

고속철도 교량의 동적거동에 미치는 탄성받침의 영향

The Effects of Elastomer-Bearing on the Dynamic Behaviors of Bridge for KHSR

곽종원*

김병석**

Kwark, Jong Won Kim, Byung Suk

국문요약

현재 시공 중에 있는 경부고속철도의 교량은 2경간 연속인 경우에 중앙교각에는 pot 받침이 설치되고 양 끝단의 교각에는 pad 받침이 설치되고 있으나, 기존의 고속주행하는 철도에 의한 교량의 동해석에서는 이러한 지점조건이 고려되지 않은 상태에서 이루어졌다. 본 논문의 목적은 이러한 지점조건에 상이성에 따른 교량의 거동과역에 있으며 이를 위하여 본 연구에서는 이러한 지점조건에 사용된 탄성받침이 교량의 동적 거동에 미치는 영향에 관하여 연구하였다.

연구결과에서 탄성받침이 사용된 고속철도교량의 동적거동은 과도한 가속도 응답을 보일 수 있음이 밝혀졌다.

주요어 : 탄성받침, 이동하중, 고속철도, 동적거동, 교량

ABSTRACT

The bridges for Korea High-Speed Railway(KHSR) under construction are supported with pot bearings on the middle pier and with pad bearings on the side piers, respectively. The dynamic analysis on these bridges due to trains with high speed, however, has been performed neglecting the effects of bearings. The objective of this study is investigation on the dynamic behavior of bridge supported by pad bearings. The effects of pad bearings with various flexibilities on the dynamic responses of bridges are studied.

From the results of this study, the effects of elastomeric bearing on the dynamic responses of bridge(especially vertical accelerations) may cause undesirable behaviors.

Key words : elastic bearing, pad bearing, moving force, high-speed railway, dynamic behavior, bridge

1. 서 론

고속 주행하는 열차에 의해서 교량은 열차가 지나가는 동안 반복적인 집중하중을 받아서 동적 거동을 하게 된다. 이러한 반복적인 하중은 반복정도 즉, 타격진동수에 따라서 다양한 응답을 보여주게 된다. 당초 콘크리트 박스 거더교로 설계되었던 경부고속철도 교량은 경제성 등의 여러 가지 이유 때문에 I형 콘크리트주형으로 지지되는 판형교로 설계가 변경되

었다가 동적 거동에 문제가 제기되어 이를 다시 원안대로 콘크리트 박스거더교로 설계 및 시공되었다. 이러한 과정에서 동적 거동에 관한 안정성문제를 검토하는 단계에서는 교량 단부의 꺾임각, 동중폭계수, 처짐, 상판의 가속도 등의 응답을 기준으로 교량의 동해석이 수행되었다. 한편 열차의 제동과 온도에 의한 교량 종방향 거동에 저항하는 교각의 강성이 부적절함을 해소하기 위하여 2경간 연속교(2@40)의 모든 교량에 일점 고정단을 위한 pot 베어링과 양단부의 pad 베어링이 설치되었다. 설계초기단계에서 이러한 지점조건이 고려되지 않은 상태에서 즉, 일점 고정과 이점 자유 이동

* 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원, 공학박사

** 정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

단의 개념으로 동해석이 미국의 CEC(International Civil Engineering Consultant, INC)사에 의하여 수행되었다.⁽¹⁾ 그러나 이러한 지점조건의 상이성은 교량의 각 응답에 영향을 미칠 것으로 판단되나 그 실체에 대한 규명이 이루어지지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 지점점에 사용된 탄성받침이 교량의 동적 거동에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

2. 고속전철의 고속주행에 따른 공진 문제

일반적인 저속 주행하는 차량을 위한 교량의 동적 거동은 차량과 교량의 공진 가능성이 적으나 고속 주행하는 열차와 같이 특정 진동을 유발 할 수 있는 연속적인 반복하중이 교량에 가해질 때는 이러한 타격효과와 교량의 고유진동수와와의 관계에 따라 공진의 가능성을 갖게 된다. 한국형 고속전철(이후 KTGv)은 대표적으로 그림 1과 같은 차량의 구성을 갖게 된다. 그림에서 볼 수 있듯이 각 대차 밑에 위치한 차륜하중은 그 간격이 3m이고 이러한 대차들간의 간격은 18.7m의 대표 값을 갖고 있다. 동력차와 객차는 그 축하중에는 거의 차이가 없으나 차륜의 분포가 달라서 동력차와 모터차 사이에 가장 큰 하중이 분포하게 된다. 그러나 반복적인 하중의 효과는 객차의 경우와 유

사한 18.7m 정도의 타격간격을 갖는다고 볼 수 있다.⁽²⁾

이러한 일정한 타격간격은 지나가는 속도와 더불어 교량에 타격진동수로 작용하게 된다. 고속 주행하는 일반 차량의 경우에는 그 타격간격이 일정하다고 볼 수 없고 속도가 저속이므로 이러한 공진 문제에 크게 문제되지 않는다. 더구나 열차의 주행 안전성을 보장하기 위한 구조물의 설계조건이 까다로운 고속전철의 경우에는 그 제한사항을 만족하기 위해서는 동해석이 필수적이며 이때 공진 검토와 그때의 응답해석은 필수적이라 할 수 있다.

그림 2는 이동하중에 의한 교량의 공진 현상과 그에 따른 부공진 현상의 개념을 설명하고 있다. 여기서, 연행하중이란 일정한 간격을 유지하면서 반복적으로 교량에 하중이 집입하는 경우를 말한다. 그림에서와 같이 교량의 고유진동수와 같은 타격진동수(또는 진동수)를 가하는 경우에(이때의 진행속도를 임계속도 또는 위험속도라함) 교량의 운동이 외부하중과 같은 위상으로서 거동하게 되며 그러한 진동수의 정수배 또는 정수의 역수배인 경우(이때를 부임계 또는 부위험 속도라 함)에도 그 진폭이 증가되는 현상이 일어날 수 있다. 일반적으로 교량의 거동이 저차 모드에서 휨모드를 가지므로 저차모드에서 공진이 일어난다.

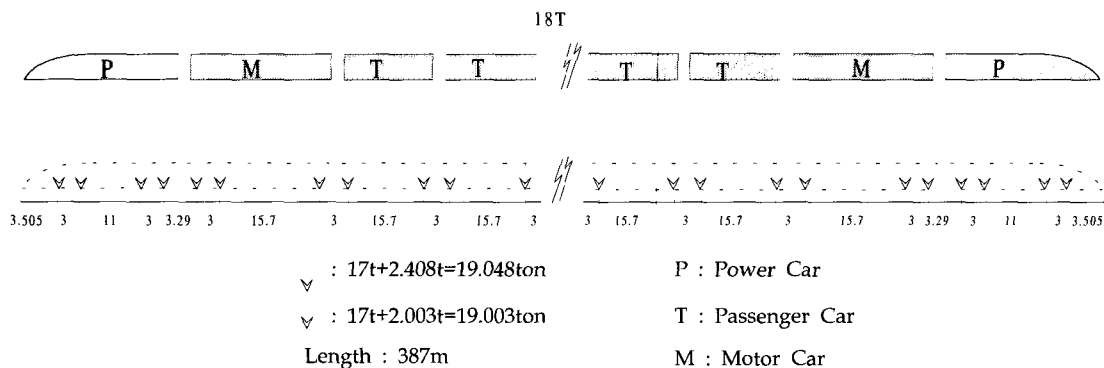


그림 1 KTGv의 구성

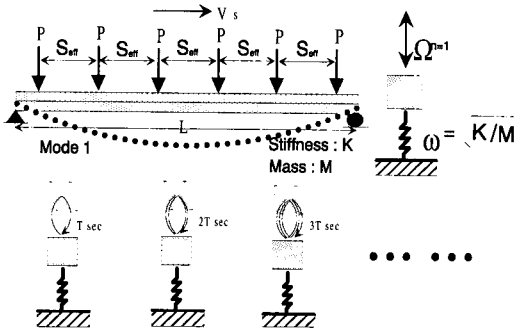


그림 2 연행하중에 의한 교량의 공진

3. 고속철도 교량의 동해석

3.1 교량의 제원 및 진동특성

대상 교량은 현재 경부고속전철에 건설되고 있는 교량형식 중에서 대표적인 콘크리트박스 거더로서 2경간 연속교이다(그림 3참조). 중앙 지점은 pot베어링이고 양단 지점은 탄성받침으로 이루어져 있다. 교량은 뼈대요소를 사용하여 모델링하고 비틀에 관한 영향은 배제하

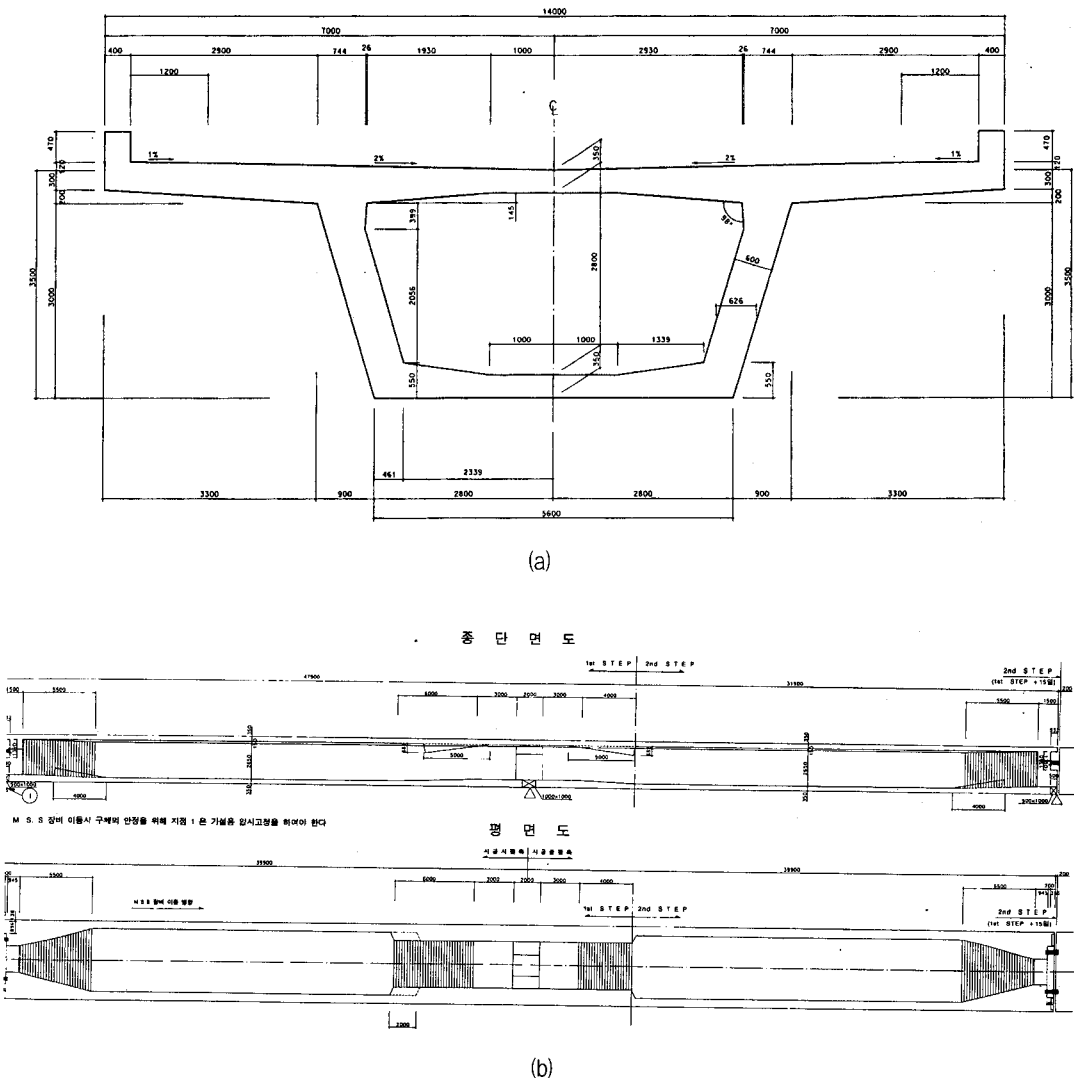


그림 3 2경간 연속 콘크리트 박스교의 대표단면과 형상

고 교량의 휨거동에 중점을 두고 해석을 수행하였다. 탄성받침의 경우는 고감쇠가 아니라서 그 감쇠효과는 무시하고 탄성거동효과 만을 포함하여 질량이 없는 스프링으로 모사하였다. 이동하중은 이동 집중하중으로 모델링하고 주행 속도는 100km/hr부터 400km/hr까지 20km/hr 씩 증가시키면서 사용하였다. 응답은 동적 증폭계수와 단부 꺾임각 그리고 가속도를 대상으로 하였다. 교량은 이러한 탄성받침이 있는 모델과 없는 모델을 사용하였다. 그림 4는 해석 대상교량의 고유진동수와 그에 따른 모드 형상을 보여주고 있다. 두 모델간의 고유진동수의 차이는 미소하게 나타났다.

이러한 교량구조물에서는 다음과 같은 임계 속도가 예상된다.

$$S_{eff} \times \omega_1 \times 3.6 = 18.7 \times 4.34 \times 3.6 = 292.2 \text{ km/hr}$$

3.2 동해석 방법

본 연구에서 동해석은 시간영역에서 직접 적분법을 이용하여 지배 운동방정식의 해를 구하였다.⁽³⁾ 교량의 모델링은 절점당 6개의 자유도를 가진 공간 뼈대요소를 사용하였다. 사용된 뼈대요소에서는 1차 라그란지안 형상 함수(Language interpolation function)가 축방향 자유도를 나타내는 형상함수로 사용되었고 3차 허미트 형상함수(Hermite interpolation

function)가 휨자유도의 형상함수로 사용되었다.^{(3),(4)}

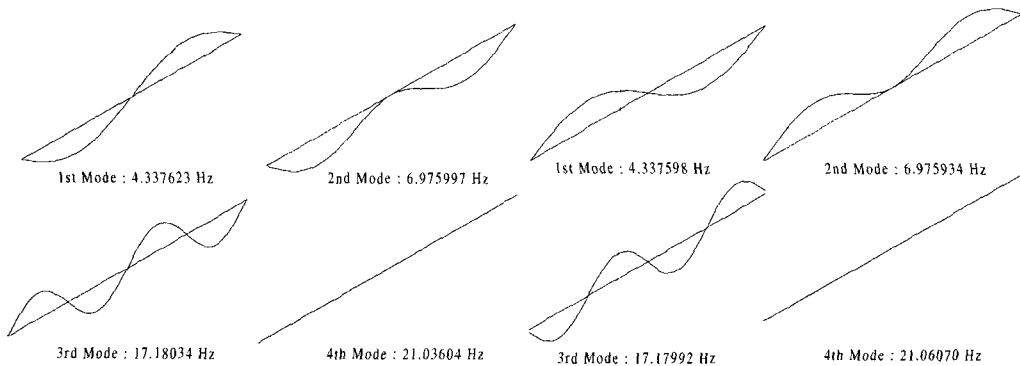
4. 탄성받침의 영향

사용된 탄성받침은 수직방향의 강성이 2.079 × 106ton/m이고 종방향 강성이 1248ton/m인 탄성받침 2개로 이루어져 있다.⁽⁵⁾ 탄성받침의 유무에 따라서 단부 꺾임각, 변위에 관한 동적 확대계수, 변위, 그리고 가속도 응답들을 비교하였다. 교량의 비틀림에 의한 영향은 무시하였으며 차량의 편심효과 또한 고려하지 않았다. 이동하중 해석은 차량의 진행 속도는 100km/hr부터 400km/hr까지 20 km/hr씩 변화 시키면서 수행되었다. 교량의 감쇠비는 0, 2 그리고 5%를 적용하였다.

4.1 탄성받침이 교량의 응답에 미치는 영향

탄성받침이 교량의 응답에 미치는 영향을 조사하기 위하여 탄성받침이 있는 경우와 없는 경우의 응답을 비교하였다. 조사된 응답으로는 단부 꺾임각, 각 경간 중앙부의 수직 변위, 변위의 동적확대계수(DMF) 그리고 각 경간 중앙에서의 수직 가속도가 있다.

그림 5에서는 진입부 단부 꺾임각을 속도에 따라 도시하고 있다. 그림 6과 그림 7에서는 각각 첫 번째 경간과 두 번째 경간 중앙부에서 수직 변위를 속도에 따라 도시하고 있다. 그림 8과 그림 9는 변위에 대한 동적확대계수



(a) 자유 이동단

(b) 탄성받침 이동단

그림 4 대상교량의 모드형상

를 도시하고 있다. 그림 5부터 그림 8에서 볼 수 있듯이 탄성받침이 교량의 변위관련 응답에 대해서는 미미한 영향을 미치며, 특히 공진 속도부근에서는 다소 응답을 감소시키는 경향이 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 각 경간

의 수직가속도를 도시하고 있는 그림 9와 그림 10에서는 위와는 다른 양상을 갖게 됨을 보여주고 있다. 불행하게도 탄성받침을 사용하는 경우에 교량의 가속도 성분이 오히려 그렇지 않은 경우보다 증가함을 나타내고 있다.

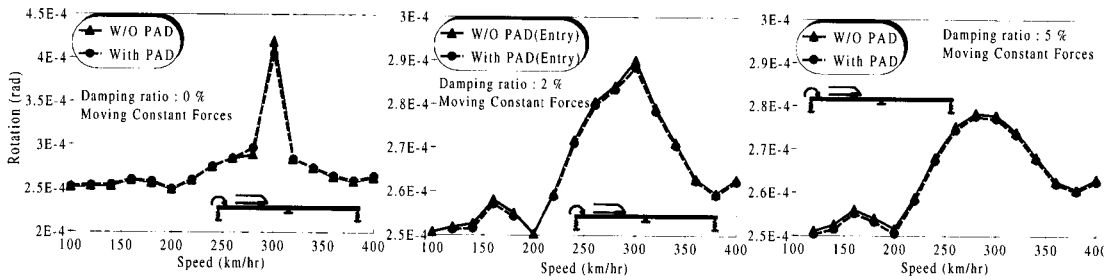


그림 5 탄성받침에 따른 단부적임각(진입부) 응답

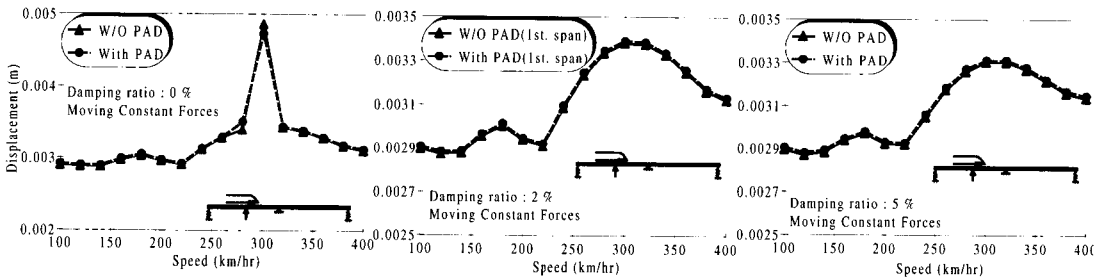


그림 6 탄성받침에 따른 변위(첫 경간 중앙부) 응답

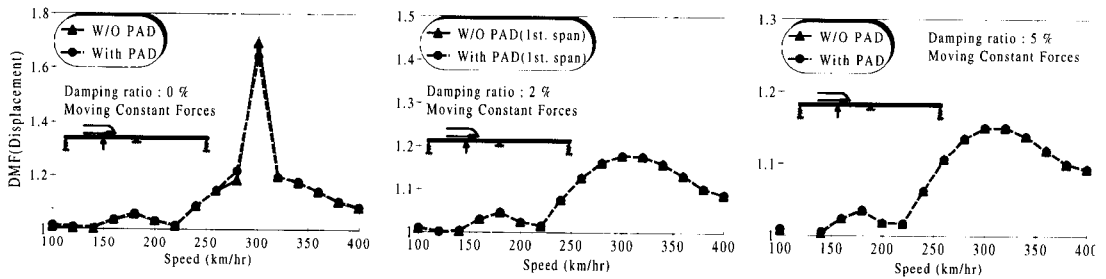


그림 7 탄성받침에 따른 변위 동적 확대계수(첫 경간 중앙부)

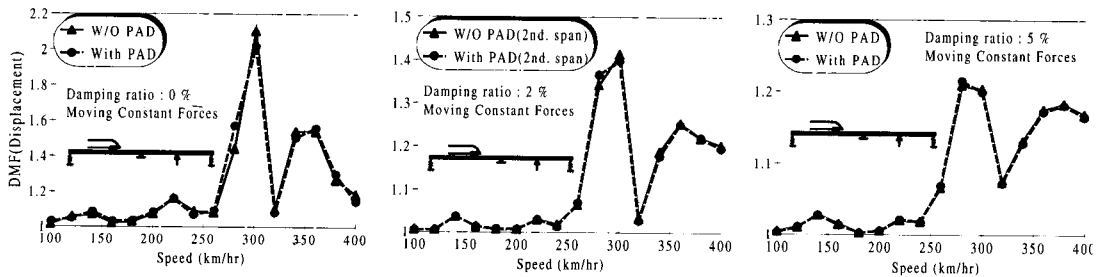


그림 8 탄성받침에 따른 변위 동적 확대계수(두 번째 경간 중앙부)

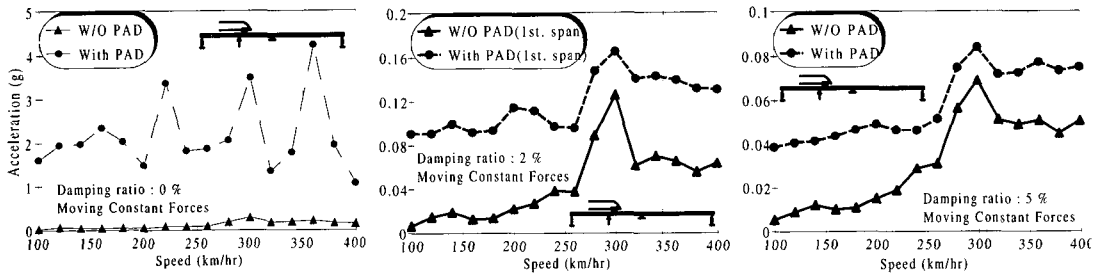


그림 9 탄성받침에 따른 경간 중앙부 수직 가속도응답(첫 경간 중앙부)

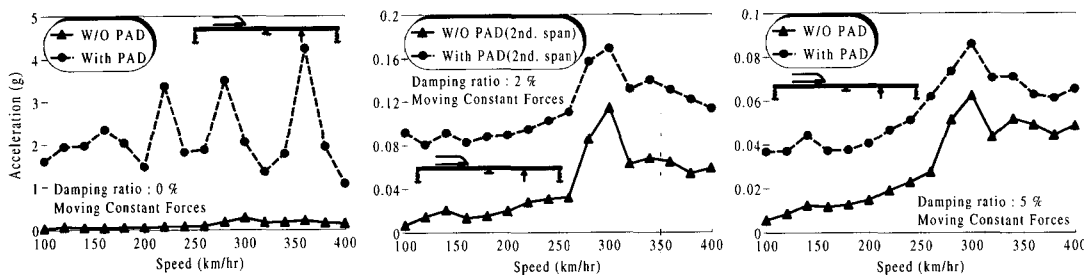


그림 10 탄성받침에 따른 경간 중앙부 수직 가속도응답(두 번째 경간 중앙부)

4.2 탄성받침의 강성이 교량의 응답에 미치는 영향

탄성받침의 강성이 교량의 동적 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 교량의 이동단에 설치되는 탄성받침의 강성을 변화시키면서 임계속도(292km/h)에 대하여 이동하중해석을 수행하였다. 이때 감쇠비는 0%를 사용하였다. 그림 11, 그림 12 그리고 그림 13에서 수직축은 탄성받침이 없는 경우의 응답에 관한 비고, 수평축은 현재 설치된 탄성받침에 대한 비를 나타낸다.

그림 11과 그림 12의 꺾임각과 변위 응답은 현재 설치된 탄성받침의 강성(2.079×10⁶ton/m) 보다 1/100 인 영역까지는 응답이 감소되어 나타나다가 그 이하가 되면 응답이 급격하게 증가함을 알 수 있다. 다시 말해서 현재 강성 보다 1/100인 영역까지의 강성을 갖는 탄성받침의 경우에는 변위에 오히려 더 유리함을 의미한다. 그러나 탄성받침을 사용한 교량의 경우에 증가된 응답을 보이던 가속도의 경우에는 강성이 매우 큰 영역(현재 강성의 1000배 이상)에서는 탄성받침이 없는 경우와 같은 가속

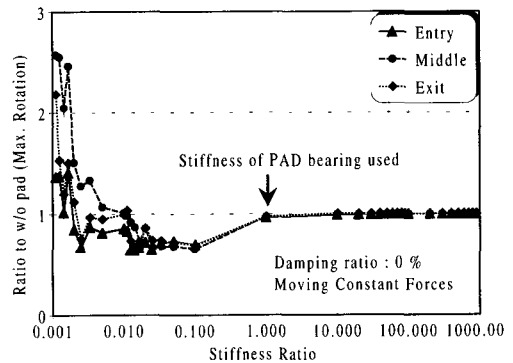


그림 11 탄성받침의 강성에 따른 단부회전각 응답의 비교

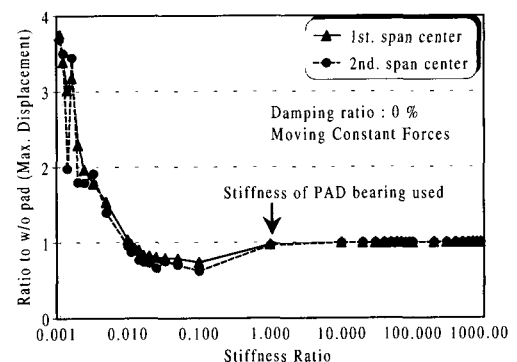


그림 12 탄성받침의 강성에 따른 변위 응답의 비교

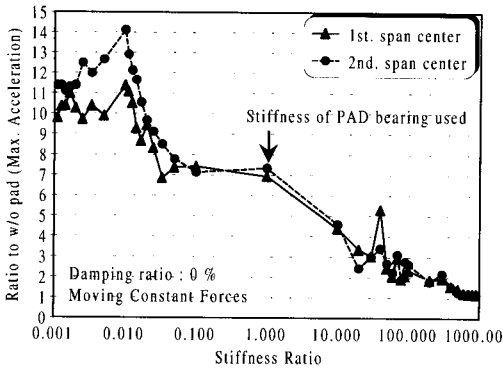


그림 13 탄성받침의 강성에 따른 경간 중앙부 수직 가속도응답의 비교

도응답을 보인다고 할 수 있으나, 강성이 작아 질수록 가속도 응답이 크게 증가될 수 있음을 보여주고 있다.

5. 결 론

탄성받침을 사용한 교량의 경우에 관한 이 동하중해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 탄성받침은 교량의 변위와 단부 회전각 응답에는 큰 영향이 없으며 임계속도에서의 응답을 다소 완화시킨다.
- (2) 탄성받침을 사용한 교량의 수직방향 가속도는 그렇지 않은 경우보다 큰 응답을 보인다. 따라서, 설계규정 중에서 가속도응답에 민감한 구조로된 교량의 경우에는 탄성받침을 사용하는 경우 엄밀한 검토가 요구된다.

- (3) 탄성받침의 강성에 따른 응답의 변화를 살펴본 결과 현재 사용되는 탄성받침의 강성을 사용한 교량의 회전각과 변위는 이보다 강성이 큰 경우에 근접된 응답을 보인다.
- (4) 탄성받침의 강성이 증가할수록 가속도 응답은 감소한다.
- (5) 탄성받침의 강성이 부족한 경우에 변위와 회전각의 응답이 매우 증가될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 G7 사업인 “고속전철 교량기술개발 (3차년도)” 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. International Civil Engineering Consultant, INC., “경부고속철도 교량 및 고가구조물의 동적특성에 대한 안정성 검토보고서”, 1994.
2. 서울대학교 토목공학과, “제동하중에 의한 강교량의 동적거동 연구”, 1996.
3. 박종원, “차량의 제동을 고려한 교량의 동적거동”, 공학박사학위논문, 서울대학교, 1997. 2.
4. Bathe, K. J., *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1982.
5. 건설교통부, “고속전철 교량기술 개발”, 1998.