철근 콘크리트의 뚫림전단 파괴메카니즘에 관한 비교

Comparison on the Failure Mechanism of Punching Shear in the Reinforced Concrete

이 주 나* 연 규 원* 이 호 준** 박 찬 수***
Lee, Ju Na Yeun, Kyu Won Lee, Ho Jun Park, Chan-Soo

ABSTRACT

In R.C. flat slab system, a brittle punching failure is a very fatal problem. But there is no generally well-defined answer to the problem and there are wide differences in current practical design codes. Therefore, in this study, the factors affecting to punching failure mechanism have been studied to find out the punching shear behavior in R.C. flat slabs by comparing other investigations and practical design codes.

The conclusions in this study are summarized as follows ;

1) The factors affecting to punching shear are concrete strength (f_{ck}), ratio of column side length to slab depth(c/d), ratio of distance from column center to radial contraflexure (l/d), yield strength of steel (f_y), flexural reinforcement ratio(ρ) and size effects.

2) It is shown that the use of $\sqrt{f_{ck}}$ in applying f_{ck} to punching shear strength estimation may be more sensitive in high concrete strength.

3) The effects of l/d, f_y, size are not clear in the punching failure mechanism, so in the future, it should be investigated with the effects of various composed load.

I 서 론

1.1 연구배경 및 목적

뚫림전단파괴는 flat slab에서와 같은 슬래브-기둥 접합부에서 취성파괴 양상을 보이는 거동이다. 이러한 뚫림전단을 고려하는 설계는 여러 설계규준에서 제시되어 왔으나, 그에 적용할 수 있는 뚫림전단 파괴메카니즘이 일반화되지는 못하였으며, 이것에 영향을 미치는 관련 요인들에 있어서도 명확하다고 볼 수 없다.

보다 이론적인 뚫림전단능력예측을 위해서는 합리적인 파괴메카니즘의 정립이 요구될 것으로, 본 논문에서는 기존 연구자들의 실험·이론적 연구를 이용하여 뚫림전단 파괴메카니즘에 구성요소로서 작용하는 각 요인들을 조사하고, 파괴메카니즘의 구성형식에 따라 변화하는 요인들의 전반적인 양상을 분석하여 철근 콘크리트 뚫림전단 파괴메카니즘 설정의 기초자료를 제시하고자 하

* 정회원, 충북대 대학원 건축공학과 박사수료
** 정회원, 충북대 대학원 건축공학과 석사과정
*** 정회원, 충북대 건축공학과 교수, 공학박사

는 것이 목적이다.

1.2. 연구범위 및 방법

Flat slab의 슬래브-기둥접합부에서 일어나는 뚫림전단의 문제를 고려함에 있어, 콘크리트 단면 보강과 전단보강근이 없으며, 모멘트가 작용하지 않는 대칭뚫림파괴의 거동을 고려하였다. 그리고 기둥을 둘러싼 슬래브는 2방향 휨 보강근을 가진 2방향 슬래브로 가정하였다.

연구방법은 기존연구자들의 파괴메카니즘연구를 고찰하여 고려된 변수를 살펴보고, 이러한 변수들이 다양하게 변화하였을 때 뚫림전단거동에 미치는 영향에 대하여 각 파괴메카니즘의 예측을 비교하여 알아보고자 한다. 그리고 그 영향을 비교적 조건이 근사한 기존의 실험자료와 비교한다. 또한 이러한 요인들의 영향이 현행 규준의 해석에서 어떠한 결과를 나타내는지에 대하여 살펴보아 철근 콘크리트 뚫림전단의 설계시 고려될 만한 각 요인과 그 내용을 제시하고자 한다.

2. 뚫림전단 파괴메카니즘 고찰

철근 콘크리트의 뚫림전단강도를 예측하는 다양한 기존의 해석메카니즘을 살펴보면 1960년 Kinnunen & Nylander(1960~69)에 의하여 도입된 "극대칭모델(polar-symmetric model)"과 Andrä(1982) 등에 의한 트러스 이론을 바탕으로 한 이른 바 "유사 트러스 모델(truss analogy model)" 및 Nielsen과 Reagan(1978) 등의 소성이론의 응용에 근거한 모델 등을 근간으로 수정을 거듭하여 오고 있다고 볼 수 있다.[1)]

이와 같은 모델 중 다양한 요소를 고려하며 탄성이론에 근거하여 제시된 다음의 "극대칭 모델"과 "유사 트러스모델"에 대하여 고찰하고자 한다.

2.1. C. E. Broms의 극대칭모델(1990)[2)]

Kinnunen & Nylander에 의하여 고안된 극대칭 모델을 기본으로 접선방향의 고압축응력(V_t)과 방사방향 고압축응력(V_d)을 고려하여, 이 두 값 중 적은 값을 부재의 뚫림파괴하중으로 가정하는 파괴메카니즘을 제시하였다. 이 메카니즘은 기본적인 요소외에 크기효과를 고려하였다.

1) 접선방향 고압축응력(ε_{cpu}값으로부터 뚫림전단력 V_t를 구한다.)

$$\varepsilon_{cpu} = 0.0008 \left(\frac{150}{\alpha x_{pu}} \times \frac{25}{f_c'} \right)^{0.333} \qquad (2\text{-}1)$$

여기서, 150 =실린더 시험체의 기준직경(mm)이며,

x_{pu} =접선방향의 파괴시 압축부의 높이(mm),

αx_{pu}=등가구형응력블록높이(mm)이다.

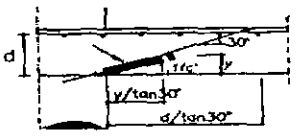

그림 1 방사방향 파괴메카니즘

2) 방사방향 고압축응력(V_d)

$$V_d = \pi(B + 1.05y)y \cdot 0.042 f_c' \left(\frac{1000}{d} \right)^{0.333} \qquad (2\text{-}2)$$

이 해석방법은 뚫림전단파괴에 관계되는 다양한 요인을 포함하고 있는 반면, 계산과정이 복잡하기 때문에 실용적인 방법으로 보기 어려운 점이 있다.

2.2. S. D. B. Alexander의 유사트러스 모델(1992)[3]

이 모델은 철근 콘크리트 뚫림전단 파괴메카니즘모델 중 유사트러스모델이라 할 수 있는 것으로서, 뚫림전단이 일어나는 슬래브를 기둥을 교차하는 직교스트립(beam strip)으로 구획하고, 압축 strut와 철근의 인장 tie를 이용하여 나타낸 트러스 모델을 적용하여 슬래브의 뚫림전단강도를 해석하였다. 그림 2와 같이 직교스트립을 켄틸레버보인 것처럼 가정하면, 직교스트립 주변의 슬래브에서 생겨난 내적전단하중(ω)을 받고 있는 이 켄틸레버보의 평형조건식에 의하여 하나의 직교스트립의 뚫림전단력을 구하고 전체 뚫림전단력은 각 기둥의 위치에 따라, 가지고 있는 직교스트립의 능력을 합산한 것으로 얻어진다.

$$M_s = \rho \cdot f_y \cdot c\,d^2\left(1 - \frac{\rho f_y}{1.7 f_c'}\right) \quad (2\text{-}3)$$

$$P_s = 2\sqrt{M_s \times \omega} \quad (2\text{-}4)$$

ω= ACI 규준의 1방향 전단력 산정으로 얻어진 ω값.

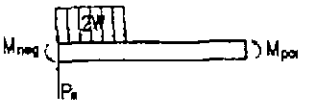

그림 2 방사방향 스트립의 평형

이 연구의 뚫림전단해석은 M_s를 구할 때 고려되는 여러 변수와 주변 판에서 전달되는 1방향 전단을 고려하여 비교적 간단한 해석방법을 제시하였다.

2.3. 이론적 파괴메카니즘 해석과 실험치의 비교

앞서 고찰한 이론적 뚫림전단 파괴메카니즘에 대하여 그 이론들의 타당성을 살펴보기 위하여, 다른 연구자들이 실시한 뚫림전단 실험자료에 이를 적용하고, 현재 일반적으로 사용되는 구조물 설계규준중 ACI 규준과 CEB-FIP 규준설계를 역시 동일한 실험자료에 적용하여 표 1에서 비교하였다.

두가지 파괴메카니즘 해석의 경우, 대부분 실험값에 대한 해석값의 비(V_t/V_p)가 1에 가까우며, 편차의 값이 적음으로써 모두 비교적 잘 일치함을 보였다. 규준설계는 예상대로 실험값보다 부재의 능력을 낮게 평가하여, V_t/V_p의 값이 다른 해석에 비교하여 큰 값을 가지므로 다소 여유를 보였다.

표 1 기존 연구자 이론식의 값과 실험값의 비교

해석연구자와 규준 / 실험자 (실험갯수)	파괴메카니즘				규준			
	Polar		Truss		ACI		CEB-FIP	
	V_t/V_p	편차	V_t/V_p	편차	V_t/V_p	편차	V_t/V_p	편차
E&H(28)[4]	0.99	0.11	1.17	0.13	1.4	0.27	1.34	0.15
K&N(16)[4]	1.04	0.03	1.034	0.12	1.3	0.40	1.41	0.096
Ghana(10)[4]	1.09	0.12	1.36	0.24	1.43	0.28	1.94	0.36
Chriswell(8)[4]	1.06	0.09	1.09	0.14	1.13	0.36	1.22	0.19
Gardner(30)[5]	0.92	0.12	1.34	0.09	1.74	0.36	1.24	0.07
Regan(42)[6]	0.94	0.05	1.44	0.45	1.44	0.3	1.61	0.49

3. 파괴메카니즘을 통한 뚫림전단요인 비교 검토

앞서 고찰한 극대칭모델(Polar)과 유사트러스모델(Truss) 파괴메카니즘 그리고 ACI 및 CEB-FIP 규준 이 4가지 방법을 기존 실험자료에 적용하여 그 해석값을 각 요인에 대하여 비교 분석하여 그 결과를 그림 3~8로 나타내었다. 각 요인별로 해석과 실험값을 비교분석하여 뚫림전단요인들의 전반적인 양상을 조사하였다.

3.1. 콘크리트 강도 (f_{ck})

콘크리트 강도를 변화시킨 Hognestad & Elstner의 실험체[4]를 이용하여 작성한 그림 3은 4가지의 해석이 실험값의 변화와 같이 콘크리트 강도에 비례함을 나타낸다.

4가지 방법중 Alexander, Broms, CEB-FIP의 해석은 비슷한 기울기를 가지고 있어 콘크리트 강도증가에 따른 뚫림전단능력의 변화정도가 일정하게 보이나, ACI 규준의 해석은 다른 해석에 비해 일정크기 이상에서 과도하게 증가됨을 보인다.

이는 ACI 규준의 해석이 콘크리트강도 변화에 민감하게 영향받고 있는 것을 보이는데, 콘크리트 강도를 $\sqrt{f_{ck}}$로 해석식에 사용함으로 인한 것으로 보인다. 보다 덜 민감한 값인 $\sqrt[3]{f_{ck}}$의 표현을 사용한 CEB-FIP 규준은 콘크리트 강도에 있어서 다른 두가지 이론적 해석과 비슷한 관계를 보임에 따라, 본 연구에서는 기존의 연구[7]에서 지적한 바와 비슷한 값인 270kgf/㎠ 이상의 콘크리트 강도를 적용할 경우는 현재의 ACI 규준의 해석이 콘크리트 강도에 민감하다고 할 수 있다.

3.2. 휨철근비(ρ)와 휨철근의 항복강도 (f_y)

철근비를 변화시킨 Hognestad & Elstner의 실험체[4]에 대하여 각 해석방법을 적용하여 그림 4에서 비교하였다. ACI 규준을 제외한 3가지의 해석이 비교적 비슷한 비례적 상관성을 보이는 반면, ACI 규준의 해석은 철근비(ρ)를 변수로 적용하지 않기 때문에 일정한 값을 보였다.

슬래브의 철근양을 뚫림전단강도의 변수로 인식하자면 철근강도 f_y도 영향을 미칠 것으로 생각되나 f_y의 경우는 실험자료가 부족하여 그 영향을 판단하기에는 어려운 점이 있다. 그렇지만 f_y의 영향은 ρf_y값과 비교하면 보다 분명해진다. 그림 5에서는 Kinnunen & Nylander 실험체[4]에 적용한 뚫림전단강도를 ρf_y값과 비교하여 나타내었다.

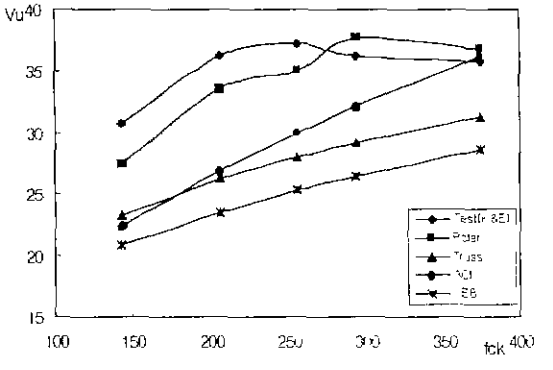

그림 3 콘크리트 강도의 영향

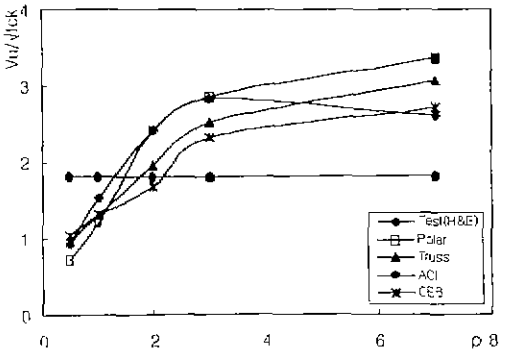

그림 4 휨철근비(ρ)의 영향

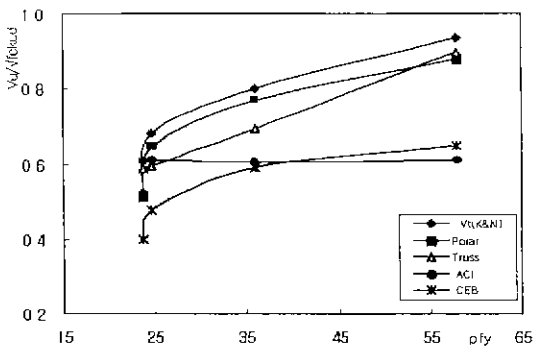

그림 5 횡철근비와 철근강도(ρf_y)의 영향

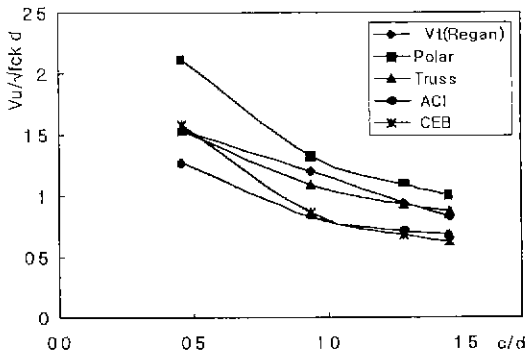

그림 6 c/d비의 영향

3.3. 기둥한변과 슬래브 유효두께 비(c/d)

c/d비를 변화시킨 Regan의 시험체[6]를 분석하여 그림 6으로 나타내었다. 4가지 해석이 실험치 비교에서와 마찬가지로 반비례로서 일관된 상태를 나타낸다. 이 점을 고려할 때 c/d비는 뚫림전단강도 해석시 고려되어야 할 일반적인 사항이라고 본다.

3.4. 슬래브전단스팬과 유효두께 비(*l*/d)

그림 7은 Regan의 *l*/d비를 변화시킨 시험체[6]를 나타낸 것으로 Broms를 제외한 3가지 해석이 슬래브전단스팬 *l*의 변화를 변수로 사용하지 않았기 때문에 Broms의 경우와 큰 차이를 보인다. *l*/d비에 대한 변화는 극대칭모델의 경우 Broms의 해석과 같은 결과를 보인다. Broms의 해석이 실험체와 비슷한 경향을 보였다고 생각되나, *l*/d비에 대한 실험값의 분포들이 많지 않아 앞으로 이 변수에 대한 연구가 필요하다 할 수 있다.

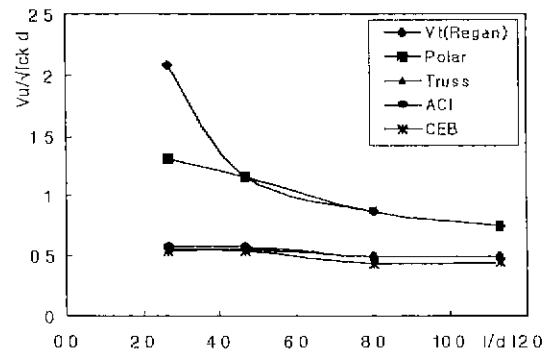

그림 7 *l*/d비의 영향

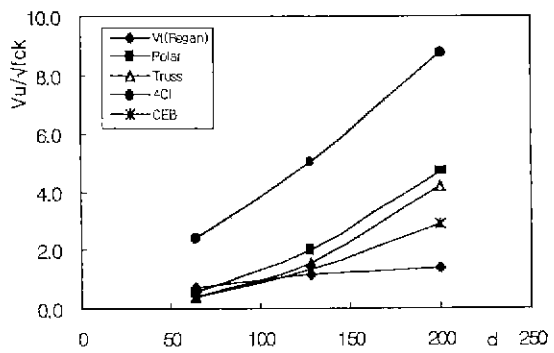

그림 8 크기효과에 따른 영향

3.5 크기효과

슬래브 두께와 기둥의 크기를 변화시켜 크기효과를 고려한 Regan의 실험체[6]에 대하여 각 규준과 두 파괴메카니즘의 크기효과영향을 조사하여 그림 8에 나타내었다. 이 실험체는 400kgf/cm²이상의 고강도에서 제작된 것인데 ACI 해석의 경우는 콘크리트 강도에 따른 과대평가영향이 있으므

로 다른 세가지 해석보다 능력이 크게 나타났으며, 슬래브 깊이에 따른 강도증가율이 다른 해석에 비해 큰 것으로 보인다.

4 결 론

철근 콘크리트 뚫림전단에 대한 관련요인들을 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 뚫림전단강도에 영향을 주는 주 요인은 콘크리트강도 (f_{ck}), 기둥한변과 슬래브 유효두께비 (c/d), 슬래브전단스팬과 유효두께비(l/d), 휨철근항복강도 (f_y), 휨철근비(ρ), 크기효과등이다.

2) 뚫림전단강도와 콘크리트 강도 (f_{ck})의 관계에 있어서 특히 고강도 콘크리트의 경우, $\sqrt{f_{ck}}$의 표현은 콘크리트에 의한 영향을 민감하게 하는 경향을 가지고 있다.

3) 휨철근비(ρ)와 항복강도 (f_y) 영향은 고려할 만한 변수이며, ρf_y값의 복합적인 영향을 고려하는 것이 보다 효과적이라 할 수 있다.

4) l/d비와 f_y의 영향 대하여는 각 파괴 메카니즘간에 나타난 영향이 일치하지 않으며 실험적 연구가 부족하다.

5) c/d비에 관한 영향은 4가지 해석에서 모두 일관된 경향을 보여, 그 요인이 철근 콘크리트 뚫림전단의 주 요인으로서 반드시 고려해야 함이 조사되었다.

더 나아가서, 뚫림전단거동에 영향을 미치는 다양한 변수를 조사하고 그러한 변수들이 보다 이론적인 메카니즘 형성에 고려되어야 할 것으로 본다.

참고문헌

(1) Shehata. I. A. E. M., et al., *"Punching in R.C. Slabs"*, *Journal of Structural engineering*, Vol.115, No.7, 1989, pp.1726~1740.

(2) Broms, C. E., "Punching of Flat plates-A Question of Concrete Properties in Biaxial compression and Size Effect", ACI Journal, Vol.87, No.3, May-June, 1990, pp.292~304.

(3) Alexander, S. D. B., et al., "Bond Model for Concentric Punching Shear", ACI Journal, Vol.89, No.3, May-June, 1992, pp.325~334.

(4) Siao, W. B., "Punching Shear Resistance of Flat Slab : A Beam-Strip Analogy", ACI Journal. Vol.91, No.5, Sep., 1994, pp.594~604.

(5) Gardner N. J, "Relationship of the Punching Shear Capacity of Reinforced Concrete Slabs with Concrete Strength", ACI Journal Vol.87, No.1, Jan., 1990, pp.66~71.

(6) Regan.P.E, "The dependence of punching resistance upon the geometry of the failure surface", Magazine of Concrete Research, Vol.36, March, 1984, pp.3~8.

(7) ASCE-ACI Committee 426, "The Shear Strength of Reinforced Concrete Members Slabs", Journal of the Structural Division, Vol.100, No.ST8, Aug., 1973, pp.1543~1591.

(8) 이주나외 2인, "철근 콘크리트 Flat Slab의 뚫림전단요인에 관한 연구",충북대학교 건설기술연구소 논문집, 17권, 2호, 1998.