

FRP 앵커를 이용한 큰 관입부가 있는 철근콘크리트 슬래브의 보강

Strengthening of RC Slabs with Large Penetrations Using Anchored FRP Composites

이현기*
Hyeon-Gi Lee박철우**
Cheol-Woo Park

이 기사는 2009년 12월 APFIS 2009(Asia-Pacific Conference of FRP in Structures) 서울에서 발표된 논문 중 S. J. Kim, S. T. Smith의 'Strengthening of RC Slabs with Large Penetrations using Anchored FRP Composites' 를 저자들의 허락 하에 번역하여 정리한 것이다.

1. 소개

많은 연구를 통하여 FRP 외부부착 공법은 기존 철근 콘크리트 구조물에 있어 보, 기둥, 슬래브 등의 주요 부재의 구조적인 보강에 아주 효과적인 것으로 증명되었다 (Bank 2006, Hollaway&Teng 2008). 이러한 연구의 대부분은 보와 기둥 보강을 중심으로 다루고 있는 반면 슬래브에 대한 연구, 특히 큰 관입부가 있는 슬래브에 대한 연구는 많이 부족한 편이다. 관입부가 존재하는 일 방향 슬래브를 FRP 플레이트로 보강한 연구는 Smith&Kim(2009) 논문에 자세히 기술된 바 있다. 대부분의 보강 실험에서, 파괴 시 FRP의 박락 현상 (중간균열유도 계면박리 파괴모드를 일으키는 계면박리 현상 ; IC Debonding) 은 FRP의 변형한계에 이르기 전에 발생된다 (Hollaway&Teng 2008). FRP 앵커리지는 이런 계면박리를 방지 또는 지연시키는 목적으로 고려되어졌고, 수년에 걸쳐 슬래브에 적용이 가능한 여러 종류의 FRP 앵커(또는 FRP 스퀘어 앵커)가 개발되었다. FRP 앵커에 대한 연구와 다른 앵커리지 시스템에 대한 실험결과 등은 Smith&Kim(2008)와 Kim&Smith(2009)의 논문에서 찾아 볼 수 있다.

본 연구에서는 중심부에 큰 관입부가 있는 일방향 RC 슬래브 실험체 3개에 대한 시험 결과를 기술했다. 첫 번째 실험은 보강

되지 않은 슬래브를 기본 시험체로 진행하였고, 나머지 2개의 시험체는 FRP 플레이트로 보강하였다. FRP 플레이트로 보강된 슬래브 중 1개의 시험체에는 FRP 플레이트에 FRP 앵커를 부착하였다.

2. 실험 상세

2.1. 실험변수의 상세

역으로 단순지지된 일방향 RC 슬래브(슬래브 S1, S2, S7) 실험체는 <그림 1>에 나타내었다. 모든 슬래브는 3,400 mm × 2,500 mm × 160 mm 직사각형 단면으로 제작되었고, 순경간(지지점 사이의 거리)은 3,200 mm이다. 슬래브 관입부는 지지대와 평행한 방향으로 폭 900 mm, 길이 1,200 mm의 크기로 <그림 1>에 나타난 것과 같이 Strong Band에 작용하는 선하중에 의해 발생된 일정한 모멘트 구간에 위치해 있다. 시험체는 두 차래의 레미콘 타설을 통하여 제작하였으며, 공시체의 압축강도는 각각 42 MPa(1차 타설의 슬래브 S1, S2)과 35 MPa(2차 타설의 슬래브 S7)로 나타났다. 모든 슬래브에는 12 mm 이형 철근(AS/NZS4671 2001)이 배근되었으며, 실험결과 슬래브 S1, S2에서 항복강도는 546 MPa, 파괴 연신율은 10.5%, 슬래브 S7에서는 항복강도 606 MPa, 파괴 연신율 10.0%를 보였다. 횡방향-지지대와 평행한 방향에서 슬래브의 대략적인 극한모멘트 허용한계는 FRP의 영향을 고려하지 않은 종방향-지지대와 수직인 방향 슬래브의 극한모멘트 허용한계의 절반정도인 것으로 나타났다.

슬래브 S2와 S7의 FRP 보강에 대한 설계는 <그림 2>에 나타냈으며, 슬래브 S7에 배치된 FRP 앵커에 대한 상세도 <그림 2>에 나타내었다. FRP 플레이트는 두께 0.117 mm, 폭 175 mm로 두 장의 탄소 섬유 쉬트르 구성되어있다. FRP 앵커의 성능을 최대화하기 위해 앵커는 FRP 플레이트 방향과 지그

* 정희원, 한양대학교 토목공학과 석사과정
ihk0228@hanyang.ac.kr

** 정희원, 강원대학교 토목공학과 교수

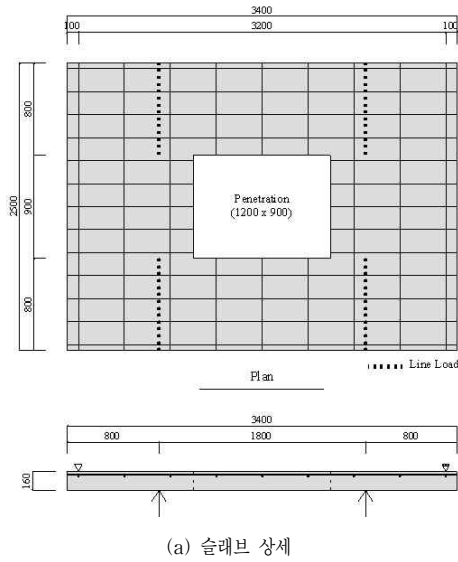


그림 1. 슬래브 실험

제그로 배열하였고, 앵커팬 또한 섬유 방향과 동일한 배열을 적용하였다. 다웰은 콘크리트 슬래브 안으로 40 mm 깊이로 매립하였다. <그림 3>은 구조물에 FRP 플레이트와 FRP 앵커를 적용하는 과정을 설명하고 있으며, 상세한 FRP 앵커의 제작 및 적용과정은 Smith&Kim(2008)에 기술되어 있다.

FRP 플레이트 보강량은 관입부의 철근 손실량을 기초로 계산되었고, 단면에서 FRP 강도는 계면파괴를 고려하여 산정되었다. 슬래브 S7의 FRP 앵커는 내부 철근의 간섭을 피하기 위하여 가장 바깥쪽 FRP 플레이트 2개를 관입부쪽으로 30 mm 더

이동시켜 배치하였다(FRP 플레이트는 슬래브 S7는 가장자리에서 230 mm, 슬래브 S2는 200 mm 떨어져 위치해 있다.). 18개의 FRP 인장강도 시험체는 ASTM(2000)에 따라 실험하였으며, FRP 시험체 기계적 성질은 전체 평균값으로 다음과 같은 결과를 나타내었다.

- 1) 파괴 연신율 = 10,405 $\mu\epsilon$ (표준 편차 = 1,785 $\mu\epsilon$),
- 2) 인장 강도 = 2,735 MPa (표준 편차 = 156 MPa)
- 3) 탄성계수 = 268 GPa (표준 편차 = 46 GPa)

2.2. 계측과 실험 절차

각 슬래브에 대하여 하중 재하는 약 70 N/sec로 유지되었고, 균열검사 및 FRP의 상태를 확인하기 위하여 일정간격으로 하중재하를 중단하였다. 안전을 위하여 슬래브의 허용 예상 하중의 65% 이후에는 하중재하의 중단없이 실험을 진행하였다.

3. 실험결과

각각 슬래브의 거동과 파괴양상은 다음의 세부 항목에 기술되어 있다. 또한 슬래브의 전반적인 거동은 <그림 4>의 하중-처

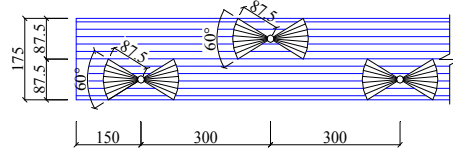
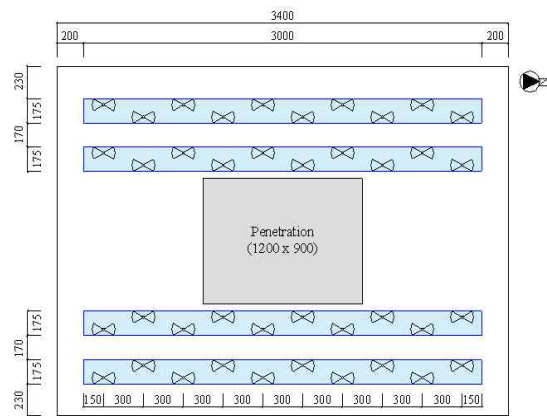


그림 2. 슬래브 S2와 S7과 앵커가 배치된 슬래브 7의 FRP 보강 계획



그림 3. 슬래브 S7의 FRP 보강과 FRP 앵커 설치

짐 곡선으로 나타내었다. 이 그림에서 FRP 보강에 따른 효과를 볼 수 있으며, 또한 앵커 부착에 따른 보강효과도 확인할 수 있었다.

3.1 컨트롤(control) 슬래브(S1)-컨트롤 시험체

컨트롤(control) 슬래브는 철근이 항복한 이후 하중의 증가없이 처짐이 증가되는 시점까지 하중재하가 이루어졌으며, 하중은 하중가력 장치 램이 최대하중에 도달하였을 때 멈추었다. 하중재하가 계속되면 슬래브는 최종적으로 일정 모멘트 구간에서 콘크리트 압축파괴로 파괴되었을 것으로 예상되었다.

3.2 앵커를 보강되지 않은 슬래브(S2)

앵커를 적용하지 않고 보강된 슬래브의 계면박리 현상은 관입부 모서리로부터 진행된 주요 균열이 FRP 플레이트와 교차하는 부분에서 발생되었다.

계면박리 이후 슬래브의 거동은 <그림 4>에서 나타난 것과 같이 컨트롤 슬래브와 유사한 거동을 보였다. <그림 5-(a)>는 FRP 플레이트의 계면박리 과정과 각 플레이트의 계면 박리의

범위를 도식화 하였다. 플레이트 최초의 계면파괴 범위는 ①로 표기되었고, 이후의 부착력 저하 구간에 대해서는 순차적으로 번호가 매겨졌다. <그림 5-(b), (c)>는 실험 중 디지털 비디오에서 추출한 일부의 사진중 FRP 플레이트의 계면박리 과정을 보여주고 있다. <그림 5>에서 나타내는 것과 관입부에 인접한 FRP 플레이트의 상당부분이 먼저 계면박리가 발생하였다(즉, 계면박리 ①). 관입부 양쪽의 Strong Band에 하중 재하가 직접되어 계면박리가 먼저 일어난 쪽에 인접한 FRP 플레이트(즉, 계면박리 ②)의 박리가 선행되었고, 관입부 반대측의 남은 두 FRP 플레이트의 계면박리는 후에 동반되었다.

계면박리 ① 거동은 <그림 4>에서 나타난 것과 같이 슬래브의 급격한 하중 저항 감소를 가져왔다. 관입부 양측의 Strong Band는 각각의 독립적인 거동을 보였으며, 이는 양측의 독립된 보의 시스템과 같은 양상을 나타냈다.

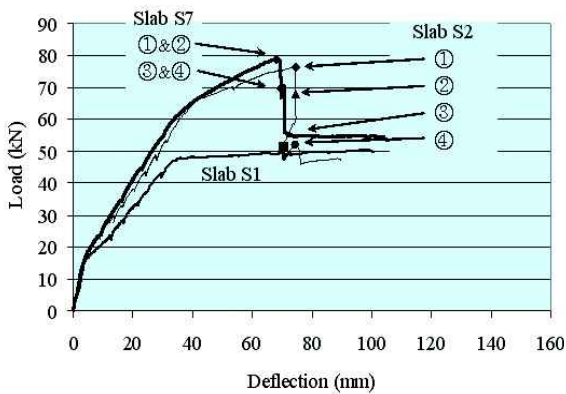
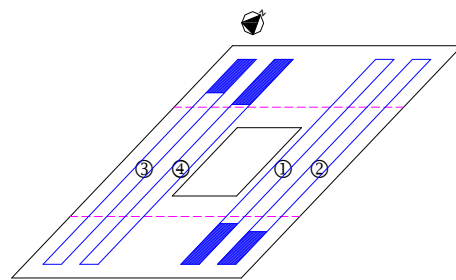


그림 4. 하중과 중앙경간의 관계



(a) 부착력 저하와 부착력저하의 규모



(b) 부착력 저하 - ① (c) 부착력 저하 - ②

그림 5. 슬래브 S2의 부착력 저하 거동

3.3 앵커로 보강된 슬래브(S7)

앵커로 보강된 슬래브 S7은 콘크리트의 계면 박락 파괴 후 콘크리트 압축파괴와 철근의 인장파괴가 일어났다. FRP와 콘크리트 계면(콘크리트 내에서)에 발생한 균열은 최대 휨 모멘트의 영역 근처에서 발생되었다. 실험 관찰과 비디오 및 데이터 기록 분석을 근거로 하면 계면 박리가 일어난 영역의 균열 확산은 FRP 앵커로 인하여 제어되었으며, 이미 박리한 플레이트 또한 콘크리트 압축파괴가 일어날 때까지 앵커에 의해 고정되어 있었다. <그림 4>는 FRP 앵커에 의한 약 5%의 강도 증가와 계면 박리 이후 약 10%의 FRP 보강 슬래브 S7의 잔류 강도 증가를 보여주고 있다. 이와 같은 강도증가는 FRP 앵커에서 기인하였다. 박리한 FRP와 거친 콘크리트 박락 표면 사이의 마찰력에 인하여 잔류 강도 또한 증가가 되었다. 강도와 강성이 증가된 앵커는 궁극적으로 부착 강도를 증가시킬 것이라고 사료된다. 최대하중과 동일한 잔류 강도 플래토(plateau)가 앵커 시스템의 최적의 결과일 것이다. 최종적으로 이러한 결과를 얻게 되면, 앵커를 사용하지 않은 FRP 보강 구조물이 가지지 못한, 그러나 안전을 위해 꼭 필요했던 연성을 앵커시스템을 통하여 확보할 수 있다.

계면박락의 시작은 약 60 kN ~ 70 kN 하중 범위에서 관찰되었다. 국부적인 계면박락은 <그림 6-(b)>에 표시된 것처럼 일정한 모멘트 영역에서 앵커의 플레이트 최외각 옆 사이의 플레이트에서 관찰되었고, <그림 6-(b)>에 표시된 것처럼 하중이 증가함에 따라 플레이트 단부쪽으로 확장되었다. <그림 6-(c)>는 박락된 플레이트의 영역과 부착력 저하의 과정을 도식적으로 표현하였다(①부터 ④로 표시). Strong Band에 부착된 두 플레이트(플레이트 1과 2, <그림 6-(c)>에서 ①과 ②의 부분)가 먼저 박락 되었고, 후에 다른 측 플레이트(플레이트 3과 4, <그림 6-(c)>에서 ③과 ④의 부분)가 박락 되었다. 박락부분의 플레이트는 완전히 콘크리트 표면에서 분리되었지만, 모든 플레이트는 여전히 앵커의 앵커 팬에 부착되어 있었다. 슬래브의 처짐이 증가함에 따라 박락 영역이 증가하였고 결국 플레이트에 부착된 앵커는 파괴되었다. 4개의 플레이트 중 3개의 플레이트의 앵커는 슬래브가 완전히 파괴되었을 때 앵커 팬이 완전히 분리되었지만 하나의 플레이트는 (<그림 6-(c)>의 플레이트 1) 파괴 후에도 앵커 팬에 부착되어 있었다.

플레이트 2와 4의 앵커는 뽑힘(pull-out, <그림 7-(a)>의 앵커 AN 2) 또는 전단(<그림 7-(a)>의 앵커 AN 4)에 의해 파괴되었다. 앵커 AN 1은 <그림 7-(b)>에 나타난 바와 같이 복합적인 앵커 팬과 FRP 플레이트 사이의 국부적인 부착파괴와 + 앵커 다웰 전단 파괴의 이례적인 파괴양상을 보여주었다. 일반적으로 앵커는 Smith&Kim(2008)의 FRP와 콘크리트 전

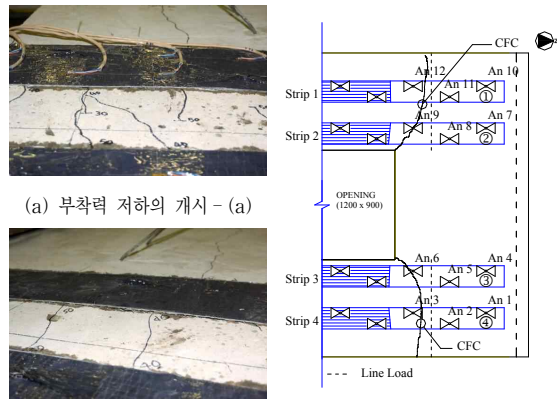
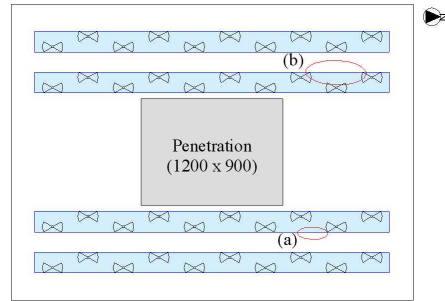


그림 6. 슬래브 S7의 부착력 저하 거동

단 시험과 Kim&Smith(2009)의 Pull-out 실험에서 보고된 것과 일치하는 파괴 양상을 보였다. Pull-out에 의해 파괴된 모든 앵커는 슬래브의 주요 균열 선상에 위치하거나 근접하게 위치해 있었다. 이런 균열은 앵커의 강도에 중요한 영향을 미쳤다.

4. 설계 방안

FRP로 보강된 슬래브의 강도는 일반적인 단면해석으로 계산될 수 있고, 이와 같은 연구는 공개된 문헌들에 의해 널리 보고되었다(예를 들어 Hollaway&Teng(2008)). 계면박리에 의한 조기 파괴를 고려하여 FRP의 최대 허용 부착 강도는 제한된다(ACI 440 2008). 이러한 부착강도는 일반적으로 FRP와 콘크



그림 7. 슬래브 S7의 플레이트와 앵커파괴 양상

리트의 전단시험에 의해 얻게 되는데 FRP 앵커에 의한 강도 효과를 고려하기 위해 동일한 접근 방법을 활용하여 허용 부착 강도를 증가시키는 방법을 적용하였다.

슬래브 S7에서 각각의 앵커에 의해 증가된 부착 강도(앵커와 근접한 균열의 거리에 의거해 얻게 되는) 증가는 대략 5% 정도로 계산되었으며, 이는 동일한 균열 거리의 Smith&Kim (2008)의 전단 시험에서 얻은 실험값과 일치하였다. 그 결과 슬래브 실험에서의 앵커 기여율과 FRP와 콘크리트 전단 시험에서의 앵커 기여율 사이의 관계가 성립되었다.

5. 결론

이 논문은 FRP복합체로 보강된 RC 슬래브의 보강 효과를 검증하였다. 모든 슬래브의 하중-변위 곡선과 슬래브 각각의 거동, 강도 그리고 파괴 양상에 대해 자세히 보고하였다. FRP 앵커로 인한 부착 강도의 증가와 계면 파괴에 의한 강도 손실의 지연을 검증하였다. 또한 앵커는 계면 박락 후 잔류 강도와 FRP 보강 시그템에 연성을 제공한다는 것으로 확인되었다. □

참고문헌

1. ACI 440.2R Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute(ACI), Committee440, Farmington Hills, USA, 2008.
2. AS/NZS 4671 Steel Reinforcing Materials, Standards Australia, Sydney, Australia, 2001.
3. ASTM Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composites Materials, ASTM D3039/D3039M, American Society for Testing and Materials (ASTM), Pennsylvania, USA, 2000.
4. Bank, L.C., 'Composites in Construction: Structural Design with FRP Materials', Wiley, New Jersey, USA, 2006.
5. Hollaway, L.C. and Teng, J.G., 'Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures using Fibre-Reinforced Polymer(FRP) Composites', Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 2008.
6. Kim, S.J. 'Strengthening of RC Slabs with Penetrations using Unanchored and Anchored FRP Composites', Ph D Dissertation, Centre for Built Infrastructure Research, University of Technology Sydney, Australia, under review, 2009.
7. Kim, S.J. and Smith, S.T. 'Behaviour of FRP Spike Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete', Advances in Structural Engineering, accepted, 2009.
8. Smith, S.T. and Kim, S.J. 'Shear Strength and Behaviour of FRP Spike Anchors in FRP-to-concrete Joint Assemblies', Proceedings(CDROM),Fifth International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, ACMBS-V, Winnipeg, Canada, 2008. 9.
9. Smith, S.T. and Kim, S.J. 'Strengthening of One-way Spanning RC Slabs with Cutouts using FRP Composites', Journal of Construction and Building Materials, Vol. 23, 2009, pp.1,578 ~ 1,590.

담당 편집위원 :
박철우(강원대학교) tigerpark@kangwon.ac.kr

◇◇◇ 원고 모집 안내 ◇◇◇

「콘크리트학회지」는 콘크리트 관련 학문과 기술에 대한 정보를 제공하기 위해 발행되고 있습니다. 우리 학회지를 통해서 연구 결과, 경험한 사례 등을 콘크리트 관련 기술자들과 함께 나누길 원하시는 분은 다음과 같은 형태로 참여하실 수 있습니다. 여러분의 육고를 기다리겠습니다.

- 원고 주제 : 포도에세이, 문화와 콘크리트(사진, 서예, 시 등), 특집기사, 기술기사, 공사기사, 원로와의 대화, 해외번역기사, 해외연구소 소개, 국제학술대회 참가기, 현장탐방, 논문, 우리회사소개 등
- 원고 분량 : 글씨크기 11pt, 줄간격 160%, A4용지 4매 ~ 6매 내외
- 보내실 곳 : kke@kci.or.kr