

# FRP긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트보의 연성개선방법

## Ductility Improvement Methods for Concrete Beams Prestressed with FRP (Fiber Reinforced Plastic) Tendons

정 상 모\*

Jeong, Sang-Mo

### ABSTRACT

Despite many advantages of FRP materials, such as corrosion resistance, their linear elastic behavior up to rupture is likely to result in a lack of ductility. This paper discusses ductility improvement methods for prestressed concrete beams using FRP tendons. The methods were evaluated thorough extensive analytical and experimental investigations. The methods include optimization of sectional ductility through proper reinforcement, concrete confinement, concrete reinforcement with fibers, and prestressing with unbonded tendons.

### 1. 서론

FRP(Fiber Reinforced Plastic or Polymers) 재료들은 강재와 달리 부식되지 않고 가벼우며 자성을 갖지 않는 등 여러 장점을 보유하고 있어서 건설분야에서 사용빈도가 증가 추세에 있다. 특히 이들은 높은 인장강도를 갖고 있어서 프리스트레스트 콘크리트에서 강재 긴장재의 대체재료로 주목을 받고 있다. 그러나 이들을 일상적인 건설재료로 활용하기에는 통용되는 시방서의 제규정이 아직 완비되지 않았다. 예를 들면 허용응력법과 강도설계법중 어느 것을 적용할 지가 미정이고, 허용응력에 대한 적합한 안전율과 강도설계법에서의 바람직한 강도감소계수 등에 대한 연구도 미흡한 실정이다. 이러한 안전도 관련 계수들을 제정할 때에는 필수적으로 파괴특성으로서 연성(Ductility)이 고려되어야 한다.

연성은 재료, 구조단면, 구조부재 또는 구조계에 있어서 파괴전까지 보여주는 변형의 정도를 지칭하는 정성적인(Qualitative) 개념이다. 여기서 변형은 탄성변형보다는 소성변형을 의미하며, 특히 내진설계시에는 유입된 지진에너지를 흡수 소모하는 지표로서 연성은 안전도평가에 중요한 인자이다.

FRP 재료들은 인장시험에서 극한 변형률이 강재보다 훨씬 작고, 파단시까지 선형 탄성거동을 보여준다. 극한 변형률은 강재 Strand가 6.9%를 상회하는 반면, 탄소섬유재는 1.6%정도이고, 아라미드 재료도 2% 이하이며, 비교적 변형률이 큰 유리섬유제품도 4%에 미치지 못한다. 따라서 FRP재료의 연성부족이 문제점으로 제기되어 왔으나, 아직까지 부분적인 연구성과들만이 발표되었을 뿐 종합적이고도 체계적인 정리가 부족한 상황이다.<sup>2,4,7)</sup>

\*정회원, 한동대학교 건설도시환경공학부 조교수

본 논문에서는 FRP 긴장재를 사용하는 콘크리트보에 있어서 가능한 많은 연성개선방법들을 체계적으로 분류하고 그 타당성을 조사 분석 평가하였다. 개선방법을 대별하면 적절한 배근, 과대철근보 개념 도입, 부착안 된(Unbonded) 긴장재 이용 등이며, 각각의 항목에 대한 평가결과를 기술하였다. 조사방법으로는 관련 파라미터들의 변화에 대한 전산해석과 그중 일부 방법에 한하여 실험에 의한 검증을 시행하였다. 즉 실험 및 해석에 의하여 프리스트레스트 콘크리트 보에 대한 모멘트-곡률 곡선 또는 하중-처짐 곡선을 극한상태 이후까지 구하고, 이 곡선들을 토대로 연성개선의 타당성을 분석 평가 하였다.

## 2. 적절한 배근에 의한 연성개선

하나의 T형보 단면에 대하여 강재 Strand와 탄소섬유, 아라미드, 유리섬유 등 3종류의 FRP 긴장재를 사용하였을 때 각각의 모멘트-곡률 관계를 비선형해석을 통하여 구하면 그림 1과 같다. 그림 1에 의하면 예상한 바와 같이 FRP 긴장재를 사용할 경우 극한 지지모멘트는 비슷하나 연성에 관하여 두가지 문제점이 발생한다. 우선 절대적인 변형량이 강재의 경우보다 작고, 변형자체가 강재의 소성변형과는 달리 직선으로 구성된 선형 탄성변형을 보여준다. 따라서 연성개선을 위해서는 변형량과 소성 변형의 문제점이 고려되어야 하며 적절한 배근을 통한 개선방법을 다음과 같이 구분하여 검토하였다.

### 2.1 변형량에 대한 검토

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

프리스트레싱 유효응력이 결정되면 이제는 긴장재의 사용 양에 따라 극한변형량이 변하며, 해석에 의하면 그림 2에서 보인 바와 같이 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.

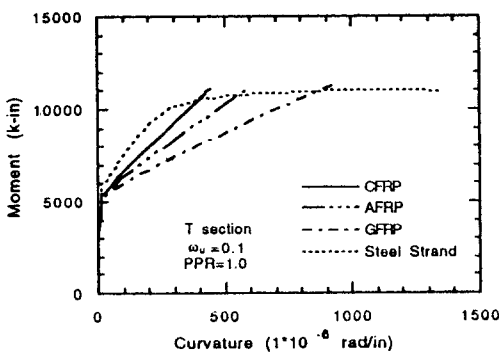


그림 1 긴장재 종류별 모멘트-곡률 곡선 비교

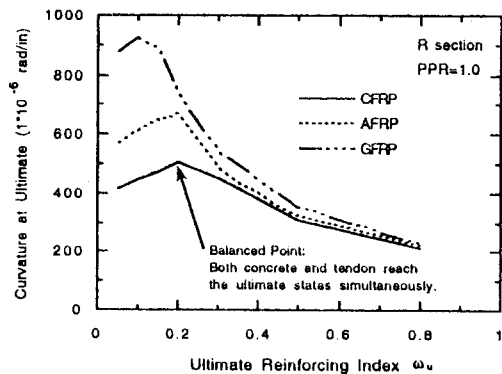


그림 2 긴장재 보강지수와 극한 곡률의 관계 곡선

## 2.2 소성에너지에 대한 검토

FRP재료만으로 콘크리트를 보강하면 두재료 공히 취성이 큰 재료이므로 비록 충분한 변형량을 확보하여도 대부분이 탄성변형으로서 실제 연성에 기여하는 소성변형은 거의 얻을 수 없다. 이때 연성 개선을 목적으로 일반 철근을 보강하여 부분긴장(Partial Prestressing) 콘크리트보로 설계하면 철근의 항복 이후 소성변형을 통하여 연성개선이 가능하며 실험을 통하여 확인된 바 있다.<sup>4)</sup> 이 경우 보강철근의 부식은 프리스트레스트 보에서는 균열이 억제되므로 크게 우려하지 않아도 될 것이다.

## 2.3 적절한 배근을 통한 소요 Ductility의 확보

이상의 검토와 같이 적절한 배근을 통하여 필요한 만큼 연성개선이 가능하다. 즉 우선적으로 유효 프리스트레싱 양과 사용재료의 양을 조절하여 큰 변형량을 확보하고, 일반철근을 보강하므로 철근의 소성변형에너지를 활용하여 궁극적으로 연성의 개선이 가능하다. 최대변형을 얻기 위한 적절한 배근량은 평형비에서 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다. 경우에 따라서는 연성의 확보를 위해서 경제성을 희생해야 할 경우도 있을 것이다.

## 3. 과대철근보 개념에 의한 연성개선

철근콘크리트보에서는 평형비의 3/4보다 작은 철근량을 사용함으로 콘크리트 파괴 전에 연성이 큰 철근의 항복을 유도하여 필요한 연성도를 확보한다. 그러나 FRP재료는 연성이 작으므로 연성개선을 위하여 굳이 평형비 이하로 설계할 필요는 없다. 역으로 과대철근보 개념으로 설계하되 취성이 큰 콘크리트를 연성거동을 하도록 조치를 취하면 연성개선이 가능할 것이다. 연성거동을 위한 조치방안으로 두가지를 제안하였으며, 그중 하나는 스테럽 등으로 콘크리트를 구속(Confinement)하는 것이고, 두번째 방법은 섬유보강 콘크리트를 사용하는 것이다.

### 3.1 콘크리트 구속 (Confinement)에 의한 방법

보강지수(Reinforcing Index)가 0.5로 과대보강된 보에 있어서 스테럽에 의한 구속정도에 따른 연성개선 효과를 비선형해석을 통하여 얻은 후 그림 3에 나타내었다. 관련 파라미터는 과대보강되는 긴장재 사용량과 콘크리트 구속을 위한 스테럽 사용량으로서, 긴장재와 스테럽 각각의 사용량이 증가할 수록 큰 연성을 얻을 수 있는 것으로 실험을 통하여 확인 된 바 있다.<sup>2)</sup>

### 3.2 섬유보강 콘크리트의 사용

섬유보강 콘크리트는 섬유의 교량효과(Bridging Effect)에 의해 Toughness가 증가하고 그에 따른 연성거동이 가능하다. 연성개선 방법으로서 과대철근보 개념으로 설계하고 섬유보강 콘크리트를 사용하는 것이 효과적임을 필자의 실험을 통하여 검증한 바 있으며, 실험 결과중 하나를 그림 4에 나타내었다.<sup>4,5)</sup>

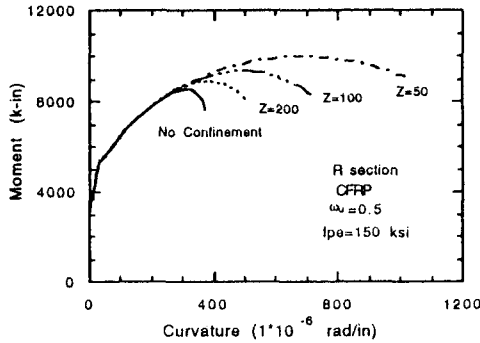


그림 3 구속정도에 따른 모멘트-곡률 곡선

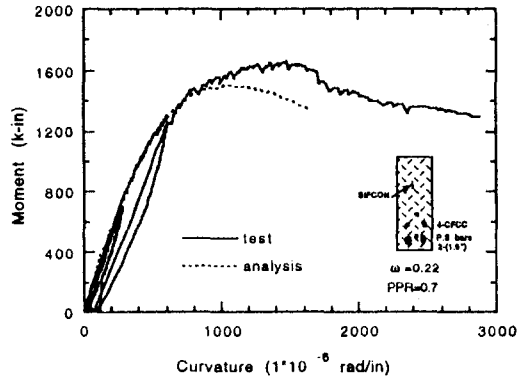


그림 4 과대보강된 섬유보강 콘크리트보의 모멘트-곡률 곡선

#### 4. 부착안 된 (Unbonded) 긴장재의 사용

강재의 경우에도 부착안 된 긴장재는 설치 점점 교체가 용이한 장점 등으로 상당히 사용빈도가 높다. 긴장재를 부착하는 주 이유는 부식을 방지하기 위한 것이므로 부식에 강한 FRP 긴장재는 굳이 부착할 필요는 없을 것이다.

부착안 된 긴장재는 어느 한 단면이 아닌 부재 전 길이상에서 평균적으로 변형하므로 긴장재의 종류와 무관하게 극한 상태까지 긴장재는 탄성거동을 하게되고 콘크리트가 압축파괴를 하면서 충분한 변형량을 확보할 수 있다. 이때에도 소성변형을 통한 연성확보는 일반철근의 보강에 의하여 가능하며 현 시방서에서도 철근비 0.004 이상의 일반철근으로 보강하도록 명시되어 있다.

부착안 된 긴장재를 사용한 장방형보에 대한 하중-처짐 곡선을 비선형해석을 통하여 구하였으며 그 결과는 그림 5와 같다. 그림과 같이 긴장재의 종류에 관계없이 거의 비슷한 하중-처짐 곡선을 보이고 있음을 알 수 있다. 실제로 부착안 된 긴장재의 사용이 연성개선에 효과적임을 실험을 통하여 발표된 바 있다.<sup>1.7)</sup>

한편 FRP재료는 전단강도에 취약하여 외부 긴장의 경우 칼 등 간단한 도구를 사용하여 긴장재를 손상시키는 것이 가능하므로 이에 대한 주의를 요한다.<sup>6)</sup>

#### 5. 기타 연성개선방법

기타 예상 가능한 연성개선방안들을 열거하면 다음과 같다. 이들의 방법들은 아직 실험을 통하여 검증되지는 않았으나 해석을 통하여 연성개선이 가능한 것으로 추정되었다.

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

또 다른 예로는 극한 변형률이 다른 탄소섬유, 아라미드 및 유리섬유제품들을 혼합하여 사용하므로 극한변형률 크기 순으로 긴장재의 파괴를 유도하여 역시 연성거동과 흡사한 결과를 얻을 수 있었다.

부착안 된 긴장재 사용을 변용한 방안으로서, 사용하중 하에서는 부착 긴장재로 작용하도록 하고, 지진 등 비상시의 큰 하중이 작용하면 부착이 파손되어 부착안 된 상태로 변하게 함으로 소요연성을 확보하는 방법이 가능할 것이다. 이를 해석적으로는 조사한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림에서와 같이 일부부착에서 부착안 된 상태로 변하는 동안 에너지를 흡수 소모하고 큰 변형을 얻을 수 있게 된다.

## 6. 결론

지금까지 FRP긴장재를 사용한 보의 연성개선방법에 대해 논하였다. 연성개선방법을 대별하면 적절한 배근, 과대철근보 개념 도입, 부착안 된 긴장재에 의한 개선 및 이들을 혼용 또는 변용하는 방법들로 구분할 수 있다. 연성평가를 위한 조사방법으로는 전산해석과 일부 실험결과에 의하였으며 극한 상태 이후 파괴시까지 모멘트-곡률 또는 하중-처짐 곡선을 구하여 분석 평가하였다.

연성개선방법에 따라 효율성 및 경제성이 다르겠지만 결론적으로 연성개선은 가능하다. 특히 효과적인 방법으로는 부착안된 긴장재의 사용 및 섬유보강 콘크리트를 사용하는 방법 등이 있다.

실제 설계시 적용은 일상적인 경우 적절한 배근법을 활용하고, 큰 지진하중 등 특별한 경우에는 별도의 효과적인 연성개선방법을 채택하여야 할 것이다. 또한 시방서상의 안전을 적용은 본 연구를 토대로 이들 연성에 대한 정량적 평가 및 재료성질의 확률적 분포 등을 고려하여 신뢰도해석을 시행하고 그 결과에 따라 적정치를 얻을 수 있을 것이다.

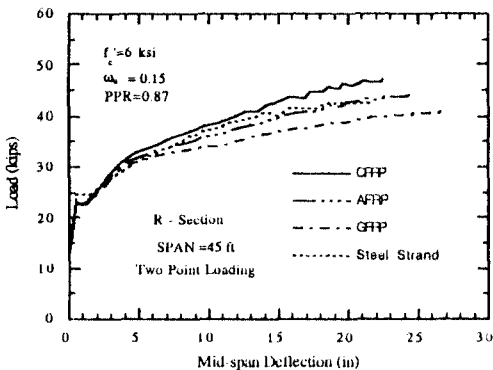


그림 5 부착안 된 긴장재를 사용한 보의 하중-처짐 곡선

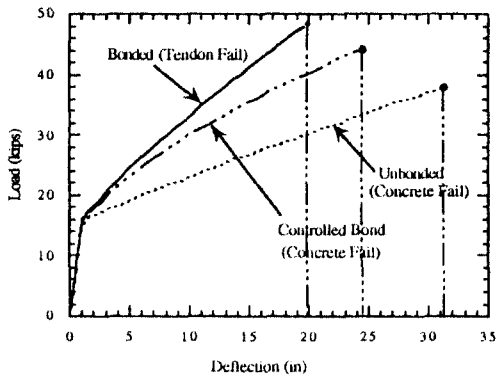


그림 6 부착을 조정한 보의 하중-처짐 곡선

## 참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. Naaman, A. E., and Jeong, S. M., "Considerations of Structural Ductility with External Tendons," Proceedings of International Workshop on External Prestressing, Paris, France, 1993.
4. Jeong, S. M., "Evaluation of Ductility in Prestressed Concrete Beams using Fiber Reinforced Plastic Tendons," Ph. D. Dissertation, The University of Michigan, December, 1995.
5. Naaman, A. E., and Jeong, S. M., "Structural Ductility of Concrete Beams Prestressed with FRP Tendons," Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the 2nd International Rilem Symposium, E & FN Spon, London, 1995.
6. Park, S., Y., "Shear Behavior of Prestressed Concrete Beams using Fiber Reinforce Plastic Tendons," Ph. D. Dissertation, The University of Michigan, 1997.
7. Grace N. F., and Sayed, G. A., "Ductility of Prestressed Bridges Using CFRP Strands," Concrete International, June, 1998.