

지하주차장 무근콘크리트 컬링제어를 위한 연구

Study for Curling Control of Plain Concrete in Underground Parking Lot

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, 16891, Korea

Abstract

The study for curling control of plain concrete in underground parking lot was conducted in this study. The shrinkage reducing agent(SRA) was used to minimize the curling deformation of plain concrete in underground parking lot. For the quantitative curling control, the simplified prediction method applying the deflection theory of cantilever beam was proposed too, and the validity of prediction method was examined through the comparison between the experimental values and predictive values. In result, the curling of SRA 1.0% concrete was about 30% less than that of SRA 0.0% concrete, and the possibility of curling estimation by the simplified prediction method was confirmed through the comparison between the experimental values and predictive values.

Keywords : curling control, plain concrete, shrinkage reducing agent, simplified prediction method

1. 서 론

건축구조물의 지하 최하층에는 지하수 처리를 위하여 기초 위에 배수판을 깔고 120mm 정도의 두께로 무근콘크리트를 타설한 후, 4~5m 간격으로 건조수축 균열을 유발시키기 위한 줄눈 시공을 하게 된다. 건조수축으로 인해 줄눈으로 균열이 유발된 후에 무근콘크리트의 타설면과 저면의 수축차에 의해 컬링(말아올라가는 현상)이 발생하게 되며 [1,2,3], 컬링이 발생한 후 차량 하중이 작용하게 되면 Figure 1과 같이 균열이 발생하게 되고 차량 운행으로 인한 소음도 발생할 수 있다[4]. 건축구조물의 지하주차장 무근콘크리트의 컬링에 의한 하자가 심각함에도 불구하고 아직까지 지하주차장 무근콘크리트를 대상으로 한 컬링에 관한 연구는 많지 않은 실정이다.

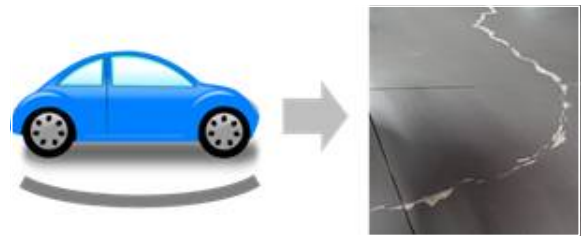


Figure 1. Cracks due to curling

컬링에 관련된 기존의 연구[5,6,7]를 통해 줄눈 간격, 콘크리트 두께, 온/습도 등에 의한 컬링 거동이 어느 정도 규명되었으며, 해석적인 연구로는 FEM 정밀해석을 통한 컬링 거동을 예측한 연구[8,9]가 발표되었다. 하지만 이러한 연구들은 콘크리트 도로포장의 컬링에 관한 연구가 대부분이다.

따라서 본 연구에서는 건축구조물의 지하주차장 무근 콘크리트의 컬링제어를 위한 연구를 수행하였다. 국내의 경우, 지하주차장 무근콘크리트의 수축균열을 제어하기 위해 섬유보강제가 사용되고 있지만, 수축균열과 컬링변형 제어에는 큰 도움이 되지 못하는 실정이므로[10], 수축저감제 (Shrinkage Reducing Agent: 글리콜 기반의 수축저감제, 이하 SRA)

Received : February 14, 2018

Revision received : March 6, 2018

Accepted : March 22, 2018

* Corresponding author : Seo, Tae-Seok

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

©2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

를 사용하였으며 아직까지 SRA가 혼입된 콘크리트의 컬링 변형을 검토한 연구는 발표되지 않았다. 또한 효과적이고 정량적으로 컬링을 관리하기 위해 캔틸레버보의 처짐이론을 활용한 예측법을 제안하였고, 본 예측법의 타당성을 검토하기 위하여 컬링 변형 실측값과 비교 분석 하였다.

2. 실험 계획

2.1 콘크리트 배합

콘크리트 배합을 Table 1에 나타내었다. 콘크리트는 SRA 무혼입 콘크리트와 SRA 1.0% 혼입 콘크리트의 두 종류로 하였다. 물/결합재비(W/B)는 54.7%로 하였으며, 두 배합의 슬럼프와 공기량은 목표치(슬럼프 210±25mm, 공기량 4.5±1.5%)를 만족하였다. 콘크리트 배합에 사용된 재료와 SRA의 특성을 각각 Table 2~3에 정리하였다. 본 연구에서 사용된 SRA는 글리콜 타입의 액상형으로 배합수의 표면장력을 감소시켜서 건조수축을 저감시키는 특징이 있으며[11,12], 사용량에 따라 최대 40%까지 건조수축을 감소시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다[13].

Table 1. Mixture proportions

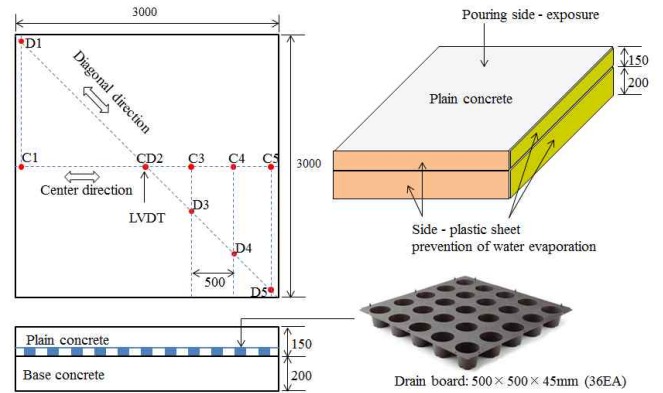
W/B	S/a	Unit weight (kg/m ³)						SRA (C×%)
		W	C	FA	S	G		
54.7	55	175	288	32	985	809	0.0	
54.7	55	175	288	32	985	809	1.0	

Table 2. Properties of materials

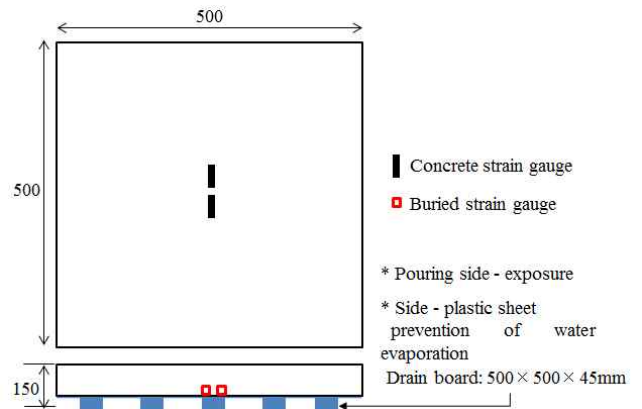
Material	Physical properties	
Ordinary Portland Cement	Specific gravity	Specific surface area
	: 3.15	: 3300 cm ² /g
Fly ash	Specific gravity	Specific surface area
	: 2.23	: 3660 cm ² /g
Coarse aggregate (Max. 25mm)	Specific gravity	Absorption capacity
	: 2.60	: 0.72%
Fine aggregate (Crushed sand)	Specific gravity	Absorption capacity
	: 2.59	: 0.83%

Table 3. Properties of SRA

Main constituent	Density (g/cm ³)	Viscosity (cps)	Shape	Color
Glycol-type	0.95±0.1 (at 20°C)	200±50 (at 20°C)	Liquid	White



(a) Specimen for curling measurement



(b) Specimen for drying shrinkage measurement

Figure 2. Details of specimen

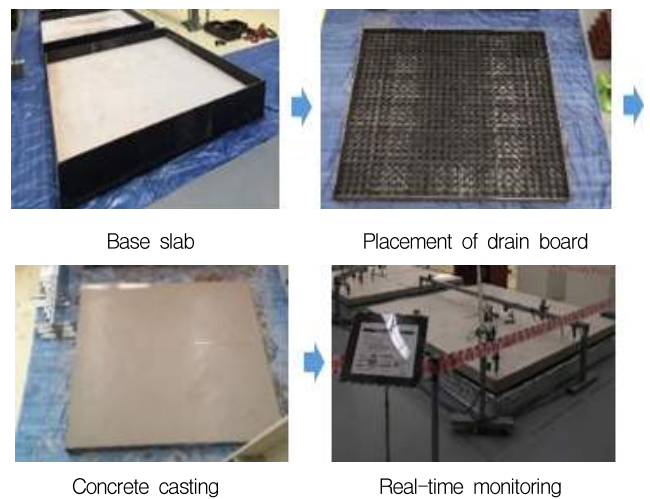


Figure 3. Fabrication of specimen

2.2 시험체 제작

Figure 2에 시험체의 개요를 나타내었다. Base slab를

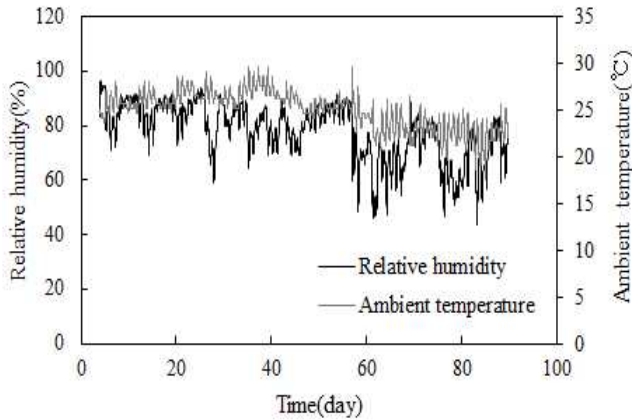


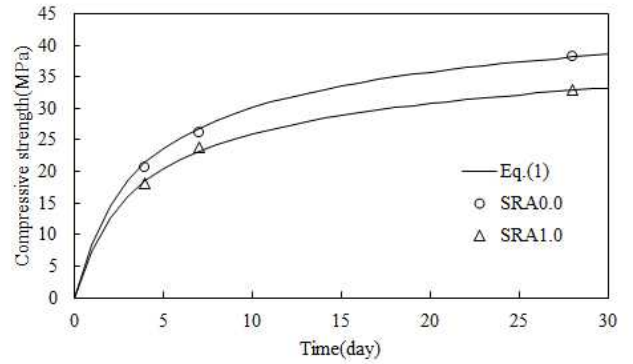
Figure 4. Environment of structural laboratory

3000×3000×200mm 크기로 제작한 후 500×500×45mm 크기의 배수판을 설치하였다. 배수판 윗면으로 무근 콘크리트를 타설하고 대형 실험동 내부에서 습윤양생을 5일간 실시한 후 컬링 변형을 모니터링 하였다(Figure 3). 컬링 변형은 Figure 2와 같이 대각선 방향과 중심 방향으로 LVDT를 설치하여 계측하였다. 또한 건조수축 측정용 시험체를 배수판 1판의 크기로 제작한 후 콘크리트 저면과 타설면의 수축차도 측정하였다. 콘크리트 타설면에는 부착형 콘크리트 게이지를, 저면은 배수판 위에 매립형 스트레인 게이지를 설치하였다. 각각의 게이지는 건조수축 시험체의 중앙부에 설치하였다. 콘크리트 시험체의 양 측면에는 플라스틱 시트를 부착하여 수분이 측면으로 증발하는 것을 방지하였다. 실험실 내부의 온도와 습도의 상황을 Figure 4에 나타내었다. 실험실 내부의 온도는 평균 25°C, 상대습도는 평균 77%였다. 실험실 내부온도의 일일편차는 3~5°C로 크지 않은 것으로 확인되었다.

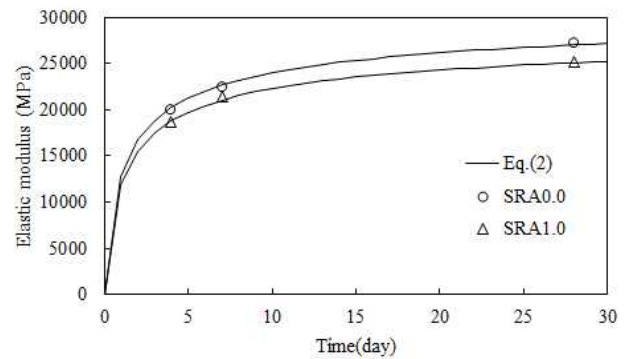
3. 실험결과 및 분석

3.1 콘크리트 역학특성

콘크리트의 압축강도와 탄성계수는 ASTM[14,15] 기준에 준하여 실시하였고, 컬링 시험체와 동일한 환경에서 양생을 실시하였다. 콘크리트 역학특성 시험 결과를 Figure 5에 나타내었다. SRA 1.0% 콘크리트의 압축강도와 탄성계수가 SRA 0.0% 콘크리트보다 각각 15%, 7% 정도 낮았으며, 이는 초기재령에서 SRA의 글리콜 성분이 콘크리트 내에서 가수분해가 되는 과정에서 Ca^{2+} 이온과 반응하여 콘크리트



(a) Compressive strength



(b) Elastic modulus

Figure 5. Concrete mechanical properties

의 Ca^{2+} 이온의 농도를 저하시키기 때문인 것으로 보고되고 있다[16]. Figure 5에 압축강도와 탄성계수의 예측식 [17]에 의한 결과도 함께 나타내었으며, 예측식은 실측값에 맞도록 수정이 되었다.

$$f_c(t) = \exp\left\{0.35\left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)\right]\right\}f_{28} \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$E_c(t) = 21000\left(\frac{f_c(t)}{23}\right)^{0.5} \quad \text{-----} \quad (2)$$

여기에서 $f_c(t)$ 는 시간 t 에서의 콘크리트 압축강도, f_{28} 은 재령 28일 압축강도, $E_c(t)$ 는 시간 t 에서의 콘크리트 탄성계수이다.

3.2 콘크리트 건조수축

콘크리트 타설면과 저면의 건조수축거동을 Figure 6에 나타내었다. 시간이 경과되면서 건조수축도 증가하였고, SRA 0.0% 콘크리트는 저면에서의 수축량이 최대 $50\mu \varepsilon$

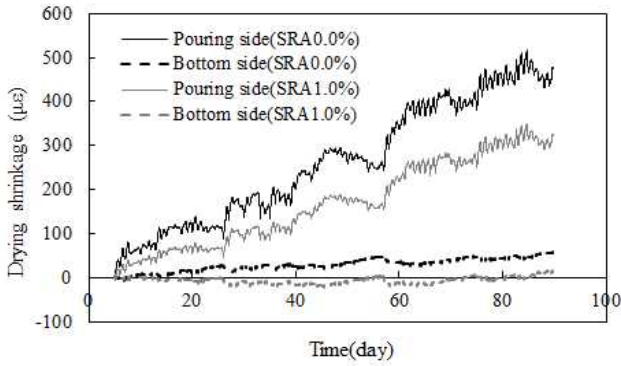


Figure 6. Behavior of drying shrinkage

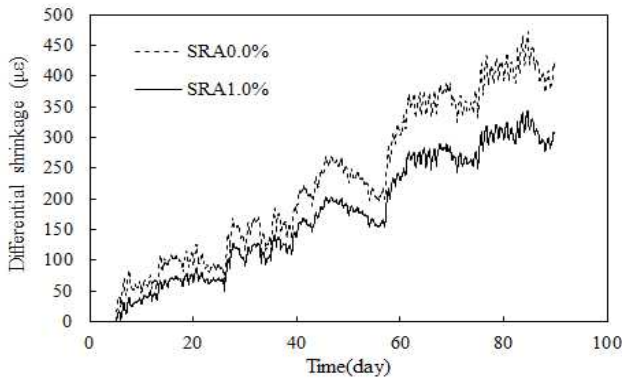


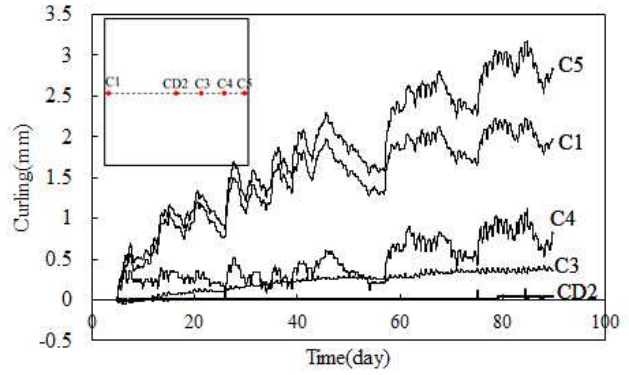
Figure 7. Differential shrinkage between pouring and bottom side

정도로 매우 낮았으며, SRA 1.0% 콘크리트는 수축이 거의 발생하지 않았다. 그 이유는 수분이 빠져나갈 수 있는 면은 타설면 뿐이었고, 지반에 타설되는 콘크리트와 달리 배수관 위에 타설된 콘크리트이기 때문에 지반으로 빠져나가는 수분의 손실이 없기 때문인 것으로 판단된다.

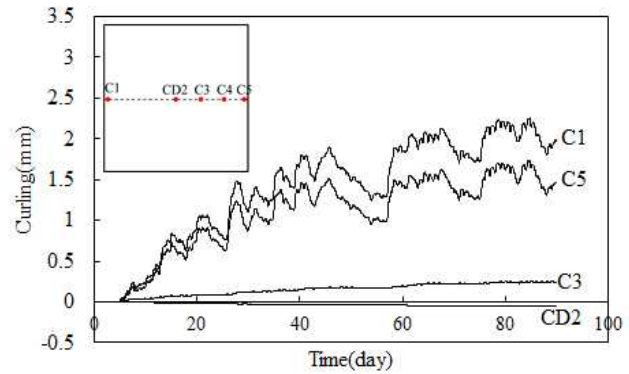
Figure 7에 콘크리트 타설면과 저면의 수축차를 나타내었다. SRA 1.0% 콘크리트의 수축차가 SRA 0.0% 콘크리트보다 30% 정도 낮았으며, SRA를 사용함으로써 콘크리트 타설면과 저면의 수축차에 의해 발생하는 컬링을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 컬링 변형의 거동

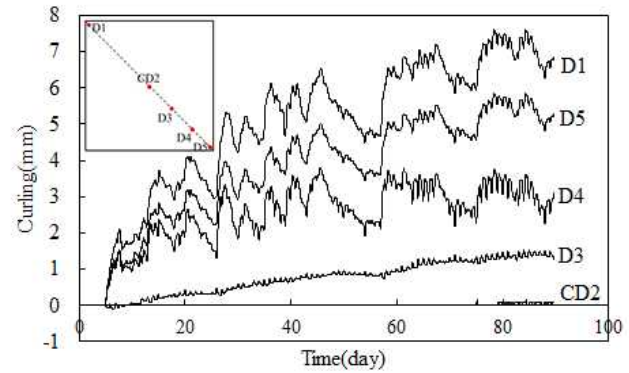
컬링 변형의 계측결과를 Figure 8에 나타내었다. 컬링 변형의 계측은 90일간 진행되었다. 전반적으로 컬링 변형은 재령 90일쯤에서 거의 수렴하는 것으로 확인되었으며, 컬링 변형의 시간에 따른 증가속도는 수축 차의 시간에 따른 증가 속도(Figure 7)보다 완만한 것으로 나타났다. 이는 무근콘크리트의 자중에 의한 크리프의 증가 때문인 것으로 판단된다.



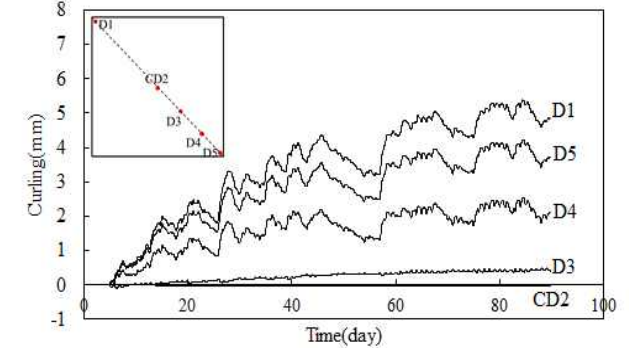
(a) SRA0.0% (Center direction)



(b) SRA1.0% (Center direction)



(c) SRA0.0% (Diagonal direction)



(d) SRA1.0% (Diagonal direction)

Figure 8. Curling behavior

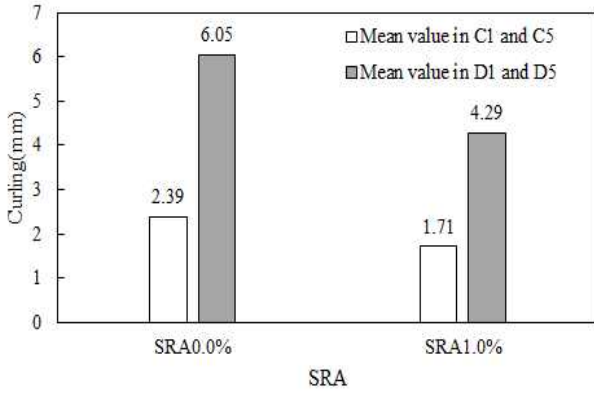


Figure 9. Compression of curling at the age of 90 days

재령 90일에서의 컬링 변형의 최대값을 비교한 결과 (Figure 9), 대각선방향과 중심방향 모두 SRA 1.0% 콘크리트가 SRA 0.0% 콘크리트보다 컬링 변형이 30% 정도 감소하였다. 중심방향과 대각선방향의 컬링 변형을 비교한 결과, 대각선방향 컬링 변형의 최대값이 중심방향 컬링 변형의 최대값 보다 2.5배 정도 큰 것으로 나타났으며, 기존 연구[18]에서는 3배 정도 큰 것으로 보고되고 있다. 이러한 변형의 차이가 발생한 이유는 대각선 방향 모서리 부분으로 이동할 수록 단면2차모멘트가 작아지기 때문인 것으로 판단된다. SRA의 사용으로 컬링 변형을 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과에서는 SRA의 사용에 따른 타설면과 저면의 수축차 감소율과 컬링 변형의 감소율이 대략 30%로 거의 유사하여 수축차의 감소율과 컬링 변형의 감소율 사이에 상관성이 있는 것으로 나타났지만, 이 부분에 대해서는 보다 많은 실험적 검증이 필요할 것으로 판단된다.

3.4 컬링 예측

간단한 방법으로 주차장 무근콘크리트의 컬링변형을 예측하기 위하여 무근콘크리트를 캔틸레버 보로 가정하였다. 주차장 무근콘크리트의 수축차에 의한 변형을 Figure 10과 같이 캔틸레버 보로 가정하면, 콘크리트 표면과 저면의 수축차에 의해 발생한 모멘트에 의한 변형은 보의 기본식에 근거하여 식 (3)과 같이 구해질 수 있으며 곡률 θ 은 식 (4)와 같이 표현될 수 있다. 또한 자중에 의한 처짐도 보의 기본식을 기반으로 식 (5)로 구해질 수 있으며, 최종적인 컬링 변형은 Figure 10과 같이 수축차에 의한 변형과 콘크리트 자중에 의한 변형의 합으로 구해질 수 있다. 컬링 변형은 장기 재령에서의 거동이므로 크리프 특성을 고려하여야 하며, 본

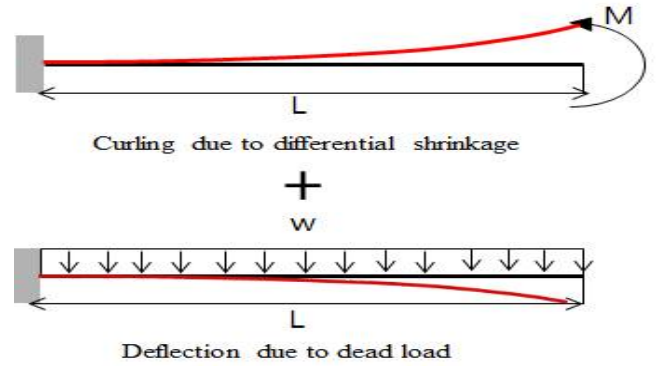


Figure 10. Diagram of deformation

예측에서는 서서히 하중이 가해지는 경우를 고려하기 위하여 식 (6)과 같은 재령보정 유효탄성계수법을 적용하였다. 재령계수는 하중 이력에 따라 다르나 일반적으로 콘크리트에 대해서는 0.8이 적용된다. 콘크리트의 탄성계수는 3.1절의 식 (2)를 사용하였고, 크리프 계수는 ACI 모델식(식 (7))을 사용하였다. 크리프 최종값 ϕ_{final} 은 ACI에서 권장하고 있는 값 2.35를 적용하였다.

$$C = \frac{ML^2}{2E_c'I} = \frac{E_c'I\theta L^2}{2E_c'I} = \frac{\Delta\epsilon_{sh}L^2}{2t} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{\Delta\epsilon_{sh}}{t} \quad (4)$$

$$\delta = \frac{w}{24E_c'I}(6L^2 - 4Lx + x^2) \quad (5)$$

$$E_c' = \frac{E_c}{1 + 0.8\phi} \quad (6)$$

$$\phi = \frac{(t - t_0)^{0.6}}{10 + (t - t_0)^{0.6}} \phi_{final} \quad (7)$$

여기에서 M은 모멘트, L은 무근콘크리트 줄눈 간격의 절반 길이, E_c' 는 유효탄성계수, I는 무근콘크리트 단면 2차 모멘트, θ 는 곡률, $\Delta\epsilon_{sh}$ 는 콘크리트 표면과 저면의 수축차, t는 무근콘크리트 두께, w는 무근 콘크리트 자중, x는 시작점에서부터의 거리, ϕ 는 크리프계수, ϕ_{final} 은 크리프 최종값 이다.

3.5 예측결과

재령 90일에서의 컬링변형을 예측하였으며, 그 결과를 Figure 11에 나타내었고, 컬링변형 상황을 Figure 12에 나타내었다. 식 (2)로부터 재령 90일에서의 콘크리트 탄성

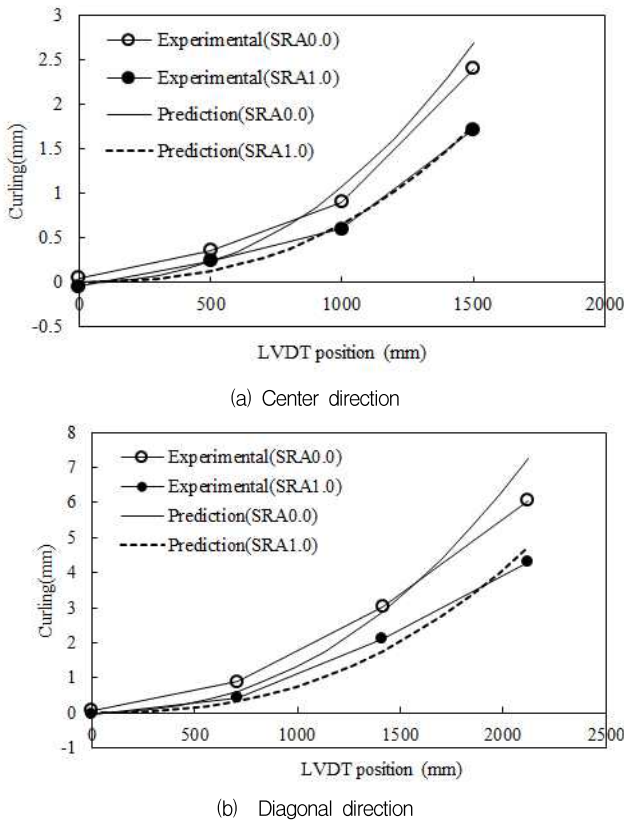


Figure 11. Prediction and experimental results



Figure 12. Deformation due to curling

계수를 구하였고, 콘크리트 수축차는 Figure 7의 실측값을 적용하였다. 대각선 방향에서의 컬링변형은 본 실험결과(대각선방향/중심방향=2.5)와 기존 연구결과(대각선방향/중

심방향=3.0)에 근거하여 중심 방향에서의 컬링변형에 평균인 2.7배를 하였다. 컬링변형 최대값과 비교하였을 때 오차율이 17% 수준이었지만, 전반적으로 켈틸레버 보의 처짐이론으로 무근콘크리트의 컬링변형을 예측하는 것이 가능함을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 건축 구조물의 지하주차장 무근콘크리트의 컬링제어를 위한 연구를 수행하였으며, 그 결과를 다음과 같이 정리하였다.

- 1) SRA 1.0% 콘크리트의 수축차가 SRA 0.0% 콘크리트보다 30% 정도 낮았으며 수축저감제의 사용으로 콘크리트 타설면과 저면의 수축차에 의해 발생하는 컬링을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 컬링 변형은 재령 90일 정도에서 거의 수렴하는 것으로 나타났으며, 컬링 변형의 시간에 따른 증가 속도는 수축차의 시간에 따른 증가속도보다 완만한 것으로 나타났다. 그 이유는 무근콘크리트의 지중에 의한 크리프의 증가 때문인 것으로 판단된다.
- 3) 재령 90일에서의 컬링 변형 최대값을 비교한 결과, 대각선 방향, 중심 방향 모두 SRA 1.0% 콘크리트가 SRA 0.0% 콘크리트보다 컬링 변형이 30% 정도 감소하였다.
- 4) 중심방향과 대각선방향의 컬링 변형을 비교한 결과, 대각선방향의 컬링 변형 최대값이 중심방향 컬링 변형 최대값보다 2.5배 정도 큰 것으로 나타났다. 이러한 변형의 차이가 발생한 이유는 대각선 방향 모서리 부분으로 이동할수록 단면2차모멘트가 작아지기 때문인 것으로 판단된다.
- 5) 컬링변형 예측결과 컬링변형 최대값의 오차율이 17% 수준이었지만 전반적으로 켈틸레버 보의 처짐이론으로 무근 콘크리트의 컬링변형을 예측하는 것이 가능함을 확인할 수 있었다.

요 약

본 연구에서는 건축구조물의 지하주차장 무근콘크리트의 컬링제어를 위한 연구를 수행하였다. 국내의 경우, 지하주차

장 무근콘크리트의 수축균열을 제어하기 위해 섬유보강제가 사용되고 있지만, 수축균열과 컬링변형 제어에는 큰 도움이 되지 못하고 있는 실정이므로, 수축균열과 컬링 변형을 최소화하는 방안으로 수축저감제 (Shrinkage Reducing Agent: 글리콜 기반의 수축저감제, 이하 SRA)를 사용하였다. 또한 정량적인 컬링제어를 위하여 무근콘크리트를 켄틸레버 보로 가정하여 처짐이론을 적용한 간이에측기술을 제안하였으며, 실측값과 비교하여 컬링변형 예측의 타당성을 검토하였다. 그 결과 SRA 1.0% 콘크리트가 SRA 0.0% 콘크리트보다 컬링 변형이 30% 정도 감소함을 확인하였다. 또한 전반적으로 켄틸레버 보의 처짐이론으로 무근 콘크리트의 컬링변형을 예측하는 것이 가능함을 확인할 수 있었다.

키워드 : 무근콘크리트, 컬링제어, 수축저감제, 간이에측기술

References

- Keeton JR, Shrinkage compensating cement for airport pavement, Phase 2, Washington DC: Federal Aviation Administration; 1979 p. 1-39.
- Bruce AS, Why slabs curl-Part II, Concrete International, 2002 Apr;24(4):59-64.
- Cement Concrete&Aggregates Australia, Curling of concrete slabs, [Internet], 2006 [cited 2006 Jan 10]. Available from: http://www.ccaa.com.au/iMIS_Prod/CCAA/Public_Content/PUBLICATIONS/Technical_Publications/Data sheets/Curling_of_concrete_slabs.aspx?WebsiteKey=4998d6ce-2791-4962-b1e2-6b717f54a8d3
- Seo TS, Choi HJ, Gong MH, Performance evaluation of concrete using performance improving-type polycarboxylic acid-based admixture, Journal of Korea Institute of Building Construction, 2017 Oct;17(5):445-51.
- Oh HJ, Cho YK, Seo YG, Kim SM, Experimental analysis of curling behavior of continuously reinforced concrete pavement, Construction and Building Materials, 2016 Dec; 128:57-66.
- Shideh S, Chris R, Kang THK, A long term restrained shrinkage study of concrete slabs on ground, Engineering Structures, 2015 Nov;102:258-65.
- Kim SM, Shim JS, Park HB, Yun DJ, Curling behavior of long span concrete pavement slab under environmental loads, Journal of Korean Society of Road Engineers, 2009 Sep;11(3):151-61.
- Moayyad AN, Wang LRL, Parametric study of slabs on grade problems due to initial warping and point loads, structural Journal, 1994 Mar;91(2):198-210.
- Lee CJ, David AL, Liu YS, Prediction of moisture curling of concrete slab, Materials and Structures, 2011 May;44(4):787-803.
- Kim YS, Kim KK, Park SJ, Kim JS, Drying shrinkage characteristics of concrete incorporated shrinkage reducing agent according to mixed proportion of concrete, Journal of Korea Institute of Building Construction, 2017 Jun;17(3):245-52.
- Sato K, Shrinkage reducing agent, JCI Concrete Journal, 2011 Mar;49(5):61-4.
- Erhan G, Mehmet G, Alaa M, Radhwan A, Zeynep A, Kasim M, Enhancement of shrinkage behavior of lightweight aggregate concretes by shrinkage reducing admixture and fiber reinforcement, Construction and Building Materials, 2014 Mar;54(3):91-8.
- Lee DG, Han HS, Jung YW, Chemical admixture technology for reducing shrinkage of concrete, Magazine of Korea Concrete Institute, 2016 Nov;28(6):31-6.
- ASTM C 39/39M-18, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International, 2006, 8 p.
- ASTM C 469/C469M-14, Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression, ASTM International, 2010, 5 p.
- Park JP, Yoo BH, Han HS, Fundamental properties of concrete corresponding to contents shrinkage reducing agent, Proceedings of the Korea Concrete Institute; 2015 May 13-15; Kimdaejung convention center, Gwangju, Korea, Seoul(Korea): Korea Concrete Institute; 2015, p.655-6.
- AIJ, 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.
- Wayne WW, Jerry AH, The first commandment for floor slabs: Thou shalt not curl crack (hopefully), Concrete International, 1999 Jan;21(1): 47-53.
- Imamoto KI, Simplified prediction of drying shrinkage stress in reinforced concrete building wall, Journal of Advanced Concrete Technology, 2008 Mar;6(1)111-20.
- ACI Committee 209R-92, Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures, Detroit: American Concrete Institute; 1997, 47 p.