

현장타설 고강도콘크리트와 유리섬유 FRP 판 사이의 부착슬립관계에 관한 연구

박찬영¹, 유승운^{1*}

¹가톨릭관동대학교 토목공학과

Bond Slip Relationship between GFRP Plank and Cast-in-place High Strength Concrete

Chan-Young Park¹, Seung-Woon Yoo^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Catholic Kwandong University

요 약 GFRP 판을 영구 거푸집 및 주요 인장 보강재로 활용한 GFRP-콘크리트 하이브리드 구조의 활용에 대해 최근 활발하게 연구가 이루어지고 있다. GFRP 판과 콘크리트 하이브리드 구조의 거동을 이해하기 위해서는 GFRP 판과 현장타설 고강도콘크리트 사이의 정량적인 국부 부착슬립모델이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 하이브리드 구조에 간단하게 적용할 수 있는 2중 직선 단순 부착슬립관계를 제안하고자 한다. 본 연구에서 제안된 단순 부착슬립관계의 최대 평균 부착응력은 3.29MPa이며, 초기 기울기는 35.66MPa/mm, 총 슬립은 0.23mm이고 계면 파괴에너지는 0.37kJ/m로 나타났다.

Abstract Recently it has been actively studied that the use of hybrid GFRP-concrete structure with dual purpose of both a permanent formwork and main tensile reinforcement of GFRP plank. In applying general analysis and design technique to evaluate the performance of hybrid structures with cast-in-place high strength concrete and GFRP plank, it is essential that the characteristics of the bond slip model is identified. In this study a simplified bilinear bond slip model for hybrid structure with GFRP plank and cast-in-place high strength concrete is proposed. Maximum average bond stress of simple bond slip relationship that has been proposed in this study is 3.29MPa, initial slope is 35.66MPa/mm, the total slip is 0.23mm and interfacial fracture energy is 0.37kJ/m.

Key Words : bond slip relationship, GFRP, hybrid structure, permanent formwork, cast-in-place concrete

1. 서론

현재 국내에 가설되어 있는 도로교 중 많은 것은 바닥판이 있는 거더교 형식의 교량이며, 교량 바닥판의 경우 대부분 철근 콘크리트 구조로 가설하고 있다. 콘크리트를 현장에서 타설하는 철근콘크리트 바닥판공법은 공기가 매우 길고, 콘크리트의 건조 수축, 온도 응력 등에 의해 비교적 초기 균열이 많이 발생하는 단점을 갖고 있다 [1-2].

선진 여러 국가들이 바닥판의 문제점을 해결하기 위해 체계적이고 지속적인 연구개발 노력을 하고 있는 것에 비해 국내의 경우에는 바닥판에 대한 연구가 아직 부족하며, 새로운 바닥판 구조시스템 개발에 대한 연구 또한 초기단계인 실정이다[3-5].

국내에서 보수/보강 이외의 토목분야에 FRP 재료를 이용하는 연구는 철근 대용으로 사용 가능한 FRP 보강근 또는 FRP 텐던에 관한 연구가 주를 이루고 있으나, 아직 기초적인 연구에 머무르고 있어 실용화하기에는 더

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

*Corresponding Author : Seung-Woon Yoo(Catholic Kwandong Univ.)

Tel: +82-33-649-7513 email: swyoo@cku.ac.kr

Received November 19, 2014

Revised (1st January 9, 2015, 2nd February 25, 2015)

Accepted March 12, 2015

Publish March 31, 2015

많은 연구가 필요한 실정이다[6]. 바닥판에 FRP를 적용하는 연구로는 2001년 국내 최초로 필라멘트 와인딩(filament winding) 공법으로 순수 복합재 바닥판을 제작하여 공사현장 교량 가설에 적용한 바 있으며 인발공법(pultrusion process)으로 제작하는 실용화 연구가 일부 수행되었다[7]. 2002년에는 복합신소재 패널과 파형 복합신소재 부재로 구성된 순수 복합신소재 바닥판을 적용한 지간 10m, 폭 8m의 교량이 강원도 영월에 가설된 바 있다. 이들 바닥판은 순수 신소재를 적용한 바닥판이며, 최근 들어 FRP 판을 영구 거푸집 및 주요 인장 보강재로 활용한 새로운 콘크리트 합성 바닥판 시스템 개발에 대한 연구가 진행되고 있다[8].

해외에서는 4개의 다른 FRP 합성 바닥판을 207m의 5경간 기존교량을 대체 시험 시공하여 시공성, 적용성, 성능 등 예측되는 많은 장단점에 대하여 검토하였고[9], 18m의 단순교로 설계된 FRP-콘크리트 합성구조의 축소 모델에 대한 정적 및 피로시험을 실시하였다[10].

본 연구는 영구 거푸집 및 주요인장재로 활용한 GFRP 판과 현장타설 고강도콘크리트 사이의 부착 및 슬립에 대한 실험을 수행하고, 해석적 접근을 위한 단순한 부착 슬립관계를 제안하고자 한다.

2. 시험체 제작 및 실험

2.1 실험개요

본 연구는 교량 바닥판 시스템의 부착거동을 가장 유사하게 표현한다고 생각되는 보휨실험(beam bending test) 방법으로 실험하였다[11].

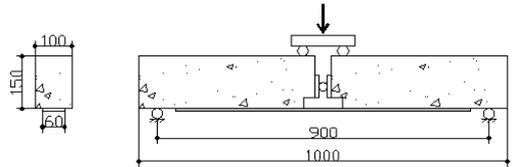
휨 인장강도시험을 위한 시험체(100×100×400 mm)를 KS F 2403에 따라 제작하였으며 압축강도시험을 위한 공시체(∅ 100×200mm)도 제작하였다. 1,000kN 용량의 UTM을 이용하여 KS F 2408에 따라 4점 재하로 실시하였고, 처짐 및 하중은 시험 양쪽에 설치한 LVDT와 로드셀을 통해 계측하였다. 시험체의 배합설계표는 Table 1과 같으며, 압축 및 휨 인장강도 실험결과 압축강도는 44.4MPa, 휨 인장강도는 2.03MPa로 나타났다.

[Table 1] Concrete mix design

Concrete	Mix proportion(Kg/m ³)				
	W	C	S	G	SP
NOCON	178.5	478.2	695.0	960.0	2.4

2.2 부착실험 시편 제작

본 실험에 사용한 시편은 길이 1000mm, 100×150mm 단면을 사용하였고, 자세한 형상과 치수는 Fig. 1과 같다. 3가지 종류의 GFRP 판에대해 각각 2개씩 총 6개의 실험 시편을 제작하였다. GFRP 판과 타설 고강도콘크리트의 부착은 한쪽면만 하였고, 반대쪽은 콘크리트 타설 전에 설치한 앵커를 이용하여 고정시켰고, 사용한 GFRP 판의 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다. 현장타설 콘크리트와 GFRP 판을 조합한 실험시편의 분류는 Table 3에 표시하였다.



[Fig. 1] Shape and dimensions of test specimen(mm)

[Table 2] Material property of FRP

FRP	Fiber type	Thickness (mm)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
GFRP1	glass	8.0	395	19.9
GFRP2	glass	5.0	514	33.6
GFRP3	glass	5.0	800	57.4

[Table 3] Classification of test specimen

Series	Specimen	FRP	Concrete
GF1	GF11-1	GFRP1	NOCON
	GF11-2		
GF2	GF21-1	GFRP2	NOCON
	GF21-2		
GF3	GF31-1	GFRP3	NOCON
	GF31-2		

실험시편의 제작 순서는 먼저 FRP 판을 폭 60mm, 길이 800mm로 절단 후 별다른 처리 없이 먼지만 제거 후 공장에서 생산된 상태에서 S사의 에폭시를 사용하여 4~7mm의 골재를 부착 하였다. 사용한 에폭시의 기계적성질은 Table 4와 같다. 완성된 FRP 판을 거푸집으로 하여 현장타설 고강도콘크리트(NOCON)를 이용하여 실험시편을 제작하였다.

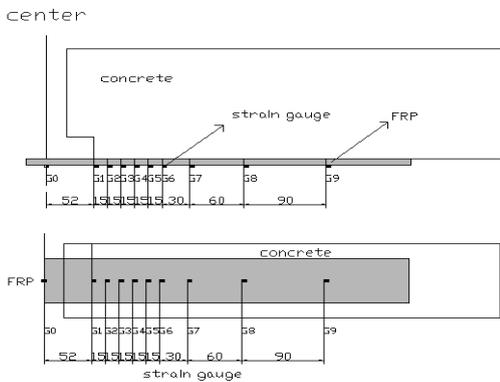
[Table 4] Mechanical property of epoxy

Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Compressive yield strength (MPa)	Gel time (min)	Shear strength (MPa)
77.9	4.8	84.0	65	18.3

2.3 실험 및 계측

데이터는 FRP 판에 부착한 전기저항식 변형률게이지, LVDT와 로드셀을 통하여 계측하였다. 첫 번째 게이지, G0은 FRP 판의 중앙부분, 즉 FRP 판과 콘크리트가 부착되지 않은 중앙 지점에 설치하였고, FRP 판과 콘크리트 부착 시작점엔 G1을 설치하였고 그 후 G2~G6은 15mm 간격으로 설치하였으며 G7은 30mm, G8은 60mm, G9는 90mm간격으로 총 10개의 변형률게이지를 설치하였다. 양 측면에 각각 1개 총 2개의 LVDT를 설치하여 G0 위치에서 처짐을 계측하였다. 자세한 변형률게이지 부착위치는 Fig. 2와 같다.

실험 시편은 톨러를 이용하여 단순지지 조건을 만들었다. 지점사이의 순 간격은 900mm이고, 유압식 압축장치를 이용하여 4점 재하형식으로 하중을 가했으며, 로드셀과 중앙 양쪽에 LVDT를 이용하여 하중과 수직 변위를 측정 하였다. 그리고 FRP 판에 설치한 변형률게이지를 이용하여 각각의 위치에서 FRP의 변형률을 계측하였으며 실험전경과 파괴형상은 Fig. 3과 같다.



[Fig. 2] Location of strain gauge on test specimen



[Fig. 3] Experiment setup and destruction of shape

3. 부착성능 실험 결과분석

3.1 파괴형상, 국부부착응력 및 인발력

각각의 FRP 판의 중앙으로부터 Fig. 2와 같이 설치된 변형률게이지에 의해 각각 위치에서 변형률을 측정하였다. 콘크리트의 파괴 형상으로 각 부재별 대부분의 파괴 형상은 FRP 판과 에폭시 사이의 파괴와 FRP 판과 콘크리트 사이의 파괴가 혼합된 형상을 보이고 있으며, 육안으로는 큰 차이는 발견되지 않았고, GFRP 종류에 따른 특이한 부착분리 거동을 보이지는 않았다.

본 연구의 주 관심중 하나인 FRP와 타설 콘크리트 사이의 국부 부착응력(local bond stress)은 전체 FRP 인발력을 전체 부착면의 면적으로 단순히 나누는 것으로 구할 수 없다.

국부 부착응력은 부착면의 위치에 따라 상이하므로 반드시 부착면을 부분적으로 나누어 각각의 영역에서 국부 부착응력을 산정해야 한다.

그러므로 국부 부착응력은 다음과 같이 각각의 위치에서 측정된 변형률을 가지고 구해야 한다. FRP 판을 선형탄성으로 가정할 때 국부 부착 전단응력은 평형조건으로부터 다음과 같은 관계를 유도할 수 있다.

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

여기서 $\tau(x)$ 는 x위치에서의 전단 부착응력, t는 FRP 판의 두께, E는 탄성계수, $\epsilon(x)$ 는 x위치에서의 FRP 변형률이다.

본 연구에서 변형률을 일정한 간격을 두고 측정 하였으므로, 국부적으로 인접한 두 변형률게이지 사이의 국부 부착응력을 다음과 같이 구할 수 있고 이를 통해 국부 부착 전단응력의 변화를 살펴볼 수 있다.

$$\tau_{i,i+1} = tE \frac{\epsilon_i - \epsilon_{i+1}}{x_{i+1} - x_i} \quad (2)$$

여기서 $\tau_{i,i+1}$ 는 G_i 와 G_{i+1} 사이의 평균 부착응력, t와 E는 FRP 판의 두께와 탄성계수, ϵ_i 는 G_i 위치에서의 변형률, x_i 는 G_i 위치의 좌표이다.

FRP 판에 작용하는 인발력(pullout force)은 평형방정식과 FRP 판 중앙에 부착한 변형률게이지에 의해 구할

수 있다. 그러나 FRP의 경우 하중을 받음에 따라 휘어지므로 FRP 중앙 하단에 발생하는 변형률은 실제보다 큰 값을 나타내며 상단의 경우 실제보다 작은 값을 보여지게 된다. 본 실험의 경우 변형률계이지를 하단에 부착하였으므로 실제보다 큰 변형률을 나타내게 되어 평형방정식을 이용해 인발력을 산정하였다. 대 변형이 발생할 경우 처음조건과 달라질 수 있으나 본 실험의 경우 변형이 미소하므로 이의 영향은 무시할 수 있다고 판단하였다.

3.2 국부부착응력, 인발력-슬립 관계

각각의 위치에서 슬립량은 그위치의 변형률을 가지고 다음과 같이 계산 할 수 있다. G_i 위치에서의 슬립은 콘크리트의 변형을 무시하면 G_i 위치와 인접한 G_{i+1} 위치 사이의 FRP 판의 신장량과 같다. 그러므로 슬립은 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다.

$$s(x) = s(0) + \int \epsilon(x) dx \quad (3)$$

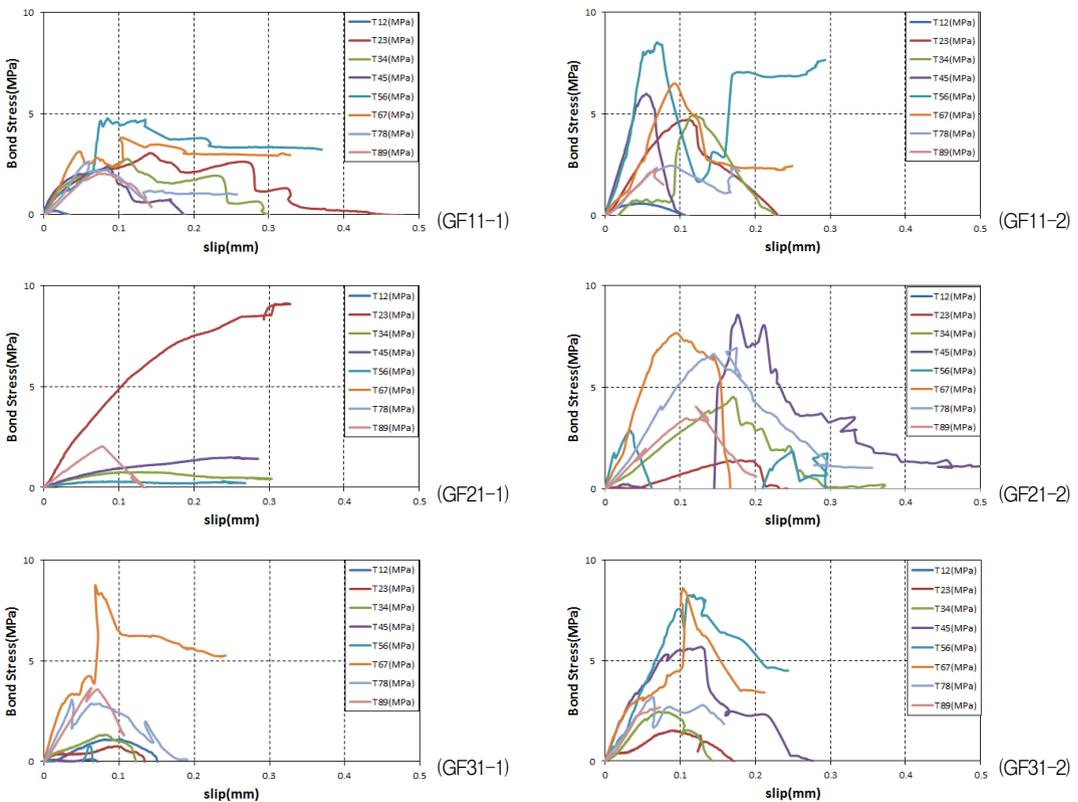
여기서, $s(x)$, $\epsilon(x)$ 는 x위치에서의 슬립 및 FRP 변형률이다.

본 연구에서 변형률을 일정한 간격을 두고 측정 하였으므로 각각 인접한 두 지점 사이의 슬립량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_{i,i+1} = s_{i+1,i+2} + (\epsilon_i + \epsilon_{i+1}) \frac{(x_{i+1} - x_i)}{2} \quad (4)$$

여기서 $s_{i,i+1}$ 는 i 와 $i+1$ 사이의 슬립, ϵ_i 는 i 위치에서의 변형률, x_i 는 i 위치의 좌표 값을 나타낸다.

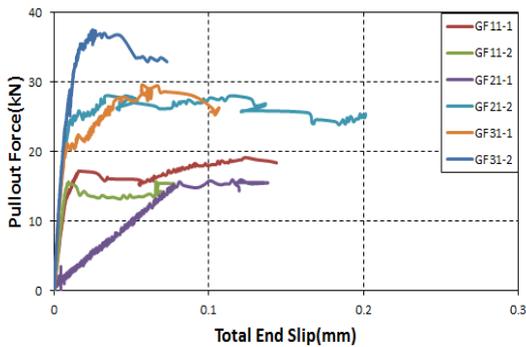
변형률계이지의 각각의 구간에서 위 식에 의해 국부 부착응력과 슬립과의 관계를 유도할 수 있다. 위 식의 관계를 이용하여 각각의 구간에서 국부 부착응력 및 슬립 곡선을 그리면 Fig. 4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 각 구간별로 다소 큰 편차를 보여주고 있다. 이와 같은 현상은 FRP를 노후 구조물의 보수/보강을 위해 예폭시



[Fig. 4] Bond stress-slip relationship of GF11, GF21 and GF31

로 외부 접착한 공법의 부착특성에도 관찰되는 현상이다.

GFRP1의 경우 하중 초기 단계에서 부착응력이 최대 값을 나타내다가 부착응력이 점차 감소하면서 파괴되는 현상을 보여주었고, GFRP2와 GFRP3의 경우 부착응력이 처음부터 서서히 증가하면서 최대 부착응력에서 파괴되는 현상을 나타낸다. 시작점에서 최대 부착응력을 보이고 이후 계속 하중이 증가함에 따라 선단부분의 미세 균열과 이로 인한 선단 부분 부착응력의 감소와 인접부분으로 최대 부착응력 값의 전이현상을 볼 수 있다. 인발력과 총슬립관계는 Fig. 5와 같다.



[Fig. 5] Pullout force-total end slip curve

3.3 계면파괴에너지 및 평균부착응력

국부 부착응력-슬립곡선의 면적으로 표현될 수 있는 계면 파괴에너지(G_f , interfacial fracture energy)는 부착 특성을 나타내는 중요한 변수 중에 하나로서 부착강도 및 부착면이 파괴메커니즘 특성을 좀 더 명확히 알 수 있게 하는 유용한 변수이다. G_f 는 콘크리트의 인장 파괴메커니즘을 잘 표현하는 값으로 이미 알려져 있으며 FRP 판과 콘크리트 사이의 계면 파괴에너지 G_f 는 식(5)와 같이 표현될 수 있다.

$$G_f = \frac{P^2}{2Et_b^2} \quad (5)$$

여기서 G_f 는 계면파괴에너지, P는 FRP 판에 작용하는 인발력으로 유효부착길이 이상의 부착면을 갖는 경우 부착면의 면적에 상관없이 일정한 값으로 알려져 있다. b는 FRP 판의 폭, E와 t는 각각 FRP 판의 탄성계수와 두께이다.

G1 게이지의 경우 FRP 판이 휘어지는 시작부분으로

응력이 집중되는 현상이 발생되고, G7게이지 이상의 경우는 등 간격이 아니며 앞부분의 급격한 분리 및 일정부분 분리 후 잔존 부착력이 적은 관계로 G2~G6위치에서의 측정값을 가지고 부착거동 특성을 분석하고자 한다. 각 시험체의 부착응력은 국부적인 변형이 집중되는 곳을 제외한 최고값을 기준으로 산정하였다. 4개 구간 전체를 평균 하면, GF11의 경우에는 3.22~6.04MPa이며 GF21은 2.25~3.17MPa이 나타났으며 GF31의 경우는 0.76~4.32MPa 정도의 부착응력을 보여주고 있으며 자세한 내용은 Table 5에 나타내었다.

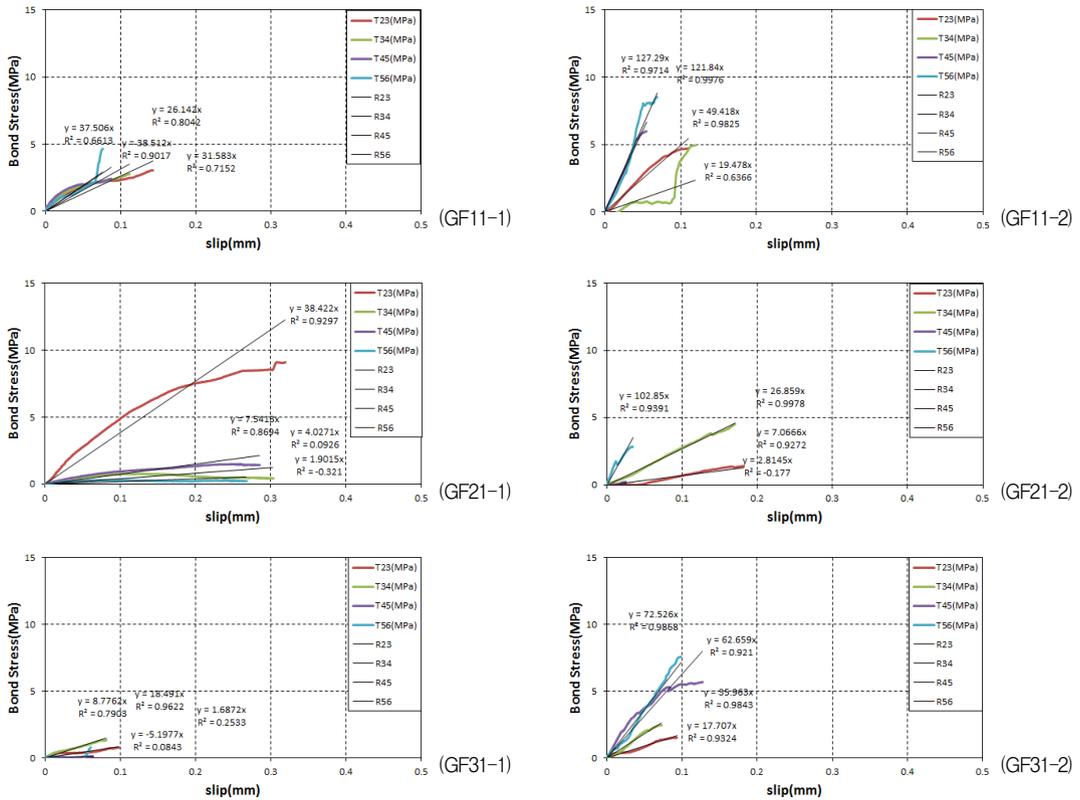
[Table 5] Average bond stress between interval (MPa)

Specimen		Bond stress				Average bond stress
		G2-G3	G3-G4	G4-G5	G5-G6	
GF11	No.1	3.05	2.77	2.42	4.65	3.22
	No.2	4.71	4.94	5.98	8.52	6.04
GF21	No.1	9.12	1.76	1.50	0.30	3.17
	No.2	1.39	4.53	0.22	2.85	2.25
GF31	No.1	0.77	1.35	0.13	0.79	0.76
	No.2	1.53	2.46	5.70	7.58	4.32

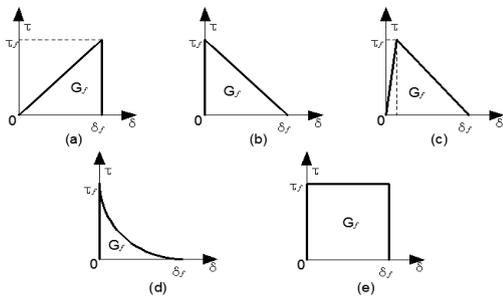
4. 단순 부착슬립관계

각각의 구간에서의 국부 부착응력 및 슬립곡선은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 각각의 구간에서 국부 부착응력 곡선들이 다소 분산되는 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 현상은 FRP를 노후 구조물의 보수/보강을 위해 예폭시로 외부 접착한 공법의 부착특성에도 발견되는 현상이다.

그 원인으로는 부착의 시작점인 G1 위치의 변형률게이지의 경우 FRP 판의 휨 때문에 발생하는 응력집중현상으로 과도한 값을 나타내고 G7, G8, G9의 경우 FRP 판과 콘크리트 사이의 부착면 중 앞부분의 급격한 파괴 및 잔존 부착력이 적은 관계로 급격한 파괴가 발생하는 등의 이유로 측정된 변형률 값이 다소 분산되는 경향을 보여준다. 그러므로 좀 더 신뢰되는 구간으로 판단되는 G2, G3, G4, G5, G6의 위치에서 측정된 변형률 값을 가지고 FRP 판과 콘크리트 사이의 부착응력 특성을 분석하였다.



[Fig. 6] Bond stress-slip curve of GF11, GF21 and GF31



[Fig. 7] Several simple bond slip model

일반적으로 단순화한 부착슬립모델로써 Fig. 7과 같은 여러 가지 형태로 단순화한 관계식들이 제안되고 있다 [12]. 그 중 (c)의 2중 직선 관계식이 실험결과에 가장 근접한 관계식이라 판단된다. 그러므로 본 연구에서 제안하는 단순 부착슬립모델은 이 관계식을 근간으로 하여 적절한 부착응력, 경사도, 총 슬립량을 계산하여 단순 부착슬립모델을 제안하고자 한다.

국부 부착응력-슬립 곡선에서 구간에 그림의 양상은

비슷하나 최대 국부 부착응력 값, 초기 기울기 및 최고점 이후의 구간에서 다소 편차를 보여주고 있다. 그러므로 본 연구의 단순 부착슬립모델에서는 최고 부착응력에 도달할 때까지의 상승부분과 최고점 이후 하강부분으로 나누어 생각한다.

[Table 6] Average slope between interval (MPa/mm)

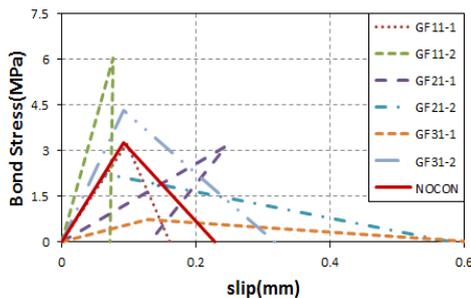
Specimen		initial slope				Average slope
		G2-G3	G3-G4	G4-G5	G5-G6	
GF11	No.1	26.14	31.58	37.51	38.51	33.44
	No.2	49.42	19.48	121.84	127.29	79.51
GF21	No.1	38.42	4.03	7.54	1.09	12.97
	No.2	7.07	26.86	2.81	102.85	34.90
GF31	No.1	8.78	18.49	1.69	-5.20	5.94
	No.2	17.71	35.96	62.66	72.53	47.22

상승부분의 경우 대체적으로 실험에서 도출된 부착응력 관계식이 일관적이므로 이 자료를 이용하여 선형회기 분석을 하면 Fig. 6과 같이 되며, 각각의 구간에서 최고 부착응력 및 기울기 실험 결과를 정리하면 Table 6과 같다.

[Table 7] Simple bond stress-slip model (descending part)

Specimen		Fracture energy G_f (kJ/m)	Bond stress (MPa)	Slope (MPa/mm)	Final slip S2(mm)
GF11	No.1	0.26	3.22	33.44	0.16
	No.2	0.21	6.04	79.51	0.07
GF21	No.1	0.21	3.17	12.97	0.13
	No.2	0.65	2.25	34.90	0.58
GF31	No.1	0.23	0.76	5.94	0.61
	No.2	0.68	4.32	47.22	0.32
NOCON		0.37	3.29	35.66	0.23

최고값 이후 하강부분의 경우 실험 결과가 상당히 분산되는 경향을 보이므로 전체 계면 파괴에너지를 이용하여 하강부분을 산정한다. 부착모델의 면적은 계면 파괴에너지 G_f 이므로 식(5)에 의해 인발력 값을 이용하면 계면 파괴에너지 값을 구할 수 있고, 계산된 계면 파괴에너지 값은 부착슬립모델의 면적과 동일하므로 손쉽게 총슬립량을 계산할 수 있으며, 결과는 Table 7에 기술하였다. 이를 통해 단순 부착슬립관계의 상승부분과 하강부분을 고려한 각각의 경우와 제안된 평균값에 대한 관계는 Fig. 8와 같다.



[Fig. 8] Proposal of simple bond slip model

5. 결론

본 연구에서는 영구거푸집 및 인장구조재로 활용한 3 가지 종류의 유리섬유 FRP 판을 가지고 콘크리트와 부착슬립에 대해 실험을 수행하였다.

부착응력-슬립 관계에서 GFRP1의 경우 하중 초기 단계에서 부착응력이 최대 값을 나타내다가 부착응력이 천천히 감소하면서 파괴되는 현상이 나타났고, GFRP2와 GFRP3의 경우 시작점에서 최대 부착응력을 보이고 이

후 계속 하중이 증가함에 따라 선단부분의 미세 균열과 이로 인한 선단부분 부착응력의 감소와 인접부분으로 최대 부착응력 값의 전이현상을 보여주었다.

제안된 단순 부착슬립관계의 최대 평균부착응력은 3.29MPa이며 초기 기울기는 35.66MPa/mm이고, 총 슬립량은 0.23mm, 계면 파괴에너지는 0.37kJ/m로 나타났다.

유리섬유 FRP 판과 콘크리트 합성구조의 거동을 이해하기 위해서는 GFRP 판과 현장타설 고강도콘크리트 사이의 정량적인 국부 부착슬립모델이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 합성구조에 간단하게 적용할 수 있는 2 중 직선 단순 부착슬립관계를 제안하였다. 앞으로 추가적인 실험 및 해석적 연구를 통해 본 관계식의 타당성을 좀 더 비교 검토할 필요가 있다고 사료된다.

References

- [1] L. Cheng, L. Zhao, V. M. Karbhari, G. A. Hegemier and F. Seible, "Assessment of a Steel-free Fiber Reinforced Polymer-Composite Modular Bridge System", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 3, pp.498-506, 2005.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9455\(2005\)131:3\(498\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9455(2005)131:3(498))
- [2] A. C. Berg, L. C. Bank, M. G. Oliva and J. S. Russell, "Construction and Cost Analysis of an FRP Reinforced Concrete Bridge Deck", *Construction and Building Materials*, Vol. 20, No. 8, pp.515-526, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.007>
- [3] L. C. Bank, M. G. Oliva, H. U. Bae and B. V. Bindrich, "Hybrid Concrete and Pultruded-Plank Slabs for Highway and Pedestrian Bridges", *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 4, pp.552-558, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.002>
- [4] K. Nakaba, T. Kanakubo, T. Furuta and H. Yoshizawa, "Bond Behavior between Fiber Reinforced Polymer Laminates and Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol. 98, pp.359-367, 2001.
- [5] M. Erki, "Fiber-reinforced Polymers for Structural Engineering in Canada", *Structural Eng.* Vol. 9, No. 4, pp.278-280, 1999.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2749/101686699780481691>
- [6] K. H. Cho, J. R. Cho, Y. H. Lee and B. S. Kim, "Fracture Mechanics Based Bond-Slip Models for the Interface between FRP and Concrete", *Proceeding of Conference on Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 24, No. 4, pp.653-661, 2004.

- [7] Y. Shao, Z. S. Wu and J. Bian, "Wet-bonding between FRP Laminates and Cast-in-place Concrete", *Int. Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, IIFC, Hong Kong. 2005.
- [8] D. A. Dieter, J. S. Dietsche, L. C. Bank, M. G. Oliva and J. S. Russell, "Concrete Bridge Decks Constructed with FRP Stay-in-place Forms and FRP Grid Reinforcing", *Journal of the Transportation Research Record*, No. 1814, pp.219-226. 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3141/1814-26>
- [9] R. M. W. Reising, B. M. Shahrooz, V. J. Hunt, A. R. Neumann, A. J. Helmicki and M. Hastak, "Close Look at Construction Issues and Performance of Four Fiber-reinforced Polymer Composite Bridge Decks", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 8, No. 1, pp.33-42, 2004.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:1\(33\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:1(33))
- [10] Y. Kitane, A. J. Aref and G. C. Lee, "Static and Fatigue Testing of Hybrid Fiber-reinforced Polymer-concrete Bridge Superstructure", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 8, No. 2, pp.182-190, 2004.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:2\(182\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:2(182))
- [11] S. W. Yoo and H. U. Bae, "Bond-slip Behavior between Cast-in-place Concrete and FRP Plank Used as Permanent Formwork and Tensile Reinforcement". *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 27, No. 1, pp.69-77, 2007
- [12] J. G. Teng, J. F. Chen, S. T. Smith and L. Lam, FRP Strengthened RC Structures. Johe Wiely & Sons, 2002.

유 승 운(Seung-Woon Yoo)

[정회원]



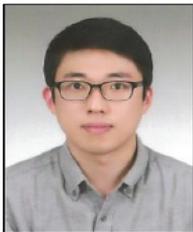
- 1985년 2월 : 연세대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : KAIST 토목환경공학 학과 (공학박사)
- 2005년 7월 ~ 2006년 8월 : 위스콘신대학교 방문교수
- 1995년 3월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 합성구조, 구조물보수보강

박 찬 영(Chan-Young Park)

[준회원]



- 2013년 2월 : 가톨릭관동대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 토목공학과 (석사과정)

<관심분야>

구조공학, 합성구조, 구조물보수보강