

철근의 연성이 소성힌지 생성에 미치는 영향

Influence of ductility of reinforcement on the plastic hinge formation

박 대 균* 조 재 열** 박 성 현***
Park, Dae Gyun Cho, Jae Yeol Park, Sung Hyun

ABSTRACT

Subjected to seismic action causing large deformation of bridge columns, the plastic hinge region is commonly formed in the column end zone. The deformation capacity of a concrete column can be expressed by using plastic hinge length. The mechanical properties of high-strength reinforcing steel is different from that of normal-strength steel and the mechanical properties of steel will influence the plastic hinge formation. Therefore, in order to accurately predict the deformation of concrete column using high-strength steel, the plastic hinge length can be expressed as a function of the mechanical properties of steel such as the tensile to yield strength ratio and the strain at ultimate state. However, little research has been conducted into the effect of mechanical properties of steel on the plastic hinge length. It was difficult to measure the plastic hinge length from the test results. Therefore, the plastic hinge length of concrete columns was investigated from the curvature profile. A numerical approach was used to study the effect of various parameters on plastic hinge length. Based on the results of the numerical parametric study, a new expression for plastic hinge length was proposed.

요 약

최근 들어 고강도 철근의 사용이 증가하고 있지만, 지진위험이 있는 지역의 내진구조물에 있어서는 고강도 철근의 취성적 성질로 인해 그 사용이 제한되어 왔다. 그러나, 철근의 연성의 변화가 기둥의 부재레벨의 연성도에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 없는 실정이다. 특히 고강도 철근을 사용하는 경우 철근의 연성의 변화로 인해 부재의 소성힌지 길이가 달라질 것으로 예상되지만, 기준의 소성힌지길이 산정식은 철근 등 재료의 특성을 고려하지 못하고 있다. 지진하중을 받는 철근콘크리트 기둥의 소성힌지길이는 실험을 통해서 측정하기는 어려움이 많다. 따라서, 본 논문에서는 해석적인 방법을 통하여 재료레벨의 연성, 특히 철근의 연성이 소성힌지의 생성에 미치는 영향을 평가하고, 그 영향을 고려한 소성힌지길이 산정식을 제안하고자 한다.

* 정회원, 서울대학교 건설환경종합연구소 선임연구원

** 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 교수

*** 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 석사과정

1. 서론

지진하중 하에서 콘크리트 교각은 큰 비선형 변형을 경험하게 되고 이러한 비선형 변형은 교각의 하단부에 소성힌지구간을 형성하게 된다. 고강도 철근의 특성은 보통강도 철근과 다른데, 이러한 성질의 차이가 콘크리트 교각의 소성힌지 형성에 영향을 미치게 된다. 따라서, 고강도 철근을 사용한 콘크리트 교각의 변형성능을 정확하게 예측하기 위해서는 소성힌지길이를 철근의 인장강도/항복강도비 또는 극한상태에서의 최외각 철근의 변형률의 함수로 표현할 수 있어야 한다. 하지만, 철근의 특성이 소성힌지 길이에 미치는 영향에 대한 연구를 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 철근의 성질 등 여러 가지 인자가 소성힌지길이에 미치는 영향을 규명하기 위하여 해석적 매개변수 연구를 수행하였고, 이를 통해서 새로운 소성힌지 길이 산정식을 제안하였다.

2. 매개변수해석을 위한 해석모델

콘크리트 기둥에 대한 준정적 실험 등 실험적인 방법으로는 소성힌지길이를 측정하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 섬유요소 모델을 이용한 유한요소해석을 통해서 철근의 특성 등 매개변수의 변화에 따른 소성힌지길이의 변화를 고찰하였다. 콘크리트 기둥 상단의 변위는 휨에 의한 변위, 부착에 의한 변위 그리고 전단변형에 의한 변위로 나눌 수 있는데, 본 연구에서는 휨에 의한 변위를 OpenSees¹⁾를 이용하여 구하였고, 부착에 의한 추가적인 변위를 더하여 구하였다. 세장비가 5 이상인 교각에 대한 해석이므로 전단에 의한 변형은 무시하였다.

구속/비구속 콘크리트의 응력-변형률 모델은 Rasvi 등 (1999)²⁾에 의해 제안된 식을 사용하였고, 철근의 응력-변형률 모델은 OpenSees의 ReinforcingBar 모델을 사용하였다. 콘크리트 교각의 항복상태 및 극한상태는 최하단 요소의 2번째 적분점에서의 콘크리트의 변형률과 철근의 변형률을 이용하여 구하였다. 극한상태는 구속콘크리트 fiber의 변형률과 최외각 철근 fiber의 변형률이 각각 구속콘크리트의 극한변형률과 철근의 극한변형률에 도달하는 step 중 작은 것을 극한상태로 정의하였다.

3. 철근의 특성을 반영한 소성힌지길이 산정을 위한 매개변수해석

3.1 매개변수 및 단면

본 연구에서 사용된 매개변수와 단면의 형상은 각각 표 1. 및 그림 1.과 같다. 매개변수는 철근콘크리트 기둥의 변형성능 및 소성힌지 길이에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 광범위하게 포함하였으며, 특히 철근의 항복강도, 인장강도/항복강도비 그리고 철근의 극한변형률을 주요 인자로 하였다.

표 1. 매개변수

매개변수	값
콘크리트 압축강도, f'_c	40, 60 MPa
철근 항복강도, f_y	300, 500 MPa
철근 인장강도/항복강도, f_u/f_y	1.15, 1.25, 1.35, 1.50, 1.60
철근 극한변형률, ϵ_u	0.05, 0.10, 0.15, 0.20
주철근비, ρ	2, 3, 4 %
횡구속철근의 양, $A_s/A_{s,code}$	1.00, 0.75, 0.50
횡구속철근의 항복강도, f_{yt}	300, 500 MPa

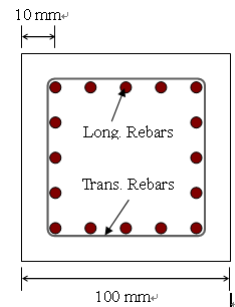


그림 1. 매개변수해석 단면형상

3.2 소성힌지길이 산정

소성힌지길이는 실험적으로 측정하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 해석적인 연구를 통해서 소성힌지길이를 구하였다. 콘크리트 기둥의 곡률분포는 소성힌지구간에 큰 곡률이 집중되는데 그림 2와 같이 소성힌지구간에서 소성변형에 의한 곡률이 일정하다고 가정할 수 있다. 섬유요소해석을 통해서 항복상태와 극한상태에서의 변위를 구한 후 아래 식을 이용하여 소성힌지길이를 추정하였다.

$$\Delta_{tip} = \Delta_y + \Delta_p = \frac{\phi_y L^2}{3} + (\phi - \phi_y) l_p (L - 0.5l_p)$$

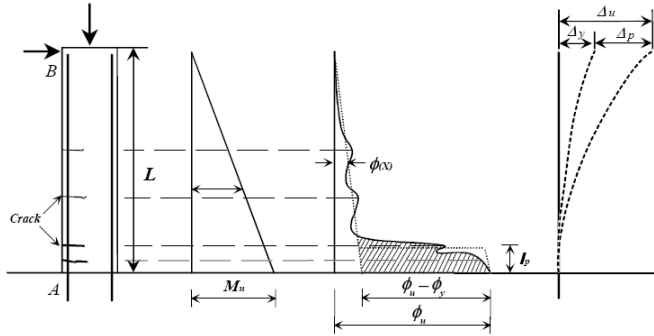


그림 2. 콘크리트 기둥의 곡률분포 및 소성힌지길이

3.3 철근의 특성이 소성힌지 길이에 미치는 영향

그림 3은 본 연구에서 수행한 매개변수해석 중 철근의 인장강도/항복강도비와 철근의 극한변형률의 변화에 따른 극한상태에서의 기둥의 곡률분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 철근의 인장강도/항복강도비가 증가할수록 극한상태에서의 기둥의 곡률은 기둥의 높이방향을 따라 넓게 분포된다. 이는 철근의 인장강도/항복강도비가 클수록, 기둥의 최하단에서 철근의 항복 이후에 철근의 파단이 발생할 때까지 더 넓은 영역에서 주철근의 항복이 발생할 수 있음을 의미한다. 즉, 철근의 인장강도/항복강도비가 클수록 소성힌지길이가 커지고 따라서 철근의 인장강도/항복강도비를 포함한 철근의 특성을 반영한 소성힌지길이 산정식이 필요함을 알 수 있다.

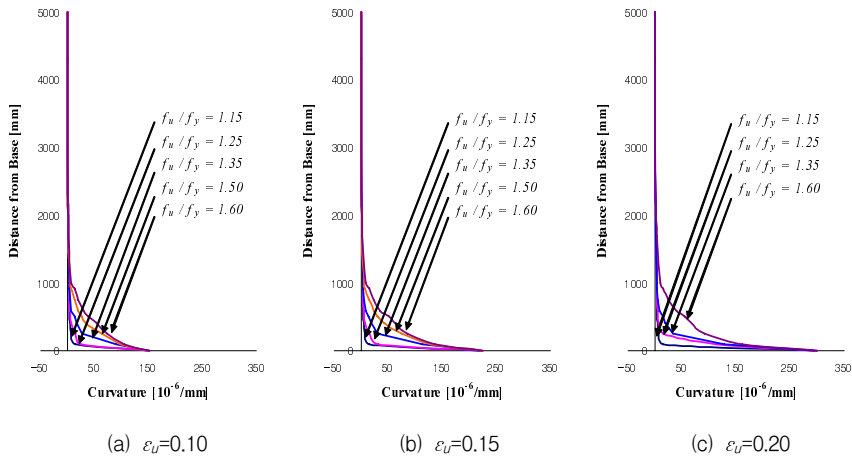


그림 3. f_u/f_y 와 ϵ_u 에 따른 곡률의 분포

3.4 철근의 특성을 반영한 소성힌지길이

철근의 인장강도/항복강도비와 극한변형률에 따른 소성힌지길이의 변화(그림 4)로부터 철근의 특성을 반영한 소성힌지길이 산정식을 제안하였다. 그림 4로부터 소성힌지길이는 철근의 인장강도/항복강도비와 극한변형률에 비례한다고 가정하고 철근의 인장강도/항복강도비의 영향과 극한변형률의 영향을 고려한 항을 선형적으로 도입하여 새로운 소성힌지길이 산정식을 제안하였다. 그림 5에서 알 수 있듯이 새로운 소성힌지길이 산정식을 이용하여 콘크리트 기둥의 소성힌지길이를 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

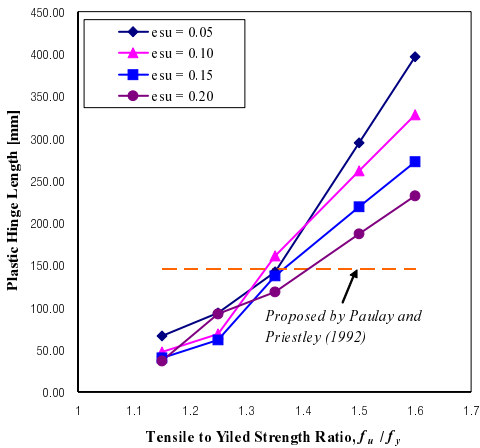


그림 4. f_u/f_y 와 ϵ_u 에 따른 소성힌지길이의 변화

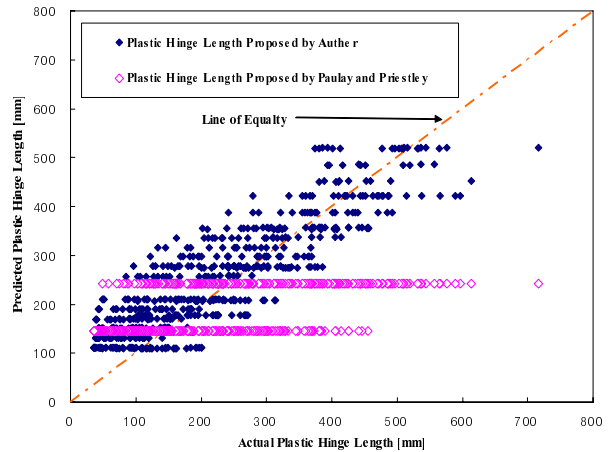


그림 5. 제안된 소성힌지길이 산정식

4. 결론

해석적인 방법을 통하여 인장강도/항복강도비 등 철근의 성질이 철근콘크리트 기둥의 곡률분포 및 소성힌지길이에 상당한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었고, 이를 통해서 철근의 특성을 반영한 소성힌지길이 산정식을 제안하였다.

참고문헌

1. OpenSees. <http://opensees.berkeley.edu>. Web page.
2. Razvi, S. and Saatcioglu, M. (1999). Confinement Model for High-Strength Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 125, No. 3, Mar., pp. 281-288.
3. Park, R., Priestley, M.J.N. and Gill, W.D. (1982) "Ductility of Square-Confined Concrete Columns," Journal of Structural Division, ASCE, V. 108, No. ST4, Apr., pp. 929-950.