
Global Report

선진 콘크리트 구조물

1. 개요
2. 소개
3. 우수 교량 사례
4. 무조인트 일체형 교량
5. 구조물 지중의 경량화
6. 체코의 선진교량 시공 사례
7. 초고성능 콘크리트의 사용
8. 결론

1. 개요

콘크리트는 교량 건설에 쓰이는 일반적인 재료이다. 본 보고서에서는 지난 100년 동안에 걸쳐 콘크리트 구조물의 발전과 관련한 몇 가지 사례들을 소개코자 한다. 일부 콘크리트 구조물의 수명이 예상보다 짧지만 제대로 설계되고 시공된 구조물을 통해 콘크리트가 필요요건에 부합하는 우수한 재료라는 것을 증명하고 있다. 사례를 든 구조물들이 완성된 시설물로서 흥미로울 뿐만 아니라 건설기술도 관심의 대상이 될 수 있을 것이다. 또한 시공이 비용 측면에서 무시할 수 없는 디자인의 한 부분이라는 것을 보여준다. 유지보수를 최소화하는 추세가 무조인트 일체형 교량(Integral bridges)의 디자인으로 이어지고 있다. 마지막으로 초고강도 콘크리트 적용에 관한 짧은 언급을 통해 콘크리트 구조물의 발전이 아직 진행 중이며 콘크리트 구조물 분야의 보다 향상된 진전이 기대되고 있음을 강조한다.

2. 소개

시멘트 복합 재료로서 콘크리트는 이미 19세기에 발명되었다. 그러나 그 광범위한 발전은 20세기에 들어와서 이루어졌다. 그 전반기에는 철근콘크리트가 주류를 이루었지만 후반기에는 프리스트레스트 구조물(prestressed structures)이 큰 발전을 이룩하였다. 프리스트레싱(Prestressing) 기법은 스팬길이를 늘리고 구조물을 경량화 하였을 뿐만 아니라 첨단 시공기술들을 개발가능하게 하였다. 이 보고서에서는 세계의 우수한 구조물들에 초점을 맞출 것이나 체코에 건설된 구조물에 대해서도 살펴 볼 것이다. 마지막으로 UHPC(초고성능 콘크리트 - Ultra High-Performance Concrete)라 불리는 비교적 새로운 재료가 최근에 개발되었는데 흥미로운 용도로 쓰일 가능성이 높다.

3. 우수 교량 사례

전 세계적으로 뛰어난 교량들이 많이 있다. 물론 그 모든 것을 이 짧은 보고서에 전부 언급하는 것은 불가능하다. 따라서 이 보고서에서는 특별한 특징을 가지고 있는 일부 교량을 집중적으로 다루었다. 로마의 티베르(Tiber River) 강을 가로 지르는 1911년에 건설된 리스보르기멘토(Risorgimento) 교량은 스팬 길이가 100m에 달한다. 이 철근콘크리트 구조물은 교대(abutments)에 고정된 다양한 횡단면을 가진 하나의 빔이다. 이것은 매우 진보된 설계로 날렵한 박스거더 횡단면 설계를 가능하게 하는 것이다. 이 구조물은 매우 현대적으로 만든 것으로 교량받침이 없다. 이 교량은 때로는 하나의 아치로 간주되지만 아치라기보다는 하나의 빔이라고 본다. 이 교량은 콘크리트 구조물의 오랜 내구성을 보여 주는 좋은 본보기인데 그 이유는 큰 보수공사 없이 100년 이상 교통시설물로서의 역할을 해내고 있기 때문이다.

스위스의 협곡을 가로지르는 살지나토벨교(Salginatobel-원문오타 bridge)는 1930년 Robert Maillart에 의하여 설계되었다. 이 교량은 지간이 90m인 전형적인 마야르 아치(Maillart's arch)로서 훌륭한 기념비적 건축물로 간주된다. 이 교량은 8톤 중량의 차량 통행용으로 좁게 설계되었지만 거의 90년 동안 아무 어려움 없이 지역 교통흐름에 이바지하고 있다.

Eugene Freyssinet는 프리스트레스트(prestressed) 콘크리트의 창시자로 널리 알려져 있다. 그러나 이보다 먼저 Plougastel 다중아치교(multispan arch bridge)가 1930년에 그의 설계로 브리타니에 건설되었다.(그림 3 참조). 이 교량은 이중 데크이며 열차와 자동차 통행으로 쓰인다. 3개의 메인 스팬의 길이는 각각 188m 길이이다. 교량의 크기 이외에도 건설기술이 그 당시 특히 흥미로웠다. 아치 구조 가설을 위한 거푸집(scaffolding)을 부유구조(pontoons)로 지지하여 각 지간별로 해당 위치에서 수상에서 떠

받치도록 계획하였다. 다소 단순한 절차로 매우 효율적인 시공 프로세스가 이루어진 것이다.



<그림 3 - Plougastel bridge - (Brittany 1930)>

독일에서는 고속도로망의 발전으로 엄청난 양의 교량 건설을 필요로 하였다. Nurnberg와 Heilbronn 사이의 A6 고속도로에 위치한 Kochertal 교량은 아주 흥미로운 구조물 중 하나이다. 이 교량은 Kocher 강의 넓은 계곡을 약 185m의 높이로 가로지른다. 다중 지간 프리스트레스트 콘크리트 상부구조(multi-span prestressed concrete superstructure)는 횡방향으로 긴 캔틸레버가 있는 박스거더 구조로 140m 길이의 지간을 가지고 있다. 교량의 전체 길이는 1128m이다. 교량의 구조적 배열은 현 시점에서 보아도 대단히 현대적이지만 이 교량은 1979년에 완공되었다. F. Leonhardt에 의한 이 설계는 시대를 앞선 것이라 할 수 있다. 이 교량구조의 특징은 아주 얇은 웨브(스판 중앙의 경우 단지 450mm)를 가지고 있다는 것이다. 높은 교각(pillars) 위에 베어링이 없는 프레임 구조도 유지보수 노력을 줄이는데 기여한다.

스위스 엔지니어인 Ch. Menn은 스위스에서 많은 교량들을 설계하였다. 그 교량들은 비록 규모 면에서 기록적이지는 않지만 아주 효율적이고 우아하게 설계되었다. 이 사람의 많이 알려진 Ganter 교량 또는 많은 아치 교량 이외에, Klosters에 인접한 Sunniberg bridge는 교량 엔지니어링의 하이라이트에 속한다. 메인 스팬이 140m 길이인 사장교(cable stayed bridge)는 낮은 주탑만을 가지고 있다. 이 교량의 상판은 매우 얇은 두께를 가지며, 비부착 외부강선(external unbonded tendons)에 의해 프리스트레스트 되어있다. 이 교량은 단부에 신축이음부를 설치할 필요가 없도록 수평방향으로 구부러져 있다. 이것이 바로 일체형 교량의 하나이다. 교량받침도 없고 신축이음 장치도 없다. 이 구조물은 유연성이 있으며 구조체 내에 과도한 응력에 따른 위험이 없이 온도 변화로 인한 변형을 가능하게 한다.

Millau에 있는 고가도로교(viaduct)는 적어도 유럽에서는 가장 높은 교량으로 간주된다. 길이 2.46km의 이 고가교는 고속도로의 다중 스팬 사장교이다. 가장 높은 콘크리트 교각은 245m에 달하지만, 강재(steel) 상부바닥판 에서부터의 주탑의 높이는 90m이다. 주탑을 포함한 교각의 전체 높이는 지상에서 343m에 달한다. 이 고가교의 표준 지간의 길이는 342m이며 심한 풍하중에 노출된다. 이 교량의 상부바닥판은 폐쇄형 박스거더로서 강재로 제작되어있다. 그 상부구조는 연속압출기법(incremental

launching technique)으로 시공되었다. 높은 교각은 압출(launching)이 진행되는 동안 발생하는 수평력에 대단히 취약해질 가능성이 있다. 이러한 압출이 진행되는 동안 발생하는 수평력을 완벽히 회피될 수 있도록 특수 유압장치가 개발되었다. 이 교량은 영국 건축가 N. Foster와 협력하여 M. Virlogeux에 의해 설계되었다.

비슷한 시기(2004)에 그리스의 Rion-Antirion 교량이 개통되었다. 이 교량은 Patras 시와 인접한 지역에 위치하며, 그리스와 Pelopones 반도를 연결하는 교량이다. 아주 가혹한 환경에 위치해 있는 것이 이 교량의 특징이다. 수심이 60m에 달해 기초구조물을 시공하기에 아주 열악한 조건에 해당한다. 해저의 지질은 지지력(load carrying capacity)이 빈약하며 토양도 부드러웠다. 단층대(tectonic break)가 교량의 축과 교차하여 위치하고 또한 이 지역은 지진 지역이다. 이러한 여건을 견뎌낼 수 있는 교량을 설계하는 것이 요구되었다. 이 사장교는 길이 560m의 3개의 메인 지간과 길이 286m의 2개의 측경간으로 설계되었다. 주탑은 직경 89.5m의 초대형 평판형 기초위에 지지되었다. 그 기초는 드라이 도크에서 타설된 후 제 위치로 수면위로 운반하여 해저로 침몰 시키는 방법으로 시공되었다. 해저면은 지층의 전단 지지력을 보강하기 위해 자갈층 치환과 강제말뚝을 관입을 시행하였다. 만약 하나의 지간이 붕괴될 지라도 주탑은 안정적으로 견디게 계획되었다. 교량 바닥판은 철제 콘크리트 복합 구조체이다. 만약 단층 운동 또는 지진으로 인하여 지간 길이의 변화가 일어난다 해도 이 교량은 버틸 수 있도록 되어 있다. 그 이유는 주탑과 교량 데크의 연결부분이 과도한 움직임을 허용하며 안정적인 주탑은 불균형한 사장재(Stays)의 힘을 견디어 낼 수 있도록 되어 있기 때문이다. Virlogeux는 디자인 컨설턴트로 참여하였으며 J. Combault는 이 교량의 설계와 시공을 담당하였다.

제3 보스포러스 해협 횡단교량이 2016년에 개통되었다. 8차선의 도로와 복선철도 노선을 수용하는 이 교량은 사장교와 현수교를 혼합하여 건설되었다. 주경간의 길이는 1408m이며 주탑 높이는 330m이다. 교량 상판의 폭은 59m이며 M. Virlogeux와 J. F. Klein에 의해 설계되었다. 열차가 운행하는 철도가 있기 때문에 교량의 변형에 대한 매우 엄격한 요건을 필요로 하였다. 주변은 풍하중이 다소 심한 조건을 갖추고 있었다. 현수교 케이블의 행어(hangers)는 철도와 도로 사이의 교량 상판에 고정되어 있는 반면에 사장 케이블(stays)은 횡단면의 모서리에 고정되어 있다. 지간의 중앙부분은 현수교 케이블 단독으로 지지되어 있는 반면에 지점에 보다 근접한 부분은 사장 케이블에 의해서만 지지된다. 이러한 배치는 전체 구조물의 안전성 확보에 보다 유리하다.

4. 무조인트 일체형 교량(Integral bridges)

교량에 소요되는 비용은 (초기)투자비 및 유지관리비, 보수비 등으로 분류할 수 있다. 최근의 디자인 철학은 유지관리비용을 줄이려는 경향이 있는데 그 이유는 교량을 폐쇄하거나 어떤 일정기간 그 운영을 제한할 필요성과 연관되어 있기도 하다. 교량의 경우 교량 구조물 그 자체보다 수명이 좀 더 짧은 수명을 가진 부분들이 있다. 그러한 부분들은 교량의 수명이 다할 때까지 여러 번 교체해 주어야 한다. 그러한 것들 중 일부는 과도한 하중(heavy load)에 노출되거나 손상에 민감한 부분들도 있다. 따라서 가능한 경우 이러한 부분들은 제거하는 경향이 있다. 신축이음 장치와 교량받침은 다소 비싼 부분이어서 설계에서 적절한 방법으로 회피할 수 있다. 신축이음 장치는 주로 온도변화에 따른 교량의 팽창을 가능하게 하는 것이다. 신축이음 장치를 교량구조물에서 없애고 공사해야 한다면 교량이 너무 길어서는 안 된다. 신축이음 장치와 교량받침이 없이 완벽한 교량의 성능을 발휘하는 교량을 우리는 일체형 교량이라 부른다. 한편 교량 전체 길이 중 일부분에서만 교량받침과 신축이음 장치가 제거되는 교량을 우리는 부분 일체형 교량이라 부른다. 일체형 교량의 설계는 보다 세심한 분석이 요구되는데 그 이유는 교량 상

부구조의 온도 변화로 인한 교량의 종방향 길이 변화를 교각과 기초의 유연성에 의해서 전달되어야 하기 때문이다. 신축이음 장치를 없앨 수 있도록, 그리고 차량들이 교량구조에서 일반도로구간으로 원활하게 이동할 수 있도록 일체형 교량 단부는 특별하게 배치(Special arrangement)되도록 설계되어야 한다. 약 50m 정도 까지의 짧은 길이의 교량은 일체형 구조물로 설계될 수 있으며, 더 길어지면 일반적으로 부분 일체형 구조물로 한다. 예를 들면 Scherkondetal 교량은 표준 지간이 44m 길이이지만 신축이음 장치를 설치하지 않고 전체 길이가 576.5m에 달한다.

5. 구조물 자중의 경량화

교량의 지간을 증가시킬 때 고정하중(특히 자중)이 교량의 최대하중이 된다. 자중을 줄이는 것이 자연스러운 추세이며 이를 통해 좀 더 긴 지간의 설계를 가능하게 하고 내력을 증대시킬 수 있는 것이다. 일반적으로 긴 지간의 교량은 박스 거더(box girders)로 설계된다. 단면의 플렌지(flanges)는 압축 또는 인장 등 하중을 전달하는데 필요하다. 단면의 웹(web)은 전단력을 지탱하며 단면의 형태를 유지하는 기능을 담당한다. 만약 웹의 두께를 줄인다면 상당한 하중의 감소를 얻어낼 수 있을 것이다. 골판 형태의 강재 웹(corrugated steel webs)로 콘크리트 웹을 대체하려는 시도들이 있었다. 최초의 아이디어는 프랑스에서 나왔으나 대부분의 실제 교량건설은 일본에서 이루어졌다. 이 시스템은 다소 노동력을 소비하는 편이다. 일본에서 발명된 다른 아이디어로 웹에 고강도 프리스트레스트 PC부재(high strength concrete prestressed precast elements)를 사용하는 방안이 있었다. 이 방안을 실행하면 그 두께는 상당히 감소될 수 있을 것이다. 그 부재는 주 인장력(Principle tensile stress)이 발생하는 방향으로 프리스트레스트 되어지며, 주 압축력(Principle compression stress)이 발생하는 방향의 압축력에 대해서는 고강도 콘크리트가 감당한다. 만약 시공 프로세스가 적절히 계획된다면 상당한 절감을 기대해 볼 수 있을 것이다. 이 방안은 일본의 많은 교량의 세그먼트 시공에 사용되었으며 교량 길이가 3km에 달하는 사례도 있다.

6. 체코의 선진교량 시공 사례

프라하와 드레스덴을 연결하는 D8 고속도로에 Rybny Creek 교량이 위치해 있다. 이 교량은 7스판(가장 긴 것은 58M)의 연속교 형태를 갖추고 있다. 원래 설계는 방향별로 하나씩 두 개의 교량 구조물을 건설하는 것으로 되어 있었다. 공기 단축의 필요성으로 약 30m 폭의 광폭 단면을 가지는 한 개의 교량 구조물로 설계되었다. 단면은 장경간 캔틸레버의 박스거더 형태로 PC 스트럿(precast concrete struts)에 의해 지지되도록 하였다. 이러한 단면은 과거 70년대 Kochertal 교량에 이미 사용된 적이 있지만 아주 효율적이고 현재에도 자주 설계되는 기법이다. 이 교량은 연속압출공법(ILM - incremental launching method)을 사용하여 건설되었는데 전체 상부 구조물의 총량이 약 2만 톤임에도 아주 효과적인 공법으로 판단된다.

프리스트레스트(prestressed) 공법을 도입한 석유저장용 콘크리트 탱크는 장수명 콘크리트 구조물의 좋은 사례로 보인다. 4기의 탱크가 Moravia의 Loukov에 건설되었는데 1기의 탱크용량이 35천 입방미터에 달한다. 이 탱크는 원통형으로 건설되었으며 내부직경은 47.8m, 벽체의 높이는 단지 60cm 두께로 21.4m에 달한다. 이 탱크의 지붕은 두께 250mm의 원형 쉘(circular shell) 형태이다. 이 구조물은 모두 프리스트레스트(prestressed) 콘크리트로 시공되었다. 벽과 마찬가지로 그 기초 슬래브도 두 개의 방향으로 프리스트레스트 기법이 적용되었다. 수평방향으로 프리스트레스트(prestressed) 기법을 적용한 부위는 원통형 벽체의 외부표면에 위치한 4개의 수직 리브에 고정되어 있다. 수직방향으로 프리스트레스

트(prestressed) 기법을 적용한 부위는 기초 슬래브와 벽체를 연결하며 벽체의 상부에서 고정된다. 지붕은 탱크 내부에서 제작된 후 스틸바(steel bars)에 지지되어 최종 위치로 들어 올려 설치되었다. 전체 구조물은 방수처리 되어있다. 누설에 대한 안전성이 매우 중요하므로 탱크 벽체 내부에 두 겹의 설비가 접착되어 있다. 만약 두 겹 중 첫 번째 겹에서 누설이 관찰된다면 알람이 작동되고 탱크를 비운 후 실링설비를 보수해야 한다. 일반적인 탱크의 수명이 25~30년인데 반해 이 탱크의 수명은 50년 이상으로 설계되어 있다. 이 탱크들은 기술적인 이유로 흠으로 덮여져 있으며 2011년에 완공되었다.

7. 초고성능 콘크리트의 사용

UHPC(초고성능 콘크리트, Ultra-High-Performance Concrete)는 지난 90년대에 개발되기 시작했는데 그 당시는 화학혼화재가 점진적으로 개선되던 시기였다. 고강도 콘크리트를 얻으려면 함수량이 최소화되어야 하고 재료의 밀도는 가능한 커야만 한다. 함수량을 감소시키는 것은 효율적인 고성능감수제(superplasticizers) 없이는 가능하지 않았다. 콘크리트 구조물의 공극을 없애기 위해서는 마이크로 실리카(microsilica) 및 석분과 같은 고운 분말재료를 첨가해야 한다. 마침내 압축강도 150MPa를 초과하는 재료를 생산하는 것이 가능해졌다. UHPC의 취성 파괴를 피하기 위하여 고강도 강섬유로 보강한다. 인장강도는 10MPa를 초과하는 수준이다. 콘크리트 재료의 특성은 주로 프리스트레스트 구조물의 전망을 밝게 하고 있다. 또한 재료의 밀도가 구조물에 수분 침투를 허용하지 않기 때문에 UHPC로 만든 부재의 뛰어난 내구성을 보장하는 우수한 기계적 특성도 가지고 있다.

UHPC로 만든 최초의 인도교(footbridge)는 1997년에 캐나다의 Sherbrook footbridge였다. 그 이후 인도교, 교량, 지붕에 사용되었으며 건축공사의 경우 건물외관 부재용으로 선호되어 사용되었다. 이러한 오랜 수명은 교체할 필요가 없는 구조물의 긴 사용수명을 의미한다.

최근에 기존 구조물의 복구 및 강화사업이 빈번히 발생하고 있다. 이 재료는 아직 새로운 재료이고 시공 사례가 다소 제한적이다. UHPC 설계지침도 서서히 발전하고 있다. 현재 교량에 대부분의 적용사례는 말레이시아에 있는데 관할 지자체에 의해 요구된 세부 설계규정이 까다로운 편은 아니었다. 약 100여개의 교량이 거기에 이미 건설되었고 단지 하나의 교량이 독일에 있다.

체코의 경우 Čelákovice 지역에 Labe 강을 가로지르는 곳에 사장교 형태의 인도교를 건설할 기회가 있었다. 이 사장교 형태의 인도교는 주경간이 156m 이고 두 개의 측경간 길이는 43m에 이른다. 교량의 상판은 UHPC로 제작한 세그먼트로 만들어졌다. 프리스트레스트 기법으로 UHPC 교량 상판 구조물을 제작하였으며 그 설계수명은 120년이다.

8. 결론

이 보고서는 세계적으로 건설된 우수한 구조물들을 소개하고 있으나 우리와 같은 작은 나라(체코)에도 흥미로운 구조물이 건설될 수 있다는 것을 보여준다. 콘크리트 구조물은 우리의 일상생활에서 볼 수 있는 난관을 겪을 수도 있으나 대체로 그러한 문제는 콘크리트 자체의 문제가 아니라 설계와 시공의 부적합함에서 초래되는 것들이다. 경험의 축적, 재료의 진보 및 보다 디테일한 건설관리로 밝은 앞날이 기대되며 콘크리트 구조물은 향후에도 발전할 것이며 성공적으로 그리고 확실히 그 목적에 부합할 것이다.

<원문제목> ADVANCED CONCRETE STRUCTURES

<원문출처> 24th International Conference 5, ENGINEERING MECHANICS 2018