



보의 휨항복 후 접합부가 파괴하는 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 전단내력 감소에 대한 해석적 연구

박종욱¹⁾ · 윤석광¹⁾ · 김병일¹⁾ · 이정윤¹⁾*

¹⁾성균관대학교 건축공학과

A Study for Shear Deterioration of Reinforced Concrete Beam-Column Joints Failing in Shear after Flexural Yielding of Adjacent Beams

Jong-Wook Park,¹⁾ Seok-Gwang Yun,¹⁾ Byoung-II Kim,¹⁾ and Jung-Yoon Lee¹⁾*

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

ABSTRACT Beam-column joints are generally recognized as the critical regions in the moment resisting reinforced concrete (RC) frames subjected to both lateral and vertical loads. As a result of severe lateral load such as seismic loading, the joint region is subjected to horizontal and vertical shear forces whose magnitudes are many times higher than in column and adjacent beam. Consequently, much larger bond and shear stresses are required to sustain these magnified forces. The critical deterioration of potential shear strength in the joint area should not occur until ductile capacity of adjacent beams reach the design demand. In this study, a method was provided to predict the deformability of reinforced concrete beam-column joints failing in shear after the plastic hinges developed at both ends of the adjacent beams. In order to verify the deformability estimated by the proposed method, an experimental study consisting of three joint specimens with varying tensile reinforcement ratios was carried out. The result between the observed and predicted behavior of the joints showed reasonably good agreement.

Keywords : RC joint, deformability prediction model, potential shear strength, joint deformability, strain penetration phenomenon

1. 서 론

철근콘크리트 보-기둥 접합부는 모멘트저항골조에 하중이 작용할 때 구조물의 연성능력에 영향을 주는 중요한 부재 중의 하나이다. 접합부에 횡하중이 작용하면 접합부에 인접한 좌우 보(내부 접합부의 경우)와 상하기둥에는 동일 방향의 모멘트가 발생하게 된다. 이로 인해서 접합부 내에는 중력하중만이 작용할 때와 비교하여 큰 수직, 수평 전단력이 작용하게 된다. 특히 지진하중과 같은 횡하중이 작용할 때에는 접합부를 가로지르는 큰 전단내력에 대한 내력 설계가 내진설계의 관건이 되며 접합부의 내력이 외력에 대응하는 수준에 도달하지 못하면 접합부 내부에서 전단파괴나 부착파괴 같은 취성적인 파괴 가능성을 만든다. 그러므로 철근콘크리트 접합부에 대한 내진설계는 인접 보의 연성이 설계 요구수준에 도달할 때까지 접합부의 강도저감이 크게 일어나지 않는 수준의 설계가 필요하다.

1960년대 이후 구조물에 사용하는 재료의 성능이 향상되면서 보와 접합부 패널의 상대적인 강도 차이가 줄어들었다. 재료의 성능 향상은 보의 휨항복을 유도하는 설계를 따랐다고 하더라도 접합부에도 파괴가 연쇄적으로 발생하는 현상을 야기했다. 이후 1970년대부터 접합부의 전단내력에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 특히 미국, 일본, 뉴질랜드 3개국의 공동연구는 큰 성과를 거두었다. 하지만 공동연구임에도 불구하고 접합부의 전단 메커니즘(shear mechanism)과 접합부의 내력을 평가하는데 각기 다른 방향을 제시하였다. 미국은 ACI Recommendation(ACI 352R-02)¹⁾에 그 결과를 반영하여 비탄성거동의 반영 유무에 따라 2개의 범주로 나누어서 전단내력을 평가하고 있다. 일본은 AIJ(Architectural Institute of Japan) Guideline²⁾에서 아치작용(arch action)만을 고려하여 전단내력에 대한 식을 제안하고 있으며 뉴질랜드의 기준 NZS(New Zealand Standard) Code³⁾에는 아치작용과 트러스작용(truss action)을 모두 고려하고 있다. 3개국 모두 공통적으로 접합부의 전단내력은 콘크리트 압축강도와 접합부의 면적이 주요한 영향인자라는 데는 동의하고 있지만 철근비 등 그 외의 요소에는 다른 의견을 보이고 있다. 위 연구를 보완하고 개선된 평가식을 제안하기 위해 개

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

Received February 3, 2012, Revised April 2, 2012,

Accepted April 3, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

인 연구자 차원에서 연구가 활발하게 진행되었다. Fujii와 Morita,⁴⁾ Durrnai와 Wight⁵⁾는 실험을 통해서 각 변수가 외부 접합부와 내부 접합부의 거동에 주는 영향을 비교하였고, Attaalla⁶⁾는 많은 실험데이터를 분석하여 접합부의 강도모델을 제시하였다. 최근에는 Kim 등^{7,8)}이 접합부 전단강도에 영향을 주는 인자를 세밀하게 분석하여 확률을 접목한 새로운 방법의 모델을 제안하였다. 하지만 기 언급한 연구들은 접합부의 최대 전단력과 보유내력 관점에서 접근하였기 때문에 부재의 거동이나 변형에 따른 전단내력의 감소를 파악하기는 힘들다. 이에 대해서 Lee 등⁹⁾은 반복하중이 작용할 때 인접보 소성힌지영역의 변형률침투를 고려하여 전단내력의 저감 추이를 파악하였으나 기둥이나 접합부 패널의 변형을 고려하지 않았고 전단내력을 평가할 때 아치작용만을 활용하였다.

이 연구는 인접보의 휨항복 후 접합부가 전단파괴하는 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 전단내력의 감소와 그에 따른 부재의 연성 예측을 목적으로 한다. 이에 대해 다음과 같은 세부적인 연구를 수행하였다.

- 1) 해석 대상은 ACI 352R-02¹⁾에서 권고하는 접합부의 전단력을 만족하는 부재로 한다.
- 2) 접합부에 인접한 보에 소성힌지가 발생한 이후 접합부의 전단내력이 점점 감소하여 파괴하는 과정을 수치적인 방법으로 분석한다.
- 3) 이를 실제 실험 결과와 비교하여 타당성을 평가한다.

2. 접합부의 연성 평가 모델

일반적인 보-기둥 접합부의 내진설계는 인접보에 소성힌지를 발생시켜 기둥을 포함하여 보와 기둥의 접합 부분의 파괴를 방지하는 것을 기본으로 한다. 따라서 접합부 패널의 극한강도는 인접보의 휨항복강도보다 크게 설계한다. 그럼에도 불구하고 접합부 패널에 많은 균열이 나타나거나 파괴까지 이르는 경우가 있는데 이는 인접보의 큰 변형률이 접합부 내로 침투하는 현상 때문이다. Fig. 1은 인접 보에 소성힌지가 발생한 후의 보와 접합부 내부의 변형률 분포를 보여주는 한 예이다. 접합부를 관통하는 보 주근을 따라서 접합부 내부에서도 철근의 변형이 발생한다. 침투한 변형률이 증가하게 되면 동시에 접합부 패널의 주인장변형률이 증가하고 이에 따라 콘크리

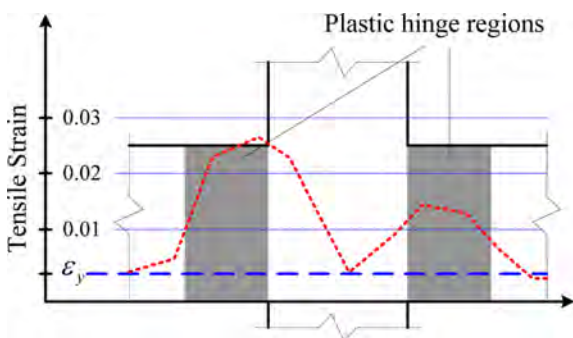


Fig. 1 Longitudinal strain distribution

트의 유효 압축강도가 줄어들어 전단 내력이 감소한다.

이 연구에서 제안하고자 하는 접합부 연성능력 평가 모델의 해석방법은 Fig. 2와 같다. 접합부의 변형은 크게 접합부 기둥, 패널, 보 세 부분에서 발생하며 접합부의 변형에 따라서 감소하는 전단 내력과 그 때의 연성률은 Fig. 2와 같은 순서로 구할 수 있다. 이 계산 과정에서는 많은 기호가 사용되었으며 이는 본문 외에 부록(기호)에도 정리하였다.

STEP 1: 철근과 콘크리트의 재료 물성치와 기하학적 성질을 입력한다. 인접보의 항복 시점을 수치 계산의 시작으로 한다. 기둥은 충분히 휨에 저항하여 탄성상태를 유지할 수 있도록 설계한다. 따라서 기둥의 변형은 다른 두 부분과 비교했을 때 무시할 수 있을 정도의 작은 값을 가진다.

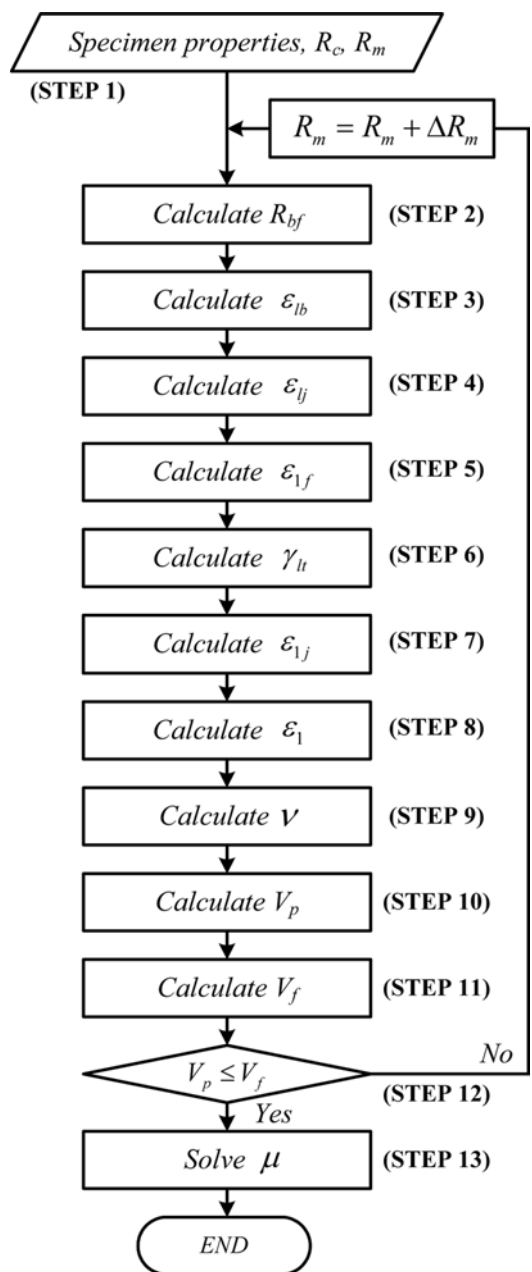


Fig. 2 Calculation procedure for potential shear capacity of beam-column joint

Fig. 3은 횡하중이 작용할 때의 내부 보-기둥 접합부의 변형을 묘사한 것이다. 구조물에 작용하는 횡하중은 층간 전단력으로 치환되어 부재의 횡변위를 일으킨다. 횡변위를 기둥의 길이로 나눈 값 즉, 기둥의 회전각($R_m = \Delta/H$)이 순서도에서 입력되는 변수가 된다. 횡변위가 커지면서 보에 소성힌지가 발생하면 접합부의 변형은 소성힌지에 집중된다.

STEP 2: 회전각 R_{bf} 는 보의 소성힌지 영역의 변형이다. 기둥의 변형이 탄성을 유지하면서 증가한다고 가정할 때, R_{bf} 는 R_m 과 같은 값을 가진다(Fig. 4).

STEP 3: 소성힌지의 길이방향 변형률 ϵ_{lb} 는 Lee와 Watanabe¹⁰⁾에 의해 제안된 식 (1)을 사용해서 구한다.

$$\epsilon_{lb} = \epsilon_y + \left(\frac{R_{mpp} + R_{mnp}}{2l_p} \right) z \quad (1)$$

여기서, ϵ_y 는 보 주인장철근의 항복변형률, R_{mpp} , R_{mnp} 는

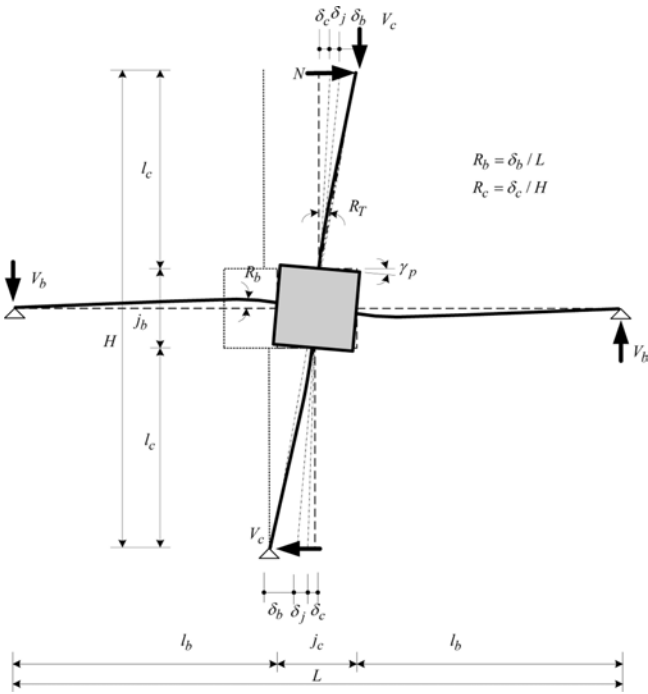


Fig. 3 Joint deformation

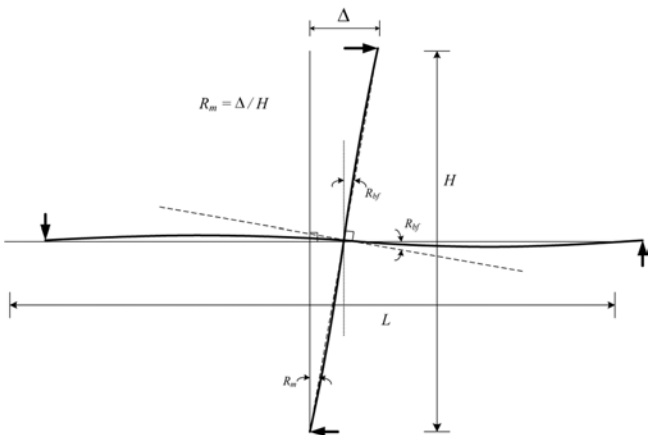


Fig. 4 Relation between joint rotation and beam rotation

각각 정, 부방향 소성회전각이며, l_p 는 소성힌지의 길이, z 는 압축철근과 인장철근 사이의 길이이다. l_p 는 다음 식을 이용한다.

$$l_p = 0.5 \left(\frac{M_b}{V_b \cdot h_b} \right) d \quad (0.75d \leq l_p \leq d) \quad (2)$$

여기서, $M_b/(V_b h_b)$ 는 전단경간비이며, d 는 보의 유효깊이이다.

STEP 4: 접합부 내부로 침투한 소성힌지의 변형률 ϵ_j 는 소성힌지의 길이방향 변형률 ϵ_{lb} 에 K 라는 계수를 곱하여 구한다. K 는 ϵ_{lb} 와 ϵ_j 를 연결하는 상관계수로써, Lee 등⁹⁾의 연구를 참고하여 산정하였다. 보가 항복할 때의 접합부의 전단강도 V_{jby} 와 ACI 352R-02¹¹⁾에 제안하는 전단강도 V_{jt} 를 통해서 구하며 고정된 값으로 적용된다.

STEP 5: ϵ_j 는 접합부 패널의 변형을 일으키고 접합부의 전단 내력을 감소시킨다. 보의 휨변형에 의해 발생한 접합부의 주인장변형률 ϵ_{lf} 는 변형률의 적합조건을 적용해서 구할 수 있다.

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{1f} \sin^2 \alpha + \epsilon_{2f} \cos^2 \alpha \quad (3a)$$

주압축변형률 ϵ_{2f} 는 주인장변형률 ϵ_{1f} 와 주근의 항복변형률 ϵ_y 에 비해서 상당히 작은 값을 가지기 때문에 무시할 수 있다. 따라서 식 (3a)를 정리하면,

$$\epsilon_{1f} = \frac{\epsilon_{ij}}{\sin^2 \alpha} \quad (3b)$$

STEP 6: STEP 5에서 구한 접합부 패널의 주인장변형률을 다음 변형률 적합조건에 적용하여 접합부 패널의 전단변형률을 유추할 수 있다.

$$\frac{\gamma_{jt}}{2} = (-\epsilon_{2f} + \epsilon_{1f}) \sin \alpha \cos \alpha \quad (4)$$

STEP 7: 전단 변형에 의해 추가적으로 발생한 주인장 변형률은 Attaalla⁶⁾가 제안한 식을 참고하였다.

$$\epsilon_{ij}' = \frac{\gamma_{jt} \sin \alpha \cos \alpha}{h_c} (h_c - 2c_j) \quad (5)$$

여기서, ϵ_{ij}' 는 전단변형률 γ_{jt} 에 의해 발생한 접합부 내부의 수평변형률이며, c_j 는 접합부의 변형이 발생한 후 접합부 패널의 압축영역 길이이다(Fig. 5).

STEP 8: 보의 휨변형에 의해 발생한 접합부 내부의 주인장변형률과 패널의 전단변형에 의해 추가적으로 발생한 주인장변형률을 더하여 접합부 내부의 전체 주인장 변형률을 구한다.

$$\epsilon_1 = \epsilon_{1f} + \epsilon_{ij}' \quad (6)$$

STEP 9: 접합부 패널의 콘크리트 유효압축강도를 구하기 위해서 강도저감계수 ν 를 구한다. ν 는 Belarbi와 Hsu¹¹⁾

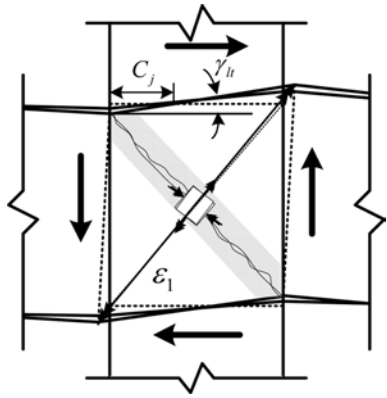


Fig. 5 Increasing shear deformation of joint panel

가 제안한 다음 식을 사용해서 계산한다.

$$v = \frac{5.8}{\sqrt{f_{ck}(1 + 400\varepsilon_1)}} \leq \frac{0.9}{\sqrt{1 + 400\varepsilon_1}} \quad (7)$$

STEP 10: 이 연구에서는 접합부의 잠재전단강도를 산정하는데 아치작용(arch action)과 트러스작용(truss action)을 모두 고려하였다. 외력이 작용하고 나서 접합부에 발생하는 힘과 영역이 Fig. 6과 같을 때, 아치 작용과 트러스 작용에 대한 부분은 각각 다음 식들로써 표현할 수 있다.

$$V_{ch} = v_c f_{ck} (b_s \cdot b_{ej}) \cos \alpha_a \quad (8)$$

$$V_{sh} = v_s f_{ck} (h_c \cdot b_{ej}) \sin \alpha_t \cos \alpha_t \quad (9)$$

여기서, v_c 와 v_s 는 각각 아치작용과 트러스작용에 적용되는 강도저감계수이다. 접합부의 잠재 전단강도는 두 요

소를 더한 값이다.

$$V_p = V_{ch} + V_{sh} \quad (10)$$

STEP 11~13: 접합부의 연성능력(ductile capacity)은 이전 과정에서 순차적으로 구한 잠재전단내력 V_p 와 보가 휨항복할 때의 전단강도 V_f 가 만나는 점으로 한다.

3. 접합부 연성 평가 모델의 실제 적용

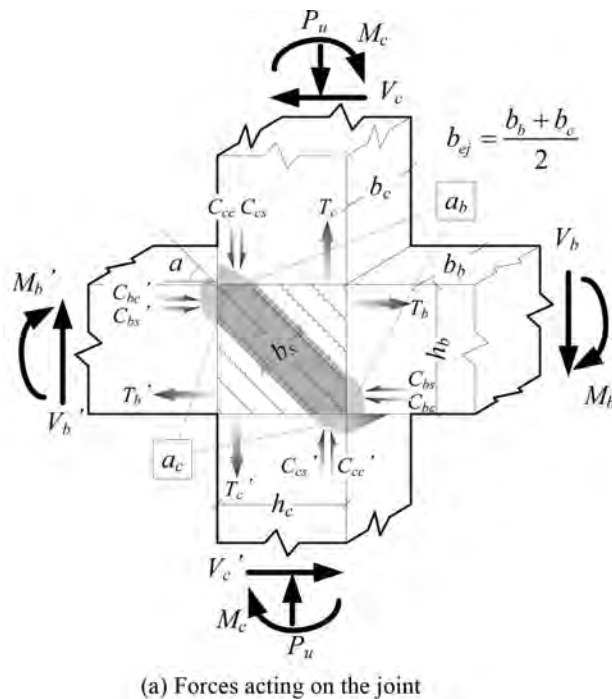
3.1 해석대상 및 변수

앞 절에서 설명한 연성 평가 모델의 유효함을 파악하기 위해서 횡하중이 작용하는 철근콘크리트 보-기둥 실험체를 검토하였다. 해석대상은 Lee 등⁹⁾의 3개 실험체, Kaku 등¹³⁾의 2개 실험체, Hayashi 등¹⁴⁾의 1개 실험체, Yoshino 등¹⁵⁾의 2개 실험체로서 보와 접합부 내부가 동시에 파괴한 실험체로 하였다.

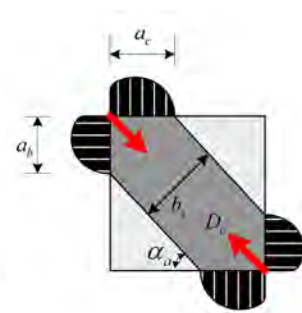
Table 1은 실험체의 재료 물성치와 분석에 사용된 변수를 보여준다. 실험체들의 전단내력은 ACI 352R-02¹⁾에서 제시하고 있는 식 (11)에 기초하여 설계되었다.

$$V_j = 0.083 \gamma \sqrt{f_{ck}} b_j h_c \quad (11)$$

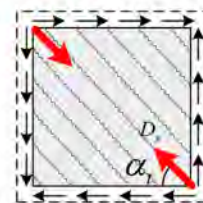
여기서, V_j 는 접합부의 전단내력, γ 는 접합부의 형태 및 비내진(Type 1), 내진(Type 2) 구역에 관한 계수, b_j 는 접합부의 유효폭이다. Table 1에서 V_{j1} , V_{j2} 는 각각 Type 1과 Type 2에 준하는 전단 내력으로 γ 가 20, 15가 적용되어 각각 477~1,626 kN, 358~1,220 kN이었다. V_{jby} 는 보가 휨에 항복할 때의 접합부의 수평 전단력으로 다음 식



(a) Forces acting on the joint



(b) Arch action mechanism



(c) Truss action mechanism

Fig. 6 Two components to predict potential shear strength

Table 1 The material properties 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}	
	Reinforcing bars (upper and lower each)		Reinforcing bars								
	f_{by} (MPa)	$N-n_b$	f_{cy} (MPa)	$N-n_c$							
Lee ⁹⁾	BJ1	509.9	6-D16	514.4	12-D29	40.0	1194.2	895.7	802	1.06	0.80
	BJ2	509.9	5-D16	514.4	12-D29	40.0	1194.2	895.7	614	1.25	0.94
	BJ3	509.9	4-D16	514.4	12-D29	40.0	1194.2	895.7	500	1.54	1.16
Kaku ¹³⁾	J31A	372.6	4-D25	371.8	14-D19	57.9	1209.0	906.8	1432	0.84	0.68
	J32B	372.6	4-D25	371.8	14-D19	57.9	1209.0	906.8	1432	0.84	0.68
Hayashi ¹⁴⁾	No.47	382.2	6-D19	644.8	12-HD19	49.0	1626	1220	1253	1.30	1.04
Yoshino ¹⁵⁾	No.1	382.4	4-D13	378.6	8-D16	28.6	477	358	397	1.20	0.96
	No.3	382.4	3-D16	378.6	8-D16	28.6	477	358	453	1.05	0.84

f_{by}, f_{cy} : The yield strength of beam and column reinforcement, N : The number of reinforcement, n_b, n_c : Grade description of beam and column reinforcement, f_{ck} : The compressive strength of concrete, V_{j1}, V_{j2} : The joint shear strength proposed by ACI 352R-02, V_{jby} : The joint shear strength when the beam bar yields

(12)에 따라 계산하였다.

$$V_{jby} = \left(\frac{H}{z_b} - 1\right) V_{by} \frac{L}{H} - \frac{h_c}{z_b} V_{by} \quad (12)$$

여기서 V_{by} 는 보가 항복할 때의 보의 수직 전단력으로 다음 식을 통해서 간단하게 계산할 수 있다.

$$V_{by} = \frac{A_b f_{by} j d}{a} \quad (13)$$

여기서, A_b 는 보의 주인장철근의 단면적, $j d$ 는 압축, 인장 응력 중심 간의 거리, a 는 전단경간으로 Fig. 3의 l_b 와 같은 값을 가진다. V_{jby} 는 A_b 의 크기에 따라 그 크기가 변하게 된다. 즉, 실험체에 따라서 보가 항복할 때 접합부의 여유내력이 다르다는 것을 의미하며 Table 1에 $V_{j1}, V_{j2}/V_{jby}$ 의 수치로 기재되었다. 이 수치는 작을수록 접합부에 파괴가 더 집중되고 클수록 보의 파괴가 고려된다는 것을 의미한다.

대상이 된 접합부는 인접보가 항복할 때의 전단강도 V_{jby} 가 ACI 352R-02¹⁾에서 제안하는 Type 1에 대한 강도 V_{j1} 에 대한 비율이 0.8~1.2로 설계되었다. Lee 등⁹⁾과 Yoshino 등¹⁵⁾은 보의 주인장철근비가 실험 변수가 되어 실험체별로 보의 내력이 다른 실험이다. Kaku 등¹³⁾은 기둥의 전단보강근 철근비와 보의 구속이 변수로 설정된 실험으로서 이 논문에서 채택한 실험체는 물성은 동일하나 보의 구속력이 다른 두 실험체이다. Hayashi 등¹⁴⁾의 실험은 부차파괴와 보의 전단파괴 등 다양한 파괴를 관찰한 실험이었는데 이 논문에서는 보와 접합부 내부가 파괴한 실험체를 분석대상으로 삼았다. 최대 하중 및 최대 응력, 항복변위, K 의 계산 결과를 Table 2에 정리하였다.

3.2 해석 결과와 비교

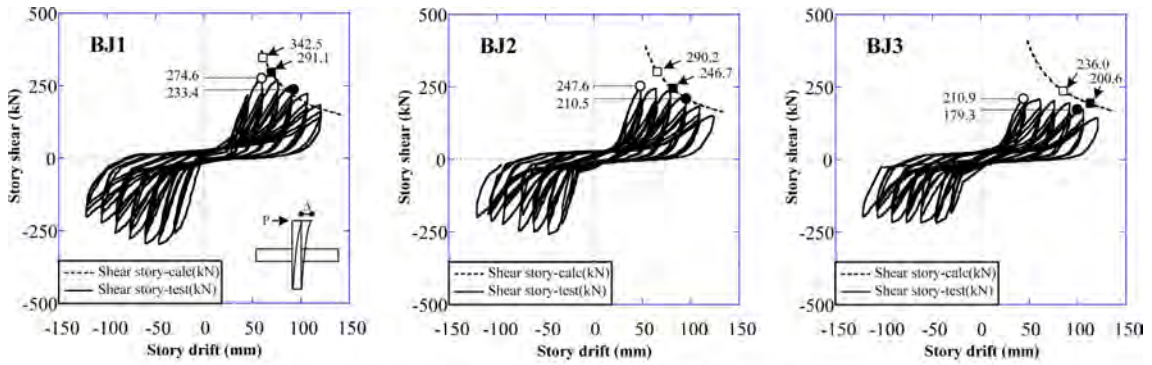
Fig. 7은 해석한 결과와 실험 결과를 직접 비교한 그

Table 2 Test results

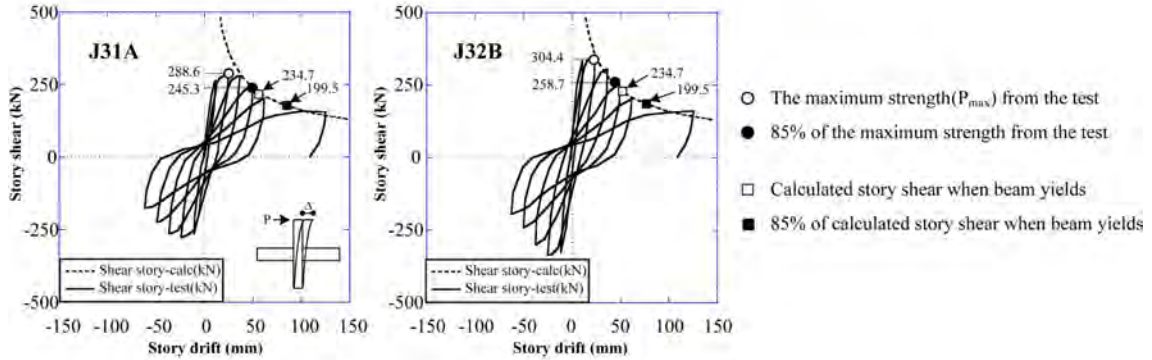
Specimen	P_{max} (kN)	τ_{max} (MPa)	Δy (mm)	K	
Lee ⁹⁾	BJ1	274.6	2.43	58	0.47
	BJ2	247.6	2.17	51	0.40
	BJ3	211.0	1.71	45	0.32
Kaku ¹³⁾	J31A	288.6	2.37	10	0.59
	J32B	304.4	2.84	8	0.59
Hayashi ¹⁴⁾	No.47	131.3	0.94	10	0.38
Yoshino ¹⁵⁾	No.1	35.0	0.65	23	0.42
	No.3	37.7	0.71	21	0.47

P_{max} : The maximum story shear strength, τ_{max} : The maximum story shear stress; $\tau_{max} = 2P_{max}/h_c(b_b + b_c)$ (where, h_c : column depth, b_b : beam width, b_c : column width), Δy : story drift when beam yields, K : strain penetration factor

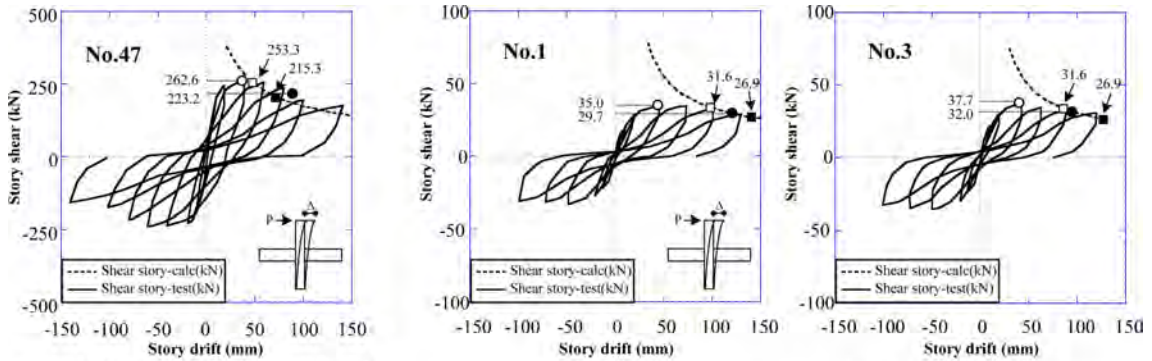
래프이다. 실선은 실험에서 구한 층간 전단력과 층간 변위의 이력 곡선이고 점선은 평가 모델 알고리즘을 통해서 계산한 잠재 전단강도이다. 실험체들은 인접보가 항복한 후 최대 하중을 지나 점점 내력이 감소하는 형태의 파괴모드를 가졌다. 해석을 통해서 구한 감소곡선은 대상 실험체의 내력을 의미하므로 이 곡선과 실험에서 나타난 이력곡선의 포락선의 차이를 비교해서 평가 모델 알고리즘의 유효함을 평가할 수 있다. 그래프에서 흰색 원으로 표시된 부분은 실험에서 얻은 최대 층간 전단력 값이다. 흰색 사각형으로 표시된 부분은 평가모델을 통해서 구하였으며, 이 값은 인접보의 주철근이 항복할 때의 층간 전단력이다. 검은 도형들은 각 흰 도형의 85%에 대응하는 값으로, 연성을 구하는 방법 중에서 Paulay와 Priestley¹²⁾가 제안한 방법을 참고하여 정한 비교 기준점이다. Fig. 8은 보가 휨항복할 때의 전단력에 대한 해석과 실험 결과를 비교한 그래프이다. 그래프 상의 각 도형에 대응하는 값은 1에 가깝게 분포되어 있으며 이는 해석에 대한 신뢰성을 보여주는 지표라고 할 수 있다.



(a) Calculated curves compared with Lee⁹⁾'s test



(b) Calculated curves compared with Kaku¹³⁾'s test



(c) Calculated curves compared with Hayashi¹⁴⁾'s test

(d) Calculated curves compared with Yoshino¹⁵⁾'s test

Fig. 7 Calculated and tested result for story drift and story shear relation

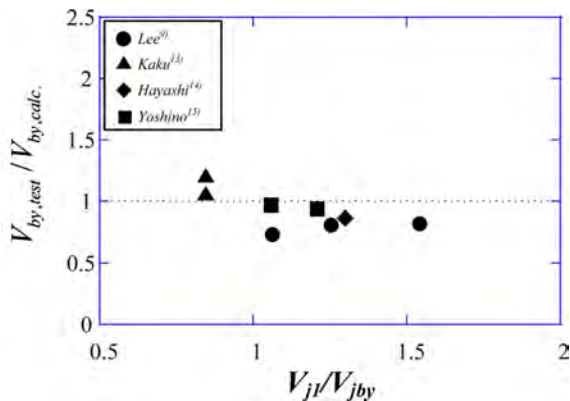
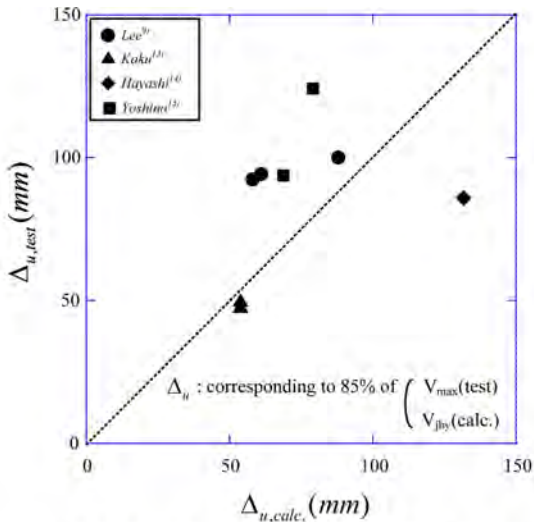


Fig. 8 Comparison of beam shear strength when beam

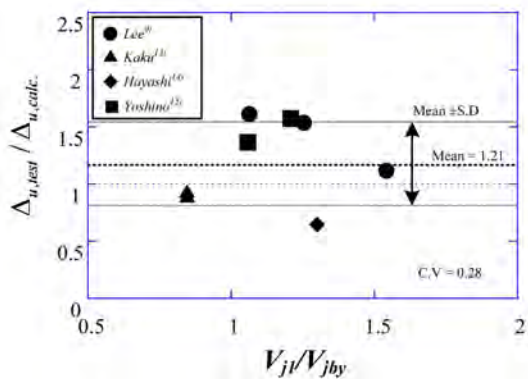
그래프 상에서 기준점에 대응하는 변위를 비교했을 때,

Lee 등⁹⁾의 실험은 약 10~60%의 오차를 보여주었으며, Kaku 등,¹³⁾ Hayashi 등,¹⁴⁾ Yoshino 등¹⁵⁾는 각각 10%, 35%, 40~60%의 오차를 나타내었다. 이를 보다 쉽게 비교하기 위해 기준 변위에 대한 분석을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)는 해석 결과와 실험 결과에서 구한 변위를 비교한 그래프이다. X축과 Y축은 각각 실험과 해석에서 얻은 값이고 도형으로 그래프 상에 표현된 각 점은 기준 변위이다. 전체적으로 해석 결과가 실험 결과보다 더 작게 나타났다. Fig. 9(b)는 Fig. 9(a)의 실험 결과를 해석 결과로 나눈 값으로서 V_{jl}/V_{jby} 에 따라 나타낸 그래프이다. 8개 실험체의 평균은 1.21, 표준편차는 0.34, 변동계수는 0.28로 계산되었다.

해석 결과와 실험 결과의 일치 정도는 해석 알고리즘을 통해서 구한 잠재 전단강도 감소 곡선(Fig. 7의 점선)



(a) Calculated displacement vs. tested displacement



(b) Joint shear strength ratio(V_{ji}/V_{jby}) vs. deformability ratio

Fig. 9 Comparison between calculated and tested results

의 기울기와 실험에서 획득하는 층간 전단력-층간 변위 이력곡선(Fig. 7의 실선)의 포락선 기울기와 관계가 있다. 보와 접합부 내부가 동시에 파괴되는 파괴 메커니즘을 가지고 있다고 하더라도 접합부 패널의 파괴 정도 즉, 변형률의 침투 정도에 따라서 이력곡선에서 나타나는 형태가 많이 다를 수 있다. Kaku 등¹³⁾의 실험 결과의 경우, 변위에 대해서는 상당히 일치하는 것을 알 수 있지만 하중은 그에 반해 차이가 많으며, Hayashi 등¹⁴⁾이나 Yoshino 등¹⁵⁾에서는 그 반대의 결과를 확인할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 기존의 많은 연구에서 주목하는 보-기둥 접합부의 최대강도가 아닌 변형능력에 주목하였다. 접합부 패널에 인접한 보의 휨항복이 접합부 내부에 영향을 미쳐 접합부 패널 내에서 전단파괴하는 양상에 대해서는 내려뿐만 아니라 연성까지 고려할 때 구조물 전체의 안정성을 더 정확하게 파악할 수 있기 때문이다. 이를 위해서 연성을 파악하는 방법을 제시하고 실제 실험 결과에 적용하여 비교하였을 때, 실제 실험체의 층간변위에 따른 전단 내력의 변화를 납득할 수 있는 오차 아

래 어느 정도 일치하는 결과를 보여주었다. 이는 보-기둥 접합부의 전단 강도 예측에서 이전과는 다른 방향의 성과를 보여준다고 할 수 있다. 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 연성 평가 모델은 부재의 회전각을 변수로 하여 회전각이 늘어남에 따라 작아지는 접합부의 전단 내력을 힘의 평형과 변형을 적합조건, 기존 접합부의 변형과 콘크리트의 강도에 관련한 이론 등을 이용하여 예측하였다.
- 2) 이 연구에서 구축한 모델은 아치작용과 트러스작용을 모두 고려하였으며 이는 실제 경우를 잘 반영하였다. 두 작용에 적용되는 강도저감계수는 인접보의 변형률이 침투한 비율의 영향을 받는데, 이 비율은 기존 문헌을 참조하여 V_{jby} 에 대한 V_{ji} 의 비로 결정하였다.
- 3) 연성 평가 모델을 실제 실험 결과와 비교했을 때 크지 않은 오차범위 내에서 접합부를 평가하였으며 해석과 실험의 연성율의 비율은 0.5~1.5에서 형성되었으며 평균은 0.97, 표준편차는 0.23, 변동계수는 0.24로 계산되었다.
- 4) 기존 접합부의 내력에 대한 실험 데이터를 더 모집하여 이 연구에서 제안한 연성 평가 모델에서 불완전한 부분을 파악하고 개선하여 오차를 줄여 나가는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

기 호

a_b, a_c	보와 기둥의 휨압축영역
b_{ej}	보-기둥 접합부의 유효폭
b_s	접합부 패널 압축스트럿의 폭
c_j	전단변형시 접합부 패널 압축영역의 길이
d	보의 유효깊이
f_{ck}	콘크리트 압축강도
h_b	보의 깊이
h_c	기둥의 깊이
K	변형률침투계수
l_p	소성힌지영역의 길이
M_b	보에 작용하는 휨모멘트
R_{mpp}, R_{mnp}	정·부방향 부재 회전각
V_b	보에 작용하는 전단력
V_p	보-기둥 접합부의 잠재전단력
V_{ch}	아치작용에 의한 전단력
V_{sh}	트러스작용에 의한 전단력
z	보 상·하부 철근 사이의 거리

α	접합부 패널 콘크리트 압축대의 각도
α_a, α_t	아치작용과 트러스작용에서 적용되는 접합부 패널 콘크리트 압축대의 각도
ε_1	접합부 패널의 주인장변형률
$\varepsilon_{1f}, \varepsilon_{2f}$	변형률 침투에 의해 발생한 접합부 패널의 주인장, 압축변형률
ε_{lb}	소성힌지 영역의 길이방향 변형률
ε_{lj}	접합부 패널의 보 길이방향 변형률
ε_{lj}'	접합부 패널의 전단변형에 의해 발생한 접합부 패널의 보 길이방향 변형률
ε_y	보주인장철근의 항복변형률
γ_{lt}	접합부 패널의 전단변형률
ν	강도저감계수
ν_c, ν_s	아치작용과 트러스작용에 적용되는 강도저감계수

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, 37 pp.
2. AIJ, *Design Guidelines for Earthquake Resistance Reinforced Concrete Buildings Based on Inelastic Displacement Concept*, AIJ, 1999, 440 pp.
3. NZS, *The Design of Concrete Structures*, NZS, 1982, 127 pp.
4. Fujii, S. and Morita, S., *Comparison between Interior and Exterior RC Beam-Column Joint Behavior*, ACI SP-123, 1991, pp. 145~166.
5. Durrani, A. J. and Wight, J. K., "Behavior of Interior Beam to Column Connections under Earthquake Type Loading," *ACI Journal Proceeding*, Vol. 82, 1985, pp. 343~349.
6. Attaalla, S. A., "Deformation Characteristics of Reinforced Concrete Beam-Column Joint Cores under Earthquake Loading," *Advanced in Structural Engineering*, Vol. 6, No. 1, 2003, pp. 15~21.
7. Kim, J., LaFave, J. M., and Song, J., "A New Statistical Approach for Joint Shear Strength Determination of RC Beam-Column Connections Subjected to Lateral Earthquake Loading," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 27, No. 4, 2007, pp. 439~456.
8. 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, 2009, pp. 2523~2539.
9. Lee, J. Y., Kim, J. Y., and Oh, G. J., "Strength Deterioration of Reinforced Concrete Beam-Column Joints Subjected to Cyclic Loading," *Engineering Structures*, Vol. 31, Issue 9, 2009, pp. 2070~2085.
10. Lee, J. Y. and Watanabe, F., "Predicting the Longitudinal Axial Strain in the Plastic Hinge Regions of Reinforced Concrete Beams Subjected to Reversed Cyclic Loading," *Engineering Structures*, Vol. 25, Issue 7, 2003 pp. 927~939.
11. Belarbi, A. and Hsu, T. T. C., "Constitutive Laws of Softened Concrete in Biaxial Tension-Compression," *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 5, 1995, pp. 562~573.
12. Paulay, T. and Priestley, M. J. N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons, New Jersey, 1992, pp. 136~142.
13. Kaku, T., Maso, K., and Muguruma, T., "Experimental Study about Deformation Characteristic of Beam Column Connection in RC Structure (in Japanese)," *Proceeding of the Japan Concrete Institute*, Vol. 15, No. 2, 1993, pp. 559~564.
14. Hayashi, K., Teraoka, M., Mollick, A. A., and Kana, Y., "Bond Characteristic of Interior RC Beam-Column Connections Using High Strength Materials (in Japanese)," *Proceeding of the Japan Concrete Institute*, Vol. 15, No. 2, 1993, pp. 583~588.
15. Yoshino, M., Takeda, S., and Kamimura, T., "Behavior of Interior RC Beam-Column Connections after Yielding of Longitudinal Beam Reinforcement (in Japanese)," *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol. 19, No. 2, pp. 987~992.

요약 철근콘크리트 보-기둥 접합부는 구조물 전체의 거동에 가장 크게 영향을 주는 부재 중 하나이다. 보와 기둥의 상대적인 강도 차이가 줄어들면서 지진에 의한 피해가 접합부에도 발생하고 있다. 지진하중과 같은 횡방향 반복하중이 작용하게 되면 접합부는 휨보다는 수직 혹은 수평방향 전단이나 부착에 대한 저항력이 중요하다. 따라서 접합부에 대한 내진설계는 설계자가 의도한 연성에 만족할 때까지 전단이나 부착에 대한 내력이 크게 감소하지 않는 수준의 설계가 요구된다. 하지만 인접보 소성힌지의 변형률 침투와 침투한 변형률의 영향으로 인해서 접합부의 변형이 발생하게 되고 접합부의 내력은 설계자의 요구 수준을 만족하지 못할 수도 있다. 이 논문에서는 부재 각 요소가 내부 접합부에 미치는 변형과 감소하는 전단내력을 파악하고 연성을 계산하는 모델을 제시하였다. 힘의 평형과 변형률 적합조건, 다른 연구자들의 이론을 참고하여 구축하였으며 모델을 실제 실험에 적용하였을 경우 타당한 범위 내에서 평가하였다. 다른 실험 데이터에 대한 추가적인 분석으로 불완전한 부분을 파악하고 개선하여 결과에 대한 오차를 줄이는 연구가 필요하다.

핵심어 : RC 접합부, 연성 평가 모델, 잠재전단강도, 접합부 변형 능력, 변형률 침투현상