

프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 교량의 시공

오 병 환*, 정 철 현**

* 정회원 · 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정회원 · 서울대학교 공과대학 박사과정

1. 머리 말

프리캐스트 콘크리트는 구조물이 설치될 최종위치로 부터 떨어진 곳에서 만들어진 콘크리트 구조물로서, 구조물의 최종 위치에 운반 및 설치되어 연결된다. 프리캐스트 콘크리트부재에 관한 설계 및 시공규정은 몇 가지 측면에서 현장타설 콘크리트의 부재와는 다르다.

프리캐스트 부재의 제작은 일반적으로 제작대를 설치하고 이것을 이용하여 여러개의 부재를 제작하는 일이 많다. 이와 같은 경우 제작대는 프리캐스트 부재의 형상과 치수가 정확히 확보되고, 또한 프리스트레싱에 의한 부재의 변형이나 지점 반력의 변화를 고려하여 설계 시공해야 한다.

프리캐스트 부재에 프리스트레스를 주면 솟음이나 수축등의 변형이 생기고 다시 시간의 경과와 함께 콘크리트의 크리프, 건조수축에 의하여 변형한다. 이들 변형이 구조물의 형상, 치수에 유해한 영향을 주는 경우는 미리 그들 변형을 고려하여 부재를 제작하여야 한다.

2. 프리캐스트 구조물의 기본요건

2.1 설계일반

프리캐스트 콘크리트의 설계는 세심한 고려가 필요하다. 제작에서 설치에 이르기까지 부재에 작용하는 모든 하중은 실제 작용하는 사용하중보다 클 수도 있으며, 프리캐스트 부재를 다루는 과정에서 종종 영구변형을 유발할 우려도 있다. 그러므로 프리캐스트 부재를 운반하고 조립하는 방법에 특별한 고려가 필요하다. 연결부와 상호연결 부재의 영향도 매우 중요하다. 프리캐스트 부재의 구조적 거동은 현장 타설된 일체구조물의 거동과는 상당히 다를 수 있다.

긴조수축, 크리프, 온도, 탄성변형, 풍하중 및 지진하중으로 인한 힘을 전달하기 위한 연결부의 설계는 프리캐스트 시공에서 특별한 고려를 하여야 한다. 이러한 연결부의 상세는 프리캐스트 시공의 적절한 성능을 위하여 특히 중요하다.

이러한 요인들을 고려한 프리캐스트 콘크리트의 설계시 고려하여야 할 전반적인 사항을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 프리캐스트 부재의 설계시에는 거푸집 제작, 저장, 운반, 조립등을 포함한 초기 제작에서 구조물의 완성에 이르기까지의 모든 하중 및 구속조건을 고려하여

야 한다.

- (2) 일체로 거동하지 않는 프리캐스트 시공에서는 구조계의 적절한 성능을 보장하기 위하여 모든 연결부분에서의 영향을 고려하여야 한다.
- (3) 상호 연결된 구조 부재에 관한 영향을 포함하여 초기 및 장기처짐의 영향을 설계에 고려하여야 한다.
- (4) 연결부 및 지압부의 설계시에는 건조수축, 크리프, 온도, 탄성변형, 풍하중, 지진등을 포함하여 전달되는 모든 힘의 영향을 고려하여야 한다.
- (5) 모든 부분의 상세는 제작 및 조립 허용범위내에 들도록 설계해야하며 일시적인 조립응력을 받을 수 있도록 설계하여야 한다.

2.2 세부사항

프리캐스트를 들어올리기 위하여 설치된 매입장치 주위에는 철근을 보강하여 모든 일시적 힘들에 견디도록 해야 한다. 프리캐스트 부재는 사용하중하에서 충분한 성능을 발휘하고, 극한설계 하중하에서는 충분한 강도를 유지하도록 설계되어야 한다. 그러나, 취급시의 하중이 영구응력이나 영구변형, 균열, 처짐등을 유발하지 않도록 각별히 주의하여야 한다.

프리캐스트 부재를 제작할때 철근을 콘크리트 외부로 노출시키도록 하는것이 어렵기 때문에, 부재의 역학적 거동에 위배되지 않을 경우 외부에서 소성콘크리트속으로 철근을 매입할 수 있다. 단, 이때 매입철근은 제자리에 정확히 위치하도록 해야하며 콘크리트가 잘 다져져야 하고, 설계하중을 발휘할 수 있도록 정착시켜야 한다.

위의 내용들을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 철근배치, 연결부, 지지대, 삽입부, 정착장치, 콘크리트 덮개, 개구부, 들어올리기 위한 장치, 제작 및 조립허용범위 등에 관한 모든 상세가 제작도면상에 포

시되어야 한다.

- (2) 콘크리트로부터 노출된 상태로 남아있는 연결철근과 같은 매입품목(embedded item)들은 콘크리트가 소성상태에 있을 때 콘크리트속에 묻을 수 있다. 단, 이때 다음 사항을 만족하여야 한다.
 - 가) 매입품목들은 소성콘크리트내에서 철근에 같고려되거나 연결되지 않은 것 이라야 한다.
 - 나) 매입품목들은 콘크리트가 소성상태일 때 제자리에 정확히 위치시켜야 한다.
 - 다) 매입품목들은 요구되는 극한설계하중이 발휘되도록 적절하게 정착시켜야 한다.

2.3 운반, 저장 및 설치

프리캐스트 부재는 운반가설등 취급방법에 따라 작용하는 하중이 작업의 단계마다 다르므로 부재에 유해한 영향을 미치지 않는 방법으로 해야 한다. 운반중에 부재를 좌우로 크게 기울이면 자중에 의한 휨모멘트가 가로방향으로부터 작용하고 부재의 측면 및 상연에 인장응력이 생긴다. 또한 지간의 길이에 비하여 폭이 좁은 부재는 일반적으로 가로방향의 안전성을 약화시키는 경향이 있다. 따라서, 안전성이 충분한가를 미리 확인하여 안전성이 작은 경우는 충분한 대책을 강구하여야 한다. 이와 같이 하여 부재의 균열 및 가로방향 좌굴에 대한 안전성을 미리 높이고 운반 가설에 있어서도 주의깊게 취급해야 한다.

프리캐스트 부재를 보관하는 경우에는 설계에서 정한 지지위치에서 확실하게 지지해야 한다. 또한 지반의 부등침하, 지진등에 의하여 부재가 기울거나 넘어지는 일이 있으므로 전도방지에 대한 대책을 강구하여야 한다. 또한 한냉기에 PC그라우트를 주입하지 않은 포스트텐션부재를 장기간 보관할 때 덕트내부에 물이 고여 있으면 이것이 동결하여 부재에 균열이 생기는 원인이 되므로 부재를 이런상태로

보관해서는 안된다.

따라서, 덕트내에 물이 고이지 않도록 적당한 대책을 강구해야 하고, 부득이 이런 상태로 장기간 보관할 경우에는 긴장재를 녹이나 부식으로부터 보호할 수 있는 충분한 조치를 강구해야 한다.

위의 내용을 간단히 요약하면 다음과 같다.

- 1) 프리캐스트 부재의 양생, 거푸집제거, 저장, 운반 및 설치과정 중에 프리캐스트 부재가 초과응력을 받거나 뒤틀리거나 손상을 입지 않도록 해야하며 구조물에 나쁜영향을 줄 수 있는 솟음(camber)을 일으키지 않도록 해야 한다.
- 2) 프리캐스트 부재는 영구적인 연결이 완료될 때까지 적절한 배치와 구조적 건전성을 보장하기 위하여 설치하는 동안에 적절히 브레이싱되고 지지되어야 한다.

3. Bahrain Causeway의 프리캐스트 시공예

3.1 개 요

사우디 아라비아와 바레인을 연결하는 국제적인 인도(causeway)로서 3,120-16,900ft(950-5,150m)의 길이를 가진 5개의 교량으로 되어 있다. 1986년에 완성된 이 교량은 중동에서 수행된 가장 규모가 큰 교량 프로젝트이며, 세계에서 바다를 연결하는 가장 긴 다리중에 하나이다.

배의 통행이 가능하도록 주 항해지간을 위한 교각을 포함해서 모든것을 프리캐스트 콘크리트 요소로하여 건설하였다(그림 3.1). 5개 교량의 상부 구조물은 각 방향에 대한 독립적인 차선으로 구성되어 있다. 각 차선은 주 항해지간이 길이 3.9m, 높이 2.7-8.4m인 프리캐스트 콘크리트 세그먼트로 이루어진 상자형 거더(box girder) 교량이다(그림 3.2). 프리캐스트는 Work섬이라 알려진 큰 지역에서 제조하였다.

배가 통행하는 지간의 높이는 다른 교량의 높이보다 2배 이상으로 끌어올렸고, 지간길이와 건설형태에서 특별한 변화를 준 주 항해지간은 3.2mile길이의 No.3 교량 중심부 근처에서 1mile이나 되는 긴 산맥을 형성하고 있다.

주항해지간은 프리캐스트 세그먼트 상자형 거더를 3경간 연속으로 시공하였고, 각 경간길이는 80m, 150m, 80m로 시공되었다. 이 주항해지간에 접속되는 지간들에는 단순지지형태의 포스트텐션 상자형거더로 시공되었다.

3.2 프리캐스트 콘크리트의 제조

3.2.1 배합특성

계약자는 아라비아만 주변의 열악한 해양환경 속에서 워커빌리티와 강도가 규정에 일정하게 만족하는 내구성있는 콘크리트를 생산할 수 있도록 많은 연구를 수행하였다. 이 지역은 평균 최대 대기온도가 40°C이상이고 습도는 때때로 100%에 이르며, 수온은 25°C, 해수의 염분농도는 4.3%이상으로 매우 높아 콘크리트 구조물의 수명이 짧은 것이 특징이었다. 따라서, 건설의 교차로 인한 염분의 결정화가 콘크리트 표면을 심각하게 열화시키는 문제를 완화하기 위하여 물의 침투성이 낮은 콘크리트 배합을 도출하였다.

3.2.2 시멘트

시멘트 선택시 다음과 같은 요인을 고려하였다.

- 1) 다양한 해양환경(marine environment)에서의 과거의 시멘트 성능
 - 2) 낮은 alkali content
 - 3) 황산염 저항성(sulphate resistance)
 - 4) 열에 의한 균열 가능성을 감소시키기 위해 낮은 수화열을 갖는 시멘트
 - 5) 프리캐스트의 7일강도는 최소 180kg/cm² 이상이 되도록 한다.
- 황산염 저항성을 갖기 위해 72%의 고로슬

래그를 함유한 포트랜드 시멘트를 선택하였으며, 이 시멘트의 알칼리 함량은 0.3%, Blaine에 의한 분말도는 3870cm²/g이었다.

3.2.3 혼화재료

ASTM C494-82 Type B에 따르는 인산염계통의 지연제에다 ASTM C494-82 Type F에 따르는 황화 나프탈렌 계통의 광범위 감수제를 혼합하여 사용하였다. 비록 콘크리트 혼합공장이 콘크리트 사용지역 가까이에 있지만 batch plant에서 다량의 감수제의 사용때문에 일어나는 슬럼프의 손실을 방지하기 위하여 자연제가 함께 사용되었다.

3.2.4 골재

잔골재는 바다의 모래에서 준설하였고, 이를 민물로 세척하였다. 이 모래의 최종 구성성분은 주로 석영과 약간의 장석, 방해석 그리고 소량의 백운석으로 구성되어 있다. 요구되는 조립율은 2.3-3.1이다. 측정된 조개껍질 성분은 최대 허용량 30%에 훨씬 못 미치는 7%였다.

굵은 골재는 아랍에미레이트에 있는 산에서 채취한 화성암을 부수어 사용하였다. 이 암석은 높은 단위 중량과 낮은 흡수율을 가지고 있으며 염화물이 존재하지 않는 비교적 양질의 골재원이었다. 굵은 골재의 최대치수는 25mm였으며, 두 골재에 대한 ASTM C289에 따르는 알칼리-골재반응 가능성에 대한 시험결과 모두 해가 없는 것으로 판명되었다.

3.2.5 물

바레인의 서쪽 부분은 수백년 동안 농업과 항해를 위한 신선한 물의 근원지였지만, 지나친 펌핑(pumping) 때문에 최근 수년동안 지하수위의 압력이 낮아졌으며 지역에 따라서는 최근에 부분적으로 염분이 존재하는 것으로 나타났다. 이 공사를 위해서는 다량의 많은 물이 필요하고 이 지역의 물은 염분함유로 적합하지 않기 때문에 역삼투압 방식의 염분제거 plant가 프리캐스트 제조공장에 세워졌다. 공사에 사용되는 모든 물은 이 곳에서 나오

처리후 염화물의 농도가 약 14ppm 밖에 되지 않았다. 이 물은 냉각수와 얼음을 만들 때에도 사용된다.

3.2.6 배합설계

이 공사는 해양공사이기 때문에 28일 콘크리트강도와 최소 시멘트량이 규정되어 있다. 기초를 위한 grid와 pier shafts와 상부구조물은 28일 압축강도가 360kg/cm², 최소 시멘트량은 400kg/m³로 규정되었다. Drop-in-span을 지지하는 half-joint는 위와 같은 최소시멘트량에 400kg/cm²의 28일 압축강도로 규정되었다.

이와 같은 규정을 만족시키기 위하여 물-시멘트비 0.38과 단위시멘트량 400kg/m³를 사용하여 실제 콘크리트를 생산하고 7일과 28일 강도를 측정된 결과 각각 350kg/cm²의 압축강도를 얻을 수 있었다.

3.2.7 혼합, 타설 및 양생

여름에 두 대의 냉각기가 각각의 batch plant에 사용된다. 주 batch plant는 얼음제조기도 가지고 있는데 때로는 하루 24시간 동안 가동하기도 한다. 단일 저장탱크에 있는 물은 타설시 콘크리트의 온도가 32°C 이하가 되도록 하기 위하여 더운 날씨에도 2°C이하를 유지해야 한다. 겨울에는 물의 온도를 30°C로 유지하였지만 콘크리트 배합후 온도는 약 20°C 정도였다. 배합은 완전 자동화로 되어 있으나 지연제는 손으로 첨가한다. 배합은 2m³의 팬에서 수행된다. 물위에 떠있는 이 batch plant는 시간당 최대 40m³의 생산능력을 가지고 있다.

콘크리트는 프리캐스트 제조공장에서 agitator trucks에 의해 운반되고 콘크리트 펌프로 타설된다. 다짐과 진동은 needle vibrators를 사용하는데 벽체와 상부슬래브는 거푸집 표면에 고정시키는 고정 vibrators를 이용한다. 하부슬래브의 윗 표면은 나무판을 이용하여 마무리하고 상부슬래브는 솔로 마무리한다.

콘크리트의 양생은 콘크리트를 타설한 후 3시간후부터 증기양생을 실시하였고 이 때 시

간당 5°C 정도로 온도를 증가시켜 32°C까지 올렸다. 프리캐스트 제품은 수화열로 인한 콘크리트 내의 최대온도가 60°C까지 올라갔을 때 거푸집을 탈형하였으며, 제거된 거푸집은 재사용되었다. 거푸집 제거후 프리캐스트 콘크리트의 갑작스런 온도차로 인한 열충격(thermal shock)을 줄이기 위하여 천막으로 보호하였다.

3.3 프리캐스트의 제작

3.3.1 프리캐스트 격자기초

항해용지간의 프리캐스트 콘크리트 상부구조를 지지하는 42번에서 45번 교각들은 매스 기초(mass foundation)위에 설치된다. 이 4개의 교각을 지지하는 4개의 기초들은 각각 3~4m 높이의 격자벽(grid wall)으로 구성된 4개의 프리캐스트 기초를 바다현장에서 쌓아올려 조립하고 이 격벽내부에는 현장타설 콘크리트를 타설하여 일체화시킨다. 이 격자기초중 아래의 2개 격자는 4각형 형태이고 위에 놓이는 2개 격자는 약간 작은 크기의 8각형 모양을 하고 있어 조류이동으로 인한 저항을 최소화하도록 설계되었다.

3.3.2 프리캐스트파일과 파일 캡

프리캐스트 프리스트레스트 중공 콘크리트 기초 파일은 직경 3.5m 높이 약 6m의 세그먼트로 제작되어 필요한 길이로 조립된 후 프리스트레싱과 그라우팅을 하여 양생 후 시공되었다. 교량높이가 낮은 구간은 각각의 파일이 개별적으로 파일캡을 갖고 있지만, 항해용 구간과 같이 교량이 높은 구간은 두개의 파일을 횡방향으로 연결하는 헤드빔(head beam)이 설치되었다. 이 프리캐스트 헤드 빔은 교량의 횡방향으로 작용하는 지진 하중에 대한 저항력을 보강하기 위한 것이다.

3.3.3 프리캐스트 상부구조

프리캐스트 상부구조를 제작하기 위한 두개의 제작장이 콘크리트 기초 위에 세워졌다.

강판 거푸집에 대한 무거운 가설물은 모든 지지점에서 수평을 유지할 수 있도록 하였다. 프리캐스트의 제작 순서는 가능한한 변화를 줄일 수 있도록 조절하였으며, 설치 계획과 제작장의 노동력 이용 계획에 맞게 조정되었다.

상판구조의 횡방향 프리스트레싱을 위한 텐던은 콘크리트를 타설하기 전에 정착장치와 함께 미리 설치되었으며 직경 6mm 강선을 여러 가닥으로 미리 조립하여 1m 간격으로 설치하였다. 제작장에 이 텐던들을 프리스트레싱한 후 간격판을 삽입하고 그라우팅을 실시하였다.

주 교각들 위에 놓이는 세개의 프리캐스트 세그먼트(hammerhead)는 제작장에서 함께 제작되어 하나의 부재로 긴장시켜 현장에 설치하며 이것의 무게는 약 728톤이나 된다. 이 해머헤드(hammerhead)는 바지선 위에 실어서 교각 위치까지 운반한 후에 shearleg floating crane으로 들어서 교각 위에 설치한다.

프리캐스트 세그먼트의 접합면에는 solvent-free thixotropic 2-component 에폭시 접착제가 사용되었으며 이 접착제는 뜨거운 기후 조건 아래서 프리캐스트 교량의 접착요건을 충족시키도록 제조되었다. 이 접착제는 먼저 설치된 프리캐스트 세그먼트에만 바르고 완전한 접착을 위하여 두개의 세그먼트를 직경 36mm의 Dywidag 강봉으로 일시적인 프리스트레싱을 가한다. 이 때 프리스트레싱의 크기는 약 2.1kg/cm² 정도이며 이를 위하여 프리캐스트 하부 슬래브에 두개의 강봉과 상부 슬래브에 4개의 강봉을 설치하여 긴장한다. 접착제로 접합된 부분의 두께는 약 1mm로 규정되어 있으나 실제 시공은 5mm 정도로 이루어졌다. 따라서 넘치는 접착제는 긴장도중에 빠져 나오게 되고 이들을 굳기 전에 제거하였다.

프리캐스트 세그먼트의 영구적인 스트레싱은 에폭시 접착과 임시 긴장을 한 다음날에 이루어지게 되며, 이 텐던은 유압으로 작동되는 스트랜드 인입기에 의하여 설치된다. 긴장 작업을 할 때에는 긴장시킨 하중과 이로 인한

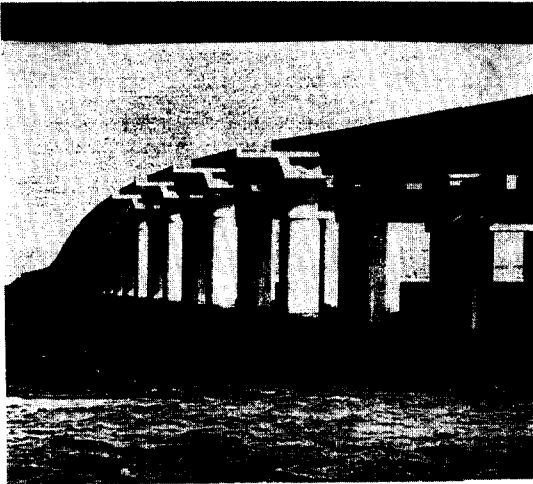


그림 3.1 교각과 상부구조가 모두 프리캐스트부재로 시공된 Bahrain Causeway교량

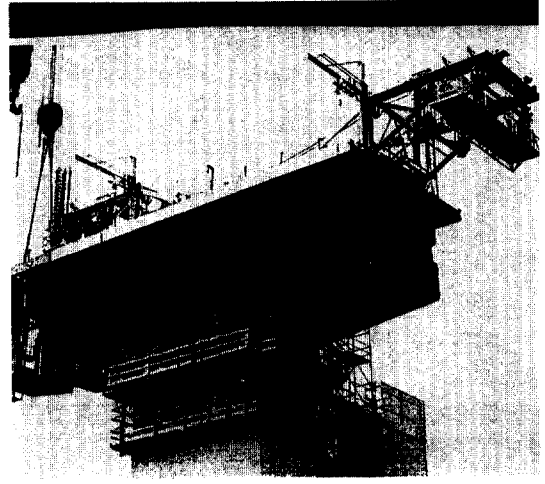


그림 3.3 주향해지간이 4m길이의 프리캐스트 콘크리트 상자형 거더 세그먼트로 시공되고 있는 광경

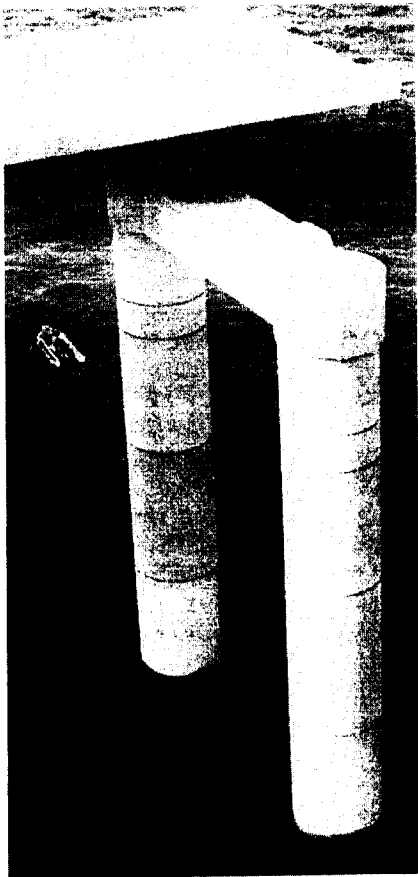


그림 3.2 4개의 파일그룹에 의해 지지되고 있는 프리캐스트교각

신장량을 모두 측정함으로써 프리스트레스의 정확한 크기를 점검하게 된다. 이 프리스트레싱 작업중에는 도입되는 응력과 변형 사이의 관계를 측정하여 그래프로 나타나게 한다.

상부구조의 시공에서 또 한가지 중요한 사항은 프리캐스트 세그먼트의 종방향 선형(elevation)과 평면 선형(plan)이다. 이를 위하여 각 세그먼트를 설치할 때마다 위치가 맞도록 조절하였으며 이 위치에 대한 측정은 고르지 못한 온도 영향을 최소화하기 위하여 아침 일찍 실시하였다. 상판 구조가 뒤틀리게 설치된 경우를 대비하여, 추가적인 덕트가 있었지만 이들이 실제로는 사용되지 않았다.

4. Zilwaukee 프리캐스트교량의 시공예

4.1 개요

Zilwaukee교량은 포스트텐션(post-tensioned), 세그멘탈(segmental), 프리캐스트 콘크리트 상자형거더(precast concrete box girder) 형식의 교량으로서, 각각의 길이가 2.4km, 높이 38m로 된 두개의 교량으로 이루어져 있다. 이 교량은 기존에 4차선으로 된 가동교를 대체하기 위해

새로이 건설되었다. 1960년에 건설된 가동교는 건설된지 몇년되지 않아서 통행량이 설계용량을 초과하였다. 현재의 일평균통행량은 약31,000대이고, 설계용량은 10,000대이다. 주말에는 하루에 약 60,000대가 통행한다.

가동교를 대체시키기 위한 결정을 내리기전에 많은 대안들을 고려하였다. 대안으로서 Saginaw강 아래로 터널형태의 교량을 건설하는 것을 고려하였는데 이는 강위로 설치하는 교량(high level bridge)보다 건설비용이 2.5배나 많이 소요된다. 또한 도로의 재배치가 요구되기 때문에 취소되었다.

많은 대안들이 검토된 끝에 강위로 교량을 건설하는 안이 채택되었다. 새로운 교량은 대략 2.4km의 길이와 38m높이를 갖는 교량으로서 차량과 배가 자유롭게 통행할 수 있게 하였다. 또한 새로 건설되는 교량은 2개의 교량이 나란히 놓이게 되어 각각 남쪽방향과 북쪽방향 차량을 수용할 수 있게 하였다.

4.2 프리캐스트의 제작 및 시공

Zilwaukee교량은 포스트텐션, 세그멘탈, 프리캐스트 상자형 거더 형식의 구조물이다. 교량건설시에 사용되는 세그멘트는 교량 건설장소에 있는 공장에서 6000psi(40Mpa)의 강도를 갖는 콘크리트로서 제조하였다. 교량을 완성시키는데 필요한 세그멘트는 총 1,592개 이다. 하나의 세그멘트는 73.5ft(22m)의 폭과 8-12ft(2.4-3.6m)의 길이를 갖는다. 또한 무게는 120-160ton 정도이다. 교량은 균형 캔틸레버 방법(Balanced cantilever method)을 사용하여 건설하였다(그림 4.1). 포스트텐션닝 텐던(post-tensioning tendon)은 7개의 wire로 구성되어진 12개의 강연선(strand)으로 이루어져 있다. 각 wire의 직경은 1/8in(3mm)이고 재질은 강선이다. 교량을 완성시키는데 소요된 강선은 총 27,000miles(43,450km)이다. 포스트텐션을 가하는 동안 각 케이블 텐던은 거의 200ton에 가까운 힘을 받는다.

각 세그멘트를 결합하기 전에 연결부위 표면에다 고강도 에폭시를 발랐다. 이 에폭시는 교량자체에 난 구멍을 통하여 노면이 부식되는 것과 물이 스며드는 것을 방지하기 위하여 세그멘트 사이의 결합부분을 밀봉하는 역할을 한다. 또한 이 에폭시는 결합되어 있는 각 콘크리트 세그멘트의 강도보다 높은 강도를 갖고 있다.

교량에 있는 케이블은 도금을 한 강관 내에 설치되어 있고 이 강관은 세그멘트 제조시 이곳에다 미리 설치한다. 교량지간이 완성되고 건설이 진전됨에 따라, 완성된 지간 안에 있는 프리스트레스 도관 내에 고압력에 의해서 시멘트 그라우팅을 하였다. 이 시멘트 그라우팅은 강선을 보호하는 층을 형성하게 된다. 강선을 부식으로부터 보호하기 위해 교통국에서는 콘크리트에 생긴 균열이 0.004in(0.1mm)보다 큰 경우는 보수할 것을 요구하고 있다. 고압력에 의해서 주입된 에폭시는 보수한 부분에 물이 스며드는 것을 방지해주고, 본래 콘크리트의 강도보다 큰 강도를 갖게 해준다.

각 세그멘트는 1700ton의 무게와 940ft(287m)의 길이를 갖는 launching girder를 사용하여 설치하였다. 이 launching girder의 무게와 세그멘트를 교량위로 운반하는 트럭의 무게를 합하면(그림 4.2) 약 40ton의 무게를 갖는 트럭 49대분에 해당한다. 교량이 건설되는 동안 교량이 받는 하중은 건설이 완료된 후 받는 차량하중보다 훨씬 무거운 하중을 받으므로, 이에 대한 고려가 필수적으로 이루어져야 한다.

4.3 시공중의 사고발생과 그에 대한 보수

1981년에 첫번째의 세그멘트가 설치되었고, 1982년까지 교량을 지지하는데 필요한 교각이 Toebe 건설회사에 의해서 완성되었다. launching girder는 9, 10, 11번 교각위에 부분적으로 완성된 지간위에 설치되었다. 각 2개의 교량은 8개의 신축이음(expansion joint)을 갖고 있다.

교량이 건설되는 동안 신축이음은 견고하여야 하며 다른 모든 세그먼트와 마찬가지로 어떠한 이동도 억제되어야 한다. 그러나 교량 지간이 완성된 후에는 조인트 부분의 신축이 가능하여야 한다. 따라서 이 신축이음부의 시공은 초기에 콘크리트 블럭을 신축이음부에 끼워넣고 일시적으로 텐던긴장을 한 후 교량지간이 완성된 후에 콘크리트 블럭을 제거함으로써 신축이음부의 역할을 수행하게 된다.

1982년 8월 이전에 4개의 신축이음이 아무런 문제없이 건설되었다. 그러나 8월 28일에 북쪽방향 교량의 11번째 지간에 있는 신축이음 부분에 일시적으로 설치한 압축블럭이 콘크리트 세그먼트를 launching girder에 의해서 운반하는 도중에 부서지기 시작했다. 이로 인해 300ft(91.5m)길이의 교량 상판 한쪽 끝단에서 5ft(1.5m)가량의 하향처짐이 발생하였고, 다른 한쪽에서는 3.5ft(1.0m)가량 위로 처짐이 발생하였다.

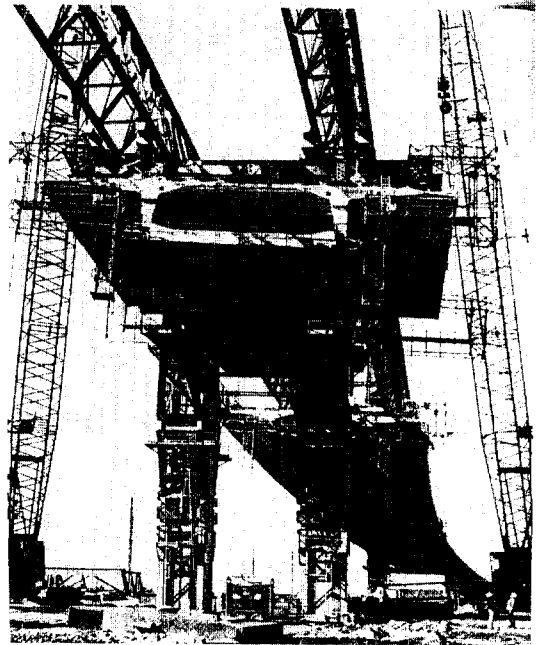


그림 4.1 균형칸틸레버방법으로 프리캐스트 상자형 거더세그먼트를 시공하고 있는 광경

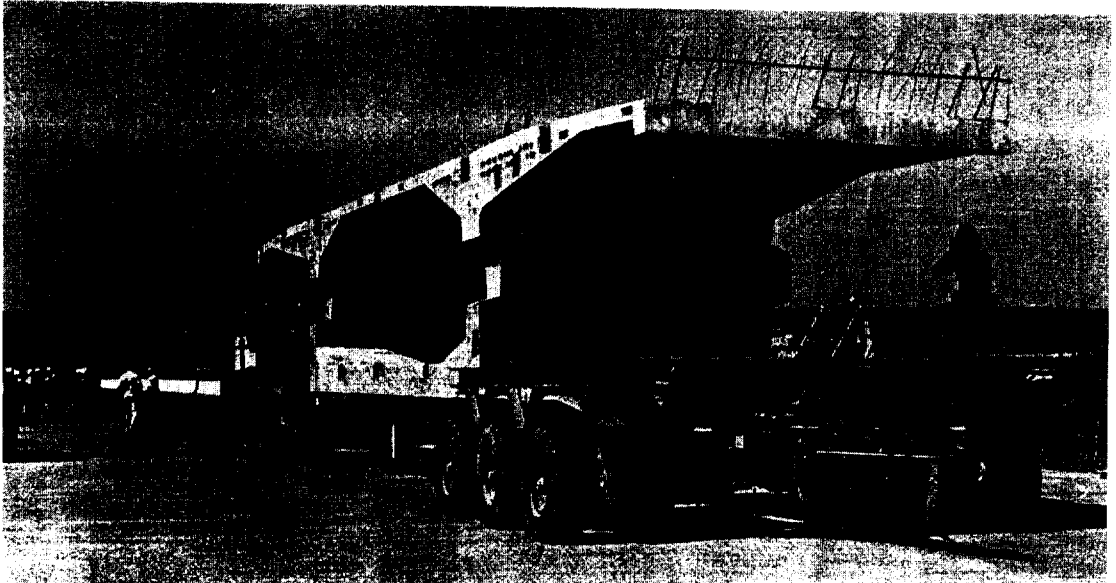


그림 4.2 프리캐스트콘크리트 세그먼트를 운반하는 차량을 이용하여 교량의 재하시험이 수행되고 있는 광경

교량 상판의 이러한 경사로 인해 상당한 손상을 입는 결과를 초래하였다. 11번 교각의 상

부는 수직으로부터 약 20cm나 밀려나게 되었고, 이로 인해 교량의 지승이 못쓰게 되었다.

신축이음부의 상향처짐은 몇몇 세그먼트 접합 부들을 벌어지게 하였고, 상부 슬래브의 콘크리트 파쇄를 유발하기도 하였다.

사건 발생후의 검사결과는 구조물이 특별한 장기이동이 없이 근본적으로는 안정하다는 것을 보여주었다. 가장 중요한 문제는 손상된 교각아래에 있는 파일캡(pile cap)에서의 손상이다. 손상된 지승부는 인접한 교량상판 단면을 끌어 올리는 것에 의해서 대체될 수 있다.

감독관청과 자문위원단은 보수작업을 어떻게 수행할 것인지 연구에 착수하였으며, 그 결과 손상된 교각에 새로운 콘크리트 기초를 교각기둥 바닥에 설치할 수 있을 것으로 결정하였다. 이 새로운 기초는 지하 27m 깊이의 기반암까지 닿는 철근콘크리트 파일에 의해 지지된다. 그러나, 파괴된 기초 옆에서 어떻게 보수작업을 수행할 수 있을 것인가가 주요 문제로 부각되었는데, 이 손상된 교각이 지지하는 무게는 약 6,600톤이었으며, 깊고 불안정한 토질조건도 보수작업을 어렵게 하는 요인이 되었다.

보수작업은 1982년 여름에 시작되었는데, 손상된 기초 주변과 지하부분을 일시적으로 동결(freezing)시켜 교각과 상부구조를 안정시키기로 하였다. 이렇게 동결된 토질은 케이슨이나 널말뚝 역할을 하므로 교량아래서 항타등과 관련된 진동유발요인을 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 이 보수작업의 첫단계로 약 200여개의 냉각파이프를 매설하는 작업이 수행되었으며, 각 파이프는 속에 작은 파이프가 또 들어 있어 냉각수가 안쪽으로 흘러내려가서 파이프사이로 되돌아 오도록하여 토질을 냉각시키게 하였다.

손상된 신축이음부를 고정시키기 위하여 이음부 아래의 지상에 커다란 콘크리트 블럭을 설치하였으며, 이 블럭으로부터 수직 텐던(케이בל)을 설치하여 교량상부의 신축이음부를 고정시켰고 상부구조가 더이상 기울어지지 않도록 조치하였다.

교각주위의 동결된 흙은 1.8m 직경의 파일을 위한 드릴작업을 하기에 충분할 만큼 견고하였으며, 손상된 기초 주위에 6개의 구멍을 기반암까지 뚫어 철근을 조립설치한후 지상면까지 콘크리트를 타설하였다.

이렇게 새로이 설치된 기초파일위에 새로운 기초(new footing)를 시공하였다. 새 기초는 손상된 구기초 바로 위에 설치하였으며 구 기초 바깥부분을 먼저 시공하고, 이를 지지대라 하여 위쪽으로 강재 트러스 구조물을 임시로 설치하고 상부구조를 잭으로 들어올리도록 하였다. 즉, 임시로 설치된 강재프레임위에 12개의 유압잭을 설치하여 상부구조를 들어 올렸다. 상부구조를 들어 올리는 이유는 손상된 교각과 기초부분을 보수하기 위한 것이었으며, 이들을 보수한 후 강도가 충분히 발휘된 상태에서, 손상된 지승을 빼내고 새로운 지승(bearings)을 설치하였다. 지승이 설치된 후 상부구조를 안치시켰으며, 올라간 신축이음부를 수평으로 고정시키는 작업이 진행되었다. 이 작업은 신축이음부의 아래에 설치된 수직 텐던을 이용하여 이 부분을 단계적으로 끌어내리는 식으로 진행되었으며 한 단계마다 약 19cm정도 끌어 내림으로서 6단계의 작업을 수행하여 제 위치를 확보하였다. 교량을 제 위치에 확보시킨 것은 1984년 3월 23일이었으며, 보수작업 비용은 6백8십만 달러였다.(그림 4.3)

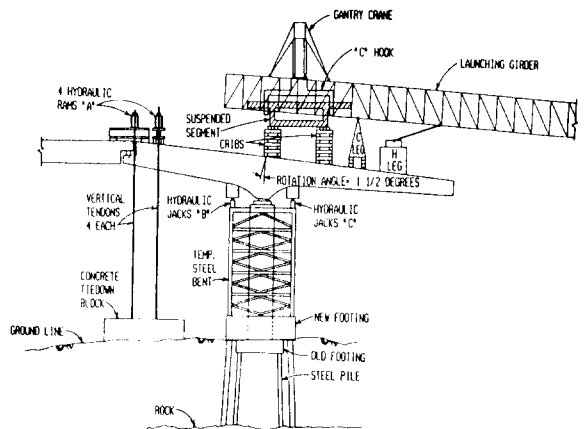


그림 4.3 보수작업

4.4 교량의 안전도 검사

교량건설에 참여한 설계자와 발주처인 미시간주 당국자들은 교량의 강도와 안전성을 확보하기 위하여 광범위한 대책을 강구하였다.

콘크리트의 새로운 세그먼트가 설치될 때마다 교량의 안정성 시험이 수행되었으며, 콘크리트 세그먼트를 운반하는 차량의 총중량은 262톤, 그리고 세그먼트를 설치하기 위한 launching girder의 중량은 1,700톤으로써 40톤 트럭 49대에 해당한다.

콘크리트 상판 세그먼트의 강도 규정은 6000psi (420kg/cm²)로써 4,500psi(315kg/cm²) 강도로 건설되고 있는 일반교량과 다른 면을 가지고 있다. 실제로 시공된 콘크리트의 시공강도는 규정강도 보다 10% 이상 높았다. 콘크리트 각 세그먼트는 약 4,536kg의 철근을 포함하고 있으며 약 3,000kg 정도의 케이블을 포함하고 있다. 콘크리트 상판을 보호하기 위하여 라텍스수정 콘크리트로 오버레이를 수행하게 되며 부식성이 없는 칼슘마그네슘아세테이트로 제빙작업을 수행하게 된다. 발주처인 미시간주 당국에서는 교량에 대한 심도있는 유지관리계획을 고안하고 있으며 이를 위한 지침서를 만들고 있다.

1,592개의 콘크리트 세그먼트를 제작하는 동안에 품질관리는 엄격하게 이루어졌고 실제 설치할 때에 딱 맞을 수 있도록 프리캐스트 제작장에서도 설치 순서에 따라 제작하였다. 제작된 각 세그먼트는 4명으로 이루어진 검사팀에 의하여 철저히 검사되었으며, 기준에 미달하는 세그먼트는 기준을 만족시킬 때까지 추가작업을 하도록 하였다. 기준에 맞지 않을 때는 그 세그먼트를 파괴시키게 되며, 모든 세그먼트는 설치 전에 샌드블라스팅으로 표면처리를 한다.

주 당국은 현장에서 뿐만아니라 주의 실험실에서도 교량에 사용되는 각 재료에 대한 계속적인 실험을 수행하였다. 각 세그먼트를 설치하기 전에 미시간 주 당국에서는 첫번째 세

그먼트에 대한 하중재하시험을 수행하였다. 검사자들은 세그먼트가 연결되는 북부부분에서 작은 균열을 발견하였고 이 균열들은 콘크리트 세그먼트의 양생과정 중에서 건조수축과 열팽창수축으로 인한 균열로 판정되었다. 콘크리트 세그먼트에 대한 재하시험은 약39톤의 콘크리트 슬래브를 세그먼트 한쪽 캔틸레버 부분에 올려 놓음으로써 수행하였고, 이때 균열폭을 조사하였다. 이 최대하중이 재하되었을 때 일곱군데에서 약 0.05mm의 균열폭을 발견하였으며 나머지 45개소에서는 균열폭 증가를 발견할 수 없었다.

이 교량의 건설이 이루어지는 동안에 실시된 또 다른 실험들을 기술하면 다음과 같다.

- (1) 콘크리트 세그먼트에 사용된 강선과 철근등이 기준에 만족하는지 실험을 수행하였다.
- (2) 콘크리트에 사용된 골재에 대한 시험이 수행되었다.
- (3) 교량의 응력과 변형 및 처짐을 측정하였다.
- (4) 콘크리트 세그먼트에 대한 강도, 공기량 및 단위수량이 조사 분석되었다.
- (5) launching girder가 진행하는 동안에 교각의 이동이 발생하지 않는지 면밀히 측정하였다.
- (6) 콘크리트의 품질을 검사하기 위해서 여러 곳에서 코어를 채취하였다.
- (7) 토질과 기반암에 대한 강도시험이 수행되었다.
- (8) 교각에 대한 강관파일의 재하시험이 수행되었다.
- (9) 콘크리트 세그먼트 내부의 양생 온도를 측정하기 위하여 온도 측정장치를 설치하였다.
- (10) 상부구조와 교각사이의 지승부 및 신축 이음부가 주기적으로 검사되었다.
- (11) 신축이음부의 강판과 고무판등의 재료를 면밀히 조사하였다.

(12) launching girder와 그의 각 부재들이
그 실제 무게를 만족하는지 측정하였다.

Zilwaukee교량의 완성은 20년 동안의 건설 계획, 설계, 시공의 결실이다. 이 교량은 건설 도중에 많은 문제점들에 부딪쳤으며, 이들 중 몇가지는 1982년의 사고와 같이 매우 심각하기도 하였다. 그러나 심각한 인명피해는 없었으며 특히 사고로 인한 교량보수 과정으로부터 얻어진 지식과 경험은 매우 값진 것이었다. 이 교량은 안전하고 내구적이며 앞으로 많은 차량을 효율적으로 운용할 것으로 전문가들은 내다보고 있다.

5. Pasco—Kennewick Intercity 프리캐스트 교량의 시공 예

워싱턴 주의 콜롬비아 강에 있는 Pasco—Kennewick 도시간을 연결하는 교량은 포스트 텐션된 세그먼트 교량으로써 각 세그먼트는 약 300톤의 무게를 갖고, 전 지간의 길이는 1794ft이다. 각 세그먼트는 길이 17ft(8.1m), 높이 7ft(2.1m)로써 62개의 세그먼트들이 현장에서 제작되었다. 이 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 교량은 높이 250ft(75m)의 탑 위에 케이블로 연결되어 있는 사장교의 형식을 취하고 있다.

6. 맺 는 말

본 소고에서는 프리캐스트 공법으로 건설되는 콘크리트 교량의 시공에 대하여 실제 시공된 교량을 중심으로 기술하였다. 프리캐스트 공법으로 건설되는 교량은 프리캐스트 세그먼트의 제작을 좀 더 엄격한 품질관리를 거쳐 균일하게 제작할 수 있는 특징이 있으며 특히 해양과 같은 건설현장에 유리하게 적용될 수 있다. 그러나 프리캐스트의 운반과 설치 및 고정작업등 실제현장에서 작업수행에 어려운 면을 갖고 있다. 본 소고에서도 토의한 바와 같이 Zilwaukee의 프리캐스트 교량 건설 도중에는 예기치 않은 건설사고가 발생하였으며, 이로 인하여 상당기간 동안 작업이 지연되었고 손상된 교각과 기초를 보수하기 위하여 상당한 보수작업과 예산이 소요되었다. 건설현장에서의 이러한 실패 사례는 실제적으로 건설에 참여했던 기술자들 뿐만 아니라 우리에게도 많은 교훈을 남겨준다.

우리나라에서도 앞으로 프리캐스트 콘크리트 교량의 건설이 예상되고 있어 이에 대한 많은 고려가 요구되고 있으며 본 소고가 조금의 도움이라도 되기를 기대하면서 이 글을 맺는다.