

FRP-콘크리트 계면의 부착모델 II : 부착특성

Bond-Slip Model for FRP-Concrete Interface II : Characteristics of Adhesive Joint

조 정 래* 조 근 희** 박 영 환*** 박 종 섭** 유 영 준* 정 우 태*
Cho, Jeong Rae Cho, Keun Hee Park, Young Hwan Park, Jong Sup You, Young Jun Jung, Woo Tai

ABSTRACT

Substantial experimental and theoretical work exists on the bond characteristics of FRP-concrete adhesive joints. Analytic solutions based on fracture mechanics are most commonly accepted for theoretical work on the joint. The solutions may be derived for the simple form of the shear stress-slip curve. And it is difficult to determine the model parameters consisting the curve. In this study, the bilinear curve with softening branch is introduced. The model parameters are determined by the method described by the companion paper with comparison of test results. There are many uncertainties in the test results of CFRP sheet adhesive joints, so that test results used for the construction of the regression problem should be reasonably selected.

1. 서론

FRP-콘크리트 부착을 이용하여 콘크리트와 FRP 보강재의 거동특성을 파악하려는 시도가 많은 연구자에 의해 시도되었다. 부착이음의 거동은 파괴역학(Yuan 등, 1999; Chen 등, 2001; Wu 등, 2002)에 기반한 해석해를 이용하는 방법이 많이 사용되어왔다. 그림 1 (a), (b)는 파괴역학을 이용하여 해석적으로 유도가능한 부착이음의 전단응력-슬립 관계를 나타내고 있다. 그림 1 (b)와 같이 유연화 구간을 갖는 곡선이 파괴역학을 이용한 해석해 중 가장 합리적인 재료모델로 알려져 있다. 이 연구에서는 그림 1 (b) 모델을 적용하여 CFRP 쉬트를 부착한 부착이음의 실험결과와 비교하여 곡선을 이루는 매개변수를 분석하였다. CFRP 쉬트 부착이음의 실험결과는 많은 불확실성을 가지고 있기 때문에, 회귀분석의 대상이 되는 적절한 실험결과를 선택할 필요가 있었다. 이 연구에서는 동일 조건의 여러 시험체에서 부착길이에 따른 극한하중 및 개별 시험체의 하중에 따른 변위특성을 매개변수 분석에 사용하였다. 회귀분석에 사용된 방법은 조근희 등(2003)이 제시한 방법을 이용하였다. 연구에 적용된 부착이음은 pull-pull 부착이음이고, 부착이음의 해석은 Wu(2002)의 해석해를 사용하였다.

* 정희원, 한국건설기술연구원 연구원

** 정희원, 한국건설기술연구원 선임연구원

*** 정희원, 한국건설기술연구원 수석연구원

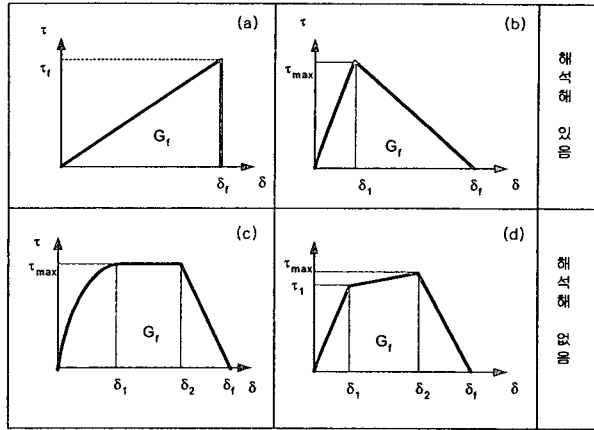
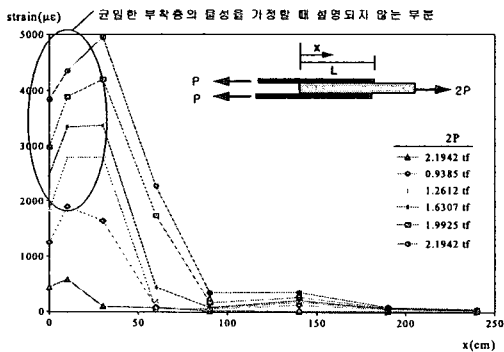


그림 1 부착이음에 적용가능한 본드-슬립 모델

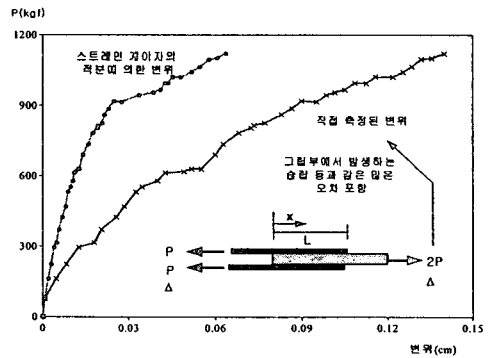
2. 회귀분석을 통한 본드-슬립 모델 매개변수의 결정

회귀분석을 위해 한국건설기술연구원에서 수행된 실험 결과를 이용하였다(한국건설기술연구원, 2002). 시험은 콘크리트 강도, 표면처리상태, 부착길이, 부착폭, 탄소섬유쉬트 적층수를 변수로 하여 24 개의 시험체 종류에 따라 각각 3개씩 동일조건의 시험체를 제작하여 CFRP 쉬트 양면부착 pull-pull 이음실험로 수행한 것이다. CFRP 쉬트 부착이음 실험은 많은 불확실성을 가지고 있다. 예를 들어 동일 조건의 시험체를 실험한 결과가 큰 편차를 보일 수 있다. 이것은 에폭시를 이용해 CFRP 쉬트를 함침하는 과정에서 균일한 작업이 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

부착이음 실험에서 일반적으로 계측되는 데이터는 가력하기 위해 고정하는 그림에서 측정되는 하중과 변위, 그리고 FRP 표면에 부착한 변형률계이지에서 측정되는 쉬트의 축방향 변형률 등이다. 이 중에서 하중은 신뢰할 수 있는 값이지만, 변형률 및 변위는 신뢰도가 떨어진다. 그림 2의 (a)는 시험체의 축방향 변형률을 나타낸 것으로 하중의 증가에 따라 거리에 대해서 나타낸 것이다. 그림에서 좌측과 같이 부착면의



(a) 축변형률분포



(b) 측정된 변위와 적분된 변위

그림 2 CA270L-25 시험체의 시험결과

끝단에서 변형율이 감소하는 데, 이것은 부착응력이 부착면을 따라 일정하지 않음을 나타내는 것이고, 대부분의 부착이음 실험에서 나타나는 현상이다. 그림 2 (b)는 직접 측정된 변위와 축방향 변형율을 적분하여 구한 변위를 비교하여 나타낸 것이다. 그림과 같이 큰 오차가 발생하는 것은 고정 장치 (그림)에서 많은 슬립이 발생하기 때문이다. 결론적으로 변형률을 직접 사용하는 것 보다는 평균적인 분포를 고려하여 변형율을 적분한 변위를 직접 측정된 변위 대신 사용하는 것이 타당하다. 이상의 관찰을 통해 회귀분석에 사용할 두 가지 실험결과를 선택하였다.

(1) 극한하중-부착길이

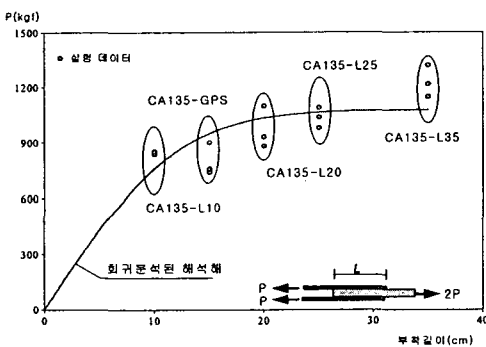
- 부착길이가 다르고, 다른 조건은 동일한 다수 실험체의 실험 결과 사용
- 파괴에너지($G_f = \tau_f \times \delta_f / 2$)를 비교적 정확히 산정할 수 있다.
- 짧은 부착길이를 가진 시험체가 부족할 경우 δ_1 을 정확하게 산정할 수 없다.

(2) 하중-변위의 회귀분석

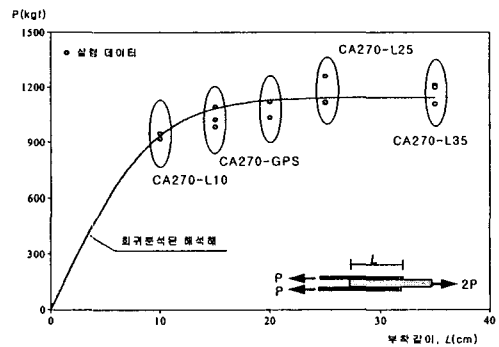
- 하나의 시험체를 대상으로 하중과 변형율을 적분한 변위를 사용
- 동일 조건의 시험체가 큰 편차를 보일 수 있으므로 대표성을 가지는 시험체를 선정해야 한다.

선택된 실험결과를 회귀분석하여 재료모델의 매개변수를 결정하는 기법은 조근희 등(2003)이 제안한 physical programming 기법과 genetic algorithm을 사용하였고, 부착이음의 해석은 Wu 등(2002)이 제안한 pull-pull 이음의 해석해를 사용하였다.

그림 3은 콘크리트 강도 135kgf/cm^2 , 270kgf/cm^2 를 갖는 시험체 군에 대해 “극한하중-부착길이”에 대해 회귀분석한 결과이다. 점으로 표현된 것은 실험데이터이고, 실선으로 나타낸 것은 파라미터 δ_1 , δ_f , τ_f 를 이용하여 부착길이에 따른 극한하중 P_u 를 해석적으로 계산한 결과이다. 표 1은 실험결과 및 계산 결과를 요약한 것이다.



(a) $f_{ck} = 135 \text{ kgf/cm}^2$ 군의 실험체



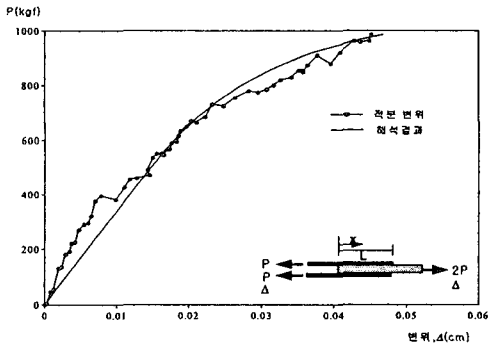
(b) $f_{ck} = 270 \text{ kgf/cm}^2$ 군의 실험체

그림 3. 극한하중-부착길이의 회귀분석

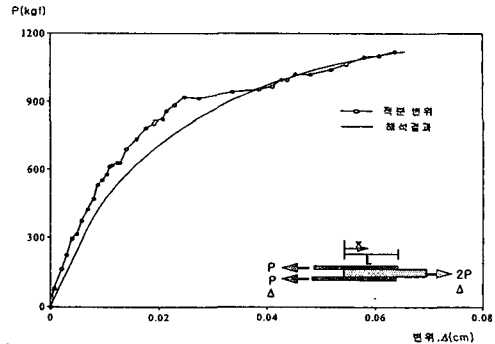
표 1. "극한하중-부착길이"의 회귀분석에 의한 모델 파라미터

실험체 공통 조건	분석대상 시험체	부착길이	모델 파라미터			G_f	τ_f/δ_1
			τ_f	δ_f	δ_1		
$f_{ck} : 135 \text{ kgf/cm}^2$ 표면처리 : GPS 부착폭 : 5cm FRP 설계두께 : 0.011cm	CA135-L10	10	17.8 kgf/cm ²	0.0995 cm	0.04991 cm	0.88555 kgf/cm	356.64 kgf/cm ³
	CA135-GPS	15					
	CA135-L20	20					
	CA135-L25	25					
	CA135-L35	35					
설계 $f_{ck} : 270 \text{ kgf/cm}^2$ 표면처리 : GPS 부착폭 : 5cm FRP 설계두께 : 0.011cm	CA270-L10	10	24.7 kgf/cm ²	0.0813 cm	0.0489 cm	1.004055 kgf/cm	504.39 kgf/cm ³
	CA270-GPS	15					
	CA270-L20	20					
	CA270-L25	25					
	CA270-L35	35					

그림 4은 CA270GPS, CA270-L25 시험체에 "하중-변위" 성분을 회귀분석한 결과를 나타낸 것이다. 이 경우 변형율을 적분한 적분변위가 필요한데, 계측된 변형률게이지의 값이 극한 하중까지 측정된 두 가지 시험체에 대해 적용한 것이다. 표 2는 "하중-변위"를 회귀분석하여 결정한 파라미터를 나타낸 것이다.



(a) CA270GPS 시험체



(b) CA270-L25 시험체

그림 4. 하중-변위의 회귀분석

표 2. "하중-변위"의 회귀분석에 의한 모델 파라미터

시험체	모델 파라미터			G_f	τ_f/δ_1	비고
	τ_f	δ_f	δ_1			
CA270-GPS	27.6 kgf/cm ²	0.0566 cm	0.01582 cm	0.78108 kgf/cm	1744.627 kgf/cm ³	
CA270-L25	24.8 kgf/cm ²	0.0806 cm	0.006580 cm	0.999440 kgf/cm	3768.997 kgf/cm ³	

3. 결론

이 연구에서는 FRP-콘크리트 부착이음의 부착층의 전단응력-슬립 곡선의 매개변수를 결정하였다. 콘크리트의 미소균열특성을 반영하고 있는 유연화 구간을 갖는 전단응력-슬립 곡선을 도입하였고, 곡선의 매개변수인 δ_1 , δ_2 , τ_f 를 CFRP 쉬트 부착이음 시험 결과와 비교하여 결정하였다.

“극한하중-부착길이”를 회귀분석한 결과는 시험체의 파괴에너지에 대해 대표성과 신뢰성이 있는 결과를 나타내었다. 파괴에너지 G_f 는 콘크리트 강도가 클수록 크고, τ_f 역시 콘크리트 강도에 의존하는 값으로 콘크리트의 인장강도와 그 크기가 비슷함을 알 수 있었다. 기존의 연구결과에 의하면, 최대국부전단응력 τ_f 는 콘크리트의 강도와 밀접한 연관이 있는 값이다. Chen과 Teng(2001)은 τ_f 를 콘크리트 할열 인장 강도에서 구하도록 제안하고 있으며, Niedermier(1996)은 독일의 DIN1048에 따라 구할 수 있는 평균 콘크리트 표면 인장 강도에서 구하도록 제안하고 있다. 하지만 δ_2 , δ_1 의 값은 현재 분석되는 데이터가 작은 관계로 추가적인 실험데이터의 분석이 필요할 것이라 판단된다. 또한 “하중-변위”를 회귀분석한 결과 CA270-L25의 파괴에너지와 τ_f 가 “극한하중-부착길이”를 회귀분석한 결과가 거의 유사하므로, CA270-L25가 콘크리트 설계기준 강도 270kgf/cm² 인 시험체의 대표성을 가장 잘 표현하고 있는 것으로 판단되었다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

- G_f 와 τ_f 는 콘크리트 강도가 클수록 크다.
- τ_f 는 콘크리트의 인장강도와 비슷한 크기를 갖는다.
- δ_1 , δ_2 는 분석방법별 편차가 크고, 표본수가 작아 규칙성을 파악하기 힘들다. 따라서 앞으로 추가적인 실험 및 분석이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원의 기관고유사업인 장수명 합리화 바닥판 개발(I)의 과제 지원금에 의해 수행된 것입니다.

참고 문헌

1. 조근희, 조정래, 김병석, 이영호, 진원중, 김성태 (2003) FRP-콘크리트 이음의 부착모델 연구 I: 이론적 연구.
2. 조근희, 이영호, 김병석, 김영진 (2003) FRP와 콘크리트의 부착 거동 특성 : 해석적 연구, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회 (심사중).
3. 한국건설기술연구원 (2002) 노후 교량의 성능향상 기술 개발.
4. Chen, J.F. and Teng, J.G. (2001) Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete, Journal of Structural Engineering, Vol. 127, No. 7, pp. 784-791.
5. Goldberg, D.E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, Reading Mass.
6. Messac, A. (1996) Physical Programming: Effective Optimization for Computational Design, AIAA Journal, Vol. 34, No. 2, pp. 149-158.

7. Wu, Z., Yuan, H. and Niu, H. (2002) Stress Transfer and Fracture Propagation in Different Kinds of Adhesive Joints, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 128, No. 5, pp. 562-573.
8. Yuan, H. and Wu, Z. (1999) Interfacial Fracture Theory in Structures Strengthened with Composite of Continuous Fiber, *Proceeding of Symposium of China and Japan: Science and Technology of 21st Century*, Tokyo, September, pp. 142-155.