

다중 지진파 입력을 고려한 장대교량의 지진응답해석

Earthquake Response Analysis of Long-Span Bridges with Multiple Input Motions

최준혁* · 최준성** · 이종세***

Choi, Jun Hyuk · Choi, Jun Sung · Lee, Jong Seh

ABSTRACT

For more rational and economical seismic design of long span bridges, it is essential to include in the analysis the effects of multiple input motions and structural or soil nonlinearity which are not considered in the current design practice. In this paper, the effects of these factors on the seismic behavior of long span bridges are studied. First, for the effect of multiple input motions, we take into account the differences in arrival times of seismic waves. To consider nonlinear soil properties we utilize SHAKE which is based on the equivalent linearization method. As a numerical example, a cable-stayed bridge is modelled using the analytical procedures described above. It is shown from the results that these factors influence the seismic response of the bridge significantly and should never be neglected in design.

1. 서론

최근 캘리포니아, 일본, 중남미에서 발생한 지진에 있어서는 내진성을 고려해서 설계된 근대적인 교량이 설계 레벨보다도 작은 지진동에 의해 붕괴되거나 심각한 피해를 입고 있다. 이와 같이 설계시에는 예상도 못했던 불충분한 내진성은 대부분의 경우 설계법이 적합지 않았거나 구조 세목에 충분히 유의하지 않았기 때문이다. 교량은 거의 대부분이 여유력을 충분히 보유하고 있지 않기 때문에 주요 구조 부재의 손상은 전체계 붕괴로 이어지기 쉽다. 특히 장대교량은 하천이나 하구 등 액상화 가능성이 높은 사질 지반이나 실트질 지반 등에 건설되는 경우가 많고 교각의 위치에 따라 지진동이 달라 정확한 동적 응답 예측이 어렵다. 따라서 장대교량과 같은 구조물은 설계시 이런 문제점에 대한 고려가 충분히 뒤따라야 할 것이다. 따라서 장대교량의 내진설계는 다중지진파의 입력 특성, 구조물 및 지반의 비선형 거동 등과 같은 보다 정밀한 해석기술을 필요로 하게

*한양대학교 토목환경공학과 공학석사 · 삼보기술단(E-mail:ratchoi@hanmail.net)

**정회원 · 한국유지관리(주) · 대표(E-mail:ceo@kmctech.co.kr)

***정회원 · 한양대학교 토목환경공학과 교수(E-mail:jonglee@hanyang.ac.kr)

되는데 이를 활용할 경우 설계가 지나치게 보수적으로 되는 것을 방지할 수 있을 뿐만 아니라 전반적으로 구조물의 내진성능을 개선할 수 있다.

이에 본 연구에서는 위에서 기술한 사항들이 장대교량의 응답에 어떤 영향을 미치는지를 고찰하고자 한다. 지진동의 경로의 차에 따른 응답의 차이를 규명하기 위해 입력지진파의 도달시간차가 고려되었으며, 구조물의 기초지반 각각의 특성에 맞는 지진파를 구해 지진응답 해석에 적용하여 이때 어떤 변화가 있는지도 확인하였다.

2. 도달시간을 고려한 지진응답해석

2.1 설계 지진동

본 연구에서 인공지진파 생성을 위해 전용프로그램인 SIMQKE (Gasparini, D. and Vanmarke, 1976)를 사용하여 S_A , S_B , S_D 지반의 설계지진파를 구하였다. 그림 1은 설계응답스펙트럼을 기준으로 S_A 지반 인공지진파의 가속도 및 변위(그림 2, 3)를 나타내었다.

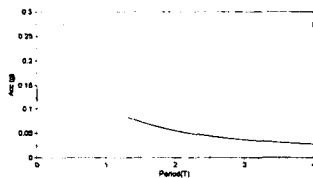


그림 1 S_A 지반에 대한 설계응답스펙트럼

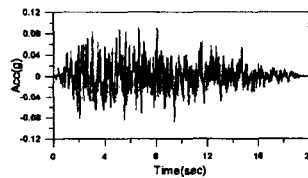


그림 2 인공지진파의 가속도데이터

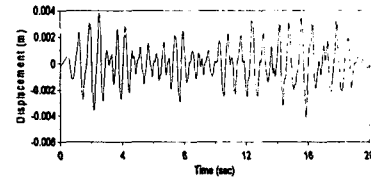


그림 3 인공지진파의 변위데이터

2.2 도달 시간차의 영향

S_B 지반의 전단파 속도를 $800m/s$ 로 가정하면 지간장이 $350m$ 인 두 주탑에 도달하는 파의 시간차는 약 $0.44초$ 이며 S_A 지반의 전단파 속도는 $1500m/s$ 이므로 동일한 지간장의 두 주탑에 도달하는 파의 시간차는 약 $0.23초$ 이다.

본 연구에서는 이와 같은 시간차를 고려하여 구조물의 응답특성을 살펴보고자 하였다. 먼저 그림 4에서와 같이 EQ1과 EQ2의 지진하중을 시간차를 두고 가진하면 그림 5의 응답을 얻을 수 있다.

그림 5는 교량의 중앙경간 중앙부의 x축 방향으로의 변위를 시간에 따라 나타낸 것이다. ①은 EQ1의 지진하중에 대한 응답이고 ②는 EQ2에 대한 응답이며 이로부터 지진하중을 시간 차 없이 가하면 서로의 응답이 거의 같음을 볼 수 있다. 그러나 EQ2를 시간차를 두어 가진하면(②') 교량의 중앙부 응답은 서로 다른 거동을 유발시켜 응답의 크기가 줄어드는 것을 예상할 수 있다.

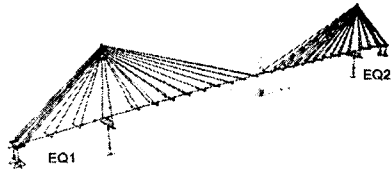


그림 4 지진하중 입력

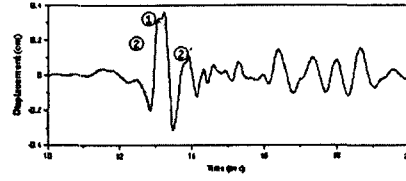


그림 5 교량 중앙부의 응답

3. 지반의 특성을 고려한 지진응답해석

지진에 의한 soil의 응답은 현저히 비선형 특성을 보이므로 이러한 비선형 특성은 지진응답해석 시 반드시 고려되어야 한다. soil의 비선형 변형도-응력 관계는 변형이 커질수록 강성이 저하하며 감쇠 효과는 증가하는 것으로 알려져 있다. 이러한 지반 매질의 시간 영역 비선형 해석에 관한 연구는 현재 활발하게 진행되고 있으며, 적합한 해석법으로 유한요소 해석법 또는 hybrid 해석법이 주로 사용되고 있다.

3.1 지반의 재료적 비선형을 고려한 지진응답해석

본 연구에서는 지반의 비선형성을 고려하기 위해 SHAKE(Schnabel et al., 1972) 프로그램을 사용하였는데 전단강성과 감쇠비의 비선형성의 고려를 위해 각각 지층의 유효 변형율에 대응하는 강성과 감쇠비를 구하고자 등가선형화 기법을 이용한 반복과정을 수행하였다. 등가선형화 기법의 사용은 단자유도 시스템의 동적거동을 평가하는데 만족할 만한 수단으로 평가되고 있다.

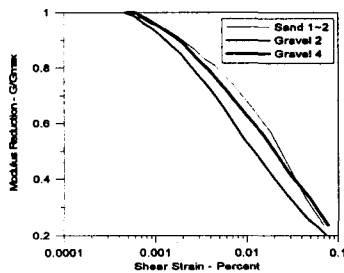


그림 6 층별 강성변화

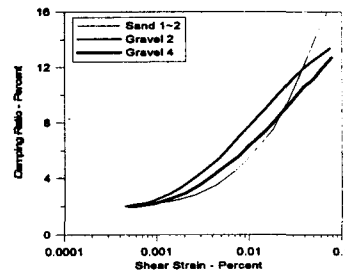


그림 7 층별 감쇠변화

그림 6, 7은 해석에 사용된 지반의 전단변형률에 따른 강성변화와 감쇠변화를 나타낸 것이다.

위와 같은 지반의 재료적 비선형성을 고려하기 위해 등가선형화 기법에 근거한 대표적인 자유장 해석프로그램인 SHAKE를 사용해서 지진파를 구하고, 시간영역상에서 지진응답해석을 수행하기 위해 범용 구조해석 프로그램인 SAP2000을 이용한 지진응답해석을 수행하였다.(그림8)

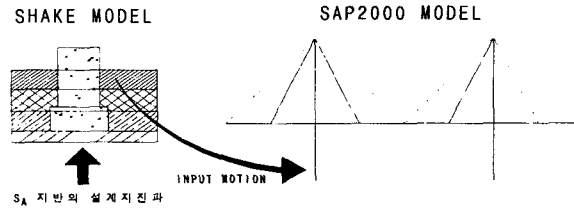


그림 8 지반의 특성을 고려한 지진응답해석

3.2 지반의 특성에 맞는 설계지진파를 이용한 지진응답해석

본 연구에서는 보다 손쉬운 기초 지반의 특성을 고려하기 위해 현 시방규정에 나와 있는 설계응답스펙트럼을 이용해서 기초 지반의 특성에 맞는 지진파를 생성해서 각각의 기초 부분에 하중으로 가해 하나의 지진파를 구조물에 가해서 생기는 거동과 비교를 하였다. 이를 위해 해석시 기초 지반을 S_B 지반과 S_D 지반으로 가정하여 인공지진파를 생성시켜 각각의 기초부분에 가진 시켰다. 그림9, 10은 S_B 지반과 S_D 지반의 설계응답스펙트럼이다.

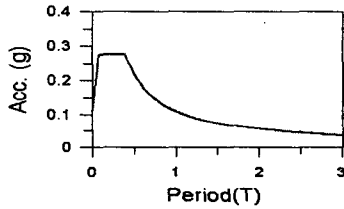


그림 9 S_B 지반에 대한 설계응답스펙트럼

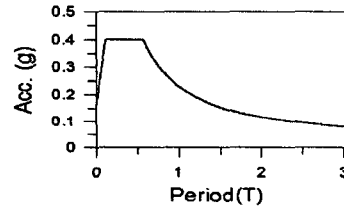


그림 10 S_D 지반에 대한 설계응답스펙트럼

4. 실 교량을 이용한 지진응답해석

4.1 해석대상 교량의 모형화

해석대상 교량은 우리나라에 현재 많이 건설 중인 사장교를 대상으로 하였다. 대상교량의 구조 해석은 SAP2000을 사용하여 그림 11과 같이 모형화 하였다. 해석에 있어서 케이블은 모멘트와 압축력에 대해 저항하지 못하게 모형화 되어야 하지만 이 예제에서는 모멘트에 대해서만 고려가 되었다. 이는 SAP2000에서 Cable에 대한 모델링이 쉽지 않고 실제로 Cable에 걸리는 하중은 초기 장력보다 지진시 걸리는 압축력이 작아서 장력을 줄여주는 결과만 생겨나기 때문에 본 연구의 목적이 다중지진파에 의한 응답의 변화를 고찰하는 데는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다. 또한 해석시에 사용되는 지진파는 생성된 인공지진파를 1/10배로 크기를 줄여서 사용하였는데 이는 되도록 Cable에 압축력이 많이 도입되지 않게 하기 위함이다.

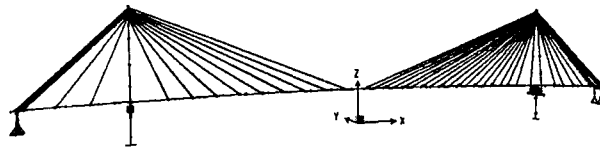


그림 11 교량의 모델링

4.2 도달시간차를 고려한 지진응답해석

지표면에서 파의 전파속도는 경암에서 $1500m/s$, 보통암지반에서 $760-1500m/s$, 그리고 연암지반에서 $360-760m/s$ 이다. 예제에 사용된 교량의 중앙지간은 $340m$ 이므로 지반에 따라 그림 12와 같이 지진파의 도달시간에 약간의 차이가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 입력파의 도달시간 차로 인해 발생하는 영향을 고찰하기 위해 지반을 경암(S_A)으로 가정하였으며 지진파의 도달시간차를 고려한 경우와 하지 않은 경우의 응답을 비교하였다.

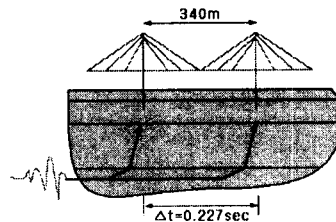


그림 12 전파경로에 따른 도달 시간차

4.3 지반의 재료적 특성을 고려한 지진응답해석

지반의 재료적 비선형성을 고려하기 위해 앞서 언급한 SHAKE를 사용하였으며 시간영역상에서 지진응답 해석이 수행되었다. 자유장 해석프로그램인 SHAKE를 통해 등가선형화기법에 근거하여 수렴된 지반의 동적물성을 표 2에 나타내었다. SHAKE에서 지반의 재료적 특성이 고려된 변위데이터의 지진하중을 SAP2000 해석용으로 모형화된 주탑 양쪽 지반에 각각 x방향과 y방향에 동시에 작용시켜 실시간 시간이력 해석을 수행하였다. 이때 SHAKE에 입력된 초기 지진가속도 데이터(그림 14)는 S_B 지반에서의 설계응답 스펙트럼으로부터 생성한 인공지진파를 최대지반가속도가 $0.003g$ 로 값을 조정하여 지진데이터를 사용하였다.

표 1 지반의 동적물성

	지 반 물 성						
	Layer	$E(\times 10^5 t/m^2)$		이력감쇠비		밀도(t/m^3)	포아송비
		선형	비선형	선형	비선형		
주탑 A	1	0.85	0.71	0.02	0.036	1.69	0.48
	2	3.05	2.66	0.02	0.028	1.93	0.48
	3	7.90	7.13	0.02	0.027	2.42	0.47
주탑 B	1	0.24	0.13	0.02	0.085	1.69	0.48
	2	0.98	0.74	0.02	0.043	1.93	0.48
	3	3.20	2.80	0.02	0.028	2.42	0.47

4.4 지반의 특성에 맞는 설계지진파를 이용한 지진응답해석

연장이 긴 교량의 기초지반은 각각 다른 층의 구성을 이룰 수 있는데 보다 쉽게 각각의 기초에 하중으로 재하 할 수 있는 지진파를 구하기 위해 설계응답스펙트럼을 이용한 인공지진파를 생성해서 기초부분에 가해 그 변화를 고찰하였다. 여기서 주탑A를 S_B 지반으로, 주탑B를 S_D 지반으로 보고 각각 해당 지진파를 그림13, 14와 같이 생성하였다.

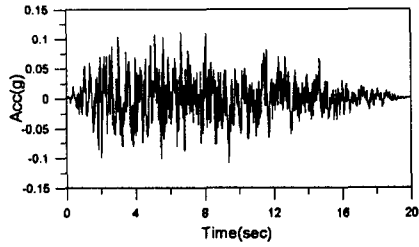


그림13 S_B 지반의 인공지진파

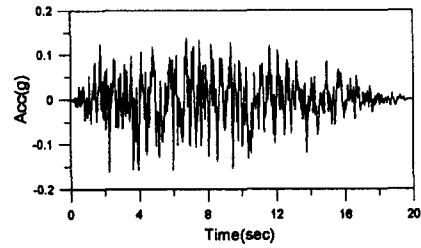


그림 14 S_D 지반의 인공지진파

4.5 해석결과

먼저 도달 시간차를 고려하여 주탑에 지진파를 입력했을 때의 영향을 보기 위해 그림 15에 도달시간차가 0초와 0.23초일 때 교량 보강형의 슈가 놓여진 주탑부 위치의 x방향 변위를 시간이력으로 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 시간차가 없는 경우가 있는 경우보다 최대변위가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

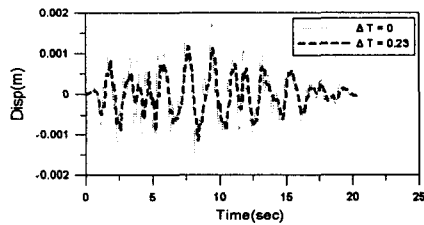


그림 15 x방향 변위에 대한
도달시간차의 영향

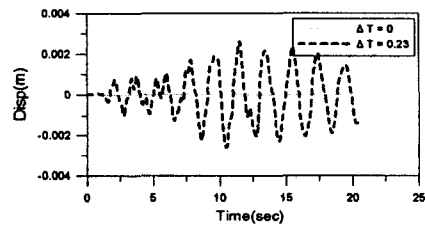


그림 16 도달시간차에 의한
중양부의 z방향 거동변화

그러나 그림 16에서 보면 보강형의 중앙부의 최대변위값은 도달시간차가 없는 경우보다는 도달시간차가 있는 경우가 더 큰 최대 변위값을 갖게 되는 것을 볼 수 있다. 이는 주탑이 서로 다른 지진파에 의해 엇갈려 거동함에 따라 상판에 압축력이 발생하여 나타난 결과라고 판단된다.

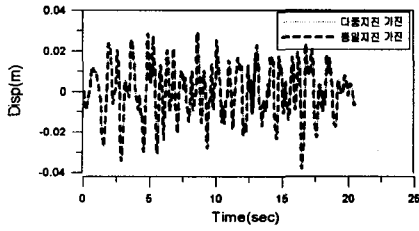


그림 17 교량의 거동에 미치는
지반특성의 영향(수평방향)

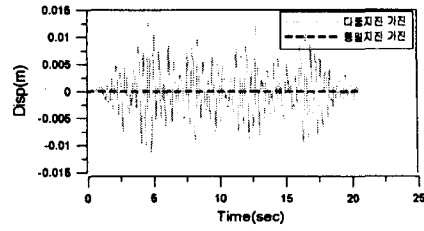


그림 18 교량의 거동에 미치는
지반특성의 영향(수직방향)

그림 17, 18은 SHAKE를 사용해서 지반의 특성을 고려한 지진응답해석 결과를 나타낸 것이다. SHAKE 사용시 지반의 충분한 물성치가 요구되는데 그렇지 못할 경우 지진파의 크기를 다시 조정해서 해결할 수 있는데 본 연구에서도 가진할 지진데이터를 최대지반가속도가 0.003g로 값을 조정하여 S_B 지반 지진데이터를 사용하였다. 위 결과를 보면 지반의 특성을 고려해서 다중으로 지진파를 입력한 경우가 역시 최대 변위값이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

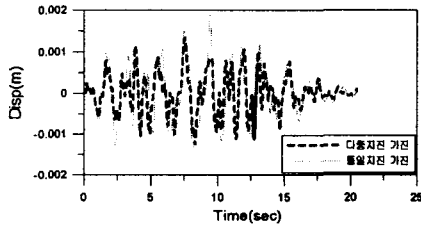


그림 19 교량의 거동에 미치는
지반특성의 영향(수평방향)

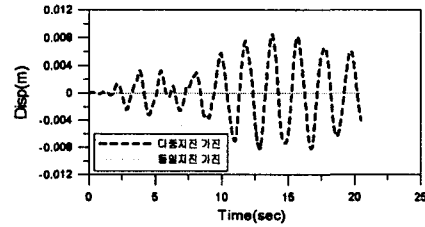


그림 20 교량의 거동에 미치는
지반특성의 영향(수직방향)

그림 19와 20은 현 설계기준에서 제시하는 지반특성에 맞는 인공지진파를 생성해서 각각의 기초에 가진한 경우와 동일한 지진파로 가진 했을때의 결과를 나타낸다. 위의 다른 경우와 비슷한 결과를 갖는데 이는 위에서 언급한 이유와 같은 이유라고 생각할 수 있을 것이다. 위 결과에서 보듯 서로 다른 지진파가 구조물에 가해졌을 때 그 구조물은 동일한 지진파를 가한 것과는 다르게 거동함을 알 수 있다.

본 연구에서 고려한 예제의 경우에 다중 지진파에 의한 지진해석의 결과는 구조물의 응력은 아래 그림과 같이 각각의 경우가 다 증가하는 것으로, 변위는 방향에 따라 다르게 영향을 받는 것으로 나타났다.

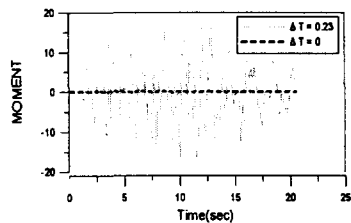


그림 21 도달 시간차를 고려한
경우

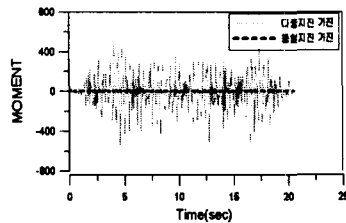


그림 22 SHAKE를 이용해서
지반특성을 고려한 경우

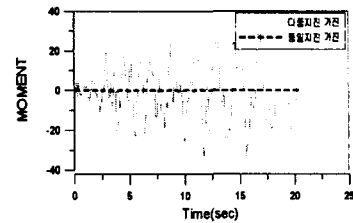


그림 23 설계응답스펙트럼을
사용한 경우

5. 결 론

앞에서 살펴본 결과로부터 도달시간차에 의해서 생기는 영향과 지반-구조물 상호작용에 의해 생기는 영향이 작지 않음을 알 수 있다. 다중 지진파 입력에 대한 영향은 앞으로 교량이 더욱더 장대화가 되면 더 큰 비율로 영향을 미칠 수 있는 요인이 될 것이므로 이 부분에 대한 면밀한 검토가 뒤따라야 할 것으로 판단된다. 특히 도달시간차에 의한 영향은 그동안 고려치 않았던 추가 하중으로 작용하는 것으로 설계 시 매우 주의해야 할 부분으로 여겨진다. 또한 지반의 특성에 따른 영향도 장대교량의 보다 합리적인 내진설계를 위해 반드시 고려되어야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Abdel-Ghaffar, A. M. and Rubin, L. I., "Suspension bridge response to multiple-support excitations", *J. Engng. Mech. Div.*, ASCE, Vol. 108, 1982, pp. 419-435.
2. Gasparini, D. and Vanmarke, "SIMQKE : Artificial time history generation software", MIT, 1976.
3. Rutenberg, A. and Heidebrecht, A. C., "Approximate spectral multiple-support seismic analysis; travelling wave approach", Research Report, Hamilton, Ontario, Canada: Department of Civil Engineering, McMaster University, 1987.
4. Schnabel, P. B. and Lysmer, J. and Seed, H. B., "SHAKE : A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites", Report No. EERC 72-12, Univ. of California, Berkeley, CA, Earthquake Engineering Research Center, 1972.
5. Yamada, Y., Takemiya, H. and Kawano, K., "Random response analysis of non-linear soil-suspension bridge pier", *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* Vol. 7, 1979, pp. 31-47.