

가동받침 마찰을 고려한 다경간 연속교의 내진 해석

Seismic Analysis of the Multi-Span Continuous Bridge
Considering the Friction of the Expansion Bearings

전 귀 현*

Juhn, Gui Hyun

Abstract

This study presents the nonlinear dynamic analysis method of the multi-span continuous bridge considering the friction of the expansion bearings. Also the numerical analysis is performed for estimating the effect of the friction on the seismic response of the multi-span continuous bridge under the longitudinal ground motion compatible to Korean bridge design response spectra. It is found that even small friction coefficient of the expansion bearings has significant effect on reducing the superstructure displacement due to energy dissipation and distributing the inertia force of the superstructure to the substructures due to frictional force. It is observed that such favorable friction effects increase as the friction coefficient increases and the magnitude of the ground motion decreases. Therefore, the friction of the expansion bearings can be effectively used for the safe and economic design of the continuous span bridge with many spans and large superstructure weight under the small to medium scale longitudinal ground motions.

요 지

본 연구에서는 다경간 연속교의 내진해석시 가동받침의 마찰을 고려할 수 있는 비선형 동적해석 방법을 제시하고 가동받침의 마찰계수에 따른 연속교의 내진응답을 고찰하였다. 연구결과 국내와 같은 소규모 설계지진시에는 가동받침의 마찰은 마찰계수가 작더라도 에너지 감쇠에 의한 상부구조의 변위감소와 마찰력에 의한 상부구조의 관성력의 각 하부구조로 분배되어 상당한 효과가 있음을 알 수 있었다. 또한 이러한 가동받침의 마찰효과는 마찰계수가 클수록, 입력지진의 규모가 작을수록 커짐을 보였다. 따라서 경간수가 많고 상부구조의 중량이 큰 다경간 연속교에 있어서 가동받침의 마찰계수를 적절히 사용함으로써 중소규모 설계지진 작용시 상부구조의 수평변위를 조절할 수 있고 상부구조의 교축방향 관성력을 각 하부구조로 분배하는 효과에 의해 경제성과 전체교량의 내진 안전성을 확보할 수 있다.

* 정희원 · 대영엔지니어링 구조연구실장, 공학박사, 토목구조기술사

1. 서론

교량은 지진에 매우 취약한 구조물로서 지진시 교대, 교각, 기초구조등에 손상이 발생하거나 상부구조가 그 지지부로부터 이탈하여 전체붕괴가 초래되기도 한다. 이러한 교량의 피해는 과거 중소규모의 지진시에도 발생한 예가 많음으로⁽¹⁾ 국내와 같이 중소규모 지진이 예상되는 지역에서도 교량의 내진 안전성 확보를 위한 설계가 수행되어야 한다. 특히 일점고정 연속교의 경우 교축방향 지반운동하에서 고정단 하부구조에는 상부구조의 관성력이 집중되어 상당히 큰 교축방향의 수평력이 작용하게 된다. 또한 고정단 교각의 높이가 높은 경우에는 연속교의 교축방향의 고유주기가 커지게 됨으로 상당히 큰 수평변위가 발생하게 된다. 따라서 상부구조의 중량이 큰 일점고정 연속교에 있어서는 설계지진 작용시 고정단 하부구조가 파괴됨이 없이 그 기능을 유지하도록 하고 수평변위에 대한 충분한 지지길이의 확보가 중요하다. 일반적으로 다경간 연속교는 온도변화, 건조수축, creep 등에 의한 상부구조의 교축방향 응력을 최소화하기 위하여 교축방향으로 신축이 자유롭도록 설계되고 있다. 따라서 연속교의 지점들은 교축방향으로 하나의 고정지점과 마찰계수가 적은 가동받침을 사용하는 가동지점들로 구성된다. 이와같은 다경간 일점고정 연속교의 교축방향 지반운동하의 내진해석은 가동받침의 마찰을 무시하고 상부구조 전체와 고정지점의 하부구조로만 형성되는 설계진동 단위에 스펙트럼 해석법을 적용하여 수행할 수 있다.⁽²⁾ 그러나 이와같은 해석방법에 있어서는 가동받침의 마찰에 의한 에너지 감쇠효과가 무시되고 상부구조의 관성력 전부가 고정단 하부구조에 집중되어 작용하게 됨에 따라 상부구조의 상대변위와 고정단 하부구조의 탄성력의 계산결과가 상당히 보수적이 될 가능성이 있다. 따라서 경간수가 많고 상부구조의 중량이 큰 연속교에 있어서 중소규모 지진 작용시 정확한 교축방향의 내진응답을 구하기 위해서는 가동받침들의 마찰을 내진해석시 포함할 필요가 있다.

본 연구에서는 일점고정 연속교에 있어서 교축방향의 내진해석시 가동지점의 마찰을 고려할 수 있는 비선형 동적해석 방법을 제시하고 가동받침의 마찰계수에 따른 응답특성을 고찰하였다. 또한 입력지

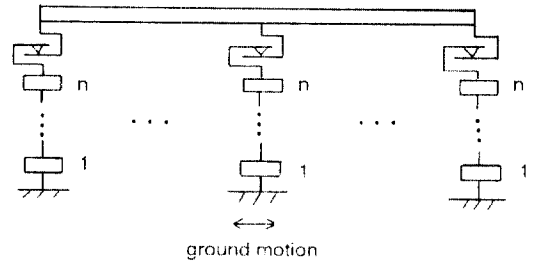


그림 1. 다경간 연속교의 수학적 모델.

진의 크기에 따른 마찰계수의 고려효과를 수치해석을 통해 살펴보았다. 교축방향의 입력지진으로는 국내의 설계응답 스펙트럼(지반종류 II)에 상응하는 모의 지반운동을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 예제 교량은 중앙교각에 고정받침이 설치된 4 경간 일점고정 연속교로써 상부구조 전체를 강체블럭으로, 각 하부구조들을 3 자유도 시스템으로, 교량받침들을 상·하부구조를 연결하는 연결요소들로 각각 모델링하였다.

여러개의 마찰요소들이 상부구조와 각 하부구조들을 연결하는 연결요소들로 사용됨에 따라 마찰모델로 주로 사용되고 있는 Coulomb 모델 대신^(3, 5) Viscoplasticity 모델을 사용하였다. Viscoplasticity 모델을 사용함으로써 Coulomb 모델사용시 요구되는 각 해석단계에서의 마찰면들의 고정 혹은 활동 상태의 구분이 필요치 않아 여러개의 마찰면을 지닌 시스템의 연속적인 동적해석이 가능하다. 따라서 본 연구에서 제시한 비선형 동적해석 방법은 각 하부구조들의 동적 특성과 각 가동받침들의 마찰계수가 다른 경우의 다경간 연속교의 교축방향의 내진응답을 구하는데 효과적으로 사용할 수 있다.

2. 해석방법

교량의 상부구조가 여러개의 하부구조들로 지지되어있는 다경간 연속교의 경우 그림 1과 같이 각 하부구조를 다자유도 시스템으로, 상부구조 전체를 1 자유도 강체블럭으로, 교량받침들을 상·하부구조를 연결하는 마찰요소들로 모델링 할 수 있다. 이때 각 마찰요소들의 마찰계수는 가동받침의 경우는 사용된 받침에 따른 동마찰계수를 사용하고 고정받침의 경우 마찰면의 활동이 발생치 않도록 상

당히 큰 마찰계수를 사용함으로써 고정받침의 효과를 얻을 수 있다.

그림 1과 같이 모델링된 시스템의 교축방향의 지반운동하의 응답을 구하기 위하여 substructuring technique을 도입하였다.⁽⁶⁾ 이 방법에서는 상부구조와 각 하부구조들을 연결하는 마찰요소에 작용하는 힘을 외부하중으로 고려함으로써 각 하부구조들과 상부구조는 지반운동에 의한 힘과 교량 받침에 발생하는 마찰력을 받는 독립된 substructure들로 해석할 수 있다. 지반운동에 의한 힘과 마찰력을 받는 하부구조들의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \dots \\ m_n \end{bmatrix}_p \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \vdots \\ \ddot{x}_n \end{Bmatrix}_p + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots \\ c_{pn} \end{bmatrix}_p \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{Bmatrix}_p + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \vdots \\ k_{nn} \end{bmatrix}_p \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix}_p = - \begin{Bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{Bmatrix}_p \ddot{x}_g + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{Bmatrix}_p F_p \quad (p=1, 2, \dots, n_p) \quad (1)$$

여기서 m_i : 하부구조의 lumped mass 요소

c_{ij} : 하부구조의 감쇠행렬요소

k_{ij} : 하부구조의 강성행렬요소

$\ddot{x}_i, \dot{x}_i, x_i$: 하부구조 i 번째 mass의 지반에 대한 상대 가속도, 속도, 변위

\ddot{x}_g : 지반가속도

F_p : p 번째 하부구조 교량받침에 작용하는 마찰력

n_p : 하부구조의 총수

n : 각 하부구조의 자유도

식 (1)에 포함된 가정사항은 각 하부구조위치의 교축방향 지반운동은 동일하며 하부구조는 선형탄성거동을 하고 유일한 비선형 거동은 연결요소인 마찰요소에서 발생한다는 것이다.

다음으로 그림 1의 강체블럭으로 모델링된 상부구조의 운동방정식은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$M_s \ddot{x}_s + K_f x_s = -M_s \ddot{x}_g - \sum_{p=1}^{n_p} F_p \quad (2)$$

여기서 M_s : 상부구조의 총 질량

K_f : 가상 스프링 계수

\ddot{x}_s, x_s : 상부구조의 지반에 대한 상대가속도, 변위

식 (2)에서 K_f 는 상부구조의 강체운동을 방지하기 위한 가상의 스프링 계수로서 수치해석시 문제가 발생치 않는 작은 값을 사용한다. 식 (1)과 식 (2)에서 F_p 는 교량의 각 받침에 작용하는 마찰력으로써 Coulomb 마찰식에 따르면 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$F_p = \mu_p \cdot R_p \cdot \text{sgn}(\dot{u}_p) \quad (3)$$

여기서 μ_p : 교량 받침의 마찰계수

R_p : 교량 받침에 작용하는 수직 방향의 반력

$\dot{u}_p = (\dot{x}_s - \dot{x}_{np})$: 교량 받침에서의 상부구조와 하부구조의 상대 속도

식 (3)에 포함되어 있는 $\text{sgn}(\dot{u}_p)$ 은 교량받침에서의 상대속도의 부호함수로서 불연속 함수이다. 이 함수의 값을 결정하기 위해서는 고려하는 마찰면의 고정 또는 활동상태의 구분을 필요로 하므로 상부구조가 마찰계수가 다른 가동받침들과 동적특성이 다른 하부구조들에 의해 지지되는 경우 수치해석을 수행함에 있어서 문제가 발생한다. 이러한 수치해석상의 문제점을 피하기 위해 불연속함수인 부호함수 대신 연속함수를 마찰력을 나타내기 위하여 사용할 수 있다. 이 연속함수는 Viscoplasticity 모델로 마찰력을 정의하는 것으로 다음식으로 쓸 수 있다.⁽⁷⁾

$$F_p = \mu_p \cdot R_p \cdot z_p \quad (4)$$

여기서, z_p 는 무차원 보조변수로서 $|z_p| \leq 1$ 의 값을 지니며 다음의 비선형 1차 미분 방정식으로 나타내진다.

$$Y \dot{z}_p + \gamma |\dot{u}_p| z_p |z_p|^{n-1} + \beta \dot{u}_p |z_p|^n + A \dot{u}_p = 0 \quad (5)$$

식 (5)에서 γ, β, A, n 은 각 가동받침에 있어서 마찰력과 활동변위의 관계에 따른 무차원 상수로서 마찰력과 활동변위의 관계곡선으로부터 구할 수 있다. 식 (4)에서 z_p 값이 ± 1 이 되면 가동받침은 활동을 하며 $|z_p| < 1$ 이면 고정상태가 된다.

이상의 식 (1), (2), (4), (5)를 사용하여 수치적분을 수행하면 연속교의 가동받침을 고려한 비선형 동적

해석이 완료된다. 수치적분방법으로는 Explicit, 또는 Implicit 방법을 사용할 수 있으나 일반적으로 식 (5)의 적분과정이 상당히 작은 시간증분을 요구함으로 여기에서는 Explicit 해석방법을 사용하기로 한다. Explicit 해석방법의 절차를 요약하면 다음과 같다.

단계 1. 초기값으로 $F_p=0$ 을 사용하여 식 (1)과 식 (2)로부터 \dot{x}_{np} 과 \dot{x}_s 을 구한다.

단계 2. $\dot{u}_p = \dot{x}_s - \dot{x}_{np}$ 를 사용하여 식 (5)로부터 z_p 를 구한다.

단계 3. 식 (4)로부터 단계 2에서 구한 z_p 를 사용하여 마찰력 F_p 를 구한다.

단계 4. 단계 3의 F_p 를 사용하여 식 (1)과 식 (2)로부터 Explicit 방법인 central difference method를 사용하여 각 하부구조들과 상부구조의 응답들을 구한다.

단계 2, 3, 4를 계속 수행하면 Explicit 방법에 의한 수치적분이 완료된다. 단계 2의 수치적분 방법에 있어서는 modified midpoint 방법을 사용하여 \dot{u}_p 로부터 z_p 를 구한다.⁽⁸⁾

3. 수치해석

본 연구에서 고려한 수치해석 예제로는 그림 2와 같은 4 경간 연속교를 고려하였다. 연속교의 경간은 60 m로 일정하며, 상부구조의 중량은 25 ton/m로 가정하였으며 이때 상부구조의 총중량은 6,000 ton이 된다.

하부구조들은 동적해석시 그 유연도를 고려하기 위하여 3 자유도 시스템으로 고려하였으며 각 하부구조들의 질량, 감쇠, 강성행렬들을 같은 값들로 사용하였다. 하부구조는 단면이 일정하고 길이가 L 인 캔틸레버 보로 생각하였으며 그 경우 3 자유도 시스템으로 모델링된 하부구조의 동적 특성행렬은

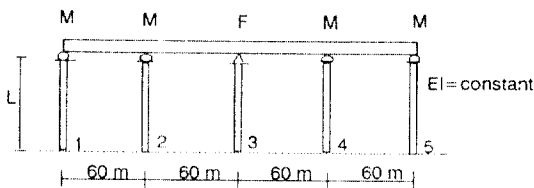


그림 2. 4경간 연속교 모델.

다음과 같이 쓸 수 있다.⁽⁹⁾

$$[M]_p = \frac{1}{g} \begin{bmatrix} \frac{W_p}{3} & & & & \\ & \frac{W_p}{3} & & & \\ & & \frac{W_p}{3} & & \\ & & & \frac{W_p}{3} & \\ & & & & \frac{W_p}{6} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[K]_p = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 499. & -287. & 75. \\ & 274. & -100. \\ \text{SYM.} & & 44 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 g : 중력가속도

W_p : 하부구조의 총중량

EI : 하부구조의 휨강성

L : 하부구조의 높이

하부구조의 감쇠행렬은 하부구조단독의 1차 및 2차 고유진동수에 해당하는 감쇠비를 각 25%로 가정하여 다음의 Rayleigh 감쇠관계를 이용하여 구하였다.

$$[C]_p = \alpha[M]_p + \beta[K]_p \quad (8)$$

$$2\xi_i \omega_i = \alpha + \beta \omega_i^2 \quad (i=1, 2) \quad (9)$$

여기서 ω_i 는 상부구조를 포함치 않는 하부구조 자체의 고유진동수들이다. 식 (9)로부터 α 와 β 를 구한 후 식 (8)에 대입하면 하부구조의 감쇠행렬을 구할 수 있다.

각 하부구조의 횡방향 강성을 결정하는 EI/L^3 은 일점고정 연속교의 설계진동단위의 고유주기에 따라 근사적으로 다음식으로부터 계산하였다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(W_s + 0.3W_p)/g}{3EI/L^3}} \quad (10)$$

여기서 T : 고유주기

W_s : 상부구조의 총중량

W_p : 고정단 하부구조의 중량

g : 중력가속도

본 예제에서 고려한 교량들은 고유주기가 0.5, 1.0, 2.0초로써 각각 stiff, intermediate, flexible한 교량들을 대표하는 것으로 고려하였다. 또한 상부구조와

하부구조의 중량비에 따른 효과를 제거하기 위하여 하부구조 총중량 W_p 는 교량의 고유주기에 관계없이 상부구조 총중량의 10%로 가정하였다.

식 (10)으로부터 대상교량의 고유주기에 따라 EI/L^3 이 정해지면 하부구조의 동적특성행렬들을 구할 수 있다. 일반적으로 Teflon과 Stainless Steel의 마찰면을 사용하는 가동받침의 경우 동마찰계수 (dynamic friction coefficient)는 마찰면에 작용하는 압력(bearing pressure)과 활동속도(sliding velocity)의 함수이나⁽⁷⁾ 본 연구에서는 가동받침의 동마찰계수가 일정한 경우를 고려하였다. 가동받침의 마찰계수에 의한 동적응답특성을 고찰하기 위해 마찰계수가 0.00~0.10인 경우 수치해석을 수행하였다. 이때 가동받침들의 마찰계수는 모두 같다고 가정하였

으며 고정받침의 경우 마찰계수값을 5.0으로 사용함으로써 교축방향으로 고정상태가 유지되도록 하였다. 그림 2에서 하부구조 1(5), 2(4), 3 작용하는 수직방향의 반력 $R_1(R_3)$, $R_2(R_4)$, R_3 는 각각 0.393wl, 1.143wl, 0.929wl로서 경간이 l이고 단위중량이 w인 4경간 연속교의 지점반력에 해당하는 값을 사용하였다. 마찰력과 활동 변위관계를 결정하는 식 (5)의 상수들은 각각 $Y=0.01$ cm, $\gamma=0.9$, $\beta=0.1$, $A=1$, $n=2$ 를 사용하였다.⁽⁷⁾

본 연구에서 교축방향의 입력지반운동으로 지반 종류 II의 설계응답스펙트럼에 상응하는 모의 가속도시간이력을 사용하였으며 그림 3에 모의가속도시간이력과 그에 따른 모의응답스펙트럼을 나타내었다.⁽¹⁰⁾ 그림 4에 BR.1(고유주기 0.5초), BR.2(고유

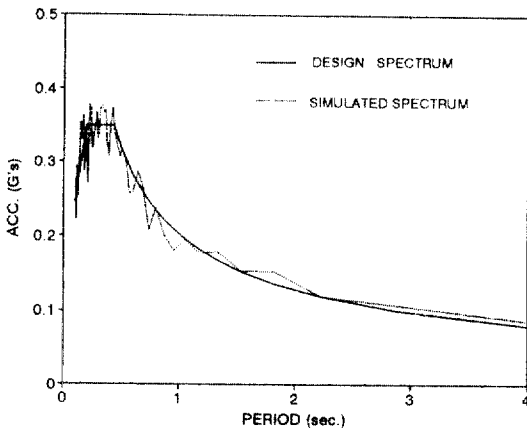
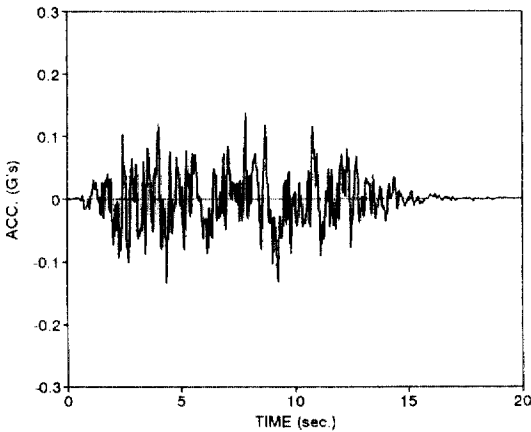
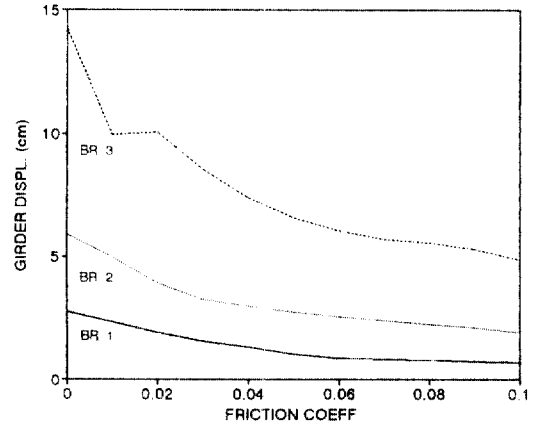
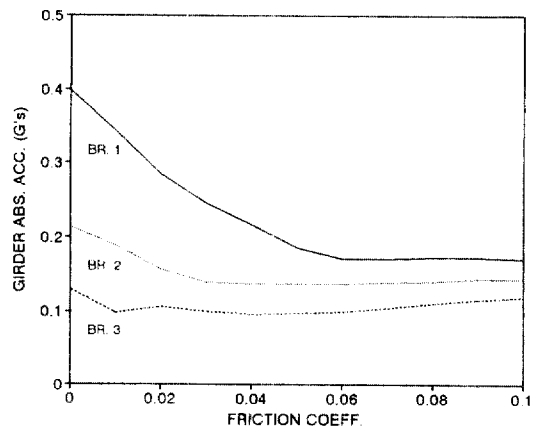


그림 3. 모의 지반 가속도 시간이력과 모의 응답 스펙트럼.



(a) 상부구조의 지반에 대한 상대변위



(b) 상부구조의 절대가속도

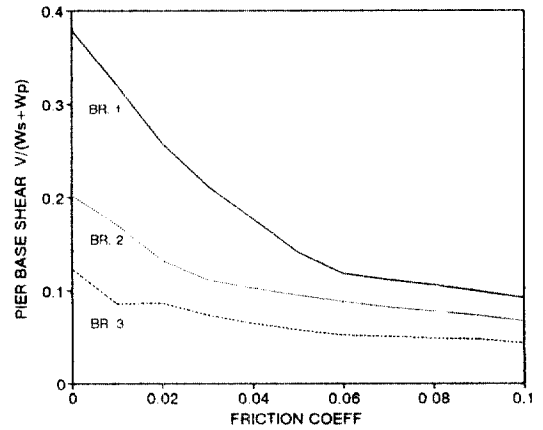
그림 4. 마찰계수에 따른 상부구조의 응답.

주기 1.0초), BR.3(고유주기 2.0초)의 일점고정 연속 교들의 상부구조의 지반에 대한 상대변위와 절대 가속도의 최대값들을 가동 받침의 마찰계수에 따라 나타내었다. 그림 5는 각 연속교들의 고정단(하부구조 3)과 가동단(하부구조 2,4) 저면 전단력들의 최대값들을 가동받침 마찰계수에 따라 나타낸 것이다.

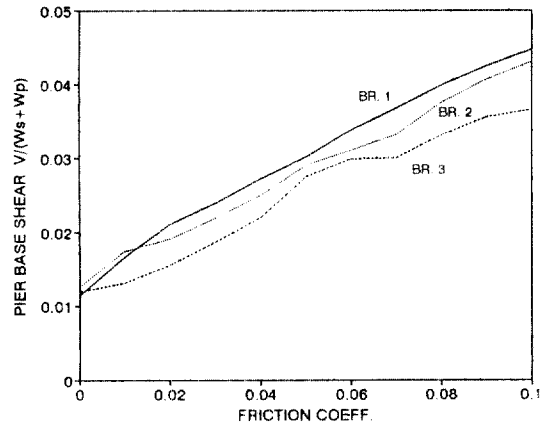
그림 4로부터 가동받침의 마찰계수가 0.05 이하인 경우 교량의 고유주기에 관계없이 가동받침의 마찰에 의해 상부구조의 상대변위와 절대가속도의 감소함을 알 수 있다. 가동받침의 마찰계수가 0.03인 경우에 상부구조의 절대가속도는 가동받침의 마찰계수가 0.00인 경우 값들에 비해 BR.1, BR.2, BR.3 각각의 경우 38%, 35%, 22%가 감소하며 상부구조의 상대변위는 BR.1은 44%, BR.2는 45%, BR.3는 40%가 감소함을 알 수 있다. 이러한 상부구조의 응답들의 감소는 가동받침의 마찰에 의한 에너지 감소에 기인된 것으로 마찰계수가 작은 경우에도 상당한 효과가 있다. 그러나 가동받침의 마찰계수가 0.05 이상이 되면 상부구조의 상대변위 감소효과가 줄어들며 상부구조의 절대가속도는 오히려 증가하게 된다. 이는 마찰 뎀핑 시스템의 특성으로서 마찰력의 증가로 인한 상부구조의 가속도가 증가하기 때문이다.

그림 5로부터 가동받침의 마찰계수가 증가함에 따라 고정단의 저면 전단력(Base Shear)는 감소하며 가동단의 저면 전단력은 증가함을 알 수 있다. 가동받침의 마찰계수가 0.03인 경우 고정단의 저면 전단력은 BR.1은 44%, BR.2는 45%, BR.3는 40%가 감소하며 가동단의 저면 전단력은 BR.1은 110%, BR.2는 74%, BR.3는 56% 증가한다. 가동단의 마찰이 증가할수록 고정단의 저면 전단력은 감소하고 가동단의 저면 전단력은 증가함을 알 수 있다. 즉 상부구조 관성력이 가동단의 마찰계수 크기에 따라 하부구조로 분배됨을 알 수 있다. 이러한 가동받침의 마찰효과는 주로 마찰력이 큰 하부구조 2와 3의 가동받침에 의한 것이다.

지반운동의 최대가속도에 따른 가동단 마찰계수의 효과를 고찰하기 위하여 그림 6에 고유주기가 1초인 교량(BR.2)에서 가동단의 마찰(마찰계수 0.03)을 고려한 경우와 마찰을 무시한 경우의 상부구조의 수평변위와 고정단 교각의 저면 전단력들의 최대값의 비, $R(0.03)/R(0.00)$ 를 지반운동의 최대가속도 크기에



(a) 하부구조 3(고정단)



(b) 하부구조 2, 4(가동단)

그림 5. 마찰계수에 따른 하부구조의 저면 전단력.

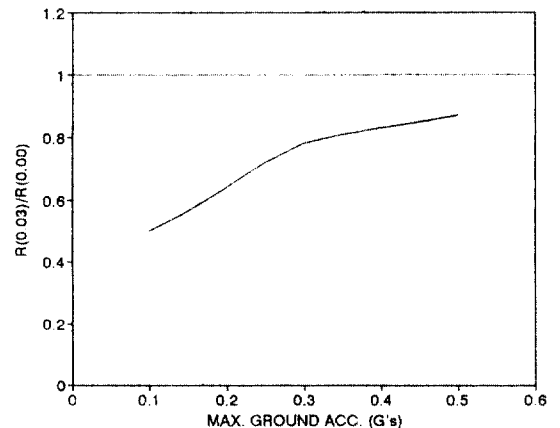


그림 6. 입력지진의 최대가속도에 따른 마찰효과.

따라 도시하였다. 계산된 수평변위와 저면 전단력의 최대값의 비는 거의 동일함으로 그림 6상에 차이가 없다. 그림 6으로부터 설계지진의 규모가 작을수록 가동단의 마찰효과가 커짐을 알 수 있다. 국내와 같이 소규모 지진이 예상되는 지역에서는 가동단의 마찰계수가 0.03인 경우 약 40%의 최대값 차이가 있으므로 경간수가 많고 상부구조의 중량이 큰 경우에는 가동단의 마찰을 고려하여 내진해석을 수행하는 것이 바람직하다.

이상으로부터 일점 고정연속교에 있어서 가동받침의 마찰은 에너지 감쇠 효과를 가져옴과 동시에 상부구조의 관성력을 각 하부구조로 분배하는 역할을 함을 알 수 있다. 또한 이러한 효과는 교량의 고유주기에 관계없이 거의 동일하며, 가동 받침의 마찰계수가 클수록, 입력지진의 규모가 작을수록 그효과가 크다. 국내와 같이 소규모지진하에서 일점고정 연속교의 고정단 하부구조의 설계지진력을 위한 교축방향의 수평 탄성력 계산과 상부구조의 탄성변위를 계산함에 있어서 가동받침의 마찰효과를 무시하고 상부구조 전체와 고정단 하부구조만을 포함하는 설계진동단위에 스펙트럼 해석법을 사용하는 것은 경간수가 많고 상부구조의 중량이 큰 연속교의 경우 너무 보수적인 결과가 된다. 위와 같은 경우 본 연구에서 제시한 가동받침의 마찰을 고려할 수 있는 비선형 동적해석방법에 따라 내진 해석을 수행함으로써 보다 정확한 탄성변위와 탄성력을 구할 수 있다. 또한 상부구조의 교축방향의 응력을 크게 발생시키지 않는 범위내에서 적절한 마찰계수값을 갖는 가동받침을 사용함으로써 일점고정연속교의 내진설계시 내진안전성과 경제성을 얻을 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 다경간 연속교에 있어서 가동받침의 마찰을 교축방향의 지진응답해석시 고려할 수 있는 비선형 동적해석방법을 제시하였고 가동받침의 마찰계수가 교축방향 지진응답에 미치는 영향을 고찰하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 다경간 일점고정 연속교의 가동받침의 마찰은 에너지 감쇠를 통하여 상부구조 변위와 상부구조 관성력을 감소시킴과 동시에 상부구조의 관성력을

각 하부구조로 분배하는 역할을 한다.

2) 국내와 같이 중소규모 설계지진이 예상되는 지역에서는 경간수가 많고 상부구조의 중량이 큰 일점고정 연속교의 경우 가동단의 마찰계수가 적더라도(0.02~0.05) 가동단의 마찰을 고려하여 상부구조의 변위와 고정단 하부구조의 탄성력을 산정함이 바람직하다.

3) 설계지진 작용시 상부구조의 수평 변위가 과도하게 발생하거나 고정단 하부구조의 탄성력이 큰 경우 가동받침의 마찰계수를 적절히 사용하여 상부구조의 변위를 조절할 수 있으며 또한 상부구조의 관성력을 마찰력의 크기에 따라 각 하부구조로 분배시켜 경제적이고 안전한 설계를 할 수 있다.

참고문헌

1. 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, pp. 284-304.
2. 도로교 표준시방서, 대한토목학회, 1992.
3. Mostaghel, N. and Tanbakuchi, J., "Response of Sliding Structures To Earthquake Support Motion," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, 1983, pp. 729-748.
4. Younis, C.J. and Tadjbaksh, I.G., "Response of Sliding Rigid Structure to Base Excitation", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 110, No. 3, 1984, pp. 417-432.
5. Yang, Y., Lee, T. and Tsai, I., "Response of Multi Degree of Freedom Structures with Sliding Supports", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 19, 1990, pp. 739-752.
6. Juhn, G. and Manolis, G.D., "A Substructuring Technique for Time-Domain Analysis", *Computers and Structures*, Vol. 36, No. 6, 1990, pp. 1097-1102.
7. Constantinou, M.C., Mokha, A.S. and Reinhorn, A.H., "Teflon Bearings in Base Isolation. II: Modeling", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 116, No. 2, 1990, pp. 455-474.
8. Juhn, G., Manolis, G.D., Constantinou, M.C. and Reinhorn, A.M., "Experimental Study of Secondary Systems in Base-Isolated Structure", *Journal of structural Engineering*, Vol. 118, No. 8, 1992, pp. 2204-2221.

9. Clough, R.W. and Penzien, J., *Dynamic of Structures*, McGraw-Hill, New York, 1975.

10. Scanlan, R.H. and Sachs, K., "Earthquake Time Histories and Response Spectra", *Journal of the*

Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 100, No. EM4, 1974, pp. 635-655.

(接受 : 1993. 9. 10)