



세종-포천고속도로 랜드마크 고덕토평대교

1. 세종~포천고속도로를 대표하는 랜드마크 “고덕토평대교”

고덕토평대교는 서울과 세종시를 연결하는 서울~세종 고속도로의 랜드마크 교량이다. 주경간교와 접속교로 나뉜다. 올림픽대로를 건너는 시점부 접속교는 국내 최대 규모 트러스 합성교(50m+80m+75m, 총 205m)를 적용했다. 한강을 건너는 주경간교는 세계에서 가장 긴 주경간장(230m+540m+230m, 총 1,000m)을 가진 콘크리트 사장교다. 강변북로를 건너는 종점부 접속교는 콘크리트 박스거더와 강합성 박스거더를 연결한 국내 최대 규모 복합교(115m+150m+160m+95m, 총 520m)로 설계됐다.

[그림 1] 고덕토평대교 위치도



2. 고덕토평대교 주경간교 교량계획

2.1 세계 최장의 콘크리트 사장교

[그림 2] 교량 계획의 주요점

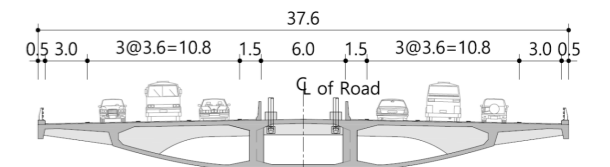


2.2 보강거더 단면계획

고덕토평대교의 폭원은 시종점 구간에 램프 연결을 위한 확폭 구간이 있어서 일반 구간은 왕복 6차로 기준으로 37.6m지만, 넓은 구간은 최대 46.6m까지 변화한다. 보강거더의 단면 형상은 왕복 6차로의 넓은 폭을 고려해 유선형 박스형상으로 계획했다. 박스형 단면은 비틀림 강성이 커서 폭이 넓은 콘크리트 사장교에서 1면 케이블과 1주 형식의 주탑과 함께 많이 사용된다. 세풍대교, 화명대교, 미국의 선사인 스카이웨이 브리지(Sunshine Skyway Bridge) 등이 그 사례다. 1면 케이블을 적용하기 위해 콘크리트 박스 중앙부에 케이블 정착 공간이 필요하며, 고덕토평대교는 이를 위해 3실 박스 단면을 선정했다. 케이블은 중앙부 복부에 근접 배치하여 케이블력에 효율적으로 저항할 수 있도록 설계되었다. 단면 형상은 곡선형으로, 외측 캔틸레버에 4m 간격으로 가로보를 두어 구조적 효율성을 높이는 동시에 미관적으로도 우수한 외관을 갖추도록 했다. 박스 내부에는 폐합형 다이아프램 대신 개방형 가로보를 배치해 비틀림 강성을

높이고 상하부 슬래브의 안전성을 강화했다. 재료적인 측면에서, 기존 교량보다 훨씬 높은 압축강도 80MPa의 고성능 콘크리트를 사용해 단면 두께를 최소화했다. 이를 통해 콘크리트 사장교의 무거운 중량 문제를 해결했다. 또한 보강거더 내부에 인장강도 2,400MPa의 강연선을 적용해 단면의 효율성을 크게 향상시켰다.

[그림 3] 보강형 단면 형상 및 현장 전경



2.3 주탑 설계 및 시공

1주 형식의 주탑은 비틀림 강성이 큰 박스형 보강거더의 단면 중앙부에 위치해 기초 규모를 최소화할 수 있다. 콘크리트 사장교는 일반적으로 케이블 간격이 좁고 2면 케이블일 경우 케이블 개수가 많아져 간섭이 발생하고 외형이 복잡해질 수 있다. 하지만 1주 형식 주탑은 간결한 형상으로 설계되어 미관을 단순화하는 데 유리하다.

1주 주탑은 교축 직각 방향으로 비지지된 세장한 부재가 되기 때문에 세심한 구조 검토가 필요하다. 주탑에 적용된 콘크리트 압축 강도는 단면 크기가 큰 하부는 50MPa, 단면 크기가 작은 상부는 60MPa으로 나뉜다. 주탑 단면은 미관적으로 우수한 형상을 채택하되, 케이블 정착구 배치를 고려해 구조 효율성을 확보해야 한다.

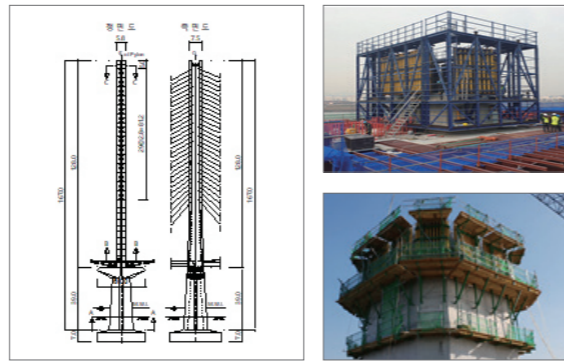
일반적으로 4각형 중공 단면이 구조 효율이 높지만, 미관적으로는 둔탁한 인상을 준다. 이번 설계에서는 케이블 정착구 배치의 효율성과 외형 미관을 모두 고려해 6각형 단면 형상을 채택했다. 6각형 단면은 케이블 장력에 대응하기 위해 곡선형 강연선을 적용하는 데 유리하다. 기존의 직선 강봉 배치는 정착구 위치에서 주철근과의 간섭 문제가 발생하기 쉬웠다.

주탑 케이블 정착부는 케이블에 의한 인장력을 견디기 위해 국부적으로 철근을 보강하고, 힘인장과 직접 인장에 저항하기 위해 곡선형 강연선을 배치했다. 6각형 단면을 통해 곡선 배치가 가능해졌으며, 철근 배치의 복잡성을 해결하기 위해 BIM(Building Information Modeling)을 활용해 간섭 여부를 확인했다.

2.4 케이블 계획 및 설계

고덕토평대교의 케이블 형식은 개별 긴장 방식으로 설계되었으며, 긴장 장비를 최소화하고 개별 스트랜드 교체가 가능해 유지관리에 유리한 MS(Multi Strand) 형식을 적용

[그림 4] 주탑형상 및 시공



했다. MS 형식은 초장대교량사업단의 연구 성과를 바탕으로 개발된 인장강도 2,200MPa급 강연선을 적용할 수 있다. 초고강도 사장케이블은 기존에 사용되던 인장강도 1,860MPa 케이블에 비해 중량을 약 14% 줄일 수 있다. 이는 보강거더의 중량이 무거운 콘크리트 사장교에서 케이블 단면을 줄일 수 있어 적용성이 우수하다. 최종적으로는 성능시험을 통해 양산 단계에서 효율성을 높인 인장강도 2,160MPa의 초고강도 사장케이블이 적용되었다.

케이블 간격은 세그먼트 길이에 따른 F/T(Form Traveller)의 중량, 케이블 단면 크기, 케이블 배치에 따른 미관 등을 고려해 결정되었다. 고덕토평대교에서는 F/T 중량에 따른 시공 중 안전성, 시각적인 개방감, 케이블 시공기간, 내풍 안전성, 경제성 등을 종합적으로 검토하여 길이 4m의 세그먼트 2개를 연결한 8m 간격에 1개의 케이블을 배치했다.

2.5 주탑 기초 설계 및 시공

본 교량이 위치한 하상 조건은 왕래하는 대규모의 선박이 없으며, 홍수 시에 주탑의 일정 위치(평수위 EL. 7.01m, 홍수위 EL. 19.77m)까지 수중에 있게 되므로 시공성이나 미관 측면에서 기초의 상면이 평수위 위로 돌출될 필요가 없었다. 따라서 한강 상에 놓이는 주탑(PY1, PY2) 및 종점부

접속교각(P4)의 기초는 지지되는 암반의 깊이가 깊지 않으므로 기반암의 굴착을 최소화할 수 있는 직접 기초 형식을 적용하였다.

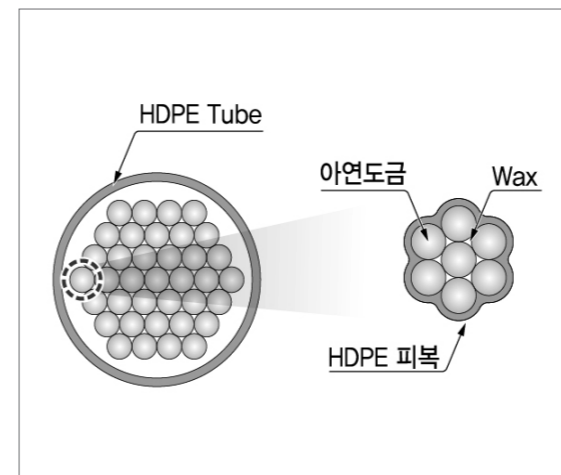
기초 설치를 위한 지반현황은 하상에서 17m의 심도에서부터 기반암이 노출되므로 수중에 위치하는 주탑(PY1, PY2) 및 종점부 접속교각(P4)의 직접 기초는 복합가물막이를 적용하였다. 토사구간은 외측에 2열 시트파일을 향타하고 내부를 토사로 속채움하는 이중 시트파일의 가물막이 공법을 적용하여 외부로부터의 유입수를 막고, 시트파일 내부에서 암반구간을 해머 비트(T4)로 굴착하여 H-말뚝을 근입시키고 토류판을 시공하여 가물막이 내에서 풍화암 및 연암을 굴착하는 두 가지 형식의 가물막이를 복합적으로 적용한 복합가물막이를 설치하였다.

3. 주경간교 가설

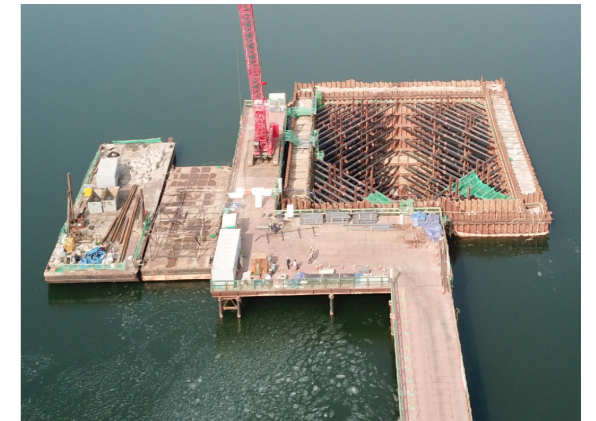
3.1 보강거더 가설

압축강도 80MPa의 콘크리트 타설은 압력관을 이용한 배관타설을 적용하였다. 특히 배관 내 압력에 의한 급격한 강

[그림 5] MS 형식의 케이블 단면



[그림 6] 복합가물막이와 시공 전경



도 저하나 슬럼프 저하 발생 시 보강거더의 품질을 확보할 수 없기 때문에 현장에서는 본 구조물 시공 전에 배관 압송성 검증을 위해 길이 100m와 270m 길이의 배관타설 시험을 수행하여 그 결과를 시공계획에 반영하였다.

보강거더는 균형 캔틸레버 공법(Free Cantilever Method, FCM)으로 시공되었으며 이동식 거푸집인 F/T는 보강거더의 확폭을 반영하여 양쪽 끝 캔틸레버에서 변단면 시공이 가능하도록 하고 F/T의 중량은 보강거더의 약60%인 2,020~2,481kN 규모의 최적단면을 적용했으며, 기상조건에 따른 제약을 최소화하고 양생작업을 원활하게 진행하기 위해 F/T 외부에 개폐식 천막을 설치하여 보강거더 공정의 연속성을 확보하였다.

3.2 주탑-보강형 병행시공

공기단축을 위해 주탑과 보강형 병행시공을 계획하였으며 BIM Simulation을 통해 장비나 공정 간섭의 확인하며 공정을 진행하여 결과적으로 3.5개월의 공기 단축효과를 가져왔다.

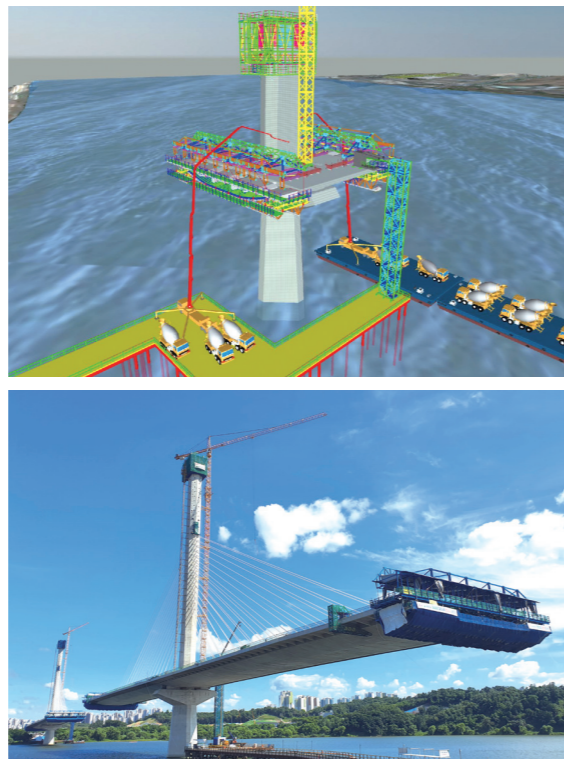
현장타설 콘크리트로 시공되는 보강거더는 한 번 타설되면 보강거더 선형의 수정이 어렵기 때문에 정밀한 해석과 면

[그림 7] 보강거더 F/T 운용



밀한 시공계획에 따른 선형관리 계획의 수립이 필요하다. 보강거더의 선형은 건조수축과 크리프 등의 재료 자체의 비선형성이 지배적이기 때문에 사전 실내시험을 통해 재료의 물성값 파악이 중요하다. 현장에서는 실내시험 결과와 설계기준에서 제시된 시험식과 비교하여 상대적으로 보수적인 설계기준(CEB-FIB Model)의 제안식을 적용하였다. 보강거더의 선형축량은 전체 좌표계를 기준으로 시공할 경우, 각종 작업 활하중과 상하연 온도차 그리고 대기 온도에 따라 시시각각 변하는 선형을 고려하기 어려우므로 기 시공된 보강거더의 선형과 새로 타설되는 세그먼트의 사이 각을 기준으로 선형을 관리하였다.

[그림 8] BIM Simulation 및 주탑-보강형 병행 시공 전경



3.3 케이블 가설

고덕토평대교에서는 초장대교량사업단의 연구성과인 인장 강도 2,160MPa의 사장케이블을 적용하였다. 초고강도 케이블과 VSL International 케이블 시스템의 성능을 검증하기 위해 61 Type은 독일의 MPA Braunschweig에서, 55 Type은 미국에 CTL Group에서 각각 병행으로 피로시험을 수행하였으며, 55 Type의 수밀시험은 포스코 글로벌 R&D 센터에서 수행하여 소요 성능에 이상이 없음을 검증하였다. 고덕토평대교는 보다 정확하게 장력을 도입하기 위해 두 단계로 나누어 진행하였다. 첫 단계에서는 설계장력의 70%를 1차 장력으로 도입하고, 다음 날 이른 새벽에 Lift-off Test를 통해 확인된 도입장력을 토대로 무응력장 기준

의 늘임량(Elongation)을 계산하여 나머지 설계장력의 30%를 도입하였다. 또한, CIP Recommendation 및 도로교설계 기준(한계상태설계법)에 따라 풍우진동의 위험이 낮은 길이가 80m 이하의 케이블을 제외한 200개소의 전체 케이블에 VSL International 社の 마찰 댐퍼를 설치하여 대수 감쇠비 3% 이상 확보하였으며, 현장 진동시험을 통해 댐퍼의 성능과 케이블의 제진 효과를 검증하였다. 이밖에 각 주탑 별로 2개씩의 이동식 작업발판을 사용함으로써 작업발판의 설치/해체에 따른 고소작업의 위험을 감소시키며 경제성도 함께 도모할 수 있었다.

[그림 9] 마찰 댐퍼 및 이동식 케이블 설치용 작업발판



[그림 10] 가설 개요



트러스 현장운반

현장조립 및 거치

바닥판타설 및 교량완성

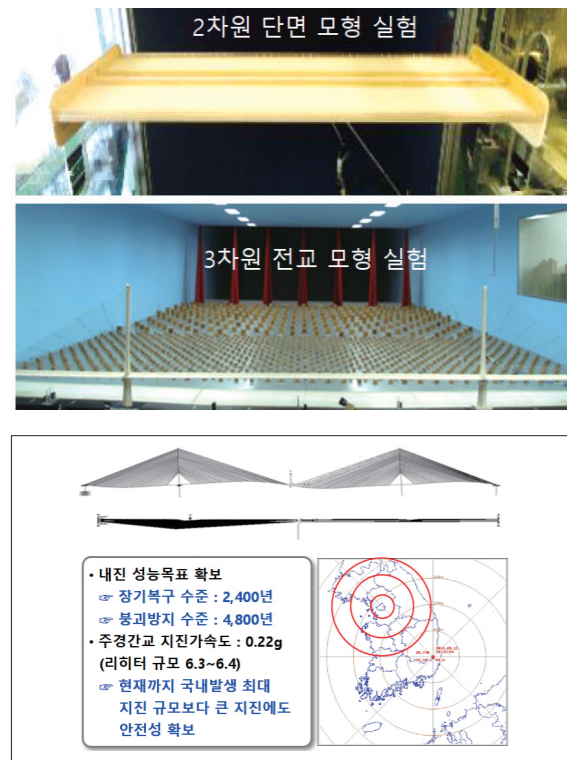
4. 접속교 계획 및 시공

시점부 트러스 합성교 정모멘트 구간에는 강박스구조, 부 모멘트 구간에는 트러스구조를 적용하여 최대 150m까지의 장경간 적용이 가능한 공법으로서 국내 최대 규모로 시점부 접속교에 적용하였다. 종점부 강-콘크리트 복합 거더교는 복합(Hybrid) 거더교의 특징은 강성이 큰 지점부 콘크리트거더와 연성이 우수한 중앙경간부 경량의 강거더를 강결-복합한 구조로서 100m 이상의 장경간교에 대해 구조적 효율성을 극대화시킬 수 있는 형식이다. 종점부 접속교는 강변복로를 횡단하는 구간에 최대 160m 경간의 국내 최대 규모의 복합교가 적용되어 강교 제작과 동시에 PSC 박스거더교를 병행 시공하여 공기를 단축시킬 수 있었다.

5. 200년 설계수명의 고성능 기능 확보

고덕토평대교는 설계수명 200년의 고성능 기능 확보를 위해 재현빈도 200년 풍하중에 대해 내풍안정성을 확보함을 풍동시험을 통해 확인하였다. 재현주기 2,400년 빈도의 지진에 대해 장기복구 수준을, 4,800년 빈도의 지진에 대해 붕괴방지 수준의 내진특등급 성능을 갖도록 하였다.

[그림 11] 고덕토평대교 내풍/내진설계 내용

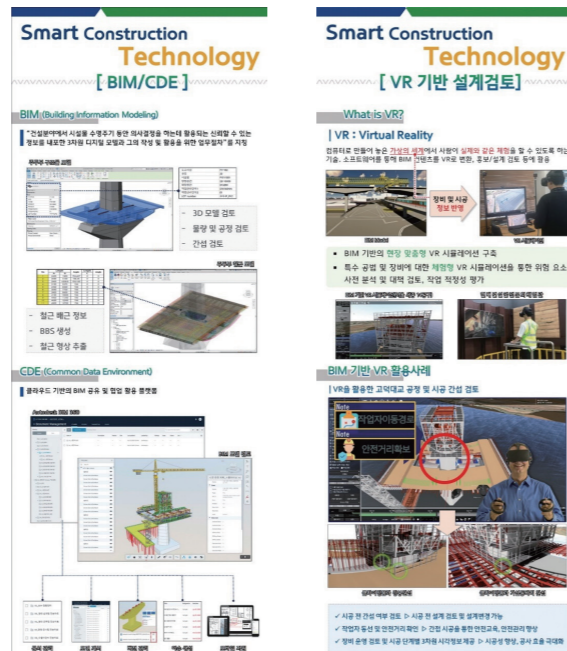


6. 스마트 및 친환경 설계 및 시공

고덕토평대교 시공 시 초장대교량사업단 및 BIM학회와 더불어 국내 케이블교량의 테스트 베드로서 시공 BIM을 통해 부재 간의 간섭, 공정계획 수립 그리고 각종 시공계획에 반영하여 입찰안내서에서 요구하는 작성 기준(Level of detail, LOD) 300 이상으로 적용하였다. 아울러, BIM 기반 가상

현실(Virtual Reality, VR) 및 증강현실(Augmented Reality, AR), 측정온도에 의한 강도예측 시스템, 고정밀 GPS를 이용한 주탑 시공측량, 드론 기반 디지털 현장 기록/관리, M-HPMS(Mobile- Hyundai Project Management System) 기반 현장업무 간소화, HloS(Hyundai IoT safety system) 안전관리시스템 그리고 360도 카메라 등의 스마트 건설기술의 적용을 통해 고품질의 시공관리를 도모하였다. 고덕토평대교가 위치한 곳은 생태보존지역 및 상수도보호구역으로서 친환경공법이 우선 적용되어야 하는 지리적 특성이 있다. 이를 고려하여 주기적으로 도장이 필요하지 않아 환경 훼손의 Risk를 줄일 수 있는 콘크리트 사장교를 적용하였다. 아울러, 종점부 접속교의 경우 한강 제방에 FSM 공법 시공을 위한 지반 보강시 자연분해 되는 친환경자재를 적용하여 지반을 보강하는 Point Foundation 공법을 적용하여 상수도보호구역의 수질을 보존할 수 있도록 하였다.

[그림 12] 스마트건설 기술 및 Point Foundation 공법 적용

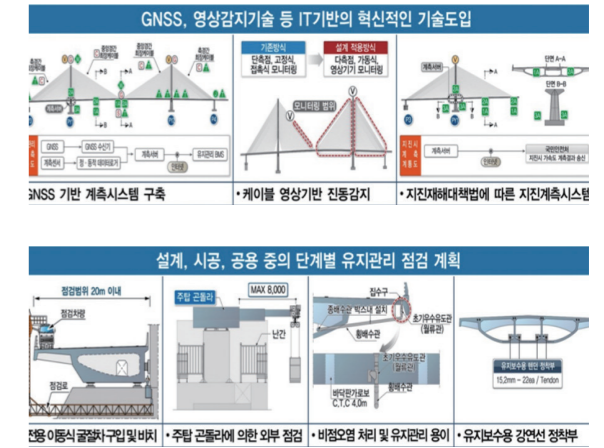


7. 유지관리시스템

예방적 유지관리를 고려하여 교량의 주요위치에 처짐계, 진계, 풍향풍속계, 변형률계 등 계측 시설을 설치하고 관리 정보구축을 통하여 외부환경요인을 계측하고 정적/동적 거동에 대한 특성을 측정 가능하도록 하였다. 특히 초장대교량사업단의 연구성과인 GNSS, 영상-감지기술 등 IT기반의 혁신적인 기술을 도입했다. 또한, 드론 및 케이블 점검 로봇 등, 다양한 유지관리 방안을 수립하여 세계 최대 주경간장 사장교의 특수성을 고려한 계측 및 유지관리 계획을 수립했다.



[그림 13] 유지관리 계획 수립



8. 대한민국 한강교량을 대표하는 고덕토평대교

대한민국 한강교량을 대표하는 고덕토평대교는 역사적 기념 교량으로 우뚝 세우기 위해 첫 번째 주탑은 '창조', 두 번째 주탑은 '소통'의 의미를 담아 수도 서울의 발전을 기념하도록 계획했다. 세계 최장의 콘크리트 사장교는 세종의 생애 54년의 업적을 영원히 기념하기 위한 주경간장 540m와 서울~세종간 연결로 새천년을 이어갈 1,000m 교량으로 기념비적인 랜드마크 교량이 될 것이다.