

급속시공을 위한 완전조립식 교량시스템 개발

Development of Fully Prefabricated Bridge System for Fast Construction



김영진*
Young-Jin Kim



김성운**
Seong-Woon Kim



조성태***
Seong-Tae Cho

1. 서론

대부분의 교량 건설은 기초를 완성하고, 거푸집을 설치하고 콘크리트를 타설하여 하부구조를 시공한 후 다시 상부구조를 제작하기 위해 동일한 공정을 반복적이며 순차적으로 진행하였다. 이러한 시공과정은 현장 위주의 공정으로 노동 집약적이며, 거푸집 설치 및 제거와 콘크리트 양생 등에 많은 시간이 소요된다. 특히 기반시설의 노후화와 교통량의 증대로 인해 기존 교량을 보수하거나 보강할 경우 장시간 동안 교통을 통제하거나 우회도로를 이용하여야 한다. 이러한 문제점을 해결하고자 급속시공이 가능한 조립식 교량에 대한 연구가 최근 대두되고 있다. 조립식 교량은 주 공정에서 콘크리트 양생 시간 및 거푸집 작업시간을 생략하므로 급속시공이 가능하다.

조립식 교량의 장점은 현장공정을 대폭 줄여 작업장을 좀 더 안전하게 유지할 수 있으며, 교통 통제를 최소화할 수 있다. 또한 공장 제작된 프리캐스트 제품으로 시공 품질향상 및 시공관리를 효율적으로 할 수 있게 된다. 즉 조립식 교량은 환경 및 사회·경제학적인 문제점을 최소화하며, 생애주기비용을 줄일 수 있다.

이와 같은 추세에 발맞추어 (주)대우건설 기술연구원에서는 교량 바닥판을 시작으로 현재까지 방호벽, 거더, 교각에 대한 조립식 공법을 개발하여 왔다. 이에 따라 교량의 상하부 구조 전체를 조립식으로 단기간에 시공할 수 있는 ‘완전조립식 급속시공 교량시스템’ 개발을 완료하여 실용화 단계에 이르렀다. 본 공법은 각 부재의 공장제작을 통해

교량의 공용수명을 획기적으로 연장시킬 수 있을 뿐만 아니라 기계화 작업 및 급속시공을 통하여 공사기간을 대폭 단축시킬 수 있고, 급속시공으로 인해 교통통제를 최소화하여 교통체증으로 인한 CO₂ 발생 저감 및 사회간접손실을 방지할 수 있는 친환경 녹색공법이다.

본 고에서는 ‘완전조립식 급속시공 교량시스템’을 구성하고 있는 방호벽, 바닥판, 거더 및 교각에 대한 각 공법의 기술적 특징 및 적용현황을 소개하고자 한다<그림 1>.

2. 완전조립식 급속시공 교량시스템

2.1 공법 핵심기술

2.1.1 프리캐스트 세그먼트 제작 기술

완전조립식 급속시공 교량시스템의 장점 중 하나는 각각의 부재를 공장에서 제작한다는 것이다. 공장에서 제작된 각 부재들은 현장타설 콘크리트 부재와는 달리 강제거푸집을 사용하고 공



그림 1. 완전조립식 급속시공 교량시스템 개요도

* 정희원, (주)대우건설기술연구원 토목연구팀 전문위원
kimyj@dwconst.co.kr
** 정희원, (주)대우건설기술연구원 상무
*** (주)대우건설기술연구원 원장

장에서 철근 가공조립이 이루어지므로 정밀한 세그먼트 제작이 가능하다. 또한 충분한 증기양생을 통하여 건조수축량 감소, 초기균열 제어 등 초기결함을 최소화하여 고강도 및 고내구성의 부재를 생산할 수 있으며, 공장에서 제작되므로 기후 및 현장여건에 관계없이 일정한 품질을 유지할 수 있다. 또한 다른 공정과 병행하여 사전에 제작이 진행되므로 공기단축이 가능하다. 각 부재별 공장제작 모습을 살펴보면 <사진 1>과 같다.

2.1.2 독자적인 세그먼트 연결시스템 개발

세그먼트를 공장제작하여 현장에서 연결하는 조립식 프리캐스트 공법 개발의 중요한 점은 고품질의 부재를 생산하는 것과 더불어 세그먼트 접합부를 적용한 구조물이 현장타설 콘크리트 구조물과 동등 이상의 구조성능을 갖는 것이다. 즉 공장에서 정밀하게 제작된 부재를 연결하여 구조물의 일체화 거동, 구조성능 등의 소요성능을 충분히 발휘할 수 있도록 하는 것이 핵심이라고 할 수 있다.

본 공법에서는 각 부재별로 프리캐스트 콘크리트 부재가 효율적으로 연결될 수 있도록 긴장재의 긴장에 의한 프리스트레스 도입, 연결부에 요철형태로 형성되어 있는 전단키의 기계적인 맞물림 작용, 전단저항 연결체 등의 주요기술을 해석 및 실험적 연구를 통해 개발하였다.



(a) 프리캐스트 방호벽



(b) 프리캐스트 바닥판



(c) 프리캐스트 교각

사진 1. 프리캐스트 세그먼트 제작

각 공법별 연구내용 및 구조적 특징을 살펴보면 다음과 같다.

2.2 프리캐스트 콘크리트 방호벽(DPB)

국내에서 프리캐스트 방호울타리를 적용했던 거의 유일한 사례는 강변북로 일부 구간이지만 이는 국토해양부 규정이 제정되기 이전에 시공된 것으로서 제반 규정에 대한 만족 여부가 불분명한 실정이다. 한편 국내에서 프리캐스트 부재를 분리대 용도로 사용하는 경우도 있으나 그 구조를 살펴보면 프리캐스트 부재와 도로 사이에 별도의 연결 구조를 두지 않고 프리캐스트 부재들끼리만 느슨하게 연결한 형태이다. 따라서 비록 유사시 이동이 가능하다는 장점이 있지만 이러한 시스템은 다양한 국토해양부 규정들을 충족시키기 어려워 차량 주행선의 분리 역할 외에 본래 의미의 강성 방호울타리로 보기는 어렵다.

이에 교량 노측용 강성 방호울타리를 적용하기 위하여 국내 최초로 시공이 간편한 신형식 프리캐스트 방호벽 구조 및 시공법을 개발하였으며, <그림 2>은 연구를 통해 개발된 프리캐스트 방호벽의 형상을 보여주고 있다.

방호벽의 기본 형상은 한국도로공사 표준도에 의거하고 있으나 프리캐스트 부재의 특성상 방호벽-바닥판 간 접합부 및 방호벽 간 접합부가 존재하므로 전체 시스템의 일체성을 확보할 수 있도록 철근 배치 등 접합부 상세를 일부 변형시켰다. 방호벽-바닥판 간 접합부는 U형 루프(loop) 철근 및 충전재를 이용하여 일체화시켰으며, 방호벽 간 접합부는 압수 전단키 및 에폭시 도포로 일체화시켰다.

기존 현장타설 방호벽을 대체하기 위한 프리캐스트 방호벽 시스템의 내하 성능을 검증하기 위해 <그림 3>과 같이 정적 실험을 실시하였고, 각종 계측값과 정밀 유한요소해석 결과와도 비

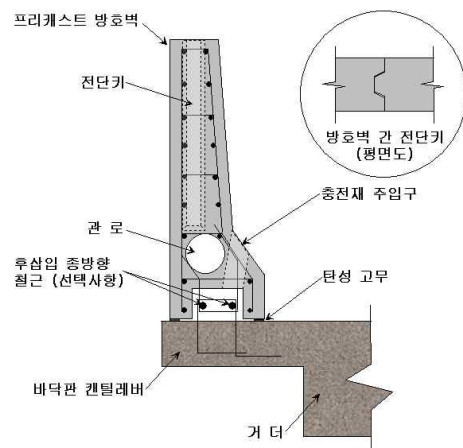
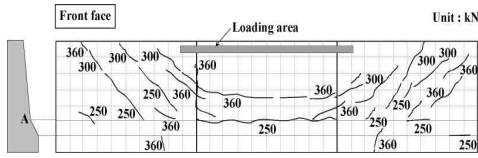
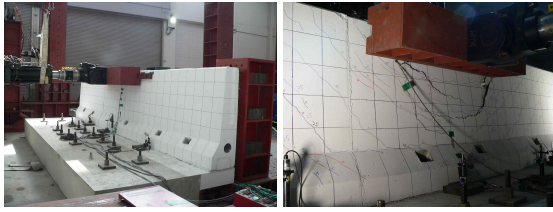
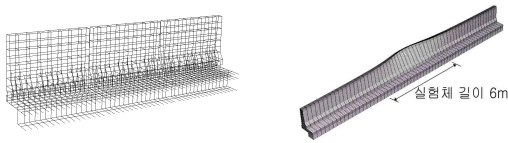


그림 2. 프리캐스트 방호벽 형상



(a) 정적실험



(b) 수치해석

그림 3. 프리캐스트 방호벽 성능 시험

교하였다. 바닥판과 방호벽으로 이루어진 실험체를 총 5개 제작하였으며, 실험 변수는 방호벽 간 접합에 대한 예폭시 적용 여부, 관로나 바닥판의 영향 유무, 재하길이의 영향이며, 그 외 거동 비교를 위해 현장타설 방호벽을 제작하였다. 방호벽-바닥판 간의 접합에는 루프 이음 철근 및 충전재를 활용하였다. 실험 결과 방호벽-바닥판 간 접합부 및 예폭시를 적용한 방호벽 간 접합부는 극한상태에 이르기까지 건전한 성능을 유지하였으며, 그 결과 현장타설 방호벽과 동등한 균열 거동 및 내력을 나타내었다.

2.3 프리캐스트 콘크리트 바닥판(DPS)

프리캐스트 콘크리트 바닥판(DPS)은 공장에서 운반, 가설에 적절한 크기로 분할 제작되기 때문에 현장에서 조립할 때 이음부가 존재하게 된다. 이에 전체 시스템의 일체성을 확보하기 위하여 바닥판간 이음부, 바닥판과 거더의 이음부에 대한 연결시스템을 개발하였다. 공법의 개요도는 <그림 4>와 같다. 먼저 바닥판간 이음부에서 전단 및 휨에 대한 하중전달능력이 가장 효과적인 형상과 접합방법을 개발하였고, 바닥판간 이음부의 일체화를 목적으로 도입하는 프리스트레스의 효과를 평가하고 프리스트레스를 도입한 부재의 정적 및 동적 실험을 실시하여 구조성을 검증하였다.

바닥판과 거더의 합성에서는 바닥판 제작시 미리 만들어둔 전단포켓과 거더에 설치된 전단연결재 사이에 무수축 모르타르를 충전시켜 거더와 프리캐스트 바닥판을 합성시키는데, 이러한 합

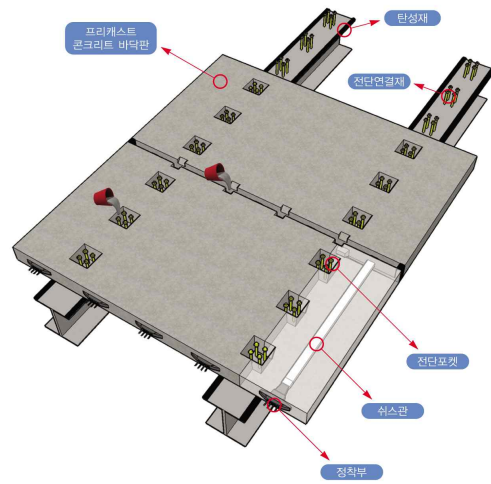
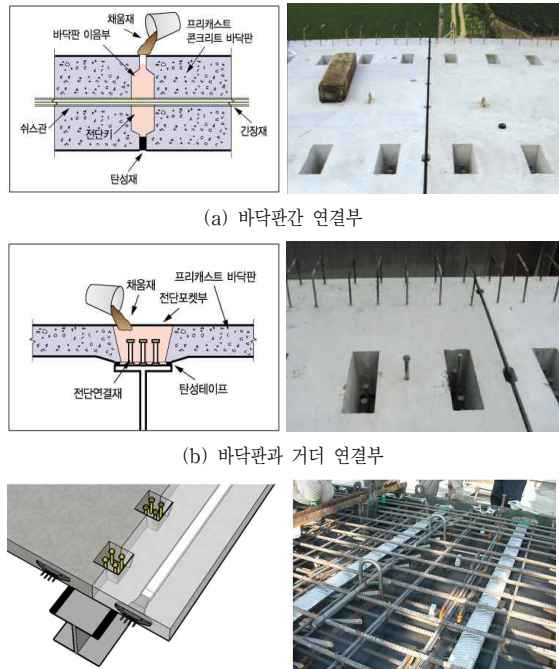


그림 4. 프리캐스트 콘크리트 바닥판 개요도

성방법의 거동평가를 위해 밀어내기(push-out) 시험체에 대한 정적 및 피로실험을 실시하여 구조성을 검증하였다. <그림 5>는 연구를 통해 개발된 프리캐스트 바닥판의 연결시스템을 보여주고 있다.

개발된 프리캐스트 교량 바닥판 공법의 구조성능, 사용성과



(a) 바닥판간 연결부

(b) 바닥판과 거더 연결부

(c) 프리스트레스 도입

그림 5. 프리캐스트 바닥판 연결시스템



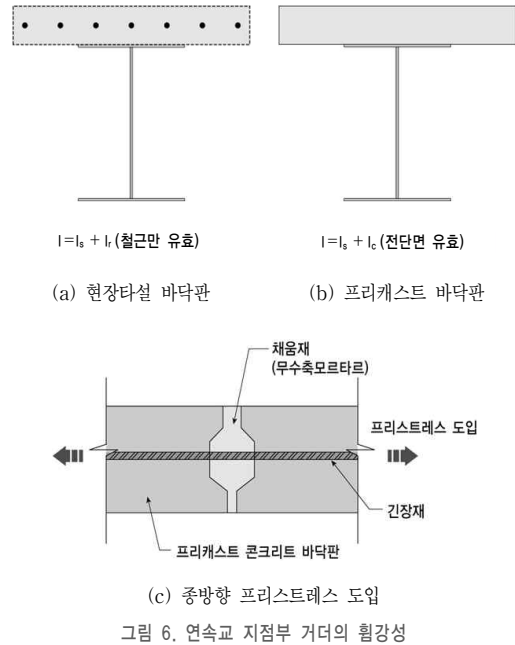
(a) 합성보 실험 (b) 플레이트 거더교
(c) 개구제 강박스 거더교(단순교)
(d) 개구제 강박스 거더교(연속교)
사진 2. 모형 교량실험

시공성을 종합적으로 평가하기 위하여 <사진 2>와 같이 모형 교량 실험을 실시하였다. 실험결과 정적 및 피로실험을 통해 바닥판, 거더와 바닥판의 일체 거동양상을 확인하였다.

연속교 설계의 경우 지점부의 부모멘트가 주요 설계모멘트가 된다. 현장타설 바닥판은 휨강성 계산시 지점부에 발생하는 인장응력에 의해 콘크리트에 균열이 발생할 것으로 예상되어 콘크리트 단면을 무시하고 바닥판 단면내의 철근만을 휨강성에 계산하게 된다<그림 6-(a)>. 그러나 종방향 내부긴장재를 갖는 프리캐스트 콘크리트 바닥판은 내부긴장재에 의해 바닥판에 압축력이 도입되며<그림 6-(c)>, 그 크기가 바닥 지점부에 발생하는 인장응력의 크기보다 큰 경우 바닥판에 균열이 발생하지 않는다. 따라서 지점부의 휨강성 계산시 바닥판의 전단면을 유효단면으로 하여 거더의 휨강성을 계산한다<그림 6-(b)>. 즉, 개구제 강박스 거더교, 소수주거더교 등의 강합성 교량에서 바닥판의 단면을 주거더 단면의 일부로 고려할 수 있으므로 강거더의 중량을 경감시킬 수 있다.

2.4 PnP 거더(preloading and progressive girder)

본 공법은 프리캐스트 바닥판의 사하중을 이용한 2차 강선 긴장 시스템이다. 본 공법의 개요도는 <그림 7>과 같다.



(a) 현장타설 바닥판 (b) 프리캐스트 바닥판
(c) 종방향 프리스트레스 도입
그림 6. 연속교 지점부 거더의 휨강성

기존 2차 강선 시스템과 달리 프리캐스트 콘크리트 바닥판을 적용함으로써 2차 강선 긴장 시 바닥판과 거더의 비합성 상태에서 긴장하여 현장타설 바닥판과 합성하는 공법보다 10% ~ 15%의 긴장재의 효율성을 높였다. 거더의 효율성을 높여 동일 시간 내 거더의 형고를 낮추거나 거더의 개수를 줄여 거더의 경제성을 확보할 수 있다. <그림 8>은 PnP 거더 시스템의 긴장력 효율을 나타내고 있다.

일반적으로 PSC 합성거더 교량에서 거더와 바닥판 사이의 합성 거동은 수평전단 연결부 접촉면의 부찰과 마찰, 전단 연결재 등에 의해 확보된다. 현재의 설계규정에는 프리캐스트 거더와 프리캐스트 바닥판사이의 전단연결부 설계 규정이 없는 실정이다. 이에 <그림 9>와 같이 수평전단 연결부에 대한 연결 구

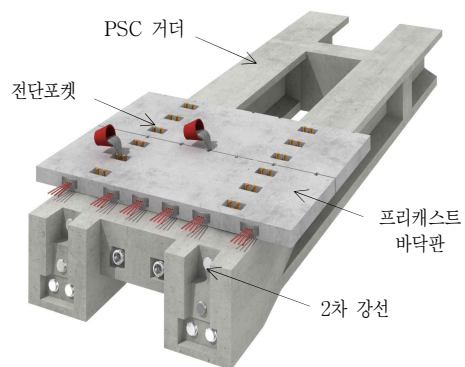


그림 7. PnP 거더 시스템 개요

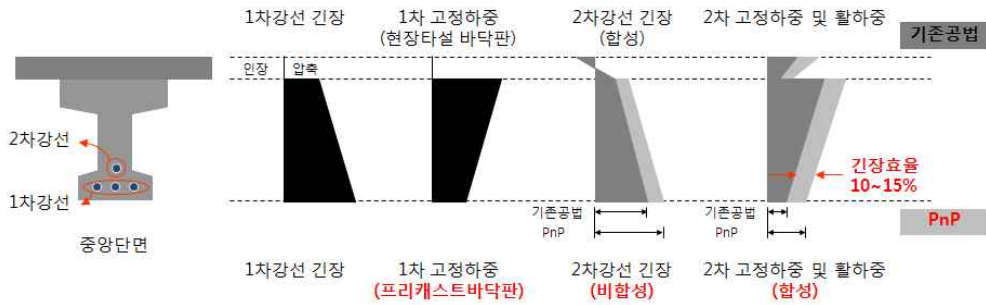


그림 8. PnP 거더의 긴장력 효율 비교

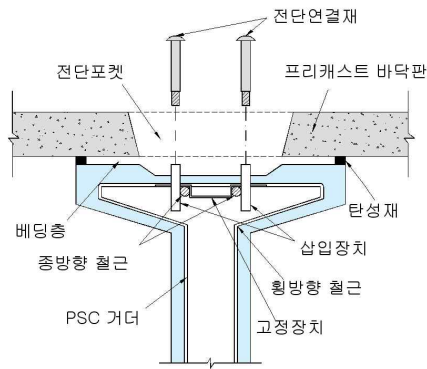
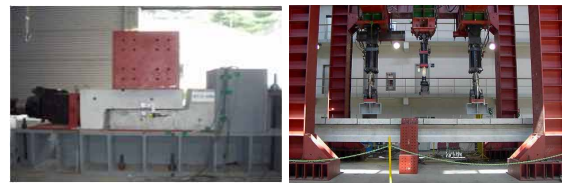


그림 9. 수평전단 연결구조



(a) 수평전단실험

(b) 합성보 실험



(c) 합성교량 실험

사진 3. PnP 거더교 실험

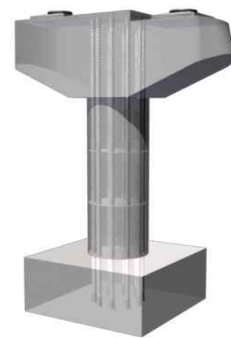
조를 제안하였고, 실험으로부터 제안된 연결구조의 타당성 및 적용성을 검증하였고, 합성보 실험을 통해 휨과 전단을 동시에 받는 전단 연결부의 거동 및 합성보 부재의 전체적인 구조거동을 평가하였다. 실험결과, 합성보는 최대하중 이후 충분한 연성거동을 나타냈으며, 설계 모멘트에 대한 극한 모멘트는 충분한 안전율을 갖는 것으로 나타났다.

수평전단 연결구조를 적용하여 수평전단 연결부에 대한 설계를 한 부재는 완전합성에 가까운 거동을 보임으로써 최대하중 작용시 수평전단에 대해 안전함을 확인하였다. <사진 3>은 수행된 PnP 거더 실험을 보여주고 있다.

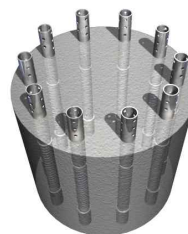
2.5 프리캐스트 콘크리트 교각(DPC)

본 공법은 공장에서 적당한 길이로 제작된 여러 개의 교각 세그먼트를 현장으로 운반하여 적층하고 조립한 후 긴장력을 도입하여 일체화 시키는 공법이다. <그림 10>은 프리캐스트 교각의 개요도를 보여주고 있다.

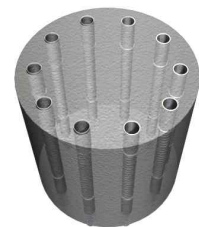
세그먼트를 제작하여 현장에서 연결하는 프리캐스트 교각 시스템의 개발에서 가장 중요한 점은 개발한 접합부를 적용한 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각이 현장타설 콘크리트 교각과 동



(a) 전체 조감도



(b) 세그먼트 상(上)면



(c) 세그먼트 하(下)면

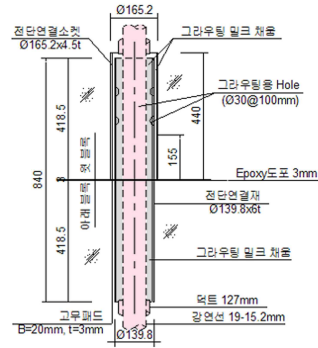
그림 10. 프리캐스트 교각 개요도

등한 구조성능을 갖는 것이다. 즉 교각의 일체화 거동 및 내진성능 등의 소요성능을 충분히 발휘할 수 있는 접합부에 대한 요소기술을 확보하는 것이 새로운 교각 시스템 개발의 핵심이라 할 수 있다.

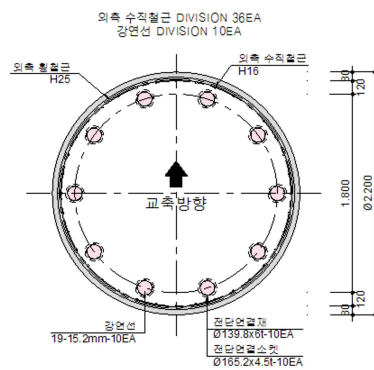
이에 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 접합부에 사용하기 위하여 새로운 전단저항 연결체를 개발하였다. 개발된 전단저항 연결체는 <그림 11>과 같다.

전단저항 연결체의 상세와 성능을 정확하게 평가하기 위하여 실험 및 해석적 연구를 수행하였다. 또한 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 일부분을 떼어 접합부로 설정하고 실제 구조 실험이 가능하도록 하였으며, 접합부를 대상으로 비선형 유한요소해석을 실시하여 비탄성 거동특성 및 파괴메커니즘을 파악하였다. 실험과 해석적 연구로 부터 개발된 전단저항 연결체를 갖는 프리캐스트 세그먼트 교각 실험체는 설계된 값을 잘 반영하고 있으며 충분한 소요성능을 갖고 있는 것으로 확인되었다. <사진 4>는 수행된 프리캐스트 교각 실험을 보여주고 있다.

프리캐스트 교각의 설계는 휨에 대한 저항과 전단에 대한 저항으로 나누어 설계한다. 수평력에 의해 휨모멘트가 발생할 경우 인장에 대해서는 교각에 삽입된 강연선이 부담하고, 압축에 대해서는 횡방향 철근 내부에 있는 심부구속 콘크리트가 부담한다. 또한 전단에 대해서는 세그먼트 사이를 연결하는 강제 덕트가 저항한다. 설계는 현행 도로교설계기준(2005), 콘크리트구조설계기준(2007)과 AASHTO LRFD(2004)를 근거로 하였다.



(a) 연결체 상세



(b) 기둥 단면도

그림 11. 전단저항 연결체



(a) 전단저항 연결체 성능실험



(b) 모형교각실험

사진 4. 프리캐스트 교각 실험

본 공법은 천안산업단지 진입도로현장의 램프교 교각에 적용되어 공기를 약 30일 단축하였고, 기존도로의 교통차단 방지 등 민원을 최소화하였다. <사진 5>는 적용현장의 시공 및 준공모습을 보여주고 있다.

3. 적용현황

본 시스템은 공기단축, 친환경 시공, 고품질 시공 등의 우수한 특징을 갖고 있어 교량의 급속시공이나 도심지 신설 및 교체교량의 공사 등 본 공법의 장점을 극대화할 수 있는 여러 현장에 적용되었으며, 향후에도 많은 적용이 예상된다.

현재 시공 완료된 교량 10개소를 포함하여 시공 중이거나 설계 완료된 교량이 80여 개에 이른다. 신설교량 뿐만 아니라 노후교량에 대한 교체공사에 적용되었으며, 현장여건에 따라 교량 형식 및 급속시공으로 인한 원가절감이 가능한 기존교량에 대해 설계변경검토가 다수 진행 중에 있다.

‘완전조립식 급속시공 교량시스템’을 구성하고 있는 방호벽, 바닥판, 거더 및 교각에 대한 주요 시공실적은 <표 1>과 같다.

표 1. 주요 시공실적

구분	교량명	교량 형식	교량제원		준공년도	비고
			연장(m)	폭(m)		
교체 교량	청주IC교	강합성 아치교	74	18.6	2004년	국내 노후바닥판 교체 최초적용
	오류교	강박스 거더교	51.8	50	2010년	서울시 노후바닥판 교체 최초적용
신설 교량	삼승1교	플레이트 거더교	50	12.6	2002년	국내 프리캐스트 바닥판 최초적용
	유성IC교	PSC 거더교	40	15.6	2006년	국내 PnP 거더교 최초적용
	한계2교	PSC 거더교	50	11.0	2007년	국내 50 m PSC 거더교 최초적용
	서천교	개구제 강박스 거더교	1,030	24.6	2008년	국내 최장 개구제 강박스 거더교
	저도교	소수주거더교	350	10.4	2008년	국내 프리캐스트 바닥판 소수주거더교 최초적용
	낙생2교	개구제 강박스 거더교	50	36.4	2009년	국내 프리캐스트 바닥판 개구제 강박스 거더교 최초적용
	F-P2 Ramp교	프리캐스트 PSC T형 교각	10.4(높이)	2.2(직경)	2009년	국내 조립식 교각 최초적용
	구중교	소수주거더교	580	20.9	2010년	국내 최장 소수주거더교



(a) 시공 전경(좌:기둥부 조립, 우:코펄부 조립)



(b) 준공 전경

사진 5. 프리캐스트 교각의 현장시공

4. 결론

(주)대우건설 기술연구원에서는 교량 바닥판을 시작으로 현재 까지 방호벽, 거더, 교각에 대한 조립식 공법을 개발하여 왔다. 세그먼트 접합부를 적용한 구조물이 현장타설 콘크리트 구조물 과 동등 이상의 구조성능을 갖도록 하기 위한 연결부 기술을 개

발하였고 해석 및 실험적 연구를 통해 구조물의 일체화 거동, 구조성능 등의 소요성능을 충분히 발휘할 수 있다는 것을 검증하였다. 이에 따라 교량의 상하부 구조 전체를 조립식으로 단기간에 시공할 수 있는 ‘상하부 완전조립식 급속시공 교량 시스템’을 개발 완료하였고, 현재 실용화 단계에 이르렀다. 본 공법은 각 부재의 공장제작을 통해 교량의 공용 수명을 획기적으로 연장시킬 수 있을 뿐만 아니라 기계화 작업 및 급속시공을 통하여 공사기간을 대폭 단축시킬 수 있는 획기적인 공법이다.

특히 도심지내 신설교량 뿐만 아니라 기존 교량의 노후화와 교통량의 증대로 인한 보수·보강의 경우 급속시공을 통해서 교통통제를 최소화하고, 교통체증으로 인한 CO₂ 발생 저감 및 사회 간접손실을 방지할 수 있는 친환경 녹색공법으로 향후 적용성이 확대될 것으로 예상된다. □

담당 편집위원 : 김태훈((주)대우건설기술연구원) kimth@dwconst.co.kr