

초기재령 콘크리트의 수분확산과 자체건조에 관한 연구

Moisture Diffusion and Self-desiccation of Concrete at Early Ages

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

ABSTRACT

In the concrete structures exposed to environmental conditions at early ages, water movement occurs by moisture diffusion in the concrete, and self-desiccation of concrete is also occurred. Thus the internal relative humidity is changed from moisture diffusion and self-desiccation. Thus the internal relative humidity at each location in concrete includes the decrease by self-desiccation. Especially, for high-strength concrete the much unit cement content is used, so that the non-uniform relative humidity distribution is affected from self-desiccation at early ages.

In this study, the internal relative humidity in concrete was measured at early ages, and the moisture diffusion component and self-desiccation component of total relative humidity were discussed.

1. 서론

콘크리트를 외기에 노출시키면 수분확산(moisture diffusion)으로 인하여 수분의 이동이 일어나고, 콘크리트 내부는 부동수분분포를 이룬다. 각 위치에서의 수분 차이로 인하여 콘크리트에서 부동건조수축(differential drying shrinkage)이 발생한다. 부동건조수축은 콘크리트 표면에 인장응력을 발생시키며, 이 때 발생된 인장응력에 의해 콘크리트 표면에 균열이 발생하는 경우가 빈번하다.

양생초기에 콘크리트를 외기에 노출시키면 건조작용으로 인하여 외기로 수분손실이 발생하고, 또한 내부에서는 자체건조로 인하여 전체 증발가능수량의 일부가 화학적 결합수로 변한다. 특히 최근에 많이 사용되고 있는 고강도 콘크리트의 경우에는 단위 시멘트량의 사용량이 증가하기 때문에 초기재령에서 자체건조로 인한 수분손실량은 매우 크다. 따라서 이로 인하여 초기재령에서 콘크리트 내부의 수분확산 및 수분분포는 크게 영향을 받는다. 그러나 기존의 콘크리트의 수분확산 실험에서는 자체건조로 인한 수분손실을 무시하거나 고려하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 초기재령에서 자체건조로 인한 수분손실을 고려하여 콘크리트의 수분확산 실험을 수행하였다. 또한 콘크리트 내부의 각 위치에서 전체 상대습도분포에 대하여 수분확산에 의한 영향과 자체건조에 의한 영향을 구분하여 초기재령에서 자체건조의 영향을 제외하고 수분확산만에 의한 상대습도의 변화에 대하여 검토하였다.

*정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

**정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

2. 실험

2.1 실험개요

그림 1은 양생초기에 콘크리트가 외기에 노출되었을 때 내부의 각 위치에서의 상대습도 변화를 나타내고 있다. 여기서 자체건조에 의한 상대습도의 변화량(Δh_{self})은 각 위치에서 동일하지만, 건조에 의한 상대습도의 변화량(Δh_{drying})은 각 위치에서 다르다. 이 때 콘크리트 내부의 상대습도 변화량은 식 (1)과 같이 자체건조와 건조에 의한 상대습도의 변화량으로 나타낼 수 있다. 또한 식 (1)을 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta h = \Delta h_{drying} + \Delta h_{self} \quad (1)$$

$$1 - h = (1 - h_{drying}) + (1 - h_{self}) \quad (2)$$

여기서, h 는 자체건조와 건조로 인한 콘크리트 내부의 상대습도이다. 그리고 h_{drying} 은 건조(drying)만이 일어날 때의 콘크리트 내부의 상대습도이고, 그림 1에서 $h_{drying} = h + \Delta h_{self}$ 이다. h_{self} 는 자체건조(self-desiccation)로 인한 콘크리트 내부의 상대습도이다.

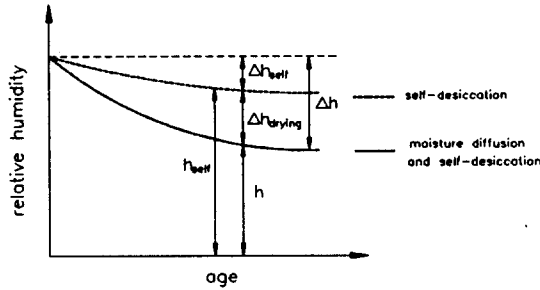


그림 1 양생초기 콘크리트 내부의 상대습도 변화

따라서 본 연구에서는 양생초기에 자체건조의 영향을 고려하여 콘크리트 내부의 수분확산에 대한 실험을 실시하였다. 이를 위하여 초기재령에서 콘크리트 내부의 자체건조로 인한 함수량의 변화와 수분확산으로 인한 콘크리트 내부의 각 위치에서의 수분분포에 대한 실험을 수행하였다. 그리고 건조로 인한 수분손실량 실험을 실시하였다. 본 연구에서 실시한 실험은 표 1과 같다.

표 1 실험체의 종류 및 크기

실험 목적	실험체 종류	실험체 크기
콘크리트 내부의 상대습도 측정	각 위치의 상대습도 측정	10×10×20cm
	자체건조 상대습도 측정	10×10×10cm
수분손실량 측정	건조에 의한 수분손실량 측정	10×10×20cm

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.

실험에 사용한 시멘트는 1종 포틀랜드 시멘트(type I)이고, 잔골재는 금강유역의 강모래이며, 굵은골재는 최대치수 19mm인 화강암 부순자갈을 사용하였다. 실험에 사용한 배합은 표 2와 같다. 자체건조가 콘크리트의 수분확산에 미치는 영향을 알아보기 위하여 고강도, 중간강도, 저강도 배합을 선정하였다.

표 2 배합설계

Specimen	W/C (%)	S/A (%)	Unit weight (kg/m ³)				S.P. (%)	f _c ' (kg/cm ²)
			W	C	S	G		
H	28	38	151	541	647	1055	2.0	780
M	40	42	169	423	736	1016	0.5	540
L	68	45	210	310	782	955	-	220

2.2 콘크리트 내부의 상대습도 측정실험

콘크리트 내부 공극의 상대습도는 콘크리트의 함수량을 나타내기 위하여 가장 널리 사용되고 있다. 콘크리트 노출표면으로부터 각 위치에 드릴을 이용하여 구멍을 설치한 후에 상대습도 측정장치(RH measuring device)를 이용하여 각 위치에서의 상대습도를 측정하였다.

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

실험체의 크기는 그림 2와 같이 10×10×20cm이며, 노출면적은 10×10cm이다. 그리고 콘크리트 내부의 각 위치에서의 상대습도를 측정하기 위하여 콘크리트의 노출표면에서 3, 7, 12cm 깊이에 Plastic Sleeve를 설치하였다.

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

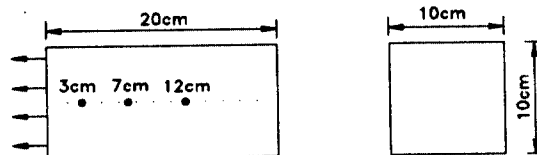


그림 2 건조용 실험체의 형상 및 크기

2.2.2 자체건조(self-desiccation)로 인한 콘크리트 내부의 상대습도 측정방법

자체건조로 인한 수분손실량을 측정하기 위하여 본 연구에서는 10×10×10cm의 실험체를 제작하였다. 이러한 실험체를 밀폐시켜 외기로의 수분손실을 차단하여 실험체 내부에 Plastic Sleeve를 설치하여 각 재령에서 자체건조로 인한 상대습도의 변화를 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 자체건조와 수분확산에 의한 콘크리트 내부의 상대습도 분포

초기재령에서 콘크리트를 의기에 노출시킨 경우 각 위치에서의 상대습도는 그림 3과 같다. 또한 콘크리트 내부에서 자체건조로 인한 상대습도를 측정하기 위하여 밀폐시킨 실험체의 상대습도 변화에 대한 실험결과도 나타났다. 저장도 콘크리트에서는 자체건조로 인한 상대습도의 변화는 매우 작지만 수분확산으로 인하여 각 위치에서의 상대습도의 차이는 매우 현저하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그렇지만 고강도 콘크리트에서는 자체건조로 인한 상대습도의 감소가 크게 나타나고 있지만, 각 위치에서의 상대습도 차이는 매우 작음을 알 수 있다. 이는 고강도 콘크리트에서는 공극조직이 저장도 콘크리트보다 치밀하게 때문에 수분확산이 느리게 일어나기 때문이다. 이와 같이 초기재령에서는 수분확산과 자체건조가 동시에 일어나므로 콘크리트 표면에서의 상대습도는 각 콘크리트에 대하여 크게 차이가 없지만, 자체건조에 따라 콘크리트 내부의 상대습도는 각 콘크리트 사이에 큰 차이를 나타내고 있다. 따라서 초기재령에서 수분확산에 대한 실험을 위해서는 자체건조로 인한 상대습도의 변화를 고려해야 한다.

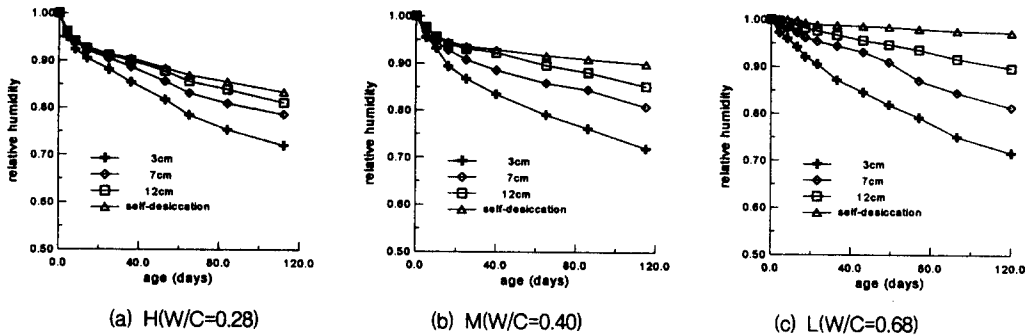


그림 3 콘크리트 내부의 상대습도 분포

3.2 수분확산에 의한 콘크리트 내부의 상대습도 실험결과와 해석결과와의 비교

그림 1에서 자체건조로 인한 상대습도(h_{self})를 제외한 수분확산만에 의한 콘크리트 내부의 상대습도(h_{drying})는 $h + \Delta h_{self}$ 이다. 따라서 콘크리트 내부의 상대습도 실험결과로부터 수분확산에 의한 콘크리트 내부의 상대습도를 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 그리고 비선형 수분확산 방정식을 통하여 콘크리트 내부의 각 위치에서의 상대습도에 대한 해석결과와 실험결과를 그림 4에서 나타냈다. 초기재령의 경우에도 수분확산 방정식을 통한 해석결과는 실험결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 그림 4에서 알 수 있듯이 고강도 콘크리트보다 저장도 콘크리트에서 수분확산이 훨씬 빠르게 진행되고, 따라서 콘크리트 내부의 각 위치에서의 상대습도 차이도 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 5는 콘크리트 표면으로 3cm깊이에서 자체건조에 의한 상대습도의 변화와 수분확산에 의한 상대습도의 변화를 나타낸 것이다. 그림 5에서 기울기는 자체건조에 대한 수분확산의 변화량을 나타내며 저장도 콘크리트에서 기울기가 매우 급하게 변하며, 고강도 콘크리트에서는 기울기가 매우 작은 것을 알 수 있다.

3.3 수분확산에 의한 콘크리트의 수분손실량

콘크리트의 수분확산에 의하여 발생하는 수분손실은 자체건조와는 상관이 없으며, 따라서 수분손실량은 수분확산 속도와 밀접한 관련이 있다. 그림 6은 시간에 따른 콘크리트의 수분손실량을 나타낸 것이다. 물시멘트비가 증가하고, 또한 단위수량이 감소함에 따라 수분손실량은 현저하게 증가하는 경향

을 보이고 있다.

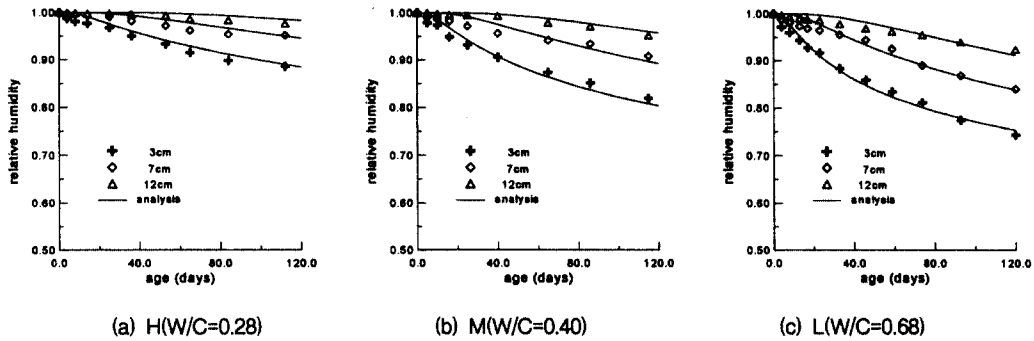


그림 4 수분확산에 의한 콘크리트 내부의 상대습도

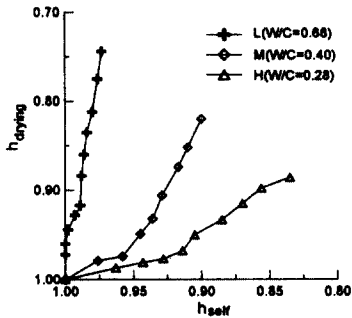


그림 5 콘크리트의 수분확산과 자체건조의 관계

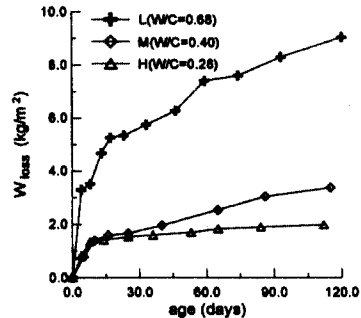


그림 6 콘크리트의 수분손실량

3.4 자체건조에 의한 콘크리트의 수분손실량

그림 7은 자체건조에 의한 콘크리트의 상대습도 변화를 나타내고 있다. 강도에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 고강도 콘크리트에서 자체건조에 의하여 콘크리트 내부의 상대습도는 저강도 콘크리트와 비교할때 큰 차이를 보이고 있다. 본 연구에서는 식 (3)과 같이 나타냈고, 회귀분석을 통하여 계수를 결정하여 표 3에 나타냈다. 회귀분석결과는 실험결과와 잘 예측하고 있다.

$$h_{self} = (1 + at)^{-1/b} \quad (3)$$

표 3 식 (3)의 a, b값

Specimen	a	b
L(W/C=0.68)	0.0154	37.630
M(W/C=0.40)	0.1752	28.024
H(W/C=0.28)	0.2032	18.896

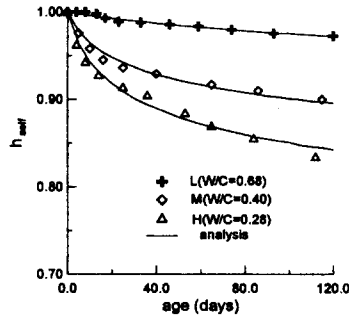


그림 7 자체건조에 의한 콘크리트 내부의 상대습도

4. 결 론

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

- (1) 초기재령에서 수분확산과 자체건조가 발생하는 경우에 저강도 콘크리트에서는 수분확산이 콘크리트 내부의 수분분포에 대하여 현저하게 영향을 주고 있지만, 고강도 콘크리트에서는 자체건조가 큰 영향을 주고 있다.
- (2) 고강도 콘크리트보다 저강도 콘크리트에서 수분확산이 훨씬 빠르게 진행되고, 따라서 콘크리트 내부의 각 위치에서의 상대습도 차이도 크게 나타나는 것을 알 수 있다.
- (3) 초기재령의 경우에도 수분확산 방정식을 통한 해석결과는 실험결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 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, 이철성, "콘크리트의 부동건조수축에 관한 연구," 콘크리트학회지, Vol. 9, No. 2, 1997, pp.153-161.
3. Sakata, K., "A Study on Moisture Diffusion in Drying and Drying Shrinkage of Concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 13, No. 2, 1983, pp.216-224.
4. Parrott, L. J., "Factors Influencing Relative Humidity in Concrete," Magazine of Concrete Research, Vol. 43, No. 154, 1991, pp.45-52.
5. Terrill, J. M., Richardson, M. and Selby, A. R., "Non-linear Moisture Profiles and Shrinkage in Concrete Members," Magazine of Concrete Research, Vol. 38, No. 137, 1986, pp.220-225.
6. Merikallio, T., Mannonen, R. and Penttala, V., "Drying of Lightweight Concrete Produced from Crushed Expanded Clay Aggregates," Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 9, 1996, pp.1423-1433.