

시공단계를 고려한 콘크리트-콘크리트 합성형 PSC 박스거더 교량의 해석

A Study on the Analysis of PSC Box Girder Bridge Considering Construction Stage in Box Section

김 영 진* 김 병 석** 강 재 윤*
Kim, YoungJin Kim, ByungSuk Kang, JaeYoon

ABSTRACT

PSC box bridge by MSS construction method may not be set at cross section at one step. Web and bottom flange(U member) would be set at first, top flange will be set later with a time lag. In this case, U member and top flange concrete have different strain history. As two different aged section behaves as the composite section, there would happen the redistribution of stress. This is come from time-dependent strain characteristics of concrete itself.

In this study, two models are considered, one with considering the set time of cross section and the other without. By performing longitudinal analysis of two models on considering construction stage, the stress differences of two are compared.

As the analysis results show a considerable differences in the stresses of cross section between two models, the set time of cross section is needed for rational design of PSC box girder bridge.

1. 서론

이동식 비계공법에 의해 타설되는 PC 박스거더교는 전 경간을 한꺼번에 전부 타설할 수 없으므로 복부와 하부 플랜지(U 부재)를 먼저 타설한 후 일정한 시간이 경과한 후 다시 상부 플랜지를 타설한다. 이러한 경우에 U 부재와 상부 플랜지 콘크리트는 재령차로 인한 변형이 상이하게 발생하며 이것은 이질적인 두 부재가 합성된 단면처럼 단면내 응력의 재분배가 일어난다. 이것은 각 콘크리트의 시간적인 변형특성으로 기인한 것이다. 콘크리트 구조물은 지속하중을 받으면 시간에 의존적인 시간변형이 순간변형의 2~3배를 초과한다. 온도와 응력이 일정하다고 하면 시간에 따른 변형 증가는 크리프와 건조수축에 기인한다.

* 한국건설기술연구원, 구조연구실, 연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원, 구조연구실, 수석연구원

이러한 비탄성적이고 시간의존적인 변형은 처짐과 프리스트레스 손실, 그리고 응력과 내력의 재분배를 초래한다. 크리프와 건조수축은 사용하중하에서 과도한 처짐을 유발한다. 또한 건조수축은 사용성과 내구성을 저하시키는 균열을 유발할 수 있다. 더구나 단면내에 타설 시간차가 있으면 시공중 유해한 균열을 발생시킬 수 있으므로 이러한 효과들을 정확하고 효율적으로 예측하는 것이 필요하다.

2. 콘크리트의 시간의존적 해석

임의 시간의 콘크리트 전체 변형은 역학적인 변형성분과 비역학적인 성분으로 분류할 수 있다.

역학적인 변형은 하중재하 즉시 일어나는 것으로 응력-변형 관계로부터 구할 수 있고, 비역학적인 변형은 크리프 변형, 건조수축, 재령효과, 그리고 온도변형으로 구성되어 있다.

먼저 콘크리트의 순간 변형을 구하기 위하여 사용된 응력-변형관계는 ACI Committee 209에서 제안하고 있는 기준을 따랐다. 이외에 해석에 필요한 사항들 또한 ACI 209의 제안사항을 따라 결정하였다.

콘크리트는 사용하중하에서 장기간에 걸쳐 시간의존적 변형이 발생하는데 이것은 크리프와 건조수축, 콘크리트 재령효과로 기인한다. 크리프의 역학적인 성격은 아직까지도 완벽히 규명되지 못하고 있다. 그래서 크리프를 설명하기 위하여 다양한 이론들, 즉 Mechanical deformation theory, Plastic theory, Viscous flow theory, Seepage of gel water theory 등이 제시되고 있다. 콘크리트 크리프에 영향을 미치는 인자가 상당히 많고 복잡하기 때문에 시간경과에 따른 크리프변형을 예측하기란 상당히 어렵다. 많은 실험을 통하여 재하시 초기 변형과 재하 후 $(t - \tau)$ days 경과후 크리프변형의 비율인 크리프계수를 ACI Committee 209는 다음 식(1) 과 같이 제안하고 있다.

$$\phi(t, \tau) = \frac{(t - \tau)^{0.6}}{10 + (t - \tau)^{0.6}} \phi_u \quad (1)$$

여기서, t 는 콘크리트 타설된후 현재까지의 시간(일)이고 τ 는 재하시 재령이다. ϕ_u 는 재하시 초기 변형에 대한 재하후 $t = \infty$ 일 때 크리프변형의 비로 정의되는 극한 크리프계수이다.

콘크리트의 건조수축은 응력과 온도에 무관하게 발생하는 시간의존적 체적변화로 정의되며, 물-시멘트비가 증가함에 따라 증가하고 골재 부피와 부재 크기, 대기 상대습도의 커짐에 따라 감소한다. 시간에 따른 건조수축 곡선은 실험을 통하여 결정되어야 하나 ACI Committee 209는 식(2)를 제안하고 있다.

$$\epsilon_{t-t_0}^s = \frac{(t - t_0)}{f + (t - t_0)} \epsilon_u^s \quad (2)$$

여기서, t 는 콘크리트 타설후 시간(일)이며 t_0 는 양생 완료시 콘크리트 재령(일)이고 f 는 양생조건에 따른 상수이다.

재령효과로 인한 콘크리트 변형은 재령 증가로 인한 역학적인 변형의 감소로 정의되고 따라서 시간 단계 t_n 과 t_{n-1} 에서 증분 재령변형은 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \epsilon_n^a = g(\sigma(t_n)) - g(\sigma(t_{n-1})) \quad (3)$$

여기서, g 는 응력으로 인한 역학적인 변형을 계산하는 시간의존적 함수로서 응력-변형 관계식을 역

으로 계산하면 구할 수 있다.

크리프계수와 건조수축 변형을 이용하여 시간에 따른 구조물의 장기적인 변형을 구하는 방법에는 유효계수법(Effective Modulus Method, EMM)과 재령보정 유효계수법(Age adjusted Effective Modulus Method, AEMM), 크리프 비율 방법(Rate of Creep Method, RCM), 수정 Dischinger 방법(Improved Dischinger Method, IDM), 중첩법(Step by step Superposition Method, SSM) 등이 있다.

이 중 본 연구에서는 변형이 크리프계수에 비례하여 변하는 문제에서 비교적 정확하다고 알려져 AEMM 방법을 사용하여 크리프, 건조수축 및 텐던 인장력의 릴락세이션에 의한 응력변화율을 계산하였다.

3. 콘크리트 합성단면의 해석

그림 1은 두 콘크리트 요소와 상하 철근 및 텐던을 갖는 전형적인 PC Box 단면과 철근 및 텐던을 콘크리트 단면으로 변환한 단면을 보여 주고 있다.

모멘트 M_s 와 텐던 전체 긴장력 P 가 작용할 때 단면내의 초기 변형 분포는 그림 1과 같이 상연의 변형 ϵ_{oi} 와 기울기 κ_i 로 나타낼 수 있다. 즉 상연으로부터 임의 지점의 초기 변형은 다음 식(4)와 같다.

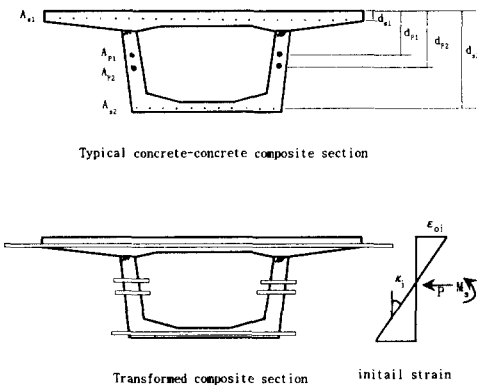


그림 1 전형적인 콘크리트-콘크리트 합성단면

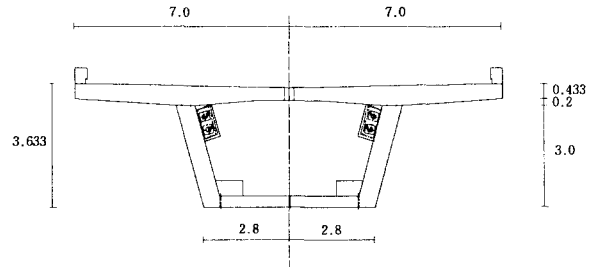


그림 2 박스거더교의 제원

$$\epsilon_i = \epsilon_{oi} - y \kappa_i \quad (4)$$

콘크리트가 초기에는 선형 탄성이라고 가정하면 단면내 응력 분포는 다음과 같다.

$$\sigma_i = E_{ci} \epsilon_i = E_{ci} (\epsilon_{oi} - y \kappa_i) \quad (5)$$

PC 변환단면의 초기 축력 N_i 는 긴장력 P 와 같으며 일반적으로

$$\begin{aligned} N_i = P_i &= \int \sigma_i dA \\ &= E_{ci} \epsilon_{oi} \int dA - E_{ci} \kappa_i \int y dA \\ &= E_{ci} \epsilon_{oi} A - E_{ci} \kappa_i B \end{aligned} \quad (6)$$

이고 상부 플랜지 상연에서 변환단면의 모멘트를 취하면 식 (7)과 같고 식(6)과 식(7)을 연립하여 풀면 초기 변형 분포를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 M_i &= M_s - \sum P d_{p_i} \\
 &= - \int \sigma_i y dA \\
 &= - E_{cl} \epsilon_{oi} \int y dA + E_{cl} x_i \int y^2 dA \\
 &= - E_{cl} \epsilon_{oi} B + E_{cl} x_i I
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\epsilon_{oi} = \frac{B M_i + I N_i}{E_{cl}(A I - B^2)} \tag{8}$$

$$x_i = \frac{A M_i + B N_i}{E_{cl}(A I - B^2)} \tag{9}$$

4. 콘크리트 합성단면의 해석 예

4.1 개요

콘크리트의 시간의존적 특성을 해석할 수 있는 프로그램인 SPCFRAME을 이용하여 그림 2의 단면제원을 갖는 2경간 연속 PC 박스거더교를 상부슬래브를 하나의 보요소로 그리고 복부와 하부플랜지를 다른 요소로 모델링하여 타설시간차를 고려한 해석을 수행하였다. 그리고 박스거더 전단면을 하나의 요소로 모델링하여 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 해석에 사용된 각종 상수는 표 1과 같다.

표 1 해석에 사용된 재료의 역학적 성질 및 특성

| 콘크리트 | 프리스트레싱 |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> · 압축강도 (28일) : 400kg/cm² · 단위 중량 : 2.5t/m³ · 탄성계수 : CEB-FIP 78 기준을 따름 | <ul style="list-style-type: none"> · Strand : 15.2 mm low relaxation steel (A=0.00014m²) · 탄성계수 : 2.0×107t/m2 · Anchorage slip : 7mm · 곡률마찰계수 : 0.3rad-1 · 파상마찰계수 : 0.004m-1 |

4.2 시공단계

박스거더를 상이한 두 보요소(U-trough 요소와 상부 슬래브)로 모델링하고 두 요소 사이에는 타설 당시에는 회전강성은 없고 축강성만 큰 bar요소로 연결하고 소정의 시간이 경과한 후에는 회전강성과 축강성이 큰 Rigid Bar요소로 연결하여 합성단면으로 거동하도록 하였다. 또한 이동식 비계를 실제와 동일한 회전강성과 축강성을 갖는 bar 요소(A=1.0m², I=0.5m⁴)로서 모델링하였다. 그림 3은 이동식 비계와 U 요소, 상부 슬래브를 1단계 시공했을 때를 모델링한 것이다.

해석프로그램은 SPCFRAME을 사용하였는데 SPCFRAME에는 bar요소와 rigid bar 요소가 없는 대신에 강성을 조절할 수 있는 traveller 요소가 있으므로 이 요소를 수정하여 사용하였다.

구체적인 시공단계는 표 2와 같다.

동일한 조건으로 상하부 분할시공을 고려하지 않았을 때 시공단계는 그림 4와 같이 모델링할 수 있

다. 구체적인 시공단계는 표 2의 밑줄 친 부분만이 해당된다.

4.3 시공단계 해석 결과

각 모델의 시공단계별 콘크리트 응력을 검토해 본 결과 두가지 경우에서 인장응력은 생기지 않는다. 그렇지만 동일한 교량임에도 불구하고 시공단계별 모델링 방법에 따라 콘크리트 응력 분포는 상당한 차이를 보인다. 표 1은 첫 번째 경간 중앙단면의 콘크리트 응력 분포인데 1단계 텐던의 일부만 긴장한 Stage 1에서 일체 모델에서는 148.6t/m^2 의 최소 압축응력이 계산된 반면에 분리 모델에서는 U-trough 요소의 상부에서 80.16t/m^2 의 압축응력이 계산되어 47%의 차이를 보이고 있다. 마찬가지로 완성계의 상연의 압축응력은 25% 작게, 하연의 압축응력은 44%가 크게 계산되었고 또한 단면내 콘크리트 응력분포도 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 결국 시공단계의 정확한 해석을 위해서는 시공상황에 맞는 시공단계별 모델이 필요하다고 할 수 있다. 특히 이동식 비계공법을 사용하여 시공하는 경우에 상하부 타설 시간차가 발생하므로 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 의해 응력이 재분배된다. 이러한 경우에는 상하부 타설시간차를 고려할 수 있는 해석프로그램이 필요한데 콘크리트-콘크리트 합성단면을 갖는 요소의 개발이 선행되어야 한다. 그러나 국내에서는 아직까지 합성단면 요소에 대한 필요성을 인식하지 못하여 연구 실적이 전무한 실정이다. 그러므로 조속한 시일내에 시간경과에 따른 굳은 콘크리트와 신생 콘크리트 사이의 합성도를 계측시험을 통해 확립하고 그 결과를 바탕으로 합성단면 요소를 개발해야 할 것이다.

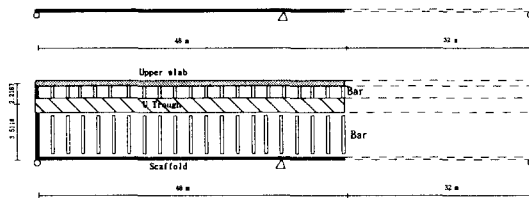


그림 3 상하부 분리 시공단계 모델

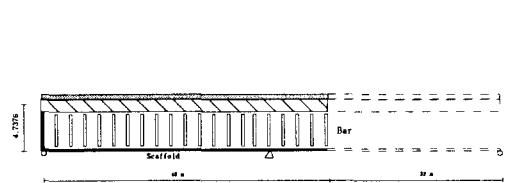


그림 4 상하부 일체 시공단계 모델

표 2 상하부 분리 시공단계의 작업공정

| 단계 | 작업공정 | 작업일 |
|---------|--|--------|
| Stage 1 | · <u>Erection of scaffold (1st stage)</u> | Day 0 |
| | · <u>Pouring 1st U</u> · <u>Tendons 8, 8' and 4 are stressed after concrete is hardened</u> | Day 7 |
| Stage 2 | · <u>Pouring of upper slab</u> | Day 9 |
| Stage 3 | · Fusion between U and upper slab · <u>Tendons 3, 3' and 6 stressed</u> · <u>Scaffold is removed</u> | Day 13 |
| | · <u>Erection of scaffold(2nd stage)</u> | |
| Stage 4 | · <u>Pouring 2nd U</u> | Day 15 |
| Stage 5 | · <u>Pouring 2nd U</u> | Day 20 |
| Stage 6 | · Activation of U inertia - Activate definitive supports of U · <u>Tendons 1, 1', 6, 7 and 7' are stressed after concrete is hardened</u> | Day 25 |
| | · <u>Pouring of upper slab</u> | |
| Stage 7 | · <u>Pouring of upper slab</u> | Day 27 |
| Stage 8 | · Fusion between U and upper slab · <u>Tendons 2, 2', 5, 5' 6 and 18 stressed</u> · <u>Scaffold is removed</u> | Day 31 |

표 3 시공단계별 콘크리트 응력분포

| 상부슬래브와 U요소를 분리하여 모델링한 경우 | | 상부슬래브와 U요소를 일체로 모델링한 경우 | |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Stage | 콘크리트 응력분포(ton/m^2) | Stage | 콘크리트 응력분포(ton/m^2) |
| 1 | | 1 | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | 2 | |
| 5 | | 3 | |
| 6 | | 4 | |
| 7 | | | |
| 8 | | 5 | |

5. 결론

단면내 콘크리트의 타설 시간차에 따른 응력분포를 알아보기 위하여 대표적인 PSC박스 단면에 대한 시공단계별 중방향 구조해석을 실시하였다. 이때 단면내의 타설순서를 고려한 경우, 무시한 경우 두가지를 구분하여 각각의 경우에 대한 단계별 응력을 검토하였다.

각 모델의 시공단계별 콘크리트 응력을 검토해 본 결과, 비록 두가지 경우에서 시공단계 중에 인장

응력은 생기지 않았으나 단면에 따른 타설시간 차이를 고려한 결과와 고려하지 않은 경우의 응력차이는 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다.

이와 같은 분석을 토대로 시공단계의 정확한 해석을 위해서는 시공상황에 맞는 시공단계별 모델이 필요하다고 할 수 있다. 특히 이동식 비계공법을 사용하여 시공하는 경우에 상하부 타설 시간차가 발생하므로 이에 대한 고려가 있어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구의 수행에 도움을 주신 건설교통부, 통상산업부 및 과학기술처 등의 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국고속철도건설공단, Bridge Design Manual, 1995. 6
2. 고속전철사업기획단, 고속철도 콘크리트구조물(RC 및 PC) 설계표준시방서(안), 1991. 9
3. Comite Euro International Du Beton, CEB-FIP Model Code, 1993
4. 국고속철도건설공단, Detail PC Box Bridge Design including Shop Drawings, Longitudinal Flexure Analysis, Diaphragm Analysis & Prestressing Transfer, Shear analysis, SYSTRA, 1997. 2
5. Vladimir Kristek, Theory of Box Girder, John Wiley & Sons, 1979
6. 한국건설기술연구원, 경제적인 PS콘크리트교량건설공법에 관한 연구, 1986. 6
7. Scordelis, A.C., et. al, Computer Programs for Prestressed Concrete Box Girder Bridges, University of California Berkeley, 1985. 3
8. Kang Young-jin, SPCFRAME-Computer Program for Nonlinear Segmental Analysis of Planar Prestressed Concrete Frames, 1989. 2