한국복합신소재구조학회 논문집 제7권, 제1호, 2016년 3월
J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc. Vol. 7, No. 1, pp. 25-31, March 2016
DOI http://dx.doi.org/10.11004/kosacs.2016.7.1.025

ISSN 2093-5145(Print)
ISSN 2288-0232(Online)

탄소섬유 FRP판과 현장타설 고인성섬유보강콘크리트 사이의 단순 부착슬립 관계

유준상[1] · 유승운[2]

가톨릭관동대학교 토목공학과 석사과정[1], 가톨릭관동대학교 토목공학과 교수[2]

Simple Bond Stress and Slip Relationship between CFRP Plank and Cast-in-Place DFRCC

Yoo, Jun-Sang[1] · Yoo, Seung-Woon[2]

[1]Graduate Student, Department of Civil Engineering, Catholic Kwandong University, Gangneung, Korea
[2]Professor, Department of Civil Engineering, Catholic Kwandong University, Gangneung, Korea

Abstract: Bond stress between cast-in-place ductile fiber reinforced cementitious composites and CFRP plank were experimentally analyzed. As failure shape, the mixture of failure between CFRP plank and epoxy, and failure between concrete and epoxy was shown. In case of RFCON from the suggested simple bond slip relationship, the maximum average bond stress was 5.39MPa, the initial slope was 104.09MPa/mm, and the total slip length was 0.19mm. PPCON showed the maximum average bond stress of 4.31MPa, the initial slope of 126.67MPa/mm, and the total slip length of 0.26mm, while RFCON+ appeared to have 8.71MPa, 137.69MPa/mm, 0.16mm. PPCON+ had 6.19MPa maximum average bond stress, 121.56MPa/mm initial slope, and 0.34mm total slip length. To comprehend the behavior of composite structure of FRP and concrete, local bond slip relation is necessary, and thus a simple relation is suggested to be easily applied on hybrid composite system

Key words: ductile fiber reinforced cementitious composites, CFRP, bond stress, slip

1. 서 론

일반콘크리트가 갖는 여러 문제점, 즉 인성 및 연성 부족 등의 문제점을 보완하고자 고인성섬유보강콘크리트(ductile fiber reinforced cementitious composites: DFRCC)의 활용에 대한 연구가 최근에 활발히 진행되고 있으며, 고기능 보수 및 보강재 등 다양한 용도에 사용되고 있다(Yun, et al., 2004). 여러 가지 형상비를 가진 PVA 섬유를 이용하여 DFRCC에 대한 여러 기능을 실험하였다. 섬유를 적절량 사용하는 경우 휨인성 및 연성 강화 효과가 있는 것으로 나타났으며, 섬유길이가 상이한 종류를 혼합하여 사용함으로 그 효과를 배가시킬 수 있다는 실험결과를 발표하였다. 1.6%의 짧은 섬유와 0.4%의 긴 섬유가 혼합된 실험에서 가장 높은 휨성능 및 연성을 나타내었고, 특히 충격하중의 경우 일반 콘크리트에 비해 그 성능이 우수하다고 보고했다. 단섬유와 장섬유의 효과적인 역할분담으로 인하여 파괴까지 에너지 흡수 능력이 가장 좋았다(Kim et al., 2009).

최근 철근 콘크리트 구조의 여러 문제점을 극복하고자 재료적인 측면과 구조적인 측면을 모두 고려한 합성시스템을 개발하려는 노력이 시도되고 있다. 이중 고내구성 및 고내식성의 장점을 갖는 섬유강화폴리머(fiber reinforced polymer: FRP)를 건설재료로 인식하여 사용하고자 하는 것은 비교적 최근 일이다(Bank, 2006). 미국에서는 사각 중공 FRP 단면을 영구거푸집과 인장재로 활용하고 FRP 격자로 보강한 합성구조를 연구하였으며, 허니콤(honeycomb) 샌드위치 구조의 FRP 합성구조체 모델 개발과 재료 물성치를 산정하는 연구를 수행하였고, FRP 보강 철근콘크리트 합

주요어: 고인성섬유보강콘크리트, CFRP, 부착응력, 슬립

Corresponding author: Yoo, Seung-Woon
Department of Civil Engineering, Catholic Kwandong University, Gangneung, Gangwon 210-701, Korea
Tel: +82-33-649-7513 , Fax: +82-33-642-3359 , E-mail: swyoo@cku.ac.kr

Received February 16, 2016 / Revised March 10, 2016 / Accepted March 11, 2016

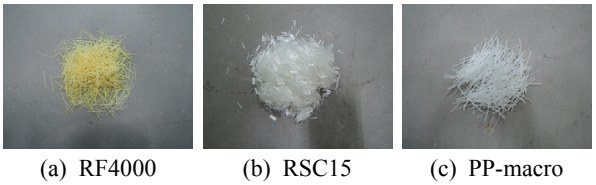
성구조체를 평가하였다(Bank, et al., 2010; Cheng, et al., 2005; Kitane, et al., 2004). 또한 FRP 바닥판 시공 시 합리적이며 경제적인 강재 거더와의 연결방법을 검토하기 위해 연결지점 조건에 대한 하중재하 실험 및 해석을 수행하였으며, 사각형 모듈을 기본으로 평판이론을 도입하여 FRP 바닥판 해석을 위한 유한요소 모델을 개발하였다. FRP는 기존 콘크리트 구조물의 보수보강용으로 많이 사용되었고 이에따른 부착성능평가가 이루어지고 있다(Utui and Kim, 2011). 또한, 최근 이들의 장점 살려 신설 구조물에 이를 합성한 합성구조시스템이 최근 국내외적으로 널리 연구되고 있으며 실제 적용한 사례가 빈번히 보고되고 있으며 보다 합리적 해석 및 설계를 위해 국내외적으로 합성시스템의 부착응력 평가에 많은 노력을 경주하고 있다(Nakaba, et al., 2001; Shao, et al., 2005)

본 연구에서는 CFRP 판과 현장타설 DFRCC 사이의 부착응력에 대한 실험(Park and Yoo, 2014) 결과를 분석하여 수치해석적 응용에 활용하기에 편한 간단한 부착슬립 관계를 제시하고자 한다.

2. 부재 제작 및 부착응력 실험

2.1 실험개요

본 실험에 사용된 섬유보강재는 N사의 제품으로 형상 및 재료특성치는 Fig. 1과 Table 1과 같다. PVA(polyvinyl acohol)계열인 RF4000을 사용한 경우 RFCON으로 명명하였으며, PP(polyolefin/polypropylene) 계열의 섬유를 사용한 시편은 PPCON, RF4000과 RSC15를 혼입한 시편은 RFCON+, PP와 RSC15를 혼입한 시편은 PPCON+로 표기하여 실험을 진행하였다. 친수성 물질 인 PVA계열 섬유는 고인장력과 내알카리성 특성을 갖고 있으며, PP계열의 섬유는 상섬유와 달리 부식의 우려가 없는 구조용 섬유보강재로 많이 사용되고 있다. 시험체의 배합설계표는 Table 2와 같다(Park and Yoo, 2014).



(a) RF4000 (b) RSC15 (c) PP-macro

Fig. 1 Shape of PVA and PP-macro

Table 1. Fiber Material Property

Fiber	Type	Color	Weight	Length (mm)	Diameter (μm)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
RF4000	PVA	yellow	1.3	30	600	900	28
RSC15	PVA	white	1.3	8	40	1,300	37
PP-macro	PP	white	0.91	48	0.5~1.0	450	5.6

Table 2. Concrete Mix Design

Concrete Type	Fiber Type	Mix Proportion (Kg/m3)					
		W	C	S	G	SP	fiber
RFCON	RF4000	178.5	478.2	695.2	960.0	7.2	2.6
PPCON	PP	178.5	478.2	695.2	960.0	7.2	18.2
RFCON+	RF4000+RSC15	178.5	478.2	695.2	960.0	9.6	1.3 +1.3
PPCON+	PP+RSC15	178.5	478.2	695.2	960.0	9.6	0.9 +1.3

시험체 제작에 사용한 고인성섬유보강콘크리트의 압축강도 실험결과의 평균 최대 압축응력은 29.45~35.33MPa이고 휨 인장강도 실험의 평균 최대 인장응력은 2.42~3.26MPa로 나타났으며, 상세한 내용은 Table 3에 표시하였다.

Table 3. Compressive and Tensile Strength (MPa)

	RFCON	PPCON	RFCON+	PPCON+
Compressive Strength	34.69	29.45	35.33	32.73
Tensile Strength	3.26	2.42	3.05	3.02

2.2 실험 시편

실험시편 본체의 크기는 1000x100x150mm이며, 실험장치는 Fig. 2과 같다. Fig. 3과 같이 FRP판과 현장타설 섬유보강콘크리트의 부착실험은 한쪽면을 앵커로 고정시켜 인장력이 작용하게 고안하였으며, 사용한 CFRP 판은 S사의 제품을 사용하였고, 기계적 성질은 Table 4에 나타내었다. 본 연구에서는 합성구조시스템의 부착거동을 가장 유사하게 모사하는 보휨실험(beam bending test) 방법을 사용하였다.

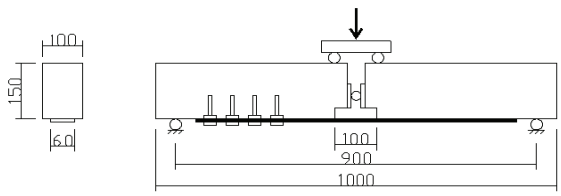


Fig. 2 Test Specimen

Fig. 3 Preparation of FRP Plank

Table 4. Mechanical Properties of CFRP

Fiber Type	Thickness (mm)	Tensile Stress (MPa)	Elastic Modulus (GPa)
Carbon	2.4	3000	165.0

CFRP 판의 처리방법은 CFRP 판을 폭 60mm, 길이 800mm로 재단 후 CFRP 판에 S사의 에폭시를 도포한 후 시편에 4~7mm 골재를 그 위에 살포 하였다. 완성된 CFRP 판을 거푸집으로 하여 고인성 섬유보강콘크리트의 실험시편을 제작 하였다. 에폭시의 성질은 Table 5과 같고, 실험에 사용된 실험시편의 분류는 Table 6과 같으며, 실험변수는 4가지 종류이며 각각 2개씩 총 8개의 실험시편을 제작하였다.

Table 5. Properties of Epoxy

Tensile Stress (MPa)	Compressive Stress (MPa)	Shear Stress (MPa)	Gel Time (min)	Elogation at Break (%)
77.9	84.0	18.3	65	4.8

Table 6. Type of Specimen

Specimen	No.	FRP Type	Concrete Type
CF11	2	CFRP	RFCON
CF12	2	CFRP	PPCON
CF13	2	CFRP	RFCON+
CF14	2	CFRP	PPCON+

2.3 실험계측 및 파괴형상

실험계측은 시험체에 부착한 전기저항식 스트레인게이지와 변위계, 하중계를 통해 계측되었다. 스트레인게이지의 부착은 시편 중앙 부위에 게이지 1번을 부착하고 FRP와 콘크리트가 만나는 시작점에 2번 게이지 그 후로 15mm 간격으로 부착하였다. Fig. 2에서와 같이 양단을 단순지지조건 상태에서 중앙부분에 하중을 가력하여 FRP와 콘크리트가 부착파괴가 발생하도록 고안되었다. 중앙부분의 하중 변화에 따라 설치된 스트레인게이지에서 변형률을 계측하였다.

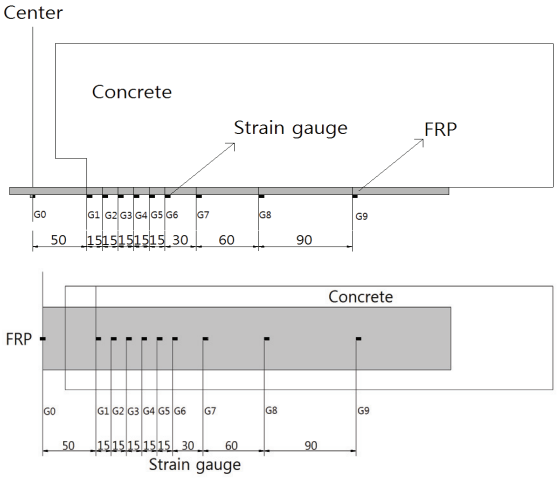


Fig. 4 Position of Strain Gauge

파괴형상은 Fig. 5과 같이 CFRP 판과 에폭시, 콘크리트 사이의 파괴가 혼합된 형태이다. 섬유 종류에 따른 특별한 파괴형상은 보이지 않았고 분리가 일어나지 않은 부분의 미세균열은 전반적으로 골고루 분포되는 형태를 보이고 있었다.

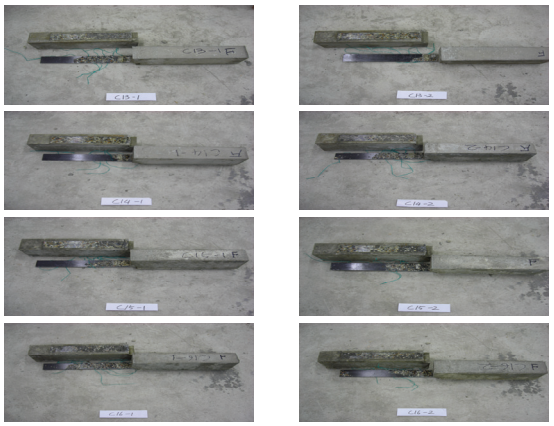


Fig. 5 Failure Shape of CF11, CF12, CF13 and CF14

3. 부착응력과 슬립 관계

3.1 국부 부착응력-슬립 관계

시험체의 각 부분에 설치된 스트레인게이지에서 변형률을 계측하였다. 실험시편의 변형률 분포는 각 시편마다 차이는 있으나 전체적으로 비슷한 결과를 나타났다(Park and Yoo, 2014). 콘크리트와 에폭시, CFRP 사이에서 분리가 일어나며 미세균열이 전체에 걸쳐 분포되어 부착이 옆으로 전달되면서 부착응력 값이 분산되는 형태를 보여 주었다.

국부 부착응력은 부착위치에 따라 다르므로 전체

면적에 대한 인발력으로 구할 수 없고 다음의 식에 의해 계산된다. FRP 판을 선형탄성으로 가정하면 국부 부착전단응력은 식(1), 슬립은 식(2)로 표현 가능하다(Dai et al., 2005).

$$\tau(x) = tE\frac{d\epsilon(x)}{dx} \tag{1}$$

$$s(x) = s(0) + \int \epsilon(x)dx \tag{2}$$

여기서 τ, t, E, ϵ, s는 각각 응력, 두께, 탄성계수, 변형률 및 슬립이다.

스트레인게이지가 부착된 구간에서 위 식에 의해 응력과 슬립을 계산한다(Dai et al., 2005). 부착응력은 처음부분에서 최대 값을 보이다 가력하중이 증가함에 따라 부착파괴가 발생하여 최대응력 값이 부착의 끝부분으로 이동하는 현상이 발생하나 후반부에서는 급속한 전체 파괴가 발생하였다.

3.2 인발력, 계면파괴에너지 및 부착응력

인발력(pullout force)의 산정은 전체 시험체의 평형방정식에 의한 방법과 한가운데 부착된 스트레인게이지로 계산하는 방법이 있는데 본 연구에서는 전체 평형방정식을 이용해 인발력을 계산하였으며 Fig. 7과 같다.

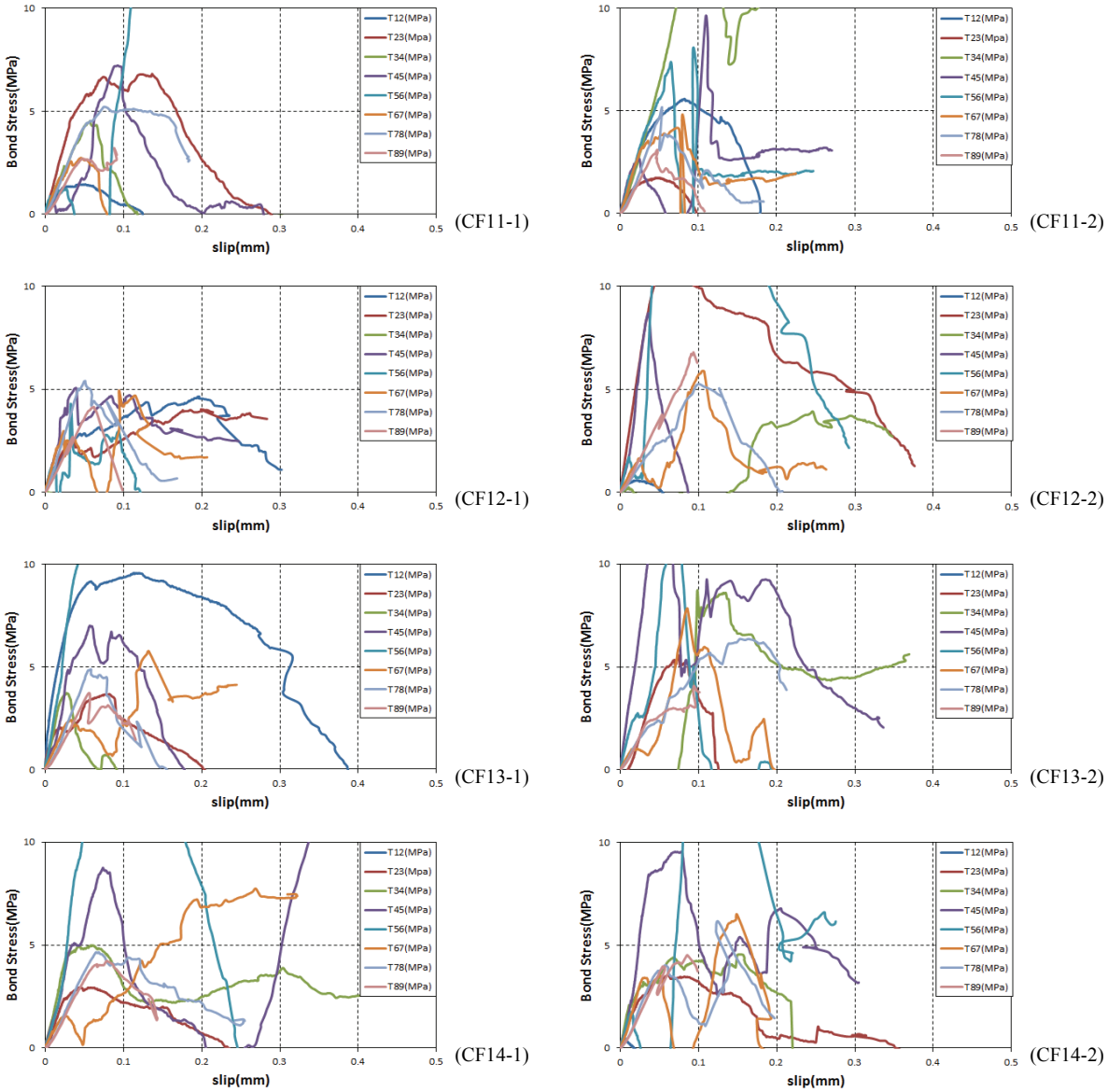


Fig. 6 Bond Stress and slip Curve of CF11, CF12, CF13 and CF14

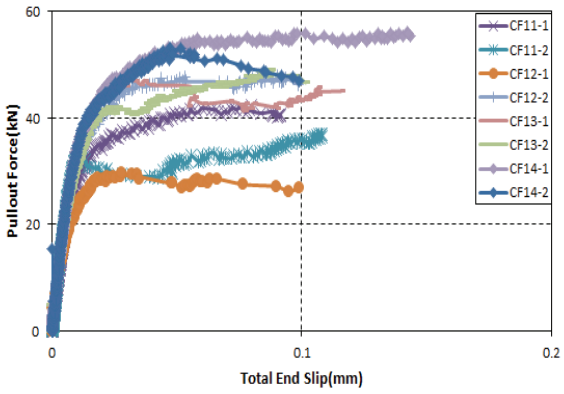


Fig. 7 Pullout Force-End Slip Curve

계면 파괴에너지(G_f, interfacial fracture energy)는 부착파괴 특성을 알려주는 변수 중 가장 중요한 것으로 판단되며, 다음과 같이 표현 된다(Dai et al., 2005).

$$G_f = \frac{P^2}{2Etb^2} \tag{3}$$

여기서 G_f는 계면파괴 에너지, P, b, E, t는 각각 인발력, 폭, 탄성계수 및 두께 나타낸다.

Table 7. Bond Stress Between G2 and G6 Gage (MPa)

Specimen		Bond Stress				Average Bond Stress
		G2-G3	G3-G4	G4-G5	G5-G6	
CF11	No.1	6.66	4.53	0.88	1.23	3.33
	No.2	1.73	18.00	2.64	7.37	7.44
CF12	No.1	2.46	0.05	5.08	1.23	2.21
	No.2	11.26	3.92	8.70	1.71	6.40
CF13	No.1	3.67	3.72	7.01	14.96	7.34
	No.2	5.58	8.75	14.23	11.72	10.07
CF14	No.1	2.94	5.00	8.77	13.53	7.56
	No.2	3.57	4.40	9.55	1.76	4.82

1번 스트레인게이지의 경우 선단에 위치하여 FRP 판의 휨에 의한 오차를 내포하고 있고, 7번 스트레인게이지 이후의 경우 부착간격이 동일 간격이 아니며 급격한 파괴에 의해 데이터의 신뢰성이 낮으므로 2~6번 게이지를 중심으로 계측자료를 분석하였다. 구간 전체에 대해 평균값으로 평가하면, RFCON의 CF11 경우는 3.33~7.44MPa, PPCON의 CF12는 2.21~6.40MPa이 나타났으며, RFOCN+의 CF13은 7.34~10.07MPa, PPCON+의 CF14는 4.82~7.56MPa 정도의 평균부착응력이 나타났으며 자세한 내용은 Table 7에 나타내었다.

4. 단순부착응력과 슬립 관계

2~6번 게이지 구간에서 도출된 국부 부착응력 및 슬립곡선은 Fig. 6에 나타내었다. 구간별 국부 부착응력 곡선들은 다소 분산되는데, 이와 유사한 현상은 노후 구조물의 보수보강을 위해 FRP를 에폭시로 외부보강한 공법의 부착특성에도 발견되는 현상이다 (Teng et al., 2002).

1번 및 7번이후의 측정값들은 다소 많은 오차를 내포하고 있으므로, 좀 더 신뢰성이 있는 구간인 2~6번 구간에서 측정한 변형률 값을 가지고 CFRP 판과 현장타설 고인성섬유보강콘크리트 사이의 부착특성을 분석한다.

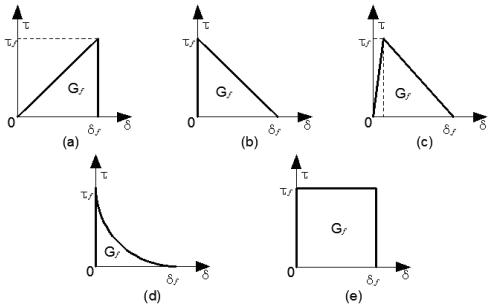


Fig. 8 Several Simple Attachment Model

일반적으로 부착모델로서 Fig. 8과 같은 단순 관계식들이 많이 제안되고 있다(Teng et al., 2002). 그 중 (c)의 2중직선 관계식이 실험결과에 근접하며 사용하기 편리한 관계식이라 판단되므로 이에 근간하여 단순 부착응력 괴 슬립 관계를 제안하고자 한다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 부착응력과 슬립 관계에서 응력 증가부분에서는 신뢰성 있는 값을 보여주나, 최고값 이후의 경우 급격한 부착파괴에 따라 계측 데이터에 많은 오차를 내포하고 있다. 본 연구에서는 초기 응력 증가단계까지는 계측된 변형률 값에 근거한 부착응력 값을 사용하고 최고점 이후 응력이 감소하는 부분은 파괴에너지 개념을 활용한다.

Table 8. Gradient Between G2 and G6 Gage (MPa/mm)

Specimen		Gradient(MPa)				Average Gradient
		G2-G3	G3-G4	G4-G5	G5-G6	
CF11	No.1	110.31	85.20	120.49	67.13	95.78
	No.2	61.63	139.11	131.40	117.40	112.39
CF12	No.1	87.99	0.00	147.69	140.52	94.05
	No.2	238.36	6.32	231.22	162.00	159.47
CF13	No.1	62.38	162.29	134.12	249.64	152.11
	No.2	75.93	0.02	278.05	139.09	123.27
CF14	No.1	67.16	120.58	125.40	196.51	127.41
	No.2	75.58	86.04	165.90	135.27	115.70

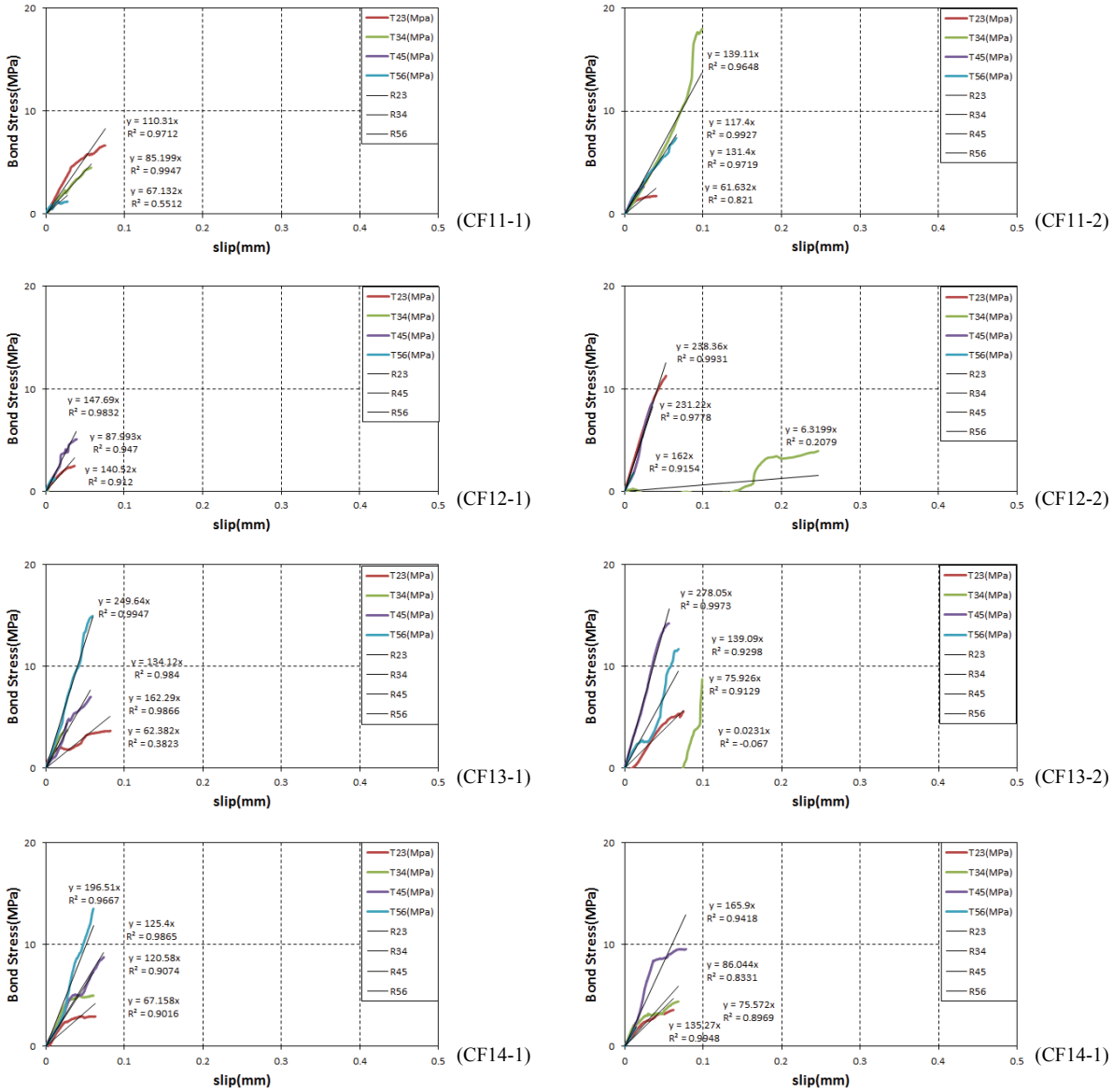


Fig. 9 Regression of Bond Stress and Slip Curve for CF11, CF12, CF13 and CF14

Table 9. Fracture Energy and Slip (After Peak Point)

Specimen	Fracture Energy (kN/m)	Bond Stress (MPa)	Gradient (MPa/mm)	Slip (mm)
CF11	0.51	5.39	104.09	0.19
CF12	0.56	4.31	126.76	0.26
CF13	0.70	8.71	137.69	0.16
CF14	1.05	6.19	121.56	0.34

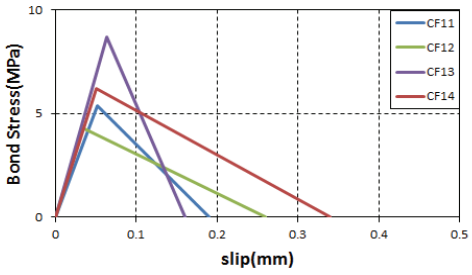


Fig. 10 Suggestion of Bond and Slip Curve

최고점에 이르는 초기 단계에서는 실험값이 일관적이므로 계측된 변형률에 근거한 부착응력과 슬립 관계를 Table 8에 나타내었고, 최고점이후 응력이 감소

하는 부분은 파괴에너지개념에 의한 식(3)을 이용하여 산출한 결과를 Table 9에 기술하였다. 실험체 종류별 각각에 대한 단순 부착응력과 슬립 관계는 Fig. 10과 같다.

5. 결론

CFRP 판을 가지고 콘크리트와 부착응력에 대해 실험분석을 하였으며, 파괴형상으로 CFRP 판과 에폭시 사이의 파괴와 현장타설 섬유보강콘크리트와 에폭시 사이의 파괴가 혼합된 형태이다.

제안된 단순 부착슬립 모델에서 RFCON의 경우 최대 평균 부착응력은 5.39MPa이고, 초기 경사는 104.09MPa/mm이며 총 슬립량은 0.19mm로 나타났다. PPCON의 최대 평균 부착응력은 4.31MPa이고 초기 경사는 126.67MPa/mm이며 총 슬립량은 0.26 mm로 나타났으며, RFCON+은 최대 평균 부착응력 8.71MPa, 초기 경사는 137.69MPa/mm, 총 슬립량은 0.16mm로 나타났다. PPCON+는 최대 평균 부착응력 6.19MPa, 초기경사는 121.56MPa/mm, 총 슬립량은 0.34mm로 나타났다.

계면 파괴에너지는 CF11, CF12, CF13의 경우 각각 0.51kN/m, 0.56kN/m, 0.70kN/m로 나타났으며, CF14의 계면 파괴에너지는 1.05kN/m로 가장 큰 계면파괴에너지를 보여주었다. CFRP 판과 콘크리트의 합성구조 거동을 이해하기 위해 국부 부착-슬립 관계가 필요하며, 이에 따라 하이브리드 합성시스템에 간단하게 적용시킬 수 있는 단순 부착응력 및 슬립 관계를 제시하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No.2013R1A1A2010852)으로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

Bank, L.C. (2006), “Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials, John Wiely & Sons, NJ.

Bank, L.C., Oliva, M.G., Bae H.U., and Bindrich, B.V. (2010), “Hybrid Concrete and Pultruded-Plank Slabs for Highway and Pedestrian Bridges,” *Journal of Construction and Building Materials*. Vol. 24, No. 4, pp.552-558.

Cheng, L., Zhao, L., M., Karbhari, V., Hegemier, G.A., and Seible, F. (2005), “Assessment of a Steel-free Fiber Reinforced Polymer-Composite Modular Bridge System” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 3, pp.498-506.

Dai, J., Ueda, T. and Sato, Y. (2005), Development of the Nonlinear Bond Stress-slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet-Concrete Interfaces with a Simple Method, *Journal of Composites for Constructions*, Vol. 9, No. 1, pp.52-62.

Kim, Y.W., Min, K.H., Yang, J.M., and Yoon, Y.S. (2009), “Flexural and Impact Resisting Performance of HPFRCCs Using Hybrid PVA Fibers” *Journal of the Korea Concrete Institute* Vol. 21, No. 6, pp.705-712. (in Korean).

Kitane, Y., Aref, A.J., and Lee, G.C. (2004), “Static and Fatigue Testing of Hybird Fiber-Reinforced Polymer-Concrete Bridge Superstructure”, *Journal of Composites for Construction, ASCE,* Vol.8, No.2, pp.182-190.

Nakaba, K., Kanakubo, T., Furuta T., and Yoshizawa, H. (2001), “Bond Behavior between Friber Reinforced Polymer Laminates and Concrete”, *ACI Structural Journal,* Vol. 98, pp.359-367.

Park, C.Y. and Yoo, S.W. (2014), “An Experimenatl Study for Bond Stress between DFRCC and Carbon FRP Plank Used as a Permanent Formwork”, *Journal of Korean Society of Civil Engineers,* Vol.34, No.6, pp1687-1694. (in Korean).

Shao, Y., Wu, Z.S., and Bian, J. (2005), “Wet-bonding between FRP Laminates and Cast-in-place Concrete”, *Int. Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, IIFC, Hong Kong.

Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., and Lam, L. (2002), FRP Strengthened RC Structures, John Wiely & Sons, England.

Utui, N and Kim, H.S. (2011), “Experimental Method for Evaluating Debonding Strength of FRPs Used for Retrofitting Concrete Structures”, *Journal of Korean Soc. Adv. Comp. Struc.,* Vol. 2, No. 3, pp.36-41. (in Korean).

Yun, H.D., Yang, l.S., Han, B.C., Fukuyama, H., and Suwada, H. (2004), “State-of-the-art of Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites - Part1: Manufacture Technology and Structural Performance” *Journal of Korea Concrete Institute,* Vol. 16, No. 5, pp.49-58. (in Korean).