

초기재령 콘크리트의 부등건조수축과 자기수축에 관한 연구

Differential Drying Shrinkage and Autogenous Shrinkage of Concrete at Early Ages

김진근* 이철성**
Kim, Jin-Keun Lee, Chil-Sung

ABSTRACT

The moisture diffusion and self-desiccation cause the differential drying shrinkage and autogenous shrinkage at early ages, respectively. Thus total shrinkage strain includes the differential drying shrinkage and self-desiccation shrinkage. Thus in this study the shrinkage strain was measured at various positions in the exposed concrete and in the sealed concrete the self-desiccation shrinkage was measured. In low-strength concrete, the differential drying shrinkage increases very rapidly, but self-desiccation shrinkage is very small. But high-strength concrete shows the reverse results. And the analytical results for differential drying shrinkage were in good agreement with the test results.

1. 서론

양생초기에 콘크리트를 외기에 노출시키면 수분확산으로 인하여 부재 단면에서의 부등수분분포로 인하여 부등건조수축(differential drying shrinkage)이 발생한다. 또한 초기재령에서는 콘크리트의 자체 건조(self-desiccation)로 인한 자기수축(autogenous shrinkage)이 발생한다. 특히 고강도 콘크리트의 경우에는 자체건조로 인한 수분손실이 크기 때문에 자기수축도 크게 발생한다. 따라서 초기재령에서 외기에 노출된 콘크리트 내부의 각 위치에서는 외기로의 건조로 인한 수축변형률과 자체건조로 인한 수축변형률이 동시에 포함하게 된다.

따라서 본 연구에서는 초기재령에서 콘크리트에서 자체건조로 인한 수축과 건조로 인한 수축이 콘크리트 내부의 각 위치에서의 수축변형률 분포(부등건조수축 변형률)에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위하여 건조로 인한 콘크리트 내부의 각 위치의 수축변형률에 대한 실험을 실시하였다. 본 연구에서는 매입형 게이지(embedded strain gauge)를 이용하여 콘크리트 내부의 각 위치에서 발생하는 수축 변형률(부등건조수축 변형률)을 측정하였다. 그리고 콘크리트 내부의 부등수분분포로 인한 수축변형률을 예측할 수 있는 해석방법을 제시하였으며, 실험결과와 해석결과를 비교하였다.

*정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

**정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

2. 실험

2.1 실험개요

양생초기에 외기에 노출된 콘크리트에서는 수분확산과 자체건조가 동시에 발생하므로 콘크리트 내부의 각 위치에서의 수축변형률도 자체건조에 의한 자기수축을 포함하고 있다. 그림 1은 양생초기에 콘크리트 내부의 상대습도 변화를 나타내고 있다. 따라서 전체 수축변형률에서 자체건조에 의한 자기수축량을 제외하여야 수분확산만에 의한 각 위치에서의 수축변형률의 변화를 나타낸다. 자체건조를 고려한 경우에서 콘크리트 내부의 각 위치에서의 수축량은 식 (1)과 같이 자체건조에 의한 수축량과 건조에 의한 수축량으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{sh}^{total}(t, t_0) = \epsilon_a(t) + \epsilon_{sh}(t, t_0) \quad (1)$$

여기서, $\epsilon_a(t)$ 는 콘크리트의 자체건조에 의한 수축량이고, $\epsilon_{sh}(t, t_0)$ 는 건조에 의한 콘크리트 내부의 각 위치에서의 수축량이다.

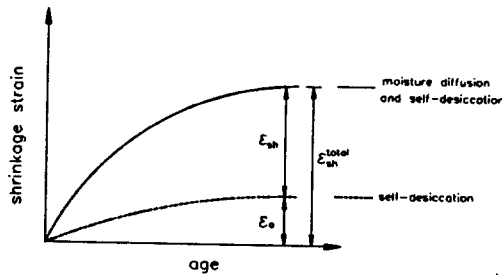


그림 1 양생초기 콘크리트 내부의 수축변형률 변화

따라서 본 연구에서는 초기재령에서 콘크리트 내부의 각 위치에서의 상대습도와 수축변형률뿐만 아니라 자체건조에 의한 상대습도의 변화량과 자기수축량을 측정하여 수분확산만에 의한 상대습도의 변화와 수축변형률을 구하고자 하였다.

실험은 항온항습실에서 실시하였으며, 항온항습실의 조건은 온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 상대습도 $50 \pm 2\%$ 이다. 실험체를 제작한 후에 건조용 실험체는 외기에 노출시키고 자체건조용 실험체는 밀폐시켜서 보관하였다.

2.2 콘크리트 내부의 수축변형률 측정 실험

본 연구에서는 콘크리트 내부의 각 위치에서 부등수분분포로 인한 부등건조수축 변형률을 측정하였다. 이를 위하여 콘크리트 내부의 각 위치에 매입형 게이지(embedded strain gauge)를 설치하였다. 매입형 게이지는 콘크리트 내부의 변형률을 측정하는데 사용되고 있다.

2.2.1 건조(drying)로 인한 콘크리트 내부의 각 위치에서의 수축변형률 측정방법

콘크리트 내부의 각 위치에서 부등건조수축량을 측정하기 위한 실험체의 형상 및 크기는 그림 2와 같다. 실험체의 크기는 $10 \times 10 \times 20\text{cm}$ 이며, 노출표면은 $10 \times 10\text{cm}$ 이다. 또한 콘크리트 내부의 각 위치

에서의 수축변형률을 측정하기 위하여 콘크리트의 노출표면에서 3, 7, 12cm 깊이에 매입형 게이지를 설치하였다.

한편 건조시에 수분확산이 일차원으로 발산하게 하기 위하여 한면을 제외한 모든 면을 파라핀으로 밀폐시켜 수분의 증발을 방지하도록 하였다.

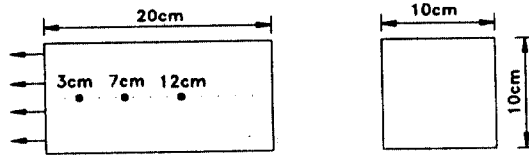


그림 2 건조용 실험체의 형상 및 크기

2.2.2 자체건조(self-desiccation)로 인한 콘크리트 내부 수축변형률 측정방법

자체건조로 인한 수축변형률을 측정하기 위하여 본 연구에서는 10×10×10cm의 실험체를 제작하였다. 이러한 실험체를 밀폐시켜 외기로의 수분손실을 차단하여 실험체 내부에 매입형 게이지를 설치하여 각 재령에서 자체건조로 인한 수축변형률을 측정하였다.

3. 콘크리트 내부의 수축변형률 해석

3.1 콘크리트의 자유수축량

본 연구에서는 수분확산에 의한 콘크리트 내부의 각 위치에서의 상대습도와 건조수축의 관계를 식 (2)와 같이 나타냈다.

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = \epsilon_{shoc} f_s(h_{drying}) = \epsilon_{shoc} (1 - h_{drying}^3) \quad (2)$$

여기서, ϵ_{shoc} 는 콘크리트가 완전히 건조되었을 때의 최종 건조수축량이다. 그리고 h_{drying} 은 수분확산에 의하여 콘크리트 내부의 각 위치에서의 상대습도이다.

3.2 콘크리트의 크리이프(creep of concrete)

콘크리트가 건조하게 되면 건조 크리이프(drying creep)가 발생한다. 이러한 추가적으로 발생하는 크리이프는 본질적으로 응력에 의한 수축(stress-induced shrinkage)이며, 부등건조수축 해석시에 고려되어야 한다. 본 연구에서는 응력에 의한 수축(stress-induced shrinkage)은 Bazant가 제시한 식에 의하여 계산하였으며, 건조 크리이프에서 응력에 의한 수축항을 따로 분리하여 고려하였다. 건조 크리이프는 자체건조와는 무관하며 건조에 의한 상대습도만을 고려한다.

따라서 시간 t_0 에서 t 까지 응력중분이 $\Delta\sigma_c(t, t_0)$ 이면 순간적인 탄성변형률과 크리이프에 의한 변형률은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_c(t, t_0) &= \frac{\Delta\sigma_c(t, t_0)}{E_c(t_0)} [1 + \chi \phi(t, t_0)] + \Delta\epsilon_{\alpha}(t, t_0) \\ &= \frac{\Delta\sigma_c(t, t_0)}{E_c(t, t_0)} + \Delta\epsilon_{\alpha}(t, t_0) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $\Delta\epsilon_{\alpha}(t, t_0)$ 는 응력에 의한 수축량이다. 그리고 χ 는 재령계수(aging coefficient)라고 하며, 응력중

분이 점차적으로 발생하는 효과를 고려하기 위하여 사용된다. x 는 0.6에서 0.9사이의 값이며, 일반적으로 0.8 정도이다.

3.3 콘크리트 내부의 수축변형률 해석

시간 t 에서 콘크리트 단면은 자체건조와 건조에 의하여 부등수분분포 상태에 있으므로 각 위치에서는 구속응력($\Delta\sigma_r$)이 발생한다. 그리고 각 위치에서 구속응력($\Delta\sigma_r$)으로 인한 변형률과 크리이프, 자유 수축 변형률의 합은 0이 되어야 한다. 즉 식 (4)의 조건을 만족해야 한다.

$$\varepsilon_{sh\&cr} f_s(h_{drying}) + \frac{\Delta\sigma_r(t, t_0)}{E_c(t_0)} (1 + \chi \phi(t, t_0)) + \Delta\varepsilon_{cs}(t, t_0) = 0 \quad (4)$$

식 (4)에서 콘크리트 단면의 각 위치에서 구속응력($\Delta\sigma_r$)을 구하면 식 (5)와 같다.

$$\Delta\sigma_r(t, t_0) = -\bar{E}_c(t, t_0) [\varepsilon_{sh\&cr} f_s(h_{drying}) + \Delta\varepsilon_{cs}(t, t_0)] \quad (5)$$

이때 콘크리트 내부의 각 위치에서의 변형률은 구속응력($\Delta\sigma_r$)에 의하여 구속을 받게 되고, 구속응력은 기준위치에서 축력(ΔN)과 휨모멘트(ΔM)를 발생시킨다. 기준위치에서의 축력(ΔN)과 휨모멘트(ΔM)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta N = \int_0^b \Delta\sigma_r(t, t_0) dA \quad (6)$$

$$\Delta M = \int_0^b \Delta\sigma_r(t, t_0) y dA \quad (7)$$

따라서 콘크리트 단면에 $-\Delta N$, $-\Delta M$ 을 작용시키면 시간 t 에서 기준위치에서의 변형률($\Delta\varepsilon_o$)과 곡률($\Delta\psi$)을 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_o(t, t_0) \\ \Delta\psi(t, t_0) \end{Bmatrix} = \frac{1}{\bar{E}_c(t, t_0)(\bar{A}\bar{I} - \bar{B}^2)} \begin{bmatrix} \bar{I} & -\bar{B} \\ -\bar{B} & \bar{A} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\Delta N \\ -\Delta M \end{Bmatrix} \quad (8)$$

여기서, \bar{A} , \bar{B} , \bar{I} 는 기준 위치에서 재령보정 환산단면(age-adjusted transformed section)의 면적, 일차 모멘트, 이차 모멘트를 각각 나타낸다.

시간 t 에서 콘크리트 단면의 각 위치에서의 변형률은 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \Delta\varepsilon_o(t, t_0) + \Delta\psi(t, t_0) y \quad (9)$$

그리고 콘크리트 단면의 각 위치에서 작용하는 응력은 식 (10)과 같다.

$$\sigma_c(t, t_0) = \Delta\sigma_r(t, t_0) + \bar{E}_c(t, t_0) [\Delta\varepsilon_o(t, t_0) + \Delta\psi(t, t_0) y] \quad (10)$$

4. 실험결과 및 분석

4.1 콘크리트 내부의 수축변형률 분포의 실험결과와 해석결과와의 비교

콘크리트 내부의 각 위치에서 수분확산과 자체건조에 의한 수축변형률 분포는 그림 3과 같다. 또한 콘크리트의 자체건조에 의한 자기수축 변형률로 나타났다. 저장도 콘크리트에서는 자체건조로 인하여 수축변형률의 변화는 매우 작지만 수분확산으로 인하여 각 위치에서의 수축변형률의 차이는 매우 현저하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그렇지만 고강도 콘크리트에서는 자체건조로 인한 수축변형률이 매우 크게 나타나지만, 각 위치에서의 수축변형률의 차이는 매우 작음을 알 수 있다. 이는 고강도 콘크리트에서는 공극조직이 저장도 콘크리트보다 치밀하게 때문에 수분확산이 느리게 일어나서 콘크리트

내부와 표면의 상대습도 차이가 작기 때문이다.

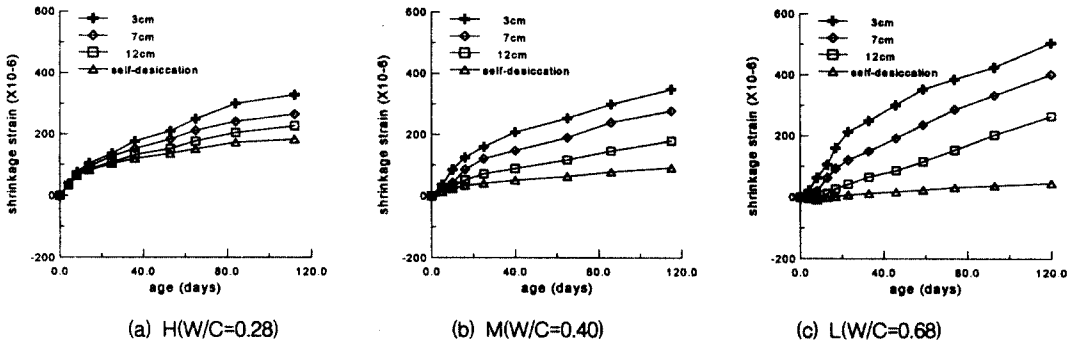


그림 3 콘크리트 내부의 수축변형률 분포

4.2 수분확산에 의한 콘크리트 내부의 상대습도 실험결과와 해석결과의 비교

식 (1)에서 자체건조로 인한 수축변형률(ϵ_a)을 제외한 수분확산만에 의한 콘크리트 내부의 수축변형률(ϵ_{sh})을 구할 수 있다. 따라서 콘크리트 내부의 수축변형률 실험결과로부터 수축변형률에 의한 콘크리트 내부의 수축변형률을 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 또한 본 연구에서 제시한 해석방법을 이용하여 자체건조와 수분확산이 동시에 일어나는 경우에 콘크리트 내부의 수축변형률 분포에 대하여 해석을 수행하였다. 그림 4에서 실험결과와 해석결과를 나타냈다. 초기재령의 경우에도 해석결과는 실험결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

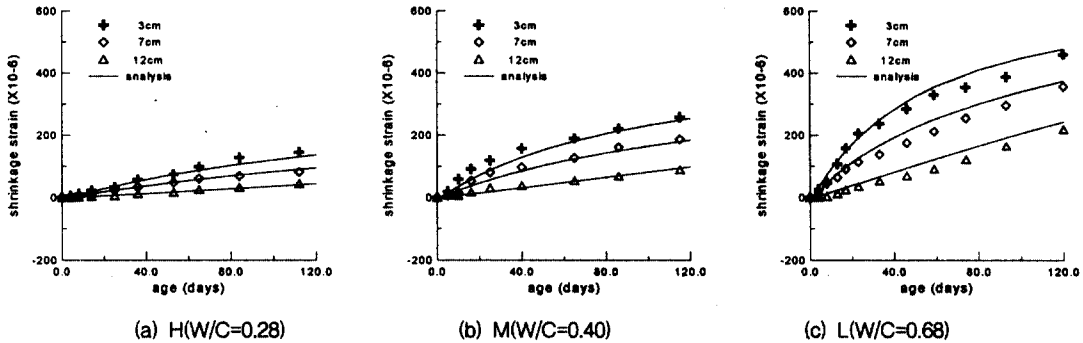


그림 4 수분확산에 의한 콘크리트 내부의 수축변형률 분포

그림 5는 콘크리트 표면으로 3cm깊이에서 자체건조에 의한 수축변형률과 수분확산에 의한 수축변형률도의 변화를 나타낸 것이다. 그림 5에서 기울기는 자기수축 변형률에 대한 수분확산에 의한 수축변형률의 변화량을 나타내며 저강도 콘크리트에서 기울기가 매우 급하게 변하며, 고강도 콘크리트에서는 기울기가 매우 작은 것을 알 수 있다.

4.3 수분손실량과 수축변형률의 관계

콘크리트의 수분확산에 의하여 발생하는 수분손실은 자체건조와는 상관이 없으며, 따라서 수분손실

량은 수분확산 속도와 밀접한 관련이 있다. 그림 6은 콘크리트 노출표면에서 3cm깊이에서 수분손실량과 수분확산에 의한 콘크리트의 수축변형률을 나타낸 것이다. 초기에는 수분손실량에 대하여 수축량이 작지만 시간이 경과함에 따라 수분손실량과 수축량이 거의 선형관계를 이루고 있다.

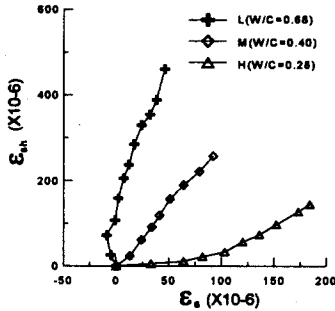


그림 5 콘크리트의 부등건조수축 변형률과 자기수축 변형률의 관계

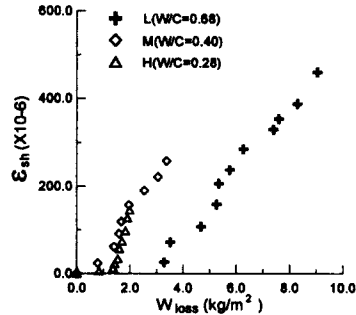


그림 6 수분확산에 의한 수축변형률과 수분손실량의 관계

5. 결 론

본 연구에서는 초기재령에서 콘크리트 내부의 상대습도의 변화에 대한 실험을 실시하였다. 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 초기재령에서는 저강도 콘크리트는 주로 수분확산의 영향을 받아 수축현상이 일어나지만 고강도 콘크리트에서는 자체건조에 의해 큰 수축량이 발생한다. 따라서 초기재령에서 수분확산에 의한 부등건조수축 실험을 위해서는 자체건조로 인한 수축변형률의 영향을 고려해야 한다.
- (2) 초기재령의 경우에도 제시한 해석결과는 실험결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.
- (3) 노출 초기에는 수분손실량에 대하여 수분확산에 의한 수축량이 작지만 시간이 경과함에 따라 수분손실량과 수축량이 거의 선형관계를 이루고 있다.

참고문헌

1. Bazant, Z. P., and Najjar, L. J., "Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete," Materials and Structures, Vol. 5, No. 25, 1972, pp. 3-20.
2. 김진근, 이칠성, "콘크리트의 부등건조수축에 관한 연구," 콘크리트학회지, Vol. 9, No. 2, 1997, pp.153-161.
3. Scott, R. H. and Gill, P. A. T., "Measurement of Internal Concrete Strains Using Embedment Strain Gauges," Magazine of Concrete Research, Vol. 39, No. 139, 1987, pp.109-112.
4. Tazawa, A. and Miyazawa, S., "Autogenous Shrinkage of Concrete and Its Importance in Concrete Technology," Creep and Shrinkage of Concrete, ed. by Bazant, Z. P., E&FN SPON, 1993, pp.159-168.