

論文 環境温度が各種ポリマーセメント系接着剤を用いた連続繊維補強材とコンクリートの付着性能に及ぼす影響

安藤 祐太郎*1・鈴木 裕介*2・Sanjay PAREEK*3

要旨: 本研究では、鉄筋コンクリート構造物の耐震補強材（連続繊維補強材）の貼付施工に一般的に用いられるエポキシ樹脂系接着剤の代替として、低環境負荷を考慮したポリマーセメント系接着剤を用い、様々な形状を有した連続繊維補強材を接着したコンクリート供試体を作製し、過酷な自然環境による温度変化がコンクリートと補強材間の接着性に及ぼす影響について評価した。その結果、直接引張付着強度は、低温及び高温変化の繰返しによって低下する傾向を示した。その要因として、ひずみ挙動の測定から、ポリマーセメント系接着剤とコンクリートの線膨張係数の違いが接着界面の損傷に影響する可能性を示唆した。

キーワード: 連続繊維補強材, ポリマーセメント系接着剤, 直接引張付着強度, 温度変化, 線膨張係数

1. はじめに

兵庫県南部地震において、鉄筋コンクリート (RC) 構造物にも、多くの被害が生じた¹⁾。その中でも 1981 年以前に建てられたものが全体の約 70% の割合を占めていた。このような旧基準で建設された建築物に対し、1995 年 12 月に「建築物の耐震改修の促進に関する法律」が施行され、耐震診断結果から不適合構造物に対して耐震補強が行われ、地震に対する安全性の向上が図られている。そのため、近年は延命化や既存不適合構造物への対応という目的で RC 構造物に対する耐震補強・改修の頻度が増加している。耐震補強方法の一手法である連続繊維補強材 (Continuous Fiber Reinforced Polymer 以下, CFRP) を用いた工法は、RC 構造物のコンクリート表面に接着剤を用いて貼付けし、薄層の補強層を形成して構造物を補強する工法である。しかし、耐震補強・改修された箇所の経時的耐久性能の評価は端緒につくばかりである^{2), 3)}。これまで著者らは、施工期間の短縮及び付着強度の改善を目的として開発された連続繊維ストランドシート (以下, CF Strand Sheet) の貼付に、従来からのエポキシ樹脂系接着剤に代わり環境負荷軽減を考慮したポリマーセメント系接着剤を用いた、CF Strand Sheet 貼付補強 RC 梁部材の曲げ・せん断耐力試験を行った。その結果、従来のエポキシ樹脂系接着剤を用いた場合と比して同等の曲げせん断補強効果が得られるとともに、現行の評価手法においても簡易的に強度計算が可能であることを確認した⁴⁾。一方で、子田らは、エポキシ樹脂系接着剤で CFRP を貼付けたコンクリート供試体に温度変化を一定期間与えた後、直接引張付着強度 (以下, 付着強度) 試験から、コンクリートと CFRP 間の付着強度の低下を報告してい

る³⁾。よって、既往の研究⁴⁾で提案したポリマーセメント系接着剤を用いた CFRP 貼付工法においても過酷な環境下における経時的な付着性能変化について基礎的な検討を行う必要があると考える。

以上から本研究では、RC 構造物の耐震補強・改修に用いられる各形状を有した CFRP をポリマーセメント系接着剤 (または比較用としてエポキシ樹脂系接着剤) で貼付けたコンクリート供試体を作製し過酷な環境下における温度変化がコンクリートと CFRP 間の付着性能に及ぼす影響について検討している。実験における環境温度は低温、高温及び常温を想定し、各温度条件下で温度変化を供試体に与え、接着剤の違いなどから CFRP 付着強度を比較している。

2. 実験概要

2.1 使用材料

Table 1 にコンクリートの配合を示す。コンクリートは、設計基準強度 $F_c=24\text{N/mm}^2$ の普通強度レディーミクストコンクリートを使用した。**Table 2** に接着剤の材料特性を示す。なお、各接着剤の線膨張係数は、ポリマーセメント系接着剤が $7.7 \times 10^{-6}/\text{C}^5$ 、エポキシ樹脂系接着剤が $62 \times 10^{-6}/\text{C}$ (規格値) である。**Photo 1** に使用した CF Strand Sheet の形状、**Photo 2** に連続繊維シート (以下, CF Sheet) の形状及び **Fig.1** に CF Strand Sheet の詳細図を示す。本研究で使用した CFRP は、接着性が良好という長所をもつ CF Strand Sheet 及び CF Sheet の 2 種類である。接着剤にはポリマーセメント系接着剤を 2 種類 (ACL, SBR) 及びエポキシ樹脂系接着剤を 1 種類用いた。なお、エポキシ樹脂系接着剤は実際の施工状況と同様にするため、CF

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 研究員 博士 (工学) (正会員)

*3 日本大学 工学部建築学科准教授/デルフト工科大 客員教授 工博 (正会員)

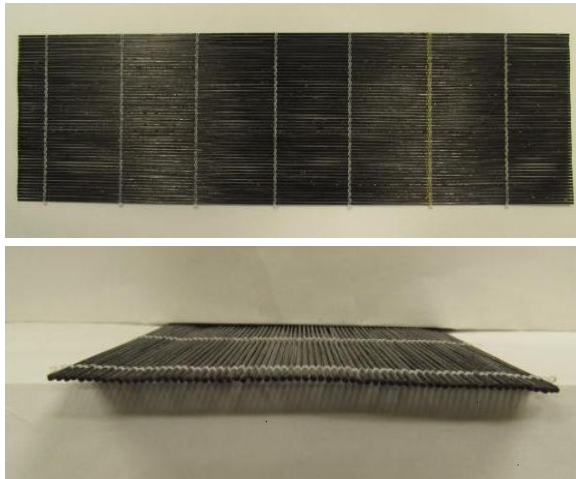


Photo.1 View of CF Strand Sheet

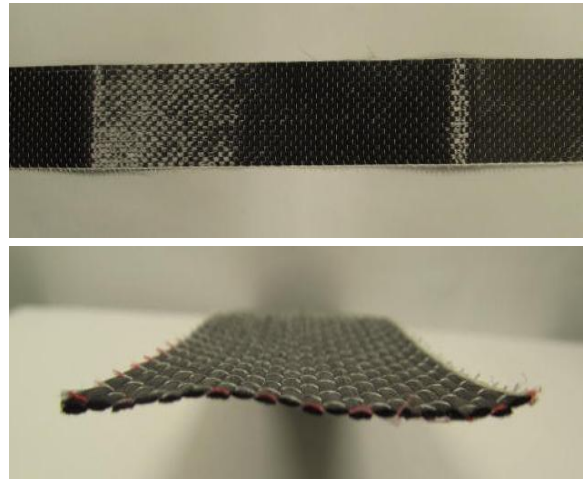


Photo 2 View of CF Sheet

Table 1 Mixing of Concrete

G _{max} (mm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	Amount of Unit (kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE
20	57.9	4.5	48.8	184	318	855	963	3.180

AE: Air Entraining and Water Reducing Agent

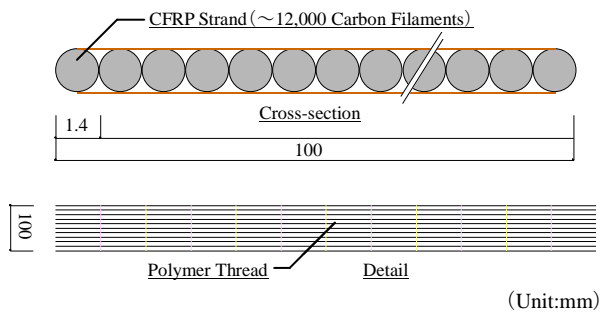


Fig.1 Detail of CF Strand Sheet

Strand Sheet (SS) 貼付時にはエポキシ系接着剤パテ (EP), CF Sheet (CS) 貼付時にエポキシ系接着剤レジン (ER) を使用した。

2.2 供試体概要

本実験では、高さ 50mm、幅 100mm、長さ 350mm (□100×100mm、長さ 350mm のコンクリート角柱の断面中央を長辺方向に沿って切断) の角柱供試体を作製した。本供試体寸法は、既往の研究³⁾を参考に、高さを低くすることで熱流量を大きくし、供試体の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。供試体の養生として、打込み後から 2 日間湿空[20℃, 90%(RH)]養生し、その後に材齢 28 日になるよう水中(20℃)養生を行った。

CFRP の貼付けには、CF Strand Sheet 及び CF Sheet を接着面に幅 100mm、長さ 350mm で 1 層接着させた。なお、CFRP の貼付面を上述の切断面とすることで下地表面処理 (ケレンなど) を省略した。CFRP の貼付け工程において、ポリマーセメント系接着剤を用いる際は、ポリマーディスパーションを下塗りし、その上にポリマーセメントペーストを塗布し CFRP を貼付けた。貼付後、

Table 2 Properties of Bonding Agents

Identification	SBR	ACL	ER	EP
Type of Adhesive	SBR-2	ACL-1	Epoxy	
Condition	Dispersion	Emulsion	Resin	Putty
Chemical Constituent	Styrene-Butadiene Rubber	Styrene Acrylics Copolymer Emulsion	Bisphenol A Type Epoxy Resin / Denatured Aliphatic Polyamine	
Solid Content(%)	45	45.4	-	
Viscosity (mPa·s)	200	14	-	
pH	9.0	4.1	-	
Ion	Nonion	Cation	-	
P/C(%)	20		-	
W/C(%)	SS:25 CS:30		-	

試験開始まで 28 日以上養生した。エポキシ樹脂系接着剤を用いる場合は、付着強度を確保するために、はじめにプライマーを下塗りした。1 日静置後、ER 又は EP を用いてそれぞれの CFRP を貼付けた。貼付後、試験開始まで 7 日以上湿空[20℃, 90%(RH)]養生を行った。また、上記の供試体は 1 種類につき各 2 体ずつ作製した

Fig.2 にひずみゲージの貼付位置を示す。ひずみゲージの貼付位置は、図に示すよう CFRP 貼付面 (表面) 及びコンクリート面 (裏面) の 2 カ所とし、ひずみ度測定方向を試験体長軸方向として各 1 枚ずつ貼付けた。

2.3 実験方法

(1) 実験条件

Table 3 に、本実験条件を示す。コンクリートと CFRP 間の付着強度試験は、供試体に与える環境温度については温度域を 3 条件に定め、下記する温度変化を繰返し与えた。温度変化として、-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。供試体に温度変化を与えた試験器には、プログラム操作で制御可能な温 (湿) 度試験器を使用し、試験器への供試体の設置の際には、CFRP の接着面以外を発砲スチロール (厚さ 50mm) で断熱し、熱の移動が一方向になるよう留意した。また、直接引張付着強度試験につ

いては、建研式接着力試験器（最大荷重 10kN）を用いて行い、温度変化を与えて 30、60 及び 90 サイクル目それぞれにおいて CFRP 付着強度を測定した。

Fig.3 に、設定温度変化の温度プログラム及び実際に供試体に入力された温度変化の測定値を示す。温度変化による 1 日当たりのサイクル数は 2 サイクルとし、温度下降と上昇の時間、最低温度、最高温度及び最高温度の保持時間については、RILEM CDF-1998⁹⁾を参考に設定した。なお、温度変化サイクルが設定温度を満足しているかを確認するため、温(湿)度試験器の内部データを確認し温度管理を行った。その結果、供試体（CFRP 接着面表面）の温度推移は、試験終了まで各条件ともに設定温度変化サイクルを満足する温度で推移した。

(2) 直接引張付着強度試験方法

Fig.4 に直接引張付着強度試験方法を示す。本試験は、建研式接着力試験器を用いて JSCE-E545-2007 に従った⁷⁾。Fig.4 に示すように、CFRP の接着面をコンクリートカッターで 40×40mm、深さ 3mm になるように切断し、その部分の CFRP 表面にアタッチメント（鋼製の引張治具）を、エポキシ樹脂系接着剤を用いて接着した。この治具を介し引張力を载荷し治具を引っ張る要領で加力した。直接引張付着強度試験を実施した際の環境温度は、全ての温度変化において 20℃の一定温度下とした。なお、付着強度は 3 カ所の試験結果の平均で評価した。また、1 体の供試体のみでは、30、60 及び 90 サイクルすべての試験カ所（計 9 カ所）を確保できなかったため、各種類 2 体ずつ作製したうちの 1 体で 30 及び 60 サイクル目の計 6 カ所の試験を行い、もう一体の供試体を用いて 90 サイクル目の試験（3 カ所）を実施した。

付着強度 f_{bnd} は、以下の式(1)で求めた。

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

ここに、 P_{max} は最大荷重(N)、 A は鋼製治具とシートの接着面積(mm²)であり $A=1600\text{mm}^2$ とした。付着強度は、3 カ所の平均値を求め、その平均値より変動係数±20%を超えた場合、その数値を異常値とみなして棄却し、残りの数値の平均値とした。

3. 試験結果

3.1 環境温度下の温度変化による直接引張付着強度試験

Fig.5 に低温変化、Fig.6 に常温変化及び Fig.7 に高温変化の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 サイクル）は、EP-SS が 4.34N/mm²、ACL-SS が 3.78 N/mm²、SBR-SS が 2.58 N/mm²、ER-CS が 4.01 N/mm²、ACL-CS が 1.16 N/mm²、及び、SBR-CS が 0.57 N/mm²であった。

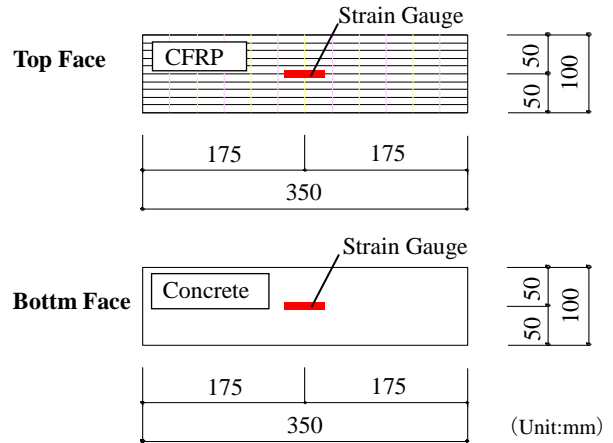


Fig.2 Pasting Position of Strain Gauge

Table 3 Experimental Condition

Evaluation Criteria	Cyclic Temperature Configuration	Test Interval	
Direct Tensile Bond Strength	Temperature Change (°C)	Cycles	
	(LT)	-20~20	0, 30, 60, 90
	(NT)	0~40	
	(HT)	20~60	

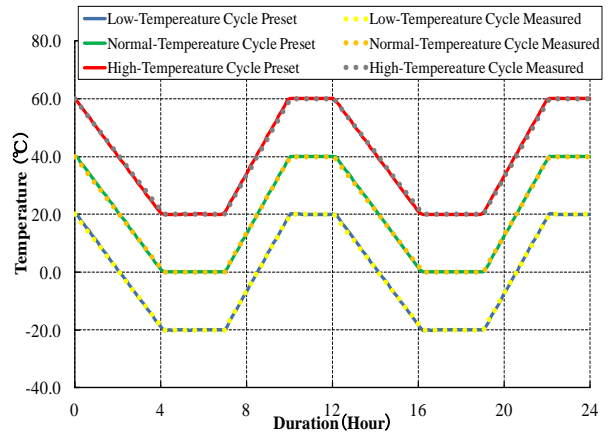


Fig.3 Preset & Measured Temperature Cycle History

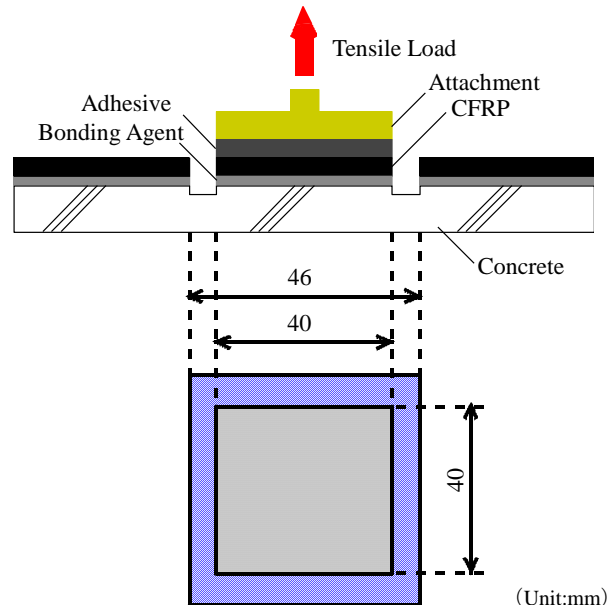


Fig.4 Test Setup for Tensile Adhesion Test

なお、図中の EP-SS とは、CF Strand Sheet をエポキシ樹脂で接着した供試体であり、同様に ACL-CS とは CF Sheet を ACL 系ポリマーセメントで接着した供試体である。

Fig.5 より、低温環境の温度変化を与えたことによる付着強度については、EP-SS 及び ER-CS は、30 サイクルで低下するものの 60 及び 90 サイクルでは強度が増加した。それぞれの 90 サイクルでの変化率を見ると、EP-SS が約 6%、ER-CS が約 12% 増加するという傾向を示した。これに対し、ACL-SS 及び ACL-CS はサイクル数を重ねるに連れ、付着強度が経時的に低下する傾向が見られ、90 サイクルにおける変化率は、ACL-SS が約 32%、ACL-CS が約 60% 低下した。一方で、SBR-SS 及び SBR-CS はサイクル数に関係なく強度にばらつきが生じたものの、いずれも 90 サイクルでは初期値から付着強度が約 3% 増加しており、低下傾向は確認されなかった。

Fig.6 より、常温環境の温度変化を与えたことによる付着強度については、EP-SS は 30 サイクルで強度が増加するものの、60 及び 90 サイクルでは強度が低下する傾向が見られた。ER-CS 及び ACL-CS は、サイクル数を重ねた場合、経時的に低下する傾向が見られ、90 サイクルにおける初期値からの低下率は、ER-CS が約 42%、ACL-CS が約 52% であった。ACL-SS は、30 及び 60 サイクルでは経時的に低下する傾向が見られたが、90 サイクルでは強度が増加し、初期値からの変化率では約 3% の低下であり、温度変化によって付着強度が低下したとは言い難い。SBR-SS 及び SBR-CS は、サイクル数を重ねるたびに、強度が経時的に増加する傾向が見られ、90 サイクルにおける変化率は、SBR-SS が約 19%、SBR-CS が 60% の増加を示した。だが、SBR-SS の 30 サイクル以降は付着強度がほとんど変化していないため、温度変化による明らかな強度変化が生じたとは言い難い。

Fig.7 より、高温環境の温度変化を与えたことによる付着強度は、EP-SS 及び SBR-SS は、30 サイクルで低下するものの 60 及び 90 サイクルで増加した。ER-CS 及び ACL-CS は、30 サイクルで強度が低下するものの、その後 90 サイクルまでは強度があまり変化せず、初期値からの変化率は ER-CS が約 25%、ACL-CS が約 57% の低下に至った。ACL-SS は、60 サイクルまで経時的に強度が低下し、90 サイクルでの付着強度の変化率は約 45% の低下が確認された。SBR-CS は、90 サイクルまで付着強度の過度な変化は見られず 90 サイクルでの初期値からの低下率は約 6% にとどまった。

以上の結果をまとめると、低温環境及び高温環境下における温度変化を与えた場合、エポキシ樹脂系接着剤を用いた供試体は、30 サイクルで著しく強度低下を示すものの 60 及び 90 サイクルで強度が回復する傾向を示した。

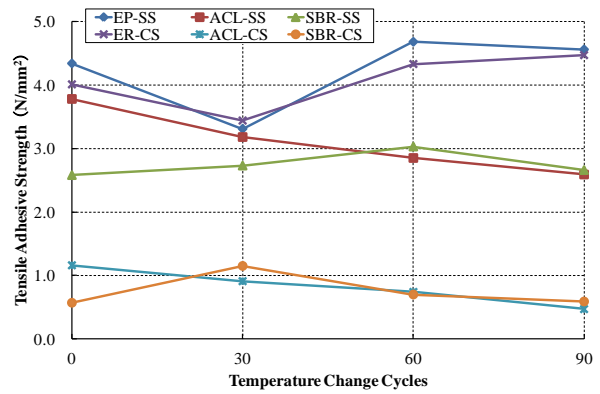


Fig.5 Effect of Low-Temperature Cycle (-20°C~20°C) on Adhesion Strength

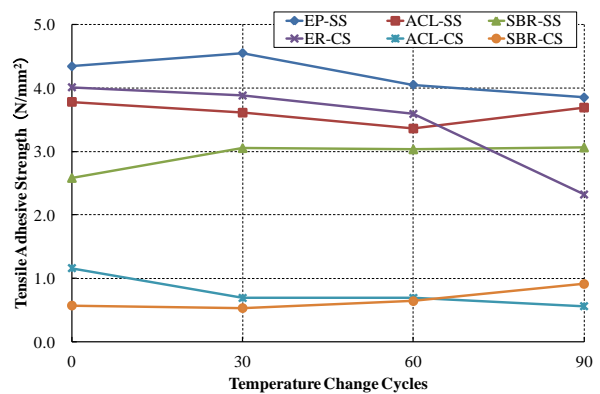


Fig.6 Effect of Normal-Temperature Cycle (0°C~40°C) on Adhesion Strength

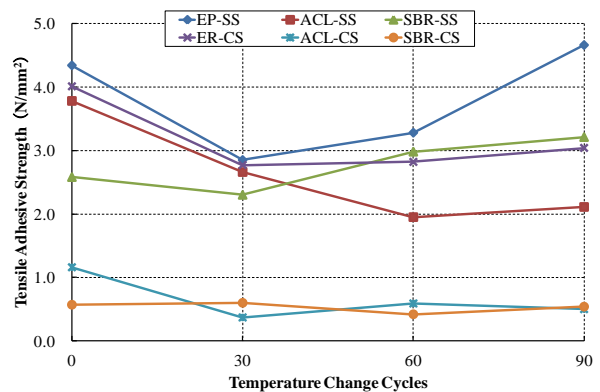


Fig.7 Effect of High-Temperature Cycle (20°C~60°C) on Adhesion Strength

ACL 系ポリマーセメント系接着剤を用いた供試体は、サイクル数を重ねるに連れ付着強度が低下する傾向が見られ、過酷な環境下における温度変化によって経時的に強度低下する可能性を示唆した。SBR 系ポリマーセメント接着剤を用いた供試体は、サイクル数を重ねる度に強度が若干変化するものの、大幅な変化は無く付着強度と低温・高温環境時の温度変化サイクル数の関係性があまりないと判断される。以上までに対し、常温変化の場合は、いずれの接着剤、CFRP を用いた供試体においても、低温変化及び高温変化時の結果と比較して、強度変化の程

Table 5 Typical Failure Modes of CFRP for Low-Temperature, Normal-Temperature and High-Temperature Cycle

Specimen Identification	Failure Mode [Interface(IF), Sheet(SF), and Concrete(CF)]									
	Initial Value	Low-Temperature Cycle			Normal-Temperature Cycle			High-Temperature Cycle		
		30 Cycle	60 Cycle	90 Cycle	30 Cycle	60 Cycle	90 Cycle	30 Cycle	60 Cycle	90 Cycle
EP-SS	IF	IF	IF	IF	IF	IF	IF	CF	CF	CF
ER-CS	CF	IF	IF	IF	IF	IF	IF	CF	IF	IF
ACL-SS	CF	CF	CF	CF	CF	CF	IF	CF	CF	CF
ACL-CS	SF	SF	SF	SF	SF	IF	IF	SF	SF	SF
SBR-SS	CF	CF	CF	CF	CF	IF	IF	CF	CF	CF
SBR-CS	SF	SF	SF	SF	SF	SF	SF	SF	SF	SF

度は小さいため、付着強度と常温変化サイクル数の関係性は少なかったと判断される。

3.2 破壊形態

Table 5 に直接引張付着試験後の供試体の破壊形態を示す。破壊形態の分類⁷⁾は、界面破壊 (IF)、シート破壊 (SF)、コンクリート破壊 (CF) の 3 つに分類されている。界面破壊とは **Fig.4** に示すように、接着剤と CFRP の接着界面における剥離である。シート破壊は、シートの一部が接着面に残る状態で破壊した形態である。コンクリート破壊は、鋼製治具にコンクリートが付着し、コンクリートと CFRP 間の付着は健全に保たれた状態で生じる破壊形態である。なお、**Table 5** の破壊形態は、各供試体の直接引張付着強度試験で使用した 3 カ所で 2 つ以上の同等な形態を示したものである。

CF Strand Sheet を貼付けた各供試体の破壊形態観察結果において、ポリマーセメント系接着剤を用いた供試体は、環境温度の高低 (低温、常温及び高温)、温度変化のサイクル数及び使用した接着剤の違いに関わらず、ほとんどの供試体で同様の破壊形態 CF に至った。これに対し、エポキシ樹脂系接着剤を用いた EP-SS は、高温変化では各サイクル時で CF であったものの、低温変化及び常温変化の各サイクルでは界面破壊 (IF) するものがほとんどであった。ER-CS に関しては、各温度変化及び各サイクルでほとんどが界面破壊 (IF) となった。

CF Sheet を貼付けた各供試体の破壊形態観察結果において、ポリマーセメント系接着剤を用いた ACL-CS 及び SBR-CS は環境温度の高低、各温度変化のサイクル数に関わらずほとんどの供試体で CF Sheet の一部が接着面に残るシート破壊 (SF) に至った。

以上のことから、すべての供試体において、いずれの環境温度下における温度変化サイクル数の進行においても破壊形態の変化はあまり見られなかった。前節で記した温度変化サイクルの進行による付着強度の変化との関係性を明確化するには、実験個体数をさらに増加し検討を加える必要がある。

4. 温度変化時のひずみ

3 章 3.2 節で示したように、各温度変化による供試体は

ACL 系ポリマーセメント接着剤では強度が低下し、SBR 系ポリマーセメント接着剤ではあまり変化が無い状態であったが、この結果のみでは接着剤の強度低下に起因したものであると考えることは難しい。本章では、この原因を解明する目的として、CFRP、各接着剤及びコンクリートの線膨張係数の違いに着目し、ひずみゲージによる CFRP とコンクリートの界面上における温度変化によるひずみ度の変化を測定した。

以下では、各接着剤の違いに関わらず、温度変化による CFRP 付着強度劣化が最も顕著であった低温変化時 (-20~20℃) の供試体ひずみ挙動について述べる。**Fig.8** に CF Strand Sheet, **Fig.9** に CF Sheet の低温変化の 2 サイクル分の CFRP (Top, 以下 T とする) とコンクリート (Bottom, 以下 B とする) のひずみ度曲線を示す。ひずみ度は、温度の下降、上昇を追尾するような増減を繰返している。EP-SS 及び ER-CS においては、-20℃時に CFRP とコンクリートのひずみの差が EP-SS で約 100 (μ), ER-CS で約 50(μ) 以上生じたが、上昇後の 20℃では EP-SS, ER-CS とともにその差は小さなものとなった。それに対し、ACL-SS においては、20℃時での CFRP とコンクリートのひずみ度の差が大きくなり、その差は約 100 (μ) であった。このことから、このひずみ度の上下の繰返しが低温変化のサイクル数の増加とともに CFRP と接着剤界面の接着性状を劣化させ、結果として、低温変化時における付着強度の低下に表れたと推察される。ACL-CS, SBR-SS 及び SBR-CS のひずみ挙動では 20℃時で測定面の違いによる変化が少なかったものの、-20℃時で ACL-CS で約 50 (μ), SBR-SS で約 100 (μ), SBR-CS で約 150 (μ) の差がそれぞれ確認された。以上のことから接着剤 (CFRP 貼付面) とコンクリートの線膨張係数の違いによって、CFRP 付着強度が劣化する傾向を示唆したが、これらの関係性を統一的に評価するためには、同様の試験におけるサイクル数の増加及び試験個体数を増加して継続的に検討する必要がある。

5. まとめ

本研究では、CFRP を接着させたコンクリートに温度変化を一定期間与え、付着強度を評価した。

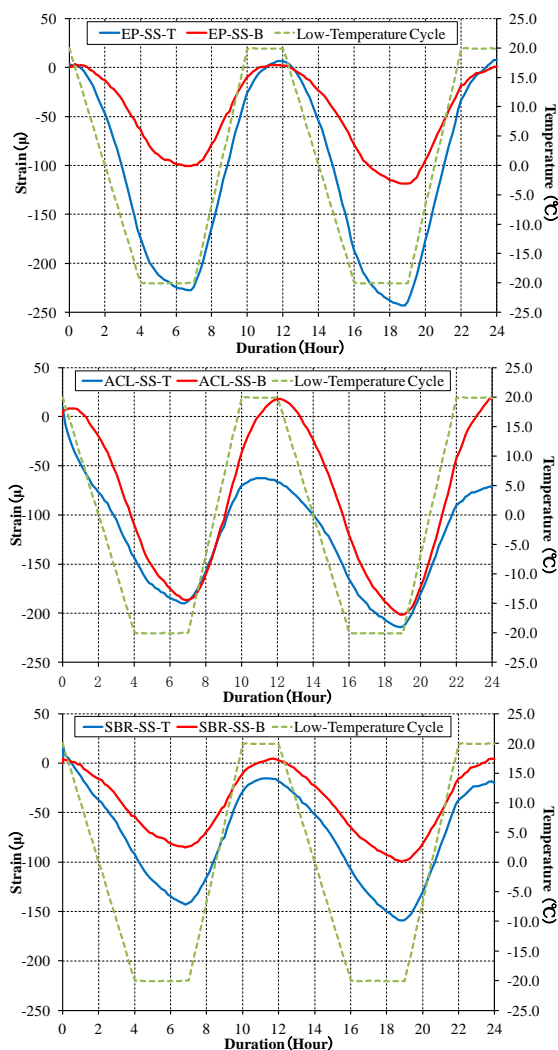


Fig.8 Temperature and Strain of SS-Bonded Concrete

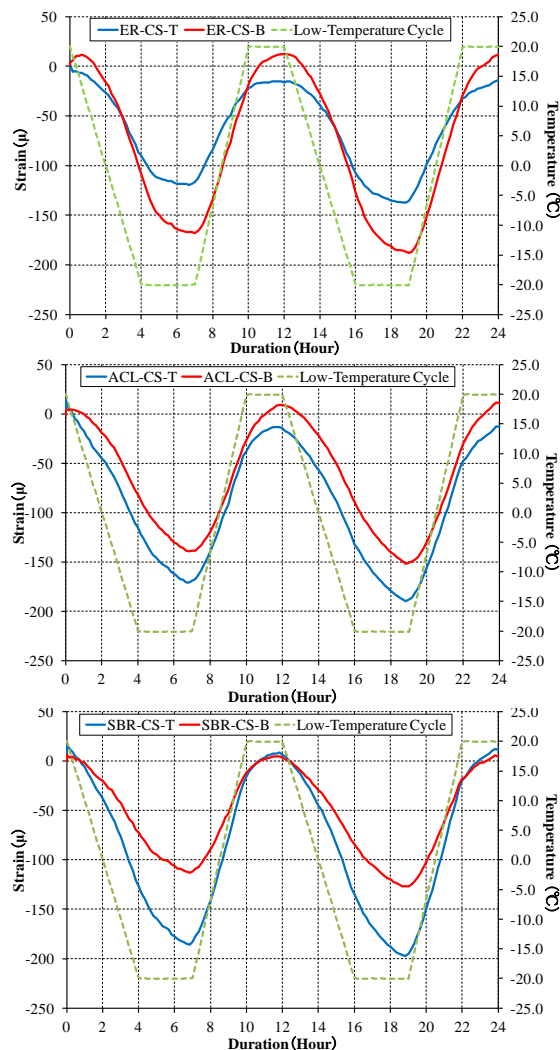


Fig.9 Temperature and Strain of CS-Bonded Concrete

得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 低温・高温環境下の温度変化による付着強度は、ACL系ポリマーセメント接着剤では強度が低下し、SBR系ポリマーセメント接着剤では変化がなかった。
- (2) 常温環境下の変化による付着強度は、変化率が小さく、温度変化サイクル数との関係性は少なかった。
- (3) 破壊形態は、温度変化サイクルが進行してもほとんどの供試体で変化せず、付着強度の変化との明確な関連性を示すまでには至っていない。
- (4) 温度変化を与えた際のひずみ挙動測定値と CFRP 付着強度変化の関係を比較した結果、CFRP とコンクリートの線膨張係数の違いによって接着剤とコンクリート間の接着界面が損傷し、その繰返しによって付着強度が低下することを示唆した。

参考文献

- 1) 建設省建築研究所:「平成7年兵庫県南部地震被害調査報告(速報)」, 1995.2
- 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, pp.474-480, 2005.5
- 3) 子田康弘, 加藤 穰, 上原子晶久, 岩城一郎: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.1435-1440, 2011
- 4) 岸 哲也, 鈴木裕介, Sanjay PAREEK: ポリマーセメント系接着剤を用いた CF Strand Sheet 補強 RC 梁の耐震設計法に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.985-990, 2009
- 5) Yoshihiko Ohama: Handbook of Polymer-Modified Concrete and Mortars, Noyes Publications, 1995
- 6) M.J.Setzer and R.Auberg: Capillary Suction-Internal damage and Freeze thaw Test, Betonwerk+Fertigteil Technik, BFT 4, pp.94-105, 1998
- 7) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書 規準編, 2007