

강박스 거더교 콘크리트 바닥판에 발생하는 크리프, 건조수축, 수화열에 관한 연구

A Study on Creep, Drying Shrinkage, Hydration Heat Produced in Concrete Floor Plate of Steel Box Girder Bridge

강성후^{*} 박선준^{**} 김민성^{***}
Kang, Sung Hoo Park, Sun Joon Kim, Min Sung

Abstract

It studies the non-structural crack factors that are produced in Steel Box Girder Bridge concrete floor plate using analytical method. It mainly studies humidity and design standard of concrete strength. It used MIDAS CIVIL Ver 5.4.0, a general structure analysis program that applies drying shrinkage rate of domestic road bridge design standard and standard value of creep coefficient, CEF-FIP standard equation and ACI standard equation from the aspect of creep, drying shrinkage and hydration heat to see the effect of the two factors on concrete crack and found the following result. The analytical results of this study showed that the initial stress, which was obtained by ACI standard, exceeds the allowable tensile stress between 5 to 18 days. This result means that even if a bridge is designed and constructed according to design standard, the bridge can have cracks due to various variables such as drying shrinkage, hydration heat and creep that produce stress in slab.

1. 서론

최근 가설되고 있는 다양한 교량형식 중 하나인 강박스 거더교의 경우 바닥판 콘크리트 슬래브는 설계시나 시공시에 설계기준을 준수하여도 균열이 빈번히 발생한다. 국내 설계기준에서 균열에 영향을 미치는 인자들의 설계시 반영 여부를 보면 양생중의 수화열, 강상자표면의 태양일사흡수도 등과 같이 설계에 반영되지 않는 것이 있는가 하면, 반영된다 하더라도 정량적으로 고려되지 않은 인자들이 많이 있다. 특히, 강박스 거더교의 경우는 바닥판 콘크리트의 경화중에 생기는 건조수축 및 크리프의 영향도 균열 요인이 된다. 이에 본 연구에서는 균열의 요인이 되는 인자들의 값이 변함에 따라 발생하는 응력의 변화를 해석적 방법으로 평가하고자 한다.

* 정회원, 동신대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 동신대학교 토목공학과 전임강사

*** 정회원, 동신대학교 대학원 토목공학과 박사과정

2. 모델식에 관한 규정

2.1 국내 설계기준(도로교 설계기준 2000)

크리프 변형률식은 $\epsilon_{cc} = \frac{f_c}{E_c} \phi$ 이며 합성단면에서 바닥판 콘크리트의 크리프 계수 $\phi_1=2.0$ 을 표준으로 하고, 바닥판 콘크리트의 최종수축률 $\epsilon_s=18 \times 10^{-5}$ 을 표준으로 한다.

2.2 CEB-FIP 모델식(1999)

$$\text{크리프 변형률식 ; } \epsilon(t, t_0) = \sigma_0(t_0) \left[\frac{1}{E_{ci}(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{ci}} \right]$$

$$\text{건조수축 변형률식 ; } \epsilon_s(t, t_0) = \epsilon_{cso} \beta_s(t - t_0)$$

2.3 ACI 모델식(1978)

$$\text{크리프 계수식 ; } \phi(t, \tau) = \frac{(t - \tau)^{0.6}}{10 + (t - \tau)^{0.6}} \phi_u$$

$$\text{건조수축 변형률식 ; } \epsilon_s(t_s, t_0) = \frac{t - t_0}{f_c - (t - t_0)} \epsilon_{s\infty}$$

3. 유한요소해석

3.1 해석교량의 모델링

유한요소 해석을 위한 모델링은 범용구조해석 프로그램인 MIDAS CIVIL Ver 5.4.0을 이용하여 2단계로 나누어서 해석하였다. 첫 번째 단계의 모델링은 그림 3.1과 같이 4경간 연속인 강박스 거더교를 대칭조건을 이용하여 2경간 연속의 보요소와 판요소로 모델링하였고 두 번째 단계의 모델링은 그림 3.2와 같이 수화열 해석을 위해 콘크리트 바닥판 부분은 Solid요소를 이용하여 모델링 하였다.

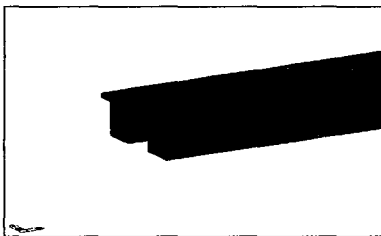


그림 3.1 유한요소망 : 모델링 #1

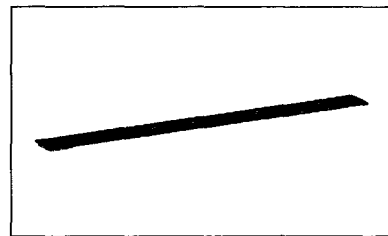


그림 3.2 유한요소망 : 모델링 #2

3.2 응력 검토 위치 및 기호 설명

두 가지 모델링을 3가지 모델식 다시 말해 도로교설계기준, CEB-FIP 모델식, ACI 모델식에 각각

적용하였다. 첫 번째 단계의 모델링에서는 시간의 흐름에 따르는 콘크리트 바닥판 슬래브의 크리프와 건조수축에 의한 응력을, 두 번째 단계의 모델링에서는 시간의 흐름에 따르는 콘크리트 바닥판 슬래브의 수화열에 의해 발생하는 응력을 알아보았다. 그 중 가장 크게 응력이 발생하는 경간인 1경간의 중심에서 교각(P1) 까지의 위치를 응력검토 위치로 하였다. 그림 3.3과 같이 등간격이면서 교량 폭의 중심 위치인 슬래브 하면의 4측점(A, B, C, D)에서 발생하는 3가지 응력(크리프, 건조수축, 수화열에 의해 발생하는 응력)과 3가지 응력을 합한 합응력을 시간의 변화에 따른 축응력의 변화 그래프로 나타내었다. 편의상 도로교설계기준을 KOR, CEB-FIP 모델식을 CEB, ACI 모델식을 ACI로 칭하기로 하며 각각의 그래프의 설명에서 “CEB(270-60)”와 같은 경우 설계기준장도 270kgf/cm²에 습도 60%를 사용한 모델링을 CEB-FIP의 모델식에 적용하여 해석한 것으로 말한다.

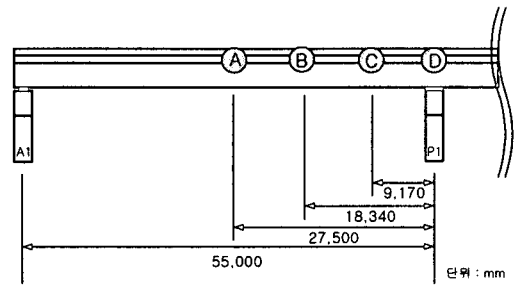


그림 3.3 A, B, C, D 각각의 위치

3.3 시간에 따른 응력의 변화

시간에 따른 응력의 변화는 각각의 조건들에 3가지 모델식을 적용하여 크리프, 건조수축, 수화열, SUM(크리프, 건조수축, 수화열에 의해 발생된 응력의 합) & 허용인장응력의 그래프로 표현할 수 있다. 그 중 설계기준장도 270kgf/cm²에 습도 40%를 사용한 모델링을 ACI의 모델식에 적용하여 해석한 것을 그래프로 나타낸 것이 그림 3.4 그래프이다.

국내의 현행 도로교 설계기준에는 SUM이 허용인장응력을 초과하지 않지만 ACI의 모델식을 적용한 그림 3.4의 그래프에서 보면 대략 5~18일 사이에서 SUM이 허용인장응력을 넘어 균열 발생가능성이 큰 것으로 나타났으며, CEB-FIP 규정에서도 그림 3.7에서처럼 SUM이 허용인장응력을 일부구간에서 초과하는 그래프 형상이 나타났다.

이것으로 볼 때 강박스 거더교 콘크리트 슬래브에 발생하는 크리프, 건조수축, 수화열에 의한 초기 균열은 해석적 방법으로 평가한 결과 국내의 현행 도로교 설계기준은 CEB-FIP 규정 및 ACI 규정에 비해 발생 응력을 상대적으로 과소평가 하는 것으로 나타났다.

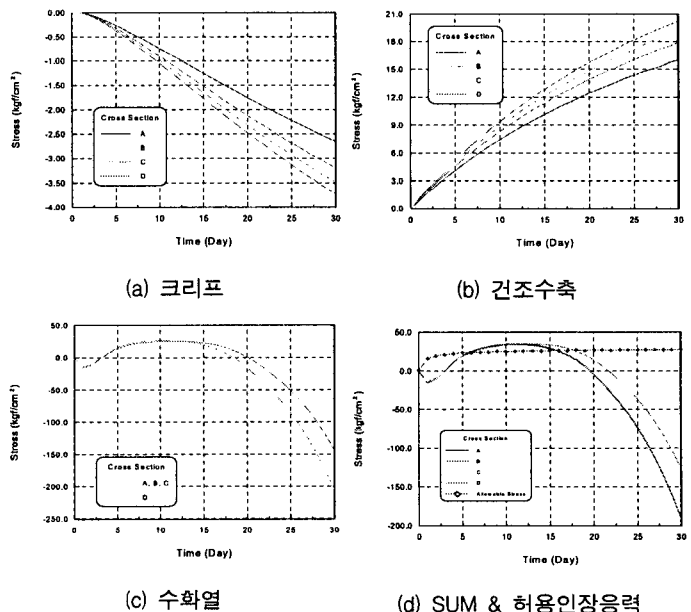


그림 3.4 ACI (270-40) 위치별 응력 - 시간 곡선

4. 해석결과 분석

4.1 콘크리트 설계강도에 따른 분석

그림 4.1 의 그래프는 A, B, C, D의 각각의 위치에서의 같은 시간대의 SUM에서 허용인장응력을 뺀 값 중 최대 값을 콘크리트 설계강도에 따른 그래프로 나타낸 것이다. 다시 말하면 그래프에서 응력값이 양(+)일 경우 발생응력이 허용인장응력을 초과하는 영역에 속하는 것이고, 응력값이 음(-)일 경우 발생응력이 허용인장응력을 넘지 않는 영역에 속한다는 것을 뜻한다.

그렇게 보면 KOR의 경우와 CEB의 경우 모두 허용인장응력을 초과하지 않는 영역에 속한 것으로 나타났으며 ACI의 경우만 습도 90%를 제외하고 허용인장응력을 넘어 균열 발생 가능성이 있는 것으로 나타났다.

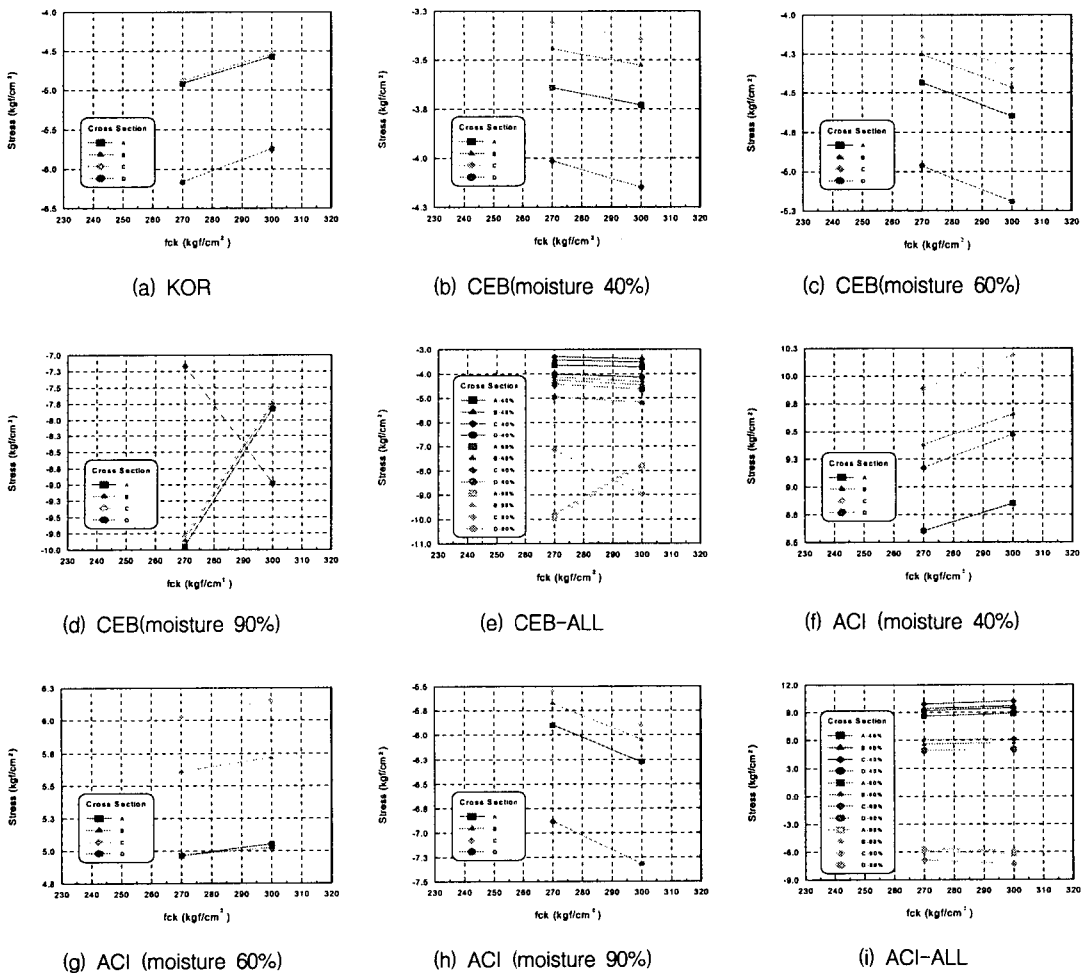


그림 4.1 설계강도의 변화에 따른 응력치의 변화(1)

또한 KOR의 경우 강도가 증가함에 따라 응력값이 약간 커지는 것으로 나타났고 CEB와 ACI의 경우 또한 약간의 증감이 있는 것으로 나타났으며 습도가 클수록 설계강도가 증가함에 따라 응력이 감

소하는 것으로 나타났다. 이것으로 볼 때 대기습도가 낮을 때 설계기준강도가 큰 콘크리트의 타설은 초기 균열 발생 가능성이 상대적으로 커진다는 것을 알 수 있다.

4.2 대기습도에 따른 분석

대기습도에 따른 분석에 앞서서 도로교설계기준에서의 습도의 고려는 별도의 규정식인 CEB-FIP의 규정에 따라 고려됨으로 CEB-FIP 규정과 ACI 규정과의 대기습도에 따른 응력의 변화를 비교·분석하였다. 다음의 그래프는 A, B, C, D의 각각의 위치에서의 같은 시간대의 SUM에서 허용인장응력을 뺀 값 중 최대 값을 대기습도에 따른 그래프로 나타낸 것이다.

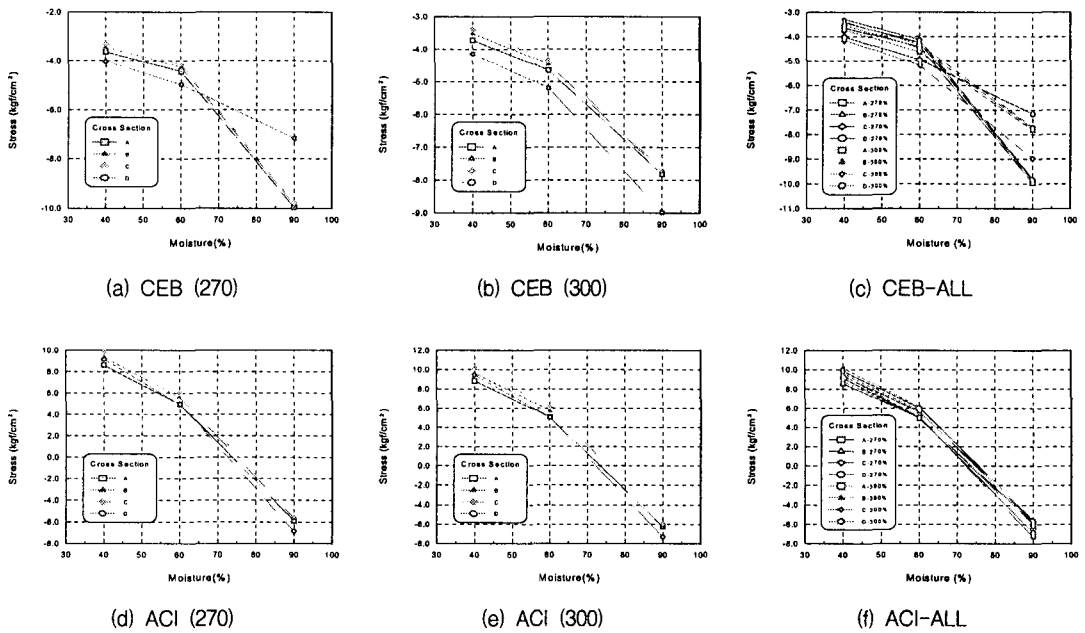


그림 4.2 습도의 변화에 따른 응력차의 변화

그림 4.2의 (a)(b)와 같이 CEB-FIP의 경우 대기습도가 40%에서 90%로 증가할 때 상대적으로 응력은 7kgf/cm^2 의 차로 감소함을 나타나 대기습도가 증가함에 따라 응력이 줄어들어 균열을 발생시키는 응력이 감소함을 나타내고 있다. 그리고 그림 4.2의 (d)(e)와 같이 ACI의 경우 대기습도가 40%에서 90%로 증가할 때 상대적으로 응력은 17kgf/cm^2 의 차로 감소함을 나타나 대기습도가 증가함에 따라 응력이 줄어들어 균열을 발생시키는 응력이 감소함을 나타내고 있다.

따라서 3가지 습도의 경우를 함께 나타낸 그림 4.2의 (c)(f)에서 보는 것과 같이 CEB-FIP의 경우는 음(-)의 값이므로 발생응력이 허용인장응력을 넘지 않는 것을 보여주고 있고, ACI의 경우는 SUM이 허용인장응력을 넘는 양(+)의 범위에서 습도 75%를 경계로 이보다 낮을 경우 콘크리트에 발생하는 초기 응력이 허용인장응력을 초과하는 것으로 평가되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 해석적 방법을 사용하여 강박스 거더교 콘크리트 바닥판에 발생하는 비구조적인 균열인자들에 대한 연구를 수행하였다. 균열 발생의 요인이 되는 인자들 중 대기습도와 콘크리트 설계기 준강도를 해석변수로 하였으며, 이 두가지 변수들의 변화에 따른 크리프, 건조수축, 수화열 응력에 대 하여 평가하였다.

- 1) 강박스 거더교 콘크리트 슬래브에 발생하는 크리프, 건조수축, 수화열에 의한 초기 응력을 해석적 방법으로 평가한 결과 국내의 현행 도로교설계기준은 CEB-FIP규정 및 ACI 규정에 비해 발생응력 을 상대적으로 과소평가 하는 것으로 나타났다.
- 2) 해석변수의 변화조건 중 대기중의 습도가 낮고 콘크리트 설계강도가 높을수록 초기 응력이 상대적 으로 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 이는 초기 균열발생 가능성이 상대적으로 크다는 것을 의미한다.
- 3) 본 연구의 해석 조건을 기준으로 ACI 규정 적용시 대기습도 75% 내외를 경계로 이보다 낮을 경우 콘크리트에 발생하는 초기 응력이 허용인장응력을 초과하는 것으로 평가되었다.
- 4) 본 논문의 해석 결과중 ACI 규정에 의해 구해진 초기응력이 허용인장응력을 5일 ~ 18일 사이에 초과하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 설계규정에 준하여 설계 및 시공이 이루어지는 경우에도 슬래브에 응력을 발생시키는 건조수축, 수화열, 크리프 등의 다양한 변수들로 인해 균열의 발생가 능성이 있음을 의미하고 있다.

참고문헌

1. 건설교통부제정(2000) 도로교설계기준, 한국도로교통협회.
2. 도로교표준시방서(1999), 한국도로교통협회.
3. 콘크리트표준시방서(1999), 한국콘크리트학회.
4. 건설교통부제정(1996) 콘크리트표준시방서, 대한토목학회
5. ACI committee 209 (1971) Prediction of creep, shrinkage, and temperature effect in concrete structure. America Concrete Institute Special Publication No.27 pp 55-93.
6. CEB-FIB Structural Concrete Volume1 (1999) 3.1.5 Effects of time upon strength and deformation.
7. 한국도로공사(1998) 합성형 교량의 시공 및 유지관리 기술개발 연구보고서.
8. 건설교통부, "도로설계편람", 한국건설기술연구원, 2001.
9. MIDAS CIVIL 01 · Getting Started & Tutorials 02 · Analysis for Civil Structures 03 · Advanced Applications, 주식회사마이다스아이티.
10. 장승필 외(1997) 합성 박스형 교량의 온도에 의한 응력 및 변형, 한국강구조학회지 제9권 4호 pp.659-672.
11. 광효경 외(2000) 강합성 상자형 교량의 바닥판 타성에 따른 거동연구(II) - 해석적 연구 및 균열 제어, 한국강구조학회지 제12권 2호 pp.133-142.