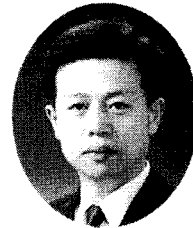


수축·온도 철근에 의한 벽체형 철근 콘크리트 구조물의 균열 제어

- Crack Control of Wall type Structures by Shrinkage and Temperature Reinforcement -



김영진*



김상철**

1. 개요

지하철 구조물과 같은 매스 콘크리트 구조물을 시공할 때 온도 측정을 하는 경우는 많으나 이는 내외부 온도차를 적정한 수준으로 유지하여 균열 발생을 제어하기 위한 수단일 뿐 균열폭을 일정한도 내로 제어할 수 있는 조치는 아니다. 매스 콘크리트 구조물에서 균열폭을 제한 값 이하로 하기 위해서는 적절한 양의 철근을 배치하여야 한다. 또한 시공 이음 등을 작은 간격으로 설치하는 것은 구속도를 완화시키고 온도응력이나 균열폭을 저감시켜 균열 제어상 매우 효과적인 수단이 될 수 있다. 그러나 시공 이음, 균열 유발 줄눈 등의 이음간 간격을 좁히면 내하력, 수밀성, 내구성 등에 악영향을 미칠 가능성이 높고, 타설 회수가 많아져 동일한 공정이 반복 투입되므로 시공 속도의 저하 및 공사비 상승 등의 단점이 나타날 수 있다.

따라서 발생하는 균열폭을 허용 균열폭 이하로 억제하기 위해서는 구조물의 기능, 설계 및 시공상 지장이 없는 범위에서 이

음간 간격을 가능한 한 최소로 하고 철근을 배근하는 것이 균열 제어에 효과적이다. 철근은 직경이 굵은 철근을 넓은 간격으로 배근하는 것보다 직경이 가는 철근을 좁은 간격으로 배근하는 것이 균열 제어에 유리한 것으로 나타나고 있다.^{1, 2)} 철근에 의해서 균열폭을 제어하기 위해서는 허용 균열폭에 대응되는 적절한 양의 철근을 배근 해야하는 데, 이 때 요구되는 철근량의 산정은 온도 강하량, 구조물의 구속 조건, 구속도 및 허용 균열폭 등과 매우 긴밀한 관계가 있으므로 철근량 산정시에는 이들 조건을 고려한 후에 산정하여야 한다.

2. 수축·온도 철근에 대한 시방서 규정

2.1 국내 시방서 규정

〈표 1 ~ 2〉는 각각 1996년도 「콘크리트표준시방서」, 1999년 「콘크리트구조설계기준」에서 각 부재별로 요구되는 최소 수축·온도 철근비를 정리한 것이다^{3, 4)}. 1996년 「콘크리트표준시방서」에는 수평 철근, 건조수축 및 온도 철근 등의 용어를 사용하고 있으나 혼동을 방지하기 위해 1999년 「콘크리트표준시방서」 상의 용어

표 1. 1996년 「콘크리트표준시방서」 상의 수축·온도 철근 규정

부재	규정	비고
벽체	- $f_y \geq 4,000 \text{ kgf/cm}^2$, D16 이하인 이형 철근 : 0.0020 - 그 외의 이형 철근 : 0.0025 - #10선 이하의 용접 강선망(보통 또는 이형) : 0.0020	제10장 벽체, pp.257~258, 최소 수평철근비 규정
슬래브	- $f_y \leq 3,500 \text{ kgf/cm}^2$ 인 이형 철근 : 0.0020 - $f_y = 4,000 \text{ kgf/cm}^2$ 인 이형 철근 또는 용접 강선망 : 0.0018 - 0.0035의 항복변형률에서 측정된 철근의 항복강도가 $4,000 \text{ kgf/cm}^2$ 을 초과할 때 : $\{(0.0018 \times 4,000)/f_y\} \geq 0.0014$	제8장 철근 세목, p.214, 바닥 슬래브와 지붕 슬래브에서 휩철근이 일방향으로 배치된 경우
박스 구조	- 수축·온도 철근은 벽체와 슬래브의 표면 가까이 설치	제16장 박스 구조, p.307
아치	- 아치 상하면 : 축방향 철근에 직각인 횡방향 배력 철근 배근 - 횡방향 철근 : D13이상, 간격은 축방향 철근 지름의 3배 이하 또는 30 cm 이하	제18장 아치, p.317

* 정회원, 대우건설 기술연구소 수석연구원

** 정회원, 한서대학교 토목공학과 교수

표 2. 1999년 「콘크리트구조설계기준」 상의 수축·온도 철근 규정

부재	규정	비고
벽체	- $f_y \geq 4,000 \text{ kgf/cm}^2$, D16 이하인 이형 철근 : 0.0020 - 그 외의 이형 철근 : 0.0025 - 지름 16 mm 이하의 용접 철망 : 0.0020	제11장 벽체, pp.220 ~ 221 최소 수평철근비 규정
슬래브	- $f_y \leq 4,000 \text{ kgf/cm}^2$ 인 이형 철근 : 0.0020 - 0.0035의 항복변형률에서 측정된 철근의 설계기준항복강도가 $4,000 \text{ kgf/cm}^2$ 을 초과할 때 : $\{(0.0020 \times 4,000)/f_y\}$ - 어떤 경우라도 0.0014 이상	제5장 철근 세목, p.103 슬래브에서 휨철근이 일방향으로 배근된 경우, 심하게 구속된 경우는 증가
아치	- 아치 상하면 : 종방향 철근에 직각인 횡방향 배력 철근 배근 - 횡방향 철근 : D13 이상, 간격은 종방향 철근 지름의 30배 이하 또는 30 cm 이하	제14장 아치, p.238

표 3. 「서울지하철9호선설계기준」 상의 수축·온도 철근 규정

구분	규정	비고
건조수축 및 온도에 대한 철근	- 휨철근이 1방향으로 배치된 경우 - 휨철근에 직각 방향으로 배근 - 온도에 대한 구조 거동을 검토하지 않는 한 $P_{mn} = 0.004$ 이상, 주철근량 미만의 철근 배근	제2편 구조물, p.68, 배력 철근과 건조수축 및 온도에 대한 철근이 동일한 철근인 경우가 대부분이므로 2가지 철근량 중 큰 값을 적용하도록 하고 있다.
배력 철근	- 슬래브 및 벽체의 배력 철근량은 주 철근량의 1/5 이상 또는 온도 철근량($p = 0.004$) 이상, 주철근량 이하 - 철근간격 : 15 ~ 30 cm이고, 노출면의 철근 간격은 15 cm 이하	

표 4. 일본 「콘크리트표준시방서」의 수축·온도 철근 규정

부재	규정	비고
벽체	- 연직 방향 철근량 : 콘크리트 단면적의 0.4 % 이상, 4 % 이하 - 수평 방향 철근 : 연직 방향 철근 직경의 1/4 이상, 특히 13 mm 이상, 배근 간격 < 30 cm	12장 부재의 설계, p.202, 12.9 벽
아치	- 아치 상하면 : 축방향 철근에 직각인 횡방향 배력 철근 배근 - 횡방향 철근 : D13 이상, 간격은 축방향 철근 지름의 15배 이하	12장 부재의 설계, p.176, 12.4 아치

표 5. 「ACI 318-99」의 수축·온도 철근 규정

부재	규정	비고
벽체	- $f_y \geq 4,000 \text{ kgf/cm}^2$, D16 이하인 이형 철근 : 0.0020 - 그 외의 이형 철근 : 0.0025 - 지름 16 mm 이하의 용접 철망 : 0.0020	제14장 벽체, 14.3절, 최소 수평 철근비 규정
슬래브	- $f_y = 2,800$ 또는 $3,500 \text{ kgf/cm}^2$ 인 이형 철근 : 0.0020 - $f_y = 4,000 \text{ kgf/cm}^2$ 인 이형 철근 또는 용접 강선망 : 0.0018 - 0.0035의 항복변형률에서 측정된 철근의 설계기준 항복강도가 $4,000 \text{ kgf/cm}^2$ 을 초과할 때 : $\{(0.0018 \times 4,000)/f_y\}$ - 어떤 경우라도 0.0014 이상	제7장 슬래브, 7.12절, 슬래브에서 휨철근이 일방향으로 배근된 경우, 심하게 구속된 경우는 증가

인 '수축·온도 철근'으로 통일하여 정리하였다.

한편 <표 3>은 「서울지하철9호선설계기준(토목분야)」의 건조수축 및 온도에 대한 철근, 배력 철근 규정을 정리한 것이다.⁵⁾

2.2 일본 콘크리트표준시방서 규정⁶⁾

일본 토목학회 제정 「콘크리트표준시방서」에는 하중에 의한 균열을 제어하기 위한 철근 외에 콘크리트의 수축 및 온도 변화 등에 의한 균열을 제어하기 위해 부

재의 표면부, 시공 이음부 등에 용심철근(用心鐵筋)을 배근하도록 하고 있다. 용심철근은 가는 철근을 좁은 간격으로 노출면에 가까이 배근하도록 하고 있고, 옹벽 등에서는 수평 방향으로 벽 높이 1 m 당 500 mm^2 이상의 단면적으로 갖는 철근을 중심간격 300 mm 이하로 배근하도록 하고 있다. 관련 규정을 정리하면 <표 4>와 같다.

2.3 ACI시방서 규정

<표 5>는 「ACI 318-99」의 7.12 “shrinkage and temperature reinforcement”의 규정이다.⁷⁾

3. 수축·온도 철근에 의한 균열 제어 효과

3.1 수축·온도 철근에 의한 균열폭 제어 효과

수축·온도 철근의 배근은 균열 제어 대책 중 지향형 대책의 하나로, 발생 가능한 균열폭과 직교하는 방향으로 철근을 배근하여 균열폭을 제어하고자 하는 것이다. <그림 1>은 철근비를 변수로 해석한 균열폭과 경과 시간과의 관계이다. 한편 <그림 2>는 최대 균열폭과 수축·온도 철근 응력간의 관계이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 최대 균열폭을 0.2 mm 이하로 제어하기 위해서는 수축·온도 철근 응력을 약 $1,400 \text{ kgf/cm}^2$ 정도 이하로 제어하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

3.2 최소 수축·온도 철근량

문헌에 의하면 수축 줄눈(contraction joint)없이 균열을 완전히 제어하기 위해 필요한 철근량은 0.65 %라고 보고되고 있다⁹⁾. <표 1 ~ 표 5>의 각 시방서 규정은 균열을 제어하기 위한 최소값이며, 실제로는 외부 구속 등으로 인하여 그 이상의 철근량이 요구된다. <그림 3>은 수밀 구조물인 경우에 요구되는 최소 수축·온도 철근량 산출을 나타내고 있다^{10), 11)}. <그림 3>에서 제시된 철근량은 수평철근 방향으로

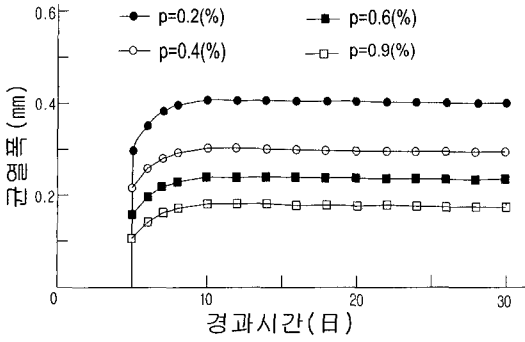


그림 1. 균열폭과 경과 시간과의 관계¹⁾

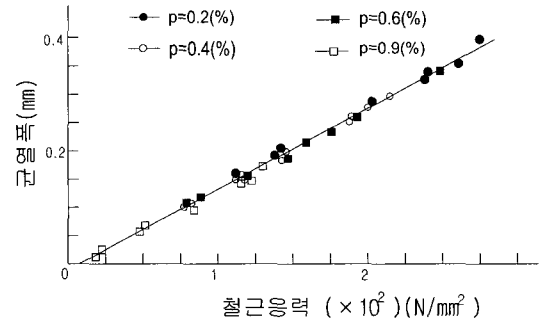


그림 2. 최대 균열폭과 수축·온도 철근 응력과의 관계¹⁾

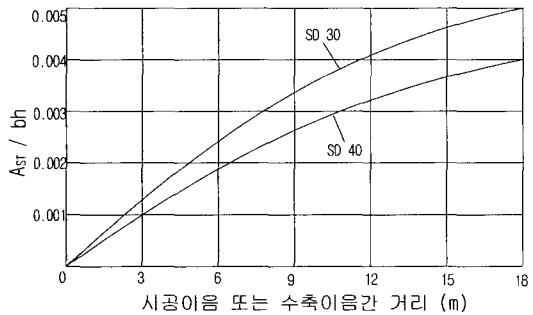


그림 3. 철근의 설계기준 항복강도와 최소 수축·온도 철근량과의 관계¹⁾

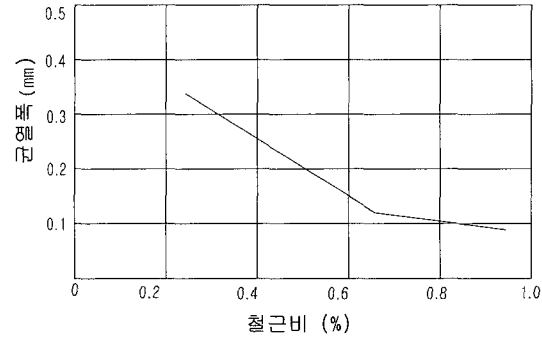


그림 4. 균열폭 - 철근비 관계의 일 예¹⁾

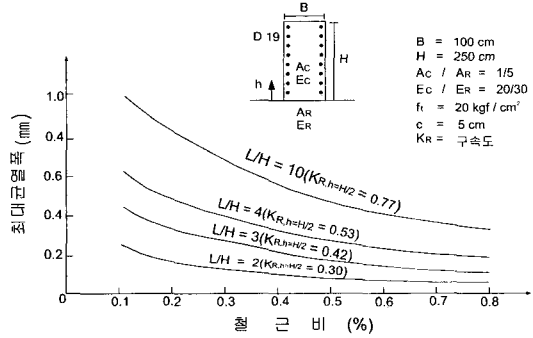


그림 5. (최대 균열폭 - L/H비 - 철근비)와의 관계¹⁾

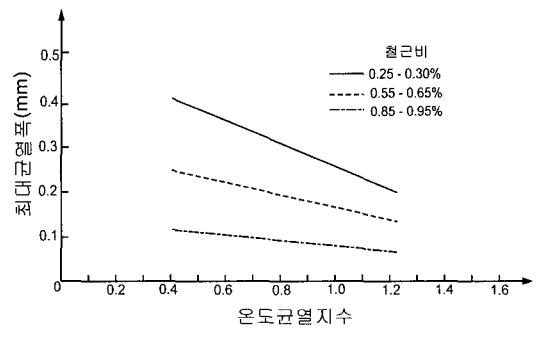


그림 6. 최대 균열폭과 온도 균열 지수와의 관계⁴⁾

수축·온도 응력의 크기가 감소 되는 이음간 거리의 함수로 산정된 것이다¹⁾. <그림 3>에서와 같이 설계기준 항복강도 3,000 kgf/cm² 보다는 4,000 kgf/cm²의 경우가 요구되는 철근량이 감소되는 것을 알 수 있다. 또한 최대 시공 이음 또는 수축 이음간 간격이 18m이고 설계기준 항복강도가 4,000 kgf/cm²인 경우, 요구되는 최소 수축·온도 철근량은 콘크리트 전체 단면적의 0.4%인 것을 알 수 있다. 이에 근거하여 판단하면 「서울지하철9호선설계기준」에서 요구하고 있는 최소 수축·온도 철근비 0.4%를 배근하여 균열 제어를 얻기 위해서는 18m 정도마다 시공 이

음 또는 수축 이음이 설치되어야 균열 제어가 가능하다는 사실을 추정할 수 있다. 그러나 만일 수축보상 콘크리트(shrink-age compensating concrete)를 사용할 경우에는 수축 이음 또는 시공 이음의 간격은 최대 22.9m까지 늘일 수 있고 철근량도 0.3% 정도만 요구된다.¹⁾

3.3 온도 균열폭의 제어

<그림 4>는 균열폭과 철근비와의 관계를 나타낸 일례이다. <그림 4>에서와 같이 통상 배근되는 0.2~0.3% 정도의 철근량에서는 균열폭이 0.3~0.4mm이고,

0.6% 전후의 철근량을 배근하면 균열폭은 약 50% 정도 감소되는 것으로 나타나고 있다. 철근에 의한 균열 제어 기구는 균열 단면 및 인근 단면에서의 철근 변형률이 철근량의 증가에 따라 변형률 최대치가 감소되어 콘크리트와 철근이 완전히 부착되기 때문인 것으로 보고되고 있다¹⁾. 균열폭에 미치는 저면 구속의 영향은 매우 큰 것으로 나타나고 있다. <그림 5>는 폭 100cm, 높이 250cm인 벽체에 대한 최대 균열폭 L/H비-철근비와의 관계이다. <그림 6>은 최대 균열폭과 온도 균열지수와의 관계이다. 구조물의 내구성에 손상을 줄 수 있는 온도 균열의 발생이 예상될

경우에는 균열폭의 분산을 고려하여 시공성 확보가 가능한 범위 내에서 되도록 가는 철근을 분산시켜 배근한다.

4. 지하철 매스 콘크리트 구조물의 균열폭 제어를 위한 철근량 산정

4.1 수화열에 의한 구속 응력의 계산

4.1.1 유효 온도의 산정

(1) 시간에 따른 온도의 변화

「콘크리트표준시방서」에서는 콘크리트의 일반적인 열특성값을 주어 온도 해석으로부터 온도 분포를 구할 수 있게 하였으나, 실무에서는 단순한 형태의 부재에 대해서는 복잡한 온도 해석을 하지 않아도 간이 계산으로 근사적인 최대 온도, 최대 온도 도달 시기 등을 구할 수 있다¹²⁾. 온도 곡선에 영향을 미치는 요소는 재료 특성 외에도 부재 부피에 대한 노출된 표면적의 비, 거푸집과 같은 단열재의 성질, 타설 온도, 외기 온도 등이 있다. 간이계산법으로는 RILEM의 간이계산법¹³⁾과 ACI 207¹⁴⁾의 간이계산법이 있다

〈그림 7〉의 (a)와 같은 온도 이력 곡선에서 체적 변화를 일으키는 T_E 는 식 (1)과 같이 정해진다.

$$T_E = T_{pk} + T_r - T_{min} \quad (1)$$

여기서, T_{pk} 는 유효 타설 온도, T_r 은 온도 상승량, T_{min} 은 온도 상승 이후 사용 중 최소 온도로 지반의 온도를 고려하여 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$T_{min} = T_A + 0.37(T_M - T_A)\sqrt{\frac{V/S}{2438}} \quad (2)$$

여기서, T_A : 노출 기간 중의 1주간 평균 최소 온도(외기 온도), T_M : 지반 또는 암반의 온도(근사적으로 $5^\circ\text{C} \sim 15^\circ\text{C}$), V/S : 부피/노출 표면적의 비(mm)

(2) 건조수축의 고려

건조수축에 의한 변형의 계산에서 「콘크리트표준시방서」에서는 계산이 필요한 통상의 구조물에 대해서는 최종 건조수축 계수를 적용하고 있다. 그러나 벽체, 박스와 같은 구조물에서는 먼저 타설한 바닥 콘크리트와 나중 타설한 콘크리트의 건조수축의 차이가 균열을 일으키는 원인이므로 시간에 따른 건조수축의 차이를 계산하여야 한다.

실무에 있어서는 실용적이고 간편한 ACI 207.2R에서 제안한 방법이 추천된다.¹⁴⁾ 이에 따르면 건조수축의 차이에 따른 변형을 온도 차이에 따른 변형에 포함시키기 위하여, 건조수축을 등가의 온도 상승으로 치환한다. 이 때의 등가 상승 온

도 T_{DS} 는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$T_{DS} = (30 - 7.87\frac{V}{S}) \times (\frac{W_u - 74.13}{106.7}) - 17.78(^\circ\text{C}) \quad (3)$$

여기서, W_u : 타설시 콘크리트의 단위수량(kg/m³), 이 값은 134 kg/m³ 보다 커야 한다. V : 총부피(m³), S : 외기에 노출된 표면적(m²)

이에 따라서 수화열에 의한 온도 변화와 건조수축에 의한 온도 변화를 같이 고려할 때의 유효 온도 T_E 는 식 (1)에 식 (3)을 더한 값이 된다.

4.1.2 구속 응력의 계산

콘크리트 부재 변형의 구속은 벽체 또는 바닥 슬래브에서와 같이 부재의 전체 변형을 다른 부재 또는 지반이 구속하는 외부 구속의 경우와 대형 기초 또는 댐에서와 같이 내외부의 변형 차이로 인한 내부 구속의 경우로 나눌 수 있다. 구속 응력은 구속 계수 K_R 을 이용하여 식 (4)와 같이 표시할 수 있다.

$$f_t = K_R \cdot \Delta_c \cdot E_c \quad (4)$$

여기서, K_R 은 구속 정도를 나타내며, 완전구속시 1로 한다. Δ_c 는 구속이 없는 자유로운 변형, E_c 는 콘크리트 탄성계수(변형 발생시)이다.

구속 계수의 계산은 실험 또는 유한요소법 등의 방법으로 구할 수 있는데, 구속 조건에 따라 아래의 값을 사용할 것을 ACI 207 위원회에서 제안하고 있다.

(1) 연속 외부 구속의 경우

〈그림 8〉과 같이 콘크리트 부재가 접촉하는 전면에 걸쳐 구속되는 경우, 구속 계수는 지간/높이비(L/H)와 부재높이(h/H)에 따라 차이를 보이며 식 (5a), (5b)와 같이 표시할 수 있다.

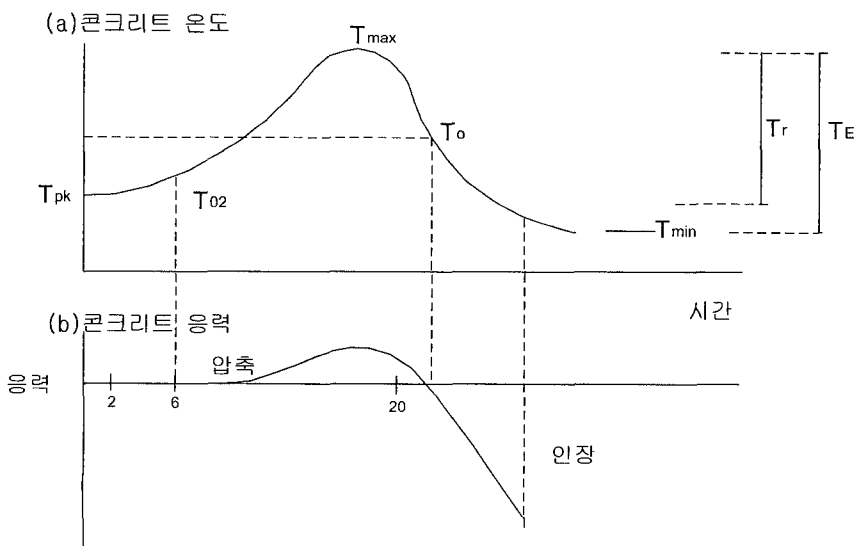


그림 7. 수화열에 의한 온도 증가와 응력의 변화¹²⁾

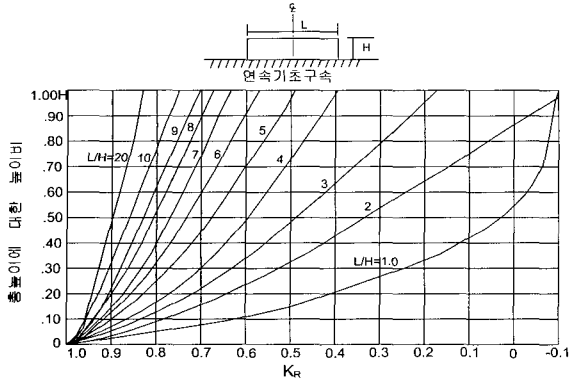


그림 8. 중앙 단면에서의 인장 구속 계수¹³⁾

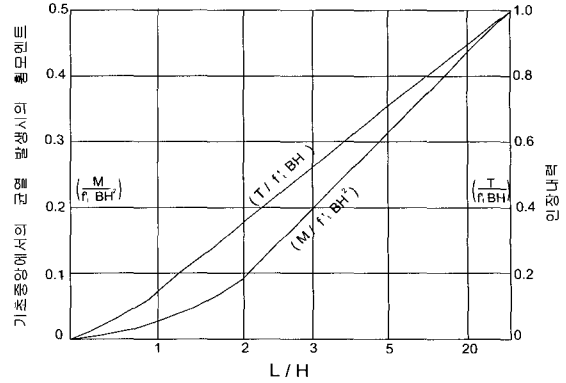


그림 9. 하부 응력이 인장강도에 도달했을 때의 내력¹³⁾

$$K_R = [(L/H - 2) / (L/H + 1)]^{h/H}, \quad L/H \geq 2.5 \text{ 일 때} \quad (5a)$$

$$K_R = [(L/H - 1) / (L/H + 10)] h/H, \quad L/H < 2.5 \text{ 일 때} \quad (5b)$$

이에 따라서 하부 응력이 인장강도에 도달했을 때 부재에 작용하는 인장력과 휨 모멘트는 <그림 9>와 같이 된다. 식 (5a), (5b)는 구속체가 강체일 때로 구속체의 강성에 따라 다음의 수정계수를 곱하여 보정한다.

$$C_F = \frac{1}{1 + \frac{A_g E_C}{A_F E_F}} \quad (6)$$

여기서, C_F : 구속도 K_R 의 수정계수, A_g : 부재 단면적, A_F : 구속체의 단면적, 암반일 때는 최대 2.5 A_g 로 취할 수 있다. E_F : 구속체의 탄성계수

(2) 불연속 외부구속 또는 단부구속의 경우

콘크리트 부재의 접촉면과 지점이 불연속하여 변형이 몇 점에서 구속될 때로, 지점 사이의 부재, 강도(인장강도 또는 전단강도)가 작은 물체 위의 위치하는 부재가 이에 해당된다.

① 경우 1: 지점 사이의 부재(예를 들어서 라멘 부재)

$$K_R = \frac{1}{1 + \frac{A_B h^3}{4L I_c}} \quad (7)$$

여기서, L 과 A_B 는 각각 변형이 발생한 부재의 길이와 단면적이고, I_c 와 h 는 각각 지지 부재의 단면 2차 모멘트와 높이이다.

지지 부재의 강성이 매우 클 때는 철근

의 휨응력 Δf_s 는 식 (8)과 같다.

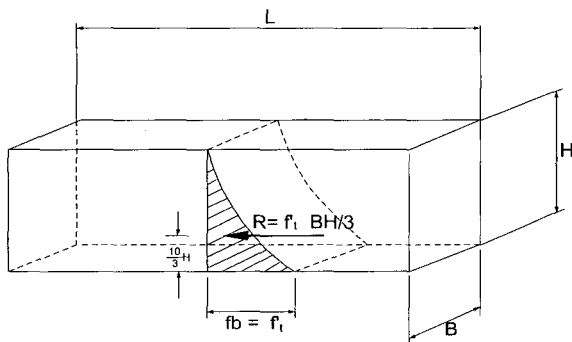
$$\Delta f_s = 2K_R \alpha_T T_E E_S \quad (8)$$

여기서, α_T 는 열팽창계수이고, E_S 는 철근의 탄성계수이다.

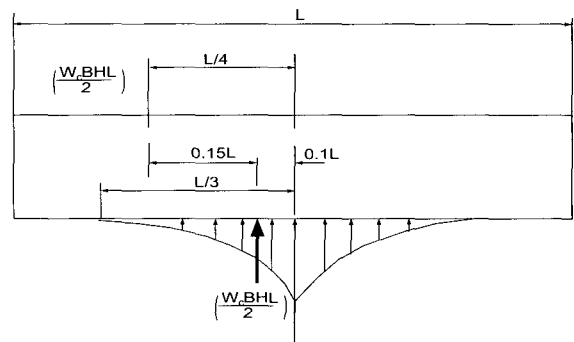
② 경우 2: 강도가 낮은 지반 위의 슬래브

강도가 낮은 지반(예를 들어서 흙) 위에 놓인 슬래브는 수축하면 슬래브 단부가 말려 올라간다. 이때 중앙부의 인장응력은 하부에서 가장 크며, 그 분포를 포물선이라 한다면 균열 모멘트는 $f_t' \cdot B \cdot H^2$ 으로 가정할 수 있다(<그림 10>의 (a)참조).

이 슬래브의 반력의 분포가 슬래브의 중간 2/3에 포물선 형태로 분포한다면 구속모멘트가 $0.075 \cdot W_c \cdot B \cdot H \cdot L^2$ 이 되므로 L 은 식 (9)와 같이 표시할 수 있



(a) 지반이 약할 때 슬래브의 내부응력 분포



(b) 슬래브가 말려 올라갈 때의 반력 분포

그림 10. 슬래브의 응력 분포와 반력 분포¹⁴⁾

다(그림 10)의 (b)참조).

$$L = L^* = \sqrt{\frac{f_t' \cdot H}{0.75 W_c}} \quad (9)$$

여기서, f_t' 는 콘크리트의 인장강도이고, W_c 는 콘크리트 단위중량이다.

만약 L 이 L^* 를 초과하면 슬래브 중앙의 응력분포는 $(L - L^*)/H$ 의 비로 연속 구속된 경우와 근사하게 된다. 이에 따라 필요한 철근은 (그림 9)의 인장력을 받을 수 있게 배근해야 한다.

(3) 내부구속의 경우

내부구속의 경우에 응력분포는 (그림 11)과 같이 되어서 양면이 연속 외부구속된 경우와 흡사하다. 외부구속이 없는 경우에는 내부구속에 의한 인장응력과 압축응력의 합은 0이 된다. 응력이 0이 되는 선은 온도 응력해석 또는 시산법으로 구할 수 있다. 자유 표면의 구속계수는 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$K_R = \frac{1}{1 + 2d_s W - 2d_s} \quad (10)$$

여기서, $2d_s$ 는 인장응력의 깊이, W 는 슬래브 총폭 또는 벽체 높이이다.

내부구속에 의한 응력은 그 값이 외부구속에 의한 응력보다 크지 않을 때 합산하여 구할 수 있다. 외부구속이 큰 경우에는 내부구속효과를 무시할 수 있다. 담과 같이 내부구속 응력이 큰 경우는 재료의 조성 및 치기 방법을 달리하여 수화열을 낮추는 것이 중요하다.

4.2 균열폭 제어를 위한 철근량의 계산

4.2.1 ACI에 의한 축방향 구속에 대한 균열폭과 균열간격의 계산¹⁴⁾

「콘크리트표준시방서」에서는 전단면에 인장력이 작용하는 인장부재의 최대 균열폭 W (mm)을 식 (11)과 같이 규정하고 있는데, 이 식은 하중이 작용하는 경우에 대한

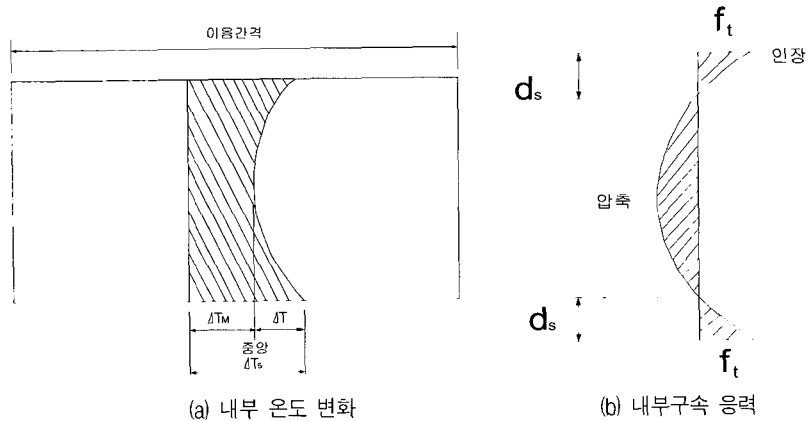


그림 11. 내부구속시 응력 분포¹⁴⁾

것으로 변형이 작용하는 경우에는 다소 작은 값이 되므로 안전측이 된다.

$$w = 1.102 f_s \sqrt[3]{d_c \cdot A_{eff}} \times 10^{-5} \quad (11)$$

여기서, d_c : 표면에서 철근 중심까지 거리(mm), A_{eff} : 철근 주위의 유효 인장 단면적($2d_c \times$ 철근 간격)(mm²), f_s : 계산한 철근 응력(MPa)

Hognestad에 의하면 최대 균열폭과 평균 균열폭의 비는 1.5 정도이므로 길이 L (mm)의 균열폭의 합은 $N \cdot w/1.5$ 과 같다. 길이 L 인 부재의 온도 T_E 에 의한 변형에서 콘크리트의 인장 변형을 빼면 이는 길이 L 의 균열폭의 합과 같아진다.

$$\frac{N \cdot w}{1.5} = L \times (K_R \cdot \alpha_T \cdot T_E - \epsilon_t) \quad (12)$$

여기서, $\epsilon_t = f_t' / E_c$ 은 콘크리트의 인장변형률로 초기 균열에 대해서는 100×10^{-6} , 사용 균열에 대해서는 150×10^{-6} 을 취한다. 길이 L 에 N 개의 균열이 발생한다면 평균 균열 간격 L' 는 L/N 이 된다.

L/H 가 2.5보다 클 때 인장응력이 균열 강도를 초과하면 전 단면에 균열이 발생할 수 있다. 무근 벽체 혹은 슬래브에서 이러한 전면 균열은 최종적으로 부재 높이의 1 ~ 2배 간격으로 발생하게 된다.

(그림 12)와 같이 최초에 발생한 균열은 중앙부의 비균열 단면에서 벽체의 인장력과 기초부의 구속력이 작힘으로 작용하여 모멘트를 발생시키는데, 균열 높이가 단면 높이의 0.2 ~ 0.3배 일 때 내력 모멘트가 최대가 된다. 이 높이 이상에서 균열은 전체 높이에 걸쳐서 발달한다. L/H 가 2.5일 때 최대 구속모멘트는 약 $0.2f_t' BH^2$ 이 되므로 무근 콘크리트에서 전면 균열이 발생하는 최소 간격은 약 1.25H가 된다.

철근이 배근된 부재에서의 전면 균열을 방지하기 위해 필요한 철근의 구속모멘트 M_{RH} 는 현재의 균열 간격이 L' 이면 $2L'$ 간격에서의 구속모멘트 $0.2f_t' BH^2$ 에서 $L'/H = 2L'/H$ 에 대한 구속모멘트를 뺀 값이 된다. 구속모멘트 M_{RH} 는 근사적으로 식 (13)과 같다.

$$M_{RH} = 0.2 f_t' B H^2 \times \left(1 - \frac{L'}{2H}\right) \quad (13)$$

높이 h 에서 균열간격 L' 이 되는 높이 h 와 바닥사이의 철근에 의한 구속모멘트는 식 (13)의 H 를 h 로 치환하여 구할 수 있다. 따라서 부재중앙에 전면균열이 발생했다면 균열과 이음사이에 발생하는 균열에서 철근이 부담하는 구속모멘트는 식 (14)와 같다.

$$A_s' \cdot f_s \cdot \frac{h}{2} = 0.2 f_t' B h^2 \left(1 - \frac{L'}{2h}\right) \quad (14)$$

여기서 A_s' 은 높이 h 에서의 철근 단면적, h 는 해당 위치에서의 벽체 높이이다.

4.2.2 ACI 207에서 제안한 균열 제한을 위해 필요한 철근량¹⁴⁾

균열폭을 w_{lim} 이하로 하기 위해서는 해당 균열폭에 대한 평균 균열간격과 철근 응력이 제한되어야 한다. h 구간 내에서 N_H 개 철근이 배근되었다면 A_s 를 단위 철근 단면적 A_b 에 대해 식 (15)와 같이 쓸 수 있다.

$$A_s' = A_b \cdot N_H / h \quad (15)$$

h_c 구간의 제한 균열폭 w_{lim} 에 대한 필요 단위 철근 단면적 A_t 는 식 (16)과 같이 구할 수 있다.(양쪽 면이 연속 구속된 경우)

$$A_b = \frac{0.4 f_t' Bh}{N_H} \times \left\{ 1 - \frac{1}{2h} \frac{w_{lim}}{1.5(K_R \alpha_T T_E - \epsilon_t)} \right\} \times \frac{1.102 \sqrt[3]{d_c A_{ceff} \times 10^{-5}}}{W_{lim}} \quad (16)$$

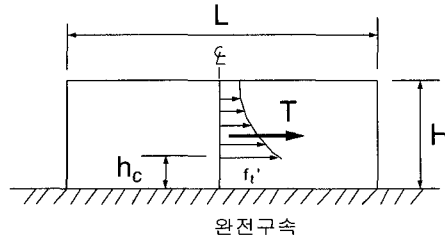
여기서 N_H 와 A_{ceff} 는 철근의 배치치를 가정하여 정하며, 식 (16)에서 사용하는 단위는 N, mm이다. 식 (16)은 ACI 207.2R에서 제안한 것으로 허용 균열폭에 대하여 필요한 철근량을 구하기 위해 사용할 수 있다.

그 외 연속 구속된 슬래브 또는 한쪽 면이 연속 구속된 벽체는 식 (17)을 적용할 수 있다.

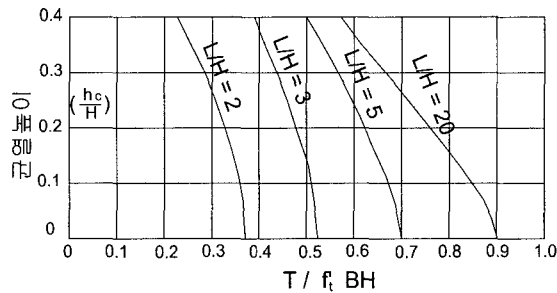
$$A_b = 0.20 \frac{f_t'}{f_s} \times \left(1 - \frac{L'}{2H} \right) \frac{B \cdot H}{N_B \left(\frac{H - d_c}{H} \right)} \quad (17)$$

여기서, N_B 는 슬래브 또는 벽체의 자유면의 총 철근 개수이다.

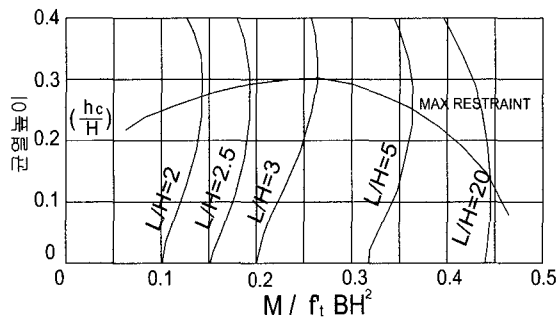
불연속 외부구속, 단부구속, 내부구속



(a) 내부 응력 분포



(b) 내부 인장력



(c) 내부 휨모멘트

그림 12 내력에 의한 균열의 진전¹⁴⁾

등에 대해서는 4.1.2 장에 따라 철근응력 f_s 를 구하여 식 (11)로 부터 균열폭을 계산할 수 있다.

내부구속의 경우에 평균 균열 간격을 인장응력 높이의 2배 이하로 제한하려면 인장 구간에 배근할 철근량은 식 (18)과 같이 구할 수 있다.

$$A_b = \frac{1}{3} \times \frac{f_t'}{f_s} \times \frac{B \cdot d_s}{N_H} \quad (18)$$

여기서 N_H 는 깊이 d_s 에 걸쳐 배근한 철근의 총 개수이다.

4.2.3 최소 철근량

ACI 318의 최소 철근량 규정은 두께

약 1.2 m 이하의 벽체, 슬래브, 기초 등에 적용되는 것으로 $A_{s, min} = 0.0015 A_g$ 를 만족해야 한다¹⁵⁾.

여기서 A_g 는 부재 단면적이다. 총 철근량의 1/2 이하, 2/3 이상이 한쪽 면에만 배근되어서는 안되며, 균열 제한을 위한 최대 철근 간격은 30 cm 이하라야 한다.

두께 1.2 m 이상의 부재에서도 온도와 건조수축을 위한 제한 철근은 식 (19) 이상이라야 한다.

$$A_s' = \frac{f_t' \cdot A_g}{f_s} < \frac{A_g}{100} \quad (19)$$

이때 철근은 직경 19 mm 이상, 중심간 간격은 30 cm 이하라야 한다.

4.3 ACI 207.2R에 따른 계산 예

4.3.1 벽체의 경우¹⁴⁾

높이가 10 m이고, 길이가 60 m인 캔틸레버 옹벽을 시공하려고 한다. 하부 슬래브는 암반 위에 타설된 것으로 하고, 옹벽의 한면은 뒷채움한다. 타설시 기온은 25 °C(사용 재료 온도 30 °C), 사용 중 최저 기온은 10 °C로 한다. 기초 암반의 온도는 15 °C로 한다. 옹벽 바닥 두께는

100 cm, 상부 두께는 45 cm로 일정한 경사를 가진다. 허용 균열폭은 0.3 mm로 하여 아래 조건을 적용하여 온도 철근을 배근하는 경우이다.

28일 압축강도 24 MPa, 사용 중 콘크리트 강도 28 MPa로 한다. 콘크리트의 단위 시멘트량은 280 kg/cm³, 분말도 2000 cm²/gm인 보통 포트랜드 시멘트를 사용한다. 타설은 같은 높이로 3번에 나누어 실시한다. 거푸집은 두께 2.5 cm의 합판으로 한다. 계산 과정은 다음과 같다.

· 온도 계산(온도 계산 과정은 ACI 207.2R을 참조), 유효 타설 온도 28 °C, 온도 상승량 33 °C, 최소 온도 11 °C, 따

표 6. 적용 예 1의 필요한 철근량 계산

h (m)	평균 두께 : B (cm)	K _R	A _b (cm ²) 철근 간격 30 cm	A _b (cm ²) 철근 간격 20 cm	철근의 선택
2.00	94.5	0.89	3.91	2.28	D19@20 ^{cm}
4.00	83.5	0.80	3.75	1.94	D19@20 ^{cm}
6.00	72.5	0.71	3.32	1.93	D19@25 ^{cm}
8.00	61.5	0.64	2.84	1.65	D19@30 ^{cm}
10.00	50.5	0.57	2.33	1.36	D19@30 ^{cm}

표 7. 배합법, 종방향 타설 길이별 ACI 규정에 의한 벽체 온도 철근량 검토 결과

사용 배합	종방향 타설 길이L(cm)	소요 온도 철근량(cm ²)	사용 온도 철근량(cm ²)	철근량 검토	추천 철근량(cm ²)
설계 시방 배합	25	7.68	H16 × 3 = 5.958	N.G	H16 × 4 = 7.940
고성능 AE감수제 사용 배합	25	6.86		N.G	
	15	4.65		O.K	H16 × 3 = 5.958

라서

$$T_E = T_{pk} + T_r - T_{min} = 50^\circ\text{C}$$

· 구속도 : L/H = 6이므로 높이에 따라 구속계수 K_R = 0.57 ~ 1이 된다.

· 콘크리트 특성 : 사용 중 콘크리트 압축 강도는 28 MPa, 인장강도는 1.75 MPa, 극한 인장 변형 150 × 10⁻⁶

· 제한 균열폭 0.3 mm에 대한 철근 필요 단면적은 식 (16)에 의해 <표 6>과 같이 2 m 간격으로 구할 수 있다.

4.3.2 슬래브의 경우¹⁴⁾

두께 2m의 기초 슬래브를 설계하려고 한다. 시공 이음은 있으나 신축 이음은 없으며 양쪽 방향으로 충분히 넓은 것으로 가정한다. 타설시 외기 온도는 25°C, 사용 재료의 온도는 30°C로 한다. 사용재료는 4.3.1 장과 같다. 슬래브는 하중에 의해 (-)모멘트를 받는 상태로 D35의 철근이 30 cm 간격으로 배근 되어 있으며 사용 하중에 의한 철근 응력은 168 MPa이다. 제한 균열폭 0.5 mm에 대하여 필요한 철근을 배치할 경우 계산 과정은 다음과 같다.

· 온도 계산 : 유효 타설 온도 28°C, 온도 상승 39°C, 최소 온도 12°C

따라서 설계 온도 차이는

$$T_E = 28 + 39 - 12 = 55^\circ\text{C}$$

· 구속도 : L/H > 20,

$$K_R = 0.9\text{로 가정}$$

· 콘크리트 특성 : f'_t = 1.75 MPa

· 제한 균열폭 0.5 mm

- 덮개 5 cm, 철근 중심간격 30 cm일 때 제한 균열폭 0.5 mm에 대한 철근 응력은 333 MPa이다(식 (11)참조). 평균 균열폭 L'은 966 mm이다(식 (12)참조).

· 철근 간격을 30 cm로 했을 때 단위 철근 단면적은 식 (17)에 의해 구한다.

$$A_b = 4.78\text{ cm}^2$$

지반을 강체로 하면 휨응력은 식 (8)에 의해 다음과 같이 구한다.

$$\Delta f_s = 198\text{ MPa}$$

따라서 최대 철근 응력 $\sum f_s = 168 + 198 = 366\text{ MPa}$ 로 제한된다. 이 값은 균열폭 0.5 mm에 대한 제한 철근 응력 333 MPa를 초과하므로 철근량을 증가해야 한다.

철근 간격을 20 cm로 가정하면 제한 철근응력은 381 MPa이므로

$$A_b = 9.56 \times \left(\frac{168}{381 - 198} \right) = 8.78\text{ cm}^2$$

따라서 D35@20를 배치한다.

4.3.3 지하철 정거장 박스 구조물 벽체의 경우¹⁶⁾

ACI 207.2R-90 수화열 제어 지침에 따라 <그림 13>의 지하철 정거장 박스 구조물의 형상 및 배합 특성에 따른 온도 상승량을 계산하고 계산된 설계 온도 및 구조물 구속도를 바탕으로 벽체의 온도 철근량을 검토하였다.

· 설계강도 : 300 kgf/cm²

· 주변 대기 온도 : 20°C = 68°F

· 사용 재료 : 시멘트(1종),

$$440/380\text{ kg/m}^3$$

· 최저 대기 온도 : 7°C = 45°F

· 타설시 온도 : 10°C = 50°F

설계 시방 배합 콘크리트 및 고성능 AE감수제 사용 배합 콘크리트를 이용하여 종방향 1회 타설 길이를 15 m 및 25 m로 시공하는 모든 경우에 대해서 현 설계상의 벽체 온도 철근량을 ACI 규정에 의해 검토한 결과를 <표 7>에 나타내었다.

<표 7>에서 알 수 있듯이 당초의 설계 시방 배합 콘크리트를 사용하여 종방향으로 25 m 타설하는 경우 및 고성능 AE감수제 배합 콘크리트를 사용하여 종방향으로 25 m 타설하는 경우들은 모두 현 설계상의 벽체 온도 철근량은 ACI 규정에 의해 계산한 소요 온도 철근량에 미치지 못하고 있어, 현재 벽체의 내외측에 H16 철근 15 cm 및 30 cm로 배근 되어 있는 배력 철근을 <그림 14>와 같이 내·외측 모두 H16 철근 15 cm 간격으로 변경하여 배근하는 것이 벽체에 발생하는 온도 균열 제어에 유리할 것으로 사료된다. 또한 고성능 AE 감수제를 사용하는 배합 콘크리트를 이용하여 종방향 1회 타설 길이를 15 m로 시공하는 경우는 현 설계상의 벽체 온도 철근량은 ACI 규정에 의해 계산한 소요 온도 철근량을 확보하고 있어 현재 벽체에 배근 되어 있는 철근은 적절한 것으로 계산되었다.

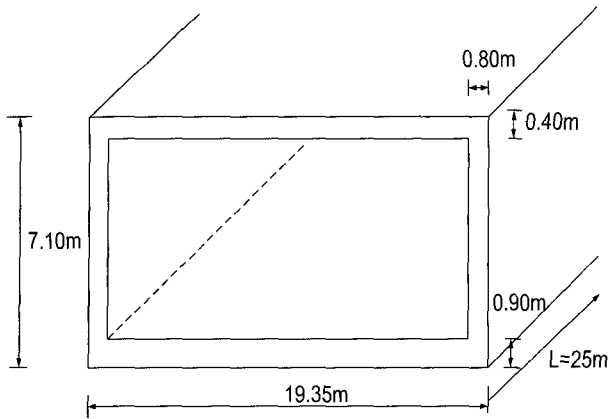


그림 13. 박스 구조물 제원¹⁾

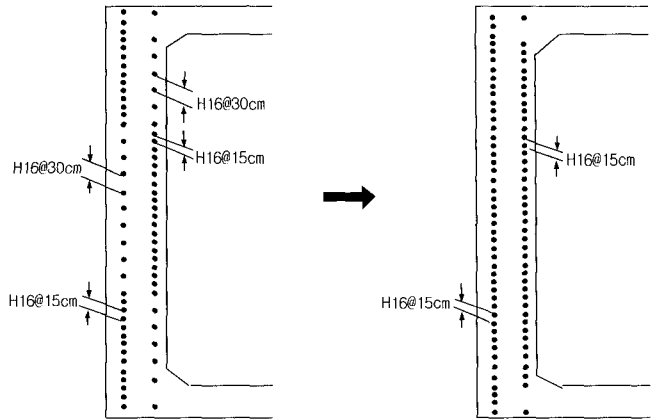


그림 14. 종방향 1회 타설 길이(25m)인 경우 벽체 온도 철근 배근 제안¹⁰⁾

5. 맺음말

(1) 수축·온도 철근을 증가시키면 균열폭 제어에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있고, 매스 콘크리트 구조물에서 허용 균열폭 내로 균열을 제어하기 위해 요구되는 철근량은 온도 강하량, 구속도, 균열 간격 등을 고려하여 철근량을 산정해야 하는 것으로 나타났다.

(2) 문헌 분석 결과, 누수 허용 균열폭인 0.1 mm까지 균열을 제어에 필요한 철근량은 다음과 같다.

· 누수 방지를 위해 균열폭을 0.1 mm 이하로 제어하기 위해서는 현행 「콘크리트구조설계기준」에 규정된 철근비(0.25%를 기준으로 한다)의 약 4배 이상으로 수축·온도 철근비를 상승시킬 필요가 있을 것으로 추정된다.⁸⁾

· 지하철 설계기준에서 요구하고 있는 최소 수축·온도 철근비 0.4%를 배근하여 균열 제어 효과를 얻기 위해서는 18 m 정도마다 시공 이음 또는 수축 이음이 설치되어야 실효성이 있을 것으로 추정된다.⁹⁾

· 누수 허용균열폭인 0.1 mm 이하로 균열을 제어하기 위해서는 최소 L/H는 2 이하, 철근비는 0.55 ~ 0.65% 이상이 되어야 할 것으로 판단된다.^{1),4)}

(3) 누수 허용 균열폭까지 균열을 제어하여 수밀 구조를 확보하기 위해 수축·온

도 철근량만을 설계기준 이상으로 증가시키는 것은, 철근량 증가에 따른 공사비의 증액과 균열폭 제어 후에도 약간의 누수는 있을 것으로 예상되는 점 등으로 경제적인 방안은 아닌 것으로 판단된다.

(4) 결국 수축·온도 철근비의 증가와 함께 재료의 변경을 통한 수화열의 저감, 수축 이음의 설치로 인한 L/H비의 감소 등의 대책이 복합적으로 적용되어야만, 콘크리트 구조물의 체적 변화량이 감소되고 이로 인한 균열 제어 효과도 얻을 수 있을 것으로 판단된다. □

참고문헌

1. 日本コンクリート工學協會, “마스콘크리트의龜裂制御指針”, 1986, pp.22~24.
2. 강석화, “매스 콘크리트의 온도 균열 제어를 위한 시공 방법,” 콘크리트학회지, 제9권 3호, 1997, pp.4~14.
3. 건설교통부, “콘크리트표준시방서”, 1996.
4. 건설교통부, “콘크리트구조설계기준”, 1999.
5. 서울특별시 지하철건설본부, “서울지하철 9호선 설계기준”, 1998.
6. 日本土木學會, “콘크리트標準示方書(設計編)”, 1996.
7. ACI, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-99) and Commentary”, 1999.
8. S. Ono, Y. Tanabe, and H. Umehara,

“State of the art on Thermal Cracking Control of Massive Concrete”, Concrete Journal, Vol.36, No.8, 1998, pp.10 ~ 18.

9. C. P. Vetter, “Stresses in Reinforced Concrete due to Volume Changes”, Transaction, ASCE, Vol.98, 1933, p.1039.
10. Mark Fintel, “Hand Book of Concrete Engineering”, Van Nostrand Reinhold, 1985, p.668.
11. ACI Committee 350, “Environmental Engineering Concrete Structure”, ACI Manual of Concrete Practice Part4, 1999, 350R-7~350R-8.
12. 강원호, 이광명, “매스 콘크리트 구조물의 균열폭 제어를 위한 철근량 산정,” 콘크리트학회지, 제9권 3호, 1997, pp.24~33.
13. RILEM, “Richtlinien Fur das Betonieren im Winter”, beton, 10/64, 1964, pp.411~427.
14. ACI Committe 207, “Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete”, ACI Manual of Concrete Practice, 1990, 207.2R.
15. ACI Committe 318, “Building Code and Commentary”, 1995, 318-95.
16. 서울대학교 에너지자원기술 연구소, 지하철 6-6공구 정거장 구조물 일부 구간 균열 조사와 구조해석 및 대책 연구, 1997, 8.