

서해대교 시공 공법 소개

(주) 대림 산업 / 윤 태섭



# 서해대교 시공 공법 소개

## Construction Method of Seohae Grand Bridge.

이윤 태 섭  
Yoon, Tae Seob

### Abstract

Since 1993, Seohae grand bridge has been continued construction for 7 years and will be completed late this year. The bridge is a part of west sea castal highway and consists of 3 types of bridge including precast segmental method, free cantilever method and cable stayed bridge. A cable stayed bridge is the core of this bridge and it consists of 5 span, symmetrical cable-stayed bridge with a total length of 990 m. The main span between two H-shaped pylons extending approximately 180 M above massive foundation of a cable stayed bridge is 470 m long and an approach span of that is 260 m long respectively.

The circular cofferdam with 16 ea of 25 m diameter flat type sheet pile had been applied to construct foundation. The slipform method had been applied for forming of con'c of two H-shaped pylons with 3 cross beams respectively which is varied horizontally and vertically.

The deck has been erected with balanced cantilever method using movable derrick crane. The stay cables is a bundle of parallel individually protected, 7 wire high tensile strands. The strands is hot deep galvanized and sheathed with a tight high density polyethylene coating . A petroleum wax fills all the inter-wire voids. The bundle of strands to prevent from deterioration due to the ambient problem covered with high density polyethylene pipe.

The Isotension method has been applied for the stressing of cable strands to ensure uniformity of force in all the strands of a syay and such works has been performed on the stay specially provided in the pylon.

keywords : Cable stayed bridge, circular cofferdam, slip-form, balanced cantilever method, Isotension

### 1. 서 론

서해대교는 서해안 고속도로의 아산만을 횡단하는 총연장 7.31km 의 왕복 6차선 교량으로 P.S.M.(Precast Segment Method) 및 F.C.M.(Free Cantilever Method)에 의한 콘크리트 상자형 연속교와 합성형 사장교의 3가지 형식으로 구성되어 있다. 본고에서는 국내 최초로 시공한 바 있는 합성형 사장교의 기초, 주탑, 상판 및 cable 가설 공법의 현장 실제 적용 사례를 중심으로 기술코자 한다.

### 2. 사장교 설계 특징

서해대교의 사장교는 총 연장 990m, 주 경간장 470m, 주탑 높이 182m, cable 본수 144개의 Multi-cable 에 의해 steel girder 와 프리캐스트 슬래브로 구성된 주형이 지지되는 합성형 사장교이다.(그림1 참조) 이러한 합성형의 장점은 순수 강형(steel girder)에 비해 강성이 크다는 점과 순수 콘크리트 부

\* 대림산업(주) 부장

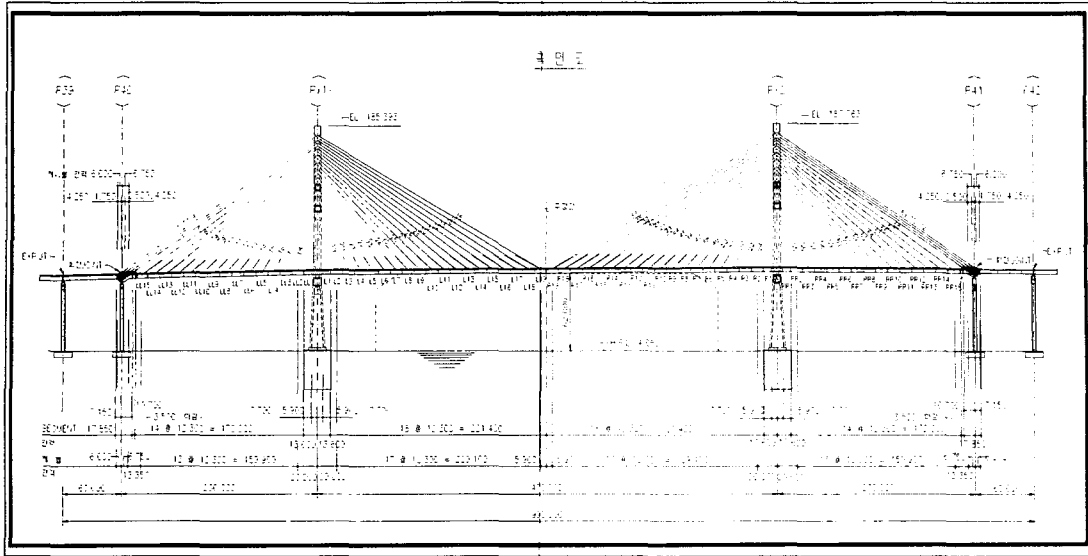


그림 1 서해대교 사장교 전경

재에 비해 자중의 부담이 적다는 점에서 콘크리트와 강형 재료의 상호 보완적인 역할을 할 수 있다. 그러나 시공시 거동 및 시공단계 해석이 복잡하여 1980년대에 들어와서 고성능 컴퓨터의 보급과 함께 경제성이 뛰어나 많이 적용되고 있으며 근대 사장교의 형식은 표 1 과 같다.

표 1. 형식별 사장교 시공 실적

Steel girder 교	Con'c girder 교	Composite girder 교
1. Tataru Br.(일본, 1999, 890m)	1. Skansundet Br.(노르웨이, 1993, 500m)	1. 양포대교(중국, 1994, 620m)
2. Normandi Br.(프랑스, 1996, 860m)	2. 올림픽 대교(한국, 1988, 180m)	2. 남포대교(중국, 1992, 450m)
3. Tsurumi Br.(일본, 1994, 520m)		3. 서해대교(한국, 2000, 470m)
4. Bay Br.(일본, 1991, 450m)		4. Second servern 교(영국, 1997, 450m)
		5. My chuang(베트남, 1999, 420m)

교량명(국가, 준공연도, Main span 장)

### 3. 기초

#### 3.1 기초의 형식

해상에 설치된 사장교의 기초는 크게 우물통, 대구경 현장말뚝, 직접 확대기초의 3가지 형식이 주로 사용되고 있으나 서해대교는 가물막이를 설치후 직접 굴착한 뒤 육안 확인이 가능한 직접기초로 설계되어 있다.

기초의 크기는 교축직각 방향이 66m, 교축방향이 28m 의 장방형 기초로 설계 소요 접지압은 200ton/m<sup>2</sup>으로 일반 풍화암에 기초를 설치하도록 되어 있어 가물막이 후 터파기용 엄지말뚝 설치시 지지심도를 결정하는데 많은 어려움이 있었으며, 굴착전 지지층 심도 결정을 위해 현장 Boring 10개 소/PY, Geotomography, Televue 탐사등 많은 시험을 실시하여 PY1은 EL -26m, PY2 는 EL -34m 심도에 기초를 설치하였다.

### 3.2 가물막이

서해대교의 기초는 수심 22m, 최고유속 1.6m/sec 의 조류속이 빠르고 탁도가 심한 해상부에 위치하게 되어 있어 이중격벽식 sheet pile, 강관 널말뚝, Flat type sheet pile(cell 식)등 3가지 공법을 검토하였으나, 시공이 빠르고, 안전한 cell식 가물막이 공법을 적용 하였다.

시공방법은 조립장에서 조립한 Flat type sheet pile 156장으로 이루어진 직경 24.85m 높이 25~27m 의 cell을 1300ton 급 해상크레인을 이용 (해상운반→거치→sheet pile 항타) 작업을 시행하고 병행하여 cell 과 cell 사이는 Arc cell을 설치후 내부에 모래 채움작업을 반복하여 가물막이를 축조후 내부에서 dry 상태로 기초공사를 가능토록 하는 가설공법이다.(그림2 참조)

- 1) 가물막이 크기 가로 103m × 세로 138m 2개소
- 2) 가물막이 구성 원형 cell 16개 (직경 24.85m)  
Arc cell 32개 (반경 3.8m)

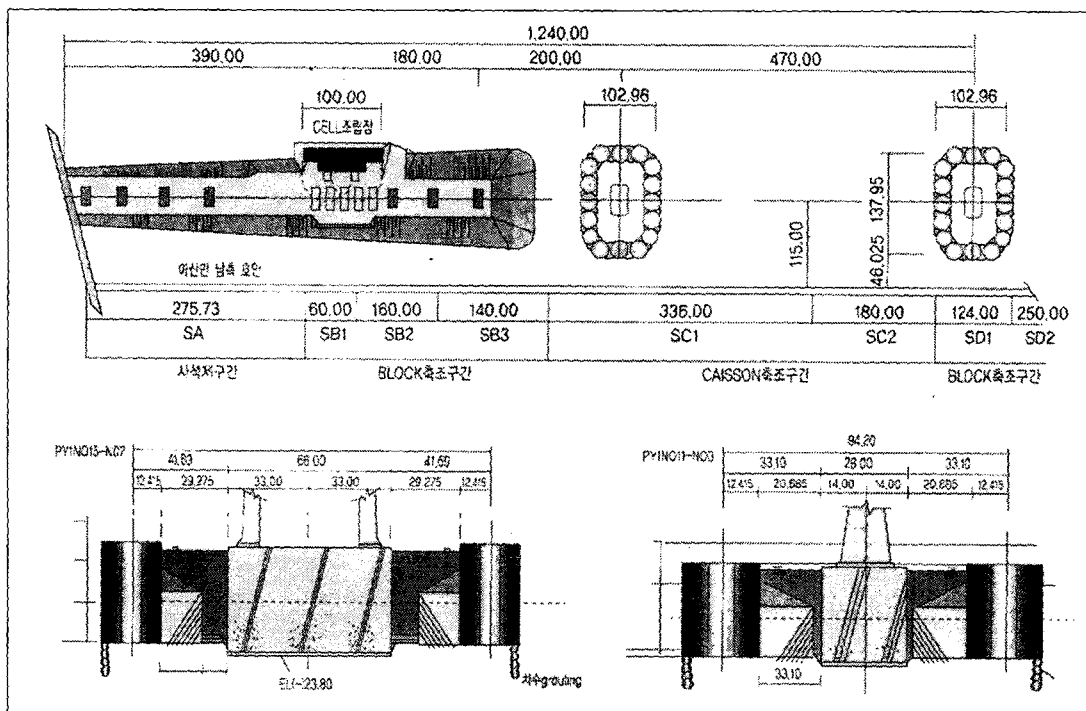


그림 2 가물막이 배치 및 단면도

### 3.3 기초터파기

가물막이 작업을 완료후 풍화암 초입에 근입된 Sheet pile 과 암반 경계부의 절리에 의한 유입수를 줄이기 위해 S.G.R. 차수 Grouting을 실시하였으며, 해상 원지반부터 지지층까지는 엄지말뚝과 Earth anchor를 이용한 토류벽 가시설을 설치하여 지지층까지 굴착하였고, 굴착시 토류벽의 변형을 관측하기 위해 경사계 Earth Anchor Load Cell 등을 설치하여 계측을 실시하였다. 1일 유입수량은 PY1은 3,000ton/일, PY2는 8,000ton/일 로 깊은 심도의 PY2에서 유입수량이 너무많아 저감대책으로 well point 우레탄 방수등을 실시하였으나 큰 효과는 보지 못하였으나 유도배수를 실시하여 효과를 보았다.

### 3.4 기초구체 시공

기초구체는 총 Con'c Volume 약 50,000m'으로 2m 높이로 1회 Con'c 타설 Volume 3,000~4,000m' 씩 C.P.B.(Con'c Placer Boom) 3대를 이용 분할 타설하였고, 수화열에 의한 Crack 방지를 위해 Pipe

Cooling을 실시하였으며 기초공사 시공 일정은 표 2와 같다.

표 2 기초 시공 공정표

공 종	1994년				1995년				1996년				1997년				1998	비 고	
	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3		
1. 가물막이	PY1	■																	
	PY2					■													
2. 터파기	PY1					■													
	PY2									■									
3. 기초구체 시공	PY1									■									
	PY2																■		

상기표에서 본것과 같이 가물막이에 의한 직접 기초 시공법은 Dry work 에 의한 가장 확실한 기초 시공법이라 할 수 있으나 공사기간이 길고 비용이 많이 들어 해상 장경간 사장교나 현수교에서는 대구경 현장 타설 말뚝의 설계가 바람직하다고 할 수 있겠다.

#### 4. 주탑

##### 4.1 설계 특징

서해대교의 주탑은 그림 3와 같이 II형 형상으로 중공 콘크리트 2주식 주탑의 구조로 설계되어 있다.

##### 4.2 Column 시공

서해대교의 주탑은 높이가 180m로 고소에서 주로 작업이 이루어지며 단면의 변화가 심하여, 거푸집 설정시 안전성, 형상 및 선형 관리, 공기등을 고려하여 Auto Climb Form 과 Slip Form을 비교 검토(표3 참조) 하여 안전성과 시공속도가 빠른 Slip form 공법을 적용하였다.

##### 4.3 콘크리트 배합설계

Slip form 에 적합한 콘크리트는 일반 재래식 거푸집에서 고려하지 않는 초결시간 및 성형성을 추가로 고려하여야 하며 현장조건에 맞는 최선의 배합설계를 얻기 위해 시공전 Mock-up을 실시하여 선택하였다.(표4 참조)

##### 4.4 가로보 이용

서해대교 주탑은 Leg를 가로지르는 Cross beam 이 3개 있으나(그림3 참조) 고소에서 임시 강제동바리를 이용 타설시 고소에서 부재조립에 따른 안전성 결여 및 공기, PY1 PY2 동시 작업에 따른 가설자재의 2중 투입에 따른 공사비 과다투자등의 문제점 해결을 위해 육상에서 Precast로 반단면을 제작하여 Heavy Lifting Strand Jack을 이용하여 인상 거치후 주탑부와 연결 조인트 콘크리트를 타설하여 완성하였다. (그림4. 참조)

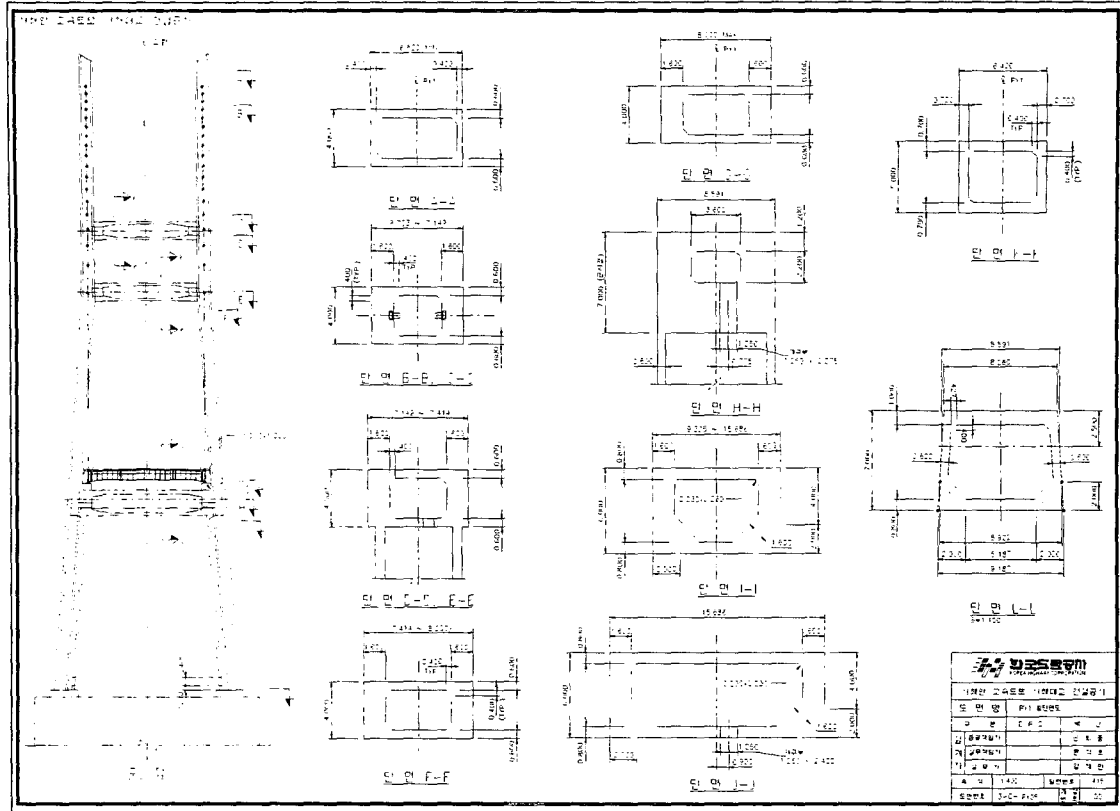


그림 3 주탑 단면도

표 3. 거꾸집 공법 비교

구분	Slip form	Auto Climb Form
구성요소	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Form Panel</li> <li>- Yoke</li> <li>- 유압 Jack 및 Rod</li> <li>- Lattice Girder</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Form Panel</li> <li>- 유압 Jack</li> <li>- Bracket</li> </ul>
Form 설치 및 해체	초기 설치 시간이 많이 걸리나 한번 설치된 Form 은 일체식 거꾸집으로 유압 Jack 을 이용 1회 25mm 씩 인상	매 lift 설치와 해체가 이루어지며 인상은 유압 설비를 이용 자체 인상
1 Lot 당 타설 높이	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 Lift 당 10~15cm</li> <li>- 1일 타설 높이 1.5~3.0m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 Lift 타설높이 2~4m</li> <li>- 1 Lift 타설소요 7~10일</li> </ul>
특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 24시간 연속작업으로 세심한 인력관리 및 품질관리 필요</li> <li>- 시공속도가 빠르다(2.4m/일)</li> <li>- 시공이음이 없다.</li> <li>- 고소작업에 안전하다.</li> <li>- 30m 이상 교각에 경제성이 있다.</li> <li>- 기상여건(강우, 강풍) 예측에 세심한 주의가 필요</li> <li>- 균열발생 요인이 적다</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 주간작업으로 품질관리 용이</li> <li>- 시공속도가 상대적으로 늦다.</li> <li>- 시공이음 처리가 필요</li> <li>- 고소에서 설치, 해체 작업시 상대적으로 안전성 결여</li> <li>- Form Tie 사용에 따른 구속 균열 및 수화열에 의한 균열 발생 요인이 있다</li> </ul>

표 4. Mock-up 시 사용배합 설계

시멘트 종류	강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	골재 치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	단위 수량 (kg)	단위 시멘트 량 (kg)	Fly ash (kg)	Silica fume (kg)	S/A (%)	W/C (%)	모래 (kg)	자갈 (kg)	혼화재 (kg)		초결시간 (HRS)	비고
													AE 감수재	유동화재		
I	400	19	20	-	189	525	-	-	41	36	660	954	-	7	8:54	②
I	400	19	20	-	179	419	104	-	42	38	672	932	-	7	10:54	③
I	400	19	20	-	179	408	104	11	42	38	692	960	-	7	10:27	④
IV	400	19	20	-	180	500	-	-	45	36	746	916	-	5	7:09	①

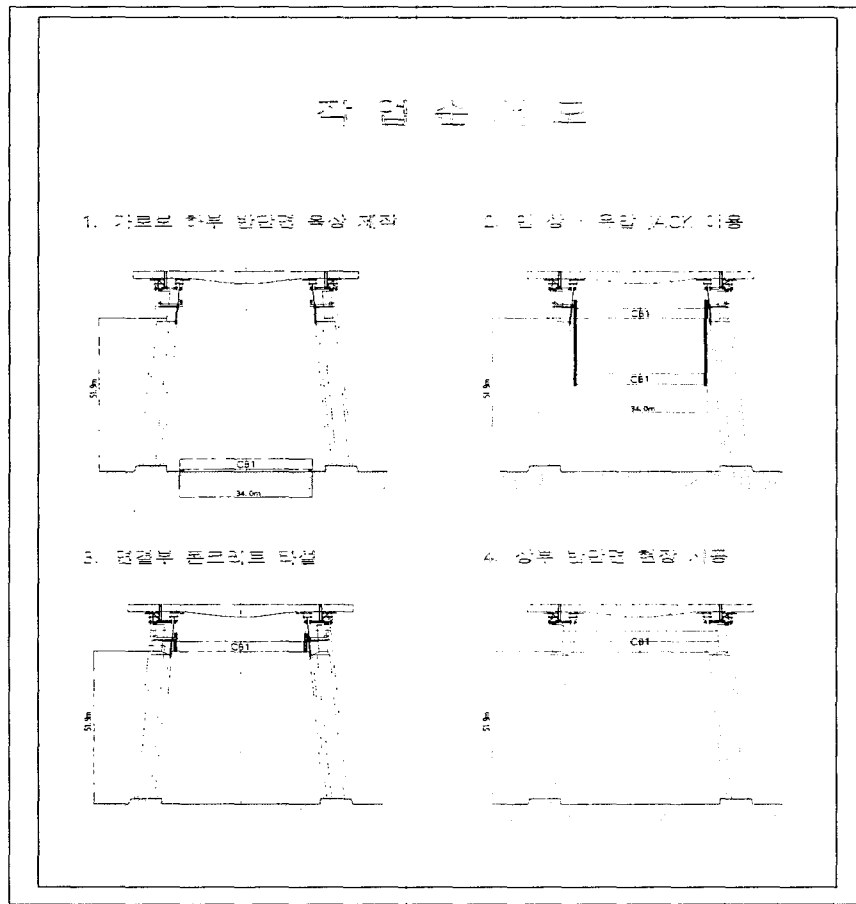


그림 4. 시공순서도

설계시 문제점 및 대책은

- (1) 반단면 Lifting 시 단면의 응력 초과는 종방향 Pre-stressing 도입
- (2) 115% Load Test 실시 : Box 내부 단면에 물을 채워 시험
- (3) 3일 소요기간 동안 바람에 의한 진동 억제 대책 : Tie cable 설치
- (4) Heavy Lifting 에 따른 주탑 변위 : 인상후 Jack을 이용 변위 보정
- (5) 연결부 철근 접이음 길이 확보 곤란 : 기계적 이음 처리



## 5. 상부 Deck 시공

서해대교 상부는 길이 12.3m 의 세그먼트로 나누어 강형과 프리캐스트 슬래브를 Derrick crane을 이용하여 인상거치후 cable을 순차적으로 가설하는 Balanced Cantilever Method 로 설계되어 있어, 각 시공단계별 해석에 따른 케이블 장력 도입 및 형상관리(Geometry Control)가 필요 하였다.

### 5.1 시공단계별 해석 (Stage Analysis)

#### (1) 시공단계 해석의 필요성

만약 전체 완공후 최종 케이블 장력을 시공단계에 그대로 적용 한다면 단계별 시공시 도입된 장력은 최종 완공후 케이블 장력과는 전혀 다른 값을 가지게 되며 종단 Profile 또한 As-Built Profile 과 전혀 다르게 된다. 그러므로 전체계의 최종단계에서 시공순서의 역순으로 강형과 케이블의 장력을 하나씩 제거하는 역해석(Backward Analysis)에 의해 각 cable 의 시공 단계시의 초기장력 및 그에 따른 Geometry를 결정해야 한다. 그리고 전체 완공계 해석보다 시공중에 주형에 보다 많은 응력이 발생할 가능성이 있으므로 각 시공 단계별 응력을 검토하기 위해 시공단계별 해석을 실시해야 한다.

#### (2) 시공 단계 해석시 고려사항

##### 가. 시공순서 작성

시공순서는 실제 작업 가설 순서를 정확히 묘사하여야 하며 주두부 가설 순서, Derrick crane 에 의한 강형 가설 순서, 케이블 가설, 케이블 1차 인장, 슬래브 설치, 조인트 콘크리트 타설, 케이블 2차 인장, Derrick crane 이동등 세그먼트 별 Typical 공정의 내풍안정 케이블설치, Side span closure 순서, Main span closure 순서등을 빠짐없이 순서대로 나열하여야 한다. 서해대교에서는 총 856단계로 나누어 검토하였으며 Typical 공정순서는 그림 5와 같다.



그림 5. 사장교 시공 순서도

##### 나. Cycle Time 작성

사용 Resource(인력, 장비, 자재)와 형상관리에 필요한 측량과 케이블 장력 측정을 감안하여 좌, 우측 Cycle Time을 결정하여야 하며 서해대교의 최종 Cycle Time 은 그림 6와 같다.

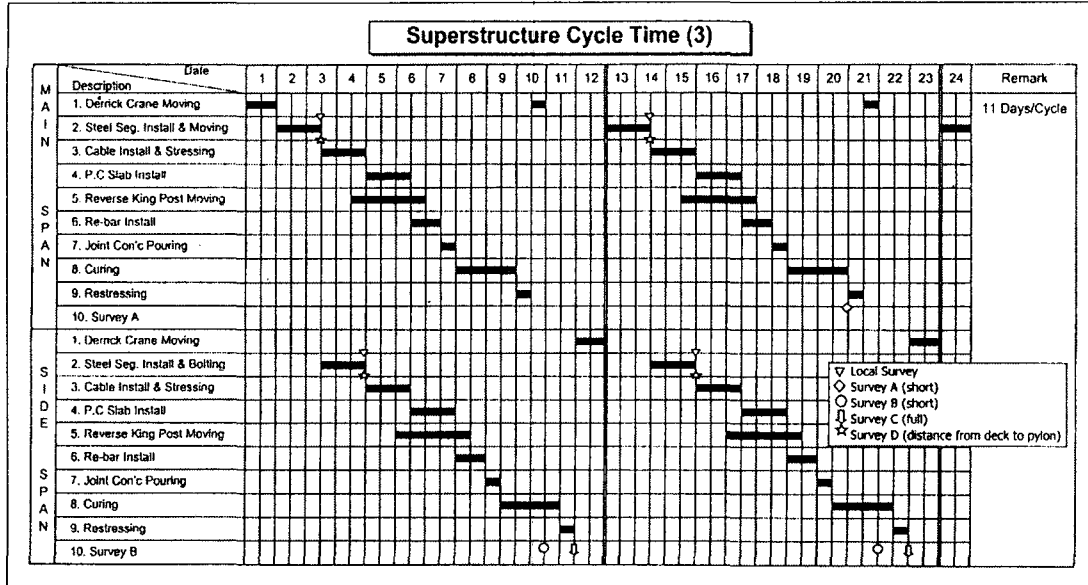


그림 6. Super structure Cycle Time

다. Derrick crane 의 결정

사상교 가설시 가장 중요한 장비인 Derrick crane 은 강형과 프리캐스트 슬래브의 설치가 편리하도록 설계하여야 하며 특히 Derrick crane 의 지점 반력은 단계별 해석의 가장 큰 외부하중으로 작용하므로 단계별 해석과 병행 설계하여야 한다.

라. 부재별 단면계수

주형의 비합성단면과 합성단면에 대한 단면계수를 계산해야 하며, 케이블 단면과 단면계수는 설계시 단면계수를 그대로 적용한다.

마. 작용 하중

강형의 자중, 슬래브자중, Anchorage 자중, Derrick crane 자중, 각종 가설하중등 각종 하중에 대한 단계별 위치를 선정하여야 한다.

(3) 해석시 응력 검토

가. 시공중 cable의 장력 검토

나. 프리캐스트 슬래브의 응력 검토

다. 강형의 응력 검토

(4) 강형의 Camber 계산

강형 제작 캠버는 설계 중단 계획고에 의해 시공단계 해석에 최종 처짐의 반대 방향 값을 더한 값으로 이는 단계별 해석시 산정한 순서대로 시공이 이루어지지 않을 경우 강형의 제작 Camber의 오차를 피할 수 없음을 의미한다.(그림 7 참조)

(5) 시공캠버 (Erection Camber)

각 시공단계별 목표 위치를 계산한 것으로 실제 필드에서는 시공캠버 값을 가지고 관리를 한다.

$$\text{시공캠버} = \text{강형제작 캠버} + \text{현단계 전체 변위}$$

5.2 Cable 장력 도입

케이블의 장력도입은 전체 스트랜드를 설치후 Multi-Jack 으로 한번에 인장력을 도입하는 방법과 스트랜드 한가닥씩 Mono-Jack을 이용하여 인장하는(Iso-tension)등 2가지 방법이 있다. Iso-tension 은 가볍고 손쉬운 Mono-Jack을 이용하는 장점이 있으나 그림 6과 같이 초기 스트랜드 인장값을 계산하여야 하며, Cable 의 장력관리를 Cable 의 길이로 관리할 수 있어 Cable 인장시 반대편의 병행작업이 가능하다.

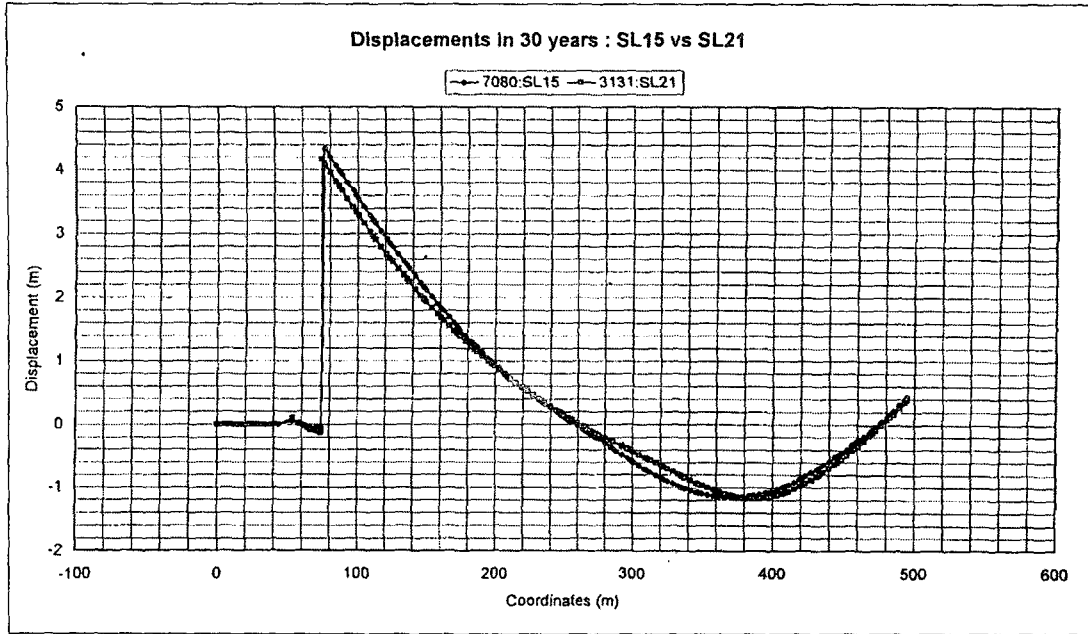


그림 7 강형 제작 Camber

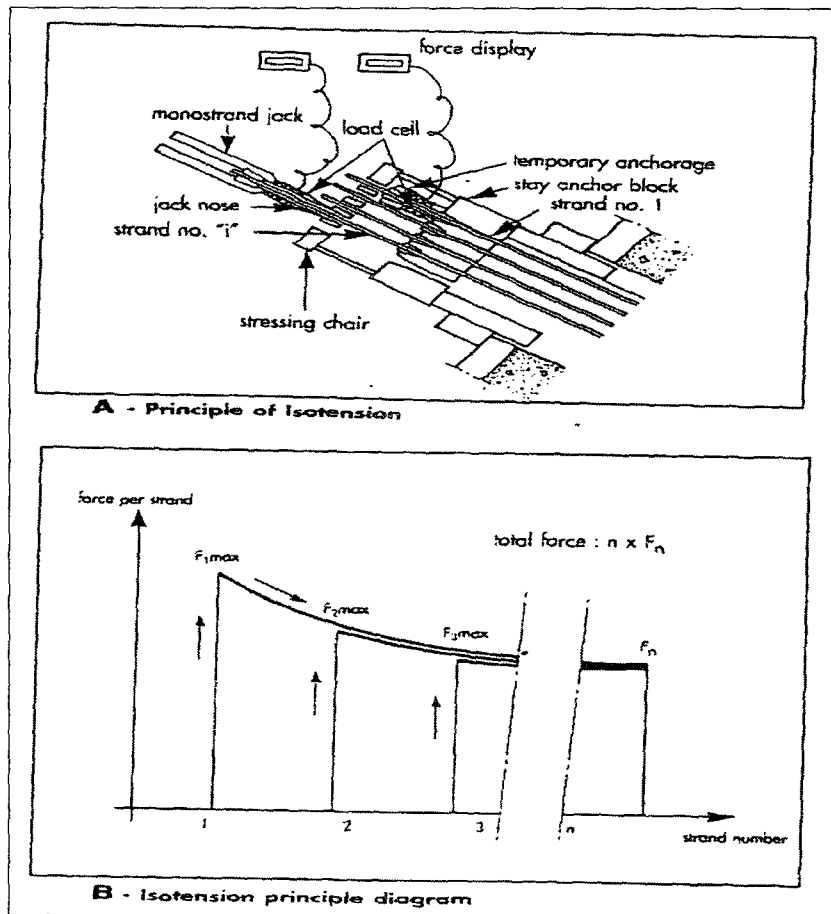


그림 8 Iso-tension의 기본원리

### 5.3. 케이블 장력 조정(Final cable force Adjustment)

사장교는 단계별 해석시 산정한 Deck 및 주탑의 Stiffness 와 가설하중의 오차는 피할수 없으며 이는 최종 상판 완료후 Geometry 오차로 나타난다.

서해대교는 시공중 Geometry 오차로  $\pm 10\text{cm}$ 를 관리 하였으며 최종 집합후 Trial Error Method 에 의해 케이블 장력을 조정하여  $\pm 3\text{cm}$  이내로 조정하였고 이때의 케이블 장력은 활하중 포함시 최대  $0.45 \sigma_{pu}$  에서 최소  $0.15 \sigma_{pu}$ 가 되도록 하였다.

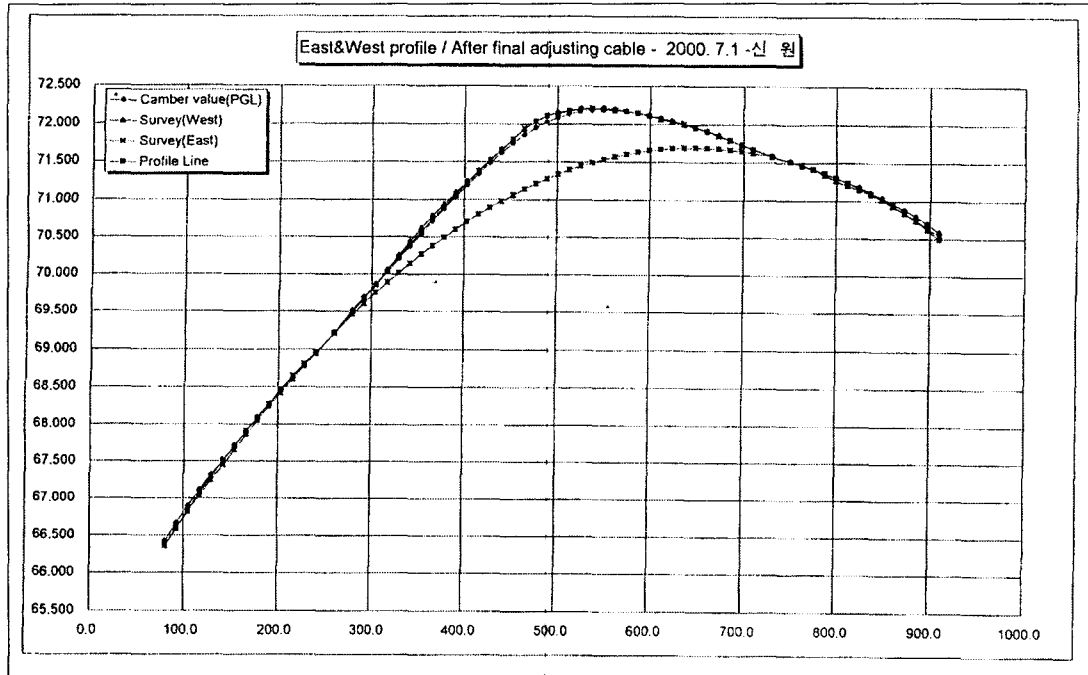


그림 9. 최종 케이블 장력조정후 주형의 Profile

## 6. 결론

서해대교는 국내에서 처음 설계시공한 장경간 사장교로 초기 설계시 감안 하지 못한 점들을 미국 T.Y. Lin 사의 기술지원을 받아 완벽히 국내 기술로 소화할 수 있는 계기가 되었다.

특히 합성형 사장교는 시공전 시공순서, 방법, 사용장비, 자재들을 면밀히 검토하여 시행착오 없이 시행하는 것이 공사의 성패를 좌우한다 할 수 있다. 이번 서해대교를 준공하므로써 국내 장대교 시공시 많은 기술개발 및 신기술 습득 뿐만 아니라 국내 설계 및 시공 기술자의 저변 확대로 향후 장대교량 설계, 시공에 도움이 될 수 있을 것이라 생각한다.

### 참고문헌

- 1) 서해대교 공사지 (2000), 대림산업주식회사
- 2) 서해대교 사장교 보완설계 (1998), 한국도로공사
- 3) 서해대교 사장교 구조계산서 (1998), T.Y.Lin.