

전력구 콘크리트 구조물의 건조수축 균열특성에 관한 연구

우상균¹, 추인엽², 김기중³, 이윤^{4*}

Cracking Behavior of Concrete Box Culvert for Power Transmission Due to Drying Shrinkage

Sang-Kyun Woo¹, In-Yeop Chu², Ki-Jung Kim³, Yun Lee^{4*}

Abstract: The purpose of this study is to predict the cracking behavior and suggest the method of controlling the cracking in concrete box culvert for power transmission due to differential drying shrinkage. Drying shrinkage cracking is mainly influenced by the moisture diffusion coefficient that determines moisture diffusion rate inside concrete structures. In addition to the diffusion coefficient, surface coefficient of concrete surface and relative humidity of ambient air simultaneously affect the moisture evaporation from concrete inside to external air outside. Within the framework of drying shrinkage cracking mechanism, it is necessary to perform the numerical analysis, which involves these three influencing factors to predict and control the shrinkage cracking of concrete. In this study, moisture diffusion and stress analysis corresponding to drying shrinkage on concrete box culvert are performed with consideration of diffusion coefficient, surface coefficient, and relative humidity of ambient air. From the numerical results, it is found that cracking behavior due to differential drying shrinkage of box culvert shows the different feature according to three influencing factors and the methodology of controlling of drying shrinkage cracks can be suggested from this study.

Keywords: Box culvert, Diffusion coefficient, Drying shrinkage, Cracking, Numerical analysis

1. 서 론

외기에 노출된 콘크리트는 사용수명 동안 외기로 내부 수분의 건조가 발생하며, 건조과정으로 인해 내부 수분은 시간이 경과함에 따라 손실된다. 그리고 이러한 콘크리트 내부 수분의 변화는 콘크리트의 여러 가지 물성에 많은 영향을 준다. 크리프나 건조수축과 같은 장기거동 특성뿐만 아니라 콘크리트의 압축강도나 탄성계수 등도 수분상태에 따라 크게 달라진다. 또한 콘크리트 내부의 수분분포는 내화성, 내구성, 동결융해 저항성 등에도 크게 영향을 준다. 따라서 콘크리트가 외기에 노출되어 건조하는 동안 내부의 수분분포를 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

콘크리트의 수분확산과정에 대한 연구는 수십 년에 걸쳐 연구되어 왔고, 그 연구결과에 있어 상당한 성과를 거두었다. (Bazant et al., 1972; Matano, 1932; Pickett, 1946; Sakata et al.,

1983) 현재, 비선형 확산 이론에 근거한 수분확산과정에 대한 예측식들은 상당한 정도의 정확성을 가지고 있다. 그럼에도 불구하고 수분확산계수와 온도와의 상관관계에 대해서는 그렇게 많은 관심을 보이지 않은 것이 사실이다. 그러나 수분의 확산과정이 온도변화에 의해 상당히 영향을 받는다는 사실을 고려할 때 수분확산계수와 온도와의 상관성에 대한 명확한 규명이 필요하다.

한편 일반적인 개착식 전력구 박스 콘크리트 구조물은 시공초기부터 구조물의 내외부가 외기에 노출되며, 외기로의 수분확산이 발생한다. 이러한 수분이동현상은 박스 구조물의 상하부 슬래브 및 벽체 단면 전체를 통해 부등수분분포를 야기하며, 부등수분분포는 부등응력분포를 발생시켜 부등건조수축에 의한 슬래브 및 벽체부의 균열 발생 원인이 된다. 부등건조수축에 의한 균열발생은 박스 형태의 전력구 구축도와 콘크리트 내부에서 외부로의 수분이동현상을 결정하는 수분확산계수와 표면계수, 외기습도에 영향을 받는다. 따라서 전력구 슬래브 및 벽체의 시공시 빈번한 문제가 되는 부등건조수축에 의한 균열제어를 위해 앞서 기술한 부등건조수축 영향인자에 대한 부등건조수축 해석이 필요하다. 따라서 이 연구에서는 박스 형태의 콘크리트 구조물의 부등건조수축 균열을 발생시키는 수분이동을 결정하는 주요영향인자의 영향을

¹정회원, 한국전력공사 전력연구원 파워시스템연구소 책임연구원

²정회원, 한국전력공사 전력연구원 파워시스템연구소 연구원

³정회원, ㈜세니츠코퍼레이션 대표이사

⁴정회원, 대전대학교 토목공학과 조교수, 교신저자

*Corresponding author: yunis@dju.ac.kr

•본 논문에 대한 토의를 2016년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 3월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

파악하고, 전력구 시공시 효과적인 균열제어 방안을 제시하고자 한다.

2. 콘크리트 수분확산 특성

2.1 수분확산방정식

콘크리트 내부의 수분분포는 수분확산이론에 의하여 설명될 수 있다. 수분확산이론에서의 수분확산계수는 상대습도와 온도의 영향을 주로 받지만, 물-시멘트비, 골재의 양과 질 등 콘크리트의 재료적 특성에도 영향을 받는다. 따라서 콘크리트 내의 수분이동은 고차의 비선형성을 나타낸다. 비선형 수분확산 방정식(nonlinear moisture diffusion equation)은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = c \operatorname{div}(k \operatorname{grad} h) = \operatorname{div}(D \operatorname{grad} h) \quad (1)$$

여기서 D 를 수분확산계수(moisture diffusion coefficient)라 하며, 그 값은 $c k$ 이다.

결국 수분확산방정식에서는 두 개의 계수를 구해야 한다. 즉 수분용량($\partial w / \partial h$)과 투수계수(k)를 결정하면 수분확산계수 D 를 구할 수 있다. 두 계수는 공극의 상대습도 h 에 의존하고 이로 인하여 수분확산방정식은 비선형성을 가진다.

2.2 수분확산계수

수분확산계수 D 는 온도와 습도 등의 함수이며, 따라서 이들의 변화로 인해 상당한 영향을 받는다. Fig. 1(a)는 습도와 확산계수와의 관계를 나타내고 있는데, 같은 온도 하에서 함유습도가 90%에서 60%로 변화할 때 수분확산계수는 약 0.05 배로 급격히 감소한다. 그러나 함유습도가 90% 이상일 때는 거의 일정하게 유지되고, 40% 이하일 경우에도 거의 변화가

없다. 함유습도가 70%에서 80% 사이에서 확산계수가 급격히 변화하는 것을 알 수 있다(Bazant et al., 1978).

CEB-FIP('90)에서는 등온조건(isothermal condition)인 경우에 수분확산계수를 공극의 상대습도의 함수로 표현하고 있다. (CEB-FIP Model Code, 1990) 식 (2)는 CEB-FIP('90)에서 제시한 수분확산계수이다.

$$D(h) = D_1 \left(\alpha + \frac{1 - \alpha}{1 + [(1 - h) / (1 - h_c)]^n} \right) \quad (2)$$

여기서, D_1 은 $h=1.0$ 인 경우의 수분확산계수(최대수분확산계수) (m^2/h), D_0 는 $h=0$ 인 경우의 수분확산계수(최소수분확산계수) (m^2/h), α 는 D_0/D_1 , h_c 는 $D(h) = 0.5D_1$ 에서 공극의 상대습도, n 은 지수, h 는 공극의 상대습도이다.

CEB-FIP('90)에서는 근사적으로 $\alpha=0.05$, $h_c=0.8$, $n=15$ 를 제시하고 있다. 그리고 최대 수분확산계수 D_1 은 식 (3)과 같이 압축강도의 함수로 나타냈다.

$$D_1 = \frac{D_{1,0}}{f_{ck}/f_{ck0}} \quad (3)$$

여기서, $D_{1,0}=3.6 \times 10^{-6} m^2/h$ 이고, $f_{ck0}=10 MPa$ 이다. 그리고 설계기준압축강도(characteristic compressive strength, f_{ck})는 콘크리트의 평균 압축강도(f_{cm})로부터 구할 수 있으며, $f_{ck} = f_{cm} - 8 MPa$ 이다.

Fig. 1(b)는 온도와 확산계수와의 관계를 나타내고 있다. 동일한 상대습도 하에서 온도를 100°C 이상 상승시키면 투수성이 급격히 증가한다(Bazant et al., 1978). 이것은 수분이 증기화하여 투수성이 급격히 증가하기 때문이다.

Bazant et al.(1978)은 공극의 상대습도뿐만 아니라 온도의 영향을 고려한 식을 제안하였으며, 이러한 관점으로 투과율 a 를 다음과 같이 근사적으로 표현하였다.

$$a = a_0 f_1(h) f_2(T) \quad (T \leq 95^\circ C \text{ 일 때}) \quad (4)$$

$$a = a_0' f_3(T), \quad a_0' = a_0 f_2(95^\circ C) \quad (T > 95^\circ C \text{ 일 때}) \quad (5)$$

여기서, a_0 는 25°C에서의 기준 투과율이다. 온도 95°C는 투과율이 급격히 증가하는 시점을 과도기라고 하여 이때의 온도를 의미한다. 함수 $f_1(h)$ 는 모세관 공극에서 흡착수층 내의 수분이동을 반영하고, Bazant and Najjar(1972)는 다음과 같이 나타내었다.

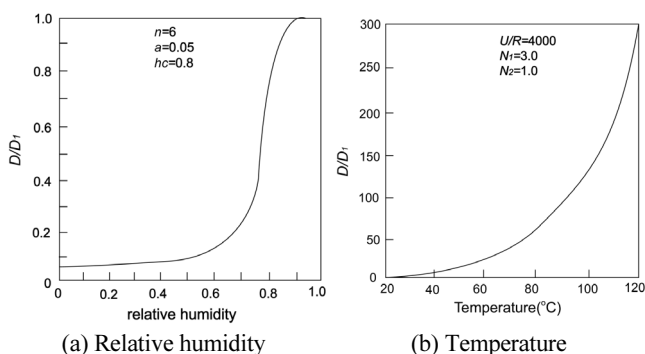


Fig. 1 Influencing factors on moisture diffusion coefficient

$$f_1(h) = \alpha + \frac{1-\alpha}{1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c}\right)^4} \quad h \leq 1 \text{ 일 때} \quad (6)$$

$$f_1(h) = 1 \quad h \geq 1 \text{ 일 때} \quad (7)$$

여기서, $h_c \approx 0.75$ = 과도기 습도, $\alpha \approx 0.05$ (25°C에서)이다. 모세관 공극은 95°C에서 물이 액체나 증기로 이동하기에 충분한 폭을 가진다고 가정하였다. 그래서 α 는 95°C에서 1이고, 25°C에서 95°C 사이의 α 값은 선형 내삽법을 사용할 수 있다. (CEB-FIP Model Code, 1990) 그러나 결과적으로 25°C 이하로 확장하는 것이 더 적합하므로 이것은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$1/\alpha = 1 + 19(95 - T)/70 \quad (8)$$

95°C이하에서 투과율의 온도 의존성은 Arrhenius-type 식에 의해 주어진다.

$$f_2(T) = \exp\left[\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T+273}\right)\right], \quad T \leq 95^\circ\text{C} \quad (9)$$

여기서, T는 섭씨온도, Q는 모세관 공극에서 흡착층을 따른 물 이동을 위한 활성화에너지, R은 가스상수로 Bazant와 Najjar(1972)에 의하면, Q/R은 2700 K이다.

함수 $f_3(T)$ 는 95°C와 105°C 사이에서 수분확산계수가 비약적으로 증가하는 것을 반영하기 위해 마련되었다. 이와 같은 온도 범위에서의 급격한 증가는 흡착 활성화에너지에 의해 결정되는 수분이동 메커니즘에서 유동수나 증기의 혼합의 점착성에 의해 결정되는 수분이동 메커니즘으로의 전이단계에 해당한다. 이 전이단계가 종료되면, 함수 $f_3(T)$ 는 물과 증기의 온도 의존에 따라야 한다. 105°C 이상이 되면 이들은 상대적으로 변화가 작으며, $f_3(T)$ 도 상수에 가깝다. 이러한 모든 성질은 다음 경험식에 의해 기술될 수 있다.

$$f_3(T) = \exp\left[\frac{T-95}{0.881+0.241(T-95)}\right], \quad T > 95^\circ\text{C} \quad (10)$$

여기서, T는 섭씨온도이고 상수는 실험결과로부터 결정된다.

2.3 수분확산의 경계조건

콘크리트 표면에서의 상대습도는 외기의 습도조건에 의해 영향을 받는다. 따라서 습도의 경계조건을 통해 콘크리트 표면의 상대습도와 외기습도와의 관계를 나타낼 필요가 있다. 노출면 S에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$D\left(\frac{\partial h}{\partial n}\right)_s = f(h_{en} - h_s) \quad (11)$$

여기서, f는 표면인자(m/h)를 나타내고, h_{en} 은 외기의 상대습도를 나타내며, 그리고 h_s 는 노출면에서의 상대습도이다.

표면인자는 Sakata et al.(1983)에 의해 물-시멘트비의 함수로 표현되었는데, 계산결과를 실험결과들과 비교하여, 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$f = 2.17 \times 10^{-3} \left(\frac{w}{c}\right) - 8.56 \times 10^{-4} \quad (12)$$

2.4 상대습도와 부등건조수축량의 관계

수분확산에 의한 콘크리트 내부의 각 위치에서의 상대습도와 자유수축량의 관계를 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다. (Kim et al., 1999; Nilsson, 1980; Pankov, 1991)

$$\Delta \varepsilon_{sh}(t, t_0) = k_{sh} f_s(h_d) = k_{sh} (1 - h_d) \quad (13)$$

여기서, k_{sh} 는 수축계수(shrinkage coefficient)이고 $\varepsilon_s^0 g_s(t)$ 로 나타낼 수 있다. ε_s^0 는 콘크리트가 완전히 건조되었을 때의 최종 극한건조수축량이다. 그리고 $g_s(t)$ 는 각 재령에서 콘크리트의 탄성계수에 대한 건조가 시작하는 시간(t_0)에서 콘크리트의 탄성계수의 비를 나타내며, $g_s(t) = E(t_0)/E(t)$ 이다.

3. 전력구 박스 구조물의 부등건조수축 해석

3.1 부등건조수축에 의한 균열 특성

콘크리트의 부등건조수축은 단면의 수분분포와 밀접한 관계가 있다. Fig. 2의 (a)와 (b)는 콘크리트 부재 단면에서의 부등수분분포와 이로 인하여 발생하는 부등건조수축을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 2의 (c)는 부등건조수축으로 인하여 콘크

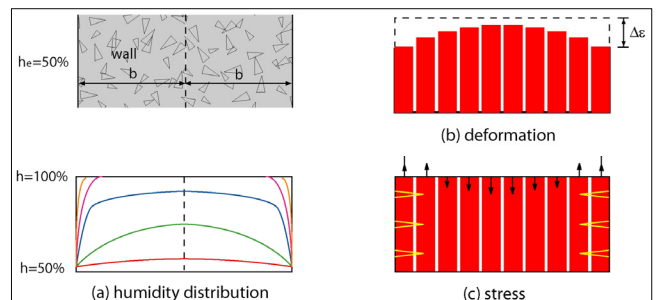


Fig. 2 Differential Drying Shrinkage in Concrete Structure

리트 부재 단면에 발생하는 부등응력을 개념적으로 나타낸 것이다. 기존의 건조수축에 대한 설계기준 식들은 평균적 변형률만을 나타내는 식들로서 이와 같은 현상을 표현할 수 없다. 따라서 이러한 균열해석을 수행하기 위해서는 콘크리트 내의 미세구조에서 발생하는 건조수축의 메카니즘을 이해하는 것이 필수적이다. 또한 부등건조수축에 의하여 발생하는 균열을 예측하기 위해서는 균열발생의 직접적인 원인인 콘크리트 부재 단면에서의 비선형 수분분포를 정확히 예측하여야 한다.

콘크리트 내부에 존재하는 수분은 콘크리트의 여러 성질에 많은 영향을 준다. 즉 크리프나 건조수축과 같은 장기거동 특성뿐만 아니라 콘크리트의 압축강도나 탄성계수 등도 수분상태에 따라 크게 달라진다. 또한 콘크리트 내부의 수분분포는 내화성, 내구성, 동결융해 저항성 등에도 많은 영향을 준다. 따라서 콘크리트가 외기에 노출되어 건조하는 동안 내부의 수분분포를 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하다. 특히 대형 콘크리트 구조물에서 내부의 수분분포는 각 위치에 따라 큰 차이를 보이므로 이에 대한 고려가 필요하다.

3.2 전력구 콘크리트 구조물의 부등건조수축 해석

전력구 박스형 콘크리트 구조물의 부등건조수축 해석을 위해 본 해석에서는 Fig. 3과 같은 전력구 박스형 단면을 해석대상 구조물로 설정하였다. 이 연구에서 부등건조수축해석은 Fig. 3과 같이 개착식 전력구 타설부의 대표단면에 대하여 수행하였으며, 이에 대한 메쉬모델링은 Fig. 3과 같다.

부등건조수축 해석변수는 Table 1에 보이는 것과 같이, 크게 최대수분확산계수와 외기습도, 표면계수로 설정하였다. 이러한 영향인자들의 부등건조수축 균열에 미치는 영향을 파악하기 위해 각 인자별 세 가지 변수를 설정하여 해석을 수행하였다. 콘크리트 내부의 상대습도의 변화에 따른 각 위치별 수분확산계수의 모델식은 CEB-FIP(90)모델을 사용하였으

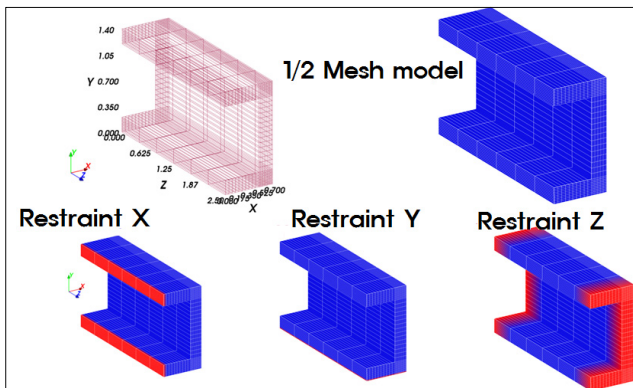


Fig. 3 Mesh Modelling of Concrete Box Culvert

Table 1 Analysis variables

	Relative humidity (at ambient air)	60, 80, 95%
Analysis variables	Maximum moisture diffusion coefficient (Relative humidity : 100%)	0.3, 0.6, 1.068×10^{-6} m ² /hr
	Surface coefficient	5.0, 7.0, 9.88×10^{-5} m/hr
	Moisture diffusion coefficient	CEB-FIP(90) model code
	Creep model	B3 model

며, 시간에 따른 크리프는 B3 모델로 구현하였다.

3.3 해석결과

Fig. 4는 개착식 전력구 시공후 거푸집 존치기간 8일 후에 거푸집 제거 후 외기로 건조가 시작된 후 60일과 192일이 경과된 후에 전력구 내부의 상대습도 분포를 나타낸다. 콘크리트의 표면으로부터의 수분증발에 의하여 건조시작 후 60일의 경우에 콘크리트 표면으로부터 상대습도가 외기습도와 같은 60%에서 100%까지의 내부까지 구배를 보이며, 건조 시작 후 60일의 경우가 192일에 비하여 상대적으로 큰 구배를 나타낸다. 이로부터 콘크리트 내부에서 외부로의 수분이동이 건조 시작 후 시간이 경과함에 따라 발생한 것을 알 수 있다. 외기습도 60%에 추가하여 건조수축에 의한 균열제어를 위해 거푸집 제거 후 살수양생을 모사하기 위해 외기습도를 95%로 가정한 경우에 대한 전력구 상부슬래브 두께에 따른 내부 상대습도의 변화는 Fig. 5에 보이고 있다. Fig. 5는 콘크리트 표면으로부터 내부에 이르기까지 표면부에서의 수분증발과 콘크리트 내부의 수분확산에 따른 상대습도의 감소현상을 보이고 있다. 이와 같은 콘크리트 표면부로부터의 상대습도의 감소는 콘크리트 내부에 건조수축을 발생시키며, 부재 두께방향으로 서로 다른 건조수축량을 나타내는 부등건조수축 특성을 유발시킨다. 콘크리트의 부등건조수축은 부재 내부에 인장응력을 유발하며, 이 인장응력이 인장강도를 초과하면 균열이 발생하게 된다.

Fig. 6와 Fig. 7은 각각 개착식 전력구 단면에 대한 부등건조

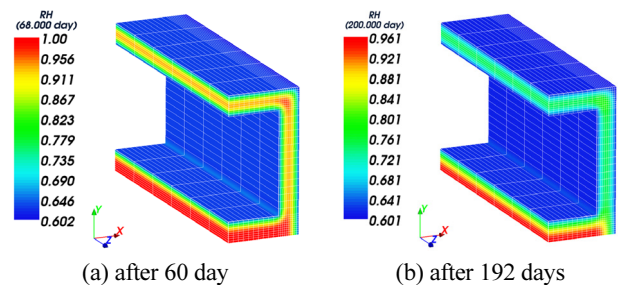


Fig. 4 Relative humidity distribution after drying

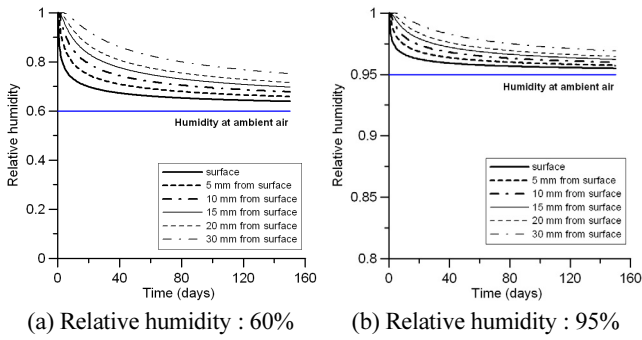


Fig. 5 Relative humidity history after drying

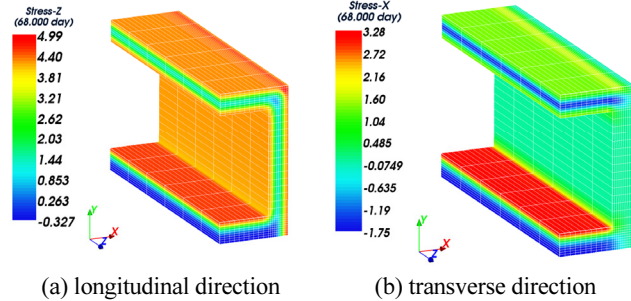


Fig. 6 Stress distribution after 60 days drying

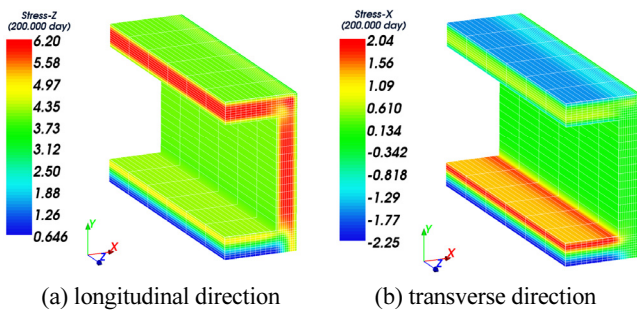


Fig. 7 Stress distribution after 192 days drying

수축 해석 수행 후 건조개시 후 60일과 192일 경의 종방향과 횡방향 응력분포를 보이고 있다. 전력구 타설 후 거푸집이 제거된 시점부터 외기로의 수분증발이 이루어짐에 따라 시간이 경과하면서 상하부 슬래브의 표면부에는 종방향과 횡방향 모두 인장응력이 발생하며, 증발이 발생하지 않는 단면중심부와 하부에는 압축응력이 발생한다. 이렇게 발생하는 압축응력은 그 크기가 매우 작으므로 콘크리트의 거동에 영향을 미치지 않으며, 표면부에 발생하는 인장응력은 그 크기가 시간이 지남에 따라 증가하여, 그 값이 콘크리트의 해당 재령에서의 인장강도 값을 초과하면 균열이 발생하게 된다. 이와 같이 콘크리트 내부에서 외부표면부로의 수분확산에 의한 부등건조수축에 의해 발생하는 균열을 부등건조수축 균열이라 하며, 실제 여러 전력구의 상하부 슬래브의 종방향 또는 횡방향 균열의 원인이 된다.

3.4 전력구 상부슬래브의 부등건조수축 특성과 균열 거동

Fig. 8은 각 영향인자별 시간에 따른 응력이력을 보이고 있다. Fig 8에서는 전력구 대표단면의 상부슬래브의 콘크리트 하부표면부와 표면으로부터 2 cm 내부 지점의 결과를 보이고 있다.

이와 같은 해석결과는 콘크리트의 표면부로부터 시작하여 내부로 진전하는 부등건조수축의 발생여부와 내부로의 균열 깊이 및 균열진전 양상을 예측할 수 있게 한다.

Fig. 8로부터 각 영향인자별로 전력구 상부슬래브의 부등건조수축에 의한 균열발생 특성을 살펴볼 수 있다. Fig 8의 (1)~(3)은 외기 상대습도의 영향을 나타내고 있다. 외기습도 60%인 경우는 다른 영향인자의 값에 관계없이 모두 표면부와 2 cm 내부에서 응력이 인장강도를 초과하는 것으로 나타났다. 이는 표면부에서 균열이 시작하여 균열이 내부로 진전하여 2 cm 지점까지 진전하였음을 의미한다. 외기습도 80, 95%의 경우는 모든 경우에 인장응력이 인장강도를 초과하지 않았으므로, 부등건조수축에 의한 균열은 발생하지 않는 것으로 판단된다. 또한 실제 시공시 콘크리트 표면부의 보습이나 살수양생과 같은 조치로 부등건조수축 균열을 제어할 수 있을 것으로 판단된다. 수분확산계수와 표면계수가 가장 작은 경우는 표면부의 균열이 타설 후 25일경에 발생하여 내부지점 2 cm까지의 균열진전은 60일경에 이루어지나, 수분확산계수와 표면계수가 가장 큰 경우는 표면균열이 8일경, 2 cm 지점에서 28일경에 균열이 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 콘크리트의 배합이나 물성치에 따라서 부등건조수축에 의한 균열양상이 변화함을 보이고 있다.

Fig. 8의 (4)~(6)은 수분확산계수의 영향을 나타낸다. 습도의 영향에서 알 수 있듯이, 외기습도 60%인 경우에만 균열이 발생하였으며, 나머지 외기습도 80, 95%에서는 수분확산계수의 크기에 관계없이 인장응력이 인장강도를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 수분확산계수가 증가하면서 외기로의 수분증발이 빨리 이루어지게 되며, 이는 곧 균열발생시점을 앞당기는 결과를 초래한다. 표면계수와는 달리 수분확산계수는 콘크리트 내부의 수분이동속도에 영향을 미치므로 표면부의 균열발생시점은 약 14일경으로 비슷한 경향을 보이나, 2 cm 지점까지의 균열진전에는 28일에서 60일로 나타났으며, 이는 수분확산계수가 균열진전속도에 많은 영향을 미침을 의미한다.

Fig. 8의 (7)~(9)는 표면계수의 영향을 나타낸다. 표면계수도 수분확산계수와 마찬가지로 수분이동속도에 영향을 미치지 않지만, 콘크리트 표면부의 증발속도를 결정하므로 수분확산계수와는 달리 콘크리트 표면부의 균열발생시점에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 표면계수가 가장 작은 경우는 균열발생시점이 대략 14일경에서 표면계수가 증가하면서 30일경으로

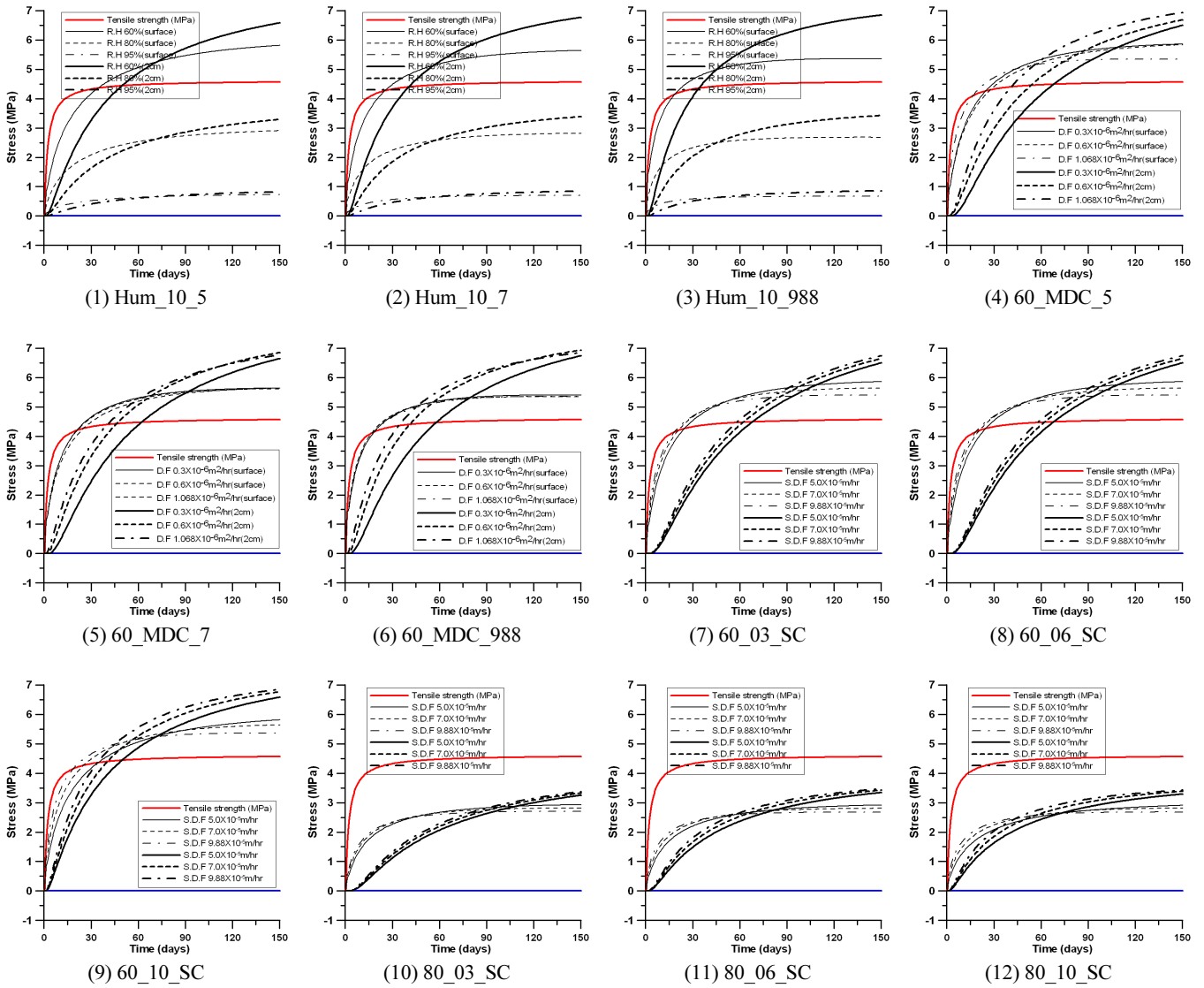


Fig. 8 Stress history after 28 days drying

변화하면서 그 시점이 달라짐을 알 수 있다.

Fig. 8의 (10)-(12)는 외기습도가 80%인 경우의 응력변화를 보이고 있다. 외기습도가 60%가 아닌 경우에는 모든 해석변수에 대하여 콘크리트 내부의 인장응력 값이 인장강도를 초과하지 않으므로 부등건조수축에 따른 균열이 발생하지 않음을 알 수 있다.

Table 2는 세 가지 해석변수에 대하여 부등건조수축에 의해 발생하는 전력구 상부슬래브의 균열거동을 나타낸다. 앞에서 언급했듯이, 외기습도가 60%인 경우는 모든 수분확산계수와 표면계수값에 대하여 콘크리트 표면부에서 균열이 발생하여 내부로 진전하는 양상을 보이고 있으며, 외기습도 80%와 95%의 경우에는 균열이 발생하지 않는 결과를 나타냈다. 외기습도가 60%인 경우에 수분확산계수와 표면계수는 콘크리트 표면부에서의 균열발생시점과 표면부로부터 2cm

깊이 지점까지의 균열진전속도에 영향을 미치며, 각각 그 값이 커질수록 표면부와 2cm 지점에서의 균열발생시점이 빨라지는 것을 알 수 있다. 전력구 상부슬래브 콘크리트에 일반적으로 시공되는 콘크리트 배합을 고려한 수분확산계수와 표면계수의 범위 내에서 최초의 균열발생시점은 타설 후 8일에서 25일경이며, 깊이 2cm 지점에서의 균열발생시점도 24일에서 60일로 나타났으며, 이 기간 내에는 전력구 콘크리트 시공후 표면의 외기습도를 80% 이상으로 유지시켜주는 표면보호처리나 양생방법이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 전력구 콘크리트의 타설 후 시간이 경과함

Table 2 Cracking behavior due to drying shrinkage

Analysis variables		Cracking behavior	
		surface	2cm from surface
Relative humidity (%)	60	10 days	30 days
		Maximum MDC, SC	
		25 days	60 days
	80	Minimum MDC, SC	
		No crack found	
		95	
Maximum moisture diffusion coefficient (MDC) ($\times 10^{-6}$ m ² /hr)	0.3	25 days	60 days
	0.6	14 days	43 days
	1.068	10 days	31 days
Surface coefficient (SC) ($\times 10^{-5}$ m/hr)	5.0	26 days	62 days
	7.0	18 days	47 days
	9.88	11 days	30 days

에 따라 부등건조수축에 의한 균열발생 특성을 파악하고, 그 제어방법을 제시하고자 하였다.

- 1) 전력구 콘크리트의 부등건조수축에 의한 균열발생 특성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 외기습도인 것으로 나타났다. 해석결과, 외기습도 60%인 경우는 최대수분확산계수 값과 표면계수에 관계없이 균열이 발생하였으며, 외기습도 80, 95%인 경우는 균열이 발생하지 않은 것으로 나타났다.
- 2) 수분확산계수는 표면부의 균열이 단면 내부로 진전하는 균열진전속도에 영향을 미치며, 그 크기가 커질수록 균열진전속도는 빨라진다.
- 3) 콘크리트 표면부의 증발속도를 결정하는 표면계수는 표면부의 균열발생시점에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 그 크기가 커질수록, 표면부의 균열발생시점이 빨라지는 것으로 판단된다.
- 4) 전력구 콘크리트 구조물의 부등건조수축 해석결과, 콘크리트 타설후 표면보습이나 살수양생과 같이 외기습도를 증가

시키는 것이 부등건조수축에 의한 균열제어에 가장 효과적인 것으로 판단되며, 수분확산계수와 표면계수를 결정하는 콘크리트의 배합이나 재료특성을 적절히 선정함으로써 균열의 진전속도나 발생시점을 제어할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 지원을 받아 한국에너지기술평가원(KETEP)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다(과제번호 : 20131010501790).

References

1. Bazant, Z. P., and Najjar, L. J. (1972) Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, *Material and Structures*, 5(25), 3-20.
2. Bazant, Z. P., and Thonguthai, W. (1978) Pore Pressure and Drying of Concrete at High Temperature, *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, 104(EM5), 1095-1079.
3. Comite Euro-International du Beton (1993) CEB-FIP Model Code 1990, 68-69.
4. Kim, J. K., and Lee, C. S. (1999) Moisture Diffusion of Concrete Self Dessiccation at Early Ages, *Cement and Concrete Research*, 29(12), 1921-1927.
5. Matano, J. (1932) Japanese Journal of Physics, 8, 109-113.
6. Nilsson, L. O. (1980) Hygroscopic Moisture in Concrete- Drying, Measurements and Related Material Properties, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, report TVBM 1003.
7. Pickett, G. (1946) Shrinkage Stresses in Concrete, *Proc. of Journal of ACI*, 42, 165-204, 361-398.
8. Pankov, J. F. (1991) Aquatic Chemistry Concepts, Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, U.S.A., 683.
9. Sakata, K., and Kuramoto, O. (1983) A Study on Moisture Diffusion in Drying Shrinkage of Concrete, *Cement and Concrete Research*, 3(2), 216-224.

Received : 03/19/2015

Revised : 03/29/2015

Accepted : 04/06/2015

요 지 : 이 연구의 목적은 개착식 전력구 콘크리트에 발생하는 부등건조수축에 의한 균열특성을 파악하고, 그 제어방법을 제시하는데 있다. 건조수축균열은 콘크리트 내부의 수분확산계수의 영향을 크게 받으며, 수분확산계수는 콘크리트 내부에서의 수분이동속도를 결정하는 주요인자이다. 수분확산계수와 더불어 콘크리트 표면의 표면계수와 외부의 상대습도는 콘크리트 내부에서 외부로의 수분이동에 영향을 미친다. 따라서 이 연구에서는 전력구 박스형 콘크리트 구조물의 부등건조수축에 의한 균열특성을 파악하기 위하여 세 가지 주요영향인자를 고려한 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과, 수분확산계수와 표면계수가 증가할수록 상부슬래브의 부등건조수축에 의한 균열발생시점이 빨라지며, 세 가지 요인 중에 콘크리트의 부등건조수축에 의한 균열발생 특성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 외기습도인 것으로 나타났다. 이 연구 결과를 분석한 결과, 개착식 전력구 시공시에 콘크리트 타설 후 표면보습이나 살수양생과 같이 외기습도를 증가시키는 것이 부등건조수축에 의한 균열제어에 가장 효과적인 것으로 판단되며, 콘크리트 재료적 측면의 균열저감방법으로 수분확산계수와 표면계수를 결정하는 콘크리트의 배합이나 재료특성을 적절히 선정함으로써 균열의 진전속도나 발생시점을 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 박스형 전력구, 수분확산계수, 건조수축, 균열, 수치해석
