

# 스트럿-타이 모델에 의한 콘크리트 T형 교각 코핑부의 설계

## Design of RC T-type Pier Coping Using Strut-and-Tie Model

정 광 회\*      심 별\*\*      송 하 원\*\*\*      변 근 주\*\*\*\*  
Jung, Kwang Hoe      Shim, Byul      Song, Ha Won      Byun, Keun Joo

### ABSTRACT

In this study, effective compressive strength and nodal zone of Strut-and-Tie Model are studied to propose a new design method for RC T-type pier coping for preventing of sudden brittle failure. The coping which transmits loads of bridge to pier should be properly designed to retain ductile behavior. In order to carry out this proper design using STM, tie must yield before concrete fails, and a stress at strut should not exceed a certain effective stress. Therefore, reasonable determination of the effective compressive strength of strut by considering stress states at the nodal zone exactly is very important.

Since conventional STM is applied under assumption that all nodes are under hydrostatic stress state, actual non-hydrostatic stress state in nodal zone caused by geometrical characteristics, loading conditions, support conditions of structures can not be considered properly. In order to apply STM for design of RC T-type pier coping, the non-hydrostatic stress state of nodal zone is considered and effective compressive strength is proposed. Then, a new design method of RC T-type pier coping which applies the principle of superposition to obtain optimum ductile behavior of the structure is rationally designed.

### 1. 서론

본 논문은 철근콘크리트 T형 교각 코핑부에 대한 합리적 설계방법을 제시하기 위한 스트럿-타이 모델의 스트럿 유효압축강도와 절점영역에 관한 연구이다. 교량상부의 하중을 전달하는 코핑부는 갑작스런 취성파괴를 방지하기 위해 연성 거동이 확보되도록 설계되어야 하며 이를 위해 모델의 적용시 타이는 콘크리트가 파괴되기 전에 항복하고 스트럿도 어느 일정 유효응력을 초과하지 않아야 한다. 따라서, 절점영역에서의 정확한 응력상태를 고려하여 스트럿의 유효압축강도를 합리적으로 산정하는 것은 매우 중요하다.

\* 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

\*\*\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

기존의 스트럿-타이 모델은 절점을 모두 정수압응력상태로 가정하기 때문에, 실제로 부재의 기하학적 형상과 하중조건, 지점조건에 의해 생기는 절점영역에서의 비정수압 응력상태를 고려하지 못한다. 연구에서는 콘크리트 T형 교각 코핑부의 설계에 스트럿-타이 모델을 적절히 적용하기 위해 절점영역의 비정수압응력상태를 고려하여 스트럿-타이 모델을 구성하였고, 최적의 연성거동이 확보될 수 있는 콘크리트의 유효압축강도를 제안하였으며, 중첩의 원리를 이용하여 콘크리트 T형 교각 코핑부의 합리적 설계방법을 제시하였다.

## 2. 스트럿-타이 모델에 의한 일반적인 설계

스트럿 타이 모델에 의한 일반적인 설계과정은 그림 1과 같으며, ②와 ③의 과정을 반복하면서 변형률에너지가 최소가 되는 최적의 모델을 선정하고 상세설계를 실시한다.

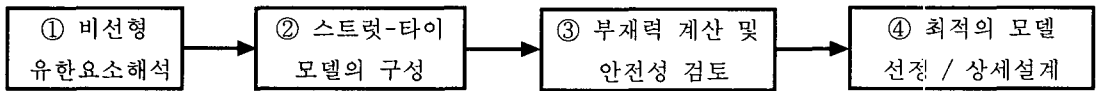
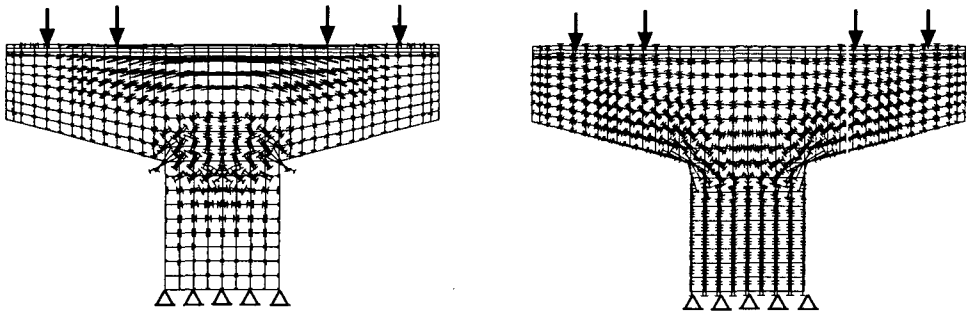


그림 1. 스트럿-타이 모델에 대한 설계과정

### 2.1. 콘크리트 T형 교각 코핑부의 비선형 유한요소해석

4지점에서 교량상부의 설계하중을 받는 콘크리트 T형 교각 코핑부를 대상으로 2차원 비선형 유한요소해석을 실시하여 하중 단계별로 주응력의 흐름을 구하면 그림 2와 같다.



(a) 주인장 흐름

(b) 주압축 흐름

그림 2. 설계하중작용시의 주응력 흐름

### 2.2. 콘크리트 T형 교각 코핑부의 스트럿-타이 모델

비선형 유한요소 해석을 통해 얻어진 그림 2(a)의 주인장응력 흐름에 따라 그림 3과 같이 코핑부 상단에 인장 타이틀을 구성하였다. 인장 타이틀의 위치는 인장철근이 배근되는 도심이며, 하중이 재하되는 4개의 지점 중앙과 연직한 선이 인장타이틀과 만나는 4점에서 CCT절점이 형성되었다. 또한, 그림 2(b)의 주압축응력 흐름에 따라 그림 3과 같이 4개의 지점에서 교각 코핑부의 모서리 부분을 연결하는 4개의 경사진 압축 스트럿을 구성하였다. 이 경사진 압축 스트럿과 코핑부 하단의 수평 압축 스트럿이 만나는 2점에서 CCC절점이 형성되며, 그 위치는 변형률에너지가 최소가 되는 점을 구하여 정하였다. 각 부재의 부재력은 각 절점의 평형조건으로부터 구할 수 있으며, 구성된 스트럿-타이 모델에 대한

선형해석을 위해 그림 3에서 점선으로 표시되는 부재력이 0인 더미 부재 ⑪, ⑫, ⑬이 필요하다.

표 1. 스트럿-타이 모델의 비교

		CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5
스트럿의 각도(deg)	$\theta_1$	42.05	41.57	41.07	40.57	40.06
	$\theta_2$	64.03	63.91	63.52	63.11	62.69
부재력 (tonf)	①,②	(-982.0)	(-982.0)	(-982.0)	(-982.0)	(-982.0)
	③,④	(-840.5)	(-848.5)	(-856.9)	(-865.6)	(-874.7)
	⑤,⑥	(-465.0)	(-466.5)	(-468.1)	(-469.8)	(-471.6)
	⑦,⑧	(+624.1)	(+634.8)	(+646.0)	(+657.5)	(+669.5)
	⑨	(+825.8)	(+840.0)	(+854.7)	(+870.0)	(+885.8)
	⑩	(-825.8)	(-840.0)	(-854.7)	(-870.0)	(-885.8)
변형률 에너지 $\sum F_i \cdot l_i \cdot \epsilon_{mi}$		944.89	942.71	976.09	1,011.27	1,012.26

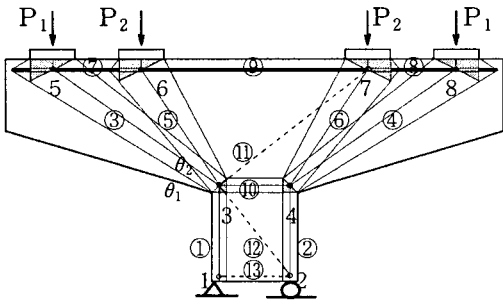
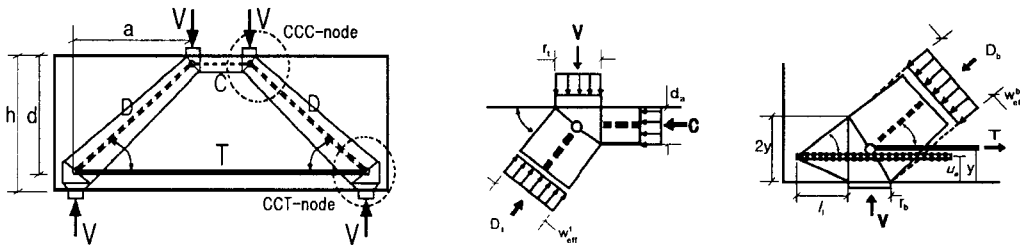


그림 3. 스트럿-타이 모델의 구성

구성한 스트럿-타이 모델에서 변형률에너지가 최소가 되는 최적의 모델을 찾기 위해 경사 압축 스트럿의 각도를 바꾸면서 5가지 경우의 부재력과 변형률에너지를 구하면 표 1 같다. 변형률에너지의 산정에 있어서 콘크리트 스트럿의 변형률은 철근 타이의 변형률이 훨씬 작으므로 생략하고,  $\sum F_i \cdot l_i \cdot \epsilon_{mi}$ 에 의해 타이의 부재력과 길이, 변형률의 곱에 의해 구할 수 있다. 이 중에서 변형률에너지가 최소가 되는 CASE-2의 경우가 최적의 모델이라고 할 수 있다.

### 3. 유효압축강도식의 제안

#### 3.1. 단순지지된 보의 유효압축강도



(a) 단순보의 스트럿-타이 모델

(b) CCC절점

(c) CCT절점

그림 4. 단순보의 스트럿-타이 모델과 절점

원대연<sup>1)</sup> 등(1998)은 그림 4(a)와 같이 단순지지된 보의 스트럿-타이 모델을 구성하고, 그림 4(C)와 같은 CCT절점의 비정수압응력상태를 고려하여, 식 1과 같이 전단지간비(a/d)의 함수로써 스트럿의 유효압축강도를 결정하였다. 또한 상부압축스트럿의 두께  $d_a$ 를 변화시키면서 상부스트럿과 하부스트럿

의 힘이 같아지는 지점에서 이 부재의 극한강도를 구할 수 있는 알고리즘을 구성하였고, 실험을 통해 이를 검증하고 제안한 유효압축강도식의 타당성을 입증하였다.

$$f_{cel}^c = 0.68 \left( 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \left( \alpha_1 - \alpha_2 \frac{a}{d} \right) f_{ck} \quad \alpha_1 = 1.25, \alpha_2 = 0.25 \quad (1)$$

### 3.2. 최적의 유효압축강도 제안

유효압축강도 식(1)에서  $\alpha_1$ 은 1.25로 고정시키고,  $\alpha_2$ 를 변화시키면서 원대연<sup>1)</sup> 등(1998)이 개발한 알고리즘에 의해 전단지간비의 변화에 따라 단순지지된 보의 극한력을 구해보면 그림 5와 같다.

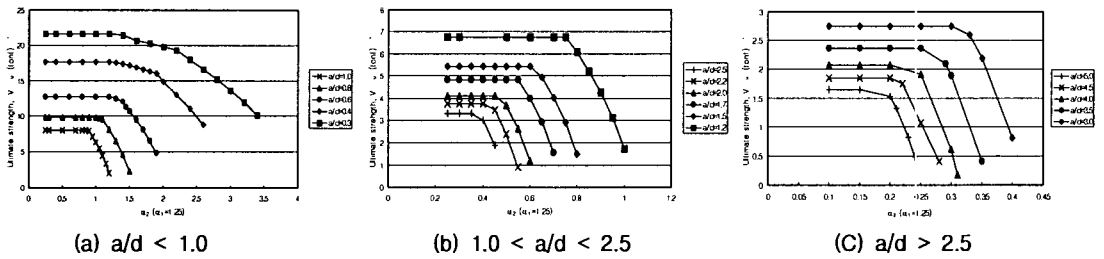


그림 5. 전단지간비(a/d)에 따른 유효압축강도식

그림 5에서 알 수 있듯이 철근 타이의 항복응력은 일정하므로  $\alpha_2$ 의 변화 즉, 콘크리트 스트럿 유효압축강도의 변화에 관계없이 철근 타이가 먼저 항복하여 부재의 극한강도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 각 그래프가 꺾이는 변곡점은 바로 철근 타이와 콘크리트 스트럿이 동시에 항복에 도달한 점을 의미하게 된다. 이렇게 각 그래프의 변곡점에서의  $\alpha_2$ 와 전단지간비(a/d)에 대하여 도시해 보면 그림 6과 같이 일정한 경향을 가지는 점들이 된다. 이 점들을 전단지간비(a/d)에 대해 동시에 나타낼 수 있도록 회귀 분석을 통해 그 식을 구해보면 식(2)와 같으며, 이 식을 식(1)에 대입하여 식(3)과 같이 최적의 스트럿 유효압축강도식을 제안할 수 있다.

$$\alpha_2 = 0.85 \left( \frac{a}{d} \right)^{-0.84} \quad (2)$$

$$f_{cel}^c = 0.68 \left( 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \left( 1.25 - 0.85 \left( \frac{a}{d} \right)^{0.16} \right) f_{ck} \quad (3)$$

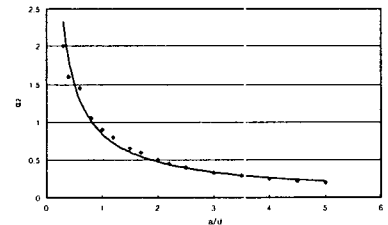


그림 6. 전단지간비(a/d)와  $\alpha_2$ 의 관계

식(3)과 같이 콘크리트 스트럿의 유효압축강도를 전단지간비(a/d)의 함수로 비선형적으로 제안함에 따라 콘크리트 스트럿과 철근 타이가 동시에 항복하는 점을 찾을 수 있게 되고 이를 통해 보다 경제적이고 합리적인 설계가 가능해진다. 또한, 식(1)과 같은 유효압축강도식을 적용하는 경우에는, 두 가지 혹은 그 이상의 모델을 중첩의 원리를 이용해서 스트럿-타이 모델을 구성할 때, 철근 타이가 콘크

리트 스트럿 보다 먼저 항복에 도달한다면 그 이후에 거동이 선형탄성범위가 아니므로, 중첩의 원리를 이용해 여러 모델을 중첩시킬 수 없다. 하지만, 식(3)의 유효압축강도식은 철근 타이와 콘크리트 스트럿이 동시에 항복에 도달하도록 함으로써, 부재가 극한강도에 이르기 전의 어떤 한 상태에서라도 철근 타이는 항복하지 않는다. 따라서, 철근 타이의 선형탄성 거동이 확보되고, 중첩의 원리를 적용할 수 있는 근거를 마련해 줄 수 있다.

#### 4. 중첩의 원리를 이용한 스트럿-타이 모델

##### 4.1 중첩의 원리를 이용한 스트럿-타이 모델에 의한 설계과정

중첩의 원리를 이용하여 새롭게 제안하는 스트럿-타이 모델에 의한 설계하는 방법을 요약해 보면 그림 7와 같다. 상부스트럿과 하부스트럿의 힘이 같아지는 지점에서 그 부재의 극한강도를 결정하는 프로그램을 통해 스트럿의 각도, 폭 그리고 스트럿과 타이의 부재력을 한번에 결정할 수 있다. 그림 1과 같은 일반적인 설계방법과 비교해 볼 때, 최적모델을 선정하는 반복과정이 없고 보다 합리적으로 스트럿의 각도, 폭을 결정할 수 있다는 장점이 있다.

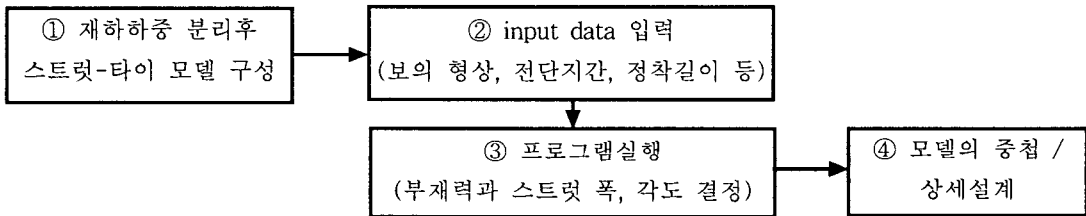


그림 7. 중첩의 원리를 이용한 스트럿-타이 모델에 의한 설계과정

##### 4.2 제안한 스트럿-타이 모델에 의한 콘크리트 T형 교각 코핑부의 설계

중첩의 원리는 식(3)과 같이 콘크리트 스트럿의 파괴와 철근 타이의 항복이 동시에 발생하는 콘크리트 스트럿의 유효압축강도를 제안함으로써 응력과 변형률 관계가 선형 탄성범위에 있도록 함으로써 가능하게 되었다. 그림 8과 같이 재하하중을 분리하여 Type-I과 Type-II 스트럿-타이 모델을 각각 구성하여 각각의 경우에 대하여 부재력을 구한 뒤, 중첩의 원리를 이용하여 두 모델을 중첩시킴으로써 전체 구조물의 부재력을 구할 수 있다.

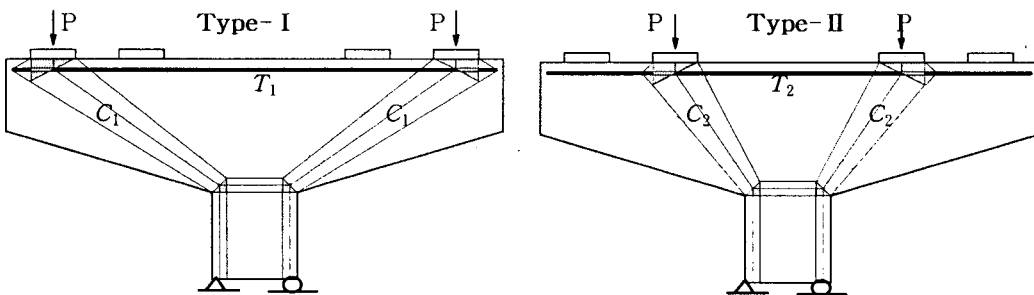


그림 8. 제안한 스트럿-타이 모델

#### 4.3. 기존 스트럿-타이 모델에 의한 설계와의 비교

표 2에서 보듯이 제안한 스트럿-타이 모델은 기존의 스트럿-타이 모델에 의한 설계결과와 아주 근사한 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 제안한 스트럿-타이 모델이 여러 번의 반복과정을 통해 구한 최적모델과 유사함으로 더 경제적이고 합리적이라는 것을 뒷받침 해준다. 또한 스트럿의 유효압축강도를 철근 타이와 콘크리트 스트럿이 동시에 항복하는 점에서 극한값에 이르도록 제한함으로 해서 중첩에 원리를 적용할 수 있다는 사실을 입증하게 되었다.

표 2. 기존 스트럿-타이 모델에 의한 설계와의 비교

구 분	기존 스트럿-타이 모델		제안한 스트럿-타이 모델	
	소요철근량(cm <sup>2</sup> )	설계철근량(cm <sup>2</sup> )	소요철근량(cm <sup>2</sup> )	설계철근량(cm <sup>2</sup> )
주철근	311.11	332.64	300.88	332.64
수평전단철근	105.28	139.36	105.29	139.36
수직전단철근	104.66	160.44	100.93	160.44

또한, 이 설계방법의 장점은 기존의 스트럿-타이 모델이 스트럿의 각도와 폭을 설계자의 판단이나 경험에 크게 의존하는 반면에 제안한 스트럿-타이 모델은 일정한 알고리즘에 의해 보다 합리적이고, 정확하게 스트럿의 두께와 스트럿과 타이의 각도가 구할 수 있다는 점이다. 즉, 변형률 에너지가 최소인 최적의 모델을 찾는 반복과정이 필요하지 않으며, 누구나 같은 스트럿의 각도와 폭을 구할 수 있다.

#### 5. 결론

다음은 본 연구결과 얻어진 결론이다.

- 1) 스트럿-타이 모델을 이용하여 콘크리트 T형 교각 코핑부의 배근상세를 설계하는 경우에 콘크리트 스트럿의 유효압축강도를 스트럿과 철근 타이가 동시에 항복하도록 전단시간비(a/d)의 함수로 제한함으로써, 선형탄성 범위에서 중첩의 원리가 적용될 수 있는 근거를 제시하였다.
- 2) 중첩의 원리를 이용한 스트럿-타이 모델로 콘크리트 T형 교각 코핑부에 대한 합리적인 설계방법을 제시하였으며, 기존 스트럿-타이 모델에 비해 모델의 최적화를 위한 반복과정이 불필요하고, 스트럿의 폭과 각도의 결정이 보다 합리적이라는 사실을 규명하였다.
- 3) 제안한 모델은 일정하게 정형화 된 경우에만 적용이 가능하지만, 역으로 여러가지 응력흐름을 잘 표현할 수 있는 간단한 모델들을 만들고 이 모델들이 실험을 통해서 검증된다면, 중첩의 원리를 보다 효과적으로 사용함으로써 복잡한 응력흐름을 가진 구조물에도 합리적이고 간단하게 적용할 수 있으며, 누구나 손쉽게 스트럿-타이 모델을 구성하여 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Won, D. Y., Hino, S. I., and Ohta, T. (1998), "Ultimate Strength Analysis of RC Deep Beams Using Strut-and-Tie Models", *J. Materials, Struct., Pavement, JSCE*, Vol. 39, No. 592, pp. 181-196.
- 2) Bergmeister, K., Breen, J. E., Jirsa, J. O., and Kreger, M.E.(1993), *Detailing in Structural Concrete*, Research Report Number 1127-3F, Center for Transportation Research.
- 3) Schlaich, M. and Anagnoutou, G. (1990), "Stress Fields for Nodes of Strut-and-Tie Models", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol.116, No. 1, pp. 13-23.