

철근콘크리트 보-기둥 접합부의 연성능력 평가

Predicting the Ductility Capacity of Reinforced Concrete Beam-Column Joints

오기종*

Oh, Ki-Jong

채희대**

Chai, Hye-Dai

이정윤***

Lee, Jung-Yoon

ABSTRACT

This paper provides a method to predict the ductile capacity of reinforced concrete beam-column joints that fail in shear after the plastic hinges occur at both ends of the adjacent beams. The proposed method takes into account shear strength deterioration in the beam-column joints. The shear strength and the corresponding ductility of the proposed method was verified by comparing with the four RC beam-column assemblies under reversed cyclic loading corrected from the technical literature. Comparisons between the observed and calculated shear strengths and their corresponding ductilities of the tested assemblies, showed reasonable agreement

1. 서론

구조부재에서 보-기둥 접합부의 파괴는 구조물의 과도한 변형을 일으키거나 붕괴를 가져오므로 접합부의 강도와 그 거동에 대한 정확한 예측이 필요하다. 하지만 현재 접합부에 관한 ACI 318-02 기준¹⁾은 콘크리트의 강도만을 고려한 실험에 의한 경험식으로 보다 합리적으로 구조물의 안정성을 평가하기 위해서는 합리적으로 접합부의 내력 및 거동을 정확하게 평가해야 한다.

접합부의 파괴는 크게 두 가지 파괴로 나누어진다. 보에서 소성힌지가 발생하기 전에 먼저 접합부가 파괴(이하 J-파괴)하는 것과 보에서 소성힌지가 발생한 후 접합부가 파괴(이하 BJ-파괴)하는 것이다. 접합부에서는 원칙적으로 어떠한 파괴도 일어나지 않아야 하기 때문에, J-파괴와 BJ-파괴는 접합부 인접보에 소성힌지가 발생 하에 계획된 연성률에 도달할 때까지 발생하지 않아야 한다. 본 논문에서는 BJ-파괴에 대하여 보-기둥 접합부에 인접한 보에 소성힌지가 발생하였을 때, 그 영향으로 인하여 접합부의 주인장 변형이 증가함과 동시에 접합부의 내력이 감소하는 경향을 평가하였다.

2. J-파괴하는 접합부의 전단내력 평가식에 대한 설명

선행 연구²⁾에서 J-파괴하는 접합부의 전단강도를 평가할 수 있는 제안식을 유도하고 검증하였다. 제안식은 콘크리트의 압축강도, 접합부의 횡방향 철근비, 축응력과 함수 관계에 있는 주인장 변형률을 트러스 이론에 의하여 유도한 후, 주인장 변형률을 변수로 하는 강도저감계수 계산과정을 포함하고 있다. 제안식은 다음과 같다.

* 정희원, 성균관대학교 건축공학과 석사과정

** 정희원, 성균관대학교 건축공학과 석사과정

*** 정희원, 성균관대학교 건축공학과 조교수

$$V_j = \nu_j f_{ck} b_j S_d \quad (1)$$

$$\nu_j = f_{ck}^{-0.5} \cdot \rho_l^{0.14} \cdot (0.003\sigma_t^2 + 5) \quad (2)$$

여기서, f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도, σ_t 는 축응력으로 단위는 MPa 이다.

3. 제안식 유도

소성힌지가 발생한 보-기둥 접합부 인접 보에서의 변형은 접합부 내부에 비하여 상당히 큰 변형을 가지게 되며, 탄성상태의 접합부 내부변형이 소성상태로 될 가능성이 크다. 콘크리트 재료특성으로 인하여 주인장 변형률이 증가하게 되면 콘크리트가 급격한 강도 저하를 보이며, 접합부의 강도가 감소하게 된다.

본 논문에서는 선행 연구자가 수행한 J-파괴시의 전단강도 계산시 사용하였던 주인장 변형률 계산방법을 사용하여 BJ-파괴하는 접합부의 내력 평가식을 유도하였다. 유도된 제안식은 보-기둥 접합부 콘크리트 스트럿의 변형에 영향을 주는 소성힌지의 영향을 접합부의 전단내력과 소성힌지의 회전변위에 대한 관계로 나타내었다.

철근콘크리트 보-기둥 접합부에 횡하중이 작용할 때, 접합부는 그림 1과 같이 변형한다. 본 연구에서는 소성힌지가 발생한 보의 처짐 δ_L , δ_R 에 의하여 소성힌지 영역의 회전각을 산정하였다. 그림 2와 같이 캔틸레버 보에 단조하중이 작용할 때, 소성힌지가 발생한 영역에서는 힌지의 회전각이 증가할수록 보의 변형이 증가한다. 소성힌지 영역이 늘어난 길이를 e 라고 하면, 이것은 보의 연성계수 μ 가 증가함에 따라 비례적으로 증가하며, 압축주근의 수축 e_c 와 소성힌지의 회전각 R_T 에 의하여 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$e = e_c + \frac{R_T \cdot z}{2} \quad (3)$$

소성힌지가 발생한 영역에서 부재의 축방향 변형률은 식(3)을 $e_{lb} = e/l_h$ 관계에 대입하면 식(4)를 구할 수 있다.

$$e_{lb} = \frac{e_c}{l_h} + \frac{R_T \cdot z}{2l_h} \quad (4)$$

식(4)에서 e_c 의 값은 휨 항복 이후 주근의 인장변형에 비하여 매우 작은 값이므로 결국 보의 주근의 축방향 변형률은 식(5)와 같다.

$$e_{lb} = \frac{R_T \cdot z}{2l_h} \quad (5)$$

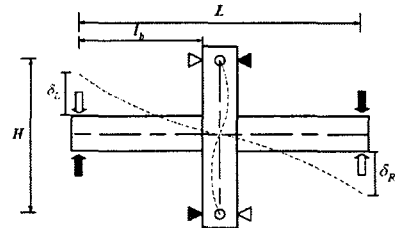


그림 1 횡하중에 의한 보-기둥 접합부의 변형

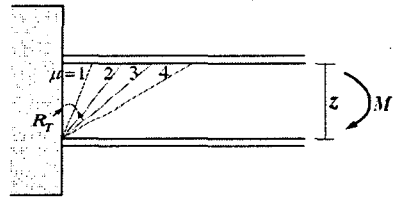


그림 2 보에 발생한 소성힌지 영역에서 주근의 변형

그림 3은 기존에 수행된 실험결과³⁾에서 중립축의 보 주근의 변형률이 보와 기둥의 접합면과 소성힌지가 발생한 보의 내부에서는 보의 연성계수가 증가함에 따라 항복변형률의 10배가 넘는 큰 변형률을 나타내고 있음을 알 수 있다.

따라서 BJ-파괴하는 접합부의 주인장 변형률은 소성힌지가 발생한 보에서의 주근의 변형률 ϵ_{ib} 를 접합부 내부의 콘크리트 스트럿의 방향으로 치환한 후, 접합부 내부의 주인장 변형률에 고려하였으며 이를 K 로 나타내었다.

기존 연구자⁴⁾의 논문에서 소개된 트러스 모델에 의하여 접합부 콘크리트 스트럿의 각도 $\alpha = 45^\circ$ 일 때 변형률의 적합조건에 의하여 $\epsilon_1 = 2\epsilon_t$, $\epsilon_1 = 2\epsilon_l$ 이며(ϵ_l , ϵ_t 는 각각 접합부의 l -방향, t -방향 변형률), 소성힌지의 길이를 $l_p = z$ (z 는 보의 상부주근과 하부 주근의 도심간 거리)로 가정하면 BJ-파괴하는 접합부의 주인장 변형률은 식(6)과 같다.

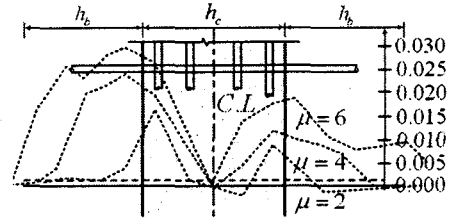


그림 3 보-기둥 접합부에서 소성힌지가 발생한 보에서의 주근의 변형률

$$\epsilon_1 + K \cdot \epsilon_{ib} = \epsilon_1 + K \left(0.5 \frac{(R_T/2) \cdot jd}{l_p} \right) \quad (6)$$

$$\nu_j = \frac{0.9}{\sqrt{1 + 400(\epsilon_1 + K \cdot \epsilon_{ib})}} \quad (\leq 1) \quad (7)$$

여기서 $K=0.5$ 이며, K 는 접합부 내부를 지나는 보 주근의 인장변형률과 소성힌지 내부의 보의 주근의 인장변형률 비이다. J-파괴시의 주인장 변형률 ϵ_1 는 식(2)에 의하여 구할 수 있으므로 소성힌지의 회전각 R_T 를 구하여, 식(6)에 대입하여 BJ-파괴하는 접합부의 강도저감계수를 구할 수 있다. 본 논문에서는 소성힌지의 회전각 R_T 를 기존의 힘에 관한 이론⁵⁾에 의하여 다음식과 같이 구하였다.

$$R_T = \int_A^B \varphi \, dx = \frac{\varphi \cdot l_b}{2} \quad (8)$$

여기서, l_b 는 보의 순길이, φ 는 보의 곡률이다.

4. BJ-파괴하는 접합부의 전단내력 평가식의 검증

보의 소성힌지의 영향을 고려하여 평가된 철근콘크리트 접합부의 강도저감을 기존 연구자의 실험체의 회전변위에 따른 접합부내력관계로 검토하였다. 그림 4에서 실선은 Teraoka⁶⁾와 Kaku⁷⁾에 의하여 수행된 철근콘크리트 보-기둥 접합부 실험결과를 나타낸 그래프로서 x축은 접합부의 회전변위, y축은 보-기둥 접합부에 작용하는 하중을 나타낸다. 그림 4에서 점선은 각각의 시험체에 대하여 제안식으로 $K=0.5$ 일때 평가한 내력감소경향이다. 그림 4에서 접합부는 보의 회전각이 증가하면서 점점 전단내력이 증가하지만, 소성힌지가 발생한 이후 접합부의 최대 전단내력은 점점 감소한다. 본 제안식은 접합부의 최대 전단내력이 감소하는 시점에서 전단강도와 그 이후 전단내력이 감소하는 경향을 잘 예측하였다. 외부접합부의 경우 제안식이 조금은 접합부를 과대평가하는 경향이 보인다. 하지만 이는 K 값을 조정하면 접합부의 전단내력을 보다 더 정확하게 예측할 수 있다.

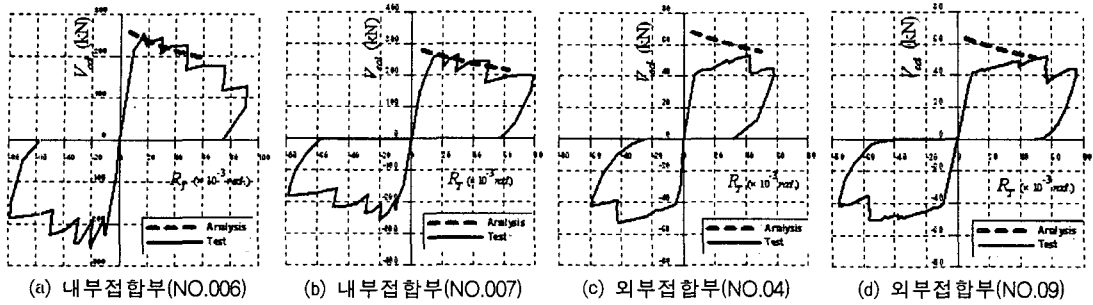


그림 4 내부접합부와 외부접합부에 작용하는 하중과 발생한 소성힌지 회전각 관계

5. 결론

본 제안식에 의하여 평가된 BJ-파괴하는 접합부의 전단내력은 보-기둥 접합부에 인접한 보에 소성힌지가 발생하였을 경우에 소성힌지 내부의 보의 주근 변형률이 접합부의 주인장 변형률에 영향을 주어 접합부의 전단 내력이 감소한다는 개념으로서, 소성힌지의 회전각 증가에 따른 접합부의 전단내력 감소경향을 적절히 예측하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 출연하고 한국과학재단에서 위탁시행 한 2004년도 특정기초사업 (R01-2004-000-10290-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (318R-02)," ACI, 2002.
2. 채희대, 이정윤, "철근콘크리트 보-기둥 접합부의 전단강도 평가," 콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제16권 제2호, 2004. 11, pp.401-404.
3. Paulay, T. and Priestley, M. J. N., "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings," John Wiley & Sons, Ltd, 1992, pp.271-273.
4. Hsu, T. T. C., "Nonlinear Analysis of Concrete Membrane Elements," *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 5, Sep.-Oct. 1991, pp.552-561.
5. Park, R. and Paulay, T., "Reinforced Concrete Structures," John Wiley & Sons Inc., 1975
6. Teraoka, M., "Study on Earthquake-Resistant Design Methods for Beam-Column Joints in High-rise Moment-Resisting Frames," Fusita Corporation, 1997, pp.124-135.
7. Kaku, T. and Asakusa, H., "Ductility Estimation of Exterior Beam-Column Subassemblages in Reinforced Concrete Frames," *Design of Beam-Column Joints for Seismic Resistance*, SP123-7, American Concrete Institute, Detroit, 1991, pp.167-185.