

초기평형상태 구현을 위한 사장교의 폐합단계 해석

Closing Step Analysis in Cable-Stayed Bridges to Produce Initial Equilibrium Condition

박 용 명¹⁾ · 윤 재 순²⁾ · 조 현 준³⁾ · 박 충 곤⁴⁾
Park, Yong Myung · Yun, Jae Sun · Cho, Hyun Jun · Park, Chung Gon

요 약 : 본 연구에서는 캔틸레버 공법으로 가설되는 사장교의 최종단계에서 초기평형상태를 구현하기 위한 폐합 방법을 제안하였다. 캔틸레버식 가설에 의한 사장교에서 초기평형상태의 구현을 위해서는 거더 폐합단계에서 폐합단면 양측의 연직 처짐, 회전각 및 축방향 변위에 대한 적합조건을 만족시켜야 하는데, 본 연구에서는 실제 시공시 적용 가능한 데릭 크레인의 인양력과 케이블의 장력, 그리고 주탑부에 설치된 유압잭을 이용하여 적절한 폐합이 가능함을 제시하였다. 제안된 방법을 예제 교량의 시공단계 해석에 적용하여 그 타당성을 검증하였으며, 폐합시 축방향 변위에 관한 적합조건에 고려 여부가 주탑의 결과에 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

ABSTRACT : This paper presents a closing method for a cable-stayed bridge erected by the free cantilever method to produce the initial equilibrium configuration at the final construction stage. To realize the initial equilibrium condition in cable-stayed bridge by the cantilever method, compatibility conditions for vertical displacements, rotational angles, and axial displacements at the closing section of both side girders should be satisfied. In this paper, it was shown that it can be accomplished by using some applicable loads during construction such as the pull-up force of the derrick crane, some cable tension forces, and jacking force at the pylon. The proposed method was applied to a construction stage analysis of a sample bridge to demonstrate its validity, and it was acknowledged that the tower was considerably affected by the compatibility condition for axial displacement in the closing step.

핵심용어 : 사장교, 캔틸레버식 가설, 폐합해석, 변위 적합조건, 주탑

KEYWORDS : cable-stayed bridges, cantilever method, closing analysis, displacement compatibility conditions, tower

1. 서론

사장교는 현수교와 함께 대표적인 케이블 지지교량으로서 구조적 효율성과 경제적인 설계가 가능하여 세계적으로 많이 건설되고 있는 장대교량 형식이다. 사장교는 다수의 케이블로 지지되는 구조 형식이므로 일반 거더교에 비해 적절한 초기평형상태를 구현할 수 있는 케이블의 장력 결정이 필요하며, 또한, 대부분 캔틸레버 공법으로 시공이 이루어지므로 가설 단계를 모사할 수 있는 시공단계해석이 필요하다.

사장교에서 적절한 초기평형상태의 구현(김제춘 등, 1999; 박용명 등, 2005; Kim 등, 2001; Wang 등, 1993)이라

함은 고정하중에 대해 보강형의 기하형상이 설계자가 목표로 하는 형상을 유지하면서 휨모멘트의 분포가 케이블 정착부를 지점으로 하는 연속보와 같은 휨모멘트 분포를 갖고, 아울러 주탑의 휨모멘트가 최소가 되도록 케이블의 장력을 결정하는 것이다.

시공단계해석(김제춘 등, 2000; Wang 등, 2003)은 캔틸레버식 가설시 가설 단계에 따라 구조계의 거동이 변화하기 때문에 필요한 과정으로서 사장교의 시공형상은 케이블의 긴장력(prestressing force)에 의해 주로 결정되므로 적절한 긴장력을 산정하는 것이 시공단계 해석에 있어서 무엇보다도 중요하다.

1) 교신저자, 정회원, 부산대학교 토목공학과 부교수
(Tel : 051-510-2350, Fax : 051-513-9596, E-mail: ympk@pusan.ac.kr)
2) 부산대학교 토목공학과 석사과정(civil21c@pusan.ac.kr)
3) 정회원, 부산대학교 토목공학과 박사과정(hjcho@pusan.ac.kr)
4) 부산대학교 토목공학과 석사과정(pcg0322@nate.com)

본 논문에 대한 토의를 2007년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

칸틸레버식 가설의 마지막 단계는 양측 보강형의 폐합단계인데, 이 단계에서는 각각 독립된 칸틸레버 구조계가 한 개의 구조계로 폐합되고, 그 이후에는 사장교 전체계가 일체로 거동하기 때문에 사장교의 가설시 적절한 폐합은 매우 중요한 공정이 된다.

사장교의 칸틸레버식 가설 중 도입 긴장력은 일반적으로 역방향해석(backward analysis), 즉, 전체계를 시공순서의 역방향으로 해체해 나가면서 수행하는 해석으로부터 결정할 수 있다. 그러나, 이로부터 결정된 케이블 긴장력으로 순방향해석(forward analysis)을 수행하면 폐합 단면 위치의 양측 보강형에서 연직 처짐과 회전각, 그리고 축방향 변위가 일치하지 않는다. 이는 전체계에 대한 역방향 해석시 폐합단면에 존재하는 단면력, 즉 인장의 축력, 전단력 및 휨모멘트를 반대방향의 하중으로 재하하여 고려하는데, 실제 폐합단계에서는 이러한 단면력을 외력으로 재하하기가 현실적으로 불가능하기 때문이다.

따라서, 칸틸레버 공법으로 가설되는 사장교의 중앙부에서는 키 세그먼트(key segment)를 이용하여 거더를 적절히 폐합하는 공정이 필요하다. 일반적으로 폐합 위치에서 연직 처짐과 회전각, 그리고 축방향 변위가 일치하지 않으므로 현장에서 적용 가능한 외력을 이용하여 변위에 관한 적합조건을 만족시켜야 한다. 이 때 폐합단면에서의 변위에 관한 적합조건을 만족시키는데 필요한 외력을 구하는 과정을 폐합해석(closing analysis)이라고 정의한다. 폐합해석으로부터 현장에서 적용 가능한 외력을 산정하고, 이를 구조물에 작용시켜 폐합단면에서의 변위에 관한 적합조건을 만족시킬 수 있다면 역방향 해석으로부터 구한 케이블 긴장력을 이용하더라도 최종 단계에서 초기평형상태와 동일한 결과를 얻을 수 있다.

폐합해석과 관련한 연구로서 이민권 등(2006)은 데릭 크레인의 인양력과 중앙경간 외측 케이블의 장력을 이용하여 연결점에서의 연직 처짐과 회전각을 일치시킬 수 있는 폐합해석법을 제안한 바 있는데, 축방향 변위에 관한 적합조건은 고려하지 않았다.

본 연구에서는 사장교 중앙부의 거더를 폐합하는 과정에서 데릭 크레인의 인양력과 외측 케이블의 장력, 그리고 주탑부에 설치된 유압잭을 이용하여 폐합단면에서의 연직 처짐과 회전각, 그리고 축방향 변위에 관한 적합조건을 만족시킬 수 있는 폐합 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해 3주탑 강사장교를 대상으로 시공단계 해석을 수행하였고, 키 세그먼트의 폐합단계에서 축방향 변위에 관한 적합조건의 고려 여부에 따라 폐합해석을 두 가지 경우로 나누어 수행하여 최종단계에서의 결과를 비교 제시하였다.

2. 사장교의 시공단계 해석

2.1 시공단계 해석방법

시공단계 해석은 시공의 진행에 따른 구조계와 하중의 변화를 정확하게 모사하기 위해서 해석적으로 의미를 갖는 시공 과정을 가설 단계별로 분석하는 것이다. 칸틸레버 공법으로 가설되는 사장교의 시공단계 해석은 그림 1과 같이 해석의 진행 순서에 따라 순방향 해석과 역방향 해석으로 구분할 수 있다(Gimsing, 1997). 순방향 해석은 일반적인 시공단계 해석방법으로서 실제 시공이 진행되는 순서대로 해석을 수행하는 방법을 의미한다. 역방향 해석은 초기형상이 결정되어 있는 완성계 구조물로부터 시공순서의 역순으로 부재와 하중을 제거해 나가면서 해석을 수행하는 방법이다.

사장교의 시공형상은 주로 케이블의 긴장력에 의해 결정된다. 따라서 시공 중 구조물에 과도한 처짐이나 응력이 발생하지 않도록 하고, 시공이 완료되는 시점에서 고정하중에 대해 최적의 모멘트 분포를 얻기 위해서는 적절한 케이블 긴장력을 산정하는 것이 무엇보다도 중요하다.

한편, 김재춘 등(2000)은 완성계에서의 기준형상으로부터 케이블의 변형전 길이를 산정하고, 이를 탄성현수선 요소를 이용한 케이블에 입력한 후 순방향 해석으로 케이블의 긴장력을 결정하는 방법을 제시하였다. 하지만 순방향 해석만으로 케이블의 긴장력을 결정하는 것은 쉽지 않으므로 보통 역방향 해석을 수행하여 긴장력을 결정하게 된다. 즉, 초기평형상태 해석을 통해 최적의 고정하중 모멘트 분포가 결정되어 있는 완성계로부터 시공과정의 역순으로 해석을 수행하여 케이블의 긴장력을 산정하게 된다.

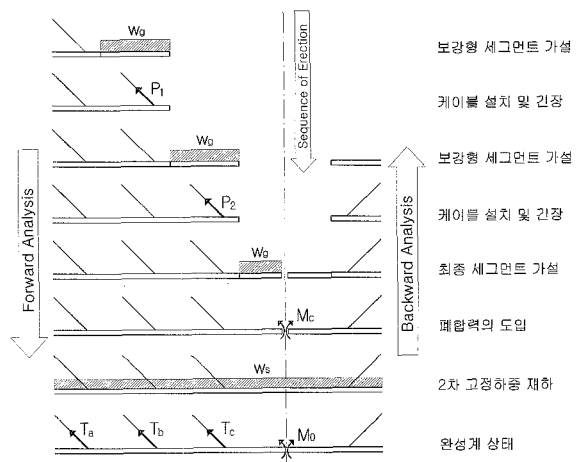


그림 1. 칸틸레버식 시공단계 해석

2.2 부재의 접선방향 가설

캔틸레버 공법으로 시공을 진행할 경우, 이미 가설이 완료된 부재의 끝에 새로운 부재를 연결시켜 가설하게 된다. 이 때 새로이 가설되는 부재는 시공 캠버를 적용하지 않는다면 그림 2에서와 같이 기존 부재의 접선방향으로 가설하여 회전각의 연속성을 확보하게 된다. 역방향 해석에서는 부재의 변형형상이 연속된 형태로 얻어지지만 순방향 해석에서는 엄밀한 시공형상을 해석적으로 구현하기 위해 접선방향으로 가설되는 부재의 좌표를 정확하게 산정해야 한다.

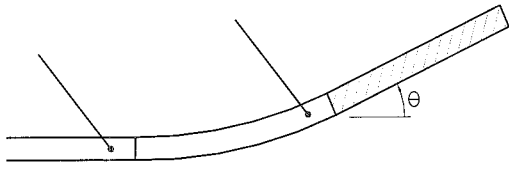


그림 2. 부재의 접선방향 가설

2.3 케이블의 비선형 거동

케이블은 인장에만 저항하는 부재로서 자체 자중에 의해서 새그(sag)가 발생하고, 이러한 새그의 영향으로 케이블은 장력의 크기에 따라 축방향 장성이 변하는 기하학적 비선형 거동을 보인다. 따라서, 사장교 해석시 케이블의 새그에 의한 비선형성을 고려하여야 하며, 이를 위해서 등가탄성계수를 갖는 등가 트러스요소가 흔히 이용된다(Fleming, 1979; Nazmy 등, 1990). 케이블의 등가탄성계수는 Ernst(1965)에 의해 처음 제안되었고, 식 (1)의 접선탄성계수(Tangent modulus)와 식 (2)의 할선탄성계수(Secant modulus)로 구분할 수 있다. 하중증분에 의한 케이블의 장력 변동이 미소한 경우에는 식 (1)의 접선탄성계수를 사용할 수 있고, 하중 변동에 의하여 케이블의 장력이 T_i 에서 T_f 로 변하는 경우에는 식 (2)의 할선탄성계수를 사용할 수 있다.(Nazmy 등, 1990)

$$E_{ea} = \frac{E}{1 + \frac{(wD)^2}{12 T^3} EA} \quad (1)$$

$$E_{ea} = \frac{E}{1 + \frac{(wD)^2}{24 T_i^2 T_f^2} (T_i + T_f) EA} \quad (2)$$

여기서, E : 케이블의 탄성계수

A : 케이블의 단면적

w : 케이블의 단위길이당 중량

l : 케이블의 수평투영 길이

T : 케이블의 장력

본 연구에서는 시공단계 해석시 케이블의 비선형성을 고려하기 위해 할선탄성계수를 이용하였다. 이때 할선탄성계수를 계산하는데 필요한 T_f 는 식 (1)의 접선탄성계수를 이용한 해석을 먼저 수행하여 해석으로부터 얻은 장력을 이용하였다.

사장교는 케이블의 비선형 거동 이외에도 주탑과 주형의 압축력에 의한 보-기둥 효과나 대변위의 영향으로 복잡한 비선형 거동을 보이지만 중소규모의 교량에서는 그 영향이 비교적 작다. 본 연구에서는 폐합해석에 비중을 두고 있기 때문에 보-기둥 효과와 대변위의 영향은 고려하지 않았다.

3. 사장교의 폐합해석

캔틸레버 공법을 이용하여 시공을 진행할 경우 사장교의 중앙부에서는 키 세그먼트를 이용하여 두 개의 독립적인 캔틸레버 구조계를 폐합하는 공정이 필요하다. 이 때 연결되는 두 부재는 연결점에서 동일한 연직 처짐과 회전각, 그리고 축방향 변위가 유지되도록 정밀하게 시공되어야 한다. 하지만, 전술한 바와 같이 완성계에 대해 역방향 해석으로부터 결정된 긴장력을 이용하여 다시 순방향 해석을 진행하면 폐합하고자 하는 단면에서는 단면력이 존재하지 않기 때문에 연결점에서 연직 처짐, 회전각 및 축방향 변위에 관한 적합조건이 만족되지 않는다.

따라서, 폐합 이후 최종 단계에서 초기평형상태 해석과 동일한 결과를 얻기 위해서는 양측 거더의 폐합단계에서 연결점에서의 변위에 관한 적합조건을 만족시켜야만 한다. 이론적으로는 적합조건을 만족시키고 있는 완성계의 폐합단면 위치에서의 단면력을 폐합하고자 하는 양측 거더에 재하하여 폐합단면에서의 변위에 관한 적합조건을 만족시킬 수 있다. 하지만 실제 시공현장에서 폐합단면에 모멘트, 전단력 및 축력 같은 단면력을 재하하는 것은 불가능하므로 시공 중에 재할 수 있는 외력을 이용하여 폐합단면에서의 적합조건을 만족시켜야 한다.

실제 시공 중에 폐합단면 위치에서 양측 캔틸레버 단부의 연직 처짐을 조정할 수 있는 외력으로는 데릭 크레인의 인양력이 있다. 그러나 데릭 크레인의 인양력만으로 회전각이나

축방향 변위에 관한 적합조건까지 만족시키는 것은 불가능하다. 따라서 데릭 크레인의 인양력 이외의 추가적인 외력이 필요하다. 회전각을 조정하기 위해서는 그림 3에서와 같이 중앙경간의 외측 케이블의 장력을 추가적인 외력으로 고려할 수 있다. 일반적으로 케이블의 장력은 너트나 쇠끼움판(shim plate)을 이용하여 케이블의 길이를 변화시켜 조정하게 된다. 그리고 축방향 변위는 시공 중에 거더의 교축방향 이동을 구속하기 위해 주탑부와 거더 사이에 설치하는 유압잭 장치(이를 fixing device라 함)를 이용하여 전체 거더 시스템을 측경간 또는 중앙경간 쪽으로 이동시켜 조정할 수 있다. 이때 주탑과 거더는 유압잭에 의해 크기는 같고, 방향이 반대인 수평력(이하 유압잭의 수평력)을 각각 받는다.

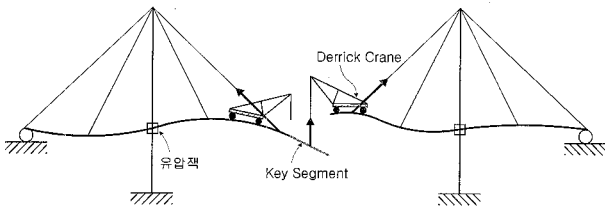


그림 3. 사장교의 폐합 시공

변위에 관한 적합조건식과 이를 만족시키기 위해 만족시키기 위해 필요한 하중벡터 $\{F\}$ 는 식 (3)과 식 (4)로 각각 나타낼 수 있다.

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} P_J \\ P_D \\ T \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서, P_J , P_D 및 T 는 각각 유압잭의 수평력, 데릭 크레인의 인양력, 그리고 케이블 장력을 의미한다.

$$\begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \Theta \end{Bmatrix}_R = \begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \Theta \end{Bmatrix}_L \quad (4)$$

여기서, δ_x , δ_y 및 Θ 는 각각 캔틸레버 단부의 축방향 변위, 연직 처짐 및 회전각을 의미하고, 하첨자 R 과 L 은 각각 좌·우측 캔틸레버 단부를 의미한다.

본 연구에서는 폐합단면 위치에서의 변위에 관한 적합조건을 만족시키는데 필요한 유압잭의 수평력과 데릭 크레인의 인양력, 그리고 케이블 장력의 조정량을 산정하기 위해 다음

과 같은 근사적인 방법을 사용하였다.

1) 폐합단면 위치에서 좌·우 캔틸레버 단부의 축방향 변위, 연직 처짐 및 회전각에 대한 변위오차벡터 $\{\Delta\}$ 를 구성한다.

$$\{\Delta\} = \begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \Theta \end{Bmatrix}_R - \begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \Theta \end{Bmatrix}_L \quad (5)$$

2) 유압잭의 수평력과 데릭 크레인의 인양력, 그리고 케이블 장력에 대응하는 단위 하중을 작용시켜 각 변위성분에 관한 영향행렬 $[S]$ 를 구성한다.

3) 영향행렬을 이용하여 변위오차를 제거하는데 필요한 유압잭의 수평력과 데릭 크레인의 인양력, 그리고 케이블 장력으로 구성된 벡터 $\{F\}$ 를 계산한다.

$$\{F\} = [S]^{-1}\{\Delta\} \quad (6)$$

4) 케이블의 비선형성을 고려할 경우 변위오차가 수렴조건을 만족할 때까지 단계 (1)~단계 (3) 과정을 반복적으로 계산한다.

5) 변위오차가 제거되면 연결점을 구속한다.

6) 폐합시공을 위해 작용시켰던 외력 $\{F\}$ 를 제거한다.

4. 예제 해석

본 연구에서 제안한 폐합단계 해석법의 타당성을 검증하기 위해 화명대교를 대상으로 상용 프로그램인 RM-Space Frame을 이용하여 폐합공정을 포함한 시공단계 해석을 수행하였다.

4.1 예제 교량의 제원

해석 예제로 선정된 화명대교는 부산광역시의 초정~화명간 연결도로 건설사업에 포함된 주경간장 170m의 3주탑 강사장교이다(부산광역시 건설본부, 2005). 본 교량의 제원은 그림 4에 보인 바와 같고, 총경간 500m의 4경간 연속 사장교로서 중앙의 주탑을 기준으로 좌·우 대칭형이다. 강상판형과 일주형의 강재 주탑을 사용하고, 총 30개의 케이블이 14~15m 간격으로 1면 배치되어 있다. 교량의 시중점부 교각에서는 가동형 포트받침을 사용하고, 주탑부에서는 탄성받침을

사용한다. 표 1에는 주요부재의 단면상수 및 물성치를 나타내었다. 표 1에서 보강형 및 주탑의 단위중량은 다이아프램 등의 추가 부재를 고려하여 30% 할증시킨 값이고, 케이블의 단위중량은 폴리에틸렌 코팅을 고려하여 산정한 값이다. 한편, 폐합후 고정하중(2차 고정하중)은 아스팔트 포장, 방호책 및 난간 등을 고려하여 46.868kN/m로 산정하였다.

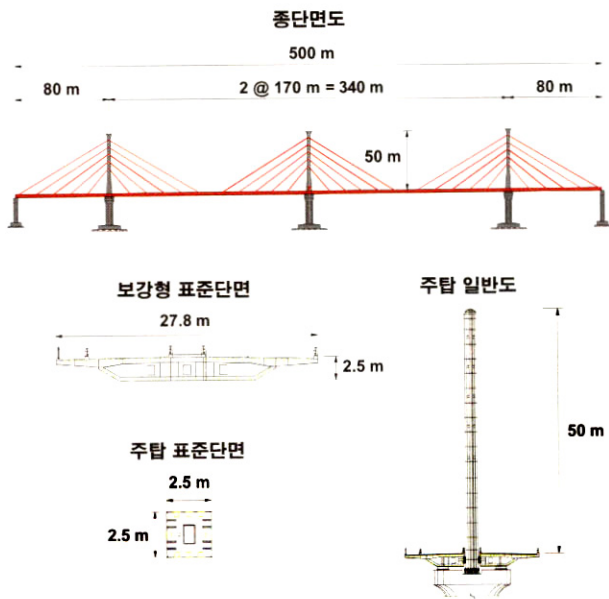


그림 4. 예제교량의 구조제원

표 1. 주요부재의 단면상수 및 물성치

부재	구분	탄성계수 (GPa)	단면적 (m ²)	단면2차 모멘트(m ⁴)	단위중량 (kN/m ³)
보강형	일반부	210	1.249	1.230	100.1
	주탑부	210	1.106	1.018	100.1
주탑	상단	210	0.463	0.467	100.1
	하단	210	0.560	1.351	100.1
케이블	외측	200	0.0144	-	83.263
	내측	200	0.0111	-	83.263

초기평형상태 및 시공단계 해석에는 그림 5와 같이 2차원 유한요소 해석 모델을 이용하였다. 보강형, 주탑 및 교각은 프레임 요소를 이용하여 모델링하였고, 케이블은 등가트러스 요소로 모델링하였다. 주탑부의 탄성받침은 스프링 요소를 이용하여 탄성지점으로 모사하였고, 시공단계 해석시 이용되는 주두부 가설벤트에도 스프링 요소를 이용하였다.

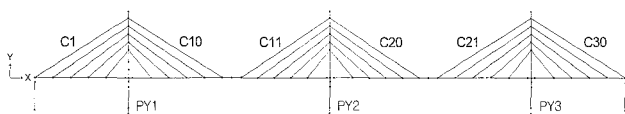


그림 5. 2차원 유한요소 해석 모델

4.2 초기평형상태의 결정

폐합을 포함한 시공단계 해석에 앞서 RM 프로그램 내의 단위하중법에 근거한 ADDCON 모듈을 이용하여 초기평형상태 해석을 수행하였다. 완성계에서 고정하중에 의해 발생하는 주형 및 주탑의 처짐 형상이 설계 형상과 최대한 일치하도록 그림 6과 같이 제약조건(Constraint)으로서 중앙경간의 거더연직 처짐과 주탑(PY1) 수평 처짐을 0으로 설정하였다. 그림 7에는 초기평형상태 해석으로부터 결정된 처짐 형상과 거더 및 주탑의 모멘트 분포를 나타내었고, 표 2에서 완성계의 초기평형상태 장력을 제시하였다. 해당 결과는 중앙의 주탑(PY2)을 중심으로 좌·우 대칭이므로 교량의 절반에 대해서만 나타내었다.

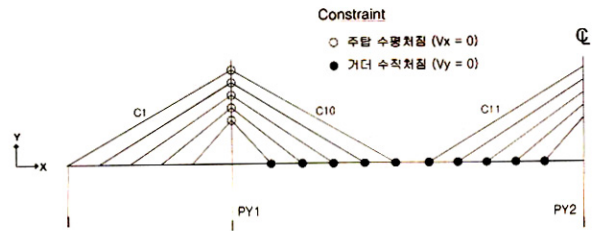
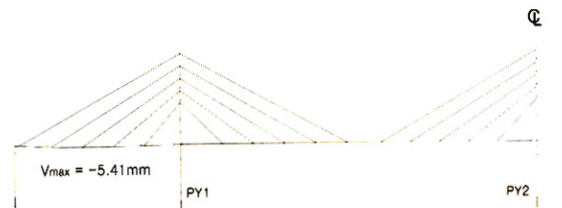
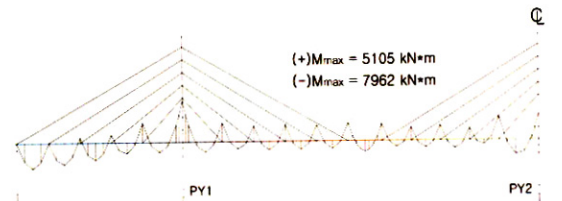


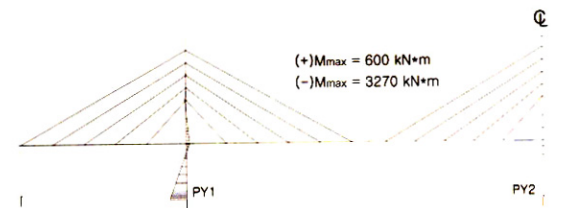
그림 6. 초기평형상태 결정을 위한 제약조건



(a) 처짐형상



(b) 거더 모멘트 분포



(c) 주탑 모멘트 분포

그림 7. 초기평형상태 해석 결과

표 2. 케이블의 완성계 장력 및 시공중 도입 긴장력

케이블 번호	완성계 장력 (kN)	케이블 긴장력 (kN)
1	5548.06	4890.68
2	4936.31	3960.91
3	4712.48	3922.43
4	3995.25	3525.93
5	3834.55	3951.05
6	3696.66	3802.07
7	4079.68	3595.93
8	4691.23	3910.28
9	4941.47	3970.38
10	5554.09	4734.82
11	5155.40	4628.50
12	4389.01	3624.53
13	4335.42	3709.83
14	3511.27	3193.23
15	3999.42	4154.79

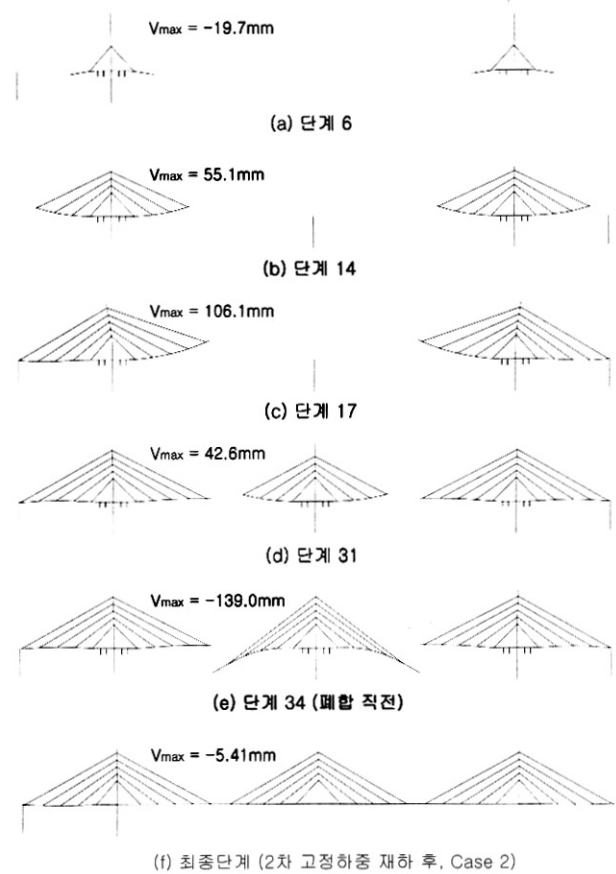


그림 8. 시공단계별 처짐형상

4.3 시공단계 해석

본 교량은 양방향 캔틸레버 가설공법에 의해 시공이 이루어지며 주요 공정을 중심으로 시공단계를 총 39단계로 구분하였다. 시공단계 해석시 구조물의 자중뿐만 아니라 데릭 크레인의 중량이나 작업하중도 고려하였으며, 케이블의 비선형성을 고려하기 위해 각 시공단계에서 케이블 장력 변동에 따른 등가탄성계수를 식 (2)로부터 직접 계산하여 시공단계 해석에 반영하였다.

케이블 설치시에 도입해야 할 긴장력을 결정하기 위해 우선 역방향 해석을 수행하였고, 해석으로부터 결정된 케이블 긴장력은 표 2에 나타내었다. 역방향 해석을 이용하여 구한 케이블 긴장력을 이용하여 실제 시공순서를 따라 순방향 해석을 수행하였다. 그림 8(a)~(e)에는 거더가 폐합되기 직전까지의 주요 시공단계별 처짐 형상을 보이고 있다.

표 3. 폐합단면 위치에서의 변위차

구분		변위	변위차
측방향 변위 (mm)	좌측	-0.673	4.576
	우측	3.903	
연직 처짐 (mm)	좌측	17.202	-156.180
	우측	-138.978	
회전각 ($\times 10^{-3}$ rad)	좌측	-0.109	-3.744
	우측	-3.853	

4.4 폐합해석

순방향 해석시 키 세그먼트를 이용하여 중앙부 거더를 폐합하는 단계에서 그림 8(e)와 같이 폐합단면 위치에서 좌·우 캔틸레버 단부에는 연직변위 차이가 발생하며, 표 3에는 폐합단면 위치에서의 측방향 변위, 연직 처짐 및 회전각에 관한 변위차를 나타내었다. 표 3에서 측방향 변위는 우측, 연직 처짐은 위쪽, 그리고 회전각은 반시계방향 (+) 방향이다.

본 예제에서는 측방향 변위에 관한 적합조건을 고려 여부에 따라 두 가지 경우로 나누어 폐합해석을 수행하여 최종단계에서의 결과를 비교하였다. 즉, Case 1에서는 연직 처짐과 회전각에 대한 적합조건만을 고려하여 폐합해석을 수행하였고, Case 2에서는 처짐과 회전각뿐만 아니라 측방향 변위에 관한 적합조건도 고려하여 폐합해석을 수행하였다. Case 1에서 폐합시공은 우선 10번 케이블의 장력을 조정한 후에 데릭 크레인의 인양력을 도입하는 순서로 이루어지는 것으로 가정하였다. Case 2에서는 Case 1과 마찬가지로 우선 10번 케이블 장력과 데릭 크레인의 인양력을 이용하여 연직 처짐과 회전각을 조정한 후에 측방향 변위를 조정하기 위한 추가적인 작업으로서 주탑부(PY1)에 설치된 유압잭을 이용하

여 좌측의 거더 시스템 전체를 측경간 또는 중앙경간 쪽으로 이동시켜 폐합시공을 완료하는 것으로 가정하였다.

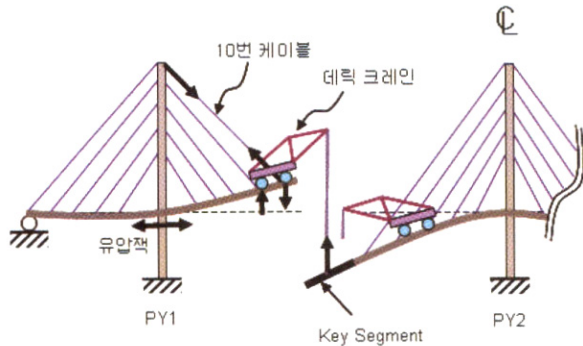


그림 9. 예제교량의 폐합 시공

폐합해석 결과에 의하면 폐합단면에서의 변위에 관한 적합 조건을 만족시키기 위해서 Case 1에서는 10번 케이블의 장력을 2,139.12 kN 만큼 추가로 긴장해야 하고, 데릭 크레인에는 1,325.39 kN의 인양력이 도입되어야 하는 것으로 나타났다. Case 2에서는 10번 케이블 장력을 2,128.06 kN 만큼 추가로 긴장하고, 데릭 크레인에는 1,323.70 kN의 인양력이 도입되어야 하며 거더 전체를 왼쪽으로 이동시키기 위해 주탑부에서 유압잭으로 239.19 kN의 수평력을 거더에 가해야 하는 것으로 나타났다.

표 4와 표 5에는 각각 Case 1과 Case 2에 대하여 폐합단면 위치에서 좌·우 캔틸레버 단부의 변위를 폐합시공 단계별로 나타내었다. Case 1에서는 연결점에서 연직 처짐과 회전각은 정확히 일치하지만 측방향 변위에 있어서는 3.889mm만큼의 차이를 보인다.(이 경우 부재를 그만큼 짧게 제작하면 될 것이다) 반면에 Case 2에서는 연결점에서 연직 처짐, 회전각 및 측방향 변위가 정확히 일치함을 확인할 수 있다.

한편, 2차 고정하중이 재하된 최종단계에서 연결점의 변위는 Case 1의 경우에 초기평형상태에서의 변위(측방향 변위 = 3.288 mm, 연직 처짐 = -0.057mm, 회전각 = 0.026 × 10⁻³rad)와 다소 차이를 보이지만 Case 2에서는 거의 일치함을 확인할 수 있다. 그림 8(f)에는 2차 고정하중이 재하된 최종단계에서의 처짐형상을 나타내었고, 그림 10에는 Case 1에서의 폐합시공시 부가 하중의 도입에 따른 처짐 형상을 비교 도시하였다.

표 6에는 시공단계 해석의 최종단계에서의 케이블 장력을 초기평형상태 해석으로 구한 케이블 장력과 비교하여 나타내었다. Case 1에서는 초기평형상태 해석 결과와 비교하여 최대 1.26%(6번 케이블)의 상대오차가 발생하였고, Case 2에서는 초기평형상태 해석 결과와 정확히 일치하였다. 그림

11과 그림 12에는 최종단계에서의 거더 연직 처짐과 모멘트를 각각 나타내었다. 초기평형상태 해석 결과와 비교해 볼 때, Case 1에서는 거더의 연직 처짐이 최대 1.5mm의 차이를 보이고, 거더의 모멘트는 최대 624 kN·m의 차이를 보이고 있다.

표 4. 폐합시공 단계별 폐합단면 위치에서의 변위(Case 1)

폐합순서	key seg. 가설	10번 케이블 장력 조정	데릭 크레인 인양력 도입	최종 단계	
측방향 변위 (mm)	좌측	-0.673	5.725	7.105	7.120
	우측	3.903	3.903	3.216	3.231
연직 처짐 (mm)	좌측	17.202	155.952	3.637	0.742
	우측	-138.978	-138.978	3.637	0.742
회전각 (×10 ⁻³ rad)	좌측	-0.109	-0.371	-0.019	0.050
	우측	-3.853	-3.853	-0.019	0.050

주) Key seg. 가설까지는 표 3과 동일

표 5. 폐합시공 단계별 폐합단면 위치에서의 변위(Case 2)

폐합순서	10번 케이블 장력 조정	데릭 크레인 인양력 도입	유압잭의 수평력 도입	최종 단계	
측방향 변위 (mm)	좌측	5.692	7.071	3.216	3.289
	우측	3.903	3.216	3.216	3.289
연직 처짐 (mm)	좌측	155.234	3.113	3.455	-0.057
	우측	-138.978	3.455	3.455	-0.057
회전각 (×10 ⁻³ rad)	좌측	-3.687	-0.170	-0.189	0.026
	우측	-3.853	-0.189	-0.189	0.026

주) Key seg. 가설까지는 표 3과 동일

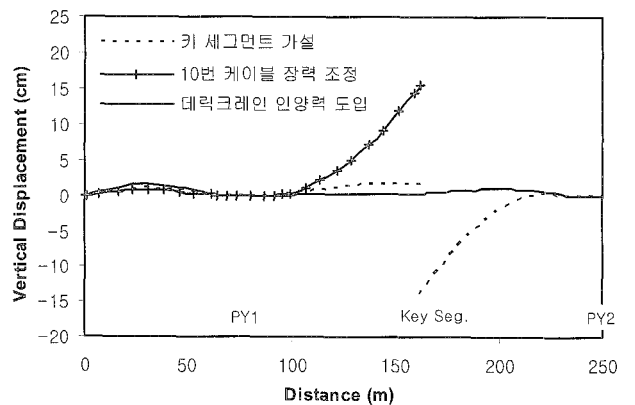


그림 10. 폐합시공 단계별 거더 처짐 형상(Case 1)

한편, 그림 13과 그림 14에는 최종단계에서의 주탑 수평 처짐과 모멘트를 나타내었다. Case 1에서는 주탑의 수평 처짐은 최대 4.1mm 만큼 증가하였고, 주탑의 모멘트는 거의 3배 가까이 증가하였다. Case 2에서는 초기평형상태 해석 결과와 정확히 일치하였다.

이상의 해석결과로부터 폐합해석시 거더의 측방향 변위에

관한 적합조건을 고려하지 않을 경우 시공단계 해석의 최종 결과는 초기평형상태 해석 결과와 차이를 보이고, 특히 거더의 연직 처짐이나 모멘트 보다는 주탑의 수평 처짐 및 모멘트가 상대적으로 큰 차이를 보임을 확인할 수 있다.

표 6. 최종단계에서의 케이블 장력

케이블 번호	케이블 장력 (kN)				
	초기평형상태	시공단계해석 (Case1)	오차 (%)	시공단계해석 (Case2)	오차 (%)
1	5548.06	5546.64	-0.03	5548.06	0.00
2	4936.31	4934.41	-0.04	4936.32	0.00
3	4712.48	4708.33	0.09	4712.48	0.00
4	3995.25	3980.28	-0.38	3995.26	0.00
5	3834.55	3787.98	-1.21	3834.47	0.00
6	3696.66	3743.08	1.26	3696.63	0.00
7	4079.68	4093.04	0.33	4079.69	0.00
8	4691.23	4691.53	0.01	4691.23	0.00
9	4941.47	4935.04	-0.13	4941.47	0.00
10	5554.09	5543.56	-0.19	5554.09	0.00
11	5155.40	5148.32	-0.14	5155.40	0.00
12	4389.01	4384.75	-0.10	4389.01	0.00
13	4335.42	4333.98	-0.03	4335.42	0.00
14	3511.27	3511.14	0.00	3511.27	0.00
15	3999.42	3999.96	0.01	3999.39	0.00

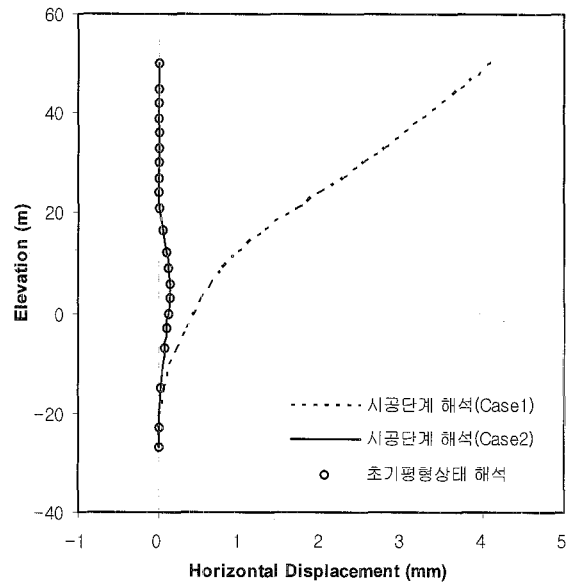


그림 13. 최종단계에서의 주탑(PY1) 수평처짐

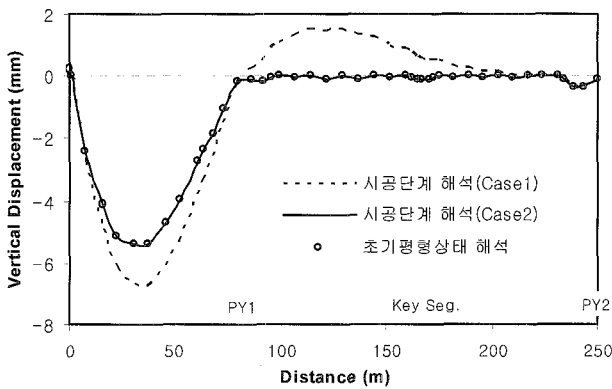


그림 11. 최종단계에서의 거더 연직 처짐

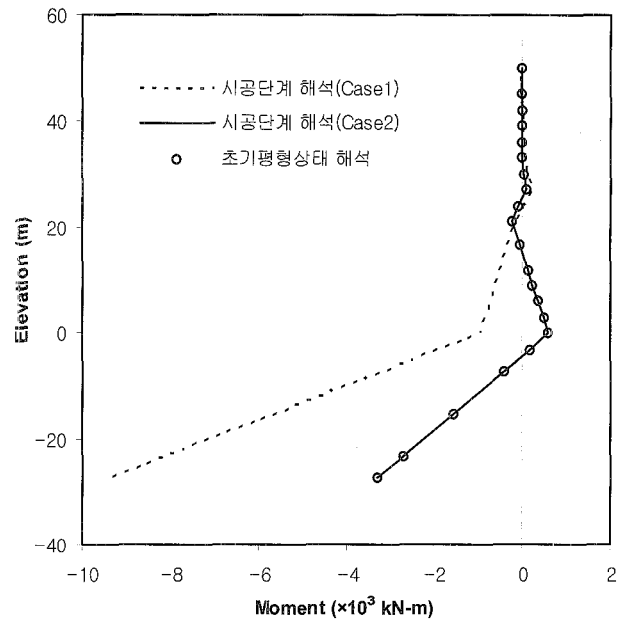


그림 14. 최종단계에서의 주탑(PY1) 모멘트

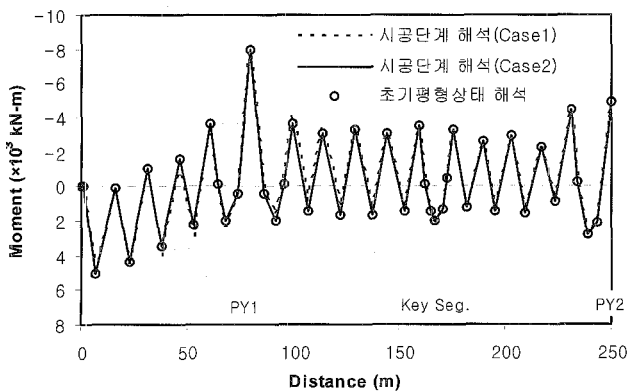


그림 12. 최종단계에서의 거더 모멘트

5. 결론

본 연구에서는 캔티레버 공법으로 건설되는 사장교에서 역방향 해석으로부터 결정된 케이블 긴장력을 이용하여 시공단계 해석을 수행할 경우 최종단계에서 초기평형상태를 구현하기 위한 폐합해석법을 제안하였다. 폐합단면에서 거더의 연직 처짐, 회전각 및 축방향 변위를 조정하기 위한 외력으로서 실제 현장에서 적용 가능한 데릭 크레인의 인양력과 케이블 장력, 그리고 주탑부에 설치된 유압잭의 수평력을 이용하였다. 본 연구에서 제안한 폐합해석법의 타당성을 검증하기 위해

3주탑 강사장교를 대상으로 시공단계 해석을 수행하였고, 제안된 폐합해석법에 의해 폐합단면에서의 연직 처짐, 회전각 및 축방향 변위에 관한 적합조건을 정확히 만족시킬 수 있었고, 따라서, 초기평형상태를 구현할 수 있었다.

폐합해석시 축방향 변위에 관한 적합조건을 고려하지 않을 경우에 최종단계에서 거더의 처짐 및 모멘트는 초기평형상태 해석 결과와 비교적 일치하지만 주탑의 처짐 및 모멘트는 초기평형상태 해석 결과와 상대적으로 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 부산대학교 자유학술연구과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김제춘, 장승필 (1999) 초기부재력을 이용한 사장교의 초기형상 및 캠버량 결정, 대한토목학회 논문집, 제19권 제1-3호, pp.377-386.
- 김제춘, 장승필 (2000) 시공단계를 고려한 사장교의 케이블 긴장력 결정, 대한토목학회논문집, 제20권, 제3-A호, pp.385-393
- 박용명, 조현준 (2005) 최소자승법을 이용한 사장교의 적정 케이블 장력 결정, 한국강구조학회논문집, 제17권, 제6호, pp.

- 727-736
- 이민권, 이해성 (2006) 대칭형 강 사장교의 폐합해석과 시공오차의 예측, 대한토목학회논문집, 제26권, 제1-A호, pp.55-65
- 부산광역시 건설본부 (2005), 혁명대교 구조계산서
- Fleming, J.F. (1979) Nonlinear Static Analysis of Cable-Stayed Bridge Structures, *Computers & Structures*, Vol.10, No.4, pp.621-635
- Gimsing, N.J. (1997) *Cable Supported Bridges, concept and design, second ed.*, John Wiley
- Kim, Ki-Seok, and Lee, Hae-Sung (2001) Analysis of target configurations under dead load for cable-supported bridges, *Computer & Structures*, Vol.79, No.29, 2001, pp.2681-2692.
- Nazmy, A.S., and Abdel-Ghaffar, M.A. (1990) Three-Dimensional Nonlinear Static Analysis of Cable-Stayed Bridges, *Computers & Structures*, Vol.34, No.2, pp.257-271
- TDV(2004) RM2004 User Guide
- Wang, P.H., Tang, T.Y., and Zheng, H.N. (2003) Analysis of Cable-Stayed Bridges during Construction by Cantilever Methods, *Computers & Structures*, Vol.82, No.4, pp.329-346
- Wang, P.H., Tseng, T.C., and Yang, C.G. (1993) Initial Shape of Cable-stayed Bridges, *Computers & Structures*, Vol.46, No.6, pp.1095-1106.
- (접수일자 : 2006. 12. 15 / 심사일 2007. 1. 9 / 심사완료일 2007. 2. 6)