

## 프리플렉스 합성형교의 내하력 평가에 관한 연구

### A Study on the Load Carrying Capacity Assessment of the Preflex Beam Bridge

채 원 규

Won-Kyu Chai

신구전문대학 토목과

#### ABSTRACT

In this thesis, the field test by truck load and the structural analysis were performed on a preflex beam bridge to investigate the load carrying capacity. From the field test and the structural analysis results, K(corrective factor) and  $P_n$ (load carrying capacity) of the preflex beam bridges were studied, and these factors were applied to the load carrying capacity assessment of the preflex bridges.

#### 1. 서론

프리플렉스 합성형교는 1949년 Belgium의 A. Lipski에 의해 처음 고안되었고, 1951년에서 1954년 사이에 설계법이 확립되어, 현재까지 세계 각국에 보급되어 교량, 건축물 등에 널리 이용되고 있는 특수 합성구조물이다.<sup>1)</sup>

이 프리플렉스 합성형교는 프리플렉스 보를 제작하는 과정에서, 추후 보의 내부에서 콘크리트에 프리스트레스를 주게 되는 강형에, 지간의 약 1/4점의 2개소에 프리플렉션 하중을 작용시킨후 하부 플랜지에 콘크리트를 타설하며, 콘크리트가 소정의 강도에 도달하였을 때 프리플렉션 하중을 제거함으로써 콘크리트에 프리스트레스를 도입시키는 공법이다.

국내에서는 1986년 대한토목학회 주간 하에 프리플렉스 합성형교에 대한 표준시방서 및 설계, 시공도서가 제정되어 설계 및 시공에 사용되고 있지만, 기존에 시공되어 있는 프리플렉스 합성형교의 안전도 평가에 사용되는 내하력 평가에 대한 자료는 미비한 실정이다.

이에 본 연구에서는 프리플렉스 합성형교에 대해 실동하중에 의한 재하시험과 구조해석을 수행하였으며, 이들 결과를 토대로 프리플렉스 합성형교의 내하력 평가를 검토하여, 앞으로 수행되는 프리플렉스 합성형교의 내하력 평가에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

#### 2. 도로교의 내하력 평가

구조물의 안전도란 구조물을 구성하고 있는 각 요소들의 다양한 특성과 외력으로 작용하고 있는 외부하중의 규모 및 발생빈도 등에 의해 복잡한 상관관계를 이루고 있어, 한두가지 방법의 간단한 접근방법에 의해 명확히 판별하기는 불가능하다. 다만 경험적 분석을 통한 현 상태의 제반결함에 대한 신중한 검토와 안전도 판별의 지표로서 보편적으로 사용되는 여러 종류의 세부지표들에 대한 검토로 정확한 판별을 피할 뿐이다. 현재 도로교에 사용되고 있는 안전도 평가계수는 다음과 같다.<sup>2), 3)</sup>

### 2.1. 합성작용계수

합성작용계수는 1에서 응답비를 뺀 수치를 나타내며 응답비와 마찬가지로 이론적인 거동과 실제거동과의 차이를 판별하는 지표가 된다. 이 계수가 클수록 구조물 주부재의 합성작용 및 횡법에 대한 격자거동으로 인한 구조강성이 크다고 유추할 수 있으며, 노후화된 구조물의 경우 부재 상호간의 합성거동이 소멸되어 합성작용계수는 상대적으로 작게 된다. 합성작용계수  $CAF$ 는 다음과 같다.

$$CAF = 1 - \frac{\sigma_M}{\sigma_C}$$

여기서,  $\sigma_M$ 은 정적 측정응력 또는 처짐,  $\sigma_C$ 는 정적 계산응력 또는 처짐이다.

### 2.2. 환산충격계수

일반적으로 노후화된 교량에서는 합성작용의 저하, 표면의 요철 및 신축이음부의 파손에 의한 부가 충격효과 등으로 인하여 활하중의 응답이 증가하게 되며, 이를 환산충격계수로 나타내어 교량의 노후도를 판정하는 지표로서 사용한다. 환산충격계수  $TIF$ 는 다음과 같다.

$$TIF = \frac{\sigma_{MD}}{\sigma_{MS}} - 1$$

여기서,  $\sigma_{MD}$ 는 측정에 의한 동적 최대응력(또는 처짐),  $\sigma_{MS}$ 는 측정에 의한 정적 최대응력(또는 처짐)이다.

### 2.3. 허용응력설계법에 의한 내하력 평가

허용응력설계법에 의한 공용내하력  $P_n$ 은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$P_n = P_L \times RF$$

$$RF = \frac{P_n}{P_L} = \frac{\sigma_a - \sigma_d}{\sigma_t} \times K$$

여기서,  $P_L$ 은 설계활하중,  $RF$ 는 내하률,  $\sigma_a$ 는 재료의 허용응력,  $\sigma_d$ 는 사하중 응력,  $\sigma_t$ 은 설계활하중에 의한 응력,  $K$ 는 내하력 보정계수이다.

또한 내하력 보정계수인  $K$ 는 다음과 같다.

$$K = K_s \times K_t \times K_r \times K_o$$

$$K_s = \frac{\sigma_C \times (1 + i_C)}{\sigma_M \times (1 + i_M)}$$

여기서,  $K_s$ 는 응력보정계수,  $K_t$ 는 교통상태에 따른 보정계수,  $K_r$ 은 노면상태에 따른 보정계수,  $K_o$ 는 기타 조건에 따른 보정계수,  $\sigma_C$ 는 정적 계산응력 또는 처짐,  $\sigma_M$ 은 정적 측정응력 또는 처짐,  $i_C$ 는 계산에 의한 충격계수,  $i_M$ 은 측정에 의한 환산충격계수이다.

## 2.4. 강도설계법에 의한 내하력 평가

강도설계법에 의한 공용내하력  $P_n$ 은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$P_n = P_L \times RF$$

$$RF = \frac{P_n}{P_L} = \frac{\varphi \times R_n - \gamma_D \times D_n}{\gamma_L \times L_n} \times K$$

여기서,  $P_L$ 은 설계활하중,  $RF$ 는 내하률,  $R_n$ 은 무손상단면의 실강도에 의한 추정 공칭강도,  $D_n$ 은 사하중에 의한 강도,  $L_n$ 은 설계활하중에 의한 강도,  $K$ 는 내하력 보정계수 이다. 한편  $\varphi$ ,  $\gamma_D$ ,  $\gamma_L$  등은 저항 및 하중관련 안전모수로서 도로교시방서의 안전규정에 따라  $\varphi = 0.85$ ,  $\gamma_D = 1.3$ ,  $\gamma_L = 2.15$ 를 사용하고 있다.<sup>4)</sup>

## 2.5. 내하력 평가 등급

앞 절에서 언급된 내하력 평가 계수들을 요약 정리하여, 이에 따른 내하력 평가 등급을 나타내면 Table 1과 같다.

Table 1. Graded list of capacity load of highway bridges.

|           | CAF                  | TIF                  | RF                    | $P_n$                | Counterplan            |
|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
| Good      | $CAF \geq 0.5$       | $TIF \leq 0.2$       | $RF \geq 1.0$         | $P_n \geq 24$        | Periodical observation |
| Common    | $0.3 \leq CAF < 0.5$ | $0.2 \leq TIF < 0.3$ | $0.75 \leq RF < 1.0$  | $18 \leq P_n < 24$   | Repair                 |
| Poor      | $0.1 \leq CAF < 0.3$ | $0.3 \leq TIF < 0.4$ | $0.57 \leq RF < 0.75$ | $13.5 \leq P_n < 18$ | Repair, reinforcement  |
| Very poor | $CAF < 0.1$          | $TIF > 0.4$          | $RF < 0.57$           | $P_n < 13.5$         | Reconstruction         |

## 3. 프리플렉스 합성형교에 대한 구조해석

본 연구에서는 프리플렉스 합성형교에 대한 구조해석의 대상구조물을 준공후 약 5년이 경과된 3경간 연속 프리플렉스 합성형교로 하였다.

### 3.1 개요

본 연구에서는 프리플렉스 합성형교의 사하중, 활하중 및 프리플렉션 하중에 의한 단면력을 산출하기 위하여 프리플렉스 빔 1개소에 대한 구조해석을 수행하였으며, 해석 프로그램은 가장 널리 사용되는 범용 구조해석 프로그램인 SAP 90을 사용하였다.

### 3.2 해석 모델링 및 단면특성

본 연구의 대상구조물은 3경간 연속 프리플렉스 합성형교로서, 교량의 실거동을 파악하기 위하여 연속되는 3경간을 고려하여 총절점수 78개, 총부재수 77개의 빔요소로 모델링하여 구조해석을 실시하였다. 교축방향의 단면은 프리플렉스 주형과 공유하는 슬래브를 1개의 거더로 이상화하였으며, 지점조건은 구조물의 실제 받침조건에 맞게 힌지 또는 로울러지점으로 모델링하였다.

구조해석에 사용된 재료의 특성치는 도로교 표준시방서 및 원설계도서를 참조하였으며, Table 2에 재료상수를 정리하였다.<sup>1)</sup>

Table 2. Material property.

|                                  |              |                         |         |
|----------------------------------|--------------|-------------------------|---------|
| Compressive strength of concrete | Slab, web    | 270 kg/cm <sup>2</sup>  | -       |
|                                  | Lower flange | 400 kg/cm <sup>2</sup>  | -       |
| Yield strength of reinforcement  | Slab, web    | 4000 kg/cm <sup>2</sup> | SD 40   |
|                                  | Lower flange | 3000 kg/cm <sup>2</sup> | SD 30   |
| Yield strength of steel          | girder       | 3600 kg/cm <sup>2</sup> | SWS 53B |

교축방향의 프리플렉스 주형의 경우에는 길이방향에 따라 상, 하부 플랜지 두께의 변화가 있었기 때문에 각기 다른 단면계수를 적용하였으며, 교축직각방향의 거더는 가로보와 슬래브의 횡방향부재를 적용하였다. Table 3에 구조해석에 적용한 부재들의 단면상수를 정리하였다.

Table 3. Sectional property.

| Size of steel girder [mm]   | Location of girder | Area [m <sup>2</sup> ] |         |         | Moment of inertia [m <sup>4</sup> ] |         |         |
|---|--------------------|------------------------|---------|---------|-------------------------------------|---------|---------|
|   |                    | Concrete               | Steel   | Total   | Concrete                            | Steel   | Total   |
| Upper flange ① : 300×23<br>Web : 842×15                             | Outside girder     | 1.17750                | 0.02643 | 1.38894 | 0.17997                             | 0.00333 | 0.21378 |
| Lower flange ① : 300×23   | Inside girder      | 1.24000                | 0.02643 | 1.45144 | 0.18511                             | 0.00333 | 0.22002 |
| Upper flange ① : 600×23<br>② : 300×23<br>Web : 842×15               | Outside girder     | 1.17750                | 0.05403 | 1.60974 | 0.17997                             | 0.00906 | 0.26510 |
| Lower flange ① : 300×23<br>② : 600×23                               | Inside girder      | 1.24000                | 0.05403 | 1.67224 | 0.18511                             | 0.00906 | 0.27227 |
| Upper flange ① : 400×23<br>② : 600×23<br>③ : 300×23<br>Web : 842×15 | Outside girder     | 1.17750                | 0.07473 | 1.77534 | 0.17997                             | 0.01378 | 0.30854 |
| Lower flange ① : 300×23<br>② : 600×23<br>③ : 500×23                 | Inside girder      | 1.24000                | 0.07473 | 1.83784 | 0.18511                             | 0.01378 | 0.31650 |

### 3.3 구조해석 결과

구조해석을 수행한 결과로서 프리플렉션 하중, 사하중, 설계활하중에 의한 최대 휨모멘트 값, 최대 전단력값 및 최대 처짐값을 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Structural analysis results.

| Load case        | Bending moment [t · m] | Shear force [ton] | Displacement [mm] |
|------------------|------------------------|-------------------|-------------------|
| Preflexion force | -506.06                | -76.82            | -53.00            |
| Dead load        | 470.24                 | 66.37             | 46.74             |
| Live load        | 82.50                  | 26.50             | 7.19              |

### 3.4 휨응력 산출

Table 3의 구조해석 결과를 토대로 프리플렉션 하중, 사하중, 설계활하중에 의한 프리플렉스 합성형교의 주형 콘크리트 하단부와 주형 강재 하단부의 휨응력을 정리하여 Table 6에 나타내었다.

Table 6. Calculated bending stress.

| Load combination                         | Bending stress of concrete at lower flange [kg/cm <sup>2</sup> ] | Bending stress of steel at lower flange [kg/cm <sup>2</sup> ] |
|--|--|---|
| Preflexion force                         | -123.797   | -855.816  |
| Dead load                                | 115.035  | 797.239   |
| Live load                                | 20.182   | 139.080   |
| Preflexion force + dead load             | -8.762   | -60.577   |
| Preflexion force + dead load + live load | 11.420   | 78.503  |

[Note : Allowable tensile bending stress of concrete at lower flange is 40 kg/cm<sup>2</sup> and allowable compressive bending stress of concrete at lower flange is -160 kg/cm<sup>2</sup>]

#### 4. 프리플렉스 합성형교의 내하력 산출

본 연구에서는 실동하중에 의한 정적재하시험의 결과인 실측치와 비교하기 위한 이론치에 대한 구조해석을 수행하였다. 구조해석시 교량의 실거동을 파악하기 위하여 연속되는 3경간을 고려하여 총절점수 384개, 총부재수 698개의 격자요소를 갖는 3차원으로 모델링하여 해석을 실시하였다. 교축방향은 프리플렉스 주형과 공유하는 슬래브를 1개의 거더로 이상화하였으며, 교축직각방향은 가로보와 슬래브를 1개부재로 이상화하여 횡방향부재로 구성하였다. 모델링은 Fig. 1에 나타내었다.

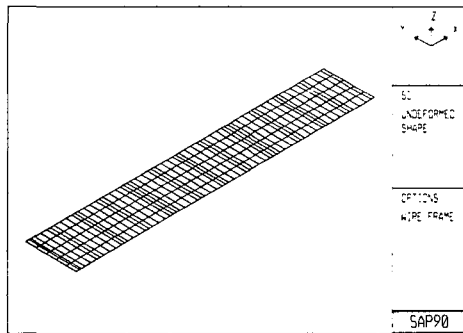


Fig. 1 Modeling of preflex beam bridge.

실동하중에 의한 실측치와 구조해석에 의한 이론치의 비교에 의해 산출된 대상구조물의 대표적인 보정계수 값을 나타내면 Table 7과 같다. Table 7의 결과 중 휨응력과 전단응력에 대한 실측 충격계수는 처짐에 대한 환산충격계수를 사용하였다.

Table 7. Corrective factor by field test.

| Member force                                     | Calculated value | Measured value | K <sub>s</sub> |
|--|------------------|----------------|----------------|
| Tensile stress of concrete [kg/cm <sup>2</sup> ] | 13.93            | 1.74           | 7.960          |
| Shear stress of concrete [kg/cm <sup>2</sup> ]   | 2.76             | 1.09           | 2.518          |
| Displacement [mm]                                | 4.51             | 5.57           | 0.805          |
| Impact factor                                    | 0.214            | 0.221          | -              |

Table 7의 결과에서 산출된 실측 보정계수의 최소값은 처짐에 대한 것으로서 0.805로 나타났으며, 이 결과에서 프리플렉스 합성형교는 처짐에 대해 가장 취약함을 알 수 있었다. 이 보정계수를 이용하여 허용응력설계법에 의한 프리플렉스 합성형교의 공용내하력을 계산하면 Table 8과 같다.

Table 8. Load carrying capacity assessment of the preflex beam bridges.

| Name of variables  | Results                     |
|--|-----------------------------|
| Bending stress of concrete by dead load ( $\sigma_d$ )       | 115.035 kg/cm <sup>2</sup>  |
| Bending stress of concrete by preflexion load ( $\sigma_p$ ) | -123.797 kg/cm <sup>2</sup> |
| ( $\sigma_d$ ) - ( $\sigma_p$ )                              | -8.762 kg/cm <sup>2</sup>   |
| Allowable bending stress of concrete ( $\sigma_a$ )          | 40.0 kg/cm <sup>2</sup>     |
| Bending stress of concrete by live load ( $\sigma_l$ )       | 20.182 kg/cm <sup>2</sup>   |
| Minimum corrective factor (K)                                | 0.805                       |
| Load carrying capacity factor (RF)                           | 1.595                       |
| Load carrying capacity (P <sub>N</sub> )                     | DB-38.3                     |

Table 8의 프리플렉스 합성형교의 내하력 평가 결과에서, 프리플렉션 하중에 의한 응력은 사하중에 의한 응력보다 크게 나타나 프리플렉스 합성형교의 내하력과 공용내하력의 증가에 크게 기여함을 알 수 있다. 이러한 결과에 의해 대상 프리플렉스 합성형교는 응력보정계수가 1보다 적은 0.805임에도 불구하고, 프리플렉션 하중에 의한 응력이 사하중에 의한 응력을 대부분 상쇄시킴으로써 공용내하력이 설계활하중 보다 크게 나타남을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 프리플렉스 합성형교의 안전도 평가에 사용되는 내하력 평가를 위하여 프리플렉스 합성형교에 대해 실동하중에 의한 재하시험과 구조해석을 수행하였으며, 이들 결과를 토대로 프리플렉스 합성형교의 내하력 평가를 검토하여 앞으로 수행되는 프리플렉스 합성형교의 내하력 평가에 대한 기초자료를 제공하고자 하였다.

본 연구에서는 먼저 프리플렉스 빔 1개소에 대한 구조해석을 빔요소에 의해 수행하여 프리플렉스 합성형교의 사하중, 활하중 및 프리플렉션 하중에 의한 단면력을 산출하였으며, 대상구조물을 3차원 격자요소로 모델링하여 구조해석한 결과에서 얻은 이론치를 실동하중에 의한 정적재하시험의 결과인 실측치와 비교하여 응력보정계수를 산출하였다.

본 연구에서 대상으로한 프리플렉스 합성형교에서는 처짐에 대한 응력보정계수가 휨응력 및 전단응력에 대한 응력보정계수보다 적게 나타나 프리플렉스 합성형교가 처짐에 대해 가장 취약함을 알 수 있었다.

이상의 결과를 토대로한 허용응력설계법에 의한 프리플렉스 합성형교의 내하력 평가 결과에서, 프리플렉션 하중에 의한 응력은 사하중에 의한 응력을 대부분 상쇄시킴으로써 프리플렉스 합성형교의 내하력과 공용내하력을 증가시키는데 크게 기여함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. “철근콘크리트 설계편람(II),” 사단법인 대한토목학회, 1991년 4월, pp. 547~550.
2. “교량관리체계개선,” 건설교통부, 1995년 5월, pp. 501~510.
3. “콘크리트 표준시방서,” 사단법인 대한토목학회, 1996년 6월, pp. 326~332.
4. “도로교 표준시방서,” 사단법인 대한토목학회, 1996년 5월, pp. 73~82.