

후긴장을 이용한 트러스의 성능 향상 평가

Behaviour of Truss Bridges by Using the Post-tensioning

정 배 근* 한 경 봉** 엄 준 식*** 박 선 규****
Jeung, Bae-Keun Han, Kyung-Bong Eom, Jun-Sik Park, Sun-Kyu

Abstract

The technique of posttensioning has been used successfully to improve the performance of existing concrete structures. However, very few applications of this technique can be found in steel structures. Posttensioning by means of high strength cable or bar can be used to effectively increase the working load capacity of Truss Bridges. The benefits of posttensioning trusses can be achieved in strengthening of existing structures as well as in the design of new structures. In this paper, the elastic behavior of posttensioned trusses with straight and draped tendon profiles is examined. For the analysis of posttensioned trusses in the elastic range of behavior, two methods are presented, namely, the flexibility method and the mixed-method, i.e., a combination of the stiffness and flexibility methods. Using the presented methods, the effects of design variables such as the tendon profile, truss type, prestress force, and tendon eccentricity on the working load and deflection of trusses are studied. The results show that the allowable load of truss increases proportionally with increase in prestress force and eccentricity. Posttensioning enlarges the elastic range, increases redundancy, and reduces deflection and member stresses. Thus, the remaining life of a truss bridge can be increased relatively inexpensively.

Keywords : posttensioning, posttensioned plane trusses, prestressing force increments, flexibility method, mixed-method, design

* 정희원, (주) 건일엔지니어링

** 학생회원, 성균관대학교 토목환경공학과 박사수료

*** Michigan University Department of Civil Engineering,
Reaserch Fellow

**** 정희원, 성균관대학교 토목환경공학과 부교수

E-mail : pcster@dreamwiz.com 019-269-9890

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내
주시면 2003년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

교량은 시간이 경과함에 따라 교통환경변화 등 여러 원인에 의해서 손상을 받게 되고 구조적 기능이 약화 되기 때문에 건설 후 적절한 보수·보강을 하여 수명을 연장하고 안전성과 사용성을 확보하여야 한다. 강연선을 이용하여 강교량에 외부 긴장하는 기술은 새로운 교량을 신설할 경우나 기존 교량의 내하력 증진과 보강하는데 쓰일 수 있다.

외부 후긴장의 기술적, 경제적 유용성은 콘크리트에 도입하면서 폭넓게 발전되었다. 그러나 프리스트레스트 스틸 교량(Prestressed Steel Bridge)은 상대적으로 더딘 발전을 보였다. 긴장력이 도입된 강구조물의 유용성은 주로 새로운 교량의 건설시 재료의 절감뿐만 아니라 노후화된 교량의 보강에 있다. 인장응력에 취약한 콘크리트 부재 단면과 달리, 강부재 단면은 특별한 응력 분포가 필요하지 않다. 또한 강구조물에서는 강연선이 프리스트레스트 콘크리트 구조물에서 발생하는 큰 마찰손실을 일으키지 않는다. 그러나 프리스트레스트 콘크리트의 발전은 프리스트레스트 강교량에도 유사한 해석 방법을 적용시킬 수 있다는 것을 보여주고 있다. 후긴장에 의한 보강방법은 구조해석이 비교적 명확하고 그 적용범위가 매우 넓으며 특히, 중·장기간의 교량의 보강에 탁월한 효과를 보이고 있다. 본 연구에서는 외부 긴장된 평면 트러스의 해석과 설계를 위한 일반적인 방법을 개발하는 것뿐만 아니라 부재력 감소측면에서 외부긴장의 잠재력을 제시하려 한다.

2. 강재 프리스트레스의 기본개념

프리스트레스는 강구조물이나 구조부재에 작용하중에 의한 응력과 반대의 응력을 인위적으로 도입시키는 것이다. Fig. 1과 같이 구조물에 재하작용에 의한 응력과 반대방향의 응력을 갖는 프리스트레스 f_0 를 도입하면 재료의 탄성일의 범위는 증가한다.

프리스트레스를 도입하면, 초기응력이 f_0 가 생성되고, 하중 P 가 작용해서 긴장재의 응력은 허용응력 F 에 도달한다.

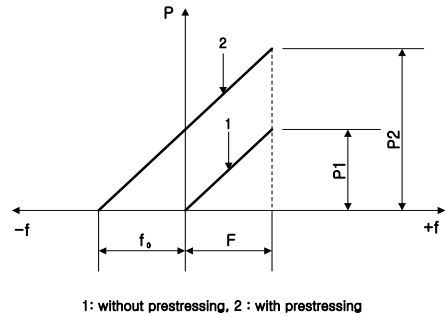


Fig. 1 A Diagram of The Work of A Bar

프리스트레스 긴장재가 지닌 인장력은 프리스트레스를 도입하지 않은 긴장재가 가진 인장력보다 $f_0 \cdot A$ 만큼 더 커진다. 케이블이나 텐드의 가격은 일반 강재보다 2~3배 비싸지만 강도가 4~6배 더 크기 때문에 이러한 형태의 프리스트레스를 적용함으로써, 고강도 재료를 효과적, 경제적으로 구조물에 사용할 수 있다.

3. 후긴장 트러스의 해석

3.1 해석절차

후긴장된 트러스의 해석은 다음과 같이 세 단계로 나눌 수 있다.

1단계 고정하중이 작용할 때

2단계 고정하중과 긴장력이 작용할 때

3단계 활하중, 충격하중, 기타하중이 작용할 때

긴장재의 강성은 3단계에서만 고려되고 최종부재력은 2단계와 3단계를 중첩함으로써 구할 수 있다. 모든 긴장재는 다른 트러스 부재처럼 독립된 부재로 취급된다. 긴장재의 배치형태가 일직선이던 절곡되었던 간에 트러스 부재와 일치할 필요는 없다. 긴장재의 끝단은 트러스 절점에 정착되며 절곡된 긴장재의 경우 도르래와 같은 편향부를 사용하여 각변화를 줄 수 있다.

후긴장효과는 트러스 형태, 긴장재의 배치, 긴장력의 크기의 함수이다. 정정트러스일 경우, 만약 긴장재 배치가 하나 또는 그 이상의 트러스 부재와 일치한다면 긴장력의 영향을 받는 것은 단지 일치하는 트러스

부재들만이다. 부정정트러스일 경우, 긴장재의 배치형상에 상관없이 만약 긴장재가 균부재를 지나면 후긴장에 의해 영향을 받는다. 부재들에 미치는 긴장력의 효과는 트러스 형태, 부재간 연결관계, 긴장재의 배치형태에 따라 다르다.

3.2 후긴장 트러스의 해석방법

후긴장 트러스는 프리스트레스 증가량에 의해 고차의 부정정차수를 갖는 구조물이다. 즉, 단경간 내적 정정 트러스에 긴장력을 도입하면 프리스트레스 증가량에 의해 내적 1차 부정정 구조물이 된다.

본 연구에서는 탄성거동 범위 내에서 후긴장된 트러스 해석을 위한 두 가지 방법을 제시하였다. 이론적 방법으로 하중법의 하나인 변형일치의 방법을 이용하는 것과 수치해석을 위한 혼합법, 즉 하중법과 변위법의 두 방법을 동시에 이용하는 방법이다.

해석을 위한 가정은 다음과 같다.

첫째, 긴장재의 재료는 선형탄성이다.

둘째, 트러스의 전체 치수를 포함하는 모든 계산은 트러스의 원래 치수를 바탕으로 계산된다.

셋째, 긴장재의 축력은 긴장재의 길이에 따라 일정하다. 즉, 긴장재와 긴장재의 경로사이에서의 마찰은 무시한다.

3.2.1 하중법(Method of Consistent Deformations)

부정정구조물의 부정정력을 해석하기 위해 처짐을 직접 이용하는데 트러스의 처짐은 가장 일반적으로 사용되는 가상일의 원리를 이용한다. 사다리꼴 긴장재로 긴장된 트러스의 프리스트레스 증가량의 계산과정은 Fig. 2에서 보여주고 있다. 이러한 트러스 해석을 위해서 Fig. 2(a)에서 긴장재를 제거하면 Fig. 2(b)와 같은 정정트러스로 된다. Fig. 2(a)에서 프리스트레스 증가량을 ΔX 라 하고, 인장력으로 가정한다. 긴장재를 절단하면 Fig. 2(c)의 상태로 될 것이다. 따라서, Fig. 2(b)와 Fig. 2(c)를 중첩한 것은 Fig. 2(a)의 트러스와 등가이다. 그림 Fig. 2(a), (b) 및 (c)의 각 트러스의 절점 A와 B와 C와 D의 상대변위를 각각 Δ , Δ_0 , Δ_1 이라 하면 Δ 는 식(1)과 같다.

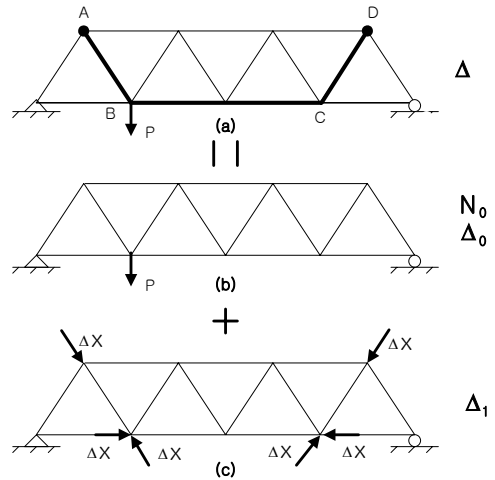


Fig. 2 Method of Consistent Deformation

$$\Delta = \Delta_0 + \Delta_1 \quad (1)$$

미소변형의 가정에 따라 $\Delta=0$ 으로 보면 (1)식은 다음과 같다.

$$\Delta_0 + \Delta_1 = 0 \quad (2)$$

Fig. 2(c)와 같이 절점 A, B, C 와 D에 ΔX 대신 단위하중이 작용할 때 트러스 임의의 부재 i의 부재력을 $F_{i,x=1}$ 라 하면, 이 경우의 A, B, C 와 D의 상대변위 δ_{11} 은 가상일의 원리를 이용하여 식 (3)과 같이 전개할 수 있다.

$$\delta_{11} = \sum_i \frac{F_{i,x=1}^2 l_i}{EA} + \frac{l_t}{E_t A_t} \quad (3)$$

여기서,

E, E_t = 각각 트러스 부재와 긴장재의 탄성계수

A, A_t = 각각 트러스 부재와 긴장재의 단면적

l_i, l_t = 각각 트러스 임의부재와 긴장재의 길이

Fig. 2(c)와 같이 ΔX 가 작용할 때 A, B, C 와 D의 상대변위 Δ_1 는 식 (4)와 같다.

$$\Delta_1 = \delta_{11} \Delta X = \Delta X \left(\sum_1 \frac{F_{i,X=1}^2 l_i}{EA} + \frac{l_t}{E_t A_t} \right) \quad (4)$$

Fig. 2(b)에서 A와 B의 상대변위 Δ_0 는 하중 P가 작용할 때 트리스 임의의 부재 i의 부재력을 $F_{i,tot}$ 이라 하면 식 (5)와 같다.

$$\Delta_0 = \sum_1 \frac{F_{i,X=1} F_{i,tot} \times l_i}{EA} \quad (5)$$

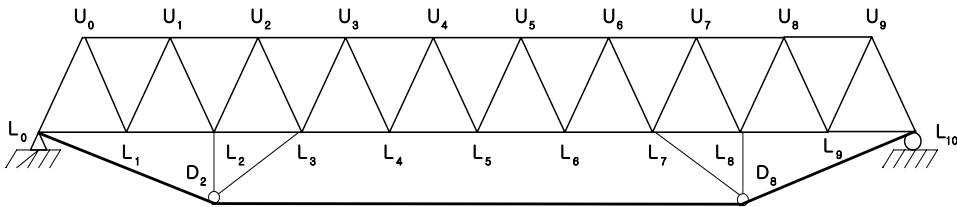
식 (4)와 식 (5)를 식 (2)에 대입하면 마찰을 무시할 경우 사다리꼴 긴장재의 응력 증가량은 식 (6)과 같다.

$$\Delta X = \frac{\sum_1 \frac{F_{i,X=1} F_{i,tot} \times l_i}{EA}}{\sum_1 \frac{F_{i,X=1}^2 l_i}{EA} + \frac{l_t}{E_t A_t}} \quad (6)$$

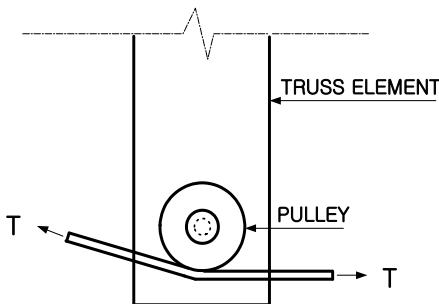
3.2.2 혼합법 (Mixed Method)

이 해석법은 후긴장 트리스교의 해석 프로그램을 개발하기 위하여 사용하였다. 절곡되고 연속된 긴장재를 트리스에 적용할 경우 긴장재는 트리스 끝단에 정착되고 편향부에서의 마찰을 무시하면 편향부에서 긴장재는 자유롭게 이동할 것이다. 즉, Fig. 3(a)에서 보는 것과 같이 정착단 절점에서 긴장재와 트리스의 변위는 일치하나 편향부 절점에서는 긴장재와 트리스의 변위는 일치하지 않게 된다. 그러므로 긴장재와 트리스의 변형에 대한 특별한 적합조건이 필요하다.

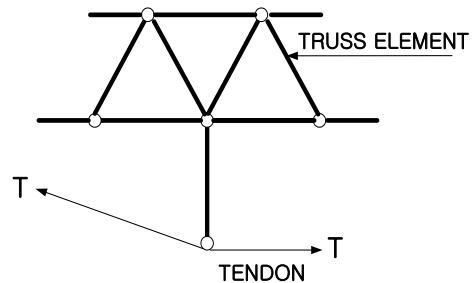
긴장재는 트리스 끝단 하현재의 절점에 부착된 브라켓에 정착되고 트리스 내부의 어느 절점에 부착된 도르래와 같은 편향부에 의해 각변화가 주어진다. Fig. 3(b)는 편향부를 보여주고 있고 Fig. 3(c)는 편향부에서의 긴장재와 트리스 부재의 연결모형을 보여주고 있다.



(a) Model with A Series of Truss Elements



(b) Tendon Saddle



(c) Connection of Tendon and Truss at Saddle

Fig. 3 Model of Posttensioned Truss with Draped Continuous Tendon

Fig. 4는 해석 2단계에서 긴장력을 등가절점력으로 치환 후 트러스 절점에 작용시키고 있는 것을 보여주고 있다. 해석 3단계에서는 긴장재의 강성을 고려해야 하는데 활하중, 추가고정하중이 작용할 때 부정정 역력인 긴장력 증가량을 구하기 위해서는 긴장재와 트러스 거더의 신장량에 관한 적합조건을 구해야 한다. 구하는 과정은 다음과 같다.

첫째, Fig. 5(a)에서 보는 것과 긴장재를 절단함으로써 정정트러스로 변환시킨다.

둘째, 하중작용 후 발생한 절단된 긴장재의 상대변위를 구한다. 계산의 편의를 위하여 Fig. 5(b)와 같이 긴장재가 배치된 절점의 상대변위를 구하여 총합을 구한다.

셋째, 실제 구조물에서 절단된 긴장재의 상대변위는 0이므로 하중발생 후 긴장재 증가량, ΔT 를 상대 변위를 없애기 위하여 절단된 긴장재 양단에 도입한다. 계산을 간단하기 위하여 Fig. 5(c)에서 보는 것 과 같이 긴장재가 배치된 절점에 긴장재 방향으로 적용한다.

Fig. 5로부터 긴장재와 트러스 거더와의 적합방정식은 식 (7)과 같다.

$$\delta_P - \delta_1 \Delta T - \frac{L_t}{E_t A_t} \Delta T = 0$$

$$\Delta T = \frac{\delta_P}{\delta_1 + \frac{L_t}{E_t A_t}} \quad (7)$$

여기서,

ΔT = 활하중 및 추가고정하중 하에서의 프리스트레스 증가량

δ_P = 활하중 및 추가고정하중하에서 긴장재의 신장량

δ_1 = 긴장재를 단위하중으로 긴장하였을 때 발생한 긴장재의 신장량

식 (7)로부터 ΔT 는 δ_P , δ_1 의 처짐의 함수임을 알 수 있는데 이 처짐은 하중법에서 설명한 방법으로 구하지 않고 변위법으로 작성된 해석 프로그램에 의해

서 긴장재가 부착되지 않은 트러스의 해석으로부터 손쉽게 구할 수 있다. 변위법에 의하여 구해지는 해는 절점변위이며 계산된 절점변위로부터 각 요소의 변형 및 부재력을 계산한다. 각각의 긴장재 세그먼트의 신장량 δ_{Pi} 는 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_{Pi} = \sqrt{(L'_{ix})^2 + (L'_{iy})^2} - L_i \quad (8)$$

여기서,

$$L'_{ix} = x_k - x_j + u_j + u_k$$

$$L'_{iy} = y_k - y_j + v_j + v_k$$

L_i = 절점 j와 k사이의 초기 긴장재 길이

L'_{ix} = 변형 후 절점 j와 k 사이의 긴장재 수평 투영길이

L'_{iy} = 변형 후 절점 j와 k 사이의 긴장재 수직 투영길이

x_j, x_k = 각각 절점 j와 k의 초기 수평 좌표

y_j, y_k = 각각 절점 j와 k의 초기 수직 좌표

u_j, u_k = 각각 하중재하 후 절점 j와 k의 수평 변위

v_j, v_k = 각각 하중재하 후 절점 j와 k의 수직 변위

하중재하 후 긴장재의 총신장량은 각 긴장재 세그먼트의 신장량을 더함으로써 구할 수 있다. 즉 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\delta_P = \sum_{i=1}^n \delta_{Pi} \quad (9)$$

여기서,

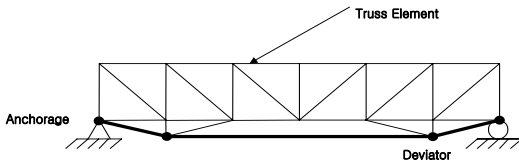
n = 긴장재 세그먼트의 수이다.

이와 유사하게, δ_1 은 식 (10)으로 구할 수 있다.

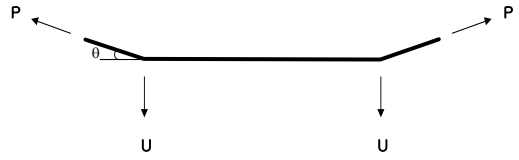
$$\delta_1 = \sum_{i=1}^n \delta_{1i} \quad (10)$$

여기서,

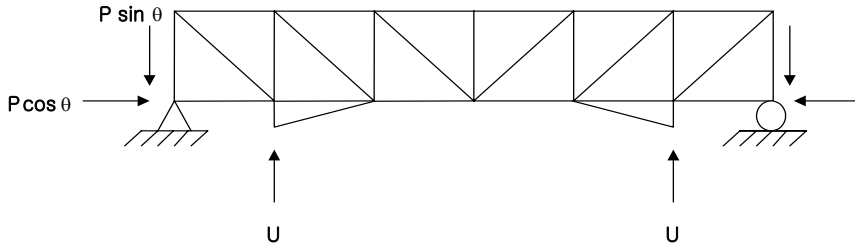
δ_{1i} = 긴장재 세그먼트 i의 양끝 절점에 단위하중을 긴장재 방향으로 도입하였을 때 긴장재 세그먼트 i의 신장량이다.



(a) Postensioned Truss Configuration

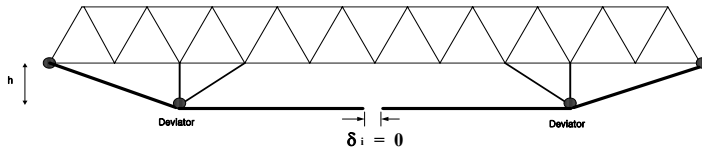


(b) Free Body Diagram of Tendon

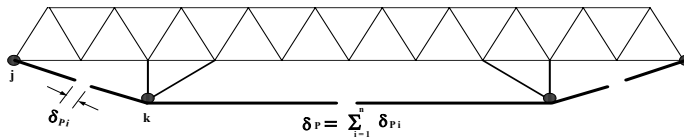


(c) Equivalent Transformed Forces

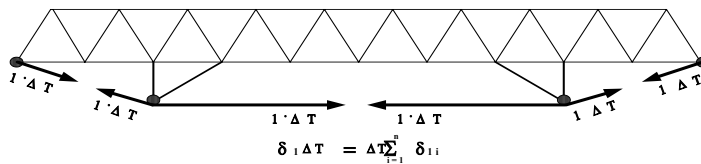
Fig. 4 Model of Truss with Equivalent Transformed Tendon Forces



(a) Cut Bars to Make Conventional Truss



(b) Calculate Elongation Caused by Applied Loads



(c) Close Gap by Applying a Force Increment

Fig. 5 Increase in Tendon Force

후긴장된 트러스의 부재력은 식 (11)로 구할 수 있다. 트러스의 각 부재력을 N_i 이라고 하면

$$N_i = N_{i,0} + u_i \Delta T \quad (11)$$

여기서,

$N_{i,0}$ = 긴장재가 배치되지 않은 트러스에 외부하중이 작용시 임의의 트러스 부재 i 에서 발생한 부재력

u_i = 긴장력을 단위하중으로 주었을 때 임의의 트러스 부재 i 에서 발생한 부재력

4. 매개변수 연구

4.1 해석 모델

본 연구에서는 설계 주요 변수인 프리스트레스력 크

기, 편향부 길이, 긴장재 형상 등이 부재력과 처짐, 프리스트레스 증가량에 끼치는 영향을 평가하는데 있어서 세 가지 형태의 트러스에 적용하였다.

4.1.1 TRUSS TYPE

트러스교량에 가장 보편적으로 쓰이는 Warren Truss, Modified Warren Truss, Pratt Truss를 대상으로 매개변수 연구를 수행하였다. 각각의 트러스 교량은 격간장이 2m이며 총 지간장은 20m로 동일하다.

Table 1은 각 부재의 단면제원을 나타내며, Fig. 6은 긴장재가 정착단에 배치된 단면을 보여주고 있다. 트러스 모델은 Fig. 7과 같으며, 긴장작업은 트러스교가 거치된 후 이루어지는 것으로 가정한다. 하중조건은 Fig. 8과 같고, Fig. 9는 긴장재가 외부에 배치되었을 경우의 트러스 형태를 보여주고 있다.

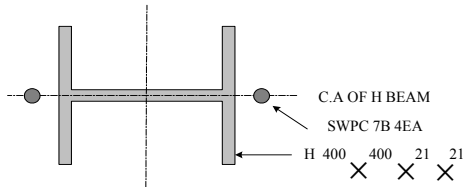


Fig. 6 Cross-Section

Table 1 Section Properties

Member	Type	f_y (kgf/cm ²)	E (kgf/cm ²)	Section-Area (m ²)
Upper	SWS 490Y	3,600	20.4×10 ⁶	7.986×10 ⁻³
Lower	SWS 490Y	3,600	20.4×10 ⁶	7.986×10 ⁻³
Diagonal	SWS 490Y	3,600	20.4×10 ⁶	5.404×10 ⁻³
Tendon	SWPC 4B	16,000	20.0	9.375×10 ⁻⁴

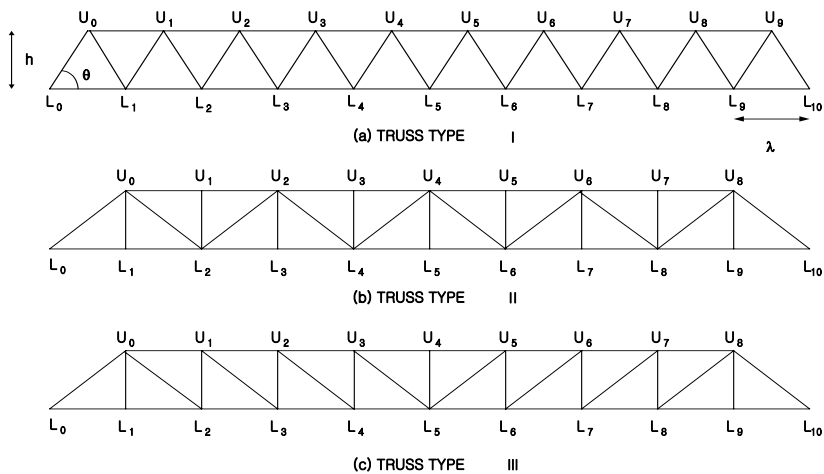


Fig. 7 Truss Model

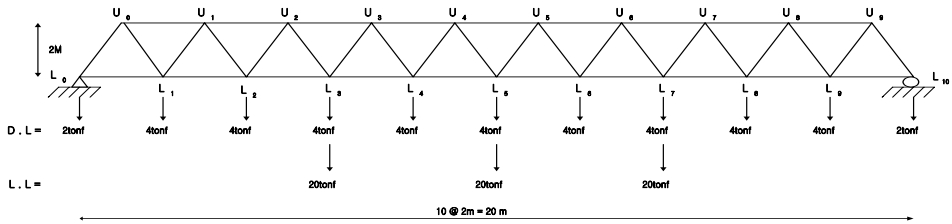


Fig. 8 Load Condition of Statically Determinate Symmetrical Truss

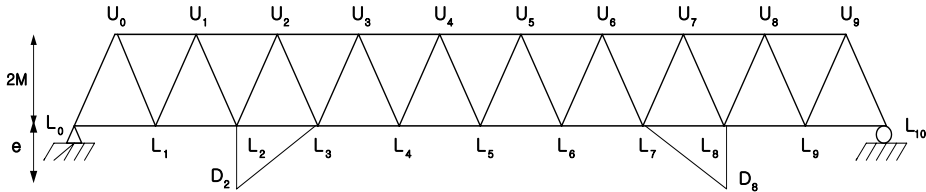


Fig. 9 Statically Determinate Symmetrical Truss Posttensioned by External Two-drape Tendon

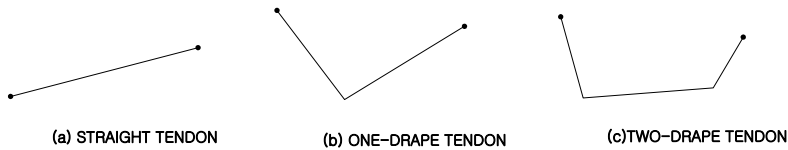


Fig. 10 Tendon Profile

4.2 해석 변수

본 연구에서 수행한 해석 설계변수는 4종류의 긴장재 배치형상, 프리스트레스력의 크기, 편향부 길이 등이며 이 변수들이 트러스 부재력과 처짐, 프리스트레스 증가량에 미치는 영향을 평가하였다. 설계변수는 다음과 같고 이들 설계변수의 요약은 Table 2에 나타내었다.

4.2.1 TENDON PROFILE

본 연구에서는 Fig. 10처럼 세 가지 종류의 긴장재 배치를 다루었다. 절곡되어진 형태에 따라 Straight Tendon, One-drape Tendon, Two-drape Tendon 이라고 칭한다. 또한 외부 배치된 긴장재의 경우 External

Tendon이라 하겠다. 절곡되어진 강연선의 배치는 트러스 절점에 편향부를 둬으로써 각변화를 줄 수가 있다.

세 가지 형태의 트러스 교량에 대하여 후긴장을 적용하여 보강효과를 검토하였다. 우선 첫번째 경우는 정정 트러스 교량 내부에 긴장재가 배치되었을 때이고 두번째는 트러스 교량 외부에 긴장재가 배치되었을 때이다. 트러스 외부에 긴장재가 배치된 경우 편향길이 h 를 0.6m, 0.9m, 1.2m로 고정하였다. Straight Tendon 경우 각각의 Truss Type에 대해 양 끝단, 즉 절점 L_0, L_{10} 에서 정착된다.

One-drape Tendon은 Straight Tendon과 마찬가지로 L_0, L_{10} 에서 정착되어지고, 절점 L_5 의 편향부를 지나게 된다고 가정한다.

Table 2 Summary of Design Variables

Design Variables	Amount	Value
Truss Type	3	Warren, Modified Warren, Pratt
Tendon Profile	6	Straight, One-drape, Two-drape, Ex-drape(0.6), Ex-drape(0.9), Ex-drape(1.2)
Prestress Force	125	From 0 to 124 tonf per 1tonf
Eccentricity	21	From 0 to 2m per 0.1m
Fixed Values		Span, Height of Truss, Tendon Area

Two-drape Tendon은 절점 L_0 , L_{10} 에서 정착되어 지고 L_3 , L_7 에서의 편향부를 지나게 된다고 가정한다. External Tendon도 마찬가지로 절점 L_0 , L_{10} 에서 정착되어지고 D_2 , D_8 의 편향부를 지나게 된다.

4.2.2 PRESTRESS FORCE

프리스트레스력의 크기를 0에서부터 긴장재의 허용 응력($0.7f_t=124\text{tonf}$)[DIN 4117]까지 증가시키며 트러스 부재력과 처짐에 미치는 영향을 규명하였다. 다른 설계변수 즉, 지간길이, 정착부와 편향부의 위치는 일정하다고 가정한다.

4.2.3 ECCENTRICITY

긴장재가 트러스 외부에 배치되었을 때 하현재로부터의 편심길이가 트러스부재력과 지간 중앙지점에서의 처짐, 프리스트레스 증가량에 미치는 영향을 검토하였다. 긴장재가 트러스 외부에 배치되었을 땐 보강공법 뿐만 아니라 새로운 트러스에 적용될 수 있다. 또한 약 25~30%의 강재를 절약할 수 있다. 그러나 이러한 외부 긴장재 배치는 트러스 형상이나 형하공간 등의 제약으로 항상 이용되지는 않는다. 편심길이는 0에서부터 트러스의 형고높이까지 변화시켰으며 TRUSS TYPE III에 대해서 Two-drape Tendon을 사용하였다. 편향부 수직재의 안정성을 확보하기 위하여 Fig. 9와 같이 브레이싱을 두었다.

4.3 해석 결과

4.3.1 Tendon Profile의 효과

긴장재가 트러스에 배치된 형태는 예로 TRUSS TYPE I에 배치된 모습을 Fig. 11에서 보여주고 있다.

긴장재 배치 형상에 따른 효과를 보기 위해 동일한 도입 긴장력과 동일한 하중조건하에서 해석을 수행하였다. 긴장력의 크기는 60tonf을 주었으며 이는 긴장재 항복강도의 40%이다.

Fig. 12와 Fig. 13은 각각 긴장재 배치 형상 변화에 따른 최대 인장력과 최대 압축력의 감소효과를 보여주고 있다. Fig. 14와 Fig. 15는 각각 긴장재 배치 형상에 따른 지간 중앙부에서의 처짐과 프리스트레스 증가량을 보여주고 있다.

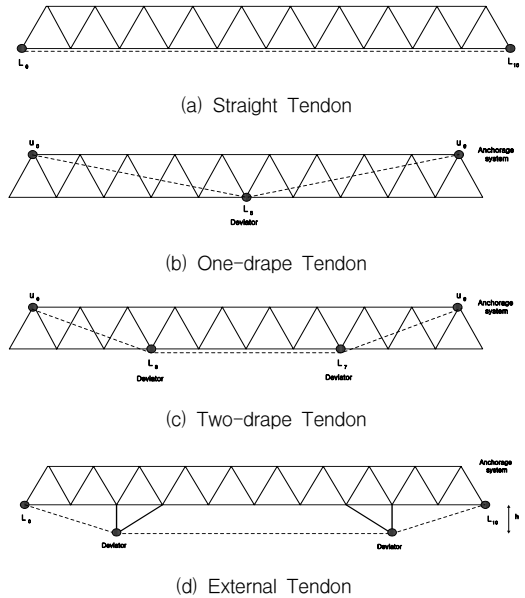


Fig. 11 Posttensioning of Truss One Using Different Tendon Layouts

최대인장력과 최대압축력의 감소는 각각 $(TMAX-P)/TMAX$ 와 $(CMAX-P)/CMAX$ 로 나타내었다. 여기서, TMAX와 CMAX는 사용하중하에서 각각 외부 후긴장되지 않은 트러스에서 발생하는 최대인장력과 최대압축력이고, P는 초기 긴장력 60tonf이다. 단, 프리스트레스력의 손실은 없다고 가정한다.

처짐은 δ/δ_0 와 같은 무차원 식으로 표현하였다. 여기서, δ_0 는 긴장재가 배치되지 않은 사용하중하에서의 트러스의 처짐량이고, δ 는 사용하중하에서의 후긴장된 트러스의 처짐량이다. 해석결과는 긴장재가 내부에 배치되었을 경우와 외부에 배치되었을 경우로 두 가지로 나누어 비교하였다. 긴장재가 내부에 배치되었을 경우를 Internal Tendon으로 명하고 외부에 배치되었을 경우를 External Tendon으로 명한다.

Internal Tendon

Fig. 12에서 보는 것과 같이 가장 인장력 감소효과가 큰 배치는 평균 56%의 감소효과로 Straight Tendon임을 알 수 있다. 두 번째는 TRUSS TYPE I, III에서는 Two-drape Tendon이며 TRUSS TYPE II에서는 One-drape Tendon임을 알 수 있다.

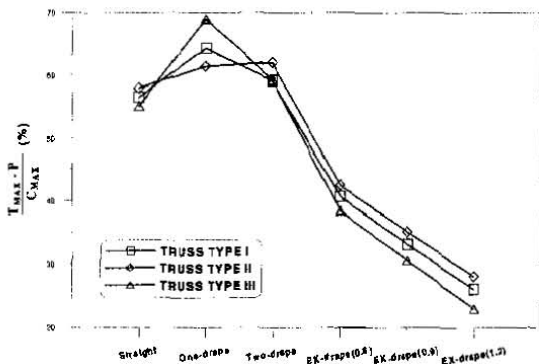


Fig. 12 Reduction in Max Tension Force versus Tendon Profile

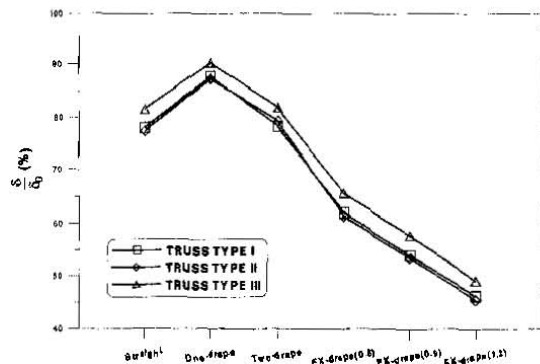


Fig. 14 Reduction in Deflection at Midspan versus Tendon Profile

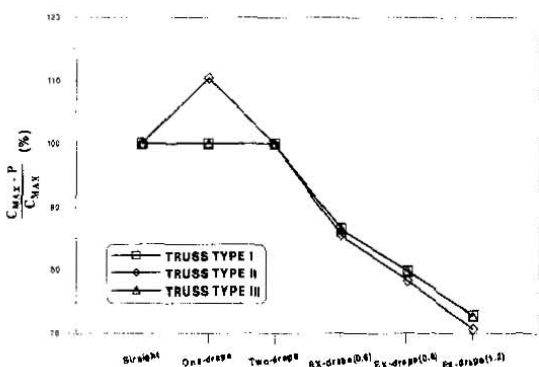


Fig. 13 Reduction in Max Compression Force versus Tendon Profile

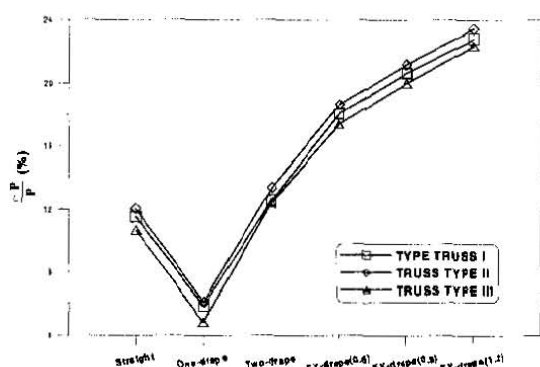


Fig. 15 Increase in Tendon Force versus Tendon Profile

최대 압축력 감소효과에서는 Fig. 13에서 보는 것과 같이 TRUSS TYPE II에서의 One-drape Tendon 경우를 제외하고는 아무런 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. TRUSS TYPE II에서의 One-drape Tendon은 10.7%의 압축력 증가효과 나타나 부적절한 긴장재 배치형상임을 알 수 있다.

Fig. 14에서 보는 것과 같이 각 트러스 형태에서 Two-drape Tendon, Straight Tendon, One-drape Tendon 순으로 처짐 감소효과가 큼을 알 수 있고 Two-drape Tendon과 Straight Tendon은 그 차이가 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

프리스트레스 증가량은 Fig. 15에서 보는 것과 같이 Two-drape Tendon, Straight Tendon, One-drape Tendon 순으로 프리스트레스 증가량이 큼을 알 수 있으나 처짐 감소효과와 같이 Two-drape Tendon과 Straight Tendon은 그 차이가 크지 않다. 즉, 프리스트레스 증가량은 처짐의 직접적인 변수임을 알 수 있다.

External Tendon

Fig. 12에서 보는 것과 같이 가장 인장력 감소효과가 큰 배치는 편향부 길이가 가장 긴 Ex-drape(1.2)임을 알 수가 있다. TRUSS TYPE I, II, III의 각각의 경우에 대해서 73.9%, 71.9%, 76.8%의 감소효과 나타났으며 이는 Internal Tendon의 경우 가장 감소효과가 큰 배치인 Straight Tendon 보다 대략 1.7배 감소효과가 있음을 알 수 있다.

최대 압축력 감소효과에서는 Fig. 13에서 보는 것과 같이 Internal Tendon과 달리 모든 트러스 형태에 감소효과가 있음을 알 수 있다. 인장력 감소효과와 마찬가지로 편향부 길이가 가장 긴 Ex-drape(1.2)가 가장 감소량이 컸다.

Fig. 14와 Fig. 15에서 보는 것과 같이 각 트러스 형태에서 편향부 길이가 길수록 프리스트레스 증가량도 컸으며 처짐 감소효과도 큼을 알 수 있다.

4.3.2 Prestress Force의 효과

프리스트레스력의 크기 효과를 보기 위하여 프리스트레스력의 크기를 0에서부터 허용긴장력인 124tonf 까지 긴장하였다. 각 트러스 형태별로 나누어 프리스트레스 크기 효과를 판명하였다.

TRUSS TYPE I

Fig. 16에 보인 것과 같이 긴장채단이 배치되고 프리스트레스력이 0일 때 Straight, One-drape, Two-drape, Ex-drape(0.6), Ex-drape(0.9), Ex-drape(1.2) 순으로 각각 4.5%, 1.8%, 4.6%, 9%, 11.43%, 13.9%의 최대 인장력 감소효과가 나타났다. 이는 부정정 여력인 프리스트레스 증가량 때문에 긴장채가 위에 나타낸 만큼의 활하중을 분담함을 나타내고 있다. 최대 인장력 감소효과는 One-drape, Two-drape, Straight, Ex-drape(0.6), Ex-drape(0.9), Ex-drape(1.2)순으로 감소되는 기울기가 급해짐을 알 수 있다. 즉, 프리스트레스 크기가 증가할수록 위에 열거한 순으로 감소폭은 비례적으로 커짐을 알 수 있다.

긴장채 배치형상에 따른 효과에서 보았듯이 Internal Tendon은 TRUSS TYPE I에서는 압축력 감소가 없음을 알 수 있었다. Fig. 17은 External Tendon의 압축력 효과를 보여주고 있다. 편향부가 긴 경우일수록 감소기울기가 급해짐을 알 수 있다.

Fig. 18은 프리스트레스력 증가에 따른 처짐의 감소를 보여주고 있다. 프리스트레스력이 증가함에 따라 처짐은 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 처짐의 감소는 Two-drape Tendon에서 최대 43.5%, Ex-drape(1.2)의 경우 처짐이 발생하지 않음을 알 수 있다. P=0일 때 즉, 긴장력이 도입되지 않았을 경우에도 처짐이 감소하는데 이는 긴장채의 강성 때문이다. 그러나 긴장채로 인한 트러스 거더의 강성변화는 크지 않으므로 처짐의 감소는 주로 프리스트레싱으로 인한 캠버에 기인한 것으로 판단된다

TRUSS TYPE II

Fig. 19에서 보는 것과 TRUSS TYPE I과 II와는 약간 다름을 알 수 있다. 즉, 최대 인장력 감소효과는

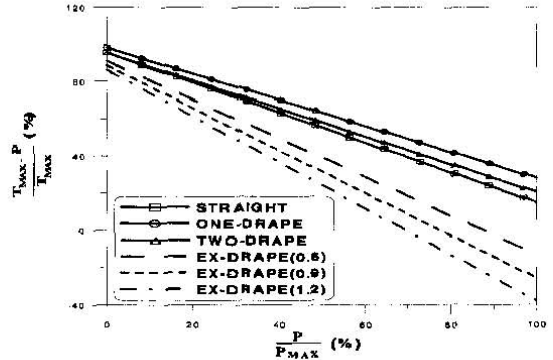


Fig. 16 Reduction in Max Tension Force versus Prestress Force (TYPE I)

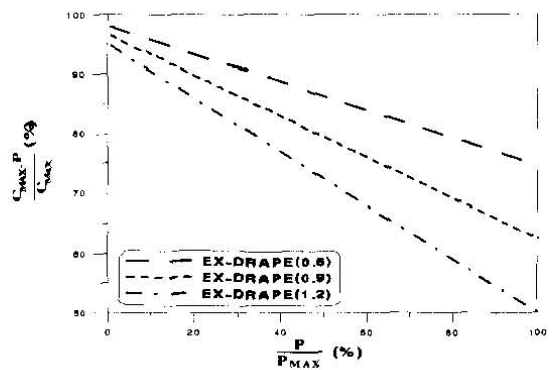


Fig. 17 Reduction in Max Compression Force versus Prestress Force (TYPE I)

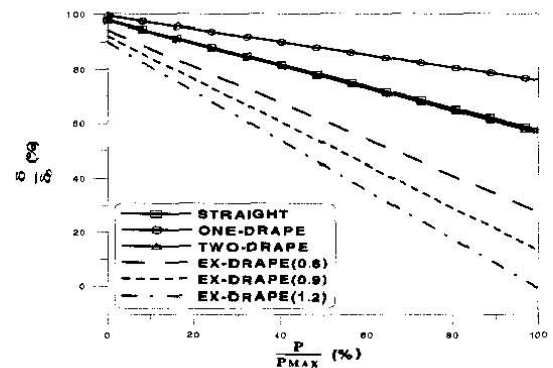


Fig. 18 Reduction in Deflection at Midspan versus Prestress Force (TYPE I)

Two-drape, One-drape, Straight, Ex-drape(0.6), Ex-drape(0.9), Ex-drape(1.2)순으로 감소되는 기울기가 급해짐을 알 수 있다. 활하중으로 인한 프리스트레스 증가량은 Two-drape Tendon이 One-drape Tendon 보다 큼으로 허용긴장력 30%까지는 Two-drape

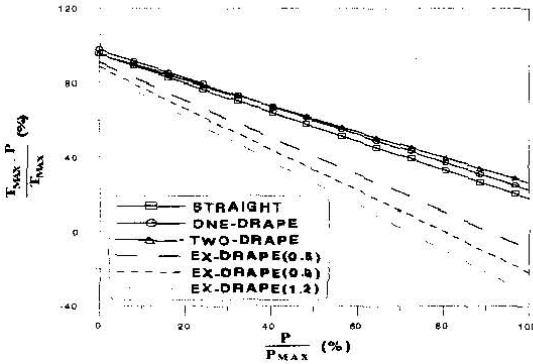


Fig. 19 Reduction in Max Tension Force versus Prestress Force (TYPE II)

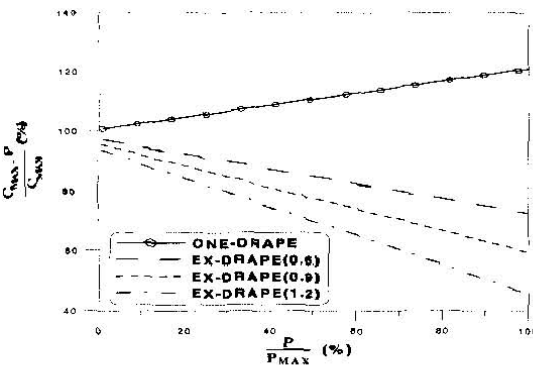


Fig. 20 Reduction in Max Compression Force versus Prestress Force (TYPE II)

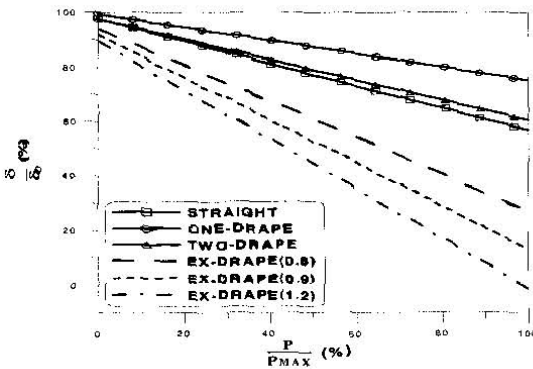


Fig. 21 Reduction in Deflection at Midspan versus Prestress Force (TYPE II)

Tendon이 감소효과가 크나, 감소되는 기울기가 급한 One-drape Tendon이 프리스트레스력 크기가 증가할수록 Two-drape Tendon보다 최대 4.5% 더 감소효과가 있음을 알 수 있다. 그러나 최대압축력 감소효

과면에서 보면 Straight, Two-drape Tendon 경우 TRUSS TYPE I과 마찬가지로 압축력 감소가 없으나 One-drape Tendon 경우 비례적으로 21%까지 증가하는 역효과가 나타남을 알 수 있다. 처짐의 경우 TRUSS TYPE I과 유사함을 알 수 있다. 처짐의 감소는 Straight Tendon에서 최대 43.3%, Ex-drape(1.2)의 경우 1.2%의 솟음이 생겼다.

TRUSS TYPE III

Fig. 22에서 보는 것과 같이 최대 인장력 감소효과는 TRUSS TYPE I과 유사하게 One-drape, Two-drape, Straight, Ex-drape(0.6), Ex-drape(0.9), Ex-drape(1.2) 순으로 감소되는 기울기가 급해짐을 알 수 있다. 그러므로 프리스트레스 크기가 증가할수록 위에 열거한 순으로 감소폭은 비례적으로 커짐을 알 수가 있다.

최대압축력 감소효과면에서 보면 TRUSS TYPE II와 마찬가지로 Straight, Two-drape Tendon 경우 압축력 감소가 없으나 One-drape Tendon 경우 비례적으로 증가하나 최대 0.2%의 경미한 증가만을 보이고 있다. 처짐 감소면에서 보면 TRUSS TYPE I과 경향은 비슷하나 앞의 두 트러스 형태보다 처짐 감소가 적음을 알 수 있다. 처짐의 감소는 최대 Straight Tendon에서 35.8%, Ex-drape(1.2)의 경우 85.7% 감소하였다.

4.3.3 편향부 길이의 효과

하현재로부터의 편향부 길이를 증가시킴으로써 최대 인장력과 최대압축력, 처짐과 프리스트레스 증가량에 미치는 영향을 규명하였으며 부정적 여력인 프리스트레스 증가량과 처짐의 상관관계를 알아보았다. 편향부 길이는 e/h 의 무차원 형태로 표시하였다. 여기서, e 는 하현재로부터 편향부까지의 길이이고, h 는 트러스의 형고높이이다. 초기 긴장력은 60tonf로 모든 경우에 일정하게 긴장하였다. Fig. 25, Fig. 26은 편향부 길이에 따른 최대 인장력과 최대압축력의 감소효과를 보여준다. 인장력 감소효과는 편향부 길이가 0일 때 즉, Straight Tendon일 경우 45%의 감소효과 나타났다. 편향부 길이가 증가함에 따라 비례적으로 감소하며 편향부의 길이가 트러스 형고높이와 같을 때 94.1%의 감소효과가 나타났다.

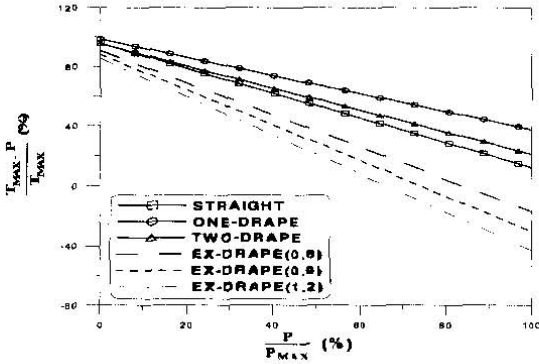


Fig. 22 Reduction in Max Tension Force versus Prestress Force (TYPE III)

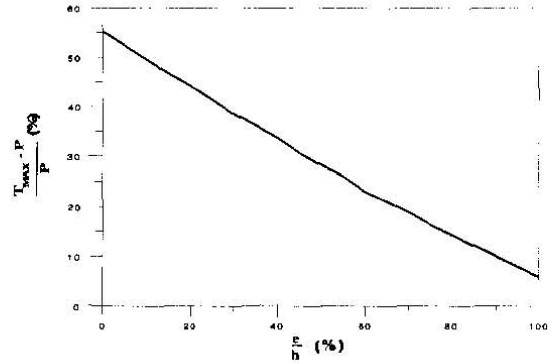


Fig. 25 Reduction in Max Tension Force versus Eccentricity

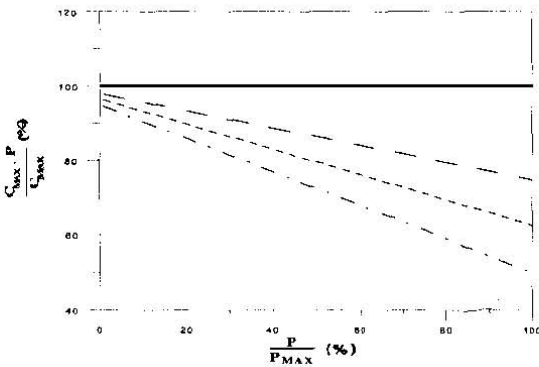


Fig. 23 Reduction in Max Compression Force versus Prestress Force (TYPE III)

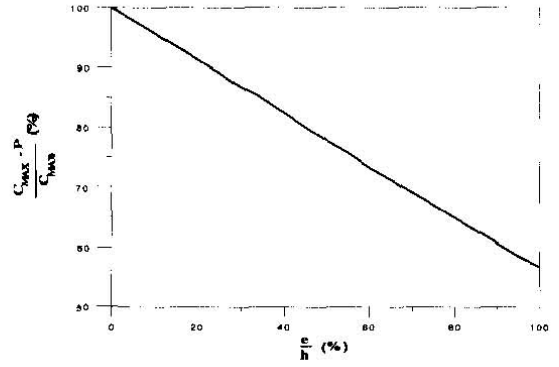


Fig. 26 Reduction in Max Compression Force versus Eccentricity

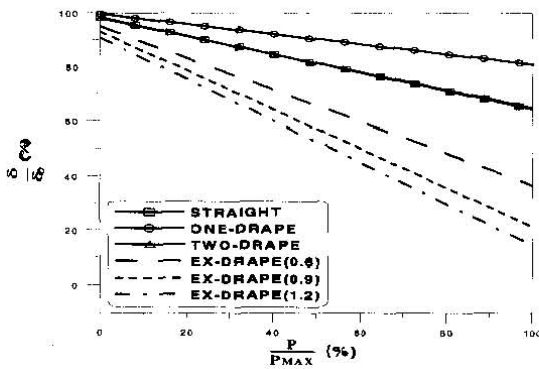


Fig. 24 Reduction in Deflection at Midspan versus Prestress Force (TYPE III)

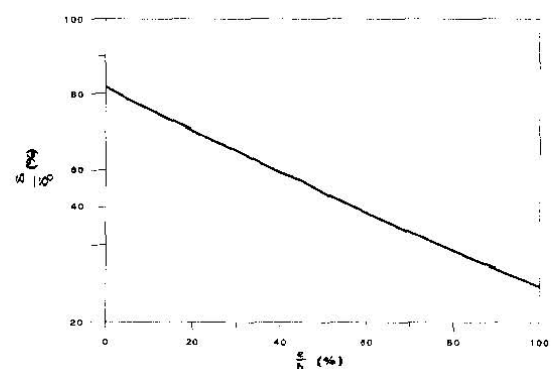


Fig. 27 Reduction in Deflection at Midspan versus Eccentricity

최대압축력의 경우 Straight Tendon 경우 감소 효과가 없었으나 인장력감소와 같이 편향부길이가 증가함에 따라 비례적으로 감소하여 $e/h = 100$ 일 경우 43.3%의 감소효과가 있었다.

Fig 27은 편향부 길이가 증가함에 따라 처짐도 감소함을 알 수 있다. 처짐감소는 최대 23.2%까지 감소되었다. 편향길이가 0일 때와 비교하여 $e/h=100$ 일 경우 부재력 감소면에서 최대인장력의 경우 49.1%,

최대압축력의 경우 43.3%가 더 감소되었고 처짐은 23.3%정도 감소 되었다.

Fig. 28은 편향부길이와 프리스트레스 증가량의 관계를 보여주고 있다. 편향부길이가 증가함에 따라 ΔP 는 증가하나 ΔP 의 증가율은 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 8의 하중조건하에서 $e/h = 100$ 일 때 프리스트레스 증가량은 허용긴장력의 26.5%까지 증가함을 알 수 있다.

프리스트레스 증가량은 외부 활하중 조건과 트러스 기하적 형상에 따른 함수이므로 설계 시 초기 긴장력 산정시 항상 고려되어야 한다.

Fig. 29는 External Tendon의 경우 프리스트레스력 증가량과 활하중 재하 시 처짐의 상호관계를 보여주고 있다. Fig. 29에서 볼 수 있듯이 부정정 여력인 프리스트레스력 증가량은 처짐에 직접적인 영향을 주는 변수임을 알 수 있다. 프리스트레스 증가량이 증가할수록 처짐의 양은 감소하지만 감소율은 프리스트레스 증가량이 증가할수록 약간 감소함을 알 수 있다.

여기서 처짐은 δ/δ_0 와 같은 무차원 식으로 표현하였다. δ_0 는 긴장재가 배치되지 않은 활하중에서의 트러스의 처짐량이고, δ 는 활하중하에서의 후 긴장된 트러스의 처짐량이다.

5. 결 론

본 연구에서는 후긴장된 트러스의 일반적인 해석모델을 제시하였고 이론적으로 강연선을 이용하여 트러스를 후긴장하는 공법의 효율성을 보여주었다. 후긴장된 트러스고의 선형해석을 위해서 두 가지 방법을 제시하였다. 우선 변형일치의 방법을 이용하여 이론적 해법을 제시하였고 수치해석을 위해 하중법과 변위법을 혼용한 혼합법을 제시하였다. 혼합법에 의한 해석 프로그램은 이론적 해법과 잘 일치하였다.

개발된 프로그램을 사용하여 긴장재 배치형상, 프리스트레스력의 크기, 편향부 길이 등의 설계변수가 후긴장된 트러스의 거동, 즉, 부재력, 처짐, 프리스트레스 증가량 등에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한 실제 실험을 통해 후긴장 트러스의 효율성을 평가하였다.

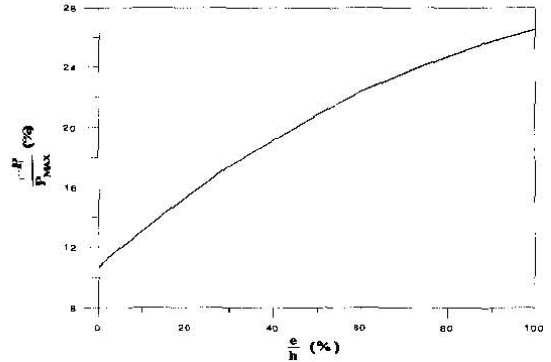


Fig. 28 Increase in Tendon Force versus Eccentricity

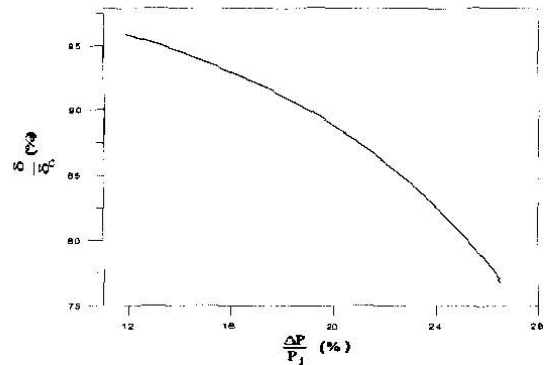


Fig. 29 The Relationship of Deflection at Midspan and Increase in Tendon Force

매개변수 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 후긴장된 트러스의 선형해석 결과, 프리스트레스력의 도입은 내하력을 증가시키며 캠버를 발생시키고 처짐을 감소시킴을 알 수 있었다.
- 2) 긴장재가 트러스 내부에 배치된 경우 트러스의 인장부재에서만 부재력 감소 효과가 있었다. 특히 삼각형 긴장재 형태는 Modified Warren 트러스의 경우에는 압축력을 증가시키는 악영향을 주고 있다. 즉 트러스 형태, 긴장재의 배치형상, 긴장력이 부재력 감소면에서 주요 설계변수임을 알 수 있었다.
- 3) 긴장재가 트러스 외부에 배치된 경우 트러스의 인장부재뿐만 아니라 압축부재의 부재력 감소 효과가 있었다. 특히 편향길이가 길수록 부재력 감소효과가 큼을 알 수 있었다. 즉, 트러스 외부에 긴장재가 배치된 경우 3)에서 언급한 변수뿐만 아니라 편향길이가 부재력 감소에 큰 영향을 줌을 알 수 있었다.

- 4) 본 연구 결과 트러스 내부에 배치되는 Internal Tendon보다 External Tendon이 더 효율적 긴장재 배치형상임을 알 수 있었고 편향부 길이가 증가할수록 선형적으로 부재력과 처짐이 감소함을 알 수 있었다. Internal Tendon의 경우 트러스 압축부재의 부재력 감소가 없었거나 오히려 증가되었으며 External Tendon의 경우 인장부재뿐만 아니라 압축부재의 부재력 감소효과도 있었다 그러므로 새로운 교량건설 시 적용시킴으로써 단면 감소 효과를 얻을 수 있다고 판단된다.
- 5) 단경간의 트러스 경우, 트러스 형태따라 약간의 차이는 있었으나 긴장재 배치형상, 프리스트레스크기, 편향부 길이 변화에 따른 거동특성은 유사하였다. 또한 프리스트레스 증가량은 외부 활하중 조건과 트러스의 기하적 형상에 큰 영향을 받으므로 긴장력 산정시 반드시 고려되어야 한다.

본 연구에서는 후긴장된 트러스교의 일반적인 해석 기법과 설계방법을 제시하였고 설계변수에 따른 거동특성을 고찰하였다. 연구결과 트러스에 프리스트레스를 도입함으로써 부재력과 처짐 등에서 상당한 감소효과를 볼 수 있으므로 트러스교 보강공법으로써 효율적인 공법임을 알 수 있었다. 더 나아가 후긴장 트러스교의 정확한 역학적 거동특성을 파악하기 위해서는 프리스트레스 손실과 압축부재의 좌굴, 피로에 관한 연구와 더불어 긴장재 정착을 위한 정착브라켓과 편향부, 긴장재의 방식 등 추가 연구가 필요하다고 사료된다.

참고문헌

1. Brodka, J., and Klobukowski, J., *Prestressed Steel Constructions*, Wilhelm Ernst und Sohm, Berlin, 1969.
2. Bilal M. A., Ahmed I., and David S., "Posttensioned truss: Analysis and Design," *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol 116, No. 6, pp. 1491-1506, 1990.
3. Federal Highway Admin., "Highway bridge replacement and rehabilitation program," Bridge Div., Office of Engrg., Washington, D.C. 1986.
4. Mollmann, H., "Analysis of plane prestressed cable structures, *J. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 96, No. ST10, pp. 2059-2082, 1970.
5. Rao, P. S. and Mathew, G., "Behavior of Externally Prestressed Concrete Beams with Multiple Deviators," *Structural Journal* ACI, V. 93, No.4, pp. 7-8, 1996.
6. Shantong, Z., *Prestressed steel structures*, Harbin Polytechnical Inc., China, pp. 144-169, 1986.
7. Speransky, B. A., *Prestressed Metal Trusses*, Edition of Literature on Construction, Moscow, pp. 88-95, 1970.
8. Tong, W., and Saadatmanesh, H., "Parametric study of continuous prestressed composite girders," *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol 118, No. 1, pp. 186-206, 1992.
9. Troitsky, M. S., *Prestressed steel bridges*, Van Nostrand Co., New York, 1990.
10. Troitsky, M. S., Zielinski, Z. A., and Rabbani, N. F., "Prestressing force increment of two-span steel girder," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 18, pp. 163-170, 1991.
11. Weaver, W., Jr., and Gere, J. M., *Matrix analysis of framed structures*, 2nd Ed. Van Nostrand Co., New York, N.Y. 1980.

(접수일자 : 2002년 11월 18일)