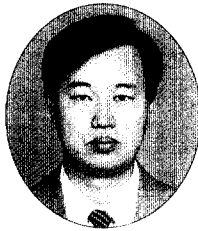


고강도 PC BEAM교량의 실용화

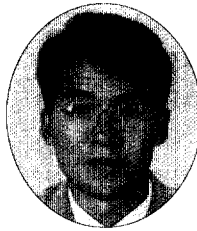
Application of PC Beam Bridges Using High Strength Concrete



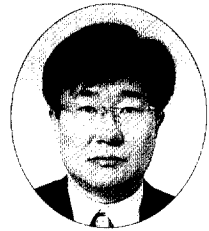
이규정*



정원기**



이형준***



엄태선****

1. 서론

최근 들어 고강도 콘크리트는 새로운 건설재료로서 세계 선진 국가에서 활발한 연구 및 실용화가 이루어지고 있는 실정이나 국내에서의 토목구조물에 대한 적용 사례는 아직도 미흡한 편이다. 실제로 국내 토목구조물에 시공된 고강도 콘크리트의 설계압축강도는 근래에 이르러서야 450kg/cm²강도 정도이며, 이는 선진 외국에서 실제 구조물에 적용한 600내지 700kg/cm²강도 이상의 적용 사례에 비추어 상당히 미진한 분야로 남아 있는 실정이다. 또한 구조물의 품질과 부설시공 문제가 사회적으로 크게 대두되고 있는 현실을 감안하면 고품질 콘크리트의 엄격한 품질관리, 시공과 함께 콘크리트의 고강도화가 필연적

으로 요구되고 있는 상황이다.

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 증대효과로 인한 거더 개수의 감소효과가 있다. 재료적인 관점에서 살펴본다면, 고강도화로 인한 콘크리트의 균열발생에 대한 저항성, 내부수성의 증진효과, shrinkage·creep 같은 체적변화의 감소효과와 함께 탄성계수의 증가로 인한 프리스트레스의 손실량 감소 같은 여러

* 정회원, 동아건설산업(주) 기술연구소 주임연구원

** 정회원, 동아건설산업(주) 기술연구소 수석연구원

*** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

**** 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 책임연구원

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.¹⁾

본 내용에서는 최근 선진 외국에서 연구 수행 중인 고강도 PC BEAM교량의 연구개발 및 실용화에 대한 대략적인 내용과 함께, 현재 한국도로공사 도로연구소, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 및 동아건설산업(주) 기술연구소가 지난해 하반기부터 공동으로 연구수행 중인 "콘크리트 장경간

은 연구 및 실용화 추진을 연방도로국(FHWA, Federal Highway Administration)을 중심으로 진행 중에 있다. 이미 지난 수년간에 걸쳐 SHRP프로그램(Strategic Highway Research Program)내에 고성능 콘크리트(HPC, High Performance Concrete)의 연구개발 과제를 수행 중에 있으며 실제로 약 40여 개의 콘크리트 교량구조물에 대한 시험적용이 실용화 단계에 있다고 알려져 있다.²⁾

HPC 프로젝트는 미국 연방도로국(FHWA)뿐만 아니라 각 주(州)의 도로국(DOT: Department of Transportation)간의 적극적인 지원 하에 유명 대학의 연구기관 등이 공동으로 연구

표 1 HPC Project에 포함된 고강도 콘크리트 PC BEAM교량

| 교 량 명 및 위 치 | 지간길이 | 설계 강도 | 년도 | 거터 형태 |
|---|--------|------------------|------|------------------|
| Alabama Highway 199 over Uphapee Creek, Macon County | 34.7m | 700@ 28 Days | 1998 | AASHTO Bulb-T |
| Colorado Interstate 25 over Yale Avenue, Denver | 34.5m | 700@ 56 Days | 1998 | Box Beam |
| Georgia State Route 920 over Interstate 75, Henry County | - | 620@ 56 Days | 1998 | AASHTO type beam |
| Nebraska 120th Street & Giles Road Bridge, Sarpy County | 23m | 830@ 56 Days | 1996 | Bulb-T |
| New Hampshire Route 3A Bridge over Newfound River, Bristol | 18.3m | 550@ 28 Days | 1999 | Bulb-T |
| New Hampshire Route 104 Bridge over Newfound River, Bristol | 20m | 550@ 28 Days | 1996 | AASHTO III-type |
| North Carolina U.S.401 over Neuse River, Wake County | 28m | 400@ 28 Days | 1999 | AASHTO IV-type |
| Ohio State Route 22 at Mile Post6.57, Guernsey County | 36m | 700@ 56 Days | 1997 | Box Beam |
| Texas Louetta Road Overpass, State Highway 249, Houston | 40m | 700-900@56 Days | 1997 | U-Shaped Beam |
| Texas San Angelo Bridge U.S.Route 67 | 20-48m | 400-1000@56 Days | 1997 | AASHTO IV-type |
| Virginia Route 40 over Falling River Lynchburg District | 25m | 550@ 28 Days | 1995 | AASHTO IV-type |
| Virginia Avenue over Clinch River, Richlands | 23m | 700@ 28 Days | 1997 | AASHTO III-type |
| Washington Eastbound State Route 18 over Route 516, King County | 42m | 700@ 28 Days | 1997 | WSDOT girder |

보 개발에 대한 연구"과제의 일부 내용을 간략하게 소개하고자 한다.

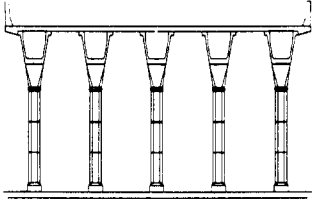
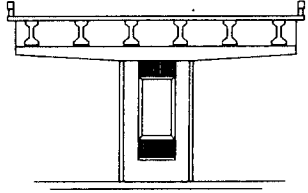
2. 외국의 시공사례

이미 선진 외국에서는 교량구조물에 대한 고강도 콘크리트의 적용이 일반화되었으며, 특히 미국의 경우 PC BEAM교량의 적용문제에 대해 많

과제를 수행 중에 있으며, 고강도 콘크리트의 적용으로 인한 구조물의 내구성능 평가와 함께 경제성 분석 등을 주요 내용으로 하고 있다.³⁾

표 1은 미국내 HPC 프로젝트 내용 중에서 PC BEAM 교량에 대한 사항만을 정리해 놓은 것이며 그 중에서 Texas주 Huston에 위치한 Louetta 육교와 San Angelo 교량에 대한 개략적인 내용⁴⁾을 표 2에 나타내었다.

표 2 Texas HPC Bridge Project

| 교량명 | Louetta Road Overpass | San Angelo Overpass |
|------------|---|--|
| 교량 단면도 |  |  |
| 교량제원 | L=119m, 3경간 3차선 사교 (U-type) | L=290m, 8경간 2차선 (AASHTO-IV type) |
| pc beam 강도 | 700-900 kg/cm ² | 400-1000 kg/cm ² |
| 특 정 | 지간길이 37-41m 일반강도 적용시 최대 35m | 1경간 L=40m(3.4m)*, 4개 보 2경간 L=48m(2.0m)*, 6개 보 |

* ()안의 값은 거더의 간격



사진 1 San Angelo교량 전경



사진 2 제1경간 및 제2경간 상세모습

이들 교량에 타설된 고강도 콘크리트의 특성치 (설계강도, 수화열, 콘크리트 탄성계수, 크리프 및 건조수축계수, 투수성계수 등)는 실내배합시험, 현장 배치플랜트의 시험 뿐만이 아니라 실제 교량의 부재까지도 시험대상으로 조사되었으며 시공된 교량에 대해서는 사용하중 하에서 장기적인 계측을 통해 구조적인 거동을 관측할 계획으로 있다. 이 중에서 San Angelo교량은 아래 사진에서 보듯이 AASHTO IV type의 거더를 적용하였는데, 이는 보통강도 콘크리트 적용시 필요

한 거더의 개수 7개와 비교하여 고강도 콘크리트 (400-1000 kg/cm²)로 타설된 제1경간에서는 거더의 간격을 3.4m로 증대시켜 거더의 개수를 4개로 감소시키는 효과를 보여주고 있으며, 제2경간에서는 6개의 거더를 사용하는 대신에 지간 길이를 무려 48m까지 증대시키는 등 각 경간마다 거더의 간격을 달리하여 지간길이 및 거더간격의 증대효과를 분석한 연구결과이다.

3. 고강도 콘크리트 PC BEAM교량 설계

고강도 콘크리트를 PC BEAM교량에 적용함으로써 건조수축, 크리프 같은 체적변화에 대한 손실량의 감소효과 뿐만이 아니라 콘크리트의 압축강도 증가에 따르는 허용인장응력과 허용압축응력의 증가효과를 나타내기 때문에 지간길이의 증대와 함께 거더간격의 증대효과를 기대할 수 있다. 연구결과에 의하면 아래와 같이 콘크리트의 고강도화로 인한 여러 효과를 몇 가지 항목에 대하여 비교 분석하였다.

첫 번째로는 고강도화에 따른 지간길이의 증대효과를 분석한 내용으로 AASHTO-IV type의 거더를 적용하였을 때, 각각의 거더간격당 가능한 최대 지간길이를 보여주고 있는 내용이다. 거더간의 간격이 6ft.(약 1.8m)인 경우, 거더의 설계 압축강도가 6,000psi(약 420kg/cm²)에 10,000psi(약 700kg/cm²)으로 증가시켰을 때 지간길이가 110ft.(약 33m)에서 140ft.(약 42m)로 약 1.27배 증가하였으며, 거더간의 간격이 10ft.(약 3.0m)인 경우에는 거더의 설계 압축강도가 같은 크기로 증가함에 따라 지간길이가 94ft.(약 28m)에서 124ft.(약 37m)로 약 1.32배 증가한 내용을 보여주고 있다. 결론적으로, 다경간 연속보일 경우에는 고강도 콘크리트를 적용함으로써 지간길이의 증대효과를 도출, 필요한 교각의 수를 감소시키는 장점이 있다.

표 4 거더의 압축강도 증가에 따른 지간길이 증대효과

| 거더간격 압축강도 | 6 ft. | 8 ft. | 10 ft. |
|--------------|---------|---------|---------|
| 6,000 psi | 110 ft. | 104 ft. | 94 ft. |
| 8,000 psi | 126 ft. | 119 ft. | 110 ft. |
| 10,000 psi | 140 ft. | 131 ft. | 124 ft. |
| 12,000 psi | 150 ft. | 141 ft. | 132 ft. |
| 14,000 psi | 159 ft. | 148 ft. | 139 ft. |

두 번째로는 앞의 경우와는 반대로 지간길이를 고정으로 하고 거더의 강도증가에 따른 거더간격의 증대효과를 분석한 내용이다. 그림 2에서 보듯이 지간길이가 120ft.(약 36m)인 경우, 거더의 설계 압축강도가 6,000psi(약 420kg/cm²)에서 10,000psi(약 700kg/cm²)으로 증가시켰을 때 거더간격이 4ft.(약 1.2m)에서 9ft.(약 2.7m)

로 약 2.25배 증가하였으며, 지간길이가 140ft.(약 42m)인 경우에는 거더의 설계 압축강도가 8,000psi(약 560kg/cm²)에서 10,000psi(약 700kg/cm²)으로 증가시켰을 때 거더간격은 3ft.(약 0.9m)에서 5ft.(약 1.5m)로 약 1.67배 증가하였음을 보여주는 그림이다. 거더의 간격을 이만큼 증대시킬 수 있다는 사실은 실제 교량을 시공함에 있어 정해진 교량의 폭에 따라 필요한 거더의 개수를 감소시킬 수 있다는 점을 보여주고 있는 것이다.

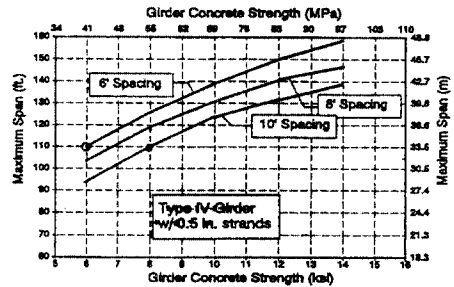


그림 1 거더강도 증가에 따른 지간길이의 변화
단위환산 : 1ft. = 0.3048m, 1psi = 0.0703kg/cm²

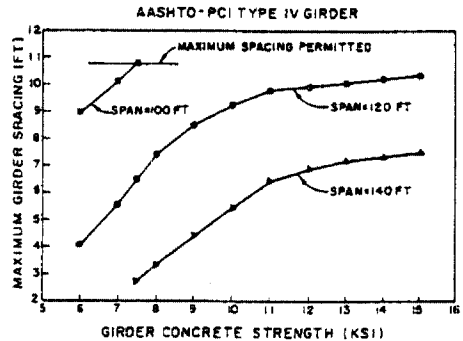


그림 2 거더강도 증가에 따른 거더간격의 변화

현재까지는 미국뿐만이 아니라 고강도 콘크리트의 실용화를 추진중인 선진 외국의 경우를 보더라도 실질적으로는 고강도 콘크리트를 사용하였음에도 불구하고 아직까지는 설계단계에 있어서 고강도 콘크리트에 적합한 새로운 설계공식의

적용과 시방규정에 대한 개정작업이 미비한 편이다. 더구나 콘크리트의 고강도화로 인한 shrinkage·creep 같은 프리스트레스의 손실량 감소효과가 PC BEAM교량의 설계과정에 있어서 제대로 반영되지 않고 있는 상황이며 따라서 기존의 보통강도 콘크리트에 적용되는 공식을 그대로 적용하는 등 다소 보수적인 설계방법을 사용하고 있는 실정이다. 그러므로 충분한 실내시험(압축강도, 탄성계수, 인장강도, 크리프, 건조수축 시험 등)을 진행하면서 도출된 연구결과를 토대로 향후에는 고강도 콘크리트의 특성치를 충분히 고려한 객관적인 설계기법을 도입하여야 할 것을 향후의 연구과제로 남겨두었다.

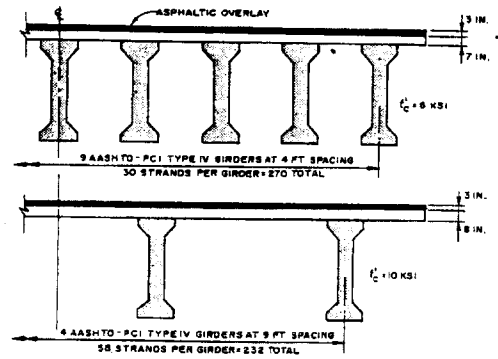


그림 3 Braker Lane 교량의 자원 비교

4. 경제성 분석

고강도 콘크리트를 사용하는 주된 이유는 전체 교량 건설비용의 절감효과를 얻을 수 있다는 점이다. 아래의 그림 3과 표 4는 미국의 Braker Lane교량에 대한 연구결과를 나타내 주고 있다. 그림에서 보듯이 거더의 설계압축강도가 약 $420\text{kg}/\text{cm}^2$ 을 적용한 경우에는 거더의 간격이 약 1.2m이고 9개의 거더가 요구되었으나, 고강도 콘크리트를 적용한 경우(거더의 설계압축강도가 약 $700\text{kg}/\text{cm}^2$)에는 거더의 간격을 약 2.7m까지 증가시킴과 동시에 4개의 거더만을 사용하는 즉, 5개의 거더갯수 감소효과를 그림으로 나타내 주고 있다.⁵⁾

이 연구결과에 의하면 고강도화로 인한 단위 시멘트 양의 증가로 인해 거더 자체의 재료단가는 상승(\$40→\$85)할지 모르나 거더간격의 증대로 인한 소요 거더개수의 감소효과(9개→4개)가 발생하므로 거더 콘크리트의 재료비 자체는 약간 감소(\$73.08→\$69.02)하고 있음을 보여주고 있다.

그러나, 고강도 콘크리트를 사용함으로써 얻을 수 있는 가장 실질적인 비용절감은 거더의 시공과 관련된 비재료적인 면에 있어서의 절감이다. 여기서 비재료적인 비용이라 함은 거더를 생산함에 있어서 발생하는 인건비, 간접비, 수송경비,

표 5 Braker Lane 교량의 공사비 비교

| item | cost per ft. | |
|---------------------|--|--|
| | 6,000 psi (약 $420\text{kg}/\text{cm}^2$) | 10,000psi (약 $700\text{kg}/\text{cm}^2$) |
| deck | $\$5.90 \times 36$ ft width \$212.40 | $\$7.46 \times 36$ ft width \$268.50 |
| strands | $270 \times \$0.40$ strands \$108.00 | $232 \times \$0.40$ strands \$92.80 |
| girder con'c | $9 \times \$0.203$ $\times \$40$ \$73.08 | $4 \times \$0.203$ $\times \$85$ \$69.02 |
| girder non-material | $9 \times \$46.68$ \$420.12 | $4 \times \$46.68$ \$186.72 |
| total per ft | \$813.60 | \$617.10 |

설치비용 등이 모두 포함된다고 볼 수 있다. 이러한 비재료적인 비용은 고강도 콘크리트나 보통강도 콘크리트의 경우에 있어서 거의 차이가 없지만, 필요한 거더의 갯수가 줄어들어 따라 전체 시공비용이 813.60에서 \$617.10로 약 25% 정도 감소가 가능해진 것이다.

이러한 비용절감 효과 이외에도 고강도 콘크리트의 적용으로 인해 유연성(flexibility)있는 구조를 가능케 할 뿐 아니라 미관상으로도 유리하며, 다경간 교량의 경우에 있어서는 장지간으로 시공이 가능해지므로 필요한 교각의 개수를 줄일 수 있게 된다.

아울러 구조물의 고강도화는 낮은 투수성을 갖게 되므로 특히 해안가나 부식될 가능성이 높

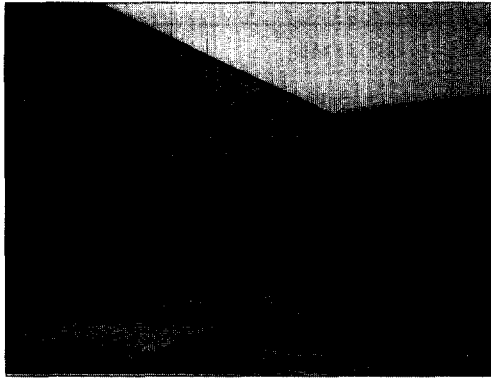


사진 3 PC BEAM부재 제작 모습

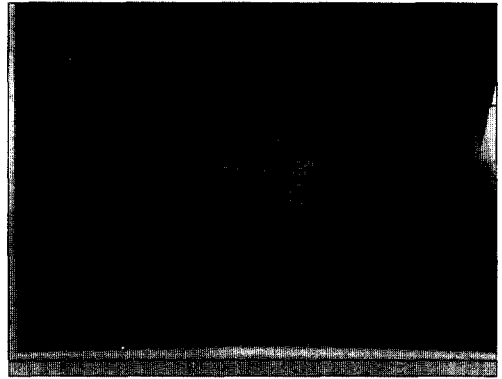


사진 4 PC BEAM부재 거치 모습

표 5 연구분야별 내용 및 범위

| 재료분야 | 구조분야 | 시공분야 |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ● 고강도 콘크리트의 배합설계 (600, 700, 800 kg/cm²) ● 콘크리트의 물리적 특성연구 ● 콘크리트의 내구성능 연구 ● 콘크리트의 장기거동 연구 | <ul style="list-style-type: none"> ● 장경간 PC BEAM설계 및 해석 ● 교량구조 해석 및 설계 ● 해석 및 설계프로그램 개발 ● PC BEAM부재 대형구조시험 (정적, 피로 및 장기거동 시험) | <ul style="list-style-type: none"> ● 예비 시험시공 ● 시험시공 ● 계획관리 및 성능평가 |

은 열악한 환경하에서도 우수한 내구성을 확보할 수 있는 방안으로 제시되고 있으며, 내구성이 향상된 고성능 콘크리트를 적용함으로써 구조물의 유지, 보수비의 절감 등 단기, 장기적인 의미에서 경제적 이득을 생각할 수 있는 등 많은 기대효과가 존재한다. 또한 혼화재용으로 고로슬래그, 플라이애쉬 등 산업폐기물을 적극 활용하여 환경보존에도 일익을 담당할 것으로 기대된다.

5. 콘크리트 장경간보 개발 프로젝트 소개

한국도로공사 도로연구소, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 및 동아건설산업(주) 기술연구소는 지난해 7월부터 공동으로 "콘크리트 장경간보 개발에 대한 연구"과제를 수행 중에 있으며, 현재까지 고강도 콘크리트의 실내배합 실험을 통한 재료특성치를 파악하여 국내의 설계 및 시공규준에 적합한 장경간 PC BEAM교량의 구조해석 및 설계과정을 거쳐, 20m PC BEAM 부재 5분을 금년 5월에 제작, 완료하였다.

또한 구조설계에 대한 검증과 구조물의 내구성능을 평가하기 위하여 이들 부재에 대한 정적재하시험 및 피로시험 그리고 장기거동시험 등 대형구조시험을 국내최초로 실시 중에 있다.

본 연구과제 전체에 대한 내용 및 범위는 고강도 콘크리트에 대한 재료개발분야, 구조설계와 구조시험을 수행하는 구조분야 및 실제교량에 대한 시공분야로 나뉘며 해당 분야별 주요 추진내용은 표 5와 같다.

상기와 같은 연구과정을 거쳐 최종적으로 실제 고속도로의 시험주요상에 건설될 금당교에 대한 재원 및 위치는 아래 표 6과 같다.

6. 결론

고강도 콘크리트를 교량구조물에 적용함으로써 부재의 내하력 증대효과를 이용, 교량구조물의 장경간화 뿐만이 아니라 거더간격의 증대로 인한 거더 개수의 감소효과가 가능하며, 이와 더불어 고강도화로 인한 콘크리트의 균열발생에 대한 저

표 6 시험대상 교량의 위치 및 교량 제원

| | |
|---------|--|
| 1. 위치 | 중부내륙 고속도로 여주-충주간 1공구상의 TEST ROAD |
| 2. 교량형식 | Post-tensioning Prestressed Concrete Beam Bridge |
| 3. 총 연장 | 30m + 3@40m + 2@60m = 270m * 30m와 40m 구간(총 150m)만 PC BEAM형식. 본 프로젝트와 관련된 범위 |
| 4. 지간길이 | 39.1m (거더길이는 39.9m) |
| 5. 교량폭원 | 12.6m (2차선) |
| 6. 교량등급 | 1등급교 (DB-24, DL-24) |

항성, 내투수성의 증진효과 그리고 건조수축, 크리프같은 체적변화의 감소효과를 기대할 수 있다. 또한 내구성이 향상된 고성능 콘크리트를 적용함으로써 구조물의 유지관리 및 보수비용의 절감 등 장.단기적인 의미에서 경제적 이득을 생각할 수 있는 많은 기대효과가 존재한다.

다가오는 건설시장 개방의 시대적인 조류와 함께 건설분야의 신기술 개발을 감안한다면 우리나라에서도 고강도 콘크리트의 현장적용이 하루빨리 이루어져야 할 것이며, 이를 위해서는 설계사, 시공사 뿐만이 아니라 발주처에서도 고강도 콘크리트의 연구에 대한 많은 관심과 함께 실용화에 대한 적극적인 지원체계가 확립되어야 한다고 판단된다.

진척된 고강도 콘크리트 연구와 더불어 콘크리트의 기술 향상은 재료 및 기술분야의 막대한 개선을 가져올 것이며 이로 인한 기술적 파급 효과는 장대 교량, 특수구조물의 설계 및 시공기술의 향상 등 가능성을 강조한 기술적 개념확립에 큰 공헌을 할 수 있을 것이라 기대되며, 혼화재용으로 고로슬래그, 플라이애쉬 등 산업폐기물을 적극 활용함으로써 환경보존에도 일익을 담당할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Bruce W. Russell, "Impact of High Strength Concrete on the Design and Construction of Pretensioned Girder Bridges", PCI Journal Jul.- Aug., 1994, pp.76-89
2. National Research Council, "Mechanical Behavior of High Performance Concretes", Volume 1-6, Strategic Highway Research Program, 1993
3. R. N. Bruce, B. T. Martin and Henry G. Russell, "Feasibility Evaluation of Utilizing High Strength Concrete in Design and Construction of Highway Bridge Structures", Louisiana Transportation Research Center, January, 1994
4. M. L. Ralls, R. L. Carrasquillo, N. H. Burns (1996) "Texas High Performance Concrete Bridges", 4th International Symposium on Utilization of High-Strength / High-Performance Concrete, Paris, 1996
5. Timothy A. Durning and Kenneth B. Rear, "Braker Lane Bridge - High Strength Concrete in Prestressed Bridge Girders", PCI Journal. 