

케이슨식 방파제의 신호기반 구조건전성 모니터링 기법

Signal-Based Structural Health Monitoring Methods for Caisson-Type Breakwaters

이 용 환* 김 주 영** 박 재 형*** 김 정 태****
Lee, Yong-Hwan Kim, Ju-Young Park, Jae-Hyung Kim, Jeong-Tae

ABSTRACT

The caisson-type breakwaters have been widely used in the area of harbor construction. Because of the importance of the breakwaters, structural health monitoring in the breakwaters by using appropriate methods is of great needs. In this study, a caisson-type breakwater that has fatigue cracks due to wave-impact is investigated. First, a signal-based structural health monitoring method is proposed for the breakwaters structures. Excitation and sensor systems are designed on finite element model and monitoring categories are also selected. Structural health monitoring was realized by using measured dynamic response signals and analyzed information.

1. 서 론

케이슨 형식의 방파제(breakwaters)는 경제성 및 시공상의 이점으로 인해 대규모 항만 등 해안구조물 건설 공사에 많이 사용되어지고 있다. 항만 외곽시설인 방파제는 외해로부터 입사하는 파랑의 효과를 저감시켜 항만 내에서의 선박의 안전과 하역을 용이하게 하는 중요한 구조물이다. 이에 따라 방파제의 안전성을 확보하고, 방파제의 손상 발생에 대해 신속한 대처를 위해서는 예상되는 손상에 대한 모니터링을 조기에 수행하여 손상을 발견하는 것이 중요하다.^[2]

현재 공용 중인 케이슨 방파제의 주요 위험요인은 (1)설계파랑 조건을 넘는 극한 외력에 의한 손상, (2)선박의 충격하중시 응력집중에 의한 손상, (3)파압에 의한 구조물 기초사석부의 손상, (4)파랑 충격 누적에 의해 야기된 피로균열 등이 있다.

본 연구에서는 케이슨식 방파제의 구조건전성 모니터링을 위해 케이슨 전면벽을 단순화한 유한요소 모델로 대체하여 연구를 수행하였다. 먼저, 가진시스템과 센서시스템을 설계하고 대상 수치모델로부터 동적응답 신호를 취득하였다. 다음으로, 모니터링 항목을 선정하였다. 취득된 신호 응답을 이용하여 모니터링 항목에 대한 손상검색 기법 및 통계적 패턴(pattern)분석을 통해 구조건전성 모니터링을 수행하였다.

* 부경대학교 해양공학과 석사과정

** 부경대학교 해양공학과 석사과정

*** 부경대학교 해양공학과 박사과정

**** 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수

2. 케이슨식 방파제 손상 유형과 분석

2.1 케이슨식 방파제의 손상 유형

케이슨 방파제에는 설계파랑조건을 넘는 극한 외력으로 인하여 손상이 빈번하게 발생한다. 케이슨식 방파제의 손상유형으로는 (1)파압에 의한 케이슨 기초 사석부의 손상, (2)선박 충돌에 의한 손상, (3)월파에 의한 손상, (4)파랑 충격에 누적에 의한 균열 및 에너지 집중현상 등을 들 수 있다. 그림 1(a)는 파압의 작용에 의한 사석부 손상의 경우를 보여주는 수치해석 결과이다. 파압의 작용으로 인해 전면부 하단 사석부가 유실되는 형태의 손상을 묘사하고 있다. 그림 1(b)는 선박 충돌시 케이슨의 동적응력 거동을 보여주는 수치해석 결과이다. 충격력으로 인해 케이슨 전면벽의 충돌위치 및 저면부까지 손상이 발생하는 것을 보여주고 있다.

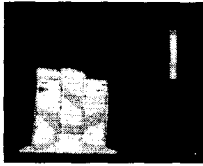


그림 1(a) 파압에 의한 케이슨 사석부 손상

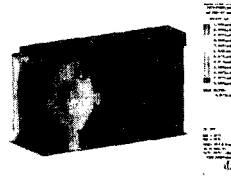


그림 1(b) 선박 충돌에 의한 케이슨의 거동

2.2 유한요소 모델

케이슨 구조물의 건전성 모니터링을 수행하기 위해 그림 2와 같이 케이슨 전면벽을 단순화한 유한 모델을 사용하였다. 단면 형상은 그림 3에 보여지는 것과 같이 단철근 보로 가정하였다.

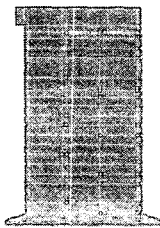


그림 2 유한 요소 모델

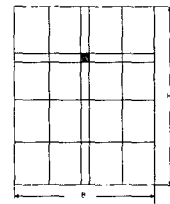
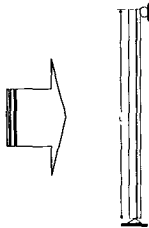


그림 3 단면 형상

2.3 손상 시나리오

본 연구에서 선정된 위험 유형은 케이슨 구조물의 파랑 충격 누적에 의한 피로파괴이다. 피로에 의한 균열이 있을 것이라 예상되는 $x/L=0.078$, $x/L=0.5$ 위치의 요소의 강성을 감소하여 손상을 도입하였다. 손상 시나리오는 표 1에 요약되어있다. 손상 경우1(Damage Case 1)은 손상위치 $x/L=0.5$ 에 99.9%의 강성을 감소하였고, 손상 경우2(Damage Case 2)는 손상위치 $x/L=0.078$ 와 $x/L=0.5$ 에 99.9%의 강성을 감소하였으며, 균열크기는 모두 $a/H=0.225$ 로 하였다.

표 1 손상 시나리오

	Damage Location (x/L)	Crack-size (a/H)
Undamage	-	-
Damage Case 1	0.5	0.225
Damage Case 2	0.078, 0.5	0.225

3. 구조 건전성 모니터링 장치

3.1 가진시스템 선정

가진시스템을 선정하기 위하여 0.1초, 0.05초의 가진시간에 대해 concrete자중의 1%, 0.1%, 0.01%의 가진력으로 각각에 대한 평가를 수행하였다.

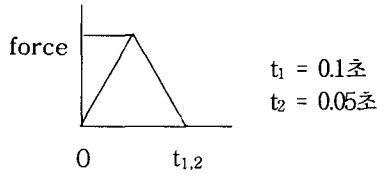


그림 4 가진 duration

그림 5는 가진시간 0.1초 일 때의 주파수응답함수(FRF)이다. 그림 6은 0.05초간 가진한 경우의 주파수응답함수(FRF)이다. 0.1초간 가진했을 때와 0.05초간 가진했을 때 모두, 가진력에 따른 크기만 틀려지고 고유진동수의 변화는 나타나지 않았다. 하중지속시간에 대해서는 0.1초보다 0.05초의 주파수응답함수(FRF)가 조금 더 매끄러운 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 0.05초로 가진시간을 결정하고 연구를 수행하였다.

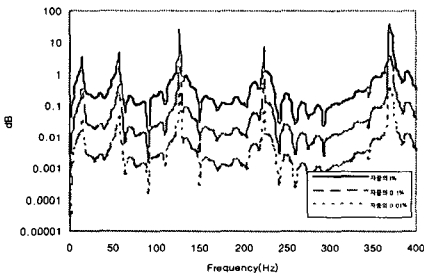


그림 5 가진시간 0.1초의 FRF

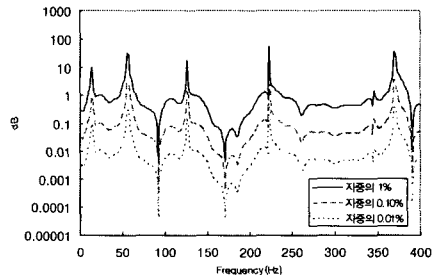


그림 6 가진시간 0.05초의 FRF

3.2 센서 시스템 설계

가속도 센서는 구조물 중립축의 $x/L=0.1$, $x/L=0.2$, $x/L=0.5$ 위치에 배열하였다. 변형률 센서는 구조물 상단에 $x/L=0.1$, $x/L=0.5$ 위치에 배열하였고, 변위 센서는 구조물 하단의 $x/L=0.1$, $x/L=0.5$ 의 위치에 배열하였다. 그림 7은 구조물에 각 센서를 배열한 것을 나타낸다.

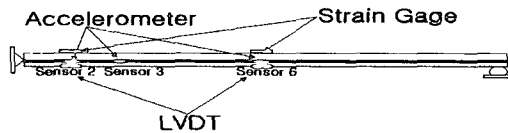


그림 7 (변형률, 가속도, 변위) 센서 배열

3.3 모니터링 항목 선정

신호기반 모니터링은 센서를 통한 신호취득, 신호를 이용한 패턴(pattern)인식 및 통계분석 메카니즘을 의미하는 것으로, 이를 활용하여 구조건전성의 변화를 감지하는데 그 목적이 있다. 본 연구에서는 케이스는 방과제

의 전면벽을 단순화 시킨 수치모델에 대해 센서링, 신호검출과 신호처리, 통계적 패턴(pattern)분석을 통한 신호기반의 구조건전성 모니터링(SHM)을 수행하였으며, 그 항목으로 주파수응답함수, 고유진동수 시간이력, 가속도 시간이력, 변형률 시간이력, 변위 시간이력을 선정하였다.

○ 주파수응답함수(Frequency Response Function, FRF)

가속도계 신호의 주파수응답은 전역적인 이상상태 감지가 가능한 모니터링이다. 먼저 가속도계의 위치를 선정하고, 가진 실험에서 가속도 신호를 계측하여 FFT변환을 통해 임의 주파수대역의 주파수응답함수를 구하였다. 구조물에 대한 특징분류 및 손상유무는 손상전후에 측정된 주파수응답함수의 도식적인 비교 및 관찰을 통해서 진동특성의 변화를 감지할 수 있는데, 주파수응답함수내의 변화로는 특정모드 주파수대역의 천이, 새로운 고차모드 응답의 발생 등이 있다.

○ 고유진동수 시간이력

가속도계 신호의 고유진동수 시간이력은 전역적인 이상상태 감지를 위한 모니터링이다. 먼저 고유진동수 시간이력을 검출할 가속도계의 위치를 선정하고, 임의 시간에 계측된 가속도응답의 FFT또는 STFT분석을 통해 특정 주파수대역의 진동모드 고유진동수를 추출하였다. 이 STFT를 일정시간의 경과에 따라 주기적으로 수행하여 시간-고유진동수 관계를 분석하고, 시간-고유진동수 관계를 불연속 발생으로 이상상태를 감지한다.

○ 가속도 시간이력

가속도 시간이력은 구조계의 전역적인 이상상태 감지를 위한 모니터링이다. 먼저, 가속도 시간이력을 검출할 대상의 국부영역을 선정하였다. 다음으로, 임의 시간동안 비손상구조계로부터 가속도를 계측하고, 후속시간 동안 손상구조계로부터 가속도를 계측한 후 각각의 확률분포곡선을 구한 후, 특징분류 및 손상판별을 위해 확률분포곡선의 변화를 도식적으로 분석하였다. 세 번째로, 임의시간 동안 계측된 비손상구조계 가속도의 절대 값과 후속시간의 가속도 절대 값을 구하고 통계적 Level-Cross한계로서 $\mu+K\sigma$ 를 설정하였다. 여기서, μ 와 σ 는 비손상구조계의 평균, 표준편차이다. 특징분류와 손상판별을 위해 전체 가속도 시간이력 중 Level-Cross한계를 초과하는 경우를 식별하고, 임의 신호가 비손상구조계의 $\mu+K\sigma$ 의 범위를 초과했는지의 여부를 확인하여 이상상태의 발생 유무를 결정하였다. 기호 K는 Confidence Level 상수이다.

○ 변형률 시간이력

변형률 시간이력은 센서가 부착된 국부 영역의 이상상태 감지를 위한 모니터링이다. 대상 모델의 국부 영역을 선정하고 비손상구조계와 손상구조계로부터 변형률을 계측한 후 각각의 확률분포곡선을 구하고, 변화를 도식적으로 분석하였다. 다음으로, 임의시간 동안 계측된 비손상구조계 변형률의 절대 값과 후속시간의 변형률 절대 값을 구하고 통계적 Level-Cross한계치 $\mu+K\sigma$ 를 설정하였다. 여기서 μ 와 σ 는 비손상구조계의 평균과 표준편차이다. 특징분류와 손상판별을 위해 전체 변형률 시간이력 중 Level-Cross한계를 초과하는 경우를 식별하고, 임의의 신호가 비손상구조계의 Level-Cross한계치를 초과했는지의 여부를 확인하여 이상상태의 발생 유무를 결정하였다.

○ 변위 시간이력

변위 시간이력은 센서가 부착된 국부 영역의 이상상태 감지를 위한 모니터링이며, 앞서 설명된 변형률 시간이력의 분석과정과 유사하다. 비손상 및 손상구조계로부터 변위신호를 계측하여 각각의 확률분포곡선을 구하고, 그 변화를 분석하여 비손상구조계 변위의 절대 값과 손상구조계의 변위 절대 값을 구하였다. 통계적 Level-Cross한계로서 $\mu+K\sigma$ 를 설정한 후, 특징분류와 손상판별을 위해 전체 변위 시간이력 중 Level-Cross한계를 초과하는 경우를 식별하였다. 여기서 μ 와 σ 는 비손상구조계의 평균과 표준편차이다. 임의 신호가 비손상구조계의 $\mu+K\sigma$ 의 범위를 초과했는지의 여부를 확인하여 이상상태의 발생 유무를 결정하였다.

4. 구조건전성 모니터링 체계의 검증

4.1 주파수응답함수(FRF)

구조물에 대한 손상유무는 손상전후에 측정된 주파수응답함수의 비교를 통해 알 수 있다. 케이슨식 방파제의 각 손상경우에 대해 가속도 센서로부터 0.0004초 간격으로 0.8192초 동안에 각 Case별로 가속도신호를 얻었다. 이 동적신호를 FFT를 통해 주파수 영역으로 변환하고, 주파수응답함수의 변화를 살펴보았다. 그림 8은 $x/L=0.2$ 에서의 주파수 응답을 나타낸 것으로, 각 손상경우에 따라 주파수응답함수의 변화가 관찰되었다. 이것으로 보아 주파수응답함수는 구조물의 이상상태를 감지하는데 용이하다고 판단되었다.

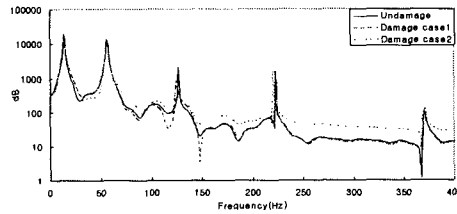


그림 8 주파수응답 ($x/L=0.2$)

4.2 고유진동수 시간이력

가속도 센서 3번($x/L=0.2$)으로부터 0.0004초의 샘플링 간격으로 신호를 획득하고, 이 신호는 Short Time Fourier Transform(STFT)을 이용하여 시간-주파수축에 plot하였다(그림 9). 그 결과, Damage Case 1의 경우 1번, 3번 모드에서 고유진동수 변화가 나타났으며, Damage Case 2의 경우 4번 모드에서 고유진동수 변화가 나타났다.

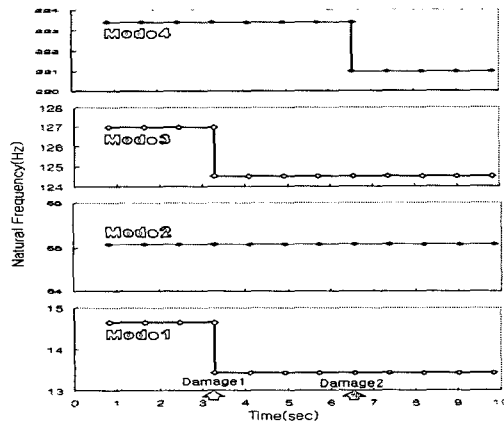


그림 9 고유진동수 시간이력

4.3 가속도 시간이력

가속도 센서 2번($x/L=0.1$), 3번($x/L=0.2$), 6번($x/L=0.5$)으로부터 0.001초 간격으로 0.1초 동안 각 Case별로 가속도데이터를 취득하였다. 비손상상태의 가속도데이터를 이용하여 통계적 Level-Cross한계치($\mu + 3\sigma$)를 구했다. 여기서 μ 와 σ 는 비손상상태에서 가속도데이터의 평균과 표준편차를 말한다. Level-Cross한계치를 각

그래프에 표시하고, upper경계를 설정했다. 그리고 어떤 손상경우가 Level-Cross한계선을 벗어나는지 각 센서별로 동일한 방법으로 관찰하였다.

가속도 센서 2번($x/L=0.1$), 3번($x/L=0.2$), 6번($x/L=0.5$)에 대한 각각의 가속도 시간이력 그래프와 확률분포곡선은 그림 10, 그림 11, 그림 12와 같다. 그 결과, 세 개의 가속도 센서 중 어떤 센서에서도 Level-Cross한계선을 벗어나는 손상경우는 없었으며, 각각의 손상경우에 대해 가속도응답 또한 큰 변화를 보이지 않았다. 그러므로 가속도 센서로 구조물의 손상을 예측하기에는 어려움이 따를 것으로 판단되었다.

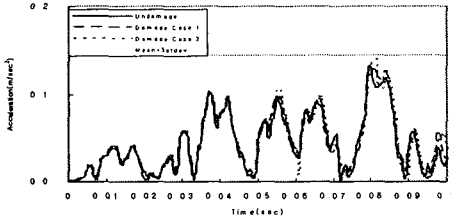


그림 10(a) 가속도 시간이력-센서2

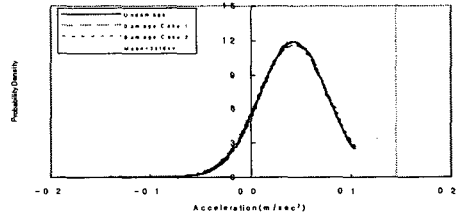


그림 10(b) 가속도 시간이력의 확률분포곡선-센서2

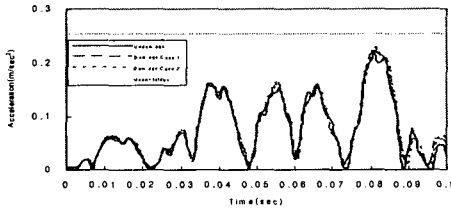


그림 11(a) 가속도 시간이력-센서3

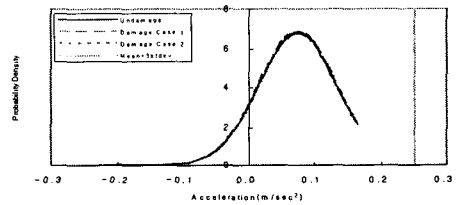


그림 11(b) 가속도 시간이력의 확률분포곡선-센서3

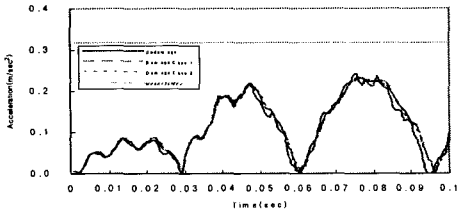


그림 12(a) 가속도 시간이력-센서6

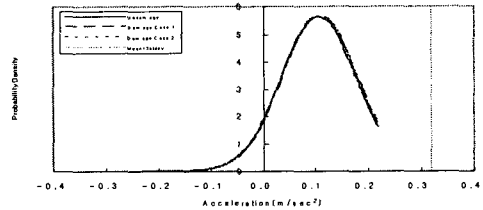


그림 12(b) 가속도 시간이력의 확률분포곡선-센서6

4.4 변형률 시간이력

변형률 센서 2번($x/L=0.1$), 6번($x/L=0.5$)으로부터 0.001초 간격으로 0.1초 동안 각 Case별로 100개의 데이터를 얻고, 비손상상태에서 취득한 변형률데이터로 통계적 Level-Cross한계치($\mu + 3\sigma$)를 구하였다. 여기서 μ , σ 는 비손상상태에서 변형률신호의 평균, 표준편차를 말한다. 다음으로, 어떤 손상경우가 Level-Cross한계선을 벗어나는지 각 센서별로 관찰하였다. 변형률 센서 2번($x/L=0.1$), 6번($x/L=0.5$)에 대한 변형률 시간이력그래프와 확률분포곡선은 그림 13, 그림 14에 각각 나타내었다. 센서 2번에서는 Damage Case 1은 Level-Cross한계선을 벗어나지 못했고, Damage Case 2는 Level-Cross한계선을 넘어가는 결과를 얻을 수 있었다. 센서 2번은 Damage Case 2의 $x/L=0.078$ 에 있는 국부적인 손상만 감지하고 있다고 판단되었다. 센서 6번의 모든 손상경우에서도 Level-Cross한계선을 벗어난 것으로 보아 센서 6번은 Damage Case 1, Damage Case 2의

$x/L = 0.5$ 에 있는 국부 손상을 감지하고 있다고 판단되었다.

4.5 변위 시간이력

변위 센서 2번($x/L=0.1$), 6번($x/L=0.5$)으로부터 0.001초 간격으로 0.1초 동안 각 Case별 100개의 변위응답을 얻고, 비손상상태에서 취득한 변위데이터로 통계적 Level-Cross한계치($\mu + 3\sigma$, $\mu + 2\sigma$)를 구했다. 여기서 μ 와 σ 는 비손상상태에서 변위데이터의 평균과 표준편차를 말한다. 이 Level-Cross한계선을 각 그래프에 표시하고, upper경계를 설정하였다. 어떤 손상경우가 Level-Cross한계선을 벗어나는지 각 센서별로 동일한 방법으로 관찰하였다.

변위 센서 2번($x/L=0.1$), 6번($x/L=0.5$)에 대하여 변위 시간이력 그래프와 확률분포곡선은 그림 15와 그림 16에 각각 나타내었다. 두 센서 모두 Level-Cross한계선을 벗어나는 손상경우는 관찰되지 않았고, 손상경우에 대해 변위응답이 거의 일치하는 것으로 보아, 변위센서 대상모델의 발생한 손상을 감지하지 못하는 결과를 얻을 수 있었다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 케이슨식 방파제의 전면벽을 단순화시킨 수치모델을 이용하여 신호기반의 구조건전성 모니터링을 수행하였다. 먼저, 대상 모델에 대해서 가진력과 가진시간에 대한 평가를 통해 가진시스템과 센서시스템을 설계하였다. 다음으로 동적응답 신호를 취득하고, 모니터링 항목을 선정하였다. 마지막으로, 모니터링 항목에 대한 손상검색과 동적응답 신호의 통계적 패턴(pattern)분석으로부터 추출된 특징정보를 활용하여 구조건전성 모니터링 체계를 검증하였다.

- (1) 가속도 센서를 이용한 고유진동수 시간이력은 Damage Case 1의 경우 1, 3번 모드의 고유진동수 변화가 나타났으며, Damage Case 2의 경우 4번 모드의 고유진동수의 변화가 나타났다.
- (2) 가속도 시간이력과 변위시간이력의 결과로, 가속도 센서와 변위센서는 본 연구에 사용된 수치모델의 손상을 감지하지 못하였다.
- (3) 변형률데이터를 이용한 시간이력 해석을 수행한 결과, 변형률센서는 센서가 위치한곳의 국부적인 손상을 감지할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

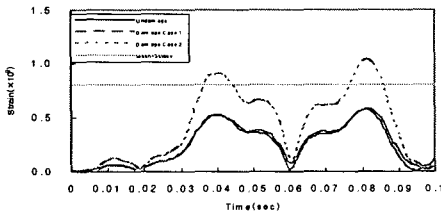


그림 13(a) 변형률 시간이력-센서2

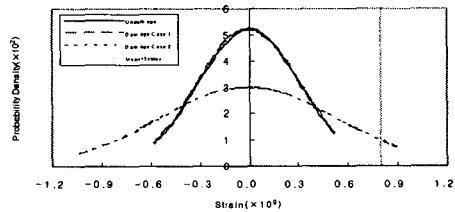


그림 13(b) 변형률 시간이력의 확률분포곡선-센서2

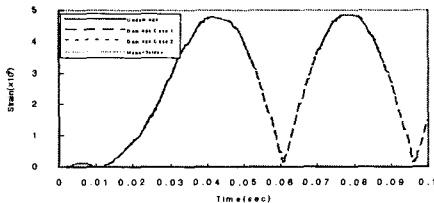


그림 14(a) 변형률 시간이력-센서6

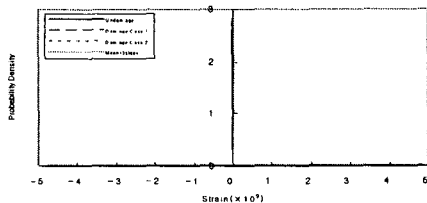


그림 14(b) 변형률 시간이력의 확률분포곡선-센서6

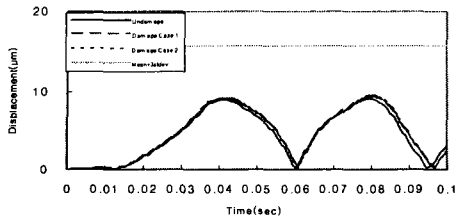


그림 15(a) 변위 시간이력-센서2

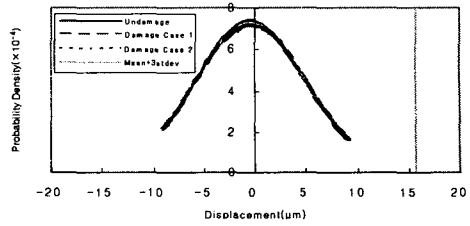


그림 15(b) 변위 시간이력의 확률분포곡선-센서2

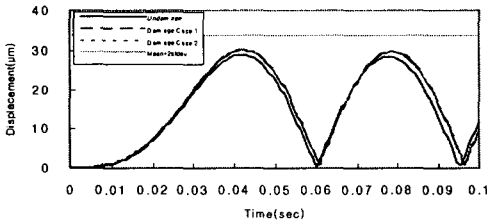


그림 16(a) 변위 시간이력-센서6

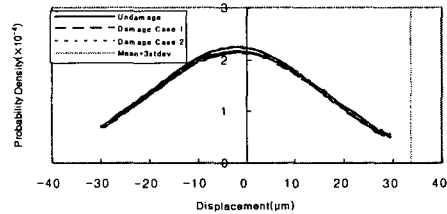


그림 16(b) 변위 시간이력의 확률분포곡선-센서6

감사의 글

이 연구는 2004년도 한국과학재단 지정 스마트사회기반연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 김정태, “소수의 고유진동수를 사용하는 비파괴 균열발견모델의 유도 및 검증”, 한국전산구조공학회, Vol. 12, No. 2, pp. 140-159, 1999.
2. 박재형, 이병준, 이용환, 김주영, 김정태, “Caisson식 방파제의 손상 모니터링 기법”, 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 151-156, 2004.
3. 김성곤, 장정환, 박민석, “서해대교 교량계측 모니터링 시스템 개발”, 대한토목학회 논문집, Vol. 20, No. 7, 2000.
4. 이계희, “선박충돌에 대한 방호공의 해석(An analysis of system for vessel collision)”, 동계구조연구회(24회), 2004.
5. Kim. J.T, Ryu. Y.S, Cho. H.M., Stubbs. N, “Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method”, Engineering Structure, Vol. 25, pp. 57-67, 2003.
6. Saïidi. M, Douglas. B, and Feng. S. “Prestress Force Effect on Vibration Frequency of Concrete Bridges”, Journal of Structure Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 7, pp. 2233-2241, 1994.