

繰り返り温度変化が連続繊維シート工法の付着性能に与える影響に関する研究

群馬工業高等専門学校 学生会員 ○牧野嶋文泰
群馬工業高等専門学校 正会員 田中 英紀

1. はじめに

近年、既存 RC 構造物の延命化や既存不適格への対応として RC 構造物の補修・補強の施工件数は増加しているが、いまだ補修・補強工法の耐久性能に関する研究は少ない現状にある。補修補強工法の一つに、高引張強度を有する連続繊維シートを樹脂接着剤によりコンクリートに接着する連続繊維シート工法があるが、この工法の特徴として、線膨張係数が大きく違う複数の材料が一体となることでコンクリートを補強していることがある。そのため、連続繊維シート工法に繰り返り温度変化が作用した場合、線膨張係数の差に起因する材料間の変位差が、工法の耐久性能になんらかの影響を及ぼすことが考えられる。

本研究では、連続繊維シートにより補強された供試体に数千サイクルの繰り返り温度負荷を与え、温度変化が連続繊維シート工法に与える影響について検討した。

2. 実験概要

本実験では、連続繊維シート補強された供試体として、炭素繊維シート補強供試体（以下、炭素繊維供試体）、アラミド繊維シート（以下、アラミド繊維供試体）、工法の不陸修正までを行った下地処理供試体、コンクリート母材の 4 つの供試体を対象に実験を行った。供試体寸法は 100mm×100mm×400mm の角柱とし、試験対象面を型枠底面とした。

表-1 に実験に用いた炭素繊維シート、アラミド繊維シートの諸元を示す。炭素繊維シートは高強度型、アラミド繊維シートは高弾性型に分類されるものを用いた。実験に使用したシートは一方向連続繊維シートである。母材コンクリートの圧縮強度は、35.73N/mm²（材齢 28 日）、ヤング係数は 27.29kN/mm² のものを用いた。

供試体に温度負荷を与える方法として凍結融解試験機を用いた。供試体に与えた温度負荷 1 サイクルを

図-1 に示す。温度負荷は約-10℃から+3℃までを、およそ 80 分で変化するものである。この温度は、実際に橋脚に炭素繊維シートを用いた補強実績のある北海道日高市の過去 5 年間の 11 月から 4 月の最高、最低気温を平均して決定した。この温度負荷を母材と下地処理供試体に 2000 サイクルまで、炭素繊維供試体、アラミド繊維供試体に 3000 サイクルまで与え、供試体隅角部に貼り付けた直角 3 軸ロゼッタゲージでひずみを計測した。

3. 実験結果

3.1 温度-主ひずみ履歴曲線

3.1.1 母材供試体

温度負荷 2000 サイクルまでの母材の温度-主ひずみ履歴曲線を図-2 に示す。ここで、主ひずみは、供試体隅角部に貼り付けた直角 3 軸ロゼッタゲージから算出した主ひずみの最大値である。また図中で、温度負荷初期の履歴曲線を 10 サイクルとしているのは、有限要素法による、母材供試体の解析結果から、初期の 5 サイクルはひずみ値に常温から冷却される影響が現れることが分かったためである。

表-3 繊維シート諸元

繊維シート	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
炭素	4657	265
アラミド	3116	131

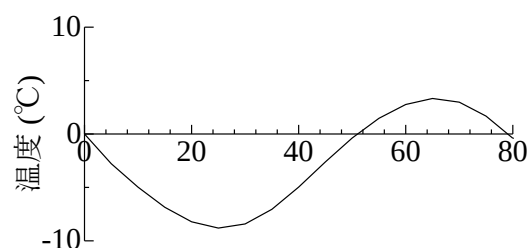


図-1 供試体に与えた温度履歴

キーワード 繰り返り温度変化、連続繊維シート、付着、炭素繊維シート、アラミド繊維シート

連絡先 〒371-0845 群馬県前橋市鳥羽町 580 群馬工業高等専門学校 E-mail: htanaka@cvtl.gunma-ct.ac.jp

母材供試体の履歴曲線は、温度負荷サイクルが増加しても、主ひずみは増加せず、温度負荷 2000 サイクルまで、ほぼ一定であった。

温度－時間グラフの負側を積分した値で評価すると、温度負荷 2000 サイクルは、本研究で想定した地域、期間の約 1.3 年分に相当するが、供試体性状変化は目視の限り確認できなかった。

3.1.2 下地処理供試体

温度負荷 2000 サイクルまでの下地処理の温度－主ひずみ履歴曲線を図－3 に示す。下地処理供試体の履歴曲線は、母材同様、温度負荷が増加しても主ひずみは増加せず、ほぼ一定であった。

温度負荷 2000 サイクル負荷後の供試体性状は目視の限りでは変化はなかった。

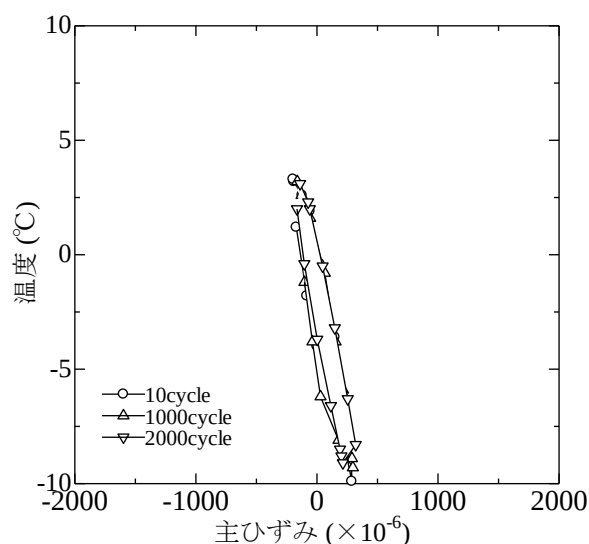
3.1.3 アラミド繊維シート補強供試体

温度負荷 3000 サイクルまでのアラミド繊維の温度－主ひずみ履歴曲線を図－4 に示す。アラミド繊維は、温度負荷約 1000 サイクルまでは、温度負荷サイクル数が増加するにしたがって、主ひずみが増加し、履歴曲線が右に推移していくことが確認された。温度負荷 1000 サイクル以降は 3000 サイクルまで、主ひずみは増加せず、ほぼ一定であった。

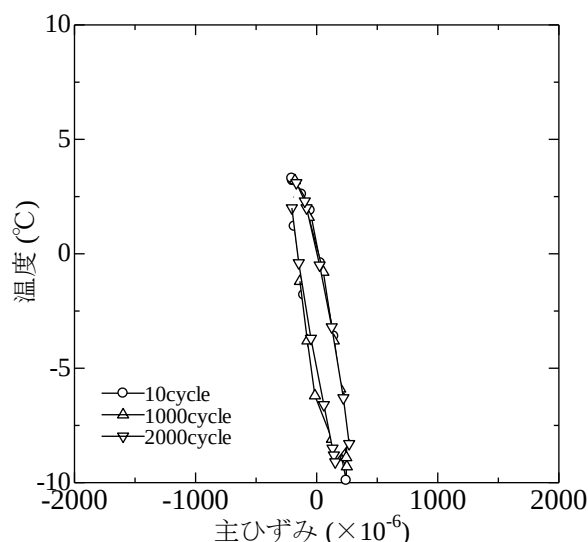
温度負荷 3000 サイクルは、温度－時間のグラフの負側を積分した値で評価すると、本研究で想定した地域、期間の約 2 年分の負荷に相当するが、実験前後で供試体性状に目視の限り変化は確認できなかった。

3.1.4 炭素繊維シート補強供試体

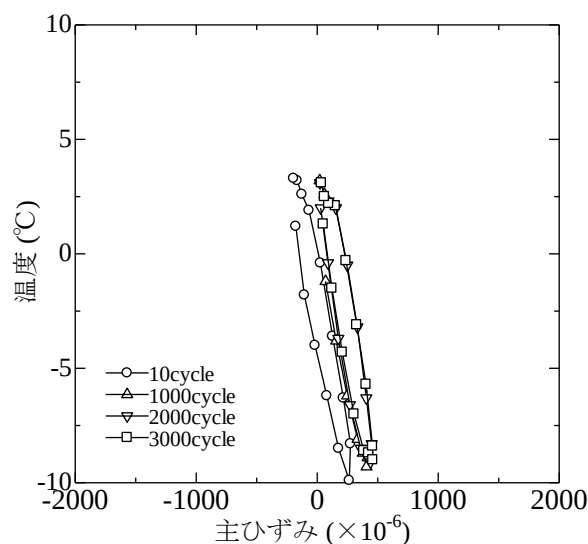
温度負荷 3000 サイクルまでの炭素繊維の温度－主ひずみ履歴曲線を図－5 に示す。炭素繊維は、温度負荷サイクル数が増加するにしたがって主ひずみが増加し、温度負荷 3000 サイクルまで履歴曲線が右へずれていくことが確認された。また、温度降下、上昇を温度負荷 1 サイクルとした場合に、母材、下地処理、アラミド繊維の履歴曲線が反時計まわりを描くのに対し、炭素繊維のみ時計回りを描くことが確認された。この結果は、アラミド繊維と炭素繊維供試体は、連続繊維以外、使用されている材料が同じことから、連続繊維の線膨張係数や弾性係数等の繊維物性の違いによるものと考えられる。実験の前後で目視の限りでは供試体に性状変化は確認できなかった。



図－2 母材供試体の履歴曲線



図－3 下地処理供試体の履歴曲線



図－4 アラミド繊維供試体の履歴曲線

3.1.5 履歴曲線から求めた線膨張係数

本実験から得られた温度－主ひずみの履歴曲線の傾きは線膨張係数の次元を有している。フックの法則と物体の熱変形の式から式(1)が導かれるが、この式は、一定温度変化下の物体の熱変形において応力低下が発生する場合、線膨張係数が見かけ上小さくなることを表している。本実験は線膨張係数の測定方法とは異なるため、履歴曲線から求めた線膨張係数の値は物体の線膨張係数の値とは異なるが、工法の付着性能を表す指標として使えないかと考えて、温度負荷前後の履歴曲線の傾きを求めた。結果を表-2に示す。炭素繊維シート供試体の結果では、温度負荷によって線膨張係数の値が小さくなっていることがわかる。炭素繊維シート供試体以外では、温度負荷前後で線膨張係数の値に変化はなかった。

3.2 主ひずみの差值による履歴曲線

3.2.1 供試体モデル

連続繊維シート工法は連続繊維や樹脂の複合材料であり、それを正確にモデル化するのは困難である。そこで本研究では、図-6に示すような母材、不陸修正(下地処理)層、連続繊維・エポキシ複合層の3層モデルを仮定し、積層方向のひずみの差をとって履歴曲線を描くことで、層単体の挙動を表現することを試みた。

3.2.2 不陸修正層の履歴曲線

同温度時に測定された下地処理供試体の主ひずみ値から母材供試体の主ひずみの値の差をとって描いた温度－主ひずみ履歴曲線を図-7に示す。

実験初期の温度負荷 10 サイクルから、2000 サイクルまで、差をとった主ひずみの値は、どの温度でも、およそ 0μ であり、ひずみ値からみて、母材、下地処理は一体となって挙動しており、本実験で与えた温度負荷 2000 サイクルまでは、下地処理層が母材に強固に付着していることが推測される。

3.2.3 アラミド繊維・エポキシ複合層の履歴曲線

アラミド繊維シート供試体のひずみを計測した時の温度と同温度の時の、下地処理供試体の主ひずみを、観測点間の温度と主ひずみは比例していると仮定して、算出し、主ひずみの値の差をとって描いた温度－主ひずみ履歴曲線を図-8に示す。

実験初期では、差をとった主ひずみの値は、ほぼ 0μ

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdots (1)$$

表-4 履歴曲線から求めた線膨張係数

供試体	線膨張係数 ($\times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$)	
	10サイクル	2000サイクル
母材	-0.4	-0.4
下地処理	-0.4	-0.4
アラミド繊維	-0.4	-0.4
炭素繊維	-0.6	-0.3

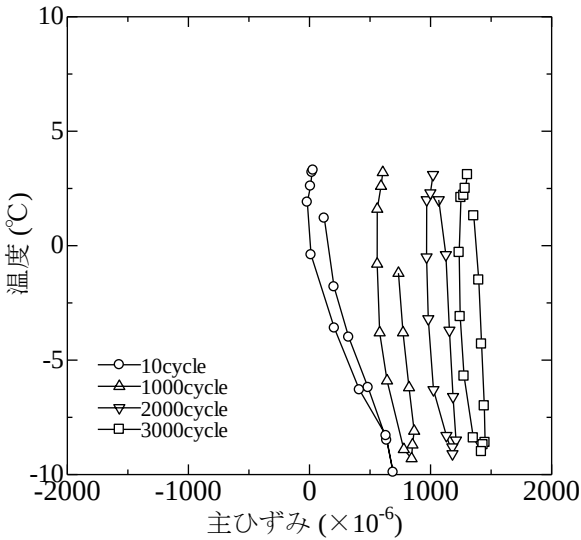


図-5 実験後の炭素繊維供試体

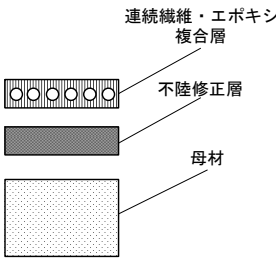


図-6 工法のモデル化

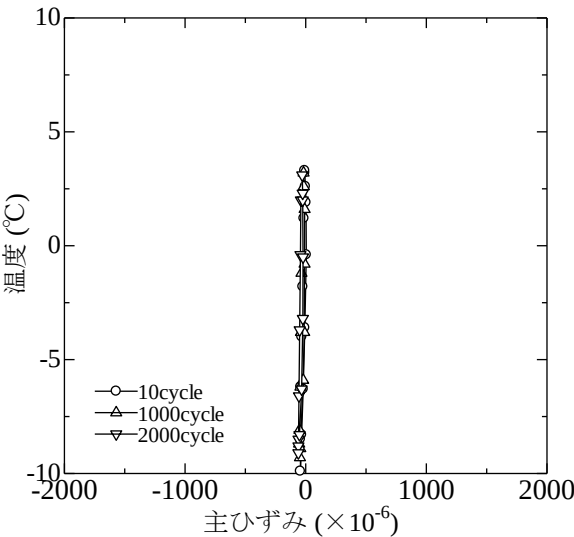


図-7 下地処理層の履歴曲線

であったが、温度負荷 500 サイクルまで、温度負荷サイクル数が増加するにしたがって増加した。温度負荷 500 サイクル以降はほぼ一定であった。

3.2.4 炭素繊維・エポキシ複合層の履歴曲線

炭素繊維シート供試体のひずみを計測した時の温度と同温度の時の、下地処理供試体の主ひずみを、観測点間の温度を主ひずみは比例していると仮定して算出し、主ひずみの値の差をとって描いた温度－主ひずみ履歴曲線を図-9 に示す。

実験初期から、差をとった主ひずみの値は 0μ にはならず、温度負荷サイクル数が増加するにつれて 2000 サイクルまで、主ひずみの差値は増加した。

4. おわりに

炭素繊維シート、アラミド繊維シートによって補強された供試体、下地処理供試体、コンクリート母材の 4 つの供試体に、長期にわたって繰り返し温度変化を与え、ひずみを計測する実験を行い、以下の知見を得た。

- ①本研究で供試体に与えた温度負荷の下では、温度上昇、下降時に炭素繊維シートとアラミド繊維シートは違う挙動を示した。これは繊維の線膨張係数やヤング係数といった物性値の違いによるものと考えられる。
- ②本研究で供試体に与えた温度負荷 2000 サイクルまででは、母材と下地処理層は、ほぼ一体となって挙動しており、付着性能の変化はないことが推測された。
- ③長期的な繰り返し温度変化は、連続繊維シート工法に少なからず影響を及ぼし、その影響と思われる結果は、下地処理層と連続繊維・エポキシ樹脂複合層の間で顕著に現れることが推測された。また、その影響はアラミド繊維シートよりも炭素繊維シートを用いた供試体で大きかった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、材料や施設の提供、連続繊維シート工法についてご指導いただいた株式会社日鉄コンポジット社様に感謝の意を表す。

また本研究は科学研究費助成事業(245605720001)による助成金の成果である。

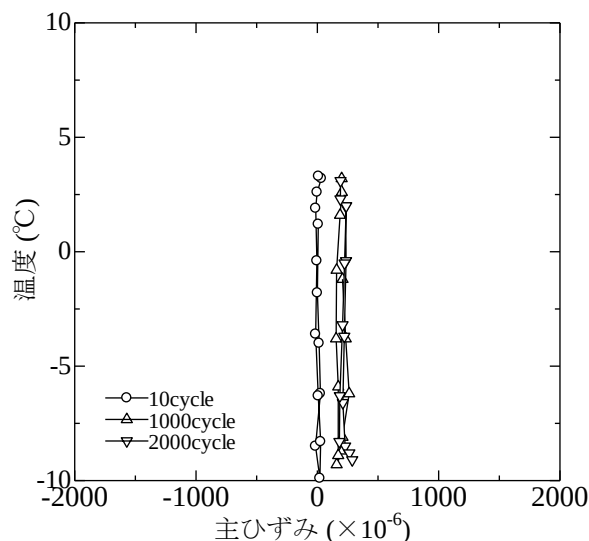


図-8 アラミド繊維層の履歴曲線

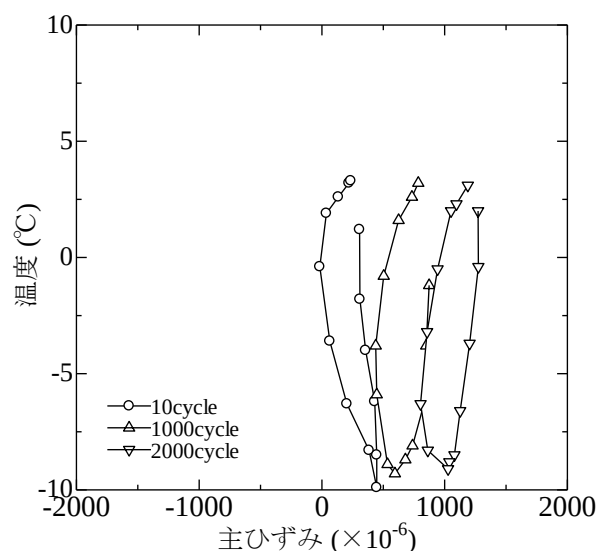


図-9 炭素繊維層の履歴曲線

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリ 101 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，2004.8
- 2) 加藤 穰，岩城 一郎，子田 康弘，上原 子昌久
土木学会第 65 回年次学術講演会：連続繊維シートとコンクリートの付着強度に及ぼす温度変化の影響，2010.9，pp1217-1218