

高强度 鐵筋콘크리트 춤이 큰 보의 전단스팬비 效果

The Effects of Shear Span-to-Effective Depth Ratio of Reinforced High Strength Concrete Deep Beam



오정근*

Oh, Jung-Keun



성열영**

Sung Yul-Young



안종문***

Ahn Jong-Moon



이광수****

Lee Kwang-Soo



신성우*****

Shin Sung-Woo

ABSTRACT

In this study, eight reinforced high strength concrete deep beams were tested to investigate the shear failure mechanism and shear strength of the specimen. Test variables are concrete compressive strength, shear span to effective depth (a/d) ratio. Test results showed that almost deep beams were failed by brittle shear failure according to expansion and development of the diagonal cracks arranged load to support point. Diagonal shear strength and ultimate shear strength were increased roughly as the a/d ratio decreased. ACI/CIRIA code equations showed good agreement with the test result in ultimate shear stress.

Keywords : R/C deep beam, shear span to depth ratio, diagonal shear stress, ultimate shear stress

* 정회원, 한양대 건축공학과 박사과정 수료

** 정회원, LG건설 건축구조부

*** 정회원, 한양대 건축공학과 박사과정

**** 정회원, 여주전문대 건축공학과 조교수

***** 정회원, 한양대 건축공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 12월 30일까지 학회로 보내주
시면 1998년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

전단스팬비가 2.5이하인 철근콘크리트 춤이큰보(이하 R/C춤이큰보)는 전단역학적 거동 및 강도성의 차이에 의해 전단스팬비가 2.5이상인 일반 철근콘크리트보와 구분될 수 있다. 즉 일반 철근콘크리트보의 전단역학적 거동특성은 휨을 동반한 전단거동을 나타냄으로서 부재의 전단파괴를 미리 예측할 수 있지만, R/C춤이큰보의 경우에는 주로 전단거동에 의해 지배를 받기 때문에 미소한 처짐에도 불구하고 급작스런 전단파괴양상을 나타낸다. 따라서 R/C춤이큰보의 전단역학적 거동을 파악하는 것은 R/C춤이큰보의 거동특성 및 강도특성을 파악하는데 무엇보다도 중요하다.

근래들어 사회환경의 변화와 더불어 새로운 구조시스템이 개발되고 있으며, 다기능 구조시스템은 이러한 사회환경의 변화를 대변하는 구조시스템의 하나라 할 수 있다. 즉 수평 및 수직방향에 따라 구조물의 기능이 변화하면서 이를 충족시키기 위한 구조부재 및 시스템이 다양하게 변화되고 있으며, 근래에 자주 설계, 시공되는 근린종합시설 및 주상복합구조는 그 대표적인 예라 할 수 있다.

이러한 다기능구조에서 사용이 불가피한 R/C춤이큰보는, 앞에서 기술한 바와 같이 부재의 파괴거동이 주로 전단거동에 의해 지배된다는 것이 일반 철근콘크리트보와 크게 다른점이라 할 수 있다.

이러한 거동특성을 내포하고 있는 R/C춤이큰보에 고강도를 적용할 경우에는 부재 전단강도의 증진에 의한 층고조절 등 많은 장점을 내포하고 있음에도 불구하고 국내에서의 고강도 R/C춤이큰보의 전단거동특성 및 강도특성에 대한 기존연구는 매우 미흡한 실

정이며, 이에 대한 연구가 절실한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고강도 R/C 춤이큰보의 전단스팬비에 따른 전단역학적 거동특성과, 콘크리트 압축강도의 변화에 따른 사균열전단강도 및 최대전단강도의 변화를 파악하고, 현재 국내에서 채택하여 사용하고 있는 ACI규준식과 유럽의 CIRIA지침식에 의한 계산값과 비교분석을 통하여 고강도 R/C춤이큰보의 전단역학적 거동특성 및 강도특성을 파악하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험체 개요

실험체는 고강도 R/C춤이큰보의 전단스팬비에 따른 전단역학적 거동 및 전단강도특성의 변화를 파악하기 위해 0.5, 0.85, 1.25, 2.0으로 하였으며, 콘크리트 압축강도효과를 파악하기 위해 콘크리트 압축강도를 500kg/cm²과 750kg/cm²으로 하였다. 수직전단보강근비는 최소철근비의 1배로 하였고, 수평전단보강근비는 최소철근비의 2배로 하였으며, 주근비는 0.0129로 동일하다. 실험체별 상세는 Table 1과 같다.

Fig1의 대표적인 실험체에서 알 수 있듯이 모든 실험체는 폭12cm, 유효춤 50cm, 유효스팬길이는 200cm로 하였으며, 수평전단보강근 및 수직전단보강근의 예상균열위치에 스트레인 게이지를 부착하였다.

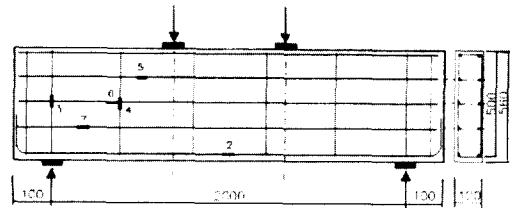


Fig 1 Details of Specimen($f_c = 500, 750\text{kg/cm}^2$)

2.2 실험재료

실험체제작에 사용된 시멘트는 국내용 H사 제품의 1종 포틀랜드시멘트이며, 세골재는 인천산 세적사, 조골재는 19mm의 화강암 쇄석을 사용하였다. 고유동화세로는 나프틸린계 PHOENIX-R1을 사용하였으며, 그 배합비는 Table 2에 나타나 있으며, 압축강도 실험결과와 Table 3에 나타나 있다.

Table 1 Properties of Specimen($f_c = 500, 750\text{kg/cm}^2$)

시험체명	전 단 스팬비 a/d	콘크리트 압축강도 (kg/cm ²)	수직전단 보강근비 ρ_v	수평전단 보강근비 ρ_h	폭 (cm)	유효춤 (cm)	인장 철근비 ρ_s	압축 철근비 ρ_c
1. HB1-A3	0.50	500	0.0018	0.0018	12	50	0.0129	0.0024
2. HB2-A3	0.85							
3. HB3-A3	1.25							
4. HB5-A3	2.00							
5. UB1-A3	0.50	750	0.0018	0.0018	12	50	0.0129	0.0024
6. UB2-A3	0.85							
7. UB3-A3	1.25							
8. UB5-A3	2.0							

Table 2 Mix Proportion of Concrete

배합강도 (kg/cm ²)	S/A (%)	단위량 (kg/m ³)						
		W	C	F/A	S/F	S	G	H/A
500	46	180	504	56		735	867	10.1
750	43	162	511	23	46	700	932	15.1

Table 3 Mechanical Properties of Concrete

압축강도 (kg/cm ²)	항복강도 (kg/cm ²)	인장도 $\epsilon_s (\times 10^{-4})$	탄성계수 (kg/cm ²)	포아송비
791	2891			
417	517	38	1812	0.26
489	751	46	1875	0.21

2.3 가력장치 및 재하시험

실험체는 200ton용량의 UTM에 설치하여 전단스팬비에 따라 가력점을 변화시켜 가력하였으며, 실험체 중앙하부의 처짐을 측정하고, 단부의 회전각을 측정하기 위해 단부상단에 전기 다이얼게이지를 설치하였다. 실험체설치를 완료하고, 게이지 이상유무를 확인후 200m/sec의 하중가력속도로 가력하였으며, 하중가력 단계별 균열을 실험체에 표기하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 일반적 파괴상황

3.1.1 처짐특성

전단스팬비가 증가함에 따라 부재 스펠 중앙하부의 처짐은 증가하는 것으로 나타났다. Table 4에서 알 수 있듯이 고강도 R/C축이콘보에서는 사균열 하중/처짐 기울기는 다소 불규칙한 값을 나타내고 있지만,

전단스팬비가 증가할수록 감소추세를 나타내고 있으며, 콘크리트압축강도가 750kg/cm²인 경우에는 500kg/cm²인 경우보다 다소 높은 기울기값을 나타내고 있다. 즉 강성이 다소 높아짐을 알 수 있다.

Fig 2에서는 콘크리트 압축강도가 500kg/cm²인 경우의 전단스팬비에 따른 하중처짐곡선을 나타내고 있다. 전단스팬비가 0.5, 0.85, 1.25인 경우에는 최대하중이후 하중곡선이 급하게 감소함을 나타내고 있으며, 2.0인 경우에는 다소 연성적거동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 콘크리트 압축강도가 750kg/cm²인 경우에도 처짐곡선의 양상은 비슷한 거동특성을 나타내었다.

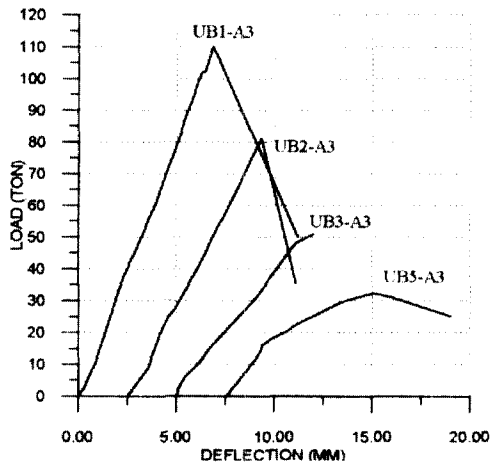


Fig. 3 Load-Deflection Curve ($f_c = 750\text{kg/cm}^2$)

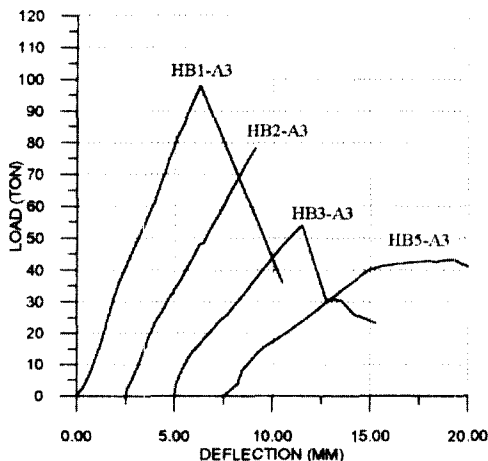


Fig. 2 Load-Deflection Curve ($f_c = 500\text{kg/cm}^2$)

Table 4 Load-Deflection Relationships of Specimen

시험체명	전 단 스펠비 a/d	하 중 (ton)		중양부 처짐 (mm)		하중/처짐 기울기	
		P_{cr}	P_{max}	δ_{cr}	δ_u	P_{cr} / δ_{cr}	P_{max} / δ_u
1. HB1-A3	0.50	52.50	98.80	3.26	6.29	16.10	15.60
2. HB2-A3	0.85	47.20	78.10	3.78	6.76	12.49	11.67
3. HB3-A3	1.25	22.90	55.20	2.17	3.49	10.55	8.51
4. HB5-A3	2.00	16.10	32.50	0.86	5.86	19.07	5.55
5. UB1-A3	0.50	59.90	110.11	3.88	4.33	15.41	25.41
6. UB2-A3	0.85	31.50	85.20	3.73	7.80	8.45	10.92
7. UB3-A3	1.25	21.74	54.06	2.57	10.81	8.38	5.00
8. UB5-A3	2.0	19.50	43.70	3.21	11.76	6.07	3.68

3.1.2 파괴특성

최종파괴시 모든 부재는 tied arch거동을 나타내었다. 또 탄성변형이후 소성변형을 전혀 나타내지 않고 최대하중이후 급작스런 파괴양상을 나타내었으며 전단스팬비가 낮을수록 이러한 양상은 뚜렷하게 나

타났다. 전단스팬비가 0.5인 경우에는 콘크리트 압축 강도에 관계없이 전단할열과괴 양상을 나타내었으며, 이는 공시체 압축강도 시험시 발생하는 수직균열과 유사하게, 하중작용점과 지지점을 연결하는 압축 스트러트와 동일한 방향의 수직균열이 점차적으로 확대되면서 최종파괴되는 양상을 나타내었다. 반면에 전단스팬비가 2.0인 경우에는 부재의 전단스팬 중앙에 초기 사균열이 발생한 후 균열이 점차적으로 확대되어 사인장균열과괴 양상을 나타내었다. 최종파괴시 수직전단보강근은 파단되었으나 수평전단보강근은 장부작용에 의해 균열면에서 휨항복하였으나 파단되지는 않았다. 전단스팬비가 0.85, 1.25인 경우에는 전단스팬비가 0.5인 경우와 유사한 양상을 나타내었으며, 이 경우에는 하중작용점과 하중지지점의 국부적인 파괴를 동반하는 전단인장 및 전단압축과괴 양상을 나타내었다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 춤이큰보에서는 사균열에 하중지지점에서 하중작용점으로 발전하였으며, 하중지지점 내단과 하중작용점 외단을 연결하는 사균열에 의해 전단파괴되었으며, 최종파괴시에는 전단스팬비에 관계없이 하중작용점 및 하중지지점에서 국부파괴를 동반하였다.

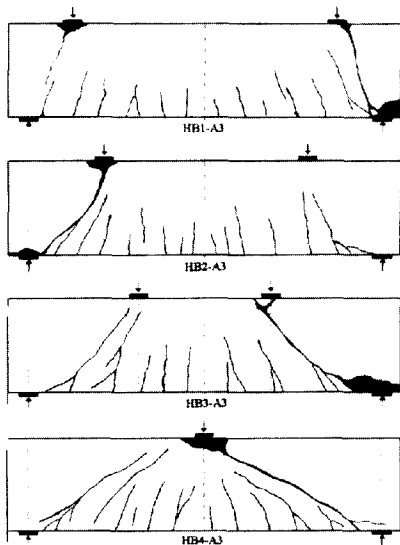


Fig. 4 Crack Patterns of Curve

3.2 전단강도 특성

R/C춤이큰보의 전단강도에 영향을 미치는 주요영

향인자로는 전단스팬비(a/d), 콘크리트 압축강도(f_c'), 수직전단보강근비(ρ_v) 및 수평전단보강근비(ρ_h) 등으로 분류될 수 있다. 이러한 영향인자 가운데 전단스팬비는 R/C춤이큰보의 전단강도에 영향을 미치는 가장 중요한 인자이다. 따라서 각국에서 사용되는 R/C춤이큰보에 대한 전단강도식은 전단강도에 많은 영향을 미치는 전단스팬비의 영향을 기본적으로 고려하고 있다.

3.2.1 전단강도식

R/C춤이큰보의 전단강도를 예측하고 평가하기 위한 각국의 표준식 및 지침식은 크게 미국 및 한국의 ACI 표준식, 유럽의 CIRIA 지침식으로 대별될 수 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

[ACI 표준식]

$$V_u \leq \phi(V_c + V_s) \quad (1)$$

$$V_c = [3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u \cdot d}] [0.5 \sqrt{f_c'} + 176 \rho_v \frac{V_u \cdot d}{M_u}] b \cdot d \quad (\text{kg}) \quad (2)$$

$$V_s = \left[\frac{A_v}{s_1} \left(\frac{1 + \ln l_n/d}{12} \right) + \frac{A_{vh}}{s_2} \left(\frac{11 - l_n/d}{12} \right) \right] f_y \cdot d \quad (\text{kg}) \quad (3)$$

ϕ = 전단강도 저감계수

M_u, V_u = 위험단면에서의 모멘트 및 전단력

f_c' = 콘크리트 압축강도

ρ_v = 주철근비 (= A_v/bd)

A_v = 수직전단보강근 단면적

A_{vh} = 수평전단보강근 단면적

l_n = 부재의 순스팬길이

s_1, s_2 = 수직 및 수평전단보강근 간격

[CIRIA지침식]

$$V_u = C_1 \left[1 - 0.35 \frac{a}{h} \right] \sqrt{f_{cw}} \cdot b \cdot h + C_2 \sum_{i=1}^n A_i \frac{V_i}{h} \sin^2 \theta_i \quad (N) \quad (4)$$

C_1 = 일반콘크리트 0.56, 경량콘크리트 0.4

a = 순 전단스팬 길이

b, h = 보단면의 폭과 깊이

f_{cw} = 정방형 공시체의 압축강도

C_2 = 아형철근 : 300 N/mm²

원형철근 : 130 N/mm²

A = 가정한 전단균열을 가로지르는 철근의 단면적

y_s = 철근과 균열이 만나는 부분까지의 보의 깊이
 θ = 철근과 균열이 이루는 각도

Table 5 Ultimate Shear Stress of Specimen

실험제명	TEST		V_u / V_c	ACI		CIRIA	
	사 균 열 전 응 V_u	최 대 전 응 V_n		최 대 전 응 V_u	최 대 전 응 V_n		
1. HB1-A3	43.80	83.30	0.53	60.09	75.89		
2. HB2-A3	39.33	66.67	0.59	51.03	62.73		
3. HB3-A3	19.08	47.00	0.41	39.37	49.46		
4. HB5-A3	13.67	28.09	0.49	23.96	30.23		
5. UB1-A5	49.92	93.28	0.54	75.80	84.61		
6. UB2-A5	26.25	70.17	0.37	56.73	70.32		
7. UB3-A1	20.70	57.62	0.31	43.90	53.77		
8. UB5-A3	16.25	36.08	0.45	26.29	31.15		

본 실험결과와 ACI규준식 및 CIRIA시침식에 의한 의한 사균열전단응력 및 최대전단응력이 Table 5에 나타나 있다. 본 실험결과에 의하면 전단스팬비가 낮아질수록 사균열전단응력은 증가하는 것으로 나타났으며, 그 값은 다소 불규칙한 양상을 나타내었다. 또 최대전단응력값은 전단스팬비가 낮아질수록 높은 증가율을 나타내었으며 사균열전단강도값에 비해 다소 명확한 증가율을 나타내었다.

3.2.2 사균열전단응력

Table 5에서와 같이 본 실험결과에 의하면, 사균열전단응력은 다소 불규칙한 값을 나타내고 있으며,

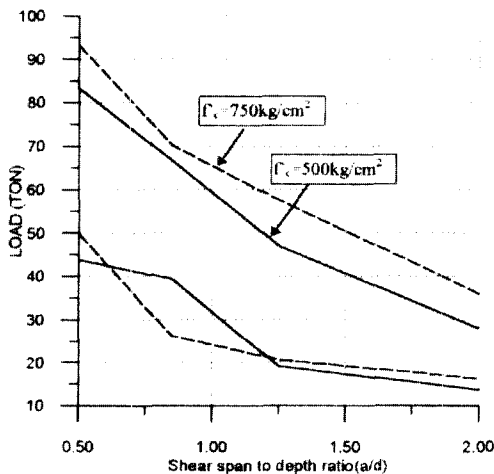


Fig. 5 Effect of a/d on Shear Stress

콘크리트 강도효과, 즉 V_u/V_c 값은 콘크리트 압축강도가 증가할수록 다소 낮아짐을 알 수 있다. 이는 콘크리트 압축강도가 증가할수록, 사균열발생후의 부재의 전단강도증진효과, 즉 부재의 보유강도 (reserve strength)가 다소 증가함을 나타내고 있다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 부재의 강도효과는 전단스팬비에 관계없이 유사한 값을 나타내고 있다.

3.2.3 최대전단응력

ACI규준식에 의한 최대전단응력은 실험결과보다 다소 높게 나타나고 있지만 적절한 안전율을 확보하고 있음을 나타내고 있으며, 전단스팬비에 따른 최대전단응력의 변화양상을 볼때, 비교적 정확하게 일치함을 알 수 있다. 또 콘크리트 압축강도의 차이에 따

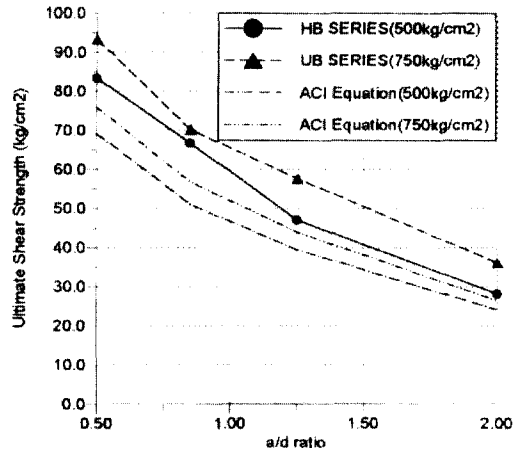


Fig. 6 Comparison of Test Results and ACI equation

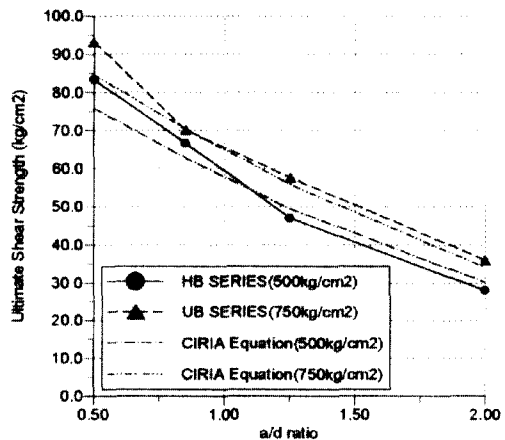


Fig. 7 Comparison of Test Results and CIRIA equation

른 최대전단응력값의 변화도 다소 일치함을 알 수 있다.

CIRIA규준식은 고강도R/C축이큰보의 최대전단응력을 비교적 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다. CIRIA식의 경우 전단스팬비가 감소함에 따라 사균열전단응력이 일정하게 증가하여 본 실험결과와 다소 차이를 나타내고 있지만, 최대전단응력은 비교적 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있다.

CIRIA지침식은 실제설계에서는 인 경우에만 적용하도록 되어있지만, 본연구에서는 본실험결과와 비교분석을 위해 까지 적용하였다. 또 CIRIA에서는 실제설계시 계수값에 안전율을 포함하고 있지만, 본연구에서는 안전율을 고려하지 않은 계수값을 적용하였다.

3.2.4 각국 규준식의 비교분석

실험결과와 ACI규준식, CIRIA지침식에 근거하여 전단스팬비에 따른 최대전단응력의 변화가 Fig 8 및 Fig 9에 나타나 있다. Fig 8은 콘크리트 압축강도가 500kg/cm²인 경우로서, ACI규준식은 전단스팬비에 따른 최대전단응력의 변화를 적절하게 고려함과 동시에 안전율을 확보하고 있음을 알 수 있다. CIRIA식에 의한 최대전단응력은 ACI규준식에 의한 값보다 다소 높게 나타나고 있으며, 전단스팬비가 감소함에 따라 실험결과값보다 다소 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또 CIRIA식의 경우 수직전단보강근이 전단스팬내에 없을 경우, 즉 본실험에서 전단스팬비가 0.5인 경우에는 최대전단응력값이 다소 낮

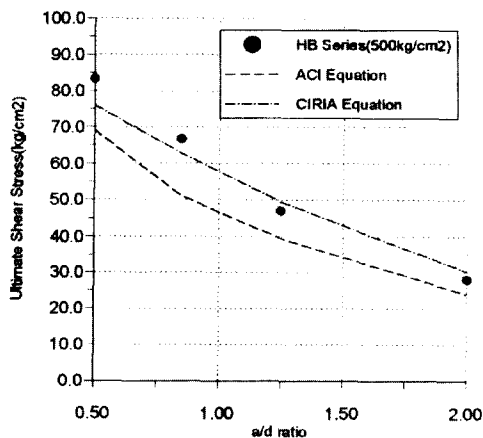


Fig 8 Comparison of Test Results and Code (f'c = 500kg/cm²)

게 나타남을 알 수 있으며, ACI규준식에 의한 최대전단응력은 전단스팬내의 수직전단보강근의 유무에 관계없이 수평 및 수직전단보강근의 간격에 의해 최대전단응력을 예측하므로, 전단스팬비가 0.5인 경우에는 ACI규준식과 CIRIA지침식에 의한 값이 다소 낮은 차이를 나타내고 있다.

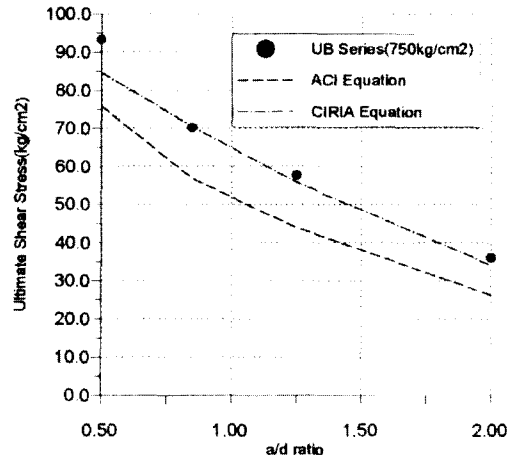


Fig. 9 Comparison of Test Results and Code (f'c = 750kg/cm²)

Fig 9은 콘크리트 압축강도가 750kg/cm²인 경우의 ACI규준식과 CIRIA지침식에 의한 최대전단응력을 나타내고 있다. 콘크리트 압축강도가 500kg/cm²인 경우와 마찬가지로 CIRIA지침식에 의한 값이 다소 높게 나타남을 알 수 있다. ACI규준식에 의한 최대전단응력의 변화는 실험결과보다 다소 낮게 나타나고 있지만, 전단스팬비에 따른 변화양상은 정확하게 일치하고 있으며, 적절한 안전율을 확보하고 있음을 확인할 수 있다. CIRIA식 또한 ACI규준식과 마찬가지로 실험결과와 비교적 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 전단스팬비가 2.5이하이고, 콘크리트 압축강도가 500kg/cm², 750kg/cm²인 고강도 R/C축이큰보의 전단스팬비에 따른 사균열전단응력 및 최대전단응력값의 변화를 알아보기 위한 실험을 실시하였으며, 각국의 규준식과 비교분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고강도 R/C 춤이큰보는 하중작용점 외단과 하중 지지점 내단을 연결하는 사균열의 발전에 의해 전단 파괴되었으며, 최종파괴시 사균열의 확대와 함께 하중작용점 및 하중지지점의 국부파괴를 동반하는 전단압축파괴양상을 나타내었고, 이러한 파괴양상은 전단스팬비가 감소할수록 뚜렷하게 나타났다.

2. 고강도 R/C 춤이큰보의 사균열전단응력값은 전단스팬비가 감소함에 따라 높은 증가율을 나타내고 있으나, 전단스팬비에 따른 사균열전단응력값은 다소 편차를 나타내고 있다.

3. 고강도 R/C 춤이큰보의 최대전단응력은 전단스팬비가 감소함에 따라 높은 증가율을 나타내고 있으며, 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 다소 높아짐을 알 수 있다.

4. ACI 기준식은 고강도 R/C 춤이큰보의 최대전단응력을 다소 과소평가하고 있다. 전단스팬비에 따른 사균열전단응력 및 최대전단응력의 변화양상은 비교적 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있다.

5. CIRIA 지침식에 의한 최대전단응력은 실험결과와 비교적 정확하게 일치하고 있음을 나타내고 있다.

참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-95)", ACI, Detroit, 1995.
 2. 신성우, 이광수, 문정일, 오정근 "고강도 철근콘크리트보의 전단역학적 거동", 대한건축학회지, 제8권2호, 1992. 4

3. Kong, F. K. et al, "High Strength Concrete Deep Beam with Effective Span and Shear Span Variations", ACI Structural Journal, V.92, No.4, July/August 1995, pp395-405.
 4. ACI Committee 363, "State-of-the-Art Report on High Strength Concrete", ACI Journal, Proceedings V.81, July/August 1984, pp.364-411.
 5. De Paiva, H. A. R., and Siess, Chester P., "Strength and Behavior of Deep Beams in Shear," Proceedings, ASCE, V.91, ST5, Oct. 1965, pp. 19-41.
 6. Kong, F. K., Robins, P. J., Cole, David F., "Web Reinforcement Effects on Deep Beams," ACI Journal, Proceedings V.67, No.12, Dec. 1970, pp.1010-1017.
 7. Kumar, Prabhat, "Collapse Load of Deep Reinforced Concrete Beams," Magazine of Concrete Research(London), V.28, No.94, Mar. 1976, PP.30-36.
 8. Mau, S. T., and Hsu, Thomas T. C., "Shear Strength Prediction for Deep Beams with Web Reinforcement," ACI Structural Journal, V.84, No.6, Nov.-Dec. 1987, pp513-523.
 9. Rogowsky, D. M., and Macgregor, J. G., "Design of Reinforced Concrete Deep Beams," Concrete International : Design & Construction, V.8, No.8, Aug. 1986, pp.49-58.
 10. Smith, K. N., and Vantsiotis, A. S., "Shear Strength of Deep Beams," ACI Journal , Proceedings V.79, No.3, May-June 1982, pp.201-213.

요 약

콘크리트 압축강도 및 전단스팬비의 변화에 의한 고강도 철근콘크리트 춤이큰보의 전단거동 및 내력특성을 파악하기 위한 실험적연구를 하였다. 춤이큰보는 하중작용점과 하중지지점을 연결하는 사균열의 확대에 의해 취성전단파괴양상을 나타내었으며, 하중작용점 및 하중지지점의 콘크리트 압괴를 동반하는 전단압축 및 전단인장파괴 형태로 최종파괴되었다. 전단스팬비가 감소함에 따라 사균열전단응력 및 최대전단응력은 크게 증가하였으며, ACI 및 CIRIA 기준식은 부재의 최대전단응력을 비교적 정확하게 예측하고 있음을 파악하였다.

(접수일자 : 1997. 4. 9)