

사장교 시공단계 장력 결정

글 | 조현준 | 토목기술부 대리 || 전화 : 02-3433-7918 || E-mail : hjcho@ssyenc.com

1 머리말

근래에 들어 교량은 본 기능을 넘어 지역의 상징적 역할로서 또는 지역발전의 중추적 역할로서 그 기능이 확대되어 계획되고 있다. 이에, 사장교는 기능이 뛰어남은 물론, 규모적인 측면과 외관적인 측면에서 웅장하고 미관이 수려하기 때문에 국내뿐만 아니라 전 세계적으로도 지역의 상징적인 의미를 부각시키는 구조물로 빈번히 채택되고 있다.

사장교는 케이블 사재에 의해 보강형이 지지되는 교량형식으로 주탑과 보강형에 큰 압축력이 도입되기 때문에 현수교에 비해서 중앙지간장의 적용 길이가 짧다. 그러나 최근 자재 성능의 발달과 설계 및 시공 기술력의 진보는 사장교의 초장대화 추세를 더욱 가시화하고 있으며, 2008년에 중앙지간장이 1,088m에 이르는 세계 최장대 사장교(수통대교, 중국)가 완공되었고, 국내에서는 2009년에 중앙지간장이 800m인 사장교(인천대교)가 완공되었다.

교량 발전에 대한 끊임없는 시도는 긴 경간장으로서의 도전에 그치지 않고 기존의 일반적인 형태를 벗어나 비대칭 단면 또는 비대칭 시간과 같은 다양성을 추구하며 설계와 시공에 반영하고 있다.



[그림 1] 수통대교



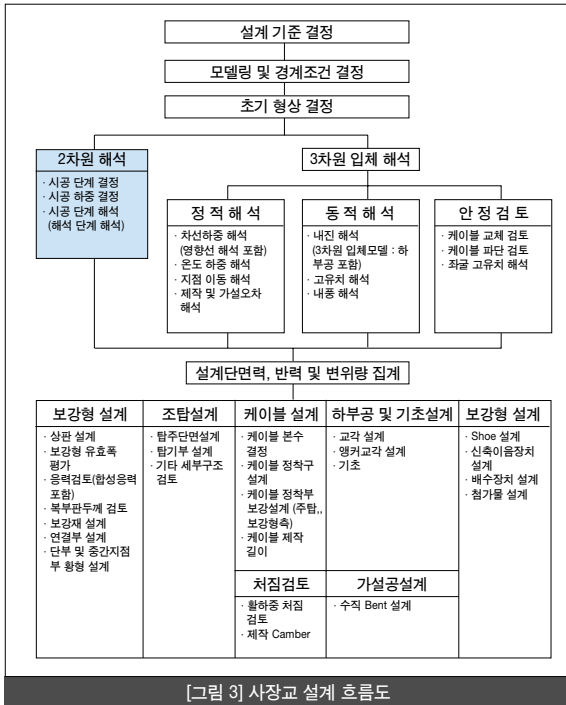
[그림 2] 인천대교

사장교는 케이블 장력의 도입양에 따라, 설계자의 의도대로 구조 거동을 달리할 수 있는 효율적인 설계가 가능하다. 케이블 장력은 초기평형상태해석과, 시공단계해석을 통해 결정되는데, 초기평형상태해석은 완공 후 교량의 기능성에 맞추어 필요한 케이블의 장력 또는 무응력 길이를 결정하는 것을 의미하며, 이에 대해서는 앞서 본 기술지 2009년 가을호에서 소개한 바가 있다.

시공단계해석이란 초기평형상태가 구현되도록 실제 시공 중 케이블의 장력 또는 무응력 길이를 산정하고, 시공 중 구조물의 건전성을 평가하는 과정을 의미한다. 사장교는 다수의 케이블로 지지되는 구조 형식이므로 일반 거더교에 비해 적절한 초기평형상태를 구현할 수 있는 시공단계 중의 케이블 장력이 결정되어야 한다.

또한 장대시간 사장교에서는 대부분 캔틸레버 공법으로 시공되는데 이러한 가설 단계를 적절히 모사하는 시공단계해석이 필요하며, 시공단계해석을 수행하여 실제 가설 중 발생하는 부재력을 확인하기 때문에 이는 가설 중 구조물의 안전성과 매우 밀접한 관계에 있다.

이에, 본 호에서는 2009년 가을호에 수록된 사장교의 초기평형상태 장력 결정방법에 이어, 시공단계 장력 결정 방법에 대해 소개하기로 한다.



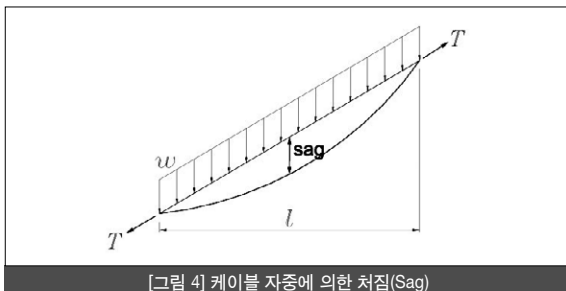
[그림 3] 사장교 설계 흐름도

2 구조적 특성

사장교의 비선형 거동의 여러 가지 원인 중 가장 큰 영향을 미치는 요인으로는 새그(Sag)에 의한 케이블의 기하 비선형 거동과 보강형과 주탑에 작용하는 큰 압축력에 의한 휨강성의 변화 등이 있다.

2-1. 케이블 부재의 비선형 거동

장대 경간인 사장교에서는 케이블 자체의 자중에 처짐(Sag)이 발생하게 되는데 이로 인하여 탄성계수가 현저하게 감소하게 된다. 이러한 처짐의 영향을 고려하기 위하여 식(1)에 나타난 바와 같이 케이블의 자중과 장력에 따른 처짐의 탄성계수 변화 효과를 고려한 Ernst의 등가탄성계수를 사용할 수 있다.



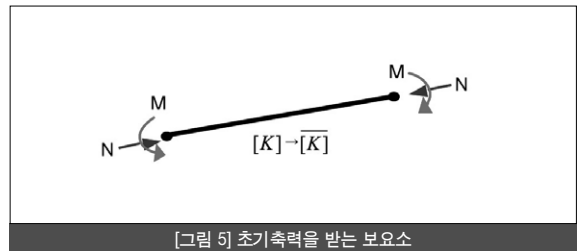
[그림 4] 케이블 자중에 의한 처짐(Sag)

$$E_{eq} = \frac{E}{\left(1 + \frac{w^2 l^2}{12T^3} EA\right)} \quad (1)$$

여기서, E_{eq} 는 케이블 새그를 고려한 등가탄성계수로 w 는 케이블의 단위 길이당 중량, l 은 케이블의 수평 길이이며, T 는 케이블에 작용하는 인장력이다.

2-2. 보-기둥 부재의 비선형성

사장교의 보강형과 주탑에서는 큰 압축력과 휨모멘트가 동시에 작용하고, 이들의 상호작용으로 비선형 거동을 보인다. 이는 일반적으로 초기축력을 받는 보요소의 강성행렬을 사용하여 그 효과를 고려할 수 있다.



[그림 5] 초기축력을 받는 보요소

3 시공단계 장력 결정

사장교는 주로 캔틸레버 공법으로 시공이 이루어지므로 효율적이고 경제적인 시공이 가능하지만 시공 중에 과도한 처짐이나 응력이 발생하고, 불안정한 상태가 되기 쉽다. 따라서 사장교의 설계에서는 원성단계에서의 고정하중에 대한 초기평형상태해석과 함께 시공단계해석을 수행하여 시공 중의 안전성에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다.

또한, 시공 중에는 설계 시에 고려하지 못한 현장 여건, 하중의 불확실성, 각 부재의 제작오차 등의 수많은 요인으로 불가피하게 시공오차가 발생하고, 이러한 시공오차는 오차원인분석을 통해 케이블의 장력 또는 길이를 조정하여 보정하게 된다. 완공 후 형상이 설계자가 원하는 목표형상으로 이루어지도록 하기 위해서는 엄격한 시공오차관리가 필요하고, 우선적으로 시공형상을 결정하기 위한 정확한 시공단계해석이 요구된다.

시공단계해석은 시공의 진행에 따른 구조계와 하중의 변화를 정확하게 모사하기 위해서 해석적으로 의미를 갖는 시공과정을 시공명

령어로 정의하여 단계적으로 해석을 수행하는 것이다. 캔틸레버 공법으로 가설되는 사장교의 시공단계해석은 해석의 진행 순서에 따라 순방향 해석(Forward Analysis)과 역방향 해석(Backward Analysis)으로 구분된다.

순방향 해석은 일반적인 시공단계해석 방법으로서 실제 시공이 진행되는 순서대로 해석을 수행하는 방법이다. 역방향 해석은 초기 형상이 결정되어 있는 완성된 구조물로부터 시공순서의 역순으로 부재와 하중을 제거해 나가면서 해석을 수행하는 방법이다.

사장교의 시공형상은 주로 케이블의 긴장력(Prestressing Force)에 의해 결정되므로 시공 중에 구조물에 과다한 처짐이나 응력이 발생하지 않도록 하고, 시공이 완료되는 시점에서 초기평형상태와 같은 최적의 상태를 구현하기 위해서는 적절한 케이블 긴장력을 산정하는 것이 무엇보다도 중요하다.

하지만 케이블 설치 시에 도입된 긴장력은 가설이 진행되는 동안 지속적으로 변하게 되고, 완공 후에 초기평형상태와 같은 최적의 상태를 구현할 수 있는 케이블 긴장력을 산정하는 것은 쉽지 않은 문제이다. 이러한 이유로 케이블 긴장력은 일반적으로 역방향 해석을 이용하여 결정하게 된다.

일반적으로 사장교 설계 시에는 역방향 해석을 수행하여 각 단계 시 도입해야 할 케이블의 긴장력을 결정하고, 이를 이용하여 다시 순방향 해석을 수행하게 된다. 구조물이 탄성범위 내에서 거동한다면 역방향 해석으로 구한 긴장력을 이용하여 순방향 해석을 수행할 경우 이론적으로 최종단계에서는 초기평형상태와 같은 최적의 상태가 구현되어야 한다.

하지만 순방향 해석 시 중앙경간 키새그먼트의 폐합단계에서는 폐합점에서의 처짐, 회전각 및 축방향 변위에 관한 적합조건이 만족되지 않으며, 이러한 폐합단계를 시공단계해석 시에 고려하지 않으면 최종단계에서는 초기평형상태와 다른 결과를 보이게 된다. 따라서 폐합단계의 적합조건을 만족시키기 위해 현장에서는 부가적인 하중(폐합하중)을 적용하게 되는데 이러한 폐합하중을 결정하는 과정을 폐합해석이라고 한다. 일반적으로 폐합하중으로 데릭 크레인의 인양력과 케이블 장력 또는 주탑부에 설치된 수평재이 사용된다.

3-1. 역방향 해석

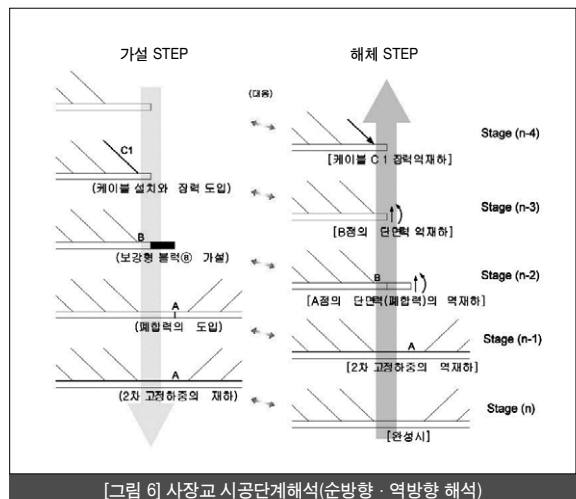
역방향 해석(Backward Analysis)은 완성계로부터 이미 가설되어 있는 부재와 작용하고 있는 하중을 실제 시공순서의 역순으로 제거해 나가면서 해석을 수행하는 방법이다. 역방향 해석은 순방향

해석에서 결정하기 어려운 시공 중에 도입해야할 케이블 긴장력을 결정하기 위한 보조적인 수단으로 이용된다. 즉, 초기평형상태해석에 의해 구조물의 처짐이나 단면력이 결정되어 있는 완성계로부터 시공과정의 역순으로 부재나 하중을 차례로 제거해 나가면서 해석을 수행하면 케이블을 제거하기 직전 단계에서 케이블 설치 시에 도입해야할 긴장력을 쉽게 결정할 수 있다. 역방향 해석은 이미 널리 알려진 방법으로서 많은 시공 사례에서 그 타당성이 검증되었다.

[그림 6]에서 가설 STEP을 따라 해석하는 것을 순방향 해석이라고 하고, 해체 STEP을 따라 해석하는 것을 역방향 해석이라고 한다. 역방향 해석을 이용하여 각 시공단계에서의 단면력이나 케이블 긴장력을 계산하는 구체적인 과정은 다음과 같다.

(1) 2차 고정하중의 역재하 : 완성계 상태에서 2차 고정하중을 실제 작용방향의 반대방향으로 재하한다. 계산된 단면력을 완성계 상태의 단면력에 가산한다. 이 때의 단면력 합계가 2차 고정하중을 재하하기 직전의 단면력이 된다. (Stage n-1)

(2) 폐합력의 역재하 : 보강형의 폐합위치에서의 단면력에 상당하는 힘을 연결을 해제한 후 양쪽 부재의 단부에 반대방향으로 재하한다. 계산된 단면력을 (1)의 단면력에 가산한다. 이때의 단면력 합계가 폐합하기 직전의 단면력이 된다. 만약 폐합위치의 단면력이 이미 "0" 이라면 폐합력(폐합을 위한 강제력)을 이용하지 않고 폐합할 수 있다. 폐합력이 "0"이 되도록 계획되어 있으면 (1)의 단면력이 그대로 폐합하기 직전의 단면력이 된다. (Stage n-2)



[그림 6] 사장교 시공단계해석(순방향·역방향 해석)

(3) 보강형 블럭^㉔의 제거 : 연결점의 단면력(2)에서의 단면력)에 상 당하는 힘을 블럭^㉔를 제거한 후 남아있는 부재의 단부에 반대방 향으로 재하한다. 계산된 단면력을 (2)의 단면력에 가산한다. 이때의 단면력 합계가 블럭^㉔를 가설하기 직전의 단면력이 된다. 또한, 이 때의 케이블 C1의 장력이 케이블 가설시 도입 긴장력이 된다. (Stage n-3)

(4) 케이블 C1의 제거 : 케이블 C1의 장력을 보강형과 주탑에 반대 방향으로 작용시킨다. 계산된 단면력을 (3)의 단면력에 가산한다. 이때의 단면력 합계가 케이블 C1을 가설하기 직전의 단면력이 된 다. (Stage n-4)

엄밀한 시공단계해석을 위해서는 가설장비나 작업하중 등의 추가 적인 하중과 경계조건의 변화도 고려해야만 한다. 또한, 콘크리트 또는 합성형 사장교의 경우, 크리프(Creep)와 건조수축(Shrinkage) 과 같은 시간의존적 효과가 구조물에 미치는 영향이 크기 때문에 이를 고려한 시공단계해석이 필요하다.

3-2. 순방향 해석

순방향 해석은 실제 시공순서대로 해석을 수행하는 방법으로서 케이블 설치시의 긴장력을 결정하기 어렵다는 단점이 있지만 실제 시공 상황을 정확히 해석에 반영할 수 있다. 순방향 해석 시 정확한 시공형상을 얻기 위해서는 케이블 긴장단계나 부재의 접선방향 가설을 모사할 수 있어야 한다.

(1) 케이블 장력의 도입

케이블의 장력은 케이블을 설치할 때 도입되는 장력으로 케이블의 긴장이 완료된 평형상태에서의 장력을 의미한다. 역방향 해석으로 부터 결정된 긴장력을 케이블에 정확히 도입하기 위해서는 케이블 의 긴장단계를 해석적으로 모사할 수 있어야 한다.

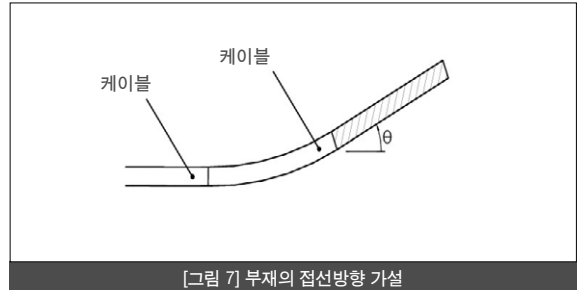
일반적으로 Pretension 하중으로 초기 케이블 가설 장력을 재하하 고, 불평형 하중이 허용치를 만족할 때까지 반복해석을 수행하여 도입장력을 결정한다.

(2) 부재의 접선방향 가설

캔틸레버 공법으로 시공을 진행할 경우, 이미 가설된 부재의 끝단 에 새로운 부재를 연결시켜 가설하게 된다. 이때, 새로운 부재는 시 공캠버를 적용하지 않는다면 [그림 7]에서와 같이 기존 부재의 접

선방향으로 가설하여 회전각의 연속성을 확보하게 된다.

사장교는 시공과정에서 변위가 크게 발생하므로 엄밀한 시공형상 을 해석적으로 구현하기 위해서는 접선방향으로 가설되는 부재의 좌표를 정확하게 산정해야 한다.



3-3. 폐합단계 해석

캔틸레버 공법을 이용하여 시공을 진행할 경우 사장교의 중앙부어 서는 키 세그먼트를 이용하여 두 개의 독립적인 캔틸레버 구조계 를 폐합하는 공정이 필요하다.

이때, 연결되는 양쪽 캔틸레버 부재는 연결점에서 동일한 처짐과 회전각이 유지되도록 정밀하게 시공되어야 한다.

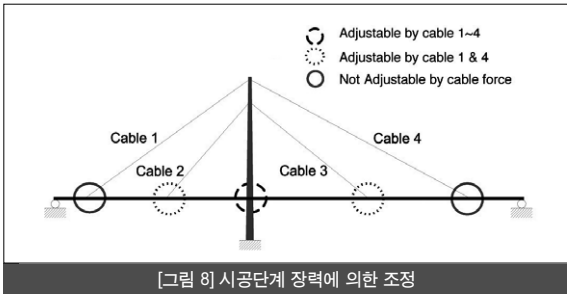
하지만 폐합되기 전까지는 주탑을 중심으로 두 개의 독립적인 구 조계가 형성되고 폐합단면에서는 단면력이 존재하지 않기 때문에 연결점에서는 처짐, 회전각 및 축방향 변위에 관한 적합조건이 만족 되지 않는다.

두 개의 독립적인 구조계의 연결부에서 변위에 관한 적합조건을 만족시키기 위해서는 완성계의 폐합단면에 작용하고 있는 단면력 을 양측 구조물의 폐합단면에 재하하여야 한다.

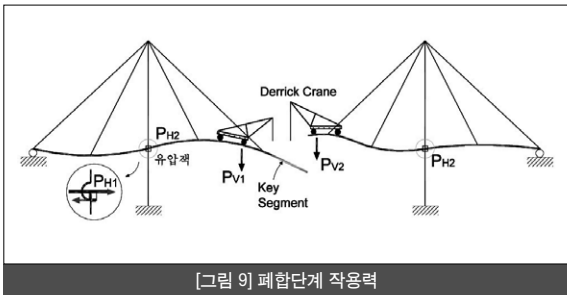
하지만 실제 시공현장에서 폐합단면에 모멘트나 전단력, 그리고 축력과 같은 단면력을 작용시키는 것은 불가능하므로 이는 이론적 으로만 타당하다.

따라서 현장에서 적용 가능한 외력을 이용하여 폐합단면에서의 적합조건을 만족시켜야 하고, 이러한 외력을 구하는 과정을 사 장 교의 일반적인 폐합 해석으로 정의할 수 있다.

또한 폐합 해석은 폐합단계에서의 단차를 일치시키는 역할뿐만이 아니라 케이블 장력으로 제어할 수 없는 부분의 부재력을 조절하 기 위한 절차로도 적용된다.



가령, 캔틸레버 공법으로 시공해 나가면 [그림 8]과 같이 좌우 주탑에 대하여 외측 케이블로 지지되어 있는 지점에서의 보강형 모멘트는 외측 케이블의 설치 단계시 조정의 대상이 될 수 없다. 이러한 경우 더욱 적합한 부재력 도출을 위한 조정 조건으로 데릭 크레인의 수직력이나 수평력의 수평력을 사용하여 모멘트를 조정하게 된다. 따라서 폐합력의 산정은 서로 다른 두 독립계의 단차를 일치시키는 과정뿐만 아니라 최종적으로 만족해야 할 부재력을 위한 조정력 산정을 의미하기도 한다.



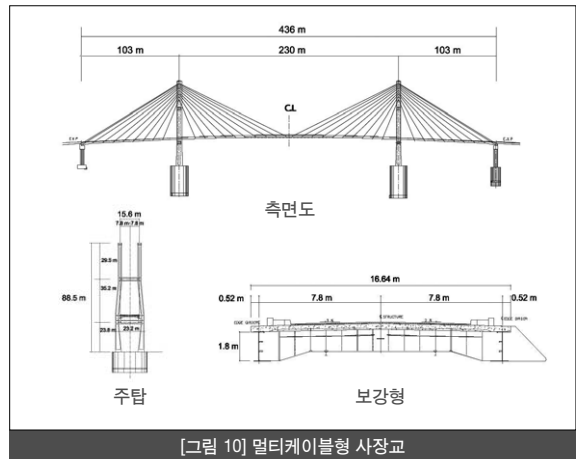
본고에서는 폐합단면에서 양쪽 부재의 처짐과 회전각을 조정하기 위한 외력으로 [그림 9]에서와 같이 좌우 데릭 크레인의 인양력 (P_{V1} , P_{V2})을 선택하였다. 또한, 거더의 축방향 변위를 조정하기 위해 캔틸레버 공법에 의한 가설시 교량의 교축방향 구속장치(Fixing Device)로서 좌우 주탑부에 설치되는 수평책(P_{H1} , P_{H2})을 이용하였다. 즉, 수평책을 이용하여 보강형 시스템 전체를 측경간 또는 중앙경간으로 이동시켜 축방향 변위를 조정할 수 있다. 폐합단면에서의 변위에 관한 적합조건을 만족시키기 위해 필요한 데릭 크레인의 인양력과 수평책에 의한 수평력의 크기를 다음의 식에 의해 산정한다.

$$\{P\} = [S]^{-1} \{Δ\} \quad (2)$$

여기서, $\{P\}$ 는 데릭 크레인의 인양력과 수평책에 의한 수평력으로 구성된 하중벡터이며, $\{Δ\}$ 는 좌우 캔틸레버 단부에서의 처짐 차이, 회전각 차이 및 축방향 변위 차이로 구성된 벡터이고, $[S]$ 는 데릭 크레인의 인양력과 케이블 장력, 그리고 수평책에 의한 수평력에 대응하는 단위 하중을 작용시켜 각 변위성분에 관한 영향행렬이다. 변위오차가 제거되면 연결점을 구속하고, 폐합시공을 위해 작용시켰던 외력 $\{P\}$ 를 제거한다.

4 수치 예제

앞서 기술한 내용들에 대한 예제 교량으로서 다음의 멀티케이블형 사장교를 선정하였다. 본 예제교량은 [그림 10]과 같이 총 40개의 케이블이 보강형을 지지하고 있는 대칭형 강합성 사장교로서 단면 제원 및 재료 물성치는 <표 1>과 같다.



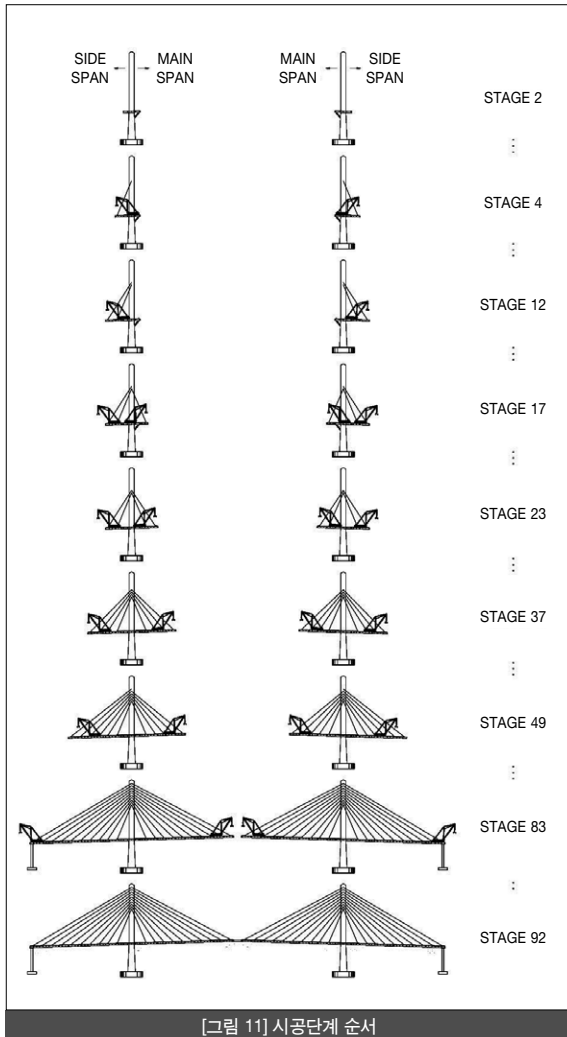
<표 1> 예제 교량 단면 상수 및 물성치

| Part | E (kN/m ²) | ν | w (kN/m ²) | A (m ²) | I (m ⁴) |
|--------------|------------------------|-------|------------------------|---------------------|---------------------|
| Steel Girder | 2.1E+8 | 0,3 | 77,0 | 0,1016~0,1488 | 0,057~0,129 |
| Con' c Slab | 3,0E+7 | 0,167 | 24,5 | 3,936~4,716 | 0,0221~0,0259 |
| Cable | 2,0E+8 | 0,3 | 78,5 | 0,00305~0,007623 | - |
| Tower | 2,806E+7 | 0,167 | 24,5 | 9,2~32,5 | 25,57~114,43 |

본 예제 교량은 교축방향을 따라 보강형의 중심에 대하여 대칭이다. 따라서 이 대칭성을 이용하여 2차원으로 간략화한 전산 모델을

구축하였다. 즉 보강형과 주탑은 각각 강성을 1/2로 고려하였고 케이블은 1면만을 배치하였으며, 보강형과 주탑에서 단면이 변하는 곳은 전후 강성의 평균값을 사용하였다. 보강형과 주탑은 P-4 효과를 고려한 보요소로, 케이블 부재는 새그 효과 및 기하강성을 고려한 케이블 요소를 사용하였다.

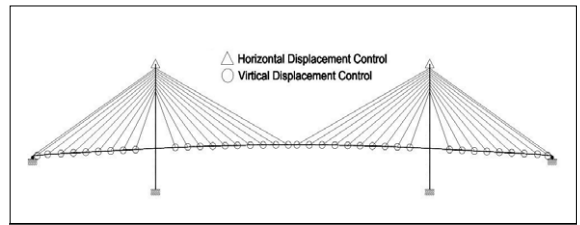
지지조건은 교각부와 주탑부 모두 회전변위에 대해서는 자유롭게 설정하였고 교축방향 및 연직방향 변위에 대해서는 강성이 $K_x=1.0 \times 10^4$ 와 $K_y=3.716 \times 10^6$ 인 스프링요소를 사용하여 탄성받침을 모사하였다. 또한 2차 고정하중은 -30kN/m 를 적용하였고, 합성단면을 일괄 시공하는 것으로 가정하였으며, 시간효과는 생략하였다. 시공단계는 총 92단계로 분류하였으며, 케이블의 새그 효과, 그리고 보강형 및 주탑의 P-4 효과를 고려하였다.



[그림 11] 시공단계 순서

4-1. 역방향 해석

시공 중 도입되어야 할 케이블 긴장력의 초기 가정값을 결정하기 위하여 역방향 해석을 수행하였다. 역방향 해석으로부터 구해지는 케이블 긴장력은 초기평형상태에 따라 달라지는데 여기서는 [그림 12]와 같이 처짐제어로 선정된 해석 결과를 이용하였으며, 역방향 해석으로부터 결정된 케이블의 긴장력을 초기평형상태의 최종 장력과 함께 <표 2>에 나타내었다.



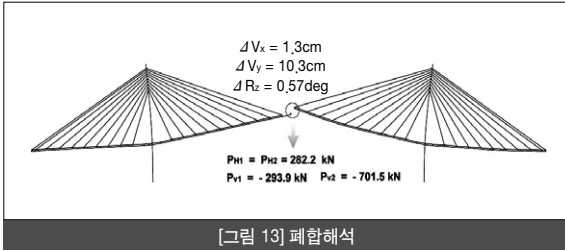
[그림 12] 초기평형상태의 결정(처짐제어)

<표 2> 시공단계 케이블장력

| Cable No | Cable Tension (kN) | | | Cable No | Cable Tension (kN) | | |
|----------|--------------------|--------|-------|----------|--------------------|--------|-------|
| | Initial | Const. | Diff. | | Initial | Const. | Diff. |
| 1 | 4601 | 2561 | 2039 | 21 | 3051 | 856 | 2194 |
| 2 | 3225 | 1429 | 1795 | 22 | 3500 | 1512 | 1988 |
| 3 | 2460 | 916 | 1544 | 23 | 3237 | 1359 | 1879 |
| 4 | 3117 | 1277 | 1840 | 24 | 2989 | 1204 | 1784 |
| 5 | 2736 | 1033 | 1703 | 25 | 2644 | 946 | 1697 |
| 6 | 2517 | 824 | 1693 | 26 | 2361 | 910 | 1452 |
| 7 | 2334 | 830 | 1504 | 27 | 2197 | 797 | 1400 |
| 8 | 2133 | 690 | 1443 | 28 | 1981 | 655 | 1327 |
| 9 | 1632 | 542 | 1090 | 29 | 1474 | 610 | 864 |
| 10 | 2726 | 1885 | 840 | 30 | 2502 | 2220 | 283 |
| 11 | 2502 | 2220 | 283 | 31 | 2726 | 1885 | 840 |
| 12 | 1474 | 610 | 864 | 32 | 1632 | 542 | 1090 |
| 13 | 1981 | 655 | 1327 | 33 | 2133 | 690 | 1443 |
| 14 | 2197 | 797 | 1400 | 34 | 2334 | 830 | 1504 |
| 15 | 2361 | 910 | 1452 | 35 | 2517 | 824 | 1693 |
| 16 | 2644 | 946 | 1697 | 36 | 2736 | 1033 | 1703 |
| 17 | 2989 | 1204 | 1784 | 37 | 3117 | 1277 | 1840 |
| 18 | 3237 | 1359 | 1879 | 38 | 2460 | 916 | 1544 |
| 19 | 3500 | 1512 | 1988 | 39 | 3225 | 1429 | 1795 |
| 20 | 3051 | 856 | 2194 | 40 | 4601 | 2561 | 2039 |

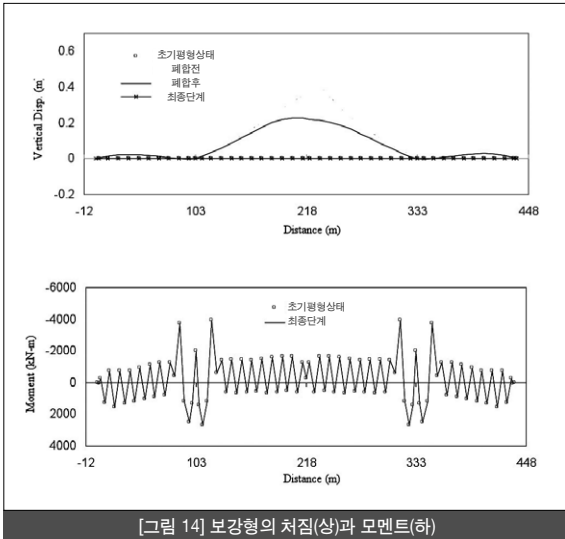
4-2. 순방향 해석

역방향 해석으로부터 구한 장력을 순방향으로 진행하면 키세그먼트 접합 단계에서는 접합점의 좌우 단차가 발생한다. 이를 폐합 해석으로부터 산정한 외력을 도입하여 일치시켜 폐합하면 최종적으로 초기평형상태와 일치하게 된다. [그림 13]은 키세그먼트 접합단계에서의 좌우 단차를 이용해 폐합력을 산정하는 과정을 보여주고 있다.

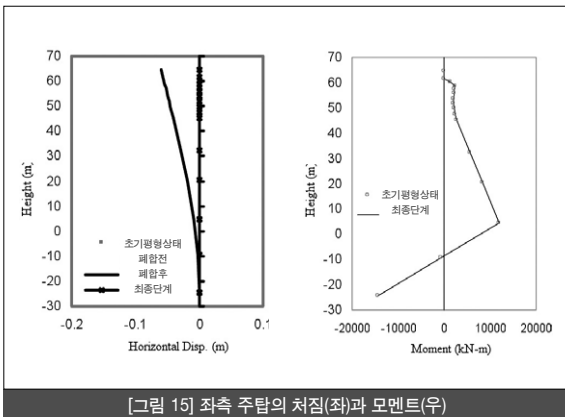


[그림 13] 폐합해석

[그림 14]과 [그림 15]는 역방향 해석을 통해 산정된 케이블 장력을 이용하여 순방향 해석을 통해 폐합과정을 거쳐 최종 산정된 처짐과 부재력 결과이다. 초기평형상태시의 부재력 및 처짐과 비교해 볼 때, 그 값들이 매우 근사함을 알 수 있다.



[그림 14] 보강형의 처짐(상)과 모멘트(하)



[그림 15] 좌측 주탑의 처짐(좌)과 모멘트(우)

5 맺음말

본 고에서는 사장교의 초기평형상태 구현을 위한 시공 시 도입 장력 결정 방법과 시공단계해석에 관련된 내용들을 소개하였다. 역방향 해석으로부터 결정된 케이블 설치 시의 긴장력을 이용하여 순방향 해석을 수행하고, 키 세그먼트의 폐합단계에서 폐합해석을 실시하여, 시공시 적용 가능한 폐합력을 산정할 수 있다. 2주탑 멀티케이 블형 사장교를 예제 교량을 통하여 그 타당성을 확인하였으며, 시 공단계해석을 통한 최종 형상과 부재력이 초기평형상태의 값과 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. S

참고문헌

1. Troitsky M.S., Cable-Stayed Bridges : theory and design, BSP Professional Books, 1988
2. Gimsing, N. J., "Cable Supported Bridges, concept and design, second ed.", John Wiley, 1997
3. Wang P. H., "Analysis of Cable-Stayed Bridges during Construction by Cantilever methods", Computers & Structures, Vol.82, 2004
4. "삼천포대교 구조계산서", 1999, 건설교통부
5. 화명대교 구조계산서, 2005, 부산광역시 건설본부
6. 김제춘, 장승필, "시공단계를 고려한 사장교의 케이블 긴장력 결정", 대한토목학회 논문집, 제20권, 제3A호, 2000
7. 박용명, 윤재순, 조현준, 박충근, "초기평형상태 구현을 위한 사장교의 폐합단계해석", 한국 강구조학회논문집, 제19권, 제2호, 2007