

케이슨식 안벽의 신뢰성설계를 위한 부분안전계수 Partial Safety Factors for Reliability Based Design of Caisson Type Quay Walls

김동현¹, 윤길립², 박우선²
 Dong Hyawn Kim¹, Gil Lim Yoon² and Woo Sun Park²

1. 서 론

케이슨식 안벽의 신뢰성설계는 설계변수의 확률적 변동성을 고려하여 제체의 파괴확률을 산정하고 이것이 허용범위를 초과하지 않도록 하는 설계법의 일종이다. 여기에는 한계상태에 대한 파괴확률을 직접 산정하는 방법(Level III 방법)과 비선형 한계상태 함수를 선형화하여 근사 파괴확률을 산정하는 방법(Level II 방법)이 있다. 그러나, 이러한 방법들은 매우 논리적이고 정밀한 신뢰성설계를 가능하게 하지만 설계기술자들이 실무에 적용하기 위해서는 많은 노력을 필요로 한다. 그래서 실무적용성을 높이면서 신뢰성설계와 같은 효과를 얻기 위해 부분안전계수법(Level I 방법)을 널리 사용하고 있다. 부분안전계수법은 각각의 설계변수에 안전계수를 적용하므로써 설계자가 원하는 수준의 신뢰성을 확보할 수 있도록 하는 매우 실용적인 방법이다.

케이슨식 안벽의 부분안전계수법은 국내에 발표사례가 없으며 일본에서는 나가오(長尾)등(2001)이 제안한 바 있다. 그러나, 그들은 극치분포 특성을 갖는 지진계수를 정규분포로 가정하여 지진의 특성을 올바르게 반영하지 못하였다. 또한, 전면조위와 잔류수위에 대한 부분안전계수를 제안하면서 특성치의 적용에 있어 현행설계법과의 불일치를 극복하지 못하였다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 일계모멘트법(FORM)에 근거한 부분안전계수법을 제안하였으며 이 과정에서 지진계수를 극치분포로 적용하므로써 지진에 의한 확률특성을 적절하게 반영하도록 하였다. 또한, 현행설계법과 논리적인 연계가 가

능한 방법을 제안하였다. 수치해석에서는 실규모 설계사례를 이용하여 목표신뢰도지수에 해당하는 부분안전계수를 제시하였다. 제안된 부분안전계수는 설계 대상구조물의 설계조건과 목표신뢰도지수 등에 영향을 받으므로 모든 케이슨식 안벽에 그대로 적용할 수는 없으나 다양한 사례에 대한 연구들 통해 부분안전계수의 표준값을 설정하는데 이용할 수 있다.

2. Level I 신뢰성 설계법

2.1 안정성 평가식

Level I 신뢰성설계를 위한 활동 및 전도 안정성 평가식은 다음과 같다.

$$f_d (\Sigma W_{id} - B_d + E_{vd}) > \Sigma I_{id} + E_{hd} + R_d + D_d \quad (1)$$

$$\Sigma d_{W_i} W_{id} - d_B B_d + d_E E_{vd} > \Sigma d_I I_{id} + d_{E_h} E_{hd} + d_R R_d + d_D D_d \quad (2)$$

여기서,

$$\begin{aligned} f_d &= \gamma_f f_k \\ W_{id} &= \gamma_{W_i} W_{ik} \\ B_d &= r_w [(\gamma_{H_n} H_{Wk} + h)b + v_f] \\ E_{vd} &= E_{hd} \tan \delta \\ E_{hd} &= \gamma_{E_s} E_{stk} + A \gamma_{K_n} K_{hk} \\ I_{id} &= \gamma_{K_h} K_{hk} \gamma_{W_i} W_{ik} \end{aligned}$$

¹ 발표자: 군산대학교 해양건설공학과 교수

² 한국해양연구원 연안개발에너지연구부 책임연구원

$$R_d = 1/2r_v \cdot [(\gamma_{H_R} H_{Rk} + h)^2 - (\gamma_{H_W} H_{Wk} + h)^2]$$

$$D_d = 7/12r_w \gamma_{K_k} K_{hk} (\gamma_{H_W} H_{Wk} + h)^2$$

위 식에서 f 는 제체와 저면의 마찰계수, W_i 는 제체의 중량, h 는 저면수심, b 는 제체폭, v_f 는 푸팅제적, δ 는 벽면마찰각, r_w 는 해수 단위중량, H_W 는 전면조위, H_R 는 잔류수위, A 지진계수에 대한 동적도압의 기울기 등이며 첨자 k 는 특성치를 의미한다. 또한, 전도안정성 평가식의 d_i 는 하중 i 의 모멘트 팔길을 의미한다.

2.2 부분안전계수

일계신뢰도법(FORM)에 의한 부분안전계수는 다음으로부터 구한다.

$$\gamma_X = \left(1 - \alpha_X \beta_T \frac{\sigma_X}{\mu_X}\right) \frac{\mu_X}{X_k} \quad (3)$$

여기서, α_X 는 Level II 설계법에서 확률변수 X 에 대한 한계상태함수의 민감도이며, β_T 는 목표신뢰도지수, μ_X, σ_X, X_k 는 각각 확률변수 X 의 평균치, 표준편차 및 특성치이다. 식 (3)에서 확률변수 X 가 정규분포를 따르지 않는 경우는 등가의 정규분포에 대한 평균 및 표준편차를 적용한다.

특성치를 현행설계법에 의한 설계치로 적용할 경우 전면조위에 대한 부분안전계수는 다음과 같다.

$$\gamma_{H_W} = \left(1 - \alpha_{H_W} \beta_T \frac{\sigma_{H_W}}{\mu_{H_W}}\right) \frac{\mu_{H_W}}{H_{Wk}} \quad (4)$$

그러나, 보통의 경우 현행설계법에 의한 전면조위 설계치는 케이슨안벽에 가장 위험한 경우인 삭망평균간조위를 적용하므로 전면조위에 대한 부분안전계수는 무한대가 되어 설계에 적용할 수가 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전면조위의 설계치를 삭망평균간조위(H_{WL})와 전면조위비($R_W = H_W/H_{WL}$)를 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$H_{Wd} = \gamma_{R_W} R_{Wk} H_{WL} \quad (5)$$

여기서 전면조위비의 부분안전계수는 다음과 같다.

$$\gamma_{R_W} = \left(1 - \alpha_{R_W} \beta_T \frac{\sigma_{R_W}}{\mu_{R_W}}\right) \frac{\mu_{R_W}}{R_{Wk}} \quad (6)$$

식 (6)을 식(5)에 대입하면 다음과 같다.

$$H_{Wd} = \gamma_{R_W}' H_{WL} \quad (7)$$

여기서, γ_{R_W}' 은 전면조위비의 수정부분안전계수로 다음과 같이 정의한다.

$$\gamma_{R_W}' = \left(1 - \alpha_{R_W} \beta_T \frac{\sigma_{R_W}}{\mu_{R_W}}\right) \mu_{R_W} \quad (8)$$

이와 같이 전면조위비에 대한 수정부분안전계수를 사용하므로써 전면조위 설계치를 저조위로써 0을 사용하는 현행설계법의 방법과 상충하지 않으면서 Level I 신뢰성설계법을 사용할 수 있다. 잔류수위에 대하여 같은 방법을 적용하면 수정부분안전계수는 다음과 같다.

$$\gamma_{R_R}' = \left(1 - \alpha_{R_R} \beta_T \frac{\sigma_{R_R}}{\mu_{R_R}}\right) \mu_{R_R} \quad (9)$$

여기서, R_R 은 잔류수위(H_R)와 설계고조위(H_{WL})의 비로써 정의되는 잔류수위 비이다.

3. 설계사례

3.1 설계제원

설계사례의 케이슨식 안벽은 삭망평균간조위가 3.873m, 삭망평균저조위가 0.0m, 설치수심은 18.6m, 제체폭은 16.8m이다. 전도에 대한 신뢰성설계를 위한 각 하중의 모멘트 팔길이는 d_{W_c} =10.4m, d_{W_e} =10.4m, d_{W_f} =10.4, d_B =10.4m, d_E =18.8m, d_{E_b} =8.02m, d_{I_r} =10.5m, d_{I_s} =22.25m, d_{I_j} =10.5m 등이다. 지진시 Level I 신뢰성설계를 위한 확률변수의 특성은 Table 1과 같다.

3.2 지진계수

항만 및 어항설계기준(2005)의 재현주기별 지진계수를 이용하여 대상지역(광양 인근)의 지진계수별 초과확률을 구하면 Fig.1 과 같다. 설계기준의 지진계수는 암반노두에서 정의된 값이므로 지반응답 해석을 이용하거나 간단한 증폭계수를 이용하여 지표에서의 값으로 환산할 수 있는데 그림에서 흰색 네모는 암반노두에서의 지진계수이고 흑색 동그라미는 지표면에서의 값이다. 지진계수에 대한 확률분포를 구하기 위해 Type I, II, 및 III를 이용하여 위의 초과확률을 추정된 결과 식 (10)과 같은 Type III (Weibull) 분포가

가장 오차가 적어 이것을 확률모델로 사용하였다.

Table 1. Characteristics of random variables

설계변수	현행설계치	평균치비	변동계수	확률분포
마찰계수	0.6	1.06	0.15	정규분포
철근콘크리트	59.0 ton	0.98	0.02	정규분포
무근콘크리트	176.0 ton	1.02	0.02	정규분포
채움석	425.5 ton	1.02	0.04	정규분포
전면조위비	0.0	0.60	0.30	정규분포
잔류수위비	1/2	0.66	0.36	정규분포
지진계수	0.0448	-	-	극치분포
정적도압	113.2 ton	1.00	0.10	정규분포
동적도압	135.7ton	-	-	-

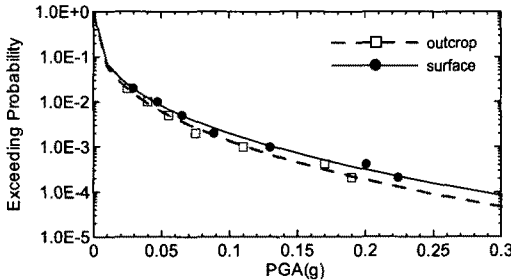


Fig. 1. Exceeding probability of seismic coefficients

$$F_{K_h}(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-c}{b}\right)^k\right] \quad (10)$$

추정결과 b, c, k 는 각각 7.554×10^{-4} , 0, 0.374이다. 재현주기(T)와 지진계수의 관계를 구하면 식 (11)과 같으며 이를 이용하여 100년 빈도의 지진계수를 구하면 0.0448이다.

$$K_h^T = b(\ln T)^{1/k} + c \quad (11)$$

3.3 민감도계수

민감도계수를 구하기 위해 Level II 신뢰성설계법을 수행해야 한다. 이를 위해 활동 및 전도 파괴의 한계상태함수를 다음과 같이 정의하였다.

$$g_o(X) = f(\Sigma W_i - B + E_o) - \Sigma I_i + E_h + R + D \quad (12)$$

$$g_o = \Sigma d_w W_i - d_B B + d_E E_o - \Sigma d_I I_i + d_E E_h + d_R R + d_D D \quad (13)$$

한계상태함수에 일계신뢰도법(FORM)을 적용하여 신뢰성설계를 수행한 결과 각 파괴모드에 대한 신뢰도 지수 및 지진계수의 등가평균 및 등가표준편차는 Table 2와 같다. 지진계수의 등가평균이 음의 값을 가지는 것은 물리적으로는 의미가 없으나 설계점에서 확률이 같은 등가의 정규분포를 찾기 때문이다. Fig. 2는 활동파괴모드의 신뢰도지수 수렴성을 보여주고 있다.

Table 2. Reliability index by FORM

구분	신뢰도지수	등가평균	등가표준편차
활동	2.727	-0.1803	0.0953
전도	3.605	-0.7973	0.2907

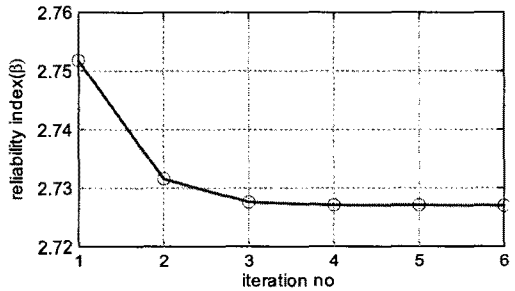


Fig. 2. Convergence of reliability index for sliding

3.4 부분안전계수

일계신뢰도법으로 구한 민감도계수를 이용하여 각 파괴확률에 대한 부분안전계수를 산정할 수 있다. 활동 및 전도파괴의 목표신뢰도지수를 각각 2.4와 2.9로 설정한 후 부분안전계수를 구한 결과 소수점 둘째자리까지 나타내면 Table 3과 같다. 민감도계수의 절대값을 보면 지진계수가 타 확률변수에 비하여 매우 큰 값을 가진다. 이것은 지진시 활동 및 전도 파괴는 지진계수가 지배함을 의미하여 결과적으로 지진계수에 대한 부분안전계수가 목표신뢰도지수의 만족여부를 결정짓는 중요한 값이 됨을 의미한다. 부분안전계수 산정시 지진계수의 설계치는 100년 빈도의 0.0448을 적용하였다.

Table 3. Partial safety factors

구 분	활 동		전 도	
	α_X	γ_X	α_X	γ_X
마찰계수	0.2694	0.96	-	-
철근콘크리트	0.0040	0.98	0.0027	0.98
무근콘크리트	0.0125	1.02	0.0053	1.02
채움석	0.0699	1.01	0.0472	1.01
전면조위비	0.0488	0.58	-0.0068	0.60
잔류수위비	-0.1426	0.74	-0.0656	0.71
지진계수	-0.9451	0.80	-0.9966	0.95
정적도압	-0.0805	1.02	-0.0123	1.00

Fig. 3은 목표신뢰도지수에 따른 지진계수의 부분안전계수 변화를 분석한 것이다. 목표신뢰도지수가 고정된 경우 결정론적 설계의 지진계수를 더 긴 재현주기에 대하여 설정하면 신뢰성설계의 부분안전계수가 작게 된다. 이것은 설정된 지진계수에 안전여유가 많이 고려되기 때문에 부분안전계수가 상대적으로 작아지기 때문이다. 설계재현주기가 동일한 경우는 목표신뢰도지수가 커질수록 부분안전계수가 높아진다. 그 이유는 더 높은 신뢰성을 확보하기 위하여 부분안전계수가 커지기 때문이다.

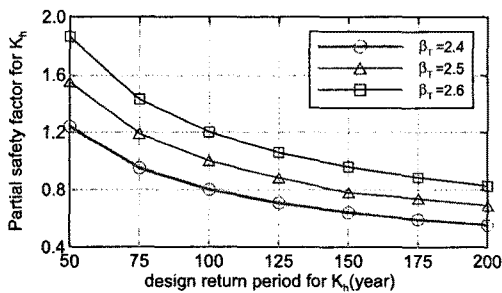


Fig. 3. Design return period vs. partial safety factor γ_{K_r}

4. 결 론

케이슨식 안벽의 Level I 신뢰성설계를 위한 부분안전계수의 산정방법을 제안하였다. 제안방법의 부분안전계수는 일계신뢰도법에 근거하여 목표신뢰도지수 및 민감도계수 등을 이용하여 산정하였다. 지진계수는 극치분포함수를 적용하였으며 전면조위 및 잔류수위에 대한 부분안전계수는 현행설계법과의 연계성을 확보하기 위해 수정부분안전계수를 새롭게 정의하였다.

설계사례를 통해 제안방법의 부분안전계수를 산정하였다. 지진시 신뢰성설계에서는 지진계수의 민감도가 타 확률변수에 비해 월등히 큰 값을 가지는 것을 확인하였다. 이러한 현상은 궁극적으로 지진계수에 대한 부분안전계수가 결정론적 설계의 지진계수와 목표신뢰도지수에 매우 민감하게 작용하는 원인이 되었다.

수치해석의 부분안전계수는 설계사례에 따라 달라질 수 있는 값이므로 다양한 사례연구를 통하여 표준적인 값을 결정할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국해양수산진흥원의 지원으로 수행된 “항만구조물 신뢰성설계법 개발” 과제의 일부이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- A.H.S. Ang & W.H. Tang (1975) Probability concepts in engineering planning and design, vol. I & II, basic principles, John Wiley & Sons, Inc.
- 長尾 外, (2001) 케슨식岸壁의外的安定にする信頼性設計法の適用, 土木學會構造工學論文集 Vol. 47A, pp. 293-304.
- 해양수산부 (2005) 항만 및 어항 설계기준.