

개구부 폭과 깊이 변화에 따른 철근콘크리트 깊은 보의 파괴모드 및 내력 평가에 관한 연구

은 회 창*

A Study on the Evaluation of Failure Mode and Strength in Reinforced Concrete Deep Beams with Variations of Width and Depth of the Web Openings

Hee-Chang Eun*

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the failure mode and the shear strength of reinforced concrete deep beams with rectangular openings. Fourteen deep beams which shear span-to-depth ratio(a/h) is 0.5 were tested and an equation to predict the ultimate shear strength of deep beams with rectangular openings was established by the test results.

Key Words : deep beams, rectangular openings, shear span-to-depth ratio

1. 서 론

전단경간비가 1.0 이하인 철근콘크리트 보의 콘크리트 스트럿을 통해 하중을 지점으로 직접 전달하는 부재이다. 이들 부재의 단부에 설비시설들을 관통시키기 위한 개구부를 설치할 경우 응력집중 및 콘크리트 스트럿의 단면결손으로 인해 다수의 균열발생과 함께 내력이 급격히 감소한다. 특히 개구부와 하중점을 연결하는 경사 균열 폭의 급격한 증가는 하중전달

능력의 저하 및 콘크리트 열화를 가속화 시킬 수 있다. 따라서 철근콘크리트 깊은 보의 단부에 개구부를 설치할 경우 균열제어 및 내력확보를 위해 세심한 보강이 필요하다.

하지만 개구부를 갖는 철근콘크리트 깊은 보의 전단설계 및 보강상세는 대부분의 기준에 아직 포함되지 않았다. 단지 콘크리트 설계 기준에서 부재의 전단내력 평가 시 개구부 면적을 제외한 유효단면적 적용만을 제시하고 있으며, 일본건축학회 기준은 원형 개구부를 갖는 일반 보에 제한되어 있다.

개구부를 갖는 철근콘크리트 깊은 보의 역학적 거동을 향상시키기 위한 보강방법 및 보강 양을 결정하기 위해서는 우선 개구부 설치로 인한 부재의 파괴모드 및 내력을 이해해야 한다. 특히 응력집중이 큰 장

* 제주대학교 건축학부, 첨단기술연구소
Faculty of Architecture, Cheju Nat'l Univ., Res. Inst. of Adv. Tech.

방형 개구부가 깊은 보의 임계단면에 위치할 때 개구부 크기 변화에 따른 내력 감소율을 파악해야 다른 조건하에서도 안전측에서 내력을 평가할 수 있을 것이다.

본 연구는 철근콘크리트 깊은 보에서 개구부 보강 상세를 제시하기 위한 기초연구로서 콘크리트 강도 변화에 따라 개구부 폭과 깊이 및 면적이 부재의 균열 거동 및 내력에 미치는 영향을 파악하는데 주요 목적이 있다.

II. 시험체 계획

개구부를 갖는 철근콘크리트 깊은 보의 개구부 상·하부의 콘크리트 스트럿 작용에 의해 그 거동이 결정된다. 개구부 상·하부의 콘크리트 스트럿 작용은 개구부 폭과 깊이에 의해 결정되며, 콘크리트 강도에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 강도, 개구부 폭 및 깊이를 주요 변수로 선택하였다.

개구부 설치로 인한 콘크리트 강도가 깊은 보의 내력에 미치는 영향의 변화를 파악하기 위하여 콘크리트 강도를 240~800kgf/cm²로 변화시켰다. 개구부 폭(mla)은 전단경간(a)이 증가할 때 같은 비율로 증가시켜 0.25a~0.65a로, 깊이(m2h)는 보 깊이(h)의 0.1h~0.3h로 각각 변화시켰다.

시험체 단면 크기는 16×60cm로 하였으며, 시험체 길이는 240cm로 하였다. 전단경간비(a/h)는 0.5로서 상부 2점가력 하였다. 주철근 배근은 3-D19($\rho \approx 0.01$)로서 1단 배근하였다. 주철근 휨복에 의한 파괴를 방지하기 위하여 항복강도가 8,200kgf/cm²인 철근을 사용하였다. 개구부만의 영향을 평가하기 위하여 전단 철근은 배근하지 않았다.

본 연구에서 수행된 시험체 상세를 Table 1에, 시험체 단면 형상 및 배근형태를 Fig. 1에 각각 나타내었다.

가력은 300tonf 용량의 UTM을 이용하여 3tonf/min의 속도로 가력하였다. 하중-변위관계를 측정하기 위하여 가력점 및 시험체 중앙의 저면에 LVDT를 설치하였다. 그리고 하중의 증가와 함께 균

열 폭 진전을 측정하기 위하여 예상 경사균열 면에 균열 게이지 6개를 부착하였다.

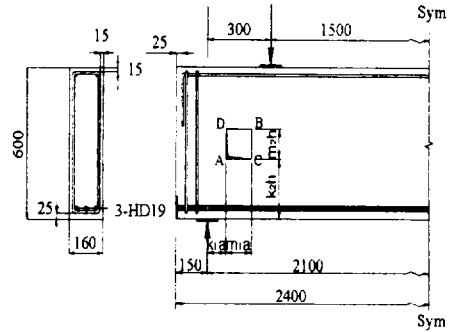


Fig. 1. Section and reinforcement details of specimens

III. 실험결과 및 분석

3.1 하중-변위 및 하중-최대 균열 폭 관계

Fig. 2에 각 시험체들의 하중-변위 관계를 나타내었다. 개구부가 설치된 보는 개구부 없는 보에 비해 초기 강성이 작을 뿐만 아니라 경사균열 발생 이후에도 변위가 급격히 증가하고 있다. 이는 콘크리트 강도가 작을수록 현저하게 있다. 개구부 깊이 변화가 부재의 하중-변위 관계에 미치는 영향은 거의 나타나지 않았다. 하지만 개구부 폭이 증가할수록 경사균열 발생 이후 처짐이 급격히 증가하고 있다. 이는 개구부 폭이 증가할수록 경사균열 발생 이후 모든 하중을 전달하는 개구부 상·하 스트럿의 세장비가 커지기 때문이라 판단된다.

Fig. 3에 하중의 증가에 따른 경사균열 폭 진전의 관계를 나타내었다. 일반적으로 초기 경사균열은 최대 내력의 20~30% 범위에서 하중점과 개구부 모서리 연결선을 따라 발생하였다. 경사균열 발생과 함께 균열 폭은 급격히 증가하며, 최대 내력의 50~75% 범위에서 부재의 사용성을 위해 제한하는 최대 균열 폭 0.3mm에 도달하였다. 따라서 개구부를 갖는 깊은 보의 내력과 함께 경사균열 폭 제어를 위한 경사보강

철근이 필요하다고 사료된다.

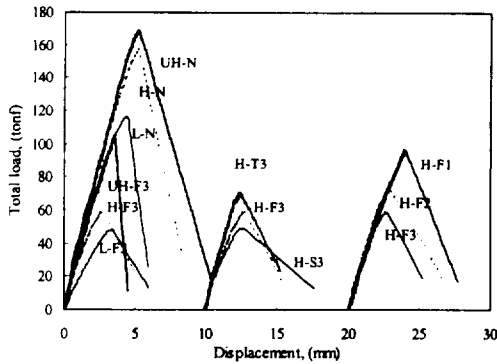


Fig. 2. Load-deflection curve

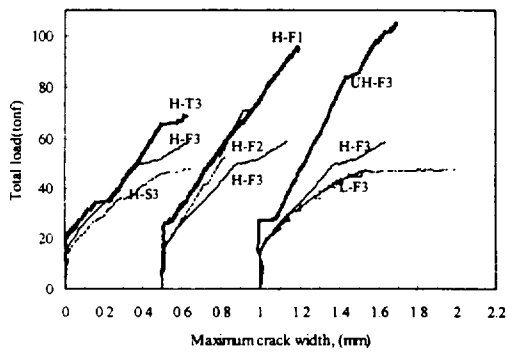


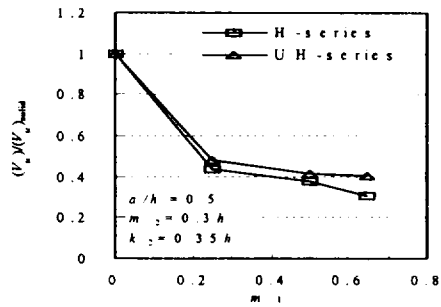
Fig. 3. Relation of load and maximum crack width

하중의 증가에 따른 균열 폭의 증가는 개구부 폭과 깊이가 클수록 현저하였다. 균열진전은 단위 면적당 소산된 에너지 해방율에 비례하므로 개구부 폭과 깊이가 클수록 개구부 상·하 스트럿 단면적이 작아지기 때문이다. 또한 콘크리트 강도가 증가할수록 최대 균열 폭은 작게 있다. 이는 고강도 콘크리트일수록 굵은 골재 함유량이 많아 균열면에서 골재의 맞물림 작용에 의한 균열제어 효과가 상대적으로 크기 때문이다.

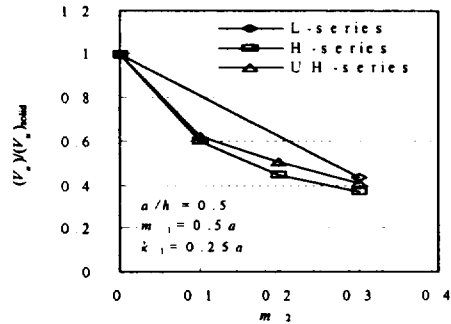
3.2 전단내력에 대한 각 변수들의 영향

Fig. 4에 개구부 폭 및 깊이의 증가에 따른 최대 내력 감소율을 나타내었다. 철근콘크리트 깊은 보에

일단 개구부가 설치되면 내력은 급격히 감소하며, 개구부 폭(m_1a)과 깊이(m_2h) 증가에 비례하여 완만하게 감소하였다. 개구부가 설치되었을 때 H-series와 UH-series에서의 최대내력은 개구부 폭이 0.25a에서 0.6a로 증가하면 각각 30%와 16% 감소하며, 깊이가 0.1h에서 0.3h로 증가하면 각각 38%와 34% 감소하였다. 개구부 설치로 인한 내력감소는 개구부 폭보다는 깊이의 영향이 크게 있었으며 콘크리트 강도가 증가할수록 개구부 폭과 깊이 증가에 따른 내력 감소율은 작게 있었다.



(a) Effects of opening width



(b) Effects of opening depth

Fig. 4. Variation of maximum load-carrying capacity according to opening width and depth

Fig. 5에 전단경간 면적(Ash)에 대한 개구비 면적(A_o) 점유율과 전단용력의 관계를 나타내었다. 전단 용력 산정은 개구부 면적을 뺀 유효 단면적을 적용하였다. 개구부를 갖는 철근콘크리트 깊은 보의 전단 용력은 개구부 면적비가 증가할수록 지수함수에 비례하여 감소하고 있음을 알 수 있다. 특히 경사균열

응력보다는 극한전단응력이 개구부 면적비의 영향을 더 크게 받고 있다. 따라서 개구부를 갖는 철근콘크리트 깊은 보의 내력은 개구부 설치로 인한 단면손실 뿐만 아니라 개구부 면적이 증가함에 따라 증가하는 콘크리트 스트럿 작용의 감소를 함께 고려하여야 할 것이다.

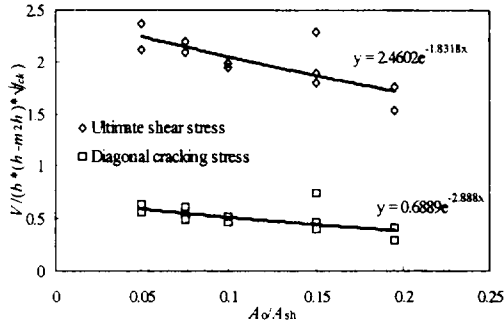


Fig. 5. Relation of area ratio of opening to shear span and shear stress

3.3 극한 전단내력식 제시

개구부를 갖는 깊은 보의 극한 전단내력은 크게 콘크리트가 분담하는 전단내력(V_c)과 주철근이 분담하는 전단내력(V_s)의 합으로 나타내며, 콘크리트가 분담하는 전단내력은 개구부 상·하 스트럿의 전단내력 분담에 의한다. Fig. 6에 개구부 중심이 전단경간 중심에 위치하는 장방향 개구부를 갖는 깊은 보의 파괴면에서 응력해방을 이상화하여 나타내었다. 초기 경사균열 발생 후 주 하중경로는 하중점과 개구부 모서리 C와 D점을 연결하는 스트럿으로 바뀌며, 하중의 증가와 함께 개구부 상·하 콘크리트 스트럿은 보의 횡 방향으로 응력해방 영역 ($2c_u'$)이 넓어진다. 이때 개구부 상·하부에서의 변형 에너지는 각각 식(1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta U_t = -b_u 2c_u' (h - k_2 h - m_2 h) (\sigma_{ct})^2 / 2E_c \quad (1)$$

$$\Delta U_b = -b_u 2c_b' (k_2 h) (\sigma_{cb})^2 / 2E_c \quad (2)$$

개구부 상·하 부재의 주 하중경로인 콘크리트 스트

럿에서 평균 압축응력(σ_{ct} , σ_{cb})은 식(3)으로 나타낼 수 있다.

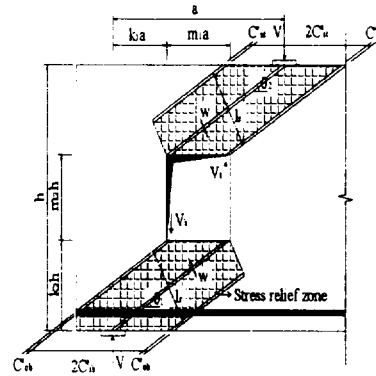


Fig. 6. Idealization of stress release along the failure surface of deep beam with openings at the mid shear span

$$\sigma_{ct} = \frac{V_u / \sin \theta_2}{b_u l_{tr}}, \quad \sigma_{cb} = \frac{V_u / \sin \theta_1}{b_u l_{br}} \quad (3)$$

여기서 l_{tr} 과 l_{br} 은 개구부 상·하부에서의 응력해방 영역 폭으로서 개구부 중심이 전단경간 중심에 위치할 때 l_{tr} 과 l_{br} 은 같다. θ_1 과 θ_2 는 개구부 상·하의 주 하중경로 각이다.

균열 진전은 파괴면에서 거의 일정한 에너지를 필요로 하며, 균열저항에너지(\mathcal{R})가 단위 면적당 소산된 에너지해방율(\mathcal{G})과 같을 때 진전된다. 따라서 식(1)~식(3)을 정리하고 콘크리트 특성길이(l_{ch})로 개구부 상·하 부재의 깊이를 무차원화하면 상·하 부재의 전단내력 분담은 각각 식(4)와 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$V_t = \phi_1 f_t \left(\frac{h(1 - k_2 - m_2)}{l_{ch}} \right)^{-\frac{1}{2}} \sin \theta_2 b_u h \quad (4)$$

$$V_b = \phi_1 f_t \left(\frac{k_2 h}{l_{ch}} \right)^{-\frac{1}{2}} \sin \theta_1 b_u h \quad (5)$$

여기서 $\phi_1 = \frac{l_{br}}{h} \sqrt{\frac{2c_u'}{c_{br}' + 2c_u'}}$ 로서 실험상수이다. 그리고 l_{ch} 는 콘크리트 특성길이로서 Yang &

Table 1. Details of specimens and experimental results

Specimen	f_{ck} (kgf/cm^2)	size of the openings				position of the openings				A_o/A_{sh} **	experimental results		Proposed V_u (tonf)			
		width		depth		horizontal		vertical			V_{cr} (tonf)	V_u (tonf)	Kong [4]	Ray [5]	KCI [1]	Eq. (8)
		m_1	m_1a (cm)	m_2	m_2h (cm)	k_1	k_1a (cm)	k_2	k_2h (cm)							
L-N	320	0	-	0	-	0	-	0	-	0.0	27.7	54.6	37.12	-	36.6	-
L-F3	240	0.5	15	0.3	18	0.25	7.5	0.35	21	0.15	7.7	23.8	25.87	21.9	23.6	20.5
H-N	540	0	-	0	-	0	-	0	-	0.0	30	78.6	43.6	-	43.0	-
H-F1	540	0.5	15	0.1	6	0.25	7.5	0.45	27	0.05	12.7	47.6	38.61	48.2	38.7	30.5
H-F2	540	0.5		0.2	12	0.25		0.4	24	0.1	9.1	35.5	34.32	47.2	34.4	33.7
H-F3	540	0.5		0.3	18	0.25		0.35	21	0.15	7.25	29.4	29.74	45.61	30.1	32.2
H-T3	540	0.25	7.5	0.3		0.375	11.25	0.35		0.075	9.5	34.3	33.81	45.6	30.1	35.0
H-S3	540	0.65	19.5	0.3		0.175	5.25	0.35		0.195	4.6	24.1	27.45	45.6	30.1	28.3
UH-N	820	0	-	0	-	0	-	0	-	0.0	35.5	84.0	51.24	-	49.5	-
UH-F1	820	0.5	15	0.1	6	0.25	7.5	0.45	27	0.05	13.7	52.5	40.8	42	44.6	41.2
UH-F2	820	0.5		0.2	12	0.25		0.4	24	0.1	10.2	42.8	36.6	37.4	39.6	39.6
UH-F3	820	0.5		0.3	18	0.25		0.35	21	0.15	7.6	34.6	32.2	32.6	34.7	37.7
UH-T3	820	0.25	7.5	0.3		0.375	11.25	0.35		0.075	9.3	40.3	34.9	32.8	34.7	43.1
UH-S3	820	0.65	19.5	0.3		0.175	5.25	0.35		0.195	7.9	33.8	30.6	32.6	34.7	35.1

* L-F3

개구부 깊이비 : 1(0.1h), 2(0.2h), 3(0.3h)

개구부 폭비 : T(0.25a), F(0.5a), S(0.65a)

콘크리트 강도 : L-series(=240 kgf/cm^2), H-series(=540 kgf/cm^2), UH-series(=820 kgf/cm^2)

** 전단경간 면적(A_{sh})에 대한 개구부 면적(A_o) 점유율

Chung[2]의 제안모델로부터 얻을 수 있다.

주철근의 타이작용에 의한 전단내력 분담은 개구부 효과를 영향을 고려하여 Yang & Chung 등[2]의 모델을 식(7)과 같이 수정하였다. 이때 경사균열 이외의 영역에서 주철근의 잔유응력에 의한 전단내력 분담은 무시하였다.

$$\frac{V_s}{b_w h} = \phi_2 n f_s \rho_s \left(\frac{h}{l_{ch}}\right)^{-1} \sin \theta_1 \tan \theta_1 \quad (6)$$

여기에서 $n = E_s/E_c$ 로서 탄성계수비율, ρ_s 는 주철근비를 나타낸다. $\phi_2 = 3.6 h/c_s'$ 로서 실험상수이다.

개구부 중심이 전단경간 중심과 일치하므로 개구부 상·하 부재의 깊이와 주 하중경로 각 θ_1 과 θ_2 는 서로 같다. 그러므로 장방향 개구부의 중심이 전단경간의 중심에 위치하는 철근콘크리트 깊은 보의 극한 전

단내력 예측식은 다음 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_u = \left[2 \phi_1 \left(\frac{k_2 h}{l_{ch}}\right)^{-\frac{1}{2}} \sin \theta_1 + \phi_2 n \rho_s \left(\frac{h}{l_{ch}}\right)^{-1} \sin \theta_1 \tan \theta_1 \right] f_b b_w h \quad (7)$$

여기서 θ_1 은 $\tan^{-1} \frac{k_2 h}{(k_1 + m_1)a}$ 이다.

식(8)에서 실험상수들을 결정하기 위해 SPSS 프로그램을 이용하여 비선형 다중회귀분석을 행하였다. 비선형 회귀분석 결과 실험상수 ϕ_1 과 ϕ_2 는 각각 0.4와 7.5로 나타낼 수 있었다. 따라서 개구부 중심이 전단경간 중심에 위치하는 장방향 개구부를 갖는 철근콘크리트 깊은 보의 극한 전단내력은 식(8)과 같다.

$$V_u = \left[0.8 \left(\frac{k_2 h}{l_{ch}} \right)^{-\frac{1}{2}} \sin \theta_1 + 7.5 n \rho_s \left(\frac{h}{l_{ch}} \right)^{-1} \sin \theta_1 \tan \theta_1 \right] f_c b_w h \quad (8)$$

Table 1 및 Fig. 7에 각 제안값과 실험값의 비교를 나타내었다. 콘크리트 설계기준[1]은 개구부가 없는 깊은 보의 극한 전단내력을 매우 안전측에서 평가하고 있지만 개구부 면적비가 증가할수록 안전율은 급격히 감소하며 면적비 0.1 이상에서는 불안전측에 있었다. 따라서 개구부가 설치된 깊은 보의 극한 전단내력 평가 시 개구부 설치로 인한 단면손실뿐만 아니라 개구부 주위 응력집중 및 방해된 스트럿 작용을 함께 고려하여야 할 것이다.

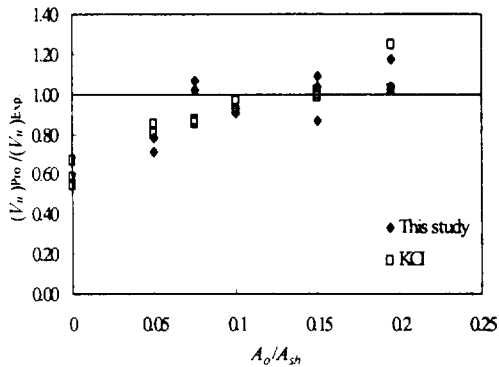


Fig. 7. Comparison of experimental and proposed values on ultimate shear strength

개구부 상·하 콘크리트 스트럿의 하중분담에 의한 전단내력을 평가하고 있는 본 제안식 (8)은 기존 제안식들에 비해서 실험값과 잘 일치하고 있다. 하지만 개구부 위치변화 및 개구부 형상에 따른 균열 진전모드 및 내력평가에 대해서는 지속적인 연구가 필요하다.

IV. 결 론

1. 최대 균열 폭은 개구부 폭과 깊이가 클수록 증가하며, 콘크리트 강도가 증가할수록 감소하였다.

2. 개구부 설치로 인한 내력감소는 개구부 폭보다는 깊이 영향이 크게 있으며 콘크리트 강도가 증가할수록 개구부 폭과 깊이 증가에 따른 내력 감소율은 작게 있었다.

3. 개구부 상·하 콘크리트 스트럿의 하중분담에 의한 전단내력을 평가하고 있는 본 제안식은 기존 제안식들에 비해서 실험값과 잘 일치하였다.

참고문헌

- 1) 한국콘크리트학회, 1999, 콘크리트 구조설계기준.
- 2) 양근혁, 은회창, 정현수, 2001, 크기효과를 고려한 철근콘크리트 깊은 보의 전단내력 예측, 대한건축학회논문집, 제17권 제12호, pp.35-44.
- 3) ACI Committee 318, 1995, Building Code Requirements for Structural Concrete (318-99) and Commentary-(318R-99), American Concrete Institute.
- 4) F.K. Kong and G.R. Sharp, 1977, Structural Idealization for Deep Beams with Web Openings, Magazine of Concrete Research, Vol. 29, No. 99, pp. 81-91.
- 5) S.P. Ray and C.S. Reddy, 1979, Strength of Reinforced Deep Beams with and without Opening in the Web, The Indian Concrete Journal, Vol. 53, pp. 242-246.