

論文 環境温度が連続繊維シートとコンクリートの付着強度に及ぼす影響

子田 康弘^{*1}・加藤 穰^{*2}・上原子 晶久^{*3}・岩城 一郎^{*4}

要旨：連続繊維シートは、エポキシ樹脂接着剤により RC 部材表面に接着する補修補強材料であるが、接着後の耐久性の評価は端緒についたばかりである。本研究では、連続繊維シートを接着したコンクリートに定値温度と温度変化を一定期間与え、その直接引張付着強度を評価した。その結果、付着強度は、高温の定値温度下および低温域と高温域の温度変化の繰り返し下で低下する傾向を示した。付着強度の低下要因は、定値温度の場合、エポキシ樹脂接着剤の強度低下と考えられた。一方、温度変化の場合は、温度解析より材料の線膨張係数の違いに起因するひずみ挙動が影響した可能性を示した。

キーワード：連続繊維シート、付着強度、温度変化、定値温度、線膨張係数

1. はじめに

我が国の既存 RC 構造物は、高度経済成長期に構築されたものが多く、その一斉老朽化が想定され、今後要求性能を満たさない RC 構造物が急増すると予想される。そのため近年は、延命化や既存不適格への対応という目的で RC 構造物に対する補修補強の頻度が増加している。連続繊維シート（以下、シート）は、RC 構造物のコンクリート表面にエポキシ樹脂接着剤を使って接着する補修補強材料である。しかし、補修補強後のシートの耐久性という経時的な性能の評価は端緒についたばかりである^{1),2)}。

本研究では、構造物周囲の環境温度に着目し、一定の温度下や温度変化がシートとコンクリートの付着強度に及ぼす影響を検討した。実験は、低温、高温および常温の環境温度を想定し、各温度条件で定値温度と、温度変化をシートを接着した供試体に与え、シートとコンクリートの直接引張付着強度を評価した。また、2 次元有限要素法による温度解析を実施し、解析より本実験と同じ温度変化における接着界面付近のひずみ挙動を推定し、シートとコンクリートの線膨張係数の違いが付着強度に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 本実験の供試体

本実験で使用した供試体寸法は、高さ 50mm、幅 100mm、長さ 400mm の角柱供試体である。この供試体寸法は、高さを低くすることで熱流量を大きくし、供試体内部まで設定温度条件の熱が伝達されるよう考慮し定めた。表-1 に、供試体の作製に使用したコンクリートの配合を示す。表より、コンクリートの配合は、粗骨材の最大寸法 G_{max} が 20mm であり、水セメント比 W/C を 64.3%、

目標空気量 Air を 4.5%とした。供試体の養生は、打込み後から 7 日間実験室内で現場湿布養生を行い、その後は材齢 28 日まで気中養生を行った。なお、試験開始時材齢（材齢 28 日）の圧縮強度は 24.6MPa であった。表-2 は、本実験で使用したシートと接着剤の物性値であり、炭素繊維を使用した。この炭素繊維を接着面に幅 100mm、長さ 400mm で 1 層接着したもので、シート接着面を供試体打込み下面とした。シートの接着作業は、コンクリート表面のケレン、プライマーによる下塗り、シートの接着、試験開始まで 7 日間以上の養生という工程で行った。

2.2 試験方法

(1) 実験条件

表-3 に、本実験の実験条件を示す。表より、まず、シートとコンクリートの付着強度の評価は、直接引張付着強度（以下、単に付着強度）とした。次に、供試体に与える環境温度は、一定の温度を与え続ける定値温度と、温度域を定めこれを繰り返し与える温度変化とした。具

表-1 コンクリートの配合

G_{max} (mm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE
20	64.3	4.5	46.6	178	277	839	1005	2.77

AE:AE 減水剤

表-2 シートと接着剤の物性値

材 料	引張強度 (MPa)	弾性率 (GPa)	厚さ (mm)
炭素繊維	3860	277	0.111
接着樹脂 (エポキシ)	30	1.5	—

*1 日本大学 工学部土木工学科准教授 博(工) (正会員)

*2 日本大学 大学院工学研究科土木工学専攻 博士前期課程

*3 弘前大学 大学院理工学研究科助教 博(工) (正会員)

*4 日本大学 工学部土木工学科教授 博(工) (正会員)

表-3 実験条件

評価項目	設定環境温度		試験実施間隔	
	定値	温度変化	定値	温度変化
直接引張付着強度	-20℃	-20℃～20℃	1日目	30 サイクル毎 (90 サイクルまで)
	20℃	0℃～40℃	7日目	
	60℃	20℃～60℃	28日目	

体的には、定値温度が-20℃（以下、低温定値）、40℃（以下、常温定値）、および 60℃（以下、高温定値）の 3 条件である。温度変化は、-20℃～20℃（以下、低温変化）、0℃～40℃（以下、常温変化）、20℃～60℃（以下、高温変化）の 3 条件であり、最低温度と最高温度の温度差を 40℃とした。また、付着強度試験の実施間隔は、定値が試験開始後、1 日目（24 時間後）、7 日目、28 日目とし、温度変化は、1 日 2 サイクルで 30 サイクル毎に測定を行い、90 サイクルまでとした。供試体への環境温度を与える方法は、プログラム制御が可能な恒温槽を使用した。供試体の恒温槽への設置では、シート接着面以外を断熱し、熱の移動が一方向になるよう留意した。

図-1 に、設定温度変化の温度プログラムを示す。図より、温度変化における 1 日当りのサイクル数（2 サイクル）、温度下降と上昇の時間、および最低温度、最高温度の保持時間は、RILEM CDF-1998³⁾を参考に設定した。なお、温度変化サイクルが設定を満足しているかを確認するため、温度変化に用いた供試体各 1 体に付き供試体作製時に熱電対をシート接着面より 0mm と 50mm の位置に設置し温度管理を行った。

(2) 付着強度試験方法

図-2 に、付着強度試験方法を示す。試験は、JSCE-E 545-2007 に従った⁴⁾。図より、シート接着面をコアドリルで直径 50mm、深さ 3mm の溝を掘り、その部分のシートに鋼製の引張治具を接着した。この治具を介して引張力を載荷し治具を引き抜く要領で行った。載荷には、建研式接着引張試験機を使用し、計測は最大荷重をロードセルにより求めた。付着強度試験を実施した環境温度は、定値が設定温度を保持した状態であり、温度変化が 20℃の一定温度下とした。なお、付着強度試験は、1 供試体に付き n=4 で実施した。

付着強度 f_{bnd} は、以下の式(1)で求めた。

$$f_{bnd} = \frac{P_{max}}{A} \quad (1)$$

ここで、 P_{max} は最大荷重(N)、 A は鋼製治具とシートの接着面積(mm²)である。付着強度は、n=4 の平均値を求め、その平均値より変動係数±20%を超える数値を異常値とみなし棄却し、残った数値の平均値とした。

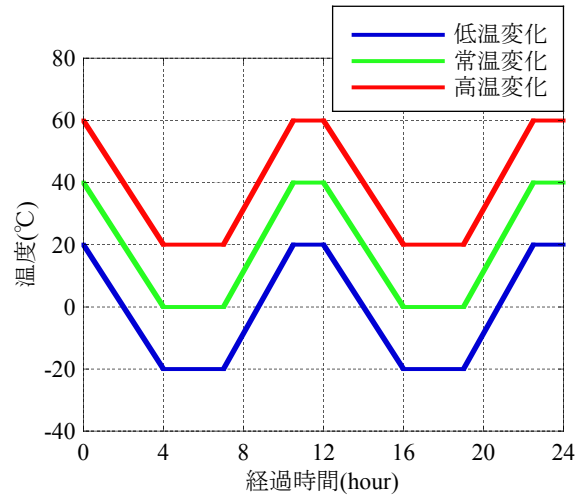


図-1 設定温度変化

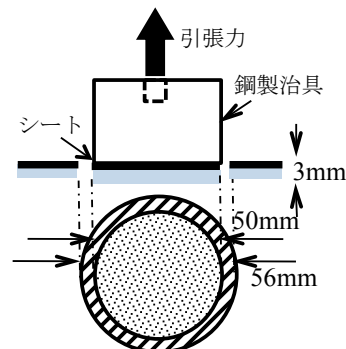


図-2 付着強度試験の方法

3. 実験結果

3.1 温度変化の測定結果

図-3 に、温度変化 3 条件の温度測定結果より、2 サイクル分の温度の推移を示す。図に示す温度の推移は、シート接着面 0mm の温度である。図より、供試体の温度の推移は、試験終了まで各条件とも設定温度変化サイクルを満足する温度で推移しており、シート接着面 50mm も設定温度変化に近い温度であったことを確認した。

3.2 環境温度下の付着強度

(1) 定値温度

図-4 に、付着強度と経過日数の関係を示す。まず、付着強度の初期値（0 日目）は、3.42MPa である。図より、低温定値と常温定値の付着強度は、1 日目が若干低下し、7 日目が初期値よりも増加するという変動があったが、28 日目は、初期値に対する付着強度で低温定値

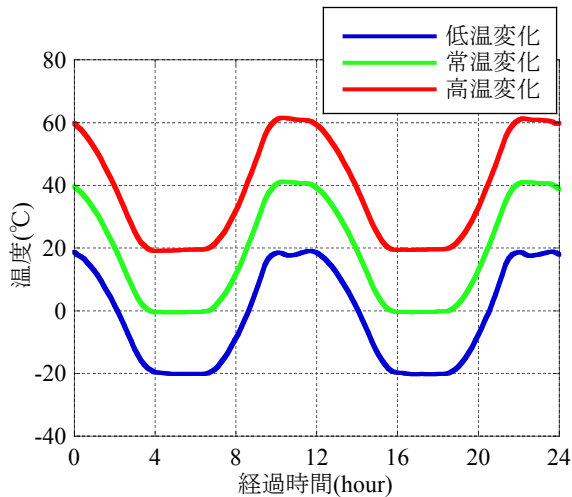


図-3 実測の温度変化サイクル(2サイクル/日)

107%, 常温定値 98%と付着強度の低下傾向が認められない結果であった。なお、両者の7日目の付着強度が大きい結果は、この時試験した供試体に限った結果と判断しており、付着強度が増加したとは考えていない。これに対して、高温定値の付着強度は、初期値よりも1日目が約30%, 7日目が約45%, 28日目が約20%と低下する傾向であった。高温定値は、7日目より28日目の付着強度が大きい低下率を平均しても32%の低下であった。これより、高温状態を一定に保持した環境下では、付着強度が低下するという結果を得た。

(2) 温度変化

図-5に、付着強度と温度変化サイクル数の関係を示す。付着強度の初期値(0サイクル)は、3.42MPaで定値の結果と同様である。図中の直線は、実測値に基づく回帰直線である。図より、温度変化を与えたことによる付着強度は、低温変化と高温変化のように低下傾向を示すものと、常温変化のように低下傾向が明らかには認められないものに大別された。温度変化条件別の付着強度の傾向は、まず、常温変化は90サイクル時で約11%と低下したように見えるが、30サイクルと60サイクルの付着強度の推移より、明らかに付着強度が低下したとは言い難い。これに対して、低温変化と高温変化は、大凡温度変化サイクルの増加に伴い次第に付着強度が低下しており、90サイクル時では低温変化が約28%, 高温変化が約27%低下する傾向を示した。また、回帰直線に着目すると、低温変化と高温変化の付着強度の低下傾向は同様であるが、常温変化はほとんど変化がなく、付着強度と温度変化サイクル数の関係に相関性がないと判断される。これより、低温や高温で温度変化する環境温度においてシートとコンクリートの付着強度は、経時的に低下する可能性が示された。

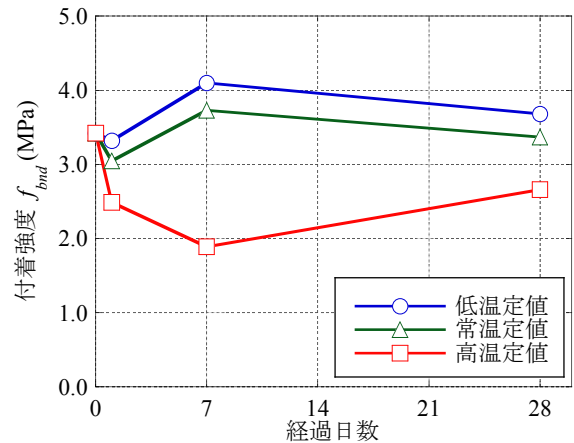


図-4 定値における付着強度と経過日数の関係

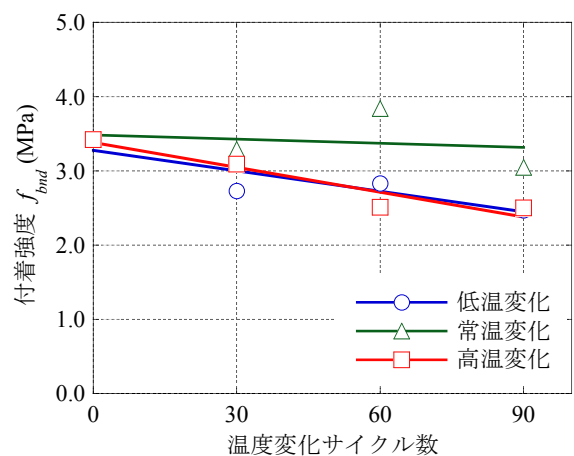
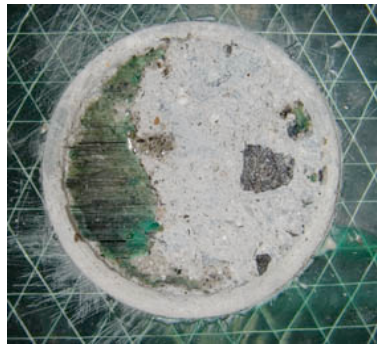


図-5 付着強度と温度変化サイクル数の関係

3.3 破壊形態

図-6に、付着強度試験後の供試体の破壊形態を示す。図は、破壊形態の一例であり、高温定値の28日目と高温変化の90サイクル時を示している。破壊形態の分類⁴⁾は、コンクリートの破壊(MF)、界面破壊(IF)、シート破壊(SF)の3つに分類されている。図より、高温定値の破壊形態の特徴は、シートの一部が接着面に残る状態であった。この破壊形態は、1日目と7日目においても同様であり、シート破壊に近い破壊形態と考えられる。なお、低温定値と常温定値は、コンクリートの破壊であった。これに対して、高温変化は、鋼製治具にコンクリートが付着したまま引きはがされるコンクリートの破壊という形態であり、この破壊形態は温度変化の条件を問わず、ほぼ全ての付着強度試験で確認された。図の破壊形態より、高温定値は、高温の一定環境に供試体が置かれたことでエポキシ樹脂接着剤の強度低下に起因し付着強度が低下したと考えられる。しかし、温度変化はほぼ全てコンクリートの破壊と、シートとコンクリートの界面で破壊が生じておらず、付着強度の低下理由が定値とは異なると考えられた。



(a) 高温定値 28 日目



(b) 高温変化 90 サイクル

図-6 付着強度試験後の破壊形態

3.4 付着強度に及ぼす環境温度の影響

本実験の整理として表-4 に、本実験で設定した環境温度が付着強度に及ぼす影響を低温、常温、高温別に整理した結果を示す。表には、付着強度の低下が認められた条件を強度低下と、認められない条件を変化なしと記した。表中の数値と記号は、低下率と破壊形態である。表より、常温環境にある場合は、付着強度が低下しない。一方で、低温環境の場合は、温度変化を受けることで付着強度が低下した。また、高温環境の場合は、定値と温度変化の両方で付着強度が低下するが破壊形態は異なるという結果を得た。

4. 温度解析による温度変化サイクル時のひずみ挙動

3 章で示したように、温度変化を受ける供試体は、低温変化と高温変化で付着強度が低下したがこれが接着剤の強度低下に起因したものではないと考えられた。本章では、この原因を解明する試みとして、シートとコンクリートの線膨張係数の違いに着目し、有限要素法による温度解析によりシートとコンクリートの界面付近における温度変化によるひずみ挙動の推定を行った。

4.1 解析方法

有限要素解析は、ASTEA-MACS Ver.5 (RCCM 社) を用いて非線形解析を行った。解析モデルは、図-7 に示すように、本実験で使用した供試体の 2 次元要素モデルであり、側面と底面は断熱状態とし、シートとコンクリートは完全付着とした。解析ケースは、低温変化、常温

表-4 付着強度試験結果の整理

環境温度	低温	常温	高温
定値	変化なし	変化なし	強度低下 (32%, SF)
温度変化	強度低下 (28%, MF)	変化なし	強度低下 (27%, MF)

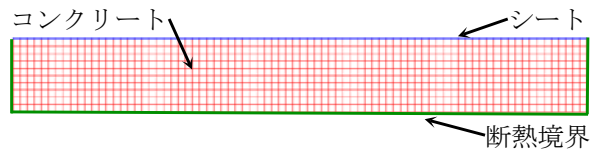


図-7 解析モデル

表-5 解析に使用した材料定数

物性値	コンクリート	炭素繊維
圧縮強度(MPa)	27.5	考慮しない
引張強度(MPa)	2.31	3860
ヤング係数(GPa)	30.8	277
熱伝導率(W/m°C)	2.70	42
密度(kg/m ³)	2400	1750
比熱(kJ/kg°C)	1.15	0.71
線膨張係数(1/°C)	10×10 ⁻⁶	0
ポアソン比	0.20	0.32

変化、および高温変化の 3 条件であり、図-1 に示した温度変化がシートとコンクリートの界面で推移するようにした。表-5 に、解析に使用したコンクリートとシートの材料定数を示す。なお、シートは樹脂も考慮した値である。表より、線膨張係数は、コンクリートが有限要素解析プログラムのデフォルト値 10×10⁻⁶/°C とし、シートは、複合材料ハンドブック⁵⁾と著者らの実測値を考慮し 0/°C と設定した。

4.2 解析による接着界面付近のひずみ挙動

図-8 から図-10 のそれぞれに、解析結果として温度サイクル 1 サイクル分のシートとコンクリートの界面 (凡例: 接着界面)、界面より 5mm 深さ位置のひずみ変化を示す。図中には、温度変化も併せて示した。図より、界面と 5mm 位置のひずみは、温度の下降、上昇という変化に追従し増減しているがひずみは相反する傾向で、ひずみの大きさも 3 条件で異なった。低温変化 (図-8) は、界面が負値 (最小約-140 μ) に対して 5mm 位置が正値 (最大約 60 μ) という履歴であり、常温変化 (図-9) は、概ね-50 μ ~ 50 μ の範囲で正負が変わるという履歴であった。高温変化 (図-10) は、低温変化とは反対に界面が正値 (最大約 140 μ) に対して 5mm 位置が負値 (最小約-50 μ) という履歴を示した。また、温度変化の温度差は 40°C であるが、低温変化と高温変化に比べ、常温変

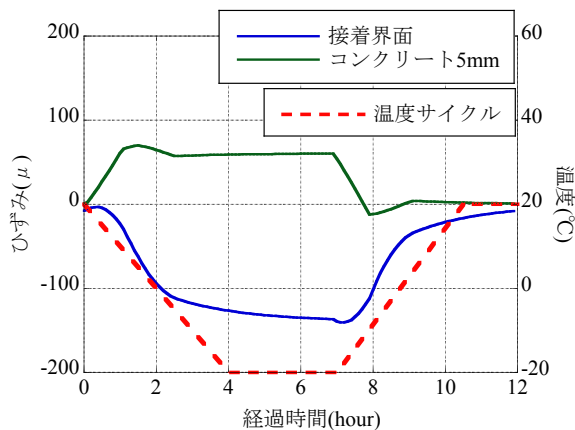


図-8 低温変化のひずみの経時変化

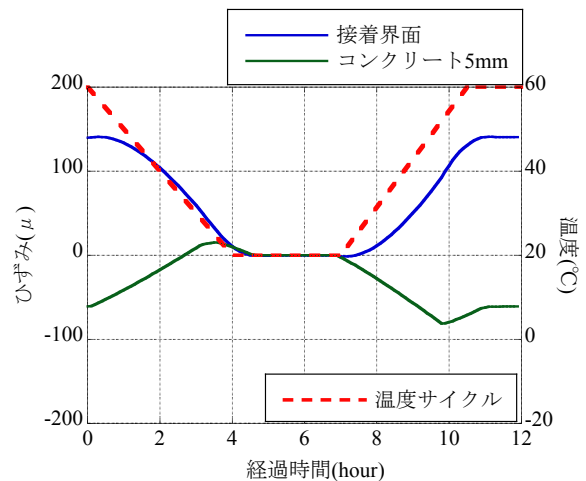


図-10 高温変化のひずみの経時変化

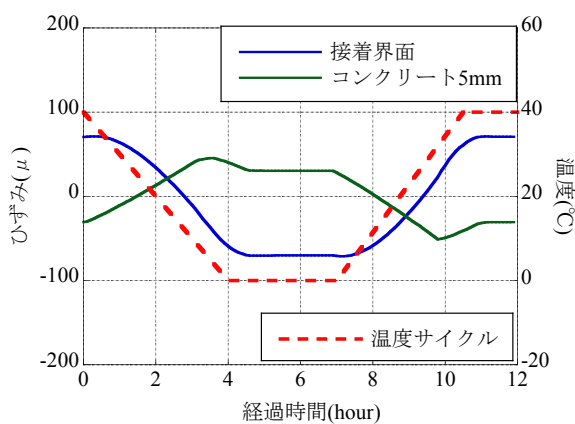


図-9 常温変化のひずみの経時変化

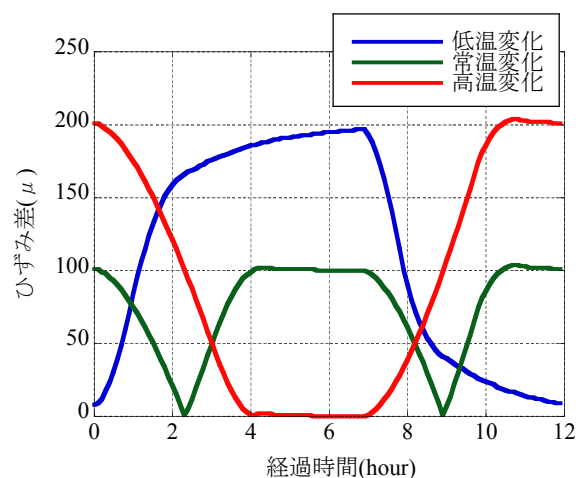


図-11 温度変化サイクルによるひずみ差の推移

化のひずみは小さいという結果であった。このように、本実験を想定した解析からは、温度変化を与えている間は、温度変化条件によって異なるひずみ挙動が生じるという結果を得た。

図-11 は、図-8 から図-10 の解析結果より接着界面と界面より 5mm 位置のひずみの差を絶対値で表し、これの推移を示している。図より、まず、低温変化が温度下降とともにひずみ差が大きくなり（最低温度付近：160 μ ～200 μ のひずみ差）、温度上昇過程で減少する傾向であった。そして、常温変化はひずみ差のピークが 1 サイクルの間に 2 回出現（最大値：100 μ ）する傾向を示し、高温変化では温度下降過程でひずみ差が減少するが、温度上昇とともにひずみ差（最大値：200 μ ）が生じていた。つまり、接着界面と 5mm 位置の関係は、引張ひずみと圧縮ひずみが相反することによりひずみ差が生じるような状態を示した。このひずみ挙動の繰り返しは、温度変化サイクル数の増加とともに界面近傍のコンクリートを損傷させ、この蓄積が結果として本実験における低温変化と高温変化の付着強度の低下傾向として表れたと推察した。

本解析は、接着界面の付着状態の設定等仮定条件を含

む解析結果であり、付着強度の低下原因を特定したとは言い難い。しかし、以上のひずみ挙動より、シートとコンクリートの線膨張係数の違いは、温度変化過程で界面付近に複雑なひずみ挙動を生じさせると示唆され、これが付着強度を低下させる要因になる可能性があるかと解釈している。よって、この詳細な検討は今後の課題と考えている。

5. まとめ

本研究では、シートを接着したコンクリートに定値温度と温度サイクルを一定期間与え、付着強度を評価した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 付着強度は、定値が高温環境で低下し、一方で温度変化が低温条件と高温条件で低下が認められた。また、温度変化における付着強度の低下傾向は同様であった。
- (2) 破壊形態は、高温定値の場合、シート破壊であり、これはエポキシ樹脂接着剤の強度低下が原因と考えられた。一方、温度変化の場合は、接着界面付近の

コンクリートが破壊するというコンクリートの破壊であった。つまり、環境温度の与え方で破壊形態が異なった。

- (3) 有限要素法による温度解析より、温度変化サイクルという温度履歴を受けると接着界面付近でひずみが相反するという結果が示された。これは、シートとコンクリートの線膨張係数の違いに起因したものと考えられる。この繰り返しが接着界面付近のコンクリートを損傷させ、その蓄積により付着強度は低下傾向となる可能性が示唆された。

謝辞：本研究の実験遂行では、本学コンクリート工学研究室の学生諸氏の協力を得た。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 上原子晶久, 菅原 隆, 阿波 稔: 凍害と塩害を受ける連続繊維シート補強コンクリートの耐久性に関する検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 7 巻, pp.271-276, 2007.11
- 2) 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
- 3) M. J. Setzer and R. Auberg : Capillary Suction-Internal damage and Freeze thaw Test, Betonwerk+Fertigteil Technik, BFT 4, pp.94-105, 1998
- 4) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書 規準編, 2007
- 5) 日本複合材料学会: 複合材料ハンドブック, 1989.11