

기존 Data 분석에 의한 슬래브의 편칭전단강도 예측

Punching Shear Strength Prediction of Slabs by Analysis of Existing Data

김재민* 김대중** 모귀석*** 김우****
Kim, Jae Min Kim, Dae Joong Mo, Gui Seok Kim, Woo

ABSTRACT

The techniques of dimensional analysis and statistical regression analysis is applied to existing voluminous data available from tests covering a wide range of slab properties, which then leads to an equation to predict the punching shear strength of slabs.

1. 서론

플래트 슬래브나 평판 슬래브와 같이 보없이 기둥으로 지지되거나, 확대기초와 같이 집중하중을 받는 경우에는 기둥 둘레의 전단력이 매우 크고 복잡하다. 이러한 슬래브나 확대기초는 보와 같은 사인장 파괴가 아니면 편칭전단파괴(punching shear failure)가 일어난다. 이와 같이 편칭전단파괴는 슬래브의 주된 파괴형태임에도 불구하고 편칭전단파괴 거동은 거동을 지배하는 변수들이 대단히 많고, 파괴메카니즘이 매우 복잡하며, 관찰 또한 어렵기 때문에 명확히 규명되지 못하고 있는 실정이다.

위와 같은 이유 때문에 지금까지 슬래브의 편칭전단강도는 경험공식 및 실험결과에 의존하고 있으며, 슬래브의 전단용력의 계산에 관한 기준 또한 각 나라마다 상당히 다르다. 예를 들어, ACI code¹⁾와 British code^{2),3)}도 각각 Moe ⁵⁾와 Regan⁶⁾의 실험적 연구에 주로 기초한 기준이며, ACI code는 전단용력의 주변수가 콘크리트강도인 반면에 British code는 콘크리트강도와 철근비가 주변수이고, 두 code의 기둥 둘레의 위험주변장(critical perimeter)에 관한 기준이 상당히 다르다.

슬래브의 편칭전단파괴거동은 매우 복잡하여 이론적 규명보다는 대부분 실험결과에 의존하고 있으며, 지금까지 많은 편칭전단실험 결과들이 발표되어 있다. 따라서 본 연구에서는 유용 가능한 넓은 범위의 기존 편칭전단 실험결과를 이용하여 슬래브의 편칭전단거동에 영향을 미치는 주요변수를 차원해석(dimensional analysis)을 통해 조사하였고, 각 변수가 편칭전단강도에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 통계적인 방법인 회귀분석(statistical regression analysis)을 통해 보없는 슬래브의 편칭전단강도식을 제안하였다.

* 정회원, 전남대학교 토목공학과 석사과정

** 정회원, 장흥대학 토목과 전임강사

*** 정회원, 대불대학교 건설공학부 조교수

**** 정회원, 전남대학교 토목공학과 교수

2. 펀칭전단강도에 영향을 미치는 주요변수 분석

본 연구에서 이용한 Data는 참고문헌 7~13의 실험결과로서 총 117개 슬래브 시험체의 기하학적 형상, 재료특성 및 펀칭전단파괴강도에 관한 자료이다. 이 Data는 전단철근이 없는 단순지지된 원형 또는 정사각형 슬래브의 펀칭전단실험 결과이며, 이들 슬래브는 철근이 일정 간격으로 배근되어 있으며, 개구부를 포함하고 있지 않다.

슬래브의 펀칭전단거동에 영향을 미치는 변수는 일반적으로 콘크리트강도, 위험단면의 주변장, 유효깊이, 철근비, 기둥크기 등으로 알려져 있다.

$$f(P_P, f_p, u, d, A_s, l, c) = 0 \quad (1)$$

여기서 P_P : 펀칭전단강도 [F] f_p : 펀칭파괴거동에 관련된 콘크리트강도 = $k_p f_{cu}^{b_i}$ [FL^{-2}]

u : 위험단면의 주변장 [L] d : 유효깊이 [L]

A_s : 철근 단면적 [L^2] l : 지지점 사이의 지간길이 [L]

c : 직사각형 기둥 단면의 한변의 길이 또는 원형기둥 지름 [L]

식 (1)에 나타난 7개의 변수에 대해 Buckingham Pi 정리를 적용하여 무차원항(dimensionless term) π_i 를 만들면 다음과 같다.

$$\pi_1 = \frac{P_P}{udf_p} = \frac{P_P}{ud\sqrt{f_{cu}}}, \quad \pi_2 = \rho = \frac{A_s}{ud}, \quad \pi_3 = \frac{d}{u}, \quad \pi_4 = \frac{c}{d}, \quad \pi_5 = \frac{d}{l}, \quad \pi_6 = \frac{l}{c}, \quad \pi_7 = \frac{l}{u} \quad (2)$$

π_7 항의 l, u 의 영향은 π_6 항에 이미 포함되어 있다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 위 무차원항 중 $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5$ 와 π_6 를 펀칭전단거동에 직접적 영향을 주는 주변수로 하여 분석하였다.

종속변수 π_1 항과 5개의 독립변수 $\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5$ 및 π_6 항간의 상관정도를 Table 1과 Fig.1, 2, 3, 4 및 5에 나타냈다. Table 1과 Fig.1에 나타낸 바와 같이, 펀칭전단강도와 철근비간의 결정계수는 0.61로써 다른 무차원항에 비하여 가장 큰 결정계수값을 보이고 있다. 이러한 결과로부터 펀칭전단강도에 가장 큰 영향을 미치는 주변수는 철근비와 콘크리트강도임을 알 수 있다.

펀칭전단파괴거동은 l/c 에 따라 구분되고 있다 Table 1 Correlation of punching shear strength with dimensionless terms

(Fig.1 참조). 즉 l/c 가 5이상인 슬래브에서는 펀칭전단강도가 l/c 에 따라 큰 변화를 보이지 않지만 l/c 가 5이하인 슬래브에서는 l/c 가 감소함에 따라 펀칭전단강도가 증가하는 경향을 보인다.

무차원항	$\pi_2 = \rho$	$\pi_3 = \frac{d}{u}$	$\pi_4 = \frac{c}{d}$	$\pi_5 = \frac{d}{l}$	$\pi_6 = \frac{l}{c}$
결정계수 (R^2)	0.61	0.18	0.09	0.30	0.13

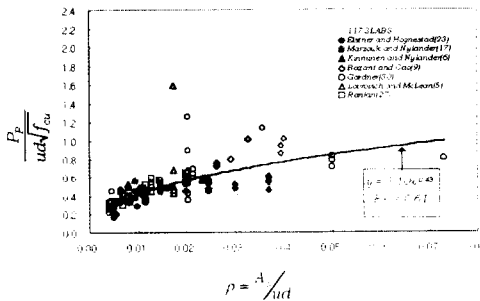


Fig.1 Punching shear strength vs. ρ

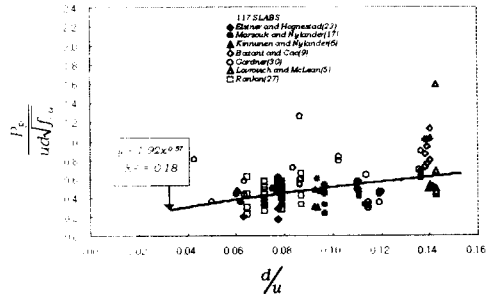


Fig.2 Punching shear strength vs. d/u

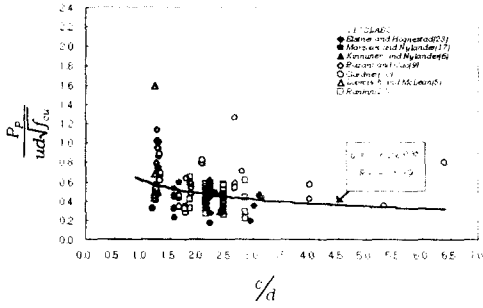


Fig.3 Punching shear strength vs. c/d

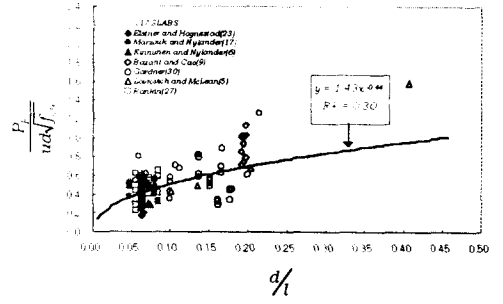


Fig.4 Punching shear strength vs. d/l

3. 회귀분석을 통한 편칭전단강도식 제안

식 (2)로부터 무차원식을 만들면,

$$\frac{P_p}{udf_p} = k_1(\rho)^{b_1} \left(\frac{d}{u}\right)^{b_2} \left(\frac{c}{d}\right)^{b_3} \left(\frac{d}{l}\right)^{b_4} \left(\frac{l}{c}\right)^{b_5} \quad (3)$$

$f_p = k_p f_{cu}^{b_1}$ 을 이용하면 편칭전단강도 예측식 형태는 다음과 같이 된다.

$$\frac{P_p}{ud} = k_2(f_{cu})^{b_1}(\rho)^{b_2} \left(\frac{d}{u}\right)^{b_3} \left(\frac{c}{d}\right)^{b_4} \left(\frac{d}{l}\right)^{b_5} \left(\frac{l}{c}\right)^{b_6} \quad (4)$$

여기서 상수값 $k_2(=k_1 k_p)$, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 및 b_6 는 아래 식과 같이 대수형태로 하여 다중회귀분석을 통해 구할 수 있다.

$$\ln\left[\frac{P_p}{ud}\right] = \ln k_2 + b_1 \ln(f_{cu}) + b_2 \ln(\rho) + b_3 \ln\left(\frac{d}{u}\right) + b_4 \ln\left(\frac{c}{d}\right) + b_5 \ln\left(\frac{d}{l}\right) + b_6 \ln\left(\frac{l}{c}\right) \quad (5)$$

Lovrovich and McLean의 연구¹²⁾에 의하면, 슬래브의 두께가 일정할 경우 대략 $l/d=6$ 을 경계로 하여 l/d 가 6이상일때는 편칭전단강도는 거의 일정하며, l/d 가 6이하일때는 l/d 가 감소함에 따라 편칭전단강도가 현저히 증가한다. 본 연구에서는 l/d 가 5이상인 114개의 슬래브 편칭전단실험결과^{7)~13)}를 이용하여 단계선택법을 통한 다중회귀분석을 하였으며, 회귀분석은 SPSS 통계 프로그램을 이용하였다.

다중회귀분석결과, 절근비, 콘크리트강도 및 d/u 가 편칭전단강도와 가장 상관성이 높은 변수로 나타났으며, $k_2=8.3$, $b_1=0.47$, $b_2=0.40$, $b_3=0.43$ 으로 산출되었다. 여기서 b_1, b_2 및 b_3 값은 대략 1/2에 가깝다. 따라서 편칭전단강도식은 다음과 같은 형태로 제안할 수 있다.

$$\frac{P_p}{ud} = k\sqrt{f_{cu}\rho\left(\frac{d}{u}\right)} \quad (6)$$

식 (6)의 k 값은 많은 실험결과로부터 쉽게 결정할 수 있다. 114개의 슬래브 Data^{7)~13)}를 회귀분석한 결과, 기울기 k 값은 Fig.6에 나타난 바와 같이 13으로 결정되었다. 따라서 l/d 가 5이상인 슬래브의 편칭전단강도식은 다음과 같다.

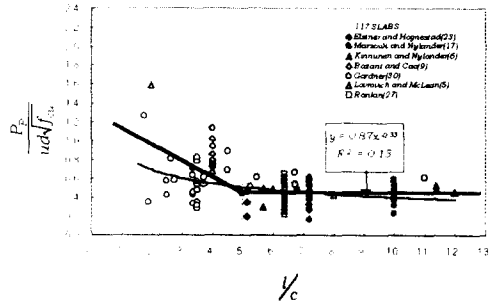


Fig.5 Punching shear strength vs. l/c

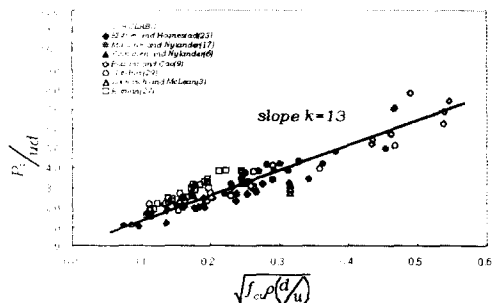


Fig.6 Determination of k in Eq. (6)

$$\frac{P_p}{ud} = 13\sqrt{f_{cu}\rho\left(\frac{d}{u}\right)} \quad (7)$$

Table 2 Statistical comparison of adequacy of Eq. (7)

식 (7)의 신뢰성을 검토하기 위해서, 식 (7)은 ACI 318, British code 및 CEB-FIP 1990 code의 편칭전단강도식과 함께 기존의 114개 슬래브 시험체^{7)~13)}에 적용되었다. Table 2에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 제안한 식 (7)에 의한 예측치는 각 code의 식보다 실험결과와 잘 일치하고 있다.

Equation	$\frac{\text{measured } P_p}{\text{calculated } P_p}$	
	Mean	Standard Deviation
Proposed Eq.(7)	1.047	0.181
ACI 318	1.531	0.548
British code	1.158	0.326
CEB-FIP 1990	1.319	0.227

4. 결론

기존 슬래브 Data를 이용하여 차원해석과 회귀분석을 통해 슬래브의 편칭파괴거동을 연구하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 철근비와 콘크리트강도가 편칭전단강도에 가장 큰 영향을 미치는 주변수이다.
- (2) l/c 가 5이상에서는 l/c 에 따라 편칭전단강도는 큰 변화가 없으며, l/c 가 5이하에서는 l/c 가 감소함에 따라 편칭전단강도가 증가하는 경향을 보인다.
- (3) 본 연구에서 제안한 식 (7)은 실험결과와 잘 일치하고 있다.

참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95)," American Concrete Institute, Farmington Hills, 1996.
2. British Standards Institution, "Code of Practice for the Structural Use of concrete," BSI, London, 1972, CP 110, Part 1.
3. British Standards Institution, "Code of Practice for Design and Construction," BSI, London, 1985, BS 8110, Part 4
4. CEB-FIP Model Code for Concrete Structures 1990, Comite Euro-International du Beton/Federation International de la Precontrainte, Lausanne, Switzerland.
5. Moe J., "Shearing strength of reinforced concrete slabs under concentrated loads", *Development Bulletin D47*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, April 1961.
6. Regan, P. E., "Design for Punching Shear." *Struct. Engr.*, V. 52, No. 6, 1974, pp. 197-207.
7. Elstner, R. C., and Hognestad, E., "Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs," *ACI Journal, Proceedings* V. 53, No. 1, July 1956, pp. 29-58.
8. Marzouk, H., and Houssein, A., "Punching Shear Analysis of Reinforced High-Strength slabs," *Canadian Journal of Civil Engineering*, V. 18, No. 6, Dec. 1991, pp. 954-963.
9. Kinnunen, S., and Nylander, H., "Punching of Concrete Slabs without Shear Reinforcement," *Transactions*, No. 158, *Royal Institute of Technology, Stockholm*, 1960, 112pp.
10. Bažant, Z.deněk P., and Cao, Zhiping., "Size Effect in Punching Shear Failure of Slabs," *ACI Structural Journal*, V. 84, No. 1, Jan.-Feb. 1987, pp. 41-51.
11. Gardner, N. J., "Relationship of the Punching Shear Capacity of Reinforced Concrete Slabs with Concrete Strength." *ACI Structural Journal*, V. 87, No. 1, Jan.-Feb. 1990, pp. 66-71.
12. John S.Lovrovich, and David I. McLean., "Punching Shear Behavior of Slabs with Varying Span-Depth Ratios." *ACI Structural Journal*, V. 87, No. 5, Sep.-Oct. 1990, pp. 507-511.
13. Rankin G.I.B., "Predicting the punching strength of conventional slab-column specimens.", *Structural Engineering Group*, June 1987, pp. 327-346.