



철근콘크리트 연속 깊은 보의 전단 거동에 대한 개구부 경사 보강근의 영향

정현수¹⁾ · 심재일²⁾ · 양근혁^{2)*}

¹⁾중앙대학교 건축공학과 ²⁾목포대학교 건축공학전공

Influence of Inclined Reinforcement around Openings on the Shear Behavior of Reinforced Concrete Continuous Deep Beams

Heon-Soo Chung¹⁾, Jae-Il Sim²⁾, and Keun-Hyeok Yang²⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Mokpo University, Chonnam 534-729, Korea

ABSTRACT Twelve reinforced concrete continuous deep beams having web openings within interior shear spans were tested to failure. All beams tested had the same geometrical dimensions. The main variables investigated were the opening size and amount of inclined reinforcement around openings. An effective inclined reinforcement factor combining the influence of the opening size and amount of inclined reinforcement on the structural behavior of the beams tested is proposed. It was observed that the load distribution, diagonal crack width, and load capacity of beams tested were greatly dependent on the effective inclined reinforcement factor which ranged from 0 to 0.171 for the test specimens. The higher this factor, the smaller the diagonal crack width and its development rate. A higher load capacity also developed in beams having effective inclined reinforcement factor above 0.077 than in the corresponding solid deep beams. A numerical technique based on the upper bound analysis of the plasticity theory is proposed to evaluate the load capacity of continuous deep beams having openings within interior shear spans. Predictions obtained from the proposed formulas are in good agreement with test results.

Keywords continuous deep beams, web openings, inclined reinforcement, load capacity, upper bound

1. 서 론

철근콘크리트 깊은 보의 복부에는 설비 시설들의 관통을 위해 개구부가 종종 설치된다. 이들 개구부는 콘크리트 스트럿에 의한 하중 전달을 감소시키며 깊은 보의 강도와 사용성을 심각하게 저하시킬 수 있다^{1,3)}. 뿐만 아니라 개구부 모서리에서의 높은 응력 집중은 개구부 상, 하부의 콘크리트 스트럿에서 경사균열을 다수 발생시킨다.

고층건물에서의 전이보와 같은 철근콘크리트 깊은 보의 경우 일반적으로 연속으로 설치된다. 연속 깊은 보의 내부 전단경간에서 높은 모멘트와 전단력의 동시 존재는 깊은 보의 주요 하중 전달 시스템인 콘크리트 스트럿의 유효 강도를 감소시킨다. Yang 등⁴⁾ 및 Rogowsky 등⁵⁾은 연속 깊은 보의 내부 전단경간의 전단 내력은 단순지지 깊은 보에 비해 감소함을 보였다. Ashour 등⁶⁾은 연속 깊은 보의 파괴모드, 하중 전달 기구 및 최대 내력은 개구부의 기하학적 조건에 의해 큰 영향을 받으며 개구부가 이들에 미치는 영향은 단순지지 깊은 보에 비해 더욱 현저하게 있음을 보였다.

개구부 보강근의 적절한 배근은 개구부 상, 하부의 콘크리트 스트럿에서의 경사균열 제어 및 깊은 보의 내력을 향상시킬 수 있다. 개구부를 갖는 단순지지 깊은 보의 실험 결과^{3,7,8)}들은 개구부 주위의 경사 보강근은 수직 또는 수평 보강근보다 내력 향상에 매우 효율적임을 보였다. 하지만 개구부를 갖는 연속 깊은 보에서 경사 보강근이 부재의 하중 분배, 경사 균열 제어 및 내력 향상에 대한 영향에 관한 유용한 실험 결과들은 거의 없는 편이다. 개구부를 갖는 연속 깊은 보의 하중 전달 기구는 개구부를 갖는 단순지지 깊은 보에 비해 매우 복잡하지만 대부분의 실험 연구들은 단순지지 깊은 보에 집중되었다. 뿐만 아니라 개구부를 갖는 깊은 보의 설계기준^{9,11)}은 아직 마련되지 않았다. 따라서 연속 깊은 보의 구조 거동에 대한 개구부와 경사 보강근의 영향을 이해하기 위해서는 더 많은 연구들이 필요하다.

본 연구의 목적은 연속 깊은 보의 최대 내력과 경사균열 진전에 대한 개구부 크기 및 경사 보강근 양의 영향을 평가하는 것이다. 개구부 폭, 깊이 및 경사 보강근 양을 주요 변수로 12개의 개구부를 갖는 연속 깊은 보가 실험되었다. 개구부를 갖는 깊은 보에서 경사 보강근의 보강 효과를 설명하기 위하여 개구부 크기와 경사 보강근 양이 조합된 유효 경사 보강근 계수가 제시된다. 또

*Corresponding author E-mail : yangkh@mokpo.ac.kr

Received September 8, 2006, Accepted March 5, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

한 실험된 보의 최대 내력은 상계치 이론에 근거한 수치해석 결과와 비교된다.

2. 유효 경사 보강근 계수

개구부를 갖는 연속 깊은 보의 파괴 면은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 하중 작용점과 그 작용점의 반대편에 있는 개구부 모서리를 연결하는 경사면을 따라 형성된다^{6,12}. 파괴면과 교차하는 경사 보강근의 하중 전달에 대한 효율성에 대해 파괴면에서 힘의 평형과 개구부 크기가 함께 고려될 수 있다. 파괴면에서 경사 보강근으로 전달되는 힘 F_D 는 Fig. 1로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_D = A_{d1} f_s \quad (1)$$

여기서 A_{d1} 과 f_s 는 각각 경사 보강근의 단면적과 응력이다. 경사 보강근에 작용하는 이들 힘은 파괴면에 대한 수직 성분에 대해 $F_D \sin(\beta + \theta)$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 θ 는 부재 축에 대한 파괴면의 각이며 β 는 부재 축과 경사 보강근이 이루는 각이다. 따라서 파괴면에 대한 개구부 상, 하부에 배근된 경사 보강근의 최대 인장력 전달 능력 $\sum F_{DT}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum F_{DT} = n_t A_{d1} f_{yh} \sin(\beta_t + \theta_t) + n_b A_{d1} f_{yh} \sin(\beta_b + \theta_b) \quad (2)$$

여기서 n 는 경사보강근의 수이며 f_{yh} 는 경사보강근의 항복강도이다. 아래첨자 t 와 b 는 각각 개구부 상부와 하부의 스트럿을 의미한다. 경사균열을 효율적으로 제어하기 위해서는 경사 보강근의 인장력 전달 능력이 경사 균열면에 작용하는 전체 횡인장응력보다 커야 하며 이는 Fig. 1로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_T b_w [k_2 h / \sin \theta_b + (1 - k_2 - m_2) h / \sin \theta_t] \leq \sum F_{DT} = n_t A_{d1} f_{yh} \sin(\beta_t + \theta_t) + n_b A_{d1} f_{yh} \sin(\beta_b + \theta_b) \quad (3)$$

여기서 σ_T 는 콘크리트 스트럿의 경사균열면에 작용하는 횡인장응력이며, b_w 와 h 는 각각 보폭과 깊이, k_2 는 보 깊이에 대한 보 밑면에서부터 개구부 밑면까지의 거리의 비이며, m_2 는 보 깊이에 대한 개구부 깊이의 비이다. 따

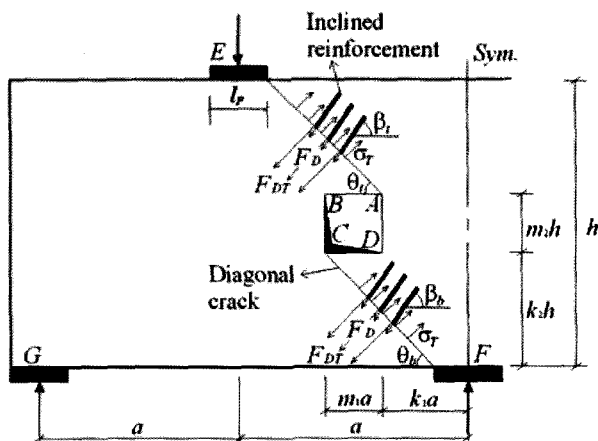


Fig. 1 Symbol identification in effective inclined reinforcement factor

라서 경사 보강근의 항복강도에 대한 콘크리트의 횡인장응력의 비는 식 (3)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\sigma_T}{f_{yh}} \leq \frac{n_t A_{d1} \sin(\beta_t + \theta_t) + n_b A_{d1} \sin(\beta_b + \theta_b)}{b_w [k_2 h / \sin \theta_b + (1 - k_2 - m_2) h / \sin \theta_t]} \quad (4)$$

전단 보강근에 의한 경사균열 폭의 제어 및 콘크리트 구속 효과는 Vecchio and Collins¹³에 의해 지적된 바와 같이 보강근에서의 응력상태에 의해 결정되며 식 (4)에 의해 나타내어지고 있다. 식 (4)의 오른쪽은 개구부 상, 하부 콘크리트 스트럿의 단면적에 대한 균열면에서의 경사 보강근의 단면적 성분의 비를 의미하므로 횡인장응력을 충분히 전달할 수 있는 유효 경사보강근비 ρ_{od} 로서 정의될 수 있다.

Fig. 2에는 Kong 등^{3,4})과 Yang 등⁵)의 실험 결과로부터 개구부를 갖는 깊은 보에서 개구부 면적비의 변화에 따른 상대 전단강도비 $V_n / (V_n)_S$ 를 나타내었다. 상대 전단강도비는 개구부 없는 깊은 보의 전단내력 $(V_n)_S$ 에 대한 개구부 있는 깊은 보의 전단내력 V_n 의 비이다. 개구부 면적비 ρ_{OA} 는 전단경간면적 $a \cdot h$ 에 대한 개구부 면적 $m_1 a \cdot m_2 h$ 의 비로서 $m_1 \cdot m_2$ 와 같다. 개구부를 갖는 깊은 보의 전단내력은 개구부 면적비의 증가와 함께 감소하였다. 개구부 면적의 증가는 단면 감소로 인해 높은 횡인장 응력을 유발하기 때문이다. 이는 개구부로 인해 손실된 내력을 보완하기 위해 경사 보강근 양은 개구부 면적비의 증가와 함께 증가하여야 함을 의미한다. 따라서 개구부를 갖는 깊은 보에서 사용성과 전단내력 향상을 위해 개구부 크기가 고려된 유효 경사 보강계수 ξ 는 다음과 같이 제시될 수 있다.

$$\xi = \frac{\rho_{od}}{\rho_{OA}} = \frac{n_t A_{d1} \sin(\beta_t + \theta_t) + n_b A_{d1} \sin(\beta_b + \theta_b)}{m_1 m_2 b_w [k_2 h / \sin \theta_b + (1 - k_2 - m_2) h / \sin \theta_t]} \quad (5)$$

3. 실험

3.1 시험체 상세

시험체의 기하학적 특성 및 철근배근 상세는 Table 1

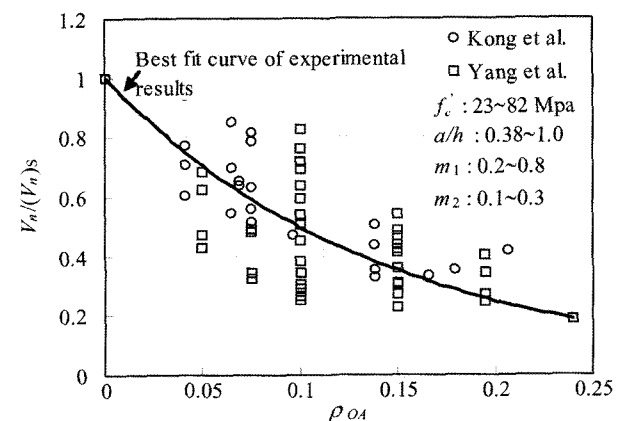


Fig. 2 Normalized shear capacity against opening area ratio

Table 1 Details of test specimens

Specimen*	Details of openings				ρ_{OA}	Inclined reinforcement	
	Width		Depth			Arrangement	ξ
	m_1	m_1a (mm)	m_2	m_2h (mm)			
T1-0	0.25	150	0.1	60	0.025	None	0.0
T1-2						2D10	0.086
T1-4			4D10	0.171			
T3-0			0.3	180		0.075	None
T3-6	6D10	0.104					
F2-0	0.5	300	0.2	120	0.1	2D10	0.0
F2-4						4D10	0.051
F2-6			6D10	0.077			
F3-0			0.3	180		0.15	None
F3-2	2D10	0.021					
F3-4	4D10	0.041					
F3-6	6D10	0.062					

* The beam notation includes three parts. The first letter refers to the opening width: T for 0.25a and F for 0.5a. The second number 1, 2 or 3 indicates an opening depth of 0.1h, 0.2h or 0.3h, respectively. The third part is used to identify the number of inclined reinforcement around openings.

및 Fig. 3에 나타내었다. 시험체는 개구부 폭이 0.25a일 때에는 T 시리즈로, 0.5a일 때 F 시리즈로 구분되었다. 여기서 a는 전단경간이다. 개구부 깊이는 0.1h, 0.2h 및 0.3h로 변화하였다. 경사 보강근은 개구부 상, 하부 콘크리트 스트럿에서 대칭으로 배근되었다. 경사 보강근은 D10이 사용되었으며 배근 각은 부재 축에 대해 45°로 하였다. 식 (5)에 의한 유효 경사 보강근 계수는 Table 1에 나타낸 바와 같이 0.0에서 0.171 범위에 있었다.

모든 시험체의 단면크기는 160×600 mm이며, 전단경간 비 alh는 1.0으로서 한 경간 길이는 1,200 mm이다. 개구부는 부재의 하중 전달에 민감하고 내력에 불리한 하중점과 중앙지지점 사이인 내부 전단경간에 위치하였다. 개구부의 중심은 하중 경로를 완전히 차단할 수 있도록 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 전단경간 중심과 일치시켰다. 상, 하부 주철근으로서 D19 철근 3본씩 배근되었으며 이때의 주철근비는 0.0097이었다. 하부 주철근은 양 단부에 설치된 160×100×10 mm 강판에 용접되었으며 상부 주철근은 외부 지지점 밖에서 90° 갈고리를 두어 정착을 확보하였다. 상, 하부 주철근의 순 피복두께는 35 mm였다.

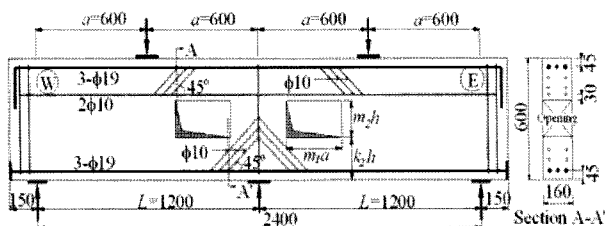


Fig. 3 Specimen details (unit: mm)

개구부 바로 위에는 상부 경사보강근의 쉬운 배근을 위해 그리고 Tan 등⁷⁾에 의해 제시된 바와 같이 개구부 상부에서 타이 작용에 의한 원활한 하중 전달을 위해 2-D10이 배근되었다. 경사 보강근과 수평 보강근의 정착은 ACI 318-05⁹⁾의 인장철근 정착길이를 만족하도록 하였다.

3.2 재료 특성

콘크리트의 설계강도는 55 MPa이다. 사용된 레디믹스트 콘크리트의 물-결합재비는 31%이며 굵은골재 최대직경은 25 mm이었다. 압축강도 평가를 위해 100×200 mm 실린더가 제작되었으며 시험체와 함께 양성되었다. 3개 실린더의 평균압축강도는 50.52 MPa이었다.

주철근과 경사보강근으로 사용된 D19와 D10의 역학적 성능은 KS 기준의 인장 실험 방법에 따라 평가되었다. Table 2에는 이들 철근의 인장 실험 결과를 나타내었다.

3.3 가력 및 측정 방법

Fig. 4에는 가력 및 측정 상황을 나타내었다. 가력은 3,000 kN 용량의 UTM (universal testing machine)을 이용하였으며 가력 보를 통하여 각 경간의 중앙에 집중 하중이 작용하도록 하였다. 제어 방법은 하중 제어로서 30 kN/min의 속도로 하였다. 단부와 중앙지지점 사이의 각 경간은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 W-경간과 E-경간으로 구분되었다. 지지점에서의 하중 분배 및 전단력을 정확히 평가하기 위하여 양 단부 지점에 1,000 kN 용량의 로드셀을 설치하였다. 양 단부의 지점은 이동 및 회전에 대해 비구속 되었으며 중앙지지점은 회전변위에 대해서만 비구속 되었다.

각 경간의 하중점 위치에서 수직변위는 전기식 변위계 (LVDT, linear variable differential transformers)에 의해 측정되었다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 하중점과 개구부 모서리를 연결하는 경사균열 폭은 PI형 전기 변위계에 의해 기록되었다. 균열 진전의 확인을 쉽게 하기 위하여

Table 2 Mechanical properties of reinforcement

Diameter (mm)	f_{yh} (MPa)	ϵ_{yh}	f_{su} (MPa)	E_s (GPa)
10	420	0.0021	575	195
19	560	0.0028	740	198

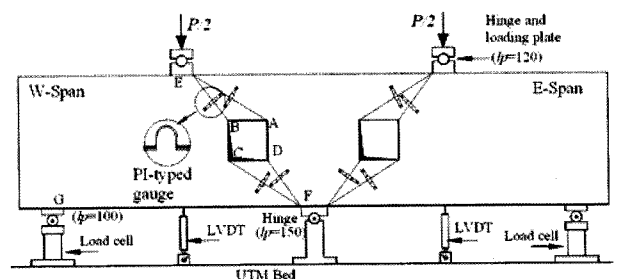


Fig. 4 Test setup (unit: mm)

시험체 표면은 흰색 페인트로 도색되었으며 가로, 세로 100 mm 간격의 선들이 그려졌다. 모든 실험 결과는 데이터로거 (TDS 303)에 의해 자동저장 되었다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 균열 진전 및 파괴 모드

Fig. 5에는 개구부가 없는 보¹²⁾와 함께 개구부 크기가 $0.5a \times 0.3h$ 인 시험체들의 균열 진전 및 파괴 모드를 나타내었다. 경사 보강근이 개구부 주위에서의 균열 제어에 미치는 영향은 개구부 크기가 클수록 뚜렷이 나타났다. 모든 시험체에서 파괴 전의 균열 진전은 W-경간과 E-경간에서 그리고 개구부 상, 하부 콘크리트 스트럿에서 비슷하였다. 개구부가 없는 보에서는 부모멘트 영역에서 휨 균열 발생 이후 내부 전단경간에서 경사균열이 발생하였다. 반면 내부 전단경간에 개구부가 있는 보들에서 최초의 균열은 Fig. 4의 B와 D인 하중점 및 중앙지지점에서

가까운 개구부 모서리에서 발생하여 하중 및 중앙지지점을 향해 진전하였다. 이들 개구부 모서리에서의 최초 경사균열 발생 하중은 Table 3에 나타낸 바와 같이 개구부 폭과 깊이가 증가할수록 감소하지만 경사 보강근 양의 영향은 받지 않았다. 하중의 증가와 함께 정, 부 모멘트 영역에서의 휨 균열과 함께 Fig. 4의 A와 C인 하중 및 중앙지지점의 반대편에 있는 개구부 모서리에서 경사균열이 발생하였다. 대부분의 균열은 개구부 모서리에 집중되었으며 외부 전단경간에서의 경사균열은 대부분 나타나지 않았다.

경사 보강근의 양은 개구부 상, 하부의 콘크리트 스트럿에서 균열 분산에 영향을 미쳤다. 경사 보강근이 배근되지 않은 T1-0, T3-0, F2-0 및 F3-0 시험체는 하중 및 중앙지지점 반대편의 개구부 모서리에서 경사균열 발생과 함께 곧 파괴하였다. 반면 경사 보강근이 배근된 보들에서는 다수의 경사균열이 발생하였다. 개구부 크기가 $0.5a \times 0.3h$ 인 시험체들에서도 유효보강근 계수가 0.062 이상 (F3-6 시험체)일 때에는 균열 분산 효과가 좋았다.

개구부가 없는 보의 파괴면은 하중점과 중앙지지점을 연결하는 경사면을 따라 발생하였다. 반면 내부 전단경간에 개구부가 있는 보의 파괴면은 하중 및 중앙지지점과 이들 반대편 개구부 모서리를 연결하는 경사균열면 (Fig. 4의 AE 및 CF)을 따라 비대칭적으로 형성되었다. 이들 파괴면은 유효 경사 보강근 계수에 관계없이 Kong 등⁴⁾에 의해 제시된 개구부를 갖는 단순지지 깊은 보의 하중 경로를 따랐다. 하지만 연속 깊은 보에서 파괴면에 의해 형성된 각 강체의 변위는 단순지지 깊은 보와는 달랐다. 내부 전단경간에 개구부를 갖는 연속 깊은 보의 경우 파괴된 경간에서의 단부 강체는 중앙지지점과 다른 단부 지지점 위에 고정된 강체에 대해 회전변위를 하였

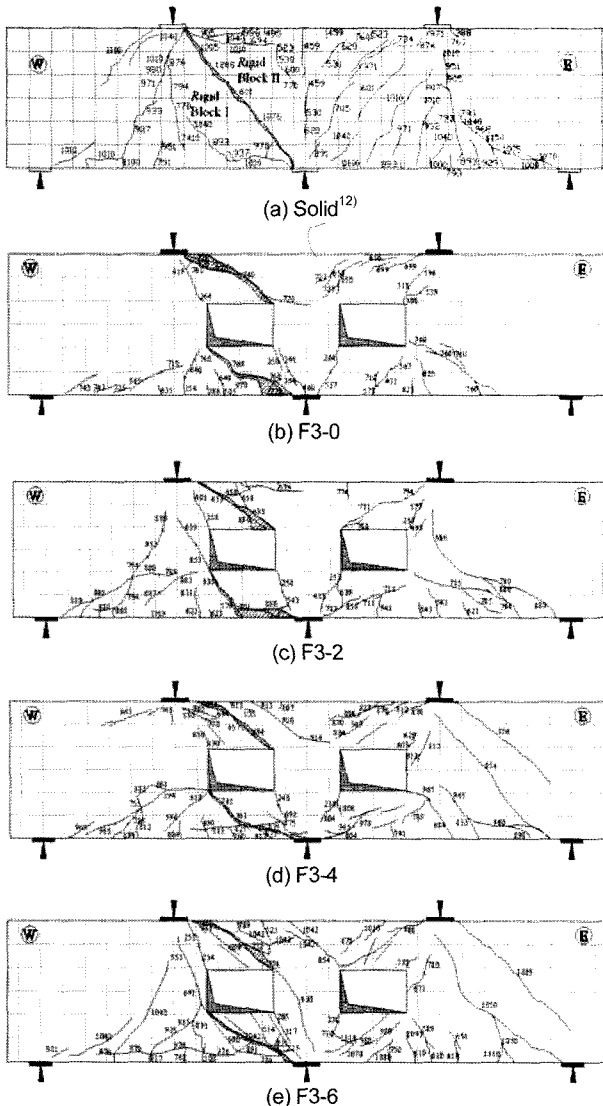


Fig. 5 Crack patterns and failure plane in solid beam and beams having opening size of $0.5a \times 0.3h$

Table 3 Details of test results and predictions

Specimen	P_{cr} (kN)		At failure (kN)			$\lambda_n = P_n / 2b_w h f_{ck}$		
	W	E	P_n	R_W	R_E	Exp.	Pro.	Pro./Exp.
T1-0	370	377	1,139	191	188	0.117	0.111	0.949
T1-2	350	302	1,363	265	252	0.141	0.128	0.908
T1-4	327	320	1,512	294	291	0.156	0.144	0.923
T3-0	301	313	1,024	246	245	0.106	0.099	0.934
T3-6	364	350	1,470	304	298	0.152	0.150	0.987
F2-0	195	250	832	235	228	0.086	0.085	0.988
F2-4	314	293	1,024	237	237	0.106	0.125	1.179
F2-6	309	327	1,292	288	287	0.133	0.142	1.068
F3-0	250	264	765	219	217	0.079	0.082	1.038
F3-2	258	252	882	238	239	0.091	0.105	1.154
F3-4	248	234	965	239	235	0.099	0.122	1.232
F3-6	265	230	1,082	235	234	0.112	0.138	1.232

Note : P_{cr} = first diagonal cracking load at interior shear spans, P_n = load capacity, R_W and R_E = end support reactions at W-span and E-span, respectively, and λ_n = normalized load capacity. Also, W and E indicate W-span and E-span, respectively.

다. 반면 개구부를 갖는 단순지지 깊은 보에서는 파괴면에 의해 형성된 두 강체가 양 단부 지지점에 대해 회전 변위를 하였다.

4.2 단부지지점 반력

Fig. 6에는 작용 하중에 대한 파괴 공간에서의 단부지지점의 반력을 나타내었다. 동일 그림 내에 본 시험체와 동일한 단면과 상, 하부 주철근을 갖는 개구부 없는 연속 깊은 보¹²⁾ 및 선형유한요소해석에 의한 단부 반력을 함께 나타내었다. 양 단부 지지점 반력은 Table 3에 나타낸 바와 같이 매우 비슷하였다. 내부 전단경간 내의 개구부 크기와 경사 보강근 양은 연속 깊은 보에서 경사균열의 발생 후 하중 분배에 매우 큰 영향을 미쳤다. 본 실험 조건에서 지지점들의 최대 부등침하는 $L/17,000$ 이하였으며 이는 내부 응력의 재분배 및 부가 모멘트와 전단력에 매우 작은 영향을 주고 있다¹³⁾. 개구부 크기가 $0.25a \times 0.1h$ 인 깊은 보들의 단부반력은 개구부 주위 경사 보강근 양에 관계없이 선형유한요소 해석 결과와 매우 비슷하였다. 반면 개구부 크기가 $0.25a \times 0.3h$ 및 F-series 보들에서는 개구부 크기가 작을수록 그리고 경사보강근 양이 많을수록 단부 반력은 낮았다. 즉 유효 경사 보강근 계수가 증가할수록 단부 반력은 선형유한요소해석 결과에 가까웠다.

4.3 하중-변위 관계

Fig. 7에는 작용 하중에 대한 파괴경간의 처짐을 나타

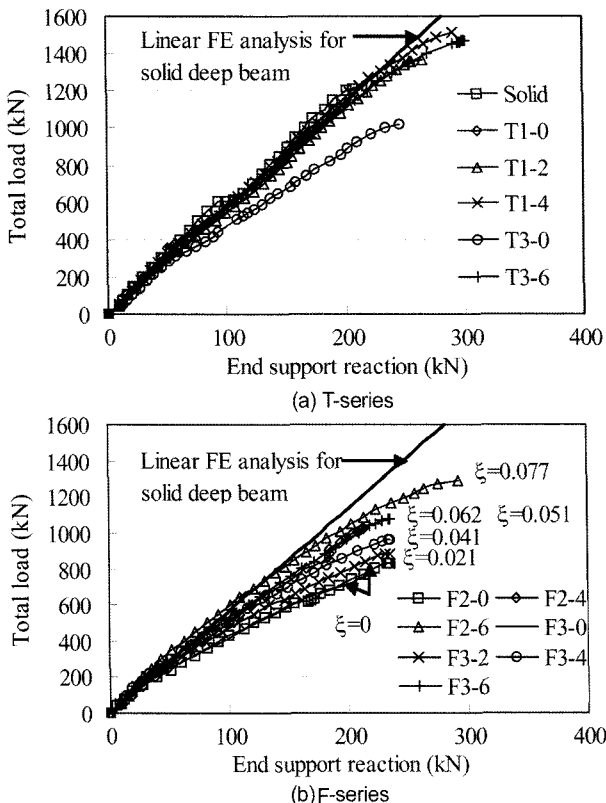


Fig. 6 End support reaction against total applied load

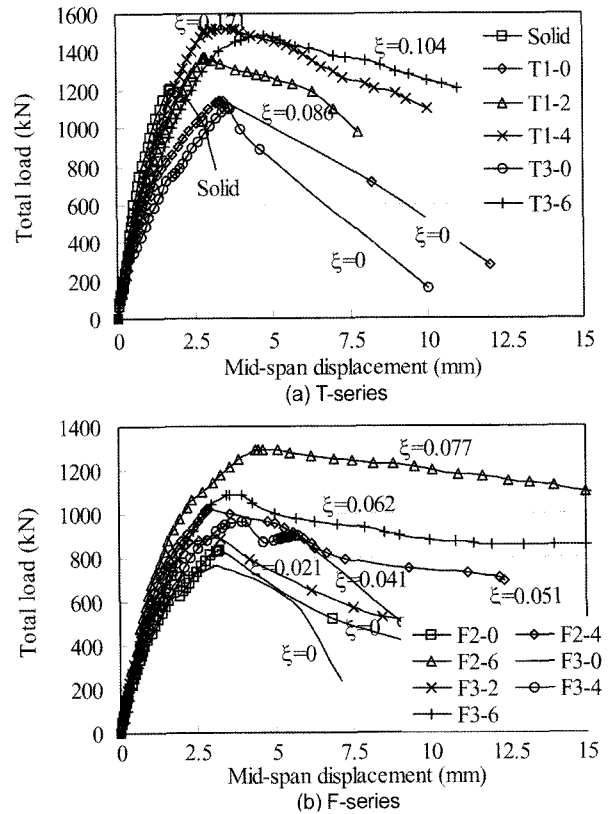


Fig. 7 Mid-span displacement against total applied load

내었다. Fig. 7 (a)에는 동일한 개구부 없는 보의 실험 결과를 함께 나타내었다. 개구부 주위에서 경사균열의 발생 전까지 보의 초기강성은 개구부 크기와 경사 보강근 양의 영향을 받지 않았다. 하지만 경사균열 발생 후에는 경사 보강근 양이 증가할수록 동일 하중에서의 처짐 양은 감소하였으며 최대 내력 시 변위도 감소하였다. 유효 경사 보강근 계수가 0.171인 T1-4 시험체의 변위증가는 동일 개구부 없는 보의 것과 거의 비슷하였다. 최대 내력 이후의 파괴 모드도 유효 경사 보강근 계수의 영향을 받았다. 유효 경사 보강근 계수가 0.051 이상인 보들은 콘크리트 스트럿의 압축파괴에도 불구하고 연성적인 거동을 보였다.

4.4 경사균열 폭

Fig. 8에는 중앙지지점과 개구부 모서리 D를 연결하는 경사면에서 하중 진전에 따른 균열 폭을 나타내었다. 경사 보강근이 없는 보들은 경사균열의 발생과 함께 0.05~0.2 mm 균열 폭에 곧 도달하였으며 작용 하중에 대한 이들 균열 폭의 증가 속도는 개구부 깊이 증가와 함께 증가하였다. 한편 유효 경사 보강근 계수 0.041 이상을 갖는 보들에서는 경사균열 발생과 함께 균열 폭이 급격히 증가하는 현상은 나타나지 않았으며 하중 증가에 따른 균열 폭 진전속도는 유효 경사 보강근 계수 증가와 함께 감소하였다.

4.5 최대 내력

Fig. 9 및 Table 3에는 시험체들의 무차원 된 최대 내

5. 내력 평가 모델

5.1 상계치 이론에 의한 최대 내력

Fig. 10에는 내부 전단경간에 개구부를 갖는 연속 깊은보 이상화된 파괴 모드를 나타내었다. 파괴 시 보는 두 강체 (rigid blocks)로 분리되었으며 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 강체 I은 I.C. (instantaneous center)에 대해 회전하고 강체 II는 중앙과 단부 지지점에서 고정된다. 양근혁 등¹⁴⁾에 의해 제시된 바와 같이 개구부 상, 하부의 항복선은 불연속이기 때문에 동일한 변위속도를 갖지 않는다. 항복선에서의 콘크리트 및 항복선과 교차하는 철근에서 분산된 전체 내부 에너지는 외부 하중에 의한 일과 같다는 상계치 이론으로부터 무차원된 최대 내력은 다음과 같이 나타낼 수 있다¹⁴⁾.

$$\lambda_n = \frac{1}{2a} \left[\sum_{i=1}^2 (v_e)_i r_i (1 - \sin \alpha_i) l_i + 2 \sum_{j=1}^n (\Phi_s)_j (r_s)_j \cos(\alpha_s)_j \right] \quad (6)$$

여기서 $(v_e)_i$ 는 항복선에서 콘크리트의 유효강도계수이며, r_i 는 항복선 i 의 중심과 I.C. 사이의 거리이며, α_i 는 상대 변위속도 δ_i 와 항복선 i 의 각이며, l_i 는 항복선 i 의 길이이며, n 은 항복선과 교차하는 철근의 수이며, $(\Phi_s)_j$ 는 항복선과 교차하는 철근지수로서 $\frac{(A_{st})_j (f_y)_j}{b_w h f_{ck}}$ 와 같다. $(A_{st})_j$ 와 $(f_y)_j$ 는 항복선과 교차하는 철근 j 의 단면적과 항복강도이며, $(r_s)_j$ 는 항복선과 교차하는 철근 j 와 I.C.의 거리이며, $(\alpha_s)_j$ 는 항복선과 교차하는 철근 j 와 I.C.에 대한 철근 j 의 상대변위속도 $(\delta_s)_j$ 의 각이다. 식 (6)에서 주철근과 경사 보강근은 항복강도 f_y 를 갖는 완전 소성체로서 가정될 수 있다.

5.2 콘크리트 유효강도계수

식 (6)에서 콘크리트는 유효강도 $v_e f_{ck}$ 를 갖는 완전소성체로서 인장력이 무시될 수 있다¹⁵⁾. 본 연구에서는 개구부 상, 하부에서의 불연속된 항복선을 고려하기 위하여 Vecchio and Collins¹³⁾의 제안 모델을 이용하였으며 크기 효과를 반영하기 위하여 다음과 같이 수정되었다.

$$(v_e)_i = \frac{\zeta_i}{1.0 + (K_c)_i K_f} \geq 0.25 \quad (7)$$

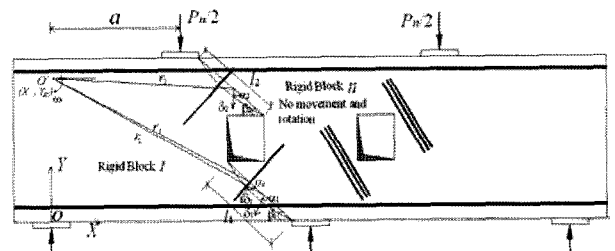


Fig. 10 Idealized failure mode of deep beams having openings within interior shear spans

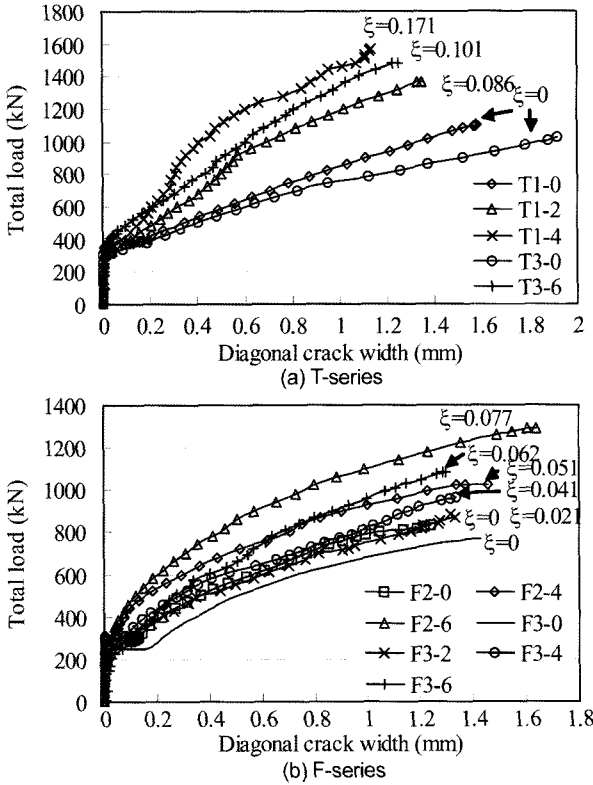


Fig. 8 Diagonal crack width against total applied load

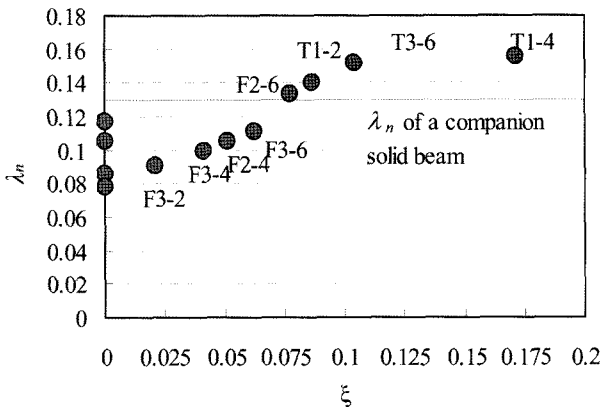


Fig. 9 Relation of ξ and normalized load capacity λ_n

력 $\lambda_n = \frac{P_n}{2b_w h f_{ck}}$ 에 대한 유효 경사 보강근 계수 ξ 의 영향을 나타내었다. 경사 보강근이 없는 보들의 최대 내력은 내부 전단경간의 개구부 크기 증가와 함께 감소하였다. 개구부 크기가 $0.5a$ 인 F2-0와 F3-0 시험체의 최대 내력은 개구부 없는 동일 깊은 보 내력의 각각 35%와 40%이었다. 반면 개구부 주위의 경사 보강근은 깊은 보의 내력을 향상시켰다. 개구부 크기가 $0.5a \times 0.3h$ 이고 경사 보강근이 6-D10 배근된 F3-6의 최대 내력은 개구부 크기가 $0.5a \times 0.2h$ 이고 경사 보강근이 4-D10 배근된 보의 내력보다 높았다. 개구부를 갖는 연속 깊은 보의 최대 내력은 개구부 크기와 함께 경사 보강근 양에 의해 중요한 영향을 받았다. 실험된 보들의 최대 내력비 λ_n 는 유효 경사 보강근 계수에 비례하여 증가하였다. 특히 유효 경사 보강근 계수가 0.077 이상인 깊은 보의 최대 내력은 개구부 없는 동일 깊은 보의 것보다 높았다.

여기서 $(K_c)_j = 0.35 \left(-\frac{\epsilon_{1,i}}{\epsilon_{3,i}} - 0.28 \right)^{0.8} \geq 1.0$ 은 횡 인장변형률의 영향을 나타내는 계수이다. $-\frac{\epsilon_{1,i}}{\epsilon_{3,i}}$ 는 상계치 이론¹⁵⁾으로 부터 $\frac{1 + \sin \alpha_i}{1 - \sin \alpha_i}$ 로 나타낼 수 있다. $K_f = 0.1825 \sqrt{f_{ck}} \geq 1.0$ 로서 재료 특성의 영향을 나타내는 계수이다. 콘크리트 스트럿에서 크기 효과를 반영하는 계수 ζ_i 는 Bazant and Kim¹⁶⁾의 모델을 따랐으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\zeta_i = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(d_s)_i}{25d_a}}} \quad (8)$$

여기서 $(d_s)_i$ 는 항복선 의 깊이이며, d_a 는 최대 골재 직경이다.

5.3 해석 절차

내부 전단경간에 개구부를 갖는 연속 깊은 보의 최대 내력은 I.C.의 위치인 (X_{ic}, Y_{ic}) 의 함수이다. Fig. 10에 나타낸바와 같이 지지점에서 강체 I 의 수직변위는 구속되기 때문에 I.C.의 수평좌표인 X_{ic} 는 강체 I 를 지지하는 지점 위에 있게 된다. 따라서 최대 내력은 I.C.의 수직좌표인 Y_{ic} 의 변화에 따른 최소값으로부터 산정될 수 있다. I.C.의 좌표 변화에 따른 최소 내력값을 산정하기 위하여 Matlab을 이용한 프로그램이 작성되었다¹⁴⁾.

5.4 실험 결과와의 비교

식 (6)으로부터 산정된 최대 내력과 실험 결과의 비교가 Table 3에 주어졌다. 제시된 모델은 개구부 크기가 $0.5a \times 0.3h$ 인 보들의 내력을 다소 과대평가하였지만 실험 결과에 대한 예측 값 비의 평균과 표준편차는 각각 1.05와 0.12였다. 개구부를 갖는 깊은 보에 대한 설계기준들이 아직 마련되지 않은 상태에서 제시된 모델은 내부 전단경간에 개구부를 갖는 연속 깊은 보의 내력 평가를 위해 이용될 수 있다고 판단된다.

6. 결 론

- 1) 경사 보강근이 배근되지 않은 보들은 하중 및 중앙 지지점 반대편의 개구부 모서리에서 경사균열 발생과 함께 곧 파괴하였다. 반면 유효 보강근 계수가 0.051 이상인 보들에서는 개구부 상, 하부의 콘크리트 스트럿에서 경사 균열 분산 효과가 좋았다.
- 2) 개구부 면적비가 0.025인 보들의 단부 반력은 개구부 주위 경사 보강근 양에 관계없이 선형유한요소 해석 결과와 매우 비슷하였다. 반면 개구부 면적비가 0.075 이상인 보들의 단부 반력은 경사 보강근 양의 증가와 함께 선형유한요소해석 결과에 가까웠다.
- 3) 경사 보강근이 없는 보들은 경사균열의 발생과 함께 0.05~0.2 mm 균열 폭에 곧 도달하였으며 작용

하중에 대한 이들 균열 폭의 증가속도는 개구부 깊이 증가와 함께 증가하였다. 한편 유효 경사 보강근 계수 0.041 이상을 갖는 보들에서는 경사균열 발생과 함께 균열 폭이 급격히 증가하는 현상은 나타나지 않았으며 하중 증가에 따른 균열 폭 진전 속도는 유효 경사 보강근 계수 증가와 함께 감소하였다.

- 4) 내부 전단경간에 개구부를 갖는 연속 깊은 보의 내력은 유효 경사 보강근 계수가 0.077 이상일 때 동일 개구부 없는 보의 내력보다 높았다.
- 5) 상계치이론을 이용한 수치해석에 의해 예측된 최대 내력은 실험값 대비 평균 1.05, 표준편차 0.12로서 실험 결과와 잘 일치하였다.

감사의 글

이 연구는 2006년도 중앙대학교 교내학술연구비 지원의 도움을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

1. Kong, F. K. and Planas, J., "Structural Idealization for Deep Beams with Web Openings", *Magazine of Concrete Research*, Vol.29, No.99, 1977, pp.81~91.
2. Kong, F. K., Sharp, G. R., Appleton, S. C., Beaumont C. J., and Kubik, L. A., "Structural Idealization for Deep Beams with Web Openings; Further Evidence", *Magazine of Concrete Research*, Vol.30, No.103, 1978, pp.89~95.
3. Yang, K. H., Eun, H. C, and Chung, H. S., "The Influence of Web Openings on the Structural Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Deep Beams", *Engineering Structures*, Accepted, 2006.
4. Yang, K. H., Chung, H. S., and Ashour, A. F., "Influence of Shear Reinforcement on Reinforced Concrete Continuous Deep Beams", *ACI Structural Journal*, Accepted for publication, 2006.
5. Rogowsky, D. M., MacGregor, J. G, and Ong, S. Y., "Tests of Reinforced Concrete Deep Beams", *ACI Journal*, Vol.83, No.4, 1986, pp.614~623.
6. Ashour, A. F. and Rishi, G., "Tests of Reinforced Concrete Continuous Deep Beams with Web Openings", *ACI Structural Journal*, Vol.97, No.3, 2000, pp.418~426.
7. Tan, K. H., Tong, K., and Tang, C. Y., "Consistent Strut-and-Tie Modelling of Deep Beams with Web Openings", *Magazine of Concrete Research*, Vol.55, No.1, 2003, pp.65~75.
8. Yang, K. H., Chung, H. S., and Ashour, A. F., "Influence of Inclined Web Reinforcement on the Reinforced Concrete Deep Beams with Openings", *ACI Structural Journal*, Accepted for publication, 2006.
9. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)*, American Concrete Institute, 2005, 436pp.
10. Canadian CSA Building Code, *Design of Concrete Structures: Structures (Design)-A National Standard of Canada (CAN-A23.3-94), Clause 11.1.2*, Canadian Standards Asso-

- ciation, Toronto, 1994, 199pp.
11. CIRIA, *The Design of Deep Beams in Reinforced Concrete (CIRIA 2)*, Ove Arup & Partners and CIRIA, London, 1997.
 12. 양근혁, 심현주, “개구부를 갖는 철근콘크리트 연속 깊은 보의 역학적 거동”, 대한건축학회논문집, 22권 7호, 2006, pp.27~34.
 13. Vecchio, F. J. and Collins, M. P., “Compression Response of Cracked Reinforced Concrete”, *Journal of Structural Engineering ASCE*, Vol.119, No.12, 1993, pp.3590~3610.
 14. 양근혁, 은희창, 정현수, “상계치 이론을 이용한 개구부를 갖는 철근콘크리트 단순·연속 깊은 보 내력의 수치해석 모델”, 콘크리트학회논문집, 18권 4호, 2006, pp.469~477.
 15. Nielsen, M. P., *Limit Analysis and Concrete Plasticity*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1984, 420pp.
 16. Bažant, Z. P. and Kim, J. K., “Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beams”, *ACI Journal, Proceedings*, Vol.81, No.5, 1984, pp.456~468.

요 약 경사 보강근이 철근콘크리트 연속 깊은 보의 구조적 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 내부 전단경간에 개구부를 갖는 연속 깊은 보 12개가 실험되었다. 주요 변수는 개구부 크기와 경사 보강근 양이다. 개구부 주위의 경사 보강근 양과 개구부 크기의 영향을 동시에 고려하기 위한 유효 경사 보강근 계수가 제시되었다. 실험 결과 개구부를 갖는 연속 깊은 보의 하중 분배, 경사균열 폭 및 최대 내력은 유효 경사 보강근 계수에 의해 결정되었다. 유효 경사 보강근 계수가 클수록 경사균열 폭 및 이들의 진전 속도는 낮았다. 특히 유효 경사 보강근 계수가 0.077 이상인 보의 최대 내력은 동일 개구부 없는 보의 것에 비해 높았다. 내부 전단경간에 개구부를 갖는 연속 깊은 보의 최대 내력을 평가하기 위하여 상계치 이론을 이용한 수치해석 모델이 제시되었다. 제시된 모델로부터 얻은 최대 내력은 실험 결과와 잘 일치하였다.

핵심용어 : 연속 깊은 보, 개구부, 경사보강근, 최대내력, 상계치 이론