

하이브리드 휨 보강 고강도 콘크리트 보의 성능 평가

Behavior of High Strength Concrete Beams with Hybrid Flexural Reinforcements

양 준 모* 민 경 환* 김 영 우** 윤 영 수***
Yang, Jun Mo Min, Kyung Hwan Kim, Young Woo Yoon, Young Soo

ABSTRACT

In a tension-controlled section, all steel tension reinforcement is assumed to yield at ultimate when using the strength design method to calculate the nominal flexural strength of members with steel reinforcement arranged in multiple layers. Therefore, the tension force is assumed to act at the centroid of the reinforcement with a magnitude equal to the area of tension reinforcement times the yield strength of steel. Because FRP materials have no plastic region, the stress in each reinforcement layer will vary depending on its distance from the neutral axis. Similarly, if different types of FRP bars are used to reinforce the same member, the stress level in each bar type will vary, and the member will show different behavior from our expectation.

In this study, six high-strength concrete beam specimens reinforced with conventional steels, CFRP bars, and GFRP bars as flexural reinforcements were constructed and tested. The members reinforced with hybrid reinforcements showed higher stiffness, smaller crack width, and better ductility than the members reinforced with single type of FRP bars.

요 약

철근으로 휨 보강된 일반적인 부재의 경우, 강도설계법으로 부재의 공칭 휨 강도를 계산할 때 모든 휨 인장 철근은 극한상태에서 항복한다고 가정한다. 따라서 인장력은 철근의 도심에 작용하고 인장 철근 단면적과 철근의 항복강도의 곱으로 표현될 수 있다. 그러나 FRP bar는 철근과 달리 항복거동을 보이지 않기 때문에 각 열 FRP bar에 작용하는 응력은 중립축에서 떨어진 거리에 따라 달라질 것이다. 게다가 서로 다른 종류의 FRP bar가 동시에 한 부재에 적용된다면, 각 FRP bar의 변형률에 따라 작용하는 응력 또한 다양하게 될 것이고, 거동 양상 역시 예상과 다르게 나타날 것이다.

이에 본 연구에서는 일반철근, CFRP bar, GFRP bar를 이용하여 하이브리드 휨 보강된 6개의 고강도 콘크리트 보를 제작하고 구조실험을 실시하였다. 실험 결과 하이브리드 보강된 부재는 FRP bar로 단순 보강된 부재의 낮은 강성, 큰 균열폭, 취성 문제를 상당히 보완시켜주는 것으로 나타났다.

* 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정

** 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정

*** 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 교수

1. 서론

최근 우수한 부식저항성 때문에 많은 연구가 진행되고 있는 FRP bar는 철근과 달리 항복거동을 보이지 않기 때문에 각 열 FRP bar에 작용하는 응력은 중립축에서 떨어진 거리에 따라 다르게 나타난다. 만약 서로 다른 종류의 FRP bar가 동시에 한 부재에 적용된다면, 각 FRP bar의 변형률에 따라 작용하는 응력 또한 다양하게 될 것이고, 거동 양상 역시 예상과 다르게 나타날 것이다. 그러나 이러한 서로 다른 종류의 FRP bar를 동시에 동일 부재에 적용한 연구는 전무한 실정이고, ACI 440.1R-06 가이드라인에서도 한 종류의 FRP bar로 보강된 직사각형 보로 그 적용 범위를 제한하고 있다. 이에 본 연구에서는 일반철근, CFRP bar, GFRP bar를 이용하여 하이브리드 휨 보강된 부재의 성능 평가를 실시하였다.

2. 실험

하이브리드 보강 고강도 콘크리트 구조물의 휨 거동 평가를 위해 휨 보강근 종류(일반 철근, GFRP bar, CFRP bar), 휨 보강근 배열을 실험 변수로 하는 총 6개의 시험체를 제작하였다. 실험 변수 상세를 표 1에, 시험체 상세를 그림 1에 나타내었다. 모든 시험체는 단면 폭(b) 230mm, 유효깊이(d) 184mm, 높이(h) 250mm, 총 길이(L) 2300mm, 전단지간-유효깊이 비(a/d) 4.32로 하였고, 유사한 극한 모멘트를 가지도록 설계되었다. 전단파괴를 방지하기 위해 80mm 간격으로 전단철근을 배근하였고, 주철근의 정착길이를 확보를 위해 양단에 200mm 씩 여유길이를 두었다. 모든 휨 보강재의 중앙에 스트레인 게이지를 부착하였고, 압축부와 인장부의 콘크리트 변형률 측정을 위해 콘크리트 매립 스트레인 게이지를 부재 중앙 상, 하단에 매설하였다. 또한, 지점부의 변위와 보 중앙의 변위를 Linear Variable Differential Transducers (LVDTs)로 측정하여 실제 보의 처짐을 구하였고, 가력장치는 500 kN 용량의 액츄에이터(actuator)를 사용하였으며 2점 가력을 하였다.

표 1 실험 변수 상세

실험 변수	휨 보강근 종류 및 배열
Beam SS	위 : Steel, 아래 : Steel
Beam CC	위 : CFRP bar, 아래 : CFRP bar
Beam GG	위 : GFRP bar, 아래 : GFRP bar
Beam SC	위 : Steel, 아래 : CFRP bar
Beam SG	위 : Steel, 아래 : GFRP bar
Beam CG	위 : CFRP bar, 아래 : GFRP bar

표 2 FRP bar 물성치

Bar type	Nominal Diameter (mm)	Nominal Area (mm ²)	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Bond strength (MPa)
CFRP bar (9mm)	9.25	67.17	138.4	2016.0	16.9
GFRP bar (13mm)	13.2	137.2	44.4	868.1	16.8

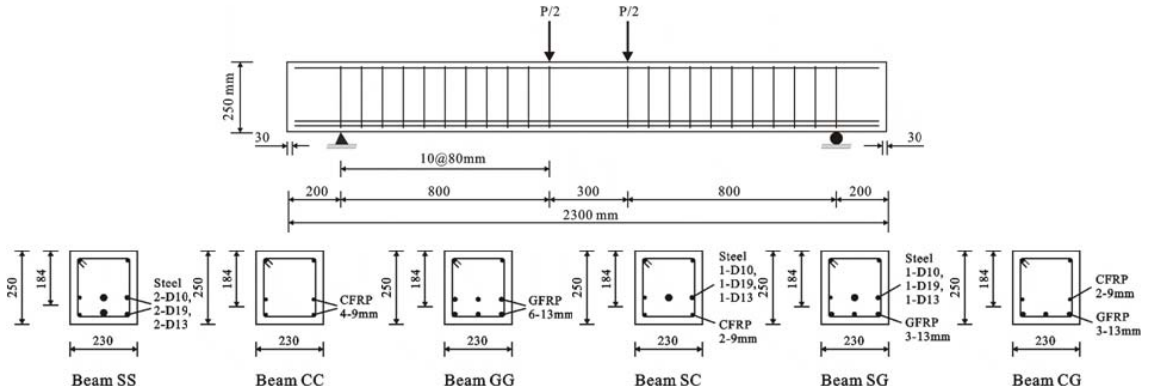


그림 1 시험체 상세

FRP bar는 국내 D사의 직경 13mm GFRP bar와 직경 9mm CFRP bar를 사용하였으며, 그 물성치는 표 2와 같다. FRP bar의 인장 시험 및 공칭 단면적 환산을 위한 실험은 ACI 440.3R-04, “Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures”에 준하여 실험하였다. 일반 철근은 D10, D13, D19 세 종류의 SD400 철근을 사용하였다. 실험 당일 100×200mm의 공시체로 측정된 콘크리트의 평균 압축강도 f_{ck} 는 81.4 MPa이었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 최대 모멘트

실험 결과 측정된 최대 모멘트 값($M_{n,test}$)과 ACI 318-05, ACI 440.1R-06에서 제안하는 예측식을 토대로 계산한 최대 모멘트 값($M_{n,ACI}$)을 표 3에 정리하였다. 표 3을 살펴보면, 전체적으로 예측식과 실험 결과 값이 유사하게 나타났고, 일반 철근이 사용된 시험체 Beam SS, SC, SG가 대체적으로 다소 낮은 $M_{n,test}/M_{n,ACI}$ 를 나타내었다.

표 3 최대 모멘트

Specimen	$M_{n,test}$ (kN-m)	$M_{n,ACI}$ (kN-m)	$M_{n,test}/M_{n,ACI}$
Beam SS	79.2	80.6	0.98
Beam CC	84.8	75.9	1.12
Beam GG	82.7	75.4	1.10
Beam SC	77.6	77.7	1.00
Beam SG	82.1	77.3	1.06
Beam CG	81.3	75.5	1.08

3.2 중앙 처짐

최대모멘트 - 중앙처짐 곡선을 그림 2에 나타내었다. 최초 콘크리트 휨 균열이 발생하기 전에는 모든 시험체가 동일한 강성을 가지고 유사하게 거동하였다. 추가 하중이 가해진 후 재하 모멘트가 균열 모멘트(M_{cr})를 넘어서면서 중앙부에 최초 휨 균열이 발생하였고, 그 이후부터 각 시험체의 거동 양상이 달라지기 시작하였다. 먼저 최초 휨 균열이 발생된 후 Beam CC의 강성은 Beam SS의 강성보다 낮게, Beam GG의 강성은 Beam CC의 강성보다 낮게 나타났다. 이는 Steel, CFRP bar, GFRP bar의 서로 다른 탄성계수와 휨 보강근 비 때문으로, 계산된 축방향 강성($E_r A_r$) 차이와 유사하게 나타났다. 또한, Beam SS는 상당한 연성 거동을 보이고 균열 발생 시 갑작스런 하중감소를 보이지 않은 반면, Beam CC, GG는 취성적인 거동을 보였고, FRP bar의 낮은 탄성계수 때문에 균열 발생 시 갑작스런 하중 감소 현상이 나타났다. 하이브리드 배근된 Beam SC, SG, CG는 각각 Beam SS와 Beam CC, Beam SS와 Beam GG, Beam CC와 Beam GG의 중간 정도의 강성 및 처짐 양상을 보였다.

3.3 균열 검토

모든 시험체의 균열 양상은 그림 4에 나타내었다. 최초 휨 균열은 순수 휨 구간 내에서 발생하였고, 최대 주응력 방향의 직각방향으로 발생하는 수직 방향 균열로 나타났다. 하중이 증가함에 따라 전단 응력이 더 중요하게 작용하면서 경사 균열이 발생하기 시작하였고, 압축부 콘크리트의 압축파괴가 발생하면서 종국 파괴되었다. FRP bar가 사용된 시험체들은 FRP bar의 낮은 탄성계수 때문에 수직 방향 휨 균열이 압축부 콘크리트 근처까지 진전되었다.

그림 3의 최대모멘트 - 최대균열폭 곡선을 살펴보면 탄성계수가 작은 FRP bar의 사용이 균열폭을 증가시키는 것을 알 수 있다. 또한, Beam CC가 Beam GG보다 더 큰 균열폭 및 균열폭의 증가를 보였다. 하이브리드 배근된 Beam SC, SG, CG는 각각 Beam SS와 Beam CC, Beam SS와 Beam GG,

Beam CC와 Beam GG의 중간 정도의 균열폭 양상을 보였다. 특히, 일반 철근과 하이브리드 배근된 Beam SC, SG는 일반 철근의 영향 때문에 Beam CC, GG의 큰 균열폭을 상당히 제어할 수 있었다.

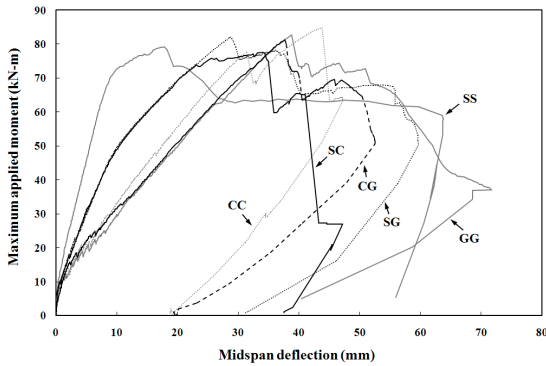


그림 2 최대모멘트 - 중앙처짐 곡선

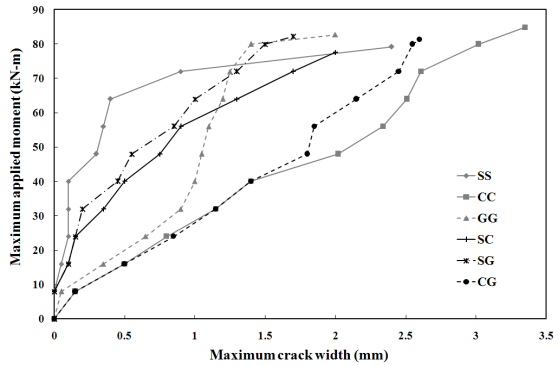


그림 3 최대모멘트 - 최대균열폭 곡선

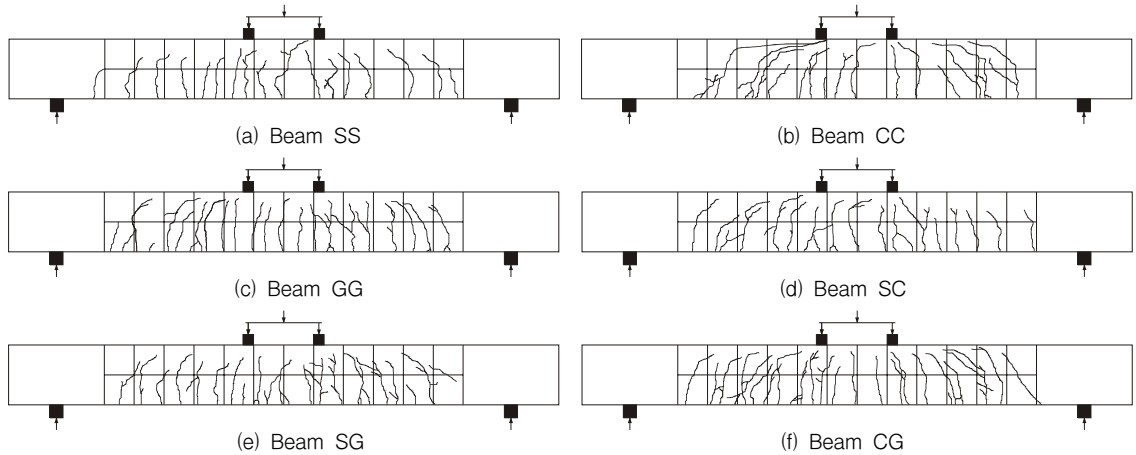


그림 4 균열 양상

4. 결 론

FRP bar의 낮은 탄성계수 때문에 CFRP bar와 GFRP bar로 보강된 부재는 Steel로 보강된 부재보다 작은 강성, 큰 처짐, 큰 균열폭을 나타내었다. Steel, CFRP bar, GFRP bar로 하이브리드 보강된 부재는 FRP bar로만 단순 보강된 부재의 낮은 강성, 큰 처짐, 큰 균열폭 문제를 상당히 보완시켜주는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설핵심기술연구개발사업(Center for Concrete Core, 05-CCT-D11)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. ACI Commitee 440, 2006, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars (440.1R-06)," American Concrete Institute, Farmington Hill, Mich., 44pp.