

# 직선배치된 외부 긴장재로 보강된 2경간 강합성교의 증가 프리스트레스력을 고려한 내하율 산정식을 이용한 보강설계

Strengthening Design Using Rating Factor Considering Increment of Tendon Force for Two-Span Steel-concrete Composite Bridges Strengthened by Straight External Tendons

최 동 호\*      유 훈\*\*      김 용 식\*\*\*      김 성 원\*\*\*\*  
Choi, Dong-Ho      Yoo, Hoon      Kim, Yong-Sik      Kim, Sung-Won

## Abstract

In this paper, a method of increasing in load-carrying capacity is shown in two-span steel-concrete composite bridges strengthened by external tendons. An analytic expression for the increment of tendon force under external loads is derived using virtual work method for straight external tendons and a new rating factor equation is proposed. Considering the initial tendon force and its increment under external loads, an analytic procedure has been developed to calculate the number of tendons and the initial tendon force from the proposed rating factor equation. This method is used to verify a validity and rationality for an existing two-span composite steel-concrete bridge.

## 요 지

본 논문에서는 2경간 강합성교량의 내하력을 향상시키기 위해, 외부 긴장재로 보강하는 방법을 제시하였다. 긴장재를 직선 배치하였을 경우, 외부하중으로 인한 증가 프리스트레스력을 가상일의 원리로 구하였고, 증가 프리스트레스를 고려한 내하율 산정식을 제시하였다. 제안된 내하율 산정식으로부터, 긴장재 개수와 초기 긴장력의 계산방법을 제시하였다. 본 방법을 2경간 강합성교량에 적용하여, 산정식의 타당성과 합리성을 검증하였다.

**Keywords :** External tendon, Initial tendon force, Increment of tendon force, Rating factor

**핵심 용어 :** 외부 긴장재, 초기 긴장력, 증가 프리스트레스력, 내하율

\* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수

\*\* 한양대학교 토목공학과 박사후 과정

\*\*\* 한양대학교 토목공학과 박사 과정

\*\*\*\* 한양대학교 토목공학과 석사 과정

E-mail : samga@hanyang.ac.kr 02-2220-0328

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2009년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

과거에 건설된 교량 구조물은 교통량의 증가, 교통 하중의 증량화, 공용기간 증대, 환경적 요인 등에 의해 현행 교통량에 대한 설계에 부적당하거나 내하력의 감소로 인해 보수·보강이 필요한 실정이다. 기존 교량의 성능향상을 위한 보강공법 중에서, 외부 강선에 긴장력을 도입한 외부 후 긴장 공법은 실용성과 경제성에 있어서 효율적이다. 외부 긴장 공법과 관련된 국외 연구로써, Saadatmanesh 등(1989 a, b, c)은 외부 긴장재로 보강된 강합성보의 정모멘트 구간과 부모멘트 구간의 거동에 대해 탄성 및 소성 해석방법을 제시하였으며, 실험 결과와 비교·분석하여 해석적 연구 결과의 합리성을 보였다.

Tong과 Saadatmanesh(1992)는 외부 긴장재로 보강된 연속 강합성교의 탄성해석에 대한 일반적인 해석모델을 제안하였으며, 긴장력, 편심거리, 긴장재 배치형상, 긴장재 설치길이의 설계변수 효과에 대해 분석하여 연속 강합성보의 거동을 분석하였고, 기존 교량에 대한 보강설계 예를 통해 보강효과를 검토하였다. Klaiber 등(1998)은 2개의 연속교량에 대해 긴장재의 배치를 달리하여 현장실험을 하였고, 외부 긴장 보강에 따른 긴장력의 종방향 및 횡분배 영향을 분석하여 부모멘트 구간의 응력 감소효과를 검토하였다.

기존 강합성교의 효과적인 보강공법의 하나로써, 외부 후 긴장 공법이 국내에서 주목받고 있으며, 다음과 같은 연구가 국내에서 진행되었다. 류형근 등(2003)은 보에 외부 프리스트레스를 도입할 경우, 외부 하중에 의해 외부강선에 추가 프리스트레스가 발생하게 되는데 특히 합성보의 경우, 슬래브와 거더 사이에 발생하는 상대슬립으로 인해, 더 많은 추가 프리스트레스가 발생할 것으로 예상되어, 상대슬립에 의한 추가 프리스트레스의 발생을 검토하였고, 외부 프리스트레스

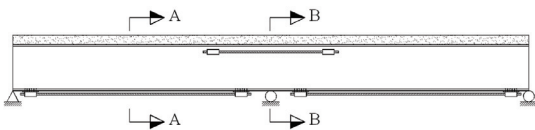


Fig. 1 직선 배치된 외부 긴장재로 보강된 2경간 강합성보

강합성 교량의 장기거동을 해석하기 위해, 증가 프리스트레스 및 외부 긴장재에 의해 프리스트레스를 도입한 합성보의 시간 의존적 구조 특성을 고려한 장기 거동 해석법을 제안하였다. 최동호 등(2005)은 증가 프리스트레스를 고려한 내하율 산정식을 제안하였으며, 제안된 내하율 산정식을 이용하여 기존 단경간 강합성교량의 긴장재를 강주형 하부에 설치하여 제안된 산정식을 이용한 초기 긴장력 및 긴장재 개수를 결정하는 방법을 제시하였다. 또한 최동호 등(2006)은 2경간 강합성교량의 경간 중앙부 하단에 긴장재를 설치하여 초기 긴장력 및 긴장재를 결정하는 방법을 제시하였으며, 정모멘트 뿐 아니라 부모멘트도 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 이 논문에서는 증가 프리스트레스를 고려하지 않은 내하율 산정식을 이용하였다.

Choi 등(2008)은 직선배치와 절곡배치된 외부 긴장재로 보강된 단경간 강합성교량의 증가 프리스트레스를 실험을 통하여 검증하고 이를 바탕으로 초기 긴장력을 결정하는 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 외부 긴장재로 보강된 2경간 연속 강합성교량의 내하력을 향상시키기 위해 긴장재를 직선 배치하고 3가지 배치 형상에 대하여 외부 긴장력 도입에 따른 각 형상별 모멘트를 정식화 하였으며, 이를 증가 프리스트레스를 고려한 내하율 산정식에 대입하여 보강 후 목표 내하율을 만족시킬 수 있는 초기 긴장력과 긴장재 개수의 결정 과정을 제시하였다. 또한 이 과정을 실교량에 적용하여 보강설계 과정의 합리성을 보였다.

## 2. 외부 긴장재로 보강된 2경간 강합성보의 응력분포

외부 긴장재로 보강된 2경간 강합성보는 Fig. 1과 같은 형상을 갖는다. 본 절에서는 Fig. 1의 단면 A-A와 같은 경간 중앙부와 단면 B-B와 같은 내부 지점부의 응력분포에 대해 기술하였다.

### 2.1 경간 중앙부

Fig. 2에 외부 긴장재로 보강된 2경간 강합성보의

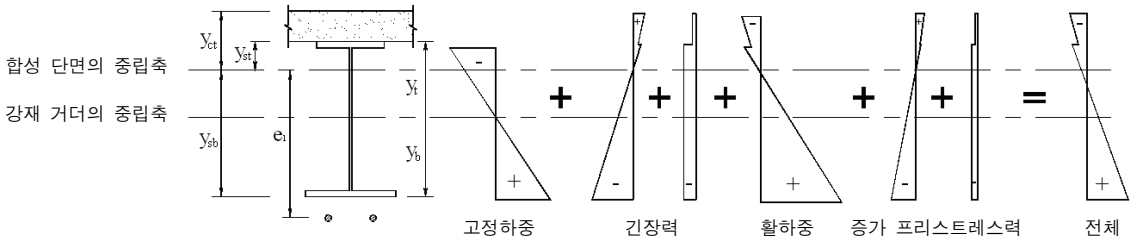


Fig. 2 외부 긴장재로 보강된 2경간 강합성보의 경간 중앙부 단면 응력분포

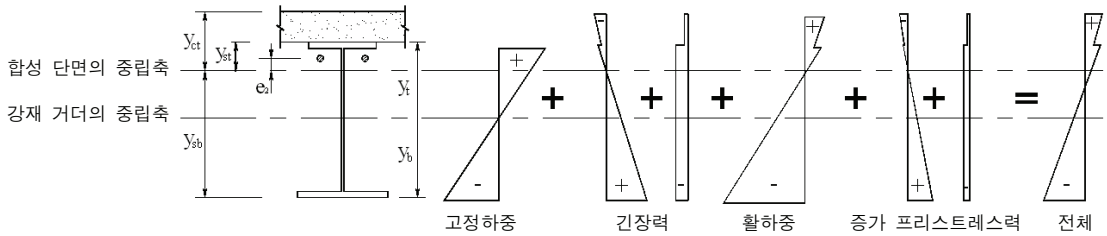


Fig. 3 외부 긴장재로 보강된 2경간 강합성보의 내부 지점부 단면 응력분포

경간 중앙부 단면 응력분포를 나타내었다. 강재 거더 및 바닥판의 자중에 의해 발생하는 모멘트  $M_{DL}$ 에 의해서 합성보의 거더 상연에는 압축응력( $-\frac{M_{DL}}{I_s} y_t$ )이 발생하고, 하연에는 인장응력( $-\frac{M_{DL}}{I_s} y_b$ )이 발생한다. 그리고 긴장재에 인장 긴장력  $T$ 를 도입하면 보의 단면에는  $T$ 와 부모멘트  $M_T$ 에 의해서 단면 전체에 압축응력( $-\frac{T}{A_{cp}}$ )이 발생하고, 바닥판 상연 및 거더 상연에는 인장응력( $-\frac{M_T}{I_{cp}} y_{ct}$ ,  $-\frac{M_T}{I_{cp}} y_{st}$ ), 거더 하연에는 압축응력( $-\frac{M_T}{I_{cp}} y_{sb}$ )이 발생한다. 그리고 활하중 재하시, 경간에 발생하는 모멘트  $M_{LL}$ 에 의해서 합성보의 바닥판 상연 및 거더 상연에는 압축응력( $-\frac{M_{LL}}{I_{cp}} y_{ct}$ ,  $-\frac{M_{LL}}{I_{cp}} y_{st}$ ), 거더 하연에는 인장응력( $-\frac{M_{LL}}{I_{cp}} y_{sb}$ )이 발생한다. 그리고 활하중 재하에 따른 긴장재의 변형으로 인해, 긴장재에 인장 증가 프리스트레스력  $\Delta T$ 가 발생하여, 거더 전체 단면에는

압축응력( $-\frac{\Delta T}{A_{cp}}$ )이 발생하고, 바닥판 상연 및 거더 상연에는 인장응력( $-\frac{M_{\Delta T}}{I_{cp}} y_{ct}$ ,  $-\frac{M_{\Delta T}}{I_{cp}} y_{st}$ ), 거더 하연에는 압축응력( $-\frac{M_{\Delta T}}{I_{cp}} y_{sb}$ )이 추가적으로 발생한다.

따라서, 외부 긴장재에 인장 긴장력  $T$ 가 도입된 강합성보에 활하중이 작용할 때, 경간 중앙부 단면에서 바닥판 상연과 거더 상, 하연의 응력  $f_c^t$ ,  $f_s^t$ ,  $f_s^b$ 는 식(1), (2), (3)과 같다.

$$f_c^t = \frac{1}{n} \left( -\frac{T}{A_{cp}} - \frac{M_T}{I_{cp}} y_{ct} - \frac{M_{LL}}{I_{cp}} y_{ct} - \frac{\Delta T}{A_{cp}} - \frac{M_{\Delta T}}{I_{cp}} y_{ct} \right) \quad (1)$$

$$f_s^t = -\frac{M_{DL}}{I_s} y_t - \frac{T}{A_{cp}} - \frac{M_T}{I_{cp}} y_{st} - \frac{M_{LL}}{I_{cp}} y_{st} - \frac{\Delta T}{A_{cp}} - \frac{M_{\Delta T}}{I_{cp}} y_{st} \quad (2)$$

$$f_s^b = -\frac{M_{DL}}{I_s} y_b - \frac{T}{A_{cp}} - \frac{M_{T1}}{I_{cp}} y_{sb} - \frac{M_{LL}}{I_{cp}} y_{sb} - \frac{\Delta T}{A_{cp}} - \frac{M_{\Delta T1}}{I_{cp}} y_{sb} \quad (3)$$

여기서,  $n$ 은 탄성계수비 ( $= E_s/E_c$ ),  $M_{DL}$ 은 고정하중에 의한 모멘트,  $M_{LL}$ 은 활하중에 의한 모멘트,  $T$ 는 긴장재의 긴장력,  $\Delta T$ 는 활하중에 의해 발생하는 긴장재의 증가 프리스트레스력,  $I_{cp}$ 는 합성보의 단면 2차 모멘트,  $I_s$ 는 강재 거더의 단면 2차 모멘트,  $A_{cp}$ 는 합성보의 환산 단면적,  $M_{T1}$ 는 긴장재의 긴장력에 의한 모멘트,  $M_{\Delta T1}$ 는 활하중에 의해 발생하는 긴장재의 증가 프리스트레스력에 의한 모멘트,  $e_1$ 은 합성보의 중립축으로부터 긴장재까지의 거리,  $y_{ct}$ 는 합성보의 중립축으로부터 콘크리트 상단까지의 거리,  $y_{st}$ 는 합성보의 중립축으로부터 상부 플랜지 상단까지의 거리,  $y_{sb}$ 는 합성보의 중립축으로부터 하부 플랜지 하단까지의 거리,  $y_t$ 는 강주형의 중립축으로부터 상부 플랜지 상단까지의 거리,  $y_b$ 는 강주형의 중립축으로부터 하부 플랜지 하단까지의 거리이다. 식(1)-(3)에 사용된 긴장력과 증가 프리스트레스력은 양의 값으로 하고, 중립축으로부터의 거리를 표시하는 변수들의 부호는 중립축을 기준으로 상연은 양의 값이고, 하연은 음의 값이다.

## 2.2 내부 지점부

외부 긴장재로 보강된 2경간 강합성보의 내부 지점부 단면 응력분포는 Fig. 3과 같으며, 외부 긴장재에 인장 긴장력이 도입된 강합성보에 활하중이 작용할 때, 내부 지점부 단면에서 바닥판 상연과 거더 상, 하연의 응력  $f_c^t$ ,  $f_s^t$ ,  $f_s^b$ 는 식(4), (5), (6)과 같다.

$$f_c^t = \frac{1}{n} \left( -\frac{T}{A_{cp}} - \frac{M_{T2}}{I_{cp}} y_{ct} - \frac{M_{LL}}{I_{cp}} y_{ct} - \frac{\Delta T}{A_{cp}} - \frac{M_{\Delta T2}}{I_{cp}} y_{ct} \right) \quad (4)$$

$$f_s^t = -\frac{M_{DL}}{I_s} y_t - \frac{T}{A_{cp}} - \frac{M_{T2}}{I_{cp}} y_{st} - \frac{M_{LL}}{I_{cp}} y_{st} - \frac{\Delta T}{A_{cp}} - \frac{M_{\Delta T2}}{I_{cp}} y_{st} \quad (5)$$

$$f_s^b = -\frac{M_{DL}}{I_s} y_b - \frac{T}{A_{cp}} - \frac{M_{T2}}{I_{cp}} y_{sb} - \frac{M_{LL}}{I_{cp}} y_{sb} - \frac{\Delta T}{A_{cp}} - \frac{M_{\Delta T2}}{I_{cp}} y_{sb} \quad (6)$$

여기서,  $M_{T2}$ 는 긴장재의 긴장력에 의한 모멘트,  $M_{\Delta T2}$ 는 활하중에 의해 발생하는 긴장재의 증가 프리스트레스력에 의한 모멘트,  $e_2$ 는 합성보의 중립축으로부터 긴장재까지의 거리이다.

## 2.3 증가 프리스트레스력( $\Delta T$ )의 계산방법

2경간 강합성보에 설치된 긴장재의 증가 프리스트레스력을 구하기 위해 가상일의 원리를 이용하여 계산하였으며 그 방법은 다음과 같다.

우선 내부 지점에 의한 부정정력과 긴장재에 도입되는 긴장력에 의해 2차 부정정 구조인 연속보를 가상일의 원리와 변위일치법을 적용하여 계산하기 위해 연보 속보를 Fig. 4와 같이 내부 지점이 없는 단순보로 가정하고, 연속보에 설치된 긴장재가 경간의 중앙부에서 잘려 있으며, 절단면 사이의 거리는 0인 것으로 가정한다.

Fig. 4(a)에서 연속보의 내부 지점에 단위 하중 ( $X_1=1$ )을 재하하였을 때 연속보의 처짐량  $\delta_{11}$ 과 긴장재의 절단면 사이의 변위  $\delta_{12}$ 를 계산한다. Fig. 4(b)에서 긴장재에 단위 증가 프리스트레스력( $X_2=1$ )을 도입했을 때 연속보의 처짐량  $\delta_{21}$ 과 긴장재의 절단면 사이의 변위  $\delta_{22}$ 를 계산한다.

Fig. 4(a)와 4(b)의 상태를 동시에 고려하면, 내부지점부의 변위합  $\delta_{11} + \delta_{21} = 0$ 이 되어야 하며, 긴장재의 절단면 간의 변위합  $\delta_{12} + \delta_{22} = 0$ 이 되어야 한다.

Fig. 4(c)에서 활하중 작용에 의해 연속보의 처짐량  $\Delta_{1L}$ 과 긴장재의 절단면 사이의 변위  $\Delta_{2L}$ 을 구한

후, Fig. 4(a), 4(b), 4(c)를 동시에 고려하여 변위 일치법으로 식(7), (8)과 같이 나타내어, 내부지점의 반력  $X_1$  및 긴장재의 증가 프리스트레스력  $X_2$  ( $= \Delta T$ )를 구할 수 있다.

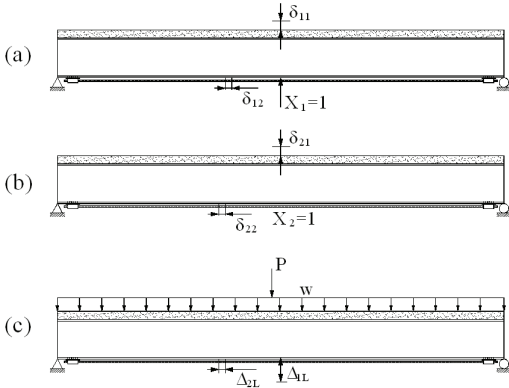


Fig. 4 단위 긴장력과 단위 지점반력에 의해 발생하는 모멘트에 의한 합성보와 긴장재의 변위

$$\delta_{11}X_1 + \delta_{21}X_2 + \Delta_{1L} = 0 \quad (7)$$

$$\delta_{12}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2L} = 0 \quad (8)$$

여기서,  $\delta_{11}$ 과  $\delta_{12}$ 는 내부지점의 가상력  $X_1=1$ 을 작용시킨 경우의 합성보 내부지점 변위와 긴장재 변위,  $\delta_{21}$ 과  $\delta_{22}$ 는 긴장재의 가상력  $X_2=1$ 을 작용시킨 경우의 합성보 중간지점 변위와 긴장재 변위,  $\Delta_{1L}$ 과  $\Delta_{2L}$ 은 활하중에 의해 생기는 내부지점 변위와 긴장재 변위이다. 식(7), (8)의 단위성분은 다음과 같다.

$$\delta_{11} = \int \frac{M_1^2}{E_s I_{cp}} dx \quad (9)$$

$$\delta_{12} = \int \frac{M_1 M_2}{E_s I_{cp}} dx \quad (10)$$

$$\delta_{22} = \int \frac{M_2^2}{E_s I_{cp}} dx + \int \frac{N_{2B}^2}{E_s A_{cp}} dx + \int \frac{N_{2Z}^2}{E_t A_t} dx \quad (11)$$

$$\Delta_{1L} = \int \frac{M_1 M_w}{E_s I_{cp}} dx \quad (12)$$

$$\Delta_{2L} = \int \frac{M_2 M_w}{E_s I_{cp}} dx \quad (13)$$

여기서,  $M_w$ 는 정정계의 활하중에 의한 합성보 휨모멘트,  $M_1$ 은 가상력  $X_1=1$ 이 작용했을 경우의 합성보 휨모멘트,  $M_2$ 는 가상력  $X_2=1$ 이 작용했을 경우의 긴장재에 의해 발생하는 휨모멘트,  $N_{2B}$ 는 가상력  $X_2=1$ 이 작용했을 경우의 합성보 축력,  $N_{2Z}$ 는 가상력  $X_2=1$ 이 작용했을 경우의 긴장재 축력,  $E_s$ 는 강재의 탄성계수,  $E_t$ 는 긴장재의 탄성계수,  $A_t$ 는 긴장재의 단면적이다.

상반정리에 의해  $\delta_{12} = \delta_{21}$ 이므로 식(7), (8)에 이를 고려하여 풀면,  $X_1$ ,  $X_2$ 는 식(14), (15)로 구할 수 있다.

$$X_1 = \frac{\Delta_{1L} \delta_{22} - \Delta_{2L} \delta_{12}}{\delta_{12}^2 - \delta_{11} \delta_{22}} \quad (14)$$

$$X_2 = \frac{\Delta_{2L} \delta_{11} - \Delta_{1L} \delta_{12}}{\delta_{12}^2 - \delta_{11} \delta_{22}} \quad (15)$$

### 3. 내하율 산정방법

일반적으로 공용중인 교량에 대한 보강의 경우 내하력을 향상시키고자 이루어지는 경우가 대부분이다. 외부 긴장재로 보강된 강합성 교량의 내하율(Rating Factor)은 식(16)과 같이 나타낼 수 있다. (Saadatmanesh, 1989c)

$$RF = \frac{f_a - (f_{DL} + f_T)}{f_{LL}(1+i)} \quad (16)$$

여기서,  $f_a$ 는 부재의 허용응력,  $f_{DL}$ 은 고정하중에 의한 부재의 응력,  $f_T$ 는 긴장력 도입에 의한 부재의 응력,  $f_{LL}$ 은 활하중에 의한 부재의 응력,  $i$ 는 충격계수 ( $15/(40 + \text{경간장})$ )이다.

일반적으로  $f_{DL}$ 과  $f_T$ 는 반대의 부호를 갖도록 긴장재를 배치하므로 식(16)에서 긴장력에 의한 응력은 내하율을 증가시키게 된다.

합성보에 활하중 작용시, 긴장재에는 증가 프리스트레스력( $\Delta T$ )이 발생하며,  $\Delta T$ 는 보에 증가 프리스

트레스력에 의해 응력 ( $f_{\Delta T}$ )을 발생시킨다. 이것을 고려하면 식(16)의 내하율 산정식에서  $f_{LL}(1+i)$ 는  $(f_{LL} + f_{\Delta T})(1+i)$ 로 표현할 수 있다.

따라서, 외부 긴장재로 보강된 강합성 교량에서 증가프리스트레스력을 고려한 내하율 산정식은 식(17)과 같이 나타낼 수 있다. (최동호 등, 2005)

$$RF = \frac{f_a - (f_{DL} + f_T)}{(f_{LL} + f_{\Delta T})(1+i)} \quad (17)$$

#### 4. 초기 긴장력을 고려한 내하율 산정식

본 절에서는 교량의 내하력을 향상시키기 위하여, 외부 긴장재로 보강할 경우, 식(17)의 내하율 산정식을 이용하여 초기 긴장력을 결정하는 방법 및 과정을 제시하였다. 본 연구에서는 2경간 연속 강합성보에 외부 긴장재를 이용하여 내하력을 향상시키기 위해, 긴장력을 도입하는 경우 초기 긴장력은 정·부 모멘트 각 구간에 대해 필요한 긴장력을 계산한 후 더 큰 값을 초기 긴장력으로 결정한다. 그러나 초기 긴장력 도입에 의해 콘크리트 슬래브의 인장응력이 콘크리트 허용 휨 인장응력을 넘지 않아야 한다.

##### 4.1 직선배치 형상 1

2경간 강합성보를 보강하기 위해 긴장재를 정모멘트 구간에 배치하였으며 이 형상을 직선배치 형상 1이라고 하고, Fig. 5에 나타내었다.

초기 긴장력은 식(17)의 내하율 산정식을 이용하여 구할 수 있으며, 그 방법은 다음과 같다. 목표 내하율을  $RF$ 라 하고 정리하면 식(18)과 같다.

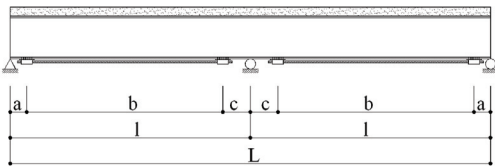


Fig. 5 2경간 강합성보의 긴장재 직선배치 형상 1

$$f_T + RF \cdot f_{\Delta T_{LL}}(1+i) = f_a - f_{DL} - RF \cdot f_{LL}(1+i) \quad (18)$$

경간 중앙부 구간에 필요한 긴장력은 식(18)을 이용하여 긴장재의 긴장력 및 증가 프리스트레스력에 따른 거더 하연 응력으로 표시되는 식(19)에 의하여 구해진다.

$$\begin{aligned} & \left( -\frac{T}{A_{cp}} - \frac{M_{T1}}{I_{cp}} y_{sb} \right) \\ & + RF \cdot (1+i) \left( -\frac{\Delta T}{A_{cp}} - \frac{M_{\Delta T1}}{I_{cp}} y_{sb} \right) \\ & = f_a - f_{DL} - RF \cdot f_{LL}(1+i) \end{aligned} \quad (19)$$

여기서,  $M_{T1}$ 은 정모멘트 구간에 외부 긴장재를 설치하고 긴장력을 도입하였을 때, 정모멘트 구간에 발생하는 모멘트,  $M_{\Delta T1}$ 은 활하중에 의해 발생하는 증가프리스트레스력에 의해 정모멘트 구간에 발생하는 모멘트이며 식(20)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} a \leq x \leq a+b \quad M_{T1} &= \left( -\frac{12e_1 b(2a+b)x}{L^3} + e_1 \right) T \\ M_{\Delta T1} &= \left( -\frac{12e_1 b(2a+b)x}{L^3} + e_1 \right) \Delta T \end{aligned} \quad (20)$$

식(20)을 식(19)에 대입한 후, 긴장재의 긴장력에 대한 식으로 정리하면 식(21)과 같다.

$$\begin{aligned} T + RF \cdot \Delta T(1+i) &= \frac{RF \cdot f_{LL}(1+i) - f_a + f_{DL}}{\frac{1}{A_{cp}} + \left( -\frac{12e_1 b(2a+b)x}{L^3} + e_1 \right) \frac{y_{sb}}{I_{cp}}} \end{aligned} \quad (21)$$

경간 중앙부 구간에 설치된 긴장재의 긴장력은 내부 지점부의 바닥판 상연 응력에 대해 식(18)을 적용하면 식(22)로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} -\frac{M_{T2}}{nI_{cp}} y_{ct} - RF \cdot (1+i) \frac{M_{\Delta T2}}{nI_{cp}} y_{ct} \\ = f_a - f_{DL} - RF \cdot f_{LL}(1+i) \end{aligned} \quad (22)$$

여기서,  $M_{T2}$ 는 정모멘트 구간에 외부 긴장재를 설치하고 긴장력을 도입하였을 때, 부모멘트 구간에 발생하는 모멘트,  $M_{\Delta T2}$ 는 활하중에 의해 발생하는 증가 프리스트레스력에 의해 부모멘트 구간에 발생하는 모멘트이며, 식(23)과 같이 표현된다.

$$a + b \leq x < l \quad M_{T2} = \left( -\frac{12e_1 b(2a+b)x}{L^3} \right) T$$

$$M_{\Delta T2} = \left( -\frac{12e_1 b(2a+b)x}{L^3} \right) \Delta T \quad (23)$$

식(23)을 식(22)에 대입한 후, 긴장재의 긴장력에 대한 식으로 정리하면, 식(24)와 같다.

$$T + RF \cdot \Delta T(1+i)$$

$$= \frac{RF \cdot f_{LL}(1+i) - f_a + f_{DL}}{-\frac{12e_1 b(2a+b)x}{L^3} - \frac{y_{ct}}{nI_{cp}}} \quad (24)$$

식(21)에 의해 구해진 경간 중앙부 구간에 필요한 긴장력과, 식(24)에 의해 구해진 내부 지점부 구간에 필요한 긴장력 중에서 큰 값을 초기 긴장력으로 결정한다. 긴장력의 제한조건으로써, 긴장력 도입에 의해 발생하는 경간 중앙부 콘크리트 상부 슬래브의 인장응력은 콘크리트의 허용 휨 인장응력( $0.07f_{ck}$ )보다 작아야 하며, 이 때의 응력식은 식(25)와 같으며, 긴장력과 증가 프리스트레스력에 대한 항으로 정리하여 나타내면 식(26)과 같다.

$$\frac{1}{n} \left( -\frac{T}{A_{cp}} - \frac{M_{T1}}{I_{cp}} y_{ct} - \frac{\Delta T}{A_{cp}} - \frac{M_{\Delta T1}}{I_{cp}} y_{ct} \right) < 0.07f_{ck} \quad (25)$$

$$T + \Delta T < \frac{n(0.07f_{ck})}{-\frac{1}{A_{cp}} - \left( -\frac{12e_1 b(2a+b)x}{L^3} + e_1 \right) \frac{y_{ct}}{I_{cp}}} \quad (26)$$

#### 4.2 직선배치 형상 2

2경간 강합성보를 보강하기 위해 긴장재를 내부 지

점부 부모멘트 구간에 배치하였으며 이 형상을 직선배치 형상 2라고 하고, Fig. 6에 나타내었다.

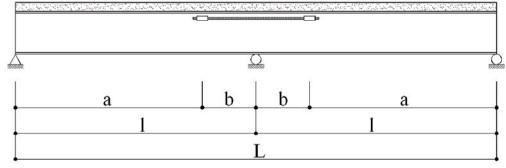


Fig. 6 2경간 강합성보의 긴장재 직선배치 형상 2

내부 지점부 구간에 설치된 긴장재의 긴장력은 경간 중앙부의 거더 하연 응력에 대해 식(18)을 적용하면 식(27)로 구할 수 있다.

$$-\frac{M_{T1}}{I_{cp}} y_{sb} - RF \cdot (1+i) \frac{M_{\Delta T1}}{I_{cp}} y_{sb}$$

$$= f_a - f_{DL} - RF \cdot f_{LL}(1+i) \quad (27)$$

여기서,  $M_{T1}$ 은 정모멘트 구간에 외부 긴장재를 설치하고 긴장력을 도입하였을 때, 정모멘트 구간에 발생하는 모멘트,  $M_{\Delta T1}$ 은 활하중에 의해 발생하는 증가 프리스트레스력에 의한 정모멘트 구간에 발생하는 모멘트이며, 식(28)과 같이 표현된다.

$$0 < x \leq a \quad M_{T1} = \left( -\frac{12e_2 b(2l-b)x}{L^3} \right) T$$

$$M_{\Delta T1} = \left( -\frac{12e_2 b(2l-b)x}{L^3} \right) \Delta T \quad (28)$$

식(28)을 식(27)에 대입한 후, 긴장재의 긴장력에 대한 식으로 정리하면 식(29)과 같다.

$$T + RF \cdot \Delta T(1+i)$$

$$= \frac{RF \cdot f_{LL}(1+i) - f_a + f_{DL}}{-\frac{12e_2 b(2l-b)x}{L^3} - \frac{y_{sb}}{I_{cp}}} \quad (29)$$

내부 지점부 구간에 필요한 긴장력 산정의 경우, 식(18)을 이용하여 긴장재의 긴장력 및 증가 프리스트

레스력에 따른 바닥판 상연 응력으로 표시하면 식 (30)과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{n} \left( -\frac{T}{A_{cp}} - \frac{M_{T2}}{I_{cp}} y_{ct} \right) \\ & + RF \cdot (1+i) \frac{1}{n} \left( -\frac{\Delta T}{A_{cp}} - \frac{M_{\Delta T2}}{I_{cp}} y_{ct} \right) \\ & = f_a - f_{DL} - RF \cdot f_{LL}(1+i) \end{aligned} \quad (30)$$

여기서,  $M_{T2}$ 는 부모멘트 구간에 외부 긴장재를 설치하고 긴장력을 도입하였을 때, 부모멘트 구간에 발생하는 모멘트,  $M_{\Delta T2}$ 는 활하중에 의해 발생하는 증가 프리스트레스력에 의해 부모멘트 구간에 발생하는 모멘트이며, 식(31)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} a \leq x \leq l \quad M_{T2} &= - \left( \frac{12e_2 b(b-2l)x}{L^3} - e_2 \right) T \\ M_{\Delta T2} &= - \left( \frac{12e_2 b(b-2l)x}{L^3} - e_2 \right) \Delta T \end{aligned} \quad (31)$$

식(31)을 식(30)에 대입한 후, 긴장재의 긴장력에 대한 식으로 정리하면, 식(32)와 같다.

$$\begin{aligned} T + RF \cdot \Delta T(1+i) \\ = \frac{RF \cdot f_{LL}(1+i) - f_a + f_{DL}}{\frac{1}{nA_{cp}} - \left( \frac{12e_2 b(b-2l)x}{L^3} - e_2 \right) \frac{y_{ct}}{nI_{cp}}} \end{aligned} \quad (32)$$

### 4.3 직선배치 형상 3

2경간 강합성보를 보강하기 위해 긴장재를 정모멘트 구간과 부모멘트 구간에 배치하였으며 이 형상을 직선배치 형상 3이라고 하고, Fig. 7에 나타내었다.

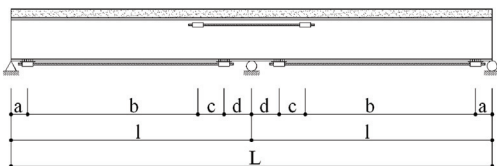


Fig. 7 2경간 강합성보의 긴장재 직선배치 형상 3

경간 중앙부와 내부 지점부에 긴장재 배치시, 두 긴장재가 같은 긴장력  $T$ 를 갖는 초기 긴장력에 의한 각 구간의 모멘트는 식(33), (34)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} a \leq x \leq a+b \quad M_{T1} &= -(Ax - e_1)T \\ M_{\Delta T1} &= -(Ax - e_1)\Delta T \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} l-d \leq x \leq l \quad M_{T2} &= -(Ax - e_2)T \\ M_{\Delta T2} &= -(Ax - e_2)\Delta T \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } A &= \frac{12}{L^3} \left[ e_1(b+c)(2l-b-c-2d) \right. \\ & \left. + e_2(c+d)(2l-c-d) \right] \end{aligned}$$

식(33)과 식(34)를 식(19)와 식(30)에 대입하면, 경간 중앙부 거더 하연 응력에 대한 식(35)와 바닥판 상연 응력에 대한 식(36)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T + RF \cdot \Delta T(1+i) \\ = \frac{RF \cdot f_{LL}(1+i) - f_a + f_{DL}}{\frac{1}{A_{cp}} - (Ax - e_1) \frac{y_{sb}}{I_{cp}}} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} T + RF \cdot \Delta T(1+i) \\ = \frac{RF \cdot f_{LL}(1+i) - f_a + f_{DL}}{\frac{1}{nA_{cp}} - (Ax - e_2) \frac{y_{ct}}{nI_{cp}}} \end{aligned} \quad (36)$$

### 4.4 긴장재의 긴장력 결정

필요한 긴장재의 개수  $N_t$ 는 배치 형상별로 결정된  $T + RF\Delta T(1+i)$ 을 사용하여 식(37)로 계산하여 구할 수 있다.

$$N_t = \frac{T + RF\Delta T(1+i)}{\phi_t F_u} \quad (37)$$

여기서,  $\phi_t$ 는 도입 긴장력의 계수로 0.4~0.6을 사용하며,  $F_u$ 는 긴장재의 인장하중이다. 긴장재의 개수는



편심을 고려하여, 식(37)에서 구해진 값 이상인 짝수로 가정하도록 한다. 긴장재의 단면적  $A_t$ 는 '긴장재 한개의 단면적×긴장재의 개수'의 식으로 구한다. 정해진  $A_t$ 를 사용하여 2.3절에 서술된 방법대로 증가 프리스트레스력  $\Delta T$ 를 구한다.  $\Delta T$ 를 사용하여 배치 형상으로 유도된 식(예, 배치형상 1은 식(21), 식(24); 배치형상 2는 식(29), 식(32); 배치형상 3은 식(35), 식(36))을 사용하여 긴장력  $T$ 를 구한다. 구해진  $T$ 를 사용하여 식(38)로 긴장재의 개수  $N_t$ 를 구한다.

$$N_t = \frac{T}{\phi_t F_u} \quad (38)$$

만일 식(38)에 의해 정해진 긴장재의 개수가 이전 단계인 식(37)에 의해 정해진 긴장재의 개수보다 적어지는 경우, 증가 프리스트레스력  $\Delta T$ 가 변하기 때문에 식(38)에 의해 정해진 긴장재의 단면으로 증가 프리스트레스력을 다시 계산한 후, 긴장력  $T$ 를 다시 계산하여 식(38)에 대입하여 긴장재의 개수를 결정한다. 이러한 과정을 긴장력  $T$ 가 수렴할 때까지 반복한다. 한편, 긴장재 1개당 도입되는 초기 긴장력은 결정된  $T$ 를 긴장재의 개수로 나누어 계산할 수 있다.

## 5. 보강설계 예

### 5.1 대상교량의 제원

외부 긴장재로 보강할 대상교량은 단면이 Table 1, Fig. 8과 같다. Table 1은 대상교량의 제원이며, 대상교량의 콘크리트 압축강도  $f_{ck} = 29.43 \text{ MPa}$ 이고 사용된 각 재료의 허용응력은 Table 2와 같다. Fig. 8에서 사용된 단면의  $A_{cp} = 0.1131 \text{ m}^2$ ,  $I_{cp} = 0.07606 \text{ m}^4$ ,  $y_{sb} = -1.646 \text{ m}$ ,  $y_{st} = 0.405 \text{ m}$ ,  $y_{ct} = 0.605 \text{ m}$ ,  $I_s = 0.02625 \text{ m}^4$ ,  $A_s = 0.0417 \text{ m}^2$ ,  $y_t = 1.265 \text{ m}$ ,  $y_b = -0.776 \text{ m}$ 이고, 탄성 계수비  $n = 8$ 이다.

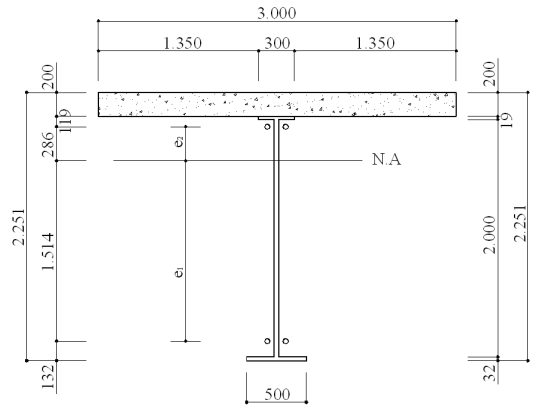


Fig. 8 외부 긴장재를 이용하여 보강할 대상교량 (단위: mm)

Table 1 대상교량 제원

상부구조 형식	목표하중	경간	총길이	교량단면
2경간 연속 강합성교	DB-18 DL-18	40 m	80 m	FIG. 8

Table 2 긴장재, 콘크리트 슬래브, 보의 허용응력 (MPa)

구 분	긴장재(SWPC 7B 15.2 mm)	콘크리트 슬래브	보 (SS400)
허용압축응력	-	11.8	140
허용인장응력	1,303.4	2.06	140

### 5.2 대상 교량의 내하율

대상 교량은 2등교이며, DB-18, DL-18 하중에 적합하도록 설계된 교량이다. 대상 교량의 내하율을 산정하기 위하여 구조해석 프로그램(MIDAS Civil)을 이용하여 구조해석을 수행하였으며, 활하중(DB-18, DL-18)은 영향선 해석을 통하여 수행하였다. 대상 교량의 내하율은  $RF = (f_a - f_{DL}) / f_{LL}(1 + i)$ 의 식을 이용하여 구하였다. 경간 중앙부에서는 DB-18 하중에 의해 단부로부터 15.5m 지점에서 최대 응력이 발생하였고 내하율은 1.331이었으며, 중앙 지점부에서는 DL-18 하중에 의해 단부로부터 40m 지점에서 최대 응력이 발생하였고 내하율은 0.821이었다. DB-24, DL-24 하중에 대해서도 DB-18, DL-18 하중과 마찬가지로 영향선 해석을 통하여 활하중에 의한 단면력

을 산정하였으며 발생응력과 내하율을 Table 3에 나타내었다. 경간 중앙부에서는 DB-24 하중에 의해 단부로부터 15.5m 지점에서 최대 응력이 발생하였으며 내하율은 1.006이었으며, 중앙 지점부에서는 DL-24 하중에 의해 단부로부터 40m 지점에서 최대 응력이 발생하였으며 내하율은 0.614였으며, 이 교량은 1등급 교로 사용할 수 없을 것으로 판단되었다. 따라서 이 교량을 1등급 교로 사용가능하도록 보강하는 것을 목표로 하여, DB-24, DL-24하중에 대해 목표 내하율을 1.2로 정하고, 이를 만족하도록 증가 프리스트레스트력을 고려한 내하율 산정식을 이용하여 보강설계를 수행하였다.

Table 3 보강 전 단면 응력 (MPa)과 내하율

구 분	경간 중앙부(x=15.5 m) 거더 하부	내부 지점부(x=40 m) 슬래브 상부
고정하중	61.812	0.000
DB-24	65.489	1.555
DL-24	59.326	2.825
RF	1.005	0.614

### 5.3 내 하력 향상을 위한 보강설계

대상교량의 내하력을 향상시키기 위해, Fig. 7과 같은 직선배치형상 3과 같이 보강을 계획하였다. 긴장재의 설치 위치는 Fig. 7에서  $a = 2\text{ m}$ ,  $b = 28\text{ m}$ ,  $c = 8\text{ m}$ ,  $d = 2\text{ m}$ 가 되도록 하였으며, 긴장재의 물리적 성질은 Table 4에 나타내었다. 편심거리는  $e_1 = -1.514\text{ m}$ ,  $e_2 = 0.286\text{ m}$ 로 정하였다.

초기 긴장력은 최대 정·부모멘트 각 단면에서 목표 내하율을 만족시키는 긴장력을 계산한 후 더 큰 긴장력을 초기 긴장력으로 결정하였다. 최대 정모멘트 위치는 단부로부터 15.5m 이며, 최대 부모멘트 발생 위치는 단부로부터 40.0m 지점이었다.

Table 4 긴장재의 물리적 성질

구분 기호	PS 강 7연선				릴랙세이션 (%)	
	표준 지름 (mm)	공칭 단면적 (mm <sup>2</sup> )	인장 하중 (kN)	0.2%연구 연신율에 대한 하중 (kN)	N	L
					8.0 이하	2.5 이하
SWPC 7B	15.2	138.7	260.68	221.71이상	8.0 이하	2.5 이하

#### 5.3.1 증가 프리스트레스트력을 고려하지 않은 보강 설계

증가 프리스트레스트력을 고려하지 않을 경우는  $\Delta T$ 의 영향을 고려하지 않아야 한다. 경간 중앙부에 대한  $T+RF \cdot \Delta T(1+i)$ 를 식(35)를 이용하여 구하면 1809.110 kN이 되며, 내부 지점부에 대한  $T+RF \cdot \Delta T(1+i)$ 를 식(36)을 이용하여 구하면 1022.707 kN이다. 여기서  $\Delta T = 0$ 으로 하면, 증가 프리스트레스트력을 고려하지 않게 되며, 식(35), (36)을 통해 구해진 값을 긴장력  $T$ 로 사용할 수 있다. 두 값 중 큰 값을 긴장력으로 사용하였다.

도입 긴장력을 인장하중의 60%로 가정하면 긴장재의 개수는 식(37)에 의해  $1809.110 / (0.6 \times 260.68) = 11.57$ 이 되고, 긴장재의 개수는 짝수 12개로 정하였으며, 긴장재 한 개에 도입되는 긴장력은  $1809.110 / 12 = 150.759\text{ kN}$ 이다.

목표 내하율이 확보되었는지 확인하기 위해 초기 긴장력 1809.110 kN을 대상교량에 도입하여 구조해석(MIDAS) 또는 수계산으로 긴장력에 의한 응력  $f_T$ 를 구한 후 식(16)으로부터 내하율(RF)을 계산하여 Table 5에 나타내었다. 내하율은 경간 중앙부와 내부 지점부에서 목표 내하율인 1.2를 만족시킴을 보였다.

Table 5 증가 프리스트레스트력을 고려하지 않은 보강 설계 후 단면 응력 (MPa)과 내하율

구 분	경간 중앙부(x=15.5 m) 거더 하부	내부 지점부(x=40 m) 슬래브 상부
고정하중	61.812	0.000
DB-24	65.489	1.555
DL-24	59.326	2.825
긴장력	-15.775	-1.972
RF	1.208	1.202

#### 5.3.2 증가 프리스트레스트력을 고려한 보강설계

증가 프리스트레스트력을 구하기 위하여 식(9)-(13)을 결정해야 한다. 식(9)-(11)은 구조물의 자중 및 긴장재의 배치에 의하여 구할 수 있으며, 식(12)-(13)의 경우는 최대 모멘트를 발생시키는 활하중의 위치를 파악하여 그 하중 경우를 찾아 모멘트를 구해야 한다. 본 논문에서는 긴장력이 DB-24하중에

의하여 결정되었으므로,  $\Delta_{1L}$ ,  $\Delta_{2L}$ 은 DB-24하중에 대한 값을 구하였다. 식(9)-(13)의 값을 구한 후 식(14), (15)에 대입하여 증가 프리스트레스력  $\Delta T = 22.373 \text{ kN}$ 을 구하였다. 이 증가 프리스트레스력은 구조해석 프로그램(MIDAS Civil)을 이용하여 구한 값과 일치하였다. 증가 프리스트레스력을 고려하여 구한 초기 긴장력은  $T = 1777.228 \text{ kN}$ 이며 식(38)을 사용하여 강연선 개수를 12개로 정하였다.

목표 내하율이 확보되었는지 확인하기 위해 초기 긴장력  $1777.228 \text{ kN}$ 을 대상교량에 도입하여 구조해석(MIDAS) 또는 수계산으로 긴장력에 의한 응력  $f_T$ 와 증가 프리스트레스력에 의한 응력  $f_{\Delta T}$ 를 구한 후 식(17)로부터 내하율(RF)을 계산하여 Table 6에 나타내었다. 내하율은 경간 중앙부와 내부 지점부에서 목표 내하율인 1.2를 만족시킴을 보였다.

증가 프리스트레스력을 고려하여 보강설계시 긴장력의 감소효과가 있음을 확인하였다.

Table 6 증가 프리스트레스력을 고려한 보강 설계 후 단면 응력 (MPa)과 내하율

구 분	경간 중앙부(x=15.5 m) 거더 하부	내부 지점부(x=40 m) 슬래브 상부
고정하중	61.812	0.000
DB-24	65.489	1.555
DL-24	59.326	2.825
긴장력	-15.495	-1.937
$\Delta T$	-0.195	-0.024
RF	1.201	1.201

## 6. 결 론

본 논문에서는 외부 긴장재를 이용하여 2경간 강합성 교량의 내하력을 향상시키는 보강설계 방법을 제시하였다. 긴장재에 도입되는 초기 긴장력과 외부 활하중에 의해 발생하는 증가 프리스트레스력을 고려한 내하율 산정식을 이용하여 초기 긴장력을 결정하는 방법과 절차를 체계적으로 기술하였다. 2경간 강합성보에 가상의 원리를 이용하여 증가 프리스트레스력을 구하였고, 내하율 산정식에서 목표 내하율을 정하고 긴장재 개수와 초기 긴장력의 계산 과정을 제시하였다. 제

시된 과정을 실교량에 반영하여 긴장재 개수와 초기 긴장력을 계산하였으며, 증가 프리스트레스력을 고려한 내하율 산정식과 고려하지 않은 내하율 산정식을 이용하여 긴장재 개수와 긴장력을 비교 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 논문에서는 증가 프리스트레스력을 고려한 내하율 산정식을 이용한 보강설계 방법을 제시하였으며, 증가 프리스트레스력의 영향을 정량적으로 평가하였다.
- 2) 예제 교량에서 목표 내하율을 1.2로 가정하고 내하율 산정식을 이용하여 초기 긴장력 및 증가 프리스트레스력을 결정 한 후, 검토 단면의 내하율이 목표 내하율과 일치함을 보였다.
- 3) 증가 프리스트레스력을 고려한 경우 검토 단면의 목표 내하율을 만족시키는 초기 긴장력은 증가 프리스트레스력을 고려하지 않은 경우의 초기 긴장력에 비해 작은 값을 나타내었다.
- 4) 보강설계시 증가 프리스트레스력의 영향이 큰 경우 증가 프리스트레스력을 고려하지 않고 보강 설계를 한다면 초기 긴장력이 크게 계산될 수 있다.
- 5) 따라서, 경제적인 보강설계를 위하여 증가 프리스트레스력을 고려한 내하율 산정식을 적용해야 한다고 사료된다.

## 참고문헌

1. 류형근, 장승필, 박중현, "부분합성을 고려한 외부 프리스트레스 합성보의 증가 프리스트레스 산정," 대한토목학회정기 학술대회 논문집, 대한토목학회, 2003, pp. 329-332.
2. 류형근, 정승인, 김현성, 장승필, "외부 프리스트레스 강합성교량의 텐던 기하배치 형상에 따른 휨 거동 특성," 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, 2002, pp. 789-792.
3. 최동호, 유동민, 정재동, 김은지, "외부 긴장재로 보강된 2경간 연속 강합성보의 초기 긴장력 결정," 한국구조물진단학회논문집, 한국구조물진단학회, 제10권, 제4호, 2006, pp. 145-152.
4. 최동호, 정상환, 유동민, "외부 긴장재로 보강된 강합성보의 내하율 산정식을 이용한 초기 긴장력 결정," 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회 제17권, 제5호, 2005, pp. 527-536.

- 
5. Choi, D. H., Kim, Y. S., and Yoo, H., "External Post-tensioning of Composite Bridges by a Rating Equation Considering the Increment of a Tendon Force Due to Live Loads," International Journal of Steel Structures, Vol. 8, No. 2, 2008, pp. 109-118.
  6. Klaiber, F. W., Wipf, T. J. and Fanous, F. S., "Strengthened of two Continuous-span Steel Stringer Bridges," Construction and Building Materials, Vol. 12, No. 2~3, 1998, pp. 151-159.
  7. MIDAS Civil, 2006, Version 7.0.1.
  8. Regan, R. S. and Krahl, N. W., "Behavior of Prestressed Composite Beams," ASCE Journal of Structural Division, Vol. 93, No. 12, 1967, pp. 87-108.
  9. Saadatmanesh, H., Albrecht, P., and Ayyub, B.M., "Analytical Study of Prestressed Composite Beams," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 9, 1989a, pp. 2364-2381.
  10. Saadatmanesh, H., Albrecht, P., and Ayyub, B. M., "Experimental Study of Prestressed Composite Beams," ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 115, No. 9, 1989b, pp. 2348-2363.
  11. Saadatmanesh, H., Albrecht, P. and Ayyub, B. M., "Guidelines for Flexural Design of Prestressed Composite Beams," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 11, 1989c, pp. 2944-2961.
  12. Tong, W. and Saadatmanesh, H., "Parametric Study of Continuous Prestressed Composite Girders," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118 No. 1, 1992, pp. 186-206.

(접수일자 : 2008년 5월 20일)

(심사완료일자 : 2008년 11월 14일)