

사장교의 초기형상해석을 위한 개선된 초기부재력법 및 TCUD법의 비교연구

Comparison Study of An Improved Initial Force and TCUD Method for Initial Shape Analysis of Cable-Stayed Bridges

김 동 영* 조 경 식* 김 문 영†
Kim, Dong-Yeong Jo, Kyeong-Sik Kim, Moon-Young

요 지

사장교 시스템의 초기형상해석이라 함은 주형의 수직 처짐과 휨모멘트, 주탑의 수평변위와 휨모멘트를 최소화하면서, 고정하중과 평형을 이룰 수 있는 케이블의 장력과 무응력길이를 결정하는 방법으로 이 때, 케이블이 정착되는 주형의 수평위치, 주탑의 수직위치가 목표형상에 부합할 필요가 있다. 본 연구에서는 고정하중을 받는 사장교의 초기형상을 효율적이고 합리적으로 결정하기 위하여 개선된 초기부재력법과 TCUD법의 비교연구 결과를 제시하고자 한다. 주형과 주탑의 케이블 정착부에서 힘의 평형조건을 이용하여 주형의 수직처짐과 주탑의 수평변위를 효과적으로 제어할 수 있는 절점평형법을 초기 부재력법에 적용하여 초기치에 민감한 기존 초기부재력법을 개선한다. 또한 개선된 TCUD법을 이용한 초기형상해석 수행결과와 비교함으로써 두 방법의 정확성을 입증하고자 한다.

핵심용어 : 사장교, 초기형상해석, 비선형해석, 초기부재력법, TCUD법

Abstract

Initial shape analysis for cable-stayed bridges should be able to find optimized initial cable forces and unstrained length that minimize deflection and bending moments of the deck and pylon. Comparison study of an improved initial force method and TCUD method for determination of initial cable forces in cable-stayed bridges is presented in this paper. For this purpose, an elastic catenary cable element and a nonlinear frame element are firstly described. And concepts and algorithm of two analysis methods are then presented. Finally to demonstrate the validity and the accuracy of two methods, numerical examples for initial state problems of cable-stayed bridges are given and compared based on these methods.

Keywords : cable-stayed bridges, initial cable force, nonlinear analysis, initial force method

1. 서 론

사장교의 설계 시 가장 먼저 수행해야 하는 것은 대상교량의 고정하중에 의한 교량의 초기형상을 결정하는 것이다. 대상교량의 고정하중에 의한 교량의 초기형상해석을 수행함으로써, 교량의 최종 구조형상과 시공시의 단계별 구조계의 변화를 철저히 예측해야 한다. 여기서, 초기형상의 결정이라 함은 완성된 구조계에서 고정하중에 의해 발생하는 케이블지지교량의 주형 및 주탑에 발생하는 휨모멘트와 변위가 최소

화되면서 고정하중과 평형을 이룰 수 있는 케이블 장력과 무응력길이를 결정하는 것을 말한다.

일반적으로 케이블은 새그의 효과, 보-기둥 효과, 대변형 효과 같은 비선형성을 고려하여야 한다. 특히 케이블거동을 정확하게 나타내기 위해 Irvine(1981)의 자중을 받는 2차원 탄성현수선이론이 제시되었으며, 이를 바탕으로 탄성현수선 케이블요소는 사장교의 사장재 및 현수교의 주케이블을 모델링하기 위해 많은 연구자들이 사용하였다.

현재까지 연구된 초기형상결정법에는 시산법(Karoumi,

† 교신저자, 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 정교수
Tel: 031-290-7514 ; Fax: 031-299-4259
E-mail: kmye@skku.edu

* 성균관대학교 초고층강대교량학과 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1999), 초기부재력법(Wang, 1993; 김계춘 등, 1999), 그리고 TCUD(Kim 등, 2001)해석법 등이 있다. 시산법은 케이블 장력을 알기 위해 설계자가 케이블 장력을 변화시켜가며, 반복계산을 수행하는 방법으로 많은 시간이 필요하지만 비교적 정확한 초기형상을 구현하기가 어렵다. 초기부재력법은 해석 처음 단계에서는 초기부재력이 없는 상태에서 비선형해석을 수행하고, 그 후 단계부터는 전 단계 비선형해석을 통하여 얻어지는 부재력을 초기부재력으로 가정하여 해석 모델에 도입한 후 다시 비선형해석을 반복하여, 가정한 초기부재력에 의하여 원하는 초기형상을 찾아질 때까지 비선형해석을 반복하는 해석방법을 의미한다. Wang 등(1993)은 초기부재력법을 이용하여 사장교의 초기형상을 결정하였다. 이때 케이블의 장력은 Ernst의 등가트러스요소를 사용하여 보정하였다. 이후 탄성현수선 케이블요소와 박벽보-기둥요소를 사용하여 모델링하고 실제에 가까운 초기 장력값을 구하여 사장교의 초기형상을 결정하는 초기부재력법을 개발하였다(김계춘 등, 1999). 하지만 초기부재력법을 이용한 해석법은 초기장력 크기에 민감하다는 단점이 있다.

TCUD해석법은 탄성현수선 케이블요소와 보-기둥요소를 이용하였다. 이 방법은 초기부재력 방법과는 달리, 케이블의 무응력길이를 변수로 추가하고 그 개수에 해당하는 절점변위를 구속하여 초기형상해석을 수행하였다(Kim 등, 2001). TCUD해석법은 초기 장력크기에 민감하지 않지만 사장교의 경우 주형과 주탑의 압축력으로 인한 변위를 제어할 수 없다. 이후 TCUD해석법과 초기부재력법을 효과적으로 결합시킨 개선된 TCUD(I.TCUD) 해석법(김문영 등, 2003)이 제시되었다. 이 방법은 기존의 TCUD해석법을 이용하여 보강형의 수직처짐, 주탑 상부의 수평변위를 제어하고, 초기부재력법을 적용하여 보강형 및 주탑의 축방향 변위를 제어하여 설계자의 의도에 적절한 초기형상해석을 수행하였다.

본 연구에서는 사장교의 초기형상 결정시 고정하중 하에서 사장교의 주형의 처짐과 휨모멘트가 최소화되어야 한다는 설계조건과 케이블 정착부에서 힘의 평형조건을 이용하여 사장교의 무응력장을 간략하게 계산하고 이를 초기치로 이용한 초기부재력법을 실시함으로써 기존 사장교의 초기치해석법들의 단점을 보완한 개선된 초기 부재력법을 제안하고자 한다. 또한 제시한 방법을 실교량모델에 적용하고, 비교적 정확한 결과를 주는 개선된 TCUD법의 결과와 비교하여 그 실효성 및 정확도를 검증하고자 한다. 뿐만 아니라 절점평형법에 의한 무응력장 외에 개선된 TCUD법에 의한 무응력장의 적용을 통해 개선된 초기부재력법의 결과가 타당한지를 분석하였다.

2. 초기치해석을 위한 사장교의 유한요소모델링

이 연구에 사용된 사장교 시스템의 기하비선형해석을 수행하는데 필요한 탄성현수선 케이블요소와 프레임요소는 Jayaraman 등(1981), 안상섭(1991), 김문영(1993), 그리고 김문영 등(1998)의 연구성과를 적용하였다.

탄성현수선 케이블이론은 Irvine(1981)에 의해 개발되었으며 케이블의 신장량과 현수선형태의 처짐형상을 정확히 묘사할 수 있다. 요소의 두 절점 사이의 상대적위치에 대한 적합조건으로부터 절점력과 무응력길이를 미지수로 가지는 비선형 연립방정식을 얻는다. 이 식에 기초하여 부재의 상태결정(state determination)이 이루어지고 엄밀한 접선강도행렬을 구성할 수 있다. 이때 무응력길이를 상수로 취급하면 초기부재력법의 강도행렬이 되고, 무응력길이를 추가적인 변수로 취급하면 TCUD법을 위한 강도행렬을 얻게 된다.

한편 휨에 의한 길이변화효과와 $P-\Delta$ 효과를 합리적으로 고려하는 비선형 프레임요소가 주거더 및 주탑을 모델링하는데 사용된다. 다만 기하학적 비선형해석에 기초한 초기치 반복해석 시 주거더 및 주탑의 절점위치가 목표형상에 부합하도록 수렴된 결과에서 부재 축방향력만을 초기 부재력으로 취하고 고정하중 하에서 새로운 반복해석을 수행하게 된다.

3. 개선된 초기부재력법

사장교의 그 구조적인 특성으로 인하여 주형과 주탑에 큰 압축력이 작용하게 되며, 이로 인해 사장교의 주형과 주탑이 수평 및 수직방향의 변위를 수반하기 때문에 설계목적에 부합하는 초기형상을 찾기 어렵다. 따라서 사장교에 적용하는 초기부재력법은 이러한 변위를 최소화하기 위하여 기하학적 비선형해석에 의하여 수렴한 부재력 즉, 케이블의 장력, 축력 등을 다시 초기부재력으로 사용하고, 모든 절점변위는 영으로 취한 상태에서 고정하중의 작용하의 새로운 평형형상을 결정하는 비선형해석을 재차 수행한다(김계춘 등, 1999; 경용수, 2002).

이렇게 하여 가정한 초기부재력에 의하여 원하는 초기형상을 찾아질 때까지 비선형해석을 반복하게 되며, 이와 같은 과정을 몇 번 반복하면 주형의 처짐과 주형 및 주탑의 휨모멘트가 감소하여 완성계의 초기형상 가정에 근접하는 해를 얻을 수 있다. 초기부재력법은 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} {}^k K^{(i-1)} \Delta U^{(i)} &= R + {}^{k-1} F^* - F^{(i-1)} \\ U^{(i)} &= U^{(i-1)} + \Delta U^{(i)} \\ L_o^{(i)} &= L_o^{(i-1)} \end{aligned} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots ; k = 1, 2$$

$$\text{초기조건} : {}^k U^{(0)} = 0; {}^k K^{(0)} = K({}^k F^*); {}^k F^{(0)} = 0$$

여기서, 위첨자 k =고정하중을 다시 재하하는 횟수; kF^* 는 $k-1$ 번째 단계에서 수렴된 주형과 주탑의 축방향력으로 구성되는 절점력벡터이다. 특히 각 케이블요소의 무응력길이는 반복계산과정에서 변화하지 않는다는 점에 유의하여야 한다. 왜냐하면 개선된 초기부재력법은 미리 무응력길이를 합리적으로 결정(본 연구는 “절점평형법” 또는 “개선된 TCUD법의 최종해”로부터 구해진 무응력길이 적용)하고 통상적인 Newton-Raphson방법으로 기하비선형해석을 수행하기 때문이다.

초기부재력법은 최적화된 초기형상에 근접하는 초기케이블장력값을 얻을 수 있어야 정확도를 향상시킬 수 있다. 즉, 초기부재력법은 초기케이블장력 값에 민감하여 수렴성의 문제를 내포하고 있으며, 축방향 변위를 감소시키기는 용이하지만 휨모멘트로 인한 변형은 감소시키기 어려운 단점이 있다. 한편 송요한 등(2011)의 연구에서 제시된 절점평형법에 의한 초기상태 결과를 시공단계 해석 등의 비선형해석을 위하여 케이블의 무응력장을 사장교 해석모델에 도입하게 되면, 사장교의 구조적 특성으로 인해 주형과 주탑에 발생하는 압축력으로 인해 각 부재에 탄성수축이 발생하게 된다. 이로 인해 주형의 경우 수평변형이 주탑은 수직 변형이 각각 발생하게 되어 원래 설계자가 의도하였던 목표 초기형상과 다소 편차가 발생하게 된다.

따라서 본 연구에서는 이러한 두 방법의 단점을 상호보완하기 위하여 절점평형법과 4장의 개선된 TCUD법의 결과로 각각 얻어지는 무응력길이를 초기치로 사용하여 초기부재력법을 수행하였다. 이로 인해 초기에 목표하였던 교량의 형상을 정확하게 구현할 수가 있으며, 기존의 초기부재력법이 가지고 있었던 초기치에 대한 민감성도 개선이 가능하게 된다.

절점평형법에 대한 내용은 송요한 등(2011)을 참조하였으며, 개선된 초기부재력법도 일반적인 초기부재력법과 마찬가지로 사장교에서 주탑 및 주형의 축방향 변위를 최소화하기 위하여 기하학적 비선형해석에 의하여 수렴한 부재력 즉, 케이블의 장력, 축력 등을 다시 초기부재력으로 사용하고, 모든 절점변위는 영으로 취한 상태에서 고정하중의 작용하의 새로운 평형형상을 결정하는 비선형해석을 재차 수행한다. 이렇게 하여 가정한 초기부재력에 의하여 원하는 초기형상을 찾아질 때까지 비선형해석을 반복한다.

4. 개선된 TCUD 해석법

TCUD 해석법은 케이블지지 구조물에서 절점변위 이외에 케이블의 초기 장력이나 무응력길이를 미지수로 추가하고, 케이블 부재 개수만큼 절점변위를 구속하여 케이블의 무응력 길이와 장력 등을 효과적으로 결정하는 방법이다.

케이블 및 보-기둥부재의 증분방정식을 이용하고 직접강도법을 적용하면 케이블지지 교량의 전체의 증분평형방정식은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta F = K_t \Delta U + K_l \Delta L_0 \tag{2}$$

여기서, $\Delta F=n \times 1$ 증분외력 또는 불평형하중벡터; K_t, K_l =각각 구조물의 $n \times n$ 접선강성행렬과 무응력길이에 대응하는 $n \times m$ 강성행렬; $\Delta U, \Delta L_0=n \times 1$ 절점변위벡터, $m \times 1$ 무응력길이벡터; n =절점의 총 수 $\times 6$; m =케이블부재의 개수다. 위 식은 조건식에 비하여 미지수가 케이블부재 개수인 m 만큼 많으므로 이 숫자만큼 절점변위를 구속할 수 있다. 이를 식으로 표현하면 다음 식(3)과 같다.

$$\Delta F = K_{t_u} \Delta U_u + K_{t_s} \Delta U_s + K_l \Delta L_0 \tag{3}$$

여기서, $\Delta U_u, \Delta U_s$ =각각 미지수인 $(n-m) \times 1$ 절점변위, 구속되는 $m \times 1$ 절점변위벡터를 나타낸다. 따라서 식 (3)에서 세 번째 항은 사라지고, 나머지 두 개의 항은 아래 식(4)와 같이 비대칭 강성행렬을 구성하게 된다.

$$\Delta F = [K_{t_u} \ K_l] \begin{pmatrix} \Delta U_u \\ \Delta L_0 \end{pmatrix} \tag{4}$$

여기서, m 개의 미지수 L_0 에 대응하여, m 개의 구속조건을 도입한다. 구속조건을 대입하면, 그 부분의 변위는 영이 되며, 이때 각 케이블에 대응하는 미지수 L_0 를 구속조건에 일대일 대응시킨다. 일대일 대응식을 이용하여 연립방정식을 풀면, 케이블의 양절점의 위치와 현재길이 L_0 를 결정할 수 있다. 이 때 결정된 좌표와 무응력길이를 가지고 Newton-Raphson 방법을 이용하여 각각의 절점력을 구한다. 그런데 케이블의 초기장력과 무응력길이를 모두 미지수라 가정하므로, 평형방정식의 수보다 미지수의 수가 더 많은 부정방정식이 된다. 따라서 케이블의 요소 개수만큼의 기하학적으로 제어시킨 조건식이 필요하다.

그림 1에 보인 바와 같이 화살표로 표시된 방향이 각 절점의 구속조건이다. 사장교의 기하학적인 구속조건은 케이블의 개수만큼 미지수가 생기므로 구속조건식을 나타내야 한다. 여기서, 주탑상부의 수평변위와 좌측 정착부의 구속조건을 제외한 각 케이블과 주형정착부의 수직변위를 구속한다. 이로 인하여 초기형상결정 조건에 맞는 주탑 및 주형의 변위를 최소화시킬 수 있기 때문이다.

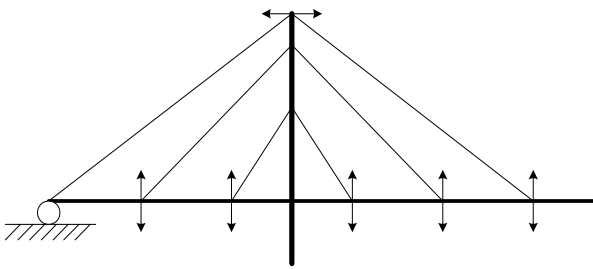


그림 1 TCUD법에서 사장교의 기하학적인 구속조건

개선된 TCUD법은 케이블지지교량의 정확한 초기형상을 결정하기 위하여 초기부재력법과 TCUD법을 효과적으로 결합시킨 개선된 해석방법이다. 그 알고리즘을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

4.1 케이블 장력의 초기값 산정:

먼저 케이블을 트러스-케이블요소, 주형과 주탑은 3차원 보-기둥요소를 사용하여 모델링하고 고정하중하에서 기하학적 비선형해석을 수행하여 장력의 초기값을 결정한다.

4.2 TCUD법에 근거한 평형반복계산:

- ① 케이블의 무응력길이를 변수로 취급하여 사장교 전체의 접선강성행렬을 산정한다. 이 때 강성행렬은 비대칭행렬이 된다.
- ② 경계조건 이외에 케이블 개수만큼의 절점변위를 설계자의 초기형상에 가깝게 되도록 추가적으로 절점변위를 구속하여 절점변위 및 무응력길이의 증분을 산정한다.
- ③ 1과 2를 토대로 케이블 부재력과 주형 및 주탑의 부재력을 산정한다. 이 때, 무응력길이와 케이블 양 절점의 상대적인 위치가 2.로부터 결정되므로 케이블부재의 힘-변위 관계식을 사용하여 케이블 부재력을 결정한다.
- ④ 구조물 전체의 증분평형방정식으로부터 부재력과 불평형하중을 산정한다.
- ⑤ 수렴이 될 때까지 다시 반복계산을 한다.

4.3 초기부재력법 적용:

수렴이 되었을 때 형상은 주탑, 주형이 압축력을 받아 변위를 일으킨다. 이 때 축방향변위를 제거하기 위하여 초기부재력법 즉, 주형 및 주탑의 압축력과 케이블장력은 수렴된 값을 가지고 모든 절점좌표를 처음 위치로 환원시켜서 TCUD법에 근거한 비선형 반복계산을 수행한다.

개선된 TCUD법은 첫 번째 단계에서 TCUD법을 적용하

여 주형의 수직처짐, 주탑 상부의 수평변위를 완전히 제어할 수 있다. 따라서 주탑, 주형부위 휨모멘트를 최소화할 수 있으며, 비교적 균일한 사장재 장력값을 얻을 수 있다. 또한 TCUD법을 적용한 이후에 반복적으로 주형 및 주탑의 축방향력만을 초기부재력을 취하여 초기부재력법을 적용하여 주형 및 주탑의 축방향 변위를 만족할 만한 정도로 제어할 수 있다. 결과적으로 TCUD법과 초기 부재력법의 장점을 효과적으로 결합시킨 개선된 TCUD법을 이용하여 설계자가 의도하는 가장 적절한 사장교의 초기형상 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 수치예제

5.1 영흥대교

영흥대교는 인천광역시 옹진군 영흥도와 선재도를 연결하는 3경간 사장교로서 64개의 케이블로 지지되어 있으며, 보강형은 전형적인 강상판 단면을 적용하고 있다(한국전력공사, 1995).

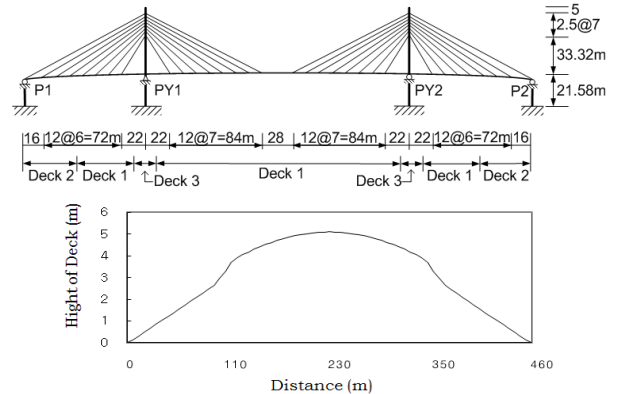


그림 2 영흥대교의 모델과 보강형 캄버

표 1 영흥대교 모델의 단면상수 및 물성값

구분	E (GPa)	A(m ²)	I(m ⁴)	W (KN/m)	비고
Cable	204	0.0076	-	0.741	
Deck1	214	0.6292	0.6576	82.1	부가사하중 35KN/m
Deck2	214	0.6798	0.7091	87	
Deck3	214	0.7650	0.7963	95.5	
Tower1	214	0.6896	1.2326	59.547	8.976m~14.215m 구간
Tower2	214	0.5544	0.9887	47.838	14.215m~25.415m 구간
Tower3	214	0.6278	1.1165	54.211	25.145m~31.119m 구간
Tower4	214	0.4549	0.8160	39.281	31.119m~56.376m 구간
Tower5	214	0.4133	1.0381	35.688	56.376m~86.376m 구간

구조물의 제원은 그림 2에 도시하였으며 대표적인 단면 상수 및 물성값은 표 1에 나타낸다.

개선된 초기부재력법(I.IFM)의 정확성을 확인하기 위한 비교의 목적으로 개선된 TCUD법(I.TCUD)도 수행하여 비교하였으며, I.IFM의 결과의 타당성을 확인하기 위하여 I.TCUD의 무응력장을 이용한 초기형상해석도 수행한다. 표 1의 편의를 위해 개선된 초기부재력법의 절점평형법으로 구한 값을 I.IFM1, I.TCUD의 무응력장을 이용하여 구한 값을 I.IFM2라고 표시한다. 이렇게 결정된 각 케이블의 장력과 무응력장을 나타낸 결과는 다음과 같다.

표 2 영흥대교 케이블 부재의 무응력장 비교(m)

부재 번호	I.IFM1	I.IFM2, I.TCUD	차 이
1	122.363	122.418	0.055
2	106.859	106.850	-0.009
3	95.084	95.079	-0.005
4	83.369	83.365	-0.004
5	71.887	71.885	-0.002
6	60.718	60.717	-0.001
7	50.108	50.108	0.000
8	40.446	40.446	0.000
9	39.396	39.400	0.004
10	48.732	48.732	0.000
11	59.118	59.122	0.004
12	70.117	70.121	0.004
13	81.478	81.482	0.004
14	93.053	93.057	0.004
15	104.881	104.887	0.006
16	116.529	116.532	0.003

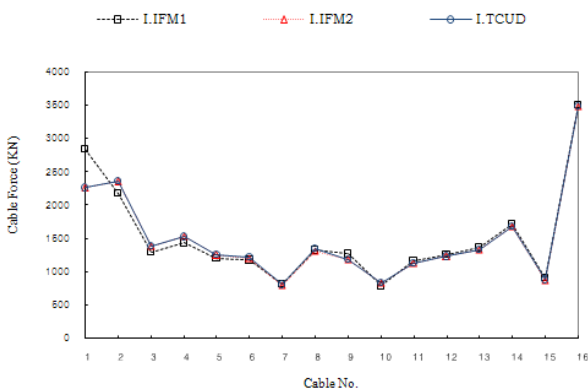


그림 3 영흥대교의 장력비교(KN)

영흥대교의 장력을 비교한 그림 3을 보면, I.IFM2와 I.TCUD의 결과가 거의 동일한 것을 볼 수 있다. 이 결과로부터 개선된 초기부재력법의 결과가 타당하다는 것을 확인할 수 있으며, 실제 개선된 초기부재력의 결과인 I.IFM1의 결과 역시 I.TCUD의 결과와 비슷한 양상을 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 각 케이블의 무응력장은 표 2에 비교결과를 제시 한다. I.IFM2와 I.TCUD의 무응력장은 동일해야 하며 I.IFM1과의 차이 역시 크지 않음을 확인할 수 있다.

주형과 좌측 주탑의 휨모멘트 형상은 그림 4, 그림 5와 같다. I.IFM2의 경우 I.TCUD와 근접한 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 하지만 I.IFM1의 경우와 I.TCUD의 결과는 다소 차이를 보인다. 주형의 경우는 I.IFM2와 I.TCUD에 의한 해석결과가 I.IFM1에 비하여 영에 가까운 처짐과 상대적으로 작은 휨모멘트값을 주는데 반하여, 주탑의 경우는 I.IFM2와 I.TCUD에 의한 결과가 더 큰 휨모멘트를 발생시키는 것으로 나타난다.

고정하중을 받는 의한 현수교와 방사형사장교의 초기치 해석결과는 주탑의 휨모멘트는 영이 되고 주형의 휨모멘트도 행어 정착부를 가상 지점으로 갖는 연속보의 최적화된 분포가 된다.

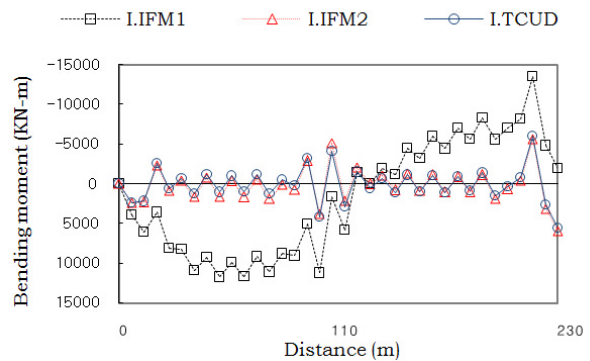


그림 4 영흥대교 주형의 휨모멘트 선도(KN·m)

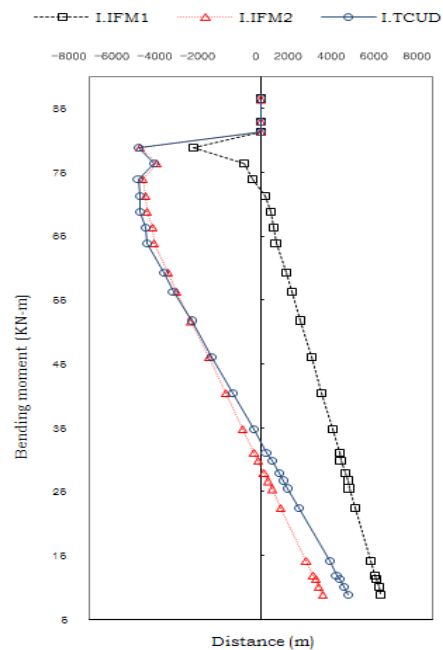


그림 5 영흥대교 좌측 주탑의 휨모멘트 선도(KN·m)

이에 반하여, 팬형이나 하프형 사장교의 초기치 해석결과는 주형과 주탑 모두에 휨모멘트를 발생시키며 무응력길이의 선택에 따라 이에 상응하는 여러 형태의 결과를 보여준다.

따라서 팬형, 하프형 사장교는 처음에 교량을 계획하는 단계에서 중앙지간과 측경간의 중량이 균형을 잡을 수 있도록 고려하는 것이 매우 중요하다는 점을 언급할 필요가 있다. 중량비가 불균형을 이루면 측경간에 중간교각을 설치하는 등의 대책이 필요하며, 이 경우에 최적화된 해를 찾는다 하여도 주탑 또는 주형에 다소 큰 휨모멘트가 발생할 수 있다.

5.2 인천대교

인천대교는 주경간 800m인 5경간 대칭 사장교로서 총 208개의 케이블이 2면 배치되어 있다. 인천대교의 구조모델은 그림 6과 같으며, 주형은 총 10개의 단면상수를 가지고 있으며, 주탑은 59개, 케이블은 16개이다. 또한 측경간에 supply pier가 1개씩 배치되어 있는 Multi back stay cable의 형태이다. 주형은 유선형 강박스(B×H=33.7×3.0m)이고 주탑은 역 Y형 콘크리트 주탑으로 높이는 EL238.5m의 대형 교량이다.

인천 대교의 케이블 수평력의 차이로 인해 발생하는 불균형력은 임시지점을 통하여 얻어진 각 케이블들의 수평장력의 최외측과 중간교각과 연결된 두 개의 케이블에서 부담하도록 하였다.

인천대교의 장력을 비교한 그림 7을 보면, 영흥대교의 결과와 동일하게 I.IFM2의 결과가 I.TCUD의 결과와 거의 비슷함을 알 수 있다. 그리고 I.IFM1의 결과가 지점에서 멀리 떨어진 경우에는 I.TCUD에 비해 작게 나타남을 알 수 있다.

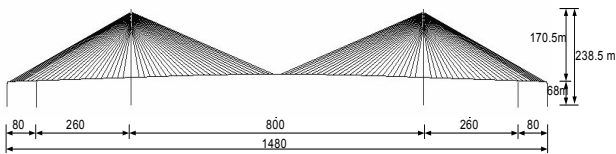


그림 6 인천대교 구조 모델 및 전경

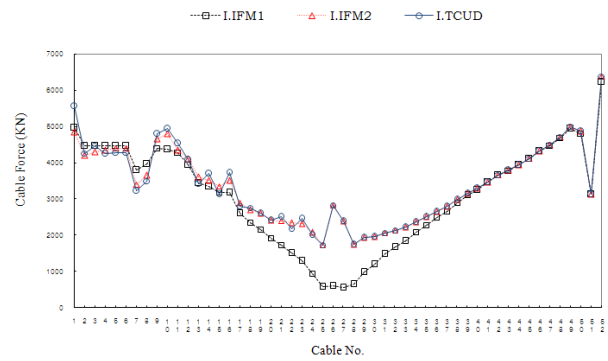


그림 7 인천대교의 장력비교(KN)

표 3 인천대교 케이블 부재의 무응력장 비교(m)

	I.IFM1	I.IFM2, I.TCUD	차 이		I.IFM1	I.IFM2, I.TCUD	차 이
1	370.559	370.460	-0.099	27	109.046	108.945	-0.101
2	364.534	364.578	0.043	28	119.716	119.624	-0.093
3	358.409	358.404	-0.004	29	126.898	126.833	-0.065
4	352.289	352.332	0.042	30	135.440	135.386	-0.054
5	346.175	346.211	0.035	31	144.722	144.678	-0.044
6	340.067	340.101	0.034	32	154.759	154.722	-0.037
7	333.965	334.269	0.304	33	165.418	165.386	-0.032
8	322.533	322.634	0.101	34	176.669	176.643	-0.026
9	311.010	310.956	-0.054	35	188.388	188.366	-0.022
10	298.706	298.638	-0.068	36	200.578	200.560	-0.018
11	286.563	286.533	-0.030	37	213.070	213.056	-0.014
12	272.813	272.797	-0.015	38	225.921	225.911	-0.009
13	259.207	259.211	0.003	39	239.003	238.997	-0.006
14	245.724	245.684	-0.039	40	252.341	252.336	-0.006
15	232.480	232.485	0.006	41	265.873	265.872	-0.001
16	219.441	219.392	-0.049	42	279.570	279.569	-0.001
17	206.729	206.709	-0.020	43	293.393	293.392	-0.001
18	194.298	194.259	-0.039	44	307.384	307.385	0.000
19	182.264	182.225	-0.039	45	321.437	321.436	-0.001
20	170.636	170.594	-0.042	46	335.647	335.646	-0.001
21	159.516	159.459	-0.057	47	349.879	349.875	-0.004
22	148.961	148.911	-0.050	48	364.273	364.269	-0.004
23	139.074	139.004	-0.070	49	378.630	378.620	-0.010
24	129.845	129.775	-0.070	50	393.153	393.140	-0.012
25	121.932	121.813	-0.119	51	404.894	404.890	-0.005
26	110.374	110.277	-0.097	52	414.932	414.905	-0.027

각 케이블의 무응력장에 대한 해석결과도 표 3에 비교하여 제시하고 있다. 표에서 보는 바와 같이 I.IFM2와 I.TCUD의 무응력장은 동일하며, I.IFM1의 결과와 비교할 때 최외측 앵커케이블에서 약 10cm로 가장 차이를 보인다. 이 케이블의 무응력길이가 370.46m 점을 고려하면 이 역시 상대적으로 작은 크기임을 확인할 수 있다.

주형과 좌측 주탑의 휨모멘트 형상은 그림 8, 그림 9와

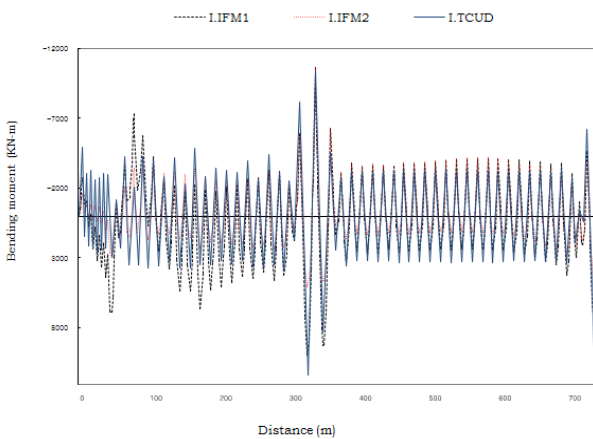


그림 8 인천대교의 주형 휨모멘트 선도(KN·m)

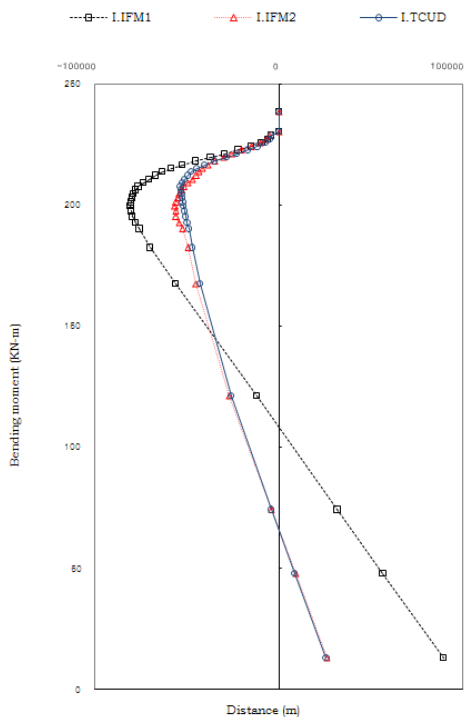


그림 9 인천대교의 좌측 주탑의 휨모멘트 선도(KN·m)

같다. 영흥대교의 경우와 마찬가지로 I.IFM2의 결과는 I.TCUD와 매우 근접한 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 하지만 I.IFM1의 경우는 주형의 휨모멘트가 측경간 단부 부분에서 휨모멘트 분포가 일정하지 않고 있다. 이는 주탑의 모멘트와 측경간의 supply pier의 영향에 의한 것으로 판단된다.

이 해석결과에 비추어 볼 때 인천대교의 경우는 개선된 TCUD법으로 구한 무응력길이를 개선된 초기력법에 적용하여 초기형상을 결정하고 이것을 이후의 시공단계 해석과 활하중 해석에 적용한다면 보다 합리적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 사장교의 초기형상을 비교적 정확하고 효율적으로 결정하기 위하여 절점평형법의 해와 개선된 TCUD법으로 얻어지는 두가지 무응력길이를 적용하는 개선된 초기부재력법을 제안하였다. 실교량에 대한 해석예제를 선택하여 개선된 초기부재력법과 개선된 TCUD법에 의한 해석결과를 제시하고 비교, 분석을 행하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 기본적으로 현수교와 방사형 사장교의 경우는 주탑의 휨모멘트는 영이고 주형은 케이블 정착부를 가상의 중간지점으로 보는 연속보의 최적화된 모멘트 분포를 보이는 초기치 해를 구할 수 있다. 이에 반하여 펜형 및 하프형 사장교 형식은 고정하중에 의한 주탑의 휨모멘트를 완전히 제거할 수 없으며 무응력길이 선택에 따라 그에 상응하는 초기치 해를 얻는다.
- 2) 개선된 초기부재력법에서 TCUD법의 무응력장을 사용할 경우에 개선된 TCUD법의 해석결과와 거의 동일한 결과를 제공한다는 것을 확인하였다.
- 3) 따라서 중앙경간과 측경간의 중량비가 균형을 이루는 경우에 개선된 TCUD법의 무응력장 결과값을 개선된 초기부재력법에 적용하여 초기형상을 결정하고 이후 시공단계해석 등이 이루어진다면 합리적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업의 초장대교량사업단 연구과제비(과제번호 : 08기술혁신E01)에 의해 연구되었기에 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 경용수 (2002) 케이블 지지교량의 개선된 초기형상 해석법, 성균관대학교 석사학위 논문.
- 김문영 (1993) 전단변형을 고려한 공간 뼈대구조의 기하학적인 비선형 해석, 대한토목학회 논문집, 13(4), pp.39~49.
- 김문영, 경용수, 이준석 (2003) 사장교의 개선된 초기형상 해석법, 한국강구조학회 논문집, 15(2), pp.175~185.
- 김문영, 김남일, 안상섭 (1998) 3차원 케이블망의 초기평형 상태결정 및 정적 비선형 유한요소해석, 한국전산구조공학회 논문집, 11(1), pp.182~183.
- 김제춘, 장승필 (1999) 초기부재력을 이용한 사장교의 초기형

- 상 및 캠버량 결정, 대한토목학회논문집, 19(I-3), pp.377~386.
- 송요한, 김문영** (2011) 사장교 시스템의 실용적인 초기형상 결정법, 한국전산구조공학회 논문집, 24(1), pp.87~96.
- 안상섭** (1991) 탄성현수선 케이블 요소를 이용한 3차원 케이블망의 정적 및 동적 비선형 해석, 서울대학교 석사학위논문.
- 한국전력공사** (1995) 영흥도 화력발전소 진입도로 및 교량 시설 설계 구조계산서.
- Irvine** (1981) Cable Structures, MIT Press
- Jayaraman, H.B., Knudson, W.C.** (1981) A curved Element for the Analysis of Cable Structures, *Computer & Structures*, 14, pp.325~333.
- Karoumi R.** (1999) Some Modeling Aspects in the Nonlinear Finite Element Analysis of Cable Supported Bridges, *Computers & Structures*, 71, pp.397~412.
- Kim, K.S., Lee, H.S.** (2001) Analysis of Target Configurations under Dead Loads for Cable-Supported Bridges, *Computers & Structures*, 79, pp.2681~2692.
- Wang, P.H., Tseng, T.C., Yang, C.G.** (1993) Initial Shape of Cable-Stayed Bridges, *Computers & Structures*, 46(6), pp.1095~1106.
- 논문접수일 2011년 10월 24일
 - 논문심사일
 - 1차 2011년 11월 8일
 - 2차 2011년 12월 6일
 - 게재확정일 2011년 12월 6일