

# 휨-전단 파괴의 한정 연성도 모형

## Deformability models for flexural-shear failure of limited ductility

홍 성 곁\*

Hong, Sung Gul

---

### ABSTRACT

Deformability of RC members in shear after flexural yielding is limited and controlled by governing failure modes and material strength. Shear strength of members in D-regions has been explained by a direct load path (direct strut or arch action) and indirect load path (fan action or truss action). Indirect load path including truss action and fan action rely on bond along tension ties. Generally, superposition of two actions results in total shear strength when shear failure modes control. The ultimate deformation depends on controlling failure modes and thereby, their force transfer patterns. Proposed models are capable of explaining of limited deformability of RC members in D-regions.

---

#### 1. 서론

철근콘크리트 부재의 극한 변형능력은 내진설계에서 부재의 응력재분배와 에너지 소산능력의 확보에 필요한 기본적인 특성이다. 그러나 전단력이 존재하는 경우 휨 부재가 비록 먼저 항복에 다다른 후 연성도가 작은 값을 갖는 경우가 많다. 전단강도로 파괴는 경우는 대체로 작은 값의 연성도를 갖게 된다. 이에 지진하중 이외의 비정상적인 극한하중에 대하여 강도는 물론 적절한 극한변형능력의 확보 및 이에 대한 추정모형개발이 필요하다.

내진설계에서는 의도적인 소성힌지의 형성과 더불어 필요한 변형능력 확보에 따라 설계의도와 같은 안전한 구조적 성능을 기대할 수 있다. 일반적으로 휨모멘트에 대한 소성힌지의 변형 능력은 단면의 평면유지가정에 따라 콘크리트의 극한 변형율을 기준으로 극한변형곡률의 추정식의 도출이 가능하다. 변형능력이 취약한 요소의 판명과 변형형태의 제시가 가장 중요한 사항이라고 볼 수 있다. 합리적인 소성힌지의 위치와 소성변형능력은 대개 휨 모멘트가 지배하는 경우 큰 문제가 없으나 전단력과 압축 응력의 영향이 큰 경우 소성변형 능력 한계가 일반적으로 간주한 소성힌지의 역할에 대한 검토가 필요하다. 대표적인 예로써 기둥부재의 전단강도와 소성변형(휨-전단) 변형 능력의 관계를 제시하였다. 이와 같은 개념은 형상비가 작은 벽체의 전단강도 산정에 확대되어 있다. 이와 같은 분체는 D-구역에서의 주요 응력체계와 이에 따른 변형 능력에 대한 모형이 필요한 것을 시사한다.

대개 접합부, 개구부, 깊은 보 등 D-구역의 특성을 가지고 있는 부재는 충분한 강도를 유지하도록

---

\* 정회원, 서울대학교 건축학과 부교수

하여 변형에 대한 고려가 불필요한 것으로 간주하여 충분한 강도를 확보하는 것이 일반적인 설계방향이다. 휨변형이 지배하는 경우에는 종전의 변형 모형으로 추정이 가능하지만 전단력이 지배하거나 D-구역에서 소성변형능력이 요구되는 경우 적절한 모형제시가 필요하다. D-구역에서의 하중 전달은 스트럿-타이 모델을 이용하면 효과적인 철근 배근과 강도를 확보할 수 있다. 스트럿-타이 모델은 주요 인장요소의 배치를 통하여 압축재의 충분히 확보하여 연성과파괴를 유도한다.

이 논문에서 휨모멘트와 전단력이 존재하는 대표적인 부재를 선택하여 변형능력 모형을 제시하고자 한다. 우선 휨 항복으로 결정된 극한 응력상태를 STM으로 표현하고 전단 파괴메커니즘에 대한 스트럿 파괴한계를 설정하여 부재의 연성도를 추정하는 모형을 제시하고자 한다.

## 2. 하중 전달 모형

STM은 극한상태의 응력상태를 나타낸다. 부재의 파괴모드에 따라 주요 응력전달요소의 항복상태를 표현한다. STM은 평형조건과 항복조건만을 만족하므로 극한 응력상태의 표현은 유일하지 않다. 흔히 부정정 STM은 설계자가 적절하게 요소에 응력을 가정할 수 있음을 의미한다. 부정정 STM은 하중점과 지지점사이를 직접 응력전달하느냐 또는 간접적으로 하는 것으로 분류할 수 있다.

### 2.1 직접응력전달과 간접응력전달 작용

단순지지 깊은 보의 하중 전달 방식은 대각선 스트럿을 통한 직접응력전달방식과 횡보강철근을 통하여 이루어진 간접응력전달방식으로 나누어 생각할 수 있다. 대각선 스트럿은 하현재의 인장타이가 절점에서 반력으로 전달하며 간접응력전달방식은 하현재의 부착응력을 의지하여 부채꼴 응력장을 이용한다. 직접-간접 응력전달 방식을 일반화하기 위한 모형을 그림 1과 같이 모형으로 접근해보자.

### 2.2 휨-전단파괴의 응력장 형성

문제는 2가지 응력전달방식에 따라 각각 전단력의 크기를 결정하는 일이다. STM의 속성은 응력장을 단순히 평형조건을 만족하는 것을 족하므로 많은 경우가 가능하다. 그림 2의 첫 번째 스트럿과 부채꼴 응력장으로 발휘되는 전단강도는 하현재의 항복으로 결정되는 전단력보다 큰 전단강도를 보유하게 된다. 그러므로 휨 항복 이후 적절한 전단강도 모형이 필요하다. 두 번째 그림은 이에 해당한다. 지지점의 집중하중에 대하여 복부의 전단보강근은 스트럿작용과 더불어 부채꼴의 압축력전달기구로 설명한다. 부채꼴 응력장은 주근의 부착력의 저항이 필요하다. 주근의 항복범위와 길이가 확장됨에 따라 부착응력이 상실되

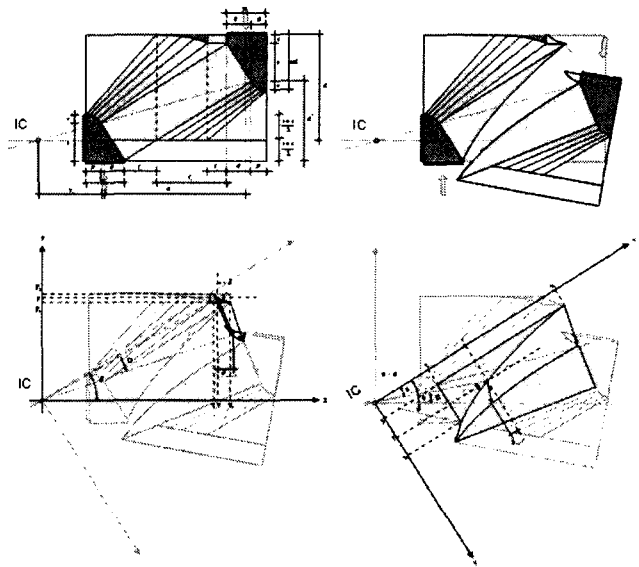


그림 1. 전단 철근이 있는 깊은 보의 변형 모형

면 원래의 부채꼴의 응력장의 형상이 변화된다. 한편 집중작용력 바로 하부에 형성된 절점영역의 오른쪽 경계면의 깊이는 휨모멘트의 작힘에 해당하는 압축응력으로 같은 값을 유지하여 전단강도의 크기는 동일한 값을 유지한다. 결국 시스템 입장에서 보면 같은 크기의 전단강도를 유지하나 스테럽에 의한 전단력 전달과 스트럿에 의한 전단력 전달의 상대적인 비율이 변한다. 스테럽에 의한 부채꼴 압축장을 통한 전단력 전달비율이 감소하면 스트럿을 통한 하중전달력이 증가한다.

이를 단순지지형 깊은 보와 연속 깊은 보로 나누어 볼 수 있다. 단순지지형 깊은 보의 경우 주근에 접한 부채꼴은 부차응력의 존재가 필요하며 대각선 압축력에 저항하며 수직방향의 인장력인 스테럽을 통하여 전단력을 전달한다. 스테럽 인장력은 상부 부채꼴에 의한 압축응력과 함께 상부의 이축압축상태의 절점을 형성한다, 다시 전단응력을 전달한다. 부차응력이 상실된 부분의 상현재는 이축의 압축절점에서 일축압축상태의 스트럿으로 변화한다.

### 3. 응력장과 변형능력

#### 3.1 스트럿-타이 모델의 파괴 메커니즘

하한계 해를 제공하는 STM은 평형조건과 항복조건을 만족한다. 구성요소에 항복조건을 적절히 다루어 설계자가 원하는 설계 강도와 파괴모드를 유도한다. 강도 발현시 충분한 소성변형 능력을 보장하기 위하여 연성도가 큰 구성요소가 항복을 전제로 한다. 이러한 이유로 연성능력이 작은 스트럿의 안전한 단면적을 확보하고 인장 타이는 항복점에 도달하도록 한다. 이러한 파괴 모드는 대체로 큰 연성능력을 확보한다. 예를 들어 휨부재의 휨파괴 연성능력은 인장철근의 항복이 먼저 일어나고 종국에는 콘크리트 최대 압축변형률로서 결정한다. 문제는 주요 인장타이가 항복 이후에 요구되는 변형능력의 추정에 있다. 대표적인 관심사는 비교적 형상비가 작은 기둥과 연결보에서 예상되는 소위 flexural-shear 파괴시 연성능력에 대한 산정방법에 있다. 여기에 한가지 방법으로 힘의 전달을 STM으로 선정할 후 STM의 파괴 메커니즘을 설정하여 이에 대한 연성능력을 평가하는 방법을 제시할 필요가 있다.

#### 3.2 휨 파괴와 전단 파괴 그리고 휨-전단 파괴의 구분

단순지지 깊은 보 상부에 대칭적으로 2 개 위치에 집중하중이 작용하는 예를 들어 파괴 메커니즘을 구분하자. 휨 파괴는 인장타이와 하중점 사이에 위치한 수평방향의 스트럿의 파괴로 이루어진다. 반면 휨-전단 파괴모드는 인장타이 항복 이후에 대각선 스트럿의 파괴를 의미한다. 결국 강도는 휨 강도로 결정되어 휨 파괴와 같지만 이후 전단파괴로 한정된 변형능력을 갖게 된다. 그림에서 휨 파괴와 전단 파괴와 휨-전단파괴의 특성을 구분할 수 있다.

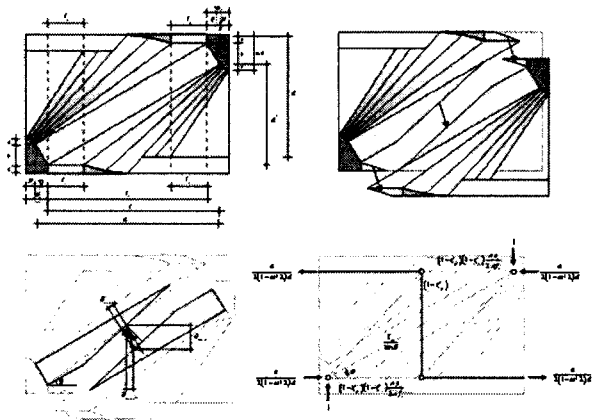


그림 2. 전단 철근이 있는 연결 보의 변형 모형

### 3.3 스트럿의 파괴 메커니즘

대표적인 파괴모드는 대각선 균열을 포함한 병진형, 절점 모서리를 중심으로 발생하는 회전형 그리고 쌍곡선의 균열선을 포함한 회전형을 들 수 있다. 병진형은 인장타이의 항복과 탄성거동을 모두 포함한다. 주요변수에 대한 변형능력을 검토하면 실용적인 측면에서 대표적으로 병진형 취성파괴 및 연성파괴와 회전형 연성파괴로 크게 나누어 볼 수 있다. 병진형과 회전형의 적절히 조합하면 대개 모든 경우의 변형형상을 예상할 수 있다.

### 3.4 스트럿 파괴에 영향을 주는 요소와 변형능력산정

파괴 메커니즘은 스트럿의 크기와 메커니즘 패턴에 따라 STM의 변형 능력을 결정한다. 아치작용과 부채꼴 응력장의 조합 또는 스트럿과 트러스로 표현하는 일반 압축장의 조합은 주근의 부차응력의 존재여부에 따라 응력부담능력비가 달라진다. 스트럿을 통해 전달되는 응력이 클수록 스트럿의 폭이 커지며 스트럿 파괴 메커니즘에 구한 식에 따르면 변형 능력이 저하된다. 증가된 스트럿의 전달능력으로 스트럿의 폭이 커지면 결국 시스템의 변형능력이 감소되는 결과로 발전한다. 변형능력곡선과 만나는 지점에서 적절한 길이의 항복 영향길이 결정된다. 결국 항복초기에 분배된 스트럿과 부채꼴 또는 스트럿과 트러스로 결정된 스트럿의 최소크기가 최대 변형능력을 결정한다. 한편 최대 스트럿의 크기가 최소 변형능력을 결정한다.

## 4. STM의 변형능력 산정법

앞서 논의한 STM의 변형능력 산정법을 다음과 같이 제시한다.

- 1) STM을 구성한다.
- 2) 항복순서를 선정한다.
- 3) 스트럿의 크기를 결정한다.
- 3) 스트럿의 파괴 메커니즘에 따른 변형능력을 선정한다.

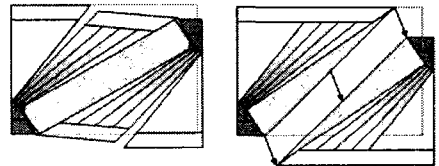


그림 3. 연결 보의 회전과 병진 파괴기구

## 5. 결론

D-구역의 변형 능력은 응력전달의 주요경로인 압축재의 파괴로 결정된다. 인장타이의 항복으로 해당 부재의 강도가 결정되지만 항복 이후 변형 능력은 스트럿의 파괴로 결정된다. 주요 하중경로를 STM으로 제시하고 STM의 인장타이로 항복으로 강도를 결정한다. 결정된 강도를 지배하는 STM의 파괴 메커니즘으로 만들어진 변형장을 근거로 스트럿의 파괴와 그에 따른 변형능력을 추정할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구개발사업의 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. W. W. L., Chan "The Ultimate strength and deformation of plastic hinges in reinforced concrete frameworks," *Magazine of Concrete Research*, Nov, 1955, pp. 121-132.
2. J. Grob, and B., Thurlimann, "Ultimate strength and design of reinforced concrete beams under bending and shear," *Memories, IABSE, Zurich*, V. 36-II, 1976, pp. 105-120.
3. T. Ichinose, "A shear design equation for ductile R/C members," *EESD*, V. 21, pp. 197-214.