

외부 후긴장된 PSC보 교량의 해석방법

Analysis of PSC Beam Bridges Strengthened by External Post-Tensioning Method

김 광 수^{*} 박 선 규^{**} 김 형 열^{***} 전 찬 기^{****}

Kim, Kwang Soo Park, Sun Kyu Kim, Hyeong Yeol Jeon, Chan Ki

ABSTRACT

An improved finite element modeling technique is proposed for the assessment of load carrying capacity of partially prestressed concrete beam bridges. Based on the finite element method of analysis, shell and frame elements are utilized to model the slab and beams of the superstructure, respectively. In the modeling of superstructure, the emphasis is placed on the use of rigid link between the middle surface of slab and mid-plane of beam. This paper also includes the comparison of three different equations that used in the calculation of effective moment of inertia for the partially prestressed concrete beams. Numerical analysis is performed for the unstrengthened and strengthened bridges. The obtained results are compared with those of load test for a prototype bridge. Agreement with the numerical solutions by using the proposed method and load test results is generally excellent.

1. 서론

현재 우리 나라의 산업기반시설 중에서 주요한 시설물중에 하나가 바로 교량이다. 이러한 중요 시설물인 교량은 공용년수의 증가와 초과하중 그리고 환경적인 원인 등에 의해서 손상을 받게 되고 구조적인 기능이 본래의 기능에 비해 약화되기 때문에 교량을 가설 한 이후에도 지속적이고 적절한 보수와 보강을 통하여 수명연장과 더불어 안전성 및 사용성을 확보하여야 한다.

본 연구에서는 PSC보 교량의 휨 내하력 산정을 위하여 유효환산단면2차모멘트를 보다 정확히 산정하는 방법과 유효요소 모델링방법에 대하여 연구하였다. 상부구조의 바닥판과 보는 각각 쉘과 뼈대요소를 사용하여 모델링을 하였으며, 모델링방법은 다음 세가지로 구분하여 적용하였다.

첫 번째 방법은 바닥판과 보를 합성단면으로 가정하여 합성단면보를 뼈대요소로 모델링하고 바닥판은 쉘요소로 모델링하는 방법이다. 두 번째는 비합성단면 즉, 바닥판을 제외한 보만을 뼈대요소로 모델링하고 바닥판은 쉘요소로 모델링하는 방법이다. 위의 두 가지 모델링방법은 기존에 PSC보 교량의 해석에서 가장 일반적으로 적용하는 모델링방법으로서 뼈대요소와 쉘요소는 모두 바닥판의 중립축에

* 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

** 정회원, 성균관대학교 토목공학과 조교수

*** 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

**** 정회원, 시립인천전문대학 토목공학과 부교수

위치하도록 배치한다.

새 번째 모델링방법은 본 연구에서 제안하는 방법으로서 상부구조의 바닥판과 보를 각각 셸과 뼈대 요소를 사용하여 모델링을 하고, 바닥판과 보의 중립축 사이를 Rigid Link 요소로 연결하는 모델링방법이다. 이 모델링방법에서는 바닥판과 보의 독립적인 거동은 물론 상호작용이 상부구조의 거동 해석에 고려될 수 있다.

본 연구에서는 모델링방법에 대한 연구 이외에 기존의 다른 연구자들이 제안한 유효환산단면2차모멘트 산정공식들을 사용하여 PSC보의 단면성질을 비교적 정확하게 반영할 수 있도록 하였으며, 구조 해석을 통하여 실제교량의 하중재하실험 결과와 비교 분석하고 뼈대요소를 이용한 격자모델링 해석결과도 본 연구의 결과와 비교하였다.

2. PSC보 교량의 해석기법 고찰

2.1 2차원 격자해석

2차원 격자해석법은 보와 가로보 또는 격벽을 격자로 연결하여 상부구조 거동을 해석하는 방법으로써 Lightfoot와 Sawko에 의해서 처음으로 개발되었던 고전적인 방법이다. 해석에서 상부구조의 종방향의 휨 강성은 종방향부재로 고려되며, 횡방향 휨 강성은 바닥판의 강성으로 나타낼 수 있다.

PSC보 교량에서는 내측보와 외측보의 중립축의 위치가 다를 수 있으며 종방향에 대해서도 바닥판과 격벽의 합성단면에 대한 부재의 중립축의 위치가 다를 수 있다. 그러나 2차원 격자해석에서는 모든 부재의 중립축이 격자절점에서 일치하여야 하기 때문에 각 부재에 있어 중립축의 차이를 해석에 고려할 수 없는 단점이 있다.

2.2 3차원 격자해석

3차원 격자해석법에서는 중립축이 서로 다른 부재들로 구성되는 상부구조를 격자모델로 구성하기 위하여 각 부재의 중립축에 있는 절점 사이를 Rigid Link 요소로 연결한다.

이 방법으로 모델링을 하는 경우 평면에 대해서는 위에서 언급된 2차원 격자와 동일한 요소망으로 구현 되지만 횡방향 부재들은 격벽이나 가로보와 바닥판의 위쪽과 아래쪽에 있는 각각의 중립축이 원 위치에 일치하도록 배치한다.

2.3 셸요소와 뼈대요소를 이용한 모델링

2.3.1 합성, 비합성보의 모델링

본 연구에서 모델링에 적용한 셸요소는 4절점 직사각형 셸요소로서 절점당 6개의 자유도 ($u, v, w, \theta_x, \theta_y, \theta_z$)를 갖는다.

바닥판을 셸요소를 사용하여 모델링하는 방법은 PSC보가 바닥판과 일체거동을 하는가, 그렇지 않은가에 따라서 합성보 단면, 비합성보 단면 두 가지로 모델링하여야 한다. 그러나 합성작용에 대해서는 현장실험이 필요하므로 일반적으로는 이 두 가지 경우의 해석방법을 각각 수행하여 평균값을 사용하기도 한다.

그림 1은 합성단면과 비합성단면의 두 가지 경우에 대한 요소의 구성을 나타내며 합성단면이나 비합성단면의 강성은 뼈대요소로 모델링하고 바닥판은 셸요소로 모델링하였다. 그림 1에서는 뼈대요소

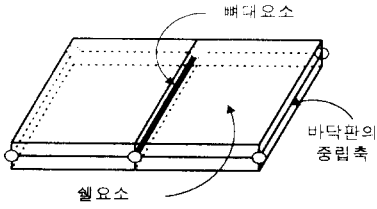


그림 1. 합성, 비합성 단면에 대한 모델링

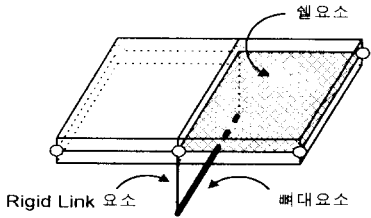


그림 3. Rigid Link를 사용한 모델링요소

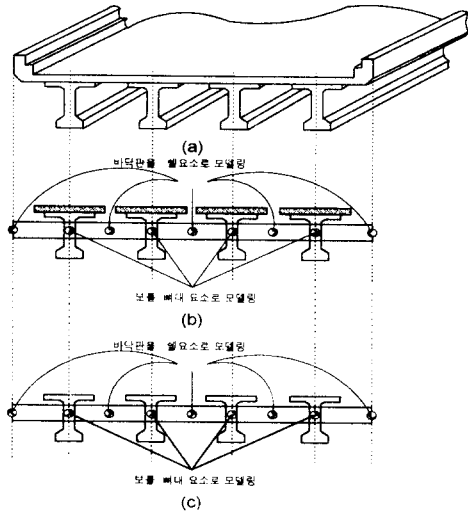


그림 2. 합성, 비합성교량의 모델링방법

와 셀요소가 같은 중립축 위치에 배치하여 평면 모델링을 수행한 그림을 나타낸다. 여기서 배대요소는 합성단면일 경우는 합성단면의 강성을 갖는 배대요소로 그리고 비합성단면일 경우는 비합성단면, 즉 바닥판을 제외한 거더만의 강성을 갖는 배대요소로 모델링할 뿐 구성요소의 배치는 일치한다.

그림 2는 보가 4개인 PSC보 교량의 모델링방법을 나타내고 있으며, 그림 2(b)는 합성단면 그리고 그림 2(c)는 비합성단면을 배대요소를 사용하여 모델링하는 방법을 나타내고 있다.

2.3.2 Rigid Link 모델링

본 연구에서 제안하는 모델링방법은 그림 3과 같이 바닥판은 셀요소로 보는 배대요소로 모델링하므로 그림 2와 유한요소 이산화 방법은 같으나, 바닥판의 중립축과 보의 중립축을 Rigid Link요소를 사용하여 연결하는 모델링방법을 나타내고 있다.

본 연구에서 바닥판은 등방성으로 가정하였으므로 탄성거동에 대한 비틀림강성의 표현은 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 비틀림을 받는 바닥판의 거동을 그림 4에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 t_{xy} &= - \frac{Ed^3}{(1+\nu)12} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \\
 &= - \frac{Gd^3}{6} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \\
 &= - cG \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \dots\dots\dots \text{식(1)}
 \end{aligned}$$

여기서, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$; 전단탄성계수, d = 슬래브 두께,

ν = 포아송비, $c = \frac{d^3}{6}$; 단위폭당 유효 비틀림상수.

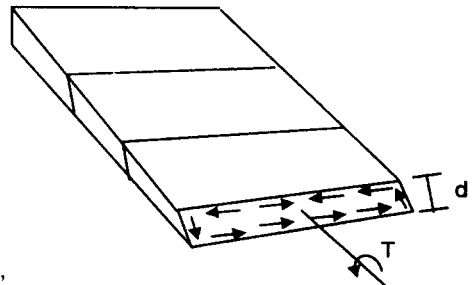


그림 4. 비틀림이 작용하는 바닥판

그림 5는 셸요소, 뼈대요소, 그리고 Rigid Link 요소를 사용하여 PSC보 교량의 상부구조를 모델링한 것을 나타내고 있다.

본 논문에서는 본 절에서 설명한 세 가지 모델링 방법을 적용하여 구조해석을 수행하였으며 각각의 모델링방법에 따른 해석결과는 실제 PSC보 교량에 하중 재하 측정값과 비교하여 분석하였다.

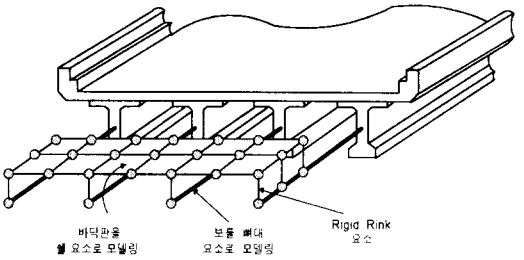


그림 5. Rigid Link 요소를 사용한 실험교량의 모델링

3. 유효환산단면2차모멘트

본 연구에서는 균열이 발생한 PSC보 교량의 유효환산단면2차모멘트를 산정하기 위하여 다음과 같은 3가지 유효환산단면2차모멘트 산정공식을 적용하였다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad \text{식(2)}$$

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^4 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^4 \right] I_{cr} \leq I_g \quad \text{식(3)}$$

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \frac{M_{cr}}{M_a} \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right)} \leq I_g \quad \text{식(4)}$$

여기서,

- M_{cr} : 균열모멘트
- M_a : 사용하중하에서의 최대모멘트
- I_g : 콘크리트 총 단면에 대한 단면 2차모멘트
- I_{cr} : 균열 환산단면 2차모멘트
- I_e : 유효 환산단면 2차모멘트

식(2)는 PSC보의 사용성을 검토할 때 적용하도록 콘크리트표준시방서에서 규정하고 있는 식이며, 식(3)은 Branson과 Trost가 파설 프리스트레스트 콘크리트보 모델에서 하중-처짐 관계를 수치적분을 통하여 유도한 이론식이다. 식(4)는 Alameh와 Harajili가 균열이 발생한 PSC보에 철근의 슬립(Slip)을 고려하여 유도한 이론식이다.

위의 세가지 산정공식으로 구한 유효환산단면2차모멘트를 PSC보의 해석에 적용하고, 그 결과를 보의 축소모형체의 실험결과와 비교한 연구는 참고문헌 (1)에 잘 정리되어 있다. 참고문헌 (1)에 따르면, 식(4)을 적용하여 해석한 결과가 축소모형체 결과와 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다.

4. 재하실험 및 보강공법

재하실험을 수행한 실제 PSC보 교량은 설계활하중이 DB-18이고 1982년 준공된 교량이다. 교량의 경간장은 30.0m이고 총 폭은 8m이나 난간과 보도의 연석을 제외한 차량의 통행이 가능한 유효폭은 6.8m이다. 재하실험에서는 처짐량을 측정하기 위하여 하중재하 위치를 6가지로 구분하여 재하 하였으나, 본 논문에서는 그중 재하차량의 오른쪽 뒷바퀴를 측정대상 주형 경간장의 1/2에서 연석으로부터 1m 떨어진 곳에 위치하도록 재하하여 측정된 결과를 비교하였다.

4.1 보강방법

정적측정의 새하위치는 균열과 처짐이 가장 크게 발생한 구간을 대상으로 하였으며, 본 실험 대상교량의 경우 중차량의 통과와 교통량의 증가 등으로 인하여 균열이 많이 발생한 상태이다. 실험 교량은 정적측정이 완료된 이후에 외부 후긴장(External Post-tensioning)공법으로 다음과 같이 보강하였다.

그림 6은 본 연구에서 실험한 교량의 단면을 나타내며 지점으로부터 11m지점에 새들(saddle)을 설치하여 외부 후긴장력을 도입하였으며 긴장재에 작용하는 긴장력은 최대 128ton이었다.

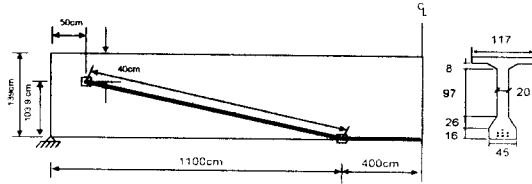


그림 6. 새하실험교량의 보 단면제원

4.2 해석방법

새하실험 대상교량은 보강되기 전과 외부 후긴장으로 보강된 후로 구분하여 해석하였다. 해석에 적용한 모델링방법은 2차원 격자해석법과 3차원 격자해석법 그리고 제 2.3절에서 언급한 3가지 모델링방법이다. 구조해석은 범용유한요소해석 프로그램을 사용하여 수행하였다.

또한 균열이 발생 한 PSC보의 휨강성을 보다 정확하게 산정할 수 있는 단면계수 산정공식을 확인하기 위하여, 기존의 세가지 유효환산단면2차모멘트 산정공식을 적용하여 해석하였고 그 결과를 실험결과와 비교·분석 하였다.

5. 해석 및 실험결과 분석

그림 7은 보강전 교량에 대한 해석결과를 나타내고 있다. 그림에서 처짐량은 교량의 최외측 보에서 발생한 처짐을 나타내며, M1, M2, M3, M4, M5는 모델링방법을 나타내는 기호로서 각각 다음과 같다.

- M1 : 뼈대요소를 이용한 2차원 격자모델링
- M2 : 뼈대요소를 이용한 3차원 격자모델링
- M3 : 보는 뼈대요소로 바닥판은 쉘요소로 모델링(합성단면),
- M4 : 보는 뼈대요소로 바닥판은 쉘요소로 모델링(비합성단면)
- M5 : 쉘과 뼈대요소를 Rigid Link로 연결

모델링방법에 따른 해석결과를 분석하면, 2차원 및 3차원 격자모델링방법에 의해 산정된 처짐값은 실측값 보다 처짐량을 과다하게 산정하고 있다. 이는 바닥판의 거동을 단순화하여 모델링한 격자모델링방법은 상부구조의 거동을 제대로 반영하지 못하고 있는 것으로 사료된다. 기존에 PSC보 교량의 해석에 적용하고 있는 쉘과 뼈대요소를 이용한 모델링방법에 의한 결과 또한 실측값 보다 크게 산정됨을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 제안한 Rigid Link를 사용한 모델링 방법에 의한 해석결과는 실측값과 비교적 잘 일치하고 있다. 이는 하중을 받고 있는 바닥판과 보의 상호작용이 Rigid Link를 통하여 해석에 고려되기 때문으로 판단된다.

그림 8은 외부 후긴장공법으로 보강된 PSC보 교량에 대한 해석결과를 나타내고 있다.

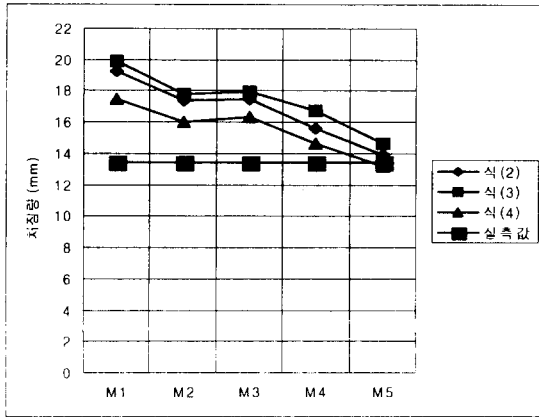


그림 7. 모델링방법에 따른 보의 처짐 (보강전)

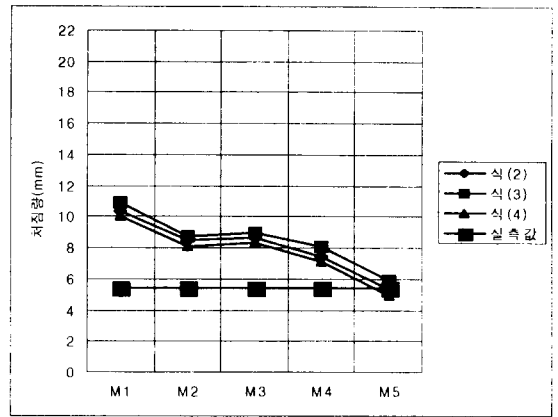


그림 8. 모델링방법에 따른 보의 처짐 (보강후)

6. 결론

본 논문에서 PSC보 교량의 내하력을 보다 정확하게 산정할 수 있는 유한요소 모델링방법에 대하여 연구하였고 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) PSC보 교량의 해석에서는 바닥판의 거동을 단순화하여 뼈대 요소로 격자모델링하는 방법보다는 바닥판을 쉘요소로 모델링하는 방법이 적합하다고 판단된다. 전반적으로 2차원 격자모델링방법으로 구한 처짐값이 실측값은 물론 다른 방법으로 구한 처짐값 보다 크게 산정되고 있다.
- (2) PSC보 교량의 바닥판과 보를 각각 쉘요소와 뼈대요소로 모델링하는 방법 중에서 기존에 적용하는 방법 보다는 본 연구에서 제안한 모델링방법으로 해석한 결과가 실측값에 근접하는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 바닥판과 보의 중립축 사이를 Rigid Link로 모델링하는 경우, 바닥판과 보의 상호작용이 거동해석에 고려되기 때문으로 사료된다.
- (3) PSC보 교량에 대한 실험결과와 기존의 유효환산단면2차모멘트 산정공식에 의한 결과를 비교 분석한 결과 Alameh와 Harajili가 제안한 산정공식으로 구한 처짐값이 실측값과 가장 잘 일치하였다.
- (4) 본 연구에서 제한적 범위하에서 도출한 연구결과에 따르면 단순지지된 파설프리스트레스트 콘크리트보 교량의 휨 내하력 산정에서는 본 연구에서 제안한 유한요소 모델링방법과 Alameh와 Harajili가 제안한 단면계수 산정공식을 조합·적용하는 것이 바람직한 것으로 조사되었다.

참고 문헌

1. 김광수, "PSC보 교량의 단면계수 산정과 해석기법에 관한 연구", 토목학회 학술발표회 논문집(I), 1998, pp. 171~174.
2. 한만엽, "당정고가교의 보강방안 및 보강 후 내하력평가 연구", 아주대학교 토목기술연구센터, 1997.
3. 건설교통부, "신설 및 노후 교량구조물의 개선된 내하력 평가시스템 및 보수기법 개발", 쌍용양회공업(주), 1996.
4. Hambly, E. C., *Bridge deck behaviour*, 2nd Ed., E & FN SPON, 1991.
5. Lightfoot, E. and Swako, F., "Structural frame analysis by electronic computer: grid frameworks resolved by generalised slope deflection," *Engineering*, 18-20, 1959.
6. Branson, D. E. and Trost, H., "Application of the I-effective Method in Calculating Deflections of Partially Prestressed Members," *PCI*, Vol. 27, No. 5, 1982, pp. 62~68.
7. Harajili, M. H. and Alamed, A. S., "Deflection of Progressively Cracking Partially Prestressed Concrete Flexural Members," *PCI*, Vol. 34, No. 3, 1989, pp.110~114.