내진 분리 베어링이 설치된 교량의 동적 거동

Dynamic behavior of the bridge with seismic isolation bearing

전 귀 현*
Juhn, Gui-Hyun

요 약

국내의 설계지진은 상대적으로 작은규모 이지만 일점고정 연속교에 있어서는 지진시 교축방향의 고정지점에 상부구조의 모든 관성력이 집중됨에따라 그 교각과 기초구조에는 상당히 큰 교축방향 수평력이 작용하게 된다. 기존의 교량의 내진설계 방법에서는 교각의 비탄성거동에 의존하는 수정응답계수를 사용하여 교각의 설계하중을 낮추어 설계에 사용하고 있으나 이는 교각의 비탄성거동으로 인한 손상과 그에 따른 큰 상부구조의 변위를 초래할 가능성이 있다.

본 연구에서는 내진분리베어링이 설치된 교량의 비선형 동적 해석 방법을 제시하고 대표적인 내진분리베어링인 lead-rubber 베어링을 고정받침대신 사용하였을 경우 국내 설계 응답스펙트럼에 상응하는 지반운동하에서 교량의 응답특성을 살펴보았다. 내진분리베어링이 설치된 교량의 비선형 동적해석을 통해 1초이하 주기의 교량에 있어서 lead-rubber 베어링의 사용은 상당한 교축방향의 수평력 감소효과를 가져오며 상부구조의 수평변위도 그리 크지 않음을 보였다. 따라서 교량의 내진설계시 내진분리베어링의 사용으로 경제성과 내진안전성을 동시에 얻을 수 있을 것이다.

Abstract

This study presents the nonlinear dynamic analysis method of the bridge with the seismic isolation bearing. Also the numerical analyses are performed for investigating the response characteristics of the bridge isolated with the lead-rubber bearing under the ground motions compatible to Korea bridge design response spectra. It is found that the pier design force can be considerably smaller than the one for the bridge with the fixed bearing. It is observed that the lead-rubber bearing has the great effectiveness for reducing the longitudinal seismic force in case of the bridges with low and medium periods. Therefore the seismic isolation bearing can be used instead of the fixed bearing for the economic and safe design of the bridge.

* 대영엔지니어링 구조실장, 공학박사, 구조기술사
• 본 논문은 전산구조공학회 논문집에 게재하기 위하여 작성되었습니다.
이 논문에 대한 토론을 1994년 9월 30일까지 본 학회에 보내 주시면 1995년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

교량은 그 특성상 지진에 매우 취약한 구조물로서 지진에 의한 교량의 피해는 교대, 교각, 기초등의 하부구조에 손상이 발생하거나 상부구조가 지지부로부터 이탈하여 전체붕괴가 초래되기도 한다. 특히 일점고정 연속교에 있어서는 교축방향의 지반운동에 의한 상부구조의 관성력이 전부 고정단의 연결부를 통해 교각을 거쳐 기초로 전달됨에 따라 중소규모의 지진시에도 고정단의 하부구조가 교축방향의 하중에 의해 손상을 입게 되며 그 손상이 심할 경우 과도한 수평변위가 발생함으로써 상부구조가 지지부로 부터 이탈 할 수 있다.

교량의 내진설계에 있어서 설계지진이 교량의 정상수명 기간내에 발생할 가능성이 적으므로 설계하중의 산정시 교각의 비탄성 거동에 의존하는 응답 수정계수를 사용함으로써 경제적인 설계를 도모하고 있다.[1] 그러나 이러한 기존의 설계방법은 구조부재의 비탄성 거동에 의존함에 따라 비탄성 변형에 의한 구조부재의 점진적인 파괴와 상당한 수평변위가 발생할 가능성이 있다. 최근에는 새로운 내진설계 방법으로 내진분리베어링을 사용함으로써 설계지진 발생시 수평지진력을 감소시켜 내진안전성과 경제성을 동시에 얻도록 하고 있다. 교량의 경우에 있어서는 기존의 교량받침대신 분리베어링을 사용할 수 있어 그 설치가 매우 간단하다. 교량의 내진 분리베어링에 관한 연구는 활발히 진행되고 있으며 이미 뉴질랜드와 이탈리아 등에서는 널리 사용되고 있다.[2],[3]

대부분의 교량에 있어서 연직방향의 지반운동은 하부구조의 내진응답에 큰 영향을 미치지 않으므로 교량의 내진해석시 무시할 수 있다.[4] 또한 교량의 교축직각 방향으로는 각 하부 구조와 그것이 지지하는 상부구조 부분이 독립된 설계진동 단위를 형성 하므로써 국내의 설계지진규모의 지반운동에 의한 상부구조의 관성력은 그리 크지 않다. 그러나 온도변화, 건조수축, creep 등에 의한 상부구조의 교축방향응력을 최소화 하기위하여 교축방향으로 신축이 자유롭도록 설계되는 일점고정 다경간 연속교의 경우에는 교축방향의 모든 상부구조 관성력이 고정지점의 하부구조에 작용함에 따라 고정단 교각에는 상당히 큰 수평지진력이 발생 하게된다. 이와같은 경우 교축방향의 고정받침대신 내진 분리베어링을 사용하면 상당한 수평 지진력 감소효과를 얻을 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 국내의 설계 응답스펙트럼에 상응하는 지반운동하에서 내진 분리베어링이 설치된 교량의 비선형 동적해석을 통해 내진 분리의 효과와 그 특성을 살펴보고자 한다.

2. 내진 분리의 개념

건물의 경우에는 건물의 기초와 지반사이에 지반분리시스템을 설치함으로써 건물에 작용하는 지진력을 감소시켜 지진으로부터 건물을 보호하게 되며 교량의 경우 내진 분리베어링을 설치함으로써 지진시 상부구조의 관성력을 감소시킴으로써 하부구조를 보호하게 된다.

내진분리의 원리는 교량의 상부구조와 하부구조사이에 수평방향으로 유연한 특성과 에너지 감쇠 특성을 동시에 갖는 베어링을 설치하여 고유주기의 이동과 에너지 감쇠효과에 의해 지진시 상부구조에 발생하는 관성력의 감소와 상부구조의 상대변위를 조절하는 것이다. 상부조의 관성력과 상대변위는 상반관계를 가짐으로 내진 분리베어링의 설계는 허용 상대변위내에서 상부구조의 관성력을 최소화 하는 것이다.

교량의 내진 분리베어링들에 요구되는 기본성질들은 다음과 같다.

1. 지진시 상부구조에서 하부구조로 전달되는 하중이 적어야한다.
2. 상부구조와 하부구조사이의 상대변위를 허용범위내로 제한할 수 있어야 한다.
3. 제동하중이나 바람 등의 상시하중에 의해 변위가 발생치 않도록 충분한 초기강성을 지녀야 한다.

교량에 내진 분리베어링을 사용하여 얻을 수 있는 장점들은 다음과 같다.

1. 설계지진 작용시 교각이 파괴됨이 없이 비탄성거동을 하도록 하는 연성을 제공 하기위한 특별한 상세설계가 필요없다.

2. 교각과 기초구조에 작용하는 수평력의 감소로 공사비의 절감과 교량의 내진안전성을 높일 수 있다.

3. 기존의 교량을 지진으로부터 보호하기위한 효과적이고경제적인 보강방법으로 사용할 수 있다.

3. 해석방법

그림 1 과 같이 일점고정 연속교에 있어서는 교축방향으로 상부구조와 1기의 하부구조가 설계진동단위를 이루게 된다. 이 설계진동단위는 그림 2 와 같이 하부구조를 n 자유도 시스템으로, 상부구조를 1 자유도 시스템으로 모델링 할 수 있다. 이때 교축방향으로 일점고정이므로 설계진동단위에 포함되는 상부구조의 질량은 전체 상부구조의 질량이 된다. 이와같은 시스템이 교축방향의 지반운동을 받는 경우 내진분리 베어링에 작용하는 비선형힘을 가상의 외력으로 고려하면 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_1 & & & \\ & M_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & M_n \\ & & & & M_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \vdots \\ \ddot{X}_n \\ \ddot{X}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} & 0 \\ & C_{22} & \cdots & C_{2n} & 0 \\ & & \vdots & & \\ & & & C_{nn}+C_s & -C_s \\ \text{SYM.} & & & & C_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \vdots \\ \dot{X}_n \\ \dot{X}_s \end{Bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} & 0 \\ & K_{22} & \cdots & K_{2n} & 0 \\ & & \vdots & & \\ & & & K_{nn}+K_s & -K_s \\ \text{SYM.} & & & & K_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \\ X_s \end{Bmatrix} = -\begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_n \\ M_s \end{Bmatrix} \ddot{X}_g - \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -1 \\ 1 \end{Bmatrix} R \qquad (1)$$

여기서 $\ddot{X}$, $\dot{X}$, X : 지반에 대한 상대가속도, 속도, 변위

M_i : 교각의 질량행렬 요소

C_{ij} : 교각의 감쇠행렬 요소

K_{ij} : 교각의 강성행렬 요소

M_s : 상부구조의 질량

C_s : 베어링의 감쇠

K_s : 베어링의 강성

R : 베어링의 비선형 힘

$\ddot{X}_g$: 교축방향의 수평 지반 가속도

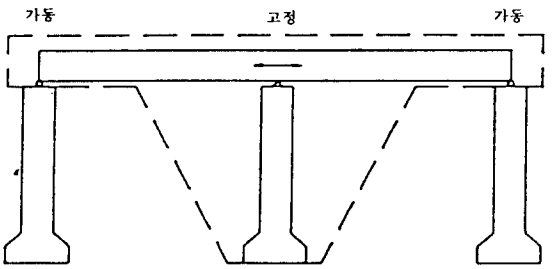


그림 1. 설계 진동 단위(교축 방향)

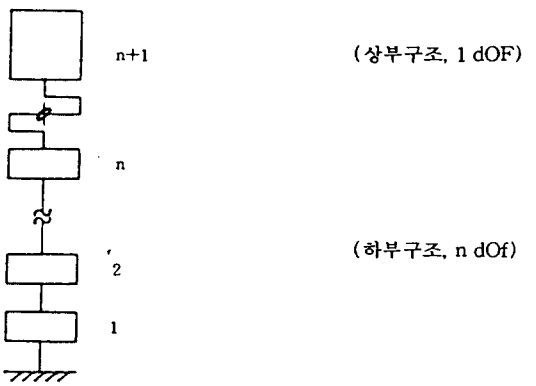


그림 2. 내진 분리베어링이 설치된 교량의 모델

식(1)에 포함된 가정사항은 하부구조는 선형 탄성거동을 하며 유일한 비선형 거동은 교각과 상부구조사이의 베어링에서만 발생한다는 것이다. 따라서 식(1)은 모든 종류이 내진 분리베어링이 설치된 교량에 적용할 수 있는 일반적인 운동방정식이다.

그림 3은 lead-rubber 베어링의 수학적 모델과 힘-변위의 관계곡선을 나타낸 것으로 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{X}+Q(\dot{X}, X)=F \qquad (2)$$

, 여기서, $\ddot{X}$, $\dot{X}$, X : 가속도, 속도, 변위

F : 작용력

식(2)에서 $Q(\dot{X},X)$는 베어링의 비선형 복원력으로서 Hysteretic 거동을 하는 경우 다음식으로

나타낼 수 있다.[5]

$$Q(\dot{X}, X) = \alpha\frac{F_y}{Y} + (1-\alpha)F_yZ \qquad (3)$$

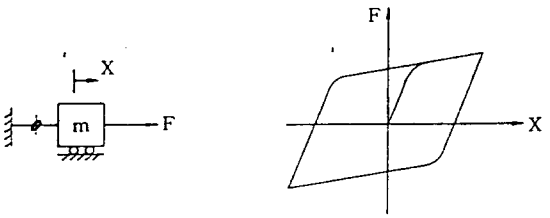
식(3)에서 Z는 다음의 비선형 1차 미분 방정식을 만족시키는 무차원 보조변수이다.

$$Y\dot{Z} + \gamma|\dot{X}|Z|Z|^{n-1} + \beta\dot{X}|Z|^n - A\dot{X} = 0 \qquad (3)$$

, 여기서 Y, F_y : 항복변위와 항복하중

α, β, γ : Hysteretic 곡선의 모양을 결정하는 상수

식(3)과 (4)에 포함된 상수들은 실험을 통해 얻은 힘-변위 곡선으로부터 결정할 수 있다.



(a) 수학적 모델 (b) Hysteresis Loop

그림 3. HYSTERETIC SYSTEM

Lead-rubber 베어링의 경우 식(1)의 내진 분리 베어링의 동적 특성은 다음과 같다.

$$C_s = 0$$
$$K_s = \alpha F_y / Y \qquad (5)$$
$$R = (1-\alpha)F_yZ$$

또한 식(4)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$Y\dot{Z} + \gamma|\dot{u}|Z|Z|^{n-1} + \beta\dot{u}|Z|^n - A\dot{u} = 0 \qquad (6)$$

여기서 $\dot{u} = \dot{X}_s - \dot{X}_n$

식(5),(6)과 함께 식(1)의 수치적분을 수행함으로써 lead-rubber 베어링이 설치된 교량의 비선형 동적해석이 완료되며 원하는 교량의 동적응답을 구할 수 있다.

수치적분 방법으로는 Explicit 방법 또는 Implicit 방법을 사용할 수 있으나 일반적으로 식(6)의 비선형 1차 미분방정식을 적분함에 있어서 상당히 작은 시간증분이 요구되므로 Explicit 방법을 사용하기로 한다. 해석 절차는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 초기값 R=0.0으로 식(1)에서 $\ddot{X}_s - \ddot{X}_n$을 구한다.

2) $\dot{u} = \dot{X}_s - \dot{X}_n$으로 식(6)에 modified midpoint method를 적용하여 Z를 구한다.

3) 식(5)로부터 비선형힘 R을 구한다.

4) R과 지반운동 가속도를 작용력으로 고려하여 식(1)에 Explicit 방법인 central difference method를 적용하여 각 응답을 구한다.

5) 2), 3), 4)를 주어진 최종 해석시간까지 수행한다.

4. 수치해석

4.1 지반운동

본 연구에서는 국내의 교량설계를 위한 설계응답 스펙트럼으로 표 1의 값을 사용하였다.[4] 표 1의 값은 탄성 지진응답 계수로서 장주기대에서 탄성가속도 스펙트럼 보다 큰 값을 갖고 있으나 국내의 지진자료가 부족한 점을 고려하여 교량의 설계응답 스펙트럼으로 사용하였다. 비선형 하중-변위 관계를 갖는 내진 분리베어링이 설치된 교량의 경우 비선형동적해석을 수행함으로써 그 응답을 구하여야 한다. 비선형 동적 해석을 위하여 지반종류에 따른 설계응답 스펙트럼들에 상응하는 지반운동의 가속도 시간이력들을 참고문헌(6)에 따라 구한 것이 그림 4에 실려있다.[6] 그 가속도

표 1. 설계 응답 스펙트럼(Unit: G, 980m/ sec^2)

Ground Condition	SPECTRUM VALUE			
I	T<0.1 0.14+2.1T	0.1≤T<0.33 0.35	0.33≤T<4. $0.167/T^{2/3}$	T≥4. $0.42/T^{4/3}$
II	T<0.2 0.14+1.05T	0.2≤T<0.44 0.35	0.44≤T<4. $0.202/T^{2/3}$	T≥4. $0.504/T^{4/3}$
III	T<0.3 0.14+0.7T	0.3≤T<0.61 0.35	0.61≤T<4. $0.252/T^{2/3}$	T≥4. $0.63/T^{4/3}$

T : PERIOD(sec.)

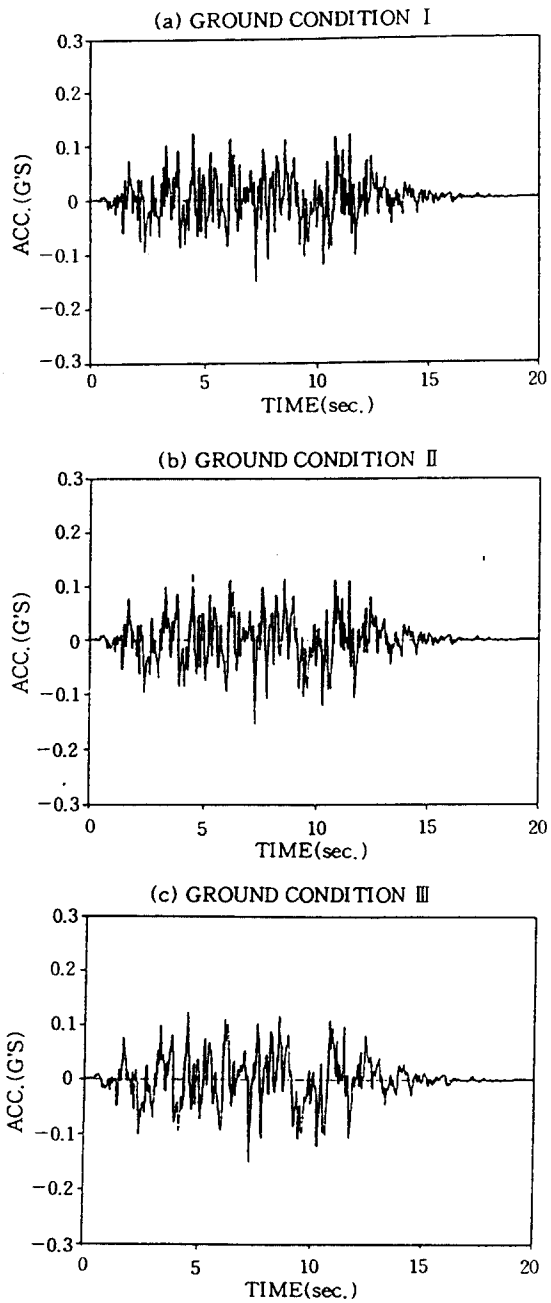


그림 4. 지반운동의 모의 가속도 시간이력

시간 이력들로 구한 모의응답 스펙트럼과 설계응답 스펙트럼을 비교하여 그림 5에 나타내었으며

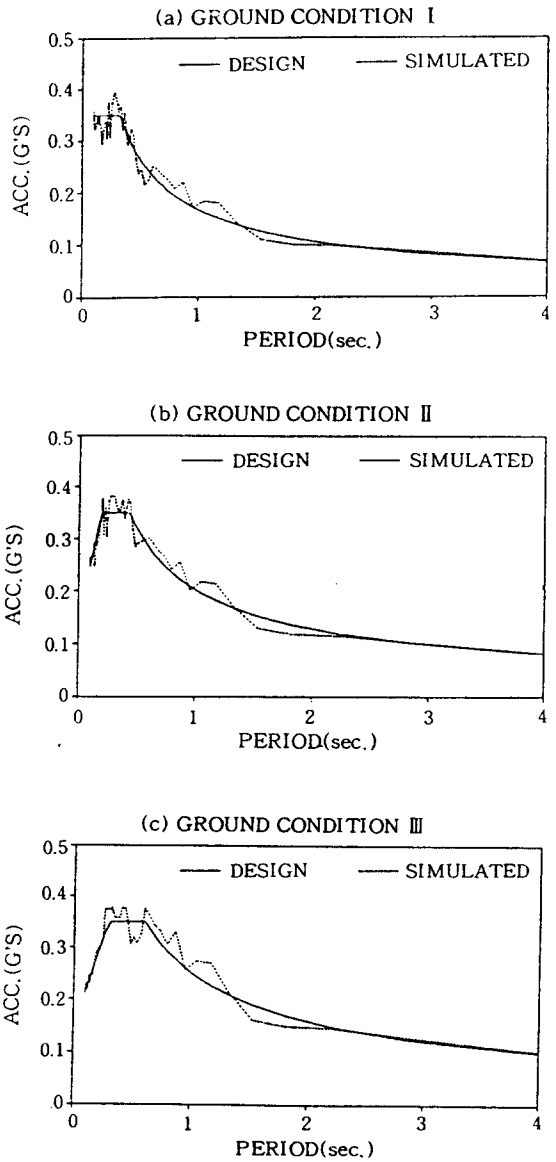


그림 5. 설계 응답스펙트럼과 모의 응답스펙트럼

모의 가속도 시간이력들이 설계응답 스펙트럼에 상응하는 것임을 알 수 있다.

4.2. 수치해석 결과

본 장에서는 고유주기 0.2-2.0초(고유진동수 0.5-5.0Hz) 범위의 교량을 대상으로 수치해석을 실시하였으며 이때 교량의 진동 단위에 포함되는

상부구조의 총중량으로는 1,000ton을 사용하였으며 고정단 교각의 총중량은 100ton으로 하였다. 교각은 일정한 단면을 지닌 것으로 생각하였으며 다 자유도 시스템으로 모델링하기 위하여 다음의 고유진동수에 관한 근사식을 사용하였다.

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{3EI/L^3}{0.3M_p+M_s}} \qquad (7)$$

, 여기서 ω_1 : 고정경우의 고유진동수

EI/L^3 : 교각의 강성특성

M_p : 교각의 총질량

M_s : 상부구조의 총질량

위의 근사식으로부터 고유진동수 ω_1에 따라 교각의 강성특성(EI/L^3)을 구한 후 고정경우의 설계진동 단위를 3자유도 시스템으로 모델링 하여 질량 행렬, 강성행렬, 감쇠행렬을 다음과 같이 구하였다.[7]

$$M = \begin{bmatrix} M_p/3 & & \\ & M_p/3 & \\ & & M_p/6+M_s \end{bmatrix} \qquad (8)$$

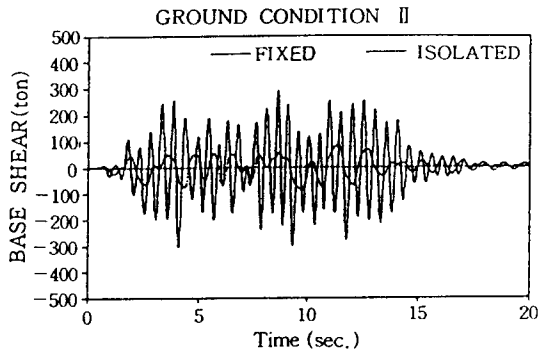
$$[K] = \frac{EI}{L^3}\begin{bmatrix} 499. & -287. & 75 \\ & 274. & -100 \\ SYM. & & 44. \end{bmatrix} \qquad (9)$$

다자유도 시스템인 교량의 감쇠행렬을 구하기 위하여 1차와 2차의 고유진동수에 해당하는 감쇠비를 각 5%로 가정하여 다음의 Rayleigh 감쇠관계를 이용하여 α, β를 구하였다.

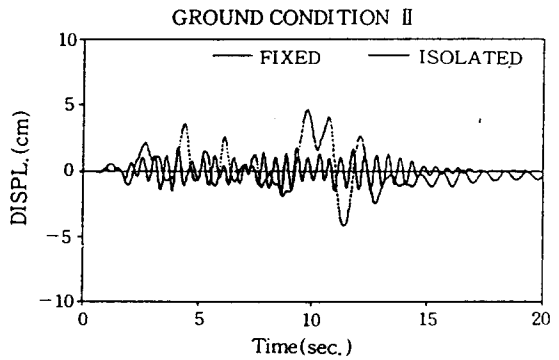
$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \qquad (10)$$

$$2\xi_i\omega_i = \alpha + \beta\,\omega_i^2 \qquad (11)$$

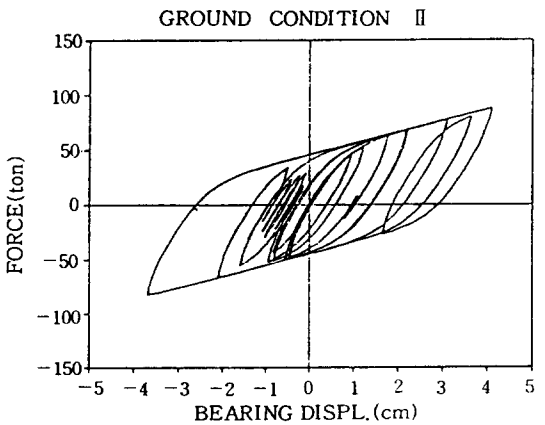
이상에서 구한 동적 행렬을 사용하여 교각을 3자유도 시스템으로 모델링하고 상부구조를 독립된 1자유도 시스템으로 고려한 총 4자유도 시스템을 3절에서 설명한 방법으로 비선형 동적해석을 실시하였다. 이때 내진분리베어링으로 사용한 lead-rubber 베어링의 특성치들은 실험에서 구한



(a) 교각 저면의 수평력



(b) 상부구조의 지반에 대한 수평 상대변위



(c) LEAD-RUBBER 베어링의 힘－변위 곡선

그림 6. 응답 시간이력과 힘－변위 곡선

α=0.157, Y=0.77cm, β=－0.54, γ=1.4, A=1.0, n=1을 사용하였다.[8] 항복하중 F_y는 설계변수로

고려할 수 있으며 여기서는 F_y를 상부구조 중량의 5%, 즉 50ton으로 사용하였다.

그림 6(a),(b)는 각각 고유주기가 0.5초인 교량에 지반종류Ⅱ에 따른 지반운동 작용시 고정경우와 분리경우의 교각저면의 수평지진력과 상부구조의 지반에대한 상대 수평변위의 시간이력을 나타낸다. 그림 6(c)은 지반 분리 베어링에 작용하는 수평력과 베어링의 수평변위의 관계곡선을 도시한 것으로 사용된 분리 베어링의 hysteresis loop을 나타낸다. 그림 6(a)의 시간 이력으로부터 lead-rubber 베어링을 설치함으로써 교량의 고유주기가 길어짐을 알수 있으며 또한 최대 수평력이 고정 경우값(약300ton)의 1/3정도(약100 ton)밖에 발생치 않음을 알 수 있다. 또한 그림 6(b)에서 상부구조의 지반에 대한 상대변위는 분리의 경우 고정경우보다 증가하고 최대 5cm가 발생하며 베어링의 비탄성 거동에 의해 영구변위가 0.5cm정도 발생함을 알 수 있다. 따라서 lead-rubber 베어링을 고정 지점의 교량받침대신 사용 함으로써 소규모의 지진시에도 상당한 지진력 감소효과를 얻을 수 있다.

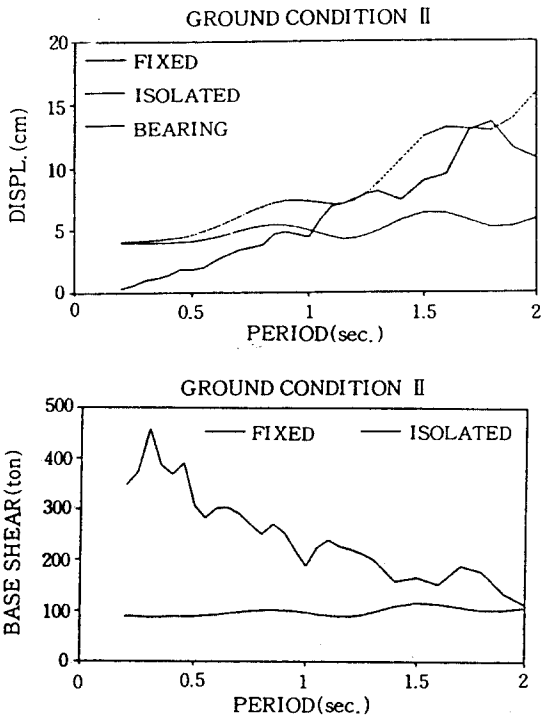


그림 8. 상부구조 수평변위 및 교각저면의 수평력 (지반종류Ⅱ)

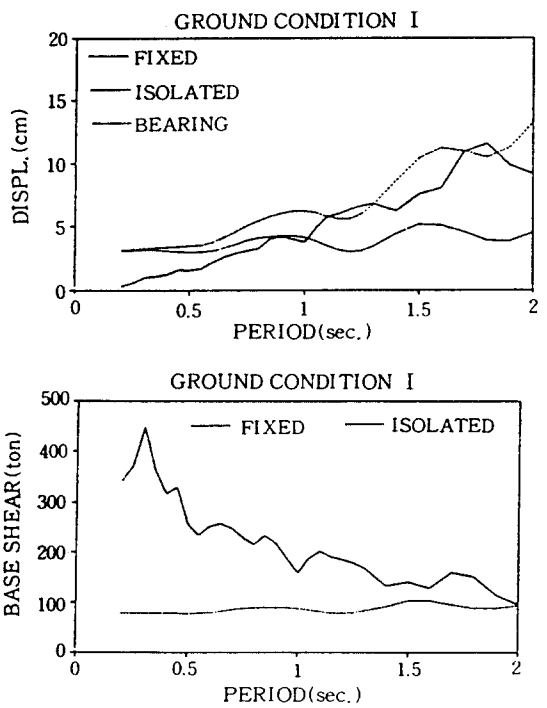


그림 7. 상부구조 수평변위 및 교각저면의 수평력 (지반종류Ⅰ)

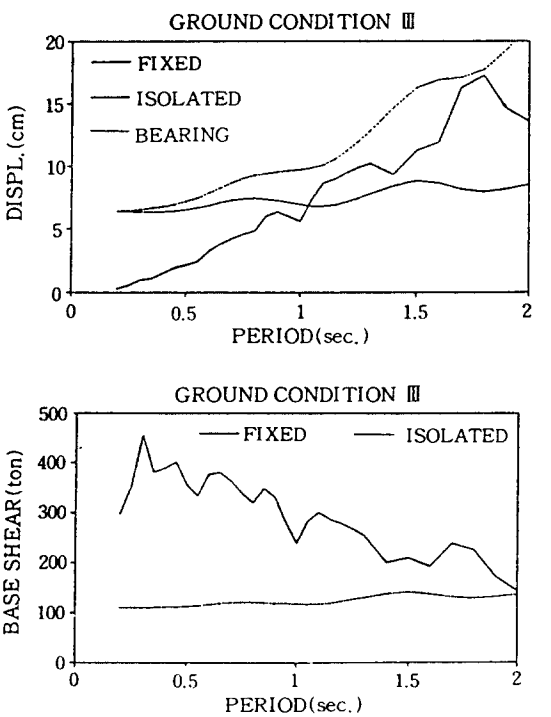


그림 9. 상부구조 수평변위 및 교각저면의 수평력 (지반종류Ⅲ)

이러한 분리효과를 지반 종류별, 교량의 고유주기별로 고찰하기위하여 지반의 종류에 따른 설계 지진 작용시 교량의 고유주기에 따라 고정경우(Fixed case)와 분리경우(Isolated case)의 교각 저면의 최대 수평 지진력(Base shear)과 상구조의 최대 수평변위 및 지반분리 베어링의 최대 수평 변위를 그림 7에서 그림 9까지 도시하였다.

지반 종류에 따른 응답특성은 별로 차이가 없으며 지반종류 Ⅲ의 경우 응답들이 가장 큼을 알 수 있다. 이는 lead-rubber 베어링에 의해 교량의 고유주기가 이동하는 장주기대의 설계 응답스펙트럼 값이 지반종류 Ⅲ의 경우가 가장 크기 때문이다.

교량의 고유주기에 따른 응답 특성은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 베어링의 수평변위와 하부구조의 수평 지진력은 교량의 주기에 관계없이 거의 일정하다. 따라서 교량의 주기가 짧을 수록 고정 경우의 지진력이 큼으로 분리 베어링에 의한 지진력 감소의 효과가 크다.

2) 대체적으로 상부구조의 지반에대한 상대변위는 분리 경우가 고정 경우보다 크나 지반 분리의 효과가 큰 짧은 주기의 교량에 있어서는 고정 경우 상대 변위가 작으므로 그 변위의 절대값은 작다.

5. 결 론

본 연구에서는 내진분리 베어링이 설치된 교량의 비선형 동적 해석방법을 제시하고 가장 대표적인 분리 베어링인 lead-rubber 베어링이 설치된 경우 국내의 설계 응답스펙트럼에 상응하는 모의 지반운동하에서 교량의 응답특성을 고찰하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 지반 종류에 따른 분리 베어링이 설치된 교량의 응답특성은 별로 차이가 없다.

2) 지반운동에 의해 내진 분리 베어링에 발생하는 수평력과 수평 변위는 교량의 주기에 관계없이 거의 일정하다.

3) 소규모의 지진시에도 일점고정 연속교의 고정단 교각에는 상당히 큰 지진력이 발생함으로 고정 받침대신 내진 분리 베어링을 사용함으로써 지반 종류에 관계없이 교축방향의 수평 지진력을 상당히 감소시킬 수 있다.

본 연구 관련 추후의 연구 과제들을 요약하면 다음과 같다.

1) 국내와 같은 소규모 지진에 사용하기 적당한 내진 분리 베어링의 연구.

2) 교각이나 교대의 강성 또는 기초 조건에따라 상부구조의 관성력을 각 하부구조에 적절히 분배하기 위한 분리 베어링의 배치에 관한 연구.

3) 지진시 지지부로부터 상부구조의 이탈을 방지하기 위한 받침 길이가 충분히 확보되지 않은 교량의 보강방법 연구.

References

1. Standard specification for highway bridges, 15th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1991
2. Kelly, J.M., "Seismic base isolation: Review and bibliography," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.5, No.3, 1986, pp202－216.
3. Mayes, R.L., Buckle, I.G., Kelly, T.E., and Jones, L.R., "AASHTO seismic isolation design requirements for highway bridges," *Journal of Structural Engineering*, Vol.118, No.1, 1992, pp284－304.
4. 도로교 표준시방서, 대한토목학회, 1992.
5. Wen,Y.K., "Equivalent linearization for hysteretic system under random excitation," *Journal of Applied Mechanics*, Vol.47, 1980, pp150－154.
6. Scanlan, R.H.and Sachs, K., "Earthquake time histories and response spectra," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol.100, EM4, 1974, pp635－655.
7. Clough, R.W. and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, Mcgraw-Hill, New York, 1975.
8. Constantinou, M.C. and Tadjbakhsh, I.G., "Hysteretic dampers in base isolation: random approach," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No.4, 1985, pp705－721.

(접수일자 : 1993. 8. 19)