

개구부를 갖는 철근콘크리트 깊은 보의 전단강도에 관한 실험 연구

An Experimental Study on the Shear Strength of Reinforced Concrete Deep Beams with Web Opening

고 희 만^{*} 이 진 섭^{**} 김 상 식^{***}
Ko, Hee Man Lee, Jin Seop Kim, Sang Sik

ABSTRACT

The shear behavior and strength of simply supported reinforced concrete deep beams with web opening subject to concentrated loads have been investigated experimentally on the effects of structural parameters such as location of web opening and reinforcements.

A total of 12 specimens were tested at the laboratory under two-point top loading. The shear span-to-depth ratio was taken constantly 0.8, and various types of reinforcements based on truss models were adopted. In the tests, the effects of location, reinforcements of web openings on the shear behavior, and crack initiation and propagation have been carefully checked and analyzed.

The test results have been compared with the formulas proposed currently being used and analyzed by nonlinear finite element method. Shear strengths obtained from the tests showed good matches with Kong and Ray's equation, and also with the results calculated by nonlinear finite element method.

1. 서론

철근콘크리트 건물에서, 주상복합 건물 등에 설치되는 층 높이의 하중 전달 보나 기초 벽보, 전단벽 등은 깊은 보의 범주에 속한다. 구조계산 규준에 의하면, 깊은 보의 하중이 부재의 상부 또는 압축면에 작용하고 보의 춤에 대한 스패의 비가 5보다 작으며, 하중점과 지지점 사이에 경사진 압축대에 의하여 힘이 전달되는 부재로 정의되고 있다.

창호, 배관, 설비 등으로 웨브에 개구부가 설치되어야 하는 깊은 보에서 개구부는 힘의 흐름을 차단하여 구조거동을 복잡하게 하고 갑작스런 전단 파괴를 유발할 가능성이 있으므로, 개구부의 위치와 이에 따른 보강은 깊은 보의 구조 안전성에 영향을 미친다.

기존의 실험 연구를 통해 개구부를 갖는 깊은 보의 하중 지지 능력은 전단스팬비, 콘크리트의 강도, 개구부의 위치, 크기, 형태 및 개구부의 보강근 등에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 왔으나, 개구부를 갖는 깊은 보에 대한 정확한 이론 및 규준식은 아직 정립되지 않고 있으며, 몇몇 연구자들에 의해 제한된 범위 내에서의 실험식이 제안되고 있는 실정이다. 따라서 웨브에 개구부를 갖는 철근콘크리트 깊은 보를 대상으로, 개구부의 위치 및 보강근의 종류에 따른 깊은 보의 전단 거동을 고찰하고, 여러 구조 변수의 영향을 실험을 통해 검토하며 이를 기존의 이론식과 비교하여 고찰할 필요가 있다.

* 정회원, 인하대학교 대학원 석사과정

** 정회원, 인하대학교 대학원 박사과정

*** 정회원, 인하대학교 건축공학과 교수

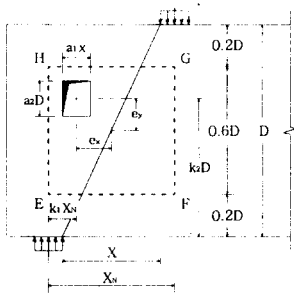


그림 1 Ray 제안식의 전단영역

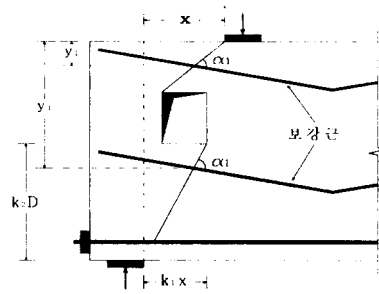


그림 2 Kong 제안식의 하중경로

2. 개구부를 갖는 깊은 보의 이론

2.1 개구부를 갖는 깊은 보의 제안식

개구부를 갖는 깊은 보의 전단강도에 대하여서는 1970년대 후반부터 Ray⁽⁵⁾, Kong⁽⁶⁾ 등에 의하여 제시되기 시작하였으며, 그 주요 내용은 다음과 같다.

1) Ray⁽⁵⁾의 제안식

$$\frac{Q_u}{bD} = 0.1f_c'(\lambda_1)(\lambda_2)(\lambda_3) + 0.0085 \Psi_s \rho_s f_{sy} + 0.01 \Psi_w k_w f_{wy} \quad (1)$$

여기서, $\Psi_s = 0.65$, $\Psi_w = 0.50$

$$\lambda_1 = \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{k_1 X_n}{k_2 D} \right) \right] \cdots \frac{k_1 X_n}{k_2 D} < 1, \quad \lambda_1 = \frac{2}{3} \cdots \frac{k_1 X_n}{k_2 D} \geq 1$$

$\lambda_2 = (1 - m)$, m ; 전체 하중경로에 대한 차단된 경로의 비

$$\lambda_3 = \left[0.85 \pm 0.3 \left(\frac{e_x}{X_{N_n}} \right) \right] \left[0.85 \pm 0.3 \left(\frac{e_y}{Y_{N_n}} \right) \right]$$

$$e_x \leq \frac{X_n}{4}, \quad e_y \leq \frac{0.6D}{4}$$

$$X_{N_n} = (X_n - a_1 x), \quad Y_{N_n} = (0.6D - a_2 D)$$

ρ_s ; 주인장철근비

ρ_w ; 웨브 보강근의 철근비

k_w ; 보강근의 방향계수로 수평 = 0.85, 수직 = $\cot \beta$, 경사 = 1.15

2) Kong⁽⁶⁾의 제안식

개구부가 주압축 하중경로를 차단하는 경우에 대한 제안식은

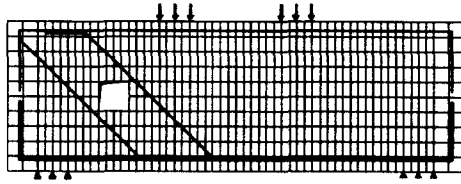
$$Q = C_1 \left[1 - 0.35 \frac{k_1 x}{k_2 D} \right] f_t b k_2 D + \sum \lambda C_2 A \frac{y_1}{D} \sin^2 \alpha_1 \quad (2)$$

여기서, A ; 주근 및 보강근의 단면적

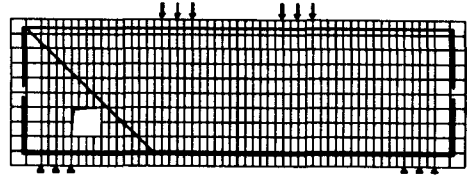
D ; 보의 총, b ; 보의 폭, f_t ; 콘크리트의 쪼갬 인장강도

$C_1 = 1.4$, C_2 ; 이형철근 = 3,000 kg/cm², 원형철근 = 1,300 kg/cm²

λ ; 주근 = 1.0, 보강근 = 1.5



(a) ZM 계열 시험체



(b) ZN 계열 시험체

그림 3 시험체의 요소 분할

2.2 유한요소 해석

깊은 보에 비해 보의 폭이 얇고 일정하므로 평면응력 상태에서 평형 방정식을 구성하여 해석할 수 있으며, 이 연구에서는 압축상황에서의 연화현상을 포함한 콘크리트의 비선형 거동, 파괴역학에 근거한 인장상태에서의 콘크리트 파괴, 2축 응력 파괴 기준, 균열 이후 압축강도 및 전단강성의 감소 등을 고려한 비선형 유한요소 프로그램인 SBETA⁽⁴⁾를 사용하여 해석하였다. 요소의 분할은 그림 3에서 보이는 바와 같이 시험체의 형상에 맞추어 작성하였는데, 콘크리트 요소의 크기는 2.5 cm × 5.0 cm를 기본으로 하여 분할하였으나, 개구부 및 가력점의 크기 등을 고려하여 조정하였다. 해석에서 콘크리트의 초기 탄성계수는 강도설계법 규준에 따라 $E_c = 15000 \sqrt{f_c'}$ 를 적용하였고, 콘크리트의 인장강도는 $f_t = 2 \sqrt{f_c'}$, 철근의 항복강도는 재료 실험에 의한 값인 4500 kg/cm²을 적용하였다.

3. 구조 실험

개구부를 갖는 깊은 보의 전단 거동은 개구부가 하중점과 지지점을 잇는 콘크리트의 주 압축대를 훼손하는 정도에 따라 큰 차이를 보이게 되는데, 개구부가 주 압축대를 훼손하는 경우 개구부 주변의 보강이 필수적이다. 이러한 보강 방법은 개구부의 위치에 따라 조금씩 달라지지만, 크게 직선 철근을 사용하는 방법과 대각근을 사용하는 방법의 두 가지로 나누어질 수 있다.

실험에 사용된 시험체는 개구부의 크기, 위치 및 개구부 보강근의 종류를 주요 변수로 하여 모두 12 개가 2차에 걸쳐 제작되었으며, 실험 변수의 내용은 표 1에서 보이는 바와 같다. 시험체 기호 표시에서, 첫번째 문자는 개구부의 크기 표시로 Z는 개구부의 크기가 10 cm × 10 cm임을 나타내며, 두번째 문자인 M, N은 개구부의 위치로서 M은 전단구역의 중앙, N은 지점부를 의미한다. 세번째 문자 B는 전단스팬비 0.8을 지칭하며, 마지막 숫자는 개구부의 보강 형태를 나타내는 것이다. 예를 들어 ZMB1-0은 개구부가 10 cm × 10 cm 크기에 전단구역의 중앙에 위치하며, 개구부 주변에 복배근으로 1-D10 이 배근된 시험체를 나타낸다.

시험체의 전단스팬비는 0.8로 일정하게 유지되며, 200 톤 용량의 구조물시험기를 사용하여 상부에 2 점 집중하중으로 가력하였다. 파괴에 이르기까지 1분당 약 1 톤의 속도로서 점진적으로 단조 가력 하였으며, 각 하중단계마다 균열의 발생과 진전 상황, 중앙부의 변위 및 각 보강근의 변형도를 측정하였다.

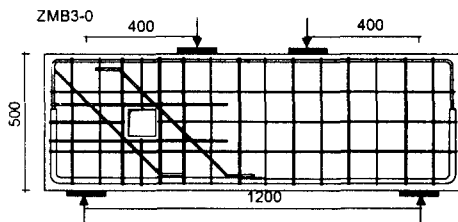


그림 4 ZM 계열 시험체

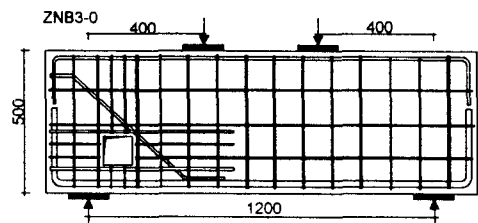


그림 5 ZN 계열 시험체

표 1 시험체의 제원

시험체명	압축강도 (kg/cm ²)	개구부 크기 (mm)	a/h	개구부의 위치	보 강 방 법 (복배근)				
					웹의 기본 배근	트러스 보강		개구부 대각근 보강	비 고
						하현재	수직재		
ZMB0	250	100×100	0.8	전단 구역의 중심	○				웹 철근비 수직 0.0057 수평 0.0054
ZMB1-0	288				○	1-D10	3-φ6		
ZMB1-1	250				○	3-D10	3-D10		
ZMB2-0	288				○			1-D10	
ZMB2-1	250				○			2-D10	
ZMB3-0	288				○	1-D10	3-φ6	1-D10	
ZMB0	250	100×100	0.8	전단 구역의 중심	○				웹 철근비 수직 0.0057 수평 0.0054
ZMB1-0	288				○	1-D10	3-φ6		
ZMB1-1	250				○	4-D10	3-D10		
ZMB2-0	288				○			1-D10	
ZMB2-1	250				○			4-D10	
ZMB3-0	288				○	1-D10	3-φ6	1-D10	

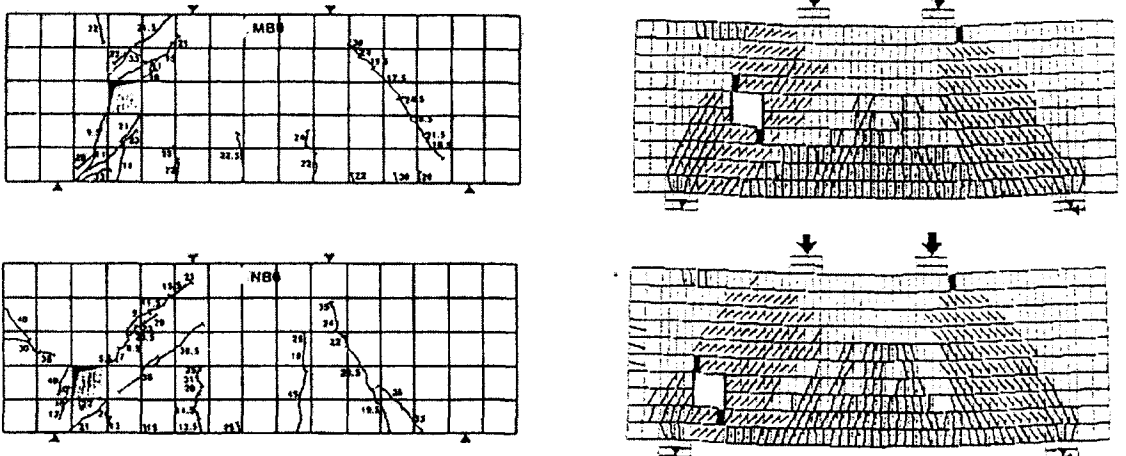


그림 6 실험 및 해석에 의한 시험체의 균열 양상

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 파괴 양상 및 최고하중

대각보강근이 배치된 시험체중 ZMB2-1, ZNB2-1 시험체와, 직선근 및 대각근이 조합된 ZMB3-0, ZNB3-0 시험체는 개구부가 없는 면에서의 과도한 균열로 전단 파괴되었고, ZMB1-1 시험체와 ZNB1-1 시험체는 양면이 거의 동시에 파괴되었으며, 나머지 시험체는 개구부 상하단 균열의 심화로 파괴되었다.

표 2 각 시험체의 전단강도에 대한 실험결과와 이론 값의 비교

시험체	실험값 (톤)	Ray 식 (톤)		Kong 식 (톤)		유한요소 (톤)		파괴 양상
		이론값	Ray/실험	이론값	Kong/실험	해석값	해석/실험	
ZMB0	33.1	32.22	0.97	33.44	1.01	43.15	1.30	
ZMB1-0	48.55	52.10	1.07	47.02	0.97	52.40*	1.08	
ZMB1-1	50.2*	54.44*	1.08	53.24*	1.06	48.44*	0.96	양면 동시 파괴
ZMB2-0	57.25	47.40	0.83	50.52	0.88	53.38*	0.93	
ZMB2-1	53.0*	54.44*	1.03	53.24*	0.95	48.66*	0.92	개구부 없는 면 파괴
ZMB3-0	58.35*	58.53*	1.00	55.92*	0.96	54.15*	0.93	개구부 없는 면 파괴
ZNB0	40.4	36.24	0.90	31.08	0.77	44.69	1.11	
ZNB1-0	48.9	46.61	0.95	40.04	0.82	52.10*	1.07	
ZNB1-1	52.9*	54.44*	1.03	53.24*	1.00	47.68*	0.90	양면 동시 파괴
ZNB2-0	51.2	46.42	0.91	41.56	0.81	52.54*	1.03	
ZNB2-1	51.55*	54.44*	1.06	53.24*	1.03	48.19*	0.93	개구부 없는 면 파괴
ZNB3-0	57.1*	54.45	0.95	55.92*	0.98	53.85*	0.94	개구부 없는 면 파괴

* 표기는 개구부가 없는 면에서의 파괴에 의해 산정된 값

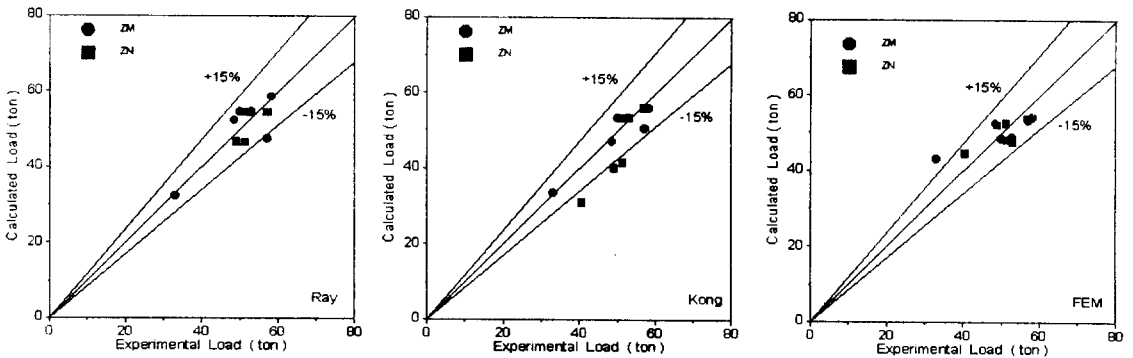


그림 7 이론 해석과의 비교

개구부 주변 보강근의 변형도는 개구부의 위치에 관계없이 수직근, 수평근, 대각 보강근의 순으로 변형도가 증가하는 것이 관찰되었고, 1-D10의 대각 보강근을 배치한 시험체가 1-D10 및 3-φ6 철근을 직선근으로 배근한 시험체보다 최고하중이 5~18 퍼센트 증가하여 대각보강근의 효율이 가장 높게 나타났다. 또한 개구부의 모서리에 직선 및 대각으로 보강한 시험체는 모두 개구부가 없는 면에서 파괴되어, 주압축대가 10 cm×10 cm 크기의 개구부에 의해 차단되는 경우, 1-D10의 철근을 조합한 보강이면 개구부가 없는 시험체의 극한 전단강도 이상을 확보할 수 있을 것으로 조사되었다. 각 시험체별 최고하중은 표 2에 나타나 있는 것과 같다.

4.2 실험결과의 고찰

실험 결과 측정된 각 시험체의 최고하중과 이론식 및 해석에 의해 산정된 해석값의 비교가 표 3에 요약되어 있다. Ray의 제안식은 이론값 / 실험값의 평균치가 ZM계열에서 1.00, 표준편차가 0.06으로 계산되었고 ZN계열에서는 각각 0.97, 표준편차가 0.06으로 계산되었으며, Kong의 제안식은 ZM계열에서

평균값이 0.98, 표준편차 0.06, ZN 계열에서는 0.90, 0.11로 산정되었다. 두 제안식 모두 실험값에 대해 0.90~1.00의 결과를 보여 실험값에 잘 부합하고 있으나, 그 중에서도 Ray의 제안식이 오차가 적게 나타났다으며, 개구부가 지지점 부근에 위치한 ZN 계열보다는 개구부가 중앙에 위치한 ZM 계열에서 실험값에 더 근접하고 있다.

비선형 유한요소 해석에 의한 깊은 보의 극한전단강도는 해석값 / 실험값의 평균이 ZM 계열에서 1.02, 표준 편차 0.15이고 ZN 계열에서는 1.00, 0.08로 측정되어 개구부의 위치에 관계없이 실험값에 근접하는 결과를 보이고 있으며, 깊은 보의 강성, 균열의 발생 및 진전 등도 실험결과와 유사하여 깊은 보의 전단 거동을 파악하는 데 유용한 수단이 될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구는 개구부를 갖는 철근콘크리트 깊은 보에서 개구부가 주 압축대를 훼손하는 경우에 관한 것으로, 개구부 위치와 보강근을 주요 변수로 하는 단순지지된 시험체를 대상으로 깊은 보의 전단 강도를 실험을 통해 조사하고 다른 이론식과 비교하였으며, 제한된 범위의 실험 연구를 통해 고찰된 결과는 다음과 같다.

- (1) 모든 시험체는 전단스팬 내에서 콘크리트의 전단 균열로 파괴되었으며, 대각보강근이 배치된 ZMB2-1, ZNB2-1 시험체와 직선근 및 대각근이 조합된 ZMB3-0, ZNB3-0 시험체는 개구부가 없는 면에서, 나머지 시험체는 개구부 상하단 균열의 심화로 파괴되었다.
- (2) 주압축대가 개구부에 의해 일정 부분 훼손되는 경우에는 개구부 모서리의 대각철근 보강이 효율적인 것으로 조사되었으며, 직선근 또는 대각근 한가지를 집중적으로 보강하는 것보다는 조합하여 보강하는 것이 상대적으로 적은 철근량으로서 큰 전단보강효과를 나타낼 수 있는 것으로 나타났다.
- (3) Ray의 제안식 및 Kong의 제안식에 의해 계산된 시험체의 전단강도는 실험값에 대해 평균 90~100 퍼센트 범위에 있어 두 제안식 모두 실험값과 유사한 결과를 보이나 Ray의 제안식이 오차가 더 작게 계산되었으며, 개구부가 지지점 부근에 위치한 ZN 계열보다는 개구부가 중앙에 위치한 ZM 계열에서 실험값에 더 근접하고 있다.
- (4) 균열된 콘크리트의 특성을 고려한 평면응력 상태의 비선형 유한요소 해석에 의한 결과는 개구부의 위치에 관계없이 실험값에 근접하는 결과를 보이고 있으며, 깊은 보의 강성, 균열의 발생 및 진전 등도 실험결과와 부합하여 깊은 보의 전단 거동을 파악하는 데 유용한 수단이 될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 대한건축학회, 극한강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조설계규준 및 해설, 1988.
2. 이진섭, 김상식, "집중하중을 받는 철근콘크리트 깊은 보의 전단거동에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회지, 제11권 1호, 1999.2, pp. 191~200.
3. G. J. MacGregor, Reinforced Concrete Mechanics and Design, Prentice Hall, 1988.
4. V. Cervenka, SBETA Program Documentation, Cervenka Consulting, 1996.
5. S. P. Ray, and C. S. Reddy, "Strength of Reinforced Concrete Deep Beams with and without Opening in the Web," Indian Concrete Journal Vol 53, Sept. 1979, pp. 242~246.
6. F. K. Kong and G. R. Sharp, "Structural Idealization for Deep Beams with Web Openings," Magazine of Concrete Research, June 1978, Vol 30, pp. 89 ~ 95.
7. F. K. Kong, Reinforced Concrete Deep Beams, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.