

구조물의 고유진동주기 및 스카이브릿지 설치위치에 따른 진동특성평가

김현수^{1*}

¹선문대학교 건축학부

Vibration Characteristics Evaluation According to Natural Periods of Structures and Location of a Sky-bridge

Hyun-Su Kim^{1*}

¹Division of Architecture, Sunmoon University

요 약 근래에 스카이브릿지를 활용하여 연결된 고층구조물의 진동제어성능을 개선하고자 하는 연구가 수행되고 있다. 본 논문에서는 스카이브릿지로 연결되는 두 구조물의 고유진동주기의 차이와 스카이브릿지 설치위치가 진동제어성능에 미치는 영향에 대해서 분석하여 보았다. 이를 위하여 40층과 50층 구조물을 연결된 예제구조물로 선택하였고 두 구조물의 고유진동주기 차이를 1.0배에서 1.5배까지 순차적으로 변경하면서 해석모델을 구성하였다. 각각의 해석 모델에 대하여 KBC2009를 기반으로 생성한 인공지진하중을 입력 하중으로 생성하여 시간이력해석을 수행하였다. 수치해석결과 두 구조물의 고유진동주기차이가 증가할수록, 연결된 층의 높이가 높아질수록 변위 및 속도응답에 대해서 일반적으로 우수한 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있었다. 그러나 가속도응답의 경우에는 이러한 경향과 반대되는 제어성능변화를 나타내었다.

Abstract Recently, studies of vibration control performance improvement of tall buildings connected by a sky-bridge have been conducted. In this study, the effect of difference of natural vibration periods of two buildings and install location of a sky-bridge on vibration control performance has been investigated. To this end, 40-story and 50-story building structures were selected as example structures. Analytical models were developed by varying the natural period difference ratio from 1.0 to 1.5. Artificial earthquake load based on KBC2009 was used as an excitation for time history analyses. Based on numerical simulation results, it has been shown that control performance for displacement and velocity of tall buildings connected by a sky-bridge is improved as the difference of natural periods of two buildings increases and the linked story becomes higher. However, in the case of acceleration response, it shows a counter trend compared to displacement and velocity responses.

Key Words : Sky-Bridge, Seismic Responses, Tall Buildings, LRB, Vibration Control

1. 서론

급격한 산업화 및 도시화로 고층건물들이 인접하여 건설되는 경우가 많아지면서 인접한 건물들 사이에 스카이브릿지(sky-bridge)가 설치되는 경우가 증가하고 있다. 원래 스카이브릿지는 연결된 두 건물사이의 비상시 이동통

로서 근래에 와서는 건축적 용도로 설치된 스카이브릿지를 진동제어효과를 증대시킬 수 있는 수단으로 연구되고 있다[1-3]. 현재까지 발표된 논문은 스카이브릿지와 구조물의 연결시스템 변화에 따른 진동제어성능을 검토한 연구가 대부분이었고 이러한 구조물의 해석시 보다 효과적인 검토를 위한 해석기법을 개발한 연구도 있었다[2].

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0015166).

*Corresponding Author : Hyun-Su Kim(Sunmoon Univ.)

Tel: +82-41-530-2315 email: hskim72@sunmoon.ac.kr

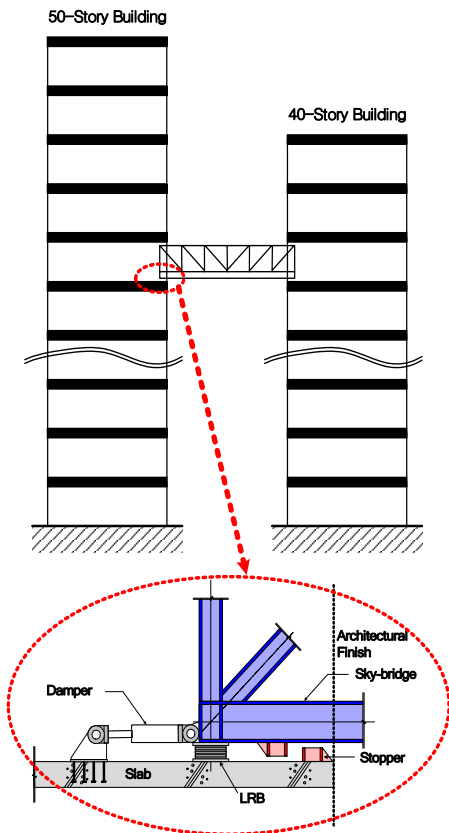
Received February 18, 2013

Revised (1st May 28, 2013, 2nd June 3, 2013)

Accepted June 7, 2013

또한 스카이브릿지로 연결되는 두 개의 고층건물은 스카이브릿지가 설치되는 위치에 따라서 연결된 구조물의 동적거동이 크게 달라지므로 이에 대한 검토도 수행된 바 있다. 스카이브릿지로 연결된 두 건물의 지진하중에 대한 동적거동은 스카이브릿지가 연결되는 위치뿐만 아니라 연결되는 두 건물의 고유진동주기의 차이에 의해서도 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 통하여 스카이브릿지로 연결된 건물의 고유진동주기 차이에 따라 달라지는 진동제어성능의 변화를 분석하였다. 이때 구조물의 진동주기와 함께 스카이브릿지의 설치 위치도 동시에 변화시켜서 진동제어성능을 검토하였다.

2. 예제구조물의 구성



[Fig. 1] Analytical model of example structure

본 연구에서는 스카이브릿지로 연결된 고층건물의 진동제어성능을 검토하기 위하여 [Fig. 1]에 나타난 50층과 40층의 전단빌딩모델을 예제구조물로 사용하였다. 예제 구조물의 스패ンは 8m, 층고는 4m로 하였고 스카이브릿지

의 길이는 20m로 하였다. 스카이브릿지가 연결된 구조물의 진동제어효과는 스카이브릿지가 설치된 방향이 스카이브릿지의 수직방향보다 더욱 우수한 것으로 알려져 있으므로 본 연구에서는 스카이브릿지가 설치된 방향에 대해서만 지진하중을 가하여 2차원 해석을 수행하였다.

스카이브릿지와 구조물의 연결시스템은 전체 구조물의 비정형성이 최소화되고 입력되는 외부 에너지를 적절히 흡수할 수 있는 Lead Rubber Bearing (LRB)과 점성댐퍼를 사용하였다. 스카이브릿지와 구조물의 연결부 경계 조건에 대해서 실제 건물에서의 설치방법을 설명하기 위하여 Fig. 1에 연결방법의 상세한 예를 나타내었다. 스카이브릿지와 구조물 연결부 응답의 상대적 차이가 발생하면 연결시스템으로 사용된 LRB와 감쇠기에 의해서 에너지가 소산되고 진동제어성능이 발휘된다. 스카이브릿지가 실제 구조물에 설치될 때에는 낙교의 위험성을 감소시키기 위해서 그림에 나타난 바와 같이 stopper를 설치하여 안전을 도모하게 된다. 트러스 구조로 구성된 스카이브릿지는 연결시스템에 비하여 강성이 매우 크기 때문에 거의 강체처럼 거동하게 된다. 본 논문에서 사용한 LRB의 특성치는 [Table 1]에 나타난 바와 같으며 LRB와 동일한 위치에 설치된 감쇠장치의 감쇠력은 100kN·sec/cm로 두었다.

[Table 1] Properties of LRB

Stiffness (kN/cm)	Post yield stiffness (kN/cm)	Yield strength (kN)	Vertical stiffness (kN/cm)
42.2	4.1	72.6	1351.04

본 논문에서는 [Table 2]에 나타난 바와 같이 50층 구조물의 1차 모드 고유주기를 40층 구조물의 1차 모드 고유주기의 1.0배에서 1.5배까지 순차적으로 변경하면서 예제 모델을 구성하였고, 동시에 구조물에 스카이브릿지를 설치하는 연결위치도 40층에서부터 10층까지 10개 층 간격으로 (Link10 - Link40) 변경하면서 모델링을 하여 스카이브릿지의 설치위치와 구조물의 고유주기 차이가 전체 구조물의 진동제어에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다.

[Table 2] Natural vibration periods of examples

40-story Bldg. (T_{40})	50-story Bldg. (T_{50})
4.0 sec	4.0 sec (1.0· T_{40})
	4.4 sec (1.1· T_{40})
	4.8 sec (1.2· T_{40})
	5.2 sec (1.3· T_{40})
	5.6 sec (1.4· T_{40})
	6.0 sec (1.5· T_{40})

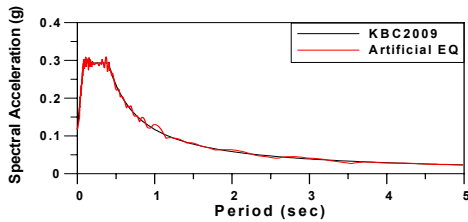
전단빌딩 예제구조물의 층별 질량은 100ton으로 하였고 기둥의 강성은 예제구조물의 선택된 고유진동주기를 구현하기 위해서 모델별로 적절한 값으로 조정하였다. 본 연구에서 기준이 되는 40층 구조물의 각 모드별 고유진동주기와 질량참여율 및 누적질량참여율은 아래 표에 나타난 바와 같다. 표에 나타난 바와 같이 3차 모드까지의 누적질량참여율이 90%가 넘는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 고유치해석 및 시간이력해석을 위해서 20차 모드까지 고려하였다.

[Table 3] Natural periods and modal participation mass

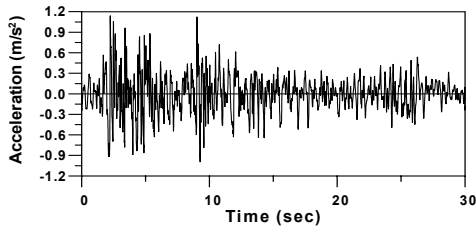
Mode	Period	Mass(%)	Sum(%)
1	4.00	63.21	63.21
2	0.73	20.85	84.06
3	0.30	7.02	91.08
4	0.18	3.29	94.36
5	0.13	1.75	96.11

3. 지진하중

본 논문에서는 KBC2009 설계기준에 근거한 설계응답스펙트럼을 사용하였고 이를 바탕으로 인공지진하중을 작성하여 수치해석을 수행하였다. 설계응답스펙트럼을 작성할 때 지역계수는 0.22, 지반종류는 S_A 를 사용하였다. 이때 S_{D8} 는 0.2933, S_{D1} 은 0.1173, T_0 는 0.08초 T_S 는 0.4초로 각각 계산되었다. 이렇게 생성한 인공지진하중의 가속도응답스펙트럼을 설계응답스펙트럼과 함께 [Fig. 2]에 나타내었고 인공지진하중의 시간이력 그래프를 [Fig. 3]에 나타내었다.



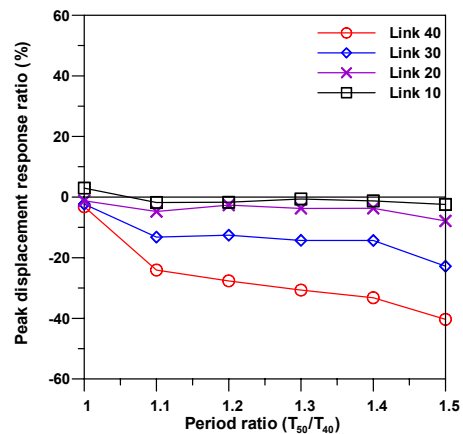
[Fig. 2] Response spectrum of artificial earthquake



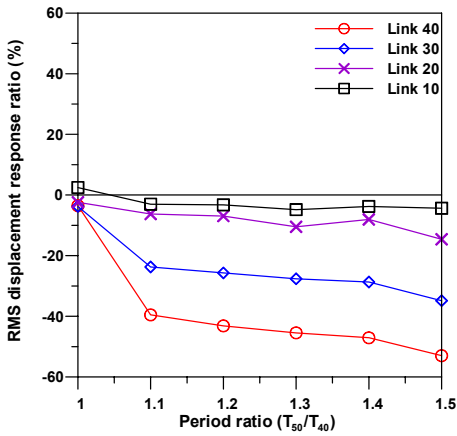
[Fig. 3] Acceleration time history of artificial earthquake

4. 시간이력해석 결과분석

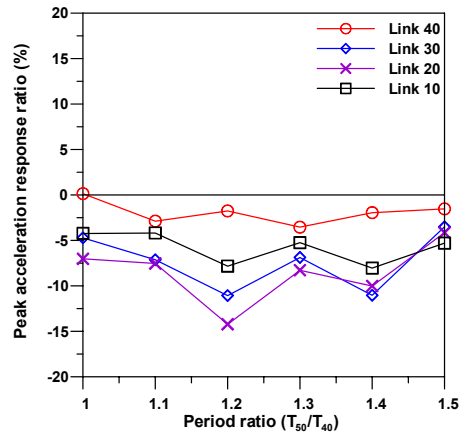
인공지진하중을 예제 구조물의 스카이버릿지가 설치된 방향으로 가하여 시간이력해석을 수행하였다. 지진하중이 가해지는 시간은 [Fig. 3]에 나타난 바와 같이 30초이지만 지반운동이 멈춘 이후에도 구조물의 동적응답이 발생하므로 전체 해석시간은 50초로 하였다. 시간이력해석을 수행한 결과를 바탕으로 50층 구조물의 최상층 변위, 속도, 가속도응답뿐만 아니라 1층 기둥의 휨모멘트 응답을 비교하여 [Fig. 4] ~ [Fig. 10]에 나타내었다. 그래프의 X축은 50층과 40층 구조물의 1차 모드 고유진동주기비를 나타내며, 그래프의 Y축은 변위, 속도, 가속도 최대 응답과 RMS 응답을 나타낸다. 이때 스카이버릿지에 의한 진동제어성능을 보다 효과적으로 파악하기 위하여 그래프의 Y축은 스카이버릿지가 연결되었을 경우의 응답을 스카이버릿지가 없을 때의 응답을 기준으로 정규화하여 나타내었다. 즉, 정규화된 값이 0보다 작으면 스카이버릿지가 설치된 구조물의 응답이 더 작은 것을 의미하고 0보다 크면 스카이버릿지로 연결된 구조물의 응답이 더 큰 것을 의미한다. 따라서, 그래프의 응답비가 음수가 될 경우에는 스카이버릿지에 의해서 진동제어성능이 향상된 것으로 판단할 수 있다. 본 논문에서는 구조해석 상용프로그램으로 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 MIDAS/GEN을 이용하였으며 스카이버릿지와 구조물 사이의 연결시스템을 이루고 있는 LRB와 점성감쇠기의 비선형성을 고려하기 위하여 경계비선형 시간이력해석을 수행하였다.



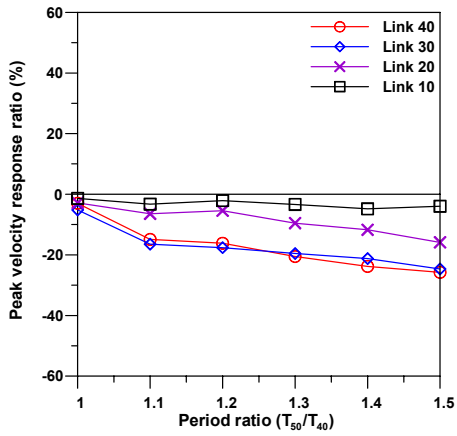
[Fig. 4] Peak displacement of 50-story building



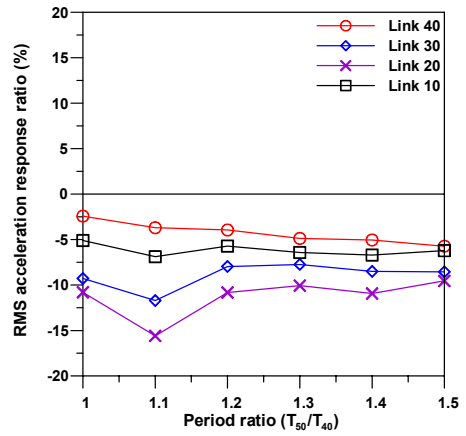
[Fig. 5] RMS displacement of 50-story building



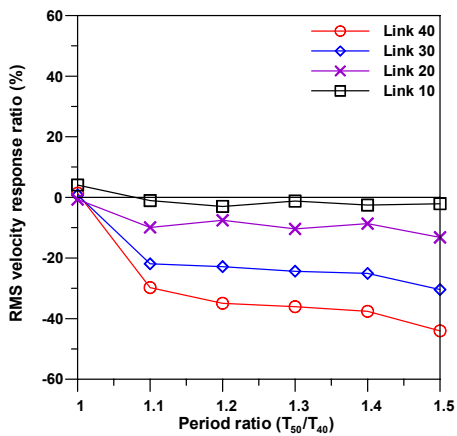
[Fig. 8] Peak acceleration of 50-story building



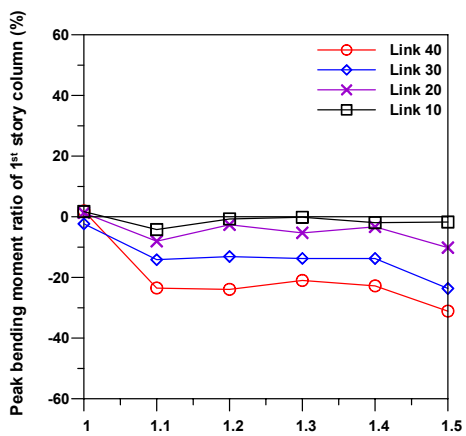
[Fig. 6] Peak velocity of 50-story building



[Fig. 9] RMS acceleration of 50-story building



[Fig. 7] RMS velocity of 50-story building



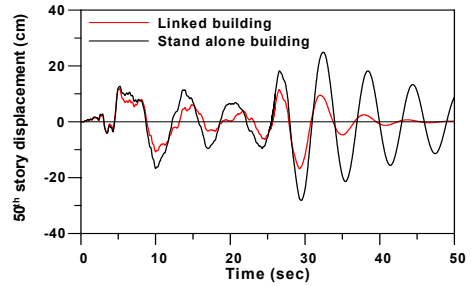
[Fig. 10] Peak bending moment of 1st story column of 50-story building

연결된 두 구조물의 고유진동주기와 모드형상이 정확하게 일치할 때에는 이론적으로 두 구조물의 응답은 동일하게 된다. 본 논문에서는 연결된 두 건물의 고유진동주기가 일치하지만 층수가 달라서 고유진동모드형상이 달라진다. 그러나 두 건물의 고유진동주기가 동일한 상태에서 연결된 구조물의 높이차(고유모드형상차)에 의한 응답의 차이는 별로 크지 않기 때문에 변위 및 속도응답의 경우에는 진동제어효과가 거의 나타나지 않지만 가속도 응답의 경우에는 어느 정도 효과가 나타나는 것을 수치해석결과 확인하였다. 즉, 구조물의 진동주기가 동일하고 높이 차이에 의한 고유모드형상의 차이만 있는 경우에는 스카이버릿지가 연결된 구조물의 변위 및 속도응답에는 영향을 미치지 못하지만 가속도 응답에는 어느 정도 영향을 미치는 것으로 판단이 된다.

[Fig. 4] ~ [Fig. 7]에 나타난 변위 및 속도 응답 그래프를 보면 50층 구조물의 1차 모드 고유진동주기가 40층 구조물 고유진동주기의 1.5배인 경우에 가장 우수한 진동제어성능을 나타내는 것을 볼 수 있다. 즉, 변위응답과 속도응답을 전체적으로 볼 때 스카이버릿지로 연결된 두 구조물의 고유진동주기 차이가 클수록 진동제어효과가 더 커지는 것을 확인할 수 있는데 이러한 경향은 최대치 응답보다 RMS 응답에서 더 크게 나타났다. 이에 비하여 [Fig. 8]에 나타난 최대 가속도 응답의 경우에는 두 구조물의 고유진동주기비가 1.5인 경우에 진동제어성능이 저감되고 1.2 근처에서 최적의 값을 나타냈다. RMS 가속도 응답의 경우에 20층 및 30층에 스카이버릿지가 설치된 모델에서는 고유진동주기비가 1.1일 때 가장 진동제어성능이 우수했고 고유진동주기비가 커질수록 제어성능이 조금씩 저감되는 것을 볼 수 있다. 나머지 모델에서는 고유진동주기비가 증가할수록 제어성능이 조금씩 향상되었다. 본 연구에서는 스카이버릿지의 연결위치 및 두 구조물의 진동주기비에 의해서 50층 구조물의 동적특성이 변화하게 되는데 이러한 구조물의 동적특성이 변함에 따라 나타나게 되는 변위, 속도응답의 경향과 가속도응답의 경향은 구조물의 일반적인 응답스펙트럼에서 볼 수 있는 것처럼 서로 경향이 다르게 나타나는 것으로 판단된다. [Fig. 10]에 나타난 50층 건물의 1층 기둥 휨모멘트응답을 보면 두 건물의 고유진동주기비가 클수록 그리고 스카이버릿지가 고층에 위치할수록 더 우수한 진동제어효과를 나타내는 것을 알 수 있다.

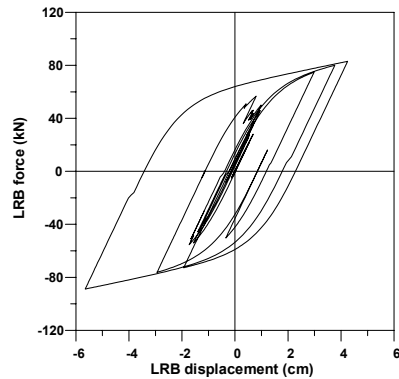
40층에 스카이버릿지가 연결된 두 구조물의 고유진동주기비가 1.5인 경우에 50층 건물의 최상층 변위시간이력을 연결되지 않은 구조물과 함께 [Fig. 11]에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 스카이버릿지가 연결된 구조물의 응답이 연결되지 않은 구조물의 응답에 비하여

대폭 줄어드는 것을 알 수 있다.



[Fig. 11] 50th story displacement time history (Link 40, $T_{50}/T_{40}=1.5$)

지진하중이 가해졌을 때 스카이버릿지 연결시스템인 LRB에서 발생하는 힘-변위 관계곡선을 [Fig. 12]에 나타내었다. 그림에서 힘-변위 이력곡선 안쪽의 면적이 넓을수록 LRB에서 소산되는 에너지의 양이 많은 것을 의미한다. 본 연구에서 사용한 LRB가 인공지진하중에 대하여 설계의도대로 적절하게 거동함으로써 스카이버릿지로 연결되는 구조물로 전달되는 지반운동에너지를 흡수할 수 있는 것을 확인하였다.



[Fig. 12] Displacement-force relationship of LRB (Link 40, $T_{50}/T_{40}=1.5$)

5. 결론

본 논문에서는 스카이버릿지로 연결되는 두 구조물의 고유진동주기의 차이와 스카이버릿지 설치위치가 진동제어성능에 미치는 영향에 대해서 분석하여 보았고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 스카이버릿지로 연결되는 구조물의 고유진동주기가

- 동일한 경우에는 스카й브리지에 의한 변위 및 속도 응답의 진동제어 효과를 기대하기 어렵다. 그러나 연결된 구조물의 고유주기가 동일하더라도 두 구조물의 높이가 달라서 고유진동모드형상이 다를 경우에는 가속도 응답에 대한 진동제어 효과가 어느 정도 나타났다.
2. 스카й브리지로 연결된 구조물의 변위응답과 속도응답의 경우에는 두 구조물의 고유진동주기 차이가 클수록 진동제어성능이 일반적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 가속도 응답의 경우에는 전반적으로 이와는 반대되는 경향을 나타내었다.
 3. 가속도응답을 제외한 대부분의 응답에 있어서 스카й브리지가 설치되는 위치가 높을수록 진동제어성능이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 고층건물의 고유진동모드형상이 캔틸레버와 비슷하므로 층수가 높을수록 두 건물 사이의 상대변위가 커져서 LRB 및 감쇠기에서 소산되는 에너지가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.
 4. 본 연구를 통해서 나타난 스카й브리지의 설치 위치 및 고유진동주기비에 따른 연결된 구조물의 진동제어 성능 검토결과는 본 논문에서 선택한 예제구조물 및 인공지진하중의 특성과의 관련이 깊기 때문에 보다 일반화된 결론을 도출하기 위해서는 더 많은 예제구조물 및 보다 다양한 주기 성분을 가진 지진하중을 사용한 충분한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

김 현 수(Hyun-Su Kim)

[정회원]



- 1995년 2월 : 성균관대학교 건축공학과 (공학사)
- 1998년 2월 : 성균관대학교 건축공학과 (공학석사)
- 2002년 8월 : 성균관대학교 건축공학과 (공학박사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 건축학부 조교수

<관심분야>
구조해석, 진동제어

References

- [1] H.S. Kim, A.R. Yang, D.G. Lee, S.K. An, J.K. Oh "Performance Evaluation of Vibration Control of High-rise Buildings Connected by Sky- Bridge", *Journal of the Korean Association for Spacial Structures*, Vol. 8, No. 4, pp.91-100, 2008.
- [2] H.S. Kim, D.G. Lee, A.R. Yang, H. Ko "Efficient Dynamic Analysis of High-rise Buildings Having Belt Walls Connected by a Sky-Bridge", *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 22, No. 3, pp. 231-242, 2009.
- [3] H.S. Kim, Y.G. Park, H. Ko, E.H. Lee, D.G. Lee "Performance Evaluation of Vibration Control According to Installation Location of a Sky-bridge", *Journal of the Korean Association for Spacial Structures*, Vol. 10, No. 3, pp.65-74, 2010.
- [4] T.T. Soong, G.F. Dargush, *Passive Energy Dissipation Systems In Structural Engineering*, John Wiley & Sons, 1997.