

# 論文 耐熱型エポキシ樹脂を用いた炭素繊維シートとコンクリートとの 付着特性と養生温度による影響

鈴木 宣暁\*1・小森 篤也\*2

**要旨：**本研究は、耐熱型エポキシ樹脂を用いた炭素繊維シートとコンクリートとの付着特性を土木学会の規定する JSCE-E-543-2012「連続繊維シートとコンクリートの付着試験方法」に準拠する供試体を作製し、試験温度をパラメータとして付着特性を評価した。結果、上記材料を用いた補強材料は、60°C環境においても、土木研究所の共同研究報告書に規定する設計法および限界状態設計法が適用できる付着特性を有していることを実験的に検証した。また、同耐熱型エポキシ樹脂を用い、養生温度別でガラス転移温度の変化を確認し、養生温度とガラス転移温度の関係を示し、必要な養生時間を示す。

**キーワード：**炭素繊維, コンクリート, 付着特性, 耐熱性, ガラス転移温度

## 1. はじめに

工場・プラント設備などのコンクリート構造物において、稼働中の煙突などの構造物の耐震性能向上のため、構造物自体を新しいものに取り換える方法や、既存の構造物を補強し対策とする方法が考えられる。しかし、構造物全体を取り換える場合は、部材の製作時間や長期の施工期間を要し、コストも増大するため、何らかの方法で既存構造物を補強し速やかに再稼働することが望ましい。補強法としては、鋼板接着工法や RC 巻き立て工法なども考えられるが、筆者らは、炭素繊維シートを使用することで、コストを抑え、施工時間を短くすることができると考えている。炭素繊維シートを用いる補強法は、鋼材やコンクリートと比べて自重による死荷重増加を小さくし、併せてコンクリート片の剥落防止にも効果がある。しかし、炭素繊維シートは、エポキシ樹脂を用いてコンクリート構造物へ接着されるため、煙突のような躯体が高温となる構造物へは耐熱型のエポキシ樹脂を用いる必要がある。エポキシ樹脂の耐熱性を表す指標の一つとして、ガラス転移温度が用いられており、一般的なエポキシ樹脂のガラス転移温度は、完全硬化時で 50°C前後であるが、耐熱型は 80°C以上とされている<sup>1)</sup>。これは、地濃ら<sup>2)</sup>の既往の研究でも夏季直射日光でのコンクリート表面温度は 50°C以上まで上昇するとされ補強効果に影響することが想定される。

そして、耐熱樹脂の高温コンクリート躯体への適用性は、樹脂の物性試験や建研式試験での接着強度、梁の曲げ試験等で確認されているが、本研究では、JSCE-E-543-2012「連続繊維シートとコンクリートの付着試験方法」<sup>3)</sup>に準拠する供試体を作製し、試験温度をパラメータとしてせん断付着特性の評価を行う。また、耐熱樹脂の完

全硬化までに必要な時間を把握するため、養生温度別のガラス転移温度の測定を行った。

## 2. せん断付着試験

### 2.1 使用材料の材料特性値

本研究で使用する炭素繊維シートおよび樹脂類の材料特性値の一覧を表-1 および表-2 に示す。実験に用いた炭素繊維シートは高強度タイプである。また、樹脂

表-1 炭素繊維シートの材料特性値

試験項目	試験結果
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	5,240
引張弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )	263,462
単位面積重量 (g/m <sup>2</sup> )	600

表-2 使用樹脂の材料特性値

試験項目	プライマー	不陸調整材	含浸樹脂	試験方法
圧縮弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )	—	2,957	2,535	JIS K 7181
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	—	111.1	107.4	JIS K 7181
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	41.1	43.8	66.4	JIS K 7161
曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	—	104.8	132.2	JIS K 7171
引張せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	18.8	13.4	16.1	JIS K 6850
ガラス転移温度 (°C)	90	84	80	DSC

\*1 日鉄ケミカル&マテリアル(株) コンポジット事業部 (正会員)

\*2 日鉄ケミカル&マテリアル(株) コンポジット事業部 開発企画グループリーダー 博 (工) (正会員)

類は標準的な施工断面となるプライマー、不陸調整材、含浸樹脂の3種類を使用し、全て耐熱仕様とする。

### 2.2 試験体概要

本試験に用いる供試体の一覧を表-3に示す。本研究で実施した付着試験は、試験温度をパラメータとして、土木学会の規定するJSCE-E-543-2012「連続繊維シートとコンクリートの付着試験方法」<sup>3)</sup>により、コンクリートと耐熱樹脂を用いた連続繊維補強層のせん断付着強度や界面剥離破壊エネルギーを評価した。供試体の概要および貼付けたひずみゲージ位置を図-1に示す。コンクリート供試体の寸法は100×100×620mmとし、コンクリートの両面に炭素繊維シートを接着した。接着後、80℃環境で3日間加熱養生し、樹脂類を完全硬化させた後、試験に供した。炭素繊維シートのひずみ分布をみるため、ひずみゲージは20mm間隔で両面に設置しデータロガーで荷重・変位・ひずみ発生状況を記録した。図-1の右側は計測部、左側は固定部であり、計測範囲をできるだけ確保し、試験機および恒温槽の寸法も考慮するため、計測部を350mm、固定部を250mmとした。固定部は炭素繊維シートを用いた周巻き補強のみでは、特に高温時に強度が不十分で、炭素繊維シートがコンクリートから滑り、剥離した為、固定部のシート貼付け面に鋼板接着とアンカー止め、更にPC鋼棒と鋼板を用いて面圧を加えることで、今回の最大試験温度80℃においても固定部が計測部よりも先に破壊することを防止した。また、計測部と固定部の間で供試体内部の鋼棒はノッチ部で分断されており、当該部位にひび割れを誘発するためにノッチを設けている。試験は写真-1に示すように、万能試験機に供試体を設置後、恒温槽内で供試体の測定部側コンクリートの温度が所定の試験温度となった後、両端の全ねじ鋼棒に上下方向の引張荷重を与え実施した。なお、载荷速度は0.3mm/minとした。試験結果の判定は、土木研究所での共同研究報告書<sup>4)</sup>によると、設計に用いるせん断付着強度は0.44N/mm<sup>2</sup>とされ、土木学会による「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の設計施工指針」<sup>5)</sup>では、限界状態設計法に用いる値として界面剥離破壊エネルギーは0.5N/mmとされている。

### 3. ガラス転移温度測定概要

エポキシ樹脂の硬化度および耐熱性を確認する為の指標として、ガラス転移温度が用いられている。一般的にエポキシ樹脂の硬化には熱エネルギーが必要であり、ガラス転移温度が高いほど必要な熱エネルギーは大きくなる。ガラス転移温度が50℃程度の汎用エポキシ樹脂であれば、23℃雰囲気下7日間の養生で完全硬化時に近いガラス転移温度に達するが、ガラス転移温度が80℃のエポキシ樹脂の場合は23℃雰囲気下では完全硬化までに多

表-3 せん断付着供試体の一覧

炭素繊維シート	積層数	試験温度(℃)	試験体数
高強度タイプ	1	23	2
		50	2
		60	2
		70	1
		80	1

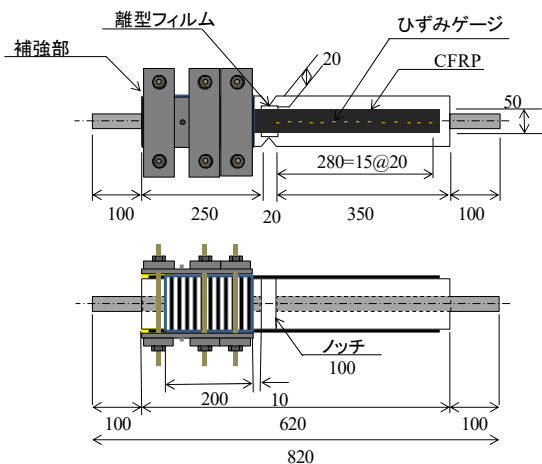


図-1 供試体の概要 (単位: mm)



写真-1 試験状況

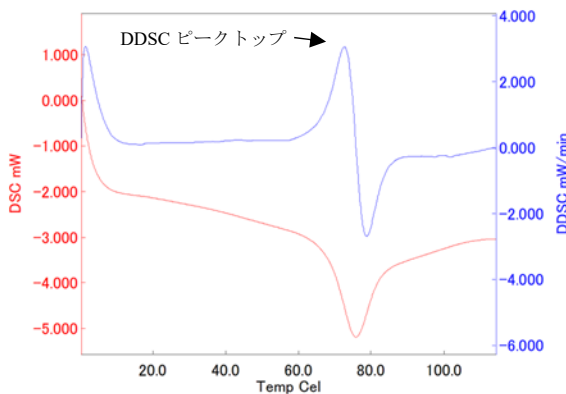


図-2 ガラス転移温度の定義

くの時間を要することが想定される。本研究では、供試体に用いたエポキシ樹脂が養生温度毎にどのように変化するか確認を行った。ガラス転移温度の測定は JIS K 7121-2012 に準拠し行った。樹脂の養生は、50～80℃においては恒温槽、23℃は恒温室で行った。時間は、各樹脂の主剤と硬化剤を23℃で攪拌完了後を0時間とした。測定は、昇温速度10℃/min、0～120℃の範囲で行い、図-2に示すDDSCのピークトップをガラス転移温度と定義した。

#### 4. 結果および考察

##### 4.1 ひずみ分布

最大荷重時における各試験温度時のひずみ分布を図-

3の(A)～(E)に示す。試験温度23℃のひずみ分布は、ノッチ部から180mmの位置以降、ひずみの値が500×10<sup>-6</sup>前後で収束するが、試験温度が上がるにつれて、ひずみ分布が漸減している。これは、試験温度がエポキシ樹脂のガラス転移温度に近づくにつれ、エポキシ樹脂の弾性率が低下し、有効付着長が測定区間よりも増大したためと考えられる。

##### 4.2 破壊状況および最大荷重

写真-2の(A)～(D)に主な供試体の破壊状況の一例を示す。これらの供試体の破壊性状として、コンクリートの表層破壊、エポキシ樹脂凝集破壊、コンクリートの表層破壊とエポキシ樹脂凝集破壊混在したものの3種

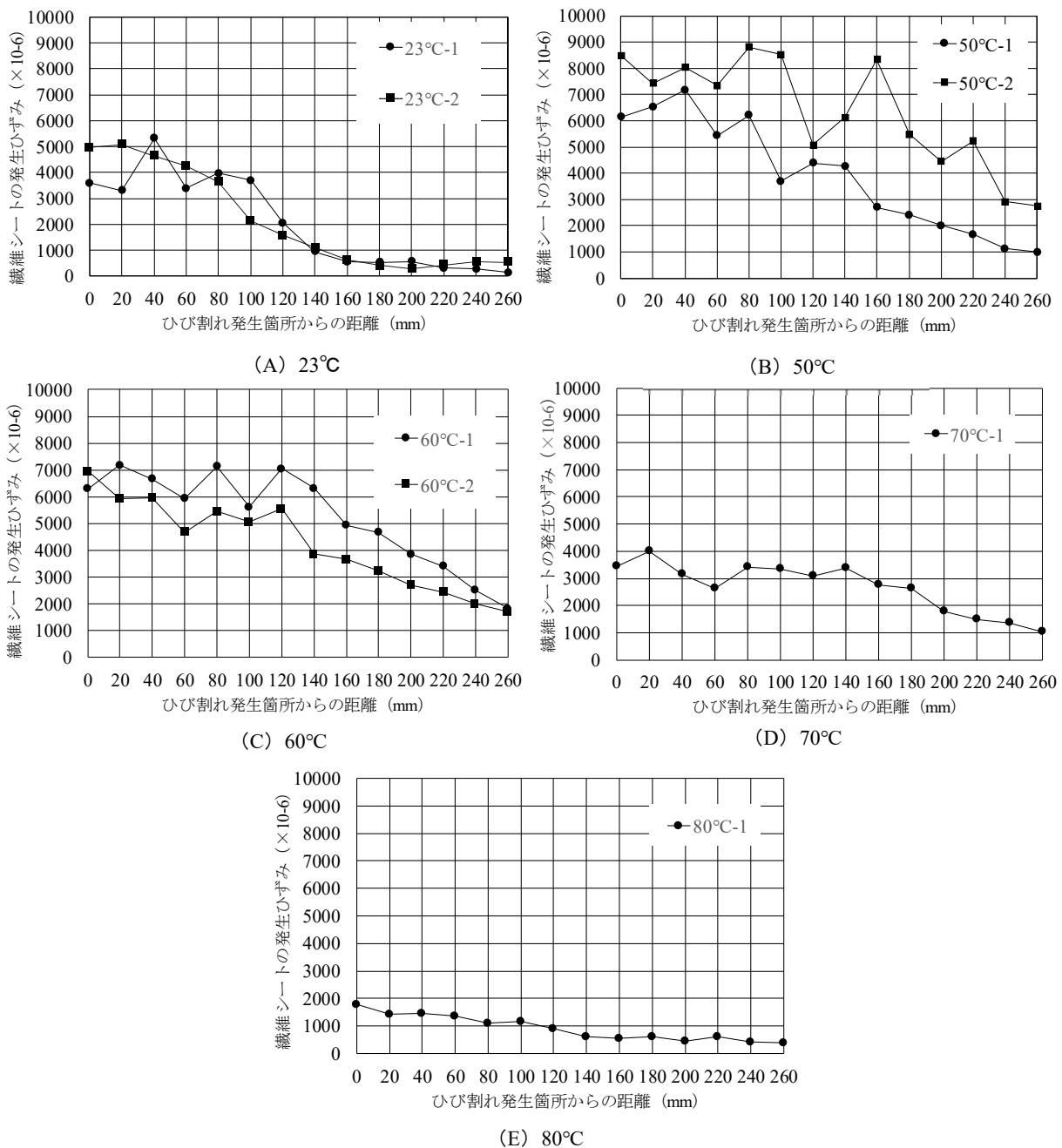
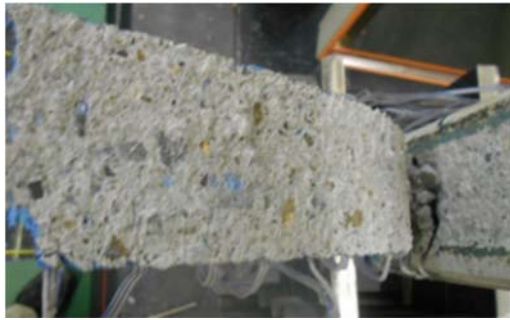
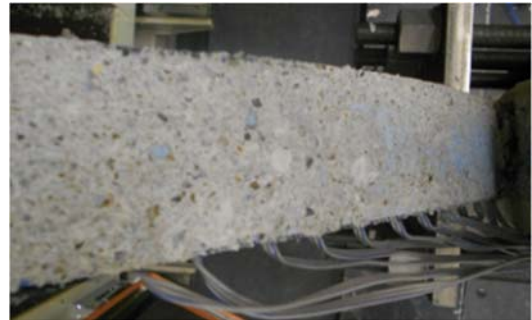


図-3 試験温度別最大荷重時ひずみ-測定位置関係



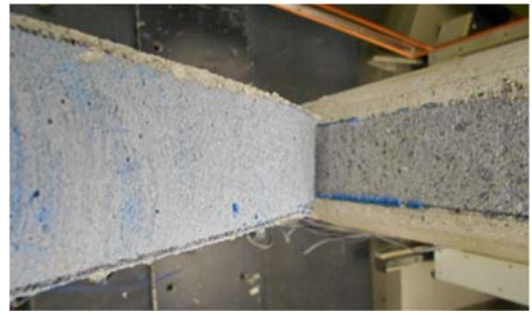
(A) 23°C



(B) 50°C



(C) 60°C



(D) 70°C, 80°C

写真-2 破壊状況

表-4 せん断付着試験結果の一覧

試験温度(°C)	No	$P_{max}$ (kN)		$\tau_u$ (N/mm <sup>2</sup> )		$G_f$ (N/mm)		$l_e$ (mm)		破壊モード
		実測値	平均値	実測値	平均値	実測値	平均値	実測値	平均値	
23	1	36.9	38.3	1.11	1.16	0.83	0.90	86.0	119.35	コンクリート表層破壊
	2	39.7		1.20		0.96		152.7		コンクリート表層破壊
50	1	58.8	62.6	1.78	1.90	2.12	2.41	算出不可	算出不可	コンクリート表層破壊
	2	66.4		2.01		2.70		算出不可		コンクリート表層破壊
60	1	53.2	52.6	1.61	1.59	1.72	1.69	算出不可	算出不可	コンクリート表層破壊、 エポキシ樹脂凝集破壊
	2	52.0		1.57		1.66		算出不可		コンクリート表層破壊、 エポキシ樹脂凝集破壊
70	1	32.4	32.4	0.98	0.98	0.64	0.64	算出不可	算出不可	エポキシ樹脂凝集破壊
80	1	23.8	23.8	0.72	0.72	0.34	0.34	算出不可	算出不可	エポキシ樹脂凝集破壊

$P_{max}$  : 最大荷重 (kN)     $\tau_u$  : 最大せん断応力 (N/mm<sup>2</sup>)     $G_f$  : 界面剥離破壊エネルギー (N/mm)

$l_e$  : 有効付着長 (mm)

類に分けられる。コンクリートの表層破壊は、剥離した炭素繊維シートにコンクリート供試体の表層部が付着している状態の破壊形状であり、エポキシ樹脂の凝集破壊は、プライマー、不陸調整材、含浸樹脂のいずれかまたはそれぞれが混在して凝集破壊する現象である。試験温度が 23°C および 50°C の供試体の破壊形態は、写真-2 (A)、写真-2 (B) のようにコンクリート表層破壊であった。剥離した炭素繊維シート側に付着しているコンクリートの付着量は、23°C 試験時が最も多かった。これは、

試験温度 23°C の供試体は有効付着長が短いと考慮される。試験温度が 60°C の供試体の破壊形態は、写真-2 (C) のように、コンクリートの表層破壊とエポキシ樹脂の凝集破壊が混在している状態であった。試験温度が 70°C を超えると、写真-2 (D) のように、エポキシ樹脂の凝集破壊のみの破壊状況であった。凝集破壊したエポキシ樹脂層を特定してみると、含浸樹脂および不陸調整材は着色が青色、プライマーは灰色であることから、プライマー層の凝集破壊であることが分かる。このように、

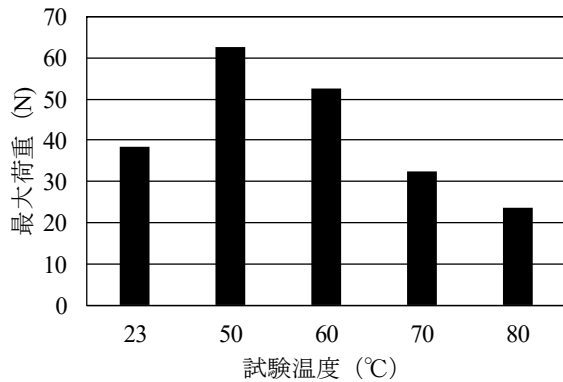


図-4 試験温度と最大荷重の関係

試験温度がエポキシ樹脂のガラス転移温度に近づくにつれ、破壊状況が変化し、コンクリートの表層破壊からエポキシ樹脂の凝集破壊へと変化し、70°C以上ではエポキシ樹脂の凝集破壊のみの破壊形態となることを確認した。また、図-4 に試験温度と最大荷重の関係を示す。最大荷重は試験温度 50°Cで最大となり、それ以降は試験温度の上昇とともに低下し、70°C以降はでは 23°Cよりも小さくなるのがわかった。

ここで、表-4 に各供試体の最大荷重  $P_{max}$ 、せん断付着強度  $\tau_u$ 、界面剥離破壊エネルギー  $G_f$ 、有効付着長  $l_e$  および破壊モードを示す。試験温度 23°Cよりも 50°Cおよび 60°Cの方が最大荷重は大きくなる傾向がみられた。これは、試験温度が高くなるにつれ、プライマー、不陸調整材および含浸樹脂の弾性率が低下し、有効付着長が増加したためと考えられる。実際に、試験温度が 50°C以上では、今回の供試体の計測範囲において、有効付着長の算出ができなかった。なお、最大せん断応力  $\tau_u$ 、界面剥離破壊エネルギー  $G_f$ 、有効付着長  $l_e$  は、土木学会の規定する JSCE-E-543-2012<sup>2)</sup>に基づいて、式(1)、式(2)、式(3)、式(4)を用いて算出した。

$$\tau_u = \frac{P_{max}}{2bl} \quad (1)$$

$$G_f = \frac{p^2_{max}}{8b^2 E_f t} \quad (2)$$

$$\tau_y = \frac{\Delta \epsilon_f \cdot E_f \cdot A_f}{S_g \cdot b} \quad (3)$$

$$l_e = \frac{P_{max}}{2\tau_y \cdot b} \quad (4)$$

ここで、

$P_{max}$  : 最大荷重(kN)

$b$  : 炭素繊維シート幅(mm)

$E_f$  : 炭素繊維シートの弾性係数(N/mm<sup>2</sup>)

$t$  : 炭素繊維シートの厚さ(mm)

$l$  : シート接着長さ(mm)

$\tau_y$  : 有効付着長を考慮した付着強度(N/mm<sup>2</sup>)

$\tau_u$  : せん断付着強度(N/mm<sup>2</sup>)

$\Delta \epsilon_f$  : ひずみ増加区間のひずみ差

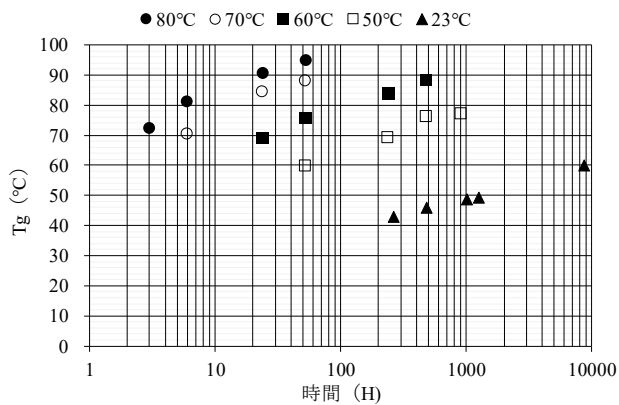
$A_f$  : 炭素繊維シートの断面積(mm<sup>2</sup>)

$S_g$  : ひずみ増加区間の距離(mm)とする。

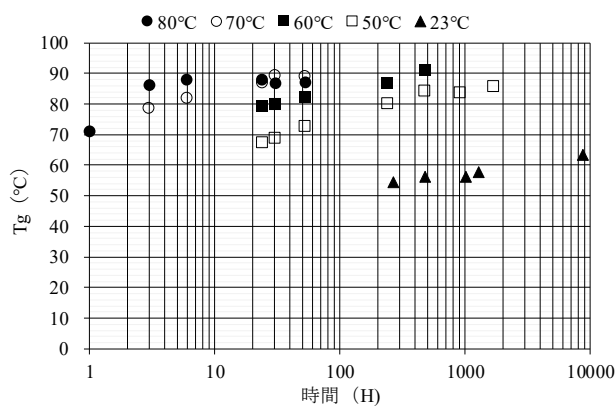
試験温度が 23°Cの供試体の場合、最大荷重  $P_{max}$  の平均値が 36.9kN、せん断付着強度  $\tau_u$  が 1.11N/mm<sup>2</sup>、界面剥離破壊エネルギー  $G_f$  は 0.83N/mm となった。また、試験温度が 60°Cの供試体の場合、最大荷重  $P_{max}$  の平均値が 52.6kN、せん断付着強度  $\tau_u$  が 1.59N/mm<sup>2</sup>、界面剥離破壊エネルギー  $G_f$  は 1.69N/mm であった。今回の実験で使用した樹脂類の実用使用域温度は 60°Cで設定されており、試験温度 60°Cで得られた結果は、付着強度は 0.44N/mm<sup>2</sup> を上回り、さらに界面剥離破壊エネルギーは 0.5N/mm を上回ったことから、各設計法に用いる試験結果として安全側であることが示され、実用使用域温度の妥当性が検証された。試験温度が 70°Cの場合においても、上記各設計法に用いる値以上であるが、破壊形態がエポキシ樹脂プライマー層の凝集破壊となり、コンクリートとプライマー間の付着強度よりもプライマー層の強度が劣る状態となる為、樹脂の耐熱性が使用上懸念される。試験温度が 80°Cの場合は、荷重の大幅な低下に加えて、界面剥離エネルギーが設計法に用いられる値以下となる為、使用不可である。

#### 4.3 養生温度別ガラス転移温度時間変化

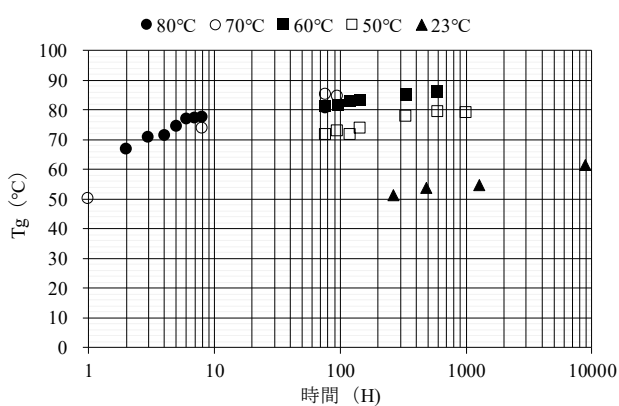
プライマー、不陸調整材、含浸樹脂の養生温度別ガラス転移温度の時間変化を図-5 (A) ~ (C) にそれぞれ示す。縦軸  $T_g$  は測定試料のガラス転移温度、横軸  $H$  は主剤と硬化剤を攪拌後速やかに所定温度環境下へ静置した時間を 0H とした養生時間である。図-5 から養生温度が高いほどガラス転移温度の上昇が早く、耐熱樹脂の実用使用域温度 60°Cで性能が十分に発現する目安としているガラス転移温度 80°Cとなる時間を見てみると、おおよそプライマーで 5 日、不陸調整材で 2 日、含浸樹脂で 4 日であることが分かった。一方、常温 23°Cでは 1 年経過してもそれぞれガラス転移温度は 60°C程度であった。ここで、図-5 (A) のプライマーの 23°C養生プロット対数近似式からガラス転移温度が 80°Cに達するまでの時間を算出すると、約 68.6 年となる。この結果から、耐熱型エポキシ樹脂を完全硬化させ、その特性を十分に発揮するためには、加温養生が必須であることが分かる。しかし、直射日光下では表面温度は十分な養生温度となり、耐熱性樹脂が必要な環境は高温の環境であり必然的に必要な温度で養生されるため実用上の問題はないものと考ええる。そして、一度上昇したガラス転移温度は、不可逆的であるため、以後の性能にも問題ないものと考ええる。



(A) プライマー



(B) 不陸修正材



(C) 含浸樹脂

図-5 各樹脂養生温度別ガラス転移温度の変化

DSC などでのガラス転移温度は目安であり実際の試験にて実用温度域を求めることが重要と考える。

## 5. まとめ

本研究は、高温となるコンクリート躯体へ適用されて

いる耐熱樹脂類の試験温度別の付着特性を土木学会の規定する JSCE-E-543-2012「連続繊維シートとコンクリートの付着試験方法」により評価し、また、養生温度別のガラス転移温度変化の調査を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 試験温度別付着特性試験から、試験温度によりコンクリートに対する炭素繊維シートの付着特性は変化し、今回の実験で使用した耐熱樹脂類に対しては、60°Cまでは良好な付着特性を有し、土木研究所の共同研究報告書に規定する設計法が適応可能なせん断付着強度 0.44N/mm<sup>2</sup> 以上を有し、また、限界状態設計法での剥離破壊耐力が算定可能である界面剥離破壊エネルギー0.5N/mm 以上を有しており、実用使用域温度 60°Cの妥当性が確認された。
- (2) 試験温度別供試体の付着試験後の破壊状況から、環境温度に対するコンクリートと耐熱樹脂を用いた炭素繊維シートとの接着せん断破壊形状を明らかにし、環境温度がエポキシ樹脂のガラス転移温度に近づくにつれてプライマー層の凝集破壊となることが分かった。
- (3) 今回の実験で使用した各耐熱樹脂の養生温度別ガラス転移温度を DSC 装置で測定し、養生温度が 23～80°Cにおける、ガラス転移温度の変化を明らかにした。

## 参考文献

- 1) 小森篤也, 阿部忠, 秀熊佑哉: 連続繊維シート接着用常温硬化型耐熱速硬化エポキシ樹脂の開発, 土木学会年次学術講演会, Vol.68, 2013.8
- 2) 地濃茂雄: 日射に代えて赤外線を照射した場合のコンクリート表面の温度上昇, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.331-336, 2008.7
- 3) 土木学会: 連続繊維シートとコンクリートとの接着試験方法(案)(JSCE-E 545-2012), 土木学会コンクリートライブラリー101, 2012.5
- 4) 建設省土木研究所: コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書Ⅲ, 1995
- 5) 土木学会: 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 コンクリートライブラリー101, 2012.5