



프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단거동에 관한 해석적 연구

김태훈^{1)*} · 김영진¹⁾ · 신현목²⁾

¹⁾대우건설 기술연구원 토목연구팀 ²⁾성균관대학교 사회환경시스템공학과

Analytical Study on the Shear Behavior of Prestressed Concrete Deep Beams

Tae-Hoon Kim,^{1)*} Young-Jin Kim,¹⁾ and Hyun-Mock Shin²⁾

¹⁾Civil Engineering Research Team, Daewoo Institute of Construction Technology, Suwon 440-210, Korea

²⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

ABSTRACT The purpose of this study is to investigate the shear behavior of prestressed concrete deep beams and to provide the data for development of improved design criteria. The accuracy and objectivity of the assessment process may be enhanced by the use of sophisticated nonlinear finite element analysis program. Hence, in this study, the computer program, named RCA-HEST (reinforced concrete analysis in higher evaluation system technology), was used. Material nonlinearity is taken into account by comprising tensile, compressive and shear models of cracked concrete and a model of reinforcing steel. A bonded or unbonded tendon element based on the finite element method, that can represent the interaction between tendon and concrete of prestressed concrete member, is used. The proposed numerical method for the shear behavior of prestressed concrete deep beams is verified by comparing the analytical results with test data by others.

Keywords : shear behavior, prestressed concrete, deep beam, nonlinear finite element analysis, material nonlinearity

1. 서 론

철근콘크리트 깊은 보는 상부 구조체의 수직하중을 지지하는 구조요소로서 충분한 전단내력을 보유하여야 하며, 전단내력을 향상시키기 위해 보의 크기를 증가시키는 방법 이외에 고강도 콘크리트 또는 프리스트레싱의 사용이 효과적인 해결책이 될 수 있다.^{1,4)}

이러한 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 일반 철근 콘크리트 깊은 보에 비해 휨-전단 균열이 감소하며 전단 내력 상승이 큰 장점을 가지고 있다. 그러나 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 거동특성에 관한 연구는 부족한 상태이며 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단거동, 프리스트레싱 작용, 그리고 크기효과 등에 관한 연구가 진행되고 있다.⁵⁻⁷⁾

현행 콘크리트구조설계기준⁸⁾에서 깊은 보의 한쪽 면이 하중을 받고 반대쪽 면이 지지되어 하중과 받침부 사이에 압축대가 형성되는 구조요소로서 순경간 l_n 이 부재 깊이의 4배 이하이거나 받침부 내면에서 부재 깊이의 2배 이하인 위치에 집중하중이 작용하는 경우 집중하중과 받침부 사이의 구간에 해당하는 부재로 정의하고 있다. 이

러한 깊은 보의 비선형해석 또는 스트럿-타이 모델(strut-and-tie model)에 따라 설계하도록 규정하고 있다. 스트럿-타이 모델은 소성이론과 힘의 평형조건을 이용한 트러스모델의 일종으로 부재의 응력교란구역의 전단설계에 효율적인 설계법이고 힘의 흐름을 명확히 파악하여 보다 합리적인 방법으로 응력교란구역의 내력을 계산할 수 있다.

이러한 스트럿-타이 모델은 1900년대 초에 소개된 트러스 모델을 근간으로 하고 있다. Schlaich 등⁹⁾은 기존의 트러스 모델을 일반화시켜 스트럿-타이 모델로 체계화하였으며 CSA,¹⁰⁾ NZS 3101,¹¹⁾ BS8110,¹²⁾ ACI 318-05,¹³⁾ 그리고 AASTHO-LRFD¹⁴⁾ 등의 세계 주요설계기준에서 그 동안의 연구 결과를 토대로 스트럿-타이 모델을 설계방법으로 채택하기에 이르렀다. 그러나 설계 기준에서 제시하고 있는 스트럿-타이 모델은 모델의 선정 및 형식, 구성요소의 유효강도 측면에서 몇몇 불확실성을 내포하고 있으며, 실무적 측면에서도 많은 계산과 기하학적 판단과정을 수행하여야 하며 여러 하중조합에 해당하는 각각의 스트럿-타이 모델을 선정해야 하는 번거로움을 가지고 있다.¹⁵⁾ 또한 이 연구의 대상인 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 설계에 대해서는 명확한 설계방법을 제시하지 않고 있다.

이 연구에서는 이와 같은 스트럿-타이 모델 설계법의 대안으로 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단거동을 해석적으로 예측할 수 있는 기법을 제시하는데 그 목

*Corresponding author E-mail: kimth@dwconst.co.kr

Received January 25, 2010, Revised April 21, 2010,

Accepted June 16, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

적이 있다.

프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 강도 및 거동특성은 전단시간대 유효깊이의 비, 프리스트레스의 크기, 하중점과 지지점의 조건, 그리고 사용재료의 성질 등의 설계변수들의 영향으로 비선형적인 변화를 보이므로, 이 연구에서는 이러한 비선형적인 거동 및 강도를 고려할 수 있는 비선형 유한요소해석 기법을 제안하였다.

2. 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

2.1 프리스트레스트 콘크리트의 비선형 재료모델

프리스트레스트 콘크리트는 일반적으로 콘크리트와 철근 및 텐던으로 구성되는 복합재료이며, 비선형 재료모델은 이들 각 구성 재료가 중첩된 것으로 표현할 수 있는데 각각의 해석모델은 콘크리트와의 부착특성을 고려하여 개발된 것이라야 한다. 이러한 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델¹⁶⁻¹⁹⁾을 그대로 적용하기로 한다. 사용된 비선형 재료모델의 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다.

균열이 분산하여 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동은 사용된 균열개념에 크게 영향을 받는다. 이 연구에서는 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였다.

균열이 발생하기 전 콘크리트의 역학모델은 이축응력 상태에 대한 탄소성 파괴모델의 기본개념에 의해서 표현하였으며 균열 발생후의 비선형성은 인장강성모델, 압축강성모델 그리고 전단전달모델을 각각 적용하였다.

콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 이 연구에서는 포락선부분에 대한 철근의 항복후 거동을 저자 등이 제안한 trilinear 모델로써 표현하였다(Fig. 1).

이 연구에서는 콘크리트 압축파괴 이후의 효과를 Kent 등²⁰⁾에 의해 제안된 해석모델을 수정하여 고려하였다. 또한, 압축파괴가 발생한 콘크리트의 안에 있는 철근의 좌

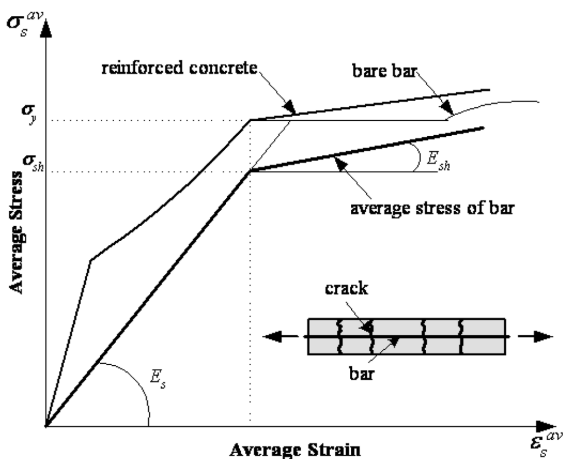


Fig. 1 Model for reinforcing bar in concrete

굴거동은 최종적인 내력저하의 원인이 된다. 철근을 둘러싸고 있는 콘크리트에 압축파괴가 발생하면 철근이 좌굴을 하였다고 판단하였으며 좌굴 시의 철근의 응력은 압축파괴가 발생한 콘크리트에서와 같이 좌굴을 무시하고 구한 철근 응력의 20%를 취하였다.¹⁷⁾

콘크리트 속의 텐던의 응력과 변형률의 관계는 저자 등에 의하여 제안된 부착이 고려된 철근의 응력-변형률 관계를 고려하여 텐던의 응력-변형률 관계를 Fig. 2와 같은 trilinear 모델로써 표현하였다.

2.2 부착 또는 비부착 텐던요소

이 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단거동을 예측하기 위해서 저자 등이 콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석을 위하여 개발한 부착 또는 비부착 텐던요소¹⁹⁾를 목적에 맞게 수정하여 사용하였다.

부착 또는 비부착 텐던요소는 Fig. 3과 같이 다절점 트러스요소를 사용하여 정식화하였으며 텐던과 콘크리트 사이의 부착작용 등의 비선형 특성을 고려함으로써 해석 결과의 정확도와 신뢰성을 향상시켰다.

부착 프리스트레스트 콘크리트 보의 경우 텐던과 주변 콘크리트가 부착되어 있음으로써 외력 하에서 텐던의 변형률 변화와 주변 콘크리트 변형률의 변화가 동일한 반면, 비부착 프리스트레스트 콘크리트 보에서는 텐던과 주변 콘크리트 사이에 비부착으로 인하여 미끄러짐이 생기기 때문에 텐던의 변형률 변화와 주변 콘크리트의 변형률 변화가 상이하게 되며 응력은 부재 전체길이의 변형을 고려하여 산정해야 한다.

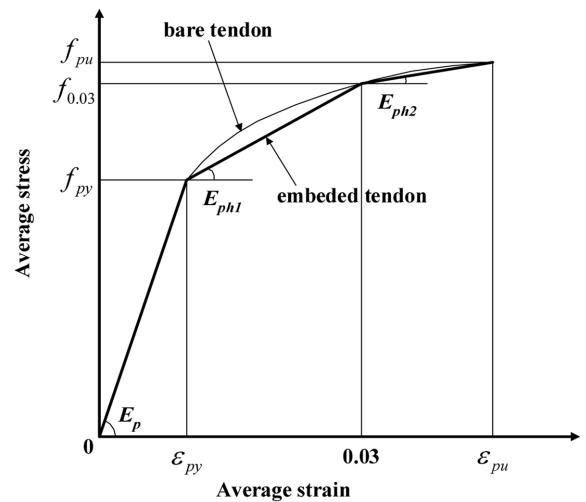


Fig. 2 Model for prestressing bars

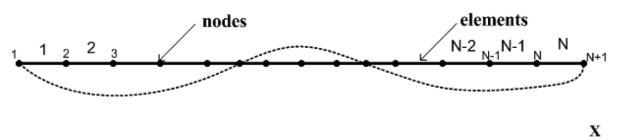


Fig. 3 Bonded or unbonded tendon element

이 연구에서 부착 또는 비부착 텐던요소는 모체 요소와 공유하는 각 절점에서의 편심 및 기울기를 이용하여 텐던요소의 강성을 구성하며 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\varepsilon = B^T u_e \quad (1)$$

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

$$[K] = A_p \int [B_i]^T E_p [B_i] dx \quad (3)$$

여기서 ε 은 변형률, B_i 는 변형매트릭스, u_e 는 변위벡터, V 는 변형률 에너지, E_p 는 탄성계수, A_p 는 단면적, 그리고 $[K]$ 는 강성매트릭스이다.

일반적으로 텐던은 구조물 내부에서 편심을 갖고 배치되어 있으며 부착 또는 비부착 텐던을 모사하기 위하여 개발된 다절점 트러스요소는 각 절점에서 텐던의 편심, 기울기, 그리고 형상에 따라 등가절점력을 계산할 수 있다.

2.3 유한요소해석 프로그램의 작성

이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근 콘크리트 평면응력요소, 그리고 부착 또는 비부착 텐던 요소 등¹⁶⁻¹⁹⁾을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP ver. 7.2²¹⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST (reinforced concrete analysis in higher evaluation system technology)을 수정하여 사용하였다(Fig. 4). 사용된 비선형 유한요소해석 프로그램의 해석과정을 나타내면 Fig. 5와 같다.

3. 해석 예 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 6에 나타난 것과 같은 Tan 등²²⁾이 실험한 프리텐션 방식의 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는

2D or 3D Spring element	4 nodes PSC shell element	2D or 3D Flexibility-based fiber beam-column element	4 nodes Elastic shell element
Joint element	FEAP		4 nodes RC shell element
Interface element	Bonded or Unbonded prestressing bar element	RC plane stress element	2D Elasto-plastic plane stress element

Fig. 4 Nonlinear FEM program RCAHEST

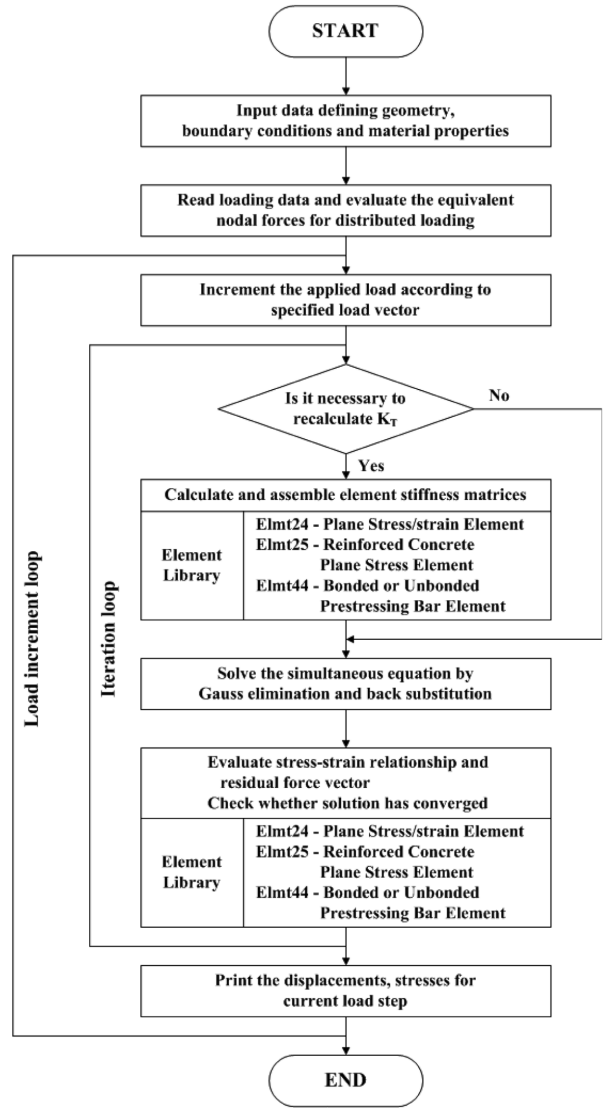


Fig. 5 Flowchart of program procedures

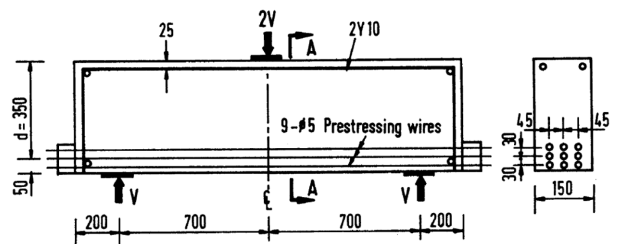


Fig. 6 Details of test specimens (unit: mm)²²⁾

집중하중을 받는 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단거동을 정량화시킨 실험이기 때문이다.

3.1 선정된 실험체의 제원

실험체는 Fig. 6에 보이는 바와 같이 150 mm × 400 mm × 1,800 mm의 장방형의 단순보로서 모든 실험체의 단면과 지점간의 거리는 일정하다. 각 실험체의 재료물성은 Table 1과 같으며 5 mm의 직경을 갖는 9개의 PS 강선(f_{py} =

Table 1 Test specimens

Specimen	a/d	Partial prestressing ratio (PPR) ¹⁾	Degree of prestress ²⁾	f_{cu} (MPa)
S14	2.0	0	0	38.3
S24		0.33	0.220	87.4
S34		0.67	0.483	65.1
S44		1.00	0.685	68.8

1) $\frac{A_{ps}f_{py}}{A_{ps}f_{py} + A_s f_y}$ 2) $\frac{A_{ps}f_{pe}}{A_{ps}f_{py} + A_s f_y}$

* A_{ps} , A_s : areas of prestressed and nonprestressed reinforcement, f_{pe} : effective prestress applied, f_{py} , f_y : yield strength of prestressed and nonprestressed reinforcement

1,480 MPa, $f_{pu} = 1,623$ MPa)과 큰 항복강도($f_y = 508$ MPa)를 갖는 압축철근을 사용하였다.

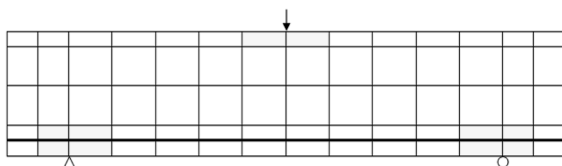
구조실험에는 2,800 kN 용량의 가력장치가 사용되었으며, 가력점과 지지점에는 실험체의 지압파괴를 방지하기 위한 지지판이 설치되었다. 실험체의 변위는 지지점 사이의 1/2 지점에 설치된 자동 변위계를 통해 측정되었으며 각 하중 단계마다 내력, 처짐, 그리고 변형률 등이 기록되었다.

3.2 유한요소해석을 위한 요소분할

이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 Fig. 7과 같이 철근콘크리트요소 50개, 탄성요소 6개, 그리고 부착 텐던요소 1개로 총 57개의 요소로 분할하였다. 철근콘크리트요소의 경우에는 8절점을 갖는 등매개요소로서 3점 가우스 적분을 적용하였고, 가력점과 지지점에는 실험체와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 사용하였다.

3.3 해석 결과

Figs. 8~11은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과(하중제어)와 실험에 의한 하중-변위 관계를 보이고 있으며, 스트럿-타이 모델에 의한 파괴하중을 함께 나타내었다. 이때 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 스



8-node RC element	50
8-node Elastic element	6
n-node Bonded prestressing bar element	1

Fig. 7 Finite element mesh for specimens

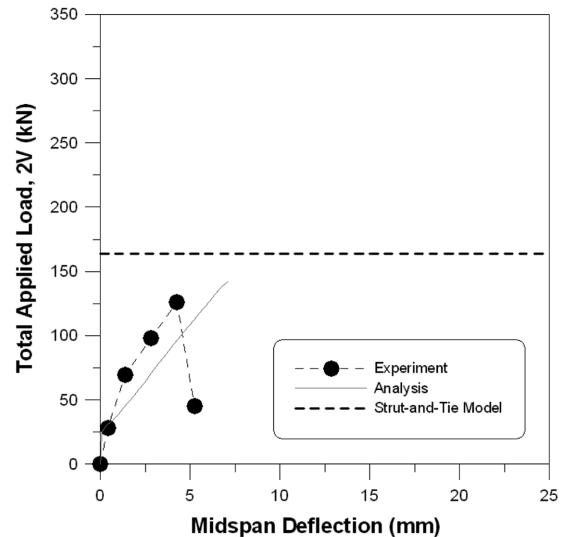


Fig. 8 Load-deflection curve for specimen S14

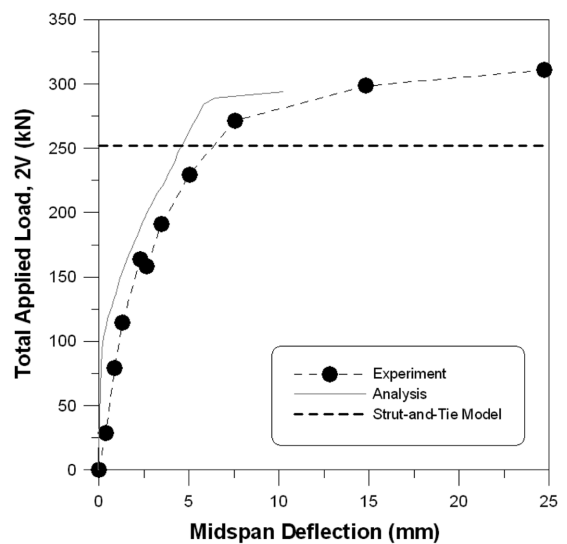


Fig. 9 Load-deflection curve for specimen S24

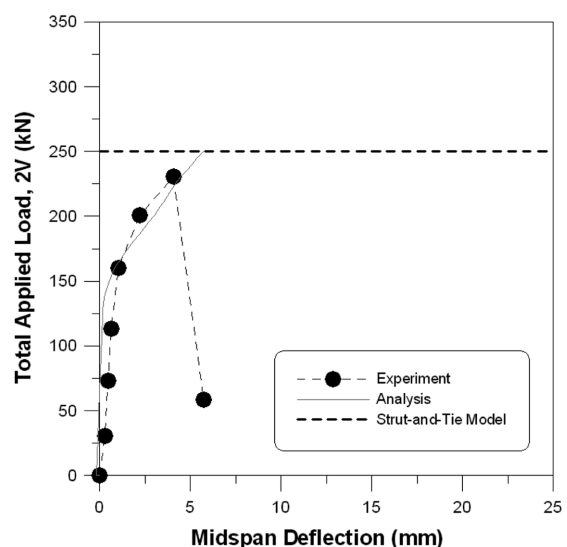


Fig. 10 Load-deflection curve for specimen S34

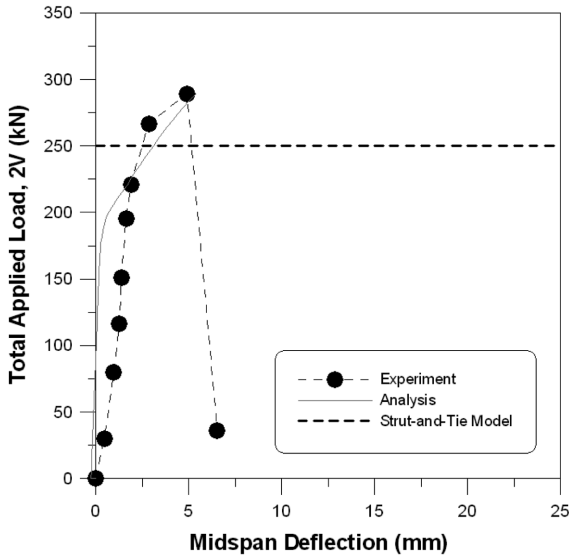


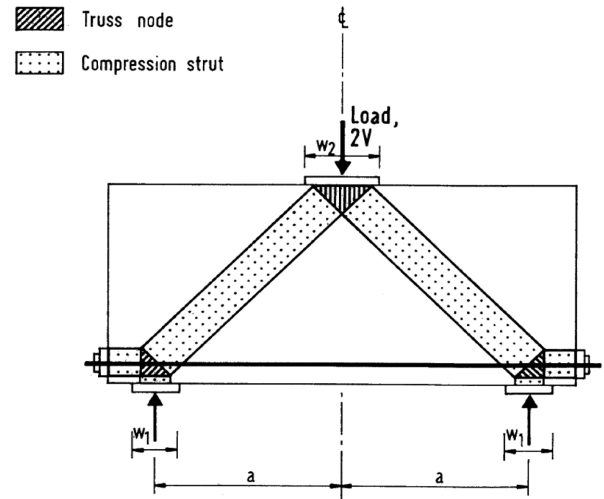
Fig. 11 Load-deflection curve for specimen S44

트럿-타이 모델에 의한 파괴하중은 Tan 등²²⁾의 연구 결과를 확인하고 사용하였다(Fig. 12).

모든 실험체는 하중이 지지점으로 직접 전달되는 스트럿-타이 작용을 보이며 가력점과 지지점을 연결하는 잠재적인 균열면을 따라 경사균열이 발생하였다. 경사균열 발생 이전까지는 탄성거동을 보였으나 경사균열이 발생된 이후에서는 강성의 감소와 함께 비선형 거동을 보여 경사균열이 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 거동특성에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었고 또한 프리스트레스트의 크기가 주요한 변수임을 확인할 수 있었다.²²⁾

해석 결과와 실험 결과 모두 실험체는 휨 파괴 또는 전단 파괴되었고, 전단경간 내에서 콘크리트의 과도한 균열 및 압축에 의해 파괴되었다. 대부분의 실험체는 파괴시 취성적이었으며 가력점과 지지점을 연결하는 주 경사균열에 의한 파괴와 압축 스트럿의 파괴에 의한 복합적인 모드를 나타내었다. 그리고 초기균열은 대부분 경간 중앙부에서 수직 휨균열 형태로 발생하였으며, 경사균열은 전단경간의 중앙부근에 거의 대칭으로 발생하였다. 이러한 결과를 정리하여 Table 2에 나타내었다. 이때 실험체 S14의 실험과 해석에 있어 파괴모드에 차이가 발생하는 이유는 실험의 오차와 해석의 오차가 겹쳐지게 되어 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 13은 파괴시점의 요소레벨의 손상지수¹⁷⁾와 실험



$$V_u = \frac{bw_1f'_c}{1 + \left(\frac{a}{d} + \frac{w_1}{2d_1}\right)^2}, \quad V_u = 0.5bw_2f'_c$$

; compressive struts

$$V_u = (A_s f_y + A_{ps} f_{ps}) \left(\frac{d}{a} - \frac{(A_s f_y + A_{ps} f_{ps})}{2f'_c b a} \right)$$

; tension tie

Fig. 12 Strut-and-tie model for prestressed concrete deep beams²²⁾

결과를 비교한 예로서 구조물의 중요한 비선형 거동특성인 균열진전 및 파괴양상을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 가시화된 요소레벨의 손상지수도를 통하여 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 손상정도를 쉽게 검색할 수 있으며 성능평가 등에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 검증 및 고찰

Figs. 14, 15는 하중증가에 따른 대표적인 PS 강선의 변형률을 비교한 예인데, 이로부터 해석 결과와 실험 결과는 대체적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

모든 실험체에서 PS 강선의 변형률은 경사균열이 발생한 이후 급격히 증가하고 있으며 응력 재분배 등의 현상이 잘 구명되고 있다. 이러한 상세거동에 대한 직접적인 비교를 통하여 이 연구의 해석 결과는 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전반적인 역학적 거동을 잘 추

Table 2 Experiment and analysis result

Specimen	Mode of failure		Ultimate capacity (kN)				
	Exp.	Ana.	Exp. (1)	Ana. (2)	Strut-and-tie model (3)	(1) / (2)	(1) / (3)
S14	shear-comp.	flexure	62	71	82	0.87	0.76
S24	flexure	flexure	156	147	126	1.06	1.24
S34	shear-comp.	shear-comp.	115	125	125	0.92	0.92
S44	shear-comp.	shear-comp.	144	145	125	0.99	1.15
Mean	-	-	-	-	-	0.96	1.02
COV	-	-	-	-	-	0.09	0.22

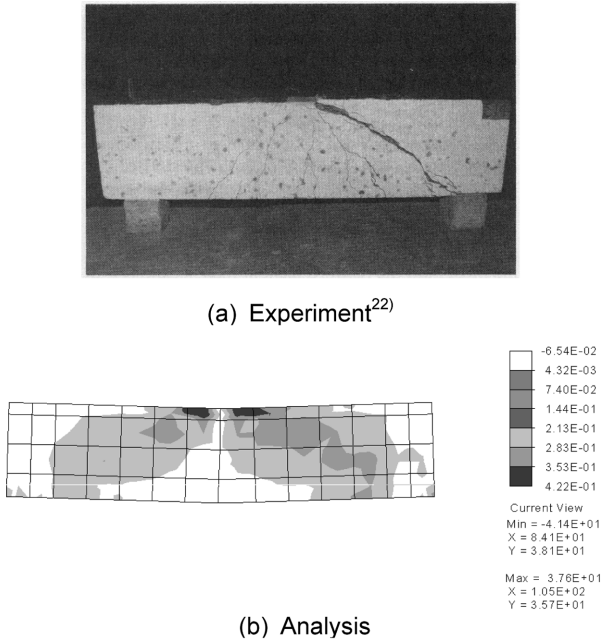


Fig. 13 Failure pattern for specimen S34

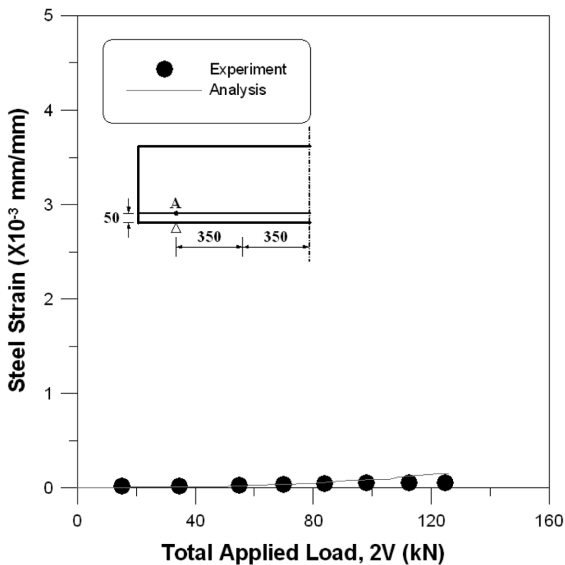


Fig. 14 Prestressing wire strain at location A for specimen S14

적하고 있다고 판단된다.

유한요소해석 결과에서 파괴하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수가 각각 0.96과 0.09로서, 파괴하중의 평균값은 전반적으로 실험 결과 보다 다소 크게 평가하고 있으나 변동계수가 0.09에 불과하여 프리스트레스트의 크기의 변화에 따른 깊은 보의 전단거동특성을 정확히 평가하고 있는 것으로 판단된다. 그리고 스트럿-타이 모델에 의한 파괴하중의 실험값/이론값의 평균과 변동계수는 각각 1.02와 0.22로서, 전반적으로 실험 결과에 비하여 안전측으로 평가하고 있다.

위와 같이 이 연구에서 제시한 비선형 유한요소해석 방법은 극한강도를 비교적 정확하게 평가하고 있으며, 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 강도 및 거동에 영향

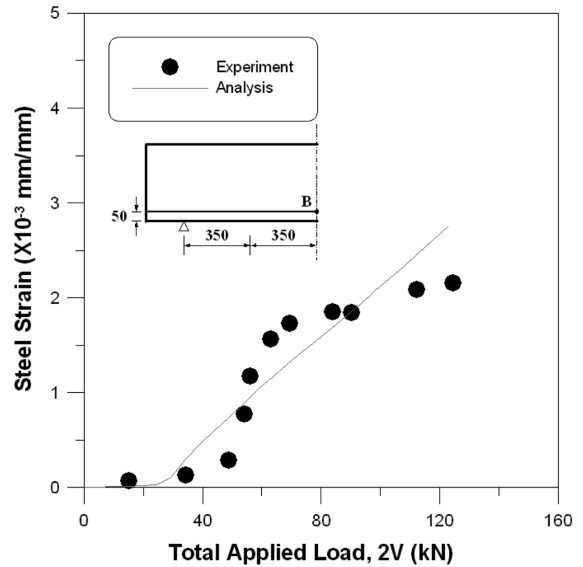


Fig. 15 Prestressing wire strain at location B for specimen S14

을 미치는 프리스트레스트의 크기, 그리고 콘크리트의 압축강도 등 주요설계변수들의 영향을 극한강도 평가 시 정확하고 일관성 있게 반영함을 알 수 있었다.

4. 결 론

이 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단거동의 예측을 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램을 사용하여, 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보를 해석하였다. 실험 결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 재료적 비선형성을 고려하기 위해서 균열 발생후의 콘크리트의 인장강성 및 압축강성, 균열면에서의 전단전달강성, 철근 및 텐던의 부착 등에 대한 각각의 구성방정식을 조합하여 유한요소해석에 적용함으로써 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 비선형 거동 특성을 비교적 충실히 예측할 수 있었다.
- 2) 해석 결과와 실험 결과 대부분의 실험체는 전단경간 내에서 콘크리트의 과도한 균열 및 압축파괴에 의해 파괴되었으며, 가력점과 반력점을 잇는 선을 따라 경사진 압축대 형성이 관찰되어 보의 아치작용에 의하여 전단력이 지지되는 것으로 나타났다. 그리고 프리스트레스트의 크기와 콘크리트 강도의 증가에 따라 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단내력이 향상됨을 확인할 수 있었다.
- 3) 비선형 유한요소해석의 파괴하중은 전반적으로 실험 결과에 비하여 다소 크게 평가하고 있으나 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단거동특성을 비교적 정확하게 평가하고 있다. 향후 강도감소계수의 조정을 통하여 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 내하력 평가 및 설계검토 등에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

4) 전단이 지배적인 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 비선형 거동특성을 비교적 정확하게 예측함으로써 향후 프리스트레스트 콘크리트 또는 분절형 프리캐스트 코핑부 등의 성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 이진섭, 김상식, “집중하중을 받는 철근콘크리트 깊은 보의 전단거동에 대한 실험적 연구,” 콘크리트학회 논문집, 11권, 1호, 1999, pp. 191~200.
- 정현수, 양근혁, 함영삼, “고강도 철근콘크리트 깊은 보의 전단거동 및 ACI 전단설계 기준과의 비교,” 콘크리트학회 논문집, 14권, 6호, 2002, pp. 874~882.
- 이우진, 윤승조, 김성수, “고강도 철근콘크리트 깊은 보의 전단 강도에 관한 실험평가,” 콘크리트학회 논문집, 15권, 5호, 2003, pp. 689~696.
- 김성칠, 박성용, “철근콘크리트 깊은 보의 전단철근 효과에 관한 연구,” 대한토목학회논문집, 25권, 2A호, 2005, pp. 365~373.
- Alshegeir, A. and Ramirez, J. A., “Strut-Tie Approach in Pretensioned Deep Beams,” *ACI Structural Journal*, Vol. 89, No. 3, 1992, pp. 296~304.
- Tan, K. H., Lu, H. Y., and Teng, S., “Size Effect in Large Prestressed Concrete Deep Beams,” *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 6, 1999, pp. 937~946.
- Tan, K. H., Tong, K., and Tang, C. Y., “Direct Strut-and-Tie Model for Prestressed Deep Beams,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 9, 2001, pp. 1076~1084.
- 국토해양부, 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2007.
- Schlaich, J. and Weischede, D., “Detailing Reinforced Concrete Structures,” *Canadian Structural Concrete Conference*, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, 1981, pp. 171~198.
- Canadian Standards Association, *Design of Concrete Structures for Buildings*, CAN3-A23.3-M84, Rexdale, Ontario, Canada, 1984, 232 pp.
- Concrete Design Committee, *The Design of Concrete (NZS3101: Part I and II)*, New Zealand Standard, New Zealand, 1995, 264 pp.
- British Standards Institution, *Code of Practice for Design and Construction (BS8110 Part 1)*, British Standard, UK, 1997, 120 pp.
- American Concrete Institute, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI318R-05)*, Farmington Hills, Michigan, USA, 2005, 107 pp.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 4th Edition, Washington, D.C., USA, 2007, 1518 pp.
- 김병현, 이원석, 윤영목, “격자 스트럿-타이 모델 방법을 이용한 철근콘크리트 깊은 보의 극한강도 평가,” 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 17권, 1호, 2005, pp. 179~182.
- 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, Vol. 129, No. 9, 2003, pp. 1199~1207.
- Kim, T. H., Lee, K. M., Chung, Y. S., and Shin, H. M., “Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns,” *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 4, 2005, pp. 576~592.
- Kim, T. H., Kim, Y. J., Kang, H. T., and Shin, H. M., “Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns Using a Damage Index,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 34, No. 7, 2007, pp. 843~855.
- Kim, T. H., Park, J. G., Kim, Y. J., and Shin, H. M., “A Computational Platform for Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Piers with Unbonded Reinforcing or Prestressing Bars,” *Computers & Concrete*, Vol. 5, No. 2, 2008, pp. 135~154.
- Kent, D. C. and Park, R., “Flexural Members with Confined Concrete,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 97, No. 7, 1971, pp. 1969~1990.
- Taylor, R. L., *FEAP-A Finite Element Analysis Program, Version 7.2 Users Manual, Volume 1 and Volume 2*, 2000, 310 pp.
- Tan, K. H. and Mansur, M. A., “Partial Prestressing in Concrete Corbels and Deep Beams,” *ACI Structural Journal*, Vol. 89, No. 3, 1992, pp. 251~262.

요약 이 연구는 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단거동을 파악하고 합리적이면서 경제적인 설계기준의 개발을 위한 자료를 제공하는데 그 목적이 있다. 정확하고 올바른 평가를 위하여 신뢰성 있는 비선형 유한요소해석 프로그램을 이용하였다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 재료적 비선형성에 대해서는 균열 콘크리트에 대한 인장, 압축, 전단모델과 콘크리트 속에 있는 철근모델을 조합하여 고려하였다. 사용된 부착 또는 비부착 텐던요소는 유한요소법에 근거하며 프리스트레스트 콘크리트 부재의 콘크리트와 텐던의 상호작용을 구현할 수 있다. 이 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 깊은 보의 전단거동을 파악하기 위해 제안한 해석기법을 신뢰성 있는 다른 연구자의 실험 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

핵심어 : 전단거동, 프리스트레스트 콘크리트, 깊은 보, 비선형 유한요소해석, 재료적 비선형성