

철근 콘크리트 연결보의 하중 전달 기구와 변형 능력

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

홍성걸*
Hong, Sung Gul

장상기**
Jang, Sang Ki

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

* 정회원, 서울대학교 건축학과, 부교수

** 학생회원, 서울대학교 건축학과, 박사과정

형성되는 파괴 기구로 설계되기 때문이다. 따라서 연결보는 전단 지배 부재이지만 변형 능력이 중요한 요소로 고려되어야 한다.

연결보의 변형 능력을 확보하기 위해서 Paulay는 대각 배근을 제안하였고, Galano등은 실험을 통하여 마름모 배근을 제시하였고, Tegos등은 대각 배근에 대한 강도 모형을 제안하였으며, Theodosios등 또한 다양한 배근 형태에 대하여 실험 연구를 진행하였다. 최근에는 여러 연구자들에 의하여 철제 플레이트, 철골 보를 매입하는 복합 상세들이 제안되고 있다. 그러나 대다수의 연구가 철근 상세나 복합 재료 효과에 국한되어 있어 연결보에 변형 능력을 결정하는 다양한 변수에 대한 체계적인 접근이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 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 측정하여 변형 능력에 대해 고찰하였다. 분석된 실험 자료를 근간으로 하여 연결보의 하중 전달 기구 모형과 변형 모형을 제시하였다.

2. 단조하중 실험

2.1 실험개요

연결보는 병렬 전단벽 시스템에서 전단력과 휨 모멘트가 발생하는 부재이다. 연결보로 인해 연결된 벽체는 독립적으로 지지하는 휨 모멘트 외에도 각각 압축력, 인장력을 부담하면서 휨 모멘트를 추가로 받게 된다. 연결보는 벽체와 결합하는 두 단부에서 대칭 휨 모멘트와 균일한 전단력이 작용하도록 실험하여야 한다. 이러한 단부 조건을 만족시키기 위해 강성이 매우 큰 철골 프레임을 이용하여 연결보 시험체의 중심부를 가력 하였다(그림 1(a)). 본 연구에서는 연결보의 항복 변위와 극한 변위에 대한 분석을 위해 경간-깊이 비, 휨 철근비, 전단 철근비, 보 중심부 철근을 변수로 시험체를 제작하였다. 표 1에서와 같이 01MCB16SMM 시험체가 기준 시험체이고, 시험체 명은 시험체번호(01), 재하방법(MCB, 단조하중), 경간-깊이 비(16, 경간-깊이 비: 1.67), 휨 철근비(S, small), 전단철근비(M, medium), 보 중심부 횡철근 유무(M, 유)을 나타낸다. 경간-깊이 비는 연결보의 경간은 800mm로 유지하고 깊이를 480mm, 600mm, 400mm로 변화시켜 제작하였다. 휨 철근비와 전단 철근비는 배근 위치와 철근의 개수는 동일하게 하고 철근의 직경만 변화시켜 가면서 배근하였다. 휨 철근은 D16, D22, D25 철근을 사용하였고 전단 철근은 D5.5, D10, D13 철근을 사용하였다. 보 중심부는 D10 철근을 배근 하였다.

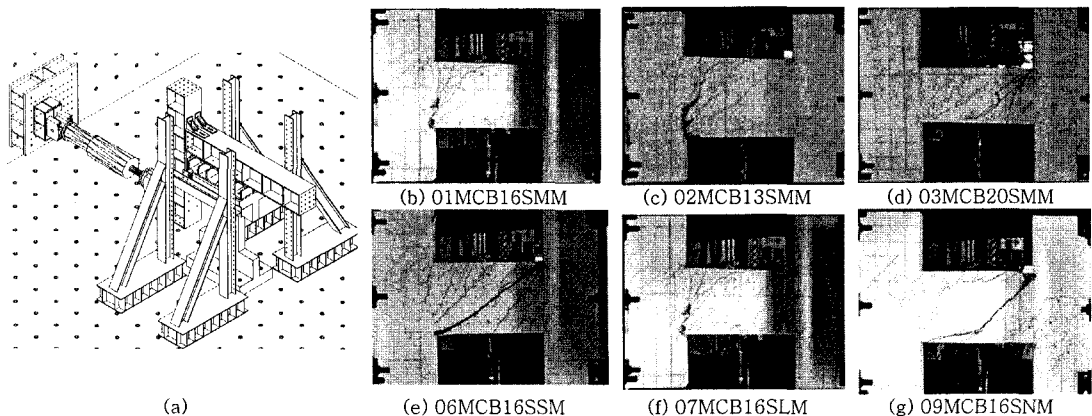


그림 1 (a) 시험체 가력 방법 (b-g) 최종파괴균열

표 1 시험체 상세

specimen	span(mm)	depth(mm)	width(mm)	span/depth	ρ (%)	ρ_s (%)	ρ_n (%)
01MCB16SMM	800	480	150	1.67	1.19	1.05	0.47
02MCB13SMM	800	600	150	1.33	0.94	1.05	0.37
03MCB20SMM	800	400	150	2.00	1.45	1.05	0.57
04MCB16MMM	800	480	150	1.67	2.25	1.05	0.47
05MCB16LMM	800	480	150	1.67	2.91	1.05	0.47
06MCB16SSM	800	480	150	1.67	1.19	0.32	0.47
07MCB16SLM	800	480	150	1.67	1.19	1.77	0.47
08MCB16SHM	800	480	150	1.67	1.19	1.05	0.39
09MCB16SNM	800	480	150	1.67	1.19	-	0.47
10MCB16SMN	800	480	150	1.67	1.19	1.05	-

2.2 실험 결과

그림 1과 그림 2에서 보는 바와 같이 4번,5번,6번,9번 시험체는 아치 스트럿의 압축 파괴로 인해 휨강도에 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 변형률이 다를 것으로 예상된다.

변형 상태에서 다른 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 전

단 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.

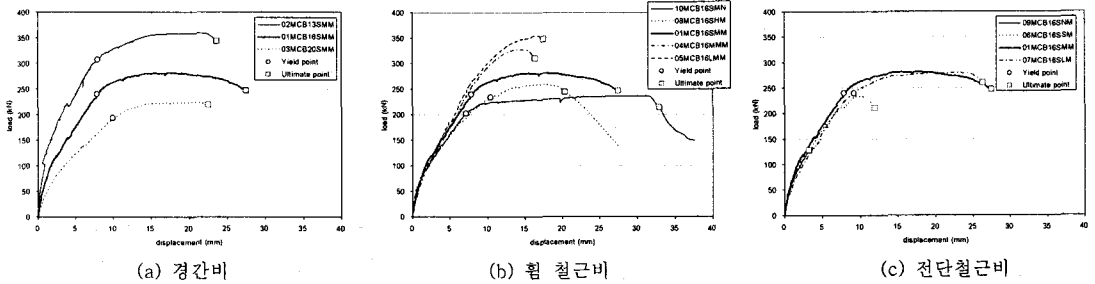


그림 2 하중-변위 곡선

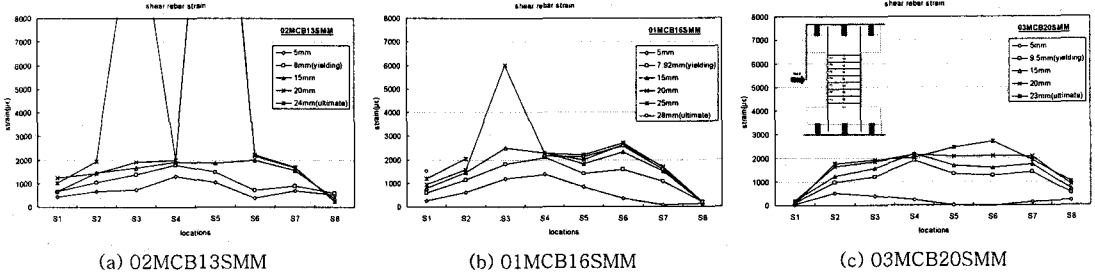


그림 3 변위에 따른 전단 철근 변형률

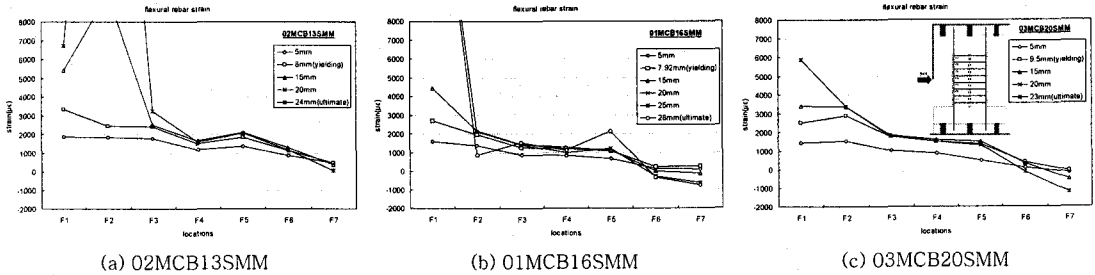


그림 4 변위에 따른 휨 철근 변형률

3. 하중 전달 기구

3.1 변형 단계에 따른 응력 변화

실험 결과를 구간으로 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. 이 때 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 이

것은 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.

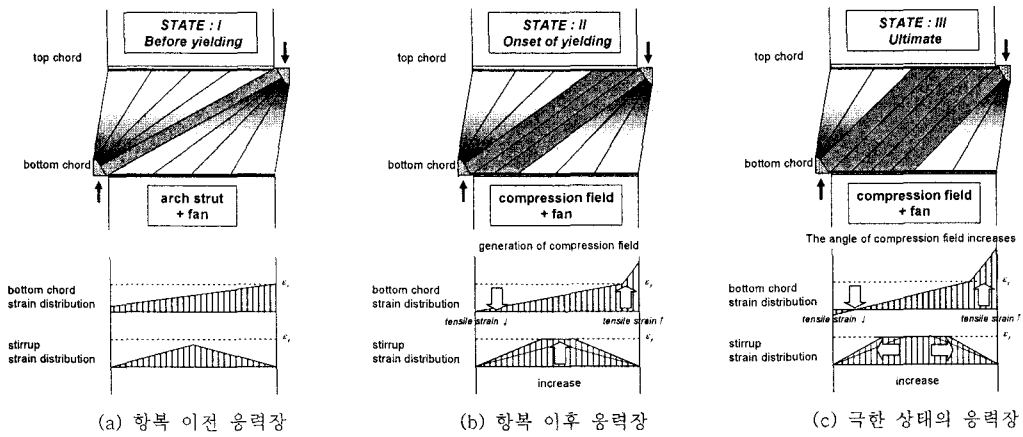


그림 5 변형 단계에 따른 응력 분포

3.2 아치 작용과 트러스 작용

실험 결과를 보면 연결부는 항복이전에는 아치 작용의 스트럿의 전단 압축파괴하고, 항복 이후에는 균일 압축장의 트러스 작용의 스트럿이 압축 파괴하였다. 항복이전에 아치 작용과 트러스 작용이 공존하고 항복 이후에는 아치 작용이 점차 축소되어 트러스 작용만이 존재함을 의미한다. 항복 이전의 휨 철근과 전단 철근의 응력 분포를 결정하기 위해서는 아치 작용과 트러스 작용을 분리해야 다. 그런데 그림 6(b)와 같이 연결부 스트럿-타이 모델은 부정정이므로 평형조건만으로 아치작용과 트러스 작용을 결정할 수 없다. CEB-FIP MC 90에서는 전단 경간비에 따른 아치 작용과 트러스 작용의 설계식을 제시하고 있으나 실험결과와 비교결과 극한 상태에서는 비교적 정확하였으나 항복 상태에서는 합리적인 결과를 얻을 수 없었다. 본 연구에서는 그림 7과 같이 연결부에 아치 작용만이 존재하는 트러스 모형과 트러스 작용만 존재하는 45도 트러스 모형에 대해 가상일의 원리를 통해 각각 강성을 구하였다.

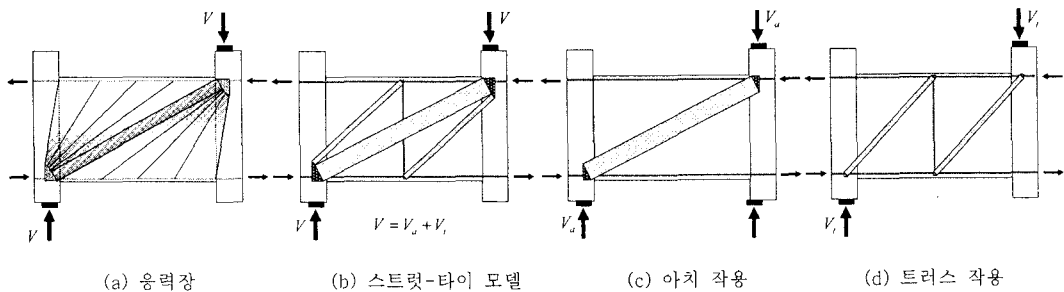


그림 6 연결부의 스트럿-타이 모델

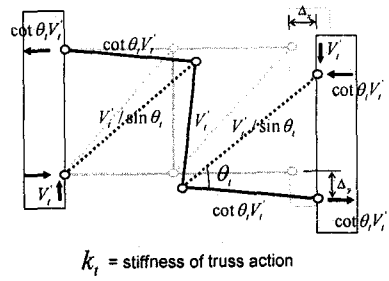
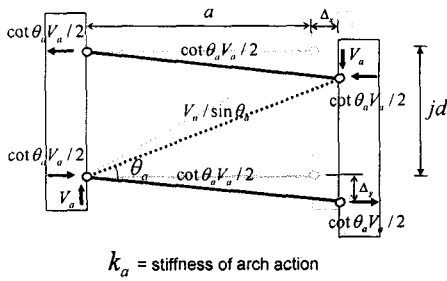


그림 7 아치 작용과 트러스 작용의 강성

다음과 같이 각 부재의 단면적과 기울기로 강성을 구할 수 있다.

$$k_a = \frac{\sin^2 \theta_a \cos \theta_a E_c A_{c,a} E_s A_s}{(2E_s A_s + \cos^3 \theta_a E_c A_{c,a}) a} \quad (1)$$

$$k_i = \frac{2 \sin^2 \theta_i \cos \theta_i E_s E_c A_{c,i} A_s A_v}{(4 \cos^3 \theta_i E_c A_{c,i} A_s + \sin^3 \theta_i E_c A_{c,i} A_s + 2E_s A_s A_v) a} \quad (2)$$

이 강성을 이용하여 트러스 작용에 전달되는 V_i 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_i = \frac{k_i jd / a}{(k_a + k_i jd / a)} V \quad (3)$$

여기서, jd/a 는 트러스 작용에 작용하는 전단력이 45도 트러스 모델에 의해 산정된다고 가정하여 나온 값이다.

3.3 전단 철근과 휨 철근의 응력 분포

3.1에서 언급한 규칙에 의해 기본적인 전단 철근의 응력이 결정된다. 다만 모든 전단 철근이 항복하는 경우에도 부채꼴 영역(fan region)에 존재하는 전단 철근의 경우에는 다음과 같이 계산된다.

$$s_i = \frac{V_i}{n} \left(\frac{a}{jd} \right) \frac{x}{jd} \quad (4)$$

그림 8(c)와 같이 s_i 는 전단 철근에 작용하는 하중이고, n 은 전단 철근의 총 개수, x 는 단부로부터의 거리이다. 단부에 가까워 저서 철근에 작용해야 할 응력이 분산되는 것으로 판단하였다. 이 식은 실험에서 관찰된 값과 비교적 유사하다.

다음으로 휨 철근의 응력 분포는 그림 8(c)에서 평형 조건에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T(x) = \frac{V a}{2 jd} - \frac{\sum s_i x_i}{jd} \quad (5)$$

휨 철근의 전 영역이 상태에 있고 균열이 발생 이후를 고려하므로 장부 작용(dowel action)과 골재 맞물림 작용에 의한 하중 전달은 제외하였다.

4. 변형 모형

4.1 균열폭을 이용한 변형 산정

기존의 휨 강성과 유효 단면을 고려한 변형의 계산은 전단 지배 부재의 경우 사용할 수 없다. 본 연구에서는 그림 8(a)와 같이 균열 폭을 이용하여 변형을 산정하였다. 균열 간격은 전단 철근

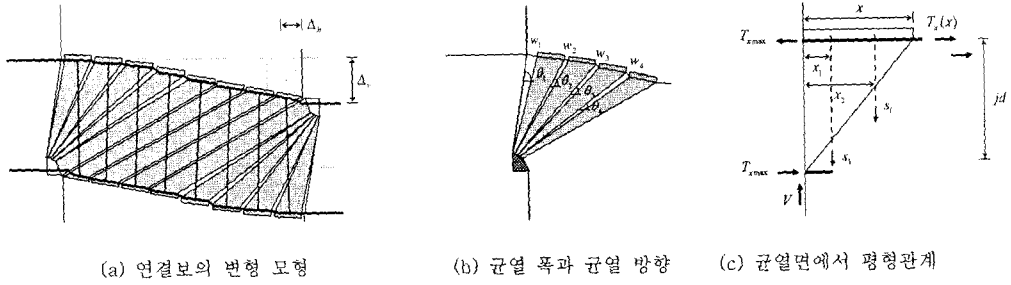


그림 8 균열 폭을 이용한 변형 모형

의 간격으로 하였고 철근은 균열면에 수직으로 변형한다고 가정하였다. 연결보의 수평 변위와 수직 변위를 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\Delta_v = \left(\sum_{j=1}^n \frac{w_j}{jd \sin \theta_j} \right) a \quad (6)$$

$$\Delta_h = \sum_{j=1}^n w_j \sin \theta_j \quad (7)$$

4.2 정착부 변형과 휨 철근의 변형 산정

그림 8(b)에서 첫 번째 균열 폭 w_1 는 정착부에서 부착-미끄러짐에 의한 폭(그림 9(a))과 연결보 내부의 휨 철근의 부착-미끄러짐에 의한 폭(그림 9(b))의 합으로 표현되고 나머지 균열 폭은 휨 철근에 의한 값으로 결정하였다.

균열폭의 산정은 Sigrist의 "Tension Chord model"을 사용하였다. 부착 강도는 철근의 항복 이전과 이후로 각각 $\tau_{b0} = 2f_{cr}$, $\tau_{b1} = f_{cr}$ 로 가정하고 부착력에 기초하여 철근의 응력, 변형률, 균열 폭을 산정하였다. 다음 식에 의해 균열 폭이 계산된다.

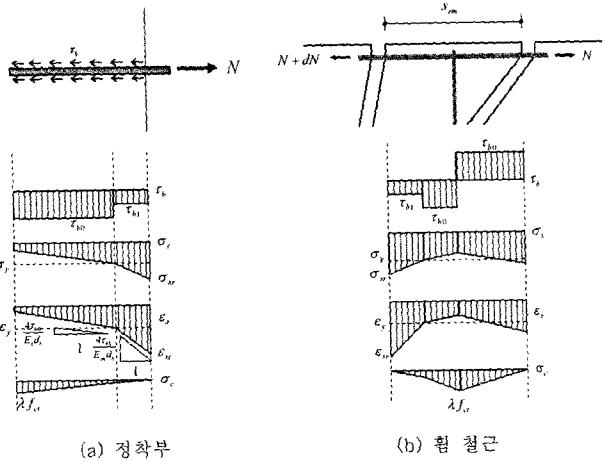


그림 9 균열 폭의 산정

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{4\tau_{b0}}{d_b E_s} \left(1 + \frac{E_c}{E_s} \frac{\rho}{1-\rho} \right) \quad (8)$$

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{4\tau_{b0}}{d_b E_{sh}} \left(1 + \frac{E_c}{E_{sh}} \frac{\rho}{1-\rho} \right) \quad (9)$$

여기서, ρ 는 철근비이고, E_{sh} 는 철근의 항복 이후 탄성계수이다.

4.3 항복 변형과 극한 변형

항복 강도는 휨철근의 항복강도에 의해 다음 식과 같이 계산된다.

$$V_y = 2A_s f_y \frac{jd}{a} \quad (10)$$

이 전단력을 이용하여 앞에서 제시한 방법으로 항복 변형을 결정하였고, 극한 변형은 항복강도에서 하중을 증가 시키면서 트러스 스트럿이 파괴 하중에 도달하는 경우로 정의 하였다.

스트럿의 주인장 변형률에 의해서 스트럿의 강도가 저하되는데 이에 파괴를 다음 식과 같이 표현할 수 있다. 필요 압축 스트럿의 폭이 절점부의 크기 보다 커지는 경우 이를 파괴기준으로 설정하였다.

$$l_{nh} < w_{c1} \sin \theta_1 + w_{c2} \sin \theta_2 \quad (11)$$

여기서 절점부 길이 $l_{nh} = V / 0.85 f_c b_b$ 이고, 스트럿 폭은 각각 $w_{c1} = V_u / f_{2\max c1} b_b$, $w_{c2} = (V_u j d / a) / f_{2\max c1} b_b$ 로 정의된다.

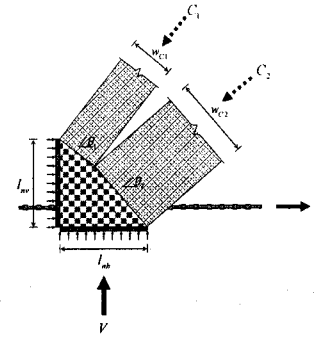


그림 10 절점부 스트럿 폭의 정의

5. 결론

본 연구에서는 경간-깊이비, 휨 철근비, 전단 철근비가 다른 10 개 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 한국과학재단 지원, 지진공학센터(KEERC)와 특정기초연구개발사업의 연구비 지원에 의하여 이루어 졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

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.