

콘크리트 건조수축 균열제어를 위한 합리적인 최소철근량

Reasonable Minimum Reinforcement for Crack Control of Concrete Shrinkage

김수만* 오민호**

Kim, Su Man Oh, Min Ho

ABSTRACT

The crack width of concrete structures subjected to shrinkage depend on a great number of parameters whose effects are restrain condition, the number and spacing of crack and the amounts of reinforcements. Through suitable reinforcement it is possible to make the individual cracks exceedingly small.

This paper is to present the amount of reasonable minimum reinforcement for crack control through a rational analysis of forces occuring in significantly restrained concrete structures due to the shrinkage. Also the analysis results from this paper are compared with the provisions for shrinkage and temperature reinforcement in the KCI concrete structural design code.

1. 서론

철근콘크리트 구조물이 사용중 균열이 발생하는 것은 통상적인 일이다. 이러한 균열은 외력에 의해 발생하는 경우와 건조수축 및 온도변화와 같은 콘크리트의 체적변화에 의해 발생하는 경우로 대별할 수 있다. 일반적으로 설계자는 외력에 의해 발생하는 균열은 현행 설계기준에 따라 설계하면 설계목적에 만족되는 범위로 제어가 가능하다. 그러나 건조수축과 같은 체적변화에 의해 슬래브에 발생하는 균열은 설계기준의 규정에 따라 최소철근량을 배근하더라도 적절히 제어가 되지않고 균열폭이 과다하게 되는 문제를 야기시키고 있다. 본 연구에서는 설계기준에서 요구하는 해석방법을 기 연구된 자료를 토대로 제안하고 제안된 방법에 따라 균열폭을 추정한다. 또한 철근비에 따른 균열폭의 변화를 조사하여 균열폭을 효과적으로 제어할 수 있는 최소철근비를 제안한다.

2. 균열폭 추정을 위한 이론적 접근

양단이 완전 구속된 철근콘크리트 부재는 건조수축에 의해 콘크리트가 수축되더라도 콘크리트에 묻힌 철근은 변형적합조건에 의해 전체길이는 변하지 않는다. 이 때 철근은 그림 1에 도시된 바와 같이 인장과 압축에 의해 늘어난 량과 단축된 량은 크기가 같고 방향이 반대이며 전체변형량은 0이 되므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{f_{sc}}{E_s} [L - (\frac{2}{3} s_o + \omega)] + \frac{f_{st}}{E_s} (\frac{2}{3} s_o + \omega) = 0 \quad (1)$$

첫 번째 균열이 발생하기 직전 즉 콘크리트의 응력이 인장강도 f_t 에 도달하는 순간 크리프와 건조수축 변형률의 합은 인장강도에 의한 탄성변형률과 크기는 같고 방향은 반대이므로 다음과 같다.

* 정희원, 수원대학교 토목공학과 부교수

** 정희원, (주)동명기술공단

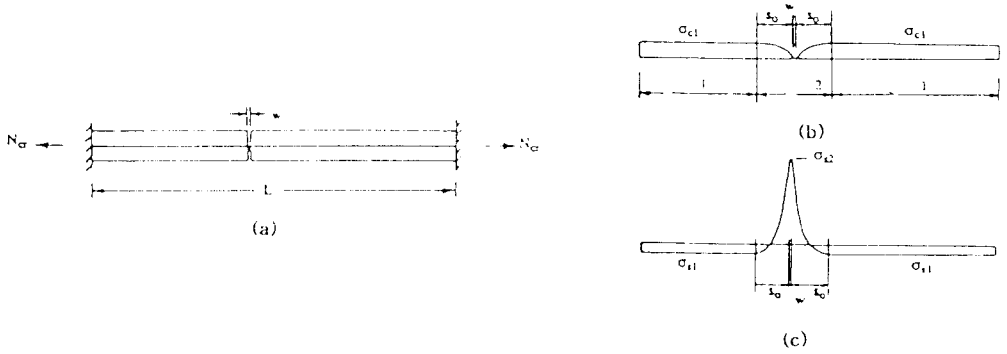


그림 1. 수축균열 후 응력분포

$$\epsilon_c + \epsilon_{sh} = -\frac{f_t}{E_c} \quad (2)$$

식(2)에서 E_c 는 첫 번째 균열 발생시 콘크리트의 탄성계수이다. 그림에 도시된 균열점에서 s_o 보다 먼 거리인 비균열 구역에서 콘크리트와 철근이 발휘하는 힘의 합은 구속력 N_{cr} 과 같으므로 다음 같다.

$$f_{ct}A_c + f_{sc}A_s = N_{cr} \quad (3)$$

식 (3)으로부터 콘크리트의 인장응력 f_{ct} 를 구하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f_{ct} = \frac{N_{cr} - f_{sc}A_s}{A_c} \quad (4)$$

식 (4)의 f_{sc} 를 L 과 s_o 로 표현하면 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$f_{ct} = \frac{3LN_{cr}}{A_c(3L - 2s_o)} \quad (5)$$

이 구역에서 철근과 콘크리트의 변형률이 같다는 변형적합조건에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다

$$\frac{f_{sc}}{E_s} = \frac{f_{ct}}{E_c} + \epsilon_c + \epsilon_{sh} \quad (6)$$

식 (2)와 (5)을 식 (6)에 대입한 다음 N_{cr} 를 구하면 다음과 같다.

$$N_{cr} = \frac{n\rho f_t A_c (3L - 2s_o)}{2s_o + 3n\rho L} \quad (7)$$

한 부재에서 균열이 m 개 발생한 경우 식 (1)을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{f_{sc}'}{E_s} [L - m(\frac{2}{3}s_o + \omega)] + m \frac{f_{st}'}{E_s} (\frac{2}{3}s_o + \omega) = 0 \quad (8)$$

$\omega = 0$ 으로 보고 가정하여 f_{sc} 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$f_{sc}' = \frac{-2s_o m}{3L - 2s_o m} f_{st}' \quad (9)$$

균열수는 $m = \frac{L}{s}$ (자연수)로 표현할 수 있으므로 이를 식 (9)에 대입하여 정리하면 다음 같다.

$$f_{sc}' = \frac{-2s_o}{3s - 2s_o} f_{st}' \quad (10)$$

m 개의 균열이 발생되었을 때 구속력을 $N(t)$ 라 하면 철근의 인장응력 f_{st}' 를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f_{st}' = \frac{N(t)}{A_s} \quad (11)$$

균열사이의 비균열구역에서 발생된 콘크리트의 최종변형률 $\epsilon_{c(\infty)}$ 는 첫 번째 균열 발생시 f_{ct} 와 f_t 의 평균 응력에 의한 탄성변형률과 건조수축 및 크리프 변형률의 합으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon_{c(\infty)} = \frac{f_m}{E_c} + \frac{f_m}{E_c} \phi_{\infty} + \epsilon_{sh(\infty)} \quad (12)$$

식 (12)에서 f_m 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_m = \frac{f_{ct} + f_t}{2} \quad (13)$$

콘크리트의 유효탄성계수 E_e 를 식 (12)에 도입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\epsilon_{c(\infty)} = \frac{f_m}{E_e} + \epsilon_{sh(\infty)} \quad (14)$$

식 (14)에서 E_e 는 다음과 같이 표현된다.

$$E_e = \frac{E_c}{1 + \phi_{(\infty)}} \quad (15)$$

m개의 균열이 발생된 최종단계에서 콘크리트 인장응력 f_{ct}' 는 식 (4)의 N_{cr} , f_{sc} 대신 각각 $N(t)$ 와 f_{sc}' 로 대체하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_{ct}' = \frac{N(t) - f_{sc}' A_s}{A_c} \quad (16)$$

(10), (11)를 식 (16)에 대입하고, $N(t)$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$N(t) = \frac{-n_e A_s (3s - 2s_o)}{2s_o} (f_m + \epsilon_{sh(\infty)} E_e) \quad (17)$$

이 때 f_{ct}' 는 f_t 이하이어야 하므로 이를 적용하여 최대 균열간격 s를 구하면 다음과 같다.

$$s = \frac{-2s_o f_t}{3n_e \rho (f_m + \epsilon_{sh(\infty)} E_e)} \quad (18)$$

콘크리트의 평균 균열폭은 균열간격 s에서 작용하는 콘크리트 인장응력 f_{ct}' 에 의한 최종변형과 건조수축에 의한 최종변형의 합으로 나타낼 수 있다. 이 때 콘크리트의 인장응력에 의한 변형에 영향을 받는 구간은 균열간격 s에다 균열점 좌우로 $s_o/3$ 를 뺀 구간이다. 이는 균열점에서 s_o 까지 콘크리트의 인장응력이 포물선 형태로 0에서 f_{ct}' 로 증가하므로 이 구간의 1/3은 콘크리트의 인장응력에 영향을 받지 않는다고 볼 수 있기 때문이다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\omega = -\left[\frac{f_{ct}'}{E_e} \left(s - \frac{2}{3} s_o \right) + \epsilon_{sh(\infty)} s \right] \quad (19)$$

3. 균열폭에 영향을 미치는 요인

건조수축에 의해 발생하는 균열의 폭은 식 (19)로부터 콘크리트의 인장응력, 크리프의 영향을 고려한 유효탄성계수, 균열간격, 철근지름 및 최종건조수축량의 크기에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 그런데 콘크리트의 인장응력, 크리프계수 및 최종건조수축량은 콘크리트의 재료 특성상 큰 변동을 나타내지 않으므로 본 연구에서는 균열간격 s의 변화와 철근지름의 크기에 따른 균열폭의 변화를 조사하고자 한다. 따라서 s에 가장 크게 영향을 미치는 ρ 와 d_b 에 따른 균열폭 ω 의 크기를 추정하여 도시하면 그림 2와 같다.

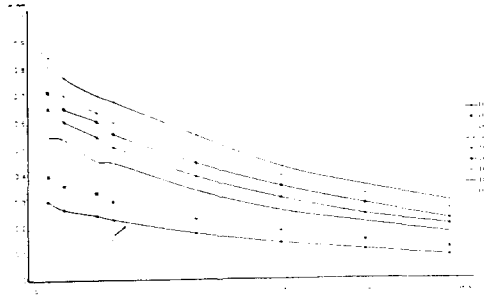


그림 2. 철근비에 따른 균열폭

그림 2로부터 철근비의 증가에 따라 균열폭이 감소됨을 알 수 있으며 철근지름에 따라 균열폭의 변화가 매우 심함을 알 수 있다. 그리고 철근간격 s 와 ω 와의 관계를 도식한 그림 3으로부터 균열간격이 작으면 작을수록 균열폭이 작게 발생함을 알 수 있다. 또한 균열폭을 0.3mm로 제어하기 위해 부재의 두께 h 와 ρ 와의 관계를 도식한 그림 4로부터 h 가 증가함에 따라 ρ 가 감소됨을 알 수 있다.

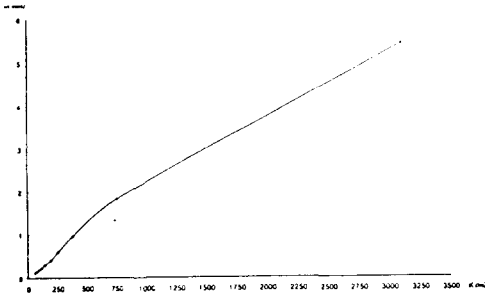


그림 3. 균열간격에 따른 균열폭

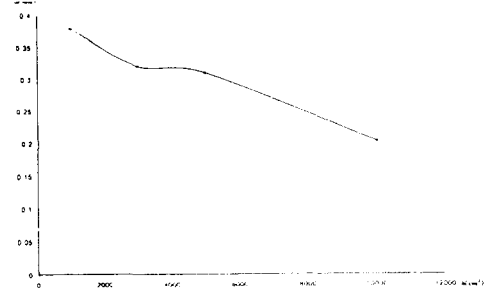


그림 4. 부재 높이에 따른 균열폭

4. 결 론

구속이 심한 콘크리트 부재에서 건조수축에 의해 발생하는 균열폭의 크기를 철근비와 철근지름, 균열간격 및 부재단면 두께에 따라 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수축 및 온도철근은 가능한 한 철근 지름이 작은 철근을 배근하는 것이 균열제어에 효과적이다.
- (2) 균열간격이 좁을수록 균열폭이 작게 발생하므로 부착강도가 좋은 이형철근을 배근하면 균열폭을 효과적으로 제어할 수 있다.
- (3) 부재 단면의 높이가 크면 클수록 건조수축 균열제어에 필요한 철근비를 줄일 수 있다.

참 고 문 헌

1. C.P.Vetter, " Stress in Reinforced Concrete Due to Volume Changes ", ASCE Tractions, Vol. 98, No.1848, 1933, pp. 1037-1053.
2. F.Levi, " On Minimum Reinforcement in Concrete Structure ", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No.12, December, 1985, pp.2791-2796.
3. R.I.Gilber, " Shrinkage Cracking in Fully Resrained Concrete Member ", ACI Structural Journal, March-April 1992, pp. 141-149