

인천대교 폐합해석

Connecting Analysis for Incheon Bridge

류근원* · 이해성** · 정길제*** · 임덕기**** · 김창현*****

Lyu, Keun Won · Lee, Hae Sung · Jung Kilje · Im, Duk Ki · Kim, Chang Hyun

1. 서론

19세기부터 시작된 현대적인 의미에서의 케이블 교량의 건설은 근래에 와서 국내에서도 활발히 진행되고 있다. 캔틸레버 공법으로 시공되는 대칭형 사장교의 경우 일반적으로 다른 형식의 교량과 다른 시공단계를 거쳐야 공정이 완료되는데 이 단계는 폐합시공이라고 할 수 있다. 이 연구에서는 사장교의 최종 시공 단계인 폐합 방법을 제안하고 이를 실제 사장교의 시공에 적용하였다. 캔틸레버 공법으로 시공되는 사장교의 폐합 시공은 키-세그먼트와 폐합 접합 면의 회전각과 수직 처짐이 일치해야 하는데 이러한 폐합단면의 수직 처짐과 회전각을 조정할 수 있는 힘은 사장 케이블의 장력과 키-세그먼트를 인양하는 데릭 크레인의 인양력이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 폐합단면의 수직 처짐과 회전각에 대한 적합 조건을 만족시키기 위하여 케이블의 무용력 길이와 데릭 크레인의 인양력을 뉴턴 랩슨 방법에 의하여 구하는 방법을 제안하였다. 그러나 회전각을 맞추기 위하여 과도한 케이블의 길이를 조정하는 일은 실제 교량의 시공에서 현실적으로 불가능한 방법이므로 이를 보완하기 위하여 양 거더 상의 이동 가능한 하중의 위치를 조정하여 케이블의 조정길이를 최소화하는 기법을 제안하였다. 제안된 기법을 실제 시공중인 인천대교의 폐합 시공 단계에 적용하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 사장교의 폐합단계 해석기법

캔틸레버 공법으로 시공되는 사장교의 시공단계에서는 사장교의 중앙부에서 거더가 폐합되기 전까지는 타워를 중심으로 두개의 독립적인 구조계가 구성되고 폐합단면에서 단면력이 존재하지 않기 때문에 폐합단면에서의 적합조건이 만족되지 못한다. 완성계에서 작용하고 있는 폐합단면에서의 단면력을 양측 구조물의 폐합단면에 재하 하여야 만이 폐합단면에서 구조물의 변위 및 처짐각이 일치하게 된다. 그러나, 실제 시공단계에서 완성계 폐합단면에 작용하는 단면력을 재하하는 것은 거의 불가능하기 때문에 시공 중에 재하할 수 있는 외력에 의하여 적합조건을 만족시켜야 한다. 실제 시공 중에 폐합단면에서의 처짐을 조정할 수 있는 힘은 최

* 서울대학교 건설환경공학부 박사과정

** 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수 · 공학박사 · E-mail: chslee@snu.ac.kr

*** 서울대학교 건설환경공학부 박사과정

**** 삼성건설 인천대교 현장 · 차장 · 기술사

***** 삼성건설 인천대교 현장 · 대리 · 토목기사

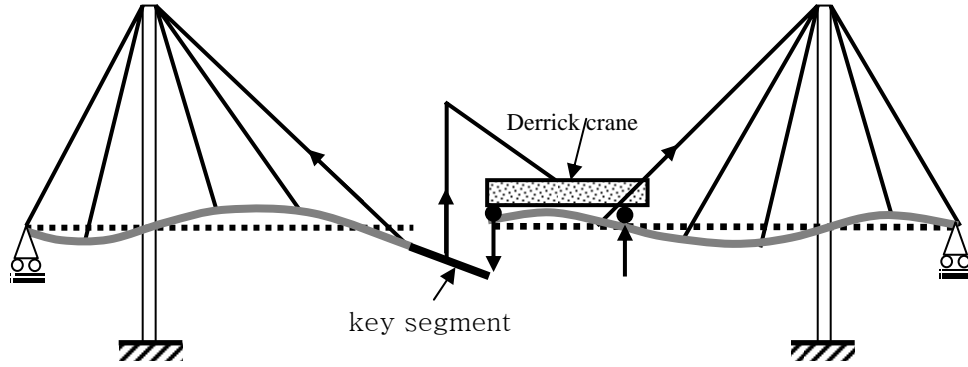


그림 1. 사장교의 폐합 과정

중 키 세그먼트를 인양하는 데릭 크레인의 인양력과 사장 케이블의 장력이다. 사장 케이블의 장력은 케이블의 길이를 조정하여 변화시킬 수 있다. 이 연구에서는 시공단계에서 폐합단면의 수직 처짐과 회전각에 대한 적합 조건을 만족시킬 수 있는 케이블의 초기 무응력 길이와 데릭 크레인의 인양력을 뉴턴-랩슨 (Newton-Raphson) 방법에 의하여 구하는 방법을 제시한다. 뉴턴-랩슨 방법에서 필요한 변위의 민감도는 직접 미분법에 의하여 구한다.

그림 1에는 폐합 시공 단계에서의 사장교의 구조 시스템을 보이고 있다. 폐합 시공은 먼저 키 세그먼트 (Key Segment)를 왼쪽 구조물에 가설하고 오른쪽 구조물에 설치된 데릭 크레인이 키 세그먼트를 인양하여 폐합단면에서의 변위 및 처짐각을 일치시켜 두 구조물을 폐합하는 것으로 가정한다. 이때 데릭 크레인에 적절한 인양력을 가하면 양쪽 구조물의 폐합단면에서의 처짐을 일치시킬 수 있다. 그러나 인양력의 조정만으로는 처짐각을 일치시킬 수 없기 때문에 추가로 사장 케이블의 장력을 조정하여야 한다.

양쪽 구조물이 폐합단면에서 만족시켜야 하는 적합조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta^L(\mathbf{L}_0^L, P) &= \delta^R(\mathbf{L}_0^R, P) \\ \theta^L(\mathbf{L}_0^L, P) - \theta^R(\mathbf{L}_0^R, P) &= \varepsilon \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 δ^L , δ^R , θ^L 그리고 θ^R 은 각각 폐합 시공 직전의 왼쪽 구조물과 오른쪽 구조물의 처짐 및 처짐각이며, \mathbf{L}_0^L , \mathbf{L}_0^R 그리고 P 는 각각 왼쪽 구조물과 오른쪽 구조물에 설치된 사장 케이블의 무응력장 길이와 크레인의 인양력이다. 식 (1)에서 ε 은 처짐각의 허용오차를 나타낸다. 케이블 지지 교량은 비선형 거동을 하기 때문에 Newton-Raphson 방법에 의한 반복계산에 의하여 식 (1)에서 정의된 적합조건을 만족시키는 인양력과 케이블의 초기 길이를 구할 수 있다. 식 (1)을 1차항까지를 포함하는 Taylor 급수로 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_k^L + \frac{\partial \delta_k^L}{\partial \mathbf{L}_0^L} \Delta \mathbf{L}_0^L + \frac{\partial \delta_k^L}{\partial P} \Delta P &= \delta_k^R + \frac{\partial \delta_k^R}{\partial \mathbf{L}_0^R} \Delta \mathbf{L}_0^R + \frac{\partial \delta_k^R}{\partial P} \Delta P \\ \theta_k^L + \frac{\partial \theta_k^L}{\partial \mathbf{L}_0^L} \Delta \mathbf{L}_0^L + \frac{\partial \theta_k^L}{\partial P} \Delta P - \left(\theta_k^R + \frac{\partial \theta_k^R}{\partial \mathbf{L}_0^R} \Delta \mathbf{L}_0^R + \frac{\partial \theta_k^R}{\partial P} \Delta P \right) &= \varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 아래 첨자 k 는 반복 계산 회수를 나타낸다. 식 (2)에는 조건식의 개수 보다 많은 수의 미지수가 포함되어 있기 때문에 식 (2)를 풀기 위하여는 추가의 조건식이 필요하지만 일반적으로 사장교에서는 폐합 단면에 가장 가까이 설치된 케이블이 폐합 단면의 처짐에 가장 민감한 영향을 미치기 때문에 중앙 경간 가장 바깥쪽에 설치된 케이블을 길이를 조정하고, 대형 사장교에서는 왼쪽과 오른쪽 구조물의 케이블 조절량이 같다고 가정하여 미지수를 2개로 줄일 수 있다. 이러한 추가의 조건은 문제에 따라 달라지게 되기 때문에 일반적으로 정의할 수 없지만, 문제에 따라 적절한 적합조건과 미지수를 선택할 수 있을 것으로 판단된다.

식 (2)에는 케이블의 초기 길이 및 데릭 크레인 인양력에 대한 민감도가 포함되어 있다. 변위의 민감도와 데릭 크레인의 인양력에 대한 민감도는 케이블의 평형 방정식과 적합 조건식을 이용하여 계산한다.

3. 폐합 해석 결과의 적용

인천대교 폐합시공을 위하여 이 연구에서 제안한 폐합 단계 해석 기법을 적용하여 폐합의 상황을 예측하고 실제 상황과 비교하였다. 인천대교는 서쪽 거더에 104개 케이블, 동쪽 거더에 104개 케이블이 시공되어 있으며 폐합 시공 단계가 이루어지기 전까지는 서쪽 거더와 동쪽 거더가 각각의 구조체로 이루어져 있다. 폐합 시공의 순서는 다음과 같다. 동쪽 거더에 데릭 크레인이 키 세그먼트를 들어올려 서쪽 거더에 접합시킨다. 이 상태에서 데릭 크레인의 인양력으로 거더를 끌어올려 양쪽 거더의 높이를 맞추게 된다. 양 거더의 높이가 맞춰지면 거더를 고정하기 위한 세팅 빔 두 대를 거더 중앙에 설치하고 데릭 크레인의 인양력을 제거하여 거더의 높이를 고정시키게 된다. 세팅 빔은 실제 시공 중에 하중조건 변화, 남북방향으로의 뒤틀림 등 오차가 발생하였을 경우 이를 제어하기 위하여 설치하는 시설물이며 세팅 빔의 동쪽 지점은 힌지의 역할을 하는 유압잭으로 이루어져 있어 단차를 손쉽게 조정할 수 있도록 해준다.

폐합 해석은 인천대교가 대형형 사장교임을 감안하여 서측과 동측 거더의 폐합 단면에 가장 가까운 4개의 케이블의 조절량이 같다고 가정하였고, 인천대교 폐합시공의 조건이 회전각차 1mrad, 단차 10mm이하이므로 해석의 수렴조건은 회전각차의 오차 1mrad이하만을 고려하여 해석하였다.

인천대교와 같은 대형 구조물에 대한 실제 형상과 해석에 의한 결과는 오차가 생기는 경우가 대부분이다. 구조물의 모델링이 실제 구조물의 특성을 정확히 반영할 수 없다는 점과 더불어 기온, 풍향 등 수시로 변동하는 외부 조건 또한 해석에 정확히 반영된다는 것은 불가능한 일이기 때문이다. 이러한 오차가 발생하는 경

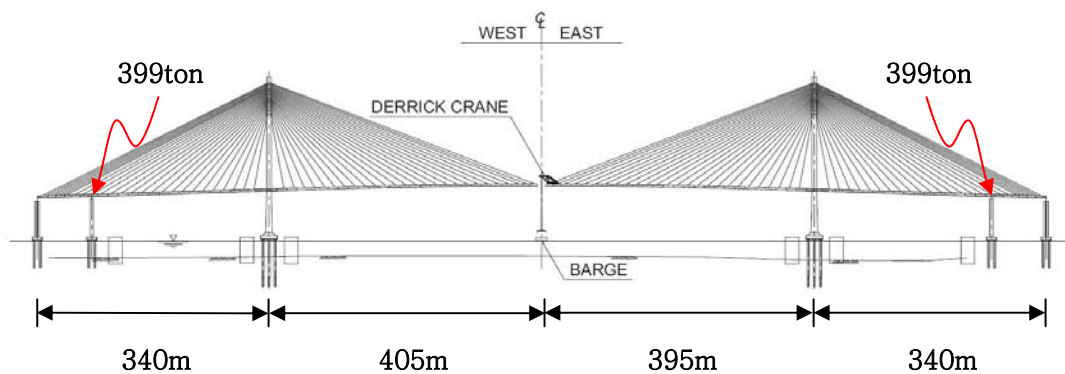


그림 2. 사장교의 폐합시 이동 가능한 하중의 위치

우를 대비하여 교량 위에 위치한 하중 중에서 그 영향이 크고 이동이 용이한 크레인 하중을 이동시켜가며 폐합해석후의 오차를 조정할 수 있도록 하였다.

폐합 시공의 경우 회전각과 거더의 높이를 일치시키기 위하여 케이블의 길이 조정을 염두에 두지만 실제 시공상에서 케이블의 길이를 조정하는 일은 상당히 번거로운 작업이기 때문에 가능한 케이블의 길이 조정량이 작은 경우가 바람직하다. 위의 하중 위치는 오차에 대한 대비 외에 케이블의 길이 조정량을 줄일 가능성이 상당한 위치이다. 현장상태와 동일한 조건으로 해석을 수행한 결과 케이블의 길이 조정량이 0인 경우에도 인양력 288ton-f의 힘을 가할 경우에 회전각차의 수렴조건인 1mrad의 값에 근접한 1.097mrad의 값이 계산되었고 거더의 단차는 4.6mm로써 현 상태로 충분히 폐합 시공이 가능함을 나타내었다. 실제 폐합 시공이 수행된 2008년 12월 17일 현장에서 폐합 시공이 순조롭게 진행되어 앞에서 제시한 사장교의 폐합기법의 타당성이 검증되었다.

4. 결론

이 연구에서는 시공과정에 있는 케이블 구조물을 해석하고 제시한 폐합 기법을 이용하여 현장에 적용 가능한 결과를 도출하는 과정을 수행하였다. 해석과 시공중인 구조물의 오차를 감안하여 해석 모델에 대한 오차를 최소화하였다. 폐합 시공을 위한 기법은 폐합 접합면의 회전각과 수직 처짐을 일치시킬 수 있는 조건인 데릭 크레인의 인양력과 사장 케이블의 장력으로 구성되었다. 폐합 접합면의 회전각과 처짐에 대한 적합 조건을 만족시키고 효율적인 계산을 위하여 식을 1차 Taylor근사를 한 후에 Newton-Raphson 방법을 통하여 반복 계산을 실시하였다. 그러나 회전각을 맞추기 위하여 과도한 케이블의 길이 조정이 이루어지는 것을 막기 위하여 시공 조건을 설정하고 그와 근접한 값을 나타낼 때에는 케이블의 길이 조정량을 최소화시키는 방법을 적용하였다. 이를 실제 시공중인 인천대교의 폐합 시공 단계에 적용하여 제안된 기법의 타당성을 검증하였다.

감사의 글

이 연구는 초장대교량 사업단 제1핵심과제를 통하여 지원된 국토해양부 건설기술혁신사업 (08기술혁신E01) 및 서울대학교 SIR BK21(안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 이민권, 이해성(2006), 대칭형 강 사장교의 폐합해석과 시공오차 예측, 토목학회논문집, Vol. 26, No.1A, pp. 55-65.
2. 정광섭, 박정일, 조의경, 김철환(1997), 케이블 장력 보정 시스템의 개발 및 적용, 토목학회논문집, Vol. 17, 제I-4호, pp. 555-564..
3. Kim K. S. & Lee H. S. (2001) "Analysis of target configurations under deal loads for cable-supported bridges", Computers and Structures 79 (29-30): 2681-2692.
4. 정길제, 박연철, 김현겸, 이해성, (2007) "케이블의 동적 해석을 위한 가상일 원리의 정식화", 교량설계핵심기술연구단.