

크리프 및 건조수축에 의한 합성거더 단면의 응력변화 추정

The Estimation of Stress Variation due to Creep and Shrinkage on Composite Girder Section

김 병 규* 김 수 만**
Kim, Byung Kyu Kim, Su Man

ABSTRACT

Under sustained load, the stress variation occurs due to creep and shrinkage of concrete on the sections of steel-concrete composite girders. In standard specification for highway bridge, the method of stress estimation considering time effects is based on the concept of Yassumi method. In this study, comparing the analysis results using the AEMM and Yassumii method long-term behaviors, the rationality of specified requirements is checked.

1. 서론

콘크리트 바닥판과 강재거더로 구성된 합성거더교는 공사기간이 비교적 적게 소요되며 시공시 형하 공간의 활용이 용이하고 재료의 효율적인 사용으로 하중 저항성이 크므로 합성형 교량형식으로 널리 채택되고 있다. 이러한 합성단면에서는 콘크리트 바닥판에서 발생하는 크리프와 건조수축이 강재거더에 의해 변형의 일부가 구속된다. 또한 건조수축에 의한 상당한 처짐은 축방향 변형과 뒤틀림을 발생시키는 요인이 되기도 하여 사용성, 내구성 및 심지어는 전단파괴를 가져올 수도 있다. 따라서 콘크리트의 크리프와 건조수축을 엄밀히 추정하지 않고 이를 설계할 경우 구조물의 과도한 변형 또는 균열을 유발시킬 수 있고 이로 인하여 전체 구조물의 사용성과 하중의 저항능력에도 영향을 미치게 된다. 특히, 현대교량이 연속화, 장대화되어 가는 추세에 따라 내구성 및 안전성 확보가 더 중요시되므로 장기거동에 의한 영향을 정확히 평가하여 이를 설계에 반영하여야 한다.

본 연구에서는 CEB-FIP(90) 모델에 의해 시간에 따른 크리프와 건조수축의 값을 구하여 그 값을 도로교설계기준해설편에 제시된 야쓰미의 해법과 Bazant에 의해 제안된 재령-보정된 유효탄성계수법(AEMM : age-adjusted effective modulus)에 적용시켜, 시간에 따른 응력변화를 추정하여 도로교설계기준에 따른 해석방법의 적정성을 조사하였다.

2. 응력 추정방법

* 정회원, 수원대학교 토목공학과 석사과정
** 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수

2.1 야쓰미 해법 (도로교설계기준해설)

크리프에 의한 응력 변화는 강재거더에 의한 구속을 받지 않는 자유로운 크리프 변형도 ε_ϕ 에 대한 $P_\phi = E_{cl} \int_{A_c} \varepsilon_\phi dA = E_{cl} A_c \varepsilon_{\phi 0}$ 인 인장력을 콘크리트단면에 작용시켜 재하직후의 변형상태로 회복시킨 후, 강재와 바닥판 콘크리트를 결합시키고 나서 P_ϕ 를 제거하면 합성단면에는 P_ϕ 만큼의 압축력과 $M_\phi = P_\phi(d_{cl} + r_c^2/d_c)$ 인 휨모멘트가 작용하는 셈이 된다. 이 양자의 응력을 겹침으로써 변화응력을 식 (1), (2)로 구한다.

$$\Delta f_{c1} = \frac{1}{n_1} \left[\frac{P_\phi}{A_{v1}} + \frac{M_\phi y_{v1}}{I_{v1}} \right] - E_{cl} \frac{f_c}{E_c} \phi_1 \quad (1)$$

$$\Delta f_{s1} = \frac{P_\phi}{A_{v1}} + \frac{M_\phi y_{v1}}{I_{v1}} \quad (2)$$

건조수축에 의한 응력변화는 ϕ_2 를 재령에 의한 보정계수 2로 잡아 $\phi_2 = 2\phi_1$ 으로 하여 변화응력을 식 (3), (4)로 구한다.

$$\Delta f_{c2} = \frac{1}{n_2} \left[\frac{P_2}{A_{v2}} + \frac{M_{r2} y_{v2}}{I_{v2}} \right] - E_{c2} \varepsilon_s \quad (3)$$

$$\Delta f_{s2} = \frac{P_2}{A_{v2}} + \frac{M_{r2} y_{v2}}{I_{v2}} \quad (4)$$

크리프와 건조수축의 영향으로 임의 시간동안에 발생하는 총 응력변화는 식(5), (6)과 같다.

$$\Delta f_c = \Delta f_{c1} + \Delta f_{c2} \quad (5)$$

$$\Delta f_s = \Delta f_{s1} + \Delta f_{s2} \quad (6)$$

2.2 AEMM

내력과 외력을 평형으로 유지하기 위해 축방향력 ΔN 과 휨모멘트 ΔM 이 단면에 작용되어야만 한다. 크리프와 건조수축에 의한 변형률변화는 인위적으로 구속력 $-\Delta N$ 과 $-\Delta M$ 에 의해 방지할 수 있다. ΔN 과 ΔM 이 단면에 작용할 때 구속력은 제거되고 평형이 된다. 이때 구속력 $-\Delta N$ 과 $-\Delta M$ 은 식(7), (8)과 같다.

$$-\Delta N = -\overline{E}_e [\phi (A_c \varepsilon_{oi} - B_c \kappa_i) + \varepsilon_{sh} A_c] \quad (7)$$

$$-\Delta M = -\overline{E}_e [\phi (-B_c \varepsilon_{oi} + I_c \kappa_i) - \varepsilon_{sh} B_c] \quad (8)$$

상단기준선에 대해 점진적으로 작용한 축방향력 ΔN 과 휨모멘트 ΔM 에 의해 발생된 상연 변형률과 곡률증가량은 식(9), (10)로 구한다.

$$\Delta \varepsilon_0 = \frac{\overline{B}_e \Delta M + \overline{I}_e \Delta N}{\overline{E}_e (A_e I_e - B_e^2)} \quad (9)$$

$$\Delta \kappa = \frac{\overline{A}_e \Delta M + \overline{B}_e \Delta N}{\overline{E}_e (A_e I_e - B_e^2)} \quad (10)$$

여기서, \overline{A}_e 는 재령-보정된 단면의 면적이고, \overline{B}_e 와 \overline{I}_e 는 재령-보정된 환산단면의 면적 1차 및 2차모멘

트이다. 힘 ΔN 과 ΔM 이 점진적으로 작용하므로 재령-보정된 유효탄성계수(\overline{E}_c)를 사용하였다. 릴랙세이션으로 인한 상단 아래 거리 y 에서 콘크리트의 응력손실은 식(11)과 같다.

$$\Delta f_{\text{릴랙세이션}} = \overline{E}_c [\phi(\epsilon_{oi} - y\kappa_i) + \epsilon_{sh}] \quad (11)$$

평형조건을 만족하기 위해 ΔN 과 ΔM 이 작용되었을 때 발생하는 응력변화는 식(12)과 같다.

$$\Delta f_{\text{restore}} = \overline{E}_c [\Delta\epsilon_{oi} - y\Delta\kappa] \quad (12)$$

크리프와 건조수축의 영향으로 임의 시간동안에 발생하는 총 응력변화는 식(13)로 구한다.

$$\Delta f = \Delta f_{\text{릴랙세이션}} + \Delta f_{\text{restore}} \quad (13)$$

3. 선택된 강합성모델의 해석 및 고찰

시간에 따른 크리프계수 및 건조수축률을 고려하기 위해 CEB-FIP(90)모델에 적용시켜 이들 크기를 추정하였다. 이때 압축강도는 30Mpa, 개념 부재치수는 303mm, 외기의 상대 습도는 65% 및 온도는 20°C를 기준으로 적용하였으며, 양생 후 7일부터 30년까지 추정하였다.

그림 2의 건조수축률은 구속이 전혀없는 순수건조수축률의 값을 도시한 것이다.

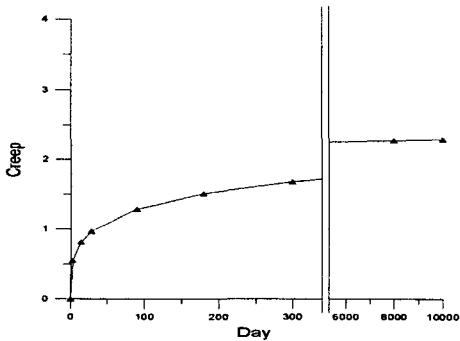


그림 1 크리프 계수 변화량

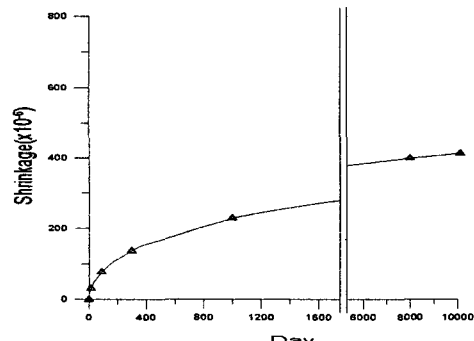


그림 2 건조수축률 변화량

순수건조수축률은 체적변화만 일으킬 뿐 응력을 발생시키지 않는다. 그러므로 응력변화를 추정하기 위해서는 강제거더에 의해 콘크리트의 변형을 억제시키는 건조수축률을 구해야한다. 도로교설계기준에서는 $\epsilon_{sh} = 180 \times 10^{-6}$ 을 응력을 발생시키는 최종 건조수축률로 추천하고 있다.

	순수 건조수축률 ($\times 10^{-6}$)	구속된 건조수축률 ($\times 10^{-6}$)
3개월	78	0.32
6개월	109	45.2
1년	150	62.4
5년	272	113
15년	369	153
30년	411	171

표 1 재령에 따른 순수 및 구속된 건조수축률

본 논문에서는 순수건조수축률에 콘크리트의 건조수축에 의한 가동받침의 이동량을 뺀 값이 응력을 발생시키는 건조수축률로 보고 시간에 따라 추정하였다. 즉, 30년 후에 순수건조수축률은 $\epsilon_{sh} = 411 \times 10^{-6}$ 이지만 콘크리트 바닥판의 건조수축이 강제거더에 의해 구속되어 실제 발생하는 건조수축률은 $\epsilon_{sh} = 240 \times 10^{-6}$ 로 추정된다. 따라서 변형을 일으키지 못한 건조수축 $\epsilon_{sh} = 171 \times 10^{-6}$ 은 응력을 발생시키는 건조수축률이 된다.

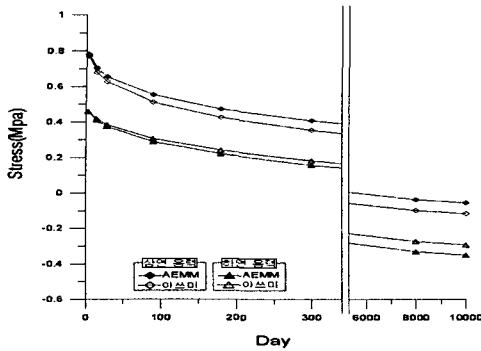


그림 3 콘크리트 응력변화

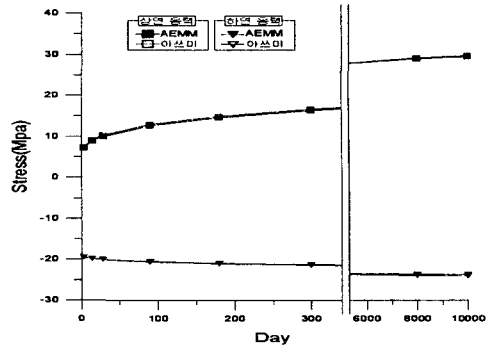


그림 4 강재 응력변화

그림 3과 그림 4는 표 1에서 추정된 구속된 건조수축률과 크리프계수를 적용하여 AEMM과 야쓰미 해법으로 응력변화를 추정하여 비교한 그래프이다. 여기서, 지속하중은 자중만을 고려하였다.

그림 4의 경우 AEMM과 야쓰미 해법으로 추정된 응력변화는 거의 차이가 없음을 보여준다. 하지만 그림 3의 경우 두 방법으로 추정된 응력변화는 상당한 차이를 보여주고 있다. 특히, AEMM에 의해 추정된 상·하면의 응력 차가 야쓰미 해법의 응력 차보다 더 크고 보수적임을 알 수 있다. 이는 강재구속으로 인한 콘크리트 내부의 인장응력이 야쓰미 해법보다 AEMM에 더 크게 작용한다는 것을 의미하고 있다.

4. 결론

- 1) 최종건조수축률을 추정된 결과 도로교 설계기준에 제시된 값에 근접하게 접근함을 알 수 있었다. 하지만 압축강도가 낮아지거나 습도가 낮아질 경우 최종건조수축률은 증가하게 된다. 특히 우리나라의 경우 습도는 계절별, 지역별 따라 많은 차이를 보인다. 따라서 현재 도로교설계기준에 제시된 값보다 일본 도로교설계기준에 제시된 최종건조수축률 $\epsilon_{sh} = 200 \times 10^{-6}$ 을 적용하는 것이 더 안전하며 바람직하다고 판단된다.
- 2) 콘크리트 바닥판 하면에서 AEMM으로 추정된 인장응력이 야쓰미 해법으로 추정된 응력보다 더 크게 산정되었다. 따라서 인장응력에 매우 취약한 콘크리트의 재료특성을 고려하면 AEMM으로 추정된 응력을 설계에 고려하는 것이 보다 보수적인 결과를 얻을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 대한토목학회, “도로교설계기준해설”, 2003
2. 한국콘크리트학회, “콘크리트 구조 설계기준”, 2003
3. R.I. Gilbert, “Time Effects in Concrete Structure”, ELSEVIER, 1988
4. A. Ghali and R. Favre, “Concrete Structures : Stress and Deformation”, E&FN SPON, 1994
5. 선성웅, “건조수축 및 크리프 영향을 고려한 철근콘크리트 휨부재의 시간에 따른 구조거동”, 1999
6. 정대준, “합성거더교의 건조수축과 크리프 영향 평가”, 2003
7. 배두병, 윤석구, 함상희, “콘크리트 건조수축에 의한 합성거더의 장기거동”, 2004