

구속된 콘크리트 슬래브의 응력감소 초기연구

A Preliminary Study on Stress Reduction in Restrained Concrete Slabs

박정우* · 정영도** · 이창준*** · 임진선**** · 정진훈***** · 이성준***** · 임광수*****

Park, Jeong Woo · Jeong, Young Do · Lim, Jin Sun · Lee, Chang Jun · Jeong, Jin Hoon
Lee, Seong Jun · Lim, Kwang Soo

1. 서 론

콘크리트는 타설 후, 수화작용을 통해 온도와 수분 변화를 통해 체적이 변화한다. 이러한 현상은 콘크리트 포장 슬래브에 와핑(Warping) 및 컬링(Curling) 현상을 일으킨다. Hatt(1925)는 콘크리트 슬래브의 수분 변화로 인하여 와핑이 발생된다고 최초로 보고 했다. Carlson(1938)은 현장에서 슬래브에 대한 건조수축 시험을 시행했으며, 그 결과 슬래브 표면의 수분 변화로 인한 수축량이 가장 큰 것을 확인했다. 또한, 이 수분 차에 따라 발생하는 상하부 간의 수축 변화차인 슬래브의 모서리와 끝단이 들어 올려지는 이른바 상향컬링현상을 유발한다고 보고 했다. Hveem(1951)은 profilograph records로 콘크리트 포장의 거동을 연구하였으며, 슬래브 깊이에 따른 온도와 수분의 변화가 균등하지 않다는 것을 보고하고 있다. 이 중 건조수축으로 인한 상향컬링으로 슬래브와 기층이 줄눈 양 옆에 붙어있지 못하는 현상이 나타나게 되며, 이것으로 인하여 슬래브 모서리와 끝단에 처짐과 슬래브의 지지력을 잃게 되는 펌핑(pumping) 현상이 발생한다고 보고했다(Hveem and Tremper 1957). 이와 같이 건조수축으로 인한 상향컬링 현상은 콘크리트 포장의 역학적-경험적 설계법 개발과 더불어 그 중요성이 더욱 증대되고 있다(Hiller and Roesler 2002).

건조수축으로 인한 컬링 및 와핑 현상이 발생할 때, 슬래브의 자중이나 하부층과의 마찰에 의하여 구속되면 슬래브의 내부에 응력이 발생하게 된다. 이것은 콘크리트 포장 파손을 유발시키는 주요 원인으로 알려져 있다(Suprenant 2002). 이러한 컬링과 와핑 현상을 유발하는 주요인자인 건조수축을 예측하기 위한 여러 모델이 개발되고 있다(ACI 209 ; CEB-FIP ; 김진철 2003). 하지만 제시된 모델의 해석 결과 슬래브에 발생하는 변형을 및 응력의 크기를 과다하게 예측하는 경우가 많으며, 이는 현장 실험을 통한 연구결과에서도 확인되었다. 이것은 현장 콘크리트 포장에 사용되는 길어깨, Tie-Bar등에 의한 구속된 콘크리트의 거동을 고려하지 않았고, 이와 더불어 구속에 의한 응력감소 영향 또한 고려하지 않았기 때문이라고 보고하고 있다(Hossain 2003).

따라서, 본 연구에서는 AASHTO에서 제안한 기준 등가온도차이 모델을 수정하여 콘크리트 슬래브 설계 시 크립가 고려되던 방식에서 응력감소를 고려하는 방식으로 접근할 것이다. 그리고 온도와 수분 변화에 관한 영향과 더불어 슬래브의 구속 경계조건 및 콘크리트 초기재령에서의 점소성 특성에 의한 응력감소 요인을 고려하기 위하여 실내에서 구속링(Restrined Ring)시편 실험을 하였고 그 결과를 통해 응력감소현상 모델을 제시하였다.

* 학생회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 · 032-873-5332(E-mail : pjwband2o@naver.com)
** 학생회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 · 032-873-5332(E-mail : civil22011271@hanmail.net)
*** 정회원 · 한국건설기술연구원 연구원·공학박사 · 031-910-0362(E-mail : cijee4@kict.re.kr)
**** 학생회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 · 02-2141-7102(E-mail : coreplay@hanmail.net)
***** 정회원 · 인하대학교 토목공학과 조교수·공학박사 · 032-860-7574(E-mail : jhj@inha.ac.kr)
***** 정회원 · 국토해양부 간선도로과 과장 · 02-2110-8718(E-mail : sungjilee@mltm.go.kr)
***** 정회원 · 국토해양부 간선도로과 서기관 · 02-2110-8719(E-mail : iim579@mltm.go.kr)



2. 기존연구와 연구 목적

2.1 부등수축 등가온도차이 모형

콘크리트 습도에 의한 변형률을 나타내기 위하여 여러 모델이 많이 개발되어 왔다(Bazant 2001). 그 중 부등건조수축 등가온도차이를 이용한 모형은 매우 많지만 그 기본 개념은 비슷하다(Shreenath. 등, 2005). 여러 가지 모델 중 AASHTO에서 제안한 식을 살펴보면 다음과 같다.

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

여기서, ΔT_{hourly} : 슬래브의 내부온도 변화에 대한 슬래브 상하부의 등가온도차이

$\Delta T_{built-in}$: 슬래브의 타설시 온도에 대한 슬래브 상하부의 등가온도차이

ΔT_{shr} : 슬래브 내부의 수분 변화(부등건조수축)에 대한 슬래브 상하부의 등가온도차이

이 모형은 습도의 영향을 슬래브에 동일한 응력을 유발하는 등가의 온도차이로 변형함으로써 온도차이 모형 하나에 온도와 습도의 영향을 모두 고려하고 있는 것이다. 하지만 장기적인 습도의 영향인 건조수축의 특성을 정확히 반영하지 못한다. 또한 여기서는 구속에 의한 크리프나 응력감소 효과를 고려하지 않았다.

2.2 응력감소 관련 실험

응력감소 혹은 응력이완 현상을 규명하기 위하여 많은 연구자들이 실내실험을 하였다. 해외에서 Hossain(2003)등은 구속된 원주형 시편을 이용했으며, K.Kovler(1993)는 시편의 균열 민감성 부분과 전체 구속이 가능하고 접촉표면적의 응력집중을 최소화하는 Dog-bone 시편을 이용한 건조수축과 인장크리프 거동에 대한 연구를 했다. Salah A. Altoubat (2001)는 Dogbone 시편을 이용해 건조수축 및 크리프 실험을 통해 그 실제 응력이 이론적 예상 값의 50%라는 연구 결과를 발표했다. 국내에서는 Schoppel 등(1995)이 TSTM(Temperature-Stress test Machine)을 사용하여 건조수축 및 크리프 실험을 한 결과를 바탕으로 조호진 등(2003)이 Bazant(2001)의 건조수축 및 크리프 모델을 이용하여 이론적 접근을 시도했다. 이러한 연구들의 주된 목적은 구속받은 콘크리트 시편의 균열발생 시점을 시편 형상, W/C 배합비, 그리고 구속 정도에 따라 예측하는 것이다.

3. 실내실험

3.1 실험 목적

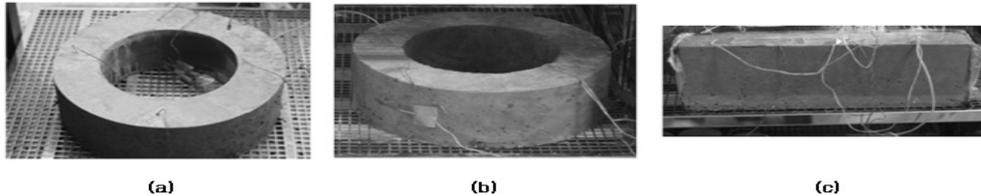
건조수축을 통해 수축하려는 콘크리트는 구속을 받으면 내부에 인장응력을 발생시킨다. 그런데 선행연구에 의하면 이 인장응력은 이론적으로 예상되었던 값보다 더 작게 나오는 응력감소 현상을 보고하고 있다(Hossain 2003). 따라서 실내실험을 통해 콘크리트 시편의 제령에 따른 응력감소의 정도를 알아보고 기존 연구와 비교를 통해 모델을 제시할 것이다

3.2 실험내용 및 방법

선행연구에서는 구속링에 등차원 방정식(Equidimensional equation)을 이용한 탄성이론과 Timoschenko and Goodier(1987) 제안식을 이용하여 콘크리트 거동을 이론식화 하였고 구속링에 steel 부착 변형률 게이지를 설치하여 그 시간에 따른 변형률로 시간에 따른 응력을 구하였다. 하지만 단지 구속링에 대한 변형률만으로 전체 콘크리트 거동을 설명한다는 것은 한계점이 있다. 따라서 본 연구에서는 구속링의 변형률 뿐만 아니라 콘크리트 내·외부 표면의 변형률을 측정하였다.

시편은 제작 비용이 저렴하며 결과 해석시 경계조건을 줄일 수 있는 바깥지름 500mm, 안지름 300mm, 높이 150mm, steel을 이용한 구속링 두께 3mm인 링 시편을 사용하였다(Hossain 2003). 여기에 steel 부착 변형률 게이지를 원주(Circumferencial) 방향으로 2개씩 부착했다. 자유 원주형 시편에는 시편 내부에 콘크리트 매립형 변형률 게이지를 원주방향으로 2개, 외부에는 콘크리트 부착형 변형률 게이지를 원주방향으로 4개,

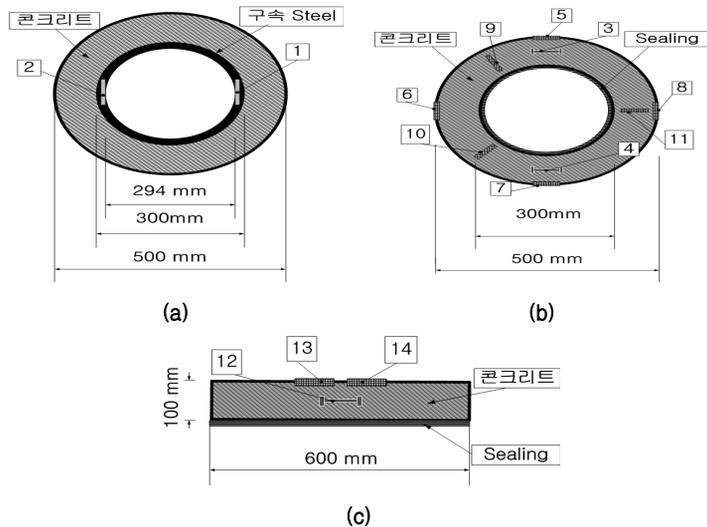
중심(Radial) 방향으로는 3개씩 두었다. 자유 각주 시편은 가로 100mm, 세로 150mm, 길이 600mm인 시편을 제작하였으며 내부와 외부에 콘크리트 매립형 변형률 게이지 1개와 콘크리트 부착형 변형률 게이지 2개를 두어 변형률을 측정하였다(그림 1,2).



(a) (b) (c)

그림 1. 실내 시험에 쓰이는 시편 형상

(a) 구속형 원주형 (b) 자유건조 원주형 (c) 자유건조 각주형



Steel 게이지
 콘크리트 부착형 게이지
 콘크리트 매립형 게이지
 * 시편의 높이는 모두 150 mm

그림 2. 각 시편의 평면도와 게이지 위치

(a) 구속형 원주형 (b) 자유건조 원주형 (c) 자유건조 각주형

KS F 2438에 의해 탄성계수 실험을 실시하여 시간에 따른 탄성계수를 측정하였다. 또한, KS F 2436 규격을 사용하여 성숙도 시험(Maturity Test)을 추가로 실시했다. 그리하여 24시간이 아닌 종결 시간에 맞추어 탈형을 하고 계측을 실시했다. 탈형 후 시편을 항온항습기에 넣었으며 온도 23℃, 상대습도 50%를 유지했다. 배합비는 표 1에 주어져 있다.

표 1. 실험 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)

3.3 실험결과

그림 3은 그림 1(a), (b) 및 (c) 시편의 변형을 결과이다. 그림 3(a)은 그림 1(a)의 steel 부착 변형을 게이지 2개의 값을 나타낸 것이다. 그림 3(b)은 그림 1(b)의 자유건조 원주형 시편 내부의 콘크리트 매립형 변형을 게이지 3개의 값을 나타냈다. 그림 3(c)과 3(d)는 시편 외부의 원주 방향 과 중심 방향 각각 3개, 4개의 콘크리트 부착형 변형을 게이지의 값을 나타내었다. 마지막으로 그림 3(e)와 3(f)는 자유건조 각주 시편 내부에 콘크리트 매립형 변형을 게이지 1개, 외부에 콘크리트 부착형 변형을 게이지 2개의 게이지 값을 나타내었다. 실험결과 자유건조 원주형 내부와 각주 내부는 비슷한 값과 거동을 보이며, 자유건조 원주형 외부 중심 방향과 각주 외부 또한 비슷한 값과 거동을 보인다. 그림 3의 각 게이지 위치는 그림 2에 표시를 해 두었다.

표 2는 재령에 따른 콘크리트의 탄성계수를 측정된 결과이다. 이 탄성계수는 후에 이론적 탄성응력 계산 시 사용된다.

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

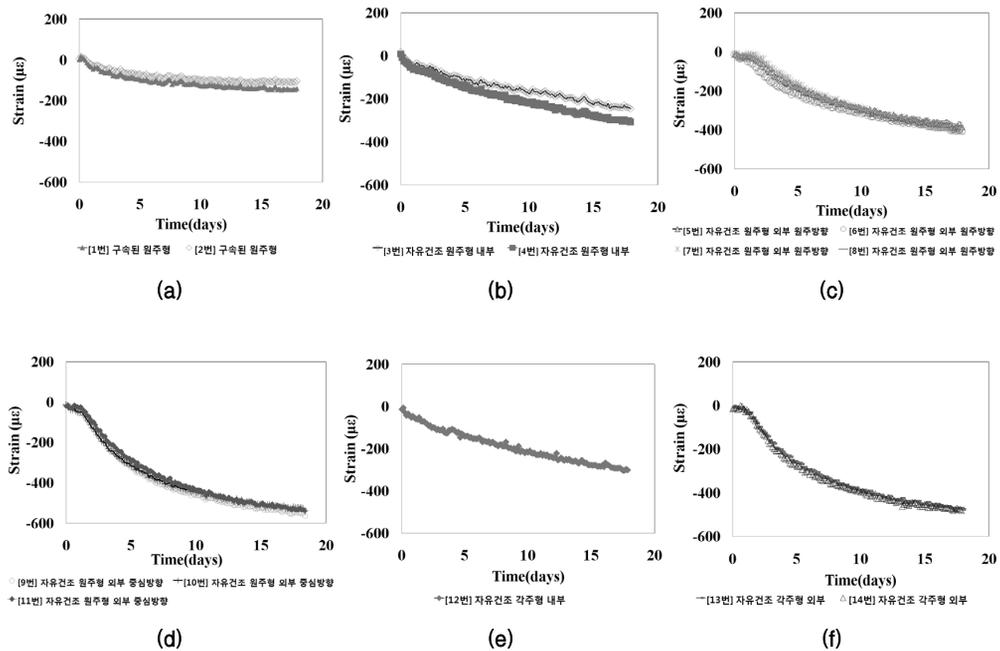


그림 3. 실내실험 결과

- (a) 구속된 원주형
- (b) 자유건조 원주형 내부
- (c) 자유건조 원주형 외부 원주방향
- (d) 자유건조 원주형 외부 중심 방향
- (e) 자유건조 각주형 내부
- (f) 자유건조 각주형 외부

각 시편은 KS F 2436에 따라 성숙도 실험을 통해 거푸집 탈형 시간을 결정하는 종결 시간에 해당하는 성숙도를 시편에서도 측정하여 변형을 원점을 잡았다(그림 4). 종결시간은 타설 후 7시간 15분 이었으며, 종결 시 성숙도는 247 °C-hours로 측정되었다.

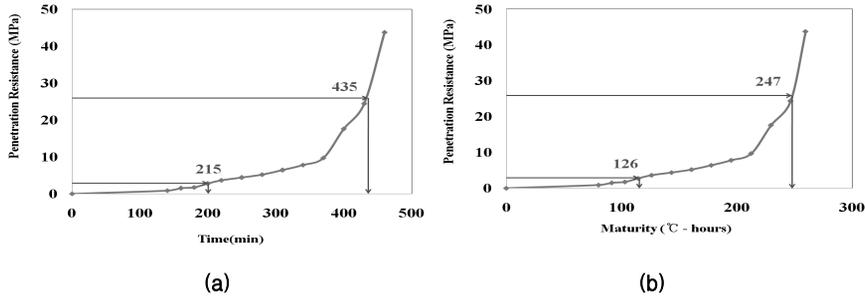


그림 4. 성숙도 실험 결과 (a) 양생시간에 따른 관입저항 (b) 성숙도에 따른 관입저항

실험계측 결과를 Hossain 등 (2008, 2003)이 식 (2), (3)과 같이 구속받는 링시편의 탄성응력 및 잔류응력 예측 모형을 기반으로 변형률 및 탄성계수 실험결과를 적용하여 식 (4)를 통해 응력감소를 추정하고 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

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

여기서, $\sigma_{elastic-max}(t)$: 종결이후 시간에 따른 구속링 시편의 탄성응력
 $\varepsilon_{SH}(t)$: 종결이후 시간에 따른 자유건조수축 변형률
 $E_c(t)$: 종결이후 시간에 따른 콘크리트 탄성계수
 E_s : 구속링의 탄성계수
 C_{1R}, C_{2R}, C_{3R} : 시편의 형상계수

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

여기서, $\sigma_{actual-max}(t)$: 시간에 따른 콘크리트의 잔류응력
 $\varepsilon_{seel}(t)$: 시간에 따른 구속링의 변형률
 C_{3R}, C_{4R} : 시편의 형상계수

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

여기서, $\sigma_{reduction}(t)$: 시간에 따른 응력감소

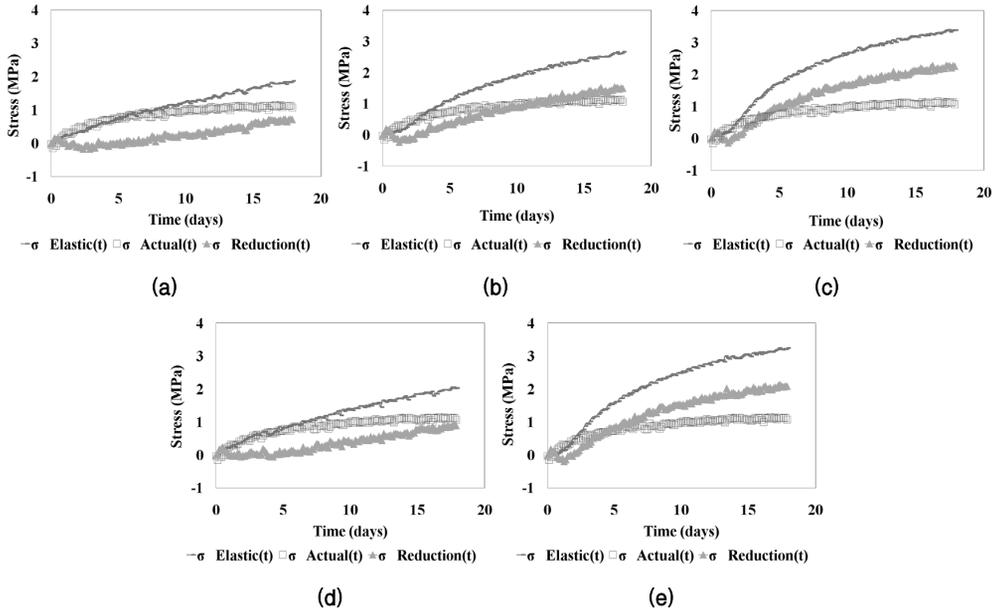


그림 5. 시편 형상에 따른 응력감소

- (a) 자유건조 원주형 내부 (b) 자유건조 원주형 외부 원주방향 (c) 자유건조 원주형 외부 중심방향
 (d) 자유건조 각주형 내부 (e) 자유건조 각주형 외부

그림 5에서와 같이 응력감소 값은 자유건조 원주형 외부 중심방향이 제일 크며, 재령 3~5일에 이론적 응력값의 30~50% 값을 보이면서 급속히 증가하다가, 재령 9~18일 사이에는 이론적 응력값의 65~70%로 점점 수렴하게 된다. 이것은 극 초기 재령에서 콘크리트 수화작용이 계속 발생하면서 그것에 대한 응력감소가 활발히 진행되다가 시간이 지나면서 응력감소증가 정도가 점점 감소하는 것으로 판단된다. 그 뒤에는 자유건조 각주형 외부, 자유건조 원주형 외부 원주 방향, 자유건조 각주형 내부, 마지막으로 자유건조 원주형 내부 순으로 응력감소가 자유건조 원주형 외부 중심 방향에 비해 줄어들거나 작아지는 경향을 보인다.

4. 응력감소의 모형화

위 실내시험에서와 같이 실제 구축을 받는 콘크리트 구조물에서는 구축조건에 의해 콘크리트에 인장응력이 발생하고, 이 인장응력이 이론적 응력 값보다 더 작게 나오는 응력감소 현상이 발생한다. 그러므로 이러한 응력감소 영향은 콘크리트 구조물 포장 설계 시 고려해야만 한다.

4.1 응력감소의 모형화

그림 5에서의 응력감소량을 식 (5)와 같이 가정한다면, 응력감소율은 식(6)으로 나타낼 수 있다.

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

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

여기서, $\Phi(t)$: 시간에 따른 점소성 특성에 의한 응력감소율
 t : 재령(day)

식 (6)에 의하여 구한 $\Phi(t)$ 와 재령의 역수 $\frac{1}{t}$ 의 관계를 그림 4와 같이 선형회귀분석을 하였다.

따라서, 그림 6과 같이 응력감소율은 식 (7)의 형태로 표시될 수 있다.

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

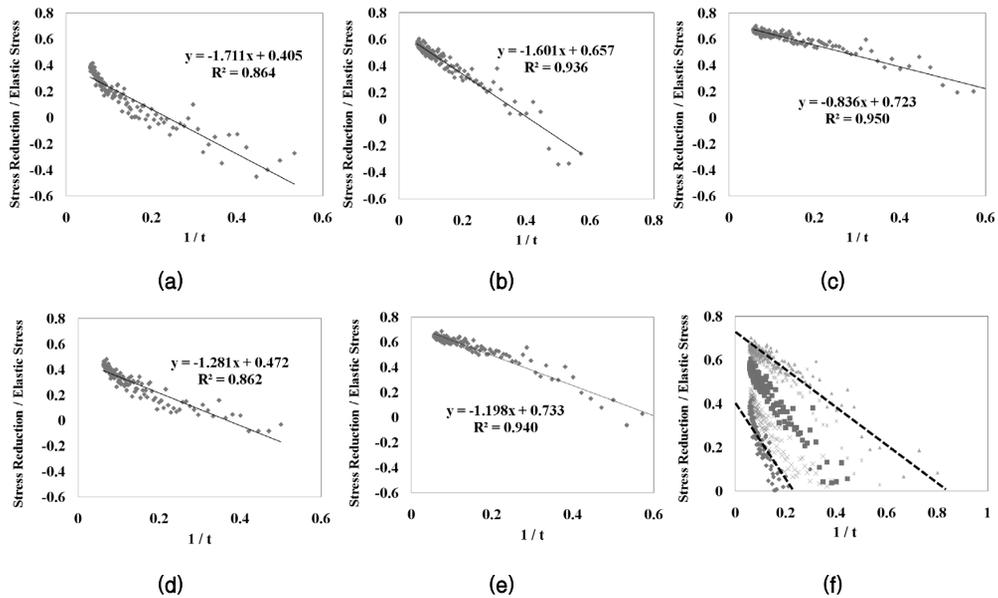


그림 6. 응력감소율

(a) 자유건조 원주형 내부 (b) 자유건조 원주형 외부 원주방향 (c) 자유건조 원주형 외부 중심방향
(d) 자유건조 각주형 내부 (e) 자유건조 각주형 외부 (f) 응력감소율의 범위

식 (7)의 A값의 범위는 $-0.836 \sim -1.711$ 이며, B값의 범위는 $0.405 \sim 0.733$ 임을 알 수 있다. 여기서 콘크리트 재령t가 매우 길어진다면(t가 무한대라고 가정하면) 응력감소율은 그래프의 y절편이 된다. 재령 t가 무한히 커질 때 각 시편의 응력감소율은 그림 6(a)는 약 40%, 6(b)는 약 65%, 6(c)는 약 72%, 6(d)는 약 47% 그리고 6(e)는 약 73%가 된다. 실내 실험에서 예측되었던 변형량이 클수록, 응력감소율은 커졌으며 응력감소율의 증가 정도(그림 6)의 그래프 기울기는 작아짐을 알 수 있다. 한편 기존 연구결과(Hossain 2008)에서는 응력감소율이 약 40~45%가 나왔다. 응력감소율이 차이가 나는 이유는 시편의 형상비(surface/volume)의 차이, 이론식에 고려되는 자유건조 수축 데이터의 차이, 그리고 구속정도의 차이 때문이라고 보여진다.

5. 결론

본 연구는 콘크리트 슬래브 거동에 영향을 미치는 인자 중, 환경하중에 의한 영향 외에 구속조건과 콘크리트 자체의 점소성 특성에 의한 응력감소 현상을 규명하는 것을 목적으로 구속링을 적용한 실내시험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실내 실험 결과 이론적 응력값과 실제 응력값을 구할 수 있었으며 응력감소 현상이 발생함을 확인하였다.
2. 응력감소는 자유건조 원주형 외부 중심 방향이 제일 크며 재령 3~5일에 이론적 응력값의 30~50% 값을 보이면서 급속히 증가하다가, 재령 9~18일 사이에는 이론적 응력값의 65~70%로 점점 수렴하게 된다. 그 뒤에는 자유건조 각주 외부, 자유건조 원주형 외부 원주방향, 자유건조 각주 내부, 마지막으로 자유건조 원주형 내부의 순서로 응력감소가 자유건조 원주형 외부 중심 방향에 비해 줄어들거나 작아



지는 경향을 보인다.

3. 실내 실험 시 계측 게이지의 위치와 방향을 다양화하여 등차원 방정식의 가정과 실제에서의 차이점을 보여주었다.
4. 제안된 응력감소율 식을 통해 콘크리트 재령이 매우 길어지면 콘크리트는 약 40~72 %의 응력감소율이 발생함을 알 수 있다. 실내 실험에서 계측되었던 변형률이 클수록, 응력감소율은 커졌으며 응력감소율의 증가 정도는 작아짐을 알 수 있다.

향후 실제 포장 조건에 적합하고 합리적인 응력감소율을 제시하기 위해 실제포장의 형상비 (surface/volume), 구속정도, 그리고 시편 크기 등을 변수로 하여 실험을 수행 할 것이다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 조호진 (2003) 초기재령 콘크리트의 거동 해석 기법(A Early- Age Concrete behavior analysis Method) PH.D. Thesis Yousei Univ., 2003
2. 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.
3. Altoubat, S. A., and Lange, D. A., (2001). "Creep, Shrinkage and Cracking of Restrained Concrete at Early-age," ACI Material Journal, V. 98, No. 4, July-Aug, pp.323-331.
4. Bazant, Z. P. (2001). "Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future", Walter P. Murphy Professor of Civil Engineering and Materials Science, Northwestern University, Evanston
5. Carlson, R. W. (1938). "Drying shrinkage of concrete as affected by many factors." *Proc. of the American Society for Testing and Materials*, ASTM, West Conshohocken, Pa, Vol, 38, Pt, II, 419 - 440
6. CEB-FIP. (1990). CEB-FIP Model Code 1990: Design Code. Thomas Telford Ltd., London, UK.
7. Hatt, W. K. (1925). "The effect of moisture on concrete." *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 157, 270 - 315.
8. Hiller, J. E., and Roesler, J. R. (2002). "Transverse joint analysis for use in mechanistic-empirical design of rigid pavements." *Transp. Res. Rec.*, 1809, Transportation Research Board, Washington, D.C., 42 - 51.
9. Hossain A.B. and Weiss J. (2003) "Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens." *Cement Concrete Compos* :25.
10. 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*, V. 6, No. 2, April, pp.261-271.
11. Hveem, F. N. (1951). "Slab warping affects pavement joint performance" *Proc., American Concrete Institute*, Vol. 47, 797 - 808.
12. Hveem, F. N., and Tremper, B. (1957). "Some factors influencing shrinkage of concrete pavements." *Proc., American Concrete Institute*, Vol.53, 781 - 789.
13. Kovler, K., Sikuler, J. and Bentur, A., (1993) "Restrained Shrinkage tests of fiber reinforced concrete ring specimens : effect of core thermal expansion", *Mater. Struct.* 26 pp.231-237
14. Shreenath Rao., and Jeffery R. Roesler(2005). "Characterizing Effective Built-In Curling from Concrete Pavement Field Measurements.", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 131, No. 4, April 1, 2005
15. Suprenant, Bruce A.(2002) "Why Slabs Curl." *Concrete International* Part 1, March 2002: 56-61; Part 2, April 2002: 59-64.
16. Timoshenko SP, Goodier JN. (1987) *Theory of elasticity*. McGraw-Hill College Div;