

특 집 II

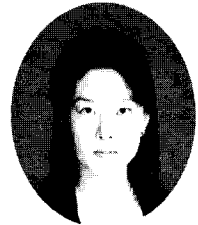
건설산업에서의 FRP

콘크리트 구조 보강용 FRP의 적용 사례

- Application of FRP to RC Structures as Strengthening Material -



신영수*



김주연**

1. 서 언

건설 구조물은 시간이 경과함에 따라 내력이 저하되고, 이 저하된 내력을 회복하기 위하여 다양한 보강 방법이 적용되어 왔다. 보강 방법의 하나로 그동안 에폭시 접착 강판 공법이 주로 사용되어 왔으나 근래에 들어서는 신소재인 FRP(Fiber Reinforced Polymer) 쉬트/판이나 격자를 사용한 보강 방법이 많이 연구되어 적용되고 있다. 구조 보강용 FRP는 섬유와 폴리머 수지의 복합체로 되어있다. 콘크리트 구조물에 적용되는 섬유 재료로는 탄소 섬유, 유리 섬유, 아라미드 섬유 등 다양한 섬유가 있으며 우리나라에서도 이러한 제품이 생산되고 있다.

본고에서는 그동안 많이 적용되어 온 탄소 섬유의 쉬트 형태 보강 방법과 격자 형태 보강 방법에 대한 적용 사례를 소개한다.

2. 탄소 섬유 쉬트를 이용한 플랫 슬래브 보강

2.1 개요

이 구조물은 지하 5층 지상 2층의 대형 주차장 건물로 플랫 슬래브 구조로 되어 있으며 현재 보수·보강이 완료되어 사용되어지고 있는 구조물이다. 당초 이 구조물은 사용 도중 심한 변형과 균열이 발생한 상태에서 안전 진단을 수행하였고 안전 진단에서 나타난 구조적 결함을 보완하여 구조물의 사용성과 구조 성능을 함께 확보하고자 하였다. 플랫 슬래브 구조는 삼풍 백화점 사고에서도 나타났듯이 결함 발생시 대형 사고가 발생할 수 있기 때문에 주의하여 안전 진단과 보강 설계를 수행하였다. 본고에서는 이 구조물의 보강 설계를 중심으로 기술하고자 한다.

2.2 보강 전 플랫 슬래브 구조물의 상태

(1) 균열

균열의 형태는 <그림 1, 2>와 같다. 균열의 형태는

* 정희원, 이화여자대학교 건축학과 교수

** 정희원, 이화여자대학교 건축학과 석사과정

각 기둥을 중심으로 하여 슬래브의 중앙부로 난 사방향 균열과 기둥 주변과 차량 통행로에서 거북이 등 모양의 미세 균열로 나눌 수 있는데 균열의 방향은 주로 차량의 진행 방향과 직각 방향으로 발생한 상태이다. 조사된 균열의 폭은 최소 0.1 mm에서 최대 5 mm까지로 측정되었으며 균열의 폭이 1.8 mm 이상의 균열은 슬래브의 상·하부를 관통하고 있었고, 이 관통 균열은 전체 균열의 약 25% 정도되었다. 그러나, 플랫폼 슬래브의 지판에는 균열이 거의 발생되지 않은 상태였다. 균열의 원인을 찾기 위해서 콘크리트 강도 조사, 철근 배근 조사, 피복 조사, 콘크리트 일부를 배근 위치까지 제거하는 등 여러 조사를 실시하였고 이를 통해 균열의 원인을 요약해보면 다음과 같다.

- ① 슬래브에 배근된 상부 철근이 설계 위치보다 매우 낮게 위치하여 모멘트 저항능력이 크게 감소하여 휨 능력 부족으로 인해 균열이 발생하였다.
- ② 주열대에 배근된 철근의 정착 길이가 충분히 확보되지 못하여 발생하는 부모멘트를 저항하지 못하였으며 이로 인하여 기둥 주위에서 중점적으로 균열이 발생하였다.
- ③ 균열로 인한 휨 강성의 저하와 정착 길이의 부족으로 균열과 과도한 처짐이 발생하였다.
- ④ 슬래브 중간대 하부 균열은 부모멘트가 중앙부로 재분배되어 발생하였다.

이상의 균열 원인이 되는 현상을 제거하는 방향으로 구조물 보강 계획을 세웠다.

(2) 구조물의 변형상태

조사 결과, 콘크리트 압축 강도와 철근의 인장 강도는 설계기준 강도를 만족하는 것으로 나타났으나, 플랫폼 슬래브의 중앙부가 단부 기둥 위치와 비교하여 최대 100 mm 이상 차이가 발생한 상태였다. 이는 이 플랫폼 슬래브 구조의 처짐 현상이 심각한 것으로 판단하여 원인을 조사하였다. 조사 결과, 변형 원인의 주원인으로 상부근이 시공시 낮게 위치하여 유효 휨이 감소하였고 주열대의 부모멘트 철근의 정착 길이가 미확보된 상태로 이로 인하여 휨 강성이 저하되어 상부에서의 균열과 변형이 크게 발생한 것으로 나타났다.

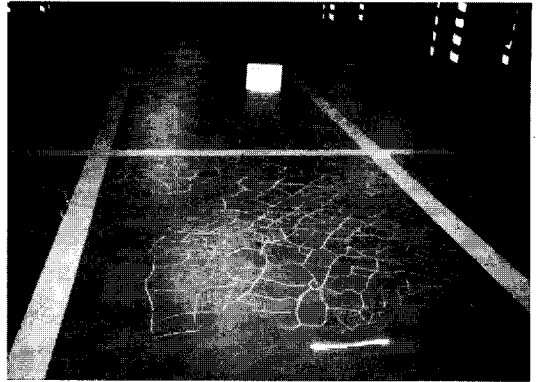


그림 1. 보강 전 균열 형태 (1)

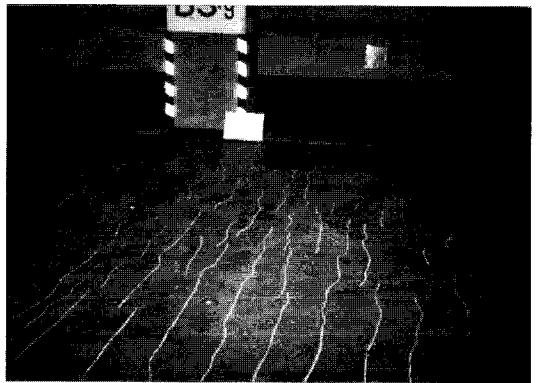


그림 2. 보강 전 균열 형태 (2)

2.3 플랫폼 슬래브의 보강 방법

(1) 보강 공법의 선택

이 플랫폼 슬래브 구조를 보강하기 위하여 다양한 보강 방법을 검토하였으나 변형으로 이미 사용성이 많이 저하되어 있는 상태이고 상부 철근의 정착 길이가 부족하여 다량의 균열과 변형이 발생한 상태로 상부 보강을 위한 방법과 하부 보강을 위한 방법을 분리하여 시공하는 것으로 하였다. 따라서, 플랫폼 슬래브 상부는 단면 증대 공법을 사용하기 위해 구조 검토를 실시하여 콘크리트로 단면을 증가시키고 배근하고, 슬래브 하부는 탄소 섬유 슈트를 사용하는 것으로 하였다. 이때 단면 증대 공법으로 인한 하중 증가는 상·하부 보강 설계에 고려하여 보강하는 것으로 하였으며 기둥, 기초 등 하중 증가로 인한 영향을 받는 모든 부분에 대해 검토하였다. 슬래브 하부 보강을 위해서는 시공

의 신속성이 공법을 결정하는 가장 중요한 요소였으므로 탄소 섬유 슈트 공법을 선택하였다.

(2) 보강량 계산 및 보강 계획

현재 배근 상태에서의 모멘트 능력과 단면 증대 후 필요한 모멘트 능력을 고려하여 슬래브의 주열대 및 중간대의 상부 및 하부에 대한 보강 모멘트를 결정하였다. 상부는 일반 철근 콘크리트와 동일한 방법으로 설계하였고, 하부는 탄소 섬유 슈트로 보강하기 위해 매수를 계산하였다. 재료는 외국산인 T사 제품을 사용하였고 계산 방법은 다음과 같다.

- 탄소 섬유 슈트의 최대 인장 강도 : 390 kg/cm
- 유효 인장 강도는 최대 인장 강도의 70%로 하여 계산

$$f_{eff} = 0.7 \times 390 = 283 \text{ kg/cm}$$

- 폭 50 cm의 슈트가 발휘할 수 있는 인장 저항 성능

$$T = 273 \times 50 \times 10^{-3} = 13.65 \text{ t}$$

- 압축력과 인장력의 중심간 거리를 0.9h(h = 25 cm)로 가정

$$\phi Mn = 0.9 T(0.9h)$$

$$n = \frac{M_u}{0.9 \times 13.65 \times (0.9 \times 0.25)} = \frac{M_u}{2.76}$$

위의 식에 따라 탄소 섬유 슈트의 보강량을 각 설계별로 계산하였고 탄소 섬유 슈트 2매를 기준으로 한 보강 계획을 나타내면 <그림 3, 4>와 같다.

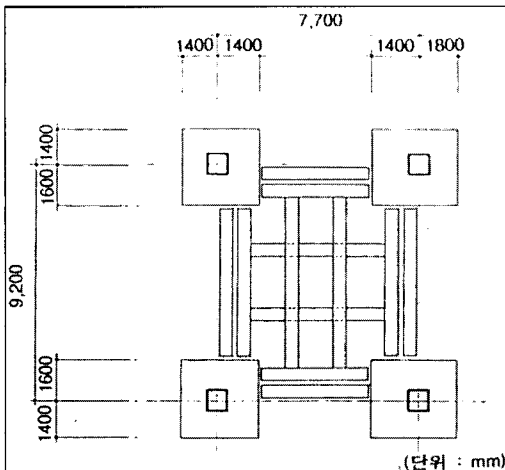


그림 3. 9.2m x 7.7m 슬래브

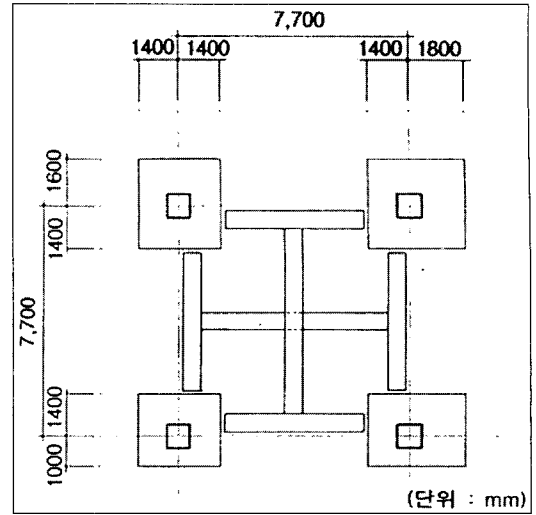


그림 4. 7.7m x 7.7m 슬래브

2.4 탄소 섬유 접착 공법의 순서

- (1) 콘크리트의 그라인딩 : 탄소 섬유가 접착될 콘크리트 바닥면을 그라인더로 고른다. 단면의 결손이 생긴 부분은 단면을 에폭시 페티로 보수한다.
- (2) 청소
- (3) 프라이머의 도포 : 에폭시계 저점도 수지를 콘크리트 면에 충분히 도포한다.
- (4) 탄소 섬유 슈트용 에폭시 수지 도포 : 탄소 섬유 슈트 전용 에폭시 수지를 도포한다. 이 경우 탄소 섬유 슈트용으로 개발되어 성능이 확인된 에폭시 수지를 사용해야 하며 수지의 선택이 잘못될 경우 구조적 성능과 내구성을 기대할 수 없으므로 수지의 선택에 유의해야 한다.
- (5) 탄소 섬유 슈트의 접착 : 탄소 섬유 슈트를 설계에 따라 정확히 재단하여 접착시킨다.
- (6) 탄소 섬유 슈트 가압 함침 : 접착된 슈트 위에 접착시 사용했던 에폭시 수지를 도포하여 가압 함침시킨 후 기포를 제거한다.
- (7) 수지 보충 함침 : 수지를 보충하여 함침시킨다.
- (8) 양생 : 평균 기온 섭씨 10℃에서 2주간, 평균 기온 섭씨 20℃에서 1주 이상 양생시킨다. 양생시 양생 온도에 특히 유의하여야 하며 4℃ 이하가 되지 않도록 해야 한다.

3. 격자형 탄소 섬유를 이용한 터널 보강

3.1 개요

이 터널은 교외선 구간의 터널로 완공 후 20년 정도 경과한 구조물이다. 완공 후 상부의 도로가 확장되어 빈번한 차량의 통행과 과하중으로 인하여 다량의 균열이 발생한 상태로 이 균열로 인하여 누수가 심하게 발생한 상태였다. 이 터널을 보강하기 위해서는 누수 문제를 먼저 해결하고 상부 과하중으로 인한 구조 보강이 필요한 상태의 구조물이다. 즉, 현재의 단면은 구조적으로 문제가 있어 외부에 보강이 필요한 상태이므로 이를 위해 격자형 탄소 섬유를 사용하였다. 본고에서는 격자형 탄소 섬유 보강법의 시공 방법을 중심으로 적용 사례를 설명한다.

3.2 사용 재료

(1) 유도 처리관

물만 통과시키고 그 외의 이물질 등은 통과시키지 않는 미세한 그물 구조로 만들어진 특수 유도 처리관으로 굴곡부에도 자유롭게 시공이 가능하다. 누수량에 따라 여러 겹 겹쳐 사용 가능하고 동결 피해를 받지 않으며, 내약품성, 내수성이 강한 유도 처리관이다.

(2) 고성장 유기 화학 방수재

유기 화학제와 시멘트계 원료로 구성된 건조 분말로서 건조 유기 화학제가 용해되었을 때 콘크리트의 공극으로 끌려 들어가며 수화 결정체 형성에 의해 콘크리트와 화학적으로 반응하고 콘크리트 내부의 공간, 미세한 균열 및 틈새를 막는다. 물이 이미 침투되었거나 자주 젖어 있는 표면은 유기 화학제의 확산이 깊게 진행되어 결정체로 형성된다.

(3) 무수축 방수 모르터

무수축 방수 모르터는 시멘트의 수화, 경화시에 생성되는 수산화칼슘을 불용성인 칼슘염으로 고정, 기공 및 모세관을 충진하는 것에 의해 비투수 및 비흡수 성능 향상을 추구한 무수

축 방수 모르터이다.

(4) 무수축 급결 지수 모르터

수압에 의해 누수가 진행 중인 경우 사용하는 무수축 급결 지수 모르터는 수축이나 균열이 없고, 소량의 물을 넣고 혼합하는 것으로 30초에서 1분 내에 응결되며, 접착성이 높은 지수 모르터를 만들 수 있다.

(5) 격자형 탄소 섬유

탄소 섬유 등의 고성능 연속 섬유를 내약품성이 뛰어난 수지에 함침시켜 격자 형태로 일체 성형한 콘크리트 보강용 연속 섬유 보강재로 경량이면서 철근보다 월등한 인장 강도를 가지고 있으며 부식의 우려가 없는 고성능 콘크리트 보강재이다.

(6) 아크릴 에멀션

초미립자 타입의 아크릴 에멀션으로 콘크리트에 혼합하면 경화체 속에서 연속 피막을 형성하기 때문에 내수성, 내구성이 개선되며, 뛰어난 분산 효과 및 감수 효과를 나타낸다. 도포 용도에서도 누수 억제, 균열 억제, 접착 증강의 효과를 나타낸다.

(7) 프레믹스 모르터

무기질계 원료를 주재료로 사용하고 결합제로 합성 고분자 폴리머를 사용, 내구성과 화학 안정성이 있는 건조 모르터로 콘크리트 보수에 탁월한 기능을 발휘하며 경량으로 시공성이 우수한 콘크리트 경량 보수재이다.

3.3 시공 방법

격자형 탄소 섬유의 시공 개념은 다음 <그림 5>와 같다.

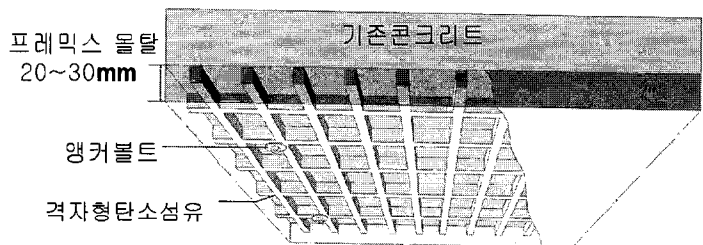


그림 5. 격자형 탄소 섬유 공법 시공 개념도

격자형 탄소 섬유 시공 순서는 다음과 같다.

- (1) 면정리 : 보수 및 보강하고자 하는 기존 콘크리트면을 고르게 연마한다.
- (2) U형 커팅 : 균열 누수 부위에 시공 부위에 따라 다소 차이는 있으나 폭 5cm, 깊이 6cm의 U형 커팅을 한다.
- (3) 고압 물청소 : 연마 부위와 커팅 부위의 이물질 제거를 위해 고압 물청소를 한다.
- (4) 유도 호스 삽입 : 치핑한 곳에 지름 15mm의 유도관 2개를 겹쳐 삽입한다.
- (5) 무수축 급결 지수 모르타의 충전 : 무수축 급결 지수 모르타를 충전시키고 완전히 경화할 때까지 수 분 간 눌러서 유도관을 고정한다.
- (6) 고성장 유기 화학 방수재 : 고성장 유기 화학 방수재를 커팅 부위의 절반 정도를 채운다.

- (7) 무수축 방수 모르타의 충전 : 무수축 방수 모르타 충전하고 면정리를 한다.
- (8) 격자형 탄소 섬유 부착 : 콘크리트면에 격자형 탄소 섬유를 1㎡에 앵커 볼트를 6개씩 사용하여 고정시키며 겹침부는 격자를 2개 이상 겹치게 한다
- (9) 접착 증강제 도포 : 초미립자 아크릴 에멀션을 물과 1:3의 비율로 배합하여 붓으로 골고루 도포한다.
- (10) 폴리머 모르타 시공 : 폴리머 모르타를 2~3cm 정도 흡수으로 밀실하게 충전한 후 깨끗하게 면정리를 한다.
- (11) 양생 : 콘크리트의 양생과 동일하게 실시한다.

시공 과정 중 주요 공정을 사진으로 나타내면 다음 <그림 6>과 같다.



(1) 누수 및 열화 전경



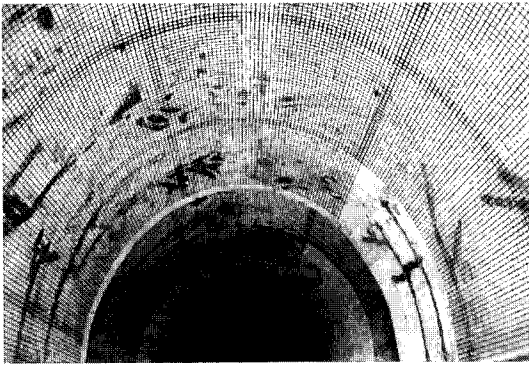
(2) 면갈기



(3) U 커팅



(4) 상부 균열 누수 보수 완료



(5) 격자형 탄소 섬유 부착 전경



(6) 시공 완료 전경

그림 6. 터널 누수 보수 및 보강 시공 과정

4. 결 론

이상으로 탄소 FRP 쉬트 및 격자 보강 방법에 대해 개략적으로 기술하였다. 보강 공사는 사용하는 재료, 시공 방법에 따라 구조적 성능이 좌우되므로 규정된 제품을 사용하여야 하고 설계 및 시방서 대로 공사가 진행되는지 검토해야 한다. 보강은 구조물을 필요한 용도로 다시 사용할 수 있도록 만든다는 측면에서 매우 중요한 일이므로 그 시공성 및 경제성은 보강 후 재보강하지 않도록 품질 관리를 철저히 하여야 경제적이다 할 수 있다. □

참고문헌

1. 신영수 외 3인, "탄소섬유쉬트로 횡보강된 콘크리트의 강

도 특성", 대한건축학회논문집, 1995. 10, pp.323~328.

2. 신영수 외 3인, "탄소섬유쉬트로 밀면 보강된 철근콘크리트 보의 구조적 거동", 대한건축학회논문집, 1995. 8, pp.249~257.

3. 최완철 외 2인, "콘크리트 구조물 보강용 FRP 시스템의 재료특성", 구조보강연구회 21C 건설용 복합재료, pp.95~103.

4. Buyukozturk, O., and Hearing, B.(1998a) Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP, ASCE Journal of Composites and Construction, Vol.2, No.3, pp.138~144.

5. ACI 440 Committee, "Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures" Draft.