

유한요소법을 이용한 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단 거동 해석

김혜경¹ · 김한수^{1*}

¹건국대학교 건축학과

Finite Element Analysis to Determine Shear Behavior of Prestressed Concrete Deep Beams

Hui-Jing Jin¹ and Han-Soo Kim^{1*}

¹Department of Architecture, Konkuk Univ., Seoul, 05029, Korea

Abstract

In this study, the shear strength of prestressed concrete deep beams is predicted using finite element analysis, and the variation in the shear strength according to the degree of prestressing is investigated. Numerical analysis results are compared with results obtained by the strut-and-tie model and associated experiments. Numerical analyses are performed on prestressed concrete deep beams with different values of concrete strength, effective prestress, ratio of tensile reinforcement, and shear span to effective depth ratio. The shear strength predicted by the numerical analysis is similar to the experimental value obtained, with an error of less than 5%. However, the strut-and-tie model highly overestimated the shear strength of prestressed concrete deep beams with a concentrated loading area. The ultimate shear capacity of prestressed concrete deep beams increased linearly with increasing prestress applied to the tendon.

Keywords : deep beam, shear, prestressed, strut-and-tie, FEA, abaqus

1. 서 론

깊은 보의 전단 경간과 유효 깊이의 비가 2보다 작거나 순경간이 부재 깊이의 4배 이하인 부재이다(ACI, 2014). 철근 콘크리트 깊은 보의 한 쪽 면에서 하중이 작용하고 그 반대 면에서 지지되는 부재로 충분한 전단 강도를 갖도록 설계되어야 한다.

철근 콘크리트 깊은 보에 대한 연구는 주로 전단 강도에 영향을 주는 요소에 관하여 진행되어 왔다. Smith와 Vantsiotis (1982)은 실험을 통하여 깊은 보의 전단 강도에 영향을 미치는 주요한 요소가 콘크리트의 강도, 전단 경간과 유효 깊이의 비, 전단 철근임을 보였다. 깊은 보의 주로 전단 파괴가 발생하며 주로 strut-and-tie 모델(Schlaich and Schafer, 1991)에 따라 설계한다. Wilhelm Ritter가 1899년에 철근 콘크리트 보에 대한 트러스 모델을 제안하였고 1902년 Emil

Mörsch가 발전시켰다. 이후 트러스 모델에 대한 연구가 활발히 진행되었으며(Schlaich and Schafer, 1991) 트러스 모델을 기초로 하여 strut-and-tie 모델이 발전되었다. 많은 연구들이 strut-and-tie 모델을 사용하여 깊은 보의 전단 강도의 예측식을 제안하였고 ACI 코드(2014) 등 구조설계기준에서도 깊은 보를 설계하는 방법으로 사용되고 있다.

콘크리트의 강도를 증가시키거나 보의 크기를 증가시키는 대신 프리스트레스트 텐던을 사용하면 깊은 보의 전단 강도를 더욱 효과적으로 증가시킬 수 있다. 전단 강도를 증가시키기 위해 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보가 제안되었지만 이에 대한 연구는 많지 않다. 설계 기준에서도 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보에 대한 명확한 기준을 제시하고 있지 않기 때문에 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단 강도 예측에 관한 추가 연구가 필요한 실정이다. 지금까지의 프리스트레스트 콘크리트

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2049-6110; E-mail: hskim@konkuk.ac.kr

Received February 25 2019; Revised April 30 2019;

Accepted April 30 2019

©2019 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.

깊은 보에 관한 연구는 콘크리트 강도와 전단 경간-유효 깊이의 비에 관해서만 진행되었으며 Tan 등(2001)은 strut-and-tie 모델을 사용한 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단 강도 예측식을 제안하였다.

본 연구에서는 유한요소법을 사용한 수치해석법으로 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단 거동을 예측하고 텐던에 가해진 프리스트레스를 주요 변수로 하여 전단 강도의 변화를 살펴보고자 한다. 실험 결과와의 비교를 통해 유한요소법을 사용한 수치해석 방법의 타당성을 검증하고 프리스트레스 도입 정도와 전단 강도의 관계를 살펴본다.

2. 깊은 보의 전단 강도 예측식

깊은 보의 전단 강도는 주로 strut-and-tie 모델을 사용하여 예측되며 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단 강도 역시 strut-and-tie 모델을 사용하여 추정한다. 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 strut-and-tie 모델은 Fig. 1과 같다.

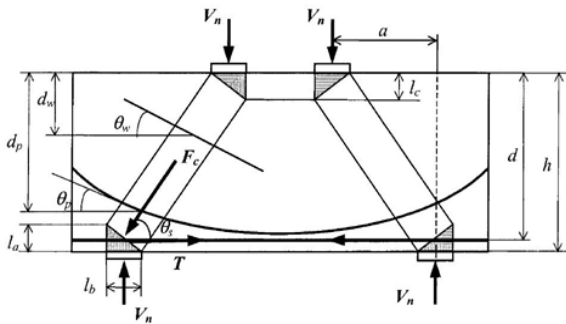


Fig. 1 Proposed strut-and-tie model(Tan et al., 2001)

본 연구에서는 Tan 등(2001)이 제안한 깊은 보의 전단강도 예측식을 사용하였다. 이 예측식은 깊은 보의 절점 영역(Nodal Zone)에서 파괴가 발생한다고 가정하고 전단 강도 예측식을 전개한다. Mohr-Coulomb 이론을 이용한 절점 영역(nodal zone)에서의 파괴 이론은 다음 식과 같다(Tan et al., 2001).

$$\frac{f_1}{f_t} + \frac{f_2}{f_c} = 1 \quad (1)$$

여기서, f_1 과 f_2 는 각각 절점 영역의 인장 응력과 압축응력을 나타내며 f_c 는 콘크리트의 압축 강도, f_t 는 콘크리트와 철근의 효과를 모두 고려한 인장 강도를 나타낸다. 프리텐션과 부착 포스트 텐션 깊은 보의 경우 f_t 는 식 (2)에 의해 계산되고 비 부착 포스트텐션 깊은 보의 경우 식 (3)을 사용하여 인장 강도를 계산한다.

$$f_t = 2 \frac{A_s f_y \sin \theta_s}{A_c / \sin \theta_s} + 2 \frac{A_w f_{yw} \sin(\theta_s + \theta_w)}{A_c / \sin \theta_s} \cdot \frac{d_w}{d} + \frac{2(F_{pu} - F_{pe}) \sin(\theta_s + \theta_p)}{A_c / \sin \theta_s} \cdot \frac{d_p}{d} + f_{ct} \quad (2)$$

$$f_t = \frac{2A_s f_y \sin \theta_s}{A_c / \sin \theta_s} + \frac{2A_w f_{yw} \sin(\theta_s + \theta_w)}{A_c / \sin \theta_s} \cdot \frac{d_w}{d} + f_{ct} \quad (3)$$

여기서, A_s, A_w 는 각각 주철근과 웨브철근의 단면적, f_y, f_{yw} 는 각각 주철근과 웨브철근의 항복강도를 나타낸다. A_c 는 깊은 보의 단면적이며 F_{pu} 와 F_{pe} 는 각각 텐던의 극한 강도와 유효 강도를 나타낸다. $\theta_s, \theta_w, \theta_p$ 는 각각 대각 스트럿과 주철근 사이의 각, 웨브철근과 수평축 사이의 각, 텐던과 스트럿이 교차하는 점에서의 텐던과 수평축 사이의 각을 나타낸다. d, d_p, d_w 는 각각 유효 깊이, 보의 윗면에서부터 텐던까지의 수직 거리, 보의 윗면에서부터 스트럿과 웨브철근이 교차하는 점까지의 수평거리를 나타내며 f_{ct} 는 콘크리트의 인장 강도로 ACI 319 기준에 의하여 식 (4)로 계산된다.

$$f_{ct} = 0.56 \sqrt{f_c'} \quad (4)$$

프리스트레스가 가해지지 않은 경우, 절점 영역의 인장 응력 f_1 은 식 (5)로 계산되며 프리스트레스가 가해졌을 때 절점 영역의 인장 응력은 식 (6)으로 계산된다.

$$f_1 = \frac{k T \sin \theta_s}{A_c / \sin \theta_s} \quad (5)$$

$$f_1 = \frac{k T \sin \theta_s}{A_c / \sin \theta_s} - \frac{k F_{pe} \sin(\theta_s + \theta_p)}{A_c / \sin \theta_s} \cdot \frac{d_p}{d} \quad (6)$$

여기서, T 는 수평 철근의 인장력이고 k 는 $T \sin \theta_s$ 의 불균일함을 고려한 인수이다. Zeng과 Tan(1999)의 연구결과를 참고하여 본 연구에서는 $k = 2$ 를 사용한다.

이 수식들을 종합하여 Tan 등(2001)은 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단 강도 예측식을 다음과 같이 제안한다.

$$V_n = \frac{1 + \frac{2F_{pe} \sin(\theta_s + \theta_p)}{f_t A_c / \sin \theta_s} \cdot \frac{d_p}{d}}{\frac{\sin 2\theta_s}{f_t A_c} + \frac{1}{f_c' A_{str} \sin \theta_s}} \quad (7)$$

하부 절점 영역은 이축 압축-압축 응력 상태이므로 전단 강도는 다음과 같은 상한값을 가진다.

$$V_n \leq A_{str} f_c' \sin \theta_s \quad (8)$$

3. 유한요소법을 이용한 해석

3.1 재료모델

프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 수치해석을 위해 유한요소해석 프로그램인 Abaqus/Standard 2016을 사용하였다. Abaqus는 콘크리트 해석을 위해 세가지 모델을 제공하며 이 중에서 압축과 인장에서 콘크리트의 비탄성 거동을 가장 잘 묘사할 수 있는 CDP(concrete damaged plasticity) 모델을 사용하였다. Fig. 2와 같이 콘크리트의 일축 인장과 압축 거동의 응력-변형률 관계를 사용한다. 일반적인 콘크리트의 거동은 일축 압축을 받을 경우 초기 항복응력 σ_{c0} 에 도달할 때까지 선형으로 거동하고 σ_{cu} 까지는 경화구간, 이후는 연화 거동을 보인다.

경화 구간은 비탄성 변형률에 의해서 정의되고 식 (9)와 (10)으로 계산된다.

$$\tilde{\epsilon}_t^{ck} = \epsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \tag{9}$$

$$\tilde{\epsilon}_c^{ck} = \epsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \tag{10}$$

여기서, ϵ_t 와 ϵ_c 는 각각 총 인장 변형률과 총 압축 변형률이고

σ_t, σ_c 는 각각 인장 응력과 압축 응력이다. $\tilde{\epsilon}_t^{ck}$ 와 $\tilde{\epsilon}_c^{ck}$ 는 인장과 압축에서의 비탄성 변형률이다.

연화 구간에서는 손상 변수가 거동에 영향을 미친다. 손상 변수와 소성 변형률은 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$\tilde{\epsilon}_t^{pl} = \tilde{\epsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \tag{11}$$

$$\tilde{\epsilon}_c^{pl} = \tilde{\epsilon}_c^{ck} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \tag{12}$$

여기서, $\tilde{\epsilon}_t^{pl}, \tilde{\epsilon}_c^{pl}$ 는 각각 인장과 압축에서의 소성 변형률을 나타내고 d_t 와 d_c 는 각각 인장 손상계수와 압축 손상계수이며 식 (13), (14)를 통해 계산된다.

$$d_t = 1 - \frac{\frac{\sigma_t}{E_0}}{\tilde{\epsilon}_t^{ck} \left(1 - \frac{\tilde{\epsilon}_t^{pl}}{\tilde{\epsilon}_t^{ck}}\right) + \frac{\sigma_t}{E_0}} \tag{13}$$

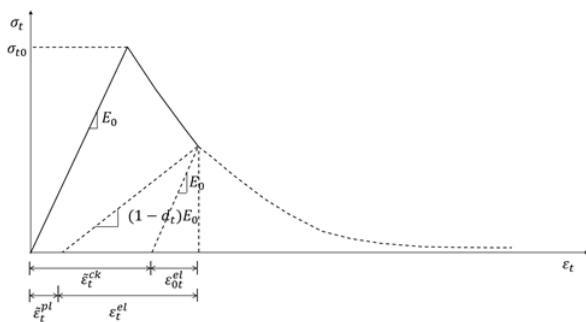
$$d_c = 1 - \frac{\frac{\sigma_c}{E_0}}{\tilde{\epsilon}_c^{ck} \left(1 - \frac{\tilde{\epsilon}_c^{pl}}{\tilde{\epsilon}_c^{ck}}\right) + \frac{\sigma_c}{E_0}} \tag{14}$$

해석시 에러를 피하기 위해 $0 < \tilde{\epsilon}_t^{pl}/\tilde{\epsilon}_t^{ck} < 1.0$ 과 $0 < \tilde{\epsilon}_c^{pl}/\tilde{\epsilon}_c^{ck} < 1.0$ 을 만족해야 하며 본 연구에서는 $\tilde{\epsilon}_t^{pl}/\tilde{\epsilon}_t^{ck}=0.5$ 와 $\tilde{\epsilon}_c^{pl}/\tilde{\epsilon}_c^{ck}=0.7$ 을 취한다.

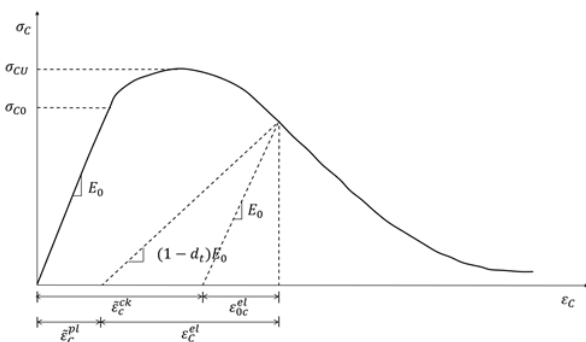
CDP모델은 Drucker-Prager의 hyperbolic 함수로 소성 거동을 나타내는데 이에 추가적으로 확대각(dilatation angel, ψ), 편심(eccentricity, ϵ), 초기 이축 압축 항복 응력과 초기 일축 압축 항복 응력의 비(σ_{b0}/σ_{c0}), 인장 메리디언(tensile meridian)에 대한 두 번째 응력 불변량의 비율(K_c) 등, 4가지의 값이 필요하다. 추가적으로 콘크리트의 강성이 작아지면서 변형률이 증가할 때 응력이 감소하는 연화 구간에서의 수렴성을 좋게 하기 위하여 점탄성 계수를 입력한다. 본 연구에서 사용된 이 5가지 매개변수의 값은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Plasticity parameter values for this study

Parameter	Value
ψ	38
Eccentricity	0.1
σ_{b0}/σ_{c0}	1.16
K_c	0.667
Viscosity parameter	0.0001



(a) Tensile stress-strain relationship



(b) Compressive stress-strain relationship

Fig. 2 Stress-Strain relationship of concrete for CDP (Abaqus, 2016)

3.2 유한요소 모델링

유한요소법을 사용한 수치해석의 정확도와 타당성을 검증하기 위해 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단 거동 실험인 Tan(1992)의 실험과 비교를 진행한다. 16개 실험체 중 4개의 모델을 선정하여 콘크리트의 강도, 전단 경간-유효깊이의 비, 프리스트레싱과 인장 철근이 전단 강도에 미치는 영향을 살펴 보았다. 모델의 기본 형상은 Fig. 3과 같고 모델의 세부사항은 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서 f_{cu} 는 콘크리트의 큐브 강도이며 ρ 는 주철근의 철근비를 나타낸다. 콘크리트의 실린더 강도인 f'_c 는 큐브강도의 80%를 취한다. 프리스트레싱 비를 나타내는 변수 PPR(partial prestressing ratio)은 식 (15)에 의하여 계산되며 프리스트레싱의 정도를 나타내는 변수 DOP(degree of prestressing)은 식 (16)에 의해 계산된다.

$$PPR = \frac{A_{ps}f_{py}}{A_{ps}f_{py} + A_{sf}f_y} \quad (15)$$

$$DOP = \frac{A_{ps}f_{pc}}{A_{ps}f_{py} + A_{sf}f_y} \quad (16)$$

여기서, A_{ps} 는 텐던의 단면적, f_{py} 와 f_{pc} 는 각각 텐던의 항복 강도와 텐던에 가해진 유효 프리스트레싱을 나타낸다.

본 연구에서 콘크리트의 압축 거동은 식 (17)과 (18)과 같은 Carreira와 Chu(1985)의 응력-변형률 관계식을 이용한다.

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{\beta(\epsilon/\epsilon'_c)}{\beta - 1 + (\epsilon/\epsilon'_c)^\beta} \quad (17)$$

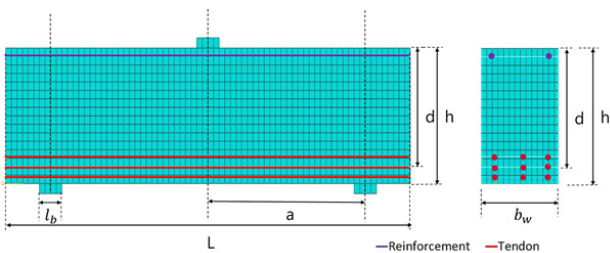


Fig. 3 Configuration of analysis models

Table 2 Characteristics of analysis models

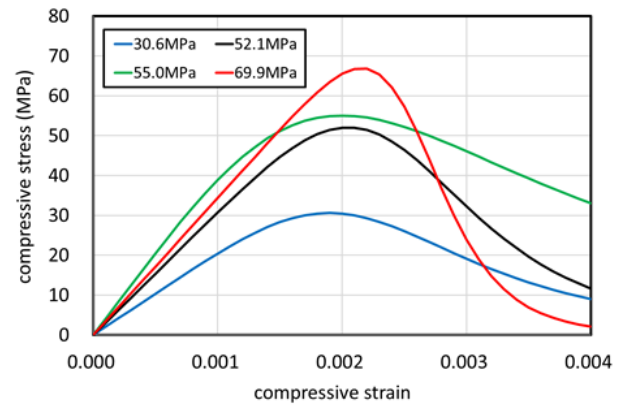
Model	a/d	a (mm)	d (mm)	L (mm)	PPR	DOP	f_{cu} (MPa)	ρ
S14	2	700	350	1800	0	0	38.3	0.00337
S24					0.333	0.220	87.4	
S34					0.667	0.483	65.1	
S44					1.000	0.685	68.8	

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{f'_c}{\epsilon'_c E_0}} \quad (18)$$

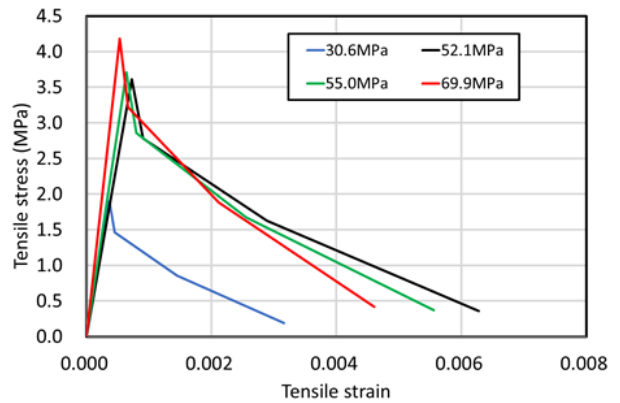
여기서, ϵ'_c 는 콘크리트의 극한 응력에서의 변형률이다.

콘크리트의 인장 거동을 표현하기 위하여 Wahalathantri *et al.*(2011)이 제안한 재료 모델을 사용하였고 Fig. 4에서 본 연구에서 사용된 콘크리트의 응력-변형률관계를 나타내었다.

주철근과 텐던은 완전소성재료로 가정하였기 때문에 탄성계수와 항복강도만을 입력하였다. 실험과 동일하게 주철근의 항복 강도는 508MPa, 텐던의 항복강도는 1480MPa로 설정하였으며 주철근과 텐던의 탄성계수는 동일하게 193.5GPa로 설정



(a) Compression



(b) Tension

Fig. 4 Uniaxial behavior of concrete used in the analysis models

하였다. 하중점과 지지점에 위치한 지지판은 탄성재료로 가정하여 탄성계수만을 입력하였고 그 수치는 200GPa이다.

콘크리트 보와 지지판은 감소적분법을 사용하는 plane stress 요소인 CPS4R 요소로 모델링하고 지지판은 콘크리트와 완전 부착으로 가정하였다. 주철근과 텐던은 T2D2 트러스 요소로 모델링을 하였고 보강재는 콘크리트와 완전 부착되었다고 가정하고 콘크리트에 삽입하였다. Abaqus에서 *INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS 방식을 사용하여 미리 강선에 인장력을 가한 다음 콘크리트를 굳히고 인장력을 푸는 프리텐션 방법을 모델링하여 프리스트레스를 도입한다. 첫 step에서 프리 스트레스를 도입한 다음 이어지는 step에서는 하중점에 하중을 가한다. 포스트텐션 방법으로 콘크리트에 프리스트레스를 가하는 경우에는 Abaqus에서 제공하는 *PRESTRESS HOLD 키워드를 이용하여 해석할 수 있다(Abaqus, 2016). 해석 모델의 상부 가력판에 분포하중을 점점 증가시키는 방법으로 실험체에 가해지는 하중을 모델링하였으며 철근 콘크리트 깊은 보가 견딜 수 있는 최대 하중에 도달하였을 때 철근 콘크리트 깊은 보가 파괴된다고 판단하며 해석은 중단된다.

3.3 수치 해석 결과

Abaqus를 이용한 S14모델의 수치해석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 수치 해석 결과와 실험 결과를 비교해 보았을 때 전단 강도는 비슷하게 나타났으나 수치 해석 결과가 실험결과에 비해 강성이 크게 나타났다. 이러한 결과는 실제 실험보다 큰 수치의 탄성 계수와 인장 강도가 수치해석에 사용되었기 때문으로 판단된다. 실제 실험에서의 탄성계수와 인장 강도가 참고 문헌(Tan 1992)에 명확히 제시되어 있지 않기 때문에 압축강도의 10%로 인장 강도를 가정하고 탄성계수는 ACI 318 기준(2014)에 제안된 식 (19)로 계산된 값으로 가정하였다. Tan과 Mansur(1992)의 논문에서는 실험에 사용된 콘크리트의 재료 강도를 큐브 압축강도인 f_{cu} 로만 제시되어 있다. 식 (19)로

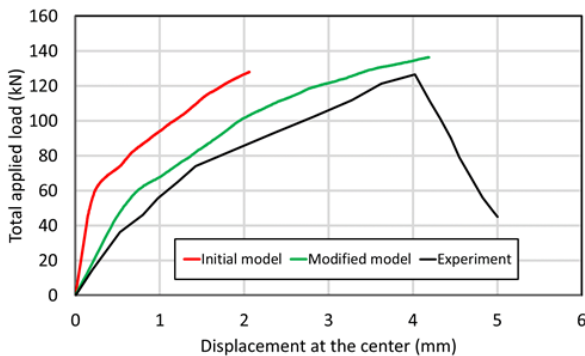


Fig. 5 Load-displacement curves of S14 from the experiment and the numerical analysis

탄성계수를 계산할 때 콘크리트의 실린더 압축 강도는 큐브 항복강도의 0.8배를 취하였다. 사용된 실린더 압축 강도와 탄성 계수 모두 설계 기준에서 제시된 수식으로 구한 값으로 실제 실험의 값과 일치하지 않는다고 판단된다.

$$E_0 = 4730 \times \sqrt{f_c} \quad (19)$$

실험결과와 수치 해석 결과를 유사하게 하려고 인장강도는 압축강도의 8%를 사용하였고 탄성계수는 계산된 초기 탄성계수의 78%를 사용하였다. 수정된 재료모델로 해석을 진행한 결과는 Fig. 5에 기존 해석 결과와 함께 나타내었다. 조정된 탄성계수의 값을 4개의 모델에 모두 동일하게 적용하였을 때 유한요소해석의 계산 결과는 실제 실험거동과 비슷한 수치를 나타내었으므로 초기탄성계수를 식 (19)로 계산된 값의 78%로 보는 것이 타당하다고 판단된다.

탄성계수와 인장 강도를 조정된 후의 4가지 해석 모델의 수치 해석 결과는 Fig. 6과 Table 3에 나타내었다. Fig. 6의 하중-변위 관계로 알 수 있듯이 수치 해석 결과와 실험 결과의 전체적인 거동이 유사하고 해석 결과가 극한 하중을 매우 유사하게 예측하고 있다. 극한하중의 실험 결과와 해석 결과의 비는 Table 3에서와 같이 평균 1.02를 나타내었다. 따라서 수치 해석 결과는 비교적 정확하게 프리스트레스트 깊은 보의 전단 강도를 예측한다고 판단된다.

프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 거동의 정확성을 확인하기 위하여 Fig. 7에서 응력 분포를 살펴보았다. 하중이 가해

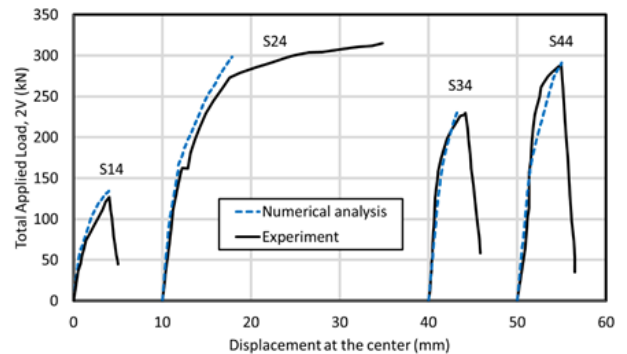


Fig. 6 Load-displacement curves of the numerical analysis and the experiment

Table 3 Comparison of shear strength(kN) of the numerical analysis and the experiment

Model	Analysis(a)	Experiment(b)	(a)/(b)
S14	68.2	62	1.10
S24	149.3	156	0.96
S34	115.7	115	1.01
S44	145.7	144	1.01
Mean			1.02

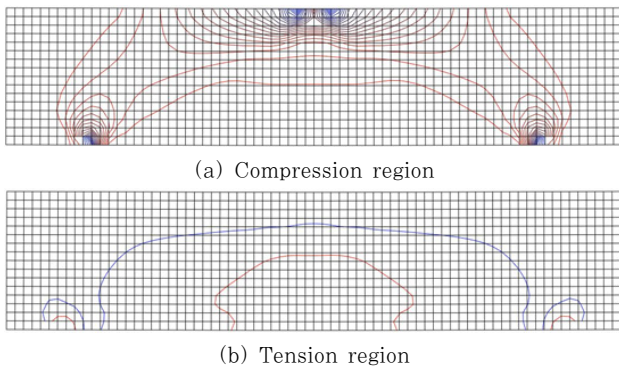


Fig. 7 Principal stress contour of the analysis model

질 때 압축 응력은 깊은 보의 하중점과 지지점을 잇는 부분에 발생하였으며 인장 응력은 하부 중앙 부분에 발생하였다. 이와 같은 응력 분포는 압축 스트럿이 하중점에서 지지점을 잇는 strut-and-tie 모델과 동일한 형태를 나타내고 있음을 보여준다.

해석 결과로 얻어진 텐던의 응력과 하중의 관계는 Fig. 8에 나타났다. 텐던의 응력을 살펴보았을 때 프리스트레스를 도입하지 않은 S14 모델의 경우 텐던의 스트레스는 0부터 점차 증가한다. 프리스트레스를 도입한 나머지 세 개의 모델에서는 하중이 가해지기 시작한 시점의 응력은 도입된 프리스트레스와 같다. S24 모델에서는 텐던이 항복강도에 도달하여 휨 파괴를 일으키는 실험과 같은 결과를 보였다. S34, S44 모델은 텐던은 항복강도에 도달하지 않았으며 콘크리트의 파괴로 인한 깊은 보의 파괴로 역시 실험과 같은 결과를 보였다.

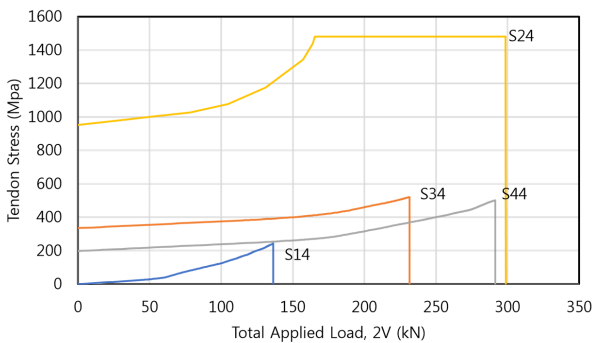


Fig. 8 Load-stress of tendon curves of the numerical analysis

콘크리트의 강도가 비슷한 S34 모델과 S44 모델을 비교해 보았을 때, DOP의 수치가 0.483인 S34 모델의 전단 강도는 DOP의 수치가 0.685인 S44 모델의 전단 강도보다 작다. 이는 DOP의 수치가 크면 철근 콘크리트 깊은 보의 전단 강도가 크다는 것을 설명한다. DOP가 철근 콘크리트 깊은 보의 전단 강도에 미치는 영향을 더 자세히 알아보기 위하여 4장에서 DOP를 주요 변수로 하여 전단 강도의 변화를 살펴보았다.

3.4 예측식으로 계산된 결과

프리스트레스트 콘크리트 깊은 보에서 프리스트레스의 영향을 알아보기 위하여 Tan 등(2001)이 제안한 전단 강도 예측식을 이용하여 계산을 진행한다. 식 (7)을 이용하여 계산된 전단 강도와 Tan과 Mansur(1992)의 실험 결과를 Table 4에 나타내었다. 식 (7)을 이용하여 계산을 진행할 때 $l_u = l_c$ 라고 가정하고 평형조건을 만족하는 l_c 값을 반복을 통하여 계산한다. 각 모델의 최종 l_c 의 값은 각각 69.5mm, 54.2mm, 63.6mm와 64.5mm로 계산되었다. 식 (7)의 전단 강도와 실제 실험 결과의 비는 평균 1.91으로 식 (7)의 전단 강도가 실제 전단 강도보다 매우 크다.

Tan 등(2001)이 제안한 철근 콘크리트 깊은 보의 전단 강도를 예측하는 수식은 파괴가 깊은 보의 절점 영역에서 발생한다는 것을 전제로 하여 전개된 수식이다. 본 해석에서 사용된 철근 콘크리트 깊은 보 모델의 경우, 전단 철근이 없는 모델로 대부분의 모델이 스트럿 영역에서의 콘크리트 파괴로 인해 파괴되며 S24 모델의 경우 휨 파괴로 인해 파괴된다.

Table 4 Comparison of shear strength(kN) of Equation(7) and the experiment

Model	Equation(a)	Experiment(b)	(a)/(b)
S14	144	62	2.32
S24	262	156	1.68
S34	226	115	1.96
S44	242	144	1.68
Mean			1.91

따라서 Tan과 Mansur(1992)이 진행한 실험에서 철근 콘크리트 깊은 보의 전단 강도를 계산할 때 식 (7)의 전단 강도 예측식을 사용하는 것은 적절하지 못하다고 판단된다. 이 경우 압축 영역에서의 콘크리트의 파괴가 고려된 철근 콘크리트 깊은 보의 전단 강도 예측식에 따라 계산을 진행하면 오차를 줄일 수 있다. 본 연구에서는 주요한 변수인 프리스트레스의 변화에 따른 철근 콘크리트 깊은 보의 전단 강도의 변화를 고찰하기 위하여 식 (7)을 사용하였다.

4. 프리스트레스의 영향

수치 해석을 진행한 4가지 모델 중 S44 모델을 기본 모델로 하여 깊은 보의 전단 강도에 미치는 프리스트레스의 영향을 알아 보았다. Table 5에 나타난 것과 같이 콘크리트의 실린더 압축 강도 f'_c , 텐던의 철근비 ρ , 전단 경간-유효 깊이의 비 a/d 를 변화시키면서 각 변수가 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의

전단 강도에 미치는 영향을 살펴보았다. 동시에 본 연구는 프리스트레싱의 정도를 표현하는 변수인 DOP를 주요 변수로 4개의 모델에서 각각 그 값을 0부터 95%까지 변화시키면서 총 80개의 전단 강도 해석을 진행하고 깊은 보의 전단 강도에 프리스트레싱이 주는 영향을 알아보았다.

Table 5 Characteristics of models for studying the effect of prestress

Model	f'_c (MPa)	a/d	ρ
S44	55.0	2.0	0.00337
S44- ρ	55.0	2.0	0.00674
S44- a/d	55.0	1.5	0.00337
S44- f'_c	87.4	2.0	0.00337

DOP와 전단 강도의 관계는 Fig. 9에 나타내었다. 기본 모델인 S44모델에서 제일 낮은 전단 강도를 보였으며 높은 철근비, 높은 콘크리트 강도를 가진 모델의 전단 강도가 더 높았다. 또한 전단 경간-유효 깊이의 비가 낮은 모델의 전단 강도가 더 높았다. 이는 깊은 보의 전단 강도가 철근비, 콘크리트 강도의 증가에 따라 증가하며 전단 경간-유효깊이의 비의 감소에 따라 증가한다는 것을 나타낸다. 4개의 모델에서 전단 강도는 DOP의 증가에 따라 거의 선형으로 증가하였다. 이러한 결과는 깊은 보의 전단 강도가 텐던에 가해진 프리스트레싱의 증가에 따라 증가한다는 것을 보여준다.

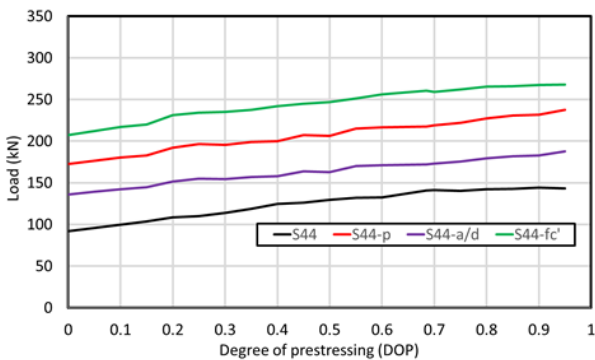


Fig. 9 DOP-Shear strength relationship predicted using numerical analysis

본 연구의 주요 목적인 프리스트레싱의 증가에 따른 철근 콘크리트 깊은 보의 전단 강도의 변화 경향을 살펴보기 위하여 Tan 등(2001)이 제안한 철근 콘크리트 깊은 보의 전단 강도 예측식을 사용하였다. Fig. 10은 전단 강도 예측식인 식 (7)을 사용하여 계산된 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단 강도와 DOP의 관계를 나타낸다. DOP의 값이 커질수록 전단 강도가 커지고 철근비와 콘크리트의 강도가 커지면 전단 강도가 커지고 전단 경간-유효 깊이의 비가 작아질수록 전단 강도가

커지는 등 전체적인 경향은 수치 해석 결과와 비슷하지만 철근 비가 더 큰 모델의 경우 전단 강도의 수식 계산 결과가 해석 결과보다 DOP의 증가에 따른 전단 강도의 증가가 더욱 빠르다. 프리스트레싱의 크기는 텐던에 영향을 미치게 되는데 텐던비가 커지면 철근 콘크리트 깊은 보는 프리스트레싱의 영향을 더욱 크게 받는다. 유한요소해석으로 계산된 결과를 살펴보면 텐던 비를 2배로 준 그룹에서의 전단 강도 증가량이 제일 크게 나타났다. 예측식을 살펴보았을 때 텐던의 철근비는 f_t 항과 F_{pc} 항 모두에 영향을 미친다. 따라서 수식으로 전단 강도를 계산하였을 때 텐던의 철근비의 영향을 더욱 크게 판단한다. 또한 예측식으로 계산된 전단 강도는 수치 해석으로 얻은 전단 강도보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있다.

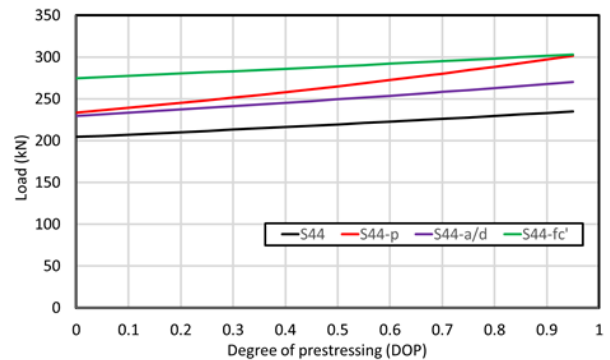


Fig. 10 DOP-Shear strength relationship calculate by Equation (7)

5. 결 론

본 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단 거동을 예측하기 위해 유한요소법을 이용한 수치 해석을 진행하고 그 결과와 실제 실험 결과와 strut-and-tie 모델로 예측된 값과 비교하였다. 프리스트레싱의 정도가 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단 강도에 미치는 영향에 대하여 고찰을 하였으며 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) Abaqus에서 제공하는 콘크리트 손상 모델과 응력 형식의 초기 조건을 이용하여 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 거동을 해석할 수 있다. 초기 조건으로 부여된 프리스트레싱은 두 번째의 해석 단계에서 텐던 주변의 콘크리트로 분산됨으로써 평형 조건을 만족시킨다.
- (2) 수치 해석으로 얻은 전단 강도와 실험 결과의 비는 평균 1.02로 유한요소법을 사용한 수치해석 방법이 비교적 정확하게 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단 강도를 예측할 수 있다는 것을 보여준다. 실험 결과로 얻어진 하중-변위의 관계는 모델링 과정에서 콘크리트의

탄성계수와 인장 강도의 재료 수치를 작게 조정함으로써 충분히 유사한 거동을 얻어낼 수 있다.

- (3) 콘크리트 깊은 보의 전단 강도에 미치는 프리스트레싱의 영향을 살펴보았다. 텐던에 가해진 프리스트레스가 커지면 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 극한 강도는 선형으로 증가한다. 또한 콘크리트 강도와 철근비의 증가와 전단 경간-유효깊이의 비의 감소에 따라 깊은 보의 전단 강도가 증가하는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2017R1A-2B40100 43).

References

Abaqus (2016) *Abaqus Analysis User's Guide*, Dassault Systems Simulia Corp.

American Concrete Institute (2014) *Building Code Requirements for Structural Concrete ACI 318-14*, Farmington Hills, MI.

Averbuch, D., De Buhan, P. (1999) Shear Design of Reinforced Concrete Deep Beams: A Numerical Approach. *J. Struct. Eng.*, 125(3), pp.309~318.

Carreira, D.J., Chu, K.H. (1985) Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression, *ACI*

Struct. J., 82(6), pp.797~804.

Cook, R.D., Young, W.C. (1985) *Advanced Mechanics of Materials*, New Jersey, U.S.

Ramirez, J.A. (1994) Strut-tie Design of Pretensioned Concrete Members, *ACI Struct. J.*, 91(4), pp.572~578.

Schlaich, J., Schafer, K. (1991) Design and Detailing of Structural Concrete using Strut-and-Tie Models, *Struct. Eng.*, 69(6), pp.113~125.

Smith, K.N., Vantsiotis, A.S. (1982) Shear Strength of Deep Beams, *ACI Struct. J.*, 79(3), pp.201~213.

Tan, K.H., Lu, H.Y., Teng, S. (1999) Size Effect in Large prestressed Concrete Deep Beams, *ACI Struct. J.*, 96(6), pp.937~946.

Tan, K.H., Mansur, M.A. (1992) Partial Prestressing in Concrete Corbels and Deep Beams, *ACI Struct. J.*, 89(3), pp.251~262.

Tan, K.H., Tong, K., Tang, C.Y. (2001) Direct Strut-and-Tie Model for Prestressed Deep Beams, *J. Struct. Eng.*, 127(9), pp.1076~1084.

Wahalathantri, B. L., Thambiratnam, D.P., Chan, T.H.T., Fawzia, S. (2011) *A Material Model for Flexural Crack Simulation in Reinforced Concrete Elements using Abaqus*, Infrastructure, Transport and Urban Development, pp.260~264.

Zeng, L.H., Tan, K.H. (1999) *Normal-Strength Reinforced Concrete Deep Beams: A Direct Approach to Design*, National Undergraduate Research Project, Nanyang Technology University, Singapore.

요 지

본 논문에서는 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단 강도를 유한요소법을 이용한 수치해석으로 예측해 보았다. 프리스트레스의 정도를 주요 변수로 하여 전단 강도의 변화를 살펴보았다. 유한요소해석 프로그램인 Abaqus를 사용하여 CDP재료 모델과 초기조건을 설정함으로 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단 강도를 비교적 정확하게 예측할 수 있으며 오차는 5%이하였다. 또한 깊은 보의 strut-and-tie 모델과 동일한 형태를 나타냈으며, 해석이 타당하다고 본다. 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단 강도를 예측하기 위해 제안된 수식으로 전단 강도를 계산하였을 때 실제 전단 강도보다 큰 수치를 얻었다. 텐던에 가해진 프리스트레스의 크기가 커질수록 깊은 보의 전단 강도는 선형적으로 증가하는 현상을 보였다. 깊은 보의 전단 강도를 효과적으로 증가시키기 위해 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보를 활용할 수 있다.

핵심용어 : 깊은 보, 전단, 프리스트레스트, 스트럿-타이, 유한요소법, 아바쿠스