

중력식 항만시설물의 원호활동 파괴에 대한 부분안전계수 연구 Partial Safety Factors for Circular Slip Failure of Gravity Type Port Facilities

윤길림¹, 윤여원², 김홍연³
Gil Lim Yoon¹, Yeo Won Yoon² and Hong Yeon Kim³

1. 서 론

중력식 항만시설물의 원호활동 파괴모드에 대한 신뢰성 설계를 위하여 각 확률변수의 부분안전계수를 결정하였다. 항만시설물의 부분안전계수에 대한 연구는 Level 1 방법에 따라 최근 설계기준을 개정한바 있는 일본에서 많은 연구가 이루어진바 있다. 특히, Ozaki 등(2005)은 안벽 및 방파제의 원호활동에 대하여 총 기대비용에서 얻어진 목표파괴확률에 해당하는 부분안전계수를 구하였다.

국내에서도 방파제와 안벽구조물의 각 파괴모드에 대한 부분안전계수를 산정하기 위한 연구가 지속되어 왔으며(이, 2007; 김 등, 2009), 신뢰성 설계기준 개발 연구가 시작되면서 더욱 활발해졌다. 그러나, 구조물별 다양한 파괴모드 중 원호활동 파괴모드의 신뢰성 해석에 대한 연구는 비교적 많지 않다. 항만시설물의 파괴는 단일 파괴 보다는 두가지 이상의 파괴가 동시에 발생함으로써 큰 피해를 초래하는 복합파괴의 영향이 매우 큰 것으로 알려져 있다. 이때, 구조물의 활동, 전도 및 지지력 부족을 유발하는 원호활동은 전반 활동파괴로써, 그로인한 배후시설의 피해규모는 매우 크다. 따라서, 원호활동 파괴모드에 대한 신뢰성 해석은 매우 중요하지만 현재까지는 몬테카를로 시뮬레이션(MCS)에 대부분 의존하여 왔다. 유럽과 일본 등의 최근 설계기준도 부분계수에 의한 설계법을 따르는 만큼 원호활동 파괴에 대하여도 Level 1 및 2 설계법의 연구가 필요

하다고 하겠다.

본 연구에서는 중력식 항만시설물중 특히 안벽의 원호활동 파괴에 대하여 신뢰성 해석을 수행하고 그로부터 얻은 민감도지수 등을 이용하여 부분안전계수를 산정하였다. 또한, 산정된 각 확률변수의 부분안전계수를 검증하여 타당함을 확인하였다.

2. 신뢰성 해석

2.1 해석조건

해석단면은 원지반 상부에 4.1m의 점토층과 사석마운드 하부에 모래층이 존재하는 중력식 안벽이다. 케이슨 자중은 $1,975.68kN/m$ 이고 삭망평 균저조위(L.W.L)는 $(\pm)0m$, 잔류수위(R.W.L)는 $(+)1.58m$ 이다.

중력식 안벽의 신뢰성 설계에 필요한 확률변수는 모래의 단위중량(γ_{Smd}) 및 내부마찰각($\tan\phi'_{Smd}$), 점토의 단위중량(γ_{Clay}) 및 비배수 전단강도(c'), 상재하중(q), 잔류수위(RWL) 및 지진계수(K_h) 등이다. 각 확률변수의 평균치(μ)와 변동계수(COV)를 Table. 1에 나타내었고, 확률분포는 지진계수(극치분포)를 제외하고 모두 정규분포로 가정하였다.

중력식 항만시설물의 하부는 침하 및 세굴방지 등을 위하여 사석마운드로 처리된다. 이때, 사석마운드가 기초지반 상부에 놓이는 경우와 하부에 놓이는 경우는 마운드가 원호활동에 미치는 영향이 다르다. 즉, 마운드가 기초지반 상부에 위치

1 발표자: 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 책임연구원
2 인하대학교 사회기반시스템공학부 교수
3 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 연구원(인하대학교 박사과정)

Table 1. Probability distribution of random variables

X	μ	COV	Dist.	X	μ	COV	Dist.
γ_{Smd}	$19kN/m^3$	0.03	Normal	q	$174.93kN/m$	0.40	Normal
γ_{Clay}	$16kN/m^3$	0.04	Normal	$R.W.L$	$1.58m$	0.05	Normal
c'	$20kN/m^2$	0.20	Normal	K_h	0.077	0.25	Extreme
$\tan\phi'_{Smd}$	0.58	0.10	Normal	$\gamma_{Con'c}$	$24kN/m^3$	-	Constant

할 때 마운드는 원호활동면에 대하여 하중으로 작용하지만, 기초지반 하부에 위치할 경우는 저항으로 작용한다. 따라서, 동일한 해석단면에서 마운드의 설치위치에 따라 2가지 경우를 별도로 해석하였다.

2.2 신뢰성 해석

일계신뢰도법(FORM)에 의한 신뢰성 해석을 수행하여 해석단면의 신뢰수준을 파악하고 확률변수의 민감도를 구하였다.

현행 설계기준에서는 원호활동에 대한 안정성 검토시 수정 Fellenius법에 의한 절편법을 이용하도록 되어있다. 상기 2가지 해석단면에 대하여 토층, 하중위치 및 기하학적 형상 등에 따라 적절히 절편을 분할하고 각 분할편의 자중을 산정하였으며 거기에 상재하중 및 수평하중을 작용시켜 총 활동모멘트를 계산하였다. 그리고, 각 분할편에 해당하는 토층의 비배수 전단강도와 내부마찰각을 이용하여 총 저항모멘트를 구하였다. 최종적으로 식 (1)의 한계상태함수에 총 활동 및 저항모멘트를 대입하여 해석을 수행하였다. 여기서, b 는 분할편의 폭, $W(W')$ 는 단위길이당 분할편의 전체(유효)중량, α 는 분할편 저면이 수평면과 이루는 각, R 은 활동원의 반경, H 는 활동원호 내의 분할편에 작용하는 수평력을 의미하고 a 는 H 의 작용점과 활동원의 중심 사이의 팔길이이다.

$$g(x) = \frac{\sum(c'b + W' \cos^2\alpha \tan\phi') \sec\alpha}{\sum Ws\sin\alpha + \frac{1}{R} \sum Ha} - 1 \quad (1)$$

해석결과, 사석마운드가 기초지반 상부에 위치하는 경우 β (신뢰지수)=2.604, 하부에 위치하는 경우 β =3.086을 얻었다. 즉, 신뢰지수를 기준으로 볼 때 동일한 단면에서 후자가 전자에 비해 33%가량 높은 안전마진을 가지고 있음을 알 수 있다.

해석치를 검증하기 위하여 추가적으로 MCS법에

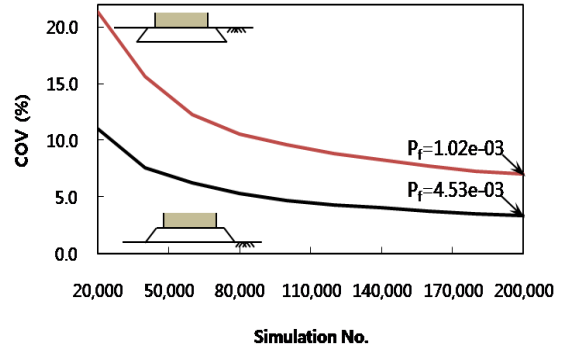


Fig. 1. Convergence trends of COV with simulation.

의해 200,000회의 시뮬레이션을 수행한 결과, 파괴확률은 각각 $P_f=0.453\%$ 와 $P_f=0.102\%$ 를 얻었고 이를 신뢰지수로 환산하면 $\beta=2.610$ 및 3.084 로 FORM 해석결과와 일치한다. Fig. 1은 MCS 과정에서 계산횟수에 따른 COV 감소 및 수렴추세를 나타낸다.

3. 부분안전계수 결정

3.1 민감도 분석

부분안전계수를 계산하기 위한 FORM 해석과정에서 얻어진 각 확률변수의 민감도는 사석마운드가 기초지반 상부에 위치하는 경우 기초지반의 내부마찰각, 지진계수, 마운드 하부지반의 단위중량(γ_R), 점성토의 비배수 전단강도, 상재하중 및 잔류수위 순으로 크게 나타났다. 반면, 사석마운드가 기초지반 하부에 위치하는 경우는 기초지반의 내부마찰각, 지진계수, 마운드 및 하부 기초지반의 단위중량(γ_R), 점성토의 비배수 전단강도, 마운드 상부지반의 단위중량(γ_S), 잔류수위 및 상재하중의 순으로 민감했다. 즉, 설계시 한계상태 발생에 가장 큰 영향을 미치는 확률변수는 기초지반의 내부마찰각과 지진계수로 나타났다.

확률변수의 민감도지수(α_X)는 (-)부호를 가질 때 하중측에, (+)부호를 가질 때 저항측에 영향을 미치는 인자이다. Table 2를 보면 사석마운드는 마운드가 기초지반 상부에 위치하는 경우 하중측에, 하부에 위치하는 경우는 반대로 저항측에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

민감도가 가장 큰 확률변수인 내부마찰각을 $\pm 3\sigma$ 만큼 증감시키며 신뢰지수의 변화를 관찰하였다. Fig. 2에 나타난바와 같이 $+3\sigma$ 만큼 증가한 경우는 평균치와 비교할 때 2가지 경우(마운드가 지반상부 및 하부에 위치한 경우)의 신뢰지수가 다소 일치해가는 경향을 보인다. 반면, -3σ 만큼 감소한 경우는 두 신뢰지수 값의 차이가 보다 큰 폭으로 커져 감을 파악할 수 있다. 이는 표준편차가 커짐에도 불구하고 내부마찰각이 증가함에 따라 마운드가 지반상부 및 하부에 위치한 경우의 신뢰지수는 점차 수렴해감으로써 안전마진이 유사해지는 것을 의미한다.

본 연구에서 가정한 지진계수는 지진구역 I에서 1,000년의 재현기간 즉, 붕괴방지수준을 고려한 값이다. 한편, 지진계수가 일정한 변동성을 가질 때, 국내 내진설계기준에 규정된 모든 재현기간 및 지진구역에서 상기 2가지 마운드조건을 가정하여 원호활동 해석을 수행하고 신뢰지수 변화를 고찰하였다. Fig. 3에 나타난바와 같이 마운드가 지반상부 및 하부에 위치한 경우 원호활동에 대한 신뢰지수는 재현기간의 증가에 따라 일정하게 감소하는 양상을 보인다. 지진구역별로 재현기간을 달리한 경우도 신뢰지수는 매우 일정하게 변화한다. 한편, 기능수행수준(OLE) 범위의 재현기간(50년/100년)과 비교할 때 붕괴방지수준(CLE) 범위(100년/1,000년)에서의 각 지진구역별 신뢰지수 감소폭은 점차 커지는 것을 알 수 있다.

이는 OLE보다 CLE의 재현기간 간격이 길고 최대지반가속도(PGA)에 의존하는 신뢰지수도 재현기간에 따른 위험도계수에 의해 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

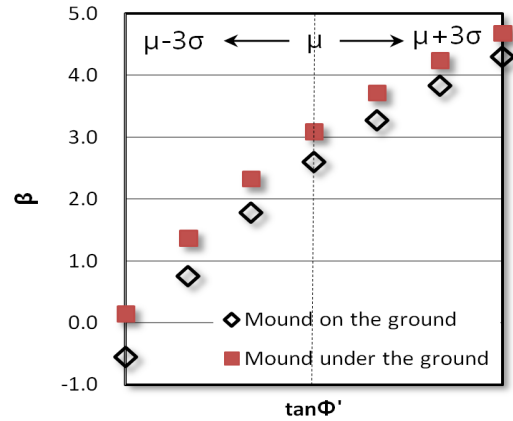


Fig. 2. Correlation between β and changes of ϕ' .

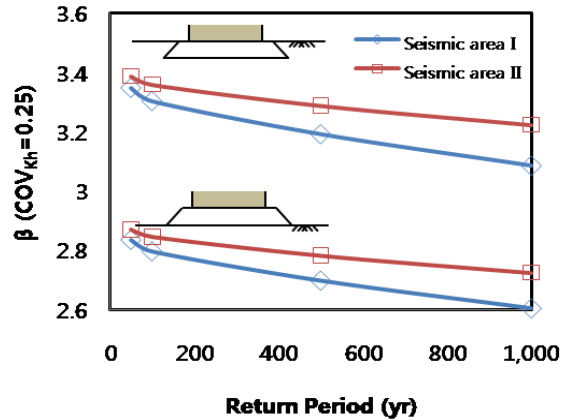


Fig. 3. Changes of β with return period depending on mound conditions.

Table 2. Partial safety factors for each variable($\beta_T=2.5$).

Variable	Mound on the ground			Mound under the ground		
	α_X	μ/X_k	γ_X	α_X	μ/X_k	γ_X
γ_S	0.012	1.0	0.999*	-0.006	1.0	1.000***
γ_R	-0.010	1.0	1.001**	0.020	1.0	0.999****
c'	0.009	1.0	0.995	0.008	1.0	0.996
$\tan\phi'_{Sand}$	0.997	1.0	0.751	0.996	1.0	0.751
q	-0.002	1.0	1.002	-0.001	1.0	1.001
K_h	-0.078	1.0	1.049	-0.087	1.0	1.054
$R.W.L$	-0.002	1.0	1.000	-0.002	1.0	1.000

*Base ground under the mound, **Mound and soil on the mound

Soil on the mound, *Mound and base ground

3.2 부분안전계수 결정

신뢰성 해석에서 산정된 민감도지수를 가지고 각 확률변수의 $COV(V_X)$, 특성치(X_k) 및 평균치(μ_X)와 별도로 설정된 목표신뢰지수(β_T)를 이용하여 식 (2)와 같이 부분안전계수를 결정할 수 있다.

$$\gamma_X = (1 - \alpha_X \beta_T V_X) \frac{\mu_X}{X_k} \quad (2)$$

마운드의 위치에 따라 산정된 신뢰지수를 고려하여 $\beta_T=2.5$ 로 가정하여 각 확률변수의 부분안전계수를 결정한 결과는 Table 2와 같다. 본 연구에서 결정된 단위중량에 대한 부분안전계수는 사석마운드의 위치에 따라 차이가 미미하나 마운드가 하중으로 작용하는지 저항으로 작용하는지는 명확하다. 또한, 모래의 내부마찰각과 지진계수에 대한 부분안전계수가 비교적 크게 결정되었다.

4. 예제검증

결정된 부분안전계수를 검증하기 위하여 본 연구에 적용한 단면에 대하여 Tabel 2의 부분안전계수를 식 (1)의 각 확률변수에 곱하여 $g(x)$ 를 계산하였다. Fig. 4에 나타난바와 같이 마운드의 위치에 따른 2가지 경우에 β_T 를 달리하여 산정한 부분안전계수를 이용하여 $g(x)$ 를 계산한 결과, β_T 가 2절에서 계산된 β 보다 큰 경우에 $g(x) < 0$ 이 되었고, 반대의 경우는 $g(x) > 0$ 가 되었으며, $\beta_T = \beta$ 인 경우의 부분안전계수로 계산한 $g(x)$ 는 0이 되었다. 따라서, 결정된 부분안전계수는 적절한 것으로 판단되었다.

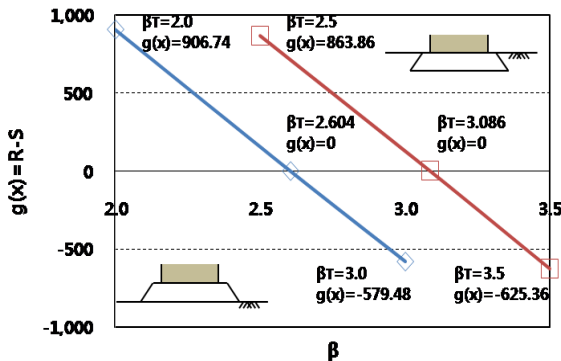


Fig. 4. Result of verification for partial safety factors.

5. 결 론

중력식 항만시설물 중 안벽구조물의 원호활동 파괴모드에 대하여 신뢰성 설계를 위한 부분안전계수를 결정하였다.

사석마운드가 기초지반 하부에 매입되는 경우가 상부에 위치하는 경우보다 신뢰지수가 크게 산정됨을 확인하였다. 이는 기초지반 상부에 위치하는 경우 마운드는 원호활동에 대하여 하중측에 기여하는 반면, 기초지반 하부에 설치되는 경우는 저항으로 작용하기 때문이다. 따라서, 마운드와 지반의 단위중량에 대한 부분안전계수는 하중측 및 저항측에 기여하는 경우를 구분하여 결정하였다.

민감도지수 산정결과, 지반의 내부마찰각과 지진계수가 한계상태 발생에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 민감도가 가장 큰 확률변수인 지반의 내부마찰각을 변화시키며 신뢰지수 변화를 확인한 결과, ϕ' 가 증가할수록 마운드가 기초지반 상부 및 하부에 위치하는 경우에 두 신뢰지수는 다소 일치되는 경향이 있는 반면, ϕ' 가 감소할수록 신뢰지수 차이는 점차 커졌다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 국책 연구과제인 “항만 구조물 신뢰성 설계법 개발(PM54100)” 연구결과 의 일부임을 밝히며, 연구수행이 가능하도록 연구비 지원을 해주신 국토해양부 항만정책관실 및 한국해양수산기술진흥원에 감사드립니다.

참고문헌

- 김동현, 윤길림 (2009). 부분안전계수를 이용한 케이슨식 안벽의 신뢰성 설계법. 한국해양·해양공학회지, 21(3), 224-229.
- 이철웅 (2007). 피복재의 부분안전계수 산정. 한국해양·해양공학회지, 19(4), 336-344.
- 해양수산부 (2005). 항만 및 어항 설계기준(상권), 535-542.
- Ozaki, R. (2005). Level-1 reliability-based design method for port and harbor facilities under ordinal conditions for minimization of expected total cost. Proc. ICOSSAR 2005, Safety and reliability of Engineering Systems and Structures, Rotterdam, 1, 1285-1292.
- 社団法人 日本港湾協會 (2007). 港湾の施設の技術上の基準·同解説(下卷).