

철근 콘크리트구조물의 설계와 해석을 위한 트러스 모델

스트럿-타이 모델 관점에서 본 압축응력장 이론

CFT/MCFT from the Viewpoint of Strut-and-Tie Models



조순호*

1. 서론

콘크리트 구조물의 구조적 거동을 조사하기 위하여 내부응력의 흐름에 근거한 트러스 유추(Truss Analogy) 개념을 처음으로 사용한 시기는 지금으로부터 100여년 전으로 거슬러 올라가지만, 이러한 모델이 비로소 상당한 진전을 보이기 시작한 시기는 1900-1920년 사이 Ritter(1899) 및 Mörsch(1909) 등의 업적에 의해서이다. 이러한 개념은 또한, 최근 20년 동안에 다시 몇몇 선두그룹의 집중적인 노력의 결과로 콘크리트 분야에 새로운 장을 마련할 만큼 획기적인 발전 혹은 완성을 이룩하게 되었다. 이와 관련하여 특별히 주목할 필요가 있는 연구그룹은 M.P. Nielsen을 중심으로 한 Technical Univ. of Denmark, B. Thürlimann을 중심으로 한 Swiss Federal Institute of Technology(ETH), J. Schlaich를 중심으로 한 Univ. of Stuttgart 및

M.P. Collins를 중심으로한 Univ. of Toronto 팀 등이다. 전자의 두 그룹은 콘크리트 소성이론(Concrete Plasticity)에 근거한 스트럿-타이 형태의 콘크리트 해석모델을 제시하고 있는 반면에, 후자의 두 그룹은 보다 실험적으로 유도된 물리적 혹은 기계적 모델에 근거한 해석방법을 채택하고 있다. 특히, Univ. of Toronto 팀은 균열방향과 주응력방향이 일치한다는 가정하에 보통의 공학적인 보이론을 사용하고 있음에 주의할 필요가 있다.

일반적으로 스트럿-타이 모델(Strut-and-Tie Model)이라 함은 구조물에 기하학적 불연속(Geometric Discontinuity) 혹은 하중조건(Static Discontinuity)으로 인하여 내부응력이 혼동되어 더 이상 평면유지 원리가 적용되지 않는 D-지역(Disturbed Region of Internal Stresses)에서의 하중 지지 기구(Load-Carrying Mechan-

* 정회원, 광주대학교 건축공학과, 조교수

ism)를 설명하기 위한 트리스 모델로 인식되어 왔으며, 다른 한편으로 기존의 트리스 모델은 주로 보의 전단응력 지지 기구만을 설명하기 위하여 제한적으로 사용되어 왔던 것이 사실이었다. 하지만, 1991년 Univ. of Stuttgart에서 개최된 IABSE Colloquium에서는 모든 콘크리트(프리스트레스, 프리캐스트 및 현장 타설 콘크리트) 구조를 통합하여 칭하는 새로운 용어-Structural Concrete-가 탄생하게 되었으며, 그 결과, 구조용 콘크리트에 상응하는 통합되고 합리적인 해석방법(Consistent & Transparent Analytical Model)의 필요성을 인식하게 되었는데, 이에 대한 하나의 해결안으로 스트럿-타이 모델을 지목하게 되었다. 따라서 스트럿-타이 모델은 구조용 콘크리트의 모든 지역, 즉 D-지역 뿐만 아니라 균일한 응력장(Stress Field)이 예상되는 B-지역(Bernoulli Region)에서도 발생할 수 있는 모든 응력상태를 설명할 수 있는 일반화된 트리스 모델로 정의하는 것이 옳바르며, 이는 또한 본 저자의 관점이기도 하다. 오늘날 스트럿-타이 모델 해석은 종래 보의 전단분재 뿐 만 아니라 부착 및 정착문제에 이르기 까지, 또는 춤이 큰 보 및 코벨 뿐 만 아니라 보-기둥 집합부에 이르기 까지, 또는 콘크리트-철골 합성구조에 이르기 까지 전 분야에 걸쳐 매우 유용하고 다양하게 적용되고 있다.

본 고에서는 스트럿-타이 모델 적용과 관련된 수많은 영역 및 내용 중에서 아직까지 상대적으로 취약한 분야 중의 하나인 전단 스패-춤 비가 2.5-6 정도이며 전단 보강근이 배치되어 있지 않은 보의 거동에 대하여 지난 20년 간의 연구결과로 탄생한 Univ. of Toronto 팀의 압축 혹은 수정 압축 응력장 이론(Modified / Compression Field Theory ; CFT/MCFT), 특히 이들이 취하고 있는 균열면에서의 응력전달 기구를 중심으로 그 배경이론을 설명하며, 또한 이와 관련하여 최근, 다른 각도에서 제시된 Univ. of Stuttgart 팀의 기계적 해석모델을 비교 설명하고자 한다. 전단보강근이 없거나 그 배근량이 적은 제법 가느다란 보(Slender Beam)는 평면유지 법칙이 성립되는 B-지역에 해당하는 구조물로서 통상의 경우와 같이 콘크리트 소성이론(Concrete Plasticity)이 제시하는 하중 작용점과 지지점을 잇

는 스트럿 작용에 의하여 거동을 예측할 경우 상당히 비안전측의 결과를 초래하며, 특히 콘크리트의 인장 강도 및 균열후 거동에 매우 민감하므로 해석적으로 그 거동을 예측하기가 매우 어렵다.

2. 압축응력장 이론

1982년 캐나다의 Univ. of Toronto에서는 막응력(Membrane Stresses)을 지지하는 철근 콘크리트 패널의 구조적 거동을 조사하기 위하여 실제 상황과 매우 유사한 조건의 실험적 연구를 수행하였으며, 그 이후 최근에 이르기 까지 평면상(2-Dimension)의 콘크리트 전단하중 전달 기구(Shear-Carrying Mechanism)에 대한 그들의 기본적인 생각(Originality)을 Plate 및 Shell 요소에 까지, 단조하중에서 반복하중 조건에 까지, 또한 보통강도 콘크리트에서 고강도 콘크리트에 까지 점차 확장 적용시키 나가고 있다. 철근 콘크리트 패널에 대한 실험결과는 평면상의 콘크리트 전단 및 비틀림 거동을 예측하기 위하여 2축-응력상태의 철근콘크리트 요소 거동을 등가 1축-응력상태로 치환한 재료 구성모델(Constitutive Law)을 제시하고 있을 뿐 만 아니라 이를 채택하고 있는 소위 CFT라 불리는 이론을 실험적으로 지지해주고 있다. 더 나아가서 MCFT라 불리는 CFT의 확장된 이론은 균열 발생후 비균열 콘크리트 부분에 존재하는 인장 지지능력을 CFT에 보완하여 콘크리트의 전단 지지 능력을 더욱 향상 발전시킨 것이다. 콘크리트의 인장응력을 고려하기 위해서는 콘크리트의 비균열 부분과 균열면의 보강근 사이에 발생하는 응력 전달 기구를 자세히 이해할 필요가 있는데 초기의 MCFT는 균열면에 골재의 맞물림 작용(Aggregate Interlock)을 포함한 마찰작용(Friction) 뿐 만 아니라 보강근의 정부작용(Dowel Action)까지 포함하는 보다 완전한 모델을 제시하기도 하였으며, 또 다른 각도에서 균열방향과 수응력방향의 일치한다는 기본진제를 더 이상 채택하지 않은 보다 실제상황에 근접한 해석방법을 시도한 적도 있다(균열면의 응력전달에 대한 보다 자세한 설명은 3장 참조). 그 후에 실용목적을 위하여 이중 단면해석(Dual Section Analysis)에서 단일 단면해석으로 보다 단순화한 점도 현재의 MCFT가 초기의 모델과

다른 점 중의 하나이다.

CFT/MCFT는 변형도 적합조건에 의하여 사인장 균열의 경사각을 결정할 수 있으며, 이에 따라 결정된 경사방향의 압축 및 인장력, 수직 보강근력 간의 평형조건에 의하여 부재의 전체 응력-변형도 응답을 결정한다. 또한, 균열발생 후 균열면에 발생하는 국부 응력상황을 직접적으로 취급하기 보다는 균열지역과 비균열 지역에 발생하는 응력상황을 평균적으로 취급하고, 후에 균열면에 대하여 국부상황 만을 별도로 검토하는 간접적인 방법을 포함하고 있다. 또한, 이를 위하여 균열방향은 하중에 따라 변화하며, 주응력 방향은 주변형 방향과 일치한다는 기본가정을 전제로 하고 있다. 하지만, 이러한 방법은 주어진 변형도에 해당하는 응력도를 결정하고 최대응력을 한정하는 재료 구성모델과 연결되어야 하는데 CFT/MCFT는 인장-압축 응력상태의 응력상황을 고려하고자 하는 방향의 압축변형도 및 이에 수직인 방향의 인장변형도의 함수로 표시하고 있다. 이러한 균열된 콘크리트의 재료모델은 수많은 철근콘크리트 전단패널 실험결과로부터 유도된 합리적인 콘크리트 응력-변형도 관계로서 주인장 변형도의 크기에 따라 압축강도가 저하하는 압축강도 연화현상(Compression Softening)을 종래와는 달리 직접적으로 나타내고 있다.

당초, 균열 콘크리트에 대한 압축강도 또는 압축강도와 변형 모두의 연화현상을 주인장 응력방향의 변형도를 핵심변수로 택하고 있는 CFT/MCFT 재료모델이 제시된 이래로, 전 세계의 여러 다른 연구자들은 이러한 식들이 압축강도 연화현상을 과대 평가하고 있다고 보고하기도 하였으며, 그결과 그렇다면 “과연, 실제로 강도 연화현상을 좌우하는 핵심변수는 무엇인지?”에 대하여 새로운 의문을 가지기 시작하였다. 그리하여, Univ. of Toronto에서 수행한 초기 전단패널 시험체와 유사한 조건의 실험을 각자가 주장하는 핵심변수에 맞추어 수행하였으며, 그 결과 매우 다양한 종류의 연화계수를 제시하기에 이르렀다. 그들이 주장하는 압축강도 연화현상의 대표적인 핵심변수로는, 주인장 변형도 및 응력도, 보강근의 부착성능 및 균열방향 등이다.

3. 균열면에서의 응력전달

보강근이 균열방향에 경사지게 배치되어 있을 때 균열면에서 어떻게 힘이 전달되는가를 아는 일은 콘크리트 전단문제의 핵심사항이다. 이 문제는 지난 20년 동안 수많은 연구자들에 의해 반복적으로 다루어져 왔으며, 그 결과 균열은 어떤 범위의 길이에 평균적으로 유효한 분포된 모델(Smeared Crack Approach)로 해석에 묘사되거나 혹은 실제 상황과 같이 집중된 모델(Discrete Crack Approach)로 묘사되었다. 2축-응력을 지지하는 철근콘크리트 구조 요소의 거동을 조사하기 위하여 개발된 CFT/MCFT 류는 분포 및 집중된 균열 모델 모두를 취급하고 있다. 분포된 균열모델은 균열된 콘크리트의 평균 응력과 변형도를 정의하는데 사용되며, 반면에 집중된 모델은 균열면에서 국부적으로 작용하는 응력을 조사하는데 하는데 사용된다(Crack Check). 이와 같이 균열면에 발생하는 응력전달 기구는 특히, 해양구조물(Offshore Structure)을 구성하는 Shell 요소와 같이 전단보강근을 배치하기 힘든 경우나 혹은 이의 2-D 거동을 나타내는 웹보강근이 배치되지 않았거나 그 량이 적은 보의 거동을 결정하는데 매우 중요한 요소가 된다. 이러한 경우 대부분의 전단력 지지는 균열 발생 후의 콘크리트 거동(Postcracking Shear Resistance)에 의존하게 되는데, 사방향 균열이 잘 조절된 경우에는 균열면의 마찰력에 의하여 상당히 큰 전단력이 전달될 수 있다.

MCFT에서 평균 응력과 변형도를 취급하는 부분은 상당히 단순하며 이해하기 쉬운 반면에 균열면에서 국부응력을 취급하는 방법은 쉽사리 이해하기 어려운 부분으로서 몇몇 사용된 가정에 의문점이 야기된다. 예를 들면 i) 주응력도 방향과 주변형도 방향이 일치한다는 가정, ii) 균열은 항상 주변형도 방향에서만 발생한다고 가정한 점 등이다. 이러한 가정은 균열면에서 절대로 전단변형(Slip)이 발생하지 않음을 암시하고 있는데 보강근이 균열방향에 경사지게 배치된 경우에는 그렇지 않다는 점이다. 따라서, Univ. of Toronto 팀은 보다 실제 상황에 유사한 모델, 즉 주응력 방향과 주변형도 방향이 일치하지 않는다는 가정 즉, 균열이 임의의 방향 어디에서든지 발생할 수

있다는 가정하에 균열면의 응력전달을 취급하는 모델을 제안하였으나, 문제는 초기 균열 발생후 제 2차적인 균열이 언제 발생하느냐를 예측하는 일이었다. 왜냐하면, 스티럽이 배치되지 않은 보와 같이 일방향으로 보강근이 배치되어 있는 경우, 초기 균열 발생 후보다 완만한 각도의 2차균열이 발생하자마자 부재가 파괴되기 때문이다. 이미 초기 균열이 존재하는 상황에서 언제 2차 균열이 발생하는가를 예측하는 일은 언제 초기 균열이 발생하느냐를 예측하는 것보다 훨씬 더 어려운 일이다. 따라서, 현재의 MCFT는 보다 안전측의 결과를 위해 어느 기준 시점에 이미 새로운 균열이 발생하였다고 가정하고 이에 따라 어떤 각도에서 새로운 균열이 발생하였느냐를 결정하는 방법을 취하고 있다. 일반적으로 균열의 경사각은 하중조건, 보강근의 량, 프리스트레스 력 및 이전 균열의 각도 등에 따라 결정되나, 하나의 가능한 가정은 주인장 응력과 수직인 방향으로 새로운 균열이 발생한다고 전제하는 것이다. 더우기, 평균응력 및 국부응력에 대한

해석을 각각 수행하느니 보다 균열면에서의 국부응력 조건을 만족하도록 평균 인장응력을 제한하는 단순화된 방법을 채택하게 되었는데 현재 실용목적을 위하여 제시된 MCFT는 바로 이와 같은 기본개념에 근거하고 있다.

그림 1은 이미 잘 알려진 바대로 MCFT가 고려하고 있는 비균열 콘크리트 부분의 응력상황과 균열면에서의 응력상황을 나타내고 있다. 주응력 방향(혹은 x & y 방향)에서의 힘을 평형조건에 의하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$f_{c1} - f_{c2} = \rho_x \Delta_{sx} \sin^2 \theta + \rho_y \Delta_{sy} \cos^2 \theta \quad (1)$$

$$v_{c1} = (\rho_x \Delta_{sx} - \rho_y \Delta_{sy}) \sin \theta \cos \theta \quad (2)$$

여기서, $\Delta f_{sx}, \Delta f_{sy}$ = 균열면에서 보강근의 국부응력과 비균열 부위에서 보강근의 평균응력의 차

v_{c1}, f_{c1} = 균열면에 작용하는 전단응력과 법선응력

f_{c1} = 콘크리트의 평균 인장응력

식(1) 및 (2)의 물리적 의미는 그림 2(a)와 같으며, 또한 대표적인 평균응력 상태는 그림 2(b)와 같다(순수전단을 받고 x축 방향의 보강근이 더 강하게 배치되었다고 가정). 균열은 주인장 응력방향과 수직

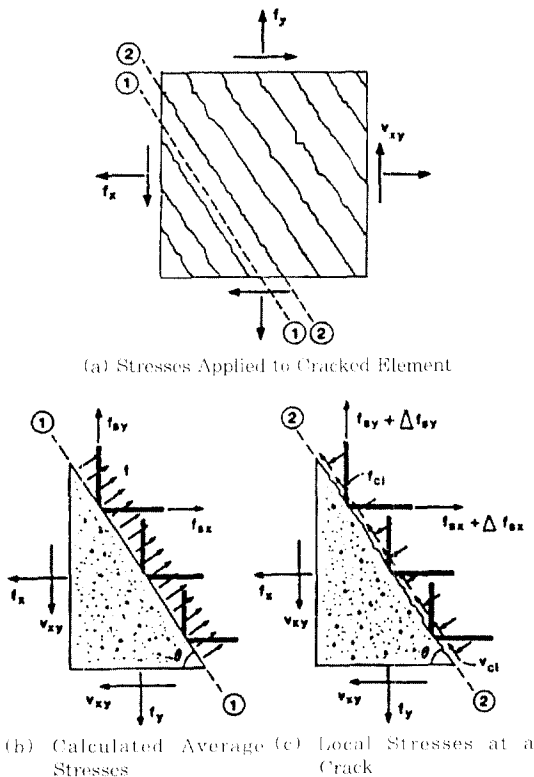
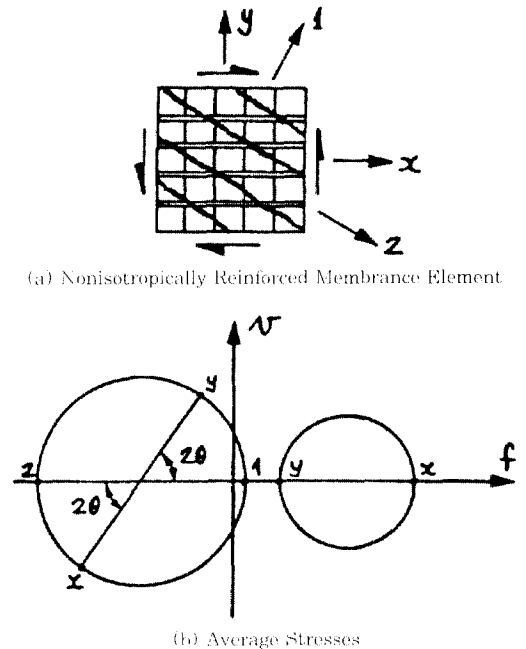
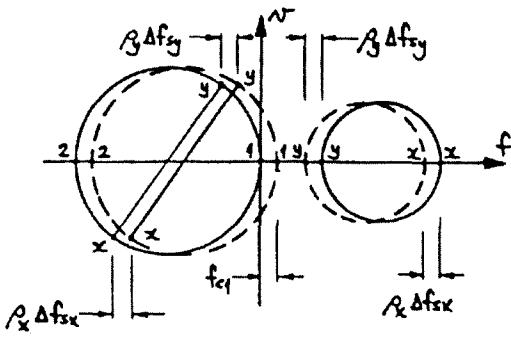
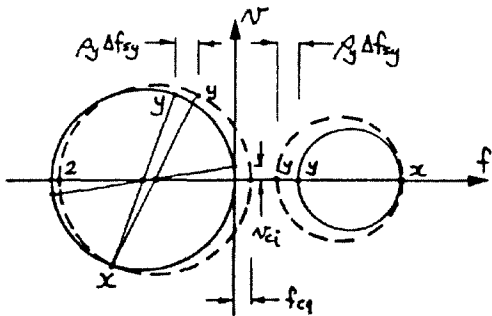


Fig.1 Average Stresses Between Cracks and Local Stresses at a Crack

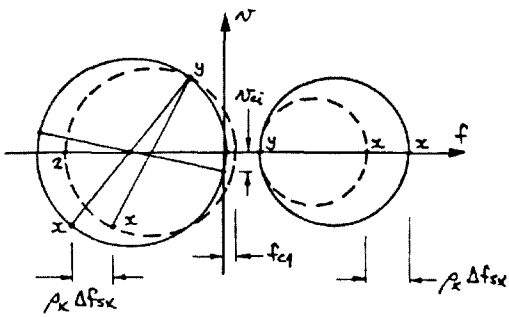




(c) Local Stresses at a Crack :
Equal Reinforcement Stress Increase



(d) Local Stresses at a Crack :
Increase in Y Reinforcement Stress Only

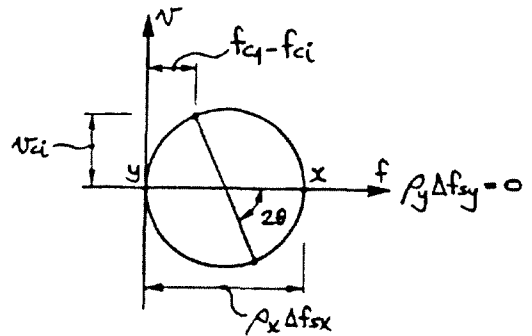


(e) Local Stresses at a Crack :
Increase in X Reinforcement Stress Only

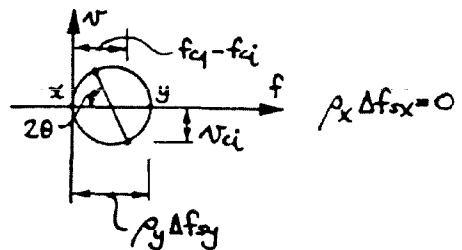
Fig.2 Comparison of Average and Local Stresses

한 방향으로 발생하고 보강근의 평균응력이 항복응력보다 적을 때, 콘크리트의 평균 인장응력이 균열면을 통하여 전달되는 방법은 여러 가지가 존재한다. 예를 들면, i) x 및 y 방향 보강근의 응력이 동일하게 증가하는 경우(그림 2(c)), ii) x방향 보강근의 응력만이 증가하는 경우(그림 2(d)), iii) y 방향의 보강근의 응력만이 증가하는 경우(그림 2(d)) 등이다. 여기서 주목할 것은 ii) 및 iii)의 경우에는 균열면에 전달응력이 작용할 것이 요구되며 국부응력의 주응력

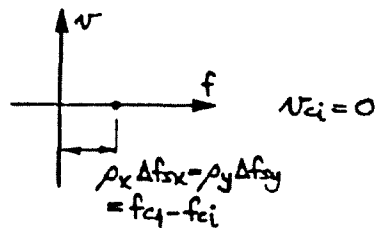
방향과 평균응력의 주응력 방향이 다르다는 사실이다. 또한, 그림 2(d) 및 2(e)는 주 압축 응력도의 작용 각도(θ)가 45° 보다 적다고 가정할 때 동일한 콘크리트의 인장응력을 전달하기 위해서는 x 방향 보강근의 응력 증가가 y 방향의 응력 증가 보다 커야됨을 암시하고 있으며, 보강근의 응력 증가가 크면 클수록 동반하는 전단응력도 커지며 이러한 전단응력은 균열면의 마찰작용 혹은 장부작용에 의해 지지되어야 함을 알 수 있다. 대개, x 및 y 방향의 보강근이 응력의 증가를 모두 수용할 수 있는 경우에는 균열면에서의 국부응력이 크게 문제가 되지 않으나 어느 한 쪽 방향이 이미 항복상태에 도달하였거나 일방향으로 배근된 경우에도, 유효한 보강근의 여분에 따라



(b) Increase in Y Reinforcement Stress Only

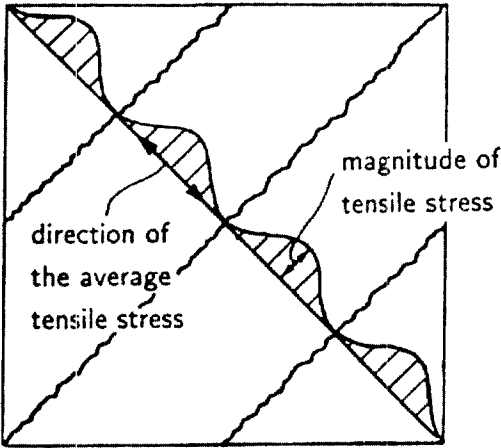


(b) Increase in X Reinforcement Stress Only

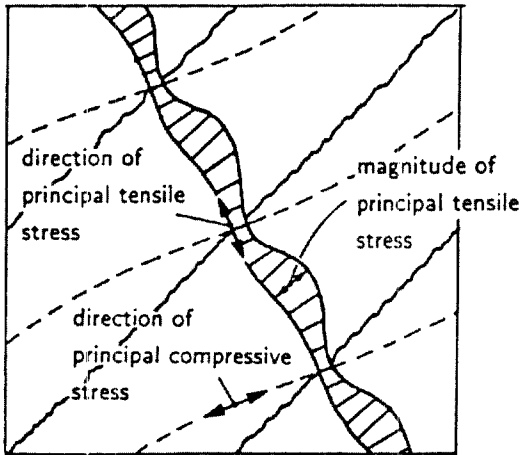


(e) Equal Increase in Both Reinforcement Stresses

Fig.3 Average Reinforcement Stresses and Reinforcement Stresses at a Crack



(a) Coincidence of Crack and Principal Average Stress Directions



(b) Incoincidence of Crack and Principal Stress Directions
Fig.4 Variations of Tensile and Principal Tensile Stresses

콘크리트의 평균 인장응력을 제한할 필요가 있는 것이다. 전술한 내용을 다른 형태의 응력상태로 표현하면 그림 3과 같다. 실용목적을 위하여 제시된 MCHT에서는 균열면을 통한 콘크리트의 평균인장응력을 전달하기 위하여 y 방향 보강근의 응력을 증가시킨 후 필요시 x 방향 보강근의 응력을 증가시키는 방법을 채택하고 있다.

한편, 그림 4(a)는 콘크리트의 평균 주응력도 방향에서 실제 인장응력도의 분포를 보여주고 있는데, 평균 인장응력은 균열위치에 가까울수록 (0)에 가까우며 중앙에서 최대값을 가진다. 균열된 콘크리트의 평균 인장응력이 어떻게 하중을 지지하는가를 이해하기

위해서는 국부적인 주인장 응력도의 변화를 고려할 필요가 있는데 균열 위치에 따라 주응력도의 크기 뿐만 아니라 방향도 변화함에 주의하여야 한다(그림 4(b)). 균열면에서 주응력도 방향에는 인장응력이 존재하지 않지만 다른 방향에서는 균열면에 발생하는 전단응력의 영향으로 인장응력이 존재할 수도 있다. 균열면을 통한 콘크리트의 주응력 전달은 스스로 방향을 재조정하므로써 이루어 지며, 하중이 증가함에 따라 부가된 압축응력의 영향으로 주압축 응력도는 강하게 배치된 보강근 축에 근접하여 회전한다.

4. 전단 보강근이 없는 보의 거동

4.1 Univ. of Toronto 모델

트러스 모델에서 축력 및 휨모멘트는 콘크리트의 압축응력 및 보의 상,하부 주근에 의하여 지지되며 전단은 중앙부 웹 콘크리트 및 수직보강근에 의하여 지지된다고 가정한다. 아래 일련의 공식들은 이러한 기본 트러스 개념 및 수정 압축응력장 이론(변형도 적합 조건 및 콘크리트 인장응력 재료 모델)으로부터 기본 보이론에 의하여 유도되었으므로 자세한 설명은 생략한다.

$$v = \frac{V}{b_v d_v} = \frac{f_2 + f_1}{\tan \alpha + \cot \alpha} \quad (3)$$

$$A_v f_v = (f_2 \sin^2 \alpha - f_1 \cos^2 \alpha) b_v s \quad (4)$$

$$V = A_v f_v \frac{d_v \cot \alpha}{s} + f_1 \cot \alpha b_v d_v = V_s + V_c \quad (5)$$

$$N_v (f_2 \cos^2 \alpha - f_1 \sin^2 \alpha) b_v d_v = V_s \cot \alpha + 2V_c \cot 2\alpha \quad (6)$$

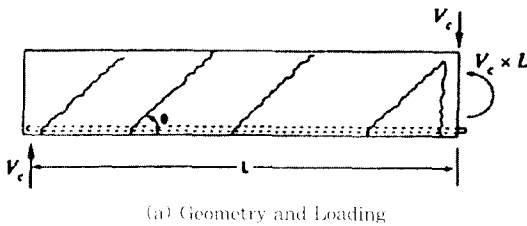
여기서, f_1, f_2 = 콘크리트의 주인장 및 압축응력도
 α = 재축으로부터 측정된 주압축 응력도의 작용 방향
 A_v, f_v, s = 수직 보강근의 단면적, 항복응력, 배치간격
 b_v, d_v = 단면의 폭 및 총

동일한 방법으로 전단보강근이 배치되어 있지 않은 보에 대하여 변각 트러스 모델(Variable Angle Truss Model) 및 수정 압축응력장 이론을 적용하여 응력상황을 가시화한 트러스 모델은 그림 5와 같다. 여기서 특히 주목할 점은 균열사이의 비균열 부분에

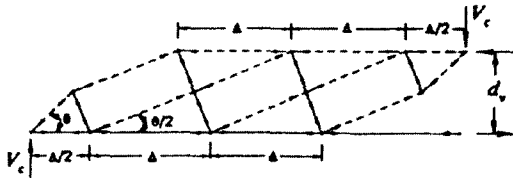
존재하는 콘크리트의 주인장 응력을 콘크리트 타이 (Concrete Tie)로 표시한 점이다. 여기서 주압축 응력도의 방향은 균열방향 각도의 1/2되는 위치에 작용한다고 가정하였다($\alpha = \theta/2$, 균열방향과 주응력도 방향 불일치). 따라서, 그림 5(c)에 따라 콘크리트 스트럿은 $V_c / (2 \sin \theta/2)$ 를 지지하는 반면에 콘크리트 타이는 $V_c / (2 \cos \theta/2)$ 에 해당하는 인장력을 지지한다. 또한, 아래 일련의 공식들은 그림 5(c)로부터 유도될 수 있다.

$$f_2 = v \cot \alpha = v \cot \frac{\theta}{2} \quad (7)$$

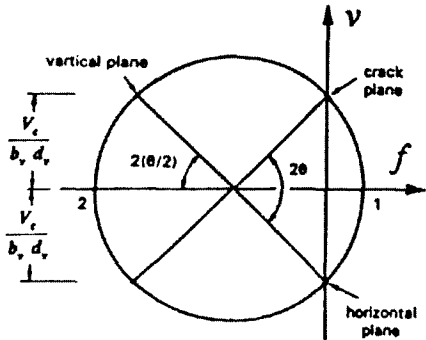
$$f_1 = v \tan \alpha = v \tan \frac{\theta}{2} \quad (8)$$



(a) Geometry and Loading



(b) Truss Model



(c) Mohr's Circle for Biaxial Stress in the Web

Fig.5 Beams Without Transverse Reinforcement

한편, 균열면에 작용하는 전단응력은 사인장 균열 방향과 무관하고 수직 및 수평면에 작용하는 전단응력과 동일하므로, 이에 따라 콘크리트가 기여하는 전

단강도는 균열각도와 무관하게 아래와 같이 표현할 수 있다. 마찬가지로, 웨브의 수직면에 작용하는 수평방향 압축력은 다음과 같다.

$$V_c = v_t b_v d_v \quad (9)$$

$$N_c = 2V_c \cot 2\alpha = 2V_c \cot \theta \quad (10)$$

상기에서 설명한 관계식들은 균열면에 국부적으로 발생하는 응력상황을 묘사하고 있는데 반하여, 실용 목적을 위하여 제시된 MCFT는 제 3장에서 전술한 바와 같이 여러개의 균열을 포함하는 범위에서 발생하는 평균 응력도에 근거한 해를 제시하고 있으며, 균열방향과 주응력 방향이 일치한다고 가정하고 있다. 따라서, 동일한 전단응력하에서 단순화된 MCFT는 상기식보다 주인장 응력은 크게, 주압축 응력은 적게 평가한다. 하지만, 전단보강근이 없는 보의 전단강도는 주응력 보다는 사방향 균열면을 통하여 전달되는 전단응력의 크기에 좌우되므로 동일한 결과를 제시한다.

4.2 Univ. of Stuttgart 모델

최근, 유사한 관점에서 Univ of Stuttgart에서는 전단보강근이 없는 보의 거동을 위해 Kani의 Tooth 모델에 근거하여 균열형상 및 비균열 부위(Tooth 부분)의 응력 및 변형상태를 자세하게 고려한 기계적 모델을 제시하였다. 여기서, 최종파괴는 주로 균열면

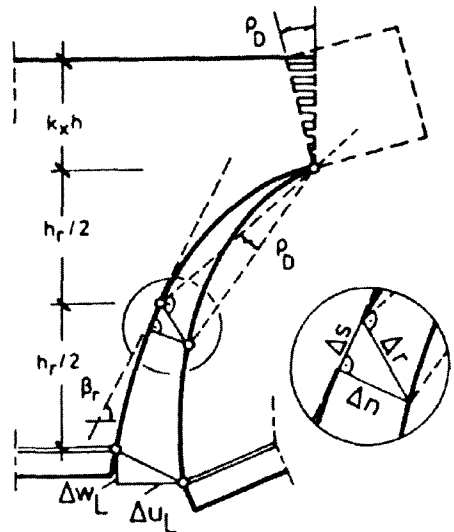


Fig.6 Kinematic Condition for Crack Deformation


석의 상이점 및 유사점, 혹은 장, 단점은 아래와 같다.

참고문헌

1. MCFIT에 기초를 두고 있는 Toronto 모델에서 비균열 부분은 평균 주응력으로, 균열면은 국부 응력으로 묘사하고 있으며, 이를 위하여 주응력 및 변형도 방향 일치조건(단, 4.1의 모델은 응력 및 변형도 방향 불일치 가정에 근거하여 유도된 것임), 변형도 적합 조건에 의한 균열방향 산정, 전체 하중-변형 응답 추적 가능, 보다 쉬운 보 이론 채용 등을 들 수 있다.

2. Tooth 부분에 발생하는 응력 및 변형조건으로부터 유도된 Stuttgart 모델은 균열면에 작용하는 전단응력으로 인하여 비균열 부분의 응력을 결정하고 있으며, 이를 위하여 마찰 혹은 장부 작용과의 상호작용을 고려하고 있다. 또한, 응력 및 변형도 방향 불일치 조건 및 소성이론 사용, 하중단계에 보다 독립적인 구성방정식(특히, 마찰력) 및 변형도 조건 사용, 따라서 전체응답 보다는 하나의 하중단계에 일치하는 응답 제시 등을 들 수 있다.

3. 1 및 2에서 설명한 것 처럼 두 모델은 균열면의 변형 및 응력상황을 고려하는 방법이 다르며 이에 따라 서로 다른 구성 방정식을 사용하고 있기는 하나, 본질적으로 동일한 응력장 및 균열면에서의 전단하중 전달 기구를 고려하고 있다. 다시말하면, 전단 보강근이 없는 보의 전단거동에 동일한 물리적 해석을 부여할 수 있다는 점이다. 또한, 두 모델 모두 다 전단보강근을 갖는 보의 해석을 위하여 확장될 수 있다.

1. IABSE, IABSE Colloquium on Structural Concrete, Stuttgart, (IABSE Report 62, 1991), pp.1-872.
2. Nielsen, M.P., Limit Analysis and Concrete Plasticity, (Prentice-Hall, 1984), 420pp.
3. Marti P., Basic Tools of Reinforced Concrete Beam Design, (ACI Journal 82(1), 1985), pp.45-56; Discussion, (ACI Journal 82(6), 1985), pp.933-935.
4. Muttoni A., Schwartz J., Thürlimann, Design of Reinforced Concrete Structures with Stress Fields, (ETH Report, 1988).
5. Schlaich J., Schäfer K., Jennewein M., Toward a Consistent Design of Structural Concrete, (PCI Journal 32(3), 1987), pp.74-150.
6. Collins M.P., Mitchell D., Shear and Torsion Design of Prestressed and Non-Prestressed Concrete Beams, (PCI Journal 25(5), 1981), pp.32-100; Discussion, (PCI Journal 26(6), 1981), pp.96-118.
7. Vecchio F.J., Collins M.P., The Modified Compression Field Theory for Reinforced Elements Subjected to Shear, (ACI Journal 83(2), 1986), pp.219-231.
8. Reineck K.H., 1991 Ultimate Shear Force of Structural Concrete Members Without Transverse Reinforcement Derived From a Mechanical Model, (ACI Structural Journal 88(5)), pp.592-602
9. Private Communication with Prof. D. Mitchell, 1998 

사사

본 원고는 한국 과학재단 지정 초대형 구조시스템 연구센터(STRESS, 한양대 소재)의 지원으로 저자가 McGill Univ.에서 방문연구(1998. 1. 23. - 1998. 2. 12)를 수행하는 중에 작성된 것임.