Japan Concrete Institute

論文　炭素繊維接着補強工法の環境変化による付着特性評価

韓　千求[*1]・朴　龍圭[*2]・金　貞辰[*3]・韓　敏喆[*4]

要旨：本研究では炭素繊維接着補強工法の剥離と関連した付着特性について検討した。その結果を要約すると温度変化による変形特性では下地コンクリートと関係なく温度変化によって各材料の変形幅が大きくなることを確認した。超音波伝播速度も温度変化とともに小さくなり，界面で剥離が生じることを確認した。付着強度は温度変化が大きいほど付着強度は小さくなったが破壊形態は界面破壊と母材破壊形態として現れた。乾湿変化によっては 4 サイクルまで各材料の変形および 超音波伝播速度で大きな変化がなかったことで 乾湿繰返しによっては大きな影響がないことを確認した。

キーワード：炭素繊維，接着補強工法，温度変化，乾湿繰返し，凍結融解

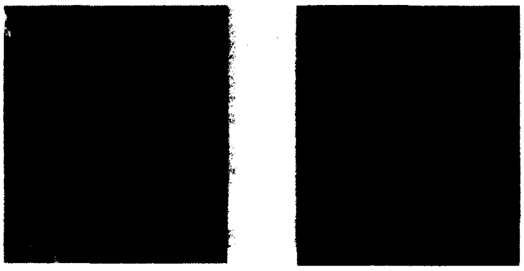
1. はじめに

耐力が不足な鉄筋コンクリート（以下 RC）構造物の補修・補強工法には補強工法として断面増設工法，置換工法，接着工法があり，接着工法には鋼板接着工法と炭素繊維接着工法，RC 巻立て工法およびプレストレス導入工法などがある。また，補修工法としてはひび割れ補修工法である充てん工法，注入工法，表面塗布工法と電気・化学的補修工法である電着工法，再アルカリ化工法，脱塩工法などがある。

そして，この中，炭素繊維接着補強工法はコンクリート構造物の表面に接着剤を用い接着させることだけで十分な補強効果が得られる点と鉄より 1/5 程度の軽量である点および施工時空間に制限がないことなどで現在使用量が大きく増加している。

しかし，炭素繊維の接着補強工法が導入された 1990 年代の韓国の状況は補修・補強技術に関する指針も確立されておらず，補修・補強材料の選定の際にも理論的な知識もなくて，外国の技術を模倣またはそのまま取り入れて，技術者の経験だけに頼っていた。その結果，炭素繊維を用いて補強した構造体に**写真−1** のように炭素繊維が剥離される事例が発見されたが，その原因は自然環境による材料の物性差によることと分析されている。

従って炭素繊維の接着補強工法の剥離原因究明のため材料間線膨張係数など物性分析を通して剥離可能性を提案した先行研究に引続いて，本研究では実構造体を想定した模擬試験体を製作し，温・湿度変化及び凍結融解など自然変化による剥離など付着特性を評価し剥離の原因を究明して，エポキシ樹脂による炭素繊維の接着補強工法の付着特性を評価しようとする。



炭素繊維の剥離（定規が入っている姿）　炭素繊維の剥離（やさしく分離される炭素繊維）

写真−1 炭素繊維の剥離写真 [1)]

2. 実験計画および方法

2.1 実験計画

本研究の実験計画は**表−1** である。

まず，実験要因は水結合材比（以下 W/B）25%の高強度コンクリートと水セメント比（以下 W/C）60%の一般強度コンクリート 2 水準の下地コンクリートを**写真−2** および**図−1**（大きさ 15×15×55cm）のように作製し，補強材として炭素繊維シートにエポキシ樹脂を用いて付着することにした。接着剤であるエポキシ樹脂は炭素繊維用を使用した。試験体は各実験要因別 1 個ずつ製作し，合計 10 個を製作した。

実験事項としては下地コンクリートに炭素繊維シートを付着した状態で高温・低温の繰返し試験，乾燥・湿潤の繰返し試験，凍結融解の繰返し試験を実施して，付着特性を把握するためにはワイヤストレインゲージを用いて実験中の各材料の変形を把握した。また，試験前後では超音波伝播速度および付着強度を測定して剥離

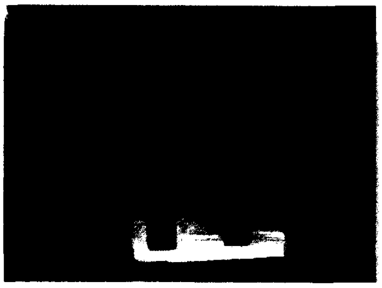
*1 清州大学校，理工大学建築工学部教授　工博　(正会員)
*2 亜洲産業(株)技術研究所 主任研究員　工修　(正会員)
*3 清州大学校，産業科学研究所研究員　工博　(正会員)
*4 清州大学校，理工大学建築工学部専任講師　工博　(正会員)

NII-Electronic Library Service

表－1 実験計画

	コンクリートの条件	付着特性				試験事項
		試験体	温度繰返し	乾湿繰返し	凍結融解	
内容	.高強度（W/B=25%） (Flow:600mm, Air:3%) .普通強度(W/C=60%) (Flow:150mm, Air:4.5%)	C0+EP+Cf* （図－1 参照）	20±0℃(4 サイクル) 20±20℃(4 サイクル) 20±40℃(4 サイクル)	4 サイクル	4 サイクル	-変形特性 -超音波伝播速度 -付着強度

- 記号中　C0:コンクリート, EP:エポキシ樹脂, Cf：炭素繊維
- 試験体数：W/B 25%：温度繰返し 3 個, 乾湿繰返し 1 個, 凍結融解 1 個
  W/C 60%：温度繰返し 3 個, 乾湿繰返し 1 個, 凍結融解 1 個

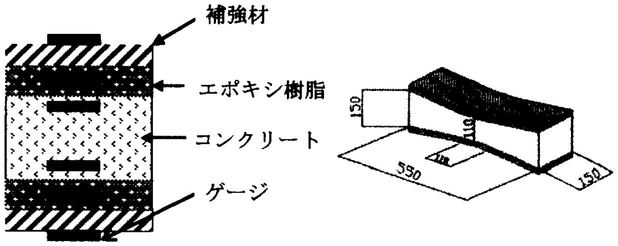


写真－2 試験体製作写真

表－2 コンクリート調合

W/B (%)	W (kg/m³)	S/a (%)	SP/C (%)	AE/C (%)	単位量(kg/m³)				
					C	FA	SF	S	G
25	165	43	2.5	0.003	462	132	66	528	733
60	170	46	1	0.003	283	-	-	799	983

SP：高性能減水剤, FA：Fly Ash, SF：Silica Fume



図－1 試験体形状及び寸法およびゲージの位置

表－3 炭素繊維の物理的性質

繊維	質量 (g/m²)	密度 (g/m³)	引張強度 (N/cm 幅)	引張弾性率 (N/cm 幅)	破断伸度 (%)
高強度炭素繊維	300	1.80	59	3,880	1.5

表－4 エポキシ樹脂の物理的性質

試験記号		含侵用	接着用
引張強度(MPa)		66	53
圧縮強度(MPa)		75	74
せん断強度(MPa)		13.8	14.1
密度(g/m³)	主剤	1.15	1.14
	硬化剤	1.03	1.03
	混合	1.12	1.11
粘度(cps)	主剤	2,700	33,000
	硬化剤	235	352
	混合	860	6,100

特性を把握することにした。本実験は下地コンクリートに炭素繊維シートを付着した後，室内実験室で6ヶ月間養生を行った後，実施した。

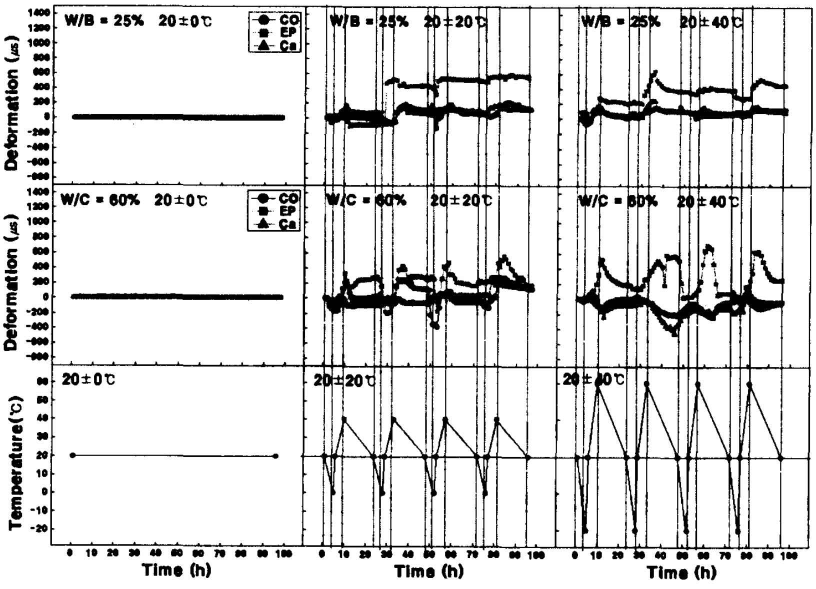
2.2 使用材料

実験体の製作に用いた下地コンクリートは普通ポルトランドセメント，川砂および 25mm の砂利を用いた。下地コンクリートの強度は材齢28日でW/B25%は圧縮強度が62MPa，引張強度が16MPaであり，W/C60%では圧縮強度が24.5MPa，引張強度が8.9 MPaであった。ここでコンクリートの調合は表－2 である。実験に用いた補強材である炭素繊維シートは1方向に構成されており，接着材である含浸用（プライマー）エポキシ樹脂と接着用（積層用）エポキシ樹脂は炭素繊維用として指定された2液型レジンを使用した。各材料の物理的特性は表－3および表－4に示す。

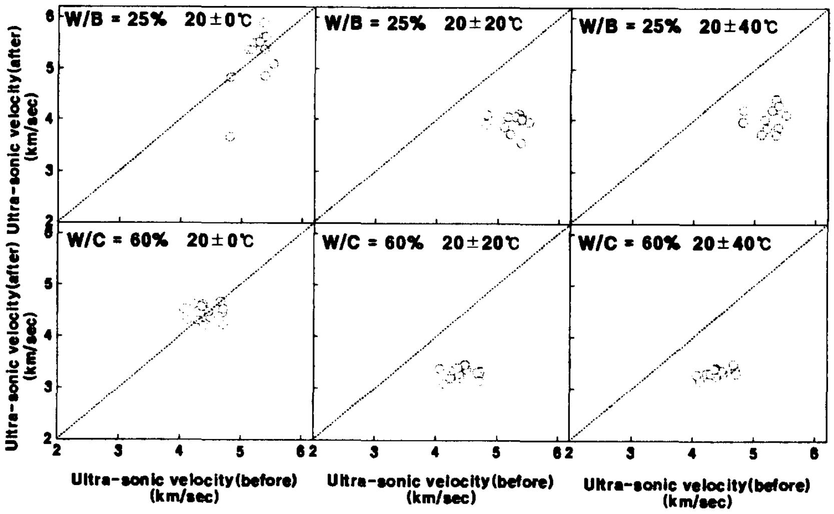
2.3 実験方法

実験方法として，フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの実験は韓国産業規格（KS）に従い行った。

付着特性実験として高温・低温の繰返し試験は 20℃を基準に±20℃また 40℃の変化を韓国産業規格（KS）に従い実施し，乾燥・湿潤の繰返し試験，凍結融解試験も韓国産業規格（KS）に従い実施した。実験中の変形測定はコンクリート，エポキシ樹脂，炭素繊維の各表面にワイヤーを貼りつけて測定し，超音波の伝播速度は KS によって直接法で総 13 点で測定した。付着強度は KS の規定により直接引張の方法で実施した。



図－2 高温･低温繰り返し試験による材料の変形特性



図－3 高温･低温繰り返し試験による超音波電波速度比較

3. 実験結果および分析

3.1 温度変化の要因

(1) 変形特性

図－2 は温度変化の要因として高温･低温の繰返しによる下地コンクリートの W/B ごとの変形特性を示す。

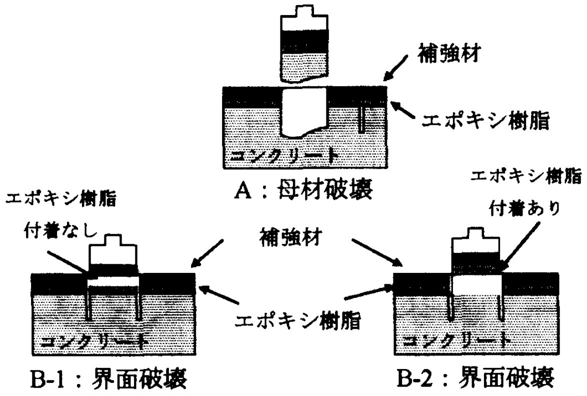
20±0℃の場合 W/B とは関係なく，変形がほとんど生じていないことが確認された。しかし，20±20℃および 20±40℃では W/B=25%の場合，下地コンクリート，エポキシ樹脂および炭素繊維は温度変化により 1 サイクルまではほぼ同様な様相を示す変形を現したが，接着剤であるエポキシ樹脂の場合は 1 サイクルの温度変化後，約 500 $\mu\varepsilon$ 以上の急激な変形率の増加を示し，W/C=60%の場合では 1 サイクルの温度変化が進行中の時からエポキシ樹脂の部分でコンクリートと炭素繊維より大きい変形を示した。即ち，このような結果は 20℃に±20℃以上変化される温度条件であれば 1×10^{-5}/℃前後の線膨張係数をもつコンクリートより 4～5×10^{-5}/℃の 4～5 倍大きい線膨張係数をもつエポキシ樹脂の膨張・収縮によるせん断応力によって 1 サイクルの以後からコンクリートの表面からエポキシ樹脂が剥離されることを明らかにするグラフである。また，W/B の変化による剥離現像は W/C=60%が W/B=25%ほうより早く起き，各材料間での変形差も現れたが，これは下地コンクリート強度の影響による付着強度差によるものと考えられる。

(2) 超音波伝播速度の特性

図－3 は高温・低温の繰返し試験による繰返し試験前後の超音波伝播速度を比較したものである。

W/B=25%と W/C=60%の両方 20±0℃では中央線の上下に広がり超音波伝播速度の変化がわずかであったが，20±20℃および 20±40℃の場合は測定したデータの全体が 45° 線の下部分に位置して高温・低温の繰返し試験後，超音波伝播速度が遅くなることが確認された。これは温度変化によって超音波の伝播経路である媒質の一部に変化が生じ，超音波の伝播時影響を与えたと考えられる。また，図－2 の変形特性との関係を見るとコンクリートと接着剤であるエポキシ樹脂間の界面部分で剥離が生じ，影響を与えるのが認められる。

NII-Electronic Library Service



図－4 試験体の破壊形状

表－5 温度変化による付着特性

種類	高強度 (W/B=25%)		普通強度 (W/C=60%)	
	付着強度 (MPa)	破壊形態	付着強度 (MPa)	破壊形態
20±0℃	5.40	A	2.89	A
20±20℃	2.34	B-2	1.75	A
20±40℃	2.52	B-2	0.96	A

(破壊形態は図－4 の説明参照)

(3) 付着強度の特性

表－5 は 高温・低温の繰返し試験による付着強度および破壊形態を示したものであり，**図－4** は試験体の破壊性状モードを示したものである。

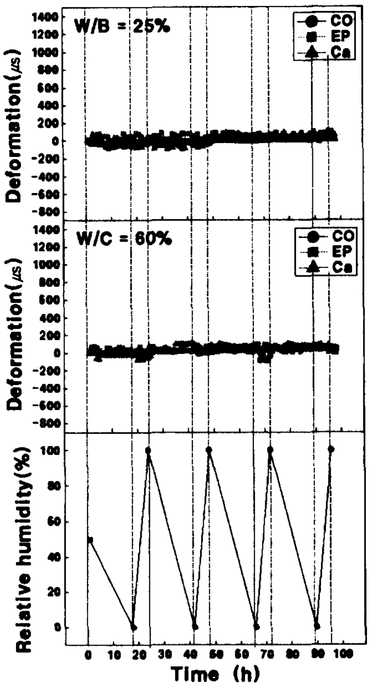
各条件によっては温度変化がない 20℃一定の場合，W/B=25%では 5.4MPa, W/C=60%では 2.89MPa の付着強度を表し，温度変化の幅が増加するほど付着強度は小さくなることが認められた。

破壊性状の場合，20±0℃では全体で下地コンクリートの破壊が発生したが，W/B=25%では温度変化によって全試験体で接着剤と下地コンクリート間の界面破壊形態として 現れた半面，W/C=60%では全コンクリートの下地が破壊される形態として現れた。即ち，W/B=25%の場合はエポキシ樹脂とコンクリートの接着界面が温度変化により付着性を喪失して剥離されると考えられ，W/C=60%の場合はエポキシ樹脂の強い接着性によって接着面での下地破壊の形態として現れたと考えられる。

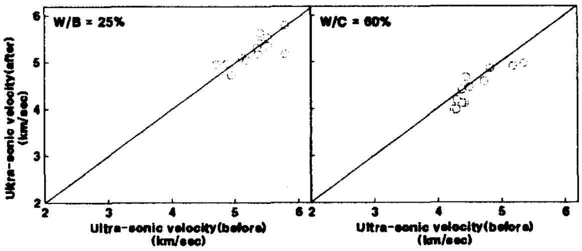
3.2 単乾湿変化の要因

(1) 変形特性

図－5 は乾湿変化の要因として，乾燥・湿潤繰返し試験による下地の変化（W/B）別各材料の変形特性を示したものである。4 サイクルまで乾燥・湿潤を繰返しした結果，各材料の変形率の差は大きいではなく，また，下地コンクリートの強度差による変形率の差も殆ど表れなかった。



図－5 乾湿繰り返しによる材料の変化特性



図－6 乾湿繰り返し前後間超音波電波速度

(2) 超音波の伝播速度

図－6 は乾燥・湿潤繰返し試験による 超音波の伝播速度を比較したものである。乾燥・湿潤繰返し試験の結果は温度変化がない 20±0℃と類した傾向として，測定前後に大きな差はなく一定に現れた。また，下地コンクリートの差によっては W/C=60%で 超音波の伝播速度が若干遅い傾向を現れたが，大きな差ではないことが認められた。

(3) 付着強度の特性

表－5 は 乾燥・湿潤繰返し試験による 付着強度および破壊形態を示したものである。W/B=25%の場合，乾燥・湿潤繰返しにより 40%程度の付着強度の低下が発生したが，これは，乾燥・湿潤繰返しによる強度低下から起因したものではなく，測定時剥離面にエポキシ樹脂が部分的に付着されていたことから考えると接着不良か

NII-Electronic Library Service

ら起因したものと判断される。従って，良子な施工時は高い付着強度を維持できると考えられる。破壊形態はW/B=25%は界面破壊（B-2），W/C=60%は下地破壊の形態として現れた。

3.3 凍結融解の要因

(1) 変形特性

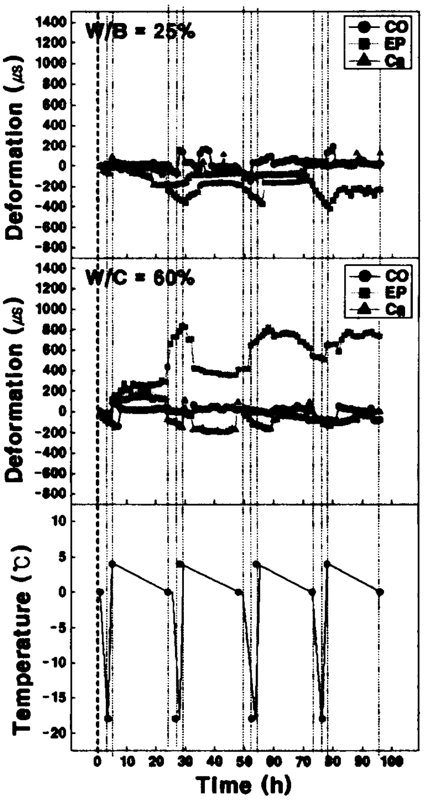
図－7 は凍結融解試験による下地の変化（W/B）別各材料の変形特性を示したものである。

W/B=25%の下地コンクリートの場合，4 サイクルまでは大きな変化はなかったが，2 サイクルからコンクリートとエポキシ樹脂は変形の差を示しており，炭素繊維とエポキシ樹脂は 3 サイクルまでエポキシの強い接着力によって良好な適合性を維持しながら同様な挙動を現したが，4 サイクルからはエポキシ樹脂と炭素繊維がお互いに異なる挙動をすることが現れた。これは，エポキシ樹脂と炭素繊維の界面でお互いに分離され炭素繊維が温度変化に敏感に変形しない炭素繊維そのままの特性を示したものとして分析される。

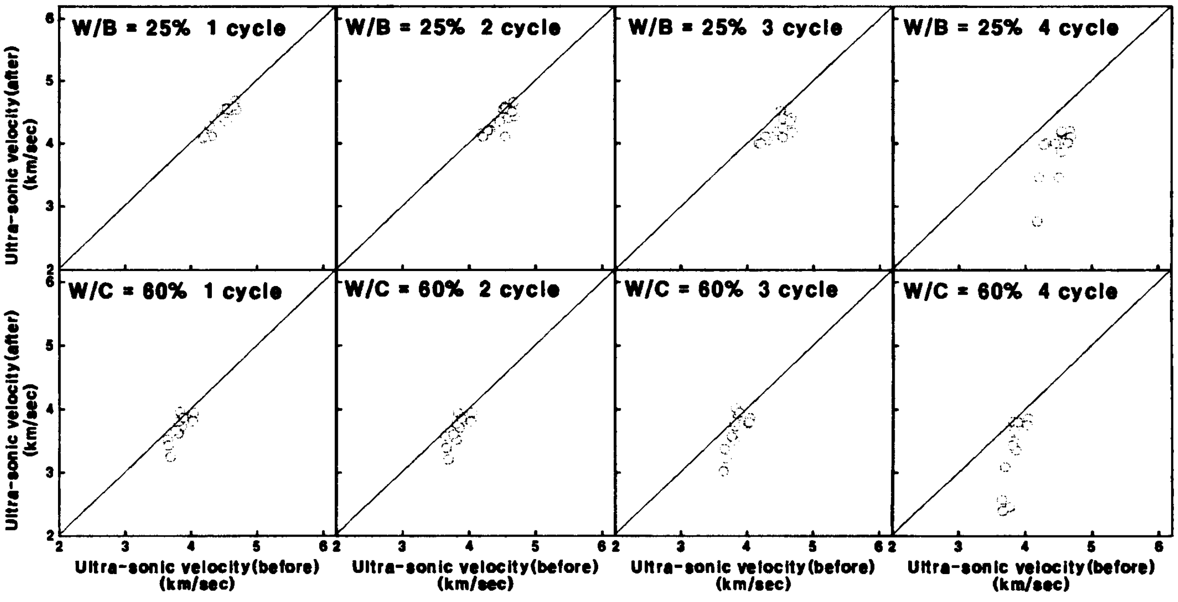
W/C=60%の下地コンクリートの場合 1 サイクルまではエポキシ樹脂が炭素繊維を良好な接着性能で補強し，共に同様な変形を示したが，2 サイクルからエポキシ樹脂が大きな膨張を示し，全く異なる挙動をすることがわかった。このようなエポキシ樹脂の膨張はエポキシ樹脂のひび割れ面に水が浸透して凍結による膨張が起きたと考えられる。また，エポキシ樹脂の大きな変形により，下地とエポキシ樹脂，エポキシ樹脂と炭素繊維の界面では全て剥離現象が発生したと考えられる。

表－6 乾湿繰り返しによる付着特性

種類	高強度 (W/B= 25%)		普通強度 (W/C= 60%)	
	付着強度 (MPa)	破壊形態	付着強度 (MPa)	破壊形態
20±0℃	5.40	A	2.89	A
乾湿繰返し後	3.45	B-2	2.75	A



図－7 凍結融解による材料の変化特性



図－8 凍結融解による超音波電波速度比較

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

(2) 超音波の伝播速度

図－8 は凍結融解試験による超音波の伝播速度を比較したものである。

凍結融解試験結果は下地の強度とは関係なくサイクルが進行されるほど超音波の伝播速度が遅くなるが，特に，2 サイクルまでは全て中央線の上下に広がり超音波伝播速度の変化がわずかであったが，3 サイクルから超音波の伝播速度が遅くなることが確認された。これは高温・低温繰返し試験と同様にコンクリートとエポキシ樹脂との変形率差によって界面部分から剥離が発生され現れた現象と考えられる。

表－7 凍結融解による付着特性

種類	高強度 (W/B=25%)		普通強度 (W/C=60%)	
	付着強度 (MPa)	破壊形態	付着強度 (MPa)	破壊形態
20±0℃	5.40	A	2.89	A
凍結融解	接着確認中剥離		接着確認中剥離	

(破壊形態は図－4 の説明参照)

(3) 付着強度

表－7 は凍結融解試験による付着強度および破壊形態を示したものである。

各補強材の条件によっては全て試験体の接着後，確認過程で剥離され付着強度の測定が不可能であった。また，破壊様子は W/B=25%と W/C=60%共に界面破壊形態を現した。

4. まとめ

本研究は温・湿潤変化および凍結融解など自然環境変化による剥離など付着特性を評価して剥離の原因を究明するためのもので，実験結果を要約すると次の通りである。

(1) 20℃±20℃，20℃±40℃のような温度変化要因によっては 4～5 倍大きい線膨張係数をもつエポキシ樹脂の伸縮率差によって 1 サイクル以後からコンクリート表面からエポキシ樹脂が剥離される傾向を現した。それによって超音波の伝播速度および付着強度値が小さくなり，試験体の破壊形態は W/B=25%の場合，下地コンクリートの破壊から界面破壊形態に変化し，W/C=60%の場合は下地コンクリート破壊の形態を現した。

(2) 相対湿度 0～100%までの乾湿変化の要因は変形特性および超音波の伝播速度で 4 サイクルまで大きな差を現してなかったため乾湿自体の繰返しは大きな影響を与えなかったと考えられる。

(3) 寒中環境の条件を想定した凍結融解試験の結果は材料の間で初期から変形の差を見せているので，凍結融解作用を受けやすい地域では温度の影響と同じく炭素繊維で補強した後，数ヵ月後に剥離が発生する可能性があると考えられる。

参考文献

1) 岳尾弘洋，松下博通，矢原輝政，佐川康貴：CFRP 接着工法における炭素繊維シート付着耐力向上実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.431-436，1998

2) 相良健一，魚本健人：炭素繊維シートで補修補強された RC 構造物の欠陥の検知について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.1203-1208，1996

3) Philio A. Ritchie, David A. Thomas, Le-Wu Lu, Guy M. Connelly : External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics, ACI, July-Aug, 1991

4) Alfarabi Sharif, G. J. Al-Sulaimani, I. A. Basunbul, M. H. Baluch, B.N. Ghaleb : Strengthened of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Paltes, ACI, Mar-Apr, 1994

5) Norris, T., Saadatmanesh, H. and Ehasani, M, R. : Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets, Journal of Structural Engineering, ASCE, pp.903-911, 1997. 7

6) 國森亮平：若材齢コンクリートの熱膨張係数に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，pp.1033～1038，2000. 2

7) 伊奈倫之，桝田佳寛，鹿毛忠，中村成春：炭素繊維シート開口部補強の特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.1，pp.277-282，2000

8) 川上英男：コンクリートの弾性係数に及ぼす骨材と界層の影響，コンクリート工学年次論文集，pp.529-534，2000. 2

9) 本田陵二，長友克寛，角徹三，松原三郎：繰返し荷重下における炭素繊維シートの局部付着特性に関する実験的研究，コンリート工学年次論文集 Vol. 25, No 2, pp.87 1~876，2003

10) 韓国建設交通部：建築構造物の補修・補強工法の性能評価に関する研究（炭素繊維シート補強工法を中心として），2001

11) 韓国産業規格：コンクリート構造物の補修用エポキシ樹脂，KS F 4923，2001

NII-Electronic Library Service