이순신대교 앵커리지 설계-시공사례

The Design and Construction of the Anchorage of Yi Sun-Sin Grand Bridge

안익균[1], Ik-Kyun An, 김경택[2], Kyung-Taek Kim, 서영화[3], Young-Hwa Seo

[1] 대림산업(주) 여수국가산단진입도로(3공구)현장 과장, Manager, Daelim Industrial Co. Ltd
[2] 대림산업(주) 여수국가산단진입도로(3공구)현장 차장, Senior Manager, Daelim Industrial Co. Ltd
[3] 대림산업(주) 여수국가산단진입도로(3공구)현장 부장, General Manager, Daelim Industrial Co. Ltd

SYNOPSIS : The Yi Sun-Sin grand bridge is the suspension bridge which connects Myodo and Gwangyang. It is over the main navigation channel of Gwangyang Harbor. South anchorage(AN1, Myodo side) of the bridge is designed as rock anchored type. It sustains using the resistance of the underground rock's mass in Myodo. As this type of anchorage can minimize the exposure of the structure, It is economically efficient and environmentally friendly. North anchorage (AN2, Gwangyang side) is designed as the gravity type. This anchorage is 68 meters in diameter and use its own weight to support. Instead of normal rectangular diaphragm wall, the circular shape diaphragm wall is adopted to the north anchorage. It doesn't need to use internal temporary facilities, so it can significantly improve the constructability of the structure.

Keywords : Suspension Bridge, Anchorage, Rock Anchored Type Anchorage, Gravity Type Anchorage, Diaphragm Wall

1. 서 론

전라남도 여수국가산단 진입도로 개설공사의 제3공구 구간에 2007년부터 2012년까지 시공 완료될 예정인 이순신대교는 전라남도 여수시 묘도동과 광양시 금호동을 잇는 총연장 2,260m, 주경간장 1,545m의 타정식 3경간 플로팅 현수교로서 완공시점을 기준으로 주경간장이 세계 제4위에 랭크되는 초장대 현수교이며, 여수국가산단과 광양국가산단간 원활한 물동량 수송, 물류비용 절감, 광양만권에 대한 설비투자 여건 개선 및 2012년 여수세계박람회, 한려해상 등 서남해안 관광개발 여건 개선을 위해 계획되었다. 2010년 3월 현재 하부공의 시공은 완료되었으며, 주탑 본체 및 앵커리지 상부공이 시공 중에 있으며, 2010년 9월부터 케이블 가설을 위한 사전 작업이 진행될 예정이다.

그림 1. 위치도

그림 2. 이순신대교 조감도

2. 교량계획

본 교량은 선박통항안전성, 내풍안전성(변장비 검토), 공사비 민감도 분석 및 교량 규모의 상징성을 고려하여 주경간장 1,545m로 설계함으로써, 2030년에 예상되는 최대 18,000 TEU급 선박의 교행이 가능하도록 계획하였다. 본 교량의 계획에 있어서 주안점을 3가지로 요약하면 다음과 같다. 첫째, 규모의 차별화를 통한 국가대표 교량의 실현, 둘째, 기술혁신을 통한 초장경간 현수교의 구현, 셋째, 최적시스템 구축으로 구조안전성 및 유지관리 효율성 제고이다. 본 교량은 주탑부에서 보강거더의 연직지지 장치가 없는 3경간 플로팅 시스템으로서 국내 최초로 트윈 강박스 보강거더를 채용하였다. 주탑은 교량의 이미지를 좌우하는 구조인 만큼 다양한 경관 검토를 거친 결과 조화형 주탑으로 계획하였다.

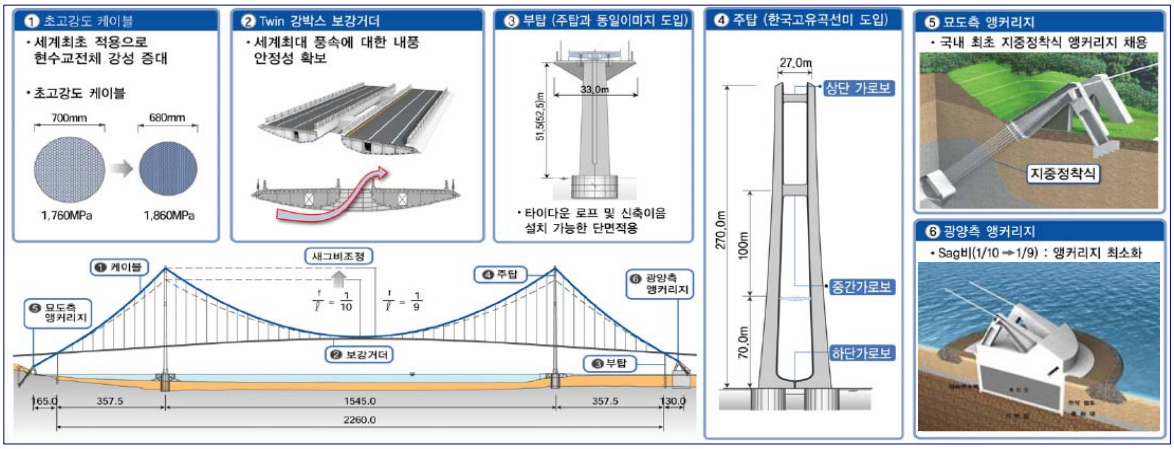


그림 3. 이순신대교 구조계획 개요

교량 형식의 선정에 있어서는 적용 실적이 풍부하고 구조적으로 안정한 3경간 및 단 경간 현수교를 상세비교 검토한 후, 3경간 현수교를 최종안으로 선정하였다. 3경간 현수교는 전통적인 형식으로서 구조성이 우수하고, 측경간 교각이 없어 통항선박에서의 시인성이 우수하다. 또한 플로팅 시스템의 도입으로 주행성 향상 및 지진 안정성을 향상시켰다.

현수교의 주케이블은 가장 중요한 구조부재로서 보강거더에 작용하는 하중을 주탑과 앵커리지에 전달한다. 본 교량에서는 사각형 스트랜드 배치와 저장력 AS 공법을 적용하여 시공기간 단축, 새들 및 정착규모 축소 등으로 시공성 및 경제성을 개선하였다. 또한, 본 교량에서는 주경간장이 초장대화됨에 따라서 세계최초로 초고강도 케이블(1,860 MPa)을 적용하여 구조효율성과 경제성을 향상시키도록 하였다. 국내자재 및 시공기술의 적용이 가능한 1,860 MPa의 초고강도 케이블을 선정하여 케이블 중량을 6% 감소시키는 효율적인 케이블 시스템의 구축이 가능하였다.

보강거더는 차량하중을 1차적으로 지지하는 부재로서, 행어에 의해 지지되는 주부재이다. 이러한 보강거더 부재를 설계하기 위해서 3차원 대변위 해석(RM2004)을 통해서 산출되는 단면력으로부터 보강거더의 휨-전단응력, 합성응력, 보강재 검토, 횡방향 설계를 수행하였다. 또한, 보강거더는 현수교 전체계의 내풍안정성을 지배하는 주부재로서 설계풍속에 대한 내풍안정성 확보를 위해서 트윈박스 보강거더를 채용하여 플러터 발현풍속을 극대화하되, 단부에서는 인접공구와의 원활한 차선의 접속을 위하여 싱글박스로 계획하였다.

주탑은 라멘형 철근 콘트리트 주탑으로 현수교 주탑으로서는 세계에서 가장 높은 270m 높이의 콘크리트 주탑이다. 트윈 강박스 거더와 형상면에서 통일성을 추구하여 곡선 탑주로 계획하였다. 주탑부에서는 거더 하면의 가로보를 생략하여 플로팅(floating) 시스템 현수교임을 부각하였다. 상단가로보는 공사 중 탑정 크레인 지지대로 활용하도록 하였고, 중간가로보는 통과 주행차량의 개방감 확보를 위해 노면 상측 110m 에 설치하였다.

3. 주탑 및 주탑기초

3.1 인공섬 조성(충돌방지공)

주탑 충돌방지공의 형식은 항만구조물에 많이 적용되는 콘크리트 블록식 안벽을 이용한 형태로 계획되었으며, 이를 통하여 콘크리트 안벽 및 내부의 채움 모래가 선박 충돌시의 충돌하중을 흡수하여 교량에 전달되는 충돌 에너지를 저감시킬 수 있도록 계획되었다. 아울러 강성구조의 충돌방지공에 비하여 선박의 파손도 최소화할 수 있도록 하였다. 또한 인공섬 조성을 통해 주탑기초인 현장타설말뚝(직경 3.0m)의 육상 시공이 가능하도록 하여 시공성을 확보하였으며, 장래 유지보수용 선박 접안이 가능하도록 계획하였다.

충돌방지공의 설계에 적용된 기준은 전 세계적으로 많이 사용하고 있는 AASHTO Guide Spec.에서 규정한 Method Ⅱ와 국내 케이블강교량 설계지침 내에 있는 선박충돌에 대한 규정을 기본으로 하였으며, 최근 연구를 반영한 위험도 분석(risk analysis)을 통하여 수행하였다. 본 교량에 대한 위험도분석 결과, 충돌방지공 설치 후 교량의 연간파괴빈도가 묘도측 주탑(PY1) 0.0019, 광양측 주탑(PY2) 0.0032로 AASHTO 기준에서 제시하고 있는 허용치인 0.0001 을 크게 상회하여 충돌방지공 설치가 필요한 것으로 나타났다.

충돌방지공 설치 이후의 연간파괴빈도 분석결과 묘도측 주탑 5.04×10^{-7}, 광양측 주탑 1.51×10^{-6} 으로 허용치인 0.0001을 충분히 만족시키는 것으로 나타났으며, 충돌방지공 설치로 인한 연간교량파괴빈도 감소효과는 PY1의 경우 1/2,361, PY2의 경우 1/2,265로 분석되었다.

광양항 내의 장래 선박 및 운항조건, 수심 등을 고려하여 충돌대상 선박 및 충돌속도를 가정하여 수치해석을 실시하였다. 해석결과를 통해 최대선박의 충돌시에도 교량기초의 안정성을 확인하였으며, 선수부분의 관입량도 이격거리 이내로서 충돌에 대한 안정성을 확인하였다.

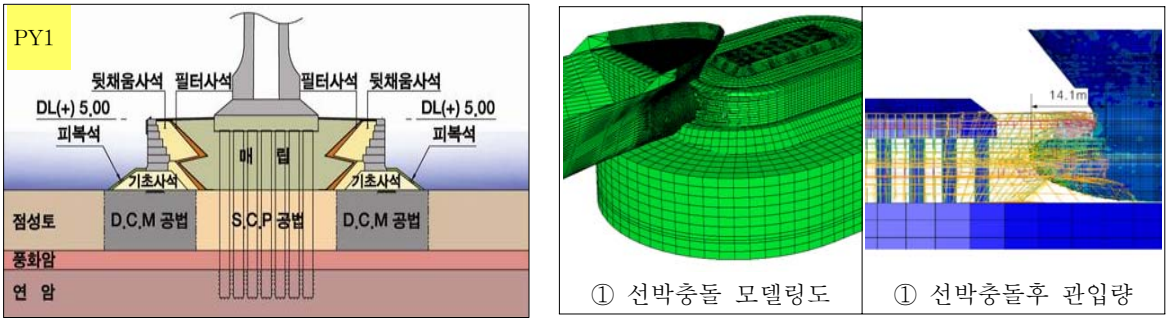


그림 4. 충돌방지공 하부보강 계획 단면도 및 해석결과

충돌방지공이 계획된 주탑 구간의 하부지층은 평균수심 15m, 연약층 심도 18~21m의 구간으로 안벽식 구조물 및 내부 매립에 의한 안정성확보를 위해 연약지반 처리가 필요하였다. 안벽하부는 사석기초의 침하방지, 지지력 확보 및 선박충돌시 안벽보호 등을 고려하여 심층혼합처리 공법 중 DCM(Deep Cement Mixing)공법을 적용하였다.

DCM 공법은 연약층 내에 시멘트계 고결제를 원지반과 교반 혼합하여 주상 또는 벽식의 개량체를 형성하는 공법으로 개량지반의 강도증대 효과가 커서 블록하부지반의 안정성 확보에 우수한 공법이다. 실내배합강도는 2.0 MPa로 계획되었으며, 시험시공을 통해 현장에서의 강도를 확인하였다.

내부 매립부는 압밀침하 촉진, 하부지반강도 증진 및 현장타설말뚝의 수평저항력 증진을 위해 모래다짐말뚝(SCP) 공법을 적용하였다. 모래다짐말뚝 공법은 모래 또는 점토로 구성된 연약지반에 모래를 압입하여 큰 직경의 다져진 모래말뚝을 조성하는 공법으로 점토지반에서는 지지력증가, 압밀기간단축, 침하량 저감을 목적으로 한다. 해상 전용선 제원을 고려하여 2.0 m 직경의 모래다짐말뚝으로 40 % 치환하였다.

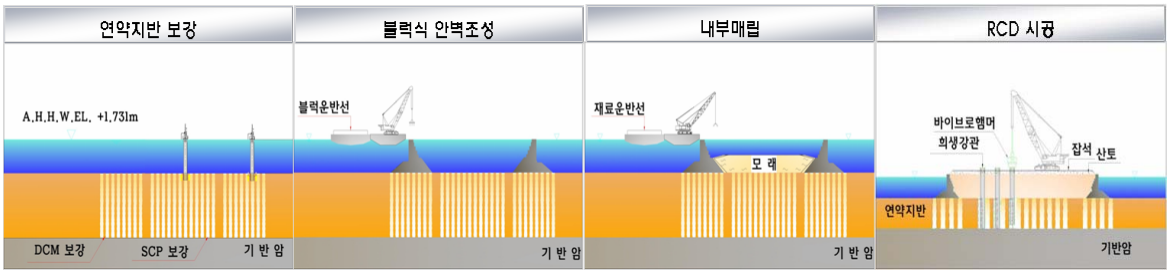


그림 5. 충돌방지공 하부보강 및 매립 시공순서도

안벽의 조성에는 총 1,562개의 콘크리트 블록이 사용되었으며, 별도의 제작장에서 제작된 콘크리트 블록을 육상 및 해상운반 후 기 조성된 사석마운드 상부에 거치시켰다. 위험도 분석 결과 선박충돌이 예상되는 방향으로는 평면상에서 곡선 형상으로 계획하여 선박충돌 에너지를 흡수할 수 있도록 계획하였으며, 블록 거치 후에는 뒷채움 사석 및 필터층을 설치하고, 속채움 재료로는 평균 해수면 아래는 모래를 그 상부는 산토를 이용하여 매립하였다.

그림 6. 콘크리트 블록 거치

그림 7. 블록 상단 거치 후

3.2 현장타설말뚝

기초 형식의 선정은 수심 및 지질조건과 시공성, 안정성 등을 종합적으로 고려하되, 해상기초의 최근 시공사례 등을 분석하여 직경 3.0m의 RCD를 이용한 현장타설말뚝으로 계획하였다. 해상에 조성된 인공섬 위에서 육상 시공으로 진행되었으며, 하부의 연약층을 고려한 공벽유지를 위하여 희생강관을 사용하였다. 말뚝과 대비되는 우물통 공법의 경우 연약층 관입시의 편기, 기반암 발파시의 민원 등의 이유로 배제되었다. 각 주탑당 38본의 말뚝이 계획되었으며 연직지지력, 수평지지력, 변위 등에 대한 안정성 검토 후, 시험말뚝에 대한 양방향 재하시험을 통해 설계지지력 이상의 지지력을 확인하였으며, 수평재하시험을 통해 지진시에도 허용치 이내의 변위 및 응력 발생을 확인하였다. 또한 건전도시험을 통해 현장타설콘크리트의 품질상태를 확인하여 품질관리에 만전을 기하였다.

표 1. 주탑기초 배치 및 안정성 검토 결과

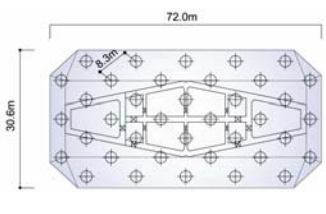
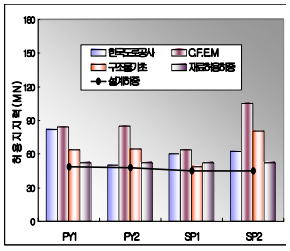
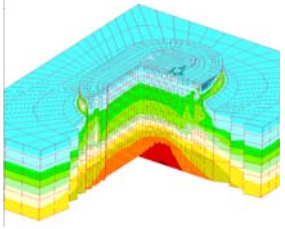
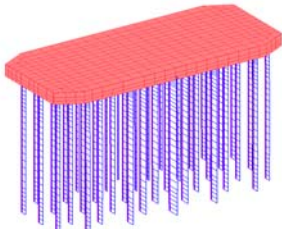
내외 시공사례 분석	연직지지력 검토결과	연직응력도	축 력 : 48.26 MN
			

그림 8. 주탑기초 RCD 철근망 근입

그림 9. 주탑기초말뚝 두부정리 후

3.3 주탑 시공

콘크리트 주탑으로는 세계 최고 높이인 270m 높이의 이순신대교 주탑은 설계 단계에서는 오토 클라이밍 폼(Auto Climbing Form)공법으로 계획되었다. 그러나, 2012년 여수엑스포 개최 시기에 맞추어 이순신대교의 임시개통을 위한 공기 단축을 목적으로 24시간 연속으로 콘크리트를 타설하는 슬립 폼(slip form)공법으로 변경하여 시공하고 있다.

슬립폼 공법은 요크(yoke), 로드(rod), 유압잭(jack)을 이용하여 거푸집을 연속적으로 이동시키면서 콘크리트를 타설하는 공법이다. 시공이음이 없고 연속 시공이 가능하며 공사기간 단축 및 공사비 절감이 가능한 장점이 있는 반면에 공사가 시작되면 완료될 때까지 연속으로 작업해야 하므로 필요한 인원이나 자재 반입 등의 계획이 중요하며, 시공 중에는 변경이 곤란하므로 준비 작업을 철저히 해야 하며, 슬립업(slip-up) 속도조정을 위한 콘크리트 세팅타임 관리에 어려움이 있는 등의 단점이 있다.

변단면을 가진 대형 주탑을 슬립폼으로 시공하기 위하여 몇 가지 시공법 개선이 필요하였다. 우선 콘크리트의 타설을 압송관 시스템을 이용한 타설로 계획하였다. 이는 강풍으로 인해 크레인 작업이 어려운 경우에도 연속적으로 콘크리트 공급이 가능하도록 하기 위함이다. 또한, 자재 인양을 위한 타워크레인 설치를 대신하여 슬립폼 위에 데릭 크레인(deric crane)을 설치하여 폼과 함께 인양되도록 하여 시공성과 경제성을 확보하였다. 주탑의 형상 조정은 슬립 폼에 설치된 스핀들(spindle)을 조정하며 관리된다. 시공 중 주탑의 형상을 확인하기 위해 각 주탑당 7개소의 수직 레이저 및 타겟을 설치하였으며, 광파기를 이용한 측량 및 GPS측량을 병행하여 종합적으로 형상관리가 이루어지도록 하였다.

슬립폼의 특성상 중간에 작업을 멈추는 경우 많은 시간적 경제적 손실이 예상되므로 2개소의 가로보를 후 시공하는 것으로 계획하였으며, 시공 중에는 가설 트러스를 이용하여 보강하였다.

그림 10. 주탑 형상관리 레이저 및 타겟

그림 11. 주탑 시공 중 전경

4. 지중정착식 앵커리지

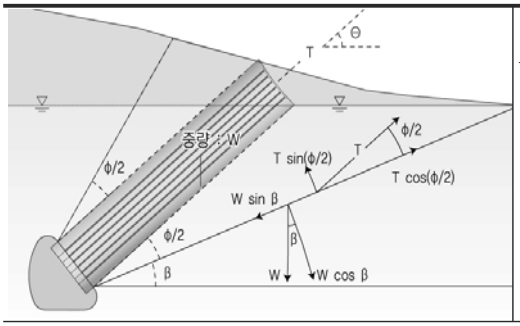
본 교량은 케이블을 앵커리지에 정착시키는 일반적인 타정식 현수교이다. 타정식 현수교에서 앵커리지 기능은 주케이블 장력을 안전하게 지지하는 것이다. 묘도측 앵커리지는 견고한 암반층의 지지기반을 충분히 활용하여 암굴착량을 최소화하고 환경 훼손이 적은 지중정착식 앵커리지를 적용하였다. 지중정착식 앵커리지는 쐐기 파괴에 대한 활동 안전율 기준 3.0이상을 확보하였다. 광양측 앵커리지의 경우에는 중력식 앵커리지로 원형 연속벽을 이용한 무지지보 가설공법을 채택하였다. 안정성 평가시 전면 점토층의 수평저항을 고려하지 않고 직접기초 형식으로 계획하여 전체 안정성을 확보하였고, 상시 저면 반력은 사다리꼴 분포가 되도록 하였다. 연속벽 선단은 암반에 근입시켜 고정점 확보 및 침투수 차수대책을 도모하였고, 지중연속벽 굴착시 공벽의 안정성 확보 및 연직도 관리를 위해 각 판넬 외부에 SCW보강을 실시하였다.

4.1 지중정착식 앵커리지의 설계

지중정착식 앵커리지는 케이블하중에 대하여 암반쐐기의 자중과 전단력에 의해 저항하는 지지 메커니즘을 지닌 것으로 고려하였다. 이에 따라 그라운드 앵커방법과 터널식 앵커리지 검토방법 등을 비교 검토한 결과, 본 교량에 적용하는 지중정착식 앵커리지의 안정성 검토방법은 기본적으로 터널식 앵커리지의 지지 메커니즘을 따르는 것으로 하였다.

이 방법은 암반쐐기의 상부면과 측면에 대한 마찰저항은 무시하고, 저면의 전단저항과 마찰저항만을 고려하여 케이블하중에 저항하는 것으로 가정하였다. 또한, 쐐기파괴에 대한 불확실성을 고려하여 기준 안전율을 2.0에서 3.0으로 강화하였다. 각종 실내시험을 통해 안정성 검토에 영향을 미치는 주요 설계인자(암반의 점착력과 내부마찰각 및 단위중량)에 대한 정확한 값을 도출하였으며, 검토 결과 안전율은 3.28로 앵커리지 전체 안정성을 확보하였다.

표 2. 지중정착식 앵커리지의 안정성 검토법(쐐기 파괴법)



$$F_s = \frac{(W\cos\beta - T\sin(\phi/2))\mu + W\sin\beta + cA}{T\cos(\phi/2)} \geqq 3.0$$

T, Θ : 케이블 장력(kN)과 굴절각(°)

β : 수평면과 쐐기면이 이루는 각 (= Θ −ϕ/2)

W : 암반 쐐기의 유효중량 (kN)

c, A : 저면(활동면)의 점착력(kPa)과 단면적(㎡)

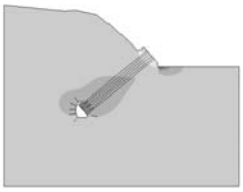
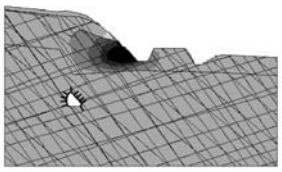
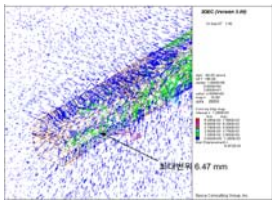
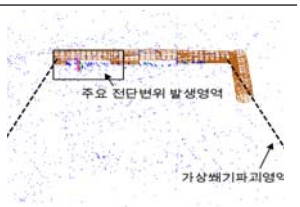
ϕ, μ : 암반의 내부마찰각(°)과 저면의 마찰계수(tanϕ)

쐐기 파괴법에서 가정된 조건의 불확실성과 불연속면의 3차원 절리특성을 반영하기 위하여 다음과 같은 수치해석을 통해 지중정착식 앵커리지의 전체계 안정성을 검증하였다.

FLAC 해석을 통한 2차원 연속체 안정성 해석결과는 긴장재에 프리스트레스가 도입될 때 지표부 암반의 변위가 최대 10mm 발생하지만, 케이블하중 작용시의 최대변위는 2.5mm 발생하였다. UDEC 해석을 통한 2차원 불연속체 안정성 해석결과, 지표부 암반에 발생되는 변위는 1.91mm이고 케이블하중 작용시 발생변위는 1.12mm정도로 앵커리지 전체 안정성을 확보하는 것으로 검토되었다.

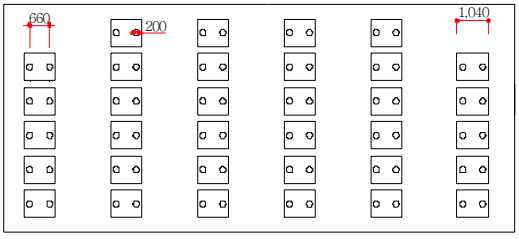
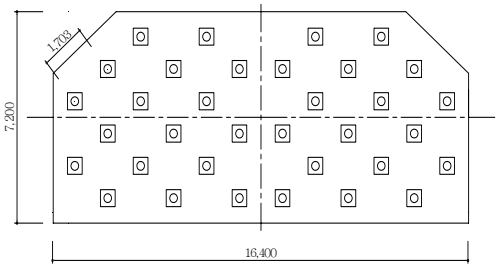
3DEC 해석을 통한 3차원 불연속체 안정성 해석결과, 케이블 하중으로 인해 응력이 집중되는 챔버에 존재하는 하부 정착판 주변 암반 블록의 변위는 최대 6.47mm 발생하였으며, 국부적으로 존재하는 절리면 전단변위는 서로 연결되지 않는 닫힌 상태로 나타나서 지중정착 암반의 쐐기파괴의 가능성이 없는 것으로 분석되었다. 절리면의 분포양상과 그 특성을 반영한 3차원 전체계 불연속체 해석결과, 양호한 암반에 정착시킨 앵커리지의 계획은 적절하며 전체적으로 안정성이 확보되는 것으로 검토되었다.

표 3. 지중정착식 앵커리지의 안정성 해석결과

2차원 연속체 해석	2차원 불연속체 해석	3차원 불연속체 해석	
			
변위 : Max = 2.5mm	변위 : Max = 1.12mm	변위 : Max = 6.47mm	전단변위 발생 영역 확인

신선한 암반에 케이블을 정착시키기 위해서는 챔버가 지표면에서 30~40m 아래에 존재해야 한다. 지표면에서 지하에 있는 챔버에 케이블을 정착시키기 위해 36m길이의 경사천공을 계획하였다. 경사 천공시의 오차를 고려하여 최대한 허용범위를 확대하기 위하여 당초 계획시의 천공 수를 절반으로 줄이고 하부 정착판의 천공위치를 지그재그식으로 배치하여 허용오차를 당초 1/200에서 1/50으로 개선하여 시공성을 확보하였다.

표 4. 하부 정착판의 천공 위치 개선

	
하부정착판 배치도(당초)	하부정착판 배치도(변경)

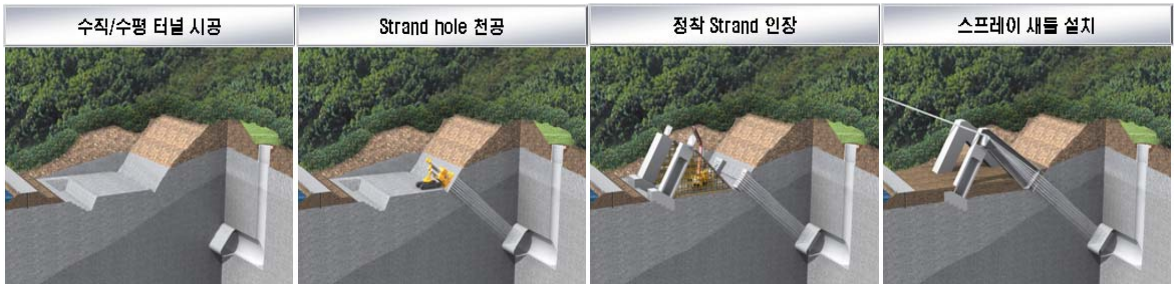


그림 12. 지중정착식 앵커리지 시공순서도

4.2 지중정착식 앵커리지의 시공

지중정작식 앵커리지의 시공에 있어서 가장 큰 어려움은 스트랜드 홀의 경사천공의 천공 정밀도 관리라 할 수 있다. 하부 챔버가 시공 된 후 상부에서 경사천공이 이루어지게 되며, 만약 천공방향에 오차가 발생하는 경우 챔버를 확장해야 하는 등의 문제가 발생하기 때문이다. 또한, 천공 과정에서 이웃하는 스트랜드홀과 겹쳐지게 되는 경우에는 스트랜드의 시공 자체가 불가능하게 된다.

지중정착식 앵커리지의 해외 시공사례를 보면 스웨덴의 하이코스트교의 경우 일반적인 공압식 천공장비를 사용하였으며, 일본 토요시마교의 경우 소형 추진장비를 사용하였다. 이순신 대교의 경우에는 천공속도면에서 유리한 공압식 천공장비를 사용하는 것으로 계획하되, 천공 중 방향 조정이 어려운 단점을 보완하기 위해 몇 가지 보완방안을 계획하였다.

일반적인 경사천공의 경우 중력의 영향으로 로드가 하향으로 향하게 되며, 비트가 시계방향으로 회전하는 경우 회전 방향에 따른 상하부 마찰력의 차이로 인해 우측으로 이동하는 경향이 있다. 이렇게 발생하는 경사오차량은 암반의 상태에도 영향을 받으며, 공압, 천공속도 등 천공장비의 운영 방법에도 많은 영향을 받는다. 이러한 문제를 해결하기 위해 우선 천공 과정에서 강성이 큰 케이싱을 사용하여 로드의 강성을 보강하였다. 또한 케이싱 사용시 불균질한 지반조건에서의 천공 직진성을 확보하기 위해 고안된 시메트릭스 비트(symmetrix bit)를 사용하였다. 아울러 본 천공에 앞서 양측 정착부 사이에서 3공의 시험시공을 통하여 실제 사용 장비와 암반 조건에서의 경사오차량을 확인하도록 하였다.

시험천공 결과 암반이 양호한 경우 0.63%, 천공 중 파쇄대를 만나는 경우 1.71% 우하향으로 경사오차가 발생하는 것을 확인하였다. 이에 따라 본 천공에 있어서는 시험시공 및 인접한 스트랜드 홀의 천공 결과를 고려하여, 예상 오차량 만큼을 좌상향으로 오조준하여 천공하도록 하여 경사천공으로 인한 오차 발생을 최소화 하도록 관리하였다. 총 68공 천공 결과 평균 경사오차량은 0.73% 였으며, 천공과정에서 케이싱이 용접부가 손상되었거나, 암반상태가 나빴던 일부 구간을 제외한다면 평균 0.5%(1/200) 정도의 범위 내에서 시공관리가 되었다고 판단할 수 있으며, 천공 속도는 평균 1.5공/일로 나타났다.

표 5. 지중정착식 앵커리지 시공

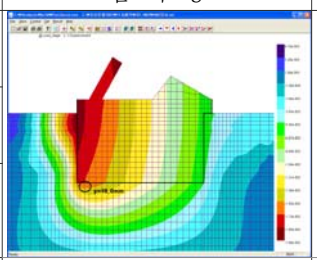
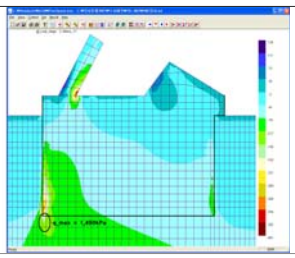
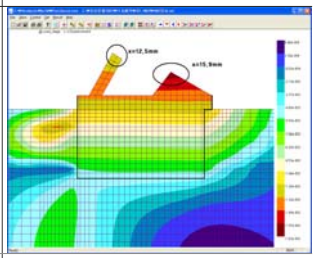
Symmetrix Bit	스트랜드 홀 경사천공	상부 정착판 시공 전경

5. 중력식 앵커리지

5.1 중력식 앵커리지의 설계

중력식 앵커리지는 케이블하중에 대하여 앵커리지 구체의 자중에 의해 저항하는 지지 메커니즘을 지니고 있다. 따라서, 광양측 앵커리지 구조물의 전면에 위치하는 연약점토층(N=0, Su=15kPa)의 전면저항은 무시하고 암반위에 설치된 직접기초의 개념으로 안정성 검토를 실시하였다. 또한, 시공시 및 케이블 하중 작용시 앵커리지 전면과 후면의 응력상태 및 변위 확인 및 하부기반암의 응력상태 확인을 위해 다양한 수치해석을 수행하여, 앵커리지 및 주변 지반의 안정성을 확인하였다.

표 6. 중력식 앵커리지 외적안정검토 및 해석 결과

외적안정검토		침 하 량	연 직 응 력	수 평 변 위
지지력 (kPa)	1,336 < 1,683			
활 동	4.47 > 2.0			
전 도 (편심량, m)	6.1 < 8,5 (D/8)			
안정성 판단 : O.K.		Max = 16.0 mm	Max=1,490≤1,683kPa(O.K)	Max=15.9≤309mm(O.K)

중력식 앵커리지 굴착을 위한 가시설로는 무지보 굴착이 가능한 원형 지중연속벽을 계획하였다. 연속벽의 두께는 1.4m, 시공 깊이는 33.3m 이다. 연약지반상에 매립을 실시한 후 연속벽 공사가 진행되며, 원형 구조물의 특성상 아치효과에 의해 무지보로 굴착이 진행된다.

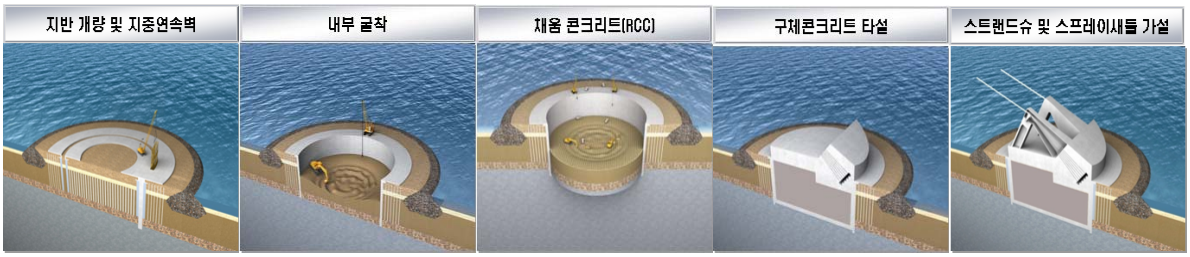


그림 13. 중력식 앵커리지 시공순서도

만약 굴착 과정에서 지반의 변형으로 인하여 아치효과가 저감된다면 전체 안정성에 큰 악영향을 미치게 된다. 따라서, 실제 시공시에는 추후 시공될 내벽(T=1.5m)을 부분 탑다운 방식으로 선시공하도록 계획하여 링빔에 의한 지지효과로 인하여 굴착 중 안정성을 개선하였다. 지중경사계에 의한 계측결과 최종 굴착시까지 벽체의 변위는 최대 22mm 로 나타났으며, 철근 및 콘크리트에 발생하는 응력도 허용치 이내임을 확인하였다. 앵커리지 내부의 격벽 및 골재 채움을 빈배합 콘크리트 채움(RCC)으로 변경하여 시공성 및 안정성을 개선하였으며, 배합시험 및 시험시공을 통해 배합비, 다짐방법 등을 결정하였다.

그림 14. 중력식 앵커리지 지중연속벽 시공

그림 15. 중력식 앵커리지 내부굴착

5.2 중력식 앵커리지의 시공

중력식 앵커리지의 시공 중 가장 어려웠던 부분은 연약지반상에서의 지중연속벽 시공이었다. 설계시에는 벤토나이트 안정액 사용만으로는 공벽이 유지가 어렵다 판단하여 매 굴착 판넬 주변을 SCW(Soil Cement Wall)을 이용하여 선 보강 하는 것으로 계획하였다. 그러나, 실제 시험시공 결과 벤토나이트 안정액 사용 및 SCW 보강으로는 굴착 중 공벽의 유지가 어려움을 확인하였다.

지중연속벽 공벽 유지가 어려웠던 이유로는 첫째, 기반암 굴착에 많은 시간이 소요되어 공벽유지기간이 약 3일(72시간) 이상으로 늘어나게 되었다는 것과, 둘째 연약 점토층에서의 연속벽 공벽을 유지하기에는 프라이머리 판넬의 굴착 폭(6.7m)이 넓었다는 점이다.

첫 번째 문제를 해결하기 위해 연속벽의 굴착 깊이를 2.0m 상향조정하는 것으로 변경하였으며, 두 번째 문제를 해결하기 위해 판넬 분할계획을 수정하여 당초 48개의 판넬을 총 80개의 판넬로 재조정하여 프라이머리 판넬의 굴착 폭이 2.8m가 되도록 하였다. 또한 안정액 비중이 공벽 안정성에 미치는 영

향이 매우 큰 점을 고려하여, 판넬 굴착 완료 후 안정액의 교환을 최소화 되도록 하였으며, 이로 인한 콘크리트 품질저하를 방지하기 위해 수중불분리 콘크리트를 사용하도록 하였다.

또한, 공벽이 붕괴되어 되메움이 진행된 구간에 대해서는 고압분사공법(JSP)을 이용한 보강을 계획하여 공벽유지가 가능하도록 하였으며, 조기 보강효과를 위해 규산소다를 섞어 사용하였다.

그림 16. 연속벽 굴착 중 공벽 붕괴

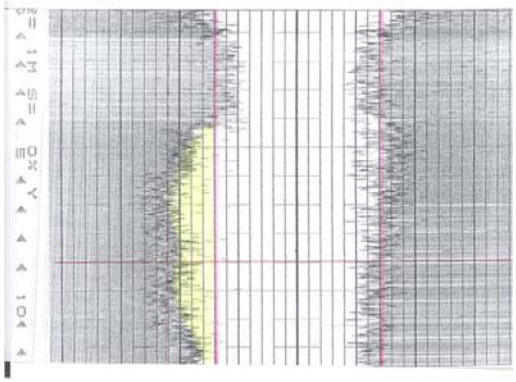


그림 17. 공벽에 대한 초음파 결과(CODEN)

원형 지중연속벽의 판넬이 세분되는 경우 횡방향 연결부가 많이 발생하여 구조적으로 불리하게 된다. 이에 따른 앵커리지 내부 굴착시의 안정성 확보를 위해 탑다운 방식으로 시공될 내벽의 시공 순서를 일부 조정하여 초기 굴착시의 변형 발생이 최대한 억제될 수 있도록 하였으며, 굴착 중 벽체의 거동 확인을 위해 지중경사계를 8개소에 시공하여 시공 중 벽체의 거동을 관리할 수 있도록 하였다. 2009년 8월 최종 굴착시까지 연속벽체의 변형은 최대 22mm 로 나타났으며 연결부의 누수는 거의 발생하지 않은 것으로 확인되었다.

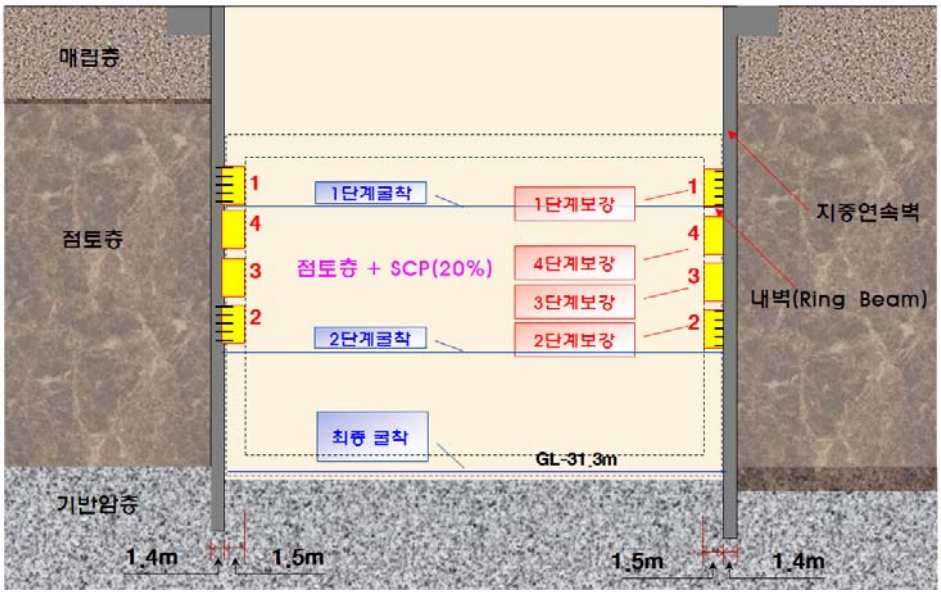


그림 18. 중력식 앵커리지 시공순서도(내벽 Top-Down 시공)

중력식 앵커리지의 채움재인 RCC 시공을 위해 배합설계 및 시험시공을 통해 배합비 및 다짐방법을 결정하였다. RCC의 설계압축강도는 9.0 MPa이며, 단위중량은 23 kN/m^{3}이다. 배합설계시 광양지역에서 많이 생산되는 슬래그 골재를 이용하는 것으로 계획하여 자재공급이 용이하도록 하였으며, 원활한 시공을 위해 현장에 별도의 베처플랜트를 설치하였다. 또한 통상적인 RCC 포설 및 다짐방법인 25cm

3층 포설 후 6회 다짐 방법 적용시 함수비의 변화로 RCC 품질 확보에 어려움이 있다고 판단하여, 매층 25cm 포설 후 2회 다짐하는 것으로 변경하여 시공하였다.

표 7. RCC 배합비 및 압축강도

시멘트 (kg/m^3)	플라이에쉬 (kg/m^3)	물 (kg/m^3)	잔골재 (kg/m^3)	굵은골재 (kg/m^3)	압축강도 (MPa)
105	45	120	676	1,383	10.78

RCC 시공에 있어서 가장 어려웠던 점은 생산된 RCC 재료를 하부로 운반하는 방법이었다. 24시간 연속 작업을 전제로 하여 자재공급량, 생산 가능량, 포설 및 다짐속도 등을 종합적으로 고려하여 장비운영을 계획하였으며, 이에 상응하는 RCC 운반방법이 필요하게 되었다. 일반적인 리프트 또는 버켓을 이용한 방법은 효율성, 공사비 등의 이유로 제외되었고, 최종적으로 컨베이어 벨트를 이용한 RCC 운반을 채택하여 시공하였다. 일 평균 2,000m^3의 RCC 시공을 통해 약 68,000m^3 물량을 40일에 완료할 수 있었다. 이를 통해 연속벽 시공시 지연되었던 공기를 약 2개월 단축시키는 성과를 이루었다.

그림 19. 중력식 앵커리지 RCC 시공

그림 20. 중력식 앵커리지 하부공 완료 모습

6. 결 론

이 글에서는 여수국가산단 진입도로 개설공사(제3공구)현장 이순신대교를 소개하고 지중정착식 및 중력식 앵커리지의 설계와 시공현황을 기술하였다.

1. 이 교량은 타정식 3경간 현수교로 국내 최대 및 세계 제4위에 해당하는 경간장의 초장대 현수교로서 국내 기술진의 주도하에 계획, 설계되었을 뿐 아니라, 주로 해외 기술에 의존해왔던 케이블 가설 또한 국내 기술로 시공할 계획이다.

2. 묘도측 앵커리지는 시공 중 육상조건이며 시공성이 우수하고 견고한 암반층의 지지기반을 충분히 활용하여 암 굴착량을 최소화하여 환경 훼손이 적은 지중정착식 앵커리지를 국내 최초로 적용하였다.

3. 지중정착식 앵커리지의 스트랜드 홀 천공시 경사오차량을 줄이기 위해 강성이 큰 케이싱을 사용하여 로드의 강성을 보강하였으며, 케이싱 사용시 불균질한 지반조건에서의 천공 직진성을 확보하기 위해 고안된 시메트릭스 비트를 사용하였다.

4. 3공의 시험시공을 통하여 실제 사용 장비와 암반 조건에서의 경사오차량을 확인 후 본 천공을 시행하였으며 총 68공 천공 결과 평균 경사오차량은 0.73% 이었다.

5. 광양측 앵커리지는 중력식 구조를 채택하였으며, 무지보 굴착이 가능한 원형 지중연속벽을 이용하여 굴착하였다. 특히, 굴착과정에서 내벽을 탑다운 방식으로 시공하여 벽체의 안정성을 개선하였다.

6. 시험시공 결과 벤토나이트 안정액 사용 및 SCW 보강으로는 굴착 중 공벽의 유지가 어려움을 확인하였으며, 그 원인이 기반암 굴착에 많은 시간이 소요와 연약 점토층에서의 연속벽 공벽을 유지하기에는 프라이머리 판넬의 굴착 폭(6.7m)이 넓다는 사실을 확인하였다. 이에 연속벽의 굴착 깊이를 2.0m 상향조정하는 것으로 변경하였으며, 프라이머리 판넬의 굴착 폭이 2.8m가 되도록 총 80개의 판넬로 분할하였다.

7. 앵커리지 내부 굴착시의 안정성 확보를 위해 탑다운 방식으로 시공될 내벽의 시공 순서를 일부 조정하여 초기 굴착시의 변형 발생이 최대한 억제될 수 있도록 하였으며, 굴착 중 벽체의 거동 확인을 위해 지중경사계 등의 계측기를 추가로 설치하여 시공관리가 이루어질 수 있도록 하였다.

8. 중력식 앵커리지의 채움재인 RCC 시공을 위해 배합설계 및 시험시공을 통해 배합비 및 다짐방법을 결정하였으며, 컨베이어 벨트를 이용한 RCC 운반을 계획하여 일 평균 2,000m^3의 RCC 시공이 가능하도록 하였다.

참고문헌

1. 여수국가산단 진입도로개설공사(제3공구) 실시설계 보고서(2007)
2. 여수국가산단 진입도로개설공사(제3공구) 구조계산서(2007)
3. 여수국가산단 진입도로개설공사(제3공구) 토질조사보고서(2007)
4. 케이블 강교량 설계지침(안), 2006, 대한토목학회.
5. 한국수자원공사, “롤러다짐콘크리트댐의 품질향상 방안 연구(제1차년도)”, 2004
6. 차수원(2009), “해상교량 콘크리트 구조물의 내구성평가 및 최적배합설계연구”, 울산대학교 산업협력단