

지진발생시 교량형식에 따른 낙교위험도 분석 Analysis of Unseating Failure of Various Types of Bridge Spans under Seismic Excitations

김상효* 마호성** 구형선***
Kim, Sang-Hyo Mha, Ho-Seong Koo, Hyoung-Seon

ABSTRACT

The probability of unseating failure of the bridge spans under earthquakes is investigated. Seismic excitations are simulated as nonstationary processes by combining a stationary process and an intensity function. For computational convenience, a simplified single-degree-of-freedom model is adopted, which retains the dynamic characteristics of the original bridge motion in concern. The time history analysis for the developed single degree-of-freedom model are carried out to evaluate the response processes, and the probabilistic characteristics of response displacements are evaluated. The reliability analysis of the bridge against the unseating failure is performed with the statistical information of the maximum displacements of responses.

1. 서론

근래에 들어와서 세계적으로 강한 지진활동이 빈번히 발생하고 있으며 그에 따른 심각한 구조물의 피해도 수반되고 있다. 한반도에서의 지진활동도 최근 활발해 지는 경향을 보이고 있으며, 인구 밀집지역에서의 지진피해는 커다란 사회혼란을 초래할 수 있어 내진설계에 대한 필요성이 국내에서도 높이 인식되고 있다. 특히 과거에 건설된 대부분의 교량이나 구조물이 지진의 영향을 고려하지 않은 설계에 의해 시공되었기 때문에 지진에 의한 피해가 발생한다면 그 정도가 매우 심각할 수도 있다.

지반운동에 의하여 발생한 지진이력은 내재되어 있는 여러 요인의 불확실성으로 인해 그 운동이 랜덤하게 되며, 이러한 지진하중을 받는 구조물의 거동 또한 랜덤하게 된다⁽¹⁾. 본 연구의 목적은 지진 발생시 일어날 수 있는 교량의 거동 중 낙교위험에 대한 확률적 특성을 분석하는 것이다. 이를 위하여 지진하중에 의한 낙교거동의 확률적인 특성을 분석하기 위한 효과적인 모의분석기법을 개발하고, 이를 이용하여 국내에서 일반적으로 건설되고 있는 교량형식에 대한 낙교위험도분석을 수행하였다. 교량의 낙교거동만을 분석하기 위해 교량해석모형을 단순화하였으며 지진에 의한 교량의 응답변위의 확률적 특성을 분석하여 낙교위험평가를 위한 확률모형을 제시하였다.

* 연세대학교 토목공학과 부교수, 정회원
** 연세대학교 토목공학과 박사후 연수과정
*** 삼보기술단

2. 지진하중 및 교량의 운동방정식

2.1 지진하중

지진하중이력은 일반적으로 비정상과정(nonstationary process)으로써 모형화되며 이는 정상과정과 시간에 따른 진폭의 변화를 결정하는 포락함수(envelope function)의 곱으로 표현 될 수 있다. 즉, 비정상과정인 지진이력은 주기와 위상각, 진폭이 다양한 정현함수를 중첩하여 이루어진 정상과정과 지진의 형태를 지배하는 포락함수와의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있다^{(3),(5)}.

$$\dot{v}_g(t) = E(t) \sum_{n=1}^N \sqrt{2S(\omega_n) \Delta\omega} \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (1)$$

여기서, $E(t)$ 는 가속도 시간이력곡선의 포락함수, $S(\omega)$ 는 스펙트럼 밀도함수, $\Delta\omega$ 는 진동수의 증분, ω_n 은 진동수, ϕ_n 은 위상각이다. 위상각 (ϕ_n)은 독립무작위변수로 0과 2π 사이에서 균등한 분포를 갖는다.

본 연구에서 사용한 Kanai-Tajimi 스펙트럼 밀도함수 $S(\omega)$ 는 다음과 같다⁽⁵⁾.

$$S(\omega) = S_0 \frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \quad (2)$$

여기서 S_0 는 백색잡음의 스펙트럼 밀도상수이며, 지반의 동적 특성에 의한 변수 ω_g 와 ζ_g 에 의해 모양이 결정된다.

지진이력을 발생시키기 위해서는 작성하려는 지진파의 전체 모양을 나타내는 포락함수를 결정하여야 한다. 일반적으로 지진파형은 지진의 발생원인, 규모와 지반조건에 따른 감쇠현상 등에 따라 다르다. 또한 동일한 지진이라도 진앙지로부터 관측소의 위치에 따라 지진파형의 특성은 달라지게 된다. 한반도의 지진특성을 반영할 수 있는 유효한 포락함수가 없는 관계로 본 연구에서는 지진파형의 포락함수를 그림 1과 같이 가정하였으며, 지진이력의 지속시간을 T_1 , T_2 , T_3 으로 나누는 각 구간별 포락함수 $E(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_1(t) &= t^a && \text{for } T_1 \\ E_2(t) &= E_{\max} && \text{for } T_2 \\ E_3(t) &= b \cdot \exp(-ct) && \text{for } T_3 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, T_1 = S파의 도달시각에서 최대진폭을 나타내는 시각까지의 구간, T_2 = 최대진폭이 일정한 구간, T_3 = 진폭이 감소되는 구간, a, b, c 는 상수다. 지진이력의 유효지속시간은 24초로 가정하였고, 지속시간의 구간별 진동시간은 표 1과 같이 결정하였다.

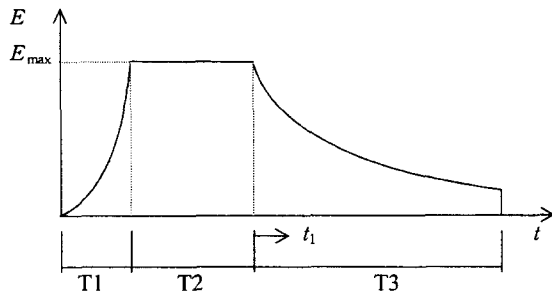


그림 1 관측된 지진파로부터 가정한 포락함수

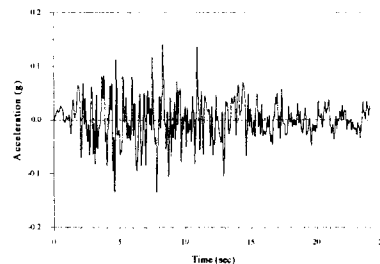


그림 2 지진이력의 예

표 1 지진이력의 유효지속시간

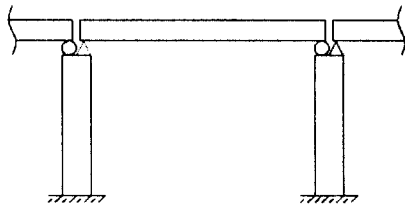
	T_1	T_2	T_3
지속시간	3초	6초	15초

모의 발생된 지진이력의 응답스펙트럼이 설계응답스펙트럼과 비교하여 만족스러운 범위 내에 있지 않을 경우에는 지진이력의 보정이 필요하다. 지진이력의 보정은 수정해야 할 응답스펙트럼 상의 진동수에 해당하는 정현파를 중첩시킴으로 이루어진다⁽⁴⁾.

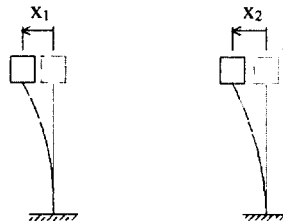
2.2 교량의 운동방정식

낙교를 지배하는 주된 교량의 거동은 교축방향의 변위이며, 이 때 교각은 그림 3에서 보인 바와 같이 상부구조와 같이 거동한다고 가정된다. 따라서 교량구조를 교각의 상단에 질량이 집중된 것으로 모형화하면 해석모형은 단자유도를 가지는 기본진동단위로 단순화시킬 수 있다.

$$m^* \ddot{x}(t) + c^* \dot{x}(t) + k^* x(t) = p_{eff}^*(t) \quad (4)$$



(a) 교량의 구성



(b) 대응되는 단자유도 모형

그림 3 교량의 단자유도 모형

교량의 낙교는 식(4)에 의해서 구한 변위와 인접교각위의 상판의 변위 또는 인접교대와의 상대 변위가 최대지지길이보다 큰 경우에 일어난다고 가정하였다. 앞으로 교량의 응답거동은 인접하고 있는 교각상판의 상대변위를 뜻한다.

3. 해석방법

교량의 지진하중에 의한 낙교위험을 분석하기 위하여 먼저 교량의 응답거동으로 이루어진 확률 과정을 수치시뮬레이션을 통하여 구하고 각 응답샘플로부터 얻은 최대응답변위의 확률적 특성을 구하였다. 교량의 사용기간을 50년으로 가정하여 주어진 지진의 진도에 대한 최대초과확률(probability of exceedance)을 구하여 50년 기간에 대한 교량의 낙교발생확률을 구하였다.

3.1 최대응답변위의 확률분포특성

지진이력에 의한 최대응답변위의 확률분포특성을 분석하기 위하여 1,000개의 시간이력을 산출하였으며 각각에 대한 최대응답변위를 구하였다. 그림 4와 같이 최대응답변위의 확률분포특성을 분석하기 위하여 대수정규분포 확률용지에 대수정규분포 모형의 적합성을 검토한 결과 전반적으로 대수정규분포와 잘 일치되는 것을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 최대응답변위의 확률특성

을 대수정규분포로 가정하였다.

3.2 지진위험도 분석

위험도 해석을 위하여 기간 t 년 동안 최대진도 I 를 초과하는 지진이 최소한 한번 발생할 확률인 최대진도 초과확률 (P_t)을 다음과 같이 표현할 수 있다⁽⁶⁾.

$$P_t = 1 - \exp[-\lambda t \cdot \exp\{-\beta^*(I - i_0)\}] \quad (8)$$

최대진앙진도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I = (\log a_g - 0.014)/0.3 \quad (9)$$

식(9)에서, λ 는 연평균발생확률, β^* 는 매개변수, i_0 는 진앙진도, a_g 는 최대지반가속도이다.

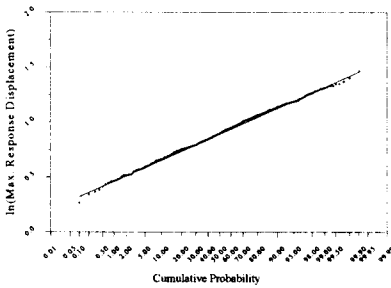


그림 4 최대응답변위의 확률분포특성 (대수정규분포)

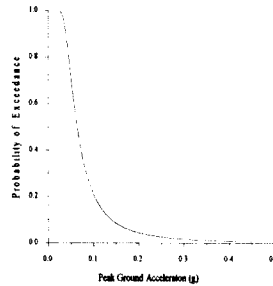


그림 5 50년 기간의 지진위험도곡선

3.3 낙교발생확률

최대지반가속도가 a_g 인 지진이 발생하였을 때 낙교가 발생할 확률은 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$P(\text{failure}|a_g) = P\left(\frac{N}{D} < 1\right) \quad (10)$$

여기서, N 은 최소받침지지길이, D 는 지진에 의한 최대응답변위이다.

최소받침지지길이는 대상교량에 따라 일정한 상수값을 갖고 최대응답변위는 대수정규분포를 나타내므로 위의 식은 다시 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(\text{failure}|a_g) = \Phi\left(\frac{\lambda_D - \ln N}{\zeta_D}\right) \quad (11)$$

그리고 신뢰성지수 (β)는 다음과 같이 정의된다.

$$P(\text{failure}|a_g) = 1 - \Phi(\beta) \quad (12)$$

여기서, $\beta = (\ln N - \lambda_D) / \zeta_D$

대상교량의 50년 동안 낙교가 발생할 확률은 50년 동안 각 최대지반가속도가 발생할 확률과 그때의 낙교발생확률의 곱을 모두 누적한 값이다.

$$P_f = \sum P(\text{failure}|a_g) P_t(a_g) \quad (13)$$

4. 결과분석

본 연구에서는 지진하중을 받는 여러 기본진동단위형식을 갖는 교량의 낙교위험에 대하여 확률적 분석을 하였다. 교량의 구조형식으로는 국내에서 많이 볼 수 있는 4가지의 형식을 고려하였으며 그 형식으로는 교대와 인접한 단순형, 교각사이에 위치한 단순형, 교대와 인접한 3경간 연속형, 교각사이에 위치한 3경간 연속형이다 (그림. 6). 단순형의 상부구조형식으로는 강교량과 콘크리트 교량의 일반적인 형식인 강판형교와 PC형교를 대상으로 하였으며 연속형은 강판형교만을 고려하였다. 대상교량은 모두 내진1등급으로 설계하였으며 강판형교는 지간 35m, 교각 높이 10m의 4차선으로 PC형교는 지간이 30m, 교각 높이가 10m인 4차선으로 정하였다. 교각의 형식은 π 형이고 기초부는 강말뚝기초, 교각의 설계안전율은 2.0으로 모두 동일하다.

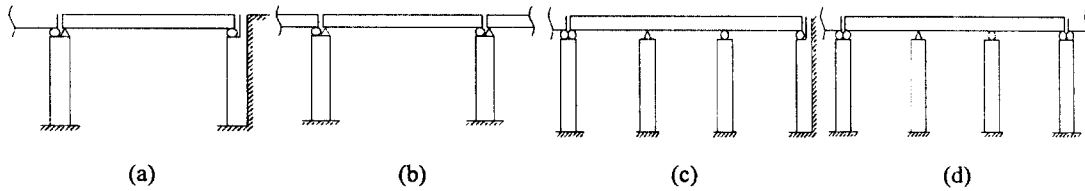


그림 6 대상교량의 기본진동단위: (a) 교대와 인접한 단순형; (b) 교각사이에 위치한 단순형; (c) 교대와 인접한 3경간 연속형; (d) 교각사이에 위치한 3경간 연속형

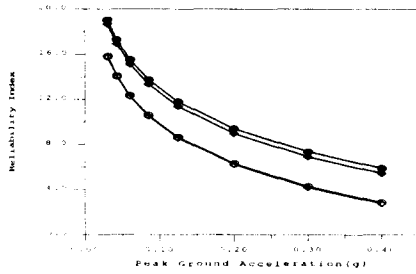
교량의 지간 또는 연속지간 중 양쪽이 모두 교각위에 위치한 지간은 지진 발생시 이웃한 두 진동단위의 거동차이로 인해 발생하는 교각 상부의 상대변위에 의해 낙교가 일어나게 된다. 인접한 진동단위는 질량차, 교각의 강성, 높이의 차이에 의해 진동특성에 차이가 발생하게 되고 이로 인하여 교각의 거동에 위상차가 발생할 수 있으나 본 연구에서는 진동단위의 물성치 차이는 무시할 만하다고 가정하고 지진파의 전파속도에 의한 도달시간차만을 고려하였다.

교량의 지간이 길 경우 지진파가 두 대상교각에 도달하는 시간차에 의하여 두 교각의 운동에 위상차를 초래하게 되며 상대변위에 영향을 미칠 수 있다. 지진파의 속도는 지반의 조건이나 깊이, 진앙지 등의 영향인자에 의해 많은 차이를 보이게 되며 단단한 점토층이나 암반의 경우 760(m/s)에서부터 연약지반의 경우 100(m/s)까지 속도의 차이가 나타난다⁽⁹⁾. 본 연구에서는 (교각사이에 위치한 단순형 및 3경간 연속형에 대하여) 지진파의 속도를 100(m/s)와 300(m/s)으로 가정하여 지진파가 각 교각에 도달하는 시간차를 고려하였다. 교대와 인접한 형식에서는 지진파의 도달시간차는 이로 인한 영향이 거의 무시할 만 함으로 고려하지 않았다.

4.1 단순형

단순형지간은 강교량과 PC형교 모두에 대하여 분석하여 교량의 구조형식은 물론 교량의 재료형식이 낙교위험도에 미치는 영향도 분석하였다. 지진파의 속도가 100(m/s)인 경우 강교량과 콘크리트교량의 최대지반가속도에 따른 신뢰성지수의 변화를 그림 7에 비교하여 나타내었다. 모든 경우에서 신뢰성지수는 지반가속도에 대하여 매우 민감하며, 지반가속도가 증가함에 따라 크게 감소한다.

교대와 인접한 단순형의 진동단위에 대하여 분석한 50년 기간의 낙교확률은 표 2와 같다. 강교량에 비해 질량이 큰 PC형 교량의 낙교발생확률이 높은 것으로 나타났다.



- 교대와 인접한 단순형 (강교량)
- 교각사이에 위치한 단순형 (강교량)
- ◆ 교대와 인접한 단순형 (콘크리트교량)
- ◇ 교각사이에 위치한 단순형 (콘크리트교량)

그림 7 강교량과 콘크리트 교량의 신뢰성지수 비교
(지진파의 진행속도 : 100 m/s)

표 2 교대와 인접한 단순형의 50년 기간 낙교확률

	강판형교	PC형교
P_f	1.03E-11	1.42E-10

다음은 교각사이에 위치한 단순형지간에 대한 낙교확률을 분석하였으며, 그 결과는 표 2에 정리하였다. 분석결과 지진파의 진행속도가 100(m/s)인 경우는 교대측에 인접한 단순형지간보다 매우 높은 낙교위험도를 보이는 반면 진행속도가 300m/s인 경우는 오히려 위험도가 줄어 든 것을 알 수 있다. 이는 인접한 두 교각에 입력되는 지진파의 속도에 따른 지진의 교각도달시간차에 따라 두 인접한 진동단위의 거동에 위상차가 크게 발생하여 상대변위가 커지기 때문인 것으로 판단된다. 재료의 차이에 의한 영향은 교대와 인접한 지간과 마찬가지로 콘크리트 교량이 강교량에 비해 낙교발생확률이 다소 높은 경향을 나타내는 것으로 나타났다.

표 3 교각사이에 위치한 단순형의 50년 기간 낙교확률

	지진파의 진행속도 : 100 (m/s)		지진파의 진행속도 : 300 (m/s)	
	강판형교	PC형교	강판형교	PC형교
P_f	1.32E-5	1.80E-5	2.01E-13	1.99E-15

4.2 3경간 연속형

3경간 연속교의 지진에 의한 거동은 힌지로 상부구조와 연결되어 있는 진동단위의 거동을 이용하여 단순화시킬 수 있다 (그림 6 참조). 지진파의 진행속도가 100(m/s)인 경우에 대상교량의 형식에 따른 신뢰성지수의 차이를 그림 8에 비교하여 나타내었다. 단순형과 마찬가지로 지반가속도의 증가에 따라 신뢰성지수가 크게 감소함을 알 수 있다.

교대와 인접한 경우와 교각사이에 위치한 경우의 3경간 연속형의 50년 기간 낙교확률을 표 4와 표 5에 각각 나타내었다. 분석결과 단순교의 교대 인접지간 결과와 비교해 보면 상부구조의 질량 증가로 인하여 3경간 연속교의 경우가 낙교위험이 큰 것을 알 수 있다. 교각사이에 위치한 3경간 연속형의 경우 지진파의 속도차로 인한 낙교위험의 변화는 매우 작게 나타났으며 그 이유는 연속형의 단부를 지지하는 교각에는 대부분의 상부구조가 가동단으로 지지되어 있어 수평력에 대하여 상부구조의 질량을 고려하지 않고 교각 자체만의 질량을 고려하기 때문에 지진하중에 의한 거동이 작아 상대변위에 큰 차이가 없기 때문인 것으로 판단된다.

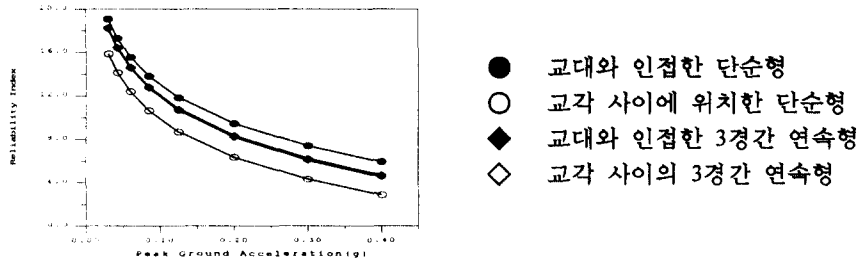


그림 8 강교량의 교량구조형식에 따른 신뢰성지수 비교

표 4 교대와 인접한 3경간 연속형의 50년 기간 낙교확률

	교대와 인접한 경우
P_f	7.97E-9

표 5 교각사이에 위치한 3경간 연속형의 50년 기간 낙교확률

	지진파 진행속도 100(m/s)	지진파 진행속도 300(m/s)
P_f	1.83E-8	1.96E-8

5. 결론

본 논문에서는 지진하중을 받는 교량의 시간이력응답해석을 수행하였으며 교량의 응답변위에 대한 확률모형과 50년 기간의 지진위험도곡선을 이용하여 지진하중에 의한 낙교위험분석을 수행하였다.

다양한 대상교량에 대한 낙교위험분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 교량을 단순화시킨 단자유도 모형을 이용한 교량의 종방향 지진이력의 응답변위를 대상교량의 유한요소 모형해석에 의한 응답변위와 비교함으로써 단순모형의 타당성을 검증하였고, 이를 낙교 분석을 위한 시간이력응답해석에 이용함으로써 작업시간과 노력을 단축시킬 수 있었다.
- 2) 단순형교에서는 교각사이에 설치된 단순형지간이 교대측에 설치된 단순형지간보다 낙교위험이 높은 것으로 분석되었으나 연속형교에서는 가동단 교각의 동적 특성상 이러한 차이가 나타나지 않았다.
- 3) 교량의 지간장에 약간의 차이가 있으나 같은 교각높이와 설계안전율을 갖는 강판형교와 PC형교에 대한 낙교위험을 분석한 결과, 질량이 큰 PC형교의 낙교위험이 다소 높은 것으로 나타났다.

도로교표준시방서에서 제시하고 있는 최소받침지지길이는 교량 상부구조의 단부까지의 길이와 교각의 높이에 의해 결정이 된다. 이러한 변수들은 지진에 의한 교량의 응답변위에 영향을 주는 요소이기는 하지만 교량의 응답에 보다 많은 영향을 주는 변수로써 교량의 구조형식에 따른 상부구조 질량의 크기 및 교각강성 등이 고려될 수 있다. 기존에 제시되어 있는 최소받침지지길이의 규정은 이러한 변수들에 대한 고려가 부족한 것으로 판단되며 도로교표준시방서의 규정에 대한 보다 합리적인 검토가 필요하다고 판단된다.

6. 참고문헌

- 1) Ang, A. H-S. and Tang, W. H., Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. I & II, John Wiley & Sons, 1984.
- 2) Priestley, M. J., Seible, F., and Calvi, G. M., Seismic Design and Retrofit of Bridges, Wiley-Interscience, 1996.
- 3) Scanlan, R. H. and Sachs, K., "Earthquake Time Histories and Response Spectra", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 100, 1974, pp. 635~655.
- 4) Tsai, N. C., "Spectrum-Compatible Motions for Design Purposes", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 98, 1972, pp. 345~356.
- 5) Yeh, C. H. and Wen, Y. K., Modeling of Nonstationary Earthquake Ground Motion and Biaxial and Torsional Response of Inelastic Structures, Structural Research Series No. 546, Department of Civil Engineering, University of Illinois, 1989.
- 6) Lee, K. and Noh, M. H., "A Probabilistic Analysis of the Seismic Risk in Korea (I)", Journal of the Geological Society of Korea, Vol. 24, No. 1, pp. 62-70.