

사람의 강성이 교량에 미치는 영향

The Effects of the Human-body Stiffness on the Footbridge

신혜린* 고만기** 이인원***
 Shin, Hye-Rin Ko, Man-Gi Lee, In-Won

1. 서론

교량의 보도부에 대한 설계에서 사람은 등분포 균중하중(500 kg/m^2)으로 고려되며(건설교통부 제정, 도로교표준시방서, 1996) 이는 사람의 뼈와 근육등으로 인해 갖게 되는 강성·감쇠특성을 무시한 것이다. 하지만 Tianjian J.는 경기진행시 경기장구조물의 붕괴(영국 Corsica, 1992년)원인에 대한 연구를 통하여 다음 2가지의 결론을 내렸다. 첫째, 만약 사람이 구조물에 하중으로서 작용된다면 사람이 구조물에 올라섰을 때 구조물의 모드와 그에 따른 각 진동수는 변화가 없어야 한다. 하지만 실제 현장실험과 철근콘크리트 단순보를 이용한 모의실험을 수행한 결과 사람이 작용된 구조물의 진동수는 비어있는 구조물과 다른 진동수 분포를 보인다. 즉 그림 1과 같이 비어있는 구조물의 1차모드로서의 ω_s 가 사람-구조물에서는 ω_s 보다 낮은 ω_1 과 높은 ω_2 두 개의 모드로 변화를 보였다. 둘째, ω_2 와 사람의 운동에 의한 하중의 진동수가 일치하여 발생한 공진이 붕괴의 직접적인 원인이 되었다. 따라서 구조물 설계시 사람의 강성특성을 고려해야 한다고 하였다. 그리고 ω_s , ω_1 , ω_2 와 사람의 진동수, ω_h 의 관계식을 다음과 같이 제안하였다.

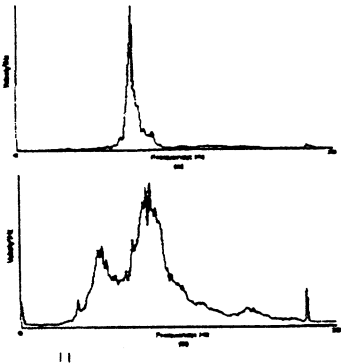


그림 1

- a) 비어있는 구조물의 진동수
- b) 사람-구조물계에서의 진동수

$$\omega_1^2 + \omega_2^2 = \omega_s^2 + (1 + \alpha) \times \omega_h^2 > \omega_s^2 + \omega_h^2 \quad (1)$$

$$\omega_1 \omega_2 = \omega_s \omega_h \quad (2)$$

$$\omega_1 < (\omega_s, \omega_h) < \omega_2 \quad (3)$$

Tianjian J.는 비어있는 구조물의 진동수보다 높게 나타나는 진동수와 사람에 의한 하중의 진동수가 일치하는 점을 고려하여 ω_2 에 관심을 두었던 반면 본 연구에서는 일반적으로 토목구조물 중 교량 구조물의 진동수와 내진설계시 고려되어야 하는 지진하중의 진동수가 주로 5Hz이하의 저주파인 점을 고려하여 비어있는 구조물의 진동수보다 낮게 나타나는 ω_1 에 관심을 두었다. 즉 실제 사람의 강성이 구조물의 진동수에 영향을 준다는 Tianjian J.의 연구결과를 바탕으로 하여 다음과 같은 사항에 대하여 검토하고자 한다. 첫째, 사람을 하중으로 고려하였을 때와 사람의 강성을 고려하였을 때, 구조물의 진동수는 각각 어떤 변화를 보이는가? 둘째, 사람의 강성을 고려하였을 때 발생하는 진동수, ω_1 과 구조물에 가해진 연직방향의 지진하중의 진동수가 일치하는 경우가 발생하는가? 셋째, 사람을 하중으로 적용할 때와 강성특성을 함께 고려하는 경우에 대한 구조물의 각각 응답특성을 구해보고 사람을 등분포 하중으로 고려하고 있는 기존 시방서의 설계 규준은 안전한 것인지를 검토하고자 한다. 본 연구에서는 사람-구조물의 진동수 해석 및 응답해석을 위하여 유한요소해석을 수행하였고 이를 위해 범용구조 해석프로그램인 ADINA를 이용하였다.

2. 사람-구조물의 유한요소해석

2.1 사람의 모델링

- * 한국과학기술원 토목공학과 석사과정 (042-869-5658, kkami@kaist.ac.kr)
- ** 공주대학교 토목공학과 교수
- *** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

유한요소해석을 위하여 사용된 사람의 모델은 ISO 7962에서 제시한 사람의 고유진동수를 참고하였다. 고유진동수는 자세, 입력하중의 작용방향 뿐만 아니라 무게, 나이, 성별 등에 따라 차이가 있을 수 있으나, ISO 7962에서는 서있는 사람의 연직방향에 대한 기본 고유진동수가 2~5Hz에 분포한다고 하였다. 유한요소해석 시 사람의 강성은 면적당 분포하는 사람의 질량과 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 를 이용하여 산출하였다. 본 연구의 목적은 구조물의 지진해석시 Tianjian J.가 제시한 것과 같이 사람의 강성을 고려하여야 할 필요가 있는지를, 나아가 시방서에서 규정하는 것과 같이 사람을 하중으로서 고려하는 것이 구조물의 지진해석시 안전한 방법인지를 알고자 하는 것이다. 따라서 유한요소모델을 위한 사람의 질량 설정은 시방서에서 규정한 500 kg/m^2 을 바탕으로 하여 구조물의 유한요소모델인 쉘요소(shell element)나 보요소(beam element)의 각 절점에 해당하는 면적에 대한 사람의 분포질량을 계산하여 집중질량으로서 각 절점에 적용하였으며 ADINA에서 강성은 general element를 사용하였다. 즉 모델링에서 사람을 하중으로 고려한 현 도로교표준시방의 방법은 단순질량(lumped mass)으로, 강성을 고려해야 한다는 Tianjian J.의 방법은 질량-강성으로서 적용되었다.

2. 2 대상 구조물의 모델링

대상구조물은 2개의 보도육교로서 모두 단경간 교량이며 교량 I은 서울 오동근린공원에 위치한 강합성형교량이며 교량 II는 박스거더교량으로 각 교량의 제원은 그림 2, 3과 같다. 교량의 모델링을 위하여 교량 I은 쉘요소(shell element)와 보요소(beam element)를 이용하였으며 교량 II는 횡단면에서 좌우대칭인 점을 고려하여 보요소(beam element)를 이용하였다. 이때 지진하중에 대한 응답해석시 지진하중은 mass proportion loading으로 적용되기 때문에 교량의 조형물, 난간등을 모두 질량(mass)으로 절점에 적용하였다.

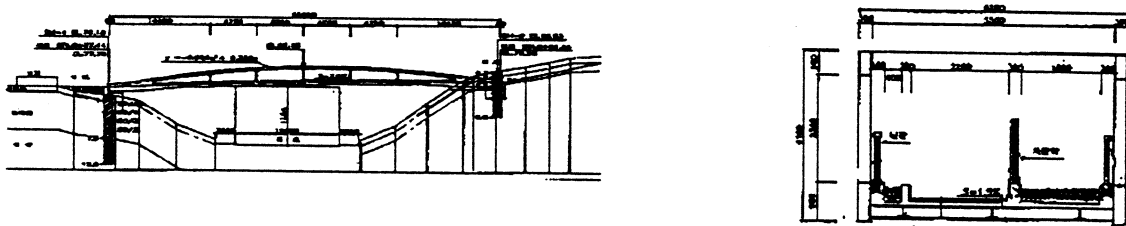


그림 2. 교량 I의 종단면도와 횡단면도 및 제원

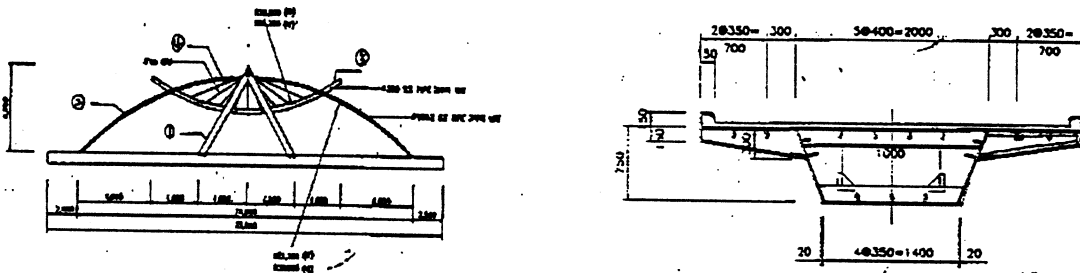


그림 3. 교량 II의 종단면도와 횡단면도 및 제원

2.3 응답해석시 입력지진하중

일반적인 구조설계에 있어서 종방향·횡방향 지진하중에 대한 구조물의 응답해석을 고려하지만 1995년에 일본에서 발생하여 많은 피해를 주었던 Kobe지진이 강한 직하지진이었다는 점과 해석의 간편함을 위하여 연직방향 지진에 대한 구조물의 거동을 해석하기로 한다. 본 연구의 구조물의 응답해석시 4가지 지진, El Centro지진, Northridge 지진, Kobe 지진, Mexico지진에 대한 연직방향 가속도를 구조물에 적용하였다.

3. 해석 결과

3.1 진동수해석

모드해석을 통하여 각 수직모드에 해당하는 진동수를 구한 결과는 표 1과 같다. 이 때 사람을 질량으로서

만 적용한 경우를 LM(lumped mass)로, 사람의 강성을 고려한 경우를 SM(sprung mass)로 표기하였다. 표를 통하여 사람을 질량으로서 고려하였을 때에는 비어있는 구조물보다 사람-구조물 계의 질량이 더 증가하였으므로 진동수가 감소하였음을 알 수 있다. 그리고 사람의 강성을 고려하였을 때에도 사람-구조물계의 진동수가 감소하였으며 이는 Tianjina J. 가 제안한 식 1), 3)을 통하여 ω_1 에 해당함을 알 수 있다.

표 1. 대상 구조물의 각 직교방향 모드에 대한 진동수 변화

교량 I				교량 II			
모드	비어있는 구조물	LM	SM	모드	비어있는 구조물	LM	SM
1	0.4635	0.4127	0.4078	1	0.9843	0.7513	0.6921
2	0.7304	0.6670	0.6479	2	3.248	2.465	1.190
4	1.4360	1.3390	1.0990	3	6.582	5.096	—
9	2.3760	2.2470	1.2540	4	11.02	8.372	—

(단위: Hz)

3.2 지진하중하의 구조물의 응답해석

각 교량에 연직방향의 지진가속도를 38초동안 0.02초 간격으로 적용하여 구조물 중앙부 한 절점의 시간에 따른 연직방향의 변위를 LM과 SM에 대하여 비교한 결과는 그림 4, 5와 같다. 중앙부 절점의 최대변위를 비교한 결과 교량 I의 경우 El Centro 지진을 제외한 나머지 응답해석 모두 LM의 경우 더 큰 값을 나타냈으며 교량 II의 경우 역시 Mexico 지진을 제외한 나머지 응답해석 모두 LM의 경우 더 큰 값을 나타내었다.

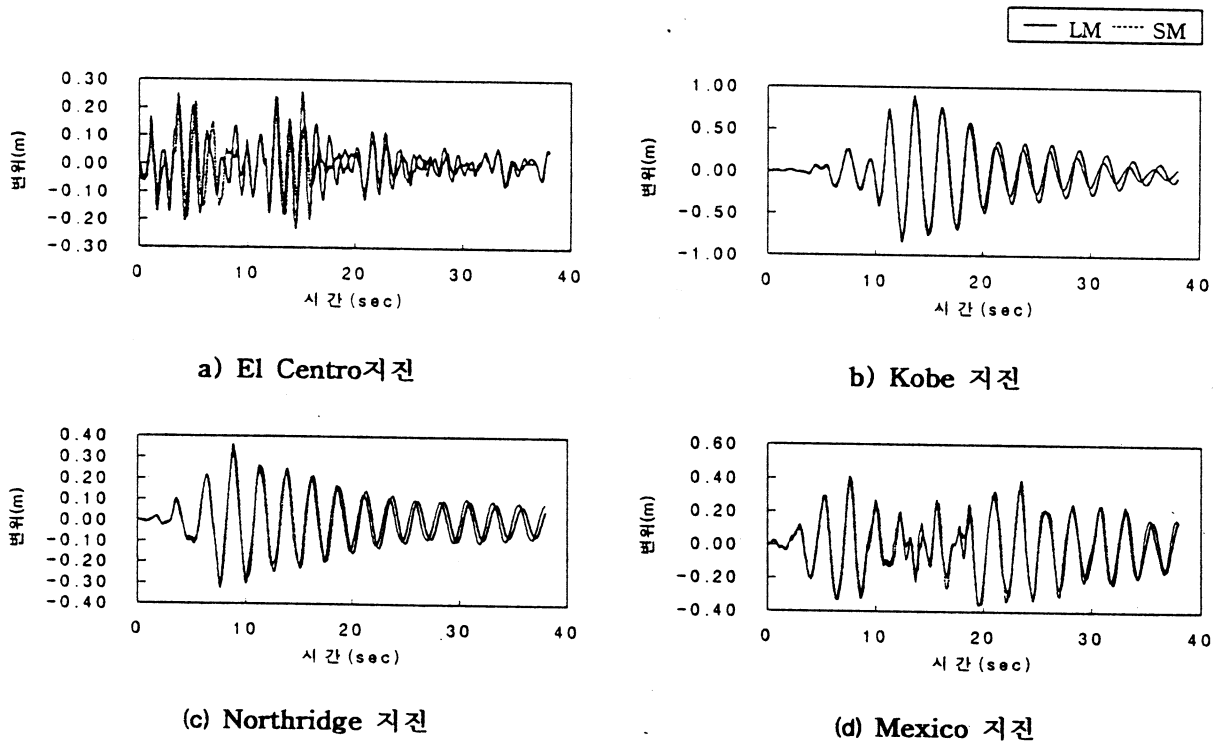
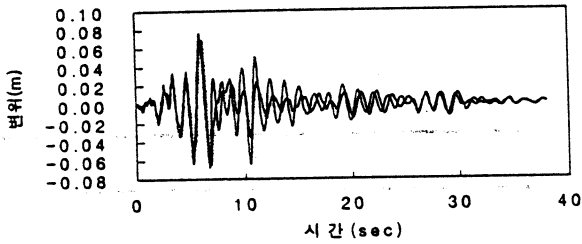
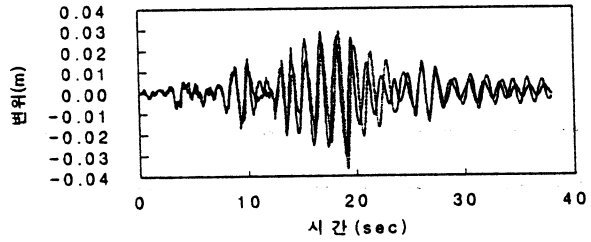


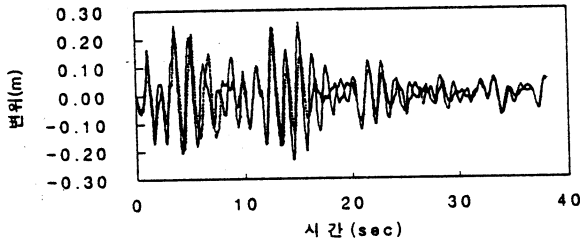
그림 4. 교량 I의 지진에 대한 응답해석(중앙부 절점의 변위)



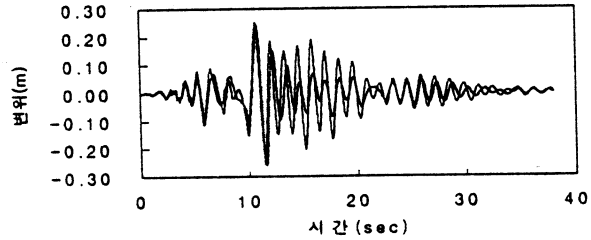
(a) El Centro 지진



(b) Kobe 지진



(c) Northridge 지진



(d) Mexico 지진

그림 5. 교량 II의 지진에 대한 응답해석(중앙부 절점의 변위)

응답해석 결과, 교량의 내진설계시에는 사람의 강성을 고려한 방법과 현 시방서에서 규정하고 있는 방법, 즉 사람을 질량으로서 고려하는 방법으로 인한 최대변위에 있어서 거의 차이가 없는 것임을 알 수 있었다.

위와 같은 결론이 나온 원인을 유추하기 위해 그림 6과 같이 임의하중에 대한 transfer function을 순수 구조물과 LM과 SM의 경우에 대한 구조물에 대하여 그려보았다. 전체적으로 SM은 순수 구조물(str)의 진동수와 차이가 거의 없으며 10Hz 이상의 고차모드에서는 LM이 순수 구조물의 진동수와 뚜렷한 차이를 보이는 반면 5Hz이하에서 주로 나타나는 1차모드의 진동수는 LM과 SM이 순수 구조물과 거의 차이가 없음을 볼 수 있다. 따라서 Tianjian J.의 연구에서는 입력하중이 10Hz이상의 진동수의 에너지가 강한, 사람에 의한 것(경기장에서 의 응원)이었기 때문에 사람의 영향으로 인한 구조물의 진동수변화를 고려하여야 하지만 본 연구에서 사용한 지진하중은 주로 5Hz이하의 진동수의 에너지가 강하므로 사람의 영향을 하중으로서 고려하여도 강성을 함께 고려한 것과 별 차이가 없다.

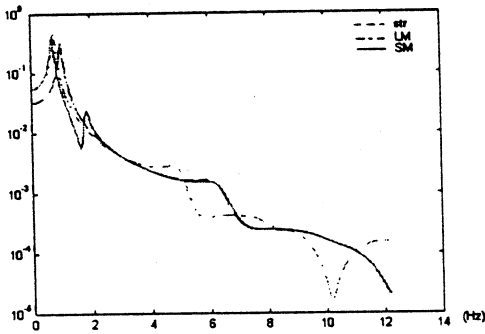


그림 6. Transfer function

4. 결론

ADINA를 통하여 2개의 보도육교에 대한 LM과 SM의 유한요소해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

첫째, 일반적으로 토목구조물과 같이 대형구조물의 LM과 SM의 경우 5Hz이하의 저차모드의 진동수 변화가 거의 없다.

둘째, 경기장 구조물의 LM과 SM은 사람의 운동에 의한 하중에서 주로 나타나는 진동수인 10Hz이상에서 진동수 변화가 순수 구조물에 비해 크므로 사람의 영향을 고려하여야 하는 반면 지진하중을 고려하여 교량의 내진설계를 하는 경우는 지진하중이 주로 5Hz이하의 진동수에서 높은 에너지를 가진다는 점과 교량구조물의 LM과 SM이 5Hz이하의 저차모드에선 진동수차이가 거의 없다는 점을 고려할 때, 사람의 강성이 구조물에 미치는 영향을 무시하여도 된다.

셋째, 따라서 현 도로교표준시방서에서 사람을 등분포하중으로 고려되어야 한다는 규정은 안전하다고 결론지을 수 있다.

감사의 글

본 연구에서 이용된 실험 데이터를 제공해주신 건설기술연구원과 성균관대학교 토목공학과 박선규 교수님께 감사드립니다. 그리고 본 연구는 국가지정연구실 연구과제 중 '첨단 제어기법을 이용한 구조물의 내진제어'에 대한 연구비지원으로 수행된 것으로 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. B. R. Ellis and T. Ji (1999), Human whole-body models in structural vibration, *Proceedings of 13th Conference of Engineering Mechanics*, ASCE
2. B. R. Ellis and T. Ji (1997) Human-structure interaction in vertical vibrations, *Proceedings of The Institution of Civil Engineers-Structures of Buildings*, Vol. 122, No. 1, pp. 1-9.
3. International Organization for Standards. Mechanical vibration and shock-mechanical transmissibility of the human body in the z direction. In:ISO 7962. Geneva:ISO, 1987, pp. 1-6.
4. 대한토목학회, (1996). "도로교표준시방서"