

마창대교의 계획, 설계 및 시공

Planning, Design and Construction of Machang Grand Bridge



배을호*
Eul-Ho Bae



김성연**
Soung-Yen Kim



김량균***
Ryang-Gyun Kim



송중호****
Joong-Ho Song



이택균*****
Taek-Kyun Lee

1. 머리말

마창대교는 정부의 국도대체우회도로 정비 중장기계획상 2016년 시행토록 되어있었으나 민간투자사업으로 조기 착공하였다. 경상남도 남부지역 개발에 따라 마산, 창원, 진해시 관내 국도 2호선의 교통 정체 현상 악화가 심각하여 본 노선의 도시권 외곽도로망 확충으로 시관내의 원활한 교통 소통, 지역 개발 촉진 및 지역 랜드마크(land mark)로 관광자원화하여 지역경제에 기여할 수 있도록 계획하였다<그림 1>.

2. 마창대교 공사 개요

마창대교 민간투자사업은 설계와 시공을 동시에 수행하는 fast-track 방식으로 건설되고 있으며 마산시 합포구 가포동에서 창원시 귀산동 간을 잇는 마산만 횡단 노선이다. 공사 기간은 50개월로 2004년 4월에 착공하여 2008년 6월에 착공 예정이다. 본 사업의 주요 공사인 마창대교는 마산항 주항로에 위치한 주경간교(사장교)와 양측의 접속교인 시점교, 종점교로 구성되고 3개의 각기 다른 교량 형식으로 계획되었다.

마창대교는 설계시 기존의 공법 적용에 머물지 않고 새로운 기술과 공법을 개발하고 도입하였다. 직경 3.0m 대구경 RCD 기초, 3단 강재 스트럿을 이용한 주탑, 영구케이블을 이용한 비대칭사장교 주두부의 시공, 국내 최대중량의 대블럭 강형거치, ballast wagon을 이용한 장경간 강합성교의 콘크리트 슬래브 타설, 클로소이드 선형을 갖는 강교의 연속압출공법 등의 획기적인 방법들이 시도되었다.

3. 마창대교의 계획 및 설계

3.1 주경간교

마창대교의 주경간교는 연장 $L=170+400+170=740$ m의 경간 구성을 갖는 사장교로 강합성 I형 단면의 보강형, H형 콘크리트 주탑 및 PWS 사장 케이블 등을 주요 구성 부재로

- 사업 규모
 - 교 량 : 4차로, $L=1,700$ m, $B=21.0$ m
 - 영업소 : toll plaza 및 관리사무소
 - 건설효과 : 물류비 연간 400억 절감효과 (거리 단축 7 km, 시간단축 28분)
 - 마창대교 민간투자사업 건설 공사 관련 기관
 - 주무관청 : 경상남도
 - 사업시행 : 마창대교주식회사
 - 시 공 사 : 현대건설(주)+BOUYGUES(프) JV
 - 감 리 사 : (주)건화+COWI(덴)
 - 설 계 사 : 현대엔지니어링(주)



그림 1. 마창대교 조감도

* 정회원, 현대엔지니어링(주) 인프라환경사업본부 구조부 이사
beh@hec.co.kr

** 정회원, 현대엔지니어링(주) 인프라환경사업본부 구조부 부장

*** 정회원, 현대엔지니어링(주) 인프라환경사업본부 구조부 차장
**** 현대건설(주) 마창대교 건설공사 현장소장
***** 현대건설(주) 마창대교 건설공사 현장설계 팀장

하여 계획하였다<표 1>. 중앙 경간이 400m를 넘는 해상 장대 교량임을 감안하여 국내외 규정 및 설계사례를 검토하여 설계 기준을 마련하여 설계에 적용하였다.

3.1.1 기초 및 파일캡(pile cap)

1) 기초 (희생 강관+ RCD, d=3.0m)

사장교의 상부 구조와 주탑에서 전달되는 하중을 해저 지반에 전달하기 위한 기초 형식은 많은 검토 끝에 희생강관을 이용한 대구경(d=3.0m) RCD 공법으로 결정하였다<표 2>.

Bulbous type 대형 선박이 파일캡 충돌 후 선체의 압괴 변위로 파일 본체에 충돌하여 각 위치의 pile 1본이 파괴되는 경우에 대하여 검토하고 안정성을 확보하였다.

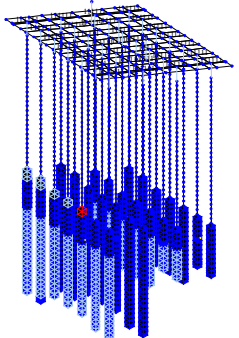
2) 파일캡 (PC house 적용)

조위가 변하는 해상에서의 파일캡 시공을 위하여 거푸집 형식을 콘크리트 PC house로 계획하고 조류, 단계별 타설 및 부력에 대한 안전성을 확보하도록 하였다<그림 2>.

표 1. 마창대교 교량 구성

구분	시점교	주경간교	종점교
연장	130+150+130=410m	170+400+170=740m	65+6@70+65=550m
상부	강합성 박스 (1 box)	강합성 I형 사장교	강합성 U-type (1 box)
하부	일주식	H형 콘크리트주탑	일주식
기초	PC house+ RCD(D=3.0m)	PC house+ RCD(D=3.0m)	직접기초
가설 공법	상부	대블럭 가설	Segment 가설
	하부	Climbing form	Slip form
			ILM 가설

표 2. RCD pile 해석 및 결과 (PY1)

해석 모델	해석 결과		
 <p>Pile 본수 : 4×7=28ea</p>	■ 지지력 검토 *() 지진시		
	구분	허용지지력 (tonf/ea)	작용력 (tonf/ea)
	연직	3,245 (4,867)	3,152 (4,353)
	인발	1,576 (2,364)	- (361)
	수평	381(571)	35(210)
	■ 수평 변위 검토 *() 지진시		
구분	허용지지력 (tonf/ea)	작용력 (tonf/ea)	
연직	3,245 (4,867)	3,152 (4,353)	

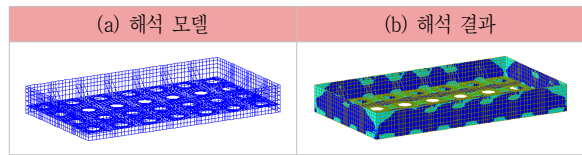


그림 2. PC house 모델링 및 해석 결과 (PY1)

3.1.2 주탑

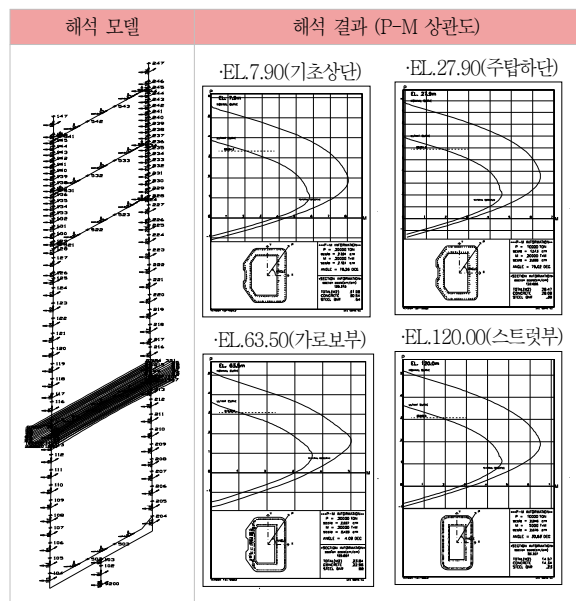
주탑은 콘크리트 H형으로 계획하고 구조적 안전성 확보를 위하여 상단에 3단 강제 스트럿을 설치하였다. 계획으로 Oresund교와 같이 H형 주탑 다리(leg)와 보강형 측 케이블이 종방향으로 동일 평면을 유지하도록 하였다<표 3>. 케이블 정착에 의한 주탑 보강은 강제 정착박스(anchorage box)를 이용하여 주탑의 시공성이 우수하도록 하였다. 주탑 해석은 3D로 모델링 후 시공 단계 해석과 완성 단계 해석을 수행하고 설계하중 및 조합에 따라 전체 및 불균형 하중을 재하 하였다.

3.1.3 보강형

표준 단면은 강합성 I형 거더로 하고 tie-down cable이 설치되는 측경간 교각부는 강합성 박스 거더로 계획하였다. 측경간 박스 거더 내부에는 부반력을 줄이기 위하여 ballast 콘크리트를 타설하였다. 주탑과 측경간 교각의 주두부는 대블럭으로 일괄 시공하고 일반 보강형은 표준 세그먼트 가설 순서에 따라 시공하였다<그림 5~7>.

보강형의 해석은 시공중, 공용중의 합리적인 하중 분포를 적

표 3. 주탑 해석 및 결과 (PY1)



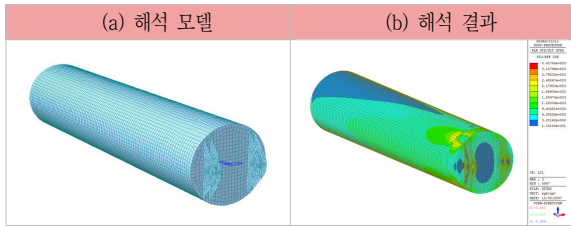


그림 3. 강재 스트럿 상세 해석

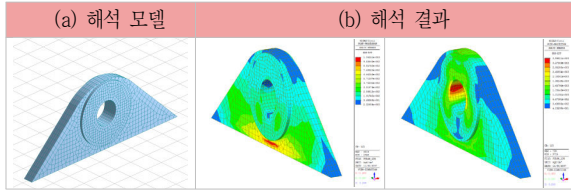


그림 4. 강재 스트럿 연결 러그 상세 해석

용하기 위해 RM2004를 사용하여 3차원으로 모델링하였다. 가설시 보강형 세그먼트 및 케이블 가설에 의한 작용 하중 및 경계 조건 변화 등의 시공 단계를 고려한 가설 단계 해석과 공용시 활하중 등이 작용하는 완성 단계 해석을 수행하였다. 또

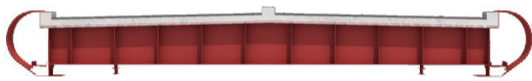


그림 5. 사장교 표준 단면

	<p>주두부 세그먼트 제원</p> <ul style="list-style-type: none"> ·Seg. 길이 : 48.75m ·Seg. 폭원 : 24.90m ·Seg. 중량 : 1,410tonf ·인 양 고 : 69.61m ·인양장비 : 3,000tonf F/C
	<p>그림 6. 영구 케이블을 이용한 주두부 대블럭 가설</p>

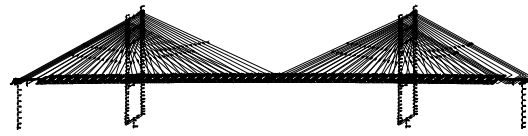
<p>1 단계</p> <p>데릭 크레인에 의한 보강형 거치, 용접 및 검사</p>	<p>2 단계</p> <p>케이블 가설, 1차 긴장, 바닥판 배치, 철근 조립</p>
<p>3 단계</p> <p>이음부 콘크리트 타설 및 케이블 2차 긴장</p>	<p>4 단계</p> <p>데릭 크레인 이동</p>

그림 7. 보강형 표준 세그먼트 가설 순서

한 측경간 및 중앙 경간 폐합전 풍하중 및 지진하중에 대한 구조 안정성도 검토하였다.

3.1.4 케이블

사장 케이블은 많은 검토 끝에 시공성, 내풍안정성 등을 고려하여 $\phi 7.0\text{mm}$ PWS(parallel wire strand)를 사용하였다. 설계는 PTI recommendation 규정에 의해 가설시, 공용시, 케이블 교체 및 파단시의 안정성을 확보하고 세그먼트에 의한 케이블의 비선형성, 피로 검토 등을 수행하였다<그림 8~11>.



·S/W : RM2004 ·요소 : beam, cable, spring element

그림 8. 사장교 전체계 3D 모델링

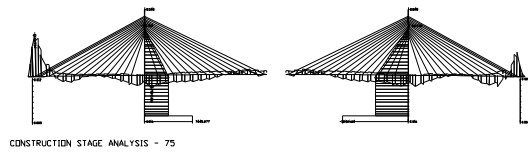


그림 9. 사장교 가설 단계별 힘모멘트도

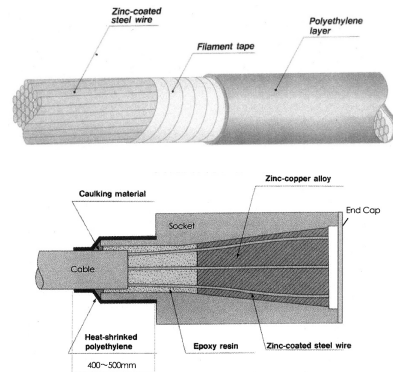


그림 10. PWS 케이블 구성 및 정착구(Socket 방식)

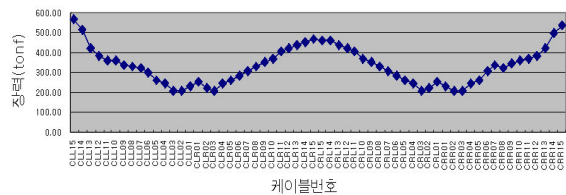


그림 11. 고정하중에 의한 케이블 장력

3.1.5 내풍 및 내진 설계

(1) 내풍 설계

Aerodynamic 해석 및 2차원 공기력, 3차원 독립 주탑, 가설 단계, 완성계 풍동 실험을 통해 안정성을 검토하였다<그림 12>. 공기력 감소를 위하여 유선형의 비구조 요소 fairing을 설계에 고려하는 등 내풍 안정성 확보에도 역점을 두었다.

(2) 내진 설계

재현주기 1,000년의 내진 1등급 교량으로 주탑 및 케이블 등의 복잡한 거동을 고려하여 7개의 인공지진파를 SIMQKE로 구하고 시간이력해석법에 의해 수행하였다.

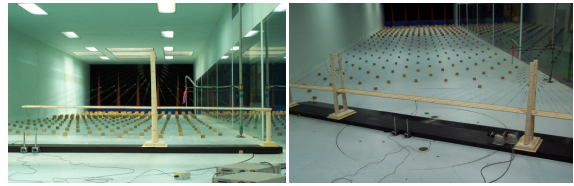


그림 12. 가설 단계 및 완성계 전교포고 및 모형 풍동 시험 전경

3.2 시점교

시점교는 폭원 21.0m, 경간구성 130.0+150.0+123.9+(6.1)=410.0m의 강합성 박스 거더교이며 단일 강박스는 폭 10.0 m, 형고 5.0~10.0m인 대단면(국내 최고)에 5.0m의 캔틸레버 강제 브라켓을 갖도록 계획하였다. 주형 가설은 시간별 3,000 tonf F/C에 의해 대블럭으로 일괄 가설하고 콘크리트 슬래브는 장경간을 고려하여 ballast wagon을 이용한 폼 트래블러(form-traveler)에 의해 타설하도록 하였다<그림 14>.

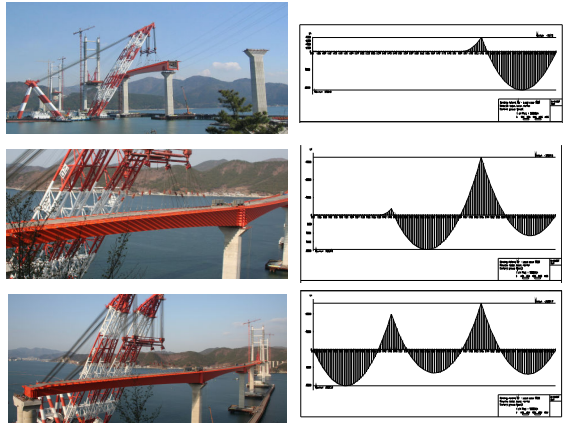


그림 13. 시점교 주형가설에 따른 가설단계해석 (모멘트도)

장경간 합성형교의 슬래브를 순차적으로 타설할 경우 1경간의 선형 콘크리트 슬래브가 2경간의 슬래브 타설시 상향 변위를 발생하며 콘크리트 슬래브 상면에 허용균열 이상의 균열이 발생한다. 따라서 1경간의 슬래브 타설시 2경간에 미리 ballast 하중을 도입하여 교량 전체에 적용하면 균열 없이 장경간의 합성형교의 콘크리트 슬래브를 타설할 수 있다. 그 개념도는 <그림 13>과 같다.

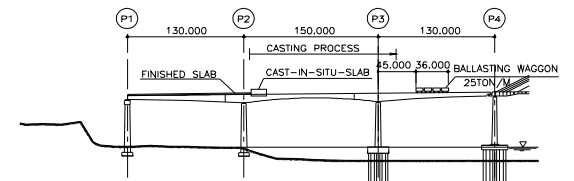


그림 14. Ballast Wagon에 의한 콘크리트 슬래브 타설

3.3 종점교

종점교는 폭원 21.0m, 경간구성 (6.1)+58.9+6@70.0+65.0=550.0m의 강합성 U-type 박스 거더교이며 단일 강박스는 폭 10.0m, 형고 5.0m인 대단면에 5.0m의 캔틸레버 강제 브라켓을 갖도록 계획하였다<그림 15~17>. 주형가설은 클로소이드 선형의 주형을 압출 공법(ILM)으로 시공하며 마지막 두개 지간의 강형을 3,000 tonf F/C에 의해 대블럭으로 일괄 가설하고 콘크리트 슬래브를 타설하도록 하였다.



그림 15. 종점교 주형 가설 개념도

종점교의 상부 구조 해석은 아래의 가설 단계 결과와 같이 종점부에서 주형을 압출하면서 클로소이드에 의한 횡방향 편기를 조정하기 위하여 교축 직각 방향으로 밀어 넣어 편기를 조정한다. P10 ~ P12의 교축 직각 방향 편기 조정량은 1.3 ~ 1.6m이며 이때 0.3634° ~ 1.4038°의 교량회전이 발생하면서 클로소이드 선형에 맞는 압출이 이루어진다.

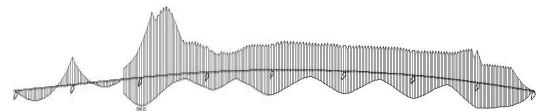


그림 16. 종점교 가설 단계 해석 (모멘트도)

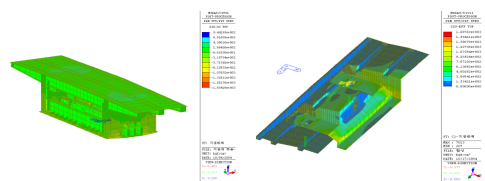


그림 17. 내부 지점부 및 연결 지점부 FEM 상세 해석

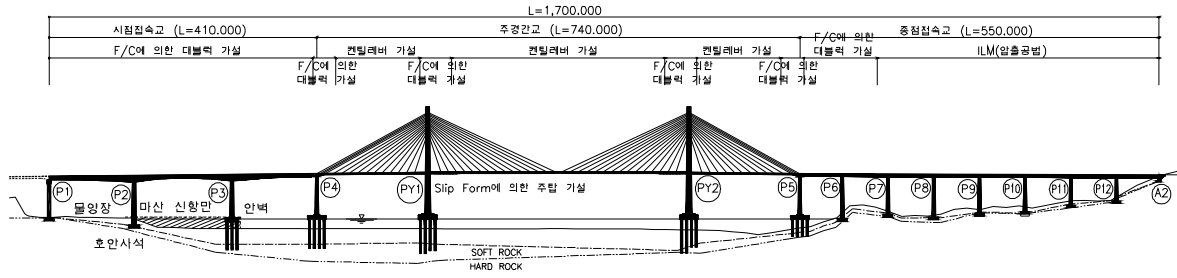


그림 18. 마창대교 상부 구조 주요 가설 공법 현황도

4. 마창대교의 시공

4.1 주경간교

4.1.1 기초공

(1) RCD

주경간교(사장교) 기초는 대구경(d=3.0m) 현장타설 말뚝공법으로 깊은 심도까지 시공할 수 있고 최대 연직지지력을 기대할 수 있는 RCD(reverse circulation drilling)공법을 적용하였다. 강관 케이싱은 설계상 토사 구간을 지나 풍화암 1m까지 근입시켜 공벽을 지지하는 희생 강관 역할을 하고 암반 구간은 희생강관 없이 RCD 굴착완료 후 콘크리트를 타설하여 rock socket이 지지력을 형성한다<표 4, 5>.

(2) PC house

거푸집과 철근 조립 작업의 효율적인 수행을 위하여 육상에서 여러 개의 프리캐스트 콘크리트 세그먼트를 제작하여 기 시

공된 RCD 파일헤드의 브라켓 위에 설치하고 차수 작업을 시행하여 파일캡의 거푸집 대용할 목적으로 PC house를 적용하였다<그림 19>. F/C의 인양 능력 및 작업 조건을 검토하고 인양을 위해 제공되는 equalizer sling, main sling 및 shackle 등 관련 속구류 및 PC house에 설치되는 리프팅 러그(lifting lug)의 구조 검토가 필수적이다.

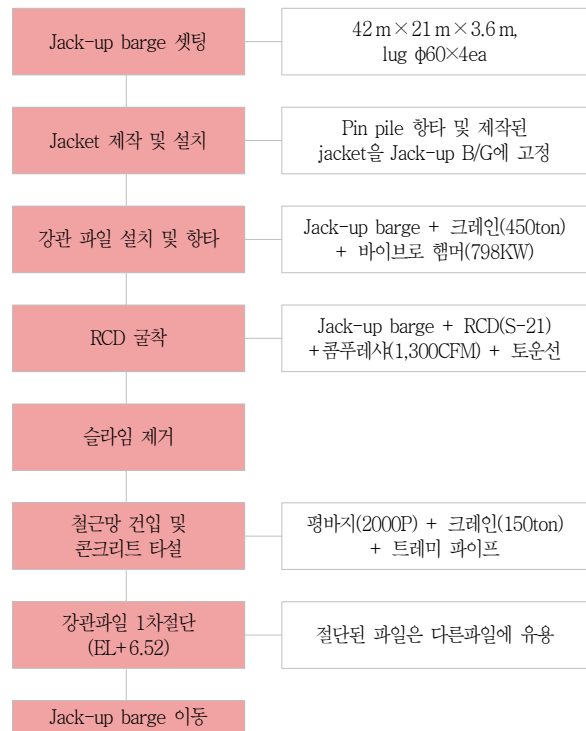
(3) 파일캡

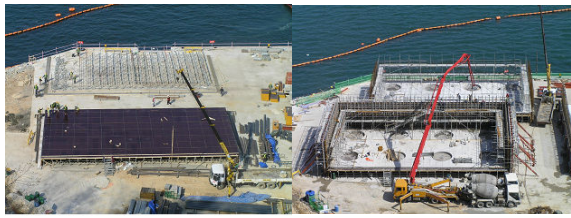
RCD파일 상부에 기 설치된 PC house의 조인트(joint) 연결용 급결콘크리트를 시공하여 차수 및 배수를 한 후 1단에서 5단까지 순차적으로 철근 가공 조립 및 콘크리트를 타설하여

표 4. 대구경 현장타설말뚝 현황

구분	주 탐		사장교 교각		시점측/접속교 교각		
	PY1	PY2	P4	P5	P2	P3	
교각 높이	156.1m		57m		57.2m	53.3m	
기초 규모	51.6 x 29.1 x 8		36 x 28.5 x 4	28.5 x 28.5 x 4	17 x 17 x 4.5	28.5 x 21 x 5	
RCD	직경	Φ3,000	Φ3,000	Φ3,000	Φ3,000	Φ2,500	Φ3,000
	배열	4x7 (28본)	4x7 (28본)	4x5 (20본)	4x3 (12본)	4x4 (16본)	4x3 (12본)
콘크리트 강도	350 kgf / cm ²						
근입장	2D	2D	Max.3.2 D	2D	Max.3.1 D	Max.3.2 D	
허용지지력 (tonf/ea)	3,245	3,256	2,840	5,378	2,903	4,715	
주철근	H51 (80가닥)	H51 (100가닥)	H51 (68가닥)	H51 (68가닥)	H35 (48가닥)	H41 (72가닥)	
말뚝길이	45.92 m	48.22 m	44.92 m	26.52 m	21.82 m	42.63 m	

표 5. 대구경 현장타설말뚝 시공 순서도





(a) PC house 바닥 폼 조립 (b) 철근조립 및 콘크리트타설



(c) PC house shackle 체결 (d) 물량장에서 리프팅



(e) PC house 거치 (f) PC house 세팅 완료

그림 19. PC house 시공 단계별 전경 사진

기초를 형성한다. 주탑 파일캡은 크기가 21 m×51 m×6 m이고, 설계기준강도가 350kg/cm³인 대형 매스콘크리트로서 저발열 시멘트를 사용하여 타설하였다<표 6>.

4.1.2 주탑공

(1) 주탑

주탑은 안전성, 공기 단축을 고려하여 EL. 119.15m 까지는 슬립폼공법을 채택하였고<표 7>, 그 이상은 정착박스 및 전이파이프(transition pipe) 설치에 따른 간섭을 고려하여 수직상승거푸집(climbing form)을 적용하였다. 2교대 작업으로 (24시간 작업) 철근조립 및 콘크리트 타설의 진행과 더불어 스

표 6. 파일 캡 주요 물량표

구분 (Lot 높이)	1 Lot (1.5m)	2 Lot (1.5m)	3 Lot (1.5m)	4 Lot (1.5m)	5 Lot (2m)	계 (8m)	
PY 1	철근(tonf)	238	238	239	244	187	1,147
	콘크리트(m ³)	2,180	2,180	2,184	22,33	1,715	10,492
PY 2	철근(tonf)	238	238	239	244	187	1,147
	콘크리트(m ³)	2,180	2,180	2,184	22,33	1,715	10,492

표 7. 주탑의 슬립 폼 시공 현황

구분	시공 높이 (m)	콘크리트양 (m ³)	실 시공 일수(일)	일 시공 높이(m)	일 타설량 (m ³)
PY1	111.25 (EL.7.9 ~ 119.15 m)	6,475	62	1.8	104.4
PY2	111.25 (EL.7.9 ~ 119.15 m)	6,399	68	1.6	94.1
합계	222.50	12,874	130	1.7	99.3

틸로드(steel rod)에 jack & yoke로 지지된 슬립폼을 연속적으로 슬립업(slip-up) 시키고, 그 조작을 반복하여 균일한 형상 혹은 변화단면을 형성하여 시공이음이 없는 일체성의 구조물을 시공하였다<표 8>.

(2) Mock-up test

슬립폼 작업 여건 및 작업 속도 등을 사전에 파악하고 슬

표 8. 주탑 시공 순서도

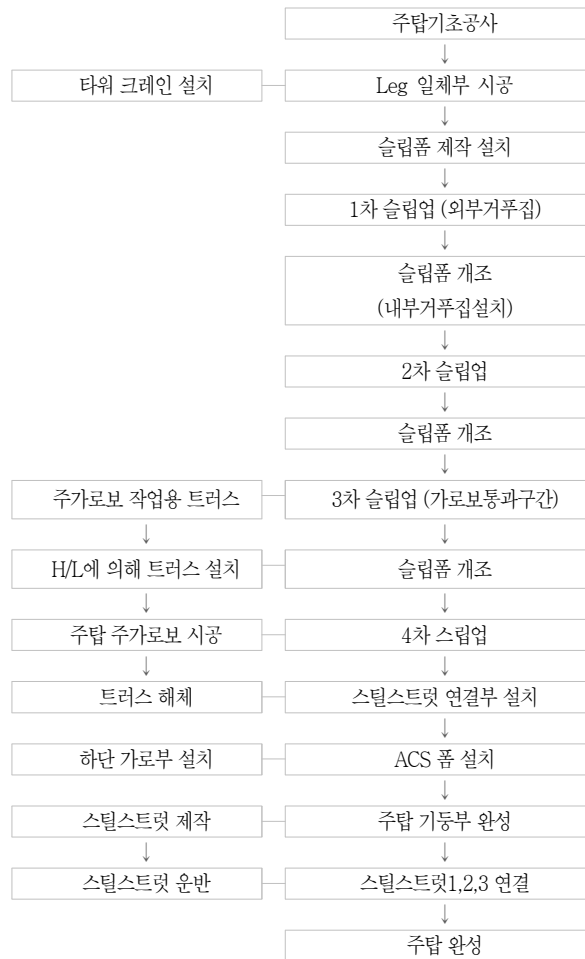




그림 20. Mock-up test 전경

립업 작업 시 최적의 콘크리트 배합설계 도출과 운행 시 문제 발생을 최소화하기 위하여 mock-up test를 실시하였다.

(3) 가로보

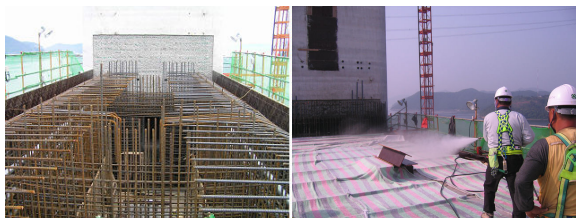
가로보는 주탑의 다리(leg)와 다리를 연결하며 철근, 강연선 쉬스(sheath)관 등의 매입물이 많고 교량 받침이 설치되어 사장교 주두부가 안착하는 중요한 구조물이다. 공기, 안전 및 품질을 확보를 위하여 가로보 시공시 받침용으로 사용할 지지 가설 형식의 트러스 거더를 주탑 기초 상에서 제작한 후 heavy lifting하여 설치한 후 거푸집 조립, 철근 작업 및 콘크리트 작업을 수행하는 공법을 적용하였다<그림 21>.

(4) 강제 스트럿(steel strut)

상단 강제 스트럿은 양쪽 주탑 leg를 연결하는 부재로 흔히



(a) 가로보 제작용 트러스거더 (b) 트러스의 heavy lifting



(c) 가로보 철근 배근 (d) 콘크리트타설 후 습윤양생

그림 21. 주탑 콘크리트 가로보 시공 전경

연결되서 스트럿 자체는 축력을 받지만, 핀 연결부에서 횡방향 모멘트, 축력, 전단력으로 인한 집중하중을 함께 받는다. 가설 시 타워크레인에 의해 인양된다<그림 22>.

4.1.3 상부공

(1) 보강형 강제 세그먼트의 제작 및 조립

보강형 세그먼트는 마산항 근처의 제작 공장에서 제작되고 조립시 중량에 의해 침하가 없는 지반의 조립대에서 강교 특성을 고려하면서 무응력 상태에서 실시하였다.

(2) 프리캐스트 슬래브

슬래브의 두께는 일반 구간에서 290mm, 압축력이 큰 주탑 양측의 2번째 케이블 정착구까지는 350mm로 사용하였다<표 9>. 프리캐스트 슬래브는 제작장에서 최소한 60일 재령을 갖도록 하여 크리프와 건조수축의 영향을 최소화하였다.

(3) 주두부

주탑 주두부는 제작 공장에서 강제 보강형 대블럭으로 조립되어 현장의 물량장으로 운반된 후 콘크리트 슬래브를 타설하였다. 대블럭 주두부는 3,000톤 해상 F/C에 의해 주탑의 가설위치까지 운반 및 인상(인상고 64m)되어 임시 케이블을 사용하지 않고 영구 케이블을 직접 설치하면서 비대칭 가설 방법에 의하여 시공되었다.



(a) 1단 스트럿 설치 (b) 2단, 3단 스트럿 설치 완료

그림 22. 강제 스트럿 가설 전경

표 9. 프리캐스트 슬래브 시공 현황

구분	철근 물량(ton)	Panel 무게 (ton/ea)	콘크리트 량 (m ³ /ea)	수량 (ea)
SEG1	2.393	12.5	5.212	16
SEG-2,6	SEG-2 : 4.134 SEG-6 : 4.859	22.3	9.314	46
SEG-4,7	SEG-4 : 4.134 SEG-7 : 4.859	22.3	9.314	46
SEG-3,5	SEG-3 : 4.432 SEG-5 : 5.262	24.6	10.276	184
Total	1240.744	6778	2,831	292



그림 23. F/C에 의한 주탑 주두부 비대칭 가설 전경

(4) 보강형 표준 세그먼트 가설

12.45m의 강형 세그먼트를 제작하여 바지선으로 해상 운반 후 데리크레인으로 인양하여 캔틸레버공법으로 조립하였다. 그 후 PC 판넬을 배치하고 각 판넬이 연결되는 보강형 플랜지 위치를 현장 타설로 연결하였다. 보강형 표준 세그먼트 가설시 1사이클 시간은 13일로 계획 운용되었다<표 10, 11>

□ 데리크레인(Derrick crane)

보강형 표준 세그먼트 가설시 강형, PC 판넬과 케이블 정착

표 10. 보강형 표준 세그먼트의 제원

구분	각종 제원	
강형	크기	12.45 m(길이) × 21.0 m(폭) × 2.15 m(높이)
	중량	75.1 tonf
PC panel	크기	9.575 m(길이) × 3.8 m(폭) × 0.29 m(두께)
	중량	25 tonf
데리크레인	인양 능력	100 tonf

표 11. 보강형 표준 세그먼트 가설 공정표

공종	일수	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
강형 인양		■												
용 접			■	■	■	■	■	■						
1차 긴장								■						
PC 판넬 설치									■					
이음부 콘크리트 타설/양생										■	■	■		
2차 긴장													■	
데리크레인 이동														■

구의 인양, 거치 및 설치 작업을 위하여 크레인의 일종인 회전형 데리크레인을 사용하였다<그림 24 ~ 26>.

□ 연결부 및 현장 타설 콘크리트

강형과 콘크리트 슬래브의 완전 합성에 필요한 좁은 폭의 연결부에서는 철근 배근과 무수축 콘크리트의 세심한 시공이 요구된다. 따라서 타설 2시간 전부터 살수하여 습윤상태를 유지하면서 콘크리트 타설 후 정량의 양생제를 도포하고 양생포를 덮어 습윤양생을 실시하였다.

(5) 케이블 가설

마창대교의 케이블은 주탑 PY1, PY2 각 60개씩 총 120개의 케이블로 지지된다. 케이블은 공장 제작으로 품질관리가 용이하고 현장에서 별도의 조립 없이 반입 즉시 시공 가능한 parallel wire strand를 사용하였다. 강연선의 원소재는 와이어드 B82MnQL을 선재로 사용하며, 소선을 염산, 인산, 붕소 등으로 표면 처리한 후 인발 작업을 거쳐 케이블로 제작된다. 케이블의 피복은 고밀도 폴리에틸렌으로 케이블과 동시에

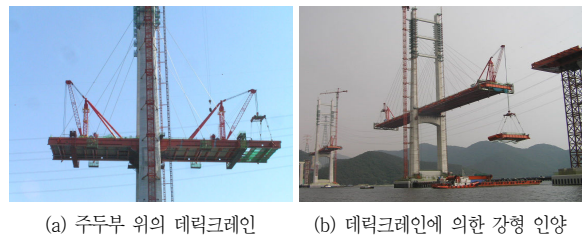


그림 24. 데리크레인인강형 인양 전경



그림 25. 주경간 키 세그먼트 연결 전경



그림 26. PC 판넬 가설 전경

표 12. 케이블의 구성 및 제원

순	소선수	단면적(mm ²)	파단하중(kN)	허용하중(kN)	수량
1	121	4,657	7,776	3,499	16
2	127	4,887	8,161	3,672	8
3	139	5,349	8,933	4,020	4
4	163	6,273	10,476	4,714	16
5	187	7,197	12,019	5,409	28
6	199	7,658	12,789	5,755	16
7	241	9,274	15,488	4,970	16
8	253	9,736	16,259	7,317	8
9	357	12,968	21,657	9,746	8

사출하여 피복을 형성하며, 케이블 보호와 풍우진동에 저항하는 역할을 하게 된다.

□ 피로 시험

제작된 케이블 중 $\phi 7 \times 121$, $\phi 7 \times 187$, $\phi 7 \times 253$ 세 종류에 대해 피로 시험을 실시하였다. 피로시험은 사장교 케이블의 일반적인 국제관리기준인 PTI(post tensioning institute)의 '2001 PTI recommendation for stay cable design testing and evaluation, section 4.2 acceptance test of stay cables'에 따라 케이블 시스템의 정적, 동적 특성을 평가하는 시험으로 미국의 CTL사에서 실시하였으며 시험 결과 모든 기준을 만족하였다.

(6) 피어테이블(pier table)

P4, 5의 코핑(copping) 위에 설치된 피어테이블은 육상에서 강형 제작 및 박스 내부의 ballast concrete 타설하여 총 중량 P4 - 1,320 tonf / P5 - 1,314 tonf의 블록을 3,000 tonf 해상 F/C에 의해 교각과 가설 벤트 위에 설치하였다<그림 27>.

(7) 타이다운(tie down)

사장교의 구조 시스템상 만재하시 측경간 교각부에서 부반력이 발생한다. 이에 대한 방안으로 P4, 5에 수직으로 연결되는



(a) 피어테이블 설치 (b) 피어테이블 설치 완료

그림 27. 피어테이블(pier table) 설치 전경

타이다운 케이블을 설치하였다<그림 28>. 타이다운 케이블은 SSI2000 케이블시스템 정착구로 시공하였고, 이 정착구는 상판의 종방향 이동량에도 정상적으로 작동할 수 있도록 케이블 정착구를 설치하였다.

(8) 내풍 케이블

사장교는 사장 케이블에 의해 상판의 하중을 지지하는 구조이므로 보강형을 캔틸레버로 가설 중에는 불안정한 구조를 갖는다. 보강형 가설시 캔틸레버 길이가 가장 길 때 태풍에 의해 발생 가능한 횡력에 대해 안정적으로 대처하기 위하여 측경간 양측에 콘크리트 블록을 매단 스톱 케이블 강연선을 사용하여 보강형에 긴장 정착구를 설치하는 방식으로 내풍 케이블을 시공하였다<그림 29>.

4.2 시점교

4.2.1 하부공

시점측 접속교의 기초는 육상 직접 기초(P1)과 RCD기초(P2~P3)를 적용하였으며 기둥은 수직상승거푸집(climbing form), 코핑(coping)부는 시스템 폼을 사용하여 시공하였다<그림 30>.

4.2.2 상부공

(1) 강교 가설

시점측 접속교는 3개의 대블럭으로 구성되어 있으며, 마산항 제작 공장에서 대블럭을 조립하여 모듈 트랜스포터(module transporter)로 마산항 4부두까지 육상 이동하였다. 3,000

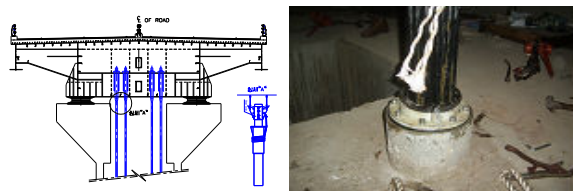


그림 28. 교각 4, 5의 타이다운케이블(tie down cable)



(a) 내풍 케이블 설치 전경 (b) 내풍 케이블 긴장 정착구

그림 29. 내풍 케이블 설치 전경

표 13. 시점교 대블럭 강형 제원

구분	무게(tonf)	길이(m)	가설 순서
SBL-01 (P1 ~ P2)	1664.8	126.10*20.0*9.64	3
SBL-02 (P2 ~ P3)	1948.2	141.00*20.0*9.71	2
SBL-03 (P3 ~ P4)	2038.9	1	



(a) 대블럭 지조립 (b) Transporter를 이용한 강교 운반



(c) 강교 인양 (d) 해상 운반



(e) SBL-03 (P3~4) 설치 (f) 강교 설치 완료

그림 30. 시점교 강형 가설 전경

tonf F/C로 인양 및 가설 위치로 해상 이동하여 잠금장치(locking device)에 의해 임시 고정 및 설치하는 대블럭 일괄 가설 공법을 적용하였다.

(2) 상부 슬래브 시공

시점교의 슬래브 타설 방법은 구조적으로 명확한 선행재하 방식의 균형하중을 가하여 주형의 응력을 줄이고 슬래브의 균열을 방지할 수 있는 신공법인 ballast wagon을 이용한 폼 트레블러(form traveller) 순차 타설을 실시하였다(2경간 648 tonf, 3경간 900 tonf ballast 하중 재하).

□ 폼 트레블러(form traveller) 설치

폼 트레블러(form traveller) 및 폼 워크(form work)의 설치, 해체 작업은 지상에서 크레인을 이용하여 이루어졌으며, 폼 트레블러와 폼 워크의 설치 시에는 교량의 횡단 및 종단의 3차



(a) 폼 트레블러



(b) Ballast wagon (c) 슬래브 타설 전경

그림 31. 시점교 ballast wagon에 의한 슬래브 타설 전경

원 계획고 변화를 정확히 측량하여 경간 중앙부로 진행할수록 누적되는 오차가 적도록 하였다.

□ Ballast wagon

Ballast wagon 설치 후 5톤 트럭 2대를 이용하여 물을 운반하고, 교각 하부에서 양수기를 2대 설치하여 ballast wagon 내부에 물을 채워 하중을 재하 하였다<그림 31>.

4.3 종점교

4.3.1 하부공

종점교 하부는 7개의 교각과 1개의 교대로 구성되며 기초는 상부 구조로부터의 하중을 직접 지반에 전달시키는 형식의 직접기초를 적용하였다. 교각의 평균 높이가 50m 정도이므로 작업의 안전성 확보 및 표준화에 의한 품질 확보가 용이하고 공기 준수를 위해 여러 세트의 장비 투입이 가능한 수직상승 거푸집을 사용하여 4m 씩 분할 타설하였다.

4.3.2 상부공

(1) 강교 가설

종점교는 교대 후면의 압출야드(launching yard)에서 기 운반된 거더를 조립하여 추진하는 ILM 공법과 직선과 클로소이드가 포함된 구간(P5~P7)의 해상크레인을 이용한 대블럭 가설 공법을 혼용하였다. 강형의 압출은 강형 후방에서 유압잭에 의한 pushing 방식을 사용하였으며 시공성 및 안전성을 고려하여 추진코를 설치하였다. 제작 공장에서 종방향으로 3개로 분리 제작된 강형을 교대 후방의 ILM yard로 운반하여 현장에서 단품을 용접하여 조립하였다. 총 37개의 세그먼트를 공장



(a) 주거터 단품조립

(b) 주거터 조립



(c) 브라켓 설치

(d) ILM launching 완료



(e) 대블럭 해상 운반

(f) 대블럭 가설

그림 32. 종점교 ILM 및 대블럭 가설 전경

제작 ⇒ 현장 운반 ⇒ 단품 조립 ⇒ 압출레일 운반 ⇒ seg. to seg. 대조립의 순으로 강형을 제작하였다<그림 32>.

(2) 상부슬래브 시공

설계시 종점교의 상부 슬래브 콘크리트 타설을 위하여 캔틸레버부는 대형 폼 트레블러, 박스부는 재래식 거푸집을 사용하는 방법으로 되어 있었다. 또한, 상부 슬래브 콘크리트 1회 타설 구간은 30m 연속으로 계획되어 지점부의 부모멘트를 제어할 목적으로 ballast wagon을 병용하였다<그림 33>. 재래식 거푸집 및 동바리는 설치 및 해체 시 많은 시간이 소요되어 재래식 거푸집 대신 반단면 PC 판넬을 이용한 공법으로 변경하여 시공성을 향상시키고 소요 공기를 단축하고자 하였다. Lattice bar가 부착된 PC 판넬은 현장치기 콘크리트와 일체화되어 완전 합성 작용에 의해 외력에 저항하는 거푸집 겸용 PC 바닥판이다. 작업 발판, 동바리가 필요 없고 이에 따른 별도의 해체 공정이 없어 공사중 추락 사고에 대한 재해 위험율이 낮으며 단순 공중에 의한 반복 작업으로 신속한 시공이 가능한 공법이다.

5. 맺음말

마창대교는 국내에서 민간제안사업에 의해 시공되는 최초의 해



(a) 반단면 PC 판넬 제작

(b) 반단면 PC 판넬 야적



(c) 반단면 PC 판넬 상차

(d) 반단면 PC 판넬 거치



(e) 상부 슬래브 철근 조립

(f) 콘크리트 타설

그림 33. 종점교 콘크리트 슬래브 시공 전경

상장대교량으로 향후 민간투자에 의한 장대교량 건설의 시금석이 될 것이다. 마창대교는 계획, 설계, 시공단계에서 최적의 구조적, 경제적 효율성 및 고품질의 안전한 시공을 위해 많은 노력을 하였다. 향후 유사 사업의 좋은 사례가 되길 바라며 사업의 성공을 위하여 협조해주시고 또한 현장에서 성공적인 완공을 위하여 노력하신 관계자 여러분의 노고에 진심으로 감사를 드립니다. 끝으로 본 사업이 장대교량의 계획, 설계 및 시공기술 개선에 작은 밑거름이 되길 바라며 앞으로도 많은 조언을 당부합니다.☞

참고문헌

1. (주)마창대교, 마창대교 민간투자사업 실시설계 종합보고서, 공사시방서, 구조 및 수리계산서, 설계도면, 2005.
2. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2005.
3. 대한토목학회, 케이블강교량설계지침, 2006.
4. 한국도로공사, 서해대교 건설지, 2000.
5. *PTI Recommendation for Stay Cables design, Testing and Installation*, 4th Edition, 2000.
6. Gimsing, Niels J., *Cable Supported Bridges, 2nd Edition*, John Wiley & Sons, 1997.
7. Walther, R., *Cable Stayed Bridges*, 2nd Edition, 1999.