

철근 콘크리트 구조물의 설계와 해석을 위한 트러스모델

현행 구조설계기준에서 트러스 모델 개념의 적용

Application of Truss Model Concept in Current Structural Design Provisions



이만섭*



윤영수**

1. 서 론

트러스 모델은 극한하중을 받는 구조물에 대하여 힘의 평형상태를 보여주고, 구조물 내의 힘의 흐름을 가시화시킴으로써 설계를 간편화 시켜주는 방법으로 소성학적 하한치이론(lower bound plasticity solution)에 기본을 두고 있다. 트러스 모델은 콘크리트로 형성되는 압축대인 스트럿(compression strut) 또는 압축응력장, 인장철근 또는 프리스트레스트 강재로 이루어지는 인장타이(tension tie), 이들 부재가 만나는 부분인 절점(node) 등으로 구성된다. 모델의 구성요소를 스트럿, 타이, 및 절점으로 표현함으로써 B-영역과 D-영역에 공히 적용하는 경우 이를 스트럿-타이 모델(Strut-Tie Model)이라 일컬으며, 스트럿-타이 모델과 구분하여, 트러스 모델(Truss Model)은 일부 압축대를 응력장으로 표현하여 주로 전단과 비틀림을 받는 구조물의 B-영역

설계에 기반이 되는 개념으로 일컬어지기도 한다. 스트럿-타이 모델의 스트럿은 트러스 모델의 응력장을 직선형태의 합력으로 표현한 것으로, 개념에서의 차이가 있다고 할 수 없다. 이 글에서는 B-영역의 설계를 다룸에 있어서는 주로 트러스 모델로 논하고, D-영역을 다룸에 있어서는 스트럿-타이 모델로 논하기로 한다.

B-영역이라 함은 Bernoulli의 평면 보존의 법칙이 성립되는 구간으로서 B는 Beam 또는 Bernoulli의 첫문자에서 비롯하고, 변형률의 분포가 비선형적인 집중하중 작용부위, 부재 접합부의 모서리, 개구부, 급격한 단면변화 부위, 높이가 큰 보 등과 같은 영역을 D-영역이라 하며, D는 Discontinuity, Disturbance 또는 Detail의 첫 문자에서 비롯한다. 표1은 B-, D-영역에 작용하는 내력 및 응력을 구하는 일반적인 해석과정을 보여주고 있다.

*강희원, 브이 에스 엠 코리아(주) 이사
**강희원, 고려대학교 토목환경공학과 조교수

표 1 각 영역의 작용내력과 응력을 구하는 해석과정

해석		구조물의 지역구분		
		B 영역 D-영역 모두 존재		D-영역만 존재(높이제한부)
		B-영역	D-영역	D-영역
전체구조계의 해석과 결과		전단력 M,N,V,T	설계면에 작용하는 힘 단면력, 관력, 전단력	
각 영역의 내력 또는 응력해석	비균열 상태	단면계수 A _c 에 용어용한 계수		시행 단면해석
	균열 상태	스트럿-타이 모델		
		트리스 모델		

콘크리트표준시방서 등의 국내설계기준이나 ACI318-89, 95^{22,23} 등에서는 전단설계에 있어서 전단철근의 산정이 트리스 모델에 기본을 두고있을 뿐이의 적용이 크게 나타나지 않는다. 현행 ACI 기준의 단점은 특별한 경우에 대한 경험식이 많으며, 직립 해당되는 조건이 아닌 경우에도 사용될 수 있는 일관된 모델을 제시하지 못하고 있는 점이라 할 수 있다. ACI의 몇몇 보고서에 의하면 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 트리스 모델의 개념이 가까운 장래에 설계기준에 반영될 것으로 보여진다.^{11,12} 일반적으로 통용되고 있는 시방서 중에서 트리스 모델과 스트럿-타이 모델에 의한 개념을 가장 적극적으로 받아들이고 있는 기준은 CEB-FIP Model Code 1990 (MC90)¹³이라 할 수 있다. 이 MC90에서는 B-영역을 취급함에 있어서 모멘트, 축력, 전단력 등의 모든 단면력 영향을 스트럿-타이 모델에서 동시에 고려하는 일관된 방식을 제시하고 있으며, D-영역의 설계 및 철근상세에 이르기까지 이 개념을 도입하고 있다. 유럽의 공동시방서로 제안되고 있는 설계 관련기준 EC2¹⁴에서는 B-영역의 전단설계에서 종래의 설계방식과 트리스 모델(variable strut inclination method)에 의한 설계방식을 함께 제안하고 있다. 캐나다의 설계기준 CAN3-A23.3¹⁵은 B-영역의 전단설계에 단순설계방식(simplified method)과 일반설계방식(general method)의 두가지 방식을 제시하고 있으며, 이중 일반설계방식이 트리스 모델에 기본을 두고 있다. 또한 CAN3-A23.3에서는 높이가 큰 보, D-영역의 설계에 스트럿-타이 모델의 사용을 제안하고 있다. AASHTO-1989¹⁶에서는 B-영역과 D-영역에 있어서 스트럿-타이 모델을 적용한 간단한 예를 보여줌으로써 이의 적용제한만을 하고 있으며,

AASHTO-1994¹⁷의 LRFD편에서 이 모델의 사용을 위한 규정들을 구체적으로 제시하고 있다.

이 글에서는 스트럿-타이 또는 트리스 모델의 적용에 있어서, 이론적 배경보다는 앞서 언급된 여러가지 설계기준에 나타난 주요 내용을 간단히 소개하고자 한다.

2. B-영역의 설계기준

2.1 ACI 설계기준

트리스 모델은 B-영역의 극한전단설계의 방안으로써 Ritter와 Morsch에 의해 처음으로 제안되었다. 초기의 이 트리스 모델은 사방향 압축응력이 45° 각도를 갖는다고 가정하고 있으며, 콘크리트의 기여도는 무시되고 있었다. 현재 사용되고 있는 ACI의 전단설계에 있어서는 그림 2.1과 같은 Morsch의 45° 트리스 모델로부터 전단철근이 부담하는 전단력 V_s 를 계산하되, 콘크리트가 기여하는 전단저항 V_c 를 추가로 고려하고 있다. 그림 2.2과 같이 균열이 발생한 트리스 모델에서 수직철근이 저항하는 전단력은 평형조건으로부터 식(1)과 같이 구해질 수 있으며 콘크리트의 압축과괴를 피하기 위하여 V_c 와 V_s 의 상한치를 규정하고 있다. 이 설계기준은 우리나라 설계기준과 동일하므로 자세한 설명은 생략하기로 한다.

$$V_s = \frac{A_v f_y j d}{s} \approx \frac{A_v f_y d}{s} \quad (1)$$

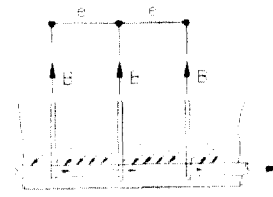
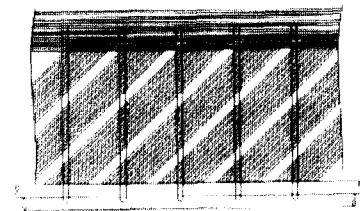
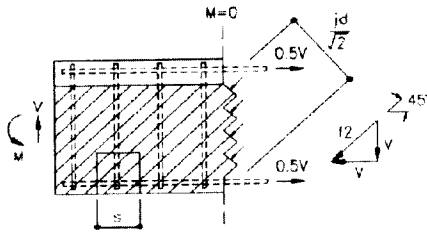
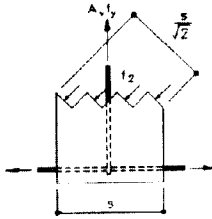


그림 2.1 Morsch의 45° 트리스 모델



(a) 단면의 평형

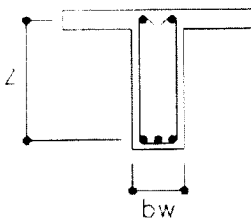


(b) 수직철근

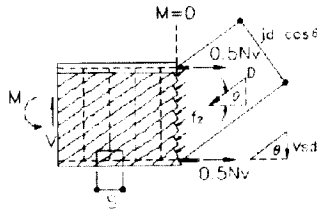
그림 2.2 45 트러스 모델의 평형조건

2.2 Eurocode(EC2)

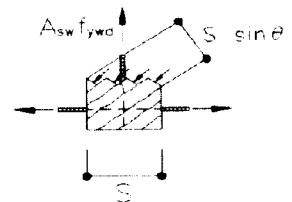
유럽의 설계기준 EC2에서는 전단설계에 있어 두 가지 방법이 제안되고 있다. 첫번째 방법은 표준 설계방법(standard method)으로 ACI와 동일한 개념을 갖고 있으며, 두번째로 트러스 모델에 의한 설계방식을 제안하고 있다. 여기에서의 모델은 변화각 트러스 모델(variable strut inclination method)을 택하고 있다. Mürsch의 45° 트러스 모델이 콘크리트의 기여도를 무시하는 점에 반하여, 변화각 트러스 모델에서는 압축 스트럿의 경사각을 작게 취함으로써 이러한 기여도를 대신하도록 하고 있다. 트러스 모델의 평형조건은 그림 2.3에 보여지는 바와 같으며, 이로부터 수직철근을 갖는 부재의 전단저항 V_{Rd3} 는 식(2)로 표현되며, 이 값은 압축파괴를 제한하는 식(3)의 V_{Rd2} 보다 클 수 없다.



(a) 단면



(b) 평형조건



(c) 수직철근의 저항

그림 2.3 변화각 트러스 모델의 평형

$$V_{Rd3} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta \quad (2)$$

$$V_{Rd2} = b_w Z v f_{cd} / (\cot \theta - \tan \theta) \quad (3)$$

f_{ywd} : 전단철근의 설계항복강도 ($f_{ywd} = f_{yw} / \gamma_s$)

f_{cd} : 콘크리트의 설계기준 압축강도 ($f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$)

$$v : \text{유효계수} = 0.7 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0.5 (f_{ck} = N / \text{mm}^2)$$

식(3)은 스트럿의 압축응력을 $v f_{cd}$ 로 제한함으로써 연성을 확보하기 위한 항목으로서 트러스 모델에 있어서 모든 압축영역은 그 종류에 따라 유효계수를 달리함으로써 압축파괴를 피하게 한다. EC2에서는 스트럿의 경사각 θ 에 대하여 다음의 범위가 제시되고 있다.

- 일정한 종방향 철근을 갖는 보 : $0.4 < \cot \theta < 2.5$
- 종방향 철근량이 변하는 보 : $0.5 < \cot \theta < 2.0$

경제적인 설계를 위하여 Marti는 가능한 작은 θ 값을 사용할 것을 추천하고 있다.⁽¹¹⁾ 이 경우 전단철근의 양은 상당히 줄어드는 반면 종방향 철근의 양은 상대적으로 증가하게 되나, 전반적으로는 이 방향이 경제성을 갖게 된다. EC2에서는 이를 위한 θ 의 결정방법으로 식(3)의 V_{Rd2} 대신에 설계 전단력 V_{Sd} 를 대입하여 θ 를 구하는 방법을 추천하고 있다. 종방향 철근에 작용하는 인장력은 다음과 같이 계산된다.

$$T_d = \frac{|M_{Sd}|}{z} + \frac{1}{2} |V_{Sd}| \cot \theta \quad (4)$$

2.3 Canadian Code (CAN3-A23.3)

캐나다의 설계기준 CAN3-A23.3에서는 B-영역의 전단설계에 있어서 두가지 방식을 제안하고 있다. 그

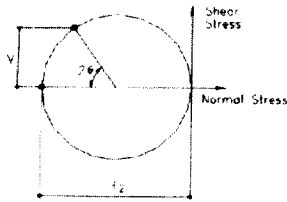
하나인 단순방식(simplified method)은 ACI와 같은 개념이며, 다른 하나는 일반방식(general method)이라 칭하여 트러스 모델의 적용을 제안하고 있다. 이 설계기준은 이론적으로 압축장이론(compression field theory)에 기본을 두고는 있으나, 압축장이론이 변형적합조건으로부터 스트럿의 경사각을 찾는데 반하여, 경사각을 어떤 범위 안에서 설계자의 판단에 의하여 선택적용하는 면에서는 차이가 있으며, 단지 변형률과 관련지어 압축응력의 한계를 규정하고 있다. 이 설계기준에서 부재는 저항성(resistance), 연성(ductility), 사용성(serviceability) 등의 조건을 만족할 것을 요구한다. 저항성이라 함은 첫째로 평형조건을 만족하여야 할 것과, 둘째로 사인장 균열상태의 콘크리트와 철근에 대한 적절한 응력-변형률 관계를 이용한 적합조건을 만족해야 할 것을 말한다. 그림 2.4(a)와 같은 주응력상태에서 콘크리트의 사방향 압축응력 f_2 는 그림 2.4(b)와 같은 Mohr의 원으로부터 식(5)로 표현되는데, 앞서 언급한 저항성의 확보를 위하여는 이 압축응력 f_2 가 식(6)으로 제안되는 압축응력의 한계보다 작아야 한다.

$$f_2 = \left(\tan \theta + \frac{1}{\tan \theta} \right) \left(\frac{V_f}{b_s d_s} \right) \quad (5)$$

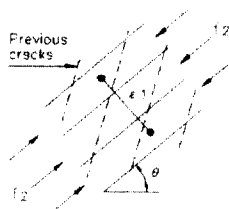
$$f_{2max} = \phi_c \frac{f_c}{(0.8 + 170\epsilon_1)} \leq \phi_c f_c \quad (6)$$

식(5)에서 V_f 는 설계전단력, b_s 는 복부의 폭, d_s 는 유효높이를 의미하며, 식(6)에서 ϕ_c 는 콘크리트의 저항계수(0.60), ϵ_1 은 주인장 변형률을 나타낸다. 주인장 변형률은 그림 2.4(c)로부터 식(7)과 같이 계산된다.

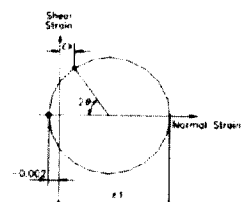
$$\epsilon_1 = \epsilon_v + \frac{\epsilon_v + 0.002}{\tan^2 \theta} \quad (7)$$



(a) 주응력



(b) 복부의 콘크리트 응력



(c) 복부 중앙의 변형률

그림 2.4 복부의 응력과 변형률

식(7)에서 ϵ_v 는 복부중앙 위치에서 축방향 변형률을 나타내는데 설계목적으로는 0.002를 택하여도 무방하다. 위의 식들에 사용된 경사각 θ 는 15°부터 75°사이에서 설계자가 임의로 취할 수 있다.

연성의 확보를 위하여는 식(8)에서와 같이 철근의 변형률이 항복변형률보다 커야하며, 이때 수직철근의 변형률은 식(9)와 같이 계산된다.

$$\epsilon_r = f_y / E_s \quad (8)$$

$$\epsilon_r = \epsilon_1 - \epsilon_s - 0.002 \quad (9)$$

위와 같은 조건들을 만족시킬 때 수직철근을 갖는 보의 전단저항은 식(10)으로 계산될 수 있다.

$$V_r = \frac{\phi_s A_s f_y d_s}{s \tan \theta} \quad (10)$$

2.4 CEB-FIP Model Code 1990 (MC90)

다른 설계기준의 경우 M, N, V, MT 등의 단면력에 대하여 각각 다른 설계과정을 갖는데 반하여 MC90에 의한 B-영역 설계는 이들 단면력을 동시에 고려하여 설계하는 트러스 모델에 기본을 두고 있다. 그림 2.6은 B-영역의 트러스 모델을 보여주고 있으며 그림 2.5는 경사각 α 의 전단철근을 갖는 복부의 단위 모델을 보여주고 있다. 그림 2.7은 복부 콘크리트의 압축력과 전단철근에 작용하는 인장력을 보여준다. 이와 같은 트러스 모델로부터 각 요소에 작용하는 단면력과 저항력은 표2와 같다. MC90에서도 콘크리트의 압축파괴를 피하기 위하여 압축응력의 한계치를 규정하고 있으며, 압축현과 복부의 압축장에서 그 한계를 서로 달리하고 있다. 식(11)은 압축현의 압축응력 한계를 나타내며, 식(12)는 복부 압축장의 압축응력 한계를 규정하는 식이다. MC90에서는

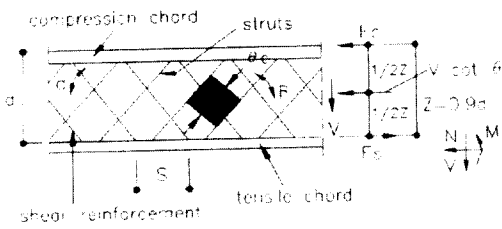


그림 2.5 복부의 단위 트러스 모델

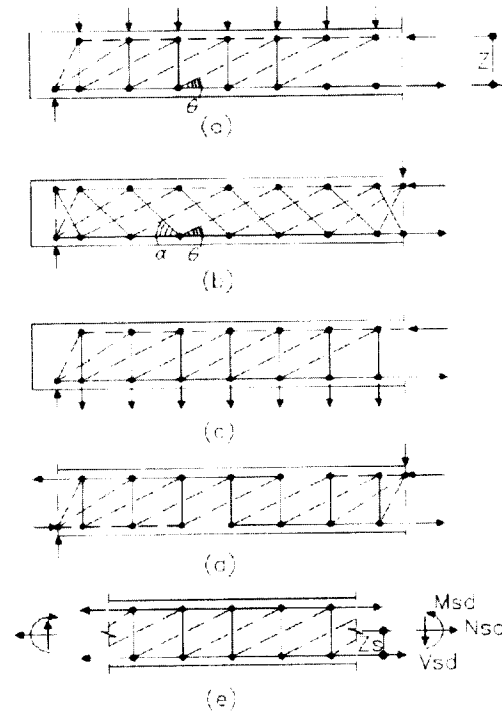


그림 2.6 보의 트러스 모델

복부 스트럿의 경사각의 범위를 식(13)과 같이 주고 있다. 이들 식(11), (12)에서 f_{cd} , f_{ck} 등은 EC2에서와 같다.

$$f_{cd1} = 0.85(1 - f_{ck} / 250)f_{cd} \quad (11)$$

$$f_{cd2} = 0.60(1 - f_{ck} / 250)f_{cd} \quad (12)$$

$$1 \leq \cot \theta \leq 3 \quad (13)$$

표2에서 보여지는 바와 같이 MC90에서는 작용 단면력을 동시에 고려하여 B-영역의 모든 설계에 트러스 모델이 적용되고 있다. 이 모델의 적용을 위한 조건으로 최대 인장철근비, 최소 전단철근, 전단철근의 최대간격 등을 규정하고 있다.

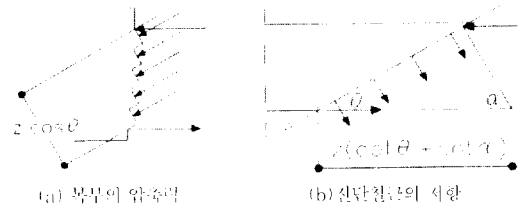


그림 2.7 복부의 압축력 및 인장저항

플랜지를 갖는 보의 B-영역 설계에 있어서 플랜지의 종방향 전단설계에 트러스모델이 적용될 수 있으며, MC90에서는 이를 제안하고 있다. 앞에서는 설명되지 않았으나 EC2에서도 이부분에 대한 설계는 MC90을 따르고 있다. 그림2.8(a)는 종방향 압축력을 받는 플랜지의 트리스 모델이며, 그림2.8(c)는 종방향 인장력을 받는 플랜지의 트리스 모델을 나타내

표 2 MC90에 의한 트러스 각 요소의 작용 단면력과 저항력

트리스 요소	작용 압축력, 인장력	저항
인장철	$F_{St} = \frac{ M_{Sd} }{z} + N_{Sd} \frac{(z - z_c)}{z} + \frac{V_{Sd}}{2} (\cot \theta - \cot \alpha)$	$F_{Rt} = A_s f_{td}$
압축철	$F_{Sc} = \frac{ M_{Sd} }{z} - N_{Sd} \frac{z_c}{z} - \frac{V_{Sd}}{2} (\cot \theta - \cot \alpha)$	$F_{Rc} = f_{cd1} A_c + f_{ytd} A_{sc}$
복부 스트럿	$F_{Sw} = \frac{V_{Sd}}{\sin \theta} \left(\frac{\cot \theta}{\cot \theta + \cot \alpha} \right)$	$F_{Rw} = f_{cd2} b_w z \cos \theta$
전단 철근	$F_{Sw} = \frac{V_{Sd}}{\sin \alpha}$	$F_{Rw} = \left(\frac{A_{sw} f_{ytd}}{s} \right) z (\cot \theta + \cot \alpha)$
비고	M_{Sd} , N_{Sd} , V_{Sd} : 설계단면력	A_s : 종방향 인장철근 단면적 A_c : 종방향 압축철근 단면적 A_{sc} : 압축철의 콘크리트 단면적 f_{td} : 압축철의 허용응력 f_{cd2} : 복부의 허용압축응력

고 있다. 종방향의 단위길이에 작용하는 전단력은 식 (14)와 같이 계산될 수 있다. 여기서 ΔF 는 Δx 길이에서 변하는 플랜지의 종방향 축력의 변화량을 의미한다.

$$V = \Delta F / \Delta x \quad (14)$$

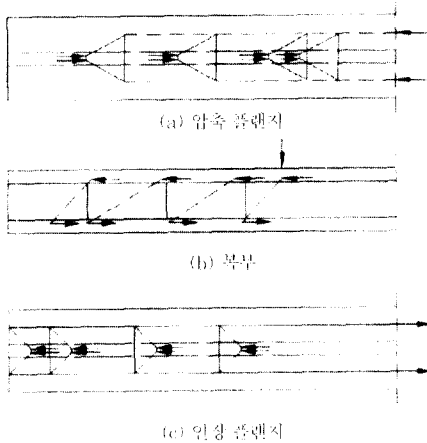


그림 2.8 I-형 보의 플랜지 트러스 모델

이로 인해 단위길이에 요구되는 횡철근은 다음의 식(15)과 같이 계산될 수 있다. 이 식에서 A_v 는 플랜지내의 횡방향 철근량이며, f_{vd} 는 설계기준 항복강도 ($= f_{yk} / \gamma_s$), θ_f 는 경사 스트리트의 종방향 축과의 각도를 나타낸다. MC90에서는 설계의 편의상, 압축플랜지에서 $\tan \theta_f = 0.5$, 인장 플랜지에서 $\theta_f = 0.8$ 을 취할 수 있는 것으로 제안하고 있다.

$$A_v f_{vd} \geq V \tan \theta_f \quad (15)$$

그림 2.9는 이와 같은 플랜지의 트러스 단위모델을 보여주고 있는데, 이 그림을 통해 플랜지에 존재하는 종방향 인장철근의 절단위치는 위와 같은 효과로 인하여 고려단면을 충분히 지나서 연장되어야 함을 알

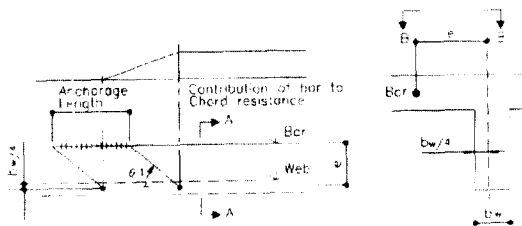


그림 2.9 인장 플랜지의 철근정착a

수 있다. 이 연장 정착길이는 북부로부터 인장철근 중심의 편심거리를 e 라고 할 때 고려단면을 지나 연장되는 길이는 적어도 $e \cot \theta$ 보다 커야한다.

MC90에서는 이와 같은 보뿐만이 아니고 축력을 받는 기둥 등의 부재에도 트러스 모델을 제안하고 있어 이의 적용을 다른 설계기준에 비하여 가장 극대화하고 있다.

2.5 AASHTO

AASHTO-1989의 "Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges"편에서는 B-영역 및 D-영역의 설계에 스트리트-타이 모델을 사용할 것을 제안하고 있다. 그러나 Schlaich 등에 의해 1987년 PCI Journal에 발표된¹⁰⁾ 내용을 중심으로 일반적인 예를 보여주고 있을 뿐, 상세한 적용기준은 제시하지 못하고 있다. AASHTO-1994의 LRFD에 의한 설계 기준에서는 주로 D-영역의 설계에 적용되는 구체적인 내용을 포함하고 있다.

3. D-영역의 설계기준

3.1 일반

D-영역은 내부응력의 흐름이 직선적이 아니고 복잡한 흐름을 갖는 영역으로서, 급격한 단면의 변화, 집중하중, 반력 등 일반보의 특징부위가 해당되며 높이가 큰 보의 경우에는 전체의 부위가 D-영역에 해당된다. 그림 3.1은 이와 같은 D-영역의 여러 가지 경우를 보여주고 있다. 이러한 영역에서는 B-영역과 같이 단면높이에 걸쳐 깊은 응력분포 상태라는 가정이 어렵게 되어, B-영역의 트러스 모델에서 이용되던 압축응력장의 개념보다는 압축응력의 흐름을 합리적으로 단순-직선화한 스트리트 요소로 표현하게 된다. 따라서 이러한 영역에서는 트러스 모델보다는 스트리트-타이 모델이라고 부르는 것이 적당할 것이다. 이 모델은 스트리트, 타이 그리고 이들이 만나는 위치의 절점으로 구성되며, 설계기준은 이 세가지 구성요소에 대한 제한사항들을 제안하게 된다. 특히 스트리트와 절점에 있어서 경계면의 응력상태에 따라 콘크리트의 최대 압축응력을 제한함으로써 압축파괴를 피하도록 하는 것이 설계기준의 중점이 되고 있다. 각

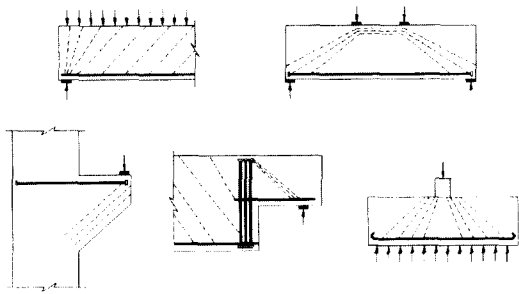


그림 3.1 D-영역의 예

설계기준이 다소 다른 허용응력을 제안하고 있으나, 이 값만이 직접적으로 비교될 수는 없으며, 비교를 위해서는 각 기준들이 취하고 있는 하중계수와 감수 계수 등을 함께 감안해야 함에 주의를 요한다.

D-영역의 설계는 일반적으로 다음과 같은 과정이 경우에 따라 반복됨으로써 이루어 진다.

- 1단계 : 영역 내에 힘의 흐름을 도식한다. 이 과정은 하중경로법에 의하거나, 선형해석에 의한 결과를 이용하게 된다.
- 2단계 : 절점영역의 응력이 허용응력내에 있어야 하는 점을 고려하여 반력과 하중의 작용면적을 결정한다.
- 3단계 : 트러스 모델의 기하형상을 정한다. 이 과정에서 다음과 같은 사항들을 고려해야 한다.
 - 스트럿은 대략적으로 압축응력의 중심에 위

치 시킨다.

- 타이 요소도 스트럿과 같이 위치 시키나, 이 경우에는 철근의 배치와 깊은 관련을 지어 결정되어야 한다. 즉 철근의 배치범위와 배치 방향을 고려하되 배치방향이 표면과 평행 또는 직각이 되도록 유도한다.
- 타이에 작용되는 인장력을 개략적으로 예측하여 정착에 필요한 절점영역의 크기를 정한다. 이때 하중, 반력의 지지면적 등이 함께 고려된다.
- 지지점 또는 집중하중 작용부위와 같이 높은 응력의 절점 위치에서 스트럿과 타이가 만나는 경우 MC90에서는 그 각도를 60° 정도로 유지하되 45° 보다 작지 않을 것을 제안하고 있다.

4단계 : 스트럿과 타이에 작용하는 힘을 계산한다.

5단계 : 인장 타이용 철근의 소요단면적을 정한다.

6단계 : 절점위치에서 인장철근의 정착가능 여부를 검토하고, 절점영역의 응력이 허용응력을 초과하는가 검토한다.

7단계 : 스트럿의 압축응력이 허용응력을 초과하는지 검토 한다.

3.2 스트럿

그림3.2는 두 개의 집중하중을 갖는 높이가 큰 보

표 3 스트럿의 허용압축응력

설계기준	B 영역과 동일	D-영역 스트럿동일
Euro-Code 2	$vf_{cd} = \left(0.7 - \frac{f_{ck}}{200}\right) f_{cd}$ $= \left(0.7 - \frac{f_{ck}}{\gamma_c}\right) f_c$:응력단위 MPa
Canadian Code	$f_{2max} = \phi_c \frac{f_c}{(0.8 + 170\epsilon_1)} \leq \phi_c f_c$ $\epsilon_1 = \epsilon_s + \frac{\epsilon_s + 0.002}{\tan^2 \theta}$	B-영역과 동일
CEB-FIP 1990	$f_{cd1} = 0.85 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd}$ $f_{cd1} = 0.60 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd}$:압축현 :스트럿
AASHTO 1994	$f_{cu} = \frac{f_c}{(0.8 + 170\epsilon_1)} \leq 0.85 f_c$ $(\epsilon_s + 0.002) \cot^2 \theta$	0.7 $\phi_c f_c$: 일반 0.6 $\phi_c f_c$: 균열이 심한상태

로서 양단의 지지반력이 서로 다른 방향을 갖고있는 예를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 해석모델은 콘크리트 압축 스트럿, 철근 또는 프리스트레스 강재에 의한 인장 타이, 그리고 이들이 만나는 위치의 절점으로 구성된다. 압축 스트럿은 1차원적 단순 압축력만을 받는 요소로서 표현되므로 B-영역의 압축응력장과 같은 조건을 갖게된다. 따라서 대부분의 설계기준에서 그 허용응력은 B-영역의 압축응력 한계치와 같게 제시된다. 각 설계기준에서 제시되는 스트럿의 허용응력을 정리하면 표3과 같다.

참고로 Schlaich에 의해 제안된 허용 압축응력의 값을 위의 기준과 비교를 하면 다음과 같다.

- 교란되지 않은 일축 상태 (압축현) :

$$f'_{ca} = 1.0f_{cd1} = 0.85f_{cd}$$

- 압축력과 평행한 균열 존재 :

$$f'_{ca} = 0.8f_{cd1} = 0.68f_{cd}$$

- 압축력과 경사를 이루는 균열 존재 :

$$f'_{ca} = 0.6f_{cd1} = 0.51f_{cd} = \nu f_{cd}$$

- 압축력과 경사방향의 심한 균열 :

$$f'_{ca} = 0.4f_{cd1} = 0.34f_{cd}$$

Schlaich에 의해 제안된 값과 설계기준에 제시된 값과 비교하면, 설계기준에서 압축력 방향과 경사를 갖는 균열의 경우와 같이 가장 낮은 값을 안전측으로 취하고 있음을 알 수 있다. 각 설계기준에서는 보이지 않고 있지 않으나, 압축응력의 방향과 다른 방향의 균열이 심한 상태에서는 상당히 허용치를 낮추고 있는데 Schlaich의 이러한 제안은 MacGregor의 제안과도 거의 비슷한 경향을 보이고 있다.¹¹⁾ 랜형태의 압축응력장에서 절점과의 경계면의 허용응력에 대하여 Schlaich는 $f'_{ca} = 1.0f_{cd1}$ 로 가장 높은 값을 취하고 있으나, 설계기준에서는 이러한 상세규정을 제시하

지는 못하고 있다. 이축압축을 받는 위치에서 허용응력은 안전측으로 취하여 10-15% 정도의 증가를 예상할 수 있다.

3.3 절점(Node)

그림3.2의 부재는 절점의 구성요소에 따라 서로 다른 세가지의 절점을 갖고 있다. 상단의 하중작용점에 위치하는 절점은 모든 경계면으로부터 압축응력을 받고 있으며(CCC node), 하단 우측의 절점은 한 개의 인장 타이만을 갖고(CCT node), 좌단의 절점은 두 개의 인장 타이(CTT node)를 갖는다. 설계기준은 이렇게 다른 구성요인에 따라 절점에 작용하는 압축 허용응력을 달리하고 있다. 각 설계기준에서 제시되는 절점에서의 압축응력 한계는 표4에 보여지는 바와 같다.

표 4 절점(Node)의 종류에 따른 압축응력 한계

절점의 종류	MC90	CAN3-A23.3	AASHTO
CCC	$f_{cd1} = 0.85 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd}$	$0.85\phi_c f_c$	$0.85\phi f_c$
CCT	f_{cd1} 또는 f_{cd2}	$0.75\phi_c f_c$	$0.75\phi f_c$
CTT	$f_{cd2} = 0.60 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd}$	$0.60\phi_c f_c$	$0.60\phi f_c$

MC90에서 응력의 단위는 MPa이며, CCT 절점의 경우 스트럿과 타이의 이루는 각도가 55°보다 크고, 절점영역의 배근이 적절히 이루어지는 경우에는 한계응력으로 f_{cd1} 을 사용할 수 있다. 또한 설계기준 압축강도 f_{cd} 는 f_{ck} / γ_c 를 의미한다. 설계기준에서 주어지는 절점에서의 콘크리트 압축응력 한계 또한 Schlaich에 의해 제안되는 값보다 안전측을 취하고 있다. Schlaich는 CCC 절점의 경우 2축압축상태로 보아 허용치를 $f'_{ca} = 1.1f_{cd1}$ 로 높게 보고있다. 또한 CCC 절점이 3축 압축상태일 경우 허용응력은 3배 이상 크게 취할 수도 있으며, 이러한 3축 압축상태는 나선철근과 같은 구속철근의 사용으로 얻을 수 있다.

3.4 인장 타이

규모가 큰 벽체와 같은 구조에서 콘크리트의 인장강도를 인정하는 경우도 드물게 있으나, 인장 타이는

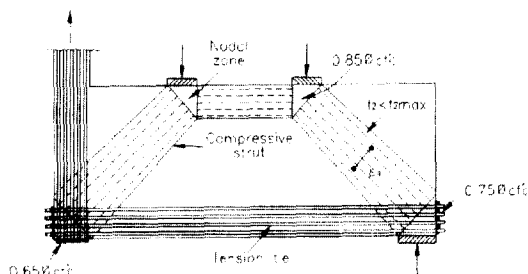


그림 3.2 스트럿-타이 모델의 구성 예

일반적으로 콘크리트의 인장강도를 무시하고 철근이나 프리스트레스 강재에 의한 보강으로 이루어진다. MC90에서 인장타이에 이용되는 강재의 설계강도는 다음과 같이 제안된다.

- 일반 철근 :

$$f_{ytd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (16)$$

f_{yk} : 항복인장강도 .

γ_s : 강재에 대한 부분적용 계수 (= 1.15)

- 부착방식의 PS 강재를 이용하고 프리스트레스 도입력이 외력과 같이 취급되는 경우 :

$$f_{psd,ncr} = 0.9 \frac{f_{pk}}{\gamma_s} - \sigma_{do} \leq 600MPa \quad (17)$$

f_{pk} : 인장강도 .

σ_{do} : 텐던의 설계응력

AASHTO 1994에 의하면 인장타이의 인장저항력은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$P_n = f_y A_{st} + A_{ps} (f_{pc} + f_s) \quad (18)$$

f_y : 철근의 항복응력.

A_{st} : 철근의 단면적

f_{pc} : PS강재의 유효응력

A_{ps} : PS강재의 단면적

식(18)의 두 번째 항은 PS강재의 응력증가를 일반철근의 응력증가와 같게 하기 위한 것이다. 이는 MC90에서 $f_{psd,ncr}$ 를 600MPa로 제한하는 것과 일맥 상통한다. 일반철근이 같은 목적으로 사용되지 않을 경우 식(18)의 두 번째 항의 f_s 는 400MPa로 택하여 균열을 제한할 것을 추천하고 있다.

인장철근은 절점위치에서 정착되는데, 이때 절점의 기하학적인 크기와 구성요소는 철근의 정착길이와 밀접한 관계를 갖는다. EC2와 MC90 등에서는 이와 관련한 소오 정착길이에 대한 기준을 제시하고 있는데, EC2에서는 반력지지점 등에 정착되는 철근의 정착길이는 압축응력 효과로 일반 정착길이보다 상당히 감소될 수 있음을 나타내고 있으며, MC90에서도 이러한 효과를 정착길이의 길정요인에 포함시키는 식을 제안하고 있다.

4. 결 언

우리나라에서 통용되고 있는 설계기준은 ACI와 그 개념을 같이하고 있다. 그러나 앞서 언급된 바와 같이 이 기준은 모든 구조물, 또는 구조물의 모든 부위의 해석에 일관되게 적용하기 어려운 단점을 가지고 있다. 이에 반하여 트러스 모델에 의한 설계방식은 일관된 개념을 모든 해석에 비교적 쉽게 적용할 수 있다는 점에서 많은 잇점을 갖고 있으며, 소개된 바와 같이 여러나라의 설계기준에서 이미 이에 대한 제안을 포함하고 있다. 캐나다의 설계기준이나 MC90 등은 이미 상당히 구체적인 사항까지 제안하고 있으나, 아직은 미흡한 면을 갖고 있는 것으로 보여진다. 예를 들면 이 설계방식의 적용시, 사용성 측면에서의 변형에 대한 제한 및 기준은 캐나다 설계기준에서만 일부 제안되고 있을 뿐이며, 철근상세 등에 대하여는 조금 더 자세한 기준제안이 필요할 것으로 생각된다.

또한 실제의 설계적용에 있어서, 특히 D-영역의 설계에서는 설계자의 많은 경험을 바탕으로 한 감각적인 판단에 설계의 적합성과 경제성이 많이 좌우되므로 설계기준과 더불어 여러 가지 조건에 대한 표준 해석모델의 제시가 필요할 것으로 보여진다.

참 고 문 헌

1. 윤영수, "철근콘크리트보의 전단설계를 위한 개념과 배경", 콘크리트학회지, 제8권, 5호, 1996, pp.61-69.
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete", American Concrete Institute, Detroit, 1989.
3. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete", American Concrete Institute, Detroit, 1995.
4. ACI ASCE 445, "New Approaches to Shear Design in Structural Concrete", State-of-the-Art Report on Shear and Torsion, Draft, Aug, 1995.
5. Texas Department Transportation, "Detailing in Structural Concrete", Research Report 1127-3P, The University of Texas at Austin, May 1988.
6. CEB FIP Model Code, Comite Euro-

- International du beton, 1990.
7. ENV 1992-1-1. Eurocode 2, 1992.
 8. Canadian Standard Association, "Design of Concrete Structures for Buildings". CAN3-A23.8-M84, Rexdale, Ontario, 1984.
 9. AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges, AASHTO, 1989.
 10. AASHTO, LRFD Bridge Design Specifications, AASHTO, 1994.
 11. Marti, P., "Application of Plastic Analysis to Shear Design of Reinforced Concrete Members", IJSEE Lecture Note, Feb. 1987.
 12. Schlaich, J., Schäfer, K. and Jennewein, M., "Toward a Consistent Design of Structural Concrete", PCI Journal, Vol. 32, No. 3, May-June 1987, pp.74-150.
 13. MacGregor, J., "Reinforced Concrete : Mechanics and Design", Prentice Hall, 1997. 