

개선된 TCUD법을 이용한 3차원 현수교의 초기형상해석

Initial Shape Analysis of 3 Dimensional Suspension Bridges using Improved TCUD Methods

조 경 식* · 김 민** · 김 문 영***

Jo, Kyeong-Sik · Kim, Min · Kim, Moon-Young

요 약

본 논문에서는 개선된 TCUD(Improved TCUD, I.TCUD)법 및 개선된 초기부재력법(Improved Initial Force Methods, I.IFM)을 이용하여 3차원 현수교의 초기형상해석을 수행하였다. 절점평형법에 의하여 초기 평형상태를 결정하고, 이때 계산된 무응력장을 초기값으로 입력하여 비선형 해석을 수행하여 나온 값을 초기값으로 하여 해석을 반복한다. 이를 통하여 간단한 수치 해석 기법인 I.IFM이 정밀한 I.TCUD법과 비교하여 근접한 결과를 나타내는 것을 수치예제를 통하여 확인하였다.

keywords : 개선된 TCUD법, 개선된 초기부재력법, 3차원 현수교, 초기형상해석, 수치해석

1. 서 론

현수교는 지간이 매우 큰 경우에 적합한 교량으로서 케이블의 이점을 충분히 활용하고 있지만, 현수교의 설계와 시공에 있어서는 케이블 구조물만의 유연한 거동특성 그리고 주탑과 자정식 현수교의 보강거더에 발생하는 큰 압축력 등의 기하학적 비선형 특성 때문에 정밀한 구조해석에 어려움이 존재한다.

고정하중에 활하중을 추가한 해석 혹은 현수교의 시공단계 해석을 위해 가장 먼저 수행하는 것이 고정하중에 의한 교량의 초기형상 결정이다. 여기서 초기형상의 결정이라 함은 완성된 구조계에서 고정하중에 의해 발생하는 주형 및 주탑의 휨모멘트와 변위를 최소화하면서 고정하중과 평형을 이룰 수 있는 케이블의 장력과 무응력길이를 결정하는 것을 말한다. 본 연구에서는, 김과 김(2010)의 계산법에 근거하여 개선된 초기부재력법을 제시하고자 한다. 즉, 역학적인 발상에 기초를 둔 간단한 수치해법으로 정밀도 있는 초기형상을 결정하고 그때의 주케이블의 좌표 및 무응력 길이 등을 초기부재력법의 초기입력 값으로 적용하여 해석을 수행하였다. 수치예제의 해석결과 비교를 통하여 해석 알고리즘의 타당성과 정확성을 검증한다.

2. 개선된 TCUD법을 이용한 초기형상 결정법

TCUD법을 이용한 현수교의 초기형상 결정법은 Kim과 Lee(2001)의 연구를 언급할 수 있다. I.TCUD법의 기본적인 내용은 Kim과 Lee(2001)과 동일하지만, 차이점은 축방향력에 의한 주탑과 자정식인 경우 보강형의 신장량을 제거하기 위하여 초기부재력의 개념을 도입하였다는 것이다.

* 학생회원·성균관대학교 초고층·장대교량학과 석사과정 ksbest727@naver.com

** 삼성물산(주) 건설부문 사원 kimo1599@naver.com

*** 정회원·성균관대학교 사회환경시스템공학부 정교수 kmye@skku.edu

1) 먼저 주케이블을 탄성현수선 케이블요소와 트러스-케이블요소, 탄성포물선 케이블요소, 행어는 트러스-케이블요소, 그리고 주형과 주탑은 3차원의 보-기둥요소를 사용하여 모델링하고 고정하중을 외력으로 재하시킨다. 아울러, 중앙경간과 측경간 주케이블의 초기 수직좌표는 고전적인 포물선 케이블형상으로 가정한다.

2) TCUD법에 근거한 평형반복계산:

- i. 케이블의 무응력길이를 변수로 취급하여 케이블 교량 전체의 접선강성행렬을 산정한다. 여기서 접선강성행렬은 비대칭행렬이 된다.
- ii. 경계조건 이외에 케이블 개수만큼의 절점변위를 설계자의 초기형상에 가깝게 되도록 추가적으로 절점변위를 구속하여 절점변위 및 무응력길이의 증분을 산정한다.
- iii. i 과 ii를 토대로 케이블 부재력과 주형 및 주탑의 부재력을 산정한다.
- iv. 구조물 전체의 증분평형방정식으로부터 부재력과 불평형하중을 산정한다.
- v. 수렴이 될 때까지 다시 반복계산을 한다.

3) 초기부재력법 적용: 수렴이 되었을 때 형상은 자정식 현수교는 주탑, 주형 그리고 타정식 현수교는 주탑이 압축력을 받아 축방향 변위를 일으킨다. 이때 축방향변위를 제거하기 위하여 주형, 주탑의 수렴된 압축력을 초기에 작용하는 부재력으로 간주하고 다른 데이터는 초기의 입력치로 재설정하고 TCUD 반복법을 수행한다.

3. 수치예제

표 1. 3차원 자정식 현수교의 단면상수 및 물성값

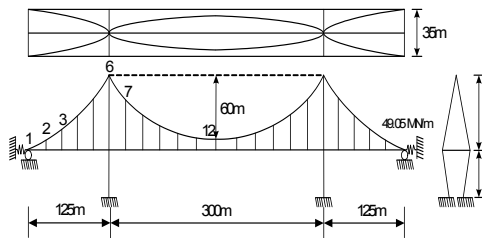


그림 1. 3차원 자정식 현수교

부재	E (GPa)	A (m ²)	I ₂₂ (m ⁴)	I ₃₃ (m ⁴)	w (KN/m)
Main cable (Center)	196.20	0.129	-	-	14.87
Main cable (Side)	196.20	0.129	-	-	14.87
Hanger	137.34	0.017	-	-	1.96
Stiffening Girder	206.01	1.363	217.39	24.57	445.18
Tower (-36.5~0m)	206.01	0.891	3.97	2.72	137.23
Tower (0~33m)	206.01	0.656	1.72	1.14	101.04
Tower (33~64m)	206.01	0.656	1.72	1.14	101.04

이 예제는 영종대교로서, 그림 1에서 보는 바와 같이 3차원의 자정식 현수교이다. 주케이블 새그부분 행어길이의 설계값은 4m이다. 각 행어 연결점의 X좌표는 측경간 및 중앙경간을, 주케이블 부재의 개수만큼 등분할하여 할당하였으며 측경간에는 8(=4×2)개의 행어가, 중앙경간에는 22(=11×2)개의 행어가 분포하고 있다. 주케이블의 시점부와 종점부를 비롯한 주형의 모든 행어 연결점의 Z좌표 값은 0이다. 초기부재력법으로 해석 시 3차원으로 모델링 하였으며 교량의 단면상수와 물성값은 표 1에 나타내었다.

절점평형법의 경우 1열의 메인케이블만을 모델링 하였고, 그에 따라 실제 보강거더의 단면적인 1.363m²

의 절반인 0.6815m²을 적용하였다. 초기부재력법의 경우 3차원으로 모델링 하였으며 이때는 보강거더의 단면적을 1.363m²로 적용하였다. 타정식현수교 모델과는 다르게 자정식 현수교의 경우, 시점부 및 종점부에서 주 케이블의 노드와 보강거더의 노드는 같은 절점으로서 서로 공유된다.

아래의 표 2에 절점평형법으로 결정한 각 케이블 부재의 무응력장과 조 등(2006)의 결과를 서로 비교하였다. 1~5번까지의 부재가 측경간의 주케이블 부재이고 6~11번까지의 부재가 중앙경간의 주케이블 부재이다.

표 2. 각 케이블 부재의 무응력길이(m)

부 재 번 호	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
I.IFM (1)	25.679	26.853	28.253	30.049	32.112	31.352	29.378
I.TCUD(2)	25.677	26.849	28.249	30.050	32.127	31.367	29.380
(2)-(1)	0.002	0.004	0.004	0.001	0.015	0.015	0.002
부 재 번 호	⑧	⑨	⑩	⑪	-	-	-
I.IFM (1)	27.709	26.395	25.483	25.015	-	-	-
I.TCUD(2)	27.706	26.391	25.481	25.015	-	-	-
(2)-(1)	0.003	0.004	0.002	-	-	-	-

표 3은 주케이블의 수평장력과 탑정부, 보강형의 변위성분을 비교하여 함께 제시하였다. 이전 예제와 마찬가지로 기하비선형 해석결과 만이 다소 차이가 발생하였고 개선된 초기부재력법에 의한 결과와 조 등(2006) 결과는 매우 잘 일치하는 모습을 확인할 수 있다.

표 3. 주케이블의 수평장력 비교

구 분	절점평형법	I.IFM at k=1	I.IFM	I.TCUD at k=1	I.TCUD
주 케이블 수평장력(MN)	44.76	37.83	44.81	44.94	44.88
탑정 수평변위(cm)	-	5.6	0	0	-
탑정 수직변위(cm)	-	4.9	0	5.8	-
보강거더 축방향변위(cm)	-	7.4	0.1	9.3	-

또한, 아래의 그림 2는 개선된 초기부재력법에 의한 자정식현수교 보강거더의 휨모멘트도를 나타내고 있다. 행어절점부의 휨모멘트는 측경간 단부에서 최대 28.0MN·m의 값을 보였으며 그 이외의 행어 절점부에서는 24.3MN·m 내외의 균일한 분포를 보였다.

축압축력을 받는 연속보의 해석의 결과 측경간 단부에서 최대 29.3MN·m, 중앙경간에서는 23.2MN·m의 균일한 분포를 보였으며 개선된 초기부재력법의 결과와 비교하여 큰 차이를 보이지는 않았다. 연속보해석의 결과와 비교하여 주탑 부근의 보강거더 절점에서 그 차이가 가장 컸는데, 이는 트러스케이블요소로 구한 주탑 부근 행어의 무응력장 입력 값의 오차로 인하여 발생했다고 볼 수 있다. 따라서 주탑 부근 행어의 무응력장은 좀 더 정확하게 산정할 필요가 있다.

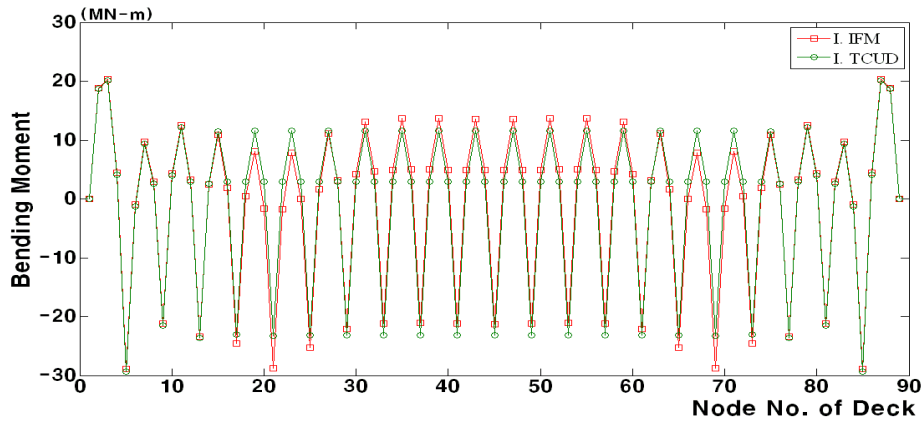


그림 2. 보강거더의 휨 모멘트도 비교(MN-m)

4. 결론

3차원 자정식 현수교 예제를 통하여 여러 해석법의 결과를 비교하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 개선된 초기부재력법은 주탑 및 보강형의 축방향변형을 제어할 수 있는 효과적인 방법이다.
2. 무응력장을 절점평형법으로 구한 뒤 이를 입력하는 개선된 초기부재력법은 반복계산시 안정적인 수렴성을 보였다.
3. 현수교의 설계 시 목표형상에 가장 부합하는 초기형상 해는 유일하며, 본 연구의 개선된 초기부재력법은 정해라고 볼 수 있는 개선된 TCUD법에 가장 근접한 결과를 나타내었다.

감사의 글

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

참고문헌

- 김민, 김문영(2010) 고정하중을 받는 현수교 시스템의 초기형상 결정법, 강구조학회 논문집, 강구조학회, 제 22권, 제6호, pp.511-521
- 조경식, 김종화, 안남규(2006) TCUD법을 이용한 현수교 해석 프로그램의 개발, 2006년도 학술발표회 논문집, 한국강구조학회, pp. 268-274
- Irvine, H. Max. (1981), *Cable structures*, The MIT Press, USA
- Kim, K.S., Lee, H.S. (2001) Analysis of target configurations under dead loads for cable-supported bridges, *Computers & Structures*, Vol.79, Issue 29-30, pp.2681-2692
- Kim, H.K., Lee, M.J., Chang, S.P. (2002) Nonlinear shape-finding analysis of a self-anchored suspension bridge, *Engineering Structures*, Vol.24, Issue 12, pp.1547-1559