

# IPC 거더 교량의 장기거동 해석

## Long-term Behavior of IPC Girder Bridge

권 승 회\*      김 진 근\*\*      이 상 순\*\*\*      한 만 엽\*\*\*\*  
Kwon, Seung Hee   Kim, Jin Keun   Lee, Sang Soon   Han, Man Yop

### ABSTRACT

The IPC(Incremental Prestressed Concrete) which is gradually introducing the tensile force by tendons has been recently developed for reducing the effective depth of PSC bridges. As well known, concrete experiences long-term deformation such as creep and drying shrinkage, and the prediction of the long-term behavior of concrete bridges is essential for both safety and serviceability aspects. This paper analysed the long-term behavior of a continuous 2-span IPC girder bridge taking into consideration of creep, drying shrinkage and the time of tensile force introduction. As results, the shrinkage of slab concrete increases the negative moment at interior support, and the The difference of concrete ages between slab and girder increases the camber. The effect of initial tensile force is larger than the effect of secondary tensile force in the tendons.

### 1. 서 론

우리 나라에서는 대부분의 교량이 강교 또는 콘크리트교로 건설되고 있으며, 이들 콘크리트 교량 중 일부는 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 교량이다. 이러한 PSC 거더 교량의 유효깊이를 줄이기 위하여 긴장력을 단계적으로 도입하는 IPC(Incremental Prestressed Concrete) 공법이 최근에 제시되었다.<sup>(1)</sup>

잘 알려진 바와 같이 콘크리트는 장기변형, 즉 크리프와 수축현상이 장기간에 걸쳐 일어나며, PSC에 사용되는 긴장제도 응력이완이 장기간에 걸쳐 일어난다. 이러한 재료의 장기변형은 구조 부재에도 영향을 주어, 시간에 따라 구조물의 처짐뿐만 아니라 내부 응력에도 큰 변화를 준다. 따라서 장기간에 걸친 거동을 정확히 예측하지 못하면 구조물의 사용성 뿐만 아니라 안전성에도 문제를 일으킬 수 있다.

본 논문에서는 최근 제시된 IPC 공법을 이용하여 설계된 2경간 연속화 교량의 장기거동을 예측하기 위하여 여러 영향인자를 고려하여 해석하였다. 우선 사용된 해석방법을 간략히 정리하였고, 바닥판 콘크리트의 건조수축, 크리프, 긴장력 도입시간에 따른 영향 등을 고려하여 해석을 수행하였다.

\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과, 박사과정  
\*\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수  
\*\*\* 정회원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원  
\*\*\*\* 정회원, 아주대학교 토목설계공학과 교수

## 2. 시간의존적 해석 방법

시간의존적 단면해석을 위해 적층 단면법을 사용하였다. 적층 단면법이란 해석하고자 하는 단면을 유한 수의 층으로 나누어, 각 층의 변형률과 응력을 각각 산정한 후 전체 단면의 평형 조건을 고려하여 시간 의존적 거동을 분석하는 방법이다. 단면의 평형 조건을 만족시키고 이를 통한 중립축의 재결정을 위해 반복법(iteration method)이 사용되었다. 단면의 크리프 변형률을 구하는 알고리즘은 크리프 함수의 전개에 기본을 둔 1차 순환적 단계 알고리즘이 사용되었다. 응력의 재분배는 평형 조건과 적합 조건을 만족시키는 범위에서 발생하며, 중립축의 변화와 변형률의 변화로써 결정된다. 콘크리트의 건조수축에 의한 변형률은 단면의 깊이에 따라 일정하다고 가정하였고, 응력 변화이력에 영향을 받지 않으므로 각 모델식에서 제안하고 있는 식을 사용하였다. 긴장력의 효과는 하나의 보 요소내에 일정한 수의 긴장재가 존재한다고 가정하고 요소내의 각 긴장재는 직선이며 길이에 따라 일정한 단면과 긴장력을 갖는다고 가정하였다. 긴장력 도입후 각 긴장재의 변형률 증분은 긴장력 도입전 길이에 대한 현재와 전 해석시간에서의 긴장재 길이의 변화비로 계산하고 임의의 해석시간에서 전체 긴장재 변형률을 계산하여 긴장재 응력-변형률 관계로부터 응력을 계산하고 이 응력에 전단계 해석까지의 응력이완을 제한으로써 최종적인 긴장재의 응력을 계산하였다.

유한요소 해석을 수행하는 데 있어 수직축에 대칭인 단면을 갖는 평면 보 요소를 사용하였고, 변위법을 바탕으로 요소 강성행렬을 유도하였다. 강성행렬과 절점하중을 이용한 해석에 있어 하중 증분법과 반복법을 함께 사용하는 복합법이 사용되었다. 각 하중 단계에서의 수렴여부를 판단하기 위해 모든 절점 중에서 불균형 하중의 최대 수직력과 최대 모멘트를 구하여 각각의 수렴기준과 비교하는 방법을 사용하였다.

## 3. 해석교량의 모델링

본 연구에서 해석한 교량은 IPC 거더를 사용하는 2경간 연속화 교량이다. 교축방향으로 단면의 형상이 변하는 경우로 전체 교량형상은 그림 1과 같으며, 그림 2는 한 경간 내의 단면의 종류를 나타내고 있다. 그림 3은 주형의 모양으로 각 부분의 치수는 표 1에 나타내었다.

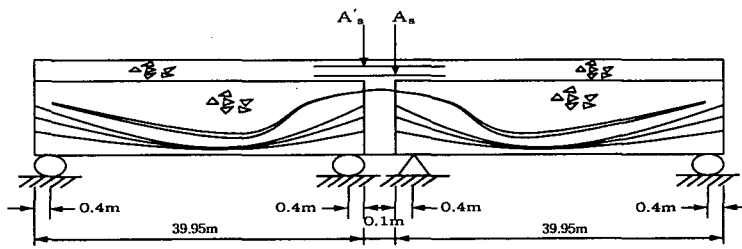


그림 1 IPC 거더 교량의 형상

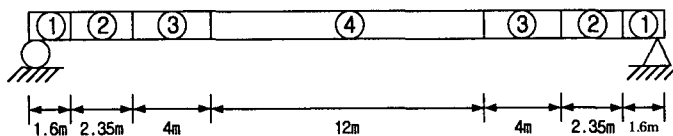


그림 2 한 경간내의 단면 종류

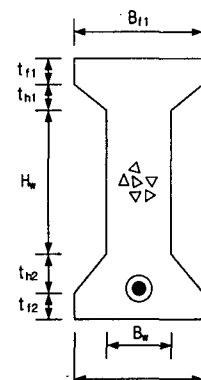


그림 3 주형 단면

표 1 단면 치수(cm)

| Sec. | Web            |                | Flange          |                 |                 |                 |                 |                 |
|------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|      |                |                | Upper           |                 |                 | Lower           |                 |                 |
|      | H <sub>w</sub> | B <sub>w</sub> | B <sub>f1</sub> | t <sub>f1</sub> | t <sub>h1</sub> | B <sub>f2</sub> | t <sub>f2</sub> | t <sub>h2</sub> |
| 1    | 170            | 90             | 120             | 10              | 3.3             | 90              | 0               | 0               |
| 2    | 146            | 72.8           | 120             | 10              | 7               | 90              | 20              | 7               |
| 3    | 138.5          | 314            | 120             | 10              | 8.9             | 90              | 20              | 12.6            |
| 4    | 140            | 20             | 120             | 10              | 5               | 90              | 20              | 15              |

표 2 긴장재 위치, 단면적, 긴장력(cm, cm<sup>2</sup>, kgf)

| 위치   | 높이     |        |        |        |        |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      | ①      | ②      | ③      | ④      | ⑤      |
| 0    | 25.5   | -18.5  | -62.5  | 72.5   | 72.5   |
| 160  | 8.2    | -29.6  | -67.4  | 70.5   | 70.5   |
| 395  | -17.1  | -45.9  | -74.6  | 58.4   | 66.6   |
| 795  | -52.3  | -68.4  | -84.6  | 12.7   | 32.2   |
| 1195 | -77.3  | -84.5  | -91.7  | -42.1  | -28.2  |
| 1595 | -92.4  | -94.2  | -96    | -75    | -64.4  |
| 1995 | -97.4  | -97.4  | -97.4  | -86    | -76.5  |
| 단면적  | 22.19  | 22.19  | 22.19  | 9.71   | 9.71   |
| 긴장력  | 286720 | 286720 | 286720 | 124500 | 124500 |

보는 횡방향으로 2.2m의 간격을 두고 배치되어 있고, 슬래브의 두께는 25cm로 가정하였다. 긴장재는 같은 재질로 위치에 따라 5개로 구분된다. 표 2는 각 긴장재 별 한 경간에서의 길이방향 위치와 주형과 슬래브를 포함한 높이의 1/2를 중심점으로 한 좌표축에서의 높이, 단면적과 작용 긴장력을 나타낸 것이다. 한 경간 내에서 대칭이 되게 배치되므로 보의 한쪽 끝에서 중심까지만 나타내었다. 1번부터 3번까지의 긴장재는 상판 슬래브의 타설전에 긴장되며, 4번과 5번 긴장재는 두 경간에 연속적으로 배치되는 것으로 슬래브 타설 이후에 긴장된다. 해석에 사용된 재료의 성질로 바닥판 콘크리트의 압축강도는 270 kgf/cm<sup>2</sup>, 주형 콘크리트의 강도는 400 kgf/cm<sup>2</sup>, 철근은 항복강도가 4000 kgf/cm<sup>2</sup>, 긴장재용 강재의 항복강도는 16294 kgf/cm<sup>2</sup>으로 해석에 이용하였다. 콘크리트의 극한 크리프 계수와 극한 건조수축 변형률은 각 영향을 고려하지 않는 경우 4.0과 400×10<sup>-6</sup>을 각각 사용하였고, 바닥판 슬래브의 철근량은 50.3 cm<sup>2</sup>이 사용되었다. 해석에 적용된 시공 공정은 주형 콘크리트 타설 후 30일 재령에서 1차 긴장력을 도입하고, 60일 재령에서 바닥판 슬래브가 타설되며, 90일 재령에서 2차 긴장력이 도입되는 것으로 하였으며, 시공공정을 변수로 하는 장기거동 해석도 수행하였다. 활하중은 장기거동 해석에서 제외하였다.

#### 4. 해석결과

##### 4.1 바닥판 콘크리트의 건조수축 효과

바닥판 콘크리트의 건조수축에 따른 IPC 거더 교량의 장기거동을 살펴보기 위하여, 바닥판 콘크리트의 극한 변형률 200×10<sup>-6</sup>, 400×10<sup>-6</sup>, 600×10<sup>-6</sup>에 대하여 해석을 수행하였다. 시간에 따른 내부 받침점에서의 모멘트와 솟음의 변화를 그림 3과 4에 나타내었다. 그림에서 dt는 초기 긴장력이 가해지는 재령 30일 이후 바닥판 슬래브가 타설되는 시점까지의 시간차이다. 2차 긴장력은 바닥판 슬래브가 타설된 후 30일 후에 도입한 것으로 해석하였다.

해석결과를 살펴보면 그림 4의 솟음 변화에서 볼 수 있듯이 바닥판 콘크리트를 타설할 때 바닥판 건조수축의 차이에 따른 솟음의 차이는 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 타설직 후 바닥판 콘크리트의 고정하중으로 인하여 처짐이 발생하였으며, 2차 긴장력이 가해진 후 다시 솟음이 회복되는 것을 알 수 있다. 바닥판 콘크리트의 극한 건조수축 변형률이 커짐에 따라 솟음의 크기가 다소 억제되는 것은 바닥판의 수축이 솟음 발생을 억제하는 효과가 있다는 것을 보여준다. 다음으로 건조수축에 따른 내부 받침부에서의 모멘트 변화를 살펴보면, 시간이 경과함에 따라 주형의 크리프 효과가 소멸되지 않고 지속적으로 나타나고 있다. 또한 바닥판 콘크리트의 극한 건조수축 변형률이 증가하게 되면서 부모멘트 쪽으로 모멘트가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 주형과 바닥판 콘크리트의 건조수축으로 인한 변형의 차이가 커지기 때문인 것으로 판단된다.

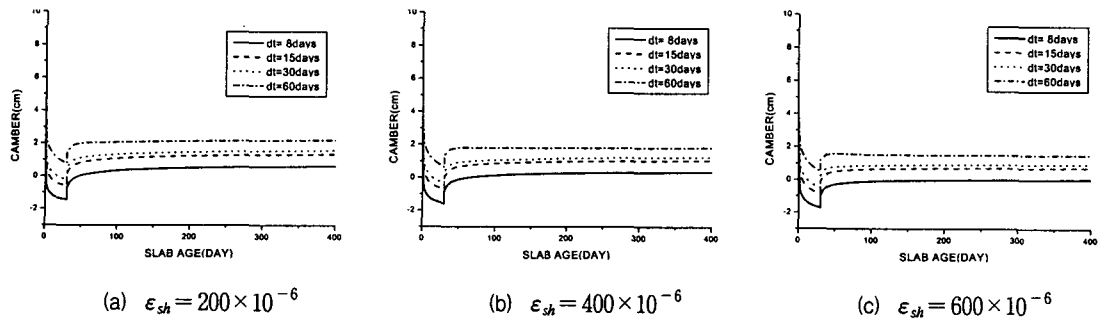


그림 3 슬래브 콘크리트의 극한 건조수축 변형률에 따른 솟음의 변화

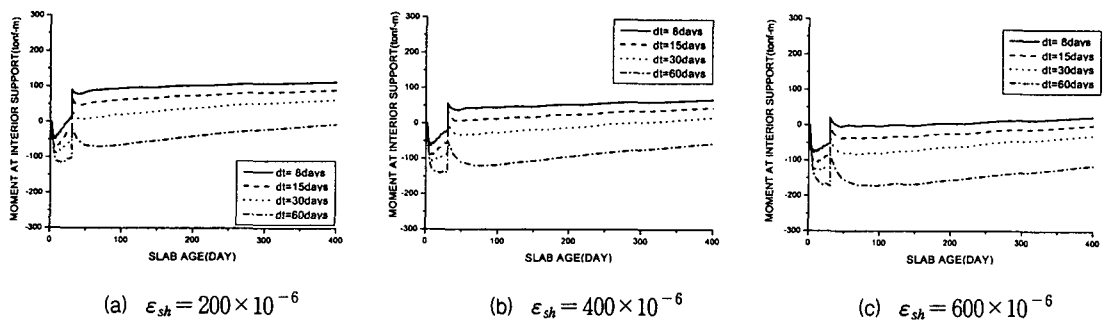
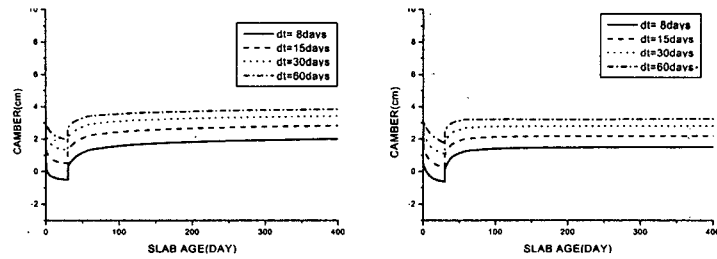


그림 4 슬래브 콘크리트의 극한 건조수축 변형률에 따른 내부 받침부 모멘트의 변화

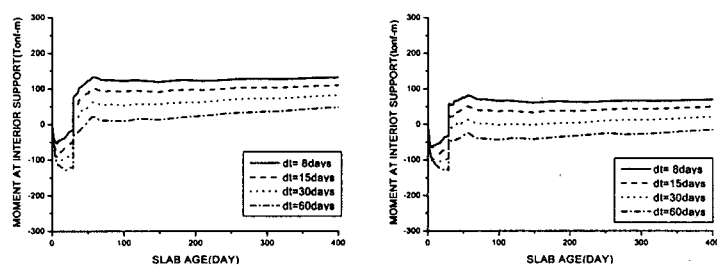
#### 4.2 크리프 효과

프리스트레스를 받는 교량에서의 솟음은 주형 콘크리트의 크리프에 의한 영향을 많이 받는다. 따라서 콘크리트의 크리프에 의한 교량의 거동을 알아보았다. 교량의 장기거동에 미치는 크리프의 영향을 알아 보기 위하여 극한 크리프 계수를 바닥판과 주형에 모두 2.0과 4.0으로 가정하여 해석하였다. 사용된 극한 건조수축 변형률은 바닥판과 주형 콘크리트에 대하여 모두  $400 \times 10^{-6}$ 을 사용하였다. 그림 5와 6은 바닥판이 타설된 직후부터의 해석결과를 나타낸 것이다. 그림 5에 솟음의 경우 바닥판과 주형의 재령차이가 클수록 솟음의 증가량이 더 크게 나타나고 있다. 이는 바닥판을 타설하게 되면 긴장력에 의한 상향력이 감소하기 때문에 바닥판이 늦게 타설되는 경우가 더 큰 솟음을 나타내게 된다. 1차 긴장력이 도입되고 바닥판이 타설되기 전까지의 솟음은 극한 크리프 계수가 큰 경우가 더 크게 나타난다. 바닥판이 타설된 후 2차 긴장력이 도입되기 전까지 솟음은 하향으로 발행하고 이 경우도 극한 크리프 계수가 큰 경우가 더 큰 하향 처짐을 유발한다. 따라서 그림 5에서 보듯이 바닥판 타설 후의 솟음은 극한 크리프 계수의 차이에도 불구하고 미비한 차이를 나타내고 있다. 또한 2차 긴장력이 가해지는 시점에서 주형 콘크리트는 강도가 거의 다 발현된 상태이기 때문에 크리프에 의한 영향이 초기재령에 비해 상대적으로 감소하는 것으로 판단된다. 그림 6은 극한 크리프 계수에 따른 모멘트 변화를 나타낸 것이다. 바닥판의 재령이 증가함에 따라 솟음의 증가 양상에도 모멘트의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 재령의 증가와 함께 바닥판 콘크리트의 건조수축 등으로 인한 주형과의 상대적 변형차이가 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 앞의 바닥판의 건조수축에 따른 영향의 해석결과와 마찬가지로 2차 긴장력은 부모멘트를 효과적으로 감소시키는 것으로 나타났다. 따라서 부모멘트에 의한 균열 또는 바닥판 타설 후 과도한 하향의 처짐이 문제가 되는 경우는 2차 긴장력을 빨리 도입하는 것이 바람직 할 것이다.



(a)  $\phi_u = 2.0$  (b)  $\phi_u = 4.0$

그림 5 콘크리트의 극한 크리프 계수에 따른 솟음의 변화

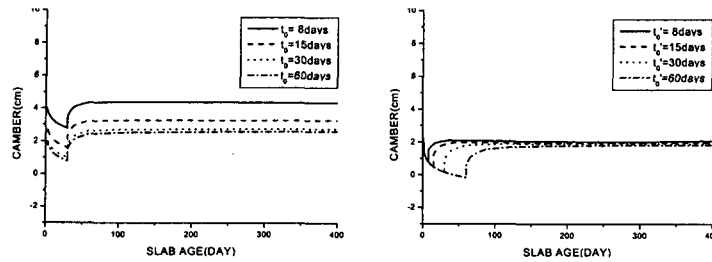


(a)  $\phi_u = 2.0$  (b)  $\phi_u = 4.0$

그림 6 콘크리트의 극한 크리프 계수에 따른 내부 받침부의 모멘트 변화

### 4.3 긴장력 도입시간의 효과

긴장력의 도입시간에 따른 효과를 알아보기 위해 1차 긴장력 도입 시기를 주형 콘크리트의 재령 8일, 15일, 30일, 60일로 변화시켜 해석을 수행해 보았다. 1차 긴장 후 30일이 지난 후 바닥판을 타설했으며, 60일 후 2차 긴장을 도입한 것으로 해석하였다. 그림 7(a)는 1차 긴장력 도입 시기의 변화에 따른 바닥판 타설 후 솟음의 해석결과이다. 여기에 나타난 솟음 변화의 경우 1차 긴장력 도입 직후 발생하는 솟음은 긴장력을 도입할 때 주형의 재령이 클수록 강성이 증가하므로 솟음은 작게 되고 또한 시간 의존적 변형도 감소하게 된다. 2차 긴장의 효과를 알아보기 위해 바닥판 타설 후 8일, 15일 30일, 60일에 2차 긴장력을 도입한 경우에 대해 해석을 수행하였으며, 이 경우 1차 긴장은 주형 제작 후 30일 재령에, 바닥판 타설은 60일에 이루어진 것으로 해석하였다. 해석결과는 그림 7(b)와 같다. 1차 긴장력의 도입시기에 따른 영향에 비해 솟음에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이는 2차 긴장력의 크기가 1차 긴장력에 비해 작고, 주형 콘크리트의 재령이 증가하여 강도를 완전히 발휘하고 난 후에 긴장된다는 점, 주형과 바닥의 복합거동으로 강성이 매우 증가했다는 점 때문일 것이다. 또한 바닥판 콘크리트의 초기 재령에선 건조수축량이 크기 때문에 2차 긴장력으로 인한 솟음 증가를 억제하는 효과가 크게 나타나고, 바닥판의 재령이 증가할수록 이 효과는 작게 나타났다.



(a) 1차 긴장력

(b) 2차 긴장력

그림 7 긴장력 도입 시기에 따른 솟음의 변화

## 5. 결론

지금까지 IPC 거더를 사용한 2경간 연속화 교량의 장기거동에 영향을 주는 여러 효과에 대해 알아보았으며, 본 연구의 결과로 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 바닥판 콘크리트의 건조수축의 시간에 따른 솟음의 변화에는 거의 영향이 없었으나 받침부 부모멘트는 시간에 따라 증가되었다.
- (2) 솟음의 경우 바닥판과 주형의 재령 차이가 클수록 솟음의 증가량이 더 크게 나타나고 있다. 이는 바닥판을 타설하게 되면 긴장력에 의한 상향력이 감소하기 때문에 바닥판이 늦게 타설되는 경우가 더 큰 솟음을 나타내게 된다.
- (3) 2차 긴장력은 받침부의 부모멘트를 효과적으로 감소시키는 역할을 한다.
- (4) 바닥판과 주형의 재령 차이가 클수록 부모멘트의 발생량이 큰 것으로 나타났다. 이는 주형과 바닥판의 재령 차이에서 나타나는 장기변형의 상대적인 차이가 크기 때문인 것으로 판단된다.
- (5) 긴장력 도입 시간에 따른 영향은 주형 콘크리트가 초기 재령에서 이루어지는 1차 긴장력에 의한 영향이 크게 나타나게 된다.

## 참 고 문 헌

1. 한만엽, 김진근, 이차돈, 박선규, "다단계 긴장법에 의한 IPC거더 개발", 아주대학교 보고서, 1992. 12.
2. Neville, A.M., "Properties of Concrete: Elasticity, Shrinkage, Creep", Longman, 1995, pp.412~481.1.
3. Bazant, Z.P., "Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method", ACI Structural Journal, No.69-20, 1972, pp.212~217.
4. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures", ACI 209 R-92(American concrete Institute, Detroit, 1992; minor update of the original 1972 version)
5. Neville, A.M., "Properties of Concrete: Elasticity, Shrinkage, Creep", Longman, 1995, p.412-481