

잘못 적용되기 쉬운 철도 설계기준 돌아보기(2)



박재용
(주)선구엔지니어링 구조본부장
T.010.8863.2704
jpr777@daum.net



김태곤
(주)선구엔지니어링 구조본부 부장
T.010.2295.6205
onlysix@hanmail.net

1. 머리말

본 기사는 철도저널 Vol.15 / No.5(2012년 10월호)에 게재된 기술기사 「잘못 적용되기 쉬운 철도 설계기준 돌아보기」에 연속되는 내용이다. 당시 기사를 읽지 못한 분들을 위하여 도입부에 대하여 간단히 다시 언급한다.

보통 설계자들은 이 전 설계의 설계심이나 설계감리 검토 등의 절차에서 문제가 없었던 경우 설계기준 적용의 옳고 그름에 대하여 돌아보지 않게 되는데, 그동안 설계과정에서 문제가 없었더라도, 철도관련 토목구조물 설계에서 일반적으로 잘못 적용되고 있다고 판단되는 몇 가지 기준 적용의 관행에 대하여 돌아보고, 기준의 원리 및 배경을 충실히 이해함으로써 불필요한 재료의 낭비를 막고 안전성을 정확히 확보하는데 도움이 되도록 하고자 한다.

지금부터 검토할, 잘못 적용되는 것으로 판단되는 기준은 다음과 같다.

- 휨과 축방향력을 받는 부재의 균열
- 암거 등 지하구조물 구조해석 시 지반스프링 간격
- 휨철근의 정착
- 허용 지지력 등 외적안정 허용력 할증

2. 휨과 축방향력을 받는 부재의 균열

강도설계법에 의해 휨부재를 설계할 때 단면의 휨강도

뿐만 아니라 균열에 대한 안전성에 대해서도 검토해야 한다. 이 전에는 사용 모멘트에 의해 철근에 발생하는 응력으로 부터 균열 폭을 계산하고, 구조물의 용도 및 중요도에 따라 이 폭을 직접 제한함으로써 균열에 대한 사용성을 확보하였으나, 콘크리트구조설계기준이 개정되면서 직접적으로 균열 폭을 제한하는 방법 대신 철근의 배치 간격을 제한하여 균열에 대한 사용성을 간접적으로 확보하는 방법으로 변경되었는데, 결과적으로 균열 폭을 직접 제한하는 방법보다 덜 엄격하여 일반적으로 균열이 철근량을 결정하는 지배적인 요소가 되지 않는다.

“철도설계기준(노반편)(2011) 10.6.4 (2) ③ 보 및 1방향 슬래브의 휨철근 배치”에서도 콘크리트구조설계기준의 규정을 따라 다음과 같이 규정하고 있다.

가~ 다. 생략

라. 콘크리트 인장연단에 가장 가까이에 배치되는 철근의 중심 간격 s 는 <식(10.6.4)>와 <식(10.6.5)>에 의해 계산된 값 중에서 작은 값 이하로 해야 한다.

$$s = 375 \cdot (210/f_s) - 2.5 C_c \quad (10.6.4)$$

$$s = 300 \cdot (210/f_s) \quad (10.6.5)$$

라. 여기서, C_c 는 인장철근이나 긴장재의 표면과 콘크리트 표면 사이의 최소두께이다. 중략. f_s 는 사용하중 상태에서 인장연단에서 가장 가까이에 위치한 철근의 응력으로 사용하중 휨모멘트에 대한 해석으로 결정해야 하지만, 근사값으로 f_y 의 2/3을 사용할 수 있다.

일반적으로 휨과 축방향력을 동시에 받는 철근콘크리트 부재에서는 축방향 압축력이 철근의 응력을 감소시키므로

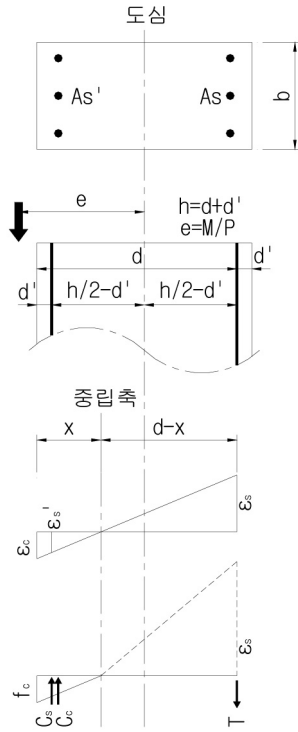


그림 1. 휨과 축방향력을 받는 부재

인장과외 부재라 하더라도 균열이 문제가 되지 않는다. 그런데 최근 NATM 터널의 콘크리트 라이닝 단면 설계에서, 단면의 강도는 휨과 축방향력을 받는 부재로 검토하면서 균열(철근의 배치)에 대해서는 휨부재로 검토하여 철근량을 과다하게 산출하고 있는 실정이다. 다시 말 해, 단면 강도 검토 시에는 모멘트와 축력을 모두 고려하면서 균열 검토 시에는 모멘트만을 고려함으로써 검토 내용에 일관성이 없는 과도한 안전측의 설계를 수행하고 있다.

이러한 상황이 발생하는 사유는, 일반적으로 터널 라이닝의 설계가 구조기술자가 아닌 터널기술자에 의해 이루어지고 있다는 점, 모멘트와 축력을 모두 고려하여 철근의 응력을 산정할 수 있는 간편한 식이 철근콘크리트 교재나 설계기준 및 편람 등에 제시된 바 없다는 점 등을 들 수 있다. 실제로 철근콘크리트 성립 요건인 응력과 변형률의 적합조건에 기초를 두고 모멘트와 축력을 모두 고려하여 철근의 응력을 산정하는 일반식을 유도해보면 너무 복잡하여 실무에 적용하기 어렵다는 것을 알게 된다.

지금부터 너무 복잡한 응력 산정의 일반식을 다소나마 단순화할 수 있도록, 철근이 대칭으로 배치된다는 가정 하에 모멘트 및 축력을 모두 고려하여 철근의 인장응력을 산정할 수 있는 식을 유도해보기로 한다. 보통 터널 콘크리트 라이닝에서는 철근이 대칭으로 배치되므로 실용적으로 의미 있는 가정이다.

인장철근과 압축철근을 함께 사용한, 휨과 축방향력을 받는 사각형 단면의 부재는 <그림 1>과 같이 나타낼 수 있다.

위 그림으로부터 철근의 변형률을 다음과 같이 콘크리트의 변형률로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\epsilon_s}{\epsilon_c} = \frac{d-x}{x} \rightarrow \epsilon_s = \epsilon_c \cdot \frac{d-x}{x}$$

$$\frac{\epsilon'_s}{\epsilon_c} = \frac{x-d'}{x} \rightarrow \epsilon'_s = \epsilon_c \cdot \frac{x-d'}{x}$$

여기서 ϵ_c , ϵ_s , ϵ'_s 각각 콘크리트, 인장철근, 압축철근의 변형률

d : 단면의 유효높이

d' : 압축철근 중심에서 압축연단까지의 거리

x : 압축 연단에서 중립축까지의 거리

콘크리트 및 철근의 응력을 변형률 및 탄성계수로 표현하면 다음과 같다.

$$f_c = E_c \cdot \epsilon_c, \quad f_s = E_s \cdot \epsilon_s, \quad f'_s = E_s \cdot \epsilon'_s$$

여기서 f_c , f_s , f'_s : 각각 콘크리트, 인장철근, 압축철근의 응력

E_c , E_s : 각각 콘크리트, 철근의 탄성계수

$\Sigma P = 0$ 으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$P = C_c + C_s - T \tag{식 1}$$

$$\text{여기서 } C_c = \frac{1}{2} f_c \cdot x \cdot b = \frac{1}{2} E_c \cdot \epsilon_c \cdot b \cdot x$$

$$C_s = A'_s \cdot f'_s = A'_s \cdot E_s \cdot \epsilon'_s = A'_s \cdot E_s \cdot \left(\epsilon_c \cdot \frac{x-d'}{x} \right)$$

$$T = A_s \cdot f_s = A_s \cdot E_s \cdot \epsilon_s = A_s \cdot E_s \cdot \left(\epsilon_c \cdot \frac{d-x}{x} \right)$$

C_c, C_s, T 를(식1)에 대입하면 다음 식과 같다.

$$P = \frac{1}{2} E_c \cdot \epsilon_c \cdot b \cdot x + A'_s \cdot E_s \cdot \left(\epsilon_c \cdot \frac{x-d'}{x} \right) - A_s \cdot E_s \cdot \left(\epsilon_c \cdot \frac{d-x}{x} \right) \quad (\text{식 2})$$

인장철근 도심에 대하여 $\Sigma M = 0$ 을 적용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$P \cdot \left(\frac{h}{2} - d' + e \right) = C_c \cdot \left(d - \frac{x}{3} \right) + C_s \cdot (d - d') \quad (\text{식 3})$$

$$P \cdot \left(\frac{h}{2} - d' + e \right) = \frac{1}{2} E_c \cdot \epsilon_c \cdot b \cdot x \cdot \left(d - \frac{x}{3} \right) + A'_s \cdot E_s \cdot \left(\epsilon_c \cdot \frac{x-d'}{x} \right) \cdot (d-d')$$

(식 2)를 ϵ_c 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\epsilon_c = \frac{2 \cdot P \cdot x}{E_c \cdot b \cdot x^2 + 2 \cdot A'_s \cdot E_s \cdot (x-d') - 2 \cdot A_s \cdot E_s \cdot (d-x)} \quad (\text{식 4})$$

다소 복잡하고 컴퓨터의 도움을 받아야 하기는 하지만, (식 4)를(식 3)에 대입하여 풀면 2개의 미지수 ϵ_c 와 x 를 구할 수 있으며, ϵ_c 와 x 로부터 인장철근에 대한 변형률 및 응력 f_s 를 구할 수 있다.

그러면 터널 콘크리트 라이닝에 대하여, 관행적으로 모멘트만 고려하여 응력을 산정한 경우와, 앞에서 유도된 바와 같이 모멘트와 축력을 모두 고려한 식에 의해 응력을 산정한 경우의 균열에 대한 안전성 검토 결과를 비교해본다. 비교 대상은 철도 현장의 실제 사례이며, 단면의 강도검토 시에는 모멘트 및 축력을 모두 고려하고 균열검토 시에는 모멘트만 고려하였다. 실제 설계의 결과와, 균열검토 시 모멘트와 축력을 모두 고려한 경우의 철근량 변화를 살펴본다.

<그림 2>는 실제 설계된 라이닝의 배근도이다.

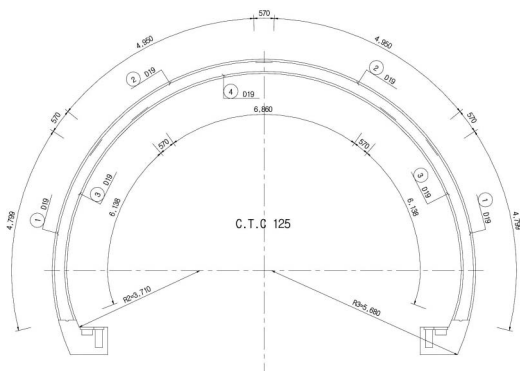


그림 2. 터널 라이닝 배근도 예

앞의 배근도에서 가장 불리한 천단부 단면에 대하여 단면의 강도를 검토한 결과, 사용 철근을 D19에서 D16으로 변경하여도 안전한 것으로 나타났다. 단면 폭 1m에 대하여 강도검토 결과만 표현하면 아래와 같다.

콘크리트 및 철근의 강도 : $f_{ck} = 27 \text{ MPa}, f_y = 400 \text{ MPa}$

단면의 두께 및 유효높이 : $h = 400 \text{ mm}, d = 340 \text{ mm}$

인장 및 압축부 사용철근 : $A_s = A'_s = 1588.8 \text{ mm}^2$ (D16@125)

계수하중에 의한 단면력 : $P_u = 1643.6 \text{ kN}, M_u = 251.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$

검토결과 단면의 설계강도 :

$\phi P_n = 2839.8 \text{ kN} > P_u = 1643.6 \text{ kN}$

$\phi M_n = 434.9 \text{ kN}\cdot\text{m} > M_u = 251.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$

앞의 검토에서 보듯이 단면의 강도에 대하여는 D16 철근으로도 충분히 안전하지만, 실제 설계에서는 균열검토 시 모멘트만 고려함으로써 불안정한 것으로 검토되어 철근의 규격을 D19로 상향 조정하였다. 균열검토 내용을 비교한 결과를 <표 1>에 수록하였다. 사용하중에 의한 단면력은 $P=1187.0 \text{ kN}, M=182.4 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 이다. 표에서 “비교 검토”는 균열검토 시 모멘트 및 축력을 모두 고려한 경우의 결과이다.

표의 결과에서 보는 것처럼, 균열검토 시 모멘트만 고려한 실제 설계에서는 D16 적용 시 철근 소요간격이 85.7mm로 배근간격 125mm를 초과하여 균열에 불안정한 것으로 나타남으로써 D19를 적용하였지만, 모멘트 및 축력을 모두 고려한 경우는 소요간격 1090.5mm로 안전에 대한 여유가 매우 큰 것으로 나타났다.

이 결과를 바탕으로 전체 주철근을 D19에서 D16으로 변경한다면 주철근량을 31% 줄일 수 있다는 결론을 얻는다.

표 1. 균열검토 결과

구 분	단면력 적용	철근량 (mm ²) A _s , A' _s	철근 응력 (MPa), f _s	소요간격 (mm), s	판정	
실제 설계	D16 적용 시	M만 적용	1588.8	365.1	85.7	NG
	D19 적용 시	M만 적용	2292.0	256.7	180.6	OK
비교 검토	D16 적용	M 및 P 적용	1588.8	57.8	1090.5	OK

지금까지의 검토 결과를 요약해보자.

휨과 축방향력을 받는 부재는 압축력으로 인하여 휨만 받는 부재보다 인장응력이 작으므로, 휨과 축방향력을 받는 부재로 단면 강도를 검토했다면 굳이 균열에 대한 검토를 할 필요는 없다고 판단된다. 다만 라이닝콘크리트와 같이 단면두께가 작아 불안하다고 생각하여 균열을 검토한다면 균열검토 시에도 축력을 고려하여 필요이상 과도한 규격의 철근이 사용되지 않도록 해야 한다.

3. 암거 등 지하구조물 구조해석 시 지반 스프링 간격

수로 및 통로암거, 지하철 및 지하차도 본선BOX 등의 구조해석에서 지반의 반력에 의해 구조물에 작용하는 상향력을 이상화하기 위하여 지반의 영향을 스프링으로 모델링하게 된다. 이 스프링의 반력이 암거의 하부슬래브에 집중하중으로 작용하여 지반 반력의 영향을 대신하는데, 지반 반력은 구조물 저면 전 면적에 분포하중과 같이 연속으로 작용하므로, 연속을 단속적 집중하중으로 대체하는 스프링의 간격이 좁을수록 실제 지반 반력이 구조물에 미치는 영향에 근접하고 스프링 간격이 넓을수록 실제 상황에서 멀어지게(부정확하게) 된다.

과거 지하철 설계에서 설계 자문위원이던 어떤 교수님께서 “지반스프링의 간격은 1m 정도가 적당하다.”고 말씀하신 이후에 지하구조물에서 스프링은 1m 내외의 간격이 정답인 것으로 여겨져 모든 설계자들이 이를 준용하여 왔다. 폭이 넓은 지하차도나 지하철의 정거장과 같이 하부슬래브의 경간장이 큰 경우에는 스프링 간격을 1m 내외로 하더라도 문제없지만, 폭 또는 하부슬래브 경간장(벽체와 벽체 중심사이 또는 벽체와 기둥 중심사이 간격) 2m~5m 정도인

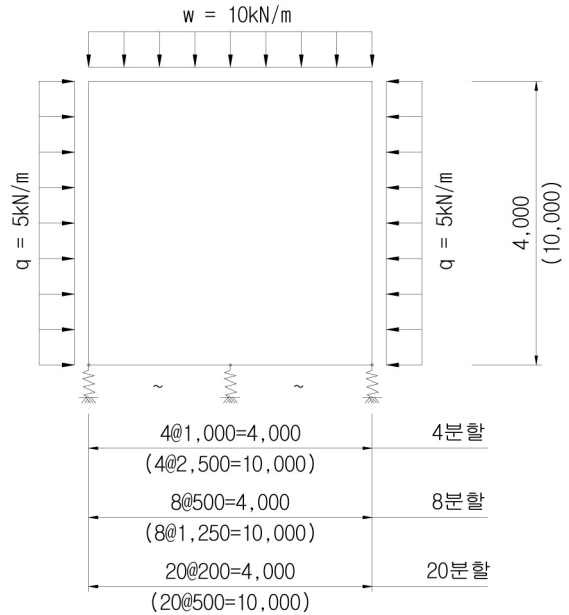


그림 3. 해석모델

수로암거나 지하철 본선BOX 등은 1m 내외의 간격으로 배치할 때 스프링 개수가 적어 집중하중인 스프링 반력이 분포하중인 지반반력을 이상화한다고 보기 어렵게 된다.

하부슬래브 경간장 4m와 10m인 가상의 구조물을 예로 스프링 간격의 적정성을 살펴보기로 한다. 이 때 콘크리트 강도는 24MPa, 단면 상수는 각각 두께 0.4m 및 1.0m로 하여 계산하였다.

각각의 경우에 대해 스프링에 의하여 4분할되는 경우, 8분할되는 경우, 20분할되는 경우에 대하여 구조해석을 수행하여 비교해 보는데, 20분할되는 경우는 하부 슬래브가 충분히 조밀하게 나누어져 분포하중으로 작용하는 지반반력의 영향을 정확하게 반영하는 것으로 본다. 이 때 상부에 작용하는 하중은 10kN/m, 측벽에 작용하는 하중은 5kN/m로 가정한다. 4분할 및 8분할되는 경우 결과 값을

표 2. 스프링계수

구 분		경간장 4m	경간장 10m
내측	4분할	$50,000 \times 4m / 4 = 50,000kN/m$	$50,000 \times 10m / 4 = 125,000kN/m$
	8분할	$50,000 \times 4m / 8 = 25,000kN/m$	$50,000 \times 10m / 8 = 62,500kN/m$
	20분할	$50,000 \times 4m / 20 = 10,000kN/m$	$50,000 \times 10m / 20 = 25,000kN/m$
외측		내측 스프링의 1/2	내측 스프링의 1/2

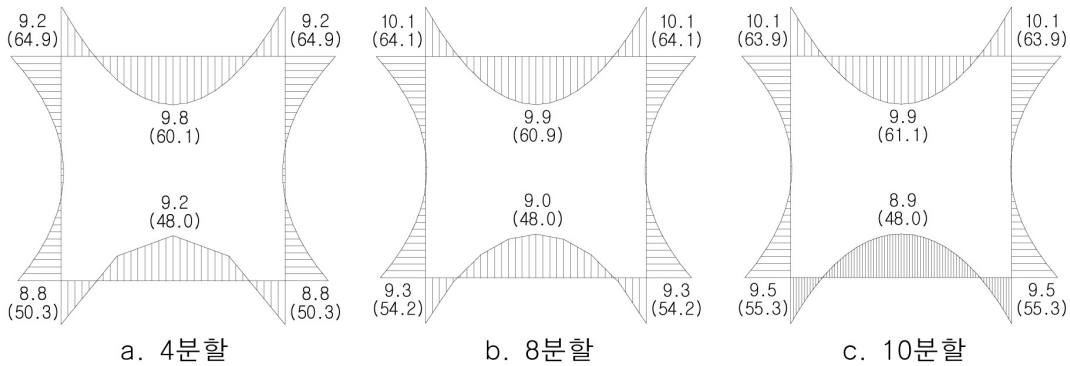


그림 4. 해석결과(BMD)

20분할된 경우(정확한 해라고 보는)의 결과와 단순히 정확도를 비교하기 위한 것이므로 하중의 크기는 별 의미가 없다. 지반반력계수는 풍화토 정도의 값에 해당하는 50,000kN/m³로 가정한다.

각각에 대한 해석모델 및 스프링계수는 <그림 3>, <표 2>과 같으며, 해석결과는 <그림 4>와 같다.

<그림 4> 해석결과 모멘트 값에서 괄호 밖은 경간장 4m, 괄호 안은 경간장 10m의 결과이다.

해석 결과 모멘트 값에 대하여 20분할한 결과를 정해로 보고 4분할 및 8분할한 경우의 결과 값 오차를 정리하면 <표 3>와 같다.

단면의 강성이나 스프링의 강도, 하중의 형태 등에 따라 결과에 차이는 있겠지만, 표의 결과에 따르면, 정모멘트 값은 경간장 4m에서 4분할된 경우가 오차가 크기는 하지만 오차의 절대값이 작으며, 경간장 10m에서는 오차가 거의 없는 것으로 나타났다. 반면 부모멘트에서는 두 경간장 모두 4분할된 경우 오차가 각각 7.4% 및 9.0%로 값의 크기가 비슷하고 의미 있는 오차가 발생하였는데 이 오차는 정해보다 모멘트가 작아지는 쪽이므로 불안전측의 오차이므로 최소화시켜야 하며, 8분할된 경우는 모두 오차 2% 정도로

실용적으로는 무시할 수 있는 작은 오차만 발생하였다.

4분할된 경우 경간장 4m인 경우는 스프링 간격 1.0m, 경간장 10m인 경우는 스프링 간격 2.5m로 차이가 있지만 결과의 오차비율이 유사하며, 8분할된 경우도 경간장 4m인 경우는 스프링 간격 0.5m, 경간장 10m인 경우는 1.25m로 차이가 있지만 결과의 오차비율이 거의 같은 것으로 나타났다. 즉 결과의 정확도는 스프링 간격의 절대값이 아니라 스프링이 설치되는 바닥슬래브가 어떻게 분할되는지에 좌우됨을 알 수 있다.

따라서 수로암거와 같은 소형 구조물에서 적절한 결과를 도출하기 위해서는 스프링의 간격을 1m 내외로 설치하는 것이 아니고 8분할 정도가 되도록 더 좁은 간격으로 설치해야 하며, 반대로 폭이 큰 구조물에서는 1m 간격으로 스프링을 설치하기 위하여 필요 이상으로 많은 스프링을 설치할 필요는 없을 것으로 판단된다.

4. 힘철근의 정착

힘철근의 정착은 콘크리트 속에 매입된 철근이 콘크리

표 3. 모멘트 오차

구 분		경간장 4m	경간장 10m
정모멘트	4분할	$(9.2 - 8.9) / 8.9 \times 100 = 3.4\%$	-
	8분할	$(9.0 - 8.9) / 8.9 \times 100 = 1.1\%$	-
부모멘트	4분할	$(8.8 - 9.5) / 9.5 \times 100 = 7.4\%$	$(50.3 - 55.3) / 55.3 \times 100 = 9.0\%$
	8분할	$(9.3 - 9.5) / 9.5 \times 100 = 2.1\%$	$(54.2 - 55.3) / 55.3 \times 100 = 2.0\%$

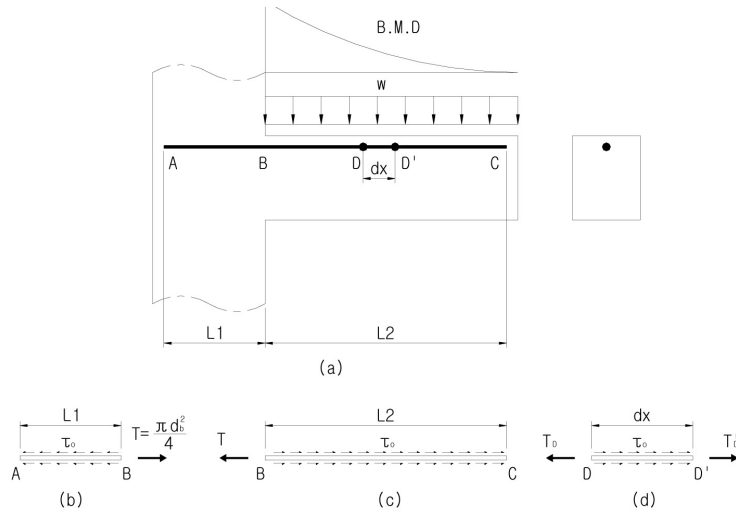


그림 5. 정착에 대한 개요도

트와 일체로 거동하여 하나의 철근콘크리트 구조부재 역할을 할 수 있도록 보장하는 중요한 기능이다. 정착길이가 부족하면 힘 인장철근의 단부가 콘크리트에서 빠져나와 (활동) 콘크리트와 일체로 거동하지 않으므로 철근콘크리트로서의 기능을 수행할 수 없게 된다.

이러한 정착이 중요하게 다루어지는 것이야 당연하지만, 일부 기술자들은 정착 방법에 대한 정확한 이해가 부족한 경우가 있으며, 심지어 모멘트가 끝나는(Zero) 점에서 철근의 정착길이를 확보하여야 한다고 생각하는 실무자들도 의외로 많다. 정착에 대한 이해가 부정확한 상태에서 중요하다는 인식만 가지고 있다 보니 대부분 실무에서 정착길이를 과도하게 적용하는 경향이 있다.

정착길이의 의미를 짚고 넘어가기로 한다.

<그림 5>의 (a) 에서와 같은 캔티레버를 생각해 보자. 고정지점 속에 묻힌 철근 AB 부분은 모멘트 최대인 B점에서 작용하는 철근의 최대 인장력(또는 인장응력)을 모멘트가 없는 콘크리트 부분에 전달해야 하는데, 이 인장력을 전달하기 위해서는 철근과 콘크리트 사이의 미끄럼에 저항하는 부착응력이 발생하며 이 부착응력의 합(부착력)이 철근의 인장력보다 커지는 매입길이를 가져야 하는데 이 길이가 정착길이이다. 즉 L_1 이 정착길이보다 작지 않아야 한다.

BC 부분은 모멘트가 변화하는 구간으로 모멘트가 없는

구간에 정착시키는 AB 부분과는 다른 것으로 보일 수도 있다. 우선 BC 구간 중의 미소구간(DD')을 생각해 보면, 이 구간에서 필요한 부착력은 dx 길이 내에서 변화하는 인장력의 변화량($T_D - T_{D'}$)보다 크면 된다. 이 철근 인장력의 변화량은 모멘트의 변화량에서 기인한다. 이를 확장하여 모멘트가 발생하는 전체 BC 구간을 생각하면 전체 부착력은 구간 전체 모멘트의 변화량(모멘트 최대값-0)으로부터 기인하는 인장력의 변화량, 즉 AB 구간과 마찬가지로 모멘트 최대인 B점에서 작용하는 최대 인장력보다 크면 된다. 다시 말해 L_2 가 정착길이보다 크면 된다.

결국 AB 구간이나 BC 구간 모두 최대 인장력 발생점을 기준으로 정착길이를 확보하면 철근과 콘크리트 사이의 활동을 방지하여 철근콘크리트로서의 기능을 만족할 수 있다.

이번에는 설계기준상의 힘철근 정착 방법에 대하여 살펴본다.

“철도설계기준(노반편)(2011) 10.5.5 (1) 힘철근의 정착일반”규정은 다음과 같다. 콘크리트구조설계기준의 규정도 동일하다.

① 생략

② 힘철근은 휨모멘트를 저항하는데 더 이상 철근을 요구하지 않는 점에서 부재의 유효깊이 d 또는 $12db$ 중

큰 값 이상 더 연장되어야 한다. 다만 단순경간의 받침부와 캔티레버의 자유단에서 이 규정은 적용되지 않는다.

③~⑤ 생략

⑥ 휨철근은 다음 조건 중 하나를 만족하지 않는 한 인장구역에서 절단할 수 없으며, 원칙적으로 전체 철근량의 50%를 초과하여 한 단면에서 절단하지 않아야 한다.

가. 절단점의 전단력이 전단철근에 의해 보강된 전단강

도를 포함한 전체 전단강도의 2/3를 초과하지 않는 경우.

나. 다. 생략

앞에서 살펴본 정착길이의 의미와 설계기준의 조항을 연속보에 적용하여 그림으로 표현하면 <그림 6>와 같다.

이 그림에서, 정모멘트의 a'철근(2단 철근 또는 2-Cycle 철근)은 인장응력 최대점이 보의 중앙(점 C)이므로 C에서 좌측으로 정착길이 l_d 이상 연장되어야 하며, 동시에 a'철근이 더 이상 필요하지 않은 점(x_a)에서 "d 또는 $12d_b$ 중 큰 값 이상" 연장되어야 한다. 또 a'철근(1단 철근 또는 1-Cycle 철근)은 인장응력 최대점이 x_a 점이므로 x_a 점에서 좌측으로 정착길이 l_d 이상, 또 a'철근이 더 이상 필요하지 않은 점(정모멘트 반곡점 PI)에서 "d 또는 $12d_b$ 중 큰 값 이상"의 두 조건을 만족하여야 한다.

마찬가지로 부모멘트의 b'철근(2단 철근 또는 2-Cycle 철근)은 인장응력 최대점이 보의 지점(점 S)이므로 S에서 우측으로 정착길이 l_d 이상 연장되어야 하며, 동시에 b'철근이 더 이상 필요하지 않은 점(x_b)에서 "d 또는 $12d_b$ 중 큰 값 이상" 연장되어야 한다. 또 b'철근(1단 철근 또는 1-Cycle 철근)은 인장응력 최대점이 x_b 점이므로 x_b 점에서 우측으로 정착길이 l_d 이상, 또 b'철근이 더 이상 필요하지 않은 점(부모멘트 반곡점 PI)에서 "d 또는 $12d_b$ 중 큰 값 이상"의 두 조

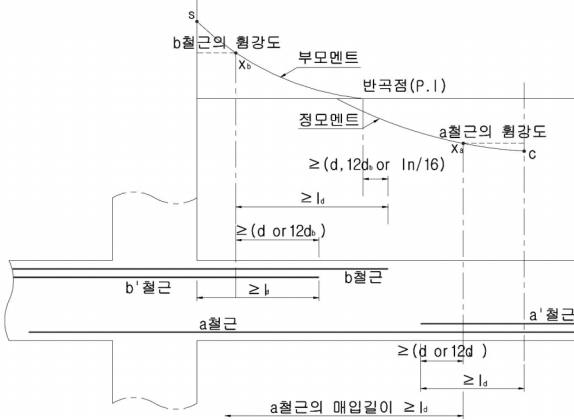
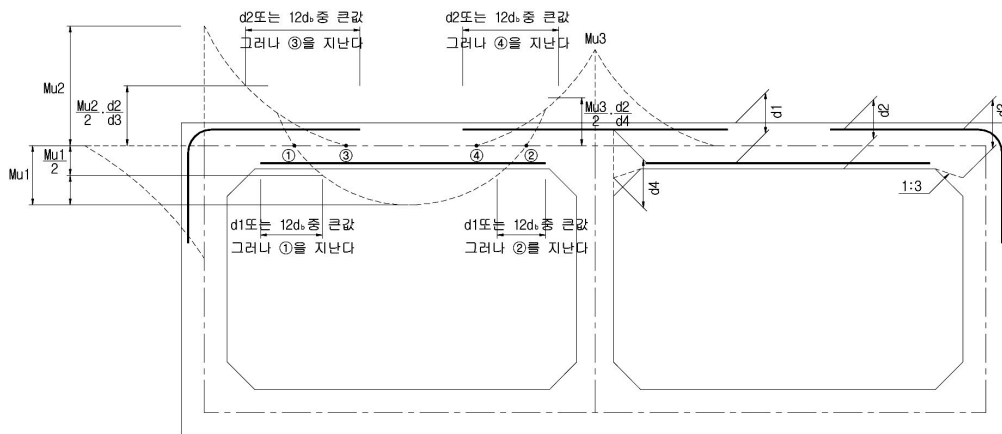


그림 6. 연속보의 휨철근 정착



※ d_b : 해당 주철근의 직경

※ 점 ①, ②, ③, ④ : 정·부 모멘트 0인 점의 위치

그림 7. 휨철근 절단의 실용적 방법

건을 만족하여야 한다.

위의 조건을 만족하더라도 a' 또는 b' 철근을 인장부(반곡점을 지나지 않은 점)에서 절단하기 위해서는 앞에 적은 설계기준 ⑥항의 복잡한 단서조항을 만족해야 하므로 2단 또는 2-Cycle 철근도 모멘트 0인 점까지 연장하는 것이 실용적이다.

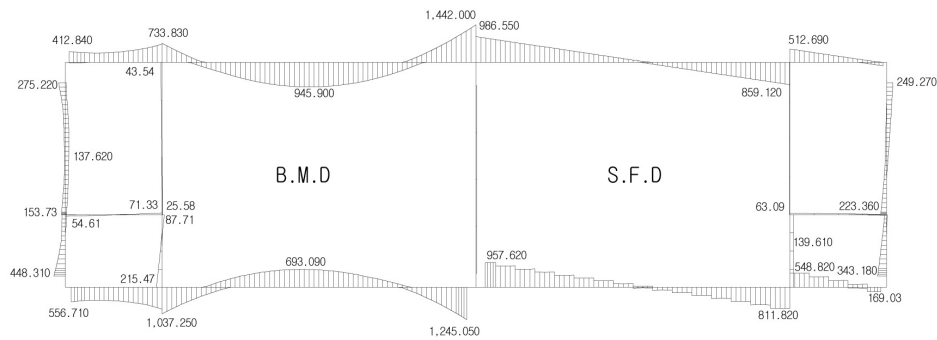
매 단면마다 a 또는 b 철근의 모멘트 강도를 계산하여 a' 또는 b' 철근이 필요하지 않은 점(x_a 또는 x_b)을 계산하는 것은 번잡하므로 <그림 7>과 같이 BMD에서 작도하는 방법을 추천한다. Md는 Mu값보다 크므로 그림과 같은 작도법은 안전측의 결과를 준다.

실제 설계 및 시공되는 지하차도(2-Cycle 철근 정착길

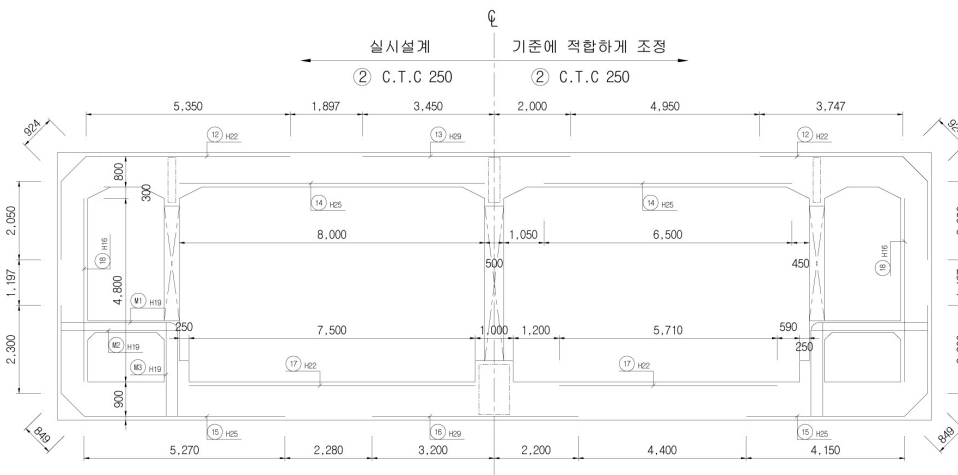
이가 과도하게 적용된 실제 사례)를, 지금까지 살펴본 방법에 따라 적절하게 철근 절단위치를 조정하여 <그림 8>에 표현하였다. 여기서 단면 좌측은 과도한 실제 설계단면을, 우측은 절단위치를 기준에 적합하게 맞춘 조정단면을 표현하였다. 좌·우 두 단면을 비교해보면 2-Cycle 주철근의 길이가 현저하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

5. 허용 지지력 등 외적 안정 허용력 할증

교량을 지지하는 교대나 교각, 라멘구조 등에서 상부구조로부터 전달되는 하중을 지반으로 전달하는 구조물 기



(a) 단면력도



(b) 주철근 조립도(2-Cycle)

그림 8. 절단위치 조정 사례

초는 기초의 구속조건에 따라 안정조건을 만족해야 한다. 즉 기초를 고정단으로 보았다면 지지력, 전도, 활동에 대한 안정조건을 만족해야 하고 힌지로 보았다면 지지력 및 활동에 대한 안정조건을 만족해야 한다. 설계기준에서 안정조건은 안전율로 규정하고 있는데, 이 때 보통 설계자들은 평상시와 지진시로 구분하여 안정조건 규정을 적용한다.

허용응력설계법에 의해 하부구조 구조물을 설계하는 경우와 비교해보자. 구조물 설계시의 부재 안전은 발생응력이 허용응력을 만족하는가로 판단하는데, 구조부재의 허용응력은 재료가 가지고 있는 강도를 소정의 안전율로 나누어 구하므로 안전율로 규정하는 기초 안정조건과 기본적으로 개념이 동일하다고 볼 수 있다. 다만 일반적인 교량 설계에서 실무자들은, 기초의 안정에 대해서는 평상시와 지진시의 2가지 경우로 구분하고, 구조부재 설계에서는 허용응력을 발생 빈도(확률)에 따라 세분화한 규정을 적용한다는 차이가 있다. 예를 들면, 온도하중이 포함되면 1.15, 풍하중이 포함되면 1.25, 충돌하중이 포함되면 1.5 등과 같은 다양한 증가계수를 허용응력(평상시)에 곱하여 해당 조합의 허용응력을 산정한다.

구조부재 설계 시 허용응력은 하중조합 조건에 따라 다양하게 적용하는 반면 기초 안정검토 시 안전율은 2가지 경우만으로 구분하여 적용하는 것이 타당한지 살펴본다. 우선, 국내 각종 설계기준에 제시된 기초 안정조건 규정을 살펴보면 <표 4>와 같다.

위 각 설계기준들의 의미를 파악하고 종합해보면 안정검토시의 조건은 평상시, 폭풍시, 지진시로 구분할 수 있고, 폭풍시(풍하중 재하시)는 지진시의 안정조건을 준수하면 된다는 결론을 얻을 수 있다. 현재 설계 실무자들은 풍하중이 재하되어도 평상시의 안정조건을 적용하고 있는데, 위의 결론과 같이 지진시 안정조건을 준용하면 고교각이면서 상부구조부재 높이가 커서 풍하중이 중요한 경우에 기초의 규격을 줄일 수도 있을 것으로 보인다.

그러나 현재까지 설계해온 관행 및 안전에 여유를 크게 두고 싶어 하는 설계심리에 비추어볼 때 풍하중 재하시에 대하여 갑자기 지진시의 안전율을 적용하는 것은 심리적 저항이 클 것으로 판단된다. 따라서 절충 방법으로 구조물 기초의 안전율도, 발생 빈도에 따라, 구조부재 설계의 허용응력 증가계수 값을 동일하게 적용하는 방법을 생각해본

표 4. 구조물 기초 안정조건에 관한 규정

설계기준	위 치	내 용
철도설계기준 (교량편), 2004	제4편 5.2.2	하중조합에 지진의 영향을 고려하는 경우에는 지진시의 하중상태를, 풍하중을 고려하는 경우에는 폭풍시의 하중상태를 고려해서 안정계산을 한다.
	제4편 6.1 (3)	~ 합력이 작용하는 위치는 평상시에는 저면의 중심으로부터 저면폭의 1/6 이내, 지진시에는 저면폭의 1/3 이내에 있어야 한다. 폭풍시 전도모멘트에 대한 안정성 검토는 지진시에 준한다.
도로교설계기준해설, 2008	5.5.3 (4)	기초의 안정성 검토는 하중조합에 따라 평상시, 폭풍시로 구분하여 수행한다. 단, 지진을 고려하는 기초는 6.6의 규정에 따른다.
	5.5.3 (4) 해설	하중조합에 따라 평상시와 폭풍시로 구분하여 풍하중을 고려하는 경우에는 폭풍시 하중상태를 사용하여 안정계산을 실시한다. 여기서 안정계산상 폭풍시의 각 허용값의 산정은 지진시의 방법에 준하는 것으로 하여 안전율은 지진시 규정하는 값을 준용해도 좋다.
	5.6.2 (2)	직접기초에 작용하는 하중의 합력이 작용하는 위치는 평상시에는 바닥면의 중심으로부터 바닥면 폭의 1/6 이내, 지진시와 폭풍시에는 바닥면 폭의 1/3 이내에 있어야 한다.
도로교설계기준, 2010	5.5.3 (4) 5.6.2 (2)	"도로교설계기준 해설, 2008"과 같음
구조물 기초 설계기준 해설, 2009	4.2.2 해설 (1)	안전율은 사하중과 최대 활하중에 대해서는 3.0을 적용하고, 활하중의 일부가 일시적으로 작용하는 때(지진, 눈, 바람 등)는 2.0을 적용한다.

※ 철도교설계기준(2011)은 기초 안정에 대한 원칙만 제시하고 세부기준은 없으므로 검토에서 제외하였고, 도로교설계기준(2012)은 한계상태 설계법 적용으로 안정에 대한 규정 방법이 다르므로 검토에서 제외함.

다. 예를 들어 평상시 안전율이 3.0이라면, 온도하중이 포함되면 3.0/1.15, 풍하중이 포함되면 3.0/1.25, 충돌하중이 포함되면 3.0/1.5 등과 같이 적용하는 것이다. 이 방법이 허용응력 설계법의 개념에 가장 충실한 방법이라고 생각된다.

6. 맺음말

지금까지 2회에 걸쳐 설계자들이 관행적으로 잘못 적용하고 있다고 판단되는 몇 가지 설계기준 적용 내용을 살펴

보고 정확한 적용방법 또는 대안을 검토하였다. 물론 본고에서 제시된 방법을 적용하면 오히려 지금까지 아무 문제 없이 통과되던 심의나 자문, 설계감리 등의 과정에서 문제를 일으킴으로써 설계자가 피곤해질 수도 있을 것으로 생각된다.

그러나 국가 예산을 절약한다는 거창한 명분이 아니더라도, 설계 기술자로서, 현재 설계 방법과는 다르지만, 옳다고 스스로 확신이 있는 항목에 한해서는, 한번쯤은 다소 어려움을 겪더라도 끝까지 관찰시키기 위해 노력하는 행위는 본인의 발전에도 큰 도움이 되리라고 생각한다. ☺