

가로보수에 따른 P.S.C 거더 교량의 동적 거동 연구

최 창 근* 김 경 호** 이 계 희***

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트(prestressed concrete, P.S.C) 거더 교량은 고속도로나 지방의 국도등에서 중소 규모의 교량에 자주 사용되는 형식이다. P.S.C 부재는 전단면을 유효하게 이용할 수 있고 중량을 경감할 수 있으므로 구조적으로 유리하다. P.S.C 거더교의 전형적인 구조시스템은 P.S.C 거더로 이루어진 종형과 철근콘크리트 상판(Deck Slab), 거더와 거더를 횡으로 연결하는 철근 콘크리트 부재, 즉 가로보(Cross Beam or Diaphragm)로 이루어져 있다. 거더 지점부에서의 가로보는 횡방향 교통하중이나 풍하중 등에 저항하고 내부의 가로보는 시공중이나 상부 슬래브의 타설시 거더의 안정을 유지하고 거더간의 횡방향 하중 분배를 수행한다. 현재 국내에서의 P.S.C 거더교 설계 및 시공은 도로공사가 제정한 표준도에 의해서 주로 이루어지고 있다. 현행 표준도에서는 30m의 지간을 가진 교량의 경우 지점부에 2개를 포함하여 총 7개의 가로

보를 사용하도록 규정하고 있다. 가로보에 대한 설계 규정은 도로교 표준시방서의 T형교의 기준을 따르고 있으며 주형의 부등 처짐이나 비틀림 변형이 바닥판, 받침에 불리하게 작용할 수 있으므로 주형 직각 방향의 강성을 높이기 위하여 주형의 지점상에 가로보를 두는 것을 원칙으로 하고, 지간 중앙부에는 1지간에 1개소 이상 또는 15m이하의 간격으로 가로보를 설치하는 것을 원칙으로 하고 있다. 그리고 지간 중앙의 가로보에 대한 규정은 권장 사항이므로 실험이나 구조 해석에 의해 가로보가 필요하지 않다는 것이 확인되는 경우에는 두지 않아도 좋다고 규정되어 있다.¹⁾ 따라서 P.S.C 거더교의 설계에서 가로보의 효용성에 대해 상세 검토를 수행하여 가로보 수를 감소시킬 수 있다면 설계 및 시공시 구조적인 결함의 원인이 될 수 있는 사항을 근본적으로 해결하게 될 것이고, 시공의 편리성 및 경제성을 도모함은 물론 시공시 문제점 발생 요인이 많은 가로보에 대한 부실 시공 예방에 도움이 될 것이다. 본 연구에 선행하여 참고문헌 4

* 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 석좌교수

** 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 박사과정 수료
토목구조기술사

*** 정회원 · 시설안전기술공단/과장 공학박사 토목구조기술사

에 제시되어 있는 바와 같이 정적 해석을 수행하여 가로보의 개수를 3개로 줄였을 때도 설계 부재력을 만족하는 것을 이미 확인하였다. 본 연구에서는 기존의 표준도에 규정되어 있는 30m 지간의 P.S.C 거더 교량의 교량상부 구조물에 대한 시간이력 해석(Time History Analysis)을 수행하였다. 이 때 표준도에 따르는 가로보가 7개인 경우와 가로보를 3개로 줄였을 경우에 대하여 각 시간단계별 거더의 처짐 및 휨모멘트, 전단력, 상판의 모멘트 변화 등을 검토(분석하여 가로보의 효율성(Effectiveness) 및 안전성(Safety)을 정확히 평가하고 이에 따라 가로보의 개수를 최대한 감소시키고자 하였다.

2. 유한요소 모델링

본 연구에 적용된 30m P.S.C 거더교의 표준단면은 그림 1과 같다. P.S.C 거더교 상부의 정확한 거동을 해석하기 위하여 그림 2와 같은 3차원 모델을 구성하였다. P.S.C 거더교의 상판은 Shell 요소, 거더와 가로보는 보 요소를 사용하여 모델링하였다. 이 때 상판과 거더의 중심이 일치하지 않아 발생하는 편심효과를 고려하기 위하여 편심보 요소를

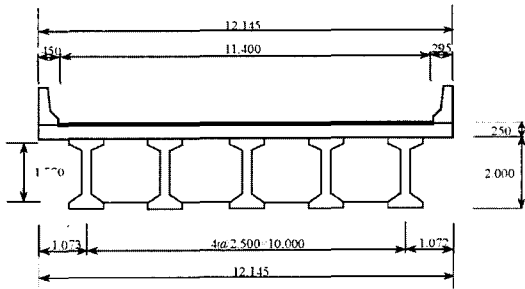
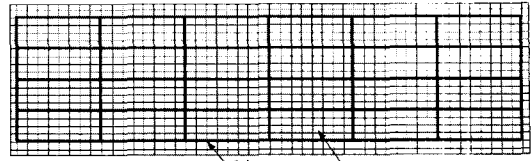
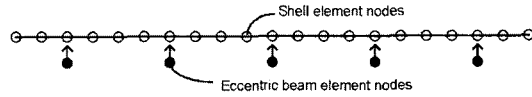


그림 1 P.S.C 거더교의 단면



(a) 유한요소의 평면도



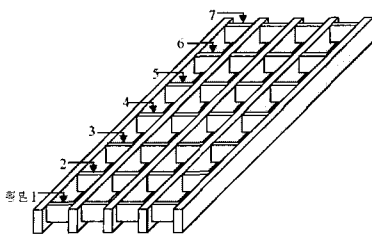
(b) 유한요소의 단면도

그림 2 대상교량의 유한요소 모델링

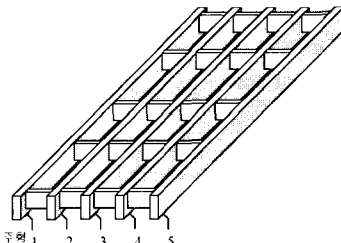
를 적용하여 사용하였다.^{2),3)} 해석에 사용된 총절점수는 1433개, 요소수는 1362개이다. 자세한 모델링 과정은 참고문헌 4에 기술되어 있다.⁴⁾

3. 정적 해석의 결과

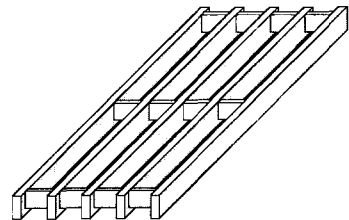
본 연구에 선행하여 현행 표준도와 동일한 30m 지간의 P.S.C 거더교량에 대하여 교량상부 구조물을 3차원적인 유한요소로 모델링하고 정적 해석을 수행하였다.⁴⁾ 가로보가 7개, 5개, 3개 있는 경우에 대하여 교량의 사각(Skew)이 있는 경우 더 위험(Critical)한 경우가 발생할 수 있으므로 사각 90°, 60°, 45°의 경우에 대하여 각각 정적해석을 수행하였다. 이러한 해석 과정을 통하여 가로보에 작용하는 최대 휨모멘트, 최대 전단력, 최대 비틀림모멘트를 산정하여 가로보의 안전성에 대해 정확히 평가하고 가로보의 개수를 현행 도로교 시행서 내에서 규정된 한도 내에서 최대한 감소시킬 수 있는 것을 확인하였으며 그 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.



(a) Case 1 : 가로보 7개 있는 경우



(b) Case 2 : 가로보 5개 있는 경우



(c) Case 3 : 가로보 3개 있는 경우

그림 3 주형 및 가로보의 모델링

해석 Case는 그림 3에 나타난 바와 같이, 가로보를 줄였을 때의 거동을 분석하기 위하여 가로보가 7개 있는 경우(Case 1), 5개 있는 경우(Case 2), 3개 있는 경우(Case 3)를 선정하였다.

가로보의 개수를 7개에서 5개, 3개로 줄이게 될 경우 가로보가 안전한지를 검토해 봄으로써 P.S.C 거더교의 가로보 개수를 줄일 수 있는지에 대하여 확인하였는데, 모든 하중 경우에 대하여 최대 부재력을 산정하여 휨 모멘트, 전단력, 비틀림 모멘트 등이 설계강도를 만족하는지를 검토하였으며 그 결과는 표 1~3에 나타난 바와 같다.

4. 동적 하중

해석에 사용된 하중은 도로교 시방서에서 채택하고 있는 DB-24하중으로 그림 4와 같은 형태를 가지고 있다.¹⁾

입력하중은 Shell 요소의 절점에 집중하중으로 입력되며 그림 5(a)와 같이 교량의 중앙 차로에서 차량이 이동하는 것으로 고려하였다.

이 때 각 절점에 작용하는 집중하중은 그림 5(b)에서 정의된 시간함수가 규정된 속도로 교량을 이동하는 것으로 가정하였다. 이 시간함수의 산(Peak)

표 1 가로보의 최대 휨모멘트(단위 : t-m)

구분	사각(Skew)	Case 1	Case 2	Case 3	설계 휨 강도	설계만족 여부
단부가로보	90°	6.51(0.20)	6.58(0.21)	6.40(0.20)	31.88	O.K
	60°	14.46(0.46)	8.58(0.27)	16.82(0.53)	31.61	O.K
	45°	19.63(0.63)	21.41(0.69)	23.04(0.74)	31.18	O.K
내측가로보	90°	26.36(0.25)	29.09(0.28)	33.49(0.32)	104.13	O.K
	60°	31.73(0.31)	22.76(0.22)	46.50(0.45)	103.50	O.K
	45°	43.36(0.42)	43.74(0.46)	53.41(0.52)	102.45	O.K

() : 최대 휨모멘트/설계 휨 강도

표 2 가로보의 최대 전단력(단위 : t-m)

구분	사각(Skew)	Case 1	Case 2	Case 3	비틀림 모멘트	$\phi_v Sc$	설계만족 여부
단부가로보	90°	14.99(0.87)	15.09(0.87)	15.31(0.88)	0.81	17.32	O.K
	60°	9.20(0.65)	8.94(0.63)	9.85(0.69)	0.80	14.19	O.K
	45°	10.69(0.84)	11.19(0.88)	11.38(0.90)	0.17	12.72	O.K
내측가로보	90°	19.59(0.60)	22.54(0.70)	28.62(0.88)	0.60	32.42	O.K
	60°	20.16(0.71)	23.84(0.84)	25.87(0.91)	0.12	28.39	O.K
	45°	16.15(0.75)	16.96(0.78)	19.73(0.91)	0.71	21.62	O.K

() : 최대전단력/ $\phi_v Sc$

표 3 가로보의 최대 비틀림(단위 : t-m)

구분	사각(Skew)	Case 1	Case 2	Case 3	전단력	$\phi_v Tc$	설계만족 여부
단부가로보	90°	1.88	1.89	1.91	4.44	1.99°	O.K
	60°	0.95	1.49	1.28	6.38	1.95	O.K
	45°	0.68	0.75	0.90	0.71	0.96°	O.K
내측가로보	90°	2.27	2.20	1.38	0.52	2.72°	O.K
	60°	1.01	1.58	1.02	8.09	2.04°	O.K
	45°	0.79	0.81	0.91	0.39	1.36°	O.K

* : 최소 비틀림 모멘트

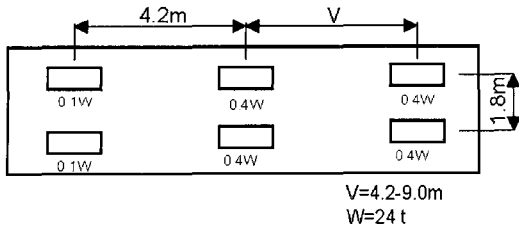
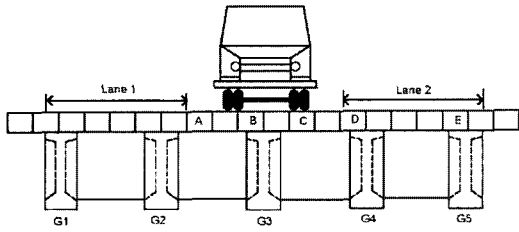
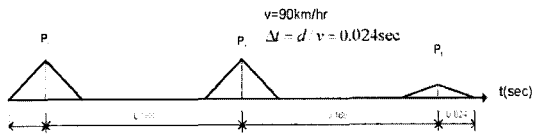


그림 4 DB-24하중



(a) 차량 하중의 이동



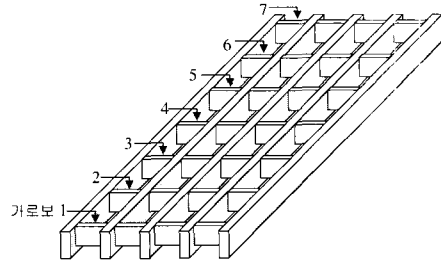
(b) 시간 함수

그림 5 동하중의 재하

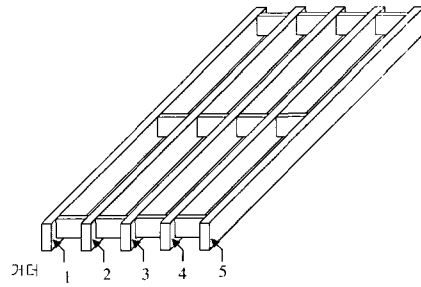
의 폭은 요소크기에 종속인 변수이며 간격은 속도에 종속인 변수이다. 트럭의 바퀴 하중은 그림 5(b)에서 정의된 시간함수에 따라 상부 슬래브요소의 각 절점에 작용하는 집중하중으로 입력되었다. 트럭 하중이 교량 위를 움직일 때 바퀴하중은 가장 근접되어 있는 상부 슬래브의 절점으로 Shell요소의 형상함수를 이용하여 분배된다. 이러한 과정이 트럭이 교량을 횡단하는 동안 각 시간 간격별로 반복된다.

5. 동적 해석

유한요소 해석은 구조해석 프로그램 FESA(Finite Element System Analysis)를 이용하여 수행하였다.³⁾ 해석 경우는 현재의 표준도와 같이 가로보가 7개 있는 경우(Case 1)와 3개 있는 경우(Case 2)를 채택하였다. 2개의 구조해석 모델을 동일한 동적하중에 대하여 해석을 수행하였다. 교량의 진동수나 주기 등의 특성을 알기 위하여 고유치 해석을 수



(a) Case 1 : 가로보 7개 있는 경우



(b) Case 2 : 가로보 3개 있는 경우

그림 6 해석 Model

행하였고 시간 이력해석을 수행하여 이동하중의 위치에 따른 응답특성을 산정하였다.⁶⁾

5.1 고유치해석

교량의 동적 특성을 파악하고 시간이력 해석에 사용될 적절한 시간 간격(Time Step)을 결정하기 위하여 고유치해석을 수행하였다. 표 4는 해석 모델별로 1~5번째모드까지의 진동수를 나타내었다. Case 2의 경우 대체로 Case 1에 비하여 주기가 짧게 나타났는데 이것은 가로보의 제거에 의한 구조물 강도(Stiffness)의 변화보다 가로보의 제거에 따른 질량감소의 영향이 구조물의 거동에 보다 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

표 4 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
4	13.01	13.42
5	13.76	13.56

그림 7은 해석 모델별로 첫번째부터 5번째까지의 모드형상을 비교한 것이다. 이에 따르면 기본모드형상 및 2~3번째 모드형상은 두 모델 모두 유사한 형태를 보이나 4차 이상의 고차 모드에서는 모드형상에 차이를 보이고 있다. 가로보가 7개 설치된 Case 1의 경우에는 전반적으로 가로보의 영향으로 횡방향으로 일체화된 거동을 보이고 있다. 그러나 전체적으로 단순지지된 구조물의 특성을

고려할 때 이들 모드가 동적거동에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다.

5.2 시간이력 해석

대상구조물의 시간에 따른 거동과 부재력에 대한 영향을 비교평가하기 위하여 시간이력 해석을 수행하였다. 시간이력 해석은 그림 5에 나타난 바와

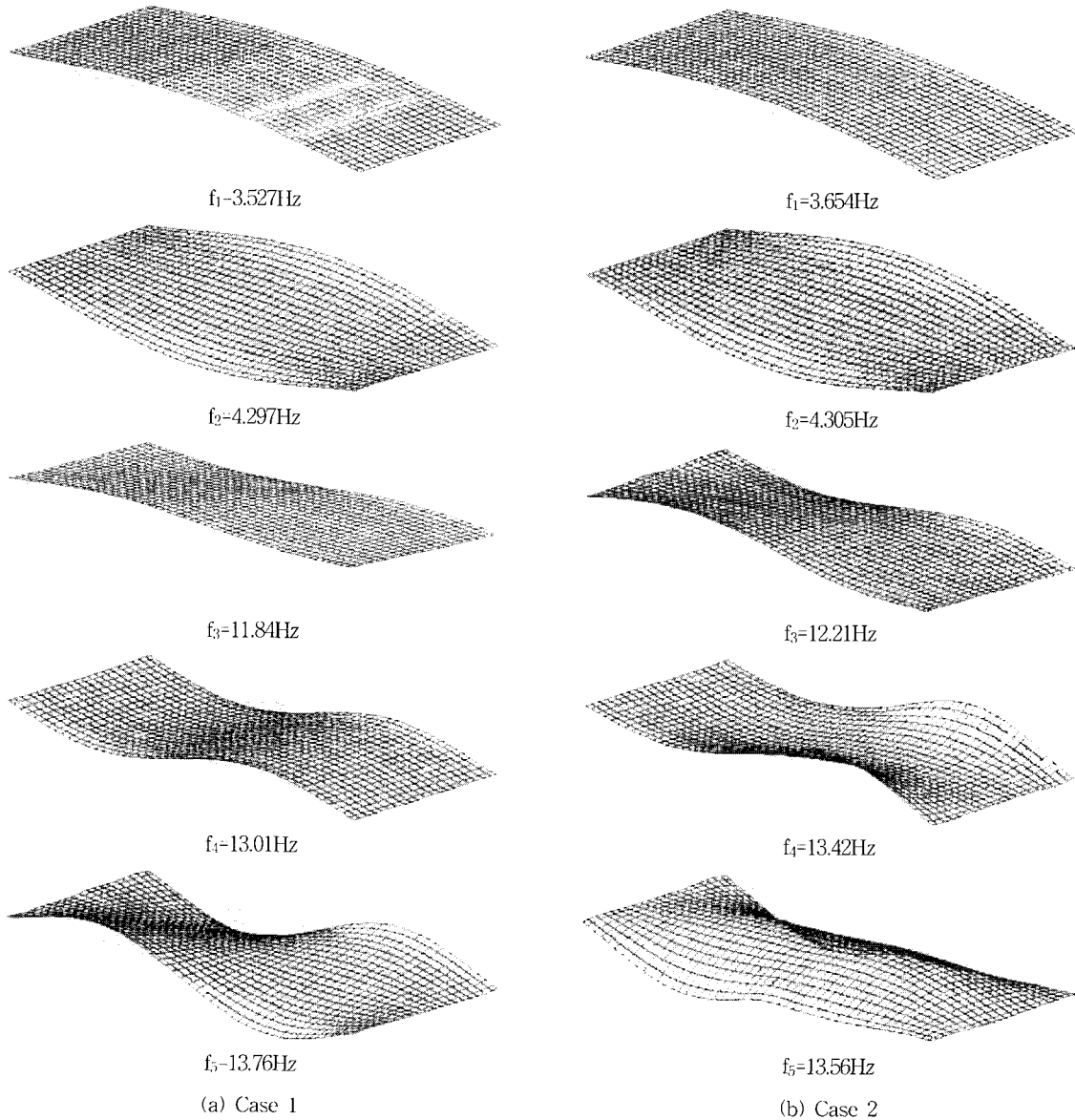


그림 7 교량의 모드형상

같은 DB-24하중이 중앙차로를 통과하는 경우에 대하여 수행하였다. 해석 결과로 거더의 최대처짐, 최대 모멘트 및 전단력, 슬래브(Deck Slab)의 휨모멘트 등을 산정하였다. 가로보 제거의 효과를 평가하기 위하여 두 가지 해석 모델에 대한 결과를 비교하여 동일한 그림에 나타내었다. 차량하중이 설계속도인 90km/hr로 이동할 때 교량을 통과하는데 걸리는 시간은 약 1.2초이며 모든 수치해석에서의 시간 간격은 1/500sec을 사용하였다. 해석을 수행한 총 시간 간격의 수는 1000개이다. 본 해석에서는 동적하중의 작용시간이 비교적 짧으므로 일관 질량행렬(Consistent Mass matrix)을 가지는 직접적분방법(Direct Integration Method)을 적용하여 정확한 해석을 수행하고자 하였다.

6. 시간이력 해석 결과의 평가

거더 1, 2, 3에 대한 경간 중앙부에서의 시간에 따른 처짐이 그림 8~10에 나타나 있다. 경간 중앙부에서의 각 거더의 처짐은 교량 횡방향 단면상의 중앙거더 G3에서 가로보가 3개인 경우가 7개인 경우보다 처짐이 약간 증가하고 외측거더인 G1으로 갈수록 처짐이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 중앙 거

더 G3에서 가로보가 3개인 경우 처짐 변화는 아주 미소한데 Case 1에 비하여 약 1.7%정도 증가하였다. 따라서 전반적으로 가로보의 제거가 거더의 처짐에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 가로보의 수가 줄었는데도 외측거더 G1에서의 처짐이 감소한 것은 가로보 수의 감소로 이동하중과 근접되어 있지 않은 Girder로의 하중의 전달을 감소시켜 주는 데에 기인되는 것으로 판단된다. 즉 7개의 가로보를 가진 Case 1에서는 내측과 외측거더의 처짐이 거의 동일하게 나타나지만 3개의 가로보를 가진 Case 2에서는 하중의 집중되는 내측거더의 처짐이 증가하고 하중으로부터 거리가 먼 외측거더의 처짐은 감소한다. 이는 적은 수의 가로보를 사용하여 횡분배효과가 감소한데 기인한 것으로 판단된다.

각 거더 G1, G2, G3에 대한 경간중앙부에서의 휨모멘트를 그림 11~13에 나타내었다. 마찬가지로 가로보 수의 감소로 인한 모멘트의 변화는 거의 나타나지 않았다. 가로보가 7개인 경우에는 내측 거더 G3와 외측 거더 G1의 모멘트값이 큰 변화가 없는 반면, 가로보 3개의 경우는 외측거더 G1에서 가로보 7개의 경우와 비교하여 약 10%정도 증가하였는데 이 증가량은 거더가 가지고 있는 설계여

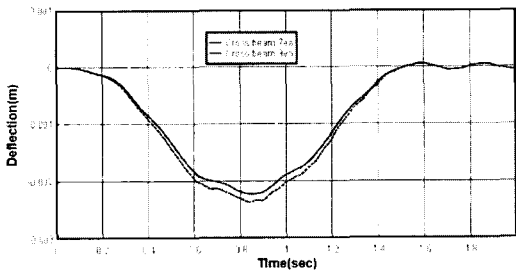


그림 8 거더3의 경간 중앙부에서의 처짐

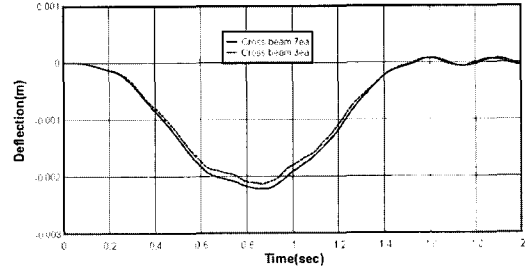


그림 10 거더1의 경간 중앙부에서의 처짐

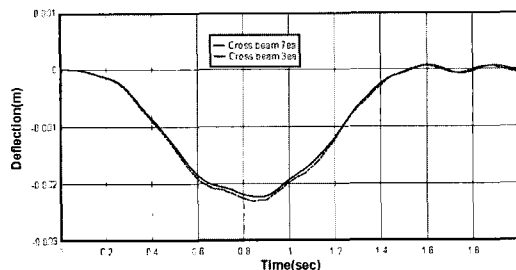


그림 9 거더2의 경간 중앙부에서의 처짐

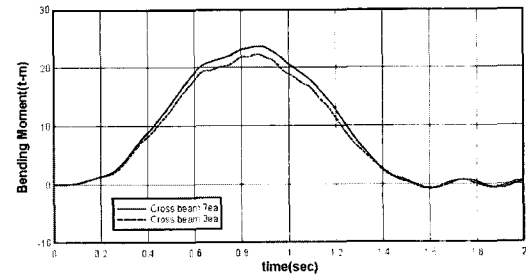


그림 11 거더3의 경간 중앙부에서의 휨모멘트

유치내에 드는 값으로 구조물의 안전성에는 영향을 미치지 못하는 양이다.

각 거더 G1, G2, G3에 대한 지점부에서의 전단력 변화를 그림 14~16에 나타내었다. 중앙부의 거더 G3에서 외측거더 G1으로 갈수록 Case 2의 전단력이 감소하는 것으로 나타났는데, 이것은 처짐의 경우와 마찬가지로 이동하중이 교량의 중앙부를 통과하는데 하중에서 떨어져 있는 외측거더로 갈수록 가로보에 의한 횡분배 효과가 작아지는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 중앙부 거더 G3에서 가로보가 7개 있는 경우가 약 10% 정도 크게 나타나지만 외측거더 G1에서 가로보가 줄었을 때 약 30%이상 감소하는 것으로 나타났다.

그림 17~21은 경간 중앙부의 상판 5군데에서의 휨모멘트를 나타낸 것이다. 가로보의 수를 3개로 줄임으로써 상판의 휨모멘트값이 Case 1에 비해 중앙 차로의 A(D)점에서 감소하는 것으로 나타났다. 특히 C점에서는 모멘트가 약 절반 정도로 줄어든다. 이러한 상판의 모멘트 감소는 가로보의 강성에 따른 상판의 횡방향 지점구속의 영향이 가로보의 제거로 인하여 유연해짐으로써 발생하는 현상으로 파악된다.

상판의 휨모멘트는 교량상판의 피로와 균열에 큰 영향을 미치므로 이러한 상판의 모멘트 감소는 균열발생 가능성을 줄여줌으로써 장기적 관점에서 교량 상판의 거동을 향상시키는 것으로 판단된다.

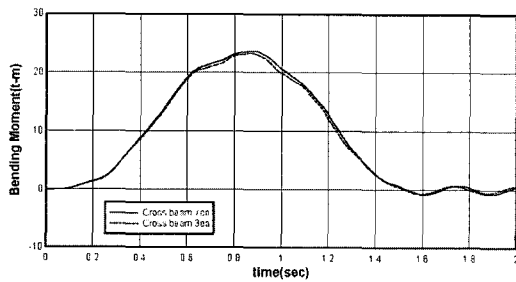


그림 12 거더2의 경간 중앙부에서의 휨모멘트

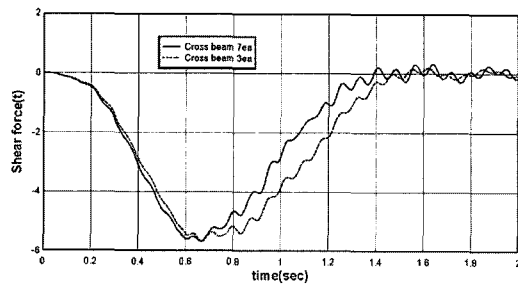


그림 15 거더2의 지점부 전단력

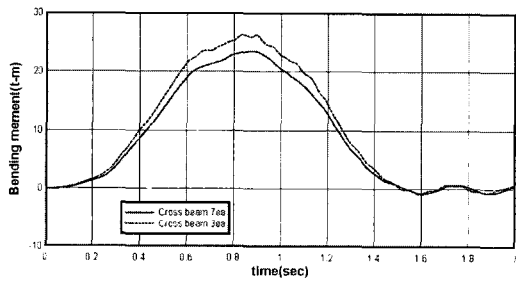


그림 13 거더1의 경간 중앙부에서의 휨모멘트

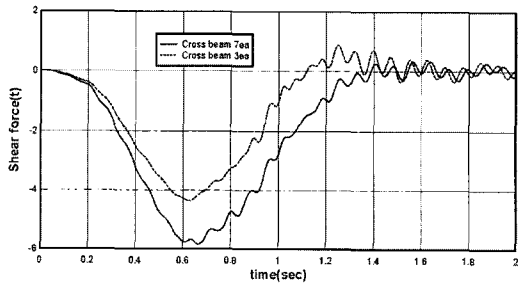


그림 16 거더1의 지점부 전단력

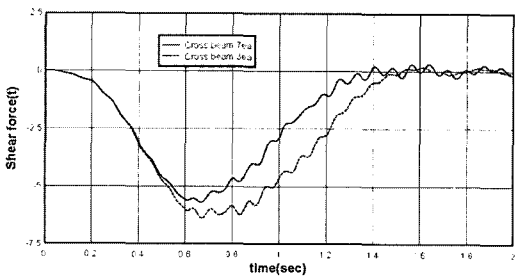


그림 14 거더3의 지점부 전단력

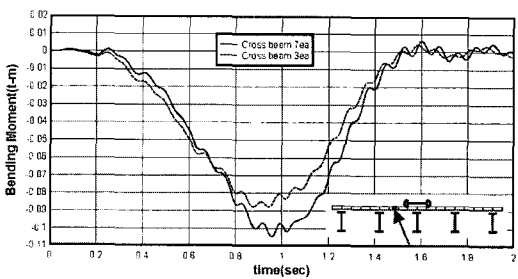


그림 17 상판 휨모멘트(A점)

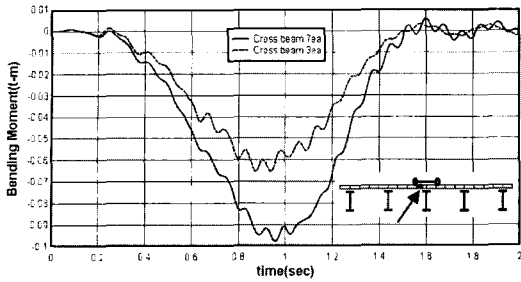


그림 18 상판 휨모멘트(B점)

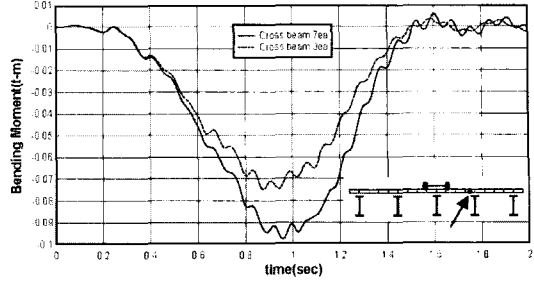


그림 20 상판 휨모멘트(D점)

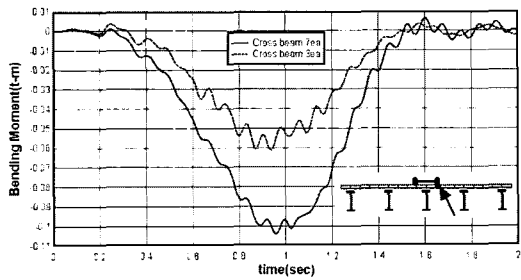


그림 19 상판 휨모멘트(C점)

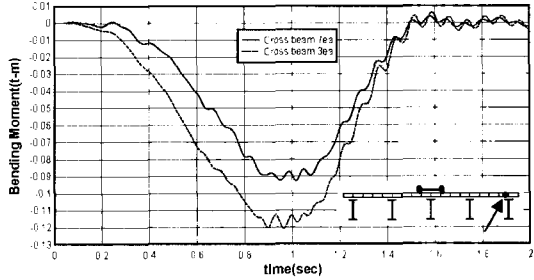


그림 21 상판 휨모멘트(E점)

7. 결 론

본 연구에서는 현행 표준도상의 지간 30m P.S.C 거더 교량의 적정 가로보수를 산정하기 위하여 교량의 3차원 유한요소 모델을 사용하여 동적해석을 수행하였다. 교량을 모델링하기 위하여 상판은 절점당 6자유도를 가지는 평면 쉘을 이용하였고, P.S.C 거더와 가로보는 편심효과를 고려할 수 있는 편심보 요소를 적용하여 사용하였다. 본 연구에 의하면 P.S.C 거더 교량의 가로보 수를 3개로 줄였을 때 정적해석 결과 발생한 최대 부재력에 대해 설계 강도는 모두 만족되며, 동적해석 결과 나타난 교량의 응답은 가로보가 7개 있는 기준의 경우와 비교하여 거의 변화하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 내측 거더에서의 최대 처짐은 약 1.7% 크게 나타났으며 외측 거더에서는 오히려 처짐이 줄었다. 경간 중앙부에서의 상판의 휨모멘트, 특히 C점(그림 19)에서는 가로보를 줄였을 때 모멘트가 약 절반 정도로 감소하는 것으로 나타났다. 상부 상판의 휨모멘트는 교량 상판의 균열에 영향을 미치므로 이러한 상판의 모멘트 감소는 균열발생 가능성을 줄여줌으로써 장기적 관점에서 교량 상부 슬래

브의 거동을 향상시키는 것으로 판단된다. 현행 도로교 시방서 기준에 따르면 지점상에 가로보를 두는 것을 원칙으로 하고, 지간 중앙부에는 1지간에 1개소 이상 또는 15m이하의 간격으로 가로보를 설치하는 것을 원칙으로 하고 있다. 본 연구 결과에 따르면 30m 표준 P.S.C 거더 교량에 있어서 현행 시방서에서 규정하고 있는 최소 기준에 의거, 가로보를 지점부와 중간부의 총 3개만 두어도 문제가 없는 것으로 판정된다. 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 설계 실무에 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 도로교 표준 시방서, 건설교통부, 1996
2. A. K. Gupta and P. S. Ma, "Error in Eccentric Beam Formulation," Int. J. Num. Meth. Eng., Vol. 11, No. 9, 1977, pp.1473~1477
3. R. E. Miller, "Reduction of the Error in Ec-

- centric Beam Modeling," Int. J. Num. Meth. Eng., Vol. 15, No. 4, 1980, pp.575~582
4. 최창근, 김경호, 김재범, "정적해석에 의한 적정 가로보 설계", 한국전산구조공학회 논문집, 2000, Vol. 14, No. 1, pp.43~55
5. FESA-Finite Elements for Structural Analysis, User's Manual, Structural Systems Lab. Civil Engineering, KAIST, 1998
6. J .W. Tedesco, 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 