

강판으로 보강된 RC보의 부착파괴하중 예측

Prediction of Bonding Failure Load of RC Beams Strengthened by Externally Bonded Steel Plates

박윤제* 신동혁** 이광명*** 신현목****
Park, Yoon-Je Shin, Dong-Hyuk Lee, Kwang-Myong Shin, Hyun-Mock

ABSTRACT

In this paper, the Mohr-Coulomb criterion was adopted to predict the bonding failure load of the reinforced concrete beams strengthened by the externally bonded steel plates. Based on this criterion, a nonlinear analysis program of APSB (Analysis Program for Strengthened Beams) and nonlinear finite element analysis program of RCSD-SB (Reinforced Concrete Structural Design - Strengthened Beams) were developed. Numerical results were then compared with experimental results and good agreements were obtained.

1. 서론

강판으로 휘보강된 철근콘크리트 보부재에서 조기파괴를 일으키는 부착파괴 현상은 모체 콘크리트에 부착된 강판이 단부에서부터 떨어지는 현상으로서, 접착이 양호한 경우에도 강판의 보강두께 및 보강길이 등 보강형태에 따라서 발생할 수 있다. 이러한 부착파괴의 메카니즘과 부착파괴하중의 예측에 대한 해석적인 연구가 많이 진행되어 왔지만 아직까지 이러한 부착파괴거동이 명확히 규명되지 못한 실정이다.¹⁻⁴⁾

본 연구에서는 강판보강된 RC 보부재의 부착파괴 하중을 예측할 수 있는 해석프로그램을 개발하였으며 개발된 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 강판보강 휘부재실험을 통한 실험결과를 해석결과와 비교, 검토하여 잘 일치하는 결과를 얻었다.

* 정회원, (주)원경그룹 토목사업부 이사, 공학박사
** 정회원, 성균관대학교 토목공학과 박사과정
*** 정회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수
**** 정회원, 성균관대학교 토목공학과 교수

2. 부착파괴 이론 및 해석

2.1 계면요소와 부착파괴 기준

강판 접합면의 파괴 즉, 박리현상을 추적할 수 있는 계면요소의 파괴기준으로 그림 1과 같은 Mohr-Coulomb 파괴기준을 사용하였으며, 기준 식은 다음과 같다.

$$\tau + \sigma \tan \phi \geq c \tag{1}$$

여기서, c 는 접착제의 점착력이고 ϕ 는 접착제의 내부마찰각으로 실험을 통해 구해질 수 있다.

그림 1에서 rx 는 파괴가 시작되는 시점에서의 모아원의 반지름이며, rr 는 파괴 전의 임의의 하중에서의 모아원의 반지름이다. 또한, 보강 계면에 사용한 계면요소는 수직방향의 2개 절점의 위치가 같은 가상의 절점을 이용한 6절점요소 또는 4절점요소를 사용하였다. 계면요소를 사용하면 접착제의 접착방향에 평행한 수평 전단응력과 이에 수직인 방향의 수직응력이 산정될 수 있다.

계면요소의 강성 매트릭스는 다음과 같이 구성된다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma \\ \tau \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n & 0 \\ 0 & K_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} O \\ S \end{Bmatrix} \tag{2}$$

여기서, σ = 수직응력, τ = 전단응력, $K_n = E/t$, $K_s = G/t$, E = 접착제의 탄성계수, G = 접착제의 전단탄성계수, t = 접착제의 두께, O = 계면의 열림(opening), S = 계면의 미끄러짐(slip)이다.

계면요소의 전단응력 모델은 최대 전단응력값까지는 선형증가를 보이고 그 이후부터 부착파괴까지는 급격히 감소하는 것으로 가정하였다.

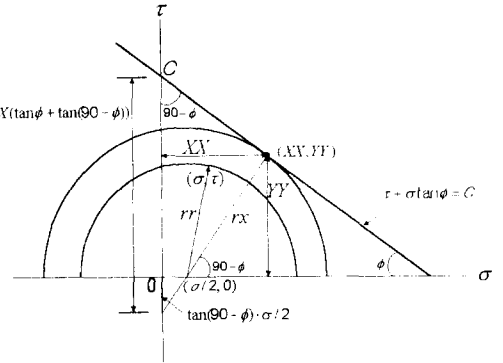


그림 1 Mohr-Coulomb 파괴기준

2.2 해석프로그램 개발

휨보강 보부재의 부착파괴하중을 예측하기 위하여 보강보의 중앙단면에 대하여 비선형 재료모델을 사용한 비선형해석 프로그램인 APSB(Analysis Program for Strengthened Beams)와 강판과 콘크리트의 부착계면에 대해 계면 요소를 사용한 유한요소해석 프로그램인 RCSD-SB(Reinforced Concrete Structural Design - Strengthened Beams)를 개발하였다. 두 프로그램은 식 (1)의 부착파괴기준을 도입하여 부착파괴하중을 예측할 수 있고, 부착파괴기준에 적용하는 계면응력 산정방법은 기존의 연구결과를 적용하였다.

APSB 프로그램은 콘크리트 압축상단의 변형률을 단계적으로 증가시키면서 중립축을 구하고, 구한 중립축에 대하여 평형방정식을 구성하여 모멘트를 계산하고, 이 때의 곡률을 구하여 처짐을 구하도록 구성되어 있다. 결과적으로 이 프로그램은 휨보강된 보의 하중-처짐곡선을 재하초기부터 부착파괴 순간 및 부착파괴 후의 부재거동까지도 표현할 수 있다.

RCSD-SB 유한요소해석 프로그램에 사용된 철근콘크리트 요소모델은 재료적 비선형 모델로서 콘크리트가 갖는 역학적 거동 즉, 이축응력 상태에서의 콘크리트의 거동, 콘크리트 속의 철근의 거동, 균열 발생 후 철근과 콘크리트의 부착거동, 균열면에서의 골재의 맞물림거동, 그리고 철근항복 후의 거동 등 복잡한 비선형성을 비교적 정확히 평가할 수 있고, 이들을 조합하여 균열의 발생, 철근의 항복, 파괴 등의 거동을 적절히 예측할 수 있는 모델이다.⁵⁾

3. 실험연구

3.1 실험체 제작

이 실험에 사용된 재료의 물성 중 콘크리트의 압축강도는 533 kgf/cm^2 이고 철근의 항복강도는 $3,500 \text{ kgf/cm}^2$ 이며 강관의 항복강도는 $2,700 \text{ kgf/cm}^2$ 을 나타내었다.

본 부재실험에서 수행된 휨보강 시험체의 구분 및 시험체 상세는 표 1과 그림 2에 나타내었다.

표 1 휨보강 시험체의 구분

시험체명	보강 두께 (mm)	보강 길이 (cm)	보강폭 (cm)	접착세 두께 (mm)
S3-150	3.0	150	13.0	3.0
S3-190	3.0	190		
S6-190	6.0	190		

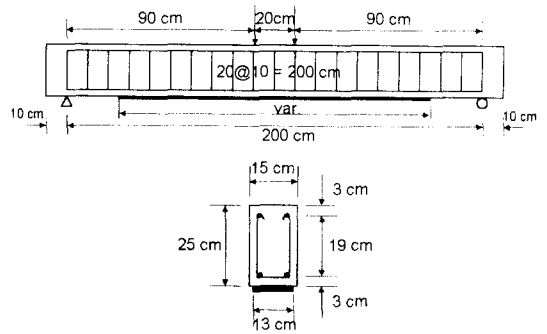


그림 2 휨보강 시험체 상세

3.2 실험결과와 해석결과와의 비교 및 분석

본 연구에서 수행한 강관으로 휨보강된 실험체의 실제 파괴하중에 대하여 APSB 프로그램 및 RCSD-SB 프로그램을 사용하여 부착파괴규준에 관한 식인 Mohr-Coulomb 파괴규준 식에서 내부마찰각을 45° 로 가정했을 때의 점착력 값을 구하였다.

또한, 휨보강 실험체 중에서 부착파괴를 일으킨 시험체인 S3-150과 S6-190에 대한 하중-처짐곡선을 실험치와 해석치를 비교하여 최대하중과 최대하중시의 처짐에 대한 해석결과를 실험결과와 비교하여 표 2에 정리하였으며, 그 하중-처짐 곡선을 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 시험체 S3-190은 부착파괴를 일으키지 않고 휨인장파괴 현상을 보여 해석결과에 포함시키지 않았다.

표 2 실험 및 해석 결과 비교

시험체명	최대하중 (tonf)			최대하중시 처짐 (mm)			점착력 (kgf/cm^2)		파괴형태
	Exp.	APSB	RCSD	Exp.	APSB	RCSD	APSB	RCSD	
S3-150	9.3	9.3	9.2	5.2	4.7	4.3	67	60	단부 부착파괴
S6-190	13.2	13.4	13.8	5.0	4.0	4.4	59	45	단부 부착파괴

표 2의 결과를 분석해 볼 때, 각각의 휨보강 시험체에 대하여 내부마찰각이 45° 로 가정했을 때 점착력 값은 다소 차이를 보이지만, 일정 범위 이내의 값을 적용할 경우 RCSD-SB 프로그램과 APSB 프로그램을 사용하여 구한 하중-처짐 곡선은 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 두 시험체의 결과를 비교해 볼 때 해석방법에 따라 점착력의 값이 다소 큰 차이를 보이므로 이에 대한 앞으로의 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

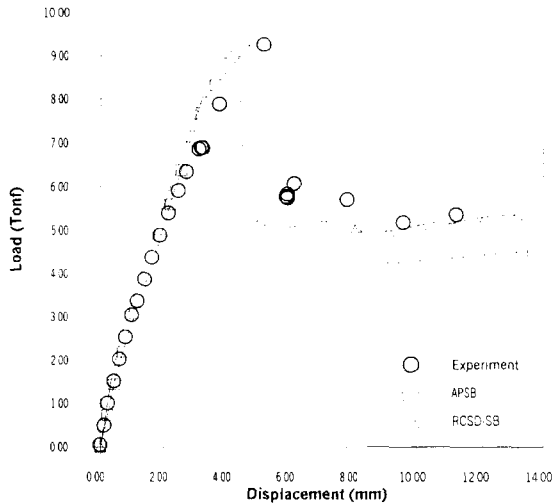


그림 3 하중-처짐곡선 (S3-150)

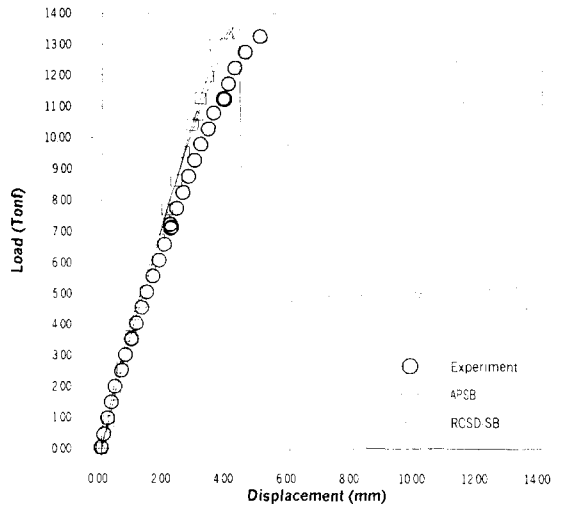


그림 4 하중-처짐곡선 (S6-190)

4. 결 론

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 계면응력 산정모델을 사용하여 강판으로 휨보강된 RC 보의 부착과괴 하중을 예측할 수 있는 비선형해석 프로그램 APSB를 개발하였다.
- (2) 강판으로 보강된 RC보의 구조해석을 위하여 기존의 유한요소해석 프로그램인 RCSD의 장점을 최대한 이용하고 Mohr-Coulomb 파괴규준을 적용한 계면요소를 도입하여 RCSD-SB 프로그램을 개발하였다.
- (3) 개발된 프로그램을 사용하여 예측한 강판으로 보강된 철근콘크리트 보의 하중-처짐 곡선과 실험으로부터 얻은 하중-처짐 곡선이 서로 잘 일치하는 결과를 얻었다.

참 고 문 헌

1. 배인환, 강판 및 탄소섬유로 보강된 철근콘크리트 보의 휨해석 및 설계기법연구, 박사학위논문, 한양대학교, 1998.
2. Jones, R., Swamy, R. N. and Charif, A., "Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-bonded Steel Plates," *The Structural Engineer*, Vol. 66, 1988, pp. 85-94.
3. Saadatmanesh, H. and Ehsani, M. R., "RC Beams Strengthened with GFRP Plates, II : Analysis and Parametric Study", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 117. No. 11, 1991, pp. 3434-3455.
4. Ziraba, Y. N., Non-Linear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams Repaired by Plate Bonding, Ph.D. Dissertation, King Fahd University of Petroleum and Minerals, 1993.
5. 中鉸穆, 繰り返し面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の有限要素解析, 博士學位論文, 東京大學校, 1988.