



02

# 전호대교(광폭 일면케이블 Extradosed교)의 설계와 시공

## Design and Construction of Extradosed Bridge Supported by Single Plane Cables with Wide Girder Width in Jeon-Ho Project

**윤정현** Junghyun Yun  
(주)스펙엔지니어링  
대표이사

**김문옥** Moonok Kim  
(주)스펙엔지니어링  
기술연구소 과장

**김태섭** Taisub Kim  
현대건설  
전호대교 현장 소장

**윤의택** Euitaek Yoon  
현대건설 토목환경사업본부  
기술개발실 차장

### 1. 머리말

전호대교는 김포 한강로(경인운하 구간) 개설공사 노선 중 경인아라뱃길을 횡단하는 교량으로써 김포시의 장기종합개발계획에 부합되고 상징적이면서 주변 경관과 조화를 이루는 Extradosed교로 계획되었다(그림 1). 교량 총연장은 650 m 이고, Extradosed교 구간의 연장은 350 m이며, 교폭은 28.9 m ~ 31.9 m, 주탑의 총 높이는 30 m이다. 케이블은 MST타입 (Parallel Strand Cable, 7연선  $\Phi 15.7$  mm,  $f_{pu}=1,860$  MPa)의 하프형으로 구성되어 있으며, 경인아라뱃길 운전 일정에 차질이 없도록 2011년 7월에 개통하였다. 본 기사에서는 전호대교의 설계와 시공 및 형상관리의 과정을 소개하고자 한다.

### 2. 전호대교의 설계

#### 2.1 상부구조 제원

전호대교 상부구조의 주요제원은 아래의 <표 1>과 같다.

#### 2.2 가설단계를 고려한 설계

전호대교의 가설공법은 동바리 공법(full staging method)으로써 일반적으로 동바리 공법으로 가설되는 교량의 경우



그림 1. 전호대교 전경

표 1. 전호대교 상부구조의 주요제원

지간구성	100 m + 150 m + 100 m = 350 m
폭원	28.9 m ~ 31.9 m (왕복 6차로, 보도 5 m, 중분대 3 m)
평면선형	원곡선(R = 650 m)
횡단경사	-2% ~ ±5%
형고	3.0 m ~ 5.0 m
주탑고	30 m(콘크리트부 높이 : 22 m)
케이블	주탑 1개소 당 11개의 일면케이블 배치

상세한 가설단계해석을 수행하지 않는다. 그러나 본 교량의 경우, 공사 관리의 기준치를 제시하고 교량의 목표형상이 오차범위 이내에서 구현될 수 있도록 하기 위해 총 26단계의 상세 가설단계해석을 수행하였다. 이때 콘크리트의 시간적 특성과 가설단계 변화에 따른 구조적 영향을 정확히 모사하기 위해 가설 동바리 강성, 보강거더 및 주탑의 콘크리트 타설 시기, 케이블의 긴장 시기 등은 최대한 현장여건과 일치시켜 적용하였다.

2.3 3차원 입체모형을 이용한 횡방향 설계법 보완

전호대교의 횡방향 해석은 2차원 골조 모델을 기초로 하여 수행되었으나 곡선선형의 영향, 광폭 일면 케이블 지지 구조형식의 영향 등에 의해 횡방향 비틀림 효과가 타 교량에 비해 클 것으로 예상되었고, 횡방향 비틀림 효과를 확인하기 위해 별도의 3차원 입체모형을 구성하였다. 3차원 입체모형을 해석하여 구조물의 횡방향 거동 특성 및 비틀림 규모를 파악하고 이를 2차원 골조모델에 적용함으로써 보강거더의 비틀림 강성을 확보하였다. 3차원 입체모형 해석 결과, 보강거더에는 각 구간별(중앙일반부, 측경간일반부, 케이블연결부, 주두부)로 서로 다른 횡방향 상대 처짐이 발생함을 확인할 수 있었고 각 복부의 서로 다른 상대 처짐은 상부 슬래브의 휨을 야기하므로 3차원 입체모형 해석을 통해 산출된 보강거더의 처짐을 2차원 모델의 각 복부에 재하하는 방법으로 횡방향 비틀림 효과를 고려하였다. <그림 2>는 3차원 입체모형 해석을 통해 산출된 고정하중 상태에서의 보강거더 상대 처짐이며 중앙일반부 구간에서 캔틸레버 끝단의 상대 처짐은 최대 13 mm로 발생하였다.

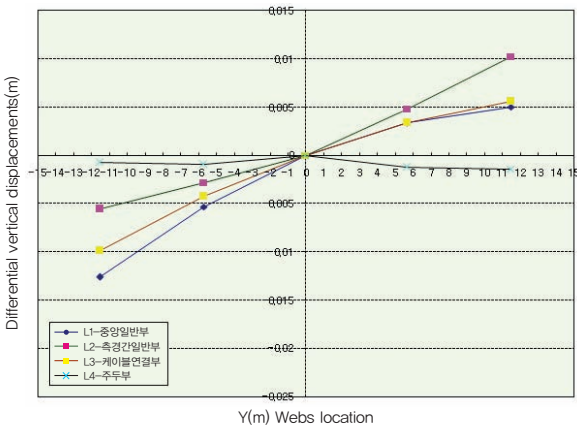


그림 2. 보강거더 횡방향 상대처짐

2.4 보강거더 격벽부 설계

전호대교는 광폭 일면지지의 구조특성 상 보강거더에는 상대적으로 큰 규모의 비틀림력이 작용하게 된다. 따라서 두께 300 mm인 중복식 격벽을 교축방향 5.5 m 간격으로 보강거더 케이블 정착 위치마다 설치하여 비틀림 강성을 증가시켰다. 또한 설치된 격벽에는 <그림 3>과 같이 횡방향 강선을 추가적으로 배치·긴장하여 다이아프램의 횡분배 기능을 향상시키는 동시에 구조물 거동의 균형을 유도하고 구조 안정성을 증대시켰다.

2.5 주탑 설계

주탑의 형상은 교량의 조형미와 상징성에 중요한 부분을 차지한다. 본 교량의 경우 원형의 강재 거푸집을 영구적으로 사용하도록 계획함으로써 마치 강주탑과 같은 독창적 조형미를 연출하였고, 주탑고를 증가시킴으로써 주탑의 상징성을 극대화시켰다. 주탑의 단면은 <그림 4>와 같은 아령형으로 주탑 하단부는 6.5 m × 3.0 m, 주탑 상단부는 5.5 m × 2.0 m의 완만히 변화하는 단면 형상을 가지고 있다.

2.6 케이블 설계

사장교와 Extradosed교의 구분 요소 중 하나는 케이블의 피로응력과 연직분담율이다. Extradosed교로 구분

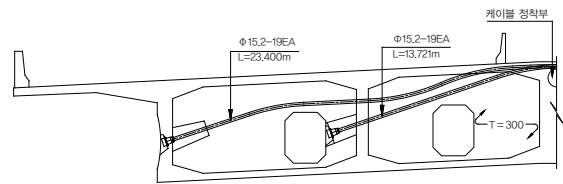


그림 3. 전호대교 보강거더 격벽부 단면

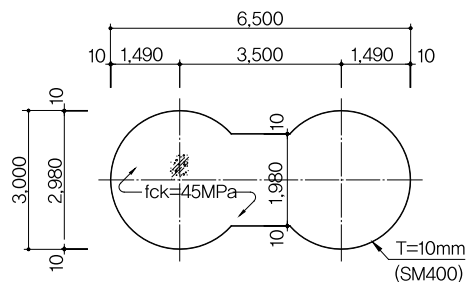


그림 4. 전호대교 주탑 하단부 단면

되어질 경우 케이블의 허용응력은 극한응력의 60%로 이내로 제한하고 사장교로 구분되어질 경우 케이블의 허용응력은 극한응력의 45%로 제한한다. 본 교량의 경우 활하중에 의해 케이블에 발생하는 피로응력은 59 MPa 이고, Extradosed교의 허용 피로응력인 70 MPa 이하로 발생하여 피로안정성을 확보하였고 케이블의 연직분담율은 약 24%이다. 따라서 본 교량은 Extradosed교로 구분되어지며 케이블의 발생응력이 케이블 극한응력의 60%를 이내에 들도록 설계하였다. 교량이 준공된 후 케이블에 발생하는 최대장력은 <그림 5>와 같이 허용장력의 약 75% 수준이므로 케이블의 안정성은 적정하게 확보된 것으로 판단된다.

### 3. 전호대교의 시공

#### 3.1 가설현황 및 보강거더 시공

앞서 언급한 바와 같이 전호대교의 가설은 교량 전 구간에 걸쳐 가설벤트를 설치하고 보강거더와 주탑이 동시에 가설하도록 계획하였다(사진 1). 가설벤트의 평균높이는 시점측이 약 13m, 종점측이 약 7m이고, 총 29개소

의 벤트모듈로 구성되어 있으며 지간은 평균 14m로 적용되었다. 보강거더는 키세그먼트를 제외하고 총 12개의 블록으로 구분하여 타설 관리하였으며, 주두부 구간 블록이 시공 완료된 후 주탑을 가설하는 것으로 계획하였다.

#### 3.2 주탑 시공

전호대교 주탑의 높이는 총 30m이고, 22m는 구조부재로서 역할을 하는 콘크리트(강재 거푸집 포함)로 구성되어 있으며, 나머지 구간은 비구조부재로서 강재 거푸집만으로 구성되어 있다. 이때 강재 영구 거푸집의 분할 간격은 3.2m이고, 콘크리트 분할 간격인 6.4m의 절반으로 계획하였으며, 2개소의 강재 거푸집을 설치한 후 콘크리트를 타설하는 과정으로 주탑이 시공되었다. 주탑 강재 거푸집은 공장에서 제작한 후 현장으로 운송되고 크롤러 크레인을 이용하여 일괄 설치하였다. 주탑 거푸집 세그먼트의 이음면은 현장에서 맞대기(t = 10 mm) 용접으로 처리하였다. 이와 같이 전호대교의 주탑은 영구 강재 거푸집을 사용함으로써 거푸집 설치 공기가 감소하고 거푸집 해체 과정이 생략되어 주탑의 시공 일수가 일반적인 콘크리트 주탑에 비해 약 절반으로 감소하였다.

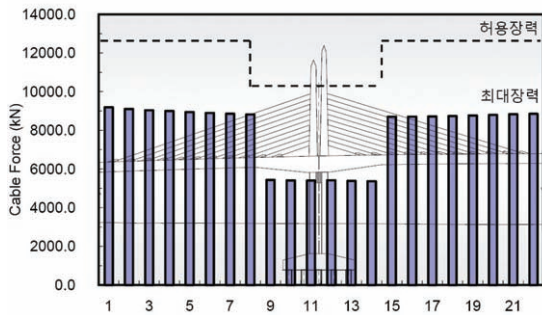


그림 5. PY1 케이블 장력도

#### 3.3 보강거더 키세그먼트 폐합

전호대교의 또 다른 주요 공정 중 하나로 보강거더 중앙부의 키세그먼트 폐합 공정을 꼽을 수 있다. 본 교량의 주탑 교각은 교량의 상부구조와 하부구조를 일체로 연결하는 라멘 형식으로 적용되었으며, 교각기둥은 2개의 레그로 구성된 단면을 채택하였다. 따라서 상부 구조계의 변화는 하부구조에 상당한 영향을 미치게 된다. 즉 교각



사진 1. 전호대교 가설 전경



기둥 레그는 보강거더 중앙부 키세그먼트가 폐합되기 전까지는 서로 균등한 하중에 저항하고 있으나 키세그먼트가 폐합되고 추가적인 하중이 재하된 후 교량의 장기거동 영향에 의해 각 교각기둥 레그가 저항하는 하중은 상당한 차이를 보이게 된다. 그 결과 중앙경간측으로 설치된 내측 레그에는 외측 레그보다 상대적으로 더 큰 하중이 작용하여 내하력이 저감되게 된다. 전호대교에서는 이와 같은 2주 교각의 거동 특성을 향상시키기 위해 키세그먼트를 폐합하기 전 보강거더를 교량의 시·중점 방향으로 미는 Set Back 작업을 실시하여 교각 거동의 균형을 향상시켜 구조안정성을 증대시켰다. Set Back은 일반적으로 사장교의 교축방향 변위를 제어하기 위해 실시되나 본 교량에서는 2주 교각의 거동특성을 감안하여 교축방향으로 약 15mm의 변위를 유발하도록 Set Back 작업을 실시한 후 키세그먼트를 폐합하였다(사진 2).



사진 2. 전호대교 키세그먼트 폐합

## 4. 전호대교의 형상관리

### 4.1 형상관리 개요

교량의 형상관리는 가설조건 및 가설하중 등이 고려된 시공단계해석을 수행하여 보강거더와 주탑의 캠버 및 케이블의 도입장력을 산출하고, 해석된 교량 형상과 실측된 교량 형상이 상이할 경우 해석치와 실측치를 비교하여 관리오차가 형상관리 허용오차 이내에 들도록 보정하는 과정을 일컫는다. 이러한 일련의 과정들을 통하여 교량 형상은 목표 형상에 도달하게 되며 교량 종단 선형은 계획고와 일치하게 된다. 전호대교의 관리 목표형상은 준공 후 1만일 경과 시 종단선형이 계획고에 도달하는 것으로 계획하고 보강거더의 처짐과 케이블의 장력을 위주로 전호대교의 형상관리를 수행하였다.

### 4.2 보강거더 처짐관리

동바리 공법으로 가설되는 교량의 경우, 캔틸레버 공법으로 가설되는 교량과는 달리 가설 중 캠버 조정 및 오차 보정이 거의 불가능하다. 따라서 보강거더의 타설 순서, 케이블의 긴장 순서, 가벤트의 강성 등을 최대한 현장 여건과 일치시켜 구조해석을 수행하고 준공 후 1만일 경과 시에 발생하는 보강거더의 처짐을 뒤집어 솟음을 주어야 한다. 이렇듯 목표 시점에 발생될 처짐을 뒤집어 솟음을 주는 것을 캠버라 하고 상세 구조해석을 통해 산출된 캠버를 기준으로 시공단계별 발생 처짐을 관리하여야 한다. 본 교량의 캠버는 중앙경간이 최대 30mm, 측경간이 최소 -13mm이며, Extradosed교 전구간에 걸쳐 적용된 캠버는 아래 <그림 6>과 같다.

본 교량의 준공시의 처짐관리 결과는 <그림 7>과 같

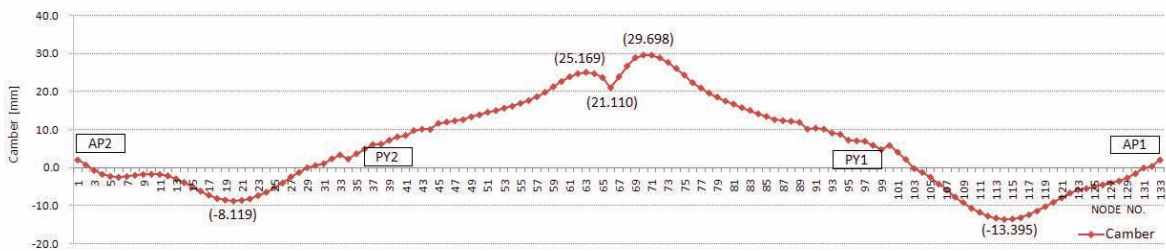


그림 6. 보강거더 캠버

으며, 주요 시공단계 및 준공시의 보강거더 수직처짐은 모두 허용오차(중앙경간:  $\pm 75$  mm, 측경간:  $\pm 50$  mm) 이내에서 발생하였다. 따라서 전호대교 보강거더의 처짐 관리는 추가적인 조정과정 없이 마무리되었으며, 최종 목표형상에 도달할 수 있을 것으로 예상되었다.

### 4.3 케이블 장력관리

전호대교의 케이블 가설은 케이블 전문업체에서 수행하였으며, 키세그먼트를 제외한 모든 구간의 보강 거더가 가설 완료된 후 주탑 내측 케이블에서 외측 케이블 방향으로 순차적으로 진행하였다. 이때 케이블의 장력관리는 케이블의 도입장력 및 발생장력이 시공 단계해석에 의해 산출된 장력과  $\pm 5\%$ 의 오차범위 이내가 되도록 계획하였고, 케이블의 도입장력 모니터링 결과 모든 케이블의 장력은 해석 결과와 허용오차범위 이내로 발생하였다.

## 5. 맺음말

경인아라뱃길을 횡단하는 광폭 일면케이블 Extradosed 형식의 전호대교는 케이블의 하중분담율을 증가시켜 경제적인 단면계획을 수립하고 적절한 격벽 배치 및 복부 계획을 수립함으로써 일면케이블 지지 구조 시스템의 기능을 향상시킨 교량이다. 한강변의 랜드마크 효과를 극대화하기 위해 하프타입의 일면케이블을 배치하였고, 효율적인 케이블 배치를 통해 주행자의 시야를 확보하고 곡선선형에 의한 케이블 간섭효과를 배제하였다.

본 교량은 광폭 일면케이블 지지 구조물의 거동 특성을 고려하여 합리적이고 세부적인 설계를 진행하였으며,

주탑에 강재 거푸집을 영구적으로 사용하도록 제안하여 시공성을 향상시켰다. 또한 일반적인 Extradosed교에서는 잘 적용하지 않는 Set Back을 실시함으로써 구조 안정성을 증대시켰다. 교량의 형상관리에 있어서는 면밀하게 현장여건을 반영하여 구조해석을 수행함으로써 정확한 보강거더 캠버와 시공단계별 처짐을 제시하였다. 그 결과, 보강거더의 선형이 목표 선형에 근접하였으며 구조해석에 의해 제시된 케이블 장력이 현장 도입 장력과 오차범위 이내로 확인되어 성공적으로 형상관리가 마무리되었다.

전호대교의 공사는 2009년에 착공하여 모든 공사가 안전하게 시공 완료되어 2011년 7월에 개통, 많은 교량 이용자들에게 안전하고 쾌적하며 편리한 교통 서비스를 제공해 주고 있다(사진 3). 전호대교의 설계 및 시공과정이 국내 Extradosed 교량의 기술능력 발전에 일조하였기를 기대하며, 본 교량의 설계 경험이 향후 Extradosed 교량의 설계기준 및 상세 시방기준을 확립하는데 도움이 되었으면 하는 바람이다. □

담당 편집위원 : 공신표(현대건설(주)) spko@hdec.co.kr



사진 3. 전호대교 완공 전경

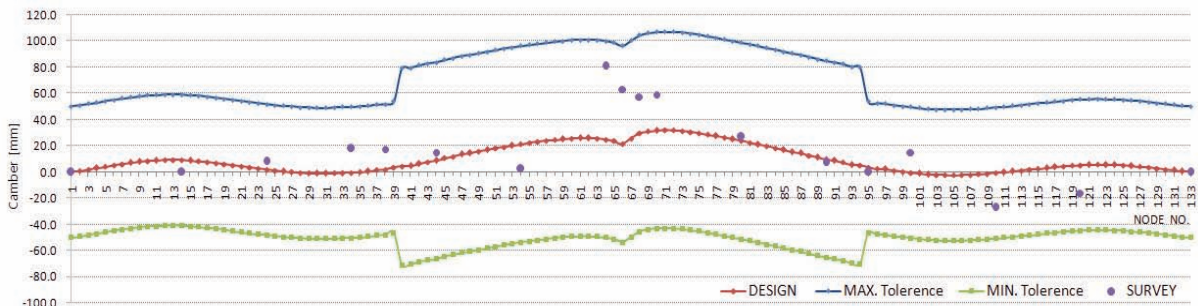


그림 7. 준공시 보강거더 처짐관리 결과



**윤정현 박사**는 한양대학교 토목공학과에서 형상기억합금 교량반침 연구로 박사학위를 취득하였고, 현대건설 토목설계실, 유신코퍼레이션 구조부 및 엔비코컨설턴트에서 케이블 지지교량 및 특수교량 설계를 수행하였다. 2009년에 건설엔지니어링 및 컨설팅 전문업체인 (주)스펙엔지니어링을 창업하여 현재 다수의 국내의 건설프로젝트의 설계 및 시공지원 업무를 수행하고 있다.

yunj@speceng.co.kr



**김문옥 과장**은 현재 연세대학교 박사과정에 재학 중이며 (주)스펙엔지니어링에서 교량의 설계 및 시공엔지니어링 분야를 담당하고 있다. 주요 참여 과업으로는 전호대교 변경설계 및 시공엔지니어링, 경안대교 및 제2나주대교의 선형관리와 시공엔지니어링 등이 있다.

hihioho@speceng.co.kr



**김태섭 소장**은 한양대학교 토목공학과를 졸업하였고 현재 현대건설에 근무중이며 진도대교(사장교), 서중대교(ILM장대교량), 싱가포르 MRT(PSM공법)등 다수의 교량시공 경험이 있으며 전호대교(ED교)는 직접 변경설계 및 시공에 책임자로 근무했다.

tesubkim@hdec.co.kr



**윤의택 차장**은 현대건설 토목환경사업본부 토목환경기술개발실에서 근무하고 있으며, 신성장사업1팀에서 초장대교량 분야를 담당하고 있다. 주요 근무 경력으로는 대만고속철도 C230 현장, 운남대교, 무영대교 및 전호대교 현장에서 선형관리, 시공 엔지니어링 및 현장 설계 총괄 업무를 수행하였으며, 현재는 본사 토목환경기술개발실에서 케이블 교량 지원 업무를 담당하고 있다.

etyoon@hdec.co.kr