

P.S.C 거더 교량의 적정 가로보 설계

An Optimal Design of Cross Beam of P.S.C Girder Bridge

최 창 근* 김 경 호 ** 이 계 회***
Choi, Chang-Koon Kim, Kyeong-Ho Lee, Gye-Hee

ABSTRACT

A three-dimensional finite element dynamic analysis was conducted to evaluate the effects of reducing cross beams from a simply supported straight P.S.C girder bridge. Two analyses were performed on the P.S.C girder bridge; one with 7 cross beams which is commonly used as current standard, and the other with 3 cross beams. A frequency analysis was conducted first in order to establish the dynamic characteristics of the bridge and determine an appropriate time step to use in the time history analyses. To assess the function and effectiveness of the cross beams, time history analysis was conducted for aforementioned two analysis cases. In the analysis, the complete model was subjected to a loading condition corresponding to the one passing truck loading. Several results of deflection, bending moment and shear forces were compared for two cases. From the analysis results, reduction of cross beams was found to have only a minimum effect on the response of the bridge. The maximum deck slab bending moment was found to decrease. This decrease should result in smaller flexural crack widths in the deck slab, which may lead to an improved deck performance.

1. 서 론

P.S.C 거더 교량은 고속도로나 지방의 국도등에서 중소 규모의 교량에 자주 사용되는 형식이다. P.S.C 부재는 전단면을 유효하게 이용할 수 있고 그 자중을 경감할 수 있으므로 교량에 유리한 구조이며 교량길이 방향의 P.S.C 거더는 주 하중 부재로 이용된다. P.S.C 거더교의 전형적인 구조시스템은 철근콘크리트 Deck Slab 과 거더와 거더를 횡으로 연결하는 철근 콘크리트 부재, 즉 가로보(Cross Beam or Diaphragm)로 이루어져 있다. 현재 국내에서 P.S.C 거더교 설계는 표준도가 작성되어 있어서 설계시에는 현행 표준도를 적용하여 설계, 시공하고 있다. 현행 표준도에서는 30m 교량의 경우 지점부에 2 개를 포함하여 총 7 개의 가로보를 설계에 사용하도록 규정하고 있다. 본 연구에서는 기존에 사용되고 있는 표

* 한국과학기술원 토목공학과 석좌교수

** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

준도와 동일한 30m 지간의 P.S.C 거더교량에 대하여 교량상부 구조물을 3차원 유한요소로 모델링하고 동적 해석(Dynamic Analysis)을 수행하여 가로보가 7개인 경우와 가로보를 3개로 줄였을 경우에 대하여 각 시간대별 Girder의 처짐 및 휨모멘트, 전단력, 상부 Deck Slab의 모멘트 변화등을 검토 분석하여 가로보의 기능(Function) 및 효용성(Effectiveness), 안전성(Safety)을 정확히 평가하고 가로보의 개수를 최적화시키는 데 그 목적이 있다.

2. 유한요소 모델링

P.S.C 거더교의 상부의 정확한 거동을 해석하기 위하여 그림 2에서 보이는 바와 같은 3차원적인 모델을 사용하였다. P.S.C 거더교의 상부 Deck Slab은 Flat Shell 요소, 거더와 가로보는 빔 요소를 사용하였다. 상부 Slab과 Girder의 중심은 일치하지 않고 이격되어 있으므로 이러한 편심효과를 정확히 고려하기 위하여 편심보 요소를 사용하였다. 해석에 사용된 총절점수는 1433개, 요소수는 1362 정도이다.

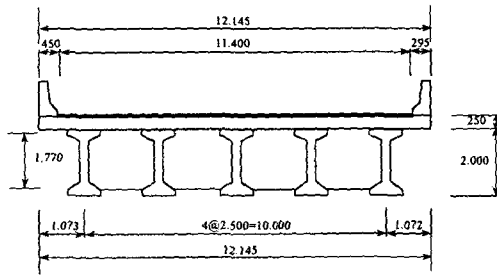


그림 1. P.S.C 거더교의 단면

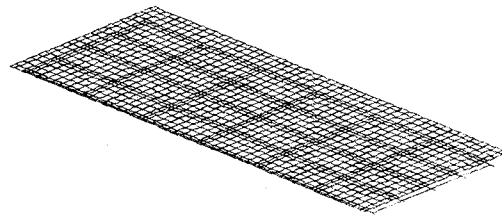
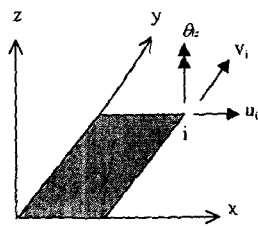


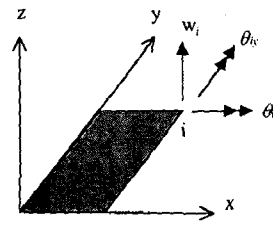
그림 2. 유한요소 모델링

2.1 셸 요소

판상의 구조물에 미소 변형이론을 적용하면 면내 변형과 면의 변형이 서로 독립적이기 때문에 결합되어 발생하지 않는다(Zienkiewicz and Taylor 1989). 따라서 그림 3과 같이 면내변형에 대한 자유도를 독립변수로 가지는 평면 응력 요소와 면외변형의 자유도를 독립변수로 가지는 평판 휨 요소를 결합하면 절점당 6개의 자유도를 가진 이상적인 3차원 평면 셸 요소를 구성할 수 있다. 본 연구에서 사용한 셸 요소는 회전자유도를 가진 평면요소와 대체전단 변형률장을 이용하여 전단 강성을 보정함으로써 거동이 개선된 평판 휨 요소(최창근 등 1992)를 이용하여 개발된 절점당 6개의 자유도를 가진 4절점 평면 셸 요소(최창근 등 1994)이다.



(a) 평면 응력 요소



(b) 평판 휨 요소

그림 3. 셸 요소

2.2 편심보 요소

실제 구조에서 거더와 Slab는 한 평면상에 존재하지 않는다. 그러나 모델링 과정에서는 자유도의 감소 및 해석상의 편의를 위해 보와 셸 요소가 한 평면에 존재하는 것과 같이 모델링 되었다. 이러한 모델링상의 문제점을 보완하여 편심보를 이용하여 모델링하고 해석하였다.

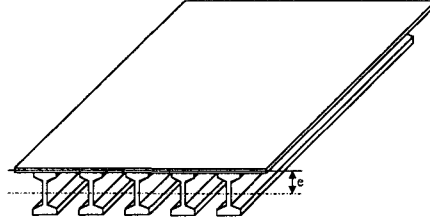


그림 4. 편심보 요소

절점당 6 자유도의 셸 요소와 편심 배치된 보의 경우는 6 자유도에 대하여 확장하여 식 (1)과 같이 변환 행렬을 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ \theta_{i,x} \\ \theta_{i,y} \\ \theta_{i,z} \end{Bmatrix}_{beam} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -e & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ \theta_{i,x} \\ \theta_{i,y} \\ \theta_{i,z} \end{Bmatrix}_{shell} \quad (1)$$

셸 요소의 자유도로 바꾸어 절점하중과 변위벡터의 관계식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\mathbf{P}_s = \mathbf{T}^T \mathbf{K}_b^e \mathbf{T} \mathbf{d}_i^b \quad (2)$$

따라서, 편심보 요소의 강성 행렬은 다음과 같다.

$$\mathbf{K}_e^e = \mathbf{T}^T \mathbf{K}_b^e \mathbf{T} \quad (3)$$

3. 동적 하중

해석에 사용된 하중은 도로교 시방서에서 채택하고 있는 DB-24 하중으로 그림 5와 같은 형태를 가지고 있다.

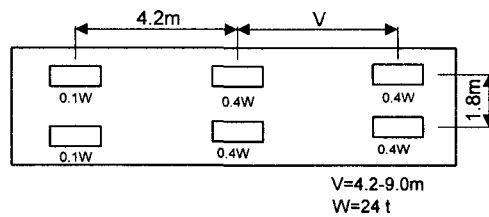


그림 5. DB-24 하중

그림 6에서 보는 바와 같이 시간함수가 재하선을 따라 이동하는 것으로 하여 Simulation 하였다. 이때 시간함수의 산(Peak)의 폭은 요소크기에 종속인 변수이다. 입력하중은 Shell Elements의 Node에서 집중하중으로 입력되는데 그림 6과 같이 교량폭의 중앙 Lane에서 차량이 시간대별로 이동하는 것으로 고려하였다.

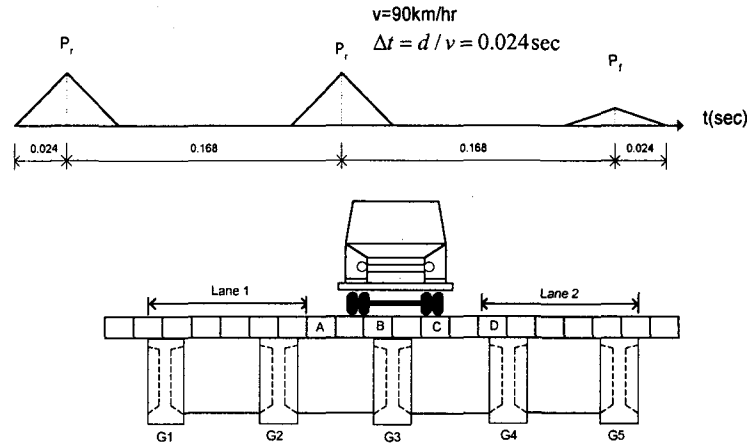
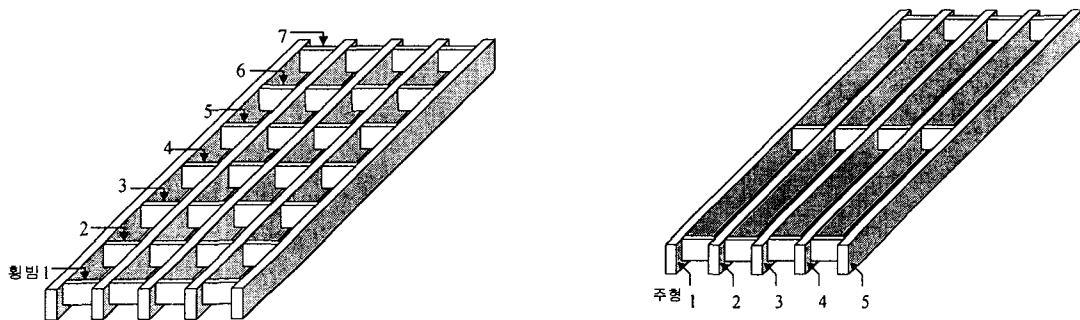


그림 6. 동하중의 재하

4. 동적 해석

유한요소 해석은 당 연구실에서 개발된 구조해석 프로그램 FESA(Finite Element System Analysis)를 이용하여 수행하였다. 해석 Case는 가로보를 줄였을 때의 거동을 분석하기 위하여 현재의 표준도와 같이 가로보가 7개 있는 경우(Case 1)와 3개 있는 경우(Case 2)를 채택하였다. 교량의 진동수나 주기 등의 특성을 알기 위하여 진동수 해석(Frequency Analysis)을 수행하였고 각 시간대별 응답특성을 알기 위하여 시간 이력해석(Time History Analysis)을 수행하였다.



(a)Case 1: 가로보 7개 있는 경우

(b)Case 2: 가로보 3개 있는 경우

그림 7. 해석 모델 Case

4.1 진동수 해석(Frequency Analysis)

교량의 동적 특성을 파악하고 시간이력 해석에 사용될 적절한 시간 간격(Time Step)을 결정하기 위하

여 진동수 해석(Frequency Analysis) 을 수행하였다. 3 개의 진동수 및 모드 형상을 Subspace Iteration 방법으로 구하였다. 표 1 은 해석 모델별로 1-3 번째모드까지의 진동수를 나타내었는데 Case2 의 경우 대체로 Case1 에 비하여 주기가 짧게 나타났는데 이것은 가로보의 제거에 의한 구조물 강도(Stiffness)의 변화보다 가로보의 질량감소의 영향이 구조물의 거동에 보다 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

표 1. 교량의 진동수

(단위: Hz)

Mode 번호	Case 1	Case 2
1	3.527	3.654
2	4.297	4.305
3	11.87	12.21

그림 8 은 해석 Case 별 첫번째부터 3 번째까지의 모드형상을 비교한 것이다. 이에 따르면 기본모드형상 및 2-3 번째 모드형상은 두경우 거의 유사한 형태를 보이나 고차 모드로 갈수록 모드형상에 차이를 보이고 있는데 전반적으로 Case 1 의 경우가 가로보의 영향으로 횡방향으로 일체화된 거동을 보이고 있다.

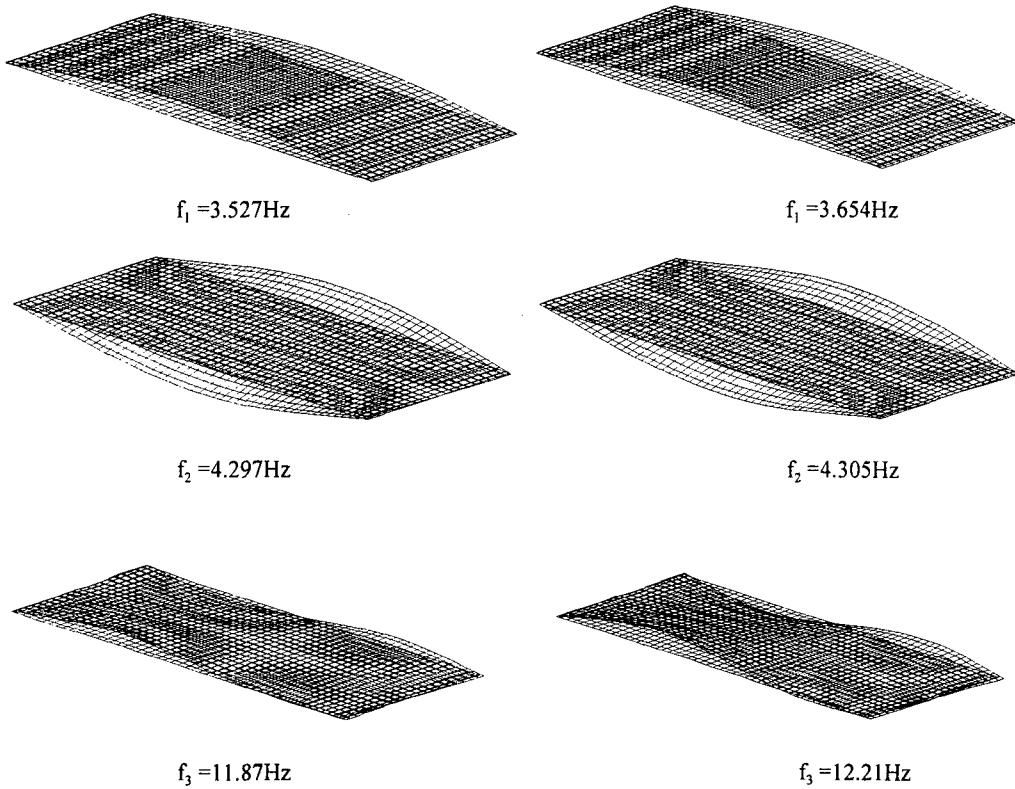


그림 8. Case 별 교량의 모드형상

4.2 시간이력 해석(Time History Analysis)

대상구조물의 시간에 따른 거동과 부재력에 대한 영향을 비교·평가하기 위하여 시간이력해석이 수행되었다. 시간이력 해석은 그림 6에 나타난 바와 같이 DB-24 하중이 Lane2를 통과하는 경우에 대하여 수행하였다. 해석결과의 주요관심대상으로서는 거더의 최대처짐, 최대 모멘트 및 전단력, Deck Slab의 휨모멘트 등이다. 차량하중이 설계속도인 90km/hr로 이동할 때 교량을 통과하는데 걸리는 시간은 약 1.2초가된다. 모든 수치해석에서의 시간 간격은 1/500sec을 사용하였으며 총 시간 간격의 수는 1000개를 사용하였다. 해석방법으로는 일관 질량행렬(Consistent Mass matrix)을 가지는 직접적분방법(Direct Integration Method)이 적용되었다.

5. 시간이력 해석의 결과

거더 1, 2, 3에 대한 Span 중앙부에서의 시간에 따른 처짐이 그림 9-11에 나타나 있다. Span 중앙부에서의 각 거더의 처짐을 면밀히 조사해 본 결과 교량 횡방향 단면상의 중앙거더 G3에서 Cross Beam이 3개인 경우가 7개인 경우보다 처짐이 약간 증가하고 외측거더인 G1으로 갈수록 처짐이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 중앙 거더 G3에서 Cross Beam이 3개인 경우 처짐 변화는 아주 미소한데 Case 1에 비하여 약 1.7%정도 증가하였다. 각 거더 G1, G2, G3에 대한 Span 중앙부에서의 휨모멘트를 그림 12-14에 나타내었다. 내측 거더 G3에서는 모멘트 값이 오히려 줄어들었으며 외측거더 G1으로 갈수록 약간 증가하였는데 약 10%정도 증가하였다.

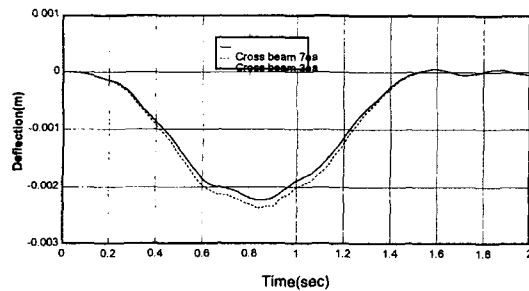


그림 9. 거더 3의 Span 중앙부에서의 처짐

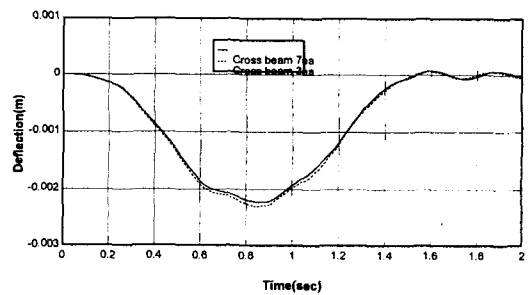


그림 10. 거더 2의 Span 중앙부에서의 처짐

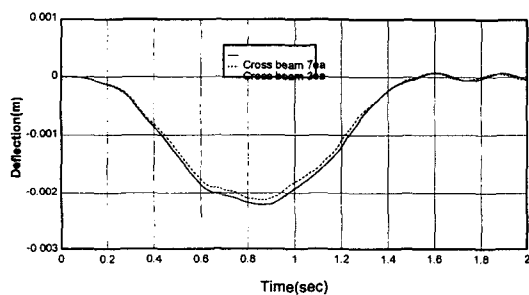


그림 11. 거더 1의 Span 중앙부에서의 처짐

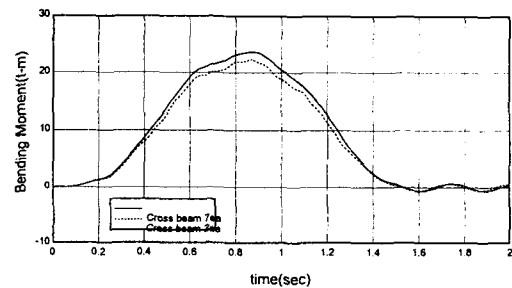


그림 12. 거더 3의 Span 중앙부에서의 휨모멘트

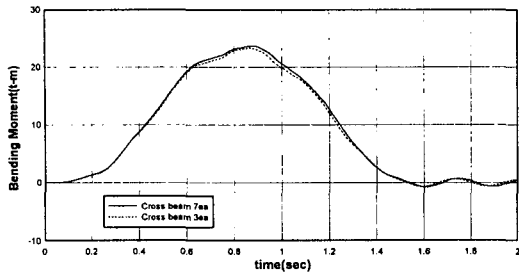


그림 13. 거더 2의 Span 중앙부에서의 휨모멘트

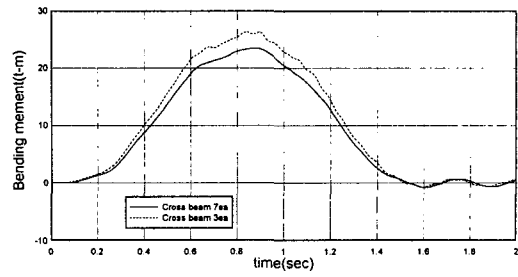


그림 14. 거더 1의 Span 중앙부에서의 휨모멘트

그림 15-18은 Midspan의 Deck Slab 4군데서의 휨모멘트를 나타낸 것이다. Cross Beam를 줄임으로써 Deck Slab Moment 값이 Cross Beam이 전부 있을 때에 비해 Lane 2의 A-D 점에서 감소하는 것으로 나타났다. 특히 C점에서는 Cross Beam을 줄일 경우 모멘트가 약 절반으로 줄어든다. 상부 Deck Slab의 휨모멘트는 교량상판의 피로와 균열에 큰 영향을 미치므로 이러한 Deck Slab의 모멘트 감소는 균열발생 가능성을 줄여줌으로써 장기적 관점에서 교량 상부 Slab의 거동을 향상시키는 것으로 판단된다.

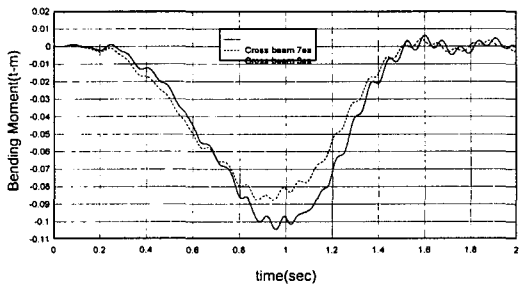


그림 15. Deck Slab 휨모멘트(A 점)

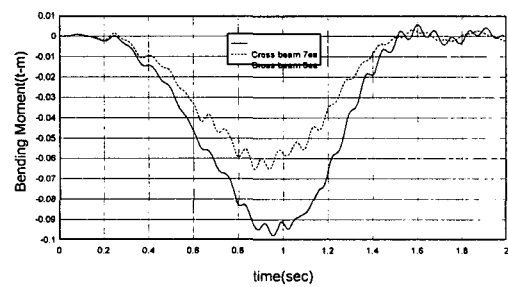


그림 16. Deck Slab 휨모멘트(B 점)

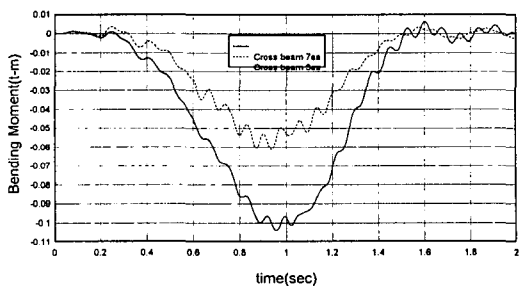


그림 17. Deck Slab 휨모멘트(C 점)

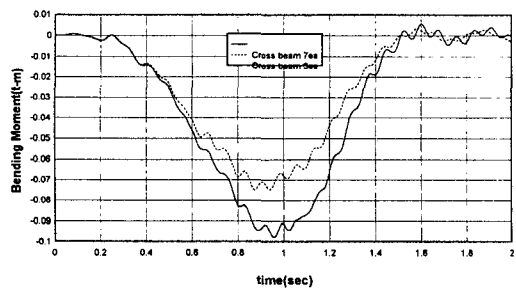


그림 18. Deck Slab 휨모멘트(D 점)

6. 결론

본 연구에서는 현행 표준도상의 지간 30m P.S.C. 거더교량의 적정가로보 설계를 위하여 교량상부구조의 3차원적인 유한요소 모델을 사용하여 동적해석을 수행하였다. 교량을 모델링하기 위하여 상판은 질점당 6자유도를 가지는 평면 쉘을 이용하였고 P.S.C 거더와 가로보는 편심효과를 고려할 수 있는 편심보 요소를 개발하여 사용하였다. 본 연구에 의하면 P.S.C 거더 교량의 가로보 수를 최소 3개로 줄였을 때 동적해석 결과 나타난 교량의 응답은 가로보가 7개 있는 기존의 경우와 비교하여 거의 변화하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 거더 중앙부에서의 최대 처짐은 약 1.7% 크게 나타났으며 외측거더에서는 오히려 처짐이 줄었다. Span 중앙부에서의 Deck Slab의 휨모멘트, 특히 C점에서는 Cross Beam을 줄였을 때 모멘트가 약 절반으로 감소하는 것으로 나타났다. 상부 Deck Slab의 휨모멘트는 교량 상판의 균열에 영향을 미치므로 이러한 Deck Slab의 모멘트 감소는 균열발생 가능성을 줄여줌으로써 장기적 관점에서 교량 상부 Slab의 거동을 향상시키는 것으로 판단된다. 따라서 P.S.C 거더 교량을 설계함에 있어서 정밀 해석을 통하여 적정 가로보의 수를 산정하면 경제성, 시공성을 개선할 수 있는 여지가 많은 것으로 사료되며, 본 연구에서 제안된 해석방법 및 결과는 설계실무 적용시 상당히 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. J. W. Fedesco, J. M. Stallings and D. R. Tow, 'Finite Element Method analysis of Bridge Girder-Diaphragm Interaction', Computer & Structures, Vol. 56, No. 2, pp.461-473.
2. A. K. Gupta and P. S. Ma, 'Error in Eccentric Beam Formulation,' Int. J. Num. Meth. Engng., Vol.11, No. 9, 1977, pp1473-1477.
3. R. E. Miller, 'Reduction of the Error in Eccentric Beam Modeling,' Int. J. Num. Meth. Engng., Vol. 15, No. 4, 1980, pp. 575-582.
4. C.K. Choi and W.H. Lee, 'Variable-node flat shell elements with drilling degree-of-freedom', EASEC, 1995.
5. R. Park And T. Paulay, Reinforced Concrete Tructures, Wiley, 1975.
6. E. C. Hambly, Bridge Deck Behavior, E & Fn Spon, 2nd Edition, 1991.
7. Robert D. Cook, Concepts And Applications Of Finite Element Analysis, Wiley, 3rd Edition, 1989.
8. Alfred G. Bihara, 'Wheel Load Ditrubution On Simply Supported Skew I-Beam Composite Bridges', Asce Journal Of Structural Enginring, Vol. 119, Pp399-419, 1993.
9. 김재범, 'PC 빔교의 적정 가로보 설계를 위한 파라메트릭 연구', 한국과학기술원 석사학위 논문, 2000.
10. 도로교 표준 시방서, 건설교통부, 1996.
11. 콘크리트 표준 시방서, 건설교통부, 1996.
12. 최창근, 유한요소법, 집문당, 1992.
13. 변동균, 철근 콘크리트, 동명사, 1999.
14. 황학주, 최신교량공학, 동명사, 1994.