

주케이블의 슬라이딩을 고려한 현수교의 시공단계 해석

Erection Sequence Analysis of Suspension Bridge Considering to Sliding of Main Cable

임 성 순*

Yhim, Sung-Soon

공 민 식**

Kong, Min-Sik

김 병 철***

Kim, Byeong-Cheol

Abstract

Anchors and saddles are used to have sufficient geometrical rigidity and make target configuration of main cable of suspension bridge. Neglecting the sliding effect at saddles, points at them have been idealized as fixed nodes in lots of former studies. In general, sliding effects are reported to show significant structural behaviors of main cable and cause to the different responses of bridges. During early erection steps of the suspension bridge, especially, the sliding effect occurs easily because there is large difference of cable tension between main and side span in removing set-back ropes or not applying set-back. This study presents the finite element analysis considering to cable sliding effect and shows the comparison of differences between sliding and non-sliding at election sequence. The analysis of sliding between main cables and saddles needs to obtain more realistic responses because the analysis result can represent unfavorably different responses of bridges. Moreover, the sliding analysis method and results in this study can be used to basic criteria in engineering design and construction steps.

요 지

현수교는 주케이블이 목표하는 형상을 이루어 기하학적 강성을 갖도록 앵커, 새들과 같은 장치를 적용하고 있다. 지금까지의 연구에서는 두 장치를 모두 고정절점으로 단순화하여 해석하는 것이 일반적이었다. 그러나 새들의 경우 주케이블의 슬라이딩 현상이 발생할 수 있으며 이로 인하여 구조물의 응답이 달라진다. 특히 현수교의 시공단계 초기에 셋백로프를 철거하거나 셋백을 수행하지 않는 경우 새들 전후 주케이블의 장력 차이가 커지므로 슬라이딩이 발생하기 쉽다. 따라서 본 연구는 유한요소법을 이용한 케이블의 슬라이딩 해석방법을 제시하고 슬라이딩을 고려한 현수교의 시공단계별 해석을 수행하여 슬라이딩을 고려하지 않은 해석결과와 차이를 분석하였다. 슬라이딩을 고려한 해석을 통해 얻어진 결과는 구조물에 불리한 응답을 나타낼 수 있으므로 주케이블과 새들 사이의 슬라이딩을 고려한 해석은 필수적이다. 또한 본 연구의 슬라이딩 해석방법 및 해석결과는 이후 현수교의 설계와 시공시의 참고자료로 활용될 수 있다.

Keywords : Cable, Erection sequence, Friction, Sliding, Saddle, Suspension bridge

핵심 용어 : 케이블, 시공단계, 마찰, 슬라이딩, 새들, 현수교

* 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

** 정회원, (주)다산컨설턴트 구조부 과장, 공학박사

*** 학생회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

E-mail : yhimss@uos.ac.kr 02-2210-2535

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2009년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

현수교는 케이블을 이용하여 자중을 최소화 시킨 대표적인 장대교량으로서 최근 그 설계와 시공이 증가하고 있다. 케이블을 이용한 교량은 앵커, 새들과 같은 장치를 이용하여 원하는 형상 및 강도를 갖도록 케이블 구조물을 설계하여야 한다. 앵커는 케이블을 구체나 보강거더에 정착시키는 장치이고 새들은 케이블을 연속된 상태로 유지시키고 새들 상면에 거치시켜 케이블에 작용하는 하중을 주탑에 전달하는 역할을 한다.

지금까지의 연구는 앵커와 새들의 구조적 차이를 고려하지 않고 두 장치를 모두 고정절점으로 단순화하여 해석하는 것이 일반적이었다. 새들과 케이블은 완전하게 일체거동 하지 않으므로 새들에서 연속되는 케이블의 전후 길이가 달라지는 슬라이딩이 발생할 수 있으며 이로 인하여 전체구조물의 기하학적 형상 및 하중에 대한 응답이 달라진다. 특히 현수교의 시공 중에 셋백로프를 철거하거나 셋백을 수행하지 않는 경우 주케이블의 주경간과 측경간의 장력차이가 크므로 슬라이딩이 발생하기 쉽다.

따라서 본 연구는 슬라이딩을 고려한 해석 방법을 유한요소법으로 정식화하고 현수교의 시공단계 해석을 수행하였다. 또한 슬라이딩을 고려하지 않은 해석결과와 비교하여 그 차이를 분석하였다.

2. 해석이론

본 연구는 유한요소법을 사용하여 슬라이딩 현상을 해석하였다. 주케이블은 탄성현수선요소, 보강거더와 주탑은 비선형 보요소, 행어는 비선형 트러스요소를 사용하여 이상화하였다. 또한 현수교는 기하학적 비선형 특성이 매우 크므로 구조물에 작용하는 외력과 내력의 차이가 일정한 범위 이내로 수렴할 때까지 반복적으로 해를 구하는 Newton-Raphson 방법으로 비선형 해석을 수행하였다. 구조물의 부재력은 미소변위마다 부재력을 누적시켜 부재의 변형에 대한 비선형 부재력을 산정하는 Updated Lagrangian 방법을 사용하여 산정하였다.

2.1 마찰 및 슬라이딩 해석이론

슬라이딩은 구조물의 일부분 혹은 전체가 강제운동을 통하여 하중의 불평형 상태를 해소하기 위해 발생하는 현상으로 물체의 운동이 가능한 방향으로 작용하는 힘의 합력이 마찰에 의한 저항력 보다 클 경우 발생한다. 현수교 주탑 정점의 새들 위에 거치된 케이블의 장력 차이가 새들과 케이블의 마찰에 의한 저항력 보다 큰 경우 슬라이딩이 발생하며 이로 인한 교량의 기하학적인 형상변화는 교량의 하중변위 특성을 변화시킨다.

케이블의 슬라이딩을 고려한 정적 해석을 검증하기 위해 Fig. 1과 같이 4개의 탄성현수선 요소와 1개의 보요소로 구성된 슬라이딩이 발생하는 구조물을 가정하였으며 각 부재의 부재력과 외부에서 작용하는 외력은 Fig. 2와 같다.

Fig. 1과 2에서 ○는 절점번호, □는 요소번호를 나타내며 F_{ij} 는 i 번 요소에 작용하는 자유도 j 의 부재력, P_i 는 i 번 절점에 작용하는 수직하중, ΔL 은 슬라이딩 길이를 의미한다. 위와 같은 구조물에 슬라이

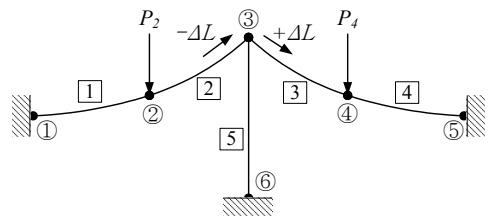


Fig. 1 Sliding catenary cable model

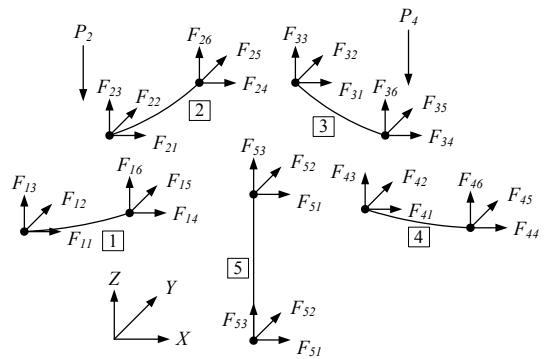


Fig. 2 Member forces of elements

딩이 발생하지 않을 경우, 평형 방정식은 식(1)과 같고 슬라이딩이 발생하는 경우, 평형 방정식은 슬라이딩에 대한 자유도를 추가하여 식(2)와 같이 구성된다.

$$\psi = \begin{pmatrix} F_{14} + F_{21} \\ F_{15} + F_{22} \\ F_{16} + F_{23} \\ F_{24} + F_{31} + F_{51} \\ F_{25} + F_{32} + F_{52} \\ F_{26} + F_{33} + F_{53} \\ F_{34} + F_{41} \\ F_{35} + F_{42} \\ F_{36} + F_{43} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -P_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -P_4 \end{pmatrix} \cong 0 \quad (1)$$

$$\tilde{\psi} = \begin{pmatrix} F_{14} + F_{21} \\ F_{15} + F_{22} \\ F_{16} + F_{23} \\ -\beta\sqrt{(F_{26} + F_{33})^2 + (F_{24} + F_{31})^2} \\ -\beta|F_{25} + F_{32} + F_{51}| \\ F_{25} + F_{32} + F_{52} \\ F_{26} + F_{33} + F_{53} \\ F_{34} + F_{41} \\ F_{35} + F_{42} \\ F_{36} + F_{43} \\ |F_{24} + F_{31}| \\ -\beta\sqrt{(F_{26} + F_{33})^2 + (F_{24} + F_{31})^2} \\ -\beta|F_{25} + F_{32}| \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -P_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -P_4 \\ 0 \end{pmatrix} \cong 0 \quad (2)$$

식(1),(2)에서 ψ 와 $\tilde{\psi}$ 는 각각 슬라이딩이 발생하지 않는 경우와 슬라이딩이 발생하는 경우의 불평형하중이며 β 는 마찰계수를 의미한다.

Fig. 1의 구조물에서 케이블에 슬라이딩이 일어나는 조건은 Fig. 3의 새들과 케이블의 자유물체도로부터 식(3)과 같이 유도된다. 슬라이딩 조건을 만족하는 경우 슬라이딩이 발생하여 구조물은 불평형 상태에 놓이게 되므로 매 반복 단계마다 슬라이딩의 발생 여부를 판별하고 강성행렬을 산정한다.

$$S_F = \frac{|\sqrt{F_{31}^2 + F_{33}^2} - \sqrt{F_{24}^2 + F_{26}^2}|}{\beta\sqrt{(F_{26} + F_{33})^2 + (F_{24} + F_{31})^2} + \beta|F_{25} + F_{32}|} > R_F \quad (3)$$

식(3)에서 S_F 는 슬라이딩이 가능한 방향으로 작용하는 하중, R_F 는 저항력을 의미한다. 먼저 슬라이딩

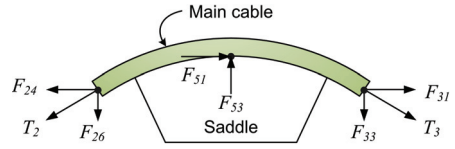


Fig. 3 Free-body diagram of saddle element

이 발생하지 않는 상태의 평형방정식(1)을 풀이한 결과가 조건식(3)을 만족하는 경우 슬라이딩이 발생하는 것이므로 슬라이딩이 발생하는 상태의 평형방정식(2)를 풀이한다. 슬라이딩이 발생하는 경우의 접선강성행렬은 식(4)를 이용하여 산정한다.

$$\tilde{K}_T = \frac{d\tilde{\psi}}{d\Delta L} \quad (4)$$

식(4)의 접선강성행렬에서 ΔL 에 대한 부재력의 변화율은 식(5)의 방법으로 산정할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \frac{dF_{24}}{d\Delta L} \\ \frac{dF_{25}}{d\Delta L} \\ \frac{dF_{26}}{d\Delta L} \end{Bmatrix} = -F^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{dl_x}{dL_2} & \frac{dL_2}{d\Delta L} \\ \frac{dl_y}{dL_2} & \frac{dL_2}{d\Delta L} \\ \frac{dl_z}{dL_2} & \frac{dL_2}{d\Delta L} \end{Bmatrix} = F^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{dl_x}{dL_2} \\ \frac{dl_y}{dL_2} \\ \frac{dl_z}{dL_2} \end{Bmatrix} \quad (5a)$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{dF_{31}}{d\Delta L} \\ \frac{dF_{32}}{d\Delta L} \\ \frac{dF_{33}}{d\Delta L} \end{Bmatrix} = F^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{dl_x}{dL_3} & \frac{dL_3}{d\Delta L} \\ \frac{dl_y}{dL_3} & \frac{dL_3}{d\Delta L} \\ \frac{dl_z}{dL_3} & \frac{dL_3}{d\Delta L} \end{Bmatrix} = F^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{dl_x}{dL_3} \\ \frac{dl_y}{dL_3} \\ \frac{dl_z}{dL_3} \end{Bmatrix} \quad (5b)$$

여기서

$$\begin{aligned} \frac{dl_x}{dL_i} &= -\frac{F_{i1}}{EA_i} - \frac{F_{i1}}{\sqrt{F_{i1}^2 + F_{i2}^2 + (F_{i3} + wL_i)^2}} \\ \frac{dl_y}{dL_i} &= -\frac{F_{i2}}{EA_i} - \frac{F_{i2}}{\sqrt{F_{i1}^2 + F_{i2}^2 + (F_{i3} + wL_i)^2}} \\ \frac{dl_z}{dL_i} &= -\frac{F_{i3} + wL_i}{EA_i} - \frac{F_{i3} + wL_i}{\sqrt{F_{i1}^2 + F_{i2}^2 + (F_{i3} + wL_i)^2}} \end{aligned} \quad (i=2,3)$$

이와 같이 접선강성행렬을 구하고 Newton-Raphson 방법으로 식(2)의 평형조건의 불평형하중이 허용오차 이내로 수렴 할 때까지 반복 계산하여 해를 구한다.

본 연구는 기존 비선형 해석프로그램에 슬라이딩을 고려한 해석을 수행할 수 있도록 강성행렬을 산정하는 부분, 산정된 변위를 이용하여 부재의 기하학적 형상을 재설정하는 부분 및 불평형하중을 산정하는 부분을 추가하였다. 해석프로그램의 흐름도는 Fig. 4와 같다.

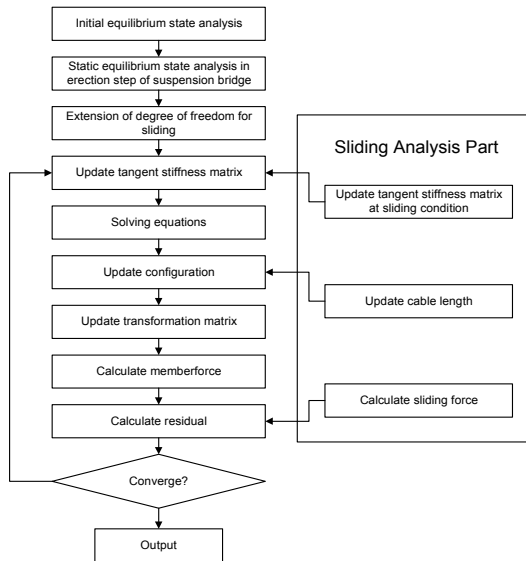


Fig. 4 Flow chart of sliding analysis program

3. 해석 예 및 분석

3.1 탄성현수선 요소의 슬라이딩

본 연구에서 사용한 해석이론을 검증하기 위해 Fig. 5와 같이 탄성현수선 케이블요소와 비선형 보요소로 구성된 모델에 대하여 슬라이딩을 고려한 해석을 수행하였다. 길이 15m의 보요소 위에 총 무중력장이 11.5m × 4ea = 46m인 탄성현수선 케이블을 올려놓은 형태의 구조물의 우측 케이블 중앙점에 집중하중을 재하하고 하중과 마찰계수의 변화에 따른 슬라이딩 길이와 보요소의 지점 모멘트의 관계를 확인하였다. 이 모델의 특성은 Table 1과 같다.

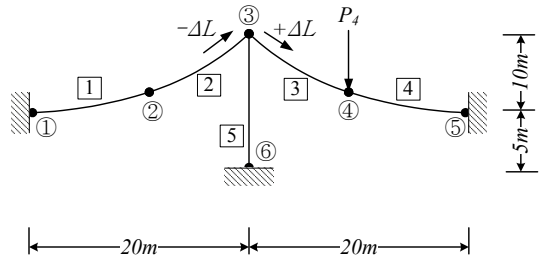


Fig. 5 Sliding cable model

Table 1 Element properties of sliding cable model

Properties	Cable	Frame
E [GPa]	199.073	205.940
A [m ²]	0.0314	0.2500
I [m ⁴]	-	0.0052
Unstressed length [m]	11.500	-
Weight density [kN/m ³]	80.362	103.715

Fig. 5의 구조물에 하중과 마찰계수에 따른 슬라이딩 길이의 변화는 Fig. 6과 같으며 세로축은 4번 절점에 작용하는 수직하중의 크기, 가로축은 보요소 상부에서 발생하는 케이블의 슬라이딩 길이를 나타낸다. 마찰계수가 클수록 슬라이딩이 시작되는 하중의 크기는 증가하며 슬라이딩이 발생한 이후 하중이 증가할수록 단위 하중에 대한 슬라이딩 길이의 변화량은 점점 감소한다.

하중과 마찰계수의 변화에 따른 보요소 하부의 모멘트 변화는 Fig. 7과 같다. 새들을 고정지점으로 모델링한 경우 보요소 하부의 모멘트는 슬라이딩이 발생하는 경우보다 크다. 그리고 마찰계수가 작을수록 모멘트의 절대값은 작다. 그러나 마찰계수가 0.05보다 작은 경우 고정지점인 경우와 반대방향의 모멘트가 발생하는 경우가 발생한다. 마찰계수가 0.05보다 작은 경우 슬라이딩이 크게 발생하여 보에 전달하는 하중의 방향이 바뀌기 때문이다.

보요소 상단의 수평변위를 Fig. 8과 같이 나타내었다. 하중이 12000kN 이하인 경우 고려하는 모든 마찰계수에서 하중이 재하되는 케이블의 반대방향으로

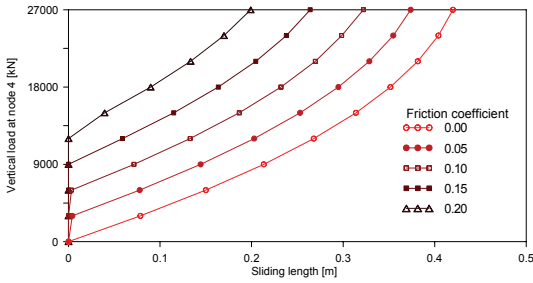


Fig. 6 Sliding length of cable

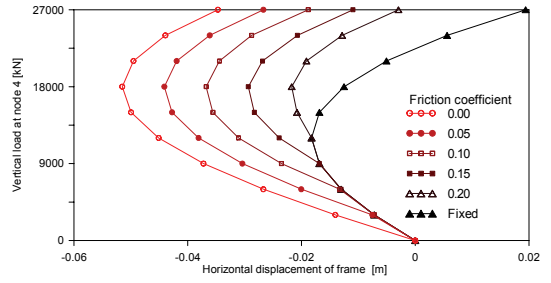


Fig. 8 Horizontal displacement of frame

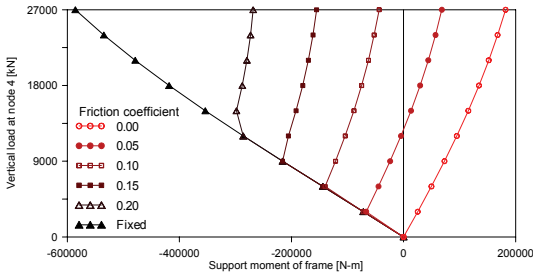


Fig. 7 Support moment of frame

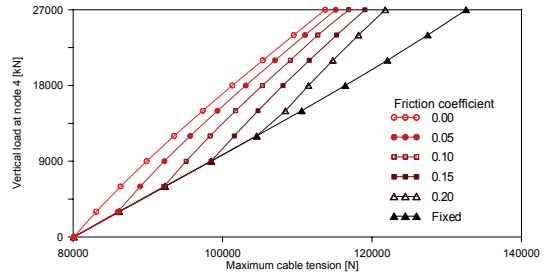


Fig. 9 Maximum cable tension

보요소 상단의 변위가 발생한다. 또한 고정지점인 경우 12000kN 이상, 마찰계수가 0.00인 경우 18000kN 이상의 하중에서 단위 하중에 대한 보요소 상단의 변위는 줄어들기 시작하고 고정지점인 경우 22000kN 이상의 하중에서 하중이 재하되는 방향으로 변위가 나타난다. 하중이 작은 경우 좌우측 하중을 받는 케이블의 장력의 변화에 비해 케이블의 각도변화가 더 크지만 하중이 증가할수록 하중의 받는 케이블의 장력변화가 각도변화보다 더 커지기 때문에 이 같은 현상이 발생한다. 또한 고정지점인 경우 좌우 케이블의 장력차이를 소산하지 못하기 때문에 하중이 재하되는 케이블 방향으로 변위가 더 크게 발생한다.

케이블요소에 발생하는 최대장력을 Fig. 9에 나타내었다. 고정지점인 경우 최대장력이 가장 크며 슬라이딩이 발생하는 경우 최대장력이 감소한다. 케이블의 최대장력이 감소하는 것은 좌우측 케이블 장력의 불균형이 슬라이딩 현상을 통하여 해소되기 때문이다. 마찰계수가 0.1이고 재하되는 하중의 크기가 27000kN 인 경우 케이블의 최대인장력은 고정지점인 경우에 비해 11.8% 작다.

본 연구에서 사용한 케이블의 슬라이딩 현상에 대한

해석방법의 타당성을 입증하기 위하여 슬라이딩이 발생하는 단순한 구조물을 해석하여 그 응답을 분석하였다. 그 결과 슬라이딩 길이, 보요소 하부의 모멘트, 보요소 상단의 수평변위 및 케이블의 최대 인장력에 대한 각각의 응답은 슬라이딩이 발생하는 케이블 구조물의 특성을 합리적으로 반영하고 있다고 판단된다. 따라서 본 연구는 상기 해석방법을 이용하여 현수교의 슬라이딩 현상을 고려한 시공단계 해석을 수행하였다.

3.2 슬라이딩을 고려한 현수교 해석

해석 대상 교량은 Fig. 11과 같이 주경간이 850m 인 타정식 현수교로서 주경간 새그가 94m이며 주케이블은 평행하게 2면으로 배치되어 있다. 주경간은 좌우 대칭이지만 측경간은 각각 좌우 255m, 220m로서 비대칭인 구조로 이루어져 있다. 또한 주케이블과 보강거더는 47×2개의 행으로 연결되어 있고 주탑은 높이 135.3m인 콘크리트 주탑으로서 상단의 고도는 138m이다. 측경간은 접속교를 사용하여 주경간 보강거더와 연속되게 하였다. 구조요소의 단면상수 및 고정하중은 Table 2와 같다.

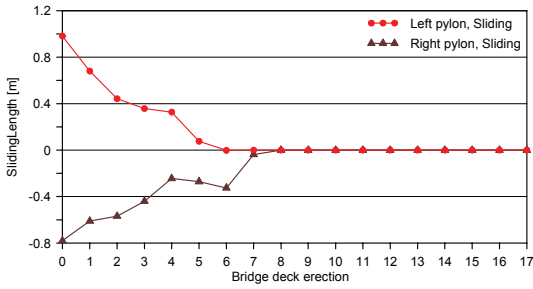


Fig. 10 Sliding length

보강거더의 시공단계는 Fig. 11과 같이 전체 17단계로 구성되어 있다. 사각형 속의 기호는 거더의 일련번호를 의미하여 주경간 중앙부로부터 시공하는 일반적인 현수교 시공단계를 적용하였다.

현수교는 주탑 상부에 새들을 시공하고 케이블을 거치시켜 행어를 통한 보강거더의 하중이 주케이블에서 주탑을 통하여 지반으로 전달되는 구조계이다. 보강거더의 시공이 진행됨에 따라 주경간 케이블을 통해 주탑에 전달되는 하중이 측경간에 비해 크게 되므로 완성계에서 주케이블의 장력의 균형을 맞추기 위하여 시공단계 초기에는 셋백로프를 사용하여 주탑을 외측으로 변위 시켜 두고 주케이블을 시공하게 되며 이를 셋

Table 2 Properties of suspension bridge

Properties	Stiffened Girder	Main Cable	Hanger
E [GPa]	205.938	199.073	199.073
A [m ²]	0.8203	0.1475	0.002809
I _y [m ⁴]	1.2190	-	-
I _z [m ⁴]	25.5276	-	-
J [m ⁴]	2.3364	-	-
Weight density [kN/m ³]	Final	144.112	80.362
	Const.	103.715	80.362

백(set-back)이라 한다. 만일 시공단계 초기에 셋백로프를 철거하거나 셋백을 수행하지 않는 경우 새들 전후의 장력 차이가 매우 크기 때문에 슬라이딩이 발생할 수 있다. 일반적으로 새들과 주케이블의 마찰계수는 0.10(Gimsing, N. J., "Cable supported bridges")을 제시하였으므로 본 연구도 0.10을 사용하여 시공단계별 해석을 수행하였다.

해석대상 모델의 시공단계별 슬라이딩 길이는 Fig. 10과 같다. 주케이블만 시공된 상태에서 주케이블의 슬라이딩 길이는 좌측 새들 상부의 케이블에서 측경간 방향으로 0.9809m, 우측 새들 상부의 케이블에서 측경간 방향으로 0.7797m이다. 주케이블만 가설된 상

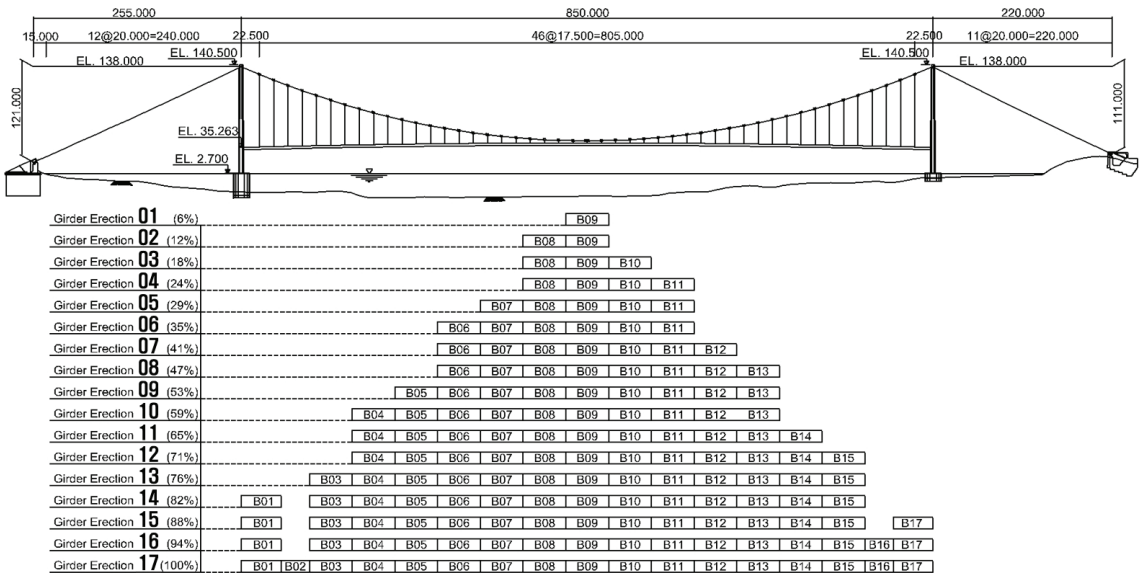


Fig. 11 Erection sequences 1~17 of suspension bridge model

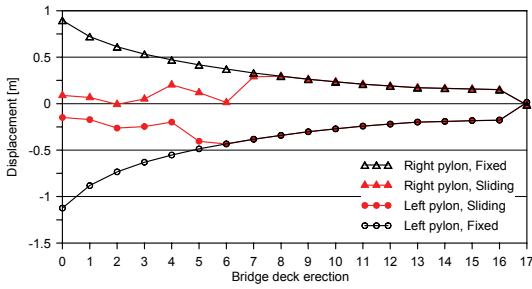


Fig. 12 Pylon top displacement

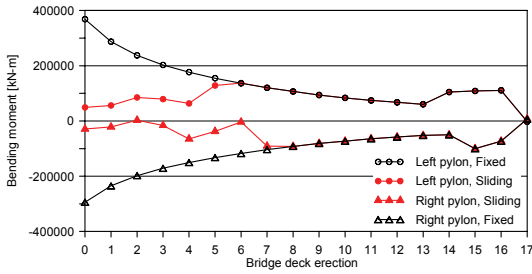


Fig. 13 Pylon Reaction moment

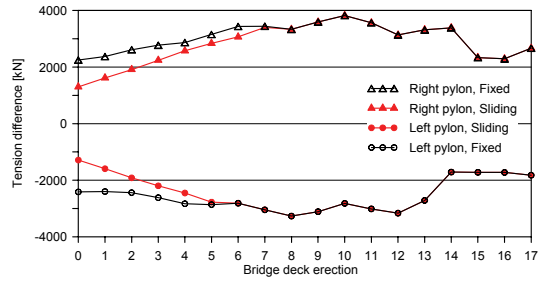


Fig. 14 Tension Difference

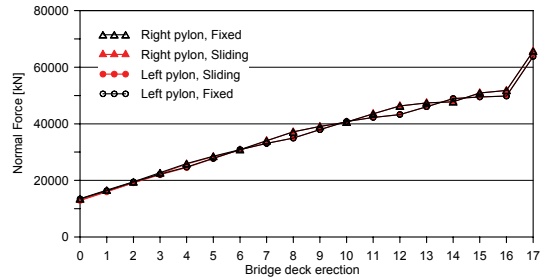


Fig. 15 Normal force at pylon top

태에서 가장 큰 슬라이딩 길이를 나타내며 보강거더의 시공단계가 진행될수록 주케이블의 장력 차이가 줄어들면서 시공 8단계 이후부터 슬라이딩이 발생하지 않는 것을 확인하였다.

주탑 정점의 교축방향 변위는 Fig. 12에 나타내었으며 이에 따른 주탑 하부의 모멘트는 Fig. 13과 같다. 케이블의 슬라이딩을 고려하지 않은 해석에서 시공단계 초기에서 주탑 정점은 큰 변위를 나타내며 주탑 하부에 큰 모멘트가 발생한다. 그러나 슬라이딩을 고려하는 경우 주탑 정점의 최대 변위는 슬라이딩을 고려하지 않은 시공 0단계의 셋백에 의한 주탑상부의 변위보다 우측 새들은 90.15% 좌측 새들은 86.75% 감소하였다. 좌측 새들은 시공 6단계, 우측 새들은 시공 8단계부터 슬라이딩이 발생하지 않는다. 시공단계에 따른 주탑하부의 모멘트 변화는 시공 0단계에서 슬라이딩이 발생하는 경우 우측 새들에서 90.07% 좌측 새들에서 86.67%의 모멘트 감소를 나타내었으며 주탑 상부의 변위의 변화와 유사한 양상을 보인다.

주탑 하부에 발생하는 시공단계를 고려한 최대 모멘트는 Fig. 13과 같이 슬라이딩이 발생하지 않는 경우

시공 0단계에서 좌측 주탑에 368416kN-m이고 슬라이딩이 발생하는 경우 시공 6단계에서 좌측 주탑에 137341kN-m이 발생한다. 시공단계 중 발생하는 슬라이딩 현상을 고려하는 경우 슬라이딩을 고려하지 않은 경우보다 주탑 하부에 작용하는 최대 모멘트가 62.72%작게 산정되었다. 현수교는 주케이블 가설 후 실시하는 셋백에 의해 주탑 하부에 큰 모멘트가 발생한다. 그러나 시공단계 초기에 슬라이딩이 발생하는 경우 슬라이딩을 고려하지 않은 경우보다 주탑 하부에 작용하는 모멘트가 60% 이상 감소하였다.

새들과 케이블의 마찰계수가 0.1인 경우 새들 전후의 케이블의 장력차이를 Fig. 14에 도시하였다. 주케이블이 새들에 전달하는 하중의 합력을 수직항력이라 하며 각 시공단계의 수직항력의 크기는 Fig. 15와 같다. 시공단계 초기에는 장력의 차이가 작지만 보강거더에 의해 주케이블에 전달되는 하중도 작으므로 슬라이딩이 쉽게 발생한다. 그러나 주케이블에 전달되는 보강거더의 하중이 커질수록 마찰에 의한 저항력이 커지므로 시공단계 후반에는 슬라이딩이 발생하지 않는다.

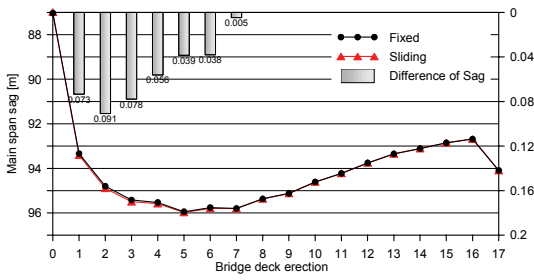


Fig. 16 Main Cable Sag

시공단계 중 주경간 새그의 변화를 Fig. 16에 비교하였다. 슬라이딩이 발생하는 경우 더 큰 새그를 가지며 시공 2단계에서 슬라이딩을 고려하지 않은 경우보다 0.09083m 큰 새그를 갖는다. 시공단계 중 가장 큰 새그 변화를 갖는 시공 5단계에서는 슬라이딩을 고려한 경우가 0.03851m 큰 새그를 나타낸다.

현수교의 주탑시공을 완료하고 주케이블의 가설시 측경간 케이블의 장력을 크게 두어 주경간에 시공될 보강거더에 의한 하중과 균형을 이루도록 한다. 그러므로 현수교의 시공단계 중 슬라이딩은 주경간 주케이블이 측경간으로 이동하게 된다. 그러나 주경간 케이블의 길이가 줄었음에도 불구하고 Fig. 16에 나타난 바와 같이 슬라이딩이 발생하면 주경간 새그가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 슬라이딩이 발생하여 주경간 케이블이 측경간으로 이동하여 주경간 새그가 감소하지만 이보다 135.5m의 주탑이 주경간 방향으로 변위를 일으키면서 주경간 새그가 증가하는 효과가 더 크기 때문이다. 슬라이딩에 의해 발생하는 새그의 변화가 서로 상쇄되기 때문에 시공단계 중의 슬라이딩 길이가 0.00~0.98m 범위임에도 불구하고 새그의 변화는 -0.049~0.091m로서 작게 나타난다.

현수교의 보강거더 시공단계에 따른 주케이블의 장력분포를 Fig. 18에 도시하였고 각 시공단계에서 주케이블의 최대장력은 Fig. 17과 같다. 보강거더가 가설되지 않은 시공 0단계에서 주케이블의 장력분포는 Fig. 18(a)에 나타난 바와 같이 좌우측경간 15965kN, 15802kN이고 주경간 13552kN를 나타내어 상대적으로 큰 차이가 발생한다. 슬라이딩을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 측경간 주케이블의 장력은 15965kN에서 14794kN으로 9.3% 감소한

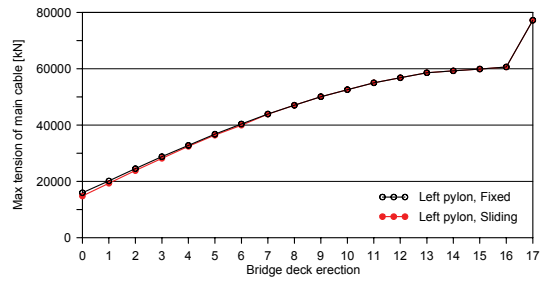
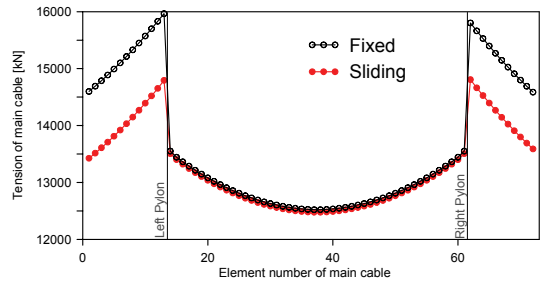
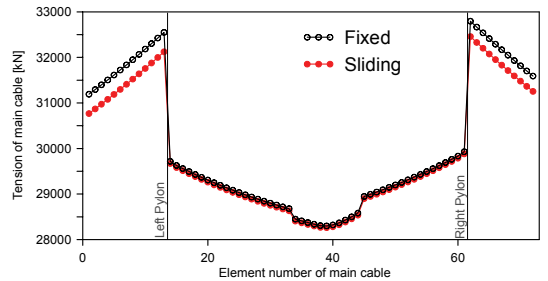


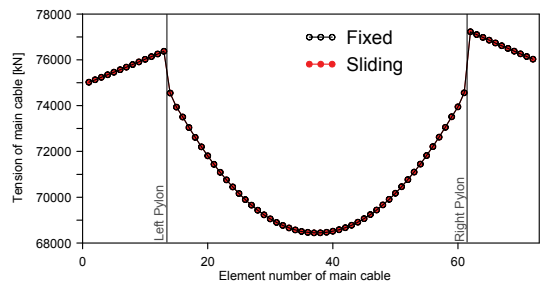
Fig. 17 Maximum Tension of main cable



(a) girder erection 00



(b) girder erection 04



(c) girder erection 17

Fig. 18 Tension distribution of main cable

다. 모든 시공단계에서 측경간의 주케이블 장력이 주경간보다 크고 완성계에서도 주경간보다 측경간의 장

력이 큰 값을 나타낸다. 완성계에서 목표형상을 이루도록 주케이블 가설시 측경간의 장력을 크게 두어 슬라이딩 길이가 시공단계 초기에 크게 발생하기 때문이다.

Fig. 11과 같은 현수교 구조물의 슬라이딩을 고려한 시공단계별 해석을 통하여 슬라이딩이 발생하는 경우와 슬라이딩이 발생하지 않는 경우의 구조물의 형상 및 부재력의 변화를 확인하였다. 슬라이딩이 발생하는 경우 주케이블의 새그의 변화는 작지만 주탑하부의 모멘트변화는 비교적 큰 값을 나타내며 주탑 상부의 변위 또한 큰 변화를 나타낸다. 그러므로 슬라이딩을 고려한 해석을 통하여 설계와 시공중에 현수교의 슬라이딩을 고려한 시공단계별 해석을 통하여 구조물이 받을 수 있는 영향을 사전에 평가하여야 한다.

4. 결 론

시공단계 및 완성계 현수교의 슬라이딩을 고려한 해석과 슬라이딩을 고려하지 않은 해석을 수행하여 응답의 차이를 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째 현수교의 시공 중 셋백로프를 철거하거나 셋백을 수행하지 않는 경우 시공단계 초기의 주케이블 슬라이딩 길이는 상대적으로 큰 값을 나타내지만 시공단계 후기와 완성계는 슬라이딩이 발생하지 않거나 작게 발생한다.

둘째 시공단계 중 슬라이딩이 발생하는 경우 주탑상부의 변위와 주탑하부의 모멘트는 감소한다.

셋째 슬라이딩이 발생하는 경우에도 주경간의 새그의 변화는 매우 작다. 슬라이딩에 의한 새그의 변화량은 시공중 보강거더의 가설에 의한 새그의 변화량에 비하여 매우 작다.

슬라이딩이 발생하는 경우 구조물에 예상치 못한 응답을 나타낼 수 있으므로 현수교의 설계 및 시공 중 주케이블과 새들 사이의 슬라이딩을 고려한 해석은 필수적으로 수행되어야 한다. 또한 본 연구의 슬라이딩 해석 방법 및 해석결과는 이후의 현수교의 설계와 시공시의 참고자료로 활용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 서울시립대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 공민식, 안찬혁, 임성순, "초기길이 수정법(ULMM)을 이용한 케이블 장력 결정에 관한 연구", 구조물진단학회 논문집, 제12권, 2호, 2008, pp. 113-120.
2. 김문영 외, "슬라이딩을 허용하는 다절점 케이블요소", 한국강구조학회 논문집, 제17권 4호, 2005, pp. 449-45.
3. 김호경, "시공단계를 고려한 현수교의 3차원 해석", 서울대학교 박사학위논문, 1993.
4. 신욱범, "자정식 현수교 케이블의 최적장력 결정", 서울시립대학교 박사학위논문, 2003.
5. 임성순, "사장교의 케이블 초기장력 및 기준길이 결정에 관한 연구", 한국구조물진단학회 제9권, 2호, 2005, pp. 137-146.
6. 장재순, "시공단계별 현수교 주케이블의 응력산정", 서울시립대학교 석사학위논문, 2008.
7. 전범렬, 박정일, 이경찬, 장승필, "슬라이딩 효과를 고려한 탄성 현수선 케이블의 정적 거동에 대한 연구", 대한토목학회 정기학술대회논문집, 2007, pp. 1700-1703.
8. Desai, Y. M. et al., "Geometric nonlinear static analysis of cable supported structures", Computers & Structures, Vol. 29, 1988, pp. 1001-1009.
9. Gambhir, M. L. and Batchelor, B., "A finite element for 3-D prestressed cable nets", Int. J. Num. Meth. Engrg., Vol. 11, 1977, pp. 1699-1718.
10. Gimsing, N. J., "Cable supported bridges : Concept and design, 2nd Ed.", John Wiley & Sons, 1997.
11. Irvine, H. M., "Cable Structures", MIT Press.
12. Ozdemir, H., "A finite element approach for cable problems", Int. J. Solids Structures, Vol. 15, 1979, pp. 427-437.
13. Zhou, B. et al., "Finite element formulation for modeling sliding cable elements", Computers & Structures, Vol. 82, 2004, pp. 271-280.

(접수일자 : 2008년 12월 31일)

(심사완료일자 : 2009년 3월 31일)