
콘크리트 강도 및 철근비에 따른 철근콘크리트 보의 강판보강효과에 관한 연구

Effects of Concrete Strength and Steel Ratio on Reinforced Concrete
Beams Strengthened with External Steel Plate



오용복*

Oh, Yong-Bok,



정일영**

Chung, Il-Young

ABSTRACT

The aim of this study is to verify the effects of concrete strength and steel ratio on cracked R/C beams strengthened with external steel plate. In this experiment, cracks of R/C beams are simulated by notches. Regression expressions between plate-steel ratio and ultimate strength of R/C beams externally strengthened are obtained through test results. From ultimate strength and ductility points of view, the structural behaviors of R/C beams strengthened with external steel plate were also studied. Composite action between external steel plate and R/C beam were attained by ultimate strength. Empirical expression of flexural rigidity of cracked R/C beams externally strengthened were proposed through regression analysis of test results.

Keywords : notch, steel ratio, plate-steel ratio, concrete strength, composite action,
flexural rigidity

* 정회원, 서울대학교 대학원 박사수료

** 정회원, 서울대학교 명예 교수

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

1. 서론

철근콘크리트 보의 밑면에 강판을 에폭시 접착하여 보강하는 경우 보강효과에 영향을 미치는 여러 가지 요소에 대한 정량적인 평가를 위하여 실험을 통한 연구가 진행되고 있지만 실험체의 최대내력의 일정 정도까지 선행가력하여 실험체에 손상을 가한 후 재하(unloading)하여 실험체를 보강한 다음 재가력하는 종래의 균열 시물레이션방법은 균열의 폭이 변화하고 철근의 응력상태가 변하는 등⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ 실제구조물에서의 균열과는 차이가 발생함으로서 새로운 실험방법이 요구되게 되었다.

또한 철근콘크리트 구조물의 보강설계는 구조물의 정밀안전진단과 관련하여 실시하게 되고, 비파괴시험에 의한 콘크리트 강도, 철근탐사에 의한 철근량이 기본적인 데이터로서 얻어지므로 이를 활용한 보강설계가 이루어져야 한다.

따라서 본 연구에서는 실험체제작에 있어서 보강이 필요한 실제와 같이 단하지않은 균열을 시물레이션하기 위하여, 콘크리트 타설시에 강판을 삽입하여 노치를 형성하는 방법⁽³⁾으로 균열이 단하게되는 선행가력방법의 문제점을 보완하여 실제구조물의 균열을 시물레이션하고 콘크리트 강도와 철근비를 변수로하여 강판 에폭시접착으로 보강된 철근콘크리트 보에 대한 실험적연구를 통하여 보강효과를 규명하고 균열이 발생한 후의 휨강성을 평가할 수 있는 실험식을 제안하고자 한다.

2. 실험

2.1 부재실험체의 제작

부재단면의 크기는 Fig.1과 같이 150(b)x230(D)x2300(L)mm으로 하고 순지지 거리는 2.1m로 하

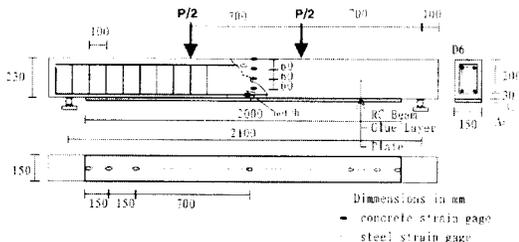


Fig. 1 Details of test beam and instrumentation

여 3등분 2점 재하방법으로 가력하였다. 압축철근은 보 상단으로부터 5cm되는 위치(d')에 2-D10을 배근하여 압축철근비는 0.47%로 하고 실험체의 설계는 건설교통부 규준인 '극한강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조설계규준 및 해설'을 적용하였으며 일부실험체를 제외한 실험체의 철근배근량은 최대철근비 $\rho_{max}(=0.75 \rho_b)$ 에 대한 비율 즉, $\rho/\rho_{max} = 18-88\%$ 로서, 보강효과를 높이기위하여⁽⁶⁾ 적은량을 배근하여 보강후에도 보강재의 면적을 포함한 보강철근비가 최대철근비를 대부분 넘지않도록하여 압축부분의 콘크리트가 철근이나 보강재보다 먼저 파괴하지 않도록 하였다. 그러나 재료시험결과 콘크리트강도가 실험계획과 달리 변화함으로서 실제적인 ρ/ρ_{max} 는 16-80%으로 변경되었다.

인장측에 있어서 콘크리트의 피복두께는 3cm로 하고 보의 유효충을 20cm로 하며 스트립은 단부로부터 10cm간격으로 SD40 D6 철근을 8개씩 배근하여 전단에 의한 파괴는 발생하지 않도록 배려하였다. 노치는 1.2mm두께의 강판을 보단면 유효충 거리이하의 15cm간격으로, 보단면 유효충의 3/4정도인 15cm높이로 각각 3개씩 삽입함으로서 단하지않은 균열상태를 시물레이션하였다. 외부접착강판의 두께는 3mm로 하였으며 접착층의 두께는 3mm스페이서로 일정두께를 유지하고 에폭시 주입공법으로 부착하였다.

강판접착에 의한 보강실험체로 부재의 콘크리트 강도, 철근비를 변수로하여 계획하였으며 실험체의 계획내용은 다음과 같다.

Table 1 Details of test beams

specimens	concrete strength		internal bar			external plate		
	specified	test	ρ_{max}	A	ρ/ρ_n	T_p	L_p	ρ_p/ρ_{pn}
CONT	210	240	0.024	2-D10	0.20	-	-	-
G1-S	210	240	0.024	2-D10	0.20	3.0	2.0	0.82
G2-CON-15	150	223	0.023	2-D10	0.21	3.0	2.0	0.86
G2-CON-27	270	271	0.027	2-D10	0.17	3.0	2.0	0.73
G2-CON-30	300	295	0.029	2-D10	0.16	3.0	2.0	0.68
G2-CON-40	400	417	0.034	2-D13	0.25	3.0	2.0	0.69
G2-SR-39	210	240	0.024	2-D13	0.35	3.0	2.0	0.98
G2-SR-61	210	240	0.024	2-D16	0.55	3.0	2.0	1.18
G2-SR-88	210	240	0.024	2-D19	0.80	3.0	2.0	1.42

*plate-steel ratio $\rho_p = (A_p + \frac{E_p}{E_c} A_p) / bd$

실험변수계획에 따라 콘크리트타설시에 1.2mm두

계의 강판을 이용하여 노치를 형성하고 콘크리트가 경화한후에 강판을 제거한 다음, 28일의 양생기간이 경과한 후에 노치에 균열주입용 에폭시로서 보수하였으며 강판을 보의 밑면에 에폭시주입공법으로 정착하여 보강하고 14일이상 추가 양생하였다. 강판접착에 의한 보강은 보강시공의 품질을 확보하기위하여 보강전문업체인 T사에 의뢰하여 시공하였다.

2.2 재하 및 측정방법

실험체의 하중재하는 가력프레임에서 유압잭으로 시간의 1/3지점에 가력용 강재보를 이용하여 2점재하하였으며 재하 하중량은 유압잭하부면에 하중계를 설치하여 측정하였다. 실험체의 단부에는 강재로올러를 설치하여 수평방향변위와 회전에 대한 구속이 없도록 하였으며 실험체의 설치 및 가력방법은 Fig.2와 같다.

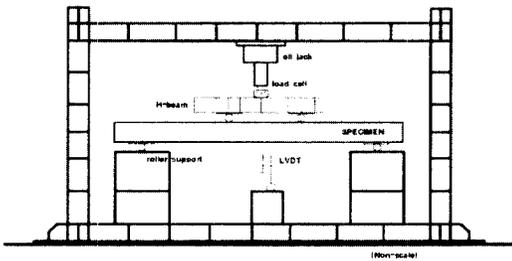


Fig. 2 Load arrangement for the test

각 실험체의 시간중앙 하단면에 자동 변위계(LVDT)를 설치하여 0.5ton의 하중단계별로 중앙점 처짐을 측정하고 인장철근과 압축철근의 중앙점에서의 변형도는 전기적 변형게이지(strain gage: 2mm)를 철근의 하부면에 부착하여 중앙부처짐과 동일한 하중단계에 따라 측정하였다. 또한 보강재에 일정간격으로 게이지를 Fig.1과 같은 위치에 부착하여 보강판의 변형도를 측정하였다. 보 실험체 상부면의 중앙점과 측면의 중앙위치에 콘크리트게이지를 부착하여 중앙부 처짐과 동일한 하중단계에 따라 측정하였다.

실험체에 하중을 가했을 때 로드셀을 통하여 전달되는 하중의 크기와 자동변위계 및 변형게이지에서 감응되는 변위는 데이터로거(Koywa Model UCAM 70A)에 저장되고 연결된 컴퓨터에 자동적으로 처리, 수록되도록 하였다.

2.3 재료의 시험 및 성능

2.3.1 콘크리트

보 실험체 제작에 사용된 콘크리트는 모두 5종류로서 배합설계내용과 실험결과는 Table 2와 같다

Table 2 Mix design and compressive strength of concrete

specified strength	mixtures(kg)						slump (cm)	compressive strength(kg/cm ²)					determined strength	E _c (kg/cm ²)
	w/c (%)	cement	water	sand	aggregate	admixture		28 d	75 d	90 d	127 d	142 d		
150	75.0	227	170	681	1265	-	18.0	-	223	-	-	-	220	2.2
210	52.2	331	150	957	901	3.32	15.4	223	-	240	-	242	240	2.3
270	65.0	319	207	770	974	-	14.9	-	-	271	-	-	270	2.5
300	60.0	376	226	753	920	-	7.8	-	-	293	295	-	300	2.6
400	50.0	396	198	692	1039	-	6.0	-	417	-	-	-	400	3.0

레미콘타설사 온도는 30℃, 습도는 40%이고, 실험실에서 타설한 경우 온도는 20℃, 습도는 60%였으며 시험체는 7일간 습윤양생 후 외기에서 양생하였다.

2.3.2 철근 및 강판

보 실험체 제작에 사용된 철근은 D6-D19으로 모두 5종류의 SD40 국내산을 사용하고 강판의 경우는 SS400(F_y=2.4t/cm²)으로 Table 3과 Table 4와 같은 실험결과를 얻었다.

Table 3 Properties of bar reinforcement

Dia.	yield strength(kg/cm ²)	tensile strength(kg/cm ²)	elastic modulus(kg/cm ²)
D6	3,925	5,229	1.95 × 10 ⁶
D10	4,366	7,113	-
D13	4,291	6,811	1.75 × 10 ⁶
D16	4,749	6,432	1.96 × 10 ⁶
D19	3,833	6,272	2.04 × 10 ⁶

Table 4 Properties of plate reinforcement

plate thickness	yield strength(kg/cm ²)	tensile strength(kg/cm ²)	elastic modulus(kg/cm ²)
3mm	2,276	3,492	2.12 × 10 ⁶

2.3.3 에폭시 접착제

본 실험의 경우에 있어서 균열주입용 에폭시, 강판

Table 5 Epoxy

Use for	Type	specific gravity	tensile strength(kg/cm ²)	compressive strength(kg/cm ²)	flexural strength(kg/cm ²)	tensile shear strength(kg/cm ²)	compressive elastic modulus(kg/cm ²)
Injection	EPX-3CW	1.17±0.05	160 ≤	700 ≤	320 ≤	120 ≤	10,000 ≤
Gluein	EPX-3W	1.17±0.05	200 ≤	700 ≤	400 ≤	150 ≤	10,000 ≤

접착용 에폭시 2가지 목적으로 사용한 각각의 에폭시 종류와 물성을 Table 5에 정리하였다.

3. 실험결과

변형특성에 관하여는 처짐거동과 부재의 콘크리트, 인장철근, 보강판 변형도변화를 살펴보고 발생 균열간격에 대하여 고찰함으로써 단면내 인장응력의 분포 즉, 단면의 효율성에 대하여 평가하고자 Table 6과같이 실험결과를 정리하였다. 강도특성에 있어서는 초기균열하중과 최대하중을 고찰하기 위하여 Table 7에 정리하였으며 파괴모드는 부재의 변형도변화를 통하여 항복여부를 결정함으로써 철근이나 강판이 항복하게되는 휨 파괴(flexural failure)와 보강판 단부에서 콘크리트 피복에 수직균열이 발생하여 보강판의 탈락이 발생하는 전단파괴(ripping-off)로 구분하고 균열발생모습을 살펴본다.

Table 6 Test results and deformation characteristics

specimens	first crack load(ton)	max. load (ton)	deflection (cm)	crack space(cm)		toughness(t-mm)	
				A	A/Acont	B	B/Bcont
CONT	1.0	4.125	60.68	7.7	1.0	197.4	1.0
G1-S	3.5	10.25	7.7	10.0	1.30	47.3	0.24
G2-CON-15	8.0	9.0	7.9	12.6	1.64	61.51	0.31
G2-CON-27	3.9	10.75	7.4	9.2	1.19	77.1	0.39
G2-CON-30	3.2	9.75	5.9	12.7	1.65	31.3	0.16
G2-CON-40	3.4	8.5	4.04	9.6	1.25	20.4	0.10
G2-SR-39	9.1	9.625	6.1	9.3	1.21	31.0	0.16
G2-SR-61	10.1	10.125	33.2	12.5	1.62	321.9	1.63
G2-SR-88	6.1	11.25	23.5	10.9	1.42	313.7	1.59

Table 7 Strength characteristics and failure modes

specimens	first crack load(ton)				max. load (ton)				failure modes
	Exp. A	Theo. B	A/B	A/D	Exp. C	Theo. D	C/D	C/Ccont	
CONT	1.0	1.17	0.85	0.27	4.13	3.65	1.13	1.0	flexure
G1-S	3.5	1.17	2.99	0.39	10.25	8.94	1.15	2.48	* flexure/shear
G2-CON-15	8.0	1.12	7.14	0.91	9.0	8.83	1.02	2.18	* flexure/shear
G2-CON-27	3.9	1.24	3.15	0.43	10.75	9.06	1.19	2.61	* flexure/shear
G2-CON-30	3.2	1.31	2.44	0.35	9.75	9.09	1.07	2.36	* flexure/shear
G2-CON-40	3.4	1.51	5.63	0.28	8.5	12.11	0.70	2.06	* flexure/shear
G2-SR-39	9.1	1.17	7.78	0.83	9.63	11.03	0.87	2.33	* flexure/shear
G2-SR-61	10.1	1.17	8.63	0.75	10.13	13.51	0.75	2.45	* flexure/shear
G2-SR-88	6.1	1.17	5.21	0.37	11.25	16.29	0.69	2.73	flexure/shear

* plate-gluе interfacial bond failure

3.1 콘크리트 강도에 따른 보강효과

3.1.1 변형특성

1) 처짐

Fig.3에는 보강판을 부착하는 손상을 입은 부재의 콘크리트 강도를 150~400kg/cm²까지 변화시켰을 때의 하중-처짐관계를 나타내었다. 콘크리트 강도증가에 따른 초기균열하중까지는 콘크리트 강도에 관계없이 동일한 값을 보이고 있으나 이후의 휨 강성 변화는 콘크리트 강도가 150kg/cm²에서부터 300kg/cm²까지는 경우는 미소한 차이를 보이지만 콘크리트 강도가 400kg/cm²일 경우는 현저한 휨 강성의 증가를 보인다. 그러나 실험계획시 철근비를 모든 실험체에서 비슷한 정도로하기 위하여 2-D13을 배근한 것을 고려하면 이런 휨 강성의 차이는 철근량의 차이에서 기인하는 것으로 사료된다. 또한 콘크리트 강도가 150, 210, 270kg/cm²의 경우는 항복이후 약간의 연성적인 거동을 볼 수 있는데 이것은 부재의 변형도변화와의 관계로부터 원인을 추정할 수 있다. 초기 균열하중이후 동일하중에 있어서의 처짐량은 콘크리트 강도가 클수록 감소하고 있어서 처짐조절 능력이 양호한 것으로 나타난다.

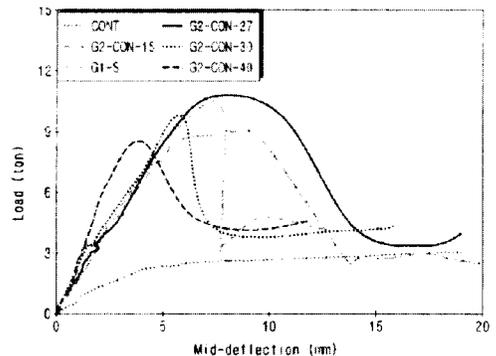


Fig. 3 Effects of concrete strength on the deflection of plated beams

2) 변형도

Fig.4는 콘크리트 강도변화에 따른 하중-인장철근 변형도곡선으로 150kg/cm²과 210kg/cm²인 경우에는 소성적인 거동을 보이고 있으나 나머지 경우는 갑작스런 강도의 저하를 겪고 있다. 두 실험체의 파괴모드를 살펴보면 타 실험체는 강판이 항복한 이후 곧이어 보강판이 탈락하고 있으나 강도가 150kg/cm²

과 210kg/cm²인 경우는 철근까지 항복한 이후에 보강판이 탈락함으로써 하중-처짐곡선에서 콘크리트 강도가 150kg/cm²과 210kg/cm²인 경우 약간의 연성적 거동을 보이는 원인이 된다. 콘크리트 강도가 270kg/cm²인 경우 최대내력시의 보강판의 변형도가 10489 $\mu\epsilon$ 으로 재료의 항복변형도를 초과한후에도 강판의 합성作用(composite action)이 유지됨으로서 보강된 보가 연성적인 거동을 보일 수 있는 원인이 된 것으로 사료된다.

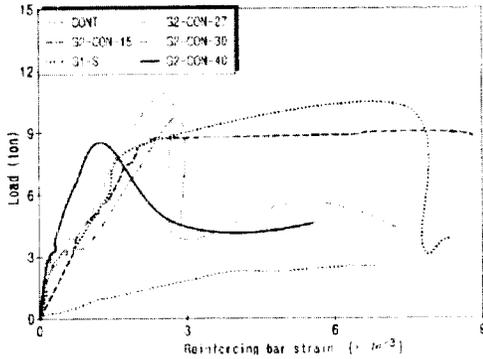


Fig. 4 Effects of concrete strength on the reinforcing bar strain of plated beams

콘크리트 강도에 따른 보의 상단에서 측정된 콘크리트 변형도는 Fig.5에 의하면 콘크리트 강도가 270kg/cm²인 경우는 3295 $\mu\epsilon$ 이므로 콘크리트의 항복변형도에 이르는 것으로 볼 수 있다. 보의 춤에 걸친 콘크리트의 변형도분포를 Fig.6에 대표적으로 나타내었다.

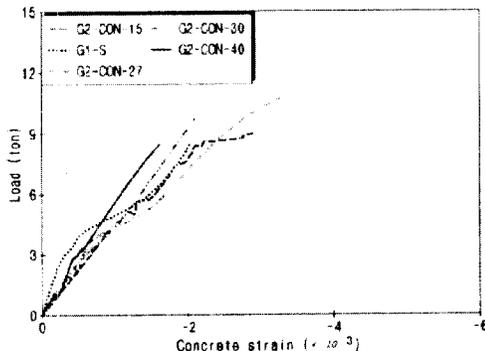


Fig. 5 Effects of concrete strength on the concrete strain of plated beams

콘크리트 강도의 증가에 따라 최대하중시 보중앙에서 보강판의 변형도는 각각 13360, 2651, 10489,

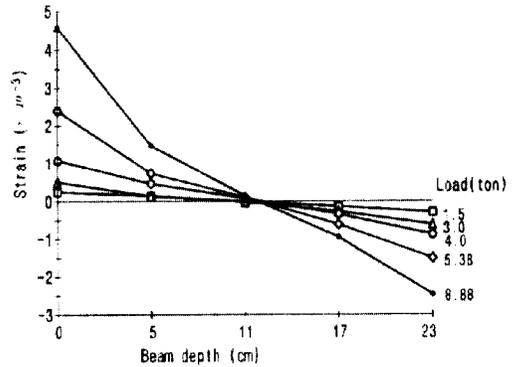


Fig. 6 Strain distribution over the depth of beam G2-CON-27

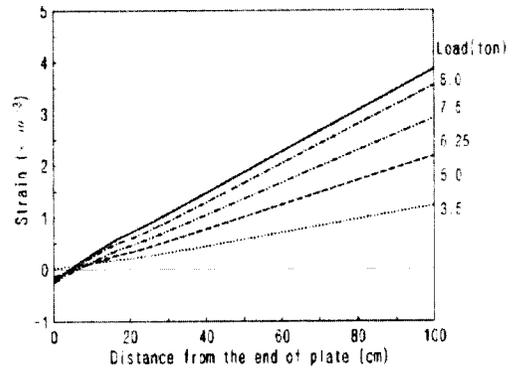


Fig. 7 Strain distribution along the steel plate of beam G2-CON-15

2343, 4280 $\mu\epsilon$ 으로 강판재료의 항복변형도를 초과하고는 있으나 개략적으로 콘크리트의 강도가 증가할수록 최대내력시 강판에의 응력이 감소하고 있으므로 강판의 재료항복변형도에 이르기전에 최대하중에 도달할수 있는 가능성이 높아진다. Table 8에서 실험결과에 의한 콘크리트변형도분포로부터 얻은 중립축거리와 이론값이 비교적 잘 일치하고 있어서 파괴시까지 합성작용이 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. Fig.7에는 콘크리트 강도에 따른 보강판 변형도의 분포를 대표적으로 나타내었다. 특히 콘크리트 강도 150kg/cm²의 경우 하중이 증가하여 최대내력에 이르면서 초기하중에서 보강판단부에 발생하던 인장응력이 압축응력으로 변화하고있다는 사실을 볼 수 있으며 D. A. Van Gemert^{[14],[15]}의 가정과 같이 최대하중까지 보강판에는 삼각형의 응력분포를 보이고 있다.

3.1.2 강도특성

1) 초기균열하중

실험을 통하여 얻은 초기균열하중은 정확하고 정밀한 값은 아니지만 보강판의 접착에 의한 구속효과(restraining effect)에 대하여 살펴볼 수 있다.⁽¹³⁾ 최대하중 이론값에 대한 균열하중 실험값의 비율이 28-88%내에 존재하므로서 표준실험체는 27%를 보이고 있는 것과 비교하면 균열억제능력이 큰 차이는 아니지만 확실히 향상된 것을 볼 수 있다.

2) 최대하중

Table 7에는 콘크리트 강도에 따른 최대하중을 이론값과 함께 나타내었다. 실험결과와 이론값의 비율이 콘크리트 강도가 400kg/cm²인 경우 70%까지 감소하고 있으며 보강판의 탈락도 강판과 접착층사이의 부착파괴가 주로 발생하는 것을 알 수 있다. 결국, 콘크리트 강도가 증가할수록 실험값/이론값이 감소하며 강판-접착층 부착파괴길이도 길어지는 것으로 나타난다.

3.1.3 파괴모드

철근비는 ρ/ρ_{max} 로서 0.16-0.25를 유지하고 콘크리트 강도를 변화시킨 경우의 파괴모드를 Table 7에 정리하고 균열의 발생모습을 Fig.14에 나타내었다.

G2-CON-15의 경우 5ton이하에서 보강판이 항복하고 8.7ton에서 철근이 항복한 후 보강판이 탈락한다. 보강판탈락시 강판-에폭시접착면 부착파괴 길이는 21.5cm를 나타내며 ripping-off가 발생한다. 특히 휨균열과 함께 전단균열이 두드러지는 것을 균열발생모습에서 볼 수 있다.

G1-S는 보강판이 5.5ton정도에서 항복한후 곧이어 철근이 9ton에서 항복하고 보강판단부에서 19.5cm가량의 강판-에폭시접착면 부착파괴가 발생하고 이어서 ripping-off에 의한 파괴가 발생한다.

G2-CON-27은 보강판이 5.0ton에서 항복한 후 보강판단부에서 19.5cm의 강판-에폭시접착면 부착파괴를 보이며 인장철근위치까지 전단균열이 발생하는 ripping-off에 의한 파괴가 발생한다.

G2-CON-30은 보강판이 7.0ton이하에서 항복하고 강판-에폭시접착면 부착파괴 길이 10cm를 보이며 보강판이 탈락한다.

G2-CON-40은 보강판이 6.5ton이하에서 항복하

고 강판-에폭시 접착면 부착파괴 길이 54cm를 보이며 취성적인 보강판 탈락현상을 보인다. 특히 균열의 발생없이 순식간에 보강판의 탈락과 ripping-off현상이 동시에 발생한다.

3.2 철근비에 따른 보강효과

3.2.1 변형특성

1) 처짐

Fig.8에는 부재의 철근비를 최대철근비 ρ_{max} (=0.75 ρ_b)에 대한 비율로서 20~80%까지 변화시킨 경우에 보강된 보의 처짐거동을 나타내었다. 그림에서와 같이 보강철근비 ρ_s 가 최대철근비 ρ_{max} 에 대하여 1.0을 넘는 경우 즉 최대철근비에 대한 철근비 ρ/ρ_{max} 가 61과 88%의 경우는 보강판접착이전의 부재내력을 상회하는 내력을 보이지 않지만 항복강도에 이르기전에 휨 강성은 증가하면서 최대내력에 이르고 있으며 부재가 항복한 이후에 연성적인 거동을 보이고 있지만 내부철근에 의한 효과라는 사실을 알 수 있다. 따라서 기존의 보강판과 철근이 동시에 고려된 보강철근비 ρ_s 가 내력적측면과 연성적측면에서 한계값이 존재하는 것으로⁽¹⁹⁾ 볼 수 있다.

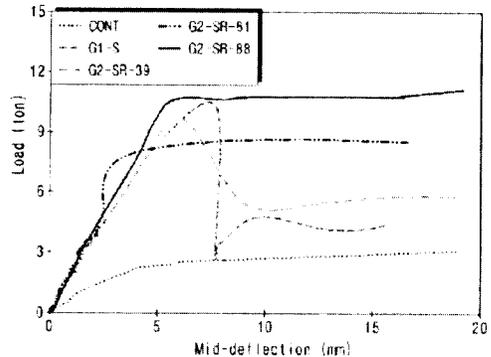


Fig. 8 Effects of steel ratio on the deflection of plated beams

2) 변형도

철근비에 따른 하중-인장철근 변형도관계를 Fig.9에 나타내었다. 최대철근비에 대한 철근비 ρ/ρ_{max} 가 39%일때는 철근의 靱性흐름(plastic plateau)이 없이 내력이 저하하고 있는데 파괴모드와 관련하여 재하속도의 변화에 의한 하중의 부담과 보강판과 콘크리트부재의 부착에 결함이 있어서 강판의 脆性的인 탈락이 인장철근의 변형도변화에 영향을 미친 것으로 추측된다.

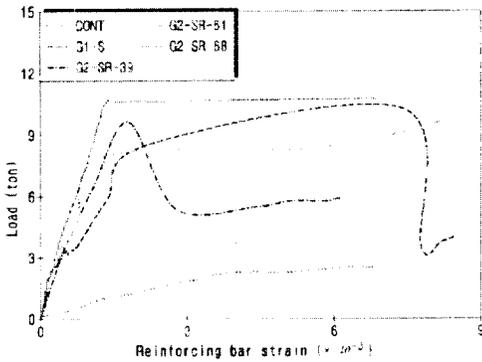


Fig. 9 Effects of steel ratio on the reinforcing bar strain of plated beams

Fig.10에서 최대철근비에 대한 철근비 ρ/ρ_{max} 가 61.88%인 경우는 콘크리트의 항복변형도에 이르고 있으며 주목해야 할 사항으로서 항복강도에 이르기 전에 콘크리트 변형도곡선의 기울기가 커지고 있는 것을 볼 수 있다. Fig.12에서 보춤에 대한 콘크리트 변형도분포로서 선형적인 분포를 볼 수 있다.

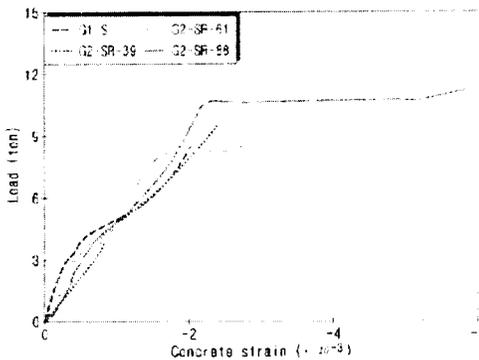


Fig. 10 Effects of steel ratio on the concrete strain of plated beams

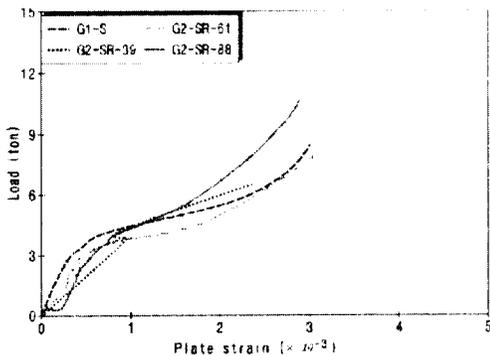


Fig. 11 Effects of steel ratio on the plate strain of plated beams

Fig.11에서는 철근비에 따른 보 중앙에서 보강판의 변형도분포가 최대내력시 2369~2994 $\mu\epsilon$ 에 분포하고 있으며 이 값들은 재료의 항복변형도를 초과하는 값으로 보강판이 모든 경우 항복하는 것으로 볼 수 있다. Fig.13에서는 철근비에 따른 보강판변형도 분포로서 D. A. Van Gemert의 연구결과와 같이 삼각형분포¹⁵⁾를 보이고 있다.

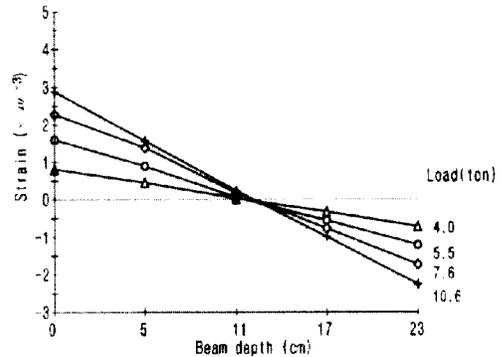


Fig. 12 Strain distribution over the depth of beam G2-SR-88

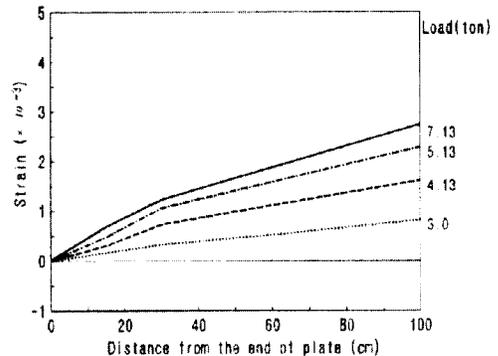


Fig. 13 Strain distribution over the depth of beam G2-SR-88

3.2.2 강도특성

1) 초기균열하중

부재의 철근비가 높을수록 초기균열하중은 높게 나타나는 것을 Table 6에서 볼 수 있으며 최대하중 이론값에 대한 초기균열하중 실험값의 비율은 최소 37%로서 27%를 보이는 표준실험체에 비하여 높은 값을 보이고 있다. 철근비가 높아짐에 따라 인장응력을 받는 보 단면의 중립축 하부 단면강성이 증가되고 강판과 접착제에 의한 구속효과때문인 것으로 사료된다.

2) 최대하중

실험값의 이론값에 대한 비율이 철근비 ρ/ρ_{max} 의 어떤한계값을 정점으로 낮아지고 있어서 철근비가 높을수록 보강판단부의 탈락에 의한 조기 내력저하 현상을 보인다. 따라서 최대하중이 이론값이하로 저하하지않는 보강철근비의 한계값이 존재한다.⁽¹⁹⁾

3.2.3 파괴모드

실험계획시에 콘크리트의 설계강도에 근거하여 ρ_{max} 를 산출하고 이에 대한 철근비의 비율 즉 ρ/ρ_{max} 로 나타내어 22-88%까지 계획하였으나 재료실험결과 콘크리트 강도가 변화함으로써 철근비가 조정되었다. 그래서 실제적인 ρ/ρ_{max} 는 20, 35, 55, 80%를 갖게되고 이때의 파괴모드를 Table 7에 정리하며 균열발생모습을 Fig.14에 나타내었다.

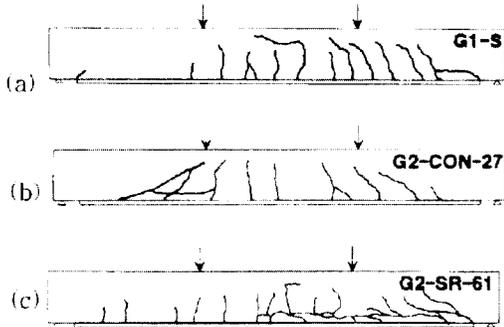


Fig. 14 Crack patterns of plated beams

G2-SR-39는 실제철근비35%로서 6.5ton이하에서 보강판이 항복하고 보강판단부가 취성적으로 탈락하며 강판-에폭시접착면 부착파괴길이를 6cm정도 나타낸다. 균열발생모습으로부터 일부 전단균열이 발생하고 있는 것을 볼 수 있다.

G2-SR-61은 보강판이 5.0ton에서 항복하고 철근이 8.0ton에서 항복한 후 보강판단부에서 취성적으로 탈락이 발생하며 강판-에폭시 접착면 부착파괴 길이는 1.0m이상으로 주요 파괴모드를 형성한다. 특히 균열발생모습으로부터 강판과 접착면에 존재하는 균열위치로부터 균열이 시작되어 콘크리트 피복두께 만큼 진행한 후 인장철근을 따라 보중양으로부터 지지단쪽으로 균열이 흐르는현상을 보인다. 이런 현상은 균열이 닫히지 않은 상태에서 균열 보수에 결합이 복합적으로 작용하여 발생할 수 있는 특이한 현상으

로 봉합효과(encapsulation effect)를 확실히 확보 하려면 균열의 보수효과가 전제되어야한다.

G2-SR-88은 실제철근비 80%로서 보강판이 7.5ton이하에서 항복하고 보강판단부에서 ripping-off가 발생한다. 보강판이 탈락한 이후에 콘크리트의 압축파괴가 발생하며 이때 압축파괴되는 콘크리트부분에서 압축철근의 좌굴을 볼 수 있고 강판-에폭시접착면 부착파괴는 발생하지 않는다.

4. 실험결과의 분석 및 고찰

4.1 콘크리트 강도

보강판단부의 접착층에서 파괴를 일으키는 수평전단응력과 수직전단응력은 콘크리트 강도에 따라 달라진다.⁽²²⁾ 따라서 콘크리트의 강도가 증가할수록 보강판의 탈락으로 내력이 결정되며 취성적인 파괴모드를 보인다. 본 실험의 경우 파괴모드의 변화는 270kg/cm²를 기점으로 한다. Fig. 15에는 x축에 콘크리트의 강도를 나타내고 y축에는 최대내력 이론값으로 무차원화한 최대내력을 나타내었다. 콘크리트 강도 270kg/cm²의 경우까지는 최대내력이 증가하며 이후부터는 최대내력이 저하하여 300kg/cm²이상에서는 이론값이하로 저하한다.

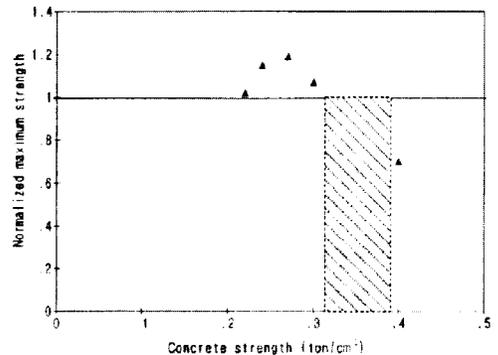


Fig. 15 Variation of maximum strength due to plated beam concrete strength

실험결과에서 콘크리트 강도가 낮을수록 합성작용이 파괴하중이후에도 유지됨으로서 철근의 항복까지 도달하며 연성적인 거동을 보이며 콘크리트 강도가 증가할수록 보강판의 변형도가 적음값에서 최대하중에 이르고 있어서 그 만큼 보강판탈락의 가능성은 높아진다. 콘크리트 강도 400kg/cm²에서는 최대내력

이론값의 70%에서 내력의 저하가 발생하고 균열발생 모습에 의한 파괴모드의 변화 등 거동의 변화가 예측되며 강판접착 보강효과에 대한 추가적인 연구가 요망된다.

4.2 보강철근비와 최대내력

외부보강판의 면적을 彈性係數比를 이용하여 철근비로 환산한 보강철근비로서 고려할 때 강도와 연성 측면에서 적정 보강효과를 확보하기 위한 한계값이 존재하며 문헌24에서 강도측면에서는 최대철근비에 대하여 1.05, 강도와 연성을 동시에 고려하면 0.8의 값을 갖는 것으로 제안되었다. 즉

$$\rho_c / \rho_{\max} \leq 0.8 \quad (1)$$

보강철근비 1.05 ρ_{\max} 이내의 범위에서 최대강도와 보강철근비의 관계를 실험결과로부터 Fig.16과 같이 회귀분석하여 다음과 같은 식을 얻었다.

$$M_{\max}^{\text{exp}} = 2.6M_{\max}^{\text{com}} \left(\frac{\rho_c}{\rho_{\max}} \right)^{0.6} \quad (2)$$

여기에서

M_{\max}^{exp} : 실험결과에 의한 최대 모멘트

M_{\max}^{com} : 표준실험체의 최대 모멘트

식(1)을 식(2)에 대입하면

$$M_{\max}^{\text{exp}} \leq 2.27M_{\max}^{\text{com}} \quad (3)$$

윗 식에서 알 수 있듯이 한계 보강철근비내에서 보강량이 결정된다면 미보강표준실험체의 최대내력의 2배정도에 이르는 강도상의 보강효과를 확보할 수 있으며 최대내력과 연성의 측면에서 적정수준으로 볼 수 있다.

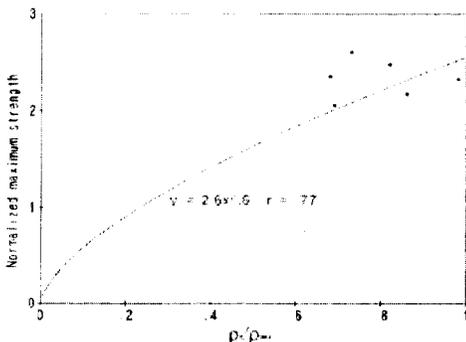


Fig. 16 Relationship between plate-steel ratio and maximum strength of plate beams

4.3 합성작용

강판접착방법으로 보강하는 경우 접착제의 선택, 보강량, 접착방법을 신중히 고려하여 파괴시까지 단면이 합성작용이 유지되도록 해야한다.⁽¹³⁾ 보강설계시 외부보강판은 보의 파괴시까지 합성작용이 이루어지는 것으로 가정하여 설계하며 인장균열이 발생한 이후까지 선형적인 변형도분포를 통하여 대부분 부재의 파괴시까지 합성작용이 이루어지는 것을 각 변수의 경우에 있어서 보춤에 대한 콘크리트 변형도 분포를 나타내는 그림으로부터 적합성(compatibility)과 조기내력저하가 발생하지않은 실험체의 구조적 거동을 통하여 확인하였다

4.4 휨 강성의 평가

보강판을 접착한 철근콘크리트 보의 휨 강성은 일정한 값을 갖지는 않지만 하중정도, 균열정도, 보강판의 두께, 접착층의 두께에 따라 달라진다.⁽¹²⁾ 따라서 최대하중에 가까운 값에서 균열이 발생한 이후라는 조건으로 휨 강성 비교조건을 한정하였다. 강판접착으로 보강된 철근콘크리트 보의 휨 강성을 Roberts의 방법으로 계산하여 실험결과와 비교한 Table 8에서와 같이 실험결과와 계산결과는 차이를 보이고 있는데 균열을 미리형성하는 방법으로서 선행가력방법에서 최대내력의 일정정도까지 가력후 제하시 균열이 다시 닫히는 문제점이 제거된 까닭으로 볼 수 있다.

R. Jones et. al.은 선행가력하여 재하상태에서 강판접착으로 보강하는 경우 즉 균열이 닫히지않은 경우의 휨 강성을 계산하여 본 실험과 유사한 결과를 발표하였다.⁽¹³⁾ 따라서 균열이 닫히지않고 열려있는상태에서 보강하는 철근콘크리트 보의 휨 강성의 계산은 Roberts의 방법을 수정적용해야한다. 본 논문에서는 실험계획시에 조기내력저하 즉 보강판단부 탈락이 발생하지않도록 고려한 경우의 실험값과 이론적으로구한 강성값과의 관계를 Fig.17과 같이 회귀분석하여 얻은 결과에 의하여 Roberts의 식⁽¹⁴⁾을 수정하였으며 그 결과를 Table 8에 함께 나타내었다.

$$EI_{\text{modified}} = 0.6 \left(\frac{E_c b c^3}{3} + E_s A_s (h_s - c)^2 + E_p b_p d_p (h_p - c)^2 - 0.6I \right) \quad (4)$$

Table 8 Experimental and theoretical rigidity before and after cracking ($\times 10^6 \text{kg}\cdot\text{cm}^2$)

specimens	Exp.		Theo.			Exp./Theo.		
	D	E	F	G	modified, H	D/F	E/G	E/H
CONT	0.08	0.20	3.59	0.81	-	0.02	0.24	-
G1-S	5.64	1.67	4.72	3.09	1.49	1.19	0.54	1.12
G2-CON-15	2.18	1.57	4.39	3.04	1.46	0.50	0.52	1.08
G2-CON-27	2.22	0.53	5.05	3.15	1.52	0.44	0.17	-
G2-CON-30	2.29	1.40	5.05	3.20	1.55	0.45	0.44	0.90
G2-CON-40	2.70	1.91	5.71	3.63	1.81	0.47	0.53	1.06
G2-SR-39	1.87	1.63	4.72	3.33	1.63	0.40	0.49	1.00
G2-SR-61	2.83	2.09	4.72	3.61	1.80	0.60	0.58	1.16
G2-SR-88	2.19	1.68	4.72	3.91	1.98	0.46	0.43	0.85

D, F : before cracking, E, G : after cracking

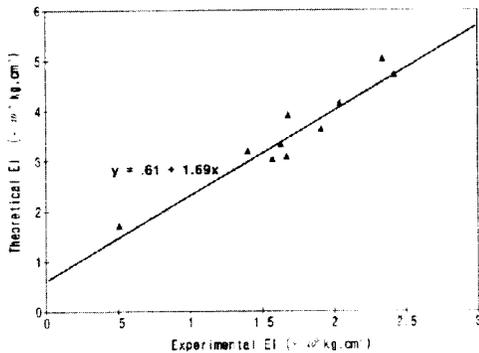


Fig. 17 Relationship between calculated and experimental flexural rigidity of plated beams

5. 결론

달리지않은 균열이 있는 철근콘크리트 보의 밑면에 강판을 접착하여 얻을 수 있는 보강효과에 대하여 콘크리트 강도, 철근비를 변수로 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 콘크리트 강도가 낮을수록 예폭시접착에 의한 강판과 철근콘크리트 보의 합성작용이 항복이후에까지 유지되어 보강판의 탈락을 지연시킴으로서 연성을 향상시킨다. 따라서 콘크리트 강도가 높을수록 보강판탈락의 가능성은 높아지며 콘크리트 강도에 따른 보강효과를 최대강도측면에서 고찰하면 강도 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상 즉 콘크리트의 고강도화에 따른 거동의 변화가 예측되며 보강효과에 대한 추가적인 규명이 요구된다.

2. 강도측면에서 보강효과를 확보하기 위해서는 $1.05 \rho_{\max}$ 의 보강철근비 한계값내에서 보강철근비

에 따른 최대강도는 $M_{\max}^{\text{exp}} = 2.6M_{\max}^{\text{theo}} \left(\frac{\rho_c}{\rho_{\max}}\right)^{0.4}$ 으로 회귀됨으로서 미보강표준실험체의 2배정도의 최대내력을 확보하도록 보강설계하는 것이 보강효과측면에서 적절하다.

3. 콘크리트 강도, 철근비를 변수로하여 강판보강된 철근콘크리트 보가 조기내력저하를 일으키지 않는다면 본 실험의 경우 대부분 파괴시까지 합성작용이 유지되는 것을 확인하였다.

4. 철근콘크리트보의 균열이 달리지않은 상태로써 강판접착보강된 경우 휨 강성의 평가는 (4)식과 같이 수정되어야 한다.

참고 문헌

1. Deric John Oehlers: ' Reinforced concrete beams with plates glued to their soffits ', ASCE Journal of Structural Engineering, vol.118, No.8, Aug. 1992
2. Deric Jone Oehlers and Jone Paul Moran: ' Premature failure of externally plated reinforced concrete beams ', ASCE Journal of Structural Engineering, vol.116, No.4, Apr. 1990
3. Hamoush, Sameer A. and Ahmad, S. H.: ' Static strength tests of steel plate strengthened concrete beams ', Materials and Structures, vol.23, No.134, Mar. 1990
4. Jones, R., Swamy, R. N., Bloxham, J. and Bouderalah, A.: ' Composite behavior of concrete beams with epoxy bonded external reinforcement ', International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete vol.2 No.2 1980, pp91-107
5. Jones, R., Swamy, R. N. and Ang, D. J. H.: ' Under- and over-reinforced concrete beams with glued steel plates ', International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete vol.4 No.1 1982, pp19-32
6. 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
7. McDonald, M. D.: ' The Flexural behavior of concrete beams with bonded external reinforcement ', TRansportation Research Laboratory Report vol.415, 1978, pp29

8. Raoof, M. and Zhang, S.: ' Analysis of plate peeling failure of RC beams with externally bonded plate '. Concrete Repair, Rehabilitation and Protection, 1996
9. Roberts, T. M.: ' Approximate analysis of shear and normal stress concentrations in the adhesive layer of plates RC beams '. The Structural Engineer vol.67 No.12 June 1988, pp228-233
10. Roberts, T. M.: ' Plate separation and anchorage of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates '. The Structural Engineer vol.66 No.5/1 Mar. 1988, pp85-94
11. Sharif, A., Hussain, M., Al-Sulaimani, G. J., 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, Jan.-Feb. 1995, pp14-22
12. 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
13. Swamy, R. N., Jones, R. and Charif, A.: ' The effects of external plate reinforcement on the strengthening of structurally damaged RC beams '. The Structural Engineer vol.67 No.3 1989, pp45-55
14. Van Gemert, D. A.: ' Repairing of concrete structures by externally bonding steel plates '. Proceedings ICP/RILEM/IBK International Symposium on Plastics in Material, Plague, June 1981, Elsevier Scientific Publishing Company
15. Van Gemert, D. A.: ' Force transfer in epoxy bonded steel/concrete joints '. International Journal of Adhesion and Adhesives vol.1 1980, pp67-72
16. Ziraba, Y. N., Baluch, M. H., Basunbul, I. A., Sharif, Alfarabi M., Azad, A. K. and Al-Sulaimani, G. J.: ' Guideline toward the design of reinforced concrete beams with external plate ', ACI Structural Journal, vol.91, No.6, 1994 pp639-646
17. 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, No.183, Nov., 1995, pp518-525
18. 오용복, 정일영, 권영웅, 신영수, ' 균열이 있는 철근콘크리트보의 예복시보수효과에 관한 연구', 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 제17권 1호 (통권 제33집), 1997.4
19. 오용복, 정일영, '철근콘크리트 보의 강판보강에 관한 연구', 대한건축학회 논문집 제13권 제6호 (통권 제 104집), 1997. 6.

요 약

실제구조물의 균열을 노치를 삽입하는 방법으로 시뮬레이션하고 콘크리트 강도와 철근비를 변수로하는 실험적연구를 통하여 철근콘크리트 보의 강판접착에의한 보강효과를 규명하였다.

보강철근비와 보강된 보의 최대내력과의 관계를 회귀식을 통하여 제안하고 강판보강된 보의 최대내력과 연성측면에서 구조적거동을 고찰하였으며 최대내력시까지 외부강판과 철근콘크리트 보의 합성작용이 유지되는 것을 확인하였다. 또한 노치에 의하여 시뮬레이션된 균열의 영향을 고려하여 강판보강된 철근콘크리트 보의 휨강성을 평가하도록 실험결과를 회귀분석하여 실험식을 제안하였다.

(접수일자 : 1997. 4. 9)