

프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 시간의존적 특성에 관한 연구

A Study on the Time-dependent Characteristics of Prestressed Concrete Box-Girder Bridge

윤 영 수*
Yoon, Young Soo

이 만 섭**
Lee, Man Sup

최 한 태***
Choi, Han Tae

ABSTRACT

In designing the prestressed concrete box-girder bridge, the dead load, prestressing force, creep and shrinkage of concrete are the main factors which influence the camber and deflection of segmental concrete structure under construction. Among these factors the creep and shrinkage are the functions of the time-dependent property which, therefore, must be considered with time.

The prediction model for estimating creep and shrinkage of concrete has been suggested by ACI, CEB/FIP, JSCE and KSCE design code and EMM, AEMM, RCM, IDM and SSM has been suggested for analytical method in consideration of the time-dependent characteristics.

In this study, the creep test was carried out for four curing ages of concrete which were applied to the prestressed concrete structure at a construction site, and the results of test were compared to the values of creep prediction by the design code. Also the creep test of step-wise incremental stresses were performed and were compared to analytical methods.

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 시공 중 캠버 및 처짐에 직접적인 영향을 주는 요인으로는 구조물의 사하중을 포함하여 프리스트레싱력 그리고 크리프 및 건조수축을 들 수 있다. 이 중 크리프 및 건조수축은 시간의 경과에 따라 증가하는 시간의 함수이므로 이들에 대한 고려가 반드시 이루어져야 한다.

콘크리트의 크리프 및 건조수축을 예측하는 방법으로는 ACI, CEB/FIP, JSCE 그리고 KSCE 등에서 실험결과를 바탕으로 한 예측모델식을 제안하고 있고, 크리프의 시간경과에 따른 효과를 고려하여 실제 구조물에 있어서의 거동을 해석하는 방법으로는 EMM, AEMM, RCM, IDM 그리고 SSM⁽¹⁻⁴⁾ 등이 사용되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 실제 교량에 적용된 콘크리트의 제작변수와 동일한 시료를 취하여 크리프 및 건조수축 실험을 수행하여 각 규준식⁽⁵⁻⁸⁾과 비교 분석한다. 증가하중에 대한 크리프 실험을 수행하고 구조물의 시간해석 방법들을 이용하여 실험을 통한 모델식과 도로교 시방서의 크리프 예측식인 CEB/FIP-78 모델식을 바탕으로 해석방법에 따른 크리프 변형률을 계산하고 비교하여 그 적합성을 검토하고자 한다.

* 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

** 정회원, 브이 에스 엘 코리아 (주) 기술담당이사

*** 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 대학원

2. 실험

PS콘크리트 박스거더 교량의 크리프 및 건조수축 실험은 ASTM C-512⁽⁹⁾의 규정에 따라 표 1과 같은 온도, 습도, 재령 및 측정주기 등의 조건을 따랐다. 크리프 및 건조수축 실험을 위한 공시체는 PS콘크리트 박스거더 교량 현장에서 제작되어 운반된 후 항온항습실에서 시험하였다. 그림 1은 실험 재료가 사용된 상대3교 PS콘크리트 박스거더 교량의 횡단면도를 나타내었다.

표 1 크리프 및 건조수축 실험 조건

종류	조건	공시체 형상 (cm)	상대 습도 (%)	온도 (°C)	공시체 재령 (일)	변형측정	하중조건
크리프실험		∅15×30	50±4%	23±2°C	3,7,28,90 3(증가하중)	세팅직전, 직후 및 2~6시간 후, 처음 1주일간은 매일 처음 1개월간은 매주 6개월까지는 매달	지정치보다 2%이상 변할 때
건조수축실험		∅15×30 10×10×40	50±4%	23±2°C	3,7,28,90	크리프 실험과 동일한 측정주기로 측정	-

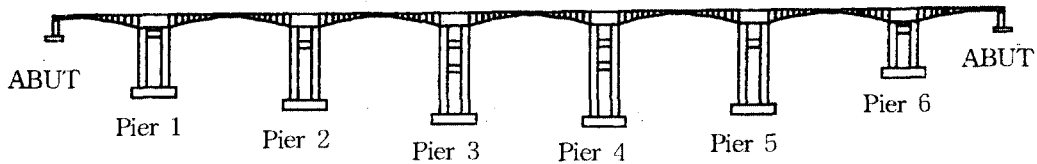


그림 1 PS콘크리트 박스거더 교량의 횡단면도

또한 표 1의 크리프실험에서 시공단계에 따른 5번 세그먼트 단면에 작용하는 시간에 따른 평균 증가하중에 대하여 철근 및 텐던의 영향을 무시하고 재령 3일에서의 콘크리트에 하중을 증가시키면서 총크리프를 측정하였다.

대상 콘크리트의 압축강도와 탄성계수의 측정을 위하여 ASTM C-469⁽¹⁰⁾에 따라 세로방향 변형률이 0.00005일 때의 하중과 극한하중의 40%하중에 대한 변형률을 측정하여 탄성계수를 결정하였다.

본 실험에 사용된 재료는 그림 1에서 보는 바와 같이 상대3교 상행선 Pier 6번의 양쪽 5번째 세그먼트이고, 배합비는 표 2와 같다.

표 2 세그멘탈 교량에 사용된 콘크리트의 배합비(상부공)

설계기준 강도 (kg/cm ²)	최대골재치수 (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Water (kg)	Cement (kg)	공기량 (%)	고유동 화제 (g)	AE 감수제 (g)	Slump (cm)
400	19	30.5	41	163	534	3.5	3738	5340	15

3. 실험결과

표 3은 콘크리트 재령별로 평균압축강도와 탄성계수 측정값을 나타낸 것이고, 그림 2는 압축강도에 따른 탄성계수 값을 국내 콘크리트 표준시방서와 비교한 것이다. 그리고 그림 3과 4는 재령에 따른 비크리프 및 건조수축 값을 나타내었다.

표 3 세그멘탈 교량에 사용된 콘크리트의 배합비(상부궁)

재령 (일)	평균압축강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (×10 ⁵ kg/cm ²)
3	330	2.13
7	454	2.42
28	544	2.68
90	550	2.91

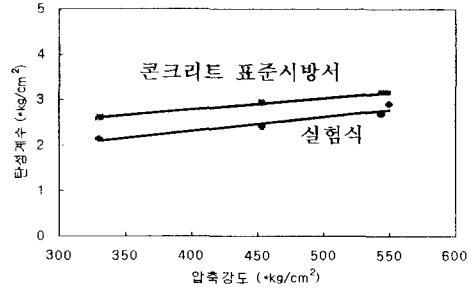


그림 2 공시체 압축강도에 따른 탄성계수

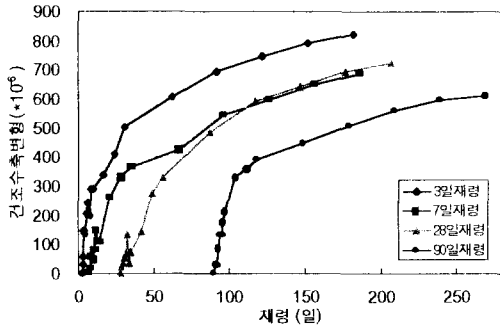


그림 3 재령에 따른 건조수축 변형률

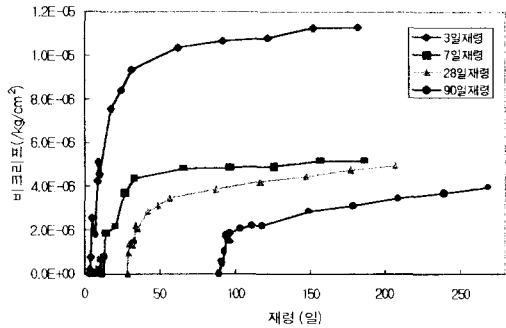


그림 4 재령에 따른 비크리프 변형

그림 2에서 보는 바와 같이 실험에 사용된 콘크리트의 압축강도에 따른 탄성계수 값이 시방서에서 제시하고 있는 값보다 전반적으로 낮은 값을 나타내었고, 크리프 및 건조수축 결과는 하중재하 초기에 변화가 민감하여 결과값이 다소 혼재해 있으나 시간이 오래될수록 안정적인 값을 나타내었다.

4. 크리프 및 건조수축의 각 규준식 비교

실험을 통한 콘크리트의 크리프 및 건조수축 값을 각 규준식과 비교 분석하여 타당성을 검토하였다. 그림 5~12는 각 재령에서의 실험을 통한 건조수축 변형과 콘크리트의 비크리프를 재령에 따라 규준식과 비교해 놓은 것이다.

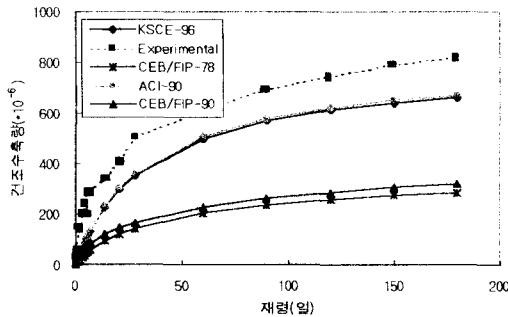


그림 5 3일재령 건조수축 비교

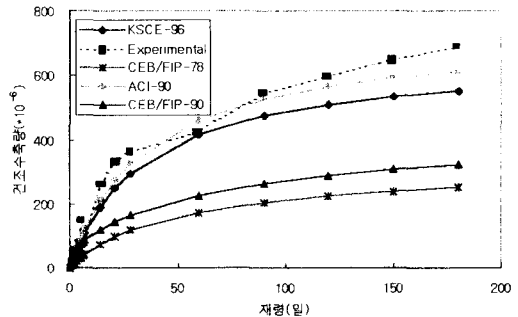


그림 6 7일재령 건조수축 비교

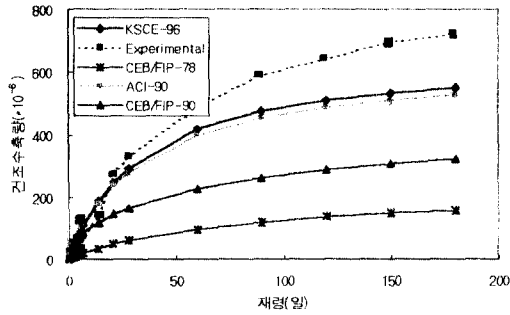


그림 7 28일재령 건조수축 비교

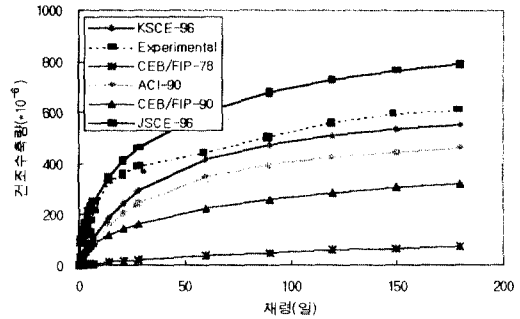


그림 8 90일재령 건조수축 비교

그림 5~8에서 보는 바와 같이 건조수축 변형은 각 기준식 사이에서도 상당한 차이를 보여주고 있으며, 실험값은 이들 기준식보다도 다소 큰 값을 나타내고 있다. 또한 그림 9~12와 같이 콘크리트의 비크리프를 비교해 보았을 때 건조수축과는 달리 다소 낮은 비크리프를 예측하고 있다.

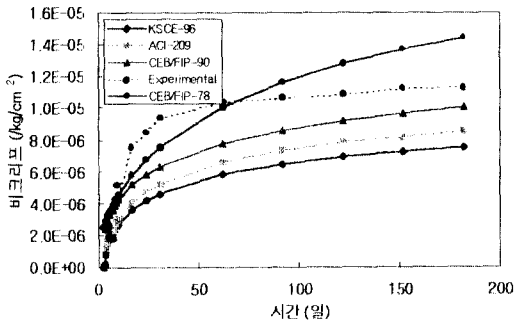


그림 9 3일재령 비크리프 비교

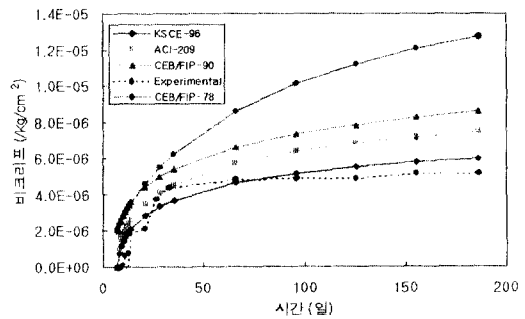


그림 10 7일재령 비크리프 비교

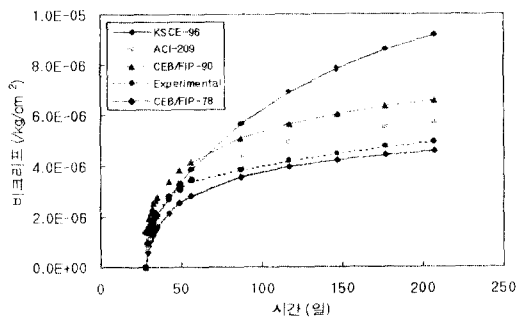


그림 11 28일재령 비크리프 비교

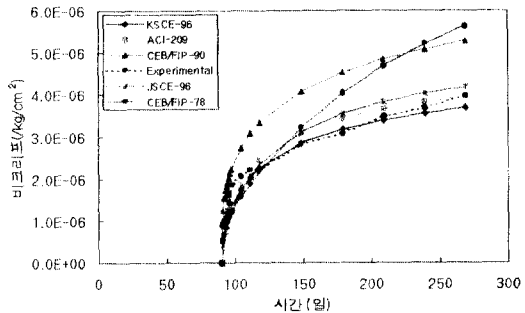


그림 12 90일재령 비크리프 비교

5. 증가하중에 대한 해석방법 비교

그림 13은 증가하중 실험을 통하여 측정된 총변형률을 그래프로 나타낸 것이다. 그림 14는 증가하중에 대한 크리프변형률을 유도하기 위하여 측정된 총변형률로부터 각 재하재령에서의 탄성변형률 및 건조수축변형률을 감산하여 그래프로 나타낸 것이다.

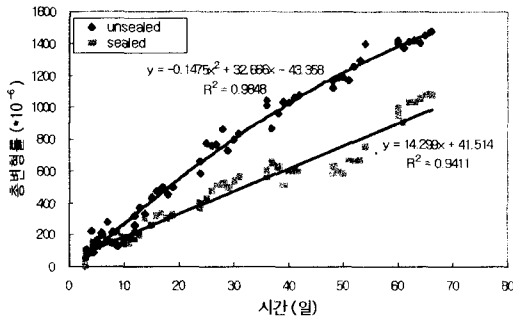


그림 13 증가하중의 총변형률(측정값)

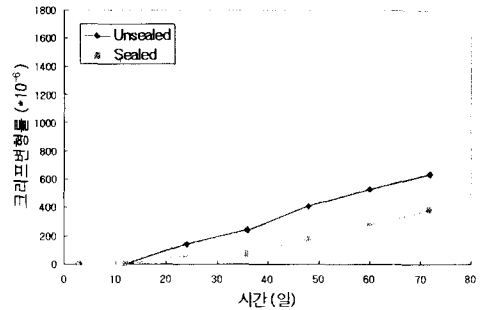


그림 14 증가하중의 크리프변형률

증가하중에 대한 크리프의 시간에 따른 해석을 하기 위하여 그림 9의 3일재령 크리프 실험결과를 바탕으로 비선형 회귀분석을 통하여 다음 식 (1)과 같은 크리프 계수식을 유도하였고, 또한 설계에 바탕이 되는 CEB/FIP-78 예측식도 기본 크리프계수식으로 선정하여 비교 분석하였다.

$$\text{실험모델식 } \phi(t, 3) = \frac{(t-3)}{2.8184 + 0.3993(t-3)} \quad (1)$$

시간해석방법으로 EMM방법은 가장 일반적이고 오래된 방법이다. 이 방법은 콘크리트의 크리프를 지체된 탄성변형도로 파악하고 유효계수 $E_e(t_0)$ 를 사용하여 탄성해석하는 방법이다. AEMM방법은 EMM방법과 같이 탄성해석하는 방법이나 시간이 지남에 따라 콘크리트의 크리프는 감소하는 경향을 가지므로 감소계수(χ)를 두어 EMM을 보완한 방법이다. RCM방법은 시간에 따른 크리프의 변화율이 재하시의 재령과는 무관하다는 가정으로 해석하는 방법으로 재령이 다른 크리프 계수는 초기의 크리프 계수로부터 구하여 계산한다. IDM방법은 크리프변형을 지체된 탄성성분과 회복불가능한 유동성분으로 나누어 해석하고 있으며, 지체된 탄성성분은 재하시의 재령과 무관하며 유동성분의 해석은 RCM과 같은 방법으로 한다.

본 논문에서는 증가하는 하중에 대한 크리프 변형률을 콘크리트의 크리프만을 고려하여 각 해석방법에 따라 구하여 비교하였다. 여기에서 시간에 관계없이 크리프변형이 일정하다는 가정으로 EMM방법을 사용하였고, AEMM에 사용되는 재령계수는 CEB/FIP-78에서 추천하는 식을 사용하여 구하였다. 또한 IDM방법으로 해석할 경우 지체된 탄성크리프계수는 CEB/FIP-78에서 채택된 0.4를 사용하였다.

그림 15와 16은 실험을 통한 크리프계수식과 CEB/FIP-78의 예측모델식을 토대로 각 해석방법에 따라 증가하중에 따른 크리프 변형률을 구하여 비교해 놓은 것이다.

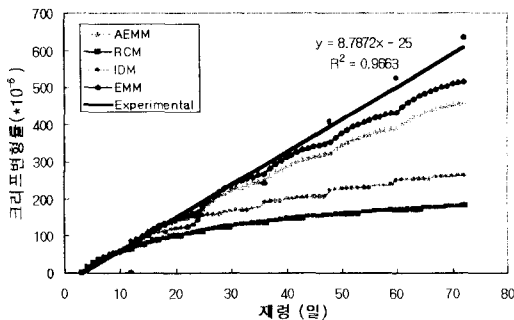


그림 15 실험모델식의 각 해석방법 비교

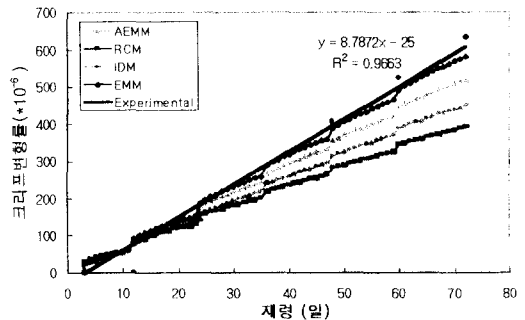


그림 16 CEB/FIP-78모델식의 각 해석방법 비교

국내의 재료를 사용하여 증가하중에 대한 크리프 해석을 할 경우 크리프 변형은 다소 과소평가되는 것으로 분석되며, 이는 프리스트레싱력의 손실과 구조물의 캠버 및 처짐에 직접적인 영향을 줄 수 있으므로 설계시 반드시 검토되어야 한다고 판단된다.

6. 결 론

프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 시간의존적 특성에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 직접 실험한 재료변수를 토대로 각국의 건조수축 예측모델 식을 비교해 보았을 때 각 모델식간에도 상당한 차이가 있음을 알 수 있었고, 실험을 통한 건조수축 값은 각 표준식보다도 큰 값을 나타냄을 알 수 있었다. 특이한 사항은 CEB/FIP-78 예측모델의 경우 재령이 커질수록 건조수축을 상당히 과소평가하고 있다.

(2) 크리프변형은 국내 콘크리트 표준시방서와 상당히 비슷한 모양을 나타내고 있으나 다른 표준식들보다는 다소 낮은 크리프 변형을 보임을 알 수 있었다. 또한 시간에 따른 크리프 변형 모양은 각 표준식에 비하여 초기에 급격하게 변하고 중반으로 갈수록 완만해짐을 알 수 있었다.

(3) 증가하중에 대한 시간해석방법은 크리프 변형을 실제 실험결과보다 다소 과소평가하는 경향을 보여주었고, AEMM이나 EMM해석이 실험결과에 가까운 양상을 보여주었다. 이는 콘크리트의 재령이 오래될수록 크리프는 감소하는 것이 일반적이나 비교적 낮은 응력-강도비에 대하여 지속적으로 증가하는 선행하중을 받는 응력이력의 경우 콘크리트의 크리프는 EMM해석을 바탕으로 크리프가 아주 약간 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다.

(4) 초기재령의 콘크리트의 크리프 특성은 초기에 많은 크리프를 보이고 급격히 감소하는 지수식이나 쌍곡선식으로 잘 표현될 수 있으므로, 이러한 경우 RCM이나 IDM으로 증가하중에 대한 크리프를 해석하는 경우 상당히 과소평가하는 것으로 해석되었다.

(5) 현재 도로교 시방서의 근간이 되는 CEB/FIP-78 크리프 모델식은 실험을 통한 3일재령의 콘크리트 크리프 변형보다 다소 크게 예측하고 있으나, 각 시간해석방법이 과소평가하는 경향을 보이기 때문에 실제 증가하중에 대한 크리프 변형은 오히려 실험결과와 잘 일치하는 경향을 보였다.

(6) 콘크리트의 크리프를 해석하는 여러 방법은 기본이 되는 크리프 계수식을 바탕으로 하기 때문에 보다 정확한 크리프 해석을 하기 위해서는 국내의 재료 및 환경변수에 따른 크리프 변형을 예측할 수 있는 연구가 선행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. Grlbert. R. L., Time effect in concrete structure, Elsevier, 1988, pp. 1-90.
2. Bazant, Z. P., Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method, Journal of ACI, Vol. 69, 1972, pp. 212-217.
3. Bazant, Z. P., and Najjar, J., Comparison of Approximate Linear Methods for Concrete Creep, Proceedings, ASCE, Vol. 99, No. ST9, Sep., 1973, pp. 1851-1874.
4. Bazant, Z. P., and Panula, L., Creep and Shrinkage Characterization for Analyzing Prestressed Concrete Structures, Journal of The Prestressed Concrete Institute, Vol. 12, No. 2, May-June 1980, pp. 86-124.
5. 건설교통부제정, 콘크리트표준시방서, 1996, pp. 8~18.
6. ACI Committe 209, Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effect in Concrete Structure, ACI-SP-76, 1982.
7. CEB/FIP, Model Code 1978, Comite Euro-International du Beton, 1978.
8. CEB/FIP, Model Code 1990, Comite Euro-International du Beton, 1990.
9. ASTM Committee C-9, Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04. 02., C-512-82, 1983.
10. ASTM Committee C-9, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04. 02., C-469-87a, 1983.