

잔교식 안벽구조물의 확률론적 지진위험도해석 Seismic Risk Analysis of Steel Pile Type Pier

김동현* · 조홍연** · 김두기*** · 조병일****

Dong Hyawn Kim*, Hong Yeon Cho**, Doo Kie Kim*** and Byung il Cho****

요 지 : 잔교식 안벽구조물의 확률론적 지진위험도 해석을 수행하였다. 부지응답해석을 통해 증폭된 지표 지진이 구조물에 가해질 때 강관파일의 조합응력비와 최대수평변위가 한계상태를 초과하는 확률을 지진취약도 곡선으로 표현하였다. 해당 지역의 지진발생확률은 항만설계기준의 지진재해도를 이용하여 최대지반가속도의 초과확률을 구할 수 있었다. 구조물의 최종적인 지진위험도는 지진취약도와 지진재해도를 이용하여 산정하였으며 수치해석 예제를 통해 그 결과를 제시하였다.

핵심용어 : 항만구조물, 신뢰성, 잔교, 취약도, 재해도, 위험도

Abstract : Probabilistic seismic risk analysis was performed. Exceeding probabilities of combined stress and maximum horizontal displacement of steel piled pier due to surface ground motion which was transferred from base rock motion was expressed as seismic fragility curves. Occurrence probability of peak ground motion was calculated by using the seismic hazard map on design code for harbor and fishery structures of Korea. Finally seismic risk of pier structure was found by combining the fragility and the hazard and those were presented through numerical analysis.

Keywords : coastal structure, reliability, pier, fragility, hazard, risk

1. 서 론

항만구조물의 신뢰성해석에는 피복석 신뢰성 해석(서경덕 외, 2003; 이철웅, 2003; 이철웅, 2004; Kim et al, 2005), 케이슨방파제의 기대활동량 산정(김동현, 2005; 김태민 외, 2005; 이철웅, 2002; 홍수영 외, 2004), 잔교식 안벽의 신뢰성해석(김동현 외, 2003) 등 주로 중력식 구조물에 국한되어 왔다. 이러한 현상은 항만구조물의 대다수가 중력식 구조물인 이유도 있으나 신뢰함수(파괴기준함수)를 양함수(explicit function)로 표현이 가능하여 신뢰성해석이 용이하기 때문이다. 그러나, 잔교식 구조물과 같이 항만 구조물에는 비중력식 구조물이 존재하며 이러한 경우에 신뢰성 해석을 수행하는 것은 음함수(implicit function)를 사용하기 때문에 다소 제한이 따르게 된다. 제한이라는 것

은 신뢰함수에 포함되는 구조물의 응력이나 변위 등과 같은 성능변수가 독립확률변수가 아니라 유한요소해석 등을 통해 얻을 수 있는 종속변수라는 점이다. 그렇기 때문에 Level II 나 Level III 신뢰성해석을 위해서는 응답면을 구하거나 몬테카를로모사법(Monte Carlo Simulation)을 이용해야 하는데 이러한 것이 그 제한사항이라 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 문제로 인해 다소 연구가 활성화 되지 못했던 유연 항만구조물에 대한 신뢰성해석을 위해 지진위험도 해석기법을 적용하였다. 지진위험도해석은 김상훈 등(2005)에 의해 중력식구조물에 적용한 바 있으나 유연구조물에 적용할 경우 그 타당성이 더 높을 것으로 판단되어 잔교식 구조물에 적용하였다. 지진위험도해석은 지진재해도로부터 구한 지진발생확률과 특정 구조물의 지진에 대한 취약도를 동시에 고려하여 사용기간별로

*정회원, 군산대학교 해양시스템공학과 교수
**정회원, 한국해양연구원 연안개발연구본부 책임연구원
***정회원, 군산대학교 토목환경공학부 교수
****정회원, 군산대학교 해양시스템공학과 석사과정

지진에 대한 위험도를 평가하는 기법이다. 평가된 위험도는 미리 정해진 기준에 의해 그 적정성 여부를 판단하여 해당 설계를 수용할 것인지 또는 위험도를 제어하여 더 보수적으로 할 것인지를 결정하는데 사용할 수 있다. 이러한 기법을 본 연구에서는 강관파일을 이용한 잔교식 안벽에 적용하였으며 실증사례를 통하여 적용성을 검토하였다.

2. 지진위험도해석

2.1 지진확률

지진의 발생은 시간, 장소, 및 그 크기에 대한 확률적 변동성을 가진다. 세 가지 변동성에 대한 확률분포는 과거의 지진기록을 통계 분석하여 구할 수 있다. 장소에 대한 확률적 변동은 광범위한 영역에 대하여 통계 분석하므로써 지진이 발생하지 않은 지역에 대한 지진정보를 구할 수 있고 시간적 변동성은 1년 단위로 지진을 분석하여 해결한다. 크기에 대한 변동성은 구조물의 관성력에 영향을 미치는 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)를 대표적 확률변수로 취급한다. 이러한 지진의 확률을 체계화하기 위하여 매년 발생하는 지진의 최대가속도를 확률변수 A_1 , 이들 중 년최대 값의 확률변수를 A 라 하자. 두 확률변수는 각각 Poisson process와 극치분포를 따르게 된다. 매회 발생하는 지진의 최대지진가속도가 a 를 초과하지 않는 확률은 $F_{A_1}(a)$ 가 되며 지진의 년평균 발생회수를 λ_E 라 정의하면 a 를 초과하는 지진의 년평균 발생회수는 $\lambda_E[1-F_{A_1}(a)]$ 된다. 따라서, 년최대 지진가속도의 누적확률분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

한편, 발생하는 지진 중에서 구조물에 손상을 주는 의미 있는 크기의 지진이 관심의 대상이므로 그 최소 지진가속도를 a_0 로 설정하면 A_1 이 a_0 를 초과하지 않을 확률은

$$F_{A_1}(a_0) = 0 \quad (2)$$

로 설정할 수 있다. 식 (1)과 (2)를 이용하면 지진의 년평균 발생회수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_E = -\ln[F_{A_1}(a_0)] \quad (3)$$

년최대 지진가속도의 극치분포를 구하기 위해 Type II

극치분포로 가정하면 다음과 같다.

$$F_A(a) = \exp\left\{-\left(\frac{a}{u}\right)^{-\alpha}\right\} \quad (4)$$

여기서, α 와 u 는 해당지역의 재현주기별 최대지반가속도를 이용하여 추정할 수 있다. 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 년평균 발생회수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_E = \left(\frac{a_0}{u}\right)^{-\alpha} \quad (5)$$

또한, 식 (4)와 (5)를 식 (1)에 대입하면 최종적으로 매번발생지진의 누적분포를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_{A_1}(a) = 1 - \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-\alpha} \quad (6)$$

확률밀도함수는 누적확률분포 함수의 미분을 통해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_{A_1}(a) = \left(\frac{a}{a_0}\right) \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-\alpha-1} \quad (7)$$

2.2 지진취약도

지진이 발생했을 때 구조물은 설계 및 시공의 정도에 따라 손상이 발생할 수도 또는 그렇지 않을 수도 있다. 특정 구조물에 대하여 어떤 지진이 발생했을 때 구조물에 손상이 발생할 확률을 설명하는 것이 지진취약도이다(Shinozuka et al, 2000). 사용자 입장에서 구조물에 발생 가능한 손상은 다양하게 정의할 수 있다. 여러 가지 손상단계 가운데 k 번째 손상에 대하여 취약도 곡선을 다음과 같은 대수정규분포함수로 나타낼 수 있다.

$$F_k(a) = \Phi \left[\frac{\ln\left(\frac{a}{c_k}\right)}{\zeta_k} \right] \quad (8)$$

여기서, Φ 는 표준정규분포의 누적확률분포함수이며 c_k 와 ζ_k 는 각각 중간값과 대수표준편차이다. 총 n 회 발생한 지진에 대하여 손상을 입은 구조물과 손상을 입지 않은 구조물을 대상으로 우도함수(likelihood function)를 다음과 같이 정의한다.

$$L = \prod_{i=1}^n [F_k(a_i)]^{x_i} [1-F_k(a_i)]^{1-x_i} \quad (9)$$

여기서, x_i 는 구조물의 손상여부에 따라 손상이 없으면

0 손상이 있으면 1을 입력하여 각각 무손상과 손상의 확률을 누적시키므로써 최우도함수를 산정할 수 있다. 대수함수는 단조증가함수이므로 우도를 최대화하는 상태는 로그를 취해 동일한 위치에서 최대가 되므로 다음과 같이 로그를 취한다.

$$\ln L = \sum_{i=1}^n [x_i \ln F_k(a_i) + (1-x_i)(1-F_k(a_i))] \quad (10)$$

중간값과 대수표준편차는 $\ln L$ 을 최대화하는 최적화문제를 풀어서 구할 수 있으며 이 위치에서는 다음의 조건을 만족한다.

$$\frac{\partial \ln L}{\partial c_k} = \frac{\partial \ln L}{\partial \zeta_k} = 0, \quad (k = 1, 2, \dots, n_k) \quad (11)$$

우도함수에 대해 식 (11)을 적용하면 대상으로 하는 총 n 회의 지진에 대한 손상 및 비손상 정보를 이용하여 중간값과 대수표준편차를 구할 수 있으며 결과적으로 식 (8)의 취약도 곡선식을 구할 수 있다.

2.3 지진위험도

1회 발생지진에 의한 지진위험도는 지진이 발생할 확률과 그 지진에 의한 구조물의 취약도를 동시에 고려하여 다음과 같이 구한다.

$$P_f = \int_{a_0}^{a_{\max}} F_k(a) f_{A_1}(a) da \quad (12)$$

여기서, a_{\max} 는 물리적으로 발생가능한 최대지진가속도이다. 구조물을 N 년 동안 사용할 때 이 기간동안의 지진위험도는 총 확률에서 지진에 의해 한번도 파손되지 않을 확률을 제외하여 구할 수 있으므로 다음과 같다.

$$P_f^T = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\lambda_E T)^n}{n!} \exp[-\lambda_E T] (1 - P_f)^n \quad (13)$$

지수함수의 무한급수를 이용하면 T 년 동안의 총 지진위험도를 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$P_f^T = 1 - \exp[-\lambda_E T P_f] \quad (14)$$

3. 수치해석

3.1 지진확률

구조물 설치 위치에서 지진이 발생할 확률을 지진재해

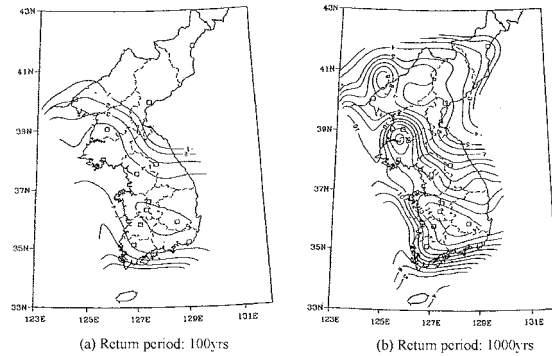


Fig. 1. Peak ground accelerations in Korea.

도로부터 구할 수 있다. 우리나라 전역에 대한 지진 재현주기 100년 및 1000년에 해당하는 설계진도는 Fig. 1(항만 및 어항 설계기준, 2005)과 같으며 이는 각각 내진 1등급에 대한 기능수행수준 및 붕괴방지수준에 해당하는 것이다.

수치해석을 위해 항만 및 어항 설계기준(2005)에 제시된 평균재현주기별 설계지반운동으로부터 어느 특정지역의 최대지반가속도를 구하면 Table 1과 같다. 평균재현주기에 따른 최대지반가속도를 이용하여 회귀분석을 수행하면 극치분포함수에 사용되는 계수를 구할 수 있으며 구조물에 손상을 유발하는 최소 지진가속도(a_0)를 0.002로 설정하면 년평균 지진발생회수를 구할 수 있다. 목포지역의 지진재해도를 이용한 계산 결과는 Table 2와 같다. Fig. 2은 지진재해도에서 취한 지진가속도별 초과확률과 회귀분석을 통해 구한 지진가속도 초과확률을 상호 비교한 것이다.

Table 1. Peak ground accelerations at Mokpo area

평균재현주기	초과발생확률/기간	최대지반가속도(g)
50년	10% / 5년	0.020
100년	10% / 10년	0.025
200년	10% / 20년	0.040
500년	10% / 50년	0.060
1000년	10% / 100년	0.080
2400년	10% / 250년	0.110
4800년	10% / 500년	0.140

Table 2. Parameters of extreme distribution

구분	값	비고
α	2.2673	
u	0.0036	극치분포상수
λ_E	3.8053	년평균발생회수

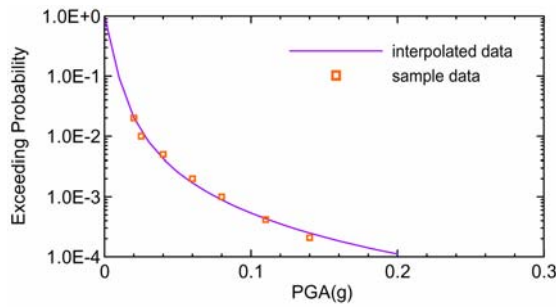


Fig. 2. Estimated exceeding probability.

3.2 부지응답해석

우리나라에서 발생한 지진 가운데 구조물에 손상을 유발할 수 있는 규모로서 가속도 기록이 존재하는 것은 없다. 따라서 지반조건을 만족하는 인공지진 3개와 국내 내진설계에 주로 사용되고 있는 Hachinohe항 지진(1968), Ofunato항 지진(1978) 등 모두 5개의 입력지진을 사용하여 0.02 g~0.5 g 사이의 크기로 scaling한 후 총 95개의 입력지진을 생성시켰다. 각 지진의 가속도 시간이력은 Fig. 3와 같다.

그림에 제시된 지진가속도는 암반노두에서의 관측된 값을 의미하지만 잔교구조물은 지반 물성치에 따라 증폭되는 것이 일반적이다. 본 연구에서 사용한 지반의 조성은 Table 3과 같으며 지반에 의한 증폭효과를 고려하기 위하여 일차원 부지응답해석 프로그램인 Proshake(Edupro Civil Systems, 2005)를 이용하였다. 암반노두의 최대지진 가속도를 PGA_0 , 지층을 통해 증폭된 지표가속도를 PGA_s 라하면 부지응답 해석결과는 Fig. 4와 같다. 암반노두의 지진가속도가 작을 때는 증폭비가 상대적으로 크고 지진가속도가 커짐에 따라 증폭비는 감소하였다. 지진가속도 시간이력에 따라 다소의 차이는 발생하였으나 전반적 경향은 일치하고 있다. 모든 시간이력에 대한 증폭비를 평

Table 3. Soil profile

종류	지반층 두께(m)	탄성파속도 (m/sec)
점토	20.1	170
모래	1.9	240
자갈	1.3	300
암반	-	1,600

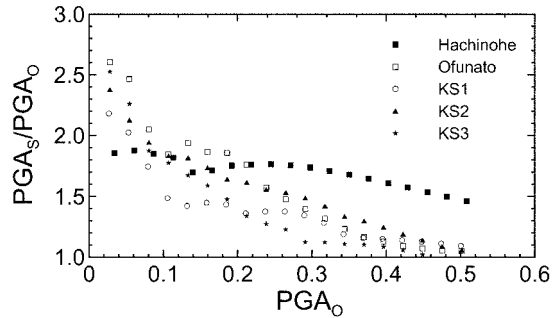


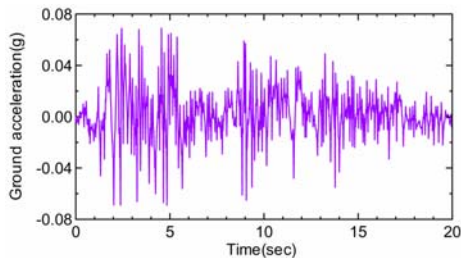
Fig. 4. Amplification of surface acceleration.

균하면 그 값은 1.52이었다. 즉, 기반암의 지진가속도에 비해 지표의 가속도는 약 50% 증가하고 있다. 이러한 결과는 지반에 특성에 영향을 받으며 지반특성이 달라지면 그 결과도 달라질 수 있다.

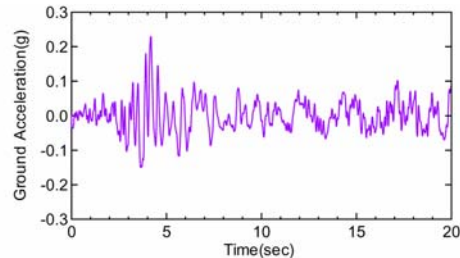
3.3 지진취약도

지진위험도 해석 대상 구조물은 Fig. 5의 잔교식 안벽이다. 총 16개의 강관파일로 철근콘크리트 상판을 지지하는 형식이다. 강관파일의 직경은 812.8 mm, 두께는 14.0 mm이다. 구조물이 지층과 접합된 부분은 수평 및 수직 스프링계수를 이용하여 지반과의 상호작용을 고려하였다.

지진취약도를 산정하기 위해서는 구조물의 손상을 정의해야 한다. 본 연구에서는 안전성측면과 성능측면에서 각각 손상을 정의하였다. 안전성 측면에서는 식 (15)의 조합응력비(S_r)가 1.0을 초과할 때를 기능수행수준의 손상이



(a) KS artificial earthquake



(b) Hachinohe port earthquake(1968)

Fig. 3. Acceleration time histories for simulation.

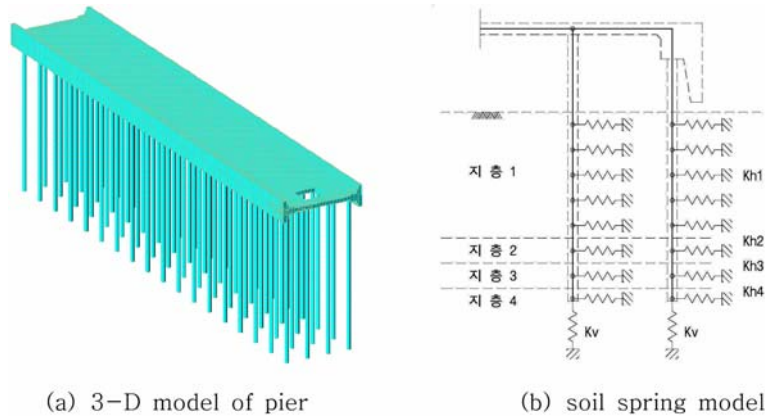
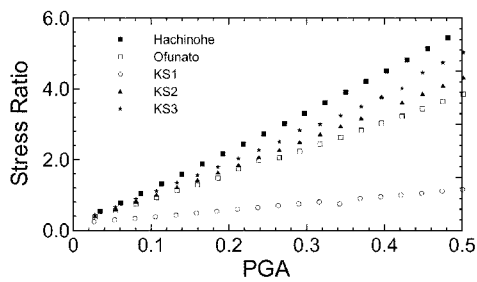
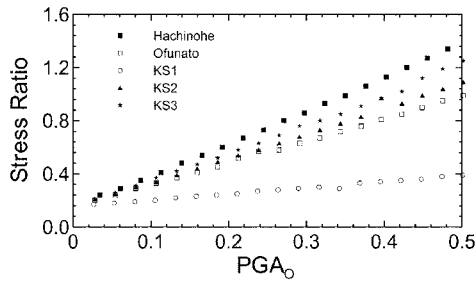


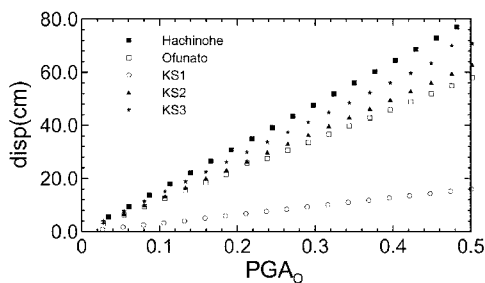
Fig. 5. FEM model used in analysis.



(a) Combined stress ratio(functional limit level)



(b) Combined stress ratio(collapse limit level)



(c) Maximum deck displacement

Fig. 6. Maximum response vs PGA.

라 정의하였고 연성계수 5.0을 적용한 경우 조합응력비가 1.0을 초과한 것을 붕괴방지수준의 손상이라 정의하였다.

$$S_r = \frac{f_c}{f_{ca}} + \frac{f_{by}}{\left(1 - \frac{f_c}{f_{ey}}\right)} + \frac{f_{bz}}{\left(1 - \frac{f_c}{f_{ez}}\right)} \cdot f_{ba} \quad (15)$$

여기서, f_c 는 축방향 압축력, $f_{b(y,z)}$ 는 휨응력, f_{ca} 는 전체 좌굴 및 국부좌굴을 고려한 허용 축방향응력, f_{ba} 는 허용 휨압축응력, $f_{e(y,z)}$ 는 허용오일러(Euler) 좌굴응력을 나타낸다. 또한, 성능측면에서는 잔교의 최대수평변위가 10 cm를 초과했을 때(기능수행수준)와 30 cm(붕괴방지수준)를 초과했을 때를 손상으로 정의하였다(항만 및 어항설계기준 2005). 해석결과 조합응력비(S_r)와 상관의 최대변위를 최대지반가속도에 따라 구하였으며 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다. Fig. 6에서 알 수 있는 것은 KS1 인공지진의 주파수 특성이 다른 지진보다 구조물에서 더 멀리 떨어져 동적응답이 작게 나타난 것임을 알 수 있다. 손상해석결과를 식 (10) 및 식 (11)에 적용하여 취약도 곡선의 중간값과 대수표준편차를 구한 것이 Table 4이고 Fig. 7과 Fig. 8가 이에 해당하는 취약도 곡선이다.

Table 4. Median and log-standard deviation

	과괴기준	중간값(g)	대수표준편차(g)
조합응력비	기능유지수준	0.1251	0.8331
	붕괴방지수준	0.4604	0.1674
최대변위	기능유지수준	0.1059	0.6271
	붕괴방지수준	0.2695	0.4268

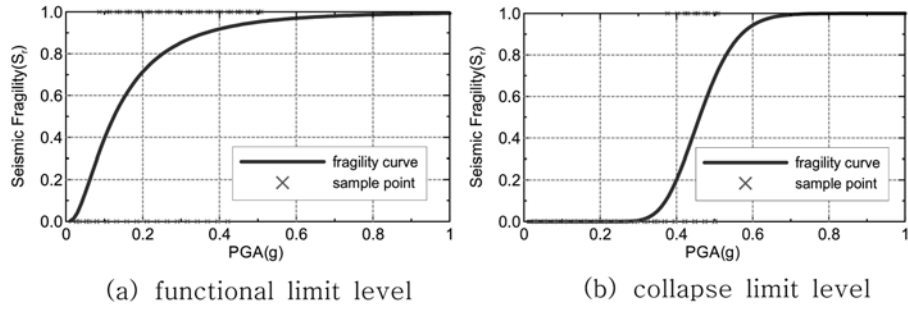


Fig. 7. Fragility curves for combined stress criterion.

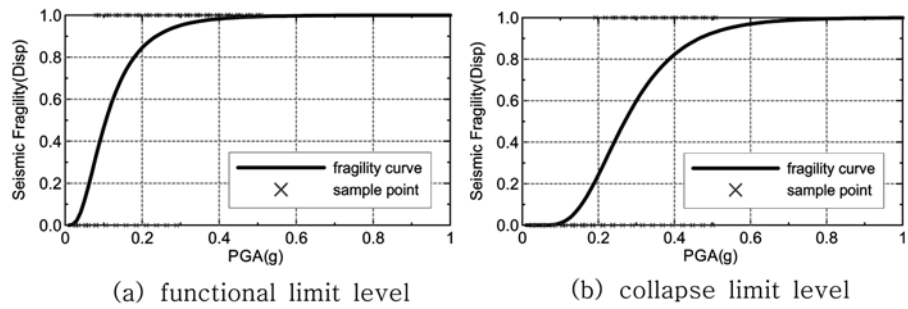


Fig. 8. Fragility curves for maximum displacement criterion.

Table 5. Seismic risk of pier

기간	조합응력비기준		최대변위기준	
	기능수행수준	붕괴방지수준	기능수행수준	붕괴방지수준
1회	5.034×10^{-4}	4.676×10^{-6}	3.394×10^{-4}	2.367×10^{-5}
10년	1.897×10^{-2}	1.779×10^{-4}	1.283×10^{-2}	9.001×10^{-4}
50년	9.133×10^{-2}	8.893×10^{-4}	6.253×10^{-2}	4.493×10^{-3}
100년	1.743×10^{-1}	1.778×10^{-3}	1.212×10^{-1}	8.965×10^{-3}
200년	3.183×10^{-1}	3.552×10^{-3}	2.276×10^{-1}	1.785×10^{-2}
500년	6.162×10^{-1}	8.857×10^{-3}	4.757×10^{-1}	4.403×10^{-2}

3.4 지진위험도

앞절에서 구한 지진취약도와 지진발생확률을 이용하여 잔교구조물의 지진위험도를 Table 5와 같이 구하였다. 50년 사용기간에 대한 위험도 평가결과 조합응력비 기준 초과 확률은 기능수행수준에서 약 0.09(9%), 붕괴방지수준에서는 약 0.0009로 100배의 차이가 발생하였다. 최대변위 초과위험도는 기능수행수준에서는 약 0.06, 붕괴방지수준에서는 약 0.005이었다. 또한, 기능수행수준에서는 조합응력비 초과위험도가 크게 나타났고 붕괴방지수준에서는 최대 변위의 기준 초과위험도가 더 크게 나타났다. 이런 수준의 확률을 케슨식 안벽의 파괴확률(김동현, 2003)과 비교하면 기능수행수준의 경우는 활동파괴 확률의 범위와 유

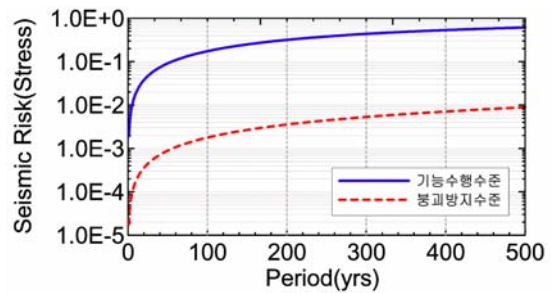


Fig. 9. Seismic risk based on stress criterion.

사하고 붕괴방지 수준의 경우는 전도파괴 수준보다는 크고 활동파괴 수준보다 작은 범위에 있다.

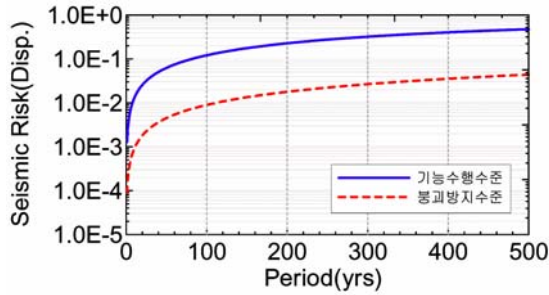


Fig. 10. Seismic risk based on displacement criterion.

Fig. 9과 Fig. 10은 사용기간별 위험도를 나타내고 있다. 전반적으로 기능수행수준 보다 붕괴방지 수준의 초과 확률이 매우 낮은 것은 지진발생으로 본 구조물이 기능수행을 못할 수 있는 가능성이 있지만 붕괴할 가능성은 매우 낮다는 의미이기도 하다.

4. 결 론

지진의 발생확률과 구조물의 취약도 곡선을 활용하여 잔교식 안벽구조물의 지진위험도를 평가하였다. 지진발생 확률은 지진재해도의 재현기간별 최대지반계수를 이용하여 최대지반가속도의 확률밀도함수를 구할 수 있었고 동적해석을 통해 응력과 변위기준의 취약도곡선을 구하였다. 지진위험도는 지진확률과 취약도를 고려하여 사용기간에 따라 구하였다. 수치해석 결과 기능수행수준에서는 응력기준의 위험도가 큰 반면 붕괴방지수준에서는 변위기준의 위험도가 높은 것으로 나타났다.

확률론적 지진위험도는 비록 모든 설계변수를 확률변수로 취급하지 못하는 단점을 가지고 있으나 다양한 지진활동에 대한 구조물의 위험도를 다양한 사용기간에 대하여 제시하는 기법이므로 항만구조물 특히 잔교식 구조물과 같이 Level III수준의 신뢰성해석 적용이 용이치 않은 유연구조물에 대한 신뢰도 해석의 대안으로 활용도가 높을 것으로 판단한다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원(항만구조물 신뢰성설계법 개발) 및 (주)동양건설산업의 연구비지원에 의해 수행되었기에 감사드립니다.

참고문헌

김동현, 윤길립, 박우선 (2003). 지진도압의 위상차를 고려한 케이슨 안벽의 신뢰성해석, 한국해양해양공학회지, 15(4), 242-248.

김동현 (2005). 소파케이슨 방파제의 기대활동량 산정, 한국해양해양공학회지, 17(4), 213-220.

김상훈, 김두기, 이진학 (2005). 방파제 구조물의 확률론적 지진위험도 분석, 한국해양해양공학회지, 17(1), 32-40.

김태민, 황규남, 타카야마토모즈카 (2005). 이중질단정규분포의 적용을 통한 케이슨방파제 기대활동량 평가의 향상, 한국해양해양공학회지, 17(4), 221-231.

서경덕, 권혁민, 윤현덕 (2003). 파향의 변동성을 고려한 피복블럭의 기대피해 계산, 한국해양해양공학회지, 15(1), 21-32.

이철웅 (2002). 혼성제 직립케이슨의 활동량 산정, 대한토목학회논문집, 22(4-B), 517-530.

이철웅 (2003). 콘크리트 피복재의 단면파괴에 대한 신뢰성 해석, 한국해양해양공학회지, 15(2), 86-96.

이철웅 (2004). 구조적 안정성을 고려한 콘크리트 피복재의 신뢰성 설계, 한국해양해양공학회지, 16(3), 142-151.

홍수영, 서경덕, 권혁민 (2004). 파향의 변동성을 고려한 직립방파제 콘크리트 케이슨의 기대활동량 산정, 한국해양해양공학회지, 16(1), 27-38.

해양수산부 (2005). 항만 및 어항 설계기준.

EduPro Civil Systems (2005). Proshake Users Manual.

Kim, D.H. and Park, W.S. (2005). Neural Network for Design & Reliability Analysis of Rubble Mound Breakwater, Ocean Engineering, 32(11-12), 1332-1349.

Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J.H. and Naganuma, T. (2000). Statistical Analysis of Fragility Curves, J. Eng., Mech. ASCE, 126(12), 1224-1231.

Received February 1, 2007

Accepted June 4, 2007