

반복하중하의 FRP 시트 종류에 따른 부착특성

Bond Characteristics of FRP sheet to Various Types under Cyclic Load

고 훈 범*

Ko, Hune Bum

Abstract

Fiber-reinforced polymer (FRP) sheets have been successfully used to retrofit a number of existing concrete buildings and structures because of their excellent properties (high strength, light weight and high durability). Bond characteristics between FRP sheets and concrete should be investigated to ensure an effective retrofitting system. RC structures strengthened with FRP sheets are often subjected to cyclic load (traffic, seismic, temperature, etc.). This research addresses a local bond stress-slip relationship under cyclic loading conditions for the FRP-concrete interface. 18 specimens were prepared with three types of FRP sheets (aramid, carbon, and polyacetal) and two types of sheet layer(one or two). The characteristics of bond stress-slip were verified through experimental results on load-displacement relationship.

요 지

최근 지진, 노후화 등에 따라 손상된 많은 콘크리트 구조물을 보강하기 위하여 고강도이면서 가볍고 내구성이 뛰어난 특성을 가지고 있는 FRP(Fiber-reinforced polymer) 시트가 구미에서 뿐만 아니라 우리나라에서도 널리 사용되고 있으며 관련연구도 활발히 체계적으로 이루어지고 있다. 일반적으로 FRP 시트로 보강된 RC구조물은 지진, 교통, 온도 등에 의해 자주 반복하중을 받는다. 그러나 대부분의 연구가 일축 하중하에 이루어진 경우가 대부분이며 이러한 연구결과를 토대로 FRP의 부착특성을 확인하고 있으며 다양한 부착모델을 제안하고 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 아라미드섬유, 탄소섬유, 폴리아세탈 섬유와 매수를 변수로 하여 총 18개의 시험체를 제작하고 최대부착강도, 최대변위, 변형률을 측정하고 그 결과에 근거하여 부착응력, 슬립을 계산하여 반복하중하의 FRP 시트와 콘크리트의 부착특성을 미시적으로 살펴보았다.

Keywords : Bond stress, Cyclic load, FRP sheet, Slip

핵심 용어 : 부착응력, 반복하중, 연속섬유시트, 슬립

* 정회원, 인하공업전문대학 건축과 부교수, 공학박사

E-mail : hbko@inhac.ac.kr 011-336-4212

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2008년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

FRP(Fiber-reinforced polymer) 시트는 고강도 이면서 가볍고 내구성이 뛰어난 특성을 가지고 있어 지진, 노후화 등에 따라 손상된 많은 콘크리트 구조물을 보강하기 위해 우리나라뿐만 아니라 구미에서도 널리 쓰이고 있는 재료라 할 수 있다. 이렇게 FRP 시트로 보강된 건물은 수명이 연장되며 구조적으로도 기존의 구조내력을 증가하는 경우가 많다. 그런데 이러한 구조내력증가와 수명연장을 위해서는 콘크리트와 FRP의 부착특성을 고려하여 위험하중에 대하여 계면에서의 부착파괴가 극소화 될 수 있는 방안들을 고려해야 한다. 최근 이러한 부착특성에 대한 연구가 국내외적으로 활발히 체계적으로 이루어지고 있다. 미시적으로는 다양한 시험방법을 통하여 FRP 시트와 콘크리트의 계면에 발생하는 부착특성을 고찰하면서 거시적으로는 FRP 시트로 보강된 철근콘크리트(RC) 부재의 휨이나 전단특성을 살펴보고 있으며 적지 않은 연구가 보고되고 있다.

일반적으로 FRP 시트로 보강된 RC구조물은 지진, 교통, 온도 등에 의해 자주 반복하중을 받는다. 그러나 대부분의 미시적 연구가 일축 하중하에 이루어진 경우가 대부분이며 이러한 연구결과를 토대로 FRP의 부착특성을 확인하고 있으며 다양한 부착모델을 제안하고 있다. 물론 일축하중하의 부착특성이 반복하중하의 부착특성과 아주 다른 경향을 보여준다고는 할 수 없으나 반복하중을 받는 FRP 시트 보강 RC구조물의 특성을 이해하는 데는 일축하중하의 부착특성으로 평가하는 방법은 논리적으로 모순된다고 할 수 있다.

이러한 관점에서 이 연구에서는 아라미드섬유, 탄소섬유, 폴리아세탈 섬유와 매수를 변수로 하여 총 18개의 시험체를 제작하고 최대부착강도, 최대변위, 변형률을 측정하고 그 결과에 근거하여 부착응력, 슬립을 계산하여 반복하중하의 FRP 시트와 콘크리트의 부착특성을 미시적으로 살펴보았다.

2. 관련 연구의 고찰

FRP 시트와 콘크리트의 부착특성에 관한 연구의

대부분은 다양한 부착시험방법을 통하여 부착에 영향을 주는 인자를 중심으로 이루어져 왔으며 그러한 연구결과를 토대로 부착응력-슬립모델을 제시하여 왔다. 영향인자로는 부착길이, 시트폭, 콘크리트 강도, 콘크리트 표면처리 및 조건, 접착재료 등을 꼽을 수 있다. 부착길이에 대한 연구에서는 많은 연구자들이 부착길이 증가하면 부착강도도 증가하지만 부착강도가 더 이상 증가하지 않는 유효부착길이 존재한다고 제안하고 있다. 물론 연구자에 따라 유효부착길이는 다른 값을 보여주고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

콘크리트 강도에 대한 연구에서는 Chajes가 단면접침 전단 시험(single-lap shear test)을 통하여 콘크리트에 부착된 FRP 시트의 부착응력 전달 메커니즘을 밝히는 연구를 시도하였는데 계면파괴모드가 콘크리트표면의 전단파괴에 의하여 지배되면 최대부착강도는 콘크리트강도의 제곱근에 비례한다고 보고하고 있다.⁽²⁾ Horiguchi와 Saeki는 콘크리트 압축강도의 증가에 따라 부착강도는 증가하며 콘크리트 압축강도가 낮을 경우, 예를들면 24.8Mpa 보다 작은 경우 콘크리트에서 파괴가 일어난다고 보고하고 있다.⁽⁴⁾ Nakaba 등은 부착실험을 통하여 평균 최대부착응력($\tau_{b,max}$)과 콘크리트 또는 모르타르 강도(σ_B)사이에 $\tau_{b,max} = 3.5\sigma_b^{0.19}$ 라는 관계가 성립한다고 발표하였다.⁽⁷⁾ 콘크리트 표면처리 방법과 조건에 관한 연구에서는 여러 연구자들이 표면처리방법이 부착강도에 영향을 미친다고 설명하고 있으며 Yoshizawa 등은 콘크리트 각주에 다양한 표면처리방법을 실시하고 CFRP 시트를 부착하여 부착강도에 미치는 영향을 조사한 결과 워터젯에 의한 방법이 샌드블래스팅보다 2배정도 효과가 있다고 보고하고 있다.⁽⁸⁾ Lorenzis의 연구에서는 샌드블래스팅보다 치핑이 보다 효과적이라는 결과를 얻었다.⁽⁵⁾

접착재료에 관한 연구에서는 현장에서는 실제적으로 많은 접착재료가 사용되고 있으나 불행하게도 이러한 재료들을 정량적으로 비교한 연구는 매우 한정적이다. Dai et al 등은 계면파괴에너지 G_f 와 계면 연성 계수 B 라는 간단한 두 가지 인자의 조합으로 부착층의 기여를 평가하였다. 그들의 연구를 통하여 연성의 접착제가 일반적으로 높은 G_f 와 낮은 B 를 보여주고 있다고 설명하고 있으나 상용화된 접착재료에 적합한 G_f

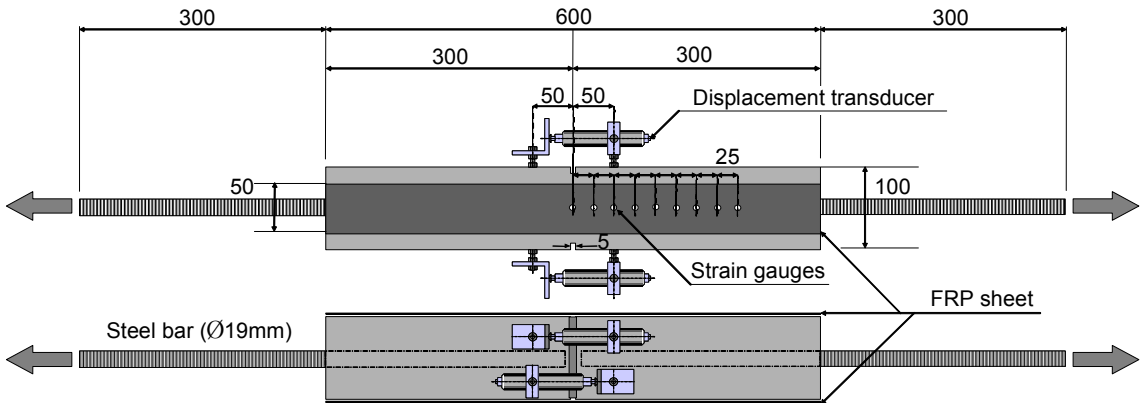


Fig. 1 시험체 형상

와 B의 통합된 관계를 정식화하기 위해서는 더 많은 실험자료가 필요하다고 보고하고 있다.⁽³⁾

3. 실험 계획

3.1 시험체 계획

시험체는 Fig. 1과 같이 100mm×100mm×600mm의 형상을 갖는 콘크리트 블록으로 이루어 졌으며 FRP 시트의 종류와 매수에 대한 인자를 가지고 제작되었다. 시트 종류는 아라미드섬유(A), 탄소섬유(C), 폴리아세탈섬유(P)를 대상으로 하였으며 시트 매수는 1매와 2매를 선택하였다. 사용된 시트의 역학적 성질은 Fig. 2와 같고 구입회사의 시험성적표에 근거하여 작성되었다. 탄소섬유 시트가 가장 높은 강도와 탄성계수를 보여주고 있으며 반대로 폴리아세탈 섬유시트는 가장 낮은 강도와 탄성계수를 나타내고 있다.

시험체는 철재 거푸집에 의해 제작되었으며 철근의 위치를 고정시키기 위하여 양면에는 합판을 이용하였다. 시험체에 사용된 콘크리트는 보통포틀랜드시멘트와 최대크기가 20mm인 굵은 골재가 사용되었다. 거푸집에 콘크리트 타설이 이루어진 후 시험체에 젖은 형질을 덮어 1주일동안 습윤양생을 실시하였으며 타설 1주일 후에 거푸집을 탈형하였다. 탈형 후 일반적으로 가장 많이 사용하는 방법인 샌드그라인더를 사용하여 시험체 표면을 연마하여 레이턴스 및 불순물을 제거하

였다. 시험체 양면에는 폭 50mm를 가진 각각의 종류의 시트를 접착하였는데, 아라미드와 탄소섬유시트는 같은 종류의 접착제를 사용하였으며 폴리아세탈 섬유인 경우는 높은 연성을 갖는 접착제를 사용하였다. 접착제의 특성은 표 1과 같다. 접착방법은 제작회사의 시방서에 의거하여 이루어졌다. 시트 접착된 시험체는 90일 정도 상온(평균 22℃)에서 보관되었으며 가력 전에 변형률게이지를 부착하였다. 2mm의 측정 길이를 가진 변형률 게이지를 사용하였으며 Fig. 1과 같이 25mm간격으로 한 면에만 9개를 부착하였다. 양면으로 부착하지 않은 이유는 기초실험을 실시한 결과 한 쪽 단면으로만 부착하여도 충분히 부착특성을 확인할 수 있다는 결론을 얻었기 때문이다. 콘크리트(설계기준강도=30Mpa, W/C=60%, 슬럼프 12cm, 공기량=3%)압축강도 공시체도 제작되었으며 평균압축강도는 33MPa를 나타내었다.

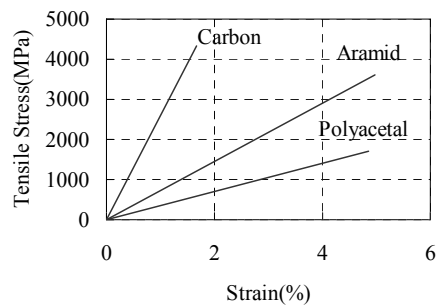


Fig. 2 FRP 시트의 역학적 특성

Table 1 접착제의 재료특성

| 접착제 종류 | 규격압축강도 (MPa) | 규격인장강도 (MPa) | 규격탄성계수 (Mpa) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|
| FP-NS(A) | 68 | 29 | 1,470 |
| FR-E3P(C) | 68 | 29 | 1,470 |
| S-800(P) | 56 | 25 | 1,030 |

3.2 시험체의 가력 및 측정 방법

시험체는 200ton 만능재료시험기를 통하여 시험체 중간에 묻혀 있는 이형철근에 직접인장을 통하여 반복 가력되었다. 이형철근은 시험체 중간부분에서 절단되어 있으며 가력전에 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 시험체 중간의 흠에 균열을 발생시켜 인장하중이 바로 FRP 시트에 전달될 수 있도록 하였다. 반복하중조건은 Fig. 3과 같으며 이 하중 조건은 부착응력-슬립 관계 그래프에서 최대 부착응력 이후의 하중이력을 명확하게 하기 위해서 채택하였으며, 하중조건은 단조하중하의 부착거동 실험결과에 근거하여 시험체는 각각의 변형률계이지 위치에서의 슬립이 s_y ($s_y =$ 최대 부착응력 τ_y 에 해당하는 슬립, A점)를 초과할 경우 제하되었으며 그 다음 제하는 슬립이 $2s_y$ (B점)일 경우에 이루어졌다. 결과적으로 변형률계이지 숫자의 2배만큼 총 18번의 제하와 제하가 반복되도록 계획되었으나 결과

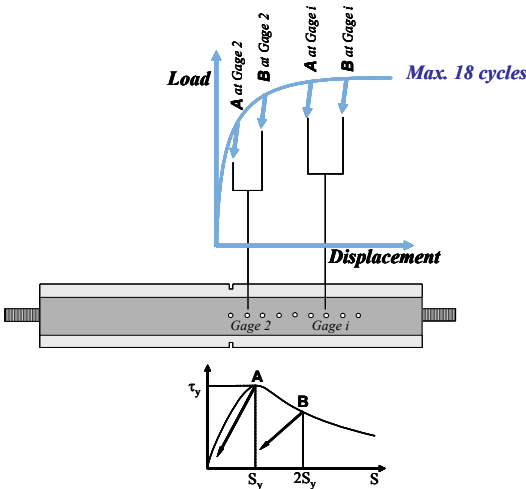
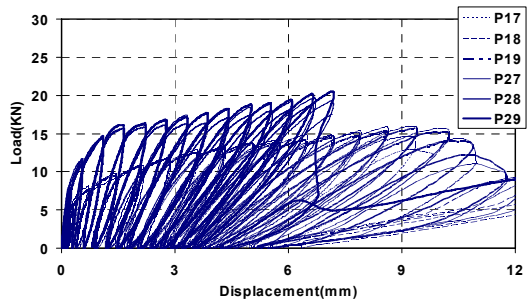
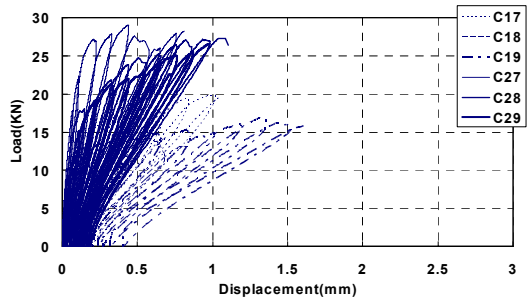
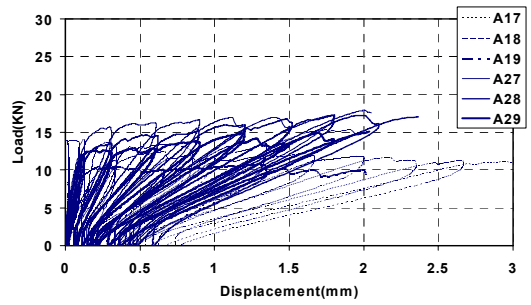


Fig. 3 반복하중 조건



(A=아라미드, C=탄소, P=폴리아세탈)

Fig. 4 하중-변위관계

적으로 Fig. 4와 같이 그 전에 시험체의 종국파괴가 관찰되었다. 시험체의 전체적인 변형은 Fig. 1과 같이 4개의 변위계를 통하여 측정하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 실험 결과

파괴형상을 살펴보면 탄소섬유 및 아라미드 섬유 시험체인 경우 콘크리트와 시트사이에서 전단파괴가 일어났으며 폴리아세탈 섬유인 경우 접착제의 연성이 높아 시트와 접착제사이에서 계면파괴가 발생한 것으

Table 2 실험결과 값

| Specimen | Sheet Layer | $t_F E_F$ kN/mm | P_{max} kN | Ultimate Disp. mm |
|----------|-------------|--------------------|-----------------|----------------------|
| A17 | 1 | 10.4 | 12.42 | 3.02 |
| A18 | | | 15.27 | 1.95 |
| A19 | | | 10.79 | 2.02 |
| Ave. | | | 12.83 | 2.33 |
| A27 | | | 17.91 | 2.05 |
| A28 | 2 | 20.9 | 17.26 | 2.37 |
| A29 | | | 15.06 | 2.04 |
| Ave. | | | 16.74 | 2.15 |
| C17 | | | 19.86 | 1.06 |
| C18 | 1 | 43.5 | 14.10 | 0.83 |
| C19 | | | 17.02 | 1.61 |
| Ave. | | | 16.99 | 1.17 |
| C27 | | | 29.01 | 0.81 |
| C28 | | | 27.31 | 1.10 |
| C29 | 2 | 87.0 | 26.57 | 0.97 |
| Ave. | 27.63 | 0.96 | | |
| P17 | 1 | 12.4 | 15.11 | 9.84 |
| P18 | | | 15.95 | 10.25 |
| P19 | | | 15.74 | 10.88 |
| Ave. | | | 15.60 | 10.32 |
| P27 | | | 19.67 | 7.19 |
| P28 | 2 | 24.7 | 18.74 | 6.66 |
| P29 | | | 20.54 | 7.20 |
| Ave. | | | 19.65 | 7.02 |

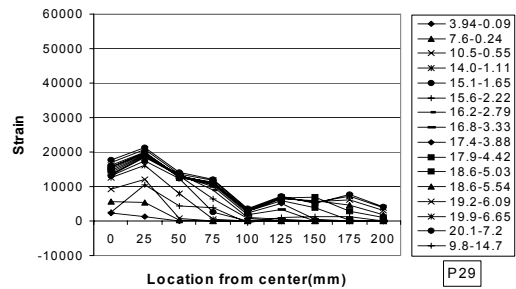
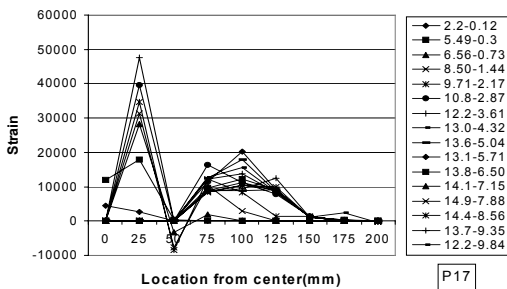
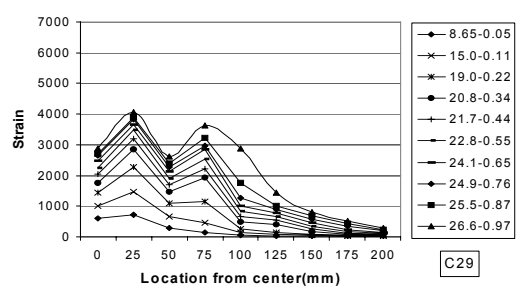
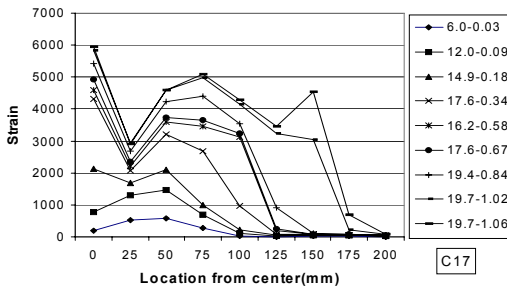
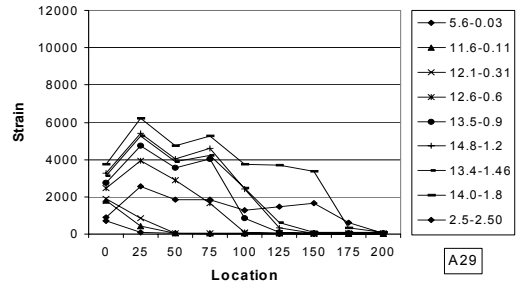
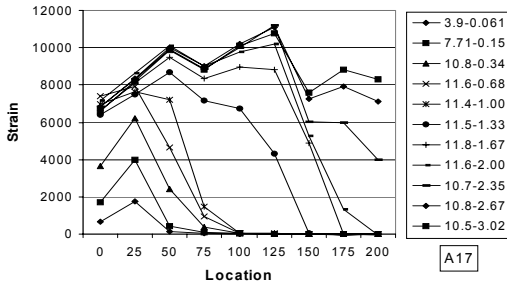
로 관찰되었다. Table 2는 실험결과를 보여주고 있으며 Fig. 4는 각각의 변수(시트 타입-아라미드섬유, 탄소섬유, 폴리아세탈섬유, 매수-1매, 2매)마다 같은 변수를 가진 3개의 시험체에 대한 하중과 변위관계를 보여주고 있는데 3개의 시험체 모두 거의 같은 경향을 보여주고 있다. 각 섬유타입별로 시트매수에 따른 최대하중과 최대변위를 살펴보면, 1매인 경우보다 2매인 경우가 높은 최대하중과 낮은 최대변위를 보여주고 있다. 그렇지만 최대하중과 최대변위에 대한 1매와 2매의 비율에 있어서 다른 연구자의 실험결과와는 다른 값의 비율을 보여주고 있어 시트매수에 따라 섬유타입별로 최대하중과 최대변위의 비율에 어떤 영향을 끼치는가에 대해서는 심도 있는 검토가 필요하다. 각 섬유종류에 따른 실험결과를 살펴보면, 최대하중은 탄소섬유, 폴리아세탈섬유, 아라미드 섬유 시험체 순서로 높고 최대변위는 폴리아세탈섬유, 아라미드섬유, 탄소섬유 순서로 낮은 값을 보여주고 있다. 일반적으로 재료

의 강성이 클수록 최대하중은 높고 최대변위는 작은 결과를 보여주는데 폴리아세탈섬유 시험체인 경우 아라미드 섬유 시험체보다 최대하중이 높게 나타나서 폴리아세탈섬유 시험체에 사용된 접착제의 연성이 높고 시험재령이 길어서 이런 결과가 나타났다고 추측되지만 좀더 검증이 필요하리라 사료된다.

4.2 실험 결과에 대한 분석

Fig. 5는 시험체의 FRP 시트 변형률 분포를 살펴보기 위하여 같은 변수의 시험체에 대하여 대표적인 시험체를 선별하고, 반복하중시 각 이력의 최대하중과 변위의 값을 나타낸 것이다. 가로축은 시험체 중간부분의 변형률게이지위치를 0으로 정하여 각각 9개의 위치값을 표시한 것이며 세로축의 변형률 값은 그 위치에서 실제 측정된 값을 나타내었다. 전체적인 변형률 분포의 특징을 살펴보면 초기 이력에서는 시트의 변형이 시험체의 중간부분에서만 발생하다가 이력이 거듭될수록 단부 쪽으로 증가되는 것을 알 수 있다. 즉 초기 이력에서는 FRP 시트의 부착력이 국부적으로 하중에 저항하다가 이력수가 증가함에 따라 FRP 시트가 전체적으로 부착력이 발휘된다는 것을 의미한다. 또한 FRP 시트의 부착파괴는 중앙부에서 시작되어 이력수의 증가와 함께 단부로 이동한다는 것도 알 수 있다.

FRP 시트 매수의 영향을 살펴보면 초기이력에는 변형률분포가 유사하나 이력수(예:A17=11,A29=9)가 증가할수록 시트 매수가 2매인 시험체(A29,C29,P29)의 변형률 분포 기울기가 안정되면서 시트 매수가 1매인 시험체(A17,C17,P17)처럼 시트가 국부적으로 하중에 저항하기 보다는 중앙부(위치0)의 시트에 부착력이 집중되면서 전체적으로 저항하는 경향을 보여주고 있다. 또한 시트 매수의 증가에 따라 최대 변형률은 작게 나타났다. 각각 시험체에 대하여 시트 종류에 따른 최대 변형률을 살펴보면 시트의 강성이 큰 탄소섬유 시트가 가장 작은 변형률을 보여주었으며 아라미드섬유, 폴리아세탈 섬유 순서로 큰 변형률을 나타내었다. 특히 폴리아세탈 섬유의 시험체는 이력수가 많은 경우 변형률게이지의 측정범위를 벗어나는 경우가 발생할 정도로 매우 높은 변형률을 보여주었다.



각 이력의 최대하중-그때의 변위(A=아라미드, C=탄소, P=폴리아세탈)

Fig. 5 FRP 시트 변형률 분포

각 FRP 시트에 대한 부착특성을 살펴보기 위하여 각 시험체에서 얻어진 변위 및 FRP 시트의 변형률로부터 각 시험체의 슬립(S)과 부착응력(τ)을 다음과 같이 계산하였다.

$$S_0 = w_{cr} / 2 \quad (1)$$

$$S_1 = S_0 - (\epsilon_0 s_g) / 2 \quad (2)$$

$$S_i = S_{i-1} - (\epsilon_i - \epsilon_{i-1}) s_g \quad (3)$$

$$\tau_i = \frac{(\epsilon_i - \epsilon_{i-1}) \cdot t_f \cdot E_F}{s_g} \quad (4)$$

여기에서,

w_{cr} : 시험체 중앙에서의 균열 폭

$$= (\text{변위계 1} + \text{변위계 2} + \text{변위계 3} + \text{변위계 4}) / 4$$

ϵ_0 : FRP 시트 중앙에서의 변형률

ϵ_i : FRP 시트 i번째에서의 변형률

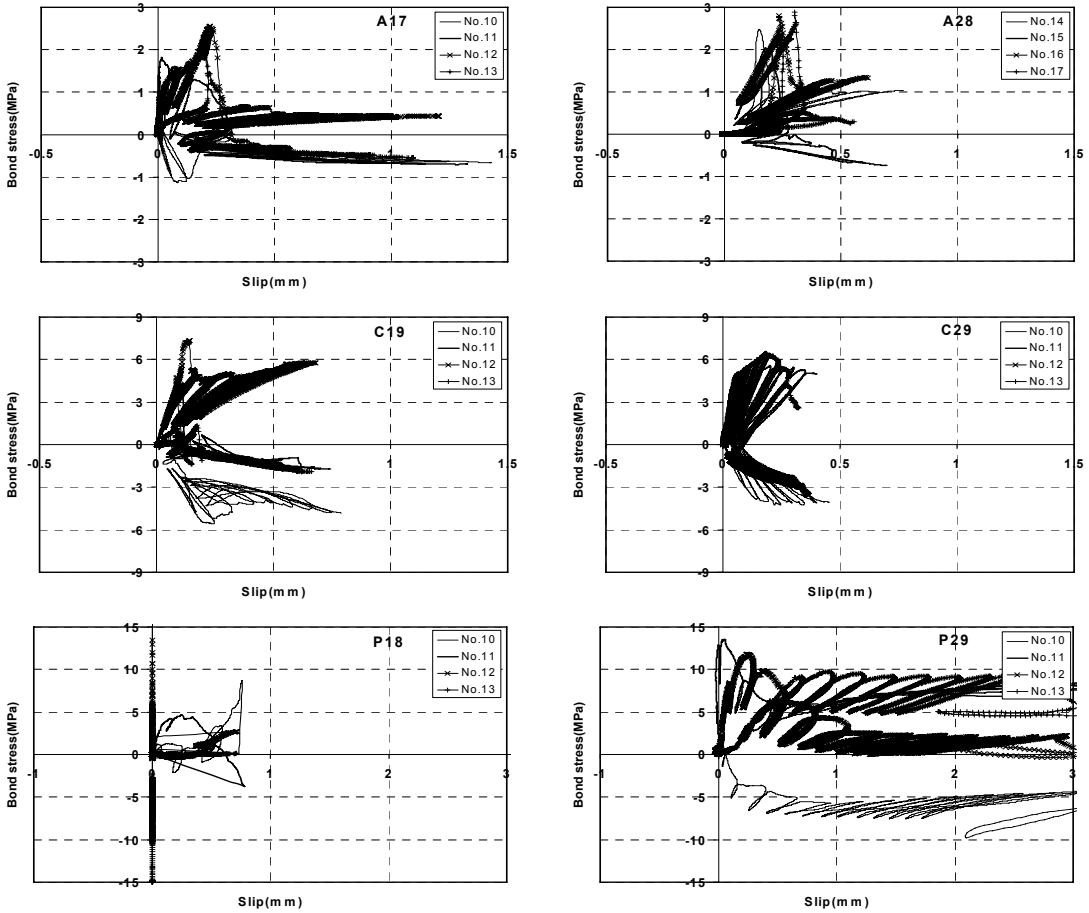
s_g : 변형률계이지의 간격

τ_i : i번째 구간의 부착응력

t_F : FRP 시트 두께

E_F : FRP 시트의 탄성계수

Fig. 6은 부착응력이 집중된 시험체의 중간부분 변형률계이지 사이의 위치에서 계산된 대표적인 국부 부착응력과 슬립 값을 나타내었다.



(A=아라미드, C=탄소, P=폴리아세탈)

Fig. 6 부착응력-슬립관계

첫 번째 변형률계이지와 두 번째 변형률 계이지의 중간위치 값이 10을 나타내며 그 다음 위치의 값은 11을 의미한다. 전체적으로 반복하중 조건에 따라 부착응력-슬립관계도 반복적인 형태를 보여주고 있으며 최대부착응력(τ_y : 1~15MPa)과 그때의 슬립(s_y : 0~3mm)도 확인될 수 있었다.

그러나 특정위치에서는 부착응력이 -값을 보여 주는 경우도 있어 위치에 따라서는 부착응력-슬립관계가 성립하지 않는 경우도 발생하였지만 이러한 현상이 발생하는 것은 Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 특정한 위치에서 골재유무, 콘크리트 표층의 저항정도 차이, 우발적인 바리전개 등으로 인하여 변형률이 거의 증가

하지 않거나 급속하게 증가하기 때문이다. 그러므로 이러한 원인을 실험시 고려하거나, 실험 후에는 이러한 원인을 제거할 수 있는 보정방법을 선택하여 정도 높은 부착응력-슬립관계를 얻을 수 있는 노력이 필요하다고 생각된다.

5. 결론

이 연구에서는 탄소섬유, 아라미드섬유, 폴리아세탈 섬유 FRP 시트와 시트 매수를 변수로 콘크리트 블록 시험체에 시트를 접착하고 반복적인 직접 인장시험을 통하여 FRP 시트와 콘크리트 사이의 부착특성을 검

토하였다. 이 실험연구를 통해 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 일반적으로 재료의 강성이 클수록 최대하중은 높고 최대변위는 작은 결과를 보여주었으며, 시트 매수에 따라 명확히 최대하중과 최대변위는 차이를 보여주었다. 그러나 폴리아세탈 섬유 시험체인 경우 아라미드 섬유 시험체 보다 최대하중이 높게 나타나 시험재령이 원인이라고 추측된다.
- 2) 초기 이력에서는 시험체의 중간부분에서만 시트에서 변형이 발생하다가 이력을 거듭할수록 시트의 변형이 단부 쪽으로 증가되며, 시트 매수가 2매인 시험체의 변형률 분포는 안정되고 중앙부의 시트에 부착력이 집중되면서 전체적으로 하중에 저항하는 경향을 보여주고 있다. 또한 시트의 강성이 클수록 작은 변형률을 보여주었다.
- 3) 전체적으로 반복하중 조건에 따라 부착응력-슬립관계도 반복적인 형태를 보여주고 있으며 최대부착응력(τ_y : 1~15MPa)과 그때의 슬립(s_y : 0~3mm)도 확인될 수 있었다.

상기의 연구결과에 근거하여 향후에는 특정위치에서 부착응력-슬립관계가 성립하지 않는 경우의 원인을 검토하고, 이러한 원인을 실험 시 고려하거나, 실험 후에는 이러한 원인을 제거할 수 있는 보정방법을 선택하여 정도 높은 부착응력-슬립관계를 얻을 수 있는 노력이 필요하다고 생각된다.

참고문헌

1. Brosens, K. and Van Gemert, D. "Anchorage Design for Externally Bonded Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminates." Proceedings of the FRPRCS-4, SP-188, ACI, 1999, pp. 635-645.

2. Chajes, M.J, Finch, Jr., W.W. Januszka, T.F. and Thomson, T.A. "Bond and Force Transfer of Composite Material Plates Bonded to Concrete." ACI Structural Journal, V. 93, No. 2, 1996, Mar.-Apr., pp. 295-303.
3. Dai, J., Ueda, T., and Sato, Y., "Unified Analytical Approaches for Determining Shear Bond Characteristics of FRP-Concrete Interfaces through Pullout Tests." Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.1, 2006. pp. 133-145.
4. Horiguchi, T., and Saeki, N. "Effect Test Method and Quality of Concrete on Bond Strength of CFRP Sheet." Proceedings of Third International Symposium of Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, V.1, 1997, pp. 265-270.
5. Lorenzis, L.D., Miller, B., and Nanni, A. "Bond of Fiber-Reinforced Polymer Fibers to Concrete", ACI Materials J., 2001, pp. 256-264.
6. Maeda, T., Asano, Y., Sato, Y., Ueda, T., and Kakuta, Y. "A Study on Bond Mechanism of Carbon Fiber Sheet." Proceedings of Third International Symposium of Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, V.1, 1997, pp. 279-286.
7. Nakaba, K., Kanakubo, T., Furuta, T., and Yoshizawa, H. "Bond Behavior between Fiber-Reinforced Polymer Laminates and Concrete." ACI Struct. J., 2001, pp. 359-367.
8. Yoshizawa, H., Myojo, T., Oskoshi, M., Mizukoshi, M. and Kliger, H.S. "Effect of Sheet Bonding Condition on Concrete Members Having Externally Bonded Fiber Sheet," Fourth Materials Engineering Conference, ASCE Annual Convention, Washington D.C, 1996.

(접수일자 : 2007년 5월 31일)