

콘크리트 슬래브의 소성수축균열에 대한 해석적 연구

A Numerical Study on Plastic Shrinkage Cracking of Concrete Slabs

곽효경* 하수준**

Kwak, Hyo Gyoung Ha, Soo Jun

ABSTRACT

In this paper, the influence of many factors related to the concrete mixture and the weather condition on plastic shrinkage cracking are analyzed through parametric studies using the numerical models introduced in the companion paper. First of all, through a systematic calculation of bleeding, the relationship between the bleeding constants and concrete mixture is proposed on the basis of the experimental data obtained by many researchers. Moreover, an equation, which can directly determine a critical point at which the evaporation and bleeding is balanced, is introduced, and the efficiency of the introduced equation is verified through the correlation study between the obtained results by the introduced equation and those by the rigorous analyses. The introduced equation can effectively be used to predict and to prevent plastic shrinkage cracking without any rigorous analysis and, in advance, to cope with the sudden changes in the concrete mixture and/or weather condition.

1. 서론

소성수축균열은 콘크리트 표면의 건조에 의해 발생하므로 블리딩수가 완전히 증발하는 시기는 소성수축균열의 발생 여부를 예측하는데 중요한 기준이 되는데 콘크리트의 초기거동을 모사하고 블리딩수가 완전히 증발하는 시기를 수치적으로 해석함으로써 소성수축균열의 발생을 예측할 수 있는 해석 모델을 참고문헌¹⁾에서 제안한 바 있다. 한편 실제 시공 현장에서는 콘크리트 배합 및 외기조건의 변화가 빈번히 발생하는 관계로 소성수축균열 발생 가능성을 예측하고 이에 대한 대비를 하는 것이 필요하다. 따라서 이 논문에서는 소성수축균열과 직접적인 관련을 갖는 변수들을 선정하여 소성수축균열 해석을 수행하였으며 얻어진 결과를 토대로 소성수축균열의 발생에 미치는 각 설계변수의 상대적인 영향을 비교, 분석하고자 한다. 먼저 소성수축균열 해석을 수행하기에 앞서 배정렬²⁾, 황인성³⁾, Hoshino⁴⁾ 등이 수행한 콘크리트 블리딩 실험으로부터 얻어진 실험결과를 이용해 블리딩 해석상수와 블리딩에 영향을 미치는 영향인자와의 관계를 규명하였다. 나아가 이 논문에서는 해석결과를 바탕으로 블리딩수의 완전 증발시기에 대한 모델식을 제안함으로써 영향인자에 따른 소성수축균열 발생 특성을 정량적으로 규명하고자 하였다.

*정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

**정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정

2. 콘크리트의 블리딩 상수 결정

먼저 콘크리트의 배합요인 및 슬래브 두께와 블리딩 해석상수와와의 관계를 알아보기 위하여 배정렬, 황인성, Hoshino 등이 콘크리트 블리딩 실험으로부터 얻은 실험결과를 분석하였다. 배합과 슬래브 두께가 서로 다른 28개의 콘크리트 공시체의 블리딩 실험결과를 분석하였고 블리딩 해석결과와 실험결과와의 오차가 최소가 되도록 최소자승법을 이용하여 해석에 사용되는 블리딩 해석상수 K_0 와 β 를 산정하였다. 이와 같은 방법으로 28개의 콘크리트 공시체의 블리딩 해석상수를 산정한 결과 콘크리트의 블리딩 해석상수는 여러 설계인자의 변화에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 따라서 각 설계인자의 상대적인 영향을 평가하고 이를 반영함으로써 해석상수의 관계식을 구성하고자 하였다. 이를 위해 특정 기준 배합을 중심으로 상대적인 크기를 나타내는 정규화(normalization)를 수행하였다. 수행한 회귀 분석 결과를 토대로 블리딩 해석상수 K_0 와 β 는 물-시멘트비(w/c), 단위수량(W), 잔골재율(s/a), 슬래브 두께(H)의 함수로 다음 식 (1)과 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$K_0 = K_{0,ref} \cdot [-7.87e^{-(w/c)/28.88} + 2.40] \cdot [2.00 \times 10^{-8}e^{W/10.36} + 0.57] \cdot [-0.115(s/a) + 6.29] \cdot [0.048H - 0.20] \quad (1)$$

$$\beta_0 = \beta_{0,ref} \cdot [193e^{-(w/c)/8.71} + 0.38] \cdot [7936e^{-W/18.10} + 0.50] \cdot [0.044(s/a) - 1.02] \cdot [0.036H + 0.10] \quad (2)$$

여기서, $K_{0,ref}$ 와 β_{ref} 는 w/c = 50%, W = 175kg/m³, s/a = 46%, H = 25cm일 때의 기준 블리딩 해석상수 K_0 와 β 를 각각 의미한다.

3. 콘크리트의 소성수축균열 특성

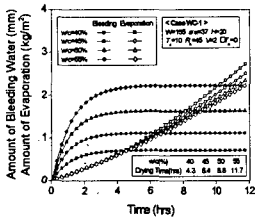
한편 콘크리트 배합 및 외기조건이 콘크리트의 소성수축균열에 미치는 영향을 파악하기 위하여 물-시멘트비(w/c), 단위수량(W), 잔골재율(s/a), 슬래브 두께(H), 외기온도(T_a), 외기습도(R_h), 풍속(V), 타설온도 저감량(ΔT_0)을 소성수축균열에 영향을 미치는 영향인자로 선정하였고 8개의 영향인자를 표 1에 나타낸 바와 같이 변화시켜 49152가지 경우에 대한 소성수축균열 해석을 수행하였다.

표 1 소성수축균열의 영향인자

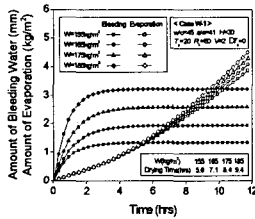
Parameters	w/c(%)	W(kg/m ³)	s/a(%)	H(cm)	T_a (°C)	R_h (%)	V(m/s)	ΔT_0 (°C)
Values	40	155	37	20	10	45	0	0
	45	165	41	30	15	60	1	-4
	50	175	45	40	20	75	2	-8
	55	185	49	50	25	90	3	

그림 1(a)와 1(b)에는 각각 물-시멘트비와 단위수량이 서로 다른 콘크리트 슬래브의 블리딩과 수분증발을 해석한 결과를 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 수분증발량 그래프는 비선형성을 나타내는데 이는 시간이 지날수록 수화열에 의해 수분증발률이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 외기조건이 일정함에도 불구하고 물-시멘트비가 증가하거나 단위수량이 감소하면 수분증발률이 감소하게 되는데 이는 콘크리트의 최대상승온도가 감소하여 콘크리트 표면온도의 증가량이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 한편 그림 1(a)와 1(b)에서 알 수 있는 바와 같이 물-시멘트비, 단위수량이 증가함에 따라 블리딩수가 완전히 증발하는 시기(drying time)가 지연되는데 이는 물-시멘트비, 단위수량이 변함에 따라 수분증발량은 큰 차이를 나타내지 않는 반면 블리딩량이 크게 변하기 때문임을 알 수 있다.

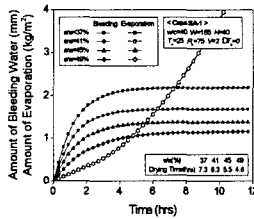
그림 1(c)와 1(d)에는 각각 잔골재율과 슬래브 두께가 서로 다른 콘크리트 슬래브의 블리딩과 수분증발을 해석한 결과를 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 수분증발량에 대한 잔골재율, 슬래브 두께의 영향은 무시할 수 있을 정도로 작음을 알 수 있다. 한편 잔골재율이 증가하거나 슬래브 두께가 작아지면 블리딩수가 완전히 증발하는 시기가 빨라지는데 이는 앞에서 언급한 바와 같이 잔골재율과 슬래브 두께에 따른 수분증발률의 변화는 거의 없지만 잔골재율이 증가하거나 슬래브 두께가 작아질수록 블리딩량이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.



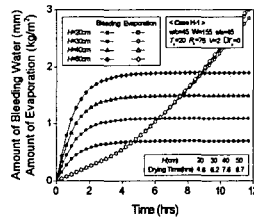
(a) 물-시멘트비의 영향



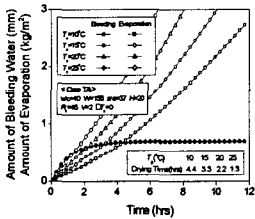
(b) 단위수량의 영향



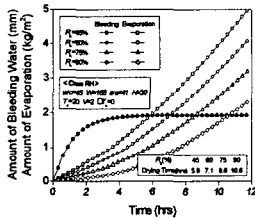
(c) 잔골재율의 영향



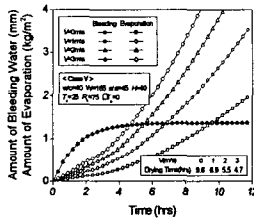
(d) 슬래브 두께의 영향



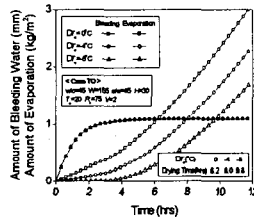
(e) 외기온도의 영향



(f) 외기습도의 영향



(g) 풍속의 영향



(h) 초기온도 저감량의 영향

그림 1 콘크리트 슬래브의 블리딩과 수분증발

그림 1(e)와 1(f)에는 동일한 배합의 콘크리트 슬래브가 각각 서로 다른 외기온도와 외기습도에 노출되었을 때의 블리딩과 수분증발 해석결과를 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 외기온도와 외기습도는 콘크리트의 블리딩에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 한편 그림 1(e)에서 알 수 있는 바와 같이 외기온도가 증가할수록 수분증발량은 증가하고 이로 인해 블리딩수가 완전히 증발하는 시기가 빨라지게 된다. 그리고 그림 1(f)에서 보는 바와 같이 외기습도가 증가하면 수분증발량은 감소하고 이로 인해 블리딩수의 완전 증발시기가 지연되는 것을 알 수 있다. 그림 1(g)에는 동일한 배합의 콘크리트 슬래브가 서로 다른 풍속에 노출되었을 때의 블리딩과 수분증발 해석결과를 나타내었고 그림 1(h)에는 타설온도 저감량이 서로 다른 경우의 해석결과를 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 풍속과 타설온도 저감량은 콘크리트의 블리딩에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 한편 그림 1(g)에서 알 수 있는 바와 같이 풍속이 증가할수록 수분증발량은 증가하고 이로 인해 블리딩수가 완전히 증발하는 시기가 빨라지게 된다. 그리고 그림 1(h)에 나타난 바와 같이 타설온도 저감량이 증가하면 수분증발량은 감소하고 이로 인해 블리딩수의 완전 증발시기는 지연되는 것을 알 수 있다.

한편 앞에서 언급한 바와 같이 소성수축균열은 블리딩수의 증발로 인한 표면의 건조에 의해 발생하므로 블리딩수가 완전히 증발하는 시기는 소성수축균열의 발생 여부를 예측하는데 중요한 기준이 된다. 따라서 앞에서 얻어진 해석결과를 회귀분석하여 블리딩수의 완전 증발시기에 대한 모델식을 구성하면 식 (3)과 같이 표현된다.

$$T_D = T_{D,ref} \cdot [0.049(w/c) - 1.45] \cdot [0.014W - 1.45] \cdot [-0.038(s/a) + 2.75] \cdot [0.024H + 0.40] \cdot [-0.040T_a + 1.80] \cdot [0.016R_h + 0.04] \cdot [-0.285V + 1.57] \cdot [-0.052\Delta T_o + 1.00] \quad (3)$$

여기서, T_D 는 블리딩수가 완전히 증발하는 시기(hrs)를 의미하고 $T_{D,ref}$ 는 $w/c = 50\%$, $W = 175\text{kg/m}^3$, $s/a = 46\%$, $H = 25\text{cm}$, $T_a = 20^\circ\text{C}$, $R_h = 60\%$, $V = 2\text{m/s}$, $\Delta T_o = 0^\circ\text{C}$ 일 때의 T_D 로 본 논문에서의 해석결과 8.58시간이다. 한편 식 (3)과 같은 모델식의 타당성을 검증하기 위하여 소성수축균열 해석으로부터 얻어진 T_D 를 모델식을 이용해 산정한 T_D 와 그림 2에서 비교해 보았다. 이 그림에서 보는 바와 같이 상관계수는 0.952로 블리딩수의 완전 증발시기 모델식이 타당함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 소성수축균열 해석모델을 이용해 소성수축균열의 영향인자에 따른 소성수축균열 발생 특성을 분석하였다. 소성수축균열의 영향인자로 콘크리트 배합과 관련이 있는 물-시멘트비, 단위수량, 잔골재율, 슬래브 두께와 외기조건과 관련된 외기온도, 외기습도, 풍속, 타설온도 저감량을 선정하였다. 먼저 영향인자에 따른 콘크리트의 블리딩 변화를 해석할 수 있도록 하기 위하여 타 연구자의 블리딩 실험결과를 토대로 블리딩 해석상수 모델식을 제안하였다. 다음으로 콘크리트 배합과 외기조건을 변화시켜 각각의 영향인자가 소성수축균열 발생에 미치는 영향을 분석하였다. 나아가 해석결과를 바탕으로 블리딩수 완전 증발시기 모델식을 제안하여 영향인자에 따른 소성수축균열 발생 특성을 정량적으로 규명하였고 이와 같이 제안된 모델식을 시공 현장에서 이용한다면 현장의 콘크리트 배합 및 외기조건에 따라 소성수축균열 발생 가능성을 예측하고 대비하는데 많은 도움이 될 것으로 생각된다.

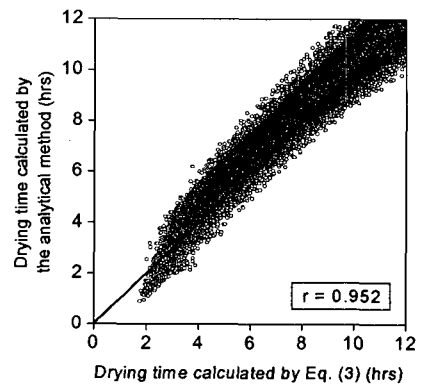


그림 2 소성수축균열 해석과 모델식으로부터 각각 구한 블리딩수 완전 증발시기의 비교

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 광효경, 하수준, "콘크리트 슬래브의 소성수축균열 해석모델", 대한토목학회논문집, 제24권, 제5A호, 2004, pp. 999-1009.
2. 배정렬, 심보길, 황인성, 전충근, 한천구, "배합요인이 콘크리트의 블리딩에 미치는 영향", 대한건축학회 학술발표논문집, 제21권, 제2호, 2001, pp. 371-374.
3. 황인성, 김경민, 전충근, 신병철, 한천구, "콘크리트의 블리딩에 미치는 배합 및 시공요인의 영향", 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제14권, 제2호, 2002, pp. 265-268.
4. Hoshino, M., "Relationship between bleeding, coarse aggregate, and specimen height of concrete", ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 2, 1989, pp. 185-190.