

노치를 이용한 보강재의 부착력 증가 방안에 관한 연구

A Study to Improve Bonding Strength of Strengthening Plate with Notches



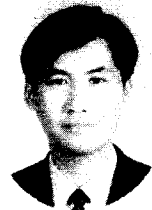
한만엽*

Han Man-Yop



송병표**

Song Byeong-Pyo



이광명***

Lee Kwang-Myong

ABSTRACT

Recently, many strengthening methods are developed and used to rehabilitate existing structures. One of the old and popular methods is strengthening with bonding steel plate. However, steel plate bonding method has a defect, which is debonding failure of steel plate before yielding of the plate due to stress concentration at the end of the bonded plate.

The objective of this study is the experimental verification of the improved bonding properties of a strengthening plate with notches. Two normal beams and ten strengthened beams with steel plate, which have several different notches, are tested and showed their effectiveness.

Test results show that the notches of strengthening plate significantly improve post-yielding behavior, compared to normally strengthened beams. It is proved that the notches of strengthening plate increases ultimate strength 14% more than normal strengthened beam after yield strength. As for the shape of notches, arc notch is the best, and triangle notch and trapezoidal notch are the next and end welding method has no effect.

* 정회원, 아주대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 아주대학교 토목공학과 석사

*** 정회원, 성균관대학교 토목공학과 교수

·본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내
주시면 1999년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

구조물의 보강공법 중 부착식 보강재로 널리 쓰이고 있는 강판 보강의 경우 구조물의 단면증가가 거의 없이 사용기간 중에도 간편하게 시공할 수 있고 다른 보강재료보다는 재료비가 절감된다는 장점 때문에 널리 쓰이고 있는 공법이다. 그러나 기존의 연구에 의하면 강판이 외부에서의 특별한 정착 장치를 갖지 못한 경우 보강재 단부에서의 응력집중으로 인하여 발생된 수평균열이 빠른 속도로 중앙부로 진전되어 보강재가 극한 내력을 발휘하기 전에 보강재의 분리에 의해 최종적인 파괴가 발생하는 경우가 주종을 이루고 있다. 즉 강판보강부재의 파괴는 거의 대부분 단부에서의 보강재 탈락으로부터 시작된다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 강판에 의한 부착식 보강공법의 단점인 단부에서의 응력집중을 감소시켜 보강재의 탈락파괴를 방지하는 방안으로 중앙부에 노치를 도입하는 방안을 제시하고 그 효과를 검증하였다. 강판의 중앙부에 노치를 두게 되면 하중이 작용할 때 보강강판에서는 노치 부분에 응력이 집중되어 가장 먼저 항복에 도달하게 된다. 따라서 노치가 있는 부분의 보강재의 폭을 설계하중에 따라 결정하면 나머지 부분은 그 이상의 강도를 갖게 되고, 또한 부착면적이 넓기 때문에 설계하중을 초과하여 과하중이 작용할 때 보강재가 항복하는 경우는 있어도 보강재가 탈락하는 것을 방지할 수 있다는 것이다.

이러한 개념을 증명하기 위하여 보강재 중앙부의 양측면에서 일정한 깊이로 다양한 형태의 노치를 적용시키거나 보강재 단부에서의 부착면적을 확대시켜, 제작된 시험체의 인장축에 부착하여 내하력 증대 효과와 최종적인 파괴 형상을 기존의 보강 방법과 비교·평가 하였다. 단부의 부착면적을 증가시키는 방법은 강판의 경우 단부에 철판을 용접해 붙이거나 가운데 부분을 절단시키는 방법이 있다. 이런 방법중 단부내 철판을 용접하는 방법은 현실적으로 작업이 매우 어려운 방법이나 본 연구에서는 그 효과를 분석하기 위하여 비교 실험을 실시하였다.

이러한 변수에 의한 실험결과를 시험체의 균열하

중, 항복하중, 항복하중 이후의 최대하중까지의 증가율, 파괴형태, 하중-처짐 곡선, 최종 파괴균열 형상 시험체내의 철근에 부착한 변형을 게이지로부터 측정된 변형을 등의 항목에 대하여 기존의 방법으로 보강된 시험체와 비교하였으며, 무보강보와 보강된 보의 이론적인 균열하중과 항복하중 콘크리트-에폭시-강판계면이 완전 접착되어 합성거동을 한다는 가정하에 가장 위험한 단면에서 철근 콘크리트 보의 휨 이론을 적용하여 계산하였다.

2. 실험

2.1 실험계획

본 실험에서 사용된 시험체의 제원 및 보강재의 물성은 Fig.1과 Table 1에 제시되어 있다.

철근 콘크리트 기준 시험체의 단면치수 및 배근상세는 Fig. 1에 제시된 바와 같이 단면 크기는 $15 \times 25 \text{cm}$ 이고 순지간 길이는 200cm이다. 콘크리트는 설계강도가 210kg/cm^2 인 레미콘을 타설하였다.

철근은 이형철근으로서 항복강도가 4000kg/cm^2 이며 인장축에서는 2-D13, 압축축에서는 2-D10을 배근하였고 보강재인 강판은 2종(SS41)제품으로서 강도가 2500kg/cm^2 인 제품을 사용하였다. 집착제로 사용된 에폭시의 배합비는 주재와 경화제가 무게비로 2:1인 춘추형으로서 외국의 T사 제품(EPX-3)을 사용하였다. 하중은 중앙에서의 일점재하가 보강재의 탈락이나 파단이 발생할 때까지 재하하였다.

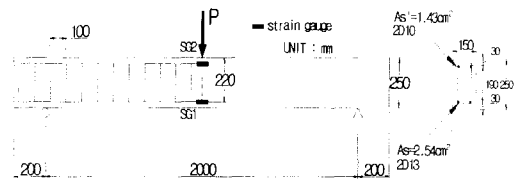


Fig. 1 Configuration of specimen

Table 1 Physical properties of material

Classification		Strength (kg/cm^2)	Young's modulus (kg/cm^2)	Modular ratio	Dimensions	Remarks
R/C beam	Concrete	210	2.17×10^5	-		
	Rebar	4,000	2.04×10^6	9	D10 & D13	
Strength -ing material	Steel plate	2,500	2.0×10^6	9	Strengthening width = 10cm Strengthening thickness = 0.3cm	Type 2(SS 41)
Epoxy		840~910	3.56×10^4	-		EPX-3

2.2 실험변수

시험체는 2개의 무보강 보를 기준으로 하여 Fig. 2에서와 같이 적용된 노치의 종류별로 10개의 보를 포함하여 총 12개의 시험체를 제작하였다.

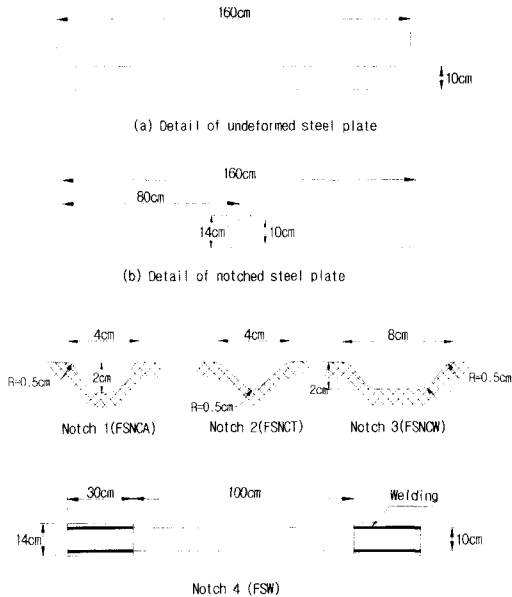


Fig. 2 Details of notches applied to strengthening steel plate

기존 보강 방법(FSNR)에서는 강판의 부착길이를 지간의 80%인 160cm, 폭 10cm, 두께 3mm의 강판을 시험체의 인장측에 주입공법으로 부착하였다. 노치는 중앙에 여러 가지 형태로 가공한 것이

다. 노치의 형상은 반원형(FSNCA), 삼각형(FSNCT), 사다리꼴형(FSNCW) 등의 형태를 양쪽 테두리에서 2cm만큼 내측으로 절단 가공하였으며, 노치가 적용된 강판 단부의 모서리는 단부에서의 균열발생을 억제하기 위하여 곡면으로 가공, 처리하였다. 노치4(FSW) 시험체는 양측 단부에서부터 중앙부로 30cm지점까지 폭 2cm의 강판을 용접하여 단부의 부착면적을 확대시킨 시험체로서 다른 관점에서 보면 노치의 폭을 더욱 확대시킨 경우에 해당된다. 본 실험에서 제작된 기존 보강재의 폭은 10cm이지만, 노치 형상을 적용한 보강재는 노치가 있는 곳만 10cm의 폭을 유지하여 결국, 보강량이 같은 값을 유지하면서, 노치 보강의 경우 보강재의 부착면적을 확대시킨 효과를 기대할 수 있도록 제작하였다. Table 2에는 이러한 노치 종류별 시험의 명칭과 개수, 및 노치 길이 등이 요약되어 있다.

Table 2 Test of strengthening beams

Type	Series	Remark	Notch length (cm)	Number of specimens
No strengthening	CON		-	2
Control	FSNR	No Notch	-	2
Notch strengthening	FSNCA	Notch1 (Arc)	4	2
	FSNCT	Notch2 (Triangle)	4	2
	FSNCW	Notch3 (Wide)	8	2
	FSW	Notch4 (Welding)	100	2
Total number of specimens				12

3. 실험결과

3.1 하중-처짐 측정결과

Fig. 3에는 2개의 무보강 시험체를 포함한 12개 시험체의 실험결과가 모두 제시되어 있다. 실험에 오차가 발생할 것에 대비하여 각 실험 변수별로 2개씩 시험체를 제작하였는데 FSNCT1 시험체를 제외한다면 측정에 따른 실험 오차는 거의 없는 것으로 나타났다. 실험 변수에 따른 노치의 보강효과를 보다 자세히 분석하기 위해서 각각 1개씩의 그래프를 추출하여 Fig. 4에 도시, 비교하였다.

무보강 시험체(CON)에서는 계산된 균열하중보다 하중이 더 큰 지점에서 약간의 강성의 저하가 관측되었으나, 외관조사에서는 계산값 보다 작은 하중에서 균열이 관측되었고, 항복하중의 경우는 계산된 값인 4.04톤에 못 미치는 하중에서 관측되었다.

특히, 항복하중에 도달했을때의 변형율을 살펴보면, 무보강 시험체의 처짐(δ_y^o)에 비하여 보강된 시험체의 항복시 처짐(δ_y^r)의 크기가 더 큰 것을 관찰할 수 있다.

강판 보강 시험체는 균열하중의 경우 계산된 균열하중인 1.31톤 근처에서 명확한 강성의 변화를 관측하지 못하였으나, 외관조사에서는 이보다 훨씬 큰 2.0톤 이상의 하중에서 부터 균열이 관측되기 시작하였다. 이러한 측정 결과는 노치의 도입과 관계 없이 항복하중이 거의 일치하고 있으며, 따라서 항복하중 이전까지의 강성도 거의 동일한 양상을 나타내고 있다. 균열하중 이후에는 시험체가 항복하중에 도달하기 약 80~85% 되는 하중점에서 약간의 강성의 변화를 관측할 수 있는데 이는 보강재인 강판이 인장철근보다 먼저 항복강도에 도달하여 관측된 것이며, 항복하중은 이론적 계산치인 7.34톤과 거의 동일한 7.12~7.41톤에서 관측되었다.

항복하중 이후의 거동을 보면, 부재의 파괴시까지 약간의 하중증가와 더불어 대단히 큰 처짐이 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이를 보강방법별로 비교해보면 기존의 방법인 FSNR 시험체의 경우, 항복하중 이후 하중의 증가가 거의 없지만 노치가 적용된 보

강 시험체에서는 노치의 형상에 따라 상당히 큰 하중의 증가가 관측되었다.

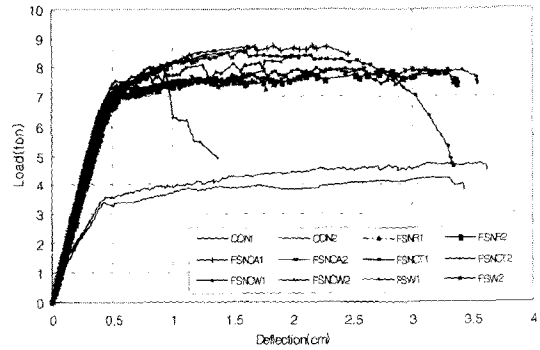


Fig. 3 Test results of load-deflection curves at midspan

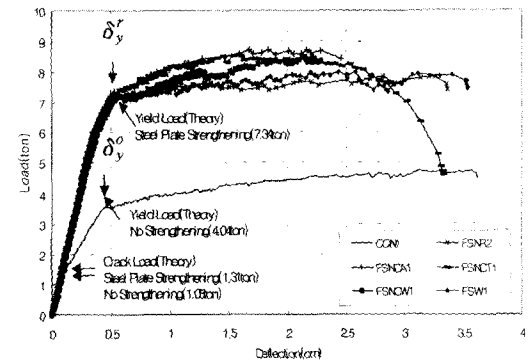


Fig. 4 Comparison of load-deflection curves at midspan

Fig. 5에는 노치의 형상에 따른 효과를 분석하기 위하여 항복하중 이후의 거동에 대한 측정값과 추측선 결과를 제시하였다. 기존 강판보강(FSNR) 공법이 하중의 증가가 거의 없어서 가장 아래에 위치하고 있으며, 양단 부착면적 증대방법(FSW)은 재래적인 방법과 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 사다리꼴 노치의 경우는 항복하중 이후 서서히 하중이 증가하여 최종적인 내하력의 크기는 다른 노치들보다 약간 작으나 거의 비슷한 정도에 도달하였다. 삼각형노치와 반원형 노치의 경우는 항복하중 이후에도 거의 비슷한 거동을 보이다가 마지막 최대하중에 도달할 때 삼각형 노치에서 하중감소가 먼저 시

작되어, 반원형 노치가 더 큰 변형율에서 가장 큰 하중값에 도달하는 것으로 관측되었다. 따라서 본 실험 결과에 의하면 반원형 노치가 가장 보강효과가 좋은 것으로 판명되었으며, 기타 노치형상은 삼각형 노치, 사다리꼴 노치, 양단부착면적 증대, 기존 방법의 순으로 나타났다.

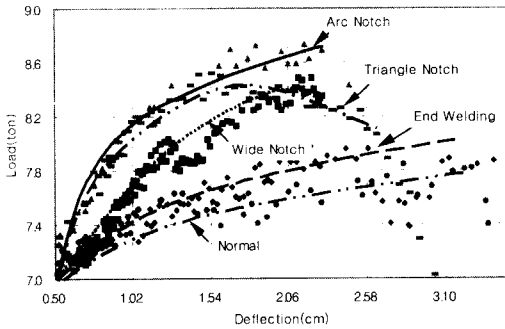


Fig. 5 The effect of notch on maximum strength after yielding

Fig. 4에서 항복하중에 도달했을 때 무보강 시험체의 처짐(δ_y)에 비하여 보강된 시험체의 항복시 처짐(δ'_y)의 크기가 더 큰 것을 관찰할 수 있는데, 이는 Fig. 6에 도시되어 있는 바와 같이 인장철근이 항복 하중에 도달할 때, 무보강보의 변형율은 ①과 같은 분포를 갖지만, 강판에 의하여 보강된 경우에는 인장축 단면이 증가하므로 중립축이 NA_0 에서 NA_r 로 하향이동하여 내부 철근이 항복한 시점의 변형율은 ②와 같은 분포가 된다. 그러므로 변형율 ②에 의한 곡률반경(ρ')은 변형율 ①에 의한 곡률반경(ρ)보다 크므로 보강된 보의 항복하중 작용시 처짐이 무보강 보의 처짐보다 커진 것이다.

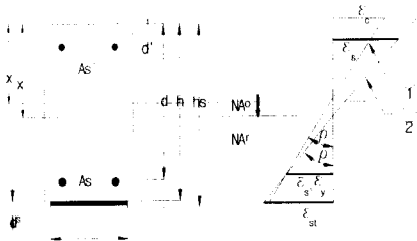


Fig. 6 Increase of curvature for strengthened beam when yielding

3.2 하중 비교 및 보강재의 파괴 양상

Table 3에서는 시험체별로 균열하중, 항복하중의 이론값과 측정값 및 최대하중의 측정값 등을 요약, 정리하였다.

균열하중의 경우, 무보강 시험체에서는 이론값보다 작은 0.8톤 내외에서 처음 균열이 관측되었으며, 강판 보강 시험체에서는 이론값의 약 2배 정도에 해당되는 2톤 이상부터 균열이 관측되기 시작하였다. 즉, 강판보강 시험체의 경우, 무보강 시험체보다 균열하중이 3배 이상 증가하여, 보강재가 초기 균열 발생을 억제하는 효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 7에서 도시된 바와 같이 무보강보의 경우는 지간의 중앙에서 콘크리트의 인장축이 휨인장강도에 도달하게 되면 바로 균열이 발생하여 이 균열이 내부로 전진하게 되며, 이때 인장철근은 콘크리트에 작용하던 모든 인장력을 받아줄 때까지 지속적으로 국부적인 응력과 변형이 증가하여 균열이 관측가능할 정도로 커지게 된다. 이에 비하여, 보강된 보의 경우는 콘크리트의 인장축이 휨강도에 도달하여도 바로 외측에 위치한 보강재가 인장변형에 저항하므로, 소수의 균열이 넓어지기 보다는 다수의 미세균열이 발생하게되어 관찰자의 눈에 인지되지 못할 정도의 작은 크기이므로, 외관상 균열이 없는 것처럼 보이기 때문이다.

항복하중을 비교해보면 무보강 시험체의 경우 계산된 값보다는 약간 못 미치는 하중에서 관측되었으며, 보강된 시험체의 경우도 이론적 항복하중인 7.34톤과 거의 일치하는 결과를 나타내었다. 또한, 보강된 시험체의 항복하중은 무보강 보보다 약 200%이상 증가하여 보강효과도 상당히 큰 것으로 판명되었다.

최대하중의 측정 결과는 기존의 방법으로 보강된(FSNR) 시험체에서는 항복하중 이후에 약 7%의 증가를 보이고 있으나, 부착면적을 확대시킨 노치보강 시험체에서는 약 16~21%의 하중이 증가하는 것을 관측할 수 있었다. 이는 보강재에서 노치가 없는 부분의 보강면적이 더 크기 때문에 결과적으로 보의 내하력을 증가시키는 효과를 나타낸 것으로 판단된다. 반원형의 노치(FSNCA)를 사용한 경우 항

Table 3 Comparison of experimental and theoretical load and failure mode

Classification	Series	Cracking Load(ton) Pcr			Yield Load(ton) Py			Maximum Load(ton) Pm			Pm / Py		Failure Mode	
		Theo.	Visual obs.		Defl. (cm)	Theo.	Visual obs.		Defl. (cm)	Visual obs.		Aver.		
			Aver.				Aver.			Aver.				
No Strengthening	CON1	1.1	0.8	0.8	0.060	4.04	3.59	3.49	0.447	4.67	4.45	1.30	1.27	-
	CON2		0.7				0.057		3.40	0.429		4.23		1.24
Control	FSNR1	1.3	2.6	2.4	0.196	7.34	7.37	7.29	0.618	7.66	7.76	1.04	1.07	-*
	FSNR2		2.2				0.131		7.21	0.550		7.85		1.09
Notch Strengthening	FSNCA1	1.3	2.9	2.8	0.167	7.34	7.33	7.22	0.533	8.72	8.71	1.19	1.21	5)
	FSNCA2		2.6				0.166		7.11	0.531		8.70		1.12
	FSNCT1		2.8	2.5	0.164		7.31	7.41	0.525	8.51	8.51	1.16	1.16	-*
	FSNCT2		2.2				0.123		7.51	0.529		7.99**		1.06
	FSNCW1		2.6	2.5	0.152		7.12	7.20	0.487	8.48	8.43	1.19	1.17	5)
	FSNCW2		2.3				0.167		7.28	0.608		8.38		1.15
	FSW1		2.1	2.1	0.133		7.22	7.12	0.549	7.98	7.96	1.11	1.12	-*
	FSW2		2.0				0.121		7.02	0.578		7.93		1.13

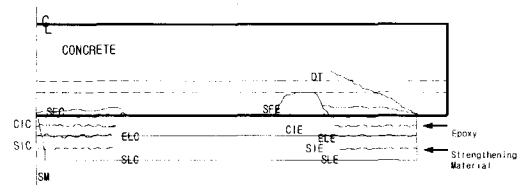
Note * Loading stopped due to large deflection exceeding the range of LVDT
 ** Abnormal failure



Fig. 7 The closing effect of strengthening plate to crack width

복하중이후 최대하중까지의 증가율이 약 21%로 기존의 보강 방법보다 14% 이상 증가하여, 가장 효율적인 보강 방법인 것으로 나타났다.

Fig. 8에는 시험체의 최종 파괴시 보강재의 파괴 양상을 체계적으로 도시한 것으로 참고문헌(2)에 제시되었던 파괴 양상을 보완한 것이다. 특히, SFE와 SFC의 파괴 경우는 에폭시층 주변의 표층에 위치한 약한 콘크리트가 떨어져 나오는 현상으로서 사전 표면처리가 불완전한 현장보강의 경우에는 가장 흔한 파괴 양상인 것으로 믿어진다. 이 파괴모드는 균열의 진행이 불규칙하여, 균열이 진행 도중 인장 철근에 도달하게 되면 덮개에 해당하는 콘크리트를 물고



No.	Name of failure	Index		Remark
		Center	End	
1)	Diagonal Tensile Failure	DT		Structural Shear Failure
2)	Shear Failure	SFC	SFE	Weak Surface Concrete Failure
3)	Concrete Interlayer Failure	CIC	CIE	Weak Epoxy Failure
4)	Epoxy Layer Failure	ELC	ELE	
5)	Strengthening Interlayer Failure	SIC	SIE	Weak Strengthening Material Failure
6)	Strengthening Layer Failure	SLC	SLE	
7)	Strengthening Material Rupture	SM		

Fig. 8 Classification of failure mode

떨어지는 경우도 있는데, 이러한 보강재의 탈락현상은 모두 파괴 직전에 급격하게 발생하는 현상이며, 이는 구조물의 해석이나 안전에 영향을 미치는 내하력과는 무관한 사항이므로, 외관상으로는 다른 종류의 파괴처럼 보이기도 하나, 이론적으로는 같은 종류의 파괴로 간주하는 것이 타당하다.

보강 방법별 시험체의 파괴 양상을 살펴보면, 하중 재하시 시험체의 중앙 하단에 설치한 변위계의 측정한계 이상의 과도한 처짐이 발생하여 시험체의 파괴를 관측하지 못한 경우를 제외한다면, 항복하중 이후 과도한 처짐을 동반하면서 주로 단부에서 에폭시층과 강판사이에서의 분리로 인한 부재의 파괴가 발생하였다.

최종 파괴의 형태를 비교하면 대부분의 시험체가 주로 단부 쪽에서의 에폭시층과 강판사이에서의 부착파괴인 5)번 형태의 파괴가 주를 이루었는데, 이는 보강강판의 표면 가공을 더욱 거칠게 하여 에폭시와의 부착성능을 향상시키는 등의 시공관리가 매우 중요함을 시사하고 있다.

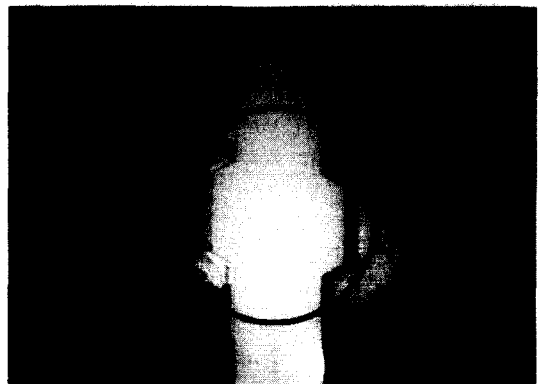
Fig. 9에는 강판의 중앙에 위치한 노치부분에서 발생한 소성변형 상태의 사진을 제시한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 노치의 안쪽 모서리 부분이 약간 굴곡이 되면서 소성 변형된 모습을 볼 수 있다.

3.3 철근 변형을 측정 결과

Fig. 10에서는 시험체에 대한 하중 재하시 시간 중앙의 인장철근과 압축철근에 부착한 변형을 게이지로부터 측정된 변형율을 나타낸 것이다. 변형율의 측정은 모든 시험체에 대하여 시행되었으나 측정값이 비교적 양호한 4개의 시험체의 측정결과를 비교하였다. 측정된 결과를 보면 인장측 철근은 변형율이 2000 $\mu\epsilon$ 에 도달할 때까지는 변형율이 완만한 포물선을 그리며 증가하였으나, 항복변형율에 도달한 이후에는 하중의 증가없이 변형율의 대폭적인 증가가 측정되었다. 그러나 압축측 철근의 변형율은 무보강보의 경우는 600 $\mu\epsilon$ 에서, 보강된 보의 경우는 1300 $\mu\epsilon$ 근처에서 변형율이 대폭적으로 증가하였다.



(a) FSNCT



(b) FSNCW

Fig. 9 Deformed shape after yielding at notches

대폭적인 변형율의 변화가 관측된 시점은 외부적으로 관측된 시험체의 항복 하중이 작용하는 시점과 일치한다.

무보강 시험체(CON2)의 경우, 측정된 항복하중인 3.55톤과 거의 동일한 하중이후 부터 변형율이 갑자기 커진 것을 관측 할 수 있었으며, 이때의 인장측의 변형율은 설계 강도에 의해 계산된 항복 변형률인 1960 $\mu\epsilon$ 와 거의 일치하는 1900 $\mu\epsilon$ 내외에서 측정되었다. 보강된 시험체의 경우에는 시험체가 항복 하중에 도달하기 전, 보강재인 강판의 이론적 항복변형율인 1250 $\mu\epsilon$ 부근에서 강성의 변화를 보이고 있으며, 그 이후에는 변형율이 2000 $\mu\epsilon$ 정도 까지 직선적으로 증가한 것을 관측할 수 있다. 제시된 그림에서 강판 보강 시험체의 경우에는 모두

2000 $\mu\epsilon$ 부근에서 철근이 항복한 것을 알 수 있다.

압축철근에서 항복이 발생된 하중의 크기는 인장철근에서 항복이 발생된 하중과 같은 값을 갖고 있으나, 항복이 발생한 변형율은 무보강의 경우는 약 600 $\mu\epsilon$ 에서, 강판보강 시험체의 경우는 약 1300 $\mu\epsilon$ 으로 이론적인 값인 2000 $\mu\epsilon$ 보다 매우 작은 변형율에서 항복한 것처럼 보였다. 그러나 이때 압축철근은 항복한 것이 아니라 인장철근의 항복후 변형량 증가에 따라 하중증가 없이도 변형량이 항복점까지 증가한 것이다.

즉, 실제로는 Fig. 11 (a)의 응력-변형률도에 제시되어 있는 것처럼 인장철근이 ①인 지점의 항복 변형율에 도달하였을 때 이 변형율에서 압축철근은 항복한 것이 아니며, 이때 계산된 압축철근의 응력은 측정된 변형율(①')로부터 항복응력의 약 65%에 불과한 것으로 나타났다. 그러나 이 응력에서 항복한 것처럼 보이는 이유는 인장철근이 항복한 뒤, 지속적인 변형량 증가로 인하여, ①지점에서 ②지점으로 이동하게 되는데, 이에 따라 하중의 증가 없이도 압축철근도 ②'지점의 범위내의 변형율을 갖게 된다. 이 후 하중이 증가하게 되면 인장철근은 ③번의 소성변형상태로 들어가고 압축철근은 철근량에 따라 ③'번의 범위내의 변형율을 갖는 상태가 된다.

이런 변화는 Fig.11 (b)의 변형율 증가 그림에서도 검토해 볼 수 있는데, ①번 변형율 상태에서 인장변형율이 ②번으로 증가하게 되면, 압축변형율도 증가하게 된다. 다만 이때는 인장력의 크기 증가가 없으므로 압축축 응력만 증가하게 되면 힘의 평형이 맞지 않으므로 중립축도 NA_0 에서 NA_1 상태로 상향 이동하게 된다. 이후 하중이 증가하게 되면 인장철근과 압축철근은 응력은 각각 ③번과 ③'번 상태로 증가하게 되고, 중립축도 그림에 도시된 바와 같이 NA_2 의 상태로 상향, 이동하게 된다.

인장철근이 소성변형으로 들어가면서 인장력이 증가하게 되면 내하력이 증가하므로 하중이 증가하게 된다. 압축철근의 변형율이 2000 $\mu\epsilon$ 인 지점에서 하중이 약간 증가하게 되는 것은, 인장축 철근이 소성 변형에 들어가는 시점에서부터 발생한 하중의 증가가 나타난 것으로 관측할 수 있다.

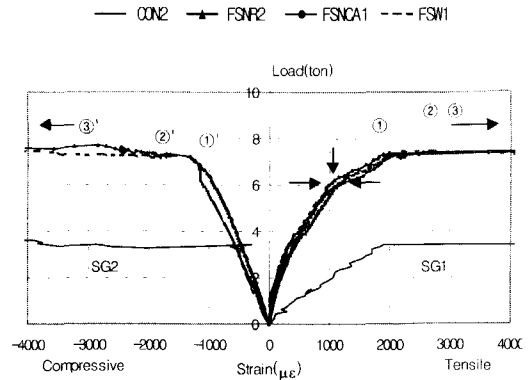


Fig. 10 Load-strain of rebar at center

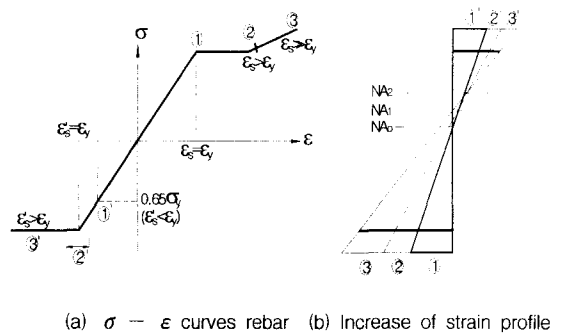


Fig. 11 The increase of compressive strain due to yielding of tensile rebar

3.4 파괴 균열 양상

Fig. 12에서는 파괴 후 최종 균열 상태를 도시하였다. 모든 시험체는 하중이 증가함에 따라 시험체 중앙 하단 부근에서 휨 균열이 발생한 뒤 점차 개수가 늘어나는 경향을 나타내었다.

무보강 시험체의 경우는 다수의 휨 균열에 의하여 파괴에 이르는 양상을 보이고 있다. 강판으로 보강된 경우는 하중초기단계에서는 휨 균열이 발생하였으나, 항복하중의 약 80~85%의 하중점을 지나서는 이러한 휨 균열은 억제되는 대신 강판 단부에서 새로운 사인장 균열이 생성되어 보의 중앙 방향으로 약 45도의 각도로 진전되었다. 이러한 균열 분포의 변화는 무보강 보에서는 휨보강에 비하여 전단보강

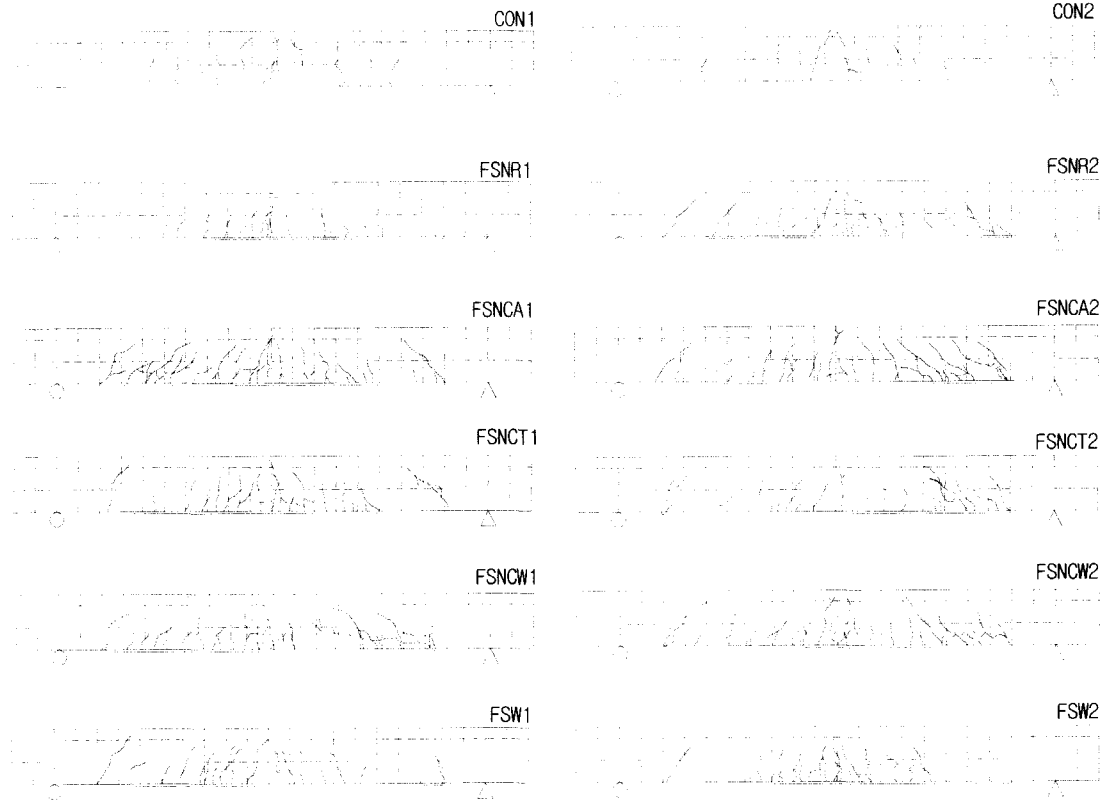


Fig. 12 Crack patterns after failure

이 크기 때문에 전단파괴가 전혀 발생하지 않았으나 보강 후에는 휨 내하력은 커졌으나 전단내하력이 변화가 없기 때문에, 상대적으로 내하력이 작아진 전단균열을 다수 발생시킨 것으로 판단된다. 노치를 도입한 보강보의 경우는 노치가 있는 중앙부에서 작은 수의 큰 균열이 형성되어 균열의 집중도가 큰 것으로 나타났다. 또한 단부의 부착면적만 확대시킨 FSW시험체의 경우는 확대된 단부 주변에서 균열이 거의 발견되지 않아서 단부 확대부에서의 응력이 감소되었음을 보여준다.

4. 결론

강관부착식 보강공법에서 보강재의 부착력을 증가시키고자, 보강재의 중앙부에 노치를 도입하는 방법을 제시하여 보강 성능을 향상시키는 효과를 검증하는 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론에 도달하

었다.

1. 검증된 다양한 형태의 노치 모두가 거의 유사한 항복하중을 보여주고 있으며, 항복하중 이후의 거동에서 최대하중까지 큰 내하력의 증가를 보임으로써, 단지 보강재의 중앙부에 노치를 도입하는 간단한 변화만으로 기존의 강관 보강공법에 비하여, 항복하중 이후 최대하중을 14%까지 증가시킴으로써 보강 효율의 증가와 안전성의 확보 측면에서 대단히 효율적이고 경제적인 방법인 것으로 나타났다.

2. 노치의 형태는 반원형 노치가 가장 효과적인 것으로 나타났으나 가공이 약간 어려운 문제점이 있고, 삼각형 노치는 가공은 쉬우나 노치선단 부분에서의 응력집중 때문에 국부적인 변형이 발생하는 등의 문제점이 있어서 삼각형 노치를 사용할 경우에는

노치선단 부분을 곡면처리를 해야 할 것으로 판단되며, 기타 노치의 경우는 가공의 어려움에 비하여 그 효과가 떨어지는 것으로 나타나 실효성이 적은 것으로 판단된다.

3. 본 실험의 경우 이론적으로 계산된 균열하중 및 항복하중이 모두 측정된 하중과 거의 유사한 결과를 나타내고 있으며, 1개의 시편을 제외하면 시험체간의 편차도 거의 없는 것으로 나타나, 실험결과가 매우 신뢰성이 있음을 보여주고 있다.

4. 보강된 보의 경우 항복하중이 작용하는 시점의 처짐량이 증가하는 것을 관측하였으며, 그 원인에 대한 이론적 고찰을 제시하였다. 또한 철근의 변형을 측정결과로부터 인장철근의 항복변형율은 이론치와 일치하나 압축철근의 변형율은 매우 작은 값에서 항복변형율이 관측된 것처럼 보이는 이유에 대하여도 적절한 분석을 제시하였다. 또한 보강부재의 경우 측정된 균열하중이 이론치와 차이를 갖는 이유에 대하여 규명하였다.

5. 보강시험체의 파괴 양상을 분석하여 이를 체계적으로 분류하는 기준표를 제시하였다. 보강 시험체의 최종 파괴양상을 보면 거의 모든 시험체에서 보강재 계면에서의 파괴가 나타나, 시공시 보강재의 표면처리와 접착제의 품질관리등이 보강공법의 성패를 좌우하는 매우 중요한 인자임을 보여주었다.

6. 보강된 보의 경우는 하중의 증가로 인하여 휨 균열단계를 지나서 보다 전단균열이 발생하는 단계까지 하중이 증가하였으며, 노치 주변에는 몇 개의 큰 휨 균열이 발생하는 것을 알 수 있고, 단부에서 부착면적을 확대한 경우에는 주변 응력 감소로 인하여 단부에서의 균열발생이 억제되는 것이 관측되었다.

참고문헌

1. 한만엽, 송병표, "노치를 이용한 보강재의 부착력증가 방안에 관한 연구", 한국 콘크리트 학회, 1998

년도 봄 학술 발표회 논문집, pp.647~652

2. 한만엽, 송병표, "보강재의 변형 부착에 따른 보의 구조적 거동", 한국 콘크리트 학회지, 제 10권, 3호, 1998, pp. 197~208

3. Swamy R. N., B. Hobbs and M. Roberts. "Structural Behavior of Externally Bonded Steel Plated RC Beams after Long-Term Exposure", The Structural Engineering, Vol.73, August 1995, pp. 255~261

4. Jonathan C. McGormley, Douglas B. Cleary, and A. Ramirez. "The Performance of Epoxy-Coated Shear Reinforcement" ACI Structural Journal, Vol.93, September-October 1996

5. Philip A. Ritchie, David A. Thomas, Le Wu Lu and Guy M. Connelly, "Externally Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics", ACI Structural Journal, Title No. 88-S52, pp.490~499

6. Michael J. Chajes, William W. Finch, Jr., Ted F. Januszka, and Theodore A. Thomon, Jr. "Bond and Force Transfer of Composite Material Plates Bonded to Concret", ACI Structural Journal, Vol.93, No.2, March-April 1996

7. Marco Arduini and Antonio Di Leo, "Composite Behavior of Partially Plated Beams in the Linear Elastic Range", "Repair and Strengthening of Concrete Members with Adhesive Bonded Plates" ACI, SP-165, pp.43~54

8. 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

9. R. N. Swamy, R. Johnes, J. W. Bloxham, "Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by epoxy-bonded Plates." The Structural Engineering, Vol. 65A, No.2, February 1987, pp.59~87

10. Deric John Oehlers, 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

요 약

본 연구는 콘크리트 구조물의 보강공법으로 널리 쓰이고 있는 강판에 의한 부착식 보강공법의 단점인 단부에서의 강판분리 현상에 대한 보완실험으로 실시되었다. 실험결과 노치가 적용된 강판부착식 공법이 항복하중 이후 최대하중까지의 증가율이 기존의 공법보다 증가되어 구조물의 보강 성능의 개선 및 안전성의 확보 측면에서 크게 개선되었을 뿐만 아니라 균열이나 처짐의 조절측면에서도 우수한 것으로 판명되었다. 이는 강판에 대한 약간의 변형만으로도 구조물의 수명을 연장시킬 수 있다는 장점과 함께 경제적으로도 보강된 구조물에 대한 추가적인 제반 비용의 절감도 기대할 수 있을 것이다.

(접수일자 : 1998.2 24)