한국지반공학회논문집 제28권 5호 2012년 5월 pp. 55 ~ 65

항만지역의 지반증폭 특성을 반영한 실시간 지진피해 평가방안 수립

Real-time Seismic Damage Estimation for Harbor Site Considering Ground Motion Amplification Characteristics

김 한 샘[1] Kim, Han-Saem
유 승 훈[2] Yoo, Seung-Hoon
장 인 성[3] Jang, In-Sung
정 충 기[4] Chung, Choong-Ki

Abstract

The purpose of this study is to estimate seismic damage for harbor site considering dynamic amplification characteristics. First of all, a series of ground response analysis is performed and then correlation equations between rock outcrop accelerations and peak ground accelerations (PGAs) are determined. These equations are saved into DB and when an earthquake occurs, PGAs are determined by them as soon as possible. For earthquake events, seismic damage grades of harbor structures are determined by using the correlated PGAs and fragility curves of harbor structures in real time. In this study, seismic damage was estimated and classified into several grades by applying two hypothetical earthquakes.

요 지

본 연구에서는 항만 지역의 지반 조건과 계측된 암반노두 가속도를 이용하여 지반증폭 특성이 반영된 지진피해 평가 방안을 구축하였다. 먼저 지반조사 자료를 토대로 부지응답해석을 수행하여 항만지역의 암반노두 가속도와 지표면 최대가속도의 상관관계식을 결정한다. 결정된 대상 항만의 상관관계식은 지진피해평가 시스템 상에 DB화 되고, 지진 발생 시 계측된 암반노두 가속도를 입력받아 실시간으로 지표면 최대가속도를 결정한다. 지진 발생 시 실시간으로 결정되는 PGA 값과 상부 구조물의 지진취약도 함수를 이용하여 항만구조물의 지진피해 등급을 결정할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 구축된 평가 방안에 따라 가상 지진을 적용하여 인천항만 지역 내 항만 구조물의 지진 피해를 추정하고 등급화 하였다.

Keywords : Damage grade, Fragility curve, Harbor, PGA, Seismic damage estimation

1. 서 론

최근 인도네시아(2004년 12월 26일, 규모 9.0), 아이티(2010년 1월 12일, 규모 7.0), 일본(2011년 3월 11일, 규모 9.0) 등에서 발생한 지진은 그 규모가 크고 진앙지가 연안 해안에 위치하고 있어 발생 지진에 의한 건물의 붕괴, 지진 해일 등의 직·간접적인 대규모 피해가 발생하였다. 국내에서도 계기지진 관측을 시작한 이후에 해안 지역을 중심으로 규모 4.0 이상의 중규모 이상의 지진들이 관측되고 있다. 이에 따라 국가기반시설을

1 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Graduate student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National Univ.)
2 정회원, 한국전력기술 사원 (Engineer, KEPCO Engineering & Construction Company, Tel: +82-2-880-8737, Fax: +82-2-875-6933, kaniyo11@snu.ac.kr, 교신저자)
3 정회원, 한국해양연구원 책임연구원 (Senior research engineer, Korea Ocean Research & Development Institute)
4 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National Univ.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

대상으로 지진 발생 및 예상 피해 규모를 사전에 예측할 수 있는 시스템의 개발을 시도하고 있다. 예컨대 인천국제공항, 고속철도, 가스기지 등의 일부 주요 시설물들의 경우, 가속도계 설치를 통한 지진계측시스템을 적용하고 있다(한국해양연구원, 2011).

지진발생이 빈번하고 앞선 지진방재 기술을 보유한 미국과 일본의 경우 지진현상 자체에 대한 연구뿐만 아니라 지진재난의 예방, 대비, 대응, 복구의 재난대처 4단계 과정을 중심으로 다양한 연구를 진행해왔다(국립방재연구소, 2003). 최근까지 수행된 연구결과에 의거하여 공학과 통계학 및 경제학 분야에 걸쳐 지진피해 평가기법을 개발하고 실제 지진피해가 발생한 지역에 적용하였으며, 지속적으로 운용하고 있다. 지진의 피해를 종합적으로 평가하고 의사결정지원을 수행하는 대표적인 시스템을 살펴보면 미국의 HAZUS, 일본의 UrEDAS, REDARS 등이 있다. 국내의 경우 소방방재청에서 지진재해대응시스템을 구축하는 등 국내 현황에 적합한 시스템 구축을 위한 연구를 수행하고 있다. 이와 같이 다양한 연구 사례를 바탕으로 여러 지진피해예측시스템이 개발되어 사용되고 있으나 크레인이나 안벽과 같은 특정 항만구조물의 지진취약도함수는 제시되어 있지 않으며, 특히 항만과 같이 특정 지역의 지진 피해를 지반과 구조물의 내진 성능을 연동하여 예측하려는 연구가 시도된 바는 없다(김한샘 등, 2011).

항만지역은 해안에 인접한 부지의 연약한 원지반 상에 준설, 매립 등으로 조성되어 있어, 지층 구성이 다양하고 두꺼운 토층을 갖는다. 따라서 항만지역의 지진피해예측을 위해서는 다양한 지반 조건으로 인한 지반특성의 차이를 합리적으로 반영할 수 있는 방안이 필요하다. 더불어 크레인, 안벽 등 아직 지진민감도 분석이 체계적으로 이루어지지 않은 항만 대표 구조물에 대한 지진취약도 정보가 요구된다. 이에 본 연구에서는 지진 발생 시 국내 주요 항만지역에 설치된 지진계측기로부터 수집된 계측 정보와 지반 및 구조물 정보를 토대로 발생 가능한 지진 피해를 실시간으로 평가할 수 있는 방안을 수립하고자 한다.

2. 지반증폭현상을 반영한 지진피해평가시스템

2.1 지진피해평가시스템

지진 발생 시 기반암을 통해 전달된 지진파는 상부의 토층을 통과하면서 그 크기가 변하는 지반증폭현상이 발생하며, 상부 구조물의 피해는 구조물의 내진 성능뿐만 아니라 지진파의 상부토층 통과 과정에서 증폭된 지진파의 세기에 따라 영향을 받게 된다. 이에 본 연구에서는 항만 지역의 지반증폭현상을 합리적으로 반영한 지진피해평가시스템을 제안하였다(Fig. 1). 시스템 구성에 따라 입력 및 평가결과 정보를 표준화하여 저장할 수 있도록 Fig. 2와 같이 시스템 데이터베이스를 설계하였다.

구조물의 지진 피해 예측을 위해서는 손상을 초래하는 지표면 최대가속도의 결정이 중요하다. 지표면 최대가속도 결정 시 Table 1에서와 같이 지반 분류에 의한 증폭 계수를 사용할 경우 지진하중의 크기에 따른 증폭정도의 변화를 고려할 수 없어 정확한 피해 예측을 할 수 없다. 따라서 지표면 최대가속도를 합리적으로 결정하기 위해 부지응답해석을 실시할 필요가 있다. 그러나 부지응답해석에는 다양한 지층 구조, 지반 물성과 지진의 시간 이력 등을 입력하고 결과를 해석하는 과정에서 많은 시간이 필요하므로 지진 발생 시 직접 부지응답해석을 수행하여 신속하게 대응하는 데에는 어려움이 있다. 이에 본 지진피해평가시스템에서는 지진 발생 시 지표면 최대가속도의 결정을 위해 사전에 미리 결정되어

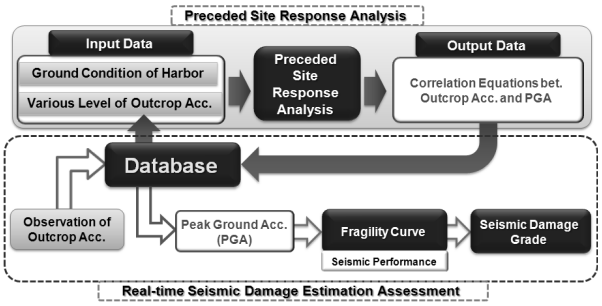


Fig. 1. Seismic damage estimation system configuration

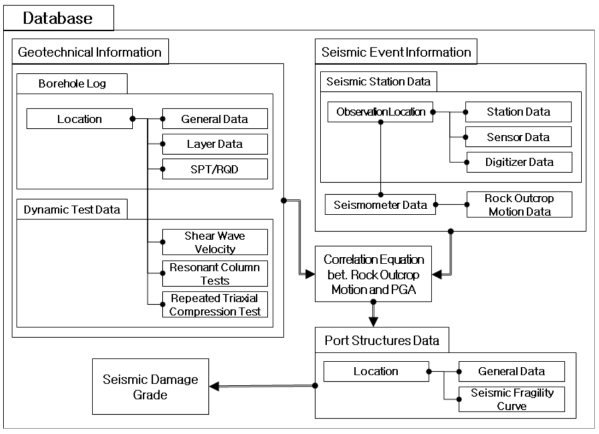


Fig. 2. System database schema

데이터베이스에 저장된 암반노두 가속도와 지표면 최대가속도의 상관관계식을 이용한다.

이를 위해 먼저 지진피해 평가 대상 항만지역의 지반조사 자료를 수집하여 데이터베이스를 구축한다. 이후 데이터베이스에 구축된 항만지역 내 시추공별 지반 조건에 대해 다양한 수준의 암반노두 가속도를 입력하여 부지응답해석을 실시한다. 해석 결과, 비선형 최적화 모델에 따른 회귀분석을 통해 암반노두 가속도와 지표면 최대가속도 간의 상관관계식을 결정한다. 본 상관관계식을 이용하여 항만지역에 지진 발생 시 항만지역 내 설치되어 있는 지진계측기로부터 관측된 암반노두 가속도를 입력받아 구조물에 피해를 발생시키는 지표면 최대가속도를 실시간으로 결정한다. 최종적으로 결정된 지표면 최대가속도는 상부 구조물의 지진취약도 함수를 통해 피해 확률로서 계산되고, 항만 구조물의 지진피해 등급 결정에 반영된다. 이러한 일련의 과정은 자동화된 지진피해평가 시스템에서 실시간으로 평가할 수 있도록 구축하였다.

2.2 부지응답해석

부지응답이란 지진의 진원에서 시작된 지진동이 암반층과 토층을 통과해서 지표면에 도달된 탄성파의 파동을 말하는 것이며, 다양한 지층을 통과하여 지표면까지 전파되는 탄성파의 전파특성을 모델링하여 부지응답을 구하는 해석을 부지응답해석이라고 한다. 입력정보는 지반정보(단위중량, 전단파 속도, 감쇠곡선 등)와 지진정보(시간이력, 최대가속도 등) 등이며, 해석 결과로 심도별 가속도 분포로부터 지표면 최대가속도를 산출할 수 있다.

부지응답해석에 사용되는 입력 가속도는 해석 조건에 따라 암반노두 가속도(rock outcrop motion)나 기반암 가속도(bedrock acceleration) 등이 사용되나, 본 지진피해평가시스템에서 항만구조물 부지응답해석을 위한 입력 가속도는 대부분의 지진계측이 자유장 암반노두(rock outcrop)에 설치된 지진계측기에서 실시되는 점을 고려해 암반노두 가속도를 사용한다. 입력 암반노두 가속도는 크기에 따른 지반 증폭의 비선형성을 모사하기 위해 지진 재현주기에 따라 0.04g에서 0.22g까지의 6단계의 암반노두 가속도와 동일본 지진(2011년 3월 11일, M 9.0)과 같은 과도한 크기의 미예측 지진을 고려하기 위해 0.3, 0.4, 0.5g의 3단계의 암반노두 가속도를 추가로 사용하여, 총 9단계의 암반노두 가속도를 입력하였다(Table 2). 또한 다양한 주기특성을 보이는 지진파의 영향을 고려하기 위해 현행 내진설계기준에서와 같이 단주기 특성을 보이는 암반계측지진파(Hachinohe)와 장주기 특성을 보이는 토층계측지진파(Ofunato)를 선정하였으며, 추가로 단주기, 장주기 특성을 모두 보이는 인공 지진파를 이용하였다(Table 3).

본 해석에서는 1차원 부지응답해석에 널리 쓰이는 등가선형해석 프로그램인 ProSHAKE를 이용하였다. 해석에 필요한 지반의 동적물성치인 변형률에 따른 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선은 현장 지반에서 시료를 채취하여 실내실험을 수행한 경우 실험값을 직접 이용하였으며, 실험값이 없을 경우 대상 항만지역의 설계·시공 시방서 및 내진성능 평가 관련 자료를 참고하여 시공 완료된 입력 지반의 대표 동적물성치를 이용하였다. 본 연구의 평가 대상항만인 인천항만 지반의 대표 동적물성치는 Table 4와 같다.

Table 1. Site coefficients of site classification

Generic Description	Site Class	V_S 30 (m/s)	Site Coefficients			
			F_a		F_v	
			Z=0.11	Z=0.07	Z=0.11	Z=0.07
Rock	B	760< V_S 30 ≤1500	1.00	1.00	1.00	1.00
Very Dense Soil and Soft Rock	C	360< V_S 30 ≤760	1.20	1.20	1.60	1.60
Stiff Soil	D	180< V_S 30 ≤360	1.44	1.60	2.30	2.30
Soft Soil	E	V_S 30 ≤180	2.00	2.40	3.4	3.4

Table 2. Input rock outcrop motion

Occurrence Period (year)	50	100	200	500	1000	2400	–	–	–
Rock Outcrop Motion (g)	0.04	0.06	0.08	0.11	0.15	0.22	0.3	0.4	0.5

Table 3. Magnitude and time history of the input seismic records

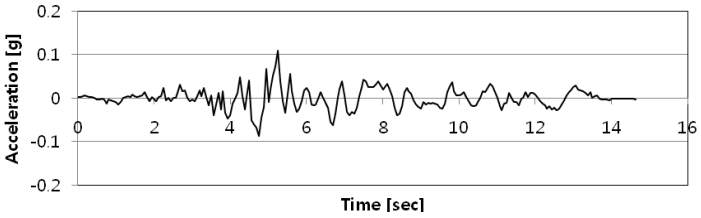
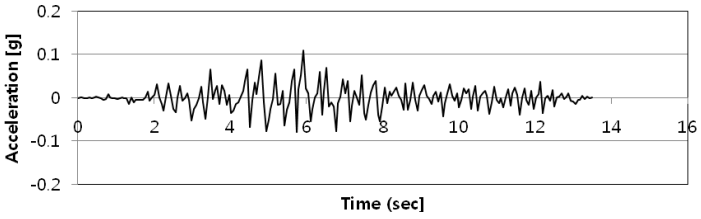
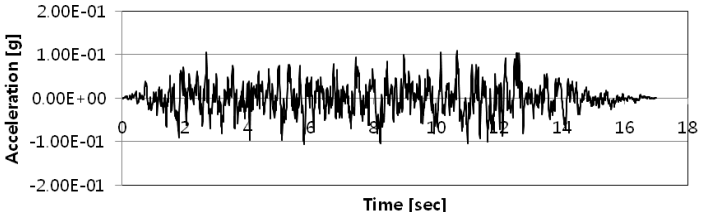
Earthquake	Magnitude	Date	Location	Site Condition	Time History
Hachinohe	7.9	68/05/16	Tokachioki, Japan	S_C	
Ofunato	7.4	78/12/06	Miyagikenoki, Japan	S_D	
Artificial	–	–	–	S_B	

Table 4. Dynamic properties of soils in Incheon port

Soil type	Wet Unit Weight γ_t (kN/m^3)	Shear Wave Velocity v_s (m/s)	Poisson's Ratio υ	Small Strain Shear Modulus $G_{\max}$ (kPa)
Riprap	18	516	0.3	489,000
Dredged Clay	17.3	193	0.45	65,700
Dredged Sand	18	194	0.35	68,900
Upper Sand	18	262	0.35	126,000
Lower Sand	18	396	0.35	287,700
Upper Clay	18.3	193	0.45	69,500
Lower Clay	18.3	283	0.45	149,400
Weathered Soil	20	467	0.35	444,600
Weathered Rock	21	681	0.3	992,800

2.3 지진취약도 함수

구조물의 지진취약도 함수는 특정 지진강도에 대해 소정의 손상 수준을 초과할 확률을 함수로 표현한 것이다. 구조물의 손상 확률을 나타내기 위해서는 지진강도를 나타내는 지진강도지수가 필요하며 구조물의 특성에 따라 스펙트럴 가속도(Spectral Acceleration, S_a)나 스팩트럴 변위(Spectral Displacement, S_d), 지반최대가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)가 많이 사용되고 있다. 지진취약도는 통상 누적 대수정규 분포함수의 형식으로 다음의 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$P_f(s) = \phi\left[\frac{\ln s - \ln \bar{s}}{\beta}\right] \quad (1)$$

여기서, $P_f(s)$는 PGA가 s인 지진 발생 시 시설물의 손상확률이며, $\phi[\,]$ Gaussian 정규누적확률분포함수, $\bar{s}$는 손상을 일으킨 지진의 지표면에서 PGA의 중앙값, s 확률변수로서 지표면에서 수평지진의 PGA 값을, β는 파괴를 일으킨 지진의 지표면에서 PGA의 log값에 대한 표준편차를 의미한다.

본 연구에서는 항만 지역에 존재하는 중력식 안벽과 겐트리 크레인(gentry crane) 및 무보강 조적 콘크리트

구조물의 지진취약도 함수를 지진피해평가 시스템에 적용하였으며, 각 지진취약도 함수의 결정 인자인 중앙값과 표준편차는 Table 5～7에 제시하였다.

2.4 지진피해 등급화

지진 발생 시 상관관계식에 의해 결정된 지표면 최대가속도는 항만구조물의 지진취약도 함수의 입력 변수로서 사용되고 피해 정도는 주어진 손상 등급에 대한 파괴 확률로서 표현된다. 본 연구에서는 구조물의 피해를 결정하기 위해 각 손상 등급의 파괴 확률을 바탕으로 하는 다음과 같은 등급화 방안을 적용하였다(Fig. 3).

먼저 지진 발생 시 주어진 PGA 값에 대하여 식 (1)과 Table 5～7을 통해 각 구조물의 손상 단계에 대한 파괴 확률을 계산한다. 본 연구에서는 대표적인 항만구조물인 안벽과 겐트리 크레인을 대상으로 지진취약도 함수 수립연구를 진행하고 있으며, 시범적으로 제안된 중력식 안벽과 겐트리 크레인의 손상 단계의 정의 및 피해 정도는 Table 5, 6과 같다. 또한 항만지역 일반 건축물의 지진피해를 평가하고자 HAZUS로부터 무보강 조적 콘크리트 구조물의 손상 단계의 정의 및 피해 정도를 Table 7에 제시하였다.

지진취약도 함수에 의해 계산된 각 손상 등급의 파괴 확률이 50% 이상인 경우, 해당하는 손상 등급의 피해가 발생한다고 가정한다. 두 가지 이상의 손상 등급이 발생한 경우에는 가장 심한 피해 단계의 손상이 구조물의 손상 등급을 지배한다. 예를 들어, 무보강 조적 콘크리트 구조물의 경우 'Slight'와 'Moderate' 단계의 파괴 확률이 모두 50% 이상인 경우 구조물의 손상 등급은 'Moderate'로 결정한다. 본 연구에서 사용된 지진피해 등급화 방안에 따라 결정된 각 항만 구조물의 손상 확률에 따른 지진피해 등급은 Table 8～10과 같다.

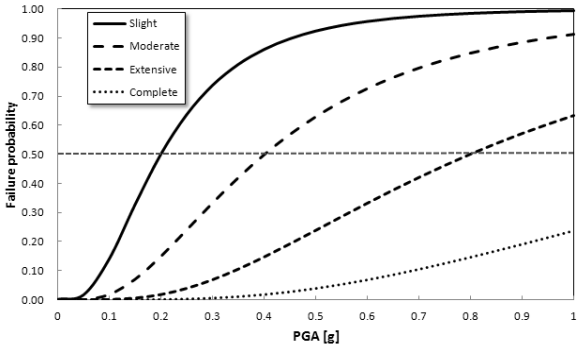


Fig. 3. Classification assessment of seismic damage levels

Table 5. Definition of damage levels of seismic fragility curves for gravity quay wall

Damage Level	Disorder	Slip Failure	Collapse
Mean Value ($\bar{s}$)	0.518	0.819	1.013
Standard Deviation (β)	0.129	0.146	0.216
Damage State	10cm in lateral displacement	10cm in slip	30cm in lateral displacement

출처: 한국해양연구원, "항만 지진응답 계측시스템 구축 및 활용기술 개발 연차실적계획서", 2011

Table 6. Definition of damage levels of seismic fragility curves for gentry crane

Damage Level	Near Collapse	Collapse
Mean Value ($\bar{s}$)	0.61	1.01
Standard Deviation (β)	0.21	0.2
Damage State	30% increase in strain	50% increase in strain

출처: 한국해양연구원, "항만 지진응답 계측시스템 구축 및 활용기술 개발 연차실적계획서", 2011

Table 7. Definition of damage levels of seismic fragility curves for unreinforced concrete structure

Damage Level	Slight	Moderate	Extensive	Complete
Mean Value ($\bar{s}$)	0.2	0.4	0.8	1.6
Standard Deviation (β)	0.64	0.67	0.66	0.66
Damage State	8%	40%	80%	100%

출처: FEMA, "HAZUS MR4 Earthquake Technical Manual"

3. 인천항 지역 지진피해 평가

3.1 선행 부지응답해석 및 상관관계식의 결정

본 연구에서는 앞서 기술한 지진피해평가시스템을 인천항만 지역에 시범적으로 적용하였으며, 지진피해평가 절차에 따라 지진 발생 시 인천항 지역의 지진피해 정도를 예측하여 평가하였다. 대상 지역은 Fig. 4와 같이 인천항을 A, B, C 구역으로 분류하여 총 22개의 지반조사 자료를 이용하였다.

이에 따라 수집한 기반자료를 바탕으로 시공조건을 고려한 평가 대상구역의 현시점 시추공별 부지조건은 Table 11과 같이 결정할 수 있다. 현행 내진설계에서 사용되는 지반분류기준(건설교통부, "내진설계기준연구 Ⅱ, 1997)에 의하면 12공의 지반조사 지점이 존재하는 A 구역은 대부분 S_C, 5공의 지반조사 지점이 각각 분포하는 B, C 구역은 대부분 S_D 지반으로 분류된다.

지진피해평가 시 Table 2와 Table 3에 제시된 9단계의 암반노두 가속도와 3개의 지진파 시간이력을 입력하여 부지응답해석 결과, 시추공별 총 27개의 지표면 최대가속도를 산정하였다. 그 후 시추공별로 단주기, 장주기, 인공지진에 따른 암반노두 가속도와 지표면 최대가속도의 상관성을 비교하였다.

Fig. 5는 A 구역의 1번 시추조사 지점, B 구역의 13번 시추조사 지점과 C 구역의 18번 시추조사 지점의 부지응답해석 결과를 보여준다. 시추지점별로 지진파형에 따라 뚜렷한 증폭 정도의 차이는 없었으나, B구역의 13번 위치는 A구역의 1번 위치와 C구역의 18번 위치에

Table 8. Seismic damage levels of gravity quay wall

	Disorder	Slip Failure	Collapse	Level
Failure Probability	< 0.5	< 0.5	< 0.5	Safe
	> 0.5	< 0.5	< 0.5	Disorder
	> 0.5	> 0.5	< 0.5	Slip Failure
	> 0.5	> 0.5	> 0.5	Collapse

Table 9. Seismic damage levels of gentry crane

	Near Collapse	Collapse	Level
Failure Probability	< 0.5	< 0.5	Safe
	> 0.5	< 0.5	Near Collapse
	> 0.5	> 0.5	Collapse

Table 10. Seismic damage levels of unreinforced concrete structure

	Slight	Moderate	Extensive	Complete	Level
Failure Probability	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	Safe
	> 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	Slight
	> 0.5	> 0.5	< 0.5	< 0.5	Moderate
	> 0.5	> 0.5	> 0.5	< 0.5	Extensive
	> 0.5	> 0.5	> 0.5	> 0.5	Complete

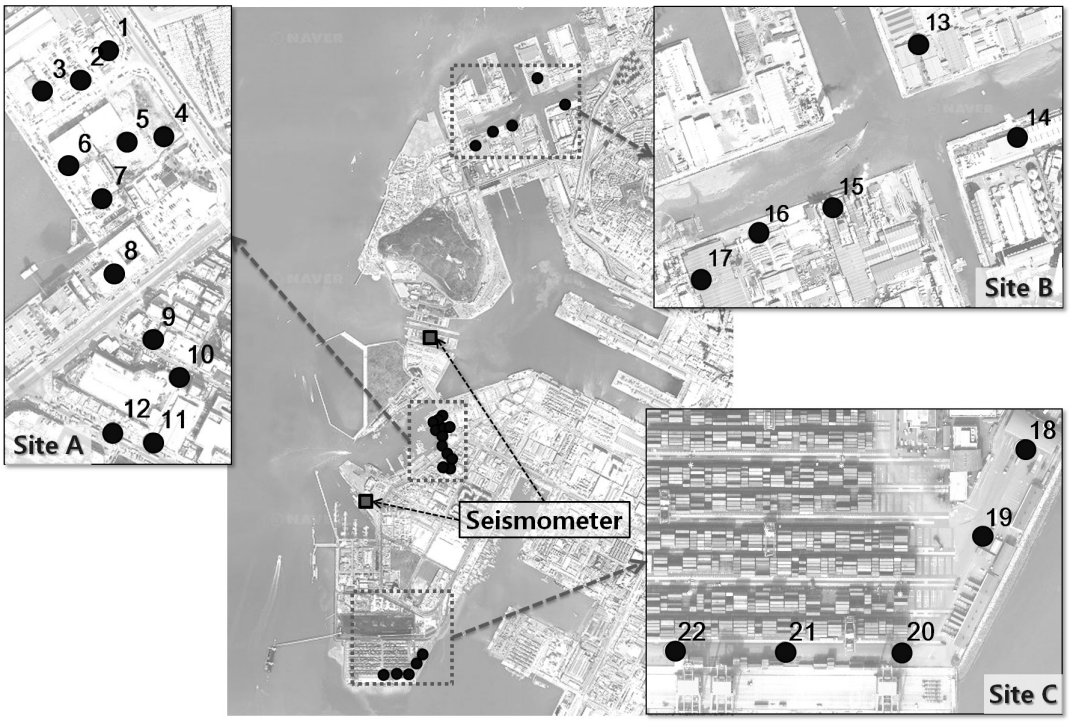


Fig. 4. Target areas (site A, B & C) of the Incheon port

비해 상대적으로 부지 진동 특성이 저진동수에 가까운 것으로 파악되는 바, Hachinohe 지진이 Ofunato 지진에 비해 전반적으로 더 큰 증폭 경향을 보였다. 이는 지점별 부지 고유 진동특성과 입력 지진 진동특성과의 상응 정도에 따른 특성적 현상이 항상 내재하고 있으며, 이러한 진동특성의 영향은 부지특성에 따라 영향이 미미한 것으로 판단되어 본 연구에서는 상관관계 결정 시 파형에 따른 영향을 고려하지 않았다.

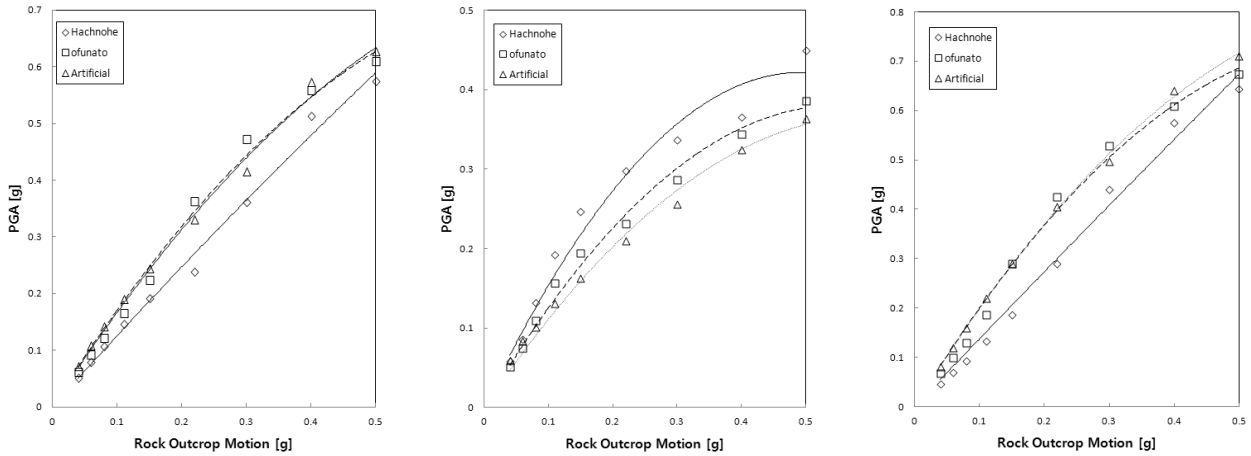
이에 따라 파형을 고려하지 않고 비선형 최적화 모델에 따른 회귀분석을 수행하여 대상구역의 시추공별 27개의 암반노두 가속도와 지표면 최대가속도 간의 관계를 나타내는 상관관계식을 결정하였다. 부지응답해석 결과 암반노두 가속도가 0인 경우 지표면 최대가속도 역시 0이 되고, 일반적으로 발생 지진하중 증가 시 증폭 효과가 감소하는 점을 고려해 식 (2)와 같이 원점을 통과하는 지수모델(exponential model) 중 box Lucas model을 기반으로 상관관계식을 결정하였으며, 시추공별 상관관계식의 계수는 Table 11에 제시하였다.

$$y = a(1 - e^{-bx}) \tag{2}$$

여기서, x는 지진 발생 시 계측된 암반노두 가속도이며, y는 상관관계식을 통해 결정된 상부 지표면에 작용하는 최대가속도이다. 이 때 a와 b는 각 시추조사 지점별 조건에 따른 상관관계식 계수로 정의되었다.

3.2 상관관계식의 적용성 검증

부지응답해석에 사용된 3가지 지진파에 근거하여 결정된 암반노두 가속도와 지표면 최대가속도 간의 상관식의 적용성을 평가하기 위해 2007년 1월 20일에 강원도 평창군 오대산 일대에서 발생한 규모 4.8의 지진을 적용하였다(Fig. 6). 오대산 지진 발생 당시 진원지 인근 대관



(a) No.1 Borehole (section A) (b) No.13 Borehole (section B) (c) No.18 Borehole (section C)

Fig. 5. Site response analysis results

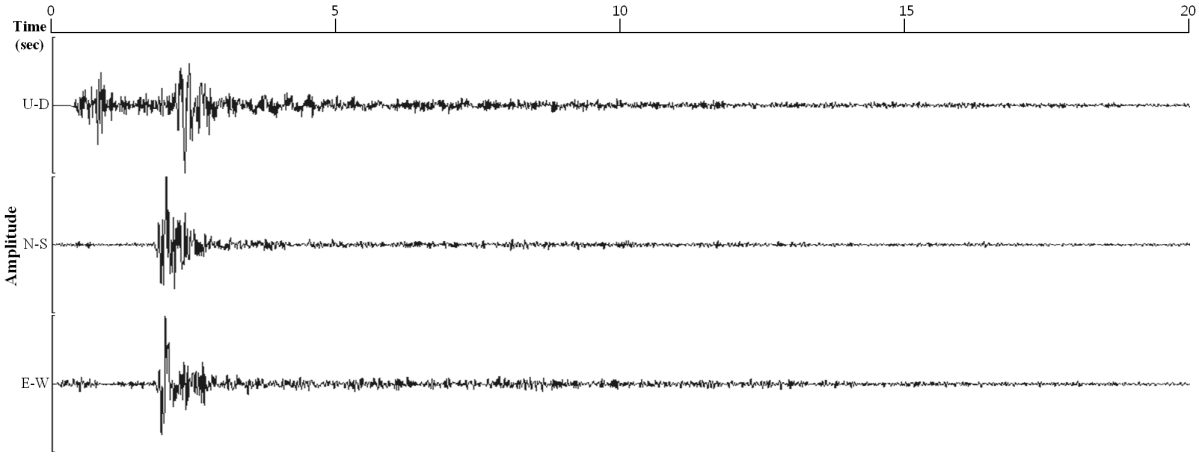


Fig. 6. The applied seismic waves monitored from Daegwalryung seismic station for verification

Table 11. Ground condition and verification results

Site	No.	Depth to bedrock(m)	Site Class	$y = a(1-e^{-bx})$			Amplification PGA (g)	Correlation PGA (g)	Response PGA (g)	Amplification −Response Error (g)	Correlation −Response Error (g)
				a	b	R^2					
A	1	11	S_C	1.40	1.17	0.97	0.223	0.273	0.263	−0.040 (−17.8%)	0.010 (3.8%)
	2	11	S_C	0.63	2.16	0.94	0.223	0.208	0.191	0.033 (14.7%)	0.018 (8.6%)
	3	12	S_C	1.09	2.50	0.96	0.223	0.405	0.403	−0.180 (−80.5%)	0.002 (0.5%)
	4	21	S_C	0.83	1.00	0.90	0.223	0.141	0.135	0.089 (39.7%)	0.007 (4.8%)
	5	14	S_C	0.65	2.24	0.95	0.223	0.222	0.219	0.004 (1.9%)	0.003 (1.5%)
	6	12	S_C	1.23	1.53	0.97	0.223	0.304	0.294	−0.071 (−31.7%)	0.010 (3.4%)
	7	19.6	S_C	1.31	1.00	0.93	0.223	0.224	0.287	−0.064 (28.7%)	−0.064 (28.5%)
	8	14	S_C	0.80	2.42	0.96	0.223	0.288	0.305	−0.082 (−36.6%)	−0.017 (−5.8%)
	9	16.5	S_C	0.69	3.07	0.98	0.223	0.299	0.302	−0.079 (−35.4%)	−0.003 (−1.0%)
	10	18	S_C	0.65	2.89	0.98	0.223	0.269	0.276	−0.052 (−23.4%)	−0.007 (−2.6%)
	11	26.2	S_D	0.61	2.79	0.93	0.268	0.246	0.265	0.003 (0.9%)	−0.020 (7.9%)
	12	24	S_C	0.65	2.72	0.94	0.223	0.257	0.245	−0.022 (−9.9%)	0.012 (4.6%)
B	13	32	S_D	0.46	3.63	0.95	0.268	0.223	0.255	0.013 (4.8%)	−0.031 (14.0%)
	14	31	S_D	0.53	3.08	0.89	0.268	0.230	0.242	0.026 (9.6%)	−0.012 (−5.4%)
	15	26.9	S_C	0.59	3.04	0.87	0.223	0.255	0.240	−0.017 (−7.6)	0.015 (5.9%)
	16	36	S_D	0.36	4.94	0.92	0.268	0.216	0.263	0.005 (1.8%)	−0.047 (−21.6%)
	17	21	S_C	0.52	3.56	0.92	0.223	0.253	0.253	−0.030 (−13.4)	0.000 (0.1%)
C	18	21.5	S_D	1.23	1.10	0.97	0.268	0.228	0.234	0.034 (12.6%)	−0.006 (−2.4%)
	19	18.8	S_D	2.43	0.45	0.91	0.268	0.196	0.201	0.067 (25.0%)	−0.005 (−10.5%)
	20	19.5	S_D	2.74	0.46	0.91	0.268	0.224	0.248	0.020 (7.4%)	−0.024 (−10.5%)
	21	17	S_D	4.46	0.28	0.95	0.268	0.227	0.246	0.022 (8.2%)	−0.019 (8.5%)
	22	13.1	S_D	3.07	0.42	0.96	0.268	0.233	0.241	0.027 (10.0%)	−0.008 (−3.6%)

령 관측소에서 계측된 암반노두 가속도는 0.186g로 계측되었으며, 이 값을 입력 암반노두 가속도로 사용하여 상관관계식에 의해 계산된 지표면 최대가속도(Correlation PGA)와 오대산 지진의 시간이력으로 직접 응답해석을 하여 결정된 지표면 최대가속도(Response PGA) 값을 비교하여 오차를 평가하였다. 또한 소방방재청의 지진재해대응시스템에서 사용되는 증폭 계수에 의한 지표면 최대가속도(Amplification PGA)와 Response PGA의 오차를 계산하고, 이를 Correlation PGA의 오차와 비교하여 상관관계식의 정확성을 평가하였으며 그 결과를 Table 11에 제시하였다.

그 결과 상관관계식에 의한 지표면 최대가속도는 직접 부지응답해석을 수행한 결과와 비교하였을 경우 평균 6.7%의 오차를, 증폭계수에 의한 지표면 최대가속도는 평균 19.2%의 오차를 보였으며 시추조사 지점에 따라 상관관계식에 의한 값이 증폭계수에 의한 값에 비해 오차 정도가 약 1～80% 정도 작게 나타났다.

3.3 가상 지진의 적용

인천항 지역의 22개 시추조사 지점에 대해 가상의 지진을 적용하여 지진피해를 평가하였다. 적용된 지진하중은 2012년 1월 24일에 인천 서남서쪽 20km 해역에서 발생한 규모 2.2의 지진으로 인천 관측소에서 계측된 암반노두 가속도 0.09g와 오대산 지진 발생 시 대관령 관측소에서 계측된 암반노두 가속도 0.186g가 인천항에 가해진 경우를 가정하여 결정하였다. 또한 동일본 대지진급(규모 9.0) 지진이 인천항에서 130km 떨어진 해저에서 발생한 경우를 가정하여 지진하중을 결정하였다. 진앙이 인천항에서 130km 떨어진 경우 인천항에서의 암반노두 가속도는 건설교통부의 "내진설계기준연구Ⅱ(1997)"에서 제시하고 있는 감쇠식을 사용하여 결정하였으며, 그 결과 인천항에 0.476g의 암반노두 가속도를 적용하였다(Table 12).

가상 지진이 발생한 경우 앞서 결정한 암반노두 가속도와 지표면 최대가속도 간의 상관관계식에 의해 지표면 최대가속도를 결정할 수 있으며, 결정된 가속도 값은 Table 13에 제시하였다. 실제 지진 발생 시에는 지진 관측소에서 계측된 암반노두 가속도 값을 네트워크상에서 제공 받아 항만 지역에 작용하는 지표면 최대가속도를 실시간으로 결정할 수 있다.

3.4 지진피해 평가

3.3절에서 계산된 암반노두 가속도와 지표면 최대가속도는 지진취약도 함수의 강도지수로 사용되어 구조물의 각 손상 단계별 파괴 확률이 계산된다. 본 연구에서는 22개 시추조사 지점의 공간 좌표상에 중력식 안벽과 겐트리 크레인, 무보강 조적 콘크리트 구조물이 존재한다고 가정하고 구조물의 파괴 확률을 계산하였다. 이

Table 12. Determination of seismic load based on the ground-motion attenuation

Formula	c_0	c_1	c_2	c_3	M	R(km)	PGA(g)
1	0.4854	1.2	−0.8416	−0.61	8.8	130	0.481
2	0.5577	1.5	−0.8587	−0.62	8.8	130	0.470
Ground−motion Attenuation: $\ln PGA = c_0 + c_1 M + c_2 \ln R + c_3 R$						Mean	0.476

감쇠식 출처: 건설교통부, "내진설계기준연구(Ⅱ)", 1997

Table 13. Seismic damage estimation results for Incheon port

Site	No.	Rock Outcrop Motion: 0.09g				Rock Outcrop Motion: 0.186g				Rock Outcrop Motion: 0.48g			
		PGA	Seismic Damage Grade			PGA	Seismic Damage Grade			PGA	Seismic Damage Grade		
			Quay Wall	Gentry Crane	Concrete Structure		Quay Wall	Gentry Crane	Concrete Structure		Quay Wall	Gentry Crane	Concrete Structure
A	1	0.140	Safe	Safe	Safe	0.273	Safe	Safe	Slight	0.601	Safe	Safe	Moderate
	2	0.111	Safe	Safe	Safe	0.208	Safe	Safe	Slight	0.406	Safe	Safe	Moderate
	3	0.219	Safe	Safe	Slight	0.405	Safe	Safe	Moderate	0.761	Safe	Near	Moderate
	4	0.072	Safe	Safe	Safe	0.141	Safe	Safe	Safe	0.317	Safe	Safe	Slight
	5	0.119	Safe	Safe	Safe	0.222	Safe	Safe	Slight	0.429	Safe	Safe	Moderate
	6	0.158	Safe	Safe	Safe	0.304	Safe	Safe	Slight	0.639	Safe	Near	Moderate
	7	0.113	Safe	Safe	Safe	0.224	Safe	Safe	Slight	0.502	Safe	Safe	Moderate
	8	0.156	Safe	Safe	Safe	0.288	Safe	Safe	Slight	0.546	Safe	Safe	Moderate
	9	0.166	Safe	Safe	Safe	0.299	Safe	Safe	Slight	0.530	Safe	Safe	Moderate
	10	0.148	Safe	Safe	Safe	0.269	Safe	Safe	Slight	0.484	Safe	Safe	Moderate
	11	0.135	Safe	Safe	Safe	0.246	Safe	Safe	Slight	0.448	Safe	Safe	Moderate
	12	0.141	Safe	Safe	Safe	0.257	Safe	Safe	Slight	0.472	Safe	Safe	Moderate
B	13	0.127	Safe	Safe	Safe	0.223	Safe	Safe	Slight	0.376	Safe	Safe	Slight
	14	0.127	Safe	Safe	Safe	0.230	Safe	Safe	Slight	0.406	Safe	Safe	Moderate
	15	0.142	Safe	Safe	Safe	0.255	Safe	Safe	Slight	0.454	Safe	Safe	Moderate
	16	0.129	Safe	Safe	Safe	0.216	Safe	Safe	Slight	0.326	Safe	Safe	Slight
	17	0.143	Safe	Safe	Safe	0.253	Safe	Safe	Slight	0.428	Safe	Safe	Moderate
C	18	0.116	Safe	Safe	Safe	0.228	Safe	Safe	Slight	0.506	Safe	Safe	Moderate
	19	0.097	Safe	Safe	Safe	0.196	Safe	Safe	Safe	0.475	Safe	Safe	Moderate
	20	0.111	Safe	Safe	Safe	0.224	Safe	Safe	Slight	0.542	Safe	Safe	Moderate
	21	0.111	Safe	Safe	Safe	0.227	Safe	Safe	Slight	0.562	Safe	Safe	Moderate
	22	0.115	Safe	Safe	Safe	0.233	Safe	Safe	Slight	0.565	Safe	Safe	Moderate

때, 상부 구조물의 종류 및 파괴 형태, 하부 지반과의 역학 관계 등에 따라 강도 지수로 사용되는 PGA 종류가 달라진다. 본 지진피해 평가 방안에서 대상으로 하는 중력식 안벽의 경우, 지진취약도 함수 결정 시에 안벽 제체 하부의 기초사석을 포함하여 수치해석을 수행하였으며, 지진발생 시 하부 기반암 가속도가 직접적으로 영향을 미치므로 암반노두 가속도를 지진취약도 함수의 강도 지수로 사용한다. 그러나 겐트리 크레인과 무보강 조적 콘크리트 구조물은 하부 지반을 통해 증폭된 지진파에 의해 구조물의 지진 피해가 발생하므로 지진취약도 함수의 강도 지수로서 지표면 최대가속도를 이용하여 파괴 확률을 계산한다.

이와 같은 평가 방법에 따라 가상 지진 발생 시 각 항만 구조물의 손상 단계별 파괴 확률과 피해 등급을 Table 13에 제시하였다.

지진피해 평가 결과 안반노두가속도 0.09g의 작용 시, 무보강 조적 콘크리트 골조의 경우 한 지점에서 'Slight' 등급의 피해가 발생하였으며, 그 외 중력식 안벽과 크레인의 경우에는 안전한 것으로 평가되었다. 또한 암반노두 가속도 0.186g의 경우 중력식 안벽과 겐트리 크레인에 손상이 발생할 정도의 하중이 작용하지 않았으나 무보강 조적 콘크리트 골조의 경우 14개 시추조사 지점에서 'Slight' 등급의 피해가 발생하였다. 동일본 대지진급의 규모 9.0의 암반노두 가속도 0.48g의 지진하중이 작용한 경우 2개 지점의 크레인에서 고정하중 시 변형률의 30%가 증가하는 'Near Collapse' 등급의 피해가 발생하였으며, 콘크리트 골조의 경우는 22개 중 19개 지점에서 'Moderate' 등급의 피해가 발생하여 대부분의 경우 약 40% 정도의 파손이 일어날 것으로 평가되었다. 중력식 안벽의 경우는 0.48g의 암반노두 가속도가 작용해도 구조물의 변위가 10cm 미만으로 안벽 기능의 수행에 이상이 발생하지 않는 것으로 평가되었다.

실제 지진 발생 시 구조물의 피해는 구조물 자체의 내진성능뿐만 아니라 포화 사질지반의 액상화나 사면의 활동 같은 지반의 파괴거동에 의해서도 영향을 받는다. 하지만 본 연구에서 평가한 지진피해 등급은 지반진동에 의한 부재 손상과 같은 구조물 자체 파괴 확률만을 고려하고 있다. 실제 항만 지역에서는 매립 지반이나 안벽의 뒷채움재가 조밀한 사질지반으로 구성된 경우가 많아서 지진 발생 시 액상화에 의한 피해 사례가 여러 연구를 통해 보고되고 있다. 액상화 발생 시 안벽의 경우 저항 하중이 감소하면서 횡하중의 증가로 인해 파괴될 수 있으며 크레인이 전도되어 파괴가 발생할 수 있다. 따라서 항만 지역의 지진피해 등급의 적용에 있어서 구조물 자체의 내진 성능에 더하여 구조물 하부 지반의 지진 발생 시 액상화 및 변위에 대한 검토가 추가로 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 항만지역의 지반 조건과 계측된 암반노두 가속도를 이용하여 지반증폭특성이 반영된 지진피해 평가 방안을 수립하였다. 먼저 입력 자료를 토대로 부지응답해석을 수행하여 대상 항만지역의 암반노두 가속도와 지표면 최대가속도의 상관관계식을 결정한다. 결정된 대상 항만의 상관관계식은 지진피해 평가 시스템 상에 DB화 되고, 지진 발생 시 계측된 암반노두 가속도를 입력받아 실시간으로 지표면 최대가속도를 결정한다. 결정된 지표면 최대가속도는 상부 구조물의 지진취약도 함수의 강도지수로 사용되며, 지진 발생 시 실시간으로 결정되는 PGA 값과 상부 구조물의 지진취약도 함수를 이용하여 항만 구조물의 지진피해 등급을 결정할 수 있다.

이 외에 구축된 지진피해평가 시스템에 가상의 지진을 적용하여 지진피해평가 과정을 예시하였다. 그 결과 동일본 지진 급의 지진 발생 시 겐트리 크레인과 무보강 조적 콘크리트 구조물에 중규모 이상의 피해가 발생할 수 있는 것으로 예측되었으며 중력식 안벽의 경우 0.476g의 암반노두 가속도에서도 기능 수행에 이상이 발생하지 않는 것으로 평가되었다. 그러나 지진 발생 시 구조물의 피해는 구조물 자체의 내진성능뿐만 아니라 지반 진동과 지반 파괴 등 복합적인 요인에 의해 결정되므로 지진피해 예측에 있어 지반의 액상화 및 변위 등 관련 영향요소에 대한 종합적인 논의가 필요하다.

본 연구에서는 항만 구조물의 공간적 위치가 시추조사 지점과 일치하는 것으로 가정하여 지진피해 예측을 수행하였으며 소수의 지반조사 자료를 이용하여 시추공별 상관관계식을 결정하였기 때문에 지진피해평가 방안에 따라 전체 인천항 지역에 대한 대표 상관관계식이나 지반 조건에 따른 상관관계식의 결정은 어렵다. 또한 본 연구에서는 중력식 안벽과 크레인에 대해 시범적으로 지진취약도 함수를 적용하였기 때문에 향후 다양한 구조물 조건에서 분석을 수행하여 표준화된 항만구조물별 지진취약도 함수 수립이 필요하다. 따라서 향후

평가대상 항만의 설계·시공 시방서와 구조물 대장 및 계산서를 수집 및 검토하여 지반의 표준단면도 및 구조물 지진취약도를 기준으로 전체 항만지역에 대한 지진하중 결정 및 지진피해평가 방안을 제안할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원이 주관하는 '항만 지진응답 계측시스템 구축 및 활용기술 개발' 사업 결과의 일부로서, 국토해양부과 서울대학교 공학연구소의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (1997), *내진설계기준 연구(II)*.
2. 국립방재연구소 (2003), *지진재해정보시스템 도입방안 연구*.
3. 국토해양부 (2005), *항만 및 어항 설계 기준*.
4. 권오순, 박우선, 윤길림 (2000), "지진으로 인한 안벽의 액상화 위험도 평가", *한국해안·해양공학회지*, 제12권, pp.28-30.
5. 김한샘, 유승훈, 장인성, 정충기 (2011), "항만지역의 지반증폭 특성을 반영한 실시간 지진피해 평가방안", *한국해양과학기술협의회 공동학술대회 발표논문집*.
6. 소방방재청 (2009), *국내 건축구조물의 지진취약도함수 개발*.
7. 윤의택, 류혁, 강태섭, 김재관, 박창업 (2005), "서울시 모델 구역 지진피해 추정 연구", *한국지진공학회논문집*, 제9권 제6호, pp. 41-52.
8. 이상호, 김봉근, 정동균 (2006), "도로교의 GIS 기반 지진피해평가체계 구축을 위한 데이터베이스 설계", *한국지진공학회논문집*, 제10권 제3호, pp.135-147.
9. 한국항만협회 (2008), *2008년 안전관리 대상 항만시설물 현황*.
10. 해양수산부 (1999), *항만 및 어항의 내진 설계 표준서*.
11. 한국해양연구원 (2011), *항만 지진응답 계측시스템 구축 및 활용기술 개발 연차실적계획서*.
12. Nakamura, Y. (1996), "Research and Development of Intelligent Earthquake Disaster Prevention System urEDAS and HERAS", *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering,* Japan Society of Civil Engineers, No.531, pp.1-33.
13. NIBS (1997), *Earthquake Loss Estimation Technology HAZUS*, Federal Emergency Management Agency, Washington D. C.
14. Werner, S. D. (1998), "Seismic Guidelines For Ports", *Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Monograph,* No.12, pp.1-17.
15. Werner, S. D., Lavoie, J. P., Eguchi, R. T., Taylor, C. E. and Moore, J. E (2003), "REDARS1: Demonstration Software for seismic Risk Analysis of Highway System", *Research Progress and Accomplishments 2001-2003*, MCEER-03-SP01, Red Jacket Quadrangle, Buffalo, New York, pp.17-23.

(접수일자 2011. 12. 30, 심사완료일 2012. 5. 8)