

재료특성치의 변화로 인한 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 거동분석

A Study on the Behavior of Prestressed Concrete Box Girder Bridges According to Material Properties

오 병 환* 양 인 환** 김 의 성*** 최 인 혁**** 김 세 훈*****
Oh, Byung-Hwan Yang, In-Hwan Kim, Eui-Sung Choi, In-Hyuck Kim, Se-Hoon

Abstract

Recently, the prestressed concrete box girder bridges are increasingly built at various locations in the world. The mechanical and structural behavior of prestressed concrete bridges varies because of time-dependent material properties and sequential change of structural system due to stepwise construction. The time-dependent behavior of concrete is of importance in the design and construction of segmentally constructed and cast-in-place prestressed concrete box girder bridges. The structural response is affected by variations in creep, shrinkage properties of concrete.

In this study, the example of time-dependent deformations is extended to establish how the variability in concrete properties affects the accuracy of the calculated deformations in such a bridge, and finally the results are discussed.

1. 서론

최근 사회간접자본의 투자 및 기간산업의 확충으로 구조적인 안전성, 경제성 등의 측면에서 유리한 프리스트레스트 콘크리트(PC) 박스거더 교량의 건설이 증가하고 있는 실정이다. PC박스거더 교량은 시공단계별 구조계가 변화하는 시간의존적 거동을 하게 되며, 각 시공단계에 따른 구조계의 변화과정에 의하여 완성된 구조물의 응력 및 기하 형상이 결정된다.

PC 박스거더 교량의 시간의존적 거동은 주로 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 캔틸레버 세그멘탈 교량의 경우, 시간의존적 변형은 두가지 효과에 의해 발전된다. 하나는 캔틸레버에 하향처짐을 유발하는 하중이며, 또다른 하나는 상향처짐을 유발하는 프리스트레스 힘의 효과이다. 세그멘탈 콘크리트 교량(segmental concrete bridges)의 시간의존적 거동을 명확

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 서울대학교 토목공학과 대학원 박사과정
*** 정회원, 동부건설기술연구소 소장, 공학박사
**** 정회원, 동부건설기술연구소 선임연구원, 공학박사
***** 정회원, 서울대학교 토목공학과 대학원 석사과정

히 규명하기 위해서는 사용되는 콘크리트 물성치의 특성 즉, 크리프 및 건조수축량 등의 특성이 교량의 시간의존적 거동에 어떻게 영향을 미치는 가를 분석, 연구하는 것이 중요하다.

2. 재료특성치의 불확실성

콘크리트의 크리프 및 건조수축은 여러가지 인자에 의해 영향을 받는다. Bazant⁴⁾는 영향인자를 온도, 상대습도등의 변동성과 같은 외부적 요인 및 콘크리트에 사용되는 재료의 재질 및 배합비의 변동성, 크리프와 건조수축의 내부 메카니즘(mechanism)에 기인하는 변동성과 같은 내부적 요인으로 분류하였다.

내부적 불확실성 인자

- 크리프 및 건조수축의 추계학적 특성에 의한 변동성
- 재료특성에 의한 변동성 (콘크리트의 압축강도, 탄성계수등 재료특성의 변동계수)

외부적 불확실성 인자

- 환경요인에 의한 변동성 (주위 온도 및 습도의 변동성)
- 작용하중의 변동성

모델링 기법에 의한 불확실성 인자

- 크리프 및 건조수축을 예측하기 위한 사용공식의 변동성
- 단순 탄성해석 및 유한요소 해석 등의 해석방법에 의한 변동성

한편, 교량설계시 크리프 및 건조수축 예측을 위해 주로 사용되는 방법은 ACI 209방법¹⁾ 및 CEB-FIP방법²⁾이 있다. ACI 209방법은 최종 크리프 계수 및 건조수축계수를 설정하여 시간의존적 거동을 예측하는 방법이다. 프리스트레스트 콘크리트 교량의 시간의존적 거동의 재료특성치에 의한 불확실성 및 변동성과 기존의 예측방법을 고려하여 본 연구에서는 콘크리트의 최종 크리프 계수 및 건조수축량, 상대습도 등을 주된 변수로 하여 박스거더 교량의 시간의존적 거동분석을 수행하였다. 아울러, ACI 209방법 및 CEB-FIP방법에 의한 거동분석도 수행하였다.

3. 시공단계 해석 예

3.1 해석 개요

본 연구에서는 현장타설 캔틸레버공법 시공에 의한 PC 박스거더 교량을 대상으로 해석을 수행하였다. 교량의 전체적인 형상은 그림 1과 같다. 교량의 거더와 하부슬래브의 두께는 종방향으로 변화하며, 교각의 주두부(pier table)를 중심으로 한쪽 캔틸레버부의 세그먼트는 그림 2처럼 분할되어 있다. 각 경간의 캔틸레버부는 순차적인 단계별 시공에 따라 거동 및 형상이 변화하며, 이러한 변화를 고려하여 이 영향을 누적하여 해석을 수행한다. 각 세그먼트는 양단에 절점번호를 가진 보요소로 처리하고 교축 방향으로는 상부슬래브 표면으로부터 각 단면의 중립축까지의 거리를 고려하여 가능한한 실제 구조물과 일치하도록 모사하였다. 세그먼트당 시공주기는 작업차 이동설치 2일, 거푸집·철근·쉬스관 설치 3일, 콘크리트 타설 1일, 양생 3일, 텐던 긴장 1일을 포함하여 총 10일이 걸리는 것으로 하였다.



그림 1. 교량의 형상

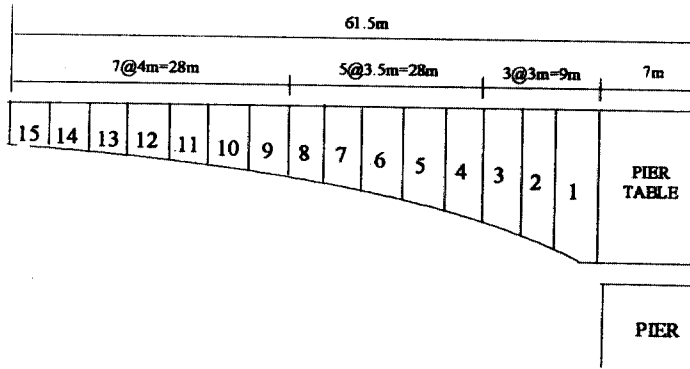
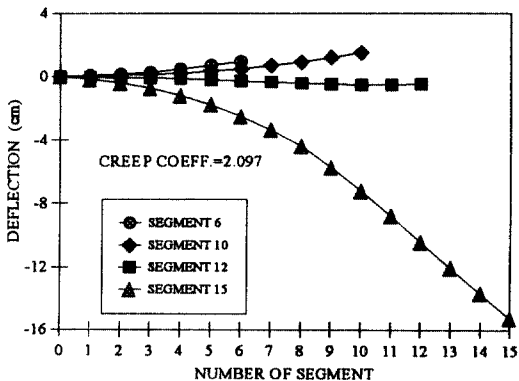


그림 2. 교량의 캔틸레버부

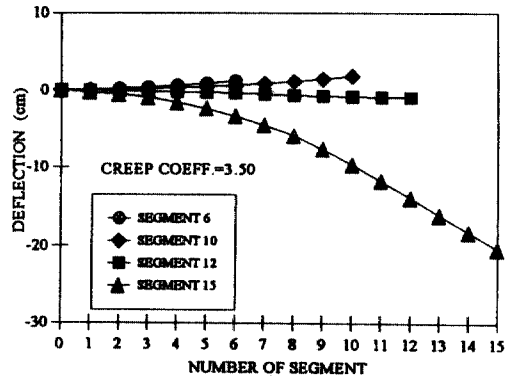
3.2 해석결과 및 거동분석

3.2.1 최종 크리프 계수에 따른 거동분석

최종 크리프 계수를 2.097 및 3.5 두가지로 하여 해석 비교하였다. 극한 크리프 계수 2.097은 설계 시 사용한 값이며, 시간에 따른 크리프 계수의 특성은 ACI규정에 따라 해석에 반영하였다. 그림 3에 각각의 크리프 계수에 따른 시공단계별 캔틸레버의 처짐량 변화를 나타내었다. 그림 4에 각 시공단계별 처짐량을 비교하였다. 시공단계별 처짐량의 차이는 누적되어지며, 6번 세그먼트 가설단계에서 캔틸레버 끝단의 차이는 약 0.24cm, 10번 세그먼트 가설단계에서 캔틸레버 끝단의 차이는 약 0.3cm, 12번 세그먼트 가설단계에서 캔틸레버 끝단의 차이는 약 0.51cm, 캔틸레버 완공시 처짐량은 약 5cm 정도의 차이가 나타나고 있다. 교량 설계시의 사용되는 크리프 계수값에 따라 시공단계별 처짐 예측에 차이가 있음을 알 수 있다.

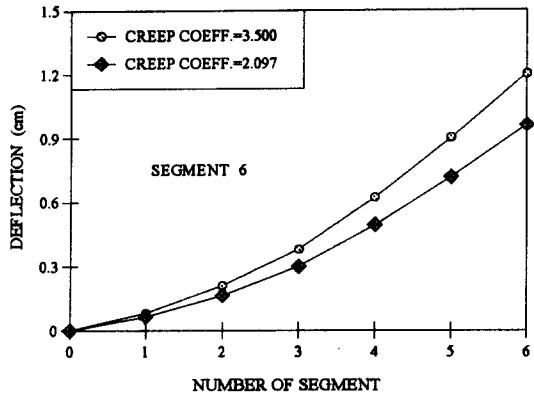


(a) 최종 크리프계수=2.097

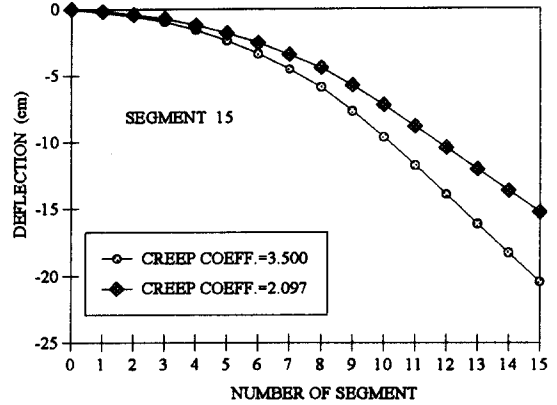


(b) 최종 크리프계수=3.5

그림 3. 최종 크리프계수에 따른 캔틸레버 처짐량 비교



(a) 6번 세그먼트 가설시



(b) 15번 세그먼트 가설시

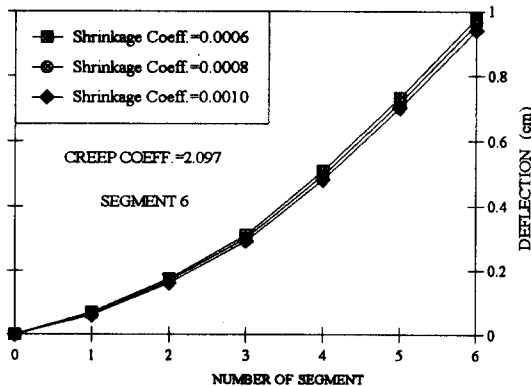
그림 4. 최종 크리프계수에 따른 시공단계별 처짐량

3.2.2 최종 건조수축량에 따른 거동분석

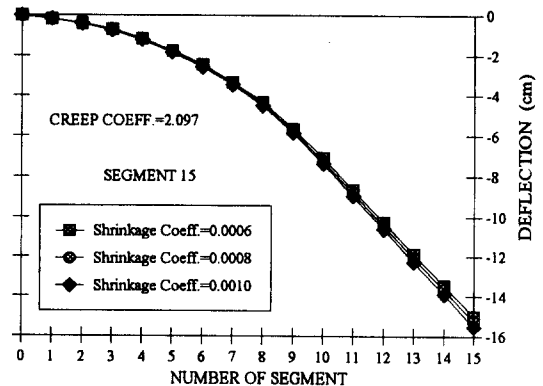
최종 건조수축량을 600×10^{-6} , 800×10^{-6} 및 1000×10^{-6} 세가지로 하여 해석 비교하였다. 최종 건조수축량 800×10^{-6} 은 설계시 사용한 값이며, 시간에 따른 건조수축량의 특성은 ACI규정에 따라 해석에 반영하였다. 그림 5에 각각의 건조수축량에 따른 시공단계별 캔틸레버의 처짐량 변화를 나타내었다. 6번 세그먼트 가설단계에서 캔틸레버 끝단의 차이는 약 0.05cm, 10번 세그먼트 가설단계에서 캔틸레버 끝단의 차이는 약 0.14cm, 12번 세그먼트 가설단계에서 캔틸레버 끝단의 차이는 약 0.3cm, 캔틸레버 완공시 처짐량은 약 0.56cm 정도의 차이가 나타나고 있다.

3.2.3 상대습도에 따른 거동분석

상대습도를 50% 및 80%로 하여 해석비교하였다. 시간에 따른 콘크리트의 특성은 CEB-FIP규정에 따라 해석에 반영하였다. 그림 6에 각 상대습도에 따른 시공단계별 캔틸레버의 처짐량 변화를 나타내었다. 6번 세그먼트 가설단계에서 캔틸레버 끝단의 차이는 약 0.02cm, 10번 세그먼트 가설단계에서 캔틸레버 끝단의 차이는 약 0.32cm, 12번 세그먼트 가설단계에서 캔틸레버 끝단의 차이는 약 0.66cm, 캔틸레버 완공시 처짐량은 약 1.61cm 정도의 차이가 나타나고 있다.

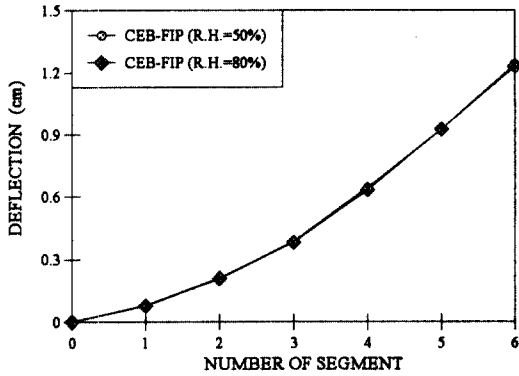


(a) 6번 세그먼트 가설시

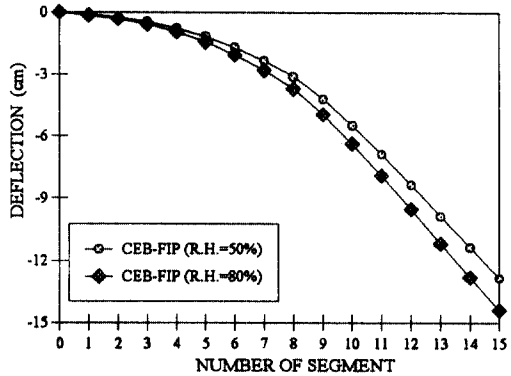


(b) 15번 세그먼트 가설시

그림 5. 최종 건조수축량에 따른 시공단계별 처짐량



(a) 6번 세그먼트 가설시

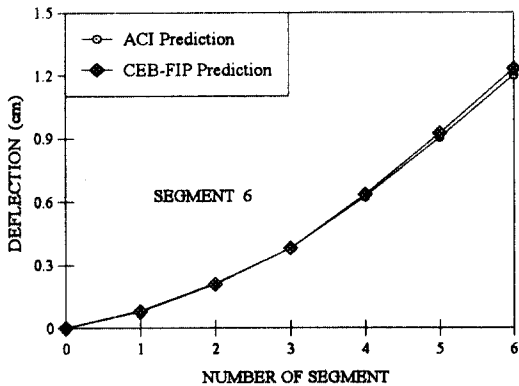


(b) 15번 세그먼트 가설시

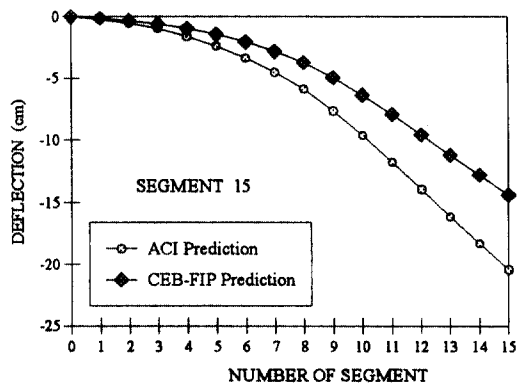
그림 6. 상대습도에 따른 시공단계별 처짐량

3.2.4 시간의존적 거동예측방법에 따른 거동 분석

ACI 209방법 및 CEB-FIP방법에 의한 캔틸레버 주요 시공단계마다 캔틸레버 끝단에서의 처짐비교를 그림 7에 나타내었다. ACI-209방법에 의한 처짐량이 CEB-FIP방법에 의한 값보다 초기 일수에 더욱 급격히 증가함을 알 수 있다. 6번 세그먼트 가설단계에서 캔틸레버 끝단의 차이는 약 0.02cm, 10번 세그먼트 가설단계에서 캔틸레버 끝단의 차이는 약 0.45cm, 12번 세그먼트 가설단계에서 캔틸레버 끝단의 차이는 약 1.45cm, 캔틸레버 완공시 처짐량은 약 5.89cm 정도의 차이가 나타나고 있다. 따라서, 설계시 사용되는 시방규준의 시간의존적 거동예측 방법에 따라 처짐예측값이 상이함을 알 수 있다.



(a) 6번 세그먼트 가설시



(b) 15번 세그먼트 가설시

그림 7. 거동예측방법에 따른 시공단계별 처짐량

4. 결론

본 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 교량설계시 콘크리트의 재료 물성치의 특성이 거동 예측에 얼마나 영향을 미치는가를 해석예제를 통하여 분석, 고찰하였다. 분석 및 고찰 결과, 설계시 사용되는 최종 크리프 계수, 건조수축량에 따라 거동예측에서 상당한 차이가 유발됨을 알 수 있다. 한편,

각 지방서의 장기거동 모델 규정에 의해 해석한 결과, ACI 209방법에 의한 시공단계별 예측처짐량이 CEB-FIP방법에 의한 값보다 초기 일수에 더욱 급격히 증가함을 나타내었다.

PC 교량 설계시 시공단계를 고려한 처짐해석을 통하여 캠버(camber)량을 산정하고 그 결과에 따라 단계별로 시공이 진행될 때 캔틸레버 팔의 타설곡선(casting curve)을 결정하는 것이 요구된다. 따라서, 캔틸레버공법에 의한 시공중에 각 세그먼트를 붙여 나갈때 그 처짐을 정확히 예측하는 것은 매우 중요하다. 그러나, 콘크리트 재료의 시간의존적 변동성 및 불확실성으로 인해 설계시 예측된 처짐량과 실제 시공시의 처짐량은 차이가 발생할 수 있으며, 주요 콘크리트 교량의 경우 시공중 및 공용시 체계적인 처짐측정이 필요하다고 사료된다.

한편, 설계시 주로 사용되는 콘크리트의 크리프 및 건조수축 예측방법(ACI 209 및 CEB-FIP방법)은 재료 물성치의 변동성에 기인하는 불확실성 때문에 교량의 시간의존적 거동을 정확히 예측할 수는 없다. 따라서 기존의 결정론적 방법에 의한 PC교량의 시간의존적 거동 예측보다는 재료 물성치의 변동성을 확률론적인 측면에서 고찰하여 크리프 및 건조수축에 대해 신뢰성에 근거한 설계 및 거동예측이 좀 더 바람직하다고 사료된다.

참고문헌

1. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures", SP-76, Design for Creep and Shrinkage in Concrete Structures, ACI, Detroit
2. CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, Comite Euro-International Du Beton(CEB), 1978.
3. Bazant, Z. P. and Wu, S. T., "Dirichelet Series Creep Function for Aging Concrete", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.99, No. EM2, April 1973, pp,367-387
4. Bazant, Z. P. , "Mathematical Modelling of Creep and Shrinkage of Concrete", John Wiley & Sons, 1988.
5. Walter Podolny Jr. and Jean M. Muller, "Construction and Design of Prestressed Concrete Segmental Bridges", 1982.
6. Jacques Mathivat, "The Cantilever Construction of Prestressed Concrete Bridges", John Wiley & Sons, 1979.
7. Ketchum, M. A., "Redistribution of Stresses in Segmentally Erected Prestressed Concrete Bridges", Report No. SESM 86-07, University of California at Berkely, May 1986.