

입력지반운동의 공간적 변화를 고려한 교량의 지진응답해석

최광규* · 강승우* · 국승규**

*동아대학교 토목공학과

**부경대학교 건설공학부

Seismic Response Analysis of Bridges Considering Spatial Variation of Input Ground Motion

Kwang-Gyu Choi, Seung-Woo Kang* and Seung-Kyu Kook**

*Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ., Busan, Korea

**School of Construction, Pukyong National Univ., Busan, Korea

KEY WORDS: Seismic response 지진응답, Input ground motion 입력지반운동, Foundation-soil interaction 기초-지반 상호작용

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

1. 서 론

최근 국내에는 사장교, 현수교 등의 장대교량의 건설이 증가하는 추세를 보이며 이러한 대형교량들은 위치하는 지역의 특성상 두 교각지점의 지반조건이 상이한 지반 상에 교량이 위치한다고 볼 수 있고 이는 지진 시 다른 조건의 입력지진이 각 교각으로 입력될 가능성을 크게 한다. 장대교량의 경우 각각의 지반과 접해있는 부분에서 발생하는 지진기록들을 살펴보면 상호간에 응답의 특성이 다소 다르게 나타나는데 이는 지진동의 경로와 지반특성에 의한 영향으로 지진파가 변화될 수 있기 때문이다. 또한 연약지반에서는 지진에 의한 지반운동이 지표면에서 크게 증폭되어 나타나는 경향이 있으므로, 지반-구조물 상호작용(Soil-structure interaction: SSI)이 교량구조에 어떤 영향을 줄 것 인지에 대한 면밀한 검토가 필요하다(박장호, 2006; Spyrakos, 1992; Harrichandran and Wang, 1990; Somini, 1987).

교량의 내진해석에 관한 기존 연구들에서는 주요관점이 구조물에 대한 동적 해석 모델링에 있고 반무한체인 지반을 포함하는 모델은 아직까지 많은 제약과 한계에 의해 주로 기초를 포함하는 지반을 등가의 스프링과 댐퍼로 가정하여 구조물에 첨가시키는 것으로 지반-구조물 상호작용을 고려한다(Somini,

1987; 한국지진공학회, 1997; 한국지반공학회, 1997; 윤정방 등, 2001; 이종세 등, 2001). 이러한 방법을 위해서는 먼저 반무한체인 지반과 기초요소를 나타내는 스프링과 댐퍼의 특성을 파악해야 하며 이 특성은 지반의 진동 특성상 진동수 의존적인 특성을 지니고 있다. 다음으로 파악된 지반과 기초의 특성을 토대로 전체 구조물에 대한 모델을 만들어 지진응답해석을 수행하고 지반-구조물 상호작용에 의한 영향을 살펴 볼 수 있다.

그러나 단순한 스프링과 댐퍼의 요소만으로는 실제 응답과 일치하는 결과를 얻기 힘들고 구조물과 지반의 상대적 강성의 차이, 그리고 지진력 입력방법의 차이에 따라 응답은 변화할 수도 있다. 따라서 본 논문에서는 지반, 기초, 하부구조를 함께 모델링하여 기초-지반 상호작용해석을 수행하고 그 결과 응답을 토대로 상부구조 지진응답해석을 수행하며 동시에 입력지반운동의 공간적 변화를 고려한 지진응답 해석을 수행한다.

2. 이론적 배경

2.1 이산화된 지반-구조물 모델의 정식화 과정

Fig 1과 같이 이산화된 진동계에 대해 구조물과 지반의 운동방정식을 유도한다. 이때, 지진 하중은 지반을 통해 대상 구조계에 전해지는 것으로 가정한다. 경계면상의 절점의 자유도를

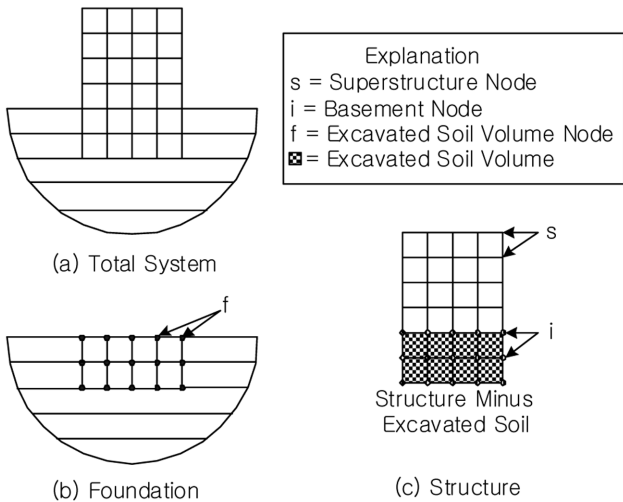


Fig. 1 Discretized soil-structure model

첨자 i 에 의해 표현하고 상부구조는 s , 굴착된 지반 절점은 f 로 표현한다.

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

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

여기서, C 는 복소수 진동수 의존 강성도 행렬이며 i 는 경계면 상의 절점의 자유도, s 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_{ff} 는 상호절점에서 기초의 동적 강성도를 나타내는 진동수 의존 행렬이며, 임피던스 행렬을 통해 구해 질 수 있다.

식 (1)은 단지 지반운동에 대해서만 고려한 운동방정식이다. 상부구조와 지하절점에서 외력은 각각의 진동수에서 하중 벡터에 다른 외력의 항들을 추가함으로써 간단하게 얻어질 수 있다. 따라서 결과 되는 상호작용계의 운동방정식은 다음 식 (3)과 같이 나타난다.

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

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

2.2 지반응답해석

본 절에서 수행하려는 지반운동해석에는 여러 가지 상용 프로그램을 사용하여 수행할 수 있으나 비교적 단순하고 쉽게 접근할 수 있으며 많은 실적을 가지고 있는 SHAKE를 이용하여 해석을 수행한다. SHAKE는 1차원 중복반사이론에 기본을 두고 주파수 영역에서 직접법으로 해석을 수행하는 프로그램이며 이

에 대한 정식화 과정은 프로그램 매뉴얼을 통해 쉽게 접근할 수 있다(Schnabel et al., 1992).

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 (4)와 같다.

$$X_{ff} = F_{ff}^{-1} \quad (4)$$

여기서, F_{ff} 는 복소수의 계수 값을 가지는 대칭행렬 형태이다. 이러한 임피던스 행렬을 계산하는 방법으로는 직접법과 Skin method 및 Subtraction 방법이 있으며 각각의 방법들은 X_{ff} 의 크기 차이에 의해 해석에 소요되는 계산시간의 차이로 대별된다(Vahdani, 1984).

3. 임피던스 해석을 통한 지진응답해석

본 연구에서 가장 먼저 선행되어야 할 사항은 입력지진파의 선정이며, 우리나라에서는 지진의 데이터가 미비한 관계로 EI Centro 지진 데이터와 설계응답스펙트럼에 부합하는 인공지진 파를 선정하여 해석하고 그 결과를 도시한다.

3.1 1차원 지반응답해석

부구조들이 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 아래에 도시한다. 예제 해석에 사용된 지반타입은 점성토, 사질토, 자갈, 암반(Base)을 편의상 순차적으로 Type 1, 2, 3, 4로 명하고 교량의 중앙하부의 하천을 중심으로 왼쪽편의 지반부를 Case 1로 가정하고 오른쪽편의 지반부를 Case 2로 가정하여 지반을 모델링하였다. 각각의 지반층은 아래의 Table 1에서 총 퇴적층 두께 84m의 Caes 1 지반부에 대해, Table 2에서 총 퇴적층 두께 40m의 Case 2 지반부에 대해 나타낸다. 입력지진파는 EI Centro 가

Table 1 Case 1 (Soil layers)

No.	Type	Depth (m)	Damping (%)	Unit weight (tonf/m ³)	Vs (m/s)
1	1	4.0	0.05	1.90	130
2	2	6.0	0.05	2.00	200
3	2	8.0	0.05	2.00	200
4	2	8.0	0.05	2.00	300
5	2	8.0	0.05	2.00	300
6	3	10.0	0.05	2.20	400
7	3	10.0	0.05	2.20	450
8	3	10.0	0.05	2.20	500
9	3	10.0	0.05	2.20	800
10	3	10.0	0.05	2.20	1000
11	4	base	0.10	2.50	1500

Table 2 Case 2 (Soil layers)

No.	Type	Depth (m)	Damping (%)	Unit weight (tonf/m ³)	Vs (m/s)
1	1	4.0	0.05	1.90	130
2	2	4.0	0.05	2.00	200
3	2	4.0	0.05	2.00	200
4	2	4.0	0.05	2.00	300
5	3	4.0	0.05	2.20	350
6	3	4.0	0.05	2.20	400
7	3	4.0	0.05	2.20	500
8	3	4.0	0.05	2.20	700
9	3	4.0	0.05	2.20	800
10	3	4.0	0.05	2.20	1000
11	4	base	0.10	2.50	1500

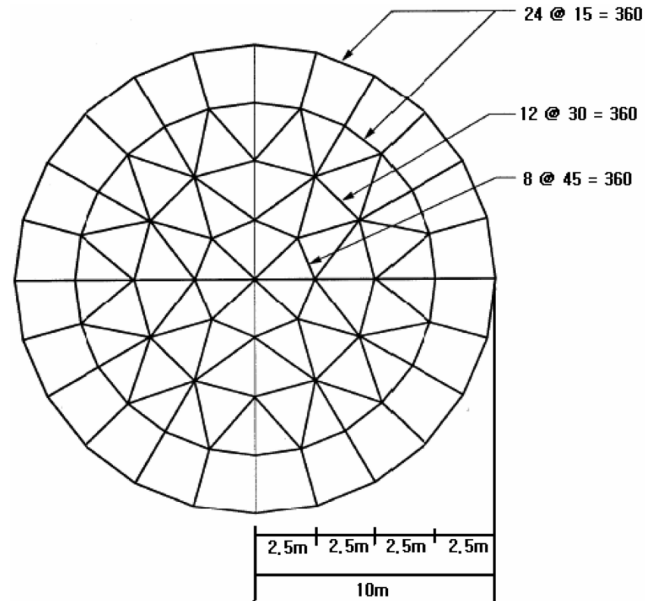


Fig. 3 Sectional view of foundation

속도 데이터로 하였으며 기반암에서부터 전파되어 지표에 도달했을 때의 가속도 응답을 나타낸다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 입력지진파의 최대가속도 0.1g를 기준으로 최대가속도 응답은 Case 1 지반부의 경우 33% 이상이 증폭 되어 0.133g의 최대 지반 가속도 값을 보여주며 Case 2 지반부의 경우 0.150g의 최대 지반가속도를 가지며 50%의 증가량을 보이며 기반암에서의 지진파 가속도와 지표에서의 가속도 응답이 현저하게 차이남을 알 수 있다. 이처럼 상부구조가 위치하게 될 지반의 조건이 조금이라도 달라질 경우 하부구조에 전달되는 지진파는 현격히 다른 값으로 전파될 수 있기에 지반응답해석의 중요성이 있다 하겠다.

Table 3 S wave and P wave velocity at each soil stratum

Soil stratum	Vs (m/sec)	Vp (m/sec)
Type a	200	400
Type b	400	800
Type c	600	1200
Type d	800	1600

3.2 임피던스 해석

임피던스 해석에 사용되는 기초의 형상은 아래의 Fig. 3과 같이 원형기초이다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 8절점 Solid요소로 모델링되며 각각의 모델링에 의한 절점과 요소는 한 면당 69개의 절점과 88개의 요소로 모델링 된다.

본 논문에서는 SASSI2000[®] 프로그램을 사용하여 임피던스

해석을 수행하였다.(SASSI User's Manual, 1988) 이 프로그램은 부구조법에 의해 개발 되어졌으며 입력지진파는 최대가속도는 0.1g, 시간간격은 0.02초 EI Centro지진 데이터를 입력값으로 한다. 또한 본 임피던스 해석에서는 무질량 기초(Rigid massless foundation)의 수평(Horizontal), 회전(Rocking), 수직(Vertical), 비틀(Torsional)의 임피던스 함수가 계산되며 4m의 굴착지반을 가지며 Cut-off 진동수는 25Hz로 선정하였다.

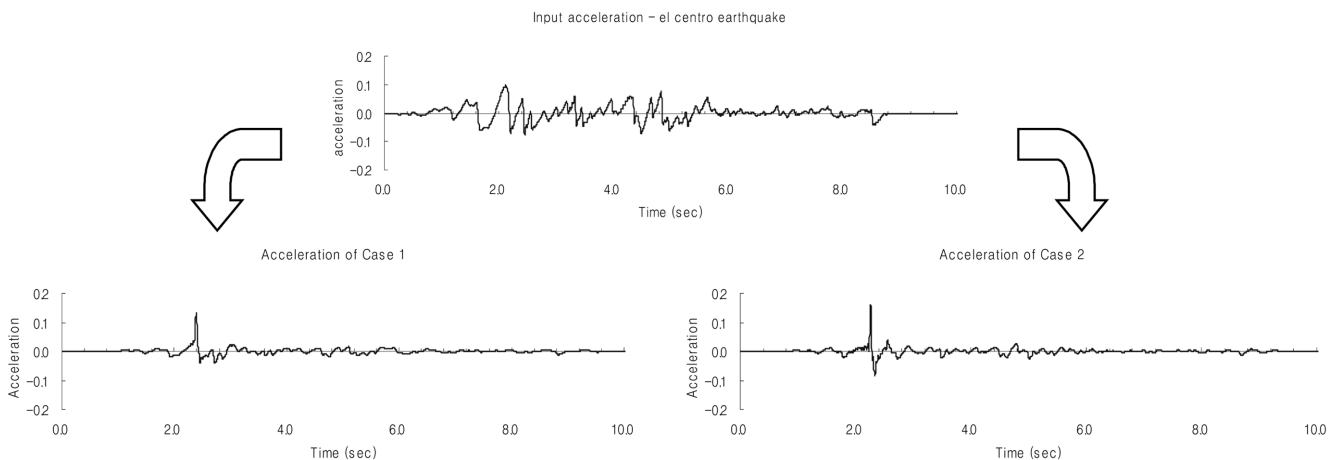


Fig. 2 Results of seismic response analysis at the surfaces of Case 1 & Case 2 stratum due to EI Centro earthquake

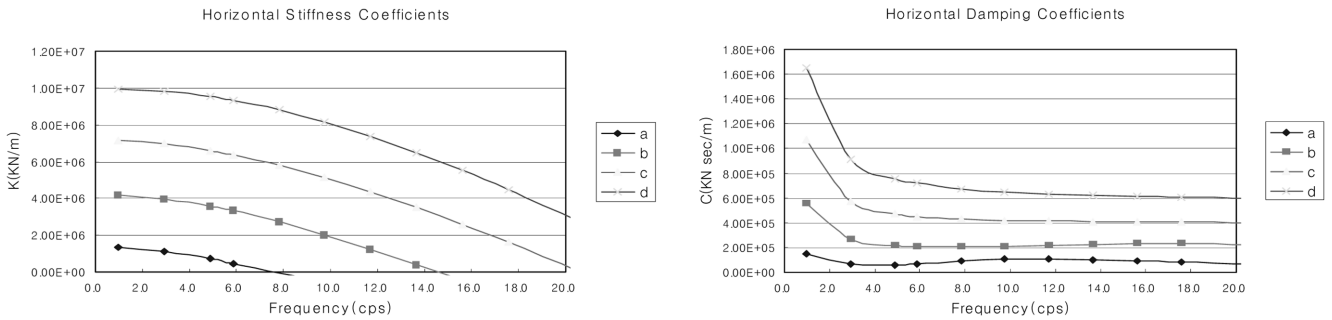


Fig. 4 Horizontal stiffness and damping coefficients due to S wave velocity

지반 속에 묻힌 기초요소는 진동수 의존 특성을 가지므로 구조물에 대해 시간영역해석을 수행하는 경우, 구조물 하부의 기초요소를 스프링과 댐퍼로 하여 해석을 수행하면 간단한 형태로 지반과 기초를 고려한 상부구조의 지진응답해석을 수행할 수 있다. 그러기 위해서는 먼저 기초요소의 임피던스를 알아야 하므로 아래의 Table 3에서 S파 속도와 P파 속도가 달라짐에 따라 임피던스 값이 어떻게 달라지는가를 알기 위해 매개변수 해석을 수행하며 그 결과를 Fig. 4에 나타낸다.

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 시간영역에서의 지진응답해석을 수행한다.

3.3 사장교 해석

앞선 임피던스 해석에 의해 선정된 스프링과 댐퍼의 값을 토대로 상부구조물인 사장교를 Fig. 5과 같이 모델링하여 지진응답해석을 수행한다. 해석을 수행한 모델은 3경간 연속 사장교로서 중앙경간 220m이며 각각 100m의 측경간을 가지며 상판으로

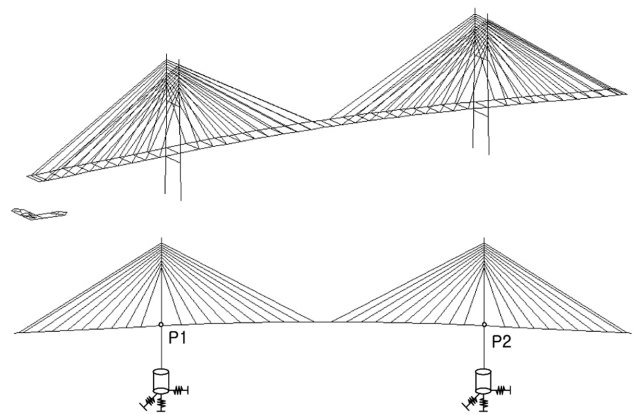


Fig. 5 Analytic model of cable-stayed bridge considered SSI

부터 상부로 65m 높이를 가지며 교면으로부터 하부로 -25m 높이로 이루어진 3경간 연속 사장교로 모델링 하였다.

교축방향에 대한 응답 중 P1 위치에 대한 가속도, 변위 응답을 살펴보면 Fig. 6의 (a), (b)와 같이 나타난다. Fig. 6의 (a)와 (b)의 윗부분의 그래프는 지반과 기초의 강성이 아주 큰 고정단으로 지점조건을 고려한 경우이고 아랫부분의 그래프는 지반과 기초의 진동수 의존 특성의 물성을 고려한 경우이며, 결과 되는 상부구조 지진응답의 차이를 볼 수 있다. 즉, 지반-구조물 상호

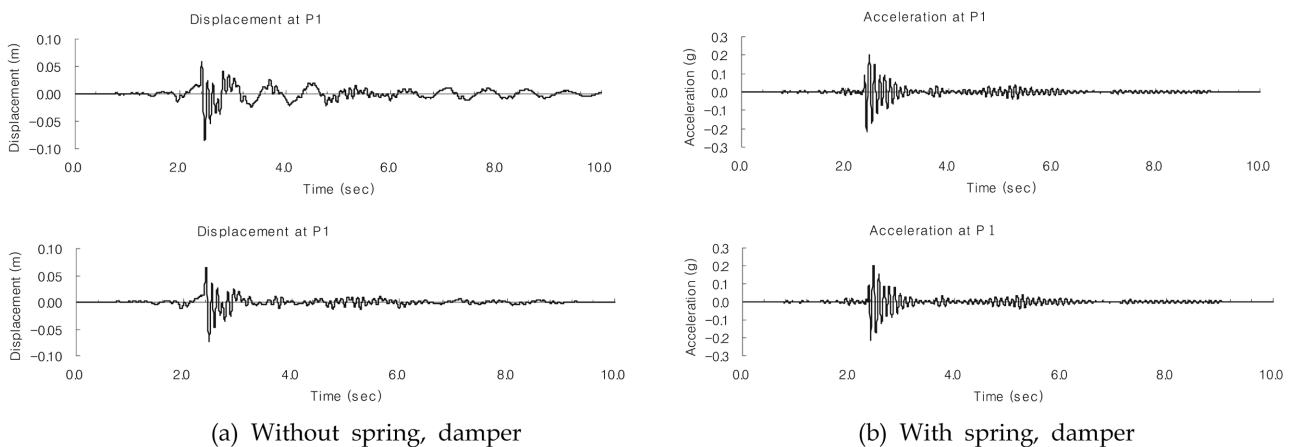


Fig. 6 Comparisons of the velocities and accelerations at P1 pier

작용의 효과가 고려되지 않은 경우와 고려된 경우의 응답이라고 말할 수 있다. 하지만 Fig. 6에서 보듯이 가속도 응답의 경우 고정단으로 지반을 고려한 경우나 스프링과 댐퍼의 요소를 고려한 경우나 거의 같은 형태를 나타내고, 다만 변위 응답에서 약간의 차이를 나타낼 수 있다. 이러한 결과의 원인은 상부구조의 교각 사이의 거리가 멀지 않은 구조이므로 Case 1 지반부와 Case 2 지반부의 물성의 편차가 크지 않고, 고려된 지반의 물성도 액상화 등의 영향을 피하기 위해 연약한 지반이 아닌 강성을 다소 크게 가지는 지반으로 모델링되었기 때문이다. 또한, 상부구조 해석에서 시간영역에 대한 해석을 수행하기 위해 진동수 특성의 지반과 기초를 단순한 스프링과 댐퍼 형태로 고려하였기 때문이라고 판단된다.

Fig. 6에서 보여 지는 차이는 미세하고 구조물 전체의 해석결과로 보았을 때에는 무시해도 될 정도의 차이이다. 따라서 지반과 기초의 영향을 고려하여 지진응답해석을 수행할 경우 다음 장의 내용에서 살펴볼게 될 기초-지반 상호작용 해석을 진동수 영역에서 직접 수행하여 그 결과를 이용하는 것이 더욱 정확하고 효과적인 해석이 될 것이다.

4. 입력지반운동의 공간적 변화를 고려한 지진응답해석

4.1 하부구조 해석

Case 1 지반부 위에 놓인 하부구조와 Case 2 지반부 위에 놓인 하부구조의 상부의 응답은 다른 응답을 나타낼 것이므로 각각의 지반에 대한 지반응답해석을 수행하고 그 결과 되는 가속도를 토대로 기초, 하부구조 모두를 함께 모델링하여 지진응답 해석을 한 후 하부구조 최상부의 가속도 응답의 결과가 다음의 Fig. 7과 같이 나타난다.

이 결과로 얻게 되는 하부구조 상부의 응답을 상부구조에 입력으로 하여 다음 절에서 상부구조 해석을 수행하도록 한다.

4.2 아치교 해석

본 절에서는 좀 더 간단한 상부구조인 아치교에 대해 해석을

수행하고 지점마다 다른 지진파를 입력 값으로 할 수 있도록 MATLAB을 이용하여 구조해석 프로그램을 개발한 후 지진응답해석을 하고 그 결과들을 비교해 본다. 본 논문에 사용된 MATLAB 구조해석 프로그램은 시간이력 해석에는 Newmark- β 법이 사용되었고, 전체 구조해석에 있어서는 여러개의 부구조로 분할하여 해석하는 부구조법이 사용되었다. 구조요소에 대한 운동 방정식의 해를 구하기 위한 부구조법의 방법들은 하중법(Force method), 변위법(Displacement method) 그리고 혼합법(Mixed method)으로 대별된다. 본 논문에서는 수치계산적인 측면의 장점을 가지는 변위법을 사용하여 뼈대 구조에 대해 부구조로 분할하여 정식화하는 과정을 거쳐 프로그램 하였다. 고려되는 모델의 형상은 Fig. 8과 같다.

기존의 구조해석 프로그램(MIDAS, SAP2000) 등을 이용한 동적 응답 해석은 고려하는 모델에 하나의 자유도 방향에 대해 하나의 지진 가속도만을 입력으로 주게 된다. 교각이 위치하게 될 지점의 지반조건이 동일하다면 기존 상용프로그램으로 해석하면 되지만 지반조건이 크게 차이 난다면 두 부분의 교각부에는 다른 입력 지진이 적용되고 상부구조의 응답도 달라지게 될 것이다. 먼저 MIDAS와 본 연구에서 개발한 MATLAB 프로그램에 하나의 입력 지진파 가속도만을 입력으로 하였을 때의 응답은 동일하게 나타난다. 이를 통해 MATLAB 프로그램을 검증

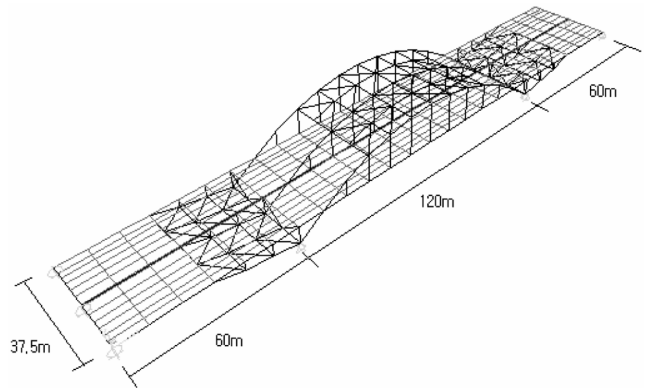


Fig. 8 Analytic model of arch bridge

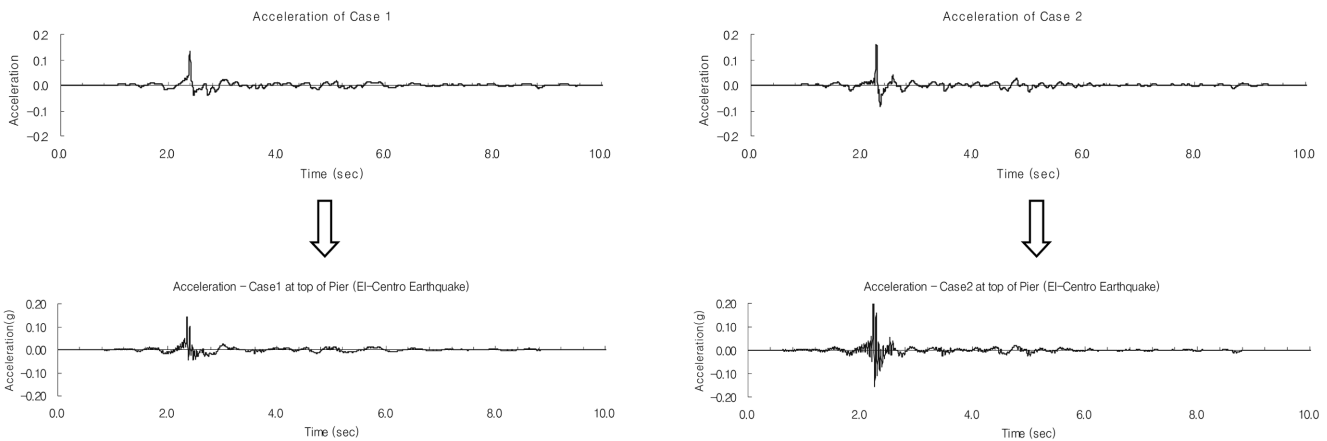


Fig. 7 Soil response analysis at Case 1 and Case 2 soil stratum (acceleration data of E1-Centro earthquake)

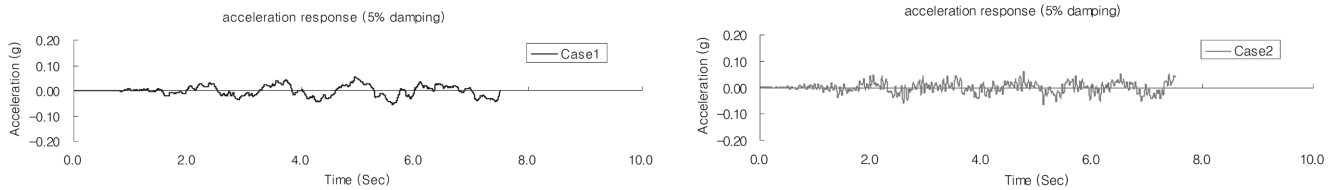


Fig. 9 Acceleration history at super structure due to artificial earthquake wave

할 수 있고, 인공지진파에 의해 Case 1과 Case 2 지반부의 결과 되는 하부구조 상부의 가속도를 각각 입력했을 때의 상부구조 가속도 응답을 Fig. 9에 나타낸다.

다음으로 인공지진파에 의해 Case 1의 결과 되는 가속도 응답만을 상부구조에 입력으로 해석하였을 경우와 Case 1과 Case 2의 두 개의 가속도 응답이 상부구조에 동시에 입력될 때의 가속도 응답을 Fig. 10에서 나타낸다. Fig. 10과 같이 교각 별로 다른 입력지진을 주어 해석한 결과와 모든 교각에 동일한 입력지진을 주어 해석한 결과는 경우에 따라 큰 차이를 나타내게 될 것을 알 수 있다.

마지막으로 Fig. 10와 같은 방법으로 E1-Centro 지진파에 대해, 상용프로그램인 MIDAS 프로그램을 사용하여 모든 교각에 동일한 지진력(Case1 지진력)이 입력되었을 때의 상부구조의 가속도 응답을 얻고 다음으로 MATLAB 프로그램을 사용하여 Case 1과 Case 2의 하부구조 상부의 가속도를 이용하여 교각 별로 상이한 지진력이 전달될 때의 상부구조 가속도 응답을 얻어 Fig. 11에서 비교한다.

Fig. 11에서 알 수 있듯이 결과 되는 상부구조의 가속도 응답은 상당한 차이를 나타내게 되고 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 해석하였으므로 사실상 지반의 물성 편차가 크지 않으므로 결과 되는 차이는 다소 작아 보일 수 있다. 하지만 앞으로 점점

더 장대교량이 가설되고 지반조건이 좋지 않아 연약 지반 위에 교량이 가설 될 경우 이러한 지반의 물성 편차로 인한 응답의 차이는 더욱 더 증가하게 될 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 교량의 지진응답해석에 있어서 입력지반운동의 공간적 변화의 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 지진응답해석을 수행하여 지점별로 상이한 지진 가속도 입력으로 상부구조 해석을 수행하였다. 그 결과 교각이 위치하는 지반물성의 편차가 심한 조건의 경우, 각 교각 별로 다른 형태의 지반증폭이 발생하여 지진입력이 달라지게 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 지점별로 상이한 입력지진을 적용할 수 있는 구조설계 프로그램의 개발과 설계방법의 발전이 필요하다고 생각된다.

참 고 문 헌

박장호 (2006). "복잡한 지층 형상을 고려한 지반-구조물 상호작용해석", 한국안전학회지, 제21권, 제3호, pp 87-93.
 윤정방, 장수혁, 서준교, 이원철 (2001). 지반-구조물 상호작용을 고려한 교량의 지진응답해석, University of California.
 이종세, 최준성, 최준혁 (2001). "다중 지진파 입력과지반의 비선형성을 고려한 장대교량의 지진응답해석", 대한토목학회, 2001학술발표 논문집 CD.
 한국지진공학회 (1997). 내진설계기준연구(II), 건설교통부.
 한국지반공학회 (1997). 진동 및 내진설계, 구미서관.
 Harrichandran, R.S. and Wang, W. (1990) "Response of Indeterminate Two-span Beam to Spatially Varying Seismic Excitation", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 19, pp 173-187.
 SASSI User's Manual (1988). The Regents of the University of California.
 Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. (1992). SHAKE91 User's Manual, University of California.

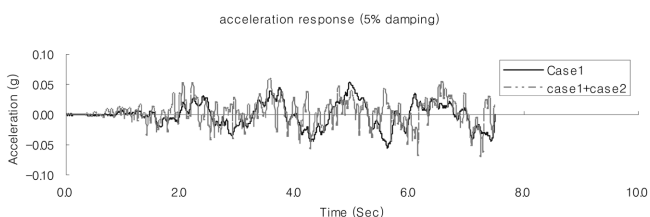


Fig. 10 Acceleration response at super structure by input seismic wave (artificial earthquake wave)

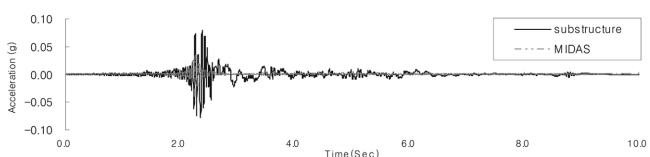


Fig. 11 Acceleration response by considering foundation-soil interaction

Spyrakos, C.C. (1992). "Seismic Behavior of Bridge Piers Including Soil-structure Interaction", *Computers & Structures*, Vol 43, No 2, pp 373-384.

Somini, D.R. (1987). "Seismic Behavior of Girder Bridges for Horizontally Propagating Waves", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 15, pp 777-793.

Vahdani, S. (1984). *Impedence Matrices for Soil-Structure*

interaction Analysis by the Flexible Volume Method, Ph. D. Dissertation, University of California, Berkely.

2009년 1월 25일 원고 접수

2010년 1월 26일 심사 완료

2010년 1월 28일 게재 확정