

고강도 레미콘의 토목분야 활용방안(I)

오 병 환

(서울대학교 토목공학과 교수, 공학박사)

- | | |
|------------------------|---------------------------|
| 1. 서론 | 3. 고강도 콘크리트의 경제적 효과 |
| 2. 고강도 콘크리트의 특성 | 3.1 개요 |
| 2.1 고강도 콘크리트의 개요 | 3.2 고강도 콘크리트 교량의 경제적 효과 |
| 2.2 콘크리트의 고강도화 방법 | 3.3 고강도 콘크리트 교량의 비용 절감 사례 |
| 2.3 고강도 콘크리트의 장점 및 문제점 | |

1. 서론

최근 들어 건축 및 토목구조물이 고층화되고 장대화되면서 건설재료의 성능향상에 대한 필요성이 대두되게 되었고, 이에 세계 각국에서는 콘크리트의 고성능 및 고부가가치화의 일환으로 고강도 콘크리트에 대한 연구가 활발히 추진되고 있다.

고강도콘크리트의 제조 기술은 PSC 기술 발전과 함께 진행되어 왔는데, 콘크리트가 고강도화됨에 따라 프리스트레스 도입시에 콘크리트의 변형에 의해서 저장되는 에너지의 양을 크게 증가시킬 수 있고, 결과적으로 고강도 콘크리트를 도입함으로써 역학적, 경제적인 효과를 기대할 수 있게 되었다. 또한 고강도 콘크리트는 물-결합재비를 감소시키게 됨으로서

시멘트 경화체의 조직을 치밀하게 하여 콘크리트 구조물의 내구성을 향상시킨다는 관점에서 매우 중요하다.

오늘날에는 프리캐스트 PSC 제품의 콘크리트 강도는 60MPa를 초과하고 있으며, 선진국에서는 PSC 교량의 경우 설계기준강도 80MPa의 고강도 콘크리트를 사용한 PSC 트러스교가 건설된 바가 있다. 이처럼 고강도 콘크리트는 새로운 건설재료로서 세계 선진국가에서 활발한 연구 및 실용화가 이루어지고 있는 실정이나 국내에서의 토목구조물에 대한 적용사례는 아직도 미흡한 편이다. 실제로 일부 선진국에서는 설계강도 60~70MPa 이상의 고강도 콘크리트가 장대교량 등 토목구조물에 활발히 적용되고 있는 반면, 국내 토목구조물에 시공된 고강도 콘크리트의 설계강도는

근래에 이르러서야 45MPa 정도로서, 선진국의 수준에 비하면 상당히 미진한 분야로 남아 있는 실정이다.

토목 구조물에 고강도 콘크리트를 적용함으로써 얻을 수 있는 여러 가지 장점들을 구조적인 면과 재료적인 면으로 나누어서 살펴보면 먼저, 구조적인 관점에서 고강도화로 인한 부재의 내하력 증대효과로 인한 교량구조물의 장경간화가 가능하여 교각 개수의 감소효과가 있을 수 있고, 혹은 거더 간격의 증대로 인한 거더 개수의 감소효과가 있다. 재료적인 관점에서 살펴본다면, 고강도화로 인한 콘크리트의 균열발생에 대한 저항성, 내투수성의 증진 효과, 건조수축, 크리프 같은 체적변화의 감소 효과와 함께 탄성계수의 증가로 인한 프리스트레스트의 손실량 감소 같은 여러 가지 복합적인 효과를 기대할 수 있으며, 이와 같은 면을 종합해 볼 때 고강도 콘크리트를 적용함으로써 구조물의 고품질화, 사용년한의 증대효과 같은 구조물의 전반적인 성능향상 뿐만 아니라 내구성 증진에 따른 사후 유지관리 비용의 감소 등 경제적인 면에 있어서도 상당히 유리할 것으로 판단된다.

따라서, 본 소고에서는 고강도 콘크리트의 특성과 장점 등을 간단히 언급하고 고강도 콘크리트가 토목 구조물에 적용된 사례를 국내와 국외로 나누어 살펴본다. 또한 고강도 콘크리트를 토목구조물, 특히 장대교량에 사용함으로써 얻을 수 있는 경제적인 효과를 분석하고 고강도 콘크리트의 비용절감 사례를 소개하고자 한다.

마지막으로, 고강도 콘크리트의 토목분야 활용방안을 고강도 콘크리트의 유동성을 개선할 수 있는 방안과 강도를 증진시킬 수 있는 방안, 그리고 품질관리 방안 및 고강도 콘크리트의 활용을 활성화 할 수 있는 제도적인 방안으로 나누어 설명하고자 한다.

2. 고강도 콘크리트의 특성

2.1 고강도 콘크리트의 개요

고강도 콘크리트의 제조 기술은 PSC기술 발전과 함께 진행되어 왔다. 콘크리트는 프리스트레스 도입시에 변형에너지를 저장하는 역할을 하게 되며, 이에 따라 변형에너지를 다량으로 저장할 수 있는 고강도콘크리트가 역학적, 경제적으로 필요하게 되었다. 또한 고강도 콘크리트는 물-결합재비를 감소시키게 됨으로써 시멘트 경화체의 조직을 치밀하게 하고, 그로 인하여 콘크리트 구조물의 내구성을 향상시킨다는 관점에서 매우 중요하다.

오늘날에는 프리캐스트 PSC제품의 콘크리트 강도는 60MPa 을 초과하고 있으며, 선진국에서는 PSC교량의 경우 설계기준강도 80MPa의 고강도콘크리트를 사용한 PSC 트러스교가 건설된 바가 있다.

이와 같은 콘크리트의 고강도화는 구조물의 장대화 및 고층화의 요구와 이에 부응한 재료 및 시공법의 현저한 진보, 발전에 의한 것으로서 앞으로도 콘크리트의 고강도화가 지속적으로 확대될 전망이다.

(1) 고강도 콘크리트의 정의

고강도 콘크리트는 일반적으로 압축강도가 60MPa이상인 것을 지칭하는 것이 보통이지만, 국가의 기술여건이나 시방서 및 규준을 제정하는 주체의 특성에 따라 그 정의가 다를 수 있다. 한국콘크리트학회 제정 「콘크리트 표준시방서」에서는 설계기준강도 40MPa 이상인 경우를 고강도콘크리트로 정의하고 있으며, 일본토목학회 제정 「고강도콘크리트 설계시공지침(안)」에서는 설계기준강도 60~80MPa 정도를 고강도콘크리트로 다루고 있다.

또한 미국, 캐나다, 유럽 등에서는 여러 단

체가 High Performance Concrete 프로젝트를 수행하고 있으며 예를 들면 SHARP에서는 고강도콘크리트를 동결융해시험의 내구성지수 80%이상, 물-시멘트비 35% 이하, 재령 28일에서의 압축강도가 69 MPa 이상인 것으로 정의하고 있다.

(2) 고강도 콘크리트의 분류

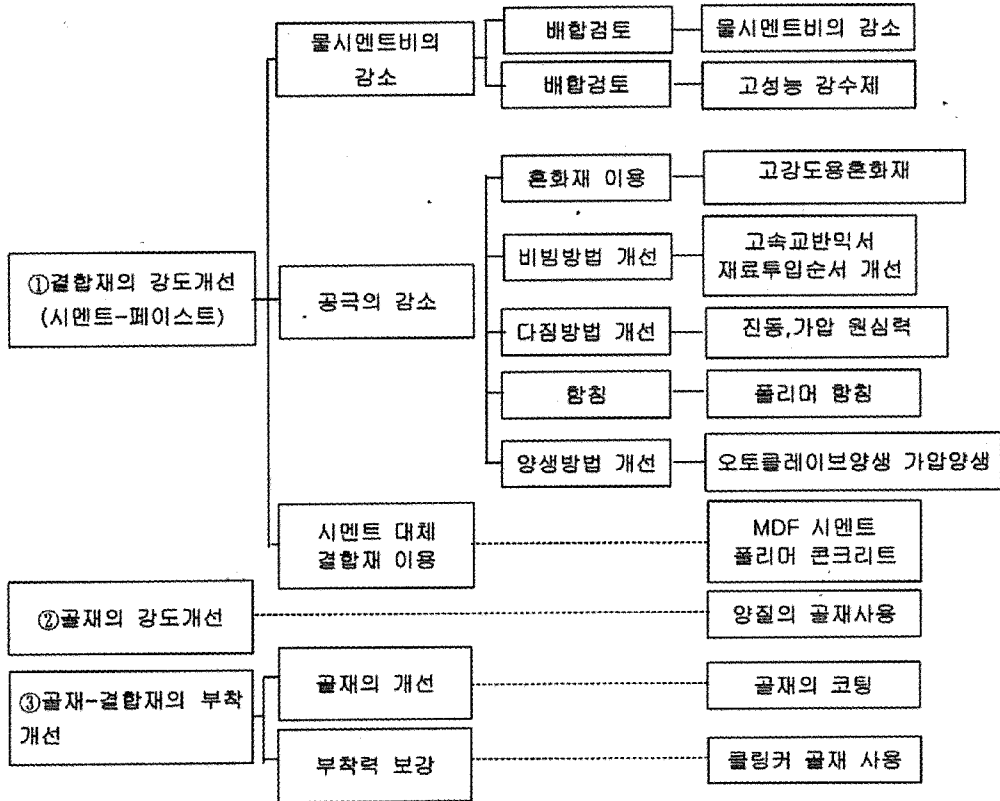
고강도 콘크리트의 분류는 생산 및 재료적인 측면에서 아래 (그림 2-1)과 같이 분류되지만 일반 재료에 고성능 감수제를 사용하여 낮은 물시멘트비로 고강도 콘크리트를 제조하는 경우와 특수한 재료나 기술을 사용하여 생산하는 고강도 콘크리트로 구별할 수 있다.

이러한 분류로서, 주로 60MPa 이하에서는 고성능 감수제만을 사용하는 것으로 생산이 가능하고, 그 이상의 강도가 요구될 때는 특수한 재료나 기술이 필요하게 된다. 따라서 제조 환경에 따른 분류가 가능하다.

2.2 콘크리트의 고강도화 방법

(1) 고강도화의 개념

콘크리트는 물, 시멘트, 골재, 혼화재료 등으로부터 이루어지는 복합재료이며, 고강도 콘크리트의 접근은 시멘트 경화체, 골재 특히 이들의 경계면인 천이대에서의 품질개선 등으로 분류할 수 있다. 즉 콘크리트의 고강도는 시



(그림 2.1) 고강도 콘크리트의 분류

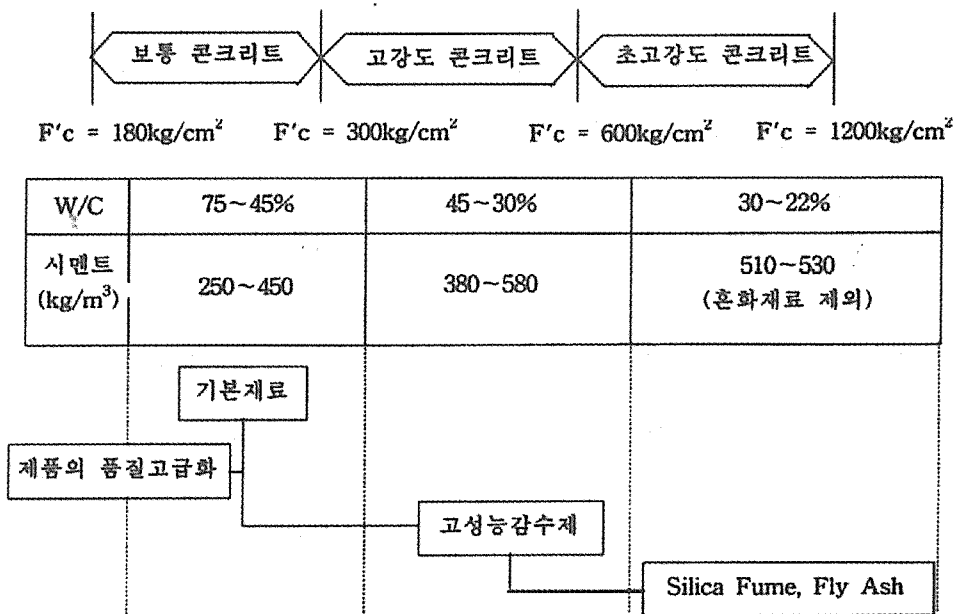
멘트페이스트의 강도, 골재의 강도, 시멘트 페이스트와 골재의 경계면에서의 부착강도 등의 3가지 요인에 의하여 정해진다. 콘크리트의 강도를 높이기 위해서는 이들의 강도를 개선시키는 것이 필요하지만, 이 가운데 시멘트 페이스트와 골재의 경계면에서의 부착강도 등의 3가지 요인에 의하여 정해진다. 콘크리트의 강도를 높이기 위해서는 이들의 강도를 개선시키는 것이 필요하지만, 이 가운데 시멘트 페이스트와 골재의 경계면에 대하여는 시멘트 자신의 강도를 개선함으로써 부착강도도 개선된다고 생각하기 때문에 시멘트 페이스트 자신의 강도를 개선시키는 것이 매우 중요하다.

시멘트 페이스트는 시멘트 수화생성물, 미반응 시멘트 입자, $10\mu\text{m} \sim 100\text{\AA}$ 이하의 크기를 가지는 모세관 공극, 100\AA 이하의 크기를 가지는 겔공극 및 콘크리트를 비벌 때 유입되는 갇힌 공기에 의한 비교적 큰 공극으로부터 구성된 많은 공극을 포함하는 다공질 재료가

다. 시멘트페이스트의 강도는 공극율에 크게 의존하지만, 그 강도에 영향을 주는 것은 주로 크기 100\AA 이상인 모세관 공극과 갇힌공기등과 같은 비교적 큰 공극으로 알려져 있다.

따라서, 시멘트 페이스트의 강도를 높이기 위해서는 모세관 공극과 갇힌공기에 의한 공극을 감소시키는 것이 중요하다. 시멘트 페이스트의 공극을 감소시키는데는 물-결합재비의 저감 혹은 다른 재료의 충전이나 양생방법에 의한 시멘트 수화생성물량의 증가에 기초한 모세관 공극의 감소, 다른 재료의 충전이나 성형방법에 의한 공극의 감소가 유효한 방법이다.

일반적으로 고강도콘크리트를 제조하는데는 물-결합재비를 저하시키는 감수효과를 이용하는 것이 가장 중요하다. 콘크리트의 유동성을 확보하면서 유동성의 시가적 변화가 적은 최소의 물-결합재비를 가지는 콘크리트의 제조를 가능하게 하는 것은 고성능AE감수제이며, 이것의 사용은 고강도콘크리트를 제조



(그림 2.2) 고강도 콘크리트의 제조환경 분류

하는데 있어서 필수적이다. 아래 [그림 2-2]는 고강도 콘크리트의 제조환경에 대한 분류를 나타낸다.

콘크리트의 밀도를 높여 고강도화를 추구하는 경우에도 고성능AE감수제의 사용은 필수적이지만, 부가적으로 포졸란 반응성, 충전성 등의 효과를 가지는 여러 가지의 초미분말이나 공극에 에트링가이트를 생성시켜 경화체를 치밀하게 하는 무수 석고 등을 주성분으로 하는 에트링가이트 생성계 혼화제 등도 이용되고 있다.

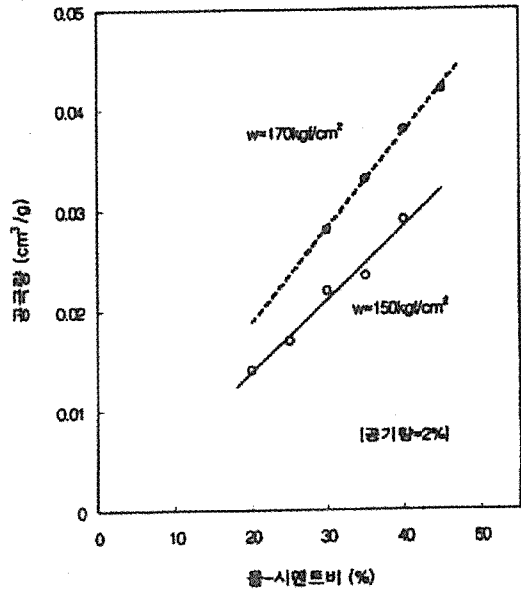
한편, 콘크리트의 공극을 감소시켜 고강도를 얻는 방법으로서 모노머나 폴리머를 콘크리트 경화체에 함침시킨 후 중합시키는 수지 함침 콘크리트도 매설 거푸집의 보급 등과 관련하여 그 중요성이 증가되고 있다.

(2) 감수효과에 의한 고강도 발현

일반적으로 콘크리트를 제조하는 데는 시공성에 적합한 워커빌리티를 확보하기 위해서 시멘트의 수화반응에 필요한 수량보다 많은 물이 사용된다. 이 물은 수화에 관여하지 않으며 경화 후에는 공극수로서 존재하기 때문에 시멘트 경화체의 강도를 저하시키고 골재와 시멘트 페이스트의 경계면에 결함을 형성하여 부착을 저해시킴으로서 고강도화를 방해하는 주된 원인이 된다.

시멘트 경화체의 강도는 경화체의 공극량 및 그 분포와 밀접한 관계를 가지고 있다. [그림 2-3]은 물-시멘트비와 공극량과의 관계를 나타낸 것이다. 공극량을 감소시키기 위해서는 물-시멘트비를 감소시키거나 혹은 물-시멘트비가 동일한 경우 단위수량을 감소시키는 것이 유효하다는 것을 알 수 있다. 물-시멘트비를 감소시키면 블리딩이나 자유수에 의한 골재표면에 형성되는 수막이 감소하기 때문에 골재와 시멘트 페이스트와의 경계면에 결함이

나 천이대의 형성을 막을 수 있어 콘크리트의 고강도화가 가능하다.



(그림 2.3) 물-시멘트비와 공극량과의 관계

물-시멘트비를 저감시키는데는 단위시멘트량을 크게 하고 단위수량을 적게 할 필요가 있다. 이 경우 고성능AE감수제, 고성능감수제 혹은 유동화제 등의 감수성이 높은 혼화제를 사용해서 콘크리트의 유동성을 확보하여 거푸집 속에 밀실하게 충전시킬 필요가 있다.

또한 구상화시멘트, 고블라이트계 시멘트 혹은 입도조정을 실시한 시멘트 등을 사용하면서 낮은 물-시멘트에서도 콘크리트의 유동성을 증가시킬 수 있는 방법도 생각할 수 있다.

이와 같이 혼화제나 특수시멘트를 사용하는 방법 외에 물-시멘트비를 감소시키는 방법으로서 가압다짐, 원심력 다짐 등의 성형방법을 사용하여 과잉수를 짜내는 방법, 된 반죽의 낮은 물-시멘트비를 가지는 콘크리트를 진동다짐에 의해 성형하는 방법 등이 있으며, 혼화제의 사용과 겹하여 시멘트 2차 제품의 제조에

널리 사용되고 있다.

(3) 고밀도화에 의한 고강도 발현

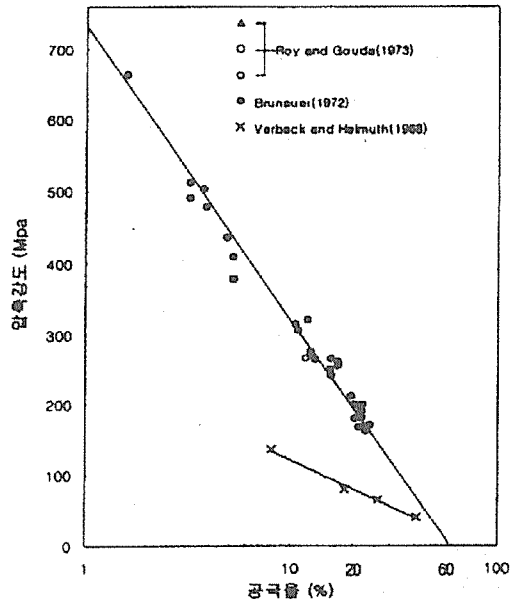
물-시멘트비를 감소시키면 모세관공극은 현저하게 감소하여 시멘트 경화체는 치밀하게 된다. [그림 2-4]는 시멘트경화체의 공극율과 압축강도의 관계를 나타낸 것으로서 공극율이 감소할수록 강도는 향상되고 있음을 알 수 있다. 또 이 그림은 공극을 현저하게 감소시켜 콘크리트를 고밀도화 시킬 경우 콘크리트의 도달 가능한 강도한계치를 제시하고 있다. 그러나 물-시멘트비를 감소시키더라도 시공성이 확보되지 않는다면 고강도를 제조할 수 없다.

고성능AE감수제를 사용하면 30%까지의 낮은 물-시멘트비를 가지는 콘크리트에서도 작업성을 확보할 수 있다. 특히 고강도를 얻고 싶은 경우에는 다량의 고성능AE감수제와 초미분말을 조합시킨 DSP기술을 이용하는 것이 효과적이다. 이것을 고강도콘크리트에 적용하면, 작업성이 지속적으로 확보되어 물-시멘트비를 20%정도까지 저감시킬 수 있으므로 200MPa 정도까지의 압축강도를 얻을 수 있다.

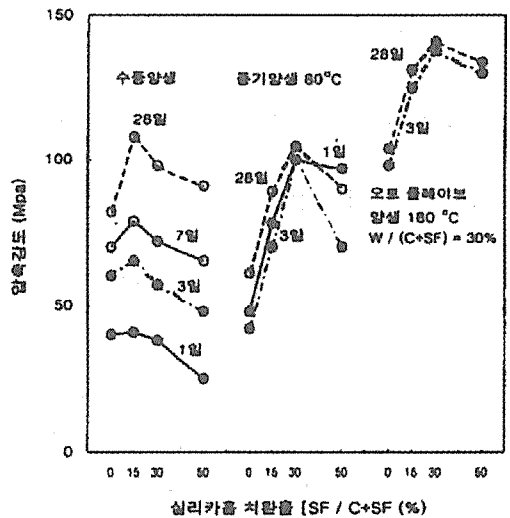
시멘트 입자의 1/10~1/100정도의 크기를 가지는 실리카폼이나 브레인 비표면적이 약 6000cm²/g 정도를 초과하는 고로슬래그 미분말 및 무수석고를 주성분으로 하는 에트링가이트 생성계 고강도 콘크리트용 혼화재 등의 미립자 혼화재를 사용하는 것은 콘크리트의 수화생성량을 증가시키면서 모세관공극을 충전시키는 효과가 있어 시멘트 페이스트의 강도를 개선시킬 수 있다.

이 밖에 분급을 실시한 플라이애시등 초미분말을 고강도용 혼화재로서 이용하는 많은 연구도 실시되고 있다. 이 초미분말의 이용에 의한 고강도 발현 매카니즘은 포졸란 반응이나 잠재수경성에 의한 수화물양의 증대와 마

이크로필러 효과에 의한 입자의 충전성 향상에 의해 시멘트 경화체의 고밀도화가 이루어진다. 특히 물-결합재비를 줄여 25% 정도 이하로 한 경우에는 시멘트의 수화반응 진행이



(그림 2.4) 시멘트 경화체의 공극율과 압축강도



(그림 2.5) 실리카폼의 혼합량과 강도발현 성상의 관계

어려우므로 실리카폼 등의 초미분말포졸란 반응이 강도증진에 효과가 있다.

[그림 2-5]는 실리카폼의 혼합량과 강도발현성상의 관계에 대한 한 사례를 나타낸 것이다. 증기양생이나 오토클레이브양생에 의해 고강도가 발현되고 있지만, 최대강도를 나타내는 실리카폼의 혼합량이 존재하고 있으며, 이것은 C-S-H의 생성과 연관이 있다. 이와 같이 실리카폼이나 고로슬래그 미분말등의 초미분말의 혼합은 포졸란반응 등에 의해 시멘트 경화체 조직을 치밀하게 하지만, 특히 골재 경계면의 천이대의 개선에도 효과가 있다.

가압양생이나 오토클레이브양생은 수화생성물의 양을 증가시켜 시멘트 페이스트의 강도를 개선한다. 즉 가압양생은 콘크리트를 가압하면서 양생을 실시하기 때문에 시멘트의 수화반응을 촉진시켜 단기간에 고강도의 콘크리트를 얻을 수 있으며, 오토클레이브양생은 수열반응에 의해 생성되는 물질은 다르지만, 적당한 배합과 양생을 실시하면 고강도를 얻을 수 있다. 그러나, 이와 같은 양생을 실시하더라도 고성능AE감수제나 광물질의 미립자 혼화제를 동시에 사용하여 고강도콘크리트를 제조하는 것이 일반적이다.

2.3 고강도 콘크리트의 장점 및 문제점

(1) 사용상의 이점

고강도 콘크리트를 사용함으로써 얻을 수 있는 이점으로서의 다음 3가지로 나타낼 수 있다.

- 단위 경비당 강도(strength)가 큼
- 단위 무게당 강도(strength)가 큼
- 단위 경비당 강성(stiffness)이 큼

미국지역에서는 제조단가의 상승이 강도의

상승비율보다 훨씬 작아 보다 경제적인 구조 재료로서 이용이 증가추세에 있다.

(2) 시공상의 이점

고강도 콘크리트는 보통중량 콘크리트로서 단위면적당 재료적인 효과가 높을 뿐만 아니라 부재단면의 간소화를 통해 넓은 공간을 얻을 수 있으며, 자중을 감소시킬 수 있는 부차적인 효과를 얻을 수 있다. 또한 고강도 콘크리트는 고유동화제(super plasticizer)를 사용함으로써 시공성(유동성)을 향상시킬 수 있으며 이러한 이점을 구체적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- ① 시공능률의 향상
- ② 공기의 단축
- ③ 작업량의 감소
- ④ 진동의 감소

이들이 응용되고 있는 건축물의 부재와 용도를 열거하면 다음과 같다.

- 철근이 집결되어 있거나 진동이 곤란한 부분 : 유동화 콘크리트의 사용으로 진동기를 사용하지 않고도 능률적으로 콘크리트를 타설할 수 있다.
- 바닥 슬라브, 지붕 슬라브, 칸막이 등과 같은 부재
- 초고층 건물과 같이 높은 부분까지 고압 펌프에 의해 콘크리트를 압송하는 경우
- 균일하고 수밀한 끝 마감 콘크리트를 사용할 경우
- 벽체, 기둥, 보, P.C.부재 : 보다 빠른 시공이외에도 얇은 박판, 많은 철근이 배근된 단면에 효과적이다.

이외에도 아파트의 벽체, 지하실 연속벽 등

에 사용될 경우 30~80%의 임금을 절약할 수 있는데, 이는 정확한 강도를 보장할 뿐 아니라 인력, 설비에 대한 요구가 낮고 보다 빠르게 진행되기 때문이다.

②항의 공기의 단축은 거푸집의 조기 탈형으로 가능한데 이는 고성능 감수제를 사용한 콘크리트는 초기재령에서의 강도가 일반 콘크리트보다 높기 때문이다. 즉 일반 콘크리트는 재령 7일의 강도가 70~75%정도인데 비하여 고성능 감수제를 사용한 고강도 콘크리트의 경우는 80~90%에 달하기 때문이다. 이는 고강도 콘크리트가 초기 재령에서 높은 수화열에 의해 콘크리트의 내부온도가 상승하며, 낮은 물-시멘트비에 의해 수화입자사이의 거리가 가깝기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 조기경화 현상은 조기탈형이 요구되는 공사나 겨울철의 공사에 보다 적절히 이용될 수 있다. 또한 건조수축과 크리프가 주로 콘크리트의 경화초기에 발생하므로 P.S.C.부재에서 프리스트레스의 손실을 초기강도 증가로 방지함으로써 효과적인 대응방법이 될 수 있다.

(3) 고강도 콘크리트의 사용상 문제점

콘크리트의 고강도화는 국제적인 추세임에도 불구하고 국내에서, 특히 건축 구조분야에서 각광을 받지 못하고 있는 이유는 아직 불확실한 경제적 배합비, Q.A, Q.C.문제, 낮은연성, 고강도 부재의 설계시 상세하지 않은 설계규준 등 많은 문제점을 가지고 있기 때문이지만 근본적인 이유로는 높은 경제성에도 불구하고 고강도 콘크리트에 대한 이해와 확신의 부족으로 인하여 고강도 콘크리트를 사용할 때 발생할 수 있는 위험부담 및 기존 건축공사 시방서의 미비, 실무자들의 경험상의 부족으로 인한 두려움 등에 기인한다고 생각된다.

근래에 상기 문제점 중 Co-polymer계통의 제3세대 고성능 감수제가 국내에서 제작되어

슬럼프상실 및 강도 증진에 많은 기대가 모아지고 있다.

3. 고강도 콘크리트의 경제적 효과

3.1 개요

최근 들어 토목분야에서는 장대교량의 건설이 늘어나면서 고강도 콘크리트의 수요가 급격히 증가하는 추세에 있다. 이러한 건설공사에는 막대한 비용이 소요되므로, 공사에 앞서 경제적인 고려가 필수적이다. 특히, 고강도 콘크리트는 토목·건설분야의 최신 기술로서, 단위시멘트량이 비교적 많이 사용되기 때문에 보통 강도의 콘크리트보다 가격이 비싸게 된다. 따라서, 장대교량 등의 공사에 고강도 콘크리트를 적용하기 위해서는 고강도 콘크리트 혹은 고강도 레미콘의 경제성에 대한 분석이 선행되어야 한다.

앞에서도 언급한 바와 같이, 고강도 콘크리트는 최신 기술로서 단위시멘트량이 많고 고성능 혼화제 등의 사용으로 재료비가 상승한다. 그러나, 고강도 콘크리트가 적용된 많은 공사에서 일반적으로 고강도 콘크리트의 사용으로 인한 이점이 비싼 재료비나 품질관리 비용을 보상하고도 남는 것으로 보고되고 있다. 본 장에서는 고강도 콘크리트의 경제성에 대하여 실제 사례를 중심으로 분석하고자 한다.

토목공사에 고강도 콘크리트가 적용될 수 있는 분야는 여러 가지가 있을 수 있지만, 여기서는 장대교량을 중심으로 고강도 콘크리트의 경제적 효과에 대해서 언급하고자 한다. 장대교량 등의 토목분야에 고강도 콘크리트가 적용되는 경우, 콘크리트 빔(beam)에 고강도 콘크리트를 사용하면 빔의 강성을 높일 수 있기 때문에 경간길이를 늘일 수 있고, 결과적으로 교각의 개수가 줄어들어 하부구조의 공사

비를 경감할 수 있다. 또, 경간길이가 일정한 경우에는, 하중을 견디는데 필요한 빔의 개수를 줄임으로써 빔의 제작·운반·설치에 소요되는 비용을 절감할 수 있다. 이처럼 고강도 콘크리트의 사용으로 인하여 건축과 토목분야에서 경제적인 효과를 기대할 수 있다.

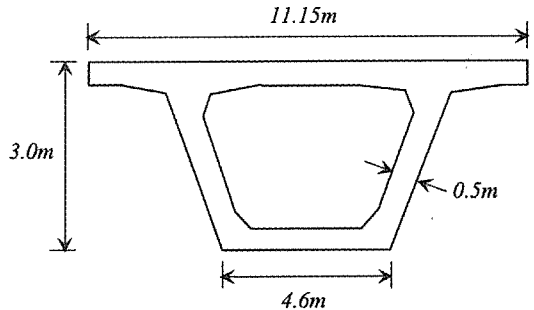
본 절에서는 고강도 레미콘의 사용으로 인한 건설비용 절감의 원리를 분석하고 고강도 콘크리트를 사용함으로써 필요한 품질관리비용에 관해서 알아본다. 또 본 연구에서는 실제 교량부재의 콘크리트 강도를 변경함으로써 비용을 절감한 예제를 소개하고 고강도 콘크리트의 적용분야에 따른 경제적인 효과를 분석한다. 마지막으로 외국에서 고강도 콘크리트를 토목분야에 사용함으로써 건설비용을 절감한 사례를 살펴보았다.

3.2 고강도 콘크리트 교량의 경제적 효과

본 절에서는 고강도 콘크리트의 사용으로 인한 비용절감 효과를 확인하기 위하여 1995년에 동아건설과 서울대학교의 공동연구로 수행된 “고강도 콘크리트 실용화를 위한 현장적용 기초연구”에 수록된 예제를 소개한다. 본 예제는 실제로 ○○교의 구조계산서를 기초로 하여 콘크리트의 강도 증가시 세그먼트 단면 변화에 대하여, 그리고 기둥에 고강도 콘크리트를 적용하여 대략적인 설계를 통하여 고강도 콘크리트의 사용효과에 대하여 고찰하였다. 고강도 콘크리트의 적용으로 인한 경제성을 분석한다는 것은 건설공사에 관련된 것들, 즉 레미콘 가격, 철근 가격, 철근 조립에 필요한 인력, 거푸집 비용, 공사 기간, 유지 보수비용 등과 그 외의 기타 비용 및 이로 인한 부수적 효과를 모두 고려해야 한다. 그러나, 본 예제에서는 레미콘과 철근의 단가에 국한하여 경제적효과를 고려하였다.

(1) 메인 세그먼트에 적용하였을 경우

프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 박스 거더 교량에 고강도 콘크리트를 적용한 설계를 구체적인 부분까지 검토하는 첫 단계의 작업으로서 본 연구에서는 ○○교의 구조계산서를 기초로 하여 콘크리트의 강도 증가시 박스의 복부(web) 부분의 두께 감소효과에 대하여 연구를 수행하였다. 구조계산에 사용된 단면은 아래의 [그림 4-1]과 같다.



[그림 3.1] 박스단면의 재원

여기서는 박스 측면의 두께를 변화시켜 전단을 받기 위한 철근량을 비교하여 경제성 검토를 수행하였다. 단면을 감소시키면 자중의 감소로 프리스트레스트의 크기도 줄일 수 있지만 안전측 검토를 위해서는 현재의 구조계산서에 사용된 값을 사용하였다.

[표 3-1]은 콘크리트의 강도와 단면변화에 따른 철근량을 나타낸 것이다. [표 3-1]에서 보듯이 현재의 콘크리트 강도를 40MPa에서

[표 3.1] 콘크리트의 강도와 단면변화에 따른 철근량

강도	철근면적	현재 단면유지의 경우 (cm ²)	단면 감소의 경우	
			폭 5cm 감소	폭 10cm 감소
현재 40MPa		34.05	35.68	37.30
50MPa		32.12	33.96	35.80
60MPa		30.40	32.4	34.40

50MPa으로 증가시키면 현재의 전단철근량을 사용하여 박스의 복부판의 폭을 5cm 정도 줄일 수 있으며, 이로 인한 자중감소로 필요한 프리스트레스의 양도 줄일 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 수행하지 않았지만, 시간 전체의 사하중 감소를 고려한 전체 교량의 재설계를 수행한다면 보다 더 큰 단면 감소와 경제적 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

(2) 교각에 적용하였을 경우

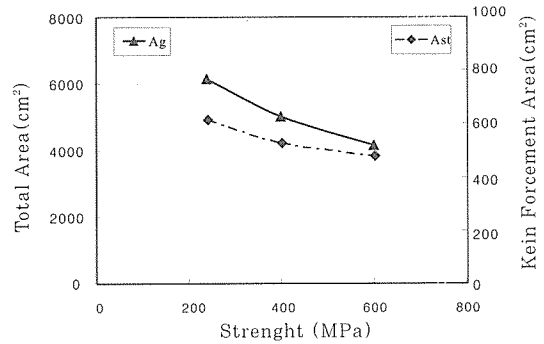
본 절에서는 현재 ○○교에 설계되어 있는 교각을 고강도 콘크리트를 사용한 재설계 단면을 결정하는 방법을 통하여 경제성 분석을 하였다. 현 설계에는 강도 24MPa의 콘크리트를 사용하였으며, 철근의 항복강도는 300MPa, 콘크리트의 탄성계수는 시방서에 규정되어 있는 간편식 $E_c = 15,000 \sqrt{f'_c}$ 를 사용하고 있다.

본 연구에서는 철근의 항복강도를 현재 설계에 사용된 300MPa를 사용하여, 콘크리트의 강도를 40MPa, 60MPa으로 변화시키면서 단면을 결정하여 24Mpa 강도의 콘크리트를 사용한 현재의 설계단면과 비교, 분석하였다. 철근비는 현재 설계의 철근비와 비슷한 약 1%로 일정하게 하였다. 그리고, 콘크리트의 탄성계수는 현행의 간편식을 사용할 경우 과대 평가되므로, Nilson의 제안식을 사용하였다.

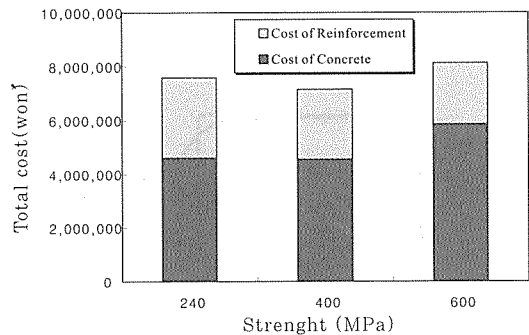
구조검토는 종방향 활하중 재하시, 종방향 활하중 비재하시, 횡방향 활하중 재하시 그리고 횡방향 활하중 비재하시의 네가지 경우에 대하여 각각 검토하였다. 콘크리트의 강도를 40MPa, 60MPa으로 변화시키면서 단면 검토를 수행하여 얻은 교각의 단면과 철근량은 [그림 3-2]에 나타내었다. 그림에서 보듯이 교각의 단면은 압축강도 40MPa의 콘크리트를 사용하였을 경우 약 19%, 60MPa을 사용

하였을 경우 약 33% 정도 감소하였다. 철근량은 각각의 경우에 대하여 15%, 23% 정도 감소하는 결과를 보였다.

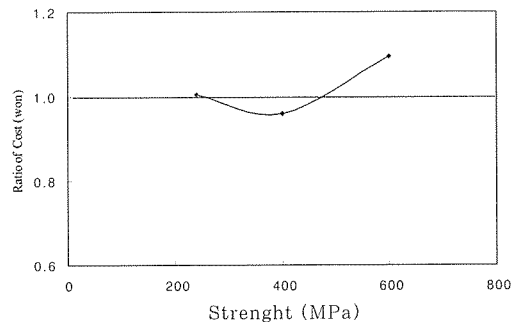
[그림 3-3]은 콘크리트의 압축강도를 달리



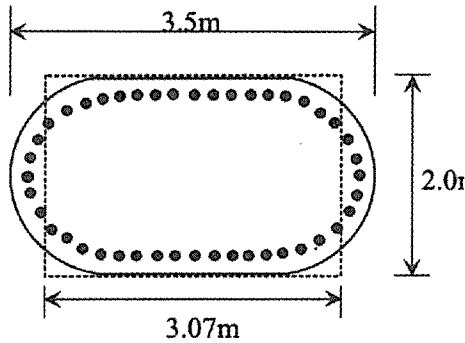
[그림 3.2] 압축강도에 따른 교각의 단면적 및 철근량



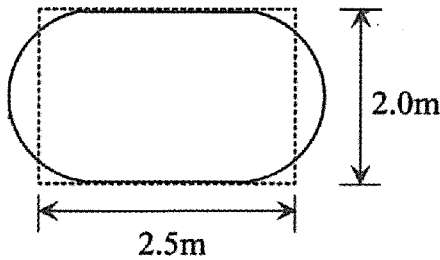
[그림 3.3] 압축강도에 따른 총 소요비용



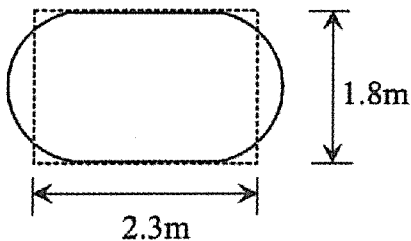
[그림 3.4] 압축강도에 따른 상대비용



(a) $f_c' = 240\text{MPa}$



(b) $f_c' = 40\text{MPa}$



(b) $f_c' = 40\text{MPa}$

(그림 3.5) 압축강도에 따른 기둥의 단면

하며 설계하였을 때의 총비용을 나타낸 그림으로 압축강도 40MPa의 콘크리트를 사용하는 것이 효과적인 것으로 나타났다. [그림 3-4]는 콘크리트의 압축강도 24MPa를 사용하였을 때의 총비용을 '1'로 하였을 때의 상대비용을 나타낸 그림이다. [그림 3-5]는 콘크리트의 강도를 달리하였을 때의 기둥단면의 변화를 나타낸 그림이다.

3.3 고강도 콘크리트 교량의 비용절감 사례

장경간의 교량은 고강도 콘크리트의 사용이 그 자체로 경제적인 매력을 끄는 분야이다. 고강도 콘크리트는 단위 중량당 그리고 단위 부피당 비교적 큰 압축강도를 발휘하는데, 고강도 콘크리트의 이와 같은 특징으로 인해 상부 구조물의 사하중을 감소시킴으로써 교각의 단면적을 줄일 수 있고 이로 인해 공간활용을 향상시킬 수 있다. 또한, 고강도 콘크리트를 사용함으로써 거더의 강성을 증가시킬 수 있는데, 이로 인해 거더의 경간 길이를 늘이거나, 거더의 수를 줄일 수 있다. 고강도 콘크리트의 사용으로 인하여 경간길이가 증가하면 결과적으로 교각 등 하부구조물의 수를 줄임으로써 경제적 효과를 거둘 수 있고, 거더의 개수를 줄이면 거더의 제작·운반·설치에 소요되는 등 추가적인 비용을 절감할 수 있다.

Ohio 강을 가로지르는 사장교의 건설에서 콘크리트 바닥판을 사용함으로써 강재 바닥판에 비해서 29%(\$10,000,000)의 비용절감을 달성했다. West Virginia의 Huntington과 Ohio의 Proctoville 사이를 가로지르는 이 2차선 교량은 미국에서 최초로 비대칭 사장교 형식을 채택하였는데, 교량의 총연장은 274.5m(900ft)이다. 이 교량의 입찰에는 고강도 콘크리트를 포함한 콘크리트 교량과 강교량 등 여러 가지안이 제시되었는데, 콘크리트 교량의 입찰가는 \$23,500,000에서 \$29,700,000로서 이것은 강교량 중 가장 낮은 입찰가인 \$33,300,000보다 작았다. 이 교량은 최종적으로 55MPa (8,000psi)의 고강도 콘크리트를 사용한 박스 거더 교량으로 설계하였다.

초기 PC 구조물의 설계는 콘크리트의 압축강도 21MPa (3,000psi)를 기본으로 하고 있었으나 콘크리트의 특성 및 품질관리에 관한

개발이 증가하면서 많은 PC 구조물에 강도 42MPa(6,000psi)의 콘크리트를 사용하는 것이 가능하게 되었다. 미국 서해안 지역에서는 강도 56MPa(8,000psi)의 콘크리트도 용이하게 이용되고 있다. 이와 같은 고강도 콘크리트를 사용함에 따라 장대지간에 필요한 경량 콘크리트 구조물의 설계가 가능하게 되었다.

수년동안 압축강도가 42MPa(6,000 psi)가 넘는 고강도 콘크리트가 사용된 사례는 몇 군데에 지나지 않으나, 최근 들어서 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트를 사용한 장대교량의 건설이 증가하면서 고강도 콘크리트의 수요가 증가하는 추세에 있다.

여러 연구자들에 의하면 박스거더 교량에 고강도 콘크리트를 적용하므로 인하여 교량의 지간을 증가시킬 수 있으며, 응력에 의해 지배를 받는 부재의 단면은 고강도 콘크리트를 사용하므로써 부재 단면의 크기를 조절할 수 있다고 밝히고 있다.

미국 연방도로국 콘크리트 기술협회에 의한 보고서 "고강도 콘크리트의 도로교 적용"에 의하면 세그멘탈 공법에 의한 교량의 기둥머리 세그먼트가 고강도 콘크리트를 사용하여 재설계되었는데 이것은 바닥판의 두께를 얇게 함에 따라 전체 휨모멘트를 감소시키는 것을 목적으로 한 것이다.

Shubenacadie교(Nova Scotia주)에 대한 실험에서는 고강도 콘크리트를 사용하여 얻는 잇점을 밝히고 있다. 이 실험에 의하면 고강도 콘크리트를 사용하여 나타난 현저한 효과로는 교량 바닥판 두께가 감소한다는 것이다. Colombia 강의 Pasco-Kennewick, Wash 교량과 같은 장지간의 사장교에 콘크리트 구조물을 사용한 것은 고강도 콘크리트를 사용하지 않고는 건설되지 못했을 것이다.

고강도 콘크리트는 침단의 재료로서 다른

여타 침단의 재료와 마찬가지로 부가적인 비용이 필요하다. 그러나, 위의 예에서 보듯이 고강도 콘크리트를 사용하므로써 얻어지는 이익은 부가적인 비용과 지출에 상응할 만하다. 위에서 언급되었듯이, 프리스트레스트 콘크리트를 사용하므로써 콘크리트를 재료로한 장대교량의 건설이 증가하는 추세에 있다. 이와 같은 장대교량은 부재의 단면을 줄이고 충분한 안전도를 확보할 수 있는 고강도 콘크리트를 사용하므로써 가능해졌다.

콘크리트의 압축강도가 42MPa(6,000 psi) 이상인 고강도 콘크리트를 사용하여 건설한 1985년 이전의 일부 교량을 소개하면 [표 3-2]와 같다. 일본의 경우 철도교량에서는 압축강도가 79MPa (11,400psi)인 고강도 콘크리트를 교량건설에 적용하고 있다. 최근에는 콘크리트 강도가 더욱 커지는 경향이 있으며 보통 60MPa~80MPa의 고강도 콘크리트가 특수 장대교량에 적용되고 있다.

미국 텍사스 시의 San Angelo에 위치한 교량은 "San Angelo 교량"이라고 불리는데, North Concho River와 U.S 87번 국도, 그리고 South Orient 철도교 위를 지나는 교량이다. 이 교량은 1995년에 계약이 체결되어 착공되었는데, San Angelo 교량은 동쪽 방향으로 가는 교량과 서쪽 방향으로 가는 교량 그리고 두 개의 램프(ramp)로 이루어져 있다. 동쪽 방향으로 향하는 교량은 고강도 고성능 콘크리트로 시공되었고, 서쪽 방향으로 가는 교량과 두 개의 램프는 보통강도의 콘크리트로 시공되어있어, 고강도 콘크리트와 보통강도 콘크리트의 경제성 비교의 예로서 적절할 것으로 판단된다.

[그림 3-6]은 미국 텍사스 시의 San Angelo에 위치한 교량의 조감도를 나타낸 것이다. [그림 3-6]에서 보듯이 이 교량은 동쪽 방향으로 가는 8경간의 고강도 고성능 콘크리

(표 3.2) 고강도 콘크리트를 이용한 장대교량

Bridge	Location	Year	Max. span, ft	Max. design concrete strength, MPa
Wilows Bridge	Tronto	1967	158	42
Housto Ship Canal	Texas	1981	750	42
San Diego to Colorado	California	1969	140	42*
Linn Cove Viaduct	North Carolina	1979	180	42
Pasco-Kennewick Intercity	Washington	1978	981	42
Coweman River Bridge	Washington		146	49
Huntington to Proctoville	W. Va. to Ohio	1984	900	56
Nitta Highway Bridge	Japan	1968	98	59.5
Kaminoshima Highway Bridge	Japan	1970	282	59.5
Fukamitsu Highway Bridge	Japan	1974	85	70
Ootanabe Railway Bridge	Japan	1973	79	79.8
Akkagawa Railway Bridge	Japan	1976	150	79.8

* Light weight concrete

트 교량과 서쪽방향으로 가는 9경간의 보통 강도 콘크리트 교량으로 구성되어있다. 동쪽 방향으로 가는 고강도 고성능 콘크리트 교량의 총 연장은 290m(950ft)로 지간길이는 20m(64ft)에서 48m (157ft)로 되어있고, 서쪽 방향으로 가는 보통 콘크리트 교량은 총 연장이 290m(958ft)로서 지간길이는 11m(37ft)에서 43m (140ft)로 되어있다. 이 교량의 형식은 단경간 프리텐션 콘크리트 빔 (beam)과 연속 현장타설 콘크리트 바닥판 공법이 사용되었다.

[표 3-3]은 두 교량의 부재별 콘크리트의 설계 압축강도를 보여준다. 동쪽 방향의 교량은 고강도 고성능 콘크리트를 사용해서 설계되었는데, 이것은 56일 압축강도 103MPa (14,700psi)의 프리캐스트 프리스트레스 콘크리트 beam과 42MPa(6,000 psi)강도의 현장타설 콘크리트 바닥판과 프리캐스트 프리스트레스 콘크리트 바닥판, 56MPa(8,000psi)강도의 현장타설 콘크리트 주두부와 42MPa

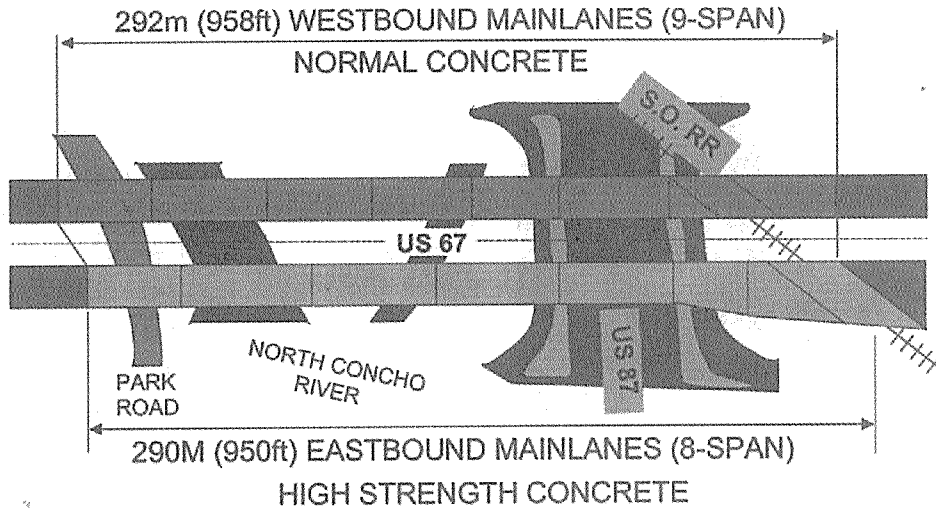
(6,000 psi)강도의 현장타설 콘크리트 교각을 포함하고 있다.

서쪽방향으로 가는 보통 콘크리트 교량에서 고강도 콘크리트가 사용된 부재는 단지 28

(표 3.3) San Angelo design concrete compressive strength

교량의 요소	콘크리트의 압축강도, MPa	
	고강도 콘크리트 (동쪽방향 교량)	보통강도 콘크리트 (서쪽방향 교량)
I형 프리스트레스 거더	40~103MPa * (5,800~14,700 psi)	35~61MPa (5,000~8,900 psi)
현장타설 바닥판	42MPa * (6,000 psi)	28MPa * (4,000 psi)
프리스트레스 트 바닥판	42MPa* (6,000 psi)	35MPa (5,000 psi)
하부구조 : 주두부	56MPa* (8,000 psi)	42MPa (6,000 psi)
하부구조 : 교각	42MPa* (6,000 psi)	25MPa (3,600 psi)

* : 고강도 고성능 콘크리트



(그림 3.6) San Angelo 교량의 조감도

MPa강도의 현장타설 콘크리트 바닥판 밖에 없는데, 이는 내구성 향상을 위한 것이다.

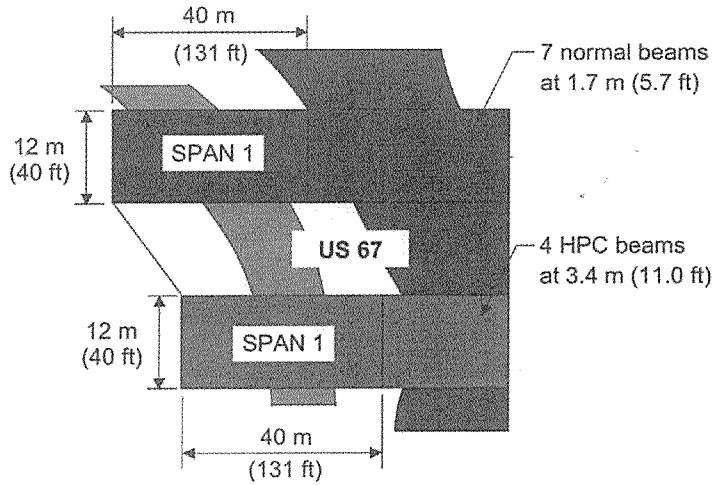
동쪽방향으로 가는 교량의 경간의 길이와 빔(bean)의 간격은 프리텐션 콘크리트 빔에서 고강도 콘크리트의 효과가 충분히 발휘될 수 있도록 결정되었다. 결과적으로 본 공사에서 장대 교량의 설계 및 건설의 경험으로부터 I-형 빔은 전형적인 최대 설계 압축강도는 84MPa (12,000psi), 전형적인 최대 경간길이는 37m(120ft)에서 41m(135ft)사이로 결정되었다. 경간의 길이와 빔(bean)의 간격을 늘리기 위해 빔에 고강도가 요구되는 반면에 내구성의 향상은 바닥판과 하부구조에 요구되는 성능인데, 내구성 향상은 시멘트의 일정비율을 플라이 애쉬로 교체함으로써 얻을 수 있다.

(그림 3-7)은 양쪽 교량의 1번 경간을 각각 비교해 놓은 것으로서 고강도 콘크리트의 명백한 장점을 보여주고 있다. 서쪽 방향으로 가는 교량의 1번 경간(40m)에는 AASHTO에서 규정하는 보통 강도 콘크리트 빔(bean)이 모두 7개 사용되는 데에 반해, 동쪽 방향으로

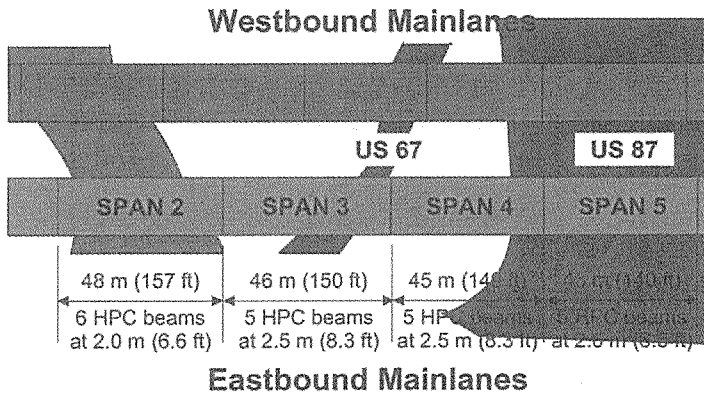
가는 교량의 1번 경간에는 모두 4개의 고강도 콘크리트 빔이 사용되었다. 이와 같이 고강도 콘크리트를 사용함으로써 빔의 개수를 43% 감소시키는 결과를 낳았고, 이로 인해서 빔의 제작, 운송 및 조립에 소요되는 비용을 절감할 수 있다.

(그림 3-8)은 또 다른 고강도 고성능 콘크리트 빔(bean)의 장점을 보여주고 있다. 동쪽 방향으로 가는 교량의 2번째 경간의 길이는 49m(157ft)로 되어있는데, 고강도 고성능 콘크리트의 경우, 총 연장 182m(596ft)에 4개의 경간이 필요한데 비해, 같은 총 연장일 때 보통 콘크리트 경간은 5개가 필요하다. 따라서, 고강도 콘크리트를 사용하면, 지간길이를 늘임으로서 결과적으로 하부구조물의 개수를 줄일 수 있는 경제적 효과를 얻을 수 있다.

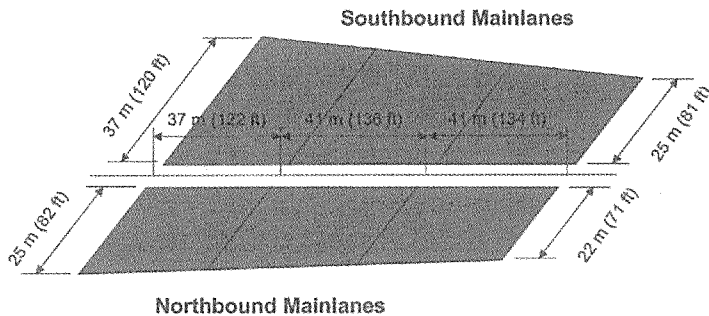
San Angelo 교량은 동쪽 방향으로 가는 고강도 고성능 콘크리트 교량, 서쪽 방향으로 가는 보통강도 콘크리트 교량 그리고 두 개의 보통강도 콘크리트의 램프(ramp)로 이루어져 있는데, 이 네 개의 교량에 포함된 빔(bean)의 입찰가는 337\$/m(115\$/ft)이다.



(그림 3.7) San Angelo 교량의 1번 Span에서의 빔의 개수 비교



(그림 3.8) San Angelo 교량의 경간 개수의 비교



(그림 3.9) Louetta 고가교량의 조감도

결국, 동쪽 방향으로 가는 교각도 고성능 콘크리트 교량과 서쪽 방향으로 가는 보통 콘크리트 교량사이의 입찰가의 차이는 교각과 하부구조 주두부의 가격차이라고 할 수 있는데, 입찰가 사이의 이러한 차이를 살펴보면, 교각도 콘크리트 교량은 교각에 교각도 고성능 콘크리트가 $504\$/m^3$ ($385\$/yd^3$) 드는데 반해, 보통 콘크리트 교량은 $471\$/m^3$ ($360\$/yd^3$) 들고, 하부구조의 주두부에 교각도 고성능 콘크리트가 $575\$/m^3$ ($440\$/yd^3$) 드는데 반해, 보통 콘크리트로는 $556\$/m^3$ ($425\$/yd^3$) 든다는 것이다.

교량의 입찰비용은 교량 바닥판의 단위면적 당 비용으로 나타내는데, (표 3-4)에서 알 수 있듯이, 동쪽 방향으로 가는 교각도 고성능 콘크리트 교량의 입찰가는 $452\$/m^2$ ($42.03\$/ft^2$)이고 서쪽 방향으로 가는 보통 콘크리트 교량의 입찰가는 $488\$/m^2$ ($45.38\$/ft^2$)이다. 이와 같이 교각도 고성능 콘크리트 교량의 입찰가격이 더 낮게 나타나는 이유는 교각도 고성능 콘크리트 교량의 경우, 필요한 빔 (beam)의 수가 감소하고 따라서, 빔의 제조, 운반, 설치에 소요되는 비용이 절감되기 때

[표 3.4] 가격비교 : San Angelo 교량

가격비교	고강도 콘크리트를 사용한 동쪽으로 향하는 교량	보통강도 콘크리트를 사용한 서쪽으로 향하는 교량
바닥판의 단위면적당 교량의 입찰가*, /m ² (/ft ²)	\$452 (\$42.03)	\$488 (\$45.38)
바닥판의 단위면적당 교량의 입찰가*, 계약자 조정가, /m ² (/ft ²)	\$510 (\$47.39)	\$440 (\$40.91)
가격차이, %	+16	-

* 입찰가에는 공사비의 10%에 해당하는 인건비와 여유비용이 포함된다.

문이다.

미국의 Texas주에 있는 최초의 고강도 고성능 콘크리트 교량인 Louetta 고가교는 Houston 근처의 249번 고속도로에 인접해 있는 두 개의 고강도 고성능 콘크리트 교량으로 구성되어 있다. [그림 3-9]에서 보듯이 이 교량은 3경간으로서 경간 길이는 각각 37.0, 41.3, 40.8m (121.5, 135.5, 134.0ft)이었다. 이 교량에서는 압축강도가 90.4MPa (13,100psi)이상의 고강도 고성능 콘크리트와 직경 15mm(0.6in)인 프리스트레스 강선이 사용되었다.

Louetta 고가교는 고강도 고성능 콘크리트로 설계되었는데, Louetta 고가 교량 공사의 모든 교량들은 같은 단가(328\$/m (100\$/ft))로 입찰되었다. 이 단가는 그 당시의 다른 보통 콘크리트 교량의 단가보다 낮은 것인데, 일반적으로 높이가 1372mm(54in.)인 U-beam의 평균 입찰가는 394\$/m (120\$/ft)정

[표 3.5] 가격비교 : Louetta 교량

가격비교	고강도 콘크리트를 사용한 Louetta 교량	보통강도 콘크리트를 사용한 교량
바닥판의 단위면적당 교량의 입찰가*, /m ² (/ft ²)	\$259 (\$24.09)	\$254 (\$23.61)
가격차이, %	+2	-

* 입찰가에는 공사비의 10%에 해당하는 인건비와 여유비용이 포함된다.

도이다.

[표 3-5]에서 보듯이 교량의 건설비용은 두 개의 Louetta 고강도 고성능 콘크리트 교량은 바닥판의 단위면적당 평균 259\$/m² (24.09\$/ft²)이고, 보통콘크리트 교량은 평균 254\$/m² (23.61\$/ft²)이다. 따라서, 고강도 콘크리트 교량의 건설비용은 보통강도 콘크리트 교량에 비해서 다소 작게 나타난다. 또한 동시대에 건설된 전형적인 프리스트레스트 콘크리트 I-형 교량보다도 낮은데, 프리스트레스트 콘크리트 I-형 교량의 건설비용은 단위 바닥판 면적에 대해서 평균 291\$/m² (27\$/ft²)이다.

San Angelo 교량과 Louetta 고가교의 예에서 알 수 있듯이, 장대교량의 건설에 고강도 콘크리트를 사용함으로써 경제적인 효과를 거둘 수 있는데, 경간 길이를 넓혀서 하부구조의 건설에 소요되는 비용을 절감하거나, 경간을 늘이는 대신 빔(beam) 사이의 간격을 넓혀서 빔의 개수를 줄임으로써 빔의 제작·운반 및 설치에 필요한 비용을 감소시키는 등의 비용 절감 효과를 거둘 수 있다.

(다음호에 계속)