

曲げ作用を受ける接着接合部のクリープ特性に関する実験的検討

川島 陽子¹・タイ ウィサル²・中村 一史³・西崎 到⁴

¹正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: y-kawashima@pwri.go.jp

²正会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: thay-visal@tmu.ac.jp

³正会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

⁴正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: nisizaki@pwri.go.jp

本研究はFRP部材の接着接合を想定し、接着用樹脂材料のクリープ特性を実験的に検証することを目的としたものである。接着用樹脂材料としてエポキシ系接着剤を用いて、作製した曲げ載荷治具にて鋼板に当て板を接着させた接着接合部の、静的載荷試験およびクリープ試験を実施した。なお、静的載荷試験において当て板ひずみが最大となる荷重でクリープ試験を実施した。クリープ試験開始後、早い段階で、荷重によるひずみの変化がほぼ見られなくなり、温度による変化が顕著となった。また、温度変化により一度ひずみが大きくなると、ひずみは戻らずそのまま保持される傾向にあり、除荷後は残留ひずみが認められた。さらに、静的載荷試験時では接着剤が凝集破壊していたが、クリープ試験では明確な凝集破壊は見られず、接着剤端部における塑性化とそれに伴う応力の再配分が生じている可能性が示唆された。

Key Words : adhesive joints, adhesive material, peeling load, cohesive failure, creep characteristics

1. はじめに

FRP（繊維強化プラスチック）を用いて接着接合により既設土木構造物の補修・補強を行うにあたっては、FRPの材料特性やFRPと鋼やコンクリートとの接合強度を適切に評価する必要がある。FRP接着による構造物の補修・補強に対して、土木学会複合構造委員会による調査研究¹⁾がなされているが、接着接合の耐久性について課題が残されている。その1つに持続荷重によるクリープ特性の評価が挙げられる。既設構造物の補修・補強では、持続荷重のうち死荷重は既設構造物で分担するため、FRPでは、活荷重が主な作用となるが、FRPを含む複合構造となる場合では、接合部の持続荷重が重要となることが考えられる。そのため、長期耐久性の観点から、FRP接着接合に用いられる接着用樹脂材料のクリープ破壊や接着性能の低下が懸念される。FRPの接合部分のクリープ特性について、炭素繊維シートと鋼とを接着接合

し、引張試験によりせん断クリープ特性を評価する研究はなされている²⁾が、曲げ作用によるクリープ特性について十分に検討されていない。

そこで本研究では、当て板をエポキシ系接着用樹脂材料で接着した鋼板の曲げクリープ試験を行い、曲げ作用を受けるときの接着接合部のクリープ特性を実験的に検証することを目的とした。

2. 試験方法

(1) 試験体の構成

本研究で使用した試験体は、「FRP接着による構造物の補修・補強指針（案）」の付属資料2「鋼板と当て板の接着接合部における強度の評価方法（案）」で規定される(a)片面に当て板が接着された鋼板の曲げ試験³⁾に準拠して作製したものである。供試体の概要図を図-1に示

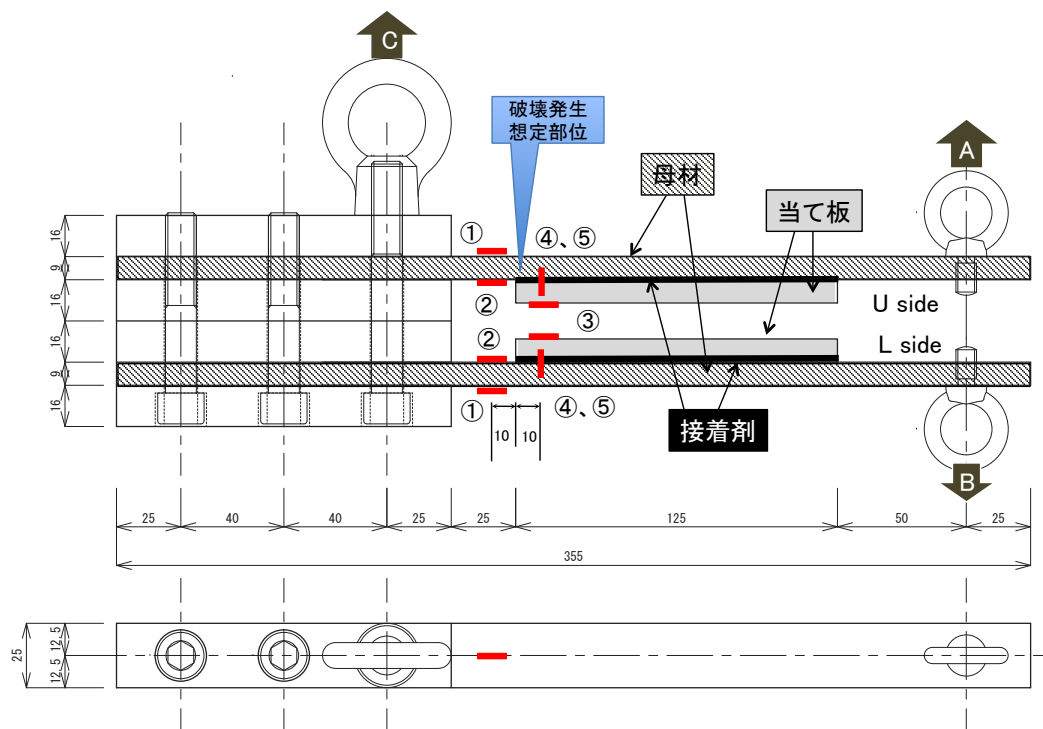


図-1 供試体の構成

表-1 接着剤の物性値

項目	値
弾性係数 (GPa)	3.6
ポアソン比	0.34
せん断弾性係数 (GPa)	1.3

表-2 接着厚さ

供試体No		目標接着厚さ(mm)	実測値(mm)
No.1 (静的載荷)	U side	0.4	0.39
	L side		0.54
No.2 (静的載荷)	U side	0.6	0.60
	L side		0.63
No.3 (クリープ)	U side	0.4	0.47
	L side		0.43
No.4 (クリープ)	U side	0.6	0.60
	L side		0.61

す。供試体は母材に当て板を接着用樹脂材料で接着したものを一つの試験片とし、上下で2つの試験片を組み合わせたものである。上下の試験片を固定した方を完全固定とした片持ちはりの自由端（図中AおよびB）に集中荷重を、当て板端部の接着接合部が破壊するまで作用させることを想定している。母材の全長は355mm、幅は25mm、厚みは9mmである。また、当て板の長さは125mm、幅と厚みは母材と同様である。本試験では母材および当て板には鋼材（SM490Y）、接着用樹脂材料には2液混合型のエポキシ系樹脂（以下、接着剤）を使用した。接着剤の物性値を表-1に示す。

(2) 作製方法

図-1の供試体を作製するにあたり、母材および当て板の接着接合面に、あらかじめブラスト処理を施し、アセトンで洗浄した。その後、接着剤を塗布し、母材と当て板を固定した状態で、40℃の恒温槽内で24時間養生した。接着厚さは少量のガラスビーズを挟み込むことでおよそ0.4mmおよび0.6mmになるように調整した。各供試体の接着剤厚さ（実測値）を表-2に示す。なお、表中のU sideおよびL sideは、図-1に示した供試体の上部の試験片および下部の試験片を表している。

(3) 載荷試験

載荷試験はクリープ試験装置（オリエンテック社製CP6-L-100S）で実施した。供試体は図-1のC部分を吊り下げる形で固定し、自由端AおよびBに荷重を載荷した。静的載荷試験においては、供試体L sideに取り付けた荷重計が1kNに達する、あるいは当て板のひずみが0に戻るまで載荷することとした。また、載荷は手動操作により、載荷速度がおよそ0.2kN/minになるように実施した。実施状況を写真-1に示す。

供試体には上下の試験片にそれぞれ5箇所ひずみゲージを貼り付け、それぞれのひずみを計測した。貼り付け位置は図-1の通りである。ひずみゲージ①および②は母材のひずみ、ひずみゲージ③は当て板のひずみ、そして、ひずみゲージ④および⑤は接着接合部のひずみを調べるために、母材と当て板にまたがって貼り付けた。なお、接着接合部のひずみゲージは、端部から10mmのところ



写真-1 実施状況

に貼り付けた。

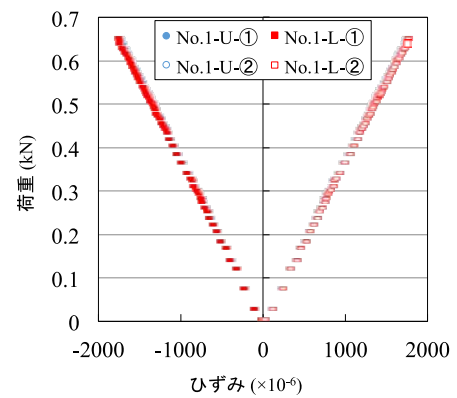
3. 試験結果

(1) 静的載荷試験

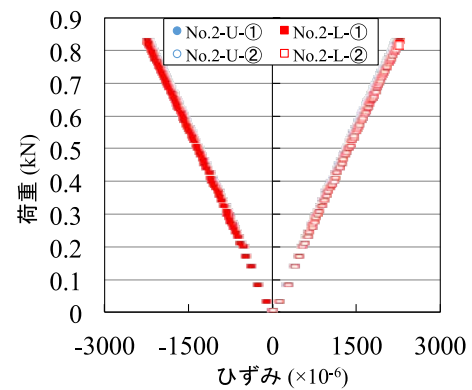
クリープ試験機に取り付けた供試体に対して徐々に荷重を載荷して、静的載荷試験を実施した。試験温度は25℃であった。試験結果を図-2から図-6に示す。図-2は供試体の母材ひずみである。ひずみゲージの①および②はそれぞれ母材の表と裏に貼り付けてあるため、荷重軸に対してひずみは対称的な挙動を示した。供試体No.2のひずみは供試体No.1と同様の傾向を示しており、母材のひずみに対して接着厚さは影響しておらず、載荷荷重のみで決まり、弾性挙動であると言える。

図-3に供試体No.1の当て板ひずみを示す。荷重の載荷に伴い、徐々にひずみが大きくなり、最大値 30×10^6 近傍で最大値を示して、その後徐々にひずみは小さくなり、最終的に0以下まで戻った。また、図-4に同じ供試体の接着接合部のひずみを示す。接着接合部のひずみは圧縮作用を受けて減少し、当て板ひずみの最大荷重近傍でひずみが増加に転じ、 1500×10^6 以上までひずみが急激に増加した。図-5および図-6には、供試体No.2の当て板ひずみおよび接着接合部のひずみを示す。供試体No.1と同様に、当て板ひずみが最大値となる荷重近傍で、接着接合部のひずみは減少から増加に転じた。また、供試体No.1よりも接着厚さが大きい供試体No.2では、当て板の最大荷重がNo.1よりも大きくなる傾向が見られた。試験後の供試体の接着剤の様子を写真-2に示す。接着剤内部で凝集破壊をしていることが確認できた。

当て板のひずみ最大値やひずみがゼロになる荷重を離荷重として、それぞれの荷重における離主応力を算出した。結果を表-3に示す。ひずみ最大値から算出した離主応力は、既往研究⁴⁾と比較すると、やや低い結果であったが、FRP接着による構造物の補修・補強指針(案)³⁾に示された供試体設計における接着用樹脂材料の主応力の範囲(30~110MPa)内には収まっていた。



(a)供試体No.1



(b)供試体No.2

図-2 母材のひずみ

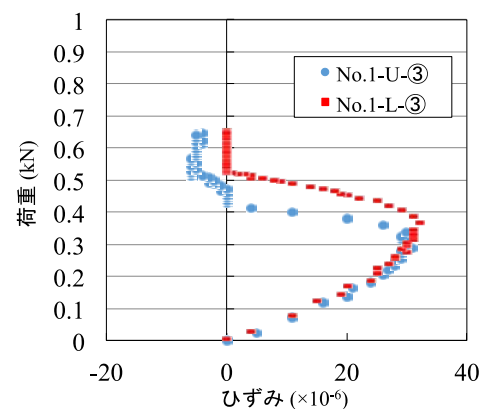


図-3 当て板のひずみ(供試体No.1)

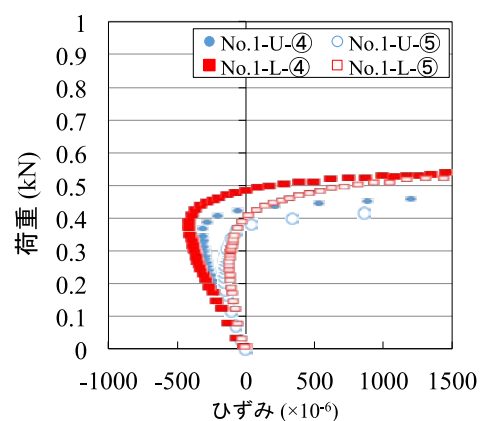


図-4 接着接合部のひずみ(供試体No.1)

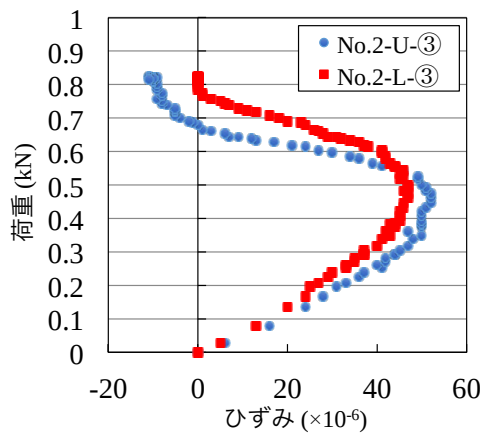


図-5 当て板のひずみ(供試体No.2)

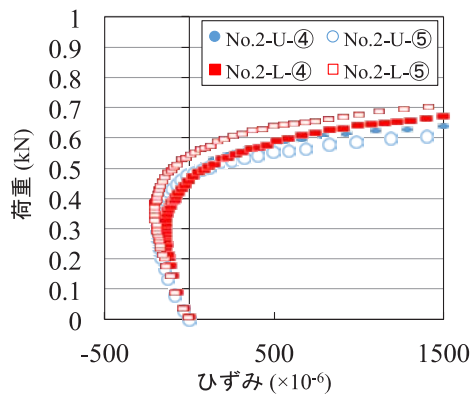


図-6 接着接合部のひずみ(供試体No.2)



写真-2 静的載荷試験後の様子(供試体No.1)

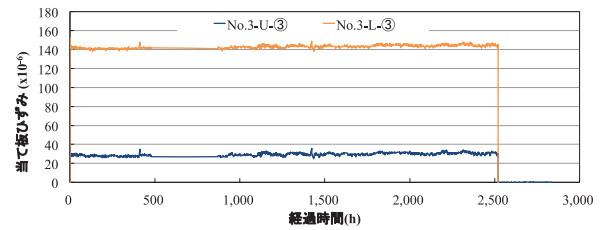
表-3 はく離主応力

供試体No		はく離荷重(kN)		はく離主応力(MPa)	
		ひずみ 最大値	ひずみ ゼロ点	ひずみ 最大値	ひずみ ゼロ点
No.1	U side	0.289	0.679	45.5	85.8
	L side	0.362	0.787	48.3	97.1
No.2	U side	0.448	0.430	56.6	67.7
	L side	0.461	0.516	56.8	68.8

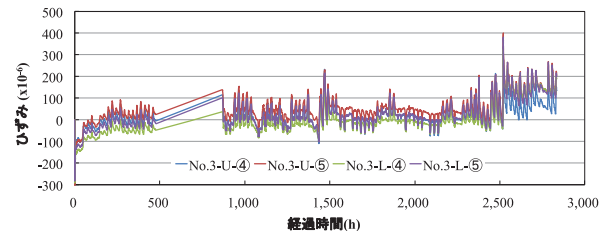
(2) クリープ試験

本研究では、当て板ひずみの最大値となる荷重を載荷してクリープ試験を実施した。静的載荷試験の結果に基づき、供試体 No.3 および No.4 の載荷荷重をそれぞれ 0.33kN および 0.45kN とした。

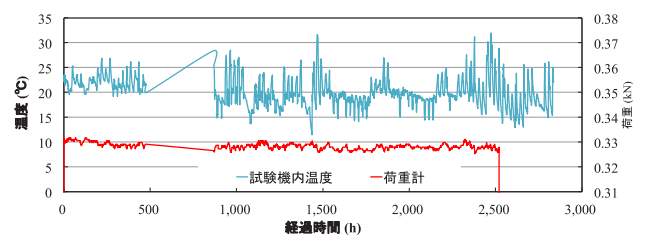
図-7 に接着剤厚さがおよそ 0.4mm の供試体 No.3 のひ



(a) 当て板ひずみ



(b) 接着接合部ひずみ

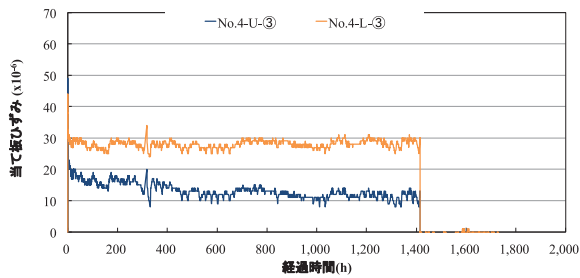


(c) 温度および荷重

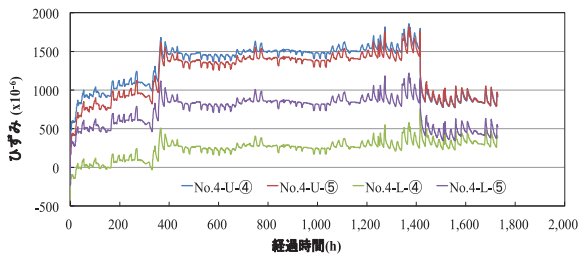
図-7 供試体No.3のひずみの経時変化

ずみや温度、荷重の経時変化を示す。なお、母材のひずみは載荷荷重で決まるため、クリープ試験においては、当て板のひずみ（ひずみゲージ③）や接着接合部のひずみ（ひずみゲージ④、⑤）の変化に着目した。また、測定開始から 490h から 900h の間は試験機の不具合によりデータの取得できなかった。当て板ひずみはほぼ一定値であり、クリープ試験中の変化はほとんど見られなかった。また、L side の当て板ひずみは 140×10^6 程度であり、図-3 に示した同じ接着厚さの供試体 No.1 の当て板ひずみと比較すると、ひずみが高くなっていた。一方、接着接合部のひずみは初期の段階でひずみが徐々に増加したが、ある程度の値になると載荷荷重による影響はほとんど見られず、試験温度によるものと考えられる変化が見られた。載荷時間がおおよそ 2,000 h のところで除荷して荷重を 0 に戻し、ひずみの変化をみたところ、当て板ひずみはほぼ 0 に戻った。一方、接着接合部のひずみは除荷に伴いひずみが上がり、荷重が 0 になった時には最大値を示し、以降はクリープ試験中と同様に温度による変化が見られた。

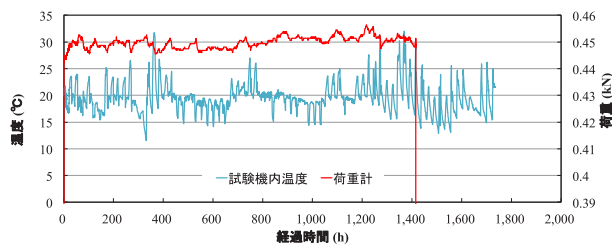
図-8 に接着厚さがおよそ 0.6mm 厚の供試体 No.4 の結果を示す。当て板ひずみはほぼ一定か、やや減少傾向を示したが、いずれにせよ連続的に荷重を載荷しているにも関わらず変化はほぼ見られなかった。また、接着接合部のひずみは、荷重の影響よりも試験温度の影響の方が大



(a) 当て板ひずみ



(b) 接着接合部ひずみ



(c) 温度および荷重

図-8 供試体No.3のひずみの経時変化

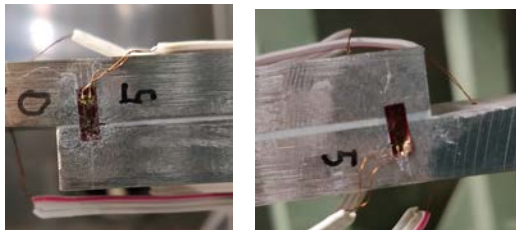


写真-3 接着接合部の様子

(左：供試体No. 3, 右：供試体No. 4)

きく、一時的な温度の上昇によりひずみが大きくなると、温度が下がってもひずみは保持される傾向にあり、接着剤の塑性変形の影響が見られた。さらに、1,400時間近傍で除荷した後、ひずみは0に戻らず、残存ひずみが認められた。

除荷直前の供試体の外観を写真-3に示す。いずれの供試体でも接着剤に破断は見られなかった。

4. 考察

(1) 接着接合部のひずみ挙動

クリープ試験時と静的載荷試験時の挙動を比較するため、両試験における接着接合部のひずみと載荷荷重の関

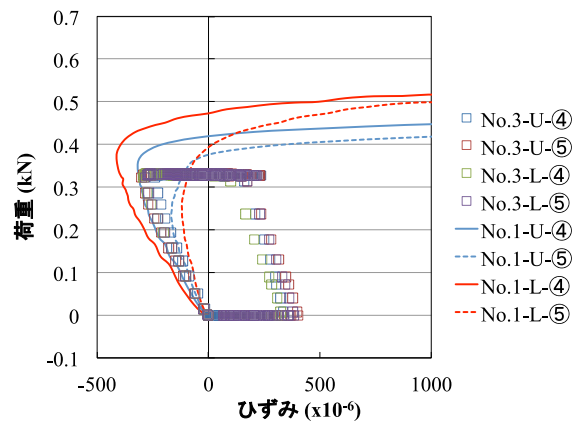


図-9 接着接合部のひずみ(接着厚さ0.4mm供試体)

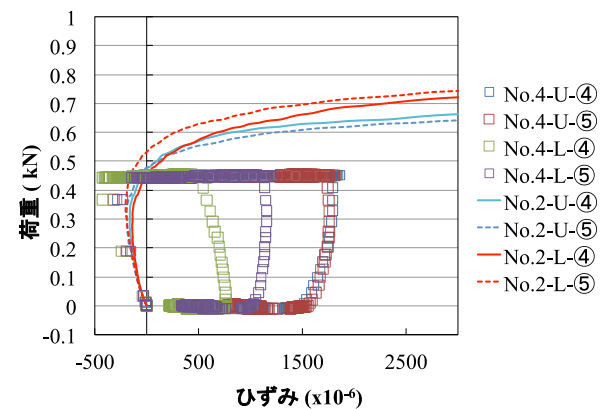


図-10 接着接合部のひずみ(接着厚さ0.6mm供試体)

係を図-9に示す。クリープ試験において、荷重が一定になるまでの載荷初期の段階では、荷重に対するひずみ応答は静的載荷試験と同様の挙動を示した。また、除荷過程においては、いずれのひずみも増加しており、荷重が0に戻った時点でひずみは最大値を示した。その後は、温度により変化したが、除荷後のひずみの平均値から残存ひずみは $82\sim159\times10^6$ 程度と推察された。

図-10に接着厚さがおおよそ0.6mm厚の供試体の静的載荷試験およびクリープ試験の結果を示す。除荷過程において供試体No.4Lsideはひずみが増加する傾向にあり、それ以外のひずみは減少する傾向が見られた。ただし完全に0には戻らず、残存ひずみは $334\sim897\times10^6$ 程度であった。供試体No.4の場合、 1500×10^6 以上のひずみが生じたにも関わらず、接着接合部に破断は観察されなかった。これらの結果から、はく離荷重に相当する荷重であっても、持続荷重の作用によって急激にひずみが増加したり、接着用樹脂材料は破断するとは限らないことが示唆された。これは接着剤が塑性変形し、これに伴い接着接合部の端部で応力の再配分が生じているためであると推察された。

(2) 除荷後の当て板および接着接合部のひずみ応答の変化

クリープ試験では、はく離荷重相当の荷重を載荷しても破断しなかったため、除荷後の供試体で再び静的載荷試験を実施した。接着厚さ0.4mm厚の供試体の当て板ひずみおよび接着接合部のひずみをそれぞれ図-11および図-12に示す。なお、静的載荷試験開始時、各ひずみは0点補正はせず、クリープ試験終了時のひずみの値を初期値として試験した。図-11より、供試体No.3のU sideは、ひずみの大きさは同程度であったが、ひずみが最大値となる荷重が、同じ接着厚さの供試体No.1よりも高くなる傾向にあった。一方、供試体No.3のL sideはひずみが大幅に増加しており、最大ひずみはクリープ試験時よりも大きかった。ただし、ひずみが最大となる荷重はU sideとほぼ同じであった。また、図-12より、接着接合部のひずみについて、載荷初期時においてひずみがやや減少し、0.5kN近傍で増加に転じた。この荷重は当て板ひずみが最大となる荷重とほぼ同等であった。

接着厚さ0.6mmの供試体の結果を図-13および図-14に示す。クリープ試験後の供試体No.4の方が、当て板のひずみが最大となる荷重がやや高くなる傾向にあった。また、接着接合部のひずみで、供試体No.4のL sideのひずみゲージ④は、載荷初期でやや減少してから増加に転じていたが、他の箇所のひずみは荷重に対して徐々に増加する傾向が見られた。いずれのひずみゲージでも0.6kN以上の荷重が載荷されると急激にひずみが増加した。この荷重は当て板ひずみの最大値の荷重とほぼ同じであった。

以上の結果から、クリープ試験後の接着接合部の挙動を2つに大別した。1つは供試体No.3および供試体No.4(L-④)の接着接合部である。これらの接着接合部はクリープ試験時にはひずみが 500×10^{-6} 程度かそれ以下であり、除荷後にややひずみが増加する傾向にあったものである(図-9、図-10)。また、これらの接着接合部は、クリープ試験後の静的載荷試験時の挙動が、クリープ試験をしていない供試体(No.1やNo.2)と同様であった。もう1つは、供試体No.4のU-④、U-⑤、L-⑤であり、これらの接着接合部のひずみは 500×10^{-6} 以上あり、除荷後すぐは残留ひずみが減少する傾向にあった。また、クリープ試験後の供試体で静的載荷試験を行った際には、荷重の増加に対してひずみが増加する傾向にあった。これは、供試体No.1やNo.2とは異なる挙動であった。したがって、持続載荷時のひずみが小さいうちは、接着剤が持続載荷前の性質を保っている可能性があり、可逆性の性質があることが示唆された。

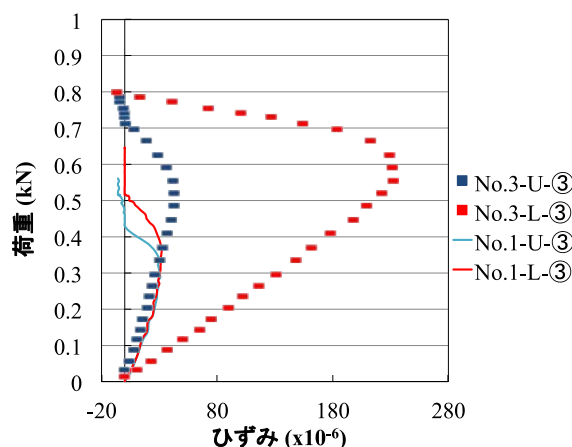


図-11 静的載荷試験による当て板のひずみ比較

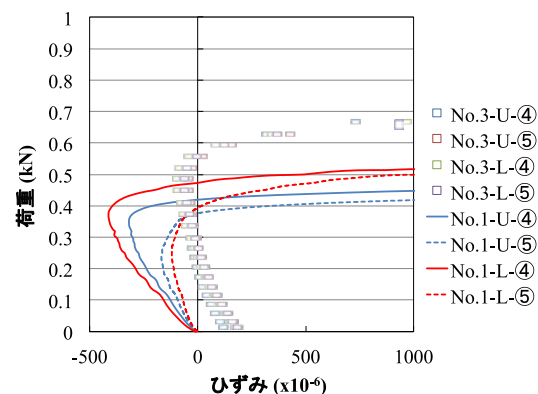


図-12 静的載荷試験による接着接合部のひずみ比較

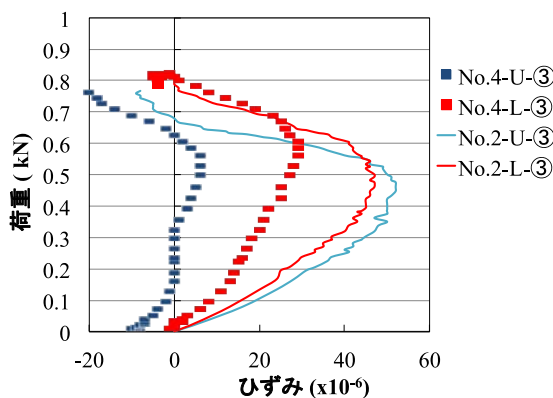


図-13 静的載荷試験による当て板のひずみ

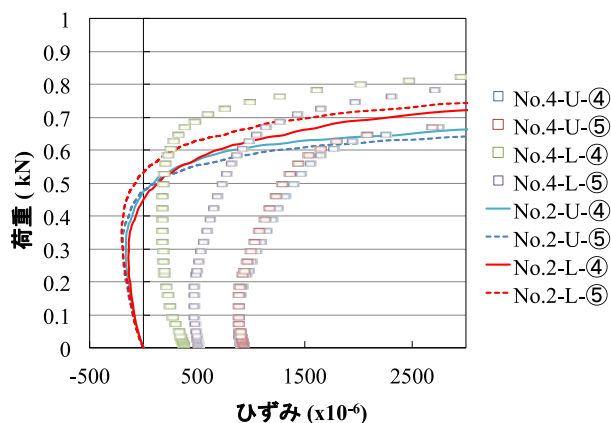


図-14 静的載荷試験による接着接合部のひずみ比較

5. 結論

本研究では曲げ作用を受ける接着接合部のクリープ特性を実験的に検証することを目的として、片面に当て板が接着された鋼板の曲げ試験に準拠した供試体を作製し、持続载荷による当て板や接着接合部のひずみ変化を調べた。その結果、クリープ試験開始後、早い段階で、接着接合部では荷重によるひずみの変化がほぼ見られなくなり、温度の増減により非可逆的な変形挙動が見られた。また、除荷後は残留ひずみが認められた。さらに、静的载荷試験時では接着用樹脂材料は凝集破壊したが、クリープ試験では明確な凝集破壊は見られず、端部の塑性化に伴う応力の再配分が生じている可能性が示唆された。

謝辞：本研究の一部は、土木学会複合構造委員会「FRP複合構造の設計・維持管理に関する調査研究小委員会」のWG活動として行われた。委員各位より貴重なご意

見をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 複合構造委員会・FRPと鋼の接合方法に関する調査研究小委員会：FRP部材の接合および鋼とFRPの接着接合に関する先端技術，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.70，II_120-133，2014
- 2) 玉井宏章，高松隆夫，服部明生，小澤吉幸，山西央朗：炭素繊維プレートと鋼との複合材のせん断クリープ特性に関する研究，広島工業大学紀要研究，第44巻，pp.171-176，2010
- 3) 土木学会：FRP接着による構造物の補修・補強指針(案)，複合構造シリーズ09，pp.117-129，2018
- 4) M. Shimizu, T. Ishikawa, A. Hattori, H. Kawano : Failure criteria for debonding of patch plate bonded onto steel members subjected to bending, Journal of JSCE, vol.2, pp.310-322, 2014

(Received August 28, 2020)

EXPERIMENTAL STUDY ON CREEP CHARACTERISTICS OF ADHESIVE JOINTS UNDER FLEXURAL LOADING

Yoko KAWASHIMA, Visal THAY, Hitoshi NAKAMURA and Itaru NISHIZAKI

The purpose is to experimentally verify the creep characteristics of adhesive resin materials, assuming adhesive bonding of FRP members. A static loading test and a creep test were performed using original bending loading specimen composed of two steel plates adhesive by epoxy adhesive material. At the early stage after the start of the creep test, the change in strain due to temperature became remarkable. In addition, once the strain increased due to temperature change, the strain tended to remain as it was without returning, and residual strain was observed after unloading. Further, the cohesive failure was observed on the static loading test. It was suggested that plasticization and the redistribution of stress at the end of the adhesive material may occur.