

PC 박스거더교량의 시공단계별 비선형 해석 및 후처리 기법

Nonlinear Analysis of the Segmentally Erected Prestressed Concrete Box-Girder Bridges and Post-Processing

오 병환*, 강 영진**, 이 형준***, 이 명규***, 홍 기증***, 김 영진****, 임 선택****
Oh, B.H., Kang, Y.J., Lee, H.J., Lee, M.G., Hong, K.J., Kim, Y.J., Lim, S.T.

ABSTRACT

Recently, a large number of box girder bridges with cantilevered decks have been constructed. Especially, segmentally erected prestressed concrete box girder bridges are widely used as economic and aesthetic solutions for long span bridges. Segmental erection is a particularly attractive construction alternative in cases where continuously supported formwork is impractical or uneconomical.

In segmentally erected bridges, the structural systems are changed as the construction stages are progressive and redistribution of member forces occurs due to time dependent effects of concrete and relaxation of prestressing steel. Then, in segmentally erected bridges, analysis are required at each construction stages.

In this study, nonlinear analysis program of the segmentally erected prestressed concrete box girder bridges is developed in taking into account nonlinearity of material and geometry, time dependent effect of concrete and relaxation of prestressing steel.

1. 서론

최근들어 국토의 효율적 이용 및 경제산업 발전을 위해 고속도로와 도시고속순환도로 등이 활발히 건설됨에 따라 장대교량건설도 증가되고 있다. 이러한 장대교량은 구조물의 내구성, 경제성 및 유지관리의 용이성 때문에 주로 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량형태로 많이 건설되고 있다. 이러한 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량은 경간이 긴 장대교량이므로 주로 세그멘탈 공법으로 시공되고 있다. 따라서, 시공이 진행됨에 따라 구조계가 계속 바뀌기 때문에, 이에 대한 매 시공단계별 해석과 설계가 필요하게 된다.

* 서울대학교 토목공학과 교수

** 계원조형예술학교 학장

*** 서울대학교 토목공학과 대학원

**** (주)대우 건설기술연구소

따라서, 본 연구의 목적은 프리스트레스트 콘크리트 세그멘탈 박스거더 교량의 시공단계별 거동을 합리적으로 예측할 수 있는 진보된 자동화해석 프로그램을 개발하는데 있으며, 이로부터 정밀시공을 위한 토대를 구축한다.

2. 재료의 비선형거동 모델

2.1 개요

콘크리트는 높은 하중하에서는 비선형 거동을 보임과 동시에 인장, 압축에서 다른 거동을 보이고 재령 및 주위 환경에 영향을 받는다. 철근은 비선형 거동을 하며 인장, 압축시의 응력-변형도관계는 대칭적이고, 시간과 주위 환경에 영향을 받지 않는다. 또한, PC 강재는 인장재로만 사용하며 응력-변형도관계는 비선형이다.

철근콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트 뼈대에서 콘크리트와 철근의 합성작용은 합성층 구조를 사용하여 고려하였다.

2.2 콘크리트의 압축거동 모델

2.2.1 단조하중에 의한 응력-변형도 관계

본 연구에서 사용한 단조하중하에서의 콘크리트의 응력-변형도 관계 곡선은 그림 2.1과 같다. 이 곡선의 상승부분은 Saenz가 제안한 식(2.1)을 사용하였으며, 하강부분은 정점에서 압축 파괴까지 식(2.2)와 같은 직선을 사용했다.

○ 상승부분(ascending part)

$$\sigma = \frac{\epsilon E_0}{1 + \left[\frac{E_0}{E_s} - 2 \right] \frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2} \quad (2.1)$$

○ 하강부분(descending part)

$$\sigma = \frac{0.2\sigma_{ck} - \sigma_{ck}}{4\epsilon_0 - \epsilon_0} (\epsilon - \epsilon_0) + \sigma_{ck} \quad (2.2)$$

여기서, E_0 : 초기접선 탄성계수

E_s : 최대 압축응력에서의 secant탄성계수

ϵ_0 : 최대 압축응력에서의 변형도

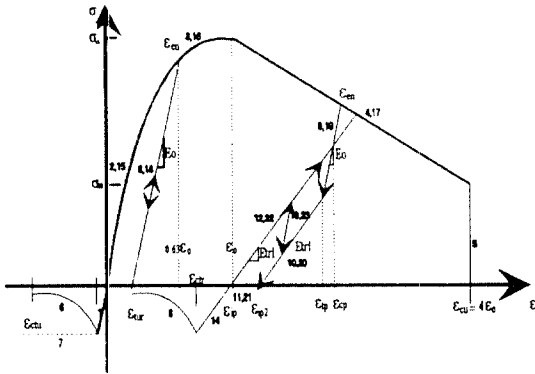


그림 2.1 콘크리트의 응력-변형도 곡선

2.2.2 반복하중에 의한 응력-변형도 관계

반복하중의 작용으로 인한 콘크리트의 강성 감소를 고려할 수 있는 그림 2.1과 같은 응력-변형도 관계곡선을 사용하였다.

이력곡선을 근사화 시킨 모델에서 포락선에서의 변형을 ϵ_{en} 과 모든 하중이 제거된 상태에서 남겨진 잔류변형도 ϵ_{ip} 와 관계는 식(2.3)으로 관계지어진다.

$$\frac{\epsilon_{ip}}{\epsilon_0} = 0.145 \left(\frac{\epsilon_{en}}{\epsilon_0} \right)^2 + 0.13 \left(\frac{\epsilon_{en}}{\epsilon_0} \right) \quad (2.3)$$

여기서, ϵ_p : 소성변형도

ϵ_{en} : 하중제거시 포락선에서의 변형도

ϵ_{cu} : 파괴시의 변형도

2.3 콘크리트의 인장거동

철근과 콘크리트의 부착 등에 의해 균열이 발생한 콘크리트도 어느 정도의 인장응력이 존재하게 되어 철근의 인장응력을 분담하게 되는데 이를 인장증강효과(tension stiffening)라 한다. 따라서 균열이 발생한 철근콘크리트 부재의 해석이나 극한해석에 있어서 콘크리트의 실제 인장거동과 철근콘크리트의 인장증강효과를 고려하여야 철근콘크리트 부재의 실제거동을 표현할 수 있다.

콘크리트의 인장거동은 그림 2.1의 6단계와 같다. 균열이 발생하기 전에는 응력은 변형도에 직접비례하며, 균열발생후의 응력-변형도 관계는 식(2.4)와 같은 사용한다.

$$\sigma = \alpha_1 \alpha_2 \frac{\sigma_{ct}}{1 + \sqrt{500\epsilon}} \quad (2.4)$$

여기서, α_1 = 철근의 부착특성을 고려한 계수,

α_2 = 하상상태를 고려하는 계수

2.4 철근

철근은 시간에 따라 재료의 성질이 변하지 않는 것으로 가정하여, 본 연구에서는 그림 2.2와 같은 bilinear model을 사용하였다.

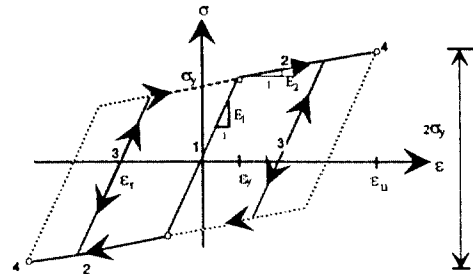


그림 2.2 철근의 응력-변형도 관계

2.5 합성층 구조

뼈대요소에서 각 재료들의 성질을 고려하기 위하여 그림 2.3과 같이 콘크리트와 철근의 층으로 구성된 합성층 구조를 사용한다.

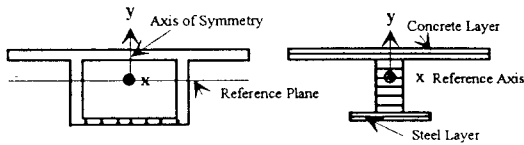
각 층의 단면적 및 기준면으로부터의 거리는 기하적 특성으로 규정하고, 단면에서 각 층은 일축 응력상태로 가정한다. 또한, 콘크리트와 철근은 완전부착된 것으로 가정하고, 내적 힘 벡터나 요소강도행렬을 계산하기 위한 적분은 다음과 같이 각 층별로 수행하여 합한다.

$$\int_V \phi \psi dV = \sum_{i=1}^{n_c} \int_V \phi \psi_i dV + \sum_{i=1}^{n_s} \int_V \phi \psi_i dV \quad (2.5)$$

여기서, ϕ : 형상함수(function of space)

ψ : 재료성질(E_i, σ etc)

n_c, n_s : 콘크리트 및 철근의 층 수



(a) Actual (b) Idealization

그림 2.3 RC 뼈대요소의 합성층 구조

3. 콘크리트의 시간의존적 거동의 모형화

3.1 개요

콘크리트는 그 변형이 시간의존성을 갖고 있으므로 사용하중 상태의 콘크리트 구조물에 대한 연구에서는 크리프, 건조수축, 재령의 시간의존성 영향을 반영하는 것이 중요하다.

3.2 크리프변형도 성분의 수학적 모형화

단위 지속하중을 받는 콘크리트 시편의 변형도 이력능 특성 총 변형도곡선과 비크리프변형도 곡선으로 나타낼 수 있다.

콘크리트의 재령 t_0 (일)에서 발생된 단위지속 응력으로 인한 측정시간(t)에서의 합응력은 크리프함수인 $\Phi(t, t_0)$ 로 다음과 같이 표시된다.

$$\Phi(t, t_0) = \frac{1}{E(t_0)} + C(t, t_0) \quad (3.1)$$

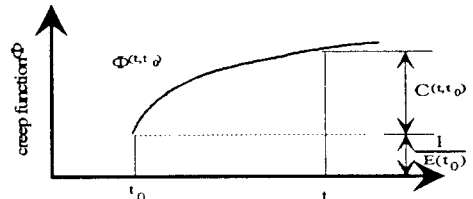
크리프계수는 $\phi(t, t_0) = C(t, t_0) E(t_0)$ 이고, 크리프계수가 콘크리트의 재령 28일에서 탄성변형과 측정시간 t (일)에서 크리프변형과의 비율이라면, 식(3.1)은 다음과 같다.

$$\Phi(t, t_0) = \frac{1}{E(t_0)} + \frac{\phi_{28}(t, t_0)}{E_{28}} \quad (3.2)$$

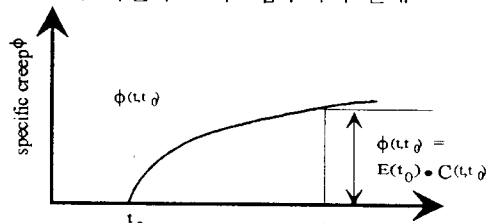
또한, 콘크리트 재령 28일과 임의의 시간 t 에서의 크리프계수의 상관관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi(t, t_0) = \phi_{28}(t, t_0) \frac{E(t_0)}{E_{28}} \quad (3.3)$$

이상의 크리프함수와 크리프계수를 시간과의 관계로 나타내면 그림 3.1과 같다.



(a) 시간과 크리프함수와의 관계



(b) 시간과 크리프계수와의 관계

그림 3.1 크리프함수 및 크리프계수와의 관계

선형 크리프법칙(linear creep law)의 적분형 정식화에서는 총 응력에 의한 변형도는 Volterra 함수로 표현된다. 그러므로 총변형도는 다음과 같이 된다.

$$\epsilon^o(t) = \int_0^t \left[\frac{1}{E(\tau)} + C(\tau, t-\tau) \right] \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \quad (3.4)$$

크리프 변형도의 수치해석에서는 비크리프에 대한 함수의 근사화가 필요하며, 적절한 근사화는 크리프 해석에 매우 중요하므로 가능한 실험 결과와 일치하도록 해야 한다.

본 연구에서는 비크리프 함수를 다음과 같이 정의한다

$$C(\tau, t-\tau, T) = \sum_{i=1}^m a_i(\tau) [1 - e^{-\lambda_i \phi(T)(t-\tau)}] \quad (3.5)$$

여기서, m , $a_i(\tau)$, λ_i , $\phi(T)$ 는 크리프 실험 자료이며, 이들은 기준온도 T_0 , 재하시 재령 τ 일 때 크리프 실험자료로 부터 결정한다. m 을 기지의 값이라 하면 비크리프 함수는 다음과 같이 된다.

$$C(x) = \sum_{i=1}^m a_i (1 - e^{-\lambda_i x}) \quad (3.6)$$

여기서, $x = t - \tau$ 는 재하시 재령 τ 이후에 경과한 시간을 나타낸다.

4. 시공단계의 모형화

4.1 개요

분할시공 방법을 해석하기 위하여 임의의 시간단계에서 구조물의 형상을 변화시킬수 있도록 하며, 이러한 형상변화에는 경계조건의 구속과 이완, 뼈대요소의 추가 또는 제거, 긴장재에 대한 긴장 또는 이완, 작업차(traveler)의 이동 및 절점하중과 요소하중의 작용 또는 제거 등이 포함된다.

4.2 시공단계의 표현

캔탈레버시공, 전진가설법, 압출공법 등 세그멘탈 공법으로 건설되는 PC박스거더 교량은 시공단계별로 해석할 수 있도록 임의 시간단계에서 구조물에 뼈대요소 및 텐던요소를 설치하거나 제거할 수 있고 또한 이동식 거푸집을 구조물에 설치, 이동 및 제거할 수 있으며, 각 절점에서의 경계조건도 변경시킬 수 있도록 한다.

4.2.1 뼈대요소의 설치와 제거

뼈대요소는 전체 평형방정식의 조합에서 이들 요소의 현 강성매트릭스, 사하중, 내력 및 시간의존적 변형도가 고려되면 설치되고 고려되지 않는 경우에는 제거된다. 요소가 설치될 때 정적 해석 시스템을 제공하기 위해서는 요소의 한 단이 구속된 절점이나 이미 다른 뼈대요소에 연결된 절점에 연결되어야 한다. 대부분의 경우에 이 절점은 전 단계의 작용하중에 의해 변위가 발생되어 있는 상태이므로 만약, 뼈대요소의 한 단이 이미 연결되어 있는 다른 뼈대요소의 한단에 연결되어 있지 않으면 이 절점의 변위는 첫번째 절점에 이미 존재하는 변위를 기초로 하여 초기화 한다. 이 초기화 작업은 새로운 요소가 이미 변위가 발생한 절점과 연결되어 강제운동을 한다는 가정 하에 이들 변위들은 프로그램내에서 자동으로 수행된다.

4.2.2 이동식 거푸집의 제거와 설치

작업차는 다음 단계의 전체 평형방정식 조합에서 강성매트릭스, 사하중과 내부응력에 의한 영향을 고려함으로써 특정한 위치에 설치되고 이들의 영향을 고려하지 않으므로써 제거된다. 작업차는 현재의 위치에서 먼저 제거되고 새로운 위치에 자동적으로 이동하여 설치된다.

5 해석 예

5.1 Burn의 PC보 해석

본 연구에서 단조하중 및 반복하중을 받는 부재의 해석 예로 선정된 PC보는 Burn 등이 실험한 부재로 2경간 연속을 갖는 포스트텐션 보(post-tensioned beam)로 보의 PC강재는 부착되지 않았다. 이 부재에 대한 지간, 텐던의 배치 형태 및 구조해석 모델은 그림 5.1과 같다.

본 해석예의 부재의 단면은 콘크리트를 14층으로 분할하였고, 철근은 인장 및 압축축에 배근되어 있으므로 2층으로 분할하였다.

또한, Burn등이 얻은 재하실험와 본 프로그램에 의한 극한해석결과로 얻은 왼쪽지간의 하중작용점에서의 하중-처짐곡선은 그림 5.2와 같다. 이 결과에 의하면 작은 하중이 작용하는 경

우에는 실험에 의한 처짐이 작게 발생하며, 초기 균열이 발생한 이후에는 실험결과보다 해석에 의한 처짐이 더 작게 나타났다. 이와같은 결과는 실험부재는 텐던이 부착되지 않은데 비하여 해석에서는 완전부착으로 하였고, 또한 해석프로그램에서 균열발생이후의 콘크리트의 강성을 크게 고려하기 때문인 것으로 사료된다. 그림 5.3은 반복하중이 작용할때의 하중-처짐곡선으로 실험에 의한 처짐보다 해석에 의한 처짐이 더 작게 발생하는 것으로 나타났다.

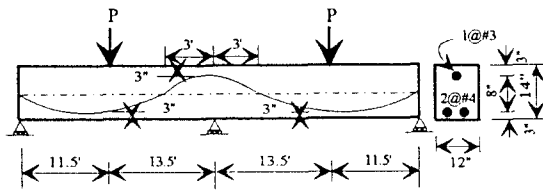


그림 5.1 해석에 사용한 Burn etl PC보

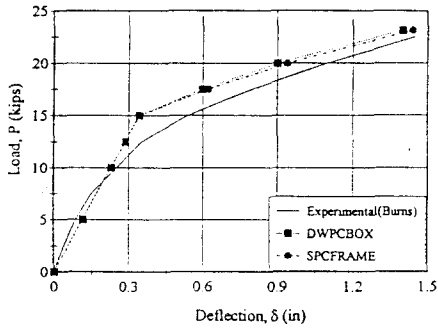


그림 5.2 단조하중 작용시의 하중-처짐곡선

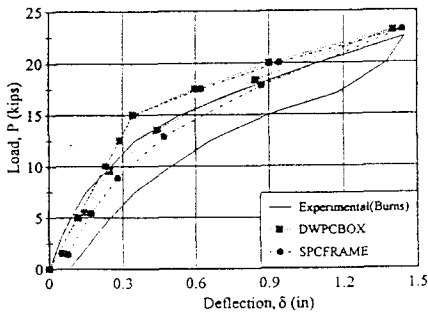


그림 5.3 반복하중 작용시의 하중-처짐곡선

5.2 Choudhury bridge의 해석

본 연구에서 장기거동 및 극한해석의 예로 선정된 Choudhury bridge는 3경간 연속을 갖는 포스트 텐션 박스거더(post-tensioned box girder) 교량으로 지간, 텐던의 배치 및 구조해석 모델링은 그림 5.4와 같다. 본 교량은 3경간 연속교로 좌우 대칭인 구조로 되어 있기 때문에 전체교량의 반에 대하여 구조해석을 수행하였으며, 교량단면은 콘크리트를 10층, 철근을 5층으로 분할하였다.

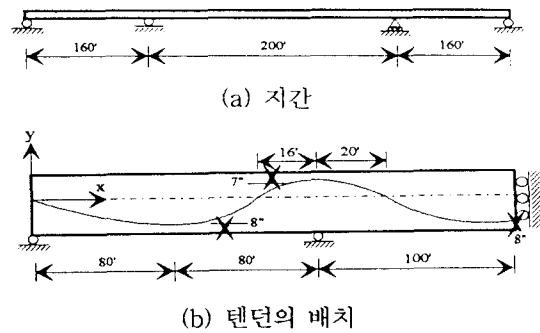


그림 5.4 Choudhury bridge 및 해석모델

5.2.1 장기거동 해석

프리스트레싱에 의해 발생하는 10000일 이후의 생긴 장기처짐을 나타내면 그림5.5와 같다. BP모델은 다른 모델에 비해 가장 큰 장기처짐을 주고 ACI모델이 가장 작은 장기처짐을 주는 것으로 나타났다. 우리나라도로교시방서 및 CEB-FIP90모델은 위의 두 값 사이에 존재한다.

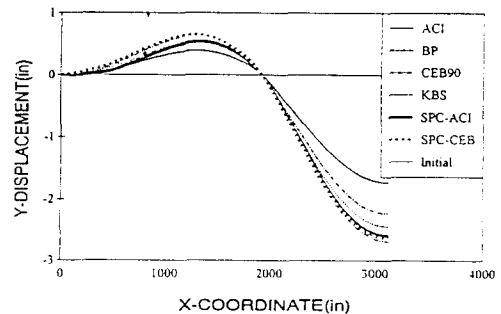


그림 5.5. 각 모델에 따른 장기처짐 계산 결과

5.2.1 극한해석

Choudhury bridge의 극한해석 결과는 그림 5.6과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 NAPBOX 프로그램에 의한 결과와 본 프로그램에 의한 결과는 거의 일치하고 있다.

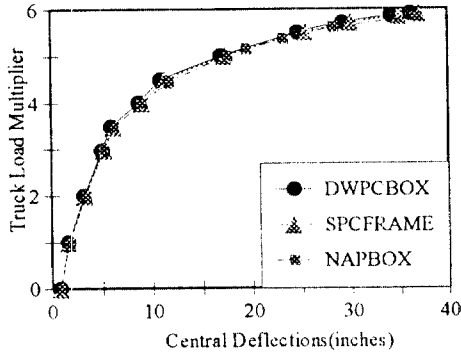


그림 5.6 Choudhury bridge의 극한해석 결과

6. 결론

최근들어 급격히 증가하고 있는 PC장대교량 즉, 프리스트레스트 콘크리트 세그멘탈 박스거더 교량의 시공단계별 거동을 합리적으로 예측할 수 있는 프로그램의 개발이 절실히 요구되고 있다. 본 연구에서는 PC교량의 각 시공단계별 거동의 변화와 콘크리트 및 PC강재 등의 특성 그리고 프리스트레싱 과정 등을 종합적으로 고려한 PC 세그멘탈 박스거더 교량의 해석 프로그램을 개발하여, 이로부터 정밀시공을 위한 토대를 구축하고자 하였다.

이를 위하여 본 연구에서는 교량의 재료비선형 및 기하비선형을 고려한 구조해석을 위하여 부재단면은 층상구조를 갖는 평면뼈대요소로 정식화하였다. 시공단계 해석을 위해 경계조건 및 하중의 변경과 뼈대요소의 설치 및 제거가 가능하도록하여 분할시공되는 교량의 모델에 유효하게 적용시킬 수 있게 하였으며, 시공단계와 사용하중단계에서의 구조물의 거동을 예측할 수 있을 뿐만 아니라 탄성, 균열, 비탄성 및 극한 영역을 고려한 해석도 가능하게 하였다.

또한, 본 연구에서는 콘크리트의 단조 및 반

복하중하에서의 비선형 거동 및 콘크리트의 시간의존적 성질을 고려한 PC박스거더 교량의 장기거동 해석을 위한 해석모델을 비교분석하였으며, 이를 프로그램에 적용시켰다.

참고문헌

1. Choudhury, D., "Analysis of Curved Nonprismatic Reinforced and Prestressed Concrete Box Girder Bridges", Report No. UCB/SEMM86/13, Dec., 1986
2. Young-Jin Kang, "Nonlinear Geometric, Material and Time Dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Frames", Report No. UCB/SESM 77-1, Jan., 1977
3. Young-Jin Kang, "SPCFRAME - Computer Program for Nonlinear Segmental Analysis of Planar Prestressed Concrete Frames", Report No. UCB/SESM 89/07, Feb. 1989
4. Darwin D., and D.A.W. Pecknold, "Inelastic Model for Cyclic Biaxial Loading of Reinforced Concrete," Univ. Ill. Civ. Eng. Stud. SRS 409, July, 1974.
5. Collins, M.P. and Mitchel, D., "Prestressed Concrete Structures", Prentice-Hall, 1991
6. Burns, N.H., Helwig, T., and Tsujimoto, T., "Effective Prestress Force in Continuous Post-Tensioned Beams with Unbonded Tendons", ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 1, Jan.-Feb., 1991, pp.84-90
7. 강 영진, "콘크리트구조물의 시간의존성변형에 대한 해석", 대한토목학회 논문집, 제3권, 제4호 1983.12
8. 강 영진, "철근콘크리트 평면뼈대구조물의 비선형해석", 대한토목학회 논문집, 제3권, 제4호, 1983.12
9. 박 찬민, "시공단계를 고려한 곡선변단면 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량해석", 공학박사학위 논문, 서울대학교 토목공학과, 1993