

입사각을 고려한 장대교량의 지반-구조물 상호작용 해석

박장호[†] · 신영석 · 최승환

아주대학교 공과대학 환경건설교통공학부

(2007. 8. 6. 접수 / 2008. 1. 9. 채택)

Analysis of Soil-Structure Interaction of a Long-Span Bridge Considering Incident Angle of Input Ground Motion

Jang Ho Park[†] · Yung Seok Shin · Seung Hwan Choi

Division of Environmental, Civil and Transportation Engineering, Ajou University

(Received August 6, 2007 / Accepted January 9, 2008)

Abstract : In a long-span bridge which is constructed on soft soil, it is requested to make a plan considering soil-structure interaction, and soil-structure interaction is partially under consideration at the actual bridge plan. Many researches on dynamic behavior of a bridge affected by soil-structure interacting have been accomplished, but it is difficult to estimate dynamic behavior of a bridge on soft soil accurately because of many uncertainties. This paper presents the results about dynamic response of a long-span suspension bridge in the site composed of soft soil considering incident angle of input ground motion. The effect of soft soil was evaluated by the use of computer program SASSI and a long-span suspension bridge was modeled by finite element program MIDAS. The effect of incident angle of input ground motion was investigated on the dynamic response of a long-span bridge.

Key Words : a long-span bridge, soil-structure interaction, incident angle, SASSI

1. 서 론

국내의 내진설계는 1986년 건축법에 의해 ‘건축물은 지진에 대하여 안전한 구조를 가져야 한다.’¹⁾라는 규정이 도입된 이후로 그 필요성이 대두되었다. 한편 토목구조물의 경우에는 1992년 도로교 표준 시방서²⁾ 개정시 각 시설물별로 내진설계의 세부 지침이 작성되었다. 그리고 그동안 지진 안전지대로 여겨져 왔던 우리나라에서도 최근 지진 발생의 횟수 및 규모가 점차 커지면서 내진설계의 필요성이 한층 더 부각되어지고 있는 상태이다. 최근 국내에서는 대형구조물 건설이 점차 증가하고 있는 추세이며, 이러한 대형 구조물들이 위치하는 지역은 대부분 점토층이나, 사질토 등의 연약지반을 포함하고 있다. 이러한 연약지반에서는 기저암반에서의 지진동이 지표면에서 크게 증폭되어 나타날 수 있으므로, 연약지반에 건설되는 중요 교량의 경우에는 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Inter-action)을

고려한 설계가 요구되고 있으며, 현재 교량의 설계에 지반-구조물 상호작용이 부분적으로 고려되고 있다. 이러한 지반-구조물 상호 작용의 영향이 교량에 어떠한 영향을 줄 것인지 면밀하게 검토함으로써 지진발생시 구조물을 보다 안전하게 하고 피해를 최소화할 수 있을 것이다.

교량의 지진응답해석은 오래전부터 연구되어 왔다. 그 중 지반-구조물 상호작용해석은 1990년대에 들어서 본격적으로 시작되었으며, Betti 등의 연구에 의하면 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우의 응답이 고려하지 않은 경우의 응답에 비하여 지진입력의 특성과 지반-구조물의 동특성에 따라 증가하기도 하고 줄어들기도 하여 지반-구조물의 상호작용의 영향을 반드시 고려해야한다고 하였다³⁾. 국내에서는 현창현 등에 의해서 추계론적 진동이론에 의한 지진해석이 동일한 지진파형의 지점간 시간차를 고려하여 연구되어진 바 있고⁴⁾, 김호경 등에 의해 현수교의 기하학적 비선형을 고려한 지진응답해석에 대한 연구가 이루어진 바 있다⁵⁾. 이와 같이 지반-구조물 상호작용을 고려한 교량의 동적 해석에 관한 연구는 많이 이루어졌으나, 해석에서의 많은

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

불확실성으로 인하여 완전한 해석방법은 정립되어 있지 않은 실정이다. 일반적인 동적해석법은 지진 입력방법에 따라 지반운동을 다지지지점에 균등하게 입력하는 균등입력해석법과 지진파의 파동전달 효과를 고려한 다지지지점 입력해석법 그리고 지반-구조물 상호작용의 고려 여부로 구분할 수 있다. 현재까지는 교량이나 다른 토목구조물의 내진해석시 지진파 입력을 일정한 방향으로 입력하여 지진파가 지반을 통해 전파될 때 지점 입력의 시간위상차, 지반특성의 공간적 변화 등에 의한 지점 입력의 상관성, 기초에서 지반의 유연성에 의해 발생하는 지반-구조물 상호작용 효과를 동시에 고려한 해석법이 정밀한 해석법으로 알려있다.

본 논문에서는 연약지반에 위치한 장대교량인 현수교에 대하여 지진파의 입사각을 고려한 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하고 이를 통하여 동적거동의 변화를 살펴보았다. 교량의 기초와 지반의 특성을 고려하기 위해 부분구조법(Substructure method)을 이용한 지반-구조물 상호작용 해석프로그램인 SASSI를 이용하여 구조물 저면에서의 지반 임피던스를 계산하고, 이로부터 기초와 지반에 대응하는 강성, 질량, 감쇠를 가지는 집중파라메타를 구하였다. 그리고 해석대상 교량의 유한요소 모델에 임피던스의 결과인 강성, 질량, 감쇠의 집중파라메타를 연계하여 전체 교량에 대한 지반-구조물 시스템을 구성하였다^{6,7)}. 장대교량의 경우 각 지점간 이격거리가 크기 때문에 시간위상차를 고려하고, 입사각이 적용된 지진파를 이용하여 다양한 경우에 대하여 해석을 수행하고 결과를 비교 분석하여 지진파의 입사각이 장대교량의 동적 거동에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 입사각을 고려한 지반-구조물 상호작용 해석법

2.1. 지반-구조물 상호작용 해석법

본 논문에서는 장대교량에서의 지반-구조물 상호작용 효과를 표현하기 위하여 부분구조법을 이용한 지반-구조물 상호작용 해석프로그램인 SASSI를 사용하여 각 지점에서의 지반에 대한 임피던스 함수를 산정하고 이에 대응하는 강성, 질량, 감쇠를 가지는 집중파라메타 모델을 구하였다⁷⁾.

부분구조법을 이용한 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램 SASSI의 해석법은 Fig. 1과 같다. Fig. 1 (c)에 제시된 전체 구조물 시스템은 구조물이 놓이

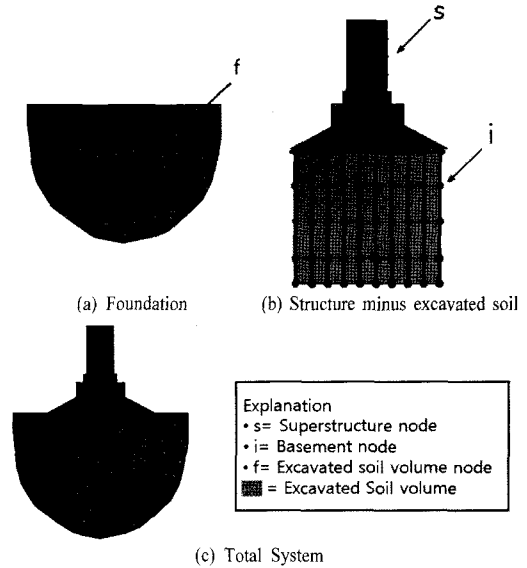


Fig. 1. Soil-structure interaction by substructure method.

기 전인 지반 Fig. 1 (a)와 굴착된 지반만을 제외한 구조물 Fig. 1 (b)의 두 부분으로 나타낼 수 있다. 지반-구조물 상호작용은 구조물의 기초부분이 지반에 매입된 상태에서 기초부분과 지반의 절점에서 발생하게 된다. 따라서 부분구조 (a)와 부분구조 (b)가 결합하여 전체 구조물 (c)를 형성하게 되며, 이에 대한 운동방정식은 다음과 같이 얻어진다.

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

여기서 $[S]$ 는 동적 강성행렬, $\{u\}$ 는 변위벡터를 나타내며, Fig. 1에 나타낸 바와 같이 각각 i 와 s 는 기초에서의 절점과 기초를 제외한 상부구조물에서의 절점을 나타내며, 상첨자 g 는 굴착된 지반의 상태를 나타낸다. 그리고 $\{u_i^g\}$ 는 지반과 구조물의 접촉면에 작용하는 지반운동, 즉 산란운동으로서 부분구조법에서 적용되는 기초부에서의 입력운동을 나타낸다. 그리고 자유장 시스템은 굴착된 지반과 굴착되어진 지반의 합이고, 산란운동의 항인 $[S_{ii}^g] \{u_i^g\}$ 는 자유장 운동으로 나타낼 수 있으며, 식 (1)은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{si}] \\ [S_{is}] & [S_{ii}^s] - [S_{ii}^e] + [S_{ii}^f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s\} \\ \{u_i\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [S_{ii}^f] \{u_i^f\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)를 이용하면 굴착된 지반의 특성, 자유장의

특성 및 운동 등이 고려된 기초부 입력운동을 산정할 수 있으며, 전체 지반-구조물 시스템의 운동을 구할 수 있다. 식 (2)를 식 (3)과 같이 강제진동해석을 수행할 수 있는 형태로 수정하고 기초부 상단에 상부구조물의 첫 번째 고유진동수로 가진을 하면 기초부의 임피던스(Impedance)함수를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{si}] \\ [S_{is}] & [S_{ii}] - [S_{ii}^e] + [S_{ii}^f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s\} \\ \{u_i\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_s\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)으로부터 구한 임피던스(Impedance) 함수에 식 (4)를 적용하여 지반과 기초에 대한 등가의 강성, 질량, 감쇠를 구할 수 있다.

$$[S^j(\omega)] \cong [\Delta K^j] + i\omega[\Delta C^j] - \omega^2[\Delta M^j] \quad (4)$$

여기서 상첨자 j 는 지점을, ΔK , ΔG , ΔM 은 각각 강성, 감쇠, 질량을 나타내는 것이다.

2.2. 입사각의 영향

어떤 평면에 파동이 들어오는 것을 입사라 하고, 이 때 평면의 법선과 입사하는 파동의 방향이 이루는 각도를 입사각이라 한다. Fig. 2와 같이 구조물의 교축방향을 법선이라고 했을 경우 법선에 대해 α 라는 입사각을 가지고 있는 지진파가 구조물에 작용하게 되면 입사각 α 에 따라서 구조물의 거동이 변하게 될 것이다. 입사각 α 를 갖는 지진파를 식 (5)와 식 (6)의 삼각함수 성질을 이용하여 표현할 수 있다.

$$\sin(\alpha) = \frac{Acceleration\ Y}{Acceleration} \quad (5)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{Acceleration\ X}{Acceleration} \quad (6)$$

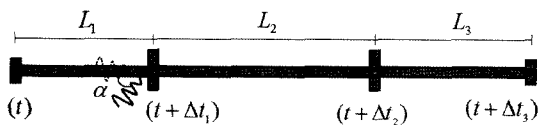


Fig. 2. Incident angle of the input ground motion.

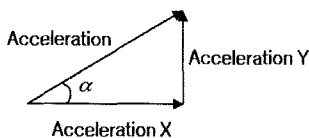


Fig. 3. Vector component of the incident ground motion.

실제로 α 라는 입사각을 가지고 있는 지진파를 교축방향과 교축직각방향 가속도 벡터로 나누어 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Acceleration\ X = Acceleration \times \cos(\alpha) \quad (7)$$

$$Acceleration\ Y = Acceleration \times \sin(\alpha) \quad (8)$$

이러한 입사각의 영향은 입사각이 적용된 파동이 구조물에 직접적으로 영향을 줄 뿐만 아니라, 해석 대상 구조물과 같이 장대교량인 경우 각 지점에 지진파가 도달하는 시간위상차에도 상당한 영향을 줄 것이다. 교량이 위치한 지역에서 나타날 수 있는 전달파 속도는 수평으로 발생하는 속도이며, 입사각이 변함에 따라서 각 지점에서의 시간위상차도 변하게 된다. 각 지점에서의 시간위상차는 다음과 같이 구하여진다.

$$\Delta t_1 = L_1 \cos\alpha / V \quad (9)$$

$$\Delta t_2 = (L_1 + L_2) \cos\alpha / V \quad (10)$$

$$\Delta t_3 = (L_1 + L_2 + L_3) \cos\alpha / V \quad (11)$$

여기서 V 는 실제 전달파 속도이며, L_1 , L_2 , L_3 는 각 지점간의 거리이다. 구조물 동적해석시 입사각의 영향이 고려된 각 지점에서의 시간위상차를 사용하여 각 지점에 지진파를 입력함으로써 입사각의 영향을 고려한 해석을 수행한다.

3. 입사각에 따른 장대교량의 지반-구조물 상호작용 해석

3.1. 해석모델 및 입력지반운동

본 논문에서의 해석 대상 교량의 형상은 Fig. 4(a)와 같으며, 최대지간장이 1270m인 현수교이다. 이 교량의 주탑부는 RCD Pile 기초로 설계되어 있으며 Fig. 4(b)와 같다. 또한 이 교량의 앵커리지는 케이슨 기초로 설계되어 있고 Fig. 4(c)와 같다.

지반-구조물 상호작용을 고려한 지반과 기초의 강성은 지반의 특성상 주파수 종속적인 특성을 지니고 있다. 그러나 본 논문에서는 구조해석프로그램인 MIDAS Civil 2006을 이용하여 교량에 대한 동적해석을 시간영역에서 수행하고자 하므로 지반과 케이슨 기초, RCD Pile 기초에 대한 주파수와 무관한 강성이 요구된다. 이를 위하여 지반-구조물 상호

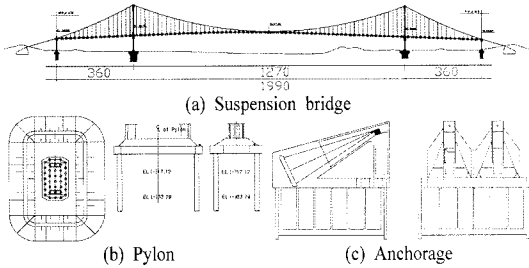


Fig. 4. A suspension bridge model.

작용 프로그램인 SASSI를 이용하여 지반과 기초에 대한 임피던스 함수를 구하고 이로부터 지반과 기초의 등가강성을 산정하였다. 지반-구조물 상호작용 해석프로그램 SASSI를 이용하여 기초와 지반에 대한 모델링을 실시하고, 상부구조물의 지배적인 모드에 해당하는 주기를 갖는 하중을 가하여 기초부 각 지점에서의 응답을 구하였다. 이 값은 복소수 형태의 단위하중에 의한 변위값으로 구하여지고 이 값의 역수를 취함으로 지반과 기초에 대한 등가강성을 구할 수 있게 된다. 이와 같은 해석으로부터 구한 기초부에서의 등가강성을 정리하면 Table 1과 같다. 여기서 AN1과 AN2는 현수교의 앵커리지 부분으로서 케이슨 기초로 이루어졌으며, PY1과 PY2는 현수교의 주탑 부분으로서 말뚝 기초로 이루어져있다. 그 위치는 Fig. 5와 같다.

Table 1. Equivalent mass, damping, stiffness

구분	질량 (kN)	감쇠계수 (kN/m)	강성계수 (kN·sec/m)	
AN1	Kx	1.479 e+4	1.352 e+7	3.168 e+8
	Ky	1.479 e+4	1.352 e+7	3.168 e+8
	Kz	1.036 e+4	2.146 e+7	3.197 e+8
	Kxx	5.371 e+11	4.351 e+12	2.949 e+13
	Kyy	5.371 e+11	4.351 e+12	2.949 e+13
AN2	Kx	1.479 e+5	1.217 e+7	3.154 e+8
	Ky	1.479 e+5	1.217 e+7	3.154 e+8
	Kz	8.139 e+4	9.526 e+7	5.489 e+7
	Kxx	4.529 e+12	2.132 e+14	9.942 e+14
	Kyy	4.529 e+12	2.132 e+14	9.942 e+14
PY1	Kx	1.480 e+6	8.249 e+8	4.730 e+9
	Ky	5.535 e+6	1.784 e+8	5.504 e+8
	Kz	1.998 e+5	4.350 e+7	4.161 e+7
	Kxx	5.328 e+8	1.524 e+10	5.212 e+11
	Kyy	8.879 e+8	2.342 e+10	7.271 e+12
PY2	Kx	2.131 e+7	2.927 e+8	3.679 e+9
	Ky	1.021 e+6	5.530 e+7	1.124 e+9
	Kz	5.919 e+5	3.783 e+8	4.657 e+8
	Kxx	3.779 e+9	2.346 e+8	5.533 e+11
	Kyy	5.475 e+9	3.453 e+11	7.008 e+12

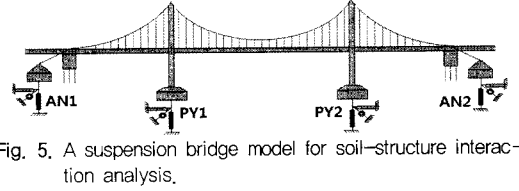


Fig. 5. A suspension bridge model for soil-structure interaction analysis.

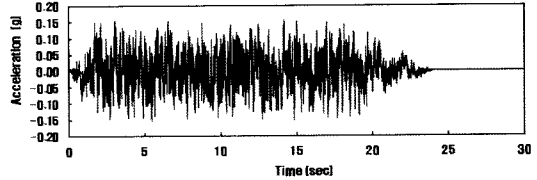


Fig. 6. Artificial earthquake acceleration time history.

입사각을 고려한 장대교량의 지반-구조물 상호작용 해석에 필요한 입력지반운동은 설계기준에 제시된 응답스펙트럼에 부합되도록 생성하였다. 해석대상 교량 가설예상위치에서의 기반암은 국내 내진설계기준에 따라 지진구역 I에 해당되고 구조물의 중요도로 내진 1등급을 적용할 경우 최대지반가속도는 0.154g가 된다⁸⁾. 이로부터 랜덤 진동론에 의한 인공지진파 생성 프로그램인 SIMQKE를 이용하여 인공지진파를 Fig. 6과 같이 생성하였다⁹⁾.

해석대상 교량에 입사각을 갖는 지진파가 가해질 경우 구조물의 지점에 도달하는 시간위상차가 변화하게 된다. 따라서 해석대상 교량이 위치한 지역의 지표면에 발생하는 지진의 전달파 속도를 입사각을 고려한 지진의 실제 전달파 속도로 변환하여 시간위상차를 계산한다. 이 지역의 수평 전달파 속도는 2365m/s이고, 0°~90°까지 10가지 경우로 구분하여 입사각에 따른 각 지점의 시간위상차를 구하여 Table 2에 나타내었다. 입사각이 90°일 경우에는 지진파가 교량의 각 지점에 동시에 작용하는 것으로 보고 해석을 수행하였다.

Table 2. Time delay due to the incident angle

입사각 (α)	도달 시간(sec)		
	Δt ₁	Δt ₂	Δt ₃
0	0.15222	0.689218	0.841438
10	0.149907	0.678747	0.828654
20	0.14304	0.647653	0.790693
30	0.131826	0.59688	0.728706
40	0.116607	0.527971	0.644579
50	0.097845	0.443021	0.540866
60	0.07611	0.344609	0.420719
70	0.052062	0.235726	0.287789
80	0.026433	0.119681	0.146114
90	0	0	0

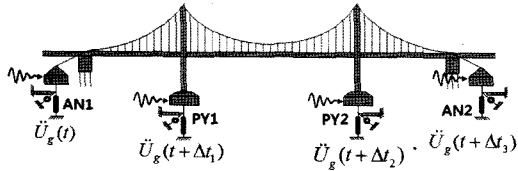


Fig. 7. Soil-structure interaction analysis model with time delay.

본 논문에서 해석대상 교량은 825개의 절점, 1022개의 3차원 보요소로 모델링하였다. 케이블과 주탑에서 사하중에 의한 장력 및 압축력에 의한 기하학적 강성을 고려하였으며, AN1, AN2, PY1, PY2에서는 Table 1에서 주어진 강성계수(ΔK), 질량(ΔM), 감쇠계수(ΔC)를 각각 스프링, 집중질량, 선형 Damper 요소로 모델링하여 지반-구조물 상호작용을 고려할 수 있도록 하였다. 또한 Table 2에 정의한 입사각을 고려한 지진파의 지점 도달하는 시간을 Fig. 7과 같이 고려하여 해석을 수행하였다.

3.2. 지반-구조물 상호작용 해석 결과

해석결과를 비교, 분석하기 위하여 입사각을 $0^\circ \sim 90^\circ$ 까지 10가지 경우로 구분하고, 입사각만을 고려한 지반-구조물 상호작용 해석 및 입사각과 시간위상차를 동시에 고려한 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하여 그 결과를 비교, 분석하였다.

(1) 모드형상과 고유진동수

고유치 해석을 수행하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우와 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 경우의 주요모드를 비교하였다. 교량의 지반-구조물 상호작용 해석시 동적 참여율을 높이며 해석결과의 정확성을 유지하기 위하여 868개의 모드

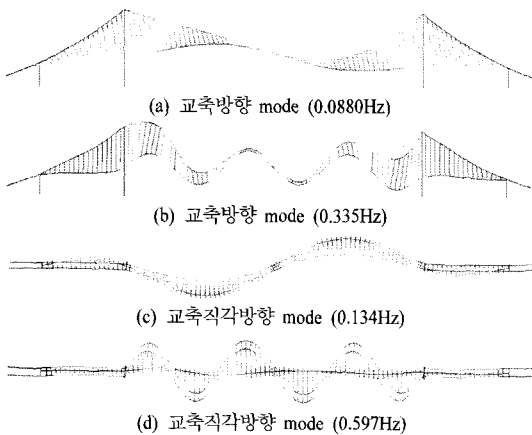


Fig. 8. Mode shapes of a fixed base model.

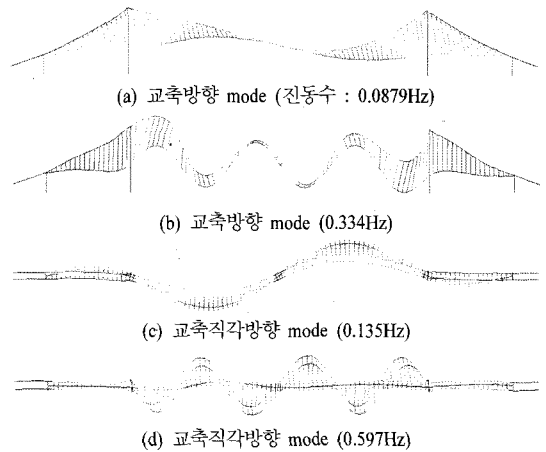


Fig. 9. Mode shapes of a model considering soil-structure interaction.

를 사용하였다. Fig. 8과 9에서 볼 수 있는 바와 같이 구조물의 고유진동수와 모드형상이 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 교량 각 지점의 강성이 충분히 크기 때문으로 판단된다.

(2) 부재력과 처짐

지반-구조물 상호작용을 고려한 장대교량에 대한 동적해석과 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 고정지반에 대한 장대교량의 동적해석을 수행하여 부재력과 처짐을 비교하였다. Fig. 10에 부재력과 처짐 검토 위치를 나타내었다.

교축직각방향 모멘트의 경우 AN1, PY2, AN2의 부분에서 입사각이 90° 일 때 최대값이 나타났고 입사각이 작아질수록 교축직각방향 모멘트의 값은 감소하는 것으로 나타났다. 축력과 교축방향의 모멘트에서는 대부분 최대값이 입사각 0° 에서 나타났으나, 특히 PY1과 AN2부분에서 입사각 40° 일 때 최대축력이 발생한 것을 Table 3을 통하여 확인할 수 있다.

Fig. 11은 주탑과 부탑의 상판과 거더의 중앙부분에서 발생한 최대 변위를 입사각별로 나타낸 것이다. 주탑과 거더 중앙부에서는 입사각이 증가함에 따라 최대변위도 크게 나타났다. 대부분 시간위상차

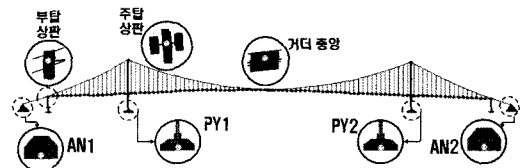


Fig. 10. Positions of output results.

를 고려하지 않은 경우가 시간위상차를 고려한 경우 보다 큰 변위가 발생한 것을 확인할 수 있다.

Table 3. Comparison of output results due to the incident ground motion with time delay

위치	입사각 (°)	축력 (kN)	교축방향 모멘트(kN·m)	교축 직각방향 모멘트(kN·m)
AN1	0	15028.26	396.19	7.16
	10	14374.23	378.97	269.85
	20	14242.44	358.69	537.89
	30	13831.7	324.68	791.15
	40	12553.44	273.12	1013.45
	50	9389.16	201.83	1222.56
	60	7226.78	147.76	1389.92
	70	5466.71	110.31	1513.69
	80	3162.31	92.66	1585.68
	90	1781.44	59.7	1606.24
PY1	0	102344	4.34	431509.09
	10	132925.2	0.45	1063262.03
	20	132493.3	0.61	2098195.18
	30	136726.7	0.83	3070938.25
	40	148890.8	0.69	4020834.07
	50	121297.4	0.77	4901658.02
	60	85049.28	0.91	5346421.7
	70	43366.71	0.85	5411439.17
	80	30019.35	0.94	5334340.41
	90	2347.65	0.44	5155395.61
PY2	0	350933.1	9.42	442706.22
	10	347802.7	1.35	898970.88
	20	350888.9	1.81	1821796.78
	30	348987.6	2.72	2668136.66
	40	321070.5	3.55	3295984.94
	50	246382.2	3.97	3820181.53
	60	132679.3	4.03	4223169.15
	70	124926	4.76	4689394.18
	80	72948	5.49	4770108.82
	90	3319.4	2.75	4837890.49
AN2	0	11249.34	220.19	7.4
	10	10866.02	209.01	171.46
	20	10246.27	213.7	345.15
	30	11101.76	209.23	509.2
	40	12188.32	189	652.26
	50	10952.15	142.34	780.24
	60	7289.69	86.19	868.41
	70	3763.3	71.07	923.18
	80	2433.73	40.39	957.57
	90	1066.27	43.24	980.96

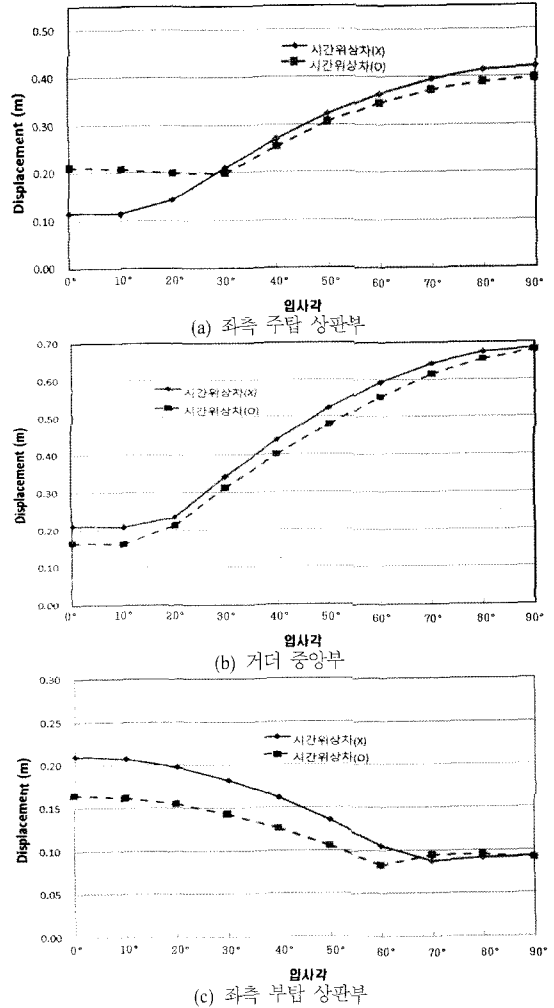


Fig. 11. Displacement due to the incident ground motion,

4. 결론

본 논문에서는 연약지반에 위치한 장대교량인 현수교에 대하여 지진파의 입사각을 고려한 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하고 이를 통하여 입사각에 따른 동적거동의 변화를 살펴보았다.

해석대상 구조물의 지점조건에 따라 구조물의 동적거동에 큰 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 구조물의 동적 해석시 지반의 조건을 정확히 고려하여 동적 해석을 수행하여야 할 것이다.

장대교량인 현수교에 대해 입사각만 적용된 지진파를 구조물 지점에 입력한 경우와 입사각과 시간위상차를 동시에 적용한 지진파를 구조물 지점에 입력한 경우의 결과들을 비교하여 보면 해석대상 구조물에 다양한 입사각을 고려해 지진파를 입력한

경우보다 입사각과 시간위상차를 동시에 고려해 지진파를 입력한 경우에 입사각 40°, 70°에서 최대 축력이나 최대 모멘트가 발생하였다. 이러한 결과를 종합하면 구조물의 내진해석시 입력지진파를 교축, 교축직각방향으로 하여 구한 일괄적인 해석결과를 설계에 적용하는 것보다는 실질적으로 발생 가능한 시간위상차와 입사각을 고려한 지진파를 적용하여 구한 해석결과를 설계에 적용하는 것이 보다 안전한 설계가 될 것이다.

본 논문에서 다룬 교량과 같이 지점간의 이격거리가 크고 각 지점에서의 상이한 지반특성을 갖는 위치에 건설되는 구조물의 경우 입사각의 영향을 고려한 설계를 수행하는 것이 보다 경제적이고 안전한 설계가 될 것이다. 또한 구조물이 대형화되거나 형식이 복잡해짐으로 인해 발생할 수 있는 부재력과 거동의 변화를 설계에 적절히 반영하면 실제 지진 발생 시 구조물을 보다 안전하게 그리고 발생되는 피해를 최소화할 수 있을 것이다.

감사의 글 : 본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술 혁신사업(과제번호 : 06첨단융합 E01)의 지원으로 이루어진 것으로, 본 연구를 가능케 한 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 건축법 제38조 “건축물은 지진에 대하여 안전한 구조를 가져야 한다,” 1986.
- 2) 건설부, 도로교 표준 시방서, 건설부, pp. 759~816, 1992.
- 3) Betti, R., Abdel-Grhaffar, A. M., and Niazy, A. S., “Kinematic Soil-Structure Interaction for Long-Span Cable-Supported Bridge,” *Earthquake Engineering and Structural Dyanmics*, Vol. 22, pp. 415~430, 1993.
- 4) 현창현, 윤정방, “다지지점 지진하중을 받는 현수교의 비정상거동해법,” 대한토목학회 1989년도 학술발표회 개요집, pp. 104~107, 1989.
- 5) 김호경, 서정인, “다중지지된 자정식 현수교의 비선형 지진응답해석,” 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제3호, pp. 45~58, 1997.
- 6) Lysmer, J., Tabatabaie, M., Tajirian, F., Vahdani, S., and Ostadan, F., SASSI, a System for Analysis of Soil-Structure Interaction, University of California, 1981.
- 7) 임채민, 박장호, 신영석, “지반-구조물 상호작용을 고려한 장대교량의 동적 거동,” 산업안전학회지, 제19권, 제2호, pp. 119~124, 2004.
- 8) 건설교통부, 도로교설계기준, 한국도로교통협회, pp. 471~510, 2005.
- 9) Idriss, I. M. and 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.