상이한 지반조건을 갖는 아치구조물의 지진응답 분석

Seismic Response of Arch Structure Subjected to Different Ground Motion

김 기 철*
Kim, Gee-Cheol

강 주 원**
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 of spatial structure for seismic design of spatial structure. An arch structure is used as an example structure because it has primary characteristics of spatial structures. Multiple support excitation may be subjected to supports of a spatial structure because ground condition of spatial structures is different. In this study, the response analysis of the arch structure under multiple support excitation and simple support excitation is studied. By means of the pseudo excitation method, the seismic response is analyzed for long span spatial structure. It 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 response of spatial structure under multiple support excitation and simple support excitation are the different in some case. Therefore, it has to be necessary to analyze the seismic response of spatial structure under multiple support excitation because the spatial structure supports may be different.

Keywords : Arch structure, Multi-support earthquake load, Seismic response, Vibration control

1. 서 론

장경간의 대공간구조물은 지진하중에 의하여 일반구조물과는 다른 응답특성이 나타낸다. 따라서 대공간구조물에 대한 내진설계를 위해서는 대공간구조물의 동적특성 및 지진응답특성의 정확한 분석이 필요하다. 대공간구조물은 형태적 특성으로 인하여 수평지진에 의하여 상하진동이 발생하며 고유진동주기가 다소 길어 일반적인 라멘구조물과는 구별되는 지진거동을 보이고 있다.^{1),2),3)}

구조물에 대한 다중지점 지진하중 적용에 대한 연구는 주로 다중지점을 갖는 장경간의 교량구조물에 국한되어 연구가 수행되어 왔다.^{4),5),6)} 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 시간 지연된 지진하중이 가해질 수 있다.^{7),8),9)}

대공간구조물은 공간을 이루는 아치나 돔과 같은 상부의 지붕구조가 하부의 기둥이나 벽에 지지되거나 지반에 직접 지지되기도 한다. 대공간구조물의 상부구조가 다른 강성을 갖는 하부구조로 지지되는 경우에 상부구조로 전달되는 하부구조의 진동특성이 다르게 나타날 수도 있다. 아치구조물이나 돔구조물의 동적

* 정회원, 서일대학교 건축과 부교수
Seoil University, Dept. of Architecture Eng.
Associate Professor

** 교신저자, 영남대학교 건축학부, 교수
Yengnam University, School of Architecture,
Professor,
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625
E-mail : kangj@ynu.ac.kr

특성 중에 하나인 진동모드 양상은 상하지진동에 반응하는 대칭 모드와 수평지진동에 대하여 응답이 크게 발생하는 역대칭 모드가 나타난다. 또한 일반 라멘구조와 다르게 수평지진에 의하여 수평방향 응답은 물론 연직방향 응답도 나타나고 있다. 대공간구조물은 상하로 진동하기 쉬우며 지진동의 수평력에 대하여서도 역대칭모드가 공진현상을 보인다. 또한, 많은 고유진동수가 서로 인접하여 있어 고차의 고유진동모드까지 지진동의 가속도 응답스펙트럼이 크게 나타나는 영역에 걸쳐 있음을 보여준다. 따라서, 공간구조의 내진설계에 있어서는 그 특유의 진동특성을 고려한 후 안정성을 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 지반이 상이한 대공간구조물에 대한 정확한 지진응답 분석을 위하여 다중지점 지진하중의 적용하고 진동응답 특성을 분석하고자 한다. 예제 구조물은 대공간구조물의 동적특성을 기본적으로 내재하고 있는 장경간의 아치구조물로 선정하였다. 다중지점 지진하중은 지점의 지반조건이 다른 경우 그리고 시간지연을 갖는 지진하중이 가진되는 경우로 하여 수치해석을 수행하였다.

2. 예제 구조물 및 지진하중

2.1 예제 구조물

예제 구조물로 선정한 대공간구조물은 장경간의 켈 아치(Keel Arch) 구조물이다. 아치구조물은 대공간구조물의 기본적인 동적특성을 내재하고 있어 대공간구조물의 거동 분석에 많이 사용된다. 본 논문에서는 다중지점 지진하중을 적용한 대공간구조물의 지진응답 분석을 위하여 <Fig. 1>과 지점과 지점 거리가 392M, 높이가 97M인 켈 아치를 예제 구조물로 선정하였다.

(a) Top view

(b) Side view

<Fig. 1> Example structure

예제 구조물은 강관으로 된 입체 트러스 형태의 단면을 가지고 있으며 주요 부재에 대한 단면은 다음 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Members of example structure

부재명	단면 크기	부재명	단면 크기
상현재	Ø1000×35	사재	Ø600×16
하현재	Ø1000×25	수직재	Ø812.80×16
중간재	Ø1000×55	수평재	Ø600×12

2.2 지진하중

장경간 켈 아치에 적용하기 위한 다지점 지진하중은 KBC2009의 설계응답스펙트럼에 따른 인공지진하중을 생성하였다. 설계응답스펙트럼은 지역계수는 0.22, 지반종류는 S_B 와 S_C 로 가정하여 두 개의 지진하중을 생성하여 예제 구조물에 적용하였다. 두 지반에 따른 인공지진하중의 가속도 시간이력을 <Fig. 2>에 나타내었다.

(a) Acceleration time history (S_B , S_C)

(b) Acceleration spectrum

<Fig. 2> Artificial earthquake (S_B , S_C)

3. 대공간구조물의 다중지점 지진하중 적용

3.1 다중지점 지진하중에 의한 운동방정식

대공간구조물과 같이 지점이 상당한 거리를 두고 있는 경우에 지진하중이 가해지는 기초의 지반이 다를 수 가있으며 또한 지진하중에 시간지연효과가 발생할 수 있다. 이러한 경우에는 각각의 지점에 적합한 지진하중을 입력하는 것이 해석결과의 정확성

을 높일 수 있다.

다중지점 지진하중을 받는 구조물에 대한 운동방정식의 자유도는 지점부분과 구조물부분으로 나누어 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 s 와 m 는 구조물부분과 지점부분의 자유도를 의미한다. U_m 는 지점부분에 대한 변위, X_s 는 지점 이외의 부분에 대한 변위를 의미한다. 그리고 M , C , K 는 질량, 감쇠, 강성행렬을 의미한다. f_m 은 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_s 는 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 동적항이 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.

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

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

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

3.2 예제 구조물의 고유치해석

예제 구조물인 킬 아치(Keel Arch) 구조물은 대공간구조물에 대한 기본적인 동적특성을 내재하고 있다.¹⁰⁾ 따라서 다중지점 지진하중의 적용한 대공간 구조물의 지진응답 분석에 앞서 예제 구조물에 대한 고유치해석을 수행하여 예제 구조물에 대한 동적특성을 분석하고자 한다.

(a) 1st mode (0.469Hz)

(b) 2nd mode (1.056Hz)

(c) 3rd mode (1.826Hz)

(d) 4th mode (2.222Hz)

<Fig. 3> Natural mode and frequency

아치 구조물의 동적특성은 구조물의 형상을 결정하는 개각(open angle)과 걸보기 세장비 등에 의하여 좌우된다. 아치 구조물의 진동모

드 양상은 <Fig 3 (a)>, <Fig. 3 (c)>와 같이 역대칭 모드 그리고 <Fig. 3 (b)>, <Fig. 3 (d)>와 같이 대칭 모드로 나타난다.

대칭 모드는 주로 연직방향 지진하중에 반응하여 구조물이 상하로 진동하는 지진응답에 기여하고, 역대칭 모드는 주로 수평방향 지진하중에 대하여 응답이 크게 발생할 것으로 예상된다. 아치 구조물은 일반 라멘구조와 다르게 수평지진에 의하여 수평응답을 물론 연직응답도 나타나고 있다. 또한 저차모드의 진동주기가 지진하중의 가속도스펙트럼에서 탁월한 주기영역에 존재하는 것을 알 수 있다.

4. 다지점 지진하중에 의한 대공간구조물의 지진응답

4.1 예제 구조물의 변위응답

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

<Fig. 4>에서 SB 및 SC는 S_B 및 S_C 지반조건으로 인공지진하중을 생성하여 경간방향으로 두 지점에 같은 지진하중을 적용한 것이다. 그리고 MP는 S_B 및 S_C 두 종류의 지반조건으로 생성한 인공지진하중을 서로 다른 지점에 각각 적용한 것이다.

예제 구조물의 1/4지점에서의 수평 및 연직방향 변위응답은 다중지점 지진하중에 의한 변위응답과 단일 지진하중에 의한 변위응답의 양상이 유사하게 나타나고 있으나 변위응답은 SB 지반 지진하중에 의한 변위응답이 가장 크게 나타나고 있다.

수평방향 변위응답의 경우에 지진하중에 의한 예제 구조물의 변형이 유지되어 시간이 경과해도 변위응답이 유지되는 것을 볼 수 있다. 이는 지진에 의한 지반의 변형을 반영하였기 때문이다. 연직방향의 변위응답의 경우에 단일 지진하중의 변위응답

양상과 다중지점 지진하중의 변위응답 양상이 다른 것을 볼 수 있다.

(a) Horizontal displacement

(b) Vertical displacement

<Fig. 4> Displacement response at 1/4 of span length

예제 구조물의 1/2지점에서의 수평방향 변위응답은 <Fig. 5>와 같이 단일 지진하중과 다중지점 지진하중에 의한 변위응답 양상이 유사하게 나타나고 있으나 SB 지반의 지진하중에 의한 변위응답이 가장 크게 나타나고 있다. 다중지점에 의한 변위응답은 유사정적해석에 의한 정적변위응답이 고려되어 나타나고 있다. 연직방향의 변위응답의 경우에 단일 지진하중의 변위응답 양상과 다중지점 지진하중의 변위응답 양상이 다른 것을 볼 수 있으며 단일 지진하중에 의한 변위응답보다 다중지점 지진하중에 의한 변위응답이 매우 크게 나타나고 있다.

예제 구조물의 고유진동모드의 영향으로 인하여 변위응답의 경우에 응답의 위치에 관계없이 수평변위응답이 연직변위응답보다 크게 나타나고 있으며 예제 구조물의 1/4지점에서의 변위응답과 1/2지점에서의 변위응답양상이 유사한 것을 볼 수 있다.

(a) Horizontal displacement

(b) Vertical displacement

<Fig. 5> Displacement response at 1/2 of span length

4.2 예제 구조물의 가속응답

지진하중에 의한 대공간구조물은 가속도응답은 사용자에게 직접적인 영향을 미치지 않지만 과도한 가속도응답은 구조부재에 추가적인 응력이 발생을 야기할 수 있고 비구조재의 탈락 등이 야기할 수 있으므로 가속도응답에 대한 분석이 요구된다.

(a) Horizontal acceleration

(b) Vertical acceleration

<Fig. 6> Acceleration response at 1/4 of span length

예제 구조물의 1/4지점에서의 수평 및 연직방향 가속도응답의 다중지점 지진하중과 단일 지진하중에 의한 변위응답의 양상이 유사하게 나타나고 있으나 SC 지반 지진하중에 의한 가속도응답이 가장 크게 나타나고 있다. 변위응답과 다르게 연직방향 가속도응답이 수평방향 가속도응답보다 큰 것을 볼 수 있다.

예제 구조물의 1/2지점에서의 수평방향 가속도응답은 단일 지진하중과 다중지점 지진하중에 의한 가속도응답 양상이 유사하게 나타나고 있으나 SC 지반의 지진하중에 의한 가속도응답이 가장 크게 나타나고 있다. 연직방향의 가속도응답의 경우에 단일 지진하중의 가속도응답 양상과 다중지점 지진하중의 가속도응답 양상이 다른 것을 볼 수 있으며 단일 지진하중에 의한 가속도응답보다 다중지점 지진하중에 의한 가속도응답이 매우 크게 나타나고 있다.

(b) Vertical acceleration

<Fig. 7> Acceleration response at 1/2 of span length

지진하중에 의한 대공간구조물의 응답분석에 있어서 시간이력에 의한 최대값 분석이 요구된다. <Table 3>은 각각의 지진하중에 따른 가속도응답의 최대값을 나타낸 것이다.

수평방향 및 연직방향 가속도응답이 SC지반의 지진하중에 의한 최대 가속도응답이 가장 크게 나타나고 있다. 그리고 SB지반에 의한 최대 가속도응답보다 다중지점 지진하중에 의한 최대 가속도응답이 크게 나타나고 있다.

<Table 3> Peak acceleration(m/sec²)

지진하중 지반조건	1/4지점 최대 가속도		1/2지점 최대 가속도	
	수평	연직	수평	연직
SB	1.58	2.78	2.96	2.51E-13
SC	2.01	3.54	3.58	4.31E-13
다중지점	1.81	3.00	3.27	0.36

5. 결론

본 논문에서는 대공간구조물의 다중지점 지진하중 적용성에 대하여 알아보고자 경간 약 300m의 아치 구조물을 대상으로 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 의한 예제구조물의 지진응답 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

장경간의 대공간구조물에 다중지점 지진하중 적용한 경우의 지진응답이 단일 지진하중 적용에 의한 지진응답과 유사한 응답을 보이고 있으나 경우에 따라서 상이한 지진응답을 나타내고 있다. 따라서 경간이 큰 대공간구조물의 지진응답 분석을 위해서는 지점간 지반조건이 상이한 조건을 고려한 다중지점 지진하중의 적용해야 할 것이다.

본 연구에서는 대공간구조물의 지반조건이 상이한 지반조건을 반영한 지진해석을 수행하였다. 그러나 대공간구조물의 경우에 장경간으로 인하여 지점의 지진하중 도달시간이 지반의 전단파 속도에 따라서 상이하므로 이에 대한 고려가 필요하다. 또한 지점에 대한 지진하중의 도달에 대한 위상차가 있을 수 있으므로 이를 고려한 지진하중의 적용이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0012407)

참고문헌

1. Arjang Sadeghi, "Horizontal Earthquake Loading and linear/Nonlinear Seismic Behavior of Double Layer Barrel Vaults," International Journal of Space Structure, Vol.19, No. 1, 2004, pp. 21-37.
2. Hassan A. Moghaddam, " Seismic Behavior of Space Structures," International Journal of Space Structure, Vol. 15, No. 2, 2000, pp. 119-135.
3. Kang, Joo-Won and Jeong, Chan-Woo, "Seismic Behavior According to Type of Large Spatial Structures", Article of Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 8, No. 1, Feb. 2008, pp. 5-12.
4. Kang, Ki-Dong "Application of Response Spectrum Method to a Bridge subjected to Multiple Support Excitation", Journal of Korean Societe Civil Engineering, Vol. 10, No. 3, Sep. 1990, pp. 1-6.
5. Kim, Ho Kyung and Suh, Jeong In, "Nonlinear Earthquake Response Analysis of a Multi-Supported Self-anchored Suspension Bridge", Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 1. No. 3, Sep. 1997, pp. 45-58.
6. Jang-Sub Kwon, In-Yeol Paik and Sung-Pil Chang, "Dynamic Analysis of Floating Bridge Subjected to Earthquake Load Considering Multi-support Excitation", Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 8. No. 2, April 2004, pp. 27-33.
7. Ling Su, Shilim Dong and Shiro Kato, "Seismic design for steel trussed arch to multi-support excitations", Journal of Constructional Steel Research 63, 2007, pp, 725-734.
8. Ye Jihong, Zhang Zhiqiang and Chu Ye, "Strength failure of spatial reticulated structures under multi-support excitation", Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol. 10., No. 1, 2011, pp, 21-36.
9. Anastasios Sextos, Andeas J. Kappos and Panayiotis Mergos, "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 August, 2004, Paper No. 2298
10. Kang, Joo-Won and Gee-Cheol Kim, "Seismic Response Control of Arch Structure by Using Passive TMD", EASEC 12, 8~12. Jan. 2011, Hongkong

(접 수 일 자 : 2013년 01월 11일)

(심사완료일자 : 2013년 02월 18일)

(게재확정일자 : 2013년 02월 28일)