

케이슨 방파제의 확률론적 지진재해도 평가

김상훈* · 김두기**

*(주)대우건설 구조설계팀 차장

**군산대학교 토목환경공학부 조교수

Probabilistic Seismic Hazard Analysis of Caisson-Type Breakwaters

SANG-HOON KIM* AND DOO-KIE KIM**

*Daewoo Engineering and Construction Co., Ltd, Seoul, Korea

**Department of Civil and Environmental Engineering, Kunsan National University, Gunsan, Korea

KEY WORDS: Caisson-Type Breakwater 케이슨 방파제, Probabilistic Theory 확률론, Deterministic Theory 결정론, Seismic Risk Analysis 지진위험도 분석, Seismic Fragility 지진취약도, Seismic Hazard 지진재해도

ABSTRACT: Recent earthquakes, measuring over a magnitude of 5.0, on the eastern coast of Korea, have aroused interest in earthquake analyses and the seismic design of caisson-type breakwaters. Most earthquake analysis methods, such as equivalent static analysis, response spectrum analysis, nonlinear analysis, and capacity analysis, are deterministic and have been used for seismic design and performance evaluation of coastal structures. However, deterministic methods are difficult for reflecting on one of the most important characteristics of earthquakes, i.e. the uncertainty of earthquakes. This paper presents results of probabilistic seismic hazard assessment(PSHA) of an actual caisson-type breakwater, 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 a seismic hazard map; then, the seismic risk of the structure is assessed.

1. 서 론

최근 울진, 경주 등의 지역에서 발생한 규모 5 이상의 지진을 포함하여 여러 번의 지진이 발생하면서 지진에 관한 관심과 항만구조물의 실제 설계에 있어서도 지진해석 및 내진성능 검토가 한 부분으로 정착되어 가고 있다. 항만구조물에 대한 기존의 내진설계 및 내진성능검토에서는 주로 설계지진에 대하여 구조물의 변위 및 응력을 검토함으로써 지진 안전성을 평가하고 있으나, 이러한 검토가 주로 정적이거나, 혹은 구조물의 모드특성을 반영한 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 결정론적(deterministic)인 접근방법에 의한 것으로 지진발생의 가장 큰 특성이라 할 수 있는 불확실성(uncertainty)을 제대로 반영하기 어려운 점이 있다(권오순 등, 2002; Ghobarah and Ali, 1988).

이러한 점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 지진발생의 확률론적 특성과 지반계수의 확률론적 분포 특성을 고려한 확률론적

지진재해도 평가(Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA)를 수행하였다. 우선 케이슨 방파제의 지진에 대한 구조적 취약성(vulnerability)을 다수의 지진자료를 이용하여 평가하에서의 지진재해도(seismic hazard)를 산정하였으며, 이들을 조합함으로써 케이슨 방파제의 확률론적 지진재해도를 평가하였다. 대수정 구분포함수의 누적확률로 지진취약도(seismic fragility)를 표현하였으며, 한반도를 대상으로 작성된 지진재해지도를 이용하여 지진재해도를 산정하였다. 예제해석으로 케이슨 방파제 한 블록에 대하여 PSHA를 평가하여, 일정한 사용기간 동안 케이슨 방파제가 기능수행수준인 최대변위 10cm를 초과할 확률과 붕괴방지수준인 30cm를 초과할 확률을 평가함으로써, 케이슨 방파제의 확률론적 지진안전성을 평가하였다.

2. 확률론적 지진재해도

2.1 개요

지진은 그 발생특성상 예측이 불가능한 확률론적 발생특성을 가지고 있다. 따라서 항만구조물이 임의의 위치에 설치되는 경우 그 구조물이 특정한 기간 동안 지진에 의하여 기능수행수준 또는 붕괴방지수준을 초과하는 거동을 할 가능성, 즉 파괴확률(failure probability)은 그 케이슨 방파제가 임의의 크기의 지진에 대한 취약성(fragility)과 그러한 크기의 지진이 발생할 확률을 이용하여 평가할 수 있다. 이러한 파괴확률을 지진재해도(seismic hazard)라고 하고, 확률론적 지진재해도는 지진취약도

제1저자 김상훈 연락처: 서울시 광진구 구의3동 611

011-9939-0086 ksh1210@chol.com

곡선(seismic fragility curve)와 지진재해도 곡선(seismic hazard curve)으로부터 구할 수 있다. 본 연구에서는 Shinozuka 등이 제안한 지진취약도 분석기법과 지진재해도 분석기법을 이용하여 케이스 방파제의 지진재해도를 분석하였다(Shinozuka et al. 2002; Kim and Shinozuka, 2004).

2.2 지진취약도

Shinozuka 등이 제안한 지진취약도 분석 기법은 1) 취약도 곡선을 대수정규분포함수로 표현하며, 2) 대수정규분포함수의 두 가지 주요 계수인 중앙값과 대수표준편차는 Maximum Likelihood Estimate로 구한다(김상훈 등, 2004; Devore, 1991).

손상단계를 N단계로 나누는 경우, 손상단계 k에 대한 취약도 $F_k(a)$ 는 다음과 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 a는 최대지반가속도를 나타내며, $F_k(a)$ 는 표준정규분포함수의 누적확률분포이다. 이렇게 가정된 확률분포에 대한 계수(c_k, ζ_k)를 Maximum Likelihood Estimate를 이용하여 추정하였다.

상기한 목적으로 쓰일 Likelihood 함수는 대수정규분포함수로 가정된 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 $F_k()$ 는 손상상태 k에 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 N은 총 입력지진의 개수를 나타낸다.

대수함수는 단조함수(monotonic function)이므로, log-likelihood를 최대화 하는 것은 likelihood를 최대화 하는 것과 동일하다. 즉, 다음과 같은 최적화 문제로 고려할 수 있으며, 본 연구에서는 기존 민감도 방법을 이용하여 아래의 문제를 해결하였다.

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

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

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

2.3 지진재해도

어떤 지역에서의 설계지진 PGA(최대지반가속도, Peak Ground Acceleration)를 a_0 라고 하고, PGA가 a_0 를 초과하는 지진이 Poisson Process로 연중 평균 발생횟수가 λ_E 라고 가정하자. 이 경우 고려 대상 지진의 최대지반가속도 A_1 에 대한 확률분포함수 $F_{A_1}(a)$ 는 연중 최대지반가속도 A의 확률분포함수 $F_A(a)$ 와 는 다음과 같은 관계가 있다(Ang and Tang, 1975).

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

여기서 $F_{A_1}(a)$ 는 A_1 이 a 미만인 확률분포함수를 나타내며 ($Prob[A_1 \leq a]$), λ_E 는 a_0 이상의 PGA를 갖는(즉, $A_1 > a_0$ 인) 지진의 연간 발생횟수이다. a_0 를 구조물에 손상을 줄 수 있는 최소 PGA라고 할 때, $F_{A_1}(a_0) = 0$ 이고 지진의 발생을 Poisson Process로 가정할 때, 연평균 발생횟수 λ_E 는 아래와 같이 구할 수 있다.

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

여기서 $F_A(a_0)$ 를 Type II의 극한분포(probabilistic distribution of extremes)로 가정하면, 다음과 같다.

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

통상 지진재해지도는 해당지역에서 발생할 수 있는 최대지반가속도에 대하여 여러 재현주기 또는 몇 년간 초과확률의 형태로 주어지므로, 이를 활용하면 식 (7)의 계수 α 와 u 를 구할 수 있다. 또한, 다음 식을 사용하면 연평균 발생횟수 λ_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 확률분포 함수 $F_{A_1}(a)$ 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, 다음과 같이 한 번의 지진 발생에 대한 위험도를 산정할 수 있다.

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

최종적으로 구조물의 사용기간 n 년 동안의 지진위험도, 즉 지진에 의한 구조물의 손상발생확률을 다음 식을 통해 구할 수 있다.

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

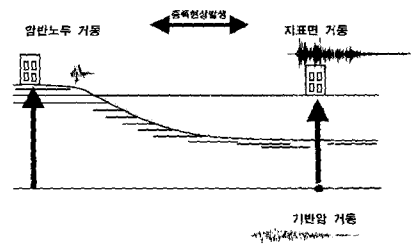
3. 자유장 응답해석

항만구조물의 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 암반 노두에서의 거동(Rock Outcrop Motion), 기반암 거동(Bed Rock Motion), 지표면 거동(Surface Motion)의 세 가지로 분류할 수 있다. 설계지진에서 정의되는 지반가속도, 혹은 지진재해지도에서 정의되는 지반가속도는 모두 암반노두에서의 거동이다. 따라서 본 연구에서는 암반노두 거동에 근거하여 작성된 인공지진 및 역사지진에 대하여 지반증폭 효과가 고려된 구조물 하단에서의 거동을 자유장응답해석(free field analysis, 부지응답해석)을 통해 구하였다.

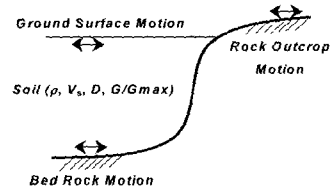
암반 내 단층으로부터 발생한 지진파는 암반 및 지반을 통해 전파가 이루어진다. 이러한 전파가 이루어지는 과정에서 지층을 통과한 지진파의 크기와 주파수 대역이 변하여 지표면에 도달하게 된다. 따라서 부지 응답특성 평가는 지반의 종류 및 지층구조에 따른 지진파의 전파특성을 고려한 설계응답 스펙트럼의 작성, 지진 발생시 액상화 평가를 위한 지반의 변형을 전단응력의 예측, 그리고 지진 발생시 지반 구조물의 내진설계를 위한 동적 하중의 산정을 위해 수행되어진다. 이를 위한 해석 방법으로 지난 수십여 년 간 부지 응답 특성 평가를 위한 여러 자유장응답 해석방법이 개발되었다(Kramer, 1996).

현재 사용 중인 여러 자유장응답해석 기법 중 가장 널리 사용되어지는 방법 중에 하나는 1차원 자유장응답특성 평가 기법이다. 이 기법은 지반을 구성하고 있는 모든 지층의 경계가 반무한수평이고 지반의 응답이 주로 기반암으로부터 연직 방향으로 전파되는 SH파에 의해 이루어진다고 가정하고 해석하는 방법이다. 일반적으로 지진 발생시 지진 거동이 계측 가능한 위치는 암반노두(Rock Outcrop)에서의 계측치와 지표면에서의 계측치이다. 암반노두에서의 계측치를 이용하여 기반암에서의 지진 거동을 예측한 후 이를 이용하여 1차원 부지응답 특성 평가를 통하여 지표면에서의 지진거동을 예측하고 이를 노두 인근 지역에서 계측되어진 지표면 실제 계측치와 비교하는 방법으로 1차원 부지응답특성 평가 방법의 타당성이 검증되어져 왔다. 대표적인 1차원 등가선형 부지응답특성 평가 프로그램으로는 Schnabel 등이 작성한 SHAKE91이 있다(Idriss and Sun, 1992).

본 연구에서는 설계지진계수 산정 및 자유장응답해석을 위해 SHAKE91을 사용하였으며, 이 경우 지반의 층상구조를 나타내는 변수로는 Fig. 1(b)와 같이 단위밀도 (또는 단위중량), 전단파속도, 감쇠비, 그리고 G/G_{max} 를 사용한다. 특히 Fig. 2와 같이 변형률에 대한 G/G_{max} 및 감쇠비의 변화를 비선형 변형 특성으로 이용하였다. 해석에 사용한 지반 단면을 Fig. 3에 나타냈다 (Rechart et al., 1970).

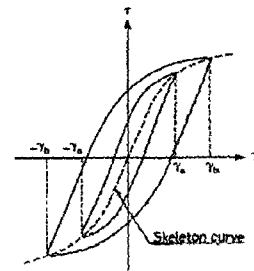


(a) Amplification of earthquakes

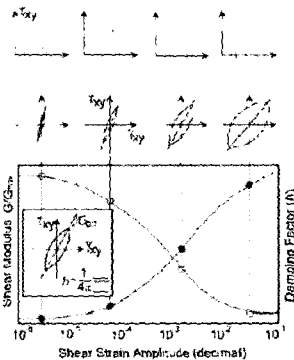


(b) Input parameters

Fig. 1 Free field analysis



(a) Nonlinear stress - strain curves



(b) Strain-dependent soil moduli

Fig. 2 Nonlinear characteristics of soil

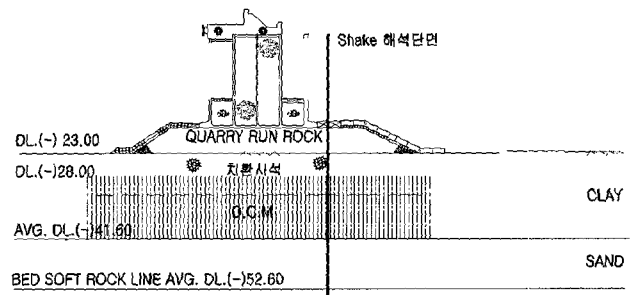


Fig. 3 Soil profile for free field analysis

4. 지진위험도 분석

4.1 인공지진작성

구조물의 지진에 대한 지진취약도 곡선은 구조물의 비선형성 뿐만 아니라 지반의 불확실성에 관련되어 있어 소수의 입력지진 자료에 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 항만구조물의 경우 비선형 모델링이 매우 어려울 뿐만 아니라 지진 발생시의 대부분의 거동이 지반에서 일어나고 케이슨 방파제의 경우 상대적으로 작은 탄성변형을 일으키기 때문에 비선형 지반해석을 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 지진성능 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 있어 국내 구조물 내진설계검토에서 많이 활용되고 있는 Ofunato 지진과 Hachinohe 지진을 기본으로 하여 암반노두(Rock Outcrop)에서 0.1g~1.0g 사이의 PGA를 균등분포로 갖는 100개의 입력지진을 작성하였으며, 그 지진에 대하여 지반특성을 고려한 지반증폭해석을 통하여 교량이 건설되는 현장에서의 지표면 지반운동을 산정하였다. Fig. 4는 보통암을 기준으로 작성한 표준응답스펙트럼이며, Fig. 5는 취약도분석을 위하여 사용된 기본 지진파형의 증폭결과를, 그리고 Fig. 6은 100개의 암반노두에서의 지반운동에 대하여 지층의 전파속도의 불확실성을 고려하여 지반증폭해석을 수행함으로써 산정한 지표면에서의 지반운동 사이의 PGA 증폭비를 보여준 결과이다.

4.2 유한요소 모델링

전 절에서 생성한 증폭된 지진을 사용하여 항만구조물에 대해 시간이력해석을 실시하였다. 케이슨 방파제의 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 케이슨 방파제의 밑면에 전달되는 지진을 구한 후 이를 입력지진으로 사용하였다.

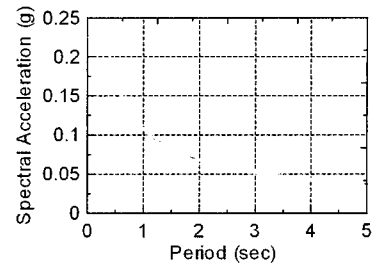


Fig. 4 Standard design response spectrum

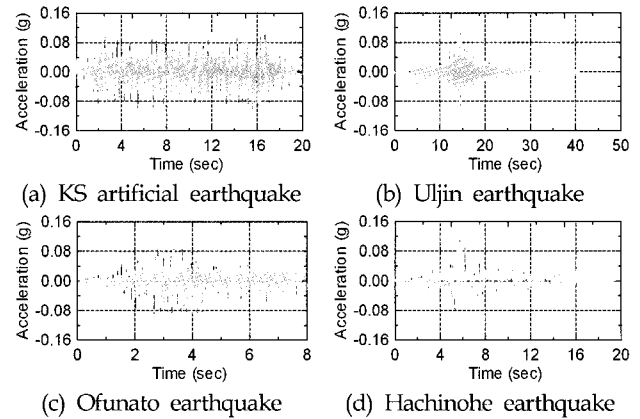


Fig. 5 Earthquakes for fragility analysis

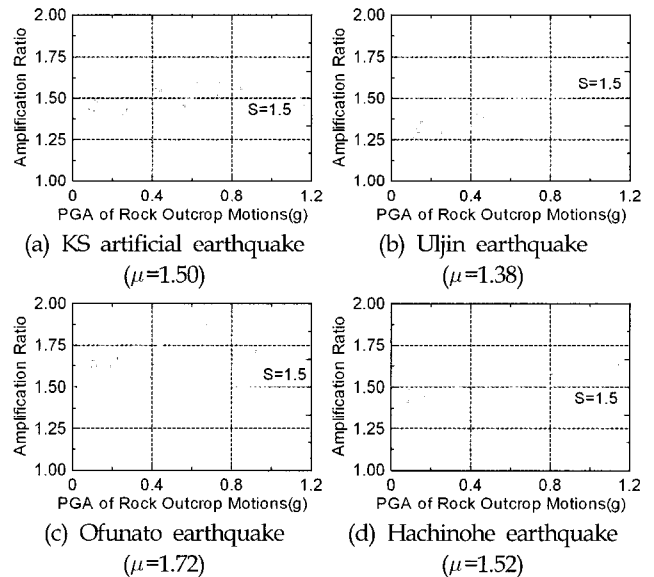


Fig. 6 Amplification of ground motions (Mean amplification factor, $\mu_t=1.51$)

또한 탄성지반의 효과는 지반의 탄성계수와 깊이를 고려하여 등가의 지반스프링으로 모델링 하여 구조물의 바닥에 경계조건으로 사용하였다(Rechart et al., 1970). 해석은 SAP2000를 이용하여 수행하였으며, Fig. 7과 Table 1에 유한요소 모델링과 모드해석결과를 나타냈다(SAP2000, 2002).

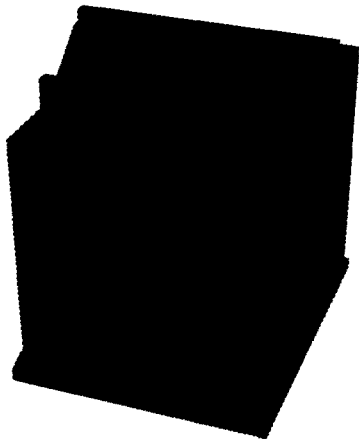


Fig. 7 Finite element model of a caisson-type breakwater

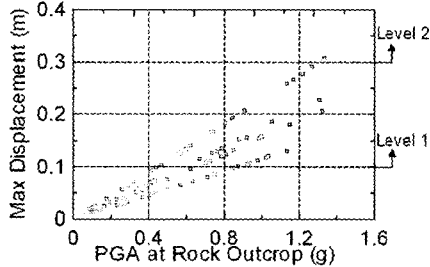


Fig. 8 Results of capacity spectrum analysis

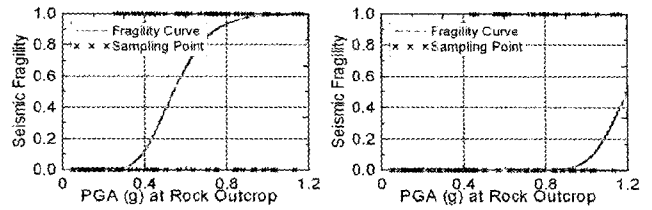
Table 1 Fundamental natural frequencies of a breakwater

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

Fig. 8에 3차원 케이션 방파제모델에 대하여 전절에서 100개의 증폭된 지반응답을 고려하여 지진해석을 수행한 결과를 정리하였다.

4.3 분석 결과

지진취약도는 대수정규분포함수로 표현하였으며, 중간값 및 대수표준편차는 Maximum Likelihood Estimation을 이용하여 추정하였고, Fig. 9는 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 PGA가 작은 경우 모두 0으로, PGA가 어느 정도 이하일 경우에는 손상가능성이 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 0.4g에서 0.8g사이의 지진에 대해서는 경우에 따라서 기능수행수준 이상의 변위가 발생할 수도



(a) serviceability requirement (b) no collapse requirement

Fig. 9 Fragility curves

있고, 경우에 따라서는 발생하지 않을 수도 있음을 결과로부터 알 수 있다. 기능수행수준 및 붕괴방지수준 이상의 변위가 발생할 가능성이 50%인 지진은 각각 0.61g와 1.2g 이었다.

5. 지진재해도 분석

5.1 지진재해지도 분석

확률론적 지진재해도 평가(Probabilistic Seismic Hazard Assessment)를 위해서는 지진에 대한 구조물의 취약성을 나타내는 지진취약도(Seismic Fragility)와 함께 그 대상지역에서의 지진발생확률을 의미하는 지진재해도(Seismic Hazard)가 필요하다. 즉, 같은 구조물의 내진성능을 보유하고 있는 구조물이라도 대상지역에 따라 재해도가 달리 평가될 수 있다. 현재 대상교량이 위치하게 될 지역에서의 지진재해도를 한반도를 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 반복주기(Return Period) 또는 일정기간 동안의 초과발생확률(Exceedance Probability)을 갖는 지진의 최대 지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)를 지도위에 표시한 것으로써, 지진재해지도로부터 반복주기 및 해당 반복주기를 갖는 지진의 PGA를 읽을 수 있다. 본 연구에서는 항만 및 어항 설계기준(1999)의 5년 및 10년, 20년, 50년, 100년, 250년, 1000년 동안 발생확률이 10%인 지진재해지도를 사용하였다.

지진재해지도에서 지진의 반복주기는 다음과 같이 구할 수 있다. 즉, N년 동안의 발생확률을 PE_N 이라 할 때, 1년 동안의 발생확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

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

$$PE_1 = 1 - (1 - PE_N)^{1/N} \tag{14}$$

결국 반복주기는 이러한 PE_1 의 역수를 취함으로써 구할 수 있기 때문에 다음과 같이 지진의 반복주기(T)를 구할 수 있게 된다.

$$T = 1/PE_1 = 1 / (1 - (1 - PE_N)^{1/N}) \tag{15}$$

위의 관계를 이용하여 5년 동안 발생확률이 10%인 지진의 1년 동안 발생확률을 구해보면 다음과 같다.

$$PE_1 = 1 - (1 - 0.1)^{(1/5)} = 0.0209 \tag{16}$$

따라서 반복주기를 구해보면,

$$T = 1/PE_1 = 1/0.0209 = 47.95 \quad (17)$$

즉, 47.95년이 계산되는데 편의상 50년 평균재현주기를 갖는 지진으로 고려하고 있다. 위의 계산과정을 거쳐서 7개의 지진재해지도의 평균재현주기를 구해보면, 47.95년, 50년, 100년, 200년, 500년, 1000년, 2400년, 4800년으로 편의상 고려할 수 있다. 지진재해지도로부터 해당지역에 대하여 초과발생확률(Exceedance Probability)과 해당하는 지진의 PGA 값을 다음 표에 정리하였다.

Table 2 PGA according to return period with 10% xceedance probability

평균 재현주기	초과발생 확률/기간	최대지반 가속도
50년	10% / 5년	0.035g
100년	10% / 10년	0.045g
200년	10% / 20년	0.065g
500년	10% / 50년	0.090g
1000년	10% / 100년	0.130g
2400년	10% / 250년	0.170g
4800년	10% / 500년	0.210g

위의 표를 이용하여 연간최대지반가속도(Annual Maximum PGA)에 따른 초과발생확률(Exceedance Probability)을 다음 그림과 같이 나타낼 수 있으며, 이로부터 회귀분석을 통하여 Gumbel Type II 극한분포의 확률상수를 추정할 수 있다. Gumbel의 Type II 극한분포는 다음과 같이 나타낼 수 있는데,

$$F_A(a) = \exp\left\{-\left(\frac{a}{u}\right)^\alpha\right\} \quad (18)$$

여기서 양변에 대수를 두 번 취하여 다음과 같은 선형관계식을 만들 수 있다.

$$\ln\{-\ln F_A(a)\} = -\alpha \ln a + \alpha \ln u \quad (19)$$

위 식을 이용하여 지진재해도 곡선과 관련된 상수를 다음과 같이 결정할 수 있고, 그 상수를 이용하여 Fig. 10과 같이 보간된 곡선($\alpha=2.49227$, $u=0.00757$, $\lambda_E=2.81005$)을 구할 수 있다.

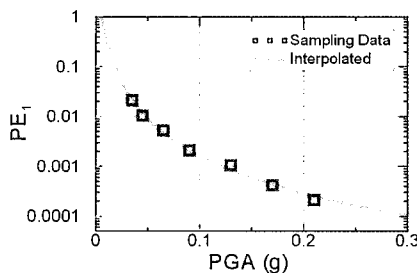


Fig. 10 Annual maximum PGA(A) and exceedance probability ($F_A(a)$)

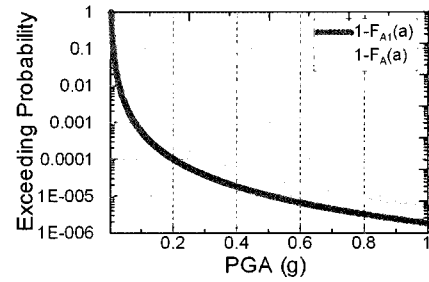


Fig. 11 Exceedance probability

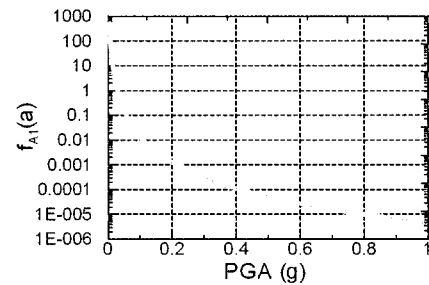


Fig. 12 Seismic hazard

한편 Poisson Process로 가정된 지진발생에 대하여 연간 최대 PGA(A)와 한번 발생한 지진의 PGA(A₁) 사이의 관계를 짓기 위해서는 연간발생횟수인 λ_E 가 필요하며, 이를 결정하기 위해서는 지진으로 고려할 수 있는 최소 PGA a_0 를 정하여야 한다. 본 연구에서는 a_0 를 충분히 작게 고려하여, $a_0 = 0.005g$ 로 결정하였다. 그리고 그 값을 이용하여 $F_A(a_0) = 0$ 로부터 유도된 다음의 식을 이용하여 λ_E 를 결정하면 $\lambda_E = 2.0440$ 으로 평가할 수 있다.

$$\lambda_E = -\ln F_A(a_0) = \left(\frac{a_0}{u}\right)^\alpha \quad (20)$$

따라서 한번 발생하는 지진의 PGA에 대한 확률분포함수 및 확률밀도함수를 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$f_{A1}(a) = \frac{dF_{A1}(a)}{da} = (\alpha \cdot a_0^\alpha) \cdot a^{\alpha-1} \quad (21)$$

Fig. 11은 연간 최대 PGA(A) 및 한번 발생한 지진의 PGA(A₁)에 대한 초과확률을 나타내며, Fig. 12는 최종적인 결과물인 지진재해도로 한번 발생한 지진의 PGA(A₁)에 대한 확률밀도함수를 나타내고, 이를 사용하여 지진위험도를 산정하였다.

5.2 지진위험도 분석

전 절에서 산정한 지진재해도와 구조물의 지진취약도를 결합하여 다음과 같이 한번의 지진 발생에 대한 구조물의 지진위험도를 평가할 수 있다.

$$p_f^c = \int_{a_0}^{a_{max}} F_k(a) \cdot f_{A1}(a) da \quad (22)$$

위의 결과를 이용하여 구조물의 사용기간 N 년 동안의 지진 위험도, 즉 지진에 의한 구조물의 손상발생확률을 다음 식을 통해 얻을 수 있다.

$$p_f^{Nyears} = 1 - \exp(-N \cdot \lambda_E \cdot p_f^c) \quad (23)$$

사용기간에 따른 지진위험도를 분석한 결과를 다음 표에 제시하였다. 보통손상에 대한 지진취약도 분석 결과, 중간값이 1.0g 부근에 위치하고 있어, 한반도의 지진발생 상황을 고려할 때 무시하여도 무방할 것으로 판단되었다.

Table 3 Results of seismic risk analysis

기간	기능수행수준 초과확률(%)	붕괴방지수준 초과확률(%)
1회	6.21×10^{-4}	1.60×10^{-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

6. 결 론

본 연구에서는 지진발생의 확률론적 특성과 기반계수의 확률론적 분포 특성을 고려한 케이스 방파제의 확률론적 지진재해도 평가에 대해 연구하였다. 우선 케이스 방파제의 지진에 대한 구조적 취약성을 다수의 지진자료를 이용하여 평가하였고, 지진재해도 곡선을 사용하여 해당 지역에서의 지진재해도를 산정하였으며, 이들을 조합함으로써 케이스 방파제의 확률론적 지진재해도를 평가하였다. 본 연구에서 사용한 해석대상 케이스 방파제의 지진재해도 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기능수행수준의 경우 지진의 PGA가 작은 경우 모두 0으로, PGA가 어느 정도 이하일 경우에는 손상가능성이 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 0.4g에서 0.8g사이의 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 0.61g와 1.2g 이었다.
- 2) 보통손상에 대한 지진취약도 분석 결과, 중간값이 1.0g 부근에 위치하고 있어, 한반도의 지진발생 상황을 고려할 때 무시하여도 무방할 것으로 판단되었다.

본 연구는 한 가지 형태의 케이스 방파제에 대해 지진재해도를 평가한 것으로, 추후 다양한 형태 또는 종류의 케이스에 대한 지진재해도에 관한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

권오순, 장인성, 박우선 (2002). "경사말뚝이 있는 잔교식 안벽의 내진 성능 평가", 한국해안·해양공학회 발표논문집, 제13권, pp 92-99.

김상훈, 김두기, 서형렬, 김종인 (2004). "내진보강된 콘크리트 교량의 손상도 곡선", 한국구조물진단학회논문집, 한국구조물진단학회, 제8권, 제1호, pp 203-210.

한국지진공학회 (1997). 내진설계기준연구(II), 건설교통부.

한국항만협회 (1999). 항만 및 여항설계기준, 해양수산부.

Ang, A.H.S. and Tang, W.H. (1975). Probability Concepts in Engineering Planning and Design, John Wiley & Sons, Hoboken.

Devore, J.L. (1991). Probability and Statics for Engineering and the Sciences, Brooks/Cole, Pacific Grove, CA, USA.

Ghobarah, A. and Ali, H. M (1988). "Seismic Performance of Highway Bridges", Journal of Engineering Structures, Vol 10, pp 157-166.

Idriss, I.M. and Sun, J.I. (1992). User's Manual for SHAKE91, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, USA.

Kim, S.H. and Shinozuka, M. (2004). "Development of Fragility Curves of Bridges Retrofitted by Column Jacketing", Journal of Probabilistic Engineering Mechanics, Vol 19, Issues 1-2, pp 105-112.

Kramer, S.L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Rechart, F.E., Woods, R.D. and Hall, J.R. (1970). Vibrations of Soils and Foundations, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

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.

2004년 2월 24일 원고 접수

2005년 5월 24일 최종 수정본 채택