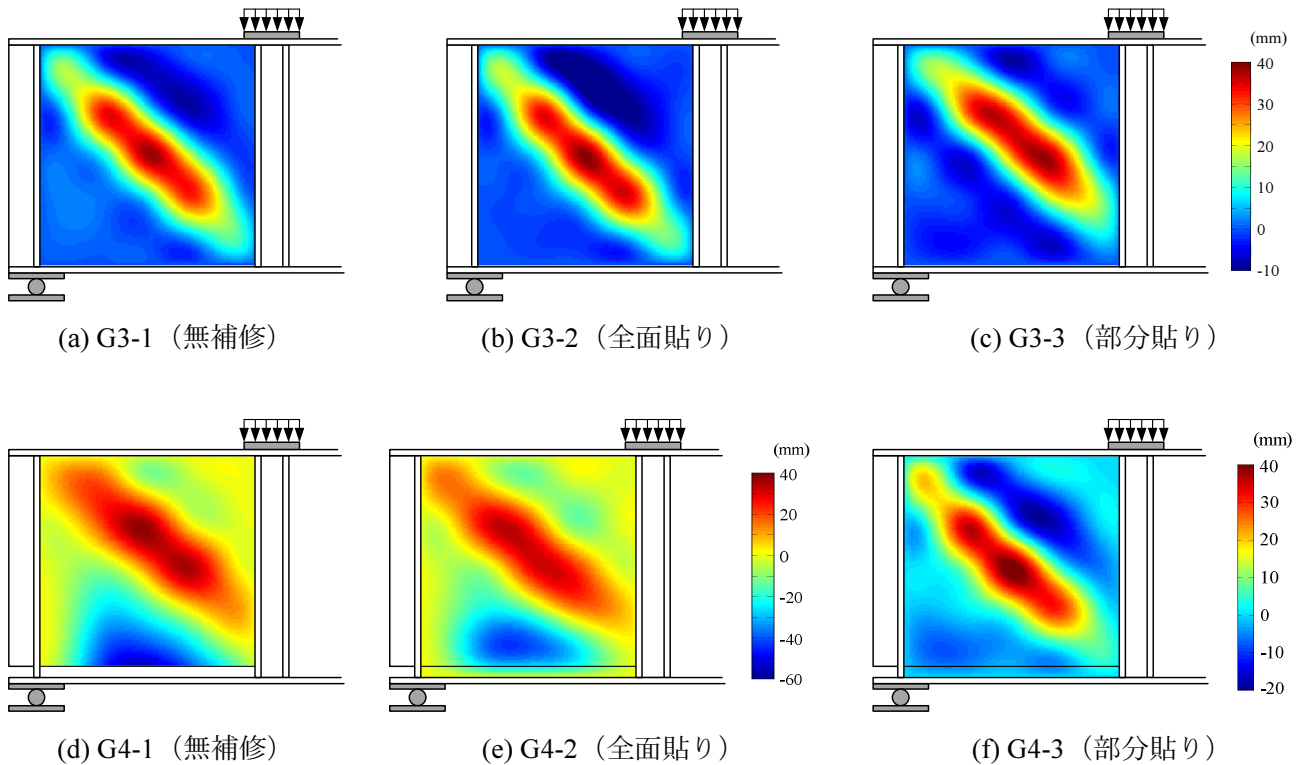


図-3.20 残留たわみ分布

### (3) 終局挙動

図-3.21 に試験終了後の試験体状況を示す。図中の破線は斜張力場の形成方向を示し、○印は炭素繊維シートに生じた初期破断位置を示している。腹板下端の板厚を50%減少させたG3シリーズでは、無補修のケース、炭素繊維シートで補修したケースのいずれのケースにおいても、試験パネルの対角線を挟むようにして変形が生じ、終局に至っていることが確認できる。一方、腹板下端に貫通孔を設けたG4シリーズでは、無補修のG4-1では下端部での面外方向の変形が大きくなっていることが確認できる。これに対し、炭素繊維シートで補修したケースについてみると、試験パネル全面に炭素繊維シートを貼り付けたG4-2では、最大荷重に達するまではG3シリーズと同様に対角線方向に変形が進行していたが、変形の進行によって腹板下端における付着切れが発生し、下端部の面外方向への変形が起こり、G4-1と同様の終局状態となった。部分的に炭素繊維シートを貼り付けたG4-3では、下端での付着切れが生じることはなく、G3シリーズと同様の終局状態となることが確認された。

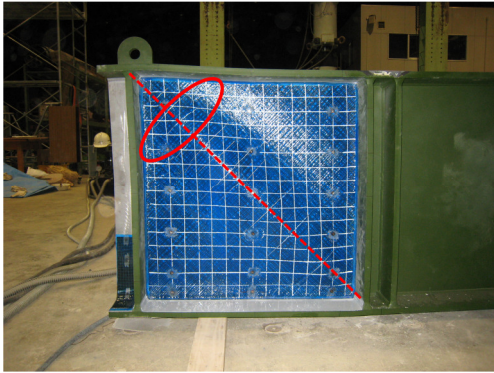
さらに、炭素繊維シートの初期破断位置に着目すると、試験パネル全面に炭素繊維シートを貼り付けたG3-2とG4-2では、せん断座屈による腹板の面外方向の曲率が最も大きくなる支点部直上の腹板上部で破断が生じた。さらに、荷重の増加に伴い、引張力および圧縮力を受ける両方向の炭素繊維シートに破断が生じた。一方、欠損部に部分的に炭素繊維シートを貼り付けたG3-3とG4-3では、載荷点直下の腹板下部で破断が生じた。これは、炭素繊維シートを貼り付けた領域の中で最も曲率が高くなる点である。初期破断が生じたのちは、G3-2やG4-2と同様、引張力および圧縮力を受ける両方向の炭素繊維シートに破断が生じた。全面貼りおよび部分貼りのいずれにおいても、破断が生じる方向は、炭素繊維シートの配向角に沿った45度方向であった。



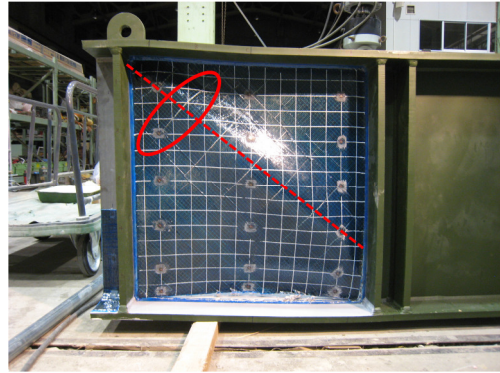
(a) G3-1



(b) G4-1



(c) G3-2



(d) G4-2



(e) G3-3



(f) G4-3

図-3.21 終局状態

### 3.4 合理的な補修方法の確立に向けたせん断座屈試験

前節までに、腹板に炭素繊維シートを貼り付けることによって強度が増加し、終局強度が向上することを確認した。また、腐食損傷に対する補修方法として、炭素繊維シートを腹板全面に貼り付ける「全面貼り工法」と欠損部周辺に部分的に貼り付ける「部分貼り工法」の2つの補修方法について検討し、十分な補修効果が得られることを確認した。

ここで、部分貼り工法においては、炭素繊維シートの厚さを鋼換算し、欠損量を補うように積層枚数を決定し、決定した枚数を腹板の±45度方向にそれぞれ貼り付ける方法とした。これは、鋼材厚に換算すると必要量の2倍の炭素繊維シートを貼り付けていることとなる。そのため、補修量が過剰となっている可能性がある。また、試験パネルの全幅にわたって欠損したケースについてのみ試験を実施しているため、実橋で見られるような局所的な欠損に対する合理的な補修範囲についても検討する必要がある。以上のことから、本節では、次の項目を目的として、せん断座屈試験を実施することとする。

#### A. 部分貼り工法における最適補修量の検討

前節で実施したせん断座屈試験では、腐食損傷事例が多くみられる下フランジ近傍の腹板が腐食した場合として、腹板下端50mm（高さ欠損率6.25%）の高さでパネル全幅（幅欠損率100%）が腹板厚の50%欠損した場合と100%欠損した場合の炭素繊維シートによる補修効果を確認した。ここでは、炭素繊維シートの厚さを鋼換算して、断面欠損量を補うにシートの積層枚数を決定し、腹板パネルの引張力、圧縮の作用する方向のそれぞれに、決定した枚数の炭素繊維シートを交互に積層する方法を検討した。その結果、炭素繊維シートを用いた補修によって、健全な鋼桁のせん断強度まで回復することを確認した。しかしながら、本手法では、腹板パネルの引張方向、圧縮方向のそれぞれに同じ枚数のシートを積層していることから、板厚に換算すると2倍のシートを貼り付けていることとなる。そこで貼り付けるシート枚数を半分として、部分貼り補修における最適補修量を検討する。例を挙げると、3.3節では、必要量4層であれば、各方向に4層ずつの計8層貼り付けていたのに対して、本試験では、各方向に2層ずつの計4層を貼り付ける。本試験の結果と3.3節の結果を比較することにより、部分貼り工法における最適な補修量について検討する（試験目的A）。

#### B. 腐食領域に応じた合理的な補修範囲の検討

腹板パネルに生じた断面欠損の幅がせん断強度の低下に与える影響を確認するために、腹板下端から50mm（高さ欠損率6.25%）の高さで腹板パネル全幅の1/2（支点側）にわたって、腹板厚が50%欠損した場合と100%欠損した場合について検討する。ここでは、炭素繊維シートによる補修方法として、部分貼り補修による補修効果を検討する。シートの積層数は、これまでに実施した試験の結果と試験目的Aの試験結果より決定する。また、炭素繊維シートの貼り付け幅は欠損幅と貼付け高さの和とした。この理由としては、欠損部周辺の炭素繊維シートの必要定着長（引張を受ける部材では100mm）が確保できないため、貼付け高さと同様の幅とすることとした。図-3.22(a)に示すように、同一の方向に貼り付けた炭素繊維シート間のずらし量が25mmを満足するように決定している。これに対し、本試験では、欠損が腹板幅の1/2領域となるため、合理的な補修を行うためには、幅方向にも定着長を設ける必要がある。よって、幅方



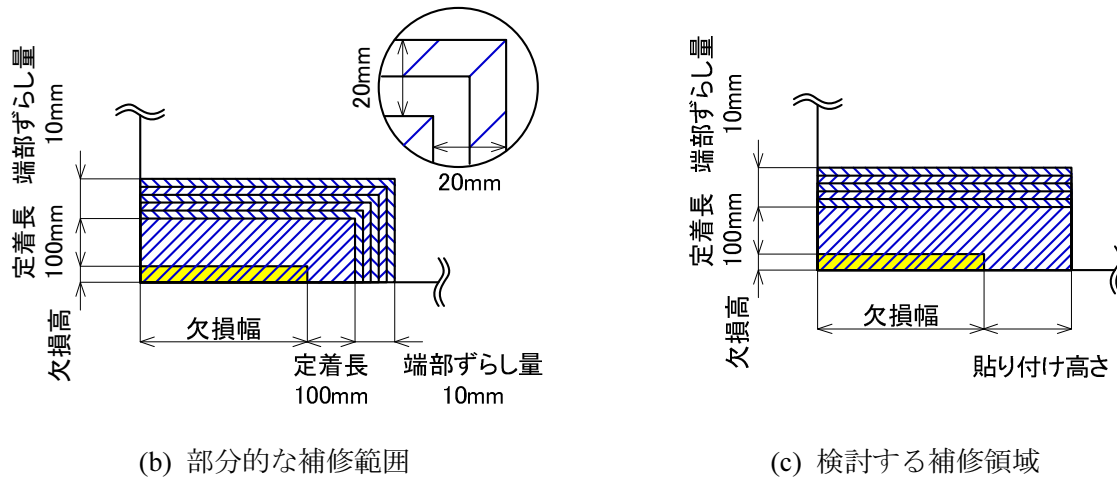


図-3.22 部分貼り工法における補修領域

向の定着長を確保するためには、高さ方向と同様に定着長+端部ずらし量を設ける必要があるが、施工性を考慮して、図-3.22(b)のように幅方向にはずらしを設けないこととした。以上の方法で貼り付けた場合の補修効果について確認し、部分貼り工法における最適補修領域について検討する（試験目的 B-1）。

さらに、腹板パネルの欠損高さをパラメータとしたせん断座屈試験を実施する。腹板に与える祖欠損は、腹板下端から 200 mm（高さ欠損率 25 %）の高さとし、腹板パネル全幅（幅欠損率 100 %）にわたりが腹板厚の 50%欠損した場合について、部分貼り補修における補修効果を確認する（試験目的 B-2）。

### 3.4.1 試験概要

#### (1) 試験体

試験体の形状は前節と同様、桁長 2,700 mm、腹板高 800 mm、腹板板厚 6 mm とした。試験パネルに対して、試験目的に応じた断面欠損を与える。欠損の形状は図-3.23 に示す通りである。試験目的 A では、腹板の全幅にわたって 50 mm の高さで欠損した場合を想定し、板厚を 50 %減少させたケース（ザグリ加工）と 100 %減少させたケース（貫通孔）について検討する。試験目的 B-1 では、腹板の欠損幅を支点側 1/2 領域とし、他の条件については、試験目的 A と同様とする。試験目的 B-2 では、欠損幅を腹板の全幅、欠損高さを 200 mm として、板厚を 50 %減少させたケース（ザグリ加工）についてのみ検討する。試験目的 A、B-1、B-2 をそれぞれ G5、G6、G7 シリーズと名付ける。

使用する鋼材は SS400（腹板の降伏応力は G5 シリーズで 348 MPa、G6 シリーズで 364 MPa、G7 シリーズで 358 MPa である）とし、前節と同様、腹板の加工を行った後に溶接を行っている。

#### (2) 試験ケース

試験ケースは表-3.7 に示す 10 ケースである。ここで炭素繊維シートの貼り付け方法について説明する。試験目的 A では、炭素繊維シートの積層数を前節の半分とする。すなわち、引張方向と圧縮方向の繊維シートの総枚数で板厚を回復させる方法である。欠損部の板厚を 50 %としたケース（G5-1、G5-2）では、必要となる補修量は腹板の片面あたり 4 層であり、前節では引張方向に 4 層、圧縮方

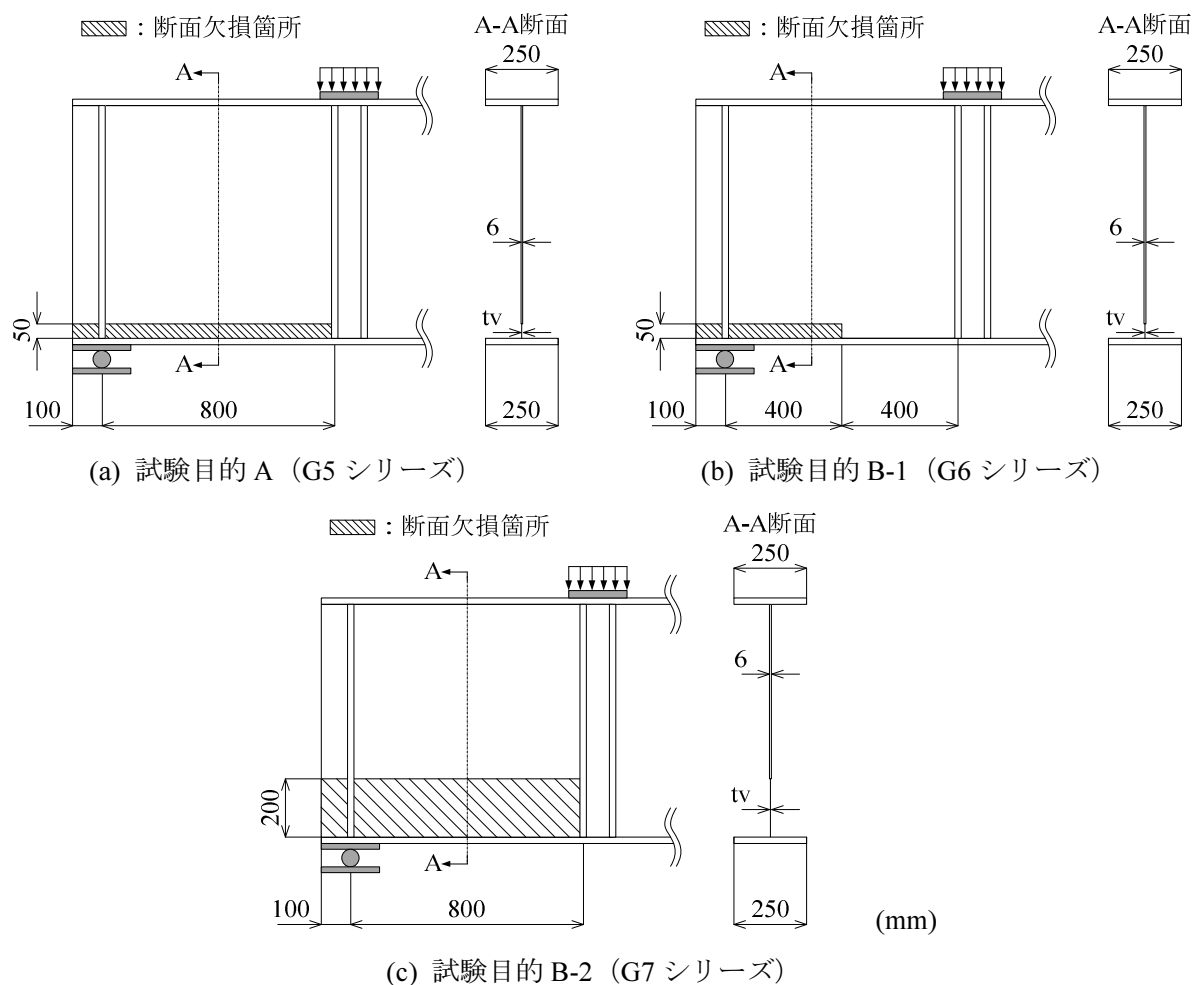


図-3.23 試験パネルの形状

表-3.7 試験ケース

試験目的	試験体番号	腹板の断面欠損			補修方法	炭素繊維シート積層数※	
		幅	高さ	板厚		引張方向	圧縮方向
A	G5-1	全幅 (100%)	50 mm (6.25%)	ザグリ	-	-	-
	G5-2			部分貼り	2層	2層	
	G5-3			貫通孔	-	-	-
	G5-4			部分貼り	4層	4層	
B-1	G6-1	1/2 幅 (50%)	50 mm (6.25%)	ザグリ	-	-	-
	G6-2			部分貼り	4層	4層	
	G6-3			貫通孔	-	-	-
	G6-4			部分貼り	7層	7層	
B-2	G7-1	全幅 (100%)	200 mm (25.00%)	ザグリ	-	-	-
	G7-2			部分貼り	4層	4層	

※腹板の片面あたりの積層数

向に4層としていたのに対して、本試験では、引張方向に2層、圧縮方向に2層として炭素繊維シートを積層する。同様に貫通孔を設けたケース（G5-3, G5-4）では、必要層数8層に対して、引張方向に4層、圧縮方向に4層の炭素繊維シートを貼り付ける。結果については後述するが、本試験より、炭素繊維シートの積層数は、炭素繊維シートの厚さを鋼換算して、断面欠損量を補うにシートの積層枚数を決定し、腹板パネルの引張力、圧縮の作用する方向のそれぞれに、決定した枚数の炭素繊維シートを交互に積層する方法（前節の貼り付け方法）が望ましいということが確認された。したがって、試験目的B-1, B-2については、前節と同様の貼り付け枚数として試験を実施した。各試験ケースにおける炭素繊維シートの貼り付け形状を図-3.24に示す。

(3) 試験方法

試験の実施状況を図-3.25に示す。これまでの試験と同様に、載荷容量2,000 kNのアクチュエータを用いて載荷を行った。載荷点直下の変位を測定し、荷重-変位の線形性が保たれる範囲では、荷重制御により計測を行い、線形性が失われたところから、変位制御により計測を行った。

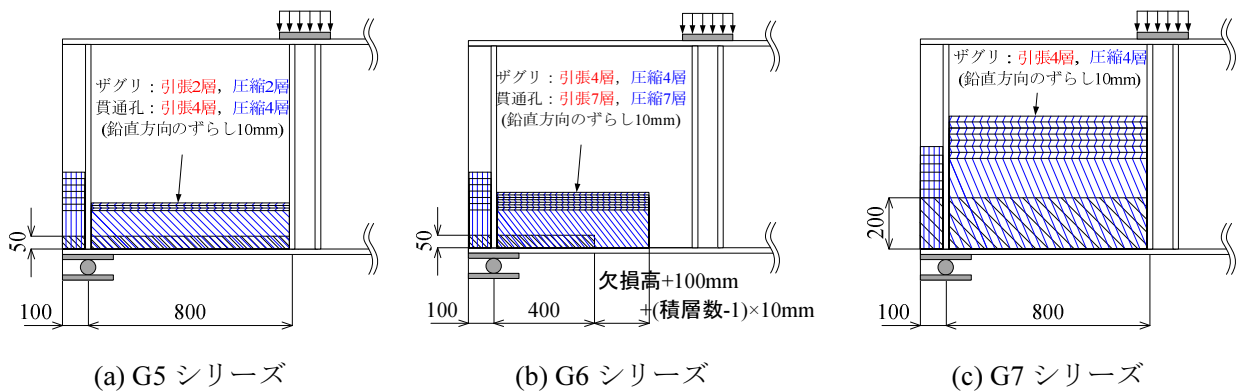


図-3.24 炭素繊維シートの貼り付け形状



図-3.25 試験状況

### 3.4.2 試験結果と考察

#### (1) 破壊形態

試験終了後の腹板の変形状態を図-3.26に示す。図中の赤矢印が载荷点、白三角が支点部を示している。さらに、黒の点線は腹板の対角方向（45度方向）、赤の破線は斜張力場の形成方向を示している。これより、斜張力場の形成方向はいずれの試験でもおおむね45度方向に発生していることが確認できる。ここで、腹板の全幅にわたり、下端に貫通孔を設けたG5-3について見ると、他のケースに比べて斜張力場の形成角度が鋭角になっていることが確認できる。これは、貫通孔を設けたことにより、腹板の支持条件が、4辺単純支持から3辺単純支持1辺自由の条件へと変化したため、斜張力場のアンカーが形成される位置が上側へ移動したためであると考えられる。これに対して、炭素繊維シートで補修したG5-4では、斜張力場の形成角度が腹板の対角線方向に変化しており、炭素繊維シートによる補修によって、アンカーの形成位置が健全時とほぼ同位置まで回復したと言える。この結果については、前節で実施した試験と同様である。

さらに、腹板の変形は、支点部直上の隅部で最も曲率が大きくなる。そのため、全面貼り工法を適用した場合には、この部位において繊維の破断が生じることが確認されている。これに対して、部分貼り工法を適用した場合、炭素繊維シートを貼り付けた範囲で最も曲率が高くなる载荷点直下の隅部で破断を生じることとなる。なお、いずれのケースについても、最大荷重に達した後で破断を生じたことから、腹板の変形が始まってからも、炭素繊維シートがはく離することなく、強度を発揮してい

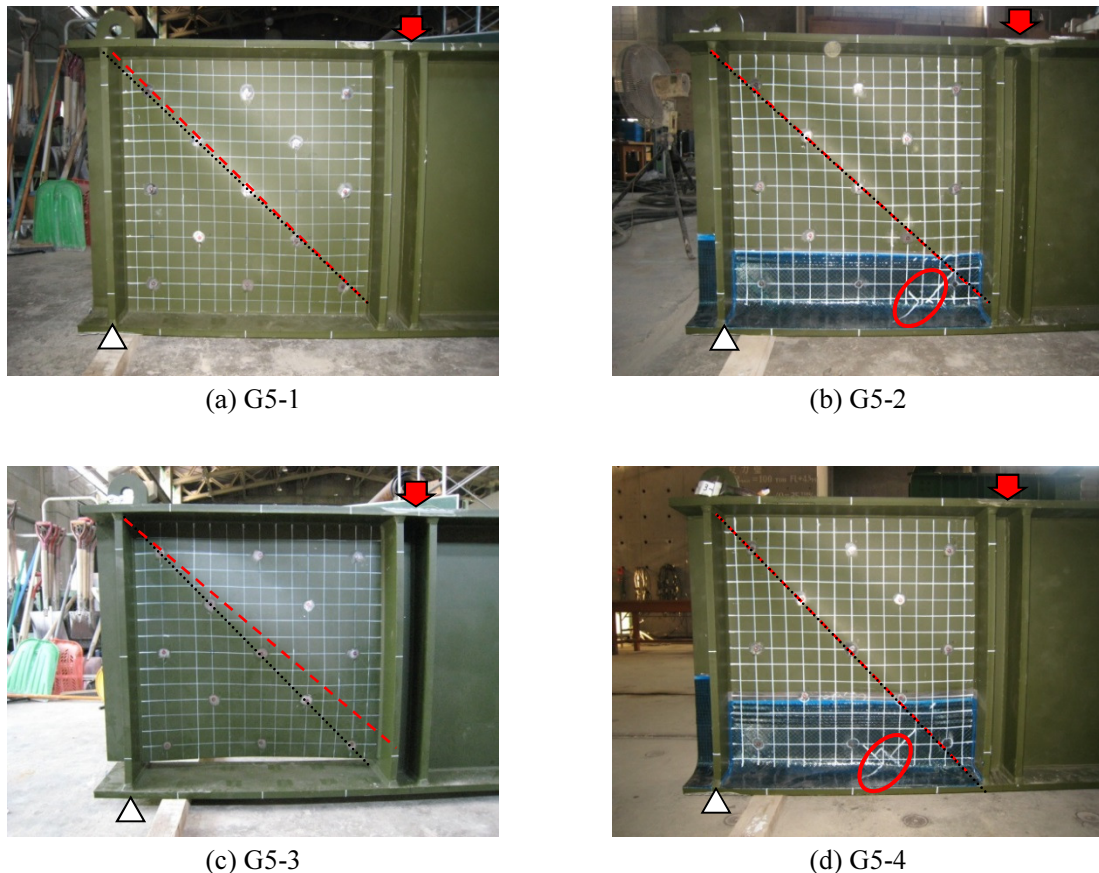
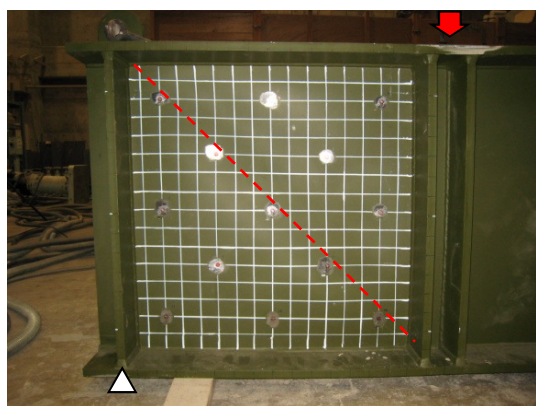
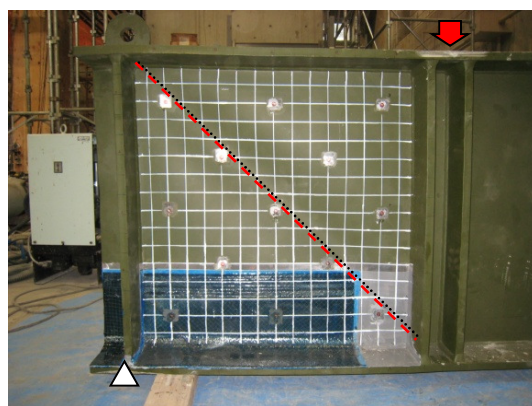


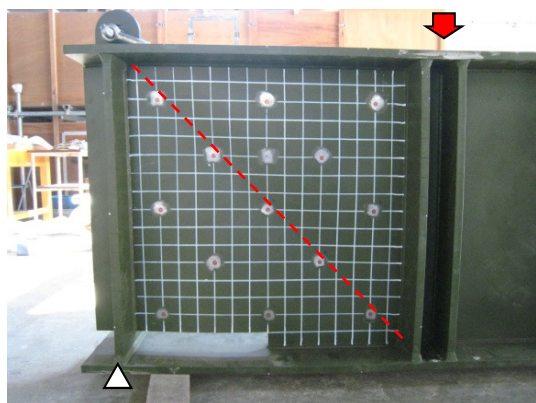
図-3.26 試験終了後の試験体状況 (1/2)



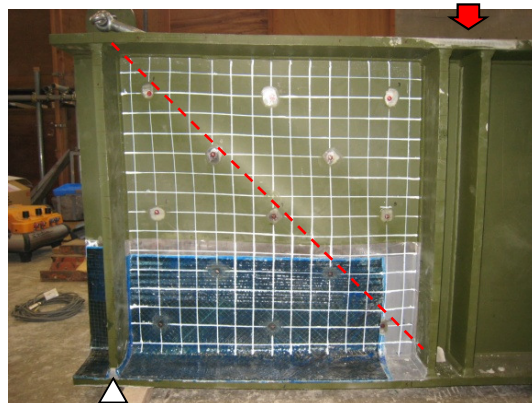
(e) G6-1



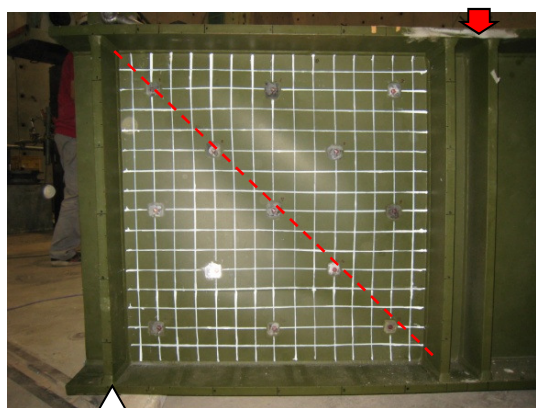
(f) G6-2



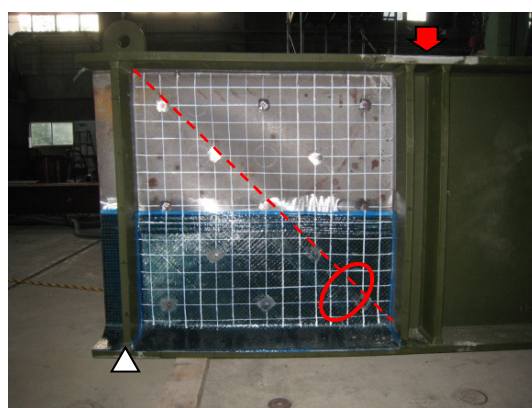
(g) G6-3



(h) G6-4



(i) G7-1



(j) G7-2

図-3.26 試験終了後の試験体状況 (2/2)

たと言える。また、G6-2 と G6-4 のように、炭素繊維シートの貼り付け幅を腐食幅 + 貼り付け高さとした場合については、炭素繊維シートに破断は生じなかった。

## (2) 最大荷重と強度改善効果

試験から得られた最大荷重を表-3.8 に示す。表には各ケースの無補修桁の最大荷重に対する比として強度改善効果を示す。さらに、前節の G3 シリーズ、G4 シリーズの結果を合わせて示す。

ここで、本試験では、試験目的ごとに使用した鋼材の降伏応力が異なり、さらには、溶接に起因する残留応力が存在するため、最大荷重は理論値よりも低くなる。これについては、残留応力を考慮した FEA によって再現することが可能であるが、残留応力の同定は困難を伴う。また、設計の際にも、不確定性を有する残留応力を考慮することはできない。そこで、せん断強度の評価に広く用いられている Basler 式<sup>3-3)</sup>によって、各ケースでの健全モデルの強度を算出することとした。Basler 式を用いる理由は、せん断強度を比較的精度よく予測することが可能であることによる<sup>3-4)</sup>。表中の GX-0 (X=3, 5, 6, 7) で示したケースが健全モデルに対応する。なお、これまでに実施した試験結果から、Basler 式は実験値に対して 10%程度大きくなることが確認されていることから、Basler 式から算出される強度を目標値とすることで安全側の設計が可能となる。

試験目的 A (G5 シリーズ) についてみると、腹板下端に 50 mm の高さで、腹板の全幅にわたり板厚を半分にした G5-1 では G5-0 に対して 15.7%の強度低下となった。また、板厚を 100%欠損させた G5-3 では 26.9%の強度低下となった。これに対して、炭素繊維シートにより補修した G5-2、G5-4 では G5-0 に対して、強度改善効果がそれぞれ 84.3%、90.6% となった。一方、G3、G4 シリーズについてみると、G3-0 に対する強度低下率はザグリを与えた G3-1 では、10.4%となり、貫通孔を与えた G4-1 では 21.0% となった。また、炭素繊維シートにより補修した G3-2、G4-2 では G3-0 に対する強度改善効果は、それぞれ 104.5%、96.8% であった。ここで、G4-2 の強度改善効果は 100% を超えていないが、Basler 式によるせん断強度の算定精度は±10%とされていることから、十分な強度回復がみられると判断する。したがって、部分貼り工法における補修量は、必要補修量を腹板パネルの引張方向および圧縮方向にそれぞれ貼り付ける方法とするのが望ましい。

次に試験目的 B-1 (G6 シリーズ) についてみると、4 体で最大荷重の大きさにほとんど差が見られない。これは、先に述べたとおり、損傷範囲が斜張力場の形成領域に達していないため、せん断強度がほとんど低下しないためと考えられる。なお、補修後のケースで、わずかに強度の低下がみられるが、これは、炭素繊維シートを貼り付けたことにより、腹板の剛性が変化したことによる影響であると考えられるが、炭素繊維シートの貼り付け領域が斜張力場の形成領域に達していないため、強度には大きく影響しなかったと言える。以上のことから、腹板パネルの 1/2 領域 (支点側) の腐食については、せん断補修の対象とする必要はないといえる。さらに、支点側 1/2 領域に貼り付けた炭素繊維シートはせん断強度の増加に影響を与えないということがわかる。ただし、支点部近傍の損傷であるため、別途、支点反力に対する補修を行う必要はある。

さらに、腐食幅を腹板の全幅、腐食高さを下端から 200 mm とした試験目的 B-2 (G7 シリーズ) についてみる。本ケースにおける強度低下率は、健全モデル G7-0 に対して、14.0%となった。これに対し、炭素繊維シートにより補修した G7-2 では、G7-0 に対する強度改善効果が 99.2% となった。このことから、欠損高さが大きくなっている場合についても、これまでと同様の設計方法で補修が可能であるといえる。

表-3.8 最大荷重および強度改善効果

試験体 番号	最大荷重 [kN]	Basler 式による 目標荷重 [kN]	強度低下率 [%]	強度改善効果 [%]
G5-0	-	1,048		
G5-1	883		15.7	
G5-2	931			84.3
G5-3	766		26.9	
G5-4	949			90.6
G6-0	-	1,075		
G6-1	1,021		5.0	
G6-2	994			92.5
G6-3	1,025		4.7	
G6-4	1,021			95.0
G7-0	-	1,058		
G7-1	910		14.0	
G7-2	1,050			99.2
G3-0	-	1,063		
G3-1	952		10.4	
G3-2	1,111			104.5
G4-1	841		21.0	
G4-2	1,029			96.8

(3) 荷重－変位関係

載荷荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係を図-3.27 に示す. 図中の青破線は Basler 式による健全モデルの理論値, 赤破線は, 曲げとせん断変形を考慮した健全モデルの理論値で以下の式より算出した.

$$w = \frac{a^2 \cdot b^2}{3 \cdot EI \cdot L} P + \frac{a \cdot b}{G \cdot k \cdot A \cdot L} P \quad (3-9)$$

ここで,  $a, b$  は各支点から載荷点までの距離 (本試験では  $a = 800$  mm,  $b = 1,700$  mm),  $P$  は載荷荷重,  $L$  は支間長,  $E, I, G, A$  はそれぞれ鋼桁の弾性係数, 断面 2 次モーメント, せん断弾性係数, 断面積,  $k$  はせん断補正係数である. せん断補正係数は, I 桁の場合, 断面積を  $A$ , 腹板の断面積を  $A_w$  とすると  $k = A_w / A$  で与えられる.

図-3.27(a)に示す腹板の全幅にわたってザグリを与えた G5-1 では, 荷重－変位関係が線形を保っている範囲では, 理論値とよく一致した挙動が得られていることから, 欠損による初期剛性の低下はほ

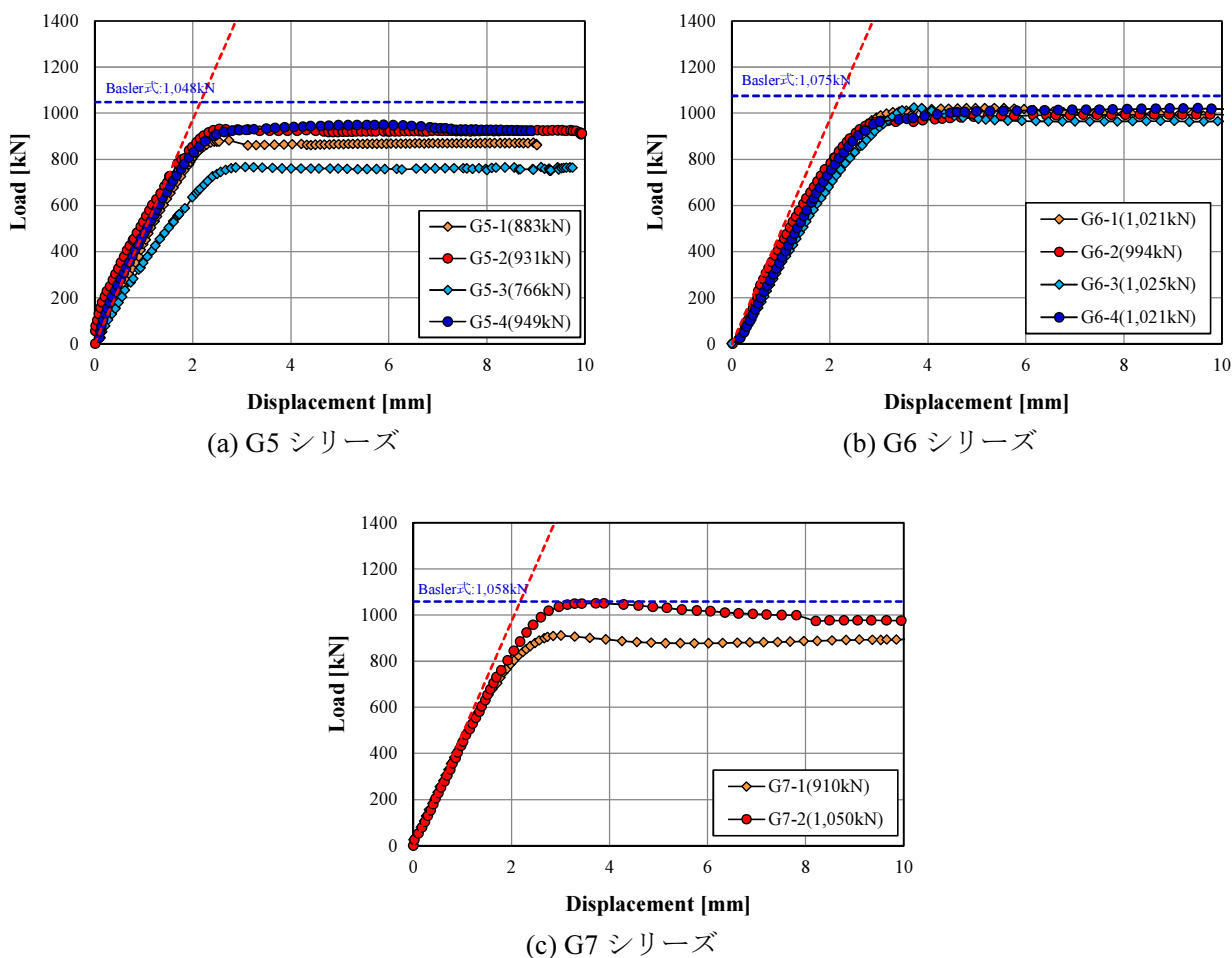


図-3.27 荷重-変位関係

とんど見られないことがわかる。これに対し、貫通孔を与えた G5-3 では、理論値と比較して、変位が大きくなっていることから、初期剛性が低下していることが分かる。これらを炭素繊維シートで補修した G5-2, G5-4 では、初期剛性は理論値と概ね一致し、欠損による剛性の低下を回復できたといえる。

次に、図-3.27(b)に示す腹板の 1/2 幅にわたって欠損を与えた G6 シリーズでは、ザグリ、貫通孔ともに、荷重が小さい段階では、理論値とよく一致した挙動となっているが荷重の増加に伴い、理論値との乖離が大きくなっている。これは、残留応力の影響によるものと考えられる。また、最大荷重についても、G6-1~G6-4 に大きな差は見られなかった。これは、腹板に与えた断面欠損が、斜張力場の形成領域に達していないため、せん断強度の低下に影響を与えないためであると考えられる。

さらに、図-3.27(c)に示す腹板下端から 200 mm の高さでザグリを与えた G7-1 では、G5-1 と同様、理論値と概ね一致した挙動となっていることから、断面欠損による剛性の低下は生じていないことが確認できる。炭素繊維シートを貼り付けた G7-2 では、炭素繊維シートの効果により、Basler 式による理論値付近まで強度が回復していることが確認できる。



### 3.5 炭素繊維シートを接着した鋼桁のせん断強度評価式

鋼桁のせん断強度の評価方法として Basler 式が用いられている。この理由は、式が簡易でその適用が容易であることと数多くの実験に対してせん断強度を比較的精度良く評価することによる。そこで、本節では、Basler 式に準じて、炭素繊維シートを腹板に貼り付けた鋼桁のせん断強度の評価を試みる。ここでは、二種類の評価方法について検討する。一つ目は、直交異方性である炭素繊維シートと等方弾性体である鋼板からなる積層板の弾性せん断座屈応力を厳密に計算して、せん断強度を評価する方法（以下、厳密法と記す）である。二つ目は、実務への適用を考え、炭素繊維シートが貼り付けられた腹板を鋼換算した合成断面として弾性せん断座屈応力の計算を簡易にし、せん断強度を評価する方法（以下、簡易法と記す）である。両者の比較を通じて、簡易手法の妥当性について検討する。

#### 3.5.1 Basler 式に準じた強度評価

Basler 式は次のようにあらわされる。

$$\frac{Q_u}{Q_y} = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1 - \tau_{cr}/\tau_y}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \quad (3.10)$$

ここで、 $Q_u$  はせん断強度、 $Q_y$  は降伏せん断強度、 $\tau_{cr}$  は弾性せん断座屈応力、 $\tau_y$  は降伏せん断応力 ( $= \sigma_y / \sqrt{3}$ )、 $\sigma_y$  は降伏応力、 $\alpha$  は腹板のアスペクト比 ( $=$  幅  $b$  / 高さ  $h$ ) である。右辺第 1 項が弾性座屈強度、第 2 項が後座屈強度を表わしている。

いま、せん断座屈試験の結果に基づいて、炭素繊維シートは鋼板の降伏まで引張応力に寄与すると考え、炭素繊維シートと鋼板のひずみが等しくなることに注意して、Basler 式を次のように変形する。

$$\frac{Q_u}{Q_y} = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1 - \tau_{cr}/\tau_y}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \left( 1 + \frac{E_L \bar{t}_c}{E_s t_s} \right) \quad (3.11)$$

ここで、 $E_L$  は炭素繊維シートの弾性主方向の弾性係数、 $\bar{t}_c$  は斜張力場に対して引張方向となる炭素繊維シートの総厚である。

#### 3.5.2 弾性せん断座屈応力

式(3.11)では、弾性せん断座屈応力  $\tau_{cr}$  の計算が必要となる。ここでは、腹板が鋼板からなる場合と炭素繊維シートと鋼板からなる場合のそれぞれについて  $\tau_{cr}$  の計算方法を示す。さらに、後者については、厳密に行う場合と簡易的に行う場合の 2 種類について述べる。

##### (1) 鋼板のみの場合

せん断桁の腹板が鋼板のみから成る場合、 $\tau_{cr}$  を純せん断を受ける四辺単純支持平板の弾性座屈応力  $\tau_e$  とすると、 $\tau_e$  はせん断座屈係数  $k_s$  を腹板のアスペクト比の関数として近似表現することで、陽な形式が導かれる<sup>3-7), 3-8)</sup>。

$$\tau_{cr} = \begin{cases} \tau_e & (\tau_e \leq 0.8\tau_y) \\ \sqrt{0.8 \cdot \tau_e \cdot \tau_y} & (\tau_e > 0.8\tau_y) \end{cases} \quad (3.12)$$

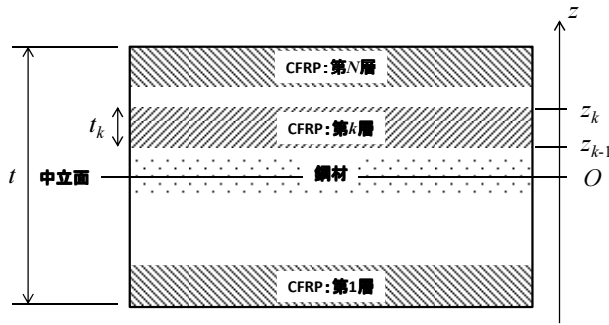


図-3.28 積層板の断面構成

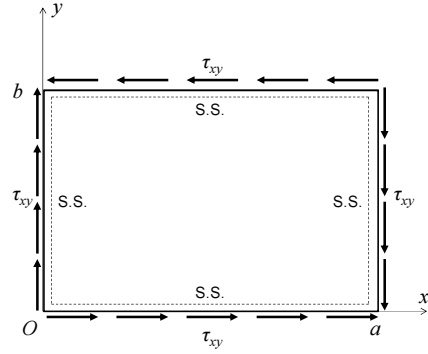


図-3.29 純せん断を受ける積層板

$$\tau_e = k_s \frac{\pi^2 E_s}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_s}{h} \right)^2 \quad (3.13)$$

$$k_s = \begin{cases} 5.34 + 4.00/\alpha^2 & (\alpha \geq 1.0) \\ 4.00 + 5.34/\alpha^2 & (\alpha < 1.0) \end{cases} \quad (3.14)$$

ここで、 $E_s$ は鋼板の弾性係数、 $\nu$ は鋼板のポアソン比、 $t_s$ は鋼板板厚を表す。

## (2) 炭素繊維シートと鋼板から構成される場合（厳密法）

本研究では、図-3.28に示すように、一方向強化繊維を樹脂で硬化させた直交異方弾性板を鋼板に積層させた積層板を対象とする。そのため、弾性座屈応力 $\tau_e$ は鋼板のみの場合とは異なり、陽な形式が存在せず、数値計算手法で求める必要がある<sup>3-9)</sup>。ここでは、文献3-9)と同様に、Rayleigh-Ritz法<sup>3-10), 3-11)</sup>を用いることにする。

いま、図-3.28の断面構成から成る積層板が、図-3.29に示すように四辺単純支持で純せん断を受ける問題を考える。CFRPは鋼板全面に貼り付けられているものとする。変形は面外方向のみに生じるものとし、面外変位を $w$ で表すと、平面応力状態にある積層板のひずみエネルギー $U$ は、まず単位面積あたりのひずみエネルギーを厚さ方向に積分して、次いで対象領域で積分することにより、次のように導出される。

$$U = \frac{1}{2} \int_A \left[ D_{xx} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + D_{yy} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + D_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + D_{ss} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 + D_{xs} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + D_{ys} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] dA \quad (3.15)$$

ここで、 $x$ と $y$ は空間座標、 $\partial$ は空間座標に関する偏微分、 $A$ は積分領域を表す。また、 $D_{xx}$ 、 $D_{yy}$ 、 $D_{xy}$ 、 $D_{ss}$ 、 $D_{xs}$ 、 $D_{ys}$ は曲げ剛性であり、 $N$ は積層板の積層数、 $k$ は $k$ 層目 ( $k = 1 \sim N$ ) を意味するものとして、次のように表される。

$$D_{xx} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{3} E_{xx}^{(k)} \bar{z}_k^3 \quad (3.16a)$$

$$D_{yy} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{3} E_{yy}^{(k)} \bar{z}_k^3 \quad (3.16b)$$

$$D_{xy} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{3} (E_{xy}^{(k)} + E_{yx}^{(k)}) \bar{z}_k^3 \quad (3.16c)$$

$$D_{ss} = \sum_{k=1}^N \frac{4}{3} E_{ss}^{(k)} \bar{z}_k^3 \quad (3.16d)$$

$$D_{xs} = \sum_{k=1}^N \frac{2}{3} (E_{xs}^{(k)} + E_{sx}^{(k)}) \bar{z}_k^3 \quad (3.16e)$$

$$D_{ys} = \sum_{k=1}^N \frac{2}{3} (E_{ys}^{(k)} + E_{sy}^{(k)}) \bar{z}_k^3 \quad (3.16f)$$

ただし,

$$\bar{z}_k^3 = z_k^3 - z_{k-1}^3 \quad (3.17)$$

また,  $E_{xx}^{(k)}$ などは $k$ 層目の積層板の弾性係数であり, 次のように表される<sup>3-12)</sup>.

$$[E^{(k)}] = \begin{bmatrix} E_{xx}^{(k)} & E_{xy}^{(k)} & E_{xs}^{(k)} \\ E_{yx}^{(k)} & E_{yy}^{(k)} & E_{ys}^{(k)} \\ E_{sx}^{(k)} & E_{sy}^{(k)} & E_{ss}^{(k)} \end{bmatrix} = [T^{(k)}] [A^{(k)}] [T^{(k)}]^T \quad (3.18)$$

ただし,

$$[A^{(k)}] = \begin{bmatrix} \frac{E_L^{(k)}}{1 - \nu_L^{(k)} \nu_T^{(k)}} & \frac{\nu_T^{(k)} E_L^{(k)}}{1 - \nu_L^{(k)} \nu_T^{(k)}} & 0 \\ \frac{\nu_L^{(k)} E_T^{(k)}}{1 - \nu_L^{(k)} \nu_T^{(k)}} & \frac{E_T^{(k)}}{1 - \nu_L^{(k)} \nu_T^{(k)}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{LT}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$[T^{(k)}] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_k & \sin^2 \theta_k & 2 \cos \theta_k \sin \theta_k \\ \sin^2 \theta_k & \cos^2 \theta_k & -2 \cos \theta_k \sin \theta_k \\ -\sin \theta_k \cos \theta_k & \sin \theta_k \cos \theta_k & \cos^2 \theta_k - \sin^2 \theta_k \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$E_L^{(k)}$ は弾性主方向の弾性係数,  $E_T^{(k)}$ は弾性主方向と直角となる方向の弾性係数,  $G_{LT}^{(k)}$ はせん断弾性係数,  $\nu_L^{(k)}$ は弾性主方向のポアソン比,  $\nu_T^{(k)}$ は弾性主方向と直角となる方向のポアソン比,  $\theta_k$ は $xy$ 座標系に

対する炭素繊維の配向角を表す。式(3.18)は、弾性主方向から角度  $\theta$  回転した  $xy$  座標系での弾性係数を与える座標変換を利用した関係式である。

図-3.28 に示したように、対象とする積層板の中央に位置する鋼板は等方性材料であるから、

$$E_L^{(k)} = E_T^{(k)} = E_s \quad (3.21a)$$

$$\nu_L^{(k)} = \nu_T^{(k)} = \nu_s \quad (3.21b)$$

$$G_{LT}^{(k)} = \frac{E_s}{2(1+\nu_s)} \quad (3.21c)$$

$$\theta_k = 0 \quad (3.21c)$$

となる。

次に、純せん断  $\tau_{xy}$  による仕事は、積層板の総厚を  $t$  とすると、以下のようにあらわされる。

$$V = \tau_{xy} t \int_A \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} dA \quad (3.22)$$

Rayleigh-Ritz 法では、式(3.14)の積分領域と境界条件に応じて、形状関数を設定する。

$$w = A_{mn} X_m Y_n \quad (3.23)$$

ここで、 $X_m$  は  $x$  の関数、 $Y_n$  は  $y$  の関数であり、 $m$  と  $n$  は総和規約に従う。

以上、式(3.15)、式(3.22)、式(3.23)から、全ポテンシャルエネルギー最小の原理は、次のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial A_{mn}} (U - V) = 0 \quad (3.24)$$

式(3.24)から、式(3.23)の  $A_{mn}$  に関する連立一次方程式が構成され、その固有値問題として、弾性座屈応力  $\tau_e$  が求まることとなる。

### (3) 炭素繊維シートと鋼板から構成される場合（簡易法）

3.5.2(2)で示した厳密法は、式が複雑であるため実務での使用には制約が生じる可能性がある。そこで、炭素繊維シートが貼り付けられた腹板を鋼換算した合成断面として弾性せん断座屈応力を簡易に評価する方法（簡易法）を検討する。

まず、炭素繊維シートと樹脂からなる CFRP の材料特性を複合則<sup>3-13), 3-14)</sup>を用いて算出する。ここで、CFRP は繊維軸方向と繊維軸直角方向で性質の異なる直交異方性板であるが、計算を簡易にするため、繊維軸方向の成分のみを用いることとする。これにより、CFRP と鋼材からなる積層板の板厚を算出し、式(3.12)、(3.13)に代入することで積層板としての弾性せん断座屈応力を得ることができる。

表-3.9 数値計算結果

項目		単位	記号	G1-1	G1-2	G1-3	G2-1	G2-2	G2-3	G2-4
簡易法	弾性せん断座屈応力	MPa	$\tau_{cr}$	95	132	175	46	81	83	82
	降伏せん断強度 (鋼桁のみ)	kN	$Q_y$	1,061	1,061	1,061	1,074	1,074	1,074	1,074
	弾性せん断座屈強度	kN	$Q_{cr}$	456	636	841	278	484	496	493
	後座屈強度	kN	$Q_t$	371	284	159	382	329	324	325
	終局せん断強度	kN	$Q_u$	827	920	1,000	660	813	820	818
	終局荷重	kN	$P_u$	1,216	1,353	1,471	980	1,206	1,217	1,214
厳密法	弾性せん断座屈応力	MPa	$\tau_{cr}$	95	100	107	46	49	47	47
	降伏せん断強度 (鋼桁のみ)	kN	$Q_y$	1,061	1,061	1,061	1,074	1,074	1,074	1,074
	弾性せん断座屈強度	kN	$Q_{cr}$	455	478	516	276	294	280	279
	後座屈強度	kN	$Q_t$	371	390	394	383	435	445	445
	終局せん断強度	kN	$Q_u$	826	868	910	659	728	726	724
	終局荷重	kN	$P_u$	1,215	1,276	1,338	978	1,081	1,077	1,075
実験での最大荷重		kN	$P_{max}$	1,182	1,255	1,328	918	1,173	1,186	1,162
簡易法 ( $Q_u$ ) / 厳密法 ( $Q_u$ )		-	-	1.00	1.06	1.10	1.00	1.12	1.13	1.13
簡易法 ( $P_u$ ) / 実験値 ( $P_{max}$ )		-	-	1.03	1.08	1.11	1.07	1.03	1.03	1.04
厳密法 ( $P_u$ ) / 実験値 ( $P_{max}$ )		-	-	1.03	1.02	1.01	1.07	0.92	0.91	0.92

### 3.5.3 数値計算結果と考察

#### (1) 厳密法と簡易法の実験値との比較

計算結果を表-3.9に示す。表には、厳密法、簡易法それぞれで得られる弾性せん断座屈応力  $\tau_{cr}$ 、鋼桁単体の降伏せん断強度  $Q_y$ 、弾性せん断座屈強度  $Q_{cr}$ 、後座屈強度  $Q_t$ 、終局せん断強度  $Q_u$ 、終局荷重  $P_u$  を示す。また、試験により得られた最大荷重も合わせて示す。なお、Rayleigh-Ritz法における形状関数は、xy方向の正弦関数とし、採用する項数は、形状関数の項数と座屈応力の収束率の検討から、 $N=20$  とした。

表-3.9より、簡易法と厳密法では、弾性せん断座屈応力  $\tau_{cr}$  に差が生じており、簡易法では厳密法に比べて3~6割程度大きく評価される結果となった。簡易法では、CFRPと鋼板からなる積層板の物性を鋼換算して求めるため、積層板としての総厚は小さくなるものの、CFRPのヤング率よりも大きな鋼板のヤング率を使用するため、弾性せん断座屈応力  $\tau_{cr}$  が大きくなる。そのため、簡易法における計算結果は、弾性せん断座屈強度  $Q_{cr}$  を過大に評価してしまうこととなる。一方で、厳密法とは異なり、繊維の配向角やCFRPの直交異方性を考慮していないことから、後座屈強度  $Q_t$  を過少評価することとなる。しかしながら、終局せん断強度についてみると、簡易法と厳密法の差は概ね10%前後となっている。図-3.30に示すように、Basler式に準じた本評価手法では、簡易法を用いた場合には、弾性せん断座屈強度が増加すると後座屈強度が減少するものの、終局せん断強度が増加するという関係にある。そのため、終局荷重に与える影響は小さかったものと考えられる。

また、実験値に対する誤差は、厳密法で-9~7%、簡易法で3~11%である。簡易法は厳密法に比べてわずかに大きい値を算定しているが、十分な評価精度を有していると言える。ただし、簡易法の適

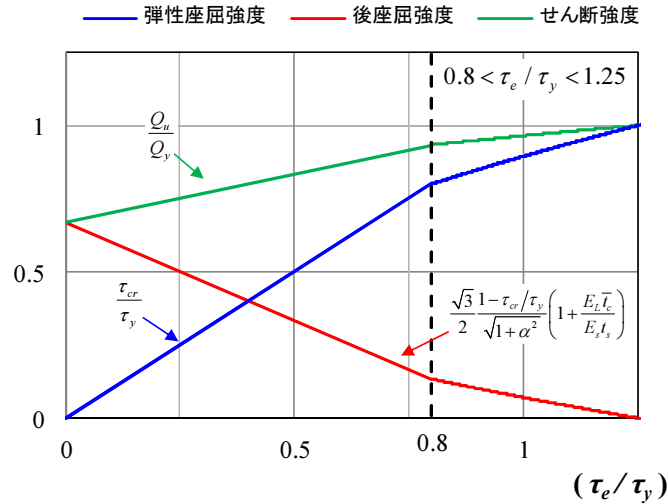


図-3.30 弾性せん断座屈強度とせん断強度の関係

用に当たっては、積層板の総厚や試験パネルのアスペクト比の大きさによって、評価精度に影響が出ることが考えられる。そこで、パラメトリック解析を実施して、簡易法と厳密法の誤差について検討を行う。

## (2) 厳密法と簡易法の誤差

パラメトリック解析で設定するパラメータは、弾性せん断座屈応力  $\tau_{cr}$  の算出に影響を与える積層板の総厚、腹板のアスペクト比とする。ここで、腹板高を 1,500 mm とし、腹板の板厚を、道示で規定される幅厚比 ( $h/t=152$ , SS400) を下回る 5 mm ( $h/t=300$ ), 6 mm ( $h/t=250$ ), 7 mm ( $h/t=214$ ) とした 3 ケースと腹板高を 1,000 mm とし、腹板厚を 5 mm ( $h/t=200$ ), 7 mm ( $h/t=143$ ), 9 mm ( $h/t=111$ ) とした 3 ケースの合計 6 ケースを検討する。試験パネルのアスペクト比は、1.0, 1.5, 2.0 の 3 ケースとし、炭素繊維シートの積層数は、腹板の片面あたり 2 層 (引張方向 1 層, 圧縮方向 1 層) ~ 10 層 (引張方向 5 層, 圧縮方向 5 層) までの 5 ケースを対象とする。以上より、パラメトリック解析で検討するケース数は 90 となる。なお、鋼板, CFRP の物性値には, G2-2 で使用したものをを用いることとする。ここで、図-3.30 に示すように、 $\tau_e/\tau_y=1.25$  のとき、後座屈強度が 0 となる。したがって、本検討ケースのうち、 $\tau_e/\tau_y \geq 1.25$  となるケースを除外した結果をまとめる。

図-3.31 に、簡易法と厳密法によるせん断強度の比較を示す。図の縦軸が厳密法によるせん断強度、横軸が簡易法によるせん断強度を示す。また、図中に示す破線は、厳密法と簡易法の誤差が  $\pm 10\%$  となることを示している。さらに、 $\Delta$ ,  $\square$ ,  $\circ$  印はそれぞれアスペクト比が 1.0, 1.5, 2.0 のグループを示している。図より、ほとんどのケースにおいて、簡易法では厳密法よりもせん断強度を大きく評価している。これは、前項で述べたように、簡易法では CFRP と鋼板の鋼換算した積層板としてせん断強度を計算するため、積層板としての総厚は小さくなるものの、積層板としてのヤング率が大きくなり、弾性せん断座屈応力  $\tau_{cr}$  が大きくなるためである。簡易法の厳密法に対する誤差は、概ね  $+10\%$  程度であり、また、厳密法と簡易法には相関が見られることから、簡易法の結果に適切な係数を乗じることによって、簡易法の精度を向上させることが可能であると言える。

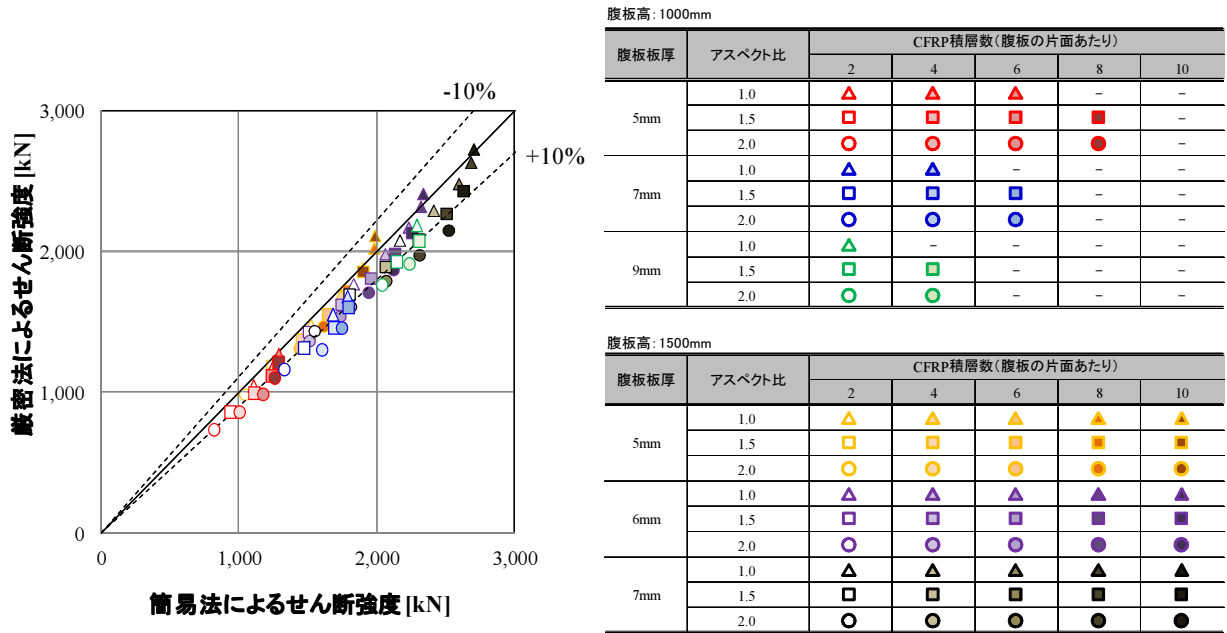


図-3.31 簡易法と厳密法によるせん断強度の比較

### 3.6 結 言

本章では、鋼桁端部の腹板を対象として、炭素繊維シートによる補修・補強工法の構築を目的とした。具体的には、腹板のアスペクト比を 1.0 と 1.5 とした鋼桁を製作し、その腹板に炭素繊維目付量、積層方法、補強方法をパラメータとして CFRP を貼り付け、せん断座屈試験を実施した。さらに、腐食を模擬した断面欠損を腹板に与え、「部分貼り工法」および「全面貼り工法」による補修効果について検討した。また、部分貼り工法における最適補修法について検討するため、補修量と腐食領域を変化させた試験体についてもせん断座屈試験を実施した。最後に、腹板に炭素繊維シートを接着した鋼桁のせん断座屈強度を評価するための計算手法について検討し、Basler 式に準じた評価手法を提案した。本研究から得られた知見を以下に示す。

- 1) 健全な腹板に対して炭素繊維シートを全面に貼り付けた G1 および G2 シリーズの結果より、炭素繊維シートを貼り付けることでせん断強度が増加することを確認した。その増加率は、腹板アスペクト比 1.0 の無補強の鋼桁に対して、炭素繊維目付量  $150\text{g/m}^2$  の CFRP を貼り付けた場合に約 6%、炭素繊維目付量  $300\text{g/m}^2$  の CFRP を貼り付けた場合に約 12%となった。また、腹板アスペクト比 1.5 の無補強の鋼桁に対して、炭素繊維目付量  $300\text{g/m}^2$  の CFRP を貼り付けた場合は、約 27~29%の強度増加となった。
- 2) 炭素繊維シートの配向角と強度改善効果の関係をみるために、G2-2 では繊維の配向方向を Basler 式の仮定と同じ  $\pm 45$  度方向とし、G2-3 では繊維の配向方向を腹板の対角線方向 ( $\pm 33.7$  度方向) とした。試験結果から、強度増加は、G2-2 で約 28%、G2-3 で約 29%となり、ほぼ同様な値を示した。CFRP の破壊は、炭素繊維の配向角に沿った方向に生じた。
- 3) 全面貼り工法における合理的な貼り付け範囲について検討した G2-4 の強度増加率は、約 27%となり腹板全面に炭素繊維シートを貼り付けた G2-2 や G2-3 と同様の値を示した。したがって、腹板に

発生する斜張力場領域を覆うように炭素繊維シートを貼り付けることでより合理的に強度を増加させることが可能であることを示した。

- 4) 腹板の板厚減少量をパラメータとし、板厚を 50%減少させたケース(G3 シリーズ)と板厚を 100%減少させたケース(G4 シリーズ)で試験を実施した。その結果、無補修の鋼桁では、耐力が G3 で 10.4%、G4 で 21.0%低下する結果となった。
- 5) 補修方法として、炭素繊維シートを部分的に貼り付ける部分貼り工法と腹板全面に貼り付ける全面貼り工法の 2 種類について検討した。この結果、いずれの補修方法を用いた場合でも、健全時のせん断強度まで回復させることが可能となることを確認した。
- 6) 部分貼り工法における最適補修量を検討するために実施した G5 シリーズの結果より、積層数を半分とした場合には期待される強度回復効果が確認できなかった。したがって、部分貼り工法における補修量は、必要補修量を腹板パネルの引張方向および圧縮方向にそれぞれ貼り付ける方法とするのが望ましい。
- 7) 腐食幅が補修効果に与える影響を確認するために、欠損幅を試験パネルの 1/2 領域とした鋼桁のせん断座屈試験を実施した (G6 シリーズ)。本試験より、腹板パネルの支点側の 1/2 幅が完全に欠損している場合であっても、せん断強度の低下は見られなかった。このことから、本試験のように腐食高さが腹板高さの 1 割未満という条件であれば、パネルの支点側 1/2 領域が腐食しているような状態については、せん断補修の対象とする必要がないと言える。ただし、支点部柱としての強度低下に結びつく位置であるため、柱としての補修対策は必要である。
- 8) 腐食高さが補修効果に与える影響を確認するために、欠損高さを 200 mm とした鋼桁のせん断座屈試験を実施した (G7-1, G7-2)。この結果、部分貼り工法を適用した G7-2 では、健全モデルである G7-0 に対して、強度改善効果が 99.2 % となった。このことから、腐食領域が高い場合についても、本工法の有効性が確認された。
- 9) Basler 式を用いて、CFRP を腹板に貼り付けた鋼桁のせん断強度の評価を試みることにした。CFRP が貼付けられた腹板は積層板となることから、弾性せん断座屈強度の算出について厳密法と簡易法の 2 種類の方法を検討した。提案した方法は、厳密法では-8%~7%、簡易法では 3%~11%の誤差であり、いずれの方法でも、せん断強度を評価することが可能である。

#### 参考文献

- 3-1) 劉翠平, 宮下剛, 長井正嗣: 端部パネルの局部腐食をもつ I 形断面桁のせん断耐力に関する考察, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.715-723, 2011.
- 3-2) (公社) 土木学会 複合構造委員会: 複合構造レポート 5 FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端, 丸善出版, 2012.
- 3-3) Konrad Basler: Strength of Plate Girders in Shear, Journal of the STRUCTURAL DIVISION, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, pp.151-197, 1961.
- 3-4) 西村宣男, 玉田和也, 小野潔: 鋼桁橋を対象とした強度設計の性能規定化, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.87-96, 2007.
- 3-5) 杉浦江, 小林朗, 大垣賀津雄, 稲葉尚文, 富田芳男, 長井正嗣: 鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.806-813, 2008.
- 3-6) 大木法文, 本橋健司, 犬飼達雄: 連続繊維シート工法の標準化に関する研究 その 4 連続繊維



シーートの引張り強度に及ぼす出隅部曲率半径の影響, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.351-352, 1999.

- 3-7) Timoshenko S. P. and Gere J. M. : Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill Book, 1963.
- 3-8) 中井博, 北田俊行 : 鋼橋設計の基礎, 共立出版, 1992.
- 3-9) Leissa A. W.: A review of laminated composite plate buckling, Applied Mechanics Reviews, ASME, Vol.40, No.5, pp..575-591, 1987.
- 3-10) Young D.: Vibration of Rectangular Plates by the Ritz Method, Journal of Applied Mechanics, Vol.17, pp.482-452, 1950.
- 3-11) S.T. Smith, M.A. Bradford and D.J. Oehlers: Elastic buckling of unilaterally constrained rectangular plates in pure shear, Engineering Structures, Vol.21, pp.443-453, 1999.
- 3-12) 小林繁夫, 近藤恭平 : 弾性力学, 培風館, 1987.
- 3-13) 日本複合材料学会編 : 複合材料ハンドブック, 日刊工業新聞社, 1989.
- 3-14) 末益博志 : 入門複合材料の力学, 培風館, 2009.



## 第4章

### 鋼橋支点部の力学挙動に関する検討

#### 4.1 緒言

橋梁支点部は、力学的に軸方向力（圧縮力）を受ける箇所である。第1章で述べたように、鋼橋に生じる腐食は、支点部やその近傍の腹板で多く発生する。道路橋示方書<sup>4-1)</sup>においては、支点反力は支点上垂直補剛材と近傍の腹板（片側あたり腹板板厚の12倍の範囲）からなる十字断面で抵抗するように設計される。そのため、支点上の十字断面の一部が腐食により断面欠損を生じると、**図-4.1**に示すような局部座屈が先行する終局モードとなり、耐荷力が急激に低下することとなる。

そこで、本章では、鋼橋支点部に生じた腐食による断面欠損を対象として、炭素繊維シート接着工法の適用性を確認するための圧縮試験を実施する。まず、炭素繊維シートの接着方法及び補修効果を検討することを目的として十字断面柱の圧縮試験（以下、柱タイプ圧縮試験と記す）を実施する。次いで、支点部垂直補剛材および近傍の腹板が腐食した場合を想定した鋼桁の圧縮試験（以下、桁タイプ圧縮試験と記す）の2つの試験を実施する。柱タイプ試験では、炭素繊維シートによる補修効果の基礎的な知見を得ることを目的とする。このとき、寸法等に制約があるため、炭素繊維シートの積層数は2層程度となる。桁タイプ試験では、実際の腐食状態として多く見受けられる支点部垂直補剛材と腹板が同時に損傷を受けた状態を想定して、施工性を考慮した炭素繊維シートの貼り付けパターンについて、その補修効果を確認することとした。

炭素繊維シートの貼り付け方法としては、**図-4.2**に示す2種類の方法を検討する。**図-4.2(a)**は、下フランジとの接合部を、不陸修正用パテ材を用いてR50mm<sup>4-2)</sup>の形状に成型し、下フランジに炭素繊維シートを定着させ、下フランジへ応力伝達させることを意図した貼り付け方法である。ここで、支点部垂直補剛材とその近傍の腹板が同時に腐食を生じている場合においては、両部材の補修が必要となる。この方法をそれぞれに適用すると、炭素繊維シート同士が干渉し、垂直補剛材と腹板の交点付近での接着が不可能となる。そこで、**図-4.2(b)**に示すような下フランジに定着せずに貼り付ける方法についても検討することとした。

炭素繊維シートの積層数は、第2章と同様、炭素繊維シートの厚さを鋼換算し、断面欠損量を補うようにシート枚数を決定する。腐食損傷による板厚減少量を $\bar{t}_s$ とすると、炭素繊維シートの積層数 $n$ は、鋼換算した炭素繊維シートの厚さが $\bar{t}_s$ 以上となるようにすればよい。したがって、積層数 $n$ は次式で与えられる。

$$n \geq \frac{E_s}{E_{cf}} \cdot \frac{\bar{t}_s}{t_{cf}} \quad (4.1)$$

ここで、 $E_{cf}$ 、 $t_{cf}$ はそれぞれ炭素繊維シートの弾性係数（=640 GPa）と設計厚さ（=0.143 mm）、 $E_s$ は鋼材の弾性係数（=200 GPa）を示している。なお、本研究で使用した炭素繊維シートは、高弾性型炭素繊維シートであり、1層あたりの鋼換算厚は、0.4576 mm（=640 GPa / 200 GPa × 0.143 mm）である。



図-4.1 支点部垂直補剛材の局部座屈

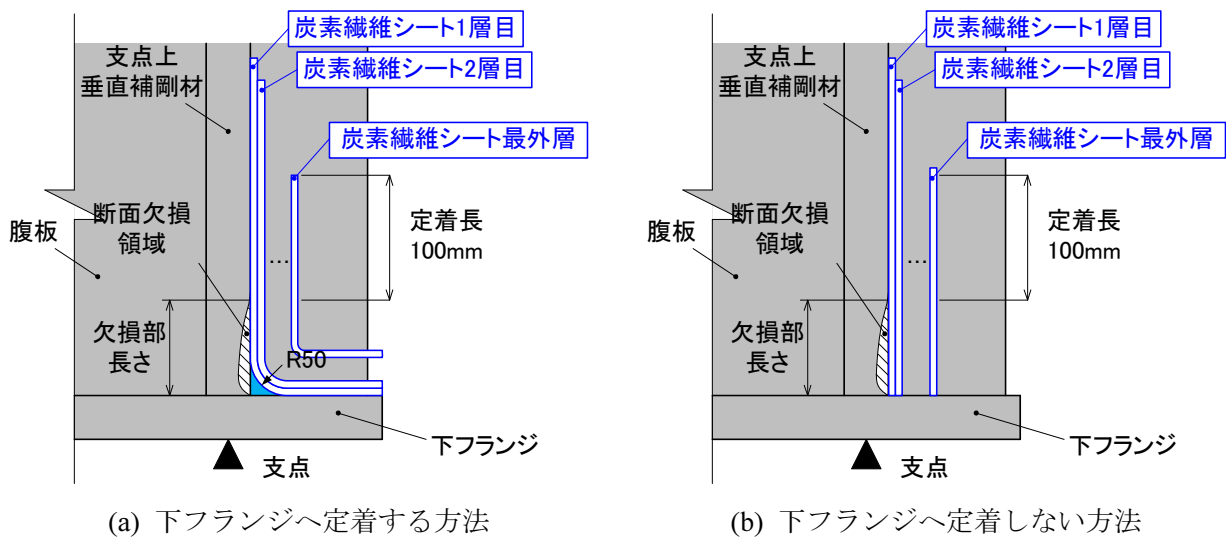


図-4.2 支点部下端への炭素繊維シート接着方法

## 4.2 十字断面柱の圧縮試験

### 4.2.1 試験概要

#### (1) 試験体

本試験に用いる試験体形状を図-4.3に示す。試験体の寸法は、補剛材と腹板の板厚をそれぞれ16mmと8mmとし、突出幅を補剛材で120mm、腹板で50mmとした。ここで、道路橋示方書では、腹板の有効幅は腹板板厚の12倍とされており、板厚8mmの場合には有効幅は96mmとなるが、本試験では、腹板での局部座屈を生じさせない形状とするために、突出幅を50mmとした。また、全体座屈も生じないようにするために、腹板高さを250mmとして、細長比パラメータが0.2を下回るように設定した。

#### (2) 試験ケース

試験ケースを表-4.1に基づいて説明する。本試験では、補剛材のみに腐食を模擬した断面欠損を与えることとし、欠損量の異なる5つの試験シリーズを作製した。損傷のない健全な試験体をC1とし、補剛材下端から50mmの高さで板厚を14mmとしたケースをC2シリーズ、補剛材下端から100mmの高

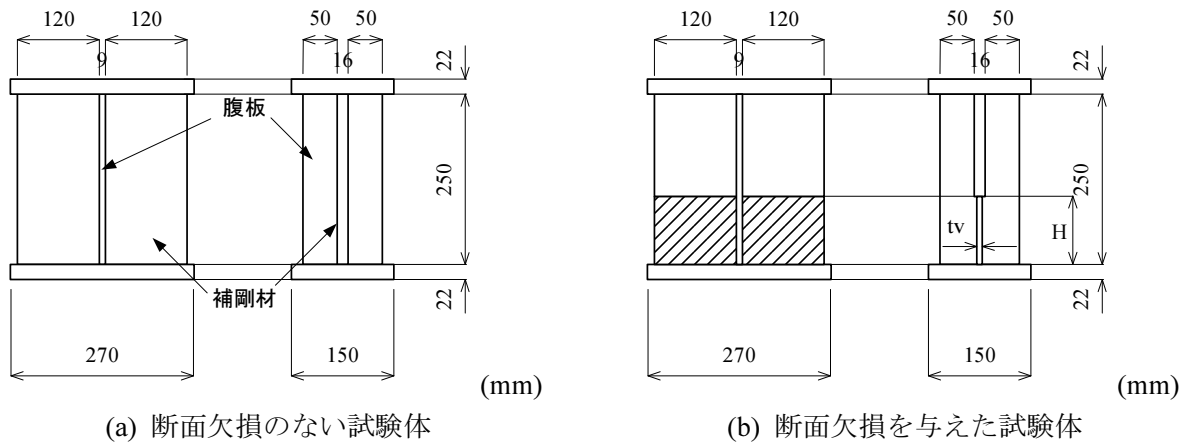


図-4.3 試験体形状

表-4.1 試験ケース

試験体番号	補剛材板厚 tv	欠損高さ H	必要補修量※	積層数※	下フランジとの定着
C1	16 mm	-	-	-	-
C2-1	14 mm (87.5%)	50 mm	2.2 層	-	-
C2-2				2 層	○
C2-3				2 層	×
C3-1	14 mm (87.5%)	100 mm	2.2 層	-	-
C3-2				2 層	○
C3-3				2 層	×
C4-1	8 mm (50.0%)	100 mm	8.8 層	-	-
C4-2-1				2 層	○
C4-2-2				2 層	×
C4-3-1					
C4-3-2					
C5-1	6 mm (37.5%)	100 mm	11.0 層	-	-
C5-2				2 層	○
C5-3				2 層	×

※補剛材の片面あたり

さで板厚を 14 mm, 8 mm, 6 mm としたケースをそれぞれ C3, C4, C5 シリーズと名付ける。いずれの試験シリーズにおいても、補剛材の板厚減少量が両面で等しくなるようにザグリ加工を施した。次に炭素繊維シートによる補修方法について説明する。欠損を与えた試験シリーズでは、無補修のケースが 1 体、炭素繊維シートにより補修したケースが 2 体、合計 3 体の試験を実施する。炭素繊維シートの貼り付け方法は、4.1 節で述べたように、下フランジとの定着を設けるケースと設けないケースの 2 種類とし、定着の有無が補修効果に与える影響について検討することとした。

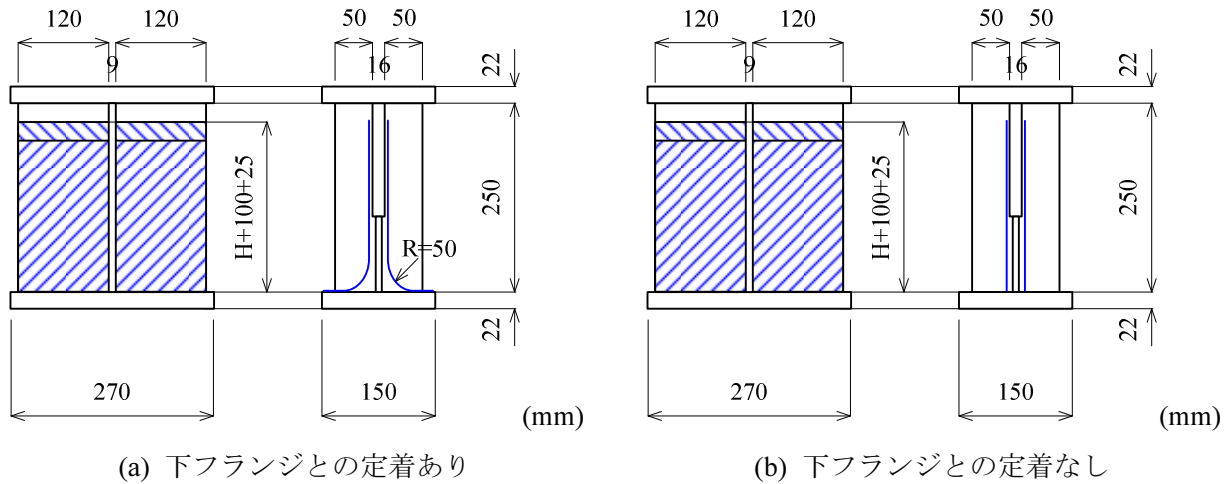


図-4.4 炭素繊維シートの貼り付け方法

ここで、C4 シリーズのうち、炭素繊維シートで補修した 2 ケースについては、再試験を実施した。この理由は、1 体目の試験結果から、下フランジとの定着を設けたケースで、定着を設けないケースに比べて、低い荷重で剛性が低下したため、この再現性を確認するためである。また、G5 シリーズについては、この再試験と合わせて追加した、断面欠損量を多くした試験ケースとなっている。

### (3) 補修方法

4.1 節に示した式(4.1)より、炭素繊維シートの積層数（補剛材の片面あたり）は、C2、C3 シリーズで 2.2 層、C4 シリーズで 8.8 層、C5 シリーズで 11.0 層となるが、ここでは、炭素繊維シートによる基本的な補修効果に関する知見を得るために、いずれの試験においても積層数は補剛材の片面あたり 2 層として炭素繊維シートを貼り付けた。炭素繊維シートの貼り付け形状を図-4.4 に示す。下フランジと定着を設けたケースと設けないケースの両者ともに、炭素繊維シートの上端には 25 mm のずらし<sup>4-3)</sup>を設け、応力集中が生じないようにシートを積層した。

### (4) 材料特性

使用した鋼材は SS400 材であり、材料試験結果より、降伏応力は腹板で 324 MPa、補剛材で 275 MPa である。追加試験として実施した C4-2-2、C4-3-2、C5 シリーズについては、腹板で 319 MPa、補剛材で 267 MPa であった。使用した炭素繊維シートは、高弾性型の一方向炭素繊維シートであり、炭素繊維目付量は 300 g/m<sup>2</sup>、厚さ 0.143 mm である。引張試験の結果、弾性係数は 701 GPa、引張強度は 2,625 MPa であった。

### (5) 試験方法

試験は、載荷容量 2,000 kN の万能試験機を用いた。ここでは、試験体が一様な圧縮を受けるように、図-4.5 に示す各ひずみゲージの値が 100 μ 程度の範囲に収まるように試験体を設置し、弾性範囲内での予備載荷を 2~3 回繰り返した後、終局まで荷重を漸増させた。荷重の制御は荷重-ひずみ関係の線形性が保たれる範囲内では荷重制御により行い、線形性が失われてからは変位制御とした。図-4.6 に試験状況を示す。

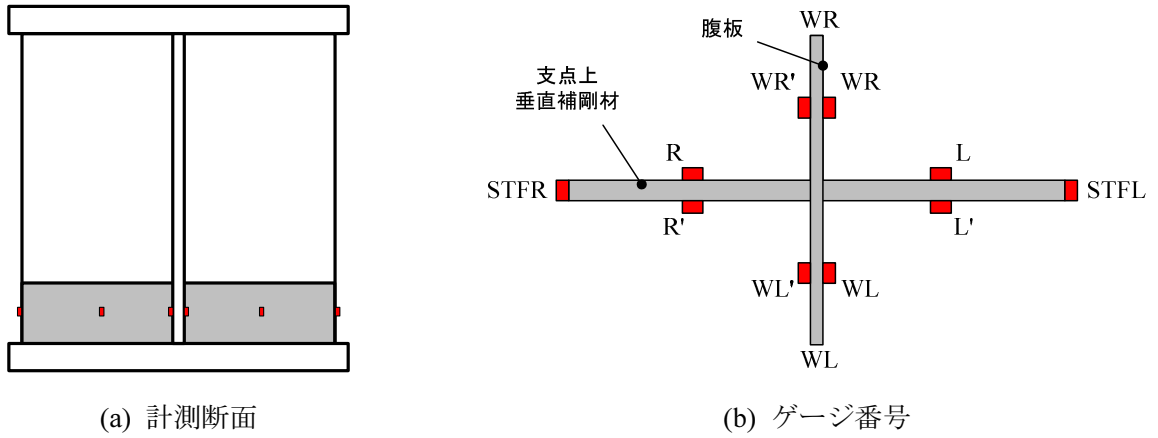


図-4.5 ひずみ計測位置



図-4.6 試験状況

4.2.2 試験結果と考察

(1) 破壊形態

試験後の試験体状況を図-4.7に示す。これより、健全モデルであるC1や欠損量の少ないC2, C3シリーズでは、補剛材の変形がほとんどないのに対して、補剛材板厚を50%以上欠損させたC4, C5シリーズでは、欠損部で局部座屈を生じていることが確認できる。





	無補修	補修 下フランジとの定着あり	補修 下フランジとの定着なし
C1			
C2			
C3			
C4			
C4 追加			
C5			

図-4.7 試験終了後の試験体状況



(2) 終局強度の評価

断面欠損を生じた補剛材は三辺単純支持一辺自由支持の板であることから、終局強度として以下に示す福本式を用いる。福本式を採用した理由は、現行の道路橋示方書では安全すぎる評価を与えてしまうためである<sup>44)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} &= \left( \frac{0.7}{R} \right)^{0.64} && (R > 0.7) \\ \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} &= 1.0 && (R \leq 0.7) \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

ここで、 $\sigma_{cr}$  は終局強度、 $\sigma_y$  は鋼材の降伏応力、 $R$  は幅厚比パラメータである。 $R$  は下式で与えられる。

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (4.3)$$

ここで、 $b$  は補剛材の突出幅、 $t$  は補剛材板厚、 $\nu$  はポアソン比 (=0.3)、 $k$  は座屈係数 (=0.425) である。式(4.2)の終局状態は、 $R > 0.7$  で局部座屈、それ以外で降伏となる。なお、炭素繊維シートで補修したケースの補剛材板厚には、炭素繊維シートを鋼換算した厚さを含むものとする。表-4.2 に各試験ケースについて式(4.3)から計算される幅厚比パラメータ  $R$ 、終局状態、終局荷重を示す。この結果、C1～C3 シリーズでは、 $R < 0.7$  となり全断面で降伏、C4、C5 シリーズについては  $R > 0.7$  となって局部座屈が発生して終局に至る。

次に、試験結果について終局状態と終局荷重を整理する。図-4.8 は、ひずみの変化点を明確とするために、荷重  $P$  とひずみ  $\varepsilon$  を  $P - \varepsilon^2$  曲線として示したものである。ここで、ひずみは補剛材の両面に貼り付けたひずみゲージの差から算出したひずみの曲げ成分である。 $P - \varepsilon^2$  曲線の勾配が急変した点から、

表-4.2 終局荷重の評価

試験体 番号	幅厚比 パラメータ $R$	終局状態	終局荷重 [kN]
C1	0.448	降伏	1,393
C2-1	0.513	降伏	1,262
C2-2	0.453	降伏	1,382
C2-3	0.453	降伏	1,382
C3-1	0.513	降伏	1,262
C3-2	0.453	降伏	1,382
C3-3	0.453	降伏	1,382
C4-1	0.897	局部座屈	695
C4-2-1	0.730	局部座屈	910
C4-2-2	0.720	局部座屈	910
C4-3-1	0.730	局部座屈	893
C4-3-2	0.720	局部座屈	893
C5-1	1.179	局部座屈	475
C5-2	0.903	局部座屈	663
C5-3	0.903	局部座屈	663

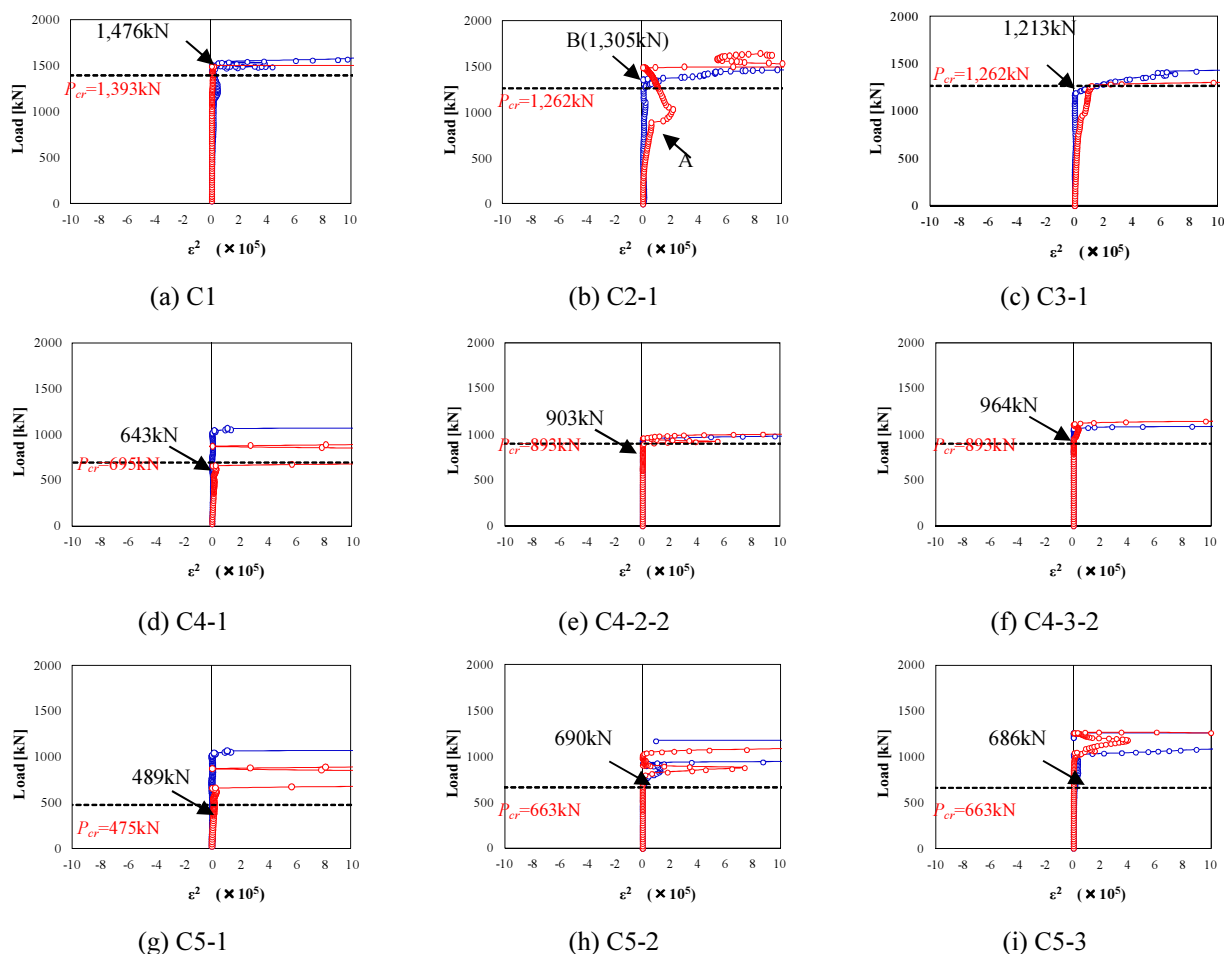


図-4.8 荷重-ひずみ関係 ( $P - \varepsilon^2$  関係)

終局荷重を読み取ることとした。図中の○印が左右の補剛材の曲げひずみ成分を、黒の破線は式(4.2)から計算される終局荷重(局部座屈荷重あるいは降伏荷重)を示す。ただし、炭素繊維シートを貼り付けたケースについては、追加試験でのみ補剛材表面のひずみを測定している(シート貼り付け前にひずみゲージを埋め込んでいる)。よって、C4-2-2、C4-3-2、C5 シリーズについてのみ結果を示す。

図より、断面欠損がないC1試験体では、降伏荷重(1,393 kN)を超えてから勾配が急変しており、降伏で終局に至ったと言える。また、C2-1では、図中の矢印Aの部分で勾配の変化が見られるが、これは塑性化が局部的に進行したことによるものであり、局部座屈の発生を意味するものではないと考えられる。その後、降伏荷重(1,262 kN)を超えてから勾配が急変していることから、降伏により終局に至ったということがわかる。C3-1でも同様に、降伏荷重(1,262 kN)を超えてから勾配が急変しており、C1~C3シリーズでは、表-4.2に示したとおり、降伏により終局に至ったことが確認できた。一方、補剛材の残存板厚をそれぞれ8mmと6mmとしたC4シリーズやC5シリーズでは、いずれも終局荷重付近で勾配が急変しており、ここで補剛材の断面欠損部に局部座屈が発生したと考えられる。このときの荷重は式(4.2)から算出される終局荷重に対して10%程度の誤差となっている。

さらに、炭素繊維シートを貼り付けた試験体について、シート表面に貼り付けたひずみゲージの値から、炭素繊維シートの破壊荷重を評価する。炭素繊維シートの破壊については、破壊が生じた際(試験時に音が発生したタイミングを考慮)に、急激にひずみが増加した点とした。また、炭素繊維シート上

表-4.3 終局荷重一覧

試験体 番号	炭素繊維シートの破壊荷重 [kN]					終局荷重 [kN]		破壊過程
	L	L'	R	R'	最小値	計算値	実験値	
C1	-	-	-	-	-	1,393	1,476	降伏
C2-1	-	-	-	-	-	1,262	1,305	降伏
C2-2	1,318	1,304	1,472	1,544	1,304	1,382	※	シート⇒降伏
C2-3	1,490	1,480	1,421	1,488	1,421	1,382	※	降伏⇒シート
C3-1	-	-	-	-	-	1,262	1,213	降伏
C3-2	1,444	1,213	1,419	1,421	1,213	1,382	※	シート⇒降伏
C3-3	1,235	1,256	1,235	1,283	1,235	1,382	※	シート⇒降伏
C4-1	-	-	-	-	-	695	643	局部座屈
C4-2-1	1,170	1,084	1,029	1,058	1,029	910	※	局部座屈⇒シート
C4-2-2	988	980	931	953	931	893	903	局部座屈⇒シート
C4-3-1	932	981	981	1,031	932	910	※	シート⇒局部座屈
C4-3-2	876	1,026	852	726	726	893	964	シート⇒局部座屈
C5-1	-	-	-	-	-	475	489	局部座屈
C5-2	903	889	800	800	800	663	690	局部座屈⇒シート
C5-3	644	537	843	728	537	663	686	シート⇒局部座屈

※ 鋼材表面にひずみを埋め込んでいないため、座屈荷重を判定できず

に設置した4点の計測点から得られた荷重のうち、最小値を炭素繊維シートの破壊荷重として採用する。  
表-4.3 に各試験体における終局荷重一覧を示す。

表-4.3 より、まず、補剛材で局部座屈が発生せず、降伏で終局に至った C2, C3 シリーズでは、いずれも降伏荷重に近い荷重で炭素繊維シートの破壊が生じている。このことから、局部座屈が発生しないケースについては、鋼材の降伏荷重付近で炭素繊維シートの破壊が生じると言える。次に、局部座屈で終局に至った C4, C5 シリーズについてみる。炭素繊維シートを下フランジに定着させた C4-2 および C5-2 では、炭素繊維シートの破壊荷重が局部座屈荷重よりも大きくなっているのに対して、下フランジへの定着を設けていない C4-3 と C5-3 では、炭素繊維シートの破壊荷重が局部座屈荷重よりも小さくなっていることがわかる。このことから、下フランジとの定着を確保することによって、炭素繊維シートを定着しない場合に比べて、炭素繊維シートの破壊を防ぐことができると言える。しかし、下フランジへの定着の有無によらず両者の局部座屈荷重は概ね等しいことから、炭素繊維シートによる強度改善に与える影響はほとんどないと言える。

### (3) 強度改善効果

各シリーズの炭素繊維シートを貼り付けた試験体と貼り付けていない試験体の荷重の比を強度改善

表-4.4 強度改善効果

試験体 番号	補剛材		評価荷重 [kN]			強度改善効果	
	板厚	降伏応力	局部座屈	シートの 破壊荷重	最大荷重	補修／無補修 (局部座屈荷重)	補修／無補修 (最大荷重)
C4-1	8 mm	274.7	643	-	1,216	-	-
C4-2-1		274.7	-	1,029	1,485	-	1.22
C4-2-2		267.0	903	931	1,347	1.40	1.11
C4-3-1		274.7	964	932	1,383	-	1.14
C4-3-2		267.0	-	726	1,396	1.50	1.15
C5-1		6 mm	267.0	489	-	1,016	-
C5-2	267.0		690	800	1,192	1.41	1.17
C5-3	267.0		686	537	1,268	1.40	1.25

効果と定義し、計算結果を表-4.4 に示す。ただし、終局状態が降伏となったために最大荷重が得られなかった C1～C3 シリーズは除く。

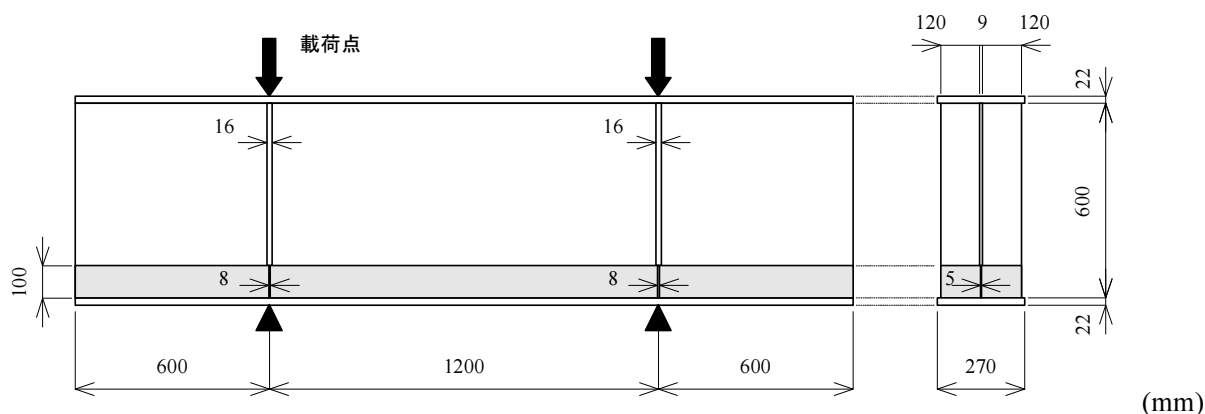
局部座屈荷重の比で評価する場合、C4 シリーズでは強度改善効果は 40～50 % となり、C5 シリーズでは 40 % となる。一方、最大荷重の比で評価する場合、いずれのケースについても強度改善効果は 10 % 以上となる。この結果から、本工法を用いることで十分な強度改善が得られると言える。

### 4.3 腐食を模擬した桁支点部の圧縮試験

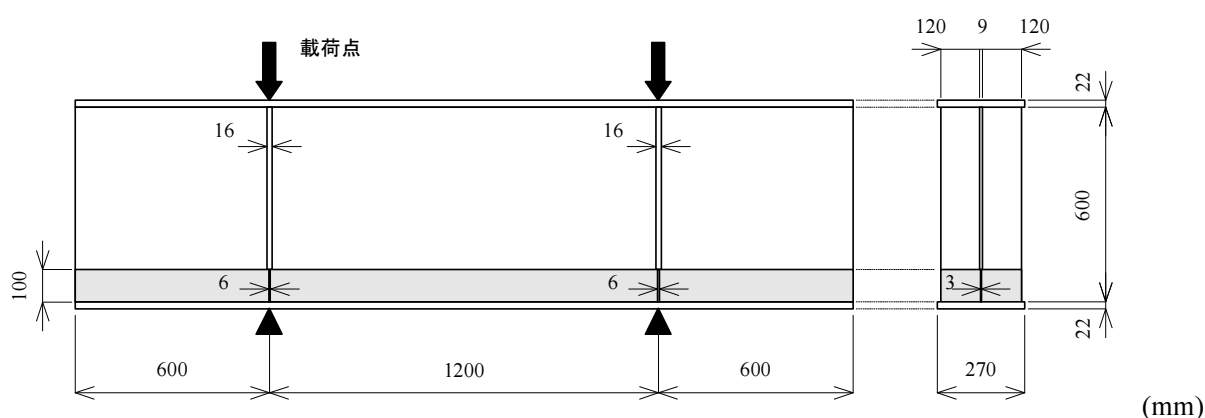
#### 4.3.1 試験概要

##### (1) 試験体

製作した試験体の寸法を図-4.9 に示す。本試験では、1 体の鋼桁について 2 か所で圧縮試験を実施する。そのため、両者の試験に影響が出ないようにするため支間長を 1,200 mm とした。また、炭素繊維シートの積層枚数を多くできるように桁高を 600 mm とした。使用した鋼材は、鋼種 SS400（降伏応力は、腹板で 270.7 MPa、補剛材で 276.0 MPa である）である。ここで、全体座屈が生じないようにするため、道示で規格されているように、腹板の有効幅を補剛材中心から片側当たり、腹板板厚の 12 倍とした断面積を用いて細長比パラメータを計算し、0.2 を下回るように寸法を決定した。補剛材と腹板の板厚については、をそれぞれ 16 mm と 9 mm とした。本試験では、垂直補剛材とその周辺の腹板が腐食した場合を想定しているため、補剛材と腹板の板厚が同程度損傷した状態を模擬した断面欠損を与えることとした。このとき、損傷の高さが補剛材下端から 100 mm で補剛材の残存板厚を 8 mm、腹板の残存板厚を 5 mm としたケースを GC1 シリーズ、損傷の高さが補剛材下端から 100 mm で補剛材の残存板厚を 6 mm、腹板の残存板厚を 3 mm としたケースを GC2 シリーズと名付ける。



(a) GC1 シリーズ



(b) GC2 シリーズ

図-4.9 試験体形状

## (2) 試験ケース

試験ケースを表-4.5 に基づいて説明する．ここでは，補剛材と腹板に与えた断面欠損を，(A) 補剛材のみで補うケース（補修方法 A），(B) 腹板のみで補うケース（補修方法 B），(C) 補剛材と腹板をそれぞれ補うケース（補修方法 C）の 3 パターンの補修方法について検討する．これらの補修方法を検討する理由は，桁端部の補剛材あるいは腹板に，落橋防止装置が取り付けられている場合や施工に必要な足場が確保できないなどの理由で，両者を補修することが困難となる場合に対しても補修が可能となるか検討するためである．GC1, GC2 シリーズともに，無補修，補修方法 A～C の 4 つの試験を実施し，炭素繊維シートによる強度改善効果について確認する．

炭素繊維シートの貼り付け枚数については，前節と同様，式(4.1)により算出する．これより，GC1 シリーズでは，補剛材の片面あたり 8.8 層，腹板の片面あたり 4.4 層となり，GC2 シリーズでは，補剛材の片面あたり 11.0 層，腹板の片面あたり 6.6 層となる．GC1 シリーズの補修方法 A では，補剛材と腹板の板厚減少量を補剛材のみで補うため，補剛材の片面に 13 層（ $8.8 + 4.4 = 13.2$  層）の炭素繊維シートを貼り付けることとした．補修方法 B では，補修方法 A とは逆に，補剛材と腹板の板厚減少量を腹板のみで補うことから，腹板の片面あたり 13 層の炭素繊維シートを貼り付ける．補修方法 C については，補剛材と腹板の両者をそれぞれ補うことから，補剛材は片面あたり 9 層，腹板は片面あたり 4 層の炭素繊維

表-4.5 試験ケース

試験体 番号	残存板厚		必要補修量*		補修方法	積層数
	補剛材	腹板	補剛材	腹板		
GC1-N					-	-
GC1-A	8 mm (50.0 %)	5 mm (55.5 %)	8.8 層	4.4 層	A	補：13層 腹：0層
GC1-B					B	補：0層 腹：13層
GC1-C					C	補：9層 腹：4層
GC2-N					-	-
GC2-A	6 mm (37.5 %)	3 mm (33.3 %)	11.0 層	6.6 層	A	補：13層 腹：0層
GC2-B					B	補：0層 腹：13層
GC2-C					C	補：9層 腹：4層

\* 補剛材，腹板とも片面あたりの必要枚数

維シートを貼り付けることとした。GC2 については，炭素繊維シートの貼り付け枚数を GC1 と同様とした。この理由については，試験体の寸法を腹板高さ 600 mm としているため，積層できる枚数に制限があることによる。したがって，炭素繊維シートの積層枚数を補修設計から要求される必要枚数よりも少なくした場合の補修効果について検討することとした。

### (3) 炭素繊維シートの貼り付け方法

炭素繊維シートの貼り付け方法については，前節と同様の方法を用いる。ここで，補修方法 A では，補剛材のみを補修するため，下フランジとの定着は設けずに積層する。これは，柱タイプ試験の結果から，定着の有無が強度改善効果に与える影響がないということが確認されているためである。これに対して，補修方法 B では，腹板のみを補修する方法であり，第3章で提案した腹板の補修方法に合わせて，下フランジとの定着を設けることとした。また，補修方法 C については，両者を組み合わせて補修することで，互いのシートが干渉しないように貼り付けた。各補修方法における炭素繊維シートの貼り付け形状を図-4.10 に示す。

### (4) 試験方法

载荷は，载荷容量 2,000kN のアクチュエータを用いて行う。試験体をセットした後，弾性範囲内での予備载荷を 2, 3 回繰り返した。そして，終局荷重まで荷重を漸増させた。試験の様子を図-4.11 に示す。载荷システムの制御方法については，これまでの試験と同様，荷重とひずみの関係が線形性を保つ範囲では荷重制御により行い，線形性が失われたのちは変位制御により行った。

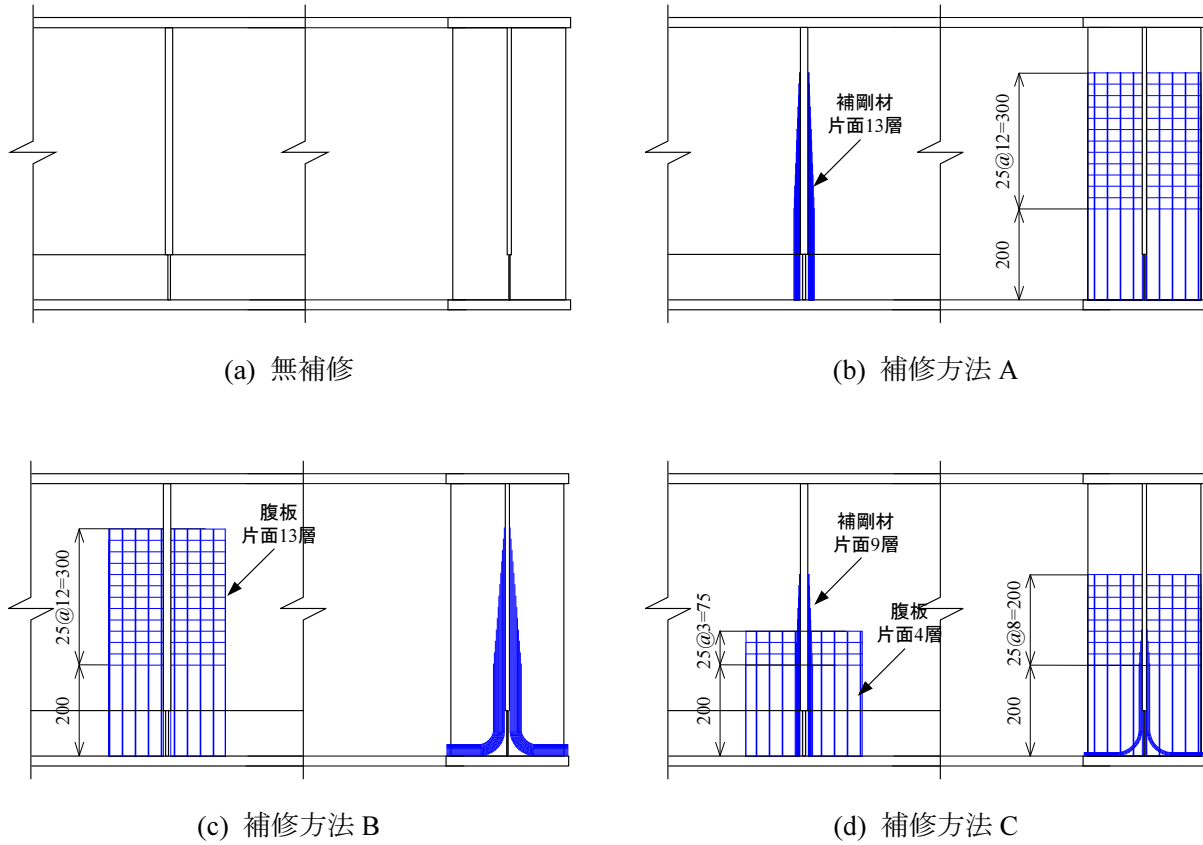


図-4.10 炭素繊維シートの貼り付け形状

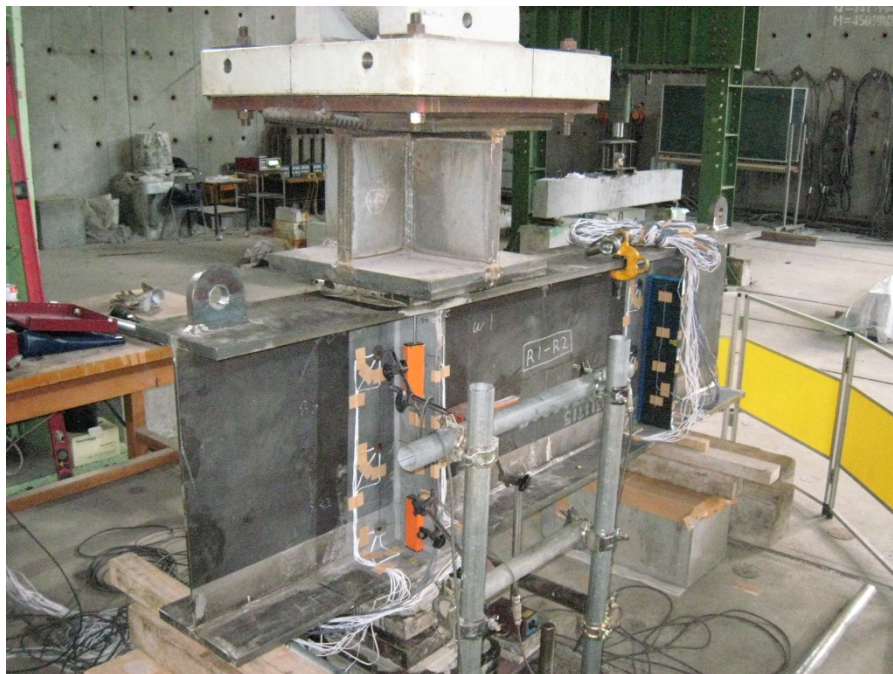


図-4.11 試験状況

### 4.3.2 試験結果と考察

#### (1) 破壊形態

試験終了後の試験体の破壊状況を図-4.12に示す。破壊形態は、補剛材の局部座屈、腹板の局部座屈、炭素繊維シートの破壊の3つに大きく分けられる。

試験の結果から、無補修のケースについては、GC1シリーズでは補剛材、GC2シリーズでは腹板の局部座屈が先行するといったように、板厚の残存率が小さい部位で先に局部座屈が発生した。その後、荷重の増加とともに、補剛材、腹板の両方で局部座屈が発生し、終局に至った(図-4.12(a), (e))。これに対して、補剛材のみに炭素繊維シートを貼り付けて補修した補修方法Aでは、炭素繊維シートを貼り付けていない腹板で局部座屈が発生し、次いで炭素繊維シートの破壊が生じた。最終的には、炭素繊維シートが破壊されたことにより補修効果が失われた補剛材に局部座屈が発生した(図-4.12(b), (f))。さらに、腹板のみに炭素繊維シートを貼り付けて補修した補修方法Bでは、補修方法Aと同様に、炭素繊維シートを貼り付けていない補剛材で局部座屈が発生し、次いで炭素繊維シートの破壊、補修効果が失われた腹板の局部座屈と破壊が進展した(図-4.12(c), (g))。一方、補剛材と腹板の両者にそれぞれ炭素繊維シートを貼り付けて補修した補修方法Cでは、補剛材、腹板の両方で炭素繊維シートの破壊が発生した。その後、炭素繊維シートによる補修効果が失われ、板厚の残存率が小さい部位から局部座屈を生じる結果となった(図-4.12(d), (h))。

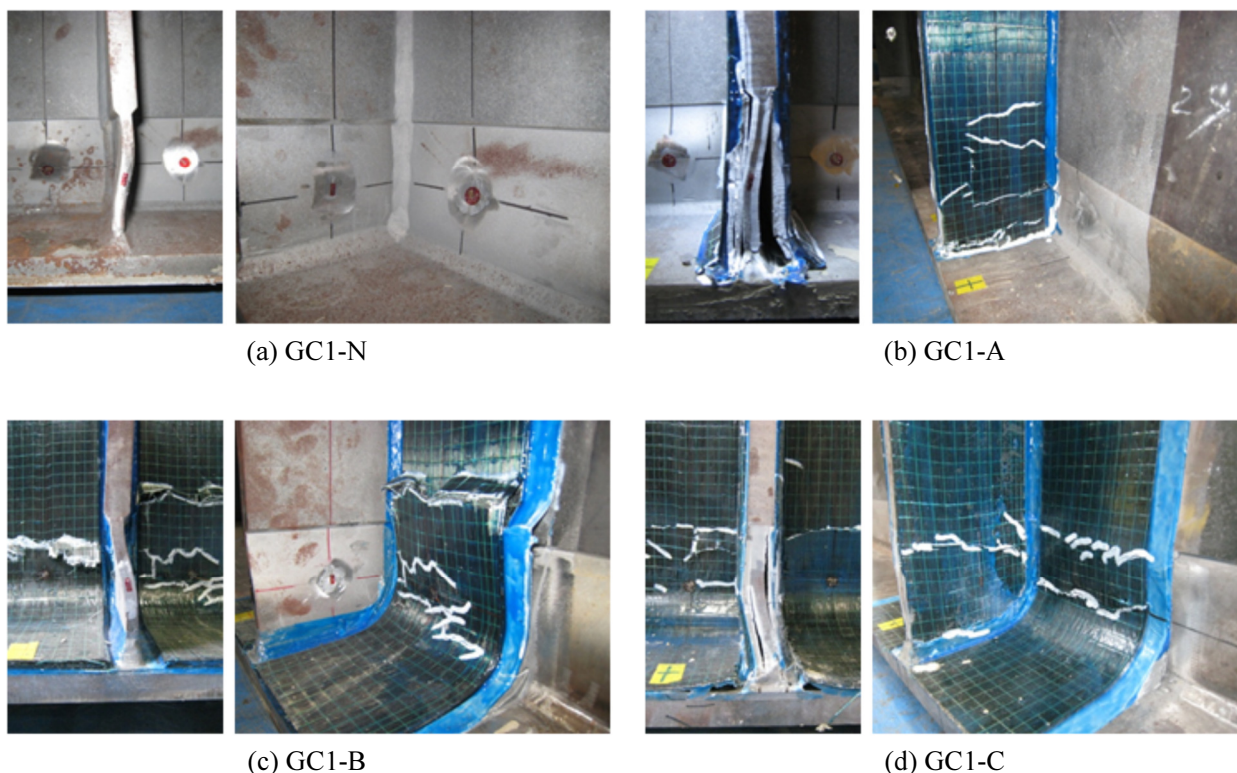


図-4.12 試験終了時の試験体状況 (1/2)





図-4.12 試験終了時の試験体状況 (2/2)

表-4.6 最大荷重と炭素繊維シートの破壊荷重

試験体 番号	残存板厚		補修方法	炭素繊維シート の破壊荷重 [kN]	最大荷重 [kN]
	補剛材	腹板			
GC1-N			無補修	-	1,678
GC1-A	8 mm (50.0 %)	5 mm (55.5 %)	A	1,102	1,923
GC1-B			B	1,602	1,880
GC1-C			C	1,602	1,993
GC2-N			無補修	-	1,036
GC2-A	6 mm (37.5 %)	3 mm (33.3 %)	A	1,077	1,433
GC2-B			B	1,302	1,544
GC2-C			C	1,312	1,529

(b) 最大荷重

各試験から得られた最大荷重と炭素繊維シートが破壊された時の荷重を表-4.6に示す。炭素繊維シートの破壊荷重は、炭素繊維シート上に取り付けたひずみゲージの値が急変した時の荷重とした。表より、炭素繊維補修を行った全てのケースで、無補修の試験体と比較して、最大荷重が増加していることが確認できる。

## 4.3.3 FEA による検証

## (1) 解析モデル

ここでは、健全モデルおよび欠損モデルに対して FEA を実施する。解析モデルを図-4.13 に示す。GC1 シリーズでは、断面欠損分を補える枚数の炭素繊維シートを貼り付けているため、炭素繊維シート補修による目標荷重は健全モデルでの最大荷重であると言える。したがって、断面欠損のない健全な鋼桁による FEA を実施し、実験値と比較することとした。このモデルを健全モデルと呼ぶ。一方、GC2 シリーズでは、炭素繊維シートを貼り付けた後も、腹板、補剛材は完全には回復していないため、目標とする荷重は、炭素繊維シートの鋼換算分だけ板厚が回復した鋼桁となる。したがって、欠損部の板厚を補剛材では  $14.23 \text{ mm} (= 6 + 0.4576 \times 9 \times 2)$ 、腹板では  $6.66 \text{ mm} (= 3 + 0.4576 \times 4 \times 2)$  とした鋼桁による FEA を実施し、実験値と比較することとした。このモデルを欠損モデルと呼ぶ。また、GC1、GC2 シリーズの無補修桁 (GC1-N、GC2-N) についても解析を実施し、実験値と比較することとした。

解析には、汎用構造解析ソフトウェア DIANA9.4.4<sup>4,5)</sup> を使用し、鋼材の材料モデルは完全弾塑性体であり、載荷板を除き 8 節点 2 次アイソパラメトリック曲面シェル要素を用いた。

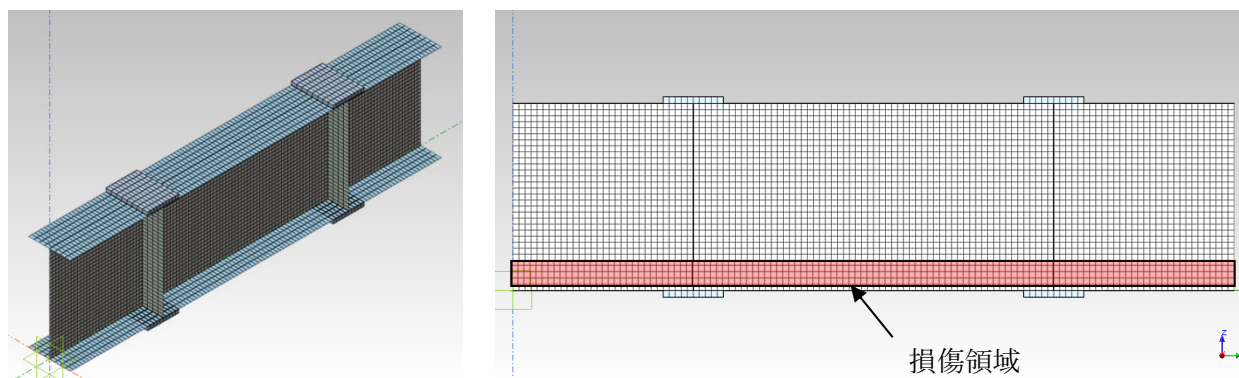


図-4.13 解析モデル

## (2) 荷重—変位関係

図-4.14 に荷重と鉛直変位関係を示す。図中には FEA による解析結果を合わせて示す。無補修桁の解析結果については青の実線で、健全モデルは赤の実線、欠損モデルは赤の破線で示している。さらに、鉛直変位の理論値を黒の実線で示している。

まず、図-4.14(a) に示す GC1 シリーズについてみると、無補修桁の FEA 結果は  $1,730 \text{ kN}$  となり、実験値の  $1,678 \text{ kN}$  に対して、 $3.1\%$  の誤差となった。また、炭素繊維シートで補修した GC1-A、B、C では、それぞれ  $1,923 \text{ kN}$ 、 $1,880 \text{ kN}$ 、 $1,993 \text{ kN}$  となったのに対して、健全モデルでは  $2,026 \text{ kN}$  という結果が得られた。いずれの結果に対しても  $10\%$  以内の誤差となっており、目標とする荷重まで回復していることが確認できる。次に図-4.14(b) に示す GC2 シリーズについてみると、無補修桁の FEA 結果は  $1,124 \text{ kN}$  となり実験値の  $1,036 \text{ kN}$  に対して  $8.5\%$  の誤差となった。また、炭素繊維シートで補修した GC2-A、B、C はそれぞれ  $1,433 \text{ kN}$ 、 $1,544 \text{ kN}$ 、 $1,529 \text{ kN}$  であったのに対して、欠損モデルでは  $1,673 \text{ kN}$  という結果が得られた。このことから、いずれのケースについても期待される効果を十分に発揮したものと考えられる。なお、FEA による解析結果は、いずれのケースについてもやや大きめの値を示しているが、これは、

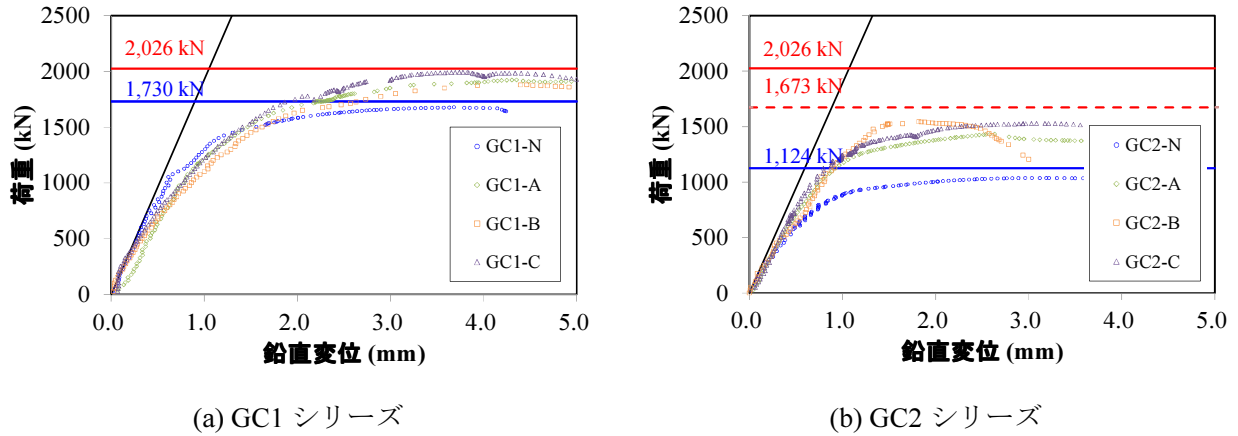


図-4.14 荷重－鉛直変位関係

初期たわみの影響や、解析では考慮していない残留応力の影響などが考えられる。

#### 4.4 結 言

本章では、鋼橋支点部に生じた腐食による断面欠損を対象として、炭素繊維シート接着工法の適用性を確認するための圧縮試験を実施した。具体的には、炭素繊維シートの接着方法及び補修効果を検討することを目的とした十字断面柱の圧縮試験（柱タイプ試験）と支点部垂直補剛材および近傍の腹板が腐食した場合を想定した鋼桁の圧縮試験（桁タイプ試験）の2つの試験を実施した。柱タイプ試験では、炭素繊維シートによる補修効果の基礎的な知見を得ることを目的とし、桁タイプ試験では、実際の腐食状態として多く見受けられる支点部垂直補剛材と腹板が同時に損傷を受けた状態を想定して、施工性を考慮した炭素繊維シートの貼り付けパターンについて、その補修効果を確認することとした。さらに有限要素法による解析を合わせて実施し、実験の妥当性についても検証を行った。本試験により得られた知見を以下に示す。

##### ■柱タイプ試験より

- 1) 垂直補剛材に生じた局部座屈は、福本式を用いることで評価可能であることを示した。さらに、炭素繊維シートで補修した場合であっても、炭素繊維シートの板厚を鋼換算して福本式に適用することで評価可能であることを示した。
- 2) 炭素繊維シートの破壊荷重にはばらつきがみられるものの、炭素繊維シートの厚さを鋼換算して算出した降伏荷重（あるいは局部座屈荷重）に近い荷重で破壊を生じる。
- 3) 下フランジへの定着を設けた場合、定着を設けない場合に比べて、炭素繊維シートの破壊が抑制される結果となったが、定着の有無によらず局部座屈荷重は概ね等しくなることから、下フランジへの定着の有無が補修効果に与える影響はないと言える。

##### ■桁タイプ試験より

- 1) 柱タイプ試験と同様、炭素繊維シートを貼り付けることによって、局部座屈の発生が抑制され、強

度を回復することが可能となることが確認できた。

- 2) 炭素繊維シートの貼り付け方法として、補剛材のみを補修する方法（補修方法 A）、腹板のみを補修する方法（補修方法 B）、補剛材と腹板のそれぞれを補修する方法（補修方法 C）の3パターンについて検討した。この結果、いずれの方法を用いた場合でも、十分な強度回復効果がみられることを確認した。

以上より、鋼橋桁端部、特に支点部周辺に生じた腐食損傷に対しても、炭素繊維シート接着工法は有効な工法であるということが確認された。

### 参考文献

- 4-1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，丸善出版，2012.
- 4-2) 大木法文，本橋健司，犬飼達雄：連続繊維シート工法の標準化に関する研究 その4 連続繊維シートの引張り強度に及ぼす出隅部曲率半径の影響，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.351-352，1999.
- 4-3) 杉浦江，小林朗，稲葉尚文，本間淳史，大垣賀津雄，長井正嗣：鋼部材腐食損傷部の炭素繊維シートによる補修技術に関する設計・施工法の提案，土木学会論文集 F，Vol.65，No.1，pp.106-118，2009.
- 4-4) (公社) 土木学会 鋼構造委員会：座屈設計ガイドライン 改訂版第2版 [2005年改訂版]，2005.
- 4-5) de Witte, F.C. and Kikstra, W.P.: DIANA Finite Element User's Manual: Analysis Procedures, TNO DIANA b.v.,2008.

## 第5章

### 炭素繊維シートを用いた鋼橋桁端部の腐食部補修法の提案

#### 5.1 緒言

近年、高度経済成長期に建設された構造物の高齢化が進行し、維持管理の重要性が再認識されている。損傷を生じた構造物に対しては、損傷が軽微な段階で補修を行うなどの予防保全が重要である。既設構造物の補修に当たっては、その多くが供用中であるため、交通規制や施工スペースの確保など制約条件が多い。第1章でも述べたとおり、鋼構造物の劣化要因の大半は腐食であり、従来当て板工法や部材交換法が用いられてきた。これらの工法は、損傷の範囲が局所的なものであっても、一定の架設機材が必要となるなど、大掛かりな作業となってしまうため、損傷が軽微な段階での補修を行うことは難しい。そのため、供用中の制約条件下における効果的かつ簡易な工法の開発が強く望まれてきた。

こうした背景を受けて、鋼構造物の補修・補強材料として炭素繊維シートの利用が注目されている。炭素繊維に樹脂を含浸・硬化させた炭素繊維強化樹脂材料（以下、CFRP と記す）は高弾性、高強度、高耐久性といった特徴を有する材料であり、樹脂を用いて鋼材表面に接着するだけであるため施工が容易である。CFRP による鋼構造物の補修・補強については、要求される補強量や対象部位に応じていくつかの工法が提案されている<sup>5-1)~5-3)</sup>。ただし、CFRP を用いた補修・補強工法に関する既往の研究では、主に、トラス橋やアーチ橋の軸力部材や桁橋のフランジなど断面の垂直応力に対する補修・補強を対象としたものが多い。しかしながら、鋼橋の大部分はI桁や箱桁などの鈹桁構造であり、桁端部付近の腹板や垂直補剛材での腐食損傷が多い。

本研究では、桁端部に生じた腐食損傷を対象としてCFRPを用いた補修・補強工法を確立すべく、種々の実験をとおして、炭素繊維シートを接着した鋼桁の強度改善や貼り付け方法に関する基礎データを取得してきた。本章では、これまでに得られた知見を基に、適用する部材に応じた設計法、施工法について整理するとともに、実物大試験体を用いた検証実験の結果についてまとめる。

#### 5.2 設計法

##### 5.2.1 使用材料

###### (1) 炭素繊維シート

炭素繊維シートは、強度、弾性係数、繊維目付量によって表-5.1のように分類される。一般にRC橋脚など高い引張耐力が要求される場合には高強度型の炭素繊維シートが用いられ、常時荷重に対する既設鉄筋の応力度改善やたわみの低減が要求される場合には、弾性係数の高い高弾性型の炭素繊維シートを用いたほうが積層数を少なく抑えることができる。本研究で提案する工法では、断面欠損部の部材の座屈を防止し強度の回復を図ることを目的とする。第2章で検証した結果から、高い補修・

表-5.1 炭素繊維シートの材料特性

分類	引張強度 [MPa]	弾性係数 [GPa]	繊維目付量 [g/m <sup>2</sup> ]
高強度型	3,400	245	200 ~ 600
中弾性型	2,900	390	300
	2,400	450	
高弾性型	1,900	540	
		640	
鋼	400 ~ 570	200	-



図-5.1 炭素繊維シート

補強効果を得るためには、貼り付ける繊維シートの弾性係数が大きいものほどその効果が高い。よって、本工法では、高弾性型炭素繊維シートうち弾性係数が最大である 640 GPa 以上のシートの使用を標準とする。炭素繊維シートの外観を図-5.1 に示す。炭素繊維シートの引張強度や弾性係数を算定するための設計厚さは、「JIS A1191:2004 コンクリート補強用連続繊維シートの引張試験法」に示される方法によって算定された値であり、本工法で用いる高弾性型炭素繊維シートの場合、1 層あたりの設計厚さは 0.143 mm、鋼換算厚さは 0.457 mm となる。

なお、積層数が多くなる場合で曲線形状での貼り付けが必要ない箇所については、経済性、施工性で有利となることが考えられるため、炭素繊維目付量が 600~900 g/m<sup>2</sup> の炭素繊維ストランドシートを使用することも可能である。

## (2) 樹脂材料

炭素繊維シートと鋼部材の接合に用いられる材料は、プライマー、不陸修正材、含浸接着樹脂である。さらに、本工法では、CFRP の剥離を抑制するための方法として、鋼材と CFRP の間に低弾性かつ伸び率の大きいパテ材（以下、高伸度弾性パテ材）を挿入する方法を提案しており、検証試験の結果から、その有効性が確認されている。以下に各種材料の特徴をまとめる。

a) プライマー

プライマーは鋼材と CFRP が確実に接着し一体化するために、また、鋼部材の表面処理後に腐食を防止するためにあらかじめ鋼部材表面に塗布するものである。本工法で使用するプライマーは、2液混合型のエポキシ樹脂を標準とする。プライマーの品質規格を**表-5.2(a)**に示す。

b) 不陸修正材

不陸修正材は鋼部材表面の段差や腐食による凹凸を平坦にするために用いられ、プライマーおよび含浸接着樹脂と十分な接着が確保できるものとしなければならない。本工法では、エポキシ樹脂系のパテを標準とする。不陸修正材の品質規格を**表-5.2(b)**に示す。

c) 含浸接着樹脂

炭素繊維シートは、炭素繊維の間に樹脂が含浸して硬化することで、所要の強度、弾性係数を有する複合材料 (CFRP) となる。したがって、含浸接着樹脂は炭素繊維シートに対して確実な含浸性を有することが重要であり、かつ鋼材との接着強度、炭素繊維シートの引張強度を確保できるものでなくてはならない。本工法では、2液混合型のエポキシ樹脂を標準とする。含浸接着樹脂の品質規格を**表-5.2(c)**に示す。

d) 高伸度弾性パテ材

高伸度弾性パテ材は、高応力下や座屈による編外変形時にも CFRP が鋼材から剥離することなく所要の補修・補強効果を発揮するために鋼板と CFRP を接合するものである。本工法では主剤に芳香族アミンを用い、硬化剤にイソシアネートプレポリマーを使用する2液混合型のポリウレタ樹脂を標準とした。ここで、高伸度弾性パテ材の弾性係数が大きいと鋼板が局部座屈を生じて面外変形しようとするときに CFRP が変形に十分に追従することができない。一方、弾性係数が小さいと CFRP を鋼部材の変形に追従させることはできるが、CFRP の接着効果が十分に得られない。また、パテ材の伸びが小さいと局部座屈によって鋼部材が大きく変形した際にパテ材が破断し CFRP が剥離するようになる。以上を考慮して材料規格値を決定した。高伸度弾性パテ材の品質規格を**表-5.2(d)**に示す。

e) 高伸度弾性パテ材用プライマー

高伸度弾性パテ材用プライマーは、鋼材あるいは不陸修正材と高伸度弾性パテ材が確実に接着し一体化するために使用するもので、鋼材あるいは不陸修正材と十分な接着強度が得られるものでなければならない。本工法では、2液混合型のウレタン樹脂を標準とする。高伸度弾性パテ材用プライマーの品質規格を**表-5.2(e)**に示す。

### 5.2.2 せん断力を受ける部材の設計

せん断力が卓越する桁端部腹板について設計法を示す。炭素繊維シートの貼り付け方向については、繊維方向が下フランジに対して±45度方向となるように交互に接着するものとする。第3章で得られた結果から、最初に鋼板面に貼り付ける炭素繊維シートは、+45度方向、-45度方向のいずれでもよいものとする。以下に、第3章で得られた知見を基に、「部分貼り工法」および「全面貼り工法」の両工法について、炭素繊維シート積層数の決定方法および補修領域について示す。

表-5.2 樹脂材料の品質規格

(a) プライマー

項目	規格値	試験法
引張強度	29N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS K 7161
引張せん断強度	9.8N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS K 6850
鋼材接着強度	1.5N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS A 6909
ガラス転移点温度	70℃以上	JIS K 7121

(b) 不陸修正材

項目	規格値	試験法
引張せん断強度	9.8N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS K 6850
鋼材接着強度	1.5N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS A 6909
圧縮弾性係数	1,500N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS A 7181
ガラス転移点温度	70℃以上	JIS K 7121

(c) 含浸接着樹脂

項目	規格値	試験法
引張強度	29N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS K 7161
引張せん断強度	9.8N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS K 6850
鋼材接着強度	1.5N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS A 6909
CFRP 引張強度	1,900N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS A 1191
ガラス転移点温度	70℃以上	JIS K 7121

(d) 高伸度弾性パテ材

項目	規格値	試験法
引張強度	8N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS K 7161
引張弾性係数	55N/mm <sup>2</sup> 以上,75N/mm <sup>2</sup> 未満	JIS K 7161
伸び	300%以上,500%未満	JIS K 7161
鋼材接着強度	1.5N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS A 6909
ガラス転移点温度	-15℃以下	JIS K 7121

(e) 高伸度弾性パテ材用プライマー

項目	規格値	試験法
混合物粘度	2,000Pa・s 以下	B 型粘度計
鋼材接着強度	1.5N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS A 6909
ガラス転移点温度	70℃以上	JIS K 7121

(1) 部分貼り工法

部分貼り工法では、炭素繊維シートの積層数は以下の式を満足するように決定する。

$$t_{sl,w} \leq t_{cfs,w} \quad (5.1)$$

ここで、 $t_{sl,w}$  は腹板の最大欠損板厚、 $t_{cfs,w}$  は腹板に接着する一方向あたりの炭素繊維シートの鋼換算厚さである。腹板の最大欠損板厚については、次のように考えるとよい。第3章の検討結果より、せん断強度の低下に影響する腐食領域は図-5.2 に示す領域である。腐食領域の高さが桁高の1割未満かつ腐食範囲が端支点上補剛材から最初の翠帳補剛材までの距離の1/2未満の場合、せん断強度の低下は見られないため、の黄色で着色した領域における最大欠損板厚を測定するとよい。

次に炭素繊維シートの貼り付け領域について説明する。最外層の炭素繊維シートの長さは以下の式を満足するように決定する。

$$L_{cf} \geq (L_{sl} - 50) + 100 + \alpha \quad (5.2)$$

ここで、 $L_{cf}$  は最外層の炭素繊維シート長さ、 $L_{sl}$  は欠損部の長さ、 $\alpha$  は R50 mm を含む下フランジへの定着長さである。炭素繊維シートの上端には、鉛直方向に炭素繊維シート1層ごとに10 mm ずらして積層するものとし、下端部は R50 mm で下フランジに定着する。下フランジに炭素繊維シートを定着するこ



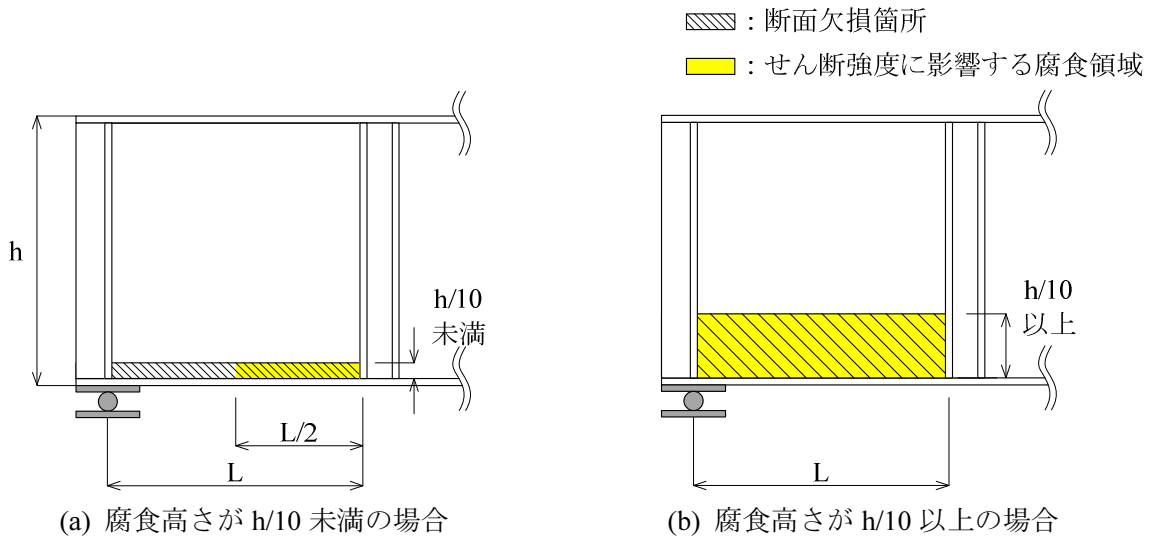
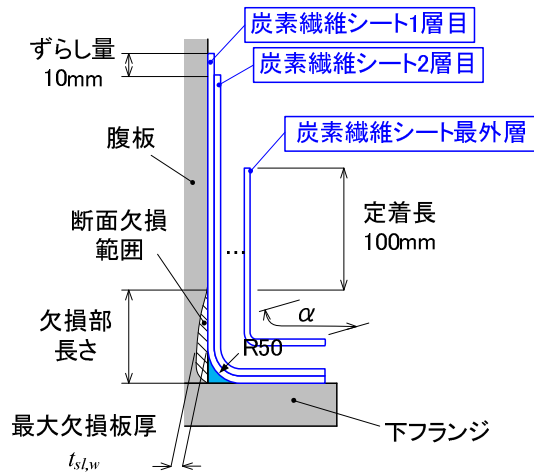


図-5.2 せん断強度に影響する腐食領域



(a) 炭素繊維シートの定着長とずれし量

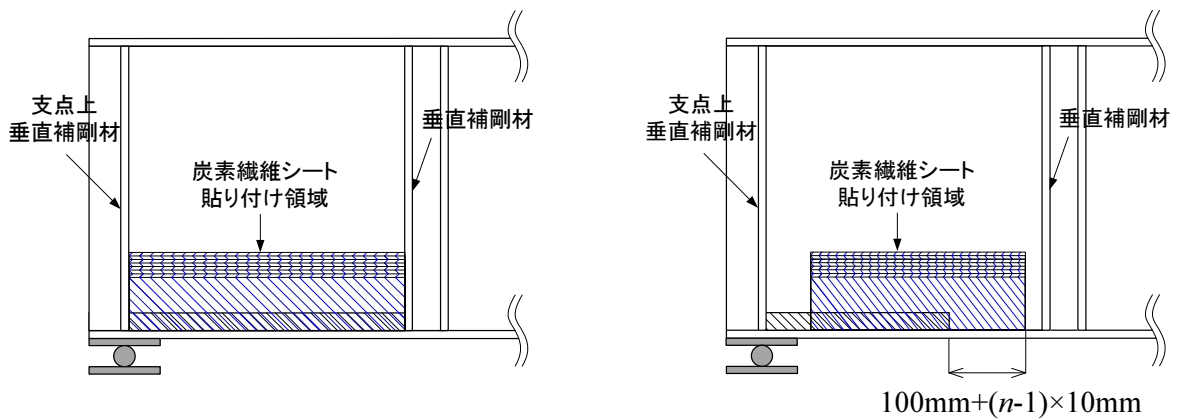


図-5.3 炭素繊維シートの貼り付け範囲

とにより、確実に炭素繊維シート貼り付け後の斜張力場の形成方向を腹板の対角宝庫とすることができ、効果的な補修を行うことが可能となる<sup>5-4)</sup>。定着範囲の一部にボルト等による接合箇所がある場合には、不陸修正材を用いて平滑に仕上げたうえで定着する。上端部については、定着長 100 mm を確保し、1 層ごとに 10 mm のずらしを設けることで、+45 度方向、-45 度方向のそれぞれについて 25 mm 以上のずらしを確保できる。

また、炭素繊維シートの貼り付け範囲については、支点上垂直補剛材から最初の垂直保護材までの範囲を標準とする。これは、炭素繊維シートを貼り付けることによる欠損断面の補修のみでなく、防食性の向上を同時に図るためである。なお、腐食領域と比較して炭素繊維シートの貼り付け幅が広範になる場合には、貼り付け範囲を最初の垂直補剛材までではなく、定着長を確保した必要最小限の範囲としてもよい<sup>5-5)</sup>。以上の補修範囲の概略図を図-5.3 に示す。

## (2) 全面貼り工法

全面貼り工法は、腹板の板厚が厚く断面欠損量が多い場合や、荷重増加に伴う補強が必要となる場合に用いることが望ましい。部分貼り工法に比べて、積層数を減らすことが可能となるため、効率的かつ経済的に補修を行うことができる場合がある。ただし、断面欠損に対する補修を行う場合には断面欠損に伴うせん断強度の低下率を FEM などの手法により算定し、目標とするせん断強度の増加率をあらかじめ把握しておく必要がある。

一方、荷重増加に伴うせん断強度の補強を目的とする場合には、炭素繊維シートを腹板全面に貼り付けた状態でのせん断強度を算出し、目標とするせん断強度以上であることを照査することで補強量を決定することができる。第3章で示したせん断強度評価式を再掲し、補強量の決定方法を示す。

鋼桁のせん断強度は、式の形式が簡易でその適用が容易であること、また、数多くの実験に対してせん断強度が精度よく評価されることから、以下に示す Basler 式が広く用いられる。

$$\frac{Q_u}{Q_y} = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1 - \tau_{cr} / \tau_y}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \quad (5.3)$$

ここで、 $Q_u$  はせん断強度、 $Q_y$  は降伏せん断強度、 $\tau_{cr}$  は弾性せん断座屈強度、 $\tau_y$  は降伏せん断応力 ( $= \sigma_y / \sqrt{3}$ )、 $\sigma_y$  は降伏応力、 $\alpha$  は腹板のアスペクト比 ( $=$  幅  $b$  / 高さ  $h$ ) である。右辺第1項が弾性座屈強度、第2項が後座屈強度を表わしている。また、せん断弾性座屈応力は以下の式で算出できる。

$$\tau_{cr} = \begin{cases} \tau_e & (\tau_e \leq 0.8\tau_y) \\ \sqrt{0.8 \cdot \tau_e \cdot \tau_y} & (\tau_e > 0.8\tau_y) \end{cases} \quad (5.4)$$

$$\tau_e = k_s \frac{\pi^2 E_s}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_s}{h} \right)^2 \quad (5.5)$$

$$k_s = \begin{cases} 5.34 + 4.00/\alpha^2 & (\alpha \geq 1.0) \\ 4.00 + 5.34/\alpha^2 & (\alpha < 1.0) \end{cases} \quad (5.6)$$

ここで、 $E_s$  は鋼板の弾性係数、 $\nu$  は鋼板のポアソン比、 $t_s$  は鋼板板厚を表す。

次に、炭素繊維シートを腹板に接着した場合のせん断強度の算定法について述べる。第3章で示したように、せん断強度の算出方法として、厳密法と簡易法の2種類を提案している。ここでは、実務での

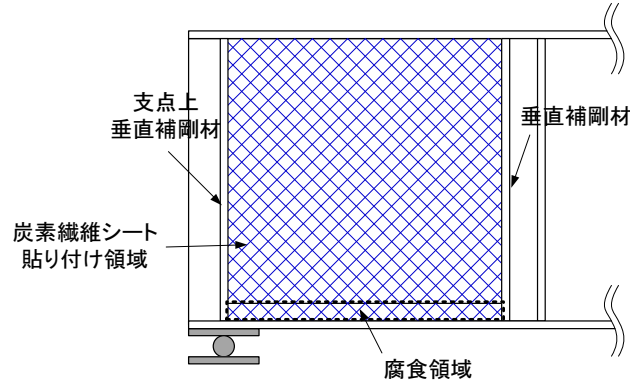


図-5.4 全面貼り工法の炭素繊維シート貼り付け領域

適用に合わせて、簡易法についてのみ記す。

$$\tau_{cr}^{s+cf} = \begin{cases} \tau_e^{s+cf} & (\tau_e^{s+cf} \leq 0.8\tau_y) \\ \sqrt{0.8 \cdot \tau_e^{s+cf} \cdot \tau_y} & (\tau_e^{s+cf} > 0.8\tau_y) \end{cases} \quad (5.7)$$

$$\tau_e^{s+cf} = k_s \cdot \frac{\pi^2 E_s}{12(1-\nu_s^2)} \left( \frac{t_{s+cf}}{h} \right)^2 \quad (5.8)$$

$$k_s = \begin{cases} 5.34 + 4.00/\alpha^2 & (\alpha \geq 1.0) \\ 4.00 + 5.34/\alpha^2 & (\alpha < 1.0) \end{cases} \quad (5.9)$$

$$t_{s+cf} = t_s + \frac{E_L}{E_s} \times t_c \times n \times 2 \quad (5.10)$$

ここで、 $\tau_{cr}^{s+cf}$  は炭素繊維シート接着後のせん断弾性座屈応力、 $E_L, t_c$  は炭素繊維と樹脂材料からなる複合材としての弾性係数と1層あたりの厚さ、 $n$  は腹板片面あたりの炭素繊維シートの積層数を示す。

炭素繊維シートは鋼板の降伏まで引張応力に寄与すると考え、炭素繊維シートと鋼板のひずみが等しくなることに注意して、Basler 式を次のように変形する。

$$\frac{Q_u^{s+cf}}{Q_y} = C_n \left\{ \frac{\tau_{cr}^{s+cf}}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1 - \tau_{cr}^{s+cf} / \tau_y}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \left( 1 + \frac{E_L \cdot t_c}{E_s \cdot t_s} \times n \right) \right\} \quad (5.11)$$

ここで、 $Q_u^{s+cf}$  は鋼板と炭素繊維からなる腹板のせん断強度、 $C_n$  は低減係数であり、簡易法では  $C_n = 0.9$  としよ。これは、3.5.3(2)に示した簡易法と厳密法の比較検討の結果より設定した値である。

以上より、炭素繊維シートの積層数は、式(5.3)および式(5.11)より得られるせん断強度の増加率  $Q_u^{s+cf} / Q_u$  が補修・補強後に必要となるせん断強度増加率以上となるように決定するとよい。全面貼り工法における炭素繊維シートの貼り付け領域の概略図を図-5.4に示す。

### 5.2.3 支点反力を受ける部材の設計

ここでは、第4章で検討した柱タイプ試験および桁タイプ試験の結果から得られた知見を基に、支点反力を受ける部材に対する炭素繊維シート接着工法の補修設計法について具体的に示す。

支点反力を受ける部材においては、主応力方向が鉛直方向となるため、炭素繊維シートの繊維方向を鉛直方向とする。支点反力は、支点上垂直補剛材と腹板（支点上垂直補剛材の中心から腹板板厚の12倍の範囲）からなる十字断面柱で受け持つため、炭素繊維シートによる補修範囲はこの範囲内とし、炭素繊維シートの積層数は以下の式を満足するように決定する。

$$A_{sl,c} \leq A_{cfs,s} + A_{cfs,w} \quad (5.12)$$

ここで、 $A_{sl,c}$  は支点上十字断面柱の必要断面積、 $A_{cfs,s}$  は支点上垂直補剛材に接着する炭素繊維シートの鋼換算断面積、 $A_{cfs,w}$  は支点上補剛材の中心から腹板板厚の12倍の範囲の腹板に接着する炭素繊維シートの鋼換算断面積である。ただし、支点上十字断面を構成する各部の断面欠損量に応じて、補修量を適切に割り付けることを基本とする。なお、第4章の結果から、補剛材と腹板の欠損をいずれかの部位にのみ炭素繊維シートを貼り付けた場合でも補修効果は確保できることが確認されている。したがって、特定の部位における断面欠損量が大きく、断面欠損量に応じた割り付けが困難となるような場合については、対象とする支点上十字断面柱の範囲内で分散または集約して炭素繊維シートを貼り付けてもよい。炭素繊維シートの積層数の割り付け例を図-5.5に示す。

次に炭素繊維シートの貼り付け領域について説明する。最外層の炭素繊維シートの長さは以下の式を満足するように決定する。

$$L_{cf} \geq L_{sl} + 100 \quad (5.13)$$

ここで、 $L_{cf}$  は最外層の炭素繊維シートの長さ、 $L_{sl}$  は欠損部の長さである。炭素繊維シートを複数枚貼り付ける場合には、1層ごとに上側の接着端を25mmずらして積層し、下フランジ側の接着端は下フランジとの定着を設けずに貼り付ける方法を標準とする。なお、下フランジの防食を期待する場合には、下フランジと支点上垂直補剛材あるいは腹板との接合部をR50mmの形状にパテで成型したうえで下フランジとの定着を確保するとよい。ただし、腹板と補剛材の両部位に炭素繊維シートを貼り付ける場合に、両方の炭素繊維シートを下フランジに定着すると、炭素繊維シートどうしが干渉し炭素繊維シートの接着幅が大きく制限されることとなるため注意が必要である。図-5.6に補修範囲の概略図を示す。

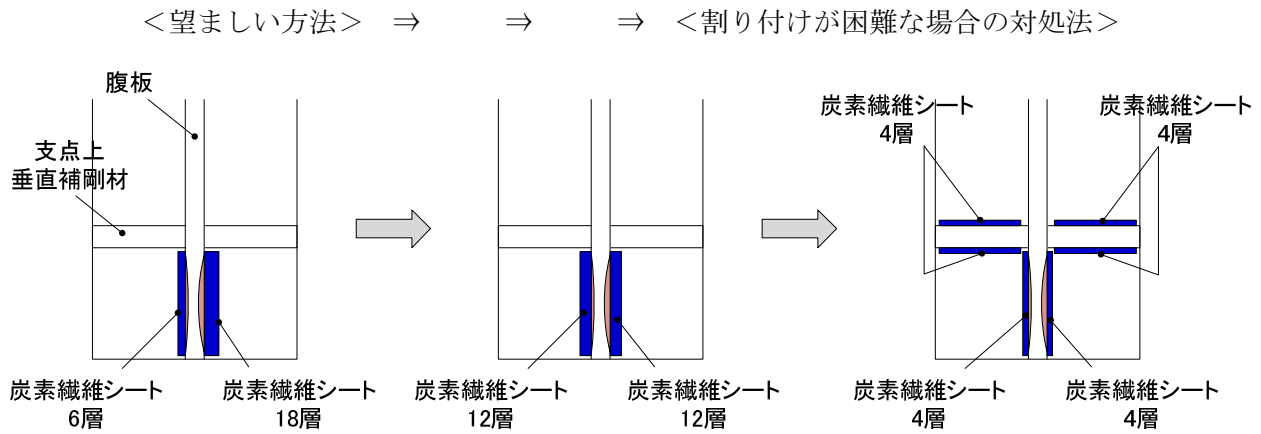
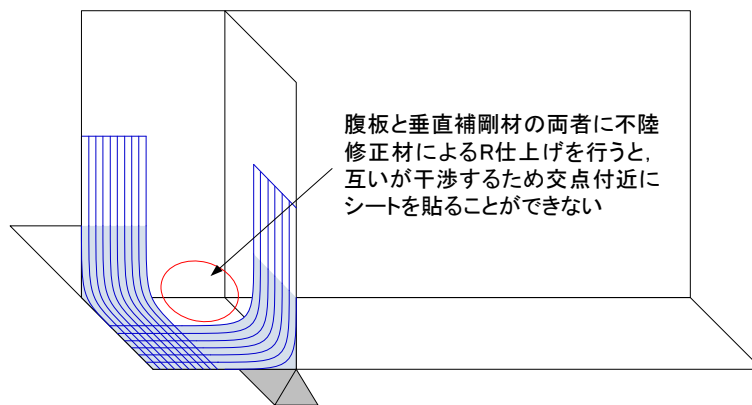
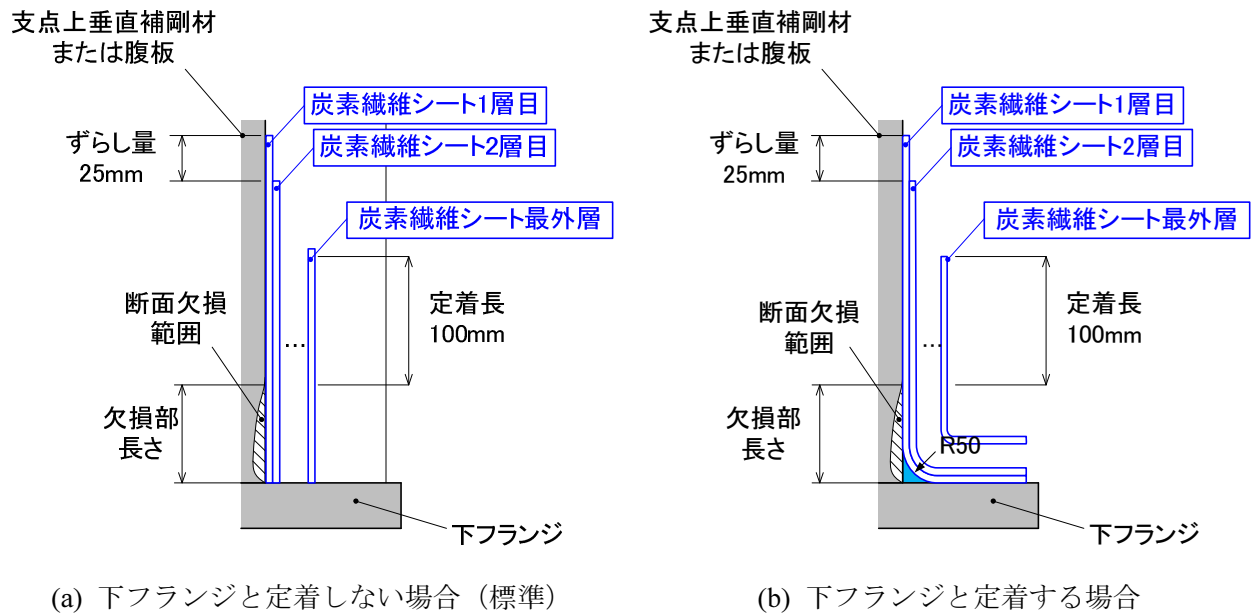


図-5.5 炭素繊維シートの割り付け例



(c) 下フランジへ定着する場合の注意点

図-5.6 炭素繊維シートの貼り付け領域

## 5.3 施工法

### 5.3.1 施工手順

鋼桁端部への炭素繊維シート接着工法の施工手順を図-5.7に示す。各工程の詳細を以下に示す。

#### a) 下地処理

炭素繊維シートを接着して、期待される補修効果を発揮するためには、母材との接着が十分に確保されていなければならない。接着面に塗膜が残っている場合、所要の補修効果が得られない<sup>5-6)</sup>。そのため、既設鋼部材の表面は、ブラストやディスクサンダーなどにより塗料や錆を除去し、その後、有機溶剤を用いて表の清掃を行い、油分や汚れのない状態にしなければならない。

#### b) プライマー塗布

下地処理後の鋼材表面は錆が発生しやすいため、下地処理後速やかにプライマーを塗布する。一般にプライマーには常温硬化型のエポキシ樹脂が使用されるため、鋼材表面に水分の付着のない状態であることを確認した上で行う。

#### c) 不陸修正

鋼材表面の平坦性が炭素繊維シートとの付着性を左右するため、腐食による減肉が大きい孔食部などには樹脂系パテ（不陸修正材）を用いて平坦に仕上げる。施工はプライマーが指触乾燥したことを確認したのちに行うものとする。

#### d) 高伸度弾性パテ材用プライマー塗布

高伸度弾性パテ材との接着性を向上させるために、鋼材表面および不陸修正材表面に高伸度弾性パテ材用プライマーを塗布する。施工は不陸修正材の初期硬化を確認したのちに行うものとする。

#### e) 高伸度弾性パテ材塗布

高伸度弾性パテ材用プライマーを塗布後、炭素繊維シートを貼り付ける範囲に高伸度弾性パテ材を塗布する。施工は高伸度弾性パテ材用プライマーが指触乾燥したことを確認したのちに行うものとする。

#### f) 炭素繊維シート接着

炭素繊維シートは、所定の位置に対して、繊維方向を正しく接着しなければならない。高伸度弾性パテ材が初期硬化したことを確認した後、含浸樹脂の下塗りを行い、炭素繊維シートをセットする。この際、ローラーやゴムヘラを使用し、気泡を除去しながら貼り付ける。含浸樹脂の上塗りを行い、炭素繊維シート内に十分に樹脂を含浸させる。これを必要層数繰り返し炭素繊維シートを貼り付ける。

#### g) 養生

含浸樹脂が硬化するまでは、雨水や砂、ほこりなどの付着を防止するとともに、気象の急変などの悪影響を受けないように、必要に応じてビニールシートなどで養生を行う。

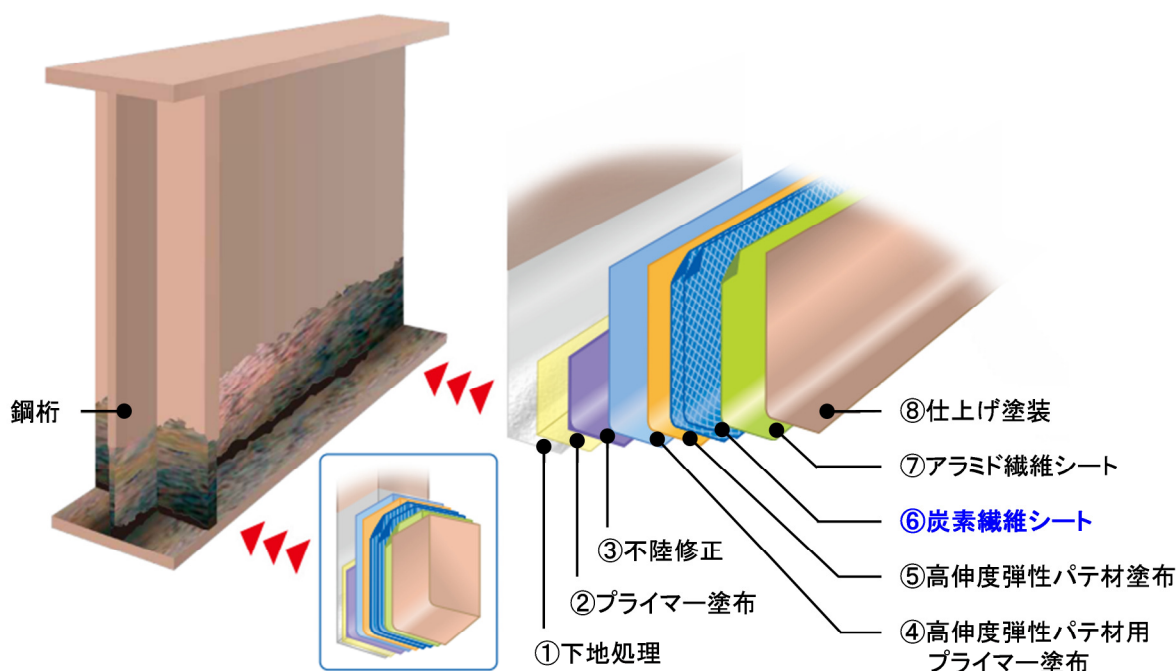


図-5.7 施工手順

#### h) 仕上げ・保護

炭素繊維シートは、屋外暴露試験や促進暴露試験により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、含浸接着樹脂は紫外線やオゾンの作用により劣化し、白化や黄変など変色し美観を損なうことがある。また、炭素繊維シートは黒色であり、日光の直射を受けると表面温度が上昇するため、樹脂の耐熱温度を超えないように、表面を保護する必要がある。保護には2方向アラミド繊維シートを用いることとする。アラミド繊維シートは、耐衝撃性、耐摩耗性に優れており、将来の塗装塗り替え時における炭素繊維シートの保護層としての機能を果たすことができる。さらに、柔軟性があることから、部材角部への巻き付けが可能である。なお、アラミド繊維シートは弾性係数が炭素繊維シートの1/6程度であるため、強度への寄与は小さいものと考えられるため、強度計算には含まないものとする。アラミド繊維シートを貼り付け後、仕上げ塗装を行うこととする。なお、塗装作業の条件は、構造物施工管理要領<sup>5-7)</sup>の規定に準ずるものとする。

### 5.3.2 施工時の留意点

#### a) 施工時の気温

含浸や接着に用いるエポキシ樹脂は、温度によって可使時間や粘度が変化するため、施工時期に応じて夏用、冬用など数種の樹脂が容易されていることが多い。したがって適切な種類の含浸・接着樹脂を選定する必要がある。一般的には、低温環境においては硬化が遅くなるため、低温下で施工を行う場合には施工箇所の保温養生などの対策をとるとよい。

表-5.3 樹脂材料の標準使用量

樹脂材料の種類	標準使用量	備考
プライマー	0.15 kg/m <sup>2</sup>	エポキシ系プライマー
不陸修正材	1.2 g/cm <sup>2</sup>	エポキシ樹脂パテ材, 比重 1.2
高伸度弾性パテ材用 プライマー	0.15 kg/m <sup>2</sup>	ウレタン系プライマー
高伸度弾性パテ	1.0 kg/m <sup>2</sup>	ポリウレタ樹脂パテ材, 施工厚 0.8 mm, 比重 1.25
含浸・接着樹脂	0.6 kg/m <sup>2</sup>	繊維目付量 300 g/mm <sup>2</sup> の炭素繊維シート 1 層あたり

#### b) 樹脂材料の塗布量

樹脂材料の塗布は、刷毛などを用いて手作業で実施するため、現場では樹脂の塗布厚さを厳密に管理することは難しい。そのため、樹脂の使用量で施工管理を行う必要がある。樹脂の標準使用量は使用する炭素繊維シートや樹脂材料の種類によって異なるため、必要に応じた使用量を決定する。本工法で標準としている炭素繊維目付量 300 g/m<sup>2</sup> の炭素繊維シートを用いる場合の樹脂材料および不陸修正材の標準使用量を表-5.3 に示す。

### 5.4 実物大試験体による検証実験

#### 5.4.1 試験概要

##### (1) 試験体

5.2 節と 5.3 節で提案する設計手法による補修効果を確認するための試験として、実物大試験体を用いたせん断座屈試験を実施する。試験に使用した鋼桁の諸元は、桁長 7.8 m、腹板高さ 1.3 m、腹板板厚 8 mm、端部腹板のアスペクト比 1.0 であり、比較的小規模ではあるが実物大スケールとした。図-5.8 に試験体形状を示す。使用した鋼材は、鋼種 SS400 であり、材料試験結果より腹板の降伏応力は 292.2 MPa である。ここでは桁端部の腹板および支点上垂直補剛材が負傷により板厚減少を生じた場合を想定して、腐食を模擬した断面欠損を与える。腹板は、下端から 100 mm の高さで試験パネルの全幅にわたって貫通孔を設けた。補剛材は健全部の 22 mm に対して、下端から 100 mm の高さで 18 mm（片側 2 mm のザグリ加工）とした。ここに炭素繊維シートを貼り付けその補修効果を確認する。

##### (2) 試験ケース

試験ケースを表-5.4 に示す。試験は全 4 ケース実施する。具体的には、損傷のない健全モデル (G1)、腹板下端から 100mm の高さで板厚を 0 mm（貫通孔）とした損傷モデル (G2)、同様の損傷を与え、炭素繊維シートを用いて 2 種類の方法で補修したモデル (G3, G4) の 4 ケースとし、それぞれのせん断強度を実験値により直接比較した。ここで、炭素繊維シートを貼り付けた G3 および G4 について積層数の決定方法を具体的に説明する。



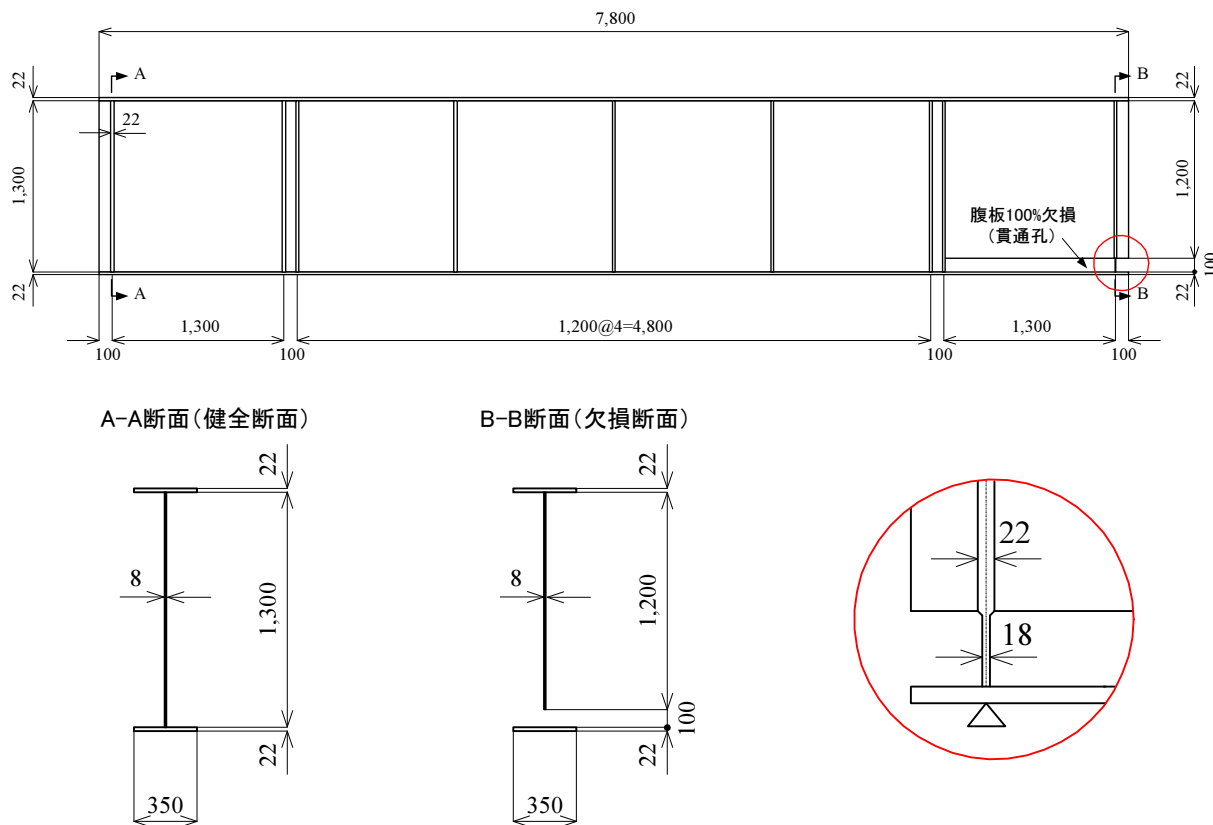


図-5.8 試験体形状 (単位 : mm)

**a) G3 (部分貼り工法)**

部分貼り工法を適用した G3 試験体では、式(5.1)を満足するように積層枚数を決定する。本試験では、腹板片側あたりの欠損量が 4 mm であるから、補修に必要な積層枚数は、 $n = 4 / (640 / 200 \times 0.143) = 8.8$  層となる。よって、腹板パネルの片側当たり 9 層（引張方向 9 層，圧縮方向 9 層）の炭素繊維シートを積層する。なお，圧縮方向・引張方向を交互に積層するものとする。

**b) G4 (全面貼り工法)**

全面貼り工法を適用した G4 試験体では，FEA 解析を実施し断面欠損による強度低下率を算出する。次いで，提案した強度評価式 (式(5.11)) を用いて，積層数，目付量をパラメータとして，炭素繊維シート補修による強度増加率を算出する。FEA による強度低下率を上回るように積層数，目付量を決定し，腹板パネル全面に炭素繊維シートを貼り付ける。ここでは，FEA による計算結果から，健全なケースに対して欠損を与えたケースでは強度低下率は 10.9%となった。評価式より，目付量  $300\text{g/m}^2$  の炭素繊維シートを腹板の片面に 2 層（引張方向 2 層，圧縮方向 2 層）貼り付けたとき，強度増加率は 15.7%となり，強度低下率を上回る結果となった。よって，貼付け枚数は腹板の片面当たり 2 層とした。

なお，垂直補剛材については，G3，G4 の両者ともに式(5.12)を用いて貼り付け枚数を決定し，補剛材の片面あたり 5 層の炭素繊維シートを貼り付けている。

表-5.4 試験ケース

試験体 番号	腹板の断面欠損			補剛材の断面欠損		補修方法, 積層数	
	幅	高さ	板厚	高さ	板厚	腹板	補剛材
G1	-	-	-	-	-	-	-
G2	全幅	100 mm	貫通孔	100 mm	18 mm	-	-
G3						部分貼り, 9層*	5層***
G4						全面貼り, 2層*	5層***

※ 腹板の片面あたりの積層数, 引張・圧縮の両方向に同数交互に貼り付ける

\*\*\* 補剛材の片面あたりの積層数

表-5.5 試験結果一覧

試験体 番号	断面欠損 の有無	補修方法	最大荷重 [kN]	健全モデルとの 強度比率
G1	なし	-	1,389	100.0 %
G2	有	補修なし	1,166	83.9 %
G3	有	部分貼り	1,479	106.5 %
G4	有	全面貼り	1,473	106.0 %

#### 5.4.2 試験結果と考察

##### (1) 最大荷重および強度改善効果

試験により得られた最大荷重の一覧を表-5.5に示す。表には、G1試験体に対する強度比率を併せて示す。これより、健全モデル（G1）の最大荷重は1,389 kNとなった。これに対して、欠損モデル（G2）では1,166 kNとなり、健全時に比べせん断強度が16.1%低下する結果となった。部分貼り補修としたG3では、最大荷重が1,479 kNとなり、炭素繊維シートによる強度の回復率は106.5%となった。全面貼り補修としたG4では、最大荷重が1,473 kNとなり、炭素繊維シートによる強度の回復率は106.0%となった。この結果から、部分貼り補修、全面貼り補修の両ケースにおいて、断面欠損によって低下したせん断強度を健全時まで回復できていることが分かる。なお、補剛材に貼り付けた炭素繊維シートにはいずれの試験体についてもはく離等の変化は見られなかった。

##### (2) 荷重－変位関係

各ケースの荷重変位関係を図-5.9に示す。図中の赤破線は、梁のせん断変形を考慮したたわみの理論値（健全モデル）を示したものである。これより、欠損モデルであるG2では、初期剛性の低下がみられ、せん断強度が低下していることが確認できる。これに対して、炭素繊維シートによる補修を行ったケースでは、部分貼り補修、全面貼り補修ともに健全時のものと同程度の初期剛性を有していることが

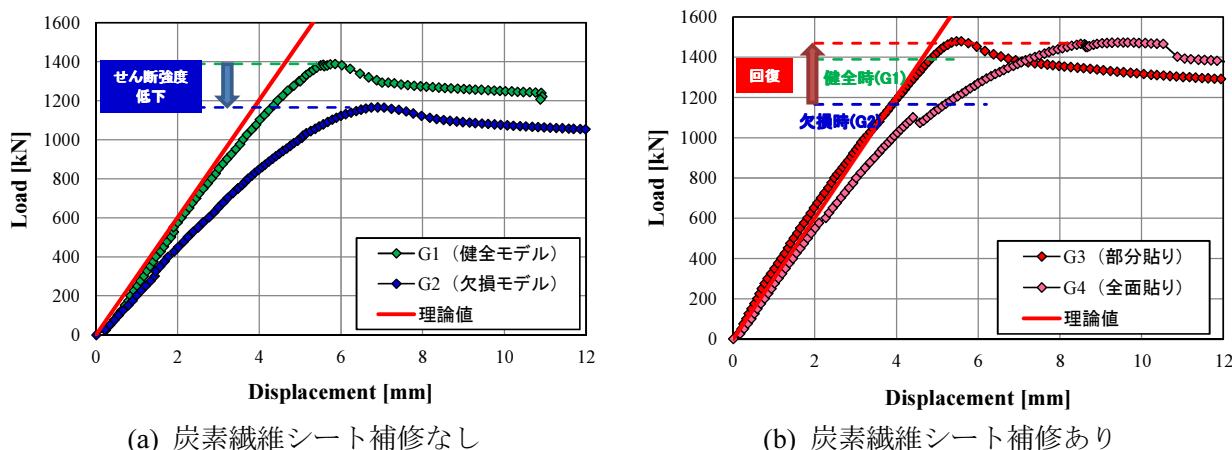


図-5.9 荷重－変位関係曲線

確認できる。また、全面貼り補修とした G4 について見ると、荷重が 1,100 kN 付近で一度荷重が低下していることが確認できる。これは、腹板下端部の欠損部でパテ材が破断したことによる荷重低下であるが、炭素繊維シートの剥離は見られず、健全時の最大荷重を超えたのち、炭素繊維シートの破断により荷重が低下する結果となった。

## 5.5 結 言

本章では、桁端部に生じた腐食損傷に対して、対象とする部材に応じた設計法、施工法について整理し、提案工法の検証のために実物大試験を実施した。本工法は、従来の当て板補修や部材交換法に比べ、施工性に優れ、制約条件の多い供用中の構造物に対して、効率的かつ効果的な補修・補強が可能となる。ここでは第3章および第4章で得られた知見を基に、腹板と垂直補剛材のそれぞれについて具体的な設計手法を示した。また、本工法で使用する繊維材料および樹脂材料について、その特徴を述べるとともに、さらに、本工法の施工方法についてその手順を説明し、施工上の留意点についても併せて示した。最後に、提案する工法の補修効果を検証するために実施した実物大試験について示し、本工法が実橋梁においても十分に適用可能であることを示した。

## 参考文献

- 5-1) 越智内士, 松村政秀, 久部修弘: 鋼 I 桁下フランジに貼付した高弾性 CFRP 板による補強効果および剥離現象について, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, pp.1097-1098, 2009.
- 5-2) 秀熊佑哉, 小林朗, 長井正嗣, 宮下剛, 和久井穰: FRP シート接着による鋼部材の補修に関する研究, 第 3 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム論文報告集, pp.91-94, 2009.
- 5-3) 松村政秀, 北田俊行, 徳林宗孝, 池田啓士, 岡田崇: 炭素繊維シートを円周方向に貼付する橋脚鋼管柱の耐震補強法に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.766, I-68, pp.17-31, 2004
- 5-4) 奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 小出宜央, 秀熊佑哉, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼橋桁端部腹板の腐食に対する CFRP を用いた補修工法の実験的研究, 構造工学論文集 Vol.58A, 10-11, pp.710-720, 2012.

- 5-5) 奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼橋桁端部腹板の腐食に対する炭素繊維シートを用いた補修・補強法の最適設計方法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.541-553, 2014.
- 5-6) 杉浦江, 大垣賀津男, 長井正嗣, 小林朗: 炭素繊維シート (CFRP) を用いた鋼部材部分補修に関する実験研究, 第6回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.48-1-48-6, 2005.
- 5-7) 構造物施工管理要領, 東・中・西日本高速道路株式会社, 2013.

## 第6章

### 結 論

本論文は、既設の鋼構造物を延命化させ、かつ、従来工法にくらべて効率的かつ経済的な補修・補強工法として、炭素繊維シート接着による補修・補強工法について検討したものである。これまでに検討されてきた事例では、引張や曲げを受ける部材を対象としたものが多い。しかしながら、実橋梁においては、桁端部での腐食損傷事例が多く見受けられ、これまでに桁端部への適用を検討した事例は少ない。そこで、本研究では、桁端部に発生した腐食損傷を対象として、炭素繊維シートを用いた補修・補強工法の適用性を明らかとするために種々の実験を実施した。本論文は、これらの試験の結果から、桁端部に生じた腐食損傷に対する炭素繊維シート接着工法の設計法、施工法についてまとめたものであり、全6章により構成されている。各章ごとの主な結論は以下の通りである。

**第1章**では、社会基盤設備としての鋼構造物を取り巻く現状から、従来工法に代わる新たな設計施工法の確立が重要な課題であること説明し、本研究で対象とする炭素繊維シート接着工法の概要について述べるとともに、適用の幅を広げるための諸課題について示した。そして、これらの諸課題を解決するために設定した研究目的を明示した。

**第2章**では、桁端部に生じた腐食損傷を炭素繊維シートを用いて補修・補強する工法を確立することを目的として、その基礎検討としてFRP接着鋼板の一軸圧縮試験を実施した。ここでは、炭素繊維シートをはじめとする6種類の繊維材料を用いて一軸圧縮試験を行い、座屈変形に対して剥離することなく追従し、補修効果を発揮できるシートの選定を行った。この結果、弾性係数の高いシートほど補修効果が高くなり、鋼板とFRPからなる合成板としての曲げ剛性に比例して強度が増加することを確認した。さらに、鋼板とFRPの間に低弾性かつ伸びの大きいパテ材（高伸度弾性パテ材）を挿入することでFRPを座屈変形に追従させることが可能となることを示した。以上のことから、大変形による剥離を防止し、かつ高い補修効果を発揮するための積層方法として、高弾性型の炭素繊維シートを補修材とし、鋼板とFRPの間に高伸度弾性パテ材を挿入する方法を用いるのがよい。

**第3章**では、鋼橋桁端部の腹板を対象とした炭素繊維シートによる補修効果を検証するために、鋼桁のせん断座屈試験を実施した。第2章で提案した積層方法を用いることで、腹板の座屈変形に対しても剥離することなく、補修効果を発揮することを確認した。また、腹板の補修・補強方法として、断面欠損部に炭素繊維シートを部分的に貼り付ける「部分貼り工法」と腹板全面に貼り付ける「全面貼り工法」の2種類の工法を提案し、両工法とも十分な補修効果を有していることを確認した。さらに、腹板に炭素繊維シート貼り付けた鋼桁のせん断強度を算出する手法として、Basler式に準じた評価手法を構築した。弾性せん断座屈強度の算出では、厳密法と簡易法の2種類の方法を検討し、実験値との比較から、いずれの手法を用いた場合でもせん断強度を評価することが可能であることを示した。

**第4章**では、支点部直上の垂直補剛材を対象とした炭素繊維シートによる補修効果を検討するために、十字断面柱の圧縮試験および鋼桁の支点部圧縮試験を実施した。まず、十字断面柱の圧縮試験により、軸圧縮力を受ける部材に対しても、炭素繊維シートの厚さを鋼換算することで十分な補修が可能となることを示した。さらに、換算した板厚を用いて、福本式に適用することで局部座屈荷重の評価も可能となることを示した。炭素繊維シートの貼り付け方法として、下フランジへ定着を設ける場合と定着を設けない場合の2種類の方法を検討した。この結果いずれの方法でも、同等の補修効果を有することを確認した。したがって、施工性の観点から、下フランジとの定着は設ける必要がない。さらに、支点部周辺の垂直補剛材および腹板が損傷した場合を想定した桁の圧縮試験を実施し、炭素繊維シートの貼り付け方法およびその補修効果について検討した。ここでは、欠損部位を適切に補修する方法と、いずれかの部位に分散して補修する方法の3種類の貼り付け方法を試みた。この結果、各部材に分散して貼り付ける方法を用いた場合でも、目標とする強度まで回復させることができることを示した。

**第5章**では、第4章までに得られた知見を基に、炭素繊維シートを用いた鋼橋桁端部の腐食部補修法について、具体的な設計手法および施工法を示した。はじめに本工法で使用する材料について述べ、次いで、桁端部腹板における設計手法として、「部分貼り工法」と「全面貼り工法」の両者について、炭素繊維シートの積層数の決定方法や炭素繊維シートの貼り付け領域について明確に示した。さらに、支点上垂直補剛材の設計方法について述べるとともに、本工法の施工方法についても手順ごとに目的と必要性を明確に示した。また、本手法の妥当性を検証するために実施した大型試験の内容についても説明し、この結果、本工法は、実橋梁においても十分な効果があることを示した。

最後に、第6章では、本論文で得られた結論をまとめて示した。

## 謝 辞

本論文は、長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 准教授 宮下剛先生のご指導のもと、著者が長岡技術科学大学大学院工学研究科 建設構造研究室における5年間の研究成果をまとめたものである。学位論文をまとめるにあたり、多くの方々にご指導、ご援助を賜りました。ここに記して深く感謝の意を表します。

宮下剛准教授には、研究室配属以来5年間、著者の担当教官として、学問、研究のみならず公私に渡りご指導、ご援助を賜ったことを深く感謝しております。

また、本論文の執筆に関し、多くのご指導とご助言を賜りました長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 教授 岩崎英治先生、同専攻 教授 高橋修先生、同専攻 教授 下村匠先生、ならびに同大学 名誉教授 長井正嗣先生には、深謝の意を表します。

本研究を遂行するにあたり、高速道路総合技術研究所・若林大氏（現：中日本高速道路株式会社）、緒方辰夫氏（現：西日本高速道路株式会社）、川崎重工業株式会社・大垣賀津雄氏（現：ものづくり大学 教授）、小出宜央氏、新日鉄住金マテリアルズ株式会社コンポジット社・小林朗氏、小森篤也氏、秀熊佑哉氏、倉敷紡績株式会社・堀本歴氏、高島博之氏には、一連の実験に関する貴重なご意見、ご高配を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

本研究は、その他多くの方々の支えによりまとめることができたものであります。ここにお名前を挙げて感謝の意を表したいと思います。長岡技術科学大学 環境・建設系 山口貴幸氏、中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋株式会社・石川裕一氏、そして、日夜、実験・研究に励んでいただいた建設構造研究室の皆さん、誠にありがとうございました。

最後に、本論文の完成をずっと待っていてくれた両親、そして、常に私の支えとなってくれた宍戸香織様に心から感謝するとともに、本論文を終えることといたします。

平成27年9月

奥山 雄介





## 本研究に関連する著者の発表論文・口頭発表一覧

### 発表論文（査読有り）（6編）

- 1) 奥山雄介, 宮下剛, 緒方辰男, 藤野和雄, 大垣賀津雄, 秀熊佑哉, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼桁腹板の合理的な補修・補強方法の確立に向けた FRP 接着鋼板の一軸圧縮試験, 構造工学論文集 Vol.57A, 10-10, pp.735-746, 2011.
- 2) 奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 小出宜央, 秀熊佑哉, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼橋桁端部腹板の腐食に対する CFRP を用いた補修工法の実験的研究, 構造工学論文集 Vol.58A, 10-11, pp.710-720, 2012.
- 3) 奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 小出宜央, 小林朗, 秀熊佑哉, 堀本歴, 長井正嗣: 腹板を CFRP 補強した鋼桁のせん断座屈試験と強度評価法, 土木学会論文集 A1, Vol.68 (No.3), pp.635-654, 2012.
- 4) 奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼橋桁端部腹板の腐食に対する炭素繊維シートを用いた補修・補強法の最適設計方法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.541-553, 2014.
- 5) 宮下剛, 秀熊佑哉, 小林朗, 奥山雄介, 工藤晃也, 長井正嗣: 継目を有する CFRP スtrandシート接着鋼板の引張試験, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.69 (No.2), pp.257-274, 2013.
- 6) 若林大, 宮下剛, 奥山雄介, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼桁補修設計法の提案, 土木学会論文集 F4, Vol.71(No.1), pp.44-63, 2015.

### 国際会議（11編）

- 1) Y. Okuyama, T. Miyashita, T. Ogata, K. Fujino, K. Ohgaki, Y. Hidekuma, W. Horimoto, M. Nagai: Uniaxial Compression Test of Steel Plate Bonded FRP Sheet for Rational Repair and Reinforcement of Web in Steel Girder Bridge, The 6<sup>th</sup> International Symposium on Steel Structures (ISSS-2011), T10-4 (CD-R), 2011.
- 2) Y. Okuyama, T. Miyashita, T. Ogata, K. Fujino, K. Ohgaki, Y. Hidekuma, W. Horimoto, M. Nagai: Mechanical Behavior of Plate Bonded FRP Sheets Under Uniaxial Compression Load, The Third Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS-2012), T1B01 (CD-R), 2012.
- 3) Y. Hidekuma, A. Kobayashi, Y. Okuyama, t. Miyashita, M. Nagai: Experimental Study on Debonding Behavior of CFRP for Axial Tensile Reinforced Steel Plate by CFRP Strand Sheets, The Third Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS-2012), T1B04 (CD-R), 2012.
- 4) Y. Hidekuma, A. Kobayashi, Y. Okuyama, T. Miyashita, M. Nagai: Experimental Study on Flexural Strengthening of Steel Members with CFRP Strand Sheets, The 6<sup>th</sup> International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2012), 1-165 (CD-R), 2012.
- 5) Y. Okuyama, T. Miyashita, D. Wakabayashi, N. Koide, Y. Hidekuma, A. Kobayashi, W. Horimoto, M. Nagai: Shear Buckling test for Steel Girder Bonded CFRP on Its Web, The 6<sup>th</sup> International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2012), 1-261 (CD-R), 2012.
- 6) T. Miyashita, Y. Okuyama, D. Wakabayashi, N. Koide, Y. Hidekuma, A. Kobayashi, W. Horimoto, M. Nagai: Uniaxial Compression Test of Steel Plate Bonded Various FRP Sheets, The 6<sup>th</sup> International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2012), 1-643 (CD-R), 2012.
- 7) M. Nagai, Y. Hidekuma, T. Miyashita, Y. Okuyama, A. Kudo, A. Kobayashi: Bonding characteristics and flexural stiffening effect of CFRP strand sheets bonded to steel beams, *Procedia Engineering*, Vol.40,

pp.137-142, 2012.

- 8) T.Miyashita, Y.Okuyama, D.Wakabayashi, N.Kiode, Y.Hidekuma, A.Kobayashi, W.Horimoto and M.Nagai: Shear Buckling Test of Steel Girder Bonded Carbon Fiber Reinforced Plastic on Its Web, Proc. of Structural Faults + Repair 2012, pp.23-24, (full paper enclosed on CD-ROM), Edinburgh, UK, 2012.
- 9) T.Miyashita, Y.Okuyama, D.Wakabayashi, N.Kiode, Y.Hidekuma, A.Kobayashi, W.Horimoto and M.Nagai: Shear Buckling Test and Prediction of Shear Load-carrying Capacity for Steel Girder Bonded CFRP on Its Web, Proc. of IABSE Seoul, pp.98-99, (full paper enclosed on CD-ROM), Korea, Seoul, 2012.
- 10) Miyashita, Takeshi, Wakabayashi Dai, Hidekuma Yuya, Kobayashi Akira, Okuyama, Yusuke, Koide Norio, Horimoto Wataru, Nagai Masatsugu : CFRP Repair Method for Corroded Steel Girder Ends, IABSE-JSCE Conference on Advances in Bridge Engineering-III, Japan, Nara, 2015.
- 11) Hidekuma, Yuya, Miyashita Takeshi, Okuyama Yusuke, Ishikawa Toshiyuki, Kobayashi Akira : Repairing Method for Steel Member with Cross Section Loss by CFRP Bonding, IABSE-JSCE Conference on Advances in Bridge Engineering-III, Japan, Nara, 2015.

### 口頭発表 (19 編)

- 1) 奥山雄介, 宮下剛, 長井正嗣 : 一軸引張りを受ける多層の CFRP が積層された鋼板の応力解析, 第 27 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, I-012, pp.80-83, 2009.
- 2) 奥山雄介, 宮下剛, 長井正嗣, 小林朗, 秀熊佑哉 : 一軸引張りを受ける多層の CFRP が積層された鋼板の応力解析, 土木学会第 65 回年次学術講演会, I-439, pp.877-878, 2010.
- 3) 奥山雄介, 宮下剛, 長井正嗣, 小林朗, 秀熊佑哉 : CFRP ストランドシートにより補強された鋼桁の曲げ試験, 第 28 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, I-207, pp.24-27, 2010.
- 4) 工藤晃也, 奥山雄介, 宮下剛, 長井正嗣, 小林朗, 秀熊佑哉 : CFRP ストランドシート接着鋼板の剥離特性の解明に向けた一軸引張試験, 第 28 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, I-211, pp.38-39, 2010.
- 5) 奥山雄介, 宮下剛, 長井正嗣, 緒方辰男, 藤野和雄, 若林大, 大垣賀津雄, 小出宜央, 小林朗, 秀熊佑哉, 堀本歴 : CFRP を接着した鋼桁のせん断耐荷力評価方法の提案, 土木学会第 66 回年次学術講演会, I-522, pp.1043-1044, 2011.
- 6) 若林大, 緒方辰男, 藤野和雄, 奥山雄介, 宮下剛, 長井正嗣, 大垣賀津雄, 小出宜央, 小林朗, 小森篤也, 堀本歴 : 鋼桁腹板部の補修・補強方法開発に向けた CFRP 接着鋼桁のせん断座屈試験, 土木学会第 66 回年次学術講演会, CS2-036, pp.71-72, 2011.
- 7) 若林大, 宮下剛, 奥山雄介, 長井正嗣, 小出宜央, 小林朗, 秀熊佑哉, 堀本歴, FRP による鋼桁腹板の補修・補強方法の確立に向けた実験的研究, 第 9 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 46, pp.371-378, 2011.
- 8) 西巻宏晃, 奥山雄介, 宮下剛, 長井正嗣, 若林大, 小出宜央, 秀熊佑哉, 小林朗, 堀本歴 : 腹板を CFRP 補強した鋼桁のせん断座屈試験, 第 29 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, I-421, pp.74-77, 2011.
- 9) 奥山雄介, 宮下剛, 長井正嗣, 若林大, 小出宜央, 秀熊佑哉, 小林朗, 堀本歴 : 腹板を CFRP 補強した鋼桁のせん断耐荷力評価方法の提案, 第 29 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, I-422, pp.78-81, 2011.
- 10) 工藤晃也, 奥山雄介, 宮下剛, 長井正嗣, 若林大, 小出宜央, 秀熊佑哉, 小林朗, 堀本歴 : 断面欠損を生じた腹板を CFRP 補修した鋼桁のせん断座屈試験, 第 29 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, I-423, pp.82-85, 2011.
- 11) 奥山雄介, 宮下剛, 長井正嗣, 若林大, 小出宜央, 秀熊佑哉, 小林朗, 堀本歴 : 腹板を CFRP 補強した鋼桁のせん断強度評価法の提案, 土木学会第 67 回年次学術講演会, CS3-008, pp.15-16, 2012.

- 12) 西巻宏晃, 奥山雄介, 宮下剛, 長井正嗣, 若林大, 小出宣央, 小林朗, 秀熊佑哉, 堀本歴: CFRP を用いた鋼桁腹板部の腐食部補修方法に関する実験的研究, 土木学会第 67 回年次学術講演会, CS3-008, pp.17-18, 2012.
- 13) 秀熊佑哉, 小林朗, 奥山雄介, 長井正嗣, 宮下剛: 炭素繊維ストランドシートを用いた鋼桁の曲げ補強に関する実験的研究, 土木学会第 67 回年次学術講演会, CS3-010, pp.19-20, 2012.
- 14) 奥山雄介, 宮下剛, 長井正嗣, 若林大, 小出宣央, 秀熊佑哉, 小林朗, 堀本歴: 炭素繊維を用いた支点部垂直補剛材の腐食部補修法に関する実験的研究, 第 30 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, I-316, pp.60-63, 2012.
- 15) 秀熊佑哉, 小林朗, 奥山雄介, 長井正嗣, 宮下剛: 炭素繊維ストランドシートにより曲げ補強された鋼桁の補強効果と剥離特性, 第 30 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, I-317, pp.64-65, 2012.
- 16) 奥山雄介, 宮下剛, 長井正嗣, 若林大, 小出宣央, 小林朗, 秀熊佑哉, 堀本歴: CFRP を用いた鋼橋支点部の腐食部補修法に関する実験的研究, 土木学会第 68 回年次学術講演会, pp.685-686, 2013.
- 17) 秀熊佑哉, 小林朗, 宮下剛, 奥山雄介, 石川敏之: 断面欠損を有する鋼板の炭素繊維ストランドシートによる補修方法, 土木学会第 68 回年次学術講演会, pp.679-680, 2013.
- 18) Phan Ngoc Vinh, 宮下剛, 長井正嗣, 奥山雄介, 若林大, 小出宣央, 小林朗, 秀熊佑哉, 堀本歴: CFRP による鋼桁腹板の腐食部補修法に関する実験的検討, 土木学会第 68 回年次学術講演会, pp.683-684, 2013.
- 19) 若林大, 宮下剛, 長井正嗣, 奥山雄介, 小出宣央, 小林朗, 秀熊佑哉, 堀本歴: 腹板腐食部に CFRP 接着した鋼桁の実物大せん断座屈試験, 土木学会第 68 回年次学術講演会, pp.687-688, 2013.

