

# 강판으로 보강된 철근콘크리트 부재의 박리기준 유도

## Derivation of Plate Separation Criteria for Reinforced Concrete Members Strengthened with Steel Plates

오 병 환\*      박 대 균\*\*\*      조 재 열\*\*  
Oh, Byung Hwan    Park, Dae Gyun    Cho, Jae Yeol

### ABSTRACT

Steel plate bonding technique is most widely used in strengthening of existing concrete structures, but it has inherently a problem of the premature failure such as interface separation and rip off. So far, many studies have been carried out in the manner of laboratory tests for the reinforced concrete beams to find out the mechanism of the premature failure. However, in order to verify the characteristics of the premature failure, more reasonable local investigations are needed rather than such relatively global experimental works. In this study, therefore, the double lap test which simulate the pure shear loadings and the half beam tests which consider combined flexure-shear force have been done. There are, however, difficulties in getting the normal stress caused to premature failure, so that finite element analysis was performed, too. In numerical study, material nonlinearity was considered, and the interface element was applied to model the interface between steel plate and adhesive. From the results of experimental and numerical studies, a realistic failure criterion on the separation of steel plates has been derived.

### 1. 서 론

강판보강공법은 콘크리트 구조물의 보강공법으로 널리 쓰이는 공법이지만 보강된 보가 향상된 휨성능을 모두 발휘하기 전에 계면의 박리나 rip-off 등에 의해 조기파괴(premature failure)될 위험성을 가지고 있다. 현재까지도 이러한 조기파괴에 대한 연구가 많이 진행되고 있으나, 대부분 보 구조물을 대상으로 한 실내실험을 중심으로 수행되었기 때문에, 조기파괴를 규명하고 이를 구조물 설계에 반영하기 위해서는 국부적인 접착계면에 대한 연구가 필수적이라고 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 강판 보강된 구조물의 조기파괴특성을 규명하기 위하여 국부특성을 규명하기 위한 실험과 해석적 연구를 수행하였다. 접착계면특성 실험으로써 본 연구에서는 순수전단실험(double-lap test)과 휨전단실험(half-beam test)을 수행하였다. 실험적 연구만으로는 접착계면에서의 법선응력을 얻기 어려우므로, 비선형 유한요소해석을 수행하여 접착계면의 법선응력을 구하고자 하였다. 이를 위하여 이차원 유한요소모델과 다양한 재료모델 등에 대해 광범위한 해석을 수행하여 실험결

\* 서울대학교 토목공학과 교수

\*\* 서울대학교 토목공학과 박사수료

\*\*\* 서울대학교 토목공학과 박사과정

과 비교를 통하여 가장 적절한 해석 방법을 제시하고자 하였다. 이상의 두가지 방법에 따른 실험결과와 이를 토대로 도출해낸 유한요소해석 모델을 기초로 하여 본 연구의 주 목적인 박리파괴의 기준으로써 법선응력과 전단응력과의 관계를 Mohr-Coulomb 파괴기준으로 표현하여 제안하고자 한다.

## 2. 접착계면의 부착특성 실험

### 2.1 시험체제원

Double-lap 시험체와 half-beam 시험체의 전체 형상을 각각 그림 1과 그림 2에서 제시하였다. 우선 double-lap 시험체의 경우, 가로, 세로, 길이가 각각 150mm, 150mm, 400mm인 concrete block의 양면에 강판을 접착제를 이용해서 부착시키고, 강판의 다른쪽 끝을 steel block에 고정시킨 후, actuator를 이용하여 concrete block에 부재길이 방향으로 인장력을 가하였다. Half-beam 시험체의 경우, double-lap 시험체와 같은 크기의 concrete block을 사용하였는데, 이때 D16 철근을 두 개씩 배근하였다. 접착면의 파괴를 한쪽으로 유도하기 위해서 다른 한쪽은 I 형강에 강판을 고정시켰다. 하중재하는 3등분점 재하방식인데, 실험의 편의를 위해서 보강면이 위로 오도록 하였다.

### 2.2 실험내용

Double-lap 시험체와 half-beam 시험체에 대해서 강판의 두께, 접착길이, 접착제의 두께 그리고 앵커볼트의 영향 등을 실험변수로 하였다. 하중재하는 변위 제어방식을 택하였고 재하 속도는 0.01mm/sec로 파괴시까지 재하하였는데, 파괴시점은 강판이 탈락하거나 콘크리트 덮개에서 rip-off가 발생하는 시점으로 하였다. 이 시점에서 대부분의 시험체들은 하중이 감소한다. 콘크리트와 강판 사이의 상대변위를 알기 위해서 두 개의 LVDT를 사용하였는데, 하나는 콘크리트의 변위를 측정하고 다른 하나는 강판의 변위를 측정하여 이들의 상대 변위를 구하였다. 변형률 계이지는 강판의 길이방향으로만 부착하였다. LVDT와 변형률 계이지의 위치는 그림 1과 그림 2에서 제시하였다.

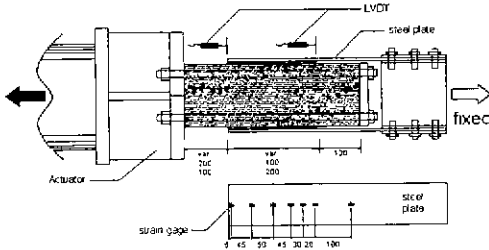


그림 1. Dimension of double-lap test specimen

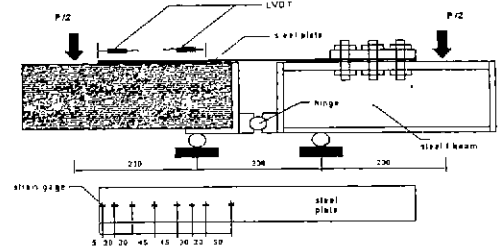


그림 2. Dimension of half-beam test specimen

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 파괴양상

파괴양상은 크게 강판이 콘크리트를 물고 떨어지는 rip-off에 의한 파괴와 강판과 접착층 사이가 떨어지는 박리(separation)에 의한 파괴로 나눌 수 있다. 모든 double-lap 시험체는 강판의 박리에 의해 파괴되었고, 그 외의 대부분의 half-beam 시험체는 rip-off에 의해서 파괴되었다. Double-lap 시험체의

성우 순수한 전단응력만을 받기 때문에 강판이 콘크리트를 들고 떨어지는 현상이나 rip-off는 일어나지 않는다. 콘크리트 피복의 rip-off에 의해서 파괴되는 경우, 파괴양상은 먼저 하중점 근처의 강판단부로부터 전단균열이 콘크리트 블록의 북부쪽으로 발생하고, 이 전단균열의 중간에서부터 철근 깊이를 따라 rip-off가 발생하면서 갑작스럽게 파괴된다. 그림 3과 4에서는 double-lap 시험체와 half-beam 시험체의 대표적인 파괴양상을 도시하였다

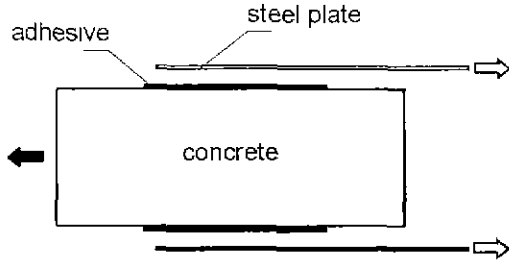


그림 3 Double-lap 시험체의 파괴양상

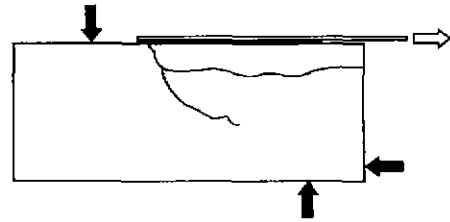
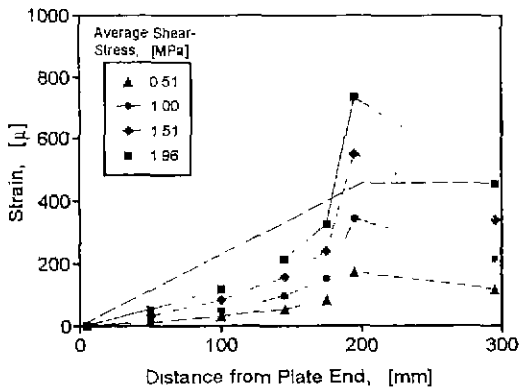


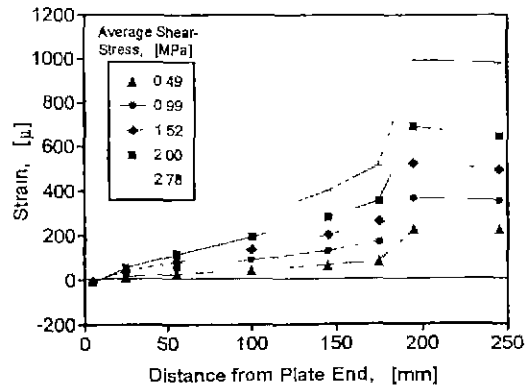
그림 4 Half-beam 시험체의 파괴양상

### 3.2 단부로부터의 거리에 따른 강판변형도

그림 5는 강판 단부로부터의 거리에 따른 강판변형도의 분포를 나타낸 것이다. Double-lap 시험체와 half-beam 시험체의 경우를 비교하면 그래프 형상에 큰 차이는 없음을 알 수 있다. 그러나 half-beam의 경우 강판의 단부 근처에서 변형률값이 (-)가 됨을 알 수 있다. 이렇게 강판 단부에서 double-lap 시험체와 half-beam 시험체의 거동이 달라지는 것은 half-beam 시험체에서 발생하는 범선응력 때문인 것으로 생각된다. 강판과 접착제 계면에서의 전단응력이 단부로부터의 거리에 따라 일정하다면 강판의 변형도는 접착면 내에서 선형적으로 증가해야 할 것이다.(그림 5(a)의 점선) 그러나 그림 5에서 강판의 변형도가 강판의 단부에서 갑자기 증가하는 것은 강판 단부에서 큰 전단응력이 발생함을 의미한다. 그림. 6은 강판 단부로부터의 거리에 따른 접착계면의 전단응력의 분포를 나타낸 그래프이다 여기서 계면의 전단응력  $\tau$ 는 강판의 변형률로부터  $\tau = \Delta\epsilon Et_p / \Delta L$ 와 같이 구할 수 있다. 이때,  $\Delta\epsilon$  은 인접한 두 변형률 게이지값의 차이,  $E$  는 강판의 탄성계수,  $t_p$  는 강판의 두께 그리고  $\Delta L$  은 인접한 두 게이지 사이의 거리이다

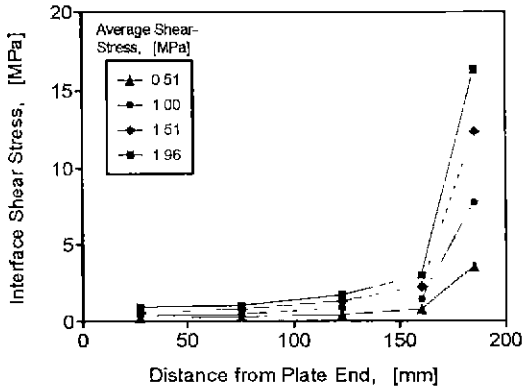


(a) double-lap test

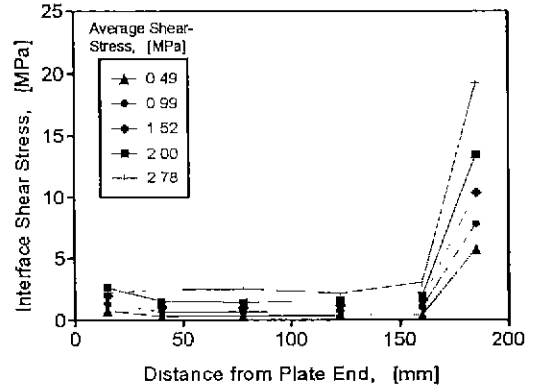


(b) half-beam test

그림 5 강판 단부로부터의 거리에 따른 변형도의 분포



(a) double-lap test



(b) half-beam test

그림 6 강판 단부로부터의 거리에 따른 전단응력의 분포

### 3.3. 파괴하중

그림 3.7에서는 파괴시점에서의 접착계면의 평균전단응력을 강판의 두께에 따라서 제시하였다. 이때, 평균전단응력은 강판에 작용하는 힘을 접착계면의 면적으로 나누어 계산한다. Half-beam 시험체에 대해서는 파괴시점의 평균전단응력과 함께, 강판단부에서 전단균열이 발생할때의 평균전단응력을 제시하였다. 그림 3.7을 살펴보면, half-beam test의 평균전단응력이 double-lap test의 평균전단응력보다 큰 것을 알 수 있는데, 이것은 double-lap test와 half-beam test의 파괴양상이 서로 다르기 때문이다. Double-lap test의 경우 강판의 박리(separation)에 의해서 낮은 전단응력에서 파괴되지만, half-beam test의 경우 double-lap test보다 높은 전단응력까지 견디다가 rip-off에 의해서 파괴된다. 즉, half-beam test의 경우 double-lap test보다 더 큰 하중에서 파괴되기 때문에 파괴시점의 평균전단응력(average shear stress)이 double-lap test보다 크게 평가되는 것으로 판단된다. 또, 그림 3.7에서 double-lap test와 half-beam test 모두 강판의 두께가 증가함에 따라 파괴시점의 평균전단응력도 증가함을 알 수 있다. 그러나, half-beam test에서 전단균열이 발생하는 시점의 접착계면의 평균전단응력은 강판의 두께에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

그림 3.8에서는 접착제의 두께에 따른 접착계면의 평균전단응력을 제시하였다. 접착제의 두께에 따

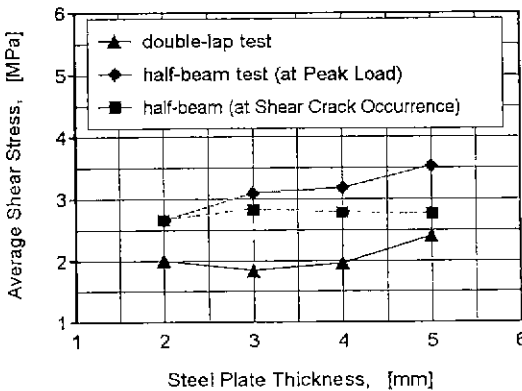


그림 7. 강판 두께에 따른 평균전단응력

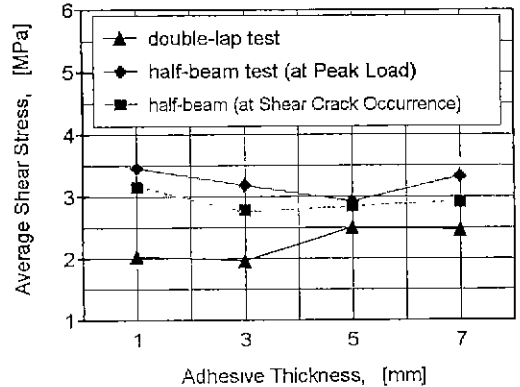


그림 8 접착제 두께에 따른 평균전단응력

라서는 뚜렷한 경향을 찾기가 어려웠는데, half-beam test의 경우에는 접착제의 두께가 증가함에 따라 파괴시점의 평균전단응력이 감소하는 경향을 보였으나, double-lap test에 있어서는 접착제의 두께가 증가할수록 평균전단응력이 오히려 증가하는 경향을 보였다.

#### 4. 유한요소 해석

##### 4.1 개요

본 연구에서는 강판 보강된 구조물의 박리파괴기준을 도출하기 위해서 접착제면특성 실험으로서 순수전단실험(double-lap test)과 휨-전단실험(half-beam test)을 수행하였고, 강판의 두께, 접착층의 두께 그리고 접착면의 길이 등을 주요 변수로 하여 파괴시의 접착제면의 평균전단응력을 분석하였다. 그러나 실험만으로는 접착제면의 법선응력을 구하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 실험적 연구와 더불어 비선형 유한요소해석을 통한 해석적연구도 수행되어야 할것으로 판단된다.

본 연구에서는 실험내용을 대상으로 범용 프로그램인 DIANA를 이용하여 비선형 유한요소해석을 수행하고자 하여 최종적으로 조기파괴기준을 도출하고자 한다. 박리파괴를 모델링하기 위해서 강판과 접착제사이에 계면요소(interface element)를 도입하였다. 해석에 사용된 모든 재료상수는 부착특성실험에서의 값을 사용하였으나 smeared crack model의 crack band width와 interface의 normal stiffness는 실험적으로는 결정하기 어렵기 때문에 기수행된 실험결과에 가장 잘 부합되는 해석모델을 찾기 위하여 crack band width와 normal stiffness를 변화시키면서 parameter study를 수행하고자한다.

##### 4.2 유한요소 모델링

콘크리트, 강판, 접착제 모두 8절점 평면응력요소를 사용하였다. Fig. 9와 Fig. 10에서 doubl-lap 시험체와 half-beam 시험체의 mesh 형상을 제시하였다. Double-lap 시험체의 경우 길이 방향 축에 대해서 대칭이기 때문에 한쪽만 모델링한다. 콘크리트 압축파괴기준으로 Drucker-Prager model을 사용하였고, 균열거동을 모델링하기 위하여 smeared crack model을 사용하였다. 강판과 접착제의 계면에 는 선계면요소(line interface element)를 사용한다.

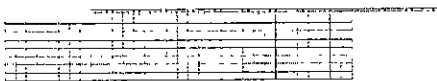


그림 9. Finite element mesh of double-lap specimen

그림 10. Finite element mesh of half-beam specimen

##### 4.3 해석모델 결정 절차

실험결과와 가장 잘 맞는 해석모델을 제안하기 위하여 다음 절차에 따라 crack band width와 interface stiffness를 구한다.

- (1) 강판과 접착제 계면에 계면요소(interface-element)를 도입하지 않은 half-beam 시험체에 대해서, crack band width를 변화시켜 실험결과와 가장 잘 맞는 crack band width를 결정
- (2) (1)에서 구한 crack band width를 적용한 double-lap 시험체에 대해서 강판과 접착제 사이에 계면

요소를 적용하고, interface stiffness를 변화시키면서 실험결과와 가장 잘 맞는 interface stiffness를 결정

(3) (2)에서 결정된 stiffness를 가지는 계면요소를 half-beam 시험체에 적용하고, 실험결과와 비교

## 5. 결 론

본 연구에서는 강판 접착계면의 국부적인 접착거동을 규명하기 위하여 double-lap test와 half-beam test를 수행하였고, 강판의 두께, 접착층의 두께 그리고 접착면의 길이 등을 주요 변수로 하여 파괴시의 접착계면의 평균전단응력을 분석하였다. 그러나 실험만으로는 접착계면의 법선응력을 구할 수 없기 때문에 비선형 유한요소해석도 함께 수행되어야 할 것으로 사료된다.

(1) 시험체의 파괴양상은 double-lap test와 half-beam test에 있어서 서로 다르게 나타났는데, double-lap test의 경우 강판과 접착제 계면에서 박리(separation)가 발생했지만, half-beam의 경우 대부분 rip-off에 의해서 파괴되었다.

(2) 강판의 두께에 대해서는, double-lap test와 half-beam test 모두 강판의 두께가 증가함에 따라 파괴시점의 평균전단응력도 증가하는 경향을 보였다. 그러나 half-beam test에서, 전단균열이 발생하는 시점의 접착계면의 평균전단응력은 강판의 두께에 따라 큰 차이를 보이지 않았다.

(3) 접착제의 두께가 증가할수록, double-lap test의 경우에는 평균전단응력도 증가하는 경향을 보였으나, half-beam test의 경우에는 접착제의 두께가 증가할수록 평균전단응력이 오히려 감소하는 경향이 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. 오병환, 조재열, 강동욱, "강판 험보강된 철근콘크리트보의 구조적 거동", 한국 콘크리트 학회지, 제 9권 5호 1997, pp. 233-244
2. Deric John Oehlers, and John Paul Moran, "Premature Failure of Externally Plated Reinforced Concrete Beams", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol 116, No. 4, April 1990, pp. 978-993
3. Hillerborg, A. (1985) "The Theoretical Basis of a Method to Determine the Fracture Energy  $G_f$  of Concrete", *Materials and Structures*, 18, pp 291-296
4. R. N. Swamy, R. Jones, and J. W. Bloxham, "Structural Behavior of Reinforced Concrete Beam Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates", *The Structural Engineer*, Vol. 65A, No. 2, February 1987, pp. 59-68
5. R. N. Swamy, R. Jones, and A. Charif, "The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged RC Beams" *The Structural Engineer*, Vol. 67, No. 3, February 1989, pp. 45-54
6. Roberts T. M., "Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in the Adhesive Layer of Plated RC Beams", *The Structural Engineer*, Vol. 67, No 12, June 1989, pp. 229-233
7. Y. N. Ziraba, M. H. Baluch, I. A. Basunbul, A. K. Azad, G. J. Al-Sulaimani, and A. M. Sharif, "Combine Experimental-numerical Approach to Characterization of Steel-Glue-Concrete Interface", *Materials and Structures*, Vol 28, 1995, pp. 518-525
8. Jansze, W., "Strengthening of Reinforced Concrete Members in Bending by Externally Bonded Steel Plates", PhD thesis Delft University of Technology, 1997