

근거리지진에서 장주기사장교의 신뢰성평가

방 명 석

한국교통대학교 안전공학과
(2011. 3. 25. 접수 / 2012. 1. 13. 채택)

Reliability Assessment of Long-Period Cable-Stayed Bridges on Near Fault Earthquake(NFE)

Myung-Seok Bang

Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation
(Received March 25, 2011 / Accepted January 13, 2012)

Abstract : The seismic safety of long-period cable-stayed bridges is assessed by probabilistic finite element analysis and reliability analysis under NFE. The structural response of critical members of cable-stayed bridges is evaluated using the developed probabilistic analysis algorithm. In this study, the real earthquake recording(Chi-Chi Earthquake; 1997) was selected as the input NFE earthquake for investigating response characteristics. The probabilistic response and reliability index shows the different aspect comparing the result from FFE earthquake. Therefore, the probabilistic seismic safety assessment on NFE earthquakes should be performed for the exact evaluation of long-period cable-stayed bridges and the earthquake resistant design criteria should be complemented.

Key Words : near fault earthquake, probabilistic, reliability, long-period, cable-stayed bridge

1. 서 론

최근에 발생한 동일본지진(2011), 아이티 및 칠레 지진(2010), 중국 쓰촨지진(2008) 등은 해당국가 및 주변지역에 막대한 인적·경제적 피해를 발생시켰다. 이에 따라 지진에 대한 사회적 관심은 매우 크며, 단층주변에 위치한 사회간접시설의 내진설계 및 내진안전성 평가에 대한 연구가 진행되었다¹⁾. 그러나 이러한 지진들은 대부분 원거리지진(FFE)으로 알려져 있고 상대적으로 근거리지진(NFE)에 대한 연구는 적다. 근거리지진(NFE)은 기존의 입력지반운동이나 원거리지진(FFE)과는 다른 특성을 가지고 있기 때문에 기존의 내진설계기준에 따라서 건설된 시설물에 대한 재검토가 필요하며, 근거리지진에 관한 특성평가는 현재 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다^{2,3)}.

근거리지진의 특성은 단층의 활동으로 지진발생초기에 펄스(Pulse)형태의 매우 큰 가속도성분을 보여주고 있으며 이에 의해서 초기지반변위가 매우

크게 나타난다. 이는 동일한 최대지반가속도(peak ground acceleration, PGA)를 갖는 일반적인 원거리지진에 비해 초기가속도 및 변위성분이 매우 큰 값을 보여주는 것으로 지진파가 내포하고 있는 에너지가 매우 큰 것을 알 수 있다. 그러나 국내의 경우에 근거리지진에 의한 손상이 큰 것으로 평가된 장주기 구조물에 대한 연구실적은 아직까지 초기단계에 불과한 실정이다^{1,3)}. 한편 유한요소법에 확률이론을 도입하여 개발된 확률론적 유한요소해석 방법은 간단한 유한요소해석으로 확률변수의 불확실성에 따른 응답결과의 평균 및 표준편차를 파악할 수 있는 평가방법이다^{4,5)}. 이 연구에서는 국내의 내진설계규정에 제시되어 있지 않은 근거리지진특성을 고려하여 장주기 사장교에 대한 확률론적 유한요소해석과 이에 따른 신뢰성해석을 수행하였다. 이를 바탕으로 장주기 사장교의 지진특성별 응답양상 및 내진안전성을 정량적으로 평가하였다. Fig. 1은 이 연구에서 선정한 근거리지진과 원거리지진의 가속도시간이력(TCU052NS: NFE; ILA035NS: FFE)을 도시한 것이다.

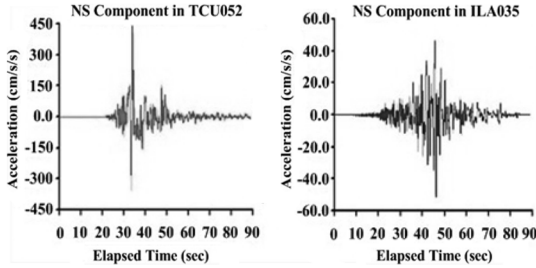


Fig. 1. Acceleration time history of near- and far-fault earthquakes(NEE; FEE).

2. 확률론적 유한요소해석 및 신뢰성평가 방법

본 해석에서는 장주기사장교의 부재강성 및 지진특성에 따른 지진하중을 불확실성을 포함한 확률변수로 고려하고 각각의 확률변수는 비연성(uncoupled)관계로 가정하였다. 확률변수벡터를 포함하는 다자유도 구조물의 확률론적 동적운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$[M(\alpha_i)]\{\ddot{X}(t, \alpha_i)\} + [C(\alpha_i)]\{\dot{X}(t, \alpha_i)\} + [K(\alpha_i)]\{X(t, \alpha_i)\} = \{F(t, \alpha_i)\} \quad (1)$$

식 (1)과 같은 확률론적 동적운동방정식을 편미분하면, 식 (2)와 같은 섭동방정식(Perturbation Equation)을 구할 수 있다⁵⁾.

$$[M]^{(0)}\{\ddot{X}\}^{(2)} + [C]^{(0)}\{\dot{X}\}^{(2)} + [K]^{(0)}\{X\}^{(2)} = \{F\}^{(2)} - [M]^{(2)}\{\ddot{X}\}^{(0)} - [C]^{(2)}\{\dot{X}\}^{(0)} - [K]^{(2)}\{X\}^{(0)} - 2\{[M]^{(1)}\{\ddot{X}\}^{(1)} + [C]^{(1)}\{\dot{X}\}^{(1)} + [K]^{(1)}\{X\}^{(1)}\} \quad (2)$$

본 연구에서는 등가정규변환방법을 이용하여 신뢰성해석을 수행하였다. 등가정규변환방법은 연성 비정규분포를 갖는 기본변수들의 한계상태방정식이 비선형함수일 경우에도 정확한 해석결과를 구할 수 있는 신뢰성해석방법이다. 등가정규분포함수는 비정규분포($F_{X_i}(X_i^*)$)값과 확률밀도함수($f_{X_i}(X_i^*)$)값이 초기추정점인 X_i^* 점에서 표준정규확률분포함수($\Phi(U_i^*)$)와 표준정규확률밀도함수($\phi(U_i^*)$)가 같게 되도록 비정규변수를 등가정규분포로 변환하여 평균($\mu_{X_i}^N$)과 표준편차($\sigma_{X_i}^N$)를 구하는 방법이다. 등가의 평균은 식 (3)과 같이 산정할 수 있다.

$$\mu_{X_i}^N = X_i^* - \Phi^{-1}\left[F_{X_i}(X_i^*)\right]\sigma_{X_i}^N \quad (3)$$

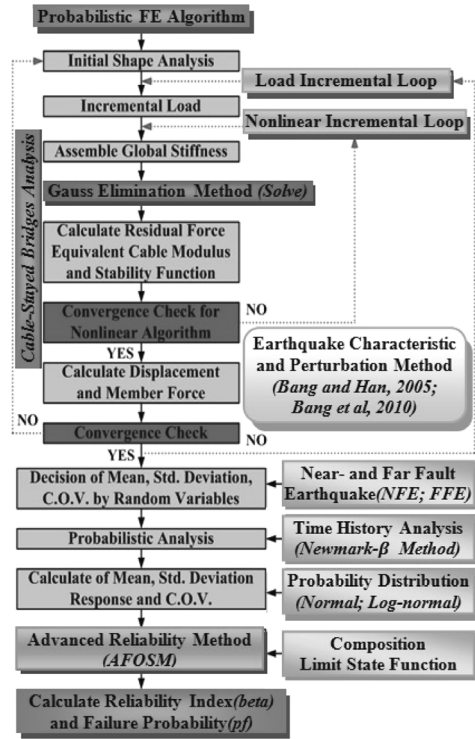


Fig. 2. Flow chart of algorithm(PFEMA).

또한 표준편차는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{X_i}^N = \frac{\phi\left[\Phi^{-1}\left[F_{X_i}(X_i^*)\right]\right]}{f_{X_i}(X_i^*)} \quad (4)$$

Fig. 2는 장주기사장교의 확률론적 유한요소해석 및 신뢰성해석을 효율적으로 수행하기 위해서 개발 및 검증된 PFEMA(Probabilistic FE Method Algorithm)의 개요도이다⁵⁾. 이 연구에서는 PFEMA를 이용하여 초기형상해석을 수행한 후 산정한 케이블의 초기긴장력을 도입하여 정적비선형해석을 수행하였으며, 지진특성별 응답해석은 정적비선형해석의 최종평형상태를 초기상태로 간주하여 수행하였다.

3. 확률론적 신뢰성해석

3.1. 해석모델 및 제원

확률론적 유한요소해석을 위한 대상교량은 국내 최초의 강사장교(steel cable-stayed bridges)인 진도대교를 선정하였다⁶⁾. 대상교량의 모델과 제원은 Fig. 3 및 Table 1, 2와 같다.

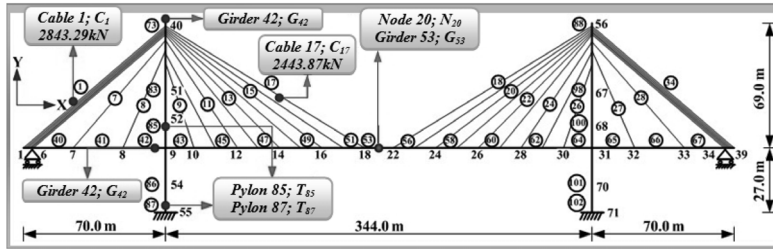


Fig. 3. Analysis model of the symmetrical long-period cable-stayed bridge.

Table 1. Section and property of selected cable-stayed bridge⁶⁾

section and properties		A (m ²)	E (kN/m ²)	I (m ⁴)
girder element	Side	0.9475	2.1×10 ⁸	0.9475
	Center	0.4373		0.5544
pilon element	Top	0.6460	2.1×10 ⁸	1.2270
	Middle	0.5250		0.4820
	Bottom	0.6190		0.5340
	Pier	35.60	2.0×10 ⁷	125.40
cable element	1,2,3,4	0.00998	1.6×10 ⁸	-
	5,6,17			
	7,11,12	0.00598	1.6×10 ⁸	
8,9,10	0.00426			
	13,14,15,16	0.00762		

Table 2. Structural type of the selected bridge

span length(m)	70.0 - 344.0 - 70.0 = 484.0
bridge width(m)	11.30
cable type	semi-fan type
cable classification	locked coil cable

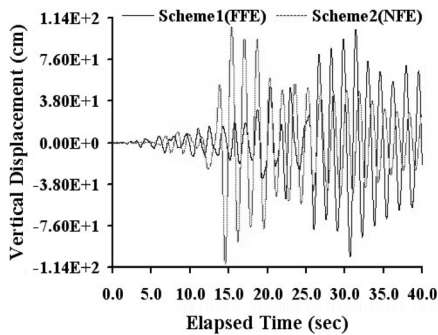
3.2. 확률유한요소해석 및 결과분석

장주기 사장교의 부재강성과 지진특성별 가속도 시간이력에 의한 지진하중이 갖는 불확실성을 모두 확률변수로 고려하였으며, 변동계수(C.O.V.: coefficient of variation)는 관련된 연구결과를 참고하여 확률론적 유한요소해석을 수행하였다. 확률변수는 케이블요소의 단면적과 탄성계수 및 주탑과 주형의 단면적, 탄성계수와 단면이차모멘트를 고려하였다.

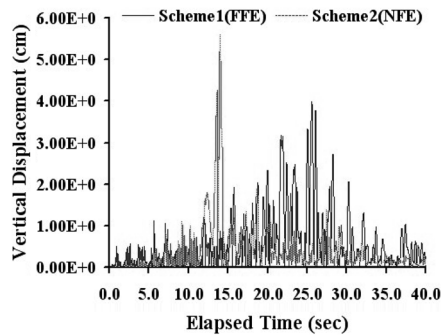
NFE 및 FFE의 가속도시간이력은 최대치를 포함하는 일부구간을 적용하였다. 기존 연구에서와 같이 지진하중은 가속도시간이력(NFE 및 FFE)을 증폭하여 정규화한 후, 질량에 곱하여 지진하중을 산정하였으며, 주경간 주형에 가진하였다. 이러한 조건하에서 확률론적 유한요소해석 알고리즘(PFEMA)을 이용하여 변위, 축력, 휨모멘트, 케이블긴장력에 대한 평균응답, 표준편차응답 및 변동계수를 검토하였다. 이때, 평가방안은 Scheme1(확률변수(부재강성 + FFE) + 비선형해석)과 Scheme2(확률변수(부재강성 + NFE) + 비선형해석)로 구분하여 검토하였다. 수치해법은 Newmark-Beta방법을 이용하였으며, 감쇠비는 2.0%를 적용하였다. 확률변수에 따른 장주기 사장교의 변위응답은 20번 절점(주형 중앙부; 수직변위)과 40번 절점(주탑 최상단부; 수평변위)을 평가하였다. 지진특성별로 같은 확률분포와 편차를 갖는 경우에 확률론적 유한요소해석에 따른 절대최대 변위응답 결과는 Table 3과 같으며, Fig. 4는 NFE

Table 3. Absolute max. displacement by NFE and FFE

critical node			displacement
			Scheme2/Scheme1
girder	N ₂₀	mean std. deviation	1.070 / 1.366
pylon	N ₄₀	mean std. deviation	1.048 / 1.358



(a) Mean value



(b) Std. deviation value

Fig. 4. Mean and std. deviation of vertical displacement value.

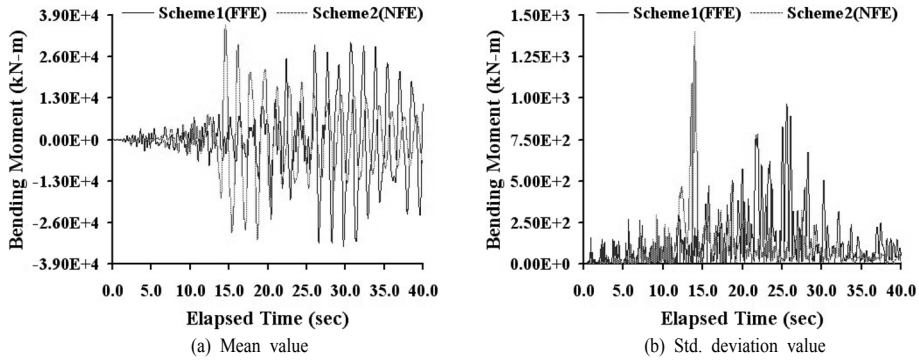


Fig. 5. Mean and std. deviation of bending moment value.

Table 4. Failure probability by NFE and FFE

critical members	girder 42 (G_{42})	girder 53 (G_{53})	pylon 85 (P_{85})	pylon 87 (P_{87})	cable 1 (C_1)	cable 17 (C_{17})
Scheme1	1.748E-06	7.351E-04	1.153E-06	1.492E-11	3.211E-08	2.502E-08
Scheme2	9.011E-07	1.662E-03	1.089E-06	1.501E-11	5.062E-08	4.503E-08

에 따른 수직변위(20번 절점)의 평균응답 및 표준편차응답을 도시한 것이다. 주형의 경우, NFE을 고려한 최대·최소 평균응답은 각각 1.062와 -1.120 m로 산정되었으며, 최대 표준편차응답은 0.056 m로 검토되었다. 주탑의 경우, 최대·최소 평균응답은 0.185와 -0.197 m로 분석되었으며 최대 표준편차응답은 0.011 m의 응답결과를 얻을 수 있었다. 확률론적 유한요소해석에 의한 부재력 응답은 축력 및 휨모멘트로 구분하여 검토하였으며 휨모멘트에 대한 결과는 Fig. 5와 같다. 주형 및 주탑에 대한 부재력 결과는 변위결과와 같이 전반적으로 NFE에 의한 영향이 크게 나타났다. 그러나 장주기 사장교의 주요 부재별 변동계수는 구조 및 지진특성에 따라서 다양하게 평가된 점을 유의해야 할 것이다. 이러한 결과를 감안할 때, 지진특성은 장주기 사장교의 내진설계규정을 정립하기 위한 상당히 중요한 설계인자로 고려되어야 할 것으로 판단된다.

3.3. 신뢰성해석 결과분석

장주기 사장교의 한계상태방정식은 지진특성별 케이블긴장력, 주형과 주탑의 부재력 및 단면계수를 이용하여 구성하였다. 신뢰성해석은 전 장에서 고찰한 등가정규변환방법을 적용하였다. Fig. 6은 확률론적 유한요소해석에 의한 지진특성별 부재력의 평균, 표준편차 및 변동계수를 고려하여 검토된 신뢰성지수를 도시한 것이며, Table 4는 주요부재별 파괴확률을 정리한 것이다. 주형 중앙부의 파괴확률은 Scheme2에 의한 영향이 크게 검토되었으나, 주

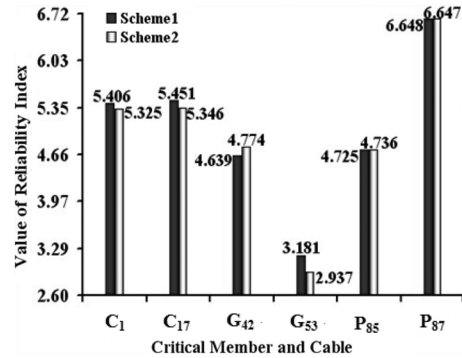


Fig. 6. Reliability index of cable-stayed bridge.

탑과의 접합부는 Scheme1에 의한 영향이 크게 산정되었다. 주탑의 경우에 파괴확률은 비슷한 양상을 보였으며, 케이블의 파괴확률은 전반적으로 Scheme2에 의한 영향이 크게 평가되었다. 상기의 결과로부터 NFE에 의한 장주기 사장교의 파괴확률 및 신뢰성지수는 FFE의 영향과는 상당히 다른 양상을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 지진특성을 반영한 장주기 사장교의 내진안전성은 충분한 검토가 요구되며, 활성단층과 인접한 경우 NFE에 대한 평가는 필수사항일 것으로 판단된다.

4. 결론

확률론적 유한요소해석 및 신뢰성해석 결과를 바탕으로 근거리지진의 특성을 고려한 장주기 사장교의 내진안전성을 평가하여 다음과 같은 결론을 유추할 수 있었다. 확률론적 유한요소해석 방안은 장주

기사장교의 지진응답해석에 따른 분산특성을 평가하는데 있어서 효율성이 큰 것으로 판단되며, 장주기 사장교의 지진특성(NFE; FFE)별 주요 응답양상을 파악하는데 있어서 유용하게 적용될 수 있다. 근거리지진 및 원거리지진에 의한 장주기 사장교의 확률론적 응답특성은 주요부재에 따라 상당히 다른 양상을 보여주는데, 근거리지진의 변위에 대한 변동계수는 원거리지진에 비해 약 1.277~1.295배 큰 양상을 나타냈다. 또한 주형 및 주탑에 대한 부재력결과는 변위결과와 같이 전반적으로 근거리지진에 의한 영향이 크게 나타났다. 상기의 결과로부터 근거리지진에 의한 장주기 사장교의 파괴확률 및 신뢰성지수는 원거리지진의 영향과는 상당히 다른 양상을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이런 결과를 검토하여 내진설계 및 이에 따른 개선된 평가규정이 정립되어야 할 것으로 판단된다. 향후 지진특성을 고려한 확률론적 유한요소해석 및 이에 따른 신뢰성해석 결과를 이용하여 기대생애주기비용에 기초한 장주기 사장교의 최적설계에 관해서도 연구범위를 확대할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 한국원자력연구소, “Near-Fault Ground Motions의 특성 연구”, Report ID KAERI/TR-2453, 2003.
- 2) P. B. Rao, and R.S. Jangid, “Performance of Sliding Systems under Near-Fault Motions”, Nuclear Engineering and Design, 203, 2001.
- 3) 방 명석, 한성호, “근거리지진의 특성 및 동적응답스펙트럼에 관한 연구”, 한국안전학회지, Vol. 20, No. 3, pp. 143~151, 2005.
- 4) 방 명석 “트리스구조물의 확률론적유한요소해석”, 대한토목학회지, Vol. 3, No.1, pp. 55~63, 1993.
- 5) 방 명석, 한성호, 이 우상, 이진욱, “강사장교의 초기형상과 비선형성을 고려한 확률론적 구조안전성평가”, 한국안전학회지, Vol. 25, No. 3, pp. 91~99, 2010.
- 6) 건설교통부, “진도대교 안전진단보고서”, 1993.