

대변위를 고려한 곡선 프리스트레스트 콘크리트 사장교의 비선형 해석

Nonlinear Analysis of Curved Prestressed Concrete Cable-Stayed Bridge due to Large Deflection

이재석* 최규천**
Lee, Jae Seok Choi, Kyu Chon

ABSTRACT

A study for the nonlinear analysis of segmentally erected curved PSC (prestressed concrete) cable-stayed bridge considering the effects due to large deflections is presented. Various case studies regarding the effects of the material nonlinearities and the geometric nonlinearities on the behavior of segmentally erected curved PSC cable-stayed bridge are conducted. The numerical results on the bridge which has relatively low stress profile through the bridge deck section like the example herein show that the geometric nonlinearities has more significant effects on the structural behavior than the material nonlinearities.

Keyword : material nonlinearity, geometric nonlinearity, segmental analysis, time-dependent nonlinear analysis, curved PSC cable-stayed bridge

1. 서론

PSC (prestressed concrete) 사장교는 단계별로 현장타설을 통하여 시공되거나 공장에서 제작된 프리캐스트 세그먼트를 순차적으로 연결해 나가는 세그먼트 공법에 의해 시공되는 경우가 대부분이다. 세그먼트 공법으로 시공되는 교량은 시공의 진행에 따라 인접부재간의 재료성질이 다를 뿐만 아니라 기하학적 비선형성과 재료의 비선형성 및 시간의존적 특성의 영향으로 인하여 구조물이 처짐이 계속적으로 변화하고 단면 내의 응력이 재분배되어 매우 복잡한 구조적 거동을 보이게 된다. 따라서 순차적으로 시공되는 PSC 사장교의 구조적 거동을 정확히 예측하기 위해서는 각 시공단계에서 재료의 비선형성과 기하학적 비선형성 및 재료의 시간존적 특성에 의한 영향을 모두 고려한 해석이 필요하다.

이 논문에서는 저자들이 개발한 단계별로 시공되는 케이블지지 PSC 뺑대의 비선형 해석 프로그램을 이용하여 순차적으로 시공되는 곡선 PSC 사장교의 정적거동 해석에 있어서 재료의 비선형성과 기하학적 비선형성의 고려 여부가 해석결과에 미치는 영향을 검토함으로써 곡선 PSC 사장교의 구조적 거동을 정확하게 예측할 수 있는 해석방법에 대해 살펴보려고 한다.

2. 구조요소 모델 및 재료의 비선형 모델

이 논문에서 곡선 PSC 사장교의 해석을 위해 사용한 구조요소와 재료의 비선형 모델은 참고문헌 (1)에 자세히 설명되어 있으며 간략히 살펴보면 다음과 같다.

* 정회원, 충북대학교 구조시스템공학과 교수
** 충북대학교 구조시스템공학과 대학원

곡선 PSC 사장교를 이상화하기 위한 구조요소로서 콘크리트와 보강철근으로 구성된 뼈대요소와 PS 강재요소 및 곡선케이블요소를 고려하였다. 뼈대요소는 임의의 단면형상이 가능하나 길이방향으로 단면의 변화가 없는 3절점 직선요소로 가정하였고, 각 요소의 양 절점은 x, y, z방향 변위와 회전변위를 포함한 6개의 자유도를 가지고, 중앙절점은 x방향 변위에 대해 1개의 자유도만 가진다. 각 요소의 단면은 임의의 단면형상을 표현하고 단면 내에서 변화하는 재료의 성질을 정확하게 고려하기 위하여 그림 1과 같이 콘크리트와 보강철근 화이버(fiber)로 이상화하였다. PS 강재는 뼈대 내에서 임의의 형태로 배치된 것을 고려하기 위해 뼈대요소의 양 절점에 강제로 연결된 3차원 직선트러스요소로 가정하였으며, 케이블요소는 절점이 2개에서 4개까지 가능한 곡선케이블요소로 이상화하였다.

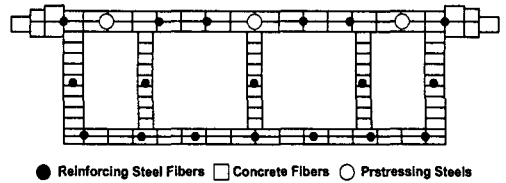


그림 1 PSC 합성단면의 이상화

곡선 PSC 사장교의 비선형 거동을 정확하게 예측하기 위한 재료 모델로서 콘크리트는 비선형 응력-변형률 곡선을 Kent²⁾와 유사하게 포물선-직선-직선 모델로 가정하였으며, 인장균열과 하중반전을 고려하였다. 콘크리트의 시간의존적 특성으로 크리프와 건조수축 및 강도증가를 고려하였다. 보강철근의 비선형 응력-변형률 곡선은 이중직선(bilinear) 모델로 가정하였고, PS 강재와 케이블의 비선형 응력-변형률 곡선은 다중직선(multilinear) 모델로 가정하였으며 시간의존적 특성으로 이완(relaxation)을 고려하였다.

3. 해석 예

그림 2(a)와 같이 상판이 케이블에 의해 압박에 지지된 형태의 곡선 PSC 사장교를 대상으로 시공 중의 각 단계에서 재료의 비선형성과 기하학적 비선형성의 고려 여부가 순차적으로 시공되는 곡선 PSC 사장교의 해석결과에 미치는 영향을 검토하였다. 이 예제는 Abbas³⁾에 의해서도 해석된 바 있으며, 교량의 제원과 재료의 성질 및 하중조건은 Abbas와 동일하게 가정하였다. 상판은 그림 2(b)와 서로 다른 5개의 단면으로 가정하였으며, 대표단면 E는 그림 2(c)와 같다. 시공순서는 시공일력 7일에 세그먼트 두 개를 지점부에 설치하고 PS 강재를 긴장하는 것으로 시작하며 이후의 시공단계부터는 7일 간격으로 세그먼트 하나와 케이블 두 개씩 붙여나가는 것으로 하였다. 시공일력 154일에 상판의 중앙을 연결하고 PS 강재를 긴장한 후에 보조 케이블을 제거하여 시공을 완료하는 것으로 하였다. 시공이 진행되는 동안에 상판의 처짐이나 케이블의 장력은 보장하지 않는 것으로 가정하였다.

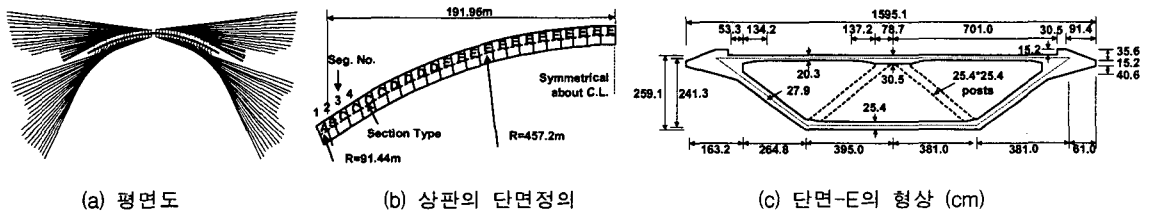


그림 2 곡선 PSC 사장교의 기하학적 형상 및 상판의 단면정보

이 논문에서는 기하학적 비선형성으로서 축력에 의한 기하강도행렬과 대변위에 의한 구조물의 위상변화 및 축방향 변형률의 2차 항을 고려하였으며 이들을 모두 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 각각 GNL과 GL로 표시하고, 재료의 비선형성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에는 MN과 ML로 표시하였다.

그림 3과 4에는 시공이 완료된 직후에 상판의 연직방향 처짐과 횡방향 처짐을 나타냈다. ML-GL, ML-GNL, MN-GL을 고려한 해석에서 연직방향 최대 처짐은 재료의 비선형성과 기하학적 비선형성

(MN-GNL)을 모두 고려한 해석의 -66.78 cm보다 각각 28.6%, 2.2%, 27.0% 작게 나타났고, 횡방향 최대 처짐은 MN-GNL을 고려한 해석의 -15.65 cm보다 각각 9.8%, 2.1%, 7.9% 작게 나타났다.

그림 5와 6에는 시공이 완료된 직후에 상판의 연직방향 모멘트와 횡방향 모멘트를 나타냈다. ML-GL, ML-GNL, MN-GL을 고려한 해석에서 지점부의 연직방향 부모멘트는 MN-GNL을 고려한 해석의 -2.22×10^5 kN·m보다 각각 2.4%, 0.1%, 2.3% 크게 나타났고, 횡방향 부모멘트는 MN-GNL을 고려한 해석의 -1.91×10^5 kN·m와 각각 -1.9% , 1.0% , -2.9% 의 차이를 보였다.

그림 7과 8에는 시공이 진행되는 동안 지점부의 외측(곡률중심 반대방향)상부 콘크리트 화이버의 응력 변화와 시공이 완료된 직후에 내측(곡률중심방향) 케이블의 장력을 나타냈다. ML-GL, ML-GNL, MN-GL을 고려한 해석에서 외측상부 콘크리트 화이버의 압축응력은 MN-GNL을 고려한 해석의 -7.78 MPa과 각각 -1.4% , 1.6% , -2.8% 의 차이를 보였다. 케이블의 장력의 경우는 18번 세그먼트에 정착된 케이블에서 가장 큰 차이를 보였으며, ML-GL, ML-GNL, MN-GL을 고려한 해석에서 18번 세그먼트에 정착된 케이블의 장력은 MN-GNL을 고려한 해석의 $2,429$ kN과 각각 -1.1% , -0.1% , -1.1% 의 차이를 보였다.

이 예제의 결과를 살펴보면, 재료의 비선형성은 곡선 PSC 사장교의 구조적 거동에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 반면, 기하학적 비선형성은 상판의 처짐에 상당히 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며, 상판의 모멘트와 콘크리트의 응력 및 케이블의 장력에는 재료의 비선형성보다는 상대적으로 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 재료의 비선형성이 곡선 PSC 사장교의 거동에 작은 영향을 미친 이유로는 콘크리트의 최대 압축력이 압축강도의 25% 이내에 있고, 보강철근과 PS 강재 및 케이블의 재료상태가 선형영역에 있기 때문에 재료의 비선형성에 의한 영향이 상대적으로 작게 반영되었기 때문이다.

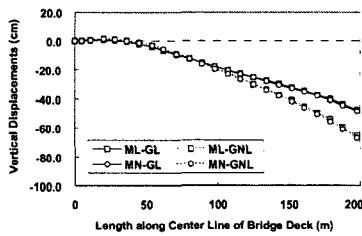


그림 3 상판의 연직방향 처짐

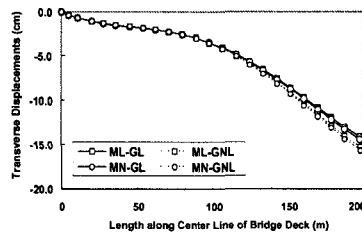


그림 4 상판의 횡방향 처짐

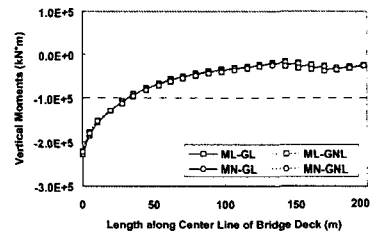


그림 5 상판의 연직방향 모멘트

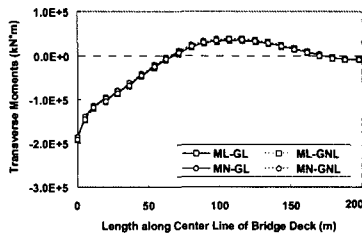


그림 6 상판의 횡방향 모멘트

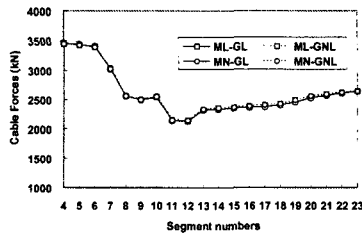


그림 7 콘크리트 화이버의 응력변화

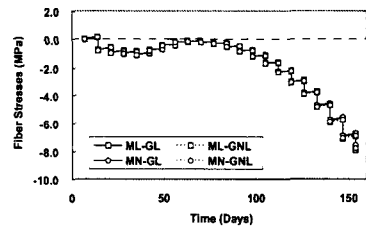


그림 8 내측 케이블의 장력

이어서 재료의 비선형성과 기하학적 비선형성의 고려 여부가 활하중이 재하된 곡선 PSC 사장교의 구조적 거동에 미치는 영향을 검토하기 위해 시공이 완료된 이후에 활하중을 차선 당 12.7 kN/m씩 두 차선에 재하하여 해석을 하였다. 그림 9~11에는 상판의 연직방향 처짐과 횡방향 처짐 및 3번 세그먼트의 내측(곡률중심방향)하부 콘크리트 화이버의 응력을 나타냈다. ML-GL, ML-GNL, MN-GL을 고려한 해석에서 활하중이 재하되었을 때의 연직방향 최대 처짐은 MN-GNL을 고려한 해석의 -135.86 cm보다 각각 16.5%, 1.2%, 15.6% 작게 나타났고, 횡방향 최대 처짐은 MN-GNL을 고려한 해석의 -18.03 cm보다 각각

17.9%, 3.0%, 15.3% 작게 나타났다. 또한 ML-GL, ML-GNL, MN-GL을 고려한 해석에서 3번 세그먼트의 내측하부 콘크리트 화이버의 압축응력은 MN-GNL을 고려한 해석의 -13.7 MPa보다 각각 7.1%, 4.3%, 2.6% 크게 나타났다. 이 결과를 볼 때, 곡선 PSC 사장교에 활하중이 추가되면서 재료의 비선형성이 구조물의 거동에 미치는 영향은 다소 증가하였으나 기하학적 비선형성이 구조물의 거동에 미치는 영향보다는 여전히 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

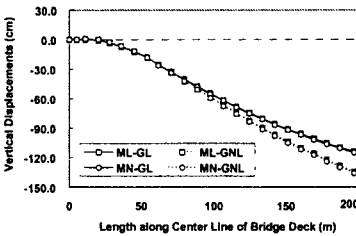


그림 9 활하중 재하 시에 상판의 연직방향 처짐

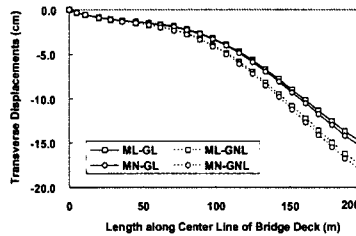


그림 10 활하중 재하 시에 상판의 횡방향 처짐

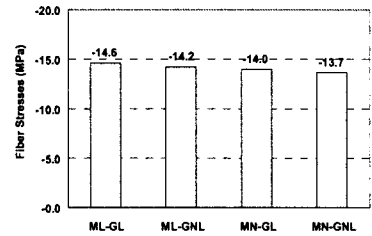


그림 11 3번 세그먼트의 내측하부 콘크리트 화이버의 응력

4. 결론

이 논문에서는 순차적으로 시공되는 곡선 PSC 사장교의 정적거동 해석에 있어서 재료의 비선형성과 기하학적 비선형성의 고려 여부가 해석결과에 미치는 영향을 검토하기 위해 다양한 해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 이 논문에서 다룬 곡선 PSC 사장교의 경우, 시공단계 해석에서 재료의 비선형성은 구조물의 거동에 큰 영향을 주지 못 하는 것으로 나타났다. 반면, 기하학적 비선형성은 상판의 처짐에 상당한 영향을 주었으며, 상판의 모멘트와 콘크리트 응력 및 케이블의 장력에도 재료의 비선형성보다 상대적으로 큰 영향을 미침을 확인하였다.
- 2) 곡선 PSC 사장교의 시공이 완료된 이후에 활하중을 추가로 재하하였을 경우에는 사하중만 재하하였을 경우보다 재료의 비선형성이 구조물의 거동에 미치는 영향이 다소 증가하였으나 여전히 기하학적 비선형성에 의한 영향보다는 상대적으로 작게 작용함을 알 수 있었다.
- 3) 이 예제와 같이 사하중 및 사용하중 재하시의 상판의 단면의 응력이 상대적으로 작은 경우에는 재료의 비선형성의 고려 여부가 구조물의 거동에 큰 영향을 주지 않기 때문에 기하학적 비선형성만을 고려한 해석으로도 곡선 PSC 사장교의 시공단계 뿐만 아니라 사용하중이 재하된 상태에서의 구조적 거동을 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. 이재석, 최규천, “3차원 프리스트레스트 콘크리트 뼈대의 비선형 해석”, 대한토목학회논문집, Vol 25, No. 1A, 2005, pp.163~172.
2. Kent, D.C. and Park, R., “Flexural members with confined concrete”, *Journal of the structural division*, ASCE, Vol. 97, No. ST7, 1971, pp.1969-1990.
3. Abbas, S., “Nonlinear geometric, material and time dependent analysis of segmentally erected, three dimensional cable stayed bridges”, Report No. UCB/SEMM-93/09, Department of Civil Engineering, University of California Berkeley, 1993.