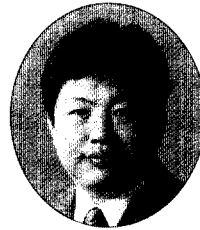

FRP로 보강된 RC보의 전단보강효과 비교연구

A Comparative Study on the Shear-Strengthening Effect of
RC Beams Strengthened by FRP



심종성*

Sim, Jongsung



김규선**

Kim, Gyuseon

ABSTRACT

This study presents test results of RC beams strengthened by carbon fiber sheet(CFS), carbon fiber reinforced plastics(CFRP) or glass fiber reinforced plastics(GFRP) for increasing shear resistance. Nineteen specimens were tested, and the test was performed with different parameters including the type of strengthening materials(CFS, GFRP, CFRP), shear-strengthening methods(wing type, jacket type, strip type), strip-spacing, strengthening direction of FRP. The test results show that shear-damaged RC beams strengthened by FRP(CFS, GFRP, CFRP) have more improved the shear capacity. The mathematical model based on plastic theory was also developed to predict shear strength of shear-damaged RC beams strengthened by FRP. The predictions using the mathematical model, are agreed with the observations from the observed shear strengths for 19 test beams.

Keywords : FRP, CFS, CFRP, GFRP, strengthening materials, shear-strengthening methods, strip-spacing, strengthening direction, mathematical model, plastic theory

* 정희원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수

** 정희원, 한양대학교 산업과학연구소 연구원

• 본 논문에 대한 토의를 1998년 12월 30일까지 학회로 보

내주시면 1999년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

철근콘크리트구조물은 일반적으로 극한하중하에서 연성적인 휨파괴를 확보할 수 있도록 설계되어야 한다. 그러나 철근콘크리트 구조물이 연성 휨파괴 형태를 취하기 위해서는 충분한 전단강도를 확보하여야 하며, 이러한 원칙은 손상된 철근콘크리트 구조물의 보수·보강시에도 동일하게 적용될 수 있다.

콘크리트 구조물의 전단 저항력이 손상될 경우 적용되어 왔던 기존의 전단보강공법으로는 손상된 전단부위에 접착제를 이용하여 강판을 부착하는 보강공법이 일반적이다. 그러나 강판의 경우는 자중과 부식문제 등의 약점을 가지고 있으므로 이를 극복할 수 있는 신소재인 FRP(Fiber Reinforced Plastics : 이하 FRP)를 이용한 보강기법에 관련된 연구가 많은 관심을 끌고 있다^[1,2,11,12]. 기존에 개발된 FRP로는 CFS(Carbon Fiber Sheets :이하 CFS) 및 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics:이하 CFRP), GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics : 이하 GFRP)등이 있으며, 각 재료들은 물리적, 역학적 특성이 다르므로 FRP의 종류에 따라 전단보강기법이 달라지게 되는 것은 자명한 사실이며, 그 보강효과도 상이하다. 따라서 본 연구에서는 전단내력이 부족한 철근콘크리트보에 각각 CFS, CFRP, GFRP를 적용하여 여러가지 보강공법으로 보강할 경우 실험변수에 따른 보강효과 및 거동을 실험을 통해 분석하였으며, 이를 토대로 하여 소성이론^[3,4,6,8,9]에 근거한 보강된 철근콘크리트보의 전단강도 예측모델을 제안하여 실험치와의 비교를 통해 제안된 모델의 적용성을 검증하였다.

2. 실험계획

2.1 사용재료 및 시험체제작

2.1.1 사용재료

본 실험에서 사용한 콘크리트는 설계강도가 240 kgf/cm² 으로 설계된 레미콘제품을 사용하였다. 그러나 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 347 kgf/cm² 로 크게 나타났으며, 슬럼프값은 18cm로 측정되었다. 시험체의 배근에 사용된 철근은 항복응력 4000 kgf/cm² 인 D13, D16 철근이며 전단보강을 위해 사용된 CFS, GFRP 및 CFRP의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

Table 1 Physical properties of strengthening materials

| Variable Reinforcement | Tensile strength (kg/cm ²) | Elastic modulus (kg/cm ²) | Gravity (g/cm ³) | Ultimate strain (%) |
|---------------------------|---|--|---------------------------------|------------------------|
| CFS | 35,000 | 2.35×10 ⁹ | 1.62 | 1.5 |
| GFRP | 4,500 | 2.27×10 ⁹ | 1.15 | 2.0 |
| CFRP | 31,600 | 1.58×10 ⁹ | 1.6 | 1.9 |

2.1.2 시험체제작

본 연구에서 시험체는 전단보강효과를 검토하기 위해서 전단내력이 취약하도록 설계하였으며 시험체의 휨강도에 해당하는 전단하중은 전단스팬비 1.7과 2.2에 대해서 각각 19.7 ton과 15.2 ton으로 무보강시험체의 전단강도에 약 2 배 이상 되도록 고려함으로써 전단보강시 휨파괴가 억제될 수 있도록 고려하였다. 단면의 전단력은 콘크리트가 거의 부담하도록 설계하였으며 사용된 시험체는 단면이 25×25cm이고 순지간은 각각 140cm, 200cm의 두 종류를 채택하였다. 본 연구에서 사용된 단면의 치수 및 배근상세는 Fig.1과 같으며, Fig.2 에는 보강재료별 보강방법 및 게이지 부착위치를 나타내었다.

2.2 실험변수

본 연구에서는 실험변수로서 보강재료는 CFS, GFRP, CFRP를 선정하였으며, 전단스팬비 (a/d)는 전단이 보의 파괴에 지배적으로 작용하는 1.7와 전단과 휨이 복합적으로 작용하는 2.2의 두 경우를 사용하였다. 측면보강방법으로는 스

트립형, 측면만을 보강한 I I형, 측면과 하면을 감싼 U형을 선정하였으며, 스트립일 경우에는 보강간격과 보강방향, GFRP를 스트립으로 보강할 경우 섬유앵커 시공에 따른 보강효과 등 총 6가지의 변수를 선정하여 이를 토대로 총 19개의 시험체를 제작하였다. Table 2 에는 각각의 시험체에 대한 상세와 실험결과를 나타내었다.

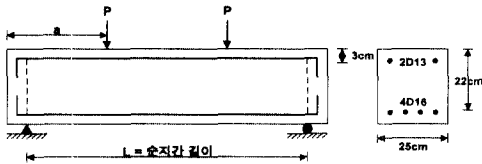
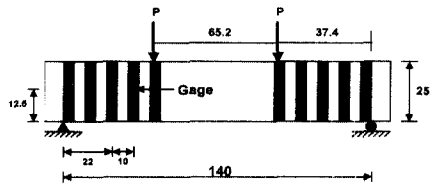
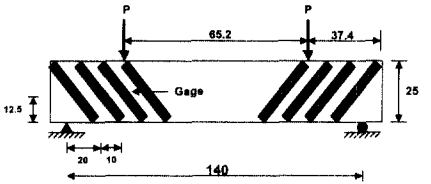


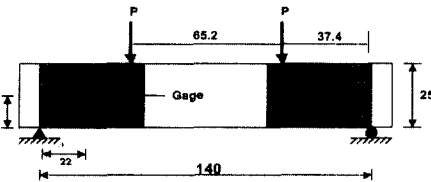
Fig .1 Reinforcement details and loading scheme



(a) 90° strip type(unit : cm)



(b) 45° strip type(unit : cm)



(c) II,U type(unit : cm)

Fig. 2 Strengthening method

2.3 재하 및 측정방법

본 연구에서는 시험체의 전단내력평가를 위한 하중재하는 200ton 규모의 만능시험기를 이용하여 지점중앙에서 재하하였으며, 재하하중량을 측정하기 위하여 로드셀을 설치하였다. 또한 전단시험체의 변위를 측정하기 위하여 중앙부에 변위계를 설치하였으며, 인장철근의 항복여부를 판단하기 위해 중앙부에 strain gage를 주철근에 1개씩 타설전에 설치하였다. 그리고 보강재의 변형율을 측정하기 위해 스트립으로 단면을 보강한 경우에는 지점으로부터 보의 유효깊이만큼 떨어진 곳(22cm)의 중앙부위 즉 하면으로부터 12.5cm 떨어진 위치의 보강재 중앙부에 게이지를 부착하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 파괴양상

본 연구에서 수행된 시험체중 휨파괴한 CP2-VW 시험체를 제외한 모든 시험체는 전단파괴가 발생하였다. CFRP로 보강한 시험체의 경우 휨파괴를 한 CP2-VW를 제외하고는 모두 콘크리트를 물고 떨어지는 박리에 의한 취성적인 전단파괴를 나타내었으며, 특히 CFRP를 45° 방향으로 보강한 경우(CP1-DS) 전단균열이 가력점에서 지점으로 진전되지 못하고, CFRP에 의해 제어되어 거의 가력점에서 수직하게 진전되어 파괴되었다.

CFS로 보강한 경우는 모든 경우에 있어서 지지점과 가력점을 연결하는 전단균열을 따라 섬유방향에 수직한 방향으로 섬유가 찢어지면서 콘크리트를 물고 떨어지는 파괴가 일어났으며, 이러한 경향은 측면을 U형으로 보강한 경우에도 같은 경향을 나타내었다.

GFRP의 경우는 CFS와 마찬가지로 지지점과 가력점을 연결하는 전단균열이 발생하였지만, 파괴시에는 섬유면이 찢어지면서 박리 파괴되었다. 기본적으로 CFS, CFRP 및 GFRP로 보강된 시

험체 모두 파괴시 콘크리트를 물고 떨어지는 박리양상을 보였다. Fig.3 에는 대표적인 시험체의 균열양상을 나타내었다.

3.2 하중-변위관계

인장철근의 항복과 함께 휨파괴가 일어난 CP2-VW시험체와는 달리 모든 시험체들이 파괴 후 급격한 하락곡선을 보이며 파괴되는 것을 알 수 있다. 이는 모체콘크리트 면에서 발생한 균열이 진전되다가 균열을 잡아주는 보강재들이 콘크리트를 물고 떨어지는 박리가 일어남으로써 전단에 대한 내력이 급격히 감소함을 보여주는 것이다. Fig.4를 살펴보면 CFS와 GFRP로 보강하였을 경우에는 강성의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있으며, CFRP로 보강한 시험체의 하중-처짐곡선은 보강방법에 따라 강성의 변화가 큰 것을 알 수 있다.

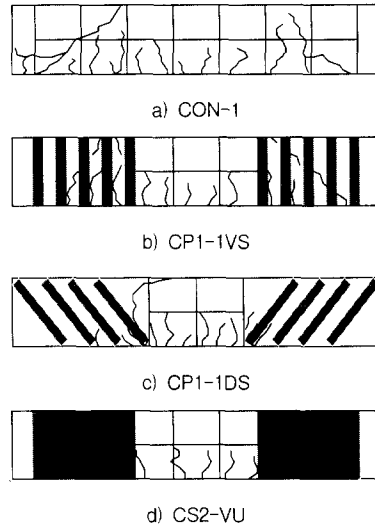


Fig. 3 Failure modes of tested beams

Table 2 Experimental parameters and results of the beams tested

| Parameters | Shear span to ratio(a/d) | Strengthening method | Strengthening space | Beam designation | Failure Load(ton) | Strengthening effect(%) | Strain of FRP at failure ($\times E-6$) | Failure mode |
|----------------|--------------------------|----------------------|---------------------|------------------|-------------------|-------------------------|---|--------------|
| Reinforcements | 1.7 | - | - | CON-1 | 10.5 | - | - | S |
| | 2.2 | - | - | CON-2 | 6.25 | - | - | S |
| CFRP | 1.7 | I I type | - | CP1-VW | 17.3 | 64.8 | 1123 | S |
| | | 90° strip | 1S(10cm) | CP1-1VS | 16.3 | 54.8 | 1890 | S |
| | | 45° strip | - | CP1-1DS | 17.8 | 69.0 | 2123 | S |
| | 2.2 | I I type | - | CP2-VW | 15.4 | - | 120 | F |
| | | 90° strip | 1S(10cm) | CP2-1VS | 9.45 | 51.2 | 503 | S |
| | | | 2S(20cm) | CP2-2VS | 8.60 | 37.6 | 198 | S |
| CFS | 1.7 | II type(90°) | - | CS1-VW | 17.0 | 61.9 | 2500 | S |
| | | II type(45°) | - | CS1-DW | 18.2 | 73.3 | 1000 | S |
| | | U type | - | CS1-VU | 13.3 | 26.7 | 1830 | S |
| | 2.2 | II type(90°) | - | CS2-VW | 10.8 | 72.0 | 3500 | S |
| | | II type(45°) | - | CS2-DW | 11.0 | 77.6 | 7230 | S |
| | | U type | - | CS2-VU | 8.50 | 40.0 | 6850 | S |
| GFRP | 1.7 | II type(90°) | - | GP1-VW | 16.8 | 60.0 | 4060 | S |
| | | II type(45°) | - | GP1-DW | 18.0 | 71.4 | 1000 | S |
| | | U type | - | GP1-VU | 17.7 | 68.6 | 4120 | S |
| | | 90° strip | 1S(10cm) | GP1-1VS | 13.2 | 25.7 | 8953 | S |
| | | | 2S(20cm) | GP1-2AS* | 14.5 | 38.1 | 16000 | S |

* F : Flexural failure, S : Shear failure

Predicted flexural strength : for a/d=1.7 and a/d=2.2 each P=19.7, 15.2 ton

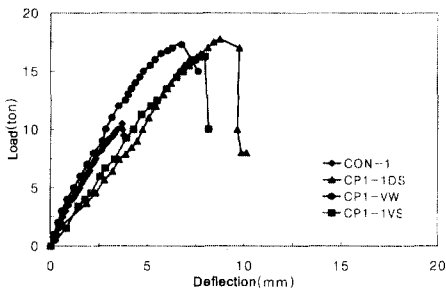
이는 CFRP가 CFS나 GFRP에 비해 큰 강성을 가지므로 보강방법에 따라 이것이 보의 강성에 영향을 미친 것으로 판단된다.

또한, 스트립으로 보강한 경우, 10cm 간격일 때 GFRP로 CFRP보강이 GFRP보강보다 약 1.5ton 정도의 증가가 있음을 알 수 있으며, GFRP의 경우 U형이나, 측면보강이 거의 같은 강성을 가지며, 최대하중에 미치는 영향이 적음을 알 수 있다.

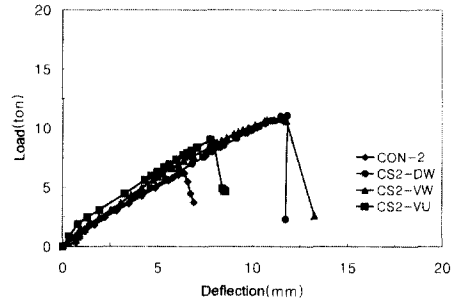
이는 콘크리트면에 발생하는 균열을 최대 전단력 이상이 되면 보강재들이 잡아주는 능력이 한계가 있음을 나타내고 있다. Fig.4에는 각 시험체에 따른 하중-변위관계를 나타내었다.

3.3 하중-보강재방향 변형률관계

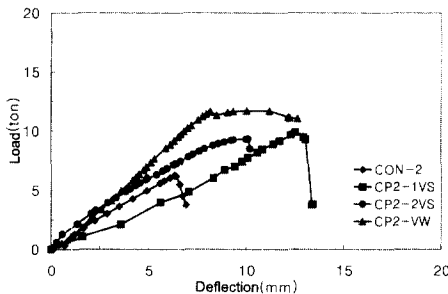
본 연구에서 사용된 FRP의 경우 일방향 섬유로 보강되었으므로 섬유방향의 변형만이 전단보



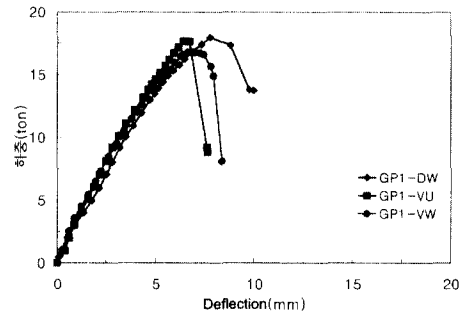
a) $a/d=1.7$ (CFRP)



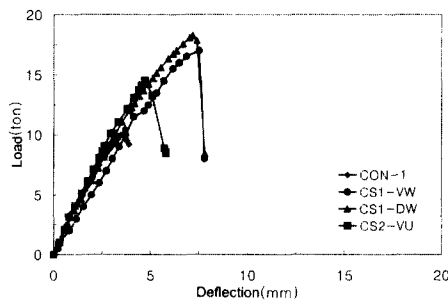
d) $a/d=2.2$ (CFS)



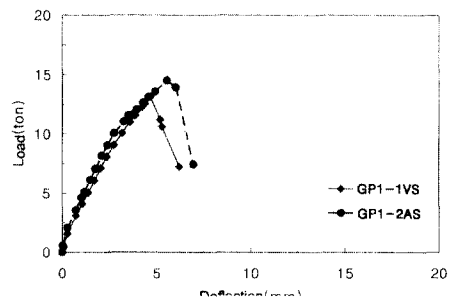
b) $a/d=2.2$ (CFRP)



e) $a/d=1.7$ (II,U type using GFRP)



c) $a/d=1.7$ (CFS)



f) $a/d=1.7$ (strip type using GFRP)

Fig. 4 Load-deflection relationships

강에 기여도를 가지게 되고, 역학적으로도 의미를 가지게 된다. 보강재의 축방향 변형율을 고찰하면 CFS와 보강한 시험체의 경우, 보강재의 섬유방향 변형율은 모체콘크리트의 사인장균열면에서 무보강시험체의 최대전단력에 도달할때까지는

기 위해서는 접착제 외에 추가적인 보강기법이 검토되어야 할 것으로 판단된다. Table 2에는 파괴시 보강재의 섬유방향 변형율을 나타내었다.

3.4 전단보강효과분석

FRP사용하여 RC보를 전단보강한 결과, 보강효과는 GFRP를 스트립으로 보강한 경우를 제외하고는 약 50~70%정도로 나타났다(Table 2 참조). CFRP의 경우 스트립의 간격은 큰 영향을 미치지 못하였지만, CFRP의 보강방향은 사인장균열에 저항할 수 있도록 45°로 보강한 경우가 수직으로 보강하였을 경우보다 14%정도 향상되었음을 알 수 있으며, GFRP의 경우는 약 7%정도 증가했음을 알 수 있다. 이는 같은 재료를 사용하더라도 보강방향을 달리함으로써 보강재를 보다 효율적으로 사용할 수 있다는 것을 의미한다. GFRP의 경우, U형으로 보강을 했을 때 측면만을 보강한 경우와 거의 비슷한 파괴하중을 나타냈으며, 이는 모체면에서 진전되는 균열면을 잡아주는 보강효과에 있어서 U형보강이 큰 영향이 없다는 것을 의미한다. 그러나 CFS로 보강을 했을 때 U형으로 보강한 경우가 측면보강한 경우보다 파괴하중이 적게 나온 것은 시공시 섬유면과 모체콘크리트가 완전히 부착되지 않은 것에서 기인한다고 판단된다. GFRP를 20cm간격의 스트립으로 보강되고 섬유앵커를 상·하단에 시공한 GP1-2AS시험체의 경우 앵커가 시공되지 않고 간격이 10cm인 GP1-1VS시험체에 비해 13%정도의 보강효과 증진을 나타내었다. 이는 섬유앵커가 GFRP를 전단보강할 경우 박리파괴를 어느정도 제어함으로써 효율적이라는 것을 의미한다.

CFS의 경우에도 측면보강을 하였을 때 섬유방향을 수직으로 보강하였을 때보다 45° 방향으로 보강했을 경우가 8~12%정도 보강효과가 더 향상됨을 알 수 있으며, 이는 CFRP와 GFRP의 경향과 동일하다.

CFS와 GFRP의 경우, 대체적으로 CFRP에

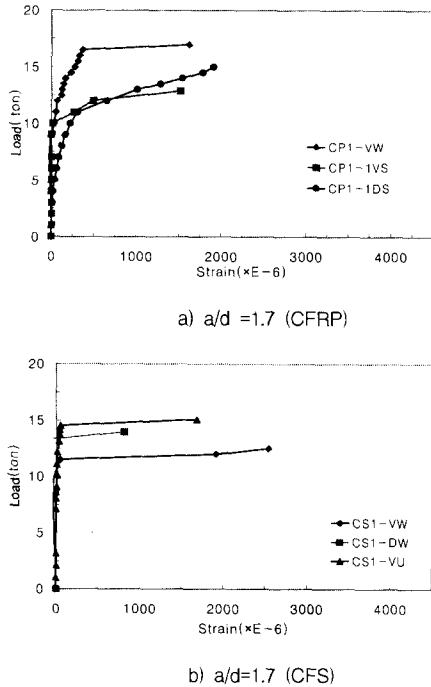


Fig. 5 Load-strain of plate relations

거의 나타나지 않으며, 무보강시험체의 최대 전단력이상이 되면 급격히 변형율이 증가되었다. CFRP로 보강한 경우에는 섬유방향의 변형도를 살펴보면 하중이 증가함에 따라 변형율도 점진적으로 증가하며 무보강시험체의 최대전단력이상이 되면 CFS와 마찬가지로 변형율이 급격히 증가하다가 콘크리트를 물고 떨어지면서 박리·파괴되는 현상을 보였다(Fig.5 참조). CFRP의 경우 다른 재료에 비해 그 변형도가 상대적으로 미소하다(Table 2 참조). 이는 보강된 시험체의 전단강도에 대한 보강효과는 타 재료와 큰차이는 없지만 보강재의 두께와 재료물성을 고려할 때 보강재가 전단보강에 효율적으로 사용되지 못한 것으로 판단되므로 CFRP가 효율적으로 사용되

비해 보강효과가 조금 더 우수한 것으로 나타났으며, 특히 파괴시 CFS는 섬유직각방향으로 찢어지면서 파괴되므로 섬유방향의 직각으로 한 겹 더 보강하거나 2방향 섬유판으로 보강할 경우, 보강성능이 더 향상될 것으로 기대되어진다. 그러나 CFS로 보강할 경우 이러한 보강효과에도 불구하고 CFS내의 콘크리트에서 발생하는 전단균열의 진행상황을 파악할 수 없으므로 유지관리 측면에서 볼 때 문제가 있지만 CFRP를 사용해 스트립으로 보강할 경우에는 균열의 진행상황을 육안으로 관찰할 수 있을 뿐만 아니라 45°로 보강할 경우 CFS로 보강할 경우와 거의 동일한 보강효과를 나타내므로 유지관리 측면에서 적절한 보강방법으로 제안될 수 있다. 그러나 재료성능을 보다 효율적으로 활용하기 위해서는 추가적인 적절한 보강방법에 관한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4. 보강된 RC보의 전단강도 예측모델

본 연구에서는 소성해석이론 즉, 상한치 이론(upper bound theorem)와 하한치 이론(lower bound theorem)을 토대로 하여 보강재로 보강된 RC보의 전단강도예측모델을 제안하였다. 일반적으로 철근콘크리트보의 전단거동에 관한 소성해석은 간단하며, 전단철근이 보강된 RC보의 전단강도를 비교적 정확하게 예측하는 것으로 보고되고 있다^[8,9]. 제안된 전단해석식은 Nielsen과 Braestrup^[8]이 제안한 상한치 이론을 토대로 한 소성해석모델과 Thurlimann^[9]이 제안한 하한치 이론을 토대로 한 휨과 전단이 복합작용을 할 경우를 고려한 트러스모델에서 보강재의 기여도향을 추가하여 전개함으로써 보강재로 전단보강된 R/C보의 전단해석 모델에 적용하였다. 이 두가지 접근방법은 각 방법에 가정된 파괴모드가 다르기 때문에 각기 다른 파괴모드에서, 즉 전단 지배영역인 $a/d \leq 2$ 이하인 지역에서는 소성모델을, 그리고 전단-휨의 복합영역인 $a/d > 2$ 이상인 영역에 트러스모델을 적용함으로써 전단스팬비의

변화에 따른 메카니즘의 변화를 고려할 수 있다^[8, 9]. 각각의 예측모델은 다음과 같다.

4.1 소성모델

Fig.6에는 수직변위로 표시된 단순화된 전단보강된 R/C보의 파괴메카니즘을 나타내었다. 여기서 보의 I 부분은 변위 u 만큼 수직이동하며, II 부분은 이동이 없다고 가정한다. 그러므로 보의 I 과II 부분은 직선의 항복선이 발생하며, 이 항복선은 수평축과 θ 의 각을 이룬다고 가정할 수 있다. 따라서, 이와 같은 파괴메카니즘을 토대로 에너지 보존법칙을 적용하면 식(1)과 같이 정리할 수 있다.

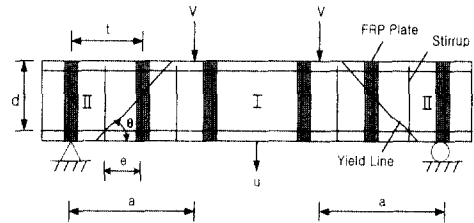


Fig.6 Failure mechanism of RC beam shear-strengthened by FRP

$$V \cdot u = [(s_y + \alpha \cdot r_y) b d c \cot \theta] \cdot u + \left[\frac{1}{2} v \sigma_{cu} (1 - \cos \theta) \frac{b d}{\sin \theta} \right] \cdot u \quad (1)$$

여기서, $s_y = \frac{A_v \cdot f_{sy}}{b \cdot e}$, A_v , A_f = 스테럽 및 보강재의 단면적, $r_y = \frac{A_f \cdot f_{fy}}{b \cdot t} (\sin \beta + \cos \beta)$, f_{sy}, f_{fy} = 스테럽 및 보강재의 항복강도, e, t = 스테럽 및 보강재의 간격, β = 보강재와 보가 이루는 각, V_c, V_{st} = 스테럽과 보강재의 전단저항 강도이다.

식 (1)의 우변에서 첫 번째 항은 항복선(yield line)을 가로지르는 스테럽과 보강재가 변위 u 에 대해 한 일이며 두 번째 항은 콘크리트가 변위 u 를 발생하는데 기여한 일로 정의할 수 있다. 식

(1)에서 ν 값은 복부에서 콘크리트의 압축강도 기여도를 나타내는 것으로서 콘크리트의 제한된 변형능력 또는 파괴시의 불안전성이나 콘크리트와 철근의 복잡한 부착-미끄럼 작용 등으로 인해 $0 < \nu < 1$ 사이의 값을 나타낸다. 본 연구에서는 복부폭이 보의 높이에 비해 큰 시험체를 고려하여 Talyor⁽¹⁰⁾이 제안한 0.4를 ν 값으로 사용하였다. 또한, 강도유�효계수(α)는 실험상수로서 보강재가 실제 콘크리트 내에 매입되어 있지 않으므로 재료의 강도를 모두 사용하지 못하는 점을 고려하여 보강된 RC보의 전단강도에 미치는 기여도를 보강재의 항복강도와 관련된 실험상수로서 표현하였는데 이는 보강재의 역학적특성, 보강재의 보강방법, 보강재와 모체콘크리트사이의 부착성능에 지배적인 영향을 받게되는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 실험결과를 토대로 α 를 산정하였으며 각 시험체들의 전단강도에서 Con-1과 Con-2에 의해 산정된 콘크리트만의 전단강도를 제외한 전단강도를 보강재와 스테럽이 가지는 전단강도, V_{sp} 에 대치시켜 α 값을 계산한 후 전단스팬비와 보강재료에 따라 산정된 평균값으로 모델에 적용하였다. 식 (1)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$V = (s_y + \alpha \cdot r_y) b \cdot d \cot \theta + \frac{1}{2} \nu \sigma_{cu} (1 - \cos \theta) \frac{b \cdot d}{\sin \theta} = V_{sp} + V_c \quad (2a)$$

또는

$$\frac{\tau}{\nu \sigma_{cu}} = \psi \cos \theta + \frac{1}{2} [\sqrt{(1 + \cot^2 \theta)} - \cot \theta] \quad (2b)$$

식(2)에서 상한해(upper bound solution)의 최소값 θ 를 결정하기 위해 $\partial V / \partial \theta = 0$ 을 적용하면 식 (3)이 된다. 따라서 식 (2)에서 상한해의 최소값이 보강된 RC보의 평균전단응력이므로 이것을 정리하면 식(4)로 표현할 수 있다.

$$\tan \theta = \frac{2\sqrt{\psi(1-\psi)}}{1-\psi} \quad (3)$$

$$\frac{\tau}{\nu \sigma_{cu}} = \sqrt{\psi(1-\psi)} \quad (4)$$

식 (1)에서 ψ 가 0.5 이상이 될 경우 $\tau / \nu \sigma_{cu}$ 의 최대값은 0.5가 되며, 균열면과 주철근이 이루는 각 θ 에 따라 경계값이 정해진다. 즉,

$$\frac{d}{a} \leq \tan \theta \leq \infty \text{ 또는 } 0 \leq \cot \theta \leq \frac{a}{d} \quad (5)$$

식 (2)에 의해 경계값이 정해지므로 식(6)으로 표현되며 이 식은 a/d 가 2이하로써 전단파괴가 지배적으로 작용하여 파괴될 경우 전단보강된 RC보의 전단강도를 예측하는데 적용할 수 있다.

$$\psi < \frac{\sqrt{(a^2 + d^2)} - a}{2\sqrt{(a^2 + d^2)}} = \lambda \text{ 일 경우}$$

$$\frac{\tau}{\nu \sigma_{cu}} = \frac{\sqrt{a^2 + d^2} - (1 - 2\psi)a}{2d} \quad (6a)$$

$$\lambda \leq \psi \leq \frac{1}{2} \text{ 일 경우}$$

$$\frac{\tau}{\nu \sigma_{cu}} = \sqrt{\psi(1-\psi)} \quad (6b)$$

$$\psi > \frac{1}{2} \text{ 일 경우}$$

$$\frac{\tau}{\nu \sigma_{cu}} = \frac{1}{2} \quad (6c)$$

4.2 트러스모델

Fig.7에 제시된 것처럼 전단보강된 철근콘크리트 보의 스테럽과 보강재를 트러스의 수직재로 가정하여 트러스로 보를 해석할 경우 스테럽과 보강재가 부담하는 축력을 전단력으로 산정할 수 있다.그림에서 스테럽과 보강재가 부담하는 전단력 S_1 과 S_2 는 단위콘크리트체적에 대해서 표현함으로써 외력 P 와 다음과 같은 평형방정식을 만족한다.

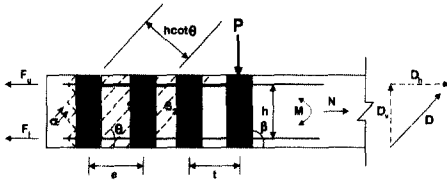


Fig. 7 Forces in the beam shear-strengthened by FRP

$$S_1 = \psi_1 \cdot e \cdot v \cdot \sigma_{cu} = P \frac{e}{h} \tan \theta \quad (7a)$$

$$S_2 = \alpha \psi_2 \cdot b \cdot t \cdot v \cdot \sigma_{cu} = P \frac{t}{h} \tan \theta \quad (7b)$$

여기서,

$$\psi_1 = \frac{A_v f_{sy}}{b \cdot e \cdot v \sigma_{cu}}$$

$$\psi_2 = \frac{A_{sp} f_{sp}}{b \cdot t \cdot v \sigma_{cu}} (\sin \beta + \cos \beta)$$

h = 압축축의 합력위 치와 인장력 사이의 거리

여기서 평형방정식을 만족하는 외력 P 는 결국 스테리럽과 보강재의 전단력의 합력 V_{sp} 로 표현할 수 있으며 식(7a)을 V_{sp} 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$V_{sp} = \frac{b \cdot h \cdot \cot \theta \cdot v \sigma_{cu} (\psi_1 e + \alpha \psi_2 t)}{(e + t)} \quad (8)$$

여기서, 식 (8)은 파괴 메카니즘을 고려한다면, 하한치정리에서 주철근이 항복했을 경우 내력의 재분배를 위해 V_{sp} 값의 최대값일때 소성한계값이 되는 것을 알 수 있다. 즉 경계값을 고려하면 $\tan \theta \geq 0.5$ 즉 $\cot \theta \leq 2$ 이므로 V_{sp} 의 최대값은 다음과 같이 전개된다.

$$V_{sp} = \frac{2b \cdot h \cdot v \sigma_{cu} (\psi_1 e + \alpha \psi_2 t)}{(e + t)} \quad (9a)$$

또는,

$$\frac{\tau}{v \sigma_{cu}} = \frac{2(\psi_1 e + \alpha \psi_2 t)}{(e + t)} \quad (9b)$$

본 모델은 $a/d > 2$ 인 즉, 전단과 휨이 조합되어 작용할 경우 스테리럽과 보강재가 부담하는 전

단력 V_{sp} 를 구하기 위한 모델이며, 전체 철근콘크리트보의 전단강도는 콘크리트가 부담하는 전단력 V_c 를 더해서 계산하여야 한다. 따라서 보강된 철근콘크리트보의 전단강도 V 는 식 (10)으로 계산할 수 있다.

$$V = V_c + V_{sp} \quad (10)$$

여기서, $V_c = 0.53 \sqrt{\sigma_{ck}} b d$

4.3 결과비교

본 절에서는 개발한 전단강도 예측모델에서 실험상수인 강도유효계수(α)값을 추정하기 위해 본 논문에서 행한 실험결과를 이용해 a/d 와 각각의 보강방법에 따른 영향을 고려한 적절한 α 값을 산출하고 이를 토대로 본 연구에서 제안한 해석모델의 해석치와 실험결과와 비교하였다. 보강재료별 강도유효계수에 영향을 미치는 인자로는 크게 전단스팬비, 보강재와 콘크리트계면의 부착 특성, 보강재의 면적, 즉 보강재의 두께 등이 있으며 이들 변수들 간의 상관관계는 보다 폭 넓은 실험변수에 의한 충분한 실험자료를 토대로 하여 접근해야지만 각 변수들의 정량적인 영향을 분석할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 기초적 연구단계로써 각 변수 중 보강재료와 전단스팬비에 따른 강도유효계수를 휨파괴된 시험체를 제외한 실험결과를 통계처리하여 Table 3에 제시하였다. 제시된 강도유효계수, α 는 제한된 실험변수를 토대로 하였으며 앞에서 언급한 변수들의 영향을 모두 고려하고 있지 않으므로 이는 해석모델 적용시 오차를 가질 수 있으며 보다 체계적인 실험 연구를 토대로 하여 지속적인 연구가 수행될 필요가 있다.

Table 3 Strength effective factor(α)

| Reinforcements | Strength effective factor(α) | | |
|----------------|---------------------------------------|-------|-------|
| | CFRP | CFS | GFRP |
| α | | | |
| $a/d = 1.7$ | 0.039 | 0.232 | 0.340 |
| $a/d = 2.2$ | 0.027 | 0.129 | - |

표 4에는 제안된 해석모델을 토대로 한 해석치와 실험치를 비교한 결과를 제시하였으며 제시된 해석치는 전단스팬비가 1.7일 경우에는 a/d가 2 이하일 경우에 적용되는 소성모델로 산정되었고, 2.2일 경우에는 a/d가 2 이상일 때 적용되는 트러스모델이 사용되었으며 비교적 만족스러운 결과를 나타내었다. 이는 제안된 해석모델이 강도유효계수, α 를 고려하여 보강재의 기여도를 반영함으로써 보강재의 전단보강효과를 적절하게 표현하는 것으로 판단된다. 그러나 아직까지는 실험변수에 따른 자료가 많이 부족하여 각 변수에 따른 보강재의 전단보강효과에 대한 영향을 충분히 고려하지 못하였으며, 이는 추후 연구과제으로써 충분한 실험과 관련자료를 통하여 각 변수의 상관관계 및 정량적인 영향을 검토해야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 총 19개의 전단시험체를 제작해 FRP로 보강된 시험체의 전단실험을 행하였으며, 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) FRP(CFS, GFRP, CFRP)를 이용하여 전단에 취약한 RC보를 보강한 결과 보강효과가 50~70%정도의 보강효과를 나타내었다.

2) FRP로 전단보강할 경우, 45° 방향으로 보강함으로써 보강재의 보강효율을 높일 수 있으며, 특히 GFRP나 CFRP를 스트립으로 보강할 경우 콘크리트면에서 발생하는 균열의 진행상황을 파악할 수 있으므로 유지관리측면이나 보강효과측면에서 바람직한 보강방법으로 제안될 수 있다.

3) CFS로 전단보강할 경우 파괴시 섬유는 직각 방향으로 찢어지면서 파괴되므로 섬유방향의 직각방향으로 변형을 제어할 수 있도록 보강할 경우 보강성능이 더 향상될 것으로 판단된다.

4) 본 논문에서 개발된 모델을 적용한 결과를 실험치와 비교한 결과, 비교적 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 그러나 제한된 실험결과를 토대로 산정되었으므로 모델의 검증에 위해

서는 보다 많은 실험자료의 통계자료가 필요하며 지속적인 연구가 요망된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 주관하는 “96 건설기술 연구개발과제”를 수행함으로써 얻어진 연구 결과의 일부이며, 저자들은 본 연구에 대한 후원에 감사의 뜻을 전합니다.

Table 4 Comparisons between predicted and experimental results

| Beam designation | Experimental results (ton) | Predicted results(ton) | | | Experimental results/ Predicted results |
|------------------|----------------------------|------------------------|-------|------------|--|
| | | Vsp | Vc | Vc+ Vsp | |
| Con-1 | 10.50 | - | 11.58 | 11.58 | 1.10 |
| Con-2 | 6.25 | - | 5.43 | 5.43 | 1.15 |
| CP1-VW | 17.3 | 9.61 | 11.58 | 21.19 | 1.21 |
| CP1-1VS | 16.3 | 4.81 | 11.58 | 16.39 | 1.01 |
| CP1-1DS | 17.8 | 6.79 | 11.58 | 18.47 | 1.11 |
| CP2-VW* | 9.45 | - | - | - | - |
| CP2-1VS | 9.45 | 3.97 | 5.43 | 9.40 | 0.99 |
| CP2-2VS | 8.60 | 1.99 | 5.43 | 7.42 | 0.86 |
| CS1-VW | 17.0 | 5.95 | 11.58 | 17.53 | 1.03 |
| CS1-DW | 18.2 | 8.42 | 11.58 | 20.0 | 1.09 |
| CS1-VU | 13.3 | 5.95 | 11.58 | 17.53 | 1.32 |
| CS2-VW | 10.8 | 3.97 | 11.58 | 9.40 | 0.87 |
| CS2-DW | 11.0 | 5.61 | 5.43 | 11.00 | 1.00 |
| CS2-VU | 8.50 | 3.97 | 5.43 | 9.40 | 1.10 |
| GP1-VW | 16.8 | 6.04 | 11.58 | 17.63 | 1.05 |
| GP1-DW | 18.0 | 8.54 | 11.58 | 20.13 | 1.12 |
| GP1-1VU | 17.7 | 6.04 | 11.58 | 17.63 | 0.99 |
| GP1-1VS | 13.2 | 3.02 | 11.58 | 14.60 | 1.11 |
| GP1-2AS | 14.5 | 1.51 | 11.58 | 13.09 | 0.9 |

* Flexural failure

참고 문헌

1. Al-Sulaimani et al, "Shear Repair for Bonding", ACI Structural Journal, July-August, 1994, pp. 458~464
2. Björn Taljsten, "Strngthening Of Structures Using Epoxy Bonded Steel or Fibre

- Reinforced Plastic Plates", Extending the Lifespan of Structures, IABSE Symposium, 1995, p.p 1173~1179
3. Braestrup, M.W., "Plastic Analysis of Shear in Reinforced Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 26, No. 89, December 1974, pp 221~228
 4. Campbell, T.I., "Rigid-plastic Theory v. Truss Analogy Method for Calculating the Shear Strength of Reinforced Beams", Magazine of Concrete Research, Vol.32, No. 110, March 1980, pp 39~43
 5. Chen, W. F. " Plasticity in Reinforced Concrete", pp 295~329
 6. Efrosini Drimoussis et al. "Shear Strengthening of Concrete Bridge Girders using Carbon Fiber-Reinforced Plastic Sheets", Fourth International Bridge Engineering Conference, pp 337~347
 7. Lim, T. Y., "Shear and Moment Capacity of Reinforced Steel-Fibre-Concrete Beams", Magazine of Concrete Research, Vol. 39, No. 140, September 1987, pp 148~160
 8. Nielsen, M.P. and Braestrup, M.W. , "Plastic Shear Strength of Reinforced Concrete Beams. Bygningsstatixke Meddelelser, Vol. 46, No. 3, 1975 pp 61~99
 9. Thurlimann, B. , "Plastic Analysis of Reinforced Concrete Beams", IABSE Colloquium on Plasticity in Reinforced Concrete, Copenhagen, 1979, Introductory Report. Vol. 26, No. 89, December 1974, pp 221~228
 10. Talyer, R., "Some Aspects of the Problem of Shear in Reinforced Concrete Beams," Civil and Public Works Reviv, Vol. 58, May, 1963, pp 629~632
 11. "노후콘크리트 부재의 보수 및 보강기법에 대한 실험적연구", 한국도로공사, 1996년도 연구보고서, pp 161~167
 12. 정현수의 3명, "보강재를 사용한 철근콘크리트보의 휨·전단내력에 관한 실험적 연구", 한국구조물진단학회 제 1 권 제 1 호, 1997. 6, pp 65~73

요 약

본 논문의 목적은 전단내력이 부족한 R/C보에 CFS(Carbon Fiber Sheets), CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics), GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)를 이용해 전단보강을 할 경우에 보의 역학적 거동특성을 규명하기 위한 것이다. 본 논문의 목적을 달성하기 위하여 총 19개의 시험체가 제작되었으며, 실험변수로는 전단스팬비, 보강재료, 보강방법, 보강간격 및 방향을 산정하였다. 본 논문의 실험결과, FRP를 이용해 전단내력이 부족한 R/C보에 보강을 하였을 경우 약 50~70%정도의 보강효과를 나타내었다. 또한, 소성이론에 근거한 철근콘크리트보의 전단강도 예측모델을 개발하였고 실험치와의 비교를 통해 개발된 모델의 적합성을 검증하였다.

(접수일자: 1998.2.14)