

콘크리트 스트럿의 유효강도가 콘크리트 부재의 설계에 미치는 영향

Effect of Effective Compressive Strength of Concrete Strut on Structural Concrete Design

윤 영 목¹⁾
Yun, Young Mook

석 철 호²⁾
Seok, Chul Ho

Abstract

In the strut-tie model design of structural concrete, the importance of the effective strength of concrete strut has been overlooked by many practitioners. The authors believe that the effective strength of concrete strut is an important factor not only in determining steel tie forces but also in verifying the nodal zone strength and geometric compatibility condition of a selected strut-tie model. This study evaluate the effect of the effective strength of concrete strut on structural concrete design by applying the different effective strut strengths to the strut-tie model design of a post-tensioned anchorage zone and a continuous concrete deep beam.

1. 서론

콘크리트 스트럿의 유효강도는 스트럿-타이 모델의 스트럿과 타이의 단면력 결정 및 선정된 스트럿-타이 모델의 적합성 판단에 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 콘크리트 부재 설계에서의 일반적인 목표는 콘크리트 부재에 예기치 않은 초과하중이 작용할 때 콘크리트 부재의 급작스런 파괴를 방지하기 위하여 콘크리트 부재의 위험단면이 연성적인 거동을 보이도록 하는 것이다. 이를 위해서는 콘크리트 부재의 보강재(steel tie)가 콘크리트(concrete strut)가 파괴되기 전에 항복되어야 하지만 콘크리트 스트럿 역시 어떤 한계응력(유효강도)을 초과하지 않아야 한다.

합리적인 콘크리트 스트럿의 유효강도를 결정하기 위한 많은 연구가 진행되어왔으며, 많은 종류의 유효강도 값 및 산정식이 제안되었다. 그러나 제안된 모든 콘크리트 스트럿의 유효강도 값 및 산정식은 몇몇 특정한 하중 및 형상 조건을 갖는 콘크리트 부재의 실험 및 수치해석 결과에 바탕을 두어 결정되었으며, 또한 제안된 유효강도 값 및 산정식은 선정된 스트럿-타이 모델이 적은 수의 스트럿과 타이로 형성된 단순한 정정의 트러스 구조일 때 적용될 수 있는 것이다. 본 논문에서는 지금까지 제안된 대표적인 콘크리트 스트럿의 유효강도 값, 유효강도 산정식, 그리고 본 저자와 동료들이 제안한 방법에 의해 결정된 유효강도 값이 콘크리트 부재의 설계에 미치는 영향을 프리스트레스트 콘크리트 I형보의 정착부 및 높이가 큰 철근콘크리트 연속보의 설계를 통하여 분석하였다.

2. 스트럿의 유효강도

콘크리트 스트럿의 유효강도 f_{se} 는 많은 논쟁의 대상이다. 콘크리트 스트럿의 유효강도는 일반적으로 콘크리트 원주형 공시체의 일축압축강도 f'_c 의 일부분으로서, 다음과 같은 식으로 표시된다.

1) 정희원, 경북대학교 토목공학과 조교수
2) 경북대학교 대학원 토목공학과 석사과정

$$f_{cs} = \nu f_c' \quad (1)$$

여기서, ν 는 1보다 작은 유효강도계수이다. 표 1은 지금까지 제안된 대표적인 콘크리트 스트럿의 유효강도 값 및 산정식을 보인 것이다. 그러나 전연한바와 같이 이들을 다양한 형상 및 하중 조건을 갖는 모든 콘크리트 부재의 설계에 사용하는 것은 옳지 않다. 스트럿-타이 모델의 부재 수 및 구조형태에 무관하고 보다 일반적인 콘크리트 스트럿의 유효강도 결정방법은 Yun과 Ramirez⁽¹¹⁾ 및 Yun과 Choi⁽¹²⁾에 의해 제안된 방법으로서, 이 방법은 2차원 응력을 받는 콘크리트의 파괴포락선 및 철근에 의한 콘크리트의 구속의 정도를 고려하는 알고리즘을 이용하여 콘크리트 스트럿의 유효강도를 결정하는 것이다. 그들은 콘크리트 스트럿의 최대 및 최소 유효압축강도를 $1.0 f_c'$ 와 $0.1 f_c'$ 로 각각 제한하였으며, 콘크리트 스트럿의 유효강도를 파괴포락선으로부터 결정하기 위한 스트럿의 주응력비를 콘크리트 스트럿이 통과하는 유한요소들의 평균 주응력비로 취하였다. 파괴포락선으로부터 결정된 콘크리트 스트럿의 유효강도는 콘크리트 스트럿이 주압축응력의 흐름과 10° 이내의 각을 이룰 때 유효하며, 만약 10° 이상의 차이가 있다면 파괴포락선으로부터 산정한 값에 $0.5(1 + \cos 2\alpha)$ 를 곱해야 한다. 여기서 α 는 주압축응력의 흐름과 콘크리트 스트럿 사이의 사이각이다.

3. 콘크리트 부재의 설계

3.1 PSC I형보의 정착부

그림 1은 PSC I형보의 정착부 단면형상을 보인 것이다. 여기서 I형보에 사용될 PS강재의 극한강도 f_{pu} 는 270ksi이며, 이 강재는 직경이 0.5in인 네 개의 저릴락세이션 강연선으로 이루어져 있다. 긴장시 발생하는 PS강재의 최대응력은 $0.75 f_{pu}$ 이며, 콘크리트의 일축압축강도는 5ksi이다. 하나의 정착판을 통해 정착부의 복부에 가해지는 극한하중 P 는 165kips ($=4 \times 0.153 \times 270$)이다. 그림 2는 PSC I형보의 정착부 스트럿-타이 모델이며, 그림 2의 치수 A 에 의한 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합성조건 및 절점영역 강도조건을 만족시키는 스트럿의 유효강도는 표 2와 같다. 그림 2의 스트럿-타이 모델에 의한 산정한 정착부의 필요 수직철근량은 그림 3과 같다.

3.2 높이가 큰 RC 연속보

그림 3은 높이가 큰 RC 연속보의 기하학적 형상 및 하중조건을 보인 것이다. 이 보는 사용분포하중과 기동하중 1446kips를 받고, 보 위의 기동은 한번의 길이가 28in인 정사각형이다. 콘크리트의 일축압축강도 f_c' 및 철근의 항복강도 f_y 는 각각 5ksi 및 60ksi이며, 이 보의 유효높이는 130in이다.

이 보의 설계를 위해 선정된 스트럿-타이 모델은 그림 4와 같다. 선정된 스트럿-타이 모델은 부정정 트러스 구조이므로 스트럿과 타이의 단면적 산정, 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합성조건, 그리고 위험 절점영역의 강도검토를 위해 프로그램 NLSTM⁽¹³⁾을 이용하였다. 스트럿-타이 모델을 이용한 설계과정에서 61번과 인근의 부재들 그리고 62번과 인근의 부재들이 상당히 큰 하중에 의한 기하학적 적합성조건을 만족시키지 못하므로, Yun⁽¹⁴⁾에 의해 제안된 다음의 식 (2)를 이용하여 산정된 철근량 만큼의 추가적인 철근배근으로 해당 스트럿의 유효강도를 증가시켰다.

$$A_s = \frac{b w_m \Delta f_{cs}}{2 f_y} \left(1 - \frac{a}{b_{eff}} \right) \quad (2)$$

$$w_m = \frac{w f_{cs}}{f_{cs} + \Delta f_{cs}} \quad (3)$$

$$b_{eff} = a + \frac{l}{6} \quad (4)$$

위 식에서, a, b, l, w , 그리고 w_m 은 각각 스트럿의 지압면적 폭, 두께, 길이, 구속되지 않은 스트럿의 폭, 그리고 구속된 스트럿의 폭이다. 또한 f_{cs} , Δf_{cs} 그리고 f_y 는 스트럿의 유효압축강도, 스트럿 유효

압축강도의 증가분, 그리고 철근의 항복강도이다. 스트럿-타이 모델에 의해 산정한 수직철근량, 상단 수평철근량, 그리고 하단 수평철근량은 그림 5에서 나타내었다.

4. 결론

설계 예를 통해서 살펴본 바와 같이 콘크리트 스트럿의 유효강도 값에 따라 필요철근량에 상당한 차이가 있음을 알 수 있었다. 결국, 콘크리트 부재 설계를 위해 선정된 스트럿-타이 모델에서 어떤 유효강도 값을 사용하는가가 선정된 스트럿-타이 모델의 적합성 및 콘크리트 부재의 정확한 극한 거동·강도의 평가·예측 가능성 여부에 직결되는 문제인 만큼 콘크리트 부재의 정확하고 합리적인 설계·해석을 위해서는 본 연구에서와 같은 콘크리트 스트럿의 유효강도가 콘크리트 부재의 설계(및 해석)에 미치는 영향을 보다 심도있게 비교·분석하여야 할 것이다. 또한 추후에 이와 같은 비교·분석 결과를 종합하여 스트럿-타이 모델이 콘크리트 부재의 극한 거동·강도를 가장 정확하게 예측·설계할 수 있는 콘크리트 스트럿의 유효강도 값, 유효강도 산정식, 혹은 유효강도 결정방법을 제시하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) American Association of State Highway Transportation Officials, "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications", AASHTO, Washington D.C., SI Units, 2nd Edition, 1998.
- (2) ACI, "ACI 318 Change Submittal; Strut-and-Tie Models", American Concrete Institute, Farmington Hill, Michigan, MI.
- (3) Alshegeir, A., "Analysis and Design of Disturbed Regions with Strut-Tie Models." *Ph. D. Thesis*, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 274 pp., 1992.
- (4) Bergmeister, K., Breen, J.E. and Jirsa, J.O., "Dimensioning of the Nodes and Development of Reinforcement." *Report, IABSE Colloquium Structural Concrete*, Stuttgart, pp. 551-564, 1991.
- (5) CEB-FIP, "Model Code for Concrete Structures", 3rd Edition, Comit-Euro-International du Beton/Federation Internationale de la Precontrainte, Paris, 348 pp., 1978.
- (6) MacGregor, J.G., "Reinforced Concrete Mechanics and Design", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 939 pp., 1997.
- (7) Marti, P., "Basic Tools of Reinforced Concrete Beam Design", *Journal of American Concrete Institute*, Vol. 82, pp. 46-56, 1985.
- (8) Nielsen, M.P., Braestrup, M.W., Jensen, B.C., and Bach, F., "Concrete Plasticity, beam shear - Shear in joints- Punching shear", *Special Publication*, Danish Society for Structural Science and Engineering, Lyngby, Denmark, 1978.
- (9) Ramirez, J.A. and Breen, J.A., "Proposed Design Procedures for Shear and Torsion in Reinforced and Prestressed Concrete", *Research Report No. 248-4F* Center for Transportation Research, Univ. of Texas, Austin, 254 pp., 1983.
- (10) Schlaich, J., Schaefer, K. and Jennewein, M., "Towards a Consistent Design of Structural Concrete", *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, Vol. 32, pp. 74-150, 1987.
- (11) Yun, Y.M. and Ramirez, J.A., "Strength of Struts and Nodes in Strut-Tie Model", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 122, pp. 20-29, 1996.
- (12) Yun, Y.M. and Choi, M.S., "Evaluation of AASHTO Specifications on Post-tensioned Anchorage Zone", *Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, in Process, 2000.
- (13) Yun, Y.M., "Computer Graphics for Nonlinear Strut-Tie Model Approach," *Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE*, Vol. 14, pp. 127-133, 2000.
- (14) 윤 영목, "스트럿-타이 모델 절점영역의 형상 및 강도 결정방법 (I) - 기존 및 제안된 방법의 소개", 대한토목학회 학회지, 심사중, 2000.

표 1. 스트럿의 유효강도계수 ν

Nielsen et al. (1978)	$0.7 - f_c' / 29,000$ (psi)	
Ramirez & Breen (1983)	$30 / \sqrt{f_c'}$ (psi)	
Marti (1985)	0.6	
CEB-FIP Model Code. (1990)	$0.47(0.85 - f_c' / 250)$ (MPa)	
Bergmeister et al. (1991)	$0.5 + 15 / \sqrt{f_c'}$ (psi)	
AASHTO-LRFD (1994)	$1' / (0.8 + 170\epsilon_1) \leq 0.85$ (MPa) where $\epsilon_1 = \epsilon_c + (\epsilon_c + 0.002) \cot^2 \alpha_c$	
Schlaich et al. (1987)	· 프리즘 스트럿에서 교란되지 않은 일축상태의 스트럿	0.85
	· 스트럿과 평행한 균열을 일으킬 수 있는 스트럿에 수직인 인장변형률을 겪는 철근이 있는 경우	0.68
	· 스트럿과 비스듬한 각도의 인장변형률을 겪는 철근이 비스듬한 균열을 유발할 수 있는 경우	0.51
	· 내부응력의 흐름과 차이가 많은 스트럿	0.34
MacGregor (1997) ($\nu_2 = 0.55 + 15 / \sqrt{f_c'}$)	· 균열이 가지 않은 일방향 스트럿 또는 압축장	1.00 ν_2
	· 병모양의 압축장에 의해 균열이 간 스트럿으로서 식 (*)에 의해 횡철근으로 보강되어있는 스트럿	0.80 ν_2
	· 위의 경우와 같으나 철근보강이 없는 스트럿	0.65 ν_2
	· 횡철근에 기인한 횡방향 인장을 받는 균열이 발생한 영역에서의 스트럿	0.60 ν_2
	· 심하게 균열이 간 세장한 보의 복부 $\theta = 30^\circ$ $\theta = 45^\circ$	0.30 ν_2 0.55 ν_2
Alshegeir (1992)	· 전단지간에 대한 깊이비가 2.0보다 작고 적절히 구속되어진 하중점에서 지점으로 연결되는 대각선 스트럿	0.85
	· 일반적인 경사스트럿	0.60
	· 아치미캐니즘을 이루는 스트럿	0.75
	· PSC 보에서 아치스트럿 및 부채형 스트럿	0.50
	· PSC 보에서 교란되지 않은 큰 압축응력을 받는 스트럿	0.95
ACI Draft (1999)	· 휨압축영역에서 스트럿의 중간단면이 스트럿의 양단단면과 같을 때	0.72
	· 스트럿의 중간단면이 스트럿의 양단단면보다 크거나 크게될 수 있을 때	
	(i) 보강재가 X.3.5항, X.3.6항을 만족할 때	0.55
	(ii) 보강재가 스트럿에 걸쳐있으면서 X.3.5항과 X.3.6항을 만족하지 않을 때	0.43 λ
	· 인장부재나 보의 인장플랜지에서의 스트럿	0.30

* : $A_s \geq 2 \left[\frac{C}{4} \left(1 - \frac{a}{b_{eff}} \right) \right]$

λ : correction factor related to the unit weight of concrete, see ACI 11.7.4.3

표 2. PSC I형보 정착부 스트럿-타이 모델에서의 스트럿 유효강도계수

Strut No.	Ref. (1)	Ref. (2)	Ref. (3)	Ref. (4)	Ref. (5)	Ref. (6)	Ref. (7)	Ref. (8)	Ref. (9)	Ref. (10)	Ref. (11,12)
1	0.85	0.55	0.50	0.71	0.33	0.61	0.60	0.53	0.42	0.68	0.52
2	0.85	0.55	0.50	0.71	0.33	0.61	0.60	0.53	0.42	0.68	0.91
3	0.85	0.72	0.75	0.71	0.33	0.76	0.60	0.53	0.42	0.85	1.00
4	0.85	0.72	0.75	0.71	0.33	0.76	0.60	0.53	0.42	0.85	1.00
5	0.85	0.72	0.95	0.71	0.33	0.76	0.60	0.53	0.42	0.85	1.00
6	0.85	0.72	0.95	0.71	0.33	0.76	0.60	0.53	0.42	0.85	0.84

표 3. PSC I형보 정착부에서의 필요철근량

Tie No.	Ref. (1)	Ref. (2)	Ref. (3)	Ref. (4)	Ref. (5)	Ref. (6)	Ref. (7)	Ref. (8)	Ref. (9)	Ref. (10)	Ref. (11,12)
7	1.89	1.91	1.91	1.91	2.30	2.04	1.97	2.00	2.10	1.88	1.88
8	2.87	2.89	2.89	2.89	3.47	3.09	2.98	3.03	3.18	2.84	2.85

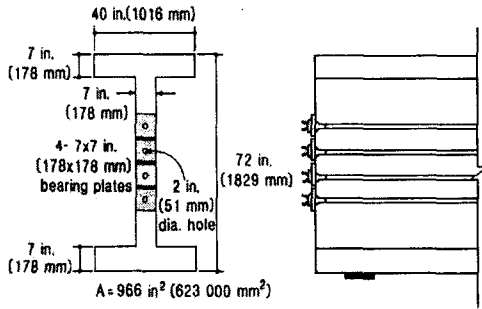


그림 1. PSC I형보의 정착부의 단면형상

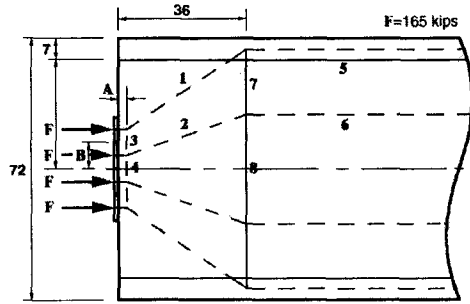


그림 2. 정착부 설계를 위한 스트럿-타이 모델

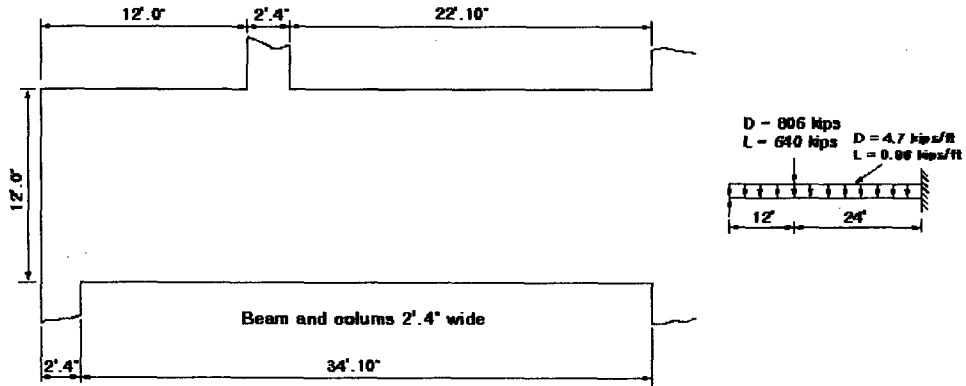


그림 3. 높이가 큰 RC 연속보의 기하학적 형상 및 하중조건

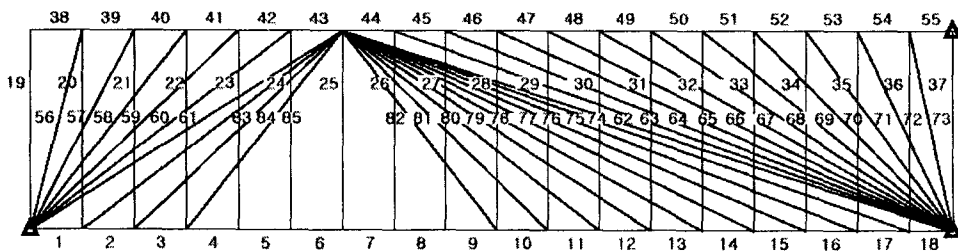


그림 4. 높이가 큰 RC 연속보의 설계를 위한 스트럿-타이 모델

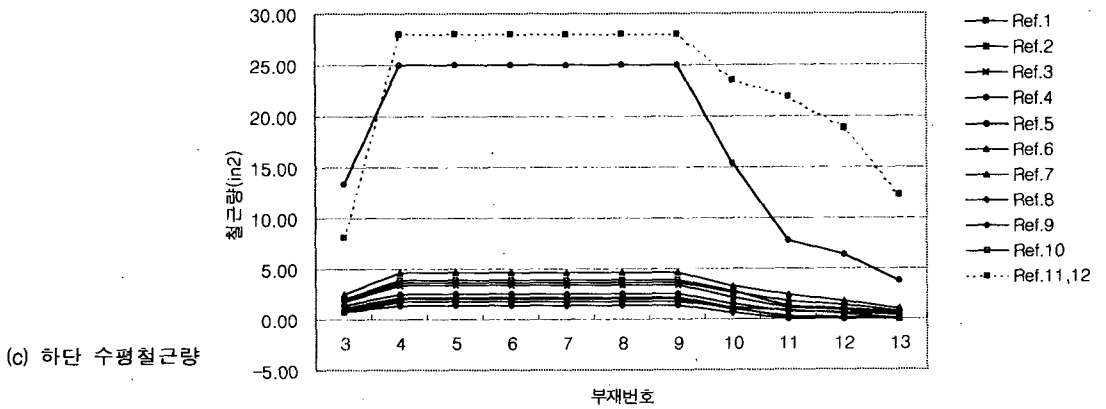
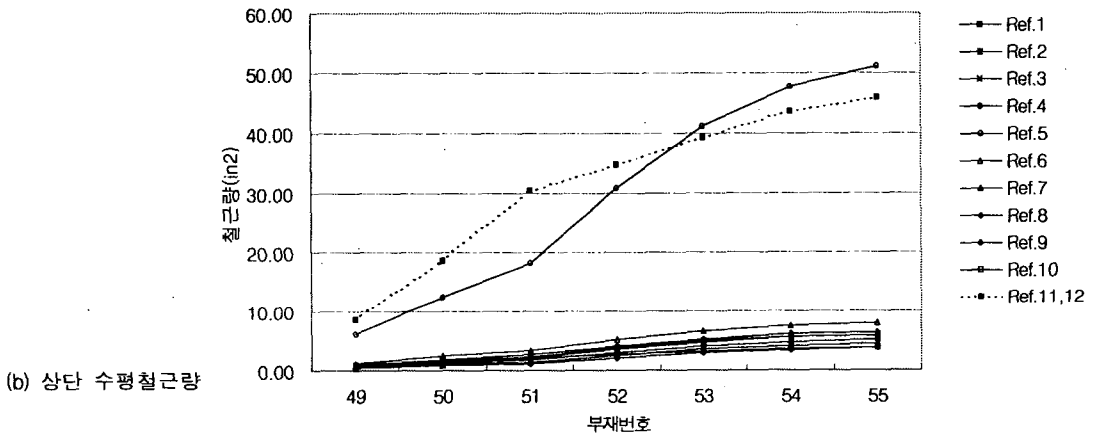
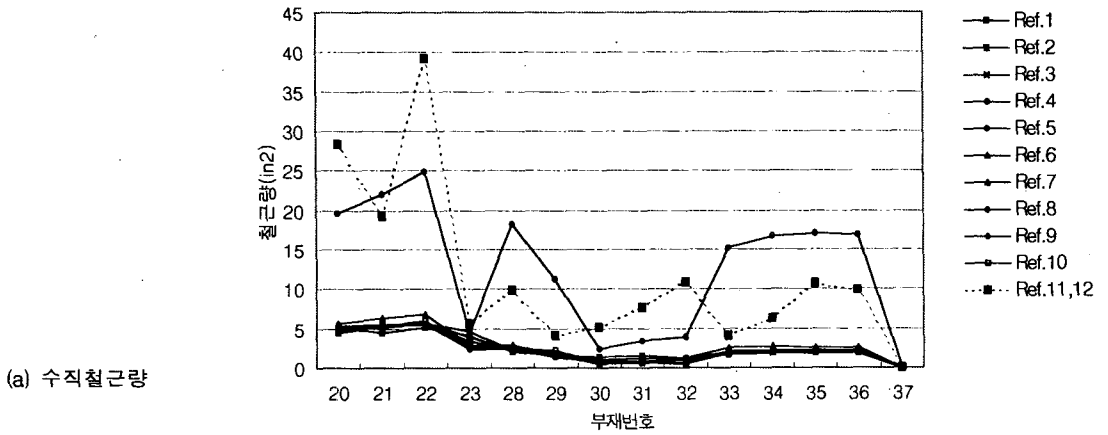


그림 5. 높이가 큰 연속보에서의 필요철근량