GFRP 보강근 콘크리트 보의 휨균열

Flexural Crack for Fiber-Reinforced-Polymer Reinforced Concrete Beams

박 종 섭* 박 영 환** 유 영 준***
Park, Jong Sup Park, Young Hwan You, Young Jun

ABSTRACT

The use of FRP(Fiber Reinforced Polymer) bars to replace conventional steel bars in reinforcing concrete structures is currently encouraged by many structural engineers, especially for their noncorrosive properties. The partial inferiority of the bond and mechanical properties for FRP bars, however, leads to wider and deeper cracks compared with those of steel reinforced concrete structures. This paper presents experimental results of concrete beams reinforced with FRP bars tested under static loading conditions up to failure. The study focuses on the effects of the reinforcement ratio on the behavior of concrete beams at various stages during loading. The study also attempts to establish a theoretical basis for the development of simple and rational design procedures for concrete beams reinforced with FRP bars.

요 약

기존의 콘크리트 구조물은 콘크리트만으로는 부족한 인장력 강화를 위해 철근을 보강근으로 사용하여 구조물을 형성하였으며, 이러한 철근콘크리트 구조물 시스템 내에서 철근은 사용연한이 지날수록 염분 및 습기, 염화물 등 외부환경에 의해 부식된다. 이러한 철근의 부식은 최종적으로 콘크리트 구조물의 성능 저하와 수명 단축을 유발시키는 주요 원인이 된다. 이와 같은 이유로 최근 Fiber Reinforced Polymer(FRP)를 이용하여 철근을 대체할 수 있는 보강근을 개발하고자 하는 연구가 활발히 진행 중이다. FRP 보강근은 철근에 비해 고강도를 발휘할 수 있을 뿐 아니라, 비부식성이기 때문에 기존 철근의 부식 문제를 해결할 수 있는 장점이 있다. 그러나 FRP 보강근은 철근에 비해 낮은 탄성계수와 부착강도로 인해 동일 하중 수준에서 철근 콘크리트보다 균열폭이 커지고 균열이 크게 진행하는 단점을 갖고 있다. 본 연구에서는 FRP 보강근 콘크리트 보와 기존의 철근콘크리트 보에 대한 정적 재하 실험을 통해 보강근의 종류와 보강근의 배치, 보강비 등에 따른 균열 거동과 파괴 모드의 변화를 고찰하였으며, 설계기준식과 측정값과의 비교를 통해 FRP 보강근 콘크리트의 균열평가에 대한 설계기준식의 타당성을 검토하였다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템연구실 선임연구원
** 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템연구실 책임연구원
*** 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템연구실 선임연구원

1. 서론

기존의 콘크리트 구조물은 콘크리트만으로는 부족한 인장력 강화를 위해 철근을 보강근으로 사용하여 구조물을 형성하였으며, 이러한 철근콘크리트 구조물 시스템에서는 사용연한이 지날수록 염분 및 습기, 염화물 등 외부환경에 의해 콘크리트의 알칼리성이 분해되어 내부에 보강된 철근이 부식된다. 이러한 철근의 부식은 최종적으로 콘크리트 구조물의 성능 저하와 수명 단축을 유발시키는 주요 원인이 된다. 이와 같은 이유로 최근 Fiber Reinforced Polymer(FRP)를 이용하여 철근을 대체할 수 있는 보강근을 개발하고자 하는 연구가 활발히 진행 중이다. FRP 보강근은 철근에 비해 고강도를 발휘할 수 있을 뿐 아니라, 비부식성이기 때문에 기존 철근의 부식 문제를 해결할 수 있는 장점이 있다. 그러나 FRP 보강근은 철근에 비해 낮은 탄성계수와 부착강도로 인해 동일 하중 수준에서 철근 콘크리트보다 균열폭이 커지고 균열이 크게 진행하는 단점을 갖고 있다. 본 연구에서는 FRP 보강근 콘크리트 보와 기존의 철근콘크리트 보에 대한 정적 재하 실험을 통해 보강근의 종류와 보강근의 배치, 보강비 등에 따른 균열 거동과 파괴 모드의 변화를 고찰하였으며, 설계기준식과 측정값과의 비교를 통해 FRP 보강근 콘크리트의 균열평가에 대한 설계기준식의 타당성을 검토하였다.

2. 재하 실험

실험체는 보강근의 개수를 변수로 하는 실험체와 보강근의 직경을 변수로 하는 실험체로 나누어 제작되었다. 실험체의 주인장 보강근은 변수에 따라 각각 철근과 GFRP 보강근이 사용되었으며, 주인장 보강근을 제외한 스터럽과 압축철근은 모두 철근을 사용하였다. 모든 실험체는 휨파괴 이전에 전단파괴가 발생하지 않도록 소요 전단력 이상의 전단저항을 갖도록 그림 1과 같이 전단철근을 배근하였다.

Gergely-Lutz 등의 연구에 따르면 균열폭은 콘크리트의 인장유효단면적, 철근의 수, 덮개에 크게 영향을 받는다(Park & Paulay, 1975). 또한 Frosch(1999)에 따르면 철근 간격도 균열폭을 결정하는데 주요 요소로 작용한다. 따라서 본 실험에서는 보강근의 배근간격과 콘크리트 유효인장단면적의 변화를 고찰하기 위해 보강근의 수를 변수로 하였다. 한편 ACI 440.1R(2006) 또는 ISIS의 규준(2001)에서는 철근 콘크리트와 동일한 균열폭 계산식에 FRP 보강근의 부착특성만을 고려하여 균열폭을 계산하도록 규정하고 있다. 본 실험에서는 철근과 FRP 보강근의 균열거동 특성을 비교하기 위해 동일 직경의 보강근과 철근을 각각 변수로 설정하였다. 그림 2에는 본 실험에서 사용된 실험체에 대한 변수 해설을 나타냈다.

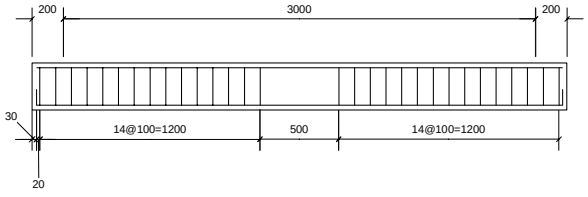


그림 1. 실험체 배근상세

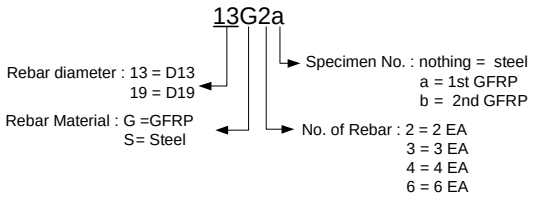


그림 2. 실험체 변수 해설

실험체에 대한 재하는 모두 4점 휨 재하방법으로 하였으며, 980kN 용량의 만능실험기를 사용하여 재하하였다. 하중은 변위제어방식에 의해 재하되었으며, 초기 10mm 변위 발생시까지는 초당 0.02mm의 속도로 10mm 이후에는 초당 0.05mm의 속도로 최종 파괴시까지 재하하였다. 재하시 균열폭 측정을 위해 매 4.9kN 단위로 재하를 일시 중지하였으며, 균열 측정이 완료된 후 재하를 계속하였다. 균열

은 정밀도 1/100mm의 레이저 균열폭 측정기를 이용하여 매 하중 단계마다 측면 최하단에서의 균열폭을 수동으로 측정하였다.
실험체에는 중앙단면 보강근에 보강근용 변형률 게이지를 설치하였으며, 중앙단면의 측면 콘크리트 상단에는 콘크리트의 압축변형률을 측정하기 위한 변형률 게이지를 설치하였다. 실험체의 변위는 경간 중앙과 1/4지점에 설치된 LVDT를 이용하여 측정하였다.

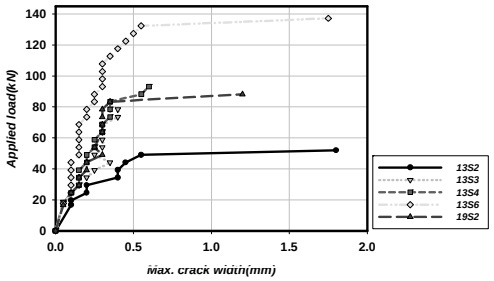
3. 실험 결과 및 분석

3.1 파괴 모드 및 최대 하중

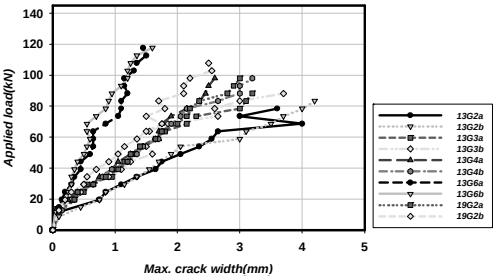
표 1에는 각 실험체의 균열하중과 최대하중 및 파괴모드를 나타냈다. 모든 철근 콘크리트 실험체는 철근 항복 후 압축파괴로 파괴되었으며, FRP 보강근 콘크리트 실험체는 인장파단 없이 압축파괴가 발생했다. 동일한 직경의 보강근으로 보강된 철근 콘크리트 실험체와 GFRP 보강근 콘크리트 실험체를 비교하면 균열하중은 철근 콘크리트 실험체가 큰 것으로 나타났으며, 최대하중은 GFRP 실험체가 더 큰 것으로 나타났다.

표 1. 실험 결과 요약

실험체명	균열하중 (kN)	최대하중(kN)		①/②	파괴모드
		실험값 ①	계산값 ②		
13S2	1.7	60.46	55.80	1.08	철근항복
13G2a	1.2	92.77	81.96	1.13	압축파괴
13G2b	0.9	93.31	81.96	1.14	압축파괴
13S3	1.9	85.42	82.29	1.04	철근항복
13G3a	1.4	106.88	97.65	1.09	압축파괴
13G3b	1.2	117.75	97.65	1.21	압축파괴
13S4	1.8	97.05	101.18	0.96	철근항복
13G4a	1.3	105.92	100.28	1.06	압축파괴
13G4b	1.3	108.19	100.28	1.08	압축파괴
13S6	1.8	141.56	146.13	0.97	철근항복
13G6a	1.5	128.25	118.10	1.09	압축파괴
13G6b	1.2	143.58	118.10	1.22	압축파괴
19S2	1.7	96.27	90.03	1.07	철근항복
19G2a	1.3	130.97	115.60	1.13	압축파괴
19G2b	1.3	132.85	115.60	1.15	압축파괴



(a) 철근 콘크리트 실험체 그룹

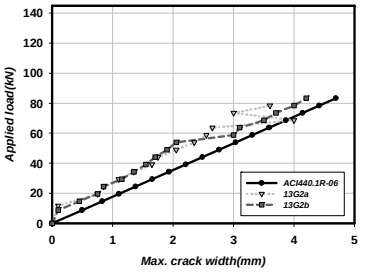


(b) FRP 보강근 콘크리트 실험체 그룹

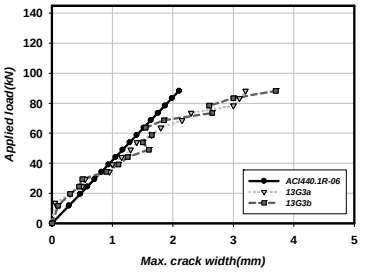
그림 3. 하중단계별 최대균열폭

3.2 하중단계별 최대 균열폭

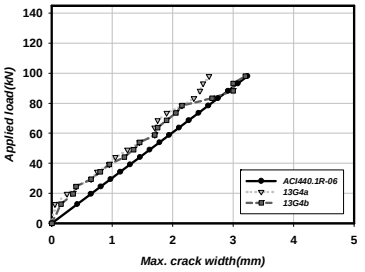
실험에서 측정된 값에 따르면 각 직경별로 GFRP 보강근 콘크리트 실험체의 최대균열폭은 동일한 하중 수준에서의 철근 콘크리트 실험체보다 4배에서 7배까지 큰 것으로 나타났다. 또한 보강근 종류와 관계없이 보강비가 높아질수록 균열폭도 감소한다. ACI 440.1R-06(2006)에서는 FRP 보강근 콘크리트에 대해 최대 휨균열폭을 계산할 때는 Frosch(1999)에 의해 제안된 균열폭 계산모델에 FRP 보강근의 부착을 고려하여 계산하도록 규정하고 있다. 그림 3에는 ACI 440.1R-06에 규정된 식으로 계산된 최대 균열폭과 실험에서 측정된 최대 균열폭을 비교하여 나타냈다. 그림에서 ACI 식으로 최대 균열폭을 계산할 때는 모두 부착계수 1.4를 적용하였다. 그림에 보인바와 같이 부착계수 1.4를 이용한 계산값은 본 연구의 실험값과 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 GFRP 보강근 3개를 사용한 13G3 실험체군에서는 70kN 이후 하중에서 계산값과 실측값의 오차가 커지는 것으로 나타났다.



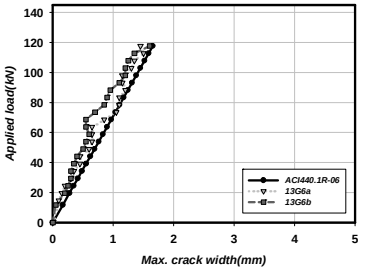
(a) 13G2



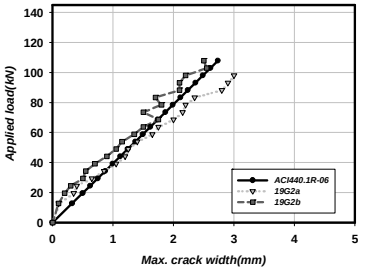
(b) 13G3



(c) 13G4



(d) 13G6



(e) 19G2

그림 4. 계산균열폭과 측정값의 비교

4. 결론

본 연구에서는 GFRP 보강근 콘크리트보의 균열 거동 특성을 고찰하기 위한 휨 실험을 수행하였으며, 실험결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) GFRP 보강근 콘크리트 실험체의 최대균열폭은 동일한 하중 수준에서의 철근 콘크리트 실험체보다 4배에서 7배까지 큰 것으로 나타났다. 또한 보강근 종류와 관계없이 보강비가 높아질수록 균열폭도 감소한다.

(2) FRP 보강근의 간격과 피복을 고려한 ACI 440.1R-06의 균열폭 모델은 부착계수를 1.4를 선택하는 경우 실험값과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Park, R., and Paulay, T. *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY., 1975.
2. Frosch, R. J., 1999, "Another Look at Cracking and Crack Control in Reinforced Concrete," ACI Structural Journal, Vol. 96, No. 3, pp. 438-442.
3. ACI 440 Committee, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-06), American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2006.
4. ISIS CANADA "Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers," The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, 2001.