

이차원 지진성분을 고려한 교량시스템의 지진거동분석

Dynamic Behavior Analyses of Bridges under Seismic Excitations in 2-Dimensional Directions

김상효* 마호성** 원정훈*** 정성진****
Kim, Sang-Hyo Mha, Ho-Seong Won, Jeong-hun Chung, Sung-Jin

ABSTRACT

Dynamic response behaviors of a bridge are examined under seismic excitations in the 2-dimensional directions are examined. A three-dimensional mechanical model is utilized and the corresponding equations of motions are derived to consider the two directional bridge motions due to the randomness residing in the excitation directions. The arbitrary 2-dimensional directions are simulated by applying two independent excitations in the two directions: main direction(longitudinal); the additive direction normal to the main (transverse). The rotational superstructure motions due to the spacial motions of the bridge are considered by admitting the deformation of the bearings at supports.

The relative displacement to the ground motions and the relative distance between adjacent oscillators are found to be increased by a considerable amount in the case when considering arbitrary directional seismic excitations. It is also found that the pier motions show more complicated behaviors due to the arbitrary seismic directions.

1. 서론

지진하중에 의한 교량시스템의 영향을 분석하는데 있어서, 일반적으로 해석의 편의를 위해 한 방향으로만 일정하게 작용하는 지진하중에 대하여 교량시스템의 거동특성을 널리 연구하여 왔다. 그러나 실제 교량시스템이 경험하는 지진하중은 지진파의 구성요소인 방향성, 진폭, 주파수크기와 지속시간 등이 다양하게 복합되어 나타난다^[1]. 그 중에서 지진하중의 방향은 한 방향으로만 일정하게 교량시스템에 작용하는 것이 아니고 시간에 따라 임의방향으로 변하면서 작용하게 된다. 이러한 지진하중에 의하여 교량시스템에는 교축방향의 지진하중만이 작용한 경우와는 다른

* 연세대학교 사회환경·건축공학부 교수, 정회원
** 호서대학교 건축토목학부 토목전공 교수, 정회원
*** 연세대학교 토목공학과 박사과정, 학생회원
**** 연세대학교 산업기술연구소 연구원, 학생회원

거동 및 그에 따른 손상이 발생될 수 있다. 이러한 거동 및 손상으로서는 상부구조의 회전으로 인한 인접한 상부구조간의 충돌, 상부구조와 외측거더 받침의 분리, 상부구조와 받침의 분리에 따른 하중집중현상과 상부구조간의 충돌로 인한 받침의 변형 및 손상 등이 있다. 교축방향의 지진하중만을 고려하는 경우에도 인접한 상부구조간의 충돌의 영향을 해석할 수 있으나, 교축직각방향의 지진하중에 의한 받침의 변형 및 손상의 영향과 이로 인한 인접한 상부구조간의 회전에 의한 충돌의 영향을 고려하지 못할 수도 있다. 그러므로, 지진하중의 임의방향성에 대한 영향분석과 이를 위한 해석기법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 유효기간동안 임의방향으로 작용하는 지진하중의 영향을 분석하기 위하여 임의방향 지진하중에 의한 상부구조의 회전, 인접 진동계간의 충돌, 그리고 교대와 기초의 운동 등의 영향을 고려할 수 있는 이상화된 다자유도 해석모형을 제안하였으며, 이를 바탕으로 다양한 최대지반가속도를 갖는 임의방향 지진하중에 의한 전체적인 교량시스템의 거동특성을 분석하였다. 단, 가동단의 손상과 충돌에 의한 상부구조 단부에서의 국부적인 손상은 고려하지 않았다.

2. 교량시스템의 모형화

본 연구에서는 인접 진동계간의 충돌, 교대의 운동, 그리고 상부구조의 회전 등이 전체적인 교량시스템의 지진거동특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 그림 1과 같은 지간장 30m 인 단순지 지된 다경간 PSC Beam교를 대상교량으로 선정하였다. 교각형식은 T-type의 철근콘크리트 원형교각으로 교각높이는 동일하게 12m를 적용하였으며, 교각의 기초형식은 비교적 지반조건이 양호한 경우에 사용되는 직접기초를 가정하였다. 교대형식은 확대기초 위에 놓여있는 seat-type으로 교

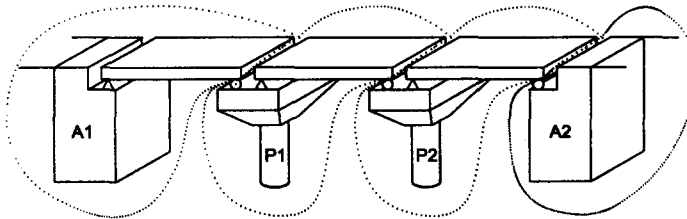


그림 1. 단순화한 대상 교량시스템

대높이는 6.5m이며, 받침의 형식은 fixed sliding bearing으로 가정하였다. 또한, 대상교량을 2개의 교대진동계(A1, A2)와 2개의 교각진동계(P1, P2)로 구분하였다(그림 1).

전체적인 교량시스템은 그림 2와 같이 이상화될 수 있다.

3. 구조요소의 모형화

3.1 받침

본 연구에서는 4개의 anchor bolt를 가지는 Fixed Sliding Bearing을 적용하였으며, 받침을 다음의 그림 3과 같이 모형화하였다. 여기서, m_i 는 상부구조의 질량, m_{i-3}, m_{i+1} 은 각각 고정단과 가동단 받침이 설치된 코핑부의 질량, u_i, u_i^T 는 각각 상부구조의 교축방향변위와 교축직각방향변위, $u_{i-3}, u_{i+1}, u_{i-3}^T, u_{i+1}^T$ 은 각각 코핑부의 교축방향변위와 교축직각방향 변위를 나타내며, u_i^R 은 상부구조의 회전변위를 나타낸다. $K_{i-3,i}$ 은 고정단 받침의 교축방향 병진강성,

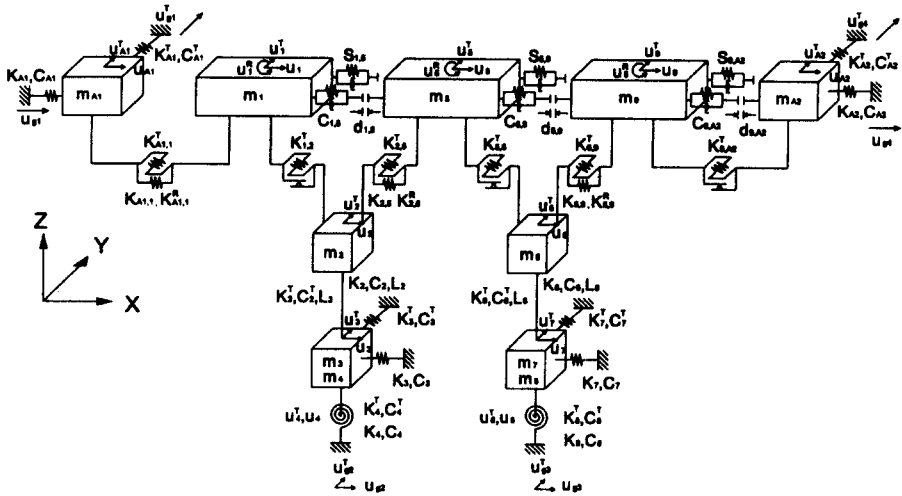


그림 2. 이상화된 교량해석모형

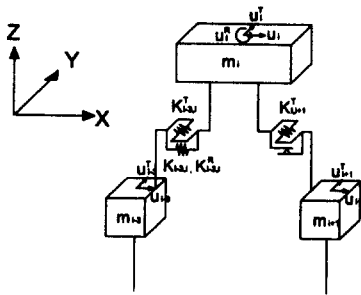


그림 3. 받침의 모형화

$K_{i-3,i}^T$, $K_{i,i+1}^T$ 은 받침의 교축직각방향 병진강성, $K_{i-3,i}^R$ 은 고정단 받침의 회전강성을 나타낸다. 받침의 강성을 구함에 있어서 받침의 변형에 의한 영향을 고려하여 교축방향의 병진강성, 회전강성, 교축직각방향의 병진강성을 구하였다^[2].

3.2 인접 진동계간의 충돌

인접 진동계간에는 교축직각방향으로의 상대변위차이로 발생하는 회전운동의 영향과 교축방향으로 발생하는 상대변위의 영향으로 인해 상부구조사이의 opening 및 충돌이 발생되며(그림 4), 이러한 현상은 상부구조의 손상을 초래한다^[3]. 본 연구에서는 인접진동계간의 충돌현상을 그림 5와 같은 충돌요소를 이용하여 모형화하였다. 여기서, u_i , u_i^T 는 각각 질량 m_i 의 교축 및 교축직각방향의 지반변위에 대한 상대변위, u_{i+4} , u_{i+4}^T 는 각각 질량 m_{i+4} 의 교축 및 교축직각방향의 지반변위에 대한 상대변위, w 는 교량시스템 상부구조의 폭, u_i^R , u_{i+4}^R 는 각각 질량 m_i , m_{i+4} 의 교축직각방향 변위에 의한 회전량을 나타낸다. 그림에서 스프링($S_{i,i+4}$)과 감쇠장치($C_{i,i+4}$)를 상부구조의 양끝 모서리 두 곳에 적용하였으며, 이는 상부구조의 회전이 발생하게 되면 상부구조의 한쪽 모서리부분에서 충돌이 발생하게 되므로 이를 고려하기 위해서이다. 충돌현상은 인접한 두 진동계사이의 상대거리가 여유공간 $d_{i,i+4}$ 를 초과하는 경우에 발생하게 되므로, 충돌의 발생조건은 다음의 식 (1)과 같다.

$$\delta_i = u_i + \frac{w}{2} u_i^R - u_{i+4} - \frac{w}{2} u_{i+4}^R + u_{g(i)} - u_{g(i+1)} + (u_{g_i}^T - u_{g(i+1)}^T) - (u_{g(i+1)}^T - u_{g(i+2)}^T) - d_{i,i+4} \geq 0 \quad (1)$$

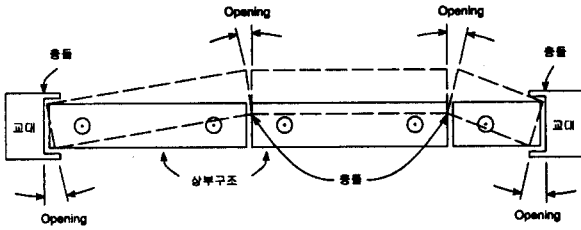


그림 4. 각 진동계의 위상차에 의한 상부구조의 회전

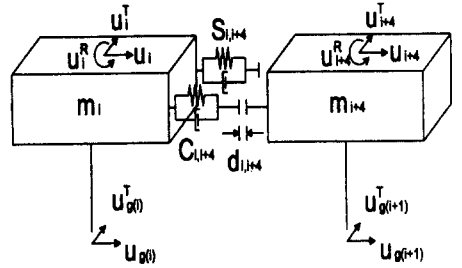


그림 5. 충돌요소

3.3 2차원적 지진하중

본 연구에서는 SIMQKE 프로그램^[4]을 사용하여 현행 도로교표준시방서의 설계응답 스펙트럼에 일치하는 2개의 독립된 인공지진이력을 이방향(종방향, 횡방향)으로 동시에 가해주었다. 이방향 지진이력은 최대지반가속도를 가지는 좌표축방향을 주축성분이라고 정의하고, 그에 대한 직교좌표축 방향의 성분을 직교축성분이라고 정의하였다. 독립되게 적용한 지진파는 결과적으로 임의의 시간에 두 지진파의 합력이 교랑에 가해지게 되며 각 지진파의 크기에 포함된 랜덤성에 의해 그 작용방향은 지진유효기간동안 임의로 바뀌게 되어 2차원적 지진파의 특성을 적절히 묘사하게 된다. 자료조사^{[5][6][7]}를 통하여 최대지반가속도를 가지는 좌표축방향 성분과 그에 대한 직교좌표축 방향의 성분의 상관관계를 분석하였으며, 이들의 상관관계를 선형회귀식과 함께 그림 6에 나타내었다. 표 1에는 본 연구에서 대표적인 조합조건으로 선정된 최대지반가속도 조합들이 정리되어 있으며 이들 조합들은 그림 6에 삼각형으로 표시되어있다. 그림 6에서 알 수 있듯이 대표적인 조합들은 선형회귀식(점선)과 상한선(실선)사이에 위치하도록 선정되었다.

표 1. 지반가속도의 크기별 분포형태

최대지반가속도 (주축성분)	최대지반가속도 (직교축성분)
0.1g	0.1g
0.2g	0.2g
0.3g	0.25g
0.4g	0.3g
0.5g	0.4g
0.6g	0.5g

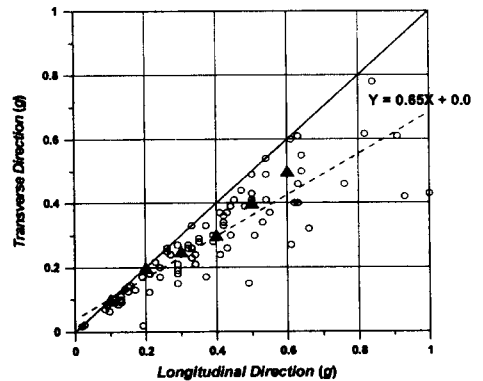


그림 6. 지진파의 발생분포도

3.4 기초와 교대의 운동

본 연구에서는 그림 7과 같이 직접기초를 수평과 회전방향으로 감쇠와 강성을 가지는 선형-탄성스프링으로 모형화하였으며, 수평 및 회전방향의 강성은 현행 도로교표준시방서에 제시된 식을

이용하여 구하였다^[8]. 또한, 교대와 지반의 상호작용으로 인한 교대의 비선형거동을 반영하기 위해 그림 8과 같이 교대진동계를 선형감쇠와 비선형스프링으로 모형화하였으며, 비선형스프링의 강성은 양질의 모래에서 직접기초 위에 놓여 있는 교대의 강성을 구하기 위해 제안된 식을 이용하여 구하였다^[9].

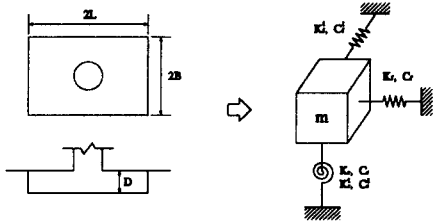


그림 7. 직접기초의 모형화

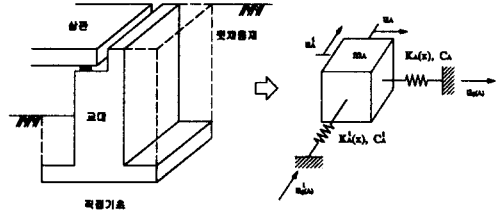


그림 8. 교대의 모형화

4. 결과분석

본 장에서는 위에서 언급한 개발된 해석모형을 이용하여 지반 및 인접진동계에 대한 상대거리를 분석함으로써 지진하중의 이차원적 방향성에 의한 교량의 거동 특성에 대하여 분석하였다. 인접 진동계간의 여유공간은 5cm로 가정하였으며, 충돌요소의 강성과 감쇠는 기존의 민감도 분석을 통하여 결정된 값을 이용하였다^[10].

4.1 지반에 대한 상대거동 분석

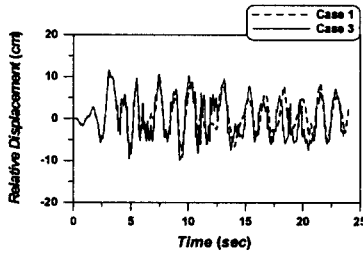
본 절에서는 이차원적 지진하중으로 인한 상부구조의 지반에 대한 상대변위 특성과 교각 상부의 지반에 대한 상대변위 특성을 분석하였다. 각 최대지반가속도의 조합 별로 상부구조의 지반에 대한 최대상대변위의 평균값을 표 2에 나타내었다. 표에서 case 1은 일방향 지진하중이 작용할 경우의 교축방향의 상대변위를, case 2는 이방향 지진하중이 작용할 경우의 교축방향만의 상대변위를, case 3은 이방향 지진하중이 작용할 경우의 임의방향으로의 상대변위를 나타낸다. 표로부터 임의방향의 지진하중을 고려한 경우 교축방향 상대변위의 최대값이 변화됨을 볼 수 있으나 변위의 차이가 크게 나타나지 않음을 알 수 있으나, 교축과 교축직각방향의 벡터합으로 구한 임의방향으로의 상대변위는 다소 증가됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 일방향 지진하중에 의한 상대변위와 임의방향 지진하중으로 인한 임의방향 상대변위의 시간이력을 나타낸 그림 9로부터도 확인할 수 있다.

인접진동계의 교각 사이에서 발생하는 교축직각방향 상대거리에 의해 야기된 상부구조 회전각의 시간이력을 그림 10에 나타내었다. 상부구조의 회전은 교축방향 상대변위에 영향을 미치고 있는 것으로 판단되며, 최대지반가속도가 증가함에 따라서 회전각도 증가되는 것을 알 수 있다. 임의방향의 지진하중에 의해 영향을 받는 교각상부의 교축 및 교축직각방향의 지반에 대한 상대변위를 나타낸 평면도를 그림 11에 나타내었다. 임의방향으로 지진하중이 작용하게 되면, 교축과 교축직각방향으로의 상대변위가 동시에 발생하므로, 시간이력에서도 알 수 있듯이 불규칙한 시간이력을 나타낸다.

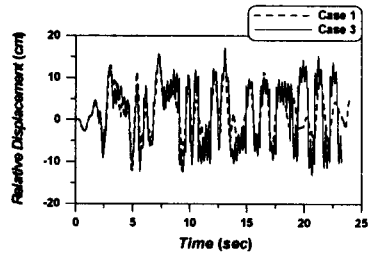
표 2. 각 진동계의 교축방향 최대상대변위

(단위: cm)

최대지반가속도(g)		A1 진동계			P1 진동계			P2 진동계			A2 진동계		
교축 방향	교축직각 방향	case 1	case 2	case 3	case 1	case 2	case 3	case 1	case 2	case 3	case 1	case 2	case 3
0.1	0.1	3.51	3.52	4.05	6.10	6.06	6.30	6.67	6.73	6.86	2.16	2.18	3.09
0.2	0.2	5.57	5.47	5.67	10.51	10.61	11.25	8.87	9.05	9.72	3.31	3.25	3.78
0.3	0.25	7.24	7.22	8.01	13.24	12.99	13.64	10.99	10.99	11.51	4.64	4.73	6.01
0.4	0.3	9.64	9.75	11.15	13.75	13.86	14.45	12.33	12.35	13.02	5.29	5.75	8.44
0.5	0.4	11.37	11.34	12.76	15.94	16.17	17.04	13.55	13.93	14.78	6.58	6.83	9.87
0.6	0.5	14.24	14.06	15.06	17.98	17.81	18.43	14.34	14.40	15.81	7.49	7.63	11.59

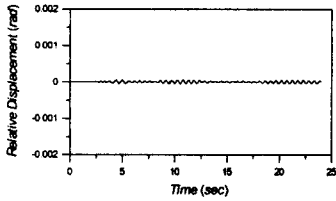


(a) 최대지반가속도 0.3g

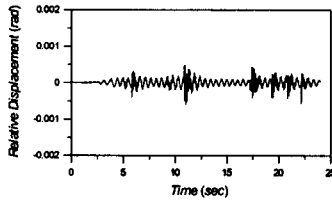


(b) 최대지반가속도 0.5g

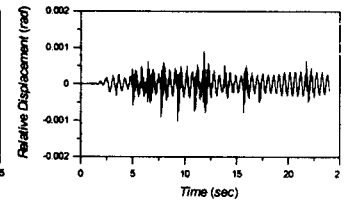
그림 9. 일방향 지진하중과 임의방향 지진하중에 의한 지반에 대한 상대변위의 시간이력(P1 진동계)



(a) 최대지반가속도 0.1g

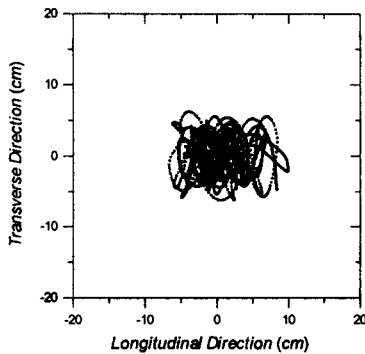


(b) 최대지반가속도 0.3g

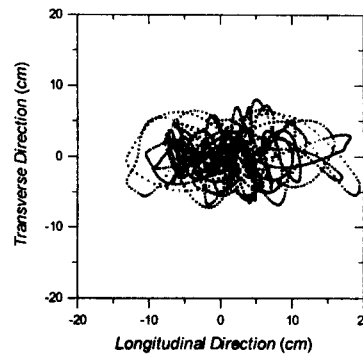


(c) 최대지반가속도 0.5g

그림 10. 임의방향 지진하중에 의한 상부구조 회전각의 시간이력 (P1 진동계)



(a) 주축 0.3g, 직교축 0.2g



(b) 주축 0.5g, 직교축 0.4g

그림 11. 교각상부의 지반에 대한 상대변위를 나타낸 평면도 (P1 진동계)

4.2 진동계간의 상대거리 분석

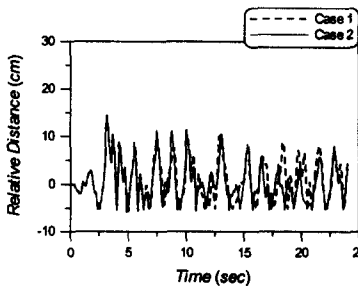
본 절에서는 이차원적 지진하중을 받는 교량시스템에서 인접진동계사이의 상대거리 변화특성을 살펴보았다. 표 3에 교축방향만을 고려한 경우의 인접진동계간 최대상대거리(case 1)와 임의방향의 지진하중을 고려한 경우의 교축방향의 상부구조의 최대상대거리(case 2)를 정리하였다. 표에서 u 는 상부구조 가운데 부분에서의 최대상대거리이며, u_l, u_r 은 상부구조 모서리부분에서의 최대상대거리이다. 표로부터 임의방향의 지진하중을 고려한 경우 인접진동계간의 최대상대거리는 증가됨을 알 수 있다. 특히 상부구조간 모서리부분의 최대상대거리는 교축방향의 상대거리만 고려한 경우보다 증가된 것을 알 수 있는데, 이로부터 모서리부분에서의 받침이 탈락할 가능성이 증가되고 낙교의 위험이 커진다고 예측할 수 있다.

인접 상부구조사이의 교축방향 상대거리의 시간이력을 그림 12에 나타내었다. 최대지반가속도 0.3g인 경우에는 교축방향만이 작용한 경우와 교축직각방향이 함께 작용한 경우가 비슷한 상대거리 이력곡선을 나타내고 있으나(그림 12(a)), 최대지반가속도 0.5g가 작용하는 경우에는 교축방향만이 작용한 경우와 교축직각방향이 함께 작용한 경우의 응답의 형태가 다소 차이를 나타낼 수 있다(그림 12(b)).

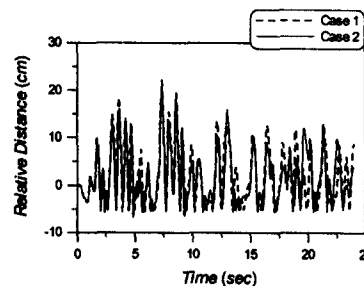
표 3. 인접진동계간의 최대상대거리

(단위: cm)

최대지반가속도(g)		A1 ~ P1 진동계		P1 ~ P2 진동계		P2 ~ A2 진동계	
교축방향	교축직각 방향	case 1	case 2	case 1	case 2	case 1	case 2
0.1	0.1	u	7.72	4.35	4.41	7.29	7.38
		u_l, u_r			4.48		7.40
0.2	0.2	u	13.37	7.14	7.45	9.70	9.72
		u_l, u_r			7.69		9.82
0.3	0.25	u	17.11	8.77	9.05	11.75	12.14
		u_l, u_r			9.49		12.36
0.4	0.3	u	20.01	10.66	11.89	13.38	13.83
		u_l, u_r			12.32		14.00
0.5	0.4	u	23.71	10.98	12.16	15.13	15.28
		u_l, u_r			12.77		15.57
0.6	0.5	u	27.66	14.11	15.62	17.26	16.70
		u_l, u_r			16.77		16.85



(a) 최대지반가속도 0.3g



(b) 최대지반가속도 0.5g

그림 12. 인접진동계간 상대거리의 시간이력 (A1~P1 진동계)

5. 결 론

본 연구에서는 이차원적 지진하중의 영향을 고려할 때 교량시스템 교축방향거동 및 최대거동에 미치는 영향을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서 개발한 교량해석모형은 이차원적 방향성을 갖고 작용하는 지진하중의 영향을 고려하여 교량시스템의 거동특성을 분석하는데 적절한 것으로 판단된다.
- 2) 이차원의 방향으로 작용한 지진하중에 의한 교량시스템의 응답은 지반에 대한 상대변위를 비교한 경우 일방향 응답거동과 현저한 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다. 또한, 인접진동계 간의 상대거리는 지진하중이 교축방향만을 고려한 경우와 큰 차이가 나지 않는 것으로 판단된다. 하지만, 휨파괴를 지배하는 교각의 지반에 대한 상대변위는 이차원적 응답거동을 고려한 경우가 일방향 응답거동만을 고려한 경우보다 크게 나타나므로 교각의 손상이 중요시되는 경우에는 이차원적 응답거동을 반드시 고려하여야 한다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원 및 1999년도 두뇌한국21 핵심분야사업 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Clough, R. W. and Penzien, J.(1993), "Dynamics of Structures", McGraw- Hill, Inc.
2. Dicleli, M. and Bruneau, M.(1995), "Seismic Performance of Multispan Simply supported Slab-on-girder Steel Highway Bridges", Engineering Structures, Vol.17, No.1, pp.4-11
3. Priestly, M. J. N., Seible, F.,and Calvi, G.M.(1996), "Seismic Design and Retrofit of Bridges", John Wiley & Sons, Inc.,
4. Gasparini, D. A. and Vanmarcke, E. H.(1976), "Evaluation of Seismic Safety of Buildings Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra", Massachusetts Ins. of Technology, Report 2.
5. Soines J.(1974), "Engineering Seismology and Earthquake Engineering", Noordhoff International Publishing
6. 일본토목학회(1995), "토목학회 한신대지진 조사(제2차 보고자료집)"
7. Goltz J. D.(1994), "Northridge, California Earthquake of January 17", 1994 General Reconnaissance Report, Technical Report NCEER-94-0005
8. 건설교통부 (1996), "도로교표준시방서"
9. 김상호, 마호성, 경규혁, 이상우 (2000), "교대인접토체의 특성에 따른 강성저하를 고려한 교량시스템의 지진거동분석", 한국전산구조공학회 봄학술발표논문집, pp. 347~354.
10. 김상호, 마호성, 원정훈 (1999), "거더간 충돌을 고려한 지진하중을 받는 교량의 동적거동분석", 한국전산구조공학회 논문집, 제12권 제 3호, pp.509-518.