

외부 긴장된 H형 보의 휨거동 특성

Flexural Behavior of External Prestressed H-Beam

양 동 석¹⁾ · 임 상 훈²⁾ · 박 선 규³⁾
Yang, Dong Suk · Lim, Sang Hun · Park, Sun Kyu

요 약: 본 연구에서는 기존에 사용된 H-Beam 교량을 편향부와 외부 긴장력을 도입하여 보강효과에 의하여 지간을 증가시킬 수 있고 단면을 축소할 수 있다는 근거를 제시하였고, 유연도법을 이용하여 편향부의 효과에 의한 추가 긴장량을 산정하였다. 또한, 실험변수(긴장량, Tendon의 개수, 편향부의 유·무)에 의해서 표준실험체(기존 H-Beam)와 외부 긴장된 H-Beam 등 5개의 실험체를 제작하여 휨 실험을 실시하여 외부 긴장된 H-Beam의 역학적 거동을 연구하였다. 특히, 보강효과 및 편향부의 효과를 실험적으로 검증하였다.

ABSTRACT: Recently, prestressed H-Beam bridges with external unbonded Tendons are increasingly built. The mechanical behavior of prestressed steel H-beams is different from that of normal bonded PSC beams in a point of the slip of tendons at deviators and the change of tendon eccentricity that occurs, when service load are applied in external unbonded steel H-beams. The concept of prestressing steel structures has been widely considered, in spite of long and successful history of prestressing concrete members. In the study, The flexural test on prestressed steel H-beams has been performed in the various aspects of prestressed H-beam including the tendon type and profile. The load was plotted against the deflection and the strain respectively in the steel beam and prestressing bars. The value expected with the equation of internal force equilibrium and compatibility between the deflection of the bars and the H-beam was found to correlate well with the measured data.

핵심용어: H-Beam, 강봉, 텐던, 편향부, 프리스트레싱, 휨실험, 처짐

KEYWORDS: prestressed H-beam, prestressing bar, tendon, deviator, prestressing, flexural test, deflection

1. 서론

기존의 가설 교량공법은 H-Beam과 복공판을 사용하여 지간거리가 짧고 복잡한 형상을 하고있기에 공사비, 공사기간 등 시공성이 떨어진다. 또한 해체시 대부분의 자재를 건설폐기물로 처리해야 하는 이중 부담과 우기시 유량의 증가로 인해 해체 후 재설치하는 등의 예산 낭비의 문제점이 있다. 그러나 가설교량과 같이 공장에서 규격화하여 제작·시공 할 수 있는 교량의 경우, 긴장력을 도입할 경우 장기간 시공이 가능해짐으로써 공기가 절약되고 경제적이며, 시공성이 우수해진다.

Tendon을 이용하여 강교량에 외부 긴장하는 기술은 새로운 교량을 신설할 경우나 기존 교량의 내하력 증진과 보강하는데 쓰일 수 있다. 긴장력의 기술적, 경제적 유용성은 콘크

리트에 도입하면서 폭넓게 발전되었다. 그러나 긴장력이 도입된 강교량은 콘크리트교량에 비해 상대적으로 더디게 발전을 하였다. 인장응력에 취약한 콘크리트 부재 단면과 달리, 강재의 단면은 인장응력과 압축응력에 견디는 성질이 강하다. 또한 강구조물에서는 강연선이 긴장된 콘크리트 구조물에서 발생하는 큰 마찰손실을 일으키지 않는다. 그러나 긴장된 콘크리트의 발전은 긴장된 강교량에도 유사한 해석 방법을 적용시킬 수 있다는 것을 보여주고 있다.

강재의 경제성은 구조물에 사용된 강재와 Tendon에 사용된 고강도 강재의 허용응력도 차이만큼 증가한다. 인장된 부재를 얻기 위해 Tendon을 긴장하면 2배 이상의 내력이 상승하지만 실제 긴장시의 좌굴 가능성을 고려하면, 내력은 70~80%의 증가효과가 나타난다.

1) 성균관대학교 토목공학과 박사과정

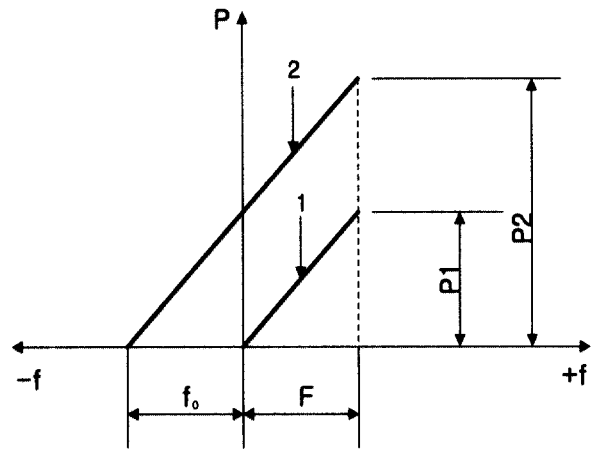
2) 주) STEEL KOREA

3) 정희원, 성균관대학교 토목공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2002년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

후긴장 보강공법은 설계에 수반되는 구조해석이 비교적 명확하여 교량구조물 뿐만 아니라 건축구조물 등 적용 범위가 매우 넓은 보강방법으로서 보다 더 많은 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 기존 H-Beam 형태의 주형에 긴장력을 도입한 H-Beam의 거동특성을 파악하고 외부 긴장력에 의한 보강효과를 연구하고자한다. 우선 긴장된 H-beam의 거동을 이론적으로 연구하고 편향부 효과에 의한 추가 긴장력을 산정하였다. 또한, 긴장량, 편향부의 유·무, 강봉의 개수 등을 실험 변수로 하여 총 5개의 실험체를 제작하여 외부의 긴장력이 도입된 H-Beam의 정적 재하 모델실험을 실시하여 긴장력 도입 정도에 따른 H-Beam의 보강 효과 정도 및 편향부(deviator)의 효과를 실험적으로 검증하였다.



1: without prestressing, 2: with prestressing

Fig. 1 긴장력의 도입

2. 외부 긴장된 H-Beam의 역학적 거동

2.1 외부 긴장된 H-Beam의 기본개념

긴장력을 도입한 콘크리트의 목적은 하중의 작용시 각 단면에 인장응력이 작용하지 않게 하거나 일부 제한된 인장응력이 작용하게 하여 주로 압축응력을 얻는 것이다. 그러나, 하중을 받는 긴장된 강구조물의 경우 동일단면 내에 인장력과 압축력이 동시에 존재한다. 결과적으로 강구조물의 유효 단면적이 콘크리트의 유효 단면적 보다 커지기 때문에 강구조물에 긴장력을 도입하면 콘크리트의 경우보다 더 경제적이다.

긴장력은 강구조물이나 구조부재에 작용하중에 의한 응력과 반대의 응력을 인위적으로 도입시키는 것이다. Fig. 1과 같이 탄성범위 내에서 긴장력을 도입하면, 초기응력이 f_0 이 생성되고 하중 P의 작용으로 Tendon의 응력은 허용응력 F에 도달한다. 그러므로 기존의 구조물은 긴장력을 도입함으로써 허용응력 범위내에서 더 많은 하중을 받을 수 있어 지간을 더 길게 하거나 단면의 크기를 감소시킬 수 있다.

또한, 다단계 긴장력을 단계적으로 도입함으로써 내력을 점차적으로 증가시킬 수가 있는데 Fig. 2와 같이 몇 회의 사이클로 긴장력과 구하고자 하는 하중을 얻을 수 있다. 변화하는 작용하중 P_1 에서 초기응력 f_0 은 한계값 F에 도달할 때까지 Tendon에 작용한다. 두 번째 사이클에서, 획득된 응력과 작용하중 P_2 를 감소시키는 초기응력 f_{02} 가 다시 주어진다. 몇 번의 사이클 후에, 하중의 합 $\sum P_2$ 는 긴장력을 도입하지 않은 구조물이 받을 수 있는 P_1 보다 몇 배가 더 크게 된다. 일반적으로 구하고자 하는 하중은 3~4번의 사이클로 얻을 수 있다.⁽¹⁾

케이블이나 Tendon의 가격은 일반 강재보다 2~3배 비싸

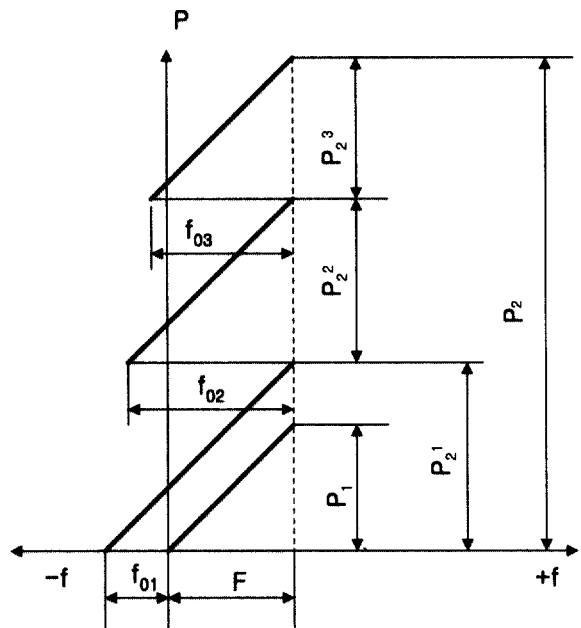


Fig. 2 긴장력의 다단계 도입

지만 강도가 4~6배 더 크기 때문에 이러한 형태의 긴장력을 적용함으로써, 고강도 재료를 효과적, 경제적으로 구조물에 사용할 수 있다.

2.2 외부 긴장된 H-Beam의 응력 평가

외부 긴장된 H-Beam의 하중 단계별 응력 변화는 Fig. 3과 같다. 첫 번째 단계는 긴장력에 의한 응력도이다. 먼저 긴장력에 의해 부재가 받는 압축응력 f_1 과 편심에 의해 작용하는 모멘트에 의해 작용하는 응력 f_2 는 식 (1)과 같다.

$$f_1 = \frac{X}{A}, \quad f_2 = \pm \frac{Xe}{I} y = \pm \frac{M_p}{S} \quad (1)$$

여기서, M_p : 긴장력의 편심에 의해 발생하는 모멘트

- A : 단면적
- e : 편심량
- S : 단면계수

두 번째 단계는 외부 하중에 의하여 상부 하부 끝단에서의 응력 결과이다. 외부하중이 작용할 때 모멘트에 의한 응력은 식 (2)와 같다.

$$f_2 = \pm \frac{M}{I} y \quad (2)$$

외부 하중에 의해 Tendon에 추가적으로 발생하는 긴장력 ΔX 값만큼의 증가 효과가 나타나고, 그 응력 결과는 식 (3)과 같다.

$$f_{top} = -\frac{\Delta X}{A}, \quad f_b = \pm \frac{\Delta X e}{I} y \quad (3)$$

그러므로 최종적으로 외부하중과 긴장력에 의해 발생하는 H-Beam의 압축축과 인장축에 발생하는 응력결과는 식 (4), (5)와 같다.

$$f_c = -\frac{M}{S_1} - \frac{X+\Delta X}{A} + \frac{(X+\Delta X)e}{S_1} < f_a \quad (4)$$

$$f_t = \frac{M}{S_2} - \frac{X+\Delta X}{A} - \frac{(X+\Delta X)e}{S_2} < f_a \quad (5)$$

또한 Tendon에 최종적으로 발생하는 응력 결과는 식 (6)과 같다.

$$f_{tendon} = \frac{X+\Delta X}{A_t} < f_{ta} \quad (6)$$

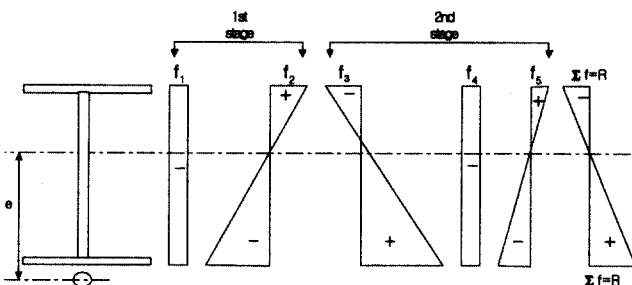


Fig. 3 외부 긴장된 H-Beam의 하중단계별 응력변화

여기서 A_t 는 Tendon의 단면적을 말한다.

2.3 추가 긴장량 산정

하중 변화에 의한 긴장된 Tendon의 인장력 증가량을 산정하기 위해서는 유연도법(Flexibility method)를 이용하여 구하며, 그 과정은 Fig. 4와 같다.

변위 적합 조건식에 의해 다음 식 (7)과 같다.

$$\delta_{11} \Delta X + \delta_{1P} = 0 \quad (7)$$

여기서, δ_{11} 는 단위 Tendon 힘에 의한 신장량 이고, δ_{1P} 는 하중 적용시 신장량이다. 가상일의 방법에 의해 신장량을 유도하면 다음 식 (8), (9)과 같다.⁽¹⁰⁾

$$\delta_{1P} = \int_0^L \frac{e M_x}{EI} dx \quad (8)$$

$$\delta_{11} = \int_0^L \frac{e^2}{EI} dx + \int_0^L \frac{1}{EI} dx + \int_0^L \frac{1}{E_t A_t} dx \quad (9)$$

여기서, M_x 는 하중 작용시 모멘트이고, e 는 Tendon의 편심량이다. 그리고, E , E_t 는 Beam과 Tendon의 탄성 계수이다.

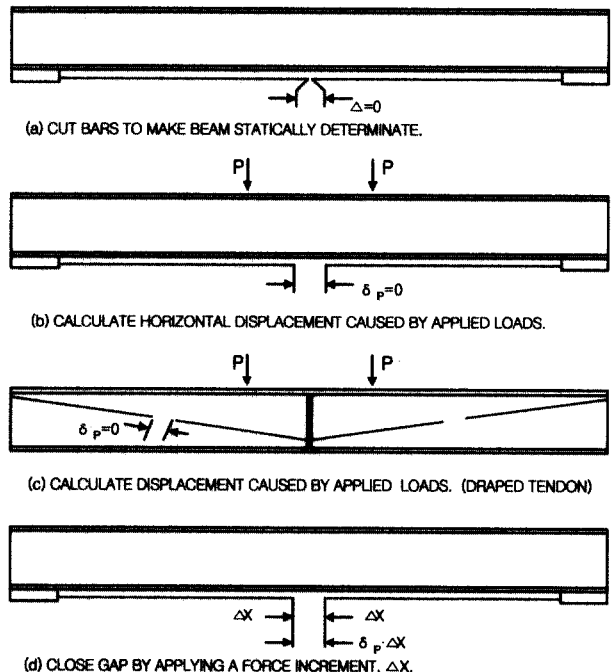


Fig. 4 하중 변화에 따른 긴장된 Tendon의 인장력 증가

식 (8)과 (9)를 식 (7)에 대입하여 유도해 보면 다음 식 (10)과 같다.

$$\Delta X = \frac{\frac{e}{L} \int_0^L M_x dx}{e^2 + \frac{EI}{E_t A_t} + \frac{I}{A}} \quad (10)$$

여기서 적분값은 모멘트 다이어그램의 면적과 Tendon의 길이에 대한 값이다.

Tendon에서의 증가된 총 긴장력은 초기 긴장력 X_i 와 고정하중과 활하중에 의하여 증가된 긴장력을 모두 합한 값이 된다.⁽⁷⁾

$$X = X_i + \Delta X_{DL} + \Delta X_{LL+i} \quad (11)$$

여기서, X_i 는 초기에 도입된 긴장력이고, ΔX_{DL} 와 ΔX_{LL+i} 는 추가 고정하중과 활하중 및 충격하중에 의해 증가된 긴장력을 말한다.

3. 외부 긴장된 H-beam의 휨 실험

3.1 개요

본 실험에서 실험체는 5가지 형태(Type)로 제작하여 실험을 실시하였다. 외부 하중 작용시 보강 효과를 평가하기 위해서 우선 일반 H-beam을 표준 실험체로 선정하였고, 실험변수로는 강봉의 개수, 긴장량과 편향부 유·무 등을 선택하여 H-beam의 휨 실험을 통하여 역학적 특성을 연구하였다. 본 실험에서 사용된 실험변수 및 실험체명은 Table 1과 같다. 사용된 재료의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

외부 긴장된 H-beam의 휨 실험을 통하여 강봉 개수를 변화시켜 H-beam의 PS량에 따른 보강의 효과와 편심량 변화 효과를 평가 해보았다. 그리고, 편향부의 유·무에 따른

Table 1 실험변수 및 실험체명

실험체명	단면 제원	단면적 (cm ²)	실험변수		
			강봉의 개수	편향부 유·무	긴장량 (tonf)
A	W300*300*15*10 강봉 : Ø25mm	119.8	-	-	-
B			1개	-	10
C			1개	유	10
D			2개	-	20
E			2개	유	20

H-beam의 압축축, 인장축 응력 변화량을 비교해 보았다.

본 실험에서 사용된 실험체는 300×300×10×15mm H형강을 사용했고 총길이 430cm, 지간길이를 400cm로 하였다. 또한 하중재하시에 발생할 수 있는 좌굴을 고려하여 수직 보강재(stiffener)로 보강하였고, Tendon은 직경 25mm 강봉을 사용하였다. 전체적인 실험체의 형상은 Fig. 5와 같다.

3.2 재하 및 측정 방법

외부 긴장된 H-beam의 휨 실험을 위한 하중재하는 UTM 기에서 유압잭으로 2점 재하 시험을 수행하였으며, 재하된 하중량을 측정하기 위하여 유압잭 하부면에 로드셀을 설치하였다. (사진 1.2) Fig. 6과 같이 실험체의 변위를 측정하기 위하여 중앙부에 변위계(LVDT)를 설치하였으며, 지간 중앙의 상부 플랜지, 하부플랜지와 Web부분에 Steel Strain Gauge를 설치하여 변형률을 측정하였다. 또한 Tendon에도 Steel Strain Gauge를 설치하여 Tendon의 변형률도 측정하였다. 이와 같이 설치한 센서로부터 나오는 데이터는 데이터

Table 2 재료의 물리적 성질

Type	단면적 (cm ²)	단면2차모멘트, I (cm ⁴)	탄성계수, E (kgf/cm ²)
H-Beam	119.8	20,400	2,040,000
Bar	4.91	1.917	2,040,000

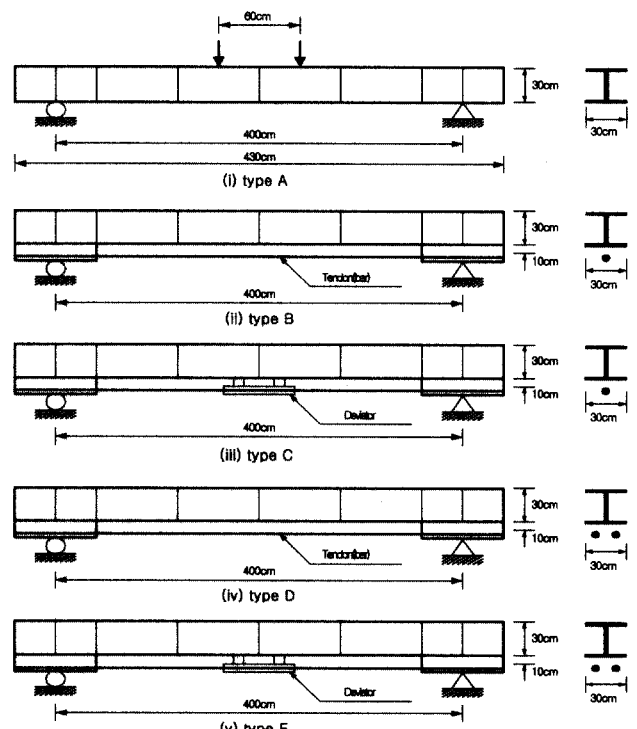


Fig. 5 실험체의 형상

로거(EDX-1500A)로 받아들여 컴퓨터를 이용하여 데이터를 정리하였다.

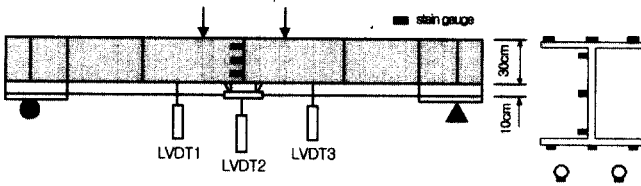


Fig. 6 Strain-Gauge의 위치

Photo 1. 실험체의 하중재하

Fig. 7 실험장치 구성도

Photo 2. 긴장된 Tendon

Table 3. 실험결과

실험체명	항복하중				극한하중				비고
	하중		최대처짐		하중		최대처짐		
	하중 (tonf)	증가율 (%)	처짐 (mm)	증가율 (%)	하중 (tonf)	증가율 (%)	처짐 (mm)	증가율 (%)	
Type A	49.2	-	22.3	-	58.3	-	88.2	-	표준실험체
Type B	58.1	18.1	27.4	22.9	66.4	13.9	67.4	-23.6	편향부 無
Type C	61.9	25.8	28.1	26.0	70.9	21.6	76.1	-13.7	편향부 有
Type D	65.4	32.9	25.3	13.5	74.5	27.8	63.5	-28.0	편향부 無
Type E	68.7	39.6	26.2	17.5	79.6	36.5	75.0	-15.0	편향부 有

4. 실험 결과 및 분석

4.1 H-Beam의 휨 실험결과

외부 긴장된 H-Beam을 강봉의 개수, 긴장량과 편향부 유·무 등을 실험변수로 선택하여 정적 재하시험을 통하여 실험결과는 Table 3과 같다.

4.2 하중-처짐 관계

본 실험을 통하여 10tonf으로 외부 긴장한 실험체가 표준 실험체보다 항복하중에서는 약 18~26%정도의 하중증가의 효과가 나타났고 극한하중에서는 약 14~21%의 하중이 증가되었다. 또한 20tonf으로 외부 긴장력을 증가시켜 실험한 실험체의 경우, 표준실험체보다 항복하중은 약 33~40%, 극한

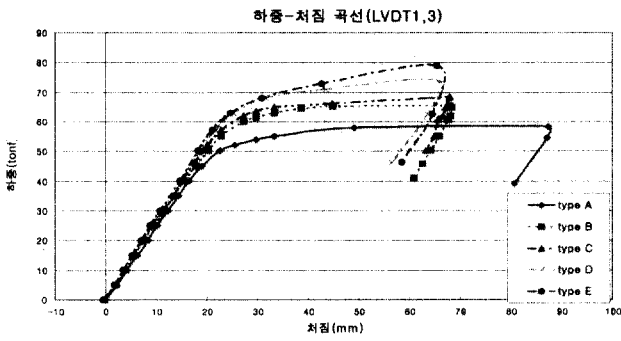


Fig. 8 하중-처짐 그래프(주형)

하중에서는 약 28~37%의 하중증가 효과가 나타났다. 이로 인해 기존에 사용되어온 가설교량을 외부의 긴장력을 가함으로써 지간을 더 길게 할 수 있거나 단면을 축소할 수 있어 시공성이나 경제성에서 큰 잇점이 있다고 판단된다.

처짐에서는 주형의 처짐이 표준실험체보다 극한하중에서는 약 14~28%로 감소되었지만 항복하중에서는 오히려 약 14~26%정도 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 항복하중에서는 하중의 증가율이 처짐이 감소량보다 크거나 거의 비슷한 결과가 측정되었다. 또한, 표준실험체의 항복하중인 49.2 tonf에서 외부 보강된 실험체의 처짐값은 감소한 것으로 나타났고, 사용하중(0.4 f_y)에서는 외부 긴장한 실험체가 표준실험체보다 처짐이 적어 사용성 측면에서 더 좋은 것으로 나타났다. 이것은 표준실험체보다 외부긴장된 실험체가 긴장력에 의한 강성이 증가되므로 사용하중에서 처짐이 감소되었고 극한하중에서도 감소된다고 판단된다. Fig. 8은 실험체의 주형에 대한 하중과 처짐의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

보강된 실험체의 경우에는 단지 하중이 감소할 때까지 하중을 재하하였다. 항복한 후에는 강봉의 변형률이 급격하게 증가되어 위험성에 때문에 파괴까지는 실험을 실시하지 않았으며 대부분의 실험체가 항복 이후에는 H-Beam 압축부의 좌굴이 발생되었고, 복부에서는 stiffener에 의하여 좌굴이 발생되지 않았다.

4.3 편향부(Deviator) 효과

본 실험에서는 편향부(Deviator)의 유무에 따라 같은 긴장력을 가력했으나 하중과 처짐에서 많은 차이가 나타났다. 편향부가 있는 실험체(Type C, E)는 편향부가 없는 실험체(Type B, D)보다 항복하중에서 약 5~7%정도, 극한하중에서는 7%정도의 하중 증가효과가 나타났다. 이것은 편향부를 설치함으로써 실험체가 외부로부터 하중이 재하될 때 주형과 Tendon이 일체거동 함으로써 긴장력 이외에 외부하중에 의해 발생하는 추가 긴장력(ΔX)이 작용하여 편향부가 설치하지

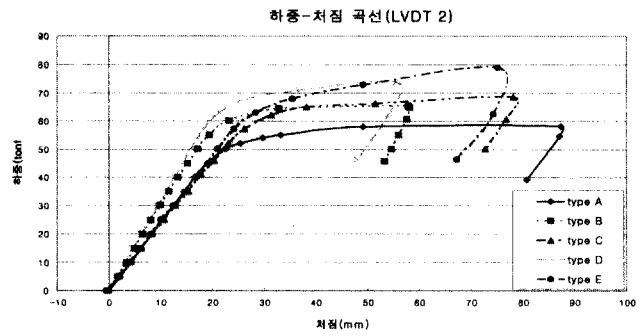


Fig. 9 하중-처짐 그래프(편향부)

않은 실험체보다 더 많은 하중을 받는 것으로 판단된다.

Fig. 9은 편향부에 대한 하중과 처짐 그래프로서 편향부가 없는 실험체는 지간중앙 Tendon의 처짐이고 편향부가 설치된 실험체는 지간중앙 편향부의 처짐을 나타낸 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 보강공법의 하나인 외부 긴장 공법을 H-Beam에 적용함에 있어서, 여러 가지 실험변수(긴장량, 편향부의 유·무, Tendon의 개수)를 사용하여 정적 재하 실험을 실시하여 실험체의 거동과 보강효과를 분석하였다. 본 논문에서 연구된 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 10tonf으로 외부 긴장한 실험체가 표준실험체보다 항복하중은 약 18~24%, 극한하중은 약 14~18%의 하중이 증가되었다. 또한 20tonf으로 외부 긴장력을 증가시켜 실험한 실험체는 표준실험체보다 항복하중은 약 33~36%, 최대하중에서는 약 28~34%의 하중증가 효과가 나타났다.
- (2) 처짐에서는 표준 실험체보다 극한하중에서는 약 14~28%로 감소되었고 사용하중에서는 외부 긴장한 실험체가 표준실험체보다 처짐이 적어 사용성 측면에서 더 좋은 것으로 나타났다.
- (3) 편향부가 있는 실험체는 편향부가 없는 실험체보다 항복하중에서 약 5~7%정도, 극한하중에서는 7%정도의 하중 증가효과가 나타났다. 이것은 편향부를 설치함으로써 실험체가 외부로부터 하중이 재하될 때 주형과 Tendon이 일체거동 함으로써 긴장력 이외에 외부하중에 의해 발생하는 추가 긴장력(ΔX)이 작용하여 편향부가 설치하지 않은 실험체보다 더 많은 하중을 받는 것으로 판단된다.
- (4) 위에서 도출된 결론에서 볼 때, 외부 긴장한 H-Beam 교량에서는 기존의 H-Beam 교량보다는 지간을 더

길게 할 수 있거나 단면의 축소가 가능하다고 판단되어 시공성 뿐만 아니라 경제성에서도 좋은 것으로 판단된다. 또한 편향부를 설치하는 것이 설치하지 않은 교량보다 더 효율적이라도 판단된다.

참 고 문 헌

1. 유성원 (1996), *외부 프리스트레스트 콘크리트 교량 부재의 극한 휨거동 해석*, 서울대학교 공학박사학위 논문.
2. 백동훈, 이우현, 김기봉 (1997), "후긴장을 이용한 연속 합성 격자형교의 보강 방법에 관한 연구", *한국강구조학회 논문집*, 제 9권, 제 3호, pp. 441~456
3. Bilal M . Ayyub, Member, Young G. Sohn, and Hamid Saadatmanesh (1986), Prestressed Composite Girders under Positive Moment, *J. Struct. Engrg.*, ASCE V. 122, No.2, pp. 2931-2951
4. Federal Highway Admin. (1986), *Highway bridge replacement and rehabilitation program*, Bridge Div., Office of Engrg., Washington, D.C.
5. Hambly, E. C. (1991), *Bridge deck behaviour*, 2nd Edition, *E&Fnspon*, pp. 157-175.
6. Hamid Saadatmanesh. (1992), "Parametric Study of Continuous Prestressed Composite Girders" *J. of Struct. Engrg.*, ASCE V. 118, No. 1, pp. 186-205
7. Hamid Saadatmanesh, and Associate Member. (1989), "Experimental Study Prestressed Composite Beams" *J. of Struct. Engrg.*, ASCE Vol. 115, No. 9, pp. 2348-2363.
8. Rao, P. S. and Mathew, G. (1996), "Behavior of Externally Prestressed Concrete Beams with Multiple Deviators," *Structural Journal, ACI*, V. 93, No.4, pp. 7-18.
9. Shantong, Z. (1986), *Prestressed steel structures*, Harbin Polytechnical Inc., China, pp. 144-169.
10. Troitsky, M. S. (1990), *Prestressed steel bridges*, Van Nostrand Co., New York.
11. Young G. Sohn, and Hamid Saadatmanesh, and Associate Member. (1989), Prestressed Composite Girders under Positive Moment *J. of Struct. Engrg.*, ASCE V. 116, No. 11, pp. 2931-2951.

(접수일자 : 2001년 5월 8일)