

포스트텐션을 이용한 장스팬 켄틸레버보의 설계

The Design of long cantilever beam using post-tensioned tendons in Kumjung Stadium

최 동 섭* 김 동 환** 김 종 수***
Dong-Sub Choi Dong-Hwan Kim Jong-Soo Kim

ABSTRACT

A prestressed/precast concrete system was used to build the new Asian Olympic Stadium Project in Pusan, Korea. The stadium(mainly intended for cycle racing) is designed for the 2002 Asian Olympic Games and has a seating capacity of 20,000 spectators plus a few private suites. More than 1300 prestressed/precast components were used and they include single columns, primary beams, cantilever beams, double riser stands, and double tees. Especially, a total of 24 cantilever beams is used on the fourth story for the stands and double tees. These 8m long beams are post-tensioned to prevent cracking, to increase their durability and to serve serviceability by vibration. A cantilever section with cast-in-place topping is 800mm wide and 1500mm deep. Cantilever beams are connected to the column with the corbel by cast-in place concrete. Bonded post-tensioning tendons were assembled at the job site. Dead-end anchorages were installed in the end of cantilever beams and live-end anchorage is the opposite of them. This article presents the geometric layouts, design features and so on.

1. 서 론

금정싸이클 경기장은 2002년 부산 아시안게임을 개최하기 위한 지하1층, 지상4층 구조물로 2만명의 관람객을 수용하기 위한 구조물이다. 대지면적 291,090m²에 연면적 33,000m²인 구조물로 3층까지 일반 관람석이 있고, 지상 4층에 8m 장스팬 켄틸레버 보로 지지되는 VIP관람석이 있다. 기존에 지하 1층, 지상 2층의 싸이클 경기장으로 계획되었으나 아시아 경기대회 후, 경륜경기장으로 전환될 수 있도록 설계변경하였다. 그림 1은 금정 싸이클 경기장의 주단면도이며, 시공도중 설계변경이 되었기 때문에 지상 2층까지는 RC와 철골조로, 지상 2층 기둥부터는 PC로 계획되었다.

2. 시스템 선정과정

* 정회원, (주)CS 구조 엔지니어링

** 정회원, (주)CS 구조 엔지니어링

*** 정회원, (주)CS 구조 엔지니어링 대표이사

설계변경이 되는 과정에서 프로젝트의 주요관심사는 공기단축이었다. 그 외에 공사비와 사용성(진동, 처짐)등을 고려하기 위해서 표 1과 같이 RC조, 철골조와 PC조에 대한 장단점을 비교검토하였다.

비교검토한 결과, 공사비면에서는 RC조와 PC조, 공기면에서는 철골조와 PC조가 유리하였다. 특히 지상 4층 특별석에 계획되는 8m 장스팬 쉐일레버보의 사용성에 대해서 면밀히 검토하였다. 이런면에서

Post-tension을 사용할 경우, 상부에 인장응력이 발생하지 않는 PC조는 사용성면에서 가장 유리하다. 따라서 본 프로젝트에서는 공기와 공사비를 만족시키고 진동제어면에서 가장 유리한 PC조로 계획하였다.

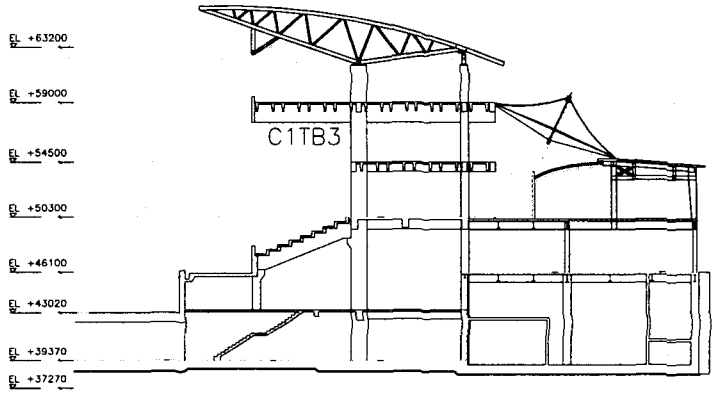


그림 1 싸이클경기장 주 단면도

표 1. RC조, 철골조와 PC조의 장단점 비교

	RC조	철골조	PC조
시공성	<ul style="list-style-type: none"> · 습식공법이므로 공기가 많이 소요됨 · 고소작업으로 인한 거푸집작업의 어려움 · 시공이 균일하지 못함 · 동바리가 필요 	<ul style="list-style-type: none"> · 건식공법으로 공기단축가능 · 내화피복등 추가공정 필요 · 동바리와 거푸집이 필요없음 	<ul style="list-style-type: none"> · 건식공법으로 공기단축가능 · 내화피복등 추가공정 불필요 · 국내 PC공장에서 좋은 품질의 부재생산 가능 · 고강도 콘크리트를 사용하므로 내구성 우수하고 노출 가능
경제성	가장 저가의 구조형식	가장 고가의 구조형식	거푸집전용에 따라 공사비가 달라지나 증가의 구조형식
사용성	관중에 의한 진동제어에 유리	진동을 제어하기 위해 대단히 큰 부재가 필요하다	Post-tension 이용하여 관중에 의한 진동제어에 가장 유리
평가	적당	적당	우수

3. Post-Tension에 사용되는 기구들

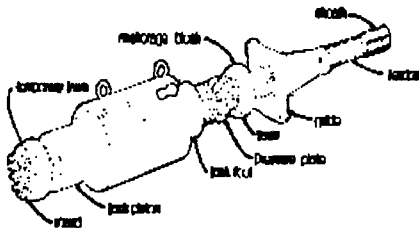


그림 2 Jack Piston과 유압장비

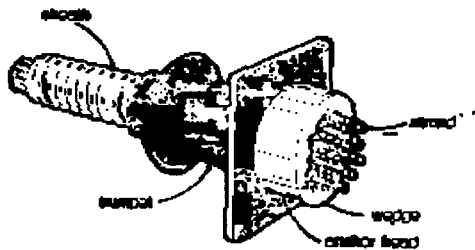


그림 3 정착구 디테일

Pre-tension과는 달리 Post-tension은 현장에서 작업을 하기 때문에 Tensioning 장비 및 정착구가 필요하다. 그림 2는 Tensioning에 필요한 장비로 Jacking Piston과 유압장비이며, 그림 3은 본 설계에서 사용된 정착구 디테일로 VSL multi-strand system을 사용하였다.

4. 8m 캔틸레버보의 설계

본 설계에서 가장 구조적으로 어려웠던 부분은 8m 캔틸레버보이며, Post-tension을 이용한 PC부재로 계획된 이유는 앞서 설명하였다. 다음은 부재설계시 고려한 단계별 하중, 프리스트레스 손실량, 설계방법에 대해서 구분하여 설명한 것이다.

4.1 설계하중

4층의 고정하중과 적재하중 이외에 시공시에 발생할 수 있는 모든단계의 하중에 대해서 전체적으로 구조물에 대한 안정성을 검토해야 했다. 특히 부재의 단면크기가 800*1500이기 때문에 길이방향으로 일체화된 부재로 생산할 경우, 양중에 문제가 있으므로 기둥에서 접합부를 만들어 부재를 분절하였다(그림 4 참조). 설계시 고려한 시공순서는 다음과 같다.

- ① 지상 3층 PC기둥 설치
- ② PC기둥위에 PC보(캔틸레버 보 포함) 설치
- ③ DTS설치
- ④ 접합부와 Topping Conc, 현장타설
- ⑤ Post-tension 도입 및 쉬스관에 그라우팅

시공단계는 Self load 단계, Superimposed load 단계와 Live load단계인 3단계로 구분하였으며, 각 단계별 시공순서 및 하중상태, 하중값은 표 2과 같다.

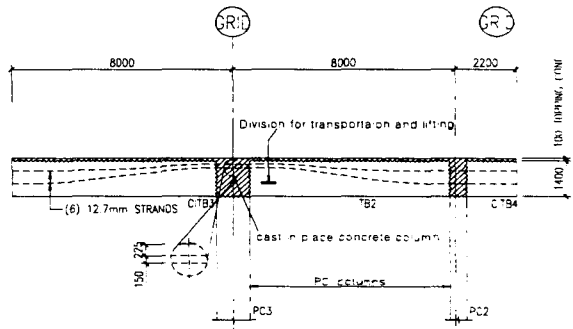


그림 4 장스팬 캔틸레버 보 입면도

표 2. 단계별 하중상태 및 하중값

시공단계	하중상태	하중(tf/m)
Self load	PC보를 설치하는 단계	3.30
Superimposed load	DTS를 설치하고, 그 위에 Topping conc.를 시공하는 단계	5.64
Live Load	시공이 된 상태에서 최종적인 적재하중이 가해지는 상태	4.00

4.2 시공단계별 부재응력

시공단계별 하중에 대해 MIDAS GEN으로 해석하였으며, 그림 5는 지상 4층에서 가장 장스팬인 C1B3의 BMD를 나타내었다.

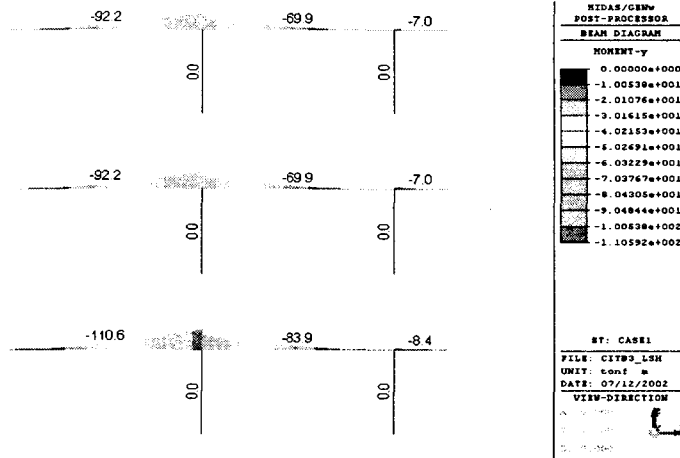


그림 5 CITB3의 BMD

4.3 POST-TENSION된 부재 설계

4.3.1 Prestress Loss

Post-Tension된 부재에서 Prestress Loss 타입은 Anchorage loss, Friction, Relaxation과 Shorting 이 고려되어야 하며, 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pA} + \Delta f_{pF} + \Delta f_{pR} + \Delta f_{pS}$$

A: Anchorage seating loss, F: Friction
R: Relaxation of tendon, S: Shortening of concrete

정착구에서 썬기 드로인에 의한 응력감소는 아래식에 의해 응력감소를 받는 구간과 정착후에 감소 되는 힘을 구할 수 있다.

$$\Delta P = 2Pl_{set}$$

P : friction loss, l_{set} : length of tendon affected by anchorage

또한 부재설계에서 사용된 곡률마찰계수와 파상마찰계수는 아래와 같다.

$$\mu=0.2, \quad k=0.002$$

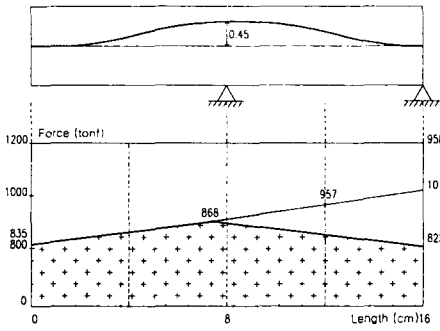
그 외에 Relaxation과 Shortening(Elastic, Creep, Shrinkage)에 의한 손실량은 Jacking Force의 15% 로 가정하여 설계하였다.

4.3.2 Service-Load Design

그림 4와 같은 부재응력에 대해서 곡률마찰계수와 파상마찰계수, 정착구의 썬기드로인의 영향 등을 고려한 설계과정이 그림 6와 표 3에 도식화되어 있다. Strand를 긴장할 때 인장응력은 인장강도의 75%로 가정하였다.

콘크리트구조설계기준¹⁾에서는 모든 프리스트레스 손실이 일어난 후, 사용하중작용시의 휨응력은 표 4에 제시된 값 이하로 규정하고 있다. 결과적으로 시공단계별 부재의 휨응력을 검토한 결과, Service-Load Design에 의한 단계별검토를 만족시켰다.

표 3 Friction loss calculation



e(m)		0.45	0
$e^{-\sum \mu a + kx}$		0.827	0.86
Stress at Transfer	P/A(tonf/cm ²)	69.62	79.81
	ft(tonf/cm ²)	125.32	0
	fb(tonf/cm ²)	-125.32	0
Effective Stress after losses	P/A(tonf/cm ²)	59.18	67
	ft(tonf/cm ²)	106.52	0
	fb(tonf/cm ²)	-106.52	0
Service-load final stress	ft(tonf/cm ²)	-12.4(O.K)	56.7(O.K)
	fb(tonf/cm ²)	130.8(O.K)	64.7(O.K)

그림 6 Friction loss diagram

표 4 Allowable stress in compression and tension

Extreme fiber stress in compression	0.4 f _{ck}
Extreme fiber stress in tension	1.6√f _{ck}

4.3.3 Ultimate-Strength Design

휨부재의 설계시 시공단계별 허용설계법 뿐만 아니라 강도설계법에 따라야 한다. 따라서 콘크리트구조설계기준에 의거해 Prestressing 긴장재에 부착되는 부재에 대해서 변형률적합조건을 기초로 하여 아래식에 의해 fps를 구할 수 있다.

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left\{ \rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{dp} (\omega - \omega') \right\} \right]$$

켄틸레버 보의 상, 하부에 각각 6-HD25를 배근하여 강도설계법에 의한 검토한 내용을 표 5에 정리하였다.

표 5 Design moment capacity

Mu	801.66 tf.m
fps	12,072 kgf/cm ²
ΦMn	1215.62 tf.m

4.4 처짐과 진동 검토

켄틸레버 보에 의해 지지되는 VIP석은 관람석이므로 진동과 처짐에 대한 사용성도 검토되어야 한다. 그 평가기준은 PCI Design Handbook (4th Edition)을 사용하였으며 표 6과 표 7에 정리되어 있다. 특히 진동의 경우, 부재의 고유진동수는 MIDAS GEN을 이용하여 고유치해석을 한 값이다.

진동에 대해서 검토한 결과, 고유치해석에 의한 켄틸레버 보의 고유진동수인 5.46Hz는 요구되는 고유진동수의 하한치 5.12Hz보다 크므로 진동의 사용성면에서 문제가 없다고 판단된다.

또한 처짐에 대해서 검토한 결과, 캔틸레버 보의 최종처짐량은 0.77cm이다. 기준에서 동하중을 받는 구조물의 최대 허용처짐량인 2.67cm(처짐한계:L/300)이므로 처짐에서도 문제가 없다고 판단된다.

표 6 진동검토

Natural Frequency of Member	Required Natural Frequency				Remark
	Mininum Required Natural Frequency	Forcing Frequency	Acceleration Limit % Gravity	Dynamic Load Factor	
5.46 Hz	1.67 Hz	1.5 Hz	5.0 %	0.25	1st frequency
	3.33 Hz	3 Hz	5.0 %	0.25	
	3.07 Hz	3 Hz	5.0 %	0.25	2nd frequency
	5.12 Hz	5 Hz	5.0 %	0.25	

표 7 처짐검토

Load case	Release(cm)	Multiplier	Erection(cm)	Multiplier	Final(cm)
Prestress	0.810 ↑	1.8	1.458 ↑	2.2	1.782 ↑
W _d	0.280 ↓	1.85	0.518 ↑	2.4	0.672 ↓
	0.530 ↑		0.940 ↑		1.110 ↑
W _{sd}			0.460 ↓	3.0	1.380 ↓
			0.480 ↑		0.270 ↓
W _i					0.500 ↓
					0.770 ↓

5. 결론

실제부터 가장 이슈가 된 부분으로, 공기, 사용성과 경제성을 고려하여 Post-tension을 이용한 8m 캔틸레버 보로 설계하였다. 현재의 시공상태는 DTS와 topping concrete가 타설이 되어 완공된 상태이며, 보의 상부와 보를 지지하고 있는 기둥에서 균열은 발견되지 않았다. 앞으로도 관중들의 동적하중에 의한 추가 응력에 대해서도 검토가 필요하며, 진동등의 문제도 검토가 필요하다고 판단된다.

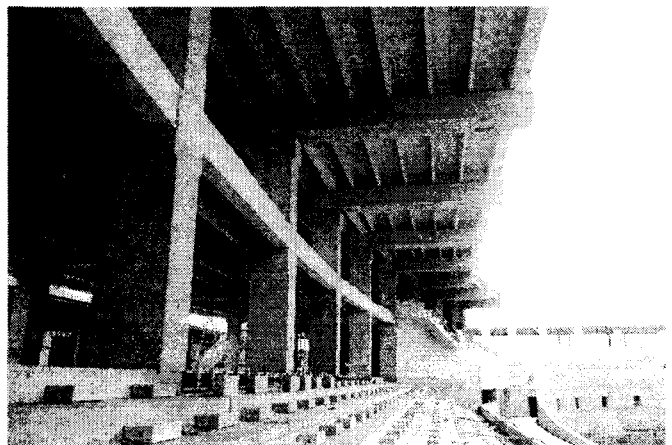


그림 7 시공된 장스팬 캔틸레버 보

본 연구를 통해 포스트텐션공법을 사용하여 관중에 의한 진동과 처짐에 효과적으로 저항할 수 있는 단면을 설계하였을 뿐만 아니라, 8m 장스팬 캔틸레버 보의 시공을 성공적으로 수행하도록 하였다. 그림 7은 시공완료된 모습을 보여주고 있다.

참고문헌

1. 건설교통부, 콘크리트구조설계기준, 1999.