

등분포하중을 받는 철근콘크리트보의 전단거동에 관한 연구

Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams
Subjected to Uniform Load

오김대중* 김우**

Abstract

The shear behavior of reinforced concrete beams subjected to uniform loading was investigated by testing 1/3 small-scale model R/C beams. The emphasis was placed in finding a fundamental difference in behavior between in uniformly loaded beams and in point loaded beams. The major variable was the span-to-depth ratio, varying from 4 to 12. The concrete strength and steel ratio were fixed.

1. 서론

지금까지 철근콘크리트보의 전단거동을 규명하기 위한 수많은 연구논문이 보고되었으나, 철근콘크리트보의 전단파괴거동은 아직 확실히 규명되지 않았다. 이것은 파괴에 관련된 인자들이 아주 많고 복잡하여 정량화하는 것이 매우 곤란하기 때문이다. 이와 같이 전단거동의 근본성질을 분명히 이해하지 못하기 때문에 철근콘크리트보의 전단강도에 대한 식은 실험적인 방법에 근거를 두고 있다. 더우기 현재 시방서에 사용되는 전단강도식은 집중하중경우의 실험결과로부터 얻어진 것이며, 콘크리트 압축강도, 철근비, 전단지간 대 유효높이의 비(a/d)를 주요변수로 포함하고 있다. 보의 전단파괴는 전단력 V 와 휨모멘트 M 의 조합작용에 의해서 일어나며, 집중하중을 받는 보의 경우는 전단지간 대 유효높이의 비(a/d)는 휨모멘트와 전단력의 비를 나타낸다. 그러나 등분포하중의 경우는 전단력 V 와 휨모멘트 M 의 조합이 집중하중의 경우와 다르다. 따라서 집중하중의 실험결과로 얻어진 현행 시방서의 전단강도식을 등분포하중의 경우에 적용한다는 것은 불합리하다고 할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 원형보와 1/3 Scale 모형보의 상사성을 확보한 후, 모형실험을 이용하여 기존의 전단강도식이 등분포하중을 받는 철근콘크리트보의 경우에도 적합한지를 검토하였다.

2. 실험

2.1 개요

모형실험의 결과를 해석함에 있어서 신뢰도를 확보하기 위해서는 상사성에 대해 사전 연구가 필요하고, Scale Effect는 가능한 최소화하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 원형보와 1/3 scale 모형보의 상사성증명실험을 실시한 후, 모형실험을 통하여 철근콘크리트보의 하중형태에 따른 전단거동의 차이에 대해서 연구하였다.

전단지간 대 유효높이의 비(a/d)에서 전단지간 a 는 하중점과 지점사이의 거리를 의미하는 것으로서 집중하중경우에만 적용되는 개념이므로 등분포하중 경우에는 사용할 수 없다. 그러므로 본 실험에서는 보의 전 스패ん길이 대 유효높이의 비(L/d)를 주요변수로 하여 실험하였다.

2.2 실험체

실험체는 Fig. 1과 같은 제원의 원형보 2개와 1/3 scale 모형보 12개를 제작하였다. 상사성증명

실험은 전 스패ん길이 대 유효높이의 비(L/d)가 5.4($a/d=2$)와 9.4($a/d=4$)인 원형보와 모형보에 대해서 대칭2점재하로 실험하여 결과를 비교 검토하였다. 철근콘크리트보의 하중형태에 따른 전단거동의 차이에 대해서 연구하기 위한 총 10개 모형보의 단면은 폭 4.3cm, 유효높이 7cm, 피복두께 1.3cm로 동일하게 하였으며, 철근은 D6을 2개 사용하여 철근비는 2.09%였다. 전 스패ん길이 대 유효높이의 비(L/d)는 4에서 12까지 5단계로 변화시켰다. 각 보의 명칭은 첫문자는 L/d , 두번째 문자는 하중형태를 나타내도록 하였다.

2.3 실험장치 및 방법

하중재하방법은 Fig. 5와 같이 등간격으로 다점재하하여 등분포하중을 실현화하였고, 집중하중은 스패ん 중앙에 1점재하하였다.

실험을 하기 전에 실험체의 중앙점과 하중재하점 및 지지점의 위치를 정확히 표시하여, 실험시 편심재하를 최소화하였다. 실험체의 하중재하점과 지점에 균일한 지압응력이 발생하도록 물로 적당히 갠 생석화(hydrostone)를 철판에 고르게 바르고, 굳기 전에 약간의 하중을 가하여 정확한 setting이 된 후 다시 하중을 제거하였다. 하중재하는 5 ton 용량의 유압 Jack을 사용하였는데, 하중측정을 위해서 Load Cell을 설치하였고 Dial Gage를 이용하여 보의 중앙점의 처짐을 측정하였다.

3. 상사성에 대한 고찰

원형보와 1/3 scale 모형보를 실험하여 각각의 보에 대해 스패ん중앙의 처짐, 균열상태, 파괴 mode, 파괴강도등을 관찰하고, scale factor를 이용해서 원형과 모형의 실험결과를 비교분석하였다. 즉, 모형보의 실험결과는 식 (1)과 (2)와 같이 모형보와 원형보의 콘크리트 강도의 차이를 보정한 후,

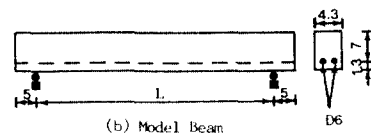
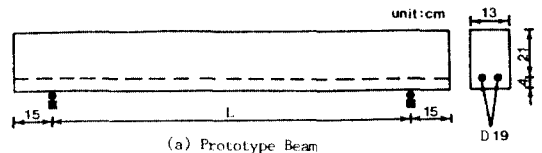


Fig. 1 Dimension of Beams

* 전남대학교 토목공학과 박사과정

** 전남대학교 토목공학과 조교수

scale factor를 곱하여 원형화시켰다.

$$V_{cr,pp} = V_{cr,m} (S_1)^2 (f'_{c,p}/f'_{c,m})^{0.5} \quad (1)$$

$$V_{u,pp} = V_{u,m} (S_1)^2 (f'_{c,p}/f'_{c,m})^{0.5} \quad (2)$$

여기서 $V_{cr,m}$: 모형보의 전단균열강도
 $V_{u,m}$: 모형보의 극한전단강도
 $V_{cr,pp}$: 원형화시킨 모형보의 전단균열강도
 $V_{u,pp}$: 원형화시킨 모형보의 극한전단강도
 $f'_{c,p}$: 원형보의 콘크리트 압축강도
 $f'_{c,m}$: 모형보의 콘크리트 압축강도
 S_1 : scale factor

모형보의 하중-처짐곡선을 상사법칙에 의해 원형화시킨 후, 원형보의 하중-처짐곡선과 비교하였는데, Fig. 2와 같이 원형과 모형의 하중-처짐곡선이 유사한 경향을 보이고 있다. 원형보와 모형보에서의 균열의 발생과 진전은 모두 유사하게 나타났다 (Fig. 3). 실험결과로부터 구한 모형보의 전단강도를 원형화시켜 원형보의 전단강도와 비교하였는데, Table 2에서 알 수 있듯이 약 10%의 차이를 보이고 있다. 따라서 스패중앙의 처짐, 균열상태, 파괴강도등과 같은 실험결과는 원형보와 모형보의 상사성을 확보하고 있다고 판단된다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 균열형태와 파괴거동

하중형태에 관계없이 전 스패길이 대 유효높이의 비(L/d)가 4에서 10까지는 전단파괴하였고, L/d가 12의 경우는 휨파괴하였다. 전단파괴의 경우 균열이 발생하여 파괴에 이르기까지의 진전과정은 하중형태에 관계없이 유사하게 나타났으나, 최초의 경사전단균열의 발생위치는 하중형태에 따라 큰 차이를 보였다. 즉, 등분포하중경우가 집중하중경우보다 최초의 경사전단균열의 발생위치가 지점쪽에 더 가까웠다.

4.2 전단강도

실험중 각 보에서 전단균열이 최초로 관찰됐을 때의 하중을 전단균열하중 P_{cr} 이라 하고, 그 때의 최대전단력을 전단균열강도(shear cracking strength: V_{cr})라 하였다. 또한 파괴시의 하중을 극한전단하중 P_u 라 하고, 이에 상응하는 최대전단력을 극한전단강도(ultimate shear strength: V_u)라 하였다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이, 모든 보에서 L/d가 증가할수록 전단균열강도 V_{cr} 과 극한전단강도 V_u 는 감소함을 보였다. 또한 하중재하형태에 따라 살펴

Table 1 Properties of Specimens

		L/d	Series	L (cm)	Mix Ratio by weight				하중재하 형태	f'_c (kg/cm ²)	f_y (kg/cm ²)
					Cement	Sand	Gravel	w/c			
상사성 중 명 실 험	prototype	5.4	5.4P2	114	1	1.5	2.2	0.6	2점재하	247	3500
	Beam	9.4	9.4P2	198	1	1.5	2.2	0.6	2점재하	247	3500
	Model	5.4	5.4P2	38	1	3	-	0.6	2점재하	290	3789
	Beam	9.4	9.4P2	66	1	3	-	0.6	2점재하	290	3789
본 실 험	Model Beam	4	4U	28	1	3	-	0.6	4점재하	290	3789
			4P1	28	1	3	-	0.6	1점재하	290	3789
		6	6U	42	1	3	-	0.6	4점재하	290	3789
			6P1	42	1	3	-	0.6	1점재하	290	3789
		8	8U	56	1	3	-	0.6	8점재하	290	3789
			8P1	56	1	3	-	0.6	1점재하	290	3789
		10	10U	70	1	3	-	0.6	8점재하	290	3789
			10P1	70	1	3	-	0.6	1점재하	290	3789
		12	12U	84	1	3	-	0.6	8점재하	290	3789
			12P1	84	1	3	-	0.6	1점재하	290	3789

Table 2 Similitude of prototype beams and model beams

L/d	Model Beam					Prototype Beam			$V_{cr,pp}$
	f'_c (kg/cm ²)	전단균열강도		극한전단강도		f'_c (kg/cm ²)	전단균열강도		
		$V_{cr,m}$ (kg)	$V_{cr,pp}$ (kg)	$V_{u,m}$ (kg)	$V_{u,pp}$ (kg)		$V_{cr,p}$ (kg)	$V_{u,p}$ (kg)	(%)
5.4	290	650	5400	1150	9550	247	4850	6900	111
9.4	290	505	4195	555	4609	247	3850	4150	108

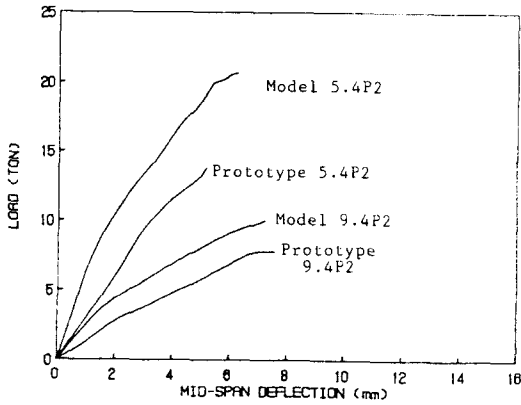


Fig. 2 Load-deflection Curves of Beams

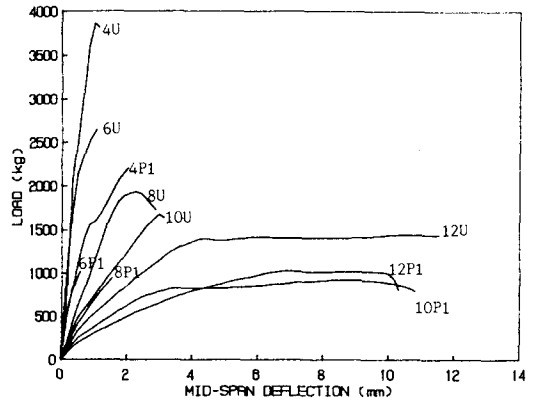


Fig. 4 Load-deflection Curves of Beams

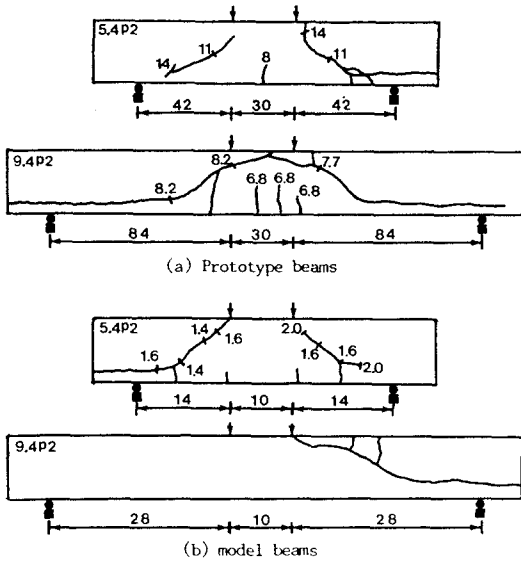


Fig. 3 Crack Configuration of Prototype Beams and Model Beams

보면, 등분포하중의 경우가 집중하중경우보다 V_{cr} 과 V_u 가 약 2배정도 큰 것을 알 수 있었다. 이것은 동일한 제원의 보에서 재하하중의 합력이 같으면 등분포하중의 경우가 집중하중경우보다 전단력과 휨모멘트가 작으므로 파괴에 상응하는 전단력과 휨모멘트의 조합에 도달하기 위해서는 등분포하중경우의 재하하중이 항상 더 커야하기 때문으로 판단된다.

전단압축파괴(shear-compression failure)에서 사인장파괴(diagonal tension failure)로 변화하는 전환점은, 집중하중경우로 부터 얻어진 기존의 연구에서는 $L/d=5-6$ (or $a/d=2.5-3$)에서 일어난다고 보고한다. Fig. 6과 Fig. 7에서 알 수 있듯이, 본 실험결과도 역시 집중하중경우에는 $L/d=6$ 에서 파괴형태의 변화가 일어나고 있으나, 등분포하중의 경우는 전단-압축파괴에서 사인장 파괴로 변화되는 위치의 L/d 가 9 이상으로 이동했음을 알 수 있다. 전단-압축파괴에서 사인장파괴로 변화하는 전환점

Table 3 Summary of Test Results

L/d	Series	P_{cr} (kg)	P_u (kg)	V_{cr} (kg)	$V_{cr,d}$ (kg)	V_u (kg)
4	4U	2300	3880	1150	575	1940
	4P1	1500	2200	750		1110
6	6U	2000	2640	1000	667	1320
	6P1	1000	1020	500		510
8	8U	1800	1930	900	675	965
	8P1	940	940	470		470
10	10U	1680	1680	840	672	840
	10P1	850	850	425		425
12	12U		1450			725
	12P1		1030			515

은 전단균열강도 V_{cr} 과 극한전단강도 V_u 가 같아지는 점이다. 즉, 전단균열이 최초로 발생하여서 파괴에 이르기까지의 추가하중(reserve strength: V_r)이 0이 되는 최초의 위치를 말한다. 그런데 경사 전단균열이 최초로 발생하여서 파괴에 상응하는 전단력과 휨모멘트의 조합에 이르기까지 동일한 하중의 증가는 집중하중경우가 등분포하중경우보다 더 큰 전단력과 휨모멘트의 증가를 가져온다. 따라서 등분포하중경우의 추가하중 V_r 은 동일한 철근콘크리트보에 집중하중이 재하했을 때의 추가하중보다 더 크므로, 하중형태의 변화에 따라 전단-압축파괴에서 사인장파괴로 변화되는 위치가 이동됐다고 판단된다.

현행 시방서의 전단보강이 없는 전단강도에 대한 식은 경사균열이 처음 부재에 나타날 때 유용한 강도가 소진된다고 가정하는 것이므로, 본 연구에서 전단균열강도 V_{cr} 을 의미한다. 따라서 전단균열강도를 L/d 의 변화에 따라 현행 시방서와 비교하면, Fig. 8과 같이 안전율이 너무 과다하다는 것을 알 수 있다. 그러나 등분포하중경우의 V_{cr} 은 최초의 경사전단균열이 발생했을 때의 최대전단력을 사용했으므로, 현실적인 또다른 방법으로, 지점으로부터 유효깊이 d 만큼 떨어진 곳의 전단균열강도

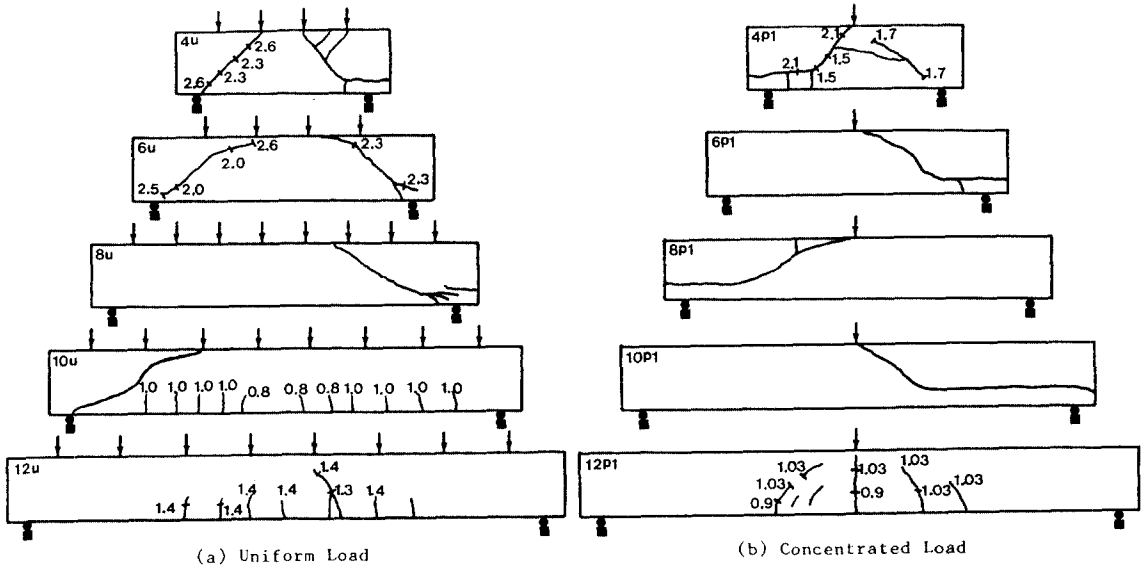


Fig. 5 Crack Configuration of Beams

$V_{cr,d}$ 를 구하여 시방서와 비교하여 보았다. 등분포하중경우의 지점으로 부터 d 만큼 떨어진 곳의 전단균열강도 $V_{cr,d}$ 도 역시 집중하중경우의 전단균열강도보다 더 컸다.

이상과 같이 전단균열강도 V_{cr} 에 대해서 살펴본 결과, 집중하중을 받는 철근콘크리트보에 대한 실험으로부터 얻어진 전단강도에 대한 식을 등분포하중경우에 적용시키면 과다한 안전율을 보이고 있다.

4.3 하중형태에 따른 전단지간의 변화

전단지간 a 는 하중점과 지점사이의 거리를 의미하는 것으로서 집중하중경우에만 적용되는 개념이므로 등분포하중이 재하될 경우에 전단지간 a 의 정확한 산정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 실험결과로부터 하중형태에 따른 전단지간의 변화를 살펴보았다.

전단압축파괴에서 사인장파괴로 변화하는 전환점, 즉 추가하중 V_r 이 0이 되는 위치는 Fig. 6에서 알 수 있듯이 집중하중경우에는 $L/d=6(a/d=3)$ 에서 일어났으며, 등분포하중경우는 $L/d=10$ 에서 발생하였다. 따라서 Fig. 6에서 등분포하중경우의 $L/d=10$ 에서의 전단강도값을 $L/d=6$ 의 위치로 이동시키면 경향이 비슷함을 알 수 있으며, 균열형태도 $10U(L/d=10)$ 와 $6P1(L/d=6 \text{ or } a/d=3)$ 이 유사함을 실험결과(Fig. 5)로부터 알 수 있다. 즉, 파괴거동과 균열형태에 대하여 살펴본 바에 의하면, 등분포하중이 재하된 경우의 전단지간 a 는 약 $L/3$ 을 사용해야 할 것으로 판단된다.

현재 시방서에서는 철근콘크리트보의 전단력을 지점으로 부터 유효깊이 d 만큼 떨어진 곳에서 구한 전단력을 사용하고 있다. 집중하중이 재하된 보는 전단지간에서의 전단력이 동일하지만 등분포하중이 재하된 경우는 전단력이 변화한다. 따라서 본 연구에서는 동일한 L/d 에서 집중하중이 재하됐을 때의 전단력과 동일한 크기의 전단력이 등분포하중경우에는 지점으로 부터 어떤 위치에 있는가를 실험결과를 이용하여 Fig. 9와 같은 방법으로 구하였

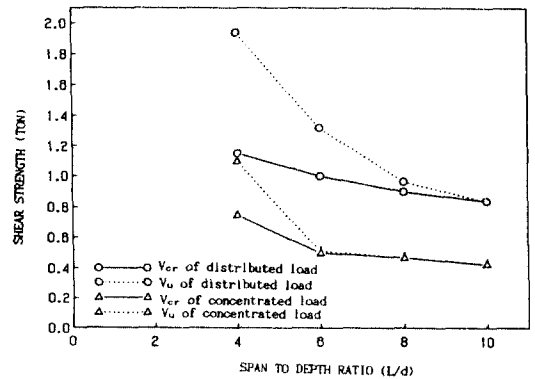


Fig. 6 Effect of L/d on Shear Strength

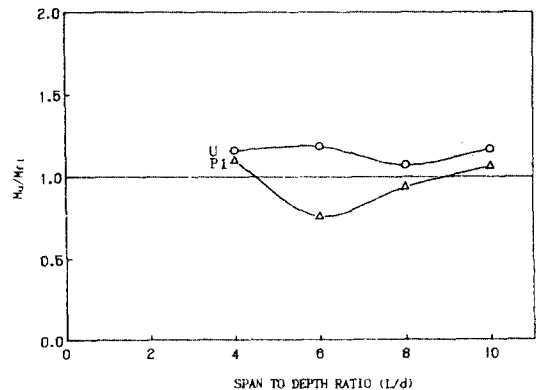


Fig. 7 Variation of Load-carrying Capacities against Span to Depth Ratio

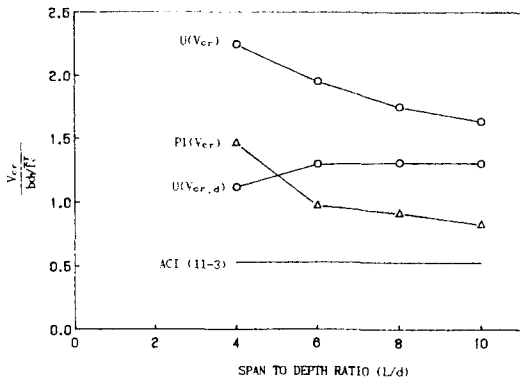
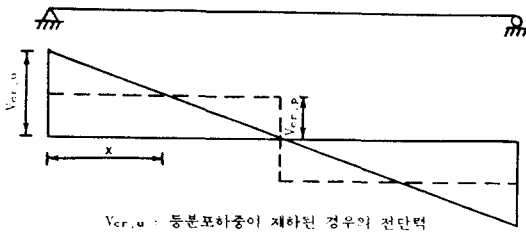


Fig. 8 Shear Cracking Strength against L/d



$V_{cr,u}$: 등분포하중이 제한된 경우의 전단력

$V_{cr,p}$: 집중하중이 제한된 경우의 전단력

Fig. 9 Shear Force Diagram

Table 4 Position of Equivalent V_{cr}

L/d	Series	P_{cr} (kg)	V_{cr} (kg)	Position of Equivalent V_{cr} : X	(cm)
4	4U	2300	1150	4.87	0.17 L
	4P1	1500	750		
6	6U	2000	1000	10.50	0.25 L
	6P1	1000	500		
8	8U	1800	900	13.38	0.24 L
	8P1	940	470		
10	10U	1680	840	17.29	0.25 L
	10P1	850	425		

다. 이와 같이 구한 위치를 등가전단력위치 (position of equivalent V_{cr} : X)라 하였다. Table 4에서 알 수 있듯이, 등가전단력위치 X는 L/d가 4인 경우를 제외하고는 지점으로 부터 약 L/4인 위치에서의 등분포하중경우의 전단력이 집중하중경우의 전단력과 일치하고 있다. 즉, 전단균열강도에 대해서 비교한 결과에 의하면 등분포하중이 재하된 보의 전단지간 a는 L/4이라고 할 수 있다.

이상과 같이 실험결과로부터 파괴거동, 균열형태 및 전단균열강도에 대해서 살펴본 바에 의하면, 등분포하중이 재하된 보의 전단지간 a는 전단파괴 거동을 할 경우 (1/4~1/3)L을 사용해야 할 것으로

판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 전단보강이 없는 철근콘크리트보에서 하중재하형태의 변화가 전단강도에 미치는 영향을 연구하고자 하였으며, 이들의 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 최초의 경사전단균열의 발생위치는 하중형태에 따라 차이를 보였다. 즉, 등분포하중경우가 집중하중경우보다 경사전단균열의 발생위치가 지점쪽에 더 가까웠다.
- 2) 전단-압축파괴(shear-compression failure)에서 사인장파괴(diagonal tension failure)로 변화되는 전환점이 집중하중경우로 부터 얻어진 기존의 연구에서는 $L/d=5-6$ (or $a/d=2.5-3$)에서 일어난다고 보고되었는데, 등분포하중의 경우는 이 전환점이 L/d가 9 이상인 곳으로 이동함을 알 수 있었다.
- 3) 등분포하중의 경우가 집중하중의 경우보다 전단균열강도 V_{cr} 과 극한전단강도 V_u 가 약 2배정도 큰 것을 알 수 있었다.
- 4) 등분포하중이 재하된 보의 전단지간 a는 전단 파괴거동을 할 경우 (1/4~1/3)L을 사용해야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 1) Kim, Woo, "Shear-Critical Cracks in Reinforced Concrete Beams Without Web Reinforcement: Their Initiation and Propagation," Ph. D. Thesis Dept. of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, N.Y., Aug. 1986.
- 2) 고광일, 김 우, "고강도 철근콘크리트보의 전단강도에 관한 연구," 대한토목학회 논문집, 제9권제4호, 1989년12월, pp.63-71.
- 3) 岩崎英徳, 丸山久一, 吉田 武, 石橋忠良, "다점 하중을 받는 R/C 보의 전단성상에 관한 기초적 연구," 일본콘크리트공학 년차강연회 논문집, 1985, pp.513-516.
- 4) Sabis, G.M., Harris, H.G., White, R.N., and Mirza, M.S., "Structural Modeling and Experimental Techniques," Prentice-Hall Inc., Englewood Cliff, N.Y., 1983.