ISSN 1598-4095 (Print)
ISSN 2287-7401 (Online)
http://dx.doi.org/10.9712/KASS.2013.13.4.057

Journal of the Korean Association for Spatial Structures
Vol. 13, No. 4 (통권 54호), pp.57~66, December, 2013

다중지점 지진하중에 대한 아치구조물의 지진응답 분석

Seismic Response of Multi-Supported Spatial Structure under Seismic Excitation

김 기 철* 강 주 원**
Kim, Gee-Cheol Kang, Joo-Won

Abstract

Spatial structures have the different dynamic characteristics from general rahmen structures. Therefore, it is necessary to accurately analyze dynamic characteristics and seismic response for seismic design of spatial structure. Keel arch structure is used as an example structure because it has primary characteristics of spatial structures. In case of spatial structures with different ground condition and time lag, multiple support excitation may be subjected to supports of a keel arch structure. In this study, the response of the keel arch structure under multiple support excitation and with time lag are analyzed by means of the pseudo excitation method. Pseudo excitation method shows that the structural response is divided into two parts, ground displacement and structural dynamic response due to ground motion excitation. It is known that the seismic responses of spatial structure under multiple support excitation are different from those of spatial structure under simple excitation. And the seismic response of spatial structure with time lag are different from those of spatial structure without time lag. Therefore, it has to be necessary to analyze the seismic response of spatial structure under multiple support excitation and time lag because the spatial structure supports may be different and very long span. It is shown that the seismic response of spatial structure under multiple support seismic excitation are different from those of spatial structure under unique excitation.

Keywords : Keel arch structure, Spatial structure, Multi-support excitation, Seismic response

1. 서 론

경기장의 지붕구조와 같은 장경간 대공간구조물의 동적거동은 일반적인 라멘구조와는 상이하게 나타나고 있다. 특히, 지진하중에 의한 대공간구조물의 지진응답은 수평지진하중에 의하여 연직방향 응답이 크게 나타나는 등 일반구조물의 지진응답과는 다른 응답특성을 보이고 있다.[1],[2] 그리고 구조물이 위치하는 지점부의 지반조건, 하부구조의 형태와 같은 하부구조의 조건에 따라서 상부 지붕구조의 지진응답이 매우 다양하게 나타난다.[3],[4],[5],[6] 또한 대공간구조물은 장경간의 특성으로 인하여 하나의 대공간구조물에서 멀리 떨어져 있는 지점부에 도달하는 지진하중의 특성이 서로 다를 수가 있다.

대공간구조물의 내진설계 및 사용성 평가 등을 위해서는 대공간구조물의 지진응답 특성에 대한 정확한 분석이 요구된다. 대공간구조물의 지진하중 적용방법은 일반적으로 지점에 상관없이 모든 지점에 동일한 지진하중이 가해지는 것으로 가정하여 해석을 하게 된다. 그러나 대공간구조물은 장경간의 특성으로 인하여 지점 지반조건, 지진하중 도달시간, 위상차 등이 각각의 지점에 따라서 다르게 작용할 수 있다. 따라서 장경간의 대공간구조물의 지진응답 분석을 위해서는 다중지점 지진하중을 적용한 대공간구조물의 동적해석이 필요하다. 다중지점 지진하중 효과를 고려하기 위하여 지진파가 한 지점에서 다른 지점으로 형상의 변화없이 이동한다고 가정한다. 구조물에 대한 다중지점 지진하중 적용에 대한 연구는 주로 장경간 교량구조물 위주로 연구가 수행되어 왔다.[7],[8],[9],[10]

* 정회원, 서일대학교, 건축과 부교수, 공학박사
Seoil University, Dept. of Architecture Eng., Associate Professor
** 교신저자, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
Yeungnam University, School of Architecture, Professor
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625
E-mail : kangj@ynu.ac.kr

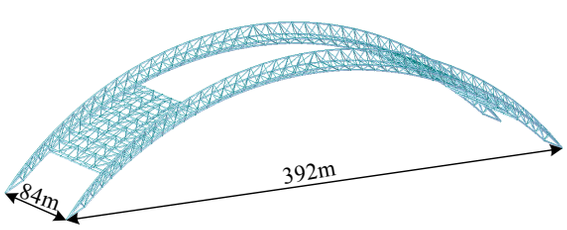
그러나 대공간구조물의 경우에도 경간이 상대적으로 길어 하부구조가 위치하는 지반의 물성치가 달라 지점에 작용하는 지진하중이 서로 상이할 수 있다. 또한 대공간구조물의 장경간 특성으로 인하여 지진의 전파속도에 따라서 지점간에 시간지연된 지진하중이 가진될 수 있다.[11],[12]

본 연구에서는 대공간구조물의 다중지점 지진하중의 적용을 통한 지진응답 특성을 분석하고자 한다. 다중지점 지진하중은 두 가지 방법으로 지점의 지반조건이 다른 경우 그리고 시간지연을 갖는 지진하중이 가진되는 경우로 하여 상용프로그램인 MIDAS/Gen을 사용하여 수치해석을 수행하였다.

2. 예제 구조물의 고유치해석 및 지진하중

2.1 예제 구조물

다중지점 지진하중을 적용한 대공간구조물 예제 구조물은 <Fig. 1>과 같다. 예제 구조물은 두 개의 킬 아치(Keel Arch)가 나란히 구성된 대공간구조물로 지점과 지점 거리가 392M, 높이가 97M, 두 킬 아치이 사이는 84M이다. 예제 구조물의 하중은 두 개의 킬 아치에 의하여 지점으로 전달된다. 대공간아치구조물은 대공간구조물의 기본적인 동적특성을 내재하고 있어 대공간구조물의 거동 분석에 많이 사용된다.



<Fig. 1> Example spatial structure

예제 구조물의 킬 아치 형상은 압축력에 유리한 삼각형 형태의 입체 트러스로 재질은 강관으로 되어 있다. 대다수의 대공간구조물의 경우에 풍하중에 의하여 부재의 단면이 결정된다. 따라서 본 예제 구조물의 주요부재 단면은 고정하중, 적재하중 및 풍하중에 의하여 예비 설계되었으며 상현재, 하현재 및 중간재는 같은 직경을 가지고 있으며 부재력에 따라서 단면의 두께가 다르게 설계되었다. 예제 구조물의 주요 부재 단면은 <Table 1>과 같다.

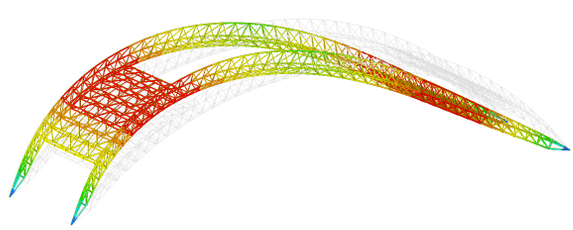
<Table 1> Members of example spatial structure

Members	Section	Members	Section
Upper Chord	∅1000×35	Diagonal	∅600×16
Lower Chord	∅1000×25	Vertical	∅812.80×16
Middle	∅1000×55	Horizontal	∅600×12

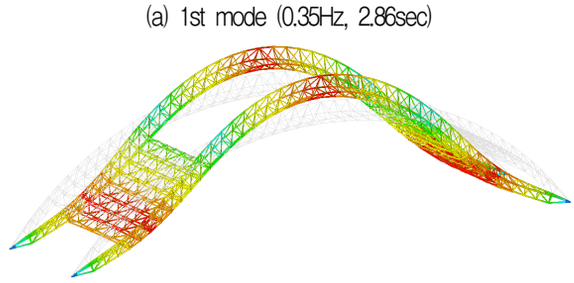
2.2 예제 구조물의 고유치해석

킬 아치(Keel Arch) 구조물은 대공간구조물에 대한 기본적인 동적특성을 내재하고 있다. 따라서 다중지점 지진하중을 적용한 대공간구조물의 지진응답 분석에 앞서 예제 구조물에 대한 고유치해석을 수행하여 예제 구조물에 대한 동적특성을 분석하고자 한다.

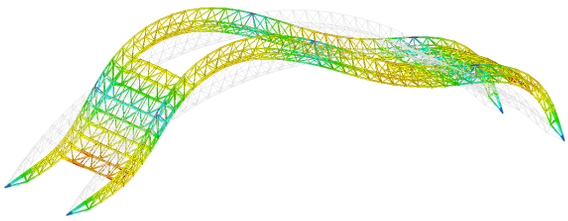
킬 아치 구조물의 진동모드 및 고유진동수와 같은 동적특성 그리고 변위, 속도 및 가속도와 같은 동적응답은 구조물의 형상을 결정하는 개각 및 겉보기 세장비 등에 의하여 좌우되며 일반적으로 진동모드는 대칭모드와 역대칭 모드가 순차적으로 나타난다.



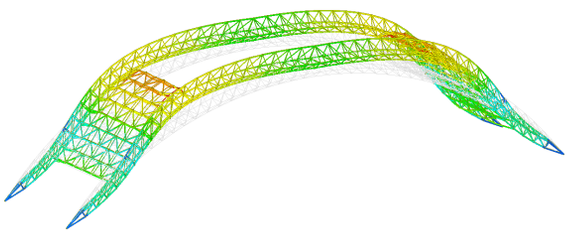
(a) 1st mode (0.35Hz, 2.86sec)



(b) 2nd mode (0.81Hz, 1.23sec)



(c) 3rd mode (1.45Hz, 0.69sec)



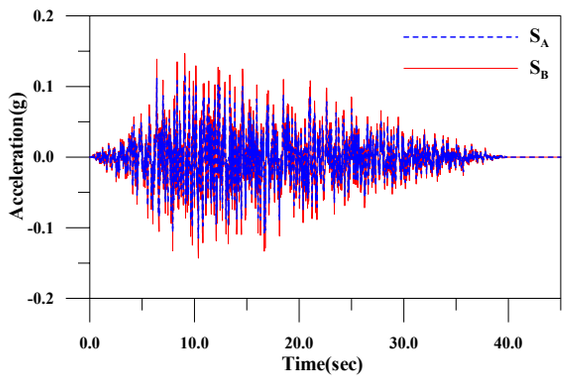
(d) 4th mode (1.72Hz, 0.58sec)

<Fig. 2> Natural vibration mode shapes and frequencies

예제 구조물의 진동모드 양상은 <Fig. 2(a)>와 <Fig. 2(c)>와 같은 역대칭 모드 그리고 <Fig. 2(b)>와 <Fig. 2(d)>와 같은 대칭 모드로 나타나고 있다. 역대칭 모드는 수평방향 지진하중에 반응하여 수평방향 및 연직방향의 지진응답에 기여하며 대칭 모드는 연직방향 지진하중에 의하여 연직방향 지진응답을 크게 일어나게 한다. 킬 아치 구조물과 같은 대공간구조물에서는 수평지진에 의하여 수평응답은 물론 연직응답도 나타나고 있다. 또한 주요 저차모드의 진동주기가 지진하중의 가속도스펙트럼의 탁월한 주기영역에 존재하는 것을 알 수 있다.

2.3 장경간구조물에 대한 지진하중 적용

대공간구조물과 같은 구조물은 경간이 매우 크기 때문에 구조물 지점의 지반이 다를 수가 있다. 따라서 지반특성이 다른 지점을 갖는 아치구조물의 지진응답을 분석하기 위하여 두 가지 지진파를 적용하고자 한다. 예제 구조물에 적용한 지진하중은 KBC2009의 설계응답스펙트럼에 따른 인공지진하중으로 지역계수는 0.22로 동일하며 지반은 S_A와 S_B로 가정하여 두 개의 지진파를 생성하여 예제 구조물에 적용하였다. 두 지반에 따른 인공지진파의 가속도시간이력을 <Fig. 3>에 나타내었다. 두 인공지진파의 형상은 유사하나 지반의 특성으로 인하여 S_A지반보다 S_B지반의 지반가속도가 큰 것을 볼 수 있다.



<Fig. 3> Ground acceleration time history

공간 구조물과 같은 장경간의 구조물은 지진 전단파속도에 따라서 각각의 지점에 도달하는 지진파의 시각이 다르다. 따라서 지진 전단파속도에 따른 예제 아치구조물의 지진응답을 분석하기 위하여 지진의 전단파속도를 <Table 2>와 같이 가정하였다.

〈Table 2〉 Velocity of ground acceleration

Case	V_s	Case	V_s
$V_{s=400}$	400m/sec	$V_{s=1200}$	1200m/sec
$V_{s=800}$	800m/sec	$V_{s=1600}$	1600m/sec

3. 다지점 하중을 적용한 구조물의 운동방정식

대공간구조물과 같이 지점사이의 거리가 매우 큰 경우에 각각의 지점에 도달하는 지진하중이 시간 지연되어 기초에 도달할 수 있으며 또한 지진하중이 가해지는 기초의 지반조건이 다를 수 있다. 이러한 경우에는 각각의 지점에 가해지는 지진하중이 다를 수가 있으며 대공간구조물의 정확한 지진응답 분석 및 내진설계를 위해서는 지점에 이러한 조건을 반영한 다중지점 지진하중을 적용해야 할 것이다.

다중지점 지진하중을 받는 구조물에 대한 자유도를 지점부분과 구조물부분으로 구분하여 이에 대한 동적운동방정식을 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sm} \\ M_{ms} & M_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_S \\ \ddot{U}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sm} \\ C_{ms} & C_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_S \\ \dot{U}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sm} \\ K_{ms} & K_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_S \\ U_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 s와 m는 구조물부분과 지점부분의 자유도를 의미한다. U_m는 지점부분에 대한 변위, X_S는 지점 이외의 부분에 대한 변위를 의미한다. 그리고 M, C, K는 질량, 감쇠, 강성행렬을 의미한다. f_m은 지점 변위를 구조물에 가하기 위해 필요한 유사정적 지점하중을 의미한다.

질량행렬은 집중질량행렬이므로 식 (1)의 첫 번째 행은 다음 식 (2)와 같다.

$$M_{ss}\ddot{X}_S + C_{ss}\dot{X}_S + K_{ss}X_S = -C_{sm}\dot{U}_m - K_{sm}U_m \quad (2)$$

여기서 X_S는 유사정적 변위(Y_S)와 동적변위(Y_D)로 구분하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_S \\ U_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_S \\ U_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_D \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

다중지점 지진하중을 받는 구조물에 대한 운동방정식, 식 (1)에서 동적항을 무시할 경우에 유사정적 변위(Y_S)는 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_S = -K_{ss}^{-1}K_{sm}U_m \quad (4)$$

식 (4)를 식 (2)에 넣어 정리하면 식 (5)와 같다.

$$M_{ss}\ddot{Y}_D + C_{ss}\dot{Y}_D + K_{ss}Y_D = -M_{ss}\ddot{Y}_s - C_{sm}\dot{U}_m - C_{ss}\dot{Y}_s \quad (5)$$

식 (5)의 오른쪽에서 감쇠항이 질량항에 비하여 매우 작으므로 이를 제거하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{ss}\ddot{Y}_D + C_{ss}\dot{Y}_D + K_{ss}Y_D = -M_{ss}\ddot{Y}_S \quad (6)$$

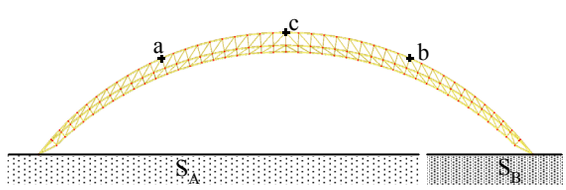
4. 다중지점 지진하중에 의한 아치 구조물의 지진응답

대공간구조물은 장경간의 특성으로 인하여 각각의 지점에 도달하는 지진파의 도달시각이 지진의 전파속도에 따라서 다를 수가 있다. 또한 장경간의 특성으로 인하여 각각의 지점에 대한 지반특성이 다를 수가 있다. 따라서 대공간구조물의 정확한 지진응답 분석을 위해서는 대공간구조물의 지점에 대한 지반특성과 지점간 지진파의 도달시각을 고려한 지진하중을 적용하는 것이 바람직할 것이다.

대공간구조물은 변위응답에 대한 비구조재의 손상, 구조부재의 추가적인 응력 발생, 사용성의 문제 등으로 인하여 지진하중에 의한 가속도응답은 물론 변위응답에 대한 분석이 필요하다. 본 논문의 예제 구조물 수치해석을 위하여 상용프로그램인 MIDAS/Gen을 사용하였다.

4.1 지반특성을 고려한 지진하중

예제 구조물의 지반특성을 <Fig. 4>와 같이 가정하고 S_A 및 S_B 지반특성을 반영한 인공지진하중을 각각의 지점에 적용하였다.



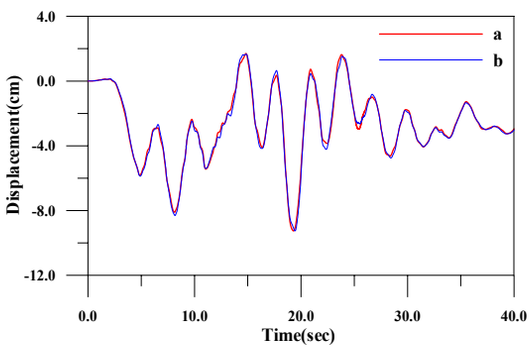
〈Fig. 4〉 Ground condition

예제 구조물의 진동모드 분석에 의하면 경간의 1/4지점과 1/2지점에서 진동응답이 크게 나타날 것으로 예상된다. 따라서 예제 킬 아치구조물의 지진응답 분석을 위하여 경간의 1/4지점과 1/2지점에서의 수평 및 연직방향 응답을 분석하고자 한다.

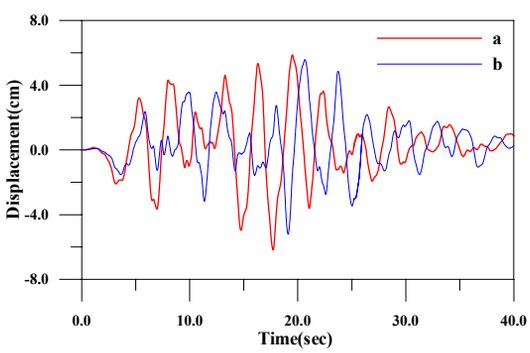
예제 구조물의 기하학적으로 대칭을 이루고 있으나 좌우 지점의 지반특성이 다르므로 경간의 1/4지점 좌우(점 a와 점 b)에서 진동응답이 다를 것을

예상된다.

<Fig. 5>는 경간의 1/4 지점 좌우에서의 변위응답으로 수평방향 변위응답의 경우에 매우 유사하게 나타나고 있으며 연직방향 변위응답의 경우에 변위응답 또한 역대칭으로 나타고 있으며 응답의 크기도 다르게 나타나고 있다.

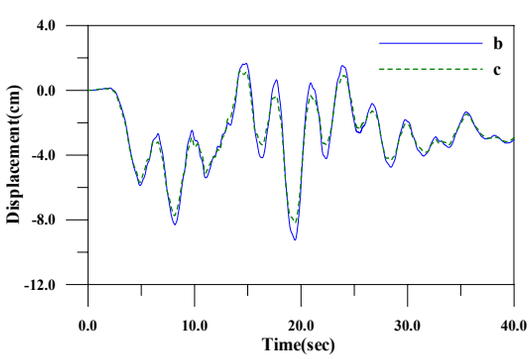


(a) Horizontal displacement responses at 1/4 span length

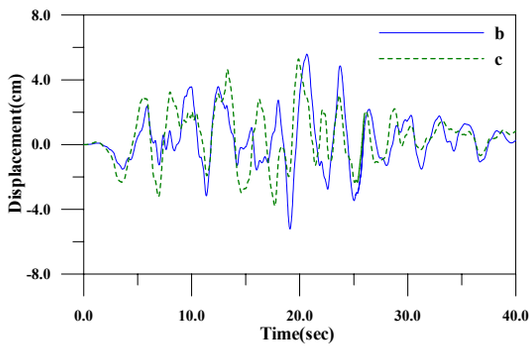


(b) Vertical displacement responses at 1/4 span length

〈Fig. 5〉 Displacement responses at 1/4 span length



(a) Horizontal dis. responses at 1/2 & 1/4 span length



(b) Vertical dis. responses at 1/2 & 1/4 span length

〈Fig. 6〉 Displacement responses at 1/2 & 1/4 span length

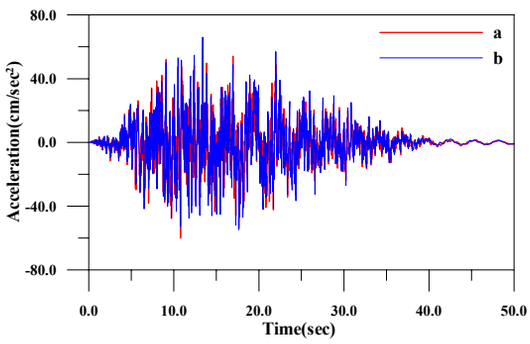
<Fig. 6>은 경간의 중앙과 경간의 1/4 지점에서의 변위응답을 나타낸 것으로 경간 1/4 지점의 변위응답이 경간 중앙의 변위응답보다 큰 것을 볼 수 있다.

〈Table 3〉 Max. displacement response (unit: mm)

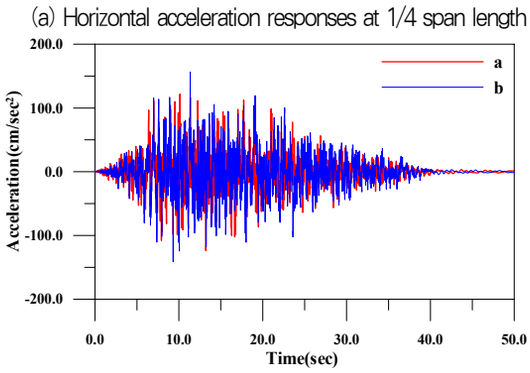
Case	*Node 'a'*	*Node 'b'*	*Node 'c'*
Max. Horizontal Dis	-9.257	-9.259	-8.203
Max. Vertical Dis.	-6.184	-5.216	-3.794

경간의 위치에 따른 절점별 변위응답의 최댓값을 <Table 3>에 나타내었다. 수평방향 변위응답은 절점 'b'에서 최댓값을 나타내고 있으며 연직방향의 변위응답의 경우에 절점 'a'에서 최댓값을 보이고 있다. 절점 'b'와 절점 'a'의 변위응답 비교에 있어서 수평방향 변위응답은 매우 유사하나 연직향 변위응답은 더 큰 차이를 보이고 있다.

가속도응답의 경우에 변위응답과 마찬가지로 경간의 좌우 1/4 지점에서 수평방향 가속도응답의 경우에 매우 유사하게 나타나고 있으며 연직방향 가속도응답인 역대칭인 것을 <Fig. 7>에서 확인할 수 있다.

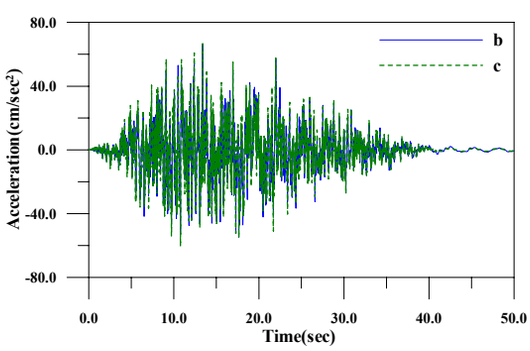


(a) Horizontal acceleration responses at 1/4 span length

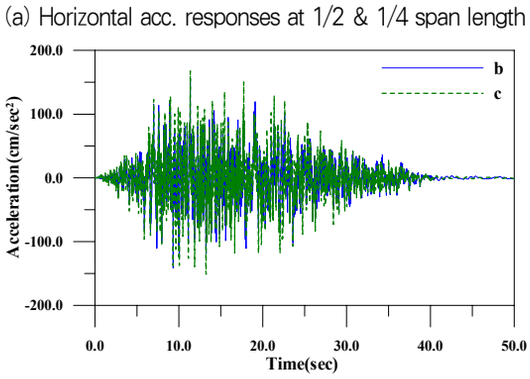


(b) Vertical acceleration responses at 1/4 span length

〈Fig. 7〉 Acceleration responses on 1/4 span length



(a) Horizontal acc. responses at 1/2 & 1/4 span length



(b) Vertical acc. responses at 1/2 & 1/4 span length

〈Fig. 8〉 Acceleration responses at 1/2 & 1/4 span length

<Fig. 8>은 경간의 중앙과 경간의 1/4 지점에서의 가속도응답을 나타낸 것으로 수평방향 가속도응답의 경우에 응답의 크기가 비슷하나 연직방향 가속도응답의 경우에 1/4 지점의 가속도응답이 경간 중앙의 변위응답보다 큰 것을 볼 수 있다.

〈Table 4〉 Max. acceleration response (unit: cm/sec^2)

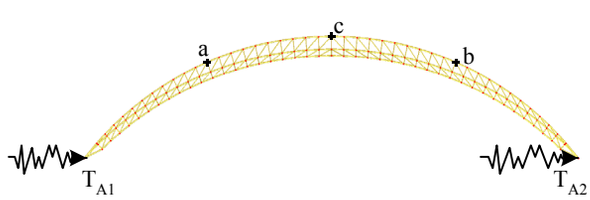
Case	*Node'a'*	*Node'b'*	*Node'c'*
Max. Horizontal Acc	-60.038	+66.025	+66.575
Max. Vertical Acc.	-123.612	+156.447	+167.276

경간의 위치에 따른 절점별 가속도응답의 최댓값을 <Table 4>에 나타내었다. 가속도응답이 절점 'c'에서 최댓값을 보이고 있다. 절점 'b'와 절점 'a'의 변위응답 비교에 있어서 연직방향 변위응답(79.0%)이 수평방향 변위응답(90.1%)보다 더 큰 차이를 보이고 있다.

절점 'b'에 대한 절점 'a'의 응답을 비교한 결과 가속도응답이 변위응답보다 더 큰 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이는 예제 구조물의 강성이 크기 때문에 변위에 대한 응답이 비교적 작게 나타나기 때문이다.

4.2 전단파속도를 고려한 지진하중

예제 구조물의 지점간 거리(약 400m)와 지진의 전단파속도(800m/sec)를 고려할 경우에 지점에 도달하는 지진하중의 지연 시간은 0.5초이다. 지연시간은 전파속도를 지점간 거리로 나눈 것으로 지진의 전단파속도에 따른 지점간 지진하중의 지연시간을 <Table 5>에 나타내었다.



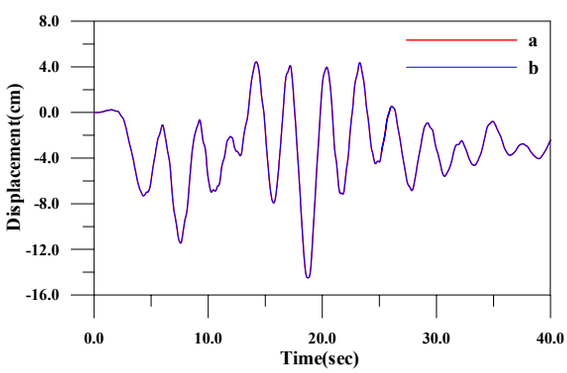
<Fig. 9> Earthquake excitation with time lag

<Fig. 9>는 전단파속도에 따른 지진하중의 도달시각을 나타낸 것이다. T_{A1}은 0.0초로 절점에 도달하는 지연시간이 없으며 T_{A2}는 전단파속도에 따라서 <Table 5>와 같이 지연시간을 갖는다.

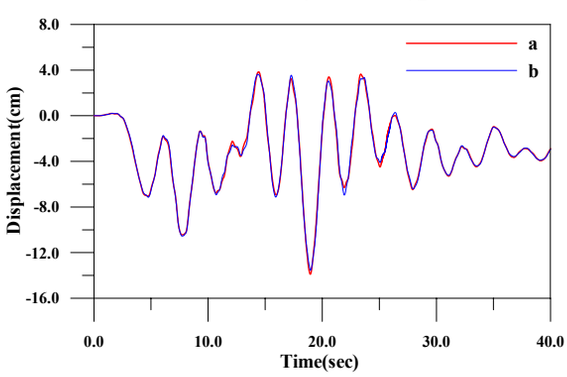
〈Table 5〉 Time lag arrived at supports

Case	T_{A2}	Case	T_{A2}
$V_{s=400}$	1.0초	$V_{s=1200}$	0.33초
$V_{s=800}$	0.5초	$V_{s=1600}$	0.25초

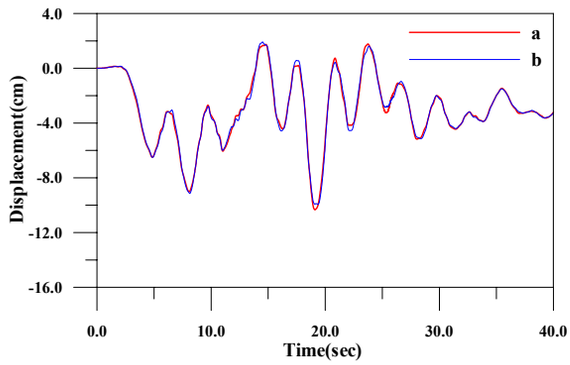
<Fig. 10>은 지진파의 지점도달 시각에 따른 경간의 좌우 1/4지점에서의 수평 변위응답에 대한 위상차를 나타낸 것이다. $T_{A2}=0.5\sec$와 $T_{A2}=1.0\sec$인 경우에 경간의 좌우 1/4지점에서의 수평 변위응답이 위상차가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 좌우 지점에 지진파가 도달하는 시각이 다르기 때문이다. 좌우 지점에 도달하는 지진파의 지연시각이 클수록 위상차가 크게 나타나고 있다.



(a) Horizontal dis. responses (T_{A2}=0.0sec)



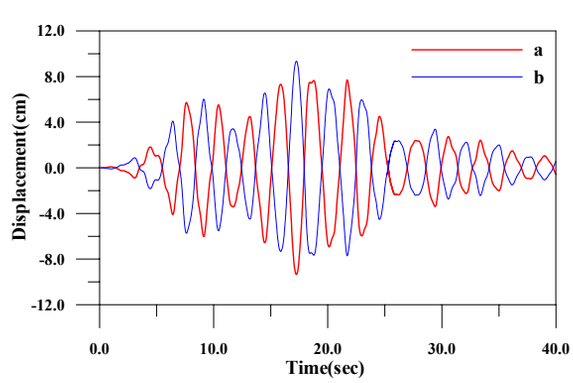
(b) Horizontal dis. responses (T_{A2}=0.5sec)



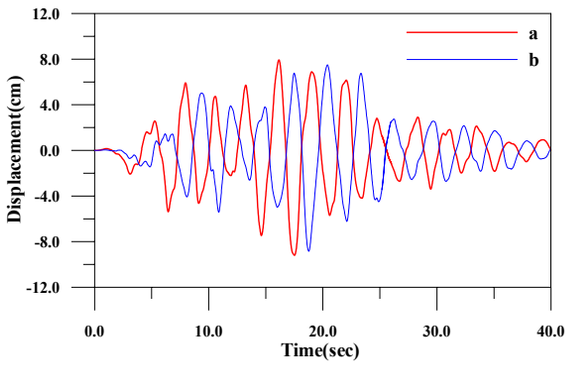
(c) Horizontal displacement responses (T_{A2}=1.0sec)

〈Fig. 10〉 Phase difference of horizontal dis. responses with T_{A2}

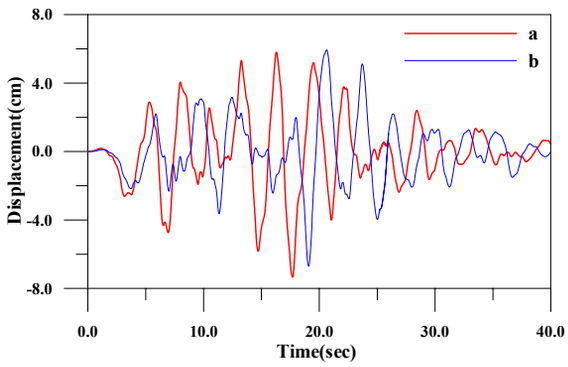
<Fig. 11>은 지진파의 지점도달 시각에 따른 경간의 좌우 1/4지점에서의 연직 변위응답에 대한 위상차를 나타낸 것이다. $T_{A2}=0.0\sec$인 경우에 경간의 1/4지점 좌측(절점 'a')과 우측(절점 'b')의 연직 변위응답이 역대칭으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 좌우 지점에 도달하는 지진파가 지연시각을 가질 경우($T_{A2}=0.5\sec$와 $T_{A2}=1.0\sec$)에 경간의 좌우 1/4지점에서의 연직방향 변위응답이 위상차가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고 좌우 지점에 도달하는 지진파의 도달시각이 클 경우($T_{A2}=1.0\sec$) 다른 경우와 비교하여 연직 변위응답의 양상이 다른 것을 확인할 수 있다.



(a) Vertical dis. responses (T_{A2}=0.0sec)



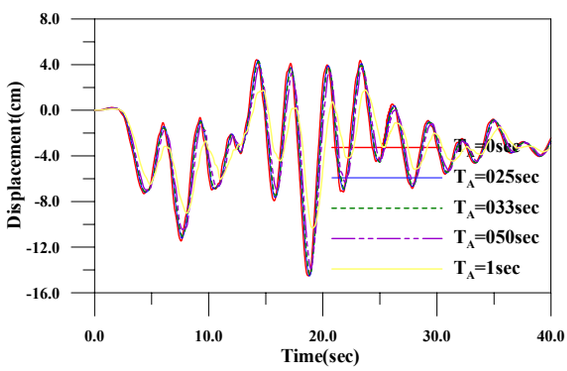
(b) Vertical dis. responses (T_{A2}=0.5sec)



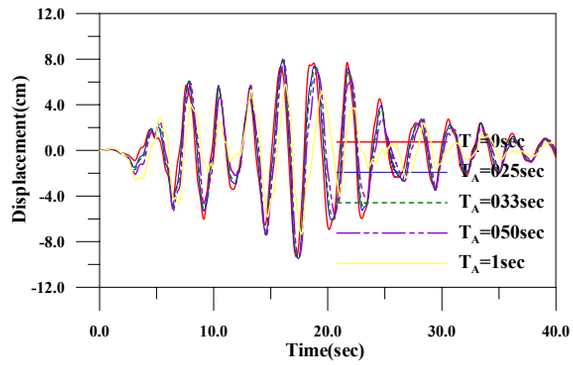
(c) Vertical dis. responses (T_{A2}=1.0sec)

〈Fig. 11〉 Phase difference of vertical dis. responses with T_{A2}

<Fig. 12>는 지진파의 지점도달 시각에 따른 경간의 1/4지점에서의 수평 및 연직 변위응답을 나타낸 것으로 좌우 지점에 도달하는 지진파의 지연시각이 클 경우에 변위응답이 작아지는 것을 볼 수 있다. 그러나 좌우 지점에 도달하는 지진파의 지연시각이 크지 않을 경우에 변위응답이 유사한 것을 볼 수 있다.



(a) Horizontal dis. responses of point 'a' with T_{A2}



(b) Vertical dis. responses of point 'a' with T_{A2}

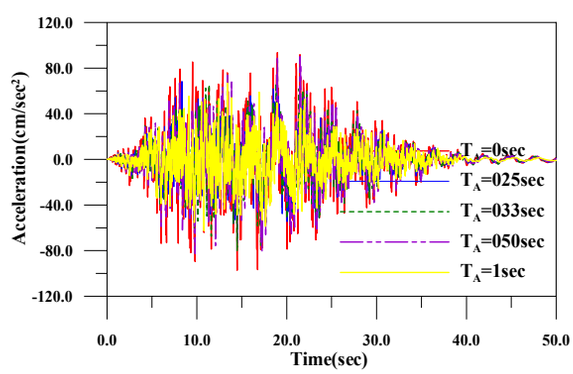
〈Fig. 12〉 Displacement responses of point 'a' with T_{A2}

<Table 6>은 지진파가 좌우 지점에 도달하는 시각에 따른 변위응답의 최댓값을 나타낸 것으로 좌우 지점에 도달하는 지진파의 지연시각에 따라서 다르게 나타나고 있으며 본 예제에서는 지진파의 지연시각이 0.25sec일 때 가장 큰 변위응답을 보여주고 있다.

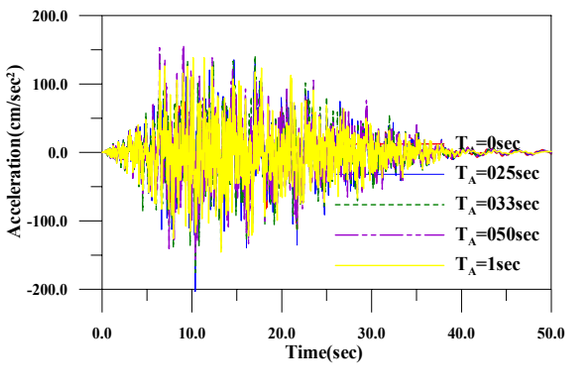
〈Table 6〉 Max. disp. response with T_{A2} (unit: mm)

T_{A2}	0.0sec	0.25sec	0.33sec	0.5sec	1.0sec
Max. Horizontal Dis	14.495	14.529	14.443	13.897	10.339
Max. Vertical Dis.	9.346	9.478	9.455	9.196	7.353

<Fig. 13>은 지진파의 지점도달 시각에 따른 경간의 1/4지점에서의 수평 및 연직 가속응답을 나타낸 것으로 변위응답과 마찬가지로 좌우 지점에 도달하는 지진파의 지연시각이 클 경우에 응답이 작아지는 것을 볼 수 있다.



(a) Horizontal acc. responses of point 'a' with T_{A2}



(b) Vertical acc. responses of point 'a' with T_{A2}

〈Fig. 13〉 Acceleration responses of point 'a' with T_{A2}

<Table 7>은 지진파가 좌우 지점에 도달하는 시각에 따른 가속도응답의 최댓값을 나타낸 것으로 좌우 지점에 도달하는 지진파의 도달시각에 따라서 매우 다른 것을 확인할 수 있다. 수평방향 가속도응답은 지진파의 지연시각이 없을 때 가장 크게 나타나며 연직방향 가속도응답은 지진파의 지연시각이 0.25sec일 때 가장 크게 나타나고 있다.

〈Table 7〉 Max. acc. response with T_{A2} (unit: cm/sec²)

T_{A2}	0.0sec	0.25sec	0.33sec	0.5sec	1.0sec
Max. Horizontal Acc	-97.15	-73.01	-80.33	+90.11	+66.97
Max. Vertical Acc.	-111.57	-203.29	-175.14	+156.77	-145.68

5. 결 론

본 논문에서는 다중지점 지진하중을 적용한 장경간의 아치구조물의 지진응답 분석하여 그 적용성에 대하여 알아보았다. 지점의 지반조건 상이한 경우 그리고 지진의 전단파속도가 다른 경우에 대한 예제구조물의 지진응답 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

장경간의 대공간구조물은 지점간의 이격 거리가 매우 크므로 각각의 지점에서의 지반이 다를 수가 있다. 따라서 장경간 대공간구조물에 대한 정확한 지진응답 분석을 위해서는 각각의 지점에 대하여 상이한 지반조건을 고려한 다중지점 지진하중을 적용하여 수치해석을 수행하여야 할 것이다. 그리고 대공간구조물의 지점간 이격거리가 매우 크므로 지진의 전단파속도에 따라서 각각의 지점에 도달하는 지진하중의 시각이 다를 수가 있으므로 시간지연을 고려한 다중지점 지진하중을 적용하여 수치해석을 수행해야 할 것이다.

본 연구에서는 아치구조물로 대상으로 수치해석을 수행하였으나 대공간구조물의 사용성 평가 및 구조 설계를 위해서는 돔 구조물 및 배럴볼트와 같은 다양한 대공간구조물의 수치해석이 필요할 것이다. 대공간구조물의 사용성 평가 및 구조 설계를 위해서는 다양한 지진하중 조건에 따른 진동응답 및 부재력에 대한 분석이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 서일대학 학술연구비에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌(References)

1. Sadeghi A. (2004) Horizontal Earthquake Loading and linear/Nonlinear Seismic Behavior of Double Layer Barrel Vaults, *International Journal of Space Structure*, Vol. 19. No. 1, pp. 21-37.
2. Hassan A. M. (2000) Seismic Behavior of Space Structures, *International Journal of Space Structure*, Vol. 15, No. 2, pp. 119-135.
3. Kang, J. W. and Jeong, C. W. (2008) Seismic Behavior According to Type of Large Spatial Structures, *Article of Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, Vol. 8, No. 1, pp. 5-12
4. Lee, K. S. and Han, S. E. (2009) A Development of Analytical Strategies for Elastic Bifurcation Buckling of the Spatial Structures, *Journal of the Korean Society of Steel Construction*, Vol. 21, No. 6, pp. 563-574 (in Korean)
5. Han, S. E., Lee, S. J. and Gang, E. K (2006) Evaluation of Performance Point of the Spatial Structures Using the ESDOF System, *Proceeding of the Korean Society of Steel Construction*, 2006, pp. 200-205.
6. Kim, G. C. and Kang, J. W. (2012) Performance Evaluation of Vibration Control of Adjacent Buildings According to

Installation Location of MR damper, *Journal of the Korean Society of Steel Construction*, Vol. 24, No. 1, pp. 91-99. (in Korean)

7. Kang, K. D. (1990) Application of Response Spectrum Method to a Bridge subjected to Multiple Support Excitation, *Journal of Korean Societe Civil Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 1-6.
8. Kim, H. K. and Suh, J. I. (1997) Nonlinear Earthquake Response Analysis of a Multi-Supported Self-anchored Suspension Bridge, Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 1, No. 3, pp. 45-58.
9. Kwon, J. S., Paik, I. Y. and Chang, S. P. (2004) Dynamic Analysis of Floating Bridge Subjected to Earthquake Load Considering Multi-support Excitation, Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 8, No. 2, pp. 27-33.
10. Sextos, A., Kappos, A. J. and Mergos, P. (2004) Effect of Soil-Structure Interaction and Spatial Variability of Ground Motion on Irregular Bridge: The Case of The Krystallopigi Bridge, 13th World Conference on Earthquake Engineering, 1-6, Paper No. 2298.
11. Jihong, Y., Zhiqiang, Z. and Ye, C. (2011) Strength failure of spatial reticulated structures under multi-support excitation, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol. 10, No. 1, pp, 21-36.
12. Su, L., Dong, S. and Kato, S. (2007) Seismic design for steel trussed arch to multi-support excitations, *Journal of Constructional Steel Research 63*, pp, 725-734.

(접 수 일 자 : 2013년 10월 21일)
(심사완료일자 : 2013년 11월 01일)
(게재확정일자 : 2013년 11월 15일)