철근콘크리트 보-기둥 접합부 철근의 뽑힘 평가

우재현¹⁾ · 박종욱¹⁾ · 김병일¹⁾ · 이정윤^{1)*}

¹⁾성균관대학교 건축공학과

Evaluation of Steel Pull-Out of Reinforced Concrete Beam-Column Joints

Jae-Hyun Woo,¹⁾ Jong-Wook Park,¹⁾ Byoung-Il Kim,¹⁾ and Jung-Yoon Lee^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

ABSTRACT In this report, the test results of five reinforced concrete beam-column joint subjected to cyclic load are presented. The main purpose of the research is to investigate the influence of the steel pull-out of the beam-column joints to the shear and ductile capacity of the RC beam-column assemblies. In addition, the influence of the amount of beam reinforcement to the joint shear and ductile capacity is evaluated. Test results indicate that the yield penetration of steel bar increases as the joint shear strength ratio, V_{j1}/V_{jby} decreases. And the slippage of the steel bars are varied according to the region of the beam-column joints. The pull-out of the steel bars of five specimens was almost the same regardless of the joint shear strength ratio, V_{j1}/V_{jby} . Because it was affected by not only the yield penetration of steel bar but also the axial elongation in the plastic hinge.

Keywords : beam-column joint, pull-out, beam reinforcement slip, ductile capacity, shear strength

1. 서 론

철근콘크리트 보-기둥 접합부는 중력하중과 함께 지진 하중과 같은 반복하중을 받을 경우에 구조물의 안전성을 결정하게 되는 중요한 부분이다. 구조물에 작용하는 수평하중에 의해 접합부는 휨모멘트보다는 전단력과 부차력에 의한 지배를 받게 되며 인접한 보와 기둥의 전단력보다 훨씬 더 큰 수평, 수직 전단력이 작용하여 전단 파괴나 부차파괴가 발생할 가능성이 높다. ACI 352R-02¹⁾에서는 지진하중을 받는 철근콘크리트 보-기둥 접합부에 대한 설계를 비내진 구역(Type 1)과 내진 구역(Type 2)으로 구분하여 설계하도록 하고 있다. 지진하중을 받는 접합부의 경우 기둥과 접합부는 탄성 범위에 머물도록 하고 인접 보에 소성힌지를 발생시켜 에너지 소산과 함께 설계자가 계획한 변형에 도달할 때까지 접합부가 파괴하지 않도록 하고 있다. 이와 같은 설계를 위해서는 보 강도보다 접합부 강도를 더욱 크게 하여야 하며 접합부에 인접한 보의 소성힌지 발생에 따른 접합부 강도 저하를 충분히 고려할 수 있어야 한다.

보-기둥 접합부에 대해서 그동안 많은 연구가 진행되어 왔지만 대부분의 연구가 접합부의 강도를 평가하는데 중점을 두어 연성에 대한 영향인자 연구가 추가될 필요

가 있다. Fujii, Morita²⁾와 Ehsani 등,³⁾ Durrani, Wight⁴⁾은 실험적인 방법으로 보-기둥 접합부에 대한 연구를 수행하였다. 이들 연구에서는 기둥의 축력, 접합부에 배근된 전단보강 철근량, 콘크리트의 강도, 기둥의 크기나 보 주철근 크기 등에 따라서 달라지는 접합부 전단강도를 평가하였지만, 접합부 연성에 영향을 미치는 요소에 대하여 평가하지 않았다. Attaalla⁵⁾는 접합부 강도 예측모델을 제시하였으나 강도에 대한 영향만을 고려하였을 뿐 연성에 미치는 영향과 철근 미끄러짐 등의 효과는 고려하지 않았다.

접합부 인접보에 소성힌지가 발생하면 보 주인장철근의 변형률이 급격하게 증가하게 되고 이러한 변형률이 접합부 내부 변형에도 영향을 주어 내력을 감소시킬 수 있다. 또한 보에 발생한 소성힌지의 확산현상(yield penetration)은 철근의 유효 부착 길이를 감소시켜 부착성능을 떨어뜨리게 된다. 감소된 부착성능은 주인장철근의 미끄러짐을 야기하고 이로 인해 접합부 내력 및 연성을 변화시킬 수 있다. Hakuto 등⁶⁾은 접합부내 부착 감소와 이에 따른 미끄러짐이 보 휨강도와 연성에 미칠 영향을 이론적으로 고찰하였다. Leon,⁷⁾ Kazuhiro 등⁸⁾과 Brooke 등⁹⁾은 실험적 연구를 수행하였으나 콘크리트 강도 또는 기둥의 폭을 영향요소로 한 부착 강도만을 고려하여 접합부 거동에 큰 영향을 주게되는 미끄러짐의 영향을 평가하지 않았다. Kim과 Lafave¹⁰⁾는 접합부 거동에 영향을 미치는 주요 인자들로 부착 강도를 포함해 확률적인 분석을 하였다. Lee 등¹¹⁾은 보-기둥 접합부 실험을 통해 연

*Corresponding author E-mail: jylee@yurim.skku.ac.kr

Received August 9, 2010, Revised October 11, 2010,

Accepted October 22, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

성 거동 평가를 목표로 부착을 고려하였으나 미끄러짐을 평가하진 않았다.

이 연구의 주목적은 5개의 콘크리트 보-기둥 접합부 실험을 통하여 보 주인장철근량에 따른 미끄러짐을 측정하고 접합부 내력과 연성 변화를 평가하는 것이다.

2. 철근콘크리트 보-기둥 접합부 실험

보-기둥 접합부는 일반적으로 3가지 파괴로 구분할 수 있다. 보가 휨 항복에 도달하기 이전에 접합부가 파괴되는 J-파괴, 보의 주인장철근이 항복하여 소성힌지가 형성된 후 접합부가 파괴되는 BJ-파괴, 접합부 강도가 매우 커 접합부의 큰 변형 없이 보 소성힌지 발생 후 휨 파괴하는 B-파괴로 나눌 수 있다.

보 주인장철근의 항복에 따른 부착 감소는 BJ-파괴를 일으키는 접합부의 내력 및 연성에 큰 영향을 미친다. 부착 감소로 인해 발생하는 주인장철근의 미끄러짐량은 Fig. 1과 같이 소성힌지가 발생하는 E구역에서의 미끄러짐이 가장 크게 발생할 것이며, 인접 접합부인 C, D구역에서 그 영향으로 인한 미끄러짐이 발생하고, A, B, F구역은 탄성영역으로서 미끄러짐량이 적을 것으로 예상된다. 소성힌지 발생으로 인한 철근의 변형은 접합부면에서 철근의 뽑힘(pull out)을 유발하게 된다. 이러한 철근의 뽑힘 현상은 결과적으로 Fig. 2와 같이 보-기둥 전체의 변형에 영향을 주게 된다. Fig. 2에서 Δ_c 는 철근 뽑힘량이며, d_n 은 보 최상부면에서 보가 탈락되기 시작한 지점과의 거리, l_b 는 보의 길이로서 이를 통해 철근 뽑힘 현상으로 인한 처짐량 Δ_{pd} 를 구할 수 있다.

실험에서는 Fig. 1과 같이 각각의 구간에서 변화하는 미끄러짐을 측정하고 미끄러짐의 영향을 평가하기 위해 보 주인장철근량을 변수로 한 5개의 실험체를 제작하였

다. 각 구간의 철근의 미끄러짐량을 측정하기 위해 철근을 5개 구간으로 구분해 앵커를 용접하였다.

2.1 실험체 계획

실험체는 보와 기둥이 직교하며, 편심이 없고 횡방향 보가 없는 십자형 내부 접합부이다. 실험체에 대한 보, 기둥 철근 배근 상세 및 강도를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 BJ실험체들은 BJ파괴하는 보-기둥 접합부로 보 항복이후 접합부가 파괴하는 실험체이다. B실험체들은 B파괴하는 보-기둥 접합부로 접합부는 탄성 상태로 유지되며, 보의 소성힌지 영역에 파괴가 집중되는 실험체이다. 보-기둥 접합부 실험체의 BJ파괴와 B파괴의 구별을 명확하게 정량화하기는 어렵다. 따라서, 이 연구에서는 Teraoka 등이 실험에 근거하여 제안한 방법¹²⁾을 이용해서 파괴모드를 구별하였다. Teraoka 등의 실험 결과에 의하면 $V_{j1} / V_{jby} = 1.8$ 을 경계로 하여 BJ파괴와 B파괴가 구별되었다. 접합부의 내력은 ACI 352R-02¹⁾를 따라 식 (1)을 이용해 계산하였다.

$$V_j = 0.083\gamma\sqrt{f_{ck}}b_jh_c \quad (1)$$

여기서, V_j 는 접합부 전단강도이며, γ 는 접합부 형태 및 비내진, 내진 구역에 관한 계수, f_{ck} 는 콘크리트 압축강도, b_j 는 접합부 폭, h_c 는 기둥 깊이이다. 표의 V_{j1} 과 V_{j2} 는 Type 1과 Type 2 실험체의 전단강도로 γ 값은 각각 20, 15이다. V_{jby} 는 보가 항복할 때의 접합부 수평전단력으로 식 (2)를 통해 계산하였다.

$$V_{jby} = \left(\frac{l_c}{z_b} - 1\right)V_{by}\frac{l_b}{l_c} - \frac{h_c}{z_b}V_{by} \quad (2)$$

여기서, l_c 는 기둥의 높이, z_b 는 보 상부와 하부 주철근의 중심간 거리, l_b 는 보의 길이, h_c 는 기둥 깊이이다. 보가 항복할 때의 전단력 V_{by} 는 식 (3)을 통해 계산한다.

$$V_{by} = \frac{A_b f_{by} j d}{a} \quad (3)$$

여기서, A_b 는 보의 주인장철근 단면적, f_{by} 는 보 주인장철근 항복강도, $j d$ 는 보 단면의 응력 중심간 거리이며, a 는 보 중심에서 접합부면까지의 거리이다.

Table 1에서 계산된 V_{j1} / V_{jby} 는 보 항복 시 접합부의 여유내력을 통해 파괴 형태를 예측하기 위한 것으로 BJ파괴를 일으키는 BJ1~BJ3실험체의 경우 V_{j1} / V_{jby} 값이 1.22~1.63의 값을 가지며 B1, B2실험체들의 경우 V_{j1} / V_{jby} 값이 1.91~2.45이다. Type 2에 대한 γ 값을 통해 계산된 V_{j2} 의 값과 V_{jby} 값을 비교했을 때 BJ1~BJ3실험체는 0.92~1.22, B1, B2실험체들은 1.43~1.83이었다.

각 실험체의 크기 및 배근 상세는 Fig. 3과 같다. 기둥

Fig. 1 Expected slippage of the longitudinal steel bars

Fig. 2 Pull-out of the beam reinforcement

Table 1 Specification of specimens

Specimens	Beam							Column							f_{ck} (MPa)	V_{j1} (kN)	V_{j2} (kN)	V_{jby} (kN)	V_{j1} / V_{jby}	V_{j2} / V_{jby}
	Upper(lower) longi. rein. bars			Stirrup				Longi. rein. bars			Tie. rein. bars									
	f_{by} (MPa)	ρ_b	n_b	f_{sy} (MPa)	ρ_s	s_b (mm)	n_s	f_{cy} (MPa)	ρ_c	n_c	f_{ty} (MPa)	ρ_t	s_t (mm)	n_t						
BJ1	530	0.0084	4-D13	385	0.0057	50	D6	530	0.0367	8-D16	529	0.011	50	D10	31	511.44	383.58	418.26	1.22	0.92
BJ2	530 529	0.0075	3-D13 1-D10	385	0.0057	50	D6	530	0.0367	8-D16	529	0.011	50	D10	31	511.44	383.58	372.54	1.37	1.03
BJ3	530	0.0063	3-D13	385	0.0040	70	D6	530	0.0367	8-D16	529	0.011	50	D10	31	511.44	383.58	313.69	1.63	1.22
B1	530 529	0.0054	2-D13 1-D10	385	0.0040	70	D6	530	0.0367	8-D16	529	0.011	50	D10	31	511.44	383.58	267.96	1.91	1.43
B2	530	0.0042	2-D13	385	0.0040	70	D6	530	0.0367	8-D16	529	0.011	50	D10	31	511.44	383.58	209.13	2.45	1.83

Where f_{by} : yield strength of longitudinal upper(lower) reinforcement of beam, ρ_b : ratio of longitudinal upper(lower) reinforcement of beam, n_b : size of longitudinal steel bars in beam, f_{sy} : yield strength of stirrup, ρ_s : ratio of stirrup, s_b : spacing of stirrup, n_s : size of stirrup, f_{cy} : yield strength of longitudinal reinforcement of column, ρ_c : ratio of longitudinal reinforcement of column, n_c : size of longitudinal steel bars in column, f_{ty} : yield strength of tie bar in column, ρ_t : ratio of tie bar of column, s_t : spacing of tie bar, n_t : size of tie bar, f_{ck} : compressive strength of concrete, V_{j1} : shear strength of type1 joint, V_{j2} : shear strength of type2 joint, V_{jby} : shear strength of joint when the beam yield

Fig. 3 Geometry and reinforcing details of specimens

과 양방향 보의 총길이는 각각 1,200 mm, 2,700 mm이며 지점간 길이는 기둥 1,200 mm(150 mm의 힌지 접합부 포함), 보 2,400 mm이다. 기둥의 단면 크기는 250 × 250 (mm), 보 단면 크기는 200 × 300(mm)이다. 기둥에는 항

복강도 530 MPa의 8-D19가 배근되었으며, 보에는 항복강도 530 MPa의 D13철근과 529 MPa의 D10철근이 각 실험체 별로 지름과 개수를 달리하여 배근되었다. 실험체 제작에 사용한 콘크리트의 공시체 압축강도는 31 MPa 이었다.

2.2 측정 및 가력 방법

보 주철근의 미끄러짐량을 확인하기 위하여 Fig. 4와 같이 접합부를 관통하는 보 주철근의 7개 지점에 전산볼트를 용접하고 전산볼트 주변에 콘크리트를 채워지지 않게 한 후 LVDT를 설치하였다. S2, S5는 Fig. 1의 E구역에 해당하는 보 소성힌지 구역을 측정하며 S3, S4는 C와 D구역에 해당하는 접합부내 철근 미끄러짐과 접합부면의 뺨힘량을 측정한다. S1, S6은 보 탄성역의 미끄러짐을 측정한다. 주철근 뺨힘은 접합부 측면까지의 철근 미끄러짐을 의미하므로 접합부면에 설치된 LVDT까지의 구간별 합(정방향 가력에 대해 S1~S4, 부방향 가력에 대해 S3~S6)을 통해 측정한다. 접합부에 인접한 보에 발생하는 소성힌지에 의한 주인장 철근의 변형률을 측정하기 위해 Fig. 5와 같이 접합부면에서 각각 20 mm와 80 mm 떨어진 거리의 상, 하부 주철근에 게이지를 부착하였다. 또한 접합부면에서 두 번째와 네 번째 떨어진 전단보강철근에도 각각 게이지를 부착하였다. 접합부내의 변형률을 측정하기 위해서 접합부를 관통하는 보 주철근의 상, 하부에 각각 3개씩의 게이지를 부착하였고 접합부내 횡보강철근 항복여부를 판단하기 위해 게이지를 부착하였다. 접합부 내부의 변형률을 측정하기 위해 Fig. 6과 같이 앵커를 삽입하여 LVDT를 설치하였다. 접합부 전체 변위에 대해서는 2개의 와이어 게이지를 이용해 측정하였다. Fig. 7과 같이 보 양단과 기둥 하부에는 철물을 이용하여 힌지를

Fig. 4 Location of LVDTs on the rebar

Fig. 5 Location of strain gauges

Fig. 6 Location of LVDTs on the concrete

설치하였다. 보 양단은 강봉을 이용하여 접합하고 기둥 하부는 보 주철근 나사선 가공을 통해 접합하였다.

횡방향 가력은 500 kN 용량을 가진 유압 액추에이터를 이용해 횡하중을 반복하여 가력 하였다. 하중 재하는 Fig. 8과 같이 변위 제어 방식으로 하며 보 상부 주철근 항복 시점을 $1\Delta_y$ 로 하였다. 이후 변위량을 $1\Delta_y$ 의 변위량 만큼씩 증가시켰다. 하중 재하는 최고 하중에 대해 약 85%로 떨어질 때까지 각 하중을 2사이클씩 반복 가력하였다. 부

Fig. 7 Loading system

Fig. 8 Loading history of displacement

방향 가력은 $2\Delta_y$ 로 제한한 것은 실험실의 여건상 실험체의 한쪽 측면이 프레임에 닿을 가능성이 있었기 때문이다.

3. 실험 결과 및 분석

ACI 352R-02¹⁾에 따라 보 주철근량을 변수로 하여 설계된 실험체는 접합부 전단내력은 동일하지만 파괴 형태는 다르다. 측정된 주인장방향 변형률을 분석하면 BJ1, BJ2, BJ3 실험체는 보 주인장철근 항복 이후 접합부내 콘크리트가 압축파괴하는 BJ파괴 형태를 나타냈다. 그러나 B1, B2 실험체는 보 항복이후 접합부가 압축파괴 하기 이전에 하중이 감소해 B파괴 형태를 나타냈다. 파괴와 균열 양상을 살펴보면 Fig. 9와 같이 BJ1, BJ2, BJ3 실험체는 접합부내 콘크리트 탈락과 균열이 많이 발생한 반면 B1과 B2 실험체는 접합부내 균열이 감소하고 인접한 보의 콘크리트 탈락과 균열이 많이 발생하여 BJ1에

Fig. 9 Observed crack patterns

서 B2 실험체로 갈수록 파괴나 균열이 접합부에서 인접 보로 이동하는 것을 볼 수 있다.

3.1 접합부 하중-변위 관계

실험체의 최대 하중은 보 주인장 철근량이 증가함에 따라 증가하였다. Fig. 10은 각 실험체의 하중-변위 곡선을 나타낸 것으로 BJ1의 경우 최대 하중이 113.36 kN이었으며 B2의 경우 최대 하중이 64.90 kN이었다. 보 주인장철근 항복시점의 변위량은 철근량이 많을수록 증가하였다. 보 주인장철근 항복시 BJ1의 변위량은 33.27 mm이며 B2의 변위량은 19.20 mm이었다. 실험 계획에서도 설명한 것과 같이 실험실의 여건상 실험체의 측면이 프레임에 닿을 가능성이 있었기 때문에 부방향에서는 $2\Delta_y$ 까지 가력되었다.

Fig. 10 Story drift vs. story shear curves

Table 2 Test results

	P_{max} (kN)	Δ_{max} (mm)	$P_{85\%}$ (kN)	$\Delta_{85\%}$ (mm)	μ
BJ1	113.36	75.8	96.36	108.66	3.27
BJ2	101.70	74.9	86.45	108.57	3.51
BJ3	87.92	74.1	74.73	106.40	3.63
B1	75.44	74.5	64.12	105.42	3.80
B2	64.09	59.1	54.48	91.24	4.75

Table 2는 실험 결과로 측정된 최대 하중(P_{max}), 최대 하중 시점의 변위량(Δ_{max}), 최대 하중 85% 감소 시점의 하중($P_{85\%}$), 85% 감소시점의 변위량($\Delta_{85\%}$)과 연성계수(μ)를 나타낸다. 연성계수는 Paulay 등¹³⁾의 제안 모델을 사용하여 최대 하중 대비 85%까지 하중이 감소한 시점의 변위에 대한 최대 하중 대비 75%에 도달한 하중과 최대 하중 점선의 교차점의 변위의 비로써 나타내었다. Fig. 11은 연성계수와 보 주철근비와의 관계를 나타낸 것으로 접합부 전단강도비 V_{ji}/V_{jby} 가 클수록 연성이 증가함을 알 수 있다. 이는 실험체 계획에서도 설명한 것과 같이 V_{ji}/V_{jby} 가 증가함에 따라서 부재의 파괴는 보에 집중되고 접합부에 미치는 소성힌지의 확산현상이 감소하기 때문으로 판단된다.

3.2 접합부내 변형률 침투

접합부에 지진하중과 같은 반복하중이 작용하면 접합부 인접보의 주인장 철근이 항복하여 소성힌지가 발생하게 된다. 소성힌지 발생 이후 변위가 계속해서 증가하게

Fig. 11 Displacement ductility ratio

되면 소성힌지 영역의 주인장철근 변형률이 급속하게 증가하면 이 변형률이 접합부 내부의 변형률에 영향을 미치게 된다. 또한, 증가된 접합부 변형은 접합부내 부착응력을 증가시켜 부착과괴를 유발할 수 있다.

실험에서는 접합부를 관통하는 보 주인장철근에 게이지를 부착하여 철근의 변형률을 측정하였다. 측정 지점은 총 7지점으로 접합부내 3지점, 접합부에 인접한 소성힌지 구역에 4지점을 측정하여 보 주인장철근이 항복하는 $1\Delta_y$ 에서부터 $3\Delta_y$ 시점까지 비교하였다. BJ1과 B1 실험체의 일부 게이지는 실험 초기 단계에 탈락되어 측정이 되지 않은 부분이 있다. Fig. 12는 각 실험체에 대한 측정 결과를 나타낸 그림으로 x축은 실험체내 게이지가 위치한 지점을 나타내며, y축은 게이지에 의해 측정된 주인장철근의 변형률을 나타낸다. 접합부 내부의 변형률은 인접한 보의 철근 변형률이 증가함에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다. 전체 변위가 증가함에 따라 접합부에 인접한 보의 철근 변형률이 크게 증가하였고 접합면에 인접한 접합부 철근이 인접보 소성힌지 변형률의 영향을 받아 비례적으로 증가하였다. 접합부 중심의 철근은 $2\Delta_y$ 시점까지 탄성을 유지하였으나 추가적인 변위에 의해 항복변형률을 넘어서었다.

Fig. 13은 접합부 축방향 변형률(ϵ_b)과 보 소성힌지 영역 변형률(ϵ_{bb})과의 관계를 나타내는 K함수($K = \epsilon_b / \epsilon_{bb}$) 그래프이다. 보 주인장철근 항복 이전 시점인 증간변위 2.08% 이전의 경우 결과값이 분산되어 특별한 경향이 없으나 보 주인장철근 항복 이후 시점인 증간변위 3.13%와 4.17%의 경우 전단강도비 V_{j1} / V_{jby} 가 클수록 접합부에 대한 보 소성힌지의 영향이 약 0.3~0.18까지 감소하였다.

3.3 접합부 주인장방향 변형률

접합부내로 침투된 변형률은 접합부내 축방향 변형을 증가시켜 콘크리트 스트럿의 인장 변형률을 증가시키고

Fig. 12 Distribution of beam bar strain

결과적으로 콘크리트 스트럿의 압축강도도 감소시키게 된다. 이것은 접합부 전단강도 감소의 주요 원인이 된다.

실험에서는 접합부내 주인장방향 변형률을 측정하기 위해 실험체에 LVDT를 설치하여 변형률을 측정하였다. Fig. 14는 측정된 변형률을 보여준다. 측정한 결과에 의하면 V_{j1} / V_{jby} 가 작을수록 접합부내 주인장방향 변형률이 크게 나타났다. BJ1과 BJ2 실험체의 경우 최대 변형률이 0.012에 이르나 B1, B2 실험체의 경우 최대 변형률이 0.004정도에 그쳐 약 3배의 차이를 보였다. 접합부 전단강도비 V_{j1} / V_{jby} 가 작을수록 접합부에 미치는 영향이 증가하여 접합부내 부재 축방향 변형률과 주인장방향 변형률을 증가시키게 되며 결과적으로 접합부 전단강도 감소에 영향을 주게 된다. 또한 주인장방향 변형률이 상

Fig. 13 Effect of yield penetration

Fig. 14 Diagonal direction strain vs. story drift ratio

대적으로 작은 B1, B2 실험체가 BJ 실험체에 비해 더 큰 연성계수를 갖게 되어 접합부 전단강도비 V_{j1} / V_{jby} 가 클수록 접합부 연성계수가 증가하였다.

3.4 주인장철근 뺄힘

지진하중과 같은 반복하중에 의해 접합부로 전달된 변형률의 증가는 접합부내 부착응력을 감소시켜 부착응력

을 증가시키게 된다. 접합부내 부착응력 증가는 보 주인장철근의 미끄러짐을 유발하고 접합부면의 균열과 결합되어 보 주인장철근의 뺄힘 현상을 발생시킨다. 이러한 현상은 접합부 내력과 연성에 영향을 주게된다.

실험에서는 접합부를 관통하는 보 상부 주인장철근에 용접을 이용한 LVDT 설치를 통해 미끄러짐을 측정하였다. Fig. 15는 실험체에 대한 측정구간별 미끄러짐량을 나타낸다. 각 구간의 위치는 Fig. 4와 같다. 그림에서 보의 소성힌지 구역에서 미끄러짐이 가장 크며 소성힌지의 영향으로 변형이 침투하는 접합부의 미끄러짐이 다음으로 크을 알 수 있다. 탄성구간(S6), 접합부구간(S4), 소성힌지구간(S5)에 대해 미끄러짐 결과를 변위시점 $2\Delta_y$ 와 $3\Delta_y$ 의 변위에 해당하는 구간별 미끄러짐량을 비교하면 가장 작은 미끄러짐량을 보인 탄성구간과 접합부 구간은 약 1.5~3.5배($3\Delta_y$ 의 경우 2~5배)의 미끄러짐량 차이를 나타냈다. 탄성구간과 소성힌지 구간은 약 3.5~6배($3\Delta_y$ 의 경우 4~8배)의 차이를 나타내며 접합부구간과 소성힌지구간 사이에는 약 1.5~2.5배($3\Delta_y$ 의 경우 1~2배) 가량 차이를 나타냈다. 수평변위가 증가함에 따라 접합부 전단강도비 V_{j1} / V_{jby} 가 클수록 보 소성힌지 구간의 미끄러짐 증가가 접합부 미끄러짐 증가량에 비해 크게 나타났다. Fig. 16은 실험체의 정방향 가력시 각 수평변위 시점에

Fig. 15 Steel slippage in each region

Fig. 16 Pull out (positive direction)

서의 주인장철근 뺄힘량을 보여준다. 뺄힘량의 측정은 주인장철근에 설치된 LVDT S1~S4의 미끄러짐을 합산하여 나타내었다. Fig. 16에서 항복시점 이전인 1Δ 지점까지는 철근의 뺄힘량이 거의 없으나 항복이후 2Δ 지점에서부터 접합부면 균열 증가와 함께 철근의 뺄힘이 크게 증가함을 알 수 있다. 변위 시점에 따라 차이는 있으나 매우 작게 측정된 BJ2를 제외하고는 실험체별로 접합부 전단강도비 V_{j1}/V_{jby} 에 무관하게 철근의 뺄힘량은 거의 비슷한 값을 보였다. 접합부 전단강도비 V_{j1}/V_{jby} 가 클수록 보 소성힌지의 영향력이 접합부에 미치는 영향이 적음에도 불구하고 뺄힘이 비슷하게 나타나는 것은 철근의 변형률은 V_{j1}/V_{jby} 에 따라서 구간별로 다르기 때문이다. 즉 V_{j1}/V_{jby} 의 값에 따라서 소성힌지 구역의 철근 변형률이 크게 발생하거나 항복 침투에 의한 접합부 내부에서의 철근 변형률이 상대적으로 크게 발생하기 때문에, 결국 보의 지점에서 접합부까지의 미끄러짐은 V_{j1}/V_{jby} 에 따

Fig. 17 Pull out increment (positive direction)

라서 큰 변화없이 거의 일정하다. Fig. 17은 정방향 가력 시점에서의 뺄힘 증감량을 나타낸 것으로 수평 변위가 추가적으로 증가할 때 뺄힘이 증가하며 2Δ 로 수평변위가 증가하는 시점에서 뺄힘이 가장 크게 증가하였다. 그러나, 동일한 수평변위가 반복되는 시점에서는 증가가 거의 없었다.

4. 결 론

이 연구에서는 접합부를 관통하는 보 주인장철근량이 서로 다른 5개의 보-기둥 접합부 실험을 수행하였다. 실험에서는 보 소성힌지 발생이후 접합부내 변형 침투와 접합부를 관통하는 보 주인장철근의 미끄러짐을 측정하고 이것이 접합부 내력과 연성에 어떠한 영향을 주는지 파악하는 것을 목적으로 하였다. 실험을 통해 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 보의 지점에서 접합부까지의 철근 미끄러짐량은 철근 항복 시점인 1Δ 이후 크게 증가하였으며, V_{j1}/V_{jby} 와 무관하게 거의 일정하였다. 이는 실험체의 V_{j1}/V_{jby} 값의 차이에 따라서 보의 구간별로 발생하는 철근의 변형률 값이 다르며, 지점부터 접합부까지의 미끄러짐량을 더하면 V_{j1}/V_{jby} 와 무관하게 거의 일정하기 때문이다.
- 2) 보 소성힌지 발생에 따른 변형률 침투량은 층변위가 증가할수록 증가하였으며 접합부 중심부의 변형률은 2Δ 시점까지는 탄성구간에 머물렀으나 추가적인 층변위에 의해 항복변형률을 초과하였다. 층간 변위 2% 이하에서는 특별한 경향이 없었으나 3% 이상에서는 접합부 전단강도비 V_{j1}/V_{jby} 가 클수록 보 소성힌지로 인한 변형률 침투 현상은 약 0.3~0.18 까지 감소하였다.
- 3) 접합부내 주인장방향 변형률 측정결과 BJ1, BJ2의 최대 변형률이 B1, B2의 최대변형률보다 약 3배 가량 크게 측정되었다. 이는 접합부 전단강도비 V_{j1}/V_{jby} 가 작을수록 접합부내 주인장방향 변형률이 증가하여 접합부 전단 내력을 감소시키기 때문이다.

감사의 글

이 연구는 2009년 한국과학재단 기초연구사업의 핵심연구지원사업(2009-0078981)의 재원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Joint ACI-ASCE Committee 352, *Recommendations for Design of Beam-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2003.
2. Fujii, S. and Morita, S., *Comparison between Interior and*

- Exterior RC Beam-Column Joint Behavior*, ACI SP-123, 1991, pp. 145~166.
3. Ehasani, M. R., Moussa, A. E., and Valenilla, C. R., Comparison of Inelastic Behavior of Reinforced Ordinary and High Strength Concrete Frames, *ACI Structural Journal*, Vol. 84, No. 2, 1987, pp. 161-169.
  4. Durrani, A. J. and Wight, J. K., "Behavior of Interior Beam to Column Connections under Earthquake Type Loading," *ACI Journal Proceeding*, Vol. 82, No. 3, 1985, pp. 343~349.
  5. Attaalla, S. A., "General Analytical Model for Nominal Shear Stress of Type 2 Normal-and Hgh-Strength Concrete Beam-Column Joints," *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 1, pp. 65~75.
  6. Hakuto, S., Park, R., and Tanaka, H., "Effect of Deterioration of Bond of Beam Bars Passing through Interior Beam-Column Joints on Flexural Strength and Ductility," *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 5, pp. 858~864.
  7. Leon, R. T., "Shear Strength and Hysteretic Behavior of Interior Beam-Column Joints," *ACI Structural Journal*, Vol. 87, No. 1, 1990, pp. 3~11.
  8. Kazuhiro, K., Shunsuke, O., and Hiroyuki, A., *Development of Design Criteria for RC Interior Beam-Column Joints*, ACI SP-123, 1991, pp. 97~124.
  9. Brooke, N. J., Megget, L. M., and Ingham, J. M., "Bond Performance of Interior Beam-Column Joints with High-Strength Reinforcement," *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 4, 2006, pp. 596~603.
  10. Kim, J. H. and Lafave, J. M., "Key Influence Parameters for the Joint Shear Behaviour of Reinforced Concrete RC Beam-Column Connections," *Engineering Structures*, Vol. 29, Issue 10, 2007, pp. 2523~2539.
  11. Lee, J. Y., Kim, J. Y., and Oh, K. J., Strength Deterioration of Reinforced Concrete Beam-Column Joints Subjected to Cyclic Loading, *Engineering Structure*, Vol. 31, Issue 9, 2009, pp. 2070~2085.
  12. Teraoka, M., Kanoh, Y., Sasaki, S., and Hayashi, K., "An Estimation of Ductility in Interior Beam-Column Sub-Assemblages of Reinforced Concreee Frames," *Journal of the Society of Materials Science*, 1996, Vol. 45, No. 9, pp. 1033~1041.
  13. Paulay, T., Priestley, M. J. N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, Jogn Wiley and Sons, New York, 1992, pp. 136~142.

요 약 이 연구에서는 5개의 철근콘크리트 보-기둥 접합부 실험을 분석하였다. 연구의 주목적은 접합부에 인접한 보의 소성힌지의 영향으로 인한 부착 감소로 발생하는 보 주인장철근 미끄러짐에 따른 접합부 내력 및 연성을 평가하는 것이다. 또한 보 주인장철근량을 변수로 하여 접합부 내력 및 연성에 미치는 영향을 평가하였다. 실험 결과에 의하면 접합부의 전단강도비 V_{j1} / V_{jby} 가 감소할수록 인접한 보의 소성힌지의 변형률 침투현상은 증가하는 것으로 나타났다. 주인장철근의 미끄러짐은 구간별로 다르게 나타났으며 주인장철근 뿔힘 현상은 접합부 전단강도비 V_{j1} / V_{jby} 와 관계없이 비슷하게 나타났다. 이것은 주인장철근 뿔힘 현상이 변형률 침투현상만이 아닌 인접한 보의 소성힌지의 축변형에도 영향을 받기 때문이다.

핵심용어 : 보-기둥 접합부, 뿔힘 현상, 보 주인장철근 미끄러짐, 연성능력, 전단강도