

지반-구조물 상호작용을 고려한 장대교량의 동적 거동

임채민 · 박장호[†] · 신영석

아주대학교 공과대학 환경건설교통공학부
(2004. 4. 30. 접수 / 2004. 6. 15. 채택)

Dynamic Behavior of a Long-Span Bridge Considering Soil-Structure Interaction

Che Min Lim · Jang Ho Park[†] · Yung Seok Shin

Division of Environmental, Civil and Transportation Engineering, Ajou University
(Received April 30, 2004 / Accepted June 15, 2004)

Abstract : The effect of soil-structure interaction becomes important in the design of civil structures such as long-span bridges, which are constructed in the site composed of soft soil. Many methodologies have been developed to account for the proper consideration of soil-structure interaction effect. However, it is difficult to estimate soil-structure interaction effect accurately because of many uncertainties. This paper presents the results of study on soil-structure interaction and dynamic response of a long-span bridge designed in the site composed of soft soil. The effect of the soft soil was evaluated by the use of computer program SASSI and a long-span bridge structure was modeled by finite elements. Dynamic response characteristics of a long-span bridge considering soil-structure interaction were investigated.

Key Words : soil-structure interaction, dynamic response, a long-span bridge, SASSI

1. 서 론

최근 국내에서는 사장교, 현수교 등 장대교량의 건설이 증가하는 추세에 있다. 이러한 장대교량은 대부분 육지와 섬을 연결하거나 도로를 건설하기 어려운 위치에 건설되고 있는데, 이러한 위치들은 대부분 지반상태가 양호하지 못한 점토층과 같은 연약지반으로 이루어져 있다. 연약지반에서는 지진 발생시 기반암에서의 지진동이 지표면으로 전달되면서 크게 증폭될 수 있으며, 연약한 지반과 구조물의 상호작용에 의하여 구조물에서의 거동이 복잡하게 나타나게 된다. 따라서 연약지반에 건설되는 장대교량의 경우에는 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction)을 고려한 설계가 요구되고 있으며, 실제 교량의 설계에서도 지반-구조물 상호작용이 부분적으로 고려되고 있다. 지반-구조물 상호작용을 고려한 교량의 동적 해석에 관한 연구는 많

이 이루어졌으나, 해석에서의 많은 불확실성으로 인하여 완전한 해석방법은 정립되어 있지 않고 있는 실정이다.

지반-구조물 상호작용이 고려되어야 하는 경우에는 입력지반운동의 규모에 따른 지반의 비선형성이 구조물의 거동에 큰 영향을 미친다. 이러한 지반의 비선형 특성은 크게 1차 비선형과 2차 비선형으로 분류할 수 있다^{1,2)}. 1차 비선형이란 지반 자체만의 운동에 의한 재료의 비선형 특성을 말하며, 2차 비선형은 지반과 구조물의 상호작용 효과로 인하여 구조물의 거동이 지반에 전달됨으로써 발생하는 지반의 비선형 특성을 말한다. 지반의 1차 비선형 특성은 대부분 수치해석 방법들을 이용하여 고려되고 있으며³⁾, Schnabel 등이 개발한 프로그램 SHAKE91이 입력지반운동에 따른 지반의 비선형성 평가에 널리 사용되고 있다⁴⁾. 그리고 지반의 2차 비선형 특성은 직접법, 부분구조법 등의 다양한 수치해석방법들에 의하여 모델링되어 평가되고 있다.

본 논문에서는 장대교량인 사장교에 대하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 해석을 수행하고 이로

[†]To whom correspondence should be addressed.
jangho@ajou.ac.kr

부터 지반-구조물 상호작용의 영향을 받는 연약지반에 위치한 사장교에 대한 동적 거동 특성을 살펴 보았다. 교량의 기초와 지반의 모델링을 위하여 부분구조법(Substructure method)을 이용한 지반-구조물 상호작용 해석프로그램 SASSI를 이용하여 구조물 저면에서의 지반 임피던스(Impedance)를 계산하고⁵⁾, 이로부터 기초와 지반에 대응하는 강성, 질량, 그리고 감쇠를 가지는 집중파라미터 모델을 구하였다. 그리고 사장교의 유한요소 모델에 케이슨 기초와 지반에 대한 집중파라미터 모델을 연계하여 전체 교량에 대한 지반-구조물 시스템을 구성하고 시간영역에서의 지반운동에 대한 동적해석을 수행하였다. 해석결과를 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 고정지반에 대한 교량의 해석결과와 비교함으로써 지반-구조물 상호작용의 영향을 살펴보았다.

2. 지반-구조물 상호작용 해석법

본 논문에서의 지반-구조물 상호작용을 고려한 장대교량의 동적 해석은 Fig. 1과 같은 순서로 수행된다.

2.1. 인공지진파의 생성

지반-구조물 상호작용을 고려한 장대교량의 시간이력해석을 위해서는 지반 운동의 가속도 시간이력이 필요하다. 지반 운동의 가속도 시간이력을 구하는 방법에는 주어진 응답스펙트럼에 부합하는 지반

운동의 가속도 시간이력을 랜덤진동론에 의하여 작성하는 방법과 진원, 전달경로 및 부지특성을 종합적으로 고려하여 지반을 모델링하고 이로부터 지반 운동의 가속도 시간이력을 구하는 방법이 있다. 본 논문에서는 랜덤진동론에 의한 인공지진파 생성 프로그램인 SIMQKE를 사용하여 설계기준의 응답스펙트럼을 만족하는 인공지진 가속도 시간이력을 생성하였다⁶⁾.

2.2. 비선형 지반 물성치 산정

지반의 비선형 특성은 대부분 수치해석 방법을 이용하여 고려하고 있으며, 본 논문에서는 Schnabel 등이 개발한 프로그램 SHAKE91를 사용하여 지반의 비선형성 물성치를 산정하였다.

2.3. 기초 임피던스 산정

본 논문에서는 장대교량에서의 지반-구조물 상호작용의 효과를 지반에서의 강성으로 표현하기 위하여 부분구조법을 이용한 지반-구조물 상호작용 해석프로그램인 SASSI를 사용하여 연약지반에서의 지반과 케이슨 기초의 임피던스를 산정하고 이로부터 케이슨 기초와 지반에 대응하는 강성, 질량, 그리고 감쇠를 가지는 집중파라미터 모델을 구하였다. 프로그램 SASSI에서 사용되는 부분구조법을 이용한 지반-구조물 상호작용의 해석 방법은 다음과 같다¹⁾.

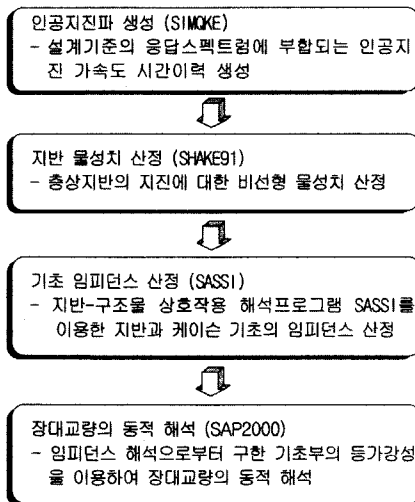


Fig. 1. Analysis procedure of a long-span bridge considering soil-structure interaction

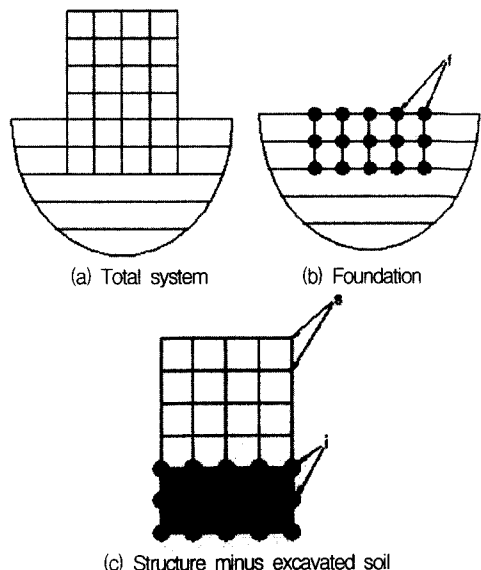


Fig. 2. Soil-structure interaction model by substructure method

부분구조법에서 Fig. 2(a)에 제시된 전체 지반-구조물 시스템은 구조물이 놓이기 전의 지반(Fig. 2(b))과 굴착된 지반을 제외한 구조물(Fig. 2(c))의 두 부분으로 나누어진다. 여기서 지반과 구조물의 상호작용은 구조물이 매입된 기초 부분의 모든 절점에서 발생한다. 부분구조 (b)와 부분구조 (c)가 결합되면 전체 지반-구조물 시스템 (a)를 형성하게 되므로 전체 지반-구조물 시스템에 대한 운동방정식은 부분구조 (b)의 지반에 대한 운동방정식과 부분구조 (c)의 구조물에 대한 운동방정식을 진동수 영역에서 결합함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{si}] \\ [S_{is}] & [S_{ii}^s] + [S_{ii}^g] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s\} \\ \{u_i\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [S_{ii}^g] \{u_i^g\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $[S]$ 는 동적 강성행렬, $\{u\}$ 는 변위벡터를 의미한다. 그리고 첨자 g 는 굴착된 지반의 상태를 나타내며, 밑첨자 i 와 s 는 각각 기초에서의 절점과 기초를 제외한 상부구조물에서의 절점을 나타낸다. $\{u_i^g\}$ 는 지반과 구조물의 접촉면에 작용하는 지진운동, 즉 산란운동으로 부분구조법에서 적용되는 기초 부에서의 입력운동을 나타낸다.

자유장 시스템은 굴착된 지반과 굴착되어진 지반의 합이므로 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$[S_{ii}^s] + [S_{ii}^g] = [S_{ii}^f] \quad (2)$$

여기서, 첨자 f 는 굴착 전의 지반을 의미한다. 또한, 산란운동의 항인 $[S_{ii}^g] \{u_i^g\}$ 는 다음과 같이 자유장 운동으로 나타낼 수 있다.

$$[S_{ii}^g] \{u_i^g\} = [S_{ii}^f] \{u_i^f\} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)을 식 (1)에 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{si}] \\ [S_{is}] & [S_{ii}^s] - [S_{ii}^g] + [S_{ii}^f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s\} \\ \{u_i\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [S_{ii}^f] \{u_i^f\} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)로부터 지반-구조물 상호작용이 고려된 연약지반에서의 전체 지반-구조물 시스템의 운동을 구할 수 있다. 식 (4)를 다음의 식 (5)와 같이 강제진

동해석을 수행할 수 있는 형태로 수정하고, 상부구조물의 고유진동수로 가진을 하면 기초와 지반으로 구성된 기초부의 임피던스(Impedance)를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{si}] \\ [S_{is}] & [S_{ii}^s] - [S_{ii}^g] + [S_{ii}^f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s\} \\ \{u_i\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_s\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)로부터 구한 임피던스로부터 다음의 식 (6)을 사용하면 지반과 기초의 강성, 질량, 감쇠를 산정할 수 있다.

$$[S^j(\omega)] \equiv [\Delta K^j] + i\omega[\Delta C^j] - \omega^2[\Delta M^j] \quad (6)$$

여기서 윗첨자 j 는 지점을 의미하며, ΔM , ΔC , ΔK 는 지점에서의 질량, 감쇠, 강성을 의미한다.

3. 장대교량의 지반-구조물 상호작용 해석

본 논문에서 제시한 해석방법을 사용하여 Fig. 3과 같은 총연장 490m의 사장교에 대하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 동적해석을 수행하고 교량의 동적 거동 특성을 살펴보았다. 교각과 교각 사이의 거리는 170m이고, 교각1과 교각2에서 기반암까지의 깊이는 각각 23.3m, 23.8m이며, 교각3에서 기반암까지의 깊이는 11.8m이다.

3.1. 인공지진파의 생성

지반-구조물 상호작용을 고려한 장대교량의 시간이력해석에 필요한 입력지반운동의 가속도 시간이력을 설계기준⁷⁾에 제시된 응답스펙트럼에 부합되도록 생성하였다. 이를 위하여 랜덤진동론에 의한 인공지진파 생성 프로그램인 SIMQKE를 사용하였다⁶⁾.

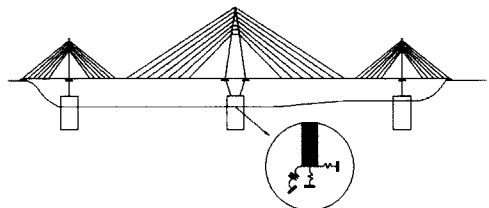


Fig. 3. A cable-stayed bridge model for soil-structure interaction analysis

해석대상 교량은 지진구역 II에 속하고, 내진 1등급급으로 위험도 계수 1.4를 사용하여 가속도계수를 0.098g로 하였다. 그리고 지반-구조물 상호작용을 고려한 해석에서는 지반계수 1을 사용하여 인공지진 가속도 시간이력을 생성하였으며, 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 고정지반에 대한 해석에서는 지반계수 2를 사용하여 인공지진 가속도 시간 이력을 생성하였다(Fig. 4).

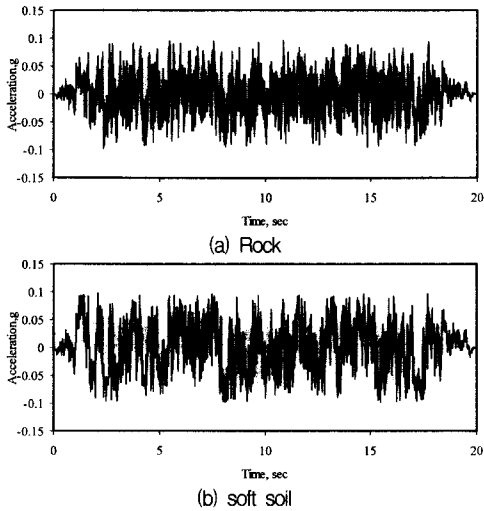


Fig. 4. Artificial earthquake acceleration time histories

32. 비선형 지반 물성치 산정

프로그램 SHAKE91을 사용하여 지반의 비선형성 물성치를 산정하였다. 이때 해석에 사용된 지반의 형상과 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1. Geometry and properties of soil layers

	P1		P2		P3	
	두께	물성치	두께	물성치	두께	물성치
1	3.8m 점토층 (1.4)	vp=1449m/s vs=132m/s	0.8m 잔류토 (1.8)	vp=1874m/s vs=283m/s	3.5m 모래 (1.7)	vp=1874m/s vs=283m/s
2	5.25m 잔류토 (1.8)	vp=1874m/s vs=283m/s	12.0m 잔류토 (1.9)	vp=1874m/s vs=283m/s	3.5m 잔류토 (1.7)	vp=1874m/s vs=283m/s
3	7.25m 잔류토 (1.9)	vp=1874m/s vs=283m/s	11.0m 풍화암 (2.0)	vp=2273m/s vs=610m/s	4.8m 풍화암 (2.0)	vp=2273m/s vs=610m/s
4	7.0m 풍화암 (2.0)	vp=2273m/s vs=610m/s	연암 (2.6)	vp=3421m/s vs=1608m/s	연암 (2.6)	vp=3421m/s vs=1608m/s
5	연암 (2.6)	vp=3421m/s vs=1608m/s				

()는 흙의 단위중량, 단위 : ton/m³

3.3. 기초 임피던스 산정

지반-구조물 상호작용을 고려한 지반과 케이슨 기초의 강성은 지반의 특성상 주파수 종속적인 특성을 지니고 있다. 그러나 본 논문에서는 구조해석용 프로그램인 SAP2000을 이용하여 교량에 대한 동적 해석을 시간영역에서 수행하고자 하므로 지반과 케이슨 기초에 대한 주파수에 무관한 강성이 요구된다. 이를 위하여 지반-구조물 상호작용 해석프로그램 SASSI를 이용하여 지반과 케이슨 기초에 대한 임피던스를 구하고 이로부터 지반과 케이슨 기초의 등가강성을 산정하였다.

프로그램 SASSI를 이용하여 Fig. 5와 같이 케이슨 기초와 지반을 모델링하고 상부구조물의 지배적인 모드에 해당하는 주기를 갖는 하중을 가하여 기초부 각 지점에서의 Compliance를 구하였다. 계산된 Compliance는 복소수 형태의 단위하중에 의한 변위 값으로 구하여지고 이 값의 역수를 취함으로써 지반과 케이슨 기초에 대한 등가강성을 구할 수 있다. 해석으로부터 구한 교각(P1, P2, P3)이 위치하는 지점에서의 지반과 케이슨 기초의 등가강성을 정리하면 Table 2와 같다.

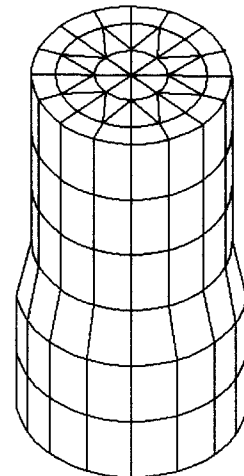


Fig. 5. Finite element model of a caisson

Table 2. Equivalent stiffness of soil and caisson

구분	P1	P2	P3
교축방향 (kN/m)	1.230E07	4.259E07	3.144E07
교축직각방향 (kN/m)	2.670E06	9.998E06	2.318E07
수직방향 (kN/m)	5.573E07	1.251E08	8.124E07
교축방향 (kNm/deg)	1.568E12	9.915E11	1.567E12
교축직각방향 (kNm/deg)	1.568E12	9.915E11	1.567E12

3.4. 지반-구조물 상호작용을 고려한 교량의 동적 거동

지반-구조물 상호작용을 고려한 장대교량에 대한 전체 지반-구조물 시스템의 동적해석과 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 고정지반에 대한 장대교량의 동적해석을 수행하여 두 결과를 비교하였다.

(1) 모드 형상

고유치 해석을 수행하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우와 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 경우의 주요 모드를 비교하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 경우와 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우에 대한 교량의 주요 모드와 주기를 나타낸 것이다. Fig. 6과 Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 지반-구조물 상호작용을 고려할 경우 구조물의 모드가 변하고 있으며, 주기도 증가함을 알 수 있다. 특히 교축직각방향의 모드에서는 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 경우 모드 형상이 대칭으로 나오고 있으나, 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우에는 각 교각의 위치에서 지반조건이 상이하여 서로 다른 강성이 도입됨으로써 모드 형상이 비대칭으로 변하여 있음을 알 수 있다.

(2) 동적 응답

동적 해석을 수행하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우와 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 경우의 동적 응답을 비교하였다.

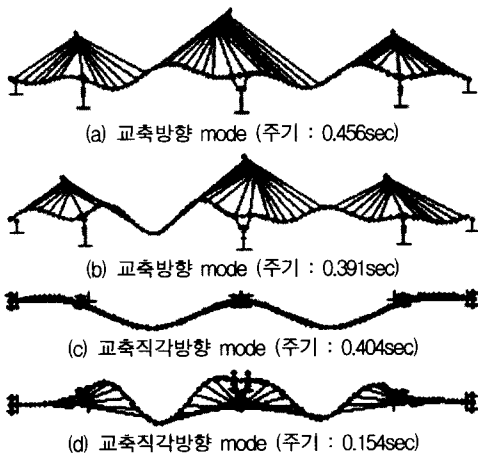


Fig. 6. Mode shapes of a fixed base model

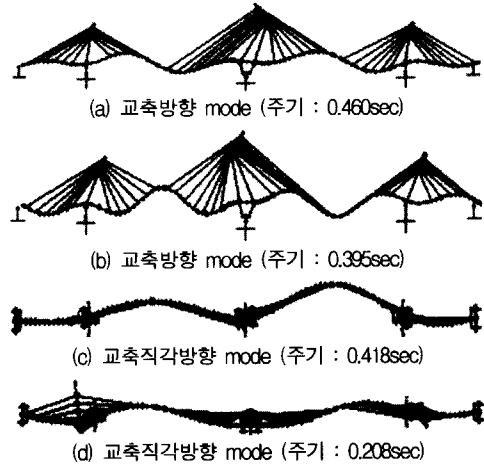


Fig. 7. Mode shapes of a soil-structure interaction model

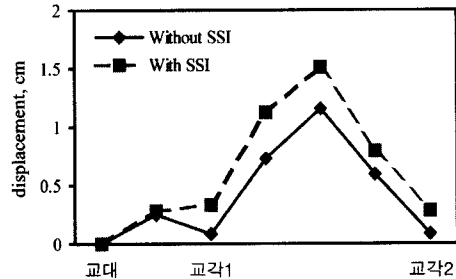


Fig. 8. Deformation of the girder

Fig. 8은 교축직각방향 입력지반운동이 가해진 경우 교량의 상판에서 발생한 변위를 도시한 것이다. 지반-구조물 상호작용을 고려할 경우 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 경우보다 응답이 증가함을 볼 수 있다. 이때 교각 1과 교각 2의 중앙부 거더 그리고 교각 2 위치의 거더에 발생하는 모멘트는 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 경우는 각각 26371.2ton·m, 24754.4ton·m이었으며, 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우는 각각 20655.6ton·m, 19490.7ton·m로 감소하여 나타났다.

Table 3은 각 교각에서 발생하는 모멘트의 최대 값을 정리한 것이다. 다른 교각에 비하여 교각2에서 큰 값이 발생하고 있는데 이는 교각2에서만 교좌장치가 고정으로 되어 있기 때문에 나타나는 현상이다. 발생하는 최대모멘트의 크기는 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우가 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 경우보다 작게 나타나고 있다. 이는 지반-구조물 상호작용이 고려될 경우 지점에 강성이 도입되어 회전과 이동이 발생함으로써 나타나는

Table 3. Maximum moment at piers (unit : ton · m)

위치	교축방향			교축직각방향		
	SSI무시	SSI고려	ratio	SSI무시	SSI고려	ratio
교각1	2867.9	2106.7	0.73	7222.7	4806.0	0.67
교각2	29725.3	21251.9	0.72	15777.8	11920.0	0.75
교각3	3143.4	2644.6	0.84	7213.2	6758.0	0.93

Table 4. Maximum shear force at piers (unit : ton)

위치	교축방향			교축직각방향		
	SSI무시	SSI고려	ratio	SSI무시	SSI고려	ratio
교각1	234.7	333.1	1.14	461.3	549.1	1.19
교각2	1811.5	1937.9	1.07	1069.8	1309.0	1.22
교각3	354.9	439.1	1.23	492.5	843.6	1.71

현상으로 판단된다. 교축직각방향 입력지반운동이 가해진 경우 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 경우 교각1과 교각3에서의 최대모멘트 값이 동일하게 나타나는데 반하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우에는 지점에 서로 다른 강성이 도입됨으로 인하여 그 값이 상당한 차이를 보이고 있다.

Table 4는 각 교각에서 발생하는 전단력의 최대 값을 정리한 것이다. 전단력의 경우에는 지반-구조물 상호작용을 고려한 해석결과가 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 해석결과보다 전체적으로 증가하여 나타나고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 장대교량인 사장교에 대하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 동적해석을 수행하고 이로부터 지반-구조물 상호작용의 영향을 받는 장대교량에 대한 동적 거동 특성을 살펴보았다.

해석은 해석프로그램 SHAKE91을 사용하여 지반의 물성치를 산정하고, 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램 SASSI를 이용하여 케이스 기초와 지반에 대한 임피던스를 구하였다. 이로부터 케이스 기초와 지반에 대응하는 강성, 질량, 그리고 감쇠를 구한 후 사장교의 유효요소 모델과 연계하여 동적 해석을 수행하는 과정으로 이루어졌다.

지반-구조물 상호작용을 고려하여 장대교량에 대한 동적해석을 수행할 경우 각 지점에 서로 다른 강성이 도입됨으로써 지반-구조물 상호작용을 고려하

지 않은 고정지반에 대한 장대교량의 동적해석과 상이한 결과를 보이게 된다. 특히 교축방향으로 대칭인 교량의 경우에는 모드 형상이 대칭에서 비대칭으로 변하게 된다. 구조물에 발생하는 변위는 지반조건, 입력지반운동 그리고 상부구조물의 특성에 따라 변화하게 되며, 일반적으로 기초부에 회전강성이 도입됨으로써 변위가 증가하는 경향이 있다. 구조물에 발생하는 부재력의 경우에는 변위에 비하여 더 복잡한 변화를 나타내게 된다. 따라서 지반의 지층구조가 복잡한 지반에 건설되는 장대교량의 경우 기초의 강성을 포함하여 지반 조건이 충분히 고려될 수 있도록 지반-구조물 상호작용을 고려한 해석이 이루어져야 할 것이다. 또한 설계시 지반-구조물 상호작용에 의해 교량에 발생하는 부재력과 거동의 변화를 충분히 고려하여야 할 것이다.

참고문헌

- 1) Wolf, J. P., "Dynamic Soil-Structure Interaction", Prentice-Hall Inc., 1985.
- 2) Wolf, J. P., "Soil-Structure Interaction Analysis in Time Domain", Prentice-Hall Inc., 1988.
- 3) Kim, J. K., Koh, H. M., Kwon, K. J. and Yi, J. S. "A three-dimensional transmitting boundary formulated in Cartesian coordinate system for the dynamics of non-axisymmetric foundations", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 29, pp. 1527~1546, 2000.
- 4) Idriss, I. M., Sun, J. I., "User's manual for SHAKE 91 : a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits", University of California, Berkeley, 1993.
- 5) Lysmer, J., Tabatabaie, M., Tajirian, F., Vahdani, S., and Ostadan, F., "SASSI, a System for Analysis of Soil-Structure Interaction", University of California, Berkeley, 1981.
- 6) Gasparini, D., Vanmarcke, E. H., "Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra", Massachusetts Inst. of Technology, 1976.
- 7) 건설교통부, "도로교 설계기준," 한국도로교통협회, 2000.