

횡방향보강근을 갖는 철근콘크리트보의 비탄성 회전능력에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Inelastic Rotation Capacity of Reinforced Concrete Beams with Lateral Reinforcement

연구원* 이주나* 강민철** 윤정민** 박찬수**
Yeun, Kyu Won Lee, Ju Na Kang, Min Cheol Yoon, Jong Min Park, Chan Soo

ABSTRACT

Reinforced concrete beams show increased ductile behaviour when the compressive concrete is confined with transverse steel. In the inelastic range, the most variations of ductile behaviour are defined the equivalent length of the plastic hinge and the plastic hinge rotation. In an investigation to study the influence of such confinement, sixteen reinforced concrete beams were tested in flexure and the deflections noted at all stages of loading. For all the beams tested, the plastic hinge rotation have been computed and the effect of confinement on the same examined.

The conclusions are summarized as follows:

The equivalent lengths of the plastic hinge are ranged within the effective depth comparatively.

The ability of the plastic hinge rotation of the reinforced concrete beams confined with transverse steel are enlarged when transverse reinforcement content are increased, but the spaces are more important as the shear force are largely increased.

1. 서론

철근콘크리트의 취성적 성질을 개선하는 한 방법으로 횡방향보강근의 사용이 일반적이다. 이러한 횡방향보강근을 폐쇄형으로 배근하면, 어느 정도 연성을 확보하여 부재의 최대내력 이후에도 파괴되지 않고 회전함으로서, 철근콘크리트부재의 비탄성거동을 유도 할 수 있다.

철근콘크리트의 비탄성거동에 대한 연구는 소성인장강도와 소성회전능력이 주요변수로 나타나고 있다. 비탄성거동에 대한 연구동향으로 1950년대 이후로 Baker¹, Corley², Mattock³, Sawyer⁴, Park⁵ 등 많은 연구자에 의해서 논의되어 실험의 결과에 따라 여러 식으로 제안되고 있다. 그러나 실험에 의해 얻어진 식의 분석결과는 실험조건 및 환경의 차이 등에 의해서 다르게 나타나고 있으며, 좀더 많은 실험결과가 필요하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 실험을 통하여 횡방향보강근의 간격, 단면적, 체적비

* 경회원, 충북대학교 건축공학과 박사과정수료

** 경회원, 충북대학교 건축공학과 석사과정

*** 경회원, 충북대학교 건축공학과 교 수

등을 변수로 부재의 소성현저길이 및 비탄성회전량을 구하여 철근콘크리트 구조물의 해석에 기초적 자료로 제시하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험계획

2.1. 시험체

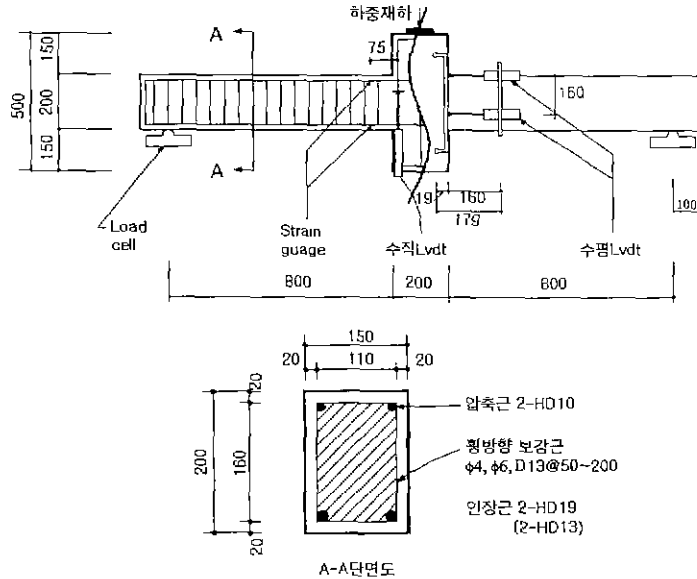


그림 1 실험체의 치수 및 측정기구(단위 : mm)

실험체는 그림 1 과 같이 부재길이는 2.0 m이며, 단면은 폭 15cm, 높이 20cm이고, 콘크리트 피복은 2cm 로 16개의 부재를 제작하였다. 압축철근량(2-HD10) 및 콘크리트강도(248.2 kgf/cm²)는 일정하고, 횡방향보강근의 단면적, 간격, 인장철근량을 변화 시켰으며, 실험체의 변수 및 표기방법은 표 1에서 볼 수 있다.

2.2. 재료의 성질

실험에 사용된 재료는 골재최대치수25mm(쇄석), 슬럼프 18cm, 압축강도 240 kgf/cm²의 콘크리트를 부강의 K사로부터 2.5m³를 주문제작 하였다.

7일 및 28일 압축강도는 15개의 공시체(φ10×20)를 만들어 강도 실험을 하였으며, 그 평균값은 표 2에서와 같다.

철근은 주근으로 HD10, HD13, HD19를 사용하였고, 횡방향보강근으로는 φ4, φ6, HD10의 철근을 사용했으며, 항복강도는 실험결과를 표 2에서 볼 수 있다.

표 1 실험의 연수(단위 : kgf. cm)

실험체 종류	콘크리트 강도(f _{ck})	철근강도(f _y)		횡방향보강근 간격	구속부 체적비	
		주근	횡방향 보강근			
HD19- 4- 5	248.2 (28일 압축 강도)	4348 (압축근)	5555	5	0.0077	
HD19- 4-10				10	0.0039	
HD19- 4-15				15	0.0026	
HD19- 6- 5				5830	5	0.0173
HD19- 6-10					10	0.0087
HD19- 6-15		15	0.0058			
HD19-10- 5		4348	5		0.0436	
HD19-10-10			10		0.0218	
HD19-10-15			15	0.0145		
HD13- 6- 5			4363 (인장근)	5	0.0173	
HD13- 6-10				10	0.0087	
HD13- 6-15		15		0.0058		
HD13-10- 5		4348		5	0.0436	
HD13-10-10				10	0.0218	
HD13-10-15			15	0.0145		
HD13-10-20	20		0.0109			

표기방법

HD19 - 6 - 5

- 횡방향보강근의 간격
- 횡방향보강근의 직경
- 주인장철근직경

표 2 철근과 콘크리트의 재료성질(kgf/cm²)

콘크리트			철 근					
평균	7일	28일	항복	φ4	φ6	HD10	HD13	HD19
강도	166.8	248.2	강도	5555	5830	4348	4735	4363

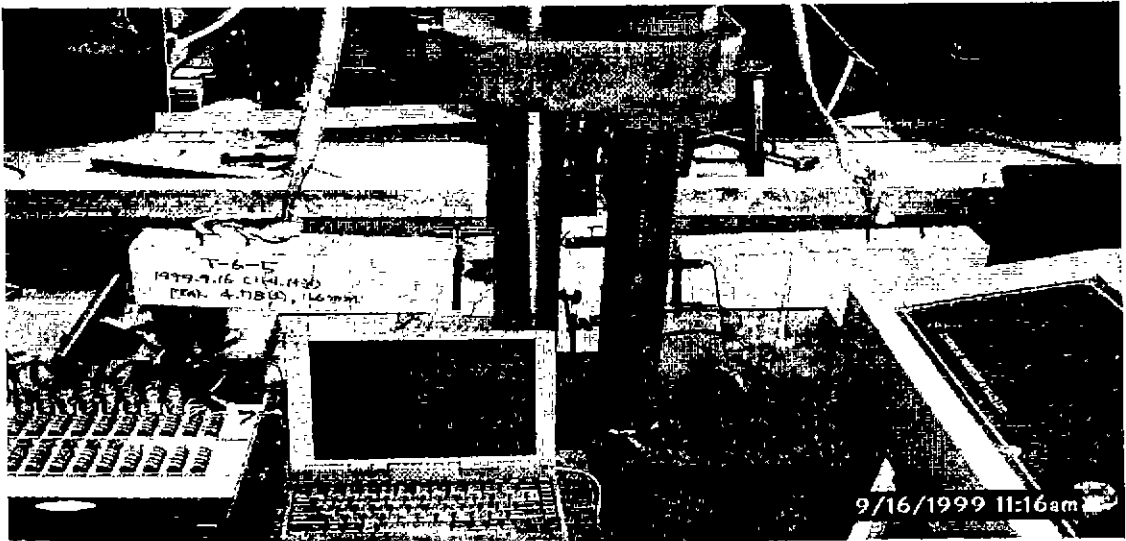


그림 2 실험전경

2.3. 기구 및 데이터 기록

하중은 U.T.M.(200 tonf 용량)을 이용하여 0에서 최대하중의 70 % 정도까지 떨어 졌을 때 또는 처짐이 약 6 cm 될 때까지 재하 하였다. 하중재하에 따른 기록은 중앙부에서 U.T.M.으로 하중을 가 려할 때, 양지지점에 로드셀(20 tonf 용량)을 설치하여 정적 데이터 기록장치(T.D.S.303)를 통해서 컴 퓨터로 받아 들였다. 양쪽 지지점에 로드셀을 설치하는 이유는 편심이 작용할 경우 하중 재하값이 양 지지단에서 다르게 나타날 것을 고려한 것이다.

콘크리트와 철근의 변형도 및 중립축의 위치를 파악하기 위해 변위계(LVDT)를 상하 좌우 4개(용 량 25mm)를 수평으로 설치하였으며, 수직으로는 2개(용량 100mm)의 변위계를 설치하였다. 또한, 좌 우측 압축 및 인장철근에 변형계이지(FLA-5-11-1L: Tokyo Sokku Kenkyujo)를 부착하였고, 하중이 재하 되는 동시에 실시간에 하중, 변위 및 변형도를 보면서 그림 2 와 같이 실험을 시행하였다.

2.4. 결과분석을 위한 기본가정

1) 모멘트

실험을 통해 얻어진 로드셀에서의 하중에 인장 및 압축철근에 부착한 변형계이지까지 거리를 곱하여 부재 모멘트를 구하였다.

2) 중립축의 위치

중립축의 위치는 부재의 상, 하단 철근에 위치한 변형계이지에서 출력되는 스트레인값을 이용하 여 비례관계를 통해 구하였다.

3) 곡률

압축철근의 변형도를 콘크리트 최외단면의 변형도로 비례관계를 이용하여 치환하고, 중립축과 의 관계를 이용하여 곡률을 구하였다.

4) 항복모멘트 및 항복곡률의 정의

인장철근의 변형도가 항복변형도일 때, 그때의 모멘트 및 곡률로 정의하였다.

5) 극한모멘트 및 극한곡률의 정의

극한상태의 정의는 모멘트를 기준으로 하는 경우와 압축변형도를 기준으로 하는 경우 등 연구 자에 따라서 많은 차이가 있으나, 본 연구에서는 기존 연구자들의 제안식 중에서 압축변형도를 근거로 한 A. H. Mattock³의 식을 사용하기로 한다.

$$\epsilon_u = 0.003 + 0.002 \frac{b}{z} + 0.2 \rho_s \quad \text{------(1)}$$

b:부재의 폭, z: 전단경간, ρ_s : 횡방향보강근의 구속부체적비

압축부 콘크리트 변형도가 상기 식-(1)에 도달하였을 때의 모멘트 및 곡률을 극한상태의 모멘트 및 곡률로 정의하였다.

6) 소성힌지길이(L_p)

소성힌지길이의 정의⁷는 다음식과 같이 하였다.

$$L_p = z \left(1 - \frac{M_y}{M_u} \right) \quad \text{------(2)}$$

L_p : 소성힌지길이, z: 전단경간, M_y : 항복모멘트, M_u : 극한모멘트

7) 비탄성회전량(θ_p)

비탄성회전량에 대한 정의는 다음과 같이 하였다.

$$\theta_p = \frac{(\phi_u - \phi_y)L_p}{2} \text{ -----(3)}$$

ϕ_y : 항복곡률 ϕ_u : 극한곡률

3. 결과분석

16개의 실험체에 대한 결과를 표 3에서 볼 수 있으며, 표에서 소성힌지길이(l_p)와 비탄성회전량(θ_p)을 구하기 위해, 항복모멘트 및 항복곡률은 상대적으로 횡방향보강근의 영향이 거의 없는 구간 값으로, 실험오차를 감안하여 평균치를 사용하였다.

3.1. 소성힌지길이 (l_p)

소성힌지길이에 대한 비교결과를 표 3의 비교란에서 볼 수 있으며, 실험결과 평균 12.06 cm(0.74d)로 타 연구자들에 비해 다소 크게 나타나고 있다.

기존의 연구자들의 실험식을 요약하면 다음과 같다.

① Corley²의 경우 단순보 실험에서 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$l_p = 0.5 \times d + 0.2\sqrt{d} \times (z/d) \text{ -----(4)}$$

(단, d : 부재유효깊이 z : 전단경간)

② Mattock³의 경우.

$$l_p = 0.5 \times d + 0.05 \times z \text{ -----(5)}$$

(단, d : 부재유효깊이 z : 전단경간)

③ Sawyer⁴의 경우

$$l_p = 0.25 \times d + 0.075 \times z \text{ -----(6)}$$

(단, d : 부재유효깊이 z : 전단경간)

3.2. 비탄성회전량(θ_p)

비탄성회전량은 주인장 길근량 및 횡방향보강근의 간격이 일정할 경우 횡방향보강근의 단면적의 크기에 비례하여 커짐을 볼 수 있다.(HD19-4-5, HD19-6-5, HD19-10-5)

횡방향보강근의 간격을 크게 하면 비탄성회전량(θ_p)은 줄어들지만 본 실험에서 간격이 15cm 이상일 경우, 상대적으로 전단 보강이 약해지므로, 전단력에 의한 추가변형으로 비탄성회전량이 크게 나타나게 하는 결과를 얻었지만, 이러한 비탄성회전량은 실험결과 급작스런 전단 파괴양상으로 나타나 실제 연성능력을 갖는 비탄성변형능력과는 많은 차이가 있다.

표 3 실험결과

부재 종류	항복 변형도	극한 변형도	구속부 체적비	항복 모멘트	항복 곡률	극한 모멘트	극한 곡률	소성힌지 길이	비탄성 회전량	비 고
	ϵ_y	ϵ_u	ρ_s	M_y	ϕ_y	M_u	ϕ_u	l_p	θ_p	
HD19-4-5	0.0021	0.0049	0.0077	2.71	0.00022	3.3	0.00042	13.6	0.0015	소성힌지길이 (l_p)비교 1) 본 실험결과 평균값 $l_p=12.06\text{cm}$ (0.74d) 2) Corley 식에서 $l_p=11.76\text{cm}$ (0.72d) 3) Mattock 식에서 $l_p=8.54\text{cm}$ (0.52d) 4) Sawyer 식에서 $l_p=9.53\text{cm}$ (0.58d)
HD19-4-10	0.0021	0.0041	0.0039	2.82	0.00019	-----	-----	-----	-----	
HD19-4-15	0.0021	0.0039	0.0026	2.67	0.00019	-----	-----	-----	-----	
HD19-6-5	0.0021	0.0068	0.0173	2.875	0.00020	3.183	0.00105	11.5	0.0049	
HD19-6-10	0.0021	0.0051	0.0087	2.563	0.00020	3.252	0.00041	12.8	0.0014	
HD19-6-15	0.0021	0.0045	0.0058	2.617	0.00020	3.183	0.00044	11.5	0.0014	
HD19-10-5	0.0021	0.0121	0.0436	2.664	0.00018	2.987	0.00201	7.5	0.0068	
HD19-10-10	0.0021	0.0077	0.0218	2.741	0.00020	3.107	0.00115	10.0	0.0047	
HD19-10-15	0.0021	0.0063	0.0145	2.461	0.00019	3.11	0.00130	10.0	0.0055	
HD13-6-5	0.0023	0.0068	0.0173	1.468	0.00016	-----	-----	-----	-----	
HD13-6-10	0.0023	0.0051	0.0087	1.584	0.00018	1.74	0.00146	12.2	0.0080	
HD13-6-15	0.0023	0.0045	0.0058	1.439	0.00018	1.726	0.00109	11.7	0.0054	
HD13-10-5	0.0023	0.0121	0.0436	1.642	0.00041	1.86	0.00111	16.1	0.0076	
HD13-10-10	0.0023	0.0077	0.0218	1.602	0.00016	-----	-----	-----	-----	
HD13-10-15	0.0023	0.0063	0.0145	1.243	0.00016	1.849	0.00148	15.8	0.0103	
HD13-10-20	0.0023	0.0056	0.0109	1.363	0.00016	-----	-----	-----	-----	

----- 측정되지 않았음

4. 결론

철근콘크리트 16개의 부재를 휨 실험을 통하여 소성힌지길이 및 비탄성회전량을 검토한 결과 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. 소성힌지길이(l_p)는 실험결과 부재유효높이(d) 보다는 적게 나타나고 있다.
2. 비탄성회전능력(θ_p)은 횡방향보강근 단면적을 크게 하면 증가시킬 수 있지만, 전단력이 작용되는 곳에서는 횡방향보강근의 간격이 중요한 요소가 된다.
3. 국내의 콘크리트 구조설계기준의 내진규정에서 보에 배근된 패쇄형스티럽의 간격은 d/4 이내로 규정한 규준은 본 연구의 d/3.3 간격의 횡방향보강근을 갖는 부재거동을 비교하여 볼 때 적절한 것으로 볼 수 있다.

실험의 결과분석에 전단력을 고려하지 못했으며, 추후 전단력의 영향을 고려한 비탄성회전능력을 재평가해야 할 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

1. A. L. L. Baker, et al. "Inelastic Hyperstatic Frames Analysis", Proc. of the International Symposium on the Flexural Mechanics of Reinforced Concrete, ASCE-ACI, Nov.1964, pp.85-142.
2. W. G. Corley, "Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams", Journal of the Structural

Division, ASCE, vol. 92. ST5, Oct. 1966, pp.121-146.

3. A. H. Mattock, "Discussion of Reference 4", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.93. ST2, Apr. 1967, pp.519-522.

4. H. A. Sawyer, "Design of Concrete Frames for Two Failure States," Proceedings of the International Symposium on the Flexural Mechanics of Reinforced Concrete, ASCE-ACI, Miami, November 1964, pp. 405-431.

5. R. Park and T. Paulay, "Reinforced Concrete Structures", 1975, John-Wiley & Son's, Inc.

6. W. W. L. Chan, "The Ultimate Strength and Deformation of Plastic Hinges in Reinforced Concrete Frameworks," Magazine of Concrete Research, Nov. 1955.

7. N. H. Burns et al., "Load-Deformation Characteristics of Beam-column Connections in Reinforced Concrete" Structural Research Series, No. 234, Civ. Eng. Studies, Univ. of Ill., Jun., 1962.

8. 박찬수, 철근콘크리트 단면의 응력-변형도관계 및 비탄성 회전능력에 대한 연구, 고려대학교대학원 박사학위논문, 1987.

9. 박찬수, 연구원, "철근콘크리트부재에서 비탄성동작에 따른 횡방향보강근의 구속지수에 대한 연구", 충북대학교 건설기술연구소 논문집, 제 17권 2호 1998. 12.

10. 박찬수, 연구원, "철근콘크리트 부재에서 횡방향보강근이 연성능력에 미치는 효과", 충북대학교 건설기술연구소 논문집, 제 18권 2호 1999. 12.