

 (19) 대한민국특허청(KR) (12) 공개특허공보(A)	(11) 공개번호 10-2012-0096228 (43) 공개일자 2012년08월30일
(51) 국제특허분류(Int. Cl.) G01B 21/32 (2006.01) (21) 출원번호 10-2011-0015506 (22) 출원일자 2011년02월22일 심사청구일자 2011년02월22일	(71) 출원인 부경대학교 산학협력단 부산광역시 남구 신선로 365 (용당동, 부경대학교) (72) 발명자 김정태 부산광역시 남구 분포로 111, LG메트로시티 1차 아파트 118동 104호 (용호동) 이소영 부산광역시 해운대구 삼어로 77, 일동아파트 103동 1003호 (반여동) 이소라 부산광역시 부산진구 가야대로 635-20, 태화현대1차아파트 102동 805호 (당감동)

전체 청구항 수 : 총 1 항

(54) 발명의 명칭 **항만케이스 지반-구조 경계부의 자기회귀모델기반 건전성 평가체계**

(57) 요약

(가) 기술분야

본 기술은 항만 케이스 구조물의 지반-구조 경계부의 손상모니터링을 위한 기술이다.

(나) 해결하고자 하는 과제

기존의 항만구조물 안전진단 기술은 주로 외관검사 및 비파괴 검사법에 의존 하고있다. 그러나 안전점검을 수행할 때, 과도한 손상까지 진행되어야 식별 가능한 경우가 검사기준이 모호하여 안전진단을 제대로 수행하기 어렵다. 따라서 보다 효과적이고 명확한 안전진단을 위한 기술이 필요하다.

전반 손상 및 국부 결함은 주로 지반-구조 경계부에서 발생한다. 중력식 항만 케이스 구조물은 구조물 자체의 손상보다 기초사석 부분에 결함이 발생할 때 더욱 치명적인 사고를 초래할 가능성이 높다. 따라서, 항만케이스 구조물의 건전성 평가기술 개발시 지반-구조 경계부 손상 모니터링에 초점을 맞추 필요가 있다.

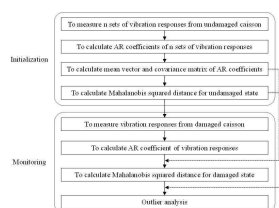
(다) 과제의 해결수단

본 발명에서는 진동신호를 이용한 항만 케이스 구조물의 건전성 평가체계를 고안하였다. 본 건전성 평가체계에서는 진동신호의 분석기법으로서 대표적인 시계열 분석 기법 중 하나인 자기회귀 모델을 사용하였다. 자기회귀 모델을 통해 분석된 시간영역 신호 특징의 이상치 분석을 위해 Mahalanobis 자승거리를 도입하였으며, 이상치 분석 결과를 통해 손상여부를 판정한다. 중력식 항만 케이스 구조물의 손상유형 특성을 바탕으로 지반-구조 경계부의 손상 모니터링에 초점을 맞추었다.

(라) 효과 등

보다 신속하고 효과적인 항만 케이스 구조물의 안전진단을 수행할 수 있으며, 초대형 태풍 등에 의해 크게 진행될 수 있는 손상을 조기에 발견하여 시설물 피해 또는 인명피해 등을 절감할 수 있다.

대표도 - 도1



특허청구의 범위

청구항 1

구조물로부터 계측된 신호로 부터 지반-경계부의 손상을 판별하는 기술.

명세서

기술 분야

- [0001] 본 기술은 항만구조물의 건전성 평가 기술 개발을 위한 것으로서, 자기회귀모델에 의한 진동응답 분석과정을 통해 항만케이슨의 지반-구조 경계부 손상을 모니터링하는 기술이다.

배경 기술

- [0002] 일반적으로 구조물 자체에 대한 건전성 평가기법은 진동기반으로 구조건전성을 평가하는 연구(문헌1, 문헌2, 문헌3)를 시작으로 토목, 건축 분야 등 육상구조물에서 구조건전성을 평가하는 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 해안/해양 구조물의 경우, 구조물의 대부분이 물속에 잠겨 있고, 수중생물이 구조체 표면에 부착되어 있는 등의 환경조건으로 인해 상기 연구의 적용이 어려운 단점이 있다. 이와 같은 이유로 인하여 항만/해양 구조물의 손상 식별은 많은 시간과 장비 및 인력을 필요로 한다는 문제점을 지니고 있다(문헌4, 문헌5).
- [0003] 기존의 항만구조물의 건전성 평가에 관한 연구로서, 조병완과 한상주(1996)는 잔교식 항만구조물에 대하여 진동실험을 통한 동특성 추출 시 제한된 센서 설치 위치에 따른 손상 예측을 위한 연구를 수행하였으며, 박재형 등(2007)은 소수의 센서로 손상예측이 가능한 고유진동수 기반의 손상검색 알고리즘을 이용하여 항만 케이슨 벽면 손상 예측에 관한 연구를 수행하였다(문헌4, 문헌5). 그리고 제한적인 모드정보를 이용한 해안 자켓 구조물의 손상 검색에 관한 연구가 이루어진 바 있다(문헌6, 문헌7). 기 수행된 연구들은 주로 항만 구조물 자체의 손상에 관한 연구가 이루어졌으며, 항만구조물의 진동응답에 관한 연구가 일부 이루어진 바 있지만 지반-구조 경계부의 손상은 고려되지 않았다.
- [0004] [문헌 1] Adams, R.D., Cawley, P., Pye, C.J., and Stone, B.J. (1978), A Vibration Technique for Non-destructively Assessing the Integrity of Structures, Journal of Mechanical Engineering Science, 20권, 93-100쪽.
- [0005] [문헌 2] Stubbs, N., Osegueda, R. (1990) Global Non-Destructive Damage Evaluation in solids - Experimental Verification, The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 5 권, 2호, 67-79쪽.
- [0006] [문헌 3] Na, U. J., Chaudhuri, S. R., and Shinozuka, M. (2008). Probabilistic assessment for seismic performance of port structures, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28권, 147-158쪽.
- [0007] [문헌 4] 조병완, 한상주, Modal-Perturbation 기법을 이용한 항만 구조물의 손상부위 추정, 1996, 한국전산구조공학회논문집, 제 9권, 제 4호, 209-217쪽
- [0008] [문헌 5] 박재형, 김정태, 나원배, 이진학, 가속도 응답을 이용한 케이슨식 항만 구조물의 건전성 평가, 2007, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 2138-2141쪽
- [0009] [문헌 6] Elshafey, A.A., Haddara, M.R., and Marzouk, H., Damage detection in offshore structures using neural networks, 2010, Marine Structures, 23권, 131-145쪽
- [0010] [문헌 7] Kim, J.T., Stubbs, N., Model-Uncertainly Impact and Damaged-Detection Accuracy in Plate-Girder, 1995, Journal of Structural Engineering, 121권, 10호, 1409-1417쪽

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0011] 국내의 기존 항만구조물은 10년 이상 노후화되었으며, 이와 같이 노후화된 항만구조물은 태풍과 같은 극치파랑 내습 시 안정성 유지가 어렵다. 또한 지구 온난화에 기인한 초대형 태풍의 빈도가 높아짐에 따라 재해위험

에 노출된 기존 항만 시설의 안정성을 평가하고 결함을 보강하는 것의 중요도가 높아지고 있다.

[0012] 기존의 항만구조물 안전진단 기술은 주로 외관검사 및 비파괴 검사법에 의존 하고있다. 그러나 수중조사 및 수준측량과 같은 외관조사를 통하여 안전점검을 수행할 때, 과도한 손상까지 진행되어야 식별 가능한 경우가 많아서 손상 발견 시 구조물의 보강에 많은 비용이 소요되거나 이미 보강의 시기를 놓치는 경우가 발생할 수 있다. 그리고 철근 탐사시험 및 코어물성시험과 같은 비파괴검사의 경우, 주기적으로 점검을 하도록 규정되어 있으나 검사기준이 모호하여 안전진단을 제대로 수행하기 어렵다. 따라서 보다 효과적이고 명확한 안전진단을 위한 기술이 필요하다.

[0013] 중력식 항만 케이슨 구조물의 손상 유형은 전반손상 및 국부결함으로 구분할 수 있는데, 국부결함을 방지할 경우 전반 손상으로 발전할 가능성이 높다. 전반 손상에는 구조체의 침하, 진동, 활동 등이 있으며, 국부결함에는 기초의 세굴, 기초사석 교란 등이 있다. 이러한 전반 손상 및 국부 결함은 주로 지반-구조 경계부에서 발생한다. 또한, 중력식 구조물은 구조물의 자중으로서 외력에 저항하는 구조물이므로, 구조물 자체의 손상보다 기초사석 부분에 결함이 발생할 때 더욱 치명적인 사고를 초래할 가능성이 높다. 따라서, 항만케이슨 구조물의 건전성 평가기술 개발시 지반-구조 경계부 손상 모니터링에 초점을 맞출 필요가 있다.

과제의 해결 수단

[0014] 본 발명에서는 [해결하려는 과제]에서 기술한 바와 같은 기존의 항만구조물 안전진단 기술의 단점을 극복하기 위하여 외관검사 또는 비파괴검사법이 아닌 진동신호를 이용한 전전성평가 체계를 고안하였다.

[0015] 시간영역의 신호는 주파수영역 또는 모드영역 데이터에 비해 상대적으로 많은 정보를 포함한다. 따라서 본 발명에서는 진동신호의 분석기법으로서 대표적인 시계열 분석 기법 중 하나인 자기회귀 모델을 사용하였다. 그리고 자기회귀 모델을 통해 분석된 시간영역 신호 특징의 이상치 분석을 위해 Mahalanobis 자승거리를 도입하였으며, 이상치 분석 결과를 통해 손상여부를 판정한다.

[0016] 본 발명에서는 [해결하려는 과제]의 세번째 문단에서 기술한 중력식 항만 케이슨 구조물의 손상유형 특성을 바탕으로 지반-구조 경계부의 손상 모니터링에 초점을 맞추었다.

<진동 기반 자기회귀 모델>

[0018] 자기회귀 계수(AR coefficient)는 시계열의 신호 특성을 나타낸다. 구조상태의 변화는 예측 시계열 특성의 변화를 야기하며, 자기회귀 계수를 이용하여 구조상태의 변화를 모니터링 할 수 있다. 본 연구에서는 지반-구조 경계부의 건전성 모니터링을 위하여 자기회귀 계수를 이용하였다. 자기회귀 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{v}(t) = \sum_{j=1}^a \varphi_j \ddot{v}(t-j) + e(t) \quad \text{식 (1)}$$

[0020] 여기서, 여기서, 여기서, $\ddot{v}(t)$ 는 시간 t 에서 예측된 가속도 응답 신호이며, φ_j 는 j 차 자기회귀 계수, a 는 자기회귀 모델 차수, $e(t)$ 는 예측오차이다. 본 발명에서는 케이슨의 지반-구조 경계부의 실시간 손상 발생 모니터링을 위해 자기회귀 계수의 변화를 이용하였다. 구조상태 변화에 기인한 자기회귀 계수의 이상치를 분석하기 위하여 Mahalanobis 자승거리 (Mahalanobis-Squared-Distance)를 도입하였다.

$$D_{\zeta} = (\varphi_{\zeta} - \bar{\varphi})^T S^{-1} (\varphi_{\zeta} - \bar{\varphi}) \quad \text{식 (2)}$$

[0022] 여기서 D 는 Mahalanobis 자승거리이며, φ_{ζ} 는 ζ 번째 데이터의 자기회귀 계수 벡터, $\bar{\varphi}$ 는 n 개의 샘플데이터로부터 구해진 자기회귀 계수의 평균벡터, S 는 n 개의 샘플데이터로부터 구해진 자기회귀 계수 벡터의 공분산행렬이다. 이때, 샘플데이터의 개수 n 은 첫번째 샘플데이터의 부분자기상관함수에 의해 결정된다.

발명의 효과

[0023] 보다 신속하고 효과적인 항만 케이슨 구조물의 안전진단을 수행할 수 있으며, 초대형 태풍 등에 의해 크게 진행될 수 있는 손상을 조기에 발견하여 시설물 피해 또는 인명피해 등을 절감할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0024] 제 1도는 항만케이슨의 지반-구조 경계부 손상모니터링 과정 모식도
제 2도는 모형 케이슨 구조물
제 3도는 모형 케이슨 구조물의 상세치수가 표기된 도면
제 4도는 기초마운드 위에 거치된 모형케이슨
제 5도는 가속도 센서의 설치위치 및 방향, 가진 위치 및 방향
제 6도는 3축방향으로 계측된 가속도 응답 신호
제 7도는 지반-구조 경계부 손상 시나리오
제 8도는 계측된 가속도 신호의 부분자기상관함수
제 9도는 손상시나리오별 자기회귀계수의 변화양상
제 10도는 진동기반 자기회귀모델 기법을 이용한 지반-구조 경계부 손상모니터링 결과

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0025] <자기회귀모델을 이용한 손상 모니터링 체계>

[0026] 진동기반 자기회귀 모델을 이용한 지반-구조 경계부의 모니터링 과정은 도 1과 같이 초기화 단계와 모니터링 단계로 구성된다. 초기화 단계에서는, 먼저, 비손상 상태의 구조물로부터 n 개의 진동응답을 계측한다. 다음으로, 식(1)로부터 n 개의 진동응답의 자기회귀 계수를 계산하고, 자기회귀 계수의 평균벡터, 공분산행렬을 계산한다. 마지막으로, 식(2)로부터 비손상 상태의 Mahalanobis 자승거리를 계산한다. 모니터링 단계에서는 우선, 손상모니터링 대상 구조물로부터 진동응답을 계측한다. 다음으로, 식(1)로부터 진동응답의 자기회귀 계수를 계산하고, 식(2)를 통해 Mahalanobis 자승거리를 계산한다. 최종적으로, 통계적 이상치(outlier) 분석을 통해 손상발생 여부를 판정한다.

[0027] <자기회귀모델을 이용한 손상 모니터링 체계의 성능검증>

[0028] 진동기반 자기회귀모델 기법의 적용성 검증을 위하여 항만케이슨 모형에 대하여 진동실험을 수행하였다. 대상 구조물은 안벽구조물 및 방파제 등의 건설에 사용되는 케이슨의 축소 모형이며 도 2와 같다. 항만케이슨 모형은 부산 신항의 안벽용으로 제작된 케이슨의 1/20 크기로서 가로 120cm, 세로 110cm, 높이 130cm의 철근 콘크리트 구조물이고, 케이슨의 상세치수 및 형상을 도3에 나타내었다. 항만케이슨 모형은 도 4와 같이 성토된 기초마운드 위에 설치하였다. 실제 항만케이슨은 지반에 성토된 기초마운드 위에 거치되고, 기초마운드는 기초마운드보다 큰 단위중량을 가지는 사석으로 피복한다. 이를 모사하기 위하여 콘크리트 지반 위에 기초마운드로서 48cm의 모래를 성토하였으며 1차 다짐을 수행한 후, 자갈을 이용하여 10cm 두께로 모래지반을 피복하고 2차 다짐을 수행하였다.

[0029] 진동응답의 계측을 위하여 도 5와 같이 항만케이슨 모형의 전면벽 중앙 상부에 가속도센서 Acc.1, Acc.2, Acc.3 을 3축 방향으로 각각 설치하였다. 항만케이슨 모형의 진동응답을 얻기 위해 도 5와 같이 y 방향의 충격 가진을 수행하였다. 충격가진 시 고무해머를 이용하였으며, 랜덤 충격가진이 수행되었다. 진동실험 시 설치된 가속도 센서의 위치와 충격 가진을 수행한 위치는 수치검증 시 적용된 위치와 동일하다. 가속도 측정을 위하여 Signal Conditioner, Terminal Block, DAQ card가 설치되었으며, 1kHz의 샘플링 주파수로 계측하였다. 가속도 센서는 PCB사의 393B04 모델이 사용되었으며, 항만케이슨 모형으로부터 계측된 3축 방향의 가속도신호는 도 6과 같다. 가진 크기의 차이로 인하여 유한요소해석에 의한 가속도응답 크기와 실험에 의한 가속도 응답의 크기의 차이는 존재하지만, 3축 방향 가속도응답의 상대적 크기는 유한요소해석 시와 동일하게 y , x , z 방향 순으로 나타났다.

[0030] 지반-구조 경계부 모니터링을 위한 손상시나리오로서 기초마운드 손상을 선정하였다. 항만케이슨 모형이 외부 극한 하중에 노출되어 있는 경우를 가정하여 기초마운드의 손상을 모사하였다. 손상시나리오는 도 7과 같이 비손상(undamage) 상태를 포함하여 총 4개의 손상시나리오를 구성하였다. 도 7 (a)는 비손상 상태로서 기초지반 성토 후의 초기상태이다. 손상 1(도 7(b))은 약 $75 \times 40 \text{ cm}^2$ 면적에 대한 피복사석을 제거한 경우이다. 손상

2(도 7(c))는 약 $75 \times 70 \text{ cm}^2$ 면적에 대한 피복사석 및 모래사석 일부를 제거한 상태이다. 손상 3(도 7(d))은 손상 2의 상태에 항만케이스 모형의 바닥 면과 접하고 있는 모래사석을 추가로 제거한 상태이다.

[0031] 손상시나리오에 따른 진동실험을 수행하고 각각의 경우에 대한 가속도신호를 계측하였다. 자기회귀 모델의 차수를 결정하기 위해 비손상 상태에 대한 3축방향의 가속도신호의 부분자기상관함수를 계산하였다. 도 8은 z 방향의 가속도응답의 부분자기상관함수이다. 수렴여부의 판단을 위하여 수렴기준을 표준편차의 3배 값(3STD)으로 선정하였다. 3축 방향 가속도신호의 부분자기상관함수 분석 결과, Lag가 35 이상일 때 3STD 범위 내에 수렴하였다. 이로부터 자기회귀 모델의 차수를 35로 선정하였다.

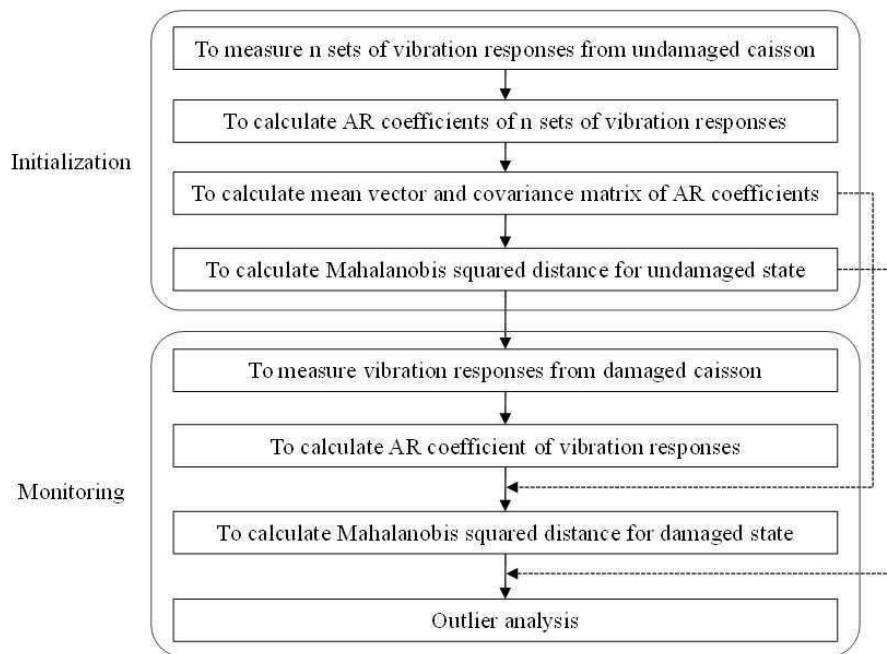
[0032] 초기화 과정으로서, 먼저, 비손상 상태의 가속도신호를 계측하였다. 비손상상태의 경우 자기회귀 모델의 차수보다 큰 샘플데이터의 개수를 필요로 하므로 50개의 가속도신호를 계측하였다. 50개의 비손상상태의 가속도신호로부터 식(1)을 통해 자기회귀계수를 구하고 자기회귀 계수의 평균벡터, 공분산행렬을 계산하였다.

[0033] 모니터링 과정으로서, 손상 상태의 항만 케이스 모형으로부터 가속도신호를 계측하였다. 손상 1 - 손상 3에 대해서 총 8회의 가속도신호를 계측하였다. 손상 경우에 대해 계측된 가속도신호로부터 각각의 자기회귀계수를 구하였다. 도 9는 모니터링 과정에서 추출된 각 손상시나리오별 자기회귀 계수이다. 각 손상시나리오에 대한 자기회귀계수와 초기화 과정으로부터 구해진 평균벡터, 공분산행렬을 이용하여 식(2)에 의한 Mahalanobis 자승거리를 구하였다.

[0034] 초기화, 모니터링 과정을 통한 지반-구조 경계부 모니터링 결과는 도 10과 같다. x, y 두 방향의 결과에서 손상 발생 유무의 식별이 가능함을 알 수 있다.

도면

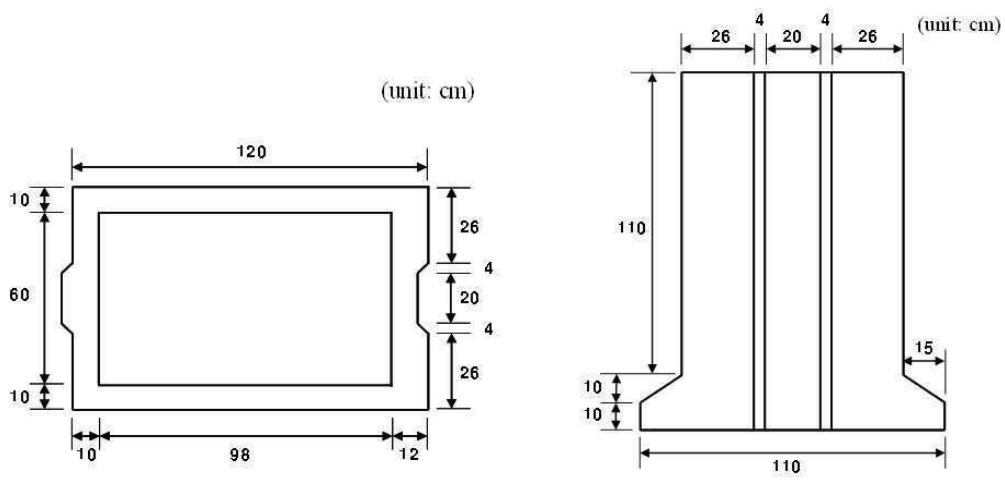
도면1



도면2



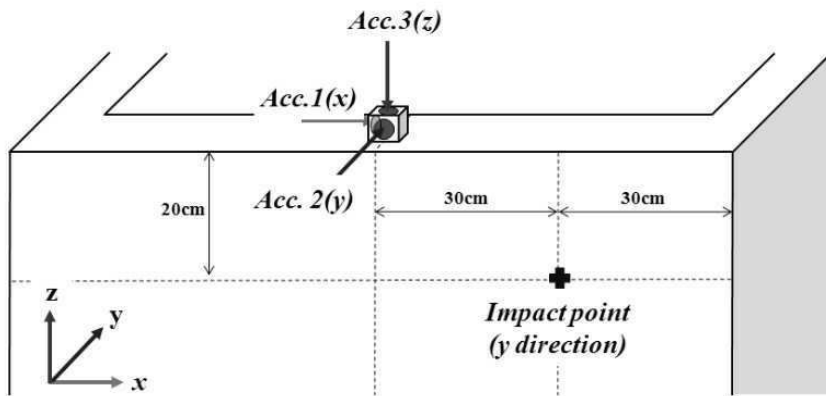
도면3



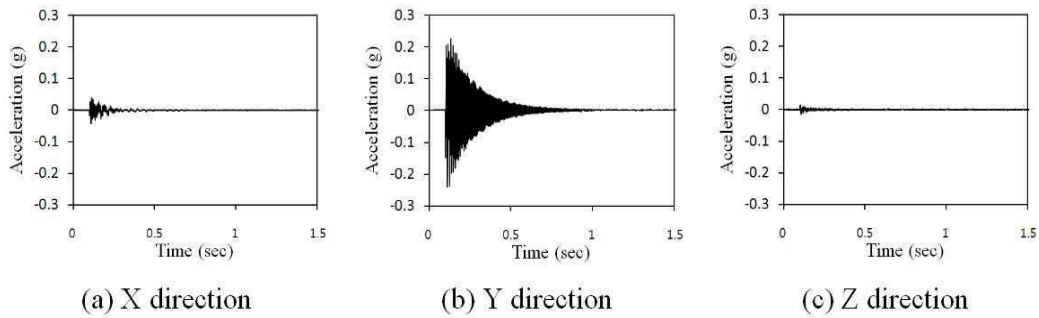
도면4



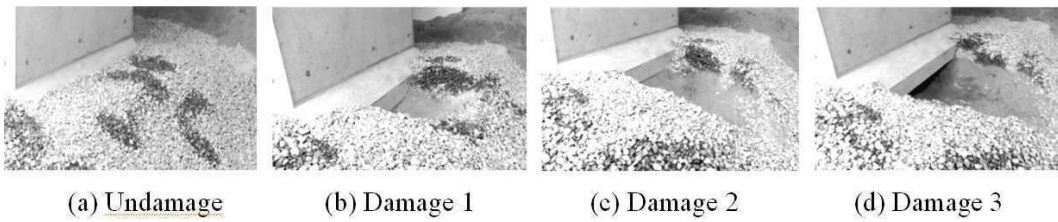
도면5



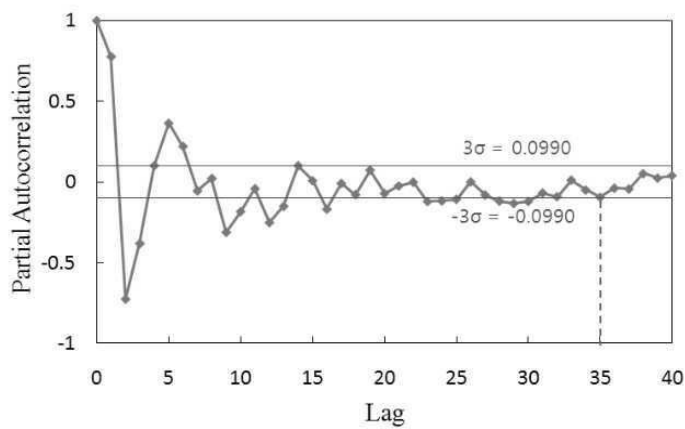
도면6



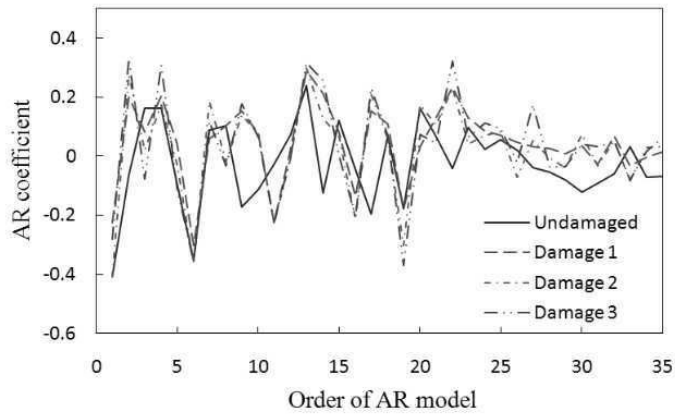
도면7



도면8



도면9



도면10

