

철근 콘크리트 연결보의 전단 저항 기구와 변형 능력

The Mechanism of Shear Resistance and Deformability of Reinforced Concrete Coupling Beams

장 상 기* 홍 성 곁**
Jang, Sang Ki Hong, Sung Gul

ABSTRACT

An experimental investigation on the behavior of reinforced concrete coupling beams is presented. The test variables are the span-to-depth ratio, the ratio of flexural reinforcement and the ratio of shear rebar. The distribution of arch action and truss action which compose the mechanism of shear resistance is discussed. This study proposes the deformation model for reinforced concrete coupling beams considering the bond slip of flexural reinforcement. The yielding of flexural reinforcements determines yielding states and the ultimate states of reinforced concrete coupling beam are defined as the ultimate compressive strain of struts and the degradation of compressive strength due to principal tensile strain of struts. It is expected that this model can be applied to displacement-based design methods.

1. 서론

차세대 내진설계 개념인 성능기초설계에서는 구조물의 안정성 확보를 위해 각 부재의 강도와 변형 능력의 척도인 연성도를 요구한다. 각 부재에 대한 항복 상태의 강도와 변형 산정과 함께 극한 상태에서의 강도와 변형 능력 확보가 주요 관심사이다. 지금까지의 전단 지배 부재에 관한 연구는 변형과 무관하게 강도 예측에 중점을 두고 있어 변형에 관한 연구가 부족한 실정이다. 비교적 규칙적이고 균일한 응력 상태를 가지는 휨 부재와 달리 대부분의 전단 지배 부재의 경우 응력교란 구역이 존재하여 변형 상태를 예측하는 것이 쉽지 않다. 본 연구에서는 대표적인 전단 지배 부재인 병렬 전단벽의 철근 콘크리트 연결보에 대해 실험과 해석을 수행하였다. 일반적으로 연결보는 경간에 비해 깊이가 크고 두께는 얇은 전단 지배 부재이지만 일반적인 보와 같이 소성힌지 구간에서 충분한 강도와 변형 능력이 요구된다. 병렬 전단벽 시스템은 일반 보-기둥 시스템과 같이 연결보 양단에서 소성힌지가 먼저 발생하고 전단벽 하부에서 최종 소성힌지가 형성되는 파괴 기구로 설계되기 때문이다. 따라서 연결보는 전단 지배 부재이지만 변형 능력이 중요한 요소로 고려되어야 한다.

본 연구에서는 일반적인 휨 철근과 전단 철근으로 배근된 철근 콘크리트 연결보의 단조하중실험을 통하여 전단 강도와 변형 능력을 중심으로 분석하였다. 각 실험체 대해 휨 철근과 전단 철근의 변형률 계측을 통하여 전단 강도 발현 메커니즘을 분석하였고, 항복 변위, 극한 변위, 수직 인장 변형을 측정

* 정회원, 서울대학교 건축학과 박사과정

** 정회원, 서울대학교 건축학과 부교수

하여 변형 능력에 대해 고찰하였다. 분석된 실험 자료를 근간으로 하여 연결보의 하중 전달 기구 모형과 변형 모형을 제시하였다.

2. 단조하중 실험

그림 1과 그림 2에서 보는 바와 같이 4번,5번,6번,9번 시험체는 아치 스트럿의 압축 파괴로 인해 휨 강도에 도달하지 못하고 파괴하였고, 나머지 시험체는 휨강도 도달 이후 트러스 스트럿의 압축 파괴로 항복 이후 전단 파괴하였다. 항복 강도 도달하지 못한 시험체는 대체로 전단 철근량이 45도 트러스 모델에서 필요한 휨 철근 대비 전단 철근량보다 작은 경우 발생하였다. 항복 강도에 도달한 이후에는 연결부 부분의 콘크리트가 압괴하면서 사인장 균열 방향으로 파괴하였다. 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 경간비가 클수록 큰 강성을 지니고, 변형능력은 작은 것을 알 수 있다. 3번 시험체의 경우 1번과 2번에 비해 상대적으로 큰 휨 철근비로 인해 변형능력이 작게 측정되었다. 휨 철근비에 의한 거동은 같은 단면을 지니므로 거의 유사한 강성을 보이고 있고, 변형 능력은 휨 철근비가 작을수록 큰 것을 알 수 있다(그림 2(b)). 그림 2(c)는 전단 철근비에 대한 영향을 보여주는데 전단 철근의 전반적인 거동에는 영향이 적으나, 전단 철근비가 클수록 변형능력이 다소 증가함을 보여주고 있다. 하중-변위 관계에서 주목할 만한 현상은 연결보의 항복 강성이 휨 지배 보에 비해 매우 작다는 것이다. 그림 1의 (b-g)에서처럼 연결보의 작은 경간비와 단부조건에 의해 균열이 부채꼴 모양(fan shape)으로 공통적으로 발생하는데 이것은 휨 균열에 비해 전체적으로 변형을 증가시키고 있다. 연결보 단부 주변의 주철근의 정착부에서도 균열이 발생하여 강성 저하에 기여하고 있다. 변형 능력은 경간비, 전단 철근비에는 비례하고, 휨 철근비에는 반비례하는 것을 알 수 있다.

그림 3은 변위에 따른 전단 철근의 변형률 분포를 보여주고 있다. 일반 보에서는 전단 철근은 각 전단 철근의 위치에 무관하게 비교적 일정한 변형률 분포를 보이지만 연결보는 중앙부의 변형률이 큰 것을 확인할 수 있다. 항복에 이르기 전까지 전단 철근의 변형률이 중앙부에서 최대의 변형률을 지니고 항복 강도 이후에는 중앙부 전단 철근의 항복이후 주변부 전단 철근의 변형률도 증가하였다. 이 현상은 항복이후 변위 증가에 따라서 전단 철근에 의한 전단력 전달의 크기가 변화하는 것을 의미한다. 전단 저항을 트러스 작용과 아치 작용으로 분류할 때 변형 증가에 따라 트러스 작용이 증가한다고 할 수 있다.

그림 3의 (a),(b),(c)를 비교해보면 경간비가 작을수록 전단 철근의 변형률 분포가 불균일한데 이 역시 부채형 균열에 의한 것으로 판단된다. 균열각이 단부에서는 다양하게 변화하므로 단부 전단 철근의

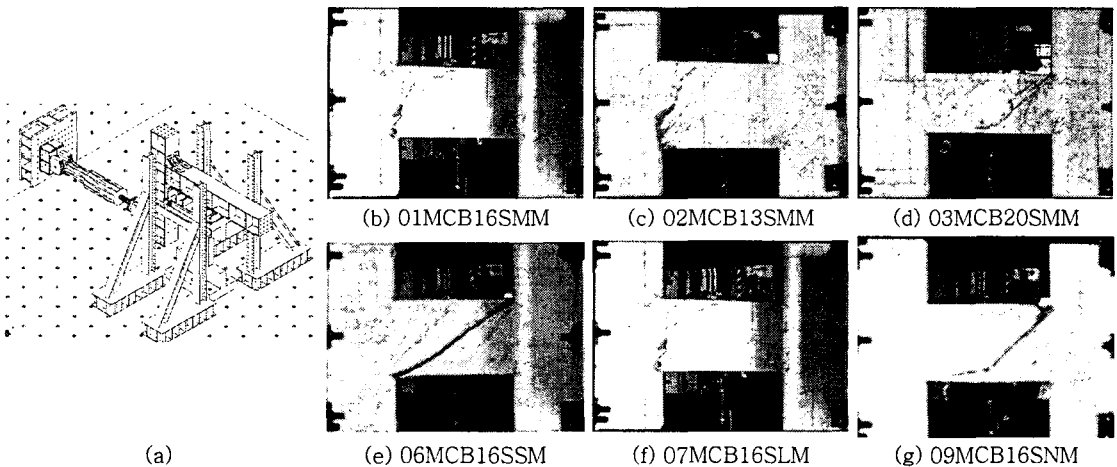


그림 1. (a) 시험체 가력방법 (b-g) 최종파괴균열

변형률이 다를 것으로 예상된다.

변형 상태에서 따른 휨 철근의 변형률 분포는 그림 4와 같다. 휨 철근의 응력 분포는 위에서 언급한 전단 철근의 변형률의 영향을 반영하고 있다. 연결보는 단부에서 모멘트를 부담하는 양단 고정보이지만 그림 4와 같이 휨 철근의 대부분의 영역이 인장 상태에 있다. 휨 철근의 응력은 전단 철근의 응력에 비례하여 변화하는데 단부에서 전단 철근의 응력이 중앙부에 비해 작으므로 상대적으로 휨 철근은 대부분이 인장영역에 있게 된다. 1번과 2번 시험체를 비교하면 경간비가 작을수록 소성힌지가 길어지는 것을 알 수 있고 3번 시험체의 경우 1번과 2번 시험체에 비해 휨 철근량이 많아서 경간비에 비해 소성힌지가 짧은 것으로 판단된다. 트러스 작용에 의한 전단 저항 성분은 경간비, 전단 철근비에는 비례하고, 휨 철근비에는 반비례하는 것을 알 수 있었다. 따라서 종합해 보면 트러스 작용에 의한 전단 저항이 클수록 변형 능력이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

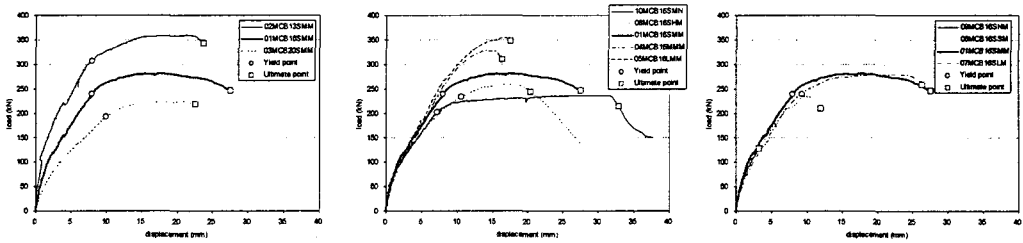


그림 2. 하중 변위 곡선 (a) 경간-깊이 비 (b) 휨철근비 (c) 전단철근비

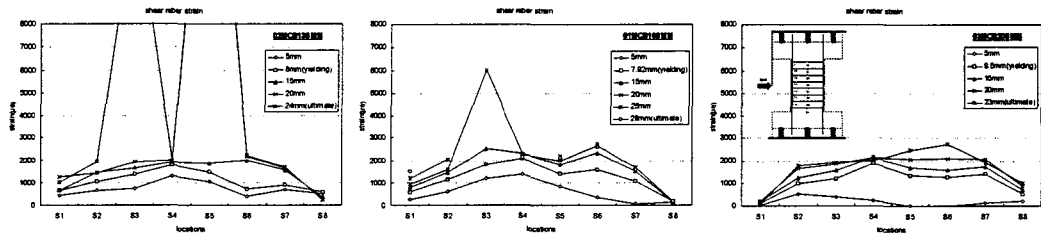


그림 3. 전단 철근 변형률 (a) 02MCB13SMM (b) 01MCB16SMM (c) 03MCB20SMM

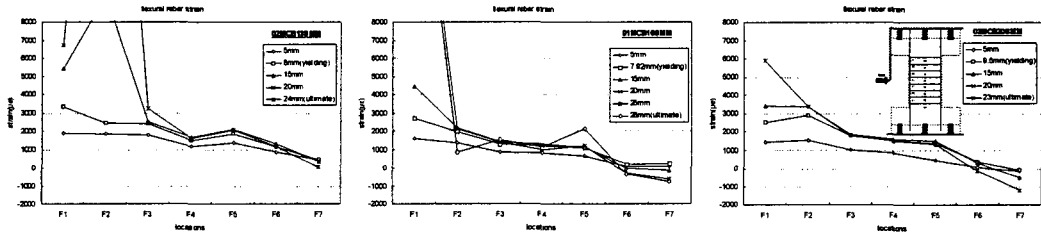


그림 3. 휨 철근 변형률 (a) 02MCB13SMM (b) 01MCB16SMM (c) 03MCB20SMM

4. 하중 전달 기구

실험 결과를 근간으로 하여 그림 5와 같은 변형 정도에 따른 응력 분포 모형을 생각할 수 있다. 휨 철근 항복이전에는 연결보에 하중이 작용하면 아치 작용과 트러스 작용에 의해 전단력이 전달된다. 이때 균열은 그림 5(a)와 같이 형성되고 이에 따라 전단 철근의 변형은 중앙부가 최대 변형을 하는 삼각형 분포를 가진다. 휨 철근은 힘의 평형 관계를 이용하여 단부 최대하중을 시작으로 점차 작아지게

된다. 항복 이후 변형률의 증가로 아치 스트럿 강도가 작아지게 되면 아치 작용으로 부담하던 전단력이 트러스 작용으로 전가된다. 이에 따라 전단 철근의 응력이 증가 되고 이것은 부채꼴의 응력장 (fan region)도 감소하게 된다. 이에 전단 철근의 항복에 따라 균일 압축장이 생성되고 휨철근의 변형률도 더불어 증가한다. 변형 증가에 따라 균일 압축장의 강도가 저하되어 균일 압축장의 기울기가 증가하다가 균일 압축장의 강도가 결국 파괴 강도에 도달하여 극한 상태에 이르게 된다.

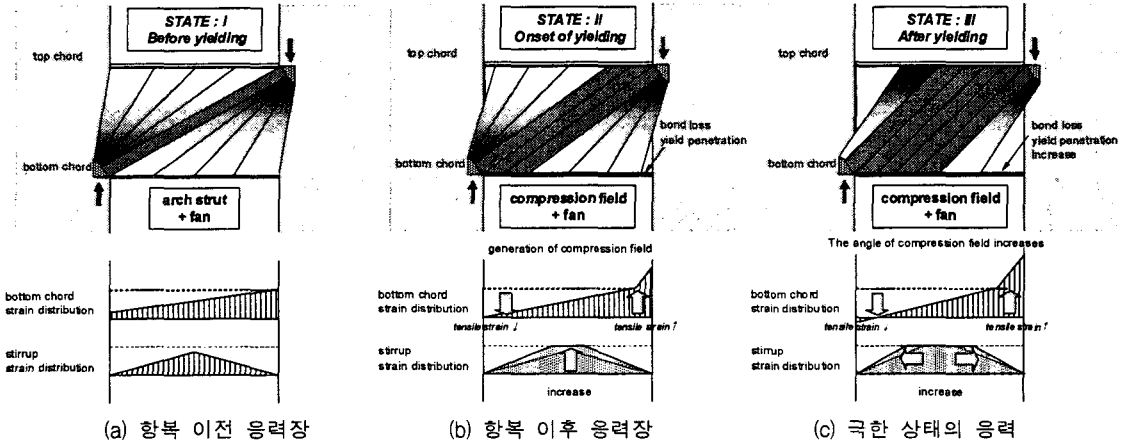


그림 5 변형 단계에 따른 응력 분포

5. 결론

본 연구에서는 경간-깊이비, 휨 철근비, 전단 철근비가 다른 10개 철근 콘크리트 연결보에 대해 단조하중 실험을 수행하여 다음과 같은 거동 특성을 파악하였고, 그에 따른 하중 전달 기구와 변형 모형을 제시하였다.

- (1) 연결보의 변형능력은 경간-깊이비, 전단 철근비에 비례하고, 휨 철근비에 반비례하는 것을 확인하였다.
- (2) 연결보의 아치 작용에 의한 전단 저항은 휨 항복 이후 점차 감소하여 트러스 작용에 의한 전단 저항으로 전이되는 것을 알 수 있다.
- (3) 경간-깊이비와 휨 철근비, 전단 철근비를 고려할 수 있는 트러스 작용과 아치 작용을 구분하는 해석식을 제시하였다.
- (4) 연결보의 변형을 휨 철근의 부착강도에 의해 균열 폭을 산정하여 결정하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술원 지원, 지진공학센터(KEERC)와 특정기초연구개발사업의 연구비 지원에 의하여 이루어 졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Park, R., and Paulay, T., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley and Sons, 1972, pp. 637-660
2. Paulay, T., "Coupling Beams of Reinforced Concrete Shear Walls," *Journal of the structural Division*, American Society of Civil Engineers, V. 97, NO. ST3, 1971, pp. 843-862.
3. Marti, P., Alvarez, M., Kaufmann, W., and Sigrist, V., "Tension Chord Model for Structural Concrete," ETH, Zurich, Swiss, 1998.