

# 보강형의 시공방법을 고려한 타정식 현수교의 초기형상해석 모델

## A Structural Analysis Model for the Initial Configuration of a Suspension Bridge Considering the Erection Method of Stiffening Girders

고성석\* · 강성후\*\* · 박선준\*\*\* · 정재호\*\*\*\*

Ko, Seong Seok · Kang, Sung Hoo · Park, Sun Joon · Jung, Jae Ho

### Abstract

To determine the initial configuration of the suspension bridge appropriate idealization model and analysis procedure are proposed as considering the boundary and loading conditions of stiffening girder during the erection. The construction stages of a suspension bridge are divided into two steps which are the first stage of the erection and the second stage of the completion in terms of the erection time of stiffening girders, and depending upon such an erection step the initial configuration analysis is classified the first configuration analysis and the revision analysis of the second configuration. The boundary and loading conditions and the analysis procedures for each stage are suggested and the results are verified by comparing with existing data. The results show that the proposed method provides better solution compared to the results using existing method.

**Keywords** : suspension bridge, initial configuration, stiffening girder, the first configuration analysis, revision of configuration

### 요 지

타정식 현수교의 보강형 가설중의 경계조건과 하중조건의 변화를 고려하여 초기형상을 결정하기 위한 구조해석 모델링 방법 및 해석 알고리즘을 제안하였다. 타정식 현수교의 가설단계를 보강형의 가설시점을 기준으로 보강형 가설단계인 1단계와 완공단계의 2단계로 구분하였으며 이러한 가설단계를 고려하여 초기형상해석 단계를 1차 형상해석과 2차 형상보정해석의 2 단계로 구분하였다. 각 해석단계에 대한 보강형의 경계조건과 작용하중의 모델링 방법 및 반복해석 알고리즘을 제안하였으며 실 교량에 대해 수치해석을 수행하여 기존 해석방법에 의한 초기형상해석결과와 비교, 분석하였다. 실 교량에 대한 수치해석 결과 기존 초기형상해석방법의 문제점을 파악할 수 있었으며 본 연구에서 제안된 방법을 적용할 경우 기존 방법의 문제점을 해결할 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 타정식 현수교, 초기형상, 보강형, 1차 형상해석, 형상보정

### 1. 서 론

현수교는 등나무나 덩굴 등의 천연소재를 이용하던 고대로부터 인류의 역사와 함께 해온 교량형식으로서 근대적인 현수교로 발전하기 시작한 것은 19세기 산업혁명 이후이다. 1877년 Ritter의 연구를 시작으로 Melan, Steinman, Moisseiff 등에 의해 처짐이론이 개발되면서 현수교의 거동을 예측하기 위한 해석방법들이 개발되기 시작하였으며(이승우, 2001) 20세기 컴퓨터의 급속한 발달과 함께 기하비선형 거동을 하는 현수교의 해석기법과 유한요소법에 근거한 구조해석 프로그램들이 개발되어 현수교의 거동을 빠르고 정밀하게 계산할 수 있게 되었다. 이러한 해석기술의 발달과 함께 고강도 재료의 개발 등 혁신적인 시공기술의 발전을 통해 최근

에는 주경간장 3,300 m의 현수교가 계획되고 있다(한국도로공사, 2008).

현수교는 그 구조 및 가설방법의 특성 때문에 가설중의 형상변화가 매우 크며, 완성된 교량의 형상은 이미 케이블 가설단계에 결정된다. 따라서 형상을 확인해가면서 시공할 수 있는 일반적인 교량구조물과는 달리 현수교의 정밀시공을 위해서는 '정확한 예측'이 보다 강조된다고 할 수 있다(문중훈 등 2008). 현재 해석기술의 정밀도와 신속도를 고려할 때 정확한 예측은 더 이상 구조해석 이론 또는 해석 프로그램의 문제가 아니며 실제 교량의 거동을 얼마나 유사하게 모델링하느냐에 달려 있다.

현수교의 거동예측은 초기형상의 결정으로부터 시작된다. 현수교의 초기형상해석(initial configuration analysis)은 완성

\*정회원 · 동신대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : hgcastls@jeonnam.go.kr)

\*\*정회원 · 동신대학교 토목공학과 정교수 (E-mail : shkang@dso.ac.kr)

\*\*\*정회원 · 동신대학교 토목공학과 부교수 (E-mail : parksj@dso.ac.kr)

\*\*\*\*정회원 · 교신저자 · 대림산업(주) 기술연구소 특수교량팀 과장 · 공학박사 (E-mail : jungjh@daelim.co.kr)

된 구조계에서 고정하중에 의해 보강형, 주탑, 케이블이 설계목표 형상을 갖도록 케이블의 장력과 무응력길이(unstress length)를 결정하는 반복해석과정을 포함한다.

현수교의 초기형상해석 방법으로는 탄성현수선 요소와 변위법에 근거한 시산법(trial and error method), 반복법(successive iteration method), TCUD법(target configuration under deadload), 초기부재력법, 초기부재력법과 TCUD법을 결합시킨 방법 등(김문영 등, 2003; 조경식 등, 2006)과 최근 케이블만의 초기형상해석 기법으로 개발된 응력법(문종훈, 2008)이 있으며, 트러스 요소를 적용하여 선형해석으로 케이블을 해석하는 방법(정운용, 1999)이 개발된 바 있다. 이러한 해석방법들은 케이블 시스템과 주탑-보강형 시스템을 분리하여 해석하거나(정운용, 1999) 케이블은 탄성현수선 요소, 주탑과 보강형은 보-기둥으로 모델링하여 동시에 비선형해석을 수행(김문영 등, 2003; 조경식 등, 2006)하지만 보강형의 가설중 경계조건의 변화와 자중에 의한 1차고정하중과 보강형 가설완료 후의 2차고정하중의 영향이 분리되어 고려되지 않아 가설중의 교량강성변화 및 하중변화가 고려되지 않고 있다.

보강형의 경계조건이 변화할 경우 전체 구조계 강성이 변하게 되고 구조계의 강성변화는 케이블의 변위 및 무응력길이, 행어의 장력 및 무응력길이, 보강형의 변위에 영향을 미치게 되며 보강형의 변위 및 행어의 장력 변화는 보강형의 휨모멘트 분포에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 시공 중 보강형의 경계조건 및 하중변화를 고려한 초기형상해석 모델을 제안하였다.

제안된 초기형상해석 모델을 적용하여 실제 설계, 시공되고 있는 서로 다른 형태의 현수교에 대해 초기형상해석을 수행하였으며 기존 모델링방법에 의한 해석결과와 비교하여 하중단계별 보강형의 경계조건 변화가 현수교의 초기형상에 미치는 영향을 분석하였다. 단, 본 연구는 전(全)힌지가설공법에 의해 시공되는 타정식 현수교로 연구범위를 제한한다.

## 2. 타정식 현수교의 보강형 가설방법

타정식 현수교의 보강형 가설방법은 가설단위에 따라 단계 가설공법, 면재가설공법, 블럭가설공법으로 구분되며 블럭가설공법을 제외한 두 방법은 주로 트러스 보강형에 적용되는 공법이다. 본 연구에서는 강박스형 보강형의 가설방법을 중심으로 설명한다.

강박스형 보강형은 주로 블럭가설공법에 의해 시공된다. 앵커리지, 주탑, 케이블 및 행어의 가설이 완료되면 일정 길이의 세그먼트 단위로 미리 제작된 보강형을 행어에 순차적으로 매달아 연결하게 된다. 보강형을 행어에 연결하기 위한 방법으로는 리프팅 크레인(lifting crane)을 적용한 공법, 플로팅 크레인(floating crane)을 적용한 공법, 스윙(swing) 공법 등이 있으며 가설조건, 경제성 등을 고려하여 결정하게 된다(조충영 등, 2004; 대림산업(주) 등, 2003).

그림 1은 전힌지가설공법으로 시공되는 강박스 보강형의 시공 예를 나타낸 개념도이다. 블럭단위로 제작된 보강형은 가설위치까지 이동하여 행어당 1개의 블럭을 매달아 가설하는 것이 일반적이며 행어의 종류 및 간격에 따라 보강형 블럭당 연결 행어의 수가 결정된다. 행어에 매달린 블럭은 1차적으로 블럭 상면에 설치된 가설힌지를 사용하여 연결되므로 소수의 보강형이 가설된 가설초기에는 그림 1의 (a)와 같이 보강형 상단이 가설힌지에 의해 회전되며 하단은 벌어지는 형태가 된다. 연결 블럭의 수가 증가함에 따라 케이블의 새그(sag)가 보강형 가설단계의 목표형상에 가까워지면 보강형 간의 하단에 벌어진 틈이 점차 줄어들어 그림 1의 (b)와 같이 보강형 연결부가 닫히는 형태가 되며 이때 보강형 연결부를 용접 또는 볼팅하여 보강형을 연속화하고 최종적으로 보강형이 폐합되면 가설이 완료된다.

보강형을 연속화하기 전까지 연결점의 휨모멘트는 발생하지 않으며 보강형 가설 완료상태의 목표형상에 도달하였을 때 연결부를 접합하므로 연결부를 용접한 후 가설되는 보강

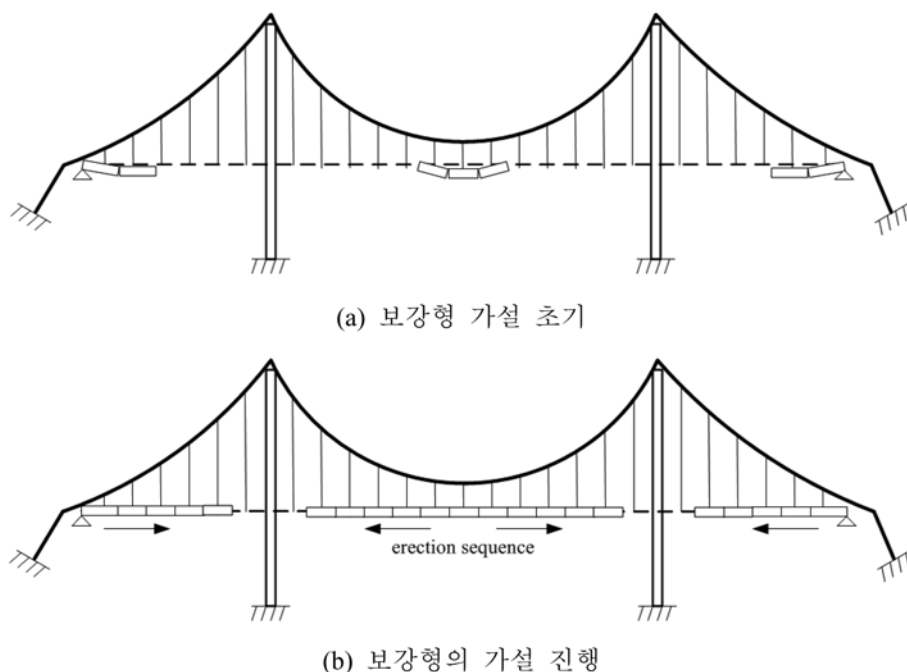
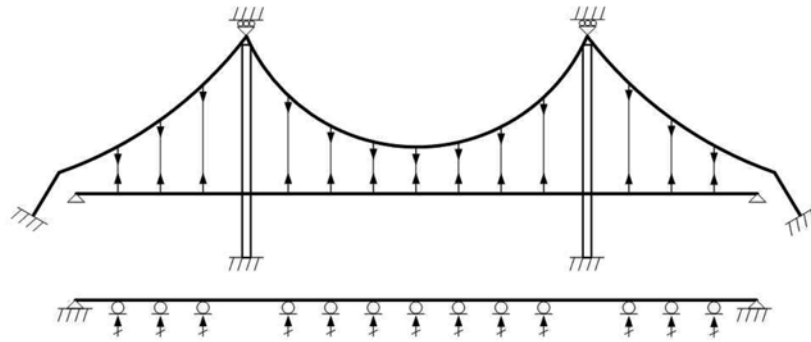
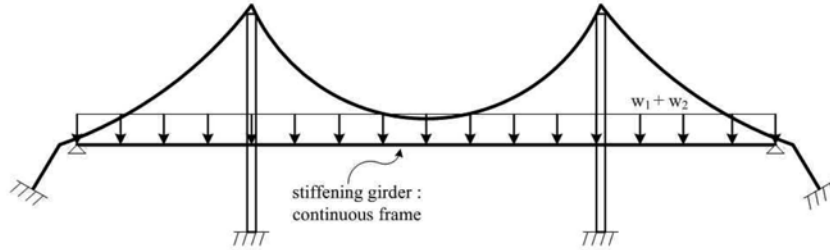


그림 1. 전힌지가설공법에 의한 현수교 보강형 시공 예



(a) 분리 모델



(b) 전체 모델(행어 표시 생략)

그림 2. 기존 초기형상해석 모델 개념도

형에 의한 휨모멘트는 무시할 수 있을 정도로 작다. 따라서 전힌지가설공법을 적용할 경우 보강형 가설단계에서 보강형간의 연결부는 휨모멘트가 발생하지 않는 힌지상태로 간주할 수 있다.

블럭의 가설순서는 주탑을 시작으로 측경간의 앵커리지방향과 중앙경간의 중앙방향으로 각각 가설하는 방법(①), 앵커리지 또는 부탑 및 중앙경간의 중앙부에서 각각 주탑을 향하여 가설하는 방법(②), 측경간은 앵커리지 또는 부탑에서 주탑방향으로 중앙경간은 주탑에서 중앙부로 가설하는 방법(③)이 있다(대림산업(주) 등, 2003).

②의 방법을 적용할 경우 중앙부의 블럭(전체 보강형의 약 75%)을 가설함으로써 주케이블의 형상이 거의 안정화되고 그 후에 가설되는 보강형의 연결을 부드럽게 할 수 있도록 전힌지가설공법을 채택하고 있으며 대표적인 시공사례로는 Verrazano Narrows교(미국), Severn교(영국), 남해대교, 오오시마대교(일본), Great belt교(덴마크) 등을 들 수 있다(대림산업(주) 등, 2003; Gimsing, 1998).

### 3. 기존 초기형상해석 방법

현수교의 초기형상을 결정하기 위한 기존 해석방법은 그림 2(a)와 같이 케이블과 주탑 및 보강형을 분리하여 케이블만의 기하비선형 문제를 독립적으로 해석하는 방법과 그림 2(b)와 같이 주탑 및 보강형은 초기축력을 갖는 연속 부재, 케이블은 단성현수선 요소를 사용하여 전체 구조계를 모델링하고 1차 고정하중( $w_1$ , 각 부재의自重)과 2차 고정하중( $w_2$ , 포장 등 부가고정하중)을 동시에 작용시켜 해석하는 방법이 있다(조경식, 2006).

그림 3은 기존 초기형상해석 과정을 나타낸 해석흐름도이다. 그림 2와 3에서 보여주는 바와 같이 기존 해석방법을 적용할 경우 하중조건에 따른 보강형의 경계조건 변화를 고

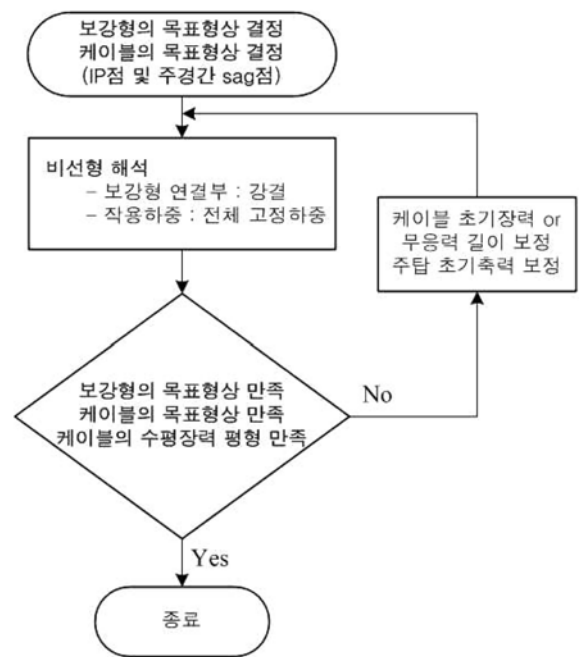


그림 3. 기존 초기형상해석 흐름도

려할 수 없다. 따라서 2차 고정하중이 재하될 때 케이블의 변형에 의해 발생하는 보강형의 휨모멘트 및 행어의 장력분포 변화를 반영할 수 없다.

### 4. 개선된 초기형상해석 모델

#### 4.1 해석 단계

개선된 초기형상해석은 1차 형상해석단계와 2차 형상보정단계로 구성된다. 표 1은 기존 해석방법과 제안된 초기형상해석 모델의 단계별 보강형 연결부의 경계조건, 하중조건, 제약조건을 나타낸 것이며, 그림 4는 개선된 초기형상해석 모델의 해석흐름도를 나타낸 것이다.

표 1. 초기형상해석 모델의 해석조건 비교

구분	제안된 초기형상해석		기존 해석방법
	1차 형상해석	2차 형상보정	
보강형 연결부	힌지	강결	강결
작용하중	1차 고정하중	2차 고정하중	전체 고정하중
제약조건	가정된 목표형상	설계목표형상	설계목표형상

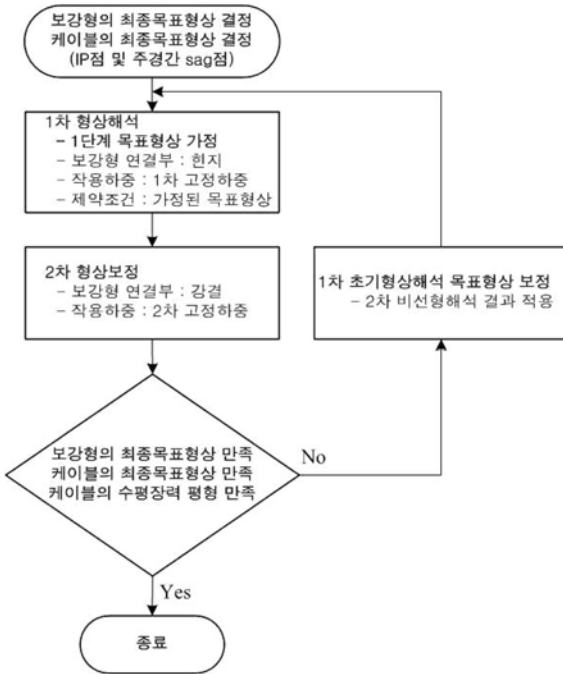


그림 4. 개선된 초기형상해석 흐름도

#### 4.2 1차 형상해석

1차 형상해석은 그림 3의 기존 초기형상해석 흐름에 따라 반복해석을 수행하게 되지만 표 1에 나타난 바와 같이 기존 방법과의 차이점은 보강형의 연결부가 힌지로 연결되며 1차 고정하중만을 작용시킨다는 것과 이 단계에서의 목표형상이 최종목표형상이 아닌 가상의 목표형상이라는 점이다.

그림 5는 1차 형상해석모델의 개념도를 나타낸 것이다. 케이블은 탄성현수선 요소, 보강형은 보 또는 보-기둥 요소로 모델링 할 수 있으며 보강형의 연결점은 회전에 대한 강성을 갖지 않는 탄성스프링(힌지스프링)으로 모델링하여 힌지로 연결되도록 한다.

현수교의 완성상태 초기형상은 주탑 새들 위치에서 양쪽 케이블 장력의 수평성분이 평형을 이루도록 결정되는데 케이블 가설상태에서도 평형을 이루기 위해서는 주탑 새들이 측경간 쪽으로 일정 거리(셋백량, set-back)만큼 이동해야 한

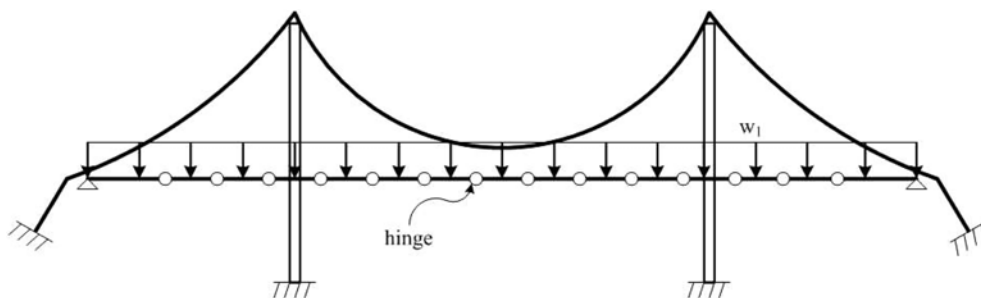


그림 5. 1차 형상해석모델(행어 생략)

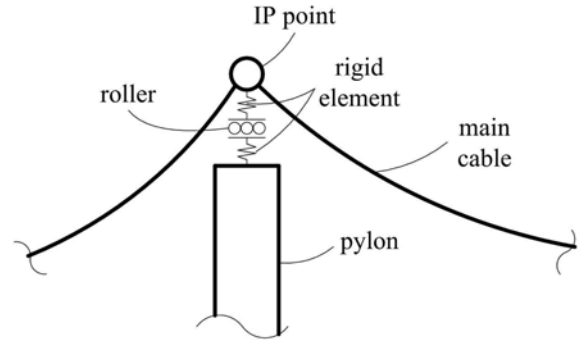


그림 6. 케이블과 주탑 탑정부의 해석모델 개념도

다. 콘크리트 주탑의 경우 대부분 셋백량만큼 주탑을 휘어 놓으면 주탑에 허용값 이상의 휨모멘트가 발생하기 때문에 주탑 위에 새들이 놓이는 위치를 조절했다가 보강형 가설 중 설계위치로 슬라이딩시키며, 강재주탑의 경우에는 셋백로 프를 이용해 강제로 주탑을 휘어 놓는다. 따라서 주탑은 완성단계에서 주탑의 지중과 탑정부 케이블의 연직분력에 의한 축력만을 받게 된다.

이러한 시공과정과 설계개념을 반영하기 위해 탑정부의 케이블 가상고정점인 IP(inflexion point)점과 주탑 상단을 연직방향에 대해서는 무한강성을 가지며 수평방향으로는 강성이 0인 스프링요소를 사용하여 그림 6과 같이 모델링 할 수 있다. 또한 주탑은 초기부재력을 갖는 보-기둥 요소로 모델링하고 반복해석을 수행할 때 이전 단계의 해석결과를 적용하여 초기축력을 보정하게 함으로써 주탑의 탄성수축에 의한 IP점의 연직변위를 제어하고 케이블 장력의 연직분력이 주탑에 도입되도록 하였다(김문영, 2003; 최인호, 2001).

#### 4.3 2차 형상보정해석

2차 형상보정해석은 보강형이 세그먼트 간의 용접에 의해 연속화된 상태에서 2차 고정하중이 작용하는 영향을 초기형상해석에 반영하기 위한 단계로서 2개의 비선형해석 과정으로 구성된다.

2차 형상보정해석을 위해 모든 절점은 1차 형상해석에서 제약조건을 만족하는 단계의 절점좌표와 동일한 좌표로 모델링하고 탑정부의 케이블과 주탑도 동일하게 모델링하며 보강형의 연결부 또한 힌지스프링을 사용하여 모델링한다. 이렇게 모델링된 상태에서 첫 번째 비선형해석이 수행되는데 작용하중은 1차 고정하중과 1차 형상해석에서 얻어진 케이블 및 행어의 장력이다.

첫 번째 해석이 완료된 상태에서 두 번째 해석을 위해 보강형의 힌지스프링이 설치된 연결점에 회전에 대한 고정스

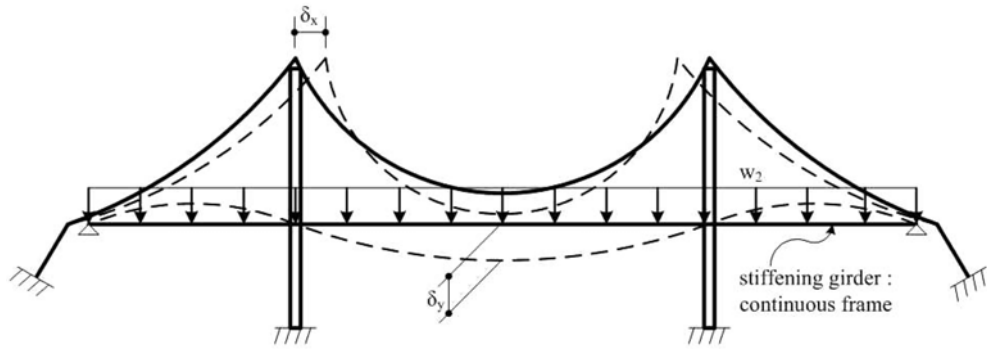


그림 7. 2차 고정하중에 대한 형상보정해석 및 해석 후 변형된 모양(행어 생략)

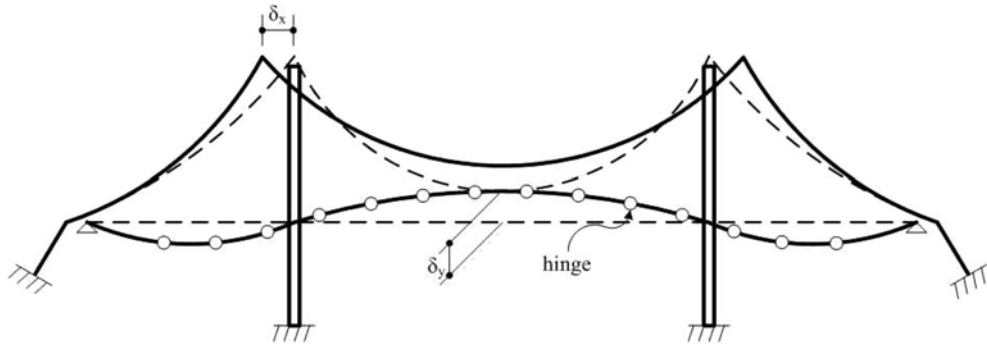


그림 8. 1차 형상해석의 목표값 보정(행어 생략)

프링을 추가하여 보강형 가설 후 용접하여 강결되는 효과를 반영한 후 2차 고정하중을 작용시켜 비선형해석을 수행한다. 그림 7은 두 번째 해석 모델과 해석 후 변형된 모양을 나타내 것으로서 두 번째 해석이 완료되면 그림 7의 점선 같이 2차 고정하중에 의해 케이블 좌표 및 보강형 좌표의 변위가 발생하게 된다.

초기형상을 결정하기 위해서는 2차 고정하중에 의한 케이블 및 보강형의 변형 후 좌표가 설계목표형상을 만족하여야 하며 케이블의 불평형력에 대한 제약조건을 만족해야 한다. 따라서 2차 고정하중에 의한 각 좌표의 변위를 사용하여 그림 8과 같이 1차 형상해석의 목표형상을 조정 한 후 2차 형상보정해석에서 제약조건을 만족할 때까지 1차 형상해석

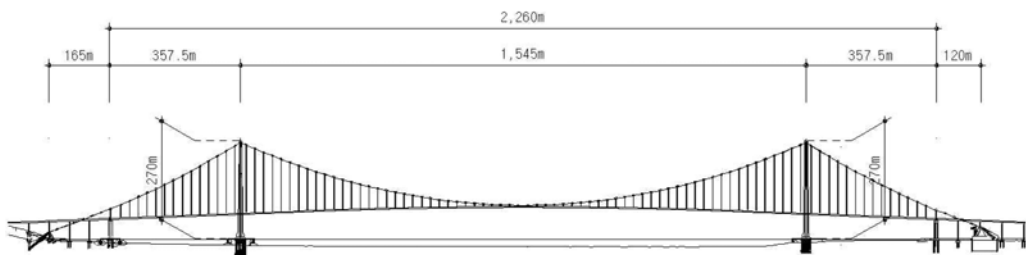
및 2차 형상보정해석을 반복 수행하면 완성된 상태의 케이블과 행어의 장력 및 무응력길이, 보강형의 단면내력 등을 얻을 수 있다.

## 5. 수치해석

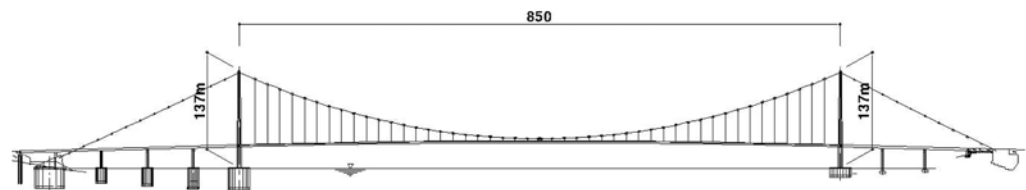
현재 시공 중인 서로 다른 형식의 2개의 현수교에 대해 기존 해석방법 및 제안된 해석방법에 따라 초기형상해석을 수행하고 그 결과를 비교, 분석하였다.

### 5.1 해석모델

해석에 적용된 교량은 주경간장이 1,545 m인 3경간 연속



(a) 3경간 연속 현수교



(b) 단경간 현수교

그림 9. 해석에 적용된 교량제원

표 2. 수치해석 방법

구분	보강형의 경계조건 변화	작용하중	비고
case 1	미고려	전체 고정하중 동시 작용	기존 해석방법
case 2	고려	1차, 2차 고정하중 분리	제안된 해석방법

현수교와 경간장이 850 m인 단경간 현수교로서 교량제원은 그림 9와 같다(이명재, 2004; 조중영 2004). 3경간 연속 현수교의 보강형은 유선형 트윈박스(twin box)이며 플로팅 형식으로서 주탑에 지점을 갖지 않으며 단경간 현수교의 보강형은 강상형 박스 형식이고 주탑 가로보에 설치된 링크슈(link shoe)에 의해 지지된다. 두 교량의 초기형상해석 방법은 표 2와 같다.

해석에 사용된 프로그램은 범용구조해석 프로그램인 RM2006 (TDV GmbH, 2007)이며 케이블 및 행어는 다절점 트러스 요소, 주탑은 초기축력을 받는 부재, 보강형은 보요소를 사용하여 3차원으로 모델링하였다. 기존 초기형상해석 및 제안된 해석방법의 1차 형상해석에서는 RM2006 내의 addcon 기능을 사용하여 제약조건을 만족하도록 하였으며 형상보정해석에서는 erection control 기능을 적용하여 단계별 해석을 수행하였다(Janjic, 2006; TDV GmbH, 2007).

5.2 결과비교

그림 10과 11은 각각 표 2에 나타난 해석방법들을 적용한 3경간 연속 현수교와 단경간 현수교의 해석결과를 비교하여 나타난 그래프이다. 각 그림의 그래프 (a)는 두 해석결과에 의한 케이블의 연직좌표의 차( $\Delta Y$ ), 그래프 (b)는 행어의 무응력길이의 차( $\Delta L$ ), 그래프 (c)는 행어장력의 차( $\Delta P$ )를 나타낸 것이며 case 2의 결과에 대한 case 1의 결과의 차를 나타낸 그래프이다. 그래프 (d)는 case 1과 case 2에 의

한 보강형의 휨모멘트 분포를 나타낸 것이다. 표 3과 표 4는 두 해석모델에 의한 각 교량의 케이블의 형상길이 및 무응력길이를 비교하여 나타낸 것이다.

케이블 Y좌표의 차는 주탑근처에서 가장 큰 차이를 나타내었다. 기존 해석방법에 비해 제안된 해석방법에 의한 케이블의 처짐이 3경간 연속 현수교의 경우에는 최대 약 22 mm 작게 나타났으며(그림 10(a)), 단경간 현수교의 경우에는 최대 약 31 mm 작게 나타났었다(그림 11(a)). 두 해석모델에 의한 케이블의 형상길이와 무응력길이의 차는 두 교량 모두 10 mm 이내의 차이를 나타내었다(표 3, 4). 주케이블의 거동에 영향을 미치는 요인으로는 작용하중의 변화와 전체 구조계의 강성변화를 들 수 있는데 두 해석모델에서 작용하중의 크기변화는 없으므로 주로 영향을 주는 요인은 1차 및 2차 고정하중 작용시점의 보강형의 연결부 경계조건의 변화라고 할 수 있다. 그림 10, 11의 (a) 및 표 3, 4의 결과로부터 보강형 세그먼트의 연결부 경계조건 변화에 따른 보강형의 강성변화가 주케이블의 형상변화에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

케이블의 Y좌표는 행어의 장력분포 및 무응력길이와 관련된다. 그림 10(b)와 (c) 및 그림 11(b)와 (c)에서 보여주는 바와 같이 두 해석모델에 따른 행어의 무응력길이와 장력의 차의 변화 경향이 케이블 Y좌표 차의 변화경향과 유사한 것을 알 수 있다.

주탑 근처에서 케이블 및 행어의 거동변화 경향은 단경간 현수교에서 더욱 크게 나타났다. 이것은 두 교량의 지지형식의 차에 기인한 것으로서 주탑에 지점을 갖는 현수교인 경우 플로팅 형식의 교량에 비해 주탑근처에서 보강형 세그먼트 연결부의 경계조건의 영향을 크게 받음을 알 수 있다.

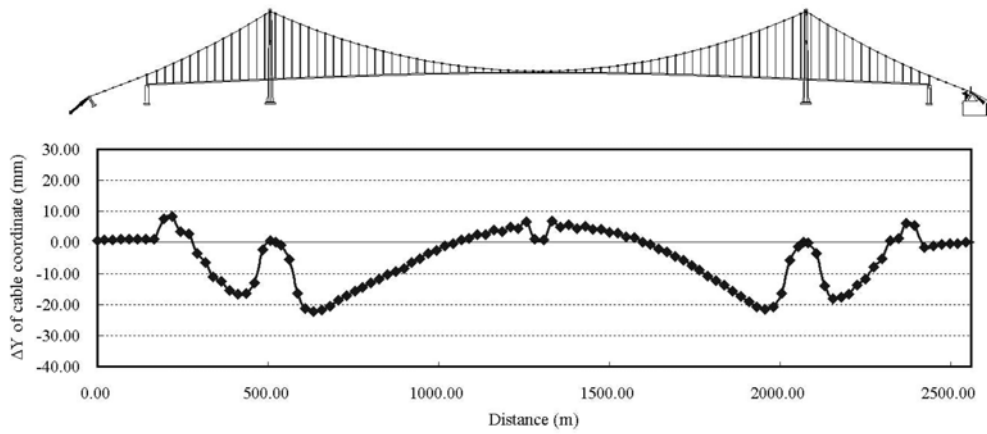
두 해석모델에 의한 가장 큰 거동의 차이는 보강형의 휨모멘트에서 나타난다. 그림 10(d)와 그림 11(d)에서 보여주는 바와 같이 두 교량 모두 주경간의 경간 중앙부에서는 두

표 3. 3경간 연속 현수교의 케이블 형상 비교

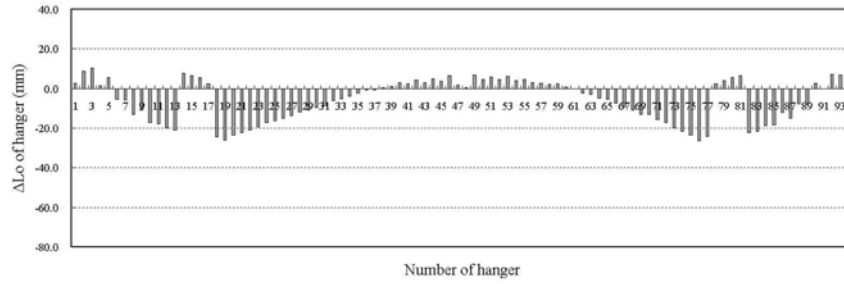
구분	형상길이			무응력길이		
	case 1 (m)	case 2 (m)	길이 차 (mm)	case 1 (m)	case 2 (m)	길이 차 (mm)
앵커리지 1	29.998	29.999	1	29.914	29.914	0
측경간 1	578.738	578.733	-5	577.034	577.028	-6
중앙경간	1594.679	1594.680	1	1590.031	1590.030	0
측경간 2	532.221	532.216	-5	530.644	530.639	-5
앵커리지 2	28.000	28.000	0	27.920	27.920	0
합계	2763.636	2763.628	-8	2755.542	2755.532	-10

표 4. 단경간 현수교의 케이블 형상 비교

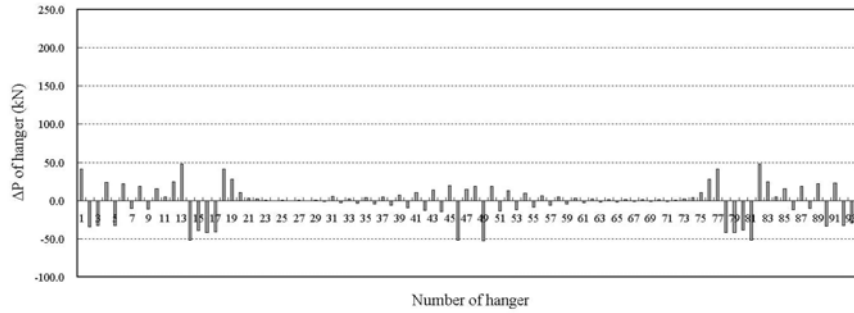
구분	형상길이			무응력길이		
	case 1 (m)	case 2 (m)	길이 차 (mm)	case 1 (m)	case 2 (m)	길이 차 (mm)
앵커리지 1	16.000	16.000	0	15.961	15.961	0
측경간 1	282.272	282.272	0	281.572	281.570	-2
중앙경간	876.983	876.982	0	874.953	874.948	-5
측경간 2	246.429	246.429	0	245.810	245.809	-1
앵커리지 2	16.001	16.001	0	15.961	15.961	0
합계	1437.684	1437.684	0	1434.257	1434.249	-8



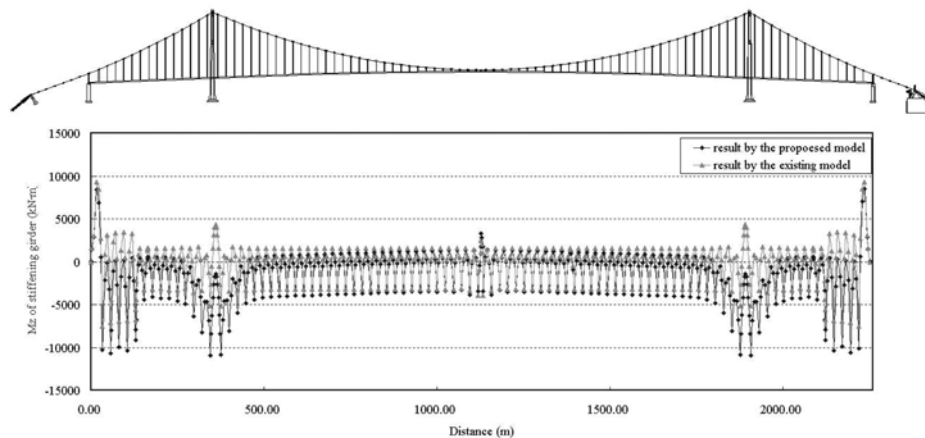
(a) 케이블의 연직좌표의 차



(b) 행어 무응력길이의 차



(c) 행어 장력의 차



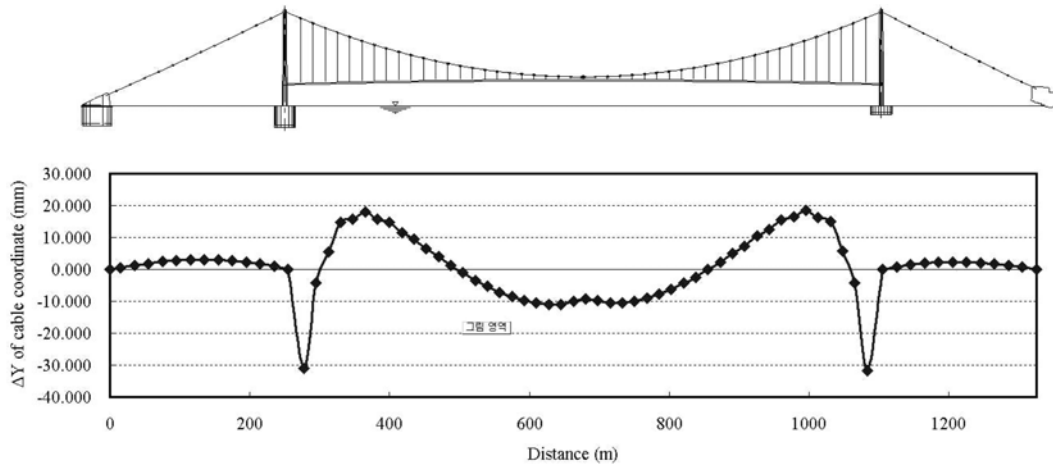
(d) 보강형의 휨모멘트

그림 10. 3경간 연속 현수교에 대한 해석결과 비교

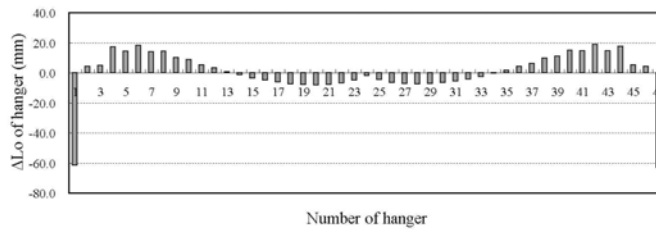
해석방법에 의한 휨모멘트 차이가 크지 않았으나 주탑 근처에서 큰 차이를 나타내었다. 3경간 연속 현수교의 경우에는 주탑부에서 부모멘트가 발생하는데 제안된 해석모델을 적용한 경우 기존 해석모델에 의한 보강형 부모멘트의 약 2.0배의 부모멘트가 발생하였으며, 단경간 현수교의 경우 제안된 해석모델에 의한 주탑 근처에서의 보강형 정모멘트가 기존

해석모델에 의한 결과의 약 5.0배 크게 발생하였다.

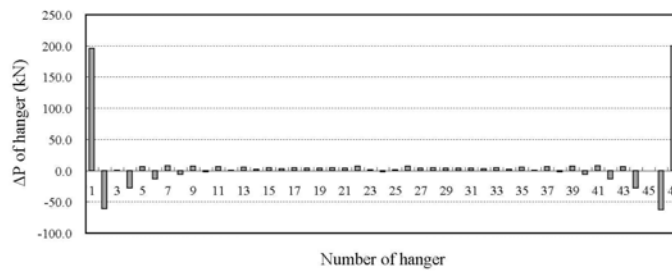
두 해석모델에 의한 보강형의 휨모멘트의 차는 1차, 2차 고정하중의 분리 작용 여부에 따른 거동 차이이다. 기존 해석모델은 가설단계에 따른 고정하중의 단계적 작용을 고려하지 않고 전체 고정하중을 동시에 작용시켜 목표형상을 만족하도록 초기형상해석을 수행하기 때문에 최종적으로 완성



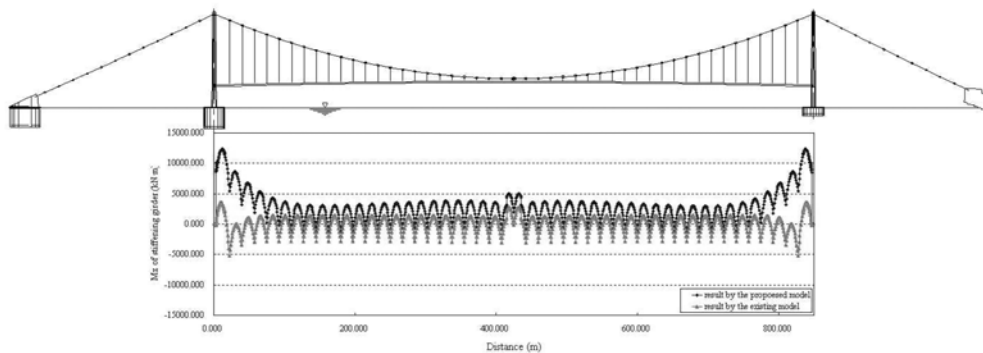
(a) 케이블의 연직좌표의 차



(b) 행어 무응력길이의 차



(c) 행어 장력의 차



(d) 보강형의 휨모멘트

그림 11. 단경간 현수교에 대한 해석결과 비교

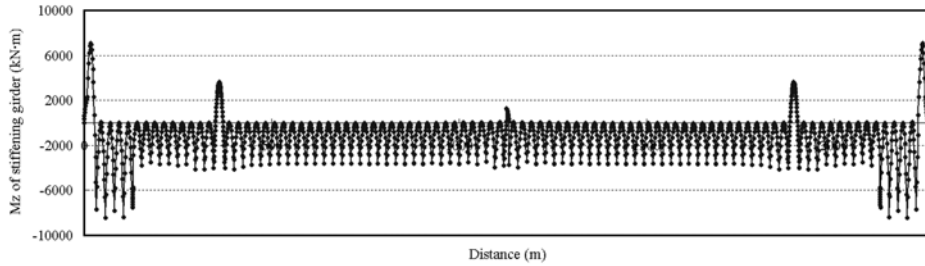
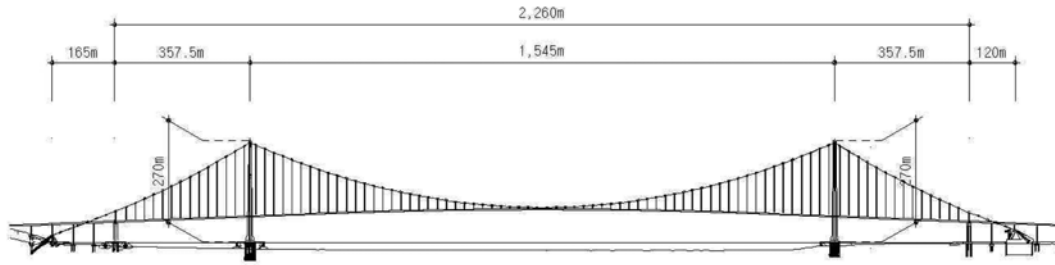
계의 형상이 목표형상을 만족한 상태에서 보강형의 휨모멘트 분포는 행어 연결점을 지점으로 갖는 연속보의 휨모멘트 분포 형상을 갖게 된다.

그러나 실제 가설과정에서는 보강형의 가설이 완료된 후 2차 고정하중이 작용할 때 케이블과 보강형에 처짐이 발생하므로 2차 고정하중에 의한 휨모멘트에 케이블 및 보강형의 처짐에 의한 추가적인 휨모멘트가 발생하게 된다.

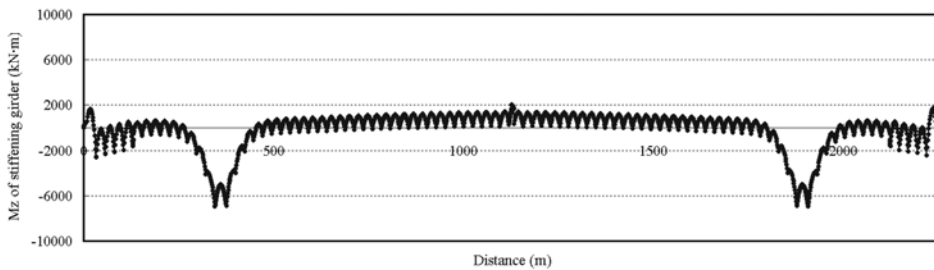
그림 12는 본 연구에서 제안한 해석모델을 적용하여 해석한 1차, 2차 고정하중에 의한 보강형의 휨모멘트 분포 및 2

차 고정하중에 의한 보강형의 처짐을 나타낸 그래프이다. 1차 고정하중이 작용할 때 보강형 세그먼트들은 힌지로 연결되므로 한 세그먼트 내에서 보강형 연결점의 휨모멘트는 0이며 행어 정착점에서 최대가 된다(그림 12(a)). 그림 12(b)의 2차 고정하중에 의한 보강형의 휨모멘트 분포는 그림 12(c)의 보강형의 처짐 형상이 잘 반영된 분포형상을 갖는다. 즉, 보강형 각 세그먼트별로는 행어를 지점으로 갖는 연속보의 분포하중에 의한 휨모멘트분포 형상을 갖고 있으며 전체적으로는 보강형의 처짐에 따른 곡률변화에 의한 휨모멘트

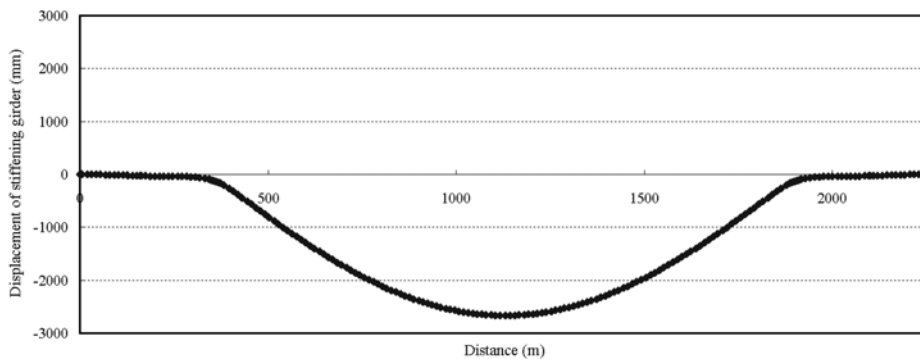




(a) 1차 고정하중에 의한 보강형의 휨모멘트



(b) 2차 고정하중에 의한 보강형의 휨모멘트



(c) 2차 고정하중에 의한 보강형의 처짐

그림 12. 고정하중에 의한 보강형의 거동(case 1)

분포 형상을 나타내고 있다. 보강형의 처짐에 의한 주탑 근처의 부모멘트의 증가는 주탑 근처에서 보강형의 곡률이 급격히 변화함에 의한 것이며 중앙경간부는 보강형의 처짐 형상이 포물선의 형상을 갖기 때문에 곡률이 거의 일정하여 보강형의 처짐에 의한 휨모멘트의 변화가 크지 않다.

이와 같은 결과로부터 본 연구에서 제안된 해석모델을 적용할 경우 보강형 가설단계의 경계조건 변화 및 고정하중의 순차적 작용 영향이 기존 해석모델에 비해 실제 가설방법에 맞게 반영될 수 있을 것이라 생각된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 전한지가설공법으로 시공되는 강박스 보강형의 가설단계에서 세그먼트 간의 힌지연결 효과 및 보강형 가설 완료 후 2차 고정하중이 작용하는 고정하중의 단계별

작용효과를 고려하여 타정식 현수교의 초기형상해석을 수행하기 위한 구조해석 모델 및 해석 알고리즘을 제시하였다. 제안된 해석모델과 기존 해석모델을 적용하여 실제 설계, 시공 중인 2개의 교량에 대해 초기형상해석을 수행하고 거동을 비교, 분석하였으며 결과분석 및 결론은 다음과 같다.

1. 두 해석모델에 의한 주케이블의 형상길이 및 무응력길이를 비교한 결과 두 교량형식 모두 10 mm 이내의 차이를 나타내었다. 이 결과로부터 가설중 보강형 세그먼트의 연결부 경계조건 변화에 따른 보강형의 강성변화가 주케이블의 형상 결정에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.
2. 두 해석모델에 의한 행어의 장력변화는 플로팅 형식의 3경간 연속 현수교의 경우 주탑 근처에서 약 53 kN 이내의 차이를 나타내었으나 주탑 가로보에 지점을 갖는 단경간 현수교의 경우 주탑과 가장 가까운 행어에서 약 200 kN의 차이를 나타내었다. 또한 행어의 무응력길이 변

화도 플로팅 형식의 3경간 연속 현수교의 경우에는 최대 26 mm의 차이를 나타내었으나 주탑 가로보에 지점을 갖는 단경간 현수교의 경우에는 주탑에서 가장 가까운 행어에서 최대 63 mm의 차이를 나타내었다. 이러한 결과로부터 주탑에 지점을 갖는 현수교의 경우 플로팅 형식의 현수교보다 보강형 연결부의 경계조건 변화로 인한 강성변화가 행어의 장력 및 무응력길이 변화에 미치는 영향이 더 큰 것을 알 수 있다.

3. 보강형의 휨모멘트 또한 두 해석모델에 의한 결과가 주탑 근처에서 큰 차이를 나타내었으며 플로팅 형식인 경우보다 주탑에 지점을 갖는 현수교에서 더 큰 차이(기존 해석 모델에 의한 결과에 5.0배)를 나타내었다. 보강형의 휨모멘트의 차이는 기존 해석모델에서 2차 고정하중이 작용할 때 보강형의 처짐 및 곡률변화에 의한 휨모멘트가 고려되지 않기 때문이다.

4. 보강형의 단면 설계에 가장 큰 영향을 주는 하중조건은 풍하중이므로 고정하중에 의한 휨모멘트의 증가가 단면치수의 증가에 미치는 영향을 작을 것이라 예상되나 경제적 설계를 위해 단면의 안전율이 크지 않을 경우 고정하중의 가설단계별 작용에 따른 휨모멘트의 증가를 고려해야 한다.

이상의 결과에서 기존 초기형상해석 모델과 본 연구에서 제안한 해석모델은 주케이블의 형상결정 측면에서는 두 해석모델 모두 설계에 유용하게 적용될 수 있을 것이라 판단된다. 특히 설계초기단계에서 교량의 형상을 계획할 때에는 기존 해석모델을 적용할 경우 해석 수행속도 측면에서 유리하다고 생각된다. 그러나 실시설계 및 시공중 가설을 위한 정밀해석 단계에서는 실제 시공조건을 반영한 본 연구에서 제시한 해석모델을 적용하여 초기형상해석을 수행하여 케이블의 형상관리 및 완성계에서 보강형의 단면력을 산출함으로써 보다 정밀한 시공관리 데이터를 얻을 수 있다고 판단된다. 특히 주탑의 가로보에 지점을 갖는 현수교인 경우 플로팅 형식의 현수교에 비해 시공단계별 보강형의 경계조건 및 고정하중의 작용시점 변화가 주탑 근처에서 행어의 거동

및 보강형의 거동에 크게 영향을 미치므로 주탑에 지점을 갖는 현수교의 경우 상세해석 단계에서 이러한 영향에 대한 검토가 필요하다고 판단된다.

### 참고문헌

김문영, 경용수, 이준석(2003) 현수교의 개선된 초기형상 해석법, **한국강구조학회 논문집**, 한국강구조학회, 제15권, 제2호, pp. 219-229.

대림산업(주), (주)유신코퍼레이션(2003) **현수교 기술과 변천**, 도서출판 과학기술.

문중훈, 장승필(2008) 현수교 케이블의 형상조정, **한국강구조학회지**, 한국강구조학회, 제20권, 제2호, pp. 47-53.

문중훈(2008) **지구곡률을 고려한 현수교케이블의 해석 및 형상관리 기법**, 박사학위논문, 서울대학교.

이명재, 김재홍, 백종균, 권호철(2004) 모도-광양간 초장대 현수교의 실현을 위한 교량 구조시스템의 혁신, **한국강구조학회지**, 한국강구조학회, 제19권, 제3호, pp. 9-19.

이승우(2001) **현수교의 계획과 해석**, 도서출판 한기술.

정운용(1999) 현수교 설계를 위한 선형해석 방법, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제19권, 제1-5호, pp. 725-732.

조경식, 김종화, 안남규(2006) TCUD법을 이용한 현수교 해석 프로그램의 개발, **2006년도 학술발표회 논문집**, 한국강구조학회, pp. 268-273.

조충영, 김재홍, 박수영, 신상훈(2004) 적금-영남 연륙교 가설공법, **대한토목학회 구조위원회 2004년도 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 219-229.

최인호, 이승우(2001) 변위법에 의한 현수교의 구조해석법, **대한토목학회지**, 대한토목학회, 제49권, 제7호, pp. 18-25.

한국도로공사(2008) **건설기술혁신사업 초장대교량사업단 상세기획 보고서**.

Gimsing, N.J. (1998) *East Bridge, A/S Storebæltsforbindelsen*.

Janjic, D. and Bokan, H. (2006) *Erection Control, TDV's Unique Tool Solution for Bridge Design and Construction*, IABSE Symposium on Responding to Tomorrow's Challenges in Structural Engineering, International Association for Bridge and Structural Engineering, Budapest, IABSE.

TDV GmbH (2007) *RM2006 User Guide*, Graz, Austria.

(접수일: 2009.4.14/심사일: 2009.6.1/심사완료일: 2009.6.1)