

철근콘크리트 부재의 핀칭 메커니즘에 대한 연구

Pinching Mechanism of Reinforced Concrete Elements

김지현*
Kim, Ji-Hyun

이정윤**
Lee, Jung-Yoon

ABSTRACT

The response of a reinforced concrete element under cyclic shear is characterized by the hysteretic loops of the shear stress-strain curves. These hysteretic loops can exhibit strength deterioration, stiffness degradation, and a pinched shape. Recent tests have shown that the orientation of steel grids in RC shear elements has a strong effect on the "pinching effect" in the post-yield hysteretic loops. When the steel grid was set at a 45 degree angle to the shear plane, there was no pinching effect and no strength deterioration. However, when the steel grid was set parallel to the shear plane, there was a severe pinching effect and severe strength deterioration with increasing shear strain magnitude. In this paper, two RC elements subjected to reversed cyclic shear stresses are considered to study the effect of the steel grid orientation. The presence and absence of the pinching mechanism in the post-yield shear hysteretic loops is studied using the Rotating Angle Softened Truss Model (RA-STM) theory.

1. 서론

지진 구역에 위치한 구조물은 탄성 범위에서 소·중규모의 지진하중을 견디고 소성 범위에서 강한 지진 하중의 에너지를 흡수하도록 설계된다. 따라서 이러한 지진 구역에 위치한 구조물의 비탄성 거동과 에너지 소산 성능을 구하고 지진하중 하에서 구조물의 지진에 대한 거동을 강화하는 방법이 필요하다. 힘에 의해서 최초로 변형을 일으킨 구조물의 응답은 철근의 특성에 영향을 받기 때문에 하중-변형 이력곡선은 핀칭 효과가 나타나지 않는다. 그러나 전단에 의해서 최초로 변형을 일으킨 철근콘크리트 구조물의 이력곡선은 하중이 '0'에 가까울 때 큰 핀칭 효과와 함께 큰 강도 저감을 보여준다. 따라서 전단력이 철근콘크리트 부재의 응답을 지배할 때, 전단력은 항복 이후 구조물의 응답에서 이력곡선상의 "핀칭 효과"와 강성의 감소, 강도의 저감 그리고 에너지 소산 성능의 감소를 발생시킨다. 최근 연구²⁾는 철근 배근의 방향이 주응력 방향과 일치하면 전단이 우세한 부재의 하중-변형 이력곡선에서 핀칭 효과가 제거된다고 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 RA-STM을 이용한 구조해석을 통해 철근 배근 방향에 따른 핀칭 효과 발생 여부를 확인하고자 한다.

* 정회원, 성균관대학교 건축공학과 석사과정

** 정회원, 성균관대학교 건축공학과 조교수

2. Rotating angle softened truss model (RA-STM)

2.1 기본 원리

Rotating angle softened truss model (RA-STM)은 단조 하중을 받는 철근콘크리트 막요소의 해석을 위해서 개발되었다. 본 연구에서는 RA-STM에 반복하중에 대한 새로운 재료의 구성 법칙을 적용하여 반복 전단 하중을 받는 RC 부재의 거동을 예측하는데 RA-STM을 발전시켜 사용하였다.

중 방향과 횡 방향 철근은 각각 l, t 축을 구성하며 $l-t$ 좌표계를 나타낸다고 정하였다. 반복 주응력은 σ_l, σ_t 로 나타냈고 반복 전단응력은 τ_{lt} 로 정하였다. 균열 후의 콘크리트 주응력 방향은 $d-r$ 좌표계로 정의했으며 균열 발생 후 콘크리트 주응력은 r 과 d 방향에 대해 각각 σ_d 와 σ_r 로 나타냈다. 균열 발생 후 콘크리트의 주응력 방향(d 축)과 철근의 중 방향(l 축)이 이루는 각도는 α 로 나타냈다.

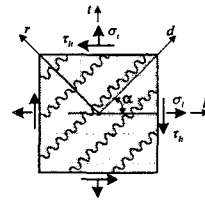
2.2 응력의 평형 방정식

Fig.1은 $\sigma_l, \sigma_t, \tau_{lt}$ 을 받아 균열이 발생한 콘크리트의 한 요소이다. 응력의 평형방정식은 Fig. 1로부터 구할 수 있다.

$$\sigma_l = \sigma_d \cos^2 \alpha + \sigma_r \sin^2 \alpha + \rho_l f_l + \rho_{lp} f_{lp} \quad (1)$$

$$\sigma_t = \sigma_d \sin^2 \alpha + \sigma_r \cos^2 \alpha + \rho_t f_t + \rho_{tp} f_{tp} \quad (2)$$

$$\tau_{lt} = (-\sigma_d + \sigma_r) \sin \alpha \cos \alpha \quad (3)$$



(a) Reinforced concrete element

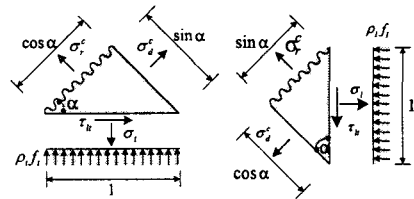
2.3 변형률의 적합 방정식

변형률의 적합 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_l = \epsilon_d \cos^2 \alpha + \epsilon_r \sin^2 \alpha \quad (4)$$

$$\epsilon_t = \epsilon_d \sin^2 \alpha + \epsilon_r \cos^2 \alpha \quad (5)$$

$$\frac{\gamma_{lt}}{2} = (-\epsilon_d + \epsilon_r) \sin \alpha \cos \alpha \quad (6)$$



(b) Stress states of concrete elements
Fig. 1 Stress conditions and coordinates in reinforced concrete

여기서, ϵ_l 과 ϵ_t 은 각각 l 과 t 방향의 평균 변형률, γ_{lt} 은 $l-t$ 좌표에서의 평균 전단변형률, ϵ_r 과 ϵ_d 은 각각 r 과 d 방향의 콘크리트 주압축 및 주인장 변형률이다.

2.4 재료의 구성 법칙

콘크리트의 압축응력-변형률 관계와 인장응력-변형률 관계 및 철근의 인장응력-변형률 관계는 Belarbi and Hsu에 의해 제안된 식³⁾을 사용하였다.

2.4.1 콘크리트의 구성 법칙

Fig. 2는 반복하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 나타낸다.

$$\sigma_c = \zeta f_c' \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\zeta \epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\zeta \epsilon_0} \right)^2 \right] \quad \epsilon_c \leq \zeta \epsilon_0 < 0 \quad (7a)$$

$$\sigma_c = \zeta f_c' \left[1 - \left(\frac{\epsilon_c / \zeta \epsilon_0 - 1}{4 / \zeta - 1} \right)^2 \right] \quad \epsilon_c > \zeta \epsilon_0 \quad (7b)$$

$$\zeta = \frac{5.9}{\sqrt{f_c' (MPa)}} \frac{1}{\sqrt{1 + 400 \epsilon_c}}$$

$$\sigma_c = E_c \epsilon_c \quad 0 \leq \epsilon_c \leq 0.00008 \quad (8a)$$

$$\sigma_c = f_{cr} \left(\frac{0.00008}{\epsilon_c} \right)^{0.4} \quad \epsilon_c > 0.00008 \quad (8b)$$

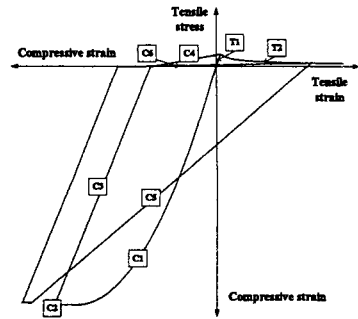


Fig.2 Stress-strain curve of concrete subjected cyclic loading

여기서, ζ 는 연화계수이며, E_c 는 콘크리트 탄성계수로서 $E_c = 3900 \sqrt{f_c' (MPa)}$ 이며, f_{cr} 은 콘크리트 인장강도로서 $f_{cr} = 0.31 \sqrt{f_c' (MPa)}$ 이다.

2.4.2 철근의 구성 법칙

Fig. 3은 반복하중을 받는 철근의 응력-변형률 곡선을 나타낸다.

$$\text{Stage 1} \quad f_s = E_s \epsilon_s \quad (\epsilon_s \leq \epsilon_n) \quad (9)$$

Stage 2T

$$f_s = f_y \left[(0.91 - 2B) + (0.02 + 0.25B) \frac{\epsilon_s}{\epsilon_y} \right] \quad (\epsilon_s > \epsilon_n) \quad (10)$$

$$B = (f_{cr} / f_y)^{1.5} / \rho$$

$$\text{Stage 2C} \quad f_s = -f_y \quad (11)$$

$$\text{Stage 4} \quad f_s = E_s (\epsilon_s - \epsilon_i) + f_i \quad (12)$$

여기서, f_s 와 ϵ_s 는 각각 철근의 평균 응력, 변형률이고 f_y 와 ϵ_y 는 각각 철근의 항복 응력, 변형률이다.

ϵ_i, f_{si} 는 단계의 마지막 철근의 응력과 변형률 값이다. 그리고 E_s 는 철근의 탄성계수이고 ρ 는 철근비이다.

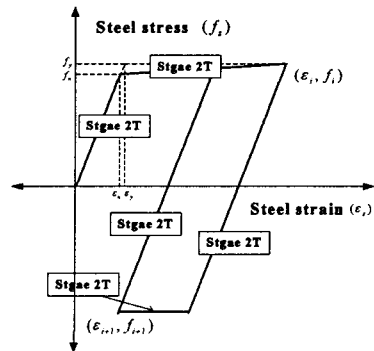
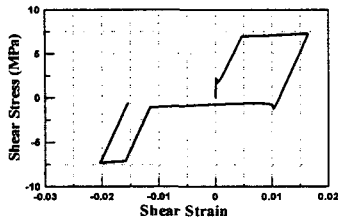


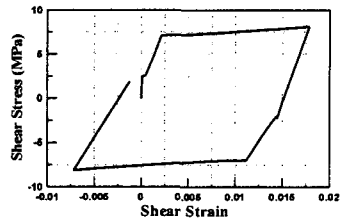
Fig.3 Stress-strain curve of steel bars subjected to reversed cyclic loading

3. 해석결과

해석모델로 사용한 실험체에 관한 특징이 Table 1에 나타나 있다. Fig. 4는 두 개의 실험체에 대한 해석 결과를 나타낸다. Fig. 4에서 해석모델 A의 이력곡선은 큰 핀칭 효과를 나타낸다. 반대로 철근 배근 방향이 주응력 방향과 일치한 해석모델 B의 이력곡선은 핀칭 효과가 나타나지 않는 것을 알 수 있다. Fig.5는 두 실험체의 종방향 철근의 응력-변형률 곡선을 나타낸다. 해석모델 A의 종방향 철근은 주로 인장에 대해 저항하고 해석모델 B의 경우는 인장과 압축 모두에 저항하는 것을 볼 수 있다.

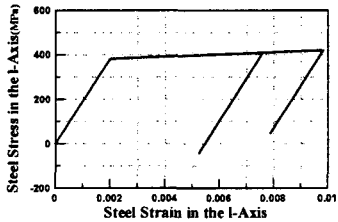


(a) analyzed result A

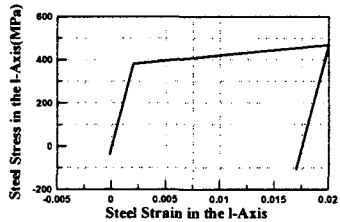


(b) analyzed result B

Fig.4 Comparison between predicted cyclic shear stress-strain curves of panels



(a) analyzed result A



(b) analyzed result B

Fig.5 Predicted axial cyclic stress-strain curves of steel bars of panels in the longitudinal direction

Table 1. Specifications of analysis models

Panel	Concrete	steel in l direction			steel in t direction			steel angle to horizontal direction
	f'_c (MPa)	Rebars(mm^2)	ρ_l (%)	f_{ly} (MPa)	Rebars(mm^2)	ρ_t (%)	f_{ty} (MPa)	
A	45	No.6(284)	1.70	428	No.6(284)	1.70	428	45°
B	45	No.6(284)	1.70	428	No.6(284)	1.70	428	0°

4. 결론

본 논문에서는 철근 배근의 방향이 이력곡선의 핀칭 효과에 미치는 영향에 대해서 검토하였다. 반복 전단력을 받는 두 개의 모델이 철근 배근 방향의 영향에 대해 평가하기 위해서 검토되었다. 해석 결과는 반복 전단력을 받는 RC 부재에서 주응력 방향과 일치하게 철근이 배근되어 있으면 바람직하지 않은 핀칭 효과와 에너지 소산 성능 감소와 연성의 감소가 나타나지 않는다는 것을 보여준다.

결론적으로 핀칭 효과는 전단을 받는 RC 부재에서 철근 배근 방향의 영향을 받는다는 것을 알 수 있고 핀칭 메카니즘은 철근이 주응력의 방향과 평행하게 놓여 지면 없어진다는 것을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C04-01) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. M. Y. Mansour, J. Y. Lee, R. Hindi, "Analytical prediction of the pinching mechanism of RC elements under cyclic shear using a rotation-angle softened truss model," Engineering Structures, Vol. 27. No. 8, July, 2005, pp. 1138-1150
2. Mansour MY, Hsu TTC, "Behavior of reinforced concrete elements under cyclic shear. I: Experiments," ASCE Journal of Structural Engineering 2005;131(1):44-53
3. Belarbi A, Hsu TTC, "Constitutive laws of softened concrete in biaxial tension-compression," ACI Structural Journal 1995;92(5):562-573