

# 博士論文

鋼材に接着した CFRP 板の低温環境下における  
付着特性に関する実験的研究

*Experimental study on bond properties of carbon fiber  
reinforced polymer (CFRP) laminate glued to steel substrate  
under cold temperature*

津田 久嗣

Hisatsugu TSUDA

山口大学大学院 理工学研究科

## 学位論文の要旨

学位論文題目：鋼材に接着した CFRP 板の低温環境下における付着特性に関する実験的研究

Experimental study on bond properties of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) laminate glued to steel substrate under cold temperature

氏 名：津田 久嗣

2012 年 12 月に起きた中央自動車道の笹子トンネルの天井崩落事故をきっかけに、社会インフラの老朽化問題への関心が高まり、高度経済成長期につくられた社会インフラの修理・改築が日本全体の喫緊の課題となっている。このような背景の中、炭素繊維強化ポリマー（以下、CFRP という）は、軽量、高強度、腐食しない等、他の材料にない優れた特性を有しており、建設産業において、鋼、コンクリートに続く新しい材料（主に補強材）として受け入れられつつある。CFRP の鋼構造物への適用に関する研究は、我が国では 2000 年頃から実施され、2002 年、我が国では初めて、設計荷重の変更に伴う耐荷力の向上を目的として、CFRP 板接着によるトラス橋横桁の補強工事が施工された。しかしながら、CFRP 板と鋼部材の接着接合に関する標準的な設計法がないため、接合部の安全性や、CFRP 板の適用による効果を実験的に検証する必要がある。CFRP 板を接着した鋼材に関する研究は、はく離強度に着目した研究や温度変化に着目した研究など実験的にも解析的にも盛んに行われているが、低温下の環境での変形挙動に着目した研究は比較的少ない。鋼構造物の補修・補強材料としての CFRP に、より信頼性を高めるためには、低温下の環境での変形挙動を明らかにしておく必要がある。

本論文では、CFRP 板を接着させた鋼板ならびに H 鋼に対して、常温から低温までの繰り返し温度変化を与え、各種の実験により、変形挙動や耐荷性能について検討を行った。また、実験結果をもとにした簡易的な数値解析を行い、CFRP 板のはく離挙動について推測を行った。本論文は、計 6 章で構成されており、各章の要約は以下のとおりである。

第 1 章「序論」では、近年国内の鋼橋をはじめとする鋼構造物の補修・補強に適用されつつある CFRP 板接着による補修・補強技術の概要を整理し、その課題について言及した。また、CFRP 板接着による既往の研究について、目的別に整理した。最後に本研究の目的と実施した実験項目についてまとめた。

第 2 章「繰り返し温度変化を受ける CFRP 板接着鋼板の変形挙動」では、CFRP 板接着鋼板に常温から低温までの繰り返し温度変化を与え、3 ヶ月長期たわみ試験を実施し、その変

形挙動について検討を行った。その結果、鋼・CFRP 板合成はりのたわみは、温度の低下に伴い、線形的に増加することがわかった。また、載荷荷重を与えた鋼・CFRP 板合成はりのたわみは 3 ヶ月の載荷期間中、一定の値を示した。載荷期間中に温度変化に伴うたわみの増減のみが生じ、鋼板と CFRP 板の間のすべりやはく離ならびにクリープ変形等は全くほとんどみられず、ひずみ挙動も同様に持続荷重下において載荷荷重に応じて一定の値を示すものであった。

第 3 章「繰り返し温度変化を受ける CFRP 板接着 H 鋼の変形挙動」では、第 2 章で用いた鋼板に比べ、軸剛性や曲げ剛性の高い H 鋼を用いて長期ひずみ試験を実施し、その変形挙動について検討を行った。また、鋼桁の下フランジ補強の場合、CFRP 板の接着が上向き姿勢になる作業環境を踏まえ、施工不良による非接着部を設けた実験を行った。その結果、H 鋼と CFRP 板のひずみは、低温時に差異がみられた。これは H 鋼の線膨張係数が CFRP 板のそれより大きく、温度変化に伴い接着剤層でせん断変形が生じたものと考えられた。また、低温時の H 鋼と CFRP 板のひずみの差は供試体の中央部より端部の方が大きく、温度変化に伴い生じるせん断変形が大きいものと考えられ、H 鋼と CFRP 板の間のすべりやはく離は部材の端部から発生することが示唆された。また、CFRP 板に非接着領域を有する実験においてもすべりやはく離はみられなかった。したがって、本実験で採用した範囲における繰り返し温度と桁剛性であれば CFRP 板の接着に施工不良が生じ、非接着率が 20%程度になっても CFRP 板の補強効果の低下は顕著なものではないものと考えられた。

第 4 章「繰り返し温度変化を受ける CFRP 板接着 H 鋼の曲げ耐荷力」では、CFRP 板接着 H 鋼が常温から低温の 30°C の繰り返し温度変化を受けた場合の曲げ耐力・破壊性状を調べるため、温度履歴と非接着領域の違いをパラメータとした曲げ試験を実施した。そして曲げ破壊挙動を調べ、CFRP 接着による鋼桁補強のより効率的で安全な設計法確立のための検討を行った。その結果、H 鋼が降伏するまでは、H 鋼と CFRP 板の間には、はく離が生じず、低温履歴の影響は小さかった。いずれの試験でも供試体も H 鋼上フランジが先に降伏し、大きく変形することで CFRP 板と H 鋼にはく離が生じ、最終的には CFRP 板が破断するという破壊機構を示した。

また、非接着領域が 13%程度（非接着部 30mm 幅）までは曲げ載荷試験結果より、常温から低温の 30°C の温度変化履歴の影響はほとんどみられなかった。一方、非接着領域が 20%程度（非接着部 50mm 幅）の場合、CFRP 板と H 鋼間に伝達されるせん断力に影響を与える可能性がみられた。

第 5 章「CFRP 板接着 H 鋼のはく離挙動に関する数値的解析」では、第 4 章で得られた実験結果をもとに簡易的な理論数値解析により、H 鋼に接着された CFRP 板がはく離する

過程をシミュレーションした。その結果、CFRP 板と H 鋼間に伝達されるせん断力は部材端部が最も大きく、その影響により、端部からはく離が生じることを示した。さらにその後、端部から支間中央に向けて順次はく離が生じていくことを予測できた。

第 6 章「結語」は本論文の総括であり、本研究の主な成果を要約するとともに、今後の研究課題についてまとめた。

以上.



## Abstract

### Experimental study on bond properties of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) laminate glued to steel substrate under cold temperature

Hisatsugu TSUDA

A fact-finding survey the ministry conducted in the wake of the collapse of part of the ceiling of the Sasago Tunnel of the Chuo Expressway in Yamanashi Prefecture in December 2012 revealed that urgently needed to promptly work out and implement safety measures. In the above-mentioned background, Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) materials have been often used in civil infrastructures, such as bridges, to strengthen steel or concrete structural members. Because CFRP has the superior characteristic that other materials do not have ie light weight, high strength and not corrode. But there is not the standard design method about the CFRP-steel plate interface. Therefore, it is necessary to investigate the safety of the bond line and an effect of the CFRP plate reinforcement experimentally. The mechanical properties of steel with high modulus CFRP laminate under cold temperature were not studied sufficiently, though the laminates are often used in strengthening of steel girders. It can be valuable to examine the bond behavior of the CFRP-steel interface subjected to cold temperature. The present study shows the effect of cold temperature on the behavior of CFRP-steel interface. The experimental investigation was performed to examine the flexural behavior of the CFRP-steel composite beam subjected to cyclic cold temperature variations. To study the effect of improper gluing work, some beam specimens including un-bond region of CFRP laminate are prepared in addition to the full-bond specimens. The paper discusses the mechanical properties of the composite beam. The thesis consists of 6 chapters, and contents of each chapter are shown below.

In Chapter 1 “Introduction”, outline of the repair, reinforcement technology to the domestic steel bridge by the CFRP laminate glued to steel substrate is explained. Also the objectives and main contents of this thesis are described in this chapter.

In Chapter 2 "Effect of cyclic cold temperature on the behavior of CFRP-steel plate interface", the purpose of this chapter is to examine the behavior of the CFRP-steel plate interface exposed to cyclic cold temperature for a long term for three months The result indicates that deflection of the CFRP-steel composite beam increased linearly the lowering of the temperature. In addition, the test confirms that the deflection and strain of CFRP-steel composite showed a constant value during a loading period of 3 months.

The test implies that slipping, debonding and creep deformation of CFRP laminates were not observed due to the cyclic temperature changes.

In Chapter 3 "Effect of cyclic cold temperature on the behavior of the CFRP-H steel interface", aims to examining the strain behavior of the CFRP-H steel using rigid H steel distortion of the CFRP board at the time of low temperature. To study the effect of improper gluing work, beam specimens including un-bond region of CFRP laminate are prepared in addition to the full-bond specimens. The strains of beam and CFRP laminate under the low temperature varied due to the difference of coefficient of thermal expansions. The behavior was caused by the shear deformation of adhesive layer. In addition, the test implies that the difference of strains of an H-beam and CFRP laminate in the low temperature is bigger at beam-end than mid span of the test specimen.

The observation implies the cyclic cold temperature variation has a significant effect on the shear deformation of the test specimen. This result also shows that end-slip and/or debonding of CFRP laminate occurs at the end of beam. Even in the cyclic temperature test of specimen with bond-defects of 50 mm, thermal strain of CFRP was almost equal to the strain of bottom flange of H-beam at normal temperature. The results confirm that slipping and debonding of CFRP laminates were not observed due to the cyclic temperature changes.

In Chapter 4 "Flexural strength of cyclic cold temperature on the behavior of the CFRP-H steel interface", the purpose in this chapter is to examine the flexural strength of the CFRP-H steel interface. The experimental investigation aims to examine the flexural behavior of the CFRP-steel composite beam subjected to cyclic cold temperature variations. As a result, all composite beam specimens tested in this study indicated the following failure. Upper flange of the H-beam with CFRP was firstly yielded, while yielding in bottom flange of the control beam was observed. After the yielding, the bending deformation of the beam was increased by the applied load increase, and the CFRP laminate finally broke down at the maximum load. The flexural strengths of each test specimen were not significantly different. The test results also confirm that the bond-defects may be negligible for composite beam subjected to the cold temperature variation. The experimental investigations imply that the bond-defect of 50 mm or greater may affect shear force between the bottom flange and CFRP laminate.

In Chapter 5 "The numerical analysis about the debonding of the CFRP-H steel interface", and the CFRP laminate based on the experimental investigations obtained in Chapter 4 by simple theory numerical analysis simulated the process that debonding. As a result, the shear stress between CFRP-H steel had a biggest beam end and

showed that debonding occurred at the end.

Chapter6 “Summary” shows conclusions of this study, and describes the future studies.

# 目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 FRP 接着による補修・補強技術	3
1.2.1 FRP 接着による補修・補強技術の概要と課題	3
1.2.2 CFRP 接着による熱応力に関する研究	13
1.2.3 CFRP 接着による耐荷力向上に関する研究	15
1.2.4 CFRP 接着による耐疲労耐久性向上に関する研究	16
1.3 研究目的	18
1.4 論文の構成と概要	19
第2章 CFRP 板接着鋼板の変形挙動	20
2.1 目的	20
2.2 実験供試体	20
2.2.1 使用材料および材料特性	20
2.2.2 製作方法	21
2.2.3 線膨張係数	22
2.3 解析方法	22
2.3.1 弾性理論による変形予測	22
2.3.2 有限要素解析	26
2.4 長期たわみ試験	27
2.4.1 実験方法	27
2.4.2 実験結果と考察	29
2.5 まとめ	34
第3章 繰り返し温度変化を受ける CFRP 板接着 H 鋼の変形挙動	35
3.1 目的	35
3.2 実験供試体	35
3.2.1 使用材料および材料特性	35
3.2.2 非接着部を有する実験供試体	36
3.3 長期ひずみ計測試験	38
3.3.1 実験方法	38
3.3.2 実験結果と考察	40
3.4 まとめ	45

第4章 繰り返し温度変化を受けるCFRP板接着H鋼の曲げ耐力	46
4.1 目的	46
4.2 実験供試体	46
4.3 有限要素解析による解析的評価	46
4.4 曲げ載荷試験	49
4.4.1 実験方法	49
4.4.2 実験結果と考察	50
4.5 まとめ	71
第5章 CFRP板接着H鋼のはくり挙動に関する数値解析	72
5.1 目的	72
5.2 数値解析	72
5.2.1 数値解析モデル	72
5.2.2 基礎微分方程式の誘導と解	73
5.2.3 数値解析結果と考察	79
5.3 まとめ	82
第6章 結語	83
6.1 結論	83
6.2 今後の課題	85
参考文献	86
本論文に関する著者の発表論文	94
謝辞	95

# 第 1 章

## 序論

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

2012年12月に起きた中央自動車道の笹子トンネルの天井崩落事故をきっかけに、社会インフラの老朽化問題への関心が高まってきた。トンネルだけでなく、道路や橋、上下水道などの高度経済成長期につくられた社会インフラの修理・改築が日本全体の喫緊の課題となっている。しかしながら、国や自治体の財政状況は厳しいため、少子高齢化に伴って今後の利用が減少していく施設に関しては存廃を含めた施設のあり方を地域住民と協議を行うことや維持管理にかかるコストをなるべく減らすため利用の少ない橋を統廃合するなど「選択と集中」の考え方を社会インフラに適用していくことが不可欠となる。さらに低コストで安全性を確保できる新しい補修技術や工法を採用することも重要である。

我が国には道路橋は図-1.1に示すように全国に約70万橋存在する。全国約70万橋の橋梁の内、7割以上となる約50万橋が市町村道にあり、大部分は地方公共団体が管理しているものである。そのうち、高度経済成長期以降に集中的に整備した橋梁が、今後急速に高齢化し、10年後には建設後50年経過する橋梁が4割以上になると見込まれている。地方公共団体が管理する橋梁では、老朽化の進行等により、通行止めや車両重量等の通行規制を実施している橋梁数が、ここ数年で2倍以上に増加している。

我が国では、鉄やコンクリートで橋梁の整備が本格化したのは昭和30年前後であり、当時、それらは“永久橋”と呼ばれ、鋼橋は塗装の塗り替えのみで良く、メンテナンス・フリーと考えられていたことから、その維持管理の必要性が十分認識されていなかった。しかしながら前述した笹子トンネルの天井崩落事故を踏まえ、国土交通省は平成25年を「メンテナンス元年」と位置づけ、道路分野においても、急遽、緊急点検や集中点検を実施し、第三者被害防止の観点から最低限の安全性が確認された。今後のメンテナンスサイクルの具体的な取り組みの基本的な考えとして、道路管理者の義務の明確化、メンテナンスサイクルを回す仕組みの構築、国民・利用者の理解と支持が同時に連動して機能する必要とされている。さらに、老朽化対策の取り組みの実効性をより高めるためには、民間の技術力・ノウハウ・活力が最大限に活用されることが必要と考えられている。(国土交通省・社会資本整備審議会道路分科会、2014)

## 老朽化の現状・老朽化対策の課題

全国約70万橋の橋梁のうち、7割以上となる約50万橋が市町村道にあり、建設後50年を経過した橋梁(2m以上)の割合は、10年後には43%と増加

緊急的に整備された箇所や水中部など立地環境の厳しい場所などの一部も構造物で老朽化による変状が顕在化し、地方公共団体管理橋梁では最近5年間で通行規制が2倍以上に増加

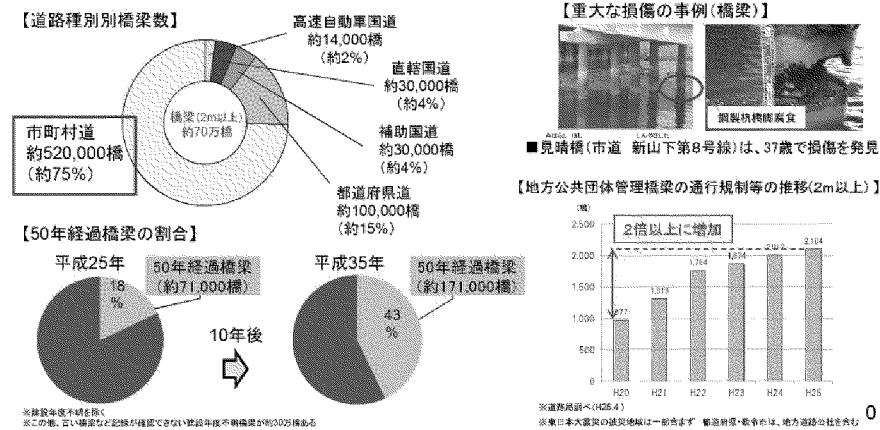


図-1.1 我が国の橋梁の現状と将来

(国土交通省ホームページ：道路の老朽化対策 老朽化対策の取組データより)

このような中、炭素繊維強化ポリマー（以下、CFRP という）は、軽量、高強度、腐食しない等、他の材料にない優れた特性を有しており、建設産業において、鋼、コンクリートに続く新しい材料として受け入れられつつある。CFRP は構造用部材としてよりも、コンクリート構造物の補修・補強材料として、いち早く注目され、研究開発が進められた。一方、CFRP の鋼構造物への適用に関する研究は、我が国では 2000 年頃から実施され、2002 年、我が国では初めて、設計荷重の変更に伴う耐荷力の向上を目的として、炭素繊維プレート接着によるトラス橋横桁の補強工事が施工された。しかしながら、CFRP と鋼部材の接着接合に関する標準的な設計法がないため、接合部の安全性や、CFRP の適用による効果を実験的に検証する必要があった。その後も、各所で研究開発が活発に行われ、橋梁をはじめとする鋼構造物への適用事例が報告されるようになり、鋼構造物の様々な部位の補修・補強に対しても CFRP の有用性が認められるようになった。

CFRP 接着工法の利点は主に以下の 2 点に集約される。

- ・CFRP は軽量で加工しやすいため、ハンドリングに優れ、施工後の死荷重増が少ない。
- ・施工は接着接合が基本であり、ボルト接合や溶接接合に比べ母材への影響が少なく簡便。



現場施工が基本となる補修・補強工事では、この 2 つの利点をもたらす効果は大きく、材料費が割高になっても、作業性の向上によって工期短縮が可能となり、総合的に評価すれば、従来工法に対して優位となる場合も示されている。このように、合理的な補修・補強技術としてほぼ認められたものの、CFRP 接着工法のさらなる普及を図るためには、さらに実験的な検証を行い、体系化された設計方針に基づいて、信頼性のある施工が行えるように、マニュアルや指針の整備が望まれている。

## 1.2 FRP 接着による補修・補強技術

### 1.2.1 FRP 接着による補修・補強技術の概要と課題

鋼構造物を対象とした FRP 接着工法の研究開発は、国内では 2000 年頃から開始され、2002 年に我が国で初めて設計荷重の変更にもなう耐荷力の向上を目的として、炭素繊維プレート接着によるトラス橋横桁の補強工事が行われた。その後も各所で研究開発が行われ、鋼橋をはじめとする既設鋼構造物への適用事例が報告されるようになってきた。しかしながら、FRP と鋼部材の接着接合に関する標準的な設計法がないため、接合部の安全性や FRP の適用による効果を実験的に検証しながら施工が行われているのが現状である。これまでの調査研究によれば、CFRP 接着による補修・補強の事例は、作用力、補修・補強に応じて、表-1.1 のように分類される。

表-1.1 作用力、補修・補強により分類した施工事例（土木学会複合構造委員会，2012）

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

補修・補強の効果は、FRP の材料特性等に依存するとともに、FRP と鋼部材の接着接合の施工品質に大きな影響を受ける。このため、あらかじめ用途に応じて使用材料の種類とその組み合わせを適切に選定するとともに、所要の品質を確保するための施工手順や品

質管理方法に十分配慮する必要がある。

以下に FRP の種類と材料特性と鋼部材と FRP の接合材料の特徴についてまとめる。

FRP の材料特性は、強化繊維と結合材である樹脂材料に依存する。一般に、FRP の機械的性質は、強化繊維の方向に支配的な特性、いわゆる異方性を示すことから、繊維方向と直角の作用力に非常に弱い性質を有する。各種 FRP (一方向材) の応力とひずみの関係を図-1.2 に示す。FRP は破断までほぼ線形挙動を示す。また、線膨張係数は、炭素繊維強化ポリマー (CFRP) で  $0.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、アラミド繊維強化ポリマー (AFRP) で  $2 \sim 5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、ガラス繊維強化ポリマー (GFRP) で  $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  であり、鋼の  $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  に比べ小さい (化学繊維技術改善委員会)。

また、CFRP (一方向性) においてはその圧縮耐力は引張耐力の 1/4~1/5 程度である。

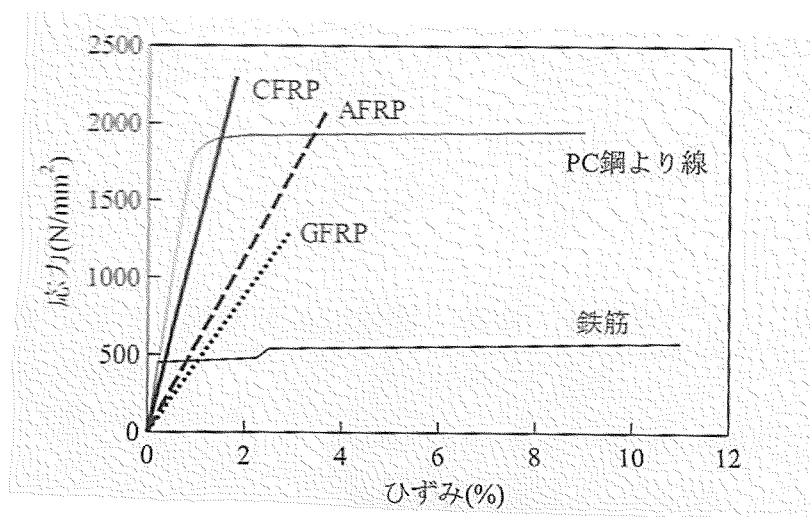


図-1.2 各種 FRP (一方向材) の応力とひずみの関係 (土木学会複合構造委員会, 2012)

次に、各種 FRP の主な特徴についてまとめる。

#### (1) 炭素繊維シート

炭素繊維シートは、強度やヤング係数などの物理的特性が異なる、高強度型炭素繊維、中弾性型炭素繊維、高弾性型炭素繊維を原料として製造され、繊維目付量や幅など、異なる種々のものが提供されている。写真-1.2に炭素繊維シートの外観を、また、炭素繊維シート（一方向性）の種類と材料特性の例を表-1.2に示す。いずれの炭素繊維シートも、軽量、高強度、高弾性、高耐久性など優れた特性を有しており、用途に応じて、所要の品質を有する炭素繊維シートを選ぶことができる。

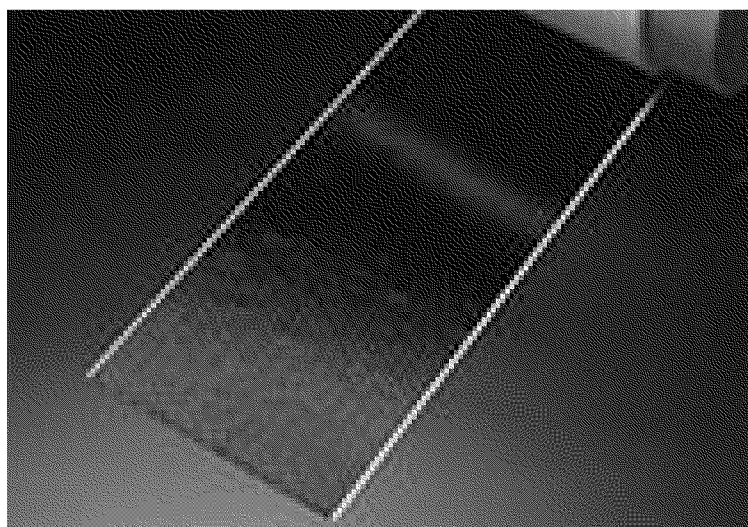


写真-1.2 炭素繊維シートの外観（三菱樹脂インフラテック（株）ホームページより）

炭素繊維シートの品質は、炭素繊維シートに樹脂が含浸して硬化した複合体（CFRP）の状態の評価されている。これは仮に、含浸接着樹脂なしで炭素繊維を引っ張った場合、ロープのように各繊維が逐次破断して、各繊維が持つ強度の総和を有効に活用することはできないためである。その品質は、引張強度、ヤング係数、終局ひずみについて、各々の特性値として定められている（JSCE-E541）。

炭素繊維シート接着工法は、炭素繊維を一方方向に配列したドライシートに現場で液状の樹脂を含浸・硬化させ、鋼部材とは一体化させる工法である。本工法では、現場で含浸させながら積層接着するため、その厚さを管理することはできず、単位体積当たりの繊維含有率（ $V_f$ ）は一般に20%程度である。

表-1.2 炭素繊維シート（一方向材）の種類と材料特性の例（土木学会複合構造委員会, 2012）

No.	炭素繊維の種類	繊維目付量 (g/m <sup>2</sup> )	設計厚さ t (mm)	引張強度 $\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
1	高強度型	200	0.111	3400	$2.45 \times 10^5$
2	高強度型	300	0.167	3400	$2.45 \times 10^5$
3	高強度型	400	0.222	3400	$2.45 \times 10^5$
4	高強度型	450	0.250	3400	$2.45 \times 10^5$
5	高強度型	600	0.333	3400	$2.45 \times 10^5$
6	中弾性型	300	0.165	2900	$3.90 \times 10^5$
7	中弾性型	300	0.165	2400	$4.40 \times 10^5$
8	高弾性型	300	0.143	1900	$5.40 \times 10^5$
9	高弾性型	300	0.143	1900	$6.40 \times 10^5$

※引張強度，ヤング係数は，ドライシートに樹脂が含浸し，硬化した複合体（FRP）の値。

また，設計厚さは，繊維目付量/CF密度で定義された値である。

※終局ひずみは，製品の特性値として特に規定されていないが，破断強度とヤング係数の関係からほぼ類推できる。

## (2) 炭素繊維ストランドシート

炭素繊維ストランドシートは，炭素繊維束に工場です樹脂を繊維含有率 (V<sub>f</sub>) 50%で含浸・硬化させた直径 1mm 程度の炭素繊維ストランドを横糸で連結したものであり，鋼部材の補修・補強に適用されている。写真-1.3 に炭素繊維ストランドシートの外観を，また，表-1.3 に炭素繊維ストランドシートの種類と材料特性の一例を示す。いずれも，軽量，高強度，高弾性，高耐食性など優れた特性を有しており，補修・補強の用途に応じて所要の品質を有する炭素繊維ストランドシートを選択することができる。

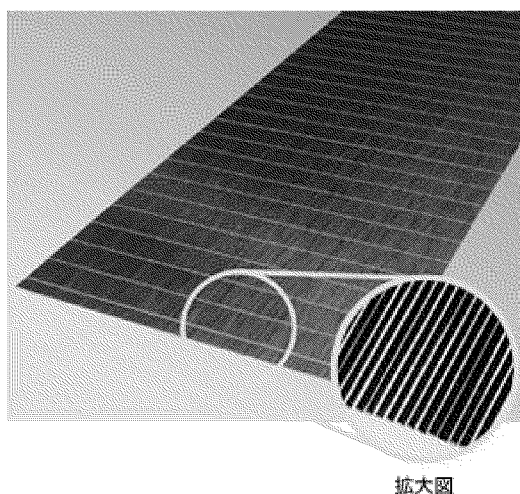


写真-1.3 炭素繊維ストランドシートの外観  
(新日鉄住金マテリアルズ(株) ホームページより)

表-1.3 炭素繊維ストランドシートの種類と材料特性の例(土木学会複合構造委員会, 2012)

No.	炭素繊維の種類	繊維目付量 (g/m <sup>2</sup> )	設計厚さ t (mm)	引張強度 $\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
1	高強度型	600	0.333	3400	$2.45 \times 10^5$
2	中弾性型	600	0.330	2900	$3.9 \times 10^5$
3	高弾性型	600	0.286	1900	$6.4 \times 10^5$
4	高弾性型	900	0.429	1900	$6.4 \times 10^5$

※終局ひずみは、製品の特性値として特に規定されていないが、破断強度とヤング係数の関係から類推できる。

炭素繊維ストランドシートの品質は、炭素繊維に樹脂が含浸して硬化したストランド状の成形材について規定され、引張強度、ヤング係数、終局ひずみについて、各々の特性値として定められている (JSCE-E541)。

炭素繊維ストランドシートは、施工現場において、樹脂含浸の工程がなく、不陸修正材兼用のペースト状の接着剤で鋼部材表面に接着される。また、炭素繊維ストランドシートと鋼部材が一体となった状態の力学特性は、炭素繊維シートと同等であることから、設計上は炭素繊維シートと同様に扱われている。

### (3) 炭素繊維プレート

炭素繊維プレートは、強度やヤング係数などの物理的特性が異なる、高強度型炭素繊維、中弾性型炭素繊維、高弾性型炭素繊維を原料とし、工場において、樹脂を含浸させた成形加工により、プレート状に製造されたものである。写真-1.4 に炭素繊維シートの外観を、また、炭素繊維プレート（一方向性）の種類と材料特性の例を表-1.4 に示す。板厚や幅など、寸法の異なる種々のものが提供されている。いずれも、軽量、高強度、高弾性、高耐久性など優れた特性を有しており、補修・補強の用途に応じて、所要の品質を有する炭素繊維プレートを選ぶことができる。

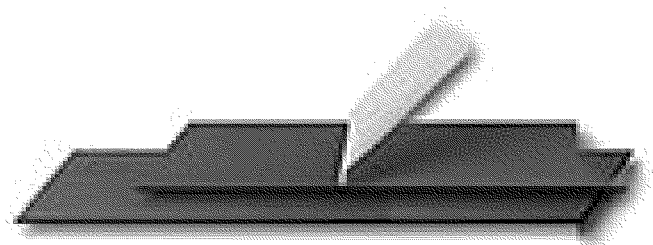


写真-1.4 炭素繊維プレートの外観(三菱樹脂インフラテック(株)ホームページより)

表-1.4 炭素繊維プレート(一方向材)の種類と材料特性の例(土木学会複合構造委員会, 2012)

No.	炭素繊維の種類	厚さ t (mm)	引張強度 $\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
1	高強度型	1.0, 1.2, 1.5, 2.0	2400	156
2	高弾性型	1.2, 2.0, 4.0	1200	450

※終局ひずみは、製品の特性値として特に規定されていないが、破断強度とヤング係数の関係からほぼ類推できる。

炭素繊維プレートの品質は、炭素繊維に樹脂が含浸して硬化した成形板について規定され、引張強度、ヤング係数、終局ひずみについて、各々の特性値として定められている(JSCE-E541)。

炭素繊維プレート接着工法は、炭素繊維プレートを接着剤で接着する工法である。炭素繊維シート接着工法はドライシートを現場で含浸させながら積層接着するため、積層工程が増え、品質にばらつきが生じやすい。これに対して、炭素繊維プレートは、引き抜き成形品であるため高品質であり、その繊維含有率 ( $V_f$ ) は一般に 70%程度である。また、工場において、炭素繊維プレートをあらかじめ積層接着しておくことも可能である。剛性の高い炭素繊維プレートが鋼部材に接着されるため、その端部の接着剤には応力集中が生じ、はく離しやすくなることから、設計、施工に十分な配慮が必要となる。

#### (4) ガラス繊維シート

ガラス繊維シートは、強度やヤング係数などの物理的特性が異なる。ガラス繊維を原料として製造され、繊維方向、繊維目付量や幅など、異なる種々のものが提供されている。鋼構造物の補修・補強に用いられているガラス繊維シートは、ガラス繊維基材に、紫外線硬化型樹脂を含浸したプリプレグシートとして製品化されたものであり、汎用の補修材として普及しているものである。写真-1.5に紫外線硬化型ガラス繊維シートの外観を、また、表-1.5に紫外線硬化型ガラス繊維シートの種類と材料特性の一例をそれぞれ示す。紫外線硬化型ガラス繊維シートは、紫外線の照射によって硬化が促進される。硬化前は柔軟性に富むため、変則的な形状への対応がある程度は可能である。

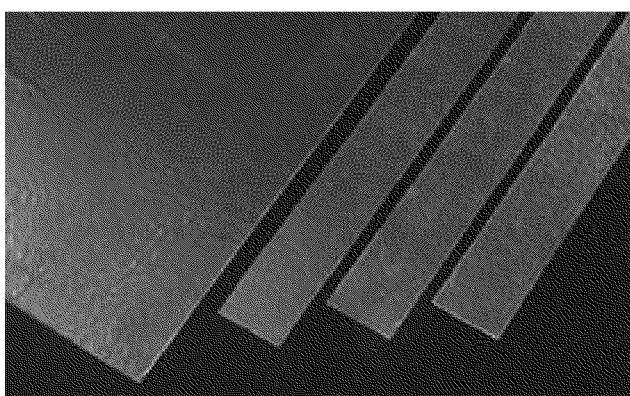


写真-1.5 紫外線硬化型ガラス繊維シートの外観（土木学会複合構造委員会，2012）

表-1.5 紫外線硬化型ガラス繊維シートの種類と材料特性の例  
（土木学会複合構造委員会，2012）

厚さ $t$ (mm)	引張強度 $\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	繊維含有率 $V_f$ (%)
1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0	115	$8.8 \times 10^3$	25~32

※ガラス繊維の種類は、チョップドストランドマットであり、その厚さは、プリプレグシートの厚さである。

※引張強度、ヤング係数は、プリプレグシートが硬化して複合体（FRP）となった状態での実験による実測値である。

※終局ひずみは、製品の特性値として特に規定されていないが、破断強度とヤング係数の関係からほぼ類推できる。

ガラス繊維シートの品質は、樹脂が硬化した状態のものについて規定され、引張強度、ヤング係数、終局ひずみについて、各々の特性値として定められている。（JSCE-E541）

また、ガラス繊維基材の形態（一方向連続繊維シートまたチョップドストランドマット）、繊維の方向や量、樹脂の種類などによって引張強度やヤング係数が異なっている。したがって、ガラス繊維シートを硬化させた成形板の状態で適切な試験方法（JSCE-E541、

JIS K 7164, JIS K 7165）により、その特性値が確認されている。なお、紫外線硬化型

樹脂を含浸していない、通常のガラス繊維シートは、鋼部材と炭素繊維との電食防止のために適用された実績がある。(山田ら, 2009) また、ガラス繊維シート等を、炭素繊維プレートと鋼部材との接着層に挿入することで、はく離に対する抵抗強度を向上する方法(石川ら, 2007) も提案されている。

#### (5) アラミド繊維シート

アラミド繊維には、メタ系とパラ系があり、補修・補強の用途としては、高強度で耐衝撃性に優れたパラ系アラミド繊維が用いられる。写真-1.6 にアラミド繊維シートの外観を、また、表-1.6 にアラミド繊維シートの種類と材料特性の例をそれぞれ示す。

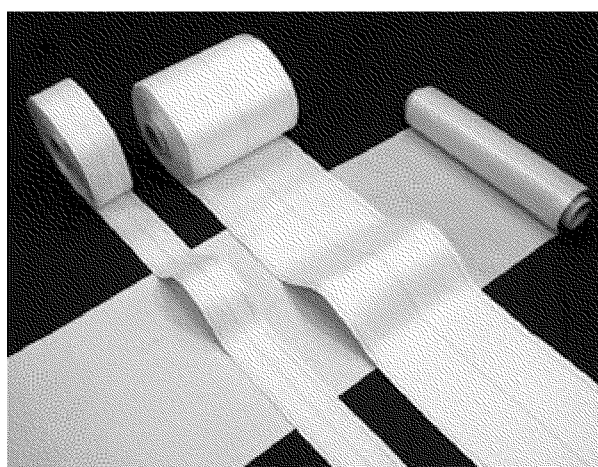


写真-1.6 アラミド繊維シートの外観 (アラミド補強協会ホームページより)

表-1.6 アラミド繊維シートの種類と材料特性の例 (土木学会複合構造委員会, 2012)

No.	繊維方向	繊維目付量 (g/m <sup>2</sup> )	設計厚さ t (mm)	引張強度 $\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
1	1 方向	280	0.193	2060	1.18×10 <sup>5</sup>
2	1 方向	415	0.286	2060	1.18×10 <sup>5</sup>
3	1 方向	623	0.430	2060	1.18×10 <sup>5</sup>
4	1 方向	830	0.572	2060	1.18×10 <sup>5</sup>
5	2 方向	90	0.0310/0.0310	2060	1.18×10 <sup>5</sup>
6	2 方向	180	0.0621/0.0621	2060	1.18×10 <sup>5</sup>

※引張強度、ヤング係数は、ドライシートに樹脂が含浸し、硬化した複合体 (FRP) の値である。

※終局ひずみは、製品の特性値として特に規定されていないが、破断強度とヤング係数の関係からほぼ類推できる。



次に CFRP 板と鋼部材の接合に用いられる材料である接着剤の特徴について以下にまとめます。

炭素繊維プレート接着工法に用いる接着剤は、作業に適した粘度および可使時間を有し、炭素繊維プレートを鋼部材表面に圧着した際に鋼部材と炭素繊維プレート間に隙間なく接着剤が充填され、炭素繊維プレートを保持できるものが選定されている。炭素繊維プレート接着工法では、炭素繊維プレートの上に接着剤を数 mm の厚さに塗布したのちに、鋼部材表面に押し付けて接着する。したがって、接着剤は、塗布作業時にダレ落ちることなく、かつ圧着時に炭素繊維プレートと鋼部材間に隙間なく圧着されて所用の接着剤厚さ（1～2mm 程度）を確保できる粘度と、適切な可使時間を有するものが選定されている。

施工は施工条件および環境条件を考慮して、要求性能に応じた品質を満足するように実施されている。本研究で対象の炭素繊維プレート接着工法の標準的な施工手順について図-1.3 に示す。

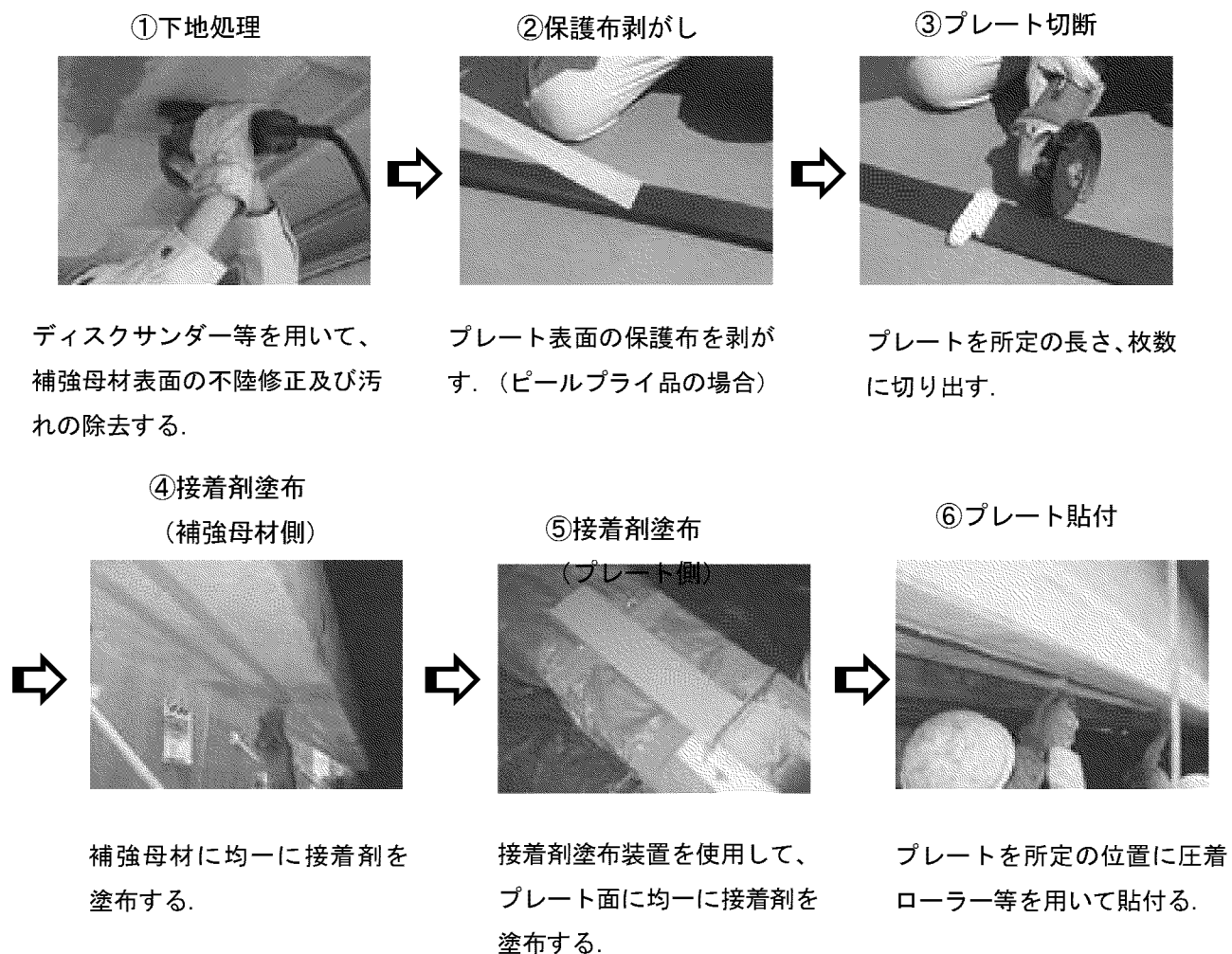


図-1.3 炭素繊維プレート接着工法の施工手順  
(三菱樹脂インフラテック(株)ホームページより)

- ・ 施工環境条件

施工は、補修・補強の性能を十分に発揮できるように、施工時および養生時の温度や湿度、施工環境条件等を十分考慮して実施される。樹脂の施工環境条件は、温度 5℃以上、鋼部材表面が乾燥した状態でかつ湿度 85%以下である。現場の雰囲気温度や鋼部材表面温度が低い場合（5℃未満）には、施工現場で加温養生を行うか、低温用のプライマー、含浸接着樹脂または接着剤を用いる。

さらに、接着剤の硬化に及ぼす動的荷重の影響については、繰り返し軸方向力を受ける鋼部材への炭素繊維プレートの接着特性を検討した実験において、接着剤の硬化中に一定振幅の繰り返し荷重を作用させても接着強度を損なうことはなかったことが報告（林ら、2010.11）されているが、繰り返し曲げモーメントを受ける鋼はりに厚板の中弾性型炭素繊維プレートを接着した際には、はく離する場合があることが確認されている。（山田ら、2011）したがって、現場状況に応じ、できるだけ動的荷重の影響を受けないように、施工の時間帯を工夫することが望ましい。

- ・ 下地処理

CFRP 板と鋼部材との接着を確保するため、鋼部材表面の塗膜等は除去し、所要の下地状態にする。鋼部材表面の素地調整は、ブラストが望ましいが、ディスクサンダーにより素地調整を行う場合、あるいは一部に塗膜等が残るような場合には、接着が確保できるかを事前に実験などにより確認した後、施工が行われている。また、鋼部材表面に油分などの汚れがあると、CFRP 板と鋼部材の接着に悪影響を及ぼすため、有機溶剤などを用いて鋼部材表面を清掃する。清掃後は、素手で触って皮脂を付着させることのないように保護手袋の着用、表面の養生などの処置が行われている。

- ・ 接着

CFRP 板は、その繊維方向にしか応力を伝達しないため、設計された方向に繊維方向を一致させて、正しい位置に、曲がりがないように接着する。特に炭素繊維プレート接着工法では、直線性が確保できない場合、所要の補強効果を発揮できないため注意が必要である。

- ・ 養生

CFRP 板の接着後、接着剤が効果するまでの間は、必要に応じて接着接合部を養生する。一般に、エポキシ樹脂は、湿気などの水分に反応し、硬化不良や白化などが生じるおそれがあるので、CFRP 板の接着後、含浸接着樹脂や接着剤が初期硬化するまでは接着部に水がかからないように養生する。また、砂、埃の付着もエポキシ樹脂の硬化に悪影響を及ぼすので、含浸接着樹脂や接着剤が初期硬化するまでは接着部を養生する。なお、含浸接着剤や接着剤が初期硬化するまでは接着部には外力が作用しないように配慮する。常温硬化型エポキシ樹脂の場合、初期養生期間の目安は、平均気温 10℃で約 3 日、

20°Cで2日、30°Cで1日とされている。強度発現の目安は、平均気温10°Cで2週間、20°Cで1週間、30°Cで3日程度とされている。さらに、低温下では樹脂の硬化反応が遅延する傾向にある。特に5°C以下ではほとんど硬化が進まないことから、加温養生等により接着面を5°C以上に保つ必要がある。

炭素繊維プレート接着工法では、軽量で粘性の高い接着剤を用いるが、上向き、横向き施工に際しては、重力により落下しによう、簡単な万力などで仮固定しておくことが望ましい。(玉井ら, 2005)

### 1.2.2 CFRP 接着による熱応力に関する研究

CFRP 接着工法では、CFRP と鋼やコンクリートの材料特性の相違に起因する問題や、樹脂材料の持続荷重に対する問題として、熱応力、ガルバニック腐食、クリープなどが指摘されており、これらに関する研究が行われている。

前項で述べたように、CFRP は、鋼やコンクリートと大きく線膨張係数が異なる材料である。そのような CFRP を鋼やコンクリートに接着した場合、気温が変動すると、鋼やコンクリートと CFRP 板の温度膨張量、収縮量がそれぞれ異なるため、内部応力(熱応力)が生じる。熱応力によって鋼やコンクリートに生じる応力や、接着剤に生じるせん断応力に関する研究、部材に生じる熱応力を低減させる工法の開発、ならびに温度が CFRP のはく離に与える影響に関する研究が行われている。

以下に FRP (主に CFRP) の熱応力に関する既往の研究を列挙する。

Dutta・Hui ら(1996)は、CFRP とガラス材との2種類の複合材料における凍結融解作用による耐久性について-60°Cから50°Cの幅広い範囲の繰り返し温度を与え、曲げ試験を行い、その機械的特性を報告した。2種類の複合材料は片方が市販のものであり、もう片方はガラス繊維を特殊な編み方をして補強したものであった。実験の結果、前者は長期サイクルで温度変化を受けて材料間に隙間が生じたが、後者は全く隙間が生じなかった。これより極端な温度環境下においては、繊維の種類や加工過程が FRP 複合物の繰り返しの温度変化に対する挙動や最終的な耐久性に影響を及ぼすことを示した。

Oliveira・Lavanchy ら(2008)は、炭素繊維複合物のオートクレーブ硬化中の内部応力の増加に対する鋳型材料の影響を光学 FBG を使って実験的に検討した。一方向性のクロスプライ複合体をアルミニウム、鋼、カーボン複合物とカーボン発泡体の4種類の平らな鋳型に保管し、鋳型の温度伸びとオートクレーブの圧縮によりひずみを増加させた。実験の結果、大きな残存ひずみがアルミニウムまたは鋼の鋳型の上で保管された供試体において軸方向に見受けられた。ところが一方、カーボンの鋳型に保管された供試体は温度が低下した後にほとんどひずみがみられなかった。これにより、樹脂にとっては引張側よりも圧縮側に抵抗する場合に有効であることを示した。

Cao・Wu ら (2012) は、炭素繊維と炭素/エポキシ複合シートの引張強度に与える温度影響について 20°C から 500°C の範囲で実験的に明らかにした。実験結果から高温になるとエポキシポリマー気質が軟化し、ファイバーが熱で弱くなるために炭素複合材の強度が低下することを明らかにした。

Kim・Hossain ら (2012) は、劣化した鋼橋の FRP 補強の典型として用いられる飽和樹脂と硬化剤からなる混合タイプのエポキシ樹脂を用いた重ねせん断継手の低温環境下 (-20°C) での耐久性について 43 体の供試体を用いて実験的に検討を行った。また、3 次元モデル解析により低温環境下における重ねせん断継手の挙動の予測を提案した。

福澤・三井ら (2001) は、コンクリート表面に CFRP シートで補強した場合の CFRP シートとコンクリート間の付着性状に及ぼす環境温度の影響を明らかにするため、環境温度を -15°C から 60°C で変化させ、はく離付着挙動への影響を検証した。また、CFRP シートをコンクリートへ接着する時や養生時の温度が CFRP シートとコンクリート間のはく離特性に及ぼす影響についても検討を行った。実験の結果、CFRP シートとコンクリート間のはく離付着特性は、実験時の温度に顕著に影響を受け、樹脂の種類や接着ならびに養生時の温度の影響は小さいことがわかった。また、CFRP シートとコンクリート間の最大付着応力は 20°C の場合に最も大きく、高温環境および低温環境になるにつれ減少するが、特に高温環境における低下が著しいことを示した。

呉・岩下ら (2005) は、CFRP シートの付着強度の耐候性評価を検証するために、環境温度に着目し、ガラス転移温度や荷重たわみ温度を超える高温環境下では剛性の低下が顕著となり、変形しやすくなるとされているエポキシ樹脂で CFRP シートをコンクリートに接着し、両引きせん断付着試験を行った。評価ははく離破壊エネルギーや平均せん断付着強度を評価指標として付着強度に対する温度の影響を評価した。実験の結果、算出されたはく離破壊エネルギーと平均付着強度は各種エポキシ樹脂の耐熱性指標を超える環境温度において急激に減少することを示した。また、耐熱性環境指標を超える環境温度においてコンクリートのせん断応力は低下しないが、樹脂のせん断強度が低下するために、はく離が樹脂の層間から生じていることがわかった。

石川・大倉ら (2006, 2007) は、温度変化によって CFRP 板接着鋼板に生じる熱応力および接着剤に生じるはく離せん断応力を、CFRP 板と鋼板との間にガラス繊維シート (GF シート) を挿入した場合と未挿入の場合の両者に対して解析的に明らかにした。さらに、CFRP 板接着鋼板を製作し、実験結果との比較を行い、解析結果の妥当性を明らかにした。その結果、ガラス繊維シートを CFRP 板と鋼板の間に挿入することにより、温度変化を受ける CFRP 板接着鋼板に生じるはく離せん断応力がガラス繊維シート未挿入の場合のそれよりも低下することを明らかにした。また、温度変化によって CFRP 板接着鋼板に生じる応力分布の全体的な傾向は、試験結果と解析結果で同様であった。

杉浦・大垣ら (2006) は、供用中の橋梁を制約条件下でも効果的な補修・補強できる工法のひとつとして炭素繊維シートを用いた工法を提案し、鋼材に炭素繊維シートを接着させ、20°C~60°C の繰り返し温度を 100 回負荷し、その挙動について確認を行った。その結

果、炭素繊維シートのはく離や破断は発生せず、温度サイクル負荷後の引張試験結果は以前のものと変わらないことが確認した。

石川・大倉ら（2008）は、CFRP 板付着端近傍に低弾性接着剤が用いられた接着鋼板に対して、鋼板の応力を所定の値まで低下させる CFRP 板の接着長さおよびはく離せん断応力の低減率を理論的に明らかにした。また、同様の条件で引張試験を行い、解析結果の妥当性を明らかにした。理論解析によって、はく離応力が最小となる低弾性接着剤の塗布範囲を定式化した。また、引張試験の結果、CFRP 板付着端近傍へ低弾性接着剤を使用することによって、はく離せん断応力が低減されることを示した。

姜・山谷ら（2009）は、平鋼板を突き合わせ、両面を CFRP 板で接合した接着継手試験片を用いて、試験温度を $-10^{\circ}\text{C}$ から $60^{\circ}\text{C}$ の範囲で変化させ、接着継手の引張試験を行った。 $-5^{\circ}\text{C}$ から $40^{\circ}\text{C}$ の範囲でこの補修工法の適用性について問題のないことを報告した。

石川・服部ら（2011a, 2011b）は、CFRP 板が上下面に対称に接着された鋼板を対象に、温度変化によって鋼板に生じる熱応力を低減させる方法として、線膨張係数が鋼の約 2 倍のアルミニウム合金板を CFRP 板と共に鋼板に接着する方法を提案し、実験的ならびに数値解析を行い、開発した工法による鋼板の熱応力の低減効果を明らかにした。

### 1.2.3 CFRP 接着による耐荷力向上に関する研究

CFRP 接着による耐荷力向上に関する研究では、軸力を受ける部材を対象とした論文が最も多く、その次に曲げモーメントを受ける部材を対象とした論文が多い。

主な研究内容としては、軸力を受ける部材も曲げモーメントを受ける部材も共に接着長さに関する検討（接着長さがある程度長くなると鋼板の応力が鋼板と炭素繊維プレートによる合成断面として計算できること）。ならびに CFRP のはく離に関する検討である。

また、近年、疲労き裂進展対策として、炭素繊維プレートをを用いて鋼板に圧縮のプレストレスを導入する方法の検討や、鋼板の座屈に対する CFRP 接着補強に関する研究が行われている。

以下に FRP（主に CFRP）の耐荷力向上に関する既往の研究を列挙する。

渡邊・板垣ら（2000）は、鋼橋の補強材として、TL-14 活荷重で設計された既存の桁を B 活荷重へ対応させるために、CFRP 板を使用し、補強の効果が得られることを実験により明らかにした。

小野・杉浦ら（2000）は、損傷を有する鋼管の円周方向に CFRP シートを巻き立てることで得られる補強効果について、曲げ試験を行い、積層数、定着長、周方向の補強の有無をパラメータとして考察した。その結果、最大曲げ耐力の改善は見込めるが、積層 CFRP の異方性と鋼管の等方性が大きく影響を及ぼし、早期に部分的なはく離が生じやすくなることがわかった。

野阪・金子ら（2003）は、CFRP 板を鋼板に接着し、CFRP 板と鋼板両方の板厚を変化させ、供試体のはく離崩壊および鋼板応力の低下（補強効果）に対する影響を実験的に検討した。実験結果より鋼板が厚い場合、CFRP 板が接着されていない面でのひずみが、補強前のひずみよりも大きくなる傾向があることがわかった。また、CFRP 板の層数が増加した場合、CFRP 板端部付近において鋼板が局所的に降伏し、早期にはく離を生じる可能性を示した。

玉井・高松ら（2004）は、アラミド及び炭素繊維プレートの補強材料と鋼材の接着後の基本的特性を把握するため、引張試験・建研式引張接着試験・引張せん断付着試験を行なうとともに、H 形鋼はりの下フランジ外面に連続繊維プレートを貼り付け、その補強効果と曲げ変形下の接着特性を評価した。実験の結果、補強により曲げ剛性は増大し、H 形鋼下フランジの引張ひずみを緩和でき、その効果は中弾性型の炭素繊維プレートが顕著であった。また、連続繊維プレートを 1 層下フランジ下面に接着する補強で、耐力を 17～25% 程度上昇させることができることがわかった。

松村・北田ら（2005）は、プレストレスを導入した CFRP シートによる鋼桁の補強効果を確認し、プレストレスを導入した場合に問題となる鋼材と CFRP との界面はく離の発生を防止できるはく離制御板を提案し、その設置効果を実験的に検討した。載荷実験では、鋼桁供試体に CFRP シートを貼付することによって、降伏荷重を 10%、プレストレスを導入すると 19% 向上することがわかった。また、CFRP シートに導入するプレストレス量が 8000  $\mu$  程度であれば、はく離制御板を CFRP シート端部におけるはく離の発生を防止することが可能であることを示した。さらに、プレストレスを導入して CFRP シートを貼付する方法を、架設時のプレートガーダーへ適用した場合、従来の設計で決定される板厚を 1～2mm 低減できる可能性があることがわかった。

杉浦・小林ら（2008a, 2008b, 2009）は、鋼部材の経年劣化、損傷等に対する効率的な補修方法として、炭素繊維シートを用いた補修工法におけるはく離強度の向上を目的として検討を行った。接着端の仕上げ方法に着目した引張試験と FEM 解析を実施した。その結果、炭素繊維シートをずらして接着することで接着端の応力集中は緩和されはく離強度の向上に有効であることを示した。また、鋼材の断面欠損部の補修に適用した場合のはく離強度への影響と補修効果の検証を行い、CFRP を接着することで荷重が分担されることから応力改善が期待できることを示した。

#### 1.2.4 CFRP 接着による耐疲労耐久性向上に関する研究

CFRP 接着による耐疲労性向上に関する研究も比較的多く行われている。研究の多くが引張部材へ FRP 接着を行い、引張応力を繰り返し与えた疲労試験に関するものであった。

以下に FRP（主に CFRP）の耐疲労耐久性向上に関する既往の研究を列挙する。

鈴木・井東ら（1999）は、切欠きからのき裂の発生を防止するための補強を想定し、CFRP 板によって補強された切欠き（長さ 25mm, 先端半径 2mm）を有する鋼板（100×9×1000mm）の引張試験を行い、切欠きを有する鋼板に補強材として CFRP 板を用いることの可能性について検討した。実験の結果、層間せん断力は、CFRP 板の先端部と中央部で大きく、CFRP 板の中央からの距離が 30～110mm の間ではほぼ 0 であった。CFRP 板は鋼板の総断面が降伏するまではく離しなかった。また、CFRP 板のはく離はその先端部あるいは中央部（切欠き部）から生じたものであることが示された。

山田・酒井ら（2003）は、照明柱や標識柱の基部に対し、疲労き裂の発生を抑制する、あるいは発生したき裂の進展を遅延させるという観点から、鋼管基部を炭素繊維シートで補強し、疲労実験を行い、き裂の簡易な補修方法の適用性について検討を行った。その結果、標識柱基部で 20mm 程度の確実に発見できるき裂に対して、約 20% 応力を低減できるように炭素繊維シートを貼り付けて補修を行うと、き裂の進展速度が 1/6～1/7 程度になり、延命効果が期待できることがわかった。

連・平野ら（2005）は、補強・補修に用いられている紫外線硬化樹脂を取り上げ、その補強・補修効果を確認するために複数の供試体を用いて疲労試験を行った。さらに、鋼構造の疲労設計指針（日本鋼構造協会、2012）で示されている疲労等級の分類を考慮し、計測データと重ね合わせるおとにより補強された供試体のき裂が進展して破壊に至るまでの繰り返し回数を延ばす延命効果が得られるか検証を行った。その結果、紫外線硬化樹脂補強を行うことにより、無補強時に比べ、破壊点に至るまでに 1.5 倍～1.6 倍程度の疲労寿命の延命効果が期待できることがわかった。疲労寿命の延命効果の原因として供試体の剛性の低下速度を抑制する効果、疲労き裂の進展を抑制する効果があることが確認された。

中村・山谷ら（2007）は、CFRP 板接着により鋼板の疲労き裂を補修した場合、目視などによる直接的な確認が困難な CFRP 貼付域におけるき裂の進展を把握することに目的として、ひずみゲージを用いたモニタリングの可能性について解析的、実験的な検討を行った。その結果、き裂の進展に伴って作用力が徐々に CFRP 板へ移行することから、CFRP 板貼付域のき裂先端位置を CFRP 板表面の 2 点間のひずみ差から評価できることが FEM 解析により具体的に示されるとともに、疲労試験によりその妥当性を確かめた。さらに、複数のひずみゲージを適用して、き裂進展が予測される延長線上の CFRP 板表面のひずみ差の変化を把握すれば、き裂の進展をモニタリングすることが可能であることを示した。

中村・姜ら（2011）は、CFRP 板接着による疲労き裂を補修効果を、過去の疲労試験結果（中村・諸井ら（2005））と対比させて、定量的に明らかにした。面外ガセット溶接継手部から発生した疲労き裂の補修を想定して、CFRP 板の接着方法の相違や回し溶接の先端部の接着形態が補修効果に及ぼす影響について解析的に検討した。線形弾性有限要素解析により、き裂先端の応力拡大係数を算定して、その低減効果を比較するとともに、線形破壊力学に基づいたき裂進展解析を行って、補修後の疲労寿命を推定した。

### 1.3 研究目的

近年、鋼構造物の特に曲げモーメントを受ける部材の補修・補強材料として CFRP 板を利用した工法の開発が盛んに行われている。CFRP 板は、剛性が高く高弾性・高強度といった特性を有し、補強断面の剛性を高くすることが有効であることからよく採用されている。また、施工においても樹脂で接着させるため比較的容易である。そこで、本研究においても施工実績を踏まえて CFRP 板を研究対象とした。

CFRP 板を利用した鋼構造物の補修・補強工法には以下のものがある。補強断面が大規模の場合、現場での含浸や接着作業を簡略化されることができ炭素繊維シートを工場で板状に硬化成形した炭素繊維プレートを用いるもの。狭隘部の補強に柔軟性に優れたガラス繊維シートを用いたもの。鋼製橋脚の耐震補強として炭素繊維シートを巻立てて補強するものなど様々な目的や施工性に応じた工法が用いられている。(渡邊・板垣ら, 2000 ; 渡辺・石田ら, 2002 ; 徳林・池田ら, 2003 ; 松村・北田ら, 2004)

CFRP 板を接着した鋼材に関する研究は、はく離強度に着目した研究や温度変化に着目した研究など実験的にも解析的にも盛んに行われているが、低温下の環境での変形挙動に着目した研究は比較的少ない。我が国の道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編(日本道路協会, 2002)においては、寒冷な地方の鋼部材に対しては 10℃を標準温度として-30℃から 50℃の範囲の温度変化に対して設計するように規定されている。よって、鋼構造物の補修・補強材料として CFRP 板により信頼性を高めるためには、低温下の環境での変形挙動を明らかにしておく必要がある。本研究では、低温下を氷点下と定義し、我が国の月別平均気温が最低である北海道の網走地方において-7.2℃であることから-5℃から-10℃を最低温度に設定し、繰り返し温度変化は1日の温度差が北海道で 10℃程度、東北から九州で 15℃前後、最大でも内陸部で 20℃であることからその設定を 30℃とやや厳しくした。

本論文では、低温下における CFRP 板を接着させた鋼板ならびに H 鋼の曲げ耐力実験を行い、さらには CFRP 板の非接着部を有する H 鋼の曲げ耐力実験を加え、低温下における基本的な変形挙動について検討を行った。また、実験結果をもとにした簡易的な数値解析を行い、CFRP 板のはく離挙動について推測を行った。



## 1.4 論文の構成と概要

本研究は、低温下において CFRP 板接着により補強された鋼構造物の接着挙動について、各種の実験結果を基に実運用に際して、基本的な力学特性と施工性について検討を行った。まず始めに、鋼板にエポキシ樹脂接着剤により CFRP 板を接着補強した供試体により、低温下での変形挙動を調べ、接着特性を把握した。次に、鋼板に比べて軸剛性・曲げ剛性の高い H 鋼をエポキシ樹脂接着剤により CFRP 板を接着補強した供試体に常温～低温の温度履歴を長期間与えた場合の接着特性を把握した。そこで、鋼板に接着した CFRP 板の変形特性やひずみの挙動を求めた。さらに、常温から低温の 30℃の温度履歴を長期間与えた場合の CFRP 板-H 鋼はりの接着特性を把握するために、曲げ載荷試験を行い、強度変化やひずみの挙動について実験的に検討を行った。最後に、常温から低温の 30℃の温度履歴を長期間受ける CFRP 板接着 H 鋼のはく離挙動を CFRP 板と H 鋼の間の接着剤に生じるせん断応力に着目し、簡易的な理論数値解析により検討を行った。本論文の構成を図-1.4 に示す。

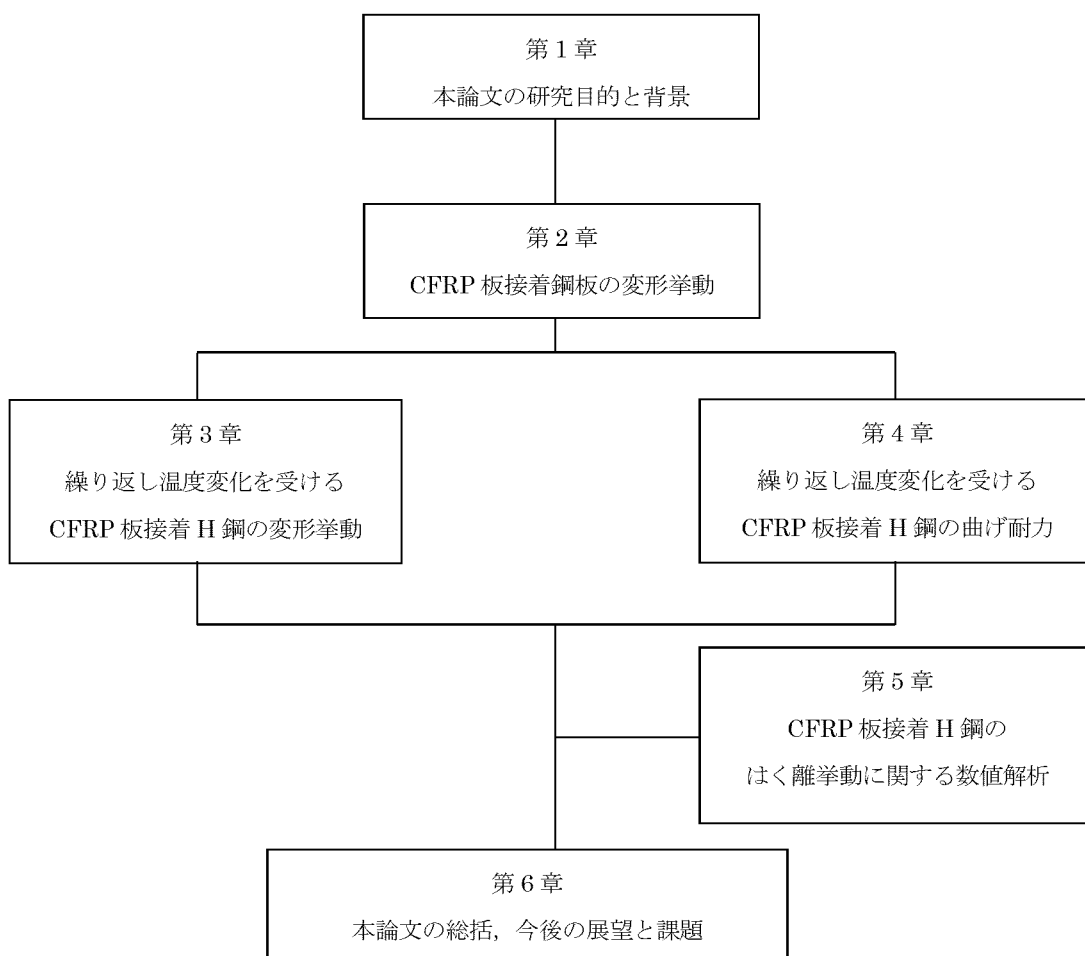


図-1.4 本論文の構成

## 第 2 章

### CFRP 板接着鋼板の変形挙動

## 第2章 CFRP 接着鋼板の変形挙動

### 2.1 目的

CFRP 板を鋼部材に接着させることにより設計荷重の変更により要求される耐荷力の向上を図ることや、腐食などにより損傷を受けた鋼部材に対して所定の断面性能まで回復させることが実構造物においても採用されている。ところが、鋼部材と CFRP 板との線膨張係数の差異が著しいため、鋼部材と CFRP 板を接着させた場合、温度変化に応じて両者の界面には、熱応力が作用することになる。CFRP 板を含む炭素繊維に関する既往の研究では、高温環境下における挙動に着目した例が多く、低温環境下における時系列変形挙動に関する検討はほとんどみられない。温度上昇過程では、鋼部材の熱膨張により、CFRP 板には引張力が作用することになるが、温度下降過程では、その逆の挙動を示すことになり、本来引張部材として設計される CFRP 板の補強効果が不明瞭となる。そこでまず鋼板（平板）に CFRP 板を接着した上で、低温環境下において曲げ変形を与え、その時間依存性変形挙動について実験的に検討を行い、考察を行った。

### 2.2 実験供試体

#### 2.2.1 使用材料および材料特性

本実験では、図-2.1 に示す供試体を実験に使用した。供試体は、CFRP 板で補強された鋼板の下フランジを模し、鋼板は平鋼（125mm×9mm）を使用し、CFRP 板には高弾性型の炭素繊維プレート（100mm×2mm）を使用した。その長さはいずれも 1600mm とした。また、鋼板と CFRP 板との接着剤には主剤であるエポキシ樹脂と硬化剤である変性脂環式ポリアミンを重量比で 2:1 の割合で混合した接着樹脂を用いた。なお、一般に接着剤は常温タイプと低温タイプの 2 種類があるが、今回は低温下で実験を行うため、低温タイプを採用した。

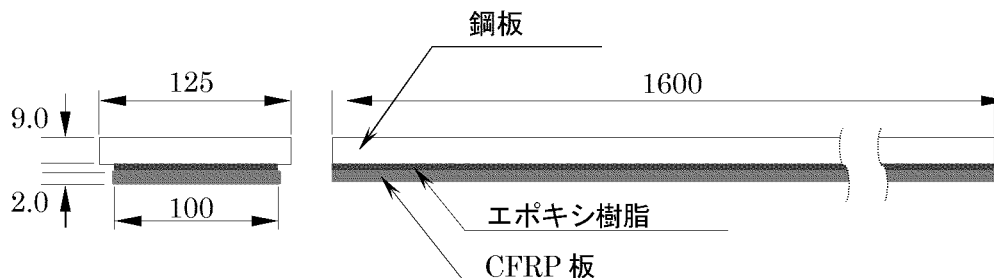


図-2.1 実験供試体

高弾性型 CFRP 板と接着剤の材料特性を表-2.1 および表-2.2 に示す。

表-2.1 高弾性型 CFRP 板の材料特性

	規格値	実験値	材料規格
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	450(+20%, -10%)	480	JIS K 7165
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	1200	1628	JIS K 7165

表-2.2 接着剤の材料特性

	保証値	実験値	試験方法
比重 (硬化物)	1.55~1.75	1.6	JIS K 7112 準拠
可使時間 (分)	30 以上 (標準 60)	58	温度上昇法 (250 g)
粘度 (硬化物)	パテ状	パテ状	JIS K 6833 準拠
引張せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	10 以上	15	JIS K 6850 準拠
コンクリート接着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	1.5 以上	3.6	JIS K 6909 準拠
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	50 以上	59	JIS K 7165 準拠
圧縮弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )	1000 以上	3700	JIS K 7165 準拠

### 2.2.2 製作方法

供試体の製作は室温を 22°C の一定に保たれた環境下で行った。また、接着作業まで CFRP 板、鋼板ならびに接着剤の各材料は同一温度下で管理し、材料間の温度差が生じないようにした。CFRP 板と鋼板の接着は写真-2.1 に示す治具を使用し、気泡が生じないように接着剤の厚さが 1mm 程度になるよう CFRP 板に塗布した後、それを鋼板に接着させて製作した。塗布した接着剤の量は、375g/m<sup>2</sup> であった。製作した供試体は、接着作業完了後、22°C の一定温度下で 11 日間養生した。



写真-2.1 接着樹脂塗布治具

### 2.2.3 線膨張係数

実験に先立ち本実験に使用する鋼板と CFRP 板の線膨張係数を求めた。線膨張係数は鋼板ならびに CFRP 板の破片にそれぞれひずみゲージを貼り付け、温度制御装置を用いて温度変化を与え、ひずみの値を測定して求めた。その測定結果を表-2.3 に示す。ここで使用したひずみゲージは低温用のものを使用し、鋼板用のひずみゲージは、ゲージ長 2mm、熱膨張係数  $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  であり、CFRP 板用のひずみゲージは、ゲージ長 2mm、熱膨張係数  $3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  である。

表-2.3 供試体材料の線膨張係数

	線膨張係数 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
鋼板	12.3
CFRP 板	0.3

## 2.3 解析方法

### 2.3.1 弾性理論による変形予測

本実験のたわみの実測値の評価にあたり、作用荷重によるたわみと温度変化を受けるたわみの弾性理論による変形予測を行った。

まず、単純桁の支間中央に集中荷重が作用した場合のたわみを求める。

図-2.2 に荷重載荷図を、式(2.1)にたわみの分布をそれぞれ示す。

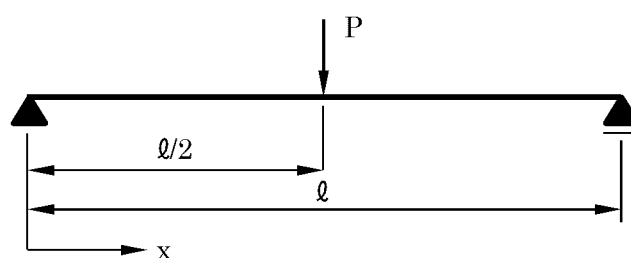


図-2.2 荷重載荷図

$$v = \frac{1}{EI} \left( -\frac{P}{12} x^3 + \frac{P \ell^2}{16} x \right) \quad (2.1)$$

$v$  : たわみ,  $P$  : 載荷荷重,  $E$  : ヤング係数,  $I$  : 断面 2 次モーメント

式(2.1)においては、断面 2 次モーメントが未知数であるため、CFRP 板のヤング係数を鋼板のヤング係数に置き換えた場合のみかけの断面 2 次モーメントを求める。

$$E_s=200\text{kN/mm}^2, \quad E_c=480\text{kN/mm}^2$$

$$n = \frac{E_c}{E_s}$$

$$x = \frac{G_s + G_c}{A_s + n \times A_c}$$

$$I_s = \left( \frac{b_s \times t_s^3}{12} \right) + A_s \left( \frac{t_s}{2} - x \right)^2$$

$$I_c = \left( \frac{b_c \times t_c^3}{12} \right) + n \times A_c \left( t_s + \frac{t_c}{2} - x \right)^2$$

$$I = I_s + I_c$$

以上から

$$I=1.79 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

ここに、 $E$ : ヤング係数,  $A$ : 断面積,  $n$ : ヤング係数比,  $G$ : 断面 1 次モーメント,  $x$ : 最上面からの図心位置,  $I$ : 断面 2 次モーメントを表す。

式(2.1)に求めた断面 2 次モーメントを代入し、

$$v = \frac{1}{200 \times 1.79 \times 10^7} \left( -\frac{P}{12} x^3 + \frac{P \ell^2}{16} x \right) \quad (2.2)$$

$v$ : たわみ,  $P$ : 作用荷重

式(2.2)から作用荷重によるたわみの変形予測を行った。そのたわみの変形予測を図-2.3 に作用荷重別に示す。

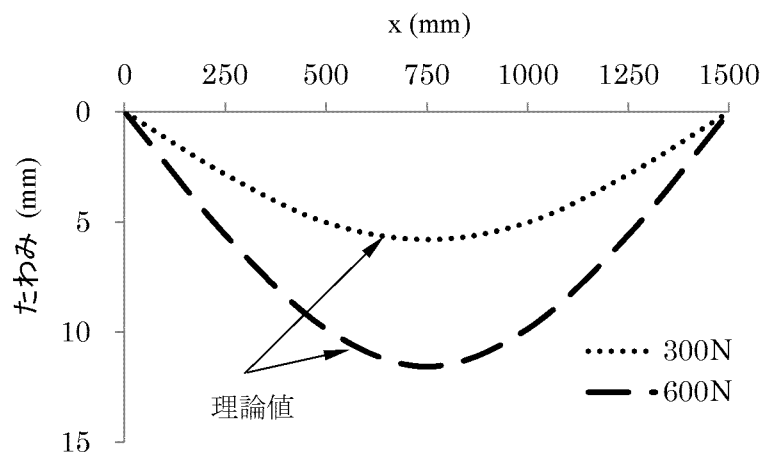


図-2.3 作用荷重によるたわみの変形予測

次に、温度変化を受ける単純はりのたわみの理論値について求める。  
式(2.1)から各計測点のたわみを式(2.3)で求めることができる。

$$v = \int_0^l M \frac{T(\alpha_l - \alpha_u)}{h} dx \quad (2.3)$$

$v$  : たわみ,  $T$  : 温度変化量 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\alpha_l$  : 下面の線膨張係数 ( $\times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ )  
 $\alpha_u$  : 上面の線膨張係数 ( $\times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ ),  $l$  : スパン長 (mm),  $h$  : 供試体厚さ (mm)

支間中央のたわみは、式(2.3)より式(2.4)で求めることができる。

$$v = \frac{T(\alpha_l - \alpha_u) \cdot l^2}{8h} \quad (2.4)$$

本実験では、鋼板の下面に CFRP 板を配置している。また、たわみの計測点は支間中央の他、端支点から 250mm および 500mm の位置にも設けている。

250mm の計測点のたわみを式(2.5)に示す。

$$v = \frac{15 \cdot T(\alpha_l - \alpha_u) \cdot l^2}{216h} \quad (2.5)$$

500mm の計測点のたわみを式(2.6)で示す.

$$v = \frac{T(\alpha_l - \alpha_u) \cdot l^2}{9h} \quad (2.6)$$

本実験では, 外気温 22°Cで鋼板に CFRP 板を接着し, その後, 冷凍庫内で温度を-5°Cまで下げた. 表-2.3に示す CFRP 板と鋼板の線膨張係数を式(2.4)~式(2.6)に代入して, 温度変化を受けるたわみの変形予測を図-2.4に示す. また, 図-2.4には, -5°Cから-20°Cまで 5°Cずつ温度を下げた場合のたわみの増加状況も示した. 温度とたわみの関係について図-2.5に示す. 理論値ではたわみは1°Cあたり-0.31mm増加する.

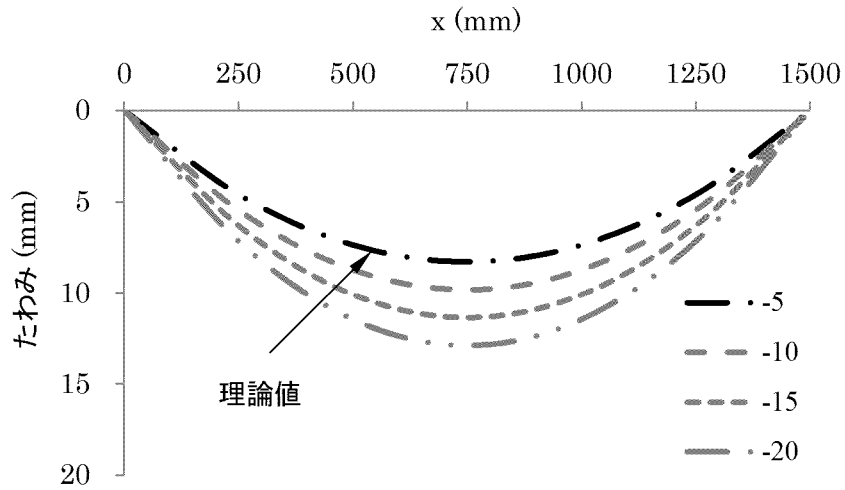


図-2.4 温度変化を受けるたわみの変形予測

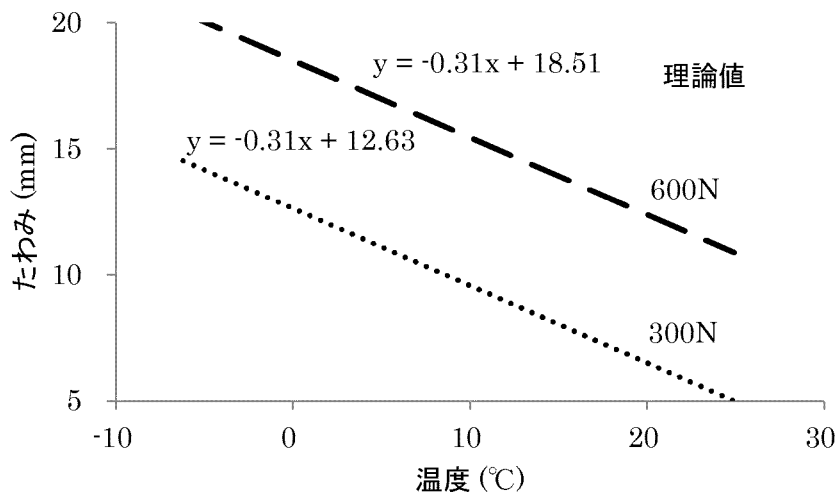


図-2.5 温度変化とたわみの関係 (理論値)



### 2.3.2 有限要素解析

実験結果と比較のために有限要素解析を行った。解析モデルを図-2.6に示す。解析モデルは鋼板を3Dモデルで、CFRP板を2Dモデルで作成した。鋼板の寸法は $125 \times 9 \times 1600$ mm, CFRP板の寸法は $100 \times 2 \times 1600$ mmとした。なお、鋼板とCFRP板の間の接着剤は解析モデルには考慮していない。

解析モデルの境界条件を図-2.7に示す。図はモデルの下面を示している。拘束条件として1端ピン支持、他端可動支点としている。

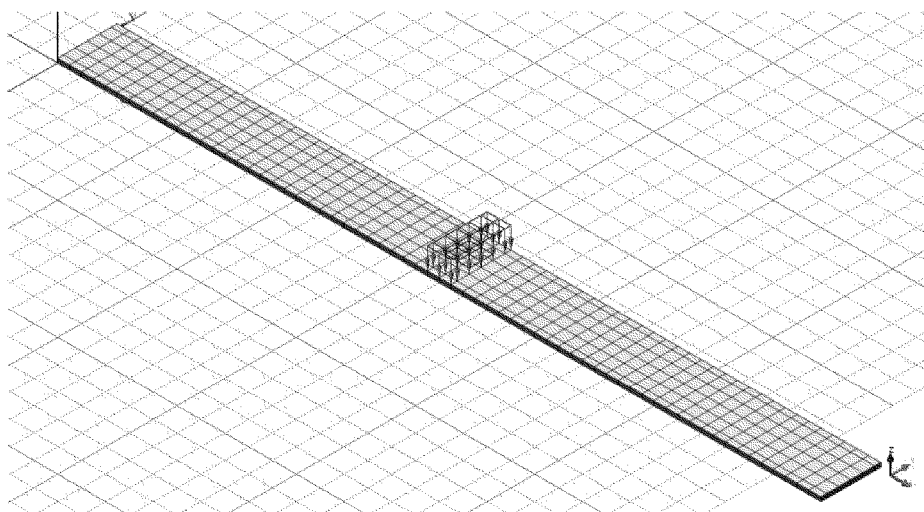


図-2.6 解析モデル

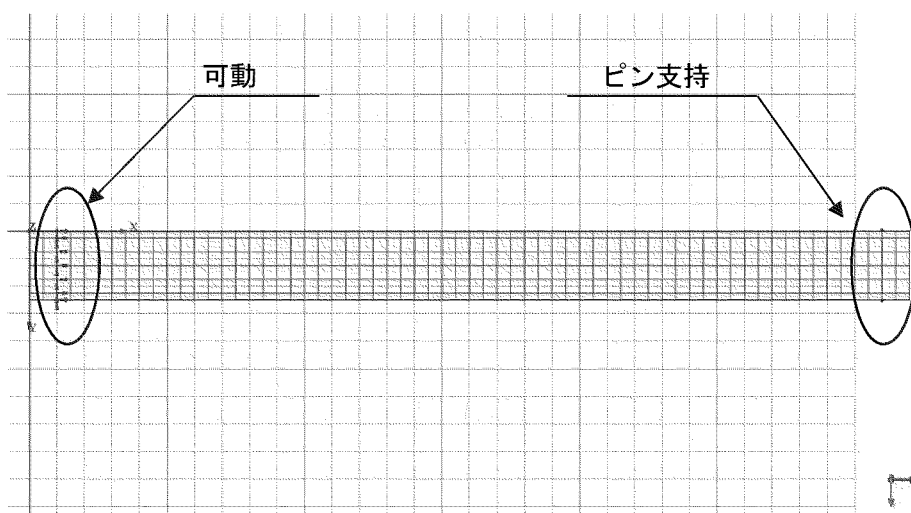


図-2.7 境界条件

解析に用いた鋼板の物性値を表-2.4, CFRP 板の物性値を表-2.5 に示す. なお, 物性値は実験値に基づいて設定した.

表-2.4 鋼板の物性値

ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	206000
ポアソン比	0.3
線膨張係数 (10 <sup>-6</sup> /°C)	12

表-2.5 CFRP 板の物性値

ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	480000
せん断弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	240000
線膨張係数 (10 <sup>-6</sup> /°C)	0.3

## 2.4 長期たわみ試験

### 2.4.1 実験方法

本実験は, 山口大学が保有する大型冷凍庫内に設置した支間長 1500mm を有する試験装置により実施した. 写真-2.2 に載荷状況を示す. 供試体の支間中央に 300N ならびに 600N の荷重を載荷した. たわみはデプスゲージを用いて, 供試体のたわみを直接計測した. 計測は図-2.8 に示すように, 各供試体に 7 箇所測定した. 計測にあたっては図中の孔のあいた梁 (はり) が供試体の両側のたわみの無視できる鋼材を 250mm 間隔でスライドし, その孔にデプスゲージを挿入して 0.05mm 単位でたわみを計測した. 計測は約 3 ヶ月間実施した. また, 冷凍庫内の設定温度を -5°C とし, 一定の冷却停止期間を設け, 供試体に温度変化を与えた. その温度履歴を図-2.9 に示す. 冷却停止時 (常温時) の供試体の温度が徐々に低下しているのは, 載荷試験を秋季から冬季にかけて行ったためである.

また, 供試体のひずみはひずみゲージを各供試体に鋼板と CFRP 板のそれぞれ 1 箇所計測した. 計測位置は支間中央より 1cm ずらせた位置とした. ひずみゲージは 1 軸低温用のものを使用し, CFRP 板および鋼板とも長手方向 (橋軸方向) に貼り付けた.

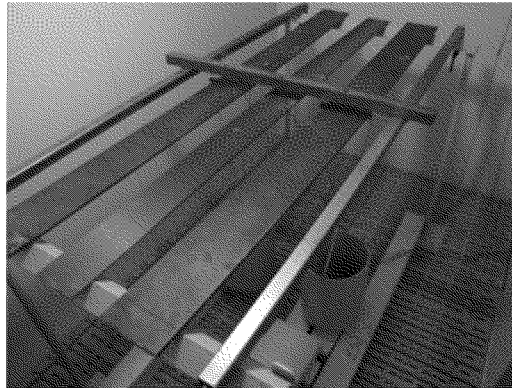


写真-2.2 静的載荷試験状況

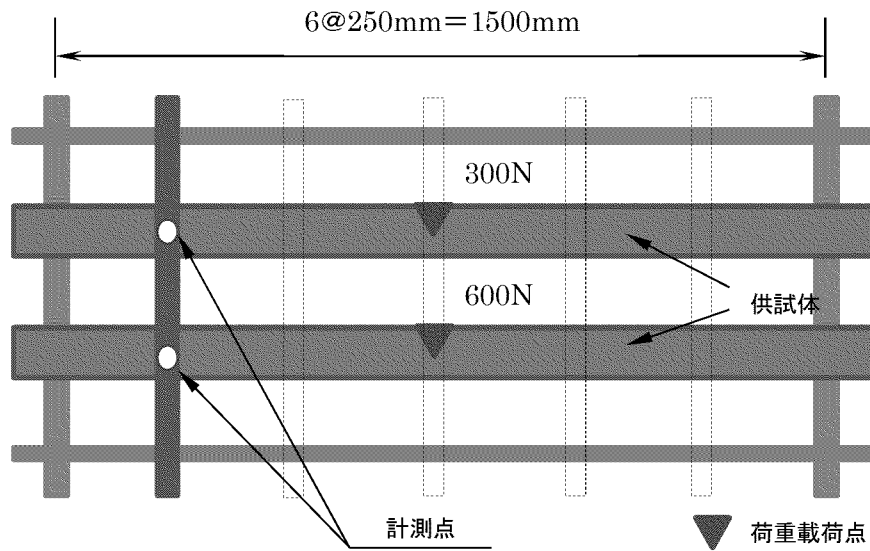


図-2.8 供試体のたわみ計測点

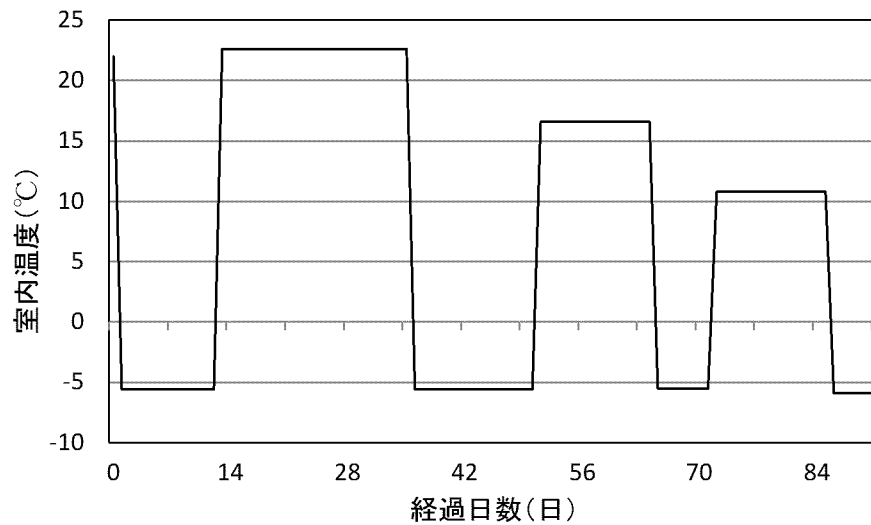


図-2.9 実験室内の温度履歴

#### 2.4.2 実験結果と考察

図-2.10, 図-2.11 にそれぞれ 300N, 600N の荷重下における供試体のたわみ分布を示す。たわみは支点から 250mm 間隔で計測した。図中の凡例は作用荷重, 温度ならびに載荷日数を示す。

たわみ分布から, 温度の低下に伴い, たわみが大幅に増加する結果がみられた。実験供試体は, 下面に CFRP 板, 上面に鋼板が位置している。そのため, 線膨張係数の違いにより, 下向きなたわみが生じたものと考えられる。

次に, 図-2.10 と図-2.11 を比較すると温度降下時のたわみの増加量は, 荷重によらず, ほぼ同程度であった。また, 測定値と有限要素解析および理論値とを比較した結果, ほぼ等しい値を示した。有限要素解析と理論値は CFRP 板と鋼板が完全接着と仮定した弾性理論を用いている。測定値と概ね一致しているため, 供試体にすべりやはく離が生じていないと推定できる。また, 3 ヶ月の載荷期間中たわみは一定の値を示したことからクリープ変形はほとんどなく, 十分な接着耐力があると考えられる。

ここで, 長さ 10m の鋼桁の単純桁について考える。鋼桁のたわみの許容値は, 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編よれば 5mm 以内と規定されている。この条件から求まる最小曲率半径は, 2500m である。一方, 測定値から求められた曲率半径は, 載荷荷重 300N では 209m, 600N では 146m という値となり, 測定値は, たわみの許容値を大幅に上回る結果となった。実橋では I 桁など曲げ剛性の高い断面が使用されており, このような大きなたわみは生じない。しかし, 大きく異なる線膨張係数の材料を合成した複合構造物では, たわみの変動に注意する必要がある。たわみの許容値の設定にも留意が必要である。

供試体は, たわみの許容値を大幅に超える変形をしているが, はく離に至っていない。これらの比較から許容値の 10 倍以上の大変形においても CFRP 板は鋼板の変形に十分に

追従できるものと考えられる。

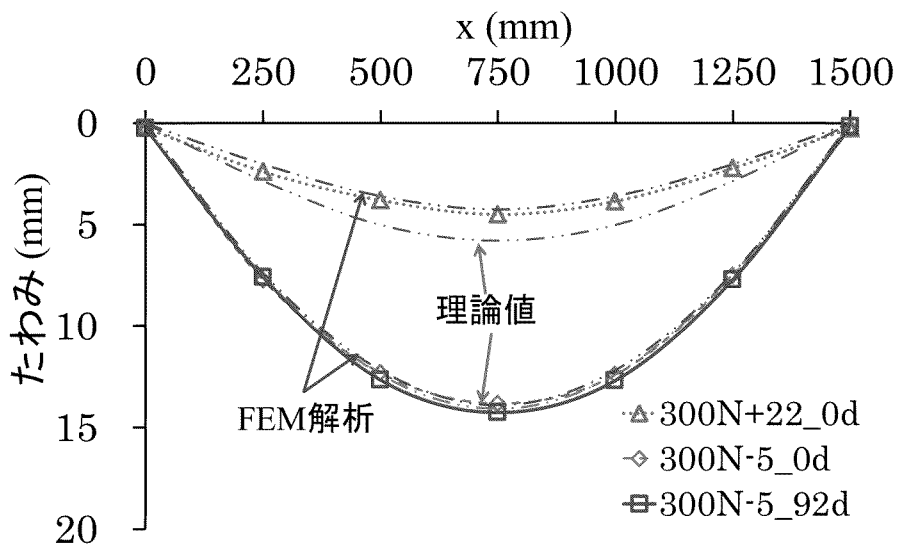


図-2.10 たわみ分布 (300N)

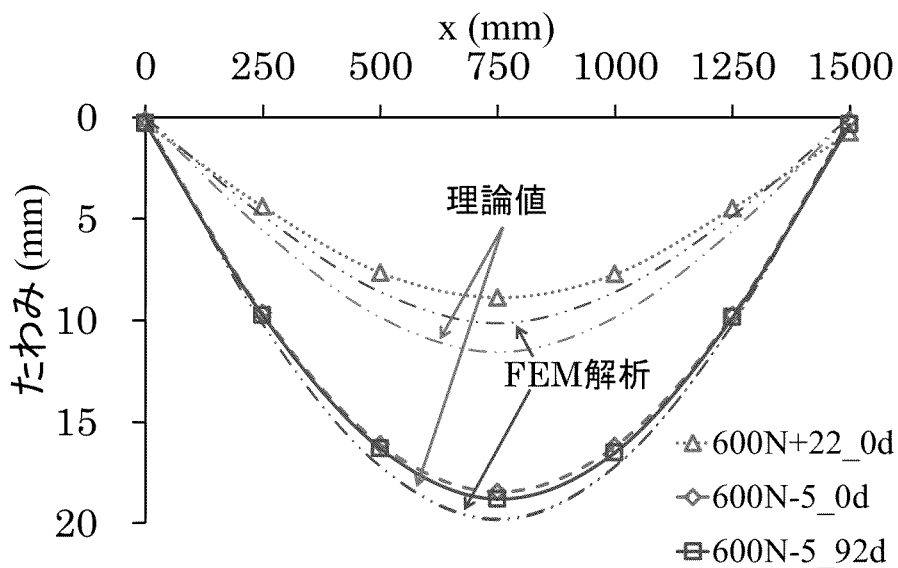


図-2.11 たわみ分布 (600N)

図-2.12 に温度と支間中央のたわみの関係を示す。この図からわかるように温度とたわみは比例関係を示していることがわかる。また、2つの直線は並行であり負の傾きをもつ。その割合は、 $-0.33\text{mm}/^\circ\text{C}$ であった。温度変化とたわみの関係は、荷重によらず一定の割合で変化することがわかる。載荷荷重 300N および 600N 作用時の有限要素解析と理論値を図-2.13 内の点線で示している。有限要素解析の傾きは $-0.36\text{mm}/^\circ\text{C}$ であり、理論値の負の

傾きは、 $-0.31\text{mm}/^\circ\text{C}$ であった。若干傾きに差異が生じる結果となった。これは、理論値の計算や有限要素解析において、接着剤層の影響を無視して CFRP 板と鋼板が完全結合と仮定したため測定値に対して若干の差異が生じたと考える。実験値が理論値に比べて傾きが小さくなったのは、接着剤の剛性によりたわみが小さくなったものと考えられる。複合構造の単純桁の変形挙動は弾性理論を用いておおよそ推定することができるが、厳密には接着剤の厚さや材料特性の影響も考慮する必要があると思われる。

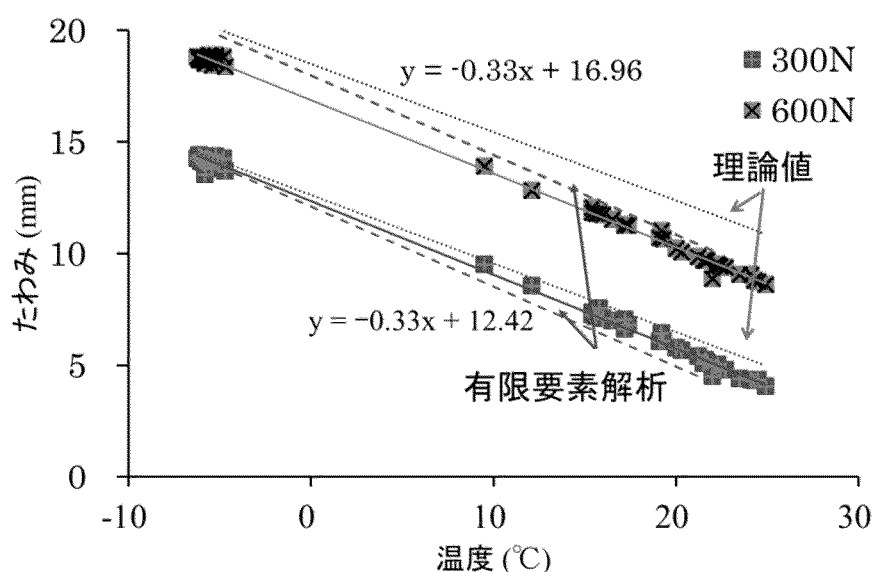


図-2.12 支間中央のたわみと温度の関係

図-2.13, 図-2.14 に温度と支間中央のひずみの関係を示すたわみの挙動と同様に 2つの直線は比例関係を示しているが、たわみのグラフと比べた場合、測定値にばらつきがみられる。温度が高くなるにつれて比例性が失われているように見られるが、これはひずみゲージの非線形性による要因と考えられる。また、図-2.13 および図-2.14 を比較した際、CFRP 板の測定値は、鋼板の測定値より安定な比例関係を示した。このことからひずみにおいても鋼板と CFRP 板の間にずれやはく離が生じていないことがわかる。

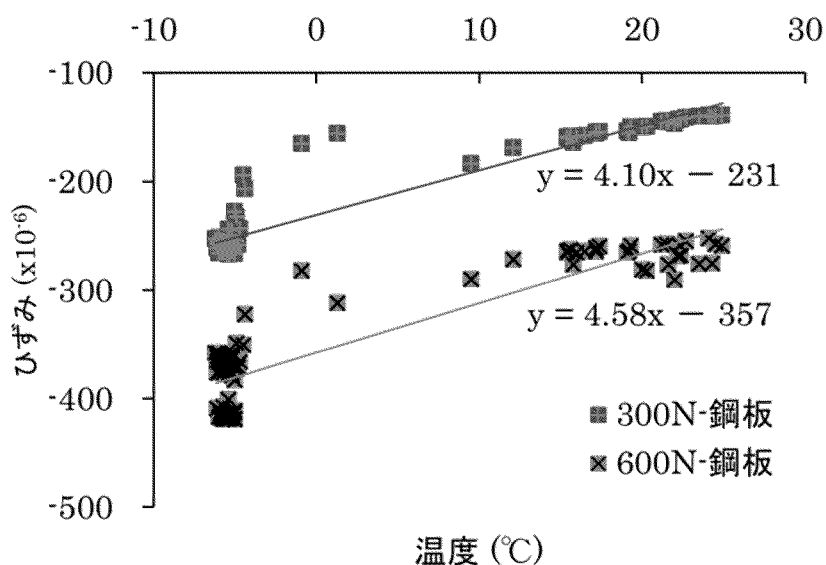


図-2.13 鋼板における支間中央のひずみと温度の関係

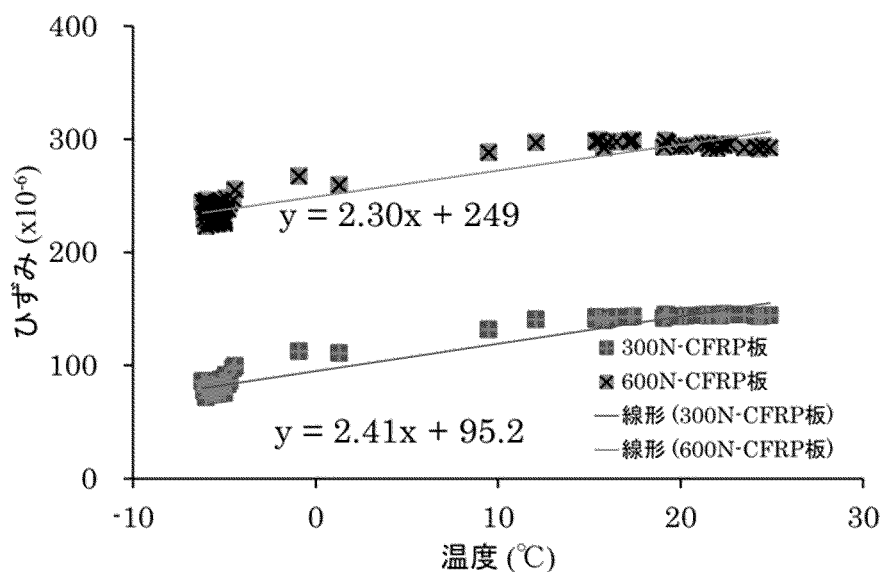


図-2.14 CFRP 板における支間中央のひずみと温度の関係

図-2.15 に支間中央のたわみの時系列挙動について示す。図中の点線は理論値を表している。本実験では繰り返し変動する温度を受けることを想定して冷却時および冷却停止時を設けており、たわみが増加している期間は冷却時それ以外の期間は冷却停止時である。

載荷荷重 300N および 600N が作用した場合のたわみの最大値は、3 ヶ月の載荷期間中一定の値を示す。また、載荷期間中に、冷却停止時および冷却時を設けて温度を上下させたが、理論値と大きく異なるたわみの変動はみられなかった。これらの結果から、たわみ

の最大値をある程度予測することができるため、複合断面のたわみを許容値内となるよう設計する場合に有効と考えられる。

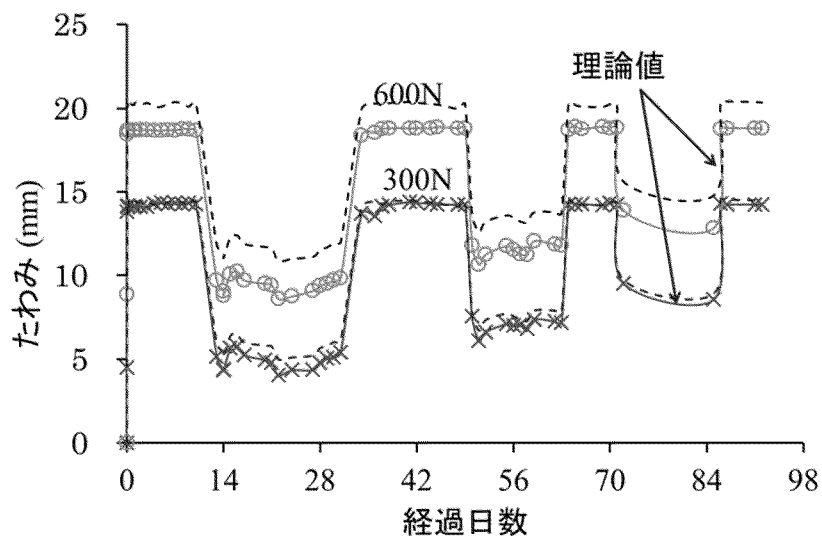


図-2.15 支間中央のたわみの時系列挙動

図-2.16 に支間中央のひずみの時系列挙動について示す。ひずみが負の値に増加している期間が冷却時であり、正の値に増加している期間が冷却停止時である。ひずみの値はたわみと同様に冷却時は常に一定の値を示している。また、温度は繰り返し変動するものであったが、冷却時のひずみの値はほぼ一定であった。

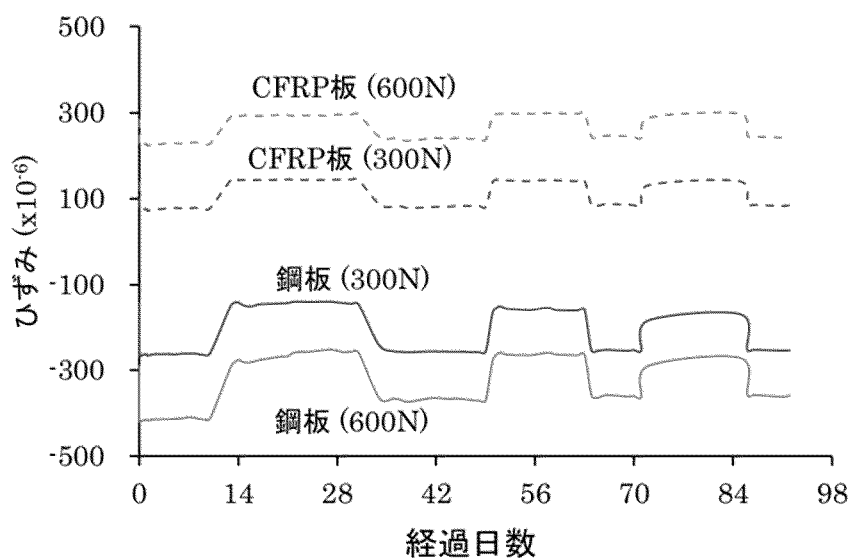


図-2.16 支間中央のひずみの時系列挙動



## 2.5 まとめ

本章では、鋼板にエポキシ樹脂接着剤で CFRP 板を接着し、繰り返し変動する低温環境下で変形挙動を求め接着特性を把握することを目的とした。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) たわみの測定を、支間長 1500mm に対して橋軸方向に 250mm 間隔で行った結果、供試体のたわみは、温度の低下に伴い、比例的に増加する。
- (2) 温度と鋼・CFRP 板合成はりのたわみは負の勾配をもつ線形関係を示し、荷重の大きさによらず $-0.33\text{mm}/\text{C}$ であった。
- (3) 鋼材と CFRP 板が完全接着したと仮定した上で、有限要素解析ならびに弾性理論を用いて、鋼・CFRP 板合成はりの繰り返し変動する温度に伴う変形挙動を概ね予測できることを示した。
- (4) 載荷荷重 300N および 600N を与えた鋼・CFRP 板合成はりのたわみは 3 ヶ月の載荷期間中、一定の値を示した。また、載荷期間中に温度変化に伴うたわみの増減のみが生じ、鋼板と CFRP 板の間のすべりやはく離ならびにクリープ変形等はほとんどみられず、有限要素解析や弾性理論値と概ね一致するものであった。
- (5) ひずみ挙動も同様に持続荷重下において載荷荷重に応じて一定の値を示すものであった。

## 第3章

繰り返し温度変化を受ける  
CFRP 板接着H鋼の変形挙動

## 第3章 繰り返し温度変化を受ける CFRP 板接着 H 鋼の変形挙動

### 3.1 目的

第2章で示した CFRP 板接着鋼板による長期たわみ実験結果により、常温から-5℃の低温環境下での繰り返し温度変化に応じたたわみの増減のみが生じ、CFRP 板と鋼板との間のすべりやはく離ならびにクリープ変形等は全くみられなかった。そこで、次のステップとして、より実構造物に近い供試体による変形挙動の把握するため、鋼鈹桁の下フランジ部の CFRP 板による補強を想定し、第2章で用いた鋼板に比べ、軸剛性や曲げ剛性の高い H 鋼を用いて長期ひずみ試験を実施し、その変形挙動について考察を行った。また、鋼鈹桁の下フランジに対して CFRP 板の接着が上向き姿勢になる作業環境を踏まえ、施工不良による非接着領域の発生を想定した非接着部を設けた供試体を製作し、比較検討を行った。

### 3.2 実験供試体

#### 3.2.1 使用材料および材料特性

本研究では鋼鈹桁の下フランジ部に CFRP 板接着による補強を想定している。第2章において CFRP 板と鋼板の接着耐力は確認された。しかし、そこで用いられた鋼板では軸剛性や曲げ剛性が小さく、変形しやすいものであった。そこで、本研究では鋼板と比べて軸剛性や曲げ剛性の高い一般構造用圧延 H 鋼のはり部材を用い、それに高弾性 CFRP 板を接着して、はり状の供試体を製作した。各材料の形状寸法と線膨張係数を表-3.1 に示す。

表-3.1 供試体材料の形状寸法と線膨張係数

	寸法 (mm)	線膨張係数 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
H 鋼	100×100×6×8×1600	12.3
CFRP 板	100×2×1600	0.3

鋼鈹桁の補強で主に使用されている CFRP 材料は主に高弾性 CFRP 板である。これは、耐荷力の不足を補うという CFRP 板貼付の目的を考慮すると弾性域の剛性向上が期待できる高弾性 CFRP 板による補強の方が、もう一方でよく使用される高強度 CFRP 板よりも効果的との報告(石川ら, 2011b)があるためである。そのため、本章では、第2章と同様に高弾性 CFRP 板を用いた。また、H 鋼と CFRP 板との接着剤は第2章と同様のエポキシ樹脂を用いた。

高弾性 CFRP 板とエポキシ樹脂接着剤の材料特性を表-3.2 および表-3.3 に示す。

表-3.2 高弾性 CFRP 板の材料特性

	規格値	実験値	材料規格
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	450(+20%, -10%)	480	JIS K 7165
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	1200	1628	JIS K 7165
幅 (mm)	100±2	101	—
厚さ (mm)	2.0±0.2	2.17	—

表-3.3 エポキシ樹脂接着剤の材料特性

	保証値	実験値	試験方法
比重 (硬化物)	1.55~1.75	1.7	JIS K 7112 準拠
可使時間 (分)	30 以上 (標準 60)	84	温度上昇法 (250g)
粘度 (硬化物)	パテ状	パテ状	JIS K 6833 準拠
引張せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	10 以上	16	JIS K 6850 準拠
接着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	1.5 以上	3.7	JIS K 6909 準拠
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	50 以上	65	JIS K 7165 準拠
圧縮弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )	1000 以上	4870	JIS K 7165 準拠

### 3.2.2 非接着部を有する実験供試体

供試体の製作は室温を一定に保たれた環境下で行った。また、接着作業まで CFRP 板、H 鋼ならびに接着剤の各材料は同一温度下で管理し、材料間に温度差が生じないようにした。CFRP 板と鋼板の接着は、接着剤の厚さが 1mm 程度になるよう CFRP 板に塗布した後、それを H 鋼に接着して製作した。なお、十分な接着効果を得るため、グラインダーを用いて H 鋼の表面の酸化皮膜を除去した後、アセトンで油分を除去した状態で接着した。製作した供試体は、接着作業完了後 20℃の一定温度下で 7 日間養生した。

供試体は H 鋼と CFRP 板を全面接着したもの以外に CFRP 板による補強作業時の施工不良による非接着部の発生を想定し、非接着部を設けた供試体を製作した。非接着部として H 鋼下フランジ部の一部に粘着性テープを貼り付け、接着剤の層を除いた。CFRP 板と H 鋼を完全接着した供試体を B0 とし、H 鋼の長手方向に 200mm 間隔で 10mm の幅の非接着部を設定したものを B10 とする。以下同様の間隔で非接着部 30mm, 50mm の幅を設定したものをそれぞれ B30, B50 とする。供試体は各タイプ 1 体の合計 4 体製作した。非接着部を設けた供試体の下面の図を図-3.1 に示す。非接着部は CFRP 板と H 鋼のすべりやはく離が生じる傾向を捉える目的から設ける位置は支間中央に対して対称とし、その

割合は、5%からおおよそ 10%刻みとした。また、非接着部を設けるためのテープ貼り付け時の状況を写真-3.1 に示す。

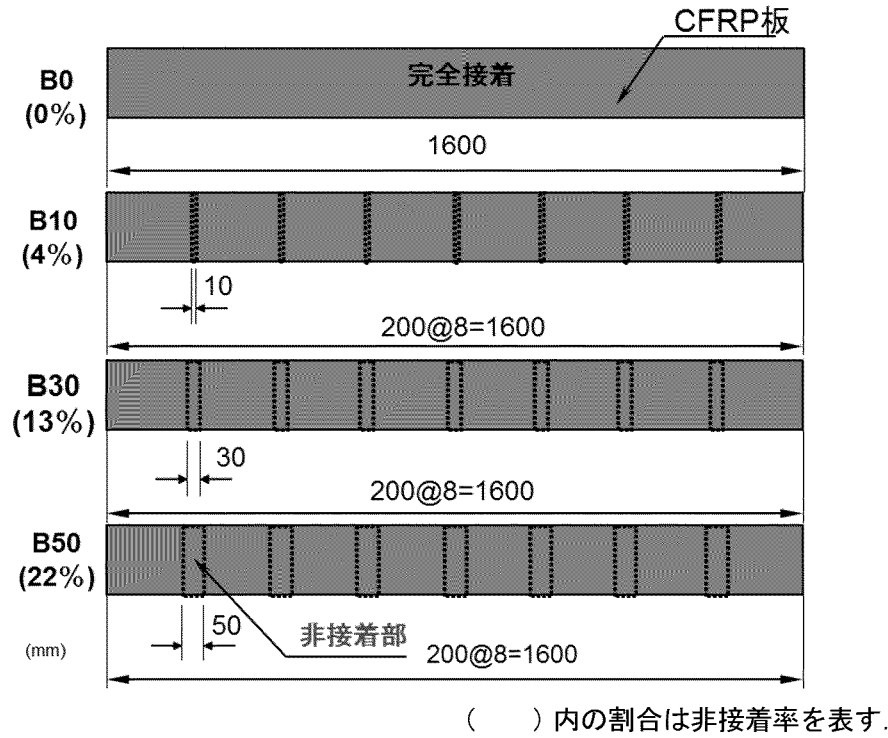


図-3.1 供試体のタイプと下面の非接着部の設定

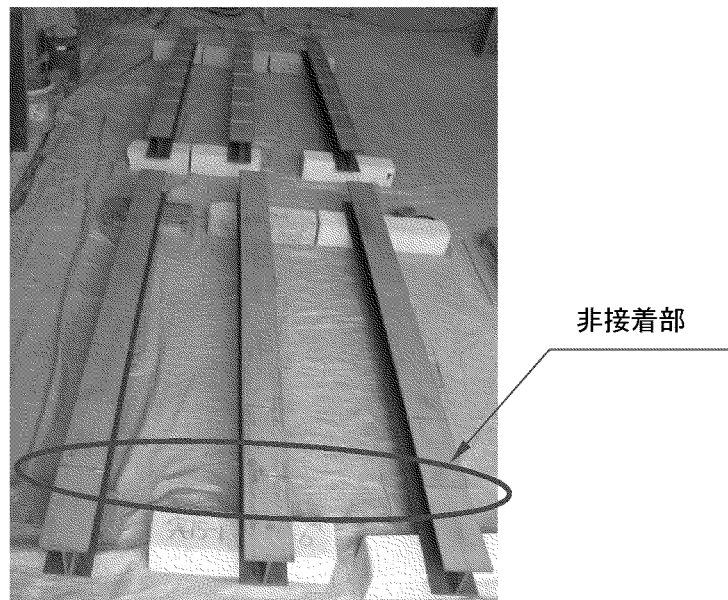


写真-3.1 供試体の非接着部の設定状況

### 3.3 長期ひずみ計測試験

#### 3.3.1 実験方法

供試体は冷凍庫内に静置し、常温から低温の 30°C の温度変化を 1 週間間隔で供試体タイプ B0 には 342 日間、供試体タイプ B10, B30 および B50 には 84 日間与えた。一つの供試体に貼付した熱電対 (T-type) を用いて計測した温度履歴を 図-3.2 に示す。冷凍庫内のスペースは高さ 1950mm×幅 2500mm×奥行 1600mm を有している。供試体を静置した冷凍庫内の状況を 写真-3.2 に示す。

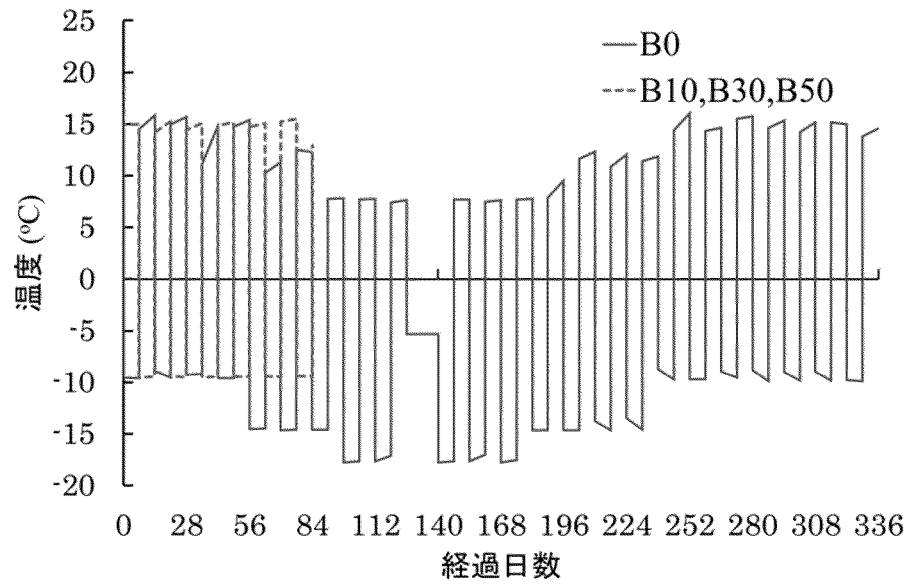


図-3.2 供試体の温度履歴

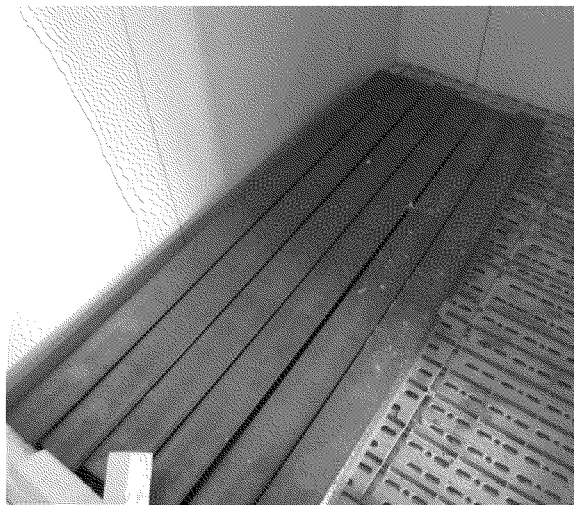


写真-3.2 冷凍庫内に静置した供試体

ひずみは図-3.3 に示すように 1 体の供試体の支間中央および両端の H 鋼下フランジと CFRP 板にひずみゲージを貼り，温度変化によって生じるひずみを計測した．なお，ひずみゲージには，熱電対による側温機能付きのものを使用し，同時に温度も計測した．供試体の計測状況を写真-3.3 に示す．

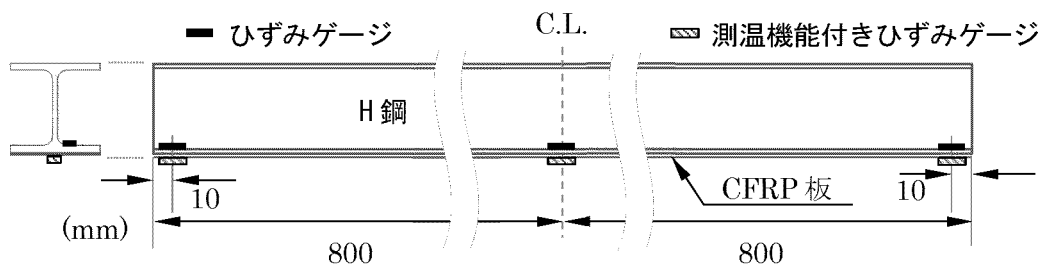


図-3.3 ひずみゲージの貼付状況



写真-3.3 計測状況

### 3.3.2 実験結果と考察

B0～B50 の供試体中央部と端部のひずみの測定結果を図-3.4 から図-3.11 に示す。いずれも低温時には H 鋼と CFRP 板のひずみに差異がみられる。図-3.4 から図-3.7 に示す供試体中央部において、低温時に CFRP 板の圧縮ひずみが H 鋼のそれより大きくなっているのは、図-3.12 の模式図に示すように、温度低下に伴い供試体全体が収縮した際に H 鋼に接着した CFRP 板が線膨張係数の違いにより、H 鋼の収縮を拘束しようとする力が接着剤層を介して CFRP 板に作用するためである。一方で供試体端部においては、図-3.8 から図-3.11 に示すように、低温時には H 鋼のひずみが CFRP 板のそれよりも  $250 \times 10^{-6}$  から  $300 \times 10^{-6}$  程度大きくなっている。これは図-3.12 の模式図に示すように、自由端である端部においては CFRP 板に比べて線膨張係数の大きい H 鋼のひずみが大きくなったと考えられる。また、そのひずみの差は供試体中央部より端部の方が大きい。以上のことから低温時には CFRP 板と H 鋼との間の接着剤層に大きなせん断変形が生じていることがわかる。また、その変形は供試体端部の方が大きい。しかしながら、温度によってひずみレベルの違いはあるが、常温時には両者のひずみの差異はいずれも小さくなっている。

また、B10 から B50 の供試体中央部と端部のひずみの測定結果から、いずれの非接着領域においても供試体にすべりやはく離は確認されなかった。図-3.7 に示すように 50mm の非接着部を 200mm 間隔でもつ供試体であっても低温時の CFRP 板と H 鋼のひずみ差は一定であり、常温まで回復すると両者のひずみの差異が小さくなっている。この結果から、常温から低温の 30°C の温度変化を長期にわたり繰り返し与え、CFRP 板と H 鋼との間に 200mm 間隔で 50mm の非接着部を与えてもすべりやはく離はみられなかった。



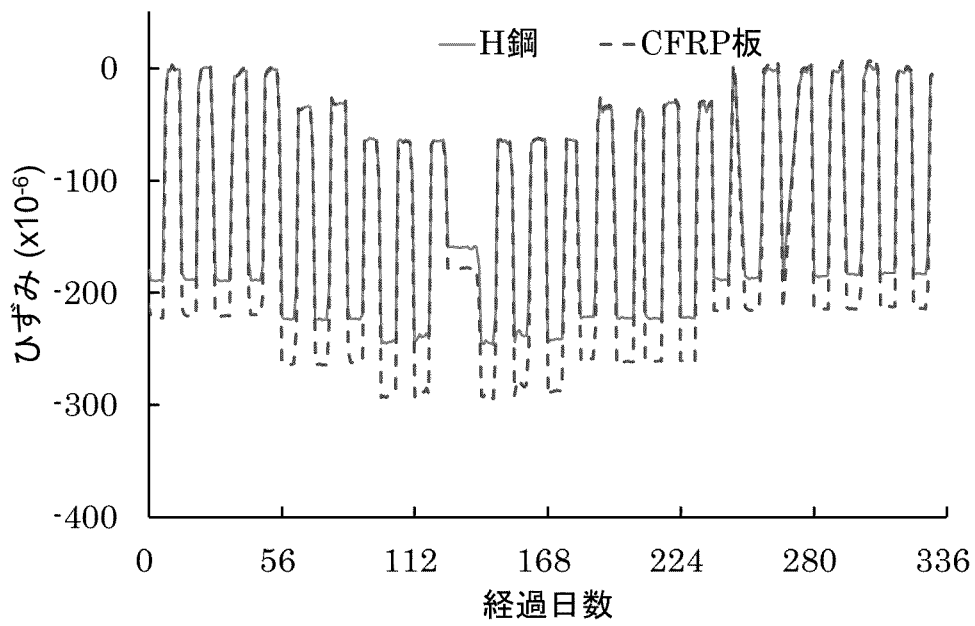


図-3.4 供試体中央部のひずみ (B0)

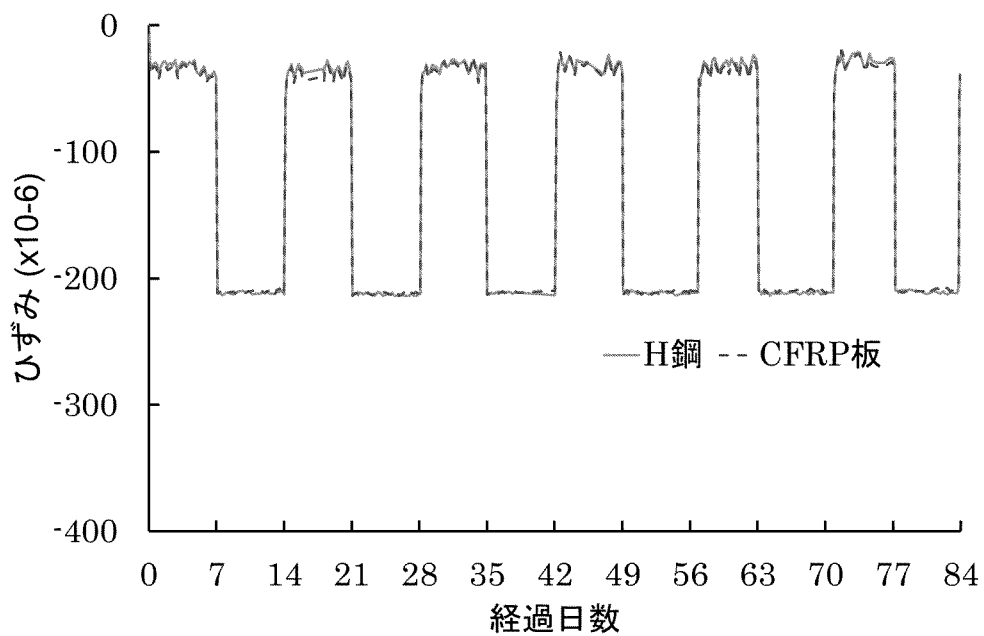


図-3.5 供試体中央部のひずみ (B10)

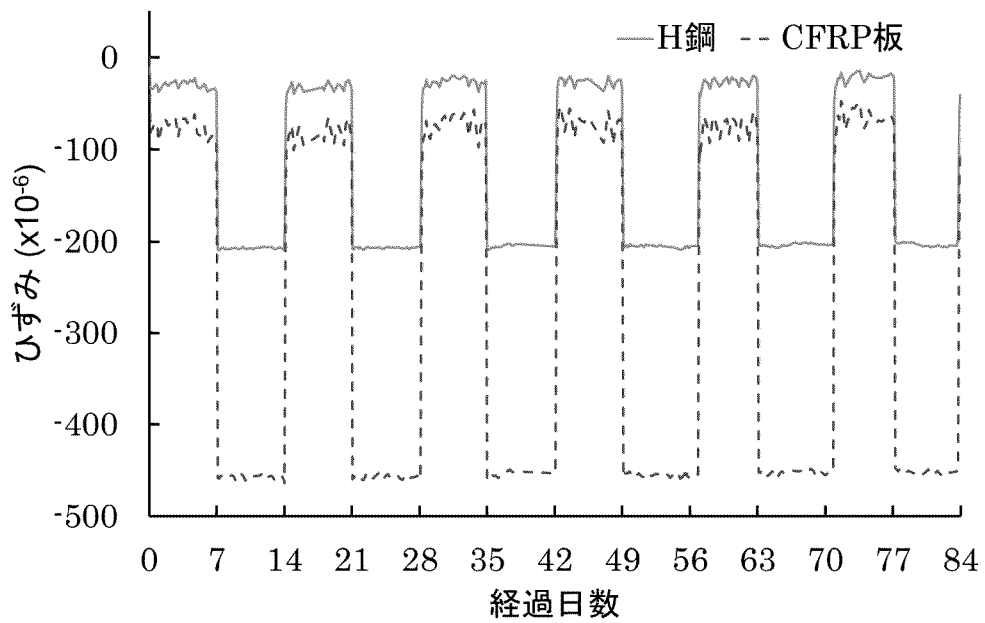


図-3.6 供試体中央部のひずみ (B30)

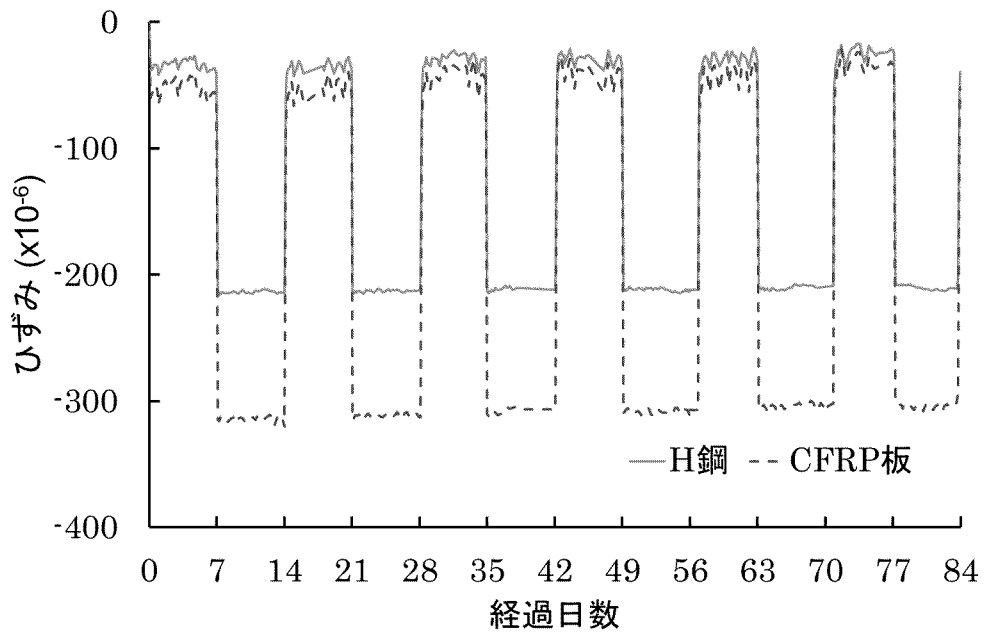


図-3.7 供試体中央部のひずみ (B50)

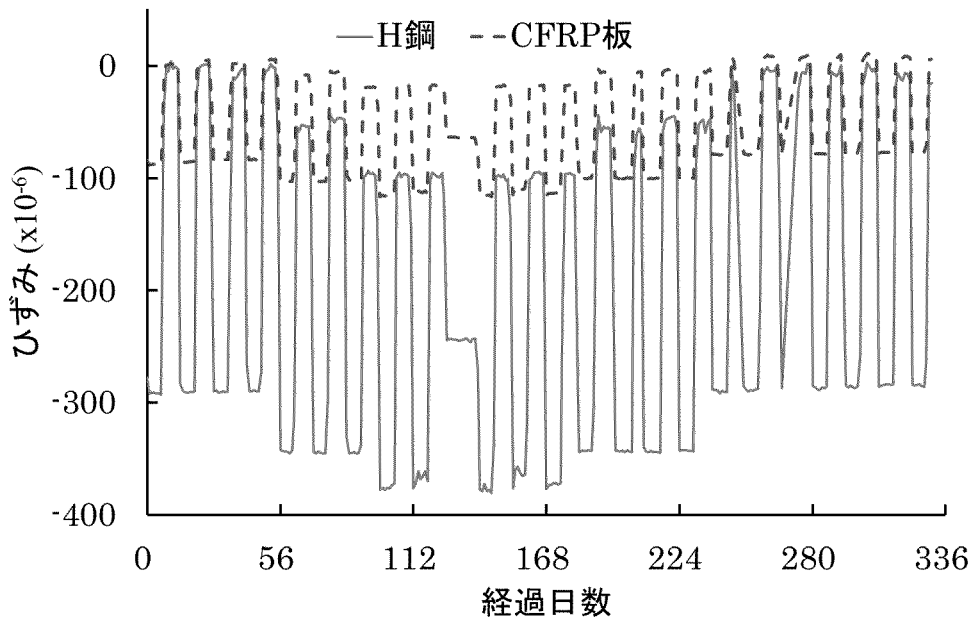


図-3.8 供試体端部のひずみ (B0)

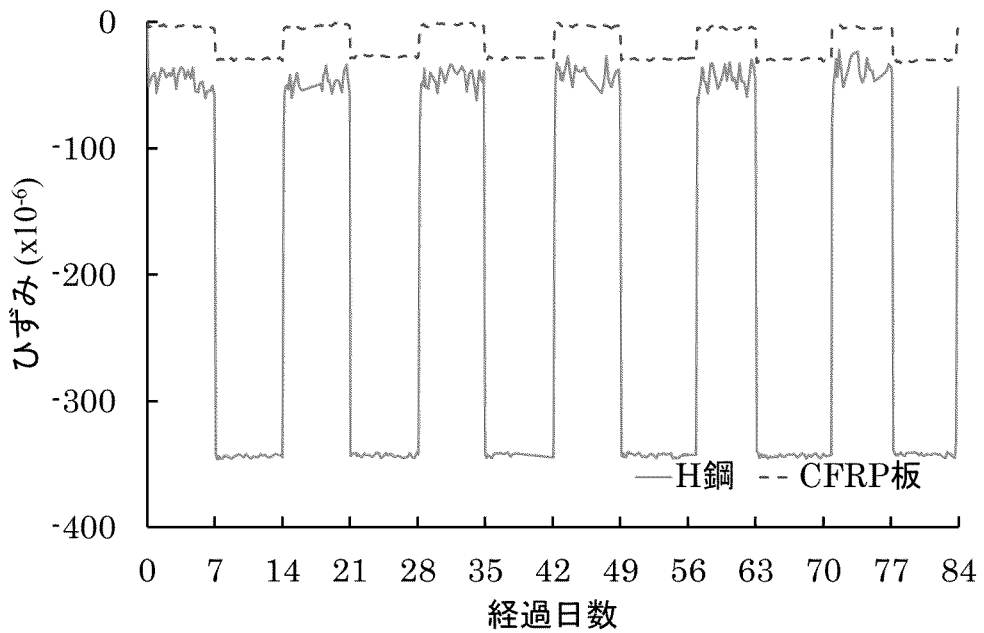


図-3.9 供試体端部のひずみ (B10)

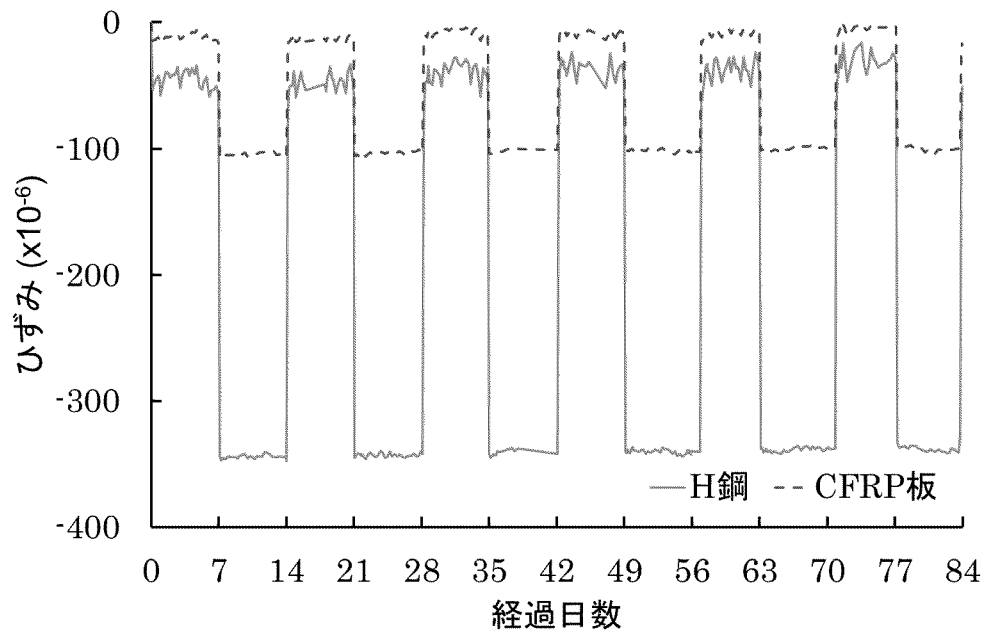


図-3.10 供試体端部のひずみ (B30)

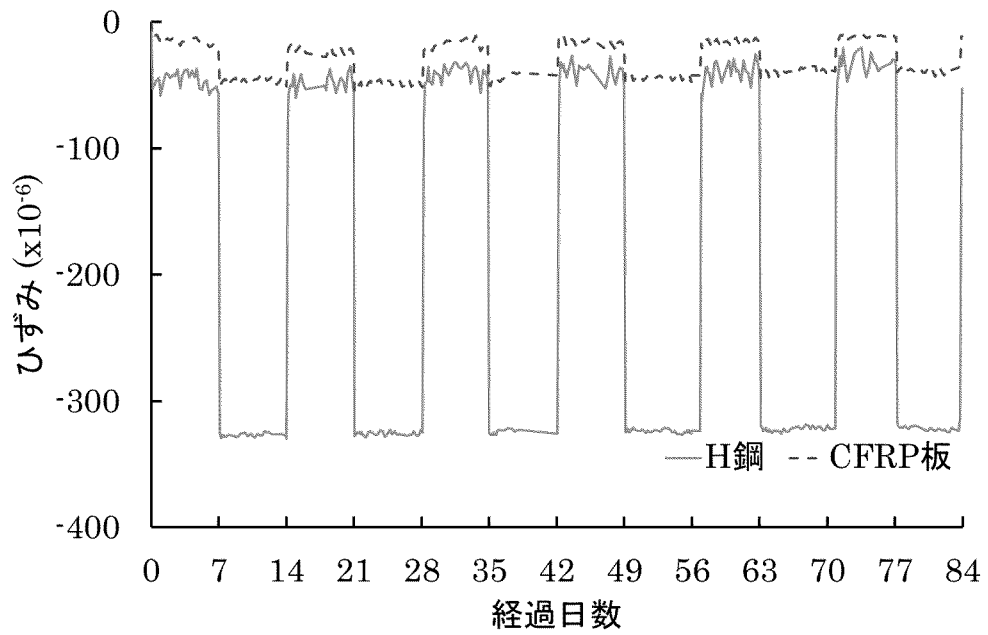


図-3.11 供試体端部のひずみ (B50)

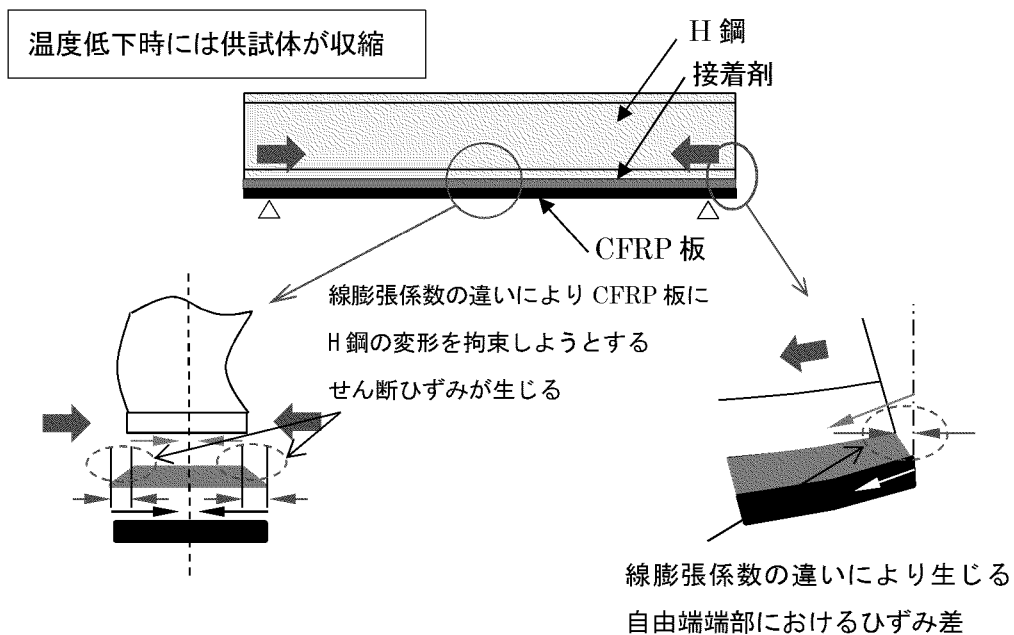


図-3.12 温度低下時に供試体の支間中央ならびに端部に生じるひずみの模式図

### 3.4 まとめ

本章では、鋼板と比べて軸剛性や曲げ剛性の高い H 鋼に対して、エポキシ樹脂接着剤で CFRP 板を接着し、常温から低温の 30°C の温度変化を長期にわたり繰り返し与えた場合のひずみ挙動を求め、接着特性を把握することを目的とした。そこで、鋼板に接着した CFRP 板の変形特性を求めた。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 低温時に H 鋼と CFRP 板のひずみに差異がみられる。これは H 鋼の線膨張係数が CFRP 板のそれより大きく、温度変化に伴い接着剤層でせん断変形が生じたものと考えられる。また、低温時の H 鋼と CFRP 板のひずみの差は供試体の中央部より端部の方が大きく、温度変化に伴い生じるせん断変形が大きいものと考えられる。このことから、H 鋼と CFRP 板の間のすべりやはく離は部材の端部から発生することが示唆された。
- (2) B10 から B50 のいずれの非接着領域においても、供試体にすべりやはく離はみられなかった。したがって、本実験で採用した温度変化の差や繰り返し温度を与えた期間ならびに桁剛性であれば CFRP 板の接着に施工不良が生じ、非接着率が 20% 程度になっても CFRP 板の補強効果の低下は顕著なものではないものと考えられる。

## 第4章

繰り返し温度変化を受ける  
CFRP板接着H鋼の曲げ耐力

## 第4章 繰り返し温度変化を受ける CFRP 接着 H 鋼の曲げ耐力

### 4.1 目的

第3章では、鋼板より軸剛性や曲げ剛性の高い H 鋼による長期ひずみ試験結果より、低温時に H 鋼と CFRP 板のひずみに差異がみられたが、すべりやはく離は確認されなかった。また、施工不良を想定した非接着領域を有する供試体においても同様の結果が得られた。次にこのような繰り返し温度変化を受けた供試体の曲げ耐力・破壊性状を調べるため、温度履歴と非接着領域の違いをパラメータとした CFRP 接着 H 鋼の曲げ試験を実施した。そして曲げ破壊挙動を調べ、CFRP 接着による鋼桁補強のより効率的で安全な設計法確立のための検討を行った。

### 4.2 実験供試体

温度変化を長期的に与えることにより、供試体の曲げ耐荷力の変化を調べるために、曲げ載荷試験を行った。曲げ載荷試験供試体を表-4.1 に示す。図-3.2 に示す常温から低温の 30℃の温度変化を 1 週間間隔で履歴を受けた供試体について、B0 は暴露期間 0 日, 28 日, 84 日, 168 日, 336 日, また 20℃の一定温度で 336 日静置した供試体に対して、それぞれ 1 体ずつ曲げ載荷試験を行った。B10 から B50 は暴露期間 0 日, 28 日, 84 日において 1 体ずつ曲げ載荷試験を行った。

表-4.1 曲げ載荷試験供試体

供試体タイプ	暴露期間 (日)	温度	供試体数
B0	0, 28, 84, 168, 336	30℃幅の温度変化	5
B0	336	20℃一定	1
B10	0, 28, 84	30℃幅の温度変化	3
B30	0, 28, 84	30℃幅の温度変化	3
B50	0, 28, 84	30℃幅の温度変化	3

### 4.3 有限要素解析による解析的評価

本実験結果と比較のために有限要素解析を行った。解析モデルを図-4.1 に示す。解析モデルは鋼板、CFRP 板ならびに接着剤をすべて 3D モデルで作成した。H 鋼の寸法は実際の供試体と同様に 100×100×6×8×1600mm、CFRP 板の寸法は 100×2×1600mm とした。なお、鋼板と CFRP 板の間の接着剤の層は厚さ 0.2mm とした。

解析モデルの境界条件を図-4.2 に示す。図はモデルの下面を示している。拘束条件として 1 端ピン支持、他端可動支点としている。

また、実験供試体と同様に非接着部を設けた解析モデルを作成した。非接着部の解析モデル

を図-4.3に示す。非接着部は完全に接着剤の層を取り除いたモデルとしている。

なお、これらの有限要素解析は線形解析で行っており、H鋼降伏前までの値での比較とした。

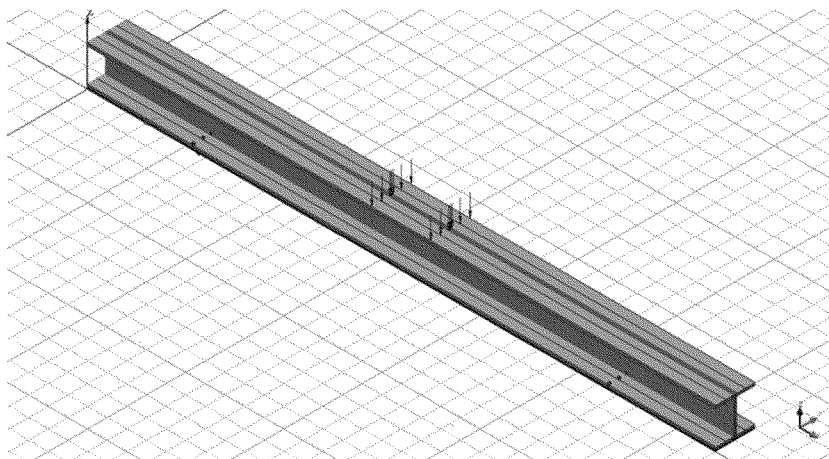


図-4.1 解析モデル

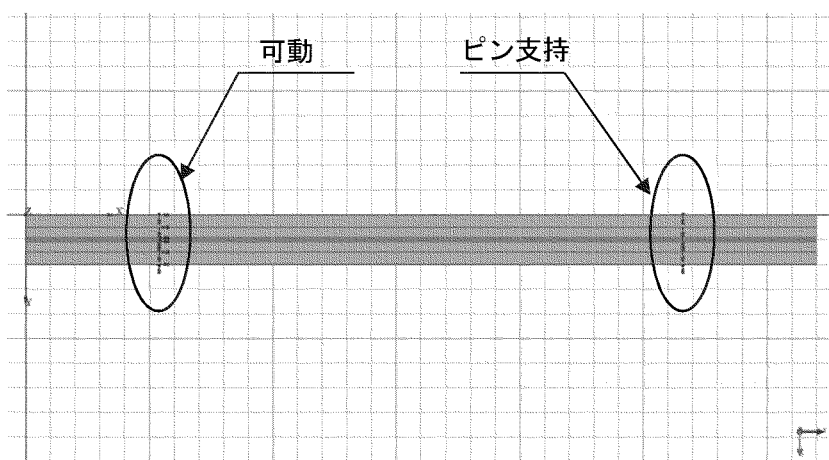


図-4.2 解析モデルの境界条件



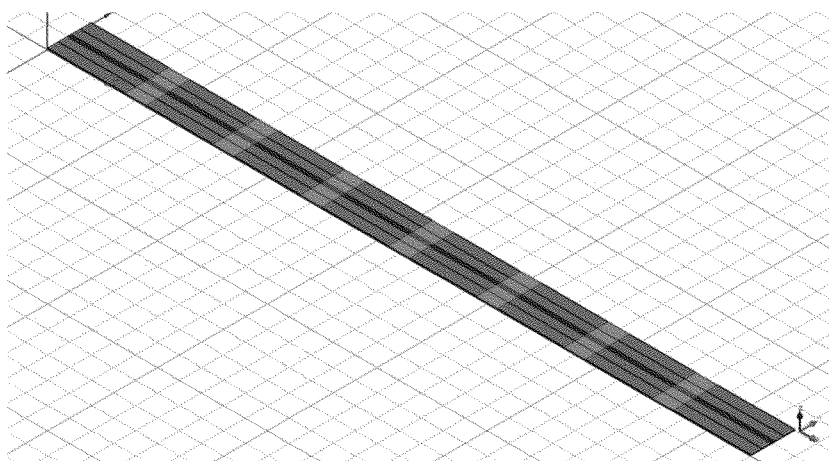


図-4.3 非接着部の解析モデル

解析に用いた H 鋼, CFRP 板ならびにエポキシ樹脂接着剤の物性値をそれぞれ, 表-4. 2, 表-4. 3 および表-4. 4 に示す. なお, 物性値は実験値に基づいて設定した.

表-4.1 H 鋼の物性値

ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	206000
ポアソン比	0.3
線膨張係数 (10 <sup>-6</sup> /°C)	12

表-4.2 CFRP 板の物性値

ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	480000
せん断弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	240000
線膨張係数 (10 <sup>-6</sup> /°C)	0.3

表-4.3 エポキシ樹脂接着剤の物性値

ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	3700
ポアソン比	0.36

## 4.4 曲げ載荷試験

### 4.4.1 実験方法

図-4.4 に示すようにひずみゲージの貼り付け位置および荷重点間隔、支点間隔を示した実験供試体を示す。曲げ載荷試験は、荷重点間隔 150mm の 2 点荷重で行い、支点間隔は 1060mm とした。荷重は CFRP 板が破断するまで 0.2kN/sec の速度で荷重した。荷重試験は常温の実験室で万能試験機を用いて行った。また、供試体を発泡スチロールで被覆し、供試体のセッティング時からの実験期間に供試体の温度をできるだけ変化させないように配慮した。写真-4.1、写真-4.2 に供試体中央部の状況と荷重試験の状況を示す。

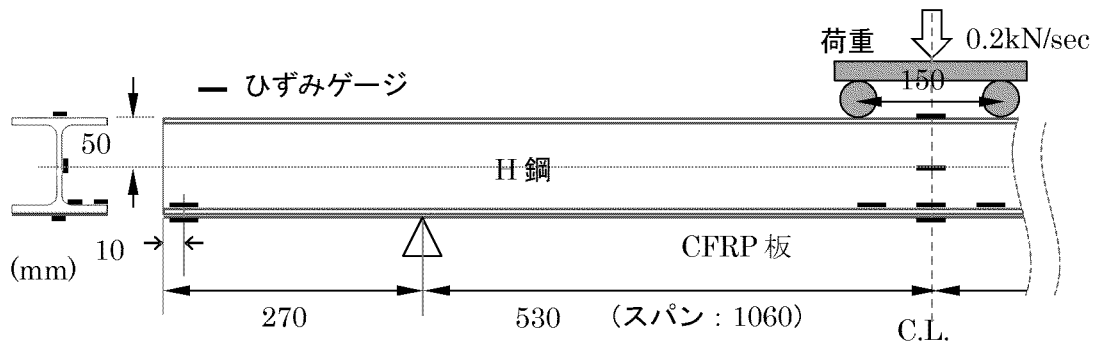


図-4.4 実験供試体

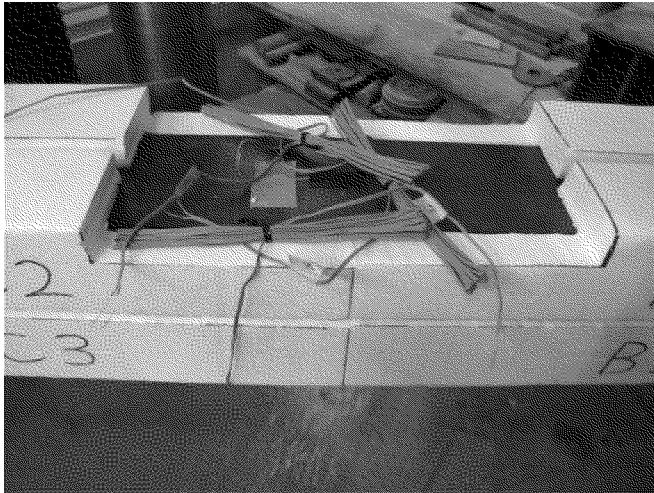


写真-4.1 実験供試体中央部

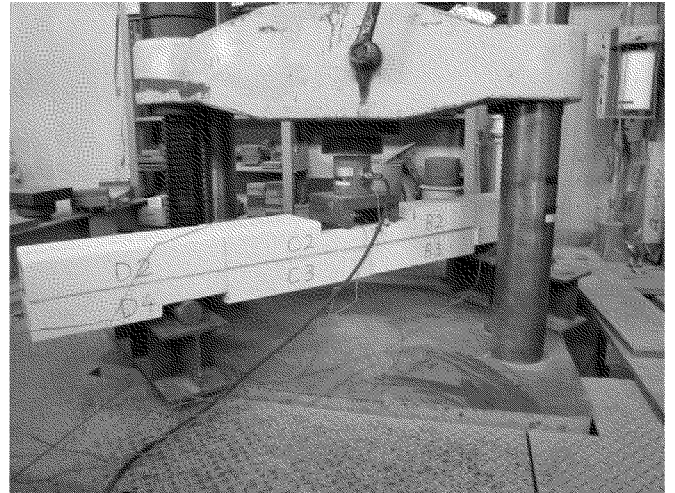


写真-4.2 曲げ載荷試験

#### 4.4.2 実験結果と考察

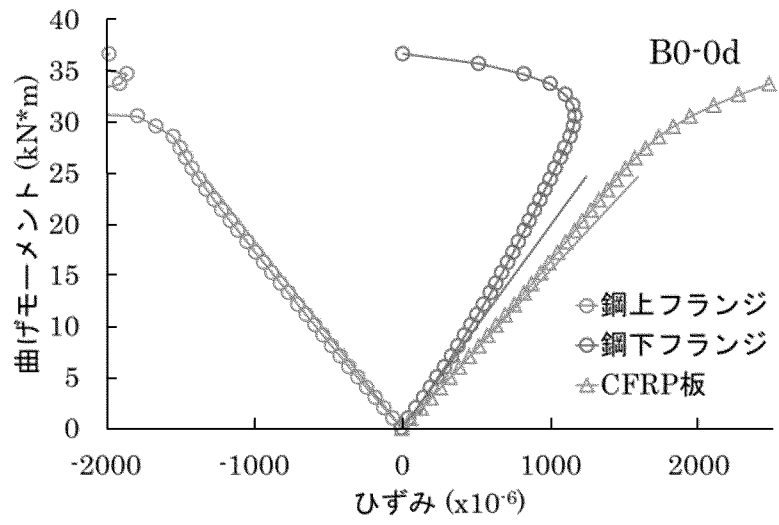
各暴露期間での曲げ載荷試験の支間中央の曲げモーメントと各ひずみの関係を図-4.5 から図-4.8 に示す。図中の実線は有限要素解析による結果を示す。また、図-4.8 において B0-342d' は 342 日間温度変化のない試験結果を示す。さらに、曲げ試験における縦ひずみを図-4.9 から図-4.12 に示す。同様に図-4.12 において B0-342d' は 342 日間温度変化のない供試体を用いた試験結果を示す。

図-4.5～図-4.8 によると、H 鋼降伏前までのひずみと有限要素解析で求めたひずみはほぼ同じ値となっており、同様の挙動を示している。このことから、H 鋼降伏前までは H 鋼と CFRP 板の間にずれやはく離が生じていないと考えられる。

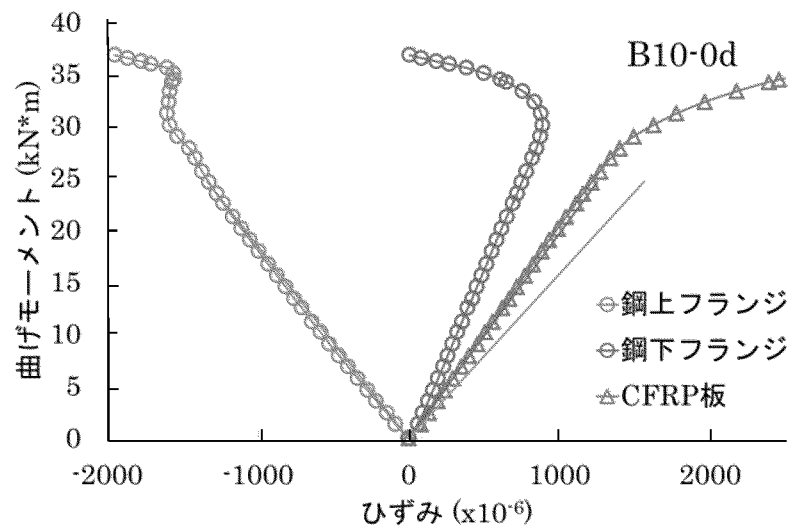
しかし、図-4.7 の B50-84d において完全接着の有限要素解析の値とそれぞれのひずみの値が大きく異なっている。この結果から H 鋼と CFRP 板との非接着領域が 20%程度と多くなった場合、長期間常温から低温の 30°C の温度変化を受けると、H 鋼と CFRP 板との間の力が完全に伝達されず、せん断力に影響を与える可能性がある。

図-4.5 の B0-0d によると、H 鋼の上フランジのひずみは曲げ荷重に対して線形的に伸びているものの、曲げモーメント 30kN・m 付近でひずみが急変している。図-4.9 の B0-0d においても曲げモーメント 30kN・m から中立軸が下方に推移している。このことから曲げモーメント 30kN・m で鋼上フランジが降伏し、中立軸が下方に推移したと考えられる。また、図-4.6 から図-4.8、図-4.10 から図-4.12 においても同様の傾向がみられ、鋼上フランジが降伏し、中立軸が下方に推移したものと考えられる。

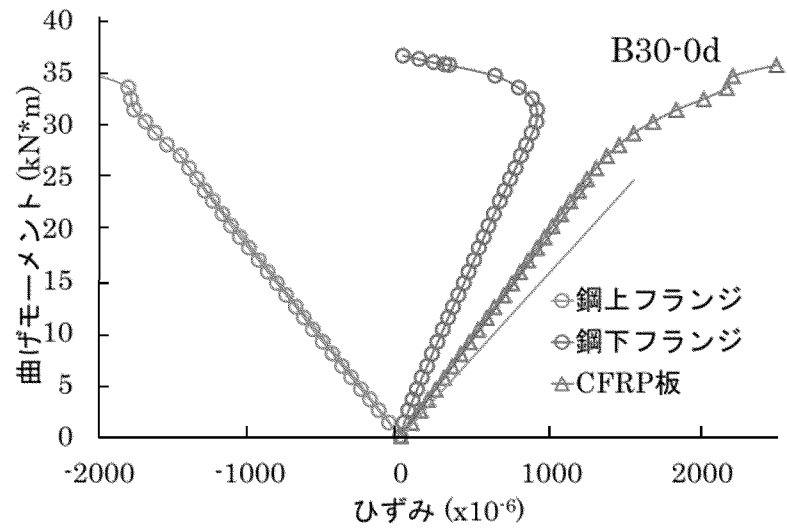
また、H 鋼上フランジ部の降伏と同時に CFRP 板のひずみが急増している。このことから、H 鋼上フランジ部が降伏後、H 鋼の曲げ変形が大きくなり、CFRP 板との間ではく離が生じはじめ、CFRP 板のみで曲げ荷重を受けるようになりひずみが増幅したものとする。



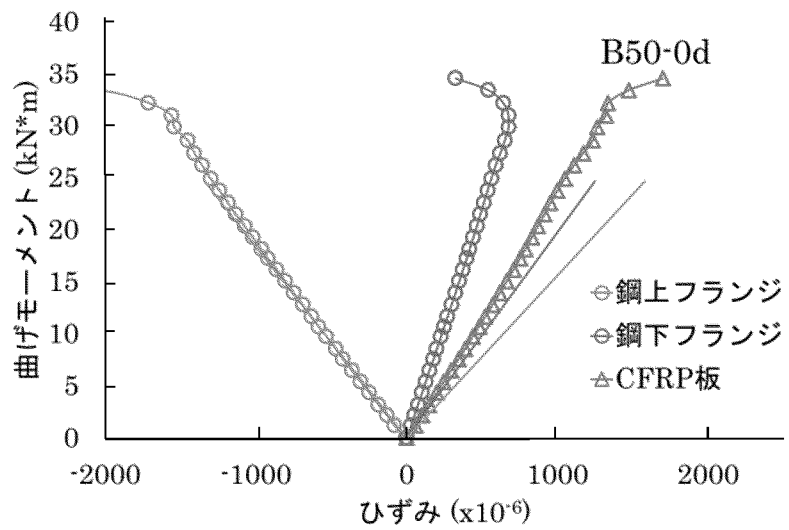
(a) 供試体タイプB0



(b) 供試体タイプB10

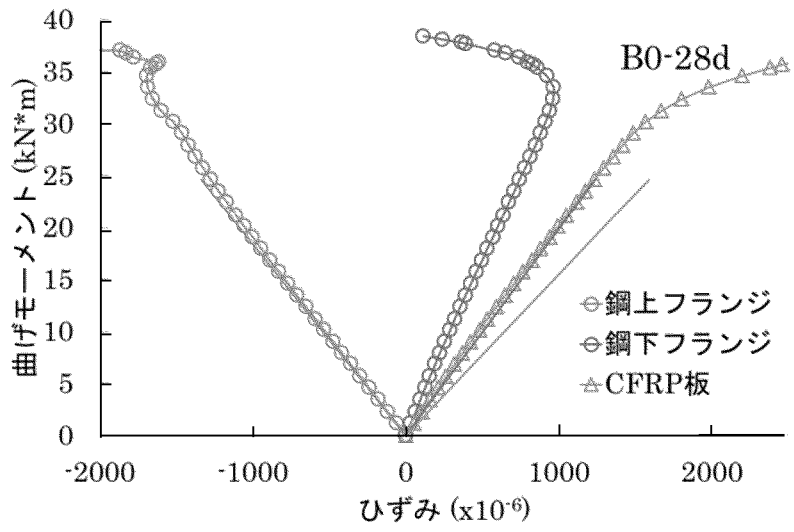


(c) 供試体タイプ B30

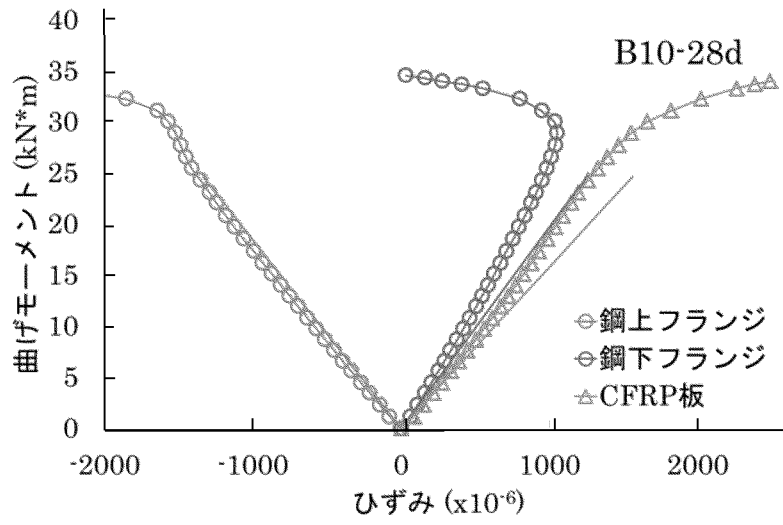


(d) 供試体タイプ B50

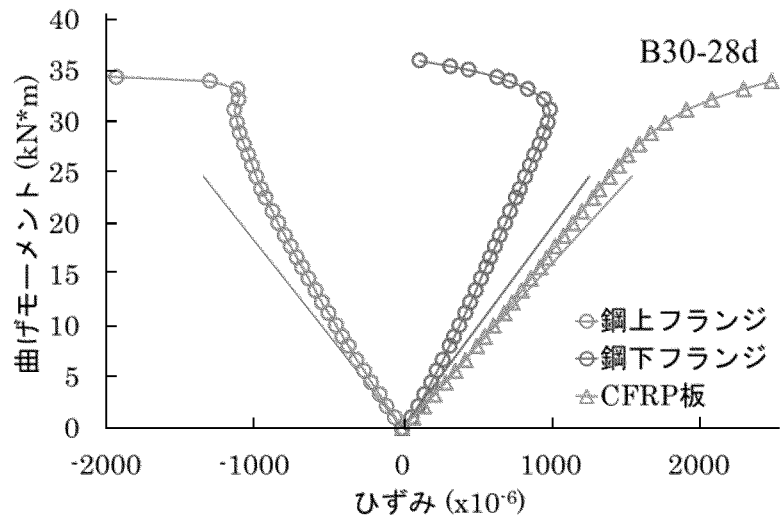
図-4.5 支間中央における曲げモーメントひずみ (暴露期間 0 日)



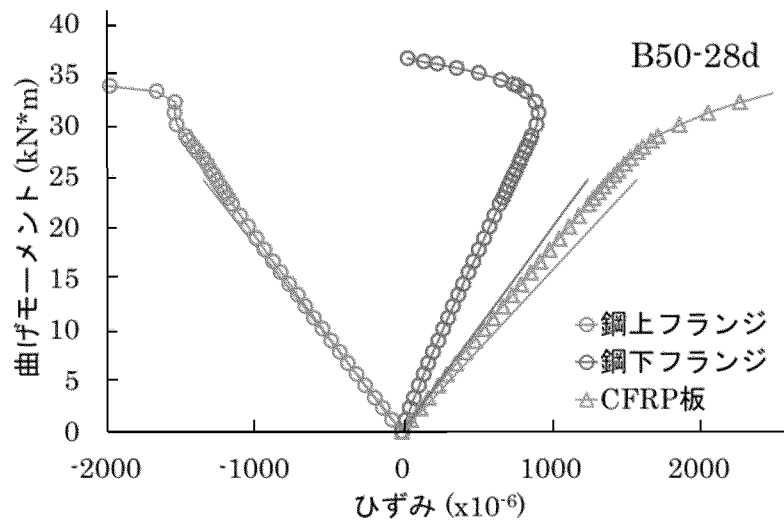
(a) 供試体タイプ B0



(b) 供試体タイプ B10

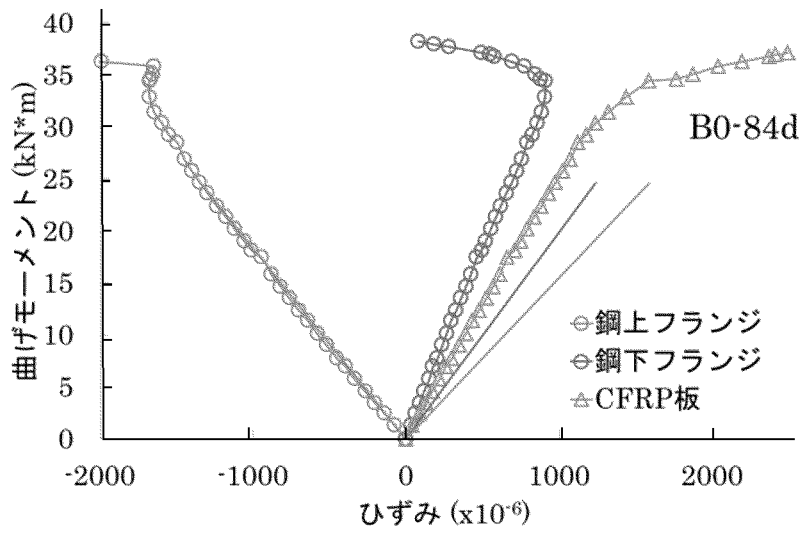


(c) 供試体タイプ B30

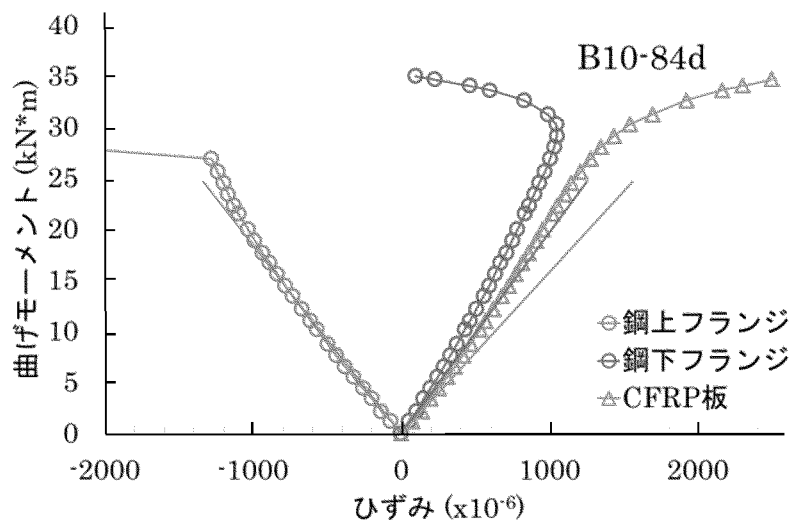


(d) 供試体タイプ B50

図-4.6 支間中央における曲げモーメントひずみ (暴露期間 28 日)

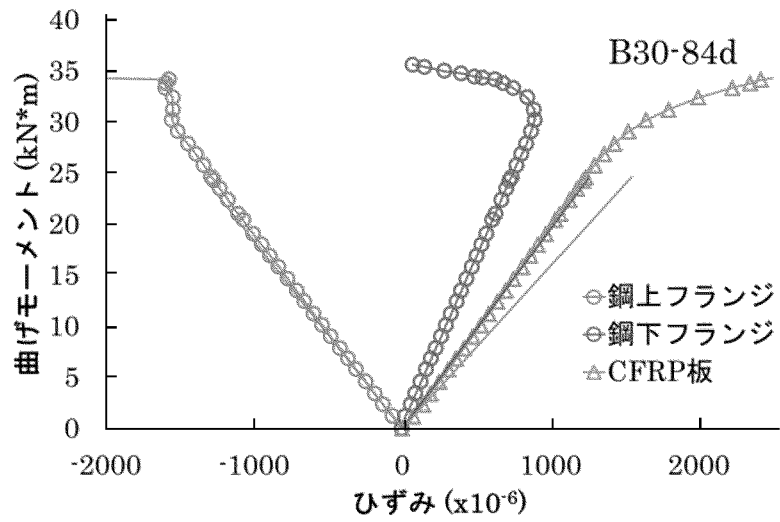


(a) 供試体タイプ B0

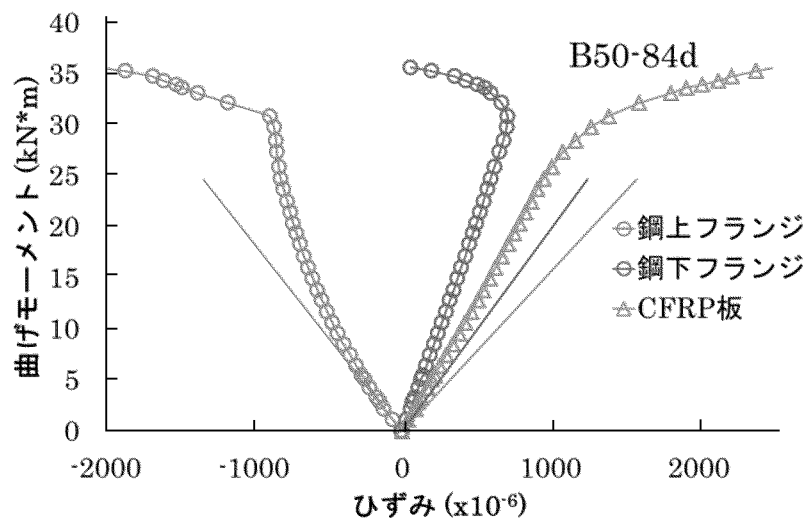


(b) 供試体タイプ B10





(c) 供試体タイプ B30



(d) 供試体タイプ B50

図-4.7 支間中央における曲げモーメントひずみ (暴露期間 84 日)

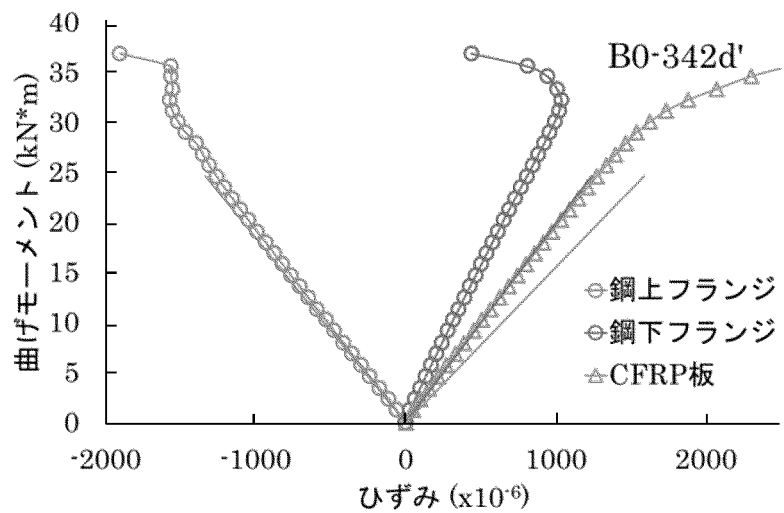
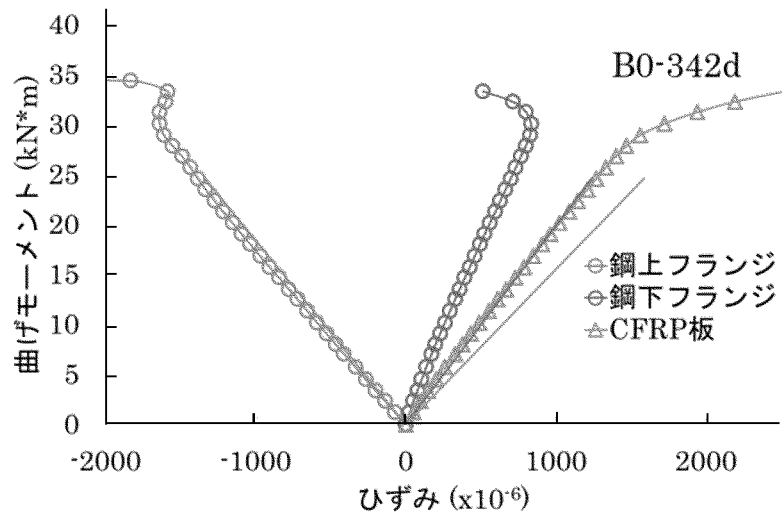
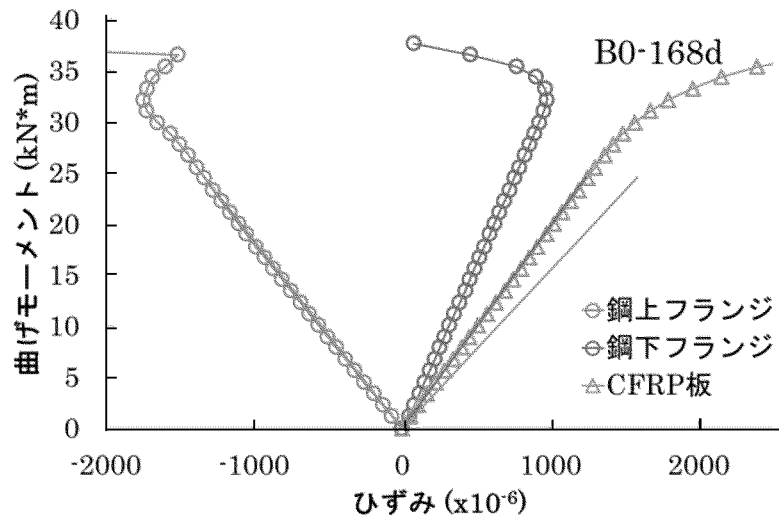
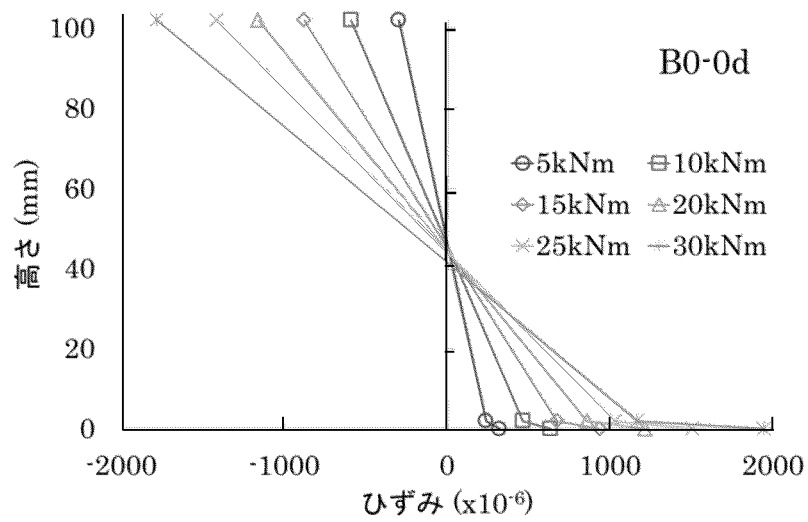
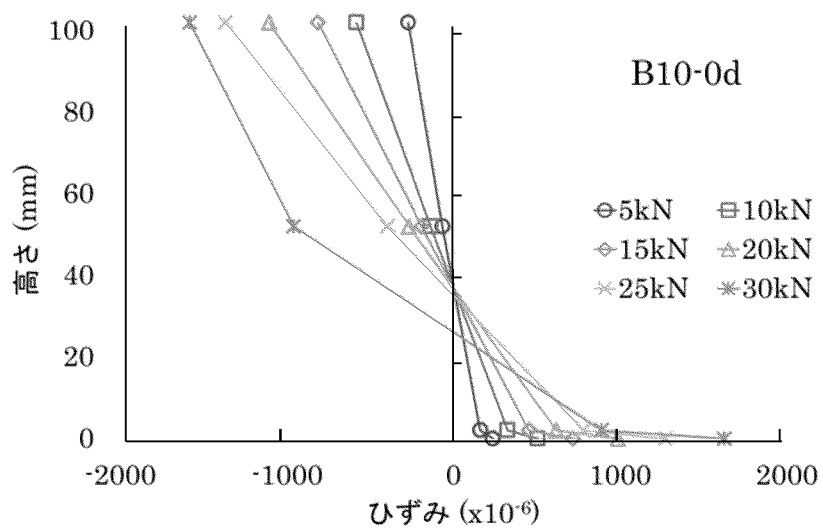


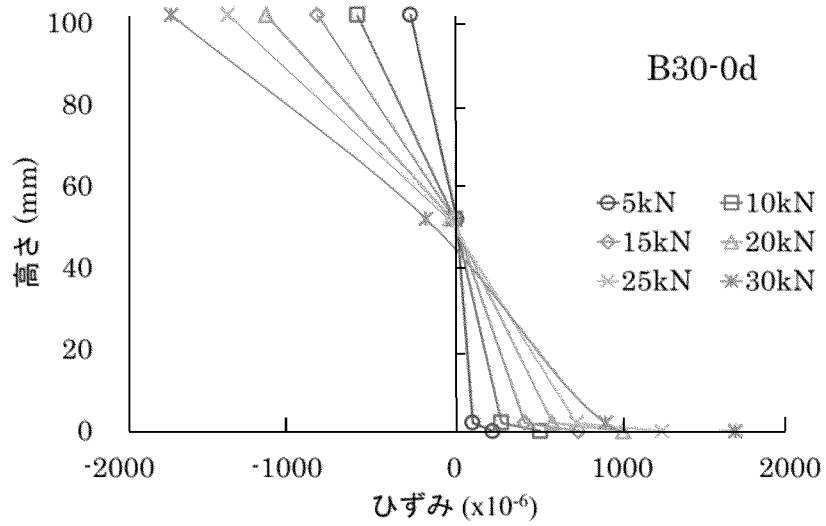
図-4.8 支間中央における曲げモーメントひずみ (B0-暴露期間 168 日, 342 日, 342 日')



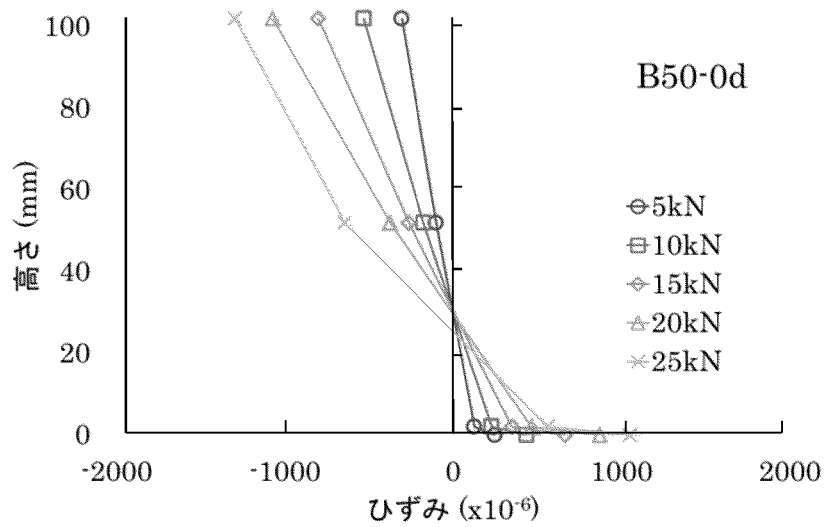
(a) 供試体タイプ B0



(b) 供試体タイプ B10

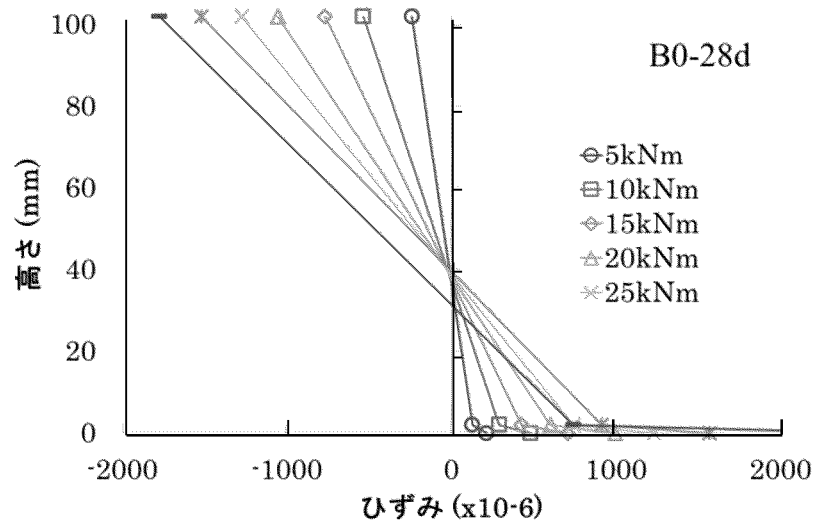


(c) 供試体タイプ B30

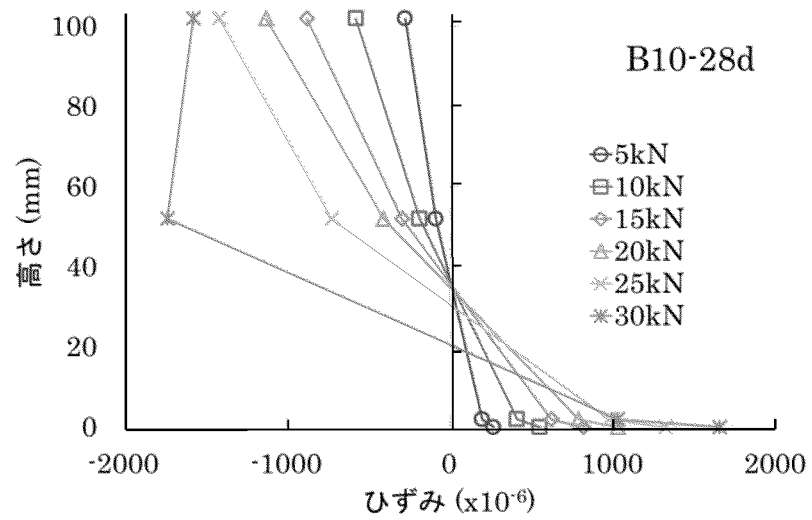


(d) 供試体タイプ B50

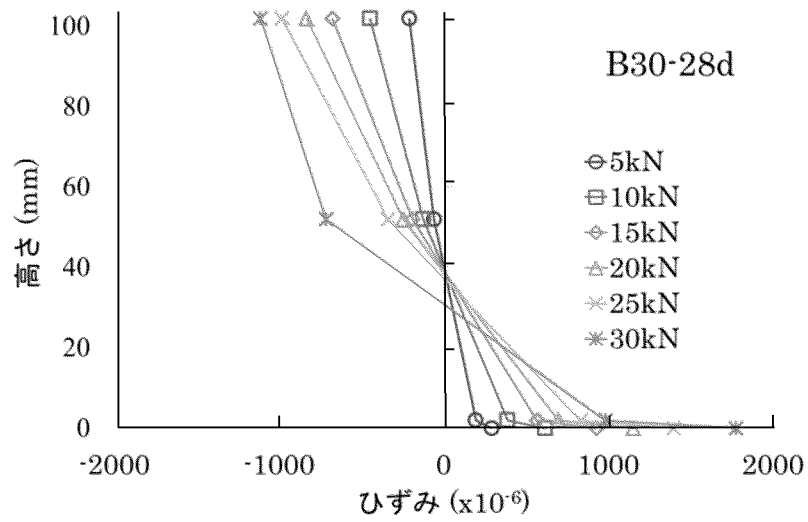
図-4.9 支間中央における縦ひずみ (暴露期間 0 日)



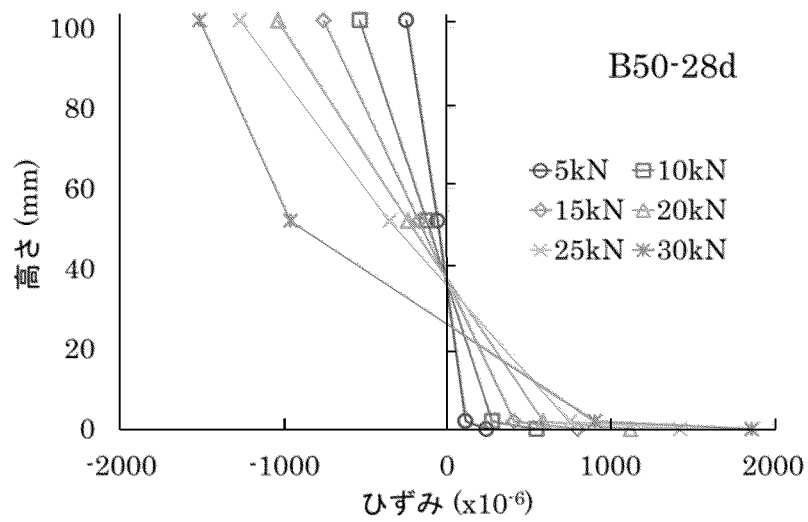
(a) 供試体タイプ B0



(b) 供試体タイプ B10

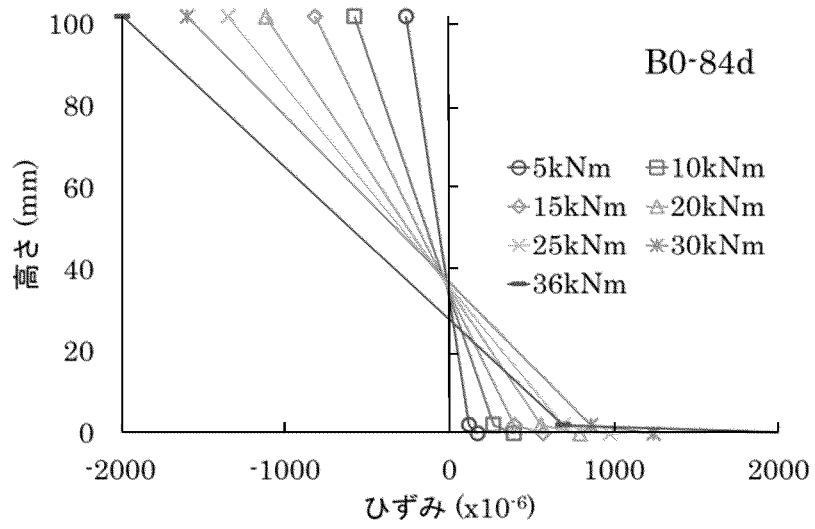


(c) 供試体タイプ B30

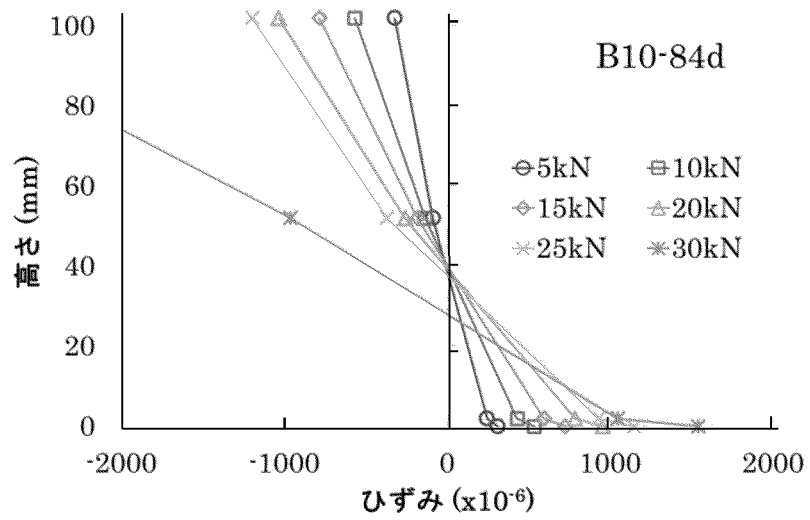


(d) 供試体タイプ B50

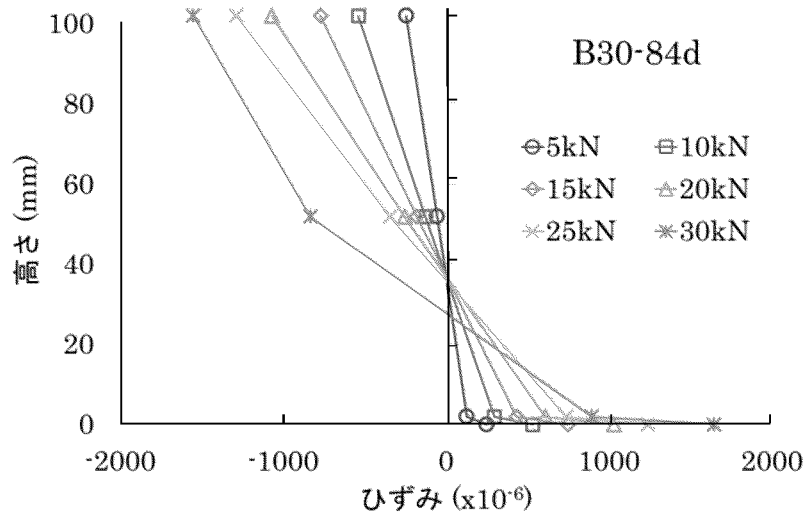
図-4.10 支間中央における縦ひずみ (暴露期間 28 日)



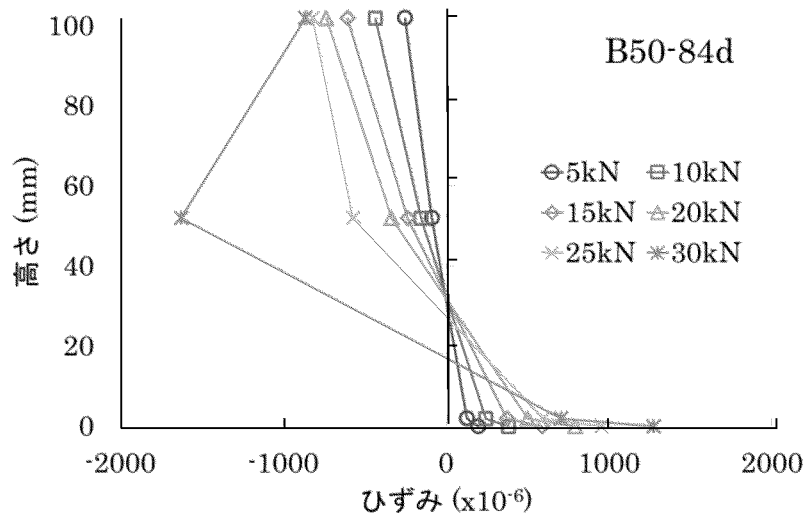
(a) 供試体タイプ B0



(b) 供試体タイプ B10



(c) 供試体タイプ B30



(d) 供試体タイプ B50

図-4.11 支間中央における縦ひずみ (暴露期間 84 日)



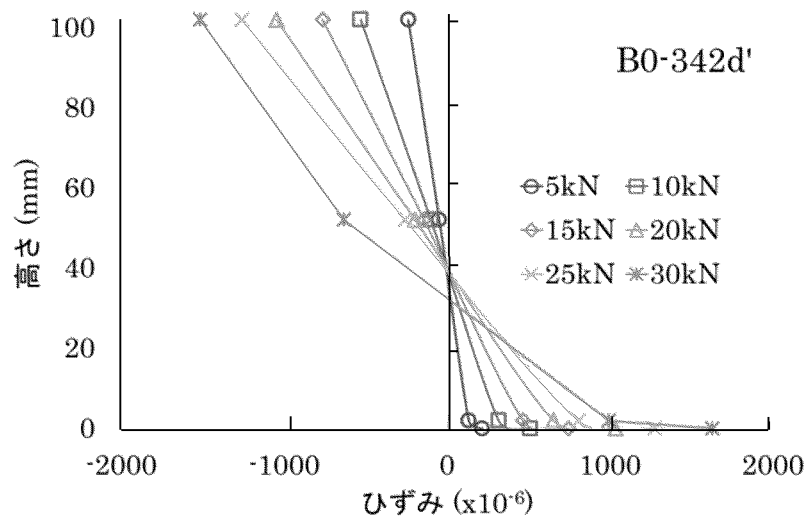
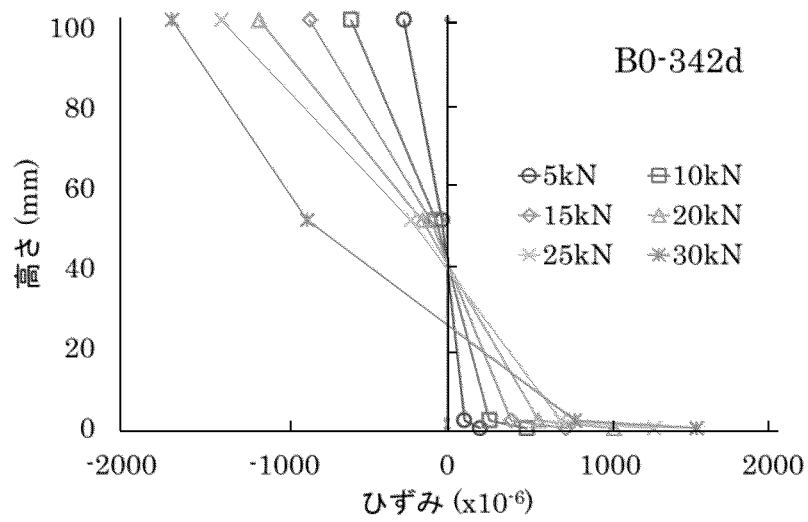
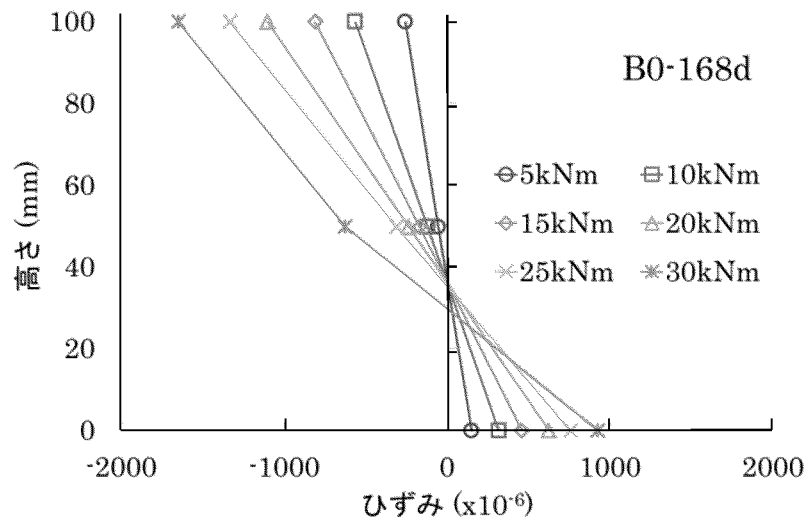


図-4.12 支間中央における縦ひずみ (B0—暴露期間 168 日, 342 日, 342 日')

図-4.5～図-4.8 に示す結果から、降伏後に H 鋼下フランジと CFRP 板のひずみがそれぞれ減少・増加している。これは、等曲げ区間内（荷重点区間内）で局所的な降伏が生じ、H 鋼下フランジに圧縮ひずみが作用したものと仮説を考えた。そこで、84 日曲げ荷重試験では上記の仮説を検証するために、等曲げ区間の両端に新たに 2 枚のひずみゲージを貼って同様の試験を行った。ひずみゲージの貼り付け位置を図-4.4 に示す。等曲げ区間内の曲げモーメントとひずみの関係を図-4.13 に示す。図-4.13 によると、等曲げ区間内のすべてのひずみが降伏後に減少しており、どのひずみも同様の挙動を示している。この結果から、等曲げ区間内（荷重区間内）で局所的な降伏が生じ、H 鋼下フランジに圧縮ひずみが作用したものと仮説は成立しないことがわかった。そこで新たに、H 鋼の上・下フランジの各薄板で曲げ変形が生じ、ひずみゲージを貼付した各フランジ上面に曲げ圧縮ひずみが作用したものと考えた。168 日曲げ荷重試験では、供試体中央部に写真-4.3 のようにひずみゲージを貼り、新たな仮説を検証した。供試体中央下フランジでの曲げモーメントとひずみの関係を図-4.14 に示す。図-4.14 によると、いずれのひずみも同様の挙動を示しており、ひずみ差はほとんどみられない。このことから、新たな仮説も成立しないことがわかった。等曲げ区間内以外を含めた下フランジ全体のひずみを確認すれば挙動の解明は可能になると思われるが、降伏までひずみの減少はみられないため、CFRP 板のはく離も降伏まで生じておらず、CFRP 接着補強は機能を果たせていると考える。

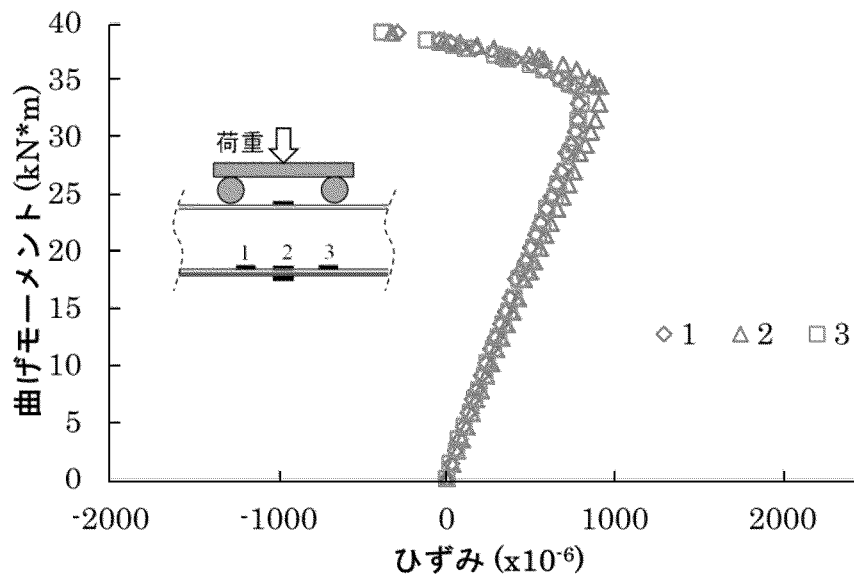


図-4.13 支間中央部下フランジ等曲げ区間の曲げモーメントとひずみ(暴露期間 84 日)



写真-4.3 支間中央部ひずみゲージ貼り付け位置（暴露期間 168 日における曲げ載荷試験）

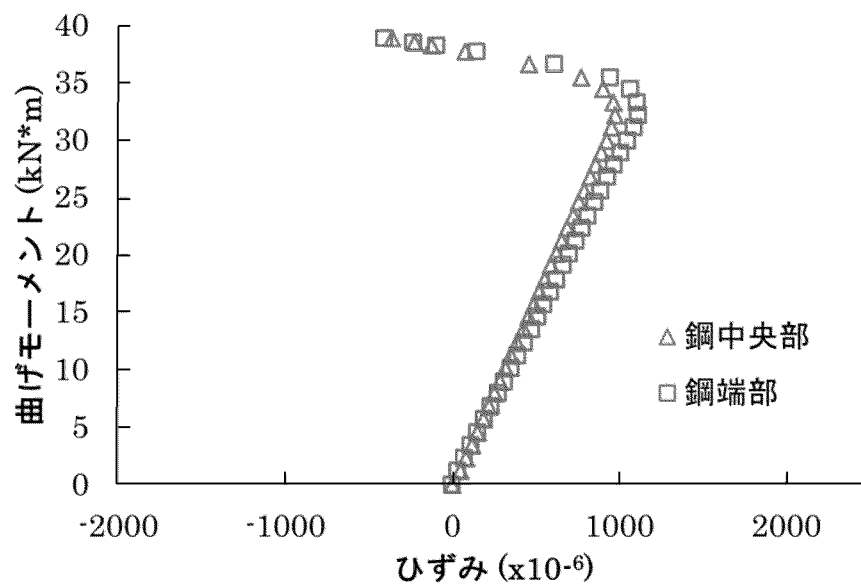


図-4.14 支間中央部下フランジにおける曲げモーメントとひずみ（暴露期間 168 日）

各曲げ載荷試験で得られた H 鋼上フランジ部の降伏荷重を図-4.15 に示し、終局荷重を図-4.16 に示す。図中の横一直線は、CFRP 板補強のない H 鋼を表す。冷凍庫内に静置している期間によらず、H 鋼上フランジ部の降伏荷重と終局荷重はほぼ一定の値を示している。この結果からも、常温から低温の 30°C の温度変化では H 鋼が降伏するまでは、H 鋼と CFRP 板の間のはく離が生じず、低温履歴の影響は小さいものと考えられる。ただし、いずれの荷重においても暴露期間 84 日の場合において、B50 がわずかながら低いことがわかる。これより、さらに低温下環境で繰り返しの温度変化を与えた場合、非接着領域の影響を含めた CFRP 板補強の評価基準の基礎データを取得することが期待できる。なお、破壊状況は、いずれの供試体も H 鋼上フランジが局部座屈を生じ先に降伏し、部材全体が大きく変形することで CFRP 板と H 鋼下フランジにはく離が生じ、最終的には CFRP 板が破断するという破壊機構であった。なお、供試体全体の横倒れ座屈は生じなかった。

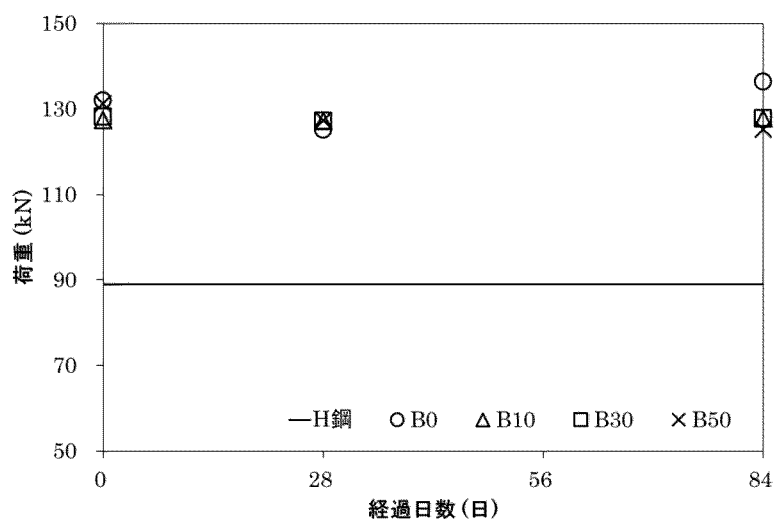


図-4.15 支間中央 H 鋼上フランジ部の降伏荷重

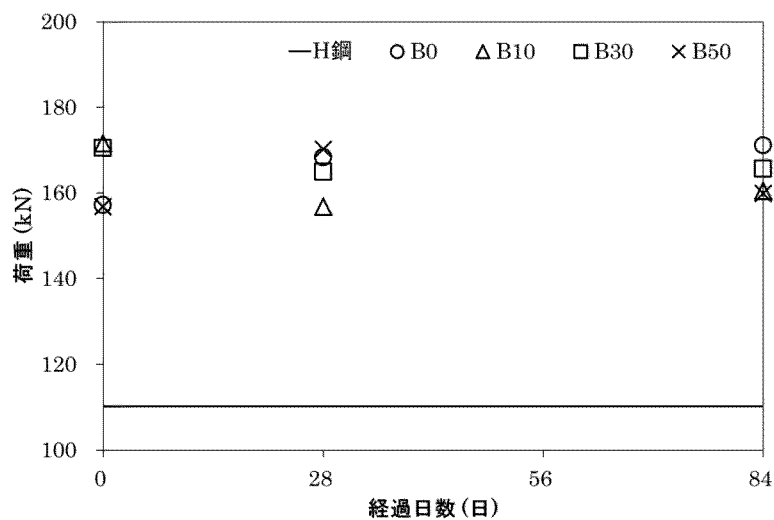


図-4.16 支間中央 H 鋼上フランジ部の終局荷重

曲げ荷重試験後の供試体を写真-4.4, CFRP 板の破断状況を写真-4.5 に示す. 各曲げ荷重試験での破壊モードは H 鋼上フランジに局部座屈が生じて先に降伏し, 大きく変形することで CFRP 板と H 鋼にはく離が生じ, 最終的には CFRP 板の破断であった. 非接着領域別の破壊状況を写真-4.6 から写真-4.9 に示す.

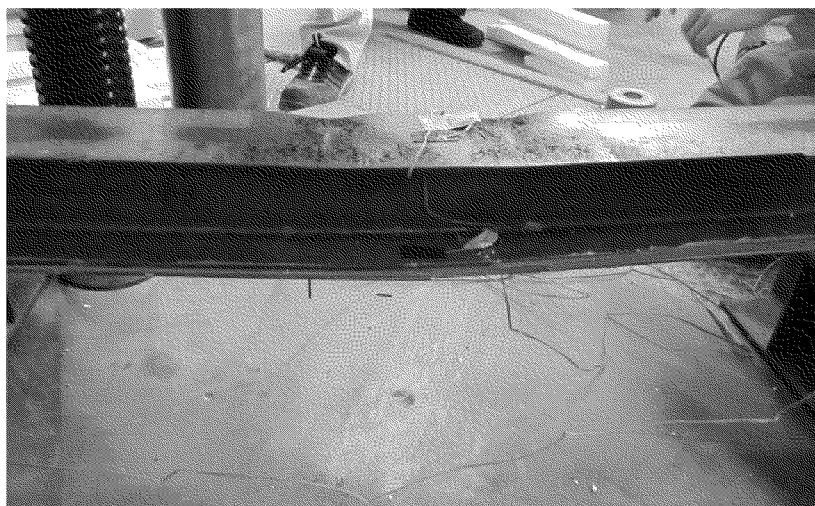


写真-4.4 曲げ荷重試験後の供試体

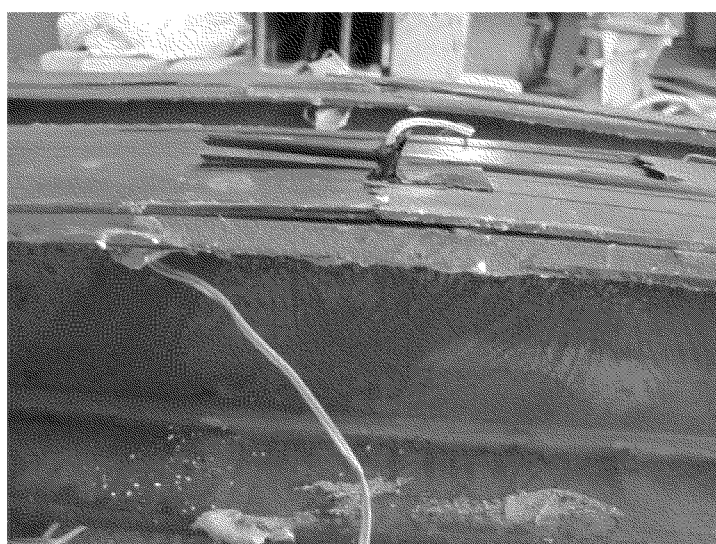


写真-4.5 CFRP 板破断状況

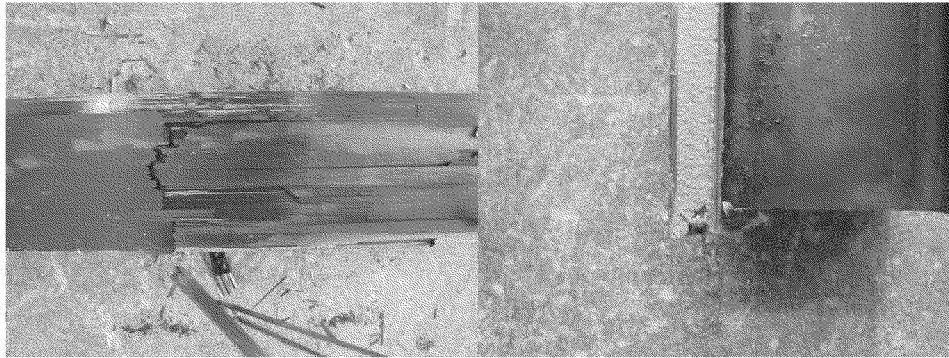
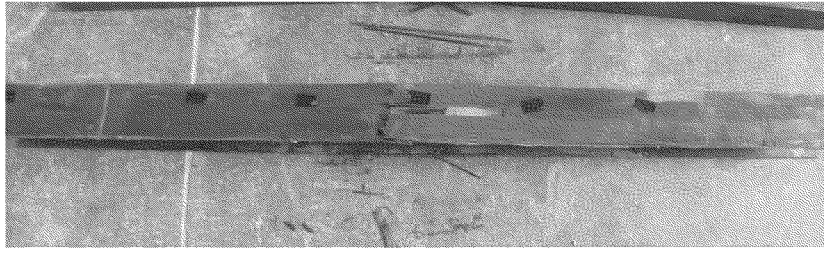


写真-4.6 破壊状況 (B0-342d)

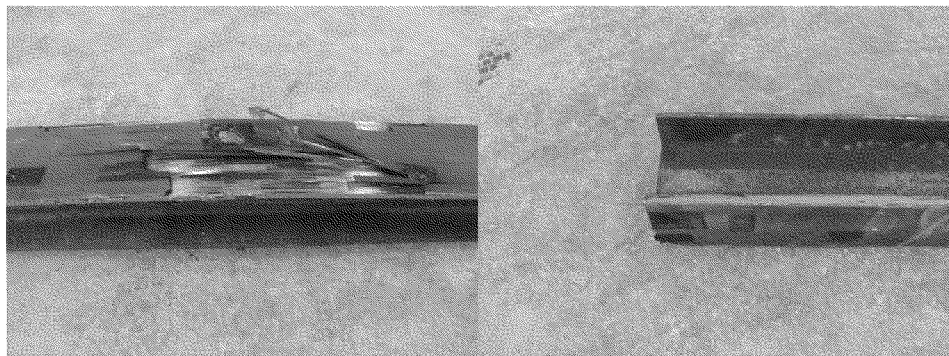
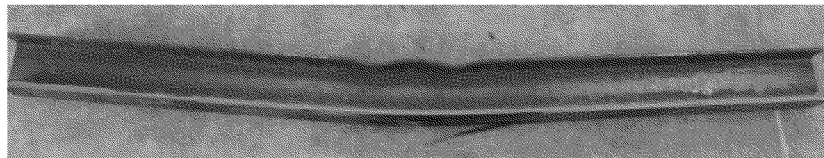


写真-4.7 破壊状況 (B10-84d)

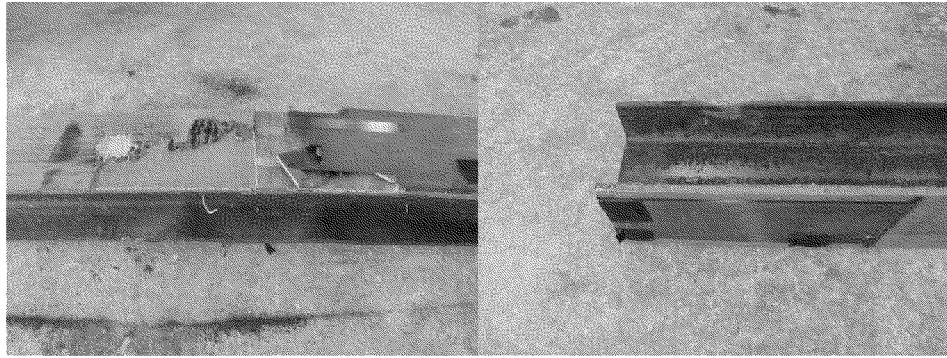
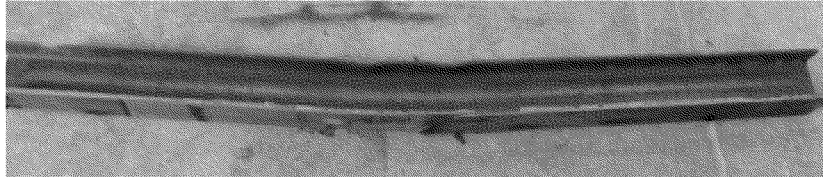


写真-4.8 破壊状況 (B30-84d)

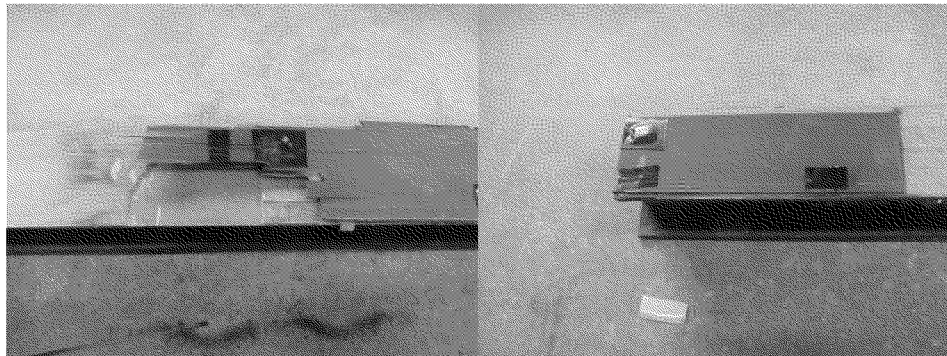
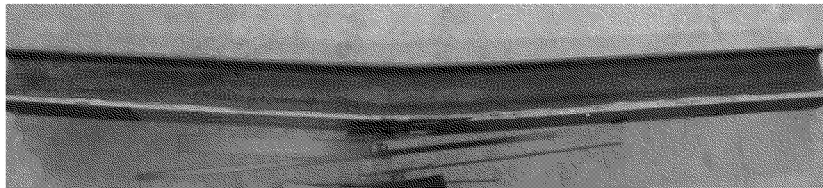


写真-4.9 破壊状況 (B50-84d)

#### 4.5 まとめ

本章では鋼鈹桁の下フランジに CFRP 板を接着補強した場合を想定し、H 鋼に CFRP 板を接着し、常温から低温の 30°C の温度変化履歴を受けることによる強度変化やひずみの挙動について実験的に調べた。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 常温から低温の 30°C の温度変化では H 鋼が降伏するまでは、H 鋼と CFRP 板の間には、はく離が生じず、低温履歴の影響は小さい。
- (2) いずれの試験でも供試体 H 鋼上フランジが局部座屈を起こし先に降伏し、部材全体大きく変形することで CFRP 板と H 鋼下フランジにはく離が生じ、最終的には CFRP 板が破断するという破壊機構を示した。
- (3) 完全接着と仮定してモデル化した合成はりの有限要素解析により、実験値を概ねシミュレートできたことから、H 鋼降伏前には、ずれやはく離は生じず、H 鋼上フランジ降伏後にずれやはく離が生じはじめたものと考えられる。
- (4) 30mm 幅までの非接着部をもつ供試体の曲げ載荷試験結果より、常温から低温の 30°C の暴露期間 0 日、28 日、84 日のいずれの温度変化履歴もその影響はほとんどみられなかった。一方、20%程度（非接着部 50mm 幅）の非接着領域を有するはり部材が同様の温度変化履歴を受けた場合、暴露期間 84 日の供試体においては CFRP 板と H 鋼間に伝達されるせん断力に影響を与える可能性がみられた。これは、繰り返し温度変化履歴を長期的に受けることにより線膨張係数の大きく異なる CFRP 板と H 鋼間に介在する接着剤に熱応力が繰り返し生じることにより、すべりやはく離などの事象が生じている可能性が考えられる。



## 第5章

### CFRP 板接着H鋼の はく離挙動に関する数値解析

## 第5章 CFRP板接着H鋼のはく離挙動に関する数値解析

### 5.1 目的

低温環境下において30℃の繰り返し温度変化を受けるCFRP板接着H鋼に対する長期の変形挙動や曲げ試験の結果より、H鋼が降伏するまでは、H鋼とCFRP板の間にははく離が生じず、低温履歴の影響は小さいことが示された。しかしながら、非接着領域が20%を有する場合には、わずかながらCFRP板とH鋼間に伝達されるせん断力に影響を及ぼす傾向がみられた。本章では、既往の数値解析による研究（大倉・福井ら，2001；大沼，1958；Deng J., Lee M. et al, 2004；Stratford T., Cadei J. et al, 2006；Schnerch D., Dawood M. et al, 2007）を参考に簡易な数値解析により、はく離挙動のプロセスを検証し、今後の設計に参考となるよう考察を行った。

### 5.2 数値解析

#### 5.2.1 数値解析モデル

数値解析は、第4章の図-4.4に示す実験供試体を対象とし、図-5.1のようなモデルを考える。

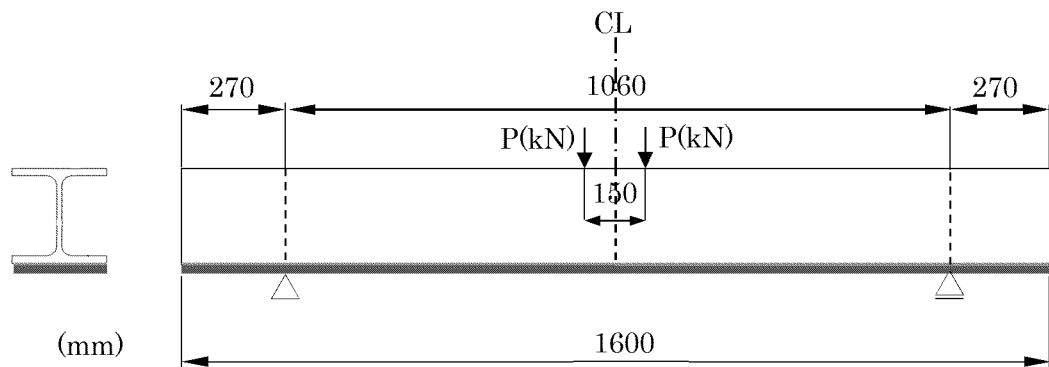


図-5.1 数値解析モデル

解析に用いたH鋼、CFRP板ならびにエポキシ樹脂接着剤の形状寸法ならびに物性値をそれぞれ表-5.1～表-5.3に示す。なお、物性値は実験値に基づいて設定した。

表-5.1 H鋼の形状寸法と物性値

形状寸法 (mm)	100×100×6×8×1600
ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	206000
ポアソン比	0.3
線膨張係数 (10 <sup>-6</sup> /°C)	12

表-5.2 CFRP 板の形状寸法と物性値

形状寸法	100×2×1600
ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	480000
せん断弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	240000
線膨張係数 (10 <sup>-6</sup> /°C)	0.3

表-5.3 エポキシ樹脂接着剤の厚さと物性値

厚さ (mm)	0.2
ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	3700
ポアソン比	0.36
せん断弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	1360

### 5.2.2 基礎微分方程式の誘導と解

CFRP 板接着 H 鋼の側面図を図-5.2 に示す。ここでは、接着剤の非接着部についてはないものとする。

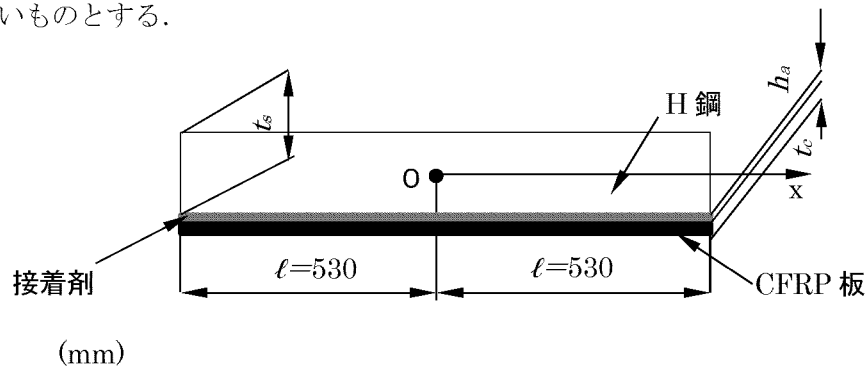


図-5.2 CFRP 板接着 H 鋼の側面図

接着剤はせん断力のみを伝達し、CFRP 板および H 鋼は引張力のみ伝達すると仮定して、CFRP 板接着 H 鋼の内力のつり合いから式 (5.1) を得る。

$$\sigma_s t_s b + \sigma_c t_c b = 0 \quad \text{式 (5.1)}$$

ここに,

$\sigma_s, t_s$  : 各々, H 鋼に生じる応力と厚さ

$\sigma_c, t_c$  : 各々, CFRP 板に生じる応力と厚さ

$b$  : CFRP 板接着 H 鋼の幅

接着剤に生じるせん断応力  $\tau_0$  を次式で仮定する.

$$\tau_0 = G_a \frac{u_s - u_c}{h_a} \quad \text{式 (5.2)}$$

ここに,

$G_a$  : 接着剤のせん断弾性係数

$u_s, u_c$  : 各々, H 鋼, CFRP 板に生じる水平変位

$h_a$  : 接着剤の片面厚さ

さらに,  $G_a$  は次式で与えられる.

$$G_a = \frac{E_a}{2(1 + \mu_a)} \quad \text{式 (5.3)}$$

ここに,

$E_a, \mu_a$  : 各々, 接着剤のヤング係数とポアソン比

式 (5.2) を  $x$  で微分して次式を得る.

$$\frac{d\tau_0}{dx} = \frac{G_a}{h_a} \left( \frac{du_s}{dx} - \frac{du_c}{dx} \right) \quad \text{式 (5.4)}$$

H 鋼に生じる応力  $\sigma_s$  は, 温度変化によって H 鋼に生じるひずみ  $\varepsilon_{st}$  および H 鋼の水平変位  $u_s$  の関係は次式で与えられる.

$$\frac{du_s}{dx} = \frac{\sigma_s}{E_s} + \varepsilon_{st} \quad \text{式 (5.5)}$$

ここに,

$$\varepsilon_{st} = \alpha_s \Delta T \quad \text{式 (5.6)}$$

$E_s, \alpha_s$  : 各々, H 鋼のヤング率と線膨張係数

$\Delta T$  : 温度変化量

同様に, CFRP 板に生じる応力  $\sigma_c$ , 温度変化によって CFRP 板に生じるひずみ  $\varepsilon_{ct}$  および H 鋼の水平変位  $u_c$  の関係は次式で与えられる.

$$\frac{du_c}{dx} = \frac{\sigma_c}{E_c} + \varepsilon_{ct} \quad \text{式 (5.7)}$$

ここに,

$$\varepsilon_{ct} = \alpha_c \Delta T \quad \text{式 (5.8)}$$

$E_c, \alpha_c$  : 各々, CFRP 板のヤング率と線膨張係数

式 (5.5), (5.7) を式 (5.4) に代入して式 (5.9) が得られる.

$$\frac{d\tau_0}{dx} = \frac{G_a}{h_l} \left( \frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{\sigma_c}{E_c} + \Delta\varepsilon_t \right) \quad \text{式 (5.9)}$$

ここに,

$$\Delta\varepsilon_t = \varepsilon_{st} - \varepsilon_{ct} = (\alpha_t - \alpha_c) \Delta T \quad \text{式 (5.10)}$$

CFRP 板および接着剤応力の厚さ方向の変化は、薄い CFRP 板および接着剤では無視できるとし、接着剤の応力は単軸応力として考え、H 鋼の高さ中央から下側の CFRP 板接着 H 鋼の微小区間の力のつり合いを図-5.3 に示す。このつり合いから式 (5.11) が得られる。

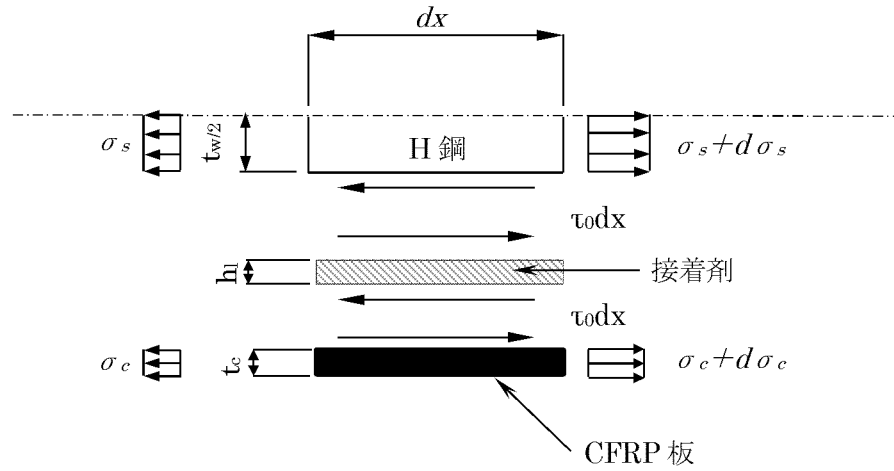


図-5.3 CFRP 板接着 H 鋼の微小区間のつり合い

$$\tau_0 = \frac{t_s}{2} \frac{d\sigma_s}{dx} \quad \text{式 (5.11)}$$

この式を  $x$  で微分し、これに式 (5.9) を代入して式 (5.12) が得られる。

$$\frac{t_s}{2} \frac{d^2\sigma_s}{dx^2} = \frac{G_a}{h_a} \left( \frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{\sigma_c}{E_c} + \Delta\varepsilon_t \right) \quad \text{式 (5.12)}$$

式 (5.1) と式 (5.12) より、 $\sigma_c$  を消去して、次の 2 階微分方程式が得られる。

$$\frac{d^2\sigma_s}{dx^2} - c^2\sigma_s = c^2(1 - \xi_0)E_s\Delta\varepsilon_t \quad \text{式 (5.13)}$$

ここに、

$$c = \sqrt{\frac{G_a}{h_a} \frac{2}{1 - \xi_0} \frac{1}{\sqrt{E_s t_s}}} \quad \text{式 (5.14)}$$

$$\xi_0 = \frac{1}{1 + E_c t_c / (E_s t_s)} \quad \text{式 (5.15)}$$

式 (5.13) の 2 階微分方程式を解くにあたり、式 (5.13) を式 (5.16) とおく。

$$y'' - c^2 y = D \quad \text{式 (5.16)}$$

$$\text{ここで, } D = c^2 (1 - \xi_0) E_s \Delta \varepsilon_t$$

まず、式 (5.16) の斉次解を求める。

$$y'' - c^2 y = 0 \quad \text{式 (5.17)}$$

$y = e^{\lambda x}$  とおくと、 $y' = \lambda e^{\lambda x}$   $y'' = \lambda^2 e^{\lambda x}$  であるから式 (5.17) は、

$$\lambda^2 e^{\lambda x} - c^2 e^{\lambda x} = 0$$

$$(\lambda^2 - c^2) e^{\lambda x} = 0$$

$$(\lambda + c)(\lambda - c) e^{\lambda x} = 0$$

$$e^{\lambda x} > 0 \quad \text{より}$$

$$(\lambda + c)(\lambda - c) = 0$$

$$\lambda = \pm c$$

よって斉次解は、 $y = e^{\pm cx}$

基本解は、

$$y = C_1 e^{cx} + C_2 e^{-cx}$$

今、特殊解を  $y_*(x) = K$  (定数) とおくと

$$y_*'' - c y_* = \frac{d^2}{dx^2}(K) - c^2 K = -c^2 K = D$$

よって、

$$y_*(x) = K = -\frac{D}{c^2} = (\xi_0 - 1) E_s \Delta \varepsilon_t$$

したがって、一般解は

$$y(x) = C_1 e^{cx} + C_2 e^{-cx} + (\xi_0 - 1) E_s \Delta \varepsilon_t$$

$$\cosh(cx) = \frac{e^{cx} + e^{-cx}}{2} \quad \text{より}$$

$$y(x) = z \cosh(cx) + (\xi_0 - 1) E_s \Delta \varepsilon_t$$

境界条件は、図-5.2 より

$x=0$  の位置で、H 鋼の応力が対称

$x=l$  の位置で、 $\sigma_s = 0$

以上の境界条件に対して式 (5.13) を解くと、H 鋼に生じる応力  $\sigma_s$ 、CFRP 板に生じる応力  $\sigma_c$  がそれぞれ式 (5.18)、式 (5.19) で与えられる。

$$\sigma_s = (1 - \xi_0) E_s \Delta \varepsilon_t \left\{ \frac{\cosh(cx)}{\cosh(c\ell)} - 1 \right\} \quad \text{式 (5.18)}$$

$$\sigma_c = \frac{1 - \xi_0}{2} \frac{t_s}{t_c} E_s \Delta \varepsilon_t \left\{ \frac{\cosh(cx)}{\cosh(c\ell)} - 1 \right\} \quad \text{式 (5.19)}$$

式 (5.18) を式 (5.11) に代入して、右辺を積分すると式 (5.20) が得られる。

$$\tau_0 = \frac{1 - \xi_0}{2} c t_s E_s \Delta \varepsilon_t \frac{\sinh(cx)}{\cosh(c\ell)} \quad \text{式 (5.20)}$$

ここに、 $\ell$ : CFRP 板全長の半分の長さ



### 5.2.3 数値解析結果と考察

#### (1) CFRP 板接着 H 鋼に生じる応力度

本研究では、30℃の幅で常温から低温まで繰り返し温度を与えたため、CFRP 板を H 鋼に接着する時の温度を常温時および低温時の最も厳しい環境下で考え、温度変化量 $\Delta T$ を30℃とし、その際の CFRP 板接着 H 鋼に発生する応力度を式 (5.16) より求めた。このときの応力度分布を図-5.4 に示す。なお、横軸は CFRP 板付着長さの中央からの橋軸方向の距離  $x$  を CFRP 板全長の半分の長さ  $l$  で除した値を表す。

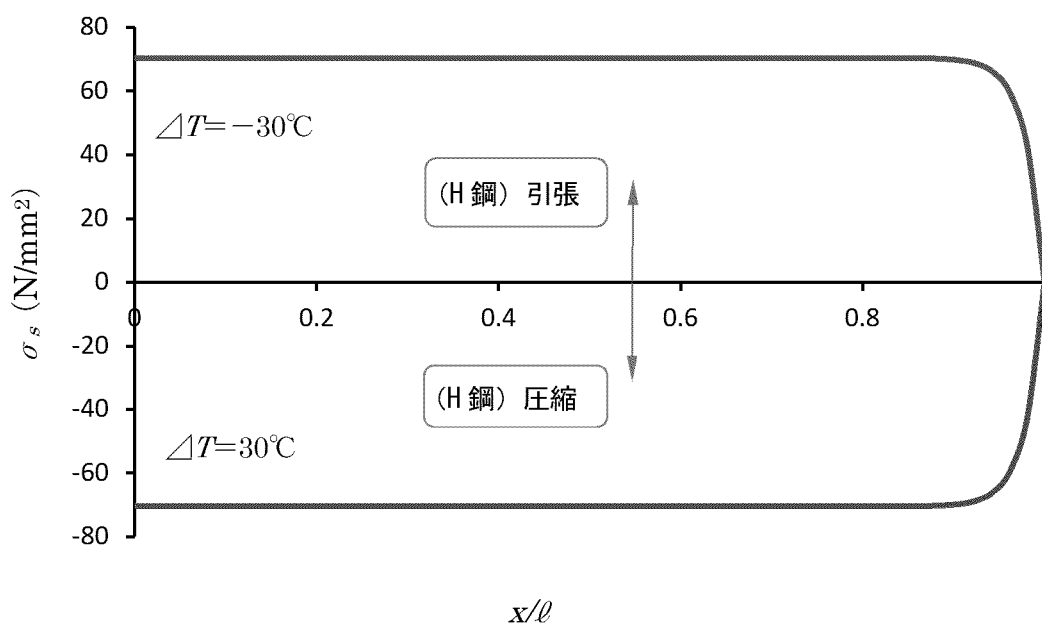


図-5.4 30℃の温度変化を与えた場合の CFRP 接着 H 鋼の応力度分布

図-5.4 から $\Delta T=30^\circ\text{C}$ の場合、H 鋼には圧縮応力が生じており、鋼鈹桁下フランジの補強を想定した場合、発生応力を低減することとなり安全側の設計となるが、 $\Delta T=-30^\circ\text{C}$ の場合、H 鋼には引張応力が生じるため、危険側の設計となることに注意しなければならない。本実験で使用した一般構造圧延 H 鋼の場合、許容応力度は 140 (N/mm<sup>2</sup>)、降伏応力度は 245 (N/mm<sup>2</sup>) であるため、耐荷力向上を目的とした補強の場合、許容応力度を超過することになる。しかしながら、最大発生応力度は 70 (N/mm<sup>2</sup>) 程度であるため、降伏には至らない。以上から、CFRP 板接着による鋼板の補強を行う際には、接着時の温度をなるべく低温時に行うよう留意が必要であることが示される。

(2) 接着剤に生じるせん断応力度

次に(1)と同じ条件において、接着剤に生じるせん断応力度を式 (5.18) より求め、その応力度分布を図-5.5に示す。図-5.5より CFRP 板接着 H 鋼の接着剤に生じるせん断応力は、CFRP 板付着端部 ( $x=l$ ) で最大となっている。また、接着剤に作用するせん断応力が卓越する位置は、 $x/l=0.9$  近傍からであることがわかる。したがって、第4章で試みた CFRP 板の非接着領域は支間中央部に存在しても、接着剤にはほとんどせん断応力が生じないため、はく離する大きな要因にはならないと考えられる。すなわち、CFRP 板接着補強の施工の場合、付着端部に十分な留意が必要であることがわかった。CFRP 板付着端部で発生する接着剤におけるせん断応力度は、 $25 \text{ (N/mm}^2\text{)}$  であり、本実験で使用したエポキシ樹脂接着剤の引張せん断強度  $16 \text{ (N/mm}^2\text{)}$  を超過している。したがって、常時温度で CFRP 板を接着した場合、最低温度時に CFRP 板付着端部ではく離が生じる可能性がある。この結果からも付着端部の施工にあたっては十分な留意が必要であることがわかる。

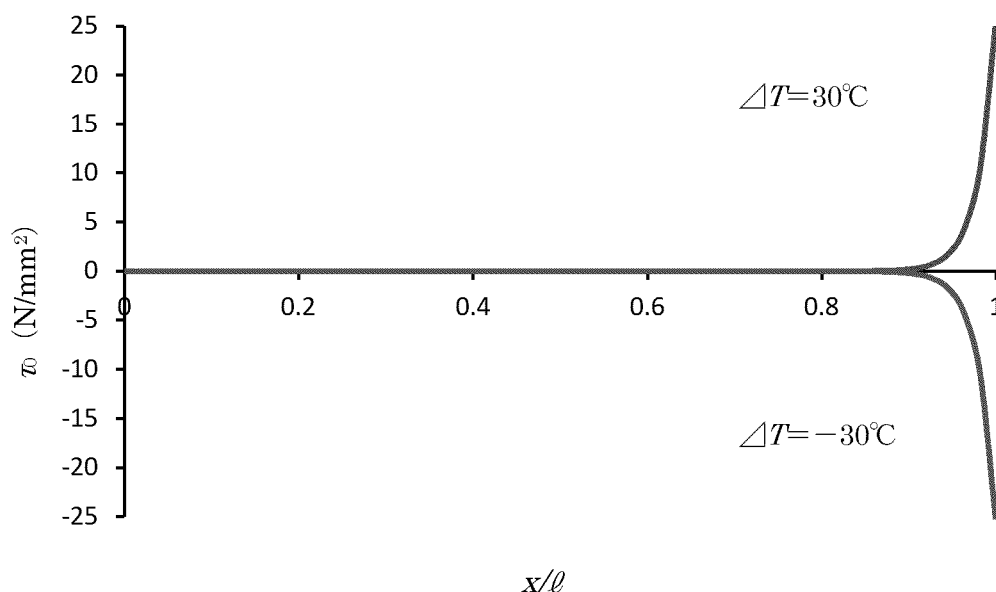


図-5.5 30℃の温度変化を与えた場合の接着剤に生じる応力度分布

次に H 鋼のフランジ板厚の違い (8mm と 21mm) による接着剤に生じるせん断応力度を式 (5.18) より求め、その応力度分布を図-5.6 に示す。図-5.6 に示すように板厚が増えた場合、わずかながら作用するせん断応力が卓越する位置が CFRP 板接着 H 鋼の支間中央寄りにずれていることがわかる。また、CFRP 板付着端部に発生するせん断応力度が約 1.6 倍になった。したがって、CFRP 板接着により補強する H 鋼が増厚すると CFRP 板付着端部で CFRP 板がはく離する可能性が高くなると考えられる。

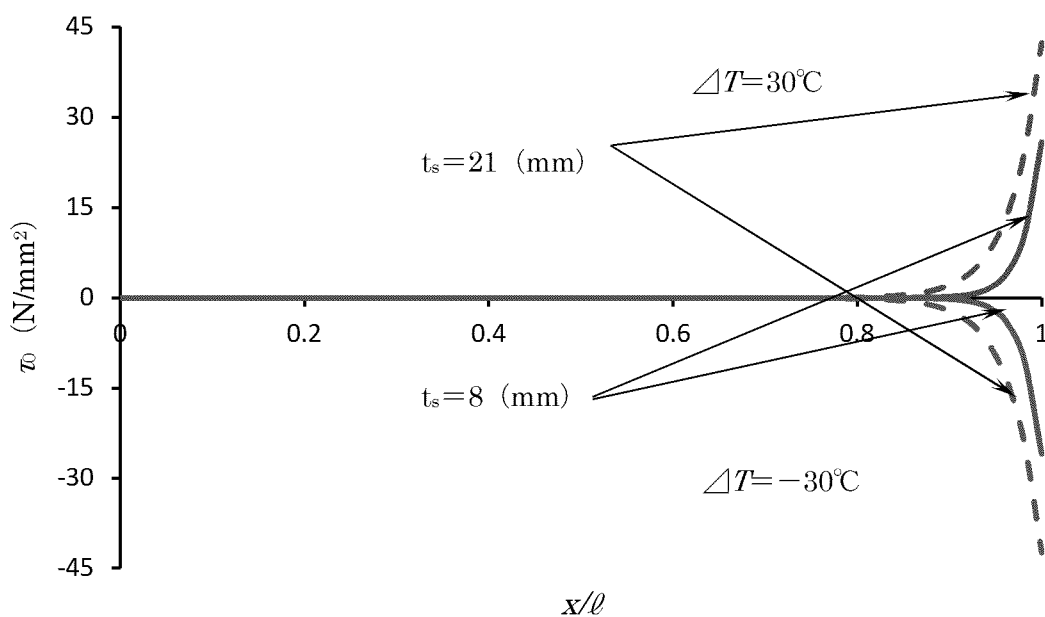


図-5.6 鋼板の板厚の違いによる接着剤に生じる応力度分布

### 5.3 まとめ

本章では、第4章で行った実験をもとに簡易な数値解析を行った。常温から低温の $30^{\circ}\text{C}$ の温度変化を受けるCFRP板接着H鋼のはく離挙動を接着剤に生じるせん断応力に着目し検証をした。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) CFRP板接着による鋼鈹桁下フランジの補強を想定した場合、低温時に接着した場合（温度変化 $=+30^{\circ}\text{C}$ ）、H鋼には圧縮応力が生じ、発生応力を低減することとなり安全側の設計となる。一方、常温時に接着した場合（温度変化 $=-30^{\circ}\text{C}$ ）、H鋼には引張応力が生じ、危険側の設計となるため接着時の温度に留意して施工しなければならないと考えられる。
- (2) 常温から低温の $30^{\circ}\text{C}$ の温度変化履歴を受けるCFRP板接着H鋼の接着剤に生じるせん断応力は、CFRP板付着端部で最大となっており、接着剤に作用するせん断応力が卓越する位置は、端部近傍（約10%）からであることがわかった。これより、支間中央部に非接着部が存在しても接着剤にはほとんどせん断応力は発生しないため、はく離の大きな要因にはならないと考えられる。
- (3) 常時温度でCFRP板を接着した場合、 $-30^{\circ}\text{C}$ の温度低下時にCFRP板付着端部ではく離が生じる可能性があることを示した。この結果からも付着端部の施工にあたっては十分な留意が必要である。
- (4) H鋼のフランジ板厚の違い（8mmと21mm）による接着剤に生じるせん断応力度は板厚が増えた場合、CFRP板付着端部に発生するせん断応力度が約1.6倍になったことから、CFRP板接着により補強するH鋼が増厚するとCFRP板付着端部でCFRP板のはく離する可能性が高くなると考えられる。

## 第6章

### 結語

## 第6章 結語

### 6.1 結論

2012年12月に起きた中央自動車道の笹子トンネルの天井崩落事故をきっかけに、社会インフラの老朽化問題への関心が高まり、高度経済成長期につくられた社会インフラの修理・改築が日本全体の喫緊の課題となっている。このような背景の中、炭素繊維強化ポリマー（CFRP）は、軽量、高強度、腐食しない等、他の材料にない優れた特性を有しており、建設産業において、鋼、コンクリートに続く新しい材料（主に補強材）として受け入れられつつある。CFRPの鋼構造物への適用に関する研究は、我が国では2000年頃から実施され、2002年、我が国では初めて、設計荷重の変更に伴う耐荷力の向上を目的として、CFRP板接着によるトラス橋横桁の補強工事が施工されている。

しかしながら、CFRP板と鋼部材の接着接合に関する標準的な設計法がないため、接合部の安全性や、CFRP板の適用による効果を実験的に検証する必要がある。CFRP板を接着した鋼材に関する研究は、はく離強度に着目した研究や温度変化に着目した研究など実験的にも解析的にも盛んに行われているが、低温下の環境での変形挙動に着目した研究は比較的少ない。鋼構造物の補修・補強材料としてのCFRPに、より信頼性を高めるためには、低温下の環境での変形挙動を明らかにしておく必要がある。

本研究では、CFRP板を接着させた鋼板ならびにH鋼に対して、常温から低温までの繰り返し温度変化を与え、各種の実験により、変形挙動や耐荷性能について検討を行った。また、実験結果をもとにした簡易的な数値解析を行い、CFRP板のはく離挙動について解析検討を加えた。本論文の主な要点（第2～5章）を以下にまとめて示す。

第2章「繰り返し温度変化を受けるCFRP板接着鋼板の変形挙動」では、CFRP板接着鋼板に常温から低温までの繰り返し温度変化を与え、3ヶ月長期たわみ試験を実施し、その変形挙動について検討を行った。その結果、鋼・CFRP板合成はりのたわみは、温度の低下に伴い、線形的に増加することがわかった。また、載荷荷重を与えた鋼・CFRP板合成はりのたわみは3ヶ月の載荷期間中、一定の値を示した。載荷期間中に温度変化に伴うたわみの増減のみが生じ、鋼板とCFRP板の間のすべりやはく離ならびにクリープ変形等は全くほとんどみられず、ひずみ挙動も同様に持続荷重下において載荷荷重に応じて一定の値を示すことが確認できた。

第3章「繰り返し温度変化を受けるCFRP板接着H鋼の変形挙動」では、一般構造用圧延H鋼を用いて長期ひずみ試験を実施し、その変形挙動について検討を行った。また、鋼板桁の下フランジ補強の場合、CFRP板の接着が上向き姿勢になる作業環境を踏まえ、施工不良による非接着部を設けた実験を行った。その結果、H鋼とCFRP板のひずみは、低温時に差異がみられた。これはH鋼の線膨張係数がCFRP板のそれより大きく、温度

変化に伴い接着剤層でせん断変形が生じたものと考えられた。また、低温時の H 鋼と CFRP 板のひずみの差は供試体の中央部より端部の方が大きく、温度変化に伴い生じるせん断変形が大きいものと考えられ、H 鋼と CFRP 板の間のすべりやはく離は部材の CFRP 板接着端部から発生することが示唆された。また、CFRP 板に非接着領域を有する実験においてもすべりやはく離はみられなかった。したがって、本実験で採用した範囲における繰り返し温度と桁剛性であれば CFRP 板の接着に施工不良が生じ、非接着率が 20%程度になっても CFRP 板の補強効果の低下は顕著なものではないことが示唆された。

第 4 章「繰り返し温度変化を受ける CFRP 板接着 H 鋼の曲げ耐荷力」では、CFRP 板接着 H 鋼が常温から低温の 30°C の繰り返し温度変化を受けた場合の曲げ耐力・破壊性状を調べるため、温度履歴と非接着領域の違いをパラメータとした曲げ試験を実施した。そして曲げ破壊挙動を調べ、CFRP 接着による鋼桁補強のより効率的で安全な設計法確立のための検討を行った。その結果、H 鋼が降伏するまでは、H 鋼と CFRP 板の間には、はく離が生じず、低温履歴の影響は小さかった。いずれの試験でも供試体も H 鋼上フランジが先に降伏し、大きく変形することで CFRP 板と H 鋼にはく離が生じ、最終的には CFRP 板が破断するという破壊機構を示した。

また、非接着領域が 13%程度（非接着部 30mm 幅）までは曲げ載荷試験結果より、常温から低温の 30°C の温度変化履歴の影響はほとんどみられなかった。一方、非接着領域が 20%程度（非接着部 50mm 幅）の場合、CFRP 板と H 鋼間に伝達されるせん断力に影響を与える可能性がみられた。

第 5 章「CFRP 板接着 H 鋼のはく離挙動に関する数値的解析」では、常温から低温の 30°C の温度変化を受ける CFRP 板接着 H 鋼のはく離挙動を CFRP 板と H 鋼の間の接着剤に生じるせん断応力に着目し、簡易的な理論数値解析により考察した。その結果、常温時に CFRP 板が H 鋼に接着された場合、低温時では 30°C の温度変化を CFRP 板接着 H 鋼は受け、CFRP 板と H 鋼間に伝達される接着剤に生じるせん断力は CFRP 板付着端部が最も大きくなり、その部分からはく離が生じることを示した。さらに、H 鋼の板厚が増加すると接着剤に生じるせん断応力度も大きくなることがわかった。

また、CFRP 板接着による鋼桁下フランジの補強を想定した場合、低温時に接着した場合（温度変化 = +30°C）、H 鋼には圧縮応力が生じ、発生応力を低減することとなり安全側の設計となる。一方、常温時に接着した場合（温度変化 = -30°C）、H 鋼には引張応力が生じ、危険側の設計となるため接着時の温度に留意して施工しなければならないことが示唆された。

## 6.2 今後の課題

本研究では、我が国の道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編に規定されている寒冷地のような低温下の環境において、CFRP板接着により鋼部材の補修・補強を行った場合の付着特性に着目した実験を行い、概ね問題なく使用できることを示した。しかしながら、数値解析結果に示されるように、補強部材の板厚などのパラメータによっては留意すべき事項も多く、また、CFRP板の接着時の温度によっては、補強部材にとっては危険側の設計になる場合も考えられる。今後の課題として、設計方法としては、CFRP板の接着にあたっての必要長さの算定方法やはく離に対する評価方法の確立および接着接合部の長期耐久性が挙げられる。また、施工面では、低温環境下での接着施工や接合養生時におけるCFRPの仮固定方法や接着施工に対する品質保証等が挙げられる。現状、我が国においては、CFRPの鋼構造の補修・補強にあたっての指針として、炭素繊維シートによる鋼製橋脚の耐震補強工法ガイドライン（土木研究センター，2002）および設計要領第二集【橋梁保全編】（東日本高速道路（株），2011）があり、炭素繊維シートによる補修工法が基準化されているが、材料や施工箇所が限定されており、設計法の完全な確立までには至っていない。

以上から、本研究で得られた結果は、今後の課題解決に向けての一助になるものと思われる。今後、設計法を確立するために、パラメトリックに解析的研究を行うと同時に公共構造物への適用に際しての絶対条件となる長期耐久性についての実験的研究を視野に入れ、本研究をさらに発展させていく必要がある。



## 参考文献

- Adams R.D., Singh M.M. : Low temperature transitions in fibre reinforced polymers : Composites A , Vol.32, pp.797-814, 2001.
- Alampalli S., O'Connor J., Yannotti A. : Fiber reinforced polymer composites for the superstructure of a short-span rural bridge, Composite structures, Vol.58, pp.21-27, 2002.
- Al-Zubaidy H., Zhao X., Ai-Mahaidi R. : Dynamic bond strength between CFRP sheet and steel, Composite structures, Vol.94, pp.3258-3270, 2012.
- Bank L., Gentry T., Thompson B., Russell J. : A model specification for FRP composites for civil engineering structures, Construction and Building Materials, Vol.17, pp.405-437, 2003.
- Banea M.D., Sousa F.S.M., da Silva L.F.M., Campilho R.D.S.G., Bastos Pereira A.M. : Effects of temperature and loading rate on the mechanical properties of a high temperature epoxy adhesive, Journal of Adhesion Science and Technology, 25, pp.2461-2474, 2011.
- Buyukozturk O., Gunes O., Karaca E., Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites, Construction and Building Materials, Vol.18, pp.9-19, 2004.
- Cao S., Wu Z., Li F. : Effects of temperature on tensile strength of carbon fiber and Carbon/Epoxy composite sheets, Advanced Materials Research, Vols.476-478, pp.778-784, 2012.
- Colombi P., Fava G., Poggi C. : Bond strength of CFRP-concrete elements under freeze-thaw cycles, Composite structures, Vol.92, pp.973-983, 2010.
- Deng J., Lee M., Moy S. : Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP plate : Composite structures, Vol.65, pp.205-215, 2004.
- Di Tommaso A., Neubauer U., Pantuso A., Rostasy F.S. : Behavior of adhesively bonded concrete-FRP joints at low and high temperatures, Mechanics of composite materials,

Vol.37, No.4, pp.517-534, 2001.

Dutta P.K. : Low temperature compressive strength of grass-fibre-reinforced polymer composites, *Journal of Offshore mechanics arctic engineering*, Vol.116(3), pp.167-172, 1994.

Dutta P.K., Hui D. : Low-temperature and freeze-thaw durability of thick composites, *Journal of Composites, Part B*, No.27B, pp.371-379, 1996.

Einde L., Zhao L., Seible F. : Use of FRP composites in civil structural applications, *Construction and Building Materials*, Vol.17, pp.389-403, 2003.

Green M.F., Bisby L.A., Beaudoin Y., Labossiere P. : Effect of freeze-thaw cycles on the bond durability between fibre reinforced polymer plate reinforcement and concrete : *Canadian journal of civil engineering*, Vol.27, pp.949-959, 2000.

Haghani R., Al-Emrani M., Kliger R. : 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.

Hmidan A., Kim Y.J., Yazdani S. : Flexural response of damaged steel beams strengthened with CFRP sheet, *Modern methods and advances in Structural Engineering and Costruction*, pp.1085-1090, 2011.

Hollaway L. : The evolution of and the way forward for advanced polymer composites in the civil infrastructure, *Construction and Building Materials*, Vol.17, pp.365-378, 2003.

Hollaway L. : A review of the present and future utilization of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties , *Construction and Building Materials*, Vol.24, pp.2419-2445, 2010.

Huang Y., Young R.J. : Interfacial behavior in high temperature cured carbon fibre/epoxy resin model composite, *Composites*, Vol.26, No.8, pp.541-550, 1995.

Im K., Cha C., Kim S., Yang Y. : Effects of temperature on impact damages in CFRP composite laminates, *Journal of Composites, Part B*, No.32, pp.669-682, 2001.

Ip K.H., Dutta P.K., Hui D. : Effect of low temperature on the dynamic moduli of thick composite beams with absorbed moisture, *Composites B*, Vol.32, pp.599-607, 2001.

JIS K 7164 「プラスチックー引張特性の試験方法ー第4部：等方性及び直交異方性繊維強化プラスチック系複合材料の試験条件」, 2005.

JIS K 7165 「プラスチックー引張特性の求め方ー第5部：一方向繊維強化プラスチック複合材料の試験条件」, 2008.

JSCE-E541 「連続繊維シート of 引張試験方法」, 2007.

Kim M., Kang S., Kim C., Kong C. : Tensile response of graphite/epoxy composites at low temperatures, *Composite structures*, Vol.79, pp.84-89, 2007.

Kim Y.J., Brunell G. : Interaction between CFRP-repair and initial damage of wide-flange steel beams subjected to three-point bending: *Composite structures*, Vol.93, pp.1986-1996, 2011.

Kim Y.J., Hossain M., Yoshitake I. : Cold region durability of a two-part epoxy adhesive in double-lap shear joints: Experiment and model development, *Construction and Building Materials*, Vol.36, pp.295-304, 2012.

Kim Y.J., LaBere J., Yoshitake I. : Hybrid epoxy-silyl modified polymer adhesives for CFRP sheets bonded to a steel substrate, *Journal of Composites, Part B*, No.51, pp.233-245, 2013.

Nguyen T., Bai Y., Zhao X.L., Al-Mahaidi R. : Mechanical characterization of steel/CFRP double strap joints at elevated temperatures, *Composite structures*, Vol.93, pp.1604-1612, 2011.

Nguyen T., Bai Y., Zhao X.L., Al-Mahaidi R. : Effects of ultraviolet radiation and associated elevated temperature on mechanical performance of steel/CFRP double strap joints, *Composite structures*, Vol.94, pp.3563-3573, 2012.

Oliveira R., Lavanchy S., Chatton R., Costantini D., Michaud V., Salathe R., Manson J-A.E., Experimental investigation of the effect of the mould thermal expansion on the development of internal stresses during carbon fibre composite processing ,

Composites : Part A, Vol.39, pp.1083-1090, 2008.

Rizkalla S., Dawood M., Schnerch D.: Development of a carbon fiber reinforced polymer system for strengthening steel structures, Composites Part A, Vol.39, pp.388-397, 2008.

Silva L., Adams R. : Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites, International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol.27, pp.227-235, 2007.

Stratford T., Cadei J. : Elastic analysis of adhesion stresses for the design of a strengthened plate bonded to a beam, Construction and Building Materials, Vol.20, pp.34-45, 2006.

Schnerch D., Dawood M., Rizkalla S., Sumner E. : Proposed design guidelines for strengthening of steel bridges with FRP materials, Construction and Building Materials, Vol.21, pp.1001-1010, 2007.

Yoshitake I., Kim Y.J., Yumikura K., Hamada S. : Moving-wheel fatigue for bridge decks strengthened with CFRP strips subject to negative bending, Journal of Composites, Vol.14, No.6, pp.784-790, 2010.

Yong-Xin Y., Qing-rui Y., Fu-ming Fu : Experimental research on bond behavior of CFRP to steel, The International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, pp.419-423, 2005.

Zubaidy H., Al-Mahaidi R., Zhao X. : Experimental investigation of bond characteristics between CFRP fabrics and steel plate joints under impact tensile loads, Composite structures, Vol.94, pp.510-518, 2012.

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, 2001.10.

大沼 康二 : 金属外板接着部の応力分布と強さ特性について, 航空学会誌, 第7巻, 第60号, 1958.11.

石川 敏之, 大倉 一郎, 喜多 伸明 : 繊維シートが挿入された炭素繊維プレート接着鋼板のはく離せん断応力, 構造力学論文集, Vol.52A, pp.1317-1326, 2006.

石川 敏之, 大倉 一郎, 横田 季彦, 斉藤 誠 : 温度変化によって CFRP 板接着鋼板に生じるはく離せん断応力, 応用力学論文集, Vol.10, pp.963-970, 2007.

石川 敏之, 小村 啓太, 大倉 一郎, 横田 季彦, 斉藤 誠 : 挿入ガラス繊維シートの端の位置が CFRP 板接着鋼板のはく離荷重に与える影響, 鋼構造年次論文報告集, 第 15 卷, pp.425-430, 2007.11.

石川 敏之, 大倉 一郎, 西田 貴裕, 横田 季彦, 斉藤 誠 : CFRP 板付着端近傍への低弾性接着剤の使用によるはく離せん断応力の低減, 構造工学論文集, Vol.54A, pp. 842-849, 2008.

石川 敏之, 大倉 一郎, 小村 啓太 : CFRP 板の端部に段差を設けることによるはく離荷重上昇の理論解析, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.362-367, 2009.4.

石川 敏之, 大倉 一郎 : 複数の段差を有する CFRP 板接着鋼板の各 CFRP 板の必要接着長さ最適剛性, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.368-377, 2010.

石川 敏之, 服部 篤史, 河野 広隆 : アルミニウム合金板接着による CFRP 板接着鋼板に生じる熱応力の低減, 土木学会論文集 A1, Vol.67, No.2, pp.336-350, 2011a.

石川 敏之, 服部 篤史, 河野 広隆, 長尾 隆史, 小林 朗 : CFRP 板が接着された鋼板に生じる熱応力の低減工法の開発, 土木学会論文集 A2, Vol.67, No.2, pp.I\_767-I\_776, 2011b.

呉 智深, 岩下 健太郎, 谷ヶ城 俊, 石川 隆司, 濱口 泰正 : FRP シートの接着界面に及ぼす温度の影響 : 材料, Vol.54, No.5, pp.474-480, 2005.5.

小野 紘一, 杉浦 邦征, 佐々木 敦, 若原 直樹, 小牧 秀之 : CFRP により補強された鋼管の曲げ挙動, 鋼構造年次論文報告集, 第 8 卷, pp.671-678, 2000.11.

化学繊維技術改善研究委員会 : 繊維素材のデータベース,  
[http://www.kaizenken.jp/db/db\\_index.html](http://www.kaizenken.jp/db/db_index.html)

国土交通省・社会資本整備審議会道路分科会:道路の老朽化対策の本格実施に関する提言,  
2014.4.

国土交通省ホームページ：活力ある経済のためのインフラ整備にチャレンジ  
[http://www.mlit.go.jp/page/kanbo01\\_hy\\_002191.html](http://www.mlit.go.jp/page/kanbo01_hy_002191.html)

後藤 弘太郎：FRP 用ガラス繊維の縦弾性係数の温度依存性，材料，Vol.42，No.475，pp.355-358，1993.4.

杉浦 江，大垣 賀津雄，長井 正嗣，稲葉 尚文，小林 朗：炭素繊維シート (CFRP) を用いた鋼橋の補修・補強に関する一検討，第 2 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム，pp.93-98，2006.1.

杉浦 江，大垣 賀津雄，稲葉 尚文，富田 芳男，長井 正嗣，小林 朗：炭素繊維シートを用いた腐食による鋼部材断面欠損部の補修効果に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.54A，pp.548-554，2008a.

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.806-813，2008b.

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.106-118，2009.3.

鈴木 博之，井東 恵美，袴田 文雄：切欠きを有する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 7 巻，pp.325-330，1999.11.

玉井 宏章，高松 隆夫，原 伸幸，灰谷 徳治，服部 明生：炭素繊維プレートによる鋼構造物の補強法に関する基礎的研究，鋼構造年次論文報告集，第 12 巻，pp.239-246，2004.11.

玉井 宏章，高松 隆夫，服部 明生，灰谷 徳治，櫻庭 誠：炭素繊維プレートによる化学プラント架構小ばり補剛の施工例，鋼構造年次論文報告集，第 13 巻，pp.454-552，2005.11.

玉井 宏章，高松 隆夫，服部 明生，灰谷 徳治，櫻庭 誠：炭素繊維プレートによる鋼構造物の接着補強工法に関する基礎的研究，鋼構造年次論文報告集，第 14 巻，pp.445-452，2006.11.

徳林 宗孝, 池田 啓士, 吉元 郁男, 長谷川 敏之, 藤津 幾雄, 岡田 崇 : 円形鋼製柱の炭素繊維シートによる耐震補強, 橋梁と基礎, pp.37-42, 2003.12.

土木学会複合構造委員会 : FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端, 複合構造シリーズ 05, 2012.6.

土木学会複合構造委員会 : 複合構造技術の最先端—その方法と土木分野への適用—, 複合構造シリーズ 03, 2007.7.

土木研究センター : 炭素繊維シートによる鋼製橋脚の補強工法ガイドライン (案), 2002.7.

中村 一史, 諸井 敬嘉, 鈴木 博之, 前田 研一 : 溶接継手に発生した疲労き裂の積層CFRP 板のよる補修効果, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp.89-96, 2005.11.

中村 一史, 山谷 佑介, 前田 研一, 鈴木 博之, 入部 孝夫 : ひずみゲージを用いたCFRP 板貼付域の疲労き裂のモニタリング, 鋼構造年次論文報告集, 第 15 巻, pp.439-446, 2007.11.

日本鋼構造協会 : 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂, 2002.4.

日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 丸善, 2012.3.

野阪 克義, 金子 大昨, 古川 嵩朗, 鈴木 研二, 西出 靖 : CFRP 板接着補強において被着体厚さが補強効果に与える影響に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 第 10 巻, 第 38 号, pp.61-68, 2003.6.

東日本高速道路 (株) : 設計要領第二集【橋梁保全編】, 2011.7.

福澤 公夫, 三井 雅一, 沼尾 達弥, 舟川 勲 : CFRP シート・コンクリート間のはく離付着特性の温度依存性, Journal of the society of materials science, Japan, Vol.50, No.12, pp.1349-1356, 2001.12.

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, 2004.7.

松村 政秀, 北田 俊行, 北田 健, 並木 宏徳: プレストレスを導入した CFRP による鋼桁のポストテンション補強と補強効果に関する研究, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.183-192, 2005.3.

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, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.378-392, 2010.

姜 威, 中村 一史, 鈴木 博之, 前田 研一, 入部 孝夫: CFRP 板と鋼板の接着特性に関する実験的研究, 鋼構造年次論文報告集, 日本鋼構造協会, 第 14 巻, 2006.

姜 威, 山谷 祐介, 中村 一史, 前田 研一, 伊原 啓裕: 温度変化時における鋼板と CFRP 板の接着継手強度, 鋼構造年次論文報告集, 日本鋼構造協会, 第 17 巻, 2009.

連 重俊, 平野 廣和, 青木 徹彦, 井田 剛史, 袁 涌: 紫外線硬化型樹脂による補強対策を施した長柱の疲労実験, 土木学会論文集, No.784/VI-66, pp.99-107, 2005.3.

林 帆, 北 章太郎, 中村 一史, 前田 研一, 福田 欣弘: 繰返し荷重作用下における鋼板と CFRP 板の接着特性, 鋼構造年次論文報告集, 第 18 巻, pp.499-506, 2010.11.

若林 大, 宮下 剛, 奥山 雄介, 長井 正嗣, 小出 宜央, 小林 朗, 秀熊 祐哉, 塚本 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, pp.371-378, 2011.11.

渡邊 憲市, 板垣 一也, 鈴木 博之: 炭素繊維強化樹脂板による鋼橋の補強, 鋼構造年次論文報告集, 第 8 巻, pp.679-682, 2000.11.

渡辺 貴之, 石田 圭吾, 林 和彦, 山口 隆裕, 池田 尚司: 炭素繊維シートを用いた鋼製橋脚の耐震補強, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.725-734, 2002.3.

山田 聡, 酒井 吉永, 山田健太郎: 撤去した標識柱基部の疲労強度とその補修方法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.725-734, 2003.3.

山田 聡, 片桐 英喜, 前野 裕文, 山田健太郎: 門型標識柱の基部に発生した疲労き裂の補修効果の検討, 鋼構造論文集, Vol.16, No.61, pp.11-22, 2009.3.

山田 稔, 長島 文雄, 大久保 智, 伊奈義直: 繰返し荷重を受ける CFRP 補強桁の接着特性に関する実験的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 19 巻, pp.553-560, 2011.11.



## 本論文に関する著者の発表論文

- 1) Isamu YOSHITAKE, Hisatsugu TSUDA, Jumpei ITOSE and Nobuhiro HISABE :  
Effect of Discrepancy in Thermal Expansion Coefficients of CFRP and Steel under  
Cold Temperature, Construction and Building Materials, Vol.59, pp.17-24, 2014.5.
- 2) Isamu YOSHITAKE, Hisatsugu TSUDA, Jumpei ITOSE, Nobuhiro HISABE and  
Yail Jimmy KIM : Bond Properties of CFRP Strips and Steel under Low  
Temperature, Proceedings of ISEC-7, pp.897-901, 2013.6.
- 3) Hisatsugu TSUDA, Isamu YOSHITAKE, Yail Jimmy KIM, Jumpei ITOSE and  
Nobuhiro HISABE : Effect of Cold Temperature on the Behavior of CFRP-Steel  
Interface, Proceedings of the 7th International Conference on FRP Composites in  
Civil Engineering, USB stick, 2014.8.

## 謝 辞

本論文は、著者が株式会社 I H I インフラシステムに在籍しながら、山口大学大学院理工学研究科博士後期課程で休学1年を含む4年間における研究をとりまとめたものです。本研究をまとめるにあたりまして、山口大学大学院理工学研究科 吉武 勇准教授には、懇切丁寧なご指導と本当に暖かい励ましを頂き、また学位論文の審査におきまして主査を務めて頂きました。ここに心より感謝申し上げます。また、海外での国際会議への論文投稿ならびに発表にあたっては非常に丁寧なご指導を頂き、貴重な経験をさせて頂いたことは本研究をとりまとめるにあたり大きな活力となりました。重ねて感謝申し上げます。

ご多忙な公務にもかかわらず、山口大学大学院理工学研究科 藤田正則教授、中村秀明教授、麻生稔彦教授、渡邊学歩准教授には本論文の副査を快く受けて頂き、研究内容ならびに論文のとりまとめに際し、貴重なご助言とご指導を賜りました。心より深く御礼申し上げます。

本研究の実験供試体の製作にあたり、炭素繊維プレートを無償提供頂くとともに専門家の見地から貴重なご指導とご支援を賜った三菱樹脂インフラテック株式会社の久部修弘博士ならびに萩原勝之氏、石川敏彦氏、三橋悠三氏に深甚の謝意を表します。

実験の実施にあたっては、極寒の環境下での計測や膨大なデータをとりまとめ頂いた施設材料学研究室修了生の糸瀬潤平氏（現前田建設工業（株））ならびに大学院博士前期課程2年生の原田雅也君ほか、研究室の皆様の心温まるご協力を得たことを記すとともに心より感謝申し上げます。

吉武准教授のご友人であり、CFRP 材料に関する研究の第一人者であるコロラド大学デンバー校の Yail J. Kim 准教授からは、本研究遂行にあたって有用なアドバイスを頂いたとともに国際会議の場においても交流する機会得ました。心より感謝申し上げます。

有限要素解析にあたりご多忙な公務の中、数多くのご助言やご指導を頂いた吉原宏敬氏、波多野雄士氏、長谷川京子氏に御礼申し上げます。

さらに、著者が社会人学生として研究を遂行している期間、株式会社 I H I インフラシステムの社員の方々、特に、徳山貴信氏（工場長）をはじめとする堺工場生産管理部の方々には、多忙な業務の中で多くの支援を頂いたことを謹んで御礼申し上げます。

また、本研究を進めるにあたり、ご支援を賜りながら、ここにお名前を記すことができなかった数多くの方々に心より感謝申し上げます。

最後に私事ながら、博士課程入学を快く受け入れてくれ、本研究および本論文の作成を陰ながら支えてくれた妻の享子、長男の丈瑠、長女の景菜には心より感謝いたします。

2015年3月 津田 久嗣