

|| 고속철도 구조물에 적용된 최신 기술 ||

고속철도 프리스트레스트 콘크리트 교량의 최신 시공기술

- Recent Construction Technology of Prestressed Concrete Bridges for High-Speed Railway -



김광수*
Kim, Kwang Soo



홍경옥**
Hong, Kyung Ok



김의성***
Kim, Eui Sung

1. 개 요

자동차와 항공기의 발달은 철도의 상대적 침체를 야기하였지만 1964년 개통된 일본의 신간선은 전 세계적으로 고속철도의 도입과 발전을 촉진하는 계기가 되었다. 한국에서도 1990년 고속철도를 이용한 새로운 경부선 철도 노선을 발표하고 1992년에 시속 300 km로 운행하는 경부고속철도(KTX)의 기공식을 거행함으로써 범 국가적인 역점사업이 시작되었다. 그로부터 십 수년에 걸친 과정을 통하여 2004년에 KTX를 개통하게 되었는데 이는 일본의 SKS, 프랑스 TGV, 독일 ICE, 스페인 AVE에 이은 세계 다섯 번째에 해당한다.

경부고속철도는 전체노선의 70% 이상이 교량과 터널로 건설되며 교량이 차지하는 비율은 약 37%에 이른다. 교량은 구조물의 진동과 소음을 고려하고 동적거동에 대한 분석을 바탕으로 PSC 박스거더를 주 교량으로 정하였으며 대부분은 MSS (Movable Scaffolding System) 공법, FSM(Full Staging Method), 그리고 PSM(Precast Span Method)에 의하여 시공되었다. 실제로 교량 상부구조에 있어서 경간 20 ~ 25 m는 중공 슬래브, 경간 30 ~ 45 m는 PSC 박스거더 구조를 기준으로 하고 고속도로를 횡단하는 경간 45 m 이상의 교량은 연속 트러스 구조를 기준으로 하여 시공되었다.

경부고속철도의 경우, 교량의 높이가 높지 않고 지반이 양호한 곳은 FSM을 적용하였으며 교량이 높고 하부에 하천이나 연약지반

등이 통과하는 구간에는 MSS를 적용하였는데 이는 도로교에서의 많은 시공경험을 바탕으로 하고 있다. PSM은 공기가 촉박하거나 MSS 장비의 운용이 원활하지 않은 구간에서 적용되었는데 경부고속철도 건설을 통하여 국내에서 최초로 시도된 공법이며 국내 콘크리트 교량의 시공기술을 한 단계 진보시키는 계기가 되었다.

이러한 경부고속철도의 설계와 시공과정에서 확인된 국내의 높은 기술력은 대만 고속철도의 진출이라는 성과를 거두게 하였다. 대만은 1990년대 초반에 고속철도 사업 계획에 착수하였지만 1998년도에야 사업자 선정과정을 거치고, 이후 빠른 진전을 보이며 2000년 초반에 건설에 들어가게 되었다. 총 12개의 토목공사 공구 중에서 3개 공구의 시공을 국내 업체가 담당하게 되었는데 C230, C240은 현대건설(주), C280은 삼성물산 건설부문이 담당하게 되었다.

본고에서는 고속철도 PSC 박스거더의 시공 기술을 국내 기술진에 의하여 수행된 사례를 중심으로 살펴보고자 한다. 특히 경부고속철도에서 처음으로 시도된 PSC 박스거더 교량의 시공법인 PSM을 중점적으로 분석하고, 대만고속철도에서는 국내 시공사에서 수행된 MSS에 의한 시공관리를 살펴본다.

2. PSM에 의한 고속철도 PSC 박스거더 교량의 시공

2.1 도입 배경

MSS 공법에 의한 PSC 콘크리트 박스거더 교량의 시공은 현장 작업이 대부분이므로 양생 방식의 한계, 기후에 따른 공정 진행의 불확실성 등이 상존하여 고품질의 확보가 어려우며, 공기의

* 정희원, 현대건설 기술개발원 과장, 공학박사
** 정희원, 현대건설 기술개발원 과장, 공학박사
*** 정희원, 현대산업개발 토목설계팀 과장, 공학박사

단축을 기대하기 어렵다. 또한, 숙련된 기능공과 MSS 장비의 부족시에는 안전 사고, 품질 저하의 우려가 있을 수 있으며 시공 계획에 따른 진행이 어렵게 된다. 따라서, 상부 구조물을 프리캐스트로 경간 일괄 제작하여 가설함으로써 공사 품질을 증대시키고 공기를 단축하며 안전성과 경제성을 확보할 수 있는 PSM의 도입과 적용을 추진하게 되었다.

한편, 25m 단순교에서 경부고속철도를 운행하는 경우, KTX 열차 하중에 대하여 불안정한 동적 거동을 나타낼 수 있다. 이에 따라, 설계 속도 350 km/hr 이내에서 일정지간의 고속철도 교량에 문제가 될 수 있는 공진 발생으로 인한 동적 거동의 불안정성을 보완하고자 연속화 시공을 계획하였다.

일반적인 프리스트레스트 콘크리트 구조물과는 달리 프리텐션과 포스트텐션을 동일 부재에 순차적으로 적용함으로써 프리캐스트 제작시와 단순교 가설, 그리고 연속화 과정의 각 공정별 구조 안정성 검토가 필요하다. 종방향 힘모멘트에 대한 구조해석, 세그먼트 연속화에 대한 구조해석 그리고 교량 세그먼트의 수화열 및 온도응력해석을 수행하여 구조적 안정성을 검토한 결과, 시공법은 획기적인 공기단축, 건설비용의 절감 및 내구성 향상뿐만 아니라 포스트텐션을 적용하여 단순교를 연속화시킴에 따라 고속철도의 주행에 대한 동적 안정성을 확보한 것으로 나타났다.

2.2 프리캐스트 PSC 박스거더의 제작 및 운반

2.2.1 프리텐션을 적용한 프리캐스트 PSC 박스거더 제작

설계 및 해석결과에 따라 구조적 안정성이 검토되고 경제성에 맞게 결정된 길이 25m, 무게 600 ~ 750 톤의 PSC 박스거더를 제작장에서 <그림 1>과 같이 프리텐션에 의한 프리스트레스를 도입하여 제작한 후, 특수차량(straddle carrier)으로 설치장소에 운반한다. 프리텐션 작업은 박스거더 한 경간을 공장에서 제작 및 거치한 후 다음 경간 설치시 가설장비가 기 설치된 박스거더를 통과할 때 견디기 위한 매우 중요한 공정이다.

기존의 국내 도로교 프리캐스트 PSC 박스거더 교량에서는 세그먼트 공법을 적용한 포스트텐션의 적용이 주로 이루어져 왔으며, 고속철도 교량과 같은 대형 부재에서의 프리텐션 적용은 실적이 거의 없으므로 시공과정에서 면밀한 검토와 분석이 수행되었다. 긴장 작업시 발생하는 손실량은 strand slippage, movement of anchorage, elongation of abutment anchor, strand rotation 등이 있으며 이는 actual elongation으로 보정하였다. 실제 측정된 신장량과 계산에 의한 신장량의 차는 5% 이내에서 관리되었으며 초기 시공 단계에서 발생한 강선의 파단은 <그림 2>에서 제시된 hold-down device의 재질을 변경함으로써 해결되었다.

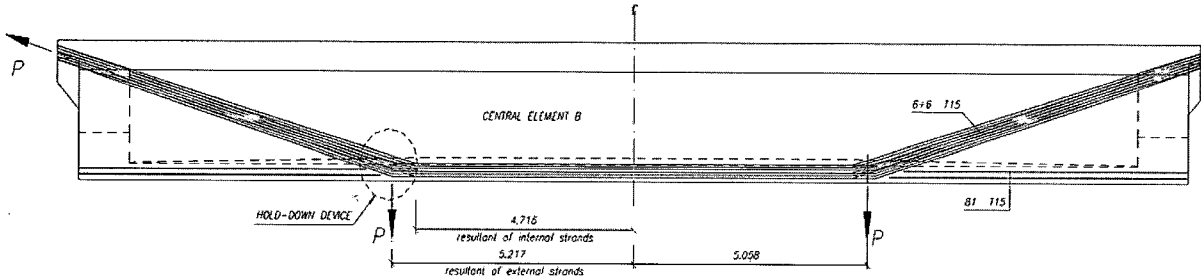


그림 1. 프리텐션용 Strand 배치

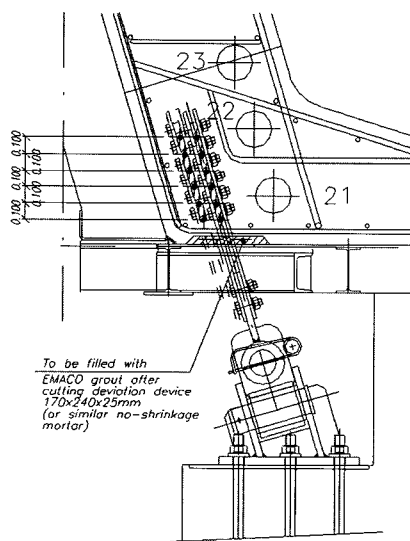


그림 2. Hold-down device 설치 단면

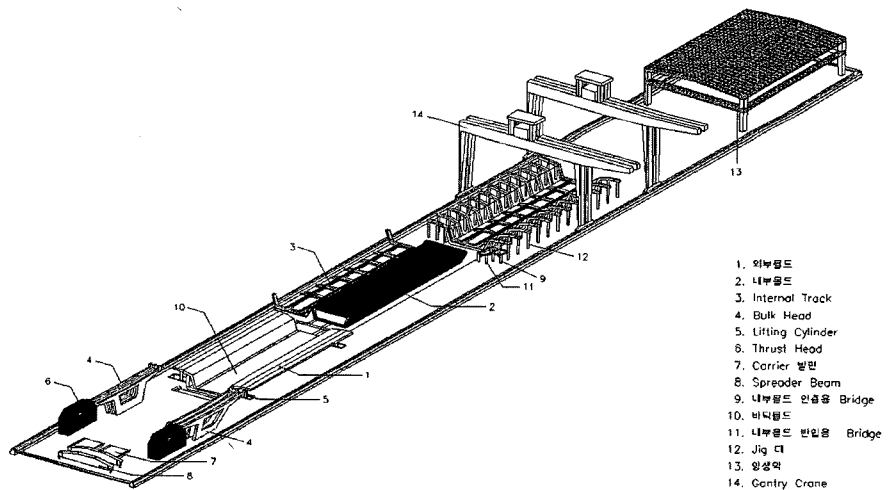


그림 3. 프리캐스트 PSC 박스거더 제작장 설비

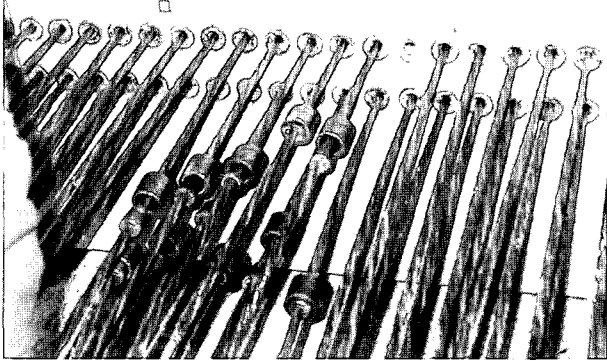
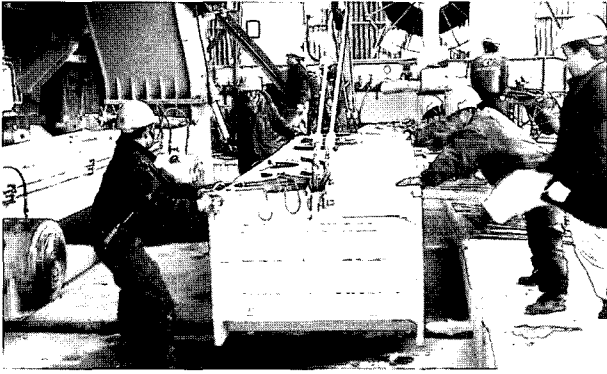


그림 4. De-tensioning

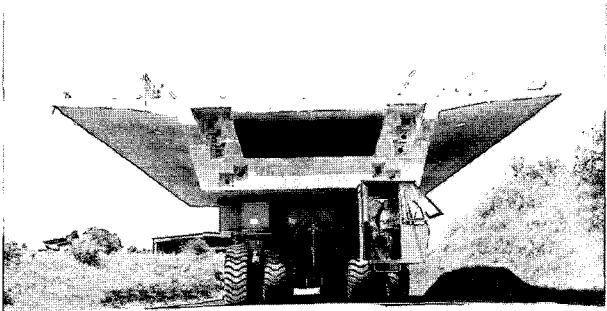


그림 5. Straddle carrier에 의한 박스거더 운반

고속철도 PSC 박스거더를 프리캐스트 경간 일괄 제작하기 위해서는 <그림 3>에 나타난 바와 같이 일정 설비를 필요로 한다. 또한 증기양생이 수행되었는데 하절기에는 12시간, 동절기에는 17시간 가량을 소요하여 박스거더를 제작하였다. 콘크리트 타설 완료 후 초기 응결이 강도 발현에 많은 영향을 미치므로 콘크리트에 물기가 거의 없는 상태에서의 증기양생 실시가 바람직하다. 초기 응결 시간은 하절기에는 약 2시간, 동절기에는 약 3~4시간 정도 소요되는 것을 바탕으로 하였으며, 동절기에는 대기 온도가 낮아 초기 응결이 늦어지므로 프리텐션 후 내부 온도를 약 20°C로 약 3시간 가량 유지하면 초기강도 발현 및 전체 시공 사이클을 단축할 수 있다. 증기 양생을 시작하여 대기온도에서 증기양생 적정 온도인 55~60°C까지 상승시킬 때와 함께 하강시킬 때는 시간당 약 20°C의 비율로 수행되었다.

<그림 4>에 나타난 de-tensioning은 프리텐션 strand에 도

입된 긴장력이 콘크리트 부재에 도입되는 단계로써 적절한 콘크리트의 압축강도가 발현되었음을 확인한 후 시행되어야 한다. De-tensioning 공정을 시행하기 위해 앞서 박스거더를 구축하고 있는 것들은 모두 제거되어야 하며 hold-down device를 제거할 때도 급작스럽게 제거해서는 안된다. 강선 절단은 oxygen sudden cut에 의하여 수행되는데 release of deviated strands, cutting of hold-down device, release of straight strands의 순으로 공정이 진행된다.

PCI 규정에 따라 multi strand de-tensioning system과 single strand de-tensioning system이 모두 적용되었는데 전자의 경우 유압잭을 사용하여 release를 하지만, 후자의 경우에는 sudden release를 적용할 수 있다. 다만, 이러한 경우에는 정착길이 분석을 수행하여 thermal shock로 인하여 발생할 수 있는 단부의 응력 감소와 이로 인한 구조적 영향을 검토한 후 development zone에 소요의 철근을 배근하여야 한다.

2.2.2 PSC 박스거더 운반

프리텐션 공법에 의해 제작된 PSC 박스거더 한 경간은 길이가 25~30m이며 중량은 600~750톤에 이르는 거대한 중량물로 <그림 5>와 같이 특수제작된 운반장비(straddle carrier)에 의해 제작장으로부터 미리 설치된 경간 위를 통과하여 가설 위치로 운반된다. 이 단계에서 수행되는 박스거더 인양과 straddle carrier에 의한 운반은 시공과정 중 가장 큰 인장응력이 발생할 수 있으며 면밀한 구조해석을 통하여 안전성을 분석하였다. Straddle carrier는 운행 중 진동을 최소화하기 위하여 최대시속 5km/hr로 운행되며, 운행로가 일정 범위 이상의 경사를 갖게 되면 자동적으로 운행을 정지하도록 설계되었다.

2.3 프리텐션이 도입된 박스거더의 전달길이 분석

2.3.1 개요

프리텐션 부재에 있어 가장 중요한 고려 사항 중의 하나는 부재 양단에서의 프리스트레스 힘의 적절한 도입 여부로써 지간이 짧은 프리텐션 캔틸레버, 철도용 PSC 침목, 트러스 부재, 기초 용 보 등과 같이 부재 단부 근처에 큰 휨 모멘트가 작용하는 구조물의 경우에는 부재단에서의 이러한 프리스트레스 전달 영역의 중요성은 매우 크다 할 수 있다.

프리텐션 부재 단부의 정확한 설계를 위해서는 강연선으로부터 콘크리트로의 프리스트레스 전달을 지배하는 부착 기구에 대한 이해가 선행되어야 하며 이러한 부착응력의 크기와 분포 및 응력 분포 영역의 길이가 실제적으로 결정되어야 한다. 강연선 및 콘크리트의 부착은 경계 영역에서의 응력 상태에 의존하며 이러한 응력 상태는 강연선 주위의 재료, 기하 특성에 지배되기 때문에 프리텐션 부재에 대한 일반적인 실험 연구들은 강연선의 기하 특

성 및 콘크리트 재료 특성의 상호 관계에 기초하여 이루어져 왔다. 이를 통하여 일반적으로 강연선의 직경, 프리스트레싱 수준, 강연선의 형상, 콘크리트 압축강도, 시간의존 효과(크리프 및 건조수축) 등이 부착 및 전달길이에 영향을 미친다는 사실은 밝혀졌지만 각 변수들의 기여도와 가장 중요한 변수는 무엇인지에 대한 연구와 통계 조사는 아직 미흡한 상태이다.

문헌조사 결과에 따르면 대부분의 전달길이 연구는 단일 강연선이 배치된 작은 사각형 부재를 대상으로 실시되었으며, 소수의 연구만이 3~5개의 강연선을 배치한 시험체에 대해서 수행되었다. 특히 AASHTO Type 보와 같이 큰 부재에 대한 전달길이 시험은 매우 제한적으로 수행되었다. 따라서 본 연구에서는 제작 과정에서 프리텐션 방식이 사용되는 PSM 교량 실 시험체를 대상으로 전달부착특성을 파악하기 위한 시험을 수행하고, 소규모 보 시험체의 실험 결과와 비교 분석함으로써 각 변수들의 영향을 독립적으로 정량 평가 분석하고 현 시방 기준의 개선 방향을 모색하고자 하였다.

2.3.2 분석대상 및 실험 기법

3경간 연속교량의 첫번째 경간 구조체를 시험 대상으로 선정하였다. 첫번째 및 세번째 경간이 강연선배치는 동일한 형태(Type A)이며, 2번째 경간의 강연선 배치는 Type A와 약간 차이를 보인다(Type B). Type A 세그먼트에는 81개의 직선 강연선과 24개의 절곡 강연선이 배치되는 반면, Type B 세그먼트에는 99개의 직선 강연선과 24개의 절곡 강연선이 배치된다.

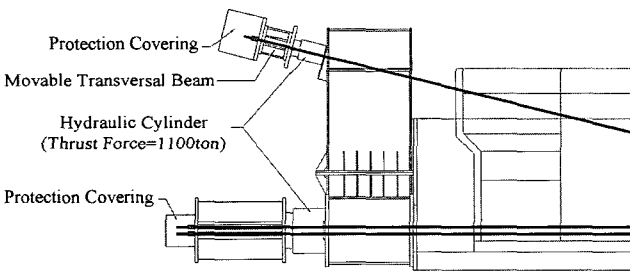


그림 6. 유압 실린더를 이용한 강연선의 프리스트레스 도입

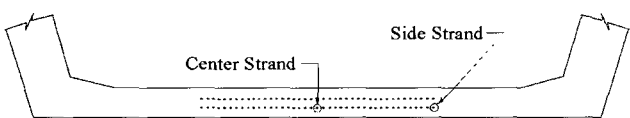


그림 7. 시험 대상 직선 강연선 위치

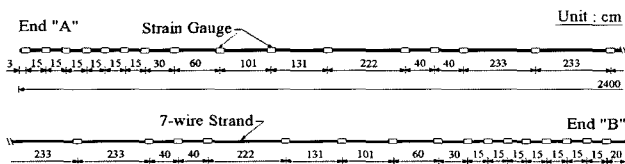


그림 8. 전기저항식 변형률 게이지 부착 위치

전달길이는 부재 길이 방향의 콘크리트 변형을 또는 강연선 변형을 분포 모두를 통해 결정할 수 있지만 강연선과 콘크리트와의 경계면의 중요성을 고려할 때 경계면에서의 부착 성능을 저해하지 않는 방법이 선호된다. 이에 따라 소규모 시험체를 대상으로 한 시험에서는 콘크리트 변형을 측정 방법을 주로 택하여 사용한다. 그러나 프리캐스트 세그먼트 박스의 경우에는 강연선 측면의 콘크리트 파복이 매우 커 콘크리트 변형을 측정치의 신뢰도가 떨어질 뿐만 아니라 박스 제작을 위한 대형 거푸집과의 간섭으로 콘크리트 게이지 또는 DEMEC point 의 부착이 난이하여, 프리스트레싱 강연선에 변형을 게이지를 부착하여 변형을 분포 특성을 측정함으로써 전달길이 특성을 파악하기로 하였다.

실험에 사용한 콘크리트의 목표 압축강도는 프리스트레스 도입 시 30 MPa, 28일 강도 40 MPa로 설정하였으며, PS 강연선은 PSC 제작장의 표준이 되어가고 있는 저릴랙세이션, 응력제거 7연선으로서 공칭직경 15.2mm를 사용하였다. 이 때 각 PS 강연선은 표면 조건의 영향을 최소화하기 위해 전 제작 과정을 통해 공장 생산 직후의 조건을 유지시켰다.

2.3.3 실험 절차

- ① PS 강연선 표면에 전기저항식 변형률 게이지(ERSG) 부착
- ② 세그먼트 철근배치 및 콘크리트 타설을 위한 거푸집 조립
- ③ 전기저항식 변형률 게이지 초기값 설정
- ④ 유압식 mono stressing jack을 이용한 PS 강연선 긴장 (= 0.75 fpu)
- ⑤ PS 강연선의 초기 변형률 측정
- ⑥ 콘크리트 타설 및 양생(14시간 증기 양생)
- ⑦ 거푸집 제거
- ⑧ slip 측정 장치 설치
- ⑨ 유압 실린더를 이용한 프리스트레스 힘 도입 (그림 6)
- ⑩ PS 강연선의 변형률 변화 계측

2.3.4 측정

박스거더 하부 슬래브에 위치한 2개의 직선 강연선을 대상으로 전달길이 측정을 실시하였다. 각 강연선은 위치에 따라 "center" 및 "side"로 구분하였다(그림 7). 절곡 강연선은 초기 강연선 배치시 "hold down" 장치에 의해 강연선에 부착된 게이지의 손상 가능성이 매우 높아 시험에서 제외하였다.

(그림 8)과 같이 33개의 전기저항식 변형률 게이지를 각 프리스트레싱 강연선에 부착하였다. 프리스트레스 도입전에 강연선 단부에 특별 제작한 클램프를 이용하여 변위계를 설치하였으며, 이를 통하여 프리스트레스 도입시의 강연선의 슬립량을 측정하였다.

2.3.5 실험 및 분석 결과

각각의 강연선을 극한 강도(fpu)의 75%까지 초기 긴장하는 과

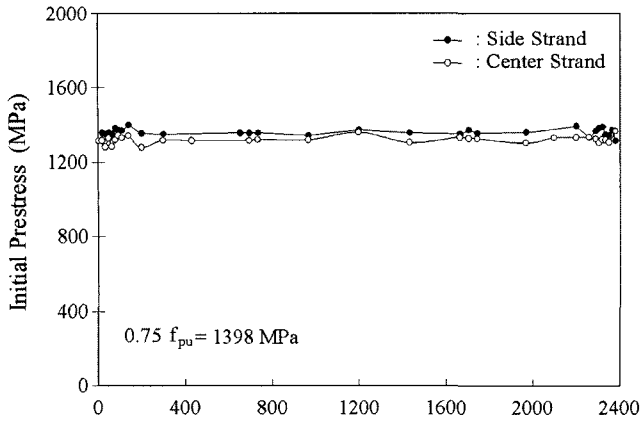


그림 9. 강연선의 초기 프리스트레스 분포

정에서 총 66개 변형률 게이지 가운데 7개의 게이지가 손상되었다. 각 강연선의 초기 프리스트레스 분포 형상은 <그림 9>와 같다.

강연선의 꼬인 형상으로 인하여 초기 강연선 응력 측정값에 약간의 편차가 발생한다. 측면 및 중앙 강연선의 평균 초기 프리스트레스는 각각 1,361 MPa(0.73 fpu) 및 1,321 MPa(0.71 fpu)로 측정되었다. 세그먼트 제작장에서는 중앙강연선의 긴장 작업 후 측면 강연선의 긴장 작업이 이루어지기 때문에, 중앙 강연선의 초기 프리스트레스 값이 측면 강연선에 비해 작게 산출되었다.

프리스트레스 도입 후의 강연선 변형률 분포는 측면 강연선과 중앙 강연선에 대해 각각 <그림 10> 및 <그림 11>과 같다. 가로축은 박스거더 단부로부터 변형률 게이지 부착 위치까지의 거리이며, 세로축은 프리스트레스 도입시의 강연선 변형률로써 부재 단부에 나타난 점진적인 변형률 증가는 강연선으로부터 콘크리트

로의 프리스트레스 힘 전달을 나타낸다.

양 단부의 전달길이는 “95 % average maximum strain” 방법에 의해 산출하였다. 양 단부의 전달길이 결정을 위해 채택한 방법은 “95 % 평균 최대 변형률법(95 % average maximum strain method)”으로써 측정 결과의 인위적인 해석을 배제시킴으로써 보다 실제적이고 합리적인 결과를 획득할 수 있다. 측정된 전달길이를 요약하면 <표 1>과 같다.

표 1. 프리캐스트 박스 거더의 전달길이 측정 결과

강연선 위치	전달길이 측정 결과 (cm)	
	단부 - A	단부 - B
중앙부 강연선	78.4	81.1
측면부 강연선	83.6	81.2

비교 분석을 위하여 PS 강연선의 개수 및 직경, 프리스트레스 도입시의 콘크리트 압축강도, 피복 두께, PS 강연선의 간격 등을 주변수로 설정하여 스트랜드의 직경 15.2mm를 사용한 프리텐션 보 부재의 전달길이 측정 결과 중 재료 조건 및 기하 조건이 유사한 부재 3개를 비교 대상으로 선정하고 프리캐스트 박스 거더를 대상으로 측정된 전달길이와 비교하여 <표 2>에 나타내었다.

또한 실측된 유효 프리스트레스를 바탕으로 ACI 기준에 의한 전달길이를 계산하고 표 2의 마지막 열에 이를 나타낸 결과, 두 가지 부재 형태 모두에서 ACI 기준이 전달길이를 과대평가하는 것으로 나타났다. 이 때 프리캐스트 박스 거더의 전달길이가 보 시험체에 비해 크게 나타난 것은 보 시험체의 압축강도($f_{ci} = 35$ MPa)에 비해 프리캐스트 박스 거더의 압축강도가 낮기 때문($f_{ci} = 30$ Mpa)인 것으로 판단된다.

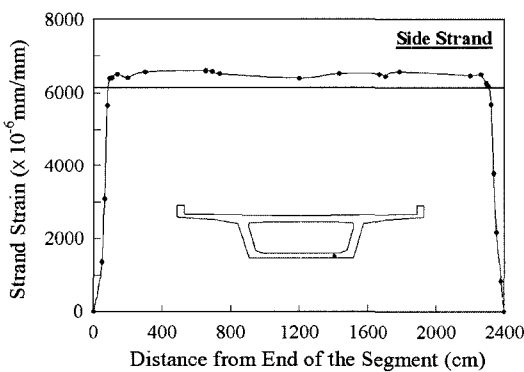


그림 10. 측면부 강연선에 대한 변형률 분포 및 전달길이

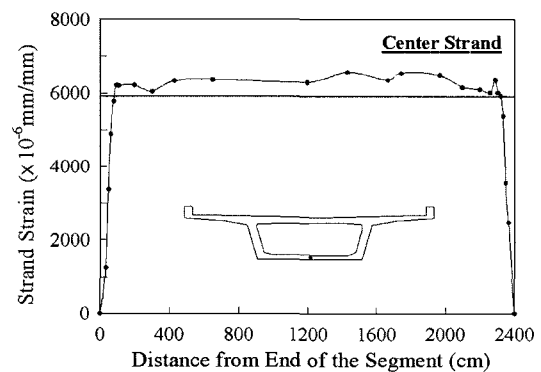
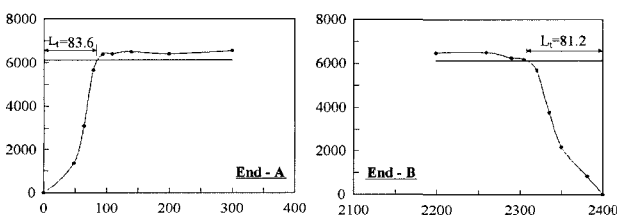


그림 11. 중앙부 강연선에 대한 변형률 분포 및 전달길이

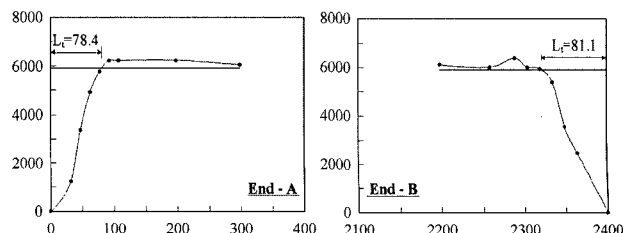


표 2 부재 형태에 따른 전달길이 비교

부재 형태		측정 평균 전달길이(cm)	ACI 기준에 의한 전달길이(cm)
보 시험체	Mono Strand - 1	69.4	89.7
	Mono Strand - 2	63.7	90.9
	Twin Strand	75.0	97.4
박스 거더	측면 강연선	82.4	93.3
	중앙 강연선	79.8	90.1

2.4 PSC 박스거더의 경간 일괄 가설

프리캐스트 박스거더는 이미 가설된 교각의 임시 받침위에 설치하게 되는데 이 공정은 이동식 가설장비(launching gantry)를 이용하여 기계화 작업으로 수행된다. 이동식 가설장비는 front pendular, rear portal, middle pendular의 세 개 leg로 구성되어 있으며 PSC 박스거더를 운반하는 트레일러가 이동식 가설장비 하부로 통과할 수 있도록 rear portal과 middle pendular는 회전이 가능하다. 이동식 가설장비는 장비 및 PSC 박스거더의 자중과 가설시의 관성력 및 풍하중을 고려한 수직하중과 양방향 수평하중을 조합하여 설계하였다.

일련의 공정은 기계적 자동화 작업에 의하여 이루어지므로 획기적인 공기단축을 이루며 시공할 수 있다. 또한, 가설된 교각을 이용하여 경간이 진전되므로 상부공을 위한 별도의 가설부지가 필요 없게 되며, 환경적인 피해를 최대한 줄일 수 있다. 시공 전에 각 가설단계에 대한 엄밀한 시공단계별 검토가 이루어져야 하며, 세심한 시공관리가 필요하다. 가설단계 중, 시공이 어려운 점인 임시교좌장치에 대한 정확한 4점 지지가 이루어지지 않았을 경우를 대비한 구조검토도 수행하였다. 즉, 교좌면의 불균등 변위에 대한 상부구조 안전성 검토로서 시공 중 및 사용하중 상태에서 교좌장치의 순간 settlement를 고려한 3차원 유한요소해석을 통하여 교좌장치 및 구조물의 영향을 각 지점 조건에 따라서 세부적으로 검토하여 안전성에 문제가 없음을 확인하였다. 전반적인 시공단계는 다음과 같다.

- ①Rear leg가 바깥쪽으로 벌어지면서 박스 거더가 이동식 가설장비 안으로 진입, <그림 12>

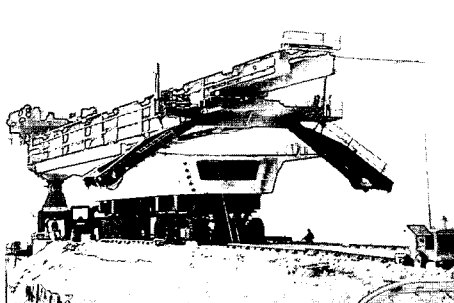


그림 12 박스 거더의 이동식 가설장비 진입

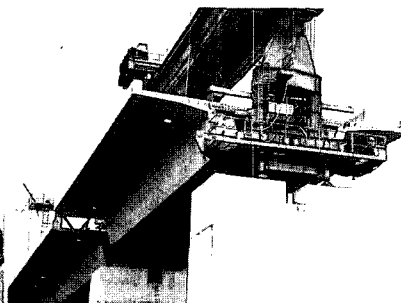


그림 13. PSC 박스거더의 가설

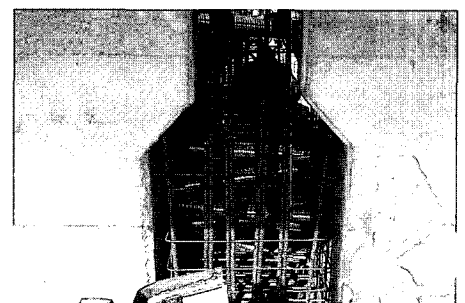


그림 14. 연속화 부위의 강선 및 철근 배치

- ②Rear leg가 정상위치로 거치되고 mid leg가 회전 시작
- ③Mid leg가 메인 빔(main beam)내로 회전완료 후 박스 거더가 인양되어 선형으로 이동시작
- ④박스 거더를 이동시켜 최종가설위치에 설치, <그림 13>
- ⑤이동식 가설장비가 rear leg의 구동력으로 자주식 이동 시작
- ⑥이동식 가설장비 이동완료 및 mid leg를 교각에 위치시킴
- ⑦Front leg를 다음 교각에 위치시킴

2.5 포스트텐션에 의한 박스거더 연속화

단순교로 시공된 대상 교량에 대하여 동적해석을 수행한 결과 공진발생 가능성이 제기되어 포스트텐션을 도입함으로써 연속교로 구조시스템을 변경하게 되었다. <그림 14>와 같은 현장타설 및 쉬스관 연결 및 긴장, 그라우팅 등으로 구성된 포스트텐션(post-tension) 작업과 임시교좌장치의 제거 후 영구 교좌장치의 설치에 의해 단순교를 연속교로 구조계를 변화시키는 과정인데 운행 열차의 주행성 향상과 교량의 동적거동 안정성을 확보할 수 있으며, 향후 유지관리 측면에서 경제적으로도 유리하다고 할 것이다.

바깥 거푸집은 두께 6mm의 강재를 사용하였으며 25회 전용하는 것으로 계산하였다. 내부 거푸집은 박스 거더 내에서 인력으로 이동이 용이하도록 목재 거푸집이나 철제 거푸집 조각으로 설계하였다. 콘크리트 타설을 용이하게 하기 위해서 박스 거더 연결부위에 4군데 100mm pouring hole을 만들어 타설이 용이하도록 한다. 포스트텐션(post-tensioning)하기 전 연속화를 위하여 sheath관을 연결할 때 곡률이 도면과 일치해야 하며 sheath coupler를 사용해서 연결한다. 연속화 후 시공이음이 발생함에 따라서 건조수축 등의 영향으로 미세균열이 발생할 가능성이 존재하나 <그림 15>와 같이 포스트텐션에 의하여 매우 큰 압축력이 작용하므로 교축 직각 방향 균열은 문제가 되지 않는다.

연속화 공정이 끝난 후 임시교좌장치를 제거한다. 이 때 <그림 16>과 같이 기 설치된 임시베어링을 flat jack이나 hydraulic jack을 사용하여 5mm jack-up한 후 영구베어링에 하중을 전달하게 함으로써 단순지지에서 연속보로 구조계가 바뀌게 된다.

이러한 과정을 고려해볼 때 시공단계별 하중 및 지점변화를 예상한 설계를 수행하여야 하며, 사용되는 베어링의 용량 및 이동량의 크기도 결정되어야 한다.

2.6 PSM에 의한 고속철도 교량 시공의 의의

PSM에 의하여 시공된 고속철도 PSC 박스거더 교량은 프리텐션과 포스트텐션을 순차적으로 적용하여 프리캐스트 경간 일괄가설이 가능하였다. 또한 동적거동에 있어서 불리한 단순교를 포스트 텐션을 적용함으로써 연속교로 시공함으로써 주행성 및 승차감 향상과 교량의 동적 안정성을 확보할 수 있었다.

본 공법을 적용하는데 있어서 필요한 특수 장비인 straddle carrier, launching gantry 등과 PSC 박스거더 일체를 제작하는 제작장 내의 각종 설비 등에 대하여 선진기술을 도입하여 국내 토목 장비 설계 및 관련 기계산업 분야의 발전의 계기가 된 것으로 평가된다. 특히, 국내 실적이 아직까지는 미비한 프리텐션 공법을 현장 제작장에서 적용하였다는 점과 이동식 가설장비에 의한 경간 일괄 가설 등 시공자동화 과정의 정밀한 시공관리 등을 시도하여 국내 미개척 분야의 시공 및 설계기술을 획기적으로 발전시킬 수 있는 계기를 마련했다고 사료된다.

현재 도로교량 및 철도교량 형식에서 PSC 박스거더가 차지하는 비율은 매우 높으며 앞으로도 다수 사용될 것으로 보인다. 본 가설공법은 PSC 박스거더를 건설하는데 있어서 우수한 품질 확보 및 획기적인 공기단축 등의 큰 장점을 지닌 공법으로서 초기 비용이 다소 많이 소요될 수도 있다. 그러나, 일정 연장 이상의 공사에 있어서는 특수장비 등을 반복 사용함으로써 경제성도 매우 뛰어날 것으로 판단되며 프리스트레스트 콘크리트 교량의 가설에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

3. 공장 철근조립 공법(caging method)

MSS를 이용하여 시공하는 PSC 박스거더의 경우 1단계로 바닥과 복부를 시공한 후 2단계로 상부 슬래브를 시공하는 경우가 일반적이는데 1단계의 바닥과 복부는 철근 가공의 종류가 매우 많아 현장에서의 작업이 비효율적이다. 특히 격벽 부위는 철근이 복잡하고 정밀하게 조립되어야 하므로 그에 따른 시공 시간이 많이 소요되었다.

이를 극복하기 위하여 현장 인근에 소요의 설비를 갖춘 공장에서 철근을 가공, 조립하여 운반, 시공하는 공장 철근조립 공법(caging method)이 <그림 18>과 같이 경부고속철도의 일부 구간에 적용되었다.

이를 통하여 시공 품질의 향상은 물론, 효율적인 인력관리와 공사시간을 단축하는 효과를 거둘 수 있었으며 전체적인 시공 순서는 다음과 같다.

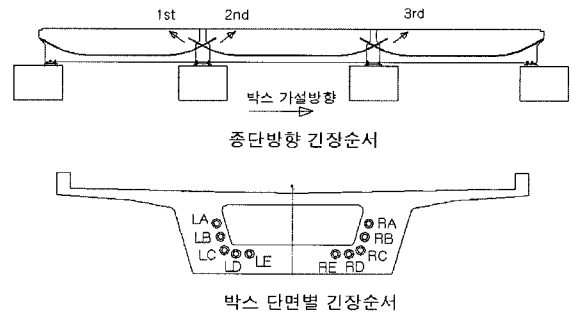


그림 15. Post-tensioning에 의한 경간 연속화

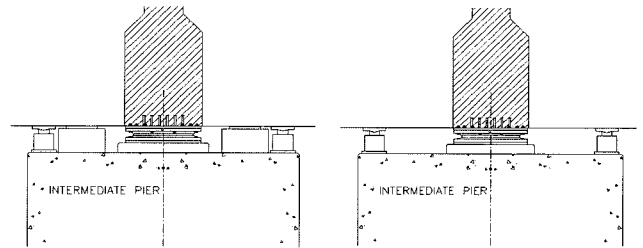


그림 16. Jack 설치 및 임시 교좌장치의 제거

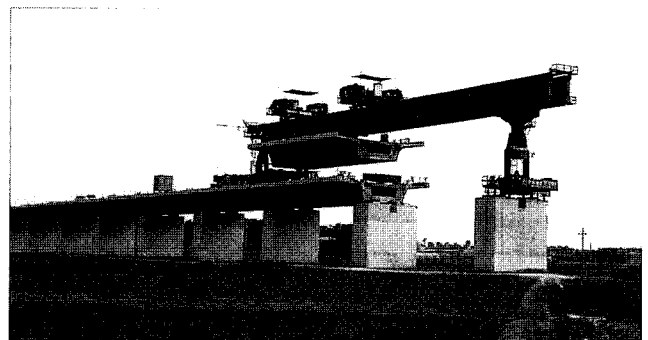
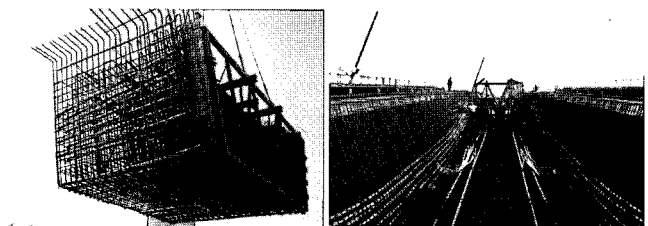


그림 17. 경부고속철도 PSC 박스거더 교량의 프리캐스트 경간 일괄가설



a. 격벽부 철근 조립 b. 철근 및 쉬스관 연결

그림 18. 공장 철근조립 공법에 의한 박스거더 시공

- ① 철근 가공공장 및 조립대 제작과 설치
- ② 철근 가공
- ③ 조립대에 철근 조립 : 40 m 1경간을 7개의 조립단위로 분할하여 지상 조립대에서 조립
- ④ Lift zig 설치
- ⑤ Cargo 트럭을 이용하여 공장에서 조립된 철근망을 현장으로 운반
- ⑥ Lift zig 해체

- ⑦ 조립단위간 연결 및 sheath 관 연결
- ⑧ 내부 거푸집 설치 및 콘크리트 타설

4. 대만 고속철도 PSC 박스거더의 시공

4.1 대만 고속철도와 PSC 박스거더 교량

대만 고속철도(THSR : Taiwan High Speed Rail)는 타이베이와 카오슝을 잇는 총 연장 326 km이며 평균속도는 300 km/hr이고 최대속도는 350 km/hr이다. 2000년 3월부터 시작된 토목공사는 2004년 7월 완공을 목표로 하고 있으며 개통은 2005년 10월을 예정으로 하고 있다.

대만 고속철도는 통과 구간의 특성과 내진 안정성을 고려하여 교량이 77%에 달하고 있으며 터널과 토공은 약 14%와 9%에 해당한다. 총 12개 토목공사 공구에서 Chiayi시와 Tainan시를 연결하는 THSR C280은 삼성물산 건설부문이 주관사로 참여하고 있으며 398 span을 PSM에 의하여 시공하였다. 이와 같은 PSM을 적용한 것은 34.4 km의 전체 구간에 있어서 약 13.9 km에 해당하며 폭은 13 m, 높이는 3.9 m인데 길이는 30 m와 35 mm의 두 가지 형을 적용하여 시공해 오고 있다.

현대건설은 연장 23.44 km의 C230과 20.84 km의 C240, 두개 공구를 시공하고 있는데 여기서는 C240에서의 사례를 중심으로 MSS에서의 종단 선형관리를 분석하고자 한다. 해당 현장은 타이베이로부터 남쪽 125 km에 위치하며 교량은 17개소, 전체의 25%인 5.21 km에 해당한다. 설계기준은 AASHTO이며 구조물의 내구연한은 100년으로 설정되어 있고 적용 지진 가속도 계수는 0.34 g로서 내진 설계에 있어서 매우 엄격하다.

교량의 상부구조는 역시 PSC 박스거더로 높이는 3.2 ~ 4.5

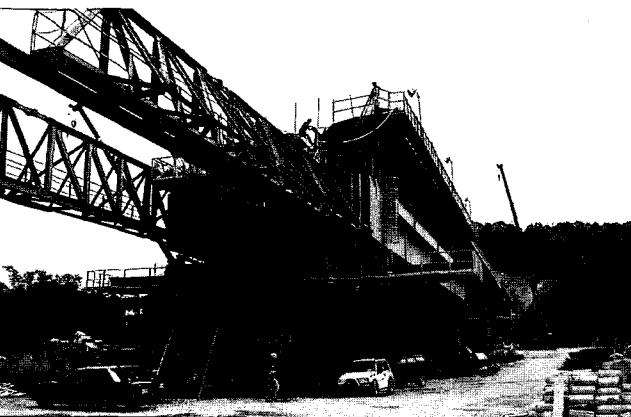


그림 19. 대만고속철도의 MSS Form

m, 경간의 길이는 30 ~ 45 m로 구성되어 있는데 70여개씩, 총 140개의 경간을 FSM과 MSS에 의하여 각각 시공하게 된다. 교량의 완공 후 측량을 실시해 보면 실제 교량의 종단선형(elevation)은 당초의 설계값(datum line)과 차이를 보인다. 대만고속철도에서는 트랙 슬래브(track slab) 최소 두께 규정으로 인하여 종단선형의 차이를 50 mm 이내로 요구하고 있었다. 여기에서는 대만고속철도 C240 현장에서 시공한 MSS 교량의 사례를 들어 종단선형의 차이가 발생하는 원인을 분석하고자 한다. <그림 19>는 현장에서 사용한 MSS Form을 보여주고 있다.

4.2 종단선형 차이의 원인

MSS 교량의 종단선형 차이는 MSS form pre-camber 오차, 텐던(tendon) 긴장에 의한 상향의 변위 및 콘크리트 타설 오차에서 기인한 것이다. MSS form 제작사는 MSS form의 자중 및 콘크리트 무게를 고려하여 상향의 솟음(camber)을 제시하였지만 그 값은 현장에서 보정이 필요하다. 텐던은 경간의 중앙에서 거더 하단부, 지점부에서 거더 상단부에 배치되는 곡선의 형상으로 긴장시 상향의 처짐을 유발하게 된다. 거더 상면에 트랙 슬래브가 추가로 설치되는 관계로 상면의 마감을 거칠게 하도록 되어 있었으며, 이로 인하여 콘크리트 타설시 약간의 오차가 발생할 수 있다.

4.3 MSS form pre-camber 오차

MSS form 제작사에서 콘크리트 타설에 따른 처짐을 보상하기 위하여 미리 상향의 변위를 제시하였다. <표 3>에는 45 m 경간에 대한 MSS의 pre-camber 값을 나타내고 있다. MSS form의 pre-camber는 구조해석을 통하여 얻을 수 있으며, 실제 MSS form의 강성은 해석 모델에서 가정된 강성보다 커서 콘크리트 타설에 의한 처짐은 pre-camber 보다 적게 발생한다.

<그림 20>에는 MSS의 form pre-camber와 실제 콘크리트 타설 후 측정된 form displacement를 나타내고 있다. 또한, <그림 21>에는 실제 측정된 처짐을 바탕으로 거푸집의 솟음값을 조정할 것을 나타내고 있다. <그림 21>에 나타나 있는 Adjust 1은 측량결과의 최대값과 경간의 중앙값을 일치시킨 것이고, Adjust 2는 측량과 같은 위치에서 처짐을 일치시키고 교량의 처짐은 매끄러운 곡선을 유지한다는 것을 이용하여 결정된 것이다. Adjust 1과 Adjust 2는 중앙점에서 최대 5 mm의 차이를 나타내고 있으며, 현장에는 Adjust 2를 적용하였다.

표 3. MSS form pre-camber value (경간길이 : 45m)

거리(m)	0	3.5	8.5	14.5	20.5	26.5	31.5	36.5	41.5	45.0
pre-camber(mm)	0	24	53	74	86	88	77	53	24	0
조정값(mm)	0	18	39	57	65	65	57	39	18	0

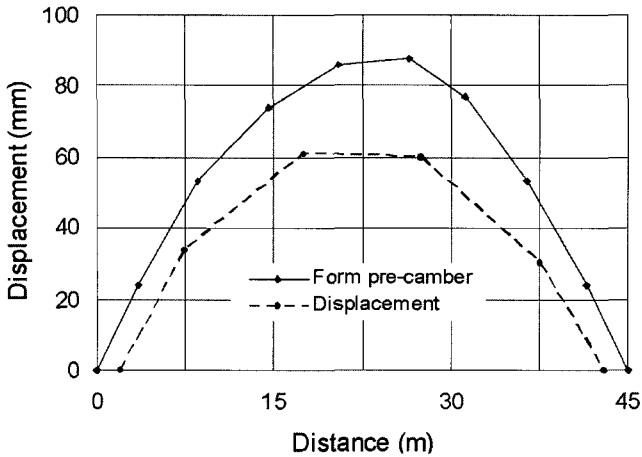


그림 20. MSS form pre-camber와 타설후 변위

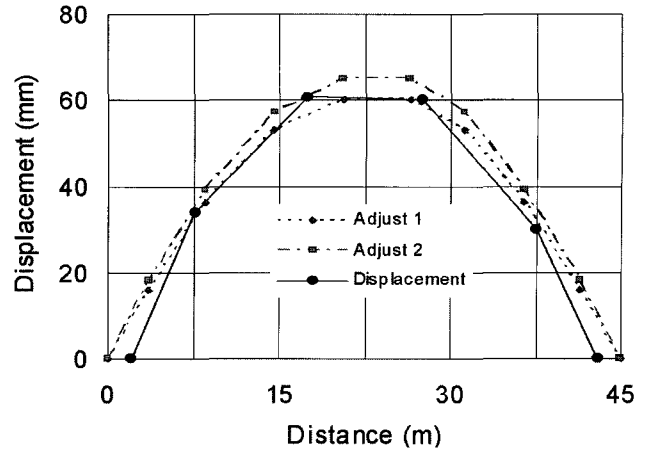


그림 21. MSS form pre-camber의 조정

4.4 프리스트레싱에 의한 상향 변위

프리스트레스트 콘크리트에서는 강선을 긴장하는 경우 강선의 배치 형상에 따라 변위가 발생하며, 단순지지 형태인 경우 경간 중앙부에서 강선이 하향으로 배치되어 긴장 후 상향의 변위가 발생하게 된다.

40 m 경간을 가지는 대만고속철도 표준 데크(standard deck)에 대해서 구조해석을 수행하여 시간의 경과에 따른 중앙점의 변위 변화를 살펴보았다. <표 4>에는 공정의 진행에 따른 40 m 경간의 중앙점 변위 변화를 나타내고 있으며, 시간의 경과에 따라 변위가 증가하는 현상은 콘크리트의 크리프(creep)때문인 것으로 판단되었다.

표 4. 40m 경간의 중앙부 변위(mm)

	prestressing	180 days	SDL* (730 days)	10,000 days
Design (CEB-FIP)	25	41	34	37
Modification (CEB-FIP)	21	35	30	34
Modification (ACI)	19	39	32	35

*SDL(Superimposed Dead Load) : 2차 사하중에 해당하는 것으로 트랙 슬래브가 포함된다.

<표 4>에 나타나 있는 설계값은 콘크리트의 강도 및 강선의 마찰계수를 시방규정에 나타나 있는 값을 사용한 것이며, 수정값(modification)은 실험을 통해 구한 콘크리트의 강도 및 강선의 마찰계수를 사용하여 구한 것이다. 크리프 모델은 CEB-FIP와 ACI 두 가지를 사용하였으며, 약간의 차이는 있었지만 변위 변화 양상은 유사한 것으로 나타났다.

<그림 22>에는 콘크리트의 압축강도 실험 결과를 나타내고 있으며, 콘크리트의 설계압축강도는 35 MPa이었으나 실험결과 평

균 압축강도는 약 63 MPa으로 나타났다. 또한, ACI 209에서 제시하고 있는 콘크리트 압축강도 발현식과 실제 현장의 콘크리트 압축강도 변화가 유사한 것으로 나타났다.

4.5 콘크리트 타설에 따른 오차

콘크리트 타설 전에 측량을 통하여 최종 마감면을 설정하지만 실제 콘크리트 타설시에 완벽하게 맞춘다는 것은 매우 어렵다. 또한, 최종 마감면을 추후 설치되는 트랙 슬래브를 고려하여 거칠게 하도록 요구하고 있었고, 배수구 등 시설물들이 콘크리트 상면에 노출되도록 하여 당초 계획하였던 마감면을 지키기에는 매우 어려운 점이 있다. 여기서는 구조해석 결과 및 측량 결과를 이용하여 타설시의 시공오차를 평가해보았다.

표 5. 측량 결과

거리 (m)	0.05	2.5	5	10	15	20	25	30	35	37.5	39.95
변위 (mm)	-6	26	24	57	49	65	42	54	8	10	-6

<표 5>에서 짙은 색으로 표시된 15 및 25 m 위치에는 drainage hole이 설치되어 있으며, 이것은 같은 level이고 교량의 변형곡선 위에 위치해야 한다. 그러나, 측량 결과 각각 49 mm와 42 mm로 7 mm의 차이를 보이고 있어서 deformation shape은 두 값의 평균(45.1 mm)을 이용하여 얻었다. 즉, 콘크리트의 자중만을 고려한 구조해석을 통하여 구한 변위 곡선에서 15 m 및 25 m 위치의 변위를 45.1 mm로 증가시켜서 deformation shape을 구할 수 있었다. 이렇게 변환하는 것은 deformation shape에 MSS form pre-camber 오차 및 강선의 긴장에 의한 상향의 변위를 포함시켜 순수한 concrete casting 오차만을 분리하기 위한 목적이었다.

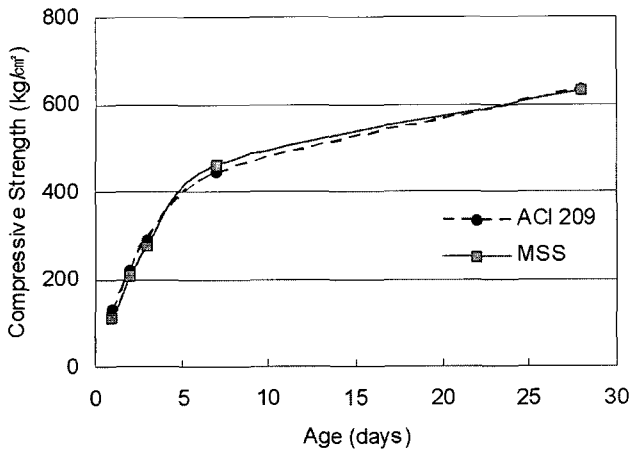


그림 22 콘크리트 압축강도

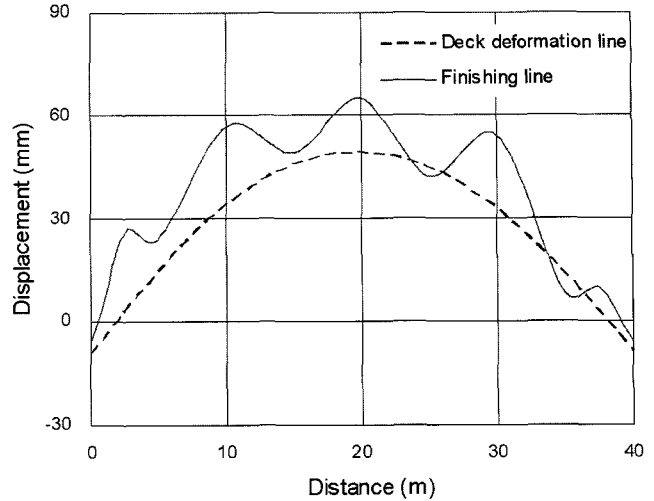


그림 23. Deck finishing level

〈그림 23〉은 이렇게 구한 deformation shape에 deck finishing level 측량 결과를 함께 나타낸 것이다. 따라서 두 곡선의 차이가 순수한 concrete casting 오차이며, deck deformation shape의 오차 범위는 최대오차 7 mm의 절반인 3.5 mm이다.

4.6 종단 선형관리를 위한 분석 결과

교량의 완공 후 종단선형(elevation)은 당초의 설계값(datum line)과 차이를 보이고 있었으며, 설계시방서에서 규정하고 있는 오차의 범위를 초과하는 차이를 나타내는 경우도 있었다. 여기에서는 대만고속전철 C240 MSS에서 종단선형 차이의 최소화 방안을 일환으로 수행한 오차의 발생원인 분석을 나타내었다. 이를 요약 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- (1) MSS 교량에서 deck finishing level은 MSS form pre-camber 오차, 프리스트레싱에 의한 상향 변위, 그리고 콘크리트 타설 오차로 구성된다.
- (2) 대만고속전철 C240 Viaduct 16 span 07의 경우 deck finishing level은 설계값(datum line)에서 상향으로 65 mm 발생한다.
- (3) MSS form pre-camber 오차의 경우 45 m span은 25 mm, 40 m span은 20 mm 정도의 오차를 나타내고 있다.
- (4) 강선의 긴장에 따른 상향의 변위는 시간의 경과와 span에 따라 약간 다르지만 약 30 mm 정도의 오차를 나타내고 있다.
- (5) 순수한 콘크리트 타설에 의한 오차만을 구하기 위하여 MSS form pre-camber 오차 및 강선의 긴장에 의한 상향의 변위를 포함시킨 deformation shape을

구하였으며, 이는 deformation shape과 일치하는 고정된 점의 변위를 이용하여 구할 수 있었다. 콘크리트 타설에 타설에 따른 오차는 약 15 mm 정도인 것으로 나타났다.

5. 맺는 말

고속철도는 우리나라 사회의 경제, 문화적인 전반적 측면에서 많은 영향을 미치고 있으며 국제적으로도 국가적 위상을 드높이

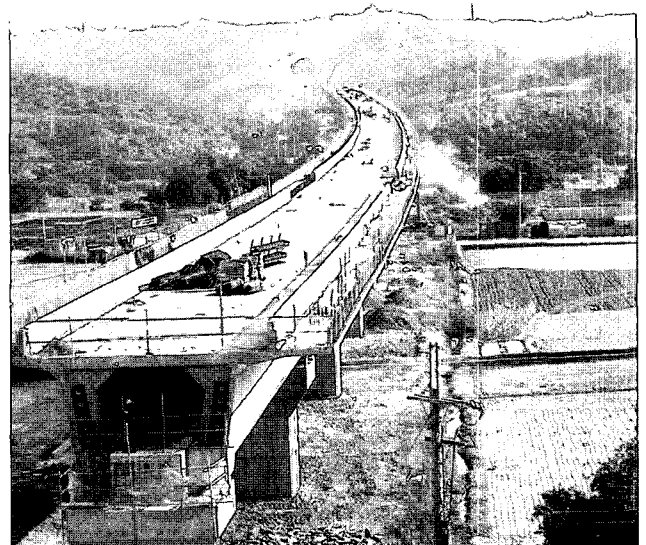


그림 24. MSS에 의한 대만고속철도 PSC 박스거더 교량의 시공

는 계기가 되고 있다. 이와 함께 기술적 측면에서도 여러 가지 분야에서 발전과 진보를 이루는 데 많은 기여를 하였으며 교량 기술의 발전에 있어서도 많은 성과를 이루고 있다.

경부고속철도의 25% 이상을 차지하는 콘크리트 교량은 고강도 콘크리트의 제조와 시공을 비롯한 재료적 측면에서의 기술 개발과 함께, 기존의 도로교에서 많은 실적을 거둔 프리스트레스트 콘크리트 교량의 시공 기술을 정착시키는 역할을 하였다. 특히, 국내에서 처음으로 PSC 박스거더 상부구조를 프리캐스트 일괄 제작 및 가설하는 PSM 공법을 적용하여 경부고속철도의 일부 구간을 성공적으로 시공함으로써 프리스트레스트 콘크리트 교량의 최신 시공기술을 확보하게 되었다. 이와 같은 박스거더의 프리캐스트 경간 일괄 제작과 가설은 국내에서 상대적으로 부족했던 대형 부재에의 프리텐션 적용이라는 실적을 갖는 계기가 되고 있다.

이러한 국내의 건설 과정을 통하여 확보된 고속철도 PSC 박스거더 교량 시공기술은 대만에서의 고속철도 건설을 담당하는 중요한 계기중의 하나가 되고 있으며 성공적인 공사 완공을 앞두고 있다. 앞으로도 지속적인 기술개발을 통하여 품질과 경제성이 뛰어난 콘크리트 교량의 시공기술을 확보하고 기술 경쟁력을 확보하는데 체계적인 투자와 노력이 뒤따라야 할 것이다. □

참고문헌

1. 김광수, "프리캐스트 PSC 박스거더 교량의 경간일괄 가설 및 연속화 공법", 건설저널, 2004. 3, pp.60~61.
2. 김광수, 박종화, 심정옥, 윤철수, "고속철도 PSC 박스거더 연속교의 프리캐스트 경간 일괄 가설", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, 2004, pp.335~336.
3. 김열규, "현대건설(주) 대만고속철도 C240 프로젝트 현장", 한국콘크리트학회지 제15권 3호, 2003. 5, pp.113~116.
4. 대한토목학회, "한국토목사 - 제7편 철도", 대한토목학회, 2001, pp.1204~1238.
5. 서울대학교 공학연구소, "경부고속철도 폴스판 프리캐스트 PC 박스거더 교량의 합리적인 설계 및 시공기법", 1997.
6. 서울대학교 공학연구소, "Rational Design and Construction Method for Precast Span Bridge", 1998.
7. 윤만근, 이충희, "대만 고속철도 C280공구 FSLM 공법 시공사례", 대한토목학회 정기학술대회, 2003, pp.3079~3087.
8. 이순병, 김오경, "KTX를 통한 국내기술의 발전 - 시공분야 -", 대한토목학회지 제52권 제3호, 2004. 3, pp.28~33.
9. 한국고속철도, "경부고속철도 건설사", 2000, 759pp.
10. 현대건설, "PSM 공법 변경에 따른 종합보고", 1997.
11. 현대건설, 동부건설, "고속철도 프리캐스트 PSC 박스거더 교량의 경간 일괄 가설 및 연속화 공법" 2003, 330pp.
12. Korea High Speed Rail Construction Authority(1995. 6), Bridge Design Manual Final Report.
13. Kim, S. I., Lee, Y. N., Kim, I. S., and Lee, W. P., "Automation of Bridge Construction by Precast Span Method in Korea High Speed Railway Project", 17th ISARC 2000, Taipei, Taiwan, 2000, pp.319~322.
14. PCI, "Manual for Quality Control for Plants and Production of Precast Prestressed Concrete Products," MNL-116-70.
15. PCI, "PCI Design Handbook," Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, Illinois, 1992.
16. Systra, "Dynamic Analysis under High Speed Live Loads," 1995.
17. Systra, "Seoul-Pusan High Speed Railway Line Design of Lot 2-2".

도서소개 - "콘크리트진단 및 유지관리"

◆ 소개

:이 책은 콘크리트구조물의 안전진단 및 유지관리에 관하여 이해하기 쉽고, 현장적용에 도움이 되도록 노력했으며, 이는 관련 분야에 종사하고 있는 실무기술자들의 참고서로 뿐만 아니라 관련자격시험 등에 필요한 필독서로도 유용할 것이다.

- 저 자 : (사) 한국콘크리트학회
- 출판사 : 기문당
- 출판일 : 2004년 2월
- 정 가 : 35,000원
- 페이지 : 670쪽
- ISBN : 89-7086-490-3

콘크리트진단 및 유지관리

