

항만구조물 지반지지력 산정을 위한 부분안전계수 결정 Partial Safety Factors for Geotechnical Bearing Capacity of Port Structures

윤길림* · 윤여원** · 김홍연*** · 김백운****

Gil Lim Yoon*, Yeo Won Yoon**, Hong Yeon Kim*** and Baek Oon Kim****

요 지 : 중력식 안벽 및 방파제 등은 편심·경사하중에 지배받는 항만구조물로서 구조물 설계시 신뢰성이론에 근거하여 지반지지력 산정에 필요한 부분안전계수를 평가하였다. 현재 항만 및 어항 설계기준(2005)에서는 구조물에 편심·경사하중이 작용하는 경우에 지반지지력을 간편 Bishop법 등에 의해 검토하도록 규정되어 있다. 이러한 설계규정은 설계자에게 지반의 허용지지력과 지반반력을 비교하는 방법으로 그동안 가장 많이 사용되어 왔다. 그러나, 지반반력에 의한 설계검토는 지지력 계산이 단순하고 편리하지만 지반의 허용지지력이 현장의 지반물성에 따라 변화하지만 단일수치로 결정하여 설계하므로 이러한 지반특성을 설계에 반영하지 못한다는 큰 문제점이 있었다. 그래서 본 논문에서는 간편 Bishop법에 의하여 Level 1 신뢰성해석이 가능하도록 각각의 설계변수에 대한 부분안전계수를 결정하였다. 이를 위해서 신뢰성 이론인 일계신뢰도법(FOSM)을 통하여 신뢰도지수와 민감도지수를 추정하고 각각의 확률변수의 변동성도 고려하였다. 마지막으로 연구결과에서 결정된 부분안전계수를 선진국의 설계기준에서 제시한 것과 비교하여 합리적임을 확인하였다.

핵심용어 : 신뢰성설계, 부분안전계수, 사면안정, 지반지지력, 한계상태설계법, 유로코드 7

Abstract : When eccentric or inclined load acts on foundation of the port & harbor structures, partial safety factors of bearing capacity limit state were estimated using reliability analysis. Current Korean technical standards of port and harbor structures recommend to estimate the geotechnical bearing capacity using the simplified Bishop method. In practice, however, simple method of comparing ground reaction resistance with allowable bearing capacity has been mostly used by design engineers. While the simple method gives just one number fixed but somewhat convenient, it could not consider the uncertainty of soil properties depending on site by site. Thus, in this paper, partial safety factors for each design variable were determined so that designers do perform reliability-based level 1 design for bearing capacity limit state. For these, reliability index and their sensitivities were gained throughout the first order reliability method(FORM), and the variability of the random variables was also considered. In order to verify partial safety factors determined here, a comparison with foreign design codes was carried out and were found to be reasonable in practical design.

Keywords : reliability-based design, partial safety factor, slope stability, bearing capacity, limit state design, Eurocode 7

1. 서 론

중력식 안벽이나 방파제는 연직력과 수평력이 동시에 작용함으로 인하여 편심·경사하중을 받는 대표적인 항만구조물이다. 항만구조물에서 연직력은 자중, 연직토압과 크레인 하중 등을 포함하고 수평력은 주로 지진, 수평토압, 파력과 견인력 등이 해당된다. 이러한 항만구조물에서 설계시 기초의 지반지지력에 대한 안정성은 편심·경사하중을 고려하여 검토하도록 되어있다(해양수산부, 2005). 안벽구조물 기초와 관련

하여 Ozaki 등(2005)은 기대 총비용 분석에 근거하여 지반지지력에 대한 부분안전계수를 산정하였다. 그리고 Yamamoto (2004)는 사질토 위에 놓인 편심 및 경사하중이 작용하는 기초의 극한해석 결과를 Meyerhof 및 Hansen 방법과 비교하였다. 또한, 최근 Paikowsky 등(2009)은 연직-중심, 연직-편심, 경사-중심 및 경사-편심하중 조건에 대하여 각각 일계이차모멘트법(First Order Second Moment method; FOSM) 및 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation; MCS) 기법을 이용하여 저항계수를 산정하였다. 그 밖에도 편심 및 경사하중

*한국해양연구원 연안개발·에너지연구부(Corresponding author: Gil Lim Yoon, Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan PO. Box 29, Seoul 426-744, Korea, glyoon@kordi.re.kr)

**인하대학교 토목공학과, 정교수(Department of Civil Engineering, Inha University)

***한국해양연구원 연안개발·에너지연구부, 인하대 박사과정(Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department, Korea Ocean Research & Development Institute)

****군산대학교 새만금환경연구센터, 조교수(Kunsan National University, Samangeum Environmental Research Center, Assistant professor)

이 작용하는 기초에 대한 많은 연구가 이루어 졌으나, 간편 Bishop법에 초점을 맞추어 지지력 해석결과를 분석한 연구는 많지 않다.

항만 및 어항 설계기준(2005)에서는 편심·경사하중에 대한 지지력 검토방법으로 간편 Bishop법(simplified Bishop method)에 의한 원호활동 해석법을 표준으로 하고 있다. 그리고 동일한 설계조건에 대하여 확실한 지지력 산정이 확인되는 경우에는 그에 따른 검증된 계산법을 따를 수 있도록 제시하고 있다. 따라서, 실무에서는 편의성 차원에서 원호활동 해석법보다는 후자에 속하는 최대 접지압과 허용지지력을 비교하는 방법이 선호되고 있다.

본 논문에서는 최근에 성능설계에 기초하여 개정된 일본 설계기준(2007) 및 현행 국내 설계기준에서 표준으로 하고 있는 간편 Bishop법을 이용하여 지반지지력에 대한 Level 1 신뢰성 설계를 할 수 있도록 각 설계변수에 대한 부분안전계수(partial safety factor)를 제시하였다.

2. 편심 및 경사하중에 대한 지지력 평가

국내 설계기준에서는 편심·경사하중이 작용하는 항만구조물(하중경사율 ≥ 0.1 ; 하중경사율은 연직 및 수평하중 합성력 벡터의 기울기)의 지지력 검토시 간편 Bishop법에 따른 원호활동 계산을 표준으로 하고 있다. 이는 중력식 항만구조물의 경우 기초지반 위에 사석 마운드가 있는 이층구조로 되어 계산시 그 특성을 반영해야 할뿐 아니라, 안벽 및 방파제 구조물의 안정성, 실내모형실험 및 현장실험을 통한 연구결과, Bishop법에 의한 원호활동 계산이 실제 현상을 잘 재현한다고 밝혀진 데에서 근거한다(해양수산부, 2005). 그럼에도 불구하고 현재 까지도 종전에 이용되었던 각종 지지력 산정법을 조합하여 검토하는 방법이 많이 이용되고 있는 것이 현실이다. 원호활동에 대한 간편 Bishop법의 안전율(F.S)은 식 (1)에 의해 계산된다.

$$F.S = \frac{1}{\sum(W' + W_C + q)\sin\alpha + \left(\frac{1}{R}\right)\sum Ha} \sum \frac{[c'b + (W' + W_C + q)\tan\phi']\sec\alpha}{m_\alpha} \quad (1-1)$$

$$m_\alpha = \frac{1 + (\tan\alpha \tan\phi')}{F.S} \quad (1-2)$$

여기서, W 는 단위길이당 분할편의 유효중량, W_C 는 케이슨의 중량, q 는 케이슨 상부에 작용하는 상재하중, α 는 분할편 저면이 수평면과 이루는 각도, R 은 활동원의 반경이고, H 는 활동원 내의 토괴에 작용하는 수평외력으로써 수평토압, 잔류수압, 동수압 및 관성력을 포함한다. α 는 수평외력 작용점에서 활동원 중심까지의 거리, c 는 비배수 전단강도(점성토) 또는 결보기 점착력(사질토), b 는 분할편의 폭이고, ϕ' 는 사질토 지반의 유효내부마찰각을 의미한다. 특히, m_α 에서 연

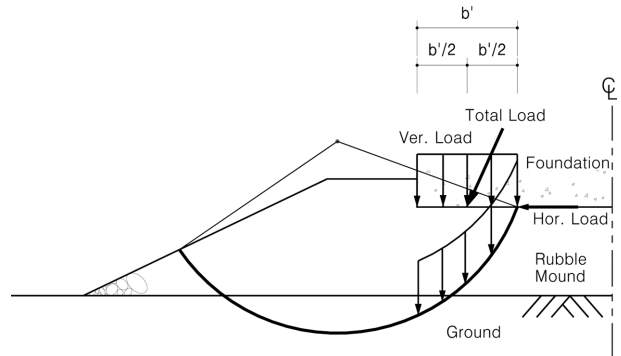


Fig. 1. Calculation of bearing capacity through simplified Bishop method.

급된 안전율 $F.S$ 는 반복계산을 통하여 최종적인 안전율을 얻기 위해 가정되는 값이다.

간편 Bishop법 계산을 위한 원호활동면 가정시 활동면의 시점은 Fig. 1과 같이 하중의 합력점에 대하여 가까운 쪽 기초의 단부와 대칭되는 점으로 가정한다. 그러한 경우 최소의 안전율이 산출되기 때문이다. 그리고, 기초면에 작용하는 연직 하중은 기초단부와 활동면 시점 사이에 작용하는 등분포하중으로 환산해야 하며, 수평력은 기초 저면에 작용시킨다. 등분포로 환산된 연직하중은 지반내에 연직으로 활동면까지 전달된다고 가정한다.

간편 Bishop법에 의한 항만구조물의 안전율은 안벽의 경우 상시 1.2, 지진시 1.0 이상이고, 방파제의 경우 상시 1.0 및 1.2(장기하중에 의한 변형 발생시), 파압시 1.0 이상 확보하여야 한다.

3. 간편 Bishop법에 대한 안전율과 신뢰도지수 산정

기초지반의 지지력 계산을 위한 부분안전계수를 결정하기 위해 먼저 Level 2 신뢰성해석을 수행하였다. 각 확률변수의 부분안전계수를 결정하기 위해서는 민감도지수(sensitivity factor)를 구해야 하므로 Level 2 신뢰성해석 기법 중 일계신뢰도법(First Order Reliability Method; FORM)을 이용하였다. 먼저 엑셀(EXCEL)을 이용한 한계평형해석으로 안전율을 산정하였고, 신뢰도지수를 산정하기 위하여 엑셀(EXCEL) 및 MATLAB을 활용하였다. 그리고 범용 구조신뢰성 해석을 위하여 COMREL을 이용하여 신뢰성 해석 결과를 검증하였다. 간편 Bishop법에 대한 한계상태함수(limit state function)는 식 (1)에 기초하여 식 (2-1)과 같이 정의할 수 있다. 또한, 활동모멘트와 저항모멘트가 같을 때 즉, 안전율이 1.0이 되는 경우에 극한한계상태(ultimate limit state)로 간주할 수 있으므로 식 (2-2)와 같이 정의할 수도 있다.

$$g(x) = \frac{[c'b + (W' + W_C + q)\tan\phi']\sec\alpha}{m_\alpha} - \left[\sum(W' + W_C + q)\sin\alpha + \left(\frac{1}{R}\right)\sum Ha \right] \quad (2-1)$$

Table 1. Characteristics of each random variable

random variable		COV	distribution	reference
total unit weight (kN/m ³)	19	0.05	normal	1984, 1992
cohesion (kPa)	20	0.25	normal	2000, 1992, 1984, 1997
internal friction angle (°)	30	0.08	normal	1984, 1992
active earth pressure (kPa)	551.63	0.12	normal	2007
surcharge (kN/m)	15	0.04	normal	2007
seismic coefficient	0.046	0.25	extreme	2001
residual water level (m)	1.58	0.05	normal	2001

$$= \frac{1}{\sum (W' + W_c + q) \sin \alpha + \left(\frac{1}{R}\right) \sum H a} \quad (2-2)$$

$$\frac{\sum [c' b + (W' + W_c + q) \tan \phi'] \sec \alpha}{m_\alpha}$$

신뢰성해석을 수행하기 위해서 가장 먼저 선행되어야 할 단계는 각 확률변수의 변동계수(COV)를 결정하는 일이며 이를 Table 1에 요약하였다. 변동계수는 표에 나타났듯이 과거에 연구되었던 범위 내에서 결정하되 특히, 토질정수는 국내의 특성을 고려하여 결정하였다. 기초지반의 토질은 지반과 지반으로 구분하여 해석하였다. 대부분 확률변수의 확률분포는 정규분포(normal distribution)로, 지진계수는 극치분포(Type-III)로 가정하였다.

결정된 확률변수의 특성을 가지고 원호활동에 의한 지지력 해석을 하기 위하여 먼저 해석단면의 가상 활동면을 2절의 절차에 따라 가정하였다. Fig. 2와 같이 기초의 중심에서 편심거리 만큼 떨어져서 작용하는 연직하중 작용점에 대하여 기초 단부와의 대칭거리에서 파괴면의 시점을 가정하고 그 구간내의 집중하중을 등분포하중으로 환산하였다. 그런 다음 토층경계, 기하학적 모형과 상재하중 작용점 등을 고려하여 분할편을 나누었으며, 계산상 편의를 위해 최소의 분할편을 형성하였다. Table 2는 각 분할편의 계산결과를 나타낸다.

3.1 기존 설계법에 의한 안전율 계산

기존의 설계법에 의한 해석단면의 안전여유(safety margin)를 확인하기 위하여 원호활동에 대한 안전율을 계산하였다. 간편 Bishop법에 의한 안전율(F.S)을 계산하려면 식 (1-1)의 활

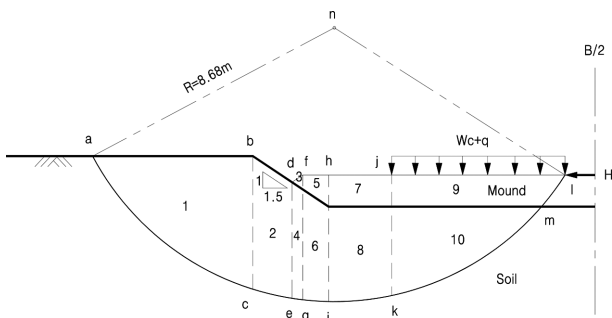


Fig. 2. Assumption and division of failure surface.

Table 2. Calculation of slice weight

slice No.		area (m ²)	unit weight (kN/m ³)	slice weight (kN/m)
1	a (2.75,6.01)	10.719	19	203.66
2	b (7.83,6.01)	4.898	19	93.06
	c (7.83,1.79)			
3	d (9.07,5.18)	1.221	19	23.19
4	e (9.07,1.50)	0.077	18	1.38
5	f (9.41,5.41)	0.595	18	10.70
6	g (9.41,1.45)	2.669	19	50.71
7	h (10.23,5.41)	2.000	18	36.00
8	i (10.23,1.40)	5.830	19	110.77
9	j (12.23,5.41)	5.125	18	92.25
	k (17.73,5.41)			
	l (12.23,1.59)			
10	m (17.73,5.41)	6.698	19	127.25
	n (10.41,10.07)			

동 및 저항모멘트를 각각 계산하여야 하는데, 특히 저항모멘트의 산정시 유의할 필요가 있다. 식 (1-2)의 m_α 값은 초기에 적절한 안전율(F.S)을 가정하여 그로인한 Bishop의 안전율이 일정한 값에 수렴할 때까지 몇 번의 반복계산을 해야 하기 때문이다. 일반적으로 합리적인 계산과 시간단축을 위하여 Fellenius법에 의한 안전율을 초기안전율로 가정하면 편리하다. 따라서, 본 연구에서는 간편 Bishop법에 의한 안전율을 계산하기 전에 먼저 Fellenius법에 의한 안전율을 산정하였다.

$c=0$ 지반에 대하여 Fellenius법에 의해 원호활동면에 대한 안전율을 계산한 결과 $F.S=1.193$ 을 얻었다. 따라서, $F.S=1.193$ 으로 최초 가정하여 식 (1-1)에 적용함으로써 그에 따른 Bishop법의 최초 안전율 $F.S=1.227$ 을 얻었다. 다시 이 값을 저항모멘트의 안전율로 대입하여 반복계산 함으로써 $F.S=1.226$ 을 얻었으며, 같은 방법으로 재 반복하여 $F.S=1.226$ 에 수렴함을 확인하였다. 따라서, 간편 Bishop법에 의한 해석단면의 안전율 $F.S=1.226$ 을 얻었다. 참고로 본 연구에서는 저항모멘트의 가정 안전율에 대한 간편 Bishop법 안전율 F.S의 허용치를 0.001로 설정하여 이에 만족할 때까지 반복계산을 실시하였다.

다른 한편으로, 신뢰성해석에서는 한계상태에서의 저항모멘트 안전율을 구하는 것이 타당하다고 볼 수도 있을 것이다. 따라서, 반복계산에 의하지 않고 저항모멘트의 안전율을 1.0으로 가정할 경우 Bishop의 안전율을 계산해 보았다. 그 결과, 원호활동에 의한 지지력 안전율 $F.S=1.234$ 로써, 앞서 반복계

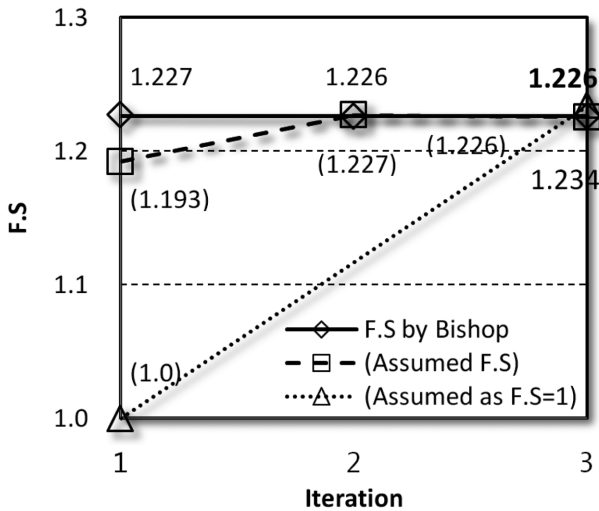


Fig. 3. Process to calculate factors of safety ($c=0$).

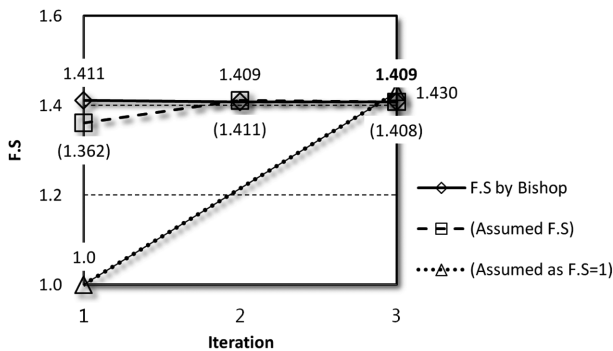


Fig. 4. Process to calculate factors of safety ($c=\phi$).

산에 의한 안전율($F.S.=1.226$)보다 크므로 이 경우는 한계상태라 할 수 없다. Fig. 3은 반복계산 및 $F.S.=1.0$ 가정시 각각 최종 안전율을 얻는 과정을 나타낸다.

반면, $c-\phi$ 지반에 대하여 Fellenius법에 의한 안전율을 계산한 결과 $F.S.=1.362$ 를 얻었다. 따라서, $F.S.=1.362$ 로 최초 가정하여 그에 따른 Bishop법의 최초 안전율 $F.S.=1.411$ 을 얻었다. 다시 이 값을 저항모멘트의 안전율로 대입하여 반복계산 함으로써 $F.S.=1.409$ 를 얻었으며, 같은 방법으로 재 반복하여 $F.S.=1.409$ 에 수렴함을 확인하였다. 따라서, 간편 Bishop법에 의한 $c-\phi$ 지반의 안전율 $F.S.=1.409$ 를 얻었다.

3.2 FORM에 의한 신뢰도지수 계산

FORM은 FOSM과 달리 평균치가 아닌 설계점(design point) 근처에서 파괴확률을 산정하는데, 먼저 통계적으로 서로 독립인 확률변수 X^* 를 식 (3)과 같이 선형변환을 이용하여 표준 정규분포의 확률변수 $X^{\bar{}}$ 로 변환한다.

$$\vec{X}^{\bar{}} = \frac{\vec{X}^* - \mu_{\vec{X}^*}}{\sigma_{\vec{X}^*}} \quad (3)$$

여기서, $\mu_{\vec{X}^*}$ 는 각 확률변수의 평균, $\sigma_{\vec{X}^*}$ 는 표준편차를 의미

한다.

그리고 식 (4)의 신뢰도지수(reliability index, β)와 각 확률변수의 민감도지수($\alpha_{\vec{X}^*}$)의 관계로부터 두 변수의 반복계산을 통하여 일정한 값에 수렴하는 신뢰도지수 값을 결정한다. 식 (4)는 확률변수 사이에 서로 상관성이 없을 때의 관계이며, 표준화된 공간상의 각 확률변수 축에서 신뢰도지수의 방향여현(direction cosine)을 의미한다.

$$\alpha_{\vec{X}^*} = \left(\frac{\partial Z}{\partial X^*} \right) / \sqrt{\sum \left(\frac{\partial Z}{\partial X^*} \right)^2}$$

$$= \frac{\vec{X}^*}{\beta} \quad (4)$$

또한, 모든 확률변수의 $\alpha_{\vec{X}^*}$ 는 식 (5)의 관계를 만족하도록 결정해야 한다.

$$\sum (\alpha_{\vec{X}^*})^2 = 1 \quad (5)$$

3.1절에서 계산된 분할편의 자중과 연직 및 수평하중을 이용하여, 식 (2)의 한계상태함수를 가지고 신뢰도지수 β 를 산정하였다. 한계상태함수에서 저항모멘트 산정시 가정되는 안전율은 3.1절의 안전율 계산과정과 동일하게 반복계산을 통한 방법과 $F.S.=1.0$ 인 경우를 모두 적용하여 그 신뢰도지수를 비교하였다.

먼저, $c=0$ 지반에 대하여 Fellenius법에 의해 계산된 최초 안전율로부터 시작하여 단계별로 $F.S.=1.193-1.227-1.226$ 을 적용한 경우, 신뢰도지수 $\beta=2.159-2.151-2.152$ 로 수렴하여 최종 신뢰도지수 $\beta=2.152$ 를 얻었다. 한편, $F.S.=1.0$ 으로 가정하여 계산된 신뢰도지수는 $\beta=2.217$ 로 나타났다.

반면, $c-\phi$ 지반에 대하여 Fellenius법에 의한 최초 안전율로부터 시작하여 단계별로 $F.S.=1.362-1.411-1.408$ 을 적용한 결과, 신뢰도지수 $\beta=3.594-3.584-3.585$ 로 수렴하여 최종 신뢰도지수 $\beta=3.585$ 를 얻었다. $F.S.=1.0$ 으로 가정하여 계산된 신뢰도지수

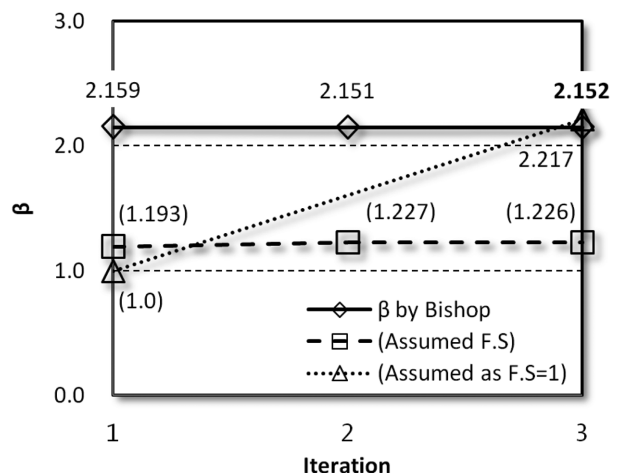


Fig. 5. Process to calculate reliability indices ($c=\phi$).

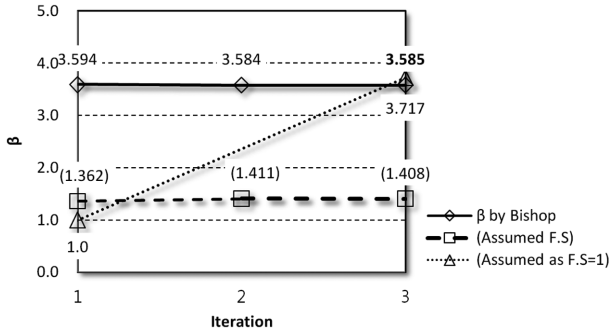


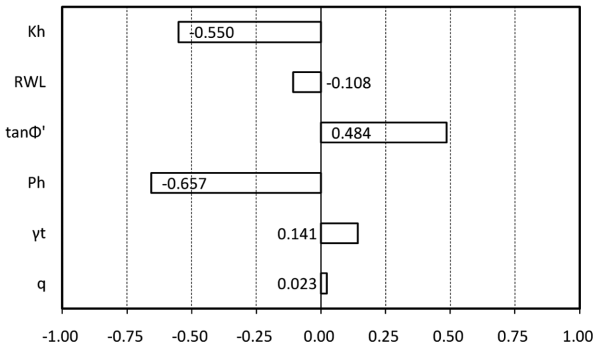
Fig. 6. Process to calculate reliability indices ($c-\phi$).

는 $\beta=3.717$ 로 나타났다. Fig. 5와 6은 각각 $c=0$, $c-\phi$ 지반에 대한 반복계산 및 $FS=1.0$ 의 가정으로 신뢰도지수를 얻는 과정을 나타낸다.

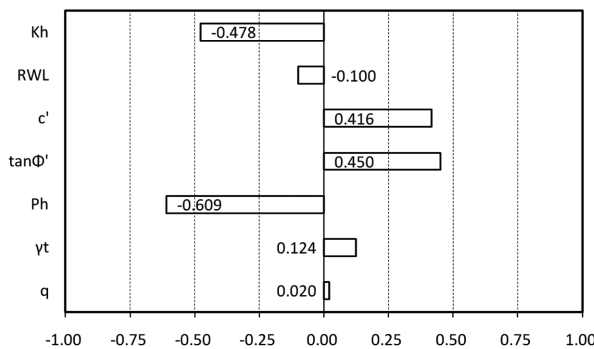
4. 부분안전계수의 결정

4.1 확률변수의 민감도지수

확률변수의 민감도지수는 앞서 수행한 FORM의 신뢰도지수를 구하는 과정으로부터 산출된다. 민감도지수가 큰 변수일수록 설계 시 한계상태의 발생에 미치는 영향이 큼을 의미하며, 하중에 기여하는 확률변수는 (-), 저항에 기여하는 확률변수는 (+)의 부호를 갖는다. Fig. 7은 3.2절에서 간편 Bishop법의 한계상태함수에 대하여 산정된 확률변수의 민감도지수 분포를 나타낸다.



(a) $c=0$



(b) $c-\phi$

Fig. 7. Distribution of sensitivity.

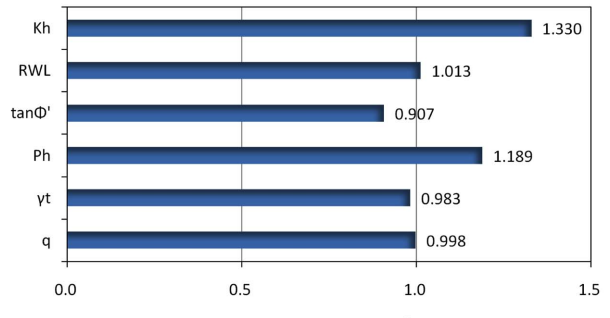
포를 나타낸다. 민감도지수는 수평토압(P_h), 지진계수(K_h), 지반의 내부마찰각($\tan\phi$), 유효점착력(c), 단위중량(γ), 잔류수위(RWL) 및 상재하중(q)의 순으로 크게 나타나 수평하중이 지지력 안정성에 가장 민감하며, 그 중에서도 배면의 수평토압력이 한계상태의 발생에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

4.2 부분안전계수 결정

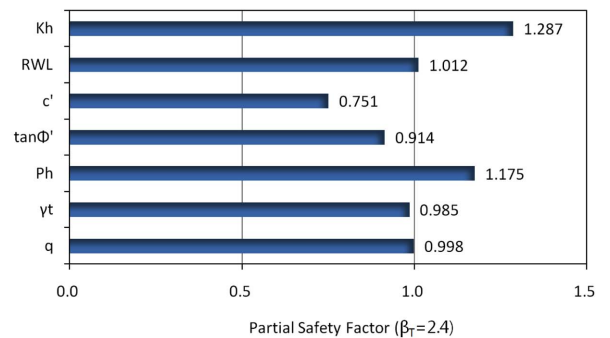
부분안전계수는 목표신뢰도지수와 각 확률변수의 민감도지수에 기초하여 다음 식으로부터 얻을 수 있다.

$$\gamma = (1 - \alpha_{\vec{X}} \beta_T V_{\vec{X}}) \frac{\mu_{\vec{X}}}{X_k} \tag{6}$$

각 확률변수의 평균치($\mu_{\vec{X}}$)와 변동계수($V_{\vec{X}}$), 특성치(\vec{X}_k), 목표신뢰도지수(β_T), 그리고 앞서 산정한 민감도지수($\alpha_{\vec{X}}$) 등을 식 (6)에 적용하여 부분안전계수를 계산하였다. 목표신뢰도지수는 $\beta_T=2.4$ 로 설정하였고, 특성치는 평균치와 동일하게 간주하였다. Fig. 8은 각 확률변수의 부분안전계수 산정결과를 나타낸다. 그림에서 1보다 큰 부분안전계수는 하중측, 1보다 작은 것은 저항측의 계수를 의미한다. 주목할 만한 점은 수평토압이 지진계수보다 민감도가 크어도 불구하고 부분안전계수는 지진계수가 가장 크다. 이는 지진계수가 수평토압에 비하여 확률적 변동성이 크기 때문이며, 확률변수의 변동성 또한 안정성에 미치는 영향이 큼을 의미한다. 이러한 부분안전계수는 식



(a) $c=0$



(b) $c-\phi$

Fig. 8. Partial safety factors for each variable.

Table 3. Comparison with foreign design codes

	results	Japanese code	Eurocode
K_h	1.29~1.33	-	1.20~1.50 (variable unfavorable)
RWL	1.01	1.00	1.20~1.50 (variable unfavorable)
c'	0.75	0.90	0.625~1.00
$\tan\phi'$	0.91	0.70	0.80~1.00
P_h	1.18~1.19	1.15	1.00~1.35 (permanent unfavorable)
γ_i	0.98~0.99	1.00	1.00
q	1.00	1.00	0.90~1.00 (permanent favorable)

(2-1) 또는 (2-2)에서 해당 설계변수에 직접 또는 간접적으로 곱함으로써 불확실성이 고려될 뿐 아니라 목표신뢰도지수에 해당하는 만큼의 안전여유를 가지고 한계상태합수를 평가하게 된다. 결국, 계산된 한계상태합수가 0보다 크면 안전하다고 판단할 수 있다.

4.3 국외기준과의 비교

일반적으로 목표신뢰도지수가 작을수록 즉, 목표파괴확률이 커질수록 부분안전계수는 1로부터 멀어지게 된다. 다시 말해 목표신뢰도지수가 작아지면 저항에 대한 부분안전계수는 감소하는 반면, 하중에 대한 부분안전계수는 증가하여 안전여유는 커지게 된다.

본 연구에서 결정된 부분안전계수를 이미 개발된바 있는 국외의 설계기준과 비교함으로써 적정성을 확인하였다. 비교하고자 한 설계기준은 일본의 항만시설기준과 유럽에서 통용되고 있는 유로코드(Eurocode 7)이다.

Table 3에 나타낸바와 같이 본 연구에서 도출된 부분안전계수는 대부분 일본의 설계기준에서 제안된 값과 유사하나, 지반의 유효점착력과 내부마찰각은 다소의 차이가 있다. 이는 내부마찰각의 변동계수는 큰 차이가 없는 반면, 지반의 유효점착력은 일본의 경우 10%, 본 연구에서는 25%로 가정하였기 때문이다. 현재까지 연구결과에 따르면 지반의 비배수 전단강도는 13~40%의 큰 변동성을 가지는 것으로 알려져 있다(Duncan, 2000). 한편, 지진 시(레벨 1 지진동)에 대하여 일본에서는 목표신뢰도수준에 관계없이 지진계수를 포함한 모든 확률변수의 부분안전계수를 1.0으로 제안하고 있다.

유로코드에서는 부분안전계수를 하중과 저항측 모두 1.0보다 크게 규정함으로써 설계치 계산 시 특성치를 이 값으로 나누게 하고 있다. 하중에 대하여는 영구(permanent) 및 변동(variable) 하중 및 구조물에 유리(favorable) 및 불리한(unfavorable) 하중으로 구분하여 부분안전계수를 제시하고 있다. 표에 나타났듯이 지반의 유효점착력 및 내부마찰각을 포함한 모든 확률변수의 부분안전계수는 본 연구에서 도출된 값들을 포함하거나 거의 일치한다.

결과적으로 본 연구에서 얻은 확률변수의 부분안전계수는 비교대상인 일본 또는 유럽의 기준에 제시된 범위에 모두 포함되므로 적합한 것으로 판단된다.

5. 결론 및 토론

본 논문에서는 간편 Bishop법에 의해 편심 및 경사하중이 작용하는 항만구조물의 지반 지지력을 확률론적으로 검토하기 위한 부분안전계수를 결정하였다. 원호활동법에 의한 신뢰성 해석과 부분안전계수를 결정하는 과정에서 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 항만구조물의 지반지지력 설계는 지금까지 사석마운드의 상·하부에서 각각 지반반력과 허용지지력을 비교하고 조합하는 설계법인 하중분산법을 이용하여 왔다. 그러나, 간편 Bishop법에 의한 원호활동 계산법이 실제 이층구조 기초의 파괴현상을 보다 잘 재현할 수 있으며 사석마운드 상·하부의 안정성을 동시에 확인할 수 있다.

(2) 지반지지력 검토시 간편 Bishop법의 원호활동에 대한 저항모멘트의 안전율을 가정하는 경우에 먼저 Fellenius법에 의한 안전율을 산정한 후, 반복계산으로 수립되는 안전율 변화를 파악하여 그 값을 가지고 FORM 해석을 통하여 설계변수의 민감도 및 신뢰도지수를 얻을 수 있다.

(3) 신뢰성 해석을 통한 확률변수의 민감도 조사결과, 한계상태에 가장 큰 영향을 미치는 설계변수는 수평토압, 지진계수 및 지반의 내부마찰각 순이었다.

(4) 계산된 민감도에 따라 목표신뢰도지수 $\beta_T=2.4$ 인 경우, 각 확률변수의 부분안전계수를 결정하였고, 일본 및 유럽의 설계기준에 규정된 부분안전계수와 비교한 결과, 본 논문에서 결정된 부분안전계수는 일본 또는 유럽의 설계기준에서 규정된 범위에 포함되어 합리적인 결과임을 파악하였다.

(5) 본 논문에서 제시하는 부분안전계수를 이용하여 안벽의 안정성을 검토한다면 보다 간편하게 신뢰성해석을 수행할 수 있으며 국제적인 설계기준에도 부합하는 원호활동법에 의하여 기초지반지지력을 검토할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

김동현, 윤길림 (2009). 부분안전계수를 이용한 케이슨식 안벽의 신뢰성설계법. 한국해양·해양공학회지, 21(3), 224-229.
 이철용 (2007). 항만구조물 부분안전계수의 산정 및 적용. 제1회 항만구조물 신뢰성 설계법 기술교육 Workshop 자료집, 101-120.
 해양수산부 (2005). 항만 및 어항 설계기준(상권).

- Duncan, J.M. (2000). Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4), 307-316.
- Harr, M.E. (1984). Reliability-Based Design in Civil Engineering. the 1984 Henry M. Shaw Lecture, Dept. of Civil Engineering, North Carolina State Univ., Raleigh, NC, 68.
- Kulhawy, F.H. (1992). On the Evaluation of Soil Properties. ASCE Geotechnical Special Publication No. 31, 95-115.
- Lacasse, S. and Nadim, F. (1997). Uncertainties in Characterizing Soil Properties. Norwegian Geotechnical Institute Publication No. 201, Oslo 1997, 49-75.
- Nagao, T., Yoshinami, Y., Sanuki, T. and Kamon, M. (2001). 케손식岸壁의 외적安定에關する信賴性設計法の適用. *構造工學論文集*, 47A(in Japanese).
- Orr, T.L.L. and Farrell, E.R. (1999). Geotechnical design to Eurocode 7, Springer, 27-30.
- Ozaki, R., Nagao, T. and Shibasaki, R. (2005). Level-1 reliability-based design method for port and harbor facilities under ordinal conditions for minimization of expected total cost. *Proc. of ICOSAR 2005*, 1285-1292.
- Paikowsky, S.G, Amatya, S., Lesny, K. and Kisse, A. (2009). Developing LRFD design specifications for bridge shallow foundations. *Proc. of the 2th International Symposium on Geotechnical Safety & Risk*, 97-102.
- Yamamoto, K. (2004). Limit analysis of foundations on frictional soils under eccentric and inclined loads. *構造工學論文集*, 50A, 1203-1214(in Japanese).
- 社團法人 日本港灣協會 (2007). 港灣の施設の技術上の基準・同解説(下卷)(in Japanese).

원고접수일: 2009년 8월 10일

수정본채택: 2009년 10월 13일(1차), 2010년 3월 31일(2차)

게재확정일: 2010년 5월 20일