

## FRP 판과 현장타설 콘크리트 사이의 단순 부착모델 제안

A Proposal of Simplified Bond Stress-Slip Model between FRP Plank and  
Cast-In-Place Concrete

유 승 운\*

Yoo, Seung-Woon

### Abstract

The use of hybrid FRP-concrete structures with a dual purpose of both permanent formwork and reinforcement, has been considered in some studies recently. For the FRP plank and the concrete to act as a composite structural member a satisfactory bond at the interface between the smooth surface of the pultruded plank and the cast-in-place concrete must be developed. Sand was bonded to the pultruded FRP plank using a commercially available epoxy system. In applying general analysis techniques to evaluate the performance of composite structures with FRP stay-in-place forming, it is essential that characteristics of the bond stress-slip relation be identified. In this study I would like to propose a simplified bilinear bond stress-slip model for FRP composite structures.

### 요 지

최근에 상용 FRP 판(plank)을 콘크리트 구조물의 영구 거푸집 및 보강재로 이용하기 위한 연구가 진행되고 있다. FRP 판과 타설 콘크리트가 합성효과를 발휘하기 위해서는 두 재료간의 부착이 중요한 요인 중의 하나이다. 이러한 부착을 확보하기 위하여 FRP 판에 모래를 일반적으로 건설현장에서 많이 사용하는 에폭시를 이용하여 부착하였다. FRP 판과 콘크리트 합성구조의 구조적 거동을 이해하기 위해서는 FRP판과 타설 콘크리트 사이의 정량적인 국부 부착모델이 필요하다. 본 연구에서는 이와 같은 합성구조 시스템에 간단히 적용할 수 있는 단순 부착모델을 제안한다.

**Keywords** : Commercial FRP plank, FRP formwork, FRP composite structure, Simplified bond model

**핵심 용어** : 상용 FRP 판, FRP 거푸집, FRP 합성구조, 단순 부착모델

\* 정회원, 관동대학교 토목공학과 교수

E-mail : swyoo@kd.ac.kr 017-286-3319

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 2월 28일까지 학회로 보내  
주시면 2008년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다

## 1. 서 론

현재 우리나라 전국에 가설되어 있는 도로교 중 바닥판이 있는 거더교 형식의 교량은 전체의 약 30% 정도를 차지하고 있으며, 교량 바닥판의 경우 대부분 철근 콘크리트 구조로 가설하고 있다.<sup>(1)</sup> 콘크리트 교량 바닥판의 경우 차량하중을 직접적으로 받는 부재로서 동결, 융해, 습윤 및 건조 등을 반복적으로 받고, 계절인 염화칼슘과 같은 부식 촉진제와 직접 접촉하는 부재로써 교량의 타 부재에 비해 쉽게 손상을 입는 경향을 보여주고 있으며, 특히 철근 콘크리트 바닥판의 경우 철근의 부식에 의한 내구성 저하가 큰 문제로 대두되고 있다.<sup>(2)</sup>

최근 들어 FRP(fiber reinforced polymer)는 항공우주 산업 뿐만 아니라 건설산업분야에서도 다양하게 활용되고 있다.<sup>(3)(5)(6)(7)</sup> 특히 콘크리트 구조물의 내부 및 외부 보강재로 활용 및 기존 구조물의 보수/보강재로의 활용뿐만 아니라 콘크리트 구조물 건설에 필수적인 거푸집으로 병행이용을 위한 연구가 최근 지속적으로 진행되고 있으며,<sup>(4)(7)(8)(9)(10)</sup> 특히 최근에는 상용으로 생산하고 있는 FRP판(plank)을 영구 거푸집 및 주요 인장 보강재로 활용하기 위한 새로운 콘크리트 교량 바닥판 시스템 개발에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>(3)(4)(11)(12)</sup>

본 시스템이 효과적으로 기능하기 위해서는 FRP 판과 타설 콘크리트의 합성작용이 매우 중요한 역할을 담당한다. 현재 생산되어 상품화 되어 있는 FRP 판의 경우 표면이 매끈하여 타설 콘크리트와의 일체 거동에 다소 문제점을 내포하고 있다. 본 연구에서는 타설 콘크리트와 FRP 판의 일체거동을 증진시키기 위해 FRP 판에 모래를 건설현장에서 많이 사용하는 B사의 에폭시를 사용하여 부착시킨다. 골재 모래의 부착은 현장에서 콘크리트를 타설하기 이전에 에폭시를 이용하여 부착하고 양생시킨 후 콘크리트를 타설하기 때문에 콘크리트 타설 공정에는 영향이 없다.

FRP와 콘크리트 사이의 부착특성에 관한 연구들은 대부분 FRP를 기존 콘크리트 부재에 나중에 에폭시로 접착하여 부착시키는 보수/보강 공법에 초점을 맞추어 진행되었으며, 본 시스템과 같은 경우에 대해서

는 연구가 거의 이루어져 있지 않다.<sup>(3)(4)(12)(13)</sup>

본 연구에서는 FRP 판을 영구 거푸집 및 인장 보강재로 활용한 시스템의 중요한 관심 중의 하나인 FRP 판과 타설 콘크리트 사이의 부착특성을 알아보기 위해 실험을 수행했던 결과를 가지고 본 시스템에 적합한 단순 부착모델을 제안하고자 한다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 실험 방법

본 연구의 부착거동 실험의 경우 기존 구조물 보수/보강을 위한 FRP 외부 부착공법에서 사용하는 실험 방법들을 본 시스템에서도 사용할 수 있다고 판단되며, 이 중 실제 본 교량 바닥판 시스템의 부착거동을 가장 유사하게 표현한다고 생각되는 보 휨 실험(beam bending test) 방법을 채택하여 실험하였다.

### 2.2 실험 시편 제작

본 연구에 사용한 FRP 판은 현재 생산되어 상품화 되어 있는 S사의 제품으로, 리브(rib) 사이를 폭 7.6 cm로 절단하여 사용하였다. Fig. 1에 실험에 사용한 FRP판 및 콘크리트 부재의 형상 및 치수를 나타내었으며, 사용된 FRP 판의 역학적인 성질은 Table 1에 나타내었다.

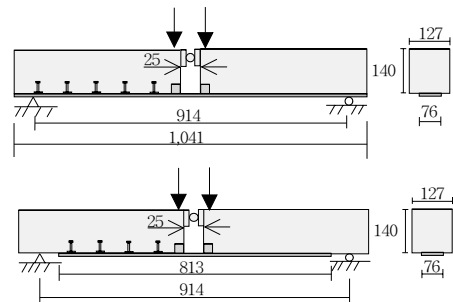


Fig. 1 실험시편 형상 및 치수

Table 1 FRP 재료특성

Type	Manufacture M.	Tensile strength(MPa)	Modulus of elasticity(MPa)
GFRP	Pultrusion Process	481.3	26,889.7

Table 2 에폭시 재료특성

Tensile strength (MPa)	Elongation at break(%)	Comp. yield strength (MPa)	Comp. modulus (MPa)	Slant shear strength (MPa)
34.5	1	79	2200	16.5

실험시편의 제작 순서는 먼저 FRP 판을 폭 7.6cm 로 먼저 절단 후 FRP 판 내부 하단 부분에 에폭시 도포한 후 골재를 그 위에 살포하였다. 실험에 사용한 에폭시는 B사의 제품으로 재료특성은 Table 2와 같다. FRP 판의 표면은 별다른 처리 없이 먼저만 제거 후 공장에서 생산된 상태 그대로를 이용하여 에폭시를 도포 후, 에폭시가 경화되기 전에 구멍이 뚫린 버킷(bucket)을 이용하여 전체 표면의 약 30%정도를 골재 부착하였다. 사용한 골재는 크기 1.59~2.54mm 인 모래이며 완성된 FRP 판을 거꾸집으로 하여 일반 상용 레미콘을 이용하여 실험시편을 제작하였다. 사용된 레미콘은 최대골재치수 19mm, 28일 압축강도는 27.6MPa로 계획하였으며, 실험 당시 발현강도는 평균 31.3 MPa로 측정되었다.

제작된 실험시편은 2가지 종류이며 각각 2개씩 총 4개의 실험시편을 제작하였다. 실험시편의 자세한 사항은 Table 3에 나타내었다. FRP 판과 타설 콘크리트의 부착은 한쪽 면만 하였고, 반대편 쪽은 스티드(stud)를 이용하여 고정시켰다. 이와 같은 한쪽 고정 방법은 기존 구조물의 보수/보강공법의 부착실험에서도 유사하게 이용하고 있는 방법이다.

### 2.3 실험 및 계측

Fig. 2는 실험 전경이며, 데이터는 Fig. 3과 같이 FRP 판에 부착한 철근용 전기저항식 변형률계이지, LVDT와 로드셀(load cell)를 통해 계측하였다. 첫



Fig. 2 실험 전경

Table 3 실험시편 상세

Specimen ID	Bond length of FRP (cm)	Thickness of FRP (mm)	Compressive strength of concrete (MPa)
SB1	104	4.3	29.2
SB2	104	4.3	31.0
SB3	81	4.3	31.6
SB4	81	4.3	33.5

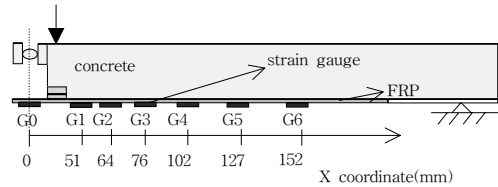


Fig. 3 실험시편 및 게이지 부착 위치

번째 게이지, G0는 FRP 판의 중앙부분, 즉 FRP 판과 콘크리트가 부착되지 않은 중앙 지점에 설치하였고, FRP 판과 콘크리트 부착 시작점엔 G1을 설치하고 그 후 G2~G6를 1.27cm, 2.54cm 간격으로 그림과 같이 설치하였다. LVDT를 이용하여 변형률계이지 G6 위치에서 FRP 판과 콘크리트의 상대변위를 계측하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 파괴형상 및 변형률 분포

파괴는 예상한 대로 FRP 판과 타설 콘크리트의 부착면에서 발생하였고, 스티드(stud)로 고정된 부분은 실험 종과 후에 세밀이 관측한 결과 예상한 대로 별다른 변형 및 파괴가 발생하지 않았다. Fig. 4는 실험결



Fig. 4 실험 후 파괴 모습

과 부착면의 파괴모습을 보여주고 있다. 전반적인 파괴 양상은 한쪽으로 치우침이 없이 균일하게 파괴되는 양상을 보여 실험 시 편심 등의 영향은 없는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 FRP 판과 타설 콘크리트의 부착면의 파괴 후의 모습이다. 그림에서 보는 바와 같이 FRP 판에 부착한 모래와 콘크리트 일부 표면이 단락되어 파괴되는 형태를 보여주고 있다. FRP 판에 부착한 모래가 파괴 후에도 많은 부분이 FRP 판에 그대로 부착되어 있는 모습을 보여주고 있다. 이러한 파괴형태는 콘크리트, 사용한 에폭시 및 모래 등의 종류 및 분포에 다소 영향을 받을 것으로 추정되나 일반적으로 에폭시 부착능력이 보통 콘크리트에 비해 크기 때문에 비슷한 현상이 발생될 것으로 예상된다. 첫 번째 실험 시편 SB1의 실험에서 부착의 선단부분에 다소의 콘크리트가 잔재하였는데 이는 FRP 판이 휘어짐에 의한 국부적인 응력집중에 의한 것으로 판단된다. FRP 판이 지점까지 연장한 경우 즉 실험시편 SB1, SB2와 지점 직전까지 부착한 실험시편 SB3, SB4 2가지 모



Fig. 5 부착 파괴 후 FRP 판과 콘크리트 면

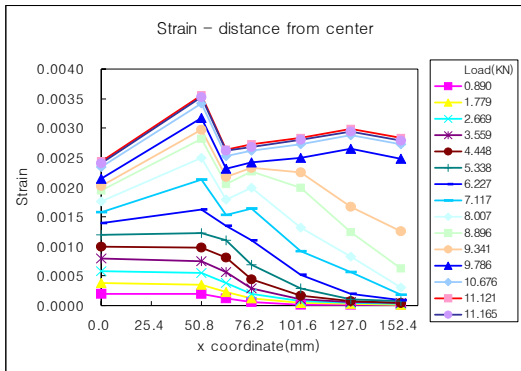


Fig. 6 국부 변형률의 분포

두 전체의 부착과괴는 임계점에 다다른 후 많은 양의 슬립을 동반하면서 급격히 파괴되는 양상을 보여 주고 있으므로 본 실험의 경우 지점조건의 영향은 미미하다고 판단된다.

FRP 판의 증양으로부터 Fig. 3과 같이 설치된 변형률게이지에 의해 각각의 위치에서 변형률을 측정하였다. 변형률의 분포는 Fig. 6에서 보는바와 같이 하중단계에 따라 서로 다른 경향을 보여주고 있다. 첫 번째는 하중 초기 단계로서 하중이 증가함에 따라 FRP 판과 타설 콘크리트의 부착이 시작되는 부분에서 변형률이 최고 값을 나타내며 끝단으로 갈수록 기하급수적으로 감소하는 경향을 보인다. 그 후 부착 시작점에서 미세균열이 발생하면서 최대 변형률 값은 선단 쪽으로 전이되어 변형률의 분포는 부착 시작점에서 선형적으로 증가하다 변형률 최고 값에 도달한 후 다시 선형적으로 감소하는 경향을 보여준다. 하중이 계속 증가함에 따라 변형률이 최고점 이후 선형적으로 감소하다 수평을 이루면서 최종적인 파괴를 보여주고 있다. 그러나 FRP 판과 타설 콘크리트의 부착이 시작되는 점 즉 G1에서 변형률은 계속 최고 값을 나타내고 있는데 이는 FRP 판의 급격한 휘어짐에 의한 응력집중의 영향으로 보여 진다.

### 3.2 국부 부착응력-슬립 관계

국부 부착응력은 부착면의 위치에 따라 상이하므로 반드시 부착면을 부분적으로 나누어 각각의 영역에서 국부 부착응력을 산정해야 한다. FRP 판을 선형탄성으로 가정할 때 국부 부착 전단응력은 평형조건으로부터 구할 수 있으며, 본 연구에서 변형률을 일정한 간격을 두고 측정 하였으므로, 국부적으로 인접한 두 변형률게이지 사이의 국부 부착응력을 다음과 같이 구할 수 있고 이를 통해 국부 부착전단응력의 변화를 살펴 볼 수 있다.<sup>(14)(15)(16)</sup>

$$\tau_{i, i+1} = tE \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}{x_{i+1} - x_i}, \quad i=5,4,3,2,1 \quad (1)$$

여기서  $\tau_{i, i+1}$ 는  $G_i$ 와  $G_{i+1}$ 사이의 평균 부착응력,  $t$ 와  $E$ 는 FRP판의 두께 및 탄성계수,  $\varepsilon_i$ 는  $G_i$  위치에

서의 변형률,  $x_i$ 는  $G_i$  위치의 x좌표 값이다.

$G_i$  위치에서의 슬립은 콘크리트의 변형을 무시하면  $G_i$  위치와 인접한  $G_{i+1}$  위치 사이의 FRP판의 신장량과 같다. 변형률을 일정한 간격을 두고 측정하였으므로 각각 인접한 두 지점 사이의 슬립량은 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>(14)(15)(16)</sup>

$$S_{i,i+1} = S_{i+1,i+2} + \frac{(\varepsilon_i + \varepsilon_{i+1})(x_{i+1} - x_i)}{2}, \quad i=5 \sim 1, \quad S_{6,7} \quad (2)$$

여기서  $S_{i, i+1}$ 는  $i$ 와  $i+1$  사이의 슬립,  $\varepsilon_i$ 는  $i$ 위치에서의 변형률,  $x_i$ 는  $i$  위치의 x좌표 값,  $S_{6,7}$ 는 변형률계이지 끝단에서 측정된 FRP 판과 콘크리트의 상대 변위량이다.

각각의 구간에서 변형률계이지의 위의 식에 의해 국부 부착응력과 슬립과의 관계를 유도 할 수 있다, 위의 관계를 이용하여 각각의 구간에서의 국부 부착응력 및 슬립곡선을 그리면 Fig. 7와 같다. 실험시편 SBI의 경우는 처음 실험한 경우로 끝단의 상대변위 측정에 오차가 있었으므로 이후 데이터 분석에서는 전체 슬립량과는 관계 없는 국부부착응력만 참고하였다.

### 3.3 인장력-슬립 관계 및 계면 파괴에너지 (interfacial fracture energy)

FRP 판에 작용하는 인장력(pullout force)은 평형 방정식을 이용해 산정하였다. FRP 판에 인장력이 작용함에 따라 FRP 판과 콘크리트 사이에는 국부 부착응력이 발생하게 된다. 하중이 증가함에 따라 FRP 판과 콘크리트 사이의 부착 시작점에서 국부 부착응력이 점차 증가하다 최고 국부 부착응력에 도달한 후 FRP 판과 타설 콘크리트 사이의 부착면에 국부적인 미세균열이 발생하고 이로 인해 국부 부착응력이 감소되면서 인접지역으로 최고 국부 부착응력 값이 전이되어 최종적으로 전체 부착면이 파괴에 이르는 것이 이상적인 관계이다.

FRP 판과 타설 콘크리트의 부착 시작점에서의 총 변위는 식(2)에 의해 총 슬립량으로 구했다. FRP 판에 작용하는 인장력과 총 변위 곡선은 Fig. 8과 같다. 실험시편 SBI의 경우, 처음 실험한 경우로  $G_6$  위치

에서 FRP와 콘크리트의 상대변위를 측정하지 않아 총 슬립량 계산을 계산할 수 없어 이를 제외한 값을 가지고 나타내어 다른 실험시편의 결과치와 총 슬립량에서 차이를 보여주게 된다. 그러므로 이후 데이터 분석에서는 참고로만 이용하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 FRP 판에 가해지는 하중이 임계점까지 증가하다 더 이상의 증가 없이 변위가 크게 발생하고 최종적으로 파괴가 되는 양상을 보여주고 있다.

국부 부착응력-슬립 곡선의 면적으로 표현될 수 있는 계면 파괴에너지는 부착특성을 나타내는 중요한 변수 중의 하나로서 부착강도 및 부착면의 파괴 매카니즘 특성을 좀더 명확히 알 수 있게 하는 유용한 변수이다.<sup>(17)</sup> FRP 판과 콘크리트 사이의 계면 파괴에너지  $G_f$ 는 다음 식으로 표현 될 수 있다.<sup>(15)(16)(18)</sup>

$$G_f = \frac{P^2}{2Etb^2} \quad (3)$$

여기서  $G_f$ 는 계면 파괴에너지(interfacial fracture energy),  $P$ 는 FRP 판에 작용하는 임계하중으로서 유효 부착길이 이상의 부착면을 갖는 경우 부착면의 면적에 상관없이 일정한 값으로 알려져 있다,  $b$ 는 FRP 판의 폭,  $E$ 와  $t$ 는 각각 FRP 판의 탄성계수와 두께이다.

### 3.4 단순 부착모델 제안

각각의 구간에서의 국부 부착응력 및 슬립곡선은 Fig. 7과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 각각의 구간에서의 국부 부착응력 곡선들은 상당히 분산되는 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 현상은 FRP를 노후 구조물의 보수/보강을 위해 예폭시로 외부접착한 공법의 부착특성에서도 관찰되는 현상이다.<sup>(15)</sup>

그 원인들을 분석해보면, 부착의 시작지점인  $G_1$  위치의 변형률계이지의 경우 FRP 판의 휨 때문에 발생하는 응력집중현상으로 과도한 값을 나타내고  $G_5, G_6$ 의 경우 FRP 판과 콘크리트 사이 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 신뢰

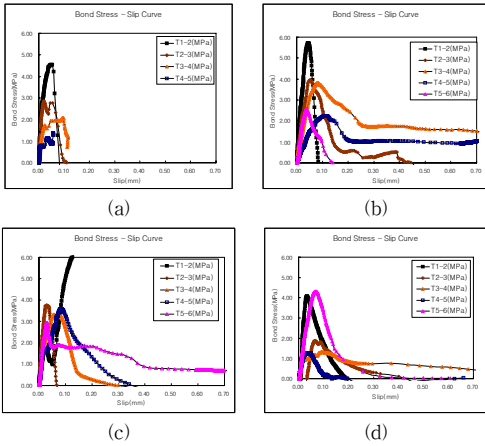


Fig. 7 국부 부착응력 및 국부 슬립 관계

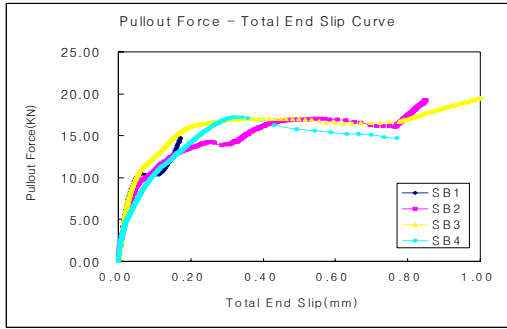


Fig. 8 인장력 및 총 슬립 관계

도가 있는 구간일 것으로 판단되는 G2, G3, G4의 위치에서 측정한 변형률 값만을 가지고 FRP 판과 타설 콘크리트 사이의 부착응력 특성을 분석하고자 한다.

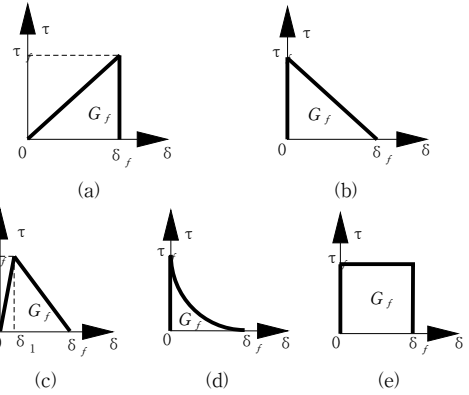


Fig. 9 여러 가지 단순부착모델(Teng, 2002)

일반적으로 단순화한 부착모델로서 Fig. 9와 같은 여러 가지 형태로 단순화한 관계식들이 제안되고 있다.<sup>(17)</sup> 그 중 (c)의 2중 직선 관계식이 실험결과에 가장 근접한 관계식으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서 제안하는 단순 부착모델은 이 관계식을 근간으로 하여 적절한 부착응력( $\tau_f$ ), 경사도, 총 슬립량( $\delta_f$ )을 계산하여 단순 부착모델을 제안하고자 한다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 국부 부착응력-슬립곡선에서 구간 G2~G3과 G3~G4의 그림이 양상은 비슷하나 최대 국부 부착응력 값, 초기 기울기 및 최고점 이후의 감소구간에서 다소 편차를 보여주고 있다. 그러므로 본 연구의 단순 부착모델에서는 최고 부착응력에 도달할 때까지의 상승부분과 최고점 이후의 하강부분으로 나누어서 생각한다.

상승부분의 경우 대체적으로 실험에서 도출된 부착

Table 4 단순부착모델(초기상승부분)

Specimen ID	Location	Max.bond stress (MPa)	Slope (MPa/mm)	Average of bond stress (MPa)	Average of slope (MPa/mm)
SB1	G2~G3	2.83	174.1	2.46	130.9
	G3~G4	2.08	87.6		
SB2	G2~G3	3.95	91.4	3.88	74.0
	G3~G4	3.81	56.5		
SB3	G2~G3	3.72	157.4	3.52	115.7
	G3~G4	3.32	74.0		
SB4	G2~G3	1.86	60.1	1.59	65.0
	G3~G4	1.32	69.8		

Table 5 단순부착모델(하강부분)

Specimen ID	Fracture energy $G_f$ (kN/m)	Bond stress (MPa)	Slope (MPa/mm)	Final slip S2 (mm)
SB1	0.162	2.46	130.9	0.132
SB2	0.217	3.88	74.0	0.112
SB3	0.217	3.52	115.7	0.123
SB4	0.222	1.59	65.0	0.279
Average	0.219*	2.86	96.4	0.171*

\* exclude SB #1

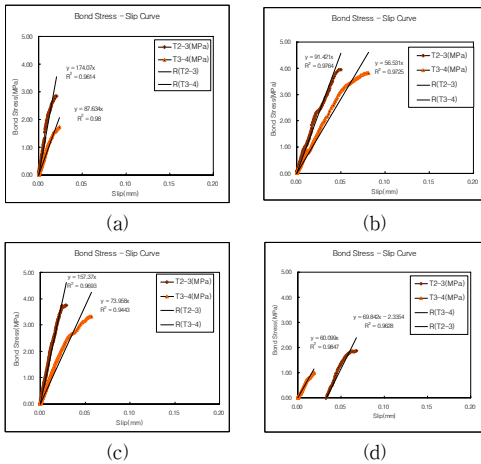


Fig. 10 국부 부착응력 및 인장력 관계

응력 관계식이 일관적이므로 이 자료를 이용한다. 각각의 구간에서 최고 부착응력 및 기울기 실험결과를 정리하면 Table 4와 같다. 최고 값 이후의 하강부분의 경우 실험 결과가 상당히 분산되는 경향을 보이므로 식 (1), (2)의 관계에서 구한 국부 부착응력 관계식 보다는 전체 계면 파괴에너지  $G_f$ 를 이용하고자 한다. 즉 부착모델의 면적은 계면 파괴에너지  $G_f$ 이므로 식(3)에 의해 측정된 임계하중 값을 이용하면 계면 파괴에너지 값을 구할 수 있고, 이를 정리하면 Table 5와 같다. 계산된 계면 파괴에너지 값은 부착모델의 면적과 동일하므로 손쉽게 총 슬립량을 계산할 수 있으며, 이를 정리하면 Table 5와 같고 그림으로 나타내면 Fig. 10과 같다.

#### 4. 결론

본 연구는 인장보강재 및 영구 거푸집으로 활용한

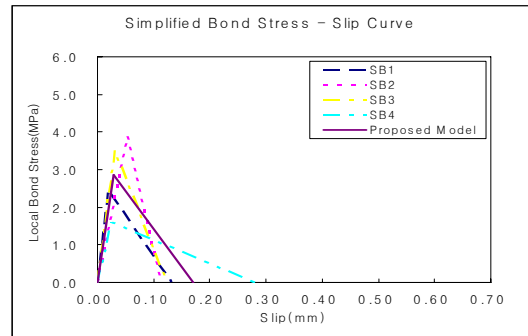


Fig. 11 제안된 단순 부착모델

FRP 판과 타설 콘크리트 사이의 부착거동을 살펴보기 위해 제 실험을 수행했고, 이를 이용하여 단순한 2중 직선 부착모델을 제안하였다. 본 합성 시스템의 경우 FRP 판을 영구 거푸집으로 사용하기 위해 현장에서 먼저 거푸집 대응으로 설치하고, 그 위에 현장에서 콘크리트를 타설하므로 기존 구조물의 보수/보강을 위해 FRP를 차후에 에폭시로 외부접착하는 공법과는 차이가 있다.

제안된 단순모델은 국부 최대 부착응력은 1.59~3.88MPa이며, 평균 2.86MPa정도이다. 초기 경사도는 65.0~130.9MPa/mm이며, 평균적으로 96.4 MPa/mm이다. 또한 총 슬립량은 0.112~0.279mm이며, 평균적으로 약 0.171mm이다.

앞으로 제안된 단순 부착모델의 타당성을 검증하기 위해 실험과 해석과의 비교를 위한 연구를 진행할 예정이다.

#### 감사의 글

본 연구는 관동대학교 교내연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 건설교통부, “교량현황조사”, 2005.
2. 건설교통부, “교량관리시스템의 운영 및 유지관리”, 2002.
3. 유승운, 배한욱, Oliva, M.G., and Bank, L.C., “FRP 판을 거푸집 및 보강재로 활용한 콘크리트 보

- 의 실험적연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 19권 1호, 2007, pp. 67-74.
4. 조근희, 조정래, 이영호, 김병석, “FRP-콘크리트 계면의 파괴 역학적 부착모델”, 대한토목학회 논문집, 24권 4호, 2004, pp. 653-661.
  5. ACI, “Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars”, ACI 440.1R-06, USA, 2006.
  6. Bank, L.C., “Composites for construction: Structural design with FRP materials”, John Wiley & Sons, USA, 2006.
  7. Deskovic, N., Triantafillou, T.C., and Meier, U., “Innovative design of FRP combined with concrete: Short-term behavior”, J. of Structural Eng., Vol. 121, No. 7, 1995, pp. 1069-1078.
  8. Hall, J.E., and Mottram, J.T., “Combined FRP reinforcement and permanent formwork for concrete members”, J. of Composites for Constructions, Vol. 2, No. 2, 1998, pp. 78-86.
  9. Dieter, D.A., Dietsche, J.S., Bank, L.C., Oliva, M.G., and Russell, J.S., “Concrete bridge decks constructed with FRP stay-in-place forms and FRP grid reinforcing”, J. of the Transportation Research Board, No. 1814, 2002, pp. 219-226.
  10. Cheng, L., Zhao, L., Karbhari, V.M., Hegemier, G.A., and Seible, F., “Assessment of a steel-free fiber reinforced polymer-composite modular bridge system”, J. of Structural Engineering, Vol. 131, No. 3, 2005, pp. 498-506.
  11. Berg, A.C., Bank, L.C., Oliva, M.G., and Russell, J.S., “Construction and cost analysis of an FRP reinforced concrete bridge deck”, Construction and Building Materials, Vol. 20, 2006, pp. 515-526.
  12. Bank, L.C., Oliva, M.G., Bae, H.U., Barker, J., and Yoo, S.W., “Pultruded FRP plank as formwork and reinforcement for concrete structures”, COMPOSITES 2006 Convention and Trade Show, ACMA, USA, 2006.
  13. Shao, Y., Wu, Z.S., and Bian, J., “Wet-bonding between FRP laminates and cast-in-place concrete”, Int. Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, IIFC, Hong Kong, 2005.
  14. Nakaba, K., Kanakubo, T., Furuta, T., and Yoshizawa, H., “Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete”, ACI Structural J., Vol. 98, 2001, pp.359-367.
  15. Dai, J., Ueda, T., and Sato, Y., “Development of the nonlinear bond stress-slip model of fiber reinforced plastics sheet-concrete interfaces with a simple method”, J. of Composites for Constructions, Vol. 9, No. 1, 2005, pp. 52-62.
  16. Lorenzis, L., Miller, B. and Nanni, A., “Bond of fiber-reinforced polymer laminates to concrete”, ACI Materials J., Vol. 98, 2001, pp. 256-264.
  17. Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., and Lam, L., “FRP Strengthened RC structures”, John Wiley & Sons, 2002.
  18. Taljsten, B., “Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete”, Int. J. Adhesion and Adhesives, Vol. 17, 1997, pp. 319-327.

(접수일자 : 2007년 1월 2일)