

NSM 보강 RC보의 부착파괴 제한에 관한 해석적 연구

An Analytical Study on Limits of Debonding Failure for RC Beams strengthened with NSM Reinforcements

정 우 태* 박 종 섭** 박 영 환***
Jung, Woo Tai Park, Jong Sup Park, Young Hwan

ABSTRACT

This paper presents an analytical results on limits of debonding failure for RC beams strengthened with near-surface mounted(NSM) CFRP strips. An analytical model was derived to predict the failure mode and the maximum load. An analytical model has two assumptions. The first is that the debonding failure occurs at the epoxy-concrete interfaces. The second is that the debonding failure occurs at the end of the FRP reinforcement due to concentration of shear stress. Results of the comparison of existing test data and analytical model data have predicted the failure mode and the maximum load well. Also, this paper proposed limits of debonding failure to prevent the debonding using the strengthening area and the groove depth.

1. 서론

Fiber-Reinforced-Polymer(이하 FRP) 보강재는 기존 구조물의 보수 및 보강뿐만 아니라 신설구조물의 철근을 대체할 재료로 최근에 광범위하게 사용되고 있다. 외부에 부착되는 FRP 쉬트 및 판은 콘크리트 보와 슬래브의 휨 및 전단보강을 목적으로 현재 사용되는 가장 일반적인 기술이다. 많은 경우에 있어서 외부에 부착된 FRP 쉬트 및 판의 파괴는 FRP와 콘크리트 계면에서 부착파괴와 같은 조기 파괴가 발생하는 문제점이 대두되었다(한국건설기술연구원, 2003). 또한 외부에 부착된 FRP는 차량의 충돌, 화재 등으로부터 손상을 받을 수 있고, 이러한 손상에 대한 보호장치가 불충분하면 구조물의 사용수명이 감소할 수 있을 것이다. 이러한 문제를 최소화하고 FRP 재료의 이용가치를 향상시키기 위해 표면매립공법(Near Surface Mounted Strengthening)이 도입되었다.

표면매립공법은 FRP 로드나 판을 미리 제작된 홈 안에 고강도 에폭시나 그라우트를 사용하여 부착시키는 공법이며, 외부 부착되는 공법과 같이 표면준비작업이 필요하지 않다. 표면매립공법의 사용은 콘크리트 덮개 깊이에 따라 좌우되며 FRP 보강재는 시공 후에 차량 충돌 등의 기계적인 손상으로부터 보호될 수 있다(El-Hacha, 2004).

* 한국건설기술연구원 연구원

** 한국건설기술연구원 선임연구원

*** 한국건설기술연구원 수석연구원

기존 연구에 따르면 표면매립공법의 파괴모드는 크게 콘크리트와 에폭시 계면의 부착파괴, 에폭시와 보강재 계면의 부착파괴, 보강재 파단으로 나타났다. 또한 이러한 파괴모드를 규명하기 위한 부착 실험과 해석연구가 수행되고 있다. 본 연구에서 수행한 표면매립보강 보의 파괴모드는 콘크리트와 에폭시 계면의 부착파괴와 보강재 파단의 두 가지로 나타났다. 표면매립공법은 파괴모드에 따라 보강부재의 성능이 좌우되므로 보강성능을 예측하기 위해 파괴모드 해석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 표면매립공법으로 보강된 철근콘크리트 보의 파괴모드를 예측할 수 있는 해석식을 유도하고 실험결과와 비교하였다. 또한 NSM 공법으로 보강된 RC보의 부착파괴를 방지하기 위하여 파괴모드 해석을 통하여 제한값을 설정하였다.

2. 해석모델

표면매립공법으로 보강된 실험체의 파괴모드를 예측하기 위해 외부에 부착된 FRP 판의 해석모델 (Malek, 1998)을 수정하여 해석식을 유도하였다. 유도된 해석식은 매립된 보강보의 파괴가 에폭시-보강재가 아닌 에폭시-콘크리트 계면에서 파괴된다고 가정하였다. 이러한 가정은 본 연구의 실험결과뿐만 아니라 El-Hacha(2004), Hassan(2003) 등의 실험결과에서도 대부분의 파괴모드가 에폭시-콘크리트 계면에서 파괴되는 것으로 나타났기 때문이다. 또한 에폭시 접착제와 FRP 보강재는 콘크리트에 비하여 강도와 접착 특성이 우수하므로, 표면매립되는 FRP 보강재의 조기 박리는 콘크리트 전단강도에 의해 지배될 것으로 판단된다. 또한 박리파괴는 휨 균열이나 균열단면의 결과로서 발생하는 것이 아니라 보강재의 끝단에서 전단응력 집중에 의해 발생하는 것으로 가정하였다.

그림 1에서와 같이 보강 콘크리트 보의 미분 평형을 고려하여 길이 dx 의 전단응력 τ 는 다음과 같이 보강재의 공칭 응력 증분 df_f 와 보강재의 단면적 A_f , 홈의 깊이 h_g 로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \frac{1}{2} \frac{A_f}{h_g} \frac{df_f}{dx} \quad (1)$$

에폭시 주변콘크리트의 전단응력-변형률 관계를 선형으로 가정하면 전단응력 $\tau = G_c \gamma$ (G_c : 전단탄성계수, γ : 전단변형률)이다. 에폭시 주변 콘크리트의 변형률-

변위 관계를 선형으로 가정하면 전단변형률은 $\gamma = \frac{du}{dz} + \frac{dw}{dx}$ (u : 에폭시 주변 콘크리트의 종방향 변위, w : 횡방향 변위)이다. $\tau = G_c \gamma$ 를 x 에 대해 미분하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d^2 f_f}{dx^2} = 2 \frac{h_g}{A_f} G_c \left(\frac{d^2 u}{dx dz} + \frac{d^2 w}{dx^2} \right) \quad (2) \quad \frac{d^2 f_f}{dx^2} - \Omega^2 f_f = -\Omega^2 n f_c \quad (\Omega^2 = \frac{2h_g G_c}{A_f t_a E_f}, n = \frac{E_f}{E_c}) \quad (3)$$

4점 재하된 단순 지지보인 경우, 콘크리트 수직응력 f_c 는 유효단면 2차 모멘트 I_{eff} 항으로 산정되며 ($f_c = \frac{P_0 y_{eff}}{2I_{eff}} + \frac{P y_{eff}}{2I_{eff}} x$; P : 적용하중, l_0 : 보강재단부로부터 지점까지의 길이, x : 보강단부로부터

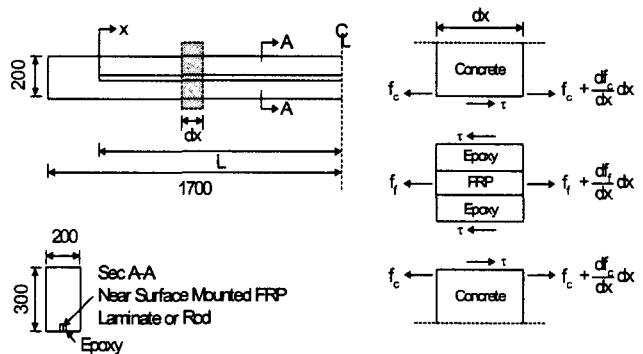


그림 1 미소요소의 전단력(mm)

의 거리, y_{eff} : 보강재에서 중립축까지의 거리), 콘크리트 균열로 인한 휨응력의 연속적인 감소를 나타내기 위해 I_{eff} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{eff} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right) I_{cr} \quad (4) \quad c_{eff} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^{2.5} c_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^{2.5}\right) c_{cr} \quad (5)$$

여기서, M_{cr} : 균열 모멘트, M_a : 적용하중에 대한 모멘트, I_g : 철근을 무시한 콘크리트 전체 단면의 중심축에 대한 단면 2차 모멘트, I_{cr} : 균열단면의 단면 2차 모멘트이다. 여기에 대응하는 중립축의 위치는 식(5)와 같다(c_g : 환산단면의 중립축 깊이, c_{cr} : 균열 환산단면의 중립축 깊이). $y_{eff} = d_f - c_{eff}$ (d_f : 압축상단으로부터 매립 보강재까지의 깊이)이므로 식 (3)을 다시 정리하면 식 (6)과 같고, 식 (6)의 해를 전단응력에 대해 나타내면 식 (7)과 같다.

$$\frac{d^2 f_f}{dx^2} - \Omega^2 f_f = -\Omega^2 n \left(\frac{P l_0 y_{eff}}{2 I_{eff}} + \frac{P y_{eff}}{2 I_{eff}} x \right) \quad (6) \quad \tau = \frac{A_f}{2 h_g} \left[\frac{n P l_0 y_{eff}}{2 I_{eff}} \Omega e^{-\Omega x} + \frac{n P y_{eff}}{2 I_{eff}} \right] \quad (7)$$

$$\tau_{max} = \frac{f_c' f_a}{f_c' + f_a} \quad (8)$$

박리는 전단응력이 주변 콘크리트의 전단강도에 도달할 때 발생된다. 콘크리트의 압축과 인장강도를 알고 있다면, 다음이 콘크리트의 전단강도를 산정할 수 있다. 여기서 f_c' 은 콘크리트의 28일 압축강도이며 f_a 는 콘크리트의 인장강도이다. 식 (8)의 전단강도와 식 (7)에서 유도된 전단응력이 같다면, 특정 하중조건과 보강길이에 대해 매립된 보강재의 박리하중을 결정할 수 있다.

3. 실험결과와의 비교

본 연구에서 실험한 표면매립보강된 실험체 중에서 1열 15 mm 깊이로 매립된 FRP 판, 1열 25 mm 깊이로 매립된 FRP 판, 2열 25 mm FRP 판의 경우에 대해서 파괴모드와 최대하중을 비교하였다 (한국건설기술연구원, 2004). 앞서 제안된 해석모델에서 도출된 식 (7)과 식 (8)을 사용하여 그림 2~그림 4와 같이 보강재 끝단에서 발생하는 전단응력을 산정하여 도시하였다. 그림 2는 15mm 매립된 FRP 판, 그림 3은 25mm 매립된 FRP 판, 그리고 그림 4는 FRP 판 2열 보강된 경우의 파괴모드 및 최대하중을 나타낸다. 그림에서 x축은 FRP 단부에서 발생하는 전단응력을 나타냈고, 전단응력이 콘크리트의 전단강도에 도달하면 에폭시-콘크리트 계면에서 파괴가 되는 것을 나타낸다. y축은 FRP 단부의 전단응력에 따른 하중의 크기로서, FRP 파단하중에 도달하면 FRP 파괴가 발생된다는 의미이다. 여기서 FRP 파단하중이란 보의 단면해석에 의한 값으로 FRP 보강재가 인장파괴 된다고 가정하여 산정된 값이다. 표 1은 그림 2~그림 4의 결과와 실험값을 정리하였다. 파괴모드를 살펴보면, 실험과 해석의 결과가 같으므로 파괴모드를 잘 예측하는 것으로 나타났다. 15, 25mm 매립된 FRP 판과 FRP 로드의 최대하중값은 2~10% 정도로 비교적 잘 예측할 수 있었다.

표 1 실험값과 해석값 비교

FRP 판	실험값		해석값		①/②
	최대하중(kN)①	파괴모드	최대하중(kN)②	파괴모드	
15mm 1열 매립	78.4	FRP 파단	71.14	FRP 파단	1.10
25mm 1열 매립	86.18	에폭시-콘크리트 박리	87.69	에폭시-콘크리트 박리	0.98
25mm 2열 매립	109.66	에폭시-콘크리트 박리	112.4	에폭시-콘크리트 박리	0.98

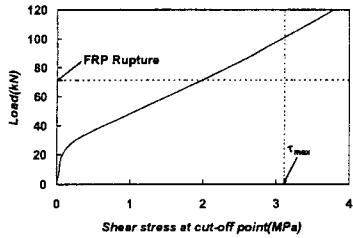


그림 2 FRP 판(15mm) 1열 보강

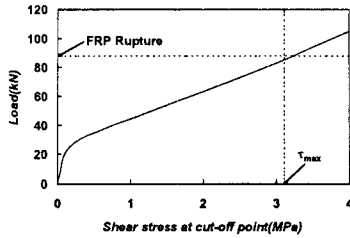


그림 3 FRP 판(25mm) 1열 보강

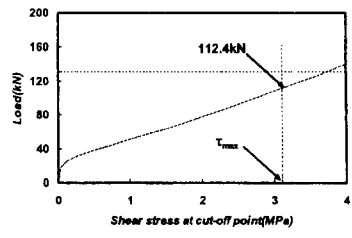


그림 4 FRP 판(25mm) 2열 보강

그림 5는 해석 및 실험결과를 토대로 FRP 판 부착 파괴 방식을 위해 보강량과 매립깊이와의 관계로부터 도출된 결과이다. 파괴모드해석으로부터 부착파괴가 예상되면 1열 보강의 경우에 A_f/h_g (보강량/매립깊이)=0.12, 2열 보강의 경우는 1열의 $A_f/h_g=0.09$ 값 이상으로 설계하여야 부착파괴를 방지할 수 있을 것으로 판단된다. 파괴모드해석에 의한 부착파괴 제한은 향후 여러 실험자료를 통해 검증되어야 할 것으로 판단된다.

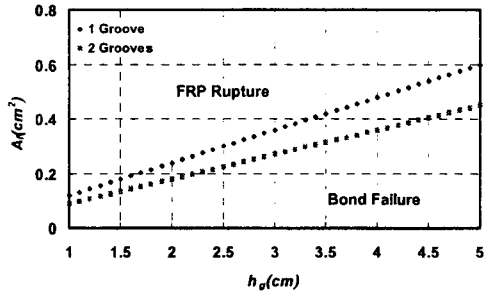


그림 5 FRP 판 부착파괴 제한

4. 결론

탄소섬유복합재료를 이용한 표면매립공법으로 보강된 철근콘크리트 보의 파괴모드를 예측할 수 있는 해석모델을 제안하였다. 해석모델은 표면매립된 보강보의 파괴가 예폭시-보강재가 아닌 예폭시-콘크리트 계면에서 파괴되며 박리파괴는 보강재의 끝단에서 전단응력 집중에 의해 발생하는 것으로 가정하여 도출하였다. 해석모델을 기존의 실험결과와 비교한 결과 FRP 판 1열 및 2열의 파괴모드 및 최대하중을 예측할 수 있었고 보강량과 매립깊이의 관계로부터 FRP 판 부착파괴를 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원 (2003, 2004), 노후 교량의 성능향상 기술 개발
2. R. EI-Hacha (2004), "Effectiveness of Near Surface Mounted FRP Reinforcement for Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams", Advanced Composite Materials in Bridges and Structures 4th International Conference
3. Malek, A., Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. (1998) "Prediction of failure load of R/C beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end" ACI Structural J. 95(1), 142-152
4. Tarek Hassan and Sami Rizkalla (2003), "Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips", Journal of Composites for Construction, V. 7, No. 3, pp. 248-257.