

단일모드 스펙트럼해석법에 의한 교량의 효율적 내진해석

Efficient Seismic Analysis of Bridge by Single Mode Spectrum Analysis Method

박 윤 봉* 국 무 성* 유 승 운** 김 선 훈***
Park, Yun-Bong Kook, Moo-Sung Yoo, Seung-Woon Kim, Sun-Hoon

ABSTRACT

Recently it is used seismic analysis like single mode spectrum analysis, multi mode spectrum analysis and time history analysis in Korea. Because bridges are not special form of them but regular and simple form of them in our country, we must develop seismic analysis program of bridge based on single mode spectrum analysis. The program developed by this study reduces a quantity and a time of calculation compared to SAP90 and gives accurate answers without errors. In the case of commercial program if we look for seismic load ($P_e(x)$), we must increase the number of node and the larger the number of node the more a quantity and a time of calculation. But this program is exactly solved with basic node compared to commercial program.

1. 서 론

우리나라는 지난 30년간 경제의 급성장과 더불어 국도, 고속도로, 철도, 고속전철 등 교통망의 건설이 활발하여 여러 형태의 교량수요가 증가하고 있다. 이러한 구조물은 지진발생시 충분한 대비가 이루어지지 않을 경우, 대형 사고로 이어져 수많은 인명과 재산의 손실을 초래함과 더불어 국가 인프라로서의 기능 수행이 마비되어 경제·사회 전체를 극도의 혼란상태에 빠뜨릴 수 있으므로, 그 어느 분야에서보다 내진설계 및 제어가 중요하다.

그러나 아직까지는 국내에서 지진의 위험도를 제대로 인식하지 못하고 있어서 내진설계나 시공과정에서 지진에 대한 철저한 배려가 제대로 되지 못하고 있다는 것이 일반적인 인식이다. 이러한 현실적 문제는 지진위험도에 대한 인식부족과 아울러 구조기술자들에 대한 내진설계 분야의 교육이 제대로 수행되지 않고 있는데도 그 원인이 있다.^[1]

* 관동대학교 건설환경시스템공학부 대학원

** 정희원 · 관동대학교 건설환경시스템공학부 교수

***정희원 · 영동대학교 토목환경공학과 교수

기존의 교량 설계는 지구의 중력에 저항하기 위한 구조물로 수직하중에 의한 주하중을 지지하고, 부하중 및 특수 하중으로서의 횡하중이 부차적으로 작용하는 하중 조합에 의해 설계되어졌다. 즉, 구조설계 과정은 주하중 및 경계성과 모형화 공간 확보에 의해 선정된 교량형식에 대해 수직 방향력에 의한 단면 설계 과정과 수평방향력에 대한 검토 단계로 이루어지며, 단면 결정은 주로 수직 방향력이 지배 요인이었다.^[2]

그러나 자연 재해중 가장 큰 재해인 지진에 대한 내진설계에서 지진은 수평하중의 형태이므로 부재별로 수평하중에 대한 설계가 이루어져야 한다. 그러므로 기존에 축적된 교량해석 및 설계 자료의 개량 또는 변경이 필요하다.

현재 우리나라의 지방사에서 제시하고 있는 내진 설계 방법 중에서 가장 단순한 것은 단일모드 스펙트럼 해석법이다. 그 외에 교량의 형식이 복잡하고 지간이 긴 교량에서는 단일모드 스펙트럼 해석법 대신에 복합모드 스펙트럼 해석법과 시간이력 해석법이 사용되고 있다.

2. 단일모드 스펙트럼 해석법

단일모드 스펙트럼해석법은 첫 번째 진동모드가 진동응답을 지배하는 교량의 설계 지진력을 계산하는데 사용한다. 이 방법은 구조진동학적 관점으로 볼 때 완전히 엄밀한 것일지라도 관성력을 도입한 후에는 정역학적인 문제로 치환된다.^[2] 이 방법은 상부구조가 연속 또는 불연속된 여러 형태의 교량에 사용할 수 있다. 해석에 기초강성의 영향을 포함하는 교대와 교각에서의 경계조건을 모형화할 수 있다.

우리나라 도로교 설계기준의 내진설계규정^[3,6]을 근거로 설계하는 경우에 일반적인 교량에 대해서는 단일모드 스펙트럼해석법(single mode spectrum analysis method)에 의하여 설계지진력(design force)을 구한다. 이 방법은 단지 교량의 기본주기(fundamental frequency)만을 이용하여 설계지진력을 계산하는 방법으로 구조물의 형상이 단순하여 기본모드가 구조물의 동적거동을 대표할 수 있는 경우에 동역학에 대한 깊은 지식이 없어도 쉽게 적용 가능한 간략한 해석법이다. 그러나 일반적으로 다른 해석법에 비해 응답 값이 크게 산정되며 구조물의 형상이 복잡하여 기본모드 이외의 모드들에 의한 영향이 큰 경우는 적용이 어려운 단점이 있다. 또한, 정확한 수치를 구하기 위해서는 수치해석과정에서 구조물의 부재에 대한 절점수를 늘려주어야 하나 그에 따른 교량주기 계산과정이 늘어남에 따라 많은 계산 량과 계산시간이 필요하게 된다.^[10]

본 연구에서는 이러한 단일모드 스펙트럼해석법에서의 계산량과 계산시간을 줄이기 위해 구조물에 대한 등가 정적 지진하중 산정에서 필요한 α , β , γ 계수값 및 교량주기 T , 탄성지진 응답계수 C_s , 등가 정적 지진하중 P_e 값을 직접적분법(direct integration)을 사용하여 좀더 정확하게 구할 수 있도록 하였다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \int_0^L v_s(x) dx, & \beta &= \int_0^L w(x) v_s(x) dx \\ \gamma &= \int_0^L w(x) v_s(x)^2 dx, & T &= 2\pi \sqrt{\frac{\gamma}{p_0 g \alpha}} \\ C_s &= \frac{1.2AS}{T^{2/3}}, & p_e(x) &= \frac{\beta C_s}{\gamma} w(x) v_s(x) \end{aligned} \quad (1)$$

3. 단일모드 스펙트럼 해석법에 의한 교량의 효율적 내진해석

우리나라 전체 교량중 대부분의 경우 형상이 단순하고 정형화되어 있는 교량이므로 도로교 설계기준에서는 단일모드 스펙트럼해석법을 주로 사용하게 규정되어 있으므로 이에 맞는 간편하고 효율적인 내진해석기법에 대해 연구한다. 또한 해석결과의 정확성을 확인하기 위해 범용프로그램과의 결과를 비교해 검증을 한다.^[47]

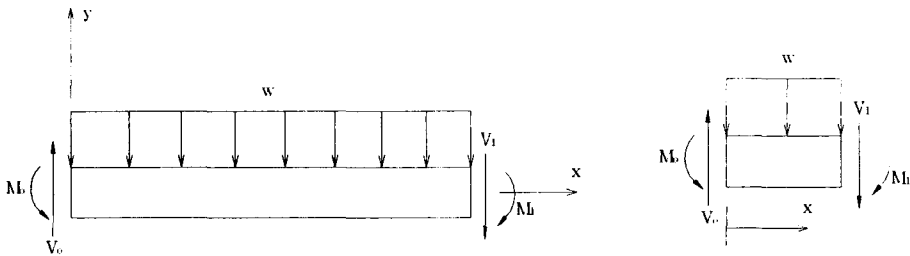
3.1 기본절차

- 교량의 길이를 따라 등분포 하중을 P_0 을 적용한다. 정적해석을 통해 변형된 형태 $V_s(x)$ 를 결정한다.
- 구조물에 대한 등가정적지진하중 산정에서 필요한 α , β , γ 를 산정한다.
- 진동형상을 추측할 수 있는 기본적인 기초를 산정한다.
- 가속도 스펙트럼에 의한 지진계수 C_s 와 관성하중 $P_e(x)$ 를 결정한다. 그리고 진동변위와 힘의 응답을 결정하기 위해 정적해석을 수행한다.
- 응답수정계수에 근거하여 힘을 수정한다.

3.2 단위등분포하중에 의한 변위장 계산

<그림 3.1>로부터 단위등분포하중으로 인한 상부 구조 절점의 이동, 회전 그리고 요소 끝부분의 전단력과 모멘트를 알고 있으면, 각 요소 내에서 변위장(displacement field)을 계산할 수 있다. 등분포하중 w 을 받는 개개의 상부부재를 고려하면, 임의의 점 x 에서 평형조건은 다음과 같다.

$$M(x) + \frac{1}{2}wx^2 - V_0x + M_0 = 0 \quad (2)$$



<그림 3.1 > 상부부재에서의 힘

보의 휨 $M(x) = EI(d^2y/dx^2)$ 에 주의하며 이 식을 두 번 적분하고, 다음과 같은 경계조건을 적용시킨다.

$$y(x_0) = y_0, \quad \frac{dy(x_0)}{dx} = \theta_0 \quad (3)$$

단위 등분포하중에 의한 정적해석으로부터 변위와 회전량, 전단력 및 모멘트 값을 먼저 구하고, 변형 형상을 다음 식을 이용하여 구한다.

$$y(x) = \frac{1}{EI} (Ax^4 + Bx^3 + Cx^2 + Dx + E) \quad (4)$$

여기서,

$$A = \frac{1}{24} w, \quad B = \frac{1}{6} V_o, \quad C = -\frac{1}{2} M_o$$

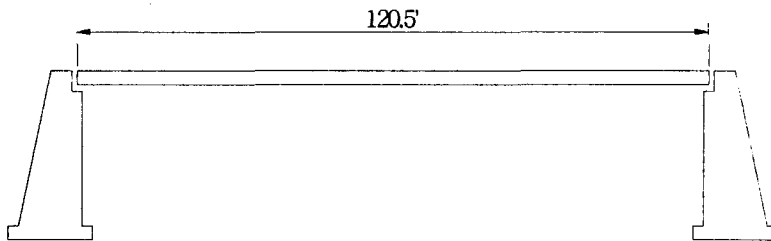
$$D = [EI\theta_o - \frac{1}{6} wx_o^3 - \frac{1}{2} V_o x_o^2 + M_o x_o]$$

$$E = [EI(y_o - \theta_o x_o) + \frac{1}{8} wx_o^4 - \frac{1}{3} V_o x_o^3 + \frac{1}{2} M_o x_o^2]$$

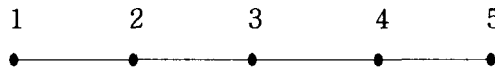
4. 수치해석 및 비교

4.1 단경간교

교량에 대한 모델은 정형화되도록 모델링을 해야 한다. 그리고 기본적인 제원에 대해서는 범용프로그램과 비교하여 복잡하거나 차별화 되지 않도록 한다.



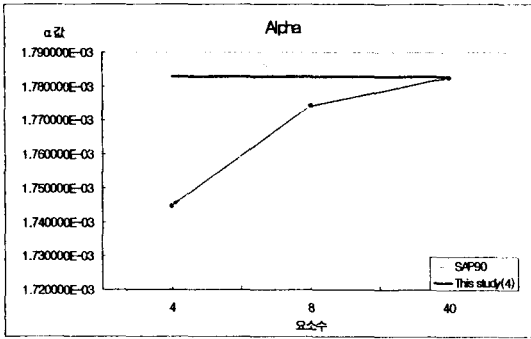
<그림 4.1> 단경간교의 모형



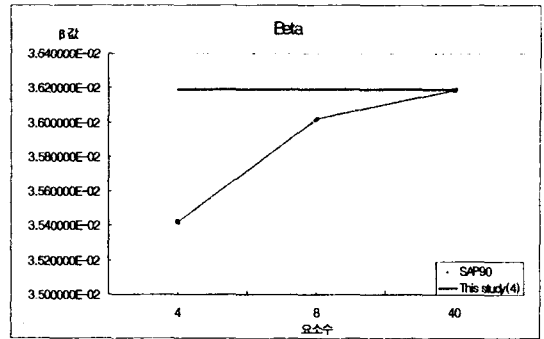
<그림 4.2> 단경간교의 모델링

<표 4.1> 부재 수에 따른 α , β , γ , T값의 오차율(교축직각방향)

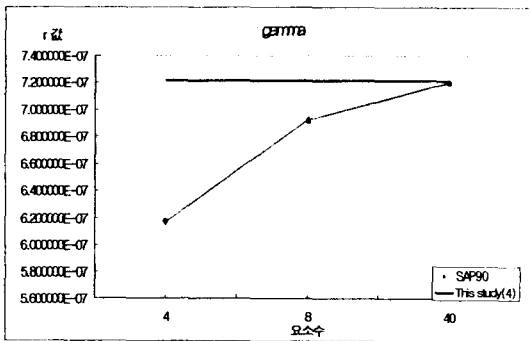
오차율(%)	Parameter	SAP90(4)	SAP90(8)	SAP90(40)
	Alpha	2.18	0.48	0.02
	Beta	2.18	0.48	0.02
	Gamma	16.98	4.20	0.17
T-Period	7.05	1.89	0.13	



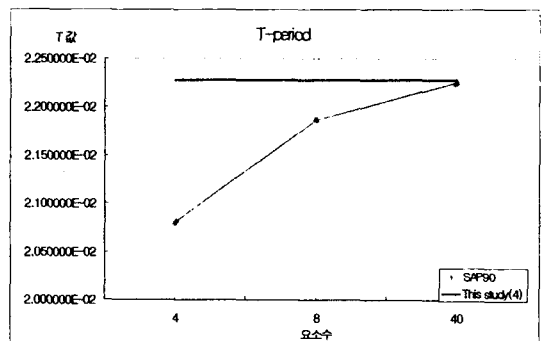
<그림 4.3> α 값에 대한 비교



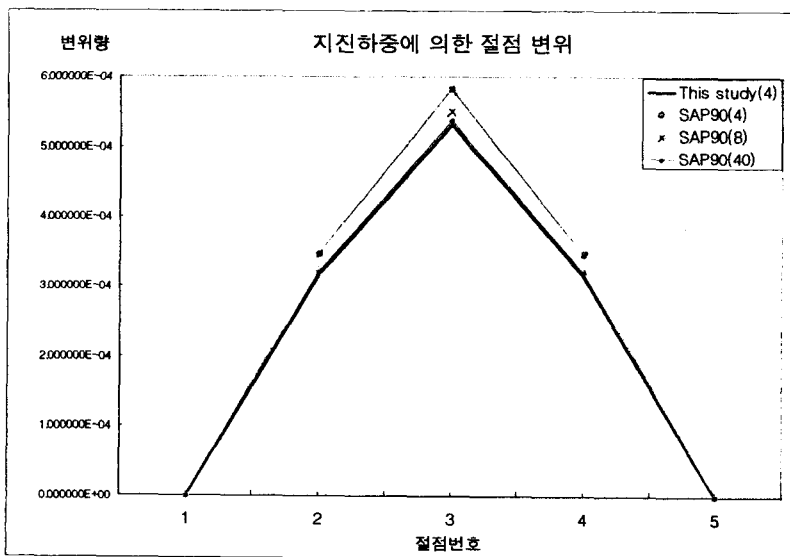
<그림 4.4> β 값에 대한 비교



<그림 4.5> γ 값에 대한 비교

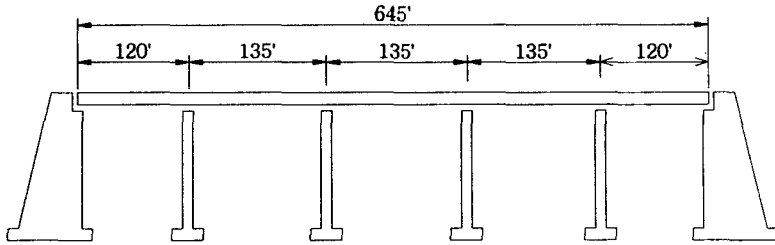


<그림 4.6> T값에 대한 비교

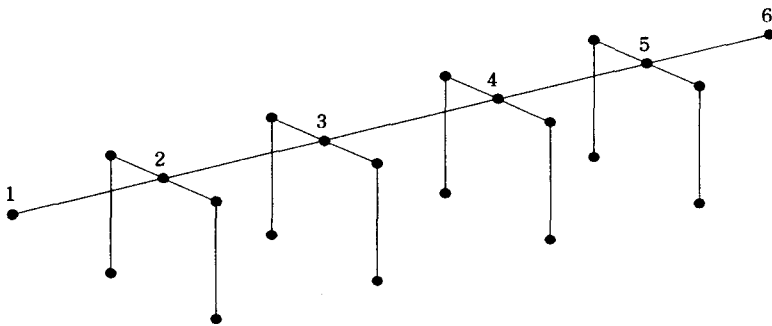


<그림 4.7> 지진하중에 대한 절점 변위 비교

4.2 5경간교



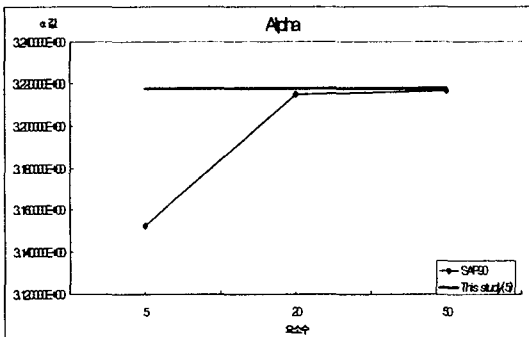
<그림 4.8> 5경간교의 모형



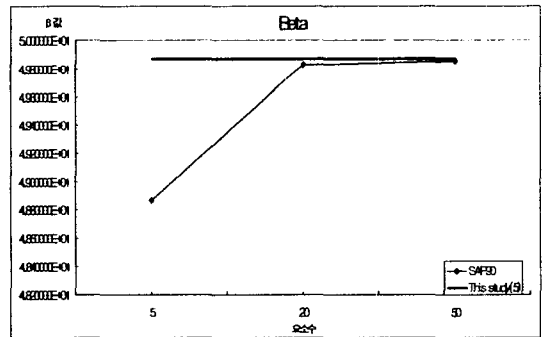
<그림 4.9> 5경간교의 모델링

<표 4.2> 부재 수에 따른 α , β , γ , T값의 오차율(교축직각방향)

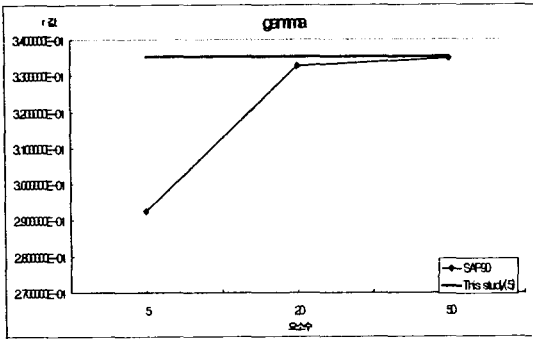
	Parameter	SAP90(5)	SAP90(20)	SAP90(50)
오차율(%)	Alpha	2.06	0.08	0.03
	Beta	2.06	0.08	0.03
	Gamma	14.63	0.79	0.16
	T-Period	6.03	0.41	0.12



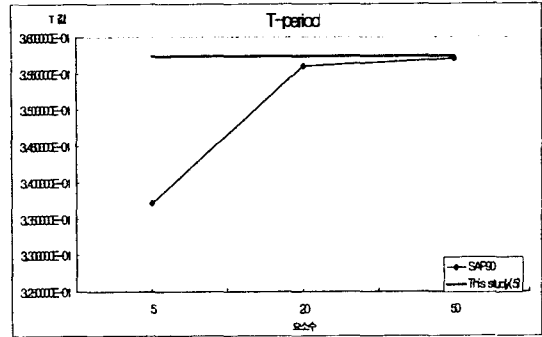
<그림 4.10> α 값에 대한 비교 그래프



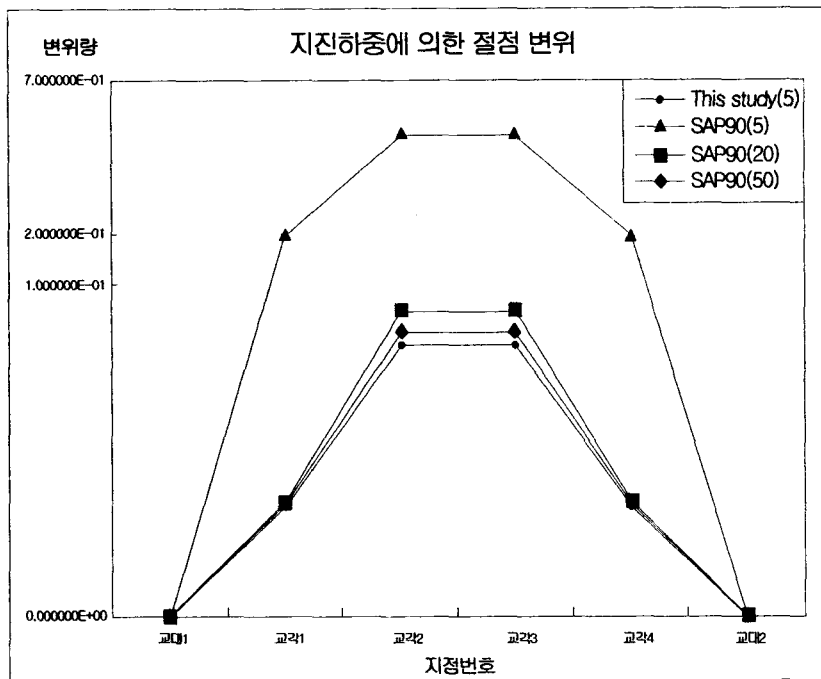
<그림 4.11> β 값에 대한 비교 그래프



<그림 4.12> γ 값에 대한 비교 그래프



<그림 4.13> T값에 대한 비교 그래프



<그림 4.14> 지진하중에 대한 절점 변위 비교

4.3 비교분석

본 연구와 범용프로그램 SAP90을 이용한 해석사이의 결과비교에서 교축방향과 교축직각방향의 단위등분포하중으로 인한 변위는 차이는 거의 없다. 또한, 교축방향에 대해서는 α , β , γ 값과 지진 하중으로 인한 결과가 비교적 일치하였다. 교축방향에서의 오차는 부재 단면에 의한 축변형 오차이므로 무시해도 상관없다고 판단된다.

교축직각방향에서의 α , β , γ 값과 지진하중으로 인한 변위는 많은 차이를 보여주고 있다.

<그림 4.2>, <그림 4.14>을 보면 SAP90에서의 절점수가 많아지면 많아질수록 조금씩 본 연구 결과와 비슷해짐을 알 수 있다. 본 연구에서는 요소의 양단에서의 변위, 전단력과 휨모멘트 값을 이용하여 변위 형상을 정확하게 추정하여 사용하기 때문에 요소 수에 무관하게 정확한 값을 얻을 수 있다.

5. 결 론

우리나라 대부분의 교량은 특수한 형태의 교량이 아닌 정형화되고 단순한 일반 형태의 교량이다. 그러므로 이에 알맞은 해석방법인 단일모드 스펙트럼 해석법에 의한 교량의 효율적 내진해석에 대한 연구가 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 단일모드 스펙트럼해석에서 필요한 기본적인 정적지진하중 산정에 필요한 α , β , γ 계수와 지진주기의 값 T, 지진하중 $P_e(x)$ 값을 수작업이 아닌 자동화로 계산하였고, 단위등분포하중에 의한 변위곡선 $V_s(x)$ 값을 구하기 위해 요소양단의 변위, 전단력 및 휨모멘트 값을 이용하여 탄성곡선식을 정확히 구하였다.

SAP90과 같은 기존 범용프로그램과 비교하였을 때 계산량과 계산시간이 단축되었으며, 수작업으로 인한 오차가 없어 매우 정확하다. 범용프로그램의 경우 지진하중 $P_e(x)$ 값을 구하기 위해서는 여러 단계의 수작업이 필요하며, 더 정확한 값을 얻기 위해 절점수를 늘리면 늘릴수록 절점 더 계산 량과 계산시간이 늘어나지만, 본 연구에서는 기본 절점만으로도 범용프로그램보다 훨씬 정확한 내진해석값을 구할 수 있다.

참고 문헌

- [1] 한국도로공사, "도로설계요령 제3권", 1992.
- [2] 한국도로공사, "고속도로 교량의 내진설계 지침", 1996.
- [3] 건설교통부, "도로교 표준 시방서", 1996.
- [4] 한국전산구조공학회, "교량의 내진설계", 1998.
- [5] 이기복, "교량의 내풍·내진", 도서출판 과학기술, 1999.
- [6] 건설교통부, "도로교설계기준", 2000.
- [7] 한국전산구조공학회, "교량 구조물의 전산구조해석", 2001.
- [8] ATC-6, "Seismic Design Guidelines For Highway Bridges", Applied Technology council, 1981.
- [9] Garret N. Vanderplaats, "ADS : A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis", Engineering Design Optimization, Inc., Santa Barbara, California, 1985.
- [10] Orié, D., Saidi, M. and Douglas, B., "A Micro-CAD System for Seismic Design of Regular Highway Bridges", Report No. CCEER 88-2, University of Nevada, 1988.
- [11] AASHTO, "Standard Specification for Highway Bridges, Division I-A: Seismic Design", NCHRP 20-7, NCEER, 1994.
- [12] Berger/Abam Engineers Inc., "Seismic Design of Bridges : Design Example No.1~No.7", 1996.