

근거리 지진에 의한 현수교의 동적응답특성

Dynamic Response Characteristics of the Suspension Bridge Subjected to Near Fault Ground Motions

한 성 호* · 이 강 혁** · 유 병 룰*** · 방 명 석**** · 신 재 철*****

Han, Sung Ho · Lee, Kang Hyuk · Yoo, Byung Ryul · Bang, Myung Seok · Shin, Jae Chul

ABSTRACT

In this study, the effect of the Near Fault Ground Motion which hasn't been considered at the domestic seismic design is demonstrated through the seismic response analysis of suspension bridge. After selecting the typical Near and Far Fault Ground Motion, the response characteristics are analysed by conducting the seismic response analysis about the long period suspension bridge which is expected to suffer the effect of Near Fault Ground Motions more largely. According to the results of this study, the Near Fault Ground Motions affect the suspension bridge more considerably than the Far Fault Ground Motions.

1. 서 론

최근 발생한 대규모 지진으로 인해 많은 인명 및 재산상의 피해가 보고 된 바 있다. 특히 1994년 Northridge 지진을 비롯하여 Kobe 지진(1995년), Chi-Chi 지진(1999년), Kocaeli 지진(1999년) 및 Duzce 지진(1999년) 등에 의해 많은 인적, 경제적 피해를 입었다.^{(1),(2)} 이는 근거리 지진(Near-Field Earthquake 또는 Near-Fault Earthquake)이 가지는 지진파의 특성이 과거 설계기준에서 제시하고 있는 입력지반운동이 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. 이는 일반적인 원거리 지진에 비해 동일한 가속도를 갖는 경우, 속도 및 변위성분이 매우 큰 값을 보여주는 것으로 지진파가 가지는 에너지가 매우 크다고 할 수 있다. 사실상 근거리 지진의 높은 PGA값은 짧은 주기를 가진 구조물에, 펄스 형태의 속도 파형은 장주기를 가진 구조물에 상당한 피해를 입혔다. 근거리 지진에 대한 연구는 세계적으로도 아직 초기 단계에 있으며 교량 시설에 미치는 근거리지진의 영향에 대한 연구는 극히 미미한 실정에 있다. 근거리 지진의 특성에 영향을 미치는 활성단층의 특성, 단층활동의 방향성(Directivity), Fling의 영향 등에 대한 연구가 미국, 일본 및 터키 등을 중심으로 활발하게 이루어지고 있으며, 구조물에 대한 영향을 평가하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다. 우리나라에서는 최근 여러 단층에 대해 활성단층이라는 주장이 제기된 바 있으며, 이에 따라 활성단층 주변에 위치한 내진 안전성에 대한 관심이 크게 증폭되고 있다. 따라서 본 연구에서는 최근 발생한 근거리 지진 기록 중 데이터의 확보가 가능한 대표적인 근거리 지진실측자료를 이용하여 근거리지진의 지진파 특성을 분석

* 정희원 충남대학교 토목공학과 공학박사
** 정희원 충남대학교 토목공학과 석사과정
*** 정희원 충남대학교 토목공학과 박사수료
**** 정희원 충주대학교 교수 · 공학박사
***** 정희원 충남대학교 토목공학과 교수 · 공학박사

하여 일반적인 지진파의 특성과 비교함으로써 추후 근거리 지진에 대비한 장주기 교량 구조물의 내진 안전성 평가에 기초 자료로써 활용하고자 한다.⁽³⁾

2. 근거리지진의 일반적 특성

근거리지진의 일반적인 특성은 지진파의 초기에 나타나는 펄스형태의 매우 큰 속도와 큰 장주기 성분으로 대변할 수 있다⁽⁴⁾. 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. 근거리지진에서 이러한 큰 속도성분을 갖는 주된 원인은 단층운동의 방향성(Directivity)과 Fling의 영향으로 대별할 수 있다. 그 외에 역단층이나 정단층과 같은 Dip-Slip Fault에서 발생할 수 있는 상반(Hanging Wall)의 영향을 들 수 있다.⁽⁵⁾

2.1 방향성 (Directivity)

단층의 활동(Fault Rupture)이 어떤 방향으로 발생하는가에 따라 방향성을 구분할 수 있다. 단층의 활동이 임의의 지역을 향하여 진행하면 그 지역에서의 지진기록은 전방향성(Forward Directivity)로 정의하며, 이러한 활동의 진행은 부지의 전단파 속도에 근접한 속도로 발생하며 지진 초기에 매우 짧은 지속시간을 갖는 펄스운동을 발생시킨다. 1992년에 발생한 Landers 지진 시 단층 활동의 전방에 위치한 지역에서는 속도가 136cm/sec로 나타났으며, 후방에 위치한 지역에서의 속도가 43cm/sec로 크게 차이가 나타나 이러한 지진의 방향성을 극명하게 보여주고 있다. 이러한 방향성은 Strike-Slip Fault 뿐 아니라 Dip-Slip Fault에서도 나타난다. 단층의 활동이 임의의 지역으로부터 멀어지는 방향으로 진행하면 그 지역에서의 지진기록은 후방향성(Backward Directivity)을 나타낸다. 이러한 지진기록은 긴 주기의 작은 진폭을 가지고 긴 지속시간 동안 운동한다. 지진의 방향성에 의한 영향은 주로 0.5초 이상의 장주기 영역에서 수평방향 응답스펙트럼을 증가시키게 되며, 최대 스펙트럴 가속도의 발생 주기를 장주기 쪽으로 이동시키는 결과를 가져오게 된다. 지반운동의 방향성은 모든 지진에서 항상 일어나는 것은 아니며, 1999년 발생한 Chi-Chi 지진에서는 방향성에 의한 영향이 나타나지 않았다. 이는 Chi-Chi 지진이 진원 깊이가 얇은 천발지진이 원인인 것으로 볼 수 있다.

일반적으로 전방향성을 보이는 지진기록이 후방향성을 보이는 지진기록들보다 PGA(Peak Ground Acceleration), PGV(Peak Ground Velocity), 그리고 PGD(Peak Ground Displacement) 값이 더 크다. 따라서 근거리지진에 대한 일반적인 고려 대상은 전방향성을 갖는 지진기록들이며, 이러한 펄스형태의 지진특성을 반영하기 위해 전방향성을 갖는 지진기록들의 펄스 특성을 이용하여 기본적인 몇 개의 펄스 형태를 정의한 후 근거리지진을 단순한 등가의 펄스로 치환하여 구조물에 대한 응답을 구하고 있다⁽¹⁾.

2.2 지반운동 성분

지반운동 성분은 단층면과 수직인 성분(Fault Normal)과 단층면과 수평인 성분(Fault Parallel)이 있다. 일반적으로 수직성분이 수평성분에 비해서 매우 큰데 이는 전단변위의 방사형 전파 패턴에 기인한다. 그러므로 단층 방향에 대한 구조물의 위치가 그 구조물이 단층의 활동에 의해 발생한 근거리지진에서 경험할 수 있는 지반운동의 크기를 결정한다.⁽¹⁾

2.3 상반의 영향

정단층(Normal Fault)이나 역단층(Reverse Fault)과 같은 Dip-Slip Fault에서의 지진동의 특성은 앞서 기술한 방향성과 상반의 영향을 받게 된다. 상반의 영향으로 인해 정단층이나 역단층에 의한 지진파의 단주기 성분이 Strike-Slip Fault에 비해 1.3~1.4배 정도 증가하게 된다.⁽⁴⁾ Abrahamson과 Somerville는 상반과 하반

(Foot Wall)에서의 지반운동의 크기를 경험적으로 구분하여 제시하였다.⁽⁶⁾ 상반의 영향은 거리가 8~18km에 위치할 때 0~0.6초 구간에서 최대 1.45배가 차이 나게 되며 5초 이후에는 동일하게 된다.⁽⁷⁾

2.4 Fling의 영향

Fling의 영향은 영구적인 지반 변형에 의해 발생하는 것으로 큰 속도의 펄스운동을 발생시키는 원인이 된다. Fling에 의한 속도 펄스는 한 방향으로 큰 속도의 발생시키며 진앙의 위치와는 무관하게 단층 활동이 발생한 근처에서 발생한다. 현재까지 지진재해도 등에 사용되고 있는 지반감쇠식 (Attenuation)에서는 Fling에 의한 영향을 고려하고 있지 않으며 이를 위한 별도의 모델이 필요하다.

3. 현수교의 동적응답해석

본 절에서는 장주기 구조물인 사장교를 대상으로 하여 앞 절에서 고찰한 근거리지진에 의한 영향을 검토하여 비교·분석하고자 한다. 대상 현수교로 선정된 남해대교는 전형적인 타정식 3경간 단순지지 현수교로서 전체적인 개형은 주경간장이 404.0m, 측경간장이 128.0m, 주탑의 높이가 60.0m인 현수교를 총 287개의 절점과 202개의 케이블(탄성현수선)요소, 172개의 보요소로 구성하여 3차원으로 모델링 하였으며, 케이블, 주탑과 주형의 구성요소에 대한 구조제원은 표 1 과 같다.⁽⁸⁾

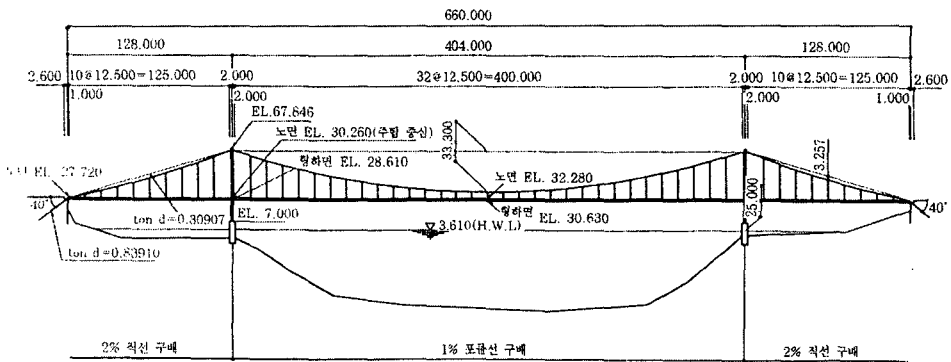


그림 1 대상 현수교의 일반도

보강형		케이블	
단위길이당 중량 (tonf/m)	4.235	단위길이당 중량 (tonf/m)	0.6908
탄성계수 (tonf/m ²)	2.1×10 ⁷	초기장력의 수평분력 (tonf)	3063
단면이차 모멘트(I ₃₃) (m ⁴)	0.1316	단면적 (m ²)	0.08356
단면이차 모멘트(I ₂₂) (m ⁴)	3.2667	주케이블의 폭 (m)	11
전단상수(J) (m ⁴)	0.4933	탄성계수 (tonf/m ²)	2.0×10 ⁷

표 1 대상 현수교 해석모델의 구조제원

3.1 초기형상 결정 및 자유진동 해석

선형해석으로 충분한 일반 교량과는 달리 현수교에서는 사하중으로 인한 완성계의 초기상태 자체가 케이블의 비선형성에 크게 영향을 받는다. 완성계의 1차 사하중은 모두 케이블이 부담하고, 보강형은 무응력 상태라는 현수교의 기본가정이 적용된다. 케이블은 현수곡선(Catenary curve)에서 사하중을 받으면 포물선 형

상이 된다. 완성계의 포물선 좌표에서 케이블의 초기길이 즉, 무응력 길이를 역으로 추정하여 케이블 강성을 결정해야 한다. 이상과 같이 초기형상 해석을 수행한 후 케이블의 무응력 길이와 케이블 강성, 케이블 완성계의 좌표 등을 사용해서 2차 사하중과 활하중에 대하여 동적해석을 수행하였다.^{(8),(9)}

정적 평형상태에서 강성행렬과 질량행렬을 구하고 남해대교의 진동특성을 알아보기 위해 자유진동 해석을 수행하였으며 기존의 해석결과와 비교하였다.

모드	모드 방향	대칭성	자유진동수 (Hz)	
			참고문헌 ⁽¹²⁾	본 연구
1	Vertical	Antisymmetric	0.2185	0.21848
2	Vertical	symmetric	0.2485	0.24821
3	Lateral	symmetric	0.2717	0.27216
4	Vertical	symmetric	0.3602	0.35970
5	Vertical	Antisymmetric	0.3860	0.38567
6	Lateral	Antisymmetric	0.4844	0.49867

표 2 대상 현수교의 자유진동수

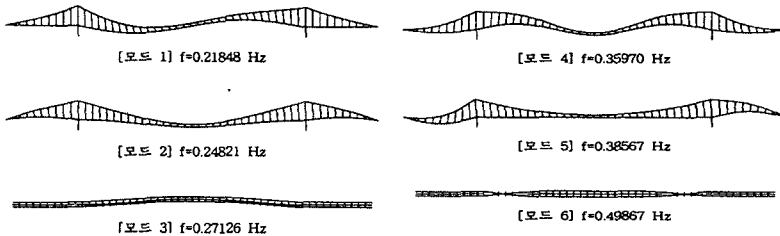


그림 2 대상 현수교의 자유진동 모드형상

위 표 2 에서 보면 참고문헌과 1%이내의 근소한 차이를 보이는데 이는 계산상의 오차와 모델링 방법의 상이에서 기인된다고 판단된다. 자유진동 해석에 의하면 대상 현수교는 장주기 구조물로 근거리 지진에 의한 영향이 원거리 지진에 비해 크게 작용할 것으로 판단된다.⁽⁸⁾

3.2 동적응답 결과 분석

기진력은 표 3 과 같은 Chi-Chi 지진에서 선정된 근거리, 원거리 지진을 0.5g로 정규화하여 얻은 가속도 시간이력을 탄성 지지점에 세 방향(N-S, E-W, Up-Down)으로 동일하게 작용하고 있다고 가정하였으며, 감쇠비는 2%를 적용하여 해석하였다. 이러한 조건으로 대상 현수교의 주형, 주탑의 절점변위, 축력 및 모멘트, 케이블 긴장력을 검토하였다. 이때 해석에 사용한 수치해법은 *Newmark-β* 방법을 이용하였다.

표 3 선정된 입력지진동의 특성

* Distance from Rupture

Site	Station No.	D_{rup} (km)	PGA (gal)		PGV (cm/s)		PGV/PGA	
			EW	NS	EW	NS	EW	NS
Far Fault	ILA002	109.11	47	71	10	11	0.21	0.15
	ILA035	104.77	69	51	11	10	0.16	0.20
Near Fault	TCU052	1.84	349	439	183	221	0.53	0.50
	TCU068	3.01	495	358	280	292	0.57	0.81

3.2.1 절점변위응답

절점변위응답은 최대변위가 발생하는 주형 중앙 절점인 144번 절점의 변위를 검토하였다. 그림 3~5 는 대상 현수교의 평균 절점변위응답을 도시한 것으로써, 근거리 지진과 원거리 지진에 의한 방향별 평균 절점변위응답을 검토해보면, 교축방향은 원거리 지진에 의한 절점변위응답이 근거리 지진에 비해 2.13배 크게 나타났으나, 교축직각방향 및 수직방향의 응답은 근거리 지진에 의한 절점변위응답이 3.42, 2.18배 크게 나타났다. 교축직각방향 및 수직방향은 앞 절에서 설명한 근거리지진의 특성에 잘 부합하는 결과라 할 수 있으나, 교축방향의 절점변위응답은 일치하지 않는 결과가 나타났다. 이러한 결과는 대상 현수교의 구조적 특성과 가속도 시간이력의 특성에 의해 나타난 결과로 판단된다.

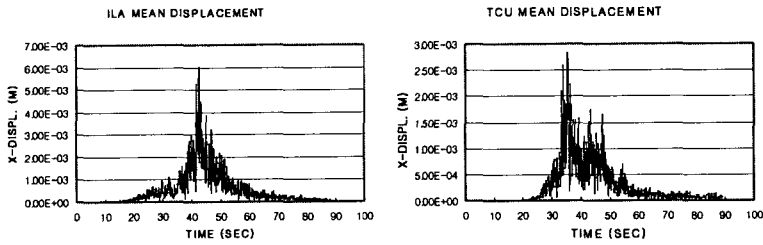


그림 3 선정된 ILA와 TCU 지진기록에 의한 144번 절점의 교축방향 평균 절점변위응답

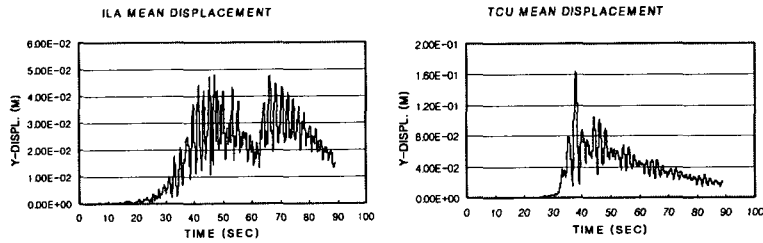


그림 4 선정된 ILA와 TCU 지진기록에 의한 144번 절점의 교축직각방향 평균 절점변위응답

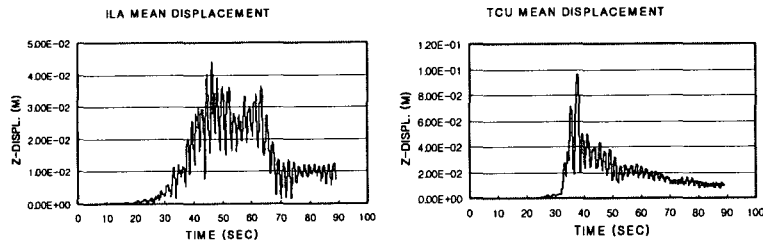


그림 5 선정된 ILA와 TCU 지진기록에 의한 144번 절점의 수직방향 평균 절점변위응답

3.2.2 부재력 응답

주형에서는 중앙경간 26번 부재의 축력 및 모멘트에 대한 평균 응답을 해석하였으며, 주탑에서는 상단 부재인 160번 부재의 축력 및 모멘트에 대한 평균 응답을 해석하여, 그림 6~11 에 도시하였다. 주형의 평균 축력응답은 원거리 지진에 의한 응답이 2.13배 크게 나타났으나, 모멘트(M_{22} , M_{33})응답의 경우 근거리 지진에 의한 응답이 1.99, 1.23배 크게 나타났다. 주탑의 경우 축력 및 모멘트(M_{22})는 근거리 지진에 의한 응답이 1.30, 1.02배 크게 나타났으나, 모멘트(M_{33})는 원거리 지진에 의한 응답이 1.21배 크게 나타났다.

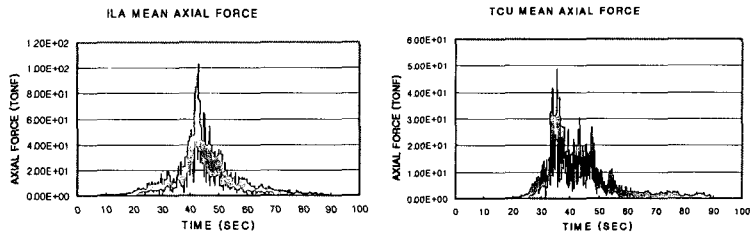


그림 6 선정된 ILA와 TCU 지진기록에 의한 26번 부재의 평균 축력응답

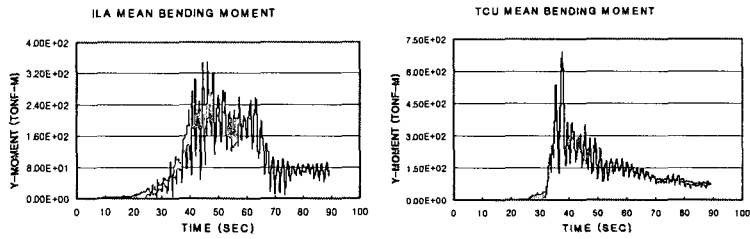


그림 7 선정된 ILA와 TCU 지진기록에 의한 26번 부재의 평균 모멘트(M_{22})응답

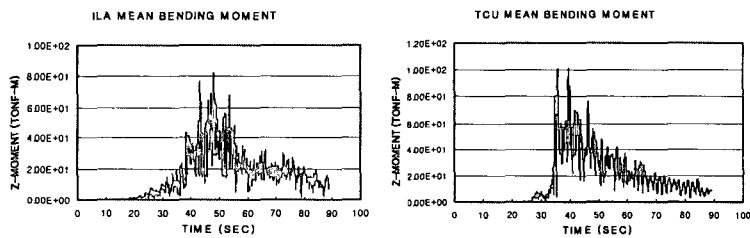


그림 8 선정된 ILA와 TCU 지진기록에 의한 26번 부재의 평균 모멘트(M_{33})응답

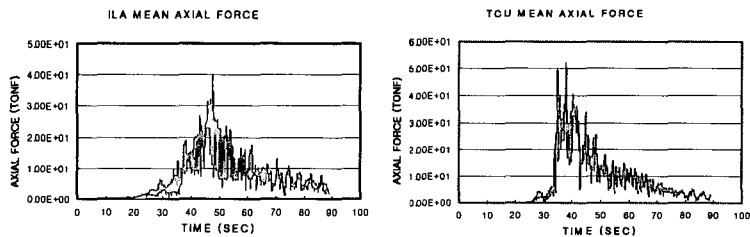


그림 9 선정된 ILA와 TCU 지진기록에 의한 160번 부재의 평균 축력응답

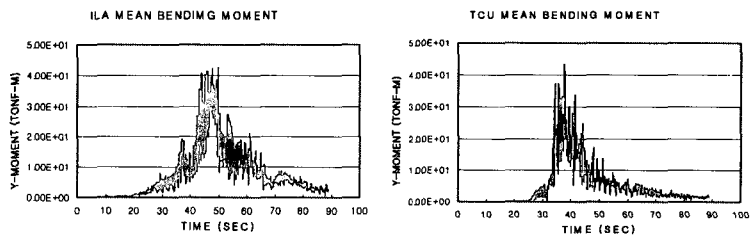


그림 10 선정된 ILA와 TCU 지진기록에 의한 160번 부재의 평균 모멘트(M_{22})응답

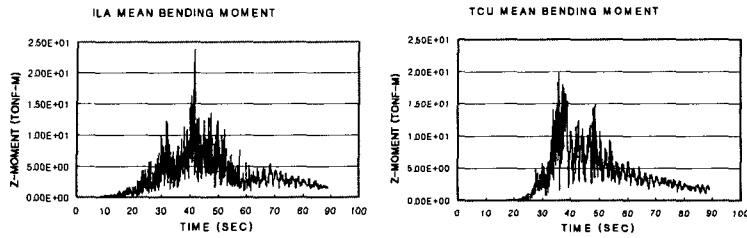


그림 11 선정된 ILA와 TCU 지진기록에 의한 160번 부재의 평균 모멘트(M_{33}) 응답

이러한 결과는 절점변위 응답의 경우와 마찬가지로 대상 현수교의 특성 및 지진의 특성에 의해 나타난 결과로 판단된다. 따라서 본 연구에서 결과에 의하면, 현수교 설계 시 근거리 및 원거리지진에 의한 동적응답 특성을 적절히 고려하여야 할 것으로 판단된다. 또한 근거리지진에 의한 명확한 결과는 본 연구에서 사용된 가속도시간이력 이외에 더 많은 지진자료를 통하여 검토해보면 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2.3 케이블 긴장력 응답

케이블지지 구조물은 케이블 긴장력을 결정하는 것이 매우 중요하다. 그러나 긴장력을 결정하는 것은 많은 어려움이 따른다. 본 연구에서는 앞 절에서 기술한 케이블 초기형상 해석 결과를 이용하여 결정하였다.

근거리, 원거리 지진에 의한 대상 현수교의 앵커 블록 쪽 케이블 긴장력에 대한 평균 응답은 그림 12 와 같이 나타났다. 케이블 긴장력에 대한 평균 응답은 비슷한 결과를 얻을 수 있었으나, 원거리 지진에 비해 근거리 지진에 의한 응답이 1.01배로 약간 크게 나타났다. 따라서 케이블 지지교량인 현수교는 케이블 자체가 역학적으로 매우 중요한 역할을 하기 때문에 근거리지진에 의한 영향에 대한 분석은 필수적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

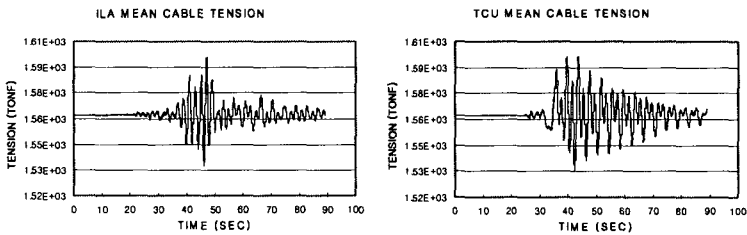


그림 12 선정된 ILA와 TCU 지진기록에 의한 1번 케이블의 평균 긴장력 응답

위와 같은 응답해석 결과에 의하면 현수교와 같은 장경간 교량 설계 시 근거리 지진에 의한 영향을 고려하여 설계하는 것이 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 근거리 지진과 원거리 지진을 선정하여 지진과 특성을 분석하기 위해 탄성응답스펙트럼을 작성하였으며, 근거리지진의 영향을 크게 받을 것으로 예상되는 장주기 현수교에 근거리 및 원거리 지진을 적용하여 동적응답해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론은 내릴 수 있다.

1. 탄성응답스펙트럼 해석을 수행한 결과 구조물이 원거리지진보다 근거리지진의 영향을 받을 때 단주기 영역과 장주기 영역에서 응답 즉 가속도, 속도 및 변위응답이 더 크며 특히, 장주기 영역에서 두드러진다.

2. 장주기 구조물인 현수교에 근거리 및 원거리 지진에 의한 평균 응답을 검토한 결과 전반적으로 근거리 지진에 의한 질점변위 응답은 원거리 지진에 비해 크게 나타났으며, 주형의 경우 축력은 원거리에 의해 크게 나타났으나 모멘트는 근거리 지진에 의해 크게 영향을 받았다. 주탑에 대한 축력 및 모멘트(M_{22})의 평균 응답은 근거리에 의해 크게 나타났으나, 모멘트(M_{33})의 평균 응답은 원거리 지진에 의한 영향이 크게 나타났다. 또한 케이블 긴장력에 대한 평균 응답 근거리 지진에 의한 영향이 크게 나타났다.

상기의 결과로부터 근거리 지진의 영향을 받는 현수교 구조물은 원거리 지진의 영향을 받는 구조물과 다른 응답이 나타나는 것을 알 수 있었다. 따라서 단층과 인접해 있는 현수교 구조물의 설계 시, 근거리 지진의 특성을 반영한 설계가 필수적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. P. B. Rao and R. S. Jangid, "Performance of Sliding Systems under Near-Fault Motions," Nuclear Engineering and Design, 203, 2001.
2. Babak Alavi and Helmut Krawinkler, "Effects of Near-Field Ground Motion on Building Structures," CUREE-Kajima Joint Research Program Phase III, 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. 김형규, "근거리 지진의 영향을 받는 철골 프레임 구조물의 비탄성 응답 특성 분석", 충남대학교 석사학위 논문, 2004.
5. 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.
6. 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.
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. 한국건설기술연구원, "장대교량의 설계 및 시공에 관한 연구", 1996.
9. 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.