

교량시스템의 지진응답특성에 미치는 받침손상의 영향

Effects of Bearing Damage on Bridge Seismic Responses

김상효* 마호성** 이상우*** 조병철****
Kim, Sang-Hyo Mha, Ho-seong Lee, Sang-Woo Cho, Byeong-Cheol

ABSTRACT

Dynamic responses of multi-span simply supported bridges are investigated to examine the effect of damaged bearings under seismic excitations. The damaged bearings are modeled as sliding elements with friction between the super-structure and the pier top. Various values of the friction coefficients for damaged bearings are examined with increasing magnitudes of peak ground accelerations. It is found that the global seismic behaviors are significantly influenced by the occurrence of bearing damage. It should be noticed that the most possible location of unseating failure of superstructures differs with that in the model without consideration of the bearing damage. It can be concluded that the bearing damage may play the major role in the unseating failure of a bridge system, so that the damage of bearings should be included to achieve more rational seismic safety evaluation.

1. 서론

지진은 고도로 발전된 현대사회에서 많은 인명피해와 함께 경제적 손실을 야기한다. 특히 교량 구조물은 그 자체의 손상이나 붕괴 등의 경제적인 문제뿐만 아니라 지진 후 피해지역에 대한 구호품의 수송 및 피해복구를 위한 장비의 운송 등을 위한 교통로의 확보 등 2차적인 측면에서 심각한 문제를 야기할 수 있다. 따라서 향후 발생가능한 지진에 의한 교량구조물의 피해를 최소화 하기 위해서는 실질적인 교량의 지진거동을 예측할 수 있어야 하며, 이를 위해서는 교량시스템의 지진거동에 영향을 미치는 다양한 요소들의 특성을 반영할 수 있는 적절한 해석방법의 개발이 필요하다. 특히 교량시스템의 중요한 부분인 받침은 내진에 대한 충분한 고려가 되어 있지 않으며, 인접진동계간의 충돌로 인해 쉽게 손상될 수 있는 구조를 가지고 있다¹⁾. 따라서 중·약진 지역인 우리나라에서는 지진으로 인한 손상 중 받침부 손상이 대부분을 차지할 것으로 예상된다. 또한 이러한 받침의 손상여부는 교량의 동적거동특성에 많은 영향을 줄 수 있기 때문에 실질적인 지진

* 연세대학교 사회환경·건축공학부, 교수

** 호서대학교 기계건축토목공학부, 전임강사

*** 연세대학교 토목공학과, 박사과정

**** 서영기술단, 사원

거동특성을 예측하기 위해 반드시 고려되어야 할 요소로 사료된다.

본 연구에서는 교량시스템의 지진거동특성에 영향을 미치는 다양한 요소들을 반영할 수 있는 단순화된 다자유도 해석모형에 기초하여 상부구조의 운동뿐만 아니라 교량시스템의 전체적인 지진거동특성에 중요한 요소로 작용될 수 있는 받침부의 손상해석모형을 적용함으로써 전체적인 교량시스템의 지진거동특성을 보다 실질적으로 예측하고, 또한 받침손상이 교량시스템의 지진응답특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 받침 해석모형

본 연구에서는 교량시스템의 지진거동분석을 위해 우리나라에서 건설된 강관형교에서 가장 많이 사용된 포트받침을 대상으로 하였다. 포트받침의 파괴는 여러 가지 형태로 나타날 수 있으며, 그 중 가장 대표적인 파괴형태로는 받침하부의 콘크리트가 파괴되면서 받침의 앵커부 소켓에 많은 변형이 발생하는 경우와 부식 및 노후화된 볼트가 지진으로 인한 강한 수평력을 받아 절단된 경우를 들 수 있다. 이러한 받침의 손상형태에 따른 거동특성을 정확하게 표현하는 것은 상당히 어려운 문제이며, 많은 제약이 따르므로 본 연구에서는 받침손상을 단순화하여 상부구조와 하부구조사이에서 작용하는 마찰력으로 모형화하였다. 또한 포트받침의 손상기준으로 고정포트받침의 경우는 극한수평력인 120tonf를 적용하였으며, 가동포트받침의 경우에는 국부적인 손상으로 인해 손상전과는 다른 마찰력이 작용될 수 있는 허용이동량인 5cm를 적용하였다.

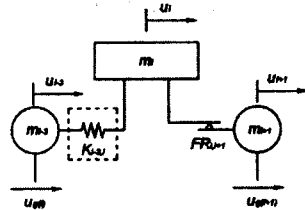


그림 1. 받침손상전의 해석모형

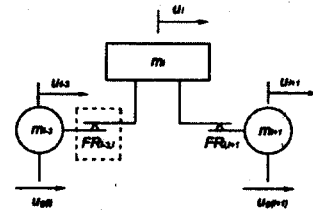


그림 2. 받침손상후의 해석모형

그림 1은 받침손상전의 해석모형을 나타낸 것으로, 고정받침은 무한강성을 갖는 스프링요소로, 가동받침은 상부구조와 하부구조사이의 상대속도에 따라 마찰력이 작용되는 마찰요소로 모형화하였다. 그림 2는 받침손상후의 해석모형을 나타낸 것으로, 고정받침과 가동받침 모두 마찰요소로 모형화하였다. 마찰요소는 두 진동계의 상대속도에 따라 마찰력의 크기와 방향이 결정되는 속도모형²⁾을 사용하였다. 그림 3과 그림 4는 고정받침과 가동받침의 손상 전후의 마찰력과 상대속도의 관계를 나타낸 것으로, 일정한 상대속도 이하에서는 상대속도에 따라 선형적으로 마찰력이 증가하고, 일정한 상대속도 이상에서는 상대속도의 크기와 상관없이 마찰력이 일정하게 작용하는 것으로 모형화하였다. 또한 일정한 상대속도 이하에서는 정지마찰계수를 적용하였으며, 일정한 상대속도 이상에서는 정지마찰계수의 0.75배인 활동마찰계수를 적용하였다.

받침손상후에 손상면에 적용되는 마찰계수는 측정을 하기에는 많은 제약이 따르고, 또한 손상면의 형태도 상당히 다르기 때문에 마찰계수도 상당히 다르게 나타날 수 있다. 기존의 실험자료^{3),4),5)}에 의하면, 강재와 콘크리트의 접촉면에서는 0.4~0.6 정도의 마찰계수를, 콘크리트와 콘크리

트의 경우는 0.7~0.9 정도의 마찰계수를 갖는 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구에서는 받침의 손상정도에 따라 다양한 마찰계수를 적용하여 교량시스템의 지진응답특성을 분석하였다.

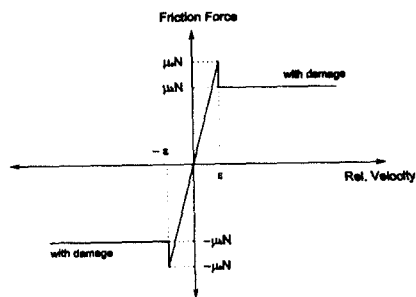


그림 3. 상대속도와 마찰력(고정받침)

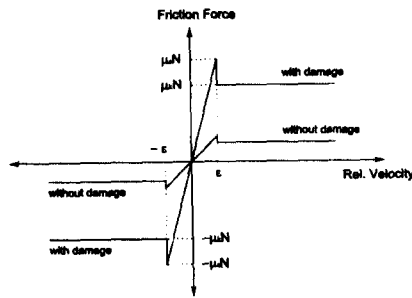


그림 4. 상대속도와 마찰력(가동받침)

3. 대상교량

본 연구에서는 그림 5와 그림 6에 나타난 것과 같이 지간장 35m인 3경간 단순 강판형교를 대상으로 지진해석을 수행하였다. 교각형식은 bent type의 원형교각으로 직경 1.7m, 교각높이는 12m인 교각을 사용하였다. 교각의 기초는 비교적 지반조건이 양호한 경우에 사용되는 직접기초를 사용하였으며, 교대는 확대기초 위에 놓여 있는 높이 6.5m의 압입형태의 교대이다.

그림 5는 받침손상전의 대상 교량시스템의 진동계를 나타낸 것으로, 받침손상이 발생하지 않아 상부구조와 하부구조가 고정받침으로 연결되어 있는 4개의 단일진동계(A1, P1, P2, A2)로 나타냈으며, 그림 6은 받침손상후의 대상 교량시스템의 진동계를 나타낸 것으로, 받침손상이 발생하여 상부구조와 하부구조가 분리된 총 7개의 단일진동계(A1, S1, P1, S2, P2, S3, A2)로 나타내었다.

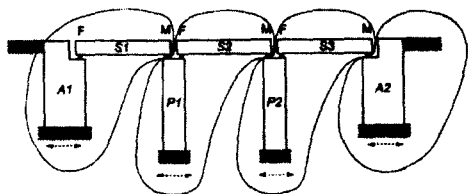


그림 5. 받침 손상전 대상 교량시스템

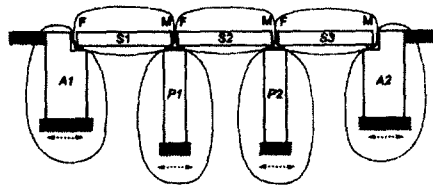


그림 6. 받침 손상후 대상 교량시스템

4. 교량시스템의 단순화된 해석모형

앞에서 기술한 받침의 손상 외에도 교량시스템의 지진응답특성에 영향을 미치는 많은 요소들이 있다. 이런 영향요소로는 인접진동계간의 충돌, 교대 및 교각의 비선형성, 기초의 운동 등이 있다. 본 연구에서 인접진동계간 충돌은 두 진동계사이에 탄성의 스프링과 감쇠 장치를 갖는 충돌 요소를 이용하여 모형화하였다⁹⁾. 또한 철근콘크리트의 교각의 비선형거동을 반영하기 위해 기하학적 비선형인 P- Δ 효과와 재료적 비선형성을 고려할 수 있는 히스테리시스모형을 적용하였다. 교각의 기초는 병진과 회전강성을 갖는 선형-탄성스프링과 감쇠장치를 갖는 것으로 고려하였으며,

교대는 인접토체와의 상호작용으로 인한 강성저하특성을 반영하기 위하여 비선형 스프링과 선형 감쇠를 갖는 요소로 모형화하였다⁷⁾.

그림 7과 그림 8은 받침손상이 발생하지 않은 경우와 받침이 모두 손상된 경우에 있어서 전체적인 교량시스템의 해석모형을 나타낸 것이다. 그림에서 m_1, m_5, m_9 는 상부구조의 질량, m_2, m_6 은 교각의 질량, m_3, m_7 은 기초의 질량, m_4, m_8 은 기초의 회전관성질량, m_{A1}, m_{A2} 는 교대의 질량, K_2, K_6 과 C_2, C_6 은 교각의 강성과 감쇠, K_3, K_7 과 C_3, C_7 은 기초의 병진강성과 감쇠, K_4, K_8 과 C_4, C_8 은 기초의 회전강성과 감쇠, 그리고 K_{A1}, K_{A2} 와 C_{A1}, C_{A2} 는 교대의 비선형감쇠와 선형감쇠를 의미한다. 그리고 $K_{A1,1}, K_{2,5}, K_{6,9}$ 는 각 진동계의 고정받침의 강성, $F_{A1,1}, F_{2,5}, F_{6,9}$ 는 고정받침 손상면에 작용하는 마찰력, $F_{1,2}, F_{5,6}, F_{9,A}$ 는 가동받침에 작용하는 마찰력, $S_{A1,1}, S_{1,5}, S_{5,9}, S_{9,A,2}$ 와 $C_{A1,1}, C_{1,5}, C_{5,9}, C_{9,A}$ 는 충돌요소의 강성과 감쇠, 그리고 $d_{A1,1}, d_{1,5}, d_{5,9}, d_{9,A,2}$ 는 인접진동계간의 여유공간의 크기를 나타낸다. 또한 u_i 는 각 진동계에 존재하는 자유도에서의 지반에 대한 상대변위를 의미한다.

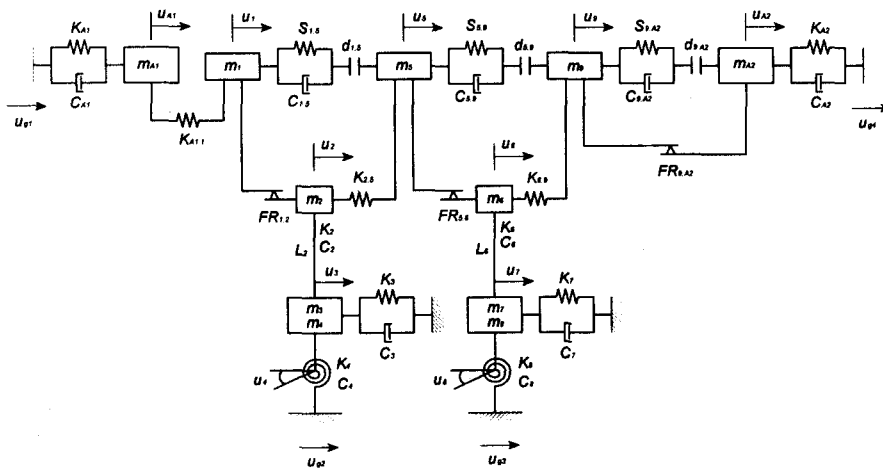


그림 7. 받침손상전의 교량시스템의 단순화된 해석모형

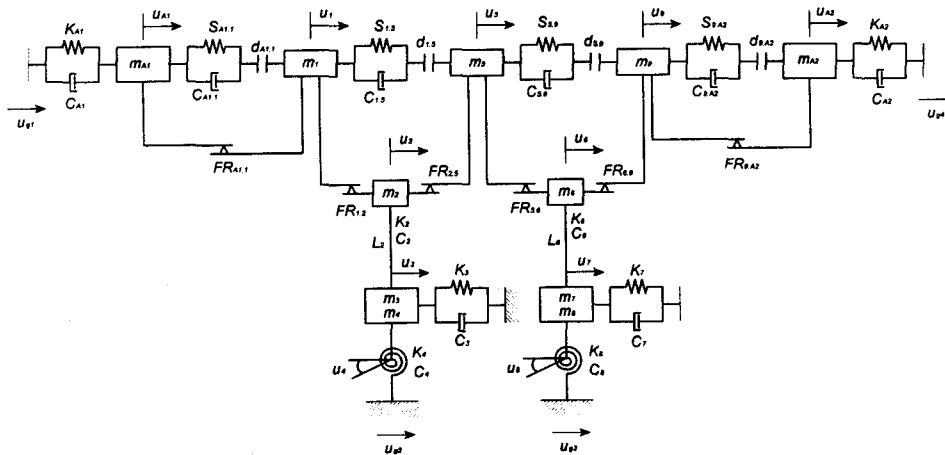


그림 8. 받침손상후의 교량시스템의 단순화된 해석모형

5. 교량시스템의 지진응답특성

본 연구에서는 다양한 영향요소를 고려할 수 있는 단순화된 교량해석모형을 바탕으로 받침손상이 전체적인 교량시스템의 지진응답특성에 미치는 영향을 분석하였다. 입력지진하중으로는 널리 사용되고 있는 SIMQKE 프로그램⁸⁾을 이용하여 현행 도로교표준시방서⁹⁾에서 제시하고 있는 설계 응답스펙트럼에 일치하도록 모의 발생시킨 인공지진이력을 사용하였으며, 인접진동계간 충돌에 대한 여유공간은 5cm를 적용하였다.

일반적으로 고정받침은 가동받침과는 달리 변위를 허용하지 않기 때문에 지진하중으로 인해 발생된 수평력의 대부분이 직접적으로 전달되는 구조요소가 된다. 따라서 가동받침보다는 쉽게 손상을 입을 수 있기 때문에 우선적으로 고정받침의 손상만을 고려하여 교량시스템의 지진응답특성을 분석하였다. 고정받침의 손상만을 고려한 경우에 있어서 고정받침 손상후의 마찰계수는 0.5를, 가동받침의 마찰계수는 0.05를 적용하였다.

표 1은 받침손상을 고려하지 않은 경우에 있어서, 그리고 표 2는 고정받침의 손상만을 고려한 경우에 있어서 각 진동계의 지반에 대한 상대변위와 인접진동계간 상대거리의 평균값과 Gumbel Type-I의 90% 최대값을 나타낸 것이다. 받침의 손상을 고려한 경우, A1 교대진동계는 상부구조의 분리로 인하여 응답이 감소한 것으로 나타났으며, A2 교대진동계는 인접한 상부구조(S3)의 분리로 인한 상부구조(S3)와 교대(A2)사이의 충돌증가로 인해 응답이 증가한 것으로 분석되었다. P1, P2 교각진동계는 받침의 손상으로 인하여 각각의 상부구조가 분리되어 인접한 상부구조간 충돌로 인한 변위억제효과가 감소하여 응답이 증가한 것으로 분석되었다. 전체적인 교량시스템에서의 인접진동계간 상대거리는 받침손상전에 고정단으로 연결되어 있던 A1-S1진동계사이에서 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 가동받침에서의 상대거리 즉, S1-P1, S2-P2, S3-A2진동계사이의 응답을 보면 최대 23.82cm로, 가동받침의 허용이동량인 5cm를 상당히 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 가동받침의 경우도 완전한 파괴에 이르지 않는 한이라도 국부적인 손상의 발생가능성이 충분하므로 이에 따른 손상의 영향을 평가하기 위하여 손상전과는 다른 다양한 마찰계수를 적용하여 교량시스템의 전체적인 응답특성변화를 분석하였다.

표 1. 받침손상을 고려하지 않은 경우의 응답 (단위 : cm)

PGA	지반에 대한 최대상대변위				인접진동계간의 최대상대거리					
	A1	P1	P2	A2	A1-S1	S1-P1	P1-S2	S2-P2	P2-S3	S3-A2
0.1g	0.02 (0.03)	2.87 (3.38)	2.52 (2.98)	0.02 (0.03)	—	3.42 (4.08)	—	0.14 (0.31)	—	2.34 (2.94)
0.2g	0.11 (0.20)	6.83 (7.85)	6.22 (7.50)	0.05 (0.11)	—	7.82 (9.32)	—	4.01 (5.84)	—	6.04 (7.65)
0.3g	0.40 (0.59)	9.76 (12.10)	8.43 (10.56)	0.24 (0.43)	—	11.64 (14.43)	—	5.37 (5.90)	—	8.56 (11.12)
0.4g	1.34 (1.93)	12.20 (15.56)	9.85 (11.82)	0.67 (1.31)	—	14.60 (19.00)	—	5.48 (5.81)	—	10.52 (13.10)
0.5g	3.05 (4.24)	15.03 (18.61)	11.69 (14.43)	1.27 (1.83)	—	18.46 (23.40)	—	6.01 (7.35)	—	12.91 (17.33)
0.6g	4.89 (7.25)	17.06 (21.82)	13.01 (16.75)	2.35 (3.41)	—	21.52 (27.93)	—	6.64 (8.62)	—	15.28 (19.61)

() : Gumbel Type - I의 90% 최대값

표 2. 고정받침의 손상만을 고려한 경우의 응답 (단위 : cm)

PGA	지반에 대한 상대변위				인접진동계간 상대거리					
	A1	P1	P2	A2	A1-S1	S1-P1	P1-S2	S2-P2	P2-S3	S3-A2
0.1g	0.03 (0.03)	2.88 (3.39)	2.52 (2.99)	0.02 (0.03)	0.12 (0.21)	3.41 (4.08)	0.00 (0.00)	0.14 (0.34)	0.00 (0.00)	2.34 (2.94)
0.2g	0.05 (0.05)	6.88 (8.01)	6.39 (7.87)	0.05 (0.11)	1.68 (3.55)	8.29 (9.73)	0.12 (0.27)	2.99 (4.89)	0.14 (0.54)	6.39 (8.19)
0.3g	0.12 (0.26)	10.91 (12.82)	10.24 (13.03)	0.40 (0.70)	4.39 (6.09)	13.62 (16.50)	2.55 (6.67)	5.56 (6.77)	0.94 (1.44)	9.65 (12.65)
0.4g	0.39 (0.67)	14.15 (17.00)	12.83 (15.35)	0.98 (1.99)	5.27 (5.43)	16.59 (21.13)	3.23 (6.48)	5.55 (6.88)	1.38 (2.21)	12.91 (15.91)
0.5g	1.11 (1.74)	15.52 (19.65)	14.37 (16.92)	1.57 (2.52)	9.33 (14.62)	17.15 (21.78)	4.10 (7.17)	6.51 (8.83)	1.77 (3.34)	13.80 (16.94)
0.6g	2.38 (3.25)	17.81 (23.49)	15.21 (18.32)	2.34 (3.57)	17.35 (26.12)	17.49 (23.82)	4.49 (7.53)	7.26 (8.76)	2.71 (4.60)	14.25 (16.13)

() : Gumbel Type - I의 90% 최대값

그림 9는 가동받침의 손상정도에 따라 마찰계수를 0.05에서 0.5까지 적용하여 해석한 교량시스템의 응답을 나타낸 것으로, 교대진동계(A1,A2)와 교각진동계(P1,P2)는 가동받침의 마찰계수가 증가할수록 전체적으로 응답이 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 그리고 인접진동계간의 상대거리인 A1-S1사이의 응답은 가동받침의 마찰계수가 증가함에 따라 상당히 증가하는 것으로 나타났다. 이는 가동받침의 마찰계수가 증가함에 따라 S1-P1진동계사이의 마찰력에 의한 구속력 증가로 인해 S1-P1진동계사이의 상대거동이 상대적으로 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 가동받침의 마찰계수가 증가할수록 상부구조의 낙교는 S1-P1사이에서보다는 A1-S1사이에서 발생할 가능성이 높은 것으로 분석되었다.

이상의 결과로부터 알 수 있듯이 고정받침이나 가동받침의 마찰계수변화에 따라 교량시스템의 전체적인 응답특성이 상당히 다른 경향을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 가동받침의 마찰계수를 0.05~0.5의 범위로, 고정받침의 마찰계수는 0.1~0.9의 범위로 하여 보다 다양한 마찰계수의 적용에 따른 교량시스템의 지진응답특성을 분석하였다. 그림 10과 그림 11은 받침 손상면에 다양한 마찰계수를 적용하여 해석한 교량시스템의 응답(PGA=0.3g, 0.6g)을 나타낸 것으로, 가동받침과 고정받침에 적용되는 마찰계수에 따라 응답에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 그림 10과 그림 11에서 P1진동계와 P2진동계는 받침손상을 고려하지 않은 경우에 대한 받침손상을 고려한 경우의 응답비를 도시한 것으로 최대지반가속도 커질수록 전체적인 응답은 더 광범위한 마찰계수영역에서 영향을 받는 것으로 나타났다. 그리고 인접진동계간 상대거리인 A1-S1은 가동받침의 마찰계수보다는 고정받침의 마찰계수에 더 민감한 것으로 나타났으며, S1-P1은 고정받침 손상면의 마찰계수보다는 가동받침의 마찰계수에 더 민감한 것으로 나타났다. 또한 받침손상을 고려한 경우의 응답이 받침손상을 고려하지 않은 경우에 비해 대체로 큰 것으로 나타났다. 따라서 받침손상을 고려한 경우가 낙교의 발생가능성이 상대적으로 높을 것으로 판단된다.

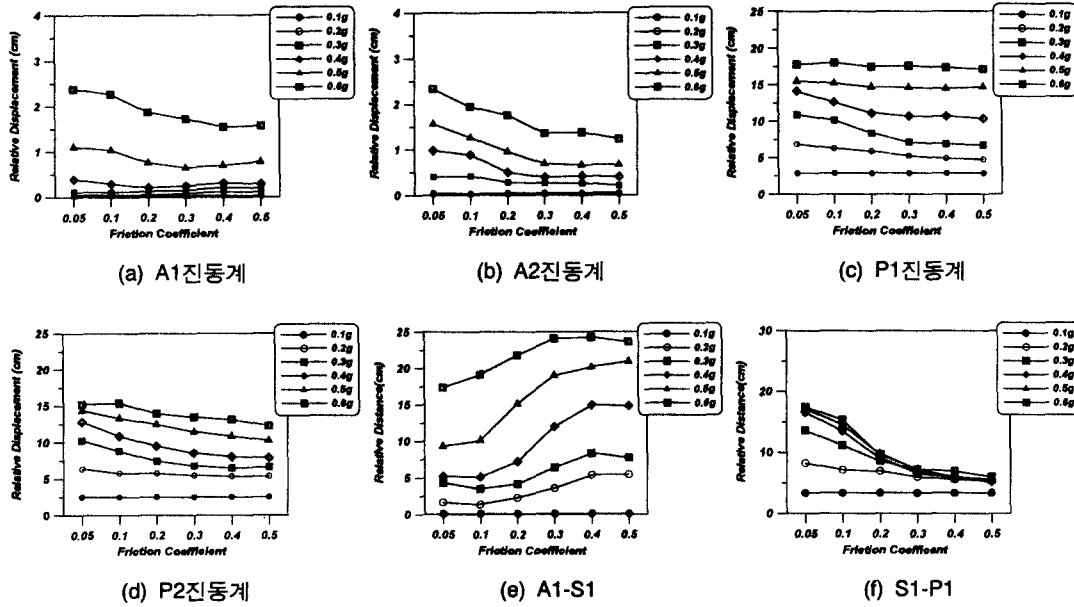


그림 9. 가동받침 손상후의 마찰계수에 따른 응답변화 ($\mu_F=0.5$, $\mu_M=0.05\sim0.5$)

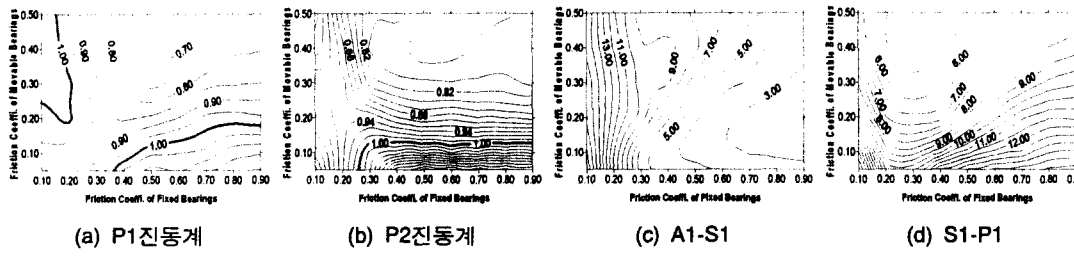


그림 10. 받침손상후의 마찰계수에 따른 응답변화 ($\mu_F=0.1\sim0.9$, $\mu_M=0.05\sim0.5$, $PGA=0.3g$)

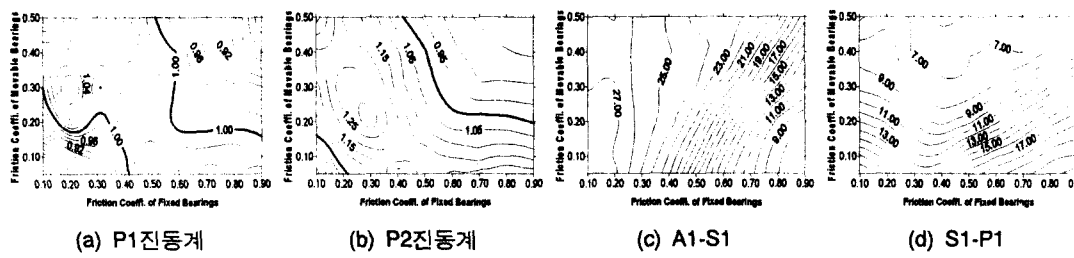


그림 11. 받침손상후의 마찰계수에 따른 응답변화 ($\mu_F=0.1\sim0.9$, $\mu_M=0.05\sim0.5$, $PGA=0.6g$)

6. 결론

본 연구에서는 교량시스템의 지진거동특성에 영향을 미치는 다양한 구성요소들의 상호작용을 비롯하여 받침손상을 고려할 수 있는 다자유도 해석모형을 개발하였으며, 개발된 해석모형을 이용하여 교량시스템의 지진응답특성에 미치는 받침손상의 영향을 분석하였다.

(1) 받침의 손상여부에 따라 전체적인 교량시스템의 응답이 상당히 차이를 보이는 것으로 나타

났다. 고정받침의 손상만을 고려한 경우에는 A1진동계를 제외한 각 진동계의 상대변위는 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 인접진동계간 상대거리는 A1-S1진동계사이 가장 큰 것으로 분석되었다.

- (2) 고정받침의 마찰계수($\mu_F=0.5$)가 일정한 경우, 가동받침의 마찰계수변화($\mu_M=0.05\sim0.5$)에 따른 각 진동계의 상대변위는 대체로 감소하는 경향을 보이며, 인접진동계간 상대거리는 S1-P1진동계사이에서는 감소하는 반면, A1-S1진동계사이의 응답이 상당히 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 낙교의 발생가능성은 받침손상에 고정단으로 연결되어 있던 A1-S1진동계사이에서 가장 높은 것으로 평가되었다.
- (3) 고정받침과 가동받침에 대해 다양한 마찰계수를 적용하여 해석한 결과, 적용된 마찰계수에 따라 응답이 상당히 차이가 있는 것으로 나타났다. 교각진동계의 상대변위는 최대지반가속도가 증가할수록 받침손상에 의한 영향이 큰 것으로 나타났으며, A1-S1진동계사이의 상대거리는 고정받침의 마찰계수변화에 민감하고, S1-P1진동계의 경우는 가동받침의 마찰계수변화에 지배적인 영향을 받는 것으로 분석되었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Dicleli, M., and Bruneau, M.(1995), "An Energy Approach to Sliding of Single-Span Simply Supported Slab-on-Girder Steel Highway Bridges with Damaged Bearings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 24, pp. 395-409.
2. Dimova, S., Meskouris, K., and Kratzig, W. B.(1995), "Numerical Technique for Dynamic Analysis of Structures with Friction Devices", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 24, pp. 881-898.
3. Baltay, P., and Gjelsvik, A.(1990), "Coefficient of Friction for Steel on Concrete at High Normal Stress", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 46-49.
4. Horyna, T., Ventura, C. E., Foschi, R. O., and Fan, B. H.(1998), "Shake Table Studies of Sliding of a Concrete Gravity Dam Model", 11th European Conference on Earthquake Engineering.
5. Rabbat, B. G., and Russell, H. G.(1985), "Friction Coefficient of Steel on Concrete or Grout", Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 3, pp. 505-515.
6. 김상효, 마호성, 원정훈(1999), "거더간 충돌을 고려한 지진하중을 받는 교량의 동적거동분석", 한국전산구조공학회 논문집, 제12권, 제3호, pp. 509-518.
7. 건설교통부(1996), "도로교표준시방서".
8. Siddharthan, R. V., El-Gamal, M., and Maragakis, E. A.(1997), "Stiffness of Abutments on Spread Footings with Cohesionless Backfill", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 34, pp. 686-697.
9. Vanmarcke, E. H., and Gasparini, D. A.(1976), "Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra", M. I. T. Department of Civil Engineering Research Report R76-4, Order No. 527.