

탄소섬유판 (CFRP) 표면매립 (NSM) 공법을 이용한 콘크리트 구조물 휨 보강에 관한 실험 연구

임동환*

Lim, Dong Hwan*

An Experimental Study of Flexural Strengthening Method of Reinforced Concrete Beams with Near Surface Mounted CFRP Strips

ABSTRACT : The purpose of this study is to establish the flexural strengthening method of the concrete members. To accomplish this objective, a total of seven concrete beams were tested. From this study, it is found that the initial flexural stiffness and strength of the beams reinforced with NSM CFRP strips were significantly improved compared to the beam without CFRP strip. Failure of the beam reinforced with NSM strips is initiated by failure of NSM strips, eventually sudden explosive compressive failure in the loaded region. This strengthening method combined with NSM CFRP strips and high performance mortar for concrete cover recovery is evaluated by a good strengthening method for the strength, durability and good appearance of concrete structures.

Key words : Near surface mounted(NSM), Exterior bonded reinforcement(EBR), Load-displacement behavior, Failure modes

초 록 : 본 연구에서는 탄소섬유판을 콘크리트 표면에 매립하는 표면매립(NSM) 공법을 적용하여 콘크리트 구조물 보강을 수행하고, 콘크리트 내구성 증진 뿐 아니라 구조물 수명을 향상시킬 수 있는 노후구조물 보수·보강 체계를 구축하고자 하였다. 이를 위하여, 표면매립 탄소섬유판 및 고성능 단면복구 모르타르로 보강된 철근 콘크리트 부재를 제작하여 실험을 수행하였다. 실험결과, 예폭시로 탄소섬유판을 매립·부착한 철근콘크리트 부재는 보강되지 않은 부재보다 초기 강성 및 휨강도가 현저하게 증가하는 것으로 나타났다. 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재는 탄소섬유판의 인장 파괴로 인하여 시작되며, 탄소섬유판의 저항능력은 매우 우수하며, 보강 효율이 우수한 것으로 나타났다. 탄소섬유판을 매립하고 표면부에 고성능 모르타르로 단면을 복구하는 보강 방식은 보의 강성 및 내구성을 향상시킬 뿐 아니라 미관이 우수하여 보수와 보강이 혼합된 적절한 보강 방식으로 판단된다.

검색어 : 표면매립(NSM), 표면부착(EBR), 하중-변위 특성, 파괴양상

1. 서 론

탄소섬유판(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)은 역학적 특성, 화학 저항성 및 내구성능이 우수하여 철근콘크리트 구조물의 보강 신소재로 널리 인식되고 있다. 탄소섬유판을 철근 콘크리트 구조물의 표면에 부착하는 보강방식(External Bonding

* 정회원·동서대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author·Professor, Dongseo University·limdh@dongseo.ac.kr)

Received August 21 2012, Revised November 11 2012, Accepted December 5 2012

Reinforcement, EBR)은 교량 및 건축구조물에 널리 적용되고 있으며, 그 시공성능 및 제반 역학적 성능이 우수하여 구조물의 보강에 매우 효과적인 방법으로 인식되고 있다. 그러나 계면 부착 파괴로 인한 탄소섬유판의 탈락 및 콘크리트 피복탈락으로 인한 파괴가 발생할 수 있으며, 탄소섬유판과 콘크리트부재와의 합성거동이 유도되지 않는 문제가 제기 되고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, 최근 들어 다양한 형태의 FRP 재료를 콘크리트에 매립하는 형태의 구조 보강이 수행되고 있으며 (De Lorenzis 등, 2007), (Rizkalla 등, 2004), (Taljsten 등, 2003) (Oehlers 등, 2007) 특히 봉 형태의 탄소섬유 및 유리섬유 재질의 FRP 보강재가 보강 방식으로 적용되고 있다(De Lorenzis 등, 2004). 그러나 이러한 구조보강 형태 역시 극한 상태에서 에폭시와 FRP면의 부착 파괴가 발생할 수 있고, 이로 인하여 급격하게 내력이 감소될 수 있다(Oehler 등, 2007), (De Lorenzis 등, 2004) (Mohamed 등, 2008), (Seracino 등, 2007). 따라서 콘크리트 구조물 본체와 탄소섬유판이 일체화된 합성작용을 유도하기 위해서는 에폭시와 탄소섬유판의 충분한 부착면적이 절대적으로 필요하다. 두께가 약 1mm 정도의 매우 얇은 탄소섬유판을 수직으로 콘크리트 표면에 매립하는 공법은 부착면적이 충분히 확보되어 에폭시와 탄소섬유판의 부착파괴가 일어나지 않기 때문에, 봉 형태의 구조보강 보다 매우 유리한 것으로 평가받고 있다(임동환, 2008), (정우태 등, 2007, 2008, 2011). 또한 콘크리트 노후 구조물 보강 시, 탄소섬유판을 콘크리트 표면에 매립한 이후 콘크리트 표면에 중성화 방지제 등을 도포하고, 고성능 모르타르로 콘크리트 표면을 복구하면, 보수와 보강이 결합된 보강을 수행할 수 있다.

본 연구에서는 두께가 매우 얇고, 충분한 부착면적을 확보할 수 있는 탄소섬유판을 콘크리트 표면에 매립하는 표면매립 (NSM) 공법을 적용하여 노후 구조물 보강을 수행하고, 콘크리트의 내구성 증진 뿐 아니라 구조물 수명을 향상시킬 수 있는 구조물 보수보강 체계를 구축하고자 한다.

2. NSM CFRP판으로 보강된 철근콘크리트 부재 실험

2.1 실험 부재

본 실험연구에서는 탄소섬유판의 매립으로 인한 보강 효과를 규명하고, 탄소섬유판 매립 이후에 행해질 단면복구 모르타르의 재질 효과를 규명하여 구조물에 적절한 보강 및 보수의 형태를 규명하고자 한다. 또한 탄소섬유판을 매립 부착 보강할 때 에폭시를 사용하지 않고 탄소섬유판을 콘크리트에 직접 매립하여 탄소섬유판과 콘크리트의 부착효과 등을 규명하고자 하였다. 본 실험에서는 탄소섬유판의 부착방법(에폭시 사용 혹은 콘크리

트 모르타르에 직접 매립), 탄소섬유판의 매립면적 및 콘크리트 표면복구 모르타르의 종류 등이 주된 실험변수로 채택되었다. 실험 연구에서는 길이 3,000mm, 폭 200mm, 높이 300mm의 직사각형모 7개를 제작하여 실험을 수행하였으며, 사용된 콘크리트는 28일 압축강도가 30MPa이 발휘될 수 있도록 배합설계 되었다. 그리고 표면매립 탄소섬유판의 보강효과를 규명하기 위하여, 탄소섬유판을 부재 하단부에 수직으로 30mm 깊이로 매립하였으며 탄소섬유판 매립개수를 1개(보강율 0.0005, NSM1-E(A)) 혹은 두 개(보강율 0.001, NSM2-E(A))를 매립하여 매립량에 따른 보강 효과를 규명하고자 하였다. 탄소섬유판 매립길이는 시간의 90%인 2,430mm로 전 부재에 동일하게 매립하였다. 본 연구에서 사용된 콘크리트 단면 복구 모르타르는 최근 널리 사용되고 있는 A사 및 B사 제품을 사용하였고, 각 단면 표면복구 모르타르의 하중지지 효과 및 탄소섬유판 매립과 혼용 사용 시 발생될 수 있는 문제점을 분석하고자 하였다. 또한 탄소섬유판을 에폭시를 사용하지 않고 콘크리트속에 직접 매립하여 콘크리트와 탄소섬유판의 부착효과를 규명 하고자 하였다. Table 1은 본 실험에서 채택한 실험 부재와 실험 변수를 나타낸 것이다. 본 실험에서 사용된 탄소섬유판은 유럽 등지에서 널리 사용되고 있는 두께 1.2mm의 S사 탄소섬유판 이며, Table 2는 탄소섬유판의 재료물성 및 인장강도를 나타낸 것이다. 사용된 철근은 2D13 및 D16(SD400)이며, 인장철근 철근비는 0.00964로서 최대철근비의 33%이다. 또한 시간 중심에서의 휨 파괴를 유도하고, 보의 전단 파괴를 방지하기 위하여 D13 철근을 100mm 간격으로 배근하였다. Fig. 1은 본 실험에서 사용된 실험부재의 배근도를 각각 나타낸 것이다.

Table 1. Test specimens and test variables

Specimens	CFRP strip				Concrete Cover Mortar Type
	Conf. Type	Spacing (mm)	No.	Att type	
CONTROL	-	-	-	-	-
NSM1-N	NSM	-	1	Concrete	-
NSM2-N	NSM	-	2	Concrete	-
NSM1-E(A)	NSM	-	1	Epoxy	A
NSM1-E(B)	NSM	-	1	Epoxy	B
NSM2-E(A)	NSM	100	2	Epoxy	A
NSM2-E(B)	NSM	100	2	Epoxy	B

Table 2. Characteristics of used CFRP strips

Density	Tensile Strength (N/mm ²)	Modulus of Elasticity (N/mm ²)	Elongation at Break (%)
1.6	2800	165,000	16.9

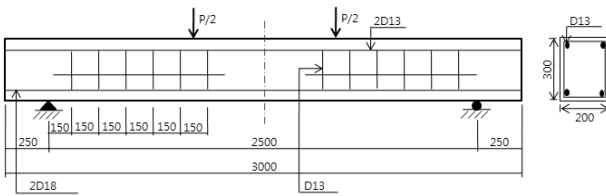


Fig. 1. Reinforcement details for test specimens

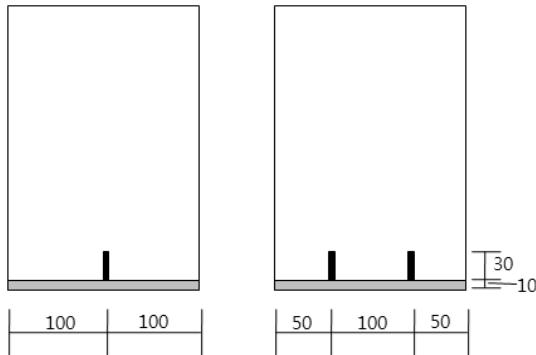


Fig. 2. Section details for test specimens

2.2 표면매립(NSM) 탄소섬유판의 설치

본 연구에서는 탄소섬유판을 표면에 매립하기 위하여, 깊이 30mm, 폭 6mm 홈을 만들기 위한 악세사리를 제작하였고, 이를 콘크리트 타설시 매립하고 콘크리트가 굳기 시작하는 시점에 이를 제거하여 콘크리트에 홈을 제작하였다. 이는 콘크리트 홈을 만들기 위해 핸드그라인더로 실험 전 홈을 절취하는 어려움을 콘크리트 제작단계에서 고려하여, 콘크리트 표면 절취로 인한 콘크리트의 손상과 번거로움을 방지 하였다.

Fig. 2는 탄소섬유판 매립 보강 시스템을 위한 홈의 위치, 간격을 나타낸 것이다. 1개의 탄소판이 부재 길이 방향으로 중심부에 매립 된 부재(NSM1 Series)의 경우, 매립 홈은 부재 하단 중심부에 길이 방향으로 폭 6.0mm, 깊이 30mm로 설치 되었으며, 2개의 탄소판이 부재 길이 방향으로 중심부에 매립 된 부재(NSM2 Series)의 경우, 탄소섬유판의 중심 간격은 100mm로 결정하였다. 탄소섬유판을 매립하기 위하여, 먼저 수동 에폭시건(Epoxy Gun)을 이용하여 에폭시레진을 홈에 충전 하였으며, 탄소섬유판을 이 홈에 매립하였다. 에폭시 레진은 스위스 S사 제품을 사용하였으며, 에폭시와 경화제를 2:1로 배합하여 사용하였다. 사용 에폭시 레진의 압축강도는 71.7MPa, 인장강도 48MPa 그리고 탄성계수는 1200MPa이다.

본 실험에서는 전술한 바와 같이 콘크리트 표면복구 모르터의 종류를 실험번호로 채택하였으며, 매립 탄소섬유판이 충분히 경화된 이후 두께 10mm로 콘크리트 표면에 도포하여 마감 하였다.

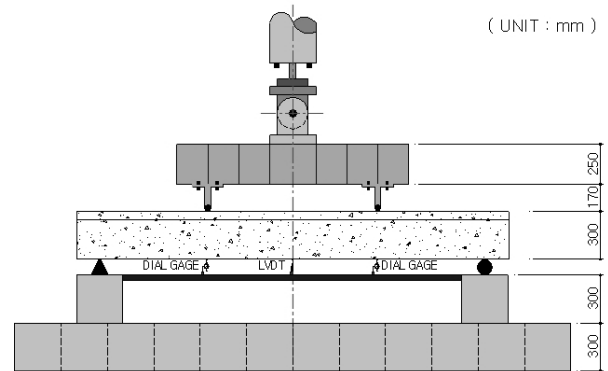


Fig. 3. Test setup

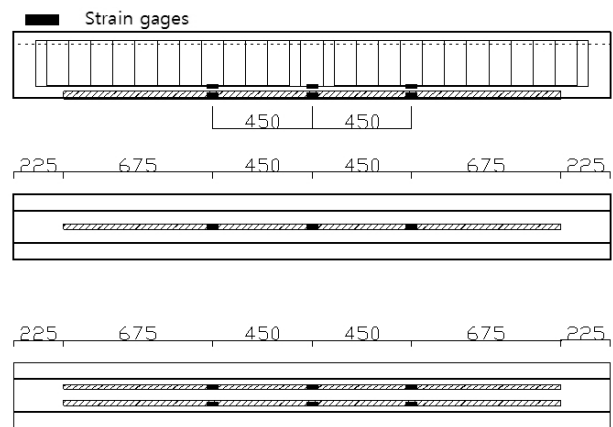


Fig. 4. CFRP strip configuration and sensors

2.3 실험방법

본 실험에서는 500kN 용량의 유압 액추에이터(Hydraulic Actuator)를 사용하여 4점 재하방식으로 하중을 단계적으로 제하하였다(Fig. 3). 각 실험부재에는 변위계(LVDT), 콘크리트 스트레인게이지, 철근 스트레인게이지, 탄소섬유판 스트레인 게이지 및 다이얼게이지 부착하여 변형을 및 변위 등을 분석하였다. 위 측정값은 Data Acquisition Software를 통해 처리 분석되었다. 표면매립(NSM) 섬유판의 변형율을 측정하기 위하여, 지점중앙 및 지점 1/3 지점에 스트레인게이지를 부착하였으며, 설치된 탄소섬유판의 형상 및 부착 센서는 Fig. 4와 같다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 하중-처짐 관계 특성

표면매립 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재는 보강 되지 않은 부재보다 더 높은 하중에 이르기까지 선형구간이 확대되며, 초기 강도가 크게 향상되는 것으로 나타나며, 보강된

보의 하중 처짐 및 강도의 특성은 탄소섬유판의 매립 면적에 따라 크게 다른 것으로 나타났다. 그러나 에폭시로 탄소섬유판을 매립 부착 하지 않고, 콘크리트 타설시 직접 콘크리트에 탄소섬유판을 매립한 경우에는 탄소섬유판과 콘크리트 사이에 부착과괴가 발생하여 탄소섬유판의 효과를 전혀 기대할 수 없었다. 따라서 탄소섬유판은 콘크리트와 탄소섬유판의 부착강도를 충분히 확보할 수 있는 에폭시의 사용이 필수적이다.

Fig. 5는 기준보와 콘크리트 모르타르에 탄소 섬유판을 직접 매립한 보의 하중-처짐 관계 특성을 비교한 것으로서 탄소섬유판을 콘크리트에 매립한 경우 휨강도가 약간 증가하나 탄소섬유판과 콘크리트 사이에 부착과괴가 발생하여 탄소섬유판의 보강 효과를 기대할 수 없었다.

Table 3은 본 실험에서 수행된 실험부재의 균열 및 극한 강도를 요약한 것으로서, 탄소섬유판이 에폭시로 부착 보강된 부재는 기준보 보다 휨강도가 크게 증진되며, 보강되지 않은 부재보다 약 90%정도의 강도 증진이 있는 것으로 나타났다. 초기 균열 발생 시점은 탄소섬유판 부착 방식에 관계없이 일정하게 나타났다.

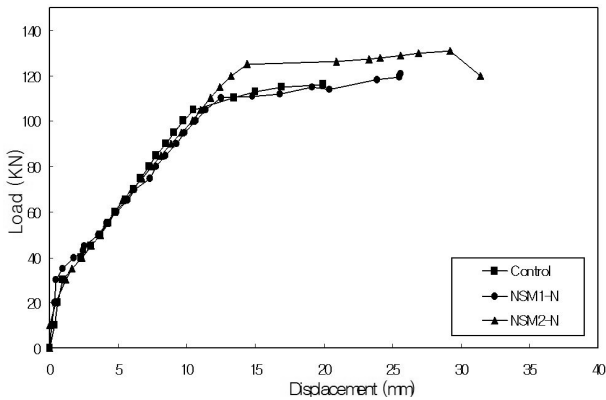


Fig. 5. Load-deflection curves for the NSM-N beam series

Table 3. Summary of test results

Specimens	CFRP Strip		Load Increase Ratio (%)
	Cracking Strength (kN)	Ultimate Strength (kN)	
CONTROL	30.0	120.0	-
NSM1-N	34.0	120.4	-
NSM2-N	32.0	132.5	-
NSM1-E(A)	37.0	170.3	41.9
NSM1-E(B)	37.0	178.2	48.5
NSM2-E(A)	45.0	224.5	87.1
NSM2-E(B)	47.0	218.7	82.3

Fig. 6은 탄소섬유판을 1줄 매립(섬유판 보강율 0.0005)하여 에폭시로 부착하고 고성능 모르타르로 단면복구를 수행한 경우의 하중-처짐 특성을 도시한 것으로서, 초기 강도가 크게 향상되는 것으로 나타났다. 또한 178.2kN으로 나타나 기준보 보다 휨강도가 약 50% 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 탄소섬유판 보강 콘크리트는 연성이 크게 증가하여 지진등과 같은 충격하중을 받는 구조물 보강에 유리할 것으로 판단된다. 또한 파괴는 탄소섬유판이 부분적으로 파괴되어 단계적으로 파괴되는 양상을 나타내고 있다. Fig. 7은 탄소섬유판을 2줄 매립(섬유판 보강율 0.001) 하여 에폭시로 부착하고 고성능 모르타르로 단면복구를 수행한 경우의 하중-처짐 특성을 도시한 것이다. 탄소섬유판이 2줄 매립된 부재는 보강되지 않은 부재보다 더 높은 하중에 이르기까지 선형구간이 확대되며, 초기 강도가 크게 향상되는 것으로 나타났으며, 또한 1줄 매립의 경우보다도 초기강도 및 휨강도가 크게 개선되는 것으로 나타났다. 휨강도 역시 매우 증가하여 휨강도가 225kN으로 나타나 기준보 보다 휨 강도가 약 90% 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 탄소섬유판 보강

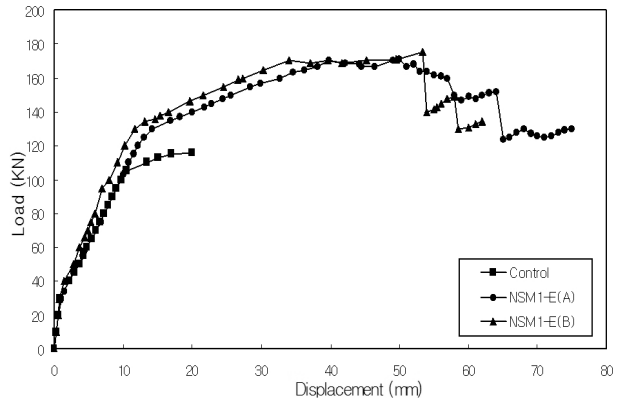


Fig. 6. Load-deflection curves for the NSM1-E beam series

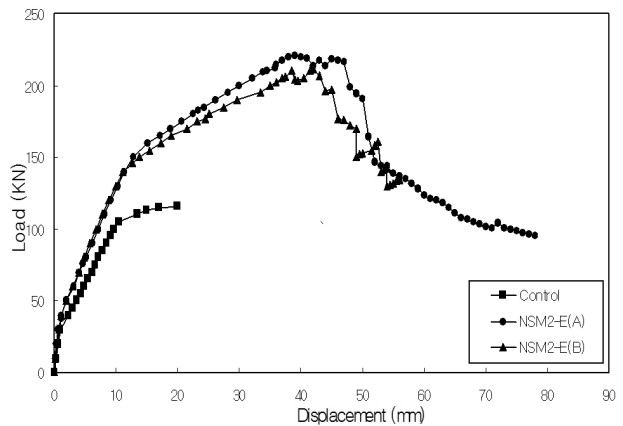


Fig. 7. Load-deflection curves for the NSM2-E beam series

콘크리트는 연성이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한 본 연구에서는 단면 복구 모르타르는 종류에 관계없이 하중에 기여하는 바는 크게 없었으나, 파괴 시점까지 탈락하지 않고 지지하고 있음을 알 수 있었다.

3.2 탄소섬유판 변형율

Table 4는 탄소섬유판 보강 콘크리트 부재의 극한 상태에서의 탄소섬유판의 변형율을 나타낸 것이다. 본 실험 결과, 부재 중심에서 탄소섬유판에 발생하는 인장변형율은 탄소섬유판의 형상 및 부착 길이에 관계없이 거의 15,000 $\mu\epsilon$ 에서 16,000 $\mu\epsilon$ 으로 나타났다.

따라서 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재는 표면 매립탄소섬유판과 철근콘크리트 부재는 합성거동이 유도되며, 매립 탄소섬유판의 보강 효율은 매우 좋은 것으로 평가된다. 그러나 전술한 바와 같이, 에폭시로 탄소섬유판을 매립 부착하지 않고 콘크리트 모르타르에 탄소 섬유판을 직접 매립한 경우에는 탄소섬유판과 콘크리트 사이에 부착파괴가 발생하여 탄소섬유판의 효과를 전혀 기대할 수 없었다. 탄소섬유판은 콘크리트와 탄소섬유판의 부착강도를 충분히 확보할 수 있는 에폭시의 사용이 필수적이다. 따라서 탄소섬유판을 보수 보강이 아닌 신 구조물에 직접 활용하기 위해서는 새로운 방법의 부착방식에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 콘크리트 타설시 탄소섬유판을 직접 매립한 경우의 탄소섬유판 변형율은 약 2,000 $\mu\epsilon$ 내외로서 외부하중에 대해 전혀 지지를 못하고 있는 것으로 나타났다.

3.3 탄소섬유판 보강보의 균열 및 파괴 양상

탄소섬유판을 표면에 매립하여 에폭시로 부착 보강한 철근 콘크리트 보(NSM1-E(A,B) 및 NSM2-E(A,B))의 파괴는 초기 균열 발생과 함께 시작되며, 초기균열은 탄소섬유판의 보강과

관계없이 일정하게 30-47kN 수준에서 발생하며 휨 균열이 확대되고 전파되었다. 그러나 초기균열 발생 이후 보강 콘크리트 부재는 저항능력이 매우 뛰어나 균열폭이 미세하게 발생하고 있으며 매우 균일한 균열양상을 보이고 있다. 철근이 항복한 이후 탄소섬유판의 저항능력은 더 크게 나타나고 있으며, 처짐을 억제하는 효과가 큰 것으로 나타났다. 탄소섬유판 보강율이 0.0005인 부재 NSM1-E(A)부재의 파괴(Fig. 8)는 매립 탄소섬유판의 인장 파괴로 인하여 시작되며, 파괴는 단계적으로 일어나는 것으로 나타났다. 보에 매립된 탄소섬유판은 철근콘크리트 부재와 합성거동을 일으키면서 섬유판의 인장파괴가 유도되며, 매우 점진적인 파괴가 발생되었다. 탄소섬유판은 하중이 증가함에 따라 섬유 결 방향으로 분리되기 시작하였으며, 극한 상태에 도달하면서 매립 탄소섬유판의 모든 섬유 소선이 풀리는 완전한 분리 양상을 나타내고 있다. 또한 탄소섬유판이 부분적으로 파단되면서 하부 단면 복구 모르타르에 균열이 발생하였으나 최종 파괴에 이르기 까지 부재에 부착되어 좋은 효과를 나타내고 있다.

Fig. 9는 탄소섬유판이 2줄로 매립된 NSM2-E(A) 철근콘크리트 부재(탄소섬유판 보강율 0.001)의 파괴형상을 나타낸 것

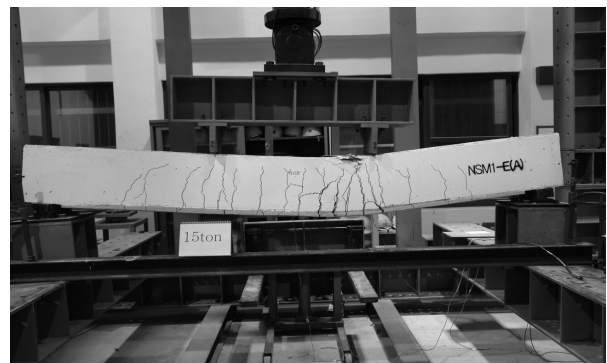


Fig. 8. Failure of the beam of NSM1-E(A)

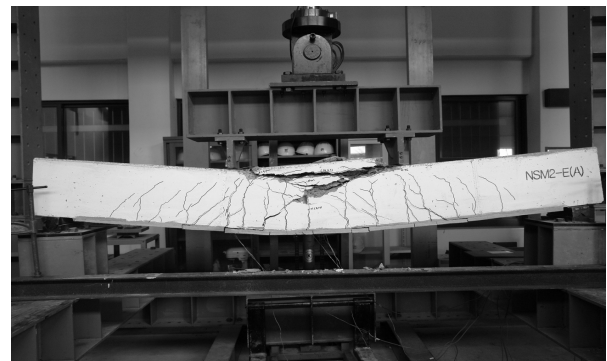


Fig. 9. Failure of the beam of NSM2-E(A)

Table 4. summary of measured strains in NSM CFRP strips

Specimens	NSM Strips	
	Mid* ($\mu\epsilon$)	1/3* ($\mu\epsilon$)
CONTROL		
NSM1-N	1,700	1,470
NSM2-N	2,100	2,300
NSM1-E(A)	16,000	15,000
NSM1-E(B)	14,800	13,200
NSM2-E(A)	15,500	16,120
NSM2-E(B)	16,200	16,100

Mid. : Strain at midpoint from support
1/3 : Strain at a third point from support

이다. NSM2-E(A) 부재는 높은 휨 강도와 보강 효율을 나타내어 다른 콘크리트 보에 비해 처짐이 현저하게 줄어들고 균열의 확대 및 진전이 크게 구속되는 것으로 나타났다. 탄소섬유판을 매립하여 보강하는 공법은 탄소섬유판을 부착하는 공법과 비교하여 탄소섬유판 보강 효과가 현저하게 개선되는 것으로 나타났다. 이것은 탄소섬유판과 콘크리트 구체와의 거의 완전한 합성 거동 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구 결과 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) 탄소섬유판을 에폭시로 부착 매립하여 철근콘크리트 부재를 보강한 부재는 보강되지 않은 부재보다 더 높은 하중에 이르기까지 선형구간이 확대되며, 초기 강성이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 또한 휨강도가 현저하게 증가하여 보강하지 않은 경우보다 약 90%의 강도증진 효과를 나타내고 있으며, 연성이 크게 증가하여 지진등과 같은 충격하중을 받는 구조물 보강에 유리할 것으로 판단된다.
- (2) 에폭시로 탄소섬유판을 매립 부착하지 않고 콘크리트 타설 시 콘크리트 속에 탄소섬유판을 직접 매립한 경우에는 탄소섬유판과 콘크리트 사이에 부착과괴가 발생하여 탄소섬유판의 효과를 전혀 기대할 수 없었다. 따라서 탄소섬유판은 콘크리트와 탄소섬유판의 부착강도를 충분히 확보할 수 있는 에폭시의 사용이 필수적이며, 탄소섬유판을 신 구조물에 직접 활용하기 위해서는 새로운 방법의 부착방식에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 탄소섬유판을 매립하고 표면부에 고성능 모르타르로 단면을 복구하는 보강 방식은 탄소섬유판의 외부적인 손상을 차단하고 내구성을 향상시킬 뿐 아니라 미관이 우수하여 보수와 보강이 혼합된 합리적인 적절한 보강 방식으로 사료된다.
- (4) 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재는 탄소섬유판의 인장 파괴로 인하여 시작되며, 이는 단계적으로 일어나는 것으로 나타났다. 보에 매립된 탄소섬유판은 철근콘크리트 부재와 합성거동을 일으키면서 섬유판의 인장파괴가 유도되며, 매우 점진적인 파괴가 발생되었다.

References

- De Lorenzis, L. and Teng, J.G. (2007) Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. *ELSEVIER, Composite Part B*, Vol. 38, pp. 119-143.
- Hassen, T. and Rizkalla, S. (2004) Bond Mechanism of Near-Surface-Mounted Fiber-Reinforced Polymer Bars For Flexural Strengthening of Concrete Structures. *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 6, pp. 830-838.
- Novidis, D., Pantazopoulou, S.J. and Tentoluris, E. (2007) Experimental study of bond of NSM-FRP reinforcement. *ELSEVIER, Construction Building Materials*, Vol. 27, pp. 1760-1770.
- Rizkalla, S. and El-Hacha, R. (2004) Near-Surface-Mounted Fiber-Reinforced Polymer Reinforcements for Flexural Strengthening of Concrete Structures. *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 5, pp. 717-726.
- Taljusten, B., Carolin, A. and Nordin, H. (2003) Concrete structures strengthened with near surface mounted reinforcement of CFRP. *Adv, Structure Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 201-213.
- Oehlers, D.J., Liu, I. and Seracino, R. (2007) A generic design approach for EB and NSM longitudinally plated RC beams. *ELSEVIER, Construction Building Materials*, Vol. 21, pp. 697-708.
- De Lorenzis, L., Lundgren, K. and Rizzo, A. (2004) Anchorage length of near-surface mounted fiber-reinforced polymer bars for concrete strengthening-experimental investigation and numerical modeling. *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 2, pp. 269-278.
- Seracino, R., Raizal Saifulnaz, M.R. and Oehlers, D.J. (2007) Generic intermediate crack debonding resistance of EB and NSM plate-to-concrete joints. *ASCE Composite Construction Journal*, Vol. 11, No. 1, pp. 62-70.
- Lim, D.H. and Nam M.H. (2008) Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP strips. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, NO. 3, pp. 299-305.
- Lim, D.H. (2008) An Experimental Study on the Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with NSM and EBR CFRP Strips. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 5, pp. 601-610.
- Jung, W.T., Park, J.S., Park, Y.H. and Kang, J.Y. (2007) A Study on Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near Surface Mounted Reinforcement. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 1A, pp. 27-33.
- Jung, W.T., Park, J.S. and Park, Y.H. (2008) Prediction of Failure Modes for Reinforced Concrete Beams Strengthened with NSM CFRP Reinforcement. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 3A, pp. 349-356.
- Jung, W.T., Park, J.S., Park, Y.H. and Kim, C.Y. (2011) Strengthening Effect of Reinforced Concrete Beams Strengthened with NSM CFRP Reinforcements and Various Reinforcement Details. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 6, pp. 781-790.