CFRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 휨거동

Flexural Behavior of Prestressed Concrete Beams with CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) Tendons

조병완* 태기호** 최용환***
Jo, Byung Wan Tae, Gi Ho Choi, Yong Hwan

ABSTRACT

Prestressing steels are susceptible to corrosion, which is considered the major reason in the deterioration of prestressed concrete structures. To solve this problem, many research have been made to utilize new type of tendons. FRP tendons have many advantages compared to steel tendons. However, FRP tendons have some disadvantages, such as no plastic behavior. This study focused on the flexural behavior of prestressed concrete beams which is fabricated by post-tensioning method with CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) tendons. The results drawn from the study, prestressed concrete beams with CFRP tendons have higher flexural cracking load, flexural yielding load, and flexural fracture load While displacement at the fracture stage is lower compared to prestressed concrete beams with steel tendons. Excessive steel reinforcement lead lower ductility index. So, appropriate reinforcement guideline is needed. Furthermore, prestressed concrete beams with CFRP tendons can have sufficient ductility index when ruptured by crushing of concrete or used unbonded tendon. Therefore, the best design method for prestressed concrete beams with CFRP tendons is over-reinforcement, and use of unbonded tendon.

1. 서론

프리스트레스트 콘크리트 구조물은 콘크리트 단면을 효율적으로 이용할 수 있는 장점을 가지고 있지만 열악한 환경에 노출되는 경우에는 부식으로 인한 내구성 저하를 피할 수 없다. 구조물의 부식으로 인한 내구성 저하는 보수, 보강 비용의 증가라는 심각한 문제를 유발하기 때문에 부식에 저항성이 큰 재료를 프리스트레스트 콘크리트의 긴장재로 사용하려는 연구가 진행되어 왔으며 가장 유력한 대

*정회원, 한양대학교 토목공학과 교수
**정회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정
***정회원, 쌍용건설(주) 기술연구소 연구원

체재료로 주목받는 것이 FRP(Fiber Reinforced Plastic)긴장재이다. FRP 긴장재는 기존의 강재 긴장재에 비해 우수한 내부식성, 높은 인장강도 등의 장점을 가지고 있지만 그 반면에 파단 시까지 소성변형없이 선형탄성 거동을 보이며, 인장강도에 비하여 전단강도가 매우 작고, 응력-파손의 위험이 있으며, 매우 높은 시공비가 요구되는 단점 등을 가지고 있다. 특히 FRP 긴장재는 소성 거동을 하지 않으므로 FRP 긴장재가 사용된 구조물의 연성은 매우 작을 수밖에 없으므로 구조거동과 연성에 관한 충분한 연구가 이루어져야 이를 바탕으로 실제 구조물에 적용할 수 있을 것이다

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험변수 및 계획

CFRP 긴장재를 사용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 내력, 거동특성, 연성에 미치는 인자를 파악하기 위하여 시험체를 제작하여 실험을 수행하였으며 변수에 따른 시험체는 다음 표 1과 같다.

표 1 변수에 따른 시험체의 분류

시험체명	긴장재의 부착여부	프리스트레스힘(tonf)	인장철근비(%)	긴장재 종류
S-G	Bonded	18($0.7P_u$)	0.25(2D13)	SWPC 7B 7Strand 15.2mm
S-U	Unbonded			
F-G	Bonded	18($0.63P_G$)		CFRP Tendon 1×7 17.8Ø
F-G-N		18(2×9)($0.44P_G$)		2×CFRP Tendon 1×7 15.2Ø
F-U	Unbonded	18($0.63P_G$)		CFRP Tendon 1×7 17.8Ø
F-U-R			1.16(3D22)	
F-U-L		12($0.44P_G$)	0.25(2D13)	
F-U-N		18(2×9)($0.44P_G$)		2×CFRP Tendon 1×7 15.2Ø

(P_U : 강재긴장재의 인장강도, P_G : CFRP 긴장재의 Guaranteed capacity)

2.2 실험재료의 특성

본 실험에서 사용한 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트이고 굵은골재 최대치수는 19mm, 슬럼프 12mm의 배합강도 350kg/cm^2 레미콘을 사용하였다. 철근은 항복강도 3000kg/cm^{2}인 D13, D22철근을 사용하였으며, 강재 긴장재는 인장강도가 190kg/mm^{2}인 7연선 15.2mm를 사용하였으며 CFRP 긴장재는 일본 Tokyo Rope사의 CFCC 15.2mm와 17.8mm 두 종류의 긴장재를 사용하였다. 또한 직접 제작하여 사용한 Bond type 정착장치의 내부 충전을 위해 Sikadur$^{®}$ 35, Hi-Mod LV를 사용하였다.

2.3 시험체의 설계 및 제작

시험체의 단면 치수는 25cm×40cm이며 총길이는 3m이다. 강재 긴장재를 사용한 시험체는 Freyssinet type의 wedge를 사용하여 정착을 하였으며 CFRP 긴장재는 Bond type의 Resin Sleeve 정착장치를 제작하여 정착을 하였다. 그림 1과 2에는 변수별 시험체의 형상을 나타내었다

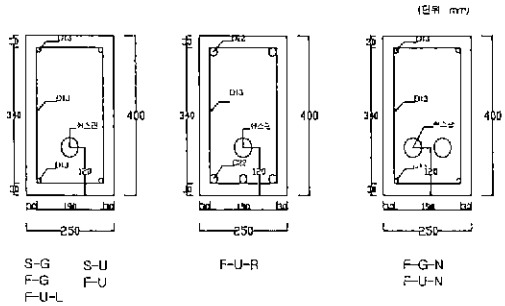

그림 1 시험체의 변수별 단면형상

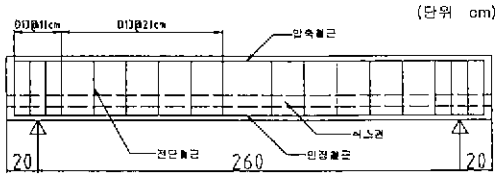

그림 2 시험체의 측면도

2.4 시험체의 하중재하 및 측정방법

시험체의 구조내력을 및 거동을 평가하기 위해 지간 중앙에서 양쪽으로 20cm의 거리를 두고 4점 재하를 하였다. 가력은 100ton 용량의 만능시험기를 사용하여 분당 1mm의 변위제어 방식을 사용하여 파괴 시까지 하중을 재하하였고 변위측정을 위해 중앙부 및 양쪽 1/4 지점에 변위계(LVDT)를 설치하였으며 긴장재, 인장철근, 압축철근, 콘크리트 표면에 strain gauge를 설치하였고 설치 위치를 그림 3에 나타내었다.

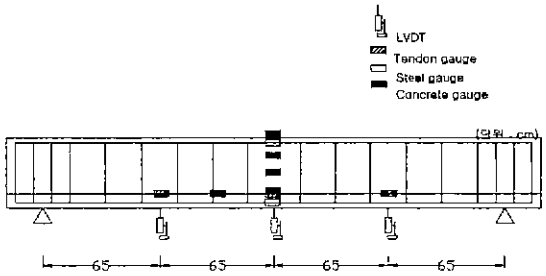

그림 3 Gauge 부착위치 및 LVDT의 위치

3. 실험 결과 및 분석

3.1 시험체별 구조내력

시험체별 초기균열 하중을 살펴보면 동일한 프리스트레스 힘으로 긴장할 경우 CFRP 긴장재를 사용한 보가 강재 긴장재를 사용한 보에 비하여 크게 나타나는 것으로 보아 초기 프리스트레스 손실량이 적음을 알 수 있었으며 인장철근 항복하중과 시험체의 파괴하중 또한 CFRP 긴장재를 사용한 시험체가 강재 긴장재를 사용한 시험체에 비하여 높게 나타났으며 파괴시 최종 처짐량은 작아 구조내력이 뛰어남을 알 수 있었다. 파괴시까지의 하중-처짐 곡선을 살펴보면 긴장재의 종류에 상관없이 초기균열하중, 인장철근의 항복점에서 하중-처짐 곡선의 기울기가 변하는 tri-linear 곡선의 형태를 띠는 것을 알 수 있었다. 시험체별 구조내력의 비교를 표 2에 나타내었으며 하중-처짐 양상은 그림 4에 나타내었다.

표 2 시험체별 구조내력 비교

	초기균열하중 (tonf)	인장철근항복하중 (tonf)	보의파괴하중 (tonf)	파괴시처짐량 (mm)	처짐을이용한 연성지수	에너지를이용한 연성지수	파괴양상
S-G	5.8	11.6	21.7	33.91	6.13	3.54	휨파괴
S-U	5	11.5	17.1	26.17	4.75	4.13	휨파괴
F-G	6.8	15.2	23.6	24.82	3.84	2.92	휨-압축파괴
F-U	7	13	17.5	29.16	5.98	5.78	휨-압축파괴
F-U-R	6.5	37.3	40.3	19.18	1.72	1.69	휨-압축파괴
F-G-N	7	17.5	25.2	24.14	3.28	3.67	휨-압축파괴
F-U-N	6.7	15.5	19.5	21.7	3.85	3.2	휨-압축파괴
F-U-S	6	12.7	18.8	31.18	5.76	4.76	휨-압축파괴

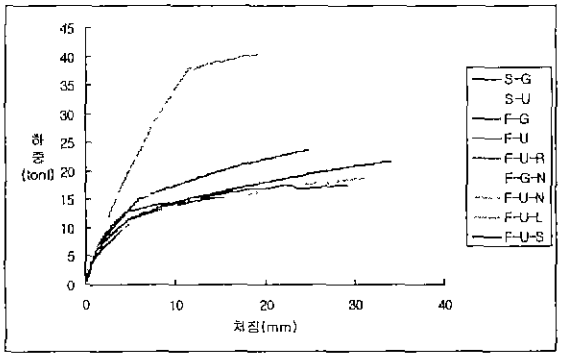

그림 4 시험체별 하중-처짐 곡선

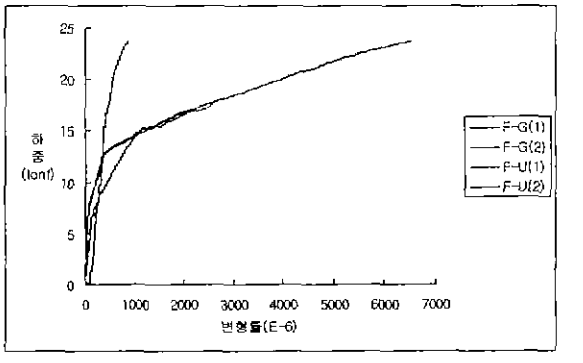

그림 5 CFRP 긴장재 부착여부에 따른 변형률 비교

3.2 CFRP 긴장재를 사용한 보에서의 긴장재 부착의 영향

F-G 시험체와 F-U 시험체의 긴장재 변형률을 살펴보면 부착시키지 않은 긴장재를 사용한 F-U 시험체의 경우 하중증가에 따라 발생되는 긴장재의 변형이 긴장재 내에서 고르게 발생되나 부착된 긴장재를 사용한 F-G 시험체의 경우 긴장재 내부에서 변형률의 차이가 최고 2.5배까지 차이가 발생되었다 강재 긴장재나 일반 긴장재의 경우 재료적으로 연성이 충분하므로 국부적으로 발생되는 높은 변형이 문제가 되지 않으나 소성변형을 하지않는 CFRP 긴장재의 경우 국부적으로 발생되는 높은 변형은 긴장재의 조기 파단을 유발할 수 있으므로 CFRP 긴장재의 경우 부착시키지 않은 긴장재의 형태로 사용하는 것이 연성확보 차원에서는 유리함을 알 수 있으며 연성지수 값도 부착시키지 않은 경우가 훨씬 큰 값을 보임을 알 수 있다. F-G와 F-U 시험체의 하중-긴장재 변형률 곡선은 그림 5에 나타내었다.

3.3 CFRP 긴장재를 사용한 보에서의 인장철근량의 영향

F-U 시험체와 F-U-R 시험체의 하중-처짐 곡선을 살펴보면 인장철근량이 증가함에 따라 보의 초기 강성이 증대되고 인장철근 항복하중이 크게 나타남에 따라 보의 파괴하중 또한 크게 나타났고 파괴시 처짐량은 감소하여 좋은 구조내력을 나타내었다. 그러나 연성지수를 살펴보면 연성지수가 급격히 감소하는 것을 알 수 있었다 일반적인 RC 구조물에서도 적정한 인장철근량의 증내는 연성을 증가시키지만 과도한 인장철근의 사용은 오히려 연성을 감소시키는 것으로 알려져 있는데 CFRP 긴장재를 사용한 보에서도 동일한 양상을 나타냄을 알 수 있다 따라서 적절한 인장철근량의 사용이 요구됨을

알 수 있다.

3.4 CFRP 긴장재를 사용한 보에서의 과보강 설계의 영향

CFRP 긴장재를 사용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 경우 긴장재의 연성이 작기 때문에 긴장재량을 평형비 이하로 설계할 필요가 없게 된다. 동일한 프리스트레싱 힘으로 긴장하면서 긴장재를 2배로 늘린 F-G-N과 F-U-N 시험체의 비교를 통하여 구조내력을 비교하여 보았다. 인장철근 항복하중은 긴장재량이 늘어남에 20~35% 정도 증가하고 파괴하중은 11~44% 까지 증가하였다. 파괴시 최종처짐량은 긴장재량을 늘려 설계한 경우가 높은 파괴하중에도 불구하고 훨씬 적은 처짐량을 기록하였다. 그러나 연성지수를 살펴보면 긴장재량을 과다하게 늘리는 것이 연성에는 큰 도움을 주지 않는 것으로 나타났다

3.5 CFRP 긴장재를 사용한 보에서의 연성평가

CFRP 긴장재가 사용된 보의 경우 긴장재가 소성변형을 하지 않기 때문에 긴장재가 조기 파단될 위험성을 항상 내포하고 있다. 그러나 본 실험에서와 같이 보의 휨-압축 파괴를 통해 콘크리트의 파괴를 기준으로 부재를 설계할 경우 충분한 연성이 확보됨을 알 수 있었다. 또한 연성지수 산정은 일반적으로 처짐을 이용한 식으로 표현하여 사용한다. CFRP 긴장재가 사용된 보의 경우 CFRP 긴장재가 소성변형을 하지 않는 재료적인 특성 때문에 연성지수 산정시 인장철근의 항복점을 기준으로 연성을 평가하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 A.E. Naaman 과 S.M. Jeong이 제안한 파괴시 에너지 개념을 이용한 연성지수 산정식을 이용하여 연성지수를 산출하여 그 결과를 비교하여 본 결과 CFRP 긴장재를 사용한 보의 경우 파괴시 에너지를 고려한 연성지수 산정식이 좀 더 합리적인 결과를 제시하여 주는 것을 알 수 있었으며 각 시험체별 연성지수 산정과 비교를 그림 6에 나타내었다.

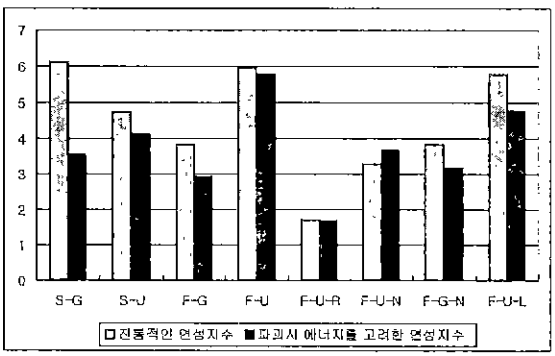

그림 6 시험체별 연성지수 산정과 비교

4. 결론

본 연구에서는 CFRP 긴장재를 사용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 휨거동과 연성을 기존의 강재 긴장재를 사용한 보와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 동일한 프리스트레스 힘으로 긴장한 CFRP 긴장재를 사용한 보는 강재 긴장재를 사용한 보와 비교하여 볼 때 전체적인 하중-처짐 양상은 유사한 거동을 나타내었으며 초기균열하중, 인장철근 항복하중, 보의 파괴하중은 높게 나타나고 처짐은 작게 나타나 구조내력이 뛰어남을 알 수 있었다

(2) CFRP 긴장재의 경우 긴장재의 재료적 연성이 부족하므로 연성의 확보를 구조계 전체에서 얻어야 한다. 본 연구에서는 CFRP 긴장재를 사용한 보에서 소정의 과보강 설계를 통해 휨-압축 파괴를 유도하여 긴장재의 파단을 예방하여 구조물의 연성을 확보할 수 있었다.

(3) CFRP 긴장재를 사용한 보에서 긴장재를 부착시킨 형태로 사용할 경우 일체거동을 통하여 보의 구조내력은 상승하였으나 긴장재 내부에서 국부적으로 높은 변형이 유발되어 긴장재가 조기 파단될 위험성이 있으므로 부착시키지 않은 긴장재의 형태로 사용하는 것이 연성확보에는 유리함을 알 수 있었다.

(4) CFRP 긴장재를 사용한 보에서 인장철근량의 증대는 보의 구조내력을 상승시켰으나 인장철근량이 과다한 경우 연성의 저하가 심각하게 나타나므로 적절한 인장철근의 배치가 요구됨을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구를 수행하는데 많은 도움을 주신 (주)후레씨네코리아 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 신현묵, "프리스트레스트 콘크리트", 동명사, 1997
2. 정상모, "FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트보의 연성개선방법", 한국 콘크리트학회 학술발표회 논문집 제10권 2호, 1998, pp. 643-648
3. F.S. Rostasy., FRP Tensile Element for Prestressed Concrete-State of Art, Potentials and Limits, FRP Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of International Symposium, Nanni,A , and Dolan, C.W , (editors), ACI SP-138, American Concrete Institute, Detroit, 1993, pp. 347-366
4. Jeong, Sang-Mo, Evaluation of Ductility in Prestressed Concrete Beams using Fiber-Reinforced Plastic Tendons, Ph. D. Dissertation, The University of Michigan, December, 1994
5. N.Gpwripaian, X.W Zou, and R I. Gilbert, Flexural Behavior of Prestressed Beams using AFRP Tendons and High Strength Concrete, Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, M M. El-Badry., (editors), Canadian Society for Civil Engineering , Montreal, Quebec, 1996, pp 325-333
6. C J. Burgoyne, Should FRP be Bonded to Concrete?, FRP Reinforcement for Concrete Structures, *Proceedings of International Symposium*, Nanni,A , and Dolan, C.W., (editors), ACI SP-138-23, American Concrete Institute, Detroit, 1993, pp. 367-380
7. T. Kato and N Hayashida, Flexural Characteristics of Prestressed Concrete Beams with CFRP Tendons, FRP Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of International Symposium, Nanni,A., and Dolan, C.W , (editors), ACI SP-138-26, American Concrete Institute, Detroit, 1993, pp 419-439
8. Angelo Di Tommaso, Fransesco Focacci, and Paolo Foraboschi, Driven Failure Mechanisms in Fiber-Reinforced-Plastic Prestressed Concrete Beams for Ductility Requirements Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, M.M. El-Badry , (editors), Canadian Society for Civil Engineering , Montreal, Quebec, 1996, pp. 281-287
9. A.E. Naaman and S.M Jeong, Structural Ductility of Concrete Beams Prestressed with FRP Tendons, Non-Metalic Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the 2nd International Rilem Symposium, E&FN Spon, London, 1995, pp. 379-386