

## 상시진동을 이용한 남해대교의 동특성 평가

### Estimation of Dynamic Characteristics of Namhae Suspension Bridge Using Ambient Vibration Test

김남식\* · 김철영\*\* · 정대성\*\*\* · 윤자걸\*\*\*

Nam Sik Kim, Chul Young Kim, Dae Sung Jung and Jah Geol Yoon

**Key Words** : Ambient Vibration Test(상시진동실험), Dynamic Characteristics(동특성), Natural Frequency(고유진동수) Mode Shape(모드형상), Traffic-induced Vibration(차량진동), Namhae Suspension Bridge(남해대교)

#### ABSTRACT

The AVT under traffic-induced vibrations was carried out on Namhae suspension bridge in Korea. Mode shapes as well as natural frequencies up to the 15th mode were acquired exactly, and the effect of traffic mass and temperature on measured natural frequencies was investigated. The results from the AVT are compared with those from forced vibration test(FVT) and FE analysis. In the case of long span suspension bridges such as Namhae bridge which has relatively large mass, the results shows that the measured natural frequencies are not affected by vehicle mass. From the results of long-term variation of natural frequencies due to temperature change, it can be said that temperature effect may be predominant to structural damage effect. Therefore, if damage detection methods based on dynamic characteristics of bridges are to be used, the variation should be taken into consideration.

#### 1. 서 론

교량의 동특성은 현 상태의 건전성 평가, 해석모델의 재구성, 내진 및 내풍설계에 대한 안전성 검토, 그리고 SI(System Identification) 또는 손상분석에 대한 신뢰도 확보 등을 위한 기초자료로 활용된다. 이러한 동특성 산정을 위해서는 일반적으로 가속도 응답을 이용하게 되는데 실교량의 가속도 응답을 측정하기 위한 방법으로는 가진기 및 임팩트 햄머 등을 이용하여 측정하는 강제진동실험(Forced Vibration Test: FVT)과 바람이나 차량 등으로 인하여 발생하는 미세 진동을 측정하는 상시진동실험(Ambient Vibration Test: AVT)이 있다. 단경간 교량과는 달리 케이 블교량 및 장지간 교량과 같이 상부구조의 질량이 크고 상대적으로 연성이 큰 교량은 1.0Hz 미만에서 저차 모드가

존재하므로 강제진동실험을 적용하기 위해서는 대용량의 가진기가 필요하다. 또한, 차량을 통제하여야 하는 문제점 때문에 통행차량을 가진력으로 하는 상시진동실험이 매우 유리하다. 이러한 상시진동에 의해 동특성을 평가할 경우 정확한 계측이 수행되어야만 가능하며 정확한 계측이 수행되었다 할지라도 교량과 같이 외부환경에 직접적으로 노출되어 있는 구조물은 고유진동수와 같은 동특성의 계측치에 변동을 가져올 수 있다. 실제로, 많은 연구결과(Rohrmann 등, 2000; Sohn 등, 1999)들에 의하면 교량과 같이 복잡하고 대형의 구조물의 경우 고유진동수의 변동은 국부적인 손상이나 기능저하 보다도 습도 및 온도변화와 같은 환경적 요인에 의해 더 큰 영향을 받을 수 있다고 알려져 있다.

본 논문에서는 효율적인 상시진동실험 시스템 및 분석 프로그램을 개발하여 남해대교에 대한 정확한 동특성을 추출하였다. 상시진동실험의 결과를 유한요소해석 및 차량 단차를 이용한 강제자유진동실험 결과와 비교·검토함으로써 상시진동실험의 적용성을 검증하였고 현수교에 대한 상시진동실험 적용시 보다 효과적인 방법을 제시하였다. 또한, 상시진동실험시 통행중 차량 질량의 크기 및 온도와 같은 외부의 물리적·환경적 조건에 따른 고유진동수의 변동 가능성과 그 영향인자별 변동 범위 등을 평가하였다.

\* 현대건설기술연구소, 차장  
E-mail : nskim@hdec.co.kr  
Tel : (031) 280-7060, Fax : (031) 280-7061

\*\* 명지대학교, 교수

\*\*\* 명지대학교, 박사과정

\*\*\*\* 대림건설(주) 기술연구소

## 2. 상시진동실험

### 2.1 대상교량

본 연구의 대상교량인 남해대교(그림 1)는 경상남도 하동군과 남해도를 잇는 총경간 660m(중앙경간 404m, 측경간 각 128m)의 3경간 2힌지 타정식 현수교로서 1973년 5월에 완공된 국내 최초의 현수교이다.

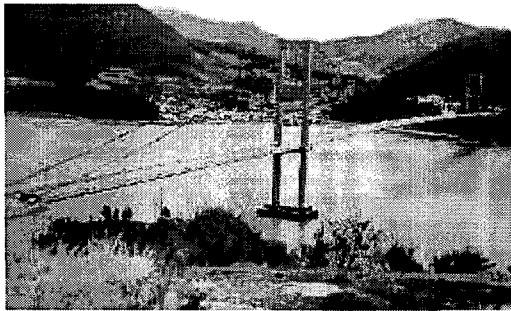


그림 1. 남해대교

### 2.2 실험현황 및 분석조건

보강형과 주케이블을 40개 단면(80개 측정점)으로 나누어 각 측정점에 대하여 수직, 수평의 2개의 자유도에 대하여 응답 가속도를 측정하였다. 또한, 계측기와 센서간 거리가 길어짐에 따른 노이즈 발생을 감소시키고 케이블 작업을 용이하게 하기 위하여 두 개의 다중기준점을 사용하였다. 그림 2는 가속도 측정점이다.

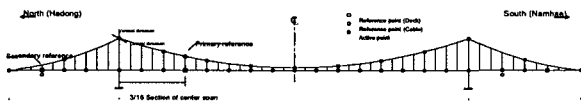


그림 2. 가속도 측정점

측정센서는 0~100Hz 범위의 K-BEAM 타입인 1Volts/g, Full Scale=2g인 저주파 가속도계를 사용하였으며 데이터 수집조건 및 분석방법은 표 1과 같다.

표 1. 데이터 수집 및 분석 조건

단일 시간이력 획득/분석	앙상블 시간이력 획득/분석
샘플링 주파수 : 32Hz	산술평균 개수 : 14Ea
필터링 대역 : 0-10Hz	창함수 : Hanning
시간이력 측정수 : 4096pt	시간이력 측정시간 : 30min
샘플링 주기 : 0.03125sec	
주파수 분해능 : 0.0078125Hz	

표 1은 상시진동실험시 데이터 획득 및 분석에 대한 변수들로서 일반적인 교량 구조물이 저차의 진동모드를 갖기 때문에 관심 주파수는 10Hz 미만(lowpass filter 사용)을 대상으로 하였다. 또한, 측정 케이블이 길어 계측기기에서의 계측시 시그널 레벨이 떨어질 수 있기 때문에 0.01Hz의 highpass filter를 사용하여 센서의 low frequency noise를 제거하였다.

고유진동수는 각각의 단일시간이력에 대한 FFT분석을 수행하여 주파수대역에 대한 PSD함수를 추출하였으며 14개 이상의 단일시간이력의 PSD함수를 산술평균하여 전체 앙상블시간이력에 대한 ANPSD함수를 구하였다. 또한, 모드형상은 기준점에 대한 정규화된 전달함수와 위상을 고려하여 형상화하는 일반적인 방법을 적용하였다.

본 논문에서는 상시진동실험, 유한요소해석 그리고 기존에 주로 사용되던 차량 단차를 이용한 강제자유진동실험에 의한 고유진동수를 비교 검토하였으며 상시진동실험에 의한 모드형상을 평가하였다. 또한, 통행중인 차량질량의 크기 및 온도 변화에 따른 상시진동실험시 고유진동수 계측치의 영향인자에 대하여 분석하였다.

## 3. 분석결과

### 3.1 동특성 평가

그림 3과 그림 4는 각각 중앙경간의 기준점에서의 교량수직방향 및 교축직각방향에 대한 보강형과 주케이블의 가속도 응답신호의 산술평균된 ANPSD함수이다. 고차모드까지 고유진동수(표 2 참조)와 모드형상(부록 참조)을 정확히 추출할 수 있었으며 측정점의 부족으로 인해 보강형의 경우 수직 15차모드(4.06Hz)까지만 모드형상을 형상화 할 수 있었다.

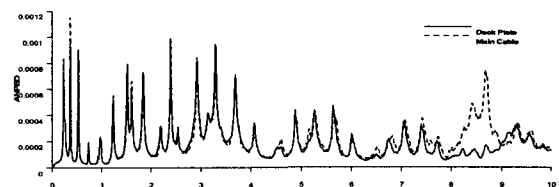


그림 3. 교량수직방향 ANPSD함수  
(Primary reference, 3/16 section of center span)

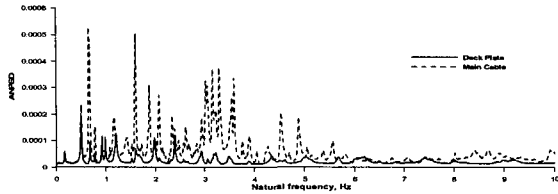


그림 4. 교축직각방향 ANPSD함수  
(Primary reference, 3/16 section of center span)

그림 3의 교량수직방향에 대한 ANPSD함수는 보강형과 주케이블이 대부분 잘 일치하고 동일한 고유진동수를 갖으며 모드형상(부록 A.1 참조) 또한 동일한 거동을 보임을 알 수 있다. 이는 보강형과 주케이블이 수직방향의 거동에 대해서는 밀접한 상호작용을 하고 있음을 의미한다. 그림 4의 교축직각방향 ANPSD함수의 보강형과 주케이블은 스펙트럼 크기 및 고유진동수 값이 차이를 보이며 모드형상(부록 A.3 참조)을 보면 서로 영향을 받지 않고 거동함을 알 수 있다. 단, 교축직각방향 모드에서 중앙경간의 1/2지점의 주케이블이 보강형의 거동에 의해 영향을 받음을 볼 수 있으나 이는 실제 교량에서 보강형과 주케이블을 Traction Rod를 사용하여 구속하였기 때문에 케이블의 거동이 보강형의 거동에 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

차량 단차시험에 의한 FVT와 AVT를 비교한 결과 고유진동수가 거의 일치함을 알 수 있다(표 2 참조). 그러나, FVT의 경우 고유진동수가 극히 저차모드에서 제한적으로 추출되었다. 따라서, 남해대교와 같은 장대교량의 경우 기존의 FVT 방법 대신 AVT 방법을 적용함으로써 차량통계 등의 불편함이 없이 보다 더 효과적이고 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

표 2. AVT와 FVT의 고유진동수 비교(Hz)

Mode	수직모드 V-series		수평모드 L-series		비틀림모드 T-series		
	AVT	FVT	AVT	FVT	AVT	FVT	
Center span modes	1	0.23	0.23	0.16	0.98	0.98	
	2	0.26	0.26	0.48	0.49	1.59	1.66
	3	0.35	0.36	0.64	-	2.38	2.41
	4	0.52	0.52	0.67	0.68	3.13	
	5	0.73	0.73	0.77	-	-	3.89
	6	0.96		0.91	0.91	4.52	
	7	1.22		0.98	-	5.13	
	8	1.52		1.20	1.19		
	9	1.84		1.59*			
	10	2.19		1.66*			
	11	2.53		1.97			
	12	2.91		2.07			
	13	3.28		2.38*			
	14	3.68		2.56*			
	15	4.06		2.92			
Side span modes	1	0.38			2.46		
	2	1.03					
	3	2.00					

\* 모드형상이 추출되지 않은 고유진동수

표 3에 AVT 결과와 HYUNSUS(케이ابل교량 전용해석 프로그램)에 의한 FEM 결과를 비교하였다. 수직 및 비틀림모드의 경우 중요한 저차모드에서 10%이내의 차이를 보이고 있으나 수평모드의 경우 1차 모드에서 68.8%의 상당한 오차를 보이고 있다. 이는 FEM 해석 모델의 Lateral stiffness에 대한 정확한 모델링이 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

표 3. AVT와 FEM의 고유진동수 비교(Hz)

Mode	수직모드 V-series			수평모드 L-series			비틀림모드 T-series			
	AVT	FEM	Diff. (%)	AVT	FEM	Diff. (%)	AVT	FEM	Diff. (%)	
Center span modes	1	0.23	0.23	0.16	0.27	68.8	0.98	1.02	4.1	
	2	0.26	0.25	-3.8	0.48	-	-	1.59	1.76	10.7
	3	0.35	0.37	5.7	0.64	0.55	-14.1	2.38	2.64	10.9
	4	0.52	0.54	3.8	0.67	0.83	23.9			
	5	0.73	0.76	4.1	0.77	-	-			
	6	0.96	1.01	5.2	0.91	1.49	46.2			
	7	1.22	1.31	7.4	0.98					
	8	1.52	1.65	8.6	1.20					
	9	1.84	2.04	10.9	1.59*					
	10	2.19	2.47	12.8	1.66*					
Side span modes	1	0.38	0.40	5.3			2.46	2.69	9.3	
	2	1.03	1.10	6.8						
	3	2.00	2.23	11.5						

\* 모드형상이 추출되지 않은 고유진동수

$$\text{Diff.}(\%) = \frac{\text{FEM} - \text{AVT}}{\text{AVT}} \times 100\%$$

### 3.2 차량질량의 크기에 따른 고유진동수의 변동

공용중인 교량에 대하여 중량 및 경량차량을 별도로 주행시켜 측정하기에는 어려움이 많기 때문에 장시간 동안의 차량진동에 의한 교량의 가속도 응답을 측정하여 측정된 신호의 응답진폭의 크기로부터 중량차량과 경량차량 신호를 따로 발췌하여 두 그룹의 신호에 대한 분석을 별도로 수행하였다. 중량·경량차량 신호는 동일한 측정 데이터에서 발췌한 신호별로 해석하였기 때문에 서로간의 습도 및 온도변화와 같은 환경적 요인의 영향은 같다고 할 수 있다. 따라서, 순수하게 차량질량의 변화에 따른 고유진동수의 변동으로 판단할 수 있다. 그림 5는 차량질량의 크기에 따른 ANPSD함수이다.

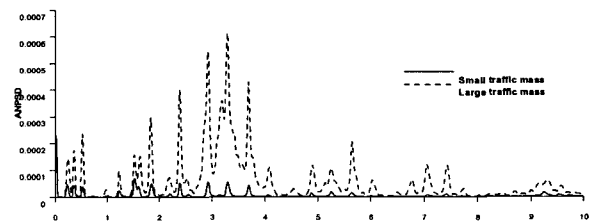


그림 5 차량질량의 크기에 따른 ANPSD함수

표 4. 차량질량 크기에 따른 고유진동수(Hz)

모드	AVT (A)	중차량 (B)	경차량 (C)	중차량-경차량 (C-B)	상대오차 (%)
V1	0.23	0.23	0.23	0.0	0.0
V2	0.26	0.26	0.26	0.0	0.0
V3	0.35	0.35	0.35	0.0	0.0
V4	0.52	0.52	0.52	0.0	0.0
V5	0.73	0.72	0.73	0.01	1.37
V6	0.96	0.95	0.96	0.01	1.04

\* 상대오차=[(C-B)/A]×100%

표 4에서 보듯이 수직 5, 6차 모드에서 0.01Hz의 고유진동수의 차이를 보이고 있으나, 이는 차량하중의 크기에 따른 고유진동수의 변화량보다는 해석과정에서의 주파수 분해능 (0.0078Hz)의 차이로 보인다. 따라서, 단경간 교량과 달리 남해대교와 같이 교량 자체의 질량 및 유연성이 큰 장경간 교량의 경우 차량하중의 크기에 따른 고유진동수 계측치의 변화는 무시할 수 있을 정도로 작으므로 차량에 의한 영향을 고려할 필요는 없는 것으로 판단된다.

### 3.3 온도영향에 따른 고유진동수의 변동

고유진동수 변동에 미치는 온도의 영향을 평가하기 위하여 남해대교에 구축된 모니터링 시스템을 이용하였다. 중앙경간의 하동측 주탑으로부터 약 1/4지점과 1/2지점에 설치된 센서로부터 가속도 응답을 약 9개월 정도 매월 5~10회 정도 측정하였다. 측정 가속도 응답 신호를 분석하여 월별 고유진동수의 변동을 평가하였다(표 5).

표 5. 고유진동수 변화율

Mode	$f_{aver}(Hz)$	$f_{max}(Hz)$	$f_{min}(Hz)$	변화량 (Hz)	변화율 (%)
1	0.236	0.238	0.232	0.006	2.58
2	0.362	0.366	0.348	0.018	5.06
3	0.519	0.525	0.513	0.012	2.35
4	0.731	0.739	0.720	0.018	2.50
5	0.971	0.977	0.964	0.012	1.26
6	1.535	1.550	1.520	0.031	1.99
7	1.642	1.672	1.624	0.049	2.98
8	1.866	1.904	1.837	0.067	3.60
9	2.218	2.277	2.185	0.092	4.13
10	2.567	2.594	2.539	0.055	2.14
11	2.968	2.997	2.948	0.049	1.64
12	3.179	3.339	3.052	0.287	9.02
13	3.490	3.583	3.430	0.153	4.37
14	4.149	4.224	4.071	0.153	3.68
15	4.598	4.724	4.492	0.232	5.04

\* 변화량 =  $f_{max} - f_{min}$  , 변화율 =  $(\text{변화량}/f_{aver}) \times 100\%$

표 5에는 각 모드별 최대 고유진동수와 최소 고유진동수 사이의 변화량 크기를 나타내었으며 상시진동실험 결과가 8월중의 특정 기간에 대한 결과임을 감안하여 측정기간동안 평균한 고유진동수( $f_{aver}$ )를 기준으로 하여 이에 대한 변동을 나타내었다. 단, 각 모드의 고유진동수는 ANPSD함수의

첨두점에 해당하는 진동수를 일련의 번호로 기술하였기 때문에 상시진동실험 결과와 다소 차이가 있을 수 있다.

진동수 대역이 낮은 3Hz 정도까지의 저차모드에서는 월별 고유진동수 변화가 거의 없으나 고차모드에서는 진동수가 커질수록 그 변화량이 커짐을 알 수 있다. 이는 계측치의 고유진동수의 변화가 온도에 의한 영향을 매우 많이 받고 있음을 의미하는 것으로 판단된다. 이는 외국의 타 연구결과(Rohrmann 등, 2000; Sohn 등, 1999)와 유사한 양상이다. 고유진동수의 변화율은 계측오차로 추정되는 몇 개의 특이 현상을 제외하면 최소 1.26%에서 최대 9.02%까지의 변화를 나타내었다.

## 4. 결론

상시진동실험을 적용하여 남해대교에 대한 정확한 동특성을 추출하였으며 현수교와 같은 장대교량에 적합한 상시진동 계측시스템 및 분석 프로그램을 개발하였다. 또한, 남해대교에 대한 차량질량의 크기에 따른 고유진동수의 변화 및 월별 고유진동수의 변동으로부터 온도에 대한 고유진동수의 영향을 평가하였다. 이상의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 남해대교와 같은 장경간 현수교의 경우, 바람에 의한 진동만으로도 충분히 동특성 평가가 가능하지만 바람이 강하지 않은 경우에는 응답의 크기가 비교적 작고 차량통제가 곤란하기 때문에 강제진동실험 보다는 교통진동을 이용한 상시진동실험을 적용하는 것이 보다 효과적이다.
- (2) 남해대교와 같은 자체 질량이 크고 유연성이 큰 장경간 현수교의 경우에는 차량 질량의 크기에 따른 고유진동수의 변동은 거의 없으며 온도와 같은 환경적 변화에 더 큰 영향을 받음을 확인할 수 있었다. 특히, 저주파 대역에서의 변화 보다는 고주파 대역에서의 변화량이 훨씬 크며 본 연구의 계측사례에서는 최대 9.02%의 변화율을 보였다.
- (3) 이상의 결과는 일반적으로 구조물에 발생할 수 있는 구조적인 손상에 의한 고유진동수의 변화량에 비교할 때 상당히 큰 값이다. 따라서, 동특성을 기초로 한 손상탐지를 적용할 경우 이러한 계측치의 동특성 변동 요인을 충분히 고려하여야 할 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

- (1) 현대건설(주) 기술연구소, 1997, "남해대교 계측보고서", 현대건설(주).
- (2) 김철영 등, 2000, "교량 상시계측 및 분석 시스템 개발과 그 적용성에 관한 연구, 연구보고서", 현대건설(주) 기술연구소.

(3) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1986, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, Second Ed., John Wiley & Sons.

(4) Chul-Young Kim, Nam-Sik Kim, Jah-Geol Yoon and Dae-Sung Jung, 2000, Monitoring System and Ambient Vibration Test of the Namhae Suspension Bridge. SPIE's 5th Annual International Symposium, Conference Proceedings of SPIE, California, Vol. 3995A-36, pp. 324-332.

(5) Felber, A. J., 1993, Development of A Hybrid Bridge Evaluation System. The University of British Columbia, California.

(6) Felber, A. J. and Reto Cantieni., 1996, Introduction of A New Ambient Vibration Testing System - Description of the System and Seven Bridge Tests, EMPA, CH-8600 Dübendorf, Switzerland.

(7) Rohrmann, R. G., Baessler, M., Said, S., Schmid, W. and Ruecker, W. F., 2000, Structural Causes of Temperature Affected Modal Data of Civil Structures Obtained by Long Time Monitoring. Proceedings of IMAC-XVIII: A Conference on Structural Dynamics, San Antonio, Texas, Vol. I, pp. 1-7.

(8) Sohn, H., Dzwonczyk, M., Straser, E. G., Kiremidjian, A. S., Law, K. H. and Meng, T., 1999, An experimental study of temperature effect on modal parameter of the Alamosa Canyon Bridge. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, pp. 879-897.



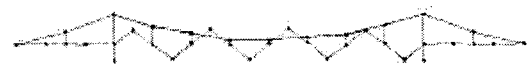
V5=0.73Hz



V6=0.96Hz



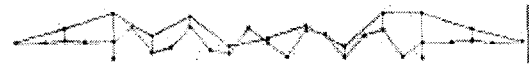
V7=1.22Hz



V8=1.52Hz



V9=1.84Hz



V10=2.19Hz



V11=2.53Hz



V12=2.91Hz



V13=3.28Hz



V14=3.68Hz



V15=4.06Hz

**부록**

**A.1 Vertical mode shape(center span)**



V1=0.23Hz



V2=0.26Hz



V3=0.35Hz

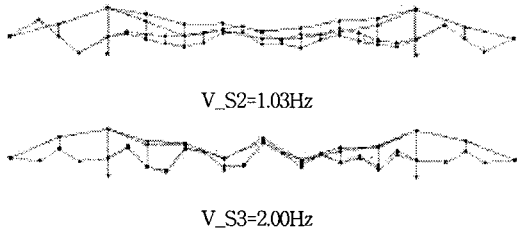


V4=0.52Hz

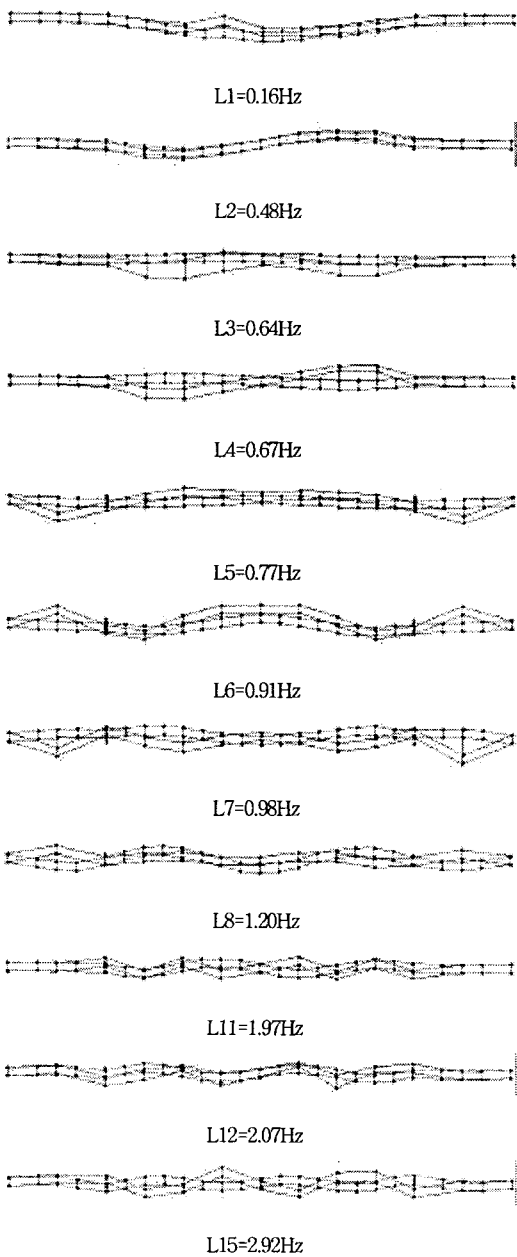
**A.2 Vertical mode shape(side span)**



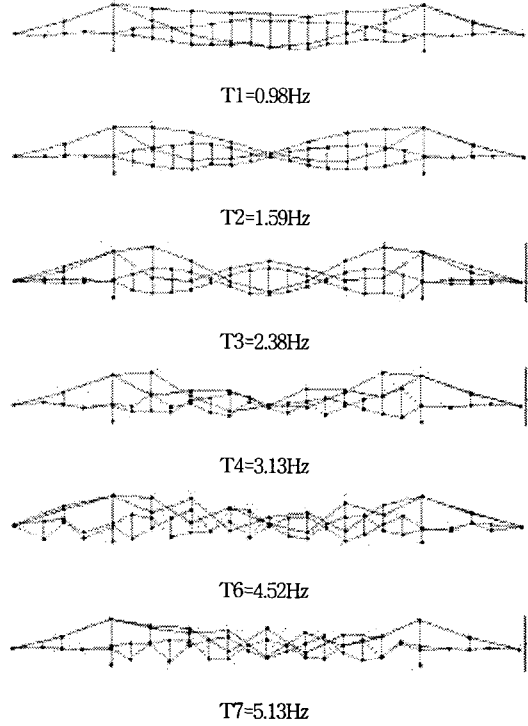
V\_S1=0.38Hz



**A.3 Lateral mode shape(center span)**



**A.4 Torsional mode shape(center span)**



**A.5 Torsional mode shape(side span)**

