

# 균일한 압축장에 대한 새로운 휨 형태의 파괴 메커니즘

## New Flexural Failure Mechanisms for Uniform Compression Stress Fields

홍 성 곁\*  
Hong, Sung-Gul

---

### ABSTRACT

New typology of failure mechanisms for uniform compression stress fields are presented based on the classical theory of plasticity, in particular the normality rule, and the limit theorem. The concrete is assumed as a rigid-perfectly plastic material obeying the modified Coulomb failure criteria with zero tension cut-off. The failure mechanisms are capable of explaining flexural types of crushing failure in uniaxial uniform compression stress fields which are called struts in truss models. The failure mechanisms consist of sliding failure along straight failure lines or hyperbolic failure curves and rigid body rotation. The failure mechanisms involving straight failure lines are explained by constant strain expansion in the first principal direction and rigid body rotation motion. The failure mechanisms presented are applied to the explanation of bond failure of bar combined with concrete crushing failure and flexural crushing failure of concrete.

Key words: Failure mechanisms; flexural failure; normality rule; theory of plasticity; truss models; uniform compression stress fields.

---

### 1. 서론

트러스 모델은 철근콘크리트 구조물의 극한응력상태를 도시적으로 압축재와 인장재로 표현하여 구조부재의 내부의 응력상태를 쉽게 파악할 수 있으며 이를 근거로 배근설계에 적용할 수 있다. 이와 같은 접근 방법은 구조물의 극한내력의 산출을 위해 소성학적 이론에 근거한 하한치를 나타낸 것이다. 트러스 모델에서의 압축재는 압축응력상태의 콘크리트를 직선형태의 스트러트, 곡선형태의 아치 및 병모양으로 표현하는 것이 일반적이며 인장재는 비교적 간단하게 인장력 상태의 철근 및 프리스트레스 부재의 텐던을 나타낼 수 있다.

트러스 모델에 대한 연구대상은 극한 응력상태의 철근 콘크리트 구조물의 기하적인 트러스 모델의 실용적인 구성방법, 그리고 적절한 압축재의 선택, 트러스 모델의 구성요소의 강도 및 연성의 발휘 여부이다. 그 중에서 인장재의 강도확보는 절점에서의 철근의 부착능력 등에 귀착된다. 트러스 모델이 철근 콘크리트 구조설계에 실용적으로 이용되기 위해서는 특히 압축장의 강도 그리고 절점 영역(nodal

---

\*서울대학교 건축학과 전임강사

zone)에서의 유효강도의 추정등이 트러스 모델이 실용적으로 이용되기 위한 연구 과제이다.

트러스 모델은 극한이론에 따르면 하한치의 해에 해당하므로 파괴 메커니즘에 근거한 상한치의 해와 비교하여 설정한 트러스 모델의 합당성을 검토할 필요가 있다. 구성된 트러스 모델을 근거로 하여 설정한 파괴 메커니즘이 대체로 정확해에 접근한 상한치의 해를 구할 수 있다. 이러한 해를 트러스 모델에 상응하는 파괴메커니즘이라고 불리운다. 본 논문에서는 트러스 모델의 구성요소인 압축재의 가장 간단한 형태인 균일 압축장의 기존의 파괴 메커니즘과 새로운 형태의 휨 형태의 파괴 메커니즘을 소개하고자 한다.

## 2. 기본가정

트러스 모델과 파괴 메커니즘은 소성학에 기본적인 틀 안에서 설명이 가능하며 다음과 같은 가정이 필요하다.

- (1) 구성 재료의 소성학적인 이상화: 콘크리트의 변형도와 응력도의 관계는 비선형이고 최대 강도에 도달한 후 강도가 떨어지는 변형연성 현상으로 쉽게 탄성-완전 소성으로 이상화하기 곤란한 재료적인 특성을 가지고 있다. 그러나 어느 정도의 구속력이 가해지는 조건하에서는 콘크리트의 적절한 유효계수를 도입하여 탄성-완전 소성 재료로 이상화할 수 있다. (Fig. 1)
- (2) 법선법칙: 파괴 메커니즘 발생시 소성 변위의 방향을 결정하는 법칙으로 소성 에너지가 최대 값을 가질 수 있다는 가설 아래 항복곡선 상에 대해 직각 방향의 벡터를 설정할 수 있다.(Fig.2)
- (3) 콘크리트에 대한 항복조건: 이 축 및 삼 축 응력상태에 대한 항복조건은 모어-쿨롱 파괴 범주에 따라 구해진 평면 응력상태에서의 육각형 형태의 항복조건을 다시 인장강도를 무시하여 간편한 정사각형 모양의 항복 조건식을 이용한다.(Fig.3)
- (4) 소변형: 파괴 메커니즘 발생후 구조물의 기하학적인 변위는 작다고 가정하여 원래 구조물의 기하학적인 조건하에서 소성소산에너지를 산정한다.
- (5) 파괴분리선: 파괴 메커니즘에서의 파괴 분리선은 failure line을 뜻하는 것으로 콘크리트의 파괴 종류에 따라 인장파괴, 압괴를 나타내는 파쇄, 그리고 일축 압축을 받는 콘크리트의 압축파괴를 나타내는 미끄러짐 파괴(sliding failure)가 있다. 여기에서는 미끄러짐 파괴인 경우를 살펴보기로 하자. 파괴 분리선에 나란하게 아주 얇은 층의 균일한 매질이 있다고 가정하고 파괴 분리선에 따라 소성 변위  $\delta$  라고 하면 다음과 같이 주응력선 방향의 변형도를 구할 수 있다.(Fig. 5)

$$\epsilon_1 = \frac{1}{2} \frac{u}{\delta} (\sin \alpha + 1)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{2} \frac{u}{\delta} (\sin \alpha - 1)$$

결국 파괴선에 따라 발생하는 소성 소산 에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$W_d = f_c \epsilon_2 t d = f_c \frac{\delta}{2d} (1 - \sin \alpha)$$

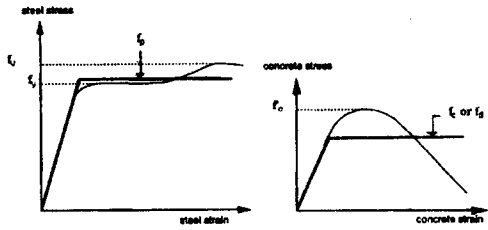


Fig. 1 Plastic Idealization

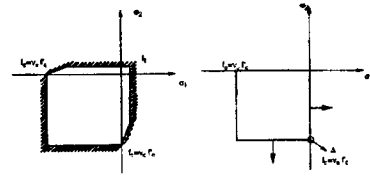


Fig. 2 Yield Condition for Concrete

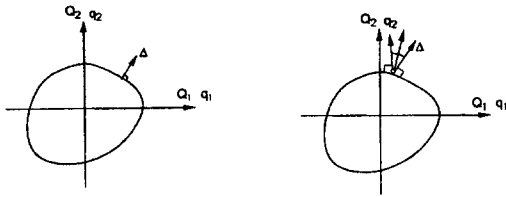


Fig. 3 Normality Rules

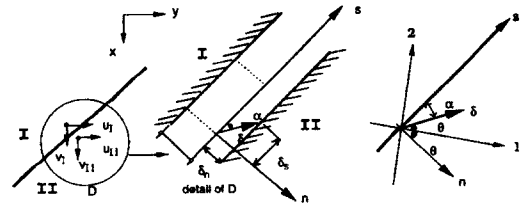


Fig. 4 Line of Discontinuity

### 3. 균일압축장의 콘크리트에 대한 기존의 파괴 메커니즘

균일한 일축 압축장에 대한 파괴 메커니즘의 설명을 위해 Fig. 5의 깊은 보의 경우를 살펴보기로 하자. 첫번째는 압축장의 대각 꼭지점을 연결하는 직선형태의 파괴 분리 선이 발생하여 하중방향으로 병진 운동하는 형태로 파괴 메커니즘이 나타난다.(Fig.6)

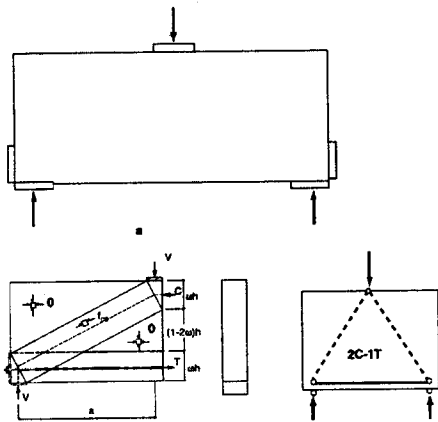


Fig. 5. Deep beam and Truss Model

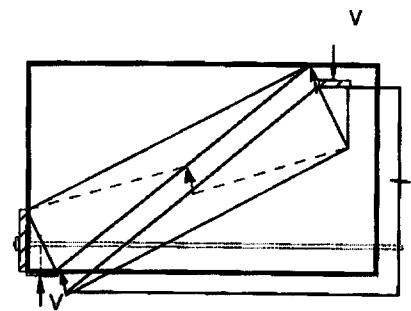


Fig. 6 Translation Mechanism

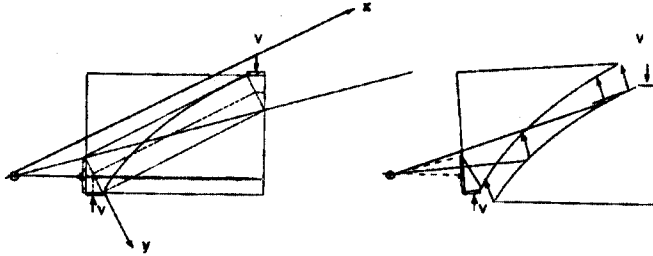


Fig.7. Hyperbolic Mechanism by Peter Marti

두번째 흥미로운 균일 압축장의 파괴 메커니즘은 Peter Marti가 제안한 파괴 메커니즘으로 철근의 항복여부에 따라 다른 파괴 메커니즘 설명에 매우 유용한 메커니즘이다. 균일한 압축대의 대각선상에 강체운동의 instantaneous center(이하 IC)가 존재한다. IC를 원점으로 x축과 y축을 설정하여 다른 대각선 꼭지점을 통과하는 쌍곡선(hyperbolic) 형태의 파괴 분리선이 설정된다. 예를 들어 Fig.7에서는 철근의 축상에 있으므로 파괴 메커니즘으로 콘크리트의 미끌림 파괴만이 발생하고 철근의 항복을 요구하지 않는다.

이상에서 소개한 파괴 메커니즘은 전단형 파괴 메커니즘이라고 불리우며 2개의 강체로 설명할 수 있는 특징이 있다.

#### 4. 휨 형태의 새로운 파괴 메커니즘

소개하는 새로운 휨 형태의 스트러트의 파괴 메커니즘은 다음의 2개로 나누어 설명할 수 있다.

##### 4-1 2개의 쌍곡선과 1개 직선의 파쇄 파괴선(Fig. 8)

Marti의 파괴 메커니즘과 전형적인 휨 파괴 형태의 휨 파괴선으로 이루어진 파괴 메커니즘이다. 두 개의 쌍곡선을 따라 미끄러짐 파괴를 일으키며 1개의 전형적인 파괴선을 따라 법선방향의 소성 변위가 존재하는 휨 압축 파쇄(flexural compression)로 발전한다. 3개의 강체로 분리되어 파괴 메커니즘을 설명할 수 있다.

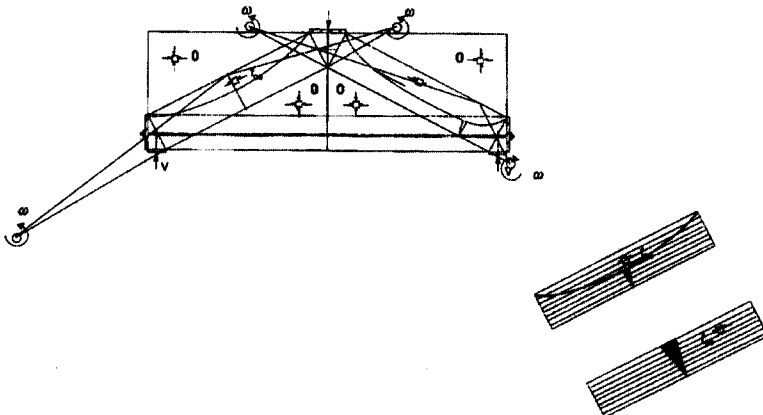


Fig. 8 New Flexural Mechanisms for Uniform Compression Field-1

4-2 2개의 직선으로 이루어진 파괴 분리선(Fig. 9)

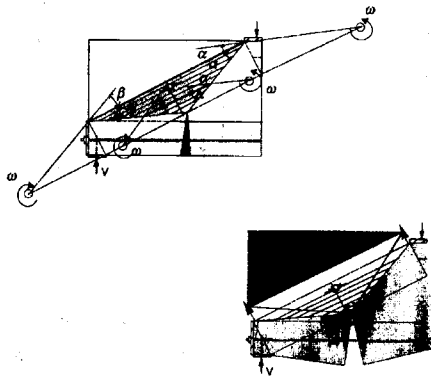


Fig. 9 New Flexural Failure Mechanism for Uniform Compression Stress Field-2

2개의 직선으로 파괴 분리선이 설정되며 삼각형 형태의 부분은 제일 주응력 방향으로 일정하게 팽창하는 파괴로 나타난다. 파괴 분리선에 따라 미끄러짐 파괴가 일어나며 삼각형 형태 내부에 위치한 개별적인 콘크리트 압축대의 변위를 표현할 수 있는 IC는 압축대와 나란한 직선상에 존재하게 된다.

이상에서 소개한 파괴 메커니즘은 동일한 소성 소산에너지 값으로 산정된다. 이러한 각각의 파괴 메커니즘은 실험결과에서 볼수 있는 다양한 파괴 메커니즘을 설명할 수 있는 근거를 마련할 수 있으며 부착파괴 등 특별한 경우의 파괴 양상에 대한 이론적인 설명이 가능하게 한다.

5. 휨 형태 파괴 메커니즘의 적용

5-1 보-기둥의 접합부(열린 모멘트)

보-기둥의 접합부의 모서리에 열린 모멘트가 작용하는 경우 잘 알려진 파괴 메커니즘은 콘크리트의 압축강도가 무한대로 크다고 가정하여 Fig. 10과 같이 3 개의 IC를 중심으로 인장형 균열이 2개 발생하여 해당 파괴 메커니즘을 설명할 수 있다.

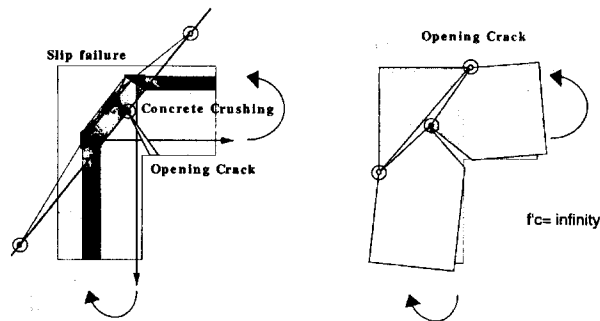


Fig. 10 Failure Mechanisms for Opening Joint

반면 새로운 휨 형태의 파괴 메커니즘을 이용하는 경우 콘크리트의 파쇄로 인한 파괴현상을 설명할 수 있다.

### 5-2 보-기둥 접합부(달힌 모멘트)

달힌 모멘트가 작용하는 보-기둥의 접합부는 대각선 방향으로 스트러트를 설정하는 것이 보통이며 이에 대한 파괴 메커니즘으로 철근이 항복하는 경우와 철근이 항복하지 않는 경우를 새로운 휨 형태의 파괴 메커니즘으로 설명할 수 있다. (Fig.11)

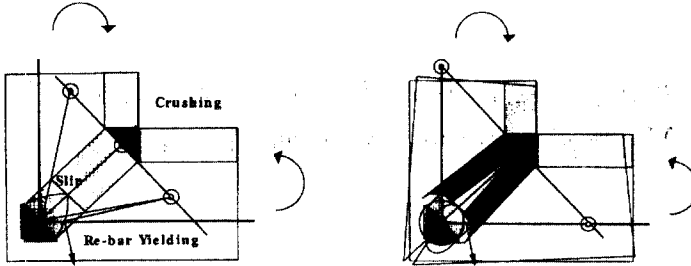


Fig. 11 Failure Mechanisms for Closing Joint

### 5-3 T-T-C 절점에서의 정착파괴

제1 주응력 방향으로의 균일한 팽창과 강제운동으로 표현되는 제 2의 휨 형태의 파괴 메커니즘은 철근의 정착파괴에 대한 트리스 모델에 대한 적절한 메커니즘 설명에 적용될 수 있다. (Fig.12)

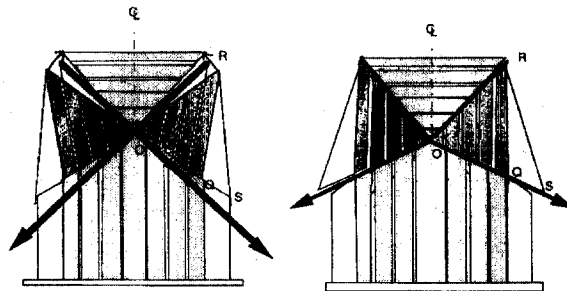


Fig. 12 Application of Flexural Failure Mechanisms to the Bond failure of Bar in T-T-C nodal Zone

## 6. 결론

새로 제안된 스트러트의 휨 형태의 파괴 메커니즘은 실험관찰결과에 대한 다양한 메커니즘의 해석 가능성을 제시할 수 있다. 특히 전단 파괴 메커니즘 위주의 현행 보의 전단파괴 메커니즘을 휨 형태의 파괴 메커니즘으로 확장할 수 있으며 철근의 부착 및 정착 파괴 등에 응용될 수 있는 가능성이 있다.

### 감사의 글

본 연구는 KEERC 세부과제 97K3-1402-03-02-3 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Ashour, A.F. and Morley, C.T., Effectiveness Factor of Concrete in Continuous Deep Beam, Journal of Structural Engineering, 122(2), pp169-178
2. Jensen, J.F., Discussion of An upper-bound rigid-plastic solution for the shear failure of concrete beams without shear reinforcement, by K.O. Kemp and M.T. Al-Safi, Mag. of Concrete Res. 34(119), 100-103