

콘크리트 슬래브 건조수축 응력 감소에 관한 초기연구

A Preliminary Study on Reduction of Shrinkage Stress in Concrete Slabs

| | |
|-----------------------|---|
| 박 정 우 Park, Jeong Woo | 학회회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : pjwband2o@naver.com) |
| 정 영 도 Jeong, Young Do | 학회회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : civil22011271@hanmail.net) |
| 임 진 선 Lim, Jin Sun | 학회회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : coreplay@hanmail.net) |
| 정 진 훈 Jeong, Jin Hoon | 정 회 원 · 인하대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : jhj@inha.ac.kr) |

ABSTRACT

Volume of concrete slab changes by variations of temperature and moisture after its placement. Shrinkage due to evaporation causes tensile stress in the slab when contraction of the slab is restrained by its self weight, friction with subbase, and etc. Actual tensile stress caused by the shrinkage was less than theoretically predicted stress according to previous studies. It was the stress reduction due to visco-elastic property of the early-age concrete slab partially restrained. In this study, strains of restrained circumferential, unrestrained circumferential, and unrestrained square pillar concrete specimens were measured to investigate stress reduction of the specimens with age of concrete. Elastic modulus of the concrete was measured at the age of 1, 3, 7, 14, 28 days and penetration test was performed. The stress reduction was calculated by input the test results into theoretical equations suggested by previous researchers. The stress reduction of the restrained concrete specimens will be applied to design of concrete pavements based on results of the study.

KEYWORDS

stress reduction, concrete slab, shrinkage, tensile stress, strain

요지

콘크리트 슬래브는 타설 후 온도와 수분 변화를 통해 체적이 변화한다. 수분증발에 의하여 발생한 건조수축은 슬래브의 자중이나 하부층과의 마찰 등에 의하여 구속되어 슬래브 내부에 응력이 유발된다. 선행 연구에 의하면 건조수축에 의하여 발생된 실제 인장응력은 이론적으로 예측된 값보다 작은 것으로 보고되었다. 이는 부분적으로 구속된 슬래브에서 발생하는 초기 재령 콘크리트의 점탄성에 기인한 응력감소 현상이다. 본 연구에서는 재령에 따른 콘크리트의 응력감소 현상을 조사하기 위하여 구속된 원주형, 구속되지 않은 자유건조 원주형, 그리고 자유건조 각주형 콘크리트 시편의 변형률을 측정하였다. 재령 1, 3, 7, 14, 28일에 콘크리트의 탄성계수를 측정하였으며 관입저항 실험을 실시하였다. 실험결과를 기존 연구자들이 제안한 이론식에 대입하여 구속된 원주형 콘크리트 시편의 응력감소를 계산할 수 있었다. 향후 본 연구의 결과를 바탕으로 구속된 콘크리트 시편의 응력감소 현상을 콘크리트 포장의 설계에 적용할 예정이다.

핵심용어

응력감소, 콘크리트 슬래브, 건조수축, 인장응력, 변형률

1. 서론

콘크리트는 타설 후 표면에서 수분이 증발되면서 장기간에 걸쳐 지속적으로 건조수축이 발생하여 체적이 줄어든다. 건조수축에 의하여 발생하는 콘크리트 슬래브의 거동은 슬래브의 자중이나 하부층과의 마찰에 의하여 구속되고 이로 인하

여 슬래브의 내부에는 응력이 발생하게 된다. 건조수축은 온도와 함께 콘크리트 포장 파손을 유발하는 환경하중의 하나로 알려져 있으며(Suprenant, 2002), 이를 예측하기 위하여 여러 모형이 개발되어 왔다(ACI, 1997, CEB-FIP, 1990, 김진철, 2003). 하지만 이들 모형으로 해석을 수행한

결과, 실제 슬래브에 발생한 건조수축보다 과다하게 예측한 경우가 많았는데, 이는 현장 콘크리트 포장에 사용되는 길어깨, 타이바, 다웰바, 보조기층 등에 의한 슬래브의 구속을 고려하지 않았기 때문으로 보고되었다(Yang 등, 2000, Hossain 등, 2004). 재령 초기 콘크리트의 변형이 구속될 경우, 완전 구속된 콘크리트에 응력이완(Relaxation)이 발생하는 것과 유사하게 응력감소가 발생하게 된다(Hossain 등, 2008).

응력감소 혹은 응력이완 현상을 규명하기 위하여 많은 연구자들이 실내실험을 수행하였다. Hossain 등(2004)은 구속된 원주형 시편을 사용했으며, Kovler 등(1993)은 Dog-bone 시편을 사용하여 건조수축과 인장크리프 거동에 대한 연구를 했다. Altoubat 등(2001)도 Dog-bone 시편을 사용하여 건조수축 및 크리프 실험을 수행하고 건조수축에 의해 구속된 콘크리트에 발생한 실제 응력이 탄성이론에 의한 예상 값의 50% 정도라는 연구 결과를 발표했다. 조호진(2003)은 기존에 Schooppel 등(1995)이 TSTM(Temperature-Stress Test Machine)을 사용하여 수행한 건조수축 및 크리프 실험결과를 Bazant 등(1978, 2001)의 건조수축 및 크리프 모형에 적용하고 기존 모형에 의한 결과들과 비교 분석하였다. 기존 연구들의 주된 목적은 구속받는 콘크리트 시편의 균열발생 시점을 시편 형상, 배합비, 양생조건, 그리고 구속 정도 등에 따라 예측하는 것이다.

역학적-경험적 포장설계법을 사용하게 되면서 AASHTO에서는 콘크리트 포장의 설계에 식 (1)과 같이 온도와 함께 건조수축을 환경하중으로서 반영하게 되었다(AASHTO, 2002)

$$\Delta T_{total} = \Delta T_{hourly} + \Delta T_{built-in} + \Delta T_{shrinkage} \quad (1)$$

여기서, ΔT_{hourly} : 실제 측정된 슬래브 상하부 간의 온도차이
 $\Delta T_{built-in}$: 중결 시 발생한 슬래브 상하부 간의 온도차이

$\Delta T_{shrinkage}$: 부등건조수축과 등가인 슬래브 상하부 간의 온도차이

기존의 건조수축을 고려하지 않던 틀에서 크게 벗어나지 않기 위하여 AASHTO 모형에서 부등건조수축의 영향은 상당히 작은 것으로 간주되고 있다. 그러나 콘크리트 포장에 미치는 건조수축의 영향은 매우 커서 온도의 영향보다 크다고 보고되고 있으며 역학적-경험적 설계법으로 개발 중인 한국형 포장설계법에는 이를 반영하여 AASHTO 설계법과는 차별화될 필요가 있다(Bendana, 2003, Sun, 2009). 이와 함께 콘크리트 슬래브의 건조수축이 구속되어 발생하는 응력감

소를 고려하여 보다 정확하고 합리적으로 콘크리트 포장의 설계를 수행할 수 있을 것이다.

이를 위하여 본 연구에서는 구속된 원주형(Restrained Ring)시편, 자유건조 원주형 시편, 자유건조 각주형 시편을 만들어 실내실험을 실시하고 그 결과를 이용하여 기존의 이론적인 모형에 대입하여 주어진 조건에 해당하는 응력감소의 범위를 찾았다. 또한, 응력감소 현상을 대표할 수 있는 모형의 형태를 제시하였다.

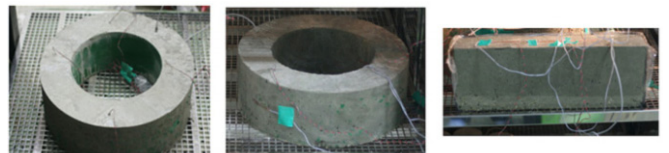
2. 실내실험

2.1. 실험방법

구속된 시편을 제작하기 위하여 비용이 저렴하며 실험 결과 해석 시 경계조건을 단순화할 수 있는 두께 3mm의 Steel ring을 외부지름 500mm, 내부지름 300mm, 높이 150mm의 원주형 콘크리트 시편 내부에 그림 1 (a)와 같이 설치하였다(Hossain 등, 2004). 자유건조 원주형 시편에는 Steel ring은 설치하지 않았으며 시편의 크기는 구속된 원주형 시편과 동일하였다(그림 1 (b)). 또한 가로 100mm, 세로 150mm, 길이 600mm의 자유건조 각주형 시편을 그림 1 (c)와 같이 제작하였다. 실험에 사용된 콘크리트의 배합비는 표 1과 같다.

표 1. 실험 배합표

| 굵은골재 최대치수 (mm) | 슬럼프 (mm) | 공기량 (%) | W/C (%) | S/A (%) | 단위재료량(kg/m ³) | | | | |
|----------------|----------|---------|---------|---------|---------------------------|-----|-----|------|------|
| | | | | | 물 | 시멘트 | 잔골재 | 굵은골재 | 혼화재료 |
| 19 | 80 | 4 | 44.1 | 39.4 | 161 | 365 | 700 | 1078 | - |

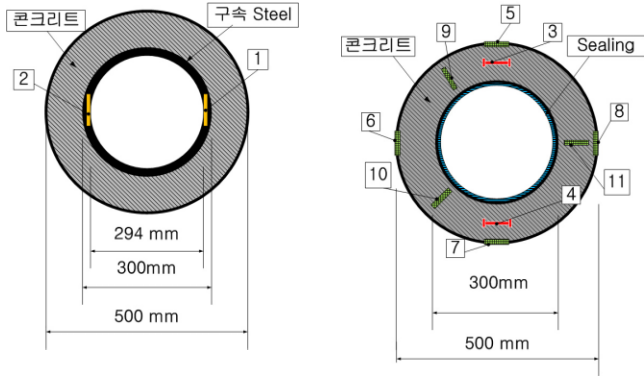


(a) 구속된 원주형 (b) 자유건조 원주형 (c) 자유건조 각주형

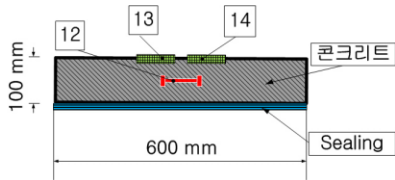
그림 1. 실내 실험에 사용된 콘크리트 시편

구속된 원주형 시편의 내측에 설치되어 있는 Steel ring 내측에 Steel 변형률 게이지를 그림 2(a)와 같이 원주(Circumferential) 방향으로 2개를 부착하였다. 자유건조 원주형 콘크리트 시편 내부에는 매립형 콘크리트 변형률 게이지를 원주방향으로 2개, 외부표면에는 부착형 콘크리트 변형률 게이지를 원주방향으로 4개, 중심(Radial) 방향으로 3개를 그림 2(b)와 같이 설치하였다. 자유건조 각주형 시편의 내부와 외부표면에 매립형 콘크리트 변형률 게이지 1개와 부착형 콘크리트 변형률 게이지 2개를 각각 그림 2(c)와 같이

시편 길이방향으로 설치하여 변형률을 측정하였다. 본 연구에서 사용된 Steel 변형률 게이지(FLA-5-11-1L), 매립형 콘크리트 변형률 게이지(PMFL-60-2LT), 그리고 부착형 콘크리트 변형률 게이지(PL-60-11-1L)는 모두 Tokyo Sokki Kenkyuio 회사에서 제조된 것이다.



(a) 구속된 원주형 (b) 자유건조 원주형



(c) 자유건조 각주형



* 시편의 높이는 모두 150mm

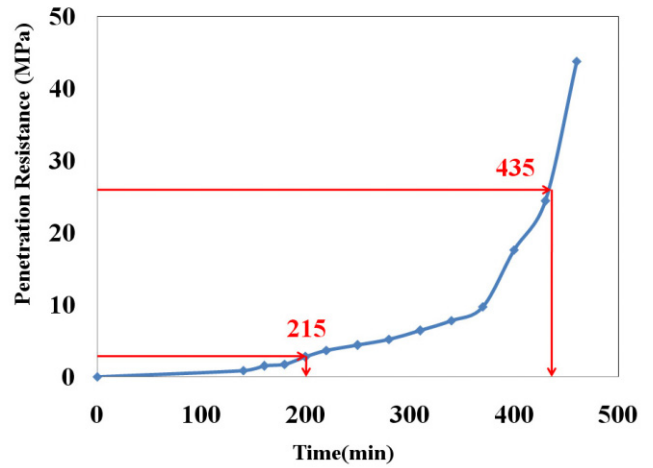
그림 2. 변형률 게이지 설치 위치

KS F 2438에 따라 재령에 따른 탄성계수를 측정하였으며, KS F 2436에 따라 관입저항 실험을 실시하여 콘크리트 시편의 응결시간을 측정하였다. 표 2는 탄성계수 측정 결과이며, 그림 3은 관입저항 실험 결과로서 종결 시의 관입저항치인 28 MPa에서의 성숙도는 본 실험의 경우 247°C-hours로 측정되었다.

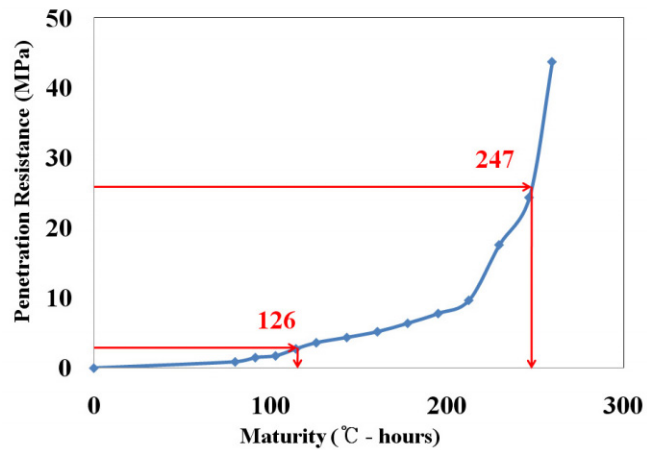
시편은 실험실에서 비닐로 덮어 보관하다가 종결 시간에 탈형하고 항온항습기로 시편을 옮겨 온도 23°C, 상대습도 50%를 유지하였다. 측정된 변형률의 영점은 콘크리트 포장 슬래브가 거동하기 시작하는 종결 시간으로 결정하였다 (Jeong 등, 2005)

표 2. 재령에 따른 탄성계수 실험 결과

| 재령(Day) | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 탄성계수(GPa) | 13.43 | 18.93 | 22.62 | 26.13 | 28.58 |



(a) 양생시간에 따른 관입저항



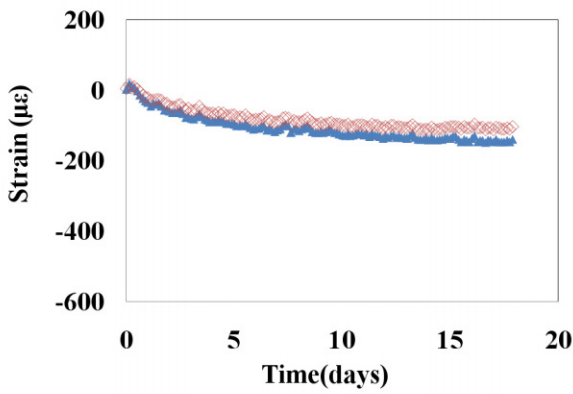
(b) 성숙도에 따른 관입저항

그림 3. 관입저항 실험 결과

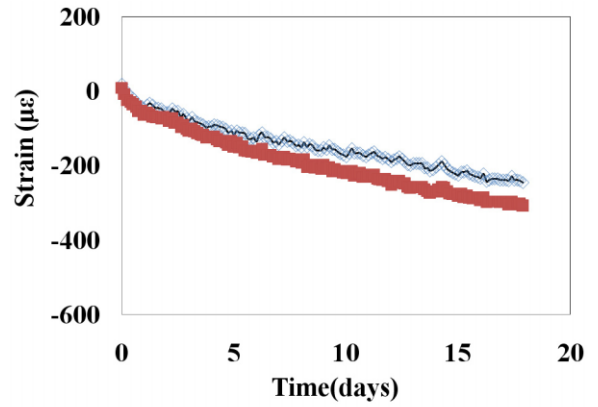
2.2. 실험결과

실험은 구속된 원주형 콘크리트 시편에 균열이 발생한 재령 18일까지 수행되었다. 그림 4(a)는 구속된 원주형 시편의 Steel ring에 부착된 Steel 변형률 게이지 2개로부터 측정된 변형률이 재령에 따라 변화하는 경향을 나타낸 것이다. 그림 4(b)는 자유건조 원주형 시편 내부에 매립된 콘크리트 변형률 게이지 2개로부터 측정된 변형률을 나타낸 것이며, 그림 4(c)와 그림 4(d)는 자유건조 원주형 시편 외부표면에 부착된 콘크리트 변형률 게이지로부터 측정된 원주 방향과 중심 방향의 변형률을 각각 나타낸 것이다. 그림 4(e)와 그림 4(f)는 자유건조 각주형 시편 내부에 매립된 콘크리트 변형률 게이지 1개와 외부표면에 부착된 콘크리트 변형률 게이지 2개로부터 측정된 변형률을 나타낸 것이다.

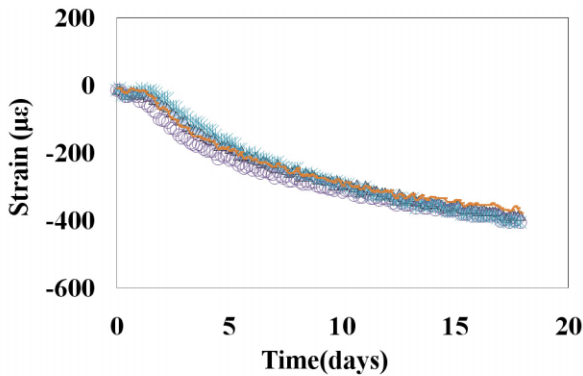
콘크리트 변형률은 모두 구속된 시편의 Steel 변형률보다 큰 값을 나타내었다. 자유건조 원주형 시편의 내부와 자유건조 각주형 시편 내부의 변형률은 유사한 경향을 보였으며, 자유건조 원주형 시편 외부표면의 중심 방향과 자유건조 각주형 시편의 외부표면의 변형률도 유사한 경향을 나타내었다.



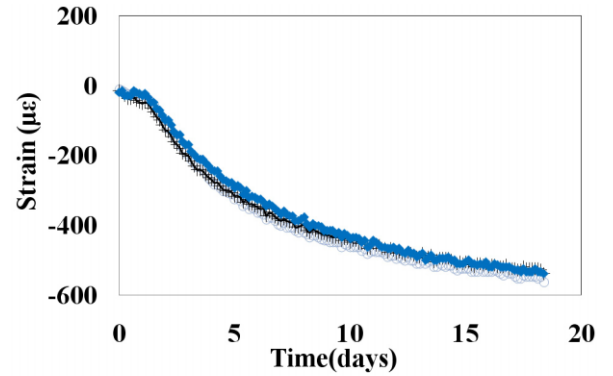
(a) 구속된 원주형



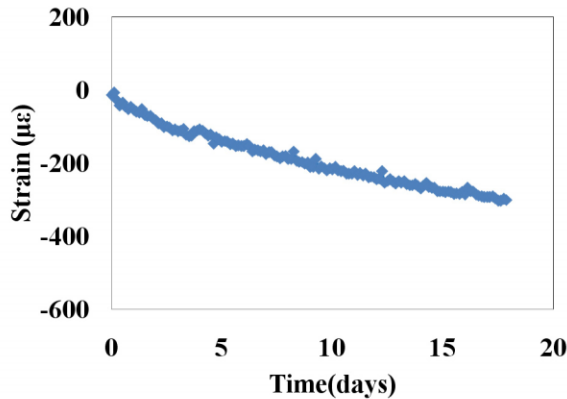
(b) 자유건조 원주형 내부



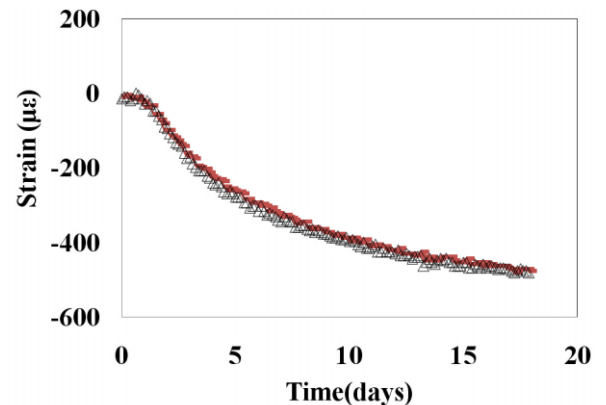
(c) 자유건조 원주형 외부 원주 방향



(d) 자유건조 원주형 외부 중심 방향



(e) 자유건조 각주형 내부



(f) 자유건조 각주형 외부

그림 4. 변형률 측정 결과

3. 실험결과 분석

Hossain 등(2008)은 Steel ring의 변형률과 콘크리트의 자유건조수축 변형률 및 탄성계수 등을 측정 한 후, 식 (2)와 식 (3)의 구속된 원주형 콘크리트 시편의 탄성응력 및 잔류 응력 예측 모형(Hossain등, 2004)에 대입하여 식 (4)로 응력감소를 추정하였다. 이와 동일한 방법으로 본 연구에서 측

정된 변형률을 이용하여 응력감소를 예측하였고 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

$$\sigma_{elastic-max}(t) = -\frac{\varepsilon_{sh}(t) \cdot E_c(t) \cdot C_{3R}}{E_s C_{1R} + C_{2R}} \quad (2)$$

여기서, $\sigma_{elastic-max}(t)$: 구축된 원주형 콘크리트 시편의 탄성응력

$\epsilon_{sh}(t)$: 콘크리트의 자유건조수축 변형률

$E_c(t)$: 콘크리트의 탄성계수

E_s : Steel ring의 탄성계수

C_{1R}, C_{2R}, C_{3R} : 원주형 콘크리트 시편의 형상계수

$$\sigma_{actual-max}(t) = -\epsilon_{steel}(t) \cdot E_s \cdot C_{3R} \cdot C_{4R} \quad (3)$$

여기서, $\sigma_{actual-max}(t)$: 구축된 원주형 콘크리트 시편의 잔류응력

$\epsilon_{steel}(t)$: Steel ring의 변형률

C_{3R}, C_{4R} : 원주형 콘크리트 시편의 형상계수

$$\sigma_{reduction}(t) = \sigma_{elastic-max}(t) - \sigma_{actual-max}(t) \quad (4)$$

여기서, $\sigma_{reduction}(t)$: 구축된 원주형 콘크리트 시편의 응력감소

식 (2)와 식 (3)에 보인 원주형 콘크리트 시편의 형상계수 $C_{1R}, C_{2R}, C_{3R}, C_{4R}$ 은 다음과 같다.

$$C_{1R} = \frac{[(1 + \nu_s)R_{IS}^2 + (1 - \nu_s)R_{OS}^2]}{(R_{OS}^2 - R_{IS}^2)}$$

$$C_{2R} = \frac{[(1 + \nu_c)R_{OS}^2 + (1 - \nu_c)R_{OC}^2]}{(R_{OC}^2 - R_{OS}^2)}$$

$$C_{3R} = \frac{R_{OS}^2 + R_{OC}^2}{(R_{OC}^2 - R_{OS}^2)}$$

$$C_{4R} = \frac{R_{OS}^2 + R_{IS}^2}{2R_{OS}^2}$$

여기서, ν_s : Steel의 프아송 비 (= 0.3)

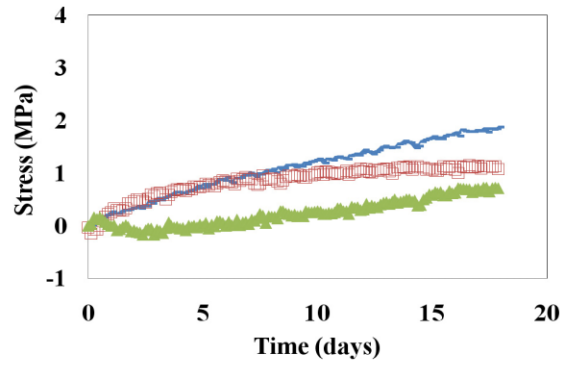
ν_c : 콘크리트의 프아송 비 (= 0.18)

R_{IS} : Steel ring의 내부 반지름

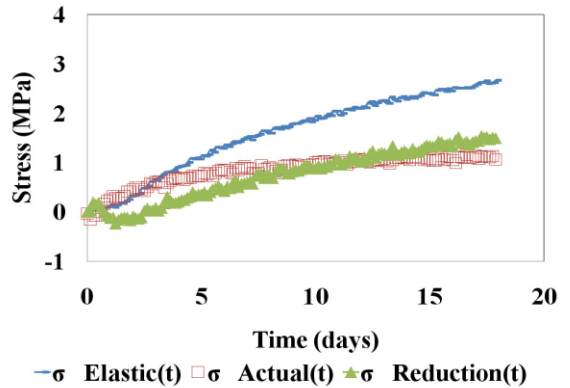
R_{OS} : Steel ring의 외부 반지름

R_{OC} : 원주형 콘크리트 시편의 외부 반지름

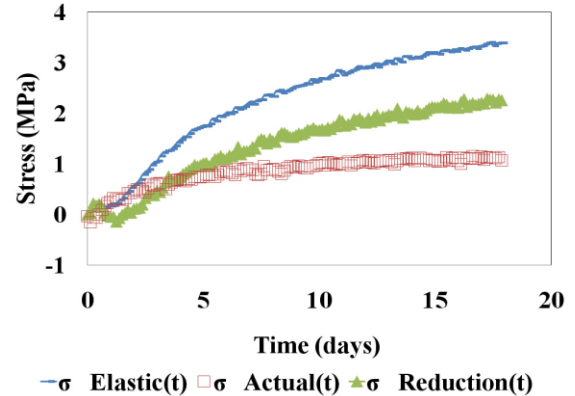
그림 5에서 보듯이 자유건조 원주형 시편 외부에서 중심 방향으로 응력감소가 가장 컸다. 이 경우 재령 3일에서 5일 사이에 이론적으로 계산된 탄성응력의 30%에서 50%를 보이며 빠른 속도로 증가하여 재령 9일에서 18일 사이에는 탄성응력의 70% 근처로 점점 수렴하였다. 구축된 원주형 콘크



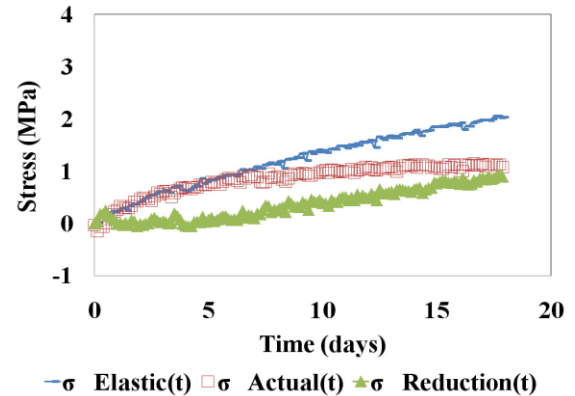
(a) 자유건조 원주형 내부



(b) 자유건조 원주형 외부 원주 방향

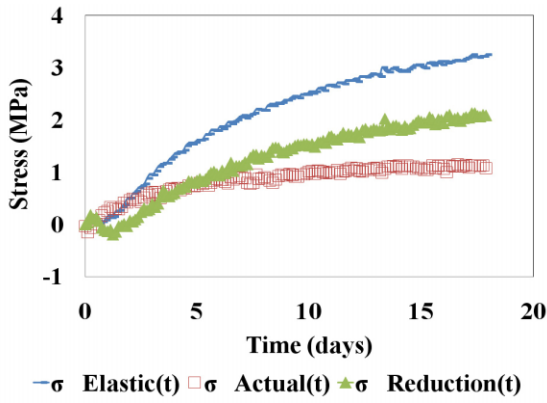


(c) 자유건조 원주형 외부 중심 방향



(d) 자유건조 각주형 내부

<그림 계속>



(e) 자유건조 각주형 외부

그림 5. 변형률 측정 위치별 응력감소

리트 시편에 균열이 발생한 18일을 기준으로 할 때 자유건조 각주형 시편 외부, 자유건조 원주형 시편의 외부 원주 방향, 자유건조 각주형 시편 내부, 자유건조 원주형 시편 내부의 순으로 응력감소율이 큰 것으로 나타났다. 콘크리트 시편 외부의 응력감소율이 재령에 따라 점차 감소한 것과는 달리 내부의 응력감소율은 구축된 원주형 시편에 균열이 발생한 재령 18일에도 크게 증가하는 경향을 보였다. 이는 재령 초기에 건조수축이 많이 진행된 콘크리트 시편 외부와는 달리 콘크리트 시편 내부의 건조수축은 18일이 지난 시점에서도 컸기 때문에 보이며, 응력감소율은 잔여 건조수축에 반비례하는 것으로 추정된다.

4. 응력감소의 모형화

식 (2)에서 식 (4)까지로 계산된 구축된 원주형 콘크리트 시편의 응력감소는 탄성응력에 대한 비율로서 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며 응력감소율은 식 (5)를 변형한 식 (6)으로서 응력감소와 탄성응력의 비로서 계산할 수 있다.

$$\sigma_{reduction}(t) = \Phi(t) \cdot \sigma_{elastic}(t) \quad (5)$$

$$\Phi(t) = \frac{\sigma_{reduction}(t)}{\sigma_{elastic}(t)} \quad (6)$$

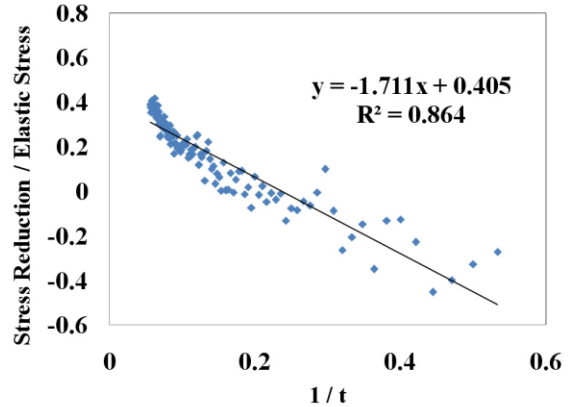
여기서, $\Phi(t)$: 구축된 원주형 콘크리트 시편의 응력감소율
 t : 재령(days)

식 (6)에 의하여 계산된 응력감소율 $\Phi(t)$ 는 재령의 역수 $\frac{1}{t}$ 와 반비례 관계를 갖고 있으며 이는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

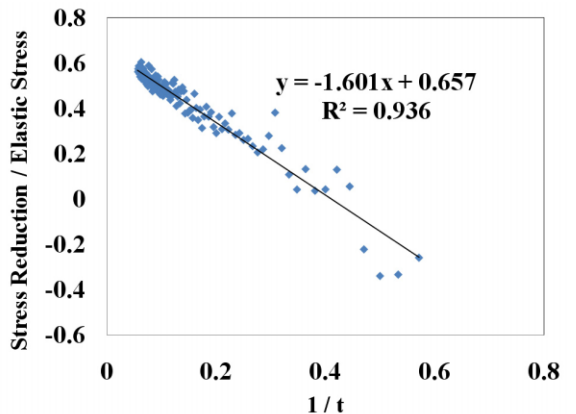
$$\Phi(t) = A\left(\frac{1}{t}\right) + B \quad (7)$$

여기서, A 와 B 는 계수이다.

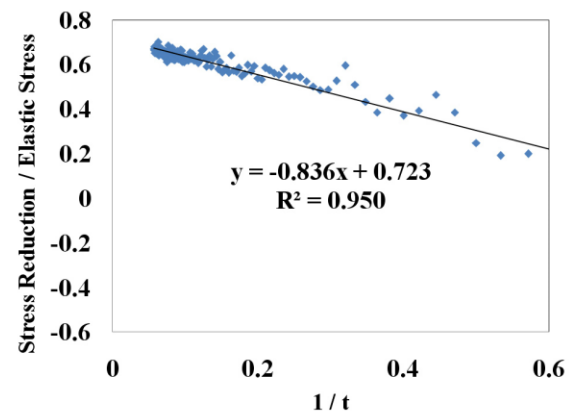
식 (7)에 의하여 계산된 응력감소율을 재령의 역수와의 관계로 나타내면 그림 6과 같다.



(a) 자유건조 원주형 내부

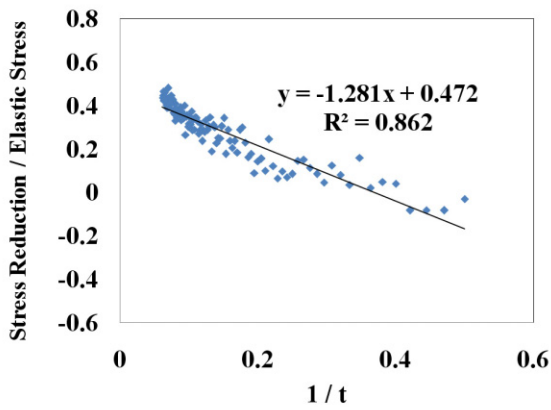


(b) 자유건조 원주형 외부 원주방향

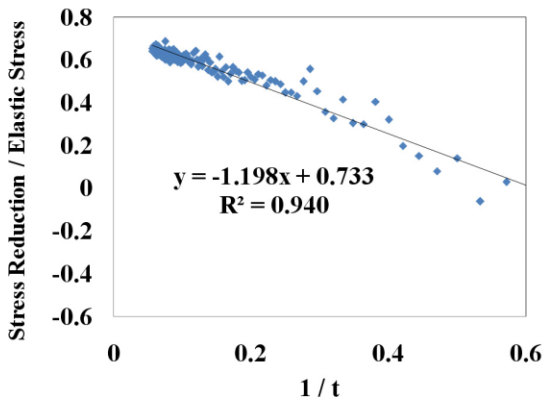


(c) 자유건조 원주형 외부 중심방향

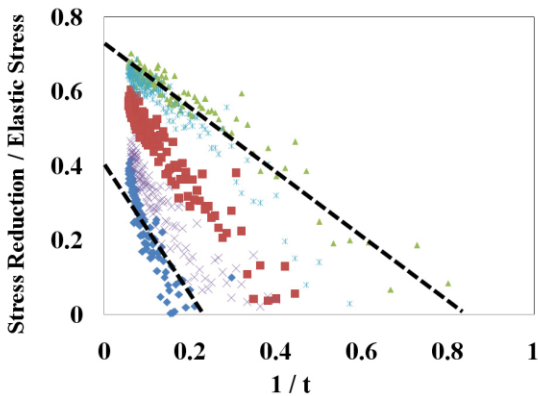
<그림 계속>



(d) 자유건조 각주형 내부



(e) 자유건조 각주형 외부



(f) 응력감소율 범위

그림 6. 재령에 따른 응력감소율 변화

식 (7)의 계수 A 의 범위는 -0.836 에서 -1.711 까지였으며, B 의 범위는 0.405 에서 0.733 까지였다. 콘크리트의 재령이 매우 오래된다면(재령 t 가 무한대라고 가정하면) 응력감소율은 그래프의 y 절편으로서 식 (7)의 계수 B 와 동일한 값이 된다. 따라서 재령 t 가 무한히 커질 때 그림 6(a)의 자유건조 원주형 시편 내부에서는 약 41%, 그림 6(b)의 자유건조 원주형 시편 외부 원주방향으로는 약 66%, 그림 6(c)의 자유건조 원주형 시편 외부 중심방향으로는 약 72%, 그림 6(d)의 자유건조 각주형 내부에서는 약 47%,

그리고 그림 6(e)의 자유건조 각주형 외부에서는 약 73%의 응력감소율이 계산되었다. 실내 실험에서 변형률이 큰 것으로 측정된 콘크리트 시편 외부의 응력감소율이 상대적으로 컸으며, 응력감소율의 증가 정도(그림 6의 직선의 기울기)는 작은 것으로 나타났다. 이는 재령 초기 콘크리트 시편 외부에서의 더 큰 건조수축으로 이미 많은 응력감소가 발생하였기 때문으로 추정되었다. 기존 연구결과(Hossain 등, 2008)는 구축된 콘크리트 시편에 대하여 약 40% 내지 45%의 응력감소율을 제안하고 있으나 이는 제한된 조건 하에서 제한된 위치의 변형률을 측정된 결과이므로 본 논문의 결과와는 차별화된다. 응력감소율은 시편의 형상비(surface/volume), 양생조건, 배합조건, 구축정도 등에 따라 차이가 나타나므로 이에 관한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 콘크리트 포장 슬래브에 장기적으로 발생하는 건조수축 변형이 다양한 현장 조건에 의하여 구축될 때 발생하는 응력감소 현상을 규명하기 위하여 수행되었으며 이를 통하여 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

1. 실내실험을 통하여 측정된 Steel ring의 변형률과 자유 건조수축 변형률을 기존 이론식에 대입하여 탄성응력, 잔류응력, 응력감소를 계산함으로써 응력감소 현상을 확인하였다.
2. 응력감소는 자유건조 원주형 시편 외부에서 중심 방향으로 가장 크게 나타났다. 그리고 구축된 원주형 콘크리트 시편에 균열이 발생한 재령 18일을 기준으로 할 때 자유건조 각주형 시편 외부, 자유건조 원주형 시편의 외부 원주 방향, 자유건조 각주형 시편 내부, 자유건조 원주형 시편 내부의 순으로 응력감소율이 큰 것으로 나타났다.
3. 응력감소율은 재령의 역수와 반비례하는 관계가 있는 것으로 나타났으며 이를 이용하여 계산한 최종 응력감소율은 약 41%에서 73% 사이인 것으로 나타났다.
4. 콘크리트 시편 외부에서의 응력감소율이 시편 내부보다 컸으며 응력감소율의 증가 정도는 작았다. 이는 재령 초기 건조수축 정도에 영향을 받았기 때문으로 추정되었다.

향후 실제 콘크리트 포장 슬래브의 상태를 모사하기 위하여 시편의 형상비(surface/volume), 양생조건, 배합조건, 구축정도 등을 달리 하여 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 및 한국연구재단의 기초지원 연구과제(과제번호 2008-313-D01091)에 대한 연구비 지원으로 수행되어 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 김진철 (2003). "콘크리트의 건조수축 매커니즘과 예측모형", *도로포장공학회지*, 제5권, 제3호, pp. 32-41
- 조호진 (2003). "초기재령 콘크리트의 거동 해석 기법." 박사학위논문. 연세대학교
- AASHTO (2002). "Guide for Design of Pavement and Structures", American Association of State Highway and Transportation Officials.
- 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.
- Altoubat, S. A. and Lange, D. A. (2001). "Creep, Shrinkage and Cracking of Restrained Concrete at Early-age," *ACI Material Journal*, Vol. 98, No. 4, July-Aug, pp.323-331.
- Bazant, Z. P. and Panula, L. P. (1978). "Simplified Prediction of Concrete Creep and Shrinkage from Strength and Mix", Structural Engineering Report No. 78-10/640, Northwestern University, Evanston, IL.
- Bazant, Z. P. (2001). "Prediction of Concrete Creep and Shrinkage: Past, Present and Future", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 203, No. 1, January, pp.27-38.
- Bendana. L. J., Sargan. S. H., Khoury. I., and Selle. R. (2003). "Environmental Influence of Early Age Response of PCC Pavement", *82nd Transportation Record Board Annual Meeting*.
- CEB-FIP. (1990). "CEB-FIP Model Code 1990: Design Code", Thomas Telford Ltd., London, UK.
- Hossain A. B. and Weiss J. (2004). "Assessing Residual Stress Development and Stress Relaxation in Restrained Concrete Ring Specimens." *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, No. 5, pp.531-540.
- Hossain. A. B, Fonseka. A. and Bullock. H. (2008). "Early Age Stress Development, Relaxation, and Cracking in Restrained Low W/C Ultrafine Fly Ash Mortars" *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 6, No. 2, April, pp.261-271.
- Jeong, J. H. and Zollinger, D. G. (2005). "Environmental Effects on the Behavior of Jointed Plain Concrete Pavements." *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 2, February, pp. 140-148.
- Kovler, K., Sikuler, J., and Bentur, A. (1993). "Restrained Shrinkage Tests of Fiber Reinforced Concrete Ring Specimens : Effect of Core Thermal Expansion", *Materials and Structures*, Vol. 26, No. 4, pp.231-237.
- Schooppel. K., Plannerer. M. and Springenschmid. R. (1995). "Determination of Restraint Stresses and of Material Properties During Hydration of Concrete with the Temperature-Stress Test Machine", *Proceedings of the International RILEM Symposium, Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*, Springenschmid, R., ed, E&FN Spon, Germany, pp.153-160.
- Sun Renjuan (2009). "Development of shrinkage-Equivalent Temperature Difference Model for Concrete Pavement Slabs", Ph.D. Thesis, Inha University
- Suprenant, B. A. (2002). "Why Slabs Curl.", *Concrete International*, Part1, March, pp. 56-61; Part 2, April, pp. 59-64.
- Yang. W., Jason. W., and Surendra. P. S. (2000). "Predicting Shrinkage Stress Field in Concrete Slabs on Elastic Subgrade", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 1, January, pp.35-42.

접 수 일 : 2009. 10. 15
심 사 일 : 2009. 10. 15
심사완료일 : 2009. 11. 23