

기초-지반 상호작용을 고려한 교량의 다지점 입력 지진해석 기법 Seismic Response Analysis Method of Bridge Considering Foundation-Soil Interaction and Multi-support Input Motion

김효건^{*}
Kim, Hyo Gun

최광규^{**}
Choi, Kwang Kyu

엄영호^{***}
Eom, Young Ho

권영록^{****}
Kwon, Young Rog

ABSTRACT

This paper presents a seismic response analysis of bridge structures considering foundation-soil interaction and multi-support input motion. In the earthquake analysis of structures it is usually assumed that the input ground motion is the same at all supports. However, this assumption is not justified for long structures like bridges, because observations have shown the earthquake ground motion can vary considerably within relatively small distances. When the soil under the foundation is relatively soft and deep, analysis for foundation-soil interaction always must be performed. To consider foundation-soil interaction, soil response analysis is preceded, and after determining the material characteristics of foundation element obtained by foundation-soil interaction analysis at the frequency domain, the seismic response analysis of bridge superstructure with the equivalent spring and damper is performed. Finally, influences of multi-support input motion, which are affected by different soil characteristics, are also considered in this paper.

1. 서론

최근 국내에서는 사장교, 현수교 등의 장대교량의 건설이 증가하는 추세를 보이며 더불어 내진설계의 중요성도 증대되고 있다. 대형 교량의 특성상 교각지점별로 지반조건이 상이한 지반 상에 교량이 위치하고 지반의 토층이 깊거나 연약지반 상에 위치하여 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction: SSI)의 필요성 또한 부각되고 있는 상황이다. 대부분 실무에서는 교량 기초를 고정단으로 모델화 하여 해석을 수행하였으나 최근 교량의 내진해석에 관한 기존 연구와 실무에서는 주요관점이 구조물에 대한

* (주)용마엔지니어링, 과장, 동아대학교 토목공학과, 박사

** 정회원 · 동아대학교 토목공학과, 교수

*** 정회원 · (주)용마엔지니어링, 전부

**** 동아대학교 토목공학과, 연구원

동적 해석 모델링에 있고 반무한체인 지반을 포함하는 모델을 고려하려 노력하고 있으나 아직까지 많은 제약과 한계를 보이고 있다. 최근에는 기초를 포함하는 지반을 등가의 스프링과 댐퍼로 가정하여 구조물에 모델화하는 것으로 지반-구조물 상호작용을 고려하고자 하였다. 스프링과 댐퍼를 모델화하는 일반적인 방법은 먼저 반무한체인 지반과 기초요소를 나타내는 진동수 의존 특성의 스프링과 댐퍼의 특성을 파악하고 지반과 기초의 특성을 토대로 전체 구조물에 대한 모델을 만들어 지진응답해석을 수행하여 지반-구조물 상호작용에 의한 영향을 고려하고 있다. 하지만 이 방법 또한 비선형특성을 고려한 등가의 선형 스프링과 댐퍼이며 실제 응답과 일치하는 결과를 얻기 힘들고 구조물과 지반의 상대적 강성의 차이, 그리고 지진력 입력방법의 차이에 따라 많은 변동성을 내포 하고 있다. 실무의 경우 구조물에 발생하는 단면력을 크게 적용함이 안전 측 설계이지만 스프링과 댐퍼를 고려한 해석을 수행할 경우 기초 하단부를 고정단으로 하여 해석한 결과보다 일반적으로 작은 단면력을 나타내게 된다. 즉, 기초 하단부를 고정단으로 가정한 경우 지진하중의 효과를 과대평가하여 해석하게 되는 것이다. 또한 연약지반위에 구조물이 위치할 경우 지진하중의 증폭에 따라 증가된 하중이 구조물에 작용하게 되어 지진하중의 효과를 과소평가하여 해석할 우려도 존재하게 된다. 따라서 본 논문에서는 집중변수모델을 이용한 방법과 지반, 기초, 하부구조를 함께 모델링 하여 기초-지반 상호작용해석을 고려하는 방법을 수행하여 상부구조 지진응답해석을 수행하고 동시에 다지점 입력 지진운동을 고려한 지진응답 해석을 수행 한다.

2. 이론적 배경

일반적으로 내진설계 및 내진성능평가의 지진 시 구조물의 동적거동을 보다 정확히 예측하기 위해서 기초를 고정단이 아닌 스프링으로 취환 하여 기초와 지반의 상호작용을 고려하여 해석한다. 이 때 기초의 형상별로 근사식을 적용하여 스프링을 산정하며 그림1과 같은 흐름을 따르도록 정립되어 있다.

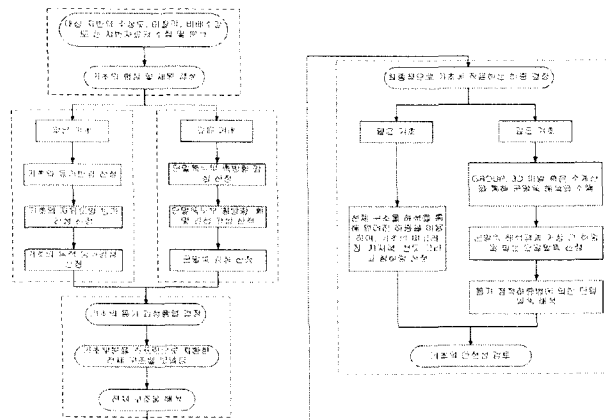


그림1. 스프링을 이용한 기초-지반 상호작용 해석 흐름도

하지만 이러한 방법은 근사적인 해석이며 본 논문의 주요한 관점인 상부구조의 경우 지진과 같은 여러 가지 인자에 의해 영향을 받아 변화하게 될 여지를 크게 가지는 방법이며 좀 더 엄밀한 해석을 위한 접근법이 요구되는 실정이다. 진원에서 입사하는 지진파에 의한 구조물의 영향을 파악하기 위해서는 입력지반운동의 공간적 변화를 고려하는 세 가지 요소 (1) Wave Travelling Effect (2) Local Site Effect (3) Incoherence Effect를 고려해야 한다. 이러한 영향을 고려하기 위해서는 먼저 그림2에서 나타내는 바와 같이 같은 무한한 지반을 포함한 구조계와 지진파의 전파를 간단히 이산화 하여 접근해야 한다.

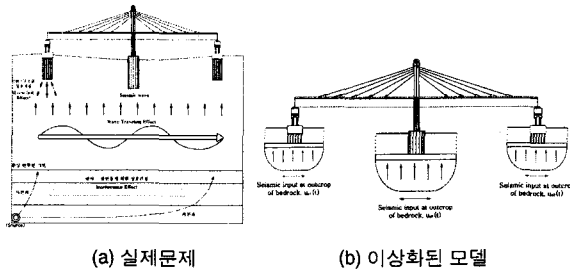


그림2. 지진파의 전파와 지반-구조물 상호작용

2.1 이상화된 지반-구조물 모델의 정식화 과정

앞서 언급한 바와 같이 그림3에서 이상화된 진동계에 대해 구조물과 지반의 운동방정식을 유도한다. 이때, 지진 하중은 지반을 통해 대상 구조물에 전해지는 것으로 가정한다. 경계면상의 절점의 자유도를 s 에 의해 표현하고 상부구조는 s , 굴착된 지반 절점은 f 로서 표현한다.

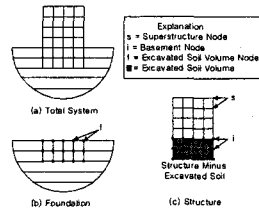


그림 3. 이상화된 지반-구조물 모델

그림3에서 보여지는 바와 같이 (a)의 구조물을 포함한 반무한 지반의 지반-구조물 시스템은 (b)와(c)에서와 같이 기초와 상부구조로 두 개의 부구조로 나뉜다. 여기서, (c)의 구조는 상부구조와 지하부에서 굴착지반 부분을 제거한 만큼이 해당된다. 즉, 굴착된 지반은 기초부분에 포함된다. 이때, 구조물과 기초 사이의 상호작용은 모든 지하 절점부에서 발생한다.

운동방정식은 진동수 영역에서 구조물에 대한 식과 지반에 대한 식을 결합하여 식(1)과 같이 유도된다

$$\begin{bmatrix} C_{ss} & C_{si} \\ C_{is} & (C_{ii} - C_{if} + X_{if}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ u_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ X_{if} \cdot u_f \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, C 는 복소수 진동수 의존 강성도 행렬이며 s 는 경계면상의 절점의 자유도, f 는 상부구조의 자유도, f 는 굴착된 지반 절점이며 식(2)와 같다.

$$C(\omega) = K - \omega^2 M \quad (2)$$

여기서, M 과 K 는 각각 조합된 전체 구조계의 질량과 강성도 행렬이며, ω 는 진동수이며 u 는 절점 변위의 벡터이다. X_{if} 는 상호절점에서 기초의 동적 강성도를 나타내는 진동수 의존 행렬이며, 임피던스 행렬을 통해 구해 질 수 있다.

지반운동에 대해서 고려된 식(1)에 상부구조와 지하절점에서 외력은 각각의 진동수에서 하중 벡터에 다른 외력의 항들을 추가 함으로써 결과되는 상호작용계의 운동방정식은 다음 식(3)과 같이 나타난다.

$$\begin{bmatrix} C_{ss} & C_{si} \\ C_{is} & (C_{ii} - C_{if} + X_{if}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ u_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_s \\ P_f \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서, P_s 와 P_f 는 각각 상부구조와 지하 절점에서 외력하중의 값이다.

2.2 지반응답해석

1차원 중복반사이론에서 지반은 균일한 반무한체 위에 놓인 수평지반 층상으로 구성된다고 가정되며 모든 재료값들은 점탄성으로 가정된다. 그러나 각 층의 강성도와 감쇠는 등가의 선형 방법을 통해 구한

값을 사용할 수 있으며 구조가 연결되는 층면의 자유장 변위에 대한 변위증폭은 식(4)와 같다.

$$u_f' = U_f' \cdot e^{i(\omega t - kx)} \quad (4)$$

여기서, U_f' 는 접촉면 증폭을 포함하는 곳에서와 제어점 아래에서의 모드형상(mode shape)에 대한 벡터이고, k 는 복소수로 나타낸 파수(wave number)이다.

2.3 임피던스 해석

앞서 언급했던 바와 같이, X_{ff} 는 접촉면 절점에서 기초의 동적 강성도를 나타낸다. 따라서, 이러한 절점에 대해 임피던스 행렬 F_{ff} 의 역으로부터 구하면 식(5)와 같다.

$$X_{ff} = F_{ff}^{-1} \quad (5)$$

여기서, F_{ff} 는 복소수의 계수값을 가지는 대칭행렬 형태이다.

3. 임피던스 해석을 통한 지진응답해석

3.1 1차원 지반응답해석

1차원 지반응답해석에서 사용하는 등가선형 모델은 실제 지반의 거동을 단순화 시킨 것으로 복잡한 비선형 거동에 대한 근사적인 해만을 제시하며 영구변형이나 파괴가 발생하는 문제에 대해서는 적용할 수 없다는 단점이 있다. 그러나 본 연구의 주요 관점은 지반보다 교량의 지진응답해석이므로 표1과 같이 간단한 매개변수(S파 속도) 해석으로 그 특성을 그림4와 같이 파악해 본다.

표 1. 깊이와 S파 속도에 대한 매개변수 해석Data

구분	깊이 (Depth of Soil)					
	1	2	3	4		
	12m(3개지층)	24m(6개지층)	36m(9개지층)	48m(12개지층)		
S 파 속도 V_s	a	200 m/s	1-a	2-a	3-a	4-a
	b	400 m/s	1-b	2-b	3-b	4-b
	c	600 m/s	1-c	2-c	3-c	4-c
	d	800 m/s	1-d	2-d	3-d	4-d
	e	1000 m/s	1-e	2-e	3-e	4-e
	f	1200 m/s	1-f	2-f	3-f	4-f
	g	1400 m/s	1-g	2-g	3-g	4-g
	h	1600 m/s	1-h	2-h	3-h	4-h

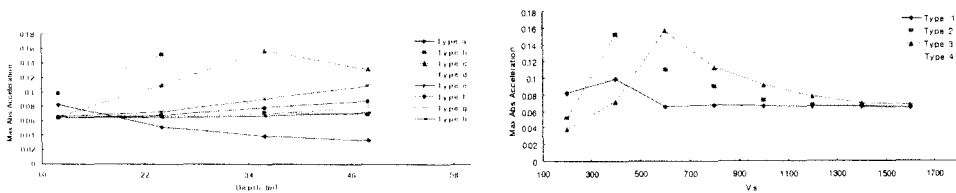


그림 4. 깊이와 S파속도에 따른 절대 최대 가속도의 변화

일반적으로 널리 알고 있는 바와 같이 진원으로부터 입사한 지진파에 대하여 1차원 지반응답해석을 통해 연약한 지반일수록 상부에서의 지반가속도 크기는 증폭되고 저주파 특성을 가지게 되며 연약지반 층이 두터울수록 그러한 경향이 커짐을 알 수 있다.

하부구조들이 위치하게 될 지반의 물성이 100% 동일 할 수는 없으므로 임의로 두 개의 예제지반 (Case 1 지반부, Case 2 지반부)을 가정하여 지반응답해석을 수행하고 그 결과를 아래 그림5에 도시한다. 입력지진파는 El Centro 가속도 데이터로 하였으며 기반암에서부터 전파되어 지표에 도달했을 때의 가속도 응답을 나타낸다.

인 SASSI를 사용하여 주파수영역에서 지반의 임피던스(Impedance)해석을 수행하고 이를 바탕으로 집중변수모델의 주파수 독립적인 변수들을 산정한다. 이때 주파수에 의존적인 지반의 동적 강성행렬(Impedance함수)을 주파수에 독립적인 집중변수 모델의 계수로 전환하는 방법은 여러 방향으로 연구되어 있는데, 본 연구에서는 대상 구조물의 주요 주파수 대역을 선정한 후 한정된 주파수 대역 내에서 질량과 강성의 조합에 의해 동적 강성행렬을 이상화하는 방법을 사용한다. 이 때, 대상 구조물의 주요 주파수 대역은 모드해석을 수행한 후 각 모드의 질량 참여율을 바탕으로 선정하였다.

임피던스 해석에 사용되는 기초의 형상은 4m 굴착지반을 가지는 8절점 Solid요소 원형기초이며 무질량 기초(Rigid Massless Foundation)의 수평(Horizontal), 회전(Rocking), 수직(수직), 비틀(Torsional)에 임피던스 함수를 S파 속도가 달라짐에 따라 변화되는 결과를 그림8에 나타낸다.

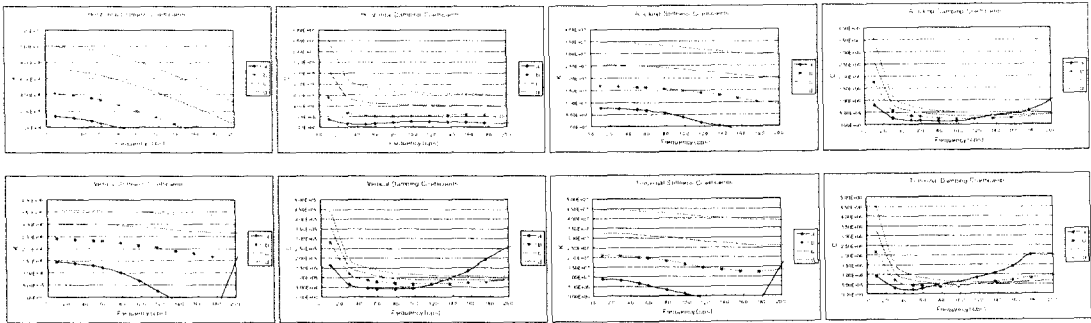


그림 8. S파 속도에 따른 강성과 감쇠 계수 변화

이와 같이 얻어진 임피던스 결과 값을 토대로, 먼저 해석할 상부구조에 대한 고유진동 해석을 수행한 후 각 자유도 별로 참여율이 가장 높은 주 진동수를 선택하고 그 이후 각각의 예제 지반(Case 1 지반부, Case 2 지반부)에 대해 얻어진 임피던스 함수 그래프에서 상부구조 진동수와 부합하는 임피던스 값을 선택하여 비선형 요소인 지반과 기초요소를 스프링과 댐퍼로 고려하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 지진응답해석을 수행한다.

4. 지반을 포함한 하부구조 해석

비선형 및 진동수 의존 특성의 지반을 등가의 선형 스프링과 댐퍼로 고려하여 지진응답을 구하는 것은 결국 여전히 큰 한계를 내포하는 방법이다. 앞으로의 방향은 지반-구조물계의 비선형성과 상호작용을 동시에 고려하기 위해 지반-구조물 상호작용을 시간영역에서 엄밀히 고려한 해석방법들이 연구되어 정립 되어야 할 것이다. 하지만 아직까지 대부분 수학적으로 복잡하며 기존의 해석프로그램과 연계하기 어려우므로 적용성이 떨어지는 문제점을 안고 있다. 현재 SASSI의 경우 일반 교량구조물의 상부구조를 다양하게 적용시키지 못하는 한계를 가지고 있다. 그러나 진동수 영역에서 간단한 형상을 가지는 교량 구조물 또는 하부구조는 충분히 해석할 수 있으며 지진 시 가장 주요한 초점이 되는 교량 구성부재는 교각기둥이므로 지반, 기초, 교각기둥을 효율적으로 함께 해석하는 방법이 필요하다.

먼저 기초-지반 상호작용과 더불어 하부구조를 진동수 영역에서 함께 해석하여 그 결과를 상부구조의 해석에 적용하는 방향으로 접근하고자 한다. 지반응답해석과 동일하게 S파 속도와 하부구조의 강성을 변화시켜 매개변수 해석을 통해 그 영향을 알아보기 위해 표 3과 같이 24개의 경우의 수를 고려하여 기

초-지반 상호작용에 의한 차이를 알아본다.

표 3. 지반의 S파 속도와 하부구조 강성 해석

구분		하부구조 강성의 변화 (EI)				
		1	2	3	4	
		50%	100%	150%	200%	
S 파 속도 V_s	a	200 m/s	1-a	2-a	3-a	4-a
	b	400 m/s	1-b	2-b	3-b	4-b
	c	600 m/s	1-c	2-c	3-c	4-c
	d	800 m/s	1-d	2-d	3-d	4-d
	e	1000 m/s	1-e	2-e	3-e	4-e
	f	1200 m/s	1-f	2-f	3-f	4-f
	g	1400 m/s	1-g	2-g	3-g	4-g
	h	1600 m/s	1-h	2-h	3-h	4-h

하부구조의 강성을 점차 변화시키고 지반의 S파 속도를 변화시켜감에 따라 가속도 응답의 값은 다른 형태를 나타내게 되는데 S파 속도 변화에 따른 스펙트럼 가속도의 변화와 절대 최대 가속도의 비교를 그림9에서 나타낸다.

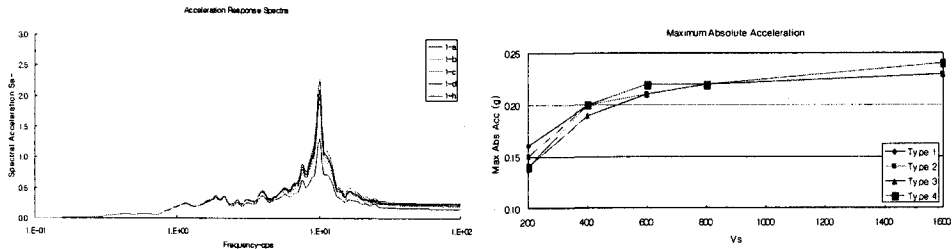


그림 9. S파 속도 변화에 따른 스펙트럼 가속도와 절대최대 가속도

지반운동해석을 한 결과를 토대로 기초와 하부구조의 매개변수 해석을 수행하고 결과되는 양상을 파악해 보면 다음의 사실을 알 수 있다.:(1) 하부구조의 강성이 변하지 않는다는 가정하에 지반의 S파 속도가 증가함에 따라 결과되는 가속도 응답은 증가하는 양상을 보인다.(2) 반대로 지반의 S파 속도가 일정한 경우 하부구조의 강성이 증가함에 따라 가속도 응답의 최대값이 감소하는 추세를 보인다.

설계응답스펙트럼에 부합하도록 산정한 인공지진파에 대해서도 Case 1 지반부와 Case 2 지반부에 대해 1차원 지반응답해석을 수행하고 기초-지반 상호작용을 고려한 해석을 수행한 후 하부구조 상부의 가속도 응답을 살펴보면 다음의 그림10과 같은 결과를 보인다.

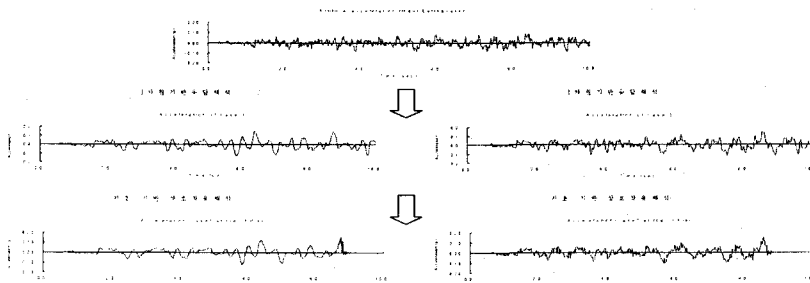


그림10. Case 1 지반부와 Case 2 지반부에 대한 지반응답해석 (인공지진파 가속도Data)

5. 상부구조해석

지금까지의 해석을 토대로 아치고 형태의 상부구조에 대해 해석을 수행하고 지점마다 다른 지진파를 입력 할 수 있는 구조해석 프로그램을 Matlab를 이용하여 개발한 후 지진응답해석을 하고 그 결과들을

비교해 본다. 인공지진파에 의해 Case 1의 결과되는 가속도 응답만을 상부구조에 입력으로 해석하였을 경우와 Case 1과 Case 2의 두 개의 가속도 응답이 상부구조에 동시에 다지점 입력될 때의 가속도 응답을 그림11에서 나타낸다.

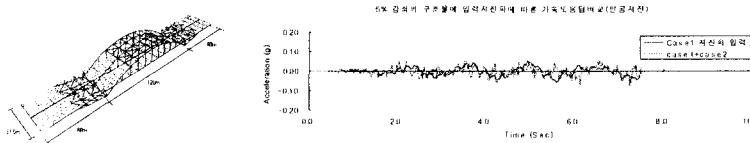


그림 11. 아치 교량 모델과 다지점 입력지진파에 따른 가속도 응답 비교(인공지진파)

그림11와 같이 교각 별로 다른 입력지진을 주어 해석한 결과와 모든 교각에 동일한 입력지진을 주어 해석한 결과는 경우에 따라 큰 차이를 나타내게 됨을 알 수 있으며 교량의 지간이 점점 더 길어질수록 교각이 위치하는 지반의 물성이 다르므로 인해 상부구조에는 큰 영향을 미치게 될 것임을 알 수 있다.

본 연구의 예제는 교각 사이의 길이가 다소 짧은 경우에 대해 해석하였으며 사실상 지반의 물성 편차가 크지 않으므로 결과 되는 차이는 다소 작아 보일 수 있다. 하지만 앞으로 점점 더 장대교량이 가설되면서 지반조건이 상이하고 연약 지반 위에 교량이 가설 될 경우 이러한 지반의 물성 편차로 인한 응답의 차이는 더욱 더 증가하게 될 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 교량의 지진응답해석에 있어서 지반-구조물 상호작용에 의한 영향을 고려하기 위해서 먼저 임피던스 해석을 통해 지반과 기초요소의 진동수 종속적인 특성을 파악하고 상부구조에 스프링과 댐퍼를 이용하여 지진해석을 수행하였다. 다음으로 지반과 기초요소 그리고 하부구조를 함께 지진응답 해석을 수행하여 지점별로 상이한 지진 가속도 입력으로 상부구조해석을 수행하였다. 그 결과 교각이 위치하는 지반물성의 편차가 심한 조건의 경우, 각 교각 별로 다른 형태의 지반종폭이 발생하여 지진입력이 변화 하게 되고, 따라서 교각이 상이한 조건의 지반 위에 놓이게 되는 경우의 교량의 지진해석에 대해서는, 기존의 지진해석방법과 함께 지반-구조물 상호작용을 고려한 지진거동에 대한 검토가 있어야 한다고 사료된다. 또한 진동수 영역에서 지반과 구조물을 전체를 상세히 모델화 하여 해석할 수 있는 구조설계 프로그램의 개발과 설계방법의 발전이 필요하다고 생각된다.

참고문헌

1. Spyrakos, C.C., "Seismic Behavior of Bridge Piers Including Soil-Structure Interaction", Computers & Structures, Vol. 43, No. 2, 1992, pp. 373-384
2. 한국지진공학회, 내진설계기준연구(II), 건설교통부, 1997.
3. 윤정방, 장수혁, 서준교, 이원철, "지반-구조물 상호작용을 고려한 교량의 지진응답해석", 대한토목학회, 2001학술발표 논문집 CD, 2001.
4. Schnabel, P.B., Lysmer, J., and Seed, H. B. "SHAKE91 User's Manual", University of California, 1992.
5. SASSI User's Manual, The Regents of the University of California, 1988