

# 강판 휨보강된 철근콘크리트보의 파괴기구 및 박리하중산정 이론연구

Prediction of Separation Load and Failure Mechanism of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Steel Plates



오병환\*

Oh, Byung Hwan



강동옥\*\*

Kang, Dong Ok



조재열\*\*\*

Cho, Jae Yeol

## ABSTRACT

Recently, the strengthening of structures is of great concern due to the increase of loadings and the degradation of structures with time. The steel-plate strengthening has been widely used due to its reliable increase of stiffness and durability. However, the analysis and design method for plate strengthening of RC beams is not well established yet. The purpose of present paper is, therefore, to analyze the failure mechanism and failure behavior of strengthened RC beams and then propose a reasonable method for the calculation of failure load for those beams.

The influence of length and thickness of steel plates on the failure behavior of beam is thoroughly studied and the inconsistency of existing theory is clarified. Roberts theory gives different results from experimental data.

The proposed theory, which was obtained from the modification of existing theory, predicts relatively well the preparation loads of strengthening RC beams, and may be efficiently used in the strengthening analysis design of RC beams.

Keywords : epoxy-bonded, rip off, strengthening, steel plate, separation

\* 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 정희원, 삼성물산 건설부문 연구원

\*\*\* 정희원, 서울대학교 토목공학과 박사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 1998년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

# 1. 서론

구조적으로 손상을 입은 콘크리트구조물들에 대한 보강방법으로는 강판, 카본슈트, 아라미드섬유슈트 등을 이용한 접착공법과 단면증설공법, 거더증설공법, 프리스트레스도입공법 등 여러 가지가 있으나 가장 널리 쓰이는 방법은 강판접착공법이다. 1970년대 들어와 보편화되기 시작한 강판접착공법의 장점은 시공기간이 짧고 사용중인 구조물에도 시공가능하며 인장부는 물론이고 압축력과 진단을 받는 부분에도 적용이 가능하다는 점이다. 이 공법에 대해서는 지금까지 많은 연구가 진행되어 오고 있으나, 보의 구조적 거동에 영향을 미치는 다양한 인자들의 영향이나 강판의 변형, 강성, 파괴형태 등에 미치는 영향에 대해서는 체계적인 평가가 이루어지지 않고 있으며, 특히 강판접착공법에서 파괴에 큰 영향을 미치는 박리하중에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 철근콘크리트 보구조물의 보강에 대한 기초적인 연구로써 가장 널리 사용되고 있는 강판접착공법을 사용하여 휨에 대한 보강성능시험을 수행하고, 그 결과를 분석하여 박리하중을 계산하는 이론적인 과정을 제안하고자 한다.

실험에 앞서 광범위한 문헌조사를 통하여, 접착식 보강공법에 대한 기존의 국내·외 연구결과를 분석하여 구조실험 계획을 수립하였다.<sup>3,4,5)</sup>

구조실험은 철근콘크리트 보부재를 대상으로 휨인장에 대해 강판접착공법을 적용하였다. 주요실험변수로는 강판의 박리에 가장 큰 영향을 미치는 강판의 길이와 두께를 선택하였다. 실험결과로부터 강판의 길이와 두께가 박리하중에 미치는 효과를 비교·분석함으로써 강판보강시험체의 주파괴원인인 박리거동을 분석하였으며, 기존의 이론에 의한 계산값과 실험값을 비교하여 보다 개선된 박리하중 예측식을 제안하였다.<sup>12)</sup>

## 2. 강판휨보강된 철근콘크리트보의 파괴기구 및 박리거동 분석을 위한 실험

### 2.1 실험개요

강판휨보강된 철근콘크리트보에 대한 파괴거동 및 박리거동을 고찰하고 박리하중을 산정하기 위하여

수행된 실험에는 총 8개의 철근콘크리트보가 이용되었다.

보강실험에 앞서 실재료에 대한 전반적인 특성실험을 수행하였으며, 그 결과를 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1 Mechanical properties of material

Concrete	Compressive Strength	31.4 MPa
	Split Tensile Strength	2.25 MPa
	Elastic Modulus	26,580 MPa
Reinforcing Bars	Yield Strength	470 MPa
	Elastic Modulus	204,000 MPa
Steel Plate	Yield Strength	292 MPa
	Elastic Modulus	210,000 MPa
Adhesive	Elastic Modulus(Tens.)	3,000 MPa

가로, 세로, 길이 각각 150, 250, 1700mm인 보 시험체 8개를 대상으로 휨인장에 대하여 강판을 보강재로써 제작하여, 강판의 길이 및 두께에 대한 성능실험을 수행하였다. 보강후 휨보강효과를 명확하게 보기 위하여 즉, 보강후 전단파괴를 피하기 위해 휨강도에 비해 전단강도가 크도록 설계하였으며, 시험체 제원은 다음 Fig. 1과 같다.

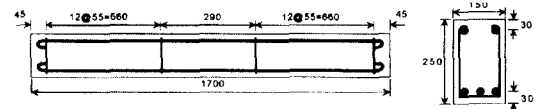


Fig. 1 Beam dimension and reinforcement details

본 실험에서 하중재하는 무보강기준시험체의 파괴하중인 140kN의 70%에 해당하는 100kN을 선행하중으로 재하하여 손상을 가한 후, 하중을 제거한 상태에서 보강을 하고, 다시 파괴시까지 하중을 재하하였다. 앞으로는 이와 같은 하중재하방식을 1주기 하중재하방식(1 cyclic loading)으로 칭한다.

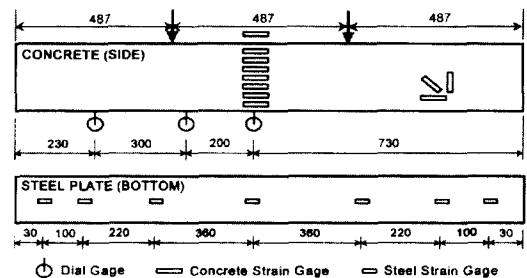


Fig. 2 Measurement schemes

하중을 보중앙으로부터 250mm 떨어진 두점에 재하하는 4점재하방식으로 재하하였으며, Fig. 2에 하중위치와 측정장치들의 위치를 표현하였다.

## 2.2 실험변수 및 시험체

본 실험에서 강관휨보강시 고려한 변수는 강관의 길이와 강관의 두께이다. 이밖에 보강전 선행하중의 크기, 강관의 층수, 앵커볼트의 유무 및 간격, 측면보강 등 여러 가지 변수를 고려하였으나 박리하중산정을 위한 본 논문에서는 이에 대한 언급을 제외하였다.

각 실험변수에 따른 시험체명은 Table 2에 제시하였으며, 시험체의 형상은 Fig. 3과 같다. Table 2에서 공백은 보강시험체간의 비교기준이 되는 L1의 형과 같음을 의미한다. 한편, 보강에 사용된 강관의 폭

은 보의 폭과 같으며, 앵커볼트는 강관의 단부로부터 약 7cm 떨어진 곳에 각각 두 개씩 장착하였다.

## 2.3 실험결과

본 강관휨보강실험에 있어 실제로 본 논문에 제시한 변수이외에 여러 가지 사항도 고려하였으며, 실험결과 분석에 있어서도 다양한 측정장치들로부터 얻은 데이터를 이용하여 다각도에서의 분석을 수행하였다. 그러나 본 논문의 목적이 강관의 길이와 두께가 강관휨보강된 철근콘크리트보의 파괴기구와 박리거동을 분석하고 박리하중 산정식을 제안하는데 있으므로 이외의 변수에 대한 실험결과는 생략하기로 한다.

### 2.3.1 파괴양상

Fig. 4는 무보강기준시험체 및 각 보강시험체별 균열과 파괴양상이다.

Table 2 Details of test beams

Test Beam Series	Magnitude of Preload (kN)	Plate Length (mm)	Plate Thickness (mm)
Control-Cyclic	100	-	-
Plate Length Effect	L1	100	1460
	L2	100	1280
	L3	100	720
Plate Thickness Effect	T1	100	1460
	T2	100	1400
	T3	100	1460
	T4	100	1460
	T5	100	1460

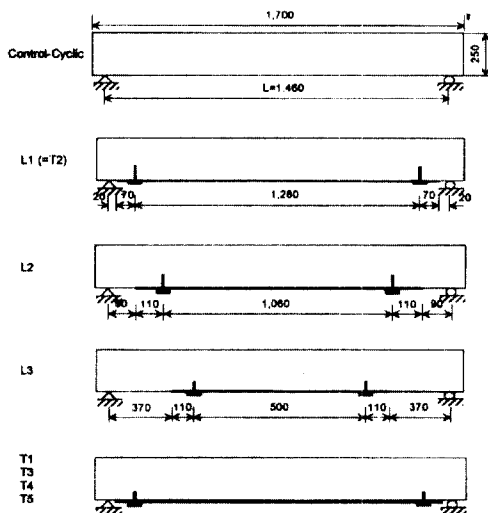


Fig. 3 Various repair schemes for damaged beam

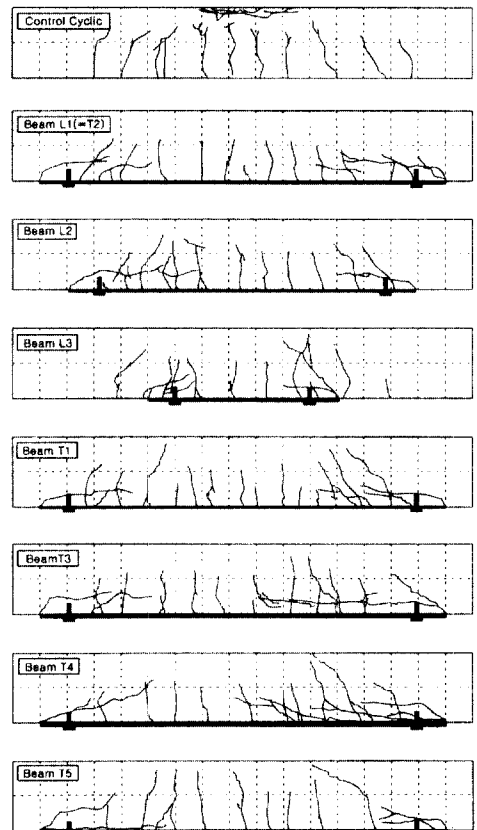


Fig. 4 Crack patterns and failure modes

무보강기준시험체가 인장철근의 항복에 이은 압축 파괴의 양상을 나타내는 것과는 달리 강관휨보강시험체의 경우에는 강관이 콘크리트를 물고 떨어지면서(rip off) 사인장균열로 발전하여 결국 전단파괴가 발생하는 것이 지배적인 파괴양상이라는 점이다.

강관이 콘크리트를 물고 떨어지는 현상(rip off)은 강관의 단부에서부터 시작하여, 사인장균열로 발전하거나 약 40mm의 높이(인장철근 바로밑)를 유지하며 종방향(보시험체의 길이방향)으로 발전하는 양상이 복합적으로 나타났는데, 비록 같은 길이의 강관이라도 두께가 두꺼워짐에 따라 강관이 콘크리트를 물고 떨어지는 양상(rip off)에서 rip off와 함께 접촉계면에서의 박리(separation)가 일어나는 형태로 파괴양상이 바뀌었다.

대부분의 시험체에서 하중재하점사이의 구간에서는 새로운 휨균열의 발생이라든지 선행하중재하시 발생한 휨인장균열의 발전은 거의 없었다.

### 2.3.2 파괴하중

표 3은 강관휨보강시험체의 파괴하중을 표로써 제시한 것이다. 실험값은 실험결과로부터 얻은 최대하중을 나타내며, 이론값은 다음의 세가지 방법에 의하여 계산하였다.

- (1) 강도감소계수를 고려하지 않은 공칭강도로써 재료의 물성치는 설계기준값을 사용한 것이다.
- (2) 강도감소계수를 고려하지 않은 공칭강도로써 재료의 물성치는 실험으로부터 얻은 값을 사용한 것이다.
- (3) 강도감소계수만을 고려한 극한강도로써 재료의 물성치는 설계기준값을 사용한 것이다.

이론값의 계산에서 하중계수를 고려하지 않은 이유는 실험에서 하중의 크기의 불확실성이 거의 없기 때문이다. 위의 세가지 방법 모두 콘크리트와 강관이 완전일체거동 한다는 가정하에 가장 위험단면에서의 단면력을 계산한 것으로 최대모멘트가 발생하는 구간에서 계산된 값이다.

전체적으로 강관휨보강시험체의 경우 이론적으로 예상한 파괴하중보다 훨씬 낮은 하중에서 파괴에 이른 것을 알 수 있다. 이는 무보강시험체와는 달리 강관보강시험체의 경우 강관의 항복 및 콘크리트의 압

축과괴 이외의 다른 원인에 의해 파괴가 일어난다는 것을 말해주고 있는 것이다.

즉, 강관휨보강시험체의 경우 기존의 강도설계법에 의한 휨 및 전단에 대한 설계이외에 박리거동에 의한 영향도 고려해야 함을 알 수 있다.

Table 3 Failure loads of beams

Beam	Failure loads of beams			
	Experimental	Theoretical		
		(1)	(2)	(3)
Control-Cyclic	143.0	126.1	141.1	107.2
L1	201.0	282.6	329.7	240.2
L2	158.0	282.6	329.7	240.2
L3	155.6	161.7	180.9	137.4
T1	204.0	223.9	259.5	190.3
T2	201.0	282.6	329.7	240.2
T3	203.1	310.0	362.2	263.5
T4	179.0	384.2	449.2	326.6
T5	186.4	446.7	520.5	379.7

강관길이의 영향을 보면, 시험체 L2는 L1에 비해 각 단부로부터 9cm씩 비교적 조금 짧아짐에도 불구하고 급격한 강도의 감소를 보임을 알 수 있다. L3의 경우는 강관의 길이가 너무 짧아 강관 단부에서 휨에 의한 파괴가 발생한 경우이다.

Table 3에서 보듯이 강관의 두께가 증가함에 따라 실험값과 이론값의 차이는 점점 증가하고 있다.

이것은 일체거동의 가정하에 계산된 이론값은 두께가 증가함에 따라 증가하나, 실제로는 두께가 증가함에 따라 박리하중이 감소함으로써 파괴하중이 줄어들거나 이론값의 증가량보다 적게 증가하기 때문이다. 강관의 두께가 어느 한도에 이르면 파괴양상이 바뀌듯이 휨보강성능도 어느 두께 이상이 되는 순간 떨어지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로 비추어 볼 때, rip off와 함께 접촉계면에서의 박리(separation)가 발생하는 경우에는 휨보강성능이 급격히 저하되고 있음을 알 수 있다.

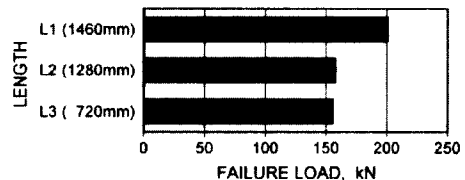


Fig.5(a) Failure load due to variation of steel plate length

Fig. 5는 강관의 두께와 길이별 파괴하중을 그대로 나타내어 크기를 비교하고자 하였다.

### 2.3.3 하중-처짐관계

전체적으로 무보강시험체와 비교할 때 처짐의 제어효과가 탁월한 것으로 나타났다. 강관의 길이가 짧을수록 보의 강성이 작으므로 처짐량은 증가하였다. 또한, 두께가 두꺼워짐에 따라 처짐이 줄어들다가 늘어나는 경향을 보이고 있는데, 이것은 일정 두께 이상이 되면 박리에 의한 영향의 증가로 인해 보의 강성이 줄어들기 때문으로 판단된다.

### 2.3.4 박리하중

표 4는 강관취보강시험체에 대한 강관의 박리하중과 기존의 연구결과로써 3절에서 제시할 Roberts의 박리하중산정에 대한 이론을 이용하여 계산한 박리하중을 표로써 제시한 것이다. 즉, 식 (3.25)와 (3.26)을 이용하여 박리하중과 실험에서 얻은 박리하중에서의 계면전단응력 및 법선응력을 구하였다.

실험결과로부터 박리하중을 결정하는데는 파괴양상, 하중-인장철근변형도관계, 하중-콘크리트압축변형도 관계, 하중-강관변형도관계 등 모든 결과를 토대로 하였는데, 특히 하중-강관변형도관계로부터 변형도의 갑작스런 변화시점을 중심으로 하여 박리하중을 결정하였다.

Roberts의 박리이론은 접착계면에서 발생하는 전단응력이 실제의 콘크리트+접착제+강관 사이의 전단강도에 이르게 되면 계면파괴가 일어나 박리

(separation)가 발생한다고 제시하고 있다. 하지만 본 실험결과를 볼 때 박리보다도 rip off현상에 의해 파괴가 일어나는 경우가 더욱 많았다.

따라서, Roberts의 박리이론에 근거하여 rip off가 발생한 시험체의 박리하중을 예측하고 시험치와 비교한다는 것은 무리가 있다고 판단된다. 즉, rip off현상에 의한 박리하중(박리:separation과 rip off는 분명차이가 있지만, 편의상 그 중 어느 현상이 일어나는 하중을 박리하중이라 칭한다.)을 예측하기 위해서는 콘크리트의 인장강도와 연관을 가져야 한다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 rip off, rip off와 separation이 함께 발생하는 경우를 구분하여 박리하중 예측식을 제안하였으며, 그 이론적 근거는 4절에 기술하였다. 또한 Table 4에 파괴양상을 함께 제시하여 박리거동 분석시 이용하였다.

Table 4에서 보듯이, 강관의 두께가 두꺼워질수록 박리하중은 감소함을 알 수 있다. 이것은 Roberts의 이론 박리하중이 3.7 mm 이상의 범위에서 미세하게나마 증가하는 경향과는 정반대의 결과이다. 두께가 두꺼워질수록 박리하중이 감소하는 현상을 Roberts의 이론이 잘 표현해내지 못하는 것으로 생각된다. 이에 대해서는 4절에서 설명하도록 한다.

## 3. 박리하중이론

### 3.1 개요

최근 들어 외국에서는 강관의 박리거동에 대한 연구는 활발히 진행되어오고 있다. 즉, 강관 단부에서

Table 4 Separation loads of beams

Beam	Experimental	Theoretical			Failure Mode
	Sep. Load (kN)	Sep. Load (kN)	Shear Stress (MPa)	Normal Stress (MPa)	
L1	147.1	132.6	5.55	2.52	Ri, Sh
L2	110.7	99.7	5.55	2.53	Ri
L3	76.9	51.9	7.41	3.37	Ri
T1	161.4	132.3	6.10	2.44	Ri, Yi, Sh
T2	147.1	132.6	5.55	2.52	Ri, Sh
T3	143.2	133.8	5.35	2.55	Ri, Sh
T4	110.6	138.4	4.00	2.11	Ri, Se, Sh
T5	98.2	142.7	3.44	1.95	Ri, Se, Sh

Ri : Ripoff - 콘크리트층고 떨어져나옴

Se : Separation - 보강재의박리

Sh : Shear Failure - 전단 파괴

Yi : Yield - 철근 및 강관의 항복

의 박리나 rip off가 발생하는 원인을 규명하고, 그러한 현상이 발생하는 시점을 예측하고자 하는 연구를 중심으로 수행되어 오고 있으나, 실제 적용가능한 합리적인 이론은 제시되어 있지 않은 실정이다.

크게 Roberts<sup>12)</sup>, Jones<sup>5)</sup>, 그리고 Deric<sup>13)</sup> 세 연구자의 이론이 널리 알려져 있으나, 이중 Jones와 Deric의 이론에는 많은 문제점이 제기되고 있어, Roberts의 이론이 가장 많이 인용되고 있다. 그 이론에 있어서도 다소 문제점이 있다고 판단되어 본 연구에서는 그러한 점을 고려하여 개선해 나가는 방향으로 연구를 수행하였다. 따라서 본 절에서는 Roberts의 이론을 간단히 기술하고자 한다.

### 3.2 Roberts 이론

Roberts에 위해 제안된 해석기법은 3단계 중첩을 이용하였으며, Fig. 6~8에 걸쳐 그림으로 설명하였다. 단계 1에서는 철근콘크리트보와 부착된 판의 완전합성거동이 가정되어 있으며, 단계2와 3에서는 판의 단부에 실제 경계조건을 고려하여 해를 구하였다.

#### 1 단계

해석의 첫단계에선 접착층에서의 단위길이당 전단력  $\tau_1$  그리고 강판에서의 법선력  $t_1$ 이 통상의 이론과 완전합성거동으로 가정하여 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_1 = \frac{VQ}{I} = \frac{Fb_p d_p}{I} (h_p - h) \quad (3.1)$$

$$t_1 = \frac{Mb_p d_p}{I} (h_p - h) \quad (3.2)$$

여기서,  $V = F$  전단력

$M =$  휨모멘트

$b_p, d_p =$  판의 폭과 두께

$h_p =$  판중심까지의 깊이

$h =$  중립축까지의 깊이

$I =$  steel환산 단면 2차 모멘트

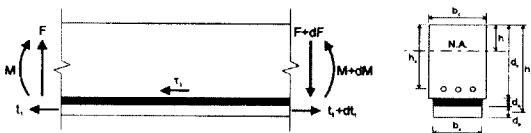


Fig. 6 Analysis1: cross section dimensions and resultant forces in a plated concrete beam

$x=0$  또는  $x=a$  이고  $M=M_0$  또는  $M=M_a$ 인 판의 단부에서  $\tau_1$ 과  $t_1$  각각의 크기는  $\tau_{10}$ ,  $t_{10}$ 와  $\tau_{1a}$ ,  $t_{1a}$ 로 나타낸다.

#### 2 단계

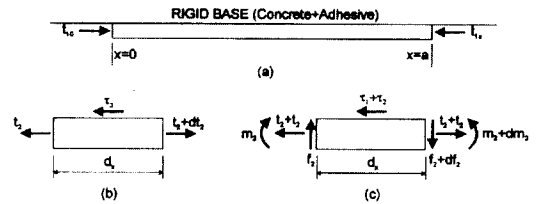


Fig. 7 Analysis 2: Forces in steel plate

해석의 두 번째 단계에서는  $-t_{10}$ 와  $-t_{1a}$ 를 판에 작용시키는데, 이것은 실제로 판의 단부에서 축력은 존재하지 않기 때문이다. (Fig. 7 (a)) 개략해는 강판이 유한전단강성을 갖는 접착층에 의해 rigid concrete base에 부착되었다는 가정하에서 구해질 수 있다. 만약  $\tau_2$ 가 단위길이당 힘이라면,

$$\tau_{gluc} = \frac{\tau_2}{b_a} = G_a \gamma = G_a \frac{u_{rel}}{d_a}$$

또는

$$\tau_2 = \frac{G_a b_a}{d_a} u_{rel} = K_s u_{rel}$$

그리고

$$K_s = G_a \frac{b_a}{d_a} \quad (3.3)$$

여기서,

$\tau_{gluc} =$  접착층에 발생하는 전단응력

$\gamma =$  접착층에 발생하는 전단변형

$G_a =$  접착층의 전단계수

$b_a, d_a =$  접착층의 폭 및 두께

$u_{rel} =$  접착층의 양면의 상대변형

힘의 평형으로부터 (Fig. 7 (b)), 접착층에서의 전단력은

$$\tau_2 = \frac{dt_2}{dx} = K_s u \quad (3.4)$$

법선력은,

$$t_2 = E_p b_p d_p \frac{du}{dx} \quad (3.5)$$

여기서  $u = x$ 방향으로의 강판의 변위

$E_p =$  강판의 탄성계수

식(3.4)와 식(3.5)를 조합하면, 다음의 지배미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\tau_2 = \frac{dt_2}{dx} = K_n u \quad (3.6)$$

위 식(3.6)의 해는 경계조건  $x=0$  일 때,  $t_2 = -t_{10}$  이고  $x=a$  일 때,  $t_2 = -t_{1a}$ 이므로 이를 적용하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$u = -\frac{t_{10} \sinh ax}{E_p b_p d_p \alpha} + \frac{(t_{10} \cosh \alpha a - t_{1a})}{E_p b_p d_p \alpha \sinh \alpha a} \cosh ax \quad (3.7)$$

식(3.4)에 식(3.7)을 대입하여 풀면

$$\tau_2 = \left( \frac{K_n}{E_p b_p d_p} \right)^{1/2} \left( -t_{10} \sinh ax + \frac{(t_{10} \cosh \alpha a - t_{1a})}{\sinh \alpha a} \cosh ax \right) \quad (3.8)$$

해석 2단계의 끝으로 강판의 미소요소  $d_1$ 에서의 모멘트 평형방정식으로부터 전단력을 이끌어 낼 수 있다. (Fig. 7 (c))

$$\sum M = 0; -dm_2 + f_2 dx + (\tau_1 + \tau_2) \frac{d_p}{2} = 0$$

$$f_2 = \frac{dm_2}{dx} + (\tau_1 + \tau_2) \frac{d_p}{2} \quad (3.9)$$

강판의 선단부( $x=0$ )에서는 콘크리트 보와 강판의 곡률이 거의 같으므로  $m_{20}$ 은 보의 전체 모멘트  $M_0$ 와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$m_{20} = M_0 \left[ \frac{E_p I_p}{E_p I_p + E_c I_c} \right] \quad (3.10)$$

여기서,  $I_p, I_c$ 는 비합성작용하에서의 강판과 콘크리트 각각의 단면중심에 대한 단면2차모멘트이다.

식(3.10)과 식(3.1)을 식(3.9)에 다음과 같다.

$$f_{20} = \left[ \frac{E_p I_p}{E_p I_p + E_c I_c} \right] F_0 + (\tau_{10} + \tau_{20}) \frac{d_p}{2} \quad (3.11)$$

모멘트  $m_{2a}$ 와 전단력  $f_{2a}$ 는  $x=a$ 에서 동일한 방법으로 구할 수 있다.

3 단계

해석의 세 번째 단계에서는 모멘트  $-m_{20}, -m_{2a}$ 와

전단력  $-f_{20}, -f_{2a}$ 가 판의 단부에 부과된다. (Fig. 8) 그리고 개략하는 강판이 유한강성(finite normal stiffness)을 갖는 접착층에 의해 콘크리트와 완전히 부착된 것으로 가정하여 해를 구한다.

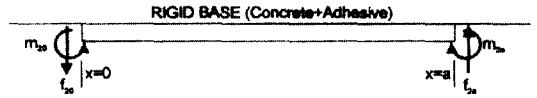


Fig. 8 Analysis 3: Forces in steel plate

$\bar{\sigma}$ 가 단위길이당 법선력이라면,

$$\sigma_{gluc} = \frac{\bar{\sigma}}{b_a} = E_a \varepsilon = E_a \frac{w_{rel}}{d_a}$$

또는

$$\bar{\sigma} = \frac{E_a b_a}{d_a} w_{rel} = K_n w_{rel}$$

그리고

$$K_n = E_a \frac{b_a}{d_a} \quad (3.12)$$

여기서,  $\tau_{gluc}$  = 접착층에 발생하는 법선응력

$E_a$  = 접착층에 발생하는 법선 변형

$w_{rel}$  = 접착층의 단성계수

$\sigma_3$  = 접착층의 양면의 상대변형

접착제의 단위길이당 박리응력,  $\sigma_3$ 는 식(3.13)과 같다.

$$\sigma_3 = K_n w \quad (3.13)$$

여기서  $w = w_{rel}$ 이라면 지배미분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\gamma^4 w = 0 \quad \gamma^4 = \frac{K_n}{4E_p I_p} \quad (3.14)$$

식(3.14)의 해는  $x$ 가 증가함에 따라  $w$ 는 영(0)으로 접근하며,  $x=0$ 에서

$$-E_p I_p \frac{d^2 w}{dx^2} = m_3 = -m_{20}$$

$$-E_p I_p \frac{d^3 w}{dx^3} = f_3 = -f_{20} \quad (3.15)$$

라고 가정하면,

$$w = \frac{e^{-\gamma x}}{2E_p I_p \gamma^4} \left( (f_{20} \gamma + m_{20} \gamma^2) \cos \gamma x - m_{20} \gamma^2 \sin \gamma x \right) \quad (3.16)$$

식(3.16)을 식(3.13)에 대입하면, 단위길이당 박리응력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_3 = 2e^{-\alpha x} \left( (f_{20}\gamma + m_{20}\gamma^2) \cos \gamma x - m_{20}\gamma^2 \sin \gamma x \right) \quad (3.17)$$

식(3.17)은  $x$ 가  $a$ 에 접근할수록 정확한 해를 제공할 수가 없다. 이것은  $w$ 는  $x$ 가 증가함에 따라 0에 수렴한다고 가정했기 때문이다. 이것은 본 관심사가 단부이기 때문에 단부의 거동만을 표현하기 위한 때문이다.

최종적인 해는 중첩의 원리를 이용하여 구하며, 다음과 같다.

$$\bar{\tau} = \tau_1 + \tau_2, \quad \bar{\sigma} = \sigma_3 \quad (3.18)$$

접착층의 전단과 박리응력,  $\tau$ 와  $\sigma$ 는 접착층의 폭으로 나누어서 구한다.

$$\tau = \frac{\bar{\tau}}{b_a}, \quad \sigma = \frac{\bar{\sigma}}{b_a} \quad (3.19)$$

식(3.8)과 식(3.17)의 미소항을 제거하면 강판 단부  $x=0$ 에서의 전단 및 박리응력,  $\tau_0$ 와  $\sigma_0$ 는 아래 식(3.20) 및 식(3.21)과 같다.

$$\tau_0 = \left( F_0 + \left( \frac{K_s}{E_p b_p d_p} \right)^{1/2} M_0 \right) \frac{b_p d_p}{I b_a} (h_p - h) \quad (3.20)$$

$$\sigma_0 = \tau_0 d_p \frac{K_n}{4E_p I_p} \quad (3.21)$$

여기에서 제시한 근사해는 부분상호작용이론에 근거한 엄밀해보다 약 30%정도 응력집중을 낮게 평가한다. 이것은 1단계에서의 근사적 접근이 2단계에서  $\tau_2$  값을 낮게 평가하게 하기 때문이다.

따라서,  $x=0$ 에서의  $M_0$ 를  $x=(d_c + d_p)/2$ 에서의  $M^*$ 로 대체하는 것을 제안한다.

#### 4. 합리적인 박리하중 예측식 제안

2절에서 보았듯이, 박리하중에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 강판의 두께와 길이이다. 따라서, 본 장에서는 강판의 두께와 길이에 대한 박리하중의 변화를 기존 이론에 의한 이론값과 실험값을 비교하면서 설명하고, 박리하중 계산과정을 제안하고자 한다. Jones, Swamy, Charif의 이론은 아직 완성된 이론이 아니므로, Roberts의 이론만을 실험값과 비교

하였다.

#### 4.1 강판길이에 대한 박리하중의 변화

Fig. 9는 강판길이에 대한 박리하중의 변화를 Roberts의 이론에 의해 계산한 값과 실험값을 비교한 것이다.

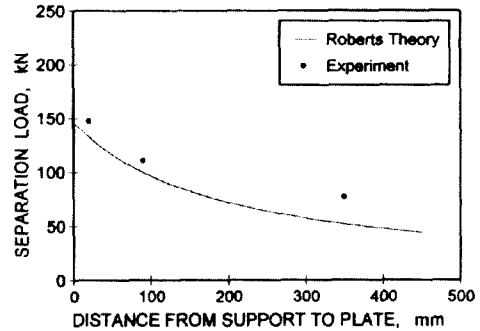


Fig. 9 Comparison of Roberts theory with test data according to plate length variation

Fig. 9에서 실험값은 지점에서 강판까지의 거리가 2.0, 9.0, 35.0cm인 경우이다. 전체적으로는 Roberts의 이론이 실험 박리하중보다 낮은 값으로 예측하고 있다. 거리가 9.0 cm인 점을 중심으로 거리가 더 작을 때에는 이론값과 실험값이 유사한 기울기를 보이는데 반해, 거리가 더 클 때에는 이론값이 실험값에 비해 보다 급격하게 감소함을 알 수 있다. 즉, Roberts의 이론은 지점에서 강판까지의 거리에 따른 박리하중값을 정확히 예측한다고 말할 수 없다. 그러나, 이론과 실험에 있어서, 곡선의 초기 경사가 급격하다는 것은 단부까지 전(全) 길이를 부착하는 것이 오히려 경제적이다는 것을 말해 주고 있다. 따라서, 설계에 응용할 때에도 전 길이를 부착하는 것을 제안한다.

#### 4.2 강판두께에 대한 박리하중의 변화

4.1절에서 살펴보았듯이, 강판의 길이를 최대한 길게 하는 것이 바람직하므로, 강판을 최대한 길게 보강한다는 가정하에서는 강판의 두께가 박리하중에 가장 큰 영향을 미치는 변수가 된다. 따라서, 강판의 두께에 따른 박리하중의 변화를 예측하는 것이 중요하며, 이 절에서는 Roberts의 이론에 의한 계산값과 실험값을 비교함으로써 수정·보완된 박리하중 예측



식의 토대를 마련하도록 하겠다.

Fig. 10은 강판두께에 대한 박리하중의 변화를 Roberts의 이론에 의해 계산한 값과 실험값을 비교한 것이다.

Fig. 10에서 실험값은 강판두께가 3, 5, 6, 9, 12 mm인 경우이다. Roberts의 이론에 의한 값이 강판두께가 5 mm와 6 mm인 경우에 있어서는 실험값과 유사하지만, Fig. 10에서 보듯이 전체적인 경향이 다름을 볼 수 있다. 특히, 강판이 3.7 mm 이상의 두께에서는 강판두께가 증가함에 따라 박리하중이 오히려 증가하고 있는데, 이것은 실험과 큰 차이를 보이고 있는 것이다. 이러한 경향의 차이를 유발하는 가장 큰 원인은 접착계면에서 파괴가 일어나는 것이 아니라, 콘크리트부에서 파괴가 발생한다는 것이다. 또한, 이러한 경향의 차이는 Roberts의 이론이  $M_0$  대신 지점에서  $(d_c + d_p)/2$  만큼 떨어진 점의 모멘트인  $M^*$ 로 대체하는 과정에서 발생하는 측면도 있다. 즉, 콘크리트 유효깊이( $d_c$ )에 비해서 강판두께( $d_p$ )가 훨씬 작은 값이기 때문에 강판두께의 증가로 인한 박리하중의 감소를 제대로 예측하지 못하고 있다. 따라서, 이 부분들을 수정하여 3.3절에서 개선된 박리하중 예측식을 제안하였다.

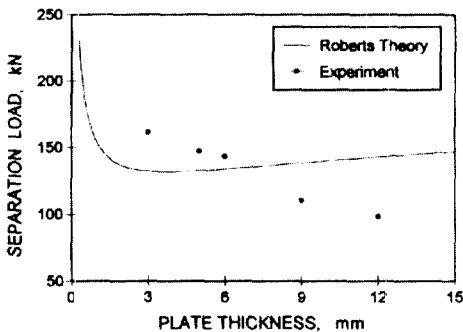


Fig. 10 Comparison of Roberts theory with test data according to plate thickness variation

강판두께가 9 mm와 12 mm 인 경우에는 rip off와 separation이 함께 발생하였다. separation이 발생하면 위의 Fig. 10과 같이 박리하중이 급격히 감소하고 있으며, 이에 따라 Roberts의 이론에 의한 예측값이 실험값보다 훨씬 크게 나타나고 있다. 따라서, 설계에 있어서는 급격한 박리하중의 감소를 가져오는 separation의 발생을 방지하기 위한 두께 제한

이 필요하다.

### 4.3 박리하중 예측식의 제안

강판의 두께가 두꺼워짐에 따라 파괴양상은 강판이 콘크리트를 붙고 떨어지는 rip off만 발생하다가, rip off와 접착계면에서의 박리(separation)가 복합적으로 발생하는 것으로 변화한다. 따라서, 두가지 경우에 대해서 박리하중 예측식이 달라져야 한다.

#### 4.3.1 강판두께 제한

강판두께가 두꺼울수록 강판단부에 작용하는 박리력이 증가하게 됨으로써 separation이 rip off와 함께 발생하게 되며, Fig. 10과 같이 separation이 함께 발생하는 경우에는 박리하중이 급격히 감소한다. 실험에서 rip off에서 rip off와 separation의 복합으로 파괴양상이 바뀌는 시점은 강판두께가 6~9 mm 사이이며, 식(4.1)에 의해 계산한 평형파괴가 일어나는 최대 강판두께는 6 mm이다. 6~9 mm 사이의 시험체가 없기 때문에 정확히 알 수는 없으나, 6 mm 시험체에서 separation이 발생하지 않은 점으로부터 평형파괴가 일어나는 최대 강판두께가 파괴양상이 바뀌는 점의 강판두께보다 작은 값으로 판단된다. 따라서, separation에 의한 박리하중의 급격한 저하를 피하기 위한 두께 제한은 기존의 최대 철근비에 의한 두께 제한으로 할 수 있다.

$$d_p \leq \frac{b_c d_p \rho_{\max} - A_s}{b_p} \frac{\sigma_{vs}}{\sigma_{vp}} \quad (4.1)$$

여기서,  $d$  : 보강전 콘크리트보의 최대철근비

$\rho_{\max}$  : 인장철근 단면적

$A_s$  : 철근의 항복강도

$\sigma_{vs}$  : 강판의 항복강도

$\sigma_{vp}$  : 콘크리트 단면의 폭

$b_c$  : 강판의 폭

#### 4.3.2 박리하중 예측식

rip off는 강판 단부의 콘크리트부에서 파괴가 발생하는 것이므로, 콘크리트에 작용하는 주응력의 크기가 콘크리트의 휨인장응력과 관련이 있는 일정 한계에 도달할 때 파괴가 발생하는 것이며, separation은 강판단부에서의 전단응력값이 0이므로, 강판 단부가 아닌 강판단부로부터 떨어진 지점의 접착층

에서 발생하는 전단응력이 계면접착응력을 초과할 때 발생하는 것이다. 먼저, rip off의 경우에 대해서 정리하면, 파괴시의 주응력이 콘크리트 활렬인장강도와 선형관계가 있다고 하면 식(4.2)와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{(\sigma_0 + \sigma_x)}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_0 - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_0^2} \geq \phi f'_c \text{ (rip off의 경우)} \quad (4.2)$$

여기서,  $f'_c$  : 콘크리트 활렬인장강도

$\phi$  : 선형계수

4점재하의 경우에 대한 rip off에 의한 박리하중 예측식을 전개하면 다음과 같다. 3.2절에서 언급한 바와 같이, Roberts의 이론은 제안사항으로  $M_0$  대신 지점에서  $(d_c + d_p)/2$  만큼 떨어진 점의 모멘트인  $M^*$ 로 대체함으로써 강판두께에 의한 영향이 적어지는 문제점을 지니고 있다. 따라서,  $M_0$ 를 그대로 사용하여 전단응력을 구하면 식(4.3)이 된다. 또한, Roberts의 이론에서  $m_{30}$  대신 식(4.4)처럼 강판에 작용하는 인장응력과 강판중양에서의 거리의 곱을 강판중양에 대해 적분하여 모멘트를 구하면 법선응력은 식(4.5)가 된다. 각 식을 A, B, C, D라는 문자를 사용하여 간단히 표현하였다.

$$\tau_0 = \frac{P}{2} \left( 1 + \left( \frac{K_s}{E_p b_p d_p} \right)^{1/2} L \right) \frac{b_p d_p}{I b_a} (h_p - h) = PA \quad (4.3)$$

여기서, L : 지점에서 단부까지의 거리

$$m_{30} = 2b_p \int_0^{d_p} \left( \frac{M_0}{I} x \right) x dx = \frac{M_0 b_p d_p^3}{12I} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \frac{P b_p d_p^3}{12 I b_a} (\gamma + L \gamma^2) + \tau_0 d_p \left( \frac{K_p}{4 E_p I_p} \right)^{1/4} \\ &= PB + PA d_p \quad \gamma = PB + PC \end{aligned} \quad (4.5)$$

강판이 콘크리트에 접촉되어 있어서 선형하중 재하시에 발생한 휨균열이 보강후에 더 이상 진전되지 않으며, 강판 단부 근처의 콘크리트부에는 균열이 존재하지 않으므로 완전균열단면으로 볼 수는 없다. 즉, 콘크리트에 작용하는 인장응력은 0과 비균열단면에서의  $\sigma_x$  값 사이에 존재하므로, 실제로는 다음 식(4.6)에서 보듯이 0과 1 사이의 계수를 곱한 값이 된다.

$$\sigma_x = \beta P \frac{E_c L (h_p - X)}{2 E_p I} = PD \quad (0 < \beta < 1) \quad (4.6)$$

식(4.3)과 식(4.5) 그리고 식(4.6)을 식(4.2)에 대입하면 박리하중은 식(4.7)과 같이 된다.

$$P = \frac{\phi f'_c}{\frac{B+C+D}{2} + \sqrt{\left(\frac{B+C-D}{2}\right)^2 + A^2}} \quad (4.7)$$

실험에서 얻은 박리하중으로부터  $\beta$  값을 0부터 1까지 변화시키면서 얻은 주응력의 크기는 2.66~3.26 MPa이며, 이것을 콘크리트 활렬인장강도 실험값인 2.23 MPa로 나누면 1.20~1.46 범위의 계수  $\phi$ 를 얻을 수 있다. 기존의 연구에 의해 콘크리트의 휨인장강도를 활렬인장강도의 1.25~1.5배로 간주하고 있으므로, 단부의 콘크리트요소에 작용하는 주응력이 휨인장응력에 도달할 때 rip off에 의해 박리가 발생한다고 보는 것이 타당성을 가진다고 할 수 있다.

Fig. 11(a)는 완전균열단면( $\beta=0$ )으로 가정하고, 선형계수  $\phi$  값을 1.23으로 취하여 식(4.2)에 의해 계산한 값과 실험값을 비교한 것이다. rip off에 의해서 파괴가 유발된 경우인 강판두께가 3, 5, 6 mm인 시험체는 식(4.2)의 결과와 유사한 경향을 보이고 있으며, separation이 함께 발생함으로써 파괴가 유발된 9, 12 mm의 강판두께로 보강된 시험체는 식의 결과와 차이를 보이고 있다.

Fig. 11(b)은 실험값을 가장 유사하게 예측하는 경우( $\beta=0.5$ ,  $\phi = 1.32$ )에 대해 식(4.2)에 의해 계산한 값과 실험값을 비교한 것이다. Fig. 11과 마찬가지로 rip off에 의해 파괴가 유발된 세 시험체의 경우에는 아주 정확하게 예측하고 있으나, separation이 함께 발생한 시험체의 경우에는 차이를 보이고 있다.

따라서, 앞의 식(4.2)의  $\beta$ 에 0.5를 대입하고, 선형계수  $\phi$ 에 1.32를 대입한 식을 최대철근비 범위에 들어오는 강판두께에 대한 박리하중 예측식으로 제안한다.

separation에 의한 박리하중 계산식은 다음 식(4.8)과 같이 최대 전단응력이 계면접착응력을 초과할 때 발생한다.

separation이 rip off와 함께 발생하는 경우에 있어서의 박리하중을 계산하는 데는 여러 가지 문제점

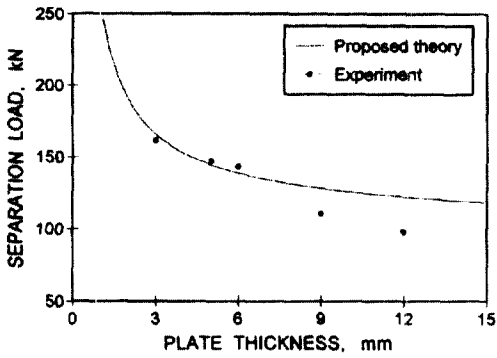


Fig. 11(a) Comparison of the proposed theory with test results( $\beta=0, \psi=1.23$ )

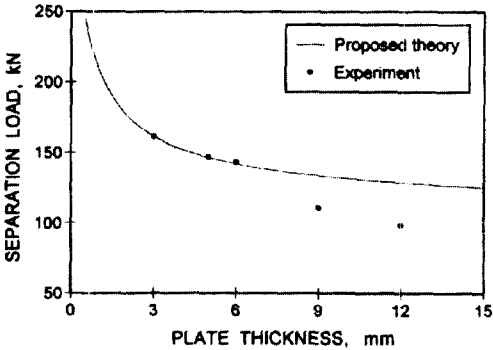


Fig. 11(b) Comparison of the proposed theory with test results( $\beta=0.5, \psi=1.32$ )

을 지니고 있다. 먼저, 최대 전단응력이 강판의 단부로부터 얼마만큼 떨어진 점에서 발생하는지 찾아서 어려우며, 응력집중량도 Roberts의 이론에 파괴역학의 개념을 첨가하여 전개한 식을 사용하여야 한다. 또한, separation의 경우에 대한 박리하중 예측식은 여러 가지 단면에 대한 실험이 수반되어야 하기 때문에 본 실험만으로는 예측식을 제안하기 힘들다. 그러나, 접착제의 성능향상으로 인하여 본 실험에서 볼 수 있듯이, 최대철근비를 넘어서는 두께 이상에서 rip off와 separation이 함께 발생하기 때문에 실제에 있어서는 rip off에 의한 계산식만으로도 설계에 적용가능하다고 할 수 있다.

이상을 정리해보면, 최대철근비에 의해 강판의 최대두께를 제한하고 그 범위 안에서는 식(4.2)를 적용하여 박리하중을 예측할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 강판휨보강된 철근콘크리트보의 구조적 거동에 대해 살펴보고, 거동에 지배적 영향을 미치는 박리하중의 예측식을 제안하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 강판이 콘크리트를 물고 떨어지는 현상(rip off)이 파괴를 좌우하는 원인이며, 강판의 길이가 짧아질수록 박리하중이 감소하여 파괴하중이 급격히 감소함을 알 수 있었다.

(2) 강판의 두께가 박리하중을 결정짓는 중요한 인자이며, 어느 한계 이상의 두께에서는 separation이 함께 발생함으로써 박리하중을 급격히 감소시켜 휨강도를 저하시키므로 평형 궤를 유도하는 최대철근비로써 최대 강판두께를 제한하도록 제안하였다.

(3) 지점으로부터 강판의 단부까지의 거리가 증가함에 따라 박리하중은 감소하며, 특히 지점부에서 박리하중의 감소가 급격하므로 강판을 최대한 길게 보강하는 것이 바람직하다.

(4) Roberts의 이론은 강판의 두께가 두꺼워짐에 따라 박리하중이 오히려 증가하는 경향을 보이고 있어 실험결과와 차이를 보이고 있다. 이것은 접착계면에서의 파괴가 아닌 강판이 콘크리트를 물고 떨어지는 rip off에 의해 파괴가 발생하기 때문이며, 또한 Roberts 이론의 전개과정에서  $M_0$  대신  $M^*$ 로 대체하는데서 기인한다.

(5) 강판휨보강시 파괴에 지배적인 영향을 미치는 박리하중에 대해, 최대철근비를 초과하지 않는 강판 두께의 범위안에서 적용할 수 있는 예측식을 제안하였다.

#### 참고문헌

1. Alfarabi Sharif, G. J. Al-Sulaaamani, and I. A. Basunbul. "Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates", ACI Structural Journal, March-April 1994, pp.160-168
2. Y.N Ziraba, M.H. Baluch Alfarabi Sharif, G. J. Al-Sulaaamani, and I. A. Basunbul. "Guidelines toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates", ACI Structural Journal, November-December 1994, pp.639-646

3. M. Hussain, Alfarabi Sharif, I. A. Basunbui, and M.H. Baluchi, "Flexural Behavior of Precracked Reinforced Concrete Beams Strengthened Externally by Steel Plates", ACI Structural Journal, January-February 1995, pp.14-22
4. Johns R., Swamy R. N., and Bloxham, "Structural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates", The Structural Engineering, Vol. 65A, No. 2, February 1987, pp.59-68
5. Johns R., Swamy R. N., and Charif A., "Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates", The Structural Engineering, Vol. 66, March 1988, pp.85-94
6. Swamy R. N., Johns R. and Charif A., "The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged RC Beams", The Structural Engineering, Vol. 67, February 1989, pp.45-54
7. Swamy R. N., B. Hobbs and M. Roberts, "Structural Behaviour of Externally Bonded, Steel Plated RC Beams after Long-Term Exposure", The Structural Engineering, Vol. 73, August 1995, pp.255-261
8. 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
9. Deric John Oehlers, "Reinforced Concrete Beams with Plates Glued to Their Soffits", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 8, August 1992, pp.2023-2038
10. S. Zhang, et. al., "Prediction of Peeling Failure of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Steel Plates", Proc. Instn Civil Engrs Structs & Bldgs, Vol. 110, August 1995, pp257-268
11. J. Cairns, "Load Relief during Structural Repairs to Reinforced Concrete Beams", Proc. Instn Civil Engrs Structs & Bldgs, Vol. 99, Nov 1993, pp. 417-427
12. Roberts T. M. and Haji-Kazemi H., "Theoretical Study of the Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Externally Bonded Steel Plates", The Structural Engineering, March 1989, pp.39-55
13. 최완철 외, "에폭시 접착강판으로 보강된 철근콘크리트 보의 구조적 거동에 관한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회논문집, 제6권, 제1호, 1994, pp25-29
14. 심종성 외, "강판 및 탄소섬유 sheet로 보강된 R/C보의 구조적 거동 특성 연구", 대한토목학회 학술발표회논문집 (1), 1995, pp. 207-210

## 요 약

최근 들어 구조물의 노후화와 차량하중 등의 증가로 구조물의 손상이 커지고 있으며 보강의 필요성이 절실히 대두되고 있다. 강판보강공법은 강성의 확실한 증가와 내구성 등으로 인하여 그 동안 폭넓게 사용되어오고 있으나 효율적 보강을 위한 공법과 이론이 아직까지도 정립되지 않은 상태이다.

따라서, 본 연구의 목적은 그 동안의 실험결과를 중심으로 보강된 철근콘크리트보의 파괴기구와 박리 거동을 분석하고 이로부터 합리적인 박리하중 산정이론을 제한하는데 그 목적을 두고 있다. 보강된 강판의 길이와 두께 등의 영향을 고찰하고, 기존의 이론을 분석하여 기존이론의 불합리한 점을 밝혔으며, 이들을 보완한 수정이론을 제시하였다. Roberts의 이론은 강판의 두께가 증가함에 따라 오히려 박리하중이 약간 증가하고 있어 실제적인 실험거동과 차이가 나고 있다. 본 연구의 제안식은 실제 거동을 합리적으로 표현하고 있으며, 앞으로 보강설계에 유용한 자료가 될 것으로 기대되고 있다.

(접수일자 : 1997. 7. 22)