

AFRP로 보강된 철근콘크리트 보의 휨 거동과 연성도 평가

Evaluation of Behavior and Ductility of Reinforced Concrete Beams Strengthened With AFRP

김 준 원* 김 태 완** 홍 성 남*** 박 선 규****
Kim, Jun-Won Kim, Tae-Wan Hong, Sung-Nam Park, Sun-Kyu

Abstract

Due to its outstanding feature, FRP is used widely for the material of strengthening in USA and Japan recently, and there have been active researches in Korea as well. This study evaluates the behavior and ductility of each structure experiment using EBR and NSMR strengthening method with different AFRP types and strengthening area. There was the biggest increase in the load when the strengthening area is expanded showing a brittle aspect, and eventually the immature failure occurred. With regard to the methods, it is found that the NSMR method is more effective to strengthen the structure, and the uneven surface causes ductile failure.

요 지

FRP는 재료가 가지고 있는 특성 때문에 최근 들어 미국, 일본 등에서 보강 재료로 널리 쓰이고 있으며 우리나라에서도 활발한 연구가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 EBR, NSMR 보강공법을 사용하는 동시에 AFRP의 종류와 보강면적을 다르게 보강하여 각 실험체의 거동과 연성을 평가하였다. 보강면적을 증가시킨 경우가 가장 큰 하중증가를 보였으나 취성적인 파괴 양상을 띠었으며 미성숙파괴가 일어났다. 공법면에서는 NSMR공법으로 보강하는 것이 더 효율적인 것으로 나타났으며 보강재료 표면의 요철이 연성파괴를 유도하는 것으로 나타났다.

Keywords : AFRP, Ductile, Energy ratio, FRP, NSMR

핵심 용어 : AFRP, 연성, 에너지비, FRP, 표면매립공법

* 정희원, 건일엔지니어링 구조부

** 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 연구교수

*** 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정

**** 정희원, 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수

E-mail : rasids@hanmail.net 02-3420-8849

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2009년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

기존구조물에 적용하는 보편적인 구조물 보강 방법은 구조물의 부재중 하중을 받는 부재의 단면적을 증가시키는 방법과 강판을 부착시켜서 보강하는 방법, 그리고 FRP를 보강할 부재에 부착하여 보강하는 방법 등이 있다. 그러나 첫 번째 방법은 현장 여건상 적용하기 어려운 경우가 발생할 수 있으며 두 번째 방법은 보강 후 구조물의 하중이 증가하고 강판이 부식한다는 단점이 있다. 그에 반해 세 번째 방법은 FRP가 가벼워 보강 후에도 구조물의 하중에 변화가 없으며 부식에 강하고 유지관리가 용이하는 등 여러 가지 장점을 가지고 있어 유럽, 미국, 일본 등에서 최근 널리 사용되고 있으며 우리나라에서도 활발한 연구가 진행 중이다.⁽³⁾⁻⁽⁶⁾⁽⁹⁾

그 중 CFRP에 대한 연구는 많이 수행되었지만 AFRP에 대한 연구는 아직 미비한 상태이다. 그러나 AFRP와 CFRP를 비교했을 경우 AFRP가 CFRP에 비해 신율과 순간충격에 견디는 방폭 성능이 우수하며, 현장적용 시 자재비면에서도 상대적으로 저렴한 점을 감안한다면 상대적으로 미비했던 AFRP에 대한 연구 또한 더욱 필요하다고 하겠다.

따라서 본 연구에서는 부착을 향상시키기 위해 제작 시 Peel-Ply를 표면에 부착한 후 인발시켜 요철을 만든 보강 재료와 그렇지 않은 재료를 EBR(Externally Bonded Reinforcement)공법과 NSMR(Near Surface Mounted Reinforcement)공법을 사용하여 보강한 다음 정적재하 실험을 수행하여 변수에 따른 보강효과 및 휨 실험체의 계면 특성 및 거동을 파악하고 연성거동을 에너지비를 사용하여 고찰하였다.

2. 실험

2.1 실험개요

AFRP로 보강된 RC보의 계면박리과괴 거동을 고찰하고 박리하중을 산정하기 위하여 수행할 실험을 위해 표준 실험체 1개, EBR공법으로 보강한 실험체 2개,

NSMR공법으로 보강한 실험체 3개로 총 6개의 실험체를 제작하였으며 보강재료 표면의 요철 유무에 대한 효과를 확인하기 위하여 각 공법마다 각각 다른 표면을 갖는 보강 재료로 보강하였다. 실험체의 단면 치수는 200×300mm로 인장과 압축 부분의 피복두께를 30mm로 하였으며 부재의 길이는 2.2m이다. 지점간 거리는 2.02m로 양쪽 부재 끝에서 중심 쪽으로 90mm거리를 두고 지점을 설치하였다. 전단철근은 125mm간격으로 총 16개를 배치하였으며 실제 시공되는 RC보와 같게 하기위해 인장 측에 2-HD13 철근을 배근하였고, 압축 측에 2-HD10 철근을 배근하였다. 본 실험에 사용된 실험체의 형상과 변수는 Fig. 1과 Table 1에, 실험체의 명명법은 Table 2에 나타내었으며 NSMR공법의 개요와 순서는 Fig. 2에, 요철을 가진 Aramid의 개략적인 형상은 Fig. 3에 나타내었다.

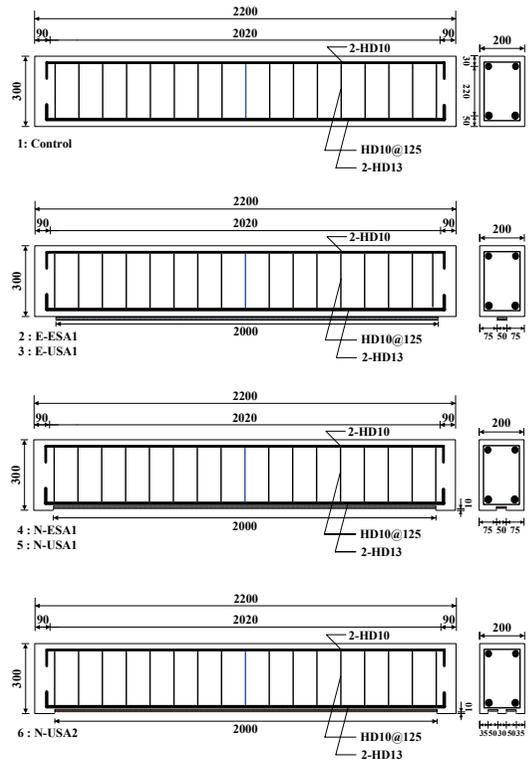


Fig. 1 Details of test beams

Table 1 Types of the test beams

Specimens	Strengthening Method	Details
Control	-	Standard specimen
E-ESA1	EBR (Externally Bonded Reinforcement)	Aramid : Even Surface Bond Width : 5 cm
E-USA1		Aramid : Uneven Surface Bond Width : 5 cm
N-ESA1	NSMR (Near Surface Mounted Reinforcement)	Aramid : Even Surface Groove Width : 5 cm Groove Depth : 1 cm
N-USA1		Aramid : Uneven Surface Groove Width : 5 cm Groove Depth : 1 cm
N-USA2		Aramid : Uneven Surface Groove Width : 5 cm Groove Depth : 1 cm 2 Strips of Width Direction

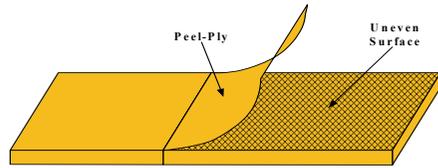


Fig. 3 Shape of uneven surface of AFRP

실험변수를 정리해보면 다음과 같다.

- ① 보강공법(EBR, NSMR)
- ② AFRP 표면의 요철 유무
- ③ 보강면적(1겹, 2겹)

2.2 사용재료

2.2.1 콘크리트

실험체 제작 시에 사용되는 콘크리트는 설계기준강도 24MPa를 기준으로 배합되었으며, 콘크리트 타설 시에 제작한 압축강도 시험용 공시체 molds를 취득해서 KS F 2405 (콘크리트 압축강도 시험방법)⁽¹⁾에 의하여 28일 강도를 측정된 결과를 가지고 평균값을 구하였으며 여기서 얻은 재료의 성질은 Table 3과 같다.

2.2.2 철근

본 실험에서 사용된 철근은 인장철근이 HD13이고 압축철근과 스트립은 HD10을 사용하였다. 철근 인장 시험을 통하여 얻은 재료의 성질은 Table 4와 같다.

Table 2 Naming of the Specimens

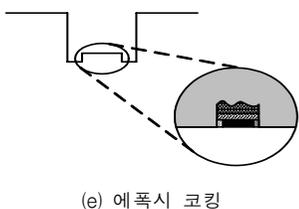
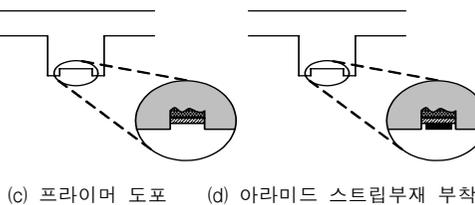
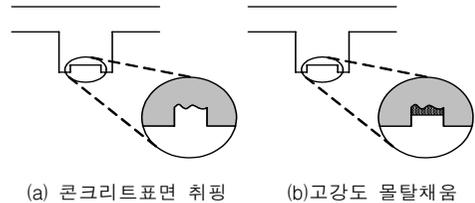
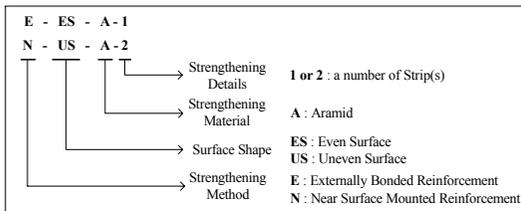


Fig. 2 Summary of NSMR method

Table 3 Material properties of Concrete

Specified concrete strength (MPa)	Compression strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
24	25.9	2.0×10 ⁴

Table 4 Material properties of Steel

Type	Yield Strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
HD10	455.0	636.0	1.95×10 ⁵
HD13	402.5	690.0	2.04×10 ⁵

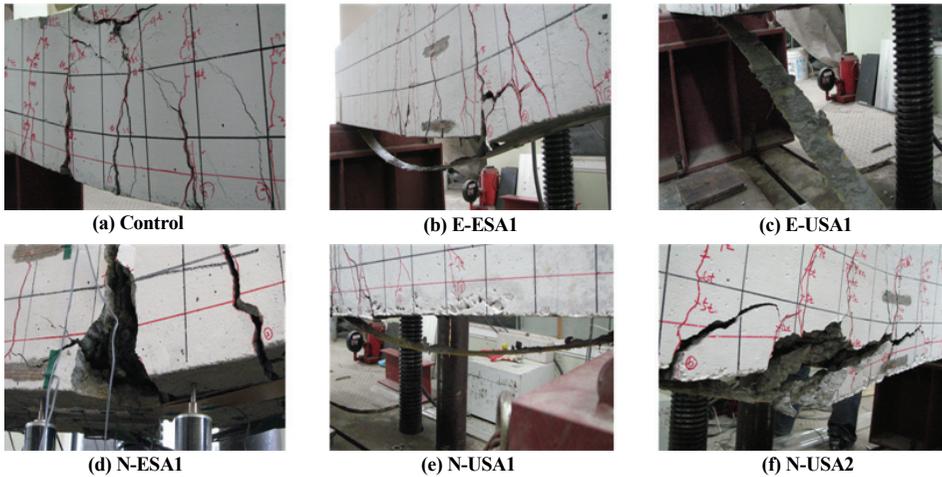


Photo 1 Failure modes of specimens

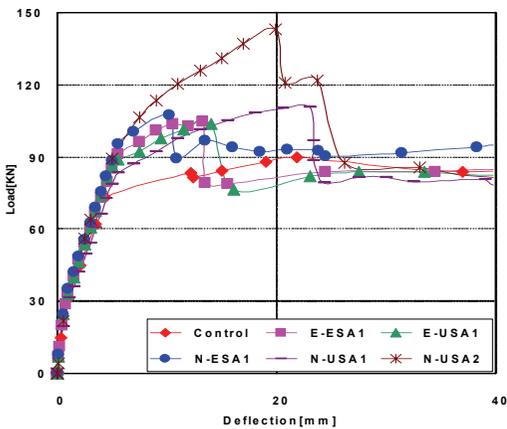


Fig. 5 Experimental load-deflection curves

3.3 FRP 표면의 요철과 보강면적에 의한 영향

보강재료 표면 요철의 효과를 확인하기 위해서 같은 공법으로 보강된 실험체를 서로 비교하였다. EBR공법으로 보강된 경우 하중증가와 보강재 박리 시의 처짐량을 가지고 판단했을 때 보강재료 표면 요철의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 NSMR 공법으로 보강된 경우 요철이 없는 경우는 약 17.8%의 하중증가를 보인 반면 요철이 있는 경우는 약 21%의 하중증가를 보였고, 보강재 박리 시 처짐량도 월등해서 연성 파괴 양상을 보여 NSMR공법으로 보강 시엔 보강재료 표면의 요철이 보강 효율을 높이며 요철에 의해 부착면적이 증가됨에 따라 박리파괴를 지연시키는 것으로 나타났다.

Table 7 Test results for experiment

Test Beam Series	Cracking					Yielding				Ultimate			
	Calculated (kN)	Load (kN)	P_{stre}/P_{cont} (%)	Deflection (mm)	D_{stre}/D_{cont} (%)	Load (kN)	P_{stre}/P_{cont} (%)	Deflection (mm)	D_{stre}/D_{cont} (%)	Load (kN)	P_{stre}/P_{cont} (%)	Deflection (mm)	D_{stre}/D_{cont} (%)
Control	39.1	21.6	-	0.49	-	79	-	5.3	-	91.1	-	23.94	-
E-ESA1	50.6	26.4	122.2	0.61	124.5	94.1	119.1	5.89	111.1	104.6	114.8	13.28	-144.5
E-USA1	50.6	26.9	124.5	0.59	120.4	89.1	112.8	5.4	101.9	104	114.2	15.59	-134.9
N-ESA1	50.6	27.4	126.9	0.59	120.4	95.1	120.4	5.59	105.5	107.3	117.8	10.21	-157.4
N-USA1	50.6	24.4	113.0	0.68	138.8	83.2	105.3	5.46	103.0	110.2	121.0	23.19	-103.1
N-USA2	50.6	27.9	129.2	0.74	151.0	100	126.6	5.97	112.6	142.8	156.8	19.95	-116.7

보강면적에 의한 영향을 확인하기 위해서 NSMR공법으로 보강된 실험체 중 표면에 요철이 있는 AFRP를 1장 보강한 N-USA1실험체와 2장 보강한 N-USA2실험체를 비교하였다. 하중증가에서는 2장 보강한 실험체가 약 56%, 1장 보강한 실험체가 약 21%의 하중증가를 보여 보강면적이 내력을 증가 시킴을 알 수 있다. 그러나 피복두께의 부족으로 미성숙 파괴가 일어나면서 파괴양상은 매우 취성적인 파괴양상을 보였다. 실험체의 초기 균열하중과 극한하중은 Table 7에 정리하였으며, 각 실험체의 하중-처짐 곡선은 Fig. 5에 나타내었다.

3.4 AFRP의 변형률

이전에 수행되었던 연구결과(Sing-ping Chiew 등, 2007)⁽¹⁰⁾에 의하면 FRP의 변형률과 콘크리트의 초기균열, FRP의 변형률과 인장철근의 항복은 밀접한 관계를 가지고 있어서 FRP의 변형률을 가지고 콘크리트와 인장철근의 상태파악이 가능하다는 결론이 도출될 바 있다. 이번 연구에서도 AFRP와 콘크리트의 초기균열의 상관관계를 정확하게 알기위하여 하중가력점 사이에 있는 AFRP에 50mm간격으로 변형률 게이지를 부착하여 실험을 수행하였으며 얻은 결과 값 중 Fig. 6과 같이 E-USA1의 거리-변형률 그래프와 균열도를 비교하여 분석하였다. 콘크리트의 초기균열이 발생하기 전 10kN, 20kN까지는 AFRP의 변형률이 사다리꼴의 형태를 보이면서 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 균열하중으로 판단되는 26.9kN 정도에 이르러서는 하중가력점 바로 아랫부분에 위치하는 AFRP의 변형률 값이 20kN일 때의 값보다 약 3배 이상 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 콘크리트부분에 균열이 나면서 콘크리트가 받았던 휨모멘트가 AFRP로 이동되었기 때문이라고 판단되며 실험에서 얻은 균열도와 비교해본 결과에서도 그 지점에서 콘크리트의 균열이 존재하였다.

Fig. 7에서와 같이 실험체에 균열하중이 발생한 후에 하중이 증가함에 따라 다시 일정한 모양을 유지하면서 AFRP의 변형률이 증가한다. 그러나 철근의 항복하중인 89.1kN을 지나서는 AFRP가 받는 휨 모멘

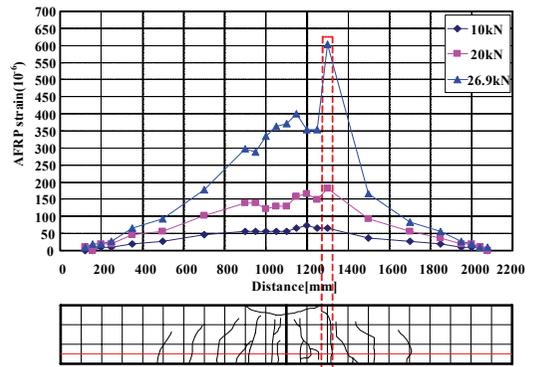


Fig. 6 Comparison of strain curve with cracking pattern of E-USA1

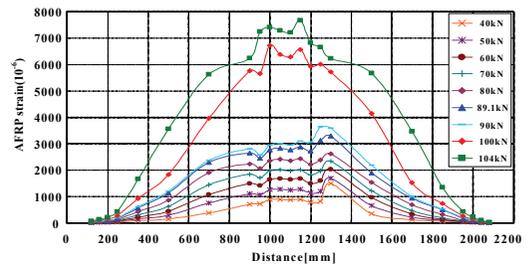


Fig. 7 AFRP strain distribution of E-USA1

트가 매우 커지면서 변형률이 하중가력지점 사이에서 불규칙적인 형태를 보이며 크게 증가하였다.

이러한 현상은 인장철근이 항복하면서 파괴되는 구조물의 평형상태를 AFRP가 인장력을 분담함으로써 구조물의 평형상태를 계속 유지하려고 하기 때문인 것으로 판단된다.

4. 보의 연성도 평가

4.1 연성의 개념

연성이란 재료, 구조단면, 구조부재 또는 구조계가 심각한 저항성의 손실이 없이 붕괴하기 전까지 보여주는 비선형 변형(Inelastic deformation)을 나타내는 정성적인 개념이다. 일반적으로 철근콘크리트 보에서는 갑작스런 취성파괴를 방지하고 구조물의 변형에너지 흡수 능력을 확보하기 위하여 어느 정도 이상의 연

성을 확보하여야 한다. 이와 더불어 부정정 구조물의 경우 연성은 위험단면의 과잉 응력을 다른 단면으로 재분배시켜 국부파괴를 지연시키는 역할을 하는 중요한 안전도 계수라고도 할 수 있다. 연성을 측정하기 위한 방법으로 연성지수(Ductility index) 또는 연성 계수(Ductility factor)가 사용되는데 곡률(Curvature), 회전(Rotation), 처짐(Deflection)의 비로 식 (1)과 같이 정의한다.

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_u}{\phi_y}, \mu_{\theta} = \frac{\theta_u}{\theta_y}, \mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

여기서, μ 는 부재의 연성지수, ϕ 는 부재의 회전 계수, θ 는 부재의 곡률, Δ 는 부재의 처짐을 나타낸다.

4.2 변위에 의한 연성도 평가

본 실험에서는 실험체가 항복할 때의 처짐과 극한 하중에 도달할 때의 처짐의 비로 표현되는 변위 연성 지수(Ductility index)를 사용하여 부재의 연성도를 평가하였고, 실험체의 변위 연성지수는 Table 8과 같다. 표준 실험체(Control)의 연성지수가 4.52로 가장 높으나, 표면부착공법을 이용한 실험체 E-ESA1과 E-USA1는 2.25~2.89로 나타나 표준 실험체보다 연성이 떨어지는 것으로 나타났다. 여기서 표면에 요철이 있는 AFRP를 사용한 E-USA1 실험체가 표면에 요철이 없는 AFRP를 사용한 실험체 E-ESA1 보다 좀 더 연성적으로 거동하는 것으로 나타났다. 또한 표

Table 8 Ductility Index by Displacement Method

Test Beam Series	Yielding		Ultimate		Ductility Index
	Load	Deflection	Load	Deflection	
	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	
Control	79	5.3	91.1	23.94	4.52
E-ESA1	94.1	5.89	104.6	13.28	2.25
E-USA1	89.1	5.4	104	15.59	2.89
N-ESA1	95.1	5.59	107.3	10.21	1.83
N-USA1	83.2	5.46	110.2	23.19	4.25
N-USA2	100	5.97	142.8	19.95	3.34

면매립 공법을 이용한 N-ESA1, N-USA1 그리고 N-USA2 실험체들은 표면부착공법을 이용한 실험체들 보다 좀 더 연성적인 거동을 하는 것으로 나타났고, N-USA1 실험체는 표준 실험체와 거의 비슷한 연성 지수인 4.25를 나타내었다. 결론적으로 재료적으로는 표면에 요철이 있는 보강재가, 보강 공법으로는 표면 부착공법 보다는 표면매립공법이 구조물의 연성 확보 측면에서 유리한 것으로 판단되었다.

4.3 에너지 방법에 의한 연성도

에너지 정의에 기초한 연성은 비탄성, 탄성, 그리고 전체에너지 중에 어떤 두 개의 비로써 정의되어 진다. 여기에서는 비탄성에너지와 전체에너지의 비로 정의 하였다. 따라서 전체에너지는 하중-변형 곡선 전체의 아래 면적을 계산하면 되므로 쉽게 계산할 수 있다. 그러나 선형에너지 부분과 비선형에너지 부분을 결정함에 있어 다소 어려운 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하는 방법으로는 다음의 두 가지 방법이 보편적

Table 9 Ductility Index by Energy Method

Test Beam Series	S	E _{total}	E _{el}	E _{in}	Energy rate	Ductility Index	Evaluation
Control	1.81	183.26	22.98	160.28	87.46%	4.49	ductile failure
E-ESA1	1.94	106.04	28.25	77.79	73.36%	2.38	semi-ductile failure
E-USA1	1.97	127.08	27.40	99.67	78.44%	2.82	ductile failure
N-ESA1	2.07	78.19	27.81	50.38	64.44%	1.91	brittle failure
N-USA1	1.49	198.00	40.80	157.19	79.39%	2.93	ductile failure
N-USA2	1.52	204.20	66.88	137.31	67.25%	2.03	brittle failure

로 이용된다. 첫 번째 방법은 하중의 증가가 다르게 바뀌는 점을 찾는 것이다. 두 번째 방법은 하중-곡선에서 편평한 부분을 기준으로 에너지 변곡점을 찾아 구분하는 것이다. 본 논문에서는 수식(2)와 수식(3)에 나타냈듯이 하중-처짐 곡선에서 정상모(1994)⁽⁷⁾가 제시한 방법을 선택하여 에너지 변곡점을 결정하였고, 에너지 개념에 의한 연성도를 통하여 연성지수를 결정하였다.

$$S = \frac{P_1 S_1 + (P_2 - P_1) S_2 + (P_3 - P_2) S_3}{P_3} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{1}{2} \left(\frac{E_{tot}}{E_{el}} + 1 \right) \quad (3)$$

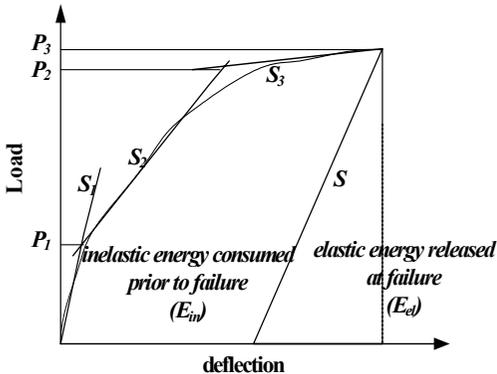


Fig. 8 Total, Elastic, and Inelastic Energies

1998년도 Grace의 연구결과에 의하면, 비탄성에너지와 전체에너지에 비로 정의된 에너지 비(energy ratio)는 연성의 더 좋은 측정방법으로 제안되어 졌다. 또한 그의 연구 결과에 따르면 만약 에너지비가 75% 보다 더 크면 그 보는 연성파괴(ductile failure)가 지배적으로, 에너지비가 70%~74% 사이이면 반연성(semi-ductile)으로 고려되어 진다. 만약 69% 이하 일 때 보는 취성파괴(brittle failure)가 지배한다.(Grace, 1998)⁽⁸⁾

에너지 개념에 의한 연성도를 각 실험체별로 분류하면 Table 9와 같다. Table 9에서 확인 할 수 있듯이 보강 실험체들은 표준 실험체에 비하여 상대적으로 낮은 연성도를 갖고 있다. 그러나 Grace의 에너지방법

에 의한 보강 실험체의 연성분류에 따르면 표면에 요철이 없는 AFRP를 사용한 실험체 E-ESA1은 semi-ductile로 나타났다. 이에 반하여 표면에 요철이 있는 AFRP를 사용한 실험체 E-USA1 과 N-USA1는 ductile failure로 나타나 충분한 연성을 확보하고 있음을 확인 할 수 있었다. 하지만 실험체 N-USA2는 실험체 제작 시 전단 철근에서 보 표면까지의 거리, 즉 피복두께가 확보되지 않아 보강재가 재료적 성능을 발휘하기 전에 탈락하는 미성숙 파괴가 일어나 연성이 확보되지 못한 것으로 판단된다.

5. 결론

NSMR공법과 EBR공법을 이용하여 AFRP plate를 보강한 RC보의 보강재료 표면의 요철 및 보강량에 따른 효과와 계면 특성과 연성도 평가의 결과의 다음과 같다.

- 1) 보강공법의 경우 EBR공법 보다 NSMR공법을 사용하여 보강하는 것이 효과적인 것으로 판단되었다. 특히 보강재료 표면에 요철이 있는 보강재를 사용할 경우 NSMR 공법의 하중증가가 뚜렷하였으며 연성파괴 양상을 보였다. 이것으로 NSMR공법으로 인한 부착면적의 증가가 박리 파괴 하중을 지연시키는 것을 알 수 있었다.
- 2) AFRP plate를 1겹 보강시킨 경우와 2겹 보강시킨 경우는 2겹으로 보강시킨 경우가 더 많은 하중증가를 보였지만 AFRP의 변형률은 비슷했으며 2겹으로 보강시킨 보의 파괴양상은 매우 취성적이었다. 이것은 보강재의 재료적 특성을 제대로 발휘하지 못하는 상태에서 콘크리트의 탈락이 일어나는 미성숙 파괴(인장철근을 따라서 발생하는 피복의 탈락)가 발생하였기 때문인 것으로 판단되며 이 결과로부터 계산에 의한 정확한 보강량의 결정이 중요하며, 실제 시공 시 이것이 지켜졌는지에 대한 검토가 꼭 이루어져야 할 것으로 판단된다.
- 3) 보강재료 표면의 요철이 있는 재료를 EBR공법으로 보강할 경우 요철이 없는 재료와 하중증가에선 차이가 없었으나 반연성파괴를 유도하는 것으로 나

타났으며 NSMR공법으로 보강할 경우 하중증가 효과와 연성파괴를 유도하는 현상이 확인되었다. 이 결과로부터 보강재료 표면의 요철이 연성파괴를 유도하는데 효과가 있는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. KS F 2405, 콘크리트의 압축 강도 시험 방법, 한국 표준협회, 2005, pp. 1-6.
2. 김진율, 김광수, 박선규, 이영재, "CFRP가 보강된 철근콘크리트 보의 거동과 연성", 한국콘크리트학회 논문집, 제19권 2호, 2007, pp. 225-231.
3. 안기만, 김광수, 박선규, 이영재, "GSP와 CFRP 쉬트의 표면부착공법을 이용한 RC 슬래브의 보강성능 평가에 관한 실험적 연구", 구조물진단학회지, 제11권 6호, 2007, pp. 95-102.
4. 양동석, 박선규, 이용학, "강연선 및 탄소 섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트 보의 휨 거동 특성", 한국콘크리트학회논문집, 제14권 2호, 2002, pp. 216-222.
5. 이현호, 구은숙, "아라미드 섬유쉬트로 휨보강한 RC 보의 강도성능 및 변형성능에 관한 고찰", 한국콘크리트학회지, 제10권 5호, 1998, pp. 151-158.
6. Björn Täljsten, "FRP Strengthening of Concrete Structures: New Inventions and Applications", Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 6, No. 3, pp. 162-172.
7. Jeong, S. M., Evaluation of Ductility in Prestressed Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastic Tendons, PhD thesis, The Univ. of Michigan, Ann Arbor, Mich. 1994.
8. N. F. Grace, A. K. Soliman, G. Abdel-Sayed, and K. R. Saleh, "Behavior and Ductility of Simple and Continuous FRP Reinforced Beams", Journal of Composites for Construction(ASCE), Vol. 2, No. 4, pp. 186-194.
9. Ninoslav Pešić, Kypros Pikakoutas, "Concrete Beams Externally Bonded Flexural FRP-reinforcement: Analytical Investigation of Debonding Failure", Composite Part B: engineering, Vol. 34, No. 4, pp. 327-338.
10. Sing-Ping Chiew, M.ASCE, Qin Sun, Yi Yu, "Flexural Strength of RC Beams with GFRP Laminates", Journal of Composite for Construction(ASCE), Vol. 2, No. 5, pp. 497-506.

(접수일자 : 2008년 9월 9일)

(심사완료일자 : 2009년 2월 10일)