

学 位 論 文 内 容 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
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℃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℃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板の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。

【論文審査結果の要旨】

社会インフラの老朽化は社会問題のひとつであり、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。鋼、コンクリートに続く新しい構造材料である炭素繊維強化ポリマー（CFRP）は、軽量、高強度、腐食しないなど、他の材料にない優れた特性を有しており、主に補強材として用いられている。これまで CFRP 板は主にコンクリート部材の補強に用いられてきたが、2000 年頃から CFRP 板接着による鋼トラス橋の補強工事が行われるなど、CFRP の鋼構造物への適用についても検討されるようになってきた。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高温下の挙動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、低温環境下における付着特性・変形挙動に着目した研究はほとんどなく、CFRP 板による補強工法の信頼性を高めるためにも、低温環境下における特性を明らかにしておく必要があった。

本論文では、CFRP 板を接着した鋼板ならびに 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ている。また、実験結果をもとにした簡易的な数値解析を行い、CFRP 板に作用する界面応力やはく離挙動について検討している。

本論文は計 6 章から構成されている。各章の主な内容等を以下にまとめて示す。

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・補強技術の概要をまとめるとともに、CFRP 板接着による既往の研究をレビューしている。これらを踏まえて本研究の目的と構成について示している。

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報告している。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、および 3 ヶ月の載荷期間中一定値を示すこと、などを報告している。さらに載荷期間中、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、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を報告している。

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ている。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、施工不良を想定した非接着部を有する同様の実験についても報告している。実験結果より、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層でせん断変形が生じたことから、低温時にひずみの差異が生じることを報告している。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、温度変化に伴いせん断変形が生じることから、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を指摘した。なお、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ことを報告した。

第4章「繰り返し温度変化を受けるCFRP板接着H鋼の曲げ耐力」では、CFRP板を接着したH鋼が常温から低温の30℃の繰り返し温度変化を受けた場合の曲げ耐力・破壊性状を調べている。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いことを指摘している。さらに、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板が破断する破壊機構を示すことを報告した。また、非接着領域が13%程度までは曲げ載荷試験結果より、常温から低温の30℃の温度変化履歴の影響はほとんどみられないこと、非接着領域が20%程度の場合、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あること、を報告している。

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調べている。解析結果より、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、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、を報告した。

第6章「結語」は本論文の総括として、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ている。

公聴会には、学内外から33名の聴講者があった。公聴会での主な質問は、CFRP板を接着補強する対象や適用範囲、鋼部材の疲労におよぼす影響、接着端部の応力集中を緩和して剥離抵抗性を向上させる方法、載荷試験における支点条件、低剛性の接着層が補強効果に与える影響、接着剤の養生期間の設定根拠、接着層の解析方法について、などであった。いずれの質問に対しても発表者から適切な回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分値するものと判断した。