

격자형 탄소섬유강화플라스틱의 외부부착 보강에 따른 철근 콘크리트 보의 구조적 거동에 관한 실험적 연구*

An Experimental Study on the Structural Behavior of Reinforced Concrete Beam with External Adhesion of CFRP Grid

김상우** · 김건우*** · 김진섭****

Sang-Woo Kim** · Geon-Woo Kim*** · Jin-Sup Kim****

Abstract

The study presents the ductility reinforcement effect of the RC bending member using the CFRP Grid as an experimental result. Experimental variables include a non-reinforced RC bending member (ORI), a bottom reinforced RC bending member (REB), and an RC bending member reinforced at the bottom and side (REBS). The experiment was carried out with four points bending test. As a result of the experiment, it was confirmed that the maximum bending strength increased by 17-20% through reinforcement. In addition, the ductility index calculation results confirmed that the ductility index of REB and REBS increased by 2 and 3 times, respectively, compared to the ORI.

Keywords : CFRP Grid, RC bending Member, FRP, Ductility, Reinforcement Effect

1. 서 론

1.1 연구의 배경

건설구조물의 보강은 건설구조물의 내하력, 강성 등과 같은 역학적 성능을 회복 또는 증진함으로써, 건설구조물의 안정성과 내구성을 확보하고, 사용상의 편의, 그리고 경제적인 가치를 상승 또는 유지·관리를 목적으로 한다. 따라서 부재 및 구조물에 대한 보강공법은 보강목적과 대상 부재의 작업 여건 등과 같은 현장실정이 적절하게 고려되어 합당한 공법과 재료가 선정되어야 한다.

기존 콘크리트 구조물의 보강공법으로 강판접착 공법과 단면증설법이 있다(임정희 외, 2015). 하지만 기존 보강공법은 자중이 크고 앵커를 위한 천공, 강판의 부식으로 인한 성능 저하가 발생하는 단점이 있다(조병환 외, 2003). 그 외 이용공간의 제한이나 건물 하중의 증가 등과 같은 다양한 문제점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 섬유 보강재(FRP)를 이용한 보강법이 개발되었다(이용택 외, 2002; 심종성·김규선, 2000). FRP는 고강도, 비부식성, 경량성, 높은 인장강도 그리고 다양한 형태로 만들 수 있는 성형성 등의 뛰어난 재료적 장점을 가지고 있다.

*본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21CTAP-C157156-02).

**경상국립대학교 토목공학과 박사과정(주저자: kimsangwoo@gnu.ac.kr)

***경상국립대학교 토목공학과 석사과정(rlarjrdnek96@gnu.ac.kr)

****경상국립대학교 토목공학과 부교수(교신저자: jinsup.kim@gnu.ac.kr)

그중 탄소섬유 복합재료(CFRP)는 철 중량의 1/5 정도이지만 강성과 강도가 더 높은 경향을 나타낸다. 이와 같이 철과 알루미늄 등의 금속보다 높은 강도와 경량성을 가지고 있기 때문에 스포츠, 레저, 항공 우주 등 다양한 분야에서 적용되어 사용되고 있다. 최근 건설 분야에서도 구조물의 보수보강 및 유지관리에 대한 관심이 증대되면서 CFRP와 같은 복합재료가 건설구조물의 보수·보강재로 각광받고 있다. 하지만 FRP 보강재는 파단 시까지 소성 변형이 없어 선형 탄성 거동을 나타내며, 인장강도 대비 전단강도가 매우 작고, 응력 파손의 위험이 있으며, 높은 시공비가 요구된다. 또한 보강재 자체가 소성 거동을 하지 않기 때문에 FRP 보강재로 보강된 구조물의 연성적 거동은 매우 취약하다. 따라서 구조물의 연성과 구조 거동에 관한 충분한 연구가 선행되어야 한다(김진섭 외, 2007).

권규빈 외(2020)는 CFRP 플레이트로 보강된 철근콘크리트 보의 장기 사용성을 검토하기 위하여 반복동결융해에 따른 보 부재의 거동특성 및 CFRP 플레이트의 동결융해에 의한 부착특성을 4절점 휨 실험을 통하여 검토하였다. 실험 결과 동결융해 후 보강한 시험체가 보강 후 동결융해된 시험체보다 보강재 박리가 일찍 이루어졌다. 이는 동결융해로 인한 재료의 성질 감소로 판단하며 사용기간 및 환경변수 등을 고려하여 상태평가가 필요하다 제안하였다.

최현 외(2007)는 CFRP Grid로 보강된 철근콘크리트 슬래브의 역학적 거동과 파괴 형태를 실험연구를 통하여 파악하고자 하였다. CFRP Grid를 표면 처리된 RC 슬래브에 앵커 핀을 이용하여 고정 설치하였으며, 리포텍스 접착제를 모르타르 타설 하루 전에 충분히 도포하고 완전히 경화시켰다. 최종적으로 보강 모르타르를 시공하여 미장하여 보강을 하였으며, 하중재하를 통해 실험하였다. 실험 결과 CFRP Grid로 보강된 RC 슬래브가 무보강 RC 슬래브에 비

해 휨강도, 휨강성이 증가하고 균열강도, 휨강도, 극한강도 등의 내력 향상 효과가 우수하게 나타남을 확인하였다.

조병환 외(2003)는 CFRP Grid의 보강 효과를 검증하기 위해 철근 콘크리트 보에 탄소 격자 섬유보강공법을 적용하여 정적 휨 파괴실험을 통해 보강 효과 및 파괴 특성을 분석하였다. 휨 실험 결과 철근에 CFRP Grid를 정착하거나 일정 간격 앵커볼트를 CFRP Grid와 콘크리트에 연결하면 보의 연성이 증가한다는 것을 확인하였으며, CFRP Grid로 보강된 단면은 사용철근비 및 보강재량, 보강길이에 영향을 받는다는 것을 확인하였다. 실험 결과를 바탕으로 압축 부위의 콘크리트가 철근이나 보강재보다 먼저 취성파괴 되지 않도록 CFRP Grid의 적정사용량을 제안하였다.

1.2 연구의 목적 및 방법

본 연구는 격자형 탄소섬유강화플라스틱(이하 CFRP Grid)을 기존의 표면을 깎아 매립 후 모르타르로 매설하는 방식(매설보강공법)이 아닌 표면 처리 후 모르타르가 아닌 접착력이 강한 에폭시 페티를 사용하여 외부 부착하여 보강하였을 때의 보강효과를 나타내고자 한다. 이는 CFRP Plate를 철근콘크리트 보에 휨 보강하는 공법과 동일하다. 무보강 철근콘크리트 보 시험체와 CFRP Grid가 외부 부착된 철근콘크리트 보 시험체의 휨 실험을 통해 파괴 형태와 휨 강도, 연성 등의 구조적 거동 특성을 비교 및 분석함으로써 CFRP Grid를 이용한 철근콘크리트 보의 보강설계 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 실험 설계

2.1 실험체 설계

실험을 위해 철근콘크리트 휨 부재를 Fig. 1과 같이 제작하였다. 휨 부재는 300mm×300mm의 정사

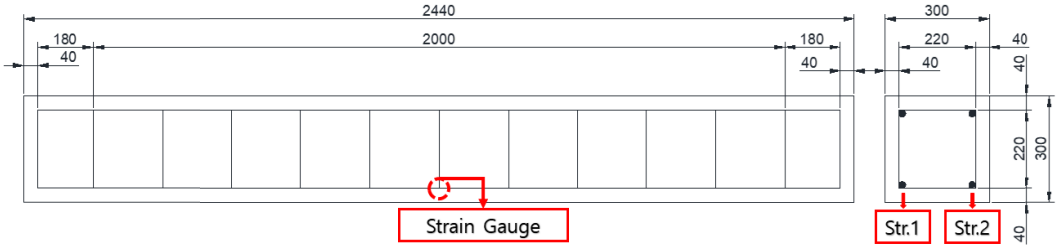


Fig. 1. Dimension of RC Beam Specimen and Location of Strain Gauge

각형 단면에 길이 2440mm의 직사각형으로 설계하였다. 콘크리트는 Ready-Mixed Concrete를 사용하였다. 철근은 압축 측과 인장 측에 각각 2개씩 D19의 주철근을 배치하였다. 보강에 따른 보의 거동을 확인하기 위해 전단 파괴 유도를 위해 D10의 전단 보강근을 시편의 유효깊이의 절반(d/2) 간격 이상인 200mm로 배근하였다. 또한, 전단경간비(a/d)를 짧게 하여 전단 압축 파괴를 유도하였다. 콘크리트 순피복 두께는 40mm로 설계하였다. 휨 부재 내부 인장 주철근의 변형률을 측정하기 위해 각 인장 주철근의 중앙에 철근 변형률 게이지(Wire strain gauge, str.1 & str.2)를 설치하였다.

2.2 사용 재료

사용된 콘크리트의 압축강도는 KS F 2403에 따라 지름 100mm, 높이 200mm의 원주형공시체를 제작하여 24시간 후 물드를 탈영하고 수중양생 하였다. 공시체의 재령 28일 후 기중 양생하였으며, 부재 실험 일과 동일한 날짜에 KS F 2405(2010)에 따라 UTM 장비로 압축강도를 측정하였다. 공시체의 평균 압축강도는 21.81MPa으로 나타났다. 사용된 콘크리트

의 압축강도 실험 결과를 Table 1에 정리하였다.

사용된 철근의 인장강도는 KS B 0802에 따라 UTM 장비로 인장강도를 측정하였다. SD400 등급의 철근을 사용하였으며 실험결과 D10과 D19 철근의 평균 항복강도는 각각 380MPa, 353MPa으로 나타났다. 사용된 철근의 인장강도 실험 결과를 Table 2에 정리하였다.

실험에 사용된 CFRP Grid는 Fig. 2와 같이 ASTM D 3039의 규정에 따른 단축 인장시험을 통해 측정하였다. 총 길이 300mm, 폭 35mm, 두께 0.5mm, Tab의 길이 75mm, Tab의 두께 3mm로 하였다. 시험체의 물림구 부분의 파단을 방지 및 중앙부 파단

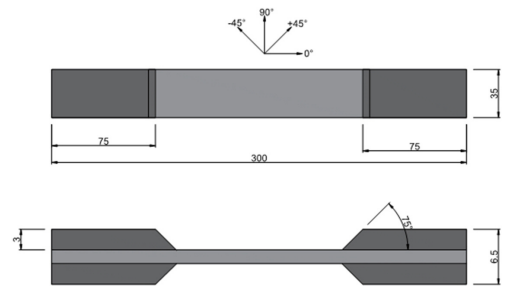


Fig. 2. Tension Test Specimen Drawing

Table 1. Mechanical Property of Concrete

Compressive Strength [MPa]	
21.4	
21.4	21.81
22.6	

Table 2. Mechanical Properties of Steel Rebar

Steel	σ_{yield} [MPa]	$\sigma_{ultimate}$ [MPa]	Elongation [%]
D10	380	566	25
D19	353	537	25

을 유도하기 위해 물림구 부분에 Tab을 씌웠으며, Tab의 길이는 식 (1)을 통해 계산할 수 있다.

$$L_{\min} = F^{tu}h/2F^{su} \quad (1)$$

여기서, L_{\min} 는 최소 접합부 길이, F^{tu} 는 시험체의 극한인장강도, F^{su} 는 접착제, 시험체 또는 탭의 최대 전단강도(그 중 가장 작은 값 사용), h 는 시험체 두께이다. 평균 인장강도는 1043MPa, 탄성계수는 1.02E05MPa, 극한변형률은 0.01로 나타났다. 사용된 CFRP Grid의 인장강도 실험 결과를 Table 3에 정리하였다. 보강 면의 프라이머로 사용된 에폭시 레진은 W사의 150 Resin과 205 Hardener를 5:1로 혼합하여 사용하였다. CFRP Grid의 보강에 사용된 에폭시 퍼티는 E사의 E-004를 주제와 경화제 1:1로 혼합하여 사용하였다. 실험에 사용된 에폭시들의 물성은 Table 4와 5에 정리하였다.

Table 3. Mechanical Properties of CFRP Grid

Type	$\sigma_{ultimate}$ [MPa]	Elastic Modulus [MPa]	$\epsilon_{ultimate}$ (%)
CFRP Grid	1,949	186,000	1.05

Table 4. Mechanical Properties of Epoxy Resin

Type	Compressive Strength [MPa]	Tension Strength [MPa]	Flexural Strength [MPa]
Epoxy Resin	78.72	54.10	97.23

Table 5. Mechanical Properties of Epoxy putty

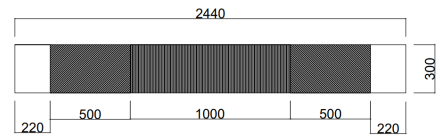
Type	Compressive Strength [MPa]	Tension Strength [MPa]	Adhesive Strength [MPa]
Epoxy putty	53	18.4	8.5

2.3 보강설계

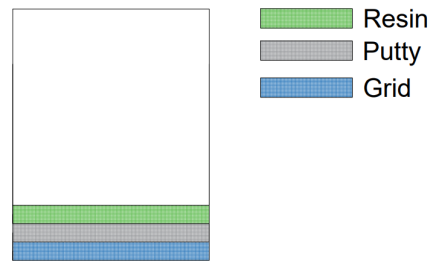
Grid의 보강 면적에 따른 철근콘크리트 휨 부재의 보강 효과를 검토하기 위해 비보강 철근콘크리트 휨 부재(ORI)와 하단면을 보강한 철근콘크리트 휨 부재(REB), 그리고 하단과 측면을 보강한 철근콘크리트 휨 부재(REBS)로 보강 설계하였다.

REB의 보강 면적은 하단 양끝 220mm를 제외하고 2000mm×300mm이다. 모든 보강재의 길이는 1000mm로 부재 중심에 1차 부착 후 각 사이드에 500mm의 겹침 이음이 되도록 2차 부착해 보강하였다. REBS의 보강면적은 REB와 동일한 면적으로 하단, 측면 2면(총3면)을 보강하였다. 보강면적 상세는 Fig. 3(a)와 같다.

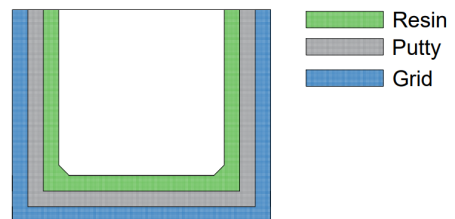
보강순서는 보강 면 정리, 에폭시 레진 도포, 에폭시 퍼티 도포, 보강재 부착 순으로 수행하였으며 2번



(a) Reinforcement Area



(b) Section of REB



(c)Section of REBS

Fig. 3. Details of Reinforcement

반복하여 보강재를 부착하였다. 따라서 보강면적 양 끝 500mm×300mm의 면적에는 총 2점의 Grid가 부착되어 있으며 중심부 1000mm×300mm의 면적에는 총 4점의 Grid가 부착되어 있다. 보강 상세는 Fig. 3과 같다.

2.4 실험 세팅 및 가력 계획

본 시험은 50ton 용량의 Actuator를 이용한 양단 지지 단순보 시험으로 시험체의 휨 성능평가를 위해 Fig. 4와 같이 4 절점 휨 실험을 계획하였다. 인장 철근 중앙 지점에 스트레인 게이지를 2개를 부착하여 콘크리트 내부 변형률을 측정하였다. 처짐을 측정하기 위해 Actuator의 하부에 와이어 형식의 LVDT-3,4를 가력 지점 시편하단과 LVDT-2를 시험체 중심하단에 설치하여 측정하였다. 가력 계획은 5mm/min의 변위 제어 방식으로 130mm까지 단순 가력 하였다.

3. 실험결과 및 분석

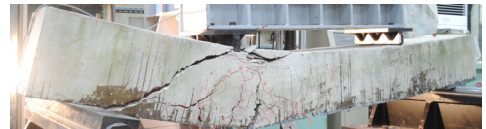
3.1 최종파괴형태

각 시험체의 최종파괴 형태를 Fig. 5에 나타내었다. ORI와 REB는 전단 파괴 유도로 인해 가력변위 10~20mm에서 휨과 전단 균열이 발생하여 20~30

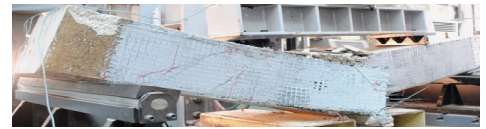
mm에서 분포가 확산되었으며, 30~40mm에 도달 하였을 때 좌측 전단균열이 크게 나타나면서 최종적으로 전단 파괴가 나타났으나, REB의 경우 하단 CFRP Grid의 보강으로 주철근 양의 증대와 같은 효과에 의한 전단균열의 억제가 나타났다. REBS는 ORI와 REB와 유사하게 가력변위 10~20mm에서 휨과 전단 균열이 발생하지만 측면에 부착된 CFRP Grid의 전단 보강 역할을 하며 전단 파괴에서 휨 파괴로 파괴 모드가 변화가 나타났다. 하지만 전단보강이



(a) ORI

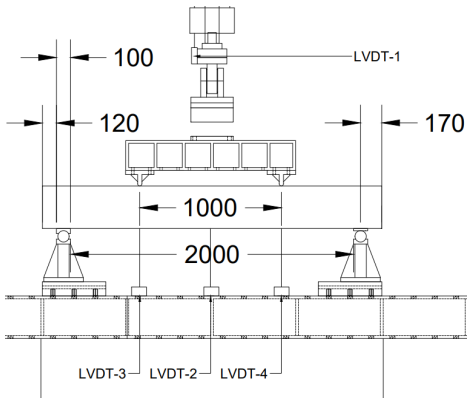


(b) REB



(c) REBS

Fig. 5. Final Failure Mode of RC Beams



(a) Test Setting



(b) View of Test Setting

Fig. 4. Test Setting for RC Beam's 4 Point Bending Test

제대로 이루어지지 않아 보강 후에도 REB와 REBS의 압축부 파괴가 일어났다.

3.2 하중-변위

보강에 따른 철근 콘크리트 휨 부재의 거동을 Fig. 6과 같이 하중 변위 이력 곡선을 통해 나타내었다. CFRP Grid 보강을 통해 ORI의 항복하중 대비 약 14~21%의 강도 상승이 나타났다. 또한, 최대 하중의 경우 최대 20% 강도 증가 효과가 나타났다. 최대 하중 이후 강도 감소에서 보강한 시험체의 경우 강도 감소가 20% 이하로 변위 35mm 이후 강도 ORI에 비해 연성적 거동이 157~201%로 크게 증가하였다.

REB는 하단 보강으로 인해 전단 균열의 억제가 일어나 휨 균열이 동반되었지만 최종적으로 전단파괴가 일어났다. 이후 FRP의 인장력 부담의 증가로 인해 변위 90mm에서 최종 파괴가 일어났으나 보강재의 박리현상은 나타나지 않았다. REBS의 경우 측면

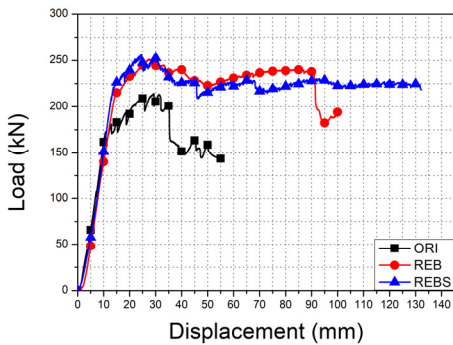


Fig. 6. Load-Displacement Relation Curve

부착으로 인한 전단 보강이 일어나 변위 30mm부터 전단 및 휨 균열이 동반하였으나, 전단 균열의 확장 없이 휨 파괴로 이어지며 변위 65mm에서 휨 파괴에 의한 보강재 박리가 나타났다. 변위 95mm에서 측면 보강재 박리가 발생하였다. 이를 통해 하단과 측면 보강을 통해 전단 보강이 이루어져 휨 파괴로 파괴 모드가 변했으며, 추가적인 휨 보강을 통해 REB시편과 비교 시 더 안정적인 보의 거동이 나타났다. 실험 결과는 Table 6과 같다.

3.3 연성 및 보강효과

각 철근콘크리트 휨 부재의 보강에 따른 연성을 평가하기 위해 연성지수를 계산하여 평가하였다. 식은 최대강도 발생 이후 최대강도의 80%에 해당하는 강도의 변위를 항복 발생 변위로 나누어 계산하였다. 연성지수 계산식은 식 (2)와 같다.

$$\Delta_u = \frac{0.8\phi_{max}}{\phi_y} \tag{2}$$

여기서, ϕ_y 는 Strain gauge의 항복점의 변위, $0.8\phi_{max}$ 는 최대 강도 이후 최대 강도의 80%에 해당하는 강도의 변위, Δ_u 는 연성지수이다. 철근 항복 변형률에 맞춰 Fig. 6과 같이 Strain gauge가 항복 변형률이 되는 지점에서의 변위를 측정하였다. 또한, 보강에 따른 강도 측정을 위해 기준 실험체인 ORI의 최대강도를 보강 실험체 최대강도에 나눠 Table 6에

Table 6. Test Result

	Yielding State		Peak State		*Inc. Ratio	0.8*Peak State		Ductility Index
	P_y (kN)	ϕ_y (mm)	P_{max} (kN)	ϕ_{max} (mm)		$0.8P_{max}$ (kN)	$0.8\phi_{max}$ (mm)	$0.8\phi_{max}/\phi_y$
ORI	127.23	8.3	214.29	26.24	1	172.43	35.34	4.26
REB	164.94	11.61	251.14	27.33	1.17	200.8	91.69	7.9
REBS	168.36	10.87	256.83	24.44	1.2	-	-	-

*Reinforcement Effect

Reinforcement Effect(이하, 보강 효과)를 나타냈다.

ORI는 4.26, REB는 7.9로 하단 보강으로 연성지수가 1.85배 증가함이 나타났다. REBS의 경우 최대강도 이후 80%에 해당하는 강도까지 떨어지지 않아 연성지수 측정이 불가하였다. 보강 효과의 경우 REB는 ORI에 비해 1.17배 상승하였으며 REBS는 1.2배 상승이 나타났다.

4. 결론

본 연구는 CFRP Grid를 활용하여 전단 파괴 유도 철근콘크리트 휨 부재를 보강하여 휨 실험을 통해 파괴 형태와 하중-변위, 연성 등의 구조적 거동 특성을 분석하였다.

Grid의 하단 및 측면 보강 모두 전단 파괴 억제 및 휨 강도와 연성의 보강 효과를 나타낸 것으로 평가되며, 특히 측면 보강까지 한 REBS의 경우 전단파괴 휨 부재의 휨 파괴 유도 효과를 나타내어 Grid의 외부보강에 따른 연성 파괴 유도 효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

REB와 REBS의 최대휨강도의 보강 효과는 REB는 약 17%, REBS는 약 20%로 나타났으며, 연성에 대한 보강 효과는 REB는 약 85%로 나타났다. 따라서 Grid를 활용하여 구조물을 보강한다면 휨 강도 대비 연성 보강 효과가 크게 나타날 것으로 판단된다.

본 연구는 CFRP Grid의 외부부착에 따른 보강 효과 및 최종파괴 형태 변화를 확인하였다. 하지만, CFRP Grid 외부부착에 따른 보강 효과 및 최종파괴 형태 변화 특성을 정립하기 위해서는 다양한 제원 및 변수로 설계된 보의 추가 실험할 필요가 있다.

참고문헌

1. 권규빈·이동주·김경민·권민호·김진섭(2020), "RC 보에 부착된 CFRP 플레이트의 동결융해에 의한 부착 거동 연구", 「복합신소재구조학회논문집」, 11(2): 1~6.
2. 김진율·김광수·박선규·이영재(2007), "CFRP가 보강된 철근콘크리트 보의 거동과 연성", 「콘크리트학회논문집」, 19(2): 225~231.
3. 심종성·김규선(2000), "건설 분야에서의 FRP 활용", 「콘크리트학회지」, 12(6): 37~43.
4. 이용택·나정민·김승훈·이리형(2002), "탄소섬유시트로 전단보강된 철근콘크리트 기둥의 거동", 「대한건축학회논문집 구조계」, 18(4): 111~118.
5. 임정희·권민호·서현수·김진섭(2015), "FRP 패널로 보강한 강골조의 가이드 시스템에 따른 성능평가", 「복합신소재구조학회논문집」, 6(2): 46~51.
6. 조병환·태기호·권오혁(2003), "격자형 탄소섬유로 보강한 R/C보의 보강효과", 「콘크리트학회논문집」, 15(3): 377~385.
7. 최현·김찬규·최병주·김옥규(2007), "CFRP Grid로 보강된 RC슬래브의 파괴거동특성", 「대한건축학회논문집」, 23(2): 19~26.

요약

본 연구에서는 그리드를 이용한 철근콘크리트 휨부재의 연성보강 효과를 실험결과로 제시했다. 실험변수로는 비보강 철근콘크리트 휨부재(ORI), 바닥면 보강 철근콘크리트 휨부재(REB), 바닥 및 측면 보강 철근콘크리트 휨부재(REBS)가 있다. 실험은 4절점 휨 실험으로 수행되었다. 실험 결과, 보강을 통해 최대 휨강도가 17~20% 증가하였고, 측면 보강을 통해 휨 파괴 유도를 통한 연성보강 효과를 확인하였다. 또한, 연성지수를 계산하여 REB와 REBS의 연성지수가 ORI 대비 각각 2배, 3배 증가하였음을 확인하였다.

주제어 : 격자형 탄소섬유강화플라스틱, 철근콘크리트 휨 부재, 복합재료, 연성, 보강효과