

현장실험을 통한 외부 후긴장 Steel I-Beam의 휨 거동 특성

Flexural Behavior Characteristics of Steel I-Beam Strengthened
by the Post-tensioning Method on the Field Experiment

조 두 용*

박 대 열**

박 선 규***

Cho, Doo-Yong

Park, Dae-Yul

Park, Sun-Kyu

Abstract

Recently, the externally prestressed unbonded steel I-beam bridges have been increasingly built. The mechanical behavior of prestressed steel I-beams which are with external unbonded tendon is different from that of normal bonded PSC beams in a point of that the slip of tendons at deviators and the change of tendon eccentricity occurs, when external loads are applied in external unbonded steel I-beams. The concept of prestressing steel structures has not been widely considered, in spite of long and successful history of prestressing concrete members. In this study, The field experimnet on prestressed steel I-beams has been performed in the various aspects of prestressed I-beam including the tend on type and profile.

keywords : external post tensioning method, steel I-beam, flexural behaviour, field experiment

요 지

외부 후 긴장 공법은 설계에 수반되는 구조해석이 비교적 명확하여 강교량 구조물뿐만 아니라 건축 구조물 등 그 적용범위가 매우 넓다. 본 연구에서는 외부 비부착 강연선 및 강봉을 가진 Steel I-Beam의 휨거동과 보강효과를 연구하기 위하여 우선 합리적인 이론해를 제시하고, 긴장력 도입 후 정적 휨 재하 실험을 수행하여 긴장력 도입 정도에 따른 휨 보강정도를 분석하였다. 또한, 강봉을 사용한 경우와 강연선을 사용한 경우로 시험체를 분류하여, 긴장재 종류에 따른 휨거동 특성과 보강효과를 비교 분석하였다. 아울러 강봉의 개수와 편향부 유.무에 따른 Beam의 휨거동 특성과 부재의 처짐의 증가에 따른 Tendon 위치의 편심량 값이 변화하고, 그에 따른 프리스트레스트 I-Beam의 휨 거동에 미치는 영향을 규명하였다.

핵심용어 : 외부 후 긴장 공법, Steel I-Beam, 휨거동, 현장실험

* 학생회원, 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정

** 건국대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수

E-mail : joecdy@hanmail.net 031-290-7517

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2003년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

Tendon을 이용하여 강교량에 외부 긴장하는 기술은 새로운 교량을 신설할 경우나 기존 교량의 내하력 증진을 위한 보강공법에 사용할 수 있다. 프리스트레싱의 기술적, 경제적 유용성은 콘크리트에 도입하면서 폭넓게 발전되었다. 그러나 프리스트레스트 강교량은 상대적으로 더딘 발전을 보였다. 인장응력에 취약한 콘크리트 부재 단면과 달리, 강부재 단면은 특별한 응력 분포가 필요하지 않다. 또한 강구조물에서는 강연선이 프리스트레스트 콘크리트 구조물에서 발생하는 큰 마찰손실을 일으키지 않는다. 결국 프리스트레스트 콘크리트의 발전은 프리스트레스트 강교량에도 유사한 해석 방법을 적용시킬 수 있다는 것을 보여주고 있다.⁹⁾

프리스트레스트를 강구조물에 적용하면, 강재의 양을 줄일 수 있어 비용을 절감할 수 있는데 주로 구조물, 새들(saddle), 앵커, Tendon의 중량, 운송과 재하 비용, 프리스트레스트를 포함한 건설비, 붕괴방지 비용과 같은 요인이 프리스트레스트 강구조물의 비용에 영향을 미친다. 강재의 경제성은 구조물에 사용된 강재와 Tendon에 사용된 고강도 강재의 허용응력 차이만큼 증가한다. 인장된 부재를 얻기 위해 Tendon을 프리스트레싱하면 2배 이상의 내력이 증가하지만 실제 프리스트레스트 시의 좌굴 가능성을 고려하면, 내력의 증가는 70-80%에 그친다. Table 1은 프리스트레스트 되지 않은 구조물과 프리스트레스트된 구조물의 경제성을 비교하여 보여주고 있다.²⁾

Table 1 프리스트레스트 구조물의 경제성 분석

Structures	Economy in Steel (%)	Economy in Cost (%)
Plate girders	10-12	8-12
Trusses of spans 100ft	5-10	2-5
Roof trusses of spans 100-130ft	10-20	5-10
Roof trusses of spans 130-200ft	10-45	7-20
Frames and arches of spans 100-200ft	20-50	10-30

후긴장 보강공법은 설계에 수반되는 구조해석이 비교적 명확하여 교량구조물 뿐만 아니라 건축구조물 등 그 적용 범위가 매우 넓은 보강방법으로서 보다 더 많은 연구가 필요한 실정이다. 본 논문에서는 구조해석과 실제 시공된 강교량의 해석을 비교·분석하였다.

2. 외부 비부착 Tendon을 가진 Prestressed Steel I-Beam의 역학적 거동 특성

2.1 프리스트레스트 Steel I-Beam의 기본개념

해석을 위한 가정은 (1) Hooke's의 법칙을 따르고, (2)미소변형 (3) Slip은 무시한다. (4) 전단 변형은 무시한다. (5) 새들점에서의 마찰은 무시한다.

여기서는 강성도법과 유연도 방법, 두 가지 해석법을 고려해본다.

2.1.1 강성도법

직선으로 배치된 Tendon을 가진 보를 강성도법으로 해석하기 위해서, PS Tendon은 정착부와 편향부에 해당되는 Frame요소의 절점에 강체 연결된 Bar요소를 이용하였으며 Fig. 1과 같다. 프리스트레스트 힘은 등가절점력을 계산 후 I-Beam에 하중으로 작용시켰으며 프리스트레스트 힘에 의한 하중벡터는 다음 식 (1)과 같음을 알 수 있다.

여기서, 절점 i , j 의 자유도는 절점 1, 2에 관계한다.

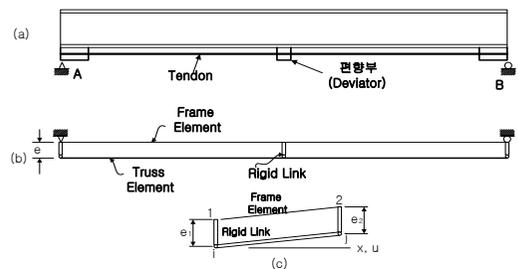


Fig. 1 직선 Tendon을 가진 프리스트레스트 Steel I-Beam의 모델

$$\begin{pmatrix} u_i \\ w_i \\ \theta_i \end{pmatrix} = \Lambda_1 \begin{pmatrix} u_1 \\ w_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u_j \\ w_j \\ \theta_j \end{pmatrix} = \Lambda_2 \begin{pmatrix} u_2 \\ w_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서,

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -e_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -e_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

e_1, e_2 는 Beam의 증립축에서 절점(node) i 와 j 단에서 Tendon의 편심을 의미한다.

Bar요소의 강성 매트릭스 K_T 는 변환 매트릭스 Γ^T 에 의해 계산될 수 있으며 변환 매트릭스는 식(3)과 같다.

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Lambda_1 & 0 \\ 0 & \Lambda_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

전체 좌표계에서 Bar요소의 강성 매트릭스는 식(4)와 같다.

$$K_T = \Gamma^T k_T \Gamma \quad (4)$$

각 요소의 강성 매트릭스가 구성되어지면, 전체 강성 매트릭스 K와 변위, 절점력을 계산할 수 있다.

2.1.2 유연도법

이 해석법은 외부 비부착 프리스트레스트 I-Beam의 해석에 사용된다. 이러한 형태의 Tendon을 I-Beam에 적용할 경우 Tendon은 I-Beam 끝단에 정착되고 편향부에서의 마찰을 무시하면 편향부에서 Tendon은 자유롭게 이동할 것이다. 즉, 절곡되어 있는 I-Beam은 Fig. 2(a)에서 보는 것과 같이 정착단 절점에서 Tendon과 I-Beam의 변위가 일치하며 편향부 절점에서는 Tendon과 I-Beam의 변위는 일치하지 않게 된다. 그러므로 Tendon과 I-Beam의 변형에 대한 특별한 적합조건이 필요하다.

Tendon은 Steel I-Beam 끝단의 절점에 부착된 브라켓에 정착되고 I-Beam내부의 어느 절점에 부착된 도르래와 같은 편향부에 의해 각변화가 주어진다. Fig. 2는 편향부에서 Tendon과 I-Beam 부재의 연결모형을 보여주고 있다.

해석단계에서는 Tendon의 강성을 고려해야 하는데 활하중, 추가고정하중이 작용할 때 부정정 여력인 긴장량 증가량을 구하기 위해서는 Tendon과 I-Beam의 신장량에 관한 적합조건을 구해야한다.

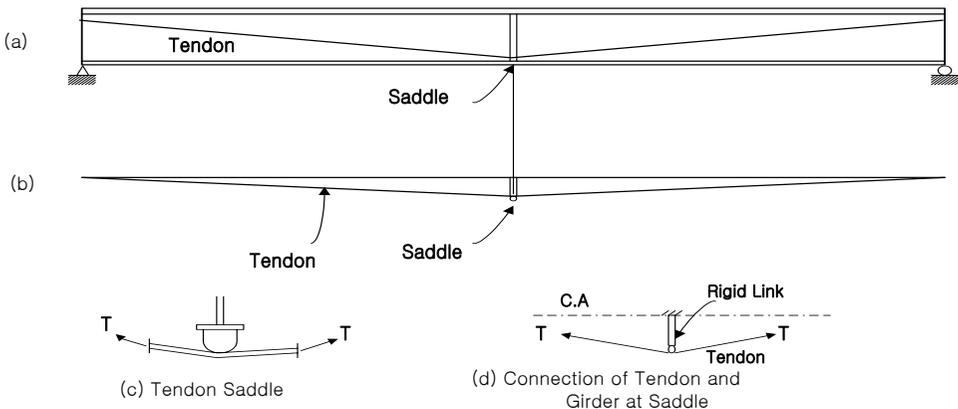


Fig. 2 절곡된 Tendon을 가진 프리스트레스트 Steel I-Beam 모델

즉, Tendon의 부정정 여력인 ΔX (긴장력의 증가량)를 구하는 과정은 다음과 같다.

첫째, Fig. 3(a)처럼 Tendon을 절단하여 정정 보로 변환시킨다.

둘째, 하중작용 후 발생한 절단된 Tendon의 상대변위를 구한다. 계산의 편의를 위하여 Fig. 3(c)와 같이 Tendon이 배치된 절점의 상대변위를 구하여 총합을 산정한다.

셋째, 실제 구조물에서 절단된 Tendon의 상대변위는 0이므로 하중발생 후 Tendon 증가량 ΔX 를 상대변위를 없애기 위하여 절단된 Tendon 양단에 도입한다. 이 때 계산을 간단하기 위하여 Fig. 3(d)에서 보는 것과 같이 Tendon이 배치된 절점에 Tendon 방향으로 적용한다.

하중 변화에 의한 프리스트레스 Tendon의 인장력 증가량을 산정하기 위해서 Flexibility method를 이용한다.

변위 적합 조건식을 이용하면 다음과 같다.

$$\delta_{11} \Delta X + \delta_{1P} = 0 \quad (5)$$

여기서 δ_{11} 은 단위 Tendon 힘에 의한 신장량이고, δ_{1P} 는 하중 적용시 신장량이다. 가상일의 방법에 의해 신장량을 유도하면 다음 식 (6), (7)과 같다.⁹⁾

$$\delta_{1P} = \int_0^L \frac{e M_x}{EI} dx \quad (6)$$

$$\delta_{11} = \int_0^L \frac{e^2}{EI} dx + \int_0^L \frac{1}{EI} dx + \int_0^L \frac{1}{E_t A_t} dx \quad (7)$$

여기서, M_x 는 하중 작용시 모멘트이고, e 는 Tendon의 편심량이다. 그리고, E , E_t 는 Beam과 Tendon의 단성 계수이다. 식 (6)과 (7)을 식 (5)에 대입하면,

$$\Delta X = \frac{\frac{e}{L} \int_0^L M_x dx}{e^2 + \frac{EI}{E_t A_t} + \frac{L}{A}} \quad (8)$$

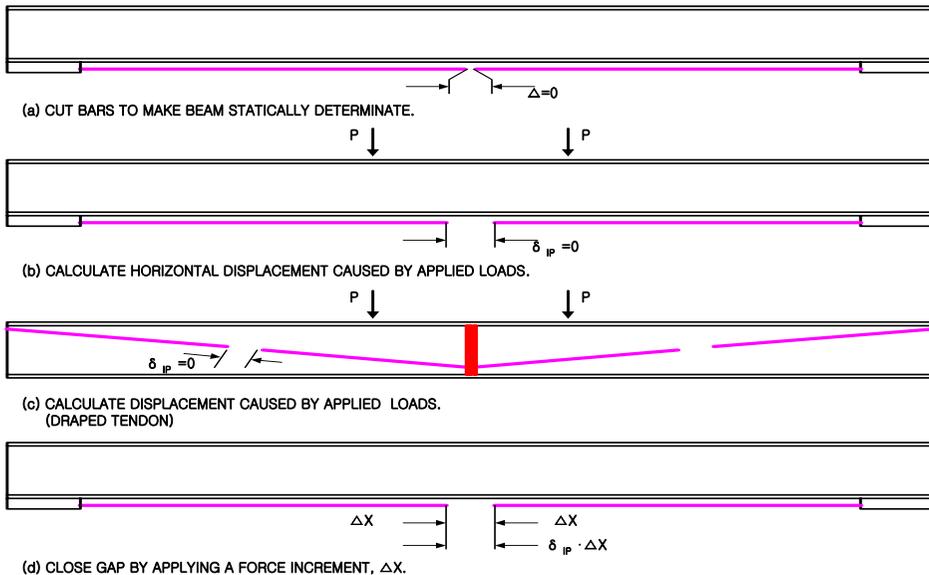


Fig. 3 하중 변화에 따른 프리스트레스 Tendon의 인장력 증가

여기서 적분값은 모멘트 다이어그램의 면적과 Tendon의 길이에 대한 값이다. Tendon에서 증가된 총 프리스트레스력은 초기 프리스트레스력, 사하중과 활하중에 의하여 증가된 프리스트레스력을 모두 합한 값이 된다.⁶⁾

$$X = X_i + \Delta X_{DL} + \Delta X_{LL+i} \quad (9)$$

여기서,

X_i : 초기 도입 긴장력

X_{DL} : 추가 사하중에 의해 증가된 긴장력

X_{LL+i} : 활하중 및 충격하중에 의해 증가된 긴장력

3. 현장 실험 결과 및 분석

3.1 개요

기존 연구에서 I-Beam에 프리스트레싱을 도입함으로써 항복하중과 극한하중을 현저하게 증가시킬 수 있다는 결론을 바탕으로 본 연구에서는 제안된 외부 긴장된 I-Beam의 현장 적용을 위해 라멘 형태의 실 구조물을 제작 시공한 결과를 분석 하였다.¹⁾

Table 2 실험 가교 모델 제원

구조물	Area of Cross-section (cm ²)	Moment of Inertia (cm ⁴)	E(kgf/cm ²)
Beam (588×300×12×20)	192.5	118,000	2,040,000
복공판 (750×1990×200)	-	-	-
Bar (36mm)	10.18	8,245	2,040,000

Note : Bar-Dywidag Bar (복공판은 하중으로 작용시킴)

현장재하시험은 대상 구조물의 실제 거동을 파악하여 안전성 및 내하력을 평가하기 위한 것이고, 본 구조물의 설계에 대한 이론적 타당성을 검증하여 외부 후긴장된 라멘교의 거동특성을 파악해 보았다.

3.2 실험 계획

3.2.1 실험 교량 제원

실제 시공된 가설교량의 주요 제원은 다음 Table 2와 같다. 본 가설 교량은 낙동강을 횡단하는 삼랑진에 위치하고 있으며 유수의 영향을 최소화하고, 경제성 및 시공성등을 고려하여 지간장 4@22m=88m로 시공되었다. 이 가설교량은 라멘형식으로 주형의 허용응력은 $f_{sa}=1,400 \text{ kgf/cm}^2$ 이고, 허용 전단응력은 $\tau_a=800 \text{ kgf/cm}^2$ 이다. 강봉은 36mm Dywidag Bar를 사용하였고 허용응력은 $f_{ta}=6,200 \text{ kgf/cm}^2$ 이다. 가설교량의 실제 모델은 Fig. 4, 5와 같이 주형 588x300빔에 하부 플랜지에서 40cm되는 편심에 고강도 강봉으로 외부 후긴장한 형태이고, 상부는 복공판으로 덮여져 있다.



Fig. 4 실제 가교 모델 I



Fig. 5 실제 가교 모델 II

이 구조물은 허용응력법에 의해 1등급 교량(DB-24 하중)으로 설계되었다.

3.2.2 현장 재하 실험 흐름도

재하 실험은 Fig. 6과 같은 단계를 통하여 데이터를 받아들여 분석하였다.

3.2.3 실험용 차량 제한

Fig. 7에서 보는 것과 같이 실험용 차량은 15tonf 덤프트럭을 이용하였고, 시험용 차량을 계량소에서 계량하였으며 축하중은 Table 3과 같다.

하중 재하 위치는 Fig. 8과 같으며, 편심 재하 및 교량폭 중심에 재하하여 데이터를 얻어 분석하였다. 그리고 Gauge 위치는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 주형 상부, 하부 플랜지 및 tendon에 배치하였고, 최대 부재력 발생 부재에 Steel Gauge를 부착하였다. 수직 변위 측정기(LVDT)는 경간 1/2 지점에 설치하여 수직 변위를 측정하였다.

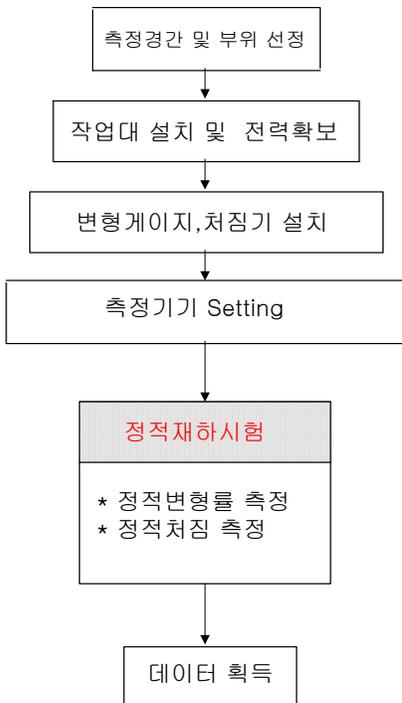


Fig. 6 재하 실험 흐름도

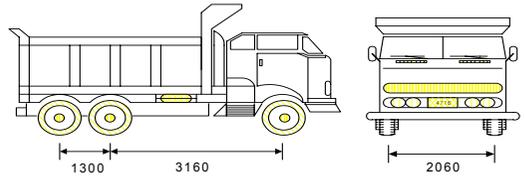


Fig. 7 시험용 차량

Table 3 시험용 차량의 축하중

구분	전륜 하중	후륜 하중	차량 총 중량
하중(kgf)	4,274	24,226	28,500

Note : 하중은 계량소에서 계량 승인 받은 하중.

3.3 해석 및 분석

해석은 범용 유한요소 해석 프로그램(SAP2000)에 의해 수행되었고, 실 구조물 설계시에는 윤하중을 재하하여 해석하였다. 여기서는 15tonf 덤프트럭을 정적 재하하여 데이터를 비교 분석하여 내하력을 평가하였다.

3.3.1 해석

부재력 및 처짐은 각 하중 재하 위치에 따라 똑 같은 조건으로 하중 재하하여 얻어진 값을 사용하였다. 거더와 교각 및 횡방향 보강재는 프레임요소를 사용하였고, 강봉은 직선 트러스 요소로 모델링하여 해석하였다.

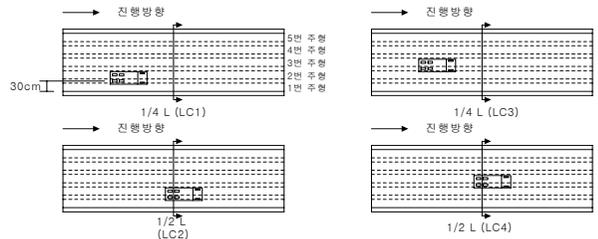


Fig. 8 하중재하 위치

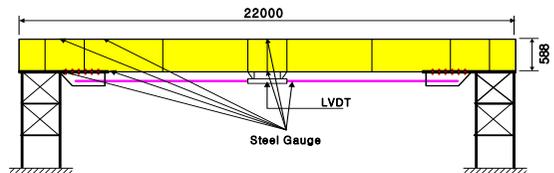


Fig. 9 Steel gauge 부착 및 LVDT 설치 위치



Fig. 10 범용 유한요소 해석 프로그램의 해석 모델

3.3.2 분석

단계별 하중에 대한 구조해석은 재하 하중에 의한 구조해석값과 현장측정값과의 비교분석하여 응답비를 구하였다. 이때 실측응력은 측정된 변형률에 Steel의 탄성계수값을 곱하여 얻어진 값이다. 결과는 다음 Table 4, 5와 같다.

하중 경우별 처짐이나 응력의 실측치를 계산치와 비교한 응답비를 가지고 프리스트레스트 I-Beam의 안전성을 평가하였다. 응답비가 1보다 작다는 것은 실제 구조물이 가지고 있는 내하력이 계산된 내하력 보다 커서 구조물이 안전하다는 것을 의미하는데, 본 연구에서 수행한 프리스트레스트 I-Beam의 처짐에 대한 응답비는 0.7~1.071 정도로 그 값들이 일정한 분포로 나타났고, 응력의 경우는 0.6~1.0 사이로 일정한 분포를 보여 주고 있다. 현장 재하시험 결과는 하중-처짐 응답비가 0.88로 나타났고, 변형률도 평균 0.8

로 나타나 프리스트레스트 I-Beam은 구조적으로 안전성을 확보함을 알 수 있다. 따라서, 실험대상인 삼랑진 프리스트레스트 I-Beam은 소요의 안전성을 확보하고 있어 실 구조물로 사용이 가능하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 보강공법의 하나인 후긴장 공법을 Steel I-Beam에 적용함에 있어, 현장실험을 실시하여 그 거동을 분석하였다. 프리스트레스트 Steel I-Beam을 긴장력과 적용된 하중하에서 처짐 및 변형률을 측정하였다. 강성도법에 의해 제시된 이론해와 실제 가설교량의 실험치와 비교하여 응답비를 얻었다.

본 논문의 제한적 연구내에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 프리스트레스트 Steel I-Beam을 후긴장하는 이론을 바탕으로 현장에 실무적으로 적용 가능하였다.
- 2) 본 실험에 대한 분석 결과 도입 긴장력의 증가에 따른 주형 하부 플랜지의 초기 압축 변형률 상승에 의하여 상당한 보강 효과가 분석되었으며, 삼랑진 가교의 실험 결과에서 얻은 실험치와 이론해의 처짐에 대한 응답비는 0.7~1.071, 응력의 경우는 0.6~1.0사이로 일정한 분포를 보여줌으로써 실제 프리스트레스트 I-Beam의 안전성을 확보할 수 있었다.

Table 4 처짐 비교 (지간 중앙)

	LC 1 (Cm)		LC 2 (Cm)		LC 3 (Cm)		LC 4 (Cm)	
	해석결과	실험결과	해석결과	실험결과	해석결과	실험결과	해석결과	실험결과
1번 주형	-1.382	-1.333	-2.366	-2.535	-0.842	-0.736	-1.742	-1.605
2번 주형	-1.105	-1.073	-2.156	-2.056	-1.083	-1.112	-2.057	-2.211

Table 5 응력 비교 및 응답비 (지간 중앙)

	응력	LC 1		응답비 (%)	LC 2		응답비 (%)	LC 3		응답비 (%)	LC 4		응답비 (%)
		수치해	실험치		수치해	실험치		수치해	실험치		수치해	실험치	
1번 주형	f_{top}	463.2	385.6	0.8	589.6	407.3	0.7	397.2	272.3	0.7	484.0	274.4	0.6
	f_{bot}	-363.3	-291.6	0.8	-453.7	-362.6	0.8	-332.4	-266.3	0.8	-390.5	-317.8	0.8
2번 주형	f_{top}	416.9	374.2	0.9	479.1	452.0	0.9	415.2	298.0	0.7	463.2	416.83	0.9
	f_{bot}	-342.0	-341.3	1.0	-390.7	-384.9	1.0	-338.6	-302.7	0.9	-378.2	-375.3	1.0

3) 정적 재하 실험에 있어서 동일 하중의 발생 변형률은 도입 압축 변형률이 높을수록 낮아지는 것으로 분석되어 긴장력 증가에 따른 보강 효과의 상승이 나타났다.

참고문헌

1. 양동석, 임상훈, 박선규, 한국강구조학회 논문집, 제14권 1호, pp79-85, 2002.
2. AASHTO, Standard Specification for Highway Bridges, 1st Edition, 394 pp., 1994.
3. Ayyub, B. M., Sohn, Y. G., and Saadatmanesh, H. (1988). "Static strength of prestressed composite steel girders." Final Report, National Science Foundation, Grant No. ECE-84-13204, Univ. of Maryland, College Park, Md.
4. 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
5. Federal Highway Admin., (1986), "Highway bridge replacement and rehabilitation program," Bridge Div., Office of Engrg., Washington, D.C.
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. 7-8.
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 : 2002년 3월 7일)