

스트럿-타이 모델에 의한 개구부를 갖는 깊은 보의 극한강도 예측

Prediction of Ultimate Strength of Concrete Deep Beams with an Opening Using Strut-and-Tie Model

지 호 석* 송 하 원** 변 근 주***
Ji, Ho-Seok Song, Ha-Won Byun, Keun-Joo

ABSTRACT

In this study, ultimate strength of concrete deep beams with an opening is predicted by using Strut-and-Tie Model with a new effective compressive strength. First crack occurs around an opening by stress concentration due to geometric discontinuity. This results in decreasing ultimate strength of deep beams with an opening compared with general deep beams.

With fundamental notion that ultimate strength of deep beam with an opening decreases as a result of reduction in effective compressive strength of a concrete strut, an equivalent effective compressive strength formula is proposed in order to reflect ultimate strength reduction due to an opening located in a concrete strut. An equivalent effective compressive strength formula which can reflect opening size and position is added to a testified algorithm of predicting ultimate strength of concrete deep beams. Therefore, ultimate strength of concrete deep beam with an opening is predicted by using a simple and rational STM algorithm including an equivalent effective compressive strength formula, not by finite element analysis or a former complex Strut-and-Tie Model

1. 서론

본 논문은 스트럿-타이 모델의 유효압축강도식을 재구성함으로써 개구부를 갖는 깊은 보의 극한강도를 합리적으로 예측하기 위한 연구이다. 깊은 보에 개구부가 있을 경우 기하학적 불연속으로 인해 개구부 주변의 응력집중 현상이 발생하고 이로 인해 초기 균열이 모서리 주변에서 발생한다. 따라서 개구부가 없을 경우의 깊은 보의 극한강도에 비해 상대적으로 극한강도가 낮다. 본 연구에서는 이러한 극한강도의 감소는 콘크리트 압축스트럿 강도의 감소에 기인한다는 개념을 도입하여 개구부로 인한 극한강도의 감소를 반영할 수 있는 등가 유효압축강도식을 제안하였다. 그리고 Won²⁾ 등(1998)이 제안

* 정회원, LG 건설 엔지니어링 부문 토건부 사원
** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수
*** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

한 개구부가 없는 깊은 보의 극한강도를 예측해 주는 알고리즘에 등가 유효압축강도식을 추가하여 콘크리트 압축 스트럿에 개구부가 존재하는 깊은 보의 극한강도를 예측할 수 있도록 하였다.

2. 스트럿-타이 모델에 의한 일반적인 설계 및 해석

스트럿 타이 모델에 의한 일반적인 설계과정은 Fig. 1과 같으며, ②와 ③의 과정을 반복하면서 변형률에너지가 최소가 되는 최적의 모델을 선정하고 상세설계 및 해석을 실시한다.

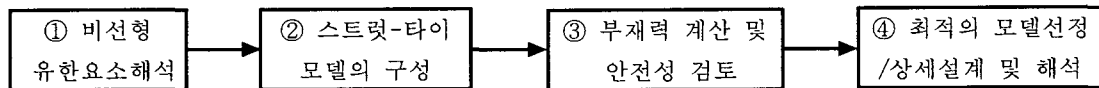
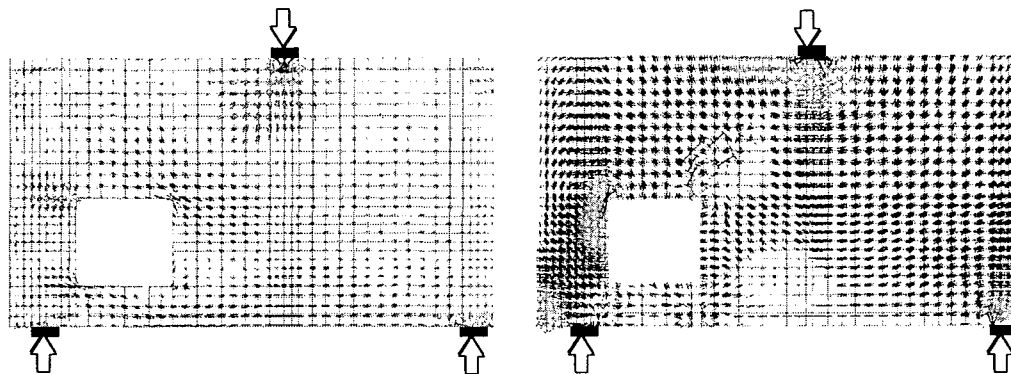


Fig. 1 Design and analysis procedure for concrete structure using Strut-and-Tie Model

2.1. 개구부를 갖는 깊은 보의 비선형 유한요소해석

설계하중을 받는 개구부를 갖는 깊은 보를 대상으로 2차원 비선형 유한요소해석을 실시하여 하중 단계별로 주응력의 흐름을 구하면 Fig. 2와 같다.



(a) Flow of principal tensile stress

(b) Flow of principal compressive stress

Fig. 2 Flow of principal stress

2.2. 개구부를 갖는 깊은 보의 스트럿-타이 모델

비선형 유한요소해석으로 구한 주응력 궤적을 이용하여 Fig. 3과 같은 모델을 구성하였다. Fig. 3(a)는 하중이 증가함에 따라 개구부 모서리 우측 상단부터 균열이 발생하는 것을 고려해 경사방향으로 타이를 배치하였고 개구부 하단에 발생하는 인장력도 고려된 모델이다.

Fig. 3(b)는 개구부 주변의 보강철근을 고려한 모델이고, 실제로 각각의 부재력을 구하기 위해서 하중 재하 지점을 기준으로 좌측과 우측으로 나누어서 부재력을 구한다. 우측부분은 개구부가 없을 경우의 하중지점과 반력지점을 연결하는 병모양(bottle shape)의 스트럿과 동일하게 구성된다. 한편 Fig. 3(b)의 모델은 전체적으로 불안정(unstable)한 상태이므로 더미(dummy)부재를 추가함으로써 모델을 안정(stable)화시킬 수 있다. Fig. 3(c)는 Type I과 Type II model을 조합한 모델이다. 설계하중 V_2 는 우측부분은 콘크리트 스트럿을 통해 지점으로 전달되고, 개구부가 있는 좌측부분에 작용되는 V_1 는

하중을 $\frac{1}{2} V_1$ 씩 나누어서 각각의 트러스 모델에 재하시킴으로써 부재력을 구한다. 따라서 개구부 주변에 발생하는 인장력과 깊은 보의 하단부에 발생하는 인장력을 동시에 고려할 수 있다. 최적의 모델은 변형률에너지가 최소가 되는 모델이다.

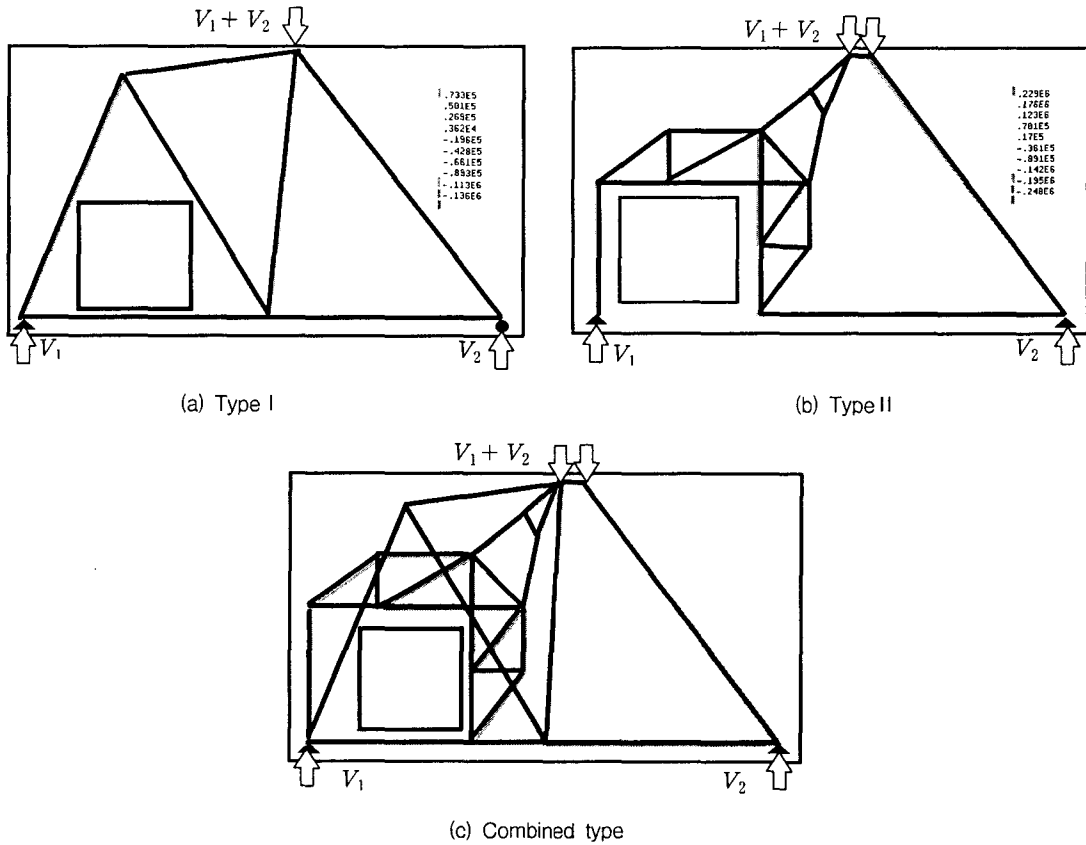


Fig. 3 Strut-and-Tie model for deep beam with an opening

3. 등가 유효압축강도식의 제안

3.1. 단순지지된 깊은 보의 유효압축강도

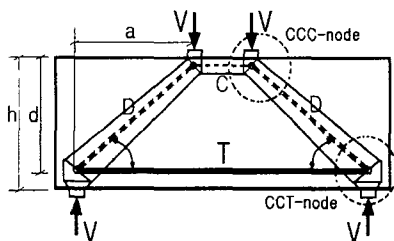


Fig. 4 Strut-and-Tie model for deep beam

Won²⁾ 등(1998)은 Fig. 4와 같이 단순지지된 보의 스트럿-타이 모델을 구성하고, 식 (1)과 같이 전단지간비(a/d)의 함수로써 스트럿의 유효압축강도를 결정하였다. 또한 상부 압축스트럿의 두께를 변화시키면서 상부스트럿과 하부스트럿의 힘이 같아지는 지점에서 이 부재의 극한강도를 구할 수 있는 알고리즘을 구성하였고, 실험을 통해 이를 검증하고 제안한 유효압축강도식의 타당성을 입증하였다.

$$f_{ce2}^c = 0.68 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \left(\alpha_1 - \alpha_2 \frac{a}{d} \right) f_{ck} \quad \alpha_1 = 1.25, \alpha_2 = 0.25 \quad (1)$$

3.2. 등가 유효압축강도식의 제안

본 연구에서는 Fig. 6와 같이 개구부가 있는 깊은 보의 극한 강도를 예측하기 위해서 콘크리트 스트럿 부분에 존재하는 개구부의 기하학적인 특성을 고려한 스트럿의 유효압축강도식을 제안하고자 한다. 개구부가 있는 깊은 보의 유효압축강도를 개구부의 위치에 따라 크기비인 (m/d)와 (n/a)의 함수로써 식 (2)와 (3)과 같이 제안하였고, 개구부를 갖는 깊은 보에 대해 극한강도 시험을 수행한 Kong and sharp(1973)의 실험자료와 다양한 개구부의 크기와 위치를 갖는 140개의 시편에 대해 비선형 유효요소해석을 실시하여 구한 극한강도를 이용하여 크기비에 대한 영향인자를 도출하였다. Fig. 5 (a)는 개구부의 위치가 콘크리트 스트럿의 중앙부에 위치할 경우의 개구부의 크기비에 따른 영향계수의 관계를 나타낸 것이고, Fig. 5(b)는 개구부의 위치가 스트럿 하단부에 위치할 경우의 관계를 나타낸다. 식 (2)는 개구부가 스트럿의 중앙부에 위치할 경우에 크기비에 따른 등가 유효압축강도식을 나타낸 것이고, 식 (3)은 개구부가 스트럿의 하단부에 위치할 경우를 나타낸 것이다.

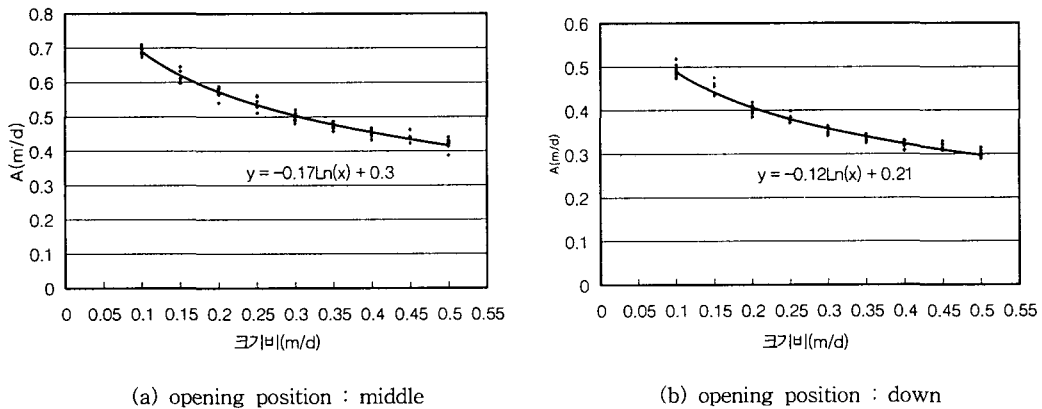


Fig. 5 Opening size ratio - influence factor relationship

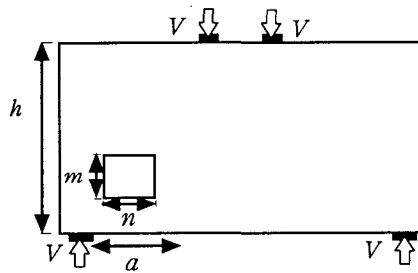


Fig. 6 Details of specimen

$$f_{eq} = f_{ce2}^c \times \left(0.3 - 0.17 \ln \left(\frac{m}{d} \right) \right) \left(0.3 - 0.17 \ln \left(\frac{n}{a} \right) \right) \quad (2)$$

$$f_{eq} = f_{ce2}^c \times \left(0.21 - 0.12 \ln \left(\frac{m}{d} \right) \right) \left(0.21 - 0.12 \ln \left(\frac{n}{a} \right) \right) \quad (3)$$

4. 개구부를 갖는 깊은 보의 극한강도 예측

Won(1998)은 깊은 보에 대해 기하학적 형상과 지점조건 등을 이용하여 구성된 간단한 스트럿-타이 모델을 이용해 그 구조물의 극한강도를 구하는 알고리즘을 제시하였고, 이를 실험결과와 비교 검증하여 타당성을 입증하였다. 본 연구에서는 개구부를 갖는 깊은 보의 극한강도를 예측할 수 있도록 개구부의 특성을 반영할 수 있는 등가유효압축 강도식을추가해 Fig. 7과 같이 완성하였다.

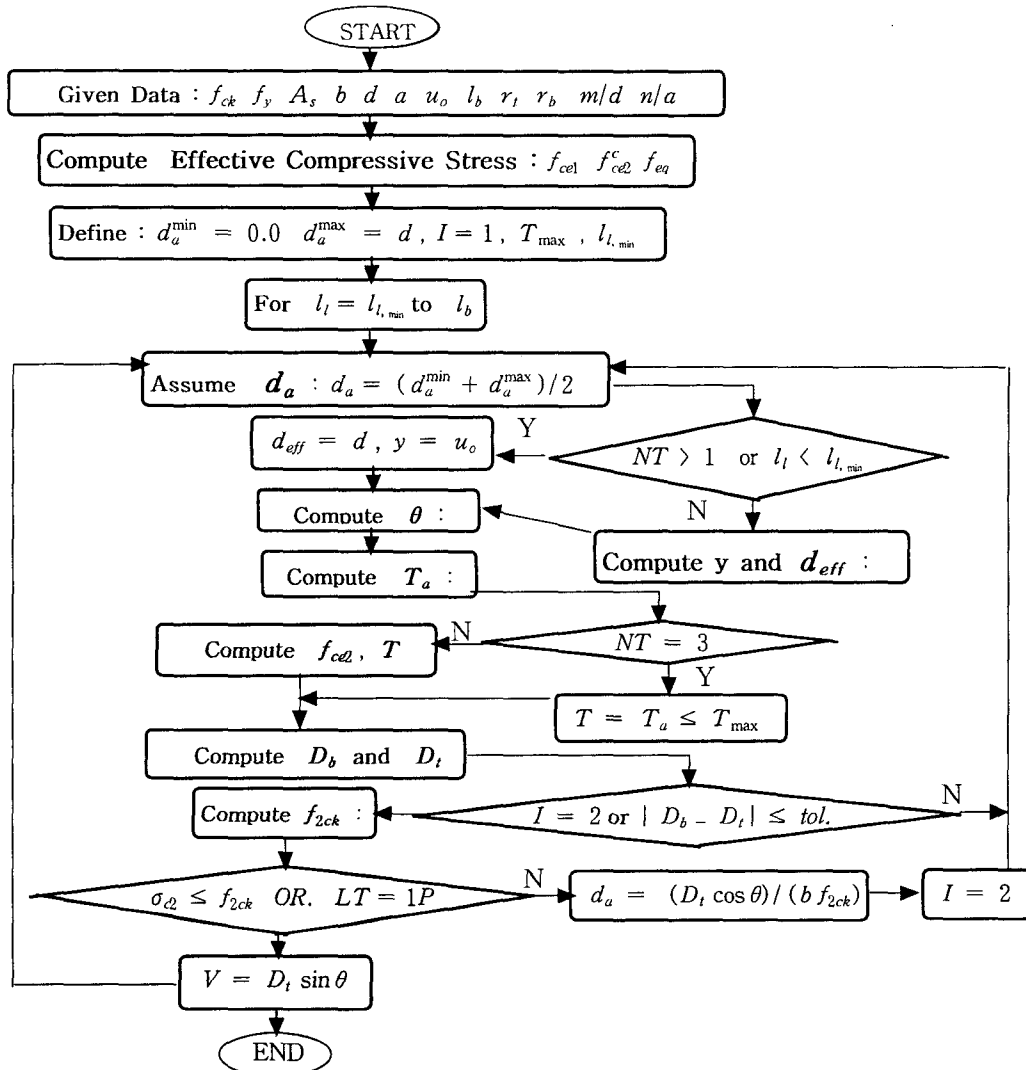


Fig. 7 Algorithm for estimation of ultimate strength

5. 등가 유효압축강도식의 타당성 검증

Fig. 8은 해석결과와 제안한 등가 유효압축강도식을 사용한 스트럿-타이 모델로써 구한 값들을

비교한 그래프이다. 제안한 등가 유효압축강도식을 알고리즘에 추가해서 개구부가 있는 깊은 보의 극한강도를 예측하는 것이 타당함을 검증하였고, 이로써 프로그램을 사용해 보다 편리하게 개구부가 있는 깊은 보의 극한강도를 예측할 수 있음을 보였다.

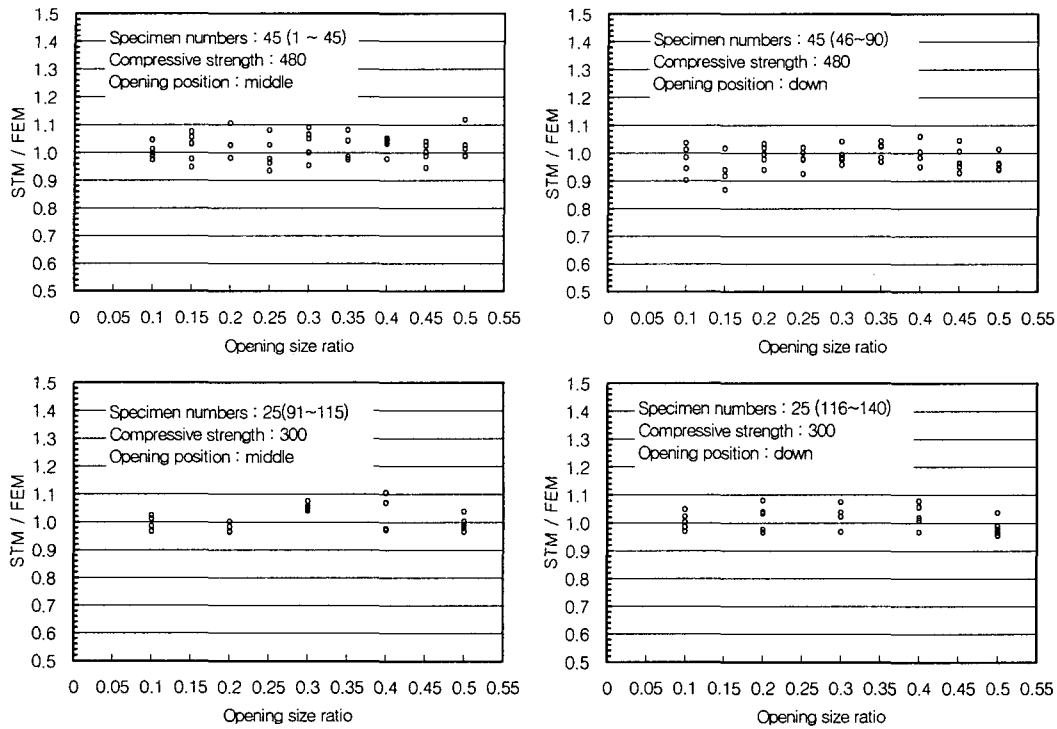


Fig. 8 Comparison of FEM and STM

6. 결론

다음은 본 연구결과 얻어진 결론이다.

- 1) 개구부가 있는 깊은 보의 극한강도를 제안한 알고리즘을 이용하여 예측하는 경우에, 힘의 경로에 위치하는 개구부로 인해 감소하는 콘크리트 스트럿의 강도를 반영할 수 있는 등가 유효압축강도식을 개구부의 크기와 위치의 함수로 제안하였다.
- 2) 제안한 등가 유효압축강도식을 사용함으로써 개구부가 있는 깊은 보의 극한강도를 개구부가 없는 깊은 보의 스트럿-타이 모델을 이용해서 보다 간단하게 예측할 수 있다는 사실을 규명하였다.

참고문헌

- 1) Brain, S. M. and Breen J. E. (2000), "Experimental Evaluation of Strut-and-Tie Model Applied to Deep Beam with Opening", *ACI Structural Journal*, January-February, pp. 142-148.
- 2) Won, D. Y., Hino, S. I., and Ohta, T. (1998), "Ultimate Strength Analysis of RC Deep Beams Using Strut-and-Tie Models", *J. Materials, Struct., Pavement, JSCE*, Vol. 39, No. 592, pp. 181-196.
- 3) Bergmeister, K., Breen, J. E., Jirsa, J. O., and Kreger, M.E.(1993), *Detailing in Structural Concrete*, Research Report Number 1127-3F, Center for Transportation Research.