

지진토압의 위상차를 고려한 케이슨 안벽의 신뢰성해석 Reliability Analysis of Caisson Type Quay wall Considering Phase Difference of Seismic Earth-Pressure

김동현* · 윤길림* · 박우선*

Dong Hyawn Kim, Gil Lim Yoon, and Woo Sun Park

요 旨 : 안벽구조물로 널리 쓰이는 케이슨구조의 신뢰성설계를 위한 위상각 고려방법을 제안하였다. 기존의 방법에서는 위상차를 고려하였기 때문에 토압의 합력이 물리적으로 발생가능한 이상의 값이 산출되어 파괴확률이 과다평가되는 문제가 발생하지만 제안방법은 위상각을 고려하기 때문에 토압합력의 합리적인 산정이 가능하며 결과적으로 파괴확률 산정의 정확도를 높일 수 있게 되었다. 실규모의 케이슨 설계사례를 통해 기존방법과 제안방법에 의한 신뢰성해석 결과를 수치적으로 비교평가하였다.

핵심용어 : 케이슨안벽, 신뢰성, 파괴확률, 위상각, 위상차, 동적토압

Abstract □ For reliability analysis of caisson type quay walls, an approach to include the phase difference between the caisson motion and the dynamic earth pressure is proposed. Present approach, which uses the phase difference parameter, may over-estimate earth pressure. But the proposed approach considers the phase angle instead of the phase difference in estimating resultant external load. Therefore, it is more reasonable than the previous one. Accordingly, calculation of probability of failure becomes more accurate. Numerical example is used to compare the two approaches.

Keywords: caisson-type quay wall, reliability, probability of failure, phase angle, phase difference, seismic earth pressure

1. 서 론

지진하중에 의한 케이슨 안벽의 파괴확률을 산정함에 있어 배면토사의 액상화 발생여부는 파괴확률을 크게 좌우하는 요인이다. 그것은 케이슨 배면토와 케이슨 체체의 동적거동이 일체화하여 위상차가 발생하지 않을 때와 액상화로 인하여 위상차가 발생할 때 케이슨에 가해지는 토압의 크기가 달라지기 때문이다. 토압의 위상차를 고려한 케이슨 안벽의 신뢰성 해석기법은 Nagao 등(2001) 이 제안한 바 있다. 이에 의하면, 액상화가 발생하지 않는 조건에서는 케이슨과 토압의 위상차가 발생하여 체체에 가해지는 순수 토압성분이 감소하는 현상이 발생한다. 따라

서, 위상차를 고려하지 않은 경우보다 파괴확률이 작게 산정된다(Inoue 등, 2003). 현행 설계법에서는 액상화가 발생하지 않도록 설계하기 때문에 위상차에 대한 고려없이 신뢰성 해석을 수행하는 것은 파괴확률을 과다평가하는 결과를 낳게 된다.

한편, Nagao 등이 사용한 해석방법에서는 동위상(위상차 = 0°)일 때와 완전 역위상(180°)일 때 위상차 변수에 확률적 특성을 부여할 경우 물리적으로 오류가 발생하는 문제점이 있다. 따라서, 이러한 문제점을 검토한 후 위상차를 합리적으로 고려할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 제시된 방법과 기존의 해석방법을 비교 검토하기 위하여 케이슨 안벽의 설계사례를 이용하였다.

*한국해양연구원 연안·항만공학연구본부(Corresponding author: Dong Hyawn Kim, Coastal and Harbor Engineering Research Lab., KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea. eastlite@kordi.re.kr)

2. 케이슨 안벽의 신뢰성 해석

2.1 신뢰성 해석 기법

신뢰성 해석의 방법에는 신뢰함수를 직접 이용하는 것 (Level III)과 이를 근사화하여 이용하는 것(Level II)이 있다. 정확도 측면에서는 Level III 기법이 우수하지만 복잡한 신뢰함수를 직접 적분하거나 Monte Carlo Simulation 등과 같이 난수 조합에 의한 수치모사를 수행하는 것은 실무적으로 활용하기에 용이하지 않다. 그래서, 정확도가 다소 떨어지지만 활용도가 높은 Level II 방법이 실무에서 자주 사용된다. 특히, 이 방법은 정확한 신뢰함수를 구하기 어려운 경우 일차(평균)와 이차모멘트(분산)만으로도 파괴확률을 구할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 이차모멘트 근사기법(Second Moment Approach)을 이용한 해석법을 사용하였다.

이차모멘트법은 해석하고자 하는 신뢰함수의 평균과 표준편차를 구하는 과정이 필요하다. 비선형 신뢰함수는 일반적으로 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$y = g(\mathbf{x}) \tag{1}$$

위의 신뢰함수를 1차 근사화하면 그 평균과 표준편차는 다음과 같다.

$$\mu_y \cong g(\mu_x) \tag{2}$$

$$\sigma_y \cong \sigma_x \left| \frac{\partial g}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mu_x} \tag{3}$$

여기서, μ_x 는 절대값을 의미한다. 보다 정확도를 높이고자 할 때 2차 근사화를 할 수 있는데 그 결과는 다음과 같다.

$$\mu_y \cong g(\mu_x) + \frac{1}{2} \sigma_x^2 \left(\frac{\partial^2 g}{\partial \mathbf{x}^2} \right) \tag{4}$$

$$\sigma_y^2 \cong \sigma_x^2 \left(\frac{\partial g}{\partial \mathbf{x}} \right)^2 - \frac{1}{4} \sigma_x^4 \left(\frac{\partial^2 g}{\partial \mathbf{x}^2} \right)^2 + E(\mathbf{x} - \mu_x)^3 \frac{\partial^3 g}{\partial \mathbf{x} \partial \mathbf{x}^2} + \frac{1}{4} E(\mathbf{x} - \mu_x)^4 \left(\frac{\partial^2 g}{\partial \mathbf{x}^2} \right)^2 \tag{5}$$

여기서, $E(\cdot)$ 는 평균치를 나타낸다. 그러나, 2차 근사화된 표준편차는 확률변수의 3차 및 4차 모멘트가 필요하기 때문에 실무에서 활용하기에 용이하지 않다. 따라서, 평균의 근사치로는 식 (4)를, 표준편차의 근사치로는 식 (3)을 사용하기도 한다.

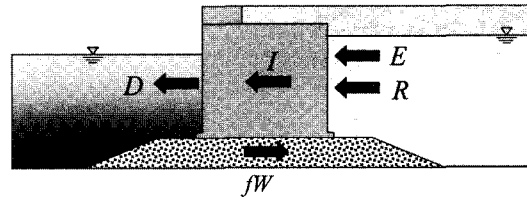


Fig. 1. Force equilibrium of caisson type quay wall under earthquake.

2.2 케이슨 안벽의 신뢰성 해석

Fig. 1은 케이슨 안벽의 일반적인 예이다. 지진시 케이슨의 신뢰성 해석시 체체에 가해지는 하중으로는 배면토사에 의한 토압(E), 잔류수위에 의한 잔류수압(R), 지진시 관성력(I) 및 동수압(D) 등이며 저항력으로는 체체와 사석사이의 마찰계수가 f 이고 자중이 W 일 때의 마찰력 fW 가 있다. 발생할 수 있는 파괴모드는 횡방향 하중에 의한 활동파괴와 전도모멘트에 의한 전도파괴 및 지지력 파괴 등이다. 이 중에서 본 연구에서는 활동과 전도에 의한 파괴확률을 해석하였으며 각 파괴모드에 대한 신뢰함수(활동: y_s , 전도: y_o)는 식 (6) 및 (7)과 같다.

$$y_s = fW - (E + R + I + D) \tag{6}$$

$$y_o = M_w - (M_E + M_R + M_I + M_D) \tag{7}$$

여기서, M_i 는 하중 i 에 의한 모멘트를 나타낸다. 따라서, 각 파괴모드에 대한 이차모멘트 근사법에 의한 파괴확률은 식 (8)과 같다.

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_y}{\sigma_y}\right) \tag{8}$$

여기서, β 는 신뢰도지수를 Φ 는 표준정규분포의 누적확률밀도함수이다.

2.3 동적토압의 위상차

Fig. 2는 액상화 유무에 따른 지진시 토압의 위상차를 보여주고 있다. (a)의 그림은 액상화가 발생하지 않는 경우에 케이슨의 관성력과 지진토압의 시간이력을 보여주고 있다. 이 경우 지진토압은 체체의 활동파괴에 대해 하중으로 작용하기 보다는 오히려 저항력으로 작용함을 알 수 있다. 즉, 위상차가 180도에서는 토압이 체체관성력과 반대방향으로 작용하기 때문에 안정성이 증가한다. (b)는 위상차가 거의 없는 경우로서 이 때는 위상차를 고려하지 않는 기존 설계법과 차이가 없게 된다. 따라서, 토압의 위

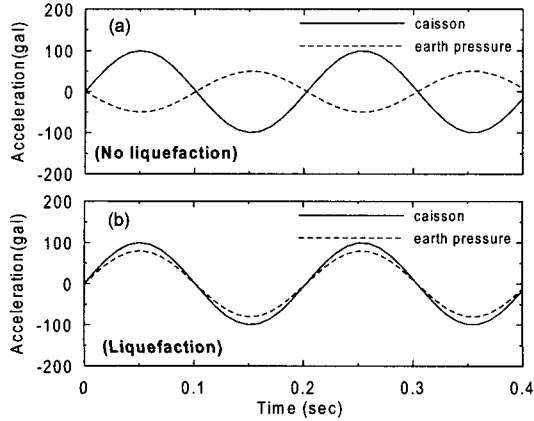


Fig. 2. Phase difference according to the presence of liquefaction.

상차를 고려해야 지진시의 정확한 파괴확률해석이 가능해진다.

Nagao 등(2001)은 배면토사에 의해 체체에 가해지는 토압의 위상차를 고려하기 위해 다음 식을 제안한 바 있다.

$$E = E_{st} + E_{dy} = E_{st} + (E_p - E_{st}) \frac{k_h}{k_{hp}} PD \quad (9)$$

여기서, E_{st} 및 E_{dy} 은 각각 토압의 정적 및 동적 성분이며, k_h 는 설계진도, 첨자 p 는 현행설계법에 의한 설계치, PD 는 위상차 변수를 각각 나타낸다. 만일 위상차가 발생하지 않아 체체의 가속도와 토압이 동위상이 된다면 PD 가 1이 되어 동적성분의 100%가 체체에 가해지지만 위상차가 180°가 되어 역위상이 된다면 PD 가 -1이 되어 토압의 동적성분이 정적성분을 상쇄하는 현상이 발생한다. Nagao 등의 논문에서는 일반적으로 위상차 변수 PD 가 -1일 때(완전 역위상) 케이슨 안벽의 활동 및 전도 파괴확률이 가장 작고 +1일 때(완전 동위상) 가장 크다는 사실을 보였다.

그들의 연구결과는 토압의 동적효과를 고려하여 체체

에 가해지는 토압을 현실적으로 산정하였기 때문에 신뢰성 해석의 정확도를 높일 수 있는 중요한 연구결과로 받아들여지고 있다. 그러나, PD 를 확률변수로 고려할 때 발생하는 문제점은 평균이 ± 1 에서 일정값의 분산을 갖는다면 +1보다 크거나 -1보다 작은 값을 가질 수 있다는 사실이다. 이것은 PD 가 가질 수 있는 범위가 -1에서 +1까지라는 물리적인 관념과 배치되는 결과가 나온다. 이러한 현상을 극복하기 위해서 본 연구에서는 다음과 같은 개선식을 제시하고자 한다.

$$E = E_{st} + (E_p - E_{st}) \frac{k_h}{k_{hp}} \cos \phi \quad (10)$$

여기서, ϕ 는 위상각을 나타내는 확률변수서 값의 범위는 0°-180°이다. 위상차를 나타내기 위해서 cosine함수를 사용하므로써 위상차가 -1보다 작거나 +1보다 큰 값을 갖지 않고 항상 -1과 1사이의 값을 갖게 된다.

3. 수치해석

수치해석에 사용한 케이슨 안벽의 신뢰성 해석은 위상차의 고려방법과 평균 및 표준편차의 산정방법에 따라 Table 1과 같이 모두 4가지 방법을 이용하였다. 방법 I은 Nagao 등이 사용한 것으로 위상차를 확률변수 PD 로 고려하여 평균치와 표준편차를 산정하였고 방법 II-IV는 위상각과 cosine함수를 이용하였으나 평균 및 표준편차의 근사치를 구하는 방법만 달리 했다. 방법 II는 평균과 표준편차를 모두 1차 근사값을 사용하였으며 방법 III은 두 값 모두 2차 근사치를 사용하였다. 방법 IV는 평균값은 2차 근사치를 표준편차는 1차 근사치를 사용하였다.

수치해석에 사용한 전면조위(H_{WL}), 잔류수위(H_{RWL}), 지진계수(k_h), 마찰계수(f) 및 정적토압(E_{st})의 확률분포는 Table 2의 값을 사용하였다. 지진시 동적토압의 설계치는 86.91 t/m이다.

Table 1. Reliability analysis method

method	variable for phase difference	mean	standard deviation
I	PD	μ_{PD}	σ_{PD}
II	$\cos \phi$	$\cos \mu_\phi$	$\sigma_\phi \sin \mu_\phi $
III	$\cos \phi$	$\left(1 - \frac{1}{2}\sigma_\phi^2\right) \cos \mu_\phi$	$\sqrt{\sigma_\phi^2 \sin^2 \phi - \frac{1}{4}\sigma_\phi^4 \cos^2 \phi + E(\phi - \mu_\phi)^3 \sin \mu_\phi \cos \mu_\phi + \frac{1}{4}E(\phi - \mu_\phi)^4 \cos^2 \mu_\phi}$
IV	$\cos \phi$	$\left(1 - \frac{1}{2}\sigma_\phi^2\right) \cos \mu_\phi$	$\sigma_\phi \sin \mu_\phi $

Table 2. Distribution of design variables

variate	mean	standard deviation
$H_{WL}(m)$	2.293	0.688
$H_{RWL}(m)$	2.523	0.910
k_h	0.070	0.018
f	0.636	0.095
$H_{st}(Um)$	67.70	6.770

확률변수 PD 와 ϕ 의 표준편차 변화에 따른 I-IV 방법에 의한 파괴확률의 비교를 위해서 다음과 같은 관계를 이용하였다. 즉,

$$PD = \cos\phi \tag{11}$$

이므로

$$\sigma_\phi^2 \cong \frac{\sigma_{PD}^2}{\sin^2 \mu_\phi} \tag{12}$$

의 관계가 성립한다. 이때 $\sin\mu_\phi$ (또는 $\mu_{PD}=0$)에서는 $\sigma_\phi \cong \sigma_{PD}$ 의 관계가 성립한다. 따라서, 위상차(PD)와 위상각(ϕ)의 표준편차를 동일하게 설정하여 해석을 수행하였으며 각 방법의 정량적 비교를 위해서 $\mu_{PD} \neq 0$ 인 다른 설계조건에 대하여도 이 관계를 적용하였다.

먼저, Fig. 3과 Fig. 4는 위상차의 표준편차가 0.1일 때 위상차 평균치의 변화에 따른 활동 및 전도파괴확률을 나타내고 있다. σ_{PD} (또는 σ_ϕ)가 상대적으로 작아 각 해석방법에 의한 차이는 거의 없는 것으로 보였다. 활동파괴확률은 μ_{PD} (또는 $\cos\mu_\phi$)의 증가에 따라 크게 나타났으며 전도파괴는 일시 감소하다 증가하는 모습을 보였다. $\sigma_{PD}=0.3$ 일 때는 $\mu_{PD}=1$ (또는 $\mu_\phi=0$)에 접근할수록 각 방법간에 차

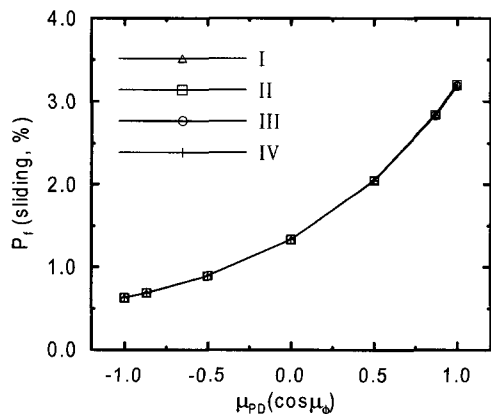


Fig. 3. Sliding failure probability vs. mean phase difference ($\sigma_{PD}=0.1$).

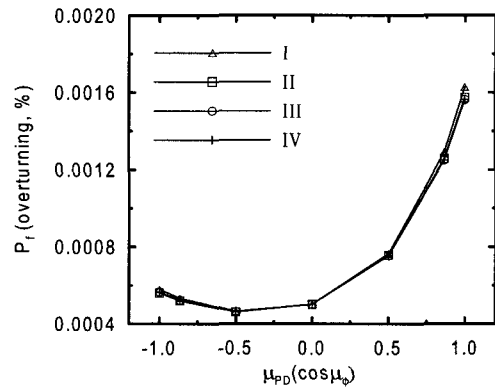


Fig. 4. Overturning failure probability vs. mean phase difference ($\sigma_{PD}=0.1$).

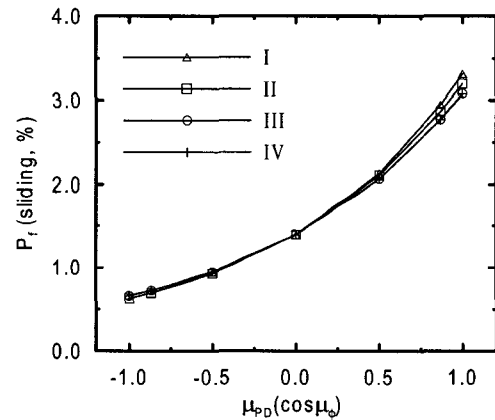


Fig. 5. Sliding failure probability vs. mean phase difference ($\sigma_{PD}=0.3$).

이가 벌어지는 현상이 발생하였다. 전도파괴확률은 μ_{PD} 가 -1.0, 1.0 값을 가질 때 각 방법간에 차이가 발생하였다. σ_{PD} 가 클수록 이러한 현상은 두드러졌다(Fig. 7 및 Fig. 8). 또한, 방법 III은 IV와 그 결과가 매우 잘 일치하기 때문에 표준편차를 1차 근사만으로도 정확도가 매우 높음을 알 수 있다. Fig. 5~Fig. 8은 σ_{PD} 가 각각 0.3, 0.5일 때의 파괴확률변화를 보여주고 있다.

$\mu_{PD}=1$ 일 때 σ_{PD} 가 커질수록 방법 I(기준방법)은 PD 가 1.0을 넘을 확률이 더 커지게 되어 파괴확률이 크게 나타나고 있으나 PD 1.0보다 크다는 것은 물리적인 관념에 위배되는 것이므로 실제 파괴확률보다 크게 산정된다고 볼 수 있다. 또한, Fig. 4에서와 같이 전도파괴확률이 위상차의 평균치 증가에 따라 일시적으로 증가하는 것은 Fig. 9로 설명할 수 있다. Table 1에서 알 수 있듯이 $\mu_{PD}=1.0$ (또는 $\mu_\phi=180^\circ$)에서부터 위상차의 평균치가 증가할수록

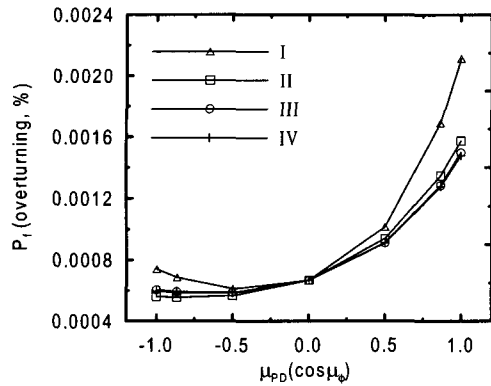


Fig. 6. Overturning failure probability vs. mean phase difference ($\sigma_{PD}=0.3$).

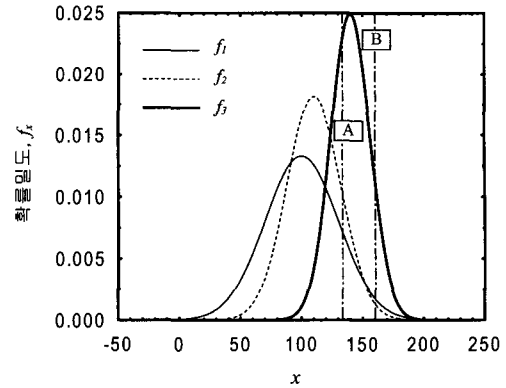


Fig. 9. Failure probability vs. standard deviation.

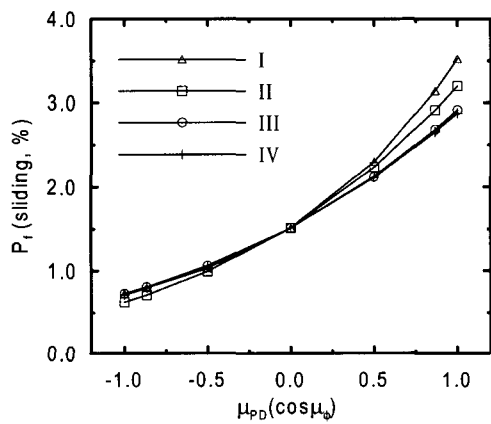


Fig. 7. Sliding failure probability vs. mean phase difference ($\sigma_{PD}=0.5$).

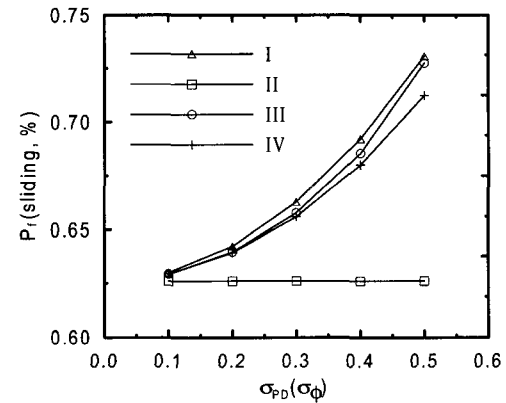


Fig. 10. Sliding failure probability vs. standard deviation of phase difference ($\mu_{PD}=-1.0$).

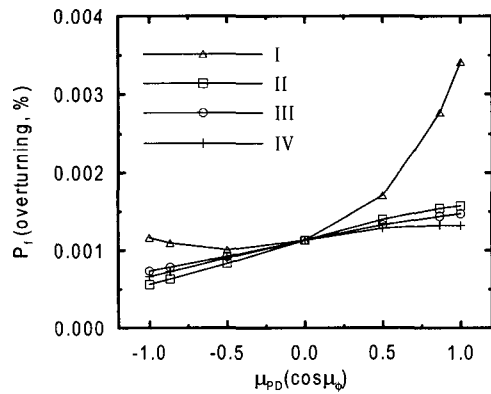


Fig. 8. Overturning failure probability vs. mean phase difference ($\sigma_{PD}=0.5$).

표준편차가 일시 감소한다. Fig. 9에서 이와 같이 평균치가 증가하면서 표준편차가 감소하는 3가지 확률밀도함수를 보여주고 있다. f_1, f_2 , 및 f_3 의 평균치는 각각 100, 110,

140이며 표준편차는 각각 30, 22, 16인 정규분포 확률밀도함수이다. A지점보다 큰 확률이 파괴확률로 주어지는 파괴모드에 대하여는 평균치 증가에 따라 파괴확률이 증가하지만 B면을 파괴기준으로 갖는 파괴모드에서는 f_1 에 의한 것보다 f_2 에 의한 확률이 작아지고 f_3 에 의한 파괴확률은 커지게 된다. 즉, 본 수치해석에서의 활동파괴와 같이 그 확률이 큰 경우는 평균위상차 증가에 따라 파괴확률이 증가하지만 전도파괴에서와 같이 파괴확률이 작은 경우는 일시적 감소 후에 다시 증가한다.

Fig. 10~Fig. 15는 μ_{PD} (또는 μ_ϕ)를 고정한 후 표준편차의 변화에 따른 파괴확률을 해석한 결과이다. 위상차 평균치가 -1일 때 방법 II를 제외하고는 σ_{PD} (또는 σ_ϕ)가 증가함에 따라 활동 및 전도 파괴확률이 증가하였다. 이것은 전체적으로 위상의 분포가 넓어지면서 토압이 증가할 확률을 높여주기 때문이다. 방법 II에서 파괴확률에 변화가 없는 것은 Table 1에서 알 수 있듯이 위상차의 평균

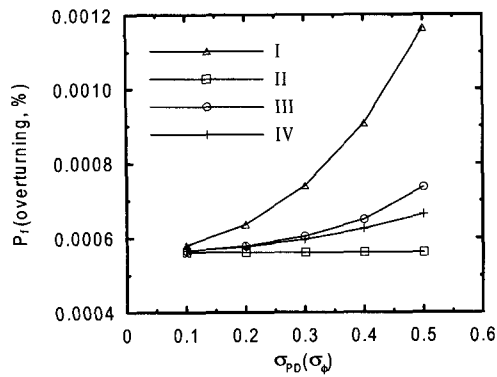


Fig. 11. Overturning failure probability vs. standard deviation of phase difference ($\mu_{PD}=-1.0$).

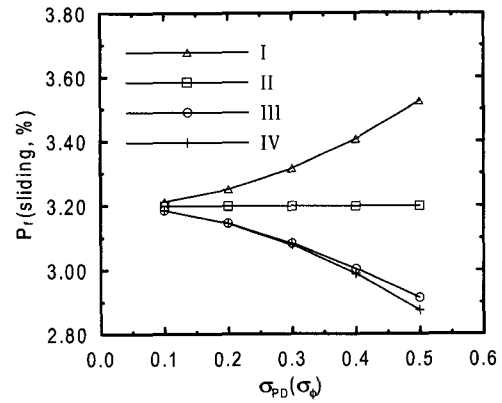


Fig. 14. Sliding failure probability vs. standard deviation of phase difference ($\mu_{PD}=1.0$).

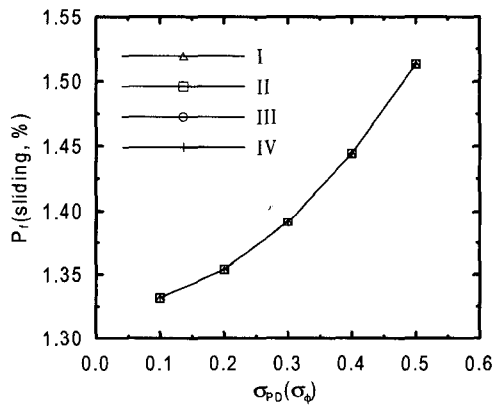


Fig. 12. Sliding failure probability vs. standard deviation of phase difference ($\mu_{PD}=0.0$).

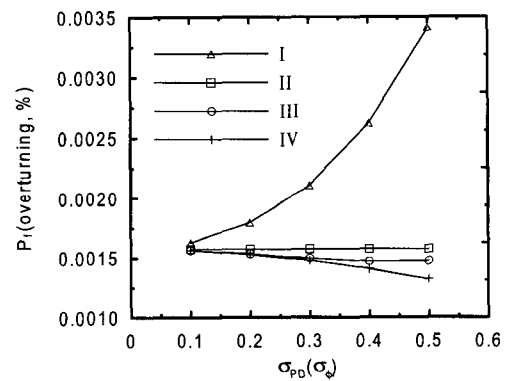


Fig. 15. Overturning failure probability vs. standard deviation of phase difference ($\mu_{PD}=1.0$).

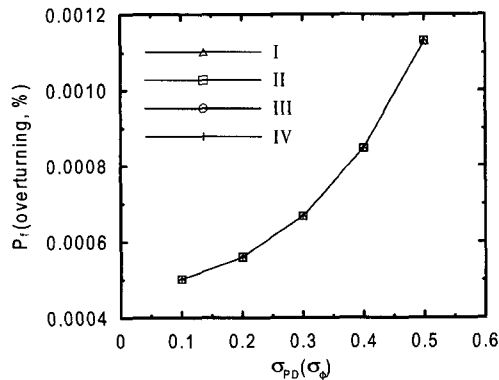


Fig. 13. Overturning failure probability vs. standard deviation of phase difference ($\mu_{PD}=0.0$).

과 표준편차가 일정하기 때문이다. 위상차 평균치가 0일 때는 네가지 방법모두 같은 결과를 주었다. 또한, 위상차 평균치가 1.0일 때는 방법 I은 파괴확률이 증가한 반면 방법 III, IV는 감소하였다. 이것은 방법 I은 위상차가 1.0

을 넘는 비현실적인 결과로 인해 토압이 과다평가되는 반면 방법 III, IV에서는 위상각의 분포가 넓어짐에 따라 상대적으로 값의 분포가 1보다 작은 값들이 발생할 확률이 높아지고 결과적으로 토압의 감소경향을 초래하기 때문이다. 이상의 해석에서도 방법 III과 IV에 의한 결과는 그 차이가 크지 않았다.

4. 결 론

케이스안벽의 지진시 파괴확률 산정시 케이스 제체와 동적토압의 위상차를 고려하는 방법에 대하여 기존방법의 모순점을 분석하고 이를 해결하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 기존방법에서 동적토압을 고려하기 위해 도입한 위상차 확률변수가 물리법칙과 위배되는 반면 제안방법의 위상각을 이용한 방법은 물리적으로 잘 부합된다. 따라서, 기존방법을 이용할 때 발생하는 과대평가되는 문제

점을 해소할 수 있다. 또한, 활동파괴와 같이 확률이 비교적 큰 파괴모드는 위상차의 평균치가 증가함에 따라 확률도 증가하지만, 전도파괴와 같이 그 확률이 비교적 작은 경우는 위상차 평균의 증가에 따라 일시 감소하다 다시 증가하는 현상을 보인다. 결론적으로 케이스 안벽의 파괴확률은 위상차의 확률분포에 따라 그 값에 상당한 차이를 보인다. 따라서, 신뢰성 해석의 합리성을 확보하기 위해서는 위상차를 고려해야 하며 그 분포 또한 적절한 값을 사용해야 함을 알 수 있다. 위상차의 확률분포 산정 과정에서 평균치의 2차 근사값을 사용했을 때는 표준편차를 1차 근사화한 경우(방법 IV)와 2차 근사화한 경우의(방법 III) 차이가 미미하다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원 개인창의과제사업 중 “인공 신경망을 이용한 방파제 설계기술 및 신뢰성 해석기술개발(과제번호: PE84500)”에 대한 사업비 지원에 의해 수

행된 것으로 한국해양연구원에 감사드린다.

참고문헌

- 해양수산부, 1999. 항만 및 어항설계기준
 Ang, A.H.S. and Tang, W.H., 1975. *Probability concepts in engineering planning and design*, John Wiley & Sons, Inc.
 Nagao, T., Yoshinami, Y., Sanuki, T. and Kamon, M., 2001. Reliability based design way for caisson type quay walls, *Journal of Structural Engineering, JSCE*, **47A**, pp. 293-304.
 Inoue, K., Miura, K., Otsuka, N., Yoshida, N. and Sasajima, T., 2003. Numerical analysis of the earth pressure during earthquake on the gravity type quay wall, *Proc. The 13th Int. Off-shore & Polar Eng. Conf.(ISOPE2003)*, San Francisco, **3**, pp. 750-754.

Received October 21, 2003

Accepted November 25, 2003