

PSC 합성거더교의 시간에 따른 응력 변화 추정

Estimation of Stress Variations on Time Effects in Prestressed Concrete Composite Girder Bridges

윤지훈* 김수만**

Yoon, Ji Hoon Kim, Su Man

ABSTRACT

When a concrete structure is subjected to load, its response is both immediate and time dependent. Under sustained load, the deformation of a structure gradually increases with time and eventually may be many time greater than its instantaneous value. The gradual development of strain with time is caused by creep and shrinkage.

On this study, to estimate of stress variations on time effects in partially prestressed concrete composite girder bridges, computer program applied Age-adjusted Effective Modulus Method(AEMM) in used.

1. 서론

구조재료로 가장 대표적 재료인 콘크리트는 물리적·화학적 성질이 시간에 따라 변하는 특성을 갖고 있다. 따라서 철근콘크리트 및 프리스트레스트콘크리트 구조물은 크리프와 건조수축의 영향으로 시간에 따라 단면응력과 변형이 지속적으로 변화한다. 이에 따라 동일단면 내에서도 각 부위별로 응력의 재분배가 발생하여 내력에도 영향을 미친다. 그러므로 콘크리트 구조의 장기거동을 엄밀하게 추정하기 위해서는 시간에 따른 재료특성 및 응력-변형률의 비선형성을 고려하여 구조거동을 해석해야 한다.

콘크리트는 시간에 따른 구조응답의 변화로 하중재하 초기에 비균열 단면이 시간이 지남에 따라 균열단면으로 변하는 현상이 빈번히 나타나고 있다. 따라서 콘크리트 구조물이 초기에는 비균열 상태에서 시간이 지남에 따라 균열단면으로 변하여 새로운 단면특성을 고려한 구조해석이 이루어지지 않아 공용중인 콘크리트 구조물의 정밀안전 점검시 점검시점에서의 구조거동을 제대로 나타낼 수 없다. 본 연구에서는 PSC합성거더교를 모델로 선정하여 PSC부재의 재래해석 방법에 의한 해석결과와 본 연구에서 적용한 AEMM에 의해 정밀 해석결과를 비교 검토하여 재래해석 결과의 문제점을 분석한다. 또한 초기에는 비균열 단면이 어느 시점에서 균열단면으로 변화하는가를 조사한다.

2. 건조수축 및 크리프 추정

크리프계수와 건조수축량을 추정하기 위해 단기 실험결과 얻어진 크리프와 건조수축량을 기연구된 경험식에 대입하여 크리프계수 및 건조수축량을 추정하는 방법이 있다. ACI 209모델, CEP Fip 90 모델 및 KCI 모델을 적용하는 본 연구에서는 기 실험된 결과(“원전 구조물용 다성분계 고유동 콘크리트 개발에 관한 연구”, 수원대학교 이평석)를 사용한다.

단기 실험결과값을 이용하여 Meyers의 쌍곡선 멱함수 식과 Neville의 대수 멱함수 식에 대입하여 구한 경험식은 식(1),(2)와 같다.

$$\phi(t, \tau) = \frac{2.35(t-\tau)^{0.6}}{10+(t-\tau)^{0.6}} \phi(28+\tau, \tau), \quad \epsilon_{sh}(t) = \frac{2.25t}{35+t} \epsilon_{sh} \quad (1)$$

*정회원, 수원대학교 토목공학과 석사과정

**정회원, 수원대학교 토목공학과 교수

$$\phi(t, \tau) = [2.51(\ln(t - \tau) - 6.19)]^{0.379} \phi(28 + \tau, \tau), \quad \epsilon_{sh}(t) = \alpha \epsilon_{sh}(28)^\beta \quad (2)$$

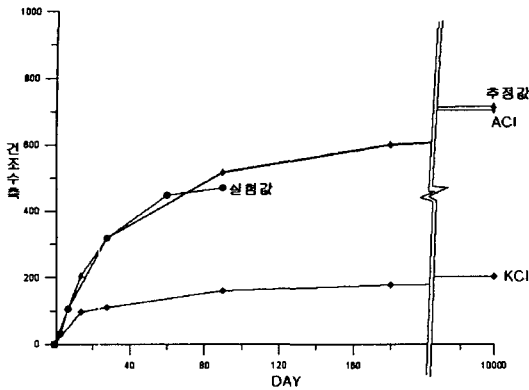


그림 3 건조수축 실축값과 추정값

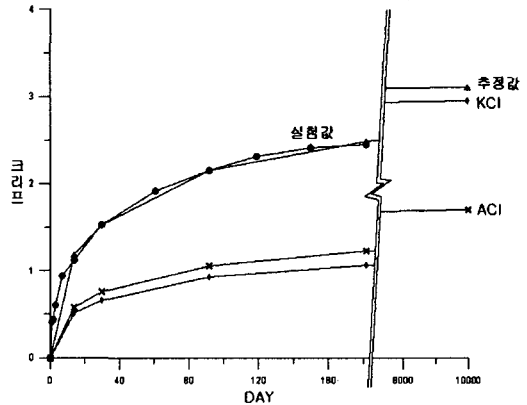


그림 4 크리프 실축값과 추정값

3. 시간에 따른 구조해석 응답

3.1 단기해석

콘크리트 합성단면에 대해 콘크리트 요소(슬래브 바닥판) 하나의 탄성계수가 환산단면의 탄성계수로 선택되어지며, 부착된 철근과 다른 콘크리트 요소의 면적은 슬래브 바닥판 콘크리트 요소의 등가면적으로 환산되어 진다. 상단 기준선에 대한 환산단면의 특성은 다음과 같다.

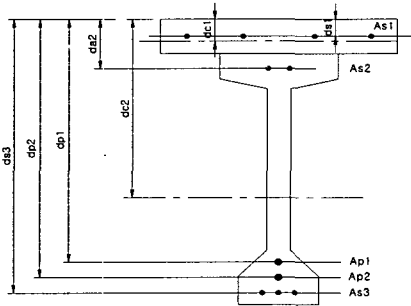


그림 5 콘크리트 합성단면

$$A = \sum_{j=1}^2 n_{cj} A_{cj} + \sum_{k=1}^3 n_{sk} A_{sk} + \sum_{k=1}^2 n_{pk} A_{pk},$$

$$B = \sum_{j=1}^2 n_{cj} A_{cj} d_{cj} + \sum_{k=1}^3 n_{sk} A_{sk} d_{sk} + \sum_{k=1}^2 n_{pk} A_{pk} d_{pk}$$

$$I = \sum_{j=1}^2 (n_{cj} I_{cj} + n_{cj} A_{cj} d_{cj}^2) + \sum_{k=1}^3 n_{sk} A_{sk} d_{sk}^2 + \sum_{k=1}^2 n_{pk} A_{pk} d_{pk}^2 \quad (3)$$

초기 축방향력 N_i 에 의해 발생된 변형을 분포와 상단 기준면에 대한 초기 모멘트 M_i 는 다음과 같다.

$$\epsilon_i = \epsilon_{oi} - y\kappa_i \quad \text{여기서, } \epsilon_{oi} = \frac{BM_i + IN_i}{E_c(AI - B^2)},$$

$$\kappa_i = \frac{AM_i + BN_i}{E_c(AI - B^2)} \quad (4)$$

상면에서 y 만큼 떨어진 j 번째 콘크리트 요소의 응력변화와 N_i , M_i 에 의해 발생된 부착철근의 응력 변화는 다음과 같다.

$$\Delta\sigma_i = E_{cj}(\epsilon_{oi} - y\kappa_i), \quad \Delta\sigma_{sik} = E_{sk}(\epsilon_{oi} - d_{sk}\kappa_i), \quad \Delta\sigma_{pk} = E_{pk}(\epsilon_{oi} - d_{pk}\kappa_i) \quad (5)$$

3.2 시간해석

시간해석시 각 콘크리트 요소에 대해 재령-보정된 유효탄성계수(AEMM)식은 다음과 같다.

$$\overline{E}_e(t, \tau_0) = \frac{E_e(\tau_0)}{1 + \chi(t, \tau_0) \phi(t, \tau_0)} \quad (6)$$

각 콘크리트 요소의 크리프와 건조수축 그리고 프리스트레싱 강재에서의 릴랙세이션의 자유로운 발생을 방지하기 위해 필요한 구속력 $-\Delta N$, $-\Delta M$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 -\Delta N &= -\sum_{j=1}^n \overline{E_{cj}} [\phi_j (A_{cj} \epsilon_{oi} - B_{cj} \chi_i) + \epsilon_{shj} A_{cj}] + \sum_{k=1}^m k_k R_k \\
 -\Delta M &= -\sum_{j=1}^n \overline{E_{cj}} [\phi_j (-B_{cj} \epsilon_{oi} + I_{cj} \chi_i) - \epsilon_{shj} B_{cj}] - \sum_{k=1}^m k_k R_k d_{pk}
 \end{aligned} \quad (7)$$

시간에 따른 변형률 분포의 변화는 재령-보정된 환산단면에 ΔM , ΔN 을 작용시켜 계산한다. 콘 크리트 요소 하나의 재령-보정된 유효탄성계수는 재령-보정된 환산단면의 탄성계수로 선택되어 진다.

$$\begin{aligned}
 \overline{A_e} &= \sum_{j=1}^2 \overline{n_{cj}} A_{cj} + \sum_{k=1}^3 \overline{n_{sk}} A_{sk} + \sum_{k=1}^2 \overline{n_{pk}} A_{pk} \quad , \quad \overline{B_e} = \sum_{j=1}^2 \overline{n_{cj}} A_{cj} d_{cj} + \sum_{k=1}^3 \overline{n_{sk}} A_{sk} d_{sk} + \sum_{k=1}^2 \overline{n_{pk}} A_{pk} d_{pk} \\
 \overline{I_e} &= \sum_{j=1}^2 (\overline{n_{cj}} I_{cj} + \overline{n_{cj}} A_{cj} d_{cj}^2) + \sum_{k=1}^3 \overline{n_{sk}} A_{sk} d_{sk}^2 + \sum_{k=1}^2 \overline{n_{pk}} A_{pk} d_{pk}^2
 \end{aligned} \quad (8)$$

상연 변형률과 곡률의 시간에 따른 변화는 다음과 같다.

$$\Delta \epsilon_0 = \frac{\overline{B_e} \Delta M + \overline{I_e} \Delta N}{\overline{E_e} (\overline{A_e} \overline{I_e} - \overline{B_e}^2)} \quad , \quad \Delta \chi = \frac{\overline{A_e} \Delta M + \overline{B_e} \Delta N}{\overline{E_e} (\overline{A_e} \overline{I_e} - \overline{B_e}^2)} \quad (9)$$

상연 아래 y 깊이 에 있는 j 번째 콘크리트 요소부분에서 응력변화는 크리프와 건조수축이 완전히 구속된 경우에는 재령-보정된 환산단면의 릴랙세이션으로 인한 응력과 ΔM , ΔN 이 단면에 작용할 때 나타나는 응력의 합과 같다.

$$\Delta \sigma = -\overline{E_{cj}} [\phi_j (\epsilon_{oi} - y \chi_i) + \epsilon_{shj}] - (\Delta \epsilon_0 - y \Delta \chi) \quad (10)$$

프리스트레스트 되지 않은 철근의 k 번째 층에서 시간에 따른 응력변화와 프리스트레스트 된 강재의 k 번째 층에서 응력변화는 다음과 같다.

$$\Delta \sigma_{sk} = E_{sk} (\Delta \epsilon_0 - d_{sk} \Delta \chi) \quad , \quad \Delta \sigma_{pk} = E_{pk} (\Delta \epsilon_0 - d_{pk} \Delta \chi) + \frac{k_k R_k}{A_{pk}} \quad (11)$$

4. 선정된 모델의 해석

4.1 선정된 모델의 제원

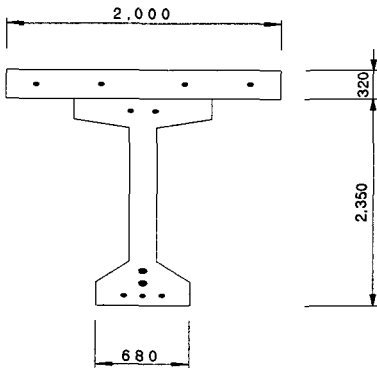


그림 6 해석모델 치수

표 1 작용모멘트

모멘트	크기	비고
PSC거더 자중모멘트(KNm)	1890	고정하중 3340 KNm
Con'c 바닥판 자중모멘트(KNm)	1450	
활하중(KNm)	2950	
전제모멘트(KNm)	6290	

건조수축과 크리프를 고려한 장기거동을 해석하기 위한 모델은 철도교 표준도에서 사용되는 전형적인 모델로 지간이 25m인 모델을 선택하였다. 그림과 같은 모델에서 사용되는 하중은 위와 같다. 해석 모델을 추정하기 위해 고정하중과 활하중의 비율을 고려하고, 크리프의 경우 고정하중의 영향을 대부분 받지만 활하중을 고정하중을 감안하여 활하중의 일정비율을 고정하중으로 변환 해석한다.

4.2 해석결과및 분석

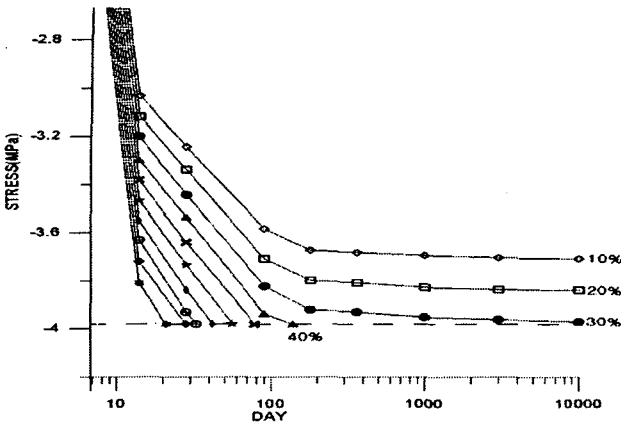


그림 7 콘크리트 하연응력

균열은 파괴계수 $0.63\sqrt{f_{ck}}$ 값에 따라 -3.98MPa 에서 균열이 발생한다. 초기단계에서 비균열 단면이었던 부재는 시간을 고려하여 해석한 결과 균열이 발생하였다.

시간해석을 한 결과 활하중을 고정하중으로 생각하는 비율의 약 40% 이상에서는 균열이 발생한다.

균열이 발생한 시기는 20일에서 180일 사이에서 균열이 일어났으며, 10000일 가까이에서도 균열이 발생할 가능성이 높았다. 그림에서와 같이 활하중을 고정하중으로 변환하는 비율이 높아질수록 균열 발생이 급속히 진전됨을 알 수 있다.

5. 결론

기 연구된 실험에서 얻어진 크리프와 건조수축량을 선택된 부분프리스트레스트 합성거더교에 적용하고 AEMM(재령-보정된 유효 탄성 계수법)을 법을 이용하여 시간해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

- 1) 28일 크리프 값과 28일 건조수축값을 Meyers 식에 넣어 해석한 10000일에서의 최종 건조수축 추정값은 ACI 코드를 이용하여 추정된 값과 매우 유사한 결과를 얻었고, KCI 코드를 이용한 추정된 값과는 큰 차이를 보였다. 그리고 크리프의 경우 Meyers 식에 의한 추정값과 KCI 추정값은 유사한 값을 보였지만, ACI추정값은 0.5배 정도의 값으로 차이를 보였다.
- 2) 단기해석에서는 비균열 단면이 부재가 시간에 따른 장기해석에서는 하연의 인장응력이 파괴계수를 초과하여 균열이 발생 할 수 있음을 확인하였다. 이때 활하중도 지속하중으로 고려한 경우는 활하중의 일부분을 고정하중으로 생각할 경우 일부 경우에서 균열이 발생하였다.
- 3) 설계를 할 때에는 크리프와 건조수축에 의한 구조물의 장기거동을 고려해야 한다.
- 4) 구조물의 안전진단을 할 때에도 이러한 영향을 고려한 진단을 실시하는 것이 바람직하다고 생각된다.

참고문헌

1. 이평석, "원전 구조물용 다성분계 고유동 콘크리트 개발에 관한 연구", 2004
2. 김수만, 권기주, 이평석, "기존 원전용 콘크리트와 다성분계 고유동 콘크리트의 장·단기거동 비교 실험 연구", 한국구조물진단학회지 30호.
3. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, 2003.
4. 선성용, "건조수축 및 크리프 영향을 고려한 철근콘크리트 휨부재의 시간에 따른 구조거동", 1999
5. 이평석, "원전 구조물용 다성분계 고유동 콘크리트 개발에 관한 연구", 2004
6. R. I. Gilbrt, Time Effects in Concrete Structures, ELSEVIER, 1988.
7. A. A. Manaseer, "Adam Neville Symposium : Creep and Shrinkage-Structural Design Effects", ACI international SP-194
8. A. Ghali and R. Favre, Concrete Structures : Stresses and Deformations 2nd edition, E&FN SPON, 2002
9. S. Mindess, J.F. Young, D. Darwin, Concrete : Second Edition, Pearson Education, 2003