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 炭素繊維の剥離 (定規が入っている姿) (やさしく分離される炭素繊維)

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

写真-1 炭素繊維の剥離写真¹⁾

表-1 実験計画

	コンクリートの冬代		封殿東西			
	コンクリートの未住	試験体	温度繰返し	乾湿繰返し	凍結融解	时候 书·负
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



図-1 試験体形状及び寸法およびゲージの位置

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。 表-2 コンクリート調合

W/B	W	S/a	SP/C	AE/C	単位量(kg/m³))	
(%)	(kg/m ³)	(%)	(%)	(%)	С	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

表-3 炭素繊維の物理的性質

繊維	質量 (g/㎡)	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	
せん断強厚	麦(MPa)	13.8	14.1	
	主剤	1.15	1.14	
密度(g/m³)	硬化剤	1.03	1.03	
	混合	1.12	1.11	
	主剤	2,700	33,000	
粘度(cps)	硬化剤	235	352	
	混合	860	6,100	

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。

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 με 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



図-3 高温・低温繰り返し試験による超音波電波速度比較

Ultra-sonic velocity(before)

(km/sec)

ୢଝିବୃ

W/C = 60% 20±20℃

のと考えられる。

62

W/C = 60%

3

5

sonic v

Ultra-

20±0℃

,<u>&</u>§

Ultra-sonic velocity(before)

(km/sec)

(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。

6 2

W/C = 60% 20±40℃

୧୯୫୬୫

Ultra-sonic velocity(before) (km/sec)

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。



図-4 試験体の破壊形状

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

表-5 温度変化による付着特性

(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





図-6 乾湿繰り返し前後間超音波電波速度

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。

(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 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

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



図-7 凍結融解による材料の変化特性





(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。

	高強度		普通強度		
禾粨	(W/B=25%)		(W/C=60%)		
11279	付着強度	破壊形態	付着強度	破壞形態	
	(MPa)	PARATIVIEN	(MPa)		
20±0°C	5.40	A	2.89	А	
凍結融解	接着確認中剥離		接着確認中剥離		

表-7凍結融解による付着特性

(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
- 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
- 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
- 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
- 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脹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
- 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
- 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
- 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, KSF 4923, 2001