

강판과 콘크리트 접착계면의 파괴거동 및 박리특성

오병환¹⁾ · 조재열^{2)*} · 차수원³⁾

¹⁾서울대학교 토목공학과 ²⁾서울대학교 공학연구소 ³⁾한경대학교 토목공학과

(2001년 12월 5일 원고접수, 2002년 1월 15일 심사완료)

Failure Behavior and Separation Criterion for Strengthened Concrete Members with Steel Plates

Byung-Hwan Oh¹⁾, Jae-Yeol Cho^{2)*}, and Soo-Won Cha³⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

²⁾ Research Institute of Engineering Science, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

³⁾ Dept. of Civil Engineering, Hankyong National University, Ansong, 456-749, Korea

(Received on December 5, 2001, Accepted on January 15, 2002)

ABSTRACT

Plate bonding technique has been widely used in strengthening of existing concrete structures, although it has often a serious problem of premature failure such as interface separation and rip-off. However, this premature failure problem has not been well explored yet especially in view of local failure mechanism around the interface of plate ends. The purpose of the present study is, therefore, to identify the local failure of strengthened plates and to derive a separation criterion at the interface of plates. To this end, a comprehensive experimental program has been set up. The double lap pull-out tests considering pure shear force and half beam tests considering combined flexure-shear force were performed. The main experimental parameters include plate thickness, adhesive thickness, and plate end arrangement. The strains along the longitudinal direction of steel plates have been measured and the shear stress were calculated from those measures strains. The effects of plate thickness, bonded length, and plate end treatment have been also clarified from the present test results. Nonlinear finite element analysis has been performed and compared with test results. The interface properties are also modeled to present the separation failure behavior of strengthened members. The cracking patterns as well as maximum failure loads agree well with test data. The relation between maximum shear and normal stresses at the interface has been derived to propose a separation failure criterion of strengthened members. The present study allows more realistic analysis and design of externally strengthened flexural member with steel plates.

Keywords : plate bonding, strengthening, concrete structure, premature failure, half beam test, double lap pull-out test

1. 서 론

1.1 개요

각종 물리적, 화학적 성능저하 요인에 의하여 콘크리트 구조물은 내하력이 점점 감소되어 가고 있다. 이러한 열화된 구조물에 대한 보강 방법으로 강판접착을 이용한 보강 방법은 오래 전부터 널리 이용되고 있다. 그러나, 이러한 판접착 공법은 보강된 구조물이 내력을 완전히 발휘하기 이전에 조기 파괴되는 심각한 문제점을 안고 있어, 국내에 서는 급기야 주요 토목구조물에 대하여 사용을 금지하는 상황까지 이르렀다. 과도한 응력집중에 의하여 야

기되는 이러한 조기 파괴는 다음과 같은 두 가지 현상으로 구분할 수 있는데, 접착판과 콘크리트가 이루는 접착계면의 박리(separation)와 보강판 단부에 발생하는 전단균열로 인한 표면 콘크리트의 탈락현상(rip-off)이 그것이다. 이러한 현상은 강판 접착된 보의 접착계면에 발생하는 전단 및 범선응력과 밀접한 관계가 있으며, 이와 관련하여 지금까지 많은 연구자에 의한 실험적 연구가 수행되어 왔다^{1~5)}. 그러나, 이러한 연구의 대부분은 조기 파괴의 원인에 대한 것이라기 보다는 보강된 보의 거동의 관점에서 연구가 이루어졌다. 그러나, 강판 보강된 보의 거동을 규명하기 위해서는 접착계면 주위에서의 국부적인 파괴 거동 및 박리 메커니즘을 이해하는 것이 필수적이라고 판단된다. 본 연구자에 의해 수행된 연구에 의하면, 강판접착에 의하여 보강된 보가 피로하중에 대해서도 상당히 좋은 성능을 가지며, 근래에 각광받고 있는 각종 FRP재료에 비

* Corresponding author

Tel : 02-880-8701(303) Fax : 02-872-3775

E-mail : cjyshk@hananet.net

해서도 강성증진 등의 좋은 효과를 발휘할 수 있으나, 지금까지 그릇된 시공에 의하여 마치 부적절한 보강공법으로 인식되고 있는 시점에 이러한 박리거동 규명을 위한 연구는 매우 의미 있다고 사료된다⁶⁾. 본 연구의 최종 목표인 박리파괴기준을 도출하기 위해서는 강판으로 보강된 콘크리트 부재의 국부파괴현상을 모사할 수 있는 특별한 시험 방법이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 일명 double lap pull-out test와 half beam test의 두 가지 시험방법을 고안하여 순수전단이 작용하는 경우와 휨과 전단이 동시에 작용하는 경우에 있어서 접착계면의 거동을 살펴보고자 하였다. 또한 강판과 콘크리트가 이루는 접착계면의 파괴거동과 응력분포를 알아내기 위하여 다양한 수치해석이 수행되었다. 즉, 접착계면에 발생하는 법선 및 전단응력을 얻기 위하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 주요변수로는 강판의 두께와 접착제의 두께를 고려하였으며, 그 밖의 몇몇 변수를 채택하여 파괴거동에 미치는 영향을 고찰하였다. 최종적으로 이러한 실험적, 해석적 연구를 종합, 분석하여 현실적인 박리파괴기준을 도출하였다.

1.2 연구의 중요성

일반적으로 강판으로 보강된 보의 경우 완전 휨 내력을 발휘하기 전에 조기 파괴에 이르는 것으로 알려져 있다. 이러한 조기 파괴의 방지 목적으로 앵커볼팅을 하는 경우 조기 파괴를 방지하는데 그다지 효과적이지 않다는 사실은 이미 밝혀졌으며, U형 래핑은 부가적인 응력집중을 유발할 수 있다. 한편, 어떠한 단부 처리를 하지 않고 비록 조기파괴가 발생하더라도 인장부 보강만으로 휨강도를 30% 이상증진시킬 수 있다. 즉, 앵커볼팅이나 래핑 등의 방법은 설계에 반영하지 않은 상태에서 추가적인 가외장치로서 고려할 뿐, 보강된 보의 내력 향상분에 고려하지 않아도 충분히 보강성능을 기대할 수 있다. 그러므로, 강판 보강된 보의 조기파괴를 예측할 수 있는 현실적이고 정확한 파괴기준이 요구된다. 지금까지 조기 파괴에 관한 몇몇 연구가 보 부재를 대상으로 수행되어져 왔다⁷⁻¹⁰⁾. Ziraba (1995)는 부착특성에 관한 국부적인 연구를 수행하였으나, 실험 변수가 다소 제한적이었다¹¹⁾. 또한, 접착계면에 발생하는 전단 및 법선응력을 계산하기 위한 해석적 방법이 제안되고 있으나, 아직 합리적인 기준을 마련하지는 못한 실정이다¹²⁻¹⁵⁾. 그러므로 이 연구에서는 국부적인 파괴거동을 고찰하기 위한 광범위한 실험을 수행하였으며 비선형 유한요소해석을 수행하여 보강된 보의 파괴기준을 마련코자 하였다. 이 파괴기준은 보 부재에 대한 강판보강 설계를 하는데 있어 매우 중요한 의미를 갖는다고 확신하는 바이다.

2. 강판보강된 부재에 대한 실험

본 연구는 콘크리트에 부착된 강판의 국부적 파괴거동을 고찰하는데 목적을 두고 있다. 두 가지 실험 방법 즉, double lap pull-out tests 와 half beam tests가 본 연구에서 수행되었다. Double lap pull-out test는 순수 전단력이 작용하는 상태에서 강판의 부착 거동을 보기 위함으로, Fig. 1에 시험체 형상을 제시하였다. 반면, half beam test는 전단력과 휨이 동시에 작용하는 경우에 대한 것이다. (Fig. 2). 본 절에서는 파괴거동과 균열 양상에 대하여 자세히 설명하였다.

2.1 실험변수

본 연구에서는 부착된 강판의 국부파괴에 영향을 미칠 수 있는 변수들을 채택하였다. 주요 실험변수는 강판의 두께, 접착제의 두께, 부착길이, 그리고 단부 처리 방법 등이다. 본 연구에서 사용된 강판의 두께는 2-5 mm이고 접착제의 두께는 1-7 mm이다. 실험변수에 따른 시험체명은 Table 1에 정리하였으며, Fig. 3은 보강판의 단부 처리에

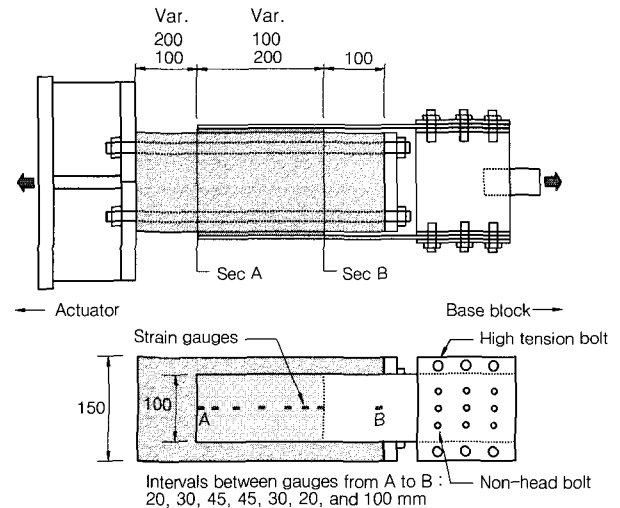


Fig. 1 Specimen configuration and test set up for double lap pull-out tests (unit: mm)

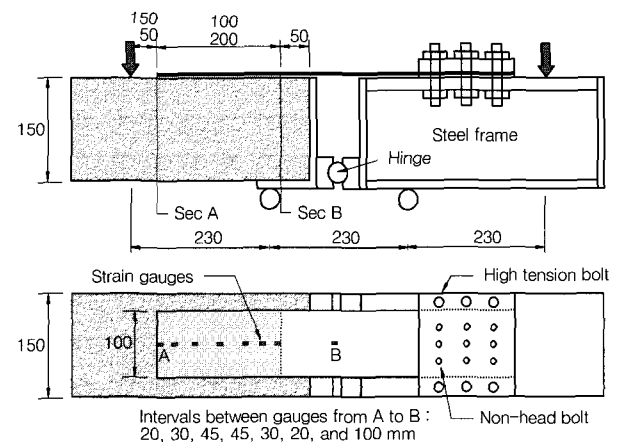


Fig. 2 Specimen configuration and test setup for half beam tests (unit: mm)

대한 상세한 내용을 그림으로 보여주고 있다.

2.2 재료특성

시험체에 사용된 콘크리트의 재령 28일 압축 및 쪼갬인장강도는 각각 46.3 MPa, 2.93 MPa이고 탄성계수는 32,000 MPa이다. 강판의 항복 및 인장강도는 각각 292 MPa, 410 MPa이며, 탄성계수는 210,000 MPa이다. 이러한 재료 특성은 모두 실제 사용한 재료에 대한 재료실험을 통하여 얻은 것이다. 접착제의 재료 특성을 살펴보면 압축 및 인장강도는 각각 180 MPa, 70 MPa이며, 탄성계수는 2,300 MPa이다.

2.3 시험체 제작

Double lap pull-out test 시험체와 half beam test specimens 시험체에 대한 개략도를 각각 Fig. 1과 2에 제시하였다. Double lap pull-out test를 위하여 총 11개의 시험체를 Table 1의 실험변수에 따라 제작하였으며, 콘크리트 블록의 크기는 150×150×400 mm이다. 강판은 접착제를 이용하여 블록의 양 측면에 부착하였으며, 반대쪽 단부는 스크래치된 지압판과 고장력볼트를 이용하여 강블록에 고정하였다. 시험체는 타설시 준비된 길이방향 4개의 구멍을 통하여 고장력 강봉을 이용하여 가력장치에 연결하였다. 이 구멍은 PVC파이프를 콘크리트 타설 전에 거푸집에 설치하여 확보하였다.

Half beam test 시험체는 Table 1에서 보는 바와 같이 double lap pull-out test와 같은 실험변수를 채택하고 있으며 시험체의 크기 역시 동일하다. Fig. 2는 시험체 및 시험방법을 보여주고 있다. 강판의 한쪽 단부만을 콘크리트 블록에 부착한 이유는 그 영역에서 조기 파괴를 유도하기 위함이었다.

콘크리트는 핸드그라인더를 이용하여 굵은 골재가 노출될 때까지 갈아냈으며, 먼지 등 불순물을 제거하였다. 표면처리를 마친 후 공극 등은 퍼티로써 마감하였으며, 강판의 표면은 샌드블라스트를 이용하여 녹과 열처리 과정에 발생한 막을 제거하였다. 부착방법에 있어서는 압착방법이 아닌 수지 주입에 의한 부착방법을 이용하였으며, 소요의 부착면적을 확보하기 위하여 퍼티가 아닌 천테이프를 이용하여 접착제의 누출을 방지하였다. 주요 실험변수인 접착제 두께의 정확성을 확보하기 위하여 아주 작은 고무 간격재를 이용하였다. 고무재질의 짧은 튜브를 콘크리트와 강판 사이의 공간에 삽입하여 접착제의 주입과 공기의 배출을 용이하게 하였다. 주재와 경화제로 구성된 저점도 접착제를 정밀 계량하여 믹서를 이용하여 혼합하여 특별 제작된 주입장치를 이용하여 주입하였다. 특히, 눈에 보이지 않은 미세 기포의 생성을 방지하는데 주의를 기하였다.

2.4 시험방법 및 측정 장치

하중은 0.01 mm/sec의 속도로 변위제어방법을 이용하여 가하였다. 강판의 변형률을 측정하기 위하여 전기저항식 변형률게이지를 강판의 길이방향으로 중심선에 부착하였으며 (Fig. 1과 2), 콘크리트와 강판의 상대변위를 측정하기 위하여 2개의 LVDT를 Fig. 4와 같이 장착하였다. 하중은 극한 파괴시까지 재하하였으며, 모든 데이터는 데이터로거와 PC를 이용하여 매 2초 간격으로 자동 수집하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 파괴 양상

강판 보강된 보의 조기 파괴는 강판의 박리와 콘크리트

Table 1 Test parameters and specimen classification

Specimen	Bonded length [mm]	Plate thickness [mm]	Adhesive thickness [mm]	End treatment
D143,H143	100	4	3	-
D223,H223	200	2	3	-
D233,H233	200	3	3	-
D243,H243	200	4	3	-
D253,H253	200	5	3	-
D241,H241	200	4	1	-
D245,H245	200	4	5	-
D247,H247	200	4	7	-
D243B1,H243B1	200	4	3	1 bolt
D243B2,H243B2	200	4	3	2 bolts
D243T,H243T	200	4	3	Tapering

Note : The prefix D and H represent double lap Pull-out test and half beam test, respectively

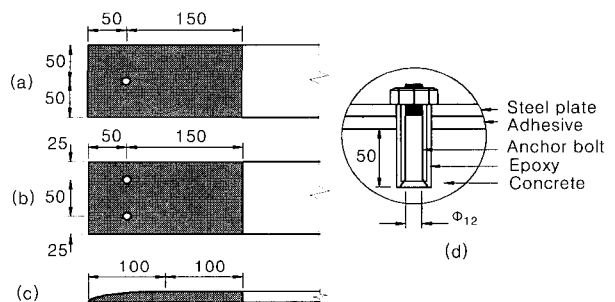


Fig. 3 Details of steel plate end treatment (unit: mm)
(a) 243B1 (b) 243B2 (c) 243T (d) anchor bolting

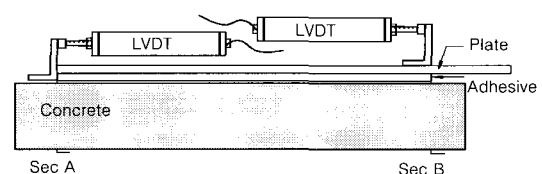


Fig. 4 Location of LVDTs to measure relative displacement

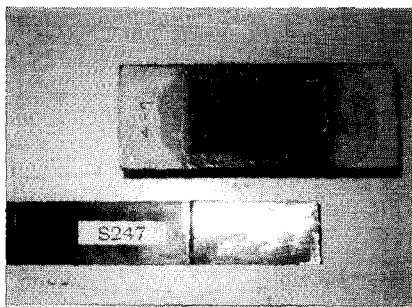
표면이 떨어지는 rip-off의 대표적 두 가지 양상으로 나뉜다. 여기서 박리파괴는 Fig. 5(a)와 5(b)에서 보는 바와 같이 콘크리트로부터 강판의 직접적인 분리를 의미하며, rip-off는 Fig. 5(c)에서 보는 바와 같이 보강판이 시험체의 일부를 물고 떨어지는 양상을 나타낸다. 강판과 접착제 사이에서 발생한 박리는 어떠한 사전 예고 없이 갑작스럽게 발생하였는데, 그러한 경향은 Fig. 6(a) 즉, 파괴시까지 가한 하중과 강판의 변형을 관계 곡선에서도 확인할 수 있다. 이러한 박리파괴의 형태는 순수 전단력이 가해진 모든 double lap pull-out test 시험체에서 나타났다. 반면에 half beam test의 경우 H223을 제외한 모든 시험체는 rip-off 파괴가 발생하였다. 이상의 결과로부터 rip-off 파괴는 전단응력뿐만 아니라 전단 및 범선응력의 복합적 작용에 발생함을 알 수 있다. 이 rip-off 현상은 Fig. 5(c)와 6(b)에서 볼 수 있듯이, 어떤 하중 단계 이상에서는 강판의 변형률과 하중의 관계가 선형성을 갖지 않는 부분을 보여주고 있는데, 이 하중 단계가 바로 rip-off의 원인인 강판 단부에 전단균열이 발생하는 시점이다. 이 전단균열은 인장철근의 위치까지 경사를 이루며 발전하다 결국에는 철근과 수평을 이루며 진전되어 콘크리트의 rip-off를 유발한다.

3.2 강판의 길이에 따른 전단응력의 분포

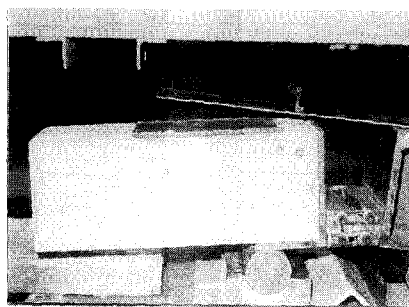
강판에 부착한 변형률계이지로부터 측정된 값을 이용하여 전단응력의 분포를 얻을 수 있다. Fig. 7은 강판의 중심선을 따라 길이방향으로 측정된 변형률을 나타낸다. 이것으로부터 강판과 접착제 사이의 계면에 발생하는 전단응력은 다음의 식을 이용하여 얻을 수 있다.

$$\tau_n = \frac{\epsilon_n - \epsilon_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} E_p t_p \quad (1)$$

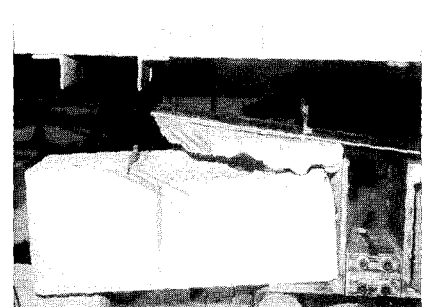
여기서, $x_n - x_{n-1}$ 는 인접한 두개의 변형률계이지의 간격을 의미하며, E_p 와 t_p 는 각각 강판의 탄성계수와 두께를 의미한다.



(a) D223

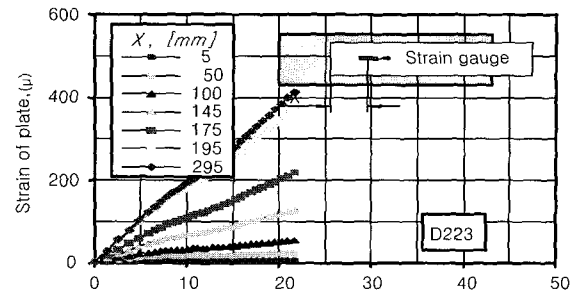


(b) H223

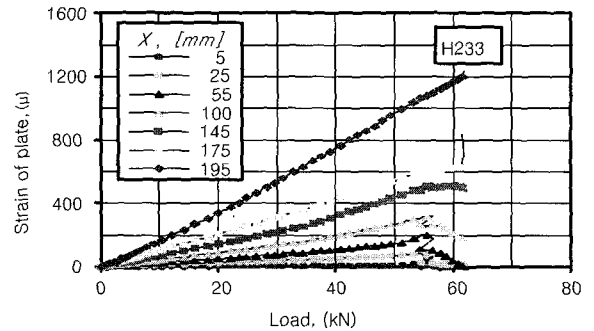


(c) H233

Fig. 5 Typical failure modes



(a) Specimen failed due to separation (D223)



(b) Specimen failed due to rip-off (H233)

Fig. 6 Typical relation of load versus strain of plate according to failure modes

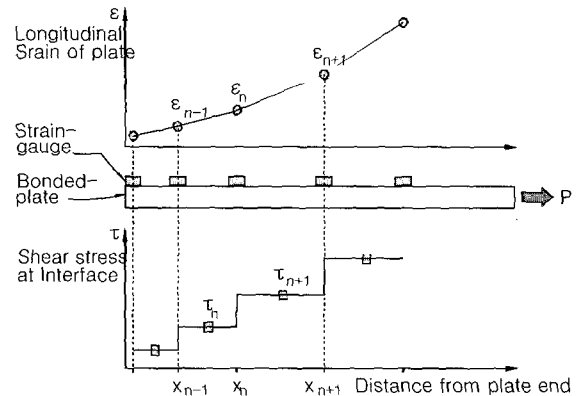
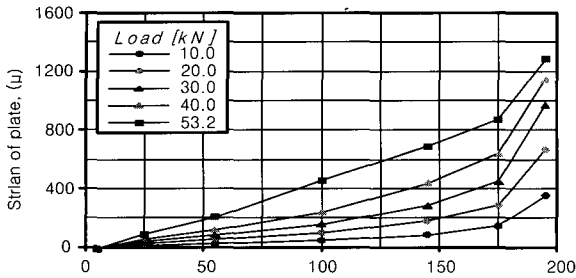


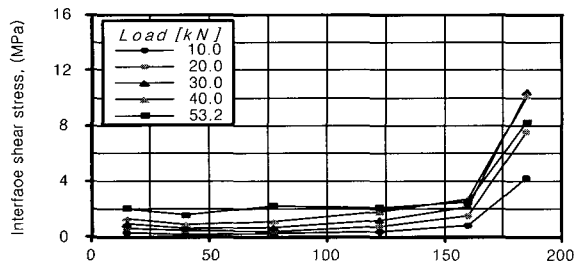
Fig. 7 Distribution of shear stress from experimental measurements

Fig. 8(a)와 (c)는 몇몇 하중 단계에서 강판의 길이방향 변형을 분포를 나타내고 있으며, Fig. 8(b)와 (d)는 이를 토대로 계산된 전단응력의 분포를 나타낸다. 흥미로운 점은 강판의 박리에 의하여 파괴에 이른 시험체 H223의 접착계면에서의 전단응력분포가 각 하중단계에서 강판의 단부로부터 150 mm 떨어진 위치에 이르기까지 일정한 값을 보이고 있다는 점이다. 그러나, rip-off에 의하여 파괴에

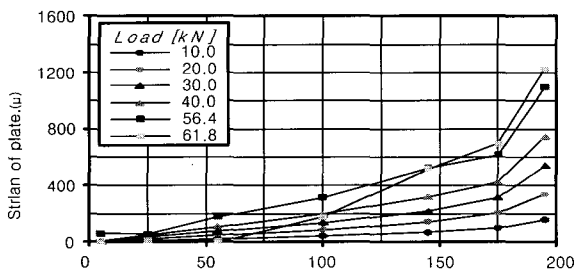
이른 시험체 H233의 경우 다른 양상을 보이고 있다. 즉 56.4 kN의 균열 발생하중에서 강판 단부의 전단응력은 0의 값을 갖게 되며, 61.8 kN의 극한 상태에서는 전단응력이 0이 되는 영역이 확대되어감을 알 수 있다 (Fig. 8(d)). 이러한 사실은 강판 단부에 발생한 전단균열이 사선 또는 수평방향으로 전파됨을 의미하는 것이다. 한편, rip-off에 의하여 파괴에 이른 모든 시험체에서 이와 같은 파괴양상과 전단응력분포를 나타내었다.



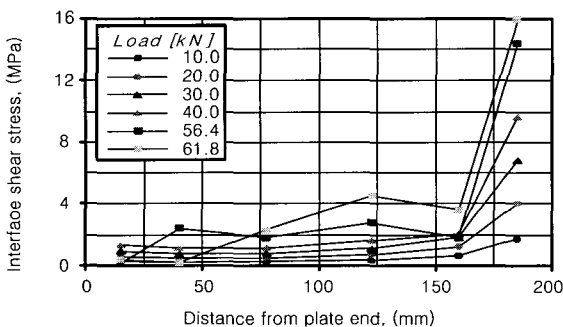
(a) Measured plate strain (Specimen H223)



(b) Calculated shear stress (Specimen H223)



(a) Measured plate strain (Specimen H233)



(b) Calculated shear stress (Specimen H233)

Fig. 8 Typical distribution of plate strain and interface shear stress

3.3 접착계면에서의 평균 전단응력-상대 변위

Fig. 9는 대표적인 시험체 D253과 H223에 대하여 평균 전단응력과 콘크리트와 강판 사이의 상대변위 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 평균 전단응력은 가해진 하중을 부착면적으로 나누어 얻은 것이며, 콘크리트와 강판 사이의 상대 변위는 LVDT로부터 얻은 값을 Fig. 10에 제시한 정의에 의하여 계산한 것이다. 접착계면의 전단계수 G_{int} 는 전단응력과 전단변형률로부터 식 (2)를 이용하여 계산한 것이다. 전단 변형률 γ 는 전단변위와 접착제의 두께로부터 식 (3)과 같이 계산할 수 있다 (Fig.10). 전단계수를 얻기 위하여 식 (2)는 다시 실험결과를 이용하여 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$G_{int} = \frac{\tau_{ave}}{\gamma} \quad (2)$$

여기서,

$$\tau_{ave} = \frac{P}{A_b}, \quad \tan \gamma \approx \gamma = \frac{\Delta \delta}{t_a} \quad (3)$$

$$G_{int} = \frac{P}{A_b} \frac{t_a}{\Delta \delta} = G_{slope} \cdot t_a \quad (4)$$

3.4 파괴하중 및 평균 전단응력

Table 2는 모든 시험체에 대한 파괴하중과 최대 평균 전단응력을 나타내고 있다. 여기서 최대 평균 전단응력은 최대하중을 부착면적으로 나누어 얻은 것이다. 최대 하중뿐만 아니라 전단균열 발생하중 또한 half beam test 시험체에 대하여 Table 2에 제시하였다. 여기서 전단균열 발생하중은 하중-강판의 변형률 관계 곡선으로부터 얻은 것인데, 강판의 단부 위치에서 균열의 발생으로 인하여 변형률의 증가가 감소하는 시점을 채택하였다. 한편, 균열발생 시점 또한 시험과정 중에 육안으로 관찰하였으나 이 방법과 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

3.4.1 부착길이(면적)의 영향

Double lap pull-out test와 half beam test 두 시험에서 공통적으로 100 mm의 부착길이를 가진 시험체 D143과 H143이 D243과 H243에 비하여 높은 평균 전단응력을 나

타내었다. 즉, 강판의 부착길이가 짧아질수록 높은 평균 전단응력을 갖는 것으로 나타났다. 그러나, Table 2에서 볼 수 있듯이 평균 전단강도의 비가 1.04로서 전단강도에

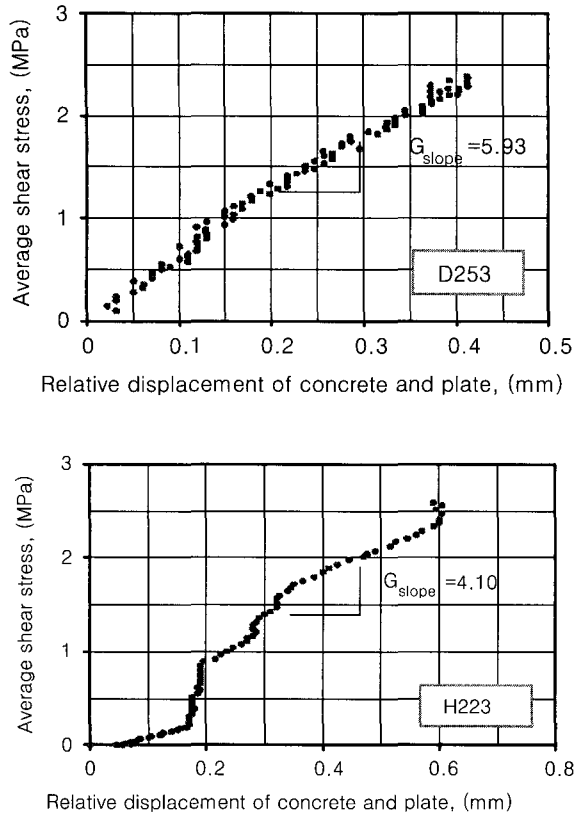


Fig. 9 Typical relation between average shear stress and relative displacement of concrete and externally bonded steel plate

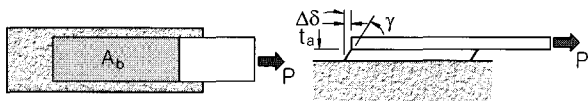


Fig. 10 Deformation of adhesive

Table 2 Failure loads and average shear stresses

Double lap pull-out test				Half beam test				
Specimen	Peak load [kN]	Peak ave. shear stress [MPa]	Peak shear stress ratio to D243	Specimen	Load in plate		Peak ave. shear stress [MPa]	Peak shear stress ratio to H243
					at peak load	at shear crack		
D143	26.9	2.69	1.25	H143	33.1	18.6	3.31	1.04
D223	21.9	1.10	0.51	H223	53.2	53.2	2.66	0.84
D233	36.8	1.84	0.86	H233	61.8	56.4	3.09	0.97
D243	42.9	2.15	1.00	H243	63.6	55.6	3.18	1.00
D253	48.3	2.41	1.12	H253	70.6	55.2	3.53	1.11
D241	40.6	2.03	0.94	H241	69.1	63.0	3.46	1.09
D245	50.0	2.50	1.16	H245	58.5	57.0	2.92	0.92
D247	49.0	2.47	1.01	H247	66.6	58.4	3.33	1.05
D243B1	41.5	2.08	0.97	H243B1	57.7	53.4	2.89	0.91
D243B2	43.5	2.17	1.01	H243B2	58.8	53.6	2.94	0.92
D243T	42.9	2.15	1.00	H243T	53.0	53.0	2.65	0.83

미치는 부착길이의 영향은 half beam test에 있어서 그 효과가 작은 것으로 나타났다. 이것은 double lap pull-out test 시험체 D143과 D243가 강판의 박리에 의하여 파괴가 일어난 반면 half beam test 시험체 H143과 H243는 rip-off에 의하여 파괴가 발생하였기 때문으로 사료된다.

3.4.2 강판 두께의 영향

Fig. 11(a)는 강판의 두께에 따른 최대 전단강도의 변화를 보여주고 있다. 이로부터 강판의 두께가 두꺼워질수록 접착계면에서의 전단강도가 증가함을 알 수 있다. 이것은 두꺼운 강판일수록 같은 하중 단계에서 상대적으로 작은 변형률을 띠게 되며 결과적으로 접착계면에서 작은 전단강도를 나타내기 때문인 것으로 사료된다. 또 한가지 흥미로운 점은 Fig. 11(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 박리에 의하여 파괴된 double lap pull-out test 시험체가 half beam test 시험체보다 작은 전단강도를 나타내고 있다는 점인데, 이것은 half beam test 시험체에 있어서 rip-off 균열을 발생시키기 위하여 보다 많은 에너지가 소산되기 때문인 것으로 판단된다.

3.4.3 접착제 두께의 영향

Fig. 11(b)는 접착제의 두께에 따른 최대 전단강도의 변화를 보여주고 있다. 여기에서, double lap pull-out test의 경우 접착제의 두께가 두꺼워질수록 전단강도 또한 증가함을 알 수 있다. 그러나 half beam test의 경우 전단강도의 변화가 일정한 경향을 보이고 있지 않다. 이것은 double lap pull-out test의 경우 강판의 박리에 의하여 파괴가 발생하였기 때문에 접착제의 두께가 시험 부재의 파괴에 직접적으로 영향을 미쳤지만, half beam test 시험체의 경우 박리가 아닌 rip-off에 의하여 파괴가 발생하여 접착층의 두께가 직접적인 영향을 끼치지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

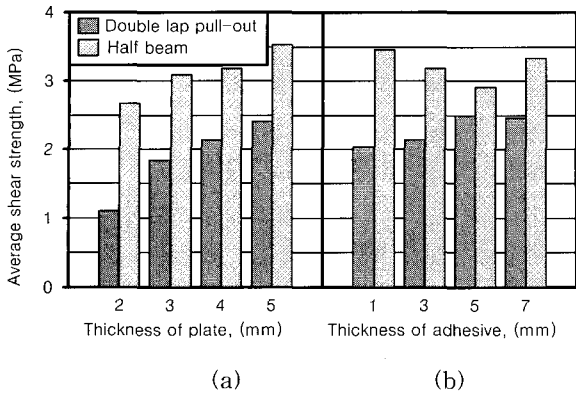


Fig. 11 Typical relation of load versus strain of plate

3.4.4 강판 단부 처리방법의 영향

부착된 강판의 단부 처리 방법이 전단부착강도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 3에서 보는 바와 같이 세 가지의 형태의 단부 처리방법을 고려하여 실험을 수행하였다. 그 결과 Table 2에서 볼 수 있듯이 double lap pull-out test에 있어서 앵커볼팅이나 테이퍼링이 부착강도를 증진시키는데 거의 효과가 없음을 알 수 있다. 오히려 half beam test 시험체에 있어서는 앵커볼팅이 최대하중을 감소시키는 역효과를 나타냈음을 확인할 수 있다. 이상의 결과를 종합해볼 때 앵커볼팅이나 테이퍼링은 박리나 rip-off를 방지할 수는 없으며 심지어는 조기 파괴를 촉진시킬 수도 있다는 사실을 보여주었다. 이러한 결과는 기존의 몇몇 연구 결과에서도 확인할 수 있었다^{1,2,8,16)}.

4. 강판 보강된 부재에 대한 수치해석

본 연구에서 수행한 시험부재에 파괴거동을 분석하기 위하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 강판과 접착제 그리고 콘크리트가 형성하는 접착계면 영역에서 법선응력은 실험적으로 측정하기가 매우 어렵다. 그러나, 유한요소 해석을 이용하면 접착계면에서의 전단응력 뿐만 아니라 법선응력을 구할 수 있다. 본 연구에서는 강판과 접착제가 이루는 계면면을 모델링하기 위하여 Fig. 12에서 보는 바와 같은 선계면요소를 도입하여 해석을 수행하였다. 이 계면요소는 접선방향과 법선방향으로의 상대 변위 Δu 와 traction t 사이의 관계를 표현한다. 식 (5)는 이 계면요소에 대한 기본 변수를 설명하고 있는데 즉, 절점변위와 상대변위 그리고 traction으로 구성된다.

$$u_e = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} \quad \Delta u = \begin{Bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \end{Bmatrix} \quad t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_t \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Fig. 12에서 보는 바와 같이 인접한 두 절점 사이의 상대변위로부터 계면에서 다음의 관계식에 따라 traction을

얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & D_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서,

$$D_{22} = \frac{D_{11}}{2(1+\nu)} \quad (7)$$

콘크리트, 강판, 그리고 접착제를 모델링하기 위하여 8 절점 평면응력 요소를 사용하였다. 콘크리트의 압축파괴기준으로서 Drucker-Prager model을 적용하였으며, 인장영역에 있어서 균열거동을 살펴보기 위하여 smeared crack model을 도입하였다. 강판에 있어서는 Von Mises yield criteria를 적용하였으며, 변형을 경화현상을 고려하였다. 이 해석에서는 균열대폭(crack band width)이 균열양상과 파괴하중에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 13은 균열대폭이 균열양상에 미치는 영향을 보여주고 있다. Fig. 13(b)가 실제 균열양상과 가장 유사한 양상을 보이고 있는데 이 때 균열대 폭은 15 mm였다. 한편, 실험결과와 최대 하중을 비교한 결과에서도 균열대폭 15 mm가 가장 적합한 것으로 나타났다. Fig. 14는 계면요소의 강성에 따른 전단계수와 최대하중의 변화를 그래프로 나타낸 것인데, 이것으로부터 최대하중 및 전단계수에 대한 실험결과와 비교하였을 때 계면 강성이 약 1000 MPa인 경우가 가장 적합한 것으로 나타났다.

5. 박리파괴 기준의 제안

강판으로 보강된 부재의 현실적인 박리파괴 기준을 도출하기 위하여 강판의 박리로 파괴에 이른 모든 시험체에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과 접착계면에 발생하는 전단응력과 법선응력을 얻을 수 있었는데, Fig. 15는 대표적인 시험체에 대한 해석결과를 그래프로 나타낸 것이다. 이러한 결과로부터 최대 전단응력과 법선응력을 취하여 도시화한 결과 Fig. 16과 같은 그래프를 얻을 수 있었다. 이 결과를 이용하여 최적의 선형회귀분석을 한 결과 계면에서의 최대 전단응력과 법선응력과의 관계를

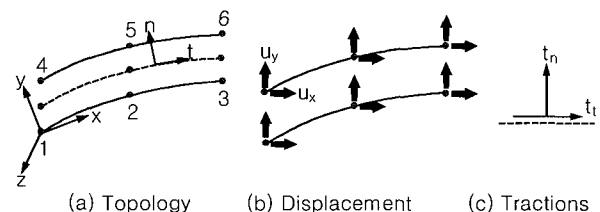


Fig. 12 Illustration of interface element used in this study

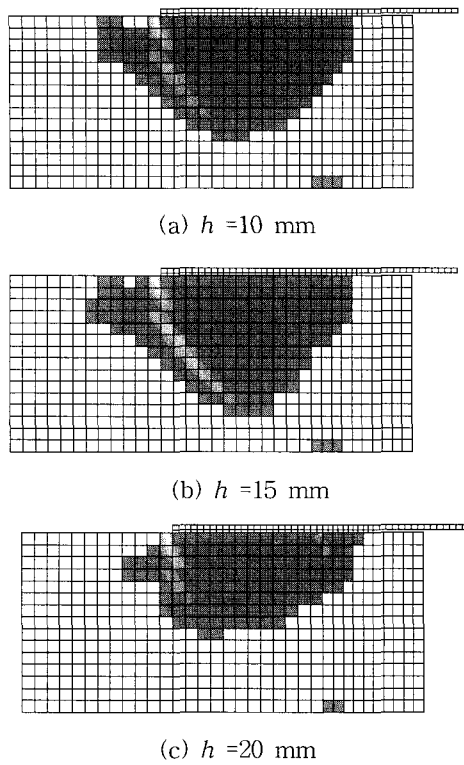


Fig. 13 Influence of crack band width on the crack pattern

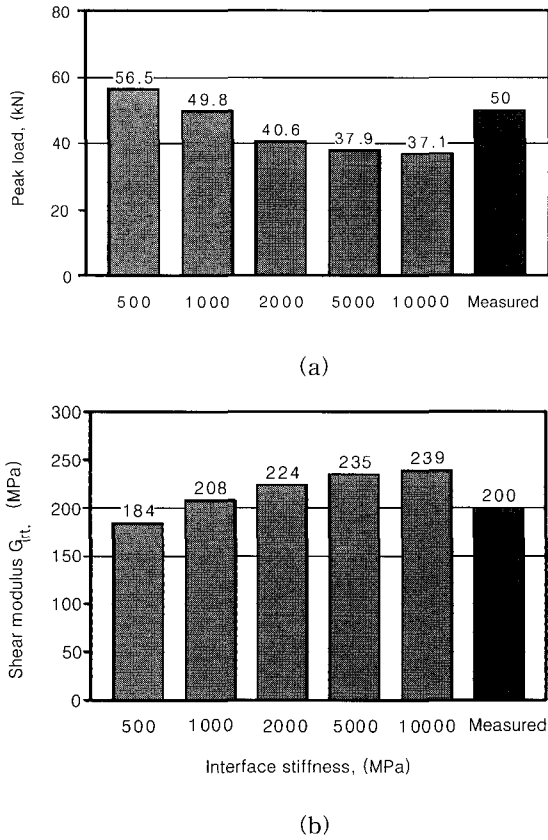


Fig. 14 Peak load and shear modulus according to interface stiffness

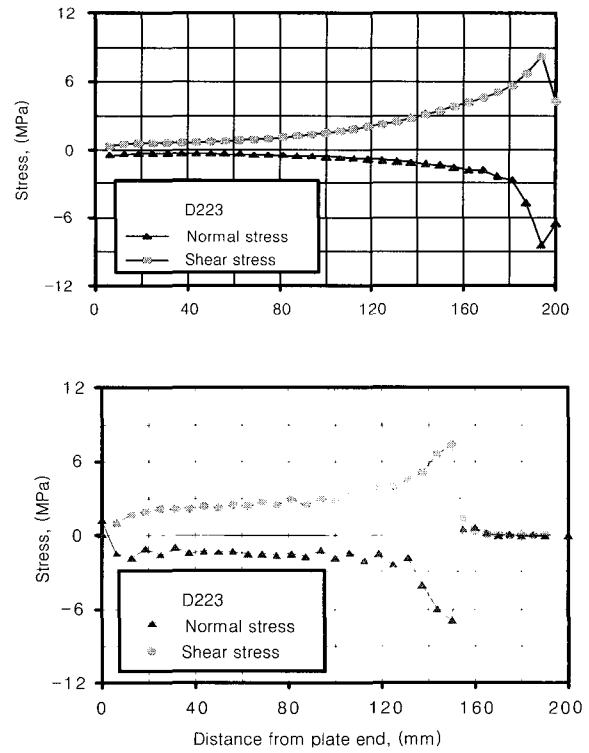


Fig. 15 Distribution of shear and normal stresses at the interface for typical test members

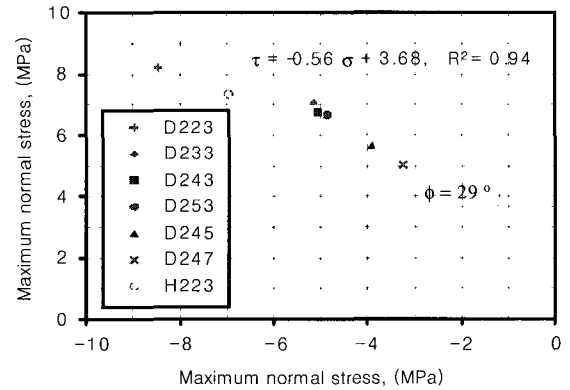


Fig. 16 Proposed failure law for the separation of strengthened plates

다음과 같이 도출할 수 있었다.

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= c - \sigma \tan \phi \\ &= 3.68 - 0.56\sigma \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 τ_{\max} 와 σ 는 각각 MPa 단위를 가지는 접착계면에서의 전단응력과 법선응력이며, 접착력 c 는 법선응력이 0일 때 전단응력을 의미한다. 한편, Fig. 16으로부터 내부마찰각은 29° 로 결정되었다. 이로써 식 (7)은 강판보강된 부재의 박리파괴를 발생시키는 기준으로서 전단응력과 법선응력의 관계로 사용될 수 있다.

6. 결 론

성능저하된 콘크리트 구조물에 대한 보강 방법으로 강판보강법은 널리 이용되어 오고 있다. 그러나, 일반적으로 보강된 구조물의 내력을 완전히 발휘하기 전에 조기 파괴가 발생하는 문제점을 안고 있다. 그러므로, 본 연구의 목적은 강판보강된 콘크리트 부재의 거동을 실험적으로 고찰하고 조기 파괴의 원인이 되는 박리파괴의 기준을 도출하는데 있다. 이를 위하여 두 가지의 새로운 시험 방법을 도입하여 광범위한 실험을 수행을 하였는데 즉, double lap pull-out test와 half beam test를 기획하고 수행하였다. 주요 실험변수로는 강판의 두께, 접착제의 두께, 부착길이, 그리고 단부처리방법 등을 채택하였으며, 각 실험변수가 파괴거동에 미치는 영향을 구명하였다. 또한 실험으로부터 고찰한 보강된 부재의 거동은 비선형 유한요소해석을 통하여 분석하고 비교하였다. 이 해석을 위하여 강판과 접착제 사이에 선계면 요소를 도입하였으며, 균열양상과 최대 하중을 실험결과와 비교분석한 결과 상당히 잘 일치함을 확인 할 수 있었다. 그리고, 이를 종합하여 보강된 휨부재의 현실적인 박리파괴기준을 제안하였다. 본 연구결과는 강판을 이용한 콘크리트 부재의 보다 현실적인 설계 및 해석에 이바지할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구를 위하여 아낌없는 재정적 지원을 해주신 (주)현대건설에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Hussain, M., Sharif, A., Basunbul, I. A., and Baluch, M. H., "Flexural Behavior of Precracked Reinforced Concrete Beams Strengthened Externally by Steel Plates," *ACI Structural Journal*, Vol.92, No.1, 1995, pp.14~22.
2. Sharif, A., Al-Sulaimani, G. J., and Basunbul, I. A., "Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates," *ACI Structural Journal*, Vol.91, No.2, 1994, pp.160~168.
3. Swamy, R. N., Jones, R., and Bloxham, J. W., "Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates," *The Structural Engineer*, Vol. 65A, No. 2, 1987, pp.59~68.
4. Swamy, R. N., Jones, R., and Charif, A., "The Effect of External Plate Reinforcement on The Strengthening of Structurally Damaged RC Beams," *The Structural Engineer*, Vol.67, No.3,

- 1989, pp.45~54.
5. Ziraba, Y. N., Baluch, M. H., Alfarabi Sharif, Al-Sulaimani, G. J., and Basunbul, I. A., "Guidelines Toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates," *ACI Structural Journal*, Vol.91, No.6, 1994, pp.639~646.
6. Oh, B. H., Cho, J. Y., and Park, D. G., "Static and Fatigue Behavior of RC Beams Strengthened with Steel Plates for Flexure," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, (accepted in 2001).
7. Hamoush, S. A., and Ahmad, S. H., "Debonding of Steel-Strengthened Concrete Beams," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.116, No.2, 1990, pp.356~371.
8. 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, No.5, 1988, pp.85~94.
9. Oehlers, D. J., and Moran, J. P., "Premature Failure of Externally Plated Reinforced Concrete Beams," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.116, No.4, 1990, pp.978~993.
10. Zhang, S., and Wood, L. A., "Prediction of Peeling Failure of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Steel Plates," *Proc. Instn. Civil Engrs. Structs & Bldgs.*, Vol.110, 1995, pp.257~268.
11. Ziraba, Y. N., Baluch, M. H., Basunbul, I. A., Azad, A. K., Al-Sulaimani, G. J., and Sharif, A. M., "Combined Experimental-Numerical Approach to Characterization of Steel-Glue-Concrete-Interface," *Materials and Structures*, Vol.28, 1995, pp.518~525.
12. Täljsten B., "Strengthening of Beam by Plate Bonding," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.9, No.4, 1997, pp.206~212.
13. 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, 1989, pp.229~233.
14. Roberts, T. M., and Haji-Kazemi, H., "Theoretical Study of the Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Externally Bonded Steel Plates," *Proc. Instn. Civil Engrs.*, Vol.87, 1989, pp.39~55.
15. Yuçoglu, U., and Updike, D. P., "Stress Analysis of Bonded Plates and Joints," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.106, No. EM1, 1990, pp.37~56.

요 약

기존 철근콘크리트 구조물에 대한 보강 방법으로서 강판접착공법은 강판의 박리나 rip-off 등 조기 파괴의 문제점을 안고 있음에도 불구하고 가장 널리 이용되고 있다. 그러나, 아직까지도 이러한 조기 파괴 문제점은 강판 단부의 접착계면 주위의 국부적인 파괴메커니즘 관점에서 파악되지 않고 있다. 그러므로, 이 연구에서는 보강판의 파괴 메커니즘을 구명하고 접착계면에서의 박리기준을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다. 이러한 목적으로 두 가지 방법에 의한 광범위한 실험이 수행되었는데, 그 하나가 순수 전단력이 작용하는 상태를 고려한 double lap pull-out test이고, 또 다른 하나는 휨과 전단이 동시에 작용하는 상태를 고려한 half beam test이다. 주요 실험변수로 강판의 두께, 접착제의 두께, 부착길이, 그리고 단부 처리방법 등을 채택하였으며, 이를 토대로 하여 각 변수에 의한 영향을 다각도에서 분석하였다. 강판의 길이방향으로의 변형률을 측정하여 그로부터 접착계면에서의 전단응력을 계산하였으며, 콘크리트와 강판의 상대 변위를 측정하여, 접착계면의 전단계수를 얻고자 하였다. 이러한 실험 결과를 이용하여 비선형 유한요소 해석결과와 비교를 통하여 실험의 검증 및 강판의 단부 접착계면에 발생하는 전단응력 및 법선응력을 도출하였다. 해석결과 최대 하중 뿐만 아니라 균열패턴 등도 실험결과와 잘 부합되는 것으로 나타났다. 최종적으로, 해석으로부터 얻은 최대 전단응력과 법선응력의 관계를 이용하여 접착계면의 박리가 발생하는 기준치를 제시하였다. 이러한 연구 결과는 강판 보강된 콘크리트 휨부재에 대하여 보다 현실적인 설계 및 해석을 가능케 할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 강판접착, 보강, 콘크리트 구조물, 조기 파괴, double lap pull-out test, half beam test
