경사고저주탑 사장교의 설계와 시공

글 임재승 / 기술영업TFT 이사 토질및기초기술사 / **전화** 02-3433-7770 / **E-mail** ljs@ssyenc.com
글 이 타 / 토목기술팀 부장 공학박사 토목구조기술사 / **전화** 02-3433-7773 **E-mail** yita@ssyenc.com

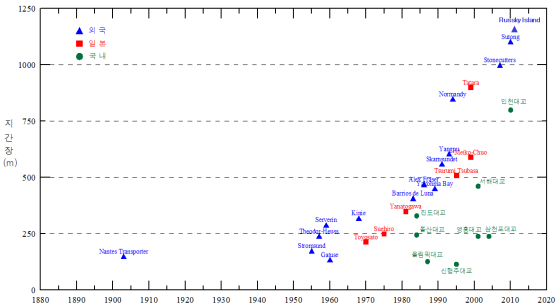
1. 머리말

국내에서 건설한 사장교는 1984년에 준공한 진도대교(강사장교, 주경간 344m)를 시작으로 2018년 12월까지 총 54개의 사장교가 준공 되었으며, 그 이후에도 강사장교를 중심으로 장대 사장교의 설계 및 시공이 진행중에 있다. 사장교는 그 규모를 중앙경간장으로 표현하고 있으며, 국내에서 뿐만 아니라 세계적으로도 중앙경간장 장대화를 위해 경쟁하고 있다. 당사에서 수주한 고속국도 제14호선 함양~창녕 11공구의 의령낙동대교는 국내에서 처음 시도한 경사고저주탑 콘크리트 사장교로서 기술적 진보로 환경제약을 극복한 대표적인 사례이므로 그 설계 및 시공을 소개 하고자 한다.

2. 사장교의 발전과정

가장 오래된 사장교의 건설 시도는 1784년 독일의 목수인 로체스터(Loescher)에 의해 시도되었으며, 그 후에는 주로 현수교의 보조부재로 사용되었다. 최초의 사장교는 프랑스에서 1903년 에 건설된 Nantes Transporter교로 주경간장 141m인 교량 이었으나 1958년에 붕괴되었다. 그러므로 최초로 성공적으로 건설된 사장교는 1955년에 건설된 스웨덴의 Stromsund교 이다([그림 2] 참조). [그림 1]에서는 국내외 사장교의 중앙 지간장의 변화를 나타내고 있다.

[그림 1] 국내외 사장교의 중앙지간장 변천



[그림 2] Stromsund교(주경간 183m) 전경

위 [그림 2]는 Stromsund교의 전경을 보여주고있다.

[그림 3] 진도대교(주경간 344m) 전경

국내 최초의 사장교는 1984년 준공한 진도대교이며, 이는 세계 최초인 Stromsund교 보다 30년 이후에 건설되었다([그림3] 참조).

[그림 4] 인천대교(주경간800m) 전경

국내에서 최장 지간장을 가진 사장교는 2009년에 준공한 인천대교로 중앙경간이 800m로 세계 8위 수준이다([그림 4] 참조).

[그림 5] Russky Island교 (주경간1104m) 전경

현재 세계 1위 사장교는 2012년에 준공된 러시아의 Russky Island교 이며 주경간장은 1,104m이다([그림 5] 참조).

당사는 2012년 준공한 화명대교(콘크리트 사장교, 주경간장 270m)와 2013년 준공한 묘도대교(강사장교, 주경간장 430m)에 참여하였다.

당사가 직접 설계하고 시공한 케이블 교량으로는 운암대교(ED교, 순창~운암 도로확장공사)와 한교천교(ED교, 호남고속철도 4공구) 등이 있으며, 그 후에도 지속적으로 케이블 교량의 설계 및 시공을 위해 전력을 다해 왔고, 그러한 결과 2018년 3월 2일에 의령낙동대교(고속국도 제14호선 함양 ~ 창녕간 건설공사 11공구)를 기술 제안으로 수주할 수 있었다.

본 고에서는 낙동강 환경오염 최소화 위해 계획한 의령낙동 대교 경사 고저주탑 콘크리트 사장교의 구조적 특징 및 주요 설계 내용을 중심으로 기술하고자 한다.

3. 의령낙동대교 교량개요

의령낙동대교는 낙동강과 농업진흥구역을 횡단하는 교량으로 자연경관우세지역의 강조형 교량위계에 맞는 교량형식인 국내 최초 경사 고저주탑 사장교를 적용하여 지역의 랜드마크(Land Mark)가 되도록 계획되었다.

낙동강 저수로 구간 교각 배제 및 장경간화로 가설중 환경오염이 최소화되도록 하였으며, 경사 고저주탑의 구조거동을 고려하여 가설중 및 공용중 안정성을 확보할 수 있는 가설 계획을 수립하였다. 의령 낙동대교는 국가하천 낙동강의 치수성, 환경성, 경관성 극대화를 고려하여 주탑기초간 간격은 405m(받침간 거리 370m) 를 적용하였으며, 주변과 조화롭고 상징적인 경관을 제공하도록 독창적인 역Y형 경사 고저주탑 사장교를 적용하였다([그림 6] 참조).

최대경간장을 1,000m까지 계획할 수 있는 강사장교와 달리 콘크리트 사장교의 경우 최대경간장은 500m 수준이며, 의령낙동대교의 경우 고주탑부 중앙경간 길이만 235m로 대칭 사장교의 470m에 해당하는 큰 규모의 사장교이다.

<표 1> 의령 낙동대교 사장교 주요 제원

구분	주요제원
연장 및 폭원	L=1000.6 m, B = 24.3 ~ 25.9m(4차로)
경 간 구 성	(접속교) 6 @ 50 = 300m (사장교) 100 + 112.5 + 370 + 117.5 = 700m
상 부 구 조	(접속교) PSC e-Beam / (사장교) PSC 박스거더
케 이 블	Multi Strand케이블
주 탑	역Y형 콘크리트 경사 주탑
기 초	(접속교) 직접기초, 합성말뚝(Φ 600) (사장교) 현장타설말뚝(Φ 3,000)

[그림 6] 의령 낙동대교 조감도

4. 의령낙동대교 계획 및 설계

4.1 교량계획시 주요 검토 사항

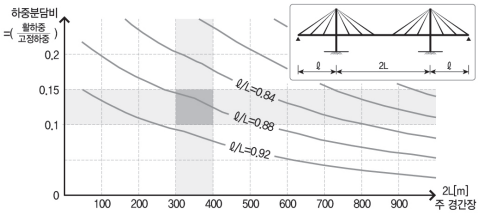
4.1.1 주경간장 및 측경간장 검토

교량형식 검토시 저수로 교각 설치를 배제하여 친환경적이고 상징성이 우수한 고저주탑 사장교 형식을 선정하였다. 저수로 폭원과 주탑기초 규모 고려시 최소 필요 주 경간장은 405m이며, 종점측 측경간장은 100m 이내의 현황 조건을 만족하는 최적의 주경간장 및 측경간장으로 계획하였다.

최적 측경간장비로 ℓ/L= 0.86~0.92를 도출하였고, 최소 필요 주경간장(405m)을 만족하는 종점측 최적 측경간장 확보가 불가하여 기초 위치와 무관한 별도의 상부지지점 설치 위치를 검토하였다([그림 7] 참조).

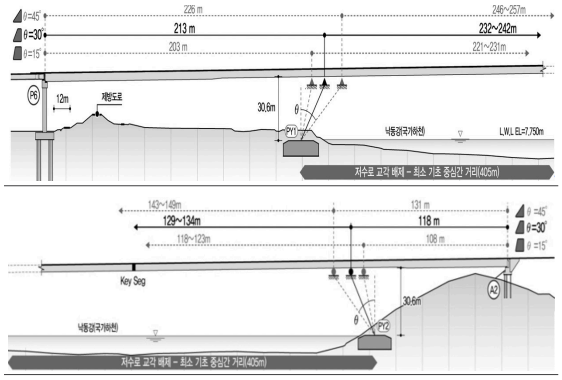
[그림 7] 최적 측경간장비 도출

최적 측경간장비(측경간장/주경간장)

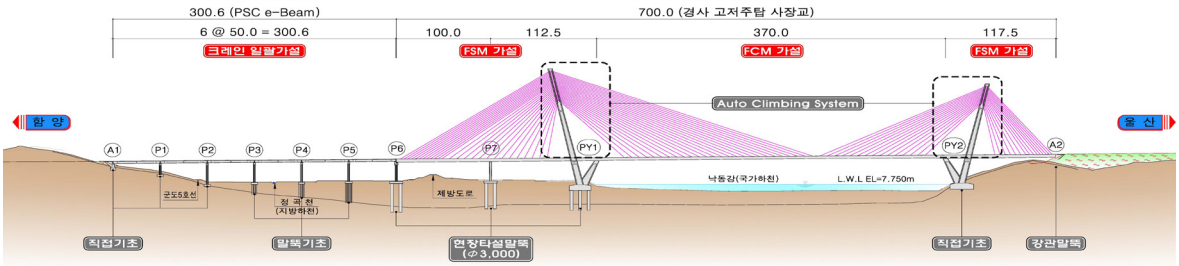


주경간장과 하중분담비 고려 최적측경간장비 : ℓ/L=0.88 ~ 0.92

[그림 8] 상부구조 지지부재 위치 및 경간장 검토



[그림 10] 의령 낙동대교 종단면도

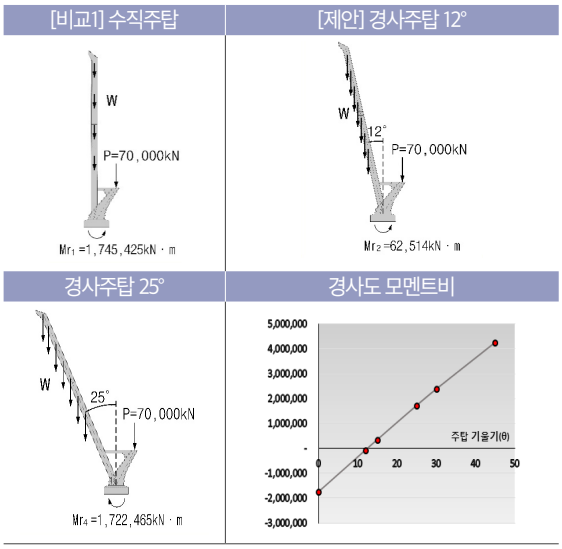


상부거더 받침점과 기초를 연결하는 경사부재를 15°~ 45°로 변경하여 검토한 결과 30°로 설치하였을 때 구조적으로 최적인 경간장비를 확보하였으며, 낙동강 저수로와 최적 측경간장 비를 고려하여 경간 분할을 계획하였다([그림 8] 참조).

4.1.2 주탑 경사 검토

받침점과 기초를 연결하는 경사부재를 30° 경사로 계획함에 따라 상부구조 반력에 의한 전도 모멘트를 경사 주탑 자중에 의해 상쇄시키도록 주탑의 기울기 검토를 수행하였다. 기울기를 수직부터 경사 25°까지 변경하여 검토한 결과, 12°일 때 최적의 전도모멘트 결과값이 도출되어 경사주탑의 기울기는 12°를 적용하였다([그림 9] 참조).

[그림 9] 주탑 기울기 검토

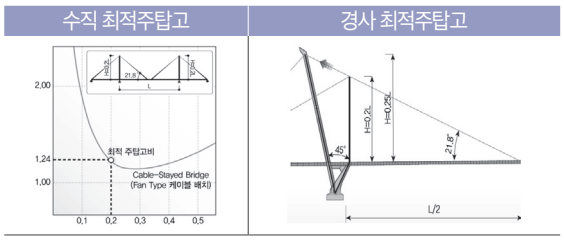


4.1.3 최적 주탑고 계획

주경간장 및 주탑경사를 고려한 최적 주탑고를 계획하였다.
통상적으로 케이블 배치가 Fan Type인 경우 최적 주탑고비는 주경간장 대비 0.20이므로 케이블각도 θ= 21.8°를 도출하여 적용하였다.
주탑고 변화에 따른 케이블 장력 및 단면력 변화 검토를 통해 경

사주탑의 최적 주탑고비(0.25L)를 선정하였으며, 탑정부를 케이블 경사에 맞춰 경사 이동하여 케이블 경사가 동일하도록 주탑고를 계획하였다([그림 11] 참조).

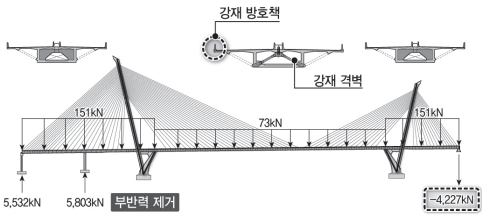
[그림 11] 주탑 기울기 검토



4.1.4 부반력 저감 위한 고정하중 배치 계획

경사 고저주탑 구조특성상 단지점부 부반력 제거 및 최소화할 수 있는 방안을 계획하였다. 측경간부는 중량이 무거운 콘크리트 방호책 및 콘크리트 격벽을 적용, 중앙경간은 가벼운 강재방호책 및 강재스트럿을 적용하는 2차 고정하중 배치를 계획하여 단지점부 부반력 제거 및 최소화 효과를 도출하였다([그림 12] 참조).

[그림 12] 2차 고정하중 배치

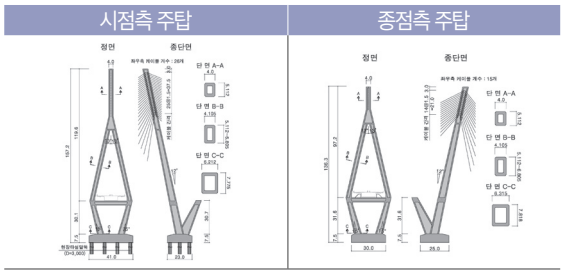


4.1.5 주탑 및 케이블 형식 계획

의령낙동대교의 주탑은 종방향 측경간쪽으로 12° 기울어져 있는 경사고저주탑이며, 비대칭 사장교의 구조특성을 고려하여 주탑 및 케이블 형식을 검토하였다.

케이블 1면 역Y형 주탑 적용으로 면내방향 강성증대로 안정성 확보 및 상부거더 확폭을 최소화시켰으며, 1면 케이블 설치로 주행자 개방감 및 유지관리 효율성을 증대하였다([그림 13] 참조).

[그림 13] 경사고저주탑 단면도



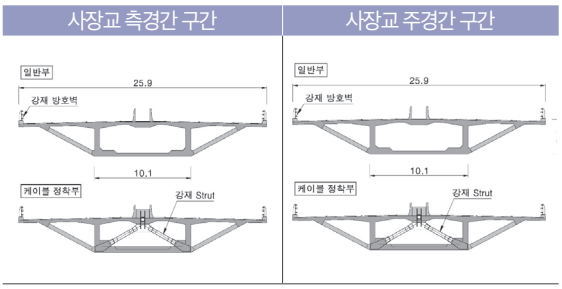
4.1.6 주거더 계획

의령낙동대교의 주거더는 PSC 박스거더 형식으로 기술제안시 전구간 동일한 1실박스 형식을 적용하였으나, 실시설계시 측경간은 카운터웨이트 설치부와 점검통로를 분리하여 3실박스, 중앙경간은 1실박스 형식을 적용하였다.

측경간 3실박스의 케이블 정착부는 콘크리트 격벽 및 횡격벽 강연선으로 보강하였으며, 거더 내부에 카운트웨이트 콘크리트를 설치하여 부반력을 저감시켰다.

중앙경간 1실박스의 케이블 정착부는 강재스트럿을 적용하여 주거더 자중을 절감시키도록 계획하였다([그림 14] 참조).

[그림 14] 주거더 횡단면도

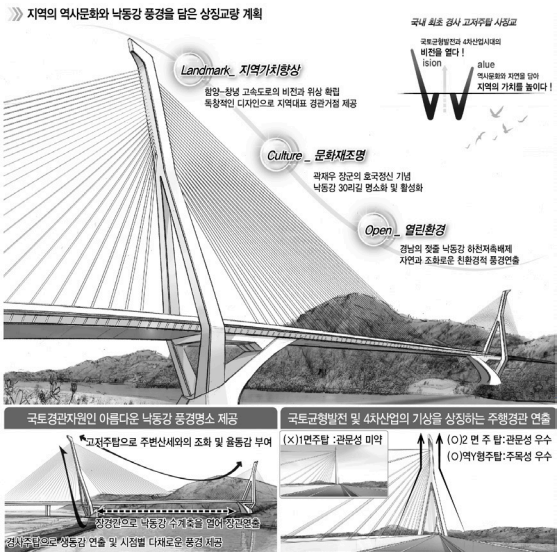


4.2 의령낙동대교의 미관설계

4.2.1 인문·지리 현황을 고려한 구조물 미관설계

의령낙동대교 주거더높이 3.5~4.0m로 거더슬림화 및 주경간 405m 장경간화를 고려하여 지역상징 이미지를 반영한 교량 디자인을 수행하였다([그림 15] 참조).

[그림 15] 의령낙동대교 경관설계

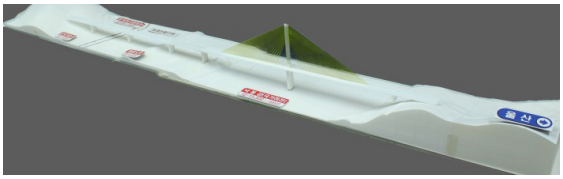


4.2.2 3D 프린팅을 사용한 형식 선정

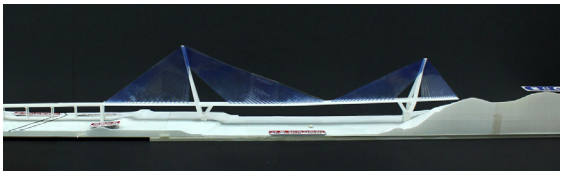
의령낙동대교의 적정한 사장교 형식선정을 위해 1주탑 사장교와 경사고저주탑 사장교를 [그림 16]과 같이 3D 프린팅을 이용한 모델링을 수행하여 실제 지형과 구조물의 조형미를 3차원으로 검토하여 가장 적정한 사장교 형식을 선정하였다.

[그림 16] 사장교 3D 프린팅

(a)1안 - 1주탑 사장교



(b) 2안 - 경사고저주탑 사장교



4.3 구조해석 및 단면설계

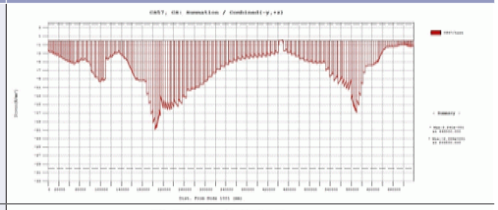
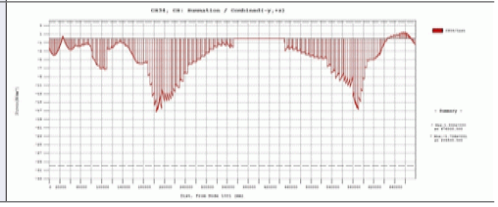
4.3.1 주거더 종방향 검토

의령낙동대교의 주거더는 고강도콘크리트 f_{ck}=60MPa 및 강연선 f_{pu} = 2,400MPa을 적용하여 거더형고를 최소화하였으며, 거더 단면해석 결과는 [그림 17] ~ [그림 22]와 같다.

본 교량은 콘크리트 세그멘탈 공법으로 시공되는 교량으로 측경간은 FSM공법, 중앙경간은 FCM공법을 적용하여 시공단계, 시공중 안정성, 공용중 사용한계, 극한한계 및 극단한계상태의 각 조건에서 허용응력 이내로 안전성을 확보하도록 설계하였다.

1) 시공 중 최대응력 발생 단계에 대한 검토

[그림 17] 시공단계 응력검토

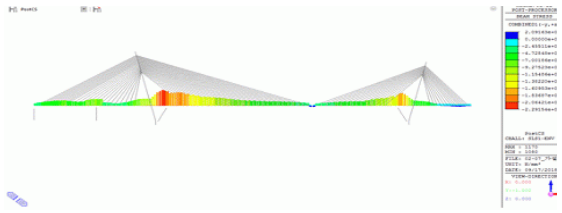
구분	상연응력 (Mpa)
CS57	
CS34	

• 상연 압축응력: 발생 21.1MPa < 허용 30.0MPa ∴ O.K

2) 가설중 불균형 모멘트에 대한 안정성 검토

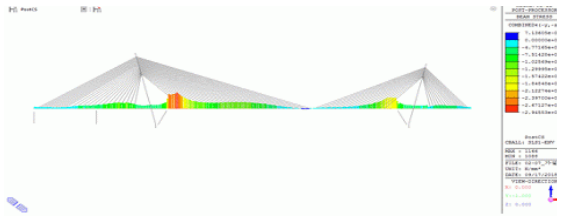
[그림 18] 가설중 상·하연응력 검토

상연 응력 검토



• 발생응력(2.09MPa) < 허용응력 (4.493MPa) S.F=1.55 ∴ O.K

하연 응력 검토

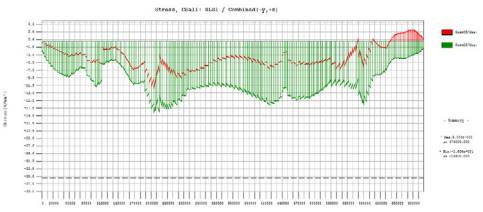
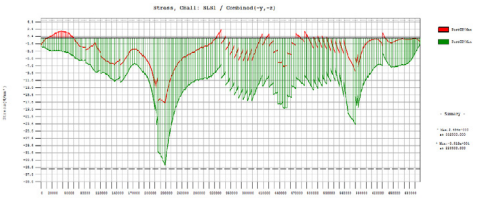


• 발생응력(29.46MPa) < 허용응력 (30.00MPa) S.F=1.01 ∴ O.K

3) 주거더 공용중 휨강도 검토

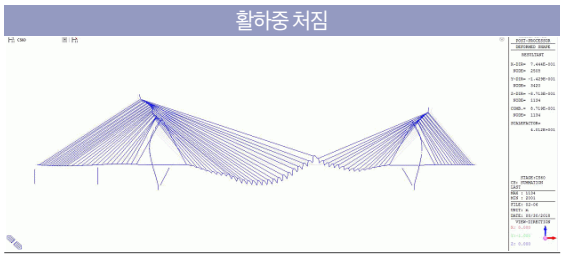
한계상태 설계법에 따라 콘크리트의 응력한계는 다음 값을 각각 준용하였음.

[그림 19] 종방향 거더 검토 결과

구 분	사용하중조합 I
상연 응력 (MPa)	
하연 응력 (MPa)	
검토 결과	상연압축 : 18.96MPa < 36.0MPa (O.K) 상연인장 : 3.08MPa < 3.43MPa (비균열) 하연압축 : 35.13MPa < 36.0MPa (O.K) 하연인장 : 2.49MPa < 3.43MPa (비균열)

4) 활하중 처짐검토

[그림 20] 처짐 검토



δmax=291mm < δa=462.5mm ; 허용처짐값(mm), L/800 ∴ O.K

4.3.2 주거더 횡방향 검토

본 교량의 중앙경간은 1실박스, 측경간은 3실박스로 구성된 변단면박스 교량이며, 종방향 활하중 영향을 고려하기 위해 Frame 해석과 3차원 Plate해석을 비교하여 윤하중 분포폭을 산정하여 적용하였다.

- 측경간 거더 형고 : 4.0m - 중앙경간 거더 형고 : 3.5m
- 교량 폭원 : 25.9m
- 횡방향 강연선 : 0.6"- 5ea, C.T.C 1,000mm
- 콘크리트 스트럿 : 300×400, C.T.C 4,000mm

4.3.3 케이블 설계

의령낙동대교의 케이블은 부분 교체가 가능하고 긴장 및 재긴장이 용이한 MS(Multi-Strand)type을 선정하였으며, 사용 강선은 38~91개로 분포하고, 총 82개의 케이블이 배치되었다.

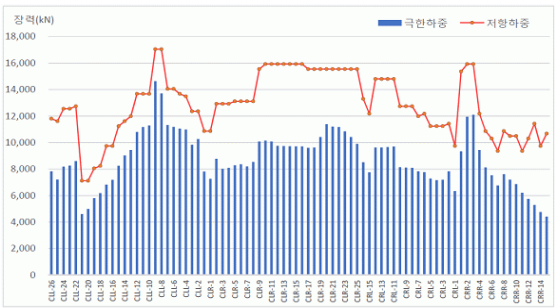
- 케이블 제원 : D=15.7mm, f_{pu} = 1,860MPa

1) 케이블 제진대책

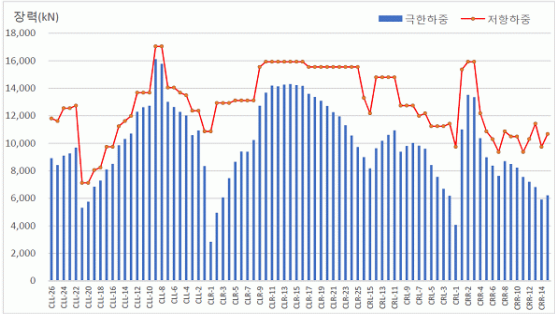
케이블 진동에 대한 위험성은 케이블의 길이가 늘어나면 커지므로 경험치에 따라 80m 이상의 긴 케이블에 대해서는 진동에 주의해야 하며, 일반적인 케이블 감쇠비로 ξ=0.5% (δ=3.14%) 이상을 추천한다.

2) 케이블의 가설 및 공용중에서의 한계상태 검토

[그림 21] 가설시 극한한계상태



[그림 22] 공용중 극한한계상태



4.3.4 타이다운 케이블 설계

시점측 측경간 P7교각과 종점측 교대에 부반력이 발생하게 되는데 이를 제어하기 위해 교좌장치 부근에 Tie down Cable을 설치하였다.

- Tie down 케이블 제원 : D=15.7mm, f_{pu} = 1,860MPa

일상조건에서 부반력이 발생하면 사용성이 현저히 저하되고 교량손상의 원인이 되므로 사용한계상태조합에서 부반력이 발생하지 않도록 초기 긴장력을 결정하였으며, 극한한계상태 Ⅰ, 극한한계상태Ⅶ(교체시), 극단상황한계상태 Ⅰ, 극단상황한계상태Ⅲ(파단시)에 대하여 Tie down 케이블의 안전성을 확보하였다.

4.3.5 주탑 검토

시점측 주탑부 높이는 119.6m , 종점측 주탑부 높이는 96.6m 로 계획하였다. 의령낙동대교의 주탑은 역Y형으로 횡방향 13°, 종방향으로 12° 기울어져 있는 주탑이며, 구조해석시 주탑 병합부까지는 독립주탑 시공을 고려, 케이블이 정착되는 주탑부는 중앙경간 거더 캔틸레버 가설과 병행시공을 고려하여 가설중 및 공용중에 대한 주탑 안정성을 검토하였다.

4.4 의령낙동대교 내진 및 내풍 설계

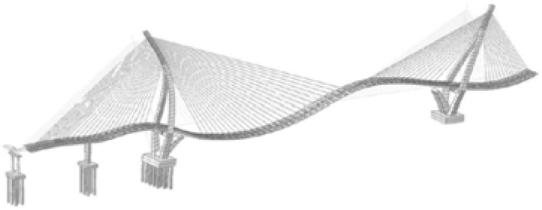
4.4.1 내진 설계

- 내진등급 : 내진 1등급 (경상남도 의령군)
- 지진계수 : 지진구역 Ⅰ (구역계수=0.11)
- 위험도계수(I) : 1.4 (재현주기 1,000년)
- 가속도계수(A) : 0.11×1.4 = 0.154g
- 지반계수(S) : 1.5 (지반종류 Ⅱ, 지진격리교량)
- 해석방법 : 접속교(면진설계-시간이력해석)
  사장교(내진설계-다중모드 응답 스펙트럼 해석)

다중모드 스펙트럼 해석에 의한 내진해석 결과 하부구조 및 연결부의 안전성과 경제성 확보가 어려워 접속교 구간은 지진 격리장치를 적용하였다.

[그림 23] 주요 모드 형상

교축방향 Mode4, T=1.7sec



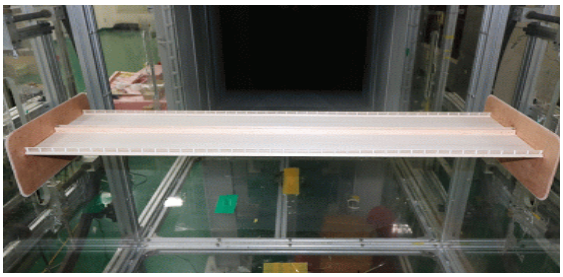
4.4.2 내풍 설계

의령낙동대교의 내풍안정성을 평가하고 구조해석 적용을 위한 풍환경 분석, 부분모형 실험 및 공기력 계수를 측정하였다. 합리적인 내풍설계 방안 도출을 위해서 기상자료의 상관성 분석과 태풍 시뮬레이션을 통한 풍환경을 분석하여 기본풍속(100년빈도, 고도 10m)을 26.1m/s로 추정하였으며, 설계시 도로교설계기준의 30m/s를 적용하였다.

또한 한계풍속의 산정을 위해 신뢰성 해석을 수행하여 파괴확률 2.3×10^{-4} (신뢰성지수=3.5)에 대한 안전계수 1.47을 결정하고, 이를 근거로 완성계의 한계풍속은 51.2m/s로 산정하였다.

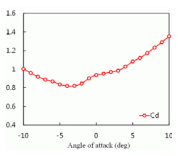
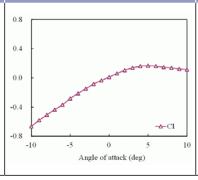
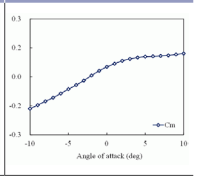
2차원 부분모형실험 결과 설계풍속 내에서 유해 진동이 관측되지 않았으며, 플러터 발현풍속 역시 한계풍속을 상회함에 따라 내풍 안정성을 확보하였다([그림 24] 참조).

[그림 24] 2차원 부분모형 실험



정적 공기력 계수를 산정하기 위해 2차원 부분모형 양단에 로드셀을 설치하여 영각의 변화 시 모형을 회전시켜 항력, 양력, 모멘트를 측정하였다.

<표 2> 공기력 계수 산정

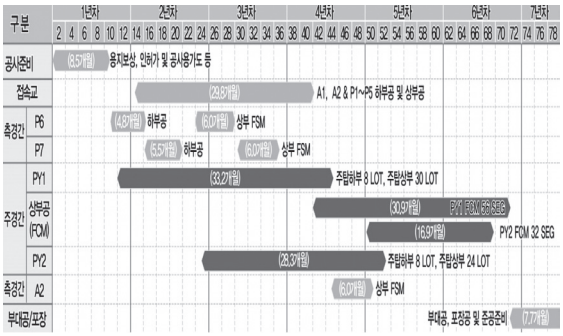
항력계수	양력계수	피칭모멘트계수
		

5. 의령낙동대교 가설 공법

5.1 구조물 시공계획

의령낙동대교의 공사기간은 착공 후 70개월이 예정되어 있으며 저수로 내 시공 배제, 상부 주거더-주탑 동시 시공 등을 통해 공기 단축 6개월을 수립하였다([그림 25] 참조).

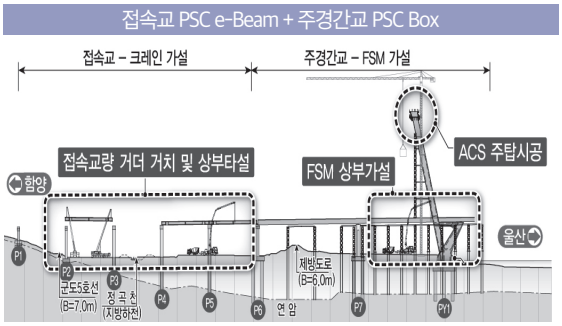
[그림 25] 예정 공정표



주교량 경간장 405m 확대 계획으로 낙동강 저수로 내 교각 설치를 배제하였고, 둔치부 교각 설치로 전구간 육상시공을 통한 시공 효율 향상 및 어업권 피해를 최소화하였다.

측경간은 둔치부에 위치하고 있어 FSM가설공법 적용이 가능하며, 접속교 및 측경간 선가설을 통해 중앙경간 FCM 가설시 장비 및 자재 운반이 가능토록 하였다([그림 26] 참조).

[그림 26] 접속교 및 측경간 선가설



콘크리트 경사주탑은 Auto Climbilg System공법을 적용하여 중앙경간 상부거더와 병행시공 함으로서 가설시 안전성을 확보하였다.

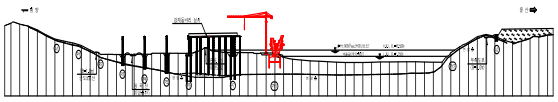
시공중 유지관리사항으로 주탑 단면변화에 대한 적용성 및 연직도 확보를 위해 레이저와 GNSS 시스템을 실시간 연동한 주탑 연직도 보정계획을 수립하였다.

5.2 의령낙동대교 시공순서

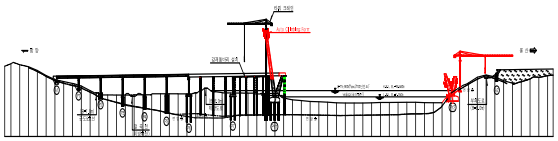
의령 낙동대교의 시공 순서는 [그림 27]과 같다.

[그림 27] 시공순서도

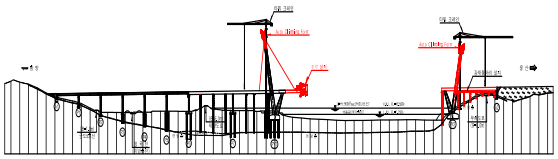
1단계 : [16개월] PY1 주탑하부 시공완료



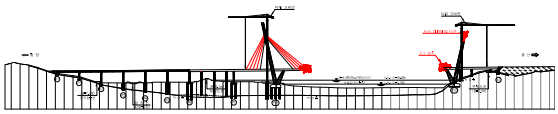
2단계 : [26개월] PY1 주탑/측경간, PY2기초/하부



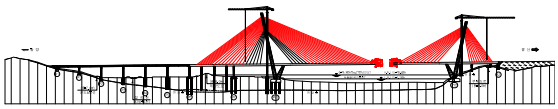
3단계 : [35개월]PY1병합부/정착부,PY2주탑부/측경간



4단계 : [43개월]PY1케이블No5, PY2병합부/정착부



5단계 : [60개월]PY1 seg15~56, PY2 seg1~32



6단계[: 63개월]Key Seg완료 F/T해체 및 장력조정

6. 맺음말

의령낙동대교는 저수로 폭 379m의 낙동강을 횡단해야 하는 조건과 11공구 종점에 근접하여 최적 측경간장 확보가 어려운 환경임에도 불구하고 측경간장 비를 맞추기 위해 V각형 기초와 경사주탑으로 구조 계획을 변경하여 환경제약을 극복할 수 있었던 국내최초 경사 고저주탑 콘크리트 사장교이다.

의령낙동대교는 거더 높이 최소화를 위해 전구간 슬랜더한 등단면을 적용하여 미관 및 개방감을 최대화 시켰으며, 측경간 선가설 후 주탑과 중앙경간 FCM 동시시공으로 공기를 단축시켰다.

또한 본 교량은 경사 및 고저 주탑 적용으로 국토경관 자연인 아름다운 낙동강 풍경 명소를 제공할 것으로 기대되며, 성공적인 교량건설로 교량분야 토목기술의 진일보를 이룩할 것으로 판단된다. 본 기고를 통하여 당사의 사장교의 설계 및 시공 기술을 공유하고, 더불어 당사 사장교 현장 시공기술자들을 포함한 모든 기술자들에게 사장교 관련 지식 및 정보가 전달되기를 기대한다.

※ 참고문헌

1. 고속국도 제14호선 함양~창녕간 건설공사, 기술제안서, 한국도로공사, 쌍용건설(주), 2018.3
2. 고속국도 제14호선 함양~창녕간 건설공사, 부속서류, 한국도로공사, 쌍용건설(주), 2018.3
3. 고속국도 제14호선 함양~창녕간 건설공사, 구조 및 수리계산서VII, VIII, IX 한국도로공사, 2018.10