

항만구조물의 사면안정 신 설계기준 연구 A Study of New Technical Standards for Slope Stability in Port Structures

윤길림* · 윤여원** · 김홍연***

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

요 지 : 국제적인 항만시설물 사면안정해석 설계기준을 분석하고 그 결과를 비교하였다. 사면안정해석에 사용된 설계기준은 한계상태 설계법에 근거한 중국, 유럽 및 일본의 설계방법이다. 사면안정해석시 공통적으로 파괴 활동면은 원호 활동면 가정을 기본으로 하고 있다. 해석방법에 있어서 중국은 수정 Fellenius법에 근간하고 있으나 근래에 간편 Bishop법으로 변화하고 있다. 유럽은 Morgenstern & Price법 또는 Bishop법을 추천하고 있다. 반면, 일본은 수정 Fellenius법을 우선시하고 간편 Bishop법은 두꺼운 사질토 지반 등에 선택적으로 이용하도록 하고 있다. 특별하게도 유럽은 포괄적 부분계수 및 재료계수를 규정하는 반면, 일본은 각 구조물별로 경험적 재료계수를 명시하고 있다. 중국에서는 포괄적 부분계수의 최소범위를 규정하고, 안정조건에 따라 특정한 시험에 의한 강도지수를 사용하도록 구체적으로 명시하고 있다. 설계사례를 통한 사면안전율을 비교한 결과, 중국, 일본 및 유럽 순으로 높게 나타났다.

핵심용어 : 사면안정, 간편 Bishop법, 수정 Fellenius법, 부분안전계수, 안전율, 한계상태설계법

Abstract : Technical design codes of slope stability for port structures were studied by comparing local Korean code with international codes; Japanese, EC and China codes. Three international design codes are based on limit state design method. Although Chinese code was based on the modified Fellenius method in slope stability analyses, it is currently changing to the simplified Bishop method. In Eurocode, the Morgenstern & Price method or the Bishop method is recommended. In Japanese code, however, the modified Fellenius method is preferentially recommended, but the simplified Bishop method could be alternatively used in case of thick sandy ground conditions. As for design parameter determination, Eurocode has stipulated comprehensive partial factors and partial material factors, however Japanese code has clarified empirical partial material factors for each port structure. Chinese code, the minimum ranges of the comprehensive partial factors are stipulated, and the use of the strength index by specific tests is concretely clarified with the safety condition. Case study of slope stability analyses showed the safety factors were higher in order of Chinese, Japanese and Eurocode, respectively.

Keywords : slope stability, simplified Bishop method, modified Fellenius method, partial safety factor, safety factor, limit state design

1. 서 론

사면안정 문제는 지반위에 놓이는 방파제나 안벽 등의 항만구조물 안정성에 있어 매우 중요하다. 지반구조물 뿐만 아니라 항만구조물에 있어서도 사면의 불안정에 의하여 태

풍 및 지진 등으로 파괴가 종종 발생하곤 한다(Bromhead, 1998; 윤, 2003). 현재 국내외에서 사면의 안정성 검토는 기본적으로 한계평형법(limit equilibrium method; LEM)에 기초한 절편법에 의해 이루어지고 있다. 절편법은 가정하는 활동면 상에 작용하는 흙 절편의 전단력과 자중을 산정

*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(Department of Civil Engineering, Inha University)

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

하는 방법 등 가정조건에 따라 다양한 해석방법이 존재한다. 이러한 가정의 차이는 근본적으로 복잡한 부정정 문제를 정정화 하기위한 목적과 계산상의 편의를 추구하고자 전제되는 사항인 것이다. 이런 상황에서 설계자는 서로 다른 해석결과로 인하여 해석법 선택에 어려움이 있는 것도 사실이다. 그래서 다양한 안정해석법들 중에서 많은 연구를 통하여 비교적 합리적인 해석법들이 몇 가지 제안되어 왔지만, 결국 설계기준은 국가별로 일관되게 규정하고 있지 못한 것이 현실이다. 그러므로 사면안정 문제를 정량적으로 규명하는데 많은 한계점이 있고, 아직까지도 사면안정 해석법에 상당한 불확실성이 내포되어 있음을 반증하는 것이기도 하다.

그 동안 학계에서는 LEM을 응용하여 보다 정확한 해를 얻기 위한 다양한 노력이 지속되어 왔는데, 유한요소법을 이용한 전단강도 감소기법(shear strength reduction method)에 의한 안전율 산정(Zienkiewicz et al., 1969), 2차원 절편법을 3차원 원주분할법으로 확장한 연구(Hovland, 1977) 등이 대표적인 사례이다. 또한, 고전적 해석법인 절편법을 근간으로 보다 합리적인 파괴확률을 구하기 위한 확률론적 해석법(probabilistic analysis method)도 많은 성과가 있었다(Matsuo and Kuroda, 1974). 이러한 연구는 최근까지 국내에서도 꾸준히 진행되어 LEM을 이용하여 3차원 사면안정 해석법의 효용성을 검증한 연구(서 등, 2005)와 기존 원호활동법의 수치모형을 개발 및 검증한 연구(서 등, 2005) 등의 사례가 있다.

본 논문에서는 사면안정해석법에 관련된 국내외 설계기준 가운데 항만시설에 이용되는 국제기준을 심층 고찰하였다. 이를 위하여 국내 항만 및 어항 설계기준(2005)에 규정된 사면안정 해석기준을 살펴보고, 국외의 설계기준과 비교하였다. 국외 설계기준으로 중국, 유럽 및 일본을 대상으로 각 나라에서 규정 또는 추천하는 해석법 등을 비교·고찰하였다. 그리고 실 설계사례를 통하여 동일한 조건에서 각 국가별 기준의 안전율 수준을 분석하였다.

2. 국내의 사면안정 설계기준: 항만 및 어항 설계기준

2.1 기본 설계개념

국내의 항만 및 어항 설계기준(해양수산부, 2005)에 명시된 바와 같이, 사면안정 문제에 있어 안전율은 흙의 전단강도와 가정한 활동면에 생기는 전단응력과의 비를 의미한다. 설계상 확보해야 할 안전율은 상시 1.3 이상을 기준으로

로 하나, 동일지반에 있어서 설계사례 등에 의한 설계정수의 신뢰성이 높다고 생각되는 경우나 시공 중 지반의 변위나 응력에 대한 예측이 실시되는 경우에는 1.1~1.3의 안전율로 설계할 수 있다.

2.2 사면안정 해석법

항만시설물에 대한 안정해석법에 대하여는 원호 및 비원호 활동면에 의한 해석으로 구분하여 설명하고 있다.

2.2.1 원호 활동면에 의한 해석

항만 및 어항 설계기준에서 원호 활동면에 의한 해석방법은 분할법인 수정 Fellenius법과 간편 Bishop법을 표준으로 하고 있다. 분할법은 각 분할편 사이의 연직면에 작용하는 힘의 합력방향이 수평이라고 가정하는 방법으로, Tschebotarioff법이라고도 한다. 수정 Fellenius법에 의한 안전율은 식 (1)에 의해 계산한다.

$$F_s = \frac{R \sum (cl + W' \cos \alpha \tan \phi)}{\sum Wx + \sum Ha} = \frac{\sum (cb + W' \cos^2 \alpha \tan \phi) \sec \alpha}{\sum W \sin \alpha + \frac{1}{R} \sum Ha} \quad (1)$$

여기서, F_s 는 안전율, R 은 원호 활동원의 반경, c 는 점성토의 비배수 전단강도 및 사질토의 배수조건에서의 겉보기 점착력, l 은 각 분할편의 밑변길이, W' 는 단위길이당 분할편의 유효중량, α 는 분할편 저면이 수평면과 이루는 각, ϕ 는 점성토에서는 0, 배수조건에서 사질토의 내부마찰각, W 는 분할편의 단위길이에 대한 전체중량, x 는 분할편의 무게중심과 원호 중심과의 수평거리, H 는 활동 원호 내에 있는 토괴에 작용하는 수압, 지진력, 파압 등의 수평외력, a 는 수평외력 H 의 작용점과 원호활동의 활동원점과의 팔길이이며, b 는 분할편의 폭을 의미한다.

한편, 간편 Bishop법은 분할편의 연직면내에 활동하는 연직방향의 전단력과 수평력을 고려한 안전율 산정식으로 식 (2)로써 계산된다.

$$F_s = \frac{1}{\sum W \sin \alpha + \frac{1}{R} \sum Ha} \frac{\sum (cb + W' \tan \phi) \sec \alpha}{1 + (\tan \alpha \tan \phi) / F_s} \quad (2)$$

항만시설물 설계기준에 언급된 각 안정해석법의 적용성에 대하여, 수정 Fellenius법과 간편 Bishop법에 의한 안전율은 $\phi=0$ 인 점성토 지반에서는 그 해석결과가 일치하지만 사질토 지반을 해석하는 경우에는 서로 다른 해석 결과를 나타낸다. 일반적으로 수정 Fellenius법에 의한 원호활동 해석이 널리 이용되고 있으며, 이는 일본의 항만지역에서 활

동과괴 사례의 해석결과에 근거하고 있다. 이 방법은 기초 지반이 전부 사질토층이거나 상부가 두꺼운 모래층 및 하부가 점성토로 구성된 지반을 통과하는 원호활동에 대해서는 보통 안전율을 과소평가하는 결과를 보여준다. 또한, 마운드의 지지력 산출시 문제가 되는 편심 경사하중이 가해지는 경우에는 간편 Bishop법을 표준으로 하고 있다.

2.2.2 비원호 활동면에 의한 해석

원호 활동면 이외의 면을 가정하는 것이 적절한 경우는 직선 활동면 또는 복합 활동면을 고려하여 안정해석을 실시하도록 하고 있다. 직선 활동면을 가정하는 경우, 파괴에 대한 안전율(F_s)은 식 (3)에 의하여 산정한다.

$$F_s = \frac{\sum(c_l + W' \cos \alpha) \tan \phi}{\sin \alpha \sum W' + \cos \alpha \sum H} \quad (3)$$

직선 활동면은 모래질 자갈의 사면안정 해석시 많이 가정하며, 상시의 활동파괴에 대한 안전율은 1.2 이상을 표준으로 한다. 한편, 복합 활동면은 제체구조물이나 지중에 근입된 구조물에서 경사지반 전체의 안정성을 검토하는 경우에 이용할 수 있다.

3. 국외의 사면안정 설계기준: 중국, 유럽 및 일본

항만시설물과 관련된 국외의 사면안정해석 설계기준은 중국과 일본, 그리고 유럽연합의 유로코드를 대상으로 조사하였고, 그 밖에 영국의 BS코드를 참고하였다.

3.1 국외의 설계방법

3.1.1 중국

중국의 항만설계기준에 의하면 토사사면과 띠기초(strip foundation)의 하부토층에 대한 안정해석은 우리나라와 마찬가지로 2차원 평면문제에 취급한다. 설계기준에서는 파괴시 원호 활동면의 사용을 권장하고 있으며, 연약층과 경사진 암반면에서는 비원호 활동으로 가정하도록 하고 있다.

한계상태설계법(limit state design)에 기초하여 원호활동에 대한 계산은 아래의 방법으로 수행한다. 가장 위험한 원호활동에 대한 한계상태식은 식 (4)와 같다.

$$M_{sd} \leq \frac{M_{Rk}}{\gamma_R} \quad (4)$$

여기서, M_{sd} 는 가장 불리한 원호면에 작용하는 활동모멘트의 설계치, M_{Rk} 는 가장 불리한 원호면에 작용하는 저

항모멘트의 표준치이며, γ_R 은 저항에 대한 부분계수이다. 또한, 활동모멘트 M_{sd} 에 대한 설계치는 식 (5)에 의해 계산된다.

$$M_{sd} = \gamma_s [(\sum R(q_{ki}b_i + W_{ki}) \sin \alpha_i) + M_p] \quad (5)$$

여기서, R 은 활동면의 반경, γ_s 는 하중에 대한 포괄적 부분계수로써 1.0을 취하고, W_{ki} 는 i 번째 분할편의 중량 표준치로써 평균치를 취할 수 있으며, M_p 는 연직 방파체에 작용하는 파력의 표준치 등 기타 원인에 의해 일어나는 활동모멘트이다. q_{ki} 는 i 번째 분할편의 상부에서 변동하중의 표준치이고, b_i 는 i 번째 분할편의 폭이며, α_i 는 활동면 접선의 중간점과 수평선이 이루는 각이다. 한편, 장기안정 계산에 대한 저항모멘트 M_{Rk} 는 식 (6)으로 계산된다. 전단강도는 압밀-급속직접전단강도(consolidated-quick direct shear strength)를 사용하도록 제안하고 있다.

$$M_{Rk} = R \sum \frac{C_{ki}b_i + (q_{ki}b_i + W_{ki} - u_{ki}b_i) \tan \phi_{ki}}{\cos \alpha_i + \sin \alpha_i \tan \phi_{ki} \frac{1}{\gamma_R}} \quad (6)$$

여기서, u_{ki} 는 i 번째 분할편의 활동면 상에서 수압이 0인 지점 위의 간극수압 표준치이고, ϕ_{ki} , C_{ki} 는 각각 i 번째 분할편의 활동면 상에서 압밀-급속전단강도의 내부마찰각과 점착력의 표준치로서, 이들 표준치는 모두 평균치를 취할 수 있다. 유효 전단강도의 값을 이용하여 안정계산을 할 경우, M_{Rk} 는 식 (6)에서 단지 ϕ_{ki} 와 C_{ki} 를 ϕ'_{ki} 및 C'_{ki} 로 대체하여 계산할 수 있다.

한편, Fellenius법을 이용하여 사면안정해석을 수행할 경우, 저항모멘트의 표준치는 식 (7)로써 구할 수 있다. Fig. 1은 각 원호활동 안정계산에 대한 개념을 그림으로 나타낸 것이다.

$$M_{Rk} = R[\sum c_{ki}L_i + \sum (q_{ki}b_i + W_{ki}) \cos \alpha_i \tan \phi_{ki}] \quad (7)$$

그리고 토질상수인 베인(vane) 전단강도, 비배수 전단강도 및 일축압축강도를 이용하여 저항모멘트의 표준치를 구

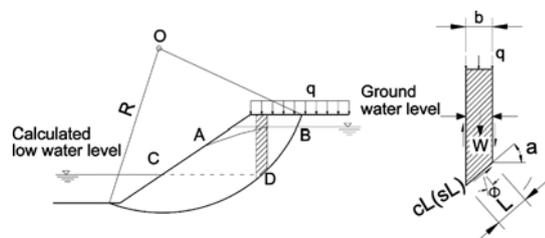


Fig. 1. Calculation of circular sliding stability (The Ministry of Communications, P. R. China, 2000).

할 경우는 식 (8)과 (9)에 따라 구할 수 있다.

$$M_{RK} = R \sum S_{uki} L_i \quad (8)$$

$$L_i = \frac{b_i}{\cos \alpha_i} \quad (9)$$

여기서, S_{uki} 는 i 번째 분할편의 배인 전단강도, 비배수 전단강도 및 일축압축강도 등의 표준치이고, L_i 는 i 번째 분할편의 원호길이이다.

모든 단기안정조건에 대하여, 저항모멘트는 식 (7) 및 식 (8)에 의해 계산하고, 활동모멘트는 식 (5)의 계산식을 사용할 수 있다. 장기안정조건에 대해서는 강도지수의 신뢰성과 구조적 안전등급 및 지역에 따른 경험계수 등을 고려하여 저항에 대한 최소 부분계수 γ_R 를 Table 1에 따라 이용하도록 제안되어 있다. 단기안정조건에서 시공 중 안정성 검토에 대한 저항의 최소 부분계수 γ_R 은 Table 1에 제안된 값들 중 하한치를 권장하고 있다. 반면, 말뚝을 포함한 성토사면에서의 안정성 검토 시에는 그 상한치의 사용을 제안하고 있다.

기타 지반의 복잡성과 지역적 특성에 대해서는 다음과 같이 규정하고 있다. 즉, 토층과 흙의 특성이 기본적으로 같고 사면의 높이와 경사가 유사하며 사면파괴의 원인이 명확할 경우, 인근의 사면붕괴를 경험한 사면에 대하여 비교설계법을 적용할 수 있다고 언급하고 있다. 또한, 토층과 흙의 특성이 기본적으로 같고 현행 사면의 M_{Rk}/M_{sd} 비가 Table 1의 최소 부분안전계수 γ_R 의 하한치보다 작으며 인근 안정된 사면의 경사도가 계획사면 경사도 이상일 경우,

비교설계법을 적용할 수 있다. 이 경우에 계획사면의 γ_R 값은 안정된 기존사면의 값 이상을 확보하도록 규정한다.

비원호 활동면에 의한 안정검토의 경우 활동면은 직선, 파선, 원호와 직선의 조합 및 기타 곡선 등으로 가정할 수 있다. 이때, 저항에 대한 최소 부분계수는 원호 활동면의 제안범위를 따르도록 정하고 있다.

3.1.2 유로코드(Eurocode)

유로코드 7(EC 7)에서는 지반이 현저한 이방성을 보이지 않는 한 사면안정 해석에 있어 절편법 사용을 추천하고 있다. 이 경우, 활동토괴 전체의 모멘트와 연직력의 안정성에 대하여 검토해야 한다. 그리고 수평력에 대한 평형조건이 검토되지 않으면 분할편간의 절편력은 수평이 된다고 가정한다. 특정한 계산법에 대하여 언급하지는 않지만 모든 평형조건이 만족되는 Morgenstern & Price법과 분할편 측면의 합성력이 수평 또는 경사지게 가정되는 Bishop법을 채택한다고 할 수 있다. 또한, 분할편 사이에 경사진 절편력을 가지는 Janbu법을 허용하는 반면에 수평 절편력을 가지는 경우의 Janbu법과 절편력이 무시되고 연직 및 수평 평형조건이 모두 만족되지 않는 Fellenius법 등의 간편법은 제외시키고 있다.

EC 7에서 사면안정 해석은 기본적으로 한계평형법을 근간으로 하고 있으며, 극한 및 사용한계상태에 대하여 검토하도록 규정하고 있다. 원호활동에 대한 평형조건은 기본적으로 활동모멘트가 설계 저항모멘트를 초과하지 않는 조건이다. EC 7에서는 이것을 비배수조건에 대하여 식 (10)

Table 1. Minimum partial factor of resistance (The Ministry of Communications, P. R. China, 2000)

Strength index	Calculation formula		
Consolidated quick shear strength (direct shear)	$M_{Rk} = R \sum \frac{C_{ki} b_i + (q_{ki} b_i + W_{ki} - u_{ki} b_i) \tan \phi_{ki}}{\cos \alpha_i + \sin \alpha_i \tan \phi_{ki} \frac{1}{\gamma_R}}$	Cohesive soil slope	1.2~1.4
		Other soil slope	1.3~1.5
	$M_{sd} = \gamma_s [(\sum R(q_{ki} b_i + W_{ki}) \sin \alpha_i) + M_p]$		
Effective shear strength	$M_{Rk} = R \sum \frac{C_{ki} b_i + (q_{ki} b_i + W_{ki} - u_{ki} b_i) \tan \phi_{ki}}{\cos \alpha_i + \sin \alpha_i \tan \phi_{ki} \frac{1}{\gamma_R}}$		1.3~1.5
	$M_{sd} = \gamma_s [(\sum R(q_{ki} b_i + W_{ki}) \sin \alpha_i) + M_p]$		
Vane shear strength; Unconfined compression strength; Undrained triaxial shear strength	$M_{Rk} = R \sum S_{uki} L_i$		1.1~1.3
	$M_{sd} = \gamma_s [(\sum R(q_{ki} b_i + W_{ki}) \sin \alpha_i) + M_p]$		
Quick shear strength (direct shear)	$M_{Rk} = R(\sum C_{ki} L_i + \sum (q_{ki} b_i + W_{ki}) \cos \alpha_i \tan \phi_{ki})$		By experience
	$M_{sd} = \gamma_s [(\sum R(q_{ki} b_i + W_{ki}) \sin \alpha_i) + M_p]$		

과 같이 나타내고 있다.

$$W_d x \leq \frac{c_{uk} L r}{1.4} \quad (10)$$

여기서, W_d 는 상재하중을 포함한 활동토피의 설계자중, x 는 원호 중심에서 활동토피 중심까지의 거리, L 은 활동면 길이이고 r 은 활동면의 반경이다.

3.1.3 일본

일본 항만설계기준의 기본적인 가정사항은 우리나라와 크게 다르지 않다. 원호활동에 대하여는 수정 Fellenius법과 관련 Bishop법에 대하여 규정하고 있다. 단, 2007년 개정된 설계기준에서는 한계상태설계법이 도입되어 수정 Fellenius법에 의한 안정검토는 식 (11)에 따른다.

$$\begin{aligned} R \Sigma \{ c_d l + (W_d' + q_d) \cos \theta \tan \phi_d \} &\geq \gamma_a [\Sigma \{ x(W_d + q_d) + a P_{H_d} \}] \\ &= \Sigma \{ c_d S + (W_d' + q_d) \cos^2 \theta \tan \phi_d \} \sec \theta \\ &\geq \gamma_a \left\{ \Sigma (W_d + q_d) \sin \theta + \frac{1}{R} a P_{H_d} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

Fig. 2에 나타난 바와 같이 R 은 활동원호의 반경, c_d 는 비배수 전단강도의 설계치(점성토) 또는 배수조건을 걸보기 점착력 설계치(사질토), l 은 분할편 밑변의 길이, W_d' 는 단위 길이당 분할편 유효중량의 설계치(수면하에 있는 경우는 수중단위중량), q_d 는 분할편 상부에 작용하는 연직하중의 설계치, θ 는 분할편 저면 및 수평면 사이의 각, ϕ_d 는 배수조건 전단저항각의 설계치(점성토 지반의 경우 0), W_d 는 단위 길이당 분할편 전 중량의 설계치, x 는 분할편의 중심과 활동원호 중심 사이의 수평거리, P_{H_d} 는 활동원내 토피 분

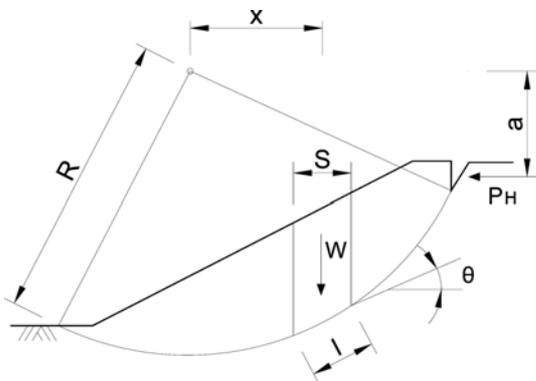


Fig. 2. Circular sliding by modified Fellenius method (社團法人 日本港灣協會, 2007).

할편에 작용하는 단위 길이당 수평력의 설계치, a 는 P_{H_d} 작용위치의 원호중심으로부터의 팔길이이며, S 는 분할편의 폭이다. γ_a 는 해석기법에 따른 부분계수로서 그 구체적인 범위는 이하에 기술될 것이다.

한편, 식 (11)에서 각각의 설계치는 특성치에 부분계수를 곱하여 식 (12)와 같이 산정하고, 특별한 지정이 없는 경우는 모두 1.0으로 취할 수 있다.

$$c_d = \gamma_c c_k, W_d' = \gamma_w W_k, q_d = \gamma_q q_k, \phi_d = \tan^{-1}(\gamma_{\tan \phi} \tan \phi_k), \quad (12)$$

Bishop법은 분할편의 연직면내에 작용하는 연직방향 전단력과 수평력을 고려한 산정식을 제안하고 있다. 설계기준에 제시된 간이 Bishop법은 식 (13)을 기본으로 $\gamma_{F_f} F_f$ 를 산출하기까지 조사 파라미터 $F_f \geq 1$ 조건에 대한 안정성을 조사할 수 있다. 이 식에서 γ 는 첨자에 해당하는 부분계수로서, 첨자 k 및 d 는 그 특성치(characteristic value)와 설계치(design value)를 나타낸다.

$$\gamma_{F_f} F_f = \frac{\Sigma \left[[c_d S + (W_d' + q_d) \tan \phi_d] \frac{\sec \theta}{1 + \tan \theta \tan \phi_d / (\gamma_{F_f} F_f)} \right]}{\Sigma [(W_d + q_d) \sin \theta + a P_{H_d} / R]} \quad (13)$$

여기서, F_f 는 조사 파라미터, γ_{F_f} 는 해석기법에 대한 부분계수이며, 설계치의 산정방법은 상기 수정 Fellenius법과 같다.

3.2 국외의 설계법 비교

3.2.1 설계의 원칙

중국코드, EC 7 및 일본코드는 모두 사면과 기초의 안정성 해석에 있어 한계상태이론에 근거하고 있다. EC 7 및 일본코드에서는 안정해석 조건을 극한한계상태(Ultimate Limit State; ULS)와 사용한계상태(Serviceability Limit State; SLS)로 명확히 구분하는 한편, 중국의 경우는 구조물을 중요도에 따라 3개 등급으로 구분하고 그에 따른 중요도 계수를 사용하도록 규정하고 있다. 또한, EC 7에서는 단지 계산의 원칙만 언급하고 있을 뿐, 구체적인 식을 정의하고 있지 않으므로 설계자는 설계상황에 따라 다소 유연한 선택을 할 수 있다.

중국코드는 다양한 사례의 신뢰성 해석 및 비교연구에 기초하여 항만의 사면안정에 대한 목표신뢰지수(target reliability index, β_T)를 2.5~4.0 범위로 규정하고 있으며, EC에서 β_T 는 ULS 설계시 3.8을 기준으로 한다. 일본의 경우, 사면안정 해석시 β_T 는 방파제 구조물 3.3~3.6, 안벽 구조물 2.89~3.31

로써, 파하중에 의한 피해 가능성이 큰 방파제 구조물에 대하여 크게 설정되었다.

3.2.2 활동파괴의 형태

중국코드에서 활동 파괴면은 크게 원호 활동면과 비원호 활동면으로 구분하고, 비원호 활동면은 직선, 파선, 원호와 직선의 조합 및 기타 곡선 등으로 가정하도록 규정한다. 계산방법에 있어 각 절편사이의 수평력과 연직력을 모두 고려하며, 구조물의 일부분에 상당한 하중이 재하되거나 제한된 활동영역이나 연약지반 층인 경우, 저항모멘트의 특정값 하에서 활동에 대한 수평마찰의 영향에 대해서도 언급하고 있다. EC 7에서도 활동면은 크게 평면, 원호 및 기타 복잡한 모양으로 구분하며, 지반 및 성토재료가 비교적 균일하고 응력에 대해 등방성일 경우는 원호 파괴면으로 가정하여도 충분하다고 규정한다. 일본코드에서는 활동 파괴면을 원호면과 평면으로 가정하고, 평면 활동면에 대한 계산방법도 규정하고 있다.

3.2.3 설계식

중국코드의 사면안정 해석에서 예전에는 수정 Fellenius 해석법이 사용되었으나, 현재는 간이 Bishop법을 추천하고

있다. 현재 중국 설계자들은 이론적으로 흙의 절편력을 고려한 간이 Bishop법이 수정 Fellenius 해석보다 합리적이며, 실제적으로 계산된 신뢰지수가 보다 현실에 가깝다고 간주한다. EC 7에서는 기술자가 설계시 유연하게 대처하도록 특정한 계산식을 규정하지는 않으나 주로 Mogenstem & Price 법과 Bishop법이 권고되는 것으로 보인다. 일본의 사면안정 설계기준은 수정 Fellenius 해석법을 우선적으로 규정하고 있고, 이는 일본 3개 지역의 항만구조물 피해사례에 대한 사면파괴의 모사에서 보다 실제현상에 부합하는 것으로 나타난 데에서 기초한 것이다. 그러나, 두꺼운 사질토 지반에서는 간이 Bishop법이 보다 유용하다고 언급하고 있다.

3.2.4 재료정수의 결정

중국설계법

중국코드에서는 모든 조건에 대하여 강도지수의 선택을 체계적으로 정리하고 있다. 모든 설계조건에 대한 강도지수와 계산식을 Table 2에 나타내었다. 장기적 안정조건에서는 일반적으로 압밀-급속전단강도를 적용하며, 상재하중에 의한 강도 증가시 이를 고려해야 한다. 이에 따르면 강도 증가는 시공속도와 재하중의 규모에 의해 결정되는 압밀도를 고려하여 계산해야 한다. 시공기간중의 안정성 해석은

Table 2. Strength index and formular for each design condition (The Ministry of Communications, P. R. China, 2000)

Design conditions	Strength index & applicable conditions		Formulae of M_{Rk} & M_{sd}	Descriptions
	Strength index	Applicable conditions		
Long term stability	Consolidated quick shear strength (direct shear)	Preferable to apply	Eq. (6) & (5)	The anti-sliding moment(resistance) caused by may be completely or partially taken into account, depending on the consolidation degree of soil mass under the action of ; the sliding moment(action effect) caused by should be completely taken into account.
			Eq. (8) & (5)	
	Vane shear strength or unconfined compression strength	Applied if allowed	Eq. (9) & (5)	The strength increment induced by consolidation of soil mass should be taken into account.
	Effective shear strength		Eq. (7) & (5)	The pore water pressure should be determined in accordance with the design conditions.
Short term stability	Undrained triaxial shear strength	Preferable to apply	Eq. (9) & (5)	The strength increment caused by consolidation of soil mass should be taken into account.
	Vane shear strength or unconfined compression strength		Eq. (9) & (5)	-
	Effective shear strength	Applied if allowed	Eq. (7) & (5)	The pore water pressure should be determined in accordance with the design conditions.
	Undrained triaxial shear strength		Eq. (9) & (5)	-
Quick shear strength (direct shear)	Applied if experienced	Eq. (8) & (5)	-	

일반적으로 베인 전단강도와 비압밀 비배수(UU) 시험에서 얻어진 강도지수를 사용하며, 압밀에 의한 흙의 강도증가를 고려해야 한다. 대부분 직접전단강도의 적용은 권장하지 않지만 충분한 경험이 있는 경우에서 한해서는 적용할 수 있다.

유로설계법(EC 7)

EC 7의 규정에서는 비배수 전단강도와 유효 전단강도를 점성토에 사용한다. 그러나 특별한 실험방법이나 추천하는 설계지수는 없다.

일본설계법

일본코드에서는 기본적으로 점성토는 비배수 전단강도, 사질토는 압밀 배수 전단강도를 적용하도록 규정한다. 중간성질 흙의 강도지수의 경우는 투수계수와 설계조건에 따라 결정한다. 점성토의 경우에는 일축압축강도, 삼축압축강도, 직접전단강도 및 베인 전단강도를 적용할 수 있다. 압밀에 의한 흙의 강도증가는 경험식을 기초로 고려해야 한다. 특별히 다른 강도지수와와의 비교 및 설계조건별 강도지수의 추천은 없다.

3.2.5 부분계수의 결정

중국설계법

중국은 설계기준 개발을 위한 신뢰성 해석과 부분계수의 결정과정에서 전체 항만구조물중 28개의 프로젝트에 대하여 조사 및 연구하였다. 이 중에는 15개의 잔교식 안벽과 10개의 중력식 안벽, 1개의 방파제, 2개의 널말뚝식 안벽 구조물이 포함되어 있다. 대개 지반이 다양한 층으로 구성되어 있고, 일관성이 부족한 지침과 방법에 의해 사면안정 해

Table 3. Partial factor for ULS, Case C; EC 7 (Orr and Farrell, 1999)

Parameter	Factor	Case C
Partial load factors (γ_f)		
Permanent unfavorable action	γ_G	1.00
Variable unfavorable action	γ_Q	1.30
Permanent favorable action	γ_G	1.00
Variable favorable action	γ_Q	0
Accidental action	γ_A	1.00
Partial material factors (γ_m)		
$\tan \phi'$	$\gamma_{\tan \phi'}$	1.25
Effective cohesion, c'	$\gamma_{c'}$	1.60 (1.25)
Undrained shear strength, c_u	γ_{c_u}	1.40
Compressive strength, q_u	γ_{q_u}	1.40
Pressuremeter limit pressure, p_{lim}	$\gamma_{p_{lim}}$	1.40
CPT resistance	γ_{CPT}	1.40
Unit weight of ground, γ	γ_g	1.00

석이 이루어진 점을 감안한다면 여러 불규칙한 변수들에 대하여 부분계수를 결정하기는 쉽지 않았을 것이며, 이로 인하여 포괄적 부분계수(comprehensive partial factor)를 적용하고 있다. 결과적으로 신뢰성 분석과 실무자의 경험에 따라 포괄적 부분계수를 1.0으로 결정하게 되었다. 저항에 대한 포괄적 부분계수는 기존의 설계기준에서 제시하고 있는 안전율의 개념과 동일하다. 28개의 프로젝트를 분석한 결과, Bishop법에서 저항의 최소 부분계수 범위는 점토지반의 경우 1.2~1.4이고, 기타 지반의 경우 1.3~1.5이다. 반면, Fellenius법의 경우 저항의 최소 부분계수 범위는 1.1~1.3으로 Bishop법의 결과에 비해 7~15% 작게 평가되었다.

유럽의 EC 7

EC 7에서 ULS의 하중에 대한 부분계수는 크게 영구적 하중(permanent action)과 일시적 하중(transient action)으로 구분하고 있다. Table 3은 EC 7에 제시된 ULS에 대한 부분계수 중 Case C의 설계조건을 나타내고 있다. 여기서, 영구적 하중과 변동하중(variable action)에 대한 부분계수는 각각 1.0 및 1.3으로 제시하고 있다. 참고로 설계시 경험식에 적용되는 설계치는 특성치를 적절한 부분계수로 나누거나 곱한 값이다. 보강되지 않은 점성토 사면은 단지 지반 강도에만 연관될 뿐 다른 구조재료와는 무관한 조건이므로 Case C에 해당된다. 이 경우, $\gamma_G=1.0$ 이므로 사면안정 해석시 지반의 설계자중과 수압은 특성치와 같게 되고, 사면의 상단면에 활하중이 작용하는 경우는 하중값에 부분(하중)계수 $\gamma_Q=1.3$ 을 곱하여 설계치를 구한다. 또한, 설계 토질강도 파라미터는 특성치를 Case C의 적절한 부분(재료)계수 γ_m 으로 나눔으로써 구한다. 식 (10)의 평형조건 식에서 W_d 는 불리한(unfavorable) 영구하중에 대하여 $\gamma_G=1.0$ 을 적용할 수 있다. 한편, 상재하중이 없을 때 c_{uk} 에 대한 부분계수 1.4를 적용하며 이 값이 안전율이 된다.

일본설계법

일본코드에서 부분계수는 포괄적 부분계수와 재료의 통계적 특성에 따라 결정되는 부분재료계수로 구분할 수 있다. 3.1.3절에 언급된 해석기법에 따른 부분계수 γ_a 는 포괄적 부분계수로 간주할 수 있다. γ_a 는 영구적 조건에 대하여는 1.3 이상, 동일한 지반에서의 실적 등에 의한 설계정수의 신뢰성이 높다고 판단되는 경우나 시공 중 지반의 변위나 응력에 대한 예측이 실시되는 경우에는 1.1~1.3 미만의 값을 사용할 수 있다. 이는 종전 설계기준의 안전율에 해당하는 값이다. 한편, 설계치를 결정하기 위한 식 (12)에서 각각의 부분(재료)계수는 구조물별 설계기준에서 별도로 정의하고 있으며, 특별한 지정이 없는 경우는 1.0으로 취할 수

있다. 원호활동에 대하여 검토하도록 규정한 중력식 및 널말뚝식 안벽의 $\tan\phi'$ 및 c' 에 대한 부분(재료)계수는 모두 0.9로 제안하고 있으며, 이를 EC 제안형태로 나타내면 1.1의 값이 된다.

부분계수의 비교

부분계수에 대한 규정은 EC 7과 중국코드 사이에 상당한 차이를 나타낸다. 영구적 하중에 대한 부분계수는 두 코드에서 모두 양호(favorable) 및 불리한(unfavorable) 하중조건에서 1.0이다. 그러나, 변동하중 조건의 부분계수는 중국코드 1.0, EC 1.3을 취하고 있다. 결과적으로 중국코드에서는 영구적 하중과 변동하중에서 모두 1.0의 부분계수를 제시하고 있는데, 이 값은 새로운 코드를 개발하는 과정에서 계산과 비교연구를 통하여 검증된 값이다.

중국코드의 $\tan\phi'$ 와 c' 에 대한 부분계수는 EC 7과 다소의 차이가 있다. 이것은 $\tan\phi'$ 와 c' 의 변동계수(Coefficient of Variation; COV)가 다르기 때문이다. EC 7에서 나타났듯이 일반적으로 c' 의 COV는 ϕ' 의 그것보다 크다. 위에서 언급했듯이 중국코드에서는 계산의 편의상 하중의 부분계수를 1.0으로 취하였고, 저항에 대하여는 포괄적 부분계수 γ_R 을 반영하였으므로 c' 와 ϕ' 의 부분계수는 같다고 볼 수 있으며, 이는 어느 정도의 통계적 편차를 허용하는 것으로 간주할 수 있다.

EC 7에서는 유효전단강도와 비배수 전단강도에 대한 부분계수를 따로 규정하는 것이 타당하다고 주장하고 있다. Table 1과 3를 비교해 볼 때, 유효전단강도와 비배수 전단강도를 제외한다면 중국코드와 EC 7는 유사하다. 그리고 중국코드에서는 영국표준(BS 6349)에서 적용하고 있는 압밀-급속전단강도(직접전단)를 사용하는데 이는 중국의 실무기술이 압밀-급속전단시험에 대한 충분한 경험을 가지고 있기 때문이라 할 수 있다.

Table 1과 3의 비배수 전단강도를 비교하면 Table 1의 비배수 전단강도에 대한 부분계수 $\gamma_R=1.1\sim 1.3$ 이고 Table 3에서의 c_u 와 q_u 의 부분계수는 1.4이다. 이로써, EC 7에서 요구하는 안전율은 중국코드에 비해 높은 것을 알 수 있다. 실제 설계에 있어 저항에 대한 부분계수는 강도지수의 신뢰성, 구조물의 안정수준, 지역적 경험 등에 의해 결정된다. 따라서, 최종단계에서 저항에 대한 부분계수 γ_R 은 Table 2의 값과 다소의 차이가 있을 수도 있다.

일본코드의 하중에 대한 부분계수는 종전 안전율에 해당하는 1.1~1.3을 채택하고 있으며, 이는 중국 및 EC의 중간수준이다. 반면, 비배수 전단강도 및 전단저항각에 대한 부분계수는 1.1로써 EC 및 중국코드에 비교하면 가장 낮은

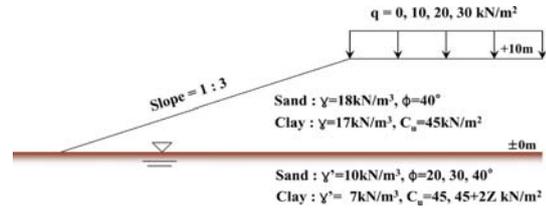


Fig. 3. Cross section of example.

값에 해당한다.

결론적으로 EC 7에서 요구하는 안전율이 중국코드의 최소치보다 높다고 볼 수 있으며, 일본코드는 하중의 부분계수를 다소 크게 설정하는 대신 재료에 대한 부분계수를 낮춤으로써 균형을 이루고자한 것으로 보인다. 이는 각국 기준이 그 나라의 기술적 숙련도와 지역적 경험 등을 반영하고 있는 결과라 할 수 있다.

3.3 설계사례 비교

국가별 설계기준에 대한 실제 설계상 결과를 비교하기 위하여 Fig. 3과 같은 임의 사면을 가정하여 해석하였다. 안정 해석법은 중국, 일본코드 및 EC에서 공통적으로 언급하고 있는 간이 Bishop법에 의해 수행하였다. 동일한 사면의 토질을 사질토 및 점성토로 구분하였고 4단계로 상재하중을 증가시키며 해석하였다. 또한, 사질토 사면의 경우는 전단저항각을 달리하여 해석하였고, 점성토 사면일 경우에는 기초지반의 비배수 전단강도가 일정한 경우와 깊이에 따라 증가하는 경우로 구분하였다.

Fig. 4는 사면이 사질토인 경우 전단저항각과 상재하중에 따른 안전율 변화를 나타낸다. 안전율은 중국, 일본코드 및 EC의 순으로 높게 나타나, 앞에서 분석한 바와 같이 일본코드에 의한 안전율 규정이 중국코드 및 EC의 사이에 위치함을 확인할 수 있다. 전반적인 안전율은 전단저항각 증가와 함께 증가함이 뚜렷하며 상재하중에 따라서는 약간 감소되는 경향을 볼 수 있다.

Fig. 5는 사면이 점성토인 경우 안정해석 결과를 나타낸다. 설계기준 사이의 양상은 사질토 사면과 마찬가지로 중국, 일본코드 및 EC의 순으로 높게 나타났고, 상재하중 증가에 따른 안전율 감소는 사질토 지반보다 더욱 명확히 나타났다.

이러한 결과를 분석해 보면, 하중에 대하여 중국코드가 1.0의 부분계수를 갖는 반면, EC는 1.3을 취하여 원래 하중의 30%를 할증하게 됨으로써 안전율이 저하된다. 게다가, Table 1과 3에 나타났듯이 EC에서 요구하는 저항에

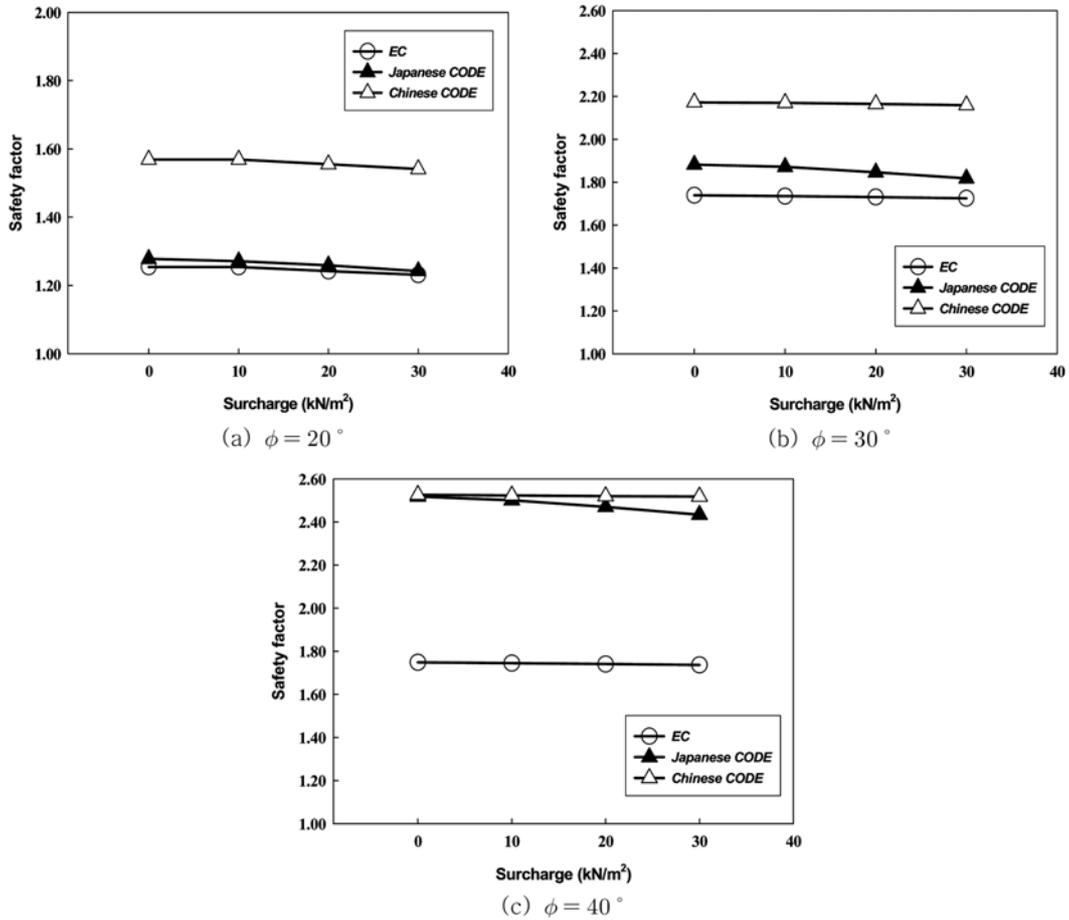


Fig. 4. Comparison of safety factors for sand ground.

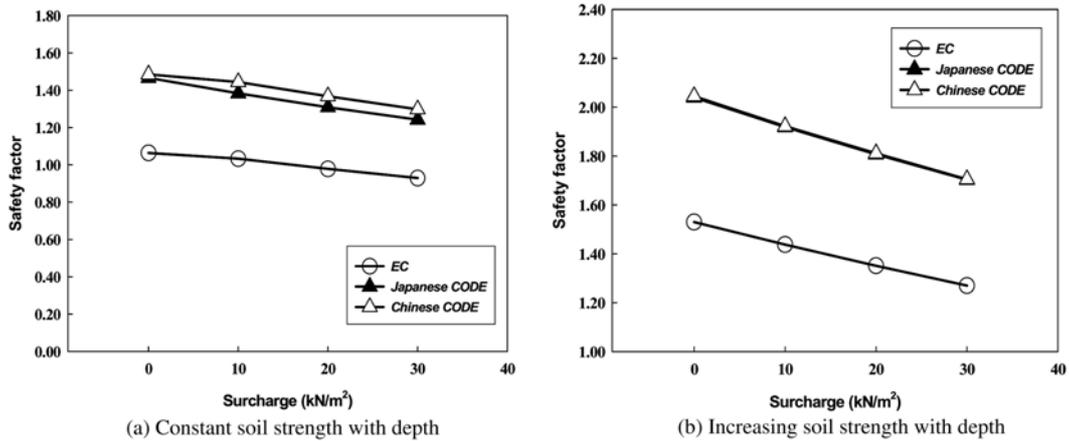


Fig. 5. Comparison of safety factors for clay ground.

대한 부분계수는 중국의 그것보다 크므로 더욱 안전측의 결과를 나타내게 되는 것이다. 한편, 일본코드의 저항에

대한 주요 부분계수는 1.1로써 낮은 편이지만, 하중에 대한 부분계수가 중국 및 EC의 중간수준인 1.1~1.3을 규정

함으로써 해석결과는 그들 사이에 위치하는 것으로 추정된다.

수 등의 부분안전계수는 심도있게 재검토되어야 할 필요가 있다.

4. 결론 및 토론

1. 항만시설물의 설계기준은 최근 일본의 설계법을 포함하여 중국과 유럽 모두 한계상태설계법에 따라 설계기준을 제시하고 있다. 사면안정 해석시 가정 파괴면은 보통 원호 및 비원호 파괴면 검토를 원칙으로 하고 있고, 일본은 비원호 파괴에 직선활동 검토를 규정하고 있다. 유럽에서는 설계시 경험적 판단의 유연성을 위하여 특정 설계법을 규정하지는 않았으며 수정 Fellenius법 보다는 Mogenstern & Price법과 Bishop법을 권고하고 있다. 중국은 기존의 수정 Fellenius법에서 합리성에 따라 간편 Bishop법으로 대체하였다. 일본은 주요 항만시설의 실제 사례분석을 근거로 수정 Fellenius법이 더 잘 부합한다고 규정하고 있다. 더불어 간편 Bishop법에 의한 설계법도 제시하여 두꺼운 모래지반 등에서 적용할 수 있도록 하고 있다.

2. 한계상태설계법에서 부분계수는 중국코드에서는 계산의 편리상 하중에 대한 부분안전계수를 1.0으로 취하고, 저항에 대하여는 포괄적 부분안전계수를 반영하였다. 이는 실제로 흙의 강도 정수별 COV가 상이하니 이를 무시한 것이므로 약간의 통계적 편차를 허용하는 것으로 볼 수 있다. 반면, EC 7에서는 다양한 하중뿐 아니라 재료에 대한 부분안전계수까지도 상세히 제시하고 있다. 일본코드는 하중에 대한 포괄적 부분안전계수를 종전 안전율에 해당하는 1.1~1.3을 채택하고 있는 반면, 흙의 재료특성에 따른 강도 지수의 부분안전계수는 구조물별로 다르게 제안하고 있다.

3. 각국에서 공통적으로 언급하고 있는 간편 Bishop법에 의한 예제 사면의 안정해석 결과, 안전율은 중국, 일본코드 및 EC의 순으로 높게 나타났다. 이는 EC, 일본 및 중국코드의 순으로 하중에 대한 부분계수를 크게 규정하고 있는 동시에, 저항에 대한 부분계수는 EC, 중국 및 일본코드의 순으로 크게 규정하는 데에서 기인하는 것으로 추정할 수 있다.

4. 현행 국내 설계기준은 과거 일본기준과 유사하므로 기존 구조물의 안전여유(safety margin)에 큰 차이가 없을 것으로 판단된다. 그리고 일본에서 제시하는 부분안전계수는 다른 나라들과 비교할 때 경제성 및 안정성에 있어서 치우치지 않는 측면이 있다. 그러나, 지진피해나 사면안정을 지배하는 토질여건은 동일할 수 없으므로 지진계수나 강도정

감사의 글

본 논문은 국토해양부와 한국해양수산기술진흥원이 지원하는 “항만구조물 신뢰성 설계법 개발(PM54100)” 연구결과 의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

서승남, 전찬후, 연영진 (2005). 항만구조물 원호활동해석 수치모형. 대한토목학회논문집, 25(5C), 343-352.

서용석, 백용, 김광식, 이경미 (2005). 한계평형법을 이용한 3차원 사면안정해석. 대한지질공학회 학술발표회 논문집, 261-268.

윤길림 (2003). 차세대 항만 설계기술 개발(III). 해양수산부. 해양수산부 (2005). 항만 및 어항 설계기준(상권), pp.536-543.

Bromhead, E.N. (1998). The stability of slopes. SPON press. BS 6349 (1984). Code of practice for maritime structures. British Standards Institution, London.

CEN (2004). EN 1997-1 Eurocode 7 Geotechnical design. Part 1-General rules. CEN.

GEO-SLOPE INTERNATIONAL (2002). SLOPE/W for slope stability analysis USER'S GUIDE.

Hovland, H.J. (1977). Three-dimensional slope stability analysis method. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 103(GT9), 971-986.

Matsuo, M. and Kuroda, K. (1974). Probabilistic approach to the design of embankments. Soils Found, 14(1), 1-17.

Orr, T.L.L. and Farrell, E.R. (1999). Geotechnical design to Eurocode 7. Springer.

The Ministry of Communications, P. R. China (2000). Technical codes for port engineering. Vol. 1, People's communications publishing house, 692-700.

Zienkiewicz, O.C., Valliappan, S. and King, I.P. (1969). Elastoplastic solutions of engineering problems 'Initial stress', finite element approach. Int. J. Num. Meth. in Engrg., 1, 75-100.

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(下巻).

원고접수일: 2009년 5월 13일
 수정본채택: 2009년 7월 14일(1차), 2009년 8월 10일(2차)
 게재확정일: 2009년 8월 10일