

스펙트럼해석법에 의한 교량의 지진해석 및 설계방법의 적용

Application of Seismic Analysis and Design Method on the Bridges by Spectral Analysis Method

김 운 학* 유 영 화** 신 현 목***
Kim, Woon Hak Yoo, Young Hwa Shin, Hyun Mock

국문요약

교량의 내진설계에 있어서 일반적인 중·소지간의 교량에 적용하도록 규정된 단일모드 스펙트럼 해석법¹⁾은 비교적 작은 규모의 단순교량에 적용되고 있는 간단한 내진설계방법이며 국내외를 통틀어 가장 많이 사용되는 방법이다. 그러나 최근에 들어서부터 구조형상이 복잡해지고 지간이 길고 교각고가 높은, 규모가 큰 비정형 교량이 많이 시공되고 있으며 이러한 경우에는 교량의 안전과 경제적, 효율적인 설계를 위해서 반드시 다중모드 스펙트럼 해석법이나 입력지진파에 의한 시간이력해석에 의해서 검토되는 것이 바람직하다. 다중모드 스펙트럼 해석법의 경우에는 교량의 형식, 경간의 수, 교각의 강성, 인접교각과의 상대적 강성 및 상부구조의 지지조건 등에 따라서 같은 유형의 교량이라 하더라도 진동응답은 각기 다르기 때문에 일괄적인 규칙을 적용하는데에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 도로교량에 대한 효율적인 내진설계가 이루어지기 위해서, 교량의 진동응답 및 특성을 파악할 수 있는 3차원 동적해석 프로그램을 작성하여 내진해석이 용이하게 이루어질 수 있도록 하였으며, 후처리 프로그램을 사용함으로써 동적해석프로그램에 의한 결과를 곧바로 내진설계에 반영할 수 있도록 하였다. 또한 교량의 형식, 규모, 지지조건 등의 변화에 따른 동적해석결과로부터 적절하고 효율적인 내진설계의 기준을 제시하였다.

주요어 : 단일모드 스펙트럼 해석법, 다중모드 스펙트럼 해석법, 고유주기, 지진하중, 동적응답

ABSTRACT

Single-mode spectral analysis method is usually applied to a small-scale bridges with the simple geometric shape and uses only fundamental period to estimate the elastic earthquake forces and the displacements of the substructure. On the other hand, multi-mode spectral analysis method may be used instead if the possibilities of potential damage are developed when considering significance, scale, and geometric shape of bridges. Since the dynamic responses of bridge can be significantly different depending on the modeling techniques for the restraint and support conditions etc, it may be misled to the unexpected results. In this study the dynamic analysis program which can model and analyze the bridge as a two- or three-dimensional framed structure is developed and verified with the results of other reliable program. Using this program together with the post processor, the designer can easily and readily obtain the responses(moments, base shears, and displacements)of bridges necessary to design purpose. And further from the analysis results according to the variations of type, scale, and restraint and support conditions of bridges including sectional properties, applications of the effective and desirable seismic design are presented.

Key words : *single-mode spectral analysis, multi-mode spectral analysis, fundamental period, earthquake force, dynamic response*

* 정회원 · 국립안성산업대학교 토목공학과 조교수
** 정회원 · 국립안성산업대학교 토목공학과 강사
*** 정회원 · 성균관대학교 토목공학과 부교수

1. 서 론

지진하중(earthquake loads)은 정량적, 정성적인 평가가 가능했던 종래의 하중과는 달리 그 발생빈도나 크기를 예측할 수 없기 때문에 과거의 지진 기록을 참고로 하여 발생 가능한 지진의 크기를 설계하중으로 규정하여 구조물의 설계에 적용하는 것이 일반적인 관례로 되어 있다. 지진하중에 대한 설계하중 산정은 설계자의 많은 경험과 사전지식을 요구한다고 할 수 있지만 미국이나 일본 등의 내진 설계자료에 대부분을 의존해 왔으며 내진설계에 관한 한 아직은 초보적인 수준에 불과하다. 최근에 들어서는 국내의 지진발생빈도와 그 규모가 커지는 추세를 나타내어 지진 및 내진설계에 관한 중요성이 나날이 부각되고 있는 시점에 직면해 있다. 도로 교량의 내진설계를 위하여 시방서에 규정된 단일모드 스펙트럼해석법(Single-Mode Spectral Analysis Method)에 의한 내진설계규정에 대해서는 교량의 중요도, 규모 및 기하학적인 형상을 고려할 때 지진으로 인한 피해가 클 것으로 예상되는 경우에는 다중모드 스펙트럼해석(Multi-Mode Spectral Analysis Method)^{(1),(2)}에 의한 결과와 비교·검토하도록 규정하고 있으며, 설계용 입력지진파에 의한 시간이력해석(Time History Analysis)⁽³⁾에 관한 내용은 규정되어 있지 않다. 규정된 가속도 스펙트럼^{(1),(4)}에 입각한 탄성지진 응답계수를 사용하는 단일모드 스펙트럼 해석법은 교량의 기본주기만으로 설계단면력을 산정할 수 있도록 하는 방법이며 동역학적 지식이 없어도 이 해석법을 간편하게 적용할 수 있는 장점이 있으며, 다중모드 스펙트럼해석법은 3차원 뼈대구조해석용 프로그램^{(5),(6),(7)}을 사용하지 않고서는 사실상 설계가 불가능하며, 다중모드 스펙트럼 해석법의 적용시에는 구속조건 및 지지조건의 모델링에 따라서 그 결과가 현저하게 다르기 때문에 내진설계의 지식이 없는 설계자가 정역학적 해석경험을 바탕으로 교량을 모델링할 경우에는 잘못된 내진설계를 초래할 수 있다. 특히 모델링 방법에 따라서 각 진동모드가 최종응답에 기여하게 되는 기여도는 다르게 평가될 수 있기 때문에 구조물 실제의 구속조건 및 지지조건들을 바르게 모델링하는 것이 중요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 도로교량에 대한 내진설계를 위한 3차원 동적해석 프로그램 및 후처리 프로그램을 개발하였고, 신뢰성 있는 범용 프로그램인 SAP90과의 비교를 통하여 본 연구의

해석 프로그램을 검증한 후에 이를 교량에 적용하여 효율적인 내진설계를 위한 기준을 제안하고자 한다.

2. 지진해석방법

동적해석(dynamic analysis)은 구조물의 동적 거동을 나타내는 운동방정식의 해를 구하는 것이다. 구조물의 모형화 과정에서 자유도는 구조물의 운동을 표현하는데 필요한 변위 성분의 개수이다. 구조계를 분석하려는 관점에 따라 자유도수는 달라질 수 있기 때문에 단자유도 시스템(Single-Degree of Freedom System)^{(6),(7)} 또는 다자유도 시스템(Multi-Degree of Freedom System)^{(6),(7)}으로 모형화하여 다음과 같은 운동방정식의 해를 구하여야 한다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\} \quad (1)$$

여기서, $[M]$ 은 질량행렬, $[C]$ 는 감쇠행렬, $[K]$ 는 강성행렬 $\{P\}$ 는 하중벡터이다. 이 운동방정식을 풀면 각 절점의 변위가 계산되어 이로부터 각 응력을 구할 수 있게 된다.

교량의 내진설계를 위한 동적해석법에는 대표적으로 모드해석법(Modal Analysis Method)과 시간이력해석법을 들 수 있다. 모드해석법에는 단일모드 스펙트럼해석법과 다중모드 스펙트럼해석법이 있으며, 시간이력해석법에는 모드중첩법(Mode Superposition Method)^{(6),(7)}과 직접적분법(Direct Integration Method)^{(6),(7)}이 있다. 시간이력 해석법은 지진에 의한 지반운동의 시간에 따른 변화를 알 때에 구조물의 거동을 알아낼 수 있는 정확한 해석 방법이지만 예상되는 지반운동을 정확히 예측하기가 어렵기 때문에 기존의 지진기록이나 합성된 지진기록을 사용하여야 하므로 번거롭고 계산량이 많다는 약점이 있다.

2.1 단일모드 스펙트럼 해석법(Single-Mode Spectral Analysis Method)⁽¹⁾

기본고유진동모드가 동적 응답을 지배하는 경우에 지진에 대한 응답을 간편하게 구할 수 있는 방법이며 입력지진동을 가속도계수, 지반계수 및 기본주기를 변수로 하는 등가정적하중(Equivalent Static Force)^{(1),(6),(8)}으로 치환하므로써 설계단면력을 산정하는 방법이다. 교량의 설계지진력을 산정하는데 있어

서 기본 진동주기만을 이용하여 지진의 영향을 등가의 정적 지진하중으로 환산하고 이를 이용하여 탄성해석을 실시하여 구조부재의 내력분포 및 상대변위를 구하여 구조물의 전체 지진응답을 계산하는 방법이다. 이와 같은 과정을 거쳐 탄성력과 탄성변위는 각 설계진동단위에 대하여 독립적으로 정하고, 두개의 직교축에 대하여 각각 독립적으로 해석하여 규정된 방법으로 조합하여 구한다.

2.2 다중모드 스펙트럼 해석법(Multi-Mode Spectral Analysis Method)⁽¹⁾

이 방법은 모드중첩법의 특별한 경우이며 교량의 기하학적인 형상이 불규칙하고 동적특성의 분포가 불규칙하여 진동의 각 모드내에서 세 개의 좌표축 방향의 진동성분이 복합되는 비정형 또는 특수교량의 지진해석에 사용되는 방법이다. 이러한 경우에는 세 개의 축에 따라 진동성분을 분류하기가 곤란하며 기본 진동 모드 외에 고차의 진동모드도 전체진동모드에 상당한 기여를 하게 된다. 이러한 고차 진동모드의 영향과 복합된 진동모드의 영향을 결정하기 위해서는 단일모드 스펙트럼 해석법에서와 같이 간략화는 어렵고 공간뺀대 동적해석 프로그램을 사용해야 한다. 고유치문제를 풀기 위한 수치적인 해법으로는 널리 사용되고 있는 Jacobi Method⁽⁹⁾를 적용하였다. 각 모드에 대한 최대 변위는 모든 모드에 대해서 중첩하여 전체의 최대 변위를 계산할 수 있다. 고차모드의 영향을 고려한 최대 응답은 제곱합평균방근(SRSS, Square Root of the Sum of the Square) 또는 CQC(Complete Quadratic Combination)^{(6),(7)}방법을 사용하여 결정할 수 있으며, 최소 시간수의 3배에서 최대 25개까지의 진동모드를 고려하도록 시방서에서는 규정하고 있다. 따라서 부재의 단면력과 변위는 개별 모드들로부터 각각의 응답성분들을 SRSS방법에 의해서 조합하여 구한다.

3. 지진해석 및 설계프로그램

구조물의 동적응답을 보다 정확히 파악하기 위해서는 동적해석을 위한 프로그램의 작성도 중요하지만, 그에 못지 않게 구조물을 적절히 모델링하는 것도 중요하다. 같은 유형 및 규모의 구조물이라 하더라도 모델링방법에 따라서 응답은 다르게 나타나는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 우선 도로교시방서에서 규정하고 있는 모델링방법에 따라서 구조물의 강성과 질량으로 인한 관성효과를 고려하기 위해서

상부구조 및 하부구조를 적절히 분할하였고, 상부구조와 하부구조간의 고정 및 가동 받침부는 부재의 강성행렬을 수정하여 이를 전체강성행렬에 고려하므로써 보다 정확한 교량의 동적응답을 구할 수 있도록 하였다. 단일모드 스펙트럼 해석은 기존의 내진설계용 프로그램인 『SEISMIC』⁽²⁾을 사용하였고, 다중모드 스펙트럼해석을 위해서는 공간뺀대구조물의 동적해석 이 가능한 프로그램인 『SEISMIC II』를 수정·보완하여 사용하였다. 또한 본 연구에서는 후처리 프로그램인 『SPL』에 의해서 구조물의 응답(진동모드, 단면력, 변위 등)을 화면 또는 프린터로 출력이 가능하도록 하여 설계자가 내진해석결과를 용이하게 분석하도록 하였다. Figure 1에는 본 연구에서 개발한 내진해석용 프로그램인 『SEISMIC II』의 흐름도를 나타내었다. 해석에 도입된 기본가정으로서, 교량은 내진 1등급교로서 가속도계수 0.14와 지반계수 1.2를 적용하며 교각하부는 바닥에 완전히 고정된 것으로 간주하였다. 각각의 해석법을 사용하여 얻은 결과는 SAP90의 결과와 비교하므로써 프로그램의 타당성을 입증하였다.

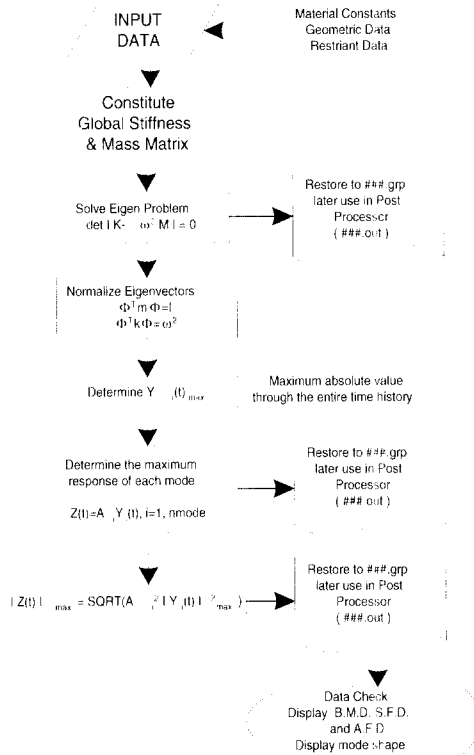


Figure 1 Flow chart of program SEISMIC II

4. 수치해석에

교량은 구조형상, 규모, 경간의 수, 교각의 높이 및 강성, 인접교각과의 상대적 강성 및 상부구조의 지지조건 등 여러 조건에 따라 그 동적응답이 다르기 때문에 이에 대한 일률적인 규정을 정하기는 쉽지 않다. 본 연구에서는 이와 같은 변수들에 대한 교량의 동적응답에 대한 추이를 개략적으로 평가하기 위해서 교량의 구조형상, 규모, 경간의 길이, 교각의 높이 및 상·하부구조간의 지지조건에 중점을 두고 이들의 변화에 따른 응답(주기, 모드형상, 단면력 등)을 구하여 각 해석방법별로 비교하였다. 이를 위해서 해석에는 92년도에 개정된 시방서에서

예제로 다루고 있는 교량과 실제로 시공된 연속교량을 대상으로 하였으며 이들의 구조형상을 Figure 2(a), (b)에 나타내었다. 교량예제 I⁽¹⁾은 상부구조와 하부구조가 일체로 된 경우이며 상부구조의 형식은 콘크리트상자형이며 하부구조는 다주식 가구조로 구성되어 있다. 해석교량 II는 콘크리트교각에 강·콘크리트 합성 상자형의 상부구조로 이루어진 연속교량이다. 교량의 규모에 따른 단면제원은 구조적으로 안전하도록 근사적으로 결정한 값을 사용하였으며, 총연장 및 교각고에 따라서 Table 1에 나타난 바와 같다. 한편, 동적해석을 위한 뼈대요소의 분할은 Figure 3과 같다.

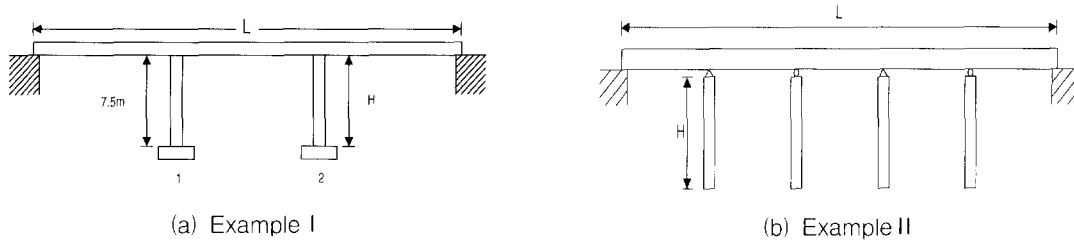


Figure 2 Typical geometric shape of bridges

Table 1 Sectional properties of bridges

(a) Example I

L 또는 H	A (m ²)	E (t/m ²)	I ₀ (m ⁴)	I _x (m ⁴)	I _z (m ⁴)	ρ(I-s ² /m ⁴)	비고
120 m	11.43	2250000	560.550	556.0	4.55	0.2676	superstructure
150 m	13.00	2250000	606.50	600.0	6.50	0.2676	"
180 m	15.00	2250000	667.50	660.0	7.50	0.2676	"
210 m	17.00	2250000	728.50	720.0	8.50	0.2676	"
7.5 m	3.60	2250000	0.224	0.112	0.112	0.2676	substructure
12.5 m	4.20	2250000	0.312	0.156	0.156	0.2676	"
17.5 m	4.80	2250000	0.407	0.204	0.204	0.2676	"
22.5 m	5.40	2250000	0.516	0.258	0.258	0.2676	"

(b) Example II

L 또는 H	A (m ²)	E (t/m ²)	I ₀ (m ⁴)	I _x (m ⁴)	I _z (m ⁴)	ρ(I-s ² /m ⁴)	비고
200 m	0.424	20400000	21.944	21.70	0.244	0.8	superstructure
250 m	0.548	20400000	27.488	27.00	0.488	0.8	"
300 m	0.680	20400000	32.724	31.860	0.864	0.8	"
350 m	0.800	20400000	38.408	37.00	1.408	0.8	"
4.5 m	6.920	2350000	3.80	1.90	1.90	0.2676	substructure
14 m	6.920	2350000	3.80	1.90	1.90	0.2676	"
23 m	9.040	2350000	6.520	3.260	3.260	0.2676	"
32 m	11.460	2350000	10.440	5.220	5.220	0.2676	"

* L : Total span length of superstructure, H : Pier height of substructure

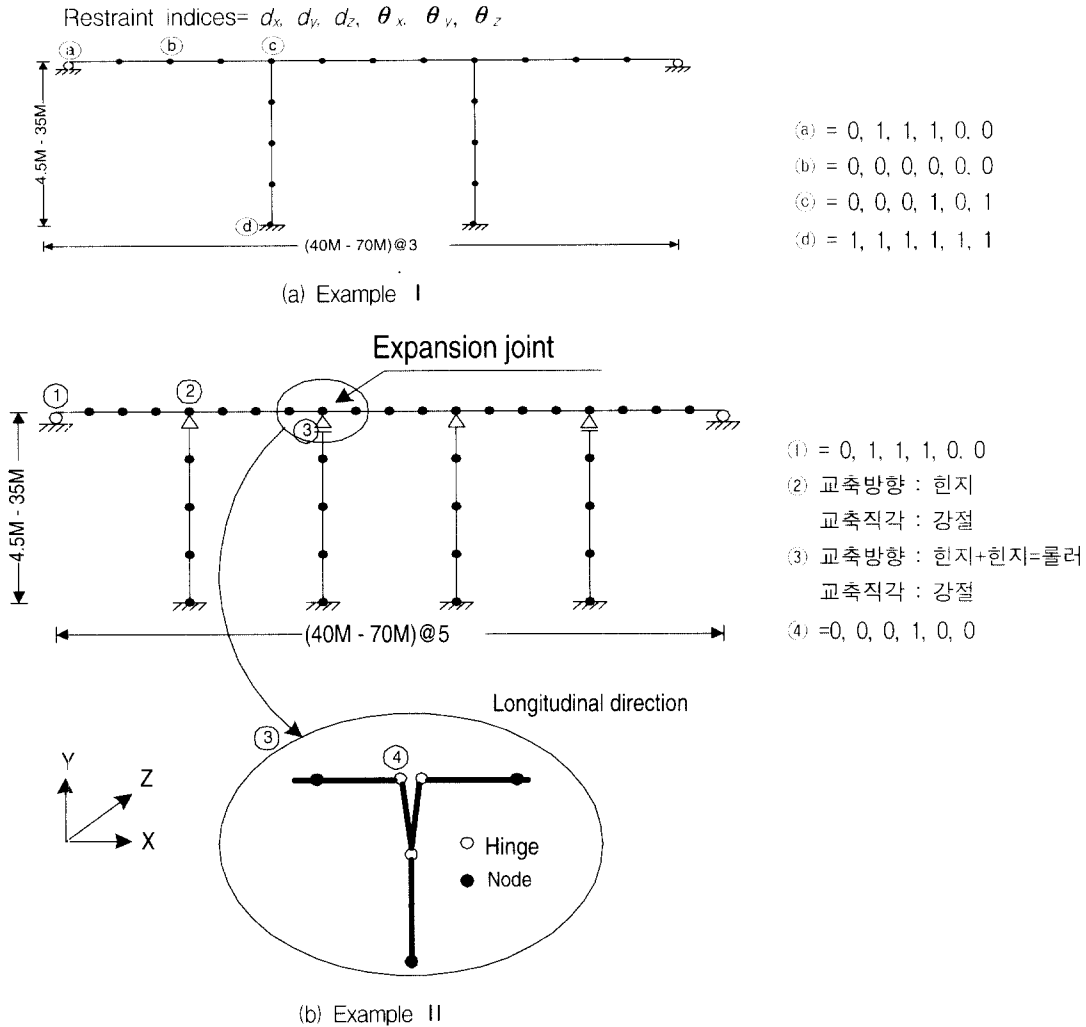


Figure 3 Finite element discretization of the example bridges

4.1 모델링방법

단일모드 해석법의 경우에는, 지진시에 동일한 진동을 하는 것으로 간주할 수 있는 설계진동단위로 나누어 교량의 종방향 및 횡방향으로 동가의 지진하중이 작용한다고 보고 단면력을 산정하도록 규정되어 있다. 대부분의 연속교에 있어서 상부구조와 하부구조간에는 가동받침과 고정받침이 병행되어 사용되고 있으므로 교축방향으로의 설계진동단위를 구성할 때에는 고정받침이 놓인 교각만이 지진하중에 저항하는 것으로 모델링할 수 있으며, 교축직각

방향에 대해서는 가동 또는 고정받침의 구분없이 모든 교각이 동시에 저항하도록 모델링된다. 이때 상부구조는 단면폭이 크다는 것과 단일교각이라 할지라도 여러개의 받침이 놓이는 것이 일반적이므로 교축직각방향으로는 강절로 연결된 것으로 모델링하는 것이 바람직하며 특히, 교대 또는 신축이음부와 같은 지지부에서는 교축에 대한 회전을 구속하므로써 교량상판의 바람직한 모드형상을 유도할 수 있다. 이것은 다중모드 해석법의 경우에도 동일하게 적용되어야 하며, 이와 같은 구속조건들의 구속여부에 따라서 각 진동모드가 최종응답에 대한 기여도

는 다르게 평가되어 그 결과로서 예상치 못한 결과를 가져다 줄 수 있기 때문에, 실제의 구속조건 및 지지조건들을 신중하게 고려할 필요가 있다. Figure 3에는 이러한 점들을 고려하여 교량의 올바른 진동 응답을 유도하기 위한 적절한 모델링을 제안하고 있다. 해석에 Ⅱ의 경우에 있어서, 고정받침부인 ②의 경우, 교축방향으로는 힌지로서 거동하도록 하고, 교축직각방향에 대해서는 강절로서 거동하도록 하기 위해서는 구조물의 강성행렬(stiffness matrix)을 수정하면 가능하다. 가동받침부이며 신축이음부인 ③의 경우에는 두 개의 힌지가 동시에 작용하여 롤러와 같은 거동을 하도록 하기 위함이며 확대시킨 부분과 같이 모델링할 경우 가동받침부의 효과를 기대할 수 있으며, 교축직각방향으로는 강절로서 거동하도록 모델링하였다. 교대 또는 신축이음부와 같은 지지점 자유도의 구속여부에 따른 응답이 차이는 다음의 수치예제에서도 명확히 드러나고 있다.

4.2 해석예 1

이 해석에는 92년도에 개정된 도로교시방서의 부록에 수록되어 있는 예제로서 총연장 114m, 교각고 7.5m인 상부구조와 하부구조가 완전고정되어 있는 3경간 연속교량이다. 수치해석을 위해서 총연장은 120~180까지, 교각고는 5~22.5까지의 범위로 하였고, 각 규모에 대한 단면상수는 Table 1(a)에 나타난 바와 같다. 수치해석상의 편의를 고려하여 교량은 좌우대칭으로 모델링하여, 형식이나 규모가 변하더라도 대칭을 유지하도록 하였다. 이 해석예의 경우에는 상부구조와 하부구조가 강절로 연결된 것으로 모델링할 수 있으므로 받침지지부를 고려할 필요가 없다. Table 2와 3은 시방서예제의 경우에 본 프로그램에 의한 결과와 Sap90 및 시방서의 결과를 비교한 것이며 지지점을 적절하게 구속한 결과인 (1)은 거의 정확하게 일치하고 있는 반면, 구속을 풀어준 결과인 (2)는 큰 오차를 나타내고 있다. Figure 4~7은 교축 및 교축직각방향에 대한 교각 하부의 모멘트와 전단력을 지간 및 교각높이에 따라서 각 해석방법별로 비교한 것이다. 여기서 Figure 5와 7은 교량의 모델링에 있어서 교대 및 받침지지부의 교축직각방향에 대한 회전과 상판의 비틀림회전을 구속하지 않았을 때의 결과이며, 이렇게 하였을 때, 교각높이가 낮아서 주기가 작은 경우에는 교축방향의 진동모드는 저차모드가 아닌 고차모드에서 발생하고 횡방향의 진동모드가 지배모드

로 되어 결과적으로 시방서에 규정된 종방향 및 횡방향으로의 설계지진력을 불합리하게 산정하는 오류를 범하게 된다. 따라서 설계지진력에 의한 단면력을 올바르게 평가하기 위해서는 위에서 언급한 부분들을 구속해 주는 것이 바람직하다. 이렇게 하였을 경우에는 Figure 4와 6과 같이 단일 및 다중 모드 그리고 Sap90에 의한 결과는 거의 정확하게 일치하였다.

이와 같이 결과가 거의 일치하는 이유로는 해석 교량의 구조형상이 단순하며 특히 일반적인 연속교에서 볼 수 있는 받침지지부 또는 신축이음부 등이 없기 때문에 각각의 진동모드들간의 복합된 효과는 나타나지 않으며, 따라서 첫 번째 및 두 번째의 진동모드를 제외한 고차모드의 영향은 거의 나타나고 있지 않음을 나타내고 있다. 따라서 이러한 교량의 경우에는 구속 및 지지조건들을 올바르게 구속한다면, 단일모드해석법만으로도 구조물의 동적응답을 충분히 고려할 수 있는 것으로 사료된다. Figure 8의 (a)와 (b)는 지간 70m, 교각고 22.5m인 경우에 교축 및 교축직각방향으로의 첫 번째 및 두 번째의 모드형상을 나타낸다.

Table 2 Comparison of analysis results with Sap90 [교각 1]

구 분	시방서	SAP90	본연구 (1)	본연구 (2)	비 고	
기본주기 (sec)	종방향	0.566	0.569	0.568	0.601	
	횡방향	0.294	0.305	0.306	0.376	
모멘트 (t-m)	종방향	633	635.8	630.3	632.7	기동당
	횡방향	227	232.5	235.6	176.8	기동당
전단력 (ton)	종방향	168.9	169.5	168.1	162.5	기동당
	횡방향	62	62	62.8	23.4	기동당

Table 3 Comparison of analysis results with Sap90 [교각 2]

구 분	시방서	SAP90	본연구 (1)	본연구 (2)	비 고	
기본주기 (sec)	종방향	0.566	0.569	0.568	0.601	
	횡방향	0.294	0.305	0.306	0.376	
모멘트 (t-m)	종방향	633	636.5	631.0	631.0	기동당
	횡방향	245	248.6	251.6	189.8	기동당
전단력 (ton)	종방향	168.9	169.7	168.3	161.7	기동당
	횡방향	62	66.3	67.1	25.5	기동당

- (1) Torsional restraint in abutments and bending restraint in pier-superstructure joint
- (2) No torsional restraint in abutments and no bending restraint in pier-superstructure joint

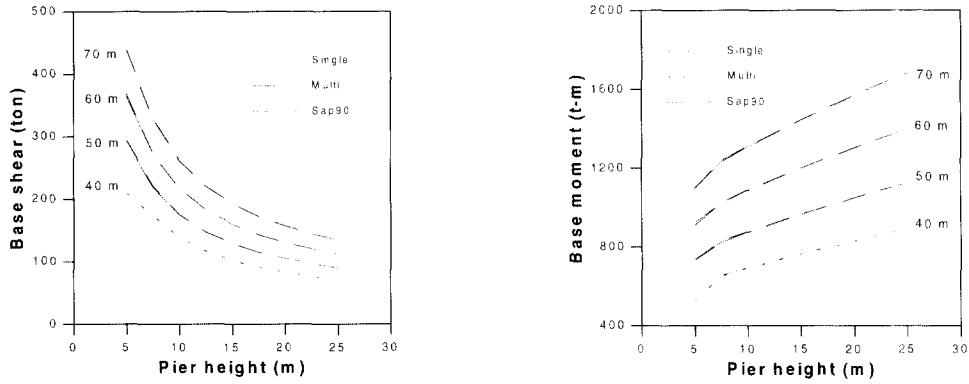


Figure 4 Sectional forces of pier in longitudinal direction
(Torsional restraint in abutments and bending restraint in pier-superstructure joint)

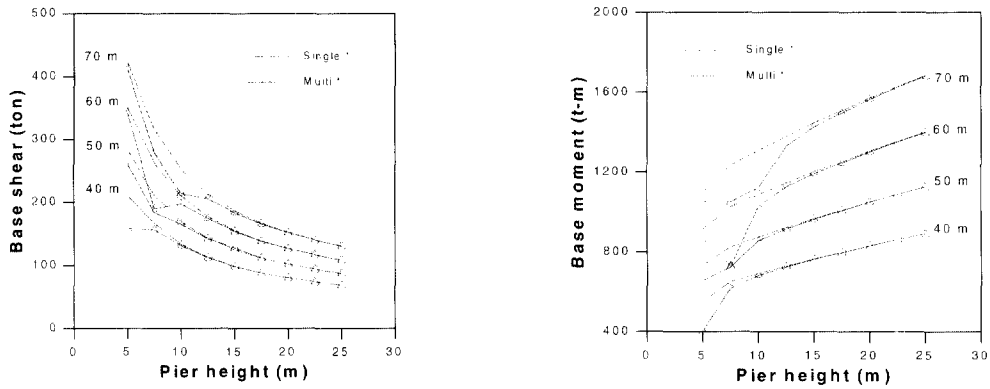


Figure 5 Sectional forces of pier in longitudinal direction
(No torsional restraint in abutments and no bending restraint in pier-superstructure joint)

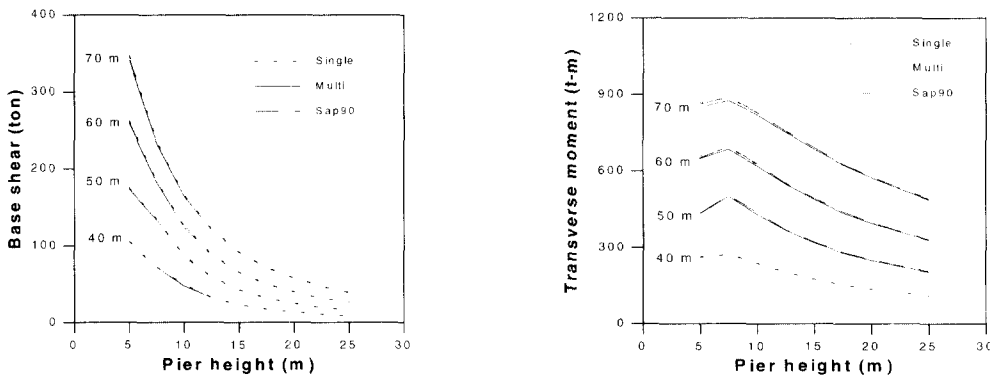


Figure 6 Sectional forces of pier in transverse direction
(Torsional restraint in abutments and bending restraint in pier-superstructure joint)

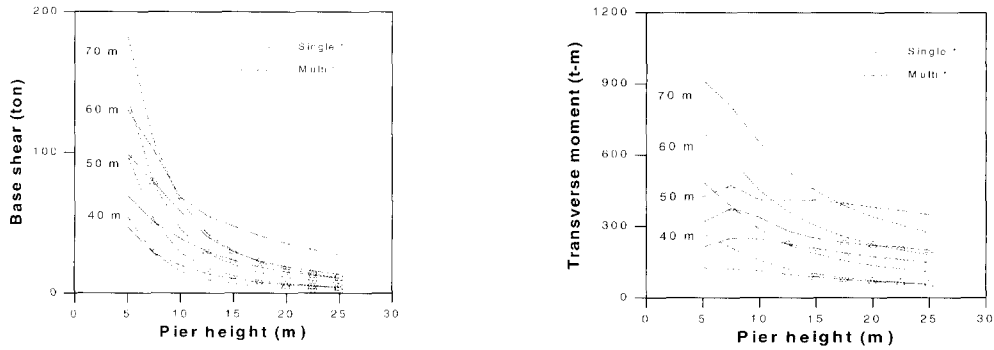


Figure 7 Sectional forces of pier in transverse direction
(No torsional restraint in abutments and no bending restraint in pier-superstructure joint)

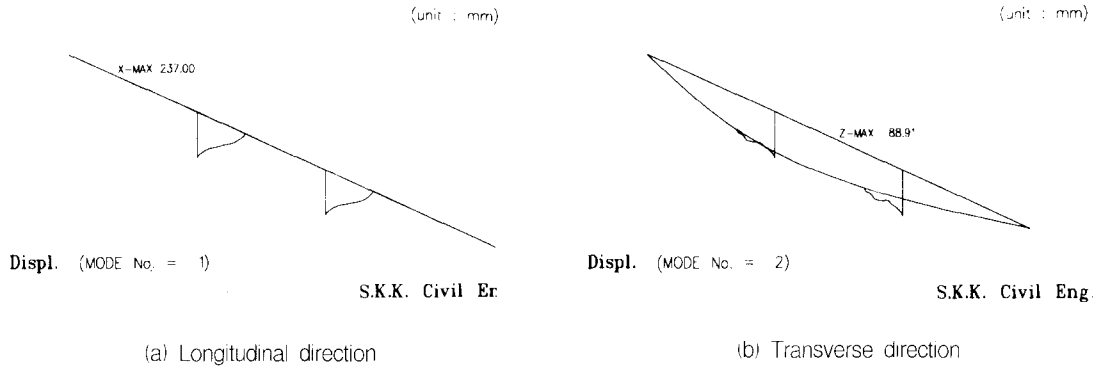


Figure 8 First and second mode shape in orthogonal direction(T=3.207 sec/T=1.292 sec)

4.3 해석예 II

이 해석에는 총연장 160m, 교각고 7.5m이고 신축이유부가 있는 (2+3)경간 연속교이며 상부구조와 하부구조가 교각 1과 3은 고정받침으로 그리고 교각 2와 4는 가동받침으로 지지되어 있는 경우이다. 가동받침부의 경우에는 교축방향으로의 마찰은 무시하였다. 이 예에서는 총연장은 200~350m까지, 교각고는 5~32m까지를 해석범위로 하였으며 각각에 대한 단면상수는 Table 1(b)에 나타낸 바와 같다. 교각 2, 3의 강성과 교각고는 일정하게 하고, 교각 1과 4의 강성 및 높이를 변화시키므로써 전체구조의 대칭성은 유지되나 인접교각과의 강성차이가 있도록 하였다.

이 경우에도 해석예 I과 마찬가지로 교대 및 신축이유부가 위치한 절점의 비틀림을 구속하였다. 이 교량의 경우에는 비교적 단순한 형식의 교량인

해석예 I의 경우와 비교할 때, 교량의 구조형상, 규모 및 지지조건 등이 상이하하여 해석예 I과는 실제로 다른 결과를 보여 주고 있다. 우선 Figure 9으로 부터, 교각 1의 하부에서 발생하는 휨모멘트와 전단력은 단일모드 및 다중모드 해석에서 거의 일치하고 있다. 교각 3은 강성이나 교각고의 변화가 없기 때문에 동일 지간장에 대해서 일정한 크기를 유지하였다. 다만, 교각 1에서 발생하는 전단력의 경우 교각고가 높은 경우에는 다중모드해석결과가 다소 크게 평가되고 있다. 해석예 I에서와 마찬가지로 상부구조의 교축에 대한 회전을 풀어준 결과는 Figure 9와 거의 동일하였으며 이것은 해석예 I과는 달리 신축이유부가 존재하기 때문에 교각 1은 교축방향으로 기타 교각과 복합되는 진동모드가 없기 때문으로 판단된다.

한편, Figure 10은 가동받침 지지부가 위치한 교각 4의 다중모드해석에 의한 교축방향으로의 휨모

멘트와 전단력을 나타내고 있다. 설계진동단위에 따라서 교각하부의 단면력을 산정하는 단일모드해석법에서는 단면력이 발생하지 않지만, 다중모드해석법에서는 이와 같이 지간장에 관계없이 교축방향으로도 단면력이 발생하고 있으며 이것은 순전히 교각만의 진동에 의한 것으로 판단되며 설계에서 무시해서는 안될 정도로 큰 단면력이 발생하고 있다.

따라서 교축방향으로는 대부분 저차인 진동모드가 명확하게 독립되어 나타나고 있으며 단면력에 미치게 되는 진동모드의 복합현상은 나타나지 않는 것으로 판단된다.

이와는 다르게 교축직각방향의 경우에는, 상부구조의 신축이음부, 교각간의 강성차이 및 교각고의 차이 등이 두 해석방법에 의한 결과에 보다 민감하게 작용하는 것으로 나타나고 있으며, 상부구조 비틀림을 구속하지 않은 경우에도 그 결과는 다른 양상을 보여 주고 있다.

이 교량의 경우, 구조형상은 대칭을 유지하므로 교각 1과 4 그리고 2와 3의 단면력 변화양상이 유사하게 나타나고 있다. 단, Figure 11과 같이, 고정받침 지지부인 교각 1의 경우에는 장지간일수록 단일모드해석법이 크게 평가되어, 지간장 70m인 경우 전단력은 최대 9.5%, 휨모멘트는 최대 9.9% 정도 크게 평가하고 있으며 Figure 12는 상부구조의 비틀림을 구속하지 않은 경우의 단면력을 나타낸다.

가동받침 지지부인 교각 4는 Figure 15와 같이 장지간일수록 다중모드해석법이 다소 크게 평가되

어 지간장 70m인 경우 전단력은 최대 7.8%, 휨모멘트는 최대 7.4% 정도 크게 평가하고 있다. 단, 교축직각방향으로의 단면력이 교각 1과 4의 높이가 낮은 경우에는 다중모드해석법이 크게 평가되고 있으며 이것은 Figure 16과 17의 (b) 및 Figure 18과 같은 교축직각방향의 고차모드가 기여한데서 기인한 것으로 판단된다. 특히, Figure 17의 (b)와 Figure 18과 같은 횡방향의 진동모드는 짧은 지간장에서는 영향이 미소했던 진동모드임을 고려하면 지간장이 길수록 교각간의 높이차이로 인하여 교축직각방향으로는 고차모드의 영향이 크게 기여한 것으로 판단할 수 있다.

고정받침부이고 강성과 높이가 변하지 않는 교각 3의 경우에는 Figure 13과 같이 대체로 단일모드해석법이 크게 평가되고 있다. 이 경향은 교각 1과 4에서 처럼 교각 1과 4의 높이가 낮은 경우 높이가 낮은 교각은 고차모드의 영향으로 인하여 단면력이 크게 평가되고, 상대적으로 교각고가 2배 이상인 교각 2와 3에는 단일모드해석법에 비해서 단면력이 작게 평가되고 있음을 알 수 있다. 특히 지간장 60 m 및 70m의 경우, 교각 1과 4의 높이가 약 11m되는 위치에서 부터 단일모드해석법의 기울기보다 급격하게 감소하는 것은, 진동모드의 주기가 약 0.424 초 이상이 되면 탄성응답 스펙트럼값이 감소되어 적용되기 때문인 것으로 판단된다. Figure 14는 상부구조의 회전을 구속한 경우의 단면력을 나타낸다.

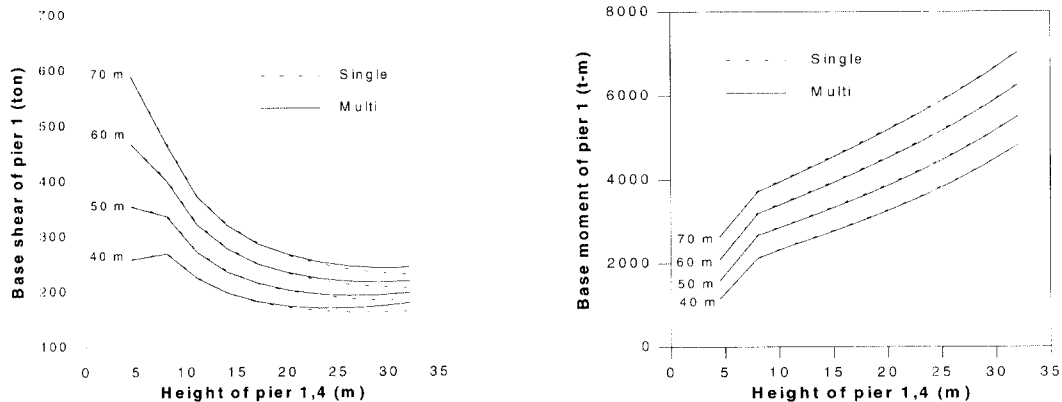


Figure 9 Sectional forces of pier 1 in longitudinal direction

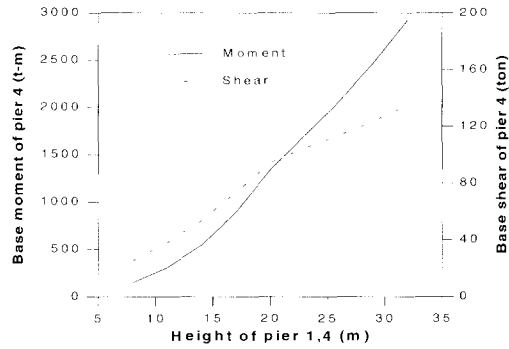


Figure 10 Sectional forces of pier 4 in longitudinal direction

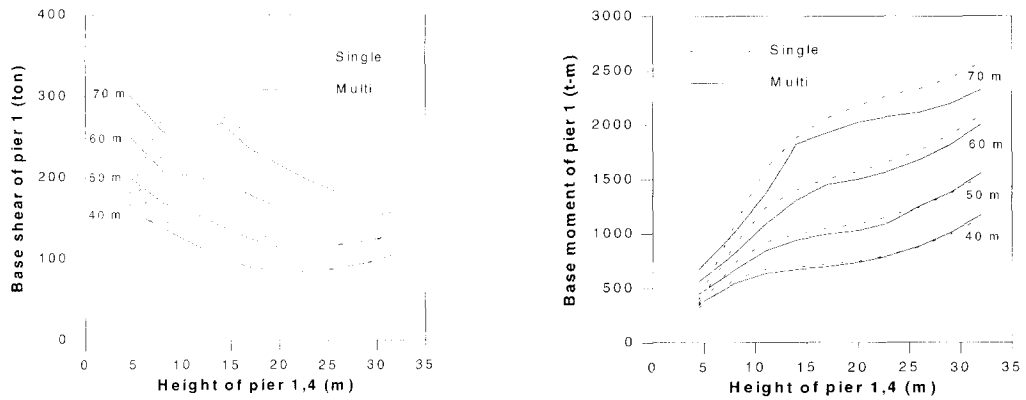


Figure 11 Sectional forces of pier 1 in transverse direction
(Torsional restraint in abutments and expansion joints)

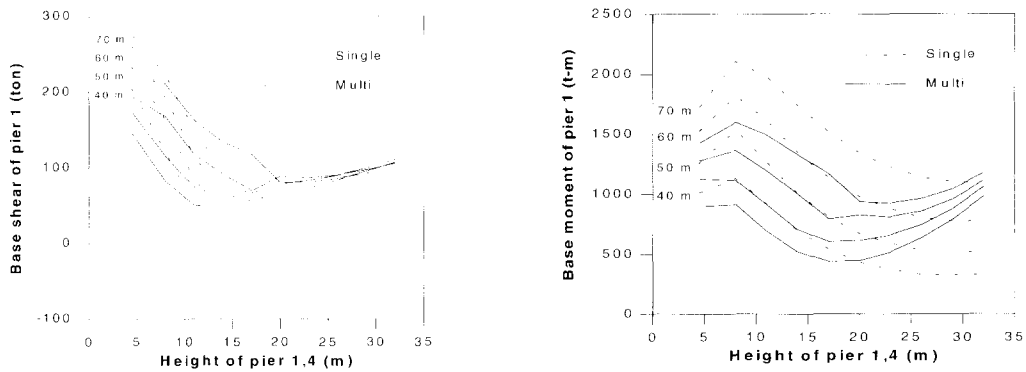


Figure 12 Sectional forces of pier 1 in transverse direction
(No torsional restraint in abutments and expansion joints)

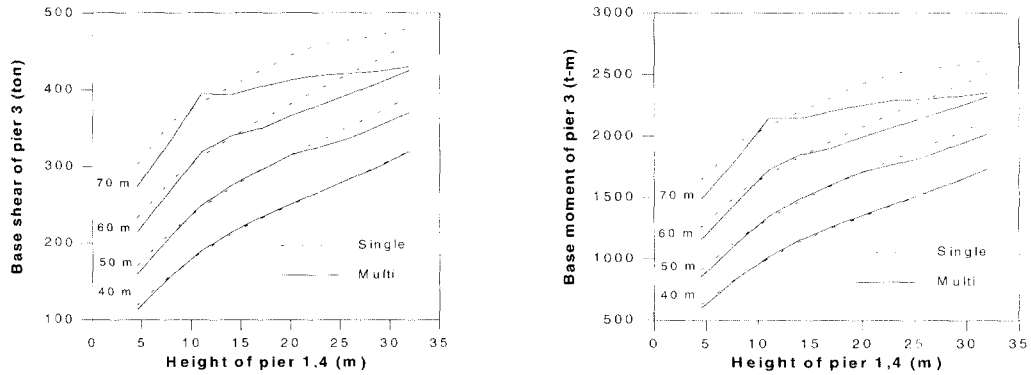


Figure 13 Sectional forces of pier 3 in transverse direction
(Torsional restraint in abutments and expansion joints)

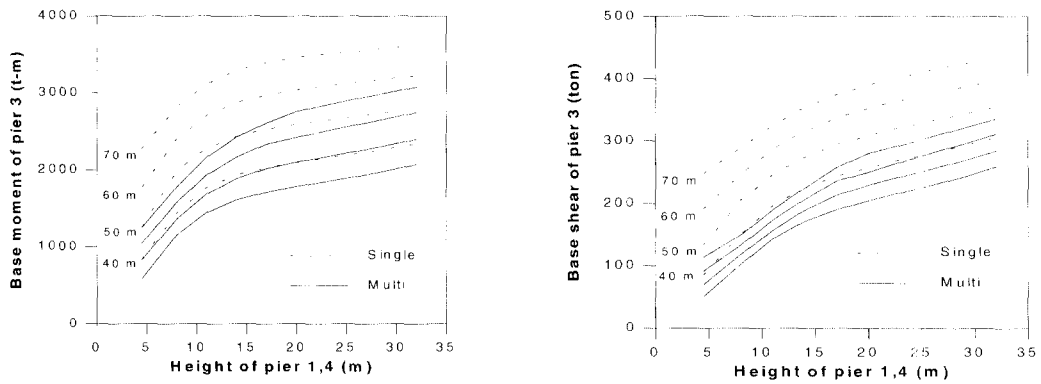


Figure 14 Sectional forces of pier 3 in transverse direction
(No torsional restraint in abutments and expansion joints)

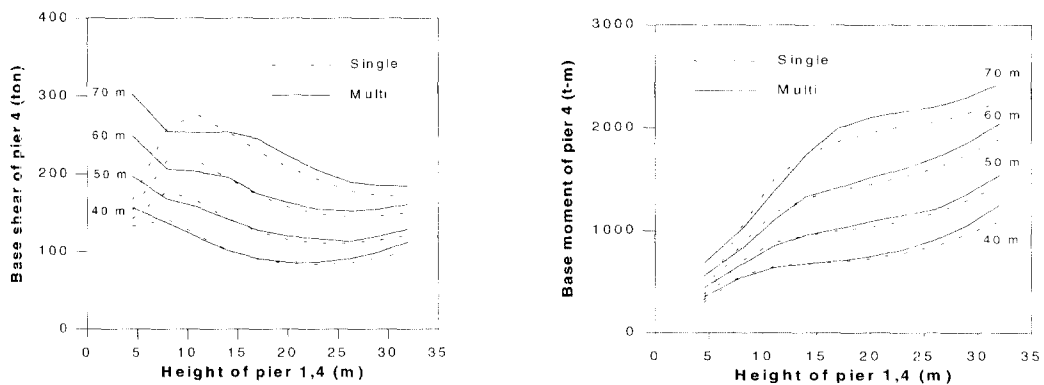


Figure 15 Sectional forces of pier 4 in transverse direction

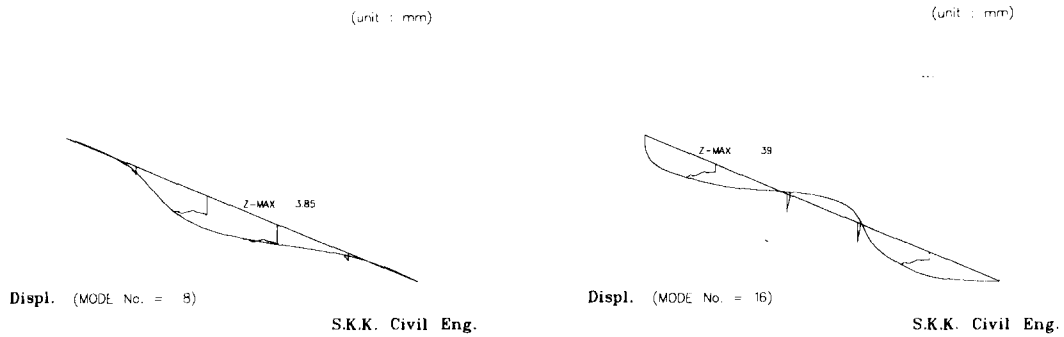


Figure 16 Mode shape in transverse direction (L=40 m, H=4.5 m)

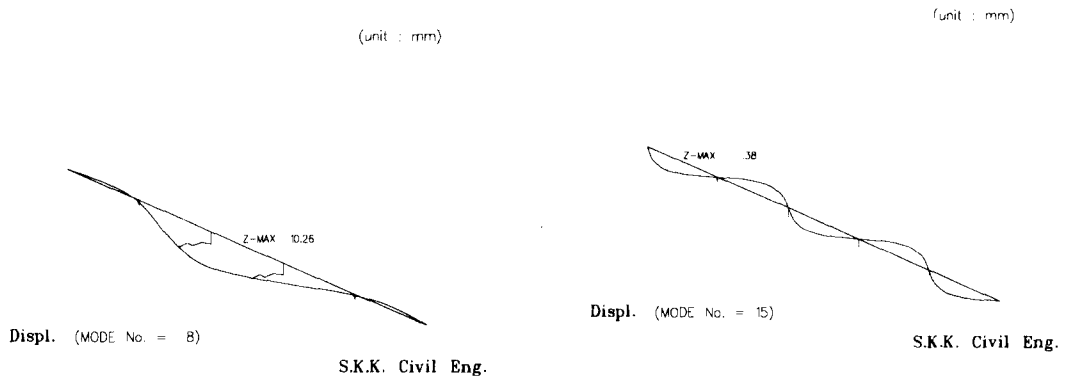


Figure 17 Mode shape in transverse direction (L=70 m, H=4.5 m)

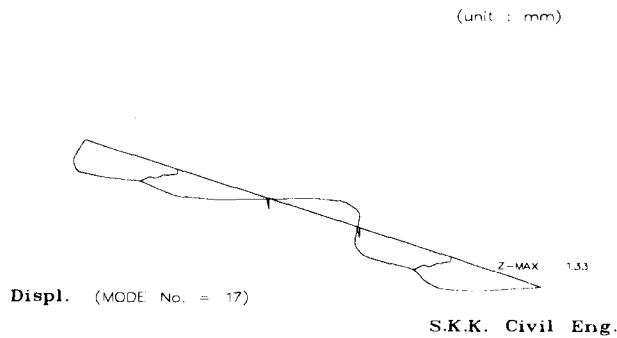


Figure 18 Mode shape in transverse direction (L=70 m, H=4.5 m)

(Unit : mm)

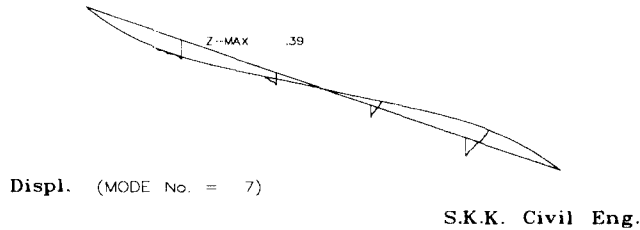


Figure 19 Mode shape in transverse direction (L=70 m, H=17m)

5. 결 론

1. 지방시의 내진설계규정에 부합하는 지진해석용 3차원 동적해석 프로그램과 후처리 프로그램을 개발하여 신뢰성있는 구조해석 프로그램과의 비교를 통하여 본 프로그램의 타당성을 입증하였다.
2. 해석에 I과 같은 형식의 교량에 대해서는 단일 모드해석법을 적용하여도 무방하다.
3. 일반적인 연속교의 경우, 장지간이고 교각고가 낮은 경우에는 다중모드해석법에 의한 단면력이 크게 나타나며, 단일모드해석법과 다중모드해석법에 의한 단면력은 교량의 규모가 증가할수록 가동 및 고정받침에 따라서 약 10% 정도의 오차가 있다. 교각간의 강성차 또는 높이가 2배 이상이 되면 다중모드해석법에 의한 검토가 이루어져야 한다.
4. 교량의 기하학적인 특성 즉, 신축이음부, 가동 및 고정받침부 등에 따른 진동응답의 민감성으로 인하여 교각의 설계단면력은 다르게 평가될 수 있으므로 교각의 설계시에는 이들을 반드시 고려해야 한다.
5. 교량구조의 동적응답은 상부구조 자유도의 구속 여부에 따라 민감하게 달라지므로 상부구조를 적절히 구속하므로써 타당한 진동응답을 유도할 수 있었고, 교량의 지진설계시에 설계자는 반드시 이점을 고려해야 한다.

6. 감사의 글

본 연구는 국립안성산업대학교 1996년도 학술

연구 조성비의 지원에 의한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 대한토목학회, 도로교 표준시방서, 건설교통부 제정, 1996.
2. 유영화, 신현복 "연속교의 내진설계에 있어서 모드스펙트럼해석법에 따른 비교연구", 대한토목학회, 학술발표논문집, 1994, pp. 119 - 121.
3. 내진설계기준연구(1), 건설교통부, 1996. 9.
4. Newmark, N. M., and Hall, W. J., *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
5. Weaver, W. Jr., and Gere, J. M., *Matrix Analysis of Framed Structures*, Van Nostrand Company, New York, 1990.
6. Weaver, W. Jr., and Johnston, P. R., *Structural Dynamics by Finite Elements*, Prentice-Hall, INC., 1987.
7. Paz, M., *Structural Dynamics*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
8. ATC-6, *Seismic Design Guidelines For Highway Bridges*, Applied Technology Council, October, 1981.
9. Bathe, K. J., and Wilson, E. L., *Numerical Methods in Finite Element Analysis*, Prentice-Hall, INC., 1976.