

유효응력효과를 고려한 안벽의 지진위험도 평가 Seismic Risk Analysis of Quay wall Considering Effective Stress

김소연* · 김동현**
So Yeon Kim* and Dong Hyawn Kim**

요 지 : 전응력 및 유효응력기반으로 케이슨식 안벽과 잔교식 안벽의 지진위험도 해석을 수행하였다. 유효응력효과를 고려하기 위해 지반의 간극수압을 분포시켰으며, Byrne(1991)이 제안한 간편식을 이용하여 매개변수를 산정하고 이를 Finn 모델에 적용하였다. 전응력 및 유효응력 해석기법에 따른 지진위험도 결과를 통해 연약지반에 설치된 안벽의 내진설계 시 유효응력해석의 필요성을 확인하였다.

핵심용어 : 유효응력, 안벽, Finn 모델, 취약도, 위험도

Abstract : Seismic risk analysis was performed based on the total stress and effective stress of caisson type quay wall and pier type quay wall. In order to consider the effective stress effect, the pore pressure of the ground was distributed, using Byrne(1991) simple formula to estimate parameter and applied to the finn model. Through the results of seismic risk analysis according to the total stress and effective stress analysis method, the necessity of effective stress analysis in the seismic design of the quay wall installed on the soft ground was confirmed.

Keywords : effective stress, quay wall, finn model, fragility, risk

1. 서 론

최근 세계적으로 대규모 지진활동이 활발해지고 있으며, 경주, 울산 등에서 규모 5.0이상의 중진규모 지진이 증가함에 따라 우리나라도 더 이상 안전지대는 아닌 것으로 판단된다.

지진으로 인한 항만구조물의 피해는 복구를 위해 많은 비용을 필요로 할 뿐만 아니라 항만기능이 정상적으로 수행되지 못함으로 국가의 막대한 경제적 손실을 유발한다. 이와 같은 피해를 사전에 예측하고 방지하기 위해 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서(Ministry of Oceans and Fisheries, 1999)에는 내진 1등급 구조물의 경우 동해석을 통해 변위를 산정하고 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대한 허용변위와 비교하여 안정성 검토를 수행 할 것을 규정하고 있다. 이에 유한요소해석 또는 유한차분해석 상용프로그램을 이용하여 지진 시 항만 구조물의 손상 및 파손을 예측하기 위한 다양한 연구가 발표된 바 있다. Kim et al.(2005)은 지진발생과 지반계수의 확률론적 분포특성을 고려하여 방파제 구조물의 확률론적 지진위험도를 평가 하였으며, Kim et al.(2007)은 잔교식 안벽구조물의 확률론적 지진위험도 해석을 수행하였다. 그러나 국내 대부분의 항만시설물은 연약지반이나 매립지반에 건설되며, 이러한 지반조건에 설치되어 있는 구조물은 지진

발생 시 지진 규모가 작아도 과잉간극수압으로 인한 액상화 현상으로 큰 피해가 발생할 수 있다. 이에 최근 과잉간극수압의 영향을 고려하기 위해 유효응력해석 기법에 의한 구조해석을 수행한다는 필요성이 제기되고 있다. 과잉간극수압 발현 및 그 영향을 고려하기 위해 Moon et al.(2003)은 2차원 유효응력해석 코드인 LIQCA-2D를 이용하여 일본 Hyogoken-Nambu 지진에서 실제로 피해를 입은 케이슨식 안벽을 대상으로 안정성 및 변형특성을 파악하였으며, Shin.(2003)은 유효응력해석 상용프로그램인 FLIP을 이용하여 케이슨 안벽의 동적 수평변위를 산정하고, FLAC을 이용하여 전응력해석한 결과와 비교하였다. 이와 같이 지반의 간극수압을 고려한 연구가 진행되어 왔으나, 대부분 중력식 안벽에 국한되어 왔다. 이에 본 연구에서는 전응력해석 및 유효응력해석이 가능한 유한차분해석 프로그램 FLAC 3D를 이용하여 잔교식 및 케이슨식 안벽의 지진해석을 수행하고 최종적으로 지진위험도를 산정하여 해석기법에 따른 결과를 상호비교 하였다.

2. 유효응력해석

2.1 유효응력해석법

동적해석은 유효응력을 기반으로 한 방법과 전응력을 기반

*군산대학교 해양산업공학과(School of Ocean Science and Engineering, Kunsan National University)

**군산대학교 해양공학과(Corresponding author : Dong Hyawn Kim, School of Ocean Science and Engineering, Kunsan National University, 558 Daehak-ro, Gunsan-si 54150, Korea, Tel:+82-63-469-1862, Fax :+82-63-469-7449, welcomed@naver.com)

으로 한 방법으로 나눌 수 있다. 느슨한 포화 사질토에 진동 하중 재하 시 간극수압이 증가하여 과잉간극수압이 발생되고 유효응력이 감소한다. 그 결과, 흙의 응력상태가 변화하기 때문에 흙의 복원력 특성이나 감쇠특성이 변화하고 지반의 응답특성도 변화한다. 흙에 가해진 외력을 σ , 유효응력을 σ' , 간극수압을 u 라고 하면 식 (1)과 같은 관계가 있으며, 흙의 전단강도는 식 (2)와 같다.

$$\sigma = \sigma' + u \quad (1)$$

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi' \quad (2)$$

여기서 τ_f = 전단강도, c = 점착력, σ' = 전단면상의 유효 수직응력, ϕ' = 전단 저항각 이다. 전응력 해석법은 과잉간극수압 및 그 영향을 고려하지 않기 때문에 유효응력의 변화에 의한 지진응답 변화가 고려될 수 없으나, 유효응력해석법은 이와 같은 상태를 고려할 수 있어 지반에 발생하는 과잉간극수압을 계산에 의해 직접 구할 수 있다(Ministry of Oceans and Fisheries, 2014).

2.2 Finn Model

간극수압의 발생 및 증가현상을 해석하기 위하여 여러 가지 모델들이 제안되었다(Prevost, 1986). 본 연구에서 사용된 유한차분해석 프로그램 FLAC 3D에서는 Finn 연구그룹이 제안한 실험적 관계식을 바탕으로 지반의 과잉간극수압을 예측할 수 있는 Finn&Byrne 모델을 제공하고 있다(Itasca Consulting Group, Inc, 2012). Martin et al.(1975)은 비배수 진동하중 조건에서 과잉간극수압의 발생이 배수 진동하중 조건의 체적변형 감소와 상관관계가 있다고 보고 실험적 관계식 (3)을 제안하였다.

$$\Delta \varepsilon_{vd} = C_1(\gamma - C_2 \varepsilon_{vd}) + \frac{C_3 \varepsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4 \varepsilon_{vd}} \quad (3)$$

여기서, ε_{vd} 는 영구적인 체적변형률, γ 는 전단변형률, C_1, C_2, C_3 및 C_4 는 상수이다.

실질적으로 Byrne(1991)이 제안한 간편식 (4)가 널리 쓰인다.

$$\frac{\Delta \varepsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \exp\left(-C_2 \frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma}\right) \quad (4)$$

C_1 은 대상 지반의 상대밀도 D_r 에 의해 결정되며 식 (5)와 같다(Byrne, 1991).

$$C_1 = 7600(D_r)^{-2.5} \quad (5)$$

상대밀도(D_r)와 정규화된 표준관입저항치($(N_1)_{60}$)와의 실험적 관계는 식 (6)과 같고, C_1 은 식 (7)에 의해 계산되며, 최종적으로 C_1 및 C_2 의 관계식은 식 (8)과 같다.

$$D_r = 15(N_1)_{60}^{0.5} \quad (6)$$

$$C_1 = 8.7(N_1)_{60}^{-1.25} \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{0.4}{C_1} \quad (8)$$

3. 지진 위험도해석

3.1 지진확률

임의지역에서 매년 발생하는 지진의 최대가속도를 A_1 , 연 중 최대지반가속도를 확률변수를 A 라 할 때, 두 확률변수는 각각 단위시간, 단위공간에서 어떠한 사건의 발생 빈도를 표현하는 이산 확률 분포인 Poisson distribution과 극치분포를 따른다고 가정하면, 매해 발생하는 지진의 최대지진가속도가 a 를 초과하지 않을 확률은 $F_{A1}(a)$ 가 되며, 지진의 연평균 발생횟수를 λ_E 라 정의하면 a 를 초과하는 지진의 연평균 발생횟수는 $\lambda_E[1 - F_{A1}(a)]$ 가 된다. 따라서 연최대 지진가속도의 누적확률분포는 다음 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다(Ang and Tang, 1975).

$$F_A(a) = e^{-\lambda_E[1 - F_{A1}(a)]} \quad (9)$$

a_0 를 구조물에 손상을 줄 수 있는 최소 지진가속도라고 할 때, A_1 이 a_0 를 초과하지 않을 확률은 $F_{A1}(a_0) = 0$ 이고, 지진의 발생을 Poisson Process로 가정하면, 지진의 연평균 발생횟수(Annual mean occurrences)는 다음 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_E = -\ln[F_A(a_0)] \quad (10)$$

여기서, 연최대 지진가속도의 극치분포를 구하기 위해 $F_A(a_0)$ 를 FT(Fisher-Tipper) Type II 극치분포로 가정하면 식 (11)과 같다.

$$F_A(a_0) = \exp\left\{-\left(\frac{a_0}{u}\right)^{-\alpha}\right\} \quad (11)$$

α 와 u 는 지진재해도(Seismic hazard map)의 해당지역의 재현주기별 최대지반가속도를 이용하여 추정할 수 있으며, 식 (11)을 식 (10)에 대입하면 연평균 발생횟수(λ_E)를 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_E = \left(\frac{a_0}{u}\right)^{-\alpha} \quad (12)$$

또한, 식 (11)과 식 (12)를 식 (9)에 대입하면 최종적으로 매번발생지진의 누적분포를 식 (13)과 같이 구할 수 있다.

$$F_{A1}(a_0) = 1 + \frac{1}{\lambda_E} \ln F_A(a) = 1 - \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-\alpha} \quad (13)$$

지진 A_1 의 확률밀도함수는 누적확률분포 함수의 미분을 통해 식 (14)와 같이 구할 수 있다.

$$f_{A1}(a) = \frac{dF_{A1}(a)}{da} = \left(\frac{\alpha}{a_0}\right)\left(\frac{a}{a_0}\right)^{-\alpha-1} \quad (14)$$

3.2 지진취약도

Shinozuka et. al.(2000)이 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)에 대한 구조물의 지진취약도 곡선을 통해 지진발생 시 특정 구조물에 손상이 발생할 확률을 식 (15)와 같이 나타내었다. 여러 가지 손상단계 가운데 k 번째 손상에 대하여 취약도 곡선식을 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 사용자 입장에서 구조물에 발생 가능한 손상은 다양하게 정의할 수 있다. 본 연구에서는 구조물의 기능수행수준을 초과하는 단계를 손상단계 1로, 붕괴방지수준을 초과하는 단계를 손상단계 2로 정의하였다.

$$F_k(a) = \Phi \left[\frac{\ln\left(\frac{a}{c_k}\right)}{\zeta_k} \right] \quad (15)$$

여기서, Φ = 표준정규분포의 누적확률분포함수, a = 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration), c_k = 중간값, ζ_k = 대수표준편차이다.

총 n 회 발생한 지진에 대하여 손상을 입은 구조물과 손상을 입지 않은 구조물을 대상으로 우도함수(likelihood function)를 식(16)과 같이 정의한다.

$$L = \prod_{i=1}^n [F_k(a_i)]^{x_i} [1 - F_k(a_i)]^{1-x_i} \quad (16)$$

여기서, x_i 는 구조물의 손상여부에 따라 손상이 없으면 0 손상이 있으면 1을 입력하여 손상이 발생하였을 경우 손상에 대한 확률 $[F_k(a_i)]$ 를 증가시키고 그렇지 않은 경우에는 손상이 일어나지 않을 확률 $[1 - F_k(a_i)]$ 을 증가시킨다. 각각 무손상과 손상의 확률을 누적시킴으로써 최우도함수를 산정할 수 있다. 대수함수는 단조증가함수이므로 우도를 최대화하는 상태는 로그를 취해 동일한 위치에서 최대가 되므로 식(17)과 같이 로그를 취한다.

$$\ln L = \sum_{i=1}^n [X_i \ln F_k(a_i) + (1 - X_i) \ln (1 - F_k(a_i))] \quad (17)$$

중간값과 대수표준편차는 $\ln L$ 을 최대화하는 최적화문제를 풀어서 구할 수 있으며 이 위치에서는 식 (18)의 조건을 만족한다.

$$\frac{\partial \ln L}{\partial c_k} = \frac{\partial \ln L}{\partial \zeta_k} = 0, \quad (k = 1, 2, \dots, n_k) \quad (18)$$

우도함수에 대해 식 (18)을 적용하면 대상으로 하는 총 n 회의 지진에 대한 손상 및 무손상 정보를 이용하여 중간값과

대수표준편차를 구할 수 있으며 결과적으로 식 (15)의 취약도 곡선식을 구할 수 있다.

3.3 지진위험도

지진이 발생할 확률과 그 지진에 의한 구조물의 지진취약도 곡선 $F_k(a)$ 와 결합하여 1회 발생지진에 의한 지진위험도를 식 (19)와 같이 구할 수 있다.

$$P_f = \int_{a_0}^{a_{\max}} F_k(a) f_{A1}(a) da \quad (19)$$

여기서, a_{\max} 는 물리적으로 발생 가능한 최대지진가속도이며, 구조물을 T 년 동안 사용할 때, 이 기간 동안의 지진위험도는 총 확률에서 지진에 의해 한 번도 파손되지 않을 확률을 제외하여 구할 수 있으므로 다음 식 (20)과 같다.

$$P_f^T = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\lambda_E T)^n}{n!} \exp[-\lambda_E T] (1 - P_f)^n \quad (20)$$

최종적으로 지수함수의 무한급수를 이용하면 구조물의 사용기간 T 년 동안의 총 지진위험도 즉 지진에 의한 구조물의 손상발생확률을 다음 식 (21)과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$P_f^T = 1 - \exp[-\lambda_E T P_f] \quad (21)$$

4. 수치해석

4.1 수치해석 모델

본 해석에서 사용된 프로그램은 Itasca사에서 개발된 유한차분해석 프로그램인 FLAC 3D로 유한차분법의 이론을 바탕으로 하고 있다. FLAC 3D는 전응력해석 뿐만 아니라 Finn 연구그룹이 제안한 실험적 관계식을 바탕으로 지반의 과잉간극수압을 예측할 수 있는 Finn 모델을 제공하고 있어 유효응력해석이 가능하다(Itasca Consulting Group, Inc, 2012). 본 연구에서는 부산향 신선대에 위치한 잔교식 안벽과 인천 지역의 케이슨식 안벽을 대상으로 지진해석을 수행하였으며, 안벽 형상 및 제원은 Fig. 1과 같다.

지반과 안벽의 분리 현상을 모사하기 위해 Interface 경계요소를 적용하였다. 이 경계요소는 구조물-지반 경계의 수직 방향과 수평 방향의 강성과 강도를 이용하여 분리현상을 모사한다. Qiang et al.(2013)이 Interface 매개변수 연구에 대한 결과를 통해 제시한 식 (22)를 이용하여 강성을 산정하였으며, 마찰각은 30°로 가정하였다.

$$k_n = k_s = \max \left[\frac{\left(K + \frac{3}{4} G \right)}{\Delta Z_{\min}} \right] \times 10 \quad (22)$$

여기서, K = 체적탄성계수, G = 전단탄성계수, ΔZ_{\min} = 최소 모서리 길이이다.

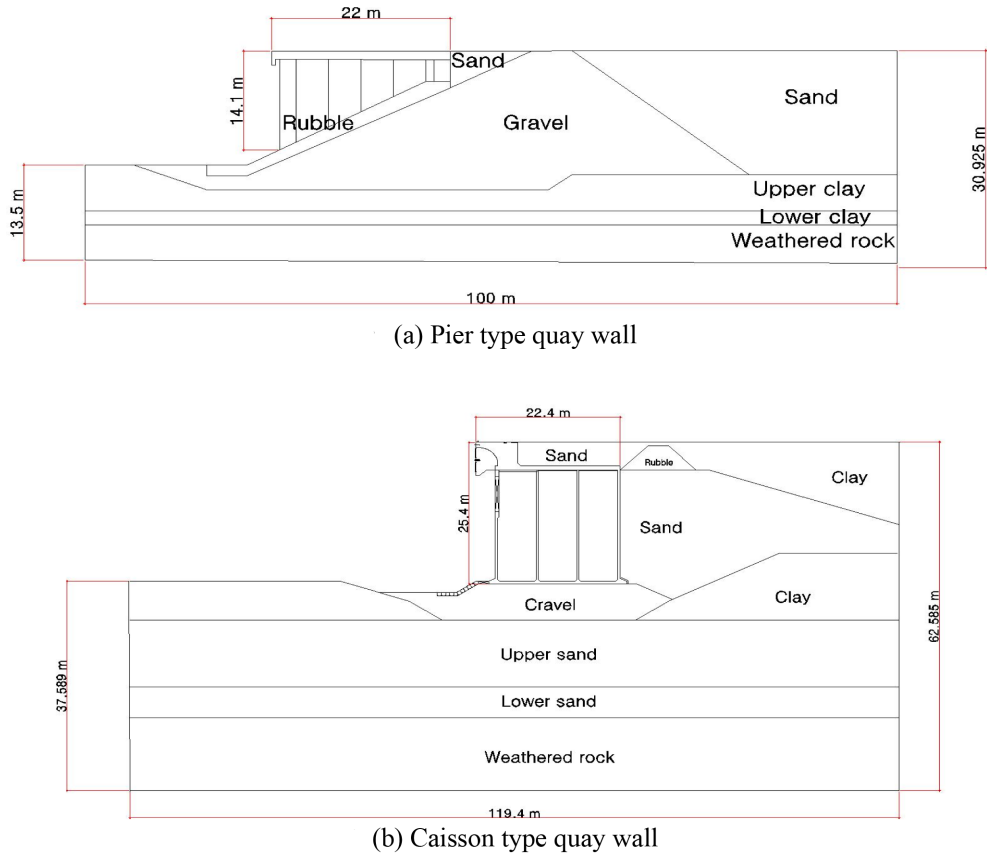


Fig. 1. Modeling of analysis target.

Table 1. Soil properties (Busan)

	Density (kN/m^3)	Poisson's ratio ν_d	Dynamic shear elastic modulus $G_d(\text{MPa})$	Cohesion (kN/m^2)	friction angle ($^\circ$)
Gravel	18.0	0.491	168	0	35
Lower clay	17.5	0.495	94	40	0
Upper clay	17.5	0.495	16	40	0
Rubble	18.0	0.495	93	-	-
Sand	17.5	0.496	153	0	30
Weathered rock	20.0	0.461	1000	25	32

Table 2. Soil properties (Incheon)

	Density (kN/m^3)	Poisson's ratio ν_d	Dynamic shear elastic modulus $G_d(\text{MPa})$	Cohesion (kN/m^2)	friction angle ($^\circ$)
Gravel	18.0	0.3	489	-	-
Clay	18.3	0.45	145	62	0
Lower sand	18.0	0.35	300	0	28
Upper sand	18.0	0.35	124	0	30
Sand	18.0	0.35	124	0	30
Weathered rock	21.0	0.3	992.8	30	35

4.2 지반조건

본 연구에서는 정해석 수행으로 초기지반응력을 분포시킨 후 동적해석을 수행하였다. 잔교식 안벽이 설치된 지반의 물

성치는 Table 1과 같으며, 케이슨식 안벽이 설치된 각 지반 물성치는 Table 2와 같다. 전응력 해석 시 지반의 소성 파괴 기준은 국내외 지진해석에 가장 널리 사용되는 구성모델

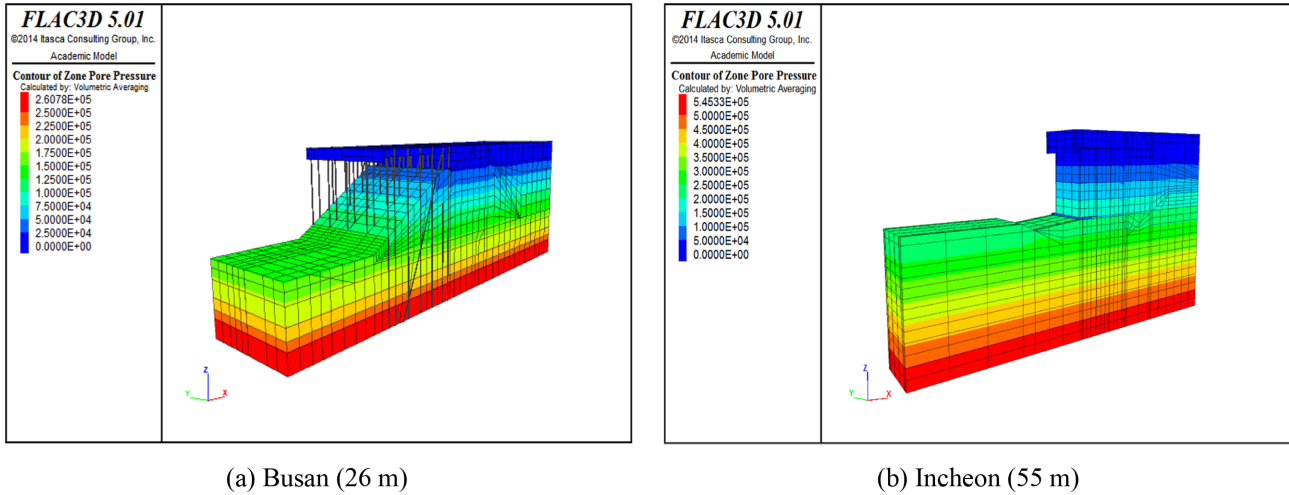


Fig. 2. Pore pressure distribution (Pa).

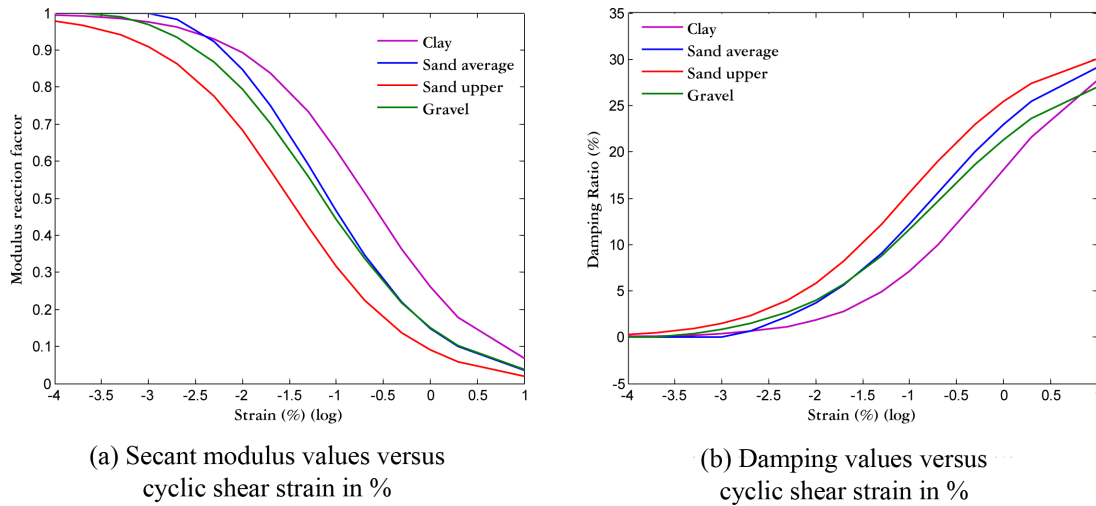


Fig. 3. Non-linear curve.

Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며, 유효응력해석의 경우 잔교식 안벽의 지반은 수심 26 m, 케이슨식 안벽의 지반은 수심 55 m로 가정하고 Fig. 2와 같이 간극수압(Pore Pressure)을 분포시킨 후 Finn 모델을 적용하였다.

지진 시 지반의 비선형 소성 거동을 모사하기 위해 본 연구에서는 지반의 비선형 거동이 Seed & Idriss(1970), Sun 등(1988)이 제안한 전단탄성계수와 감쇠비 곡선에 상응한다고 가정하여 Fig. 3과 같이 각 층의 비선형 곡선을 산정하였다. 비선형 모델은 FLAC 3D에서 제공하는 Sig3 모델을 사용하였으며, 이 모델은 식 (23)과 같이 정의된다(Itasca Consulting Group, Inc, 2012).

$$G_{tan} = \frac{a}{1 + \exp(-(L - x_0)/b)} \quad (23)$$

여기서, G_{tan} = 접선전단탄성계수, $L = \log(\gamma)$, x_0, a, b = 모델변수이다.

지반의 경계조건으로는 정해석 시에는 좌우 및 바닥 고정 경계를 적용하여 초기 안정화 후 동해석 시에는 정적 해석과 달리 지반의 반무한성과 지반의 감쇠를 고려해야 하므로, 지진 하중으로 인한 해석 경계부에서의 반사파의 영향을 최소화하고 무한지반의 거동을 모사할 수 있도록 지반의 좌우 흡수경계(Quiet Boundary) 조건을 적용하였다.

4.3 입력지진

가속도 시간이력을 사용하여 내진동해석을 수행하는 경우 장주기, 단주기 성분의 실지진기록 및 해당 부지의 지역적인 특성을 반영하는 인공적인 지진기록을 반영하는 것이 필요하다. 이에 본 논문에서는 1999년 제정된 항만 및 여항시설의 내진설계 표준서(Ministry of Oceans and Fisheries, 1999)에서 적용 시작되어 국내 여러 시설물별 내진설계 기준에 널리 적용되고 있는 장주기(Hachinohe)지진파와 단주기(Ofunato)지진파를 사용하였으며, 국내 설계응답스펙트럼에 부합하는

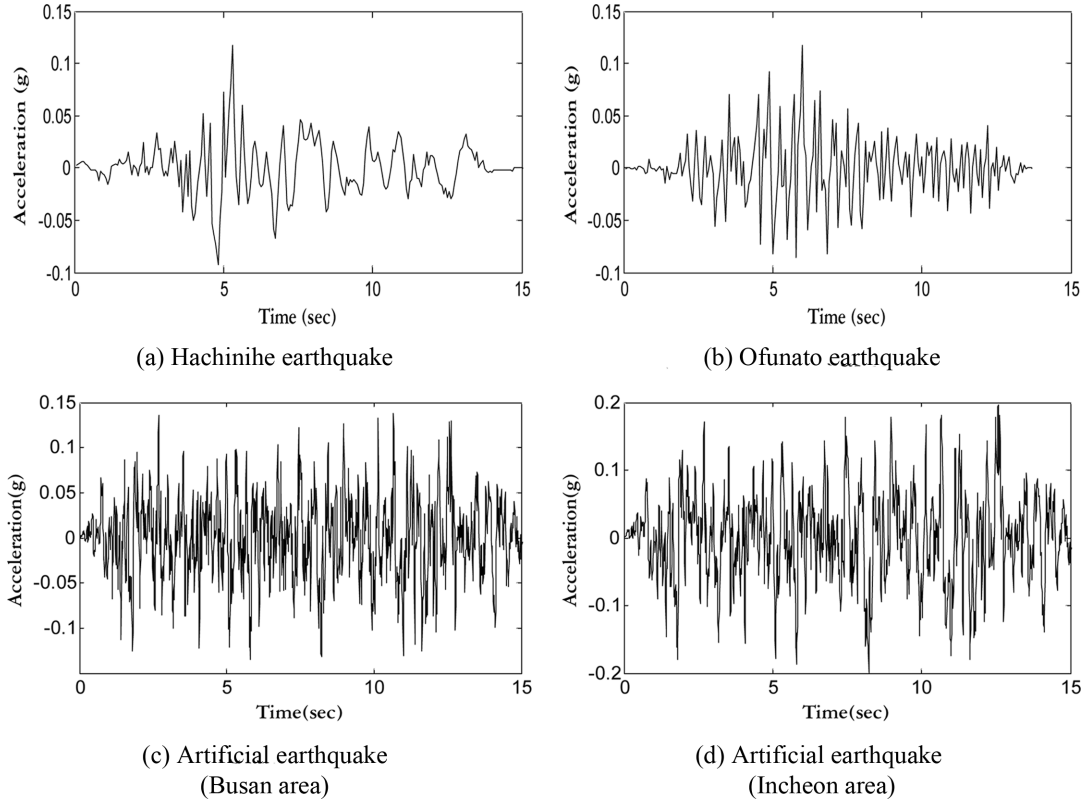


Fig. 4. Time history of the earthquake.

인공지진을 사용하였다(Fig. 4). 인공지진의 시간이력은 주기와 위상각, 진폭이 다양한 정현함수, 포락함수를 중첩하여 식 (24)와 같이 시간의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\ddot{v}_g(t) = E(t) \sum_{n=1}^N C_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (24)$$

4.4 시간이력해석 및 최대변위

본 연구에서는 입력 지진의 크기를 0.03 g부터 0.7 g 까지 변화시키면서 15초 동안 가하여 전응력 및 유효응력해석 기법에 의한 안벽 상부에서 기반암과의 상대수평변위를 비교해 보았다. 이중 최대 가속도 0.12 g에서 해석기법에 따른 시간이력해석 변위결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 입력지진에 따라 차이가 있으나, 잔교식 및 케이슨식 안벽 모두 유효응력해석 시 변위가 크게 산정되었다. 이는 전응력해석의 경우 지진 시 연약지반에서의 과잉간극수압 발현 및 유효응력감소의 영향을 수치해석에 반영하지 못하여 유효응력해석 결과와 차이를 보이는 것으로 판단된다. Fig. 7 및 Fig. 8은 각 지진 크기에 대한 시간이력해석을 통해 얻은 최대값을 나타낸 것으로 전반적으로 지진가속도가 커짐에 따라 구조물의 변위가 크게 나타나는 경향을 보이고 있으며, 지반 물성의 비선형성 및 구조물과 지반의 접촉조건에 의해 다소 비선형성이 나타났다. 또한, 잔교식 및 케이슨식 모두 세 지진 하중에 대해 유효응력해석 시 최대변위가 크게 산정되었다.

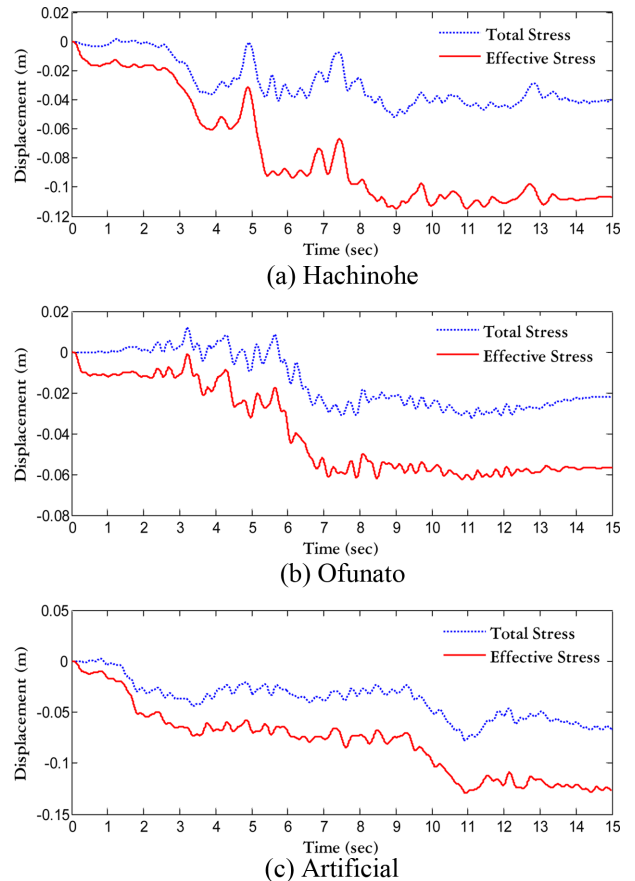


Fig. 5. Displacement under 0.12 g earthquake (Pier type quay wall).

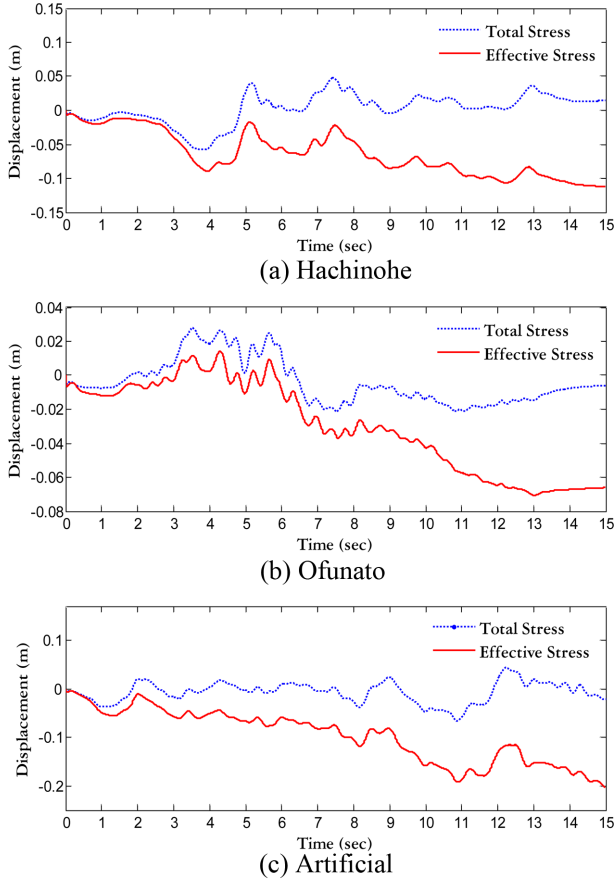


Fig. 6. Displacement under 0.12 g earthquake (Caisson type quay wall).

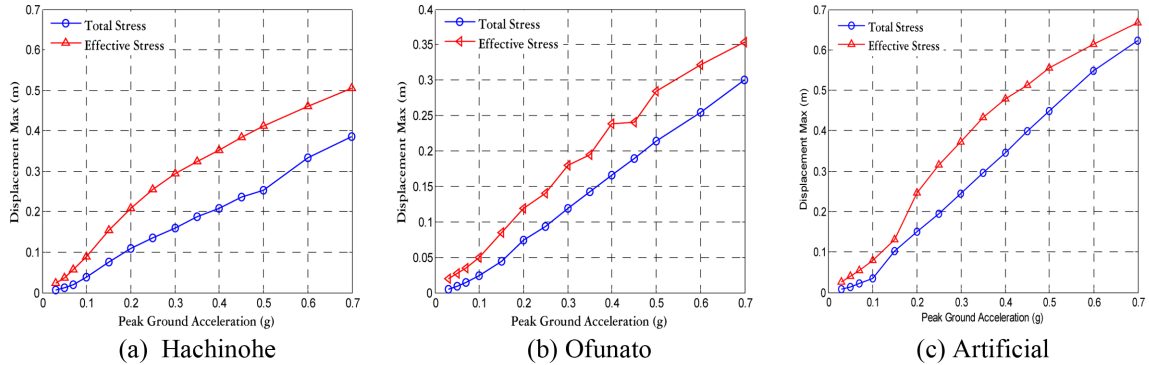


Fig. 7. Maximum Displacement (Pier type quay wall).

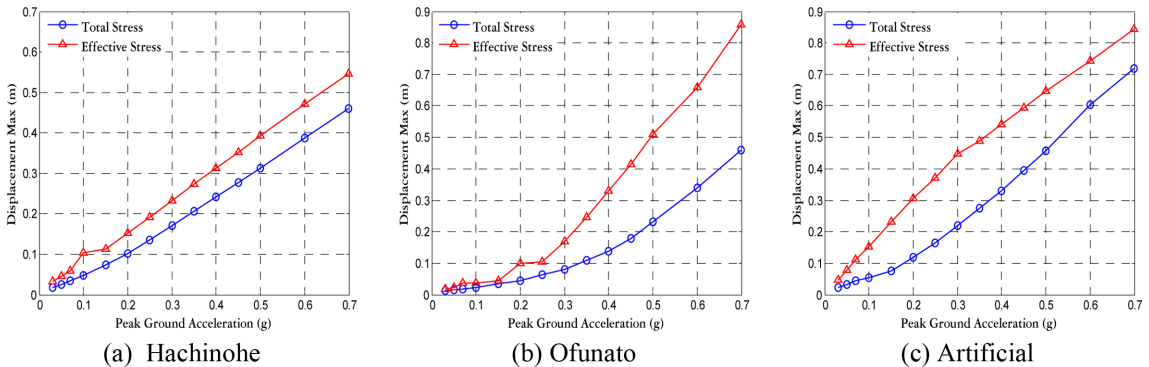


Fig. 8. Maximum Displacement (Caisson type quay wall).

4.5 지진확률

구조물 설치 위치에서 지진이 발생할 확률을 지진재해도로 부터 구할 수 있다. 우리나라 전역에 대한 지진 재현주기 100 년 및 1000년에 해당하는 설계진도는 Fig. 9(Ministry of Oceans and Fisheries, 2014)과 같으며, 수치해석을 위해 평 년주기별 설계지반운동으로부터 해석구조물의 가설대상지역 인 부산 및 인천지역에 대하여 발생 가능한 최대지반가속도 값을 산정하면 Table 3과 같다.

평년재현주기에 따른 최대지반가속도를 이용하여 회귀분석을 수행하면 Type II 극치분포의 확률계수 α 와 u 를 추정 할 수 있다. Type II의 극한분포는 식 (11)의 양변에 대수를 두 번 취하여 수립된 선형관계식을 이용하여 지진재해도 곡선과 관련된 상수를 같이 결정할 수 있으며, 이를 이용하여 보간된 곡선을 구할 수 있다. 또한, 구조물에 손상을 유발하는 최소 지진가속도 a_0 를 설정하여 연평균 지진발생횟수 λ_E 를 구할 수 있다(식 (12)). 연간 발생횟수 λ_E 를 통해 Poisson Process로 가정된 지진발생에 대한 연간 최대 지반가속도와 한번 발생한 지진의 최대지반가속도 사이의 관계를 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 $a_0 = 0.005 g$ 로 충분히 작게 고려하였으며, 그 값을 근간으로 하는 식을 이용하여 λ_E 를 구하였다(Table 4). Fig. 10은 부산과 인천 지역의 지진재해도를 통해 산정된 지진가속도별 초과확률과 회귀분석을 통해 구한 지진가속도 초과확률을 상호 비교한 것이다.

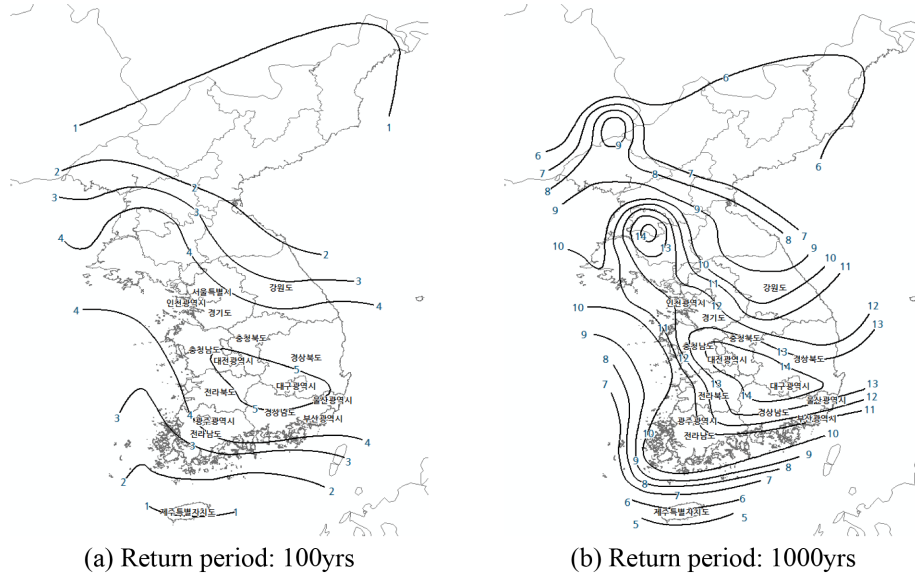


Fig. 9. Peak acceleration with 10% probability of exceedance on Seismic hazard map (%) (Ministry of Oceans and Fisheries, 2014).

Table 3. Peak ground accelerations

Mean Return Period (years)	Exceeding Probability / Period (%/ years)	Peak Ground Acceleration at Busan area (g)	Peak Ground Acceleration at Incheon area (g)
50	10 / 5	0.03	0.03
100	10 / 10	0.045	0.045
200	10 / 20	0.06	0.065
500	10 / 50	0.085	0.095
1000	10 / 100	0.11	0.12
2400	10 / 250	0.17	0.17
4800	10 / 500	0.23	0.215

Table 4. Parameters of extreme distribution

	Busan	Incheon
α	2.3095	2.3462
u	0.0058	0.0062
λ_E	1.4173	1.6873

4.6 지진취약도

앞서 산정한 PGA에 따른 최대변위를 이용하여 변위기반 취약도 해석을 수행하였다. 지진취약도는 식 (15)와 같이 대수정규분포함수로 표현하였으며, 중간값 및 대수표준편차는 최우도추정법을 이용하여 추정하였다(식 (16)). 손상등급은 항만 구조물의 내진검토에서 주로 사용되는 기능수행수준과 붕괴방지수준의 허용값인 10 cm 와 30 cm를 이용하여 구조물의 손상을 평가하였다. Table 5와 Table 6은 지진취약도 분석결과인 대수정규분포함수의 중간값과 대수표준편차이며, Fig. 11과 Fig. 12는 이에 해당하는 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대한 지진취약도 곡선을 보여주고 있다.

잔교식 안벽에 대한 기능수행수준의 지진취약도는 전응력 해석 시 0.21 g에서 50%의 취약성이 나타났지만, 유효응력

Table 5. Median and log-standard deviation (Pier type quay wall)

	Execution level of function (10 cm)		Collapse prevention level (30 cm)	
	Total Stress	Effective Stress	Total Stress	Effective Stress
Median(C_k)	0.205	0.146	0.507	0.344
L.S.D(ζ_k)	0.199	0.062	0.229	0.370

Table 6. Median and log-standard deviation (Caisson type quay wall)

	Execution level of function (10 cm)		Collapse prevention level (30 cm)	
	Total Stress	Effective Stress	Total Stress	Effective Stress
Median(C_k)	0.217	0.10	0.458	0.291
L.S.D(ζ_k)	0.284	0.421	0.145	0.32

해석 시에는 0.15 g에서 50%의 취약성이 나타났다(Fig. 11(a)). 또한 붕괴방지수준에 대한 지진취약도는 전응력해석 시 0.51 g에서 50%의 취약성이 나타났으나, 유효응력해석 시에는 0.35 g에서 50%의 취약성이 예측되었다(Fig. 11(b)).

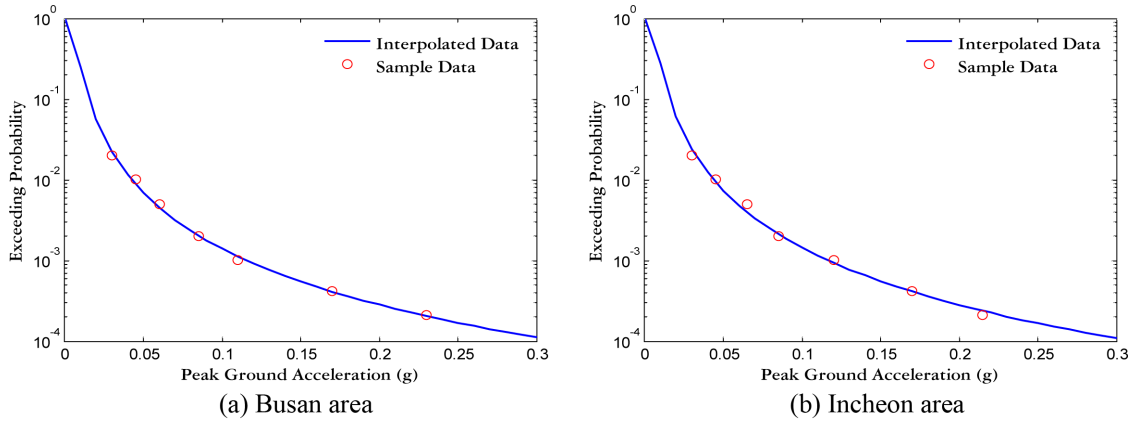


Fig. 10. Estimated probability of exceedence for PGA.

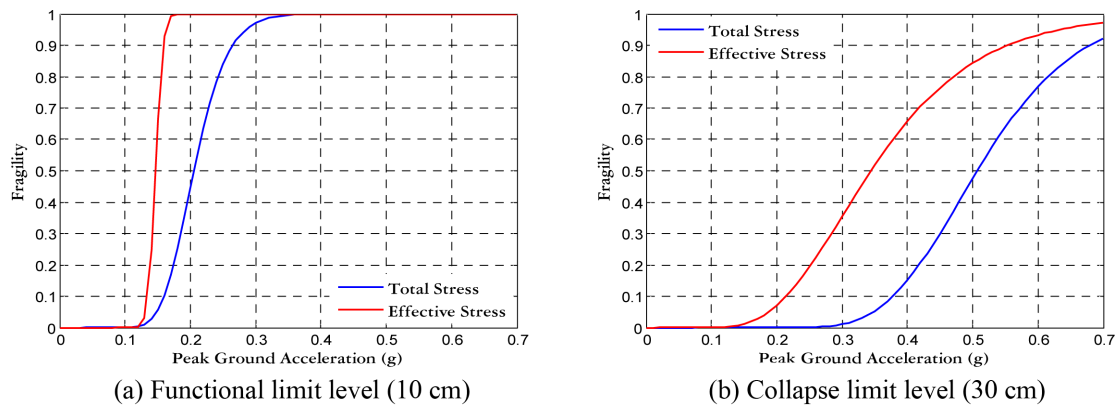


Fig. 11. Fragility curves for maximum displacement criterion (Pier type quay wall).

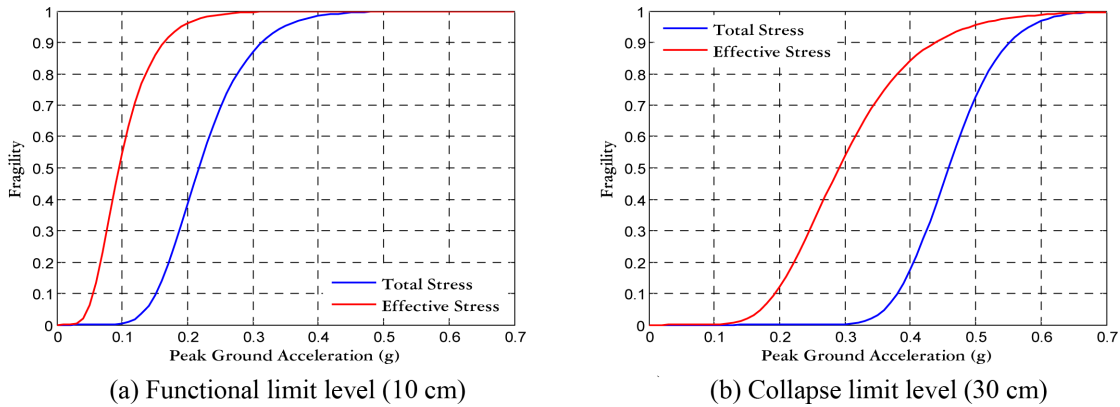


Fig. 12. Fragility curves for maximum displacement criterion (Caisson type quay wall).

한편, 케이슨식 안벽에 대한 기능수행수준의 지진취약도는 전응력해석 시 0.22 g에서 50%의 취약성이 나타났지만, 유효응력해석 시에는 0.1 g에서 50 %의 취약성이 나타났다 (Fig. 12(a)). 또한 붕괴방지수준에 대한 지진취약도는 전응력해석 시 0.46 g에서 50%의 취약성이 나타났으나, 유효응력해석 시에는 0.3 g에서 50%의 취약성이 예측되었다(Fig. 12(b)). 취약도 곡선을 통해 전반적으로 유효응력해석 시 안벽의 PGA에 따른 취약성이 급격히 상승함을 확인할 수 있었다.

4.7 지진위험도

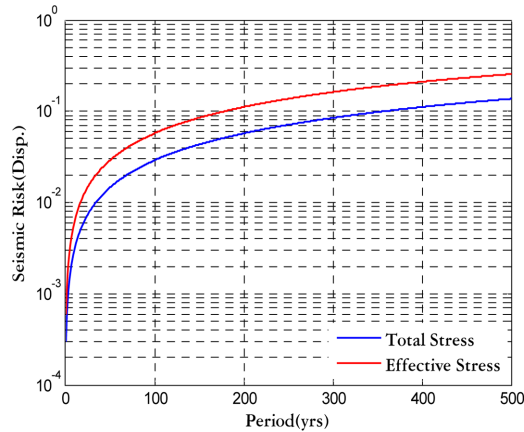
앞서 산정한 지진취약도와 지진발생확률을 식 (19)에 적용하여 안벽구조물의 사용기간별 지진위험도를 Table 7과 Table 8과 같이 구하였으며, 이를 Fig. 13 및 Fig. 14에 도시하였다. 50년 사용기간에 대한 위험도 평가결과 잔교식 안벽의 경우 기능수행수준에서 전응력해석 시 약 0.015(1.5%), 유효응력해석 시 약 0.029(2.9%)로 약 1.9배 차이가 발생하였다. 붕괴방지수준에서는 전응력해석 시 약 0.0019(0.19%), 유효응력해석 시 약 0.0058(0.58%)로 약 3배 차이가 발생하였다. 한편, 케이슨 안벽

Table 7. Seismic risk of Pier type quay wall

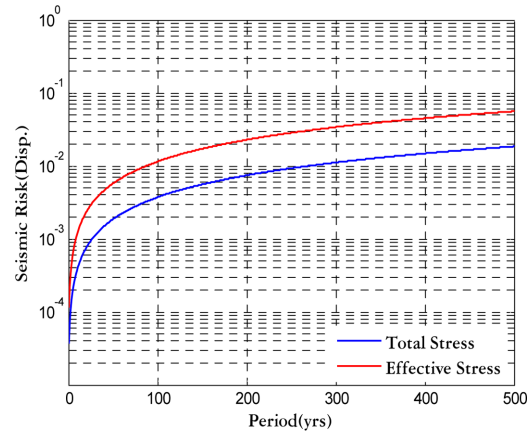
Period	Execution level of function(10 cm)		Collapse prevention level(30 cm)	
	Total Stress	Effective Stress	Total Stress	Effective Stress
1 time	2.963×10^{-4}	5.904×10^{-4}	3.741×10^{-5}	1.159×10^{-4}
10 years	2.959×10^{-3}	5.888×10^{-3}	3.741×10^{-4}	1.158×10^{-3}
50 years	1.471×10^{-2}	2.910×10^{-2}	1.869×10^{-3}	5.779×10^{-3}
100 years	2.920×10^{-2}	5.734×10^{-2}	3.734×10^{-3}	1.152×10^{-2}
200 years	5.755×10^{-2}	1.114×10^{-1}	7.455×10^{-3}	2.292×10^{-2}
500 years	1.377×10^{-1}	2.557×10^{-1}	1.853×10^{-2}	5.631×10^{-2}

Table 8. Seismic risk of Caisson type quay wall

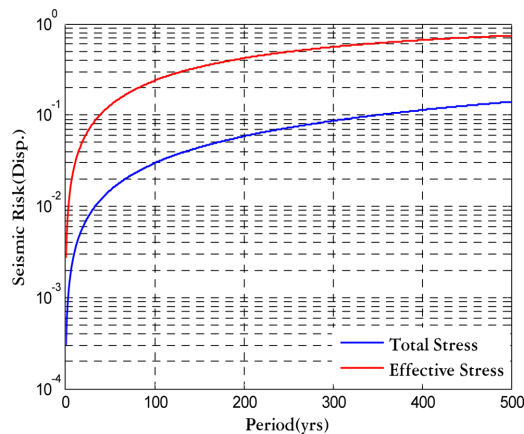
Period	Execution level of function(10 cm)		Collapse prevention level(30 cm)	
	Total Stress	Effective Stress	Total Stress	Effective Stress
1 time	3.026×10^{-4}	2.432×10^{-3}	4.408×10^{-5}	1.612×10^{-4}
10 years	3.022×10^{-3}	2.405×10^{-2}	4.407×10^{-4}	1.611×10^{-3}
50 years	1.502×10^{-2}	1.146×10^{-1}	2.202×10^{-3}	8.027×10^{-3}
100 years	2.981×10^{-2}	2.161×10^{-1}	4.399×10^{-3}	1.599×10^{-2}
200 years	5.874×10^{-2}	3.855×10^{-1}	8.778×10^{-3}	3.172×10^{-2}
500 years	1.404×10^{-1}	7.040×10^{-1}	2.180×10^{-2}	7.743×10^{-2}



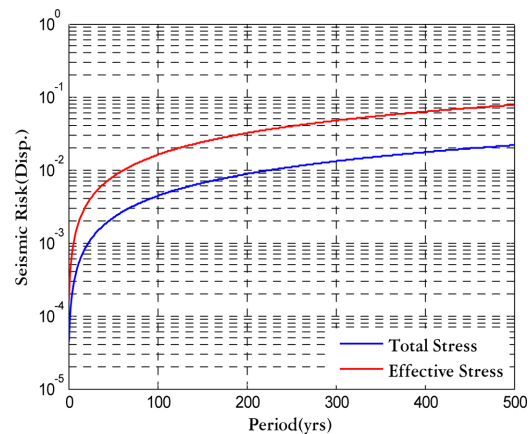
(a) Functional limit level (10 cm)



(b) Collapse limit level (30 cm)

Fig. 13. Reliability index of Pier type quay wall.

(a) Functional limit level (10 cm)



(b) Collapse limit level (30 cm)

Fig. 14. Reliability index of Caisson type quay wall.

의 경우 기능수행수준에서 전응력해석 시 약 0.015(1.5%), 유효응력해석 시 약 0.11(11%)로 약 7배 차이가 발생하였다. 붕괴방지수준에서는 전응력해석 시 약 0.002(0.2%), 유효응력해석 시 약 0.008(0.8%)로 약 4배 차이가 발생하였다.

대체적으로 기능수행수준 보다 붕괴방지 수준의 초과 확률이 매우 낮은 것으로 보아 지진발생으로 인해 대상 구조물의 기능수행을 못할 가능성에 비해 붕괴할 가능성은 매우 낮다고 판단되며, 잔교식 및 케이슨식 안벽 모두 유효응력해석 시 기능수행수준 및 붕괴방지수준의 초과 확률이 전응력해석에 비해 큰 것으로 보아, 전응력해석 시 구조물의 위험도가 낮게 평가됨을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 지진 발생 시 유효응력의 효과를 고려하여 잔교식 및 케이슨식 안벽의 거동을 분석하기 위해 유한차분 해석 프로그램 FLAC 3D를 이용하여 전응력 및 유효응력 기반으로 안벽의 시간이력해석을 수행하고 지진의 발생확률과 안벽의 취약도 곡선을 활용하여 해석기법에 따른 지진위험도를 상호비교 하였다. 수치해석결과 잔교식 및 케이슨식 안벽 모두 유효응력해석 결과가 전응력해석 결과 보다 최대변위가 크게 발생하였으며, 기능수행수준(최대변위 10 cm) 및 붕괴방지수준(최대변위 30 cm)에 대한 취약도 해석을 수행한 결과, 잔교식 안벽과 케이슨식 안벽 모두 유효응력해석 시 PGA에 따른 안벽의 취약성이 전응력해석에 비해 급격히 상승하며, 파괴에 이를 확률 50 %가 더 낮은 PGA에서 나타났다.

최종적으로 안벽의 지진위험도를 산정한 결과 유효응력해석 시 기능수행수준 및 붕괴방지수준의 초과 확률이 전응력해석에 비해 크게 나타나며, 전응력해석 시 구조물의 위험도가 낮게 평가됨을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 통해 안벽구조물의 내진설계 시 지반의 유효응력의 효과를 고려한 동적해석은 필수적이라 판단되며, 본 논문에서는 결정론적 관점에서 지반정수를 설정하였으나, 향후 지반정수의 불확실성을 고려하여 지진해석을 수행한다면 안벽의 지진위험도를 좀 더 정확히 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)(No. 20144030200590)의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

References

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

- Byrne, P. (1991). A Cyclic Shear-Volume Coupling and Pore-Pressure Model for Sand. in Proceedings Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics., St.Louis, Missouri, 47-55.
- Itasca Consulting Group, Inc. (2012). FLAC 3D - Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three Dimensions Ver. 5.0. Minneapolis, USA.
- Kim, D.H., Cho, H.Y., Kim, D.K. and Cho, B.I. (2007). Seismic Risk Analysis of Steel Pile Type Pier. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 19(3), 237-243 (in Korean).
- Kim, S.H., Yi, J.H. and Kim, D.K. (2005). Probabilistic Seismic Risk Analysis of Breakwater Structures. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 17(1), 32-40 (in Korean).
- Kim, S.Y. and Kim, D.H. (2016). Seismic analysis of Steel Pile Type Pier Considering Effective Stress. Journal of Coastal Disaster Prevention, 3(4), 173-177 (in Korean).
- Martin, G. R., Finn, W. D. L. and Seed, H. B. (1975). Fundamentals of Liquefaction Under Cyclic Loading. Joournal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 101, 423-438.
- Ministry of Oceans and Fisheries (1999). Seismic design standards of harbor and port.(in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries (2014). Engineering standards Commentaries Port and Harbor Facilities.(in Korean).
- Moon, Y., Kim, J.K. and Shin, H.Y. (2003). A Study on the dynamic deformation characteristic of the caisson type quay wall. Korean Society of Civil Engineers., 4088-4091 (in Korean).
- Prevost, J.H. (1986). Effective Stress Analysis of Seismic Site Response. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 10, 653-665.
- Qiang, X., Carlos Dinis, D.G., Xianbin, Y. and Yuxin, C. (2013). A Parametric Study of Interface Characteristics in a Buttress Retaining Wall. electronic journal of geotechnical engineering, 18, 1478-1492.
- Seed, H.B and Idriss, I.M. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Earthquake Engineering Reserch Center., University of California, Berkeley.
- Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J. and Naganuma, T. (2000). Statistical Analysis of Fragility Curves. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 126(12), 1224-1231.
- Shin, W.K. (2003). Estimation of Dynamic Lateral Displacement of Caisson quay walls with Effective Stress Analyses for Moderate Earthquake Loading. Master's Thesis, Yonsei University (in Korean).
- Sun, J.I., Goleorkhi, R. and Seed, H.B. (1988). Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils. Earthquake Engineering Reserch Center., University of California, Berkeley.

Received 16 December, 2016

Revised 3 February, 2017

Accepted 9 February, 2017