

콘크리트 사장교의 시공사례

A Case Study on Concrete Cable-Stayed Bridge

윤자길 Jahgeol Yoon
대림산업(주) 기술개발원
특수교량팀 팀장

이광민 Kwang-Min Lee
대림산업 (주) 기술개발원
특수교량팀 과장

박대용 Dae-Yong Park
대림산업 (주) 기술개발원
특수교량팀 과장

1. 개요

콘크리트 사장교는 압축에 강한 콘크리트를 주탑 및 보강거더의 주요 부분에 적용한 합리적인 교량이며, 일반적인 고강도 콘크리트를 사용할 경우 중소지간에 대해 강상형이나 강합성 사장교에 비해 탁월한 경제성을 나타내며 유지관리면에서도 유리하다. 세계 최장의 콘크리트 사장교는 노르웨이의 Skarnsundet(주경간 530m)이며, 국내에서는 제2돌산대교를 기점으로 세풍대교, 운남대교, 화명대교, 낙동강대교, 칠산대교, 화포교, 교동대교, 백석대교, 사랑대교 등 많은 콘크리트 사장교가 설계와 시공이 진행되고 있다. 콘크리트 사장교는 설계 시 크리프 및 건조수축 고려, 가설 시 균열, 선형관리 및 가설장비(Form traveller; 이하 FT)고려 등 계획 및 시공에서 세심한 주의를 기울여야 하는 민감한 교량이다. 콘크리트 사장교 보강형의 형식으로는 에지 거더(edge girder)와 박스 거더(box girder)가 주로 적용되고 있다. 에지 거더가 적용된 경우는 박스 거더가 적용된 콘크리트 사장교와 비교 시 경제적인 교량이지만 상대적인 강성이 작으므로 시공 중 부모멘트 저감방안과 균열방지에 대해 더욱 세심한 관리가 필요하다<그림 1>.

본 고에서는 국내 최초 FCM 공법으로 시공되었고 에지 거더가 적용된 콘크리트 사장교인 제2돌산대교의 시공에 대해 소개하고자 한다. 제2돌산대교는 Floating 방식을 도입함으로써 연직받침 생략에 의한 유지관리성이 우수하고 주두부 가설에 대한 시공성 및 공기단축, 주두부 부모멘트 감소에 따른 적정한 동일형고 계획이 가능하였다. 기초의 규모를 최소화하기 위해 PY01은 분리식 2열 우물통을 적용하였으며 일체거동을 위해 가로보로 연결하는 것으로 계획하였고 PY02은 지반조건을 고려하여 현장타설 말뚝으로 시공하였다. 이러한 주경간 사장교에 대한 보강형, 케이블, 주탑, 기초에 대한 구조제원은 <표 1>과 같다.

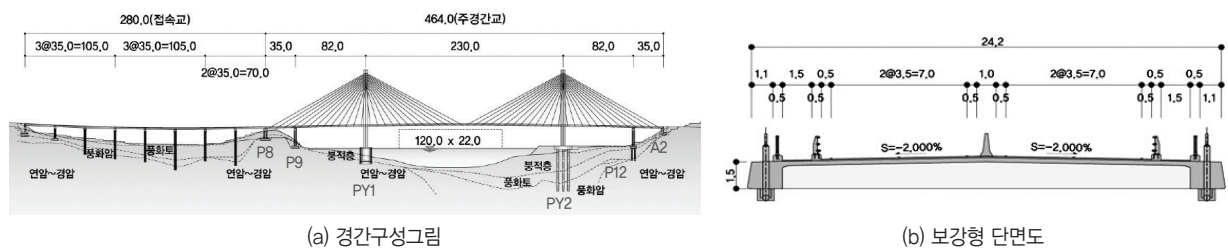


그림 1. 제2돌산대교 교량제원

표 1. 제2돌산대교 구조제원

보강형	형식	Edge Girder Type 콘크리트 보강형
	폭원/형고	24.2m/1.5m
	바닥판	현장타설 RC바닥판($f_{ck}=40\text{MPa}$, $t=250\text{mm}$)
가설공법	Heavy Lifting(주두부), Balanced Cantilever Method(일반 Segment), FSM(축경간)	
	배치/형식	2면 Semi-Fan형식 / Parallel Multi Strand Cable
케이 블	단면구성	7wire strand($\phi 15.7\text{mm}$, $f_{pm}=1,860\text{MPa}$, 23~49 Strand, $A=34.5\sim 73.5\text{m}^2$, 직경=160~200mm)
	길이	38,9128.4m, 104본(총중량 3,500kN)
주탑	형식/높이	H-Shape 콘크리트주탑/PY01=90m, PY02=88.44m
	적용재료	$f_{ck}=40\text{MPa}$, 3119 m^3
	가설공법	Auto Climbing Form
기초	형식	PY01 : 분리형 2열 우물통($\phi=12.5\text{m}$), PY02 : 현장타설말뚝($\phi=2.5\text{m}$, $3\times 5=15\text{EA}$)
	적용재료	$f_{ck}=35\text{MPa}$ (PY01=3,335 m^3 , PY02=3,690 m^3)
	가설공법	PY01 : Floating Dock에서 Floating Crane을 이용한 인양거치 PY02 : Reverse Circulation Drill(RCD공법)



(a) 우물통 제작 (Floating Dock) (b) Floating Crane을 이용한 거치

사진 1. PY01 기초시공(2006. 06)



사진 2. PY02 현장타설 말뚝 시공전경(2008. 01)

2. 기초 및 주탑시공

2.1 기초의 시공

PY01 우물통 기초는 Floating Dock에서 2열 우물통을 동시 제작 후 1,300kN Floating Crane으로 거치 하였다(공사기간, 제작 및 거치: 2006년 03월부터 7개월, 캡 콘크리트 시공 및 우물통 가로보 시공종료: 3개월 소요)〈사진 1〉. 한편 PY02의 말뚝기초는 기반암 심도가 깊어 시공성이 우수하고 축도로 육상시공이 가능한 현장타설 말뚝을 적용하였으며, 공벽 붕괴방지를 위해 주름관이 적용되었다(공사기간, RCD말뚝시공: 2008년 1월부터 약 5.5개월, 말뚝정리 및 확대 기초시공: 약 2개월)〈사진 2〉.

2.2 주탑의 시공

주탑은 주탑의 축선변화에 대한 적용성, 경제성, 품질 확보 및 콘크리트 공급에 대한 공기조절이 가능한 이동식 거푸집 공법(Auto Climbing System; 이하 ACS Form)을 적용하였다(그림 2). 타설 높이는 2.5m~3.9m로 하였으며, 주탑 콘크리트는 타워크레인 2 m^3 의 버킷을 사용하여 타설하였다. 주탑 가로보는 강제거푸집을 브라켓(bracket)으로 지지하는 방식으로 시공하였고, 공기단축을 위해 주탑 Leg와 병행하여 시공되었다(공사기간, PY01: 2007년 03월부터 8개월,

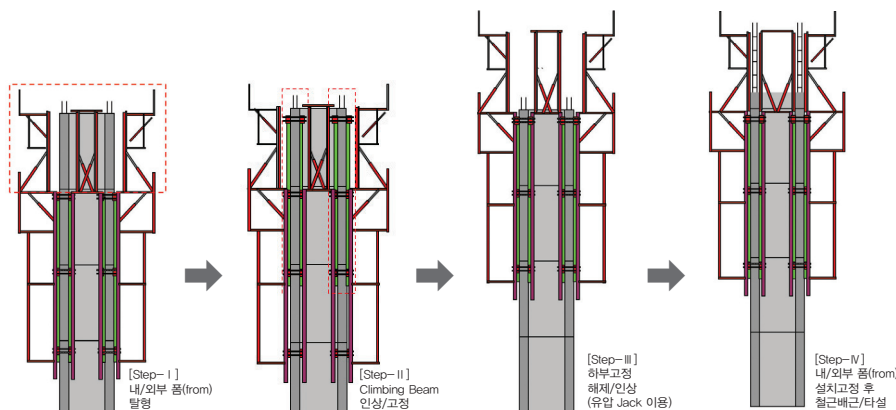


그림 2. ACS Form의 운용 Sequence(개념도)



사진 3. 주탑시공

PY02: 2008년 09월부터 7개월). 공기상의 특성과 공사비 절감을 고려하여 PY1 주탑 시공종료 후 ACS Form을 전용하여 PY2를 시공하였다(사진 3). PY02의 시공 시에는 작업 숙련도 향상 및 ACS Form 조립 기간 단축으로 인해 PY01보다 약 1개월의 공기가 단축되었다.

3. 보강형 시공

보강형은 Floating System으로 주두부 길이는 F/T 거치 및 운용을 위하여 12.75m, FCM 공법으로 시공되는 일반 세그먼트 길이는 9m(CS 및 CM 1~7 세그먼트, CM 8~12 세그먼트), 측경간 및 주경간 키 세그먼트(key segment)는 1.25m 계획되었고 측경간 47.5m(교각 P9 및 P12의 중심축에서 11.375m 주경간 방향으로 내민구간)는 FSM공법으로 시공되었다. 주두부는 블록으로 제작하여 F/T와 함께 임시 케이블을 이용하여 인양 후 영구 케이블에 연결하였다.

3.1 거푸집 이동장치(form traveller; 이하 F/T)

제2돌산대교는 Nth 세그먼트 콘크리트 타설시 이전 세그먼트 상연에 발생하는 부모멘트에 취약한 것으로 검토되어 부모멘트 저감을 위해 설계단계에서는 에지 거더(edge girder) 타설 후 슬래브를 타설하는 분할 타설로 계획되었다. 현장 개설 후 보강형 공기단축을 위해 콘크리트 타설 전에 영구케이블을 F/T의 임시정착구에 정착함으로써 F/T 자중 및 타설 하중을 부담하는 방식의 F/T를 적용하였다. 전방 F/T 자중 및 콘크리트 타설 하중에 의해 발생하는 영구케이블의 수평력으로 인한 F/T의 좌굴을 방지하기 위해 F/T의 부재 및 보강재가 증가하여 설계당시 약 1,400kN이었던 F/T 중량이 2,590kN으로 증가되었다. 전술한 케이블의 수평력은 Reaction 브

라켓을 통하여 보강형으로 전달되도록 설계되었다. 보강형의 양생이 완료된 후에는 임시정착구 블록에서 보강형 영구정착구로 하중전이가 필요하다.

(사진 4)는 대상교량에 사용된 F/T를 보여주고 있다. 전방 F/T(콘크리트 타설 하중을 분담 및 케이블 임시정착구, 약 2,100kN)와 후방 F/T(타설 하중에 의한 연직 반력 및 수평반력을 보강형에 전달, 약 490kN)로 분리하고 상현재에 핀(pin)을 사용하여 힌지형식으로 연결된 형식이다. 전방 F/T와 후방 F/T 연결부 하현재에 전방 F/T Elevation 조절이 가능하도록 Alignment Jack이 설치되어 있다. 영구케이블 가설 후 Alignment Jack을 제거하면 전방 F/T 하중은 영구케이블이 부담하게 된다. 측경간 키 세그먼트 시공이 완료되면 측경간 F/T는 주두부 근처까지 Back launching한 후 Heavy Lifting시 사용한 잭(jack)을 이용하여 주탑 기초상에 설치된 가설트러스 위로 내려 해체하였다. 주경간 세그먼트가 완료되면 주경간 F/T는 2개 세그먼트 뒤로 Back launching 한 후 해상 Barge 위로 내려 해체하였다.

3.2 Heavy Lifting

제2돌산대교의 주두부 가설 및 F/T 설치의 중량이 매우 큰 구조물을 인양, 하강하는 Heavy Lifting 방법을 사용하였다. 이러한 Heavy Lifting은 주두부 및 세그먼트 1가설을 위한 F/T, 일반 세그먼트 가설을 위한 F/T에 대하여 총 3번의 Heavy Lifting을 실시하였다.

3.2.1 Heavy Lifting Jack(이하 SMU-120)

무거운 하중을 고인장 강선을 사용해 짧은 스트로크로 인양하도록 설계된 중앙부에 구멍을 가진 높은 용량의 유압잭이다. 주두부(5,612kN) 및 주두부(2,590×2=5,180kN을 위해 4개의 SUM-120 Jack(용

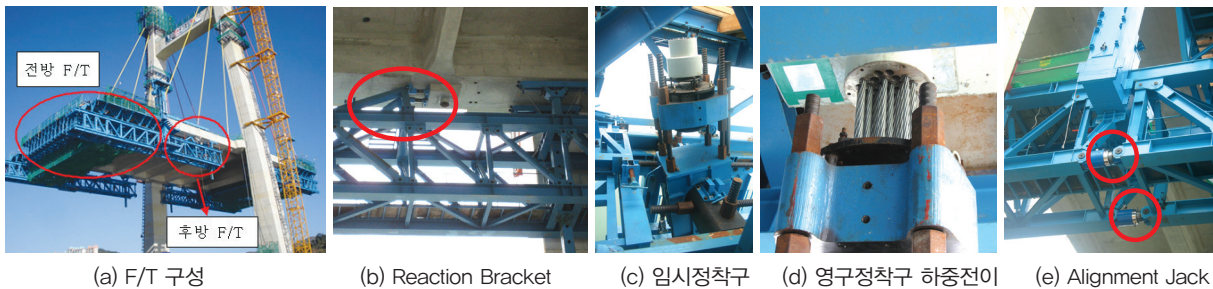


사진 4. 제2돌산대교 보강형 시공을 위한 F/T

량 : 1,500kN/Ea, Lifting 속도 : 10m/hr)이 사용되었다 <사진 5>.

3.2.2 Lifting Frame(이하 LF)

LF는 SMU 짝을 지지하고 인양물의 중량을 지지되고 있는 Support로 전달하는 역할을 한다. 이 부재는 주두부와 F/T 인양 시 사용된다.

주두부와 1st F/T를 인양 시에는 주탑 가로보에 설치되고 세그먼트 2 타설을 위한 2nd F/T(1st F/T에 Rear Module 추가) 인양 시는 보강형 상부에 설치된다. 각각의 위치에서 수직 강봉이 LF를 고정하기 위해 사용된다 <사진 6, 7>.

3.2.3 Lifting Beam(이하 LB)

LB는 Lifting시 주두부로 하중을 도입하는 역할을 한다. 주두부의 자중은 강봉에 의해 지지되고 이 강봉은 리프팅 강선과 연결된 LB에 정착된다. 주두부는 4개의 각 코너에 LB가 설치되어 인양되므로 4개의 LB가 필요하다. 하나당 무게는 약 3kN이다.

Heavy Lifting 과정에서는 무수축 모르타르 등을 사용하여 연결부를 견고히 하고 편심이 발생하지 않도록 수평을 유지하여 설치한다. Lifting Device 안정성 검토



사진 5. SMU-120



사진 6. Lifting Frame



사진 7. Lifting Framse(F/T 2nd Heavy Lifting 시)

시 사용된 중량과 부합되는지 Lifting 즉시 중량을 확인하였다 <사진 8>.

제2돌산대교는 Floating 형식의 사장교로써 시공중 불안정한 구조계를 피하고 횡방향 풍하중에 저항하기 위해 교축 및 교직방향 가고정장치를 주탑과 보강형 주두부에 설치하였다 <사진 9>.

3.3 보강형 일반 세그먼트 시공

FCM 가설 구간인 일반 세그먼트(세그먼트 3~세그먼트 7)에 대한 단위공정은 약 20~22일이 소요되었다(F/T 런칭 및 셋팅 1.5일→Stay Blister 설치 0.5일→측경간 케이블 설치 2일→주경간 케이블 설치 2일→철근조립 전 F/T 셋팅 0.5일→철근 및 부속자재, 쉬스관, 거푸집 등 설치 4.5일→타설 전 F/T 셋팅 0.5일→양생(강도발현 0.8) 3(여름)~5(겨울)일→횡방향 텐던 긴장 1일→측경간 케이블 재긴장 1일→주경간 케이블 재긴장 1일→F/T 하강 및 면 정리 1일).

세그먼트 3까지는 측경간 타설종료 후 주경간을 타설



사진 8. Heavy Lifting



사진 9. 주두부에 설치된 Lifting Beam

하는 순서로 시공하였고 세그먼트 4~세그먼트 7은 측경간 타설 종료시 주탑연단의 인장응력이 허용인장응력을 초과하는 것으로 검토되어 측경간과 주경간을 동시타설하였다.

PY1측 FCM 구간은 대부분이 해상에 위치하여 측경간 키 세그먼트 폐합 전까지는 Setting Barge에 펌프카를 위치시키고 Moving Barge에 레미콘 상차 후 해상으로 이동하여 시공하였고, 측경간 키 세그먼트 폐합 후에는 펌프카를 직접 보강형에 위치시켜 현장타설을 수행하였다. PY2 측 FCM 구간은 육상접근이 가능하여 펌프카를 사용하여 현장타설을 수행하였다. 측경간 폐합후 주경간 FCM 구간 타설시 펌프카와 레미콘을 시공해야 할 세그먼트까지 이동할 경우 보강형 상연에 부모멘트가 발생하여 유해한 균열 발생이 예상되어 주두부까지만 펌프카 및 레미콘 차량을 운행하고 주경간 방향으로 배관타설을 수행하였다.

단위 공정 중 케이블 정착구(stay blister) 설치(사진 10) 공중에서 보강형의 정착구 일부를 모든 케이블에 대해 프리캐스트하였다. 이는 현장타설 보다는 프리캐스트 제작장에서 정확한 각도로 제작이 가능하기 때문이었다. 정착구는 케이블 가설 전에 먼저 설치되는데 이는 전술한 바와 같이 전방 F/T하중을 지지하고 보강형 타설 및 양생 후 하중전이가 이루어지게 하기 위해서이다.

3.4 키 세그먼트 시공

1.25m의 측경간 키 세그먼트는 F/T를 사용하지 않고 측경간에 설치된 강재동바리를 연장하여 강재빔 상에 시스템 동바리를 조립한 후 거푸집을 설치하여 시공하였다. FCM으로 시공되는 일반교량에서와 달리 제2



사진 10. Stay Blister 설치

돌산대교에서는 측경간 키 세그먼트 부분에 텐더이 배치되어 있지 않으므로 사실상 H-Prop의 역할이 중요하지 않다. 하지만 키 세그먼트 타설 후 콘크리트가 소정의 강도발현 전에 교축방향 온도변화에 저항하기 위해 H-Prop(H200×200×8×12)을 예치 거더당 4개소, 총 8개소에 설치하였다. FCM 구간과 FSM 구간의 레벨조정이 가능하도록 Leveling Beam을 설치하였으나 실제적으로는 FCM 구간의 케이블을 재인장하여 레벨을 조정하였다. 마지막으로 키 세그먼트 타설 전후의 교축방향 풍하중에 저항할 수 있도록 X-bar를 설치하였다.

주경간 키 세그먼트는 PY2측에서 진행되어 온 F/T를 사용하여 시공하였으며, PY1측 세그먼트 12와의 연결은 케이블 임시정착구 블록을 연직으로 회전시켜 강연선으로 고정하였다. 탄성받침의 Pre-Setting을 위해 주경간 키 세그먼트 시공 전 가고정장치를 유압잭으로 대체 후 Set Back을 수행하였다. 공용기간동안 발생할 수 있는 Creep 및 건조 수축량을 산정하여 총 수축량에 절반에 상응하는 값을 받침 Pre-Setting량으로 적용하였다.

4. 케이블 시공

제2돌산대교 케이블은 MS형식으로 Mono 잭을 사용하여 케이블을 긴장하였다. 케이블은 Helical Rib가 설치된 HDPE관으로 보호되어 있으며 11.75m 단위로 현장에 반입되며 Mirror Welding을 통해 소요되는 길이로 제작되었다. 케이블은 Master Strand를 HDPE에 삽입한 후 이를 타워크레인으로 인양하고 주탑측 및 보강형 측에 임시 고정하였다. 그리고 사전에 작성된 ISO-Tension 계획에 따라 Master Strand 및 일반 strand를 가설하였다.

시공단계해석을 수행한 결과 제2돌산대교는 F/T의 특이성과 보강형의 강성이 작아서 모멘트에 의한 균열 발생가능성이 크므로 많은 횡수의 재긴장이 필요하였다. 재긴장은 다음과 같은 상황에 적용되었다.

- (1) N 세그먼트 가설 후 N+1 세그먼트로 F/T 이동시 보강형 상연에 부모멘트가 발생되므로 이에 저항할 수 있도록 F/T 런칭전에 N 세그먼트의 케이블을 재긴장
- (2) 주경간 보강형 가설 종료 후 F/T는 Back




사진 11. 제2돌산대교 시공완료 후 전경(2011.04, 부대공 제외)

Launching되는 과정에서의 보강형의 정·부도멘 트를 제어

(3) 주경간 키 세그먼트 폐합전 FT하중 불균형에 의한 장력불균형의 제어

시공 시에 케이블은 적게는 2회, 많을 경우 5회까지 케이블이 재긴장되었다. 이러한 많은 횟수의 케이블 재 긴장으로 인해 야기될 수 있는 웨지(wedge)의 손상 가능성은 사전에 검토되었다.

5. 맺음말

본 고에서는 제2돌산대교의 시공사례를 소개하였다. 제2돌산대교는 국내 최초로 시공되는 에지 거더 형식의 콘크리트 사장교로써 콘크리트 사장교의 경제적 우수성이 입증되어 세풍대교, 화명대교, 낙동강대교, 칠산대교, 화포교 등 많은 콘크리트 사장교가 설계와 시공이 진행되고 있다(사진 11). 본 형식의 교량은 중소경간의 강 사장교를 대체할 수 있을 뿐만 아니라 향후 UHPC와 같은 고기능성 콘크리트를 활용하여 장경간의 많은 강 사장교를 대체할 수 있을 것으로 기대된다. 

담당 편집위원 : 유성원(우석대학교) imysw@woosuk.ac.kr

참고문헌

1. 이광민, 박대용, 'Edge Girder형 콘크리트 사장교의 Form Traveller에 대한 연구', 대한토목학회 정기학술대회, 2009, pp. 2,187~2,190.
2. 이광민, 문중훈, 김성호, 박대용, '제2돌산대교 시공을 위한 형상관리', 대한토목학회 정기학술대회, 2008, pp. 2,396~2,399.



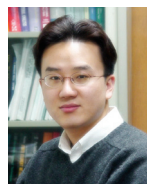
윤자걸 박사는 서울대학교 토목공학과에서 사장교 해석모델의 보정에 관한 연구로 박사학위를 취득하였고, 대림산업(주)에 입사하여 기술개발원에서 교량 관련 연구개발과 기술지원 업무를 담당하다가 토목사업본부에서 특수교량 프로젝트 설계 T/F팀장과 현수교 현장 근무를 거쳐 현재 대림산업 기술개발원의 특수교량팀장으로 근무하고 있다.

yoongjg@daelim.co.kr



이광민 박사는 한양대학교 토목공학과에서 교량의 지진 비선형해석 및 신뢰성해석과 관련한 연구로 박사학위를 취득하였고, 대림산업(주)에 입사하여 기술개발원에서 교량 관련 연구개발 및 기술지원 업무를 담당하다가 건기연 UHPC 보도사장교, 여수의 제2돌산대교, 인천청라지구 심곡 5교 시공 및 형상관리 업무를 수행하였고 현재 대림산업 기술개발원의 특수교량팀 과장으로 근무하고 있다.

kmlee@daelim.co.kr



박대용 박사는 서울시립대학교 토목공학과에서 층이 분리된 복합적층판의 좌굴거동에 관한 연구로 2006년 박사학위를 취득하였다. 2006년 대림산업 기술개발원 특수교량팀에서 근무를 시작하였고 2008.3~2009.12에는 제2돌산대교(콘크리트 사장교) 현장에서 구조분야 기술지원을 총괄하였으며 현재는 본사에서 사장교 현장 기술지원 및 사장교 관련 형상관리, 내풍안전성, 케이블 장력측정등의 연구과제를 총괄하고 있다.

dypark@daelim.co.kr