

서해안 고속도로 서해대교 PC박스거더 교량

Prestressed Concrete Box Girder Bridge
Section of Seo-Hae Grand Bridge



박래선

1. 개 요

서해안 고속도로 아산만을 횡단하는 서해대교(그림 1)는 경기도 평택시 포승면 내기리와 충남 당진군 송악면 복운리를 연결하는 총연장 7,310m, 왕복 6차선의 교량이다. 서해대교는 21세기의 서해교역의 관문이 될 아산항과 아산만 주변의 포승, 고대, 부곡 지역의 국가공단의 입지를 견고히 할 뿐 아니라 현충사, 도고온천 등의 주변관광시설과 어울려 주요 관광 명소가 될 것이다. 서해대교는 주항로가 될 사장교 990m, 예비항로가 될 FCM교(Free Cantilever Method에 의한 교량) 500m, 그리고 PSM교량(Precast Segmental Method) 5,820m로 구성된다.

이 중 공사현황을 소개하려는 교량은 PSM교로서 국내에서도 이미 적용되고 있는 공법의 교량이지만 일반인의 남다른 관심과 국제적인 주목을 받고 있는 본 교량은 그동안의 국내 건설경험(표 1 참조)을 총

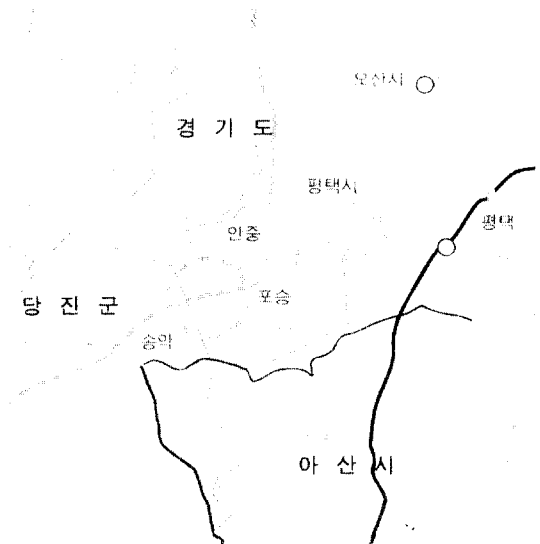


그림 1 서해안 고속도로 서해대교 위치도

* 한국도로공사 특수건설본부 계획부장

표 1 국내 PSM교 시공 예

교량명	연장(m)	경간경(m)	폭원(m)	시공사	소재지
강변북로교	4,300	50	34.8	남광토건	서울
북부간선로	9,100	50	26.0	삼성종합	서울
강변도시고속도로	4,850	50	26.0	현대건설	서울
부산 고가차도*	2,109	50 ~ 53	19.1	대원산업	부산

* : 부산 콘테이너 부두 배후수송 고가차도

동원하고 외국전문가들의 의견을 집약시킨 작품이라 할 수 있다.

프리캐스트 세그멘탈 공법(Precast Segmental Method)이란 일정한 길이로 분할된 상부부재인 세그멘트를 제작장에서 제작하여 가설현장으로 운반하고 lifting device를 이용하여 launching girder 위에 상부구조를 거치한 후, 포스트텐션으로써 상부구조를 완성시키는 공법이다. 이 때, 교각과 교각 사이에서 pier bracket에 의해 거치된 launching girder 위에서 프리캐스트된 세그멘트를 배열한 후 조립·연결하여 하나의 경간을 완성시키는 작업을 반복하는 공법이 되므로 Span by Span 공법에 의한 교량이라고도 칭할 수 있다. 이 공법의 특징은 다음과 같다.

- 분할 세그멘트 제작으로 복잡한 단면을 쉽게 처리할 수 있다.
- 공장에서 연속제작하므로 세그멘트 제작의 품질 및 인력관리가 용이하다.
- 하부구조 시공과 병행하여 실시하므로 공기단축 효과가 있다.
- 시공시는 제작 세그멘트가 충분히 경화된 상태이어서 프리스트레싱의 손실량이 적다.
- 세그멘트의 제작과 야적을 위한 장소, 운반 및 가설을 위한 장비가 필요하다.

2. 공사현황

PSM교 하부구조는 강관파일(φ1500)을 이용한 현장타설콘크리트 말뚝과 climbing form에 의한 콘크리트 교각으로 이루어진다. 이 공사중 교각이 해상부에 위치하는 경우, 강관말뚝 위에 교각기초 콘크리트를 타설하기 위하여 철근콘크리트 박스형 거푸집(PC House)을 이용하고 있다.

PSM교 프리캐스트 부재는 2개 공구에 마련된 2개의 세그먼트 제작장에서 제작하고 있다. 상부구조는 종방향 프리스트레싱(internal tendon과 external tendon으로 구성)과 횡방향 프리스트레싱이 동시에 이루어지며 2개의 예비긴장구를 갖는다. 한국도로공사에서는 향후 사용중의 보강을 위해 예비긴장구를 10% 이상 확보하도록 지침을 마련한 바 있다. '96년 12월말 현재 PSM교의 공사추진 현황은 다음과 같다.

표 2 '96년 12월말 공사추진 현황

공 종	단위	전체수량	'96년까지	'97년까지
현장타설말뚝	본/기	1,933/88	1,594/75	339/13
Footing	기	102	71	31
구재	기	102	63	39
세그멘트 제작	개	4,074	849	3,225
세그멘트 가설	경간	97	3	94

3. 특징 및 개선사항

본 교량 시공전 그동안 국내 건설현장에서 경험하였던 여러 가지 방대한 자료를 수집하고 분석하는 과정에서 도로공사, 감리단, 시공사, 설계사로 구성된 기술팀을 구성, 총 10회('95~'96)에 걸친 기술회의를 거쳐 구조검토를 비롯한 20여개 항목을 설정하여 '97. 1월 현재 도로연구소에서 시험시공 중인 내염도장 추가시행 항목과 교면방수 항목을 제외한 전 항목을 보완하여 성공적으로 시공 중에 있다.

이들 항목에는 개정된 시방기준에 만족하는지의 여부검토 및 보강, 방향변환블록(Deviation Saddle) 시공성 향상 등이 포함되어 있으며 여기에서는 신축이음부 세그멘트의 정착부 배면 균열방지 성공예와 내진설계에 대한 보강대책을 중심으로 소개하고자 한다.

3.1 신축이음부 세그멘트 균열제어

신축이음부는 PSM교량에서 하자발생이 가장 많고 구조적으로 취약한 부분으로 시공전에 충분한 검토가 필요한 부재이다.

서해대교 PSM구간은 프리스트레싱에 의한 Span by Span 공법으로 시공을 하도록 설계되었으며 긴

장재가 집중적으로 정착되는 신축이음부 및 지점부 격벽에 발생하는 일반적인 균열을 구조적으로 제어하기 위해 상세한 구조검토를 실시하였다.

3.1.1 검토조건

구조적인 검토를 위해 다음과 같은 과정을 수행하였다.

- ① 상부구조의 활하중과 사하중은 격벽에 불리하게 작용하도록 모두 복부를 통하여 전달된다고 가정한다. 또한 활하중의 편심재하도 고려한다.
- ② 종방향 P.S는 격벽에 외력으로 작용하고 횡방향 및 격벽의 수직 P.S는 내력으로 작용하므로, 이에 대한 고려를 위하여 종방향 P.S는 외력으로 작용시키고 내력으로 작용하는 모든 P.S는 solid 요소 내부의 frame 요소로 동시에 모델링한 후 온도하중으로 환산하여 긴장력을 고려한다.
- ③ 모든 긴장재의 프리스트레스는 주인장응력이 발생하는 격벽에 불리하게 작용하도록 제한한다.
 - 종방향 P.S : 초기긴장력 적용(σ_{pu} 의 75, 80%)
 - 상부슬래브 횡방향 P.S : 초기긴장력 적용(σ_{pu} 의 80%)
 - 격벽부 P.S : P.S의 장기손실이 고려된 긴장력 적용 (σ_{pu} 의 62%)
- ④ Launching truss에 의한 세그먼트의 거치시 검토를 위한 지점의 위치는 시공시 충분한 공간확보를 위해 세그먼트 상부슬래브 캔틸레버 시점에서 1m 이격된 곳으로 가정한다.
- ⑤ 격벽의 해석은 이웃한 세그먼트의 복부와 상·하부 슬래브에 의해 단순지지된 높이가 큰 보로 가정하여 철근량을 구한다.

3.1.2 검토결과

FEM 해석결과 응력상 필요 철근량은 수평방향 철근을 제외하고는 원설계의 소요배근량이 적절하며, 균열폭의 제어를 위해 수직 철근의 증가가 필요하다고 판단되었다. 이 때, 허용균열폭은 확실한 규정이 제시되어 있지 않아 전문가들이 잠정적으로 추

천하는 0.2mm를 기준으로 하였다.

검토시에 다음의 3가지 안을 비교 검토하였으며 그 결과를 요약한 것이 표 3이다.

- 제1안 : 균열을 허용균열폭 이하로 제어하는 철근을 추가로 보강
- 제2안 : 균열을 허용균열폭 이하로 제어하되 P/T bar와 철근으로 보강
- 제3안 : 철판을 부착하는 방안

① 각 안별 정밀해석 결과정리

정밀구조해석 결과 신축이음부 하부슬래브에서 횡방향 강선에 의한 압축력이 허용압축력을 상회하는 것으로 밝혀져 하부슬래브의 두께를 증가시켰다(20cm → 40cm). 따라서, 원설계에 대한 검토시는 하부슬래브 두께 20cm를 적용하고 나머지 3개안에서는 40cm로 변경한 단면에 대해서 계산하였다.

표 3 각 안별 정밀해석 결과정리

항 목	수평 방향	수직 방향	
실 계 도 면	철근량 : H29@150=42.83cm ²	철근량 : H29@100=64.24cm ²	
FEM 해석결과	원설계	응력 : 101.6kg/cm ² 소요철근량 : 84.67cm ²	응력 : 77.3kg/cm ² 소요철근량 : 60.14cm ²
	제1안	응력 : 95.5kg/cm ² 소요철근량 : 87.58cm ² 사용철근량 : 102.78cm ² 추정균열폭 : 0.12mm	응력 : 74.7kg/cm ² 소요철근량 : 58.07cm ² 사용철근량 : 102.78cm ² 추정균열폭 : 0.16mm
	제2안	횡방향 P.T : D38×2row×3col 사용 응력 : 80.1kg/cm ² 소요철근량 : 73.33cm ² 사용철근량 : 102.78cm ² 추정균열폭 : 0.10mm	응력 : 72.0kg/cm ² 소요철근량 : 60.0cm ² 사용철근량 : 102.78cm ² 추정균열폭 : 0.16mm
	제3안	12mm 철판 사용 사용적정량 : 51.39cm ²	12mm 철판 사용 사용적정량 : 51.39cm ²

여기서, 제1, 2안의 수직방향 사용철근량은 0.2mm 이하로 균열폭 제어를 위해 소요철근량보다 다소 많은 양의 철근을 사용하였다. 즉, 해석결과에서 2-H22@125=61.93cm²인 경우 0.27mm, 2-H25@125=81.07cm²인 경우 0.21mm의 균열폭이 예상되어 2-H29@125=102.78cm² (예상균열폭 0.16mm)를 사용하였다.

② 각 안별 비교검토

표 4 각 안별 비교검토

항 목	제1안 : 철근보강	제2안 : P/T 및 철근보강	제3안 : 철관사용
보강내용	수직, 수평철근 : 2-H29@125=102.78cm 사용	수직, 수평철근 : 2-H29@125=102.78cm 사용 횡방향 P/T : D38×2row×3col. 사용	철관 t=12mm 천면사용 수직, 수평철근 : H29@125=51.39cm 사용
보강효과	수평방향의 응력이 제2안보다 약 15kg/cm ² 정도 과다하나 효과 양호	수평방향의 응력이 제1안보다 약 15kg/cm ² 정도 축소되나 P/T bar 사용지점의 국부적인 보강 필요	철근 대신 철관으로 표면을 보완하는 개념으로 효과 양호
시공성	양호	제1안에 비하여 P/T bar 추가작업이 소요되나 작업 양호	철관과 콘크리트의 합성작용을 위하여 철관과 철근의 용접이 요구되며 철관 중앙 추가로 기획된 설치장비의 능력에 다소 무리
경제성	경제적	P/T bar는 추가되나 철사용 철관량은 1안과 동일함	철관량은 축소되나 철관의 추가 및 제작이 복잡하여 다소 높은 공사비 소요
유지관리	외부 표면에 미소량의 균열발생이 우려되나 균열발생시 Monosilane 도포	외부 표면에 미소량의 균열 발생이 우려되나 균열발생시 Monosilane 도포	내부 콘크리트에 미소균열 발생시 견결은 불기하나 철관으로 유해물질 침투는 방지 가능하며 철관에 대한 별도의 도장이 요구

3.1.3 검토 결론 및 시공

신축이음부 세그먼트의 정착부 배면에 발생하는 균열은 일반적으로 억제할 수 없다. 구조상 문제가 없고 유지관리상에 무해한 균열발생을 억제하기 위하여 격벽의 두께를 과다하게 설계하는 것은 비경제적이므로, 본 교량에서는 구조상 무해한 미세한 균열 발생은 허용하되 균열발생을 최소화하고자 노력하였다.

균열 정밀검토 결과를 참고로, 원설계의 횡방향 P/T와 철근배근을 유지하는 상태에서 추가 횡방향 강봉 도입은 기설계된 P/T와 맞물려 너무 복잡하게 되고, 철관 사용은 원천적으로 균열억제를 하지 못하는 상태에서 향후 유지관리시 문제점이 예상되어, 철근으로 보강하였다.

이에 의하여 실제 철근조립을 함에 있어서 겹이음과 강선배치 등으로 철근배치가 매우 조밀하게 되었으며 콘크리트 시공성과 품질관리를 위해 굵은 골재 치수를 19mm에서 13mm로 조정하게 되었다.

실제 시공 결과, 가장 큰 주인장응력이 걸리는 시점인 1경간 시공 직후와 현재까지 정착부 배면에서

균열은 발견되지 않았다.

따라서, 신축이음부 세그먼트의 정착부 배면 균열과 같이 구조적인 균열인 경우, 정밀해석에 의하여 그 원인을 파악하고 적절한 배근과 보강을 한다면 예상균열폭 내의 관리가 가능하다고 판단한다.

아울러 국내 현장에서 사용되는 콘크리트 배합은 여전히 높은 시멘트량을 근간으로 하고 있는 실정이므로 구조적인 균열이 아닌 경우에 대해 재료적인 측면에서 접근해야 할 것이다. 이를 위해 지속적인 연구와 개발이 필요하다.

3.2 교좌장치 내진설계

우리나라는 세계에서 지진이 가장 많이 발생하는 일본, 필리핀, 뉴질랜드 등이 속하는 환태평양 지진대와 경계를 형성하고 유라시아 지진대에 속한다. 우리나라의 경우 지진발생빈도는 매우 드물고 불규칙한 편이나 근래들어 빈번해지는 현상을 보이고 있어 정부에서는 '92년 도로교시방서 상에 내진설계에 대한 시방기준을 제정한 바 있고 '96년도에 들어서 건설공사 실시설계시 내진설계기준을 철저히 준수토록 하고 있으며, 지진에 대한 안정성 확보를 기할 수 있도록 내진설계기준을 전면 재검토 및 보완 중에 있다.

한국도로공사에서도 서해대교 건설공사 설계에 내진설계를 도입하기 시작하였으며 설계사업소에서 '95년도 내진설계 적용기준을 제정한 바 있고, 현재 내진설계 지침 작성 연구용역을 시행하고 있다.

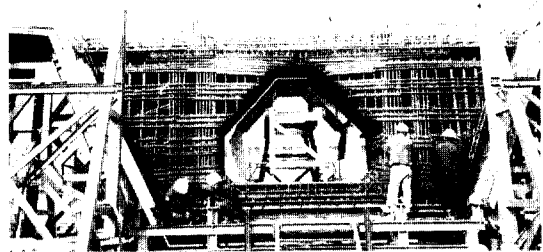


사진 1 신축이음부 세그먼트 철근조립 상태

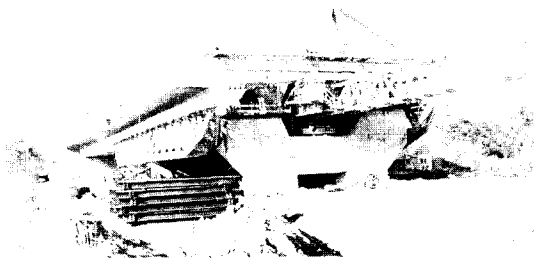


사진 2 Launching girder 위에 상부구조를 거치한 장면

이와 같이 국내의 내진설계에 대한 기술수준은 아직 초기 단계이며 보다 구체적인 설계세목이나 기준 등이 미흡한 실정이다. 특히, 교량에 있어 상·하부를 연결시키는 교좌장치에 대해서는 설계측면의 이론정립은 물론, 내진용 교좌장치의 제작, 생산 등에 있어서도 많은 연구개발이 요구되고 있다.

교좌장치는 지진발생시 발생하는 지진력을 상부와 하부구조에 전달시키는 형태에 따라 내진(耐震)과 면진(免震) 받침으로 나눌 수 있고, 교량받침의 고정방식에 따라 일부 고정식과 다점 고정식으로 구분할 수 있는데 그에 따라 각 교좌장치의 원리와 그 규격이 결정되어진다. 서해대교 PSM교는 국내에서 처음으로 내진설계 개념이 도입된 다경간 일점 고정 연속교량으로서, 등가정적 해석법(사장교구간은 복합모드 스펙트럼 해석법)을 적용하였다. 이 방법은 상부구조 사하중의 일정비율(10% 내외)을 지진에 의한 수평력으로 간주하여 해석하는 것으로 본 교량의 경우에는 6%를 사용하였다.

원설계시는 지진발생시 고정지지된 교량 받침이 파괴되어 상부질량에 따른 교축방향의 수평력을 콘크리트용 지진저항 전단키에 의하여 전 교각에서 고르게 분담시킨다는 개념으로 설계되었다.

그러나, 최근 지진에 대한 중요성이 부각되면서 내진설계에 대한 전면적인 검토가 실시되었으며 원설계의 몇가지 문제점을 발견하고 점성 Stopper, 면진 받침 등 첨단 내진시설 개발에 따라 이들 적용을 검토 중에 있다.

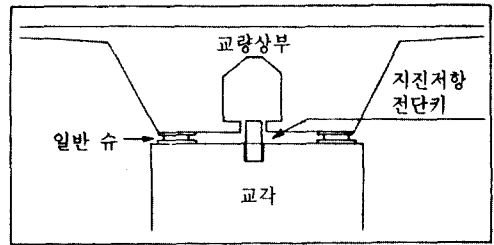


그림 2 지진저항 전단키 설치 개요도

3.2.1 원설계의 개념

지진이 발생할 경우에 상부의 수평하중은 결국 고정지지된 교각에 모두 전달되게 된다. 그러나, 9~12경간으로 설계된 본 교량을 상부의 전체 수평하중이 하나의 고정교각에 집중된다는 개념으로 교각을 설계할 경우 교량 받침에 과도한 수평하중이 작용할 뿐만 아니라 교각 및 하부기초가 비현실적으로 비대해지는 결과를 낳게 된다.

따라서, 원설계에서는 지진이 발생할 경우 고정교각의 교량받침이 파괴되고 각 교각에 설치되어 있는 지진저항 전단키로 수평하중을 분담하여 저항한다는 개념이 적용되었다(그림 2).

여기서, 다음과 같은 문제점이 발견되었다.

- ① 지진시 모든 교각이 수평하중을 분담하기 위해서는 고정교각의 받침이 설계하중에서 정확히 파괴되어야 한다. 교량받침의 성능이 우수하여 설계하중 이상을 저항할 경우에는 교각 자체의 안정성에 문제가 발생할 수 있기 때문이다. 그러나, 교량 받침의 용량은 최소 저항치를 의미하므로 정확한 용량의 받침을 선정하기 어렵다.
- ② 지진시 모든 교각이 동시에 수평하중을 분담하여야 한다. 원설계에서는 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 의한 변형이 완료되고 온도가 15℃일 때의 유격을 20cm로 하였다. 그러나, 지진 발생전에 기준온도 상태가 아니라면 고정교각을 중심으로 양쪽 전단키의 유격은 일정하지 않으므로 지진의 특성상 교각의 개별적인 거동으로 일부교각에 하중이 집중되어 안정성에 문제가 발생한다.
- ③ 원설계는 지진의 영향을 등가의 정적하중으로 치환하여 고려하였다. 이 때 고려된 최대지반

가속도는 AASHTO 시방규정에 따라 0.3g 이하에 해당하며 설계개념상 10경간 연속인 경우에 고정교각부의 받침이 실제로 저항하는 최대지반가속도는 0.3g 이하의 약 1/10에 해당한다. 즉, 매우 작은 지진이 발생한 후에도 교량받침을 보수 또는 교체하여야 한다.

3.2.2 개선

위와 같은 문제점을 개선하기 위해 원설계에서 사용한 Pot Bearing을 사용하되 교각의 최소 수평저항력을 재검토하여 그 이상의 지진력이 전달될 경우 탈락이 되도록 Pot Bearing의 용량을 조정하도록 하였다.

또한 현재 9-12 연속경간을 3-10 연속경간으로 축소하였으며 stopper를 추가하도록 하였다. 즉, 온도 등과 같은 정적하중에는 저항하지 않고 지진등과 같은 동적하중에 대하여서는 고정역할을 하는 Damper System으로 상부구조와 교각을 연결하여 지진시 전 교각이 균등하게 하중을 분담하도록 하여 원설계의 개념을 완전히 충족시키도록 하였다.

이 때, 기설계된 지진저항 전단키를 적극 활용하여 stopper를 전단키와 PC박스 하부슬래브 사이에서 작동토록 하였고 설치 위치는 박스 내부에 둠으로써 설치가 용이하고 유지관리상의 장점도 최대한 살리도록 하였다. 또한 전단키를 설계대로 설치함으로써 예상되지 않은 경우의 사고에도 낙교방지 역할을 하도록 하였다.

탄성고무받침에 의하여 다지점 고정받침식으로서의 전환도 고려하였으나, 지진하중에 대해 저항할 수 있는 탄성고무받침의 강성 및 전단변형량 크기는 받침의 규격(높이, 면적)에 비례하므로 본 교량에서는 대규격이 요구되었다. 이에 따라 기시공된 교각에서 clearance가 부족하여 전반적인 교량의 종단선형의 조정이 요구되어 완성고무 받침 적용은 부적합하다고 판단하였다.

또한 본 교량에 대해서 경제성을 검토한 결과, stopper의 설치가 탄성고무받침의 설치에 비해 경제적으로 약간 유리한 것으로 검토되었다.

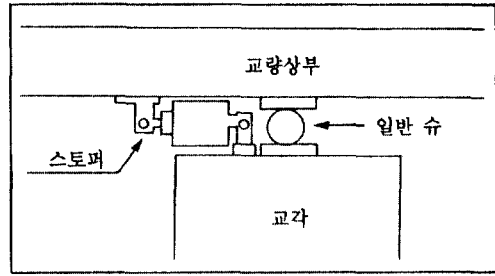


그림 3 Stopper 장치 설치 개요도

3.2.3 기타

원설계 개념에 따라 지진시 stopper에 작용하는 수평력 H는 약 107.5 ton으로 stopper는 두께 20mm의 SWS400 강판에 강도 600kg/cm² 이상의 무수축 모르타르로 속채움하였다.

이 때, stopper 자체의 휨과 전단에 대하여 응력을 검토하여야 하며, 아울러 PC박스 하부 슬래브의 지압응력 및 교각 coping부 콘크리트의 지압응력을 검토하여야 한다.

이러한 검토 결과에 의하여 stopper의 매입길이 (120cm)와 전단철근량을 결정하였다.

4. 결 언

서해안 고속도로 서해대교는 세계적인 규모의 교량으로서 국내·외의 관심이 집중되어 있고 우리나라의 토목기술을 세계에 알릴 수 있는 좋은 기회라고 생각한다. 그러므로 끊임없이 문제점을 찾아내고 개선대책을 세워 보완함으로써 보다 튼튼한 서해대교를 건설할 수 있으리라고 생각한다.

이 공사에 임하는 우리 공사나 시공사, 감리단 모두가 이와같은 인식을 같이 하고 책임감을 느끼고 있을 뿐만 아니라, 아울러 기술적인 부분에서의 관련 기술자들간의 혼연일치된 정보교류 및 상호지원을 통한, 어느 현장에서든 찾아볼 수 없는 성취도에 자부심을 가지고 있다고 판단한다. 