

응답스펙트럼에 의한 트러스 구조물의 내진해석

Seismic Analysis of 3D-Truss by Response Spectrum

안주옥* 이승재**

An Zu-Og Lee Seung-Jea

ABSTRACT

In seismic analysis, there are two main ways - uniform load method and dynamic analysis, dynamic analysis can be divided into response spectrum analysis and time history analysis. In case of which get the complexion of the vibration with 3-axis of coordinate direction in each mode of free vibration mode happened owing to complication of the shape, 3-dimensional dynamic analysis is recommended to perform as multi-mode spectral analysis in standard specification for highway bridge.

The purpose of this study is to understand the dynamic behavior by performing multi-mode seismic analysis according to responses analysis and time history analysis in using record of earthquake.

In accordance with the criterion of seismic design as defined in standard specification for highway bridge by using modified records of the El Centro and Coyote Lake earthquake, response spectrum was constructed by using the tripartite logarithmic plot. The 3-span continuous space truss bridge was selected as model of numerical analysis. As the result performed time history analysis and analysis of response spectrum for the model of numerical analysis, the result of time history analysis was slightly larger than that of response spectrum analysis. This coincide with the tendency of the result came from the analysis when using a jagged response spectrum for a single excitation.

In the process of performing these two analysis, response spectrum analysis is more effective than time history analysis in saving times in analyzing data.

1. 서론

우리나라는 판 구조론(plate tectonics)에 의한 판 경계 지진활동지역인 미국 캘리포니아지역이나 일본처럼 지진 다발지역은 아니지만 중국과 같이 판 내부 지진활동에 의하여 지진이 발생하고, 최근 한반도의 영월지역에 발생한 지진(1996년 12월 13일 발생)으로 지진에 대한 인식 정도가 한층 더 높아지고 있다.

국내에서는 흥성지진(1978년 10월 7일 발생)을 계기로 내진설계에 대한 연구의 필요성을 인식하게 되었으며, 현재는 당시보다 사회적, 경제적 성장에 따른 교량의 건설과 구조물의 대형화로 지진 위험도가 상대적으로 높아져 지진에 대한 인적, 경제적, 사회적 피해가 를 것으로 사료된다.

우리나라는 1988년도에 인명과 밀접한 건축 구조물 설계 때 내진설계 규정을 제정한 이래로 지금까지 활발한 연구가 진행되고 있고, 교량에 관련된 내진설계 규정은 1991년도에 서울-부산간 고속철도 건설을 위하여 내진설계가 포함된 시방서를 처음 제정하였으며, 도로 교량에도 내진설계의 필요함이 인식되어 1992년에 시방서 규정이 만들 어지기로 이르렀다. 선진 외국에서는 이미 내진설계를 실시하여 왔으며, 이에 대한 관심과 연구 개발이 활발하게 진행되어 온 것에 비해 우리나라는 지진에 대한 경험이 적고 내진설계 규정이 비교적 짧은 기간에 제정되어 많은 연구 개발이 필요하다.

* 경희대학교 공과대학 토목건축공학부 교수

** 경희대학교 토목공학과 석사졸업

(주)한석엔지니어링 기술연구소

우리나라 도로교 표준시방서(1996년)에서는 한반도의 지진발생 확률이 적고 지진의 강도 또한 작은 점을 감안하여 보통 교량 형식의 내진설계에서는 해석의 정확도는 떨어지나 비교적 간단한 방법인 등가정적방법의 단일모드 스펙트럼해석법(Single-Mode Spectral Analysis)을 사용하도록 하고 있다. 한편, 기하학적으로 형상이 복잡하여 자유 진동 모드의 각 모드 내에서 3개의 좌표축 방향으로 진동이 복합되는 교량에서는 복합모드스펙트럼해석법(Multi-Mode Spectral Analysis)으로 3차원 동적해석을 실행하기를 권장하고 있다. 그러나, 매번 설계할 때마다 정확한 동적해석을 수행하는 것은 많은 시간과 노력이 필요하므로 과거의 지진기록과 정보를 토대로 지역 특성에 적합하고 완만한 형태의 설계응답스펙트럼(Design Response Spectrum)을 이용하는 것이 바람직하다. 따라서, 설계응답스펙트럼을 작성하는데 가장 중요한 자료인 각각의 특정 지진에 대한 응답스펙트럼을 작성하여 그 특성을 파악하고 각각의 응답스펙트럼이 구조물에 미치는 영향을 고찰하는 것은 설계응답스펙트럼을 이용한 내진해석에 대단히 중요한 작업이라 할 수 있다.

본 연구에서는 지진기록을 이용한 내진해석을 위하여 미국의 El Centro 지진기록과 Coyote Lake 지진기록을 이용하였고, 각 지진기록은 미국지역 기록으로 우리나라 설정에 응용할 수 있도록 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration : P.G.A)를 0.14g로 계수조정하였다. 복합모드 동적해석을 위하여 구조해석 상용프로그램인 SAP90과 LUSAS를 사용하였다. El Centro 지진과 Coyote Lake 지진기록은 [표 1.1]과 같다.

본 연구에서는 지진기록을 활용한 응답스펙트럼해석과 시간이력해석에 의한 복합모드 내진해석을 수행하여 구조물의 실제 동적거동의 특성을 이해하는데 목적이 있다.

[표 1.1] 지진기록

지진명	시간	성분	최대지반가속도 (cm/sec ²)
El Centro	1940/05/18	180°	-349.8
Coyote Lake	1979/08/06	230°	-413.7

2. 응답스펙트럼해석

어떤 특정한 지진에 대하여 일정한 감쇠율을 가진 단일자유도 구조물의 진동수(또는 진동주기)를 여러 가지로 변환시키면서 동적해석을 수행하고, 이때 발생하는 최대응답(가속도, 속도, 변위의 최대치)을 구하여 이것을 진동주기의 변화에 대하여 그림으로 나타내면 응답스펙트럼(Response Spectrum)이 된다.⁽¹⁾

응답스펙트럼해석법은 응답스펙트럼을 이용하여 지반운동에 의한 구조물의 최대응답을 나타내는 방법으로, 시간에 따른 구조물의 거동을 알 수 없는 단점이 있으나 구조물의 동적 특성을 고려할 수 있고 계산이 간편하여 내진설계 규정에서 널리 이용되고 있다. 지진하중을 받는 단일자유도계 구조물의 동적 응답은 운동방정식에 의하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{x}(t) + 2\omega_n \xi \dot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = -\ddot{x}_g(t) \quad (2.1)$$

Duhamel Integration 방법에 의한 운동방정식의 구조물에 발생되는 상대변위 $x(t)$ 는 다음과 같다.

$$x(t) = -\frac{1}{\omega_d} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) \exp[-\xi \omega_n(t-\tau)] \sin \omega_d(t-\tau) d\tau \quad (2.2)$$

여기서, ω_d : 감쇠 진동수($=\omega_n \sqrt{1-\xi^2}$)

응답스펙트럼은 진동수와 감쇠비에 따른 최대응답으로, 이를 표현하면 다음과 같다.

$$S_D(\xi, \omega_n) = [x(t)]_{\max} = -\frac{1}{\omega_d} \left[\int_0^{\infty} \ddot{x}_g(t) \exp[-\xi \omega_d(t-\tau)] \sin \omega_d(t-\tau) dt \right]_{\max} \quad (2.3)$$

$$S_V(\xi, \omega_n) = [\dot{x}(t)]_{\max} \quad (2.4)$$

$$S_A(\xi, \omega_n) = [\ddot{x}(t)]_{\max} \quad (2.5)$$

여기서, S_D : 변위 응답스펙트럼 (Displacement response spectrum)

S_V : 속도 응답스펙트럼 (Velocity response spectrum)

S_A : 가속도 응답스펙트럼 (Acceleration response spectrum)

$\ddot{x}'(t)$: 구조물의 절대가속도 (Absolute Acceleration)

그러나, 실제 구조물에 있어서는 감쇠비(ξ)는 매우 작은 값을 갖으므로 $\omega_n \equiv \omega_d$ 라하면, 식(2.3), (2.4), (2.5)로부터 유사속도 응답스펙트럼(Pseudo Velocity Response Spectrum) $PS_V(\xi, \omega)$ 과 유사가속도 응답스펙트럼(Pseudo Acceleration Response Spectrum) $PS_A(\xi, \omega)$ 은 다음 관계식으로 정리 될 수 있다.

$$PS_V(\xi, \omega_n) = \omega_n S_D(\xi, \omega_n) \quad (2.6)$$

$$PS_A(\xi, \omega_n) = \omega_n^2 S_D(\xi, \omega_n) = \omega_n S_V(\xi, \omega_n) \quad (2.7)$$

각 모드의 구조응답의 조합방법에는 절대값의 합성방법(Absolute Sum : ABS), 제곱의 합의 제곱근 방법(Square Root of Sum of Square : SRSS), 모드간 상관도를 고려한 합성법(Complete Quadratic Combination : CQC)의 세가지 방법이 있다. 응답스펙트럼 해석은 각각의 모드별 구조응답의 최대값이 발생하는 시점이 다르므로 절대값의 합성방법(ABS)은 과도하게 값을 크게 하여 더 이상 사용하지 않고, 제곱의 합의 제곱근 방법(SRSS)과 모드간 상관도를 고려한 합성법(CQC)을 사용하여 응답을 조합한다.⁽¹⁾

3. 시간이력해석

다자유도 구조물의 응답을 구하기 위해서는 다음의 미분방정식을 직접 풀어야 한다.

$$[M]\{\ddot{X}(t)\} + [C]\{\dot{X}(t)\} + [K]\{X(t)\} = \{F\} \quad (3.1)$$

이 미분방정식은 계수행렬이 아닌 연립방정식이므로 이를 직접 풀려면 그 과정이 너무 복잡하다. 따라서, 보통의 경우 모드중첩법(Mode Superposition Method)을 사용하는 것이 효율적이다.

모드중첩법(Mode Superposition Method)은 구하고자 하는 변위를 $[M]$ 과 $[K]$ 에 관한 직교성을 가지는 변위형상의 선형조합으로 나타내어 해를 구하는 방법이다.

$$\mu_i \ddot{q}_i(t) + c_i \dot{q}_i(t) + \kappa_i q_i(t) = P_i(t) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (3.2)$$

식(3.2)를 이용하면, 자진하중이 작용할 때 각 모드 좌표계에 대하여 비연계된(Uncoupled) 방정식을 얻을 수 있다.

$$\mu_i \ddot{q}_i(t) + 2\mu_i \xi_i \omega_n \dot{q}_i(t) + \mu_i \omega_n^2 q_i(t) = -L_i \ddot{x}_g(t) \quad (3.3)$$

여기서, $\mu_i = \{\Psi\}_i^T [M] \{\Psi\}_i$, $2\xi_i \mu_i \omega_n = \{\Psi\}_i^T [C] \{\Psi\}_i$, $\mu_i \omega_n^2 = \{\Psi\}_i^T [K] \{\Psi\}_i$, $L_i = \{\Psi\}_i^T [M] \{l\}$

모드행렬 $[\Psi]$ 은 질량행렬 $[M]$ 과 강성행렬 $[K]$ 로 부터 구한 자유진동모드행렬 $[\Phi]$ 을 사용하는 것이 적합하다. 그러나, 구조물에 작용되는 하중의 분포형태와는 무관하므로 많은 모드를 사용하여 정확한 해를 구할 수 있고,

자유진동모드행렬을 구하기 위하여 비교적 큰 차수의 고유치 문제를 풀어야하는 부담이 있는 단점을 가지고 있다. 이처럼 모드중첩법을 사용할 때에는 해석에 포함시켜야 할 모드수를 정하는 적절한 기준이 필요한데 보통 유효모드질량(Effective modal mass)의 개념을 이용한다. i 번째 모드에 대한 유효모드질량은 식(3.4)와 같고, 전체모드에 대하여 합하면 구조계의 전체질량이 된다. 구조해석 시에는 해석에 포함된 유효모드질량의 합이 식(3.5)와 같이 전체질량의 90%이상이 되도록 모드 수를 정한다.⁽⁶⁾

$$\text{Effective Modal Mass} = \frac{L_i^2}{\mu_i} \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{L_i^2}{\mu_i} > 0.9 \times \text{Total Mass} \quad (3.5)$$

두 수평방향과 한개의 수직방향의 지진운동을 고려하기 위하여 3차원 구조모형을 사용할 경우, 식(3.5)를 세 방향에 대하여 적용하여야 하며 각 방향별로 유효모드질량이 구조물 전체질량의 90%이상이 되도록 해석에 포함될 모드수를 정하여야 한다.

4. 응답스펙트럼 작성

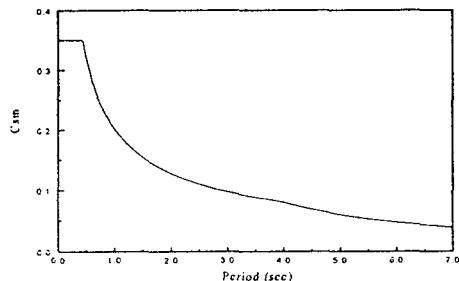
응답스펙트럼에 의한 내진해석은 지진기록을 Duhamel Integration에 의하여 단일자유도의 주기별 최대값을 이용한 해석이므로 구조물에 지진하중으로 작용할 각 지진기록의 응답스펙트럼을 정확히 작성하는 것은 중요하다.

우리나라 도로교 표준시방서에서는 내진설계편에서 가속도 계수를 국내 연구 결과^{(15) (16)}와 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙(1988년), 고속철도 구조물 설계 표준시방서(1991년) 등을 참조하여 강원도, 전라도, 제주도 지역은 0.07, 기타 지역은 0.14로 규정하고 있다.⁽¹²⁾ 복합모드스펙트럼해석법에 대하여 서방서에서는 m 번째 진동모드에 대한 탄성지진응답계수(C_{sm})를 주기 4.0초 이하일 경우는 식(4.1), 주기 4.0초 이상일 경우는 식(4.2)로 주어지고 2.54를 넘지 않도록 하고, 내진설계 시 m 번째 진동모드의 지진하중으로 사용하고 있다.⁽¹²⁾

[그림 4.1]는 식(4.1), 식(4.2)을 주기-탄성지진응답계수로 나타낸 것이다.

$$C_{sm} = \frac{1.2AS}{T_m^{2/3}} \quad (4.1)$$

$$C_{sm} = \frac{3AS}{T_m^{4/3}} \quad (4.2)$$



[그림 4.1] 주기-탄성지진응답계수(C_{sm})

본 연구에서는 1940년 5월 18일 미국에서 발생한 El Centro 지진(180°성분)과 1979년 8월 6일 미국에서 발생한 Coyote Lake 지진(230°성분)을 식(4.3)에 의하여 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration : P.G.A) 0.14g로 계수조정한 지진을 사용하였다. 적분간격(Δt)은 식(4.4)에 의하여 선택하며, Δt_{max} 값이 0.02초 이하로 한다.

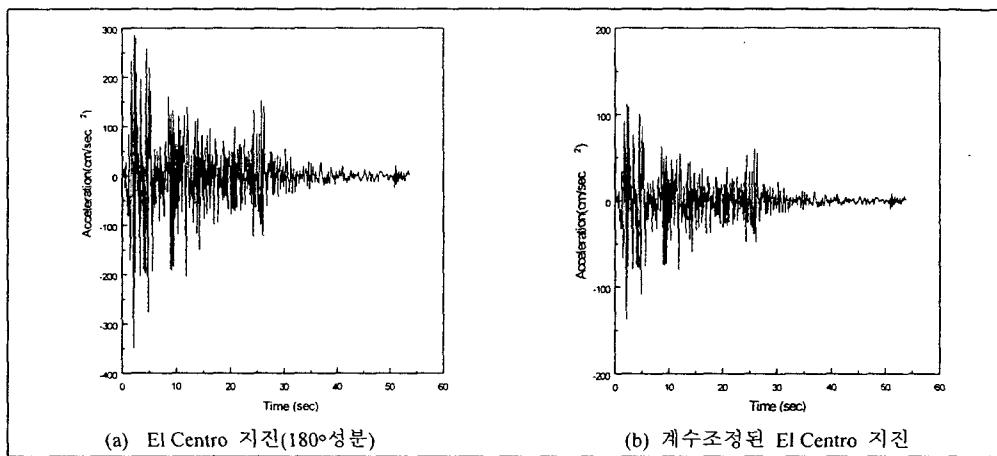
$$\text{Scale Factor} = \frac{0.14g}{|P.G.A|} \quad (4.3) \quad \Delta t \leq \frac{T}{10} \quad \text{여기서, } T \text{ 는 구조물의 전동주기이다.} \quad (4.4)$$

각 지진에 대한 입력 내용은 [표 4.1]과 같다.

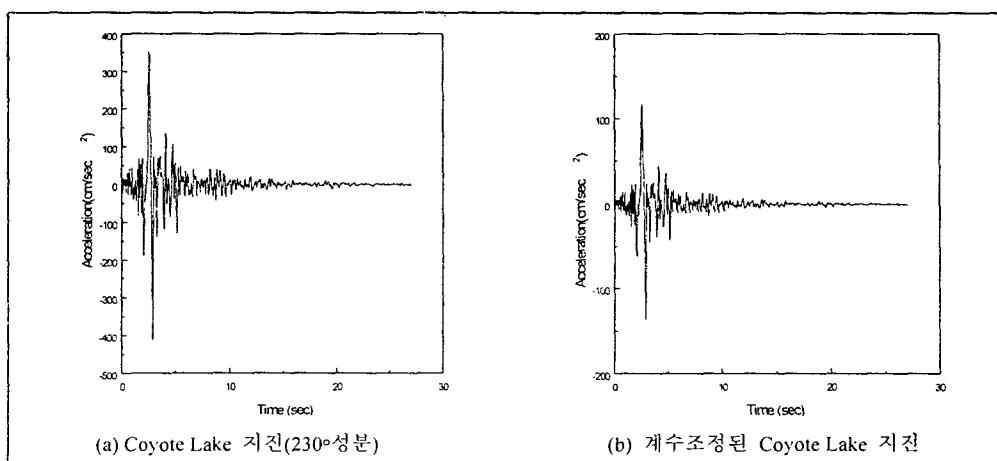
[표 4.1] 지진기록에 대한 자료

지진명	Data 수	Δt (sec)	Scale Factor
El Centro	10747	0.005	0.3926
Coyote Lake	5419	0.005	0.332

[그림 4.2]와 [그림 4.3]에 각각의 지진에 대한 원래 지진과 계수조정된 지진을 비교하였다.



[그림 4.2] El Centro 지진과 계수조정된 El Centro 지진



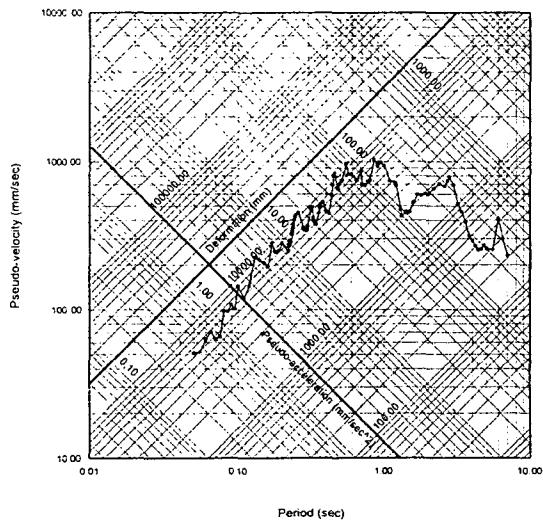
[그림 4.3] Coyote Lake 지진과 계수조정된 Coyote Lake 지진

지진기록에 의한 응답스펙트럼을 작성하기 위하여 Duhamel Integration을 이용한 프로그램을 작성하여 계수조정된 El Centro 지진, Coyote Lake 지진에 대한 응답스펙트럼을 작성하였다.

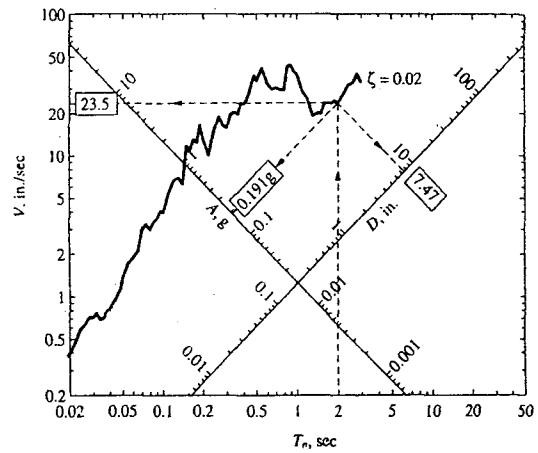
프로그램 검증을 위하여 El Centro 지진(180°성분) Damping 2%에 대한 응답스펙트럼을 작성하여 참고문헌(1)과 비교 검토하고, [표 4.2]에 결과를 나타내었다.

[표 4.2] El Centro 지진(180°성분) Damping 2%, 주기 2 초에 대한 응답스펙트럼 비교

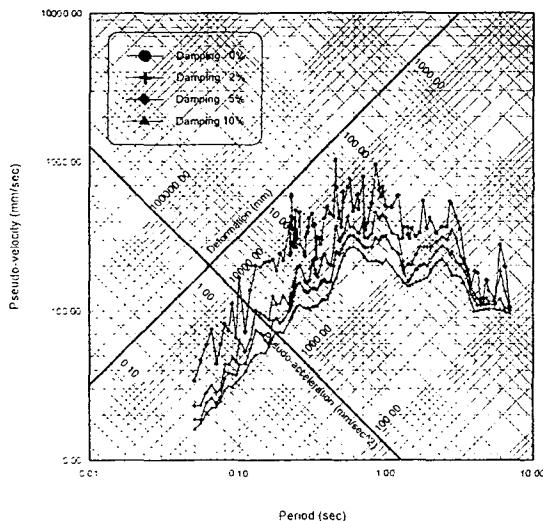
응답스펙트럼	본 연구	참고문헌(1)
Deformation(in.)	7.485	7.470
Pseudo-velocity(in./sec)	23.52	23.50
Pseudo-acceleration (g)	0.191	0.191



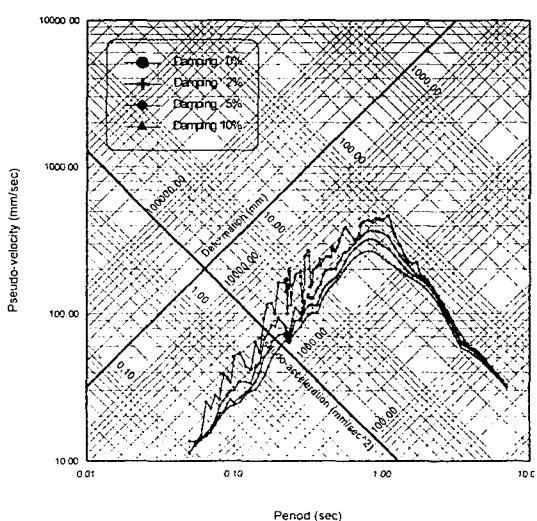
[그림 4.4] El Centro 자진의 응답스펙트럼
(180°성분 . Damping 2%)



[그림 4.5] 참고문헌(1) 의 El Centro 지진의 응답스펙트럼
(180°성분 , Damping 2%)



[그림 4.6] 계수조정된 El Centro 지진의 응답스펙트럼



[그림 4.7] 계수조정된 Coyote Lake 지진의 응답스펙트럼

[그림 4.4]에 본 연구에서 작성한 응답스펙트럼과 [그림 4.5]에 참고문헌(1)의 응답스펙트럼을 나타내었다.

검토된 프로그램에 의하여 계수조정된 El Centro 지진, Coyote Lake 지진에 대한 응답스펙트럼을 Tripartite Logarithmic Plot (Four-way Logarithmic Plot) 하고, [그림 4.6], [그림 4.7]에 각각 나타내었다.

5. 수치해석

해석에 사용된 구조물 모델로는 [그림 5.1]과 같이 3 경간(235m-510m-235m)의 3 차원 입체 트리스 교량을 선택하여 총 2752 절점, 총 1907 부재로 모델링하였다.

본 해석 모델의 고유치해석 결과, 교축방향(X)에 대해서는 29 차 모드, 교축직각수직방향(Y)에 대해서는 52 차 모드, 교축직각수평방향(Z)에 대해서는 23 차 모드까지가 유효모드질량 90%이상 모드로 나타났다. 따라서, 본 해석 모델의 내진해석에서는 세방향이 모두 유효모드질량 90%이상 되는 52 차 모드까지 고려하여 동적해석을 수행하였다.

계수조정된 El Centro 지진, Coyote Lake 지진을 이용하여 작성한 응답스펙트럼에서 Damping 2%, 5%에 대하여 해석을 수행하고 각 모드의 응답은 제곱근의 합의 제곱근 방법(SRSS)으로 조합하였다.

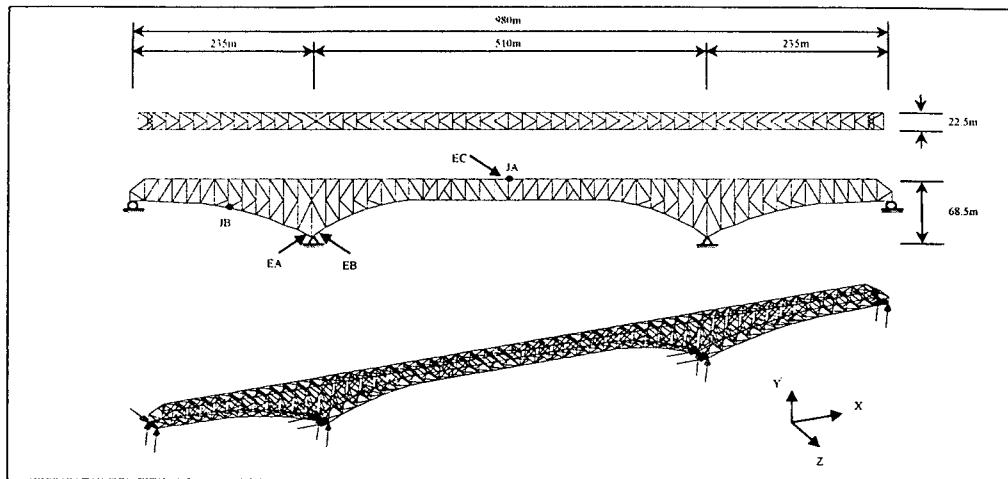
또한, 시간이력해석은 모드중첩법에 의한 해석을 통하여 응답스펙트럼에 의한 해석과 같은 조건인 Damping 2%, 5%에 대하여 각 절점에서의 시간이력을 구하였다.

지진하중은 교축방향(X), 교축직각수평방향(Z)과 시방서에서 규정하고 있는 합성지진하중(교축방향에 교축직각수평방향의 30 % 합성과 교축직각수평방향에 교축방향의 30% 합성)에 대한 동적해석을 하였다. 본 연구에서는 합성지진하중의 첫 번째 조합을 C1 으로, 두 번째 조합을 C2 로 정의하고 사용하였다.

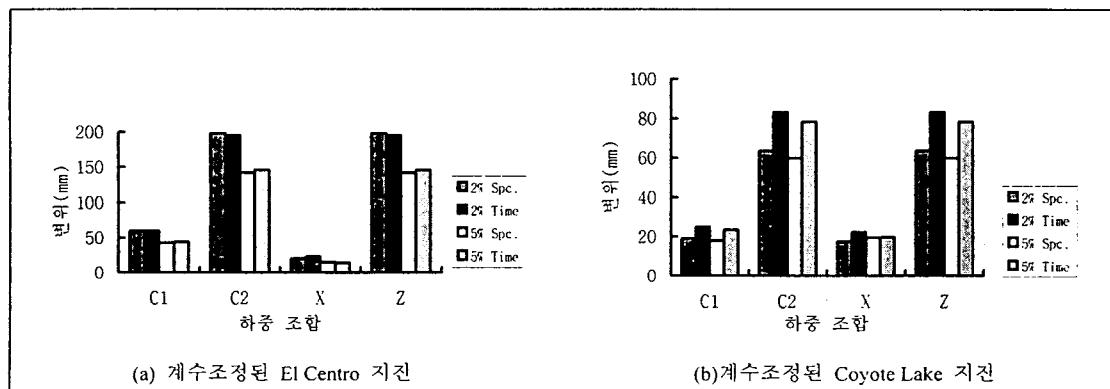
절점 JA, JB 의 변위와 부재 EA, EB, EC 의 부재력에 대하여 하중 조합별로 응답스펙트럼해석과 시간이력해석을 비교하고, [그림 5.2]~[그림 5.6]에 나타내었다. 변위와 부재력에서 감쇠계수에 대한 감쇠 효과를 확실히 나타내고 있으며, 교축방향(X)과 교축직각수평방향(Z) 중 후자에 의한 결과값이 크게 나타나고 있다. 두 가지의 합성지진하중에서도 교축직각수평방향의 성분이 대단히 크게 지배적인 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 응답스펙트럼해석과 시간이력해석의 결과값은 대체적으로 시간이력해석의 결과가 약간 크게 나타나고 있다.

[표 5.1] 재료의 특성

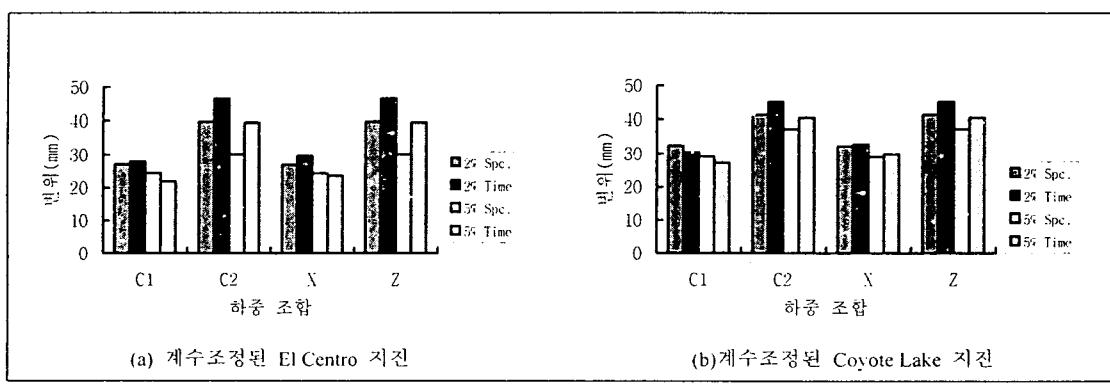
ELEMENT	AREA (mm^2)	POISSON'S RATION	MODULUS ELASTICITY (kg / mm^2)	WEIGHT PER UNIT VOLUME (kg / mm^3)	COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION OF THE MATERIAL
상현재	178000	0.3	21000	7.85×10^{-12}	1.2×10^{-5}
	256800				
	145600				
하현재	178000	0.3	21000	7.85×10^{-12}	1.2×10^{-5}
	370800				
	145600				
수직.경사재	120000	0.3	21000	7.85×10^{-12}	1.2×10^{-5}



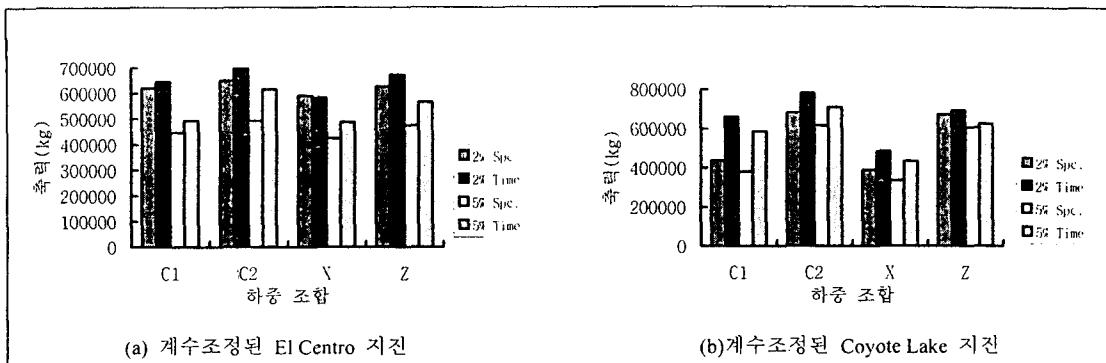
[그림 5.1] 해석 모델



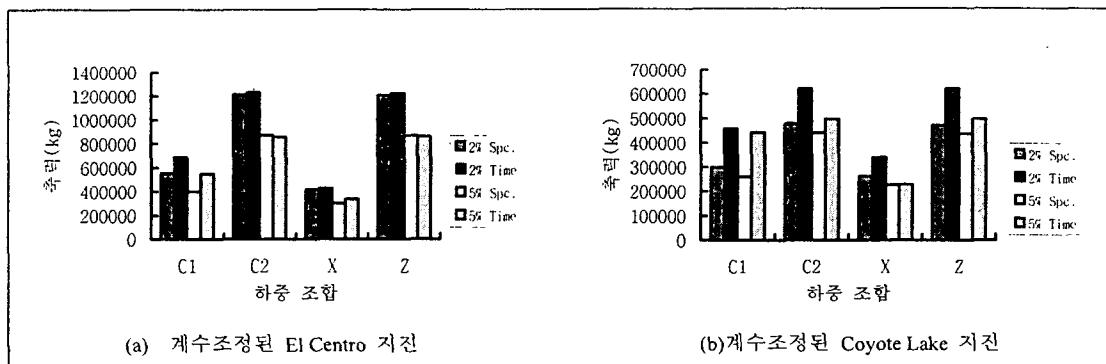
[그림 5.2] Damping 2%, 5%에 대한 JA 변위



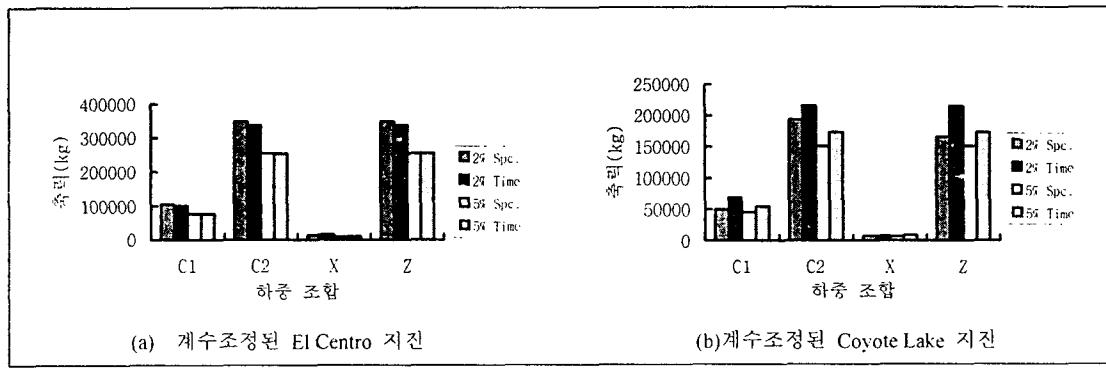
[그림 5.3] Damping 2%, 5%에 대한 JB 변위



[그림 5.4] Damping 2%, 5%에 대한 EA 부재력



[그림 5.5] Damping 2%, 5%에 대한 EB 부재력



[그림 5.6] Damping 2%, 5%에 대한 EC 부재력

6. 결론

응답스펙트럼해석을 위한 Duhamel Integration 방법을 이용한 프로그램을 작성하였으며, 최대지반가속도를 0.14g로 계수조정한 El Centro, Coyote Lake 지진기록을 이용한 응답스펙트럼을 Damping 0%, 2%, 5%, 10%로 작성하여 [그림 4.6].[그림 4.7]과 같이 Tripartite Logarithmic Plot (Four-way Logarithmic Plot) 하였고, 3 차원 입체 트러스 교량의 내진해

석을 응답스펙트럼해석 방법과 시간이력해석 방법으로 수행하였다. 지진하중을 교축방향(X), 교축직각수평방향(Z), 합성지진(C1,C2)으로 하중 조합하여 두 해석 방법에 대하여 비교하였다.

작성된 응답스펙트럼에 의한 3 차원 입체 트러스 교량의 내진해석과 시간이력해석을 수행하여 특정 절점과 특정 부재에 변위와 부재력을 검토한 결과 [그림 5.2]~[그림 5.6]과 같은 결과를 얻을 수 있었으며, 대체적으로 시간이력 해석의 결과값이 약간 크게 나타났다. 이 결과는 특정 지진의 평탄화 되지 않은 응답스펙트럼(jagged response spectrum)을 사용한 해석에서 나타나는 경향과 일치한다.

본 연구에 의해 제시되는 응답스펙트럼해석 방법은 시간이력해석 방법 보다 해석과 자료분석에 시간적으로 유리하며, 설계 목적에 비교적 만족한 결과값을 얻을 수 있었다. 또한, 본 연구를 통하여 각종 지진기록에 관한 자료가 있을 경우에 그 지진의 응답스펙트럼을 작성하여 제시함으로써 구조물의 내진해석을 손쉽게 수행할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 계수 조정된 El Centro, Coyote Lake 지진기록을 이용하여 지진에 대한 동적거동의 이해에 중점을 두었으나, 추후 연구과제로는 우리나라 지진의 특성을 반영하는 지진기록에 의한 해석과 지질조건까지 고려된 해석이 수행되어야 하겠다.

참 고 문 헌

1. Anil K. Chopra, *Dynamics of Structures*, Prentice-Hall, Inc., 1995, pp.187~548
2. Applied Technology Council. "Tentative Provision for the Development of seismic Regulations for buildings", ATC-3-06 Applied Technology Council Report ATC-3-06 Palo Alto, California, 1984
3. Brady, A.G., Hudson, D.E. and Trifunac, M.D., "Analysis of Strong Motion Earthquake Accelerograms", Earthquake Engineering Research Laboratory EERL 72-80, Caltech Pasadena, 1972
4. E. Hudson, "Reading and Interpreting Strong Motion Accelerograms", Earthquake Engineering Research Institute, 1979, pp.22~66
5. Klaus-Jürgen Bathe, *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, Inc., 1996, pp.954~978
6. Manolis Papadrakakis. *Solving Large-Scale Problems in Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., 1993, pp.224~257
7. Mario Paz, *Structural Dynamics*. Van Nostrand Reinhold, 3rd ed., 1991, pp. 63~198
8. Mario Paz, *International Handbook of Earthquake Engineering*, Chapman & Hall, Inc., 1994, pp.3~53
9. N.M Newmark, W.J.Hall. "Earthquake Spectra and Design", Earthquake Engineering Research Institute, 1982, pp.58~69
10. Ray W. Clough, Joseph Penzien. *Dynamics of Structures*, McGraw Hill, Inc., 2nd Ed., 1993, pp.575~667
11. William Weaver, Jr., Paul R. Johnston, *Structural Dynamics by Finite Elements*, Prentice-Hall, Inc., 1987, pp.73~194
12. 대한토목학회, "도로교 표준시방서", 대한토목학회, 1996
13. 小西一郎. 鋼橋設計論 I. 丸善株式會社, 1975, pp.688~708
14. 성준현. "한반도 지진에 의한 설계 응답 스펙트럼 작성과 이에 따른 구조물의 내진 해석", 박사학위 논문, 고려대학교, 1993
15. 오병환, 강영진. "지진위험도 해석기법과 설계지진결정 연구", 대한토목학회논문집, 제 12 권 제 1 호, 1992
16. 유철수. "한반도의 지진활동과 동적해석을 위한 최대지반가속도값의 산정", 대한토목학회논문집, 제 8 권 제 1 호, 1988
17. 한국도로공사. "고속도로 교량의 내진설계 지침", 한국 도로 공사, 1996