



외부강선으로 보강되는 PSC I 합성거더의 해석 기법

박재근¹⁾ · 이병주²⁾ · 김문영¹⁾ · 신현목^{1)*}

¹⁾ 성균관대학교 건설 환경시스템학과 ²⁾ 한국도로공사 도로교통기술원

Analytical Method on PSC I Girder with Strengthening of External Tendon

Jae-Guen Park,¹⁾ Byeong-Ju Lee,²⁾ Moon-Young Kim,¹⁾ and Hyun-Mock Shin^{1)*}

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-476, Korea

²⁾ Korea Expressway Transportation & Technology Institute, Whasung 461-703, Korea

ABSTRACT This paper presents an analytical prediction of Nonlinear characteristics of prestressed concrete bridges by strengthened of externally tendon considering construction sequence, using unbonded tendon element and beam-column element based on flexibility method. Unbonded tendon model can represent unbonded tendon behavior in concrete of PSC structures and it can deal with the prestressing transfer of posttensioned structures and calculate prestressed concrete structures more efficiently. This tendon model made up the several nodes and segment, therefore a real tendon of same geometry in the prestressed concrete structure can be simulated the one element. The beam-column element was developed with reinforced concrete material nonlinearities which are based on the smeared crack concept. The fiber hysteresis rule of beam-column element is derived from the uniaxial constitutive relations of concrete and reinforcing steel fibers. The formulation of beam-column element is based on flexibility. Beam-column element and unbonded tendon element were be involved in A computer program, named RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), that were used the analysis of RC and PSC structures. The proposed numerical method for prestressed concrete structures by strengthened of externally tendon is verified by comparison with reliable experimental results.

Keywords : externally tendon, construction sequence, unbonded tendon element, fiber beam-column element, PSC structure

1. 서 론

거더 교량에서 노후화로 인해 감소된 내하력을 회복시키거나 성능개선을 위하여 가장 빈번하게 적용되는 방법이 거더의 측면에 외부 강선을 이용하여 긴장력을 도입하는 외부강선보강공법 (external prestressing strengthening method)이다. 이 공법은 다양한 연구를 통하여 그 효과가 분석되고 있지만, 품질관리 등을 포함한 규정이 명확히 정립되지 못하여 장기간 공용될 경우 긴장력이 소실되는 등 부분적으로 문제점이 야기되고 있다.

외부 강선을 이용한 콘크리트구조물의 보강은 거더 교량뿐만 아니라 현재 많은 수의 콘크리트구조물에 적용되고 있다. 하지만, 이러한 외부 강선은 콘크리트와 일체로 거동하지 않기 때문에 단면의 변형도 적합조건으로 긴장재의 응력을 추정할 수 없으며, 구조물의 변형에 영향을 미치기 때문에 보강설계 또는 내하력 계산 과정에서 긴장력을 정확히 산출할 수 없다. 따라서 정확한 구조설계와 해석을 위해서는 외부 강선을 고려할 수 있는 유한요소해석 프로그램이 요구된다.

비부착된 강선에 관한 연구는 여러 연구자들에 의하여 수행되어져 왔다. 직선으로 부착 및 비부착된 강선 모델은 Ariyawardena와 Ghali¹⁾이 제안하였다. 외부 프리스트레스트 강선을 이용하여 RC 연속보의 보강에 관한 연구가 Tan과 Tjandra²⁾에 의하여 수행되었으며 Andrea³⁾ 등은 축 변형률과 곡률을 이용하여 단순화한 외부 프리스트레스트 강선으로 보강된 콘크리트 보의 파괴를 예측하였다. Bilal⁴⁾은 외부 보강된 철근콘크리트 보의 강성을 수학적 으로 유도하였다. Andersson⁵⁾ 등에 의한 비부착 텐던의 평균 응력은 사용 기간 동안 여러 하중에 의하여 재분배되어 초기 마찰에 의한 내부 비부착 강선 응력 분포 기울기에 비하여 낮아지는 경향을 보여주고 있다. Kwak와 Kim⁶⁾은 균열거동과 인장 강성효과를 고려하여 수정된 부착 및 비부착된 강선의 응력-변형률 관계를 제안하였다. Moon와 Burns^{7,8)}는 콘크리트의 시간의존적 비선형 구성원칙을 제안하고 하이브리드 요소법으로 비부착 강선의 응력-변형률 계산 능력 향상을 유도한 프로그램 (TAPS)을 개발 및 검증하였다. Wu and Lu⁹⁾는 8절점 등 매개 요소 내부에 강선을 고려한 강선모델을 제안하였다.

이 연구에서는 내부 긴장재와 외부 보강 긴장재를 수치해석적으로 추정할 수 있도록 유한요소에 기초하여 3D 곡선 부착 및 비부착 강선 요소를 개발하여 강선의 여

*Corresponding author E-mail : hmshin@skku.edu

Received April 8, 2008, Revised August 31, 2008, Accepted November 13, 2008

©2008 by Korea Concrete Institute

러 상태에 대한 단계별 실험과 동일한 단계로 해석을 수행하여 개발한 프로그램을 검증하고자 한다. 개발된 부착 및 비부착 강선 요소는 보-기둥 요소 및 셸 요소와 조합할 수 있도록 6개의 자유도를 갖고 있으며, 유연도 법에 근거한 보-기둥 요소와의 조합이 가능하도록 하였다.

실험에 사용된 시험체는 36년간 실제 공용된 PSC 거더 교량에서 절단 인양한 것으로 상부 바닥판과 거더가 일체로 된 합성형 거더이다.¹⁰⁾ 실험은 사용하중 상태에서의 부재 강도평가, 내부 강선 중 일부를 절단하였을 때 강도평가가 그리고 외부 강선으로 보강하였을 경우에 대한 강도평가 등이 수행되었으며 개발한 프로그램을 이용하여 각 실험 단계를 모사하고 해석을 수행하여 실험 결과와 비교하였다.

2. 비부착 강선 요소

2.1 비부착 강선모델

부착 프리스트레스트 콘크리트 보의 경우 긴장재와 주변 콘크리트가 부착되어 있으므로 외력 하에서 긴장재의 변형을 변화량과 콘크리트 변형률의 변화량이 동일한 반면, 비부착 프리스트레스트 콘크리트 보에서는 긴장재와 콘크리트 사이에 비부착으로 인하여 미끄러짐이 생기기 때문에 긴장재 변형을 변화와 주변 콘크리트의 변형을 변화가 다르게 된다. 텐던의 응력은 콘크리트와 긴장재가 부착되어 있지 않았기 때문에 부재 전체 길이의 변형을 고려해야 한다.⁹⁾

이 연구에서는 Fig. 1과 같은 비부착된 강선을 갖는 보를 Fig. 2와 같이 비부착된 강선 전체를 하나의 여러 절점을 갖는 텐던 요소로 표현하였다. Fig. 2에서와 같이 텐던 주변의 콘크리트를 모사하는 콘크리트 요소와 텐던 요소와의 조합을 통하여 비부착된 강선을 갖는 PSC 구조물의 거동을 모사할 수 있도록 하였다.

텐던 요소는 모체 요소와 공유하는 각 절점에서의 편심 및 기울기를 이용하여 텐던 요소의 강성을 구성하며, 각 절점에서 텐던의 변위는 모체 요소와 동일하지만 텐던의 변형률은 텐던 요소 전체의 변위를 텐던 전체의 길이로 나누어 모든 텐던 요소 내의 변형률을 동일하게 유지하여 비부착 텐던을 모사하였다.

2.2 비부착 텐던 유도

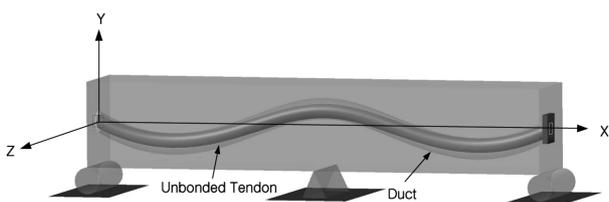


Fig. 1 PSC beam with unbonded tendon



Fig. 2 Idealization of PSC beam with unbonded tendon

변형 전 임의 위치는 위치벡터로 Fig. 3과 같이 직각 좌계에서 정의할 수 있다. 텐던의 편심거리는 모체 콘크리트구조물의 도심에서의 편심거리로 나타낼 수 있다. Fig. 3에서와 같이 변형 전 비부착 텐던의 위치벡터 ($r_o(x_1)$)는 다음과 같이 표현된다.

$$r_o(x_1) = x_1 t_1 + G_2(x_1) t_2 + G_3(x_1) t_3 \quad (1)$$

여기서 $G_2(x_1)$: 텐던의 x_2 방향의 편심

$G_3(x_1)$: 텐던의 x_3 방향의 편심

t_1, t_2, t_3 : X_1, X_2, X_3 방향의 단위벡터

식 (1)을 이용하면 비부착 텐던의 초기 길이를 산정할 수 있다.

$$L^0 = \int \alpha \, dx_1 \quad (2)$$

여기서 $\alpha = \sqrt{1 + (G_2')^2 + (G_3')^2}$

Fig. 3과 같이 각 방향의 강체 변위 (u_1, u_2, u_3)를 나타낼 수 있으며, 단면 내 임의의 점에서 변위의 성분은 다음과 같은 형식으로 나타낼 수 있다.

$$\hat{u} = \hat{u}_1 t_1 + \hat{u}_2 t_2 + \hat{u}_3 t_3 \quad (3)$$

각 방향의 변위 성분인 \hat{u}_1, \hat{u}_2 그리고 \hat{u}_3 는 단면 내에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{u}_1 = u_1 + G_3 \omega_2 - G_2 \omega_3$$

$$\hat{u}_2 = u_2 - \omega_1 G_3 \quad (4)$$

$$\hat{u}_3 = u_3 + \omega_1 G_2$$

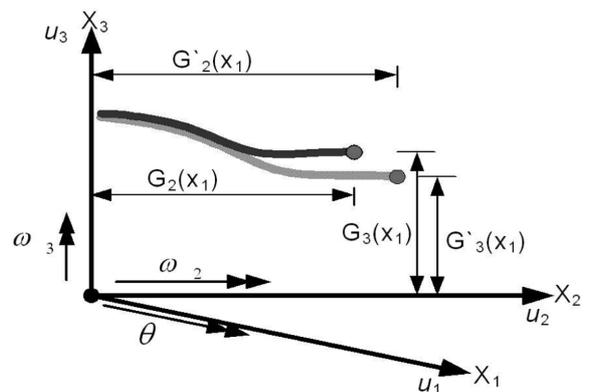


Fig. 3 Initial and deformed shape of tendon

여기서 $u_1, u_2, u_3 = x, y, z$ 방향의 변위 및 회전각

$\theta, w_2, w_3 = x, y, z$ 방향의 회전각

베르누이의 가정으로 전단변형을 무시하면 변형 후 텐던의 길이 (L_t)는 다음과 같이 된다.

$$L_t = L_o + \int_0^L \frac{A}{\alpha} dx_1 \quad (5)$$

여기서 $A = u_1' - G_2 u_2'' - G_3 u_3'' + (G_2 G_3' - G_2' G_3) \theta'$

2.3 비부착 텐던 요소 정식화

앞에서 유도한 텐던 모델은 Fig. 4(a)에서와 같이 곡선 내부 비부착 텐던의 경우 n개의 요소와 n+1개의 절점으로 구성된다고 가정하고, 외부 직선 텐던의 경우 정착구 (anchorage)와 편심기 (deviator)에서 콘크리트 요소와 연결된다면 (Fig. 4(b)), 식 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_t = L_o + \sum_{k=1}^n \int_0^{l_k} \frac{A_k}{\alpha_k} dx \quad (6)$$

여기서 $A_k = u_1^k - G_2^k u_2^{k''} - G_3^k u_3^{k''} + (G_2^k G_3^{k'} - G_2^{k'} G_3^k) \theta^{k'}$

$$\alpha_k = \sqrt{1 + (G_2^{k'})^2 + (G_3^{k'})^2}$$

변위장을 나타내는 형상함수로서 k번째 요소에서의 u_1^k, θ^k 에 대해서는 1차, u_2^k, u_3^k 는 3차 Hermitian 다항식을 사용하였다. 따라서 n개의 요소와 n+1개의 절점을 갖는 비부착 텐던 요소의 변형률 (ε_{ps})은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\varepsilon_{ps} = \frac{L - L_0}{L} = \frac{\sum_{k=1}^n \int_0^{l_k} \frac{A_k}{\alpha_k} dx}{\sum_{k=1}^n \int_0^{l_k} \alpha_k dx} \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여 비부착 텐던의 변형률은 다음과 같이 [B]와 변형 벡터 [U]의 곱의 합으로서 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = [B_{1,1} \ B_{1,2}] \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} + [B_{2,1} \ B_{2,2}] \begin{bmatrix} U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} + \dots$$

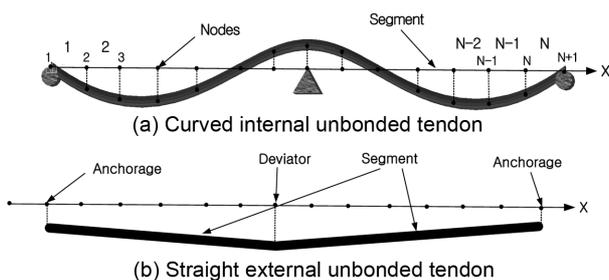


Fig. 4 Composition of one unbonded tendon element

$$\dots + [B_{k,1} \ B_{k,2}] \begin{bmatrix} U_k \\ U_{k+1} \end{bmatrix} + \dots + [B_{n,1} \ B_{n,2}] \begin{bmatrix} U_{n,1} \\ U_{n+1,2} \end{bmatrix} = B^T u_e \quad (8)$$

비부착 텐던 요소의 변형률 에너지는 다음과 같이 된다.

$$V = \frac{1}{2} E_p A_p \varepsilon^2 = \frac{1}{2} u_e^T [K] u_e \quad (9)$$

여기서 E_p : 텐던의 탄성계수, A_p : 텐던의 단면적

u_e : 텐던 요소변위벡터

[K]: 비부착 텐던 요소의 강성 매트릭스

따라서 강성 매트릭스 [K]는 식 (9)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[K] = A_p \int [B_t]^T E_p [B_t] dx \quad (10)$$

비부착 텐던이 모체 콘크리트부재에 발생시키는 프리스트레스 내력 (F_{ps})은 초기뿐만 아니라 하중 단계별로 계산되어지는 텐던의 변형률과 각 가우스 적분점에서의 텐던의 형상을 고려하여 다음식과 같이 산정하였다.

$$F_{ps} = E_{sp} A_{sp} \int B_t^T \varepsilon_{sp}' dx \quad (11)$$

여기서 ε_{sp}' : 각 하중 단계별 PS 텐던의 변형률

2.4 비부착 텐던의 재료모델

비부착 PSC 구조물 속의 텐던의 응력-변형률 관계는 콘크리트와 텐던사이의 마찰을 무시하면 텐던만의 응력-변형률 관계와 거의 같게 나타난다. 이 연구에서는 비부착 텐던의 재료거동을 텐던의 항복 후 거동이 일정한 변형률 경화율을 갖는 것으로 trilinear 모델을 사용하여 고려하였다 (Fig. 5).

$$f_p = f_{py} + E(0.03 - \varepsilon_{py}) + E_{ph2}(\varepsilon_{pu} - 0.03) \quad (12)$$

$$E_{ph1} = \frac{f_{0.03} - f_{py}}{0.03 - \varepsilon_{py}}, E_{ph2} = \frac{f_{pu} - f_{0.03}}{\varepsilon_{pu} - 0.03} \quad (13)$$

여기서

f_p : 텐던의 평균응력

f_{py} : 텐던의 변형률 경화 개시점의 평균응력

f_{pu} : 텐던의 극한 평균변형률에 대응하는 평균응력

ε_{py} : 텐던의 변형률 경화 개시점에 대응하는 평균변형률

ε_{pu} : 텐던의 극한 평균변형률

E_{ph1}, E_{ph2} : 텐던의 변형률 경화율

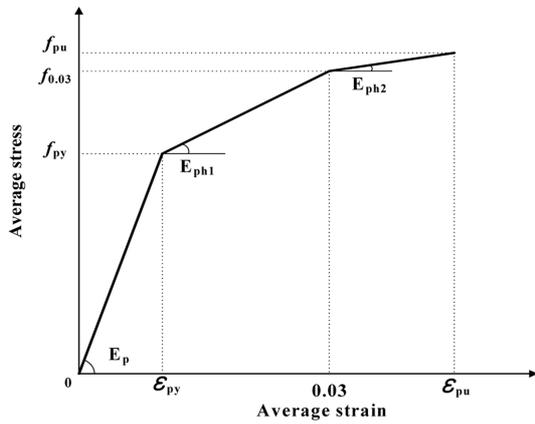


Fig. 5 Material model of unbonded tendon

3. 파이버 보-기둥 요소

3.1 유연도법에 근거한 보-기둥 요소

유연도법에 근거한 보-기둥 요소는 하중이 재하되는 동안 변형 전 평면이 변형 후에도 평면을 유지한다는 가정을 전제로 하고 있다. 요소정식화는 혼합법 (mixed method)을 기초로 하며, 요소 내에서 평형을 만족하는 내력의 분포 함수를 표현하는 것으로부터 적분점에서 단면변형률에 대응하는 요소형상함수를 선택한다. 보-기둥 요소의 정식화를 위해서 혼합유한요소법 (mixed finite element method)이 적용된다. 정식화 과정에서 변위를 위한 특정한 보간 함수를 사용하지 않고 단면의 유연도 행렬에 종속된 변형 형상 함수를 선택함으로써 혼합법은 유연도법으로 단순화될 수 있다. 비선형 단면력-단면변형률의 관계는 일반적인 경우와 동일하다.

정식화 유도는 요소력과 그에 상응하는 요소변형의 행렬 관계를 이끌어내기 위하여 평형방정식의 적분형태와 단면력-단면변형률 관계를 정식화 유도과정에 도입한다. 반복계산 과정에서 선형화된 요소력-요소변형의 관계를 얻기 위해 단면력-단면변형률 관계를 현재 상태에 대하여 선형화한다. 허용 오차 내에서 비선형의 요소력-요소변형 관계가 수렴할 때까지 반복 알고리즘을 사용한다. 요소에 따라 작용하는 단면력과 단면변형률을 구하기 위해서 서로 독립적인 것으로 가정된 형상함수를 사용하였다. 증분의 단면력과 단면변형률은 요소력과 요소변형에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다.

3.2 파이버 보-기둥 요소

3차원 PSC 골조 구조물의 비선형 해석을 위해 파이버 기법을 사용한다. 파이버기법에서는 Fig. 6에서와 같이 요소를 단면의 중심과 일치하는 하나의 선 요소로써 모델링하고 요소의 단면을 여러 개의 파이버들로 나눈다. 각 파이버의 변형은 변형전 평면인 단면은 변형 후에도 평면을 유지한다는 가정을 이용해서 계산할 수 있다. 요소의 축을 따라서 각각의 파이버 변형률에 상응하는 거

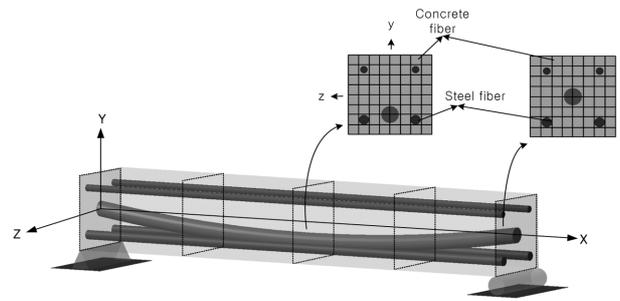


Fig. 6 Fiber beam-column element based on flexibility method

동은 국부적인 거동을 나타내는 재료의 축방향 구성모델로부터 구할 수 있다.

이 파이버들의 거동을 적분해서 각 요소의 거동을 예측할 수 있으며 모든 요소의 거동을 조합해서 전체 구조물의 거동을 알 수 있다. 따라서 요소의 비선형 특성은 기본적으로 파이버의 응력-변형률 관계에 의존한다.

파이버 보-기둥 요소의 정식화는 기하학적 선형과 변형 이력 동안 중립축에 대해 단면변형률의 선형변화를 전제로 하고 있다. 반면에 이 가설은 균질 재료로 구성된 요소의 미소 변형 내에서 허용되며 균열과 정착슬립과 같은 철근콘크리트 요소의 특성을 정확히 설명할 수 없다.

따라서 균열과 인장 경화의 효과는 유한요소해석의 분산 균열 개념에 따라 철근과 콘크리트의 응력-변형률 관계를 근사적으로 수정해서 모델에 포함할 수 있다. 정착 부착 효과는 큰 균열의 발생이 예상되는 위치에서 철근의 인발 등으로 인한 변형의 증대효과를 고려하기 위해 변형에 관련된 스프링 요소로 모델에 고려할 수 있으며 반복이력 거동에 따른 피로손상은 변형률의 진폭과 관련한 손상지수로서 모델링할 수 있다.

요소 응답의 정확성, 또는 전체 구조물 응답의 정확성은 각 부재의 이산화에 사용되는 단면의 개수와 각 단면에서 사용한 파이버 개수에 의해 영향을 받는다. 더 많은 수의 파이버를 사용하면 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다. 그러나 각 파이버의 이력 거동을 추적하는데 필요한 이력 변수를 각 반복 단계마다 저장해야 하는 이유로 계산상 번거롭다. 가장 적합한 파이버의 개수와 위치의 선택 및 적분 점 개수의 선택이 요구된다. 철근콘크리트의 비선형성은 요소 단부에서 가장 크게 발생하므로 이 연구에서는 단부를 적분점으로 취하는 Gauss-Lobato 수치 적분 기법을 사용하였다.

4. 비선형 유한요소해석 프로그램

이 연구에서는 철근콘크리트 평면응력요소, 그리고 경계면요소 등을 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST¹¹⁾ (reinforced concrete analysis in higher evaluation system technology)를 사용하였다.

RCAHEST 프로그램은 일차원, 이차원, 그리고 삼차원 요소망을 정의할 수 있고, 여러 가지 선형 및 비선형해석 알고리즘을 갖고 있으며 해석 결과의 다양한 그래픽

처리가 가능하다. 또한 선형 및 비선형 솔리드 (solid) 요소, 2차원 및 3차원 골조요소, 판 및 셸 요소 등을 갖추고 있으며 선형, 점탄성, 그리고 소성 등의 구성방정식을 포함하고 있다.

개발된 3D 곡선 부착 및 비부착 텐던 요소를 추가하여 기존 요소인 유연도법에 근거한 보-기둥요소와의 조합을 이용하여 외부강선으로 보강된 PSC 구조물의 거동을 해석적으로 추정하였다. 해석은 PSC 구조물의 시공 단계를 고려하여 수행하였다.

5. 외부 강선으로 보강된 PSC I 거더의 비선형해석

5.1 시험체의 제원 및 모델링

해석 대상 시험체는 고속도로에서 27년 동안 공용되었던 PSC I 합성거더⁹⁾이며, 하중효과에 의한 거동 특성 및 내하능력을 분석하기 위하여 사용하중 및 극한하중 등을 반복 재하하는 실험을 수행하였다. 이 실험에서는 인위적으로 손실을 유도하기 위하여 거더 중앙부의 PS 강선을 절단하였고 절단된 양만큼을 외부강선으로 보강하여, 손상의 영향 및 보강전후의 거동을 비교분석하였다. 시험체의 형상은 기존 교량으로부터 절삭 인양한 관계로 상부바닥판과 거더가 일체로 된 합성형이며, 길이는 26.2 m이다. 교량 단면에서의 철근 및 텐던의 위치는 Fig. 7에 나타내었다. PS강선은 Fig. 8과 같이 총 6개로 구성되어 있고 단계별 시공에 의해 단부 정착부가 3단, 상부 정착부가 3단으로 구성되어 있다. 실험시 하중위치와 변위 측정 지점은 Fig. 9에 나타내었다.

교량에 사용된 재료로 실측한 콘크리트의 압축강도는 37 MPa이며, 내부 및 외부 PS강선은 항복강도 1,352 MPa, 1,580 MPa이고 인장강도는 1,599 MPa, 1,854 MPa이다. 내부 및 외부 강선의 규격은 12φ8, 7φ12.7이며, 긴장력은 본단 760 kN, 490 kN이다.⁹⁾

실험시 Table 1과 같이 여러 상태의 평가를 위하여 하

중을 재하 하였다. 해석에서도 실험과 같이 Fig. 10과 같이 3단계로 나누었으며 콘크리트 손상의 누적을 고려하여 실험과 같이 반복적으로 하중을 재하하고 다시 제거하고 다시 하중을 재하는 방법으로 해석을 수행하였다.

모델링은 평면 내 거동을 하는 것으로 가정하였다. 16개의 보-기둥요소를 이용하여 PSC 거더를 모사하였으며, 내부 텐던은 다른 형상을 갖는 6개의 텐던을 6개의 부착 텐던 요소를 이용하였다. 외부 보강 텐던은 2개이나 같은 형상을 갖기에 비부착 텐던 요소 한 개를 사용하여 모델링하였다.

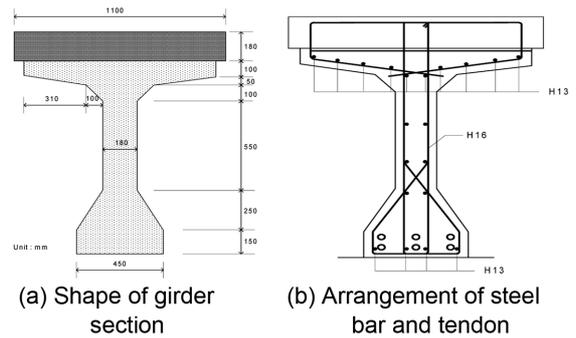


Fig. 7 PSC I girder middle section

Table 1 Loading stage

Evaluation contents	Total load (kN)	Loading number
Elastic behaviors	240	5
Crack loading	600	1
Uncrack and crack behaviors	600	5
Crack pattern	800	5
Behaviors of internal tendon cutting	600	5
Effect of strengthened	600	5
Failure	1,000	1

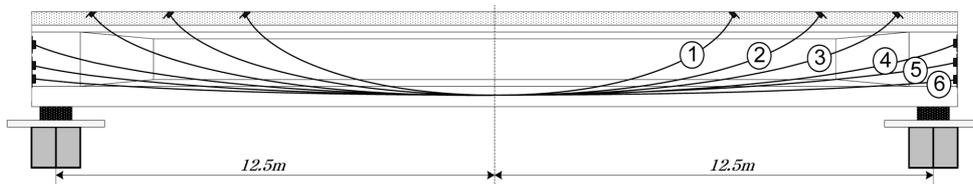


Fig. 8 Arrangement of internal tendon

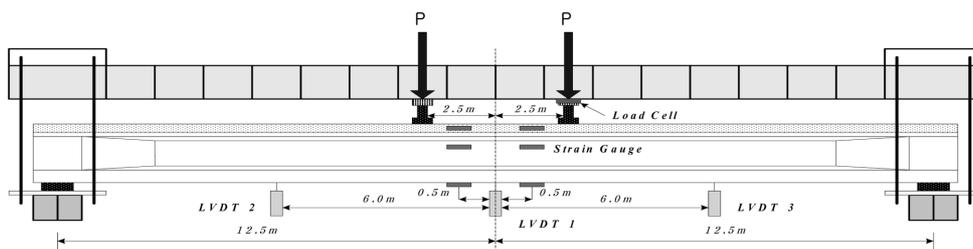


Fig. 9 Test beam shape, loading point, and measurement location

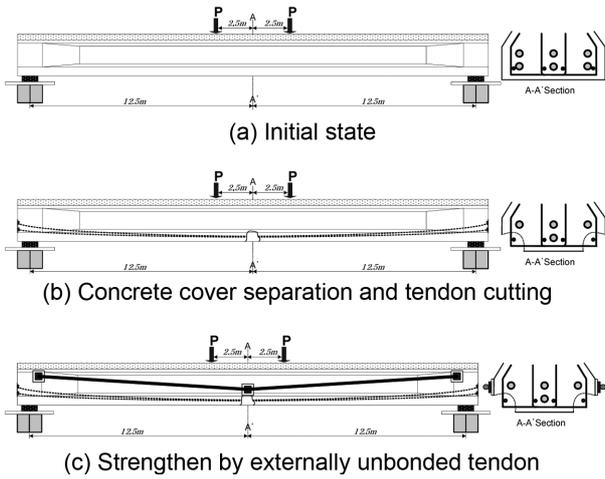


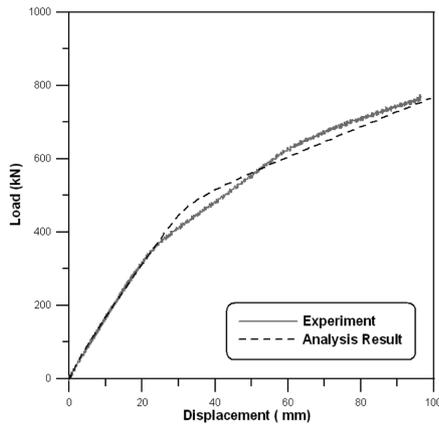
Fig. 10 Stage of experiment and analysis

5.2 해석 결과와 실험 결과의 비교 및 고찰

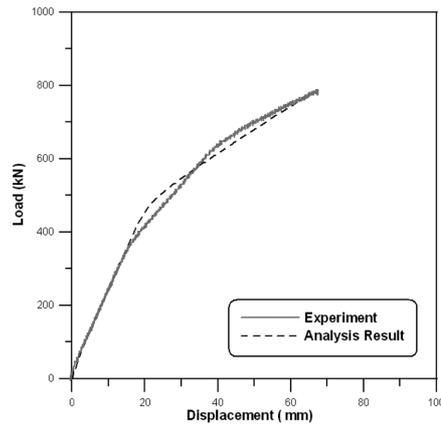
우선 초기 상태에서 하중재하로 인한 거동을 해석하다. 실험 결과와 비교한 Fig. 11에는 여러 반복 하중에 의한 거동 중 최종 하중에 의한 결과만 도시하였다. 그 후 내부 강선 두개를 자른 후 실험 결과와 비교하기 위하여 내부

강선을 제거한 후 해석한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 다음으로 외부강선 보강기법으로 보강한 실험 결과와 해석 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 실험시 Table 1에서와 같이 26번의 반복하중과 1번의 파괴 하중을 재하하여, 해석치가 조금 과대평가 되는 경향을 보이고 있다. 그러나 전체적인 거동으로 판단할 때, 부착된 텐던이 곡선으로 배치된 PSC 구조물의 거동뿐만 아니라 외부 강선에 의해 보강된 구조물을 비부착 텐던 요소를 사용한 해석이 시험체의 거동을 잘 추적하는 것을 알 수 있었다.

강선절단 전의 비선형해석에 의한 파괴양상은 부재 중앙의 콘크리트 상단면 압축파괴이며, 극한 모멘트의 크기는 5,400 kN·m, 내부강선의 응력은 1,373 MPa이다. 따라서 극한 모멘트가 프리스트레스 긴장재의 인장파괴가 아닌 거더 상단 콘크리트의 압축파괴에 의해서 결정된 것으로 내부강선의 f_{ps} 는 항복응력 이하임을 알 수 있다. 내부 강선 절단 후 외부강선으로 보강 후 극한모멘트는 4,800 kN·m이며, 내부 강선의 응력은 1,393 MPa, 외부강선의 응력은 1,006 MPa로 각각 해석되었다. 따라서 PSC 거더 실험체는 파괴상태에 도달 시 외부강선의 응력은 탄성범위 내에 있음을 알 수 있다.

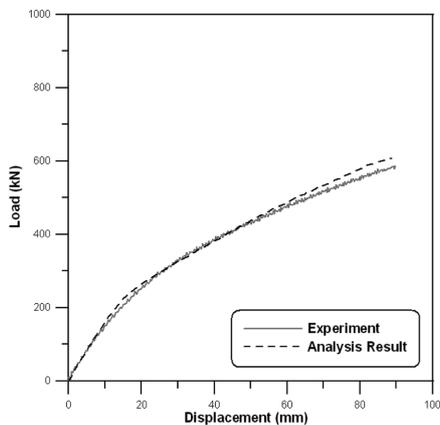


(a) Load and deflection curve of middle section

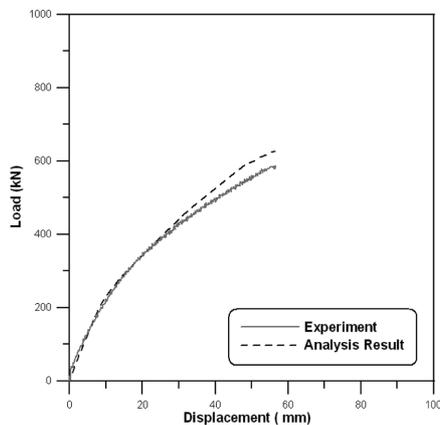


(b) Load and deflection curve of 1/4 section

Fig. 11 Initial state analysis results

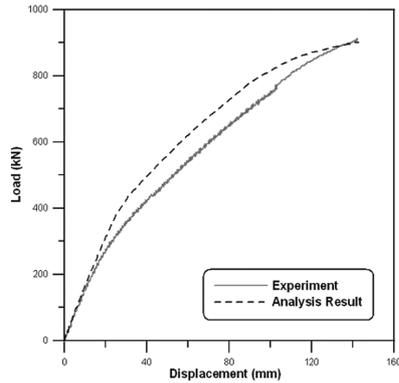


(a) Load and deflection curve of middle section

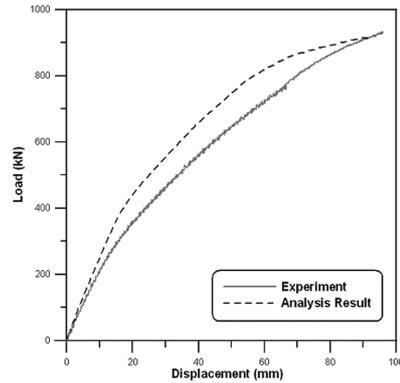


(b) Load and deflection curve of 1/4 section

Fig. 12 Concrete cover separation and tendon cutting stage analysis results



(a) Load and deflection curve of middle section



(b) Load and deflection curve of 1/4 section

Fig. 13 Strengthened with externally unbonded tendon stage analysis results

6. 결 론

외부 강선으로 보강된 PSC 보의 비선형 해석을 위하여 비부착 텐던 요소 개발하였으며 텐던 요소와 유연도법에 근거한 보-기둥 요소와의 조합을 이용하여 해석을 수행하였다. 이 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 비부착된 텐던모델을 기반으로 유한요소 정식화를 통하여 비부착 텐던 요소를 개발하였으며 텐던 요소와 보-기둥요소의 조합을 통하여 외부 강선으로 보강된 PSC 부재의 단계별 해석을 가능하게 하였다.
- 2) 비부착 텐던 요소의 유도시 3D 곡선으로 배치된 텐던을 기본으로 유도하였기 때문에 보-기둥 요소와 조합을 통하여 비부착된 텐던을 갖는 PSC 구조물 해석에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 비선형해석을 통하여 PSC I 거더교의 실제 거동뿐만 아니라 내부 강선의 절단으로 인한 교량의 강성저하 및 외부강선으로 보강된 교량의 거동을 실험과 해석 결과를 비교함으로써 개발된 프로그램의 유효성을 검증하였다.
- 4) 개발한 요소를 이용하여 비부착된 텐던을 갖는 PSC 구조물의 극한 비선형거동시 텐던의 응력뿐만 아니라 전체적인 거동을 해석적으로 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업 (과제 번호: 06 첨단융합E01)의 지원으로 이루어진 것으로, 본 연구를 가능하게 한 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ariyawardena, N. and Ghali, A., "Prestressing with Unbonded

- Internal or External Tendons: Analysis and Computer Model," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 128, No. 12, 2002, pp. 1493~1501.
2. Tan, K. H. and Tjandra, R. A., "Strengthening of RC Continuous Beams by External Prestressing," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 133, No. 2, 2007, pp. 195~204.
3. Andrea, D., Laura R., and Alessandro, Z., "Simplified Method for Failure Analysis of Concrete Beams Prestressed with External Tendons," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 133, No. 1, 2007, pp. 121~131.
4. Bilal, E. A., "Stiffness of Reinforced Concrete Beams with External Tendons," *Engineering Structures*, Vol. 26, 2004, pp. 2047~2051.
5. Andersson, P., Berglund, L. E., and Gustavsson, J., "Average Force along Unbonded Tendons: a Field Study at Nuclear Reactor Containments in Sweden," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 33, 2005, pp. 91~100.
6. Kwak, H. G. and Kim, J. H., "Numerical Models for Prestressing Tendons in Containment Structures," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 236, 2006, pp. 1061~1080.
7. Moo, J. H. and Burns, H. H., "Flexural Behavior of Member with Unbonded Tendons. I : Theory," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 8, 1997, pp. 1087~1094.
8. Moo, J. H. and Burns, H. H., "Flexural Behavior of Member with Unbonded Tendons. II : Applications," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 8, 1997, pp. 1095~1101.
9. Wu, X. H. and Lu, X., "Tendon Model for Nonlinear Analysis of Externally Prestressed Concrete Structures," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 129, No. 1, 2003, pp. 96~104.
10. 이병주, 박재근, 김문영, 신현목, 박창호, "PSC I 합성거더의 휨 거동 및 외부강선 보강효과에 관한 실험연구," 콘크리트학회논문집, 19권, 6호, 2007, pp. 755~762.
11. Kim, T.-H., Lee, K.-M., Yoon, C.-Y., and Shin, H. M., "Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake. I: Theory and Formulation," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2003, Vol. 129, No. 9, pp. 1199~1207

요 약 이 논문은 외부 강선으로 보강된 PSC 교량의 시공단계가 고려된 비선형거동 예측을 위한 연구이다. 해석시 비부착 텐던 요소와 유연도법에 근거한 보-기둥 요소를 사용하였다. 비부착 텐던 모델은 PSC 구조물의 콘크리트내의 텐던의 거동을 모사하며 포스트텐션 (posttensioned) 구조물의 프리스트레싱력과 전달을 효율적으로 모사할 수 있다. 이 모델은 여러 절점과 세그먼트로 구성되며 PSC 구조물내의 같은 위치의 텐던을 하나의 텐던 요소로 모사할 수 있다. 보-기둥 요소는 분산균열 개념에 기초한 철근콘크리트 비선형 재료모델을 포함하고 있다. 유연도법에 근거하여 유도된 보-기둥 요소의 각각의 파이버는 콘크리트와 철근의 일축 거동을 모사한다. 보-기둥요소와 비부착 텐던 요소는 RC 및 PSC 구조물의 상세 비선형해석을 수행할 수 있는 RCAHEST (reinforce concrete analysis in higher evaluation system technology)에 이식하였다. 외부 강선으로 보강된 PSC 구조물에 대한 수치기법은 신뢰성 있는 실험 결과와 비교하여 검증하였다.

핵심용어 : 외부 강선, 시공단계, 비부착 텐던 요소, 파이버 보-기둥 요소, PSC 구조물