

# 변단면 깊은 보의 전단설계

## Shear Design of Deep Beam with Variable Depth

최정호\*, 김태완\*\*, 이승훈\*\*\*, 임장섭\*\*\*\*, 진치섭\*\*\*\*\*

Choi, Jeong Ho Kim, Tae Wan Lee, Seung Hun Eom, Jang Sub Jin, Chi Sub

### ABSTRACT

Reinforced concrete deep beams are commonly used in many structural applications, including transfer girders, pile caps, foundation walls, and offshore structures. In this paper, the shear behavior and reinforcement effects of simply supported reinforced concrete deep beam with variable depth subject to concentrated loads have been scrutinized using strut-and-tie model to verify the effects of variable depth.

The analysis results show that strut-and-tie Model of ACI 318-02 code is very effective method to design of simply supported reinforced concrete deep beam with variable depth.

### 1. 서론

일반적으로 깊은 보는 하중이 부재의 상부 또는 압축면에 작용하고, 보의 폭에 대한 지간의 비가 5보다 작으며, 하중점과 지지점 사이에 경사진 압축대에 의하여 힘이 전달되는 부재로 정의되고 있다.<sup>1)</sup> 철근 콘크리트 부재 중에서 주상복합 건물 등에 설치되는 하중 전달 보나 기초 벽체의 보, 전단벽 등이 깊은 보의 범주에 속한다고 볼 수 있다. 깊은 보는 실제 시공에서 여러 제약 조건 등에 의해 그 형태 및 치수가 변하는 변단면의 경우가 많다. 이런 경우, 깊은 보의 거동은 더욱 복잡하게 되어 일반 관용 구조설계로는 정확한 전단 파괴 거동을 해석하기가 어렵다.<sup>2)</sup>

많은 연구결과에 의하면 깊은 보의 하중지지 능력은 전단 지간비, 콘크리트 강도 및 웹 보강근의 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그러나 깊이가 변하는 깊은 보의 경우는 연구성과가 미비한 실정이다. 본 연구에서는 변단면 깊은 보의 전단 거동에 따른 정확한 응력 해석 및 거동 파악을 위해 스트럿-타이 모델을 적용하여 전단해석을 수행하였으며, 해석결과에 따른 소요 철근량을 산정하고 그 결과를 배근 상세와 함께 나타내었다.

### 2. 변단면 깊은 보의 스트럿-타이 모델

#### 2.1 스트럿-타이 모델

---

\* 정회원, 부산대학교 대학원 석사과정  
\*\* 정회원, 부산대학교 대학원 박사과정  
\*\*\* 정회원, 부산대학교 대학원 박사과정  
\*\*\*\* 정회원, 장신대학 토목공학과 부교수  
\*\*\*\*\* 정회원, 부산대학교 토목공학과 교수

스트럿-타이 모델은 압축 응력의 흐름을 일련의 평행한 압축 스트럿(strut)으로 나타내고, 인장 응력의 흐름을 인장 타이(tie)로 나타낸 해석 모델로서 이러한 특성은 스트럿-타이 모델을 깊은 보에 적용함에 있어서 부재 내부 힘의 흐름을 표현하는 데 보다 간단하고 정확하게 표현되는 장점이 있다.

본 연구에서는 높이가 변하는 변단면 깊은 보에 대해 전단 특성을 고려한 스트럿-타이 모델을 적용하여 전단 해석을 수행하였는데,<sup>3)</sup> 그림 1과 같은 형태의 변단면 깊은 보에서 보의 양측에 하중이 작용하는 경우 전단 거동은 하중 작용점과 지지점을 연결하는 콘크리트의 주 압축대에 영향을 주지 않는다. 따라서 단면의 깊이가 변하는 부재 중간부 영역에서 주 압축대의 불연속성이 발생되지 않으므로 압축대를 통한 힘의 전달이 교란되지 않아 깊은 보의 전단강도가 감소되는 경우는 발생하지 않는다. 그림 1은 해석을 수행할 변단면 단면 깊은 보의 형상 및 제원을 나타낸 것이다.

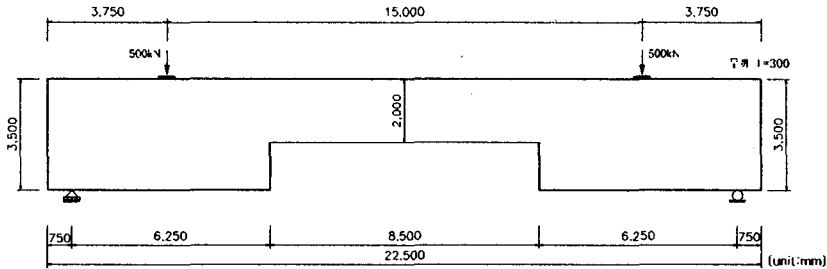


그림 1 변단면 깊은 보의 형상 및 치수

## 2.2 변단면 깊은 보의 해석

변단면을 갖는 깊은 보를 스트럿-타이 모델로써 해석하기 위해서는 먼저 선형탄성 유한요소해석을 통해 구조물 내부의 응력 상태를 파악해야 한다. 그 다음 단계로 주응력이 작용하는 방향을 파악한 후 작용 방향에 따라 분력이 작용하는 위치를 구하고, 이를 바탕으로 한 스트럿-타이 모델을 구성한다. 즉, 스트럿은 주압축 응력이 작용하는 방향으로 배치시키고, 타이는 주인장 응력이 작용하는 방향으로 배치시키되 배근될 타이를 구성하는 철근의 위치 및 피복두께를 고려하여 스트럿-타이 모델을 형성시킨다.<sup>4)</sup>

그림 2는 변단면 깊은 보의 유한요소해석을 위한 선형탄성 유한요소해석 모델을 나타낸 것이다. 해석에 사용된 프로그램은 범용 유한요소 프로그램인 LUSAS를 이용하였으며, 사용 유한요소 모델은 전단변형을 고려한 2차원 평면응력요소를 사용하였다. 작용 하중은 2개의 500 kN의 극한 집중하중으로써 보의 양측에 각각 재하하였다.

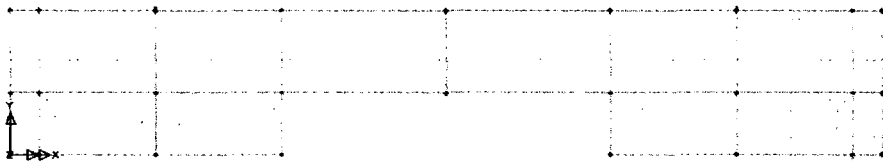


그림 2 변단면 깊은 보의 유한요소해석 모델

그림 3과 그림 4는 각각 유한요소해석에 의한 변단면 깊은 보의 주응력 벡터를 나타낸 것이다. 그림 4에서 단면 깊이가 변하는 중간부의 양쪽 모서리 영역은 인장 응력의 집중이 일어나는 것을 볼 수 있다. 따라서 이러한 구조물 내부의 응력 분포는 전단 파괴에 영향을 미치게 되므로 단면의 깊이가 변하는 부분에 대한 전단 해석이 반드시 필요하게 된다. 변단면 깊은 보에 대한 유한요소해석 결과로부터, 해석된 주응력 벡터를 기준으로 하중의 위치와 배근될 철근의 위치 및 피복두께를 고려한 스트럿

-타이 모델을 그림 5와 같이 구성하였다. 여기서, C는 압축을 받는 스트럿, T는 인장을 받는 타이, D는 영부재를 각각 의미한다. 그림 6은 구성된 스트럿-타이 모델의 해석 후 부재력을 나타낸다.

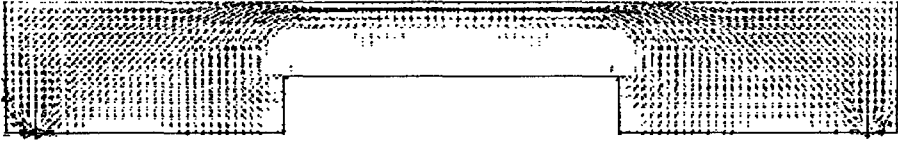


그림 3 주압축 응력 궤적도

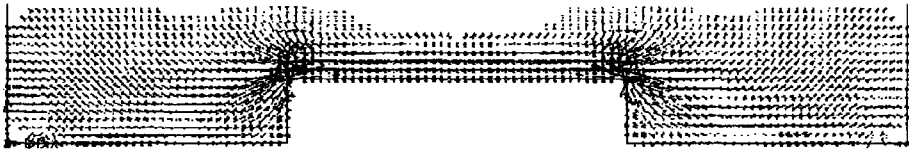


그림 4 주인장 응력 궤적도

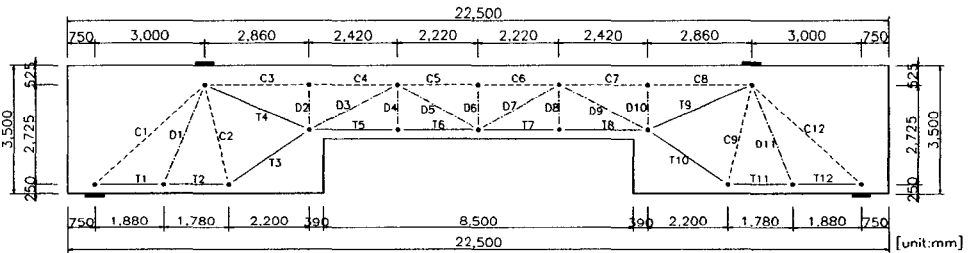
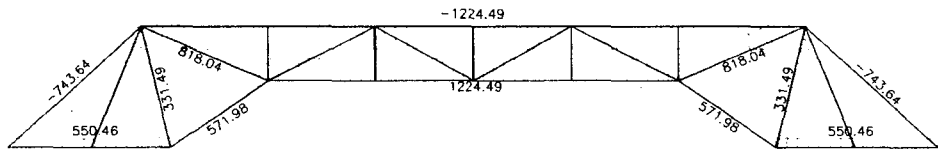


그림 5 스트럿-타이 모델

[unit:mm]



[unit:kN]

그림 6 스트럿-타이 모델 부재력도

### 3. 변단면 깊은 보의 설계

본 연구의 스트럿-타이 모델은 ACI 318-02<sup>5)</sup>에서 제안한 모델을 사용하였다. 스트럿-타이 모델을 이용한 변단면 깊은 보의 콘크리트 압축강도 및 스트럿의 유효 단면적 계산은 식 (1)과 식 (2)를 사용하여 검토하였으며, 필요 철근량은 식 (3)을 사용하여 산정하였다.

$$f_{cu} = 0.85 \beta_s \cdot f_c' \quad (1)$$

$$F_{ns} = f_{cu} \cdot A_c \quad (2)$$

$$A_s = \frac{F_y}{\Phi f_y} \quad (3)$$

여기서,  $f_{cu}$ : 콘크리트의 압축강도(MPa)

$f_c'$ : 콘크리트 원추형 공시체의 압축강도(MPa)

$A_c$ : 스트럿의 양 끝의 면적 중 작은 값(mm<sup>2</sup>).

$F_y$ : 타이의 부재력(N)

$f_y$ : 철근의 항복 강도(MPa)

$\beta_s$ : 스트럿이나 절점 영역의 유효압축 강도 계수

$F_{ns}$ : 스트럿의 부재력(MPa)

$A_s$ : 타이의 단면적(mm<sup>2</sup>)

$\Phi$ : ACI 318-02에 수정된 값으로 0.75를 적용

그림 7은 스트럿-타이 모델에 의해 설계된 변단면 깊은 보의 철근 배근 상태를 보여주고 있다. 변단면 깊은 보의 소요 주철근량은 스트럿-타이 모델의 각 타이 부재의 최대 부재력을 사용하여 결정하였으며, 인장 타이의 유효범위 내에서 필요 철근량을 배근하였다(표 1 참조). 그림 7에서 주철근의 경우 기존의 설계법에서 제안하고 있는 수직수평 방향의 철근 배근이 아니라 전단 균열의 발생 방향 및 전단 파괴에 대해 효과적으로 저항할 수 있는 방향으로 배근하여 전단에 대한 안정성을 높일 수 있는 배근 형태를 얻을 수 있었다.

표 1 스트럿-타이 방법에 따른 필요 철근량

번호	부재력(kN)	필요 철근량(mm <sup>2</sup> )	사용 철근량(mm <sup>2</sup> )
①	1224.5	4081.6	4497.0 ( 7 D29 )
②	550.5	3669.7	4011.3 ( 14 D19 )
③	572.0	3813.2	4011.3 ( 14 D19 )
④	818.0	5453.6	6424.2 ( 10 D29 )

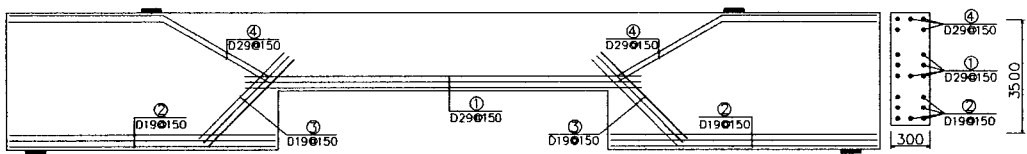


그림 7 변단면 깊은 보의 배근 상세

#### 4. 결론

본 연구를 통해 변단면 깊은 보의 스트럿-타이 모델을 이용한 해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

변단면 깊은 보의 구조형식의 특성상 단면이 급격히 변하는 부분에 응력 집중 및 기하형상의 불연속으로 인해 D-영역(응력교란 영역)이 발생하는 대표적인 구조물로서 기존 구조설계기준에서 제안하고 있는 설계법으로는 이 부분의 소요 철근량 산정 및 배근 방법에 많은 어려움을 지니고 있는 구조물이다. 그러나 변단면 깊은 보의 거동 해석시, 스트럿-타이 모델을 사용하면 특수 구조형태에 따른 내적 힘의 분포형상 및 파괴메커니즘을 명확히 파악할 수 있어 기존 구조설계기준에서 제안하고 있는 깊은 보의 전단 설계법 보다 유용한 방법임을 밝혔다. 단면의 깊이가 변하는 부분에 대한 주응력 흐름을 반영한 스트럿-타이 모델을 구성하여 전단 설계를 수행한 결과 균열 발생 및 전단 파괴에 대해 효과적으로 지지할 수 있는 합리적인 전단 철근량 및 배근 방법을 도출할 수 있었다.

#### 참고 문헌

1. (사)한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준, 1999.
2. 김성수, 이우진, "연화 스트럿-타이 모델에 의한 고강도 철근콘크리트 깊은 보의 전단강도 예측에 관한 연구", 한국구조물진단학회, 제7권, 제4호, pp.159~169, 2003.
3. University of Stuttgart, "IABSE Workshop Strut-and-Tie Model", New Dehli, India, 1993.
4. Abolfo B. Matamoros and Kuok Hong Wong, "Design of Simply Supported Deep Beams Using Strut-and-Tie Models", ACI Structural Journal, Vol.100, No.6, pp.704~712, November-December 2003.
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", American Concrete Institute, 2002