

## 방파제 구조물의 확률론적 지진위험도 분석 Probabilistic Seismic Risk Analysis of Breakwater Structures

김상훈\* · 이진학\*\* · 김두기\*\*\*

Sang-Hoon Kim\*, Jin-Hak Yi\*\* and Doo Kie Kim\*\*\*

**요 지 :** 방파제 구조물에 대한 기존의 내진설계 및 내진성능검토에서는 주로 설계지진에 대하여 구조물의 변위 및 응력을 검토함으로써 지진 안전성을 평가한다. 그러나 이러한 검토가 주로 결정론적 접근방법에 의한 것으로 지진의 가장 큰 특성이라 할 수 있는 불확실성을 제대로 반영하기 어렵다. 본 연구에서는 지진발생과 지반계수의 확률론적 분포 특성을 고려한 확률론적 지진위험도 평가에 대해 연구하였다. 우선 항만구조물의 지진에 대한 구조적 취약성을 다수의 지진자료를 이용하여 평가하였고, 지진재해지도를 이용하여 해당 지역에서의 지진재해도를 산정하였으며, 이들을 조합함으로써 방파제 구조물의 확률론적 지진위험도를 평가하였다.

**핵심용어 :** 방파제 구조물, 결정론적 방법, 확률론적 방법, 지진위험도 분석, 지진취약도, 지진재해도

**Abstract :** Recent earthquakes over magnitude 5 in the eastern coast of Korea have aroused interests in the earthquake analyses and seismic design of breakwater structures. Most of earthquake analysis methods such as equivalent static analysis, response spectrum analysis, nonlinear analysis, and capacity analysis methods are deterministic and have been used for seismic design and performance evaluation of breakwater structures. However, deterministic methods are difficult to reflect one of the most important characteristics of earthquakes, i.e. the uncertainty of earthquakes. This paper presents results of probabilistic seismic risk assessment(PSRA) of an actual caisson type breakwater structure considering uncertainties of earthquake occurrences and soil properties. First the seismic vulnerability of a structure and the seismic hazard of the site are evaluated using earthquake sets and seismic hazard map, and then seismic risk of the structure is assessed.

**Keywords :** breakwater structure, deterministic method, probabilistic method, seismic risk analysis, seismic fragility, seismic hazard

### 1. 서 론

최근 울진, 경주 등의 지역에서 발생한 규모 5 이상의 지진을 포함하여 여러 번의 지진이 발생하면서 지진에 관한 관심과 방파제 구조물의 실제 설계에 있어서도 지진 해석 및 내진성능 검토가 한 부분으로 정착되어 가고 있다. 방파제 구조물에 대한 기존의 내진설계 및 내진성능 검토에서는 주로 설계지진에 대하여 구조물의 변위 및 응력을 검토함으로써 지진 안전성을 평가하고 있으나, 이러한 검토가 주로 정적이거나, 혹은 구조물의 모드특성을 반

영한 응답스펙트럼해석 등에 의하여 주로 수행되고 있다(한국항만협회, 1999). 최근에는 설계응답스펙트럼을 이용하여 설계지진의 지반운동가속도를 작성하고 이로부터 비선형지진해석을 수행하여 내진성능을 검토하거나 혹은 역량스펙트럼법에 의하여 내진성능을 검토하는 경향도 있으나, 이러한 검토는 모두 결정론적인 접근방법에 의한 것으로 지진발생의 가장 큰 특성이라 할 수 있는 불확실성을 제대로 반영하기 어려운 점이 있다(권오순 등, 2002; Ghobarah and Ali, 1988). 이러한 점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 지진발생의 확률론적 특성과 지반계수의 확

\*(주)대우건설(Daewoo Engineering & Construction Co., LTD)

\*\*한국과학기술원 스마트사회기반시설물연구센터(Smart Infra-Structure Technology Center, KAIST)

\*\*\*군산대학교 토목환경공학부(Corresponding author, Department of Civil & Environmental Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 573-701, Korea. kim2kie@kunsan.ac.kr)

률론적 분포 특성을 고려한 확률론적 지진위험도 평가 (Probabilistic Seismic Risk Assessment)를 수행하였다. 우선 방파제 구조물의 지진에 대한 구조적 취약성(vulnerability)을 다수의 지진자료를 이용하여 평가하였고, 지진재해지도 (seismic hazard map)를 이용하여 울산지역에서의 지진 재해도(seismic hazard)를 산정하였으며, 이들을 조합함으로써 방파제 구조물의 확률론적 지진위험도를 평가하였다. 대수정규분포함수의 누적확률로 지진취약도(seismic fragility)를 표현하였으며, 한반도를 대상으로 작성된 지진재해지도를 이용하여 지진재해도를 산정하였다. 예제해석으로 케이슨유형 방파제 구조물 한 블록에 대하여 확률론적 지진위험도 평가를 수행하여, 일정한 사용기간 동안 케이슨이 기능수행수준인 최대변위 10 cm를 초과할 확률과 붕괴방지수준인 30 cm를 초과할 확률을 평가함으로써, 방파제 구조물의 확률론적 지진안전성을 평가하였다.

## 2. 확률론적 지진위험도 분석

### 2.1 개요

지진은 그 발생특성상 예측이 불가능한 확률론적 발생 특성을 가지고 있다. 따라서 방파제 구조물이 임의의 위치에 설치되는 경우 그 구조물이 특정한 기간 동안 지진에 의하여 기능수행수준 또는 붕괴방지수준을 초과하는 거동을 할 가능성, 즉 파괴확률(failure probability)은 그 방파제 구조물이 임의의 크기의 지진에 대한 취약성과 그러한 크기의 지진이 발생할 확률, 즉 지진재해도를 이용하여 평가할 수 있다. 이러한 파괴확률을 지진위험도(seismic risk)라 하고, 확률론적 지진위험도는 지진취약도 곡선(seismic fragility curve)과 지진재해도 곡선(seismic hazard curve)으로부터 구할 수 있다. 본 연구에서는 Shinozuka et al.(2002)이 제안한 지진취약도 분석기법과 지진재해도 분석기법을 이용하여 방파제 구조물의 지진위험도를 분석하였다(Shinozuka et. al., 2002; Kim and Shinozuka, 2004).

### 2.2 지진취약도 분석

Shinozuka et. al.(2002)이 제안한 지진취약도 분석 기법은 1) 취약도 곡선을 대수정규분포함수로 표현하며, 2) 대수정규분포함수의 두 가지 주요 계수인 중앙값과 대수 표준편차는 최우도추정법(Maximum Likelihood Estimate)으로 구한다(Devore, 1991).

손상단계를  $n$ 단계로 나누는 경우, 손상단계  $k$ 에 대한 취약도  $F_k(a)$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 구조물의 기능수행수준을 초과하는 단계를 손상단계 1로, 붕괴방지수준을 초과하는 단계를 손상단계 2로 정의하였다.

$$F_k(a) = \Phi \frac{\ln(a/c_k)}{\zeta_k} \quad (1)$$

여기서  $a$ 는 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration; PGA)를 나타내며,  $F_k(a)$ 는 표준정규분포함수의 누적확률분포이다. 이렇게 가정된 확률분포에 대한 계수  $c_k(a$ 의 중앙값)와  $\zeta_k(a$ 의 대수표준편차)는 최우도추정법을 이용하여 추정하였다.

상기한 목적으로 쓰일 Likelihood 함수는 대수정규분포함수로 가정한 식 (1)을 모든 데이터에 대해 적용시켜, 손상이 발생되었을 때에는 손상에 대한 확률  $\{F_k(a_i)\}$ 을 증가시키고 손상이 발생되지 않았을 경우에는 손상이 일어나지 않을 확률  $\{1-F_k(a_i)\}$ 을 증가시키도록 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$L = \prod_{i=1}^N [F_k(a_i)]^{x_i} [1-F_k(a_i)]^{1-x_i} \quad (2)$$

여기서  $F_k(a_i)$ 는 손상상태  $k$ 에 대한 취약도이고,  $a_i$ 는 구조물에 가해지는 지진하중의 최대지반가속도이며,  $x_i$ 는 구조물의 그 손상상태에 대한 해당여부로, 손상이 없으면 0, 손상이 있으면 1의 값을 갖는다. 또한  $N$ 은 총 입력지진의 개수를 나타낸다.

대수함수는 단조증가함수(monotonic increasing function)이므로, log-likelihood를 최대화 하는 것은 likelihood를 최대화하는 것과 동일하기 때문에 식 (2)를 식 (3)과 같이 변형시킬 수 있다.

$$\ln L = \sum_{i=1}^N [x_i \ln F_k(a_i) + (1-x_i) \ln (1-F_k(a_i))] \quad (3)$$

따라서 다음 식 (4)를 이용하면 분포함수의 주요 계수  $c_k$ 와  $\zeta_k$ 를 추정할 수 있다.

$$\frac{\partial \ln L}{\partial c_k} = 0, \quad \frac{\partial \ln L}{\partial \zeta_k} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, N_{state} \quad (4)$$

여기서  $N_{state}$ 는 총 손상단계를 의미하며, 본 연구의 경우 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 나누었으므로,  $N_{state} = 2$ 이다.

### 2.3 지진재해도 및 위험도 분석

어떤 지역에서의 설계지진 최대지반가속도를  $a_0$ 라고 하고, 최대지반가속도가  $a_0$ 를 초과하는 지진이 Poisson Process로 년중 평균 발생횟수가  $\lambda_E$ 라고 가정하자. 이 경우 고려 대상 지진의 최대지반가속도  $A_1$ 에 대한 확률분포함수  $F_{A_1}(a)$ 와 연중 최대지반가속도  $A$ 의 확률분포함수  $F_A(a)$ 는 식 (5)와 같은 관계가 있다(Ang and Tang, 1975).

$$F_A(a) = \exp[-\lambda_E\{1 - F_{A_1}(a)\}] \quad (5)$$

여기서  $F_{A_1}(a)$ 는  $A_1$ 이  $a$ 미만인 확률분포함수를 나타내며,  $\lambda_E$ 는  $a_0$  이상의 최대지반가속도를 갖는 지진의 연평균 발생횟수(annual mean occurrences)이다.  $a_0$ 를 구조물에 손상을 줄 수 있는 최소 지반가속도라고 할 때,  $F_{A_1}(a_0)=0$ 이고 지진의 발생을 Poisson Process로 가정할 때, 연평균 발생횟수  $\lambda_E$ 는 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_E = -\ln F_A(a_0) \quad (6)$$

여기서  $F_A(a_0)$ 를 FT(Fisher-Tippeter) Type II의 극치분포로 가정하면, 식 (7)과 같다.

$$F_A(a_0) = \exp\left\{-\left(\frac{a_0}{u}\right)^{-\alpha}\right\} \quad (7)$$

통상 지진재해도도는 해당지역에서 발생할 수 있는 최대지반가속도에 대하여 여러 재현기간 또는 몇 년간 초과확률의 형태로 주어지므로, 이를 활용하면 식 (7)의 계수  $\alpha$ 와  $u$ 를 구할 수 있다. 또한, 식 (8)을 사용하면 연평균 발생횟수  $\lambda_E$ 를 계산할 수 있다.

$$\lambda_E = -\ln F_A(a_0) = \left(\frac{a_0}{u}\right)^{-\alpha} \quad (8)$$

식 (5)와 (6)을 조합하면, 지진의 확률분포함수  $F_{A_1}(a_0)$ 는 다음과 같다.

$$F_{A_1}(a) = 1 + \frac{1}{\lambda_E} \ln F_A(a) = 1 - \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-\alpha} \quad (9)$$

따라서 지진  $A_1$ 의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f_{A_1}(a) = \frac{dF_{A_1}(a)}{da} = \left(\frac{\alpha}{a_0}\right) \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-\alpha-1} \quad (10)$$

이를 지진발생시 손상확률을 나타내는 지진취약도 곡선  $F_k(a)$ 와 결합하면, 식 (11)과 같이 1회 지진 발생시의 지진위험도를 산정할 수 있다.

$$p_f^c = \int_{a_0}^{a^{max}} F_k(a) f_{A_1}(a) da \quad (11)$$

최종적으로 구조물의 사용기간  $n$ 년 동안의 지진위험도, 즉 지진에 의한 구조물의 손상발생확률은 식 (12)을 통해 구할 수 있다.

$$p_f^{n,year} = 1 - \exp(-n\lambda_E p_f^c) \quad (12)$$

### 3. 부지응답해석

방과제 구조물의 내진해석에 있어 지반을 따로 모델링하지 않고 구조물만을 모델링 하는 경우에는 구조물 하단에서의 지반운동을 결정하는데 있어, 지진의 지반증폭을 고려하는 것이 매우 중요하다. 지진발생시 지반가속도는 다음의 Fig. 1(a)와 같이 암반노두에서의 거동(Rock Outcrop Motion), 기반암 거동(Bed Rock Motion), 지표면 거동(Surface Motion)의 세 가지로 분류할 수 있다. 설계지진에서 정의되는 지반가속도, 혹은 지진재해도에서 정의되는 지반가속도는 모두 암반노두에서의 거동이다. 따라서 본 연구에서는 암반노두 거동에 근거하여 작성된 인공지진 및 역사적으로 발생된 지진에 대하여 지반증폭 효과가 고려된 구조물 하단에서의 거동을 부지응답해석을 통해 구하였다.

암반 내 단층으로부터 발생한 지진파는 암반 및 지반을 통해 전파가 이루어진다. 이러한 전파가 이루어지는 과정에서 지층을 통과한 지진파의 크기와 주파수 대역이 변하여 지표면에 도달하게 된다. 따라서 부지응답특성 평가는 지반의 종류 및 지층구조에 따른 지진파의 전파특성을 고려한 설계응답 스펙트럼의 작성, 지진 발생시 액상화 평가를 위한 지반의 변형율-전단응력의 예측, 그리고 지진 발생시 지반 구조물의 내진설계를 위한 동적하중의 산정을 위해 수행되어진다. 이를 위한 해석 방법으로 지난 수십 여 년 간 부지응답특성 평가를 위한 여러 해석 방법이 개발되었다(Kramer, 1996).

현재 사용 중인 여러 부지응답해석 기법 중 가장 널리 사용되어지는 방법 중에 하나는 1차원 부지응답특성 평가 기법이다. 이 기법은 지반을 구성하고 있는 모든 지층의 경계가 반무한-수평이고 지반의 응답이 주로 기반암으로부터 연직 방향으로 전파되는 SH파에 의해 이루어진다고 가정하고 해석하는 방법이다. 일반적으로 지진 발생시 지진 거동이 계측 가능한 위치는 암반노두에서의 계측값과 지표면에서의 계측값이다. 암반노두에서의 계측값을 이

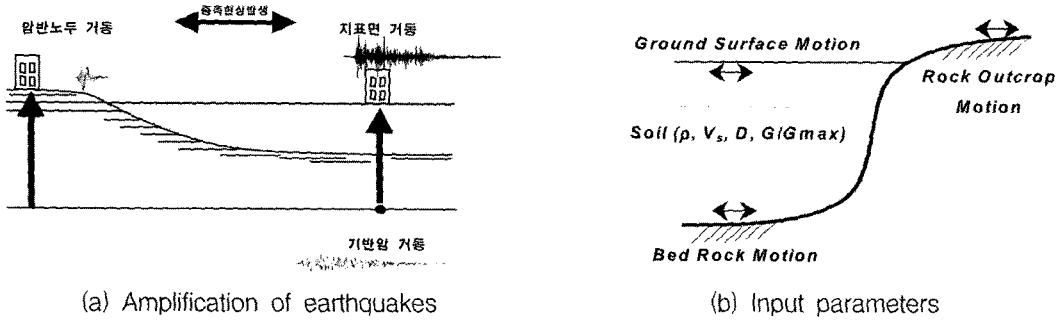


Fig. 1. Free field analysis.

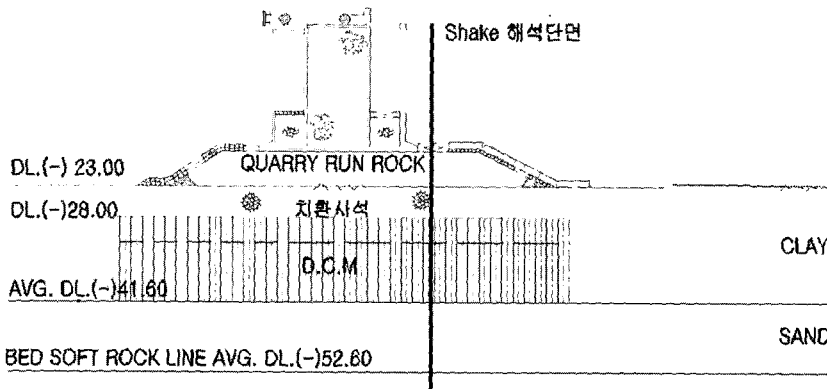


Fig. 2. Soil profile for free field analyses.

용하여 기반암에서의 지진 거동을 예측한 후 이를 이용하여 1차원 부지응답특성 평가를 통하여 지표면에서의 지진거동을 예측하고 이를 노두 인근 지역에서 계측되어진 지표면 실제 계측값과 비교하는 방법으로 1차원 부지응답특성 평가 방법의 타당성이 검증되어져 왔다. 대표적인 1차원 등가선형 부지응답특성 평가 프로그램으로는 SHAKE91이 있다(Idriss and Sun, 1992).

본 연구에서는 설계지진계수 산정 및 부지응답해석을 위해 SHAKE91을 사용하였으며, 이 경우 지반의 층상구조를 나타내는 변수로는 Fig. 1(b)와 같이 단위밀도  $\rho$ (또는 단위중량), 전단파 속도  $V_s$ , 감쇠비  $D$ , 그리고  $G/G_{max}$ 를 사용한다. 이때 변형률에 대한  $G/G_{max}$  및 감쇠비의 변화를 비선형 변형 특성으로 이용하였다(Rechart et. al., 1970). 해석에 사용한 지반 단면은 Fig. 2과 같다.

#### 4. 지진재해도 분석

##### 4.1 인공지진작성

구조물의 지진에 대한 지진취약도 곡선은 구조물의 비

선형성 뿐만 아니라 지반의 불확실성에 관련되어 있어, 소수의 입력지진자료에 대한 결과만으로 합리적인 지진취약도 곡선을 구하는 것은 매우 어려우며, 일반적으로 충분한 수의 입력지진자료에 대하여 비선형지진해석을 수행하고, 그 결과를 이용하여 확률론적으로 지진취약도를 구한다. 그러나 본 연구에서는 사용한 대상 방파제 구조물의 경우 비선형 모델링이 매우 어려울 뿐만 아니라 지진 발생시의 대부분의 거동이 지반에서 일어나고 방파제 구조물의 경우 상대적으로 작은 탄성변형을 일으키기 때문에 비선형지반해석을 수행함으로써 지진의 증폭을 고려하고, 지반 물성치의 불확실성을 추가적으로 고려함으로써 구조물은 선형거동을 하는 것으로 보더라도 충분한 해석을 수행할 수 있을 것으로 판단하였다. 건설교통부에서 1997년에 발행한 “내진설계기준연구(II)”에서 밝힌 바와 같이 이러한 확률론적 지진성능 평가와 관련하여 여러 지진자료가 필요한 경우 계측된 지진자료를 사용하는 것이 가장 바람직하다고 할 수 있으나, 계측지진자료가 부족한 국내 상황에서는 다른 지역에서 발생한 지진 혹은 설계응답스펙트럼을 만족하는 지진자료를 이용하여 확률론적 지진성

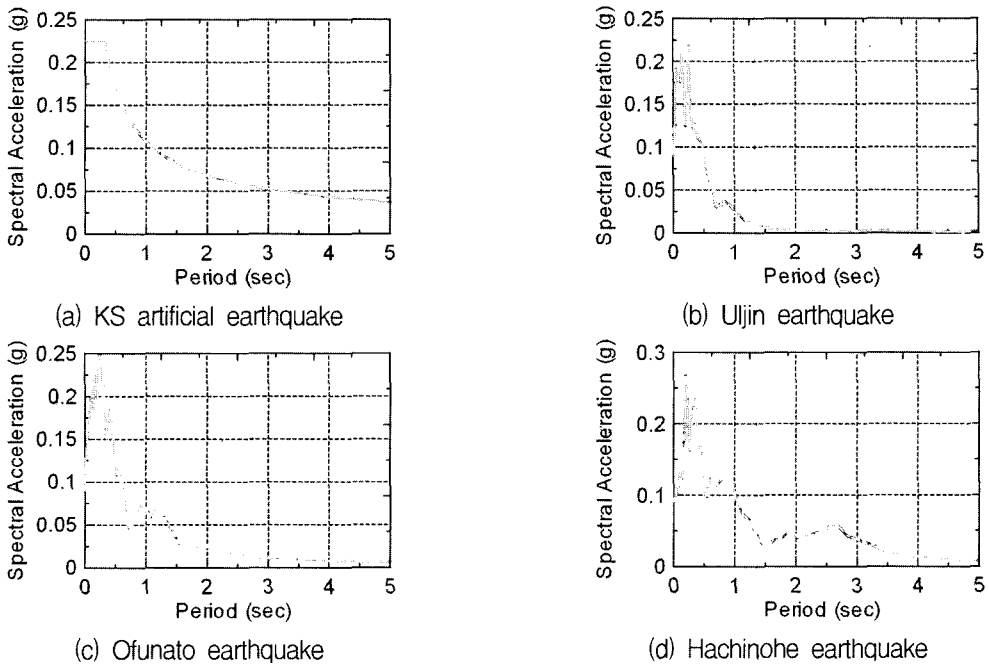


Fig. 3. Response spectrum on outcrop.

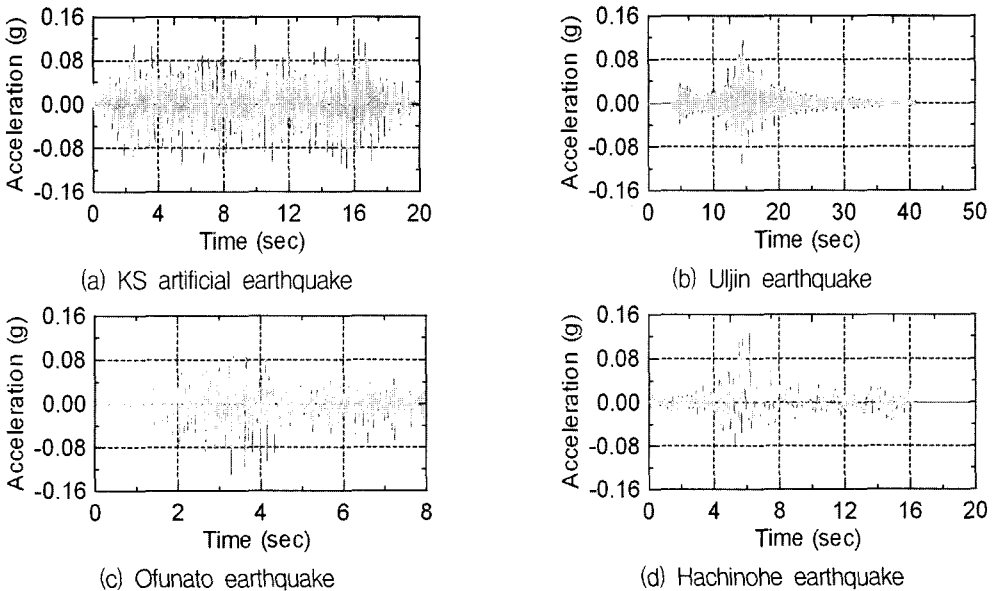


Fig. 4. Earthquakes for fragility analysis.

능 평가를 수행하는 것이 합리적인 대안이 될 수 있을 것이다(한국지진공학회, 1997). 본 연구에서는 확률론적 구조물의 지진취약도 분석을 위하여 국내 설계응답스펙트럼을 만족하는 KS 지진, 최근 국내에서 발생하여 충격을 던져준 울진지진, 그리고 특정한 주파수 특성을 가지고 있

어 국내 구조물 내진설계 검토에서 많이 활용되고 있는 Ofunato 지진과 Hachinohe 지진을 기본으로 하여 암반노두에서 0.1 g~1.0 g 사이의 최대지반가속도를 균등분포로 갖는 100개의 입력지진을 작성하였으며, 그 지진에 대하여 지반특성을 고려한 지반증폭해석을 통하여 방파제가 건

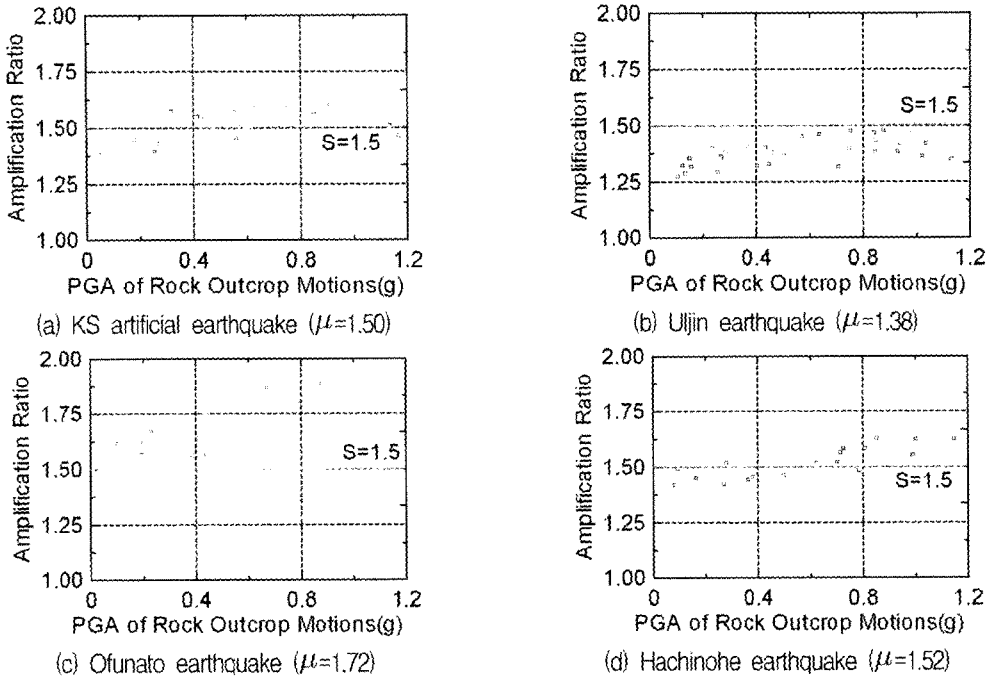


Fig. 5. Amplification of ground motions (mean amplification factor,  $\mu_r=1.51$ ).

설되는 현장에서의 지표면 지반운동을 산정하였다. Fig. 3은 보통암을 기준으로 작성한 표준응답스펙트럼이며, Fig. 4는 지진취약도 분석을 위하여 사용된 기본 지진파형의 증폭결과를, 그리고 Fig. 5는 100개의 암반노두에서의 지반운동에 대하여 지층의 전단파속도의 불확실성을 고려하여 지반증폭해석을 수행함으로써 산정한 지표면에서의 지반운동 사이의 최대지반가속도 증폭비를 보여준 결과이다.

4.2 유한요소 모델링

전 절에서 생성한 증폭된 지진을 사용하여 방파제 구조물에 대해 시간이력해석을 실시하였다. 방파제 구조물의 경우 벽체식 구조물로서 3차원 효과를 고려하는 것이 타당하나, 3차원으로 구조물을 모델링 하는 경우 유체 또는 지반효과를 합리적으로 고려하는 것이 매우 어려우므로, 본 연구에서는 구조물과 내부사석의 효과만을 8313개의 고체요소를 사용하여 모델링 하였으며, 유체의 영향은 무시하였다. 또한 지반의 효과는 다음의 두 가지 방법으로 처리하였다. 우선 지반을 전파하는 동안 증폭되는 지진의 효과는 1차원 부지응답해석을 통하여 케이스 구조물의 밑면에 전달되는 지진을 구한 후, 이를 입력지진으로 사용하였다. 또한 탄성지반의 효과는 지반의 탄성계수

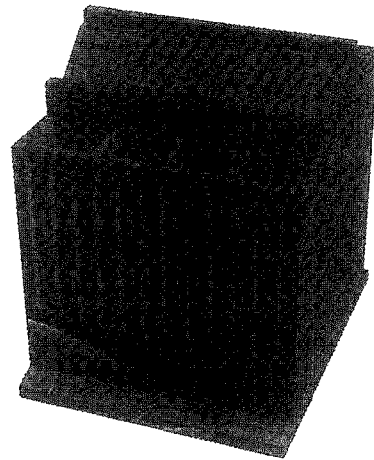


Fig. 6. Finite element model of a breakwater structure.

와 깊이를 고려하여 등가의 지반스프링으로 모델링 하여 구조물의 바다에 경계조건으로 사용하였다(Rechart et al., 1970). 해석은 SAP2000(2002)을 이용하여 수행하였으며, Fig. 6과 Table 1에 유한요소 모델링과 모드해석결과를 나타냈다.

지진취약도는 대수정규분포함수로 표현하였으며, 중간값 및 대수표준편차는 최우도추정법을 이용하여 추정하였

**Table 1.** Fundamental natural frequencies of a breakwater structure

모드종류	모드	고유주파수(Hz)
강체운동모드 (지반영향)	방파제 축방향	1.635
	방파제 축직각방향	1.847
	수직방향	4.469
탄성변형모드	비틀림 모드	6.365
	전면부 국부변형모드	8.361
	전면부 국부변형모드	10.136

고, Fig. 7에 각각 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대한 지진취약도 분석결과를 나타냈다. 지진취약도에서 실선으로 표시된 것은 지진취약도 곡선을 보여주고 있는 것이며, x는 100개 지진에 대하여 연성도가 지진손상 조건에 해당되는 지의 여부를 나타내고 있다. 기능수행수준의 경우 지진의 최대지반가속도가 작은 경우 모두 0으로, 최대지반가속도가 어느 정도 이하일 경우에는 손상가능성이 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 0.4 g에서 0.8 g사이의 지진에 대해서는 경우에 따라서 기능수행수준 이상의 변위가 발생할 수도 있고, 경우에 따라서는 발생하지 않을 수도 있음을 결과로부터 알 수 있다. 기능수행수준 및 붕괴방지수준 이상의 변위가 발생할 가능성이 50%인 지진은 각각 0.61 g와 1.2 g 이었다.

**4.3 지진위험도 분석**

확률론적 지진위험도 평가를 위해서는 지진에 대한 구조물의 취약성을 나타내는 지진취약도와 함께 그 대상지역에서의 지진발생확률을 의미하는 지진재해도가 필요하다. 즉, 같은 구조물의 내진성능을 보유하고 있는 구조물이더라도 대상지역에 따라 위험도가 달리 평가될 수 있다. 현재 대상구조물이 위치하게 될 지역에서의 지진재해도를 한 번도를 대상으로 주어져 있는 지진재해지도(seismic hazard

map)를 바탕으로 구할 수 있다. 지진재해지도는 일반적으로 해당 지역에 발생한 역사지진을 통계처리하여 분석하게 되는데, 이러한 지진재해지도는 주로 지진의 재현기간  $T$  또는 일정기간 동안의 초과발생확률(exceedance probability)을 갖는 지진의 최대지반가속도를 지도위에 표시한 것으로서, 지진재해지도로부터 재현기간 및 해당 재현기간을 갖는 지진의 최대지반가속도를 읽을 수 있다. 본 연구에서는 항만 및 어항설계기준(1999)의 5년 및 10년, 20년, 50년, 100년, 250년, 1000년 동안 발생확률이 10%인 지진재해지도를 사용하여 울산지역에서의 최대지반가속도를 구하였다.

지진재해지도에서 지진의 재현기간은 다음과 같이 구할 수 있다. 즉, 년 동안의 발생확률을 이라 할 때, 1년 동안의 발생확률은 다음 식 (13)과 같이 구할 수 있다.

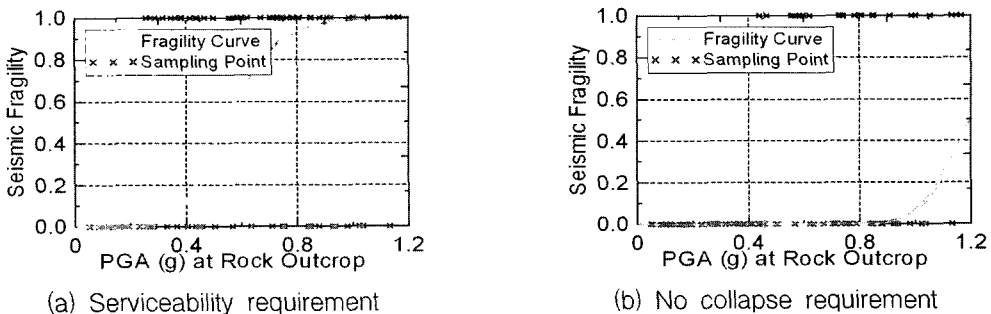
$$PE_1 = 1 - (1 - PE_N)^{1/N} \tag{13}$$

결국 재현기간은 이러한  $PE_1$ 의 역수를 취함으로써 구할 수 있기 때문에 다음 식 (14)와 같이 지진의 재현기간을 구할 수 있게 된다.

$$T = 1/PE_1 \tag{14}$$

위의 관계를 이용하여 5년 동안 발생확률이 10%인 지진의 1년 동안 발생확률과 재현기간을 구해보면  $PE_1 = 0.0209$ ,  $T = 47.95$ 년이다(Fig. 8). 여기서 재현기간이 47.95년이 계산되는데 편의상 50년 평균재현기간을 갖는 지진으로 고려하고 있다. 위의 계산과정을 거쳐서 7개의 지진재해지도의 재현기간을 구해보면 50년, 100년, 200년, 500년, 1000년, 2400년, 4800년으로 편의상 고려할 수 있다.

지진재해지도로부터 해당지역에 대하여 초과발생확률과



**Fig. 7.** Fragility curves.

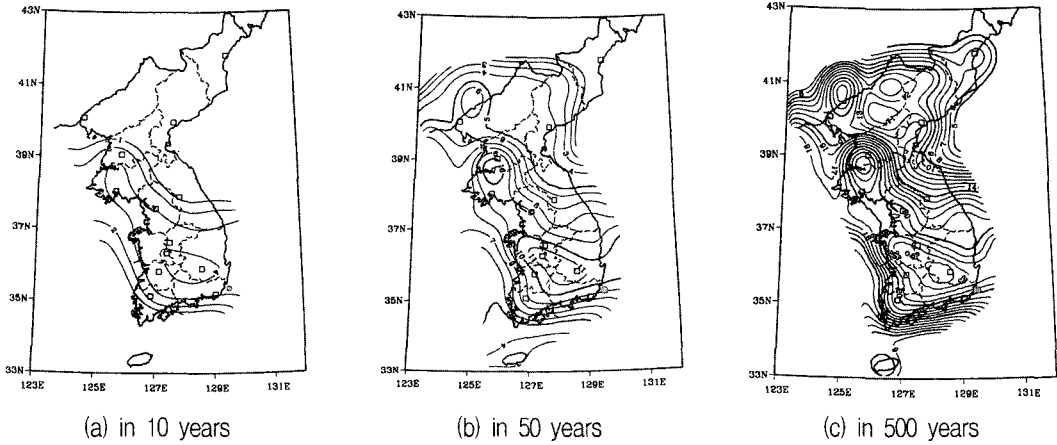


Fig. 8. Peak acceleration with 10% probability of exceedance on Seismic hazard map (%g).

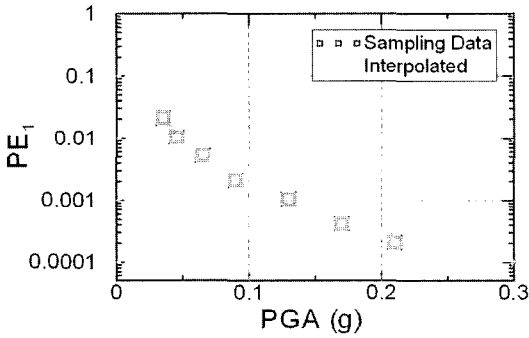


Fig. 9. Annual maximum PGA(A) and exceedance probability( $F_A(a)$ ).

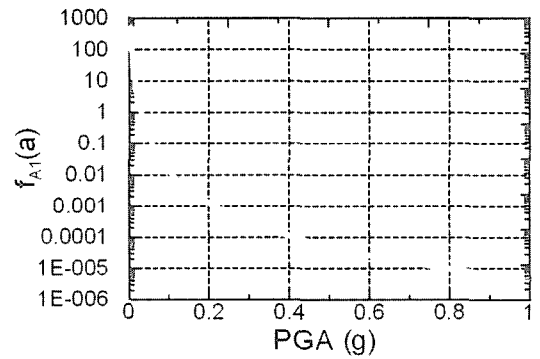


Fig. 10. Seismic hazard.

해당하는 지진의 최대지반가속도 값을 구한 후, 연간최대 지반가속도에 따른 초과발생확률을 회귀분석을 통하여 FT Type II 극치분포의 확률상수를 Fig. 9와 같이 추정할 수 있다. FT Type II 극치분포는 식(7)의 양변에 대수를 두 번 취하여 수립된 선형관계식을 이용하여 지진재해도 곡선과 관련된 상수를 결정할 수 있다( $\alpha=2.49227$ ,  $u=0.00757$ ,  $\lambda_E=2.81005$ ).

한편 Poisson Process로 가정된 지진발생에 대하여 연간 최대의 최대지반가속도(A)와 한번 발생한 지진의 최대 지반가속도( $A_1$ ) 사이의 관계를 찾기 위해서는 연간발생횟수인  $\lambda_E$ 가 필요하며, 이를 결정하기 위해서는 지진으로 고려할 수 있는 최소의 최대지반가속도  $a_0$ 를 정하여야 한다. 본 연구에서는  $a_0$ 를 충분히 작게 고려하여,  $a_0=0.05g$ 로 결정하였다. 그리고 그 값을 근간으로 하여 식(8)을 이용하여  $\lambda_E$ 를 결정하면  $\lambda_E=2.0440$ 으로 평가할 수 있다. 따라서 한번 발생하는 지진의 최대지반가속도에 대한 확률분

Table 2. Results of seismic risk analyses

기간	기능수행수준 초과확률(%)	붕괴방지수준 초과확률(%)
1회	$6.21 \times 10^{-4}$	$1.60 \times 10^{-6}$
20년	0.0349	0.0001
50년	0.0871	0.0002
100년	0.1742	0.0004
200년	0.3481	0.0009
500년	0.8681	0.0022

포함수 및 확률밀도함수를 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다. Fig. 10은 최종 결과물인 지진재해도로 한 번 발생한 지진의 최대지반가속도( $A_1$ )에 대한 확률밀도함수를 나타내고, 이를 사용하여 지진위험도를 산정하였다.

앞서 산정한 지진재해도와 구조물의 지진취약도를 결합하여 식(11)과 같이 한 번의 지진 발생에 대한 구조물의 지진위험도( $p_j^c$ )를 평가할 수 있다. 위의 결과를 이용하여 구조물의 사용기간 년 동안의 지진위험도, 즉 지진



에 의한 구조물의 손상발생확률( $p_f^{n_{year}}$ )을 식 (12)를 통해 얻을 수 있다. 사용기간에 따른 지진위험도 분석결과를 Table 2에 제시하였다. 보통손상에 대한 지진취약도 분석 결과, 중간값이 1.0 g 부근에 위치하고 있어, 한반도의 지진발생 상황을 고려할 때 무시하여도 무방할 것으로 판단되었다.

## 감사의 글

본 연구는 군산대학교 지방대학 혁신역량 강화사업 (NURI) 건설교육혁신사업단의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 지진발생의 확률론적 특성과 지반계수의 확률론적 분포 특성을 고려한 확률론적 지진위험도 평가에 대해 연구하였으며, 방파제 구조물의 지진에 대한 구조적 취약성을 다수의 지진자료를 이용하여 평가한 후, 지진재해지도를 이용하여 해당 지역에서의 지진재해도를 산정하였다. 본 연구에서 제시한 지진위험도 분석법은 향후 파랑하중의 고려 등을 통해 방파제 구조물의 내진 해석 및 평가에 좀 더 현실적으로 적용될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

권오순, 장인성, 박우선 (2002). 경사말뚝이 있는 잔교식 안벽의 내진 성능 평가. 한국해안·해양공학 2002년 발표

논문집, 13, 92-99.

김상훈, 김두기, 서형렬, 김종인 (2004). 내진보강된 콘크리트 교량의 손상도 곡선. 한국구조물진단학회논문집. 한국구조물진단학회, 8(1), 203-210.

한국지진공학회 (1997). 내진설계기준연구(II). 건설교통부.

한국항만협회 (1999). 항만 및 어항설계기준. 해양수산부.

Ang, A.H.S., Tang, W.H. (1975). Probability concepts in engineering planning and design. John Wiley & Sons.

Devore, J.L. (1991). Probability and statics for engineering and the sciences. Brooks/Cole.

Ghobarah, A., Ali, H. M. (1988). Seismic performance of highway bridges. Engineering Structures, 10, 157-166.

Idriss, I. M., Sun, J. I. (1992). Use's Manual for SHAKE91: Center for Geotechnical Modeling. Department of civil and Environmental Engineering, University of California.

Kim, S.H., Shinozuka, M. (2004). Development of fragility curves of bridges retrofitted by column jacketing. Probabilistic Engineering Mechanics, 19(1/2), 105-112.

Kramer, S.L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. Prentice-Hall.

Rechart, F.E., Woods, R.D. and Hall, J.R. (1970). Vibrations of soils and foundations. Prentice-Hall.

SAP2000 v.7.44. (2002). User Manual. Computer and Structure. CA, USA.

Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H.K. and Ueda, T. (2002). Statistical Analysis of Fragility Curves. Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, NY, USA.

Received December 6, 2004

Accepted March 11, 2005