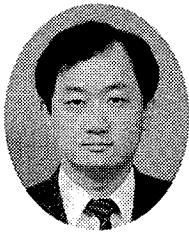


세계 최저의 형고/경간비를 실현한 IPC 거더

- IPC Girder : The Lowest Height/Length Ratio Girder -



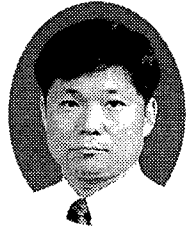
한만엽*



김진근**



황의승***



이차돈****



박상일*****

1. 서 론

교량이나 주차장, 강당 등 건설 시장에서 광범위하게 사용될 수 있는 신형 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 거더가 아주대학교를 주축으로 본 연구진에 의하여 개발되었다. 이 거더는 미국에서 가장 최근에 개발된 거더보다도 같은 형고에서 20~30% 이상 장경간이 가능하다는 점에서 또한 새로운 개념의 PSC 거더 설계 개념을 창안했다는 점에서 의의가 크다고 하겠다. 이번에 개발된 다단계 긴장형 IPC (Incrementally Prestressed Concrete) 거더는 지금까지 PSC 거더의 경간의 한계를 기존 30m에서 60m로 증대시킨 기술적인 도약을 이룩한 것이다.

1800년대 초 시멘트의 발명 이후 널리 사용되던 7~8m의 경간이 1900년대 초에 철근 콘크리트(RC)가 도입되면서 15m로 2배 정도 늘어났으며, 1950년대부터(국내에는 1960년대에 도입됨) 사용된 PSC 거더의 개발로 거더의 경간이 또 다시 2배로 증대되어 30m 경간의 교량이 오늘날 널리 건설되고 있었다. 이렇게 기둥 사이의 경간을 넓히기 위한 노력은 지난 200년간 약 50년을 주기로 몇 번의 기술적인 도약을 통해 이룩되어 왔다. 지금까지 이러한 경간의 도약은 철근이나 교강도 강선의 등장을 통해 이루어 졌으나, 이번에 개발된 IPC 거더는 기존 PSC 거더의 설계 기술을 응용한 설계 방법의 변화로 거더 경간의 획기적인 증대를 이룩한 것이다.

기존 교량에 사용되는 PSC 거더는 자중이 크고 거더의 형고가 높기 때문에 거더의 길이가 30m 이상일 경우에는 사용이 매우 어려운 형편이었다. 기존의 PSC 거더 설계 기술로 경간 40m를 실현하기 위해서는 거더의 높이가 2.3m, 무게가 90톤 이상이 되어야 하나, 이번에 개발된 기술로는 경간 40m

* 아주대학교 토목설계공학과 교수
** 한국과학기술원 토목공학과 교수
*** 경희대학교 토목공학과 교수
**** 중앙대학교 건축공학과 교수
***** (주)인터컨스텍 대표이사

의 경우 단면 높이를 1.5m로, 무게는 65톤으로 줄이는 것이 가능하게 된 것이다.

거더의 높이를 낮추는 것은 건설업계의 숙원이지만, 높이가 반으로 줄어들면 내하력이 1/4로 떨어지는 것이 지금까지의 공학적인 개념이며, 한계였다. 그런데 이번에 개발된 신기술은 거더의 높이를 반으로 줄였음에도 불구하고 거더 자체의 내하력은 기존 거더와 같은 160톤으로 계산, 측정되었으며, 이는 설계 하중의 6.0배에 달하는 크기로서 교량의 안전성에 전혀 문제가 없다는 것을 의미한다.

본고에서는 IPC 거더를 개발하게 된 배경과 IPC 거더의 기본 개념 및 지난 1999년 10월에 각계의 전문가를 모시고 공개적으로 진행되었던 30m 경간의 IPC 거더 합성교의 재하 실험 결과를 소개하고, IPC 거더의 사용성 및 경제성 등에 대한 검토 내용을 요약하였다.

2. 개발 배경

교량의 상부 구조에 PSC I형 거더를 이용한 합성형 교량은 그 뛰어난 시공성과 경제성으로 인하여 지난 1960년대에 국내에 처음 도입된 이래 길이 30m 이하의 도로교 및 철도교 등에 매우 광범위하게 설계 시공되고 있다. 그러나, <표 1>에 제시된 바와 같이 1980년대 이후부터는 경제 발전과 더불어 자동차 통행량의 급격한 증가로 인하여 도로의 폭이 넓어짐에 따라 입체 교차로나 고가도로의 경간은 40m 이상의 장경간이 요구되는 경우가 일반화되었을 뿐 아니라 화물 운송 차량의 대형화에 따라 차량 통과 높이 확보를 위해 높이가 낮은 거더의 필요성이 더욱 증대되었다. 이에 따라 PSC 박스교나 강박스교 등이 40~50m 경간에 널리 사용되고 있으며, 형고가 낮은 프리플렉스빔교 또한 널리 사용되고 있다.

또한 기술적인 면에서는 장경간화에 따른 거더의 형고 및 자중의 증대가 기존 PSC 방식의 거더 사용에 제한적인 요소로 작용하며, 거더에 작용하는 긴장력이 증대됨으로 해서 거더의 장기 처짐이 증가하는 문제가 심각해지게 된 것이다. 이와 같이 기술적인 문제를 해결하면서 거더의 높이가 낮고, 장경간화가 가능한 거더의 필요성이 절실하게 요구됨에 따라 IPC 거더가 개발되었다.

표 1. IPC 거더 개발의 필요성

| 사회적 동기 | 기술적 동기 |
|---|--|
| 1. 도로의 폭이 넓어짐에 따라 입체 교차로 등에서 교량 길이의 장경간화 필요성 증대 | 1. 프리스트레스트 교량의 장경간화에 따른 거더의 형고 및 자중의 증대 |
| 2. 차량의 대형화에 따른 통과 높이 확보를 위해 형고가 낮은 거더의 필요성 증대 | 2. 교량 준공 후 장기간 사용에 따른 균열과 처짐 발생에 대한 유지 보수 대책 마련 및 사용 하중의 증가에 따른 경제적인 보강 대책의 필요성 증대 |
| 3. 장경간(40~60m) 교량에서의 건설 비용 및 유지 관리 비용 증대 | |

2.1 국내외 교량 건설 동향

최근 3년간 국내에서 교량 종류별 건설 현황이 다음 <그림 1>에 제시되어 있는데, 강박스 거더교가 1996년부터 최근 3년간 건설된 전체 교량 연장의 1/2 이상을 차지하고 있다. 그 이유는 최근 많이 건설되고 있는 40~60m 경간의 교량을 건설하는 데 있어서 PSC 박스 거더교와 강박스 거더교만이 가능한 공법인 것으로 국내에서는 인식되고 있기 때문이다. 그러나, 강박스 거더교는 건설비가 비싸고, 추후 지속적인 유지 보수비용이 요구되는 바, 보다 값이 싸고, 장경간이 가능한 콘크리트 교량 공법의 개발이 절실히 필요하게 된 것이다.

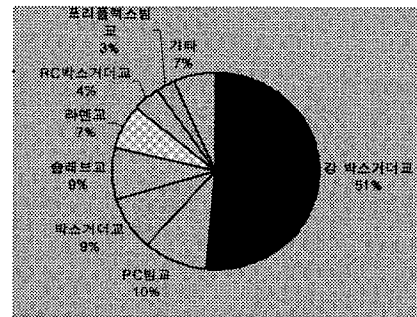


그림 1. 국내 교량 건설 동향(1996~98년)

이러한 국내 시장의 교량 건설 동향과는 반대로, 1950년대 이후 미국에서 건설된 교량을 형식별로 구분하여 건설 동향을 분석해보면, 국내의 건설 현황과는 현격한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. <그림 2>에 나타난 바와 같이 미국에서는 PSC 교량의

건설이 50년대 중반 이후 급속도로 증가하여 90년대에 들어서는 전체 교량 건설의 절반 이상을 PSC 교량이 차지하고 있으며 이와 같은 증가 경향은 향후에도 지속될 것으로 분석되는 반면에 강교는 전체의 20% 이하에 불과한 실정이다. 미국에서 이와 같이 프리스트레스트 콘크리트 교량이 지속적으로 증가하는 이유는 PSC 교량이 다른 모든 교량 형식에 비하여 상대적으로 매우 경제적인 공법이기 때문이다.

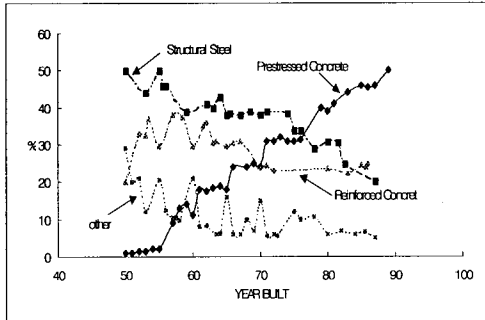


그림 2. 미국의 교량 형식별 건설 동향

그러나, 이러한 선진 외국의 경우와는 반대로 우리나라에서는 건설비가 상대적으로 비싸고 유지 보수비가 많이 드는 강교량의 건설이 전체의 절반 이상을 차지하고 있다는 것은 국내의 건설 동향에 문제가 있음을 의미하는 것이다. 따라서, 이와 같은 미국시장의 경향에 비추어 볼 때 국내 건설 시장도 장기적으로는 프리스트레스트 콘크리트 교량이 교량 건설의 지배적인 공법이 될 것으로 예상되는 것이다.

3. IPC 거더

3.1 IPC 거더의 개요

IPC 거더는 PSC 거더 제작시 시공 단계의 하중 증가에 맞추어 긴장력을 단계적으로 도입할 수 있도록

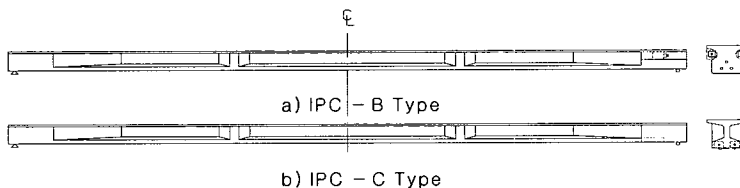


그림 3. IPC 거더의 종류(IPC-B형 & IPC-C형)

록 설계, 제작함으로써 거더의 높이와 단면적을 줄이는 효과를 가지면서도 장경간이 가능하도록 한 것이다. 즉, 하중이 증가하여 거더 하단에 인장응력이 유발되면, 이를 상쇄할 수 있는 프리스트레스를 도입함으로써 거더의 단면을 키우지 않고도 거더의 응력이 항상 허용응력 이내에 머물도록 설계한 것이 특징이다.

IPC 거더는 <사진 1>에 제시된 바와 같이 시공 중이나 시공 후에도 항상 강선을 재긴장할 수 있도록 강선의 정착 장치를 거더의 단부 부근에 노출시킴으로서 강선을 언제든지 재긴장할 수 있도록 하였다. 또한 IPC 거더는 <그림 3>에 도시된 바와 같이 단부의 정착방법에 따라서 단부에 브래킷이 있는 IPC-B형과 단부에 커플러를 갖고 있는 IPC-C형의 2가지 방식이 있다.

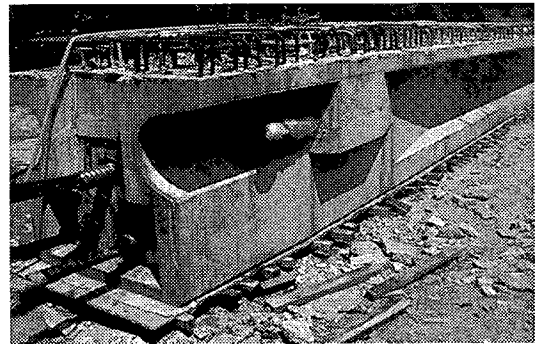


사진 1. IPC 거더 단부 정착 장치의 위치

3.2 IPC 거더의 기본 원리

기존의 프리스트레스트 콘크리트 거더의 설계 개념은 초기에 긴장된 강선의 긴장력으로 사하중이 작용하는 초기 상태에서의 응력과 활하중이 작용하는 최종 상태에서의 응력이 동시에 허용응력의 한계 내에 있도록 설계를 해 왔다. 이런 두 가지 극한 상태

에서의 응력을 항상 허용응력의 한계 내로 유지하기 위해서는 단면의 크기를 줄이는 데 한계가 있는 것으로 인식되어 왔다. 그러나, 본 IPC 거더는 교량 시공 중에 하중의 증가에 맞추어 강선의 긴장력을 단계적으로 증가시킬 수 있도록 비부착 강선과 이 강선을 추후에 긴장시킬 수 있는 장치 및 공간을 거더 단부에 설치하여 이런 문제를 해결하였다.

즉, <그림 4>에 도시된 바와 같이 거더 제작 단계에서는 자중과 슬래브의 무게를 받을 수 있을 정도만의 긴장력(1차 긴장)을 가해준 뒤, 슬래브를 타설하여 거더 하단의 응력이 인장측으로 이동하게 되면 다시 긴장력(2차 긴장)을 가해줌으로써 거더 하단의 응력을 허용 압축응력까지 증가시키는 것이다. 슬래브가 굳고 추가 사하중과 크리프 등에 의한 손실이 발생되면 거더 하단의 압축응력이 다시 감소하게 되는데 이때 다시 긴장력(3차 긴장)을 가해준다면 장기 처짐 등의 보정이 가능하고, 교량의 내하력 또한 대폭 증대되게 된다. <그림 4>에서는 시공 중이나 공사 완료 후나 항상 응력이 허용응력 이내임을 보여주며, 동시에 활하중 작용시 응력의 변동폭을 개념적으로 보여주고 있다.

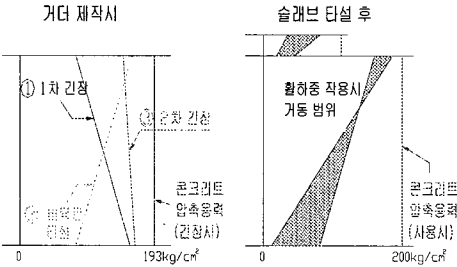


그림 4. 다단계 긴장에 따른 내부응력 변화

3.3 IPC 거더의 시공 방법

IPC 거더의 시공은 크게 2가지 방법이 있는데 그 중 한 가지 방법이 다음 <그림 5>에 제시되어 있다. 여기에 제시된 시공 단계는 제(5)단계인 단 한 가지 공정을 제외하고는 기존의 PSC 거더교의 시공과 정확하게 일치하고 있다. 즉, 정착 장치가 노출되어 있으므로 해서 슬래브 타설 직후에 2차 긴장을 하게 되면 앞의 <그림 4>에서 설명된 바와 같은 거

더 내의 응력을 재조정할 수 있게 되는 것이다. 단 슬래브에 인장 균열이 발생하는 것을 방지하기 위하여 이 2차 긴장은 슬래브가 굳기 전인 타설 후 1.5 시간 이내에 실시되어야 한다.

그러나, 만약에 불의의 사고로 인하여 슬래브가 굳기 전에 2차 긴장을 실시하지 못할 경우에는 2차 긴장을 하지 않고 슬래브가 완전히 경화될 때까지 기다린 후에 슬래브에 인장응력이 허용 인장응력을 초과하지 않도록 긴장을 하거나 추가 사하중의 증가에 맞추어 긴장을 하면 된다. 즉, 2번째 시공 방법은 제(5)단계의 2차 긴장을 슬래브 경화 후와 추가 사하중 작용 후로 나누어 3차에 걸쳐 실시하는 것이다.

<그림 5>에 제시되어 있는 마지막 제(8)단계는 거더에 균열이나 처짐이 심각한 경우에 실시하는 보수 보강 기능에 대한 것으로서 거더 내부에 미리 설치되어 있는 보강용 강선을 추가로 긴장함으로써 손상된 교량을 간단히 보강할 수 있는 것을 보여주기 위한 것이다.

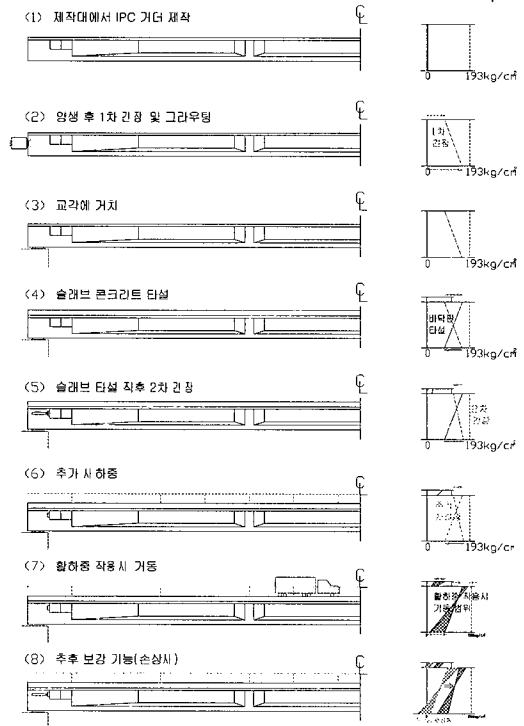


그림 5. IPC 거더의 시공 단계

3.4 적용 범위

이 IPC 거더는 긴 경간과 낮은 형고를 실현한 새로운 개념의 단단계 긴장형 PSC 거더로서 기존의 PSC I형 거더 외에도 경간 40~60m 사이의 중경간 교량에 널리 사용되고 있는 프리플렉스교, 강박스 거더교, PSC박스 거더교, RC박스 거더교 등 60m 이하의 대부분의 기존 교량 형식을 대체할 수 있을 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 미관적으로 우수하면서도 장경간 시공이 가능하다는 특성으로, 공장, 주차장, 강당, 체육관 등 건축 분야에도 폭 넓게 사용될 수 있는 등 그 적용 범위를 더욱 넓힐 수 있을 것으로 평가된다.

3.5 기술적 장점

기존의 PSC 거더 설계 기술로 경간 40m를 실현하기 위해서는 거더의 높이가 2.3m, 무게가 90톤 이상이 되어야 하나, 이번에 개발된 IPC 거더 기술로는 경간 40m의 경우 단면 높이를 1.5m로, 무게는 65톤으로 줄이는 것이 가능하게 된 것이다.

다음 <그림 6>에서는 현재 사용되고 있는 도로공사 거더의 표준단면도와 지난 97년 12월에 미국의 북동부 뉴잉글랜드 지역에서 개발, 발표된 NEBT 거더 및 금번 개발된 IPC 거더의 단면을 서로 비교한 것이다. 도로공사의 표준단면도가 경간 30m인 점을 고려하여 경간이 30m인 경우를 비교하였는데, 도로공사의 표준단면도에 비하면 높이가 절반으로 줄어들었으며, 미국에서 가장 최근에 개발된 거더의 형고를 최대한 낮춘 NEBT 거더와 비교하여도 30% 정도 형고가 낮음을 알 수 있다. 이 정도의 높이는 현재 널리 사용되는 프리플렉스 거더와 같은 높이에 해당된다.

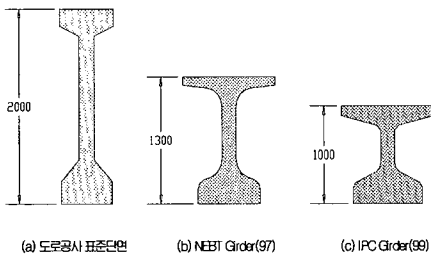


그림 6. 각종 PSC 거더의 높이 비교

현재 세계에서 최장의 경간/형고비를 갖고 있는 PSC 거더는 미국에서도 구시가지의 도로가 매우 복잡하여 이를 극복하고자 1997년 12월에 개발된 NEBT(New England Bulb Tee)로서 미국의 동북부 지역을 중심으로 널리 보급되고 있으나 아래 <그림 7>에서 비교되는 바와 같이 본 IPC 거더는 NEBT 거더보다 형고를 30% 정도 낮추거나 20% 이상의 장경간이 가능한 것으로 판명되었다.

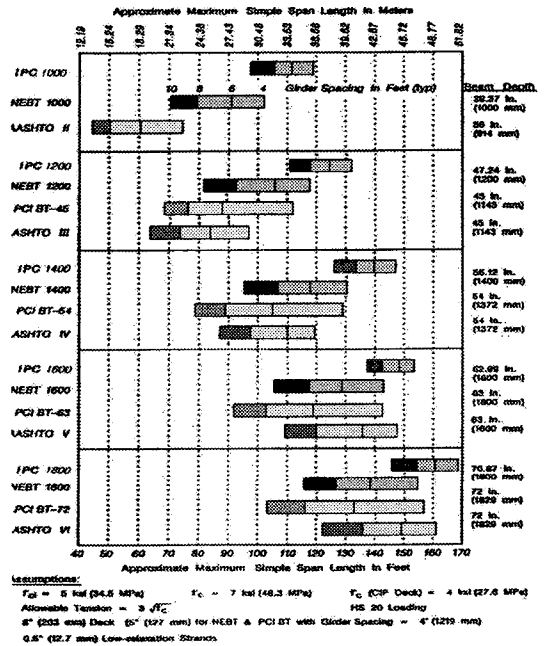


그림 7. 거더의 형고와 간격에 따른 최대 경간의 비교

다음 <표 2>에 국내에서 사용되는 기존 거더와의 성능이 비교 분석되어 있다. IPC 거더는 기존의 PSC 거더에 비하여 크기와 무게가 현저히 작고 이에 따라 <그림 3>에 제시된 바와 같이 교량의 상부 구조 공사비가 기존의 절반에 불과하다. 또한 제작비의 절감 이외에도 운반 및 가설 공사 비용 등을 추가적으로 절약할 수 있으며, 현재 연간 수백억원씩 지출되고 있는 교량의 유지 보수비용도 대폭 절감할 수 있게 된 것이다.

즉, 교량의 사용 도중 보수 보강을 할 필요가 있거나 건조 수축이나 크리프 등에 의하여 처짐과 균열이 발생하여도 이의 회복이 가능하며, 설계 기준

의 개정 등에 의하여 교량의 내하력을 증가시킬 필요가 있을 경우에도 내장된 강선을 추가 긴장하여 간단히 내하력의 증가가 가능하므로 유지 보수비용도 다른 공법에 비해 경제적이다.

표 2 기존 PSC 거더와의 성능 비교표

| 항 목 | | PSC 거더 | Preflex 거더 | IPC 거더 | 비 고 |
|------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|--|
| 거더의 형고 (m) | 경간 30m | 2.0 | 1.0 | 1.0 | 1. 하천 횡단시 최고 홍수고 확보가 용이 2. 직접 공사비 외에도 부대 비용 및 토지 보상비 등 절감 |
| | 40m | 2.4 | 1.5 | 1.5 | |
| | 50m | 3.0 | - | 2.0 | |
| 경간 40m | 무게 (t) 제작비 (만원) | 90 4,000 | 73 7,000 | 60 4,000 | 1. 제작비, 운반비, 설치비 등 절감으로 상부 구조 건설비를 1/2로 낮춤. |

3.6 경제적 장점

교량 건설비용을 비교하기 위하여 다음 <표 3>에 개략적인 비용의 비교가 제시되었다. 교량의 전반적인 공사비를 비교하는 것은 현장에 따라서 편차가 심하기 때문에 거더만의 공사비를 비교하였다. 예를 들어 총 길이 150m에 30m, 5경간인, 왕복 4차선 교량의 경우 경간 당 거더의 개수는 모두 똑같이 10개이다. PSC 거더와 IPC 거더는 기본적으로 제작, 시공 방법이 똑같으므로 총 제작비에는 차이가 없으나, 프리플렉스거더는 가격이 2배 이상에 달하므로 총 제작비가 12억원 가량 증가하게 된다. 따라서, 낮은 형고가 필요할 때 프리플렉스거더를 IPC 거더로 대체하게 되면 12억원의 공사비가 절감되는 것이다. 교량의 형고가 문제가 되지 않는 경우에는 거더의 간격을 3.6m로 벌리는 소수주형용 IPC 거더를 사용하게 되면 1.5억원의 비용 절감이 가능하게 된다.

또한 총 길이 200m의 40m, 5경간 교량의 경우 강 박스를 사용하게 되면 공사비가 36억원 정도인데, 프리플렉스거더를 사용하는 경우는 사용 거더의 개수가 10개로서 총 공사비가 거의 비슷한 수준이다. 그러나, 이에 반하여 IPC 거더의 경우는 최저형고의 IPC 거더를 사용하는 경우에 21억원의 비용 절감이 가능하고, 소수주형용의 IPC 거더를 사용하는 경우에는 총 24억원을 절약할 수 있게 된다.

표 3.5 경간 고가도로의 거더 제작비 비교표

| 경간장 | 명 칭 | 거더 갯수 | 단가 (만원) | 총액 (억원) | 차액 | |
|-------------------|---------|-------|---------|---------|-----------|----------|
| 30m 5경간 4차선 | I형 | 10 | 1,500 | 7.5 | - | |
| | Preflex | 10 | 4,000 | 20 | 12.5억원 증가 | |
| | IPC | 최저형고 | 10 | 1,500 | 7.5 | 변동 없음 |
| | | 소수주형 | 6 | 2,000 | 6 | 1.5억원 절감 |
| 40m 5경간 4차선 | 강박스 | 4 | 18,000 | 36 | - | |
| | Preflex | 10 | 7,000 | 35 | 1억원 절감 | |
| | IPC | 최저형고 | 10 | 3,000 | 15 | 21억원 절감 |
| | | 소수주형 | 6 | 4,000 | 12 | 24억원 절감 |

다음 <그림 8>에는 경간이 50m인 경우의 상부 공사비를 비교한 것으로 수원시 과선교의 설계 단가를 인용하였는데 1개 경간당 8억~10억원 정도의 상부 공사비의 절감이 가능한 것으로 나타났다

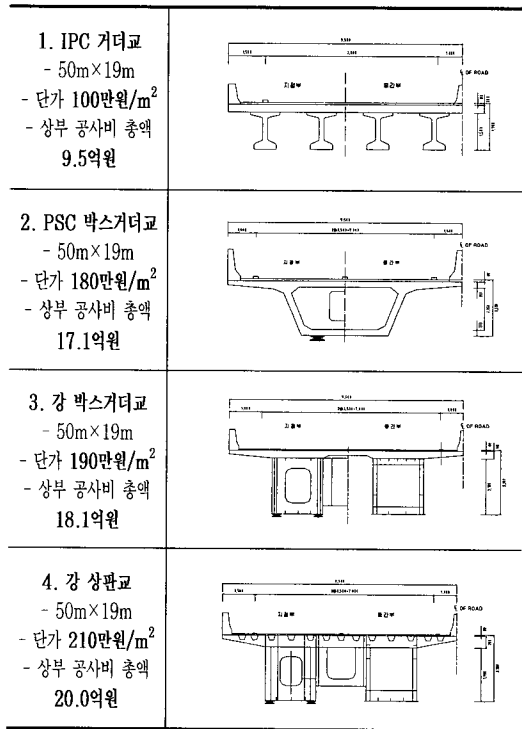


그림 8. 교량 형식별 상부 구조 건설비 비교표 (수원 과선교)

4. IPC 거더의 검증 실험

4.1 서론

IPC 거더의 설계 개념을 검증하고, IPC 거더의 구조적 거동을 실물 실험을 통하여 다단계 긴장의 효과 및 실제 교량에 적용 시 발생할 수 있는 문제점을 발굴, 해결하기 위하여 실시되었다. 실물 실험을 통하여 철근 배근이나, 쉬스 배치의 문제점, 1차·2차 긴장시의 문제점 및 콘크리트의 타설에 따른 문제점 등을 검증한 것이다.

이 실험에서는 DB-24 하중을 견딜 수 있는 경간 30m의 2차로 교량에 적용 가능한 거더를 실제 크기로 제작하여 설계 하중과 균열 하중, 및 내하력, 처짐과 철근 변형률 등 구조적인 거동을 측정, 분석하였다. 이렇게 측정된 실험 결과를 앞서 제시한 이론값과 서로 비교 분석함으로써 IPC 거더의 해석 및 설계 이론의 정당성을 검증하였다. <사진 2>에는 재하대에 거치된 30m 길이의 IPC 거더 실험체의 전경을 보여주고 있다.

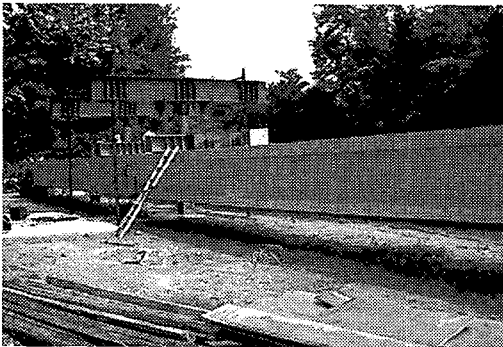


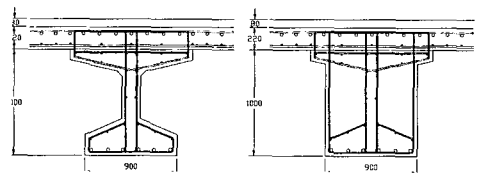
사진 2. 길이 30m의 실험용 IPC 거더교

4.2 실험 내용

실험용 거더는 길이 30m에, 거더의 형고를 1m로 만든 IPC 거더로서 슬래브의 폭과 두께는 각각 200cm와 22cm로 제작하였다. 실험 내용은 거더를 제작하여 시공 중 측, 거더 제작 후 1차 긴장과 슬래브 타설, 및 슬래브 타설 직후 2차 긴장시의 부재 거동과 완공 후 사용 하중 및 극한 하중 하에서의 부재 거동을 측정하고 분석하는 데 있다. 이 검증

실험에서는 단부 정착 장치의 종류에 따라 브래킷형(IPC-B) 거더 및 커풀러형(IPC-C) 거더의 2개의 실험체로 이루어져 있다. 이 2종류 거더의 설계 조건은 같으나 2차 긴장을 위한 정착 방법 및 정착 장치에서 다소 차이가 있어서, 긴장재의 배치와 강선수에 약간의 차이가 있었다. 본 실험에서는 슬래브 이외의 추가 고정 하중은 재하 하중에 포함되는 것으로 보고 실험을 수행하였다.

실험용 거더의 제작은 현장 레미콘 공장에서 배달이 가능한 500kg/cm²의 콘크리트를 사용하였으며, 상부 슬래브는 300kg/cm²의 콘크리트를 사용하였고, 콘크리트의 건조 수축으로 인한 품질 저하를 피하고 콘크리트의 조기 강도 발현을 위하여 타설 후 12시간 동안 증기 양생을 실시하였다. 실험체의 단면은 <그림 9>에 제시된 바와 같은데 거더의 상하부 플랜지의 크기 및 치수는 NUBT와 NEBT의 단면을 참조하여 철근 및 긴장재 배치공간 확보, 단면계수의 증가, 콘크리트 타설 등의 시공성을 검토하여 결정하였다. 또한 시공 단계를 고려하는 공법이므로 슬래브 바닥판을 합성한 형태로 제작하였다.



(a) 중앙부 단면 (b) 단부 단면

그림 9. 실험용 IPC 거더교의 단면도

4.3 재하 및 측정 방법

IPC 거더의 정적 재하 시험은 <그림 10>에 도시된 바와 같이 단경간 단순 지지 조건 하에서 수행되었으며 거더 중앙에서 양쪽으로 2m씩 4m 간격을 갖는 2점 재하 방식으로 재하하였다.

IPC-C형 거더의 경우 1차 시험시에는 거더의 항복 하중에 해당하는 140톤까지 하중을 가한 후 하중 제거에 따른 탄성 회복 양을 측정하였고, 2차 시험시에는 극한 하중인 160톤을 초과하여 거더가 파괴될 때까지 재하하였다. IPC-B형은 극한 하중에 도달할 때까지 지속적으로 하중을 증대시켰다. <사

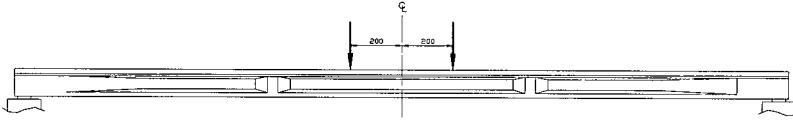


그림 10. 하중 제하 방법

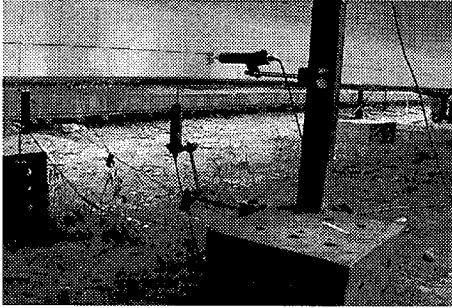


사진 3. 수평, 수직 변위 측정을 위한 계측기

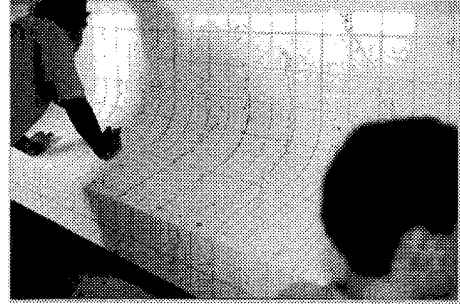


사진 4. 제하 시험 중 균열 기록 광경

진 3)과 (사진 4)는 수직, 수평 처짐을 측정하기 위한 측정 장치 및 실험 시 균열의 진행 상황을 기록하는 모습을 보여주고 있다.

4.4 주요 실험 결과

〈표 4〉에는 IPC-C형 거더 및 IPC-B형 거더의 실험 결과가 종합되어 있다. 균열 하중, 항복 하중, 극한 하중의 이론값과 실측값이 거의 일치하고 있어서 실험의 신뢰도가 높은 것을 알 수 있으나, 처짐의 측정값은 오차가 큰 것으로 나타났다. 이론적인 균열 하중은 40톤으로 충격계수가 포함된 설계 활하중보다 35% 정도 큰 것으로 계산되었으나, 처음 균열이 관측되기 시작한 하중은 44톤으로 이보다 더 큰 값으로 나타났다. 이러한 균열 하중은 DB-24의 설계 하중이 충격계수를 포함하여 28.1톤인 점을 고려하면, 균열이 발생하기까지 충분한 안전율을 확보하고 있음을 보여주고 있다.

또한 설계 활하중인 28.1톤 작용 시 이론적 처짐은 26.2mm정도인데 비하여 실제 처짐은 18.1mm로서 다소 차이가 나는데, 이는 계산에 포함되지 않은 온도축근이나, 설계값을 상회하는 거더와 슬래브의 콘크리트 강도 때문인 것으로 추정된다. 이들 처짐은 모두 설계 기준에 규정된 활하중 처짐 제한값인 37.5mm보다 상당히 작은 것으로 측정되어 충분한 사용성을 확보하고 있는 것으로 판명되었다.

IPC-B형 거더의 경우도 하중과 처짐 등의 이론치와 실측치는 모두 IPC-C형 거더와 거의 유사한 경향을 나타내고 있는데, DB-24 설계 하중 및 균열 하중 작용 시 실제 처짐이 IPC-C형에 비하여 약간 크게 측정되어 각각 23.7mm, 34.1mm로 나타났으나 활하중 처짐 제한값에 비하면 아직 충분한 사용성을 확보하고 있는 것으로 판명되었다. 이러한 실험 결과는 실제 교량에서는 하중의 횡분배 효과 때문에 더욱 줄어들 것으로 예상된다.

표 4. 설계값과 측정값의 비교표

| 실험 거더 | 하중 단계 | 하중-처짐의 비교 | | | 측정값 | |
|-----------|-------|-------------|------------|------------|-------------|------------|
| | | 이론 하중 (ton) | 이론 처짐 (mm) | 측정 처짐 (mm) | 측정 하중 (ton) | 측정 처짐 (mm) |
| IPC-C형 거더 | DB-24 | 28.1 | 26.2 | 18.1 | - | - |
| | 균열하중 | 39.8 | 37.1 | 30.2 | 44.0 | 34.5 |
| | 제한처짐 | 47.0 | 37.5 | | - | - |
| | 항복하중 | 133 | 325 | 287 | 136 | 296 |
| | 공칭하중 | 165 | 637 | 545 | 165* | 545 |
| IPC-B형 거더 | DB-24 | 28.1 | 25.8 | 23.7 | - | - |
| | 균열하중 | 38.4 | 46.4 | 34.1 | 45.0 | 35.0 |
| | 제한처짐 | 47.0 | 37.5 | | - | - |
| | 항복하중 | 132 | 322 | 267 | 144 | 329 |
| | 공칭하중 | 160 | 539 | 455 | 167* | 572 |

* 공칭하중 이상에서도 파괴가 발생하지는 않았으나 처짐이 과다하여 실험을 중단함.

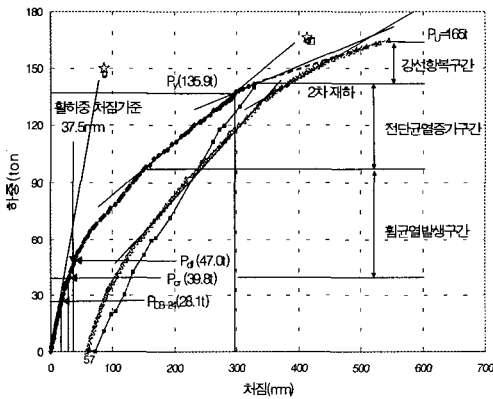
〈그림 11〉에는 거더의 중앙점에서 측정된 하중-처짐 곡선을 보여주고 있다. 균열이 발생되기 전까지 처짐의 증가가 적어서 사용성을 확보하기 위한 충분한 강성이 확보되어 있음을 볼 수 있으며, 균열 발생 후에는 강성이 급격히 저하됨을 알 수 있다. 균열 발생 초기에는 휨 균열이 주로 증가하고, 하중이 더욱 증가하게 되면 전단 균열이 급격히 증가하는데, 전단 균열이 증가할 때는 하중-처짐 곡선의 경사에 거의 변화가 없어서 전단 균열은 처짐의 증가에 둔감한 것을 알 수 있다. 항복 하중 근처에서는 곡선의 변화를 관측할 수 있으며, 항복 하중 이후 하중이 제거된 뒤 잔류 처짐은 약 7cm 정도가 발생되었으나, 12시간 경과 후 측정된 처짐은 5.7cm로서 1.3cm 정도의 크립 회복이 발생한 것을 관측할 수 있었다.

연속적으로 파괴 시까지 하중을 가했던 IPC-B형 거더의 경우에도 측정결과는 거의 유사하게 나타났다. 2개 거더 모두 최종 하중 재하 시 처짐이 파다하여 지면에 닿을 정도가 되어서 실험을 중단하였다. 이러한 실험 결과는 IPC 거더가 충격계수를 포함한 설계 하중의 약 6배에 달할 정도의 극내하력을 갖고 있으며, 극한 하중에 도달할 때까지의 처짐이 40cm를 초과함으로써 파괴 전에 과하중에 대한 경고를 해줄 수 있는 충분한 연성을 확보하고 있음을 의미하며, 하중이 제거되면 처짐이 거의 회복되는 복원력 또한 매우 우수한 것으로 나타나 안전성 면에서도 유리한 특성을 보이고 있다. 따라서 다단계 긴장 이론을 적용한 실물 교량 실험 결과 IPC 거더는 충분한 안전성과 강성, 연성 등을 갖고 있는 것으로 결론을 내릴 수 있었다.

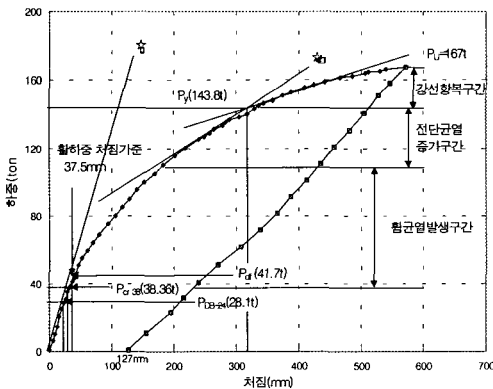
5. 결 론

‘교량’ 하면 한강에 있는 다양한 형태의 장경간 대형 교량들을 먼저 연상하게 된다. 그러나, 전국에서 가장 많이 건설되고 있는 교량의 경간은 거의 대부분 30~60m 사이이다. 이런 중경간 교량들은 콘크리트나 강재를 주재료로 건설되고 있는데, 선진국에서는 강교보다는 값싼 콘크리트 교량을 선호하고 있다. 미국에서는 또한 지속적인 기술 개발을 통하여 최고 95m에 달하는 PSC 거더교를 설계, 시공한 실적이 있는 반면에, 국내에서는 30여 년 전에 개발되었던 I형 표준단면에 묶여서 30m 이상의 장경간거더 교량의 개발을 소홀히 하여 왔으며, 이에 따라 40~60m 경간의 교량은 대부분 강 박스교로 건설되고 있는 실정이다.

급변에 개발된 IPC 거더는 기본적인 공정이 PSC 거더와 거의 유사하며, 다단계 긴장의 개념 또한 연속교에서 이미 사용되고 있는 개념과 유사하다. 이에 따라 개발 초기에는 이런 개념의 PSC 거더가 이미 존재하고 있다는 선입견이 있었으며, 그래서 더 이상의 기술 개발을 시도하지도 않게 된 것이 아닌가 생각한다. 그러나, 본고에서 설명되었듯이 IPC 거더의 개념은 매우 간단하고, 기존의 기술을 거의 그대로 이용하면서도, 간단한 설계 및 시공 방법의 변경으로 현재 사용되고 있는 기술로서는 프리렉스 거더만이 이를 수 있는 낮은 형고/경간비



(a) IPC-C형



(b) IPC-B형

그림 11. IPC 거더 중앙 지점 하중-처짐 곡선

를 PSC 거더로서 이룩해 낸 것이다.

새로 개발된 기술은 예측하지 못한 문제가 발생되는 경우가 많다. 그러나, 예측하지 못한 문제의 발생은 사전에 철저한 검토와 준비를 거치는 경우, 그 가능성을 최소화되거나 또는 완전히 제거할 수 있으며, 이를 위해서는 많은 현장 경험과 토의가 필요하다고 할 수 있다. 본 연구진도 이를 달성하고자 거더의 강성, 연성, 내하력 이외에도, 장단기 처짐, 진동, 운반시 좌굴 문제, 제작 및 시공 시 철근 및 콘크리트의 품질 관리 문제 등을 세밀히 검토해 왔으며, 현장에서 이런 문제들을 관리하기 위한 설계지침 및 시방서와 표준설계도 등 제반 자료의 준비를 완료하였다.

이러한 기술 개발의 노력이 결실을 맺어서 앞으로는 외국의 기술을 수입하기만 하는 것이 아닌, 국내에서 개발된 기술이 선진 외국으로 수출되어 우리의 기술력을 과시할 수 있는 기회가 오기를 바라며, “건설 분야에서도 기술 개발이 있느냐”는 일반인들의 인식을 타파할 수 있는, 또한 국내 기술에 대한 자부심을 가질 수 있는 계기가 되기를 바라는 바이다.

참 고 문 헌

1. 한만엽, 김양현, 진경석, “프리스트레스를 단계적으로 도입하는 PSC I형 거더의 설계에 관한 연구,” 한국콘크리트학회 학술발표회논문집, 제11권 1호, 1999.5, pp.375~380.
2. 정원기, 이형준, 이규정, 윤석구, “고강도 PSC범교량의 휨거동,” 한국콘크리트학회논문집, 제10권 2호, 1998.11, pp.706~711.
3. 심종성, “국내 시방 규정에 적합한 장경간 벌브티 거더 개발 연구,” 한양대학교 공학기술연구소, 연구보고서, 1999.8, pp.164.
3. R.M. Barker, and J.A. Puckett, “Design of Highway Bridges,” 1997.
4. M.P. Collins, and D. Mitchell, “Prestressed Concrete Structures,” 1991.
5. E.G. Nawy, “Prestressed Concrete : A Fundamental Approach,” Prentice Hall, 1989.
6. K.B. Alexander, L.S. Rita, & M.P. Culmo, “Design, Fabrication and Construction of the New England Bulb-Tee Girder,” PCI Journal, 1997. Nov.-Dec., pp.30~40.
7. K.L. Geren, “Optimization of Precast /Prestressed Concrete Bridge I-Girders,” MS Thesis at U. of Nebraska, 1992.
8. PCI Committee on Bridges, “State-of-The-Art of Precast/Prestressed Concrete Spliced I-Girder Bridges,” 1995.
9. F.J. Jacques, “Study of Long Span Prestressed Concrete Bridge Girder,” PCI Journal, 1991. Mar~Apr.
10. J.R. John, T.M. Barney, G.R. Henry & N.B. Robert, “Performance of Prestressed High Strength Concrete Bridge Girder,” PCI Journal, 1995, pp.34~45. □