

# 근거리 지진에 의한 사장교의 동적응답해석에 관한 연구

## A Study on Dynamic Response Analysis of the Cable-Stayed Bridge Structure Subjected to Near Fault Ground Motions

한 성 호\* 권 의 성\*\* 신 제 철\*\*\* 방 명 석\*\*\*\*  
Han, Sung Ho Kwon, Eui Sung Shin, Jae Chul Pang, Myung Suk

### ABSTRACT

In this study, the characteristic of the Near Fault Ground Motion which was not considered at the seismic design in our country and how the Near Fault Ground Motion affects the cable-stayed bridge which have long period is analyzed through the dynamic response analysis. So, the object of this study is following that it makes the data which can be utilized as the seismic safety evaluation in case of the cable-stayed bridge taken the near fault in the future.

### 1. 서 론

최근 발생한 Northridge 지진(1994년, 미국), Kobe 지진(1994년, 일본), Chi-Chi 지진(1999년, 대만), 그리고 Kocaeli 및 Duzce 지진(1999년, 터키) 등에 의해 많은 인적, 경제적 피해가 발생했다. 이들 지진에 의해 피해를 입은 대부분 지역은 지진을 발생시킨 활성단층(Active Fault) 인근에 있었고 과거의 내진설계기준에 따라 설계된 구조물의 피해도 매우 큰 것으로 보고 되고 있다.<sup>(1),(2)</sup> 이는 근거리 지진(Near-Field Earthquake 또는 Near-Fault Earthquake)이 가지는 지진파의 특성이 과거 설계기준에서 제시하고 있는 입력지반운동이나 원거리 지진과 다른 특성을 가지고 있기 때문이다. 근거리 지진은 단층의 활동으로 인해 지진발생 초기에 펄스(Pulse) 형태의 매우 큰 속도성분을 가지고 있으며 그에 따른 변위량도 매우 크게 나타났다. 과거에 발생한 근거리 지진에서는 변위가 0.5~1.5m로 나타났으며 그 이상의 변위량을 보인 경우도 있다. 또한 최대속도는 0.5m/sec 이상의 매우 큰 값을 보여주었다.<sup>(2)</sup> 이는 동일한 최대 지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)를 갖는 경우, 일반적인 원거리 지진에 비해 속도 및 변위성분이 매우 큰 값을 보여주는 것으로 지진파가 가지는 에너지가 매우 크다고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 우리나라의 내진 설계규정에서 고려하고 있지 않은 근거리 지진에 대한 일반적인 특성을 살펴본 후 근거리 지진이 일반적인 원거리 지진과는 달리 장주기 구조물인 사장교에 어떠한 영향을 미치는지를 응답해석을 통하여 비교·분석하였으며 향후 사장교 구조물의 내진 안전성 평가에 기초 자료로 활용될 수 있도록 하였다.<sup>(3)</sup>

\* 정회원 충남대학교 토목공학과 공학박사  
\*\* 충남대학교 토목공학과 석사과정  
\*\*\* 정회원 충남대학교 토목공학과 교수  
\*\*\*\* 정회원 충주대학교 토목공학과 교수

## 2. 근거리 지진의 일반적 특성

근거리 지진은 지진파의 초기에 나타나는 펄스형태의 매우 큰 속도와 큰 장주기 성분으로 대변할 수 있다.<sup>(4)</sup> 이러한 펄스형태의 운동은 큰 에너지를 가지고 있어 구조물에 큰 피해를 발생시킬 수 있으며 특히 펄스의 주기와 근접한 고유주기를 갖는 구조물의 경우 구조물의 응답이 급격히 증가하게 된다. 지진원(Seismic Source)의 특징과 관련하여 근거리 지진은 원거리 지진과는 달리 지진원을 하나의 점(Point)으로 모델링 하여 해석할 수 없기 때문에 지진원의 특징을 고려해야한다.

근거리 지진에서 큰 속도성분을 갖는 주된 원인은 단층운동의 방향성(Rupture Directivity)과 Fling-Step의 영향으로 대별할 수 있다. 그 외에 역단층이나 정단층과 같은 Dip-Slip Fault에서 발생할 수 있는 상반(Hanging Wall)의 영향을 들 수 있다.<sup>(5)</sup> 방향성(Rupture Directivity)과 관련하여 전방향성(Forward Directivity) 활동의 진행은 부지의 전단파 속도에 근접한 속도로 발생하기 때문에 지진 초기에 매우 짧은 지속시간을 갖는 펄스운동을 발생시킨다. 후방향성(Backward Directivity)을 나타내는 지진기록은 긴 주기의 작은 진폭을 가지고 긴 지속시간 동안 운동한다.<sup>(5)</sup> 방향성에 따른 근거리 지진의 시간이력이 그림 1에서 제시된다. 그림 1에서 지진 발생 초기에 큰 속도성분을 갖는 펄스 형태의 지진파를 볼 수 있으며 변위 성분이 매우 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 Landers 지진에서는 지반의 영구변형이 크게 나타나는 Fling의 영향을 확인할 수 있다. 상반의 영향과 관련하여 정단층이나 역단층에 의한 지진파의 단주기 성분이 Strike-Slip Fault에 비해 1.3~1.4배 정도 증가하게 된다.<sup>(7)</sup> Abrahamson과 Somerville는 상반과 하반(Foot Wall)에서 지반운동의 크기를 경험적으로 구분하여 제시하였다.<sup>(6)</sup> 상반의 영향은 거리가 8~18km에 위치할 때 0~0.6초 구간에서 최대 1.45배가 차이 나게 되며 5초 이후에는 동일하게 된다.<sup>(8)</sup>

Fling의 영향은 영구적인 지반 변형에 의해 발생되는 것으로 큰 속도의 펄스운동을 발생시키는 원인이 된다. Fling에 의한 속도 펄스는 한 방향으로 큰 속도를 발생시키며 진앙의 위치와는 무관하게 단층 활동이 발생한 근처에서 발생한다.

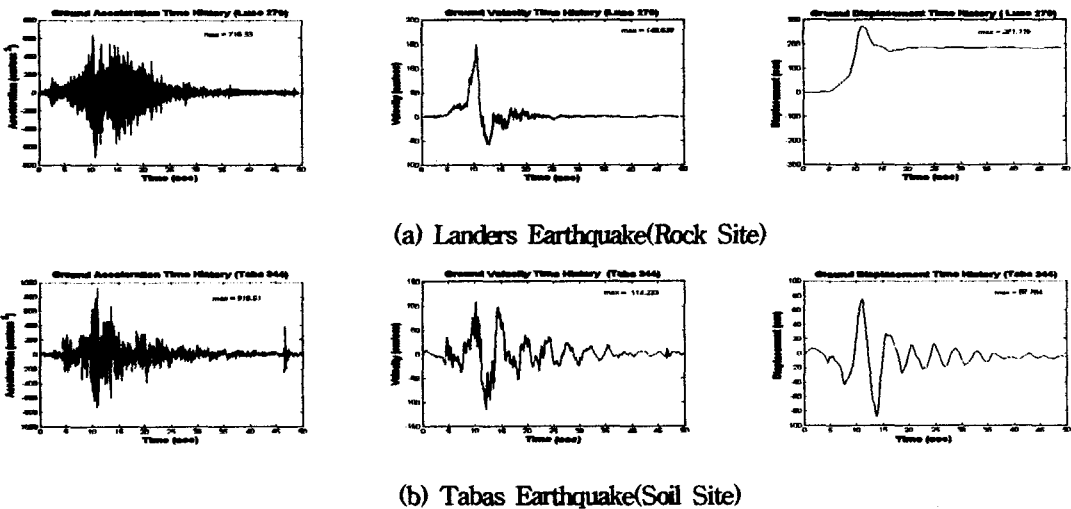


그림 1. Landers 지진 및 Tabas 지진의 시간이력

## 3. 사장교의 동적응답해석

대상 사장교의 전체적인 개형은 주경간장이 335.28m, 측경간장이 137.16m, 주탑의 높이가 60.96m인 세 가지

형태의 사장교를 총 24개의 절점과 12개의 케이블(등가트러스)요소, 23개의 보요소로 구성하였으며, 케이블, 주탑과 주형의 구성요소에 대한 제원은 표 2와 같다.<sup>(9)</sup>

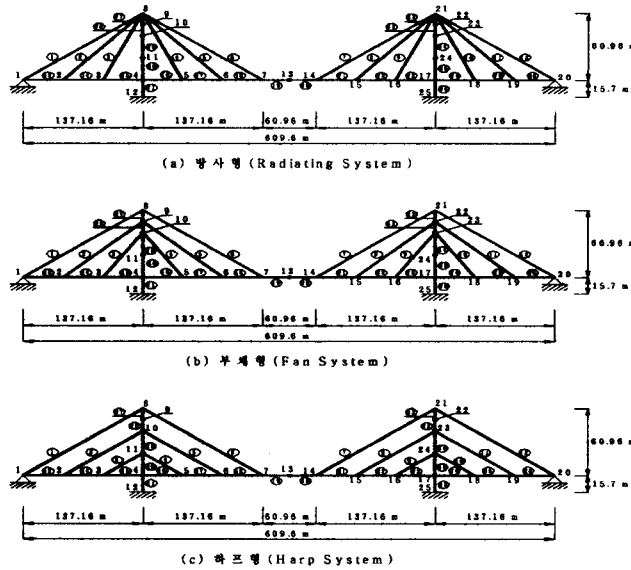


그림 2 사장교의 해석 모델링

표 1 사장교 해석 모델의 제원 및 재료특성

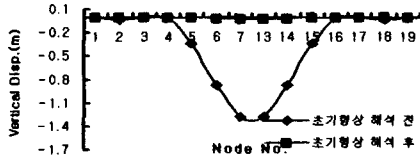
Properties		A (m <sup>2</sup> )	E(tonf/ m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	ρ(tonf/ m <sup>3</sup> )
Girder		0.60	2.1 × 10 <sup>7</sup>	1.50	7.85
Tower		0.80	2.1 × 10 <sup>7</sup>	1.90	7.85
Cable	Top	0.043	1.6 × 10 <sup>7</sup>	0	7.85
	Middle	0.037			
	Bottom	0.030			

### 3.1 케이블의 초기긴장력 결정

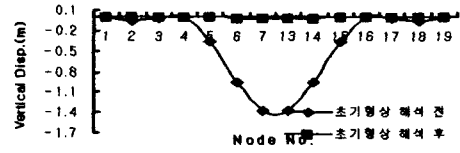
주형의 사하중 분포에 따른 케이블의 초기긴장력은 사장교의 비선형성을 고려한 시산법을 이용하여 모든 절점에서 최대 상태변위 0.001mm의 수렴조건으로 결정하였다. 주어진 대상 사장교가 대칭구조이므로, 케이블 1~6번 요소의 초기긴장력에 대한 해석 결과는 표 2와 같다.<sup>(10)</sup>

표 2 초기긴장력 결정

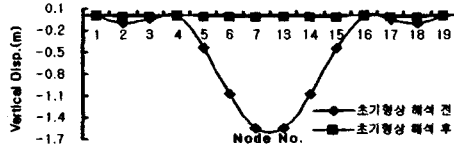
Cable No.	Type	(tonf)		
		Radiating System	Fan System	Harp System
1		630.7877	641.9985	651.6942
2		487.6787	544.8865	639.7575
3		265.7405	326.0680	520.3903
4		269.2478	337.6191	537.5941
5		407.3586	463.8829	580.6305
6		704.2271	699.8916	685.6875



(a) 방사형(Radiating System)



(b) 부채형(Fan System)

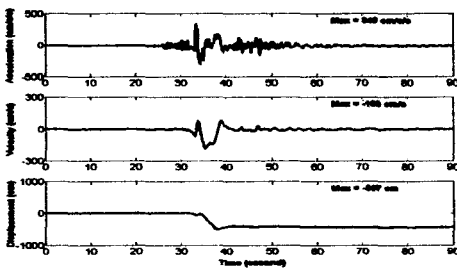


(c) 하프형(Harp System)

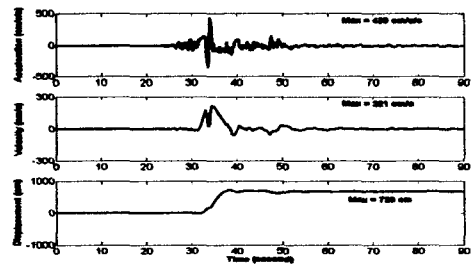
그림 3 사장교의 초기형상해석

### 3.2 동적응답 결과 분석

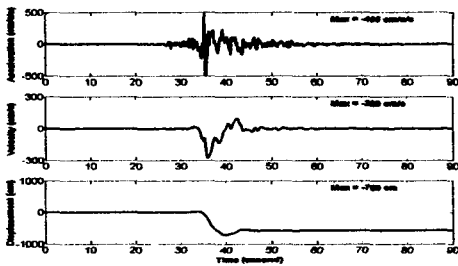
기진력은 그림 4~5와 같은 근거리, 원거리 지진데이터를 0.5g로 정규화하여 얻은 가속도 시간이력을 각각 주형에 수직으로 작용하고 있다고 가정하였으며, 감쇠비는 2%를 적용하여 해석하였다.<sup>(9)</sup> 초기형상 해석을 통하여 얻은 케이블의 초기긴장력을 도입하여 사하중과 평형을 이루는 상태까지는 정적 비선형 해석을 수행하였으며, 사용상태에 대한 동적해석은 정적 비선형 해석의 최종 평형상태를 초기상태로 간주하여 선형해석을 수행하였다. 이러한 조건으로 대상 사장교의 주형, 주탑의 절점변위, 축력 및 모멘트, 케이블 긴장력을 검토하였다. 이때, 해석에 사용한 수치해법은 *Newmark- $\beta$*  방법을 이용하였다.<sup>(11)</sup>



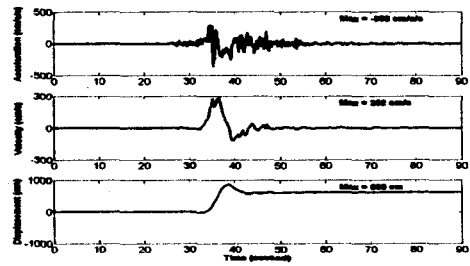
(a) EW Component in TCU052



(b) NS Component in TCU052

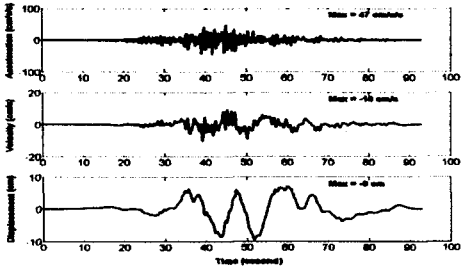


(a) EW Component in TCU068

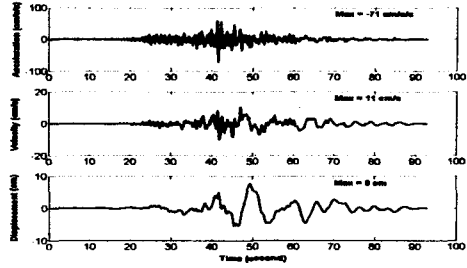


(b) NS Component in TCU068

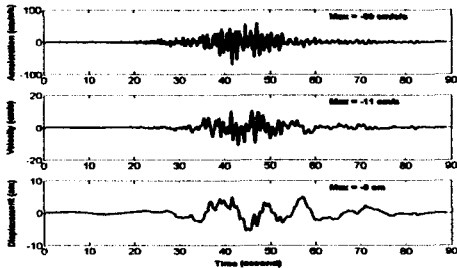
그림 4 선정된 TCU052와 TCU068 근거리 지진기록에 대한 가속도, 속도 및 변위 시간이력



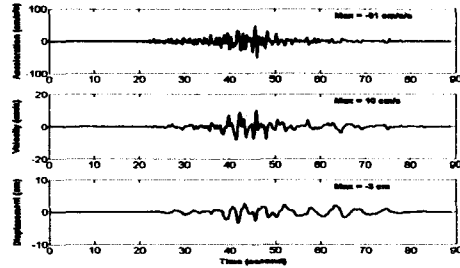
(a) EW Component in ILA002



(b) NS Component in ILA002



(a) EW Component in ILA035



(b) NS Component in ILA035

그림 5 선정된 ILA002와 ILA035 원거리 지진기록에 대한 가속도, 속도 및 변위 시간이력

### 3.2.1 절점변위

절점변위 응답은 주형에서는 13번 절점의 수직변위를 검토하였으며, 주탑에서는 8번 절점에서의 수평변위를 검토하였다. 근거리 지진에 의한 응답변위가 원거리 지진에 비해 크게 나타났다. 사장교의 형식에 따른 평균 절점변위 응답을 검토해보면, 원거리 지진데이터에 의한 수평변위는 방사형 사장교가 크게 나타났으며, 수직변위는 하프형 사장교의 응답이 방사형, 부채형 사장교의 응답 보다 가장 크게 나타났다. 또한 근거리 지진에 의한 수평, 수직변위는 하프형 사장교가 가장 크게 나타났다.

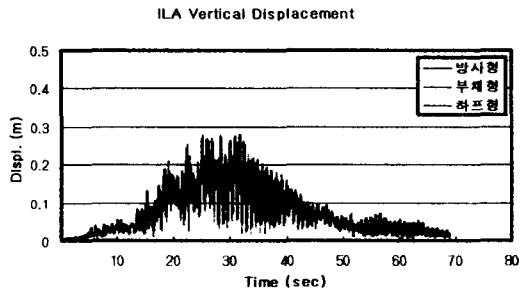
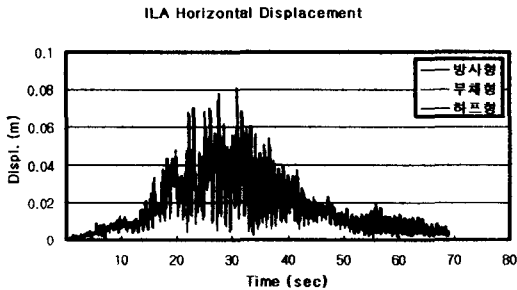


그림 6 선정된 ILA002와 ILA035 원거리 지진기록에 의한 8, 13번 절점의 평균 수평, 수직변위

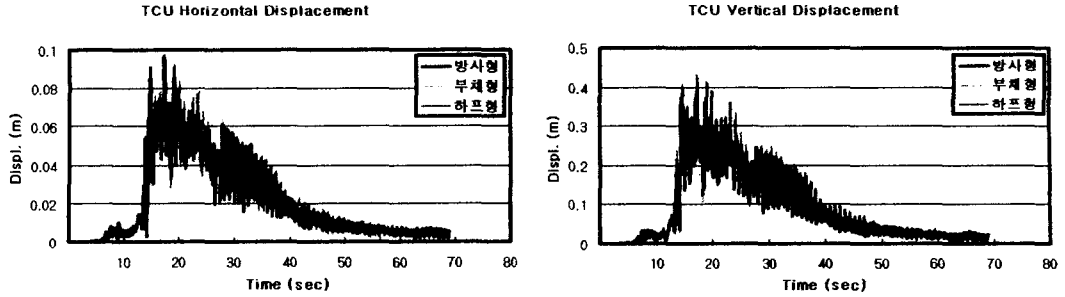


그림 7 선정된 TCU052와 TCU068 근거리 지진기록에 의한 8, 13번 절점의 평균 수평, 수직변위

### 3.2.2 부재력

주형에서는 중앙경간 19번 부재의 축력 및 모멘트에 대한 평균응답을 해석하였으며, 주탑에서는 주형과 주탑이 교차하는 31번 부재의 축력 및 모멘트에 대한 평균응답 해석하여 그림 8~11에 도시하였다. 주형의 축력 및 모멘트에 대한 평균응답은 원거리 지진데이터에 의한 응답이 크게 나타났다. 축력의 경우, 하프형 사장교가 방사형이나 부채형 사장교에 비해 크게 나타나고 있으며, 모멘트는 방사형 사장교가 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 근거리 지진데이터에 의한 축력 및 모멘트에 대한 평균응답은 하프형 사장교가 가장 크게 나타났다. 주탑의 축력에 대한 평균응답은 근거리 지진에 의한 응답이 크게 나타났으며, 모멘트의 경우에는 거의 유사하나 원거리 지진에 의한 응답이 크게 나타났다. 원거리 지진에 의한 축력은 하프형 사장교가 방사형이나 부채형 사장교에 비해 크게 나타나고 있으며, 모멘트는 방사형 사장교가 크게 나타났다. 근거리 지진데이터에 의한 축력 및 모멘트에 대한 평균응답은 하프형 사장교가 가장 크게 나타났다.

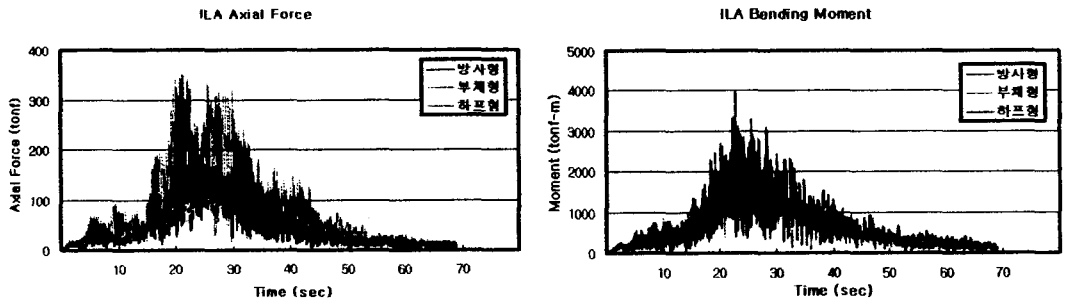


그림 8 선정된 ILA002와 ILA035 원거리 지진기록에 의한 19번 부재의 평균 축력 및 모멘트

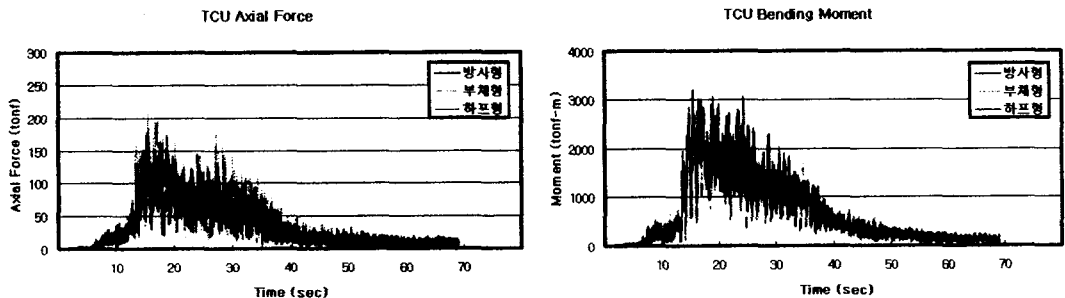


그림 9 선정된 TCU052와 TCU068 근거리 지진기록에 의한 19번 부재의 평균 축력 및 모멘트

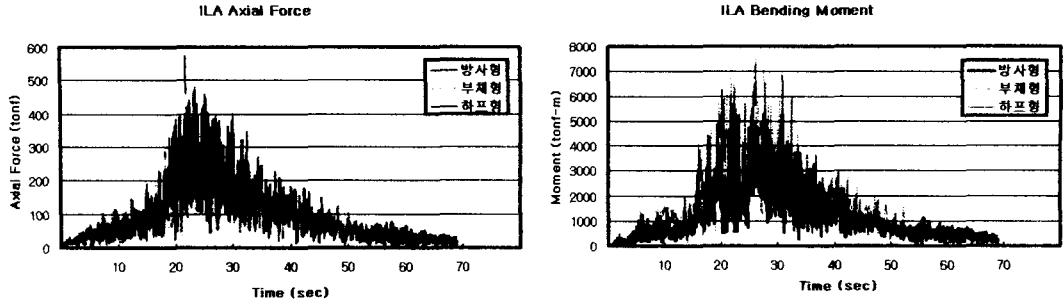


그림 10 선정된 ILA002와 ILA035 원거리 지진기록에 의한 31번 부재의 평균 축력 및 모멘트

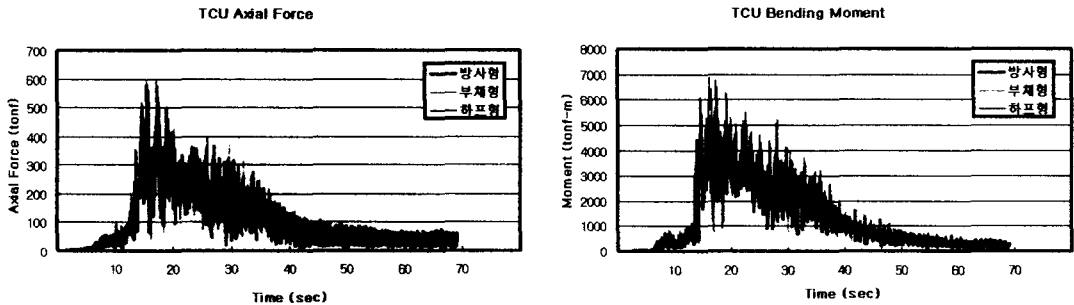


그림 11 선정된 TCU052와 TCU068 근거리 지진기록에 의한 31번 부재의 평균 축력 및 모멘트

### 3.2.3 케이블 긴장력

사장교와 같은 케이블지지 구조물은 케이블 긴장력을 결정하는 것이 매우 중요하다. 그러나 긴장력을 결정하는 것은 많은 어려움이 따른다. 본 연구의 경우, 사장교의 형태별 케이블 긴장력은 앞 절에서 수행한 케이블 초기긴장력 해석 결과를 이용하여 결정하였다.

근거리, 원거리 지진에 의한 케이블의 긴장력에 대한 평균응답은 그림 12와 같이 나타났다. 그림을 검토해보면 케이블 긴장력에 대한 평균응답은 원거리에 비해 근거리 지진에 의한 응답이 크게 나타났으며, 하프형 사장교가 방사형 및 부채형에 비해 크게 나타났다. 또한 원거리 지진에 의한 평균응답은 방사형 사장교가 가장 크게 나타났다.

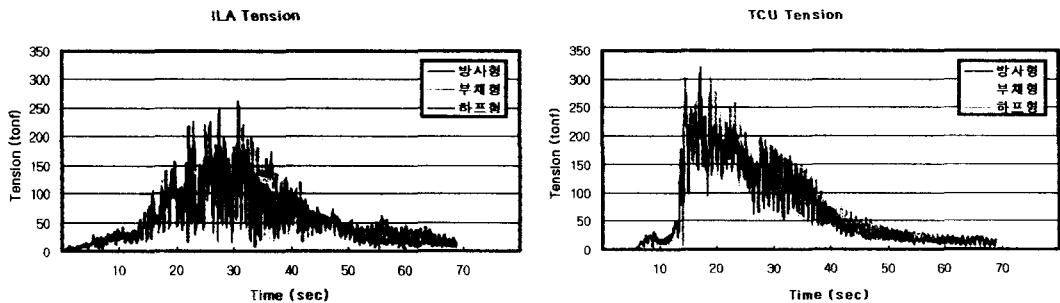


그림 12 선정된 ILA와 TCU 지진기록에 의한 1번 케이블의 평균 긴장력

위와 같은 응답해석 결과에 의하면, 사장교와 같은 장경간 교량 설계시 형식 선정은 매우 중요한 것으로

사료된다. 하지만 어느 형식이 유리한지 명확히 판단하기는 힘들다. 따라서 축력과 휨모멘트가 동시에 작용하는 경우, 부재에 작용하는 축응력과 휨응력에 의한 합응력을 고려하여 사장교 형식을 선정하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 대표적인 근거리 지진과 원거리 지진을 선정한 후 사장교의 일반적인 형식에 근거리, 원거리 지진데이터에 의한 평균 응답을 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 근거리 지진데이터에 의한 변위응답은 원거리에 비해 크게 나타났으며, 주형, 주탑에 대한 축력 및 모멘트의 평균응답은 원거리 지진데이터에 의한 부재력 응답이 크게 나타났다. 케이블 긴장력에 대한 평균응답은 근거리 지진데이터에 의한 응답이 크게 나타났다.
2. 사장교의 변위응답 및 부재력 케이블 긴장력에 대한 응답을 검토한 결과 구조 형식별로 상대적인 장, 단점을 점을 가지고 있으나, 부재형 사장교가 다른 형식의 사장교에 비해 우수한 구조형식으로 나타났다. 상기의 결과로부터 근거리 지진의 영향을 받는 사장교 구조물은 원거리 지진의 영향을 받는 구조물과 다른 응답 패턴을 보이는 것을 알 수 있었다. 따라서 단층과 인접해 있는 장주기 사장교 구조물의 설계시 근거리 지진의 특성을 반영한 설계가 필수적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

#### 참고 문헌

1. Babak Alavi and Helmut Krawinkler, "Effects of Near-Field Ground Motion on Building Structures," CUREE-Kajima Joint Research Program Phase III, 2001.
2. P. B. Rao and R. S. Jangid, "Performance of Sliding Systems under Near-Fault Motions," Nuclear Engineering and Design, 203, 2001.
3. JHON F. Fleming, ENGIN A. Egesell, "Dynamic Behaviour of a Cable-Stayed Bridge", Earthquake Engineering and Structure Dynamics. Vol. 8, pp. 1-16, 1980.
4. N. Abrahamson, <http://civil.eng.buffalo.edu/webcast/abrahamson/presentation.html>.
5. 김형규, 최인길, 전영선, 서정문(2002), "근거리 지진의 지진파 특성 분석", 한국원자력학회 2002년도 추계학술발표회논문집.
6. Paul Somerville, "Characterization of Near-Fault Ground Motions," U.S.-Japan Workshop on the Effects of Near-Field Earthquake Shaking, San Francisco, California, pp. 21-29, 2000.
7. Abrahamson, N. A. and P. G. Somerville, "Effects of the Hanging Wall and Foot Wall on Ground Motions Recorded during the Northridge Earthquake," Bull. Seism. Soc. Am., 86, 1996.
8. Abrahamson, N. A. and W. J. Silva, "Empirical response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes," Seismological Research Letters, 68, 1997.
9. ALY S. Nazmy, AHMED M. Abdel-Ghaffar, "Non-linear Earthquake-Response Analysis of Long-Span Cable-Stayed Bridges : Theory", Earthquake Engineering and Structure Dynamics. Vol. 19, pp. 45-62, 1990.
10. Wang, P. H., Tseng, T. C., Yang, C. G., "Initial Shape of Cable-Stayed Bridges", Computers & Structures, Vol. 46, No. 6, pp. 1095-1106, 1993.
11. M. Paz , "Structure Dynamics, Theory & Computation", 3rd edn. Van Nostrand Reinhold, New York, 1985