

# 광안대교의 계획 및 설계

## Planning and Design of Gwangan Grand Bridge

### 서 식 구

#### 1. 서 론

광안대로는 녹산국가공단-명지대교-신호대교-남항대교-북항대교-광안대로-수영강변도로-경부고속도로로 연결되는 부산시 해안순환도로의 핵심 구간으로써 장차 거가대교(가덕도-거제도)와도 연결될 예정이며, '98년 완공된 해운대 신시가지 발생 교통량 처리와 수영로의 도심교통량 분산 및 부산항 항만물동량의 원활한 처리(항만배후도로 10개년 확충계획의 일환)를 위해 계획되었다.

광안대로의 노선은 남구 남천동 49호 광장에서 출발하여 광안리 해수욕장 해상 1.5km 지점을 가로질러 미래형 도시인 센텀시티를 사이에 두고 갈라지는데 우측으로는 해운대 신시가지 우회고가도로와 접속되고 좌측으로는 센텀시티 지하철도를 통해 수영강변도로를 따라 경부고속도로에 연결되는 총연장 7.42km에 이르는 국내 최대의 해상복층 강교이다.

광안대로 가설지점이 민락매립지 친수공간, 센텀시티, 이기대공원, 황령산유원지 그리고 해운대 해수욕장 등의 천혜의 관광명소로 에워싸여 있고 광안리 해변의 전면을 통과하기 때문에 장대교 형식이 본선교량에 필요하였으며, 장대교량중에서도 직선적인 이미지의 사장교 보다는 황령산의 완만한 능선 및 광안만 해안선과 조화를 이룰 수 있고 주변지역의 낮은 건물들과 어울릴 수 있는 입체적 공간구성에 역점을 두어 부드러운 이미지를 갖는 중앙경간길이 500m의 현수교(200+500+200=900m)로 계획되었다.

본 고에서는 2003년 1월 1일부터 개통예정인 광안대로 현수교(이하 광안대교) 구간에 대한 계획 및 주요부재에 대한 설계내용을 간략하게 소개하고자 한다.



그림 1 광안대교 조감도

## 2. 설계 및 구조해석 개요

### 2.1 설계 개요

광안대교 설계당시의 상황에 있어서 광안대교가 기존의 교량에 비해 규모나 기술적 측면에서 큰 차이가 있는 교량구조물인 점을 감안하여 장대교량에 대한 설계실적이 풍부한 미국, 영국, 일본 등 선진외국의 설계시방서와 설계요령 등을 입수하여 국내시방서와의 상관관계를 면밀히 분석하였으며, 이를 토대로 설계기준(안)을 작성한 후 자문위원회의 심사를 거쳐 「광안대로 설계시방서」(1993. 4)를 제정하였다. 현수교 설계에 사용된 각종 설계기준 및 설계요령을 표 1에 정리하여 나타내었다.

광안대교의 구조규격은 표 2와 같으며, 구조형식의 특수성 및 가설지역현황 등을 종합적으로 고려하여 공용수명 동안 발생가능한 모든 설계하중을 적용하여 설계하였다.

표 1 광안대교의 설계기준

설계기준	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 상부구조 설계기준</li> <li>· 내풍설계기준</li> <li>· 내진설계기준</li> </ul>	
설계요령	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 풍동실험요령</li> <li>· 트러스 격점구조 설계요령</li> <li>· 주탑 앵커프레임 설계요령</li> <li>· 케이블밴드 설계요령</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 강상판 설계요령</li> <li>· 주탑설계요령</li> <li>· 행어 설계요령</li> <li>· 케이블 정착부 설계요령</li> </ul>

표 2 광안대교의 구조규격

도로등급	설계속도	차 선 수	설계활하중	통과높이
자동차 전용도로	80km/h	상·하층 각 4차선	DB-24, DL-24	5m 이상

광안대로의 중앙부에 위치한 현수교 구간은 그림 2에 나타낸 바와 같이 중앙경간 500m의 3경간 2хин 현수교이다. 보강트러스는 비합성형식이며, 보강트러스의 높이와 폭은 각각 9.85m, 24.0m이다. 보강트러스는 상층 및 하층 모두 4차선 편도 자동차 전용도로로 구성된 2층 구조이며, 수직재를 갖는 평행현 와렌트러스형식이다. 주케이블은 직경  $\phi 5.0\text{mm}$ 의 와이어를 사용하여 한 케이블당  $37\text{strands} \times 312\text{wires/strand} = 11,544\text{wires}$ 로 구성하였으며, 그 직경은 랩핑(wrapping) 후 0.6086m이다. 케이블은 air spinning 공법에 의해 가설되고, 케이블의 새그비는 1/8이다. 주케이블과 보강트러스를 연결하는 행어는 한 격점마다 4개씩  $\phi 61\text{mm}$  C.F.R.C.(Center Fit Rope Core)를 사용하였으며, 가장 외측(현수교 시종점)에 위치

한 한 개의 행어에 대해서는  $\phi 66\text{mm}$  C.F.R.C.를 사용하였다. 주탑은 교량의 조형적 경관성을 증시하여 곡선의 수평재를 가진 라벤형식을 선정하였으며, 주탑기둥의 간격은 24.0m, 주탑의 높이는 105.0m이다. 한편, 현수교의 시종점부에 위치한 앵커블럭은 중력식 구조로서 약 22,424tonf의 케이블 축력을 지지할 수 있도록 설계되었다.

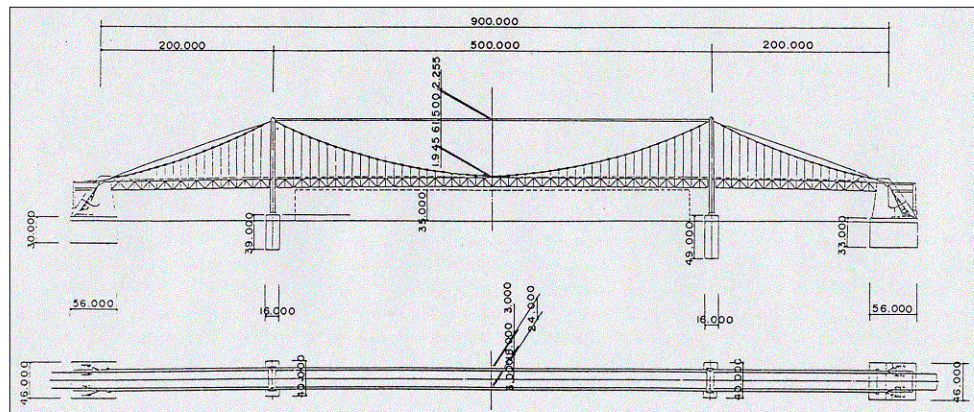


그림 2 광안대교의 형상 및 제원

## 2.2 구조해석 개요

주요 구조부재의 설계를 위한 구조해석은 장대교량 전용해석 프로그램인 RITTAI((株)長大, 일본)를 사용하여 수행하였으며, 전체구조계의 해석모델은 그림 3과 같다. 현수교의 구조적 특성을 감안하여 기하학적 비선형성이 크게 나타나는 고정하중상태에 대해서는 유한변위이론에 의한 구조해석을 수행하였으며, 기하학적 비선형성의 영향이 비교적 적은 활하중 등의 영향선 재하경우에 대한 해석은 선형화 유한변위이론을 적용하였다.

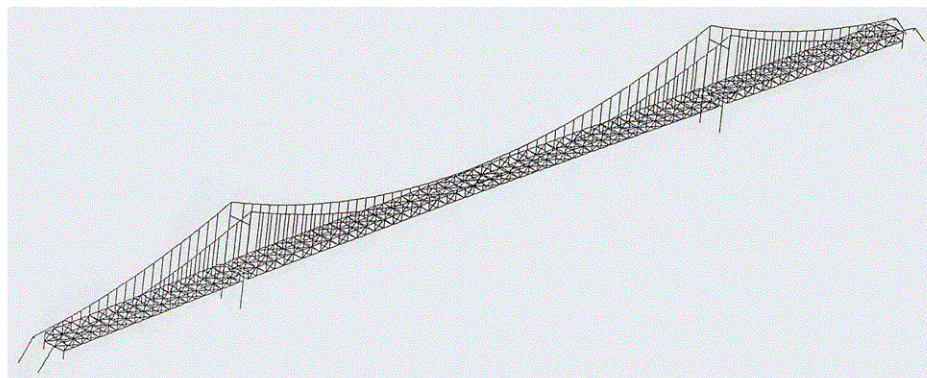


그림 3 광안대교의 전체계 구조해석 모델

### 3. 주요 구조부재 설계

#### 3.1 보강트러스

보강트러스는 평행현 와렌트러스 형식으로서 그림 4에 나타낸 바와 같이 행어를 통해 주케이블에 매달리게 되며, 그 위에 상·하층의 강상판이 놓이게 된다. 보강트러스는 상현재(700×800), 하현재(700×700), 상·하층 가로보(1,000×800), 수직재(700×800), 사재(500×700) 및 브레이싱(450×450)으로 구성되며, 모두 박스형태의 단면을 갖는다. 그림 5에 광안대교 전 연장에 대한 강재 단면두께 및 사용강재를 나타내었다.

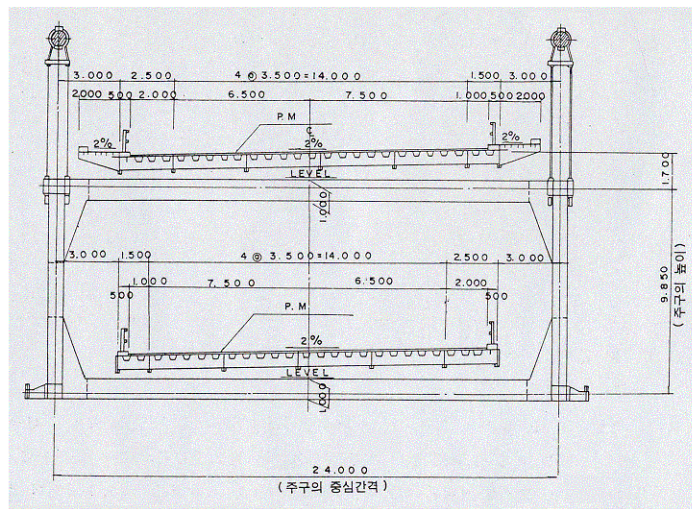


그림 4 보강트러스의 횡단면

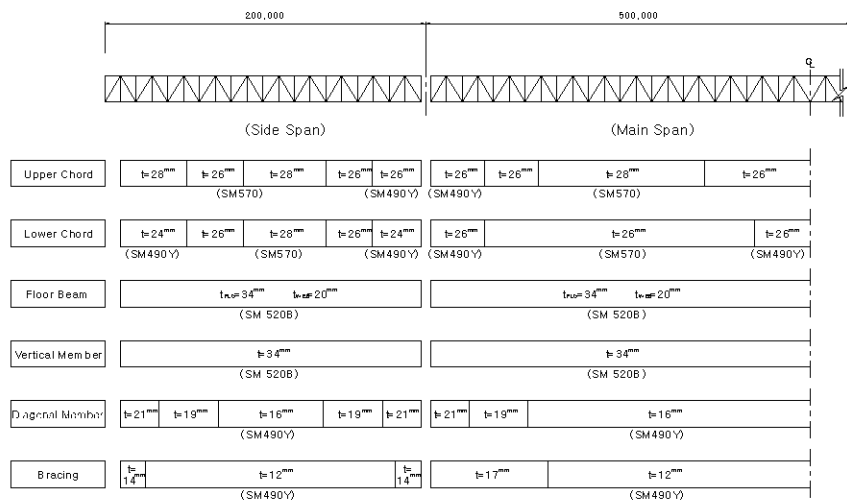


그림 5 보강트러스의 강재단면 두께 및 사용강재

설계하중에 대한 상·하현재, 사재 및 브레이싱의 응력수준(=발생응력/허용응력)을 표 3에 정리하여 나타내었다.

표 3 보강트러스의 응력수준

구 분	응력수준	구 분	응력수준
상현재	0.60~0.93	사 재	0.30~0.57
하현재	0.64~0.82	브레이싱	0.23~0.62

### 3.2 강상판

강상판은 그림 4와 같이 2층 구조로서 상층 강상판은 양측에 보도 2.0m씩을 포함하여 그 폭이 22.0m이고, 하층 강상판은 18.0m이다. 상·하층 강상판 모두 차선도색(line marking)위치에 세로보가 위치하도록 계획하여 비대칭구조이며, 한쪽 방향으로 2.0%의 횡단구배를 가지는 구조이다.

강상판은 비합성 형식으로서 광안대교 중앙경간은 6경간(=56.5m) 및 8경간(=75.6m) 연속, 측경간은 10경간(=91.75m) 연속으로 되었다. 그림 6에 8경간 연속 강상판의 평면도와 측면도를 나타내었다. 강상판의 종리브(U-Rib 340×260×8-40)는 Pelikan-Esslinger 방법으로 응력을 검토하였으며, 강상판의 세로보와 횡리브는 격자구조모델에 대한 유한요소해석을 통해 설계되었다.

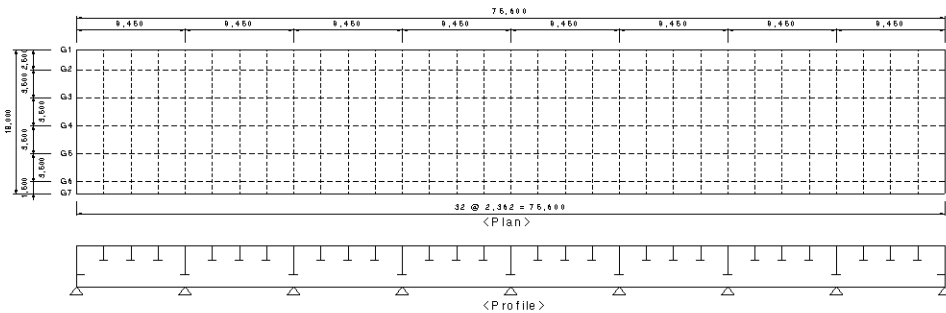


그림 6 강상판의 평면도 및 측면도(8경간 연속)

종리브와 테크플레이트의 응력검토시에는 바닥판으로 작용하는 경우의 응력과 세로보의 주형작용으로 발생하는 응력을 중첩하여 안전성을 검토하였다. 종리브 및 세로보의 응력검토결과는 각각 표 4 및 표 5와 같다.

표 4 종리브의 응력검토 결과

구 분		응 력 (kgf/cm <sup>2</sup> )			
		주형 작용	바닥판 작용	합응력	허용응력
테크플레이트 상연	압 축	-330.3	-265.9	-596.2	2,000
	인 장	366.8	122.7	489.5	2,000
종리브 하연	압 축	118.5	-317.4	-198.9	2,000
	인 장	111.4	687.9	799.3	2,000

표 5 세로보의 응력검토 결과

구 분	상부플랜지		하부플랜지	
	$(\sigma_{w0}/\sigma_a)^2 + (\tau/\tau_a)^2$	허용치	$(\sigma_{lw}/\sigma_a)^2 + (\tau/\tau_a)^2$	허용치
G1	0.23	1.2	0.64	1.2
G2	0.27	1.2	1.03	1.2
G3, G4, G5	0.28	1.2	0.98	1.2
G6	0.23	1.2	0.84	1.2
G7	0.24	1.2	0.40	1.2

※ 세로보를 나타내는 기호인 G1~G7은 그림 6 참조.

### 3.3 케이블 및 행어

#### 가. 케이블

air spinning 공법에 가설되는 광안대교의 주케이블에는 최대 12,548tonf의 장력이 걸리게 되는데, 이러한 커다란 장력에 견디게 하기 위해  $\phi 5.0\text{mm}$ 의 소선 312가닥으로 1개의 스트랜드를 구성하며, 37개의 스트랜드가 모여서 1개의 주케이블을 형성하게 된다(그림 7 참조). 랩핑 후의 케이블 직경은 약 0.6m(공극율 20%)가 되며, 이때 최대 장력에 대한 안전율은 약 2.5이다. 한편, 케이블의 길이계산은 그림 8과 같은 과정을 통해 결정하였다. 표 7에서 지간장에 대한 지구곡률의 보정은 케이블 가설시의 상세계산시에 행하는 것이므로 본 설계에서는 고려하지 않았다.

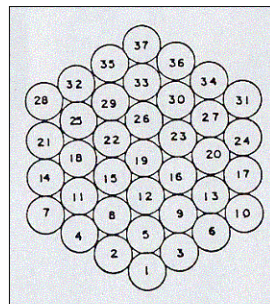


그림 7 스트랜드 배치도

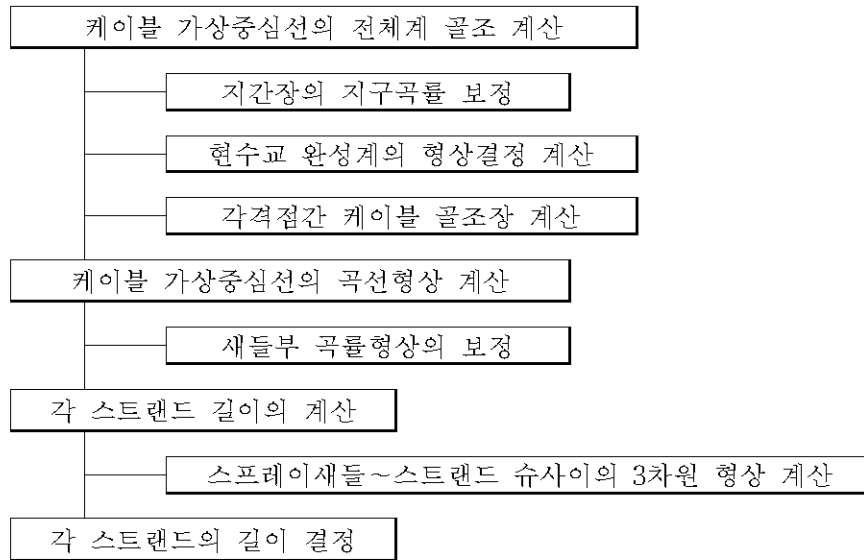


그림 8 케이블의 길이계산 흐름도

나. 행어

강상판과 보강트러스에 작용하는 각종 설계하중을 주케이블에 전달하는 행어는 C.F.R.C.형 로프로 설계되었다. C.F.R.C형 로프는 유연성면에서는 I.W.R.C.(Independent Wire Rope Core)와 거의 동등하지만 유효단면적이 커서 단면 효율이 양호하고, 내피로성이 우수한 장점이 있다. 행어 로프의 제원은  $\phi 61\text{mm}$ (일반부)와  $\phi 66\text{mm}$ (측경간 제1행어)이며, 그 구성은  $6 \times \text{WS}(41) + 7 \times \text{S}(19)$ 이다. 행어 로프의 단면은 그림 9와 같다.

행어의 직경을 결정하기 위해 주하중인 고정하중과 활하중외에 온도변화, 제작 및 가설오차, 행어의 휨, 가설하중을 고려하였으며, 행어에 도입된 장력은 그림 10과 같다.

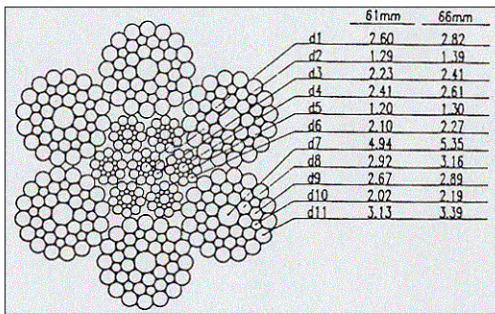


그림 9 행어의 단면

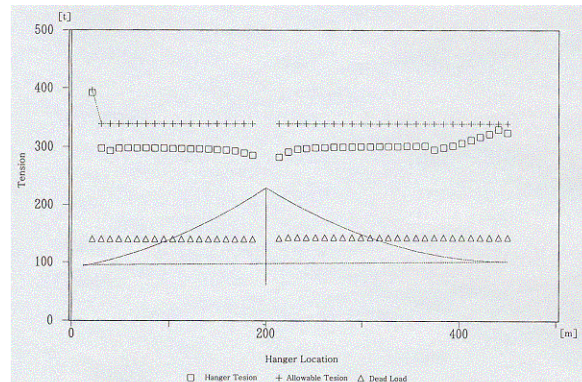


그림 10 행어에 도입된 장력





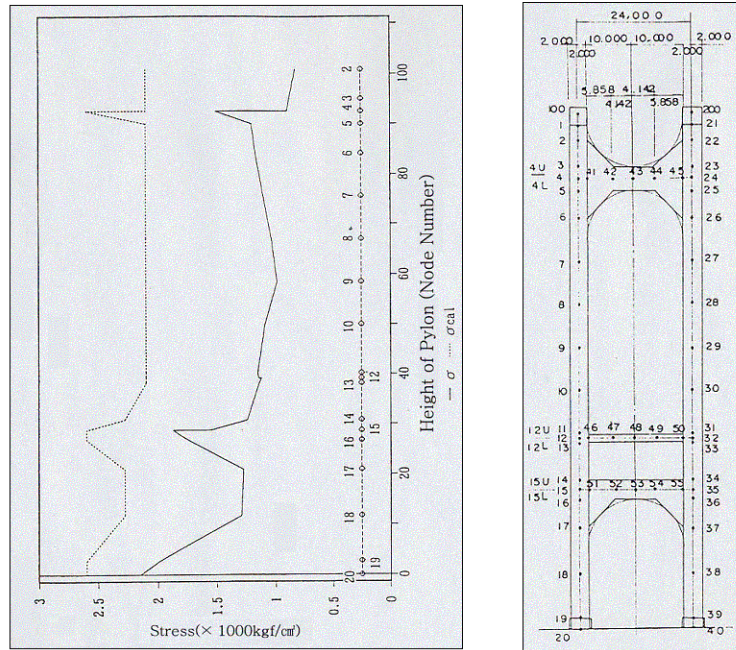


그림 13 주탑의 응력검토결과의 일례

표 6 주탑기초의 검토결과

구 분		PY1	PY2	
지지력 안전율	평상시	교 축	2.69	3.28
		교축직각	3.18	3.77
	지진시	교 축	1.57	1.93
		교축직각	1.80	2.16
활동안전율	지진시	교 축	6.80	7.10
		교축직각	8.40	8.80
회전각 (rad)	기준변위	$8.37 \times 10^{-4}$	$8.37 \times 10^{-4}$	
	발생변위	$8.22 \times 10^{-4}$	$4.35 \times 10^{-4}$	

### 3.5 앵커블럭

앵커블럭은 케이블 및 보강트러스로부터 전달되는 수직, 수평하중을 지지하는 매우 중요한 구조이다. 또한, 케이블을 정착시킴으로써 케이블이 충분한 장력을 받을 수 있도록 하는 기능과 함께 현수교와 연결되는 접속교량의 지점 역할도 하게 된다.

광안대교 앵커블럭의 형상은 경관상의 배려에서 케이블 굴절각을 크게 하여 앵커블럭을 작게 함으로써 구체가 두드러지지 않도록 계획하였다. 앵커블럭의 제원은 46.0×56.0×30.0m이며, 앵커블럭의 형상 및 상세한 제원은 그림 14와 같다.

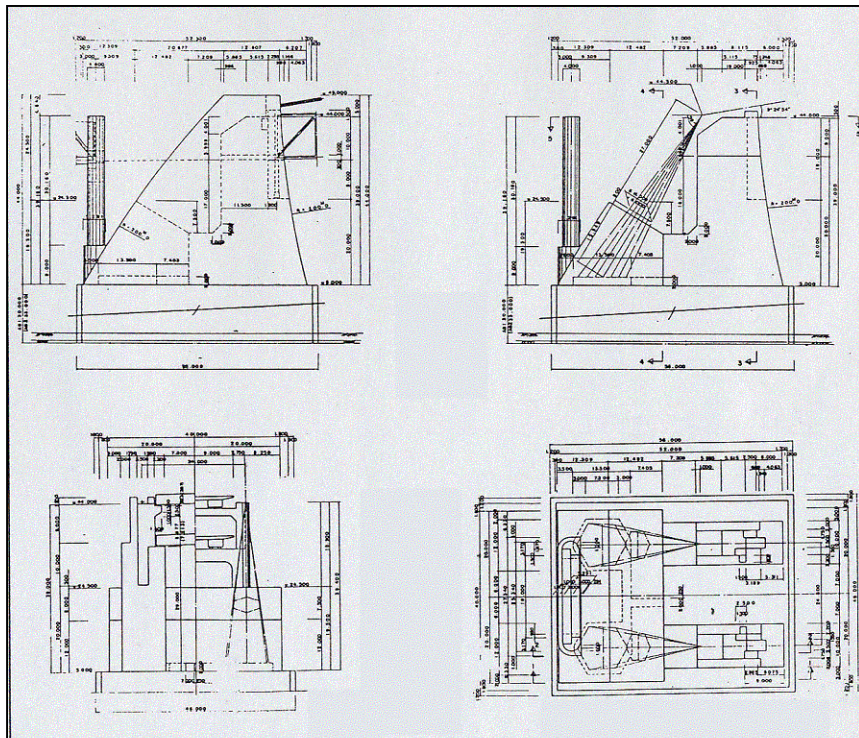


그림 14 앵커블럭의 형상 및 제원

광안대교에서는 케이블의 정착방식을 일본에서 많이 사용하는 앵커 프레임방식 대신에 최근 유럽에서 적용실적이 많은 스트랜드를 이용한 정착방식을 채택하여 공사비 절감을 도모하였다. 그림 15에 앵커블럭 정착부 구조를 나타내었다.

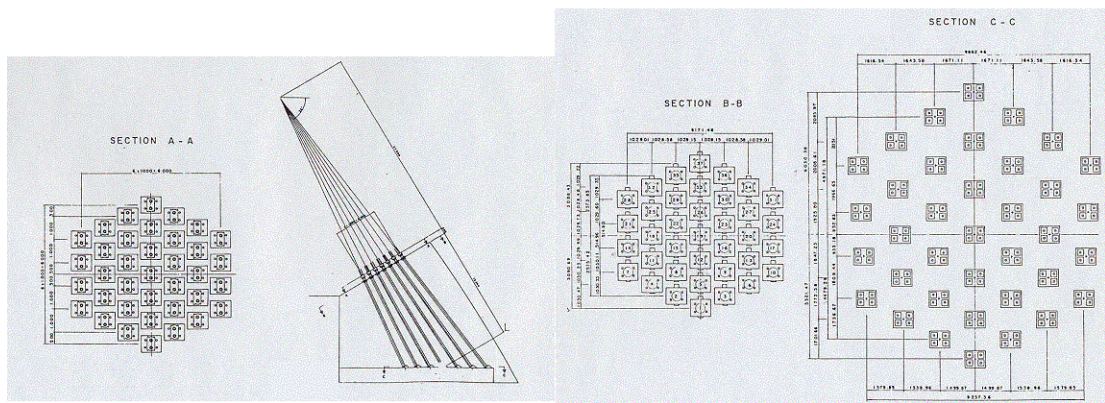


그림 15 앵커블럭 정착부 구조

앵커블럭의 필요철근량을 산정하기 위하여 그림 16과 같이 판요소를 이용한 2차원 유한요소해석이 수행되었다. 한편, 앵커블럭기초의 검토결과는 표 7과 같다.

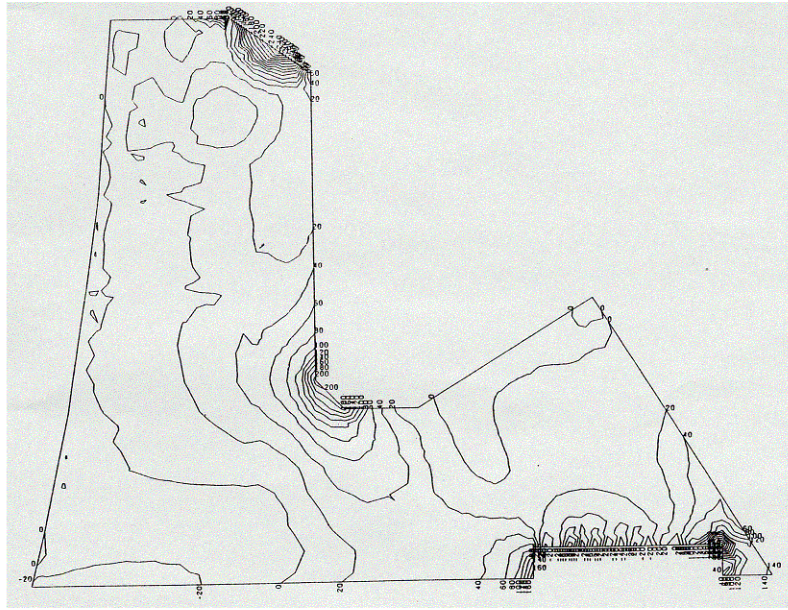


그림 16 앵커블럭에 대한 유한요소해석결과의 일례

표 7 앵커블럭기초의 검토결과

구 분		AB1	AB2	
지지력 안전율	평상시	4.30	4.33	
	지진시	교 축	2.40	2.46
		교축직각	2.40	2.42
활동안전율	평상시	6.30	9.70	
	지진시	2.50	3.60	
수평변위 (cm)	기준변위	10.0	10.0	
	발생변위	6.7	7.0	

앵커블럭(주탑기초도 동일)은 거대한 매스콘크리트 구조물이므로 구조물 시공시 수화열 관리에 만전을 기하여야 한다. 본 설계에서는 수화열에 의한 유해한 균열의 발생을 제어하고자 저발열 시멘트(고로슬래그 시멘트)를 사용하였으며, 시공시에 pipe cooling 방법을 병행하였다. 표 8에 고로슬래그 시멘트의 배합설계결과를 나타내었다.

표 8 고로슬래그 시멘트의 배합설계

$f_{ck}$	W (kg)	C (kg)	S (kg)	G (kg)	혼화재 (kg)	W/C (%)	$G_{max}$ (mm)	Slump (cm)	Air (%)	시멘트종류
240	175	306	727	1,099	0.61	57.1	25	12±2.5	4±1	중용열고로(특급)

#### 4. 내진설계

광안대교에 대한 고유치해석결과는 표 9와 같으며, 그림 17에 면내 휨 대칭 1차 진동모드 형상을 일례로서 나타내었다.

표 9 고유치해석 결과

구 분		고유진동수(Hz)	진동모드 차수
횡진동	대칭 1	0.1169	1
	비대칭 1	0.3729	5
휨 진동	대칭 1	0.2236	3
	비대칭 1	0.2175	2
	대칭 2	0.4042	6
	비대칭 2	0.6423	20
비틀림 진동	대칭 1	0.4409	7
	비대칭 1	0.6710	21
	대칭 2	0.6375	19
	비대칭 2	0.8468	29

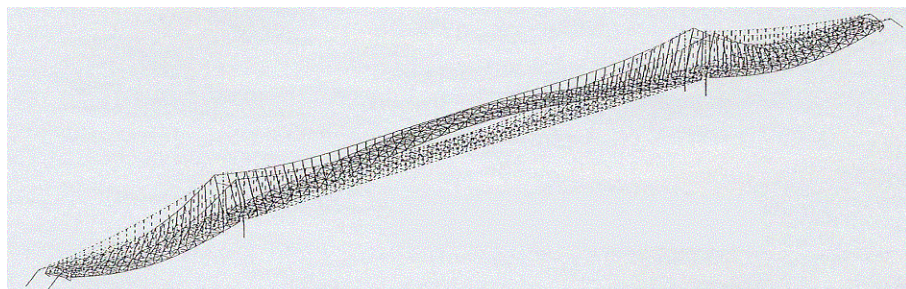


그림 17 진동모드형상의 일례(면내 휨 대칭 1차 진동모드)

광안대교의 내진설계를 위한 지진해석은 다중모드 응답스펙트럼해석법을 적용하였다. 설계응답스펙트럼은 그림 18과 같다. 지진해석시 고려한 최대지반가속도는

0.14g이고, 지반계수는 지질조사결과에 기초하여 중질토에 해당하는 값을 적용하였다. 또한, 감쇠상수는 보강트러스, 케이블 및 주탑에 대해서는 0.02, 하부구조에 대해서는 0.2를 적용하였다.

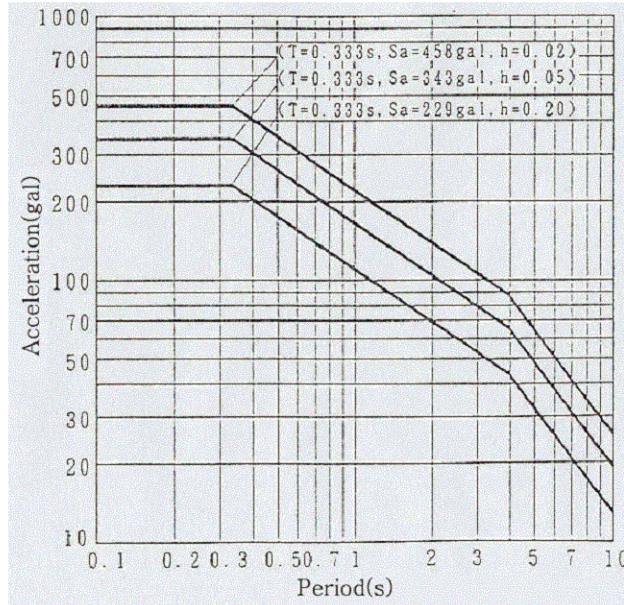


그림 18 설계응답스펙트럼

지진해석을 통해 얻어진 변위를 표 10에 정리하여 나타내었다.

표 10 지진에 의한 변위

구 분		교축직각방향 지진력	교축방향 지진력
보강트러스 연직변위 (m)	주경간 중앙	0.029	0.000
	측경간 중앙	0.028	0.038
주탑 PY1 상단수평변위 (m)	교축방향	0.004	0.009
	교축직각방향	0.041	0.000
주탑 PY2 상단수평변위 (m)	교축방향	0.004	0.009
	교축직각방향	0.041	0.000