

철근의 배근위치가 다른 철근콘크리트 부재의 거동 분석

Behavior of Reinforced Concrete Members Having Different Steel Arrangements

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. Recent tests have shown that the orientation of steel grids in RC shear elements has a strong effect on the "pinching effect" and ductility in the post-yield hysteretic loops. In this paper, four RC elements are considered to study the effect of the steel grid orientation on "pinching effect" and ductility. The presence and absence of the pinching mechanism in the post-yield shear hysteretic loops are studied using the Rotating Angle Softened Truss Model (RA-STM) theory.

1. 서론

지진하중을 받는 철근콘크리트 부재의 내진설계는 부재의 에너지 소산 능력과 연성과 밀접한 관계가 있다. 전단보강철근이 주응력방향과 일치되게 배근된 철근콘크리트 판요소의 전단 용력-전단 변형을 곡선은 큰 에너지 소산을 보인다. 이와 같이 큰 에너지 소산은 전단경간비가 비교적 커서 부재가 휨모멘트에 의하여 지배받는 부재나 전단경간비가 작지만 대각선 전단보강철근이 배근된 부재의 거동에서도 나타낸다. 전단보강철근이 주응력 방향과 45도로 배근된 철근콘크리트 판요소의 전단 용력-전단 변형을 곡선은 핀칭효과에 의하여 에너지 소산이 매우 작다. 이와 같이 작은 에너지 소산은 연결보와 같이 전단경간비가 작아 전단하중에 의하여 지배받는 부재나 전단보강철근이 부재축과 수직하게 배근되어 전단경간비가 짧은 부재의 하중-처짐 곡선에서도 나타난다. 또한 부재의 연성능력은 철근의 배근과 밀접한 관계가 있어서, 철근 배근 방향이 주응력 방향과 일치하거나 전단경간비가 긴 부재의 연성 능력은 핀칭효과가 나타나지 않으며 철근이 주응력 방향과 45도로 배근된 부재의 연성능력보다 일반적으로 크다. 이와 같이 철근의 배근 위치에 따라서 부재의 이력곡선의 에너지 소산이 달라짐과 함께 부재의 연성능력도 달라질 수 있다. 몇몇 연구자의 실험 결과에 의하면 벽체나 연결보에 철근을 부재축과 수직 또는 경사지게 배근할 경우에 각 부재의 연성능력에는 큰 차이가 나타났다.

* 정회원, 성균관대학교 건축공학과 석사과정

** 정회원, 성균관대학교 건축공학과 부교수

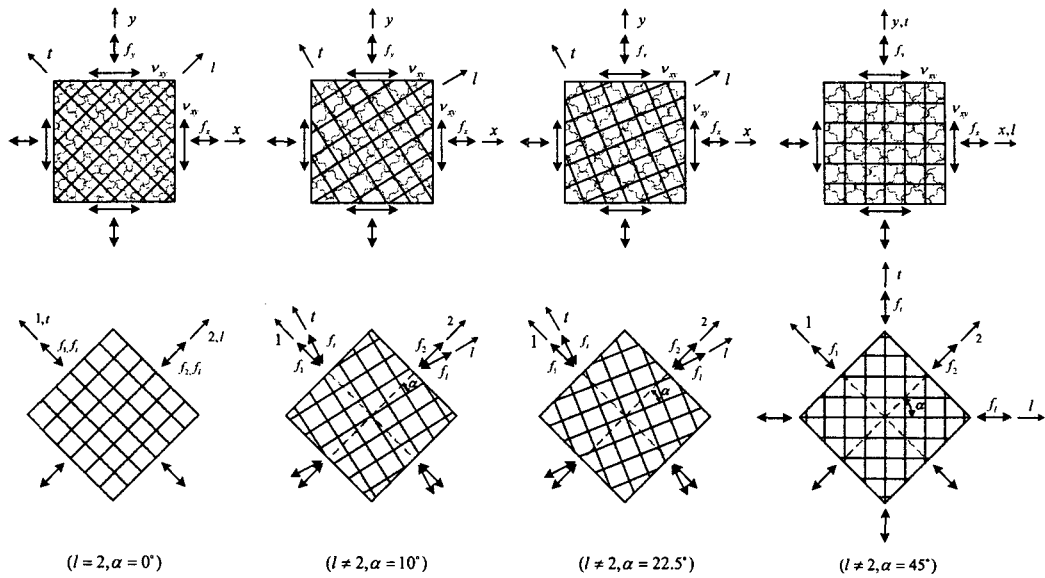


그림 4 RC elements subjected to in-plane stresses.

이 연구에서는 철근의 배근 위치에 따라서 달라지는 핀칭효과를 규명하고 이를 이용하여 배근에 따라서 달라지는 부재의 연성을 예측하였다.

2. 변형률의 적합조건을 이용한 트러스 모델

지진하중을 받는 철근콘크리트 원통셀, 전단벽, I형보 등의 비선형 거동을 평가하기 위한 방법으로 각 구조물의 임의의 요소를 절단하여, 그 요소의 거동을 예측함으로써 전체구조물의 성능을 평가할 수 있다. 이러한 면내응력을 받는 철근콘크리트 막요소에 대한 연구는 Collins 등²⁾, Hsu 등³⁾에 의하여 활발히 이루어졌다. Collins 등은 순수전단을 받는 철근콘크리트 막요소의 전단응력-전단변형을 관계로 수정압축장이론(Modified Compression Field Theory, MCFT)에 의하여 예측하였고, 이를 철근 및 프리스트레스 콘크리트 보의 전단강도 예측에 적용하였다. Hsu 등은 회전각연화트러스모델(Rotated Angle Softened Truss Model, RA-STM)을 제안하여 철근콘크리트 막요소의 전단거동을 예측하였다.

이 연구에서는 기존 연구자가 제안한 변형률의 적합조건을 이용한 트러스모델을 이용하여 부재의 거동을 예측하였다. 그림 1은 면내 응력을 받아 균열이 발생한 철근콘크리트 판요소를 나타낸다. 철근은 l 방향과 t 방향에 배근 되어 있으며 콘크리트 판요소의 주응력 방향은 1과 2방향이다. 변형률의 적합조건을 이용한 트러스모델에서는 외력에 의한 주압축 응력 각도가 균열 각도 α 와 일치한다고 가정한다.

3. 단조하중을 받는 요소의 연성평가

이 연구에서는 변형률 적합조건을 이용한 트러스 모델을 이용하여 단조하중을 받는 세 요소의 응력-변형률 관계를 해석적으로 계산하였다. 해석에서는 철근의 배근 각도를 0도(콘크리트 주응력방향=철근 배근방향)에서부터 90도로 변화시키며 각각의 각도에서의 부재의 최대 전단력 및 최대전단력에 상응

표 1 Specification specimens and material propertie

Specimen	f_{α} (MPa)	ρ_t	f_{ty} (MPa)	ρ_t	f_{ty} (MPa)	α (degree)
S00	45.14	0.007	431.56	0.007	431.56	0
S10	45.14	0.007	431.56	0.007	431.56	10.0
S23	45.14	0.007	431.56	0.007	431.56	22.5
S45	45.14	0.007	431.56	0.007	431.56	45.0

하는 전단변형률을 계산하였다. 표 1은 해석에 사용된 부재의 재료적 특징을 나타낸다. 표 1에는 α (철근의 배근과 콘크리트의 주압축응력 방향과의 차이각도)를 0도(콘크리트 주응력방향=철근배근방향), 10도, 22.5도, 45도로 구분한 4개의 실험체명과 변수를 표시하고 있다. 해석에서는 이들 4개의 실험체 외에도 각도를 0.001radian으로 증분하면서 철근 각도의 변화에 따라서 달라지는 부재의 거동을 예측하였다. 그림 2는 해석에서 계산된 전단강도비와 각도 및 전단변형률비와 각도의 관계를 나타낸다. 그림의 전단강도비(v_{α}/v_{45})란 각각의 각도에서 계산된 전단강도를 철근이 45도로 배근되었을 때의 전단강도로 나눈 값을 의미한다. 전단변형률비($\gamma_{\alpha}/\gamma_{45}$)도 이와 유사하게 각도가 변화하는 부재의 전단강도에 상응하는 변형률을 45도로 철근이 배근된 부재의 전단변형률로 나눈 값이다. 그림에서 전단강도 및 최대 변형률은 철근의 배근각도가 콘크리트의 주응력 방향 (0도나 90도)에 가까워짐에 따라서 증가함을 알 수 있다. 철근이 주응력방향에 배근된 경우의 전단강도 및 전단변형률은 철근이 주응력방향과 45도 각도로 배근된 경우보다 약 1.5배 크다는 것을 알 수 있다. 전단강도 및 전단변형률의 증가하는 비율은 각도에 따라서 선형적으로 증가하거나 감소하는 것이 아니라 45도로부터 약 25도 전후에서는 증가비율이 매우 작지만 그 이후에는 증가 비율이 급속하게 커짐을 알 수 있다. 이와 같은 현상을 보다 명확히 규명하기 위하여 이 연구에서는 표 1과 같이 각각 0도, 10도, 22.5도, 45도로 철근이 배근된 부재의 거동을 비교·분석하였다.

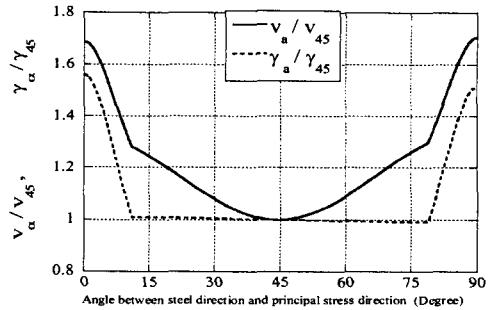
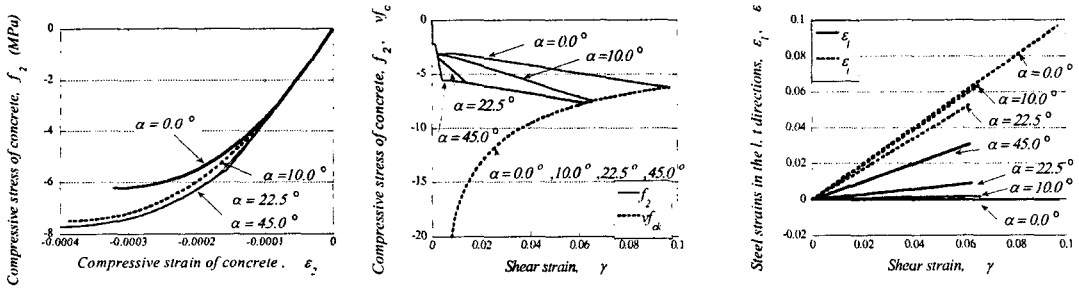


그림 2 Shear strength and strain corresponding shear strength vs angle between steel direction and principal stress direction

그림 3에서 전단강도와 전단변형률이 큰 실험체(S00와 S10)와 작은 실험체(S23와 S45)의 특징을 살펴보면 다음과 같다. S00와 S10 실험체의 경우 철근이 주 응력방향에 가까운 쪽에 배근됨으로써 양 방향 철근이 각각 인장과 압축을 저항하였다. 따라서 압축력은 콘크리트와 철근이 함께 부담하게 되므로 콘크리트가 저항하는 압축응력(f_2)은 그림 3(a)와 같이 상대적으로 작았다. 반면에 S23과 S45 실험체의 경우는 철근이 전부 인장만을 저항함으로써 압축력을 콘크리트가 전부 저항해야 하므로 콘크리트가 부담하는 압축응력은 상대적으로 크게 작용하였다. 적합조건을 이용한 트러스 모델에서 부재는 철근이 항복한 이후에 콘크리트의 압축응력(f_2)이 유효압축강도(vf_{α})에 도달할 때 파괴된다. 그림 3(b)와 같이 S23과 S45 실험체의 경우는 콘크리트가 부담하는 압축응력이 크기 때문에 S00과 S10 실험체보다 빠른 단계에서 유효압축강도에 도달하였고 따라서 S00과 S10 실험체의 파괴시의 전단변형률이 S23과 S45 실험체의 전단변형률보다 컸다. 그림 2에서 전단변형률과 전단응력이 갑자기 변화하는 이유는 철근의 항복여부로 설명할 수 있다. 그림 3(c)에서 실험체 S00과 S10의 경우는 양 방향 철근 중에서 한 쪽 방향 철근만이 인장 항복하여(다른 쪽 철근은 압축이나 탄성 상태) 콘크리트의 부담 응력이 작은 반면에 실험체 S23과 S45의 경우는 양 방향 철근이 모두 항복함으로써 콘크리트의 부담



(a) Compressive stress-strain relationships (b) Compressive stress-shear strain relationships (c) Steel stress-strain relationships

그림 3 Analytical results of specimens under monotonic load.

응력이 커지고 이에 따라서 전단강도와 전단변형률도 현저하게 감소됨을 알 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 철근의 배근 위치가 다른 4개의 실험체에 대하여 각각의 핀칭효과를 규명하고 이를 이용하여 배근에 따라서 달라지는 부재의 연성을 예측하였다. 전단강도 및 최대 변형률은 철근의 배근 각도가 콘크리트의 주응력 방향(0도나 90도)에 가까워짐에 따라서 증가함을 알 수 있었다. 또한 증가하는 비율은 각도에 따라서 선형적으로 증가하거나 감소하는 것이 아니라 45도부터 약 25도 전후에서는 증가비율이 매우 작지만 그 이후에는 증가 비율이 급속하게 커짐을 알 수 있었다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 철근이 주 응력방향에 가까운 쪽에 배근된 실험체는 철근이 각각 인장과 압축을 저항하여 압축력을 콘크리트와 철근이 함께 부담하고, 철근이 주 응력방향에 가까운 쪽에 배근되지 않은 실험체는 철근이 인장만을 저항하여 압축력을 콘크리트가 전부 부담하기 때문이다. 따라서 철근이 주 응력방향에 가까운 쪽에 배근된 실험체는 그렇지 않은 경우보다 콘크리트가 부담하는 압축응력이 작으므로 낮은 단계에서 유효압축강도에 도달하여 실험체 파괴시의 전단변형률이 상대적으로 컸다.

결론적으로 철근콘크리트 부재의 핀칭효과와 연성은 철근의 배근위치에 따라서 영향을 받는다는 것을 알 수 있었고 각도에 따른 부재의 연성은 선형적으로 변하는 것이 아니라 일정 구간에서는 증가 비율이 작고 일정 구간에서는 증가 비율이 급속히 큰 것을 알 수 있었다.

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