

개구부가 있는 무량판 슬래브의 뚫림전단에 대한 위험단면 결손 산정

Estimating Ineffective Part of Critical Section for Punching Shear Strength of Flat Slabs with Openings

하태훈* 오보환**
Ha, Tae Hun Oh, Bo Hwan

ABSTRACT

According to current design provisions for shear strength of reinforced concrete slabs, critical slab sections around columns should be modified in the presence of openings in slabs to consider the effect of openings on the shear strength of slabs. Although the method of estimating the ineffective part of critical section due to openings are explained in codes, the real math for calculating it is somewhat complex and cumbersome. This paper classifies different cases of the location and geometry of columns and openings, respectively, and derives corresponding equations for estimating ineffective part of critical section for each case.

1. 서론

현행 콘크리트 구조설계기준에 의하면 무량판 구조물의 기둥 주변 슬래브에 개구부가 있는 경우에 개구부 발생에 의한 슬래브의 전단 내력 감소를 반영하기 위하여 개구부가 기둥으로부터 일정 거리 내에 존재할 때 뚫림전단에 대한 위험단면의 크기를 감소시키도록 하고 있다.¹⁾ 개구부에 의해 감소되는 위험단면의 크기를 구하는 방법은 여러 기준에서 유사한 방법을 채택하고 있지만 실제로 감소되는 값을 계산하고자 할 때 기둥과 개구부의 위치 및 기하학적 형상에 따라 다양한 경우가 발생하며 계산 방법 역시 단순하지 않기 때문에 구조 실무에의 적용에 어려움이 발생하는 실정이다. 무량판 구조물은 다른 구조 형식에 비해 기둥 주변에서의 전단에 취약하기 때문에 개구부 발생에 의한 위험단면의 정확한 계산이 중요하다고 할 수 있다.

2. 슬래브 개구부 발생에 의한 위험단면의 감소

무량판 구조물의 설계에서 양방향으로 작용하는 모멘트에 의해 발생하는 전단력에 저항하기 위해서는 기둥면으로부터 일정 거리에 존재하는 위험단면의 설계 강도가 작용 하중보다 커야만 한다. 위험단면의 위치는 기준에 따라 각각 다른 값을 사용하고 있는데, 국내 설계기준²⁾과 ACI 318³⁾에서는 기둥면으로부터 $0.5d$ (d =슬래브 유효깊이)만큼 떨어진 위치에 있는 최소 둘레를 위험단면으로 설정하고 있

* 정회원, 대우건설 기술연구원 선임연구원
** 정회원, 대우건설 기술연구원 수석연구원

는 반면, Eurocode 2⁴⁾와 BS 8110⁵⁾에서는 이 값을 $1.5d$ 로 하고 있다. 이 때 슬래브에 발생한 개구부에 의해 감소되는 위험단면의 크기는 모든 기준에서 동일하게 기둥의 도심에서 시작된 방사선이 개구부와 만나는 영역 내에 위치하는 위험단면의 둘레를 계산함으로써 구할 수 있다. 추가적으로 기둥 상부 슬래브에 전단머리가 있는 경우에는 개구부에 의해 감소된 위험단면의 크기를 절반으로 줄여서 고려하도록 하고 있다.

3. 경우에 따른 단면결손 산정방법

기준에서 명시한 방법대로 개구부 발생에 의한 위험단면의 결손을 산정하는 것은 기둥과 개구부의 위치 및 기하학적 형상에 대한 복잡한 경우의 수와 번거로운 계산방법을 요구하므로 정형화된 계산식을 구하기 힘들다고 할 수 있다. 그러나 실질적으로 많이 사용되는 기둥과 개구부의 형상을 고려하면 그림 1에서와 같이 4가지 경우로 분류할 수 있다. 3.1 ~ 3.4절에 제시된 방정식들은 이들 4가지 경우에 대하여 기둥과 개구부의 크기 및 상대적인 위치를 고려하여 위험단면의 결손값(l_p)을 수식화한 것이다. 수식에 사용된 변수는 사각형 기둥의 치수(가로 c_1 , 세로 c_2), 원형 기둥의 반지름(R), 사각형 개구부의 치수(가로 a_1 , 세로 a_2), 원형 개구부의 반지름(r), 기둥 도심에 대한 개구부 도심의 상대적 좌표(x_o, y_o), 슬래브의 유효깊이(d) 등이다. (그림 1 참조) 3.5에서는 기타의 경우를 포함한 일반적인 경우에 대하여 위험단면의 결손을 구할 수 있는 기술적인 방법을 설명한다. 다음에 전개된 수식은 대칭성을 고려하여 기둥의 도심을 좌표축의 원점으로 보았을 때 제1사분면 내의 y -축과 위험단면의 우측 상단을 연결한 방사선으로 둘러싸인 영역을 기준으로 한다.

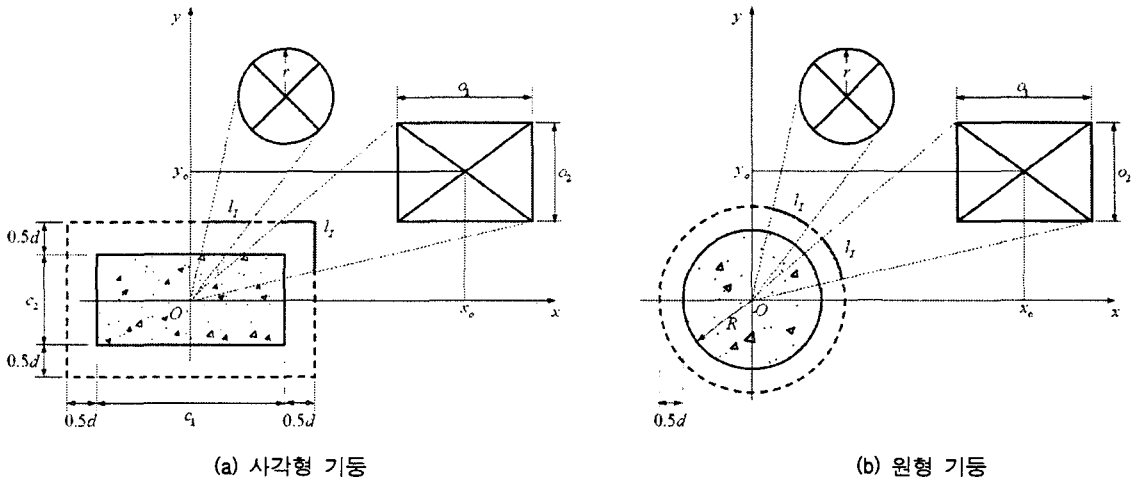


그림 1 기둥과 개구부의 형상 및 개구부의 위치에 따른 슬래브 위험단면 결손 변화

3.1. 사각형 기둥과 사각형 개구부

기둥의 도심에서 시작된 방사선이 개구부의 어느 꼭지점을 지나느냐에 따라, 그리고 위험단면의 결손 부위에 꼭지점이 존재하느냐에 따라 다음과 같은 3가지 경우로 나눌 수 있다. ①은 방사선이 개구부의 좌·우측 하단 꼭지점을 지나는 경우이고 ②는 방사선이 개구부의 좌측 상단 꼭지점과 우측 하단 꼭지점을 지나는 경우로서 두 경우 모두 위험단면의 결손 부위는 직선의 형태를 갖는다. 반면 ③은 ②에서와 같이 방사선이 개구부의 좌측 상단 꼭지점과 우측 하단 꼭지점을 지나지만 위험단면의 우측 상단을 지나는 방사선을 포함하고 있으므로 꺾은선 형태의 결손 부위를 갖게 되고 다음 식에서와 같이

계산 결과도 좀 더 복잡하다. (그림 1(a) 참조)

$$\begin{aligned} \text{①: } l_I &= \frac{(c_2+d)o_1}{2y_o-o_2} && \text{for } x_o < \frac{o_1}{2} \\ \text{②: } l_I &= \frac{2(c_2+d)(o_2x_o+o_1y_o)}{4y_o^2-o_2^2} && \text{for } \frac{o_1}{2} < x_o \text{ and } \frac{c_2+d}{c_1+d} < \frac{2y_o-o_2}{2x_o+o_1} \\ \text{③: } l_I &= \frac{c_1+d}{2} \left(1 - \frac{2y_o-o_2}{2x_o+o_1}\right) + \frac{c_2+d}{2} \left(1 - \frac{2x_o-o_1}{2y_o+o_2}\right) && \text{for } \frac{2y_o-o_2}{2x_o+o_1} < \frac{c_2+d}{c_1+d} < \frac{2y_o+o_2}{2x_o-o_1} \end{aligned}$$

3.2. 사각형 기둥과 원형 개구부

개구부가 원형인 경우는 방사선과 개구부가 접하는 조건을 구하는 과정이 추가로 필요하지만 사각형 개구부의 경우처럼 방사선이 개구부의 어느 꼭지점을 지나느냐 하는 경우를 고려할 필요가 없어지므로 2가지 경우로 축소시킬 수 있다. ④는 위험단면의 결손 부위가 직선의 형태를 갖는 경우이고, (그림 1(a) 참조) ⑤는 3.1의 ③에서와 같이 위험단면의 결손 부위가 꺾은선 형태인 경우이다. 다음 식에서 l_o 는 기둥의 도심에서 방사선과 개구부의 접점까지의 거리이고 $l_o = \sqrt{x_o^2+y_o^2-r^2}$ 을 이용해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{④: } l_I &= \frac{(c_2+d)rl_o}{y_o^2-r^2} && \text{for } \frac{c_2+d}{c_1+d} < \frac{x_o y_o - r l_o}{x_o^2 - r^2} \\ \text{⑤: } l_I &= \frac{c_1+d}{2} \left(1 - \frac{x_o y_o - r l_o}{x_o^2 - r^2}\right) + \frac{c_2+d}{2} \left(1 - \frac{x_o y_o - r l_o}{y_o^2 - r^2}\right) && \text{for } \frac{x_o y_o - r l_o}{x_o^2 - r^2} < \frac{c_2+d}{c_1+d} \end{aligned}$$

3.3. 원형 기둥과 사각형 개구부

기둥이 원형인 경우는 위험단면 중간에 꺾인 부분이 없으므로 3.1에 비해 경우의 수가 2개로 줄어들게 된다. 그리고 사각형 기둥에서 사용했던 직교좌표계 대신 극좌표를 사용하여 원호 형태의 위험단면 결손을 계산해야 한다. ⑥은 방사선이 개구부의 좌·우측 하단 꼭지점을 지나는 경우이고 ⑦은 방사선이 개구부의 좌측 상단 꼭지점과 우측 하단 꼭지점을 지나는 경우이다. (그림 1(b) 참조) 만약 위험단면 산정 시 ACI-ASCE Committee 426⁶⁾에서 제안한 대로 원형 기둥의 둘레와 동일한 길이를 갖는 사각형 기둥으로 치환한 경우라면 3.1의 ① ~ ③을 따를 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{⑥: } l_I &= \left(R + \frac{d}{2}\right) \tan^{-1} \frac{2o_1(2y_o-o_2)}{4x_o^2-o_1^2+(2y_o-o_2)^2} && \text{for } x_o < \frac{o_1}{2} \\ \text{⑦: } l_I &= \left(R + \frac{d}{2}\right) \tan^{-1} \frac{4(o_2x_o+o_1y_o)}{4(x_o^2+y_o^2)-(o_1^2+o_2^2)} && \text{for } \frac{o_1}{2} < x_o \end{aligned}$$

3.4. 원형 기둥과 원형 개구부

기둥과 개구부의 형상이 모두 원형인 경우는 각각의 반지름과 상대적인 위치에 따라 다음의 한 가지 식을 이용해 위험단면의 결손값을 계산할 수 있다.

$$\text{⑧: } l_I = \left(R + \frac{d}{2}\right) \sin^{-1} \frac{Rr l_o}{x_o^2+y_o^2}$$

3.5. 기타의 경우

이상에서 구한 위험단면의 결손값은 기둥과 개구부가 모두 사각형 또는 원형인 경우에 적용 가능하다. 만약 기둥의 형상이 비정형인 경우에는 기둥 주변의 위험단면의 형태도 비정형이 되므로⁷⁾ 위험단면의 결손을 정형화된 식으로 도출할 수 없고, 도면의 실측 등을 통해 구하는 것이 경제적이다. 다만 기둥의 형상이 사각형이거나 원형인 경우에는 개구부의 형상이 비정형이거나 여러 개의 개구부에 의한 위험단면의 결손 부분이 겹치는 경우에도 다음의 방법을 이용해 그 결손값을 구할 수 있다.

- (1) 기둥의 도심을 원점으로 하는 좌표축을 설정한다.
- (2) 원점과 개구부의 가장 외곽을 지나는 직선(방사선)의 방정식을 구한다. 이 때 다각형 개구부인 경우는 가장 외곽 꼭지점의 좌표를 이용하고 원형 개구부는 접선의 방정식을 이용한다. 그리고 여러 개의 개구부에 의해 위험단면의 결손 부분이 겹치는 경우에는 가장 외곽의 직선만을 고려한다.
- (3) 위험단면과 (2)에서 구한 직선의 방정식의 교점을 구한다. 이 때 원형 기둥인 경우에는 각 직선의 기울기를 구한다.
- (4) (3)에서 구한 교점 좌표의 거리(사각형 기둥) 또는 직선의 기울기 차이(원형 기둥)를 이용해 위험단면의 결손값을 계산한다. 이 때 사각형 기둥인 경우에는 위험단면의 꼭지점 위치를 고려해야 한다.

4. 결론

무량판 구조물의 슬래브에 개구부가 존재하는 경우 슬래브의 전단강도 산정을 위한 위험단면은 감소한다. 본 연구의 결과에 의하면 기둥과 개구부의 형상이 사각형 또는 원형인 경우에 8가지의 계산식에 의해 위험단면의 결손값을 구할 수 있으며 이를 이용해 복잡한 계산 과정을 단순화시킬 수 있다.

참고문헌

- 1) Teng, S., Cheong, H. K., Kuang, K. L., and Geng, J. Z., 2004, "Punching Shear Strength of Slabs with Openings and Supported on Rectangular Columns," *ACI Structural Journal*, V. 101, No. 5, SEP.-OCT., p.678-687.
- 2) 한국콘크리트학회, 2004, "콘크리트 구조설계기준 해설," 기문당, 405pp.
- 3) ACI Committee 318, 2005, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-05)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 443pp.
- 4) British Standards Institution, 1997, "Structural Use of Concrete: Part 1, Code of Practice for Design and Construction, (BS 8110: Part 1: 1997)," London, 120pp.
- 5) "Eurocode 2: Design of Concrete Structures-Part 1: General Rules and Rules for Buildings," European Prestandard ENV 1992-1-1:1991, 253pp.
- 6) ASCE-ACI Committee 426, 1979, "Suggested Revisions to Shear Provisions for Building Codes," American Concrete Institute, 82pp.
- 7) Park, R., and Gamble, W. L., 2000, "Reinforced Concrete Slabs, Second Edition," John Wiley & Sons, 716pp.