

FRP 합성재료에 의하여 구속된 정사각형 콘크리트 기둥의 거동

Behavior of Square Concrete Columns Confined by FRP Composites

조 순 호* 방 세 환**
Cho, Soon Ho Bang, Se Hwan

ABSTRACT

Three series of 36 short square columns confined by wraps, full shells and partial shells were tested by varying the thickness of GFRP laminates. An assessment of the effectiveness of the existing model on confinement of concrete columns with FRP was made. Test results indicated moderate increases in strength, but significantly enhanced deformability compared with those in unconfined concrete, particularly the warp and full shell confinement.

1. 서 론

최근의 연구문헌을 살펴보면 유리, 아라미드 및 탄소섬유 등과 같은 합성재료(Fiber Reinforced Polymers)에 의하여 구속된 콘크리트의 거동에 대하여 다양한 연구가 진행되고 있음을 알 수 있다. Harmon(1992) 등은 3축 응력을 지지하는 FRP로 구속된 원형기둥의 실험을 처음으로 수행하였다. 본 연구는 유리섬유(GFRP)로 제작된 Wrapping, Full Shell, Partial Shell 형태의 외피(External Jackets)에 의하여 정사각형 단면의 기둥을 구속하였을 경우 예상되는 콘크리트의 구조적 특성을 조사하기 위하여 총36개의 1축 응력 재하, 단주 실험결과를 기술한다. FRP 외피는 콘크리트 기둥에 수평구속을 유발하여 콘크리트가 파괴하는 시점의 강도 및 변형률을 크게 증가시키며, 이는 콘크리트 구조물의 내진설계 핵심사항이다. 하지만, 원형단면과는 달리 사각형단면의 경우 모서리 부분은 날카로운 기하학적 형상을 취하고 있으므로 구속력을 발동하는 주요기구를 제공하는 반면에, 다른 한편으로는 얇은 합성재의 구속매체가 쉽게 파단 하는 불리한 조건을 나타낸다.

*정회원, 광주대학교 건축학부 부교수, **광주대학교 석사과정
(본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2003-000-11885-0)지원으로 수행되었음).

2. 사각형 기둥의 구속기구

그림 1은 외부 FRP 보강에 의하여 구속된 사각형 기둥의 단면을 나타내며, 외부 FRP 보강은 단면이 곡선화된 4곳의 모서리를 통하여 코아에 아치형태의 횡구속력(f_l)을 유발한다. 고려하고자 하는 수평단면 축에 수직인 방향으로만 보강된 것으로 가정하여 관계식을 유도하고, 또한 FRP가 연속적으로 보강되지 않았다면 수직방향으로도 구속력을 발동하기 위한 아치작용이 형성된다고 가정한다. 따라서 전체단면이 균등하게 구속된 원형단면과는 달리 단면의 상당부분이 구속되지 않은 채 남아있다. 서로 다른 아치곡선의 합을 취하여 비구속된 콘크리트 수평단면의 합을 산정하고, $(A_c - A_u)/A_c$ 비에 따라 단면형상에 따른 유효구속계수 k_e 를 산정하면

$$A_u = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{w_i^2}{6} \right) = \frac{b^2 + d^2}{3}, \quad k_e = 1 - \frac{b^2 + d^2}{3A_g(1 - \rho_{sg})} \quad (1)$$

여기서 w_i 는 곡선화된 모서리 부분을 제외한 단면의 순수거리이며, A_c, A_{fr} 는 각각 콘크리트 및 FRP 보강근의 단면적이며, $\rho_{sg} = A_{fr}/A_c$ 이다. 원형단면에서와 마찬가지로 수평구속력은 고려하고자하는 축에 대하여 아래와 같이 분해하여 표현할 수 있다.

$$f_{lfrx} = E_x \epsilon_{fr} = (\rho_{frx} k_e E_{fr}) \epsilon_{fr}, \quad f_{lfr y} = E_y \epsilon_{fr} = (\rho_{fry} k_e E_{fr}) \epsilon_{fr}, \quad \rho_{frx} = \frac{2h_{fr} t_{fr}}{sd}, \quad \rho_{fry} = \frac{2h_{fr} t_{fr}}{sb} \quad (2)$$

한편, 사각형 단면을 갖는 구속된 콘크리트의 향상된 압축강도를 $f_{\infty} = \alpha_1 \alpha_2 f_{\infty}$ 라고 표현할 때 Restrepo(2001) 등은 아래와 같이 강도향상계수 및 비균일 구속력에 의한 감소계수를 각각 정의하고 있다.

$$\alpha_1 = 2.25 \sqrt{1 + 7.94 \frac{F_l}{f_{\infty}}} - 2 \frac{F_l}{f_{\infty}} - 1.25, \quad \alpha_2 = \left[1.4 \frac{f_l}{F_l} - 0.6 \left(\frac{f_l}{F_l} \right)^2 - 0.8 \right] \sqrt{\frac{F_l}{f_{\infty}} + 1} \quad (3)$$

여기서 F_l, f_l 은 단면형상에 따른 최대 및 최소 수평구속력을 각각 나타낸다. 또한, 구속된 콘크리트의 최대변형률은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\epsilon_{\infty}}{\epsilon_{\infty}} = \beta_1 \left[\frac{f_{\infty}}{f_{\infty}} - \beta_2 \right] \quad (4)$$

여기서 β_1, β_2 은 구속 혹은 비구속된 콘크리트의 특성 및 아치 작용각도에 의하여 결정되는 상수이다.

3. 실험개요

본 연구에서 고려한 시험체의 주요변수는 i) Glass Fiber 배치 방법(양 및 방향), ii) 구속형태 및 방법(상, 하부 연속 및 불연속, 수직 이음부 유무) 등이다. 기둥 단면은 정사각형(150x150x300mm)으로 하였으며, 모서리 부분은

$r_c=10\text{mm}$ 를 갖도록 곡선화 하였다. 사용된 FRP 보강재에서 Fiber 배치는 구입 가능한 1-방향(x 혹은 y방향) 및 2-방향 Woven Roving Cloth형 Glass Fiber를 다양하게 조합하여 전체 6종류를 결정하였다. 또한, FRP는 구속 방법에 따라 외부를 감싸는 **Wrapping형(SW)**, 이미 성형된 Shell을 나타내는 **Full Shell형(SF)**, 2개의 채널형 Shell을 수직 이음하여 접착하는 **Partial Shell형(SP)** 등을 포함한다(그림 2). 완전 Shell형 시험체는 충분히 Wrapping한 후 상, 하단부를 절단하여 제작하였으며, 부분 Shell형의 경우는 이음부가 취약할 것으로 예상되나 현재의 기기 보유현황 및 작업여건상 제작 및 시공이 용이한 점에서 고려하였고, 이음부의 파괴를 가능한 지연할 수 있도록 50mm의 충분한 이음길이를 두었다. 따라서 Wrapping 및 부분 Shell 형은 FRP에 수직하중이 직접 작용하지 않도록 10mm 정도를 순수콘크리트로 남겨둔 반면에 완전 Shell 형은 FRP에 수직하중이 직접 작용하도록 전단면에 걸쳐 FRP를 부착하였다. FRP 인장시험편은 Fiber 두께 및 방향 별로 x방향을 주방향으로 하여 2개씩 제작하였으며, 모든 시험체에 사용된 콘크리트 압축강도(f_{co})는 21MPa 이다. Epoxy 함침 및 수동으로 적층(Manual Lay-up)하여 소요 Fiber량을 확보하였다.

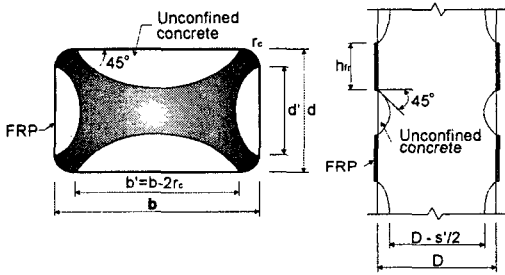


Fig. 1 Confinement Mechanism

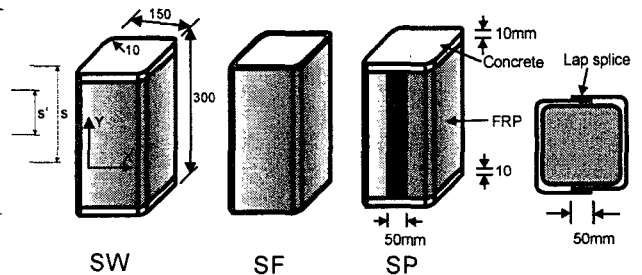


Fig. 2 Specimen Types

4. 실험결과

모든 시험체의 파괴는 구속형태 및 방법에 상관없이 모서리 혹은 모서리의 곡선부분이 끝나는 부위에서 일직선 혹은 계단형 FRP 파단이 수직으로 전체 혹은 부분에 걸쳐 진전되면서 발생하는 경우와, 먼저 수평파단이 전단면에 걸쳐 충분히 발생한 뒤 모서리까지 이어 지면서 수직파단으로 전환하는 양상으로 구별할 수 있다. 파괴는 갑작스럽게 발생하였으나 감지할 수 있었으며, x 방향 Fiber 량이 증가 할수록 후반부 강성이 증가하였다. 초기 재하로부터 50%정도의 파괴하중 구간에서 콘크리트 내부에 미세균열 및 골재의 이동을 나타내는 소리를 들을 수 있었으며, 최대하중 부근에서는 Fiberglass가 끊어지는 소리를 들을 수 있었다. 또한, 최대하중에 가까워짐에 따라 시험체 모서리 부위에서는 FRP의 균열을 나타내는 수직 혹은 수평의 흰선 혹은 흰블록(Whitening)을 감지 할 수 있었다. 이러한 조짐은 수지가 소성변형을 시작했음을 의미하며, 하얀색의 Fiberglass 만이 하중을 지지하고 있음을 의미한다. FRP에 국부좌굴 및 물결모양의 찌그러짐이 관측되었으나, 대부분 시험체의 주요파괴 형태는 FRP의 파단으로 종료되었다. 각 Series 별 FRP x방향 Fiber 량에 따른 응력 및 변형능력 향상은 그림 3과 같으며, 식(2) 및 (4)에 의한 강도 및 변형도 예측결과는 그림 4와 같다.

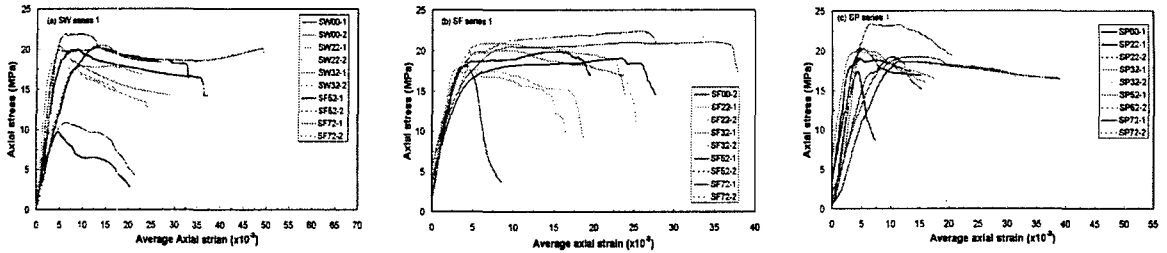


Fig. 3 각 Series 별 응력-변형률 관계

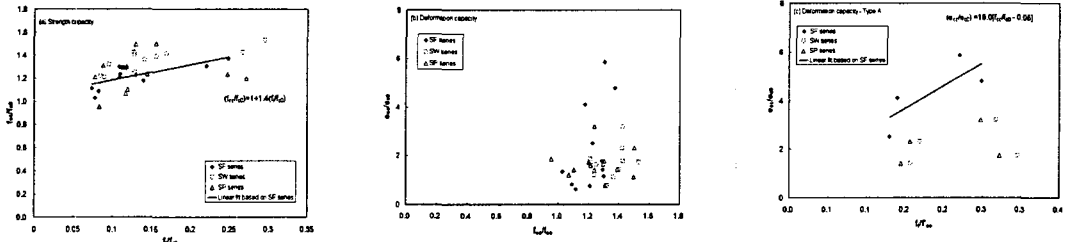


Fig. 4 예측식과 실험결과의 비교

5. 결론

콘크리트의 구속효과는 FRP 두께(x방향 Fiber량)에 크게 지배되었으며, 대체로 Wrapping형 및 Full-Shell형 FRP에 구속된 콘크리트의 성능은 보강되지 않은 콘크리트에 비하여 우수한 강도 및 특히, 변형률 향상효과를 나타내었다. 사각형 단면의 경우 모든 파괴는 모서리부분에서 FRP 파단에 의하여 발생하므로, 원형단면의 지속적 증가형태와는 달리 완전 탄소성 형태 혹은 후반부가 저하하는 응력-변형률 관계를 나타내었다. 보강되지 않은 콘크리트와 비교하여 정사각형 시험체의 강도증가는 SW형에서 1.2~1.5배, SF형에서는 1.1~1.3배, SP형에서는 1.1~1.5배를 나타내었다. 기존식에 의한 최대강도 예측은 일정한 양상을 나타내었으나, 최대변형률은 매우 산란한 결과를 나타내었다. 이에 후반부에 강도가 증가하는 충분히 보강된 시험체의 응력-변형률 관계만을 비교한 결과 구속력에 대하여 어느 정도 일정한 양상을 얻어낼 수 있었다.

참고문헌

1. Harmon, T. G., and Slattery, K. T. (1992), "Advanced Composite Confinement of Concrete," Proc., 1st Conf. on Advanced Compos. Mat. in Bridges and Struct., K. N. Neal and P. Labossiere, eds., CSCE, Montreal, Canada, pp. 299-306.
2. Wang, Y. C. and Restrepo, J. (2001) "Investigation of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined with Glass Fiber-Reinforced Polymer Jackets," ACI Struct. J., ACI, 98(3), pp. 377-385.