



콘크리트 슬래브 상하부간 부등건조수축 예측모델 개발

Development of Differential Drying Shrinkage Model of Concrete Pavements

최기효* 임진선** 남영국*** 김연복**** 정진훈*****
 Choi, Ki Hyo Lim, Jin Sun Nam, Young Kug Kim, Yeon Bok Jeong, Jin Hoon

1. 서 론

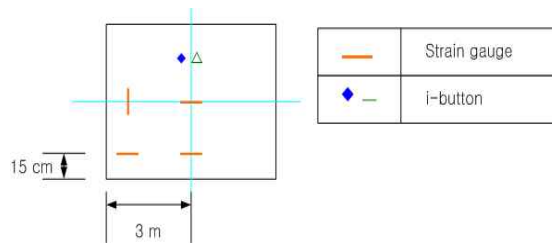
콘크리트 구조물은 시공 후 지속적으로 건조수축을 일으키며 변형이 진행되어 가는데, 이에 관한 연구는 미국 ACI나 유럽 CEB-FIP등의 연구단체를 통해 오랜 기간 동안, 여러 영향인자에 대하여 수많은 연구가 진행되어져 오고 있으며, 국내 또한 여러 연구자들에 의하여 연구되고 있다.

이러한 연구 결과로부터 여러 가지 예측식이 제안 되었지만, 대부분의 연구가 표준시편 위주로 실내실험이 수행되어져 콘크리트포장 슬래브의 건조수축과 비교하여 그 값이 상당히 크게 예측되어 지고 있는 실정이다. 콘크리트 포장의 경우 슬래브의 상부는 대기에 노출되어져 있고, 하부는 기층과 맞닿아 대기에 노출되지 않은 채로 구속되어 있어서 상부 하부간의 건조수축에 의한 변형이 다르게 진행되어진다. 본 연구는 콘크리트포장 슬래브의 재령에 따른 부등건조 수축에 대한 장기 거동을 현장에서 직접 계측하였다. 이를 통하여 얻어진 데이터와 기존에 개발되어진 예측모형으로부터, 위치 별, 깊이 별 건조수축량을 재령에 따라 예측 할 수 있는 모형을 제시함으로써 콘크리트 도로 포장의 설계를 보다 합리적으로 설계할 수 있는 기반을 마련하려한다.

2. 현장실험 및 배합

현장 실험은 2007년 5월 29일부터 6월 5일까지 충청남도 당진군에 총 연장 152m의 편도 2 차로 콘크리트 시험포장 구간에서 시행 되었으며, 슬래브의 크기는 6×3.7×0.31(m)이었고, 분리막을 배치한 린콘크리트 위에 타설되었다. 슬래브의 25mm, 76mm, 178mm, 275mm 깊이에 Thermocouple과 I-Button을 설치하여 온도 변화를 측정하였다.

줄눈거동을 측정하기 위하여 슬래브 윗면의 줄눈사이에 Demec Disk를 설치하였으며 Demec Gauge를 이용하여 줄눈의 거동을 측정하였다. 또한 2 차로에서 특정한 슬래브에 한하여, 중앙부, 우각부, 횡방향 및 종방향 측부의 상부(지면으로부터 250mm)·하부(지면으로부터 50mm)에 Strain Gauge를 매설하였다. 현장의 배합결과와 계측기 매설위치는 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 계측기 매설위치

* 학생회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 · 032-873-5332 (E-mail : high80@naver.com)
 ** 학생회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 · 032-873-5332 (E-mail : coreplay@hanmail.net)
 *** 정회원 · (주)한맥기술 연구원장 · 공학박사 · 02-2141-7102 (E-mail : yknam@incheon.ac.kr)
 **** 정회원 · 한국건설기술연구원 책임연구원 · 공학박사 · 031-910-0310 (E-mail : ybkim@kict.re.kr)
 ***** 정회원 · 인하대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · 032-860-7574 (E-mail : jhj@inha.ac.kr)

〈표 1〉 현장시험 배합표

Cement	Flyash	W	S1	S2	G1	AD1	W/C(%)	S/A(%)
310	55	161	350	350	1078	1.83	44.1	39.4

(S1: 바다모래, S2: 부순모래, AD1: 표준형 AE감수제)

3. 현장데이터 결과 및 분석

앞 에서 설명한 현장시험을 통하여 슬래브의 각 위치 별, 깊이 별 총변형률과 온도를 측정하였고, 다음과 같은 가정을 통하여 건조수축변형률을 데이터로부터 얻었다. 최종경화시간(Final Setting Time)을 기준하여 크립(Creep)에 의한 영향이 거의 없다고 가정할 때, 시간에 따른 콘크리트의 총 변형률은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\delta\epsilon_{Total} = \delta\epsilon_T + \delta\epsilon_{sh} \tag{1}$$

여기서,

$\delta\epsilon_{Total}$: 시간에 따른 콘크리트슬래브의 전체 변형률

$\delta\epsilon_T$: 시간에 따른 온도에 의한 변형률

$\delta\epsilon_{sh}$: 시간에 따른 건조수축에 의한 변형률

$\delta\epsilon_{Total}$ 은 최종경화시간(Final Setting Time)을 기준하여 시간에 따른 콘크리트슬래브의 총 변형률이며 이는 현장 으로부터 변형률계지를 통하여 계측되어진 결과이다. $\delta\epsilon_T$ 또한 최종경화시간(Final Setting Time)을 기준으로 해당 시간의 온도의 의한 변형률이며 식(2)와 같이 계산하였다.

$$\delta\epsilon_T = \alpha_c \times \delta T \tag{2}$$

여기서, α_c : 콘크리트 열팽창계수(/°C)

δT : 최종경화시간의 온도를 기준으로 한 온도변화량



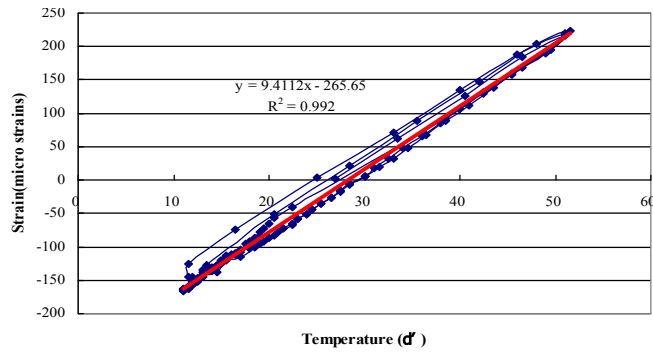
(a) 열팽창계수 실험기(in-bar 사용)



(b) 항온수조

〈그림 2〉 열팽창실험 장비

δT 는 Thermocouple, I-Button 그리고 Strain Gauge를 통하여 데이터를 수집하였으며, 콘크리트의 열팽창계수는 현장배합과 같은 배합의 공시체를 AASHTO TP 60-00(2005)에서 제시한 방법으로 〈그림 3〉과 같이 실내 실험을 실시하였으며, 그 결과 9.412×10^{-6} 의 값을 얻었다.

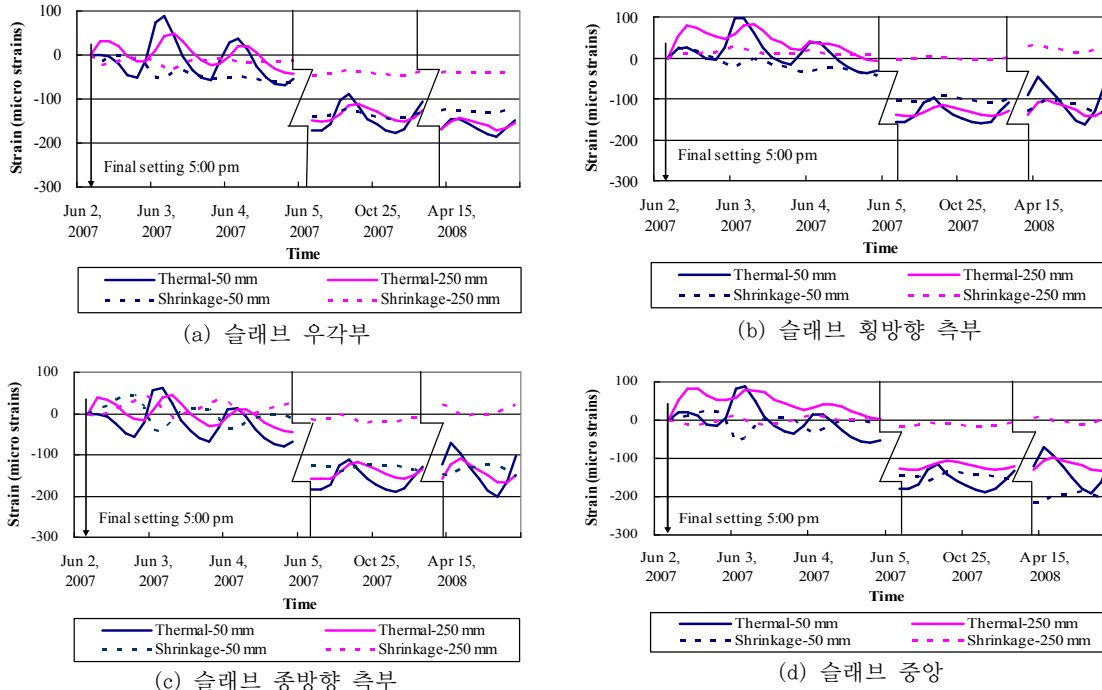


〈그림 3〉 열팽창계수 시험 결과

이를 통하여, 시간에 따른 콘크리트의 건조수축에 의한 변형률은 식(3)과 같이 계산하였다.

$$\delta\epsilon_{sh} = \delta\epsilon_{Total} - \delta\epsilon_T \tag{3}$$

〈그림 4〉는 슬래브의 각 위치의 상부 및 하부에서 위의 계산 과정을 통하여 계산된 열변형률과 건조수축변형률 결과를 도시한 것이다.



〈그림 4〉 슬래브 각 위치별 온도변형률 및 건조수축변형률

〈그림 4〉에서 보여주는 것과 같이, 콘크리트 슬래브는 시간이 지남에 따라서 슬래브 상하부간의 부등건조수축현상이 일어남을 알 수 있었다. 슬래브의 우각부의 상부 및 하부에서는 다른 위치에 건조수축량의 차이가 적었음을 확인할 수 있었다.



4. 구속조건을 고려한 상하부간의 부등건조수축 예측모형

콘크리트의 건조 수축 예측 모형은 ACI 209모형, CEB-FIP모형 등, 여러 가지 모형이 제시되어 졌고, 국내에서도 콘크리트의 형상비와 골재종류를 고려한 건조수축 예측 모형이 개발되어 졌으며 그 모형은 다음과 같다. (양성철 외, 2004)

$$\epsilon_{shrinkage} = \frac{t}{a2+t} \times a1 \times [1 + a3 \times \exp(-a4 \times (V/S))] \tag{4}$$

- 여기서, $\epsilon_{shrinkage}$: 건조수축 변형률(μ strains)
- t : 재령 (일)
- $a1, a2, a3, a4$: 건조수축 예측상수
- V/S : 형상비 (mm)

〈표 2〉 굵은 골재별 콘크리트 슬래브의 건조수축 예측상수

골재	a1	a2	a3	a4
석회암	362.9	36.71	1.613	0.0372
사암	431	33.3	2.204	0.0194
화강암	397	35	1.2	0.0194

하지만, 위 모형식은 구속조건이 고려되지 않은 채 시간에 따른 슬래브의 평균적인 건조수축량에 대한 예측 모형이어서 그 예측 값이 실제로 현장에서 측정된 값보다 크게 예측되는 것을 현장 실험 데이터를 통하여 알 수 있었다. 따라서, 현장 실험을 통하여 계측되어진 데이터를 통하여, 식 (4)의 예측모형에 선형의 형태를 가지는 조건계수 K를 고려하여 다음과 같이 위치 별, 깊이 별로 부등건조수축을 예측할 수 있는 모형을 식 (5)와 같이 제안하였다.

$$\epsilon_k = K \times \epsilon_{shrinkage} \tag{5}$$

- 여기서, ϵ_k : 조건계수가 고려된 건조수축 변형률(μ strains)
- $\epsilon_{shrinkage}$: 예측된 건조수축 변형률(μ strains)
- K : 조건계수 ($= a \times \frac{h}{h_0} + b$)
- h_0 : 포장두께 (mm)
- h : 포장 하부로부터의 깊이(mm)
- a, b : 슬래브의 위치에 관한 회귀계수 (〈표 3〉 참고)

조건계수 K의 계수 a, b는 특정 재령에서 상부 및 하부에서 각각 계측되어진 결과(ϵ_k)와 식 (4)의 예측모형으로 예측되어진 결과 값($\epsilon_{shrinkage}$) 간의 관계를 식(6)과 식(7)의 형태로 놓고, 이에 대하여 연립방정식을 풀어 a, b를 얻었고 재령에 따라 얻어진 a, b에 대하여 회귀분석하여 〈표 3〉과 같이 결정하였다.



$$\varepsilon_{k-top} = \left(a \frac{h_{top}}{h_0} \times \varepsilon_{shrinkage} + b \right) \times \varepsilon_{shrinkage} \tag{6}$$

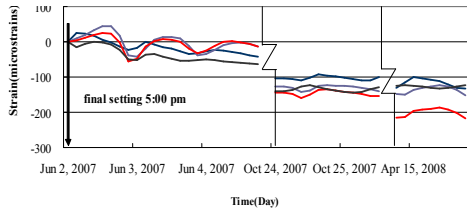
$$\varepsilon_{k-bot} = \left(a \frac{h_{bot}}{h_0} \times \varepsilon_{shrinkage} + b \right) \times \varepsilon_{shrinkage} \tag{7}$$

〈표 3〉 조건계수 K에 대한 슬래브 위치에 관한 계수

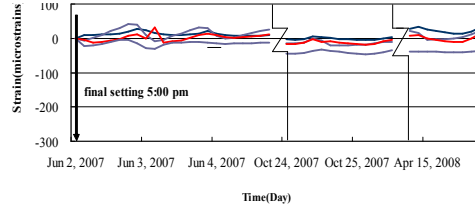
	중앙부	우각부	종방향 측부	횡방향 측부
a	0.65	0.37	0.61	0.60
b	-0.08	0.05	-0.14	-0.16

5. 부등건조수축 모형과 현장데이터의 비교

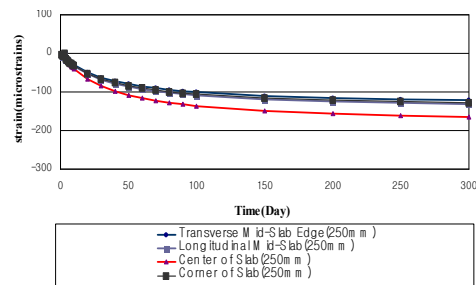
다음 〈그림 5〉-(a)는 슬래브의 각 위치에서 상부 하부의 건조수축 변형률을 나타낸 그림이며, 〈그림 3〉-(b)는 앞에서 제시한 조건계수 K를 고려한 건조수축예측모형으로부터 예측되어진 결과를 나타낸 그림이다. 예측 모형은 그림에서 보여주듯이 현장에서 실측한 계측값과 같이 위치별 깊이별로의 특성을 반영함을 확인할 수 있었다.



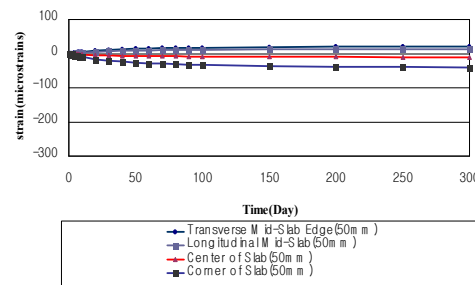
(a) 현장계측결과 (상부)



(b) 현장계측결과 (하부)



(a) 예측모형을 통한 결과(상부)



(b) 예측모형을 통한 결과(하부)

〈그림 5〉 부등건조수축 모형비교

7. 결론

본 연구에서는 콘크리트 슬래브의 부등건조수축으로 인한 상·하부의 변형률 차이를 현장실험을 통하여 계측하였고, 그 데이터를 통하여 다음의 결과를 얻었다.



- (1) 현장실험을 통하여 슬래브의 건조수축이 하부에서 보다 상부에서 더 활발히 발생하고, 장기적으로도 계속 진행됨을 알 수 있었다.
- (2) 기존에 제시된 모형과 현장데이터를 통하여 조건계수 K 를 고려한 콘크리트 포장의 부등건조수축예측모형을 개발하였다.
- (3) 재령에 따라 부등건조수축이 진행되면서, 온도에 의한 컬링이 아닌 부등건조수축으로 인한 상향컬링 현상이 발생함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원의 『구조적 성능을 고려한 시멘트 콘크리트포장의 기능 개선 시공화 연구』와 국토해양부의 한국형포장설계법의 수행결과의 일부로써, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1. ACI Committee 209. (1997). "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures." ACI 209R-92, ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- 2. CEB-FIP. (1990). CEB-FIP Model Code 1990: Design Code. Thomas Telford Ltd., London, UK.
- 3. Eisenmann, J. and Leykauf, G. (1990). "Simplified Calculation Method of Slab Curling Caused by Surface Shrinkage." Proceedings, 2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements, Siguenza, Spain, 185-197.
- 3. Rajeev, G., Ram, K., and Paul, D.K. (2007). "Comparative Study of Various Creep and Shrinkage Prediction Models for Concrete." Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol., No. 3, 249-260.
- 4. Gardner, N. J. and Lockman, M. J. (2001). "Design Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal-Strength Concrete." ACI Materials Journal, Vol. 98, No. 2, 159-167.
- 5. Jeong J.H. and Zollinger D.G. (2004). "Early-Age Curling and Warping Behavior: Insights from a Fully Instrumented Test-Slab System." Transportation Research Record 1896, Transportation Research Board, Washington, DC, 66-74.
- 6. 김진철(2003), "콘크리트의 건조수축 메커니즘과 예측모델", 도로포장공학회지, 제 5권 제 3호, 32-41.
- 7. 양성철, 안남식, 최동욱, 강승민(2004). "형상비 및 골재의 종류에 따른 콘크리트 시편의 건조수축 특성 연구", 한국도로학회 논문집, 6권 제4호, 109-121