

유한요소해석을 이용한 프리스트레스트 보의 처짐에 대한 변수 해석

박 하 은¹ · 최 진 웅¹ · 김 민 숙¹ · 이 영 학^{1*}

¹경희대학교 건축공학과

A Parametric Study of Deflection Analysis of the Prestressed Beams using Finite Element Analysis

Ha Eun Park¹, Jin Woong Choi¹, Min Sook Kim¹ and Young Hak Lee^{1*}

¹Department of Architecture Engineering, KyungHee Univ., Yongin, 446-701, Korea

Abstract

The purpose of this study is to analyze the deflection of the prestressed beams. In this paper, a finite element model for deflections of prestressed beams is presented. Proposed finite element model was verified comparing with existing experimental results, and it showed a good agreement with the experimental results. Also, a parametric study has been conducted to analyze the influence of eccentricity, span-depth ratio, and prestressing force. The finite element model results were compared with hand calculation results. Deflections were increased as the eccentricity decreases, the span-depth ratio increases, and the prestressing force decreases. Hand calculation overestimated the deflection when the eccentricity or prestressing force is too small.

Keywords : prestress, deflection, finite element analysis, parametric analysis

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트(prestressed concrete)는 철근 콘크리트 보에 발생하는 인장응력을 상쇄할 수 있도록 미리 콘크리트에 압축응력을 가하는 구조이다. 이는 기존의 철근 콘크리트 구조에 비해 강도가 증가하여, 부재의 단면의 감소 및 장경간화가 가능하여 경제적인 설계가 가능하다. 그러나 철근콘크리트 구조보다 부재의 두께가 얇고 경간이 길기 때문에 처짐에 대해 취약할 수 있으며, 따라서 사용성에 대한 평가가 보다 면밀하게 이루어져야 한다. 국내 콘크리트 구조 설계기준과 ACI Building Code에서는 철근콘크리트 부재의 처짐을 제한하기 위해 최소두께 값을 제시하고 있으며, 제시된 최소두께와 같거나 클 경우 처짐은 계산하지 않아도 된다. 이에 달리, 프리스트레스트 부재는 모든 프리스트레스트 휨부재에 대하여 처짐을 계산하고, 제시하는 처짐 허용

값과 비교할 것을 요구하고 있다.

국내에서 철근콘크리트 부재의 처짐에 대한 연구와 비교하여 프리스트레스트 부재의 처짐에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. Rao와 Dilger(1992)는 부분 프리스트레스트 콘크리트 부재의 유효단면2차모멘트를 구하는 여러 방법을 고찰하고, 기존 연구자들의 실험결과와의 비교를 통해 그 정확성을 평가하였다. Chao와 Naaman(2006)은 유한요소해석 결과를 이용하여 프리스트레스트 이방향 슬래브의 단기처짐을 간단하게 구할 수 있는 식을 제안하였다. Yang 등(2011)은 프리스트레스트 경량 콘크리트 보의 휨 거동에 대한 실험을 수행하고 처짐과 균열을 분석하였다. 프리스트레스트 콘크리트 부재는 철근콘크리트 부재보다 처짐에 영향을 미치는 변수가 많기 때문에 다양한 변수에 대한 처짐의 변화를 분석하는 연구가 필요함에도 불구하고 관련 실험 데이터는 여전히 부족하며, 해석연구 또한 미흡하다. 이에 본

* Corresponding author:

Tel: +82-31-201-3815; E-mail: leeyh@khu.ac.kr
Received August 13 2014; Revised September 25 2014
Accepted September 26 2014

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 보의 처짐 예측이 가능한 유한요소해석 방법을 제시하고, 기존 연구자들의 실험결과와 비교함으로써 해석방법의 타당성을 검증하였다. 또한 제시된 해석모델을 이용하여 편심, 스펠-깊이비, 프리스트레싱 크기의 변화에 따른 처짐을 분석함으로써 향후 프리스트레스트 콘크리트 보의 처짐 연구에 기초자료를 제공하는 것에 목적을 두었다.

2. 프리스트레스트 콘크리트의 처짐

2.1 ACI Building Code

ACI Building Code(ACI Committee 318 2011)에서 프리스트레스트 콘크리트 휨부재는 미리 압축을 가한 인장구역에서 사용하중에 의한 인장연단응력에 따라 Fig. 1과 같이 비균열등급, 부분균열등급, 그리고 완전균열등급으로 구분된다. 비균열등급 부재는 최종하중단계에서 콘크리트의 인장응력이 제한되어 균열이 발생하지 않는 부재이고 이 부재의 경우 처짐을 계산할 때 전체 단면에 대한 전단면2차모멘트를 사용한다. 부분균열등급 부재는 최종하중단계에서 폭이 작은 균열을 허용하는 부재이며 이 부재의 처짐을 계산할 때에는 균열단면2차모멘트를 사용한다. 균열등급 부재는 최종하중단계에서 콘크리트의 인장응력에 대한 제한이 없으므로 폭이 큰 균열이 발생할 수 있는 부재이며, 이 부재의 처짐을 계산할 때에는 균열단면2차모멘트를 사용한다.

프리스트레스트 부재의 순간처짐은 기존 역학방법인 공액보법에 따라 탄성처짐 공식으로 계산하여야 한다. 전체 처짐은 프리스트레스트에 의한 솟음과 부재의 처짐을 합하여 계산하며, 이는 콘크리트 탄성계수와 균열발생여부에 따라 달라지는 단면2차모멘트를 대입하여 계산할 수 있다. 계산된 전체 처짐은 Table 1의 처짐 한계 값과 비교하여 초과여부를 판단한다.

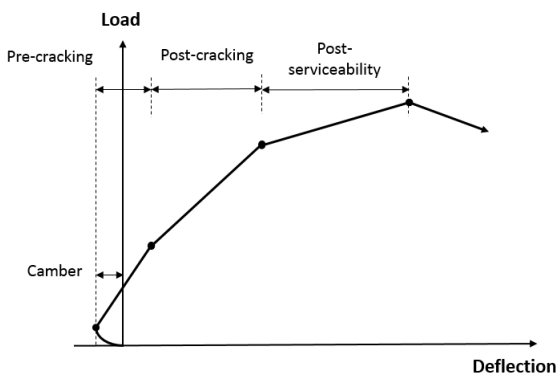


Fig. 1 Load-deflection curve of prestressed concrete members

Table 1 Maximum permissible computed deflections

Type of member	Deflection to be considered	Deflection limitation
Flat roofs not supporting or attached to nonstructural elements likely to be damaged by large deflections	Immediate deflection due to live load L	$\frac{l}{180}$
Floor not supporting or attached to nonstructural elements likely to be damaged by large deflections	Immediate deflection due to live load L	$\frac{l}{360}$
Roof or floor construction supporting or attached to nonstructural elements likely to be damaged by large deflections	That part of the total deflection occurring after attachment of nonstructural elements(sum of the long-term deflection due to all sustained loads and the immediate deflection due to any additional live load)	$\frac{l}{480}$
Roof or floor construction supporting or attached to nonstructural elements not likely to be damaged by large deflections	That part of the total deflection occurring after attachment of nonstructural elements(sum of the long-term deflection due to all sustained loads and the immediate deflection due to any additional live load)	$\frac{l}{240}$

2.2 처짐 계산

ACI Building Code에서 프리스트레스트 콘크리트 휨부재의 처짐 계산은 PCI Design Handbook(PCI Industry Handbook Committee)을 참조하도록 제시하고 있다. 앞서 설명하였듯이 프리스트레스트 콘크리트 부재의 전체 처짐은 솟음과 처짐을 합하여 계산한다. 이 때 Fig. 2와 같은 프리스트레스트 콘크리트 부재의 솟음을 구하는 식 (1)은 다음과 같다.

$$\Delta_{P_{max}} = -\frac{1}{8} \frac{Pe l^2}{EI} \quad (1)$$

여기서, P는 긴장력, e는 편심거리, l은 스펠길이를 의미하며, E는 콘크리트 탄성계수, I는 단면2차모멘트를 나타낸다.

비균열부재의 처짐은 균열이 일어나지 않은 콘크리트 전체 단면에 대한 단면2차모멘트와 규정된 콘크리트에 대한 탄성계수를 사용하여 구한다. 균열부재의 처짐을 구하는 방법은 유효단면2차모멘트를 이용하는 방법과 이단선형법(Bilinear

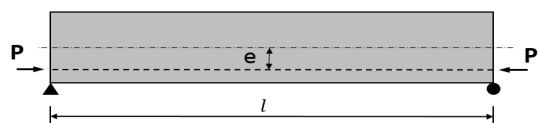


Fig. 2 Prestressed beam with straight tendon

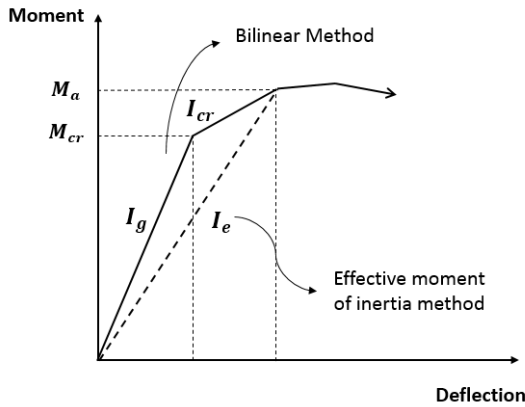


Fig. 3 Deflection calculations for cracked prestressed member

Method)을 제시하고 있다. Fig. 3은 두 가지 방법을 비교하여 보여주는 그림이다.

균열이 발생할 경우에 균열면과 비균열면을 정확하게 구분하여 단면2차모멘트를 합하는 것은 어려우므로, 설계에서는 균열이 발생한 이후의 부재의 단면2차모멘트를 균열면에서의 단면2차모멘트와 비균열면에서의 단면2차모멘트의 평균값인 유효단면2차모멘트로 계산한다. 유효단면2차모멘트의 식 (2)은 다음과 같다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr}$$

$$\frac{M_{cr}}{M_a} = 1 - \frac{f_{t1} - f_r}{f_t} \quad (2)$$

여기서, I_g 는 콘크리트 총 단면에 대한 단면2차모멘트, I_{cr} 은 균열환산단면에 대한 단면2차모멘트, f_r 은 콘크리트의 인장강도를 나타내며, f_{t1} 은 부재에서 최종적으로 계산된 총 응력, f_t 은 활하중에 의한 응력을 나타낸다.

이단선형법은 휨균열발생을 경계로 하여 균열이 발생하기 전에는 전단면2차모멘트를 사용하여 처짐을 계산하고, 휨균열이 발생한 후에는 균열단면2차모멘트를 이용하여 처짐을 계산한 후에 두 값을 더하는 방법이다. 이 때 균열단면 2차모멘트는 정확한 계산 대신, 다음과 같은 식 (3)을 사용한다.

$$I_{cr} = n_p A_{ps} d_p^2 (1 - 1.6 \sqrt{n_p \rho_p}) \quad (3)$$

여기서, n_p 는 긴장재의 탄성계수비, A_{ps} 는 긴장재의 단면적, d_p 는 압축연단에서 긴장재 단면 중심까지의 거리를 나타내며, ρ_p 는 긴장재의 비(= $A_{ps}/(b \cdot d_p)$)를 나타낸다.

3. 유한요소해석 모델

3.1 유한요소모델

본 논문에서는 프리스트레스트 콘크리트 보의 처짐 해석을 위해 Kim 등(2010)이 제안한 감절점 쉘 요소의 정식화를 기본으로 하는 적층 쉘 요소를 적용하였다. 프리스트레스트 콘크리트는 두께 방향으로 불연속적인 재료특성을 가지고 있기 때문에 기존의 통상적인 쉘유한요소를 이용하여 정확한 구조물의 강성을 계산하기가 용이하지 않다. 그에 반해 적층 쉘 요소는 두께 방향의 여러 층으로 쉘을 나누어 각 응력을 산정하기 때문에 프리스트레스트 콘크리트와 같이 두께 방향으로 불연속적인 재료 특성을 비교적 정확히 고려할 수 있다. 적층 쉘 요소는 다음과 같은 기본적인 가정을 바탕으로 한다.

- 1) 변형 전 중립면에 수직인 평면은 변형 후에도 평면을 유지한다.
- 2) 중립면에 수직으로 작용하는 응력에 의해 생성된 변형 에너지를 무시한다. 즉, 중립면에 수직인 응력성분은 없다고 가정한다.

요소의 각 절점당 자유도수는 3방향의 직선변위(u, v, w)와 2개의 회전변위(α, β)를 가지며, 직선변위와 회전변위는 각각 독립적으로 가정한다. 각 층의 중간에서 계산된 응력은 두께방향으로 일정하다고 가정하며 각 힘은 다음 식 (4)을 이용하여 구할 수 있다.

$$N_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x dz = \frac{h}{2} \sum_{i=1}^n \sigma_x^i \Delta \zeta^i \quad (4)$$

$$M_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x dz = \frac{h^2}{4} \sum_{i=1}^n \sigma_x^i \zeta^i \Delta \zeta^i$$

여기서, N_x 는 x 축의 수직력(Normal force), M_x 는 x 축의 휨모멘트(Bending moment)를 나타내며, h 는 전체 적층 쉘의 두께, n 은 층의 수, 그리고 ζ 는 층의 두께를 나타낸다.

3.2 재료모델

3.2.1 콘크리트의 재료모델

본 논문에서는 재료비선형성을 고려하기 위하여 균열이 발생하지 않은 콘크리트와 균열이 발생한 콘크리트로 나누어 재료 모델을 구성하였다. 균열이 발생하기 전 콘크리트는 등방성의 탄성계수를 가지는 것으로 가정하였고, 균열이 발생한 후 콘크리트는 직교 이방성 재료로 가정하였다. 콘크리트의 압축거동을 나타내기 위해서 Thorenfeldt 등(1987)이 제안

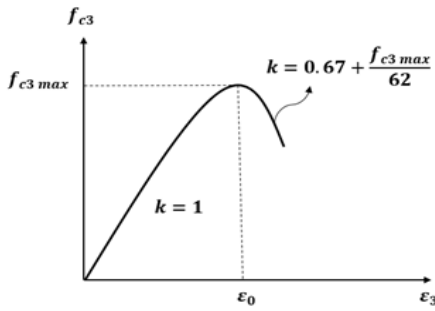


Fig. 4 Compressive behavior model of concrete (Collins et al., 1989)

하고 Collins와 Parasz(1989)이 수정한 모델을 적용하였으며, 그 내용은 다음 식 (5)과 같다. Fig. 4는 콘크리트의 압축거동을 나타내는 그림이다.

$$\begin{aligned} \epsilon_1 < \epsilon_{cr}, f_{c1} &= E_c \cdot \epsilon_1 & (5) \\ f_{c3} &= -\frac{f_{c3_{max}}(n\epsilon_3/\epsilon_0)}{(n-1) + (\epsilon_3/\epsilon_0)^{nk}} \\ f_{c3_{max}} &= \frac{f'_c}{0.8 - 0.34 + (\epsilon_1/\epsilon_0)} \leq f'_c \\ n &= 0.8 + \frac{f_{c_{max}}}{17} \\ \epsilon_3 < \epsilon_0, k &= 1 \\ \epsilon_3 > \epsilon_0, k &= 0.67 + \frac{f_{c_{max}}}{62} \end{aligned}$$

여기서, f'_c 는 콘크리트 압축강도, f_{c1}, f_{c2}, f_{c3} 는 주응력 방향의 콘크리트 응력, $f_{c3_{max}}$ 는 균열이 발생한 콘크리트의 압축강도를 나타내며, ϵ_0 는 최대 압축응력에서의 변형률, $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 는 주변형률을 나타낸다. 또한, n 은 곡선적합계수이며, k 는 최대압축강도 도달 후 응력감소를 고려하기 위한 계수이다.

본 논문에서 콘크리트의 인장거동을 나타내기 위하여 Tension stiffening 효과를 고려하였다. 콘크리트와 철근 사이의 부착거동으로 인해 인장력의 일부를 콘크리트가 부담하게 되는 Tension stiffening 효과는 콘크리트의 구성방정식 모델로 정의하였다(Izumo, 1992).

3.2.2 철근 및 긴장재의 재료모델

본 논문에서 철근은 항복응력에 도달하기 전까지는 탄성거동을 하고 항복응력 도달 후에는 완전 소성거동하는 것으로 가정하는 bi-linear 방식을 선택하였다. 철근의 응력은 다음의 식 (6)으로 구할 수 있다. Fig. 5는 철근 및 긴장재의 거동을 나타내는 그림이다.

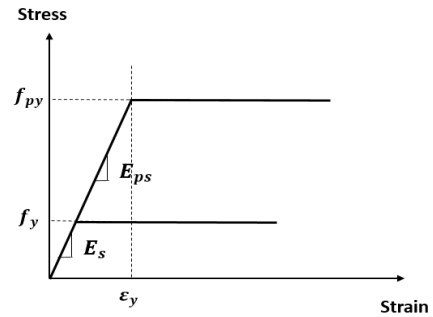


Fig. 5 Stress-strain relationship of steel and tendon

$$f_s = E_s \times \epsilon_s \leq f_y \quad (6)$$

여기서, f_s 는 철근의 응력, E_s 는 철근의 탄성계수, ϵ_s 는 철근의 변형률을 나타내며, f_y 는 철근의 항복응력을 나타낸다.

프리스트레스트 콘크리트에 사용되는 긴장재는 형상에 따라서 PS강선, PS강연선, PS강봉의 세 종류로 구분되지만, 본 논문에서는 PS강연선으로 재료를 선정하였다. PS 강연선은 탄성범위 내에서 탄성계수가 일정하며, 철근의 탄성계수와 같은 값을 사용한다. 따라서 본 해석모델에서는 철근과 마찬가지로 항복응력 도달 후에는 완전 소성거동하는 것으로 가정하였다.

3.3 해석 알고리즘

본 논문에서는 부재의 두께에 걸쳐 수치적분을 수행함으로써 요소의 강성행렬을 산정하였다. 총 하중을 부재에 가하고 재료는 초기 선형 탄성거동하며, 이에 따라 변위를 찾는다. 변위가 결정되는 식 (7)은 다음과 같다.

$$[K_i]\{D\}_{i+1} = R \quad (7)$$

여기서, $[K_i]$ 는 i 번 반복을 통해 얻은 전체 강성행렬, $\{D\}_{i+1}$ 는 $i+1$ 번의 반복에서 계산된 변위 벡터를 나타내며, $\{R\}$ 은 가해진 하중을 나타낸다.

계산된 변위를 통해 다음 단계의 새로운 강성행렬이 계산되면서 재료 비선형을 고려하게 되고, 총 하중이 다시 가해지면서 새로운 강성행렬이 산정되어 이에 따라 변위를 산정하게 된다. 이 과정은 수렴에 도달할 때까지 반복되며 수렴은 다음 식 (8)을 기준으로 하였다.

$$\sqrt{\frac{\sum (d_{i+1} - d_i)^2}{\sum (d_{i+1})^2}} \times 100\% < 1 \quad (8)$$

여기서, d_{i+1} 는 현재 단위의 변위, d_i 는 이전 단계의 변위를 나타낸다.

4. 유한요소해석 모델의 검증

본 논문에서 제안한 유한요소해석모델의 타당성을 검증하기 위해 기존 연구자들의 프리스트레스트 콘크리트 보의 실험 결과와 해석결과를 비교하였다. 해석에 있어 다음의 제한을 두었다.

- 최대하중 도달 후 콘크리트 균열 발생 및 파괴로 인한 하중 저감은 고려하지 않는다.
- 프리스트레싱의 손실은 고려하지 않는다.
- 프리스트레싱을 위한 강연선은 직선 배치로 제한한다.

4.1 Yang 등(2011)의 실험

Yang 등(2011)은 Fig. 6과 같이 상부 2점 대칭 하중을 받는 프리스트레스트 경량 콘크리트 보의 휨 거동을 평가하였다. 단면 폭과 전체 깊이는 각각 205mm와 330mm이며, 지점 중심간 길이는 5310mm이다. 전단 철근은 300mm 간격으로 배근되어 있으며, 긴장재로 이용된 3연선의 직경은 2.9mm이다. 콘크리트 압축강도는 30MPa이며, 긴장재의 항복강도는 1741MPa를 사용하였다. 직경 10mm와 6mm 철근의 항복강도는 각각 383MPa와 399MPa이다. 프리스트레싱 크기는 1270MPa이다. 콘크리트 압축강도, 철근 및 강연선의 항복강도를 제외한 재료 물성치의 정확한 값을 알기 어

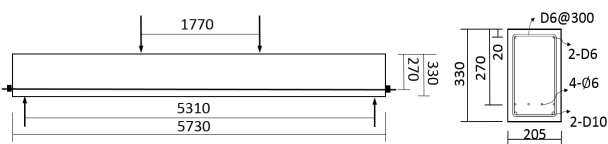


Fig. 6 Specimen configuration of Yang *et al.*(2011) experiment

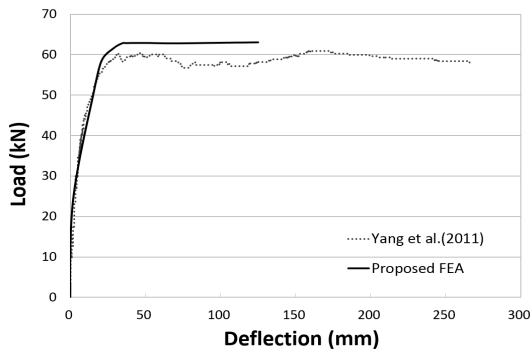


Fig. 7 Comparison of As-1.0 specimen and analysis result

렵기 때문에 콘크리트 탄성계수는 $E_c = 4700 \sqrt{f_c}$ (MPa)를, 포와송비 ν 는 0.15의 값을 사용하였다.

경계조건은 단순지지로 하였으며 비교 대상의 실험과 동일하게 2점 집중하중을 가력하였다. 해석의 편의를 위해 시험체 단면은 폭 200mm, 깊이 330mm로 하고 길이는 5700mm로 하여 114개의 요소로 모델링하였으며, 보 두께 방향으로 15개의 층으로 구분하였다. 철근은 2번째와 14번째 층에 위치하도록 하였으며 프리스트레싱을 위한 강연선은 4번째 층에 위치하도록 하였다.

Yang 등(2011)의 실험결과와 본 논문에서 사용한 유한요소해석 결과를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에 나타나는 바와 같이 본 논문에서 사용한 유한요소해석 모델이 실험체 중앙부에서의 처짐을 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타났다. 실험체에 재하한 하중이 약 60kN일 때 처짐을 비교한 결과, 실험결과 대 해석결과의 비가 0.90로 나타났다. 본 논문에서 제안한 유한요소해석 모델은 항복 이전까지의 선형거동을 실험체의 거동과 매우 유사하게 예측하고 있으며, 항복 이후의 거동 또한 비교적 유사하게 예측한다고 판단된다.

4.2 Padmarajaiah와 Ramaswamy(2002)의 실험

Padamarajaiah와 Ramaswamy(2002)은 Fig. 8과 같이 상부 2점 대칭 하중을 받는 프리스트레스트 콘크리트 보의 휨 거동을 평가하였다. 단면 폭과 전체 깊이는 각각 105mm와 240mm이며, 지점 중심간 길이는 2000mm이다. 전단철근의 직경은 6mm이며, 75mm 간격으로 배근되어 있다. 콘크리트의 압축강도는 65MPa이며, 7mm직경의 긴장재의 프리스트레싱 크기는 1835MPa이다. 콘크리트 탄성계수는 $E_c = 4700 \sqrt{f_c}$ (MPa)를, 포와송비 ν 는 0.15의 값을 사용하였다. 경계조건은 단순지지로 하였으며 비교 대상의 실험과 동일하게 2점 집중하중을 가력하였다. 해석 모델의 단면 및 길이는 비교 대상 시험체와 동일하게 하였으며 66개의 요소로 모델링하였다. 보 두께 방향으로 10개의 층으로 구분하여 하부 철근은 2번째 층에 위치하도록 하였으며 프리스트레싱을 위한 강연선은 4번째 층에 위치하도록 하였다.

Padamarajaiah와 Ramaswamy(2002)의 실험결과와 본 논문에서 사용한 유한요소해석 결과를 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 전반적인 거동은 유사하게 나타났으나, 초기에 유사하게 진행되던 강성 차이를 나타내면서 항복을 시작하는 지점에서 차이가 발생하였다. 하중이 약 81kN일 때 처짐을 비교한 결과 약 실험결과 대 해석결과의 비가 0.87로 나타났다. 초기의 강성은 유사한 것으로 보아 이는 실험과정에서

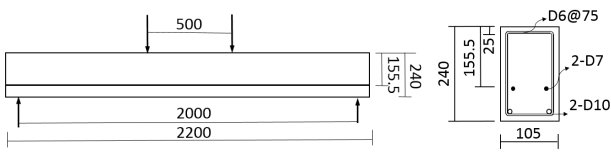


Fig. 8 Specimen configuration of Padmarajaiah and Ramaswamy(2002) experiment

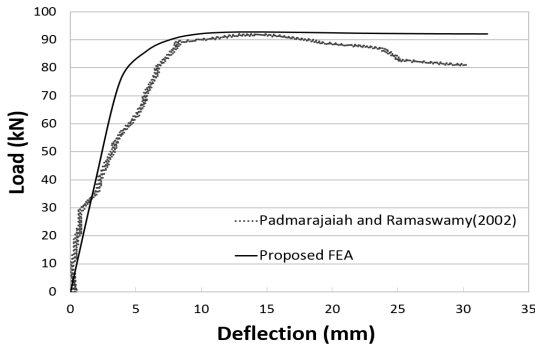


Fig. 9 Comparison of A-PP/f0-0 specimen and analysis result

긴장재와 콘크리트가 완전히 부착되지 않아 슬립현상이 발생하여 하중에 따른 처짐이 증가한 것으로 판단된다. 실험체가 비선형거동을 시작하는 지점과 유한요소해석 모델이 비선형 거동을 시작하는 지점은 거의 일치하며, 이후의 비선형거동은 매우 유사하게 예측하였다.

5. 변수 해석

본 논문에서는 프리스트레스트 보의 편심, 스패-깊이비, 그리고 프리스트레싱 크기에 따른 처짐의 변화를 파악하고자 앞서 기술한 유한요소해석 모델을 사용하여 변수 해석을 수행하였다. 유한요소해석 결과와 수계산 결과를 비교하기 위하

Table 2 Variable table

Specimen	b (mm)	h (mm)	l (mm)	P (kN)	f'_c (MPa)	e (mm)
A-1	300	600	12000	401	35	50
A-2	300	600	12000	401	35	100
A-3	300	600	12000	401	35	150
A-4	300	600	12000	401	35	250
A-5	300	600	9600	803	35	200
B-1	300	600	10800	803	35	200
B-2	300	600	12000	803	35	200
B-3	300	600	13200	803	35	200
B-4	300	600	14400	803	35	200
C-1	300	600	12000	201	35	200
C-2	300	600	12000	401	35	200
C-3	300	600	12000	604	35	200
C-4	300	600	12000	1006	35	200

여 앞서 설명한 수계산으로 숫음을 계산할 때 사용되는 변수를 주요변수로 선정하였다. 주요 변수에 관한 내용은 Table 2에 나타내었다.

5.1 편심에 따른 처짐

편심에 따른 처짐의 변화를 보기 위하여 편심은 50mm, 100mm, 150mm, 200mm, 250mm를 변수로 두었다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 유한요소해석값과 수계산값 모두 편심이 증가할수록 스패-처짐비가 증가하며 처짐이 감소하는 것을 알 수 있다. 편심이 150mm일 때 수계산값과 유한요소해석값은 각각 11.28mm과 11.20mm이며, 수계산결과 대 유한요소해석 결과의 비가 0.99로 매우 정확하다. 하지만 편심이 150mm보다 작아질수록 수계산값과 유한요소해석값이 차이를 나타낸다. 편심이 50mm일 때 수계산값과 유한요소해석값은 각각 36.32mm와 19.09mm이며, 수계산결과 대 유한요소해석 결과의 비는 0.53이다. 이처럼 편심이 작을 때 결과의 차이가 발생하는 이유는 수계산이 편심이 매우 작을 경우를 고려하지 않기 때문이라고 판단된다. 일반적으로 프리스트레스트 부재를 설계할 때에는 편심이 매우 작아지면 프리스트레스트 부재를 사용하는 의미가 없어지므로 편심을 작게 설계하지 않기 때문이다.

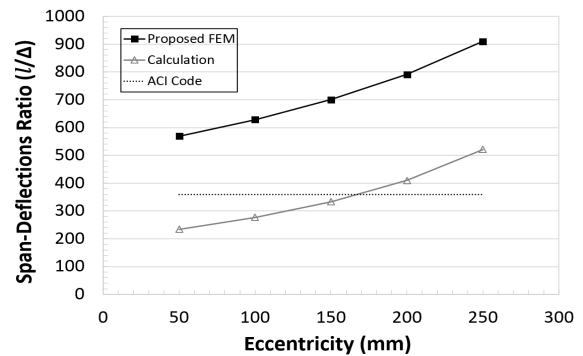


Fig. 10 Effects of eccentricity

5.2 스패-깊이비에 따른 처짐

스패-깊이비는 16, 18, 20, 22, 24를 변수로 두어 유한요소해석을 수행하였으며, 해석결과는 Fig. 11에 나타내었다. 해석결과는 앞서 검증한 유한요소해석 모델의 결과값과 앞서 설명한 수계산값, 그리고 ACI Building Code에서 제시하고 있는 처짐 한계값을 비교하였다. 이 때, 과도한 처짐에 의해 손상되기 쉬운 비구조 요소를 지지 또는 부착하지 않은 바닥구조의 처짐 한계값인 $l/360$ 을 사용하였다. Fig. 10에서 보면, 수계산값과 유한요소해석값 모두 스패-깊이비

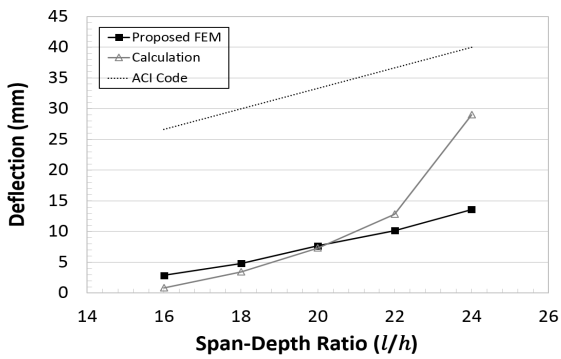


Fig. 11 Effects of span-depth ratio

가 커질수록 처짐이 증가하며, ACI Building Code에서 제시하고 있는 처짐 한계값보다 적은 값을 나타낸다. 스패-깊이비가 20일 때 수계산결과와 유한요소해석 결과가 각각 7.34mm와 7.25mm이며, 수계산결과 대 유한요소해석 결과의 비가 0.99이다. 또한 스패-깊이비가 20을 넘어서면서 수계산값이 유한요소해석값에 비해 매우 급등히 높아지는 것을 확인할 수 있다. 스패-깊이비가 24일 때 수계산결과와 유한요소해석결과는 각각 29.02mm와 13.57mm이며, 수계산결과 대 유한요소해석 결과의 비가 0.47이다. 이를 통해 스패-깊이비가 커질수록 수계산이 유한요소해석에 비해 처짐을 과대평가하고 있는 것을 확인하였다.

5.3 프리스트레싱 크기에 따른 처짐

프리스트레싱 크기에 따른 처짐의 변화를 보기 위하여 프리스트레싱 크기는 201kN, 401kN, 604kN, 803kN을 변수로 두어 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 유한요소해석값과 수계산값 모두 프리스트레싱 크기가 커질수록 스패-처짐비가 증가하며 처짐이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 프리스트레싱 크기가 클 때에는 유한요소해석값과 수계산값이 거의 동일한 처짐을 보였고, 프리스트레싱 크기가 작아질수록 두 값의 차이가 증가하는 것을

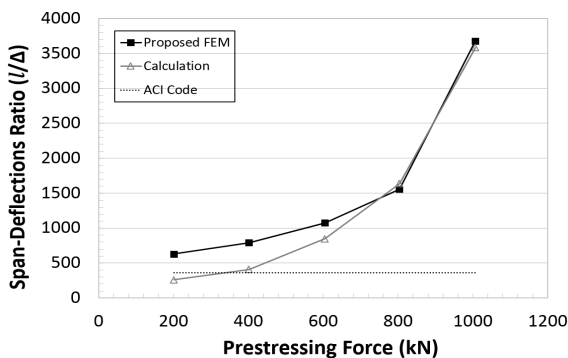


Fig. 12 Effects of prestressing force

확인하였다. 프리스트레싱 크기가 1006kN일 때 수계산값과 유한요소해석값은 각각 3.35mm와 3.26mm이며, 수계산결과 대 유한요소해석 결과의 비는 0.97로 매우 정확하다. 반면에 프리스트레싱 크기가 201kN일 때, 수계산값과 유한요소해석값은 각각 46.34mm와 19.09mm이다. 이 때, 수계산결과 대 유한요소해석 결과의 비는 0.41이며, 수계산값은 ACI Building Code의 처짐 한계값을 초과하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 수계산이 유한요소해석 모델에 비해 프리스트레싱 크기가 작을 때의 처짐을 과대평가한다고 판단된다. 그 이유 또한 앞서 설명한 바와 같이, 프리스트레싱 크기가 작아지면 프리스트레스트 부재를 사용하는 의미가 없어지므로 수계산이 프리스트레싱 크기가 매우 작을 경우는 고려하지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 프리스트레스트 보의 처짐을 예측할 수 있는 유한요소해석 모델을 제시하고 타당성을 검증하여 변수해석을 수행하였다. 변수는 프리스트레스트 보의 편심, 스패-깊이비, 그리고 프리스트레싱 크기를 선정하였다.

- (1) 프리스트레스트 보의 처짐 예측을 위해 재료비선형이 고려된 콘크리트 및 철근, 강연선의 거동을 고려할 수 있는 구성모델을 조합하여 적층 쉘 요소를 사용한 유한요소해석 모델에 적용하였다. 기존 연구자들의 실험결과와 본 논문에서 제시한 유한요소해석 모델의 결과를 비교한 결과, 하중에 따른 처짐을 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타났다.
- (2) 편심에 대한 변수 해석결과, 수계산값과 유한요소값 모두 편심이 증가할수록 처짐이 감소하며, 편심이 매우 작아지면 수계산이 처짐을 과대평가하는 것을 확인하였다. 그 이유는 수계산이 편심이 매우 작을 경우를 고려하지 않기 때문이라고 판단된다.
- (3) 스패-깊이비에 대한 변수 해석결과, 수계산값과 유한요소해석값 모두 스패-깊이비가 커질수록 처짐이 증가하는 것을 확인하였다. 또한 스패-깊이비가 커질수록 수계산이 유한요소해석에 비해 처짐을 과대평가한다는 것을 확인하였다.
- (4) 프리스트레싱 크기에 따른 변수해석 결과, 수계산값과 유한요소해석값 모두 프리스트레싱 크기가 커질수록 처짐이 감소하는 것을 확인하였으며, 수계산이 유한요소해석 모델에 비해 프리스트레싱 크기가 작을 때의 처짐을 과대평가한다고 판단된다. 그 이유 또한, 수계

산이 프리스트레싱 크기가 매우 작을 경우를 고려하지 않기 때문이라고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2013R1A2A2A01067754).

References

ACI Committee 318-11 (2011) *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-11)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, p.503.

Chao, S.H., Naaman, A.E. (2006) Simplified Calculation of Short-Term Deflection in Prestressed Two-Way Flat Slabs, *ACI Struct. J.*, 103(6), pp.226~233.

Collins, M.P., Parasz, A. (1989) Shear Strength for High Strength Concrete, Bulletin D' Information Design Aspects of High Strength Concrete, *CEB 193*, pp.75~83.

Izumo, J., Shin, H., Maekawa, K., Okamura, H. (1992) An Analytical Model for RC Pannel Subjected to In-Plane Stress Concrete Shear in Earthquake, *Elsevier Applied Science*, London and New York, pp.206~215.

Kim, M.S., Lee, Y.H., Kim, H.C. (2010) Analytical Study on Punching Shear of Reinforced Concrete Flat Plates, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 23(4), pp.409~416.

Padmarajaiah, S.K., Ramaswamy, A. (2004) Flexural Strength Prediction of Steel Fiber Reinforced High-Strength Concrete in Fully/Partially Prestressed Beam Specimens, *Cem. & Concr. Compos.*, 26(4), pp.275~290.

PCI Industry Handbook Committee (1999) *PCI design handbook Precast and Prestressed Concrete Fifth Edition*, Precast/Prestressed Concrete Institute, U.S.A., p.632.

Rao, S.V.K.M., Dilger, W.H. (1992) Evaluation of Short-Term Deflections of Partially Prestressed Concrete Members, *ACI Struct. J.*, 89(1), pp.71~78

Thorenfeldt, E.I., Tomaszewicz, A., Jensen, J.J. (1987) *Mechanical Properties of High Strength Concrete and Application in Design, Proceedings of the Symposium Utilization of High Strength Concrete*, Stavanger, Norway.

Yang, K.H., Moon, J.H., Byun, H.Y. (2011) Effect of Partial Prestressing Ratio and Effective Prestress on the Flexural Behavior of Prestressed Lightweight Concrete Beams, *J. Korea Concr. Inst.*, 23(1), pp.39~48.

요 지

본 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 보의 처짐 예측을 위해 재료비선형이 고려된 콘크리트 및 철근, 강연선의 거동을 고려할 수 있는 구성모델을 조합하여 적층 쉘 요소를 사용한 유한요소해석 모델에 적용하였다. 이를 기존 연구자들의 실험 결과와 비교함으로써 모델의 타당성을 검증하였고, 스펠-깊이비, 편심 그리고 프리스트레싱 크기에 대한 처짐을 해석하고 이를 수계산 결과와 비교하였다. 그 결과, 스펠-깊이비가 커질수록, 편심이 작아질수록, 프리스트레싱 크기가 작아질수록 처짐이 증가하는 것을 확인하였다. 또한, 편심이 매우 작을 경우와 프리스트레싱 크기가 매우 작을 경우에는 수계산이 처짐을 과대평가한다는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 프리스트레스, 처짐, 유한요소해석, 변수 해석