

# 論文 緩衝材を用いたFRPシート・コンクリート間のせん断付着特性の温度依存性

三井 雅一<sup>\*1</sup>・福澤 公夫<sup>\*2</sup>・斉藤 誠<sup>\*3</sup>・舟川 勲<sup>\*4</sup>

**要旨**：連続繊維シートによる補強を行う場合、ひび割れ位置にて付着応力が著しく高くなり、そこを起点として付着破壊が進展しシートの性能を十分に発揮できないことが問題とされてきた。そこで、FRPシートとコンクリート間に緩衝層を設け応力緩和を行う技術が開発された。一般に、その緩衝層に使用する材料はエポキシ系樹脂であり周辺温度の変化によるFRPシート・コンクリート間の付着特性を詳細に検討する必要がある。本研究では、せん断付着特性に関して要素レベルの付着試験により緩衝材を用いる場合の温度依存性を検討した。その結果、とくに高温域にて大きく付着特性が変化することが確認された。

**キーワード**：FRPシート、緩衝材、せん断付着特性、温度依存性、局所付着特性

## 1. はじめに

連続繊維シート接着工法では、補強材であるFRPシートと母材であるコンクリートとが完全に一体化することで、コンクリートに生じる外力の一部をFRPシートが分担し補強効果を発揮する。また、一般にFRPシート・コンクリートの付着特性は脆性的である。このことから、コンクリートの曲げやせん断ひび割れなどにより、付着界面の一部に局所的な応力集中を生じることで付着破壊が急激に進展し、シートによる補強効果を失うことが問題として挙げられている<sup>1)</sup>。そこで、FRPシートとコンクリート間に変形能力の富んだ樹脂を緩衝層として設けることにより、局所的な応力集中を緩和し、シートの有する性能を十分に発揮させる技術が報告されている。前田ら<sup>2)</sup>は、緩衝材を用いる補強効果の検証としてRCはり試験体により曲げ部材に対する耐力増加の確認や平板試験体により押し抜き試験を行い、トンネル内面におけるコンクリートのはく落防止効果の確認を行っている。

一般に、その緩衝材には常温においてゴム状になるように調整された特殊な柔軟性エポキシ樹脂が使用される。なお、その柔軟性エポキシ樹脂も含めて、一般に高分子材料は、その材料の持つガラス転移温度を閾値として高温になると柔らかくなり、また低温になると硬くなる特性を有する。つまり、高温や低温環境では緩衝材としてエポキシ樹脂を使用した場合、その緩衝材により期待される応力緩和効果に変化することが考えられる。そこで、本研究では緩衝材を用いたFRPシート・コンクリート間のせん断付着特性の温度依存性を実験的に検証する。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

図-1に示すように40×40×200mmのコンクリート角柱の相対する二面に一枚の連続繊維シートを接着した供試体を使用した。供試体のコンクリートの配合を表-1に示す。また、供試体には10mmのふるいを通過する粗骨材を用いた。材齢1日で脱型を行い、その後、水中養生を材

\*1 (株)CRCソリューションズ 社会基盤ソリューション部 工博 (正会員)

\*2 茨城大学工学部都市システム工学科 教授 工博 (正会員)

\*3 日鉄コンポジット(株) 技術部長 (正会員)

\*4 (株)青木建設 研究所 工修 (正会員)

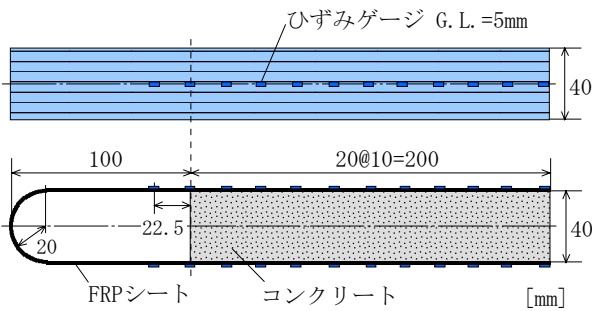


図-1 供試体の形状および寸法

表-1 コンクリートの配合

W/C [%]	s/a [%]	空気量 [%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				
			W	C	S	G*	Ad**
42.0	44	4.0	170	405	742	991	1.00

\*粗骨材の最大寸法：10mm

\*\*AE 減水剤  $f_c'_{28d} = 51.2\text{N/mm}^2$

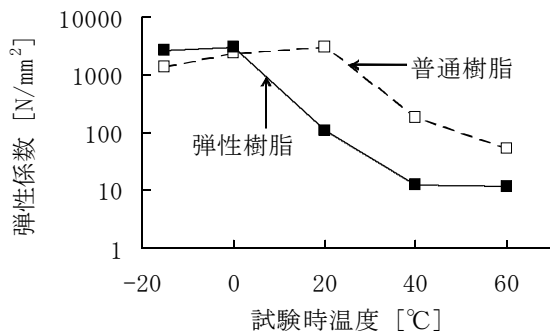


図-2 緩衝材の弾性係数の温度依存性

齢 28 日まで行った。養生後、2 日間、気中に静置した後、接着面の脆弱な部分をディスクグラインダーにて取り除いた。処理面の粉塵除去、清掃およびプライマーの塗布を行い、その 1 日後に緩衝材の重量管理により厚さ 1mm に塗布した。さらに 1 日後に、エポキシ樹脂を含浸した連続繊維シート（高強度炭素繊維、公称弾性係数  $230\text{kN/mm}^2$ 、目付量  $200\text{g/m}^2$ ）を接着した。なお、供試体作製の一連の作業は、 $20^\circ\text{C}$ 、60%RH に設置した恒温恒湿室にて行い、その後、接着作業から約 1 ヶ月間、静置した。

せん断付着試験時の FRP シートのひずみ分布を測定するため、図-1 に示すようにゲージ長 5mm のワイヤストレインゲージを 20mm 間隔で 11 カ所貼付した。

表-2 緩衝材に用いた樹脂

樹脂の物性	弾性樹脂	普通樹脂
混合比 (主剤:硬化剤)	1 : 2	1 : 2
ガラス転移温度 [ $^\circ\text{C}$ ]	6.4	46.3

表-3 試験の因子と水準

因子	水準
試験時温度 [ $^\circ\text{C}$ ]	-15, 0, 20, 40, 60
緩衝材の種類	弾性樹脂, 普通樹脂

## 2.2 緩衝材

本研究では、常温にてゴム状の柔軟性エポキシ樹脂（以下、弾性樹脂という）と FRP シート接着工法において一般に不陸調整材として用いられるエポキシパテ材（以下、普通樹脂という）を緩衝材として用いた場合の比較を行った。図-2 にそれぞれの樹脂について温度を変化させるときの樹脂の弾性係数の測定結果を示す。図に示すように、普通樹脂では、 $20^\circ\text{C}$  の試験時温度にて最も高い弾性係数を示すのに対し、弾性樹脂ではその  $20^\circ\text{C}$  の試験時温度では弾性係数が約  $100\text{N/mm}^2$  と普通樹脂に比べ小さい値を示し、さらに温度が高くなると弾性係数が低下する傾向を示す。表-2 に各樹脂の混合比および TMA 法により得られたガラス転移温度  $T_g$  を示す。なお、ガラス転移温度を測定した樹脂は  $20^\circ\text{C}$  にて 7 日間の養生後、 $60^\circ\text{C}$  にて 4 時間の高温養生後に試験を行った。

## 2.3 試験の因子と水準

表-3 にせん断付着試験の因子と水準を示す。試験時温度は、 $-15^\circ\text{C}$  から  $60^\circ\text{C}$  までの 5 水準とした。なお、各水準で各 4 体ずつ、計 40 体のせん断付着試験を行った。

## 2.4 せん断付着試験方法

せん断付着試験方法を図-3 に示す。試験機は、冷・熱気循環方式の箱形恒温槽を付属した  $100\text{kN}$  の変位制御万能試験機であり、変位速度は毎分  $0.5\text{mm}$  とした。供試体は予め試験時温度に設定した恒温恒湿槽に約 6 時間静置した後、図-3 に示す試験機の恒温槽内部にすばやく取り

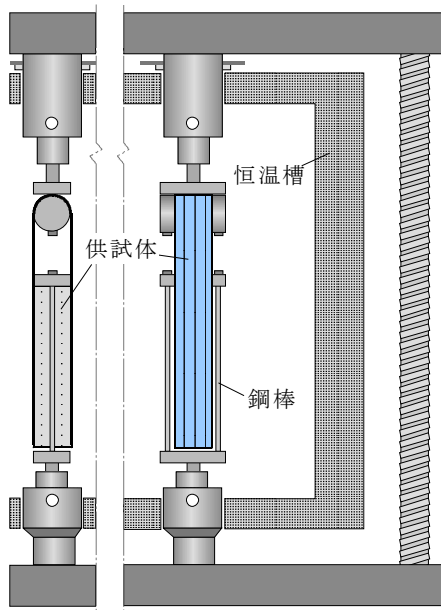


図-3 せん断付着試験方法



(a) 弾性樹脂, 40°C



(b) 弾性樹脂, 60°C



(c) 普通樹脂, 40°C

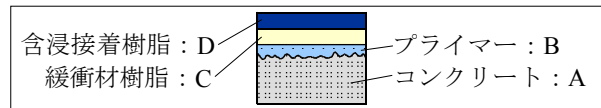


(d) 普通樹脂, 60°C

図-4 破壊面の観察

表-4 破壊位置の分類

試験温度 [°C]	弾性樹脂				普通樹脂			
	A	A	AB	C	A	A	A	A
-15	A	A	AB	C	A	A	A	A
0	A	A	A	AB	A	A	A	A
20	A	A	A	AB	A	A	A	A
40	BC	BC	C	C	A	A	A	A
60	C	C	C	C	BC	BC	C	C



付けた。取付け作業に伴う供試体の温度変化を考慮して、15 分間程度、試験機の恒温槽内で保持した後、载荷を行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊状況の観察

表-4に各供試体のせん断付着試験における破壊位置を示す。表中の太線で囲む供試体について図-4に試験後の破面を示す。普通樹脂を用いる場合には試験時温度が 40 °C までは全てコンクリートにおける破壊 (A) であり、60 °C の場合にはプライマーと樹脂との混合破壊 (BC) または樹脂のみの凝集破壊 (C) となるのに対

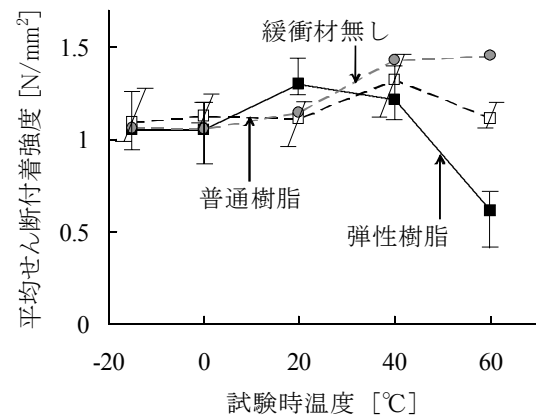


図-5 平均せん断付着強度の試験時温度の影響

し、弾性樹脂の場合には、試験時温度が 40 °C では、混合破壊および樹脂の凝集破壊とが混在し、60 °C では全て樹脂の凝集破壊となった。

#### 3.2 平均せん断付着強度

図-5に試験時温度を変化させるときの平均せん断付着強度を示す。なお、平均せん断付着強度は最大荷重  $P_{max}$  を付着面積 ( $1600\text{mm}^2$ ) で除した値である。普通樹脂は試験時温度 40 °C, 弾性樹脂は 20 °C にて付着強度のピークが確認される。また、図-5には既往の研究<sup>3)</sup>にて得られた緩衝材を用いない場合の結果を併せて示す。図に示すように普通樹脂では 40 °C, 弾性樹脂では 20 °C を超える温度にて平均せん断付

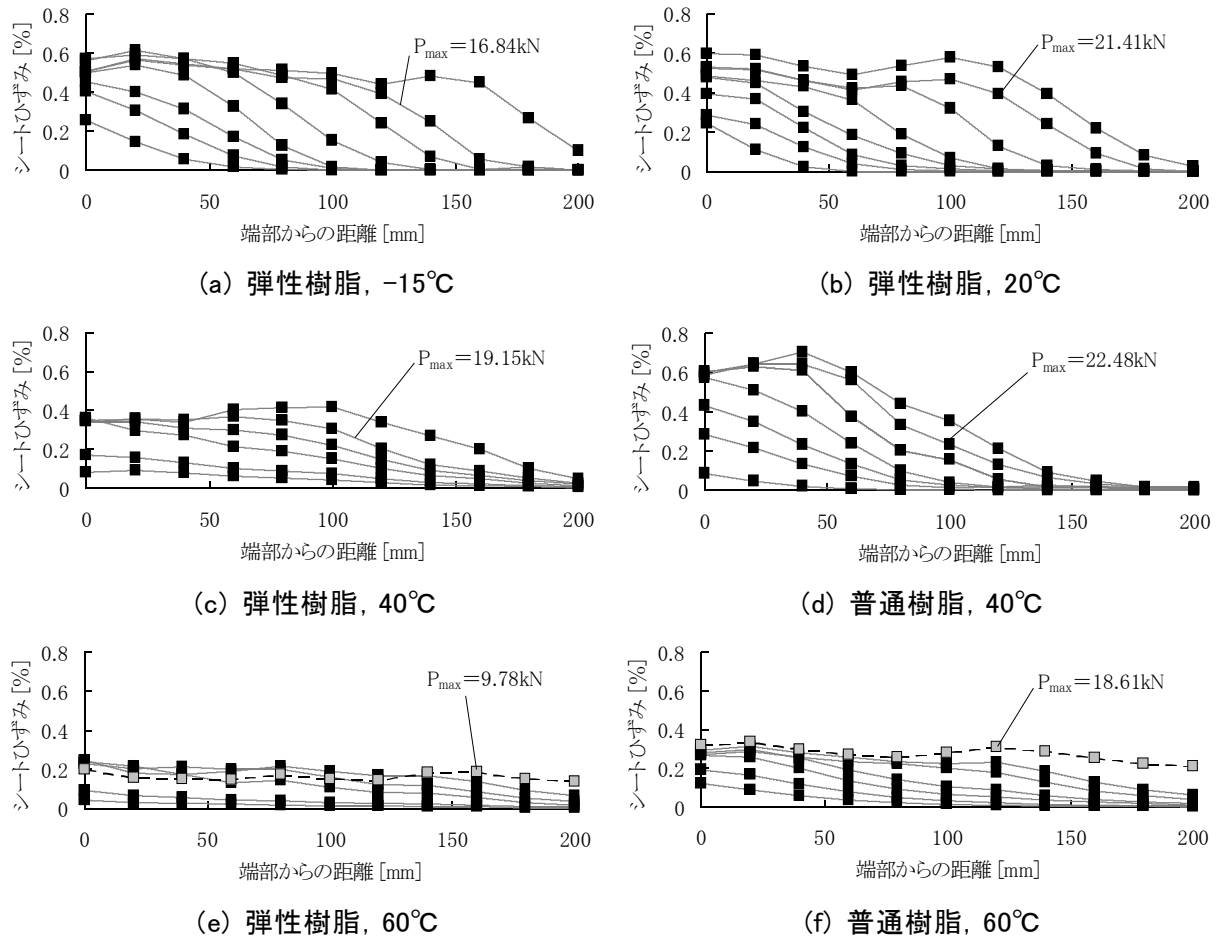


図-6 荷重ステップごとのFRPシートのひずみ分布

着強度の低下が確認できる。これは、後述のようにいずれの樹脂においても付着強度が低下する温度にて有効付着長が供試体の付着長を越えたことに起因するものと考えられる。

### 3.3 FRPシートのひずみ分布

図-6に引張荷重  $P$  を変化させるときの FRP シートのひずみ分布を示す。FRP シートのひずみは粗骨材による影響を緩和するために測定位置のゲージと隣り合う 3 点の測定値の平均値とした。図中、荷重が増加するにつれ右側のひずみ分布と変化する。図-6に示すように試験時温度の違いおよび緩衝材の種類によりひずみ分布が大きく変化することが確認できる。また、両樹脂ともに試験時温度が 60 °C の場合、引張荷重の作用する初期の段階にて付着領域の全体にひずみが生じ、図中の破線に示すように最終的には付着領域の勾配が無くなり破壊に至る。つ

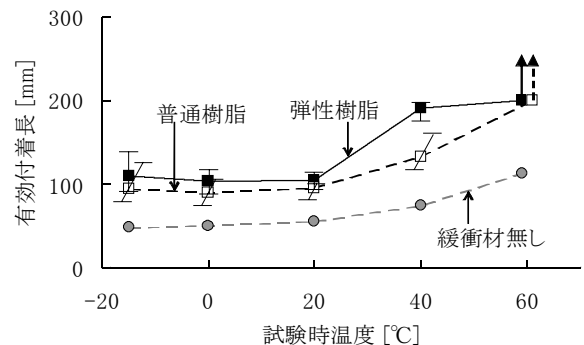


図-7 有効付着長の試験時温度の影響

まり、図-4(b)および(d)に示すように付着領域の全面において緩衝材の凝集破壊によるすべりが生じて最終破壊に至ったものと考えられる。

### 3.4 有効付着長

有効付着長  $L_e$  と試験時温度との関係を図-7に示す。有効付着長は、最大荷重時のひずみ分

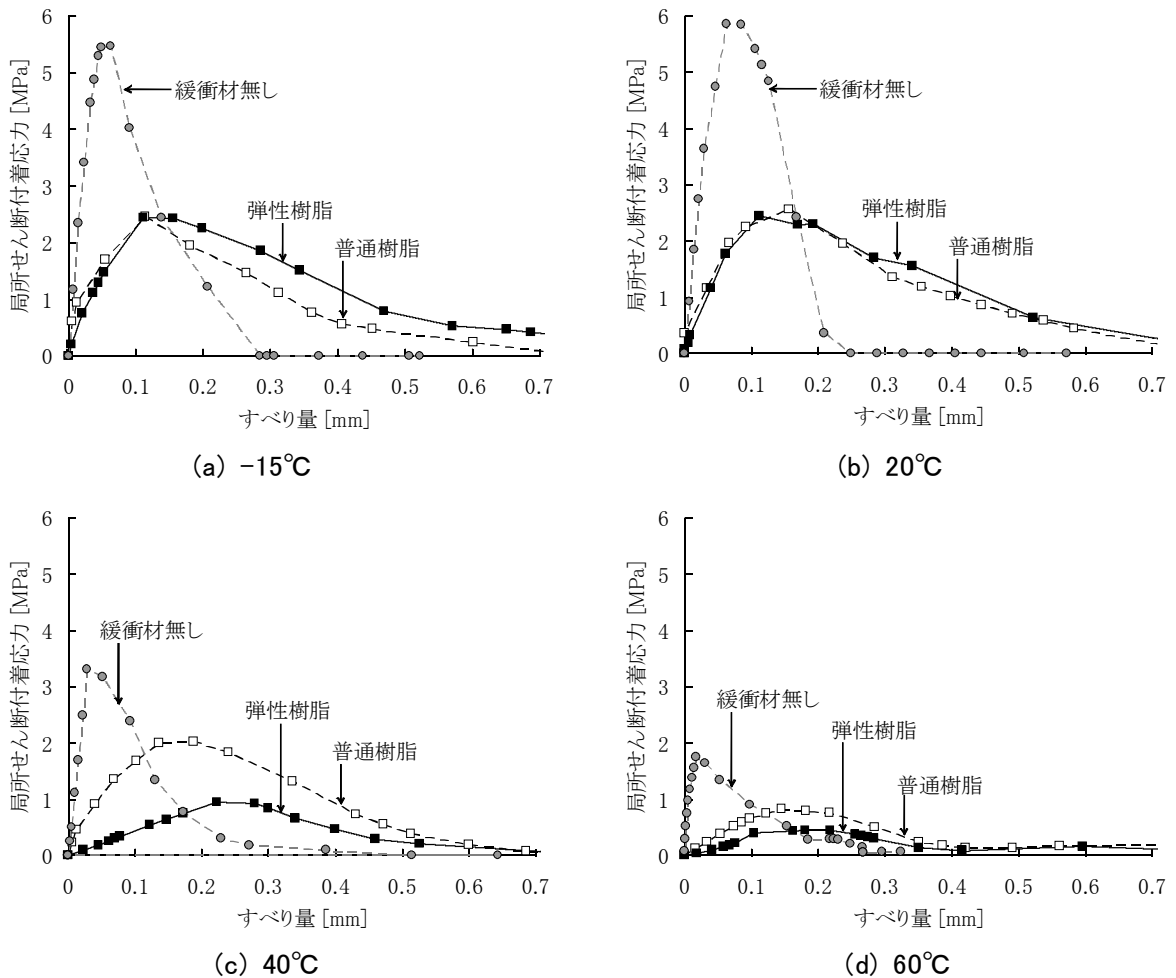


図-8 局所せん断付着応力ーすべり量関係

布において、最大ひずみの位置とせん断力の伝達の影響がほとんど無い位置としてその最大ひずみの 1/100 となる距離として求めた。60℃の場合については最大荷重時にひずみ分布の勾配が無くなるため有効付着長の算出は行わなかった。図-7に示すように、有効付着長は試験時温度が低温および常温域では樹脂の種類に因らず 100mm 程度であるが、試験時温度が 40℃を超えると急激に増加した。また、図-7には既往の研究<sup>3)</sup>にて得た緩衝材を用いない場合の有効付着長の温度依存性を破線で示す。緩衝材無しの場合には、有効付着長が 50mm 程度であり、緩衝材を用いることにより約 2 倍となる。

#### 4. 局所せん断付着特性の検討

##### 4.1 局所付着応力ーすべり量関係

図-8に局所せん断付着応力  $\tau$  とすべり量  $s$  と

の関係等を等価断面を考慮した金久保らの導出方法<sup>4)</sup>に基づき求めた結果を示す。なお、供試体の上端付近ではコンクリートの圧縮変形が付着界面に影響を与えるため適切な局所せん断付着応力ーすべり量関係が得られないことから、図-8には上端より 60mm の位置における算出結果を示す。図に示すように、普通樹脂では試験時温度 60℃にて、弾性樹脂では 40℃および 60℃にて、最大付着応力が低下し、最大付着応力時のすべり量が大きくなる。また、図-8には緩衝材を用いない供試体から得られた結果<sup>3)</sup>も併せて示す。図に示すように、いずれの試験時温度においても緩衝材を使用することにより最大付着応力に達するまでの勾配が緩やかになり、試験時温度が高温になるほどその傾向は顕著になる。また、最大付着応力を比較すると、緩衝材を用いることにより -15℃から 20℃まで

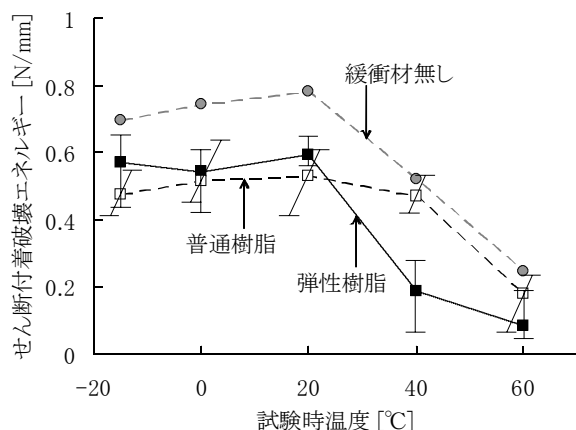


図-9 せん断付着破壊エネルギーの温度依存性

の試験時温度では約 1/2 に低下する。また、40 °C そして 60 °C では、とくに弾性樹脂を緩衝材として使用した場合、緩衝材を使用しない場合に比べ 1/4 以下に最大付着応力は低下することが確認できる。

#### 4.2 せん断付着破壊エネルギー

図-9にせん断付着破壊エネルギーの試験時温度による影響を示す。このせん断付着破壊エネルギーは、図-8に示す局所せん断付着応力-すべり量関係の面積として算出し、すべり量は 0.5mm までの区間を使用した。図に示すように、せん断付着破壊エネルギーは低温および常温域においては弾性樹脂が普通樹脂を上回る。しかし、40 °C を超える高温域では弾性樹脂に顕著な低下が確認できる。つまり、本研究に使用した弾性樹脂を緩衝材として使用した場合、使用温度が低温から 20 °C 程度までの範囲であればせん断付着破壊エネルギーの増加が見込まれるが、高温の環境についてはせん断付着性能の低下が認められることから補強材の端部定着方法の工夫などの対策が必要であろう。

#### 5. 結論

緩衝材を使用した場合の FRP シート・コンクリート間のせん断付着特性に関して試験時温度を影響因子として検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) せん断付着試験において破壊の生じる部分は試験時温度の影響を受ける。すなわち、その温度にて緩衝材がゴム化している場合は、緩衝材における凝集破壊が増加する。
- (2) 局所せん断付着応力-すべり量関係は、緩衝材を用いることにより試験時温度に関係なく最大付着応力に達するまでの勾配が緩やかになるとともに最大付着応力が低下する。また、-15 °C から 20 °C では最大付着応力が緩衝材を用いない場合に比べ使用樹脂の種類に因らず約 1/2 に低下する。さらに高温である 40 °C そして 60 °C では、弾性樹脂を緩衝材として用いる場合、それが 1/4 以下に低下する。
- (3) 弾性樹脂を緩衝材として用いる場合、低温から 20 °C まではせん断付着破壊エネルギーが約 0.6N/mm となるが、40 °C そして 60 °C の温度ではそのエネルギーが大きく低下する。

謝辞: 実験の実施に当たっては、平成 15 年度卒業研究生、濱長雄一君の協力を得た。付記して謝意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 上田多門, 三井雅一, 上原子晶久: コンクリート構造物の補強技術研究委員会報告, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25-1, pp.23-32, 2003.
- 2) 前田敏也, 小牧秀之, 坪内賢太郎, 藤間章彦: 緩衝材を用いた炭素繊維シート接着工法の開発, コンクリート工学, Vol.41, No.11, 2003.
- 3) 福澤公夫, 三井雅一, 沼尾達弥, 斉藤誠: FRP シート・コンクリート間のせん断付着特性に及ぼす試験時温度及び樹脂の特性の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24-1, pp.249-255, 2001.
- 4) 金久保利之, 中場和正ら: 連続繊維シートとコンクリートの局所付着応力-すべり量関係の提案, コンクリート工学論文集, 第 12 巻, 第 1 号, pp.33-43, 2001.