

# 연속지지 RC 깊은 보의 합리적인 설계를 위한 부정정 스트럿-타이 모델의 제안

## Indeterminate Strut-Tie Model for Rational Design of Continuous RC Deep Beams

채 현 수\*                      김 병 현\*\*                      윤 영 목\*\*\*  
Chae, Hyun Soo              Kim, Byung Hun              Yun, Young Mook

### ABSTRACT

Recently, many design standards recommend the use of a strut-tie model approach for design of structural concrete with D-region(s). However, since the design standards of the conventional strut-tie model approaches are suggested on the assumption of using a determinate strut-tie model, it is difficult to apply an indeterminate strut-tie model in the design of continuous deep beams. In this study, an indeterminate strut-tie model for continuous deep beams is proposed to resolve the problem, and the ultimate strengths of 35 continuous deep beams tested to failure are evaluated for the validity check of the proposed indeterminate strut-tie model. The analytical results by the proposed model are compared with those by the conventional approaches of ACI 318-99 and ACI 318-05.

### 1. 서론

철근콘크리트 연속 깊은 보는 콘크리트와 전단철근에 의한 전단저항 메커니즘의 성능에 의해 극한 강도가 지배된다. 연속 깊은 보의 거동은 전단지간대 유효깊이의 비, 휨철근비, 하중점과 지지점의 조건, 그리고 사용재료의 성질 등의 여러 변수간의 복합적인 역학관계로 인해 매우 복잡하다. 본 연구에서는 이러한 연속 깊은 보의 강도 및 거동 특성을 모두 반영할 수 있는 연속 깊은 보 부정정 스트럿-타이 모델을 제안하였다. 또한 현행 스트럿-타이 모델 설계규정을 부정정 스트럿-타이 모델을 이용한 설계에 합리적으로 적용하기 위해 단부 및 중앙부 지지점이 부담하는 하중의 비인 반력분배율과 수직 트러스 메커니즘에 의해 전달되는 하중의 크기 즉 부정정 스트럿-타이 모델의 하중분배율을 제안하였다. 제안한 반력분배율 및 하중분배율을 ACI 318-05 스트럿-타이 모델 설계규정<sup>(2)</sup>에 적용하여 파괴실험이 수행된 35개 철근콘크리트 연속 깊은 보에 대한 극한강도 평가를 수행하였으며, 그 결과를 실험 결과, 실험 및 이론에 기초한 전단강도모델, 그리고 현행 스트럿-타이 모델 설계규정에 의한 극한강도 평가결과와 비교하였다.

### 2. 연속 깊은 보를 위한 부정정 스트럿-타이 모델

\* 정회원, 경북대학교 토목공학과 박사과정  
\*\* 정회원, 콜로라도대학교 토목공학과 박사후과정  
\*\*\* 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수

본 연구에서는 연속지지 깊은 보 부정정 스트럿-타이 모델의 하중분배율을 결정하기 위해 먼저 연속지지 깊은 보의 주요 하중전달 메커니즘을 정의하고, 이러한 하중전달 메커니즘을 반영하는 부정정 스트럿-타이 모델을 선정하였다. 그림 1과 같이 선정한 부정정 스트럿-타이 모델을 이용하여 작용하중에 대한 각 하중전달 메커니즘이 부담하는 하중의 크기 즉 연속지지 깊은 보의 주요하중전달 메커니즘이 부담하는 하중분배율을 스트럿과 타이 요소의 재료적 비선형 거동을 고려하는 비탄성 해석을 통해 결정하였다. 선정한 부정정 스트럿-타이 모델이 2차 부정정 트러스 구조를 가지고 있으므로 두 전단저항 메커니즘의 하중분배율을 결정하기 위한 비탄성 해석을 수행하기에 앞서 내측 전단지간과 외측 전단지간에 작용하는 전단력의 크기 즉 중앙부 지지점과 단부 지지점이 부담하는 하중의 크기를 우선적으로 결정해 주어야 한다. 본 연구에서는 부정정 스트럿-타이 모델의 모든 구성요소의 강성(EA)을 동일하게 가정한 후 전단지간대 유효깊이의 비를 변화시키면서 선형탄성해석을 수행한 결과를 이용하여 반력분배율을 결정하였다. 스트럿과 타이 요소의 재료적 비선형 거동을 고려한 비탄성 해석에서는 전단저항 메커니즘을 구성하는 콘크리트 스트럿의 압축파괴와 철근 타이의 인장파괴가 동시에 발생한다는 전단평형철근비 개념을 이용하여 연속지지 깊은 보의 전단파괴에 대한 연성거동 능력을 확보하였다. 그리고 전단지간대 유효깊이의 비( $a/d$ ), 휨철근비( $\rho$ ), 그리고 콘크리트의 공칭강도( $f_{ck}$ ) 등의 주요설계변수의 영향을 고려하기 위해 다양한 설계변수 상태에 대한 비탄성해석을 수행하였으며, 이 결과를 바탕으로 결정한 수직 트러스 메커니즘의 하중분배율 결정식을 식 (5)와 같이 제안하였다. 그림 2는 비탄성 해석을 통해 결정한 수직 트러스 메커니즘의 하중분배율을 보여주고 있고, 그림 3은 전단 평형철근비 개념을 이용한 부정정 스트럿-타이 모델의 하중분배율 결정 절차를 보여주고 있다.

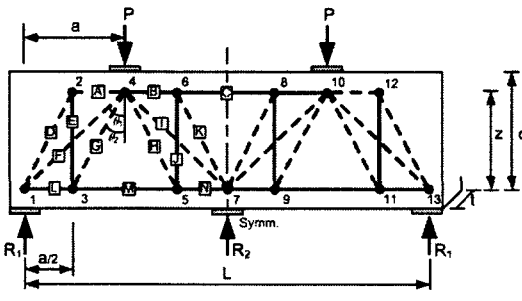


그림 1. 본 연구의 부정정 스트럿-타이 모델

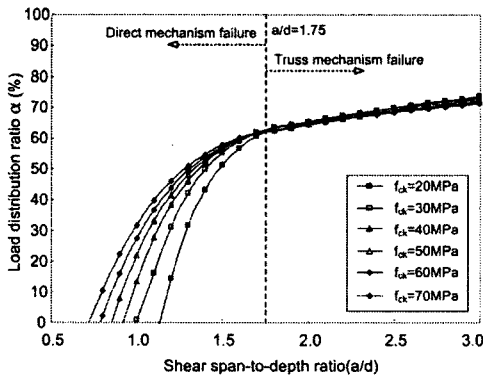


그림 2. 비탄성 해석을 통해 결정한 수직 트러스 메커니즘의 하중분배율

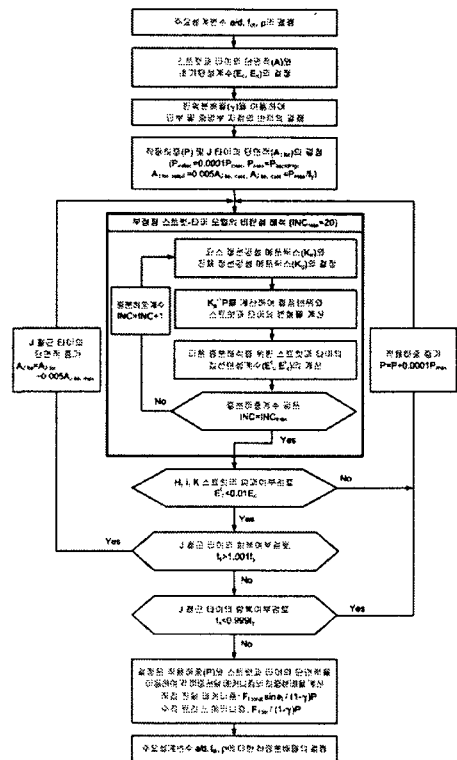


그림 3. 전단 평형철근비 개념을 이용한 부정정 스트럿-타이 모델 하중분배율 결정 알고리즘

### 3. 연속 깊은 보의 극한강도 평가

본 연구에서는 연속지지 깊은 보 부정정 스트럿-타이 모델, ACI 318-99의 깊은 보 설계규정<sup>(1)</sup>, 그리고 ACI 318-05의 스트럿-타이 모델 설계규정<sup>(2)</sup>을 연속 깊은 보에 적용하여 극한강도를 평가하였다. 실험에 기초한 진단강도모델을 가진 ACI 318-99 설계규정에 의한 연속지지 철근콘크리트 깊은 보의 극한강도 평가는 각각 실험에 기초한 콘크리트가 부담하는 전단력을 포함하는 아래와 같은 식을 이용하여 수행하였다.

$$V_n = V_c + V_s \text{ (MPa)} \quad (1)$$

$$V_c = \left( 3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u d} \right) \left( 0.158 \sqrt{f_{ck}} + 17 \rho \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \leq 0.5 f_{ck} b_w d, \quad \left( 3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u d} \right) \leq 2.5 \quad (2)$$

$$V_s = \rho_v \left( \frac{1 + l_n/d}{12} \right) f_{vy} b_w d + \rho_{vh} \left( \frac{11 - l_n/d}{12} \right) f_{vh} b_w d \text{ or } V_s = \rho_v f_{vy} b_w d \quad (3)$$

여기서,  $M_u$ ,  $V_u$ , 그리고  $l_n$ 은 각각 위험단면에서의 휨모멘트와 전단력 그리고 지점간의 순경간길이를 나타낸다.

ACI 318-05 설계규정에서는 기존의 깊은 보에 대한 진단설계규정을 삭제하고, Appendix A에 소개되어 있는 스트럿-타이 모델에 의해 깊은 보의 설계를 수행하도록 규정하고 있으므로, 순경간대 유효깊이 비가 5이하인 깊은 보의 경우에는 스트럿-타이 모델 설계규정에 따라 설계를 수행하여야 한다. 다만 ACI 318-05 설계규정에서는 공칭전단강도  $V_n$ 는  $10 \sqrt{f'_c} b_w d$ 를 넘지 않도록 규정하고 있으며 전단철근의 간격이 12in를 초과하지 못하도록 규정하고 있다.

본 연구에서는 수치해석을 통해 결정된 반력분배율 및 하중분배율값을 바탕으로 단순지지 깊은 보의 설계에 간단히 적용할 수 있도록 부정정 스트럿-타이 모델의 반력분배율 및 하중분배율 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$R_1 = \gamma P, \quad R_2 = (1 - \gamma)P, \quad \gamma = [0.011(a/d - 3)^2 + 0.34] \quad (4)$$

$$\alpha = \beta(f_{ck} - 40) + \frac{590 - 80(\rho/\rho_b)}{3(a/d)} \ln \left( \frac{a/d}{1.09 - 0.2(\rho/\rho_b)} \right) \quad \text{for } \frac{a}{d} < \eta \quad (5a)$$

$$\alpha = \beta \left( \frac{a}{d} - \eta \right) + 63 \quad \text{for } \frac{a}{d} \geq \eta \quad (5b)$$

여기서,  $\alpha (= P_w/P)$ 는 작용하중에 대한 수직 트러스 메커니즘의 하중분담율,  $\rho_b$ 는 휨 평형철근비 그리고 단순지지 깊은 보의 파괴를 지배하는 메커니즘을 결정하는 변수  $\eta$  및 주요설계변수에 따른 하중분배율의 변화를 고려하는 변수  $\beta$ 는 다음과 같이 정의하였다.

$$\eta = 2.25 - \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_b} \right) \quad (6)$$

$$\beta = \begin{cases} (1 + 2\rho/\rho_b)(a/d - \eta)^2, & f_{ck} > 40 \text{ MPa} \\ (0.6 + \rho/\rho_b)(a/d - \eta)^2, & f_{ck} \leq 40 \text{ MPa} \end{cases} \quad \text{for } a/d < \eta \quad (7a)$$

$$\beta = -0.03f_{ck} + (8.5 + \rho/\rho_b) \quad \text{for } a/d \geq \eta \quad (7b)$$

본 연구에서 제안한 부정정 스트럿-타이 모델과 이 모델의 하중분배율 식을 ACI 318-05의 스트럿-타이 모델 설계규정에 적용하여 파괴실험이 수행된 35개 연속지지 깊은 보의 극한강도를 평가하였다. 극한강도 평가결과는 표 1과 같고, 주요 설계변수에 따라 평가한 극한강도는 그림 4와 같다.

### 4. 결론

Investigator		Conventional Method( $V_{calc.}/V_{test}$ )		Strut-Tie Model Approach( $V_{calc.}/V_{test}$ )	
		ACI 318-99		ACI 318-05	Present Study
Total	Mean	1.06		0.73	0.84
	STDEV	0.372		0.158	0.163
	COV	35.19		21.61	19.31

표 1. 기존 설계규정 및 제안한 부정정 스트럿-타이 모델에 의한 연속지지 깊은 보의 극한강도 평가결과

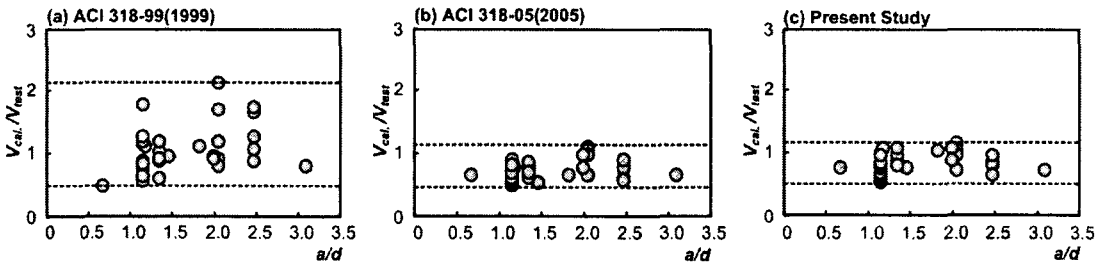


그림 4. 주요 설계변수( $a/d$ )에 따라 예측된 극한강도

ACI 318-99 설계규정의 깊은 보 전단강도식은 깊은 보의 전단강도를 비교적 정확히 평가하였으나, 시험체의 조건에 따라 예측결과의 정확성에 차이가 큰 것으로 나타났다. ACI 318-05의 스트럿-타이 모델 설계규정은 ACI 318-99 설계규정의 실험에 기초한 전단강도모델에 비해 연속지지 철근콘크리트 깊은 보의 극한강도를 일관되게 예측하였다. 본 연구에서 제안한 부정정 스트럿-타이 모델을 이용하는 방법은 다른 설계규정에 비해 일관된 해석결과를 나타내었을 뿐만 아니라 연속 깊은 보의 극한강도를 비교적 정확히 평가하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제안한 부정정 스트럿-타이 모델을 이용하는 방법은 연속 깊은 보의 합리적인 설계방법으로 제시될 수 있음을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- (1) ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (ACI 318R-99), American Concrete Institute, 1999.
- (2) ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05), American Concrete Institute, 2005.
- (3) Ashour, A. F., "Tests of Reinforced Concrete Continuous Deep Beams", Journal of ACI, Vol. 94, pp. 3-12, 1997.
- (4) Hsu, T. T. C. and Mo, Y. L., "Softening of Concrete in Torsional Members", Research Report No. ST-TH-001-83, Department of Civil Engineering, University of Houston, Texas, 1983.
- (5) Rogowsky, D. M., MacGregor, J. G. and Ong, S. Y., "Tests of Reinforced Concrete Deep Beams", Journal of ACI, Vol. 83, pp. 614-623, 1987.
- (6) Subedi, N. K., "Reinforced concrete two-span continuous deep beams", Proc. Instn Civ. Engrs Structs, Vol. 128, pp. 12-25, 1998.
- (7) 신용호, "흙이 깊은 연속보의 전단내력에 관한 실험적 연구", 석사학위논문, 부경대학교 건축공학과, 2001.