

장방형 기둥-슬래브 접합부의 이력거동에 대한 철근비의 영향

Influence of Reinforcement Ratio on the Hysteretic Behavior of Rectangle Column-Slab Connection

조 인 중* 최 명 신** 신 성 우***
Cho, In Jung Choi, Myung Shin Shin, Sung Woo

ABSTRACT

In this investigation, results of laboratory tests on six reinforce concrete flat plate interior connections with elongated rectangular column support which has been used widely in tall residential buildings are presented. The purpose of this study is to evaluate an effect of column aspect ratio($\beta_c=c_1/c_2$) on the hysteretic behavior under earthquake type loading. The aspect ratio of column section was taken as 0.33~3($c_1/c_2=1/3, 1/1, 3/1$). Other design parameters such as flexural reinforcement ratio of slab and concrete strength was kept constant as $\rho=1.0\%$, 1.5% and $f_{ck}=40\text{MPa}$, respectively. Gravity shear load(V_g) was applied by 30 percents of nominal vertical shear strength($0.3V_o$) of the specimen. Experimental observations on punching failure pattern, peak lateral-load and story drift ratio at punching failure, and stiffness degradation were achieved and discussed in accordance with different column aspect ratio.

요 약

본 연구는 주거용 고층 건물에서 폭넓게 사용되고 있는 플랫 플레이트 구조에서 장방형 기둥-슬래브 접합부를 대상으로 실시한 6개의 실험결과를 분석한 것이다. 연구의 목적은 지진하중과 같이 반복적으로 작용하는 횡하중에 대하여 기둥 단면의 형상비($\beta_c=c_1/c_2$)에 따른 접합부의 이력거동을 비교·평가하는 것이다. 기둥 형상비는 b_o 가 일정해 지도록 0.33~3($c_1/c_2=1/3, 1/1, 3/1$)으로 선정하였다. 슬래브 휨철근비는 1.0%, 1.5%로 변화시켰으며, 중력전단력비(V_g/V_c) 등 접합부의 이력거동에 영향을 줄 수 있는 다른 영향인자들은 일정한 조건으로 계획하여 기둥 형상비의 영향을 고찰할 수 있도록 하였다. 실험을 통해서 뚫림전단파괴 양상과 균열 패턴, 접합부의 강성, 변형능력 등을 변수에 따라 분석하였다.

*정회원, 한양대학교 대학원

**정회원, 한양대학교 연구교수, 공학박사

***정회원, 한양대학교 건축학부 교수, 공학박사

1. 서 론

최근 국내 초고층 주상 복합 아파트에 사용자의 요구에 맞추어 Wall column type의 기둥이 적용된 가변형 평면이 일반화 되면서 무량판 구조가 활발하게 적용되고 있으며, 뉴욕과 시카고 등지에서 내진 성능을 강화한 기둥-슬래브 접합부의 진단보강 시스템을 통하여 초고층 및 강진지역에도 사용이 증가하고 있다. 하지만 무량판 시스템이 적용된 건물의 내진설계시 대부분 미국등지에서 적용하고 있는 사례를 기준으로 하고 있는데 ACI Code에서는 기둥-슬래브 접합부의 내력산정에 있어 철근비를 고려하고 있지 않으며, 기존의 선행연구는 기둥형상비가 2이하의 무량판이 대부분이고 기둥형상비가 변화하면서 위험단면의 둘레길이(b_o)가 변화하고 있어 직접적인 비교가 어려운 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 장방형 기둥-슬래브 접합부의 반복 횡하중 실험을 통하여 기둥형상비와 철근비의 변화에 따른 이력거동을 확인하기 위해 6개의 실험체를 제작하여 실험을 수행하였으며, 기둥 형상비에 의한 영향이 적절히 비교될 수 있도록 하기 위하여 기둥 단면의 크기 선정시 위험단면의 둘레길이가 일정해 지도록 하였으며, 슬래브 유효폭 범위내의 휨 철근비($\rho_{t,c+3h}$)를 1.0%와 1.5%로 변화시켰다. 그리고 슬래브-기둥 접합부의 강도와 변형성능에 영향을 미치는 인자 중에서 중력전단력비(V_g/V_c)와 콘크리트 압축강도 등 다른 설계조건은 모두 일정하게 계획하였다.

2. 실험계획 및 방법

실험체는 내부골조의 슬래브-기둥 접합부를 대상으로 2.4m×2.4m, 두께 120mm인 슬래브와 각각 $c_1 \times c_2 = 150 \times 450, 300 \times 300, 450 \times 150$ mm의 단면치수를 갖는 1200mm 기둥과의 접합부를 계획하였다. 각 실험체에서 기둥단면의 형상비($\beta_c = c_1/c_2$)는 0.33, 1, 3이 되며 위험단면 둘레길이(b_o)가 모두 일정하도록 선정함으로써 크기효과(b_o/d)의 영향이 포함되지 않도록 하였다. 40 MPa 규격의 콘크리트와 400 MPa 규격의 철근(D10)이 사용되었으며, 실험시의 콘크리트 압축강도 측정값은 33.3~41.3 MPa이었고 철근의 항복강도는 458 MPa로 측정되었다. 콘크리트는 슬래브와 하부 기둥을 1차로 타설한 후 상부 기둥을 2차로 타설하여 슬래브와 기둥의 콘크리트 강도가 동일하게 하였다. 슬래브 철근비는 ACI 318-05 Section R13.5.3.3의 권장량에 따라 유효폭($c+3h$) 내에서 인장 철근비(상부근)가 1.0%, 1.5%가

표 1. 실험체 상세 및 실험결과

Name	c_1/c_2 = β_c	$\rho_{t,c+3h}$ (%)	$\rho_{c,c+3h}$ (%)	d (mm)	f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	V_g/V_o	V_g (kN)	P_{max} (kN)	M_{ub} (kNm)	D_{peak} (%)	D_{pun} (%)	μ_p (D_p/D_y)	μ_u (D_u/D_y)	V_{test} (MPa)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(12)	(13)	(14)	(15)
S1.0-C1/3	150/450 =0.33	1.0	0.5	90	35.0	458	0.3	69.22	+63.0 -58.0	+64.3 -59.2	+3.0 -3.0	+3.0 -3.0	2.71	8.61	1.94
S1.5-C1/3	150/450 =0.33	1.5	0.75	90	41.3	458	0.3	75.19	+62.3 -56.85	+63.5 -58.0	+4.0 -6.0	+4.0 -6.0	1.74	5.98	1.97
S1.0-C1/1	300/300 =1	1.0	0.5	90	33.5	458	0.3	81.26	+81.5 -79.8	+83.1 -81.4	+3.0 -3.0	+3.0 -2.7	2.16	2.37	2.38
S1.5-C1/1	300/300 =1	1.5	0.75	90	41.3	458	0.3	90.23	+117.8 -117.4	+120.2 -119.7	+3.0 -3.0	+3.0 -3.0	1.66	1.85	3.27
S1.0-C3/1	450/150 =3	1.0	0.5	90	33.3	458	0.3	67.52	+128.4 -79.0	+130.9 -80.6	+3.0 -2.0	+3.0 -2.0	1.42	1.58	3.65
S1.5-C3/1	450/150 =3	1.5	0.75	90	37.8	458	0.3	71.93	+115.4 -99.7	+117.7 -101.7	+2.0 -2.0	+2.0 -2.0	1.38	1.86	3.36

(1)실험체명, (2)기둥단면의 형상비, (3)유효폭 $c+3h$ 이내의 인장철근비, (4) $c+3h$ 폭 이내의 압축철근비, (5)슬래브 유효깊이, (6)콘크리트 압축강도(실험시 측정), (7)슬래브 철근(D10)의 항복강도, (8)중력전단력비, (9)기둥 하부의 오일잭으로 작용시킨 중력전단력의 크기, (10)엑츄에이터에서 기록된 최대 수평하중의 크기, (11) P_{max} 로 계산한 불균형 모멘트의 크기(그림6), (12)폴립전단파괴시의 층간변위비, (13)최대하중에서의 층간변위비를 기준으로 계산된 변위연성지수, (14) $0.8P_{max}$ 에서의 층간변위비를 기준으로 계산된 변위연성지수, (15)위험단면에서의 전단응력. ※(10)~(12)의 +, - 기호는 정, 부 가력방향을 나타냄.

되도록 산정하였으며 유효폭 이외의 부분은 0.5%, 0.75%의 철근비로 배근하였다. 중력전단력비 (V_g/V_o)는 0.3으로 적용하고, 표 1에 실험체의 제원과 실험결과를 요약하여 나타내었다.

실험체의 가력 조건은 그림 4와 같이 상·하부 기둥에 각각 250kN 액추에이터를 설치하고 서로 반대방향으로 변위를 발생시켜서 반복 횡하중을 작용시켰으며, 슬래브의 4변을 상·하부면이 단순지지 되도록 철제블럭을 설치하여 횡하중의 반복 작용에 따른 반력이 형성되도록 하였다. 하중은 중력하중의 크기를 기둥 하부에 설치된 가력장치(Hydraulic jack)에서 상향 하중을 작용시킨 후, 층간 변위비(Story drift ratio)를 기준으로 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0%에 상응하는 변위(Δ_i)를 점진적으로 증가시킨 횡하중을 기둥의 상하부에서 층간변위비(Δ_i)의 절반에 해당하는 $\Delta_i/2$ 를 서로 반대방향으로 변위가 발생하도록 사이클당 2회씩 반복해서 점증 가력 하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 하중-변위 이력

그림 1은 횡하중과 층간변위비(Story drift ratio)의 상관관계 그래프를 나타낸 것이다. 기둥형상비가 1이상인 4개의 실험체는 모두 최대하중에서 풀림 전단파괴가 발생하였고 이때의 층간변위비(D_p)는 S1.5-C3/1가 2.0%, 나머지는 3.0% 수준으로 나타났다. 기둥형상비 1/3 실험체들은 3.0%에서 최대하중이 기록되었으나 휨연성적인 파괴양상을 보이며 최종 풀림전단파괴는 6.0%에서 나타났다. 또한, 기둥형상비가 1인 실험체 경우 철근비가 증가함에 따라 하중-변위 이력이 크게 증가함을 알 수 있으나 장방형 기둥인 나머지 실험체의 경우 철근비의 영향이 미비함을 알 수 있었다.

3.2 균열양상

수직하중 재하 직후에는 슬래브 중앙에서 십자(+)형으로 기둥면과 나란하게 휨 균열이 형성되었고, 반복 횡하중의 점증가력에 따라서 휨 균열의 증가와 함께 기둥에서 슬래브 모서리 방향으로 방사형의 균열들이 발생하다가 각 실험체별 최대 층간변위비(D_{pun})에서 풀림전단균열이 발생하면서 최종파괴되는 것으로 나타났다. 기둥형상비 1/3인 실험체들은 풀림전단파괴까지 연성적인 휨저항 능력을 발휘하였고, 기둥

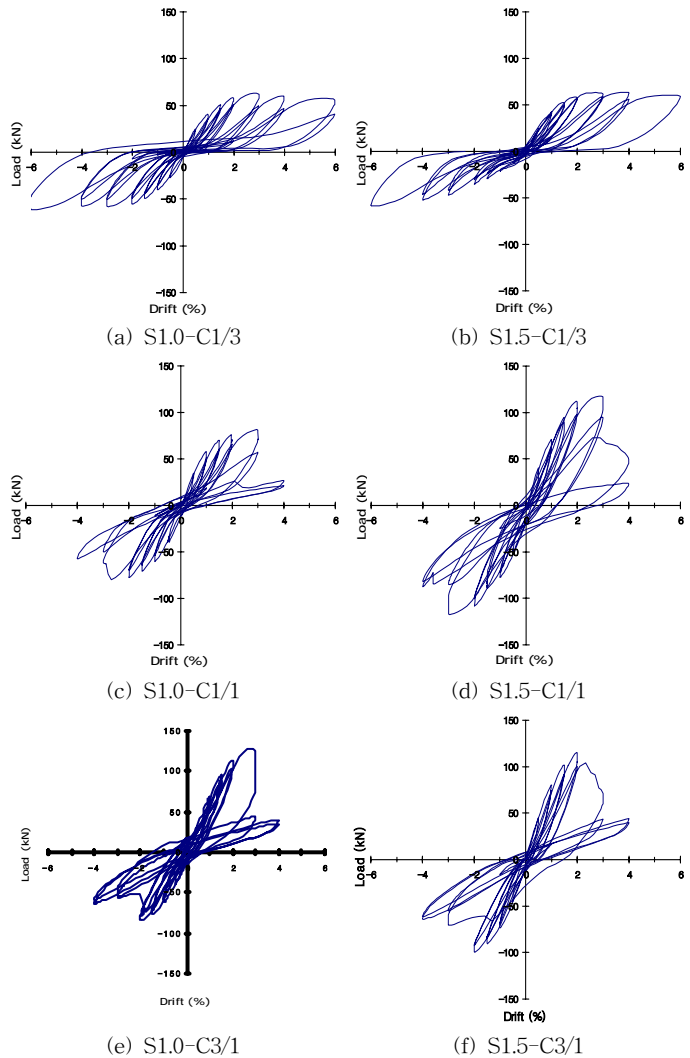


그림 1. 하중-변위 이력

형상비가 3/1인 실험체들은 가력방향의 전-후면으로 좁은 구간에서 전단균열이 집중적으로 발생하였으며, 기둥면에서 punching cone까지의 거리도 더 멀게 형성되는 경향을 나타내었다. 철근비가 증가함에 따라 휨과괴에 가까운 균열양상을 나타내었으며 위험단면부근으로 균열이 증가하는 것으로 철근비가 증가할수록 철근이 위험단면에서의 응력부담 비율이 더 높다는 것을 알 수 있다.

3.3 강성

실험체에 대한 강성비교 결과 기둥 형상비가 1에서 1/3으로 감소하면서 컷 사이클($D_i=0.25\%$)에서의 활선강성이 6% 감소하였고, 최대하중에서의 층간변위비 3.0%에서의 활선강성은 9%정도 작아지는 것으로 나타났다. 반면, 기둥 형상비가 증가된 실험체의 경우 초기강성은 비슷하고, 층간변위비 3.0%에서의 강성은 약 30% 증가하였다. 철근비 증가에 따라 층간변위비 3.0%에서 기둥 형상비가 1 이하인 실험체는 강성이 증가하였으며, 기둥형상이 3/1인 실험체는 강성이 감소하였다. 또한, 동일 형상비 내에서 철근비가 0.5% 증가하면서 강성에 미치는 영향은 기둥형상비 1/3일때 9.5%, 1/1일때 3.4%의 폭으로 강성이 감소하였으며 3/1일때 37.5%의 강성 증가가 발생하였다.

3.4 연성지수

본 연구에서는 Pan과 Moehle의 연구에서 사용된 변위연성지수(Displacement ductility index)를 사용하였으며 결과는 표 1에 나타내었다. 기둥형상비가 감소하면서 휨 저항 능력이 증가하여 Ultimate ductility가 가장 크게 나타났으며, 기둥 형상비가 증가된 실험체는 연성지수가 비슷하거나 약간 작게 계산되었는데 이는 횡하중 방향의 기둥치수(C_l) 증가로 인해 강성이 큰 값을 갖기 때문이다. 또한, 철근비가 증가할 때 연성지수가 감소하였는데 이는 철근량이 증가하면서 항복점이 상대적으로 커지기 때문이다.

4. 결론

일정 수직전단력과 반복 횡하중이 작용하는 슬래브-기둥 접합부의 이력거동에 대한 실험을 통하여 기둥 단면의 형상비와 철근비의 증가에 따른 영향을 고찰한 결과, 슬래브-기둥 접합부의 이력은 기둥형상비의 변화를 잘 반영하고 있으나 철근비의 영향은 기둥형상비의 증감에 따라 상이하게 나타났다. 따라서 ACI 318-05에서 규정하는 위험단면에서의 전단응력 계산식에는 철근비 영향의 반영이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업인 한양대학교 친환경건축 연구센터의 지원으로 수행되었음 (R11-2005-056-01003-0)

참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete(318-05) and Commentary (318R-05)", American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2005, pp.181-183.
2. A. Pan, J. P. Moele, "Lateral Displacement Ductility of Reinforced Concrete Flat Plates", ACI Structural Journal, 1989, 86(3), pp.250-258.
3. Y. H. Luo, A. J. Durrani, "Equivalent Beam Model for Flat -Slab Buildings—part I: Interior Connections", ACI Structural Journal, 1995, 92(1), pp.115-124.
4. Korea Concrete Institute, "Design Code and Commentary for Concrete Structures", KCI, 2003 (in Korean).
5. Paul E. Mast, "Stresses in Flat Plates Near Columns", ACI Journal, Oct. 1970, pp.761-768.