

하이브리드 FRP 보강근의 형상개발과 부착성능 평가

Development of Hybrid Fiber Reinforced Polymer Reinforcing Bars and Evaluation of the Bond Properties

박 지 선* 박 영 환** 유 영 준* 김 공 환***

Park, Ji-Sun Park, Young-Hwan You, Young-Jun Kim, Keung-Hwan

ABSTRACT

The various rib geometry of hybrid fiber reinforced polymer (FRP) reinforcing bars were analyzed by finite element method. From the analysis result, two types of hybrid FRP reinforcing bars such as spiral and cross type with the same dimension of rib geometry were fabricated in this study.

To evaluate the bond properties of them, direct pull-out test was performed. All testing procedures including specimens preparation, set-up of test equipments and measuring devices were made in accordance with the recommendations of CSA Standard S806-02.

From the test results, it was found that cross type hybrid FRP reinforcing bars showed the highest bond strength than that of the others due to the higher relative rib area.

1. 서론

FRP 보강근의 재료적 특성은, 주로 사용되는 강화섬유와 레진의 종류 및 함유율에 의해서 결정된다. 현재 FRP 보강근에 적용되는 강화섬유로는 주로 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드 섬유가 있으나 유리섬유는 역학적 특성치가 탄소섬유에 비하여 저하되는 반면, 경제성 측면에서는 유리한 것으로 분석되고 있다^{1,2)}. 한편, 유리섬유는 알칼리 환경에서의 내구성에 대하여 지속적으로 의문이 제시되고 있어 이에 대한 보완이 요구된다^{3,4)}.

따라서 본 연구에서는 가격 경쟁력이 우수한 유리섬유를 주요 강화섬유로 적용하고 유리섬유 이외에, 재료의 물성과 내구성이 우수한 탄소섬유를 표면에 배치하여 재료의 물성과 내구성을 향상시킨 하이브리드형 보강근에 대하여 강성과 강도를 향상시킬 수 있는 최적의 마디 형상을 제안하고자 하였다.

이를 위하여 보강근 마디의 간격과 높이, 탄소층의 두께 등을 변수로 하여 유한요소 해석을 수행하였으며, 해석결과로부터 도출된 마디형상에 따라 시제품을 제작, 직접인발(direct pull-out) 실험을 통하여 부착성능을 평가하였다.

* 정희원, 한국건설기술연구원 연구원

** 정희원, 한국건설기술연구원 수석연구원

*** 정희원, 한국건설기술연구원 연구위원

2. 하이브리드 FRP 보강근의 형상개발¹⁾

2.1 하이브리드 FRP 보강근

본 연구에서는 유리섬유를 주요 강화섬유로 선정하되, 유리섬유의 내구성이 상대적으로 취약한 알칼리 환경 및 일부 역학적 측면에서의 보완을 위하여 유리섬유를 70%정도 함유한 코어를 제작하고 그 외피부분에는 탄소섬유를 배치하는 하이브리드형을 기본으로 선정하였다.

2.2 형상설계

보강근의 형상설계를 위하여 보강근의 마디의 간격, 너비, 탄소 및 유리강화 섬유 두께, 코어부로부터 돌출 및 만입되는 마디 높이를 변수로 하여 유한요소해석을 수행하였으며, 해석결과는 표1에 종합정리 하였다.

rb2-a 모델은 탄소층의 두께를 1 mm로 고정하고 보강마디의 간격을 4~12 mm간격으로 변화시킨 것이다. 마디의 간격이 늘어날수록 마디로 인한 FRP 보강근의 탄소층에 발생하는 만입부가 줄어들게 되므로 보강근의 강성이 점차적으로 증가하는 경향이 나타났다.

rb2-b 모델에서는 마디간격과 탄소층의 두께를 고정하고 마디의 높이를 0.4~1.0 mm까지 증가시키면서 해석을 수행한 것이다. 동일한 공칭지름에서 보강마디가 증가함에 따라 코어재의 지름이 줄어 결과적으로 보강근의 강성이 점차적으로 감소하였다.

rb2-c 모델에서는 탄소층의 두께를 1.6~1.7 mm까지 변화시켰다. 마디의 간격이 늘어남에 따라 보강섬유가 휘어진 구간이 줄어들기 때문에 탄소층의 두께가 약 60~70% 증가함에 따라 축방향 강성이 약 24~27% 향상되었다.

rb2-d 모델은 rb2-a~c 모델의 시험제작 후, 현재의 공정기술의 한계로 인하여 발생한 코어부와 외피를 감는 마디부의 체결의 결함을 향상시키고자 마디의 높이를 증가시키고 대신 탄소층의 증가시켰다¹⁾. 따라서 내부 탄소층의 증가로인하여 본 연구에서 제시한 모델 중 가장 높은 강성을 나타내었다.

3. 하이브리드 FRP 보강근의 성능평가

본 연구에서는 2절에서 제시한 다양한 하이브리드형 FRP 보강근 중, 현재의 제작기술 여건 및 재료적인 특성을 고려하여 가장 높은 강성을 가질 수 있는 보강근의 마디형태인 rb2-d모델을 선정, 나선형태 및 교차형 마디를 갖는 2종의 보강근을 제작하였다.

3.1 실험계획 및 방법

본 연구에서 개발한 2종의 나선형 및 교차형 하이브리드 FRP 보강근의 부착성능평가를 위하여

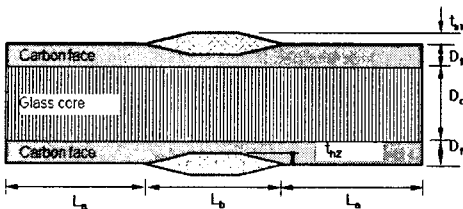


그림 1 하이브리드 FRP 보강근의 마디형상

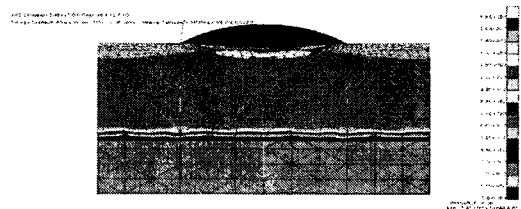


그림 2 하이브리드 FRP보강근의 유한요소 해석결과

Canadian Standard Association(이하, CSA) 규준에서 제시하는 직접 인장시험법에 따라 실험을 수행하였다. 아울러 나선형 요철형태의 마디 및 외피를 구사코팅한 2종의 기성제품에 대한 시험도 실시하여 기성제품과 개발제품과의 성능비교를 하였다.

모든 시험체는 CSA 규준에 따라 제작하였으며 각각의 시편은 1면의 길이가 150mm인 콘크리트 입방체에 1개의 FRP 보강근을 수직으로 중심축에 설치하였다. 실험에 사용된 콘크리트의 압축강도는 $f_{ck}=18$ MPa 이다.

3.2 실험결과 및 고찰

직접인발 실험으로부터 얻은 각 보강근별 부착특성 및 부착응력-슬립관계를 종합정리하면 각각 표 2와 그림 3과 같다.

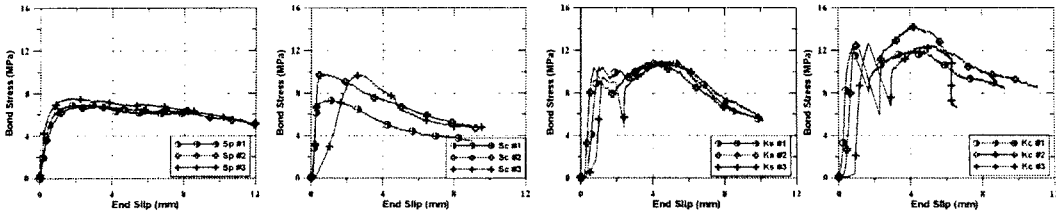
표 1 하이브리드 FRP 보강근의 마디 치수 및 보강근의 강성 및 강도

| Model ID | L_a | L_b | D_t | t_{h1} | t_{h2} | E (GPa)* | σ_{1max} (MPa)** |
|----------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|-------------------------|
| rb2-a1 | 2.0 | 4.0 | 1.00 | 0.78 | 0.15 | 57.6 | 3,010 |
| rb2-a2 | 3.0 | 4.0 | 1.00 | 0.78 | 0.15 | 59.0 | 2,970 |
| rb2-a3 | 4.0 | 4.0 | 1.00 | 0.78 | 0.15 | 59.3 | 2,970 |
| rb2-a4 | 5.0 | 4.0 | 1.00 | 0.78 | 0.15 | 59.6 | 2,970 |
| rb2-a5 | 6.0 | 4.0 | 1.00 | 0.78 | 0.15 | 60.5 | 2,950 |
| rb2-b1 | 2.0 | 4.0 | 1.00 | 0.40 | 0.15 | 57.9 | 2,950 |
| rb2-b2 | 2.0 | 4.0 | 1.00 | 0.60 | 0.15 | 57.1 | 3,030 |
| rb2-b3 | 2.0 | 4.0 | 1.00 | 0.80 | 0.15 | 55.8 | 3,100 |
| rb2-b4 | 2.0 | 4.0 | 1.00 | 1.00 | 0.15 | 52.9 | 3,270 |
| rb2-c1 | 2.0 | 4.0 | 1.60 | 0.78 | 0.15 | 71.4 | 2,430 |
| rb2-c2 | 3.0 | 4.0 | 1.65 | 0.78 | 0.15 | 73.9 | 2,550 |
| rb2-c3 | 4.0 | 4.0 | 1.65 | 0.78 | 0.15 | 74.2 | 2,400 |
| rb2-c4 | 5.0 | 4.0 | 1.65 | 0.78 | 0.15 | 74.5 | 2,370 |
| rb2-c5 | 6.0 | 4.0 | 1.70 | 0.78 | 0.15 | 76.6 | 2,340 |
| rb2-d | 2.0 | 4.0 | 2.225 | 1.00 | 0.20 | 103 | 1,650 |

* E : 길이방향 유효강성
 ** σ_{1max} : 섬유방향 최대응력

표 2 다양한 FRP 보강근의 최대 평균부착강도와 최대 평균부착강도시의 자유단 슬립

| Type | Fiber | Specimen ID | Ultimate Bond Stres(MPa) | End Slip(mm) | Remark |
|-------------|---------|-------------|--------------------------|--------------|------------------------|
| Spiral | E-glass | Sp-1 | 6.9 | 2.00 | Commercially Available |
| | | Sp-2 | 6.8 | 2.70 | |
| | | Sp-3 | 7.6 | 1.70 | |
| Sand Coated | E-glass | Sc-1 | 7.4 | 0.94 | Commercially Available |
| | | Sc-2 | 9.8 | 0.86 | |
| | | Sc-3 | 9.6 | - | |
| Spiral | Hybrid | Ks-1 | 11.0 | 4.96 | Prototype |
| | | Ks-2 | 10.7 | 3.88 | |
| | | Ks-3 | 10.8 | 4.92 | |
| Cross | Hybrid | Kc-1 | 12.1 | - | Prototype |
| | | Kc-2 | 14.2 | 4.06 | |
| | | Kc-3 | 12.5 | 5.28 | |



a. 나선형 b. 모래분사형 c. 나선형 하이브리드 d. 교차형 하이브리드

그림 3 FRP보강근의 부착응력-슬립관계

기성 GFRP 보강근중 나선형 GFRP 보강근의 경우, 평균 약 7MPa의 최대 부착강도 도달 후, 연성 거동을 나타내었다. 반면 모래분사형 GFRP 보강근의 경우, 다소 높은 약 9MPa의 부착강도를 발휘한 후, 취성적으로 파괴하였다.

하이브리드형 FRP 보강근의 경우, 마디부를 나선형으로 감은 보강근의 경우, 약 11MPa의 부착강도를 발휘하였으며 교차형으로 감은 보강근의 경우, 약 13MPa로 기성 GFRP 보강근에 비하여 콘크리트에 대한 부착강도가 높게 나타났다. 또한 부착거동은 1차응력 감소 후, 다시 최대부착강도값이나 그에 상응하는 응력에 도달하였다.

4. 결론

본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 동일한 공칭지름을 갖는 하이브리드형 FRP 보강근에 대한 유한요소해석 결과로부터 탄소층의 두께를 고정하고 보강마디의 간격을 증가시킬 경우, 보강근의 탄소층에 발생하는 만입부위가 감소하여 섬유적 직진성 유지로 인하여 보강근의 강성이 점차적으로 증가하는 경향이 나타났다. 한편, 마디간격과 탄소층의 두께를 고정하고 마디 높이를 1mm까지 증가시킬 경우, 코어재의 지름의 감소로 인하여 보강근의 강성이 감소하였다.
- (2) 본 연구에서 제안한 형상으로 개발한 하이브리드형 FRP 보강근의 경우, 기성의 GFRP 보강근보다 우수한 부착특성을 나타내었다. 특히 교차형 마디를 갖는 하이브리드 FRP 보강근의 경우, 높은 상대리브면적(relative rib area)으로 인하여 가장 높은 부착성능이 발휘되었다.

감사의 글

본 논문은 공공기술연구회의 정책연구사업인 “FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발”의 지원에 의하여 연구되었으며 관계 제위께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발(1차년도) 2004.
2. ISIS Canada, Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers, Design Manual No.3 Sep. 2001.
3. 문창권, 타까구 아끼라, *고분자복합재료*, 시그마프레스, 2002.
4. Canadian Standard Association, “Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers,” Canadian Standard Association, May, 2002.