

Bow 공법으로 보강된 철근콘크리트 보의 휨보강 성능

Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Bow System

임재형* 문정호** 이재연***
Lim, Jae-Hyung Moon, Jeong-Ho Lee, Jae-Yeon

Abstract

This paper is to investigate about a new technique (Bow system) which is to develop the disadvantages of the external post-tensioned method. The purpose of this paper is to analyze about the prestress loss when the loads apply along the long term and to improve the capacity of the members strengthened by Bow system. The variables in the test program are the span/depth ratio, the amount of tendon area. And the test was carried out to confirm the long term behaviour. It is shown that can apply the current code in the design, and have no the structural problems about the prestress loss.

요 지

본 논문은 압축력 흡수장치를 사용하지 않은 프리스트레스 보강공법의 단점을 보완한 Bow 공법에 대한 연구이다. 본 논문의 목적은 장기 하중이 작용할 때 발생할 수 있는 프리스트레스의 손실 등에 대하여 분석하는 것이며, 또한 Bow 공법으로 보강한 부재의 성능 향상에 대한 자료를 제시하는 것이다. 이상의 목적을 달성하기 위하여 경간/깊이 비, 긴장재 양을 변수로 실험체를 제작하여 실험을 실시하였다. 그리고 장기 하중 재하 실험도 실시되었다. 실험결과에 의하면 Bow 공법은 현행의 설계규준을 적용하여 설계할 수 있음을 확인하였으며, 장기 하중 재하에 의하여도 구조적인 문제가 없는 것으로 확인하였다.

Keywords : Bow system, External post-tension, Strengthen

핵심 용어 : Bow 공법, 외부 포스트텐션, 보강

* 정회원, 우송정보대학 리모델링건축과 교수

** 정회원, 한남대학교 건축학부 교수

*** 정회원, 목원대학교 건축학부 교수

E-mail : phd-lim@hanmail.net 042-630-9941

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2009년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

구조물을 보강하는 방법 중에서 이미 발생된 변형을 회복함과 동시에 구조성능을 향상시킬 수 있는 능동적인 보강방법 중에서 압축력 흡수장치를 사용하지 않은 프리스트레스 보강공법은 보강되는 부재에 도입되는 프리스트레스에 의한 압축력 때문에 인접 부재에 변형을 발생시키거나 균열을 발생시킬 가능성이 있음을 알 수 있었다.⁽¹⁾ 따라서 압축력 흡수장치를 사용하지 않은 프리스트레스 보강공법에서 나타나는 불합리한 점, 즉 프리스트레스에 의한 압축력이 보강하는 부재에 발생되지 않는 Bow 공법이 개발되었고, 이 공법에 대한 해석 및 실험적 연구로부터 압축력 흡수장치를 사용하지 않은 프리스트레스 보강공법보다 우수한 성능을 보유하고 있는 공법으로 확인하였다.⁽²⁾

또한 포스트텐션에 의한 긴장재는 웨지(wedge set)에 의하여 정착되기 때문에 웨지의 정착상태에 따라 오랜 시간이 흐르면 프리스트레스가 감소될 가능성이 있다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 Bow 공법의 개발에 관한 세 번째 연구로써 Bow 공법에 의해 보강된 보의 성능향상 방법과 오랜 기간의 하중재하에 의한 프리스트레스의 손실 등에 대하여 검증하고 설계에 활용할 수 있는 자료를 제시하는 것이 연구의 목적이다.

2. 실험

2.1 실험체 계획 및 설계

프리스트레스드 콘크리트 보에서 부착 긴장재를 갖는 보의 거동과 비부착 긴장재를 갖는 보의 거동 특성이 다르게 나타난다.⁽⁶⁾ 이 연구에서 사용된 공법과 같이 비부착 긴장재를 갖는 보는 긴장재에 대한 응력을 평가할 때 부재 전체에 발생된 변형의 평균으로 평가하여야 한다. 따라서 외부 포스트텐션 보강공법에 의하여 보강된 부재를 설계할 경우에도 비부착 긴장재를 갖는 부재로 설계함이 바람직하다. 또한 프리스트레스드 콘크리트 부재의 연성파괴를 유도하기 위하여 강도설계기준에 따라 $\Phi Mn > 1.2Mcr$ 를 만족할 수 있도록 설계한다.

본 연구에서의 실험체는 국내 콘크리트구조 설계기준⁽³⁾과 ACI 318-08⁽⁴⁾의 기준을 참고하여 설계하였으며, 주로 Bow 공법의 구조성능에 대해서 평가하는 것을 주목적으로 하였다. 실험에 사용된 변수는 다음과 같다.

- (1) 유효프리스트레스 (f_{se})
- (2) 긴장재 양 (A_{ps})
- (3) 경간/깊이 비 (L/d_p)

연구대상 구조물은 7×8m의 모듈을 갖는 사무소 건물을 대상으로 하였으며, 실험체 크기는 실험실 여건

Table 1 실험체 일람

실험체명	Load Block	F_{se}	보강 방법	보강재	경간	L/d_p	크기	보강비	보강철근	보강재료 크기
B-LD14	D:80ea L:50ea	D : T=35.7kN/ea L : T= 9.7kN/ea	Bow	강연선	5.3m	$\frac{14}{(d_p=38cm)}$	23×43cm	0.198	4-D16	2-Ø12.7
B-LD12	D:80ea L:50ea	"	Bow	강연선	5.3m	$\frac{12}{(d_p=45cm)}$	23×43cm	0.168	4-D16	2-Ø12.7
B-LD10	D:80ea L:50ea	"	Bow	강연선	5.3m	$\frac{10}{(d_p=53cm)}$	23×43cm	0.142	4-D16	2-Ø12.7
B-R12	D:80ea L:50ea	D : T=17.9kN/ea L : T= 4.9kN/ea	Bow	강연선	5.3m	$\frac{12}{(d_p=45cm)}$	23×43cm	0.112	4-D16	4-Ø6 3연선
B-T12	D:80ea L:50ea	"	Bow	강연선	5.3m	"	23×43cm	0.112	4-D16	4-Ø6 3연선

* Note : 1. Load Block은 500×500×15mm 철판을 의미함.

2. F_{se} 는 유효프리스트레스이므로 Jacking Force는 예비프리스트레싱 실험을 통하여 결정함.

을 고려하여 2/3 축소모형으로 하였다. 경간/깊이 비 (L/d_p), 보강비를 변수로 4개의 단순보와 장기재하에 의한 프리스트레스 손실 및 장기처짐에 대한 검토를 위하여 1개의 단순보 실험체(B-T12)가 제작되었다. Table 1에 실험체 일람과 Fig. 1에 실험체 상세가 나타나 있다. 본 연구의 실험에서 사용되는 보강공법은 Bow 공법인데 Fig. 2에 각각의 실험체에 적용할 보강상세를 나타내었다. Fig. 3에는 Bow 공법으로 보강될 때 지지부의 정착상세를 나타내었다.

2.2 재료시험

본 실험에 사용된 철근 및 콘크리트의 재료적 특성 및 강도를 알아보기 위하여 KS 규정에 따라 시험편을 제작하여 재료시험을 실시하였다. 긴장재는 3가닥 또는 7가닥의 강연선으로 꼬여져 있기 때문에 철근의 재료시험과 같이 실험을 실시하면 정확한 재료적인 특성을 알 수 없다. 그러나 Freyemuth의 연구결과⁽⁷⁾에 의하면 긴장재의 재료적 특성은 시험방법, 시험장비, 제품의 종류 및 제작회사에 따라 $\pm 2.5 \sim \pm 5.0\%$ 정도의 오차가 발생할 수 있는 것으로 보고 되고 있다. 따라서 긴장재 제작사의 시험방법 및 외국문헌을 참고하여 제작사에서 제시하는 자료를 이용하였다. 철근의 재료시험결과를 Table 2에 나타내었고 콘크리트의 재료시험결과를 Table 3, 긴장재의 역학적 특성을 Table 4에 나타내었다.

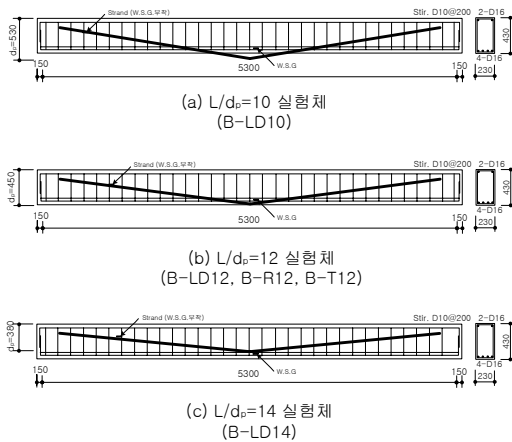


Fig. 1 실험체 상세

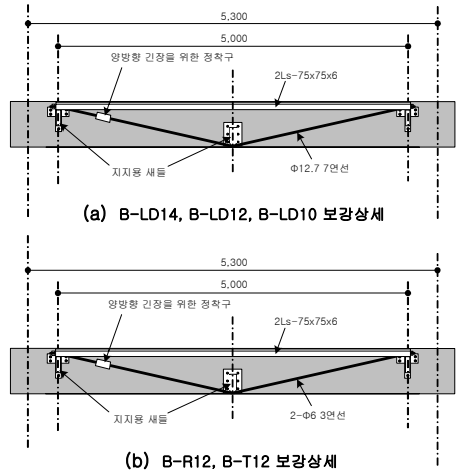


Fig. 2 Bow 공법에 의한 보 실험체의 보강상세

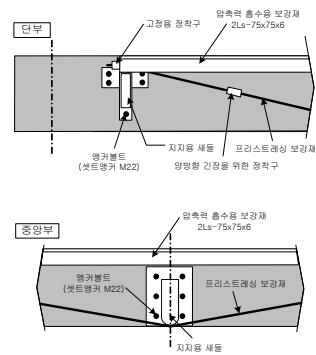


Fig. 3 Bow 공법에 의한 보 실험체의 지지부 상세

Table 2 철근의 역학적 특성

종류	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	항복변형률 ($\times 10^{-6}$)	탄성계수 (MPa)
D10	361.7	487.8	2,320	1.56×10^5
D16	422.6	551.9	2,710	1.56×10^5

Table 3 콘크리트 역학적 특성

압축강도(MPa)	극한변형률($\times 10^{-6}$)	탄성계수(MPa)
28	5,130	2.39×10^4

Table 4 긴장재의 역학적 특성

종류	단면적 (mm^2)	항복하중 at 0.2% Ext. (kN)	인장하중 (kN)	파단시 신율 in 600mm (%)
φ12.7 7연선	99.0	175	188	7.0
φ6 3연선	9.8	35	39	3.5

2.3 실험방법

(1) 긴장방법

긴장력이 도입된 긴장재는 정착에 의하여 긴장력의 손실이 발생하므로 정확한 긴장력을 도입하기 위한 예비 긴장실험이 필요하다. 예비긴장실험에 의해 측정된 로드셀 값과 긴장장치에 의해 측정된 긴장력 값을 비교·분석하였으며, 여기에서 측정된 오차를 흡수할 수 있는 긴장력의 범위를 설정한 후, 이 실험에서 요구하는 긴장력을 결정하였고 그 자료를 토대로 긴장력을 도입하였다.

긴장력을 도입할 때 긴장장치에서 발생할 수 있는 긴장력의 오차는 정착구에 설치되어 있는 로드셀에 의해서 초기에 조정하도록 하였다. 또한 마찰력이 큰 경우와 작은 경우에 대한 긴장력의 손실도 검토하였는데, 이 연구의 실험에서는 긴장재가 외부에 노출되어 있기 때문에 마찰에 의한 긴장력의 손실이 매우 작았다. 이유는 예비 긴장실험에서 알 수 있었는데, 실험체의 양단에 설치된 로드셀 값의 차이가 3% 이내였기 때문이다.

(2) 하중 가력방법

실험은 휨실험이므로 단순지지되어 있는 보의 상부에서 1000kN 용량의 오일잭으로 하중을 가력하고 오일잭에 부착되어 있는 500kN 용량의 로드셀로 가력 하중의 크기를 측정하였다.

하중 가력시 외부 긴장재로 보강하기 전, 실험체는 각각 예상파괴하중의 60% 하중으로 선재하(preloading) 하였으며 외부 긴장재로 보강한 후에는 중앙부 변위와 철근 및 콘크리트의 변형률을 관찰하면서 변위제어 방식에 의해 하중을 가력하였다.

실험의 종료는 최대하중 이후 가력하중이 감소될 때와 긴장재의 응력이 항복하중에 근접되면 긴장재의 파단이라는 위험을 내포하고 있으므로 하중의 가력을 중단하고 실험을 종료하였다.

B-LD14, B-LD12, B-LD10, B-R12 실험체는 파괴실험체이고, B-R12 실험체는 사용하중으로 장기 재하하는 실험체이다.

3. 실험결과 및 분석

본 연구는 철근콘크리트로 제작한 단순보 실험체를 Bow 공법으로 보강하였을 경우에 대한 구조적 거동을 확인하는 실험이었다. 일반적인 실험결과와 내용을 정리하여 Table 5에 나타내었다.

3.1 균열 및 파괴상황

일반적으로 균열진행은 최대 휨모멘트가 발생하는 위치인 중앙하부에서 초기 휨균열이 미세하게 발생한 후, 하중이 증가됨에 따라 지지점 부근으로도 휨균열이 분산되어 발생하였다. 또한 휨균열이 가력점을 향 하면서 콘크리트 압축단에서 압괴가 발생하여 최종적으로 파괴되었다. 보 중앙부에 발생한 균열 때문에 중앙부 새들에서 앵커볼트의 뺄힘파괴도 발생하였다.⁽²⁾ 따라서 향후 보강공사에서 이들에 대한 문제점을 보완하여 보강공사를 시행하여야 할 것이다.

또한 무리하게 긴장력을 도입할 경우에는 프리스트레싱 보강재를 정착시키는 췌기에서 나사산이 뭉그러지는 파괴현상도 발생하고 있으므로 긴장력을 도입할 경우에는 췌기의 나사산이 뭉그러지는 파괴가 발생하지 않도록 주의하여야 할 것이다.

Table 5 실험결과

Specimen	P_{cr} (kN)	δ_{cr} (mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)	P_{cr}/P_y	P_u/P_y	δ_u/δ_y	비 고		
										L	L/d _p	Tendon
B-LD14	23.9	4.29	164.4	30.61	234.5	141.92	0.15	1.43	4.64	5.3m	14	2- ϕ 12.7
B-LD12	26.1	4.44	170.1	31.01	254.1	143.35	0.15	1.49	4.62	5.3m	12	2- ϕ 12.7
B-LD10	29.7	4.78	176.4	30.29	283.5	145.73	0.17	1.61	4.81	5.3m	10	2- ϕ 12.7
B-R12	26.9	3.87	160.2	27.30	177.3	52.69	0.17	1.11	1.93	5.3m	12	4- ϕ 6 3연선

3.2 변수별 구조적 거동의 비교

변수별 실험체의 이력거동을 알아보기 위하여 아래와 같이 하중-변위 관계를 중심으로 기술하였다. 하중-변위 관계는 변수별로 정리하였으며, 실험결과 내용으로 기술하였다.

(1) 경간/깊이 비에 따른 거동

Fig. 4는 압축연단에서 긴장재 도심까지의 거리 d_p 에 따른 하중-변위 관계를 나타낸 것이다. 모든 실험체는 2- ϕ 12.7 7연선을 보의 옆면에서 절곡된 형태로 배치하였으며, $f_{se}=0.25f_{pu}$ 이다. 그림에 나타난 바와 같이 압축연단에서 긴장재 도심까지의 거리 d_p 에 의한 경간/깊이 비가 14인 B-LD14 실험체의 경우, 초기 휨균열이 23.9kN에서 발생하였으며, 초기 휨균열 발생시 강성은 0.56으로 나타났다. 초기 휨균열 발생 후 강성이 감소하는 경향을 보였으며, 164kN에서 철근이 항복하였다. 철근항복시 강성은 0.53으로 초기 휨균열 발생시 강성에 비해 5.36% 감소하였다. 철근항복 이후 강성이 급격하게 감소하였고 외부 긴장재(external tendon)의 응력은 급격하게 증가하였다. 최종적으로 최대하중 도달시 콘크리트의 압축연단에서 압축파괴가 발생하는 취성적인 경향을 보였으며, 최대 하중 이후 내력이 급격히 감소하는 경향을 보였다.

압축연단에서 긴장재 도심까지의 거리 d_p 에 의한 경간/깊이 비가 12인 B-LD12 실험체의 경우, 초기 휨균열이 26.1kN에서 발생 하였으며 초기 휨균열 발생시 강성은 0.59로 나타났다. 초기 휨균열 발생 후 강성이 감소하는 경향을 보였으며 170kN에서 철근이 항복하였다. 철근항복시 강성은 0.55로 휨균열 발생시 초기강성에 비해 6.78% 감소하였다. 철근항복이후 강성이 급격하게 감소되었고 외부 긴장재(external tendon)의 응력은 급격하게 증가하였다. 최종적으로 콘크리트의 압축연단 에서 B-LD14과 유사한 압축파괴가 발생 하였으며, B-LD14 실험체보다 초기강성, 철근항복시 강성은 각각 5.08%, 3.64% 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 초기 휨균열, 철근의 항복, 최대 하중이 각각 9.21%, 3.47%, 8.49%정도 증가하는 것으로 나타났다.

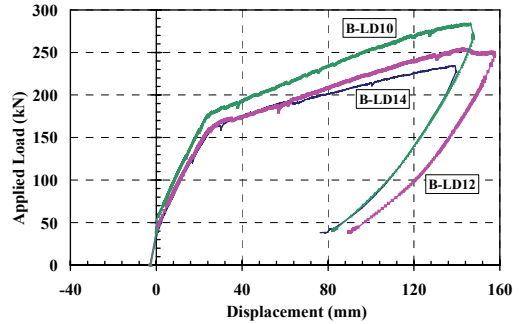


Fig. 4 경간/깊이 비를 변수로한 실험체의 하중-변위 곡선

압축연단에서 긴장재 도심까지의 거리 d_p 에 의한 경간/깊이 비가 10인 B-LD10 실험체의 경우, 초기 휨균열이 29.7kN에서 발생하였 으며, 초기 휨균열 발생시 강성은 0.62로 나타났다. 초기 휨균열 발생 후 강성이 감소하는 경향을 보였으며, 176kN에서 철근이 항복하였다. 철근 항복시 강성은 0.58로 초기 휨균열 발생시 강성에 비해 6.45% 감소 하였다. 철근 항복이후 강성이 급격하게 감소되었고 외부 긴장재(external tendon)의 응력은 급격하게 증가하였다. 최종적으로 콘크리트의 압축연단에서 압축파괴가 발생하며 취성적인 거동을 하는 것으로 나타났다. 또한, 초기 휨균열시 강성 및 철근 항복시 강성값은 B-LD12, B-LD14 실험체보다 1.05~1.11배 증가하는 것으로 나타났다.

이상의 실험결과를 요약하면, 압축연단에서 긴장재 도심까지의 거리 d_p 가 증가함에 따라 최대하중이 B-LD14 실험체를 기준으로 각각 7.0%와 17.5% 증가하는 것으로 나타났고, 초기 강성도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 긴장재까지의 깊이 d_p 가 증가함에 따라 콘크리트구조설계기준에서 정의된 f_{ps} 가 증가하기 때문에 나타난 역학적인 결과이다. 또한 항복하중이후에 최대 하중까지 하중이 증가하는 현상은 유효 프리스트레스가 $0.25f_{pu}$ 로 작은 값이기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 따라서 보강설계시 압축축 콘크리트 연단으로부터 긴장재까지의 깊이 d_p 를 크게 하는 것이 유리하다고 사료된다.

(2) 긴장재 양에 따른 거동

Fig. 5는 긴장재 양을 변수로한 실험체의 하중-변

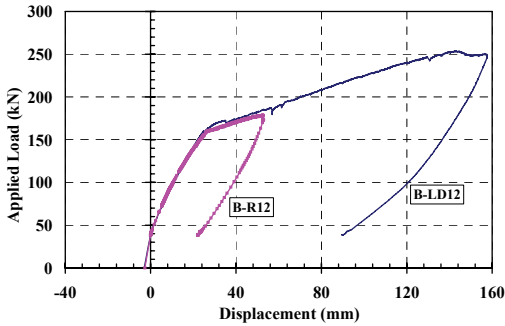


Fig. 5 긴장재 양을 변수로 한 실험체의 하중-변위 곡선

위 관계를 나타내었다. B-LD12 실험체와 B-R12 실험체는 유효 프리스트레스 힘(F_{se})과 d_p (45cm)가 동일하지만, B-LD12 실험체는 2- ϕ 12.7 7연선으로 $f_{se}=0.25f_{pu}$ 이고, B-R12 실험체는 4- ϕ 6 3연선으로 $f_{se}=0.6f_{pu}$ 이다. 여기서 2- ϕ 12.7 7연선과 4- ϕ 6 3연선은 단면적이 2.49배이다.

그림에서 알 수 있듯이 항복하중은 동일하게 나타나고 있으나, 최대하중에서 B-LD12 실험체보다 B-R12 실험체가 현저히 낮게 나타나고 있다. 그러나 최종 파괴 형태에서 B-LD12 실험체는 압축측 콘크리트가 파괴하는 취성적인 현상을 나타내고 있으며, B-R12 실험체는 긴장재가 항복응력에 도달하는 인장파괴의 형태를 나타내고 있었다. 여기서 콘크리트구조설계기준에 의하여 설계되는 극한내력은 항복하중임을 상기하여야 할 것이다.

따라서 콘크리트구조설계기준에 의한 보강설계시 긴장재의 양과 유효프리스트레스(f_{se})의 산정은 안전하면서 경제적인 설계가 되는 기초가 됨을 알 수 있다. 즉, 유효 프리스트레스(f_{se})를 높게 할 수 있도록 긴장재의 양을 선정하여야 할 것이다.

3.3 장기 하중 재하에 대한 검토

B-T12 실험체는 Bow 공법으로 4- ϕ 6 3연선을 사용하여 보강하였고 $f_{se}=0.6f_{pu}$ 이다. 이 실험체는 장기 재하에 의하여 발생할 수 있는 처짐의 변화와 긴장력의 손실을 분석하기 위한 실험체이다. 하중은 고정 및 활하중에 해당하는 무게만큼 철판을 이용하여 재하하

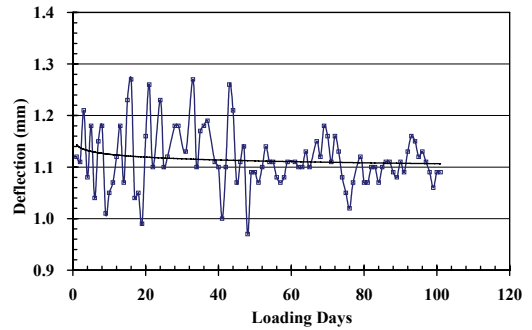


Fig. 6(a) 장기재하에 따른 변위 그래프

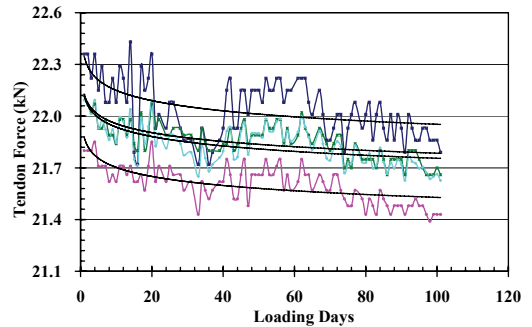


Fig. 6(b) 장기재하에 따른 긴장력 그래프

였으며, 실험기간은 약 100일이다. 실험결과를 Fig. 6(a)에 중앙부 처짐의 변화와 Fig. 6(b)에 긴장력의 손실량을 분석할 수 있도록 4가닥의 긴장재에 대한 긴장력의 변화 그래프로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 중앙부 처짐의 증가는 최초 재하시의 처짐에 비하여 약 2.3% 정도 증가하였으며, 긴장력은 최초 도입된 긴장력에 비하여 평균 약 2.0% 정도 감소한 것으로 나타났다. 따라서 장기처짐과 긴장력의 장기 손실은 구조적으로 문제가 없는 미소한 양이라고 사료된다.

3.4 보강설계를 위한 설계방법

Bow 공법에 의하여 보강된 실험체에 대하여 실험을 실시하고 그 결과를 분석하였다. 실험결과에 의하면 Bow 공법에 의하여 보강된 실험체는 콘크리트구조설계기준에서 제시하는 설계기준에 의하여 보강설계를

하여도 무방함을 확인할 수 있었다.

특히 부재 설계시 적용하는 강소감소계수도 콘크리트구조설계기준에서 제시하는 기준을 적용할 수 있음을 확인하였다. 그리고 유효 프리스트레스(f_{se})를 결정함에 있어서 콘크리트 구조설계기준에서 제시하는 일반적인 적용 범위로 결정하는 것이 보강설계에 보다 경제적임도 확인하였다.

4. 결 론

- 1) Bow 공법에 의하여 보강한 경우에서의 주요 파괴 모드는 균열이 고르고 넓게 분포한 휨파괴로서 기존의 철근콘크리트구조에서와 비슷한 휨파괴의 형태를 나타내었다.
- 2) Bow 공법에 의하여 보강된 실험체는 구조내력상의 성능이 콘크리트구조설계기준에서 제시하는 설계기준에 의하여 보강설계를 하여도 무방함을 확인할 수 있었다. 특히 유효 프리스트레스(f_{se})는 콘크리트구조설계기준에서 제시하는 일반적인 적용범위로 결정하는 것이 보강설계에 보다 경제적임을 확인하였다.
- 3) 장기재하에 의한 실험에서 장기처짐과 긴장력의 장기손실은 구조적으로 문제가 없다고 사료된다.

참고문헌

1. 임재형, 문정호, “외부 포스트텐션 보강공법의 개발 및 평가”, 구조물진단학회지 제12권 제5호, 2008. 9, pp. 91-100.
2. 채영석, 임재형, 문정호, “압축력 흡수장치를 사용한 보강공법의 보강효과”, 대한건축학회지회연합논문집 제10권 3호, 2008. 9, pp. 177-184.
3. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 기문당, 2004, pp. 405.
4. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-08), American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2008, pp. 436.
5. PCI Committee on Prestress Losses, “Recommendations for Estimating Prestress Losses”, PCI Journal, Vol. 20, No. 4, Jul.-Aug. 1975, pp. 43-75.
6. Lee L.-H., Moon J.-H., and Lim J.-H., “Proposed Methodology for Computing of Unbonded Tendon Stress at Flexural Failure”, ACI Structural Journal, V. 96, No. 6, Nov.-Dec. 1999, pp. 1040-1048.
7. C. L. Freyermuth, “Rational application of the elongation tolerance for post-tensioning tendons”, ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 6, Nov.-Dec. 1991, pp. 730-737.

(접수일자 : 2009년 1월 4일)
(심사완료일자 : 2009년 4월 15일)