

고층건물 콘크리트 슬래브의 건조수축응력 해석에서 철근의 구속효과

The Effect of Internal Restraint of Rebar in Shrinkage Stress Analysis of Concrete Slab in Multistory Building

김 한 수* · 김 재 건**

Kim, Han-Soo · Kim, Jae-Keun

ABSTRACT

In this study, a practical method of shrinkage stress analysis on concrete slab in multi-story building is proposed, which considers both internal restraint and external restraint variation resulting from construction sequence. The shrinkage stress due to external restraint is obtained by multiplying relaxation coefficient to elastic shrinkage stress. The additional shrinkage stress due to internal restraint is obtained by residual strain of the elastic analysis. A verification example was analyzed and compared by the proposed method and commercial analysis program that is capable of time-dependent analysis of concrete. The results of 10-story example building show that the internal restraint of reinforcement increases the shrinkage stress considerably at the slabs under loose external restraint.

Keywords: Drying Shrinkage, Creep, Tall Building, Slab, External Restraint, Internal Restraint

1. 서론

건조수축 및 크리프를 고려한 콘크리트의 장기거동에 관한 연구는 무근 콘크리트의 시간 의존적 변형 특성을 수식으로 나타낸 콘크리트 모델과 외부 및 내부 구속에 의한 응력 변화를 해석할 수 있는 장기거동 해석법으로 나눌 수 있으며 각각에 관한 연구가 상당히 많이 진전되어 왔다. (Bazant and Wittmann, 1982; Gilbert, 1988) 하지만 고층 건물 슬래브에 발생하는 건조수축응력을 실용적으로 해석할 수 있는 방법은 거의 연구되어 있지 않은 상태여서 건조수축으로 인한 슬래브 균열대책은 대부분 구조전문가들의 경험에 의존하고 있는 상황이다. 따라서 이 논문에서는 고층건물 슬래브에 발생하는 건조수축응력을 외부구속조건 뿐만 아니라 철근에 의한 내부구속효과도 고려할 수 있는 해석방법을 제안하고 그 해석 결과를 분석하였다.

2. 시공단계를 고려한 건조수축응력 해석

고층건물의 슬래브는 슬래브를 지지하는 기둥 또는 벽체에 의하여 외부구속조건이 주어지며 이 외부구속은 상부층이 시공됨에 따라 변화하게 된다. 또한 슬래브의 건조수축변형은 위층과 아래층의 기둥 또는 벽체

* 정희원 · 건국대학교 건축공학부 교수 E-mail: hskim@konkuk.ac.kr

** 정희원 · 현대건설 기술연구소 선임연구원 E-mail: kjk5577@hdec.co.kr

의 구속정도에도 영향을 주므로 외부구속조건을 정확하게 고려하기 위해서는 시공단계를 고려한 해석방법이 필요함을 알 수 있다.

전체구조물이 재료적으로 균질하다면 크리프를 고려한 건조수축응력과 크리프를 고려하지 않은 건조수축응력의 비는 구속의 정도와는 무관하므로 임의의 구속조건을 갖는 구조물에서 크리프를 고려한 건조수축에 의한 부재응력 $S(t, t_0)$ 과 크리프를 고려하지 않은 건조수축에 의한 부재응력 $S_{el}(t, t_0)$ 과의 비는 다음과 같은 건조수축응력의 릴랙세이션 계수 $R(t, t_0)$ 로 나타낼 수 있다.

$$\frac{S(t, t_0)}{S_{el}(t, t_0)} = \frac{\sigma(t, t_0)}{\sigma_{el}(t, t_0)} = R(t, t_0) \quad (1)$$

여기서 $\sigma(t, t_0)$ 는 크리프를 고려한 완전구속상태의 건조수축응력이며 $\sigma_{el}(t, t_0)$ 은 크리프를 고려하지 않은 ($\phi(t, t_0) = 0$) 완전구속상태의 건조수축응력을 나타낸다. 건조수축응력의 릴랙세이션 계수 $R(t, t_0)$ 을 구하는 방법은 수치적분에 의한 방법 이외에도 유효탄성계수법(Effective Modulus Method), 또는 연령보정탄성계수법(Age-adjusted Effective Modulus Method)을 이용하여 구할 수 있다.(김한수와 조석희, 2003)

(1)식으로 주어지는 건조수축응력은 철근에 의한 내부구속을 고려하지 않은 응력이므로 철근이 배근된 경우에는 정확한 건조수축응력을 제시하지 못한다. 철근을 고려하기 위하여 철근을 압축을 받는 트러스 요소로 모델링하여 시공단계에 따른 탄성해석에 포함시킨 후 릴랙세이션 계수를 곱하는 방법도 생각해 볼 수 있는데, 이 방법은 철근도 크리프 변형이 발생하는 것으로 보는 것이므로 적절한 방법이 아니다.

본 논문에서는 철근에 의한 내부구속조건을 고려하기 위해 다음과 같은 해석방법을 제안한다. 이 해석법은 외부구속에 의한 응력을 우선 구하고 외부구속에 의한 잔존변형률에 대하여 내부구속에 의한 건조수축응력을 구하는 방법으로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma_{el}(t)R(t, t_0) + \frac{\epsilon_{el}(t)E(t_0)n\rho}{1 + n\rho[1 + \chi(t, t_0)\phi(t, t_0)]} \\ &= \sigma_{el}(t)R(t, t_0) + \frac{\epsilon_{el}(t)E(t_0)n\rho}{1 + n\rho/R(t, t_0)} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\epsilon_{el}(t)$ 은 탄성해석에서 각 슬래브에 발생하는 변형률이며 다음 식에 의하여 탄성해석에 의한 건조수축응력으로부터 구할 수 있다.

$$\epsilon_{el}(t) = \frac{\sigma_{el}(t)}{E(t_0)} + \epsilon_{sh}(t, t_0) \quad (3)$$

(2)식에서 첫 번째 항은 외부구속에 의한 건조수축응력을 나타내며 두 번째 항은 철근에 의한 건조수축응력을 나타낸다. 두 번째 항에서 철근비와 철근의 탄성계수를 제외한 값들은 첫 번째 항의 외부구속에 의한 건조수축응력을 구하는 과정에서 모두 구해지므로 간단하게 철근에 의한 건조수축응력을 구할 수 있다.

3. 적용 예제

본 논문에서 제시한 해석방법을 적용해 보기 위하여 그림[1]과 같은 평면을 가진 구조물에 대하여 건조수축응력 해석을 수행하여 보았다. 예제 건물은 층고 3m의 10층 벽식 건물로 폭 9m의 12개의 경간으로 되어 있고 건물의 폭은 25m이다. 슬래브의 두께는 250mm이고 벽체의 두께는 길이방향과 폭 방향 벽체 모두 300mm이다.

이 건물의 시공공정은 층당 20일로 하였으며 건조수축은 타설 후 7일간의 습윤양생 후 슬래브와 길이방향 벽체에만 발생한다고 가정하였다. 최종 건조수축응력은 10,000일 후의 값을 검토하였다. ACI모델의 극한건조수축 변형률과 극한크리프계수는 $780 \times 10^{-6} \text{m/m}$ 와 2.35로 하였다. CEB모델에서 28일 때의 설계기준강도 f_{ck} 는 24MPa, 상대습도는 50%, 시멘트는 1종으로 하였다. 해석모델은 평면에서 볼 때 길이방향으로만 건조수축이 작용하고 건물 폭에 대하여 건조수축응력이 균등하다고 가정하여 층의 시공단계에 따라 10개의 2차원 시공단계 해석모델을 구성하였다. 슬래브와 폭 방향의 벽체는 보요소로 모델링하였고 길이 방향의 벽체는 4절점 평면응력요소를 이용하여 모델링하였다. 건조수축변형률에 의한 절점하중은 슬래브와 길이 방향 벽체에만 작용하는 것으로 하였고 경계조건은 1층 바닥에 완전 고정되어 있는 것으로 하였다.

ACI모델을 적용한 경우와 CEB 모델을 적용한 경우에 대하여 각각 철근이 없는 경우, 철근비가 0.002, 0.01, 0.02의 네 가지 경우에 대하여 각각 해석하고 건조수축응력이 가장 크게 나타난 5월과 6월 사이의 슬래브의 응력을 각각 그림 [2]과 [3]에 나타내었다. 그림을 보면 외부구속이 가장 큰 1층의 값이 가장 크며 층수가 증가할수록 감소하다가 고층부에서 다소 커지는 경향을 나타내고 있다.

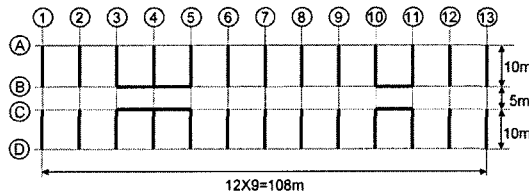


그림 1. 해석예제 건물의 평면

예상한 바와 같이 철근비가 증가함에 따라 내부구속에 의한 건조수축응력도 커지고 있음을 알 수 있다. 철근에 의한 효과는 외부구속이 큰 1층의 경우에는 크지 않고 외부구속이 작은 상층 슬래브에서 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 건조수축응력에 의한 균열 발생이 예상되는 부분은 외부구속이 큰 1층과 2층 슬래브이며 이 경우에는 내부구속에 의한 건조수축응력은 크지 않음을 알 수 있다. 이는 건조수축응력이 큰 곳을 찾고자 할 때에는 철근으로 인한 내부구속조건을 반드시 고려하여야 하는 것은 아니라는 것을 보여 준다.

4. 결론

본 논문에서는 건조수축변형률, 크리프, 외부 및 내부 구속조건 등 건조수축응력에 영향을 주는 요소들을 고려한 고층건물 슬래브의 실용적 건조수축응력해석법을 제안하였다. 특히 크리프를 고려하지 않은 탄성해석 결과만을 이용하여 철근에 의한 내부구속조건에 의한 건조수축응력을 해석할 수 있는 방법을 제시하고 그 결과를 비교분석하였다. 제안된 해석방법을 10층 규모의 예제 구조물에 적용하였으며 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 외부구속조건과 내부구속조건이 동시에 작용할 경우에는 외부구속에 의한 건조수축응력과 내부구속에 의한 건조수축응력을 분리하여 산정할 수 있다.
- 2) 외부구속에 의한 응력은 탄성해석과 릴랙세이션 계수를 이용하여 얻을 수 있고 내부구속에 의한 응력은 탄성해석과 철근의 환산단면적을 이용하여 얻을 수 있다.
- 3) 내부구속으로 인한 건조수축응력은 외부구속의 정도에 따라 달라지며 외부구속이 작을수록 내부구속에 의한 건조수축응력은 커지나 외부구속 없이 내부구속만에 의한 건조수축응력값을 넘지 않는다.

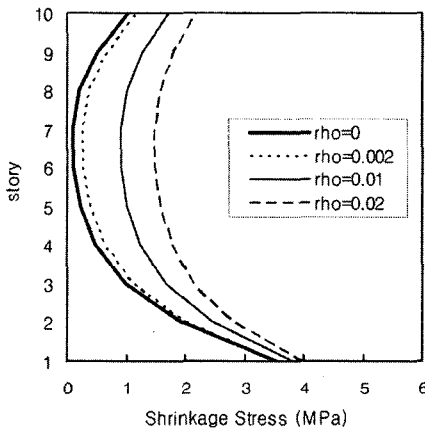


그림 2. 예제 건물의 층별 건조수축응력 (ACI모델)

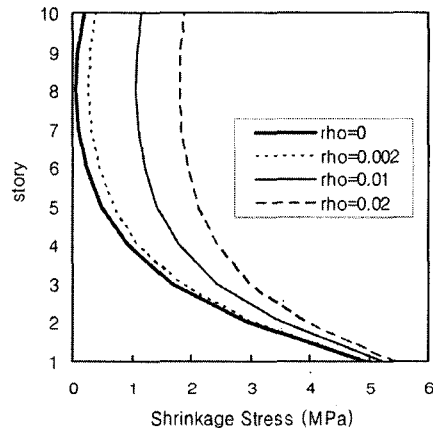


그림 3. 예제 건물의 층별 건조수축응력 (CEB모델)

감사의 글

본 연구는 2005년 건국대학교 신입교수연구비 지원사업으로 이루어진 것으로, 본 연구를 가능케한 학교당국에 감사드립니다.

참고문헌

김한수, 조석희 (2003), 구속조건 변화와 크리프에 의한 응력 완화를 고려한 고층건물 콘크리트 슬래브의 건조수축 응력해석”, *대한건축학회논문집-구조계*, 19(1), pp.29-3

Bazant, Z.P. and Wittmann F.H. (1988), *Creep and Shrinkage in Concrete Structures*, John Wiley & Sons, 1982

Gilbert, I. (1988), *Time Effects in Concrete Structures*, Elsevier