

초고강도 콘크리트 Ductal을 이용한 선유도연결 보행전용교량의 설계와 시공

Design and Construction of Sunyudo Pedestrian Bridge Using Ultra-High Performance Concrete, Ductal

변운주* 허석범** 정의환***

Byun, Yoon Joo and Huh, Suk Bum and Jung, Eui Hwan

This paper describes the design and construction of main Arch bridge using Ultra-high performance concrete, Ductal in the Sunyudo pedestrian bridge project.

Ductal is a new family of cementing materials with remarkable properties.

Its mechanical characteristics reach unique values, with compressive strength in industrial use of 180 to 230 MPa and bending tensile strength of 50 to 80 MPa. By the use of Ductal, main Arch bridge crossing the Han-river is designed to the span 120m-long with optimized π shape section.

1. 서론

본 교량은 뉴 밀레니엄을 맞이하여 서울시와 프랑스 2000년 위원회의 공동기념사업으로 계획된 선유도연결 보행전용교량 설치공사 구간의 한강 유심부를 통과하는 주교량으로서 최첨단의 초고성능 콘크리트(Ultra-High Performance Concrete) Ductal을 소재로 한 지간 120m의 양단고정 단경간 아치교로 계획·설계되었다.

미래지향적 테크놀로지와 자연친화적 이미지의 조화를 목표로 하는 보행자 전용교량으로서의 상징성을 구현하기 위하여 도입된 초고성능 콘크리트 Ductal은 프랑스 Bouygues사에서 개발한 최첨단 신소재로서 초고강도와 연성특성을 구현함으로써 종래 강교형식으로서만 가능하였던 최소단면의 슬랜더한 아치교의 계획을 가능케 하였다.

고강도 콘크리트 분야의 기술개발은 주로 건축분야의 초고층 빌딩공사의 필요성을 중심으로하여 1880년대 이후 미국의 주도하에 이루어져 왔으며 현재는 압축강도 $600\sim 800\text{ kgf/cm}^2$ 수준에서 적용되고 있는 실정이다. 반면에 본 교량에 사용된 초고성능 콘크리트(UHPC) Ductal은 압축강도의 수준이 $2000\sim 8000\text{ kgf/cm}^2$ 정도로서 기존의 고강도 콘크리트와도 차원을 달리하는 최첨단 신소재이며 초고강도와 고연성 능력과 더불어 우수한 내구성을 확보함으로써 건축 및 토목분야의 기술혁신을 주도할 것으로 기대된다.

Ductal을 이용한 주경간 아치교량의 계획 및 설계는 프랑스 Bouygues사와 (주)신성엔지니어링의 기술협력하에 공동작업으로 수행되었으며 현재 (주)동양고속·건설에서 시공중에 있다. Ductal을 이용한 아치교 프리캐스트 세그먼트 제작시의 세부 기술적인 문제 또한 Bouygues와 긴밀한 협의를 통하여 해결함으로써 초고강도 콘크리트의 시공에 대한 기술발전의 계기를 마련하고 있다.

이하에 본 교량의 계획과 설계·시공개요 및 Ductal의 재료적 특성, 적용사례를 소개함으로써 고강도 콘크리트 기술분야의 발전에 도움이 되고자 한다.

* (주)신성엔지니어링 구조부 전무

** (주)신성엔지니어링 구조부 이사

*** (주)동양고속·건설 선유도 현장소장

2. 공사개요

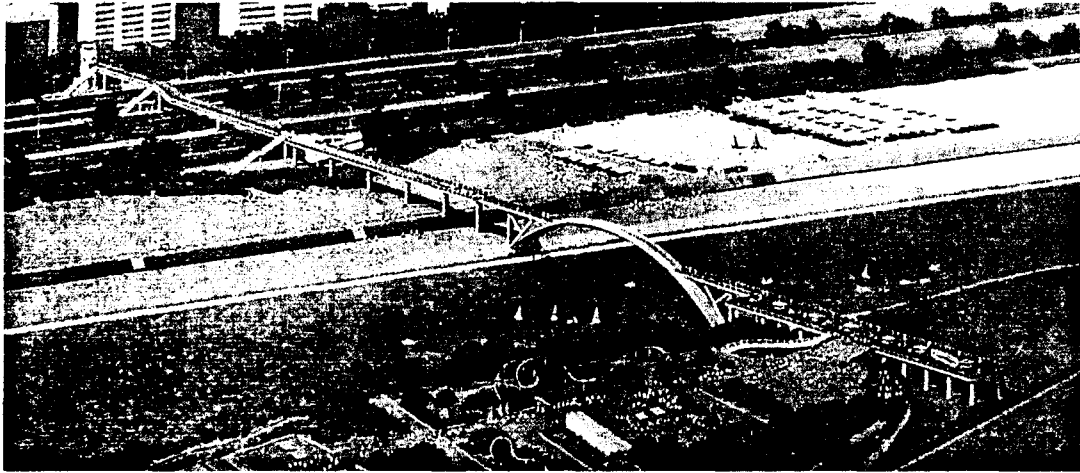


그림 1. 선유도연결 보행전용교량 조감도

2.1 공사의 목적

선유도연결 보행전용교량 설치공사는 「새서울 : 우리한강 사업계획」의 일환으로 서울시민에게 쾌적한 휴식공간과 상징적 볼거리를 제공할 수 있도록 하기 위하여 선유도 환경재활용 공원계획과 연계하여 추진되었으며 교량의 전체적인 디자인 컨셉은 노들길·올림픽대로에 의해 분리된 주변지역(양평동 일대)과 한강시민공원, 선유도 환경재활용 공원을 연결하는 상징적이고 친환경적인 보행자전용교량으로서 한강 도시미관의 아름다움을 창출하고 서울시의 수준높은 랜드마크로서의 기능을 실현할 수 있는 조형적 구조계획을 목표로 하였다.

2.2 시설개요 및 특징

본 교량은 노들길·올림픽대로를 횡단하는 영등포구 양평동측의 기존 보도육교를 시점으로하여 현재 공사추진중에 있는 선유도 환경재활용 공원과 연결되는 선유도 전망대를 종점으로 하는 총연장 469.237m의 보행자 전용교량으로서 주교량인 지간장 120m의 Ductal Arch교를 포함하여 <표-1>과 같이 계획되었다.

표 1. 시설개요 및 특징

구 분	연장 및 폭원	구조형식 및 횡단조건	계획의 특징
기존육교 구간	L=108.55m B=4.0m	• 강상판 박스라멘 • 노들길·올림픽대로 횡단	• 기존보도육교 재활용 구간으로서 식재터널 및 목재마감에 의한 환경개선
신설보도육교	L=100.65m B=6.0m	• 강박스 거더교(목재마감) • 한강시민공원 구간 횡단	• 난간 및 바닥의 목재마감, 매립형 조명설치로 환경친화적 보행동선 제공
주경간 아치교 구간	L=120.00m B=4.3m (아치접속교 제외)	• 단경간 고정아치(Ductal) • 한강 횡단(B=100m)	• 날렵한 단면구성으로 현대적 이미지의 조형성을 실현 (최첨단 신소재 Ductal 적용)
선유도 전망대 구간	L=111.30m B=14.0m	• 강박스거더교(목재마감) • 선유도 환경재활용공원 연결	• 선유도상의 전망공간으로서 가로등·목재 벤치등 편의시설 설치로 휴식공간의 기능 극대화

3. 초고성능 콘크리트 Ductal의 재료적 특성과 적용사례

미래지향적 테크놀로지의 현대적 이미지를 추구하는 주경간 아치교에 사용된 Ductal은 프랑스 Bouygues사에서 개발한 RPC(Reactive Powder Concrete)의 개념을 토대로 건설재료 회사인 Lafarge, 화학재료 회사인 Rhodia 등 3개사가 공동개발한 초고강도콘크리트(UHPC)의 상업적 명칭으로서 재료적 특성과 대표적인 적용사례를 소개하면 다음과 같다.

3.1 RPC의 기초원리와 재료적 특성

RPC는 재료내부의 공극을 최소화함으로써 고강도특성을 구현한다는 기본원리에 기초하여 매우 치밀한 혼합물을 제공하기 위해 1mm이하에서 0.5 μ m 사이의 미립자를 최적의 비율로 조절한 신소재 콘크리트로서 <표-2>와 같은 기본원칙하에 연구개발 되었으며 대표적인 구성비율은 <표-3>와 같다.

표 2. RPC 개발의 기본원리

구 분	RPC 개발의 기초원리
구성성분의 동질성 향상 (Homogeneity)	<ul style="list-style-type: none"> • 굵은골재의 제거에 의한 균질성 향상 $\phi_{max}(RPC) / \phi_{max}(HPC) = \frac{1}{50} - \frac{1}{30}$ • 골재와 시멘트 페이스트의 강도비 : HPC ($\frac{E_a}{E_p}$)=3.0, RPC ($\frac{E_a}{E_p}$)=1.0-1.4
다짐밀도의 향상	• 석영모래, 시멘트, 실리카폼등의 입도최적화에 의한 치밀한 밀도의 실현
마이크로 구조의 개선	• 콘크리트 경화후 열처리에 의한 크리프· 건조수축 특성의 개선
연성(Ductility)의 개선	• 섬유보강재의 사용에 의한 연성능력의 강화

표 3. 일반적인 RPC의 구성비

구 분	섬유보강재	석영모래	HSR시멘트	석영가루	실리카폼	초유동화제	물
입자의 직경 (μ m)	200.0	310.0	10.0	12.0	0.2		
중량(kg/m ³)	161	1066	746	224	242	9	142
체적비(%)	2.11	40.40	23.62	8.44	10.75	0.40	14.27

RPC는 일반적인 고강도콘크리트(HPC)보다 압축강도는 3배(RPC200)에서 12배(RPC800), 휨강도는 10배(RPC200)정도의 역학적 특성을 발휘할 수 있다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 RPC200의 역학적 특성과 대표적인 휨강도 특성은 <표-4>, (그림-2)와 같다.

표 4. 역학적 특성치

구 분	RPC 200
Pre-Setting Pressure	none
Heat Treating	20~90 °C
Compressive Strength	170~230 MPa
Flexure Strength	30~60 MPa
Fracture Energy	20,000~40,000 J/m ²
Young's Modulus	50~60 GPa

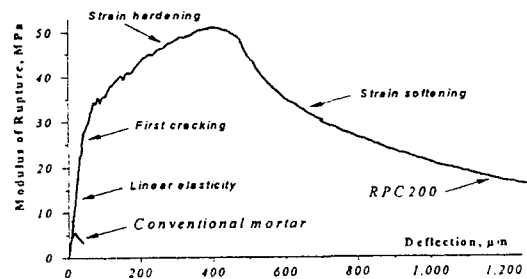


그림 2. RPC의 휨강도 특성

3.2 Sherbrooke Footbridge 적용사례

Sherbrooke Footbridge는 Ductal(RPC200, RPC300)을 사용하여 1997년 캐나다의 Sherbrooke시에 건설된 지간 60m의 Open Web-Space Truss 형식의 보도교로서 뛰어난 조형성과 최소유지관리의 이상을 실현하였다.

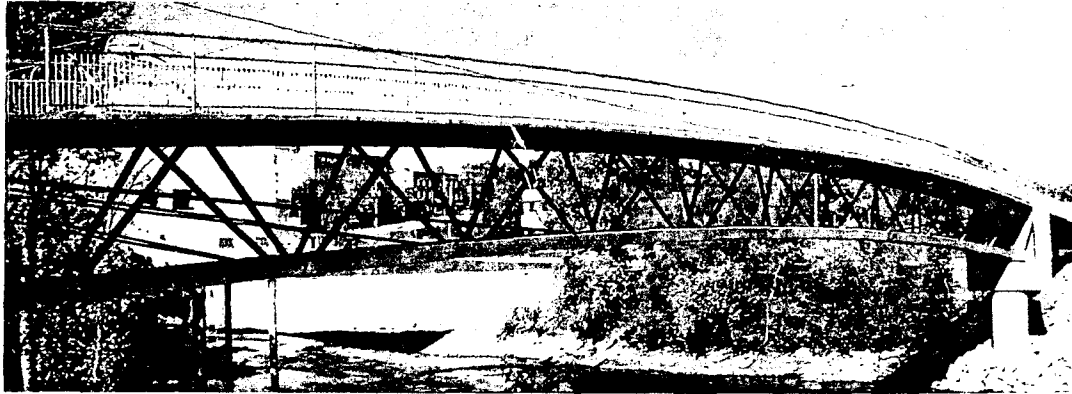


그림 3. Sherbrooke Bridge 전경

본 교량의 횡단면 구성은 (그림-4)와 같이 횡방향 Rib로 보강된 두께 30mm의 초박형 Deck(상현재), 스텐레스 스틸튜브에 RPC를 충전한 Web구조, 320×380mm의 Beam Type 하현재로 구성된 3차원 조립식 트러스로 계획되었다. 또한, 상현재(Deck)와 하현재(Beam)는 Compact Anchor를 이용하여 Web(RPC Tubes)와 연결되었다. 본 교량의 하현재와 Web는 가압처리에 의하여 300MPa이상의 고강도를 갖도록 하였으며 상현재인 Deck는 200MPa의 강도를 갖게 제작되었다.(그림-5)

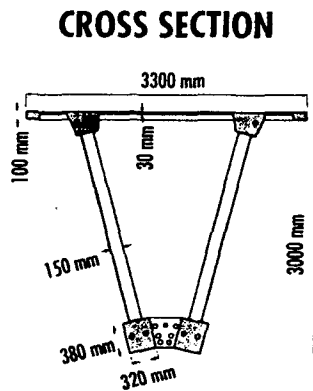


그림 4. 횡단면의 구성

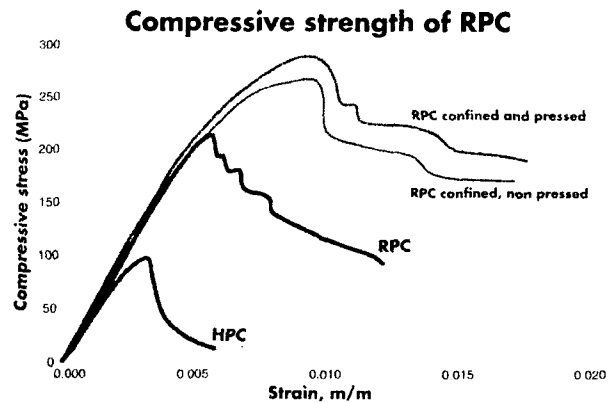


그림 5. RPC의 압축강도 특성

부재제작시 10m 단위의 세그먼트로서 6분할하여 3개 세그먼트를 지상조립한 후 30m의 부재를 200ton급 Crane으로 인양하여 거치하였다. 거치 후 종방향으로 프리스트레싱을 실시하여 완성시 하중에 대해 안전하도록 하였다.

Ductal을 이용한 본 교량의 설계 및 시공을 통하여 다음과 같은 기술발전을 이룩하였다.

- 200MPa 이상의 고강도를 바탕으로 한 경량화와 낮은 형고비 실현으로 조형성 증대
- 높은 연성확보로 초과하중에 대한 저항성 증대
- 뛰어난 내구성 · 내화확성에 의한 유지관리 비용의 절감

4. 아치교의 기본계획

4.1 현황개요

주경간 아치교의 위치는 한강시민공원과 선유도 사이의 한강을 횡단하는 조건으로서 한강의 횡단폭은 B=100m 정도이고 시종점부에 호안보호블럭이 설치되어 있으며 평수위 M.W.L 2.50m, 200년 빈도 홍수위 H.W.L 13.84m이다. 또한, 양측 둔치부의 지반고는 EL. 6.50m로서 아치교 계획시 기초부 Spring Line의 기준점으로 설정되었다.

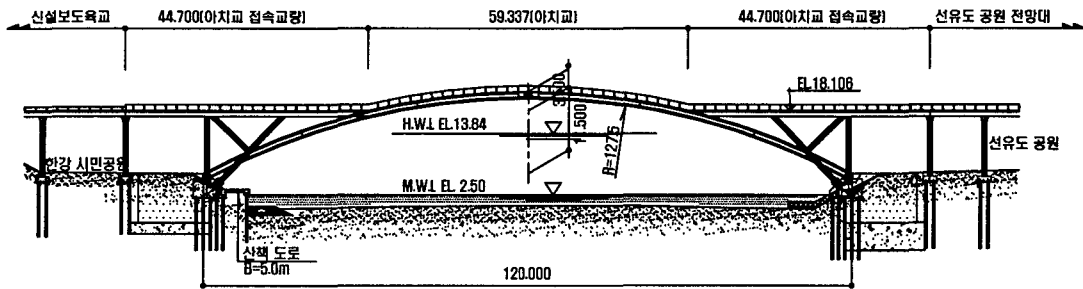


그림 6. 아치교 계획현황

4.2 구조계획 개요

4.2.1 교량 종단 및 평면계획

주경간 아치교의 지간은 (그림-6)에서와 같이 하천의 유심부폭원 및 호안현황에 부합하는 아치 Spring Line 위치를 고려하여 L=120m로 계획하였고 종단계획은 접속교와의 연결, 조형적 구성을 종합적으로 감안하여 R=127.5m 선정하여 아치라이즈 f=15.0m로 계획하였다. 따라서 지간-라이즈비는 $f/l = 1/8$ 로서 비교적 슬랜더한 종단계획이 가능하였다.

평면계획은 지간에 비하여 좁은 폭원구성(B=4.3m)에 따른 횡방향 Sway의 취약성을 해소하고 동선의 변화에 의한 미관을 개선하기 위하여 아치교와 접속교의 교차각을 7°로 선정하였다.

4.2.2 횡단면 구조계획

아치교의 횡단면은 폭원 B=4.3m, 높이 H=1.3m의 π형 단면으로서 상부 플랜지의 Deck는 1.225m 간격의 Rib로 보강된 3cm두께의 패널구조를 적용하였고 Web두께는 16cm로서 자중을 최소화하였다.

중·방향으로의 P.S 도입은 다음과 같다

- 횡방향(Transverse)
 - T13 Monostrand(C.T.C 1.225m)
- 종방향
 - 상부 : 12T15×2ea
 - 하부 : 9T15×4ea

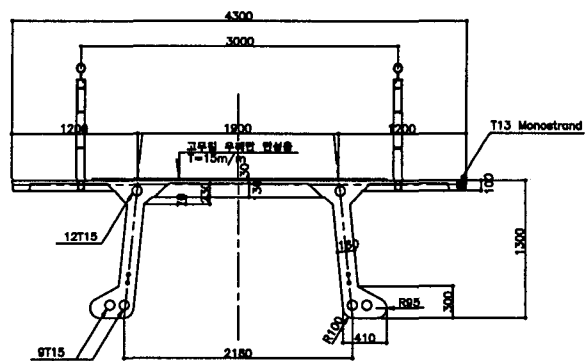


그림 7. 아치교 횡단면 구성

5. 아치교 상세설계

5.1 구조해석 개요

(1) 하중조건

국내의 관련 제기준, 한강수계상의 주변현황 및 보행자 사용여건 등을 감안하여 설계하중을 적용하였다.

구분	기호	적용	구분	기호	적용
자중	DL	2.02t/m(2.5t/m ²)	온도	T	±15℃
상재사하중	D2	0.03t/m(난간)	지진	E	내진 1등급(0.154g 적용)
균중하중	L1	350 kg/m ² (주형검토시) 500 kg/m ² (바닥판검토시)	유지보수차량	L2	750 kg
풍하중	W	300 kg/m ²	유속하중	F	W=10ton, V=5m/sec

(2) 구조해석 Modelling 및 설계방법

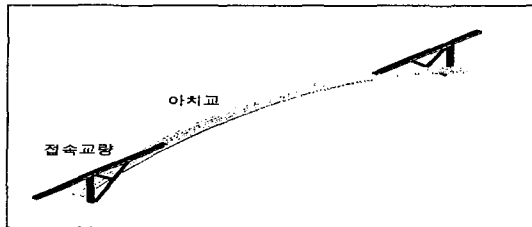


그림 8. 구조해석 Modeling

- (그림-8)과같이 Beam과 Shell 요소를 이용하여 3차원 정밀 구조해석(3000 Element 사용) 수행
- 한계상태설계법(Limit State Design)을 이용하여 사용한계상태(Service Limit State) 및 극한한계상태(Ultimate Limit State)에서 구조적 안정성 확보
- 교량가설 및 P.S 도입등 시공단계별 해석수행

(3) Ductal의 거동특성 및 허용응력

Ductal 재료의 실험결과에 따른 거동특성을 (그림-9)(그림-10)과 같이 이상화하여 설계에 반영하였다.

허용압축강도 $f_c=180\text{MPa}$

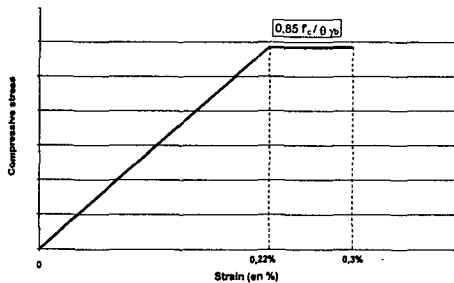


그림 9. 압축강도곡선

허용인장응력 $f_t=8\text{MPa}$

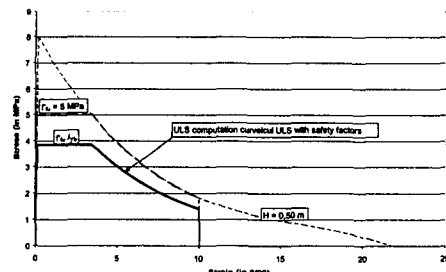


그림 10. 인장강도곡선

(4) 최대 및 최소응력 검토 결과

아치교 부재 위치별 최대, 최소 발생응력은 (그림-11)과 같이 허용 압축응력 $f_c=180\text{MPa}$, 허용인장응력 $f_t=8\text{MPa}$ 미만이 발생하여 안정한 결과를 보이고 있다.

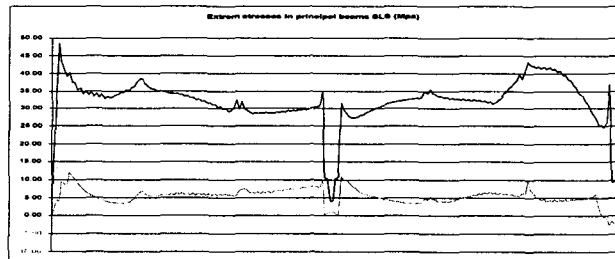


그림 11. 부재위치별 최대, 최소 발생응력

5.2 진동영향 검토

본 교량은 지간 120m, 폭원 4.3m, 형고 1.3m의 매우 슬랜더한 2-Fix Arch교량으로 보행자 이용시 진동에 대한 안정감을 확보하도록 진동영향을 검토하고 진동을 제어할 수 있는 제진장치(T.M.D, Tuned Mass Damper)를 설치하였다.

(1) Vibration 검토결과

보행자의 보행시 2.0Hz 정도의 진동이 발생하는 것으로 알려져 있으므로 구조물의 안정감 확보를 위해 2.0Hz 이상의 구조물 고유진동수가 필요하다.

각 진동 Mode별 진동해석결과 Mode 1, 2, 3에 대해서 <표-5>와 같이 진동을 제어할 수 있는 별도의 제진장치가 필요한 것으로 검토되었다.

표 5. 진동 해석 결과

Modes	Period(in second)	Frequency(in Hertz)
1	1.495	0.67
2	0.793	1.26
3	0.504	1.99
4	0.472	2.12
5	0.340	2.94

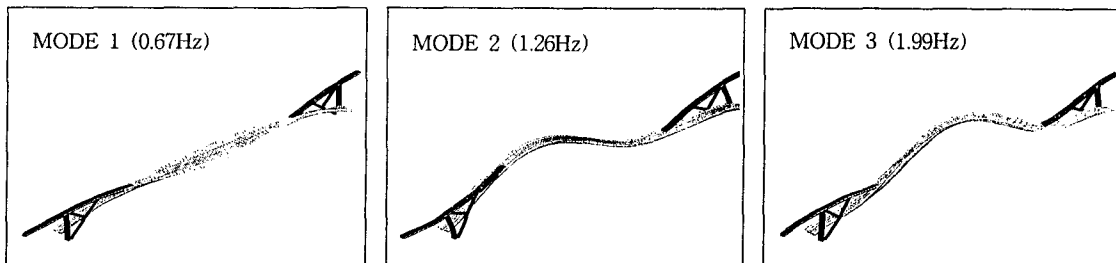


그림 12. 진동 Mode별 구조물 변형 형상

(2) 제진장치(T.M.D)의 설치

Damper D1은 Mode1의 수평진동에 대응하도록 설치하였으며 Damper D2, D3은 Mode2, Mode3의 수직진동에 대응하도록 설치하였다. (그림-13)

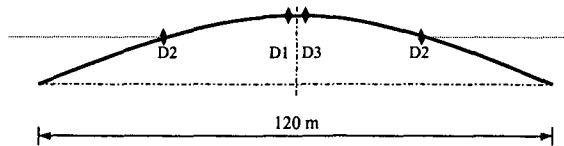


그림 13. TMD 설치위치

표 6. 필요 Damping

Mode	Mass M, in tons	Frequency of the damper f_d , in Hz	Stroke L1, in m
1	0.288	0.667	0.214
2	0.562	1.265	0.122
3	3.300	1.911	0.029

수평 및 수직 TMD의 개념은(그림-14),(그림-15)와 같이 진동성분의 방향성에 따라 가능하도록 설계되었으며 TMD의 상세설계 및 제작은 본 교량의 진동특성을 고려하여 프랑스의 전문회사인 GERB와의 기술협력하에 추진되고 있다.

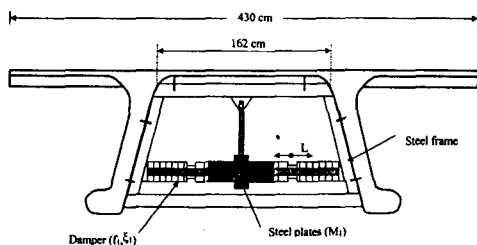


그림 14. Horizontal TMD

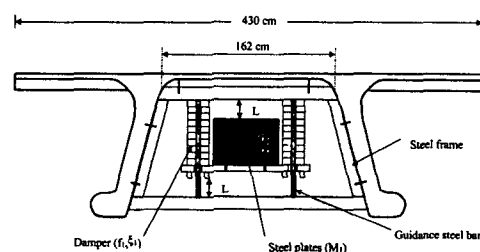


그림 15. Vertical TMD

6. 아치교의 시공

주경간 아치교의 시공은 120m 지간의 아치부재를 20m의 Segment 6조로 분할하여 프리캐스트 부재로 제작하는 과정과 제작된 세그먼트를 가벤프상에 거치하여 P.S를 도입함으로써 일체화하는 Crane Erection과정으로 구분할 수 있다.

6.1 프리캐스트 세그먼트의 제작

두께 3cm의 Deck 구조의 π 형 단면 Ductal Segment의 제작은 특수성 및 고강도·고연성 특성을 감안한 엄밀한 시공계획 및 품질관리가 요구되므로 프랑스 Bouygues사와의 기술협력을 통하여 제작의 각 단계별로 엄격한 사전검토 과정을 거쳐 수행되었으며, 특히 초기건조수축 균열의 방지를 위한 시험시공을 통해 수화열관리·탈형시기·열처리 및 감온 처리과정의 최적화를 도모하였다.

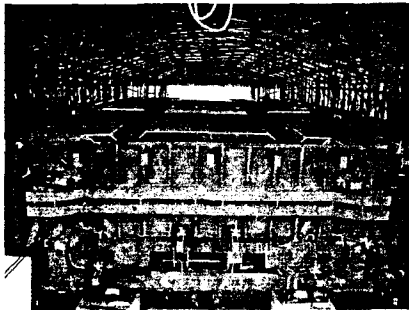


그림 16. Mould 제작현황

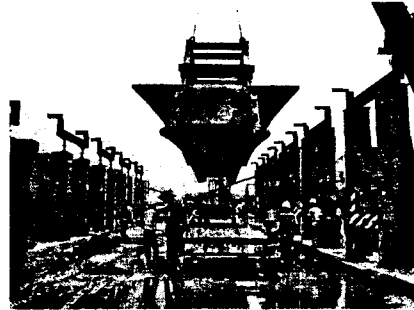


그림 17. Segment의 이동전경

6.2 단계별 시공계획

Casting Yard에서 제작된 길이 20m의 Segment를 거치하기 위하여 가설벤트를 설치하고, 좌·우 1/2경간씩 P.S를 도입하여 연속화한 후, 중앙부의 Key Segment를 삽입하여 P.S 강봉긴장에 의해 일체화함으로써 지간 120m의 양단 고정아치를 완성하도록 하였다.

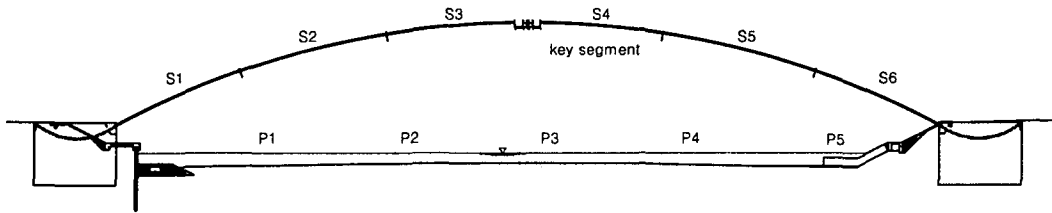


그림 18. 아치교 가설개요도

특히, 가벤프상단에 세그먼트를 정밀하게 거치하기 위하여 Jack-Support 구조를 설치하여 수평력의 발생을 방지하고 P.S 도입시 강제적인 지점부 구속이 없도록 계획하였다.

7. 결론

최첨단 신소재 Ductal을 이용한 주경간 아치교의 설계와 시공경험은 엄격한 품질관리를 요구하는 초고강도 콘크리트 기술의 개발과 응용에 귀중한 자료가 될 것으로 예상되는 바, 향후 본 교량의 시공 중 최대난제로 대두되었던 품질관리상의 제반 문제점 및 처리과정을 상세히 분석하여 별도의 지면에 소개함으로써 우리나라의 고강도 콘크리트 기술분야의 기술발전에 도움이 되고자 한다.