

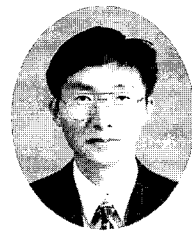
특집 II

건설산업에서의 FRP

철근 및 프리스트레싱 강재 대체재로서의 FRP 문제점 - Problem Statement of FRP as Substitutes of Steel Reinforcement -



박상렬*



정상모**

1. 서론

FRP(Fiber Reinforced Polymer)를 철근이나 프리스트레싱 강재의 대체재로서 콘크리트 구조에 적용하기 위한 연구가 세계 여러 대학과 연구소에서 활발히 진행 중에 있다. 이러한 높은 관심과 이에 따른 많은 노력의 가장 큰 이유는 FRP가 재래의 강재에 비하여 부식성, 고인장 강도, 경량성, 비전기 전도성 등 뛰어난 장점을 가지고 있기 때문이며 이러한 장점으로 건설 시장에서 철근이나 프리스트레싱 강재를 대체한다면 엄청난 시장성을 갖고 있기 때문이다. 특히 부식성은 사회간접시설물에 필요한 가장 중요한 특성인데 이는 부식으로 인한 구조물의 노후화가 전세계적으로 재가설하거나 보수 보강하는 데 심각한 경제적인 문제뿐만 아니라 기술적인 문제를 야기하고 있기 때문이다. 그러므로 FRP는 철근이나 프리스트레싱 텐던 대신으로 이상적으로 보여진다.

그러나, FRP 재료는 또한 몇 가지 단점을 가지고 있는데 그것은 비소성(탄성), 낮은 횡 방향 강도, stress-rupture 현상, 높은 가격 등이다. 공학적인 관점에서 가장 심각한 문제는 소성의 결핍과 매우 낮은 횡 방향 전단 강도이다. FRP는 강재보다도 높은 인장 응력을 가지나 선형 탄성 재료로 취성파괴한다(〈그림 1〉).

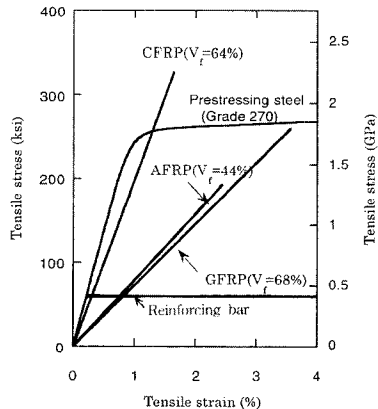


그림 1. 여러 FRP 재료의 응력-변형률 관계

* 정회원, 제주대학교 해양토목공학과 교수

** 정회원, 한동대학교 건설도시환경공학부 교수

FRP bar나 텐던은 섬유를 길이 방향으로 결합체를 이용해 하나로 묶은 것으로 일방향성을 지닌다. 따라서 길이 방향의 인장력에 대해서는 높은 저항력을 가지나 횡 방향 전단력에 대해서는 대단히 취약하다. 횡 방향 전단 저항력은 실험 방법, 즉 직접 전단 기구의 강성과 섬유의 종류, 섬유의 함유율 등에 따라 다르나 인장 강도의 약 5~10% 정도이다.

위의 두 단점은 FRP를 철근이나 프리스트레싱 긴장재 대신으로 사용할 때 다음과 같은 세 가지 문제점을 발생시킬 수 있다. ① 비소성으로 인한 극한 상태에서의 낮은 연성(ductility) 문제, ② 비소성과 낮은 횡 방향 전단 강도로, 특히 사인장 균열 단면에서 텐던 조기 파괴로 인한 전단 저항력 감소와 전단에 대한 연성 감소 문제, ③ 비소성과 낮은 횡 방향 전단 저항력으로 FRP를 프리스트레싱 텐던으로 사용할 경우 정착구(anchorage) 제작에 따른 효율과 신뢰도 문제 등이다.

위의 세 가지 문제점은 FRP를 철근이나 프리스트레싱 강재 대신으로 사용할 경우 구조적인 면에서 심각할 수 있는 부분으로 앞으로 극복해야 할 과제이다. 그러나 아직까지 이 문제에 대한 연구 성과가 많지 않고 실험 성과가 적어 앞으로 깊은 관심과 함께 연구 개발해야 할 숙제이다. 본고에서는 이 세 가지 과제를 제시하고 그간의 연구 성과를 소개하여 연구 관심을 높이고 새로운 대책을 모색함으로써 FRP 콘크리트 구조물의 실용화에 도움이 되고자 한다.

2. 연성(Ductility)

2.1 구조물의 연성

연성(ductility)은 구조 재료, 구조 단면, 구조 부재 및 구조계에 있어서 파괴 전까지 지지 능력을 유지하면서 발휘하는 소성 변형(plastic deformation)의 정도를 지칭하는 정성적인 개념이다. 연성은 강도와 함께 구조물의 안전도를 평가함에 있어서 고려해야 할 가장 중요한 요소 중 하나이다. 연성이 큰 구조물은 갑작스런 파괴가 발생하지 않고 파괴 전에 큰 균열이나 처짐 등 징조를 보여주므로 시간을 갖고 대피하거나 보강하여 안전도를 확보할 수 있도록 한다. 연성은 부정 정구조물에서 일부 취약한 부분의 단면력이 지지 능력을 초과하더라도 즉시 구조물의 파괴로 진행하지 않고 구조계 전체의 지지 능력에 도달할 때까지 순차

적으로 초과한 단면력을 재분배할 수 있도록 한다. 따라서 구조계의 지지 능력을 충분히 발휘하도록 하므로 연성이 큰 구조계의 안전도는 어느 한 단면이나 부재의 안전도보다 클 수밖에 없다. 특히 연성은 일반 정하중에는 물론 지진 하중이 작용할 때는 유입된 지진 에너지를 흡수 소모하는 지표로서 경제적인 안전도 확보에 필수적이다.

일반적으로 휨 부재의 연성에 대한 정량적인 평가 방법은 식 (1)과 같이 변형량으로서 곡률 ϕ , 회전 θ , 처짐 Δ 의 비 μ 로 나타내며 연성비(ductility ratio) 또는 연성 지수(ductility index)라고 부른다. 여기서 첨자 u 및 y는 각각 극한 상태 및 항복 상태를 나타내며, 철근 콘크리트 및 강구조물의 경우 강재의 특성상 항복 상태에 대한 정의가 명확하다. <그림 2>는 어느 교량의 FRP와 강재 PC 보의 하중-곡률 관계를 보여주고 있다.

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_u}{\phi_y} \text{ or } \mu_{\theta} = \frac{\theta_u}{\theta_y} \text{ or } \mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

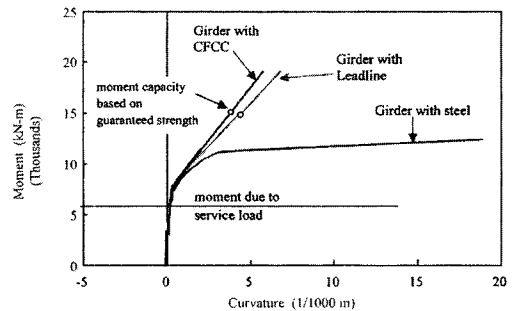


그림 2. 교량의 FRP와 강재 PC 보의 하중-곡률 관계

2.2 FRP 콘크리트 보의 연성 평가

FRP 재료들은 인장 시험에서 극한 변형률이 강재보다 훨씬 작고, 파단시까지 선형 탄성 거동을 보여준다. 극한 변형률은 강재가 6.9%를 상회하는 반면, 탄소 섬유재는 1.6% 정도이고, 아라미드 재료도 2% 이하이며, 비교적 변형률이 큰 유리 섬유 제품도 4%에 미치지 못한다. 이들을 프리스트레싱 긴장재로 사용할 경우 제한 변형률 중 상당 부분이 프리스트레싱으로 소요되어 하중을 지지하는 데 이용될 나머지

변형률은 더욱 감소하게 된다. 따라서 FRP 재료의 연성 부족이 중요한 문제점으로 제기되어 왔다.

FRP 긴장재를 사용하는 구조물의 연성 지수 평가는 재료의 항복점이 없어서 식 (1)의 적용이 곤란하다. 따라서 강제뿐만 아니라 FRP재로 보강된 보에도 함께 적용할 수 있도록 다음과 같이 에너지 개념을 도입한 연성 지수 평가식이 제안되었다.

$$\mu = \frac{1}{2} \left(\frac{E_{tot}}{E_{el}} + 1 \right) \quad (2)$$

여기서 E_{tot} 는 총 흡수 에너지로서 부재의 하중-처짐 곡선 또는 단면의 모멘트-곡률 곡선에서 극한 상태까지 총 면적으로 계산되며, E_{el} 은 탄성 에너지로서 총 에너지 중 소모되지 않고 저장되는 변형 에너지를 의미한다. 이렇게 정의할 때 강재로 보강된 보에 적용하면 종래의 평가식에 의한 값과 비슷하게 계산되며 FRP 및 기타 다른 재료를 사용한 보에도 공통적으로 적용이 가능하다. 특히 FRP 재료로만 보강한 콘크리트 보에서는 두 재료 모두 취성이 커서 큰 변형에 대해 연성이 과대하게 평가되어서는 안되므로 에너지 개념에 의한 연성 평가가 보다 합리적인 것이다. 예를 들면 극한 변형률이 비교적 큰 유리 섬유 재료를 사용하여 큰 변형량을 확보하여도 에너지는 소모되지 않고 탄성 에너지 형태로 저장되므로 지진 지역에서의 위험도는 감소하지 않을 것이다.

평가식 (2)에 의하여 기존의 실험 보들에 대해 연성 지수를 평가한 바 있으며 예상대로 강재로 긴장한 보들은 3 이상의 높은 연성 지수를 보여준 반면, 별도의 연성 증진 방안을 채택하지 않고 FRP를 사용한 보의 연성 지수는 3 이하의 작은 값을 보여주었고 특히 극한 변형률이 작은 탄소 섬유재로 긴장한 보의 경우 2 이하의 낮은 값을 나타내었다. 따라서 충분한 연성을 확보하기 위해서는 적절한 연성 개선 방법을 채택하여야 한다.

2.3 연성 개선 방법

본 절에서는 FRP 긴장재를 사용하는 콘크리트 보에 있어서 가능한 연성 개선 방법들을 체계적으로 분류하고 그 타당성을 조사 분석 평가하였다. 개선 방법을 대별하면 적절한 배근, 과대 철근 보 개념 도입, 부착안된(unbonded) 긴장재 이용 등이며, 각각의 항

목에 대한 평가 결과를 기술하였다. 조사 방법으로는 관련 파라미터들의 변화에 대한 전산 해석과 그 중 일부 방법에 한하여 실험에 의한 검증을 시행하였다. 즉, 실험 및 해석에 의하여 프리스트레스트 콘크리트 보에 대한 모멘트-곡률 곡선 또는 하중-처짐 곡선을 극한 상태 이후까지 구하고, 이 곡선들을 토대로 연성 개선의 타당성을 분석 평가하였다.

2.3.1 적절한 배근

FRP 보강재는 절대적인 변형량이 강재의 경우보다 작고, 변형 자체가 강재의 소성 변형과는 달리 직선으로 구성된 선형 탄성 변형을 보여준다. 따라서 연성 개선을 위해서는 변형량과 소성 변형의 문제점이 고려되어야 하며 적절한 배근을 통한 개선 방법을 다음과 같이 구분하여 검토하였다.

(1) 변형량에 대한 검토

큰 연성을 얻기 위해서는 기본적으로 충분한 변형량이 확보되어야 한다. 그러나 FRP 긴장재는 원래부터 작은 극한 변형률 중 상당량을 프리스트레싱으로 활용하고 나머지만이 하중을 지지하는 데 사용되므로 극한 상태의 변형량이 작을 수밖에 없다. 따라서 큰 변형량을 얻기 위해서는 극한 변형률 내에서 프리스트레싱으로 활용하는 변형률을 감소시켜야 하는데, 이는 프리스트레싱 유효 응력의 감소를 의미하며 곧 효율성 및 경제성 저하로 직결된다.

프리스트레싱 유효 응력이 결정되면 이제는 긴장재의 사용량에 따라 극한 변형률이 변하며, 해석에 의하면 평형비에 해당하는 긴장재 양을 사용했을 때 최대의 변형량을 얻을 수 있다. 여기서 평형비는 콘크리트가 극한 변형률인 0.003에 도달했을 때 동시에 긴장재도 극한 변형률에 도달하게 되는 긴장재 사용량의 비를 의미한다.

(2) 소성 에너지에 대한 검토

FRP 재료만으로 콘크리트를 보강하면 두 재료 공히 취성이 큰 재료이므로 비록 충분한 변형량을 확보하여도 대부분이 탄성 변형으로서 실제 연성에 기여하는 소성 변형은 거의 얻을 수 없다. 이때 연성 개선을 목적으로 일반 철근을 보강하여 부분 긴장(partial prestressing) 콘크리트 보로 설계하면 철근의 항복 이후 소성 변형을 통하여 연성 개선이 가능하며 실험

을 통하여 확인된 바 있다. 이 경우 보강 철근의 부식은 프리스트레스트 보에서는 균열이 억제되므로 크게 우려하지 않아도 될 것이다.

2.3.2 과대 철근 보 설계

철근 콘크리트 보에서는 평형비의 3/4보다 작은 철근량을 사용하므로 콘크리트 파괴 전에 연성이 큰 철근의 항복을 유도하여 필요한 연성을 확보한다. 그러나, FRP 재료는 연성이 작으므로 연성 개선을 위하여 균이 평형비 이하로 설계할 필요는 없다. 역으로 과대 철근 보 개념으로 설계하되 취성이 큰 콘크리트를 연성 거동을 하도록 하면 연성 개선이 가능할 것이다. 연성 거동을 위한 조치 방안으로 두 가지를 제안하였으며, 그 중 하나는 스티럽 등으로 콘크리트를 구속 (confinement)하는 것이고, 두번째 방법은 섬유 보강 콘크리트를 사용하는 것이다.

콘크리트를 구속할 때 관련 인자는 과대 보강되는 긴장재 사용량과 콘크리트 구속을 위한 스티럽 사용량으로서, 긴장재와 스티럽 각각의 사용량이 증가할수록 큰 연성을 얻을 수 있는 것으로 실험을 통하여 확인된 바 있다.

섬유 보강 콘크리트는 섬유의 교량 효과(bridging effect)에 의해 toughness가 증가하고 그에 따른 연성 거동이 가능하다. 연성 개선 방법으로서 과대 철근 보 개념으로 설계하고 섬유 보강 콘크리트를 사용하는 것이 효과적임을 실험을 통하여 검증한 바 있다.

2.3.3 비부착 (Unbonded) 긴장재의 사용

강재의 경우에도 부착안된 긴장재는 설치 점검 교체가 용이한 장점 등으로 상당히 사용 빈도가 높다. 긴장재를 부착하는 주 이유는 부식을 방지하기 위한 것이므로 부식에 강한 FRP 긴장재는 균이 부착할 필요는 없을 것이다.

부착안된 긴장재는 어느 한 단면이 아닌 부재 전 길이상에서 평균적으로 변형하므로 긴장재의 종류와 무관하게 극한 상태까지 긴장재는 탄성 거동을 하게 되고 콘크리트가 압축 파괴를 하면서 충분한 변형량을 확보할 수 있다. 이 때에도 소성 변형을 통한 연성 확보는 일반 철근의 보강에 의하여 가능하며 현 설계기준에서도 철근비 0.004 이상의 일반 철근으로 보강하도록 명시되어 있다.

부착안된 긴장재를 사용한 장방형 보에 대한 하중-

처짐 곡선을 비선형 해석을 통하여 비교하면 긴장재의 종류에 관계없이 거의 비슷한 하중-처짐 곡선을 보인다. 실제로 부착안된 긴장재의 사용이 연성 개선에 효과적임을 실험을 통하여 발표된 바 있다.

2.3.4 기타 방법

기타 예상 가능한 연성 개선 방안들을 열거하면 다음과 같다. 이들의 방법들은 아직 실험을 통하여 검증되지는 않았으나 해석을 통하여 연성 개선이 가능한 것으로 추정되었다.

한 예로는 긴장재를 층별로 배치하여 순차적으로 긴장재의 파손을 유발하는 방법으로서 해석상으로는 연성 거동과 흡사한 결과를 얻을 수 있었다.

또 다른 예로는 극한 변형률이 다른 탄소 섬유, 아라미드 및 유리 섬유 제품들을 혼합하여 사용하므로 극한 변형률 크기 순으로 긴장재의 파괴를 유도하여 역시 연성 거동과 흡사한 결과를 얻을 수 있었다.

부착안된 긴장재 사용을 변용한 방안으로서, 사용 하중 하에서는 부착 긴장재로 작용하도록 하고, 지진 등 비상시의 큰 하중이 작용하면 부착이 파손되어 부착안된 상태로 변하게 함으로 소요 연성을 확보하는 방법이 가능할 것이다.

3. 전단 저항력

3.1 전단 텐던 파괴

FRP를 사용한 콘크리트 구조물의 전단에 대한 연구는 그동안 매우 미흡하였다. 전단 저항 거동은 휨 거동과는 달리 철근 콘크리트나 강재 프리스트레스트 콘크리트 보에서도 매우 복잡하다. 더군다나 강재를 사용한 철근 콘크리트 부재에 대한 전단 저항력에 대한 실험식은 FRP를 이용한 콘크리트 부재에 적용될 수 없다. 왜냐하면 FRP의 역학적 특성, 즉, 비소성, 낮은 휨 방향 전단 강도, 낮은 탄성 계수 등이 강재와는 매우 다르기 때문이다. <그림 3>에서 보인 바와 같이 콘크리트 보의 전단 저항력은 콘크리트와 전단 보강재에 의해 제공된다. 외부 하중에 의한 콘크리트의 전단력 전달은 다음의 세 가지로 이루어진다. 즉, ① 콘크리트 압축부, ② 골재 맞물림 (aggregate interlock), ③ 다우얼 작용 (dowel action) 등에 의한 전달이다.

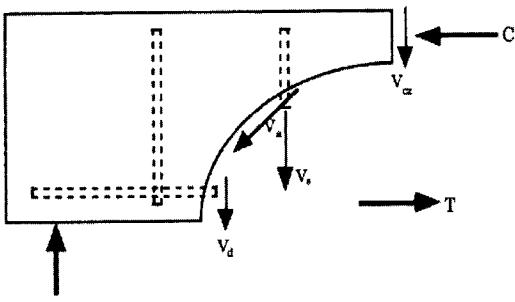


그림 3. 콘크리트 보의 전단 저항력

길이 방향의 인장 철근이나 인장 텐던은 본래 휨에 의한 인장력을 저항하도록 설계되어지지만, 종종 사인장 균열면을 통한 다우얼 작용에 의해 전단력을 저항하여야 한다. 사인장 균열이 진전하여 보가 균열 선단을 중심으로 회전하면 양 균열 면에 대하여 전단 변위가 발생하는데 이러한 전단 변위는 균열 면을 통한 전단 미끄러짐에 의해서도 발생한다. 따라서 위와 같은 이유로 전단 변위가 일어나면 이 변위에 저항하기 위해 bar나 텐던에 횡 방향 전단력이 발생하게 된다. 이러한 변위에 대한 bar나 텐던의 반작용을 '다우얼 작용'이라 한다(<그림 4>).

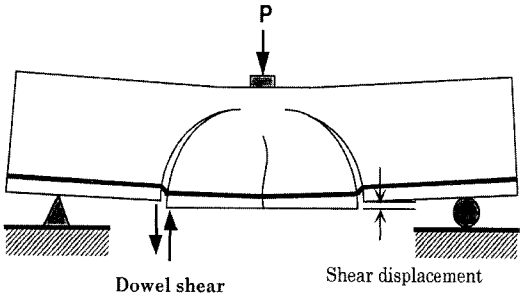


그림 4. 콘크리트 보의 다우얼 작용과 전단 변위

사인장 균열이 발생한 콘크리트 보에서 다우얼 작용은 휨에 의해 인장 응력을 받고 있는 보강재 자체에 추가로 휨 응력과 전단 응력을 발생시킨다. 따라서 하중이 증가함에 따라 단면의 휨 모멘트에 의한 인장 응력과 다우얼 작용에 의한 보강재 자체 내의 휨 응력과 전단 응력이 증가하게 된다. 이러한 응력 상황에서 탄성 재료인 FRP bar나 텐던은 그의 최대 인장 응력이나 최대 전단 응력에 다다를 때나 두 응력의 상호 작용에 의한 파괴 기준을 넘을 때 파단하게 된다. <그림

5>는 FRP 콘크리트 보에서 일어날 수 있는 전단 텐던 파괴의 형태를 보여주고 있다.

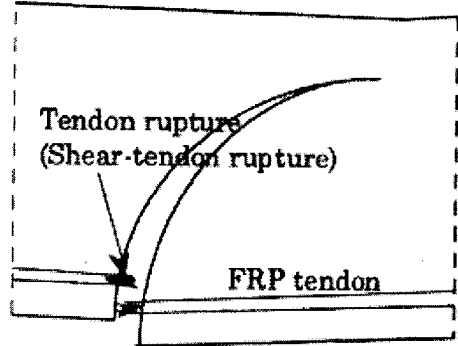


그림 5. FRP 콘크리트 보의 전단 텐던 파괴

그러므로 다우얼 작용에 의한 FRP 콘크리트 부재의 사인장 균열 단면에서 전단 텐던 파괴는 조기 미성숙 파괴를 일으키고 이는 전단 저항력의 감소와 전단에 대한 연성을 감소시키는 결과를 초래하게 된다. 이러한 결론의 판단 근거는 아래와 같다.

- ① FRP 재료의 탄성(비소성)
- ② 매우 낮은 횡 방향 전단 강도
- ③ 균열 단면에서의 응력 집중
- ④ 횡 방향 압축과 표면 손상 등에 의한 응력 집중
- ⑤ 사인장 균열이 주로 시작되는 스티럽의 콘크리트에 비하여 높은 강성

3.2 전단 텐던 파괴와 실험 결과

<그림 6>과 <그림 7>에서 보인 바와 같이 비슷한 조건에서 FRP 텐던으로 만들어진 프리스트레스트 콘크리트 보(Beam C1)가 강재 텐던으로 만들어진 보(Beam S1)보다 작은 강도와 적은 변위를 나타내고 있다. FRP PC 보는 작은 변위 하에서 조기 미성숙 파괴된 전단 텐던 파단에 의해 전단 파괴되어 보의 하중 지지력을 충분히 발휘하지 못하였다. 한편 강재 PC 보는 상당한 변위를 보인 다음 전단 인장 파괴에 의해 파괴되었다. FRP PC 보는 파괴시 강재 PC 보에 비해 전단 변위에 있어서는 1/3, 전단 균열 폭에 있어서는 1/2 값을 나타내고 있다. 이 실험에서 만약 FRP 텐던이 프리스트레싱 강재 정도의 전단 변위를

가졌다고 가정하면 약 35% 정도의 하중을 더 지지할 수 있었을 것으로 예측된다. 따라서 전단 텐던 파괴는 FRP를 가진 콘크리트 보의 미성숙 초기 파괴로서 보의 전단 저항력과 전단 연성을 감소시킴으로써 결국에는 보의 하중 지지 능력을 감소시킨다는 사실을 알 수 있다.

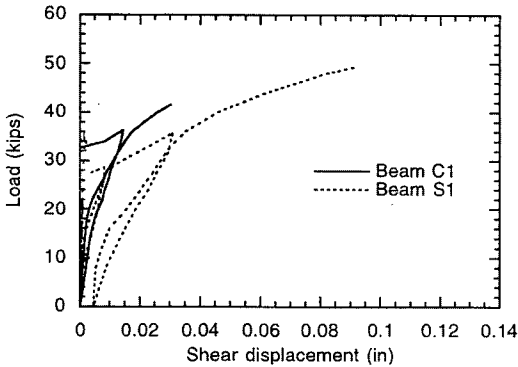


그림 6. FRP와 강재 PC 보의 하중-전단 변위 곡선

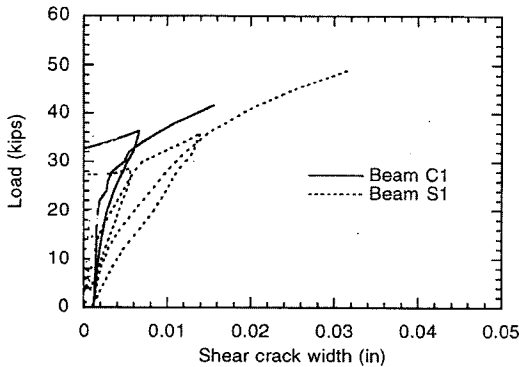


그림 7. FRP와 강재 PC 보의 하중-전단 균열 폭 곡선

3.3 전단 텐던 파괴의 방지

FRP 콘크리트 보에서 전단-텐던 파괴를 방지하기 위해서는 사인장 균열의 위험단면에서 전단 변위와 전단 균열 폭을 줄이는 것이 필요하다. 이를 위해서는 다음과 같은 방법들을 고려해볼 수 있다.

- ① 전단보강근의 양을 늘린다.
- ② 전단보강근의 간격을 줄인다.
- ③ 보강 섬유(fiber)를 이용한다.
- ④ 극한 상태에서 전단 지간 내 FRP의 응력 여유

를 가지도록 설계한다.

4. 정착구(Anchorage)

FRP 텐던을 프리스트레싱 긴장재로 사용할시 FRP의 비소성(탄성)과 낮은 횡 방향 전단 강도는 정착구(anchorage)의 효율과 신뢰도를 감소시키는 어려움을 가져온다. 이는 강재 긴장재의 경우와 같이 강재로 된 썬기형 정착구를 높은 신뢰도를 가지고 직접 사용할 수 없다는 것을 의미한다. 따라서 FRP 긴장 시스템의 정착구에 대하여 효율과 신뢰성, FRP 재료에 미치는 영향, 부식 등을 고려하여야 한다. 또한 여러 이용 가능한 FRP 텐던들은 각기 다른 섬유와 결합재를 가지고 있을 뿐만 아니라 제조 방법, 기하학적 모양, 물리적인 성질들이 다르기 때문에 텐던에 손상을 주지 않는 적당한 물립 장치를 가지는 정착구의 설계를 어렵게 만든다. 파괴시 낮은 변형률과 낮은 횡 방향 강성은 FRP 텐던이 정착구에서 파괴되기 쉽게 만든다. 특히, 비부착 포스트 텐손닝 시스템에서와 같이 구조물의 사용연한 동안 파괴되지 않아야 할 영구 정착구의 경우에는 더욱 심각해진다.

본 장에서는 Antonio Nanni의 기존 프리스트레싱 텐던 시스템에서 사용하고 있는 정착구 실험 결과를 소개한다. 또한 Tokyo Rope에서 생산한 CFCC 텐던 정착구와 저자가 직접 제작한 슬리브형 현장 정착구에 대한 실험 결과도 소개한다.

4.1 정착구의 종류

정착구는 크게 세 가지 종류로 나눌 수 있는데 그 내용은 아래와 같다.

- (1) Molded Anchor(형틀형 정착구) : 형틀 속을 레진으로 채워 경화시키므로 긴장시 텐던과의 부착력을 이용하여 정착력을 확보하는 방법
- (2) Wedge Anchor(썬기형 정착구) : 외부 socket 과 내부 썬기로 이루어져 있으며 긴장시 텐던과 썬기의 마찰력 저항력으로 정착력을 확보하는 방법
- (3) Spike Anchor(돌기형 정착구) : 긴장시 외부 원통과 그 중앙 변단면 돌기구 사이에 섬유를 끼워 잡음으로써 정착력을 확보하는 방법

4.2 텐던의 종류와 정착구

현재 세계 시장에서 이용 가능한 FRP 텐던과 정착구 시스템은 아래와 같다.

(1) Arapree

- 생산자 : 이태리 Sireg S.P.A
- 섬유 및 레진 : 아라미드(Twaron) 섬유와 에폭시 레진
- 모양 : 직사각형 및 원형 rod
- 정착구 : 형틀형 정착구(강재 슬리브), 썬기형 정착구(강재 소켓과 2개의 변단면 플라스틱 썬기) (<그림 8>)

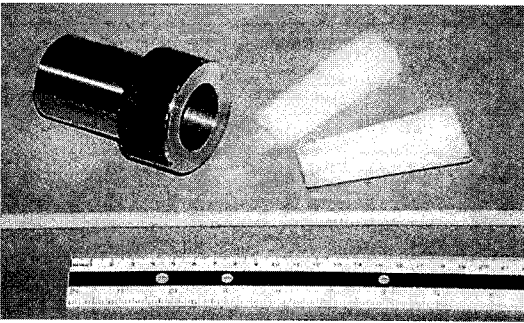


그림 8. Arapree 텐던과 정착구

(2) FiBRA

- 생산자 : 일본 Mitsui Construction Company
- 섬유 및 레진 : 아라미드 섬유와 에폭시 레진
- 모양 : 원형 강성(RC용) 및 연성 rod(PC용)
- 정착구 : 형틀형 정착구
썬기형 정착구(원추형 내부 실린더를 가진 강재 실린더와 석분이 내부에 발라진 4개의 강재 썬기) (<그림 9>)

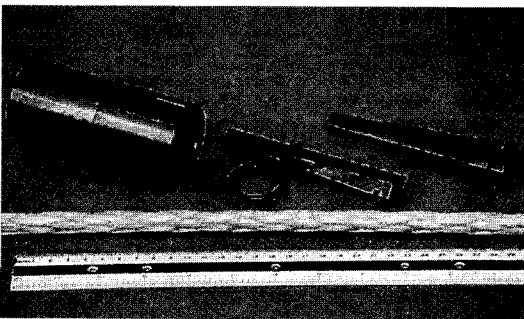


그림 9. FiBRA 텐던과 정착구

(3) Carbon Stress

- 생산자 : 네덜란드 Nederlanse Draad Industri
- 섬유 및 레진 : 탄소 섬유와 에폭시 레진
- 모양 : 원형 및 표면에 교차된 평행선 모양으로 들어간 편평형 bar
- 정착구 : 썬기형 정착구(원형: 강재 소켓과 2개의 매끄러운 변단면 플라스틱 썬기 그리고 텐던과 썬기 사이의 마찰력을 증가시키기 위한 에폭시 모래막)
(편평형: 강재 소켓과 편평형 텐던을 잡아주는 부분에 모래를 입힌 2개의 변단면 플라스틱 썬기)

(4) Leadline

- 생산자 : 일본 Mitsubishi Kasei Corporation
- 섬유 및 레진 : 탄소 섬유(pitch-based)와 에폭시 레진
- 모양 : 매끄럽거나 두 개의 나선형으로 얹게 들어간 표면을 가진 원형 rod
- 정착구 : 수정 썬기형 정착구(강재 소켓과 2개의 강재 썬기 그리고 썬기와 텐던 사이에서 응력을 고르게 분포시켜주는 알루미늄 슬리브) (<그림 10>)

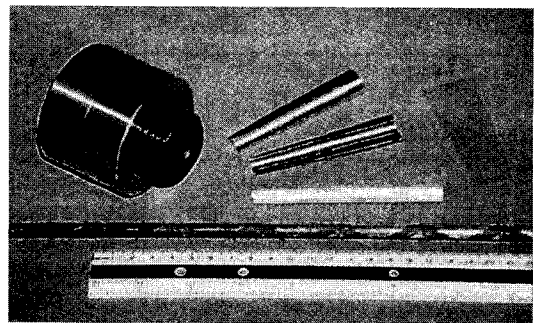


그림 10. Leadline 텐던과 정착구

(5) Technora

- 생산자 : 일본 Sumitomo Construction Company 와 Teijin Corporation
- 섬유 및 레진 : 아라미드 섬유와 비닐 에스터 레진
- 모양 : 나선형으로 꼰 rod
- 정착구 : 썬기형 정착구
형틀형 정착구(직경이 작은 강재 실린더와 정착판 고정용 너트)

(6) CFCC

- 생산자 : 일본 Tokyo Rope와 Toho Rayon Co.
- 섬유 및 레진 : 탄소 섬유(PAN-based)와 에폭시 레진
- 모양 : strand(연선)
- 정착구 : 형틀형 정착구(직경이 작은 강제 실린더와 정착판 고정용 너트, 레진 이나 녹인 합금 채움 방법) (<그림 11>)

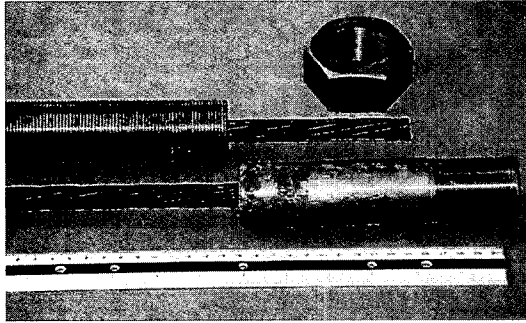


그림 11. CFCC 텐던과 정착구

(7) Lightline

- 생산자 : 미국 Neptco Inc.
- 섬유 및 레진 : 유리 섬유(E-glass)와 에폭시 레진
- 모양 : strand(연선)
- 정착구 : 형틀형 정착구 제작(포물선 모양으로 내부 변단면을 갖는 실린더와 정착판 고정 너트)

(8) Parafil

- 생산자 : 영국 Linear Composites of England
- 섬유 및 레진 : 아라미드 섬유(Kevlar 49), 레진 없음.
- 모양 : rope
- 정착구 : 돌기형 정착구(외부 원통과 섬유를 끼워 잡는 중앙의 변단면 돌기부 그리고 정착판에 고정하는 너트) (<그림 12>)

4.3 정착구 실험 결과

<표 1>은 Nanni의 정착구 실험 결과를 보여주고 있다. 8개의 정착구 중 4개만이 만족할 만한 결과를 보여주고 있으며, 나머지는 그러하지 못하고 있다.

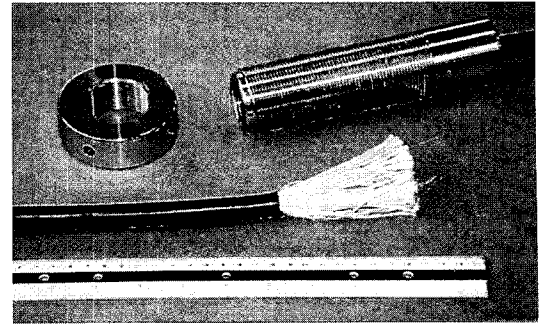


그림 12. Parafil 텐던와 정착구

이러한 결과는 정착 장치의 효율을 증대시킬 필요가 있음을 시사하고 있다. 더군다나 각 시스템별로 단지 2개의 정착구만 실험하였기 때문에 만족된 4개의 시스템에 대한 신뢰도에 대해서도 의문이다. 이러한 이유는 Nanni의 실험에서 만족된 CFCC 정착 시스템도 저자의 실험 결과인 <표 2>에 나타난 바와 같이 8개의 정착구 중 단지 3개만이 만족되고 있다. <그림 13>은 CFCC 정착구의 파괴 모습으로 부착 저항력 상실로 인한 텐던 미끄러짐(slip)과 텐던 파열 모습을 보여주고 있다.

표 1. Nanni의 정착구 실험 결과

Specimen type	Data source	Breaking stress (MPa)	Breaking load (kN)	Maximum elongation (percent)	Young's modulus (GPa)
FIBRA FA13	Reported	1389	176.40	2.00	68.6
	Test #1	1572	199.62	2.03	77.4
	Test #2	1511	191.91	1.95	77.5
High temperature	Test #1	1410	179.06	1.88	75.8
	Test #2	1483	188.40	2.07	71.4
Carbon Stress 17.5 x 1.65 mm	Reported	1870	54.00	1.60	150.0
	Test #1	1424	41.12	1.09	131.1
	Test #2	1335	38.55	1.08	124.0
Carbon Stress 5.4 mm	Reported	2140	49.00	1.60	160.0
	Test #1	1310	29.99	0.94	139.6
	Test #2	1160	26.56	0.69	166.2
Leadline Indented	Reported	2256	104.00	1.30	150.0
	Test #1	2605	120.08	1.48	177.2
	Test #2	2416	111.38	1.36	177.2
Technora Spiral wound	Reported	1716	86.23	3.70	54.0
	Test #1	1825	91.67	4.24	43.5
	Test #2	1773	89.10	3.55	49.0
CFCC 1 x 7, 12.5 mm	Reported	1868	142.00	1.57	137.3
	Test #1	2040	155.07	1.27	160.4
	Test #2	2255	171.35	1.52	148.0
Lightline Strand	Reported	1344	90.82	2.50	51.8
	Test #1	786	53.12	1.09	74.0
	Test #2	980	66.19	1.24	78.7
Parafil Type G	Reported	1213	105.00	1.50	120.0
	Test #1	1087	94.13	1.71	63.57
	Test #2	1009	87.39	1.25	80.74

Note: 1.0 in. = 25.4 mm; 1.0 kip = 4.48 kN; 1.0 Msi (ksi) = 0.145 GPa (MPa).

표 2. CFCC 정착구에 대한 실험 결과

정착구 번호	파괴 형태	파괴 강도(kip)	탄성계수(ksi)
1	부착 파괴	13.50 (93%)	-
2	텐던 파괴	15.40(106%)	19,073 (95%)
3	부착 파괴	7.94 (54%)	18,700 (94%)
4	부착 파괴	9.03 (62%)	-
5	텐던 파괴	15.25(105%)	20,077(100%)
6	텐던 파괴	15.30(105%)	20,000(100%)
7	부착 파괴	13.88 (95%)	19,176 (96%)
8	부착 파괴	13.78 (94%)	19,381 (97%)

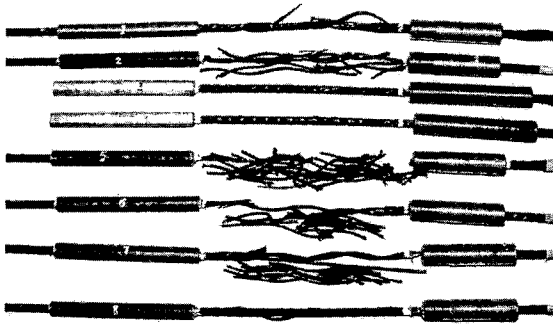


그림 13. CFCC 정착구 파괴 모습

표 3. 현장 제작 슬리브형 정착구 실험 결과

정착구 번호	텐던 지름(in)	슬리브 길이(in)	채움 횟수	파괴 형태	파괴 강도 (kip)
1	1/2	4	1	부착 파괴	18.61(50%)
2	1/2	4	1	부착 파괴	18.32(49%)
3	1/2	6	1	부착 파괴	22.48(60%)
4	1/2	6	1	부착 파괴	27.39(74%)
5	1/2	8	1	부착 파괴	33.26(89%)
6	1/2	8	1	부착 파괴	33.19(89%)
7	5/16	4	1	부착 파괴	10.55(72%)
8	5/16	4	1	부착 파괴	11.61(80%)
9	5/16	6	1	부착 파괴	5.66(39%)
10	5/16	6	1	부착 파괴	10.55(72%)
11	5/16	8	1	부착 파괴	13.25(91%)
12	5/16	8	1	부착 파괴	7.46(51%)
13	5/16	6	2	부착 파괴	12.83(88%)
14	5/16	6	2	부착 파괴	13.16(90%)
15	5/16	8	2	부착 파괴	16.20(111%)
16	5/16	8	2	부착 파괴	15.59(107%)

주 : 슬리브 내경은 5/16 in. 텐던은 1/2 in., 1/2 in. 텐던은 1 in.

〈표 3〉은 저자의 현장 제작 형틀형(슬리브형) 정착구에 대한 실험 결과이다. 사용된 관은 일반 배관용 파이프를 사용하였고 관 속에 충전된 레진은 에폭시(SikaDur 30)를 사용하였다. 이 실험 결과에 따르면 형틀형 정착구에서는 슬리브의 내경과 텐던의 직경비(면적비)와 길이가 정착력을 결정하는 데 중요한 인자가 될 수 있음을 알 수 있다. 또한 레진 경화시 발생하는 건조 수축의 영향이 매우 커 특히 슬리브와 텐던의 면적비가 작은 경우 무수축 레진을 사용하거나 레진 채움을 2회 이상으로 나누어 채우는 방법 등이 중요함을 알 수 있다.

5. 결 론

FRP-재료를 철근이나 프리스트레싱 긴장재 대체재로서 사용할 경우 FRP는 비부식성과 고인장 강도 등의 커다란 장점이 있지만, 비소성(탄성)과 낮은 횡방향 전단 강도 등의 단점으로 구조적인 면에서 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 이러한 문제점은 FRP를 사용한 콘크리트 부재의 연성 부족, 미성숙 전단 텐던 파괴에 의한 하중 지지력 감소, 정착 장치의 효율 및 신뢰성 저하 등이다. 이러한 문제점의 내용과 개선 방법 등에 대하여 다음과 같은 결론을 맺을 수 있다.

- (1) FRP는 탄성재료로서 항복점이 없기 때문에 FRP 콘크리트 부재에도 적용할 수 있는 에너지 개념에 기초한 연성지수 평가식이 필요하다.
- (2) FRP 콘크리트 부재의 가능한 연성 개선방법으로는 적절한 배근, 과대철근보 설계, 비부착 긴장재의 사용 등이 있다.
- (3) 전단 텐던 파괴는 FRP 콘크리트 부재에서만 일어나는 미성숙 전단파괴로 전단에 대한 저항력과 연성의 감소를 가져와 결국 부재의 하중 지지력을 감소시킨다.
- (4) FRP 콘크리트 부재에서 전단 텐던 파괴에 의한 하중 지지력과 연성 감소를 방지할 위해서는 이에 대한 많은 연구와 그 결과를 기초로 한 강제 콘크리트 부재보다 엄격한 전단설계 기준이 마련되어야 한다.
- (5) 현재 프리스트레싱 텐던의 정착구에 대한 효율과 신뢰성은 상당히 낮은 편으로 이에 대한 연구 개발이 필요하다. □

참고문헌

1. 박상렬, "FRP를 사용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 전단 텐던 파괴," 한국콘크리트학회 논문집, 제10권 1호, 1998년 2월, pp.133-141.
2. 정상모, "FRP긴장재를 이용한 콘크리트보의 연성지수 평가," 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.237-240, 1998.
3. 정상모, "FRP긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트보의 연성개선방법," 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, pp.643-648, 1998.
4. Burgoyne C. J., Guimaraes G. B., and Chambers J. J., "Tests on Beams Prestressed with unbonded Polyaramid Tendons," Technical Report CEED/D-Struct/TR. 132, Cambridge University, Engineering Department, U. K., 1991.
5. Grace N. F., Ductility of Prestressed Bridges Using CFRP Strands, Concrete International, 1998.
6. Jeong, S. M., "Evaluation of Ductility in Prestressed Concrete Beams using Fiber Reinforced Plastic Tendons," Ph. D. Dissertation, The University of Michigan, December, 1995.
7. Nanni, A., Bakis, C. E., and O'Neil, E. F., "Performance of FRP Tendon-Anchor Systems for Prestressed Concrete Structures," PCI Journal, Vol. 41, No. 1, Jan./Feb. 1996, pp.34-43.
8. Park, S., Y., " Shear Behavior of Prestressed Concrete Beams using Fiber Reinforce Plastic Tendons," Ph. D. Dissertation, The University of Michigan, 1997.
9. Taniguchi, H., Mutsuyoshi, H., Kita, H., and Machida, A., "Ductile Behavior of Beams using FRP as Tendons and Transverse Reinforcement," FRP Reinforcement for Concrete Structures, ACI SP 138-39, 1993, pp.651-670.