

받침배치에 따른 곡선교의 동적응답에 관한 연구

Dynamic Response of Curved Bridges by Support Arrangement

김 상 효* 이 용 선** 김 태 열***
Kim, Sang-Hyo Lee, Yong-Seon Kim, Tae-Yeol

ABSTRACT

In this study a 3-dimensional analytical model is developed, which can analyses dynamic responses of curved bridges subject to moving vehicles. A 5-axle semi-trailer is modeled to simulate the actual tire forces that are redistributed by vehicle rolling effect due to the centrifugal force. The 1-span curved bridge with two steel box girders is modeled using the frame elements. The dynamic response characteristics of curved box girder bridges are examined and compared for two different support conditions. One is the case that two shoes are arranged at the outer sides of box girders with larger space between the two shoes and the other is that two shoes at the center of each box girder.

In the curved bridges, the dynamic effect of moving vehicles influences the reaction force much more than other responses, such as displacement or stress, especially the upward reaction of inner-radius shoes. It is more advantageous for the reaction considering dynamic effect when shoes are arranged further at the outer sides of box girders than when shoes at the center of each box. The shoes for curved bridges with two-box girder system should be arranged to have larger distance.

1. 서 론

도로가 점점 복잡해지면서 입체교차로가 많아지고 곡선교의 건설은 필수적이 되었다. 곡선교는 가설지역의 입지조건이나 교통의 원활한 흐름을 위해서 필요할 뿐만 아니라 미적·경제적 장점도 가지고 있다. 하지만 구조적 거동이 복잡하고 그에 대한 정보가 부족하여 곡선교를 채택하는 데에는 많은 어려움이 따른다. 곡선교는 초기 곡률을 가지고 있고 주행차량에 의한 원심하중이 작용하며, 형상에 따른 연계성(coupling)이 발생한다. 또한 직선교와 달리 곡선 내측지점에 반반력이 발생할 수 있으며 지점조건에 따라 동적거동이 달라질 수 있다.

임성순⁽¹⁾은 곡선교의 고유진동수 특성에 대하여 연구하였고, 장승필⁽²⁾ 등은 롤링회전을 고려하지 않은 2차원 차량하중 하의 곡선교의 동적해석 방법을 제시하였고, 서영국⁽³⁾은 이동하중을 받는 곡선교의 동적해석을 위한 차량과 교량의 모델링 방법과 수치해석 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 2개의 강박스거더로 구성된 단경간 곡선교에 대하여 받침의 배치위치에 따른 동적응답을 분석하였다. 이를 위해 곡선교에서 차량의 롤링운동에 의한 윤하중의 쓸림현상을 정확히 반영할 수 있는 3차원 차량모형화를 이용한 해석프로그램을 개발하였고, 받침이 강박스거더의 중앙에 배치된 경우와 강박스거

* 정회원·연세대학교 토목공학과 교수
** 연세대학교 토목공학과 박사과정
*** 연세대학교 토목공학과 석사과정

더의 외측에 배치된 경우에 대하여 주행차량에 의한 곡선교의 동적 응답을 비교·분석하였다.

2. 동적해석을 위한 모형화

2.1 곡선교의 모형화

본 연구의 기본 교량은 지간장 50m, 곡률반경 150m의 단순 곡선교로서 대상교량의 평면도와 단면도는 그림 1과 같다. 대상교량은 2주형 강박스거더 곡선교로서 점선은 강박스거더와 가로보를 나타낸다. 대상교량의 교폭은 7.6m, 강박스거더의 높이는 2.5m, 폭 1.8m이며 플랜지와 복부판의 두께는 12mm이다. 대상교량은 전지간에 걸쳐 동일한 단면을 가지는 것으로 하였다.

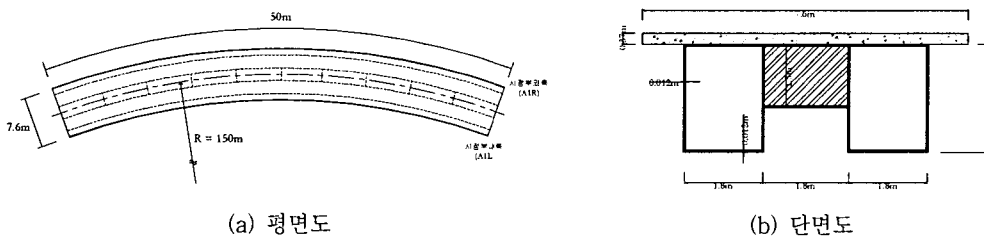


그림 1 대상교량

대상교량은 3차원 뼈대요소를 이용하여 그림 2와 같이 직선의 프레임요소들을 곡선으로 연결하여 절점에서 강결된 격자로 모형화하였다. 뼈대요소법은 교량의 상판을 보로 구성하여 격자구조로 나타낼 수 있고, 상판의 형태에 대해서도 제한이 없어 사교나 곡선교, 또는 불규칙한 교량에도 쉽게 적용할 수 있으며, 구조물의 절점에서 임의의 구속이 가능하므로 고정지지, 탄성지지 등 모든 형태의 지지조건을 표현할 수 있다. 몇몇 해석프로그램에서는 곡선보요소를 사용하고 있으나, 하중분배가 잘 되도록 부재길이를 정하여 절점에서의 부재각이 5°를 넘지 않도록 하면 실제 곡선보의 거동과 별 차이가 없다.⁽⁴⁾

교량의 질량은 일관성질량으로 모형화하였으며, 교량 감쇠행렬의 구성에는 점성감쇠(Rayleigh damping or viscous damping)를 사용하였고, 일반적인 강교량의 감쇠비를 고려하여 감쇠비는 2.0%로 하였다.

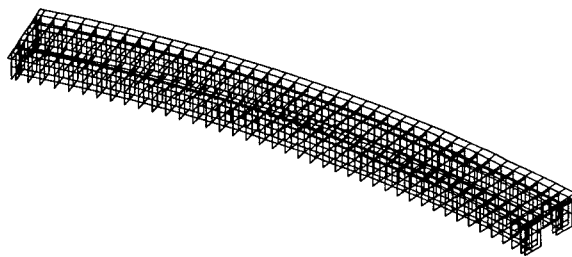


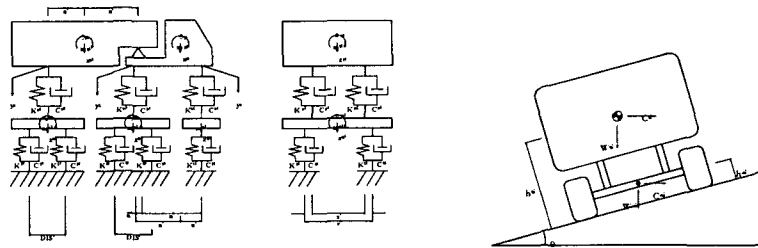
그림 2 대상교량에 대한 3차원 뼈대요소 모형

2.2 노면형상의 모형화

본 연구에서는 지수스펙트럴밀도(Power Spectral Density : PSD)함수를 사용하여 생성시킨 교량의 노면 형상을 사용하였으며 Dodds와 Robson⁽⁵⁾이 여러 가지 도로 상태에 대하여 제안한 값을 사용하였다. 노면 각각의 종류 즉, 매우 양호, 양호, 보통에 대해 사용한 조도계수(단위:m3/cycle)는 각각 5.0×10^{-6} , 20.0×10^{-6} , 80.0×10^{-6} 이다. 차량의 좌·우륵이 지나가는 두 개의 평행한 노면형상은 교차상관(cross correlation)을 고려하였다.⁽⁶⁾

2.3 차량의 모형화

도로교에서 흔히 볼 수 있는 대표적인 중차량은 트럭과 세미-트레일러(semi tractor-trailer)로, 본 연구에서는 5축 세미-트레일러를 대상으로 차량의 원심하중에 의한 차륜하중의 쓸림현상을 구현할 수 있는 13자유도의 3차원 주행차량모형을 적용하였다.⁽⁷⁾ 그림 3은 13자유도의 5축 세미-트레일러의 차량모형을 나타낸다. 차량의 전부(트랙터)와 트레일러의 질량은 m_{ti} 로 나타내고, 앞 차축과 텐덤의 질량은 m_{ai} 로 나타내었다. 차체는 수직변위(z)와 롤링변위(ϕ) 그리고 피칭변위(θ)로 3개의 자유도를 갖고, 앞 차축은 수직변위와 롤링변위의 2개의 자유도를 갖으며, 텐덤은 수직변위와 롤링변위, 피칭변위를 가진다. 트랙터와 트레일러는 피봇으로 연결되어 있어 각부의 처짐과 피칭을 y_i 로 치환할 수 있다. 대상 차량을 이같은 방법으로 모형화하면 전체 자유도 수는 13개가 된다.



(a) 측면도 (b) 정면도
그림 3 3차원 5축 세미-트레일러의 모형

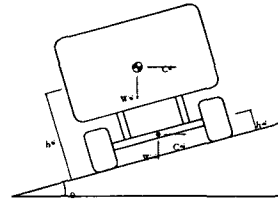


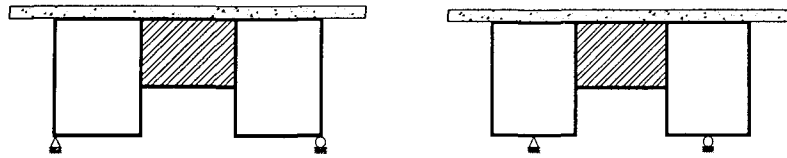
그림 4 차량에 작용하는 외력

곡선교 위를 주행하는 차량에는 원심력이 작용한다. 원심력에 의해 차량은 교량에 수평력을 작용시킬 뿐만 아니라 차량의 롤링운동에 의해 운하중의 쓸림현상이 발생한다. 이러한 현상은 수직 운하중과 수평 운하중을 변화시켜 내측의 운하중을 감소시키고 외측의 운하중을 증가시킨다. 그림 4는 곡선교 위를 주행하는 차량에 작용하는 외력을 나타낸다. C_{ti} 와 C_{ai} 는 각각 차체와 차축에 작용하는 원심력이고, W_{ti} 와 W_{ai} 는 각각 차체와 차축의 무게, h_{ti} 와 h_{ai} 는 각각 차체와 차축의 무게중심 높이, θ 는 곡선교의 편구배이다.

3. 동적응답 분석

본 절에서는 원심력에 의해 발생하는 차륜하중의 변화가 곡선교에 발생시키는 동적효과를 분석하고, 받침 배치위치가 다른 2개의 곡선교에 대하여 주행차량에 의한 동적응답을 비교·분석하였다. 대상교량의 받침 배치위치에 따른 곡선교의 동적응답을 분석하기 위하여 그림 5와 같이 받침이 강박스거더 외측에 배치된 경

우와 중앙에 배치된 경우를 선택하였으며, (a)의 경우 해석모형에서의 편의를 위해 받침이 강박스의 최외측에 배치된 것으로 모형화하였다.



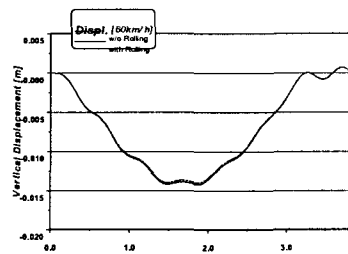
(a) 박스거더 외측에 배치된 경우 (b) 박스거더 중앙에 배치된 경우

그림 5 받침의 배치 위치

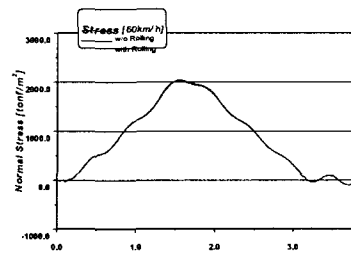
3.1 주행차량의 롤링운동에 의한 동적응답 분석

그림 6은 받침이 강박스거더 외측에 배치된 경우에 대하여 주행속도 60km/h일 때, 차량의 롤링운동에 따른 율하중 변화를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대한 시간이력곡선을 비교한 것이다. 노면조도의 영향을 배제하기 위해서 노면은 완전히 평탄한 상태로 가정하였다. 처짐과 응력은 각각 교량 중앙부의 외측 박스거더 하부플랜지에서의 연직방향 처짐과 수직응력을 나타내었으며, 반력은 시점부 곡선내측지점(AIL)과 시점부 곡선외측지점(AIR)에서의 연직방향 반력을 나타내었다. 이때 시간이력곡선은 차량의 전륜이 교량에 진입할 때부터 후륜이 교량을 빠져나갈 때까지의 각 응답의 시간이력을 보여준다.

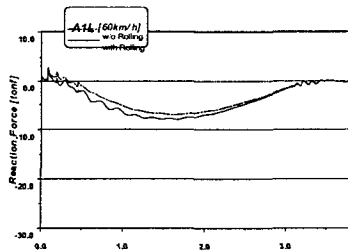
원심력에 의한 율하중 변화를 고려한 경우의 처짐, 응력, 반력에 대한 동적응답은 고려하지 않은 경우 보다 크게 나타났다. 지간 중앙부에서의 처짐은 1.4%, 응력은 1.0% 증가하였으나, 곡선내측지점의 반력은 14.2%, 곡선외측지점의 반력은 3.8% 증가하였다. 원심력에 의한 율하중 변화에 따른 동적효과는 곡선외측지점보다 부반력이 발생하는 내측지점의 반력에 더 큰 영향을 준다.



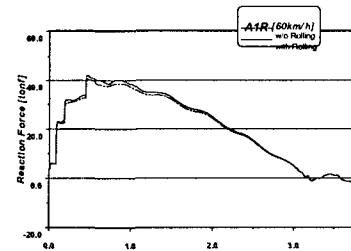
(a) 지간중앙부의 처짐



(b) 지간중앙부 하부플랜지의 수직응력



(c) 곡선내측지점 반력



(d) 곡선외측지점 반력

그림 6 차량롤링 유무에 따른 시간이력곡선 비교 (받침 외측배치)

3.2 차량의 주행속도에 따른 동적응답 분석

주행속도는 20, 40, 60, 80km/h에 대하여 연구를 수행하였으며, 노면조도는 완전 평탄한 상태로 하였다. 그림 7은 처짐, 응력, 반력에 대한 주행속도에 따른 동적증폭계수의 변화를 나타낸다. 반력에 대한 동적 증폭계수는 차량의 주행속도에 따라 증가하며, 처짐이나 응력보다 큰 값을 갖는다. 받침이 중앙에 배치된 경우에는 곡선외측지점보다 곡선내측지점 반력의 동적증폭계수가 더 크게 나타나지만, 받침이 외측에 배치된 경우에는 부반력을 받는 곡선내측지점 반력의 동적증폭계수가 곡선외측지점보다 작아지므로 동적인 측면에서 더욱 유리하다고 할 수 있다.

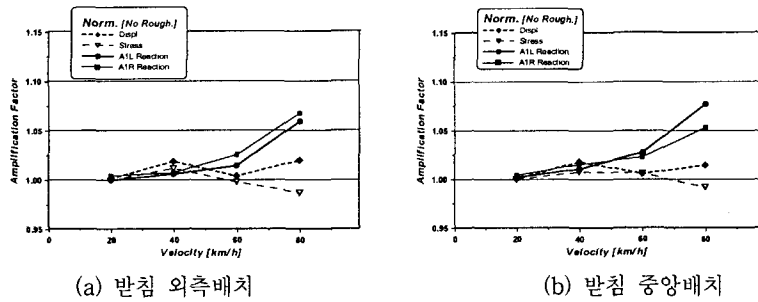


그림 7 주행속도에 따른 동적 증폭계수

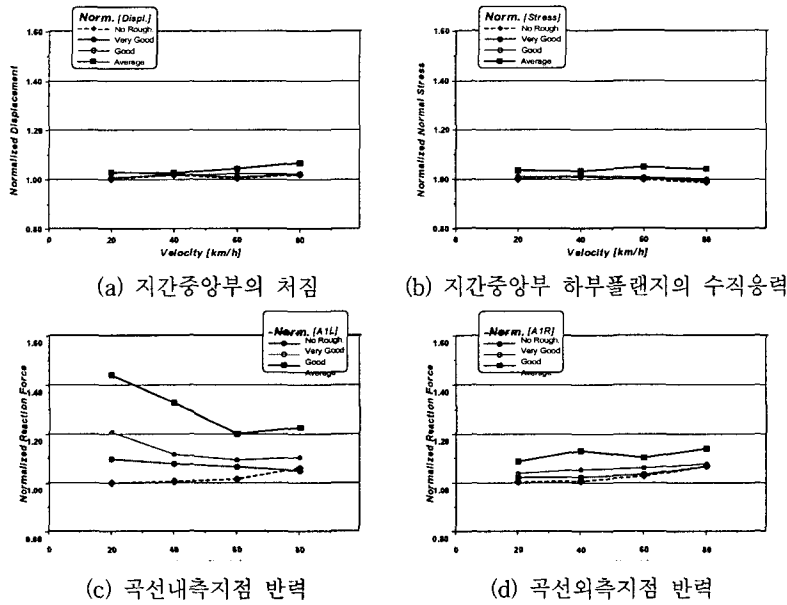


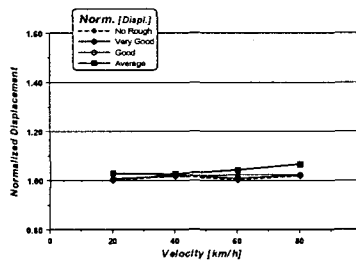
그림 8 노면조도에 따른 동적증폭계수 (받침 외측배치)

3.3 노면조도에 따른 동적응답 분석

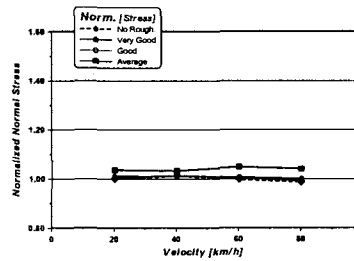
노면조도 등급에서는 5cm이상의 결손이 발생할 수 있는 불량과 매우 불량한 노면조도는 고려하지 않았으며, 매우 양호, 양호, 보통의 노면조도를 발생시켜 사용하였다. 그림 8은 받침이 외측에 배치된 경우에 대

하여 노면조도에 따른 동적증폭계수를 나타낸다. 노면조도가 불량해질수록 처짐, 응력, 반력에 대한 동적증폭계수는 모두 증가한다. 노면조도가 불량해짐에 따라 반력에 대한 동적증폭계수는 처짐이나 응력에 대한 동적증폭계수보다 더 크게 변화하며, 곡선외측지점의 반력보다 곡선내측지점의 반력에 대한 동적증폭계수의 변화가 더 크다는 것을 알 수 있다. 곡선내측지점 반력의 경우, 보통의 노면조도일 때 속도에 따라 동적증폭계수가 감소하는데, 이는 속도의 증가에 따라 반력의 크기가 커지기 때문에 노면조도에 의한 동적효과가 상대적으로 작아지는 것이다. 이는 속도가 증가할수록 노면조도에 따른 동적증폭계수의 변화폭이 더 작게 나타나는 것과 합치된다.

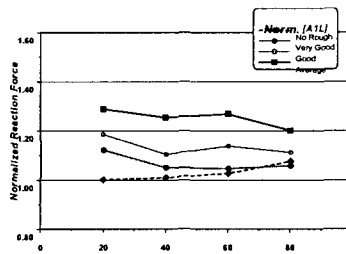
그림 9는 받침이 중앙에 배치된 경우에 대하여 노면조도에 따른 동적증폭계수를 나타낸 것으로, 곡선외측지점 반력에 대해서는 받침이 외측에 배치된 경우와 별 차이가 없으나 곡선내측지점 반력에 대해서는 오히려 더 작은 것을 볼 수 있다. 이는 받침이 외측에 배치된 경우에 부반력의 크기가 더 작으므로 상대적으로 동적증폭계수가 크게 나타나는 것이다. 즉, 노면조도가 불량해지면 곡선내측지점 반력의 동적증폭계수는, 받침이 외측에 배치된 경우가 중앙에 배치된 경우보다 더 커질 수는 있으나, 받침이 중앙에 배치된 경우가 부반력이 크게 발생하므로 더 불리하다고 할 수 있다.



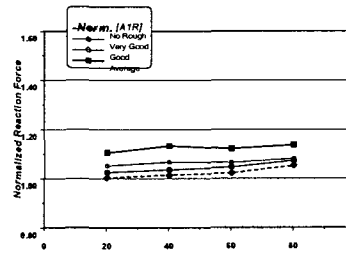
(a) 지간중앙부의 처짐



(b) 지간중앙부 하부플랜지의 수직응력



(c) 곡선내측지점 반력



(d) 곡선외측지점 반력

그림 9 노면조도에 따른 동적증폭계수 (받침 중앙배치)

3.4 편구배에 따른 동적응답 분석

편구배는 0° , 5° , 10° 의 세 가지 경우를 고려하였으며, 주행속도는 60km/h이고 노면조도는 완전 평탄한 상태로 하였다. 그림 10은 편구배에 따른 동적증폭계수를 나타낸 것으로 처짐이나 응력보다 곡선내측지점 반력에 대한 동적증폭계수가 훨씬 크게 나타나며, 받침이 중앙에 배치된 경우가 외측에 배치된 경우보다 더 큰 동적증폭계수를 보인다.

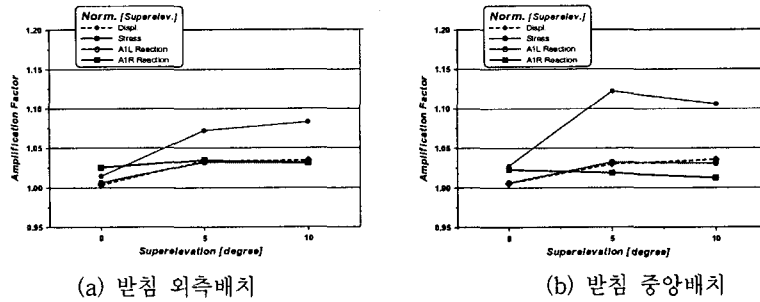


그림 10 편구배에 따른 동적증폭계수 (60km/h)

4. 결 론

본 논문에서는 주행차량에 의한 곡선교의 동적응답 특성을 연구하였고, 받침이 강박스거더의 외측에 배치된 경우와 중앙에 배치된 경우에 대하여 몇 가지 매개변수에 따른 곡선교의 동적응답을 비교·분석하였으며, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 곡선교에서 주행차량에 의한 동적효과는 처짐이나 응력보다 반력에 큰 영향을 주며, 곡선내측지점의 반력은 곡선외측지점의 반력보다 더 큰 동적효과를 나타낸다. 따라서 반력에 대한 검토가 필요하며, 특히 부분반력을 받는 곡선내측지점의 반력에 대한 검토가 중요하다.
- 2) 받침이 박스거더 외측에 배치된 경우에는 받침이 중앙에 배치된 경우보다 곡선내측지점의 부분반력이 상당히 작아지며 동적인 측면에서도 유리하므로 곡선교에서는 가급적이면 받침간격이 넓게 되도록 외측으로 배치하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 임성순, "1축 대칭단면을 갖는 곡선교의 고유진동수특성", 대한토목학회 논문집, 제14권, 제6호, pp.1281~1288, 1994.
2. 장승필, 박종원, 김성일, "차량하중 하의 곡선교의 동적해석", 대한토목학회 논문집, 제16권, 제I-2호, pp.123~133, 1996.
3. 서영국, "A Dynamic Analysis of Curved Girder Bridge Subject to 3-Dimensional Vehicular Loads", 서울대학교 석사학위논문, 1996.
4. Hambly, E. C., *Bridge Deck Behavior, 2nd ed.*, Chapman & Hall, 1991.
5. Dodds, C. J. and Robson, J. D., "The Description of Road Surface Roughness", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.31, No.12, pp.175~183, 1973.
6. 김상효, 허진영, "차량하중에 의한 다주형 강판형교의 충격계수 변화에 관한 연구", 한국전산구조공학회 논문집, 제10권, 2호, pp.159~170, 1997.
7. 김상효, 전강훈, 허진영, 김종학 "중차량 텐덤 모형화에 의한 강판형교의 동적응답에 관한 연구", 한국강구조학회 학술발표논문집, pp.342~348, 1999