

3경간 연속곡선교의 지진응답 특성분석

Analysis of seismic response of 3-span continuous curved bridges

김 상 효* · 이 상 우** · 조 광 일*** · 박 병 규****

Kim, Sang Hyo · Lee, Sang-Woo · Cho, Kwang Il · Park, Bounng Kyu

ABSTRACT

Little has been understood about the seismic behavior of curved bridges due to the different structural characteristics compared to straight bridges. In this study, a simple numerical model, widely used for seismic analysis, is modified for a more realistic estimation of the seismic behavior. The seismic response of curved bridges obtained with the modified simple numerical model was compared with the result using a more sophisticated model to verify the feasibility. Seismic analyses were performed on three-span continuous curved bridges, which is a structural system widely used in highway structures. Numerical model of the three-span continuous curved bridges were subjected to seismic loads in diverse directions. From the result of the analysis, it was found that the direction of the seismic load have significant effect of the seismic behavior of curved bridges when the central angle exceeds 90 degrees.

Keywords : Curved Bridge, Radius of Curvature, Bearing Arrangement, Application Direction of Seismic Load, Upward Reaction Force.

1. 서 론

교통의 원활한 흐름을 위해서 도로의 신설이 필요하고 이러한 요구로 도로가 복잡해지고 도로를 연결하는 입체교차로나 램프가 많아지면서 곡선교 건설의 필요성이 커지고 있다. 그러나 곡선교의 역학적인 응답특성은 직선교와 다르게 나타나며, 우리나라에는 곡선교의 합리적인 설계를 위한 기초자료가 부족하여 현재 곡선교의 설계는 주로 외국의 자료에 의존하고 있다. 현재까지의 곡선교에 관한 연구는 상부구조의 정·동적 응답에 대한 연구가 주를 이루었으며, 지진응답에 대한 연구는 특히 미미한 실정이다.

곡선교의 경우, 교대와 교대를 연결하는 현의 외측에 상부구조가 놓이게 되므로 지진하중의 작용에 따라 각 받침부에 발생하는 수직방향의 반력에 영향을 미치게 된다. 이러한 영향으로 인해 곡선교의 내측지점에서 부반력의 발생가능성이 높아지고, 이에 따른 상부구조의 현방향에 대한 회전력에 따른 낙하의 가능성도 높아질 수 있다.

따라서 본 논문에서는 다양한 영향인자들에 의해 상대적으로 복잡한 응답특성을 보일 것으로 예상되는 곡선교의 지진응답 특성을 효과적으로 분석하기 위하여 곡선교의 지진응답을 반영할 수 있는 합리적인 모형화 방법을 개발하고, 개발된 모형을 이용하여 3경간 연속곡선교를 대상으로 곡

* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수(E-mail: sanghyo@yonsei.ac.kr)

** 정회원, (주)송화이엔씨 기술연구소 소장(E-mail: swlee05@paran.com)

*** 학생회원, 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정(E-mail: cky222@yonsei.ac.kr)

**** 정회원, (주)씨텍컨설팅 사원 (E-mail: bobo2mi@yahoo.co.kr)

선반경, 지진하중의 작용방향 등의 변화에 따른 지진응답을 평가하여 곡선교의 합리적인 내진설계를 위한 참고자료로서 활용할 수 있도록 한다.

2. 곡선교 설계기준

현재 곡선교에 대한 내진 설계기준은 명확하게 규정되어 있지 않으나, 곡선교의 지진거동 분석과 관련된 설계기준들을 살펴보면 다음과 같다. AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)의 'Guide Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges (2003)'에는 정규교량으로 분류할 수 있는 곡선교량은 동일지간을 갖는 직선교량으로 변화하여 해석할 수 있다고 규정하고 있으며 비정형 교량에 대해서는 곡선형에 대한 기하학적 형상을 고려한 3차원 해석모델을 작성하여 시간이력해석등의 보다 정밀한 방법에 따라서 지진해석을 수행하도록 하고 있다. JRA(Japanese Road Association)의 'The Japanese Specification for Highway Bridges (1996)'에는 진도법에 의해서 얻어진 정적하중을 그림 1과 같이 적용하도록 정의하고 있으며, 최대응답의 발생은 지진하중의 작용방향을 θ 만큼 회전 시켰을 경우 발생한다고 제시하였다. 여기서 θ 는 일본의 한신고속도로 공단의 강교량을 위한 설계규약(1980)에서 제안한 값이다.

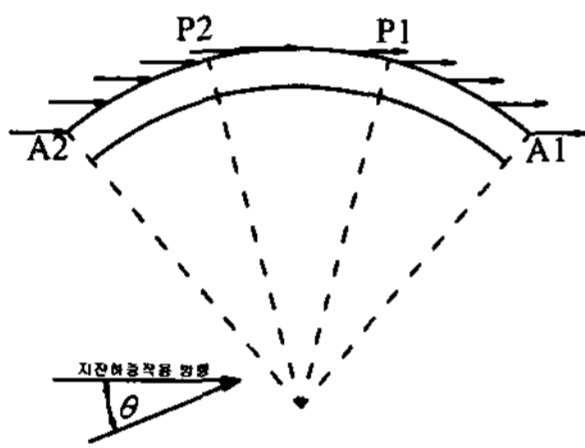


그림 1. 곡선교의 지진하중 작용방향 (JSHB, 1980)

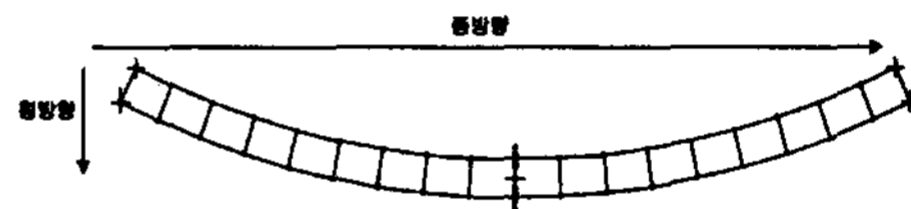


그림 2. 설계기준에 제시된 다중모드스펙트럼해석 방향

우리나라의 도로교설계기준(2000)에서는 단경간교에 대해서는 상부구조와 교대사이 연결부에 고정하중 반력에 가속도계수와 지반계수를 곱한 값이 수평지진력으로 작용한다고 보고 종방향 및 횡방향에 대하여 안전하게 설계하도록 하고 있다. 또한, 그림 2와 같이 곡선형태의 구조물에 대해서 종방향 운동은 교대들을 연결하는 현(chord)을 따라서 작용되고, 횡방향 운동은 이 현에 수직인 방향으로 작용하도록 하여 이와 같은 방법으로 작용된 종방향 및 횡방향 운동에 의해 발생하는 힘은 도로교설계기준(2000)에서 제시하고 있는 직교 지진력의 조합 규정을 따라서 합성해야 한다고 제시되어있다. 그러나 곡선교는 직선교에 비하여 교폭이 매우 좁고 주거더의 높이가 상대적으로 높기 때문에 지진하중과 같은 수평하중에 대하여 직선교와는 달리 횡방향응답이 크게 발생될 것으로 예측된다. 또한 교량에 작용하는 지진하중의 작용방향을 특정한 방향으로 정의하기 어렵기 때문에 현재의 설계기준에서 제시하는 방법으로는 실제 발생하는 지진하중의 영향을 효과적으로 반영하는데 어려움이 있을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 단경간 곡선교의 지진응답 특성을 분석하기 위하여 응답스펙트럼 해석을 수행하였으며, 연속곡선교에 대해서는 지진하중의 작

용방향을 변화시키면서 이에 따른 응답특성을 분석하였다.

3. 지진거동 분석을 위한 대상교량의 모형화

곡선교의 모형화 방법의 편리성을 위해 일반적으로 설계 실무에서 사용되는 간략모형의 경우에는 지점부를 보강하지 않고 있다. 그러나 간략모형의 경우 모형의 구조적인 특징으로 인하여 실제 교량에서 발생하는 변위보다 과도한 변위가 발생할 수 있을 것으로 예상되므로 본 논문에서는 간략모형의 문제점을 보완시킨 개선된 모형을 제시하고자 한다.

3.1 대상교량의 제원

곡선교 통계자료 분석결과, 연속곡선교의 경우 3경간 연속교가 가장 일반적인 것으로 나타났다. 따라서, 모형화방법 개발을 위한 교폭 9m, 곡선반경 150m, 교장 40-50-40m인 연속곡선교를 선정하였으며 평면도와 단면도, 교각일반도는 그림 3과 같다.



(a) 평면도 및 단면도

(b) 교각일반도

그림 3. 연속곡선교의 평면도 및 교각일반도

3.2 대상교량의 모형화 및 적합성 검증

현재 일반적으로 사용되는 간략모형은 지점부를 보강하지 않고 있는데 이러한 경우 간략모형의 구조적인 특징으로 인하여 횡방향 응답 등이 정밀모형과 비교하여 과다하게 나타날 것으로 예상된다. 따라서, 본 논문에서는 대상교량 지점부의 단면을 그림 4와 같이 셀모형, 정밀모형, 간략모형으로 각각 모형화하고 각각의 모형에 횡방향으로 단위 지진하중을 작용시켜 이때 발생하는 횡방향 변위를 표 1에 나타내었다. 표 1로부터 간략모형의 경우 지점부를 보강하지 않았을 경우 횡방향 변위가 셀모형이나 정밀모형보다 과도하게 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 간략모형이 셀모형이나 정밀모형과 유사한 응답을 나타낼 수 있도록 지점부를 X형으로 보강한 모형을 사용하였다.

지진응답 분석에 적용할 모형의 검증은 위하여 정밀모형과 개선된 간략모형에 대하여 단일모드 스펙트럼해석을 수행하였으며, 내진설계 시 이용되는 지점의 변위와 지진력을 비교·분석하였다. 대상교량의 정밀모형은 3차원 뼈대요소를 이용하여 그림 5와 같이 프레임요소들을 곡선으로 연결

하여 절점에서 강결된 격자로 모형화하였다(Hambly, 1991). 3차원 뼈대요소를 횡방향과 종방향으로 구분하여 요소가 단면의 제원을 갖도록 모형화였으며, 교량의 질량은 일관성질량으로 모형화하였다.

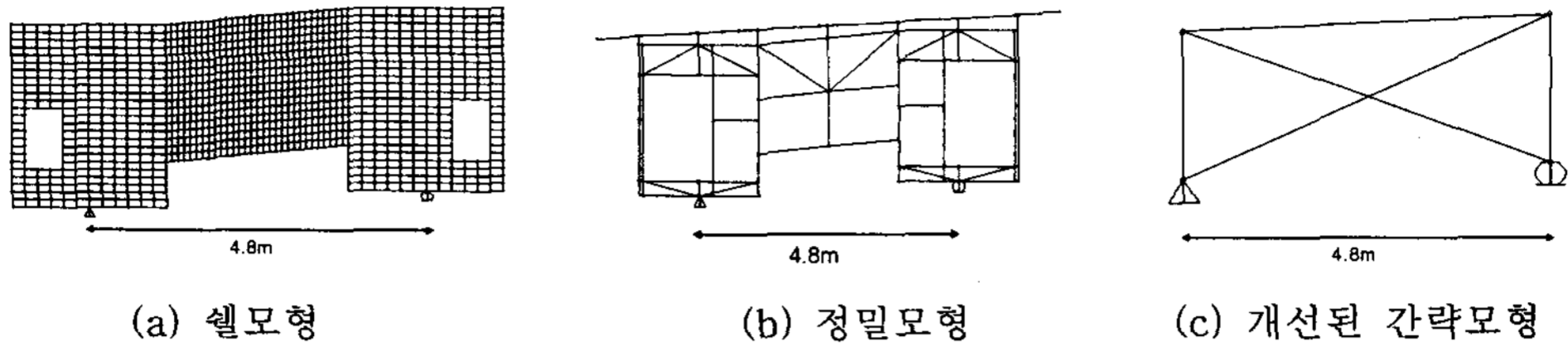


그림 4. 대상교량의 지점부 모형

표 1. 지점부의 횡방향 변위 비교

(단위 : mm)

shell 모형	정밀모형	지점 미보강	지점보강
0.009	0.010	1.8	0.012

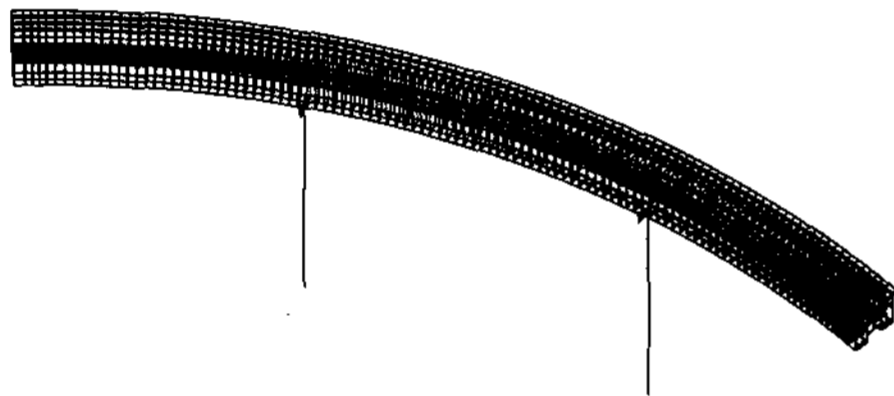


그림 5. 대상교량의 정밀모형

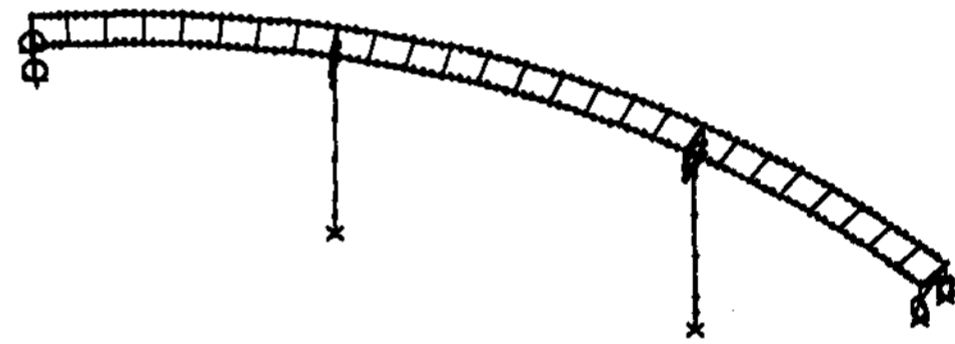


그림 6. 대상교량의 개선된 간략모형

그림 6의 개선된 간략모형은 정밀모형과 같이 직선의 프레임 요소를 곡선으로 연결하여 절점에서 강결된 격자로 모형화하는 3차원 뼈대요소모형을 사용하였다. 가로보를 제외한 횡방향 부재의 질량을 종방향 부재에 포함시켜 모형화 하였으며 상부구조의 중립축과 교량받침부의 높이차를 고려하기 위해 강성이 높은 요소를 사용하여 거더의 중립축과 받침부를 연결하였다.

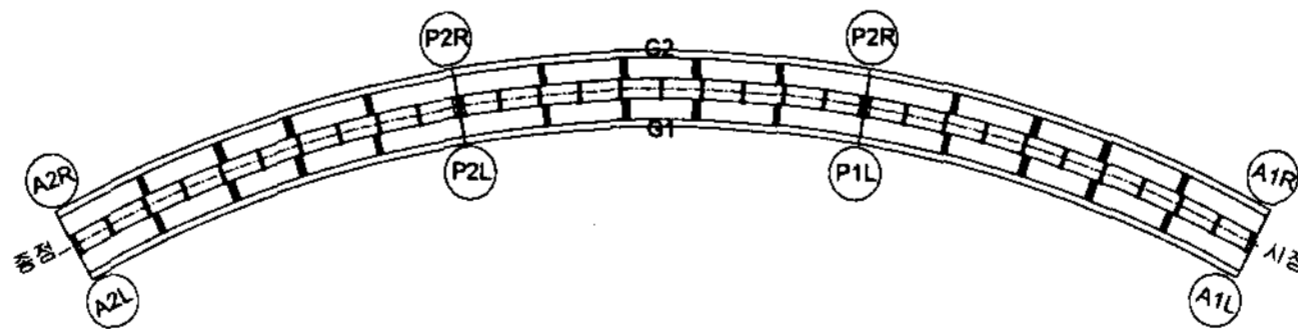


그림 7. 연속곡선교의 받침기호

그림 7에는 연속곡선교의 기호를 나타내었으며 고정단은 P2L에 위치해 있다. 연속곡선교의 단일모드스펙트럼해석 시 대상교량에 발생하는 교축직각방향 변위와 지진력을 그림 8에 나타내었으며 교각 P1과 P2의 변위 및 지진력의 결과는 교각의 코핑부와 기둥부가 만나는 위치의 값으로 나타냈다. 정밀모형과 개선된 간략모형에 대한 단일모드스펙트럼해석을 통하여 비교한 결과, 교축

직각방향 변위의 경우에는 2.5cm 정도의 차이가 나타났으나 이는 단일모드스펙트럼해석이 교량의 복합적인 모드를 직접적으로 나타낼 수 없기 때문인 것으로 판단되며 지점에서의 지진력은 개선된 간략모형과 정밀모형 사이에 약 10% 미만의 차이를 보이는 것으로 나타났다.

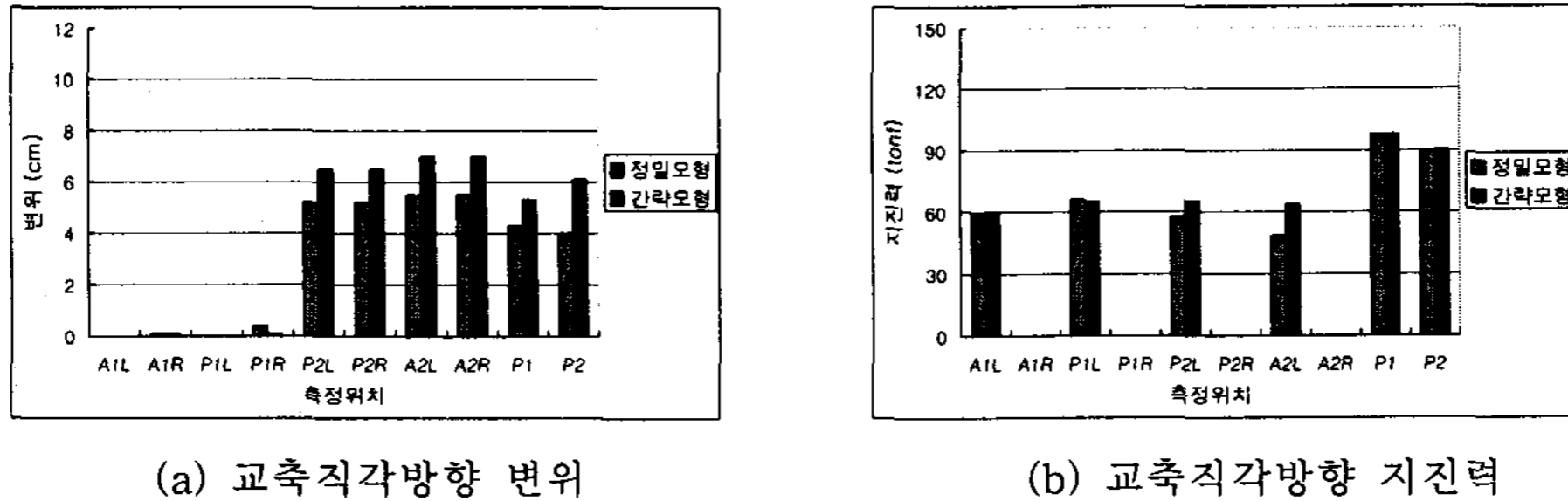


그림 8. 연속곡선교의 지진응답

전체적으로 연속곡선교에 대하여 정밀모형과 개선된 간략모형을 비교한 결과, 각 모형의 지진응답의 특성이 유사하게 나타났다. 따라서, 모형화의 용이함을 고려한다면 간략모형을 곡선교의 지진하중에 대한 응답특성을 분석하기 위한 모형으로 간략모형을 적용하여도 충분하다고 판단되므로 본 논문에서는 모형화에 많은 시간과 노력을 대폭 줄일 수 있는 간략모형을 이용하여 곡선교의 지진하중에 의한 응답을 분석하였다.

4. 지진응답 특성분석

4.1 해석방법 및 대상교량

현행 도로교설계기준에는 곡선형태의 구조물에 대해서는 종방향과 횡방향을 정의하여 정의된 2방향에 대하여 다중모드스펙트럼해석이나 공인된 해석법을 이용하여 지진응답해석을 수행하도록 정의하고 있다. 그러나, 연속곡선교의 경우 정의된 2방향으로만 지진하중을 작용시킨다면 실제로 발생하는 지진에 의해서 교량에 발생하는 응답을 충분히 반영할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 3경간 연속곡선교에 대하여 다양한 지진하중의 방향을 적용하여 곡선교의 지진응답해석을 수행하였다. 곡선교의 형상에 따른 응답의 변화를 관찰하기 위해 대상교량의 곡선반경을 변화시키면서 이에 따른 곡선교의 지진응답을 비교하였다. 또한, 곡선반경의 변화에 따른 곡선교의 지진응답 특성을 비교·분석하기 위하여 곡선반경이 다른 교량을 추가로 선정하였으며, 선정된 연속곡선교의 제원은 표 2에 나타내었다.

곡률이 큰 연속곡선교의 경우, 도로교설계기준(2000)에서 제시하는 설계기준에 따라 교대들을 연결하는 현을 기준으로 지진하중이 작용한다고 가정하여 설계를 하는 것은 실제 지진하중이 교량에 작용하는 것과 많은 차이를 보일 수 있다. 실제 지진하중은 교대와 교대사이의 현방향과 현에 수직인 방향으로만 작용하는 것이 아니라 다양한 방향에서 작용할 수 있기 때문에 이러한 지진하중의 작용을 반영하기 위해서는 지진하중의 작용방향을 달리하여 곡선교의 지진응답을 분석하는 것이 필요하다. 따라서, 본 절서는 지진하중의 작용방향을 그림 9와 같이 0~180°까지 15°간격으로 변화시키면서, 지진하중의 작용방향에 따른 곡선교의 응답과 설계기준에 의한 응답을 비교·분

석하였다. 지진하중은 교축방향 및 교축직각방향의 2방향으로 작용하는 것으로 하였으며 지진하중의 조합은 도로교설계기준(2000)에서 제시하고 있는 직교지진력의 조합방법을 이용하였다. 또한, 일반적으로 수직방향 지반운동은 교량에 영향을 줄만큼 강하지 못한 것으로 알려져 특별한 주의가 요구되지 않으므로 본 논문에서는 수직방향의 응답은 고려하지 않았다.

표 2. 연속곡선교의 제원

곡선반경(m)	지간장(m)	중심각(°)	교폭(m)
R=55	140(45+50+45)	146	6.3
R=75	125(40+45+40)	92	9
R=93	150(40+70+40)	91	12
R=120	130(40+50+40)	62	9
R=150	130(40+50+40)	49	9
R=200	130(40+50+40)	37	9

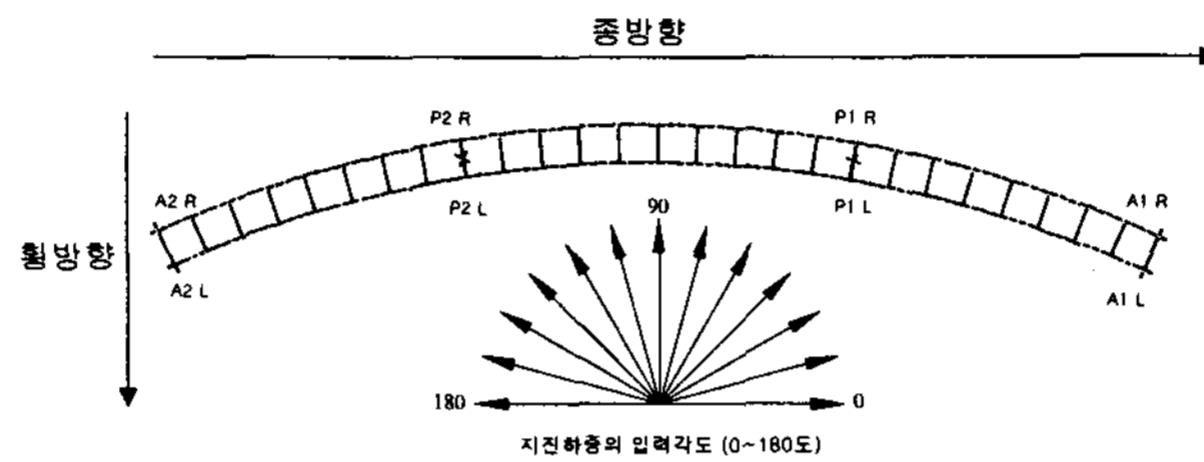


그림 9. 지진하중 작용방향

4.2 연속곡선교의 지진응답 특성분석

지진하중에 대한 곡선교 응답의 결과는 대상교량의 곡선반경에 따라 거동특성이 유사한 곡선반경 120~200m의 곡선교와 곡선반경 55~93m의 곡선교로 크게 나누어 분석할 수 있다. 여기서, 곡선반경 55~93m인 교량은 중심각이 90°이상인 교량으로서 AASHTO의 'Guide Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges(2003)'에서 정의하는 비정형 교량에 속한다.

표 3. 곡선반경에 따른 변위

(단위 : cm)

곡선반경(m)	교축방향			교축직각방향		
	설계기준	최대값	증가율(%)	설계기준	최대값	증가율(%)
200	14.25	14.25	0	6.51	6.52	0.2
150	13.48	13.5	0.1	6.68	6.68	0
120	12.44	12.58	1.1	6.87	6.87	0
93	11.45	11.5	0.4	9.39	9.52	1.4
75	6.43	6.96	8.2	6.54	6.86	4.9
55	11.6	14.59	25.8	6.68	9.23	38.2

대상교량의 P2 지점에 대한 변위와 지진력을 표3~4에 나타내었다. 곡선반경 120~200m의 경우에는 지진하중의 작용방향을 변화시켰을 때 발생하는 변위와 지진력은 설계기준에 의해서 구해지

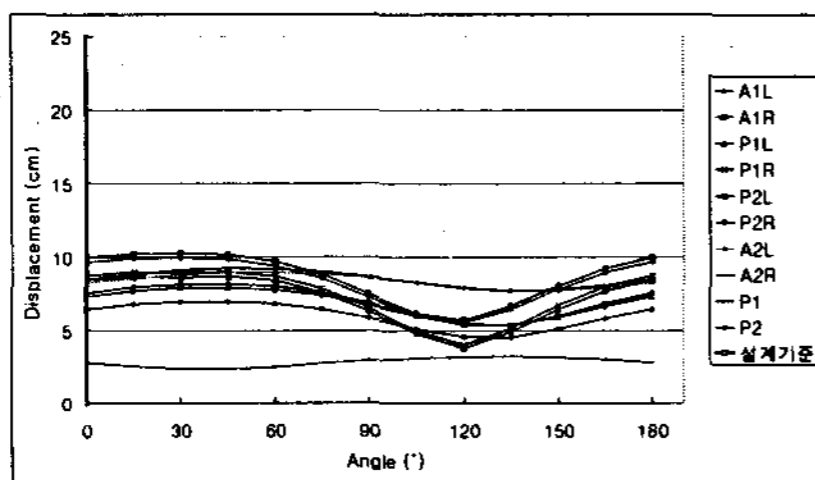
는 값과 거의 동일하게 나타난 반면, 곡선반경 120~200m의 경우에는 지진하중의 작용방향을 변화시켰을 때 발생하는 변위는 설계기준에 의해서 구해지는 값에 비하여 최대 38% 큰 값을 보였으며 지진력은 최대 27% 크게 나타났다. 또한 그 차이는 곡선반경이 작을수록 증가하는 경향을 보였다.

표 4. 곡선반경에 따른 지진력

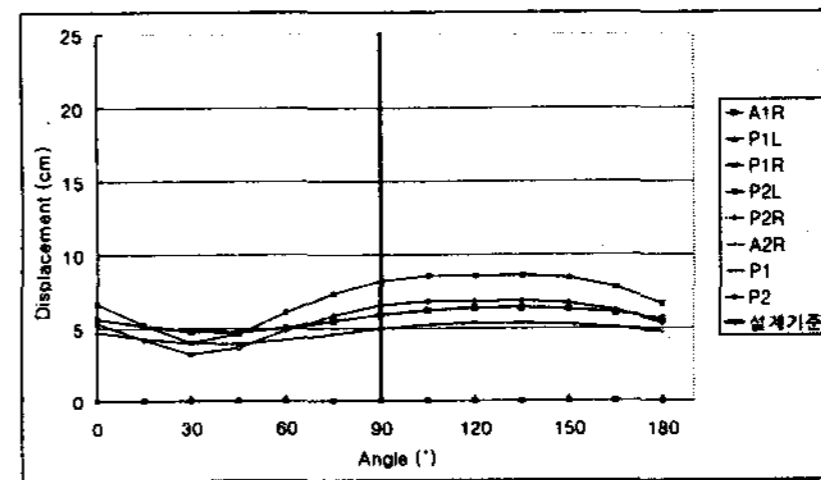
(단위 : tonf)

곡선반경 (m)	교축방향			교축직각방향		
	설계기준	최대값	증가율 (%)	설계기준	최대값	증가율 (%)
200	218.98	219.02	0	101.41	101.49	0.1
150	218.93	218.93	0	104.18	105.37	1.1
120	217.29	219.01	0.8	105.17	107.22	2.0
93	321.26	323.05	0.6	117.64	134.93	14.7
75	209.89	221.87	5.7	102.36	112.09	9.5
55	90.52	110.2	21.7	91.68	116.42	27.0

교량의 응답변화를 나타낸 그래프는 지진하중의 작용방향에 따른 변화가 크게 나타나는 곡선반경 55~93m의 곡선교 중 곡선반경이 75m인 곡선교의 결과만을 나타내었다. 곡선반경 120~200m인 교량에 대하여 지진하중의 작용방향을 변화시켰을 때 발생하는 최대변위는 설계기준에 의해서 구해지는 변위와 거의 동일하게 나타난 반면, 그림 10에 나타낸바와 같이 곡선반경 55~93m인 교량에 대하여 지진하중의 작용방향을 변화시켰을 때 발생하는 변위는 설계기준에 의해서 구해지는 변위보다 크게 발생하는 경우가 발생하였으며 그 차이는 최대 3cm로 나타났다.



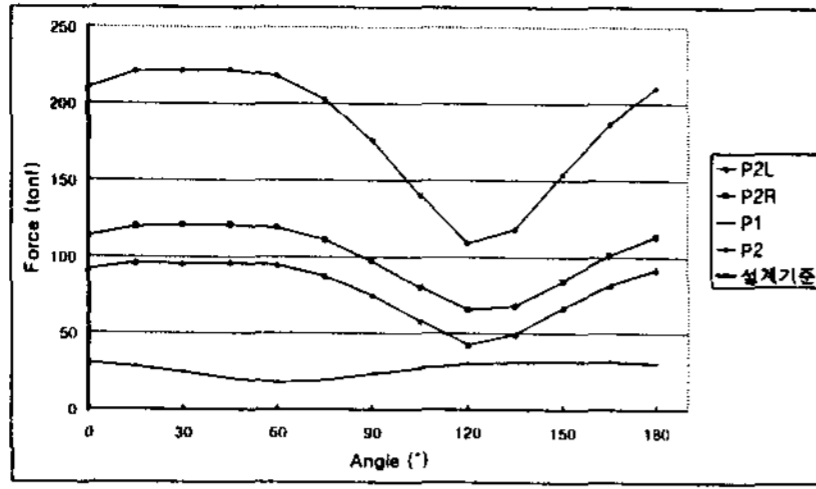
(a) 교축방향



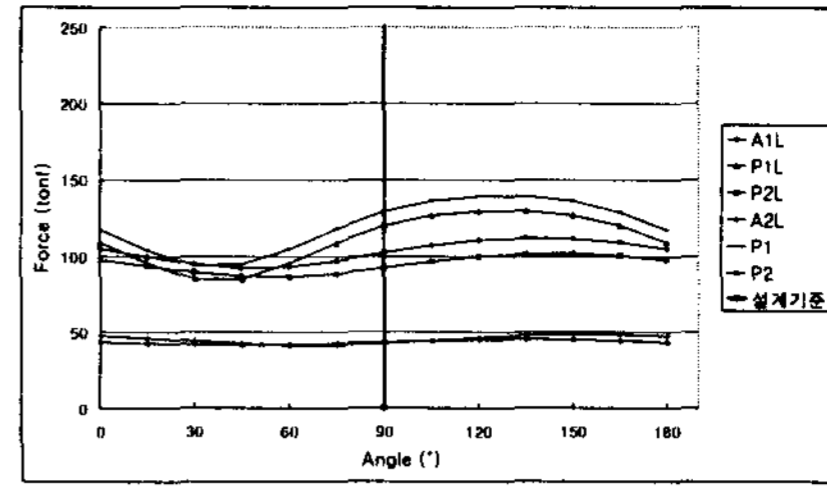
(b) 교축직각방향

그림 10. 연속곡선교 지점에 발생하는 변위 (R=75m)

지진력의 경우에도 곡선반경 120~200m인 연속곡선교에 대해 지진하중의 작용방향을 변화시켰을 때 발생하는 응답은 설계기준에 의해서 구해지는 응답과 거의 동일하게 나타난 반면, 곡선반경 55~93m인 교량에 대하여 지진하중의 작용방향을 변화시켰을 때 발생하는 지진력은 설계기준에 의해서 구해지는 지진력보다 크게 발생하는 경우가 그림 11과 같이 발생하였으며 그 차이는 최대 20tonf로 나타났다.



(a) 교축방향



(b) 교축직각방향

그림 11. 연속곡선교 지점에 발생하는 지진력 (R=75m)

5. 결론

본 논문에서는 다양한 곡선반경을 갖는 연속곡선교에 대해 지진응답해석을 수행하였다. 곡선교의 지진응답특성을 분석하기 위하여 합리적인 곡선교의 모형화 방법을 제시하였고, 곡선교의 지진응답을 변위와 지진력을 중심으로 분석하였다. 본 논문의 결론은 다음과 같다.

1. 곡선교의 합리적인 지진응답 분석을 위하여 일반적으로 설계시 사용하고 있는 단순모형의 지점부를 X자형으로 보강한 모형을 제안하였다. 제안된 간략모형의 적합성을 검증하기 위하여 정밀모형과의 응답비교를 수행한 결과 각각의 해석모형에 의한 변위나 지진력이 거의 유사한 수준인 것으로 평가되었다. 따라서 지진해석 시 지점부가 보강된 간략모형을 사용하여도 곡선교의 지진응답을 효과적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 현행 도로교설계기준에서 제시하는 방법에 의한 교량의 응답은 곡선반경이 120m 이상인 교량(중심각 90°이하)의 경우에는 지진하중 작용방향 변화에 따라 발생하는 최대응답을 충분히 반영할 수 있지만, 곡선반경이 93m보다 작은 교량(중심각 90°이상)의 경우에는 지진하중 작용방향 변화에 따라 발생하는 최대응답을 반영할 수 없는 것으로 분석되었다. 따라서, 중심각이 90°를 초과하는 교량에 대해서는 지진하중의 작용방향을 고려하면서 다중모드스펙트럼 해석을 수행하여 대상교량의 지진응답 특성을 분석하여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 연구지원으로 이루어진 것입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, “도로교표준시방서”, 설계/시공 및 유지관리편, 건설교통부, 1996.
2. 김상호 등, “곡선교 받침배치형태에 따른 주행차량하중에 의한 수평반력 특성분석, 대한토목학회 논문집”, Vol.24 No.1A, 2004, pp. 143-150.
3. AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials), “Guide Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges”, AASHTO, 2003.
4. JRA(Japan Road Association), “The Japanese Specification for Highway Bridges”, JRA, 1996.
5. Hambly, E. C., “Bridge Deck Behavior”, 2nd ed., Chapman & Hall, 1991.