

포스트텐션으로 보강한 합성보의 내력평가에 관한 연구

A Study on the Strength Evaluation of Composite Beams Strengthened with Post-Tensioning

김 성 배* 김 도 훈** 서 동 기**
Kim, Sung-Bae Kim, Do-Hoon Seo, Dong-Gee
김 상 모*** 이 창 남**** 김 상 섭*****
Kim, Sang-Mo Lee, Chang-Nam Kim, Sang-Seup

Abstract

The deteriorated structures ought to be repaired over time to ensure the safety for failure. The capacity of structure is deteriorated to some extent due to the corrosion of steel bars and the neutralization of concrete.

The purpose of this study is to investigate the effect of flexural strength on composite steel beams strengthened with post tensioning method. In order to investigate the data, six test specimens were examined containing the standard and strengthened specimens. The results showed that the increase of post tensioning improves the ultimate load and the yield load.

키워드 : 포스트텐션, 보수 보강 공법, 합성보, 내력평가

Keywords : Post Tension, Repair and Retrofit Method, Composite Beam, Strength Evaluation

1. 서 론

최근 리모델링과 재건축 등이 활발히 진행되면서, 리모델링에 대한 수요가 급격히 증가하고 있다. 리모델링은 구조물의 노후화로 반드시 교체해야 하는 설비, 전기와 평면 확장 및 구조 변경으로 인한 보수·보강 등이 요구된다. 이때 리모델링은 신축공사 보다 공사기간이 짧고 경제적이며 산업 폐기물 감소 등의 많은 잇점을 갖는다.

구조체의 리모델링과 함께 진행되는 내력 보강은 부재의 신설과 단면 보강 등의 방법이 주로 사용되고 있다^{(1)~(4)}. 단면보강은 철판이나 탄소섬유 등의 고강도 재료를 이용하는 방법과 와이어 텐션을 이용한 방법 등이 적용되고 있으며 이에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 와이어를 이용한 포스트텐션은 다른 공법에 비해 경제적으로 우수하여 보강효율과 적용성 등이 높다. 특히 외부 포스트텐션 공법은 설계에 수반되는 구조해석이 비교적 명확하여 교량과 기초 공사 등의 토목공사에서 많이 사용되고 있다^{(7)~(15)}. 그러나 건축분야에서는 아직 적용 예가 적다^{(5)~(6)}.

이에 본 연구에서는 포스트텐션 공법을 이용하여 건축 구조물에 사용되는 철골 합성보 보강실험을 실시하였다. 주요 실험 변수는 와이어에 도입된 텐션량과 편향부에 설치한 새들 높이에 의한 보강효과 등을 검토하였고, 보강 전후 실험체의 내력평가를 하였다.

2. 포스트텐션 및 실험계획

2.1 포스트텐션으로 보강된 합성보의 이론적 해석

포스트텐션은 큰 인장응력이 발생하는 부위에 와이어를 이용하여 역으로 압축응력을 도입하여 인장응력을 상쇄시켜 부재의 경제성을 도모하는 공법이다. 포스트텐션을 이용한 보강은 프리스트레스 공법의 한 분야로, 국내에서는 주로 토목 구조물, 교량 등에 많이 적용되고 있다.

포스트텐션을 도입한 보를 설계하는 경우 단계별 응력변화는 크게 세 단계로 나눈다. 단성범위에서 보에 긴장력만 작용하는 경우와 외부하중에 의해 추가 긴장력이 발생 시, 외부하중만 작용하는 경우 등이다. 최종응력은 각 단계를 조합하여 콘크리트 슬래브 및 강재 상, 하부 플랜지의 응력을 구한 값이 된다. 단 최종응력은 강재 또는 콘크리트의 허용응력보다 작아야 한다. 이 때의 응력변화는 그림 1과 같다.

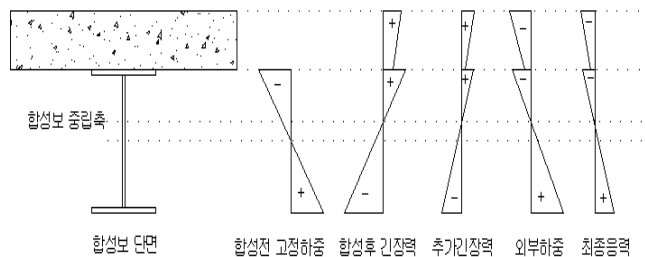


그림 1. 포스트텐션으로 보강된 합성보의 응력변화

* 정희원, (주)센구조 연구소, 연구개발팀장, 공학박사
** 정희원, (주)센구조 연구소, 연구개발팀, 공학석사
*** 정희원, (주)센구조 연구소, 부장, 구조기술사
**** 정희원, (주)센구조 연구소, 대표이사, 구조기술사
***** 정희원, 한국기술교육대학교, 교수, 공학박사

보강 시 긴장력 산정은 과도한 응력으로 상부 슬래브 콘크리트에 인장균열이 발생하지 않도록 하고, 정착구의 위치와 긴장력의 크기에 따라 보강에 필요한 장력을 산정한다.

인장균열을 방지하는 긴장재의 위치산정은 식 (1)과 같다. 상부 콘크리트에 발생하는 응력과 실험체 자중에 의한 응력의 합이 인장을 받는 콘크리트의 허용인장응력 이하가 되도록 한다. 이 때 사용되는 기호는 그림 2와 같다⁽¹²⁾⁽¹⁵⁾.

$$-\frac{T}{n \times A_{cp}} + \frac{T}{n \times I_{cp}} \times e \times y_{vcu} - \frac{y_{vcu}}{n \times I_{cp}} \left(-\frac{4}{l^2} a^2 + \frac{4}{l} a \right) \left(\frac{\omega l^2}{8} \right) \leq 0.07 f_{ck} \quad (1)$$

여기서, T : 긴장력 n : 탄성계수비
 A_{cp} : 합성보의 단면적 I_{cp} : 합성보의 단면 2차 모멘트

최대 긴장력은 식 1과 슬래브 부분을 제외한 강재단면만의 최대 저항모멘트를 비교하여 최소치로 산정한다. 또한 프리스트레스 강재의 허용응력은 인장강도의 0.7배 이하 ($f_p = 0.7 f_{pu}$)가 되도록 한다.

포스트텐션으로 강재에 도입된 긴장력은 여러 가지 요인에 의해 감소된다. 이러한 긴장력의 손실은 즉시손실과 시간함수에 의한 시간적 손실로 나누인다. 즉시손실은 주로 프리스트레스 강재와 쉬스(sheath)의 마찰, 정착장치의 활동(Anchorage set), 장력의 도입방법 등에 의해 발생하고, 시간 손실은 크리프와 건조수축, 긴장재의 이완(relaxation) 등에 의한다. 특히 정착장치 활동에 의한 손실은 정착장치의 종류에 따라 상이하다. 췌기식 정착장치는 3~6mm, 지압식 정착장치는 1mm의 변형량이 발생하므로 긴장작업 시 초과 긴장(over stressing)하여 보정한다. 긴장재의 총 손실은 도입장력의 20~35%가 되고, 포스트텐션에 의한 시간적 손실은 약 15%가 된다. 시간에 의한 긴장력 손실의 합은 식 2와 같고, 이 때 최종 긴장력은 식 3과 같다.

실험체 설계에 적용한 최종 긴장량은 포스트텐션에 의한 외부보강을 적용하여 즉시손실은 고려하지 않았고 최종 긴장량은 초기 긴장량의 0.85배 ($T_{final} = 0.85 T_0$)로 하였다.

$$\sum \Delta T_{loss} = \Delta T_{cc} + \Delta T_{sr} + \Delta T_{fr} + \Delta T_t \quad (2)$$

$$T_{final} = T_0 + \Delta T_0 - \sum \Delta T_{loss} \quad (3)$$

여기서, ΔT_{cc} : 콘크리트의 크리프에 의한 손실
 ΔT_{sr} : 콘크리트 수축에 의한 손실
 ΔT_{fr} : 마찰에 의한 손실 ΔT_t : 온도에 의한 손실
 T_0 : 초기 긴장량 ΔT_0 : 추가 긴장량

2.2 실험 계획

실험은 합성보 실험체를 대상으로 6개의 실험체를 제작하여 보강 전·후의 거동을 비교 분석하였고, 보강방법은 새들의 높이와 도입장력의 영향을 주요 변수로 하였다. 실험체는 철골 보와 슬래브로 이루어진 합성보에 대해 정착판과 새들(saddle), 긴장재(Tendon)를 이용하여 포스트텐션에 의한 긴장력의 영향을 평가하였다.

표 1은 새들의 높이와 와이어 텐션량을 변수로 한 실험체 일람표이다. 표 1에서 새들의 높이는 보 인장 플랜지 하부에서 편향부 와이어 간의 거리이고, 와이어 텐션량은 하나의 와이어에 도입되는 긴장력으로 각 실험체는 2개의 와이어로 장력을 도입하였다. 새들의 높이는 현재 적용되는 것을 기준으로 2, 10, 15cm로 하였고 하나의 와이어에 도입된 텐션량은 5, 10, 15톤이다.

정착판의 위치와 최대 도입장력은 식 1을 이용하여 구조체에 긴장력을 도입할 경우 긴장력에 의한 부모멘트의 인장균열을 방지하도록 하였다. 이 때 산출한 한계 긴장력을 기준으로 그 이하와 기준치, 기준치 이상으로 구분하여 각각 10, 20, 30tf의 장력을 도입하였고 한계 긴장력 산출 시 긴장력의 손실을 고려하였다. 그러나 본 연구에서는 정착장치의 활동에 의한 손실은 고려하지 않았다.

2.3 실험체 제작 및 실험방법

보강 전 실험체는 그림 3과 같이 H-294×200×8×12(SS400)의 철골 보와 700×135(mm)의 단면을 갖는 슬래브로 구성된 합성보이다. 철골 상부 플랜지에는 스티드를 2-D19 200mm 간격으로 설치하여 완전 합성으로 설계 제작하였다.

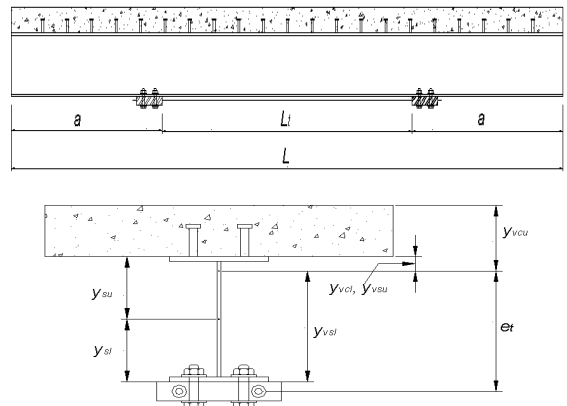


그림 2. 포스트텐션 합성보의 입면과 단면

표 1. 실험체명 및 구분

구분	실험체명	새들 높이	와이어 텐션량
보강전 실험체	CBO-D00WT00	-	-
	CBR-D02WT05	2 cm	5 tf
보강 실험체	CBR-D02WT10	2 cm	10 tf
	CBR-D02WT15	2 cm	15 tf
	CBR-D10WT10	10 cm	10 tf
	CBR-D15WT10	15 cm	10 tf

CBR - D 00 WT 05
 └─ 하나의 와이어에 도입된 텐션량 : 5, 10, 15 (tf)
 └─ 새들 높이 : 2, 10, 15 (cm)
 └─ 보강 여부 구분 : R-보강 실험체, O-보강 전 실험체

보강 실험체는 와이어, 정착판, 새들 등으로 구성된 외부 보강부를 갖는 실험체로 총 5개를 제작하였다. 와이어 텐션량에 의한 실험체(CBR-D02WT05, CBR-D02WT10, CBR-D02WT15)는 2개의 와이어가 인장 플랜지 하부로부터 정착구의 높이(2cm)만큼 떨어진 위치에 설치되어 하나의 와이어당 각각 5tf, 10tf, 15tf로 텐션량을 증가 시켰다. 새들 높이에 의한 실험체(CBR-D02WT10, CBR-D10WT10, CBR-D15WT10)는 1개의 와이어당 10tf의 일정한 텐션량에 새들의 높이를 2cm, 10cm, 15cm로 변화시켰다. 그림 4는 보강 실험체의 단면이다.

정착판 위치는 일반적으로 단부에 설치되어 기둥 등에 간섭되나, 본 연구는 실구조물에 적용하여 긴장 시 불편을 해소하기 위해 정착판을 보 1/4 위치에 설치하여 검토하였다. 정착판의 크기는 250×270×45(mm, 폭×길이×두께)로 하였고, 새들은 보의 중앙부에 500mm 간격으로 2개를 설치하였다. 그림 5는 실험체 설치도이다.

실험은 200tf용량의 만능시험기(UTM)를 이용하여 중력 방향으로 2점 재하 정적 단조가력 하였다.

실험체의 변위 및 변형측정은 보 중앙부의 슬래브상부, 상·하부플랜지에 스트레인 게이지를 부착하였고, 가력점과 지점에 각각 변위계(LVDT)를 설치하여 측정하였다.

2.4 소재 시험

시험체 제작에 사용된 철골 보의 인장시험 결과는 표 2와 같다. 시험은 보 플랜지에 대해 3개의 시험편을 제작하여 하였고, 그 평균치로 나타내었다. 인장시험편은 KS B 0801 1A호로 제작하였다.

사용된 콘크리트는 설계강도 210kgf/cm²인 레미콘 제품을 사용하였고, 공시체는 KS F 2404에 따라 제작하여 28일 압축강도를 측정하였다. 표 3은 3개 공시체에 대한 콘크리트 압축강도 시험결과 및 배합비 이다.

포스트텐션 도입 시 사용된 긴장재는 KS D 7002 7연선의 SWPC 7B이고 제원 및 시험결과는 표 4와 같다.

표 2. 철골 보 인장시험 결과

강종	항복내력 (tf/cm ²)	인장강도 (tf/cm ²)	연신율 (%)	항복비 (%)
SS400	2.88	4.37	29.3	65.9

표 3. 콘크리트 압축강도 시험결과와 배합비

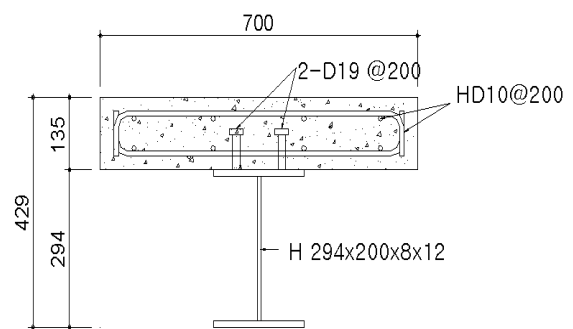
설계강도 (kgf/cm ²)	28일강도 (kgf/cm ²)	W/C (%)	콘크리트 배합량 (kgf/cm ³)			
			결합재	물	잔골재	굵은골재
210	260	55.9	309	156	883	940

※ W/C : 물 시멘트 비

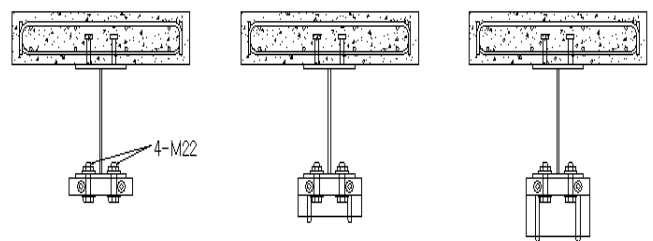
표 4. 긴장재 시험 결과

종류 (SWPC 7B)	공칭직경 (mm)	단면적 (mm ²)	인장강도 (tf/cm ²)	연신율 (%)	0.2 P _y (tf)
강연선	15.2	138.7	19.5	9.1	24.6

※ 0.2 P_y : 0.2% 영구연신율에 대한 하중



CBO-D00WT00
그림 3. 기준 실험체



CBR-D02WT05 CBR-D02WT10 CBR-D02WT15
BR-D10WT10 CBR-D15WT10

그림 4. 보강 실험체

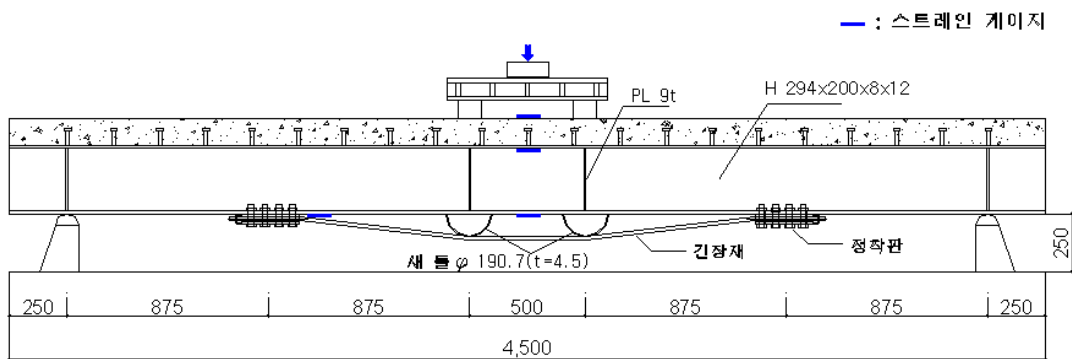


그림 5. 실험체 설치도

3. 실험 결과

3.1 실험 결과

실험 결과는 표 5와 같다. 보강진 실험체와 10tf, 20tf, 30tf의 총 도입 긴장력으로 보강한 실험체 및 새들의 높이가 10cm, 15cm인 보강 실험체의 항복내력, 최대내력, 항복 변위와 최대변위를 나타내었다.

항복내력의 산정은 그림 6과 같다. 항복변위는 최대내력과 최대내력의 60%인 강성을 연결하여 만나는 점을 항복 변위로 산정하였고⁽⁴⁾, 이 때의 내력을 항복내력으로 정의하였다. 또한 실험체는 더 이상의 가력이 불가능할 때 까지 가력 하거나 최대내력의 70% 이하로 저하시 까지 가력하는 것을 원칙으로 하였다.

와이어에 도입되는 텐션량과 새들 높이에 따른 하중 변위 곡선은 그림 7, 그림 8과 같다. 각 실험체는 초기에 모두 선형 거동을 하나 인장 플랜지에서 항복이 발생하면 강재의 항복은 점차 웹 쪽으로 진전 되어 비선형적인 양상을 보인다.

합성보의 보강효과는 인장하부에서 일정한 거리(2cm)만큼 떨어진 경우 와이어에 도입되는 긴장력이 증가할수록 보강 실험체의 항복내력과 최대내력이 상승하였다. 그리고 새들의 높이를 변화시킨 실험체의 보강효과는 새들의 높이 즉, 와이어와 인장하부의 거리가 멀수록 항복내력과 최대내력이 상승하였다.

기준 실험체에 대한 보강 실험체의 내력은 항복하중과 최대하중 모두 110%~130%로 증가하였으나 최대하중 시 변위는 도리어 감소한 실험체도 있다.

표 5. 실험 결과

구분	실험체명	항복하중		최대하중	
		하중(tf) (P_y)	변위(mm) (δ_y)	하중(tf) (P_u)	변위(mm) (δ_u)
기준실험체	CBO-D00WT00	38.22	18.30	47.08	51.62
보 강 실험체	CBR-D02WT05	41.87	19.76	52.35	44.76
	CBR-D02WT10	43.21	18.98	53.96	57.28
	CBR-D02WT15	44.61	19.03	55.57	44.56
	CBR-D10WT10	44.17	21.58	57.70	54.71
	CBR-D15WT10	46.98	19.87	60.16	44.79

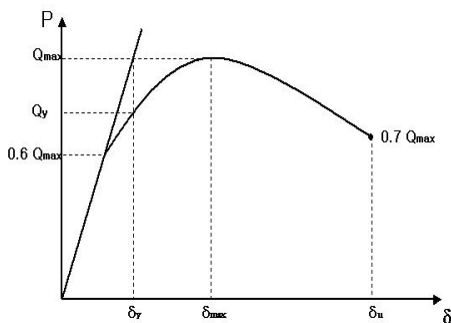


그림 6. 항복내력의 산정

사진 1, 2 는 가력 상황과 가력 종료 후 모습이다. 실험체는 모두 상부 압축 콘크리트의 압괴로 파괴 되었고, 도입 장력이 큰 일부 실험체는 와이어로 인한 추가 긴장력으로 하부 새들의 국부좌굴도 발생하였다.

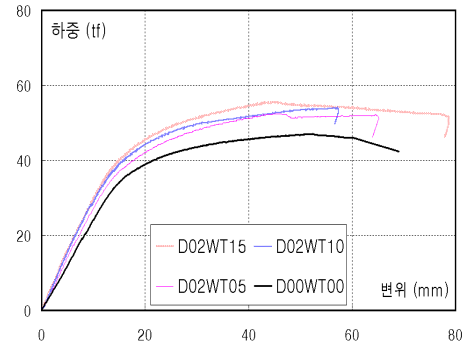


그림 7. 와이어 텐션량에 의한 하중 변위곡선

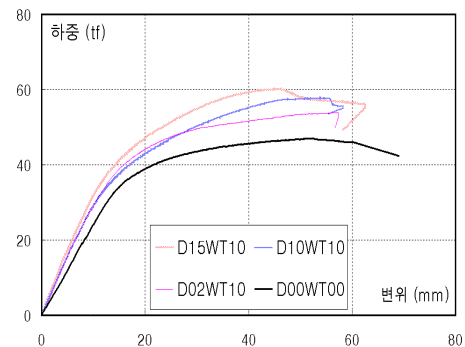


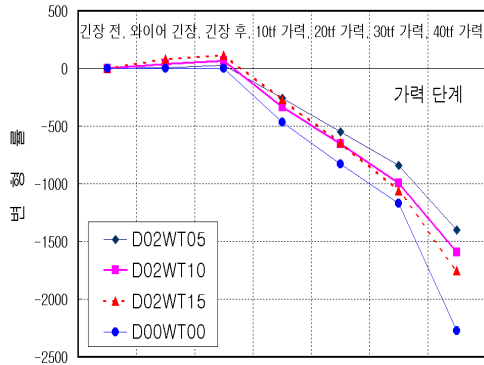
그림 8. 새들 높이에 의한 하중 변위곡선



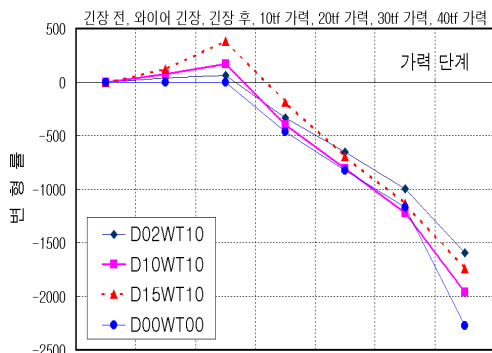
사진 1. 가력 상황



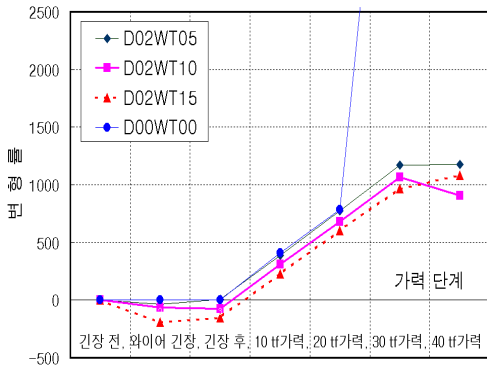
사진 2. 상부 슬래브의 콘크리트 파괴



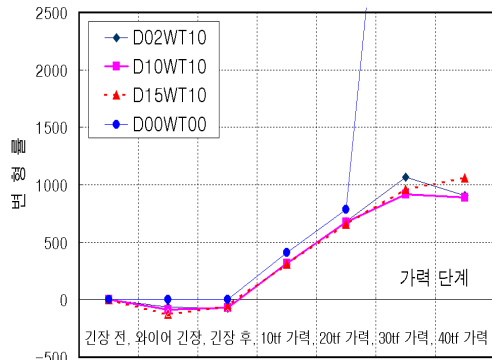
(a) 와이어 텐션량에 의한 슬래브 상부 변형률 변화



(b) 새들 높이에 의한 슬래브 상부 변형률 변화



(c) 와이어 텐션량에 의한 하부 플랜지 변형률 변화



(d) 새들 높이에 의한 하부 플랜지 변형률 변화

그림 9. 각 실험체의 하중과 변형률 관계

3.2 변형도 분포

그림 9는 각 실험체의 하중과 변형률관계이다. 실험체에는 그림 5와 같이 철골 보와 상부 콘크리트 슬래브에 스트레인 게이지를 부착하여 포스트텐션으로 장력 도입 시 실험체의 변형도 변화를 확인하였고, 긴장 전을 0 으로 초기화하여 정리하였다. 변형률 측정은 가력 단계 별로 포스트텐션 도입 전과 와이어 긴장, 긴장 후, 하중이 10·20·30·40 tf 일 때의 값이다.

그림 9 (a)와 (b)는 슬래브 상부 콘크리트 면에 부착한 스트레인 게이지의 변형률이고, (c)와 (d)는 하부 플랜지의 변형률이다. 새들의 높이가 같고 와이어 텐션량이 상이한 경우와 와이어 텐션량이 같고 새들의 높이가 상이한 경우이다. 그림에서 기준 실험체의 하부 플랜지 변형률은 20tf 이후 스트레인 게이지가 탈락되어 측정 데이터가 없고, ‘+’는 인장 ‘-’는 압축을 나타낸다.

실험결과 실험체는 모두 상부 콘크리트 슬래브의 압축 파괴로 실험이 종료되었다. 그림 9에서도 하부 플랜지 보다 슬래브 상부의 변형률이 대략 500~1,000 정도 높아 상부 슬래브의 콘크리트 파괴를 뒷받침하고 있다. 또한 보강 실험체가 기준 실험체 보다 낮은 변형률을 보이고 있다.

보강 실험체의 경우 상부 슬래브의 변형률은 포스트텐션에 의한 총 도입 긴장력의 크기에 비례하여 감소하고 있다. 이 때 도입장력 보다 새들의 높이가 클수록 가력 전 변형률이 크고 비례적으로 큰 반력을 유발하였음을 알 수 있다. 이러한 결과는 표 5의 실험결과 중 최대하중과 동일한 경향을 갖는다. 그러나 하부 플랜지는 와이어 텐션량과 새들 높이에 따라 변형률의 차이가 없다.

4. 고찰 및 분석

4.1 고찰 및 분석

표 6은 실험결과에 대한 고찰 및 분석내용이다. 초기강성과 내력비, 연성, 에너지비 등에 대해 정리하였다.

초기강성은 항복하중에 대한 항복 변위에 대한 비이다. 기준 실험체와 보강 실험체간에 큰 차이가 없이 거의 일정한 값을 보이고 있다.

내력비는 최대하중에 대한 항복하중의 비로 정의 하였다. 보강 실험체가 기준 실험체에 비해 다소 상승하였으나 보강으로 인한 내력비의 상승은 없는 것으로 나타났다.

표 6. 고찰 및 분석

실험체명	초기강성 (tf/mm, P_y/δ_y)	내력비 (P_u/P_y)	연성 (δ_u/δ_y)	에너지 (tf·mm)	에너지비
CBO-D00WT00	2.09	1.23	2.82	1892.5	2.71
CBR-D02WT05	2.12	1.25	2.27	1699.6	2.05
CBR-D02WT10	2.28	1.25	3.02	2387.8	2.91
CBR-D02WT15	2.34	1.25	2.34	1819.2	2.14
CBR-D10WT10	2.05	1.31	2.54	2359.1	2.48
CBR-D15WT10	2.36	1.28	2.26	1950.9	2.09

* 에너지비=에너지/($P_y \times \delta_y$)

연성은 최대하중 시 변위에 대한 항복하중 시 변위의 비로 정의하였다. 연성은 평가방법에 따라 차이가 있으나, 기준 실험체에 비해 보강 시험체는 대부분 연성이 다소 저하되어 하중증가와 함께 변형능력이 증가하지 않았다.

에너지는 하중 변위곡선에서 최대하중에 대한 최대하중 시 변위의 전체 면적을 에너지로 평가하였다. 또한 이 때의 에너지를 항복하중과 항복변위의 곱으로 나누어 에너지비로 정의하였다. 보강 실험체는 기준 실험체 보다 대부분 낮은 에너지비를 나타내고 있다. 이것은 연성과 거의 동일한 경향을 보인다.

그림 10은 연성과 내력비의 관계이다. 내력비가 증가할수록 연성은 저하하는 경향을 보이고 있다. 그림 11은 연성과 에너지비의 관계에 대해 추세선을 함께 나타내었다. 연성과 에너지비는 정비례 관계를 보이며 높은 상관계수를 갖고 있어 동일한 지표로 평가가 가능함도 알 수 있다.

4.2 보강 효과 평가

새들 높이와 와이어 텐션량에 의한 보강 효과를 평가하여 그림 12~15에 나타내었다.

그림 12는 보강 실험체에 도입된 긴장력에 의한 항복 및 최대내력의 평가이다. 각 와이어에 5tf, 10tf, 15tf의 긴장력으로 보강한 실험체의 항복 및 최대하중을 비교하면, 무보강 실험체 보다 보강 실험체가 항복하중의 경우 각각 10%, 13%, 17% 증가하였고, 최대하중은 11%, 15%, 18% 증가하였다.

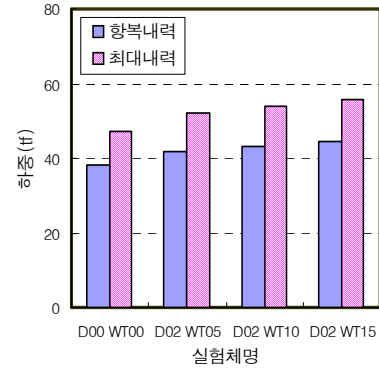


그림 12. 와이어 텐션량에 의한 항복 및 최대하중

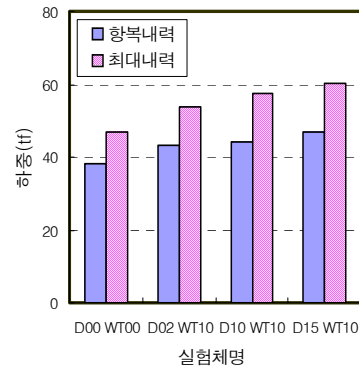


그림 13. 새들 높이에 의한 항복 및 최대하중

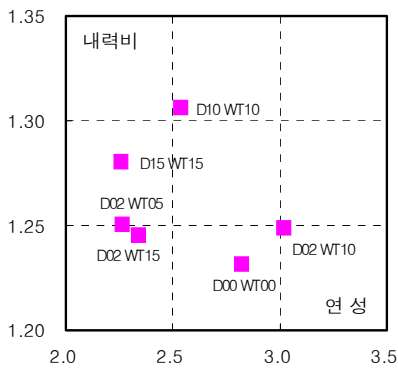


그림 10. 연성과 내력비

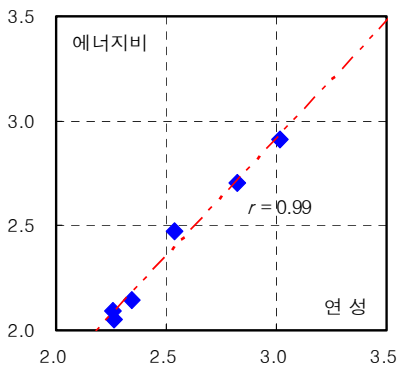


그림 11. 연성과 에너지비

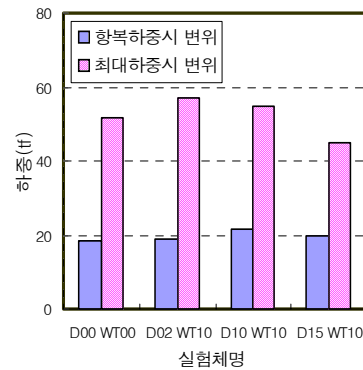


그림 14. 새들 높이에 의한 항복 및 최대변위

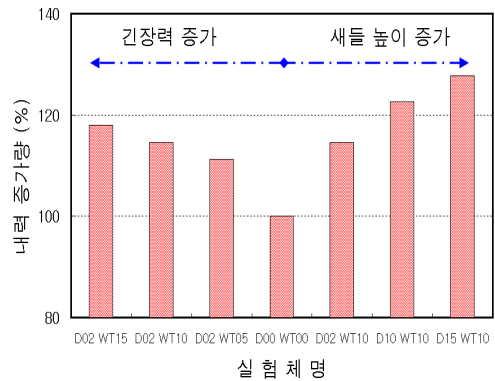


그림 15. 보강효과와의 비교

그러므로 포스트텐션을 이용하여 합성보를 보강하는 경우, 긴장력의 도입이 보강 전에 비해 하부플랜지의 항복을 지연시켜 항복 및 최대 하중을 증가시키는 역할을 하는 것으로 판단된다. 또한 긴장력의 증가는 보강효과를 비례적으로 증대시키는 것으로 사료된다.

그림 13은 각 와이어에 10tf의 긴장력을 동일하게 작용시키면서 새들의 높이 즉, 편향부에서 인장하부 면과 와이어의 거리를 2cm, 10cm, 15cm로 변화시켜 보강 실험체의 보강효과를 비교한 것이다. 무보강 실험체에 비해 항복하중은 13%, 16%, 23%, 최대하중은 15%, 23%, 28% 증가하여 새들의 높이가 증가할수록 항복 및 최대하중이 증가하였다. 이는 편향부에서 새들의 높이 증가에 따라 편심거리가 증가하여 휨 보강 효과가 있는 것으로 판단된다.

그림 14는 새들의 높이에 의한 항복 및 최대변위의 변화이다. 새들의 높이가 증가할수록 대체로 항복 시 변위는 커지고, 최대변위는 낮아지고 있다. 그러므로 최대변위에 대한 항복변위의 비로 연성을 평가하면 연성이 저하되고, 하중 변위곡선의 전체 면적인 에너지도 감소함을 알 수 있다. 이러한 경향은 그림 10의 연성과 내력비의 관계에서도 동일하다.

그림 15는 와이어 텐션량의 증대와 새들의 높이 증가에 의한 보강효과를 비교하였다. 보강하지 않은 실험체(D00 WT00)를 기준으로 왼쪽은 와이어 텐션량이 증가한 실험체이고, 오른쪽은 새들의 높이가 증가한 실험체이다. 내력증가는 오른쪽의 새들 높이가 증가할수록 내력 증가량이 커짐을 알 수 있다. 이것은 그림 12와 그림 13의 와이어 텐션량과 새들 높이에 의한 항복 및 최대하중의 변화에서도 동일한 경향을 보인다. 그러므로 외부 포스트텐션에 의한 합성보 보강은 외부 긴장력을 증대시키는 경우보다 새들의 높이를 증가시키는 것이 보강효과가 우수하다.

4.3 연성 평가

실험 변수인 새들 높이와 와이어에 도입된 텐션량 중 어느 인자가 연성에 영향을 크게 미치는가를 확인하기 위해 새들 높이와 와이어 텐션량을 독립 변수로 이원배치법에 의한 분산분석을 유의확률 5%에 대해 검정하였다.

표 7은 분산분석 결과이다.

연성에 영향을 미치는 인자 중 새들의 높이는 유의확률 0.263으로 유의확률 0.05를 초과하여 유의한 관계가 없음을 알 수 있다. 반면 와이어 텐션량과 연성의 관계는 유의확률 0.038로 유의한 관계가 있음을 보여준다. 그러므로 포스트텐션에 의한 합성보 보강 시 연성은 와이어의 텐션량과 관계가 더 높다.

그림 10과 그림 14에서 내력은 연성과 관계가 있으며, 새들의 높이가 증가할수록 최대하중 시 변위가 감소하는 반비례관계가 있음을 보이고 있다. 이 때 내력은 새들의 높이와 와이어 텐션량에 비례하므로 이들과 연성과의 관계를 비교하여 그림 16에 나타내었다.

그림에서 횡축은 새들의 높이×와이어에 도입된 포스트텐션이고, 종축은 연성이다. 또한 추세선과 상관계수도 함께 나타내었다. 상관계수가 다소 낮으나 새들의 높이와 와

이어에 도입된 장력의 곱이 증가할수록 연성이 감소하는 경향을 보인다.

포스트텐션으로 인한 연성의 영향은 무보강 시험체를 기준으로 약 10% 정도 감소하였으나, 최대내력은 20% 정도 상승하여 보강으로 인한 내력상승을 확인할 수 있다.

4.4 내력 평가

내력 평가는 실험 변수인 새들 높이와 와이어에 도입된 긴장력에 의한 변화에 대해 실험치와 이론치를 비교 평가하였다.

표 8은 실험체 단면 특성 제원이고, 표 9는 최대내력 시 실험치와 이론치의 비교이다. 이론치의 산정은 먼저 합성보를 완전합성으로 보고 각 단면 특성치를 산정하였다. 내력 산정은 소재 시험값을 적용하지 않고 설계기준강도로 계산하였다.

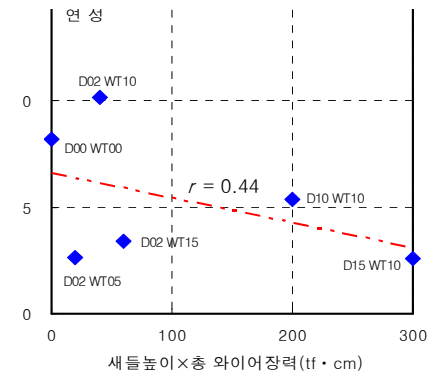


그림 16. 연성 평가 방법

표 7. 연성에 영향을 미치는 인자-이원배치법

변동 요인	제공 합	제공 평균	F 비	P 값
새들 높이	458.4	91.7	1.82	0.263
와이어 텐션량	396.8	396.8	7.88	0.038
잔차	251.8	50.4	-	-
계	1,106.9	-	-	-

표 8. 실험체 단면 특성 제원

탄성계수비	콘크리트등가단면(cm ²)	합성단면도심(cm)	등가단면2차모멘트(cm ⁴)	등가단면계수(cm ³)
9.66	97.8	27.0	31,925.2	1,181.1

표 9 실험치와 이론치의 비교

실험체명	최대내력(tf)		실험치/이론치 (%)
	실험치	이론치	
CBO-D00WT00	47.08	42.16	111.7
CBR-D02WT05	52.35	44.78	116.9
CBR-D02WT10	53.96	47.40	113.8
CBR-D02WT15	55.57	50.03	111.1
CBR-D10WT10	57.70	51.06	113.0
CBR-D15WT10	60.16	52.80	113.9

보강하지 않은 기준 실험체의 최대 내력(P_u)은 합성보의 공칭모멘트(M_n)로부터 식 4와 같이 구할 수 있다. 이 때 본 실험에 적용된 실험체는 소성 증립축이 플랜지 내에 있는 경우($P_{yw} < C_e < P_y$)이다⁽¹¹⁾.

$$M_n = 0.5(d - t_f)P_y + (0.5t_c + 0.5t_f)C_e$$

$$M_n = P_u \times l' / 2 \quad \text{이므로} \quad P_u = M_n \times 2 / l' \dots\dots\dots (4)$$

여기서, l' : 가력점에서 지점까지 거리(m), 본 실험은 $2/l' = 1.14$
 C_e : 슬래브의 유효압축력(tf)

- $C_e = A_s F_y$ 또는 $C_e = 0.85 f_{ck} b_e t_c$ 중 작은 값
- P_y : 강재보의 항복축력(tf), $P_y = A_s F_y$
- d : 철골 보 춤(cm) t_f : 플랜지 두께(cm)
- t_c : 콘크리트 두께(cm) A_s : 강재의 단면적(cm^2)
- F_y : 강재의 항복강도 f_{ck} : 콘크리트 압축강도
- b_e : 콘크리트 슬래브 폭 P_{yw} : 강재보 웨브의 항복축력

보강 실험체는 철골 보 하부에서 직선 보강한 경우와 새들을 이용하여 긴장재를 절곡한 경우로 나누인다.

이 때 보강 실험체는 외부 하중에 의해 추가 긴장력(ΔT)이 발생하는데, 추가 긴장력은 외부 하중에 의해 긴장재가 추가로 늘어나는 것에 의한 현상이다. 추가 긴장력은 단위 외부하중에 단위 추가 긴장력이 작용한다고 가정하여 식 5와 같이 산출할 수 있고, 하중의 작용 위치와 종류에 따라 구할 수 있다.

$$\delta_{\#} \cdot \Delta T + \delta_{\#p} = 0 \quad \text{그러므로} \quad \Delta T = -\delta_{\#p} / \delta_{\#} \dots\dots (5)$$

여기서, $\delta_{\#}$: ΔT 에 의한 긴장재의 수평변위
 $\delta_{\#p}$: 외부하중에 의한 긴장재의 수평변위

식 5로 구한 추가 긴장력은 하중의 작용 위치 등에 따라 상이하나 공칭모멘트의 대략 10% 전후가 된다⁽⁷⁾. 본 실험의 이론치 산정에서는 추가 긴장력은 제외하였다.

보강 실험체 중 보 하부에서 직선보강한 실험체의 내력은 식 4에서 산정한 공칭 모멘트에 긴장력×긴장재의 편심거리(e_t)의 합으로 식 6과 같이 구할 수 있다. 이 때 와이어에 도입된 총 긴장량(T_t)은 초기 긴장량(T_0)의 0.85배($T_t = 0.85T_0$)로 산정하여 손실을 고려하였다.

새들을 이용하여 긴장재를 절곡하는 경우 정착부는 임의의 각(θ)을 가지므로 이를 이용하여 모멘트와 전단력을 구하면 식 7과 같다⁽¹²⁾⁽¹⁵⁾. 이 때 임의의 각(θ)은 작으므로 $\cos \theta = 1$ 로 보기도 한다.

$$P_u = 1.14(M_n + 0.85T_0 \times e_t) \dots\dots\dots (6)$$

$$P_u = 1.14(M_n + 0.85T_0 \cos \theta \times e_t) + 0.85T_0 \sin \theta \dots\dots\dots (7)$$

식 7을 이용하여 계산한 이론치는 표 9와 같다. 이 때 실험값에 대한 이론치의 비는 약 110% 정도로 적절하게 대응되고 있다고 판단된다.

5. 결론

본 연구는 토목에서 이용 되고 있는 포스트텐션 공법을 건축 구조물의 합성보에 대해 적용 검토한 기초실험이다. 그러므로 적용 된 새들과 도입장력 등은 현재 적용되는 것으로 한정되었고, 정착구 등에 의한 긴장력의 손실과 외부 하중에 의한 강선의 추가 긴장력, 슬래브의 캠버량 측정 등은 제외되었다. 실험에 의한 결론은 다음과 같다.

1. 무보강 실험체를 기준으로 보강 실험체의 최대내력은 외부 긴장력을 증가시킨 경우 10~20% 정도 증가하였고, 새들의 높이를 증가시킨 경우 15~30% 증가하여 포스트텐션으로 보강하면 보강효과가 뛰어나다.
2. 외부 포스트텐션에 의한 합성보 보강은 초기 강성에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났으나, 새들의 높이와 외부 긴장력이 증가할수록 실험체의 연성과 에너지 등의 변형능력은 감소한다. 이것은 포스트텐션으로 와이어에 장력을 도입하여 구조물을 보강하면 내력은 증가하나 구조물의 연성이 다소 저하하는 것으로 판단된다.
3. 외부 포스트텐션으로 합성보를 보강할 경우 외부 긴장력의 증가보다는 편향부를 설치하여 새들의 높이를 증가시키는 것이 편심거리가 증가하여 휨 보강 효과가 크다.
4. 포스트텐션으로 보강한 합성보는 식 7을 통해 내력 평가가 가능하고, 실험치와 잘 일치한다. 그러나 실구조물에서 절곡각도(θ)는 작으므로 이에 대한 영향을 무시하여 6식으로 적용 하면 안전치로 평가할 수 있다.

참고문헌

1. 김성배, 서동기, 김상모, 이창남, 「볼트 장력을 이용한 철근콘크리트 기둥의 보강공법에 관한 실험적 연구」 대한건축학회 논문집 19권, 9호 pp11~18, 2003. 9.
2. 이원호, 임재형, 박인수, 「탄소섬유시트에 의한 철근콘크리트 보의 휨보강 효과」, 대한건축학회 논문집 15권 9호, pp11~18, 1999. 9.
3. 유기찬, 이영미, 김우석, 백승민, 광운근, 「구조적 손상을 받은 RC 보의 휨보강 효과에 관한 실험적 연구」, 대한건축학회 논문집 19권 3호, pp51~60, 2003. 3.
4. 이용택, 나정민, 김승훈, 이리형, 「탄소섬유시트로 전단보강된 철근 콘크리트 기둥의 거동」, 대한건축학회, Vol. 18, No. 4, 2002. 4. pp 19~26
5. 김도훈, 서동기, 김성배, 김상모, 이창남, 「포스트텐션으로 보강된 철골 보의 거동에 관한 실험적 연구」, 한국구조물진단학회 학술발표 논문집, 7권 1호, pp307~312, 2003. 5.
6. 민락기, 오창열, 「포스트텐셔닝을 이용한 기존 구조물 보강」, 콘크리트 학회지, 8권 4호, pp65~75, 1996. 8.
7. 최혁주, 「외부 후긴장으로 보강한 합성보에 대한 실험적 연구」, 중앙대학교 석사학위논문, 1998. 12.
8. 박용걸, 박영훈, 이승용, 「외부 후 긴장 공법을 이용한 강합성보의 보강에 관한 연구」, 한국강구조학회논문집, 12권 5호, pp549~558, 2000. 10.
9. 김기봉, 정영수, 최혁주, 강보순, 「외부 후긴장으로 보강한 합성보에 대한 실험적 연구」, 한국강구조학회논문집, 10권 4호, pp701~708, 1998. 12.
10. 정우태, 유영준, 박종섭, 「정착방식별 외부 프리스트레싱 보강공법에 대한 실험적 연구」, 대한토목학회 2002년 학술발표회 한국건설비전 2025, pp585~588, 2002. 11.
11. 한국강구조학회, 「강구조의 설계」, 구미서관, 2002. 1.
12. 신현목, 「프리스트레스트 콘크리트」, 동명사, 2003. 2.
13. Hamid Saadatmanesh, Pedro Albrecht, Bilal M. Ayyub, 「Experimental Study of Prestressed Composite Beams」, ASCE, Vol. 115, No. 9, pp2348~2363, 1989.
14. Hamid Saadatmanesh, Pedro Albrecht, Bilal M. Ayyub, 「Analytical Study of Prestressed Composite Beams」, ASCE, Vol. 115, No. 9, pp2364~2381, 1989.
15. Troitsky M. S., 「Prestressed Steel Bridges : Theory and Design」, Van Norstrand Reinhold Co. New York, 1990.

(接受: 2003. 7. 3)