

교통하중에 의한 상시미진동을 이용한 교량의 건전도 감시기법

Health Monitoring Method for Bridges

Using Ambient Vibration Data due to Traffic Loads

이종원* 김응석** 박동욱*** 윤정방**** 김재동*****
Lee, Jong-Won Kim, Eung-Sock Park, Dong-Uk Yun, Chung-Bang Kim, Jae-Dong

ABSTRACT

This paper presents intermediate results of an on-going research for identification of the modal and the stiffness parameters of a bridge based on the ambient vibration data caused by the traffic loadings. The main algorithms consist of the random decrement method incorporating band-pass filters for estimation of the free vibration signals, the cross spectral density method for identification of the modal parameters, and the neural networks technique for estimation of the element-level stiffness changes. An experimental study is carried out on a scaled bridge model with a composite section subjected to various moving vehicle loadings. Vertical accelerations are measured at several locations on the girder. The estimated frequencies and mode shapes are found to be well-compared with those obtained from the impact tests. The estimated stiffness changes using the neural networks are found to be very good for the case with the simulated data. However, the accuracy is found to be not quite satisfactory for the case with the experimental data, particularly for the small value of the stiffness changes.

1. 서론

본 연구에서는, 차량의 상시통행에 의해 발생하는 교량의 상시미진동 계측데이터로부터 random decrement (RD) 기법[1]을 이용하여 자유진동신호(randomdec 신호)를 추출한 후 이로부터 교량의 자유진동특성을 추정하였다. RD 기법에서는 불규칙하중의 평균이 0이라는 가정하에, 계측된 구조응답 시계열을 적절한 초기조건(triggering condition)을 적용하여 분할하고, 이를 조합하여 초기조건에 의한 구조물의 자유진동신호를 추정하며, 여기서 구해진 randomdec 신호로부터 구조물의 모드특성을 추출할 수 있다. 이 기법은 H.A. Cole에 의해 제안된 이후 교량, 해양구조물 및 비행체 등 다양한 구조물의 모드특성추정에 이용되어왔다[2-6].

제안된 기법을 검증하기 위하여 단순지지된 합성형 모형교량을 제작하였으며, 모형차량을 주행시켜 모형교량에 교통하중을 가하였다. 모형차량 주행시 모형교량의 수직가속도를 계측하였으며, 계측데이터로부터 상기의 RD 기법을 적용하여 randomdec 신호를 추출하고, 아울러 교량의 자유진동수 및 진동모드를 추정하였다. 이를 검증하기 위하여 충격하중실험을 병행하여 수행하였다.

* 한국기계연구원 구조시스템연구부 선임연구원, 정회원

** 현대건설㈜ 해외사업부

*** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

**** 한국과학기술원 토목공학과 교수, 정회원

***** 한국기계연구원 구조시스템연구부 책임연구원

한편, 신경망기법(neural networks technique)을 적용하여, 추정된 모드특성치를 근거로 강성변화를 추정하였다. 수치해석의 경우 추정결과가 매우 정확한 반면, 특히 본 연구에서 수행한 미소한 강성변화에 대한 실험 결과를 이용하는 경우에는 만족할만한 결과를 얻지 못하였으며, 현재 추가적인 실험 및 분석을 진행 중이다.

2. 이론적 배경

2.1 모드특성 추정

본 연구에서 적용한 모드특성 추정절차를 Fig. 1에 요약하여 나타내었다.

바람, 차량통과 등에 의한 상시진동기록에는 교량구조물의 자유진동모드특성만이 아니고 복잡한 입력하중의 주파수특성과 각종 노이즈성분이 포함되어 있다. 따라서, 상시진동기록으로부터 모드특성을 효과적으로 추정하기 위하여 구조물의 각 자유진동수를 중심으로 band-pass filter를 적용하였다. Band-pass filter의 주파수 대역은 상시진동실험에 앞서 수행된 충격하중실험결과로부터 구하였으며, infinite impulse response (IIR) filter의 일종인 Butterworth filter를 이용하였다. 각 모드에 대하여, filtering된 결과로부터 RD 기법을 사용하여 randomdec 신호를 추출하였다. RD 기법의 기본개념은, 불규칙하중에 의한 선형구조계의 응답이 초기조건에 의한 확정적 성분(deterministic part)과 불규칙 입력하중에 의한 불규칙 성분(random part)의 합으로 구성되어 있으므로, 동일한 초기조건을 가지는 충분히 많은 수의 샘플들을 조합하면 불규칙 성분은 소멸되고 확정적 성분만을 구할 수 있다는 것이다. 따라서, 최종적으로 구해진 확정적 성분은 상기의 초기조건을 가지는 자유진동응답(randomdec 신호)이며, 이로부터 모드특성 및 감쇠특성을 쉽게 추정할 수 있다[7-8].

계측데이터 $y(t, x)$ 에 대하여 randomdec 신호 $z(\tau, x)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$z(\tau, x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(\tau + t_i, x) \quad (1)$$

여기서 $y(t, x)$ 는 측정점 x 에서의 계측데이터이고, t_i 는 y 의 기록에서 특정의 초기조건(triggering condition)을 만족하는 시점이며, N 은 그 시점의 개수이다. 많이 사용되는 초기조건은 level crossing, local extremum 및 zero crossing [5]등이며, 본 연구에서는 선도측정점(leading sensor location) x 를 교량 지간의 중점($L/2$)으로 설정하고 식 (2)와 같은 zero crossing 조건을 이용하여 모든 측정점(x)에 대한 randomdec 신호를 추출하였다.

$$y(t_i, x) : \{y(t_i, L/2) = 0, \dot{y}(t_i, L/2) > 0\} \quad (2)$$

각각의 모드에 대해 구해진 randomdec 신호를 모두 더한 후, 이를 이용하여 각 측정점에서의 cross-spectral density(CSD) 함수를 구하였다. 이때 기준점(reference location)은 1차와 3차 모드에 대해서는 중앙점($x=L/2$), 2차 모드에 대해서는 1/4 지점($x=L/4$), 4차 모드에 대해서는 1/8 지점($x=L/8$)으로 각각 설정하였으며, 자유진동모드는 CSD 함수의 진폭(amplitude)과 위상(phase)에 대한 정보로부터 추정하였다.

2.2 강성변화 추정

부재단위의 강성변화를 추정하기 위하여, 부재별 강성지수(α_j)를 아래와 같이 정의하였다.

$$\alpha_j = \frac{(EI)_j}{(EI)_j^0} \quad (3)$$

여기서 $(EI)_j^0$ 와 $(EI)_j$ 는 각각 기저(baseline) 상태와 현재 상태에 대한 j 번째 부재의 휨강성이다.

본 연구에서는 다중 퍼셉트론 신경망(multi-layer perception neural networks) [9]을 이용하여 부재단위의 강성지수를 추정하였다. 다중 퍼셉트론 신경망은 Fig. 2와 같이 하나의 입력층(input layer), 두개의 은닉층(hidden layer) 및 하나의 출력층(output layer)으로 구성된다. 입력층은 계측데이터로 구한 모드특성치로 구성되고, 출력층은 추정하고자 하는 부재강성지수가 된다.

다중 퍼셉트론은 다수의 입력과 출력의 관계를 표현하는 일종의 선형 또는 비선형함수로 볼 수 있으며, 이 때 입출력 관계는 인접한 두 층에 존재하는 뉴런(neuron)간의 관계를 설정하는 연결강도(synaptic weight)에

의해 결정된다. 따라서, 연결강도가 변화하면 입출력 관계도 함께 변화한다. 이러한 연결강도를 주어진 패턴으로 훈련시켜 개선시키는 과정을 학습(training or learning algorithm)이라 하며, 본 연구에서는 보편적으로 이용되는 역전파 (back-propagation) 학습방법을 적용하였다.

한편, 계측데이터의 노이즈 영향을 감소시키기 위하여 일정 수준의 노이즈를 인위적으로 첨가시켜 학습시키는 노이즈첨가 학습방법(noise injection learning algorithm)[10]을 적용하였다. 이 방법은 역해석문제의 ill-posedness 를 감소시키는 regularization 기법과 유사한 효과가 있으므로 신경망기법의 성능을 개선시킬 수 있다 [11-12].

3. 실험연구

3.1 모형교량 및 실험 setup

제안된 방법을 적용하기 위하여 단순지지된 1 경간 모형교량을 제작하였다. 모형교량은 Fig. 3 에 나타난 바와 같이 2 개의 강형과 콘크리트 바닥판으로 구성된 합성형교이며 지간은 6 m 이고 전체중량은 810 kgf 이다. 실험 setup 의 개요는 Fig. 4 와 5 에 나타내었다. 또한, 교통하중을 모사하기 위하여 Fig. 6 과 같이 3 대의 모형차량을 제작하였다. 이들의 중량은 각각 10, 20 및 20 kgf 이며, 전체중량을 100 kgf 까지 조정할 수 있고, 와이어를 이용하여 서로 연결될 수 있도록 제작하였다. 한편, 수직가속도를 계측하기 위하여 강형 하부플랜지에 Fig. 7 과 같이 가속도계를 부착하였다

모형차량은 와이어를 통해 모터에 연결되어, 모터 작동 시 가이드레일 사이로 교량구간을 주행할 수 있다. 모형차량의 주행속도는 1-3 m/sec.사이에서 조절이 가능하며, 주행속도를 측정할 수 있는 센서를 설치하였다. 즉, 중량, 주행속도 및 차량간격을 변화시키고, 바닥판 노면에 턱(bump)을 설치함으로써 다양한 교통하중조건을 모사할 수 있다.

3.2 실험절차

사후 검증을 위하여, 주행하중실험에 앞서 충격하중실험을 수행하였다. 주행하중실험은 Table 1 에 나타난 바와 같이 30 회 수행하였다. 모형교량 좌측 지지점으로부터 지간의 1/2 위치와 3/8 위치에 턱을 설치하여 1 대 또는 2 대의 모형차량을 주행시켰다. 모형차량이 교량구간에 진입하기 직전에 데이터 취득을 시작하였으며, 20 초간 1 kHz 의 속도로 데이터를 취득하였다.

3.3 Randomdec 신호 및 모드특성 추정

모형차량을 1 회 왕복시키는 중 4 번 채널 가속도계에서 측정된 가속도 시간이력 및 FFT 결과를 Fig. 8 과 9 에 각각 나타내었는데, 여러 요인에 기인한 다양한 주파수성분이 포함되어있어 자유진동성분만을 분리하기가 어려움을 짐작할 수 있다. Fig. 8 과 9 에서와 같이 다양한 주파수성분이 포함된 상시미진동 계측데이터로부터 자유진동수 및 진동모드를 추정하기 위해서 band-pass filtering 기법을 도입하였다. 이때 cut-off 주파수는 먼저 수행한 충격하중실험의 결과로부터 추정된 자유진동수(Table 2 참조)에 근거하여 결정하였는데, 4 개의 저차모드별로 5-6, 15.5-17, 32.5-35.5 및 58-62 Hz 로 각각 설정하였다. Fig. 10 에는 4 개의 모드별로 band-pass filtering 한 후의 시간이력을 나타내었다.

각각의 모드별로 band-pass filtering 된 가속도 시간이력을 이용하여 randomdec 신호를 추출하였는데, 이때 지간 중앙에 부착된 가속도계(4 번 채널)의 응답 크기가 0 이고 양의 기울기를 갖는 초기조건(zero crossing)을 적용하였다. 여기서, 초기조건을 만족하는 샘플의 개수(식(1)의 N)는 모드 및 실험경우에 따라 다르지만 대략 3000-7000 의 범위이다. Fig. 11 에는 4 번 채널 가속도의 randomdec 신호를 각 모드별로 나타내었다. 이러한 각 모드별 randomdec 신호의 선형함을 Fig. 12 에 나타내었으며, 선형함으로 구해진 randomdec 신호의 FFT 결과를 Fig. 13 에 나타내었다. 또한, Fig. 14 에는 동일 채널 가속도에 대하여 충격하중실험으로부터 구해진 FFT 결과를 나타내었다.

1 차와 3 차 모드에 대해서는 4 번 채널 가속도 응답을 기준으로, 2 차 모드에 대해서는 2 번 채널, 4 차 모드에 대해서는 1 번 채널 가속도 응답을 기준으로 각 측정점에 대하여 구한 randomdec 신호간의 CSD 함수를

구한 후 이를 이용하여 모드특성을 추정하였다. 자유진동수는 CSD 함수에서의 최대 peak 로 결정하였고, 자유진동모드는 미리 결정된 자유진동수에서 CSD 함수의 진폭과 위상에 대한 정보를 이용하여 추정하였다.

3.4 모드특성 추정결과

주행하중실험으로부터 추정된 모형교량의 자유진동수를 충격하중실험과 교량단면의 크기로부터 작성한 기저 유한요소모델(Fig. 17)을 이용한 해석결과와 비교하여 Table 2 에 보였다. 기저 해석모델은 휨강성이 9.88×10^5 kN.m² 인 단순보로 모형화하였다. 주행하중실험결과는 다양한 하중조건에서 수행된 30 회의 실험결과를 평균한 것인데, 분산계수(coefficient of variation : COV)가 1-3%의 작은 값이어서 실험결과와 신뢰도를 보이고있다. 한편, 주행하중실험으로부터 추정된 자유진동모드의 평균을 충격하중실험결과와 비교하여 Fig. 15 에 나타내었다.

주행하중실험과 충격하중실험에 의해 추정된 자유진동수와 진동모드는 매우 잘 일치하는 반면, 유한요소모델로 계산한 자유진동수는 첫번째 값부터 매우 다름을 알 수 있다. 따라서, 다음 절에 기술하는 유한요소모델의 개선이 필요함을 알 수 있다.

3.5 유한요소모델의 개선

앞 절에서 지적한 바와 같이, 균일단면을 가진 단순보의 해석모델은 첫번째 자유진동수를 실험치보다 매우 작게 추정하였다. 또한, 실험으로 구한 첫번째 자유진동모드는 균일단면 보의 이론적 형상에 반하여 좌우가 비대칭이었다(Fig. 15). 따라서, 해석모델을 개선하기 위한 1 단계로, 모형교량의 양쪽 지지점에 회전강성을 가진 스프링요소를 도입하였다. 이는 Fig. 16 에 보인 바와 같이 실제 지지점이 교량단면의 강성중심과 크게 다른 것을 고려한 것이다. 교량단면의 강성을 종전과 같이 균일한 값으로 고정시키고, 양단 회전스프링의 강성을 자유진동수에 대한 예측오차를 최소화시키는 방법으로 각각 2.013×10^6 N.m² 과 6.151×10^5 N.m² 으로 구하였다. 두 값이 다른 이유는 양단의 조건이 회전단과 이동단으로 다르기 때문이다.

2 단계로, 양단의 회전스프링 강성을 상기 값으로 고정하고, 상부 보 요소들의 강성을 자유진동수와 진동모드에 대한 예측오차가 최소가 되는 방법으로 추정하였다. 이때 Fig. 2 와 같은 다층 신경망기법을 사용하였는데, 신경망의 입력 데이터로는 4 개의 자유진동수와 진동모드를 사용하였고, 출력결과로는 보 요소들의 휨강성에 대한 부재강성지수(α_j)를 사용하였다. 신경망 학습과정에 필요한 훈련패턴은 부재강성지수의 여러 경우에 대한 유한요소해석을 통하여 구하였다. 최종적으로 개선된 부재강성지수를 Table 3 에 보이었는데, 보 요소의 휨강성을 기저모형의 값보다 -8 - 14% 범위에서 변한 값으로 추정하였다. 개선된 유한요소모델로부터 구한 자유진동수와 진동모드는 Table 2 와 Fig. 15 에 보인 바와 같이, 주행하중이나 충격하중실험에서 구한 값과 잘 일치하여, 개선된 해석모델의 신빙성을 보여주고 있다.

4. 강성변화 추정결과

4.1 수치해석

신경망기법을 적용하여, Fig 17 과 같은 여러 경우의 덧댐판 보강으로 인한 부재단위의 강성변화를 추정하기 위하여 우선, 수치적으로 임의의 요소에 손상을 가하여 강성이 저하된 구조물의 모드특성을 개선된 유한요소모델을 이용하여 해석에 의해 구하였다. 다음 단계로, 구해진 모드특성을 입력 데이터로 사용하여 구조물의 부재별 강성지수를 구하였으며, 이 작업을 50 회 수행하여 구한 부재강성지수별 오차를 Table 4 에 나타내었다. 한편, 자유진동수에 대해서는 3%, 자유진동모드에 대해서는 10%의 노이즈를 신경망기법의 훈련패턴에 도입하였다. Table 4 에서 보이는 바와 같이 노이즈가 포함된 입력데이터의 경우 노이즈침가 학습방법에 의해 추정결과와 정확성이 개선됨을 알 수 있다. Table 5 에는 부재손상지수 추정의 한 예를 나타내었다.

4.2 실험연구

Fig. 17 과 같은 4 가지의 덧댐판 보강 경우의 모드특성을 실험을 통하여 구한 후 부재강성지수를 추정하였다. 보강된 부재의 휨강성 변화는 대략 3-4%이며, 4 가지 경우의 주행실험에 의한 자유진동수의 변화를 Table

6 에 나타내었다. 강성변화가 미소하여 현재의 신경망기법으로는 만족할 만한 결과를 얻지 못하였다. 따라서, 미소한 강성변화를 추정하기 위해서는 현재의 신경망기법의 개선이 요구되어진다.

5. 결 론

본 연구에서는 교통하중에 의해 유발되는 상시미진동 계측데이터를 이용한 교량의 모드특성 추정기법과 부재단위의 강성추정방법을 제안하였으며, 기법의 검증을 위하여 모형교량에 대한 주행하중실험을 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 다양한 주파수성분이 포함된 응답측정기록으로부터 모드특성을 효율적으로 추정하기 위하여 도입한 band-pass filter 와 random decrement 기법은 매우 효과적임을 알 수 있었다. 또한, 이로부터 CSD 함수를 이용하여 구한 자유진동수와 진동모드가 충격하중실험으로부터 구한 결과와 잘 일치하여, 본 연구에서 제안한 방법의 정확성을 알 수 있었다.

2) 수치적 입력데이터를 이용한 부재강성지수 추정의 경우, 노이즈첨가 학습방법을 적용한 신경망기법을 이용하면 결과의 정확성이 향상됨을 알 수 있었다. 그러나 특히, 강성변화가 미소한 경우의 실험데이터를 이용할 경우에는 만족할 만한 결과를 얻지 못할 수 있으므로 기법의 개선이 요구된다.

3) 본 논문에서 제안한 방법을 상시미진동 계측에 의한 시설구조물의 건전성 모니터링을 위하여 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부, 지진공학연구센터 및 한국과학기술단을 통한 연구비지원에 의하여 수행되었음을 밝히며, 저자들은 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Cole, H.A., *On-The-Line Analysis of Random Vibrations*, AIAA Paper no. 68-288, 1968.
- [2] Ibrahim, S.R., *Application of Random Time Domain Analysis to Dynamic Flight Measurements*, The Shock and Vibration Bulletin, Bulletin 49, Part 2 of 3, pp. 165-170, Sept. 1979.
- [3] Nasir, J. and Sunder, S.S., *An Evaluation of the Random Decrement Technique of Vibration Signature Analysis for Monitoring of Offshore Platforms*, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Research Report R82-52, Sept. 1982.
- [4] Asmussen, J.C., Ibrahim, S.R. and Brincker, R., *Random Decrement and Regression Analysis of Traffic Responses of Bridges*, Proc. 14th International Modal Analysis Conference, Vol. 1, pp. 453-458, Dearborn, Michigan, 1996.
- [5] Asmussen, J.C., Ibrahim, S.R. and Brincker, R., *Random Decrement : Identification of Structures Subjected to Ambient Excitation*, Proc. 16th International Modal Analysis Conference, pp. 914-921, Santa Barbara, California, 1998.
- [6] Yang, J.C.S., Chen, J. and Dagalakis, N.G., *Damage Detection in Offshore Structures by the Random Decrement Technique*, Transactions of the ASME, Vol. 106, pp. 38-42, 1984.
- [7] Cole, H.A., *On-Line Failure Detection and Damping Measurements of Aerospace Structures by Random Decrement Signature*, NASA CR-2205, 1972.
- [8] Reed, R.E., *Analysis Aspects of Randomdec Analysis*, AIAA/ASME/AHS 20th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, St. Louis, Mo., Apr. 1979.
- [9] Haykin, S., *Neural networks-a comprehensive foundation*, Macmillan, New York. 1994.
- [10] Matsuoka, K., *Noise injection into inputs in back-propagation*, IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, 22(3) 436-440. 1992
- [11] Yun, C.B., Bahng, E.Y. and Yi, J.H., *Neural Network Approach to Damage Assessment of Civil Structures*, Proceedings of Structural Engineers World Congress (SEWC), San Francisco, U.S.A. 1998
- [12] Yun, C.B., Yi, J.H. and Bahng, E.Y., *Joint Damage Estimation Using Neural Networks*, Proceedings of Fifth Pacific Structural Steel Conference, 1211-1216. 1998

Table 1 Cases of vehicle traveling tests

Case	No. of vehicles	Length of connecting wires(m)	Weights of vehicles (kgf)	No. of tests
1	1	-	20	5
2	1	-	30	10
3	2	1	10, 30	5
4	2	1	20, 40	10

Table 2 Natural frequencies from vehicle tests, impact tests and FE analysis (Hz)

Modes	Tests		Analysis		
	Vehicle tests [COV]	Impact tests	FE analysis w/o offset elements	FE analysis w/ offset elements	Neural networks w/ offset elements
1	5.57 [0.026]	5.50	3.77	5.47	5.51
2	16.25 [0.014]	16.25	15.09	16.28	16.48
3	33.38 [0.012]	33.30	33.92	35.19	35.12
4	59.97 [0.006]	60.05	59.97	58.95	59.69

Table 3 Estimated element stiffness indices of the baseline model

Element Numbers	1	2	3	4	5	6	7	8
Stiffness Indices	1.00	0.96	1.04	1.08	0.92	1.14	0.96	1.14

Table 4 Estimation errors for stiffness indices (%)

Cases	Input modal data (50 test sets)					
	Noise free			Corrupted with noise		
Stiffness changes (%)	-5	-10	-20	-5	-10	-20
w/o NIL [*]	0.8	0.9	0.8	6.2	7.4	7.3
w/ NIL [*]	2.7	3.4	4.5	3.6	4.0	5.2

* NIL : Noise Injection Learning

Table 6 Natural frequencies for the strengthened cases obtained from the vehicle tests (Hz)

Mode	Case I	Case II	Case III	Case IV	Baseline
1	5.6	5.6	5.5	5.5	5.50
2	16.7	16.6	16.4	16.3	16.25
3	34.8	34.5	34.0	33.7	33.30
4	61.0	60.7	60.5	60.2	60.05

Table 5 Example of estimated stiffness indices with simulated data

Elements		1	2	3	4	5	6	7	8
Element level stiffness indices	Target	0.80	0.80	0.95	0.80	1.00	0.90	1.00	0.95
	Estimated without NIL [*]	0.69	0.70	0.97	1.08	0.90	0.67	0.99	0.78
	Estimated with NIL [*]	0.79	0.82	0.93	0.81	0.99	0.90	0.96	0.99

* NIL : Noise Injection Learning

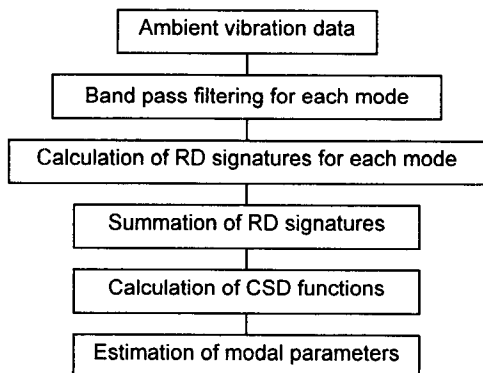


Fig. 1 Procedure for modal parameter estimation

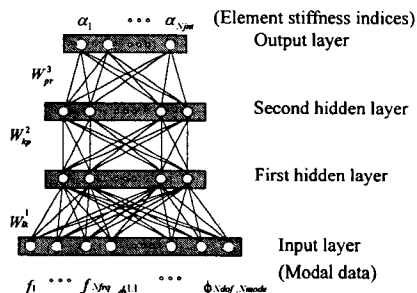


Fig. 2 Architecture of back-propagation neural networks

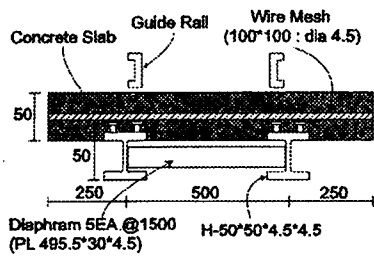


Fig. 3 Section view of the bridge model (lengths in mm)

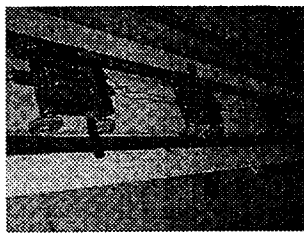


Fig. 6 Test vehicles

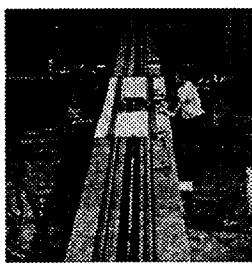


Fig. 5 Bridge model with approach and deceleration ramps

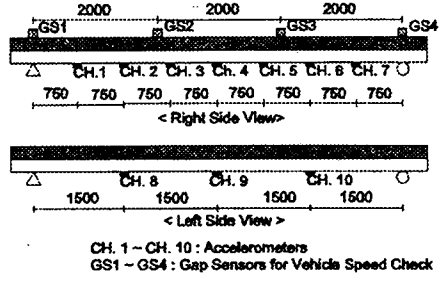


Fig. 7 Measurement locations (lengths in mm)

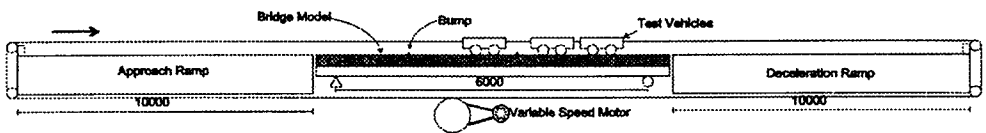


Fig. 4 Schematic of experimental setup (lengths in mm)

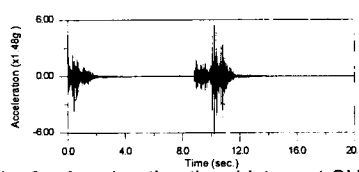


Fig. 8 Acceleration time history at CH. 4 (A round-trip for Case 2 in Table 1)

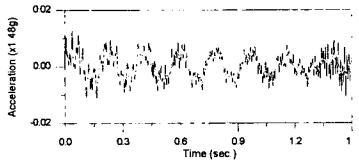


Fig. 12 Sum of RD signatures at CH. 4

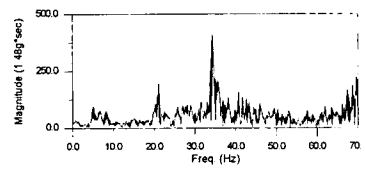


Fig. 9 Fourier amplitude spectrum at CH. 4 (Case 2 in Table 1)

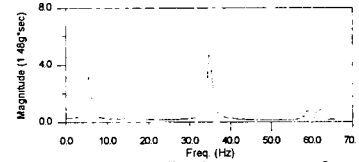


Fig. 13 Fourier amplitude spectrum for sum of RD signatures at CH. 4

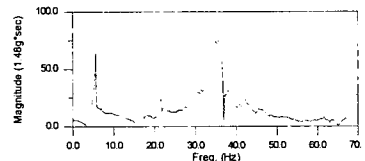


Fig. 14 Fourier amplitude spectrum at CH. 4 from an impact test

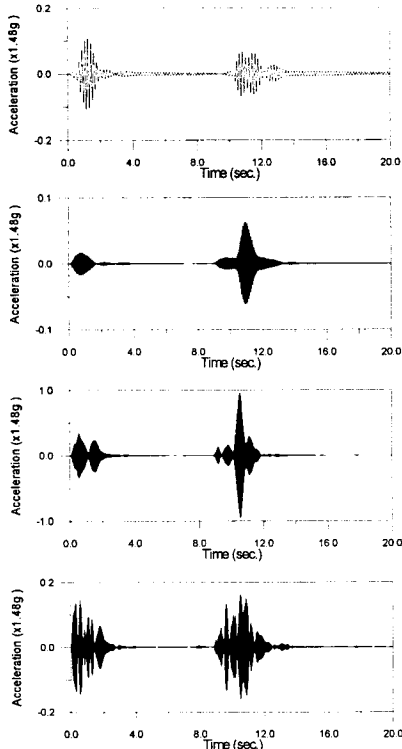


Fig. 10 Band-pass filtered time histories for the first four natural modes at CH.4

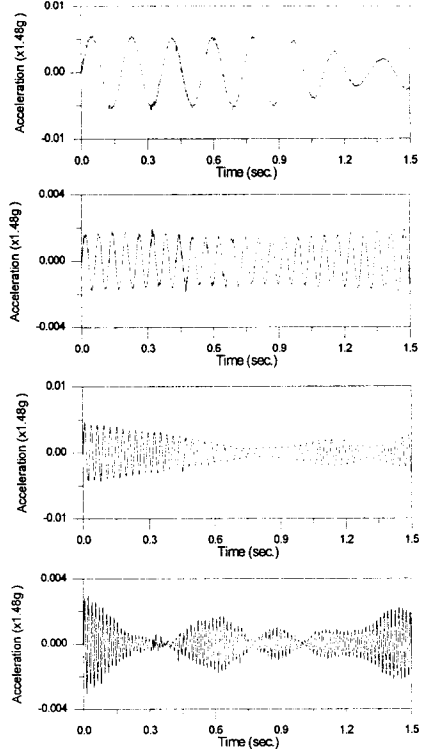


Fig. 11 Randomdec signatures at CH.4 for the first four natural modes

● Impact test □ Vehicle test * NN w/ offset elements

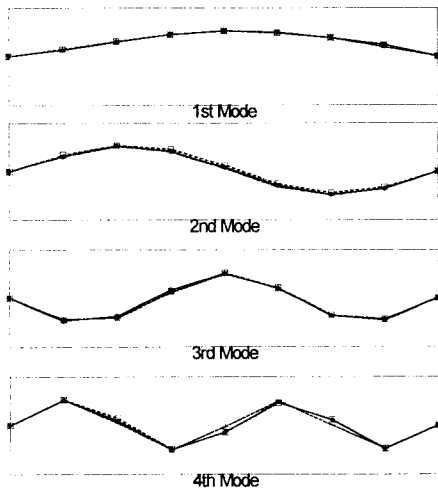
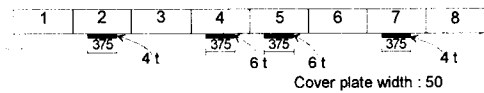


Fig. 15 Estimated mode shapes of the baseline model



Fig. 16 Boundary condition at a support



- Case I : Cover plate at element 2, 4, 5, 7
- Case II : Cover plate at element 2, 4, 5
- Case III : Cover plate at element 2, 5
- Case IV : Cover plate at element 5

Fig. 17 Strengthened cases for identification (lengths in mm)