

Half PC 슬래브의 건조수축 거동 예측에 관한 연구

Study on Prediction of Drying Shrinkage Behavior of Half PC slab

서 태 석*

최 훈 제

Seo, Tae-Seok*

Choi, Hoon-Jae

Hyundai E&C , 102-4, Mabuk-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 446-716, Korea

Abstract

The use of half PC slab has been increasing to shorten construction period. Because the drying shrinkage of topping concrete is restrained by PC slab, the tensile stress is generated at the topping concrete and the cracks can be occurred at the topping concrete due to drying shrinkage. Therefore, it is important to predict the tensile strain of half PC slab due to drying shrinkage to improve the quality of half PC slab. However, there is no studies on prediction of shrinkage behavior of half PC slab yet. Therefore, in this study, half PC slab was made, and the predictability of tensile strain generated at half PC slab due to drying shrinkage was investigated. The step by step method considering creep was used to estimate the tensile strain of half PC slab. In result, good agreement was obtained between the analytical and experimental values.

Keywords : half PC slab, drying shrinkage, tensile strain, step by step method

1. 서 론

건축 구조물의 콘크리트 벽체와 슬래브의 두께는 150~200mm 수준으로 부재가 두껍지 않으므로 건조수축이 많이 발생하게 되어 건조수축에 의해 부재단면을 관통하는 균열이 쉽게 발생할 수 있는 문제가 있다[1,2]. 콘크리트는 시간의 경과와 함께 콘크리트 내부의 수분의 증발에 의해 수축을 하게 되고, 철근 및 외부 인접 부재에 의한 구속으로 콘크리트 구조물에 인장응력이 발생하게 되며, 인장응력이 콘크리트의 인장강도에 도달하게 되면 균열이 발생하게 된다 [3,4,5]. 이러한 균열들은 콘크리트 구조물의 수명을 단축시키고 유지비용을 증가시키기 때문에 콘크리트 구조물의 품질향상을 위해서 구속작용에 의해 발생하는 콘크리트 구조물의 수축거동을 정확히 예측하는 것이 중요하다[6].

일본건축학회[7]에서는 건조수축의 구속작용에 의해 발생하는 콘크리트 인장응력 예측을 위해 크리프 특성을 고려한 증분법을 제안하였으며, 몇몇 연구자들에 의해 그 타당성이 검증되었다[8,9]. 하지만 이 연구들은 철근콘크리트 보에 의해 구속받는 벽체와 H-beam 에 의해 구속받는 데크플레이트 슬래브를 대상으로 축차해석법에 의한 구속변형 및 응력 예측의 타당성을 검토한 연구이다. 최근에는 공사기간을 단축하기 위해서 데크플레이트 외에 half PC 슬래브의 사용도 점차적으로 증가하고 있고, Figure 1과 같이 PC 슬래브 위에 후타설되는 topping concrete 의 건조수축으로 인한 균열이 현장에서 빈번히 발생되고 있는 실정이다.



Figure 1. Shrinkage crack on topping concrete

Received : September 22, 2016

Revision received : October 27, 2016

Accepted : December 26, 2016

* Corresponding author : Seo, Tae-Seok

[Tel: 82-2-746-0247, E-mail: tsseo@hdec.co.kr]

©2017 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

따라서 half PC 슬래브의 품질을 향상시키고 내구성능을 증가시키기 위해서 건조수축에 의한 half PC 슬래브의 거동을 사전에 정확히 예측하는 것이 중요하다. 하지만 아직까지 half PC 슬래브의 수축거동 예측에 관한 연구결과가 없는 실정이므로 본 연구에서는 half PC 슬래브를 대상으로 건조 수축거동을 관찰하였으며, 크리프 계수를 고려한 증분법에 의한 수축거동을 예측하여 실험값과 비교한 후 그 타당성을 검토하였다.

2. 실험 계획

2.1 콘크리트 배합과 재료

Table 1에 콘크리트 배합을 나타내었다. 물-시멘트비 (W/B)는 49.6%로 하였다. 콘크리트 슬럼프와 공기량은 목표치(슬럼프 15±2.5cm, 공기량 4.5±1.5%)를 만족하였고, 콘크리트 배합에 사용된 재료를 Table 2에 정리하였다.

Table 1. Mixture proportions

W/B	S/a	Unit weight (kg/m ³)			
		Water	Cement	Sand	Gravel
49.6	48.8	165	333	862	925

Table 2. Properties of cement and aggregate

Ordinary Portland Cement	Specific gravity	3.15	Specific surface area	3300cm ² /g
Coarse aggregate	Specific gravity	2.60	Absorption capacity	0.72%
Fine aggregate	Specific gravity	2.59	Absorption capacity	0.83%

2.2 시험체 및 시험방법

Figure 2에 half PC 슬래브 시험체를 나타내었다. Half PC 슬래브의 수축거동을 관찰하기 위하여 일반적으로 현장에 적용되고 있는 크기의 PC 시험체를 증기양생으로 제작하였다. PC 시험체 제작 후 1개월 후에 topping concrete 를 타설하였고, 증기양생용 콘크리트와 topping concrete 의 배합은 동일하다. 시험체의 수축거동을 측정하기 위하여 topping concrete 타설 전 시험체의 중앙부에 매립형 변형률 게이지를 2개 설치하였고, 본 실험에 사용된 변형률 게이지는 20000μ ε 까지 측정이 가능한 Tokyo Sokki Kenkyujo사의

PMFL-60-2LT 타입이다. Half PC 슬래브의 저면 중앙부에도 콘크리트용 변형률 게이지를 2개 설치하였다. 콘크리트 타설 후 3일간 습윤양생을 실시하여 거푸집을 탈형 하였다. 이후 실험실 내부에서 기건양생을 실시하였다.

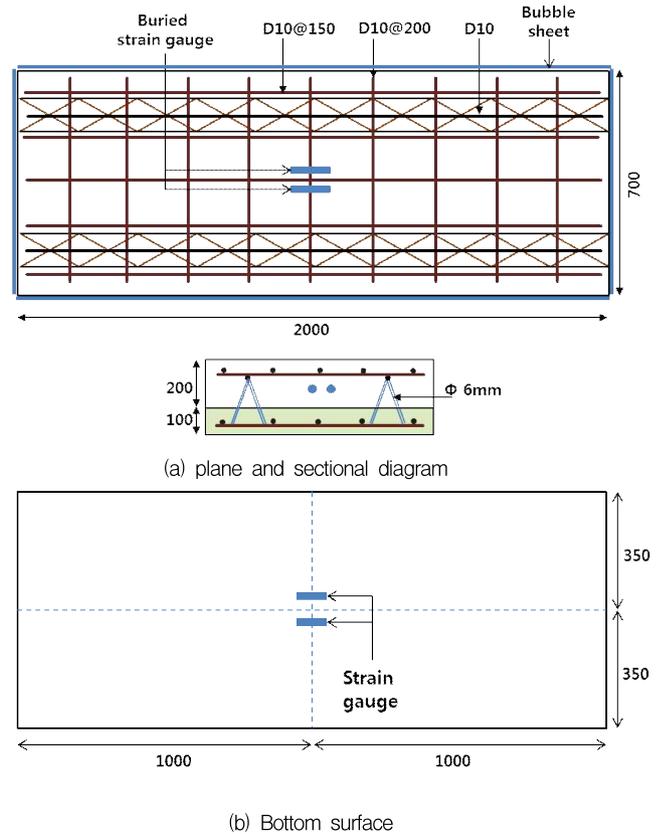


Figure 2. Half PC slab specimen

실제 현장에서는 half PC 슬래브의 측면은 다른 슬래브들의 설치 및 타설에 의해 외기와 차단되므로, 본 연구에서도 거푸집 탈형 후에 측면을 버블시트로 감싸 외기를 차단하였다. 또한 내부의 철근과 PC 슬래브에 의한 구속을 받지 않는 topping concrete 의 자유 건조수축을 측정하기 위하여 Figure 3와 같이 자유건조수축 측정용 시험체도 제작하였다. Topping concrete 타설과 동시에 동일한 콘크리트로 타설하였고 거푸집 탈형 및 양생도 동시에 실시하였다. 자유건조수축 시험체의 측면도 half PC 슬래브와 동일하게 측면을 버블시트로 감쌌다. 총 2개의 시험체를 제작하였으며 자유건조수축을 측정하기 위하여 매립형 변형률 게이지를 콘크리트 중심부에 설치하였다. Figure 4 및 Figure 5에 실험실 내부 온/습도 거동 계측결과를 나타내었다.

콘크리트의 역학특성(압축강도, 탄성계수)을 평가하기 위하여 각각 JIS A 1108 [10], JIS A 1149[11] 에 준하여 시험을 수행하였다. 증기양생 콘크리트의 압축강도와 탄성계수는 증기양생 완료 후 재령 1일, 7일, 14일, 28일에 실시하였으며, topping concrete의 압축강도와 탄성계수는 half PC 슬래브 시험체와 동일한 양생을 실시한 후 재령 7일, 14일, 28일에 실시하였다.

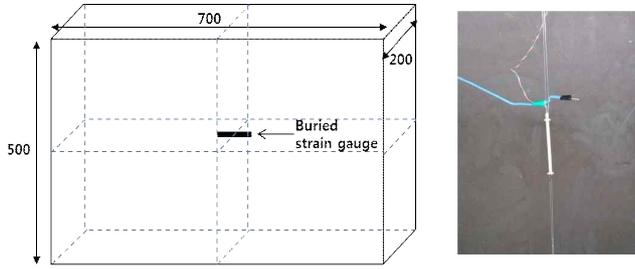


Figure 3. Free drying shrinkage specimen

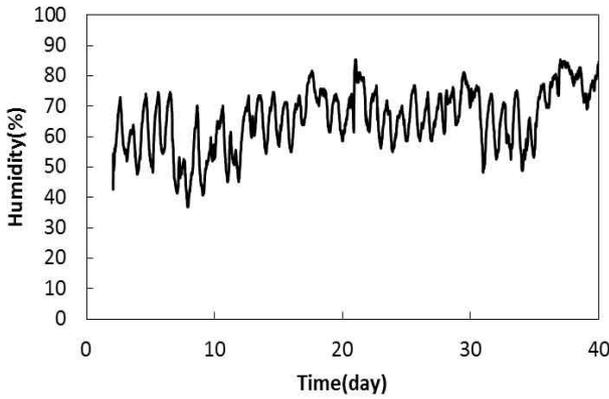


Figure 4. Histories of humidity

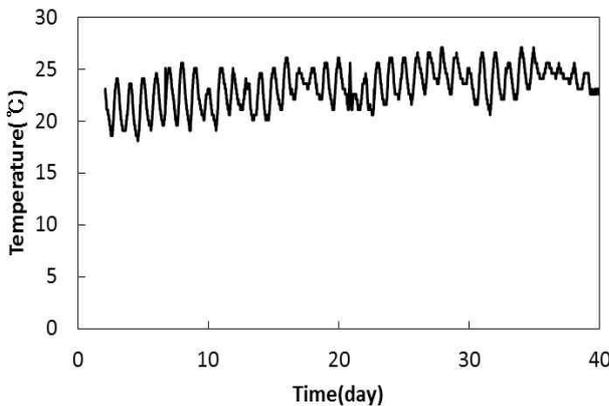
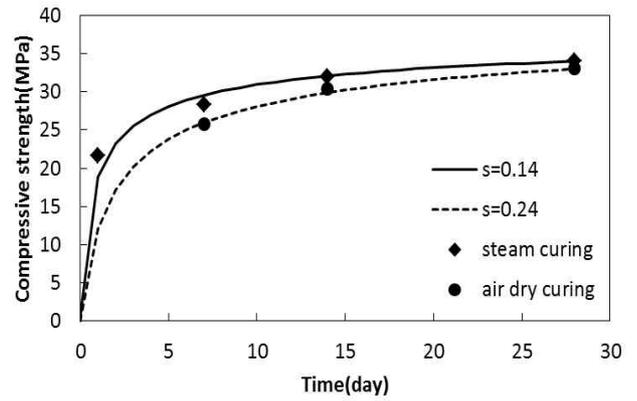


Figure 5. Histories of temperature

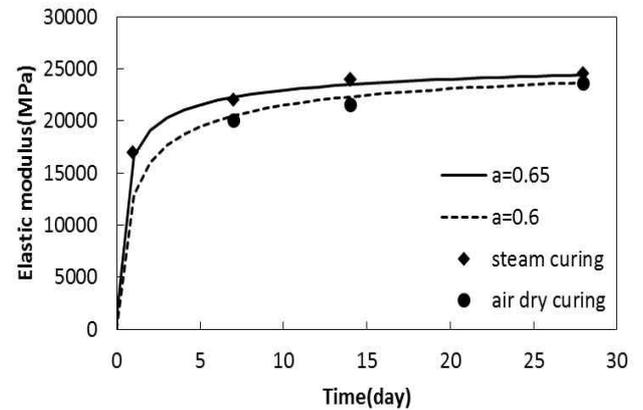
3. 실험결과 및 분석

3.1 콘크리트 역학특성

콘크리트의 역학특성 (압축강도, 탄성계수) 실험결과를 Figure 6에 나타내었다. 증기양생 콘크리트의 경우 재령 1일에서 콘크리트 설계기준강도(24MPa)의 87% 이상 강도가 발현되었다. 시간 경과에 따라 증기양생 콘크리트와 3일간 습윤양생 후 기건양생을 실시한 콘크리트를 비교한 결과, 강도와 탄성계수의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. Figure 6에 식(1), (2)[7]에 의한 압축강도와 탄성계수 계산 결과도 나타내었다. 식(1), (2)에서 각각 s와 a를 조정하여 계산값을 실험값에 맞추었다.



(a) Compressive strength



(b) Elastic modulus

Figure 6. Concrete mechanical properties

$$f_c(t_i) = \exp\left\{s \left[1 - \left(\frac{28}{t_i}\right)^{0.5}\right]\right\} f_c(28) \quad \text{----- (1)}$$

$$E_c(t_i) = 21000 \left(\frac{f_c(t_i)}{27}\right)^a \quad \text{----- (2)}$$

여기에서 t_i 는 재령, $f_c(28)$ 은 28일 에서의 콘크리트 압축 강도, $f_c(t)$ 는 재령 t_i 일 에서의 콘크리트 압축강도이다.

3.2 콘크리트 수축거동

Figure 7에 슬래브 시험체의 topping concrete 와 half PC 슬래브의 수축거동을 나타내었다. 위치별로 2개씩 변형률 게이지를 설치하였고, 위치에 따라 변형률은 큰 차이가 없었으며 topping concrete의 건조수축량이 PC 슬래브의 수축량보다 15% 정도 큰 것으로 나타났다. 이는 센서 종류 및 설치 위치에 따른 영향으로 판단된다.

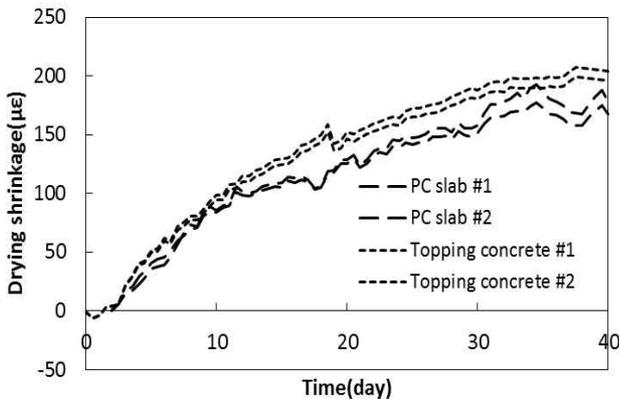


Figure 7. Drying shrinkage of slab specimen

Figure 8에 자유수축 시험체에 의한 topping concrete 의 자유 건조수축변형률과 슬래브 시험체의 구속 건조수축 변형률을 나타내었다. 슬래브 시험체의 구속 건조수축 변형률은 topping concrete와 half PC 슬래브의 건조수축 변형률의 평균값으로 나타내었다. 재령 40일 에서의 topping concrete 의 자유수축변형률은 $303\mu \epsilon$, 슬래브 시험체의 구속 건조수축변형률은 $186\mu \epsilon$ 이었으며, half PC 슬래브 의 구속작용으로 인하여 슬래브 시험체의 구속 건조수축 변형률이 자유 건조수축변형률보다 38% 정도 작게 발생하였다. Figure 8에는 건조수축 예측결과도 나타내었다. 현재까지 대부분의 건조수축 예측식들은 쌍곡선식의 형태로 제안 되었으며, 쌍곡선식이 건조수축을 잘 예측하는 것으로 보고 되고 있다[7]. 따라서 본 연구에서는 쌍곡선식을 활용하여 회귀분석을 통하여 식(3)과 같이 건조수축예측식을 구하였으며, 그 결과 실험값과 예측값이 잘 일치하는 것으로 나타났다.

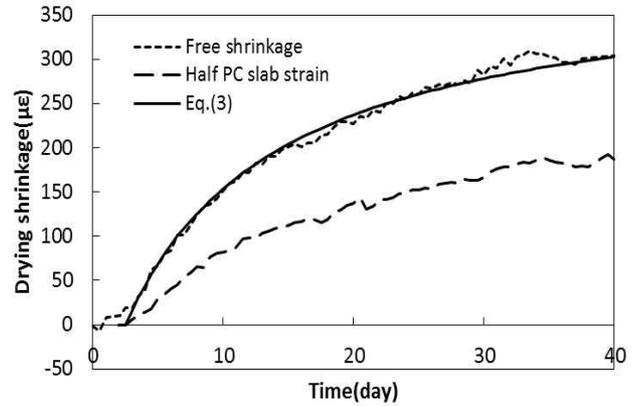


Figure 8. Free shrinkage and restrained shrinkage

$$\epsilon_f(t_i) = \frac{t_i - 3}{3 + 0.25(t_i - 3)} \quad (3)$$

3.3 Half PC 슬래브 수축거동 예측

Figure 9에 half PC 슬래브의 수축거동 개념도를 나타내었다. PC 슬래브 위에 후타설되는 topping concrete의 자유수축이 PC 슬래브에 의해 구속을 받게 되므로 topping concrete에서는 인장력이, PC 슬래브에서는 압축력이 작용하게 된다. 따라서 구속률의 정의(식(4))와 슬래브에 작용하는 인장력(식(5))과 압축력(식(6))의 힘의 평형조건으로부터 다음의 식(7)[6]과 같이 해석 대상 콘크리트의 구속률 R을 구속부재와 비구속부재의 강성비로 나타낼 수 있다. 구속률의 정의를 Figure 10에 나타내었으며 구속률이란 콘크리트 부재가 어느 정도로 구속을 받는지를 나타내는 지표로서 콘크리트 자유수축변형률 ϵ_f 에 대한 콘크리트 인장변형률 ϵ_t 의 비로 정의된다(식(4))[1,2,12]. 완전구속이란 구속률 R=1.0을 의미하고 구속이 작을수록 1.0보다 작게 된다. 특히 콘크리트의 크리프, 탄성계수는 시간이 경과함에 따라 변화하는 물성이므로 이러한 특성들을 복합적으로 시간변화와 함께 고려하여야 한다. 따라서 식(7)에서 콘크리트의 탄성계수에 크리프의 영향을 고려하기 위하여 크리프 계수를 고려한 증분법을 이용하였으며 그 개념도를 Figure 11에 나타내었다. 구속률 R을 알게 되면 구속수축에 의해 발생하는 인장변형률 ϵ_t 을 식(4)에서 알 수 있듯이, 자유수축변형률 ϵ_f 에 구속률 R 을 곱하여 구할 수 있으며[1,2,12], 최종적으로 구속수축에 의해 발생하는 인장변형률 ϵ_t 은 식(8)과 같이 구할 수 있다.

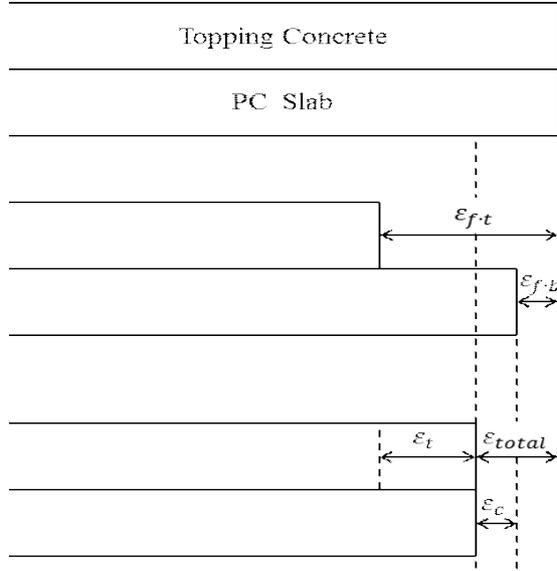


Figure 9. Shrinkage strain of half PC slab

여기에서 ϵ_{ft} 는 topping concrete 자유수축, ϵ_{fb} 는 PC 슬래브 자유수축, ϵ_t 는 topping concrete 인장변형률, ϵ_{total} 은 half PC 슬래브의 실제 변형률, ϵ_c 는 PC 슬래브 압축변형률

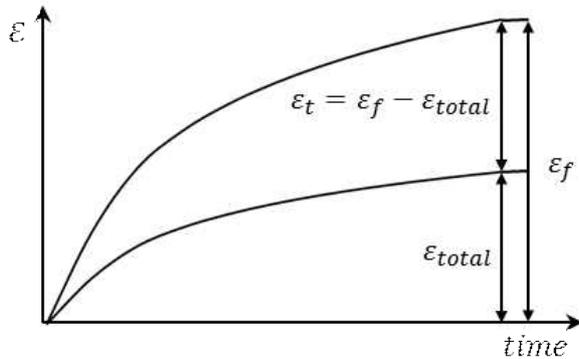


Figure 10. Restraint ratio

$$R = \frac{\epsilon_f - \epsilon_{total}}{\epsilon_f} \quad (4)$$

$$T = a_{tc} E'_{tc}(t_i) \{ \epsilon_f(t_i) - \epsilon_{total}(t_i) \} \quad (5)$$

$$= a_{tc} E'_{tc}(t_i) R(t_i) \epsilon_f(t_i)$$

$$C = a_{pc} E'_{pc} \epsilon_{total}(t_i) + a_s E_s \epsilon_{total}(t_i) \quad (6)$$

$$= a_{pc} E'_{pc} \{ (1 - R(t_i)) \epsilon_f(t_i) + a_s E_s (1 - R(t_i)) \epsilon_f(t_i) \}$$

$$R(t_i) = \frac{\frac{a_{pc} E_{pc}(t_i)}{1 + \phi(t_{i+1/2}, t_i)} + a_s E_s}{\frac{a_{tc} E_{tc}(t_i)}{1 + \phi(t_{i+1/2}, t_i)} + \frac{a_{pc} E_{pc}(t_i)}{1 + \phi(t_{i+1/2}, t_i)} + a_s E_s} \quad (7)$$

여기에서, a_{pc} 는 PC 슬래브 단면적, $E_{pc}(t_i)$ 는 재령 t_i 에서의 PC 슬래브 탄성계수, a_s 는 철근 단면적, E_s 는 철근 탄성계수, a_{tc} 는 topping concrete 단면적, $E_{tc}(t_i)$ 는 재령 t_i 에서의 topping concrete 탄성계수, $\phi(t_{i+1/2}, t_i)$ 는 재령 t_i 에서 재하한 재령 $t_{i+1/2}$ 에서의 크리프 계수

$$\epsilon_t(t_i) = \epsilon_f(t_i) \sum_{i=1}^n \Delta R(t_i) \quad (8)$$

3.4 예측값과 실험값의 비교

건조수축에 의해 half PC 슬래브에 발생한 구속률과 인장 변형률을 증분법(Figure 11)에 의해 예측하여 실험값과 비교하였다. 압축강도, 탄성계수, 건조수축의 시간의존 특성은 각각 식(1), (2), (3)을 사용하였고, 크리프 계수는 ACI[13]에서 제안한 예측식(식(9))을 사용하였다. 여기에서 크리프 계수 최종값 ϕ_{final} 은 ACI에서 제안하고 있는 2.35를 적용하였다. 구속률 R 과 인장변형률 ϵ_t 은 Figure 12의 자유건조수축 변형률 ϵ_f 과 Half PC 슬래브의 수축변형률 ϵ_{total} 측정값으로부터 구하였다.

예측값과 실험값을 비교한 결과를 Figure 13에 나타내었다. Half PC 슬래브에 발생한 구속률은 0.35~0.40 정도로 시간의 변화에 따라 큰 변화가 없는 것으로 나타났으며, 예측값의 경우 0.35~0.37 수준으로 실험값과 거의 일치하는 것으로 나타났다. half PC 슬래브에 발생한 인장 변형률은 시간의 변화와 함께 증가하였고, 재령 40일에서 117μ ϵ 였으며 인장변형률 예측값도 실험값과 거의 일치하는 것으로 나타났다. Figure 13에 크리프 계수를 고려하지 않은 해석결과도 함께 나타내었다. 그 결과 크리프 계수의 영향을 고려했을 경우 예측값은 실험값과 더 잘 일치하였지만, 크리프 계수를 고려했을 때와 고려하지 않았을 때 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 따라서 건조수축의 구속작용에 의해 Half PC 슬래브에 발생하는 인장변형률은 구속률 개념과 증분법을 적용하여 예측이 가능할 것으로 기대되며 건조수축균열제어를 위한 설계에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

$$\phi = \frac{(t_i - t_0)^{0.6}}{10 + (t_i - t_0)^{0.6}} \phi_{final} \quad \text{----- (9)}$$

여기에서 t_0 는 하중 재하일, ϕ_{final} 은 크리프 최종값

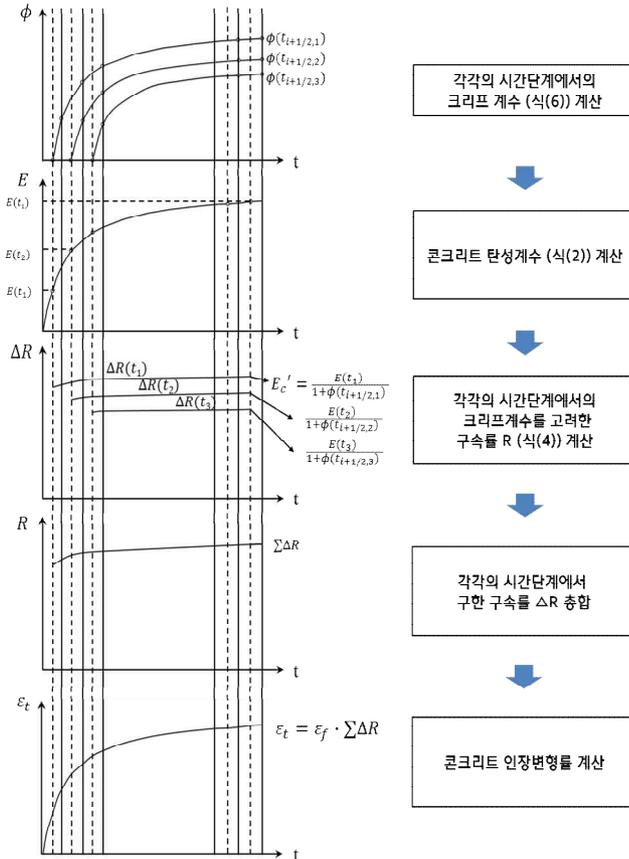


Figure 11. Step by step method

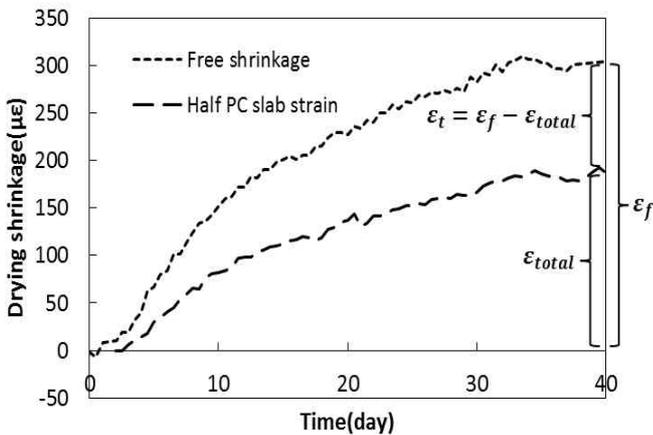
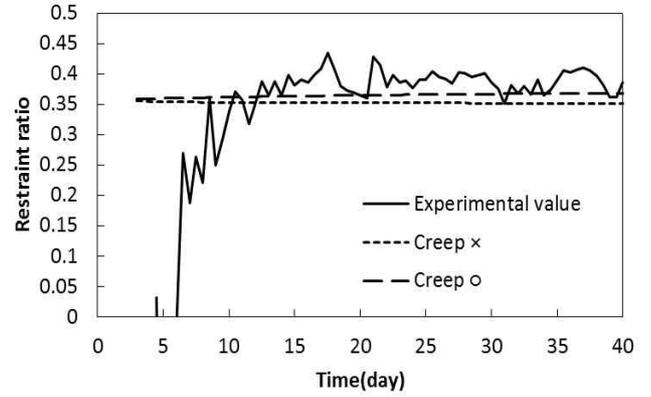
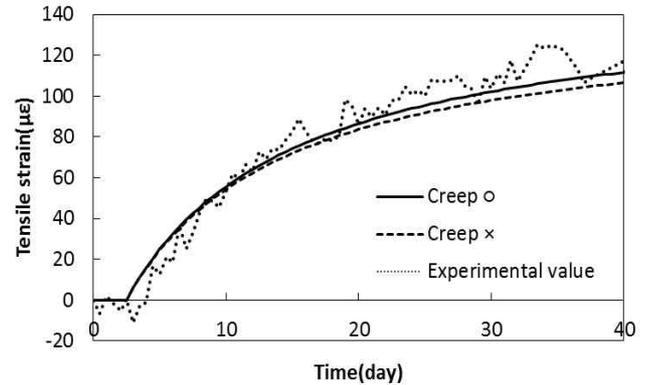


Figure 12. Shrinkage behavior



(a) Histories of restraint ratio



(b) Histories of tensile strain

Figure 13. Comparison between experimental value and predicted value

4. 결 론

본 연구에서는 half PC 슬래브를 대상으로 크리프특성을 고려한 증분법에 의한 수축거동을 예측하여 실험값과 비교 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 재령 40일 에서의 topping concrete 의 자유수축변형률은 $303\mu\epsilon$, 슬래브 시험체의 구속 건조수축변형률은 $186\mu\epsilon$ 이였으며, half PC 슬래브의 구속작용으로 인하여 슬래브 시험체의 구속 건조수축변형률이 자유 건조수축변형률보다 38% 정도 작게 발생하였다.
- 2) half PC 슬래브에 발생한 구속률은 0.35~0.40 정도로 시간의 변화에 따라 큰 변화가 없는 것으로 나타났으며 예측값의 경우 0.35~0.37 수준으로 실험값과 거의 일치하는 것으로 나타났다.
- 3) half PC 슬래브에 발생한 인장변형률은 시간의 변화와 함께 증가하였고, 재령 40일에서 $117\mu\epsilon$ 였으며, 인장

변형률 예측값도 실험값과 거의 일치하는 것으로 나타났다.

- 4) 크리프 계수를 고려하지 않은 해석도 실시하였으며, 그 결과 크리프 계수의 영향을 고려했을 경우 예측값이 실험값과 더 잘 일치하였지만, 크리프 계수를 고려했을 때와 고려하지 않았을 때 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.

건조수축의 구속작용에 의해 half PC 슬래브에 발생하는 인장변형률은 구속률 개념과 증분법을 적용하여 예측이 가능할 것으로 기대되며 건조수축균열제어를 위한 설계에 적용 될 수 있을 것으로 판단된다.

요 약

최근에는 공사기간을 단축하기 위해서 데크플레이트 외에 half PC 슬래브의 사용도 점차적으로 증가하고 있는 실정이다. PC 슬래브 위에 후타설되는 topping concrete 의 건조수축 변형이 PC 슬래브에 의해 구속을 받게 되므로 topping concrete 에 건조수축에 의한 균열이 발생할 수 있다. 따라서 half PC 슬래브의 품질을 향상시키고 내구성능을 증가시키기 위해서 건조수축에 의한 half PC 슬래브의 거동을 사전에 정확히 예측하는 것이 중요하다. 하지만 아직까지 half PC 슬래브의 수축거동 예측에 관한 연구결과가 없는 실정이다. 본 연구에서는 half PC 슬래브를 대상으로 건조수축거동을 관찰하였으며, 크리프특성을 고려한 증분법에 의한 수축거동을 예측한 후 실험값과 비교하여 그 타당성을 검토하였다. 그 결과 건조수축의 구속작용에 의해 half PC 슬래브에 발생하는 인장변형률은 구속률 개념과 증분법을 적용하여 예측이 가능한 것으로 확인되었다.

키워드 : Half PC slab, 건조수축, 증분법, 인장변형률

References

1. Seo TS, Ohno Y, Choi CS. Cracking due to drying shrinkage in a RC wall: Part 1: estimation by bond analysis, Magazine of Concrete Research, 2009 Oct;61(8):609-19.
2. Seo TS, Ohno Y, Choi CS. Cracking due to drying shrinkage in a RC wall: Part 2: Proposal of estimation equation, Magazine of Concrete Research, 2009 Oct;61(8):621-31.
3. Seo TS, Lee MS. Experimental study on tensile creep of coarse recycled aggregate concrete, International Journal of Concrete Structures and Materials, 2015 Sep;9(3):337-43.
4. Seo TS, and Kim JC. Behavior of concrete in a stress continuity region after cracking under restrained drying shrinkage, Structural Concrete, 2013 Jun;14(2):131-7.
5. Lee MS, Seo TS. Prediction method of drying shrinkage crack in reinforced concrete walls, International Journal of Civil Engineering, 2014 Mar;14(1):73-81.
6. Chung, L, Lee MS, Seo TS. Crack control design due to drying shrinkage in restrained reinforced concrete wall, Structural Design of Tall and Special Buildings, 2013 Oct;22(14):1047-61.
7. ALJ. Recommendations for practice of crack control in reinforced concrete structures (Design and Construction), Tokyo: Architectural Institute of Japan; 2006. Chapter 3, Performance Design, p. 53-7.
8. Imamoto K. A study on shrinkage of several kinds of concrete walls, Proceeding of Japan Concrete Institute, 2003;25(1):413-8.
9. Momose H, Kanda T, Mihashi H. A study of controlling shrinkage cracking in constructions, Journal of Structural and Construction Engineering, 2008 Feb;73(624):157-64.
10. JIS A 1108. Method of test for compressive strength of concrete, Japanese Standards Association, 2006, 7 p.
11. JIS A 1149. Method of test for static modulus of elasticity of concrete, Japanese Standards Association, 2010, 16 p.
12. Daniel C, Hoogeven T. An experimental approach for the analysis of early-age behaviour of high performance concrete structures under restrained shrinkage, Cement and Concrete Research, 2007 Feb;37(2):200-9.
13. ACI 209.2R-08. Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete, Detroit: American Concrete Institute; 2008, 45 p.