

개구부를 갖는 철근콘크리트 깊은 보의 전단거동에 대한 실험 연구

An Experimental Study on the Shear Behavior of R/C Deep Beams with Web Openings

임 채 문*
Lim, Chae-Moon

이 진 섭**
Lee, Jin - Seop

양 창 현***
Yang, Chang-Hyun

김 상 식****
Kim, Sang-Sik

ABSTRACT

The shear behavior of reinforced concrete deep beams with web openings has been scrutinized experimentally to verify the influences of the structural parameters such as size, shape, location and reinforcements of web openings, and shear span ratio.

A total of 22 specimens has been tested under one or two point loading conditions at the laboratory. In the tests most specimens have shown shear failures with inclined cracks from the loading points to the supports through openings. The ultimate strengths of the specimens measured from the tests have shown wide differences depending on the locations of the openings which deter the formation of the compression struts between the loading points and the supports. The effects of the reinforcements and the geomtry of the openings on the shear strengths and the crack developments have been carefully checked and analyzed.

1. 머리말

철근콘크리트 건물에서 기둥열이 바뀔 때 설치되는 층높이 보, 기초 벽보, 전단벽 등의 부재들은 스패에 비하여 층이 큰 보로서 일반적인 보와는 힘이 전달되는 경로가 달라 깊은 보로 다뤄지고 있다. 또한 극한강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조계산 기준에서는 하중이 부재의 상부 또는 압축면에 작용하고, 보의 층에 대한 스패길이 비가 5 이하이며, 하중점과 지지점 사이에 경사진 압축대에 의하여 힘이 전달되는 부재로 정의하고 있다.

철근콘크리트 깊은 보에서는 균열 발생으로 인한 구조 및 재료의 비선형성으로 인해 이론 해석이 확립되어 있지 않으며, 대부분의 설계

공식은 실험에 근거를 두고 있다. 많은 실험 연구에서 깊은 보의 하중지지능력은 콘크리트 강도, 전단스팬과 보춤의 비, 수평 및 수직 보 강근, 하중의 형태와 위치의 영향을 받는 것이 외에도, 창호, 배관 및 설비 등의 문제로 인하여 웨브 부분에 개구부를 갖는 경우가 많아 개구부의 위치 및 모양에 따라 구조거동에 큰 차이를 보이게 된다. 이러한 관점에서 이 연구에서는 웨브에 사각형의 개구부를 갖는 철근콘크리트 깊은 보를 대상으로 구조거동과 파괴형태를 실험적으로 조사하고, 전단스팬과 보춤의 비와 개구부의 위치 등의 관계를 규명하여, 웨브에 개구부를 갖는 철근콘크리트 깊은 보의 설계에 필요한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 시험체 및 시험장치

2.1 시험체 제작

시험체는 전단스팬비와 개구부의 위치, 크기 및 개구부 주변의 보강 등을 변수로 하여 모두 22개가 제작되었다.

- * 인하대학교 건축공학과 석사과정
- ** 인하대학교 건축공학과 박사과정
- *** 인하대학교 토목공학과 교수, 공박
- **** 인하대학교 건축공학과 교수, 공박

표 1 시험체의 형태 및 보강

시험체	개구부의 위치 및 크기 (mm)	a/h	철근 보강			
			개구부 4면 보강 (1)	웹 등간격 보강 (2)	개구부 대각 보강 (3)	웹 대각 보강 (D)
XA0	지지점의 내측 단부 (L/6, 5L/6)	0.4	.	.	.	.
XA1	.		2×2-D10	.	.	.
XA2	.		2×2-D10	2×Φ6@50	.	.
XA3	200×200		2×2-D10	2×Φ6@50	2-D13	.
XB0	지지점의 내측 단부 (L/6, 5L/6)	0.8	.	.	.	.
XB1	.		2×2-D10	.	.	.
XB2	.		2×2-D10	2×Φ6@50	.	.
XB3	200×200		2×2-D10	2×Φ6@50	2-D13	.
XC0	지지점의 내측 단부 (L/6, 5L/6)	1.2	.	.	.	.
XC1	.		2×2-D10	.	.	.
XC2	.		2×2-D10	2×Φ6@50	.	.
XC3	200×200		2×2-D10	2×Φ6@50	2-D13	.
YA0	스팬 중앙	0.4	.	.	.	.
YA1	.		2×2-D10	.	.	.
YAI-D	200×300		2×2-D10	.	.	2×Φ6@100
YB0	스팬 중앙	0.8	.	.	.	.
YB1	.		2×2-D10	.	.	.
YBI-D	200×300		2×2-D10	.	.	2×Φ6@100
YC0	스팬 중앙	1.2	.	.	.	.
YC1	.		2×2-D10	.	.	.
YCI-D	200×300		2×2-D10	.	.	2×Φ6@100
YC0-1	스팬 중앙 하부 200×300	1.2	.	.	.	.

시험체의 실험변수와 기호는 다음과 같다.

- (1) 개구부의 형상, 위치 ; 양단 2개(X), 중앙 1개 (Y)
- (2) 전단스팬비 (a/h) ; 0.4 (A), 0.8 (B), 1.2 (C)
- (3) 개구부 보강 ; 무보강 (0)
 - 개구부 4면 보강 (1)
 - 개구부 주변 웹 보강 (2)
 - 개구부 모서리 보강 (3)
 - 웹의 대각근 보강 (D)

각 시험체의 개구부 위치, 크기, 전단스팬비와 보강 내용은 표 1과 같다. 시험체 기호의 첫 번째 문자는 개구부의 형상 및 위치에 관련된 것이고, 두 번째 숫자는 전단스팬비, 세 번째 숫자는 보강철근의 내용에 관한 기호이다. 예를 들어 XA2는 스패의 1/6, 5/6 위치에 20 cm × 20 cm 크기의 개구부가 있으며, 전단스팬비 0.4에 개구부 상하좌우 및 웹에 철근이 보강되어 있는 시험체를 나타낸다.

각 시험체의 하부는 2-D19의 인장철근, 상부는 2-D10의 압축철근이 90° 호크에 충분한 정착길이

표 2 콘크리트 배합표

설계강도 (kg/cm ²)	물시멘트비 (%)	중량비 (kg/m ³)			
		시멘트	물	모래	자갈
250	55.3	333	184	857	887

로 보강되어 있고, 개구부의 보강에는 D10 철근과 D13 철근이, 웹의 전단보강근으로는 Φ6 원형철근이 사용되었다.

시험체 제작에는 강재 거푸집이 이용되었으며, 거푸집에 타설된 콘크리트가 밀실하게 채워지도록 봉형 진동기를 전면적에 고르게 사용하였다. 또한 콘크리트의 설계 압축강도는 250 kg/cm² 을 기준으로 하여 표 2와 같이 배합하였고, 콘크리트 타설시 압축강도 측정용 공시체를 제작한 후 시험체와 동일한 조건으로 양생하여 실험 실시 일에 압축강도 시험을 하였다.

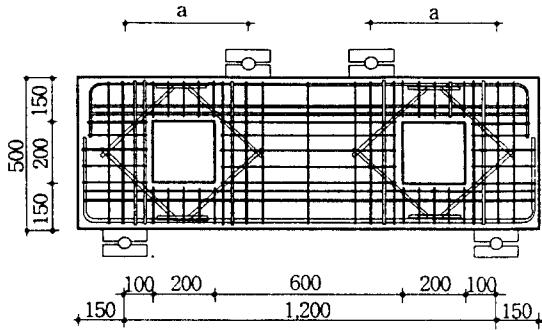
시험결과 콘크리트의 평균 압축강도는 313 kg/cm² 이고 표준편차 10.3 kg/cm², 변동계수는 3.3 퍼센트로 나타났다.

2.2 시험장치 및 실험 방법

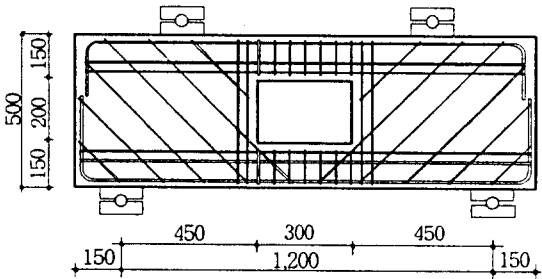
구조실험에서 시험체의 가력에는 200톤 용량의 만능시험기(UTM)가 사용되었으며, 가력점과 지지점에는 시험체의 지압파괴를 막기 위하여 길이 14 cm, 넓이 10 cm에 헨지로 된 지지판이 설치되었다.

시험체의 보강철근에 부착된 와이어 스트레인게이지를 통해 보강철근의 변형률을 측정함과 동시에, 시험체의 중앙부에 3개, 지지점 사이 1/4 지점에 각각 2개씩의 자동변위계를 설치하였으며, 시험체에 가해지는 하중은 만능시험기에 장착되어 있는 로드셀을 통해 취득하였다.

A계열과 B계열 시험체는 2점 집중하중, C계열 시험체는 중앙부에 집중하중으로 작용토록 하여 각기 다른 전단스팬비를 갖도록 하였고, 파괴에 이르기까지 1분당 약 2톤의 속도로써 점진적으로 가력하였으며, 각 하중 단계마다 하중, 처짐, 보강철근의 변형률 등을 자동변형률 측정기를 통해 컴퓨터에 저장되도록 함은 물론 균열 발생 및 진전 상황을 관찰하였다.



(a) X계열 시험체



(b) Y계열 시험체

그림 1 시험체의 상세

3. 실험 결과

3.1 균열 및 파괴형태

모든 시험체는 휨파괴 이전에 전단파괴되었는데, 주압축대가 개구부를 통과하는 시험체는 개구부 상하단에서, 주압축대가 개구부를 통과하지 않는 시험체는 전단스팬 내에서 콘크리트의 과도한 균열 및 압괴에 의해 파괴되었다.

주압축대가 개구부를 통과하는 X계열 시험체의 파괴선은 대부분 가력점 또는 반력점에서 먼 쪽의 개구부 모서리를 잇는 경향을 보였다. 개구부 주변이 보강될수록 비교적 폭이 작고 길이가 짧은 균열이 여러개소에 분산되어 발생하는 것을 관찰할 수 있었으며, 시험체 중앙에서의 휨 균열은 찾아보기 어려웠다.

주압축대가 개구부의 모서리에 맞닿아 있는 YC계열 시험체는 개구부의 상부에서 먼저 전단 파괴되었으나, 주압축대가 개구부를 통과하지 않는 YA, YB 계열 시험체는 개구부가 없는 시

표 3 각 시험체의 하중, 변위 측정 결과표

시험체명	초기 균열		대각 균열		최고하중시	
	하중 (t)	변위 (mm)	하중 (t)	변위 (mm)	하중 (t)	변위 (mm)
XA0	4.5	0.18	19.0	0.84	28.7	1.57
XA1	4.5	0.07	16.5	0.41	36.2	1.48
XA2	4.5	0.22	16.5	0.57	40.5	2.39
XA3	4.5	0.08	22.5	0.56	53.9	3.68
XB0	2.0	0.09	9.5	1.24	13.3	2.98
XB1	4.0	0.18	12.0	0.84	17.4	2.10
XB2	4.0	0.19	12.0	0.83	28.0	3.95
XB3	5.5	0.22	17.5	0.94	32.8	3.12
XC0	4.0	0.27	5.0	0.50	10.4	3.30
XC1	4.5	0.26	9.0	0.59	13.9	1.38
XC2	5.0	0.31	14.0	1.46	24.3	4.47
XC3	4.0	0.20	15.0	1.09	29.2	3.56
YA0	7.0	0.09	24.0	0.41	69.9	1.96
YA1	11.5	0.28	30.5	0.62	83.2	2.03
YA1-D	13.0	0.13	30.5	0.39	85.8	1.67
YB0	6.5	0.12	18.0	0.52	54.3	1.99
YB1	6.5	0.02	18.0	0.41	56.2	2.40
YB1-D	11.5	0.23	20.0	0.47	69.6	3.15
YC0	5.0	0.14	12.5	0.44	24.1	1.21
YC0-1	7.0	0.08	11.0	0.18	29.6	1.23
YC1	6.5	0.14	13.5	0.32	20.2	0.64
YC1-D	6.5	0.18	14.5	0.37	21.1	0.57

험체의 파괴와 거의 비슷한 양상을 보였다. 또한 웨브에 대각선 방향의 철근이 보강된 시험체는 최고하중의 증가는 물론 파괴에 이르기까지 균열 폭이 작고, 여러개소에 분산되어 발생하는 현상을 관찰할 수 있었다.

3.2 하중-변위 관계

그림 2는 시험체 중앙부의 하중 - 처짐 곡선을 나타낸 것인데, 공통적으로 초기 강성은 전단 스펀비가 적을수록 크게 나타났다.

X계열 시험체의 하중 - 변위곡선은 대부분 개구부 상하단에 주파괴균열이 관통되는 단계인 최고하중의 70.~ 80 퍼센트까지는 거의 선형이었고 이후 비선형 거동이 나타났으며, 개구부가 보강되지 않은 시험체는 개구부가 보강된 시험체에 비해 초기강성이 현저히 낮음을 알 수 있었다. 개구부 주변에 배치된 보강근이 증가될수록 시험체의 변형에너지 흡수율이 증가하였고, 특히 개구부 주변을 따라 직선철근을 배치한 시험체보다 개구부 주변의 웨브에 수직수평근을 등간격으로 배치한 시험체에서 변형

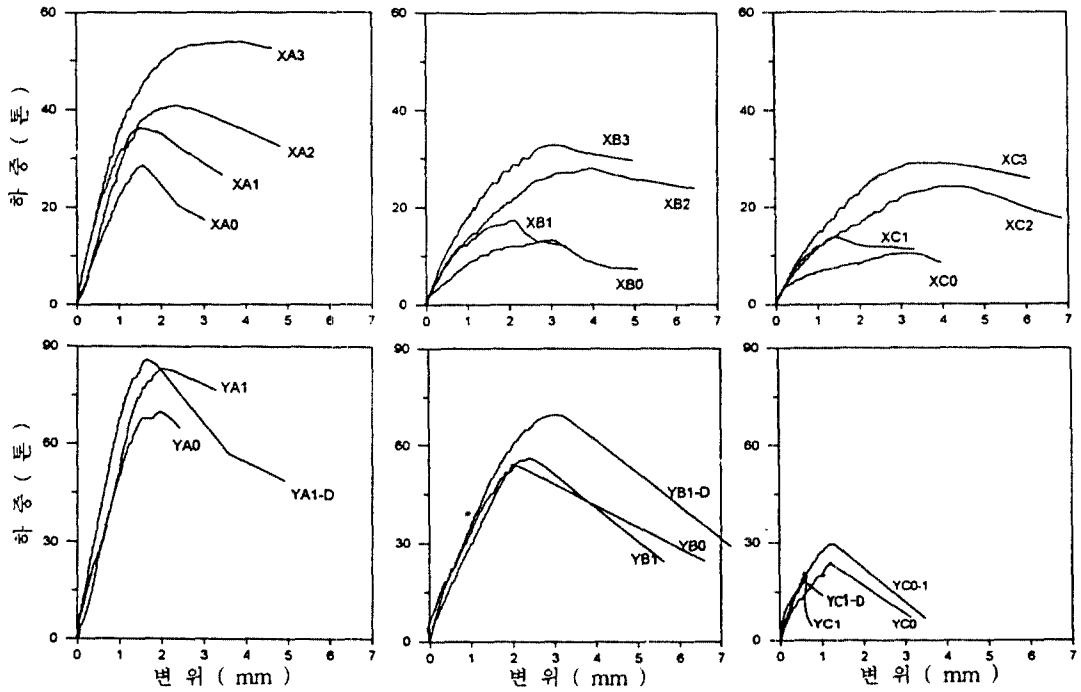


그림 2 시험체의 하중 - 변위 곡선

에너지 흡수율이 큰 폭으로 증가하였다.

Y계열 시험체의 하중 - 변위곡선은 가력점 하부의 개구부 상단이 국부적으로 전단파괴된 YC계열 시험체를 제외한 모든 시험체에서, 대각균열 발생 이전까지는 거의 탄성거동을 보였으나 대각균열이 가력점과 반력점 사이로 이어지는 시점 이후에서는 현저한 비선형 거동을 보였으며, 최고하중 이후에 급격히 하중이 감소되는 것으로 나타났다. 최대 하중시 처짐은 전단스팬비가 클수록 처짐량이 크게 나타났으며, 전반적으로 개구부가 없는 시험체와 유사한 형태를 보이고 있다.

4. 실험결과의 분석

4.1 주압축대와 개구부의 위치에 따른 영향

1) X계열 시험체

X계열 시험체에서는 전단스팬의 변화에 따라 시험체의 주압축대가 일정 부분 개구부의 간섭을 받게 되므로, 최고하중은 개구부가 없는 시

험체에 비해 낮게 나타났으며, 개구부의 보강 유·무에 관계없이 시험체의 전단스팬 변화에 따라 최고하중은 개구부가 없는 시험체의 경우와 유사한 기울기로 일정하게 감소하고 있다. 개구부 주변의 보강이 증가함에 따라 시험체의 최고하중은 개구부가 없는 시험체의 89~100 퍼센트까지 근접하였는데, 전단스팬비가 0.4인 A계열 시험체의 경우에는 개구부 모서리의 대각근 보강의 효율이 비교적 높게 나타났고, 전단스팬비가 0.8, 1.2인 B, C계열 시험체의 경우에는 개구부 주변의 웨브에 등간격으로 보강근을 배치한 시험체의 효율이 비교적 높게 나타났다.

2) Y계열 시험체

전단스팬비가 0.4, 0.8 인 YA, YB 계열 시험체는 주압축대가 개구부의 간섭을 받지 않는 위치에 있어 개구부의 영향이 거의 없는 것으로 나타났으며, X계열 시험체와 마찬가지로 개구부의 보강 유·무에 관계없이 시험체의 전단스팬 변화에 따라 최고하중은 개구부가 없는

시험체의 경우와 유사한 기울기로 일정하게 감소하고 있다. YC 계열 시험체의 경우에는 가력점의 아래에 있는 개구부 상부가 전단파괴됨으로써 개구부가 없는 시험체의 최고하중보다 낮은 69~83 퍼센트 정도를 나타내었으나, 주압축대가 개구부를 벗어나 있는 YC0-1 시험체는 개구부가 없는 시험체에 대해 102 퍼센트의 최고하중을 나타내어 거의 비슷한 내력을 보였다. 따라서 집중하중을 받는 깊은 보에서 주압축대가 개구부를 통과하지 않을 경우에는 개구부의 영향은 무시할 정도로 작을 것으로 판단된다.

4.2 개구부 철근보강의 영향

1) X계열 시험체

전단스팬비가 0.4인 XA계열 시험체는 개구부가 없는 시험체에 대해, 개구부의 보강방법에 따라 48~89 퍼센트의 내력을 나타내었으며, 개구부 모서리 대각보강의 효율이 가장 크게 나타났다. 전단스팬비가 0.8인 XB계열 시험체는 보강방법에 따라 개구부가 없는 시험체에 비해, 37~92 퍼센트의 내력을 나타내었으며, 전단스팬비가 1.2인 XC계열 시험체는 36~100 퍼센트의 내력을 나타내었는데, XB, XC계열 시험체에서는 개구부 모서리의 대각보강과 더불어 개구부 주변을 등간격 보강한 것의 내력 증가율이 가장 크게 나타났다.

2) Y계열 시험체

전단스팬비가 0.4인 YA계열 시험체는 보강방법에 따라 개구부가 없는 시험체에 대해 116~142 퍼센트의 최고하중을 보였고, 전단스팬비가 0.8인 YB계열 시험체는 153~196 퍼센트의 최고하중을 보여 개구부의 영향을 전혀 받지 않고 있음을 나타냈다. 또한 YA계열에서는 개구부 4면의 직선철근이, YB계열 시험체에서는 웨브에 등간격으로 배치된 대각선 방향의 철근 보강 효율이 큰 것으로 나타나, 전단스팬이 증가하여 주압축대가 45°에 가까울수록 웨브의 대각보강 효율이 증가함을 알 수 있었다. 그러나 전단스팬비가 1.2인 YC계열 시험체는 개구부 상단이 국부적으로 전단파괴됨으로써 철근 보강의 효과를 볼 수 없었다.

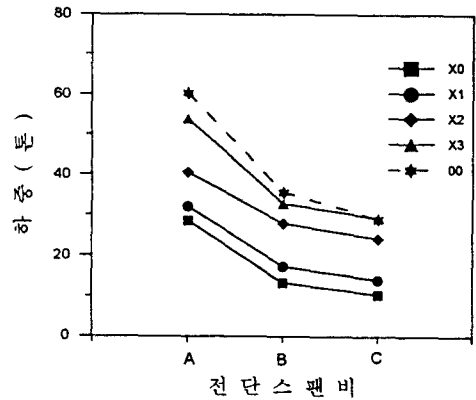


그림 3 X계열 시험체의 전단스팬에 따른 비교

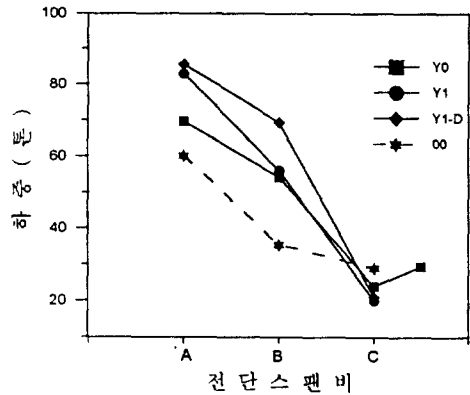


그림 4 Y계열 시험체의 전단스팬에 따른 비교

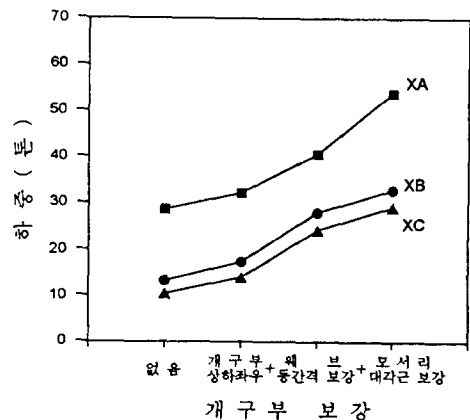


그림 5 X계열 시험체의 철근보강에 따른 비교

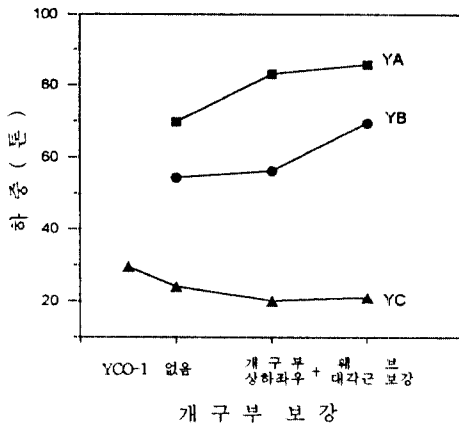


그림 6 Y계열 시험체의 철근보강에 따른 비교

5. 맺음말

이 연구는 웨브에 개구부를 갖는 깊은 보를 대상으로, 각기 다른 위치 및 형태의 개구부와 개구부 보강근 및 전단스팬비를 갖는 단순지지 철근콘크리트 깊은 보 시험체의 전단강도 및 구조 거동을 실험을 통해 조사하였으며, 고찰된 결과는 다음과 같다.

- 1) 주압축대가 개구부를 통과하는 시험체는 개구부 상·하단에서 파괴되었고, 주압축대가 개구부를 통과하지 않는 시험체는 개구부가 없는 시험체와 유사하게 전단스팬 내부에서 콘크리트의 과도한 균열 및 압괴에 의해 파괴되었다.
- 2) 모든 시험체는 개구부의 보강 유·무에 관계 없이 시험체의 전단스팬 변화에 따라 초기 강성이 일정 비율로 감소하며, 개구부 상하단 또는 웨브에 대각균열이 상·하로 관통되는 단계까지는 거의 선형적 거동을 보였고 그 이후에는 비선형 거동을 보였다.
- 3) 주압축대가 개구부를 통과하는 X계열 시험체에서는 개구부 주변에 배치된 보강근이 증가될수록 시험체의 변형에너지 흡수율이 크게 증가하였는데, 전단스팬비가 작은 경우 개구부 모서리의 대각보강 효율이, 전단스팬

비가 큰 경우는 개구부 주변을 등간격 보강한 것의 내력 증가율이 가장 크게 나타났다.

- 4) 집중하중을 받는 깊은 보에서 주압축대가 개구부를 통과하지 않을 경우, 깊은 보의 강도에 미치는 개구부의 영향은 거의 없는 것으로 나타났으며, 주압축대의 경사가 45°에 가까울 수록 웨브의 대각보강이 효율적으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 1993년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. F. K. Kong, G. R. Sharp, "Shear Strength of Lightweight Reinforced Concrete Deep Beams with Web Openings", The Structural Engineer, Vol. 51, No.8, Aug. 1973., pp 267 ~275.
2. F. K. Kong, G. R. Sharp, "Structural Idealization for Deep Beams with Web Openings", Magazine of Concrete Research, Vol. 29, No. 99, June 1977., pp 81~91.
3. F. K. Kong, G. R. Sharp, S. C. Appleton, C. J. Beaumont, L. A. Kubik, "Structural Idealization for Deep Beams with Web Openings", Magazine of Concrete Research, Vol. 30, No. 103, June 1978., pp 89~95.
4. S. P. Ray, C. S. Reddy, "Strength of Reinforced Concrete Deep Beams with and Without Opening in the Web", The Indian Concrete Journal, Vol. 53, Sept. 1979., pp 242~246.
5. R. Singh, S. P. Ray & C. S. Reddy, "Some Tests on Reinforced Concrete Deep Beams with and Without Opening in the Web", The Indian Concrete Journal, Vol. 54, July 1980., pp 189~194.