

부분안전계수를 이용한 케이슨식안벽의 신뢰성설계법 Reliability Based Design of Caisson type Quay Wall Using Partial Safety Factors

김동현* · 윤길림**

Dong Hyawn Kim* and Gil Lim Yoon**

요 지 : 케이슨식 안벽의 Level I 신뢰성설계를 위한 부분안전계수를 산정하였다. 일계신뢰도법에 의한 부분안전계수는 한계상태함수의 확률변수에 대한 민감도, 목표신뢰도지수, 확률특성치 및 설계특성치 등의 함수로써 표현하였으며 전면조위와 잔류수위에 대해서는 현행설계법과의 연계성을 유지하기 위하여 수정부분안전계수를 새롭게 정의하였다. 수치해석을 통하여 목표신뢰도지수에 대한 부분안전계수를 산정하였으며 지진계수의 확률분포는 극치분포를 사용하였다. 지진계수의 설계치를 적용함에 있어서 재현주기가 길수록 부분안전계수가 작게 산정됨을 확인하였다.

핵심용어 : 케이슨, 안벽, 신뢰성, 부분안전계수, 지진계수, 신뢰도지수

Abstract : Partial safety factors(PSFs) for Level I reliability based design of caisson type quay walls were calculated. First order reliability method(FORM) based PSFs are the functions of sensitivities of limit state function with respect to design random variables, target reliability index, characteristic values and first moment of random variables. Modified PSFs for water level and resilient water level are newly defined to keep consistency with the current design code. In the numerical example, PSFs were calculated by using a target reliability index. Seismic coefficient is defined to show extreme distribution. It was found that PSFs for seismic coefficient becomes smaller as the return period for design seismic coefficient grows longer.

Keywords : caisson, quay wall, reliability, partial safety factor, seismic coefficient, reliability index

1. 서 론

케이슨식 안벽의 신뢰성설계는 설계변수의 확률적 변동성을 고려하여 체제의 파괴확률을 산정하고 이것이 허용범위를 초과하지 않도록 하는 설계법의 일종이다. 여기에는 한계상태에 대한 파괴확률을 직접 산정하는 방법(Level III 방법)과 비선형 한계상태함수를 선형화하여 근사 파괴확률을 산정하는 방법(Level II 방법)이 있다. 그러나, 이러한 방법들은 매우 논리적이며 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. 부분안전계수

법은 각각의 설계변수에 안전계수를 적용하므로써 설계자가 원하는 수준의 신뢰성을 확보할 수 있도록 하는 매우 실용적인 방법이다.

케이슨식 안벽의 부분안전계수법은 국내에 발표사례가 없으며 일본에서는 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 일계신뢰도법(FORM)에 근거한 부분안전계수법을 제안하였으며 이 과정에서 지진계수를 극치분포로 적용하므로써 지진에 의한 확률특성을 적절하게 반영하도록

*군산대학교 해양건설공학과의 Corresponding author: Dong Hyawn Kim, Dept of Coastal Construction Engineering, Kunsan National Univ., Miryongdong, Kunsan 573701, Korea, welcomed@naver.com

**한국해양연구원 연안개발·에너지연구부(Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department, KORDI)

하였다. 또한, 현행설계법의 전면조위와 잔류수위 적용방법이 부분안전계수 산정과정에서 논리적으로 일관성(consistency)을 잃지 않도록 하기 위하여 수정부분안전계수를 새롭게 정의하였다. 수치해석에서는 실규모 설계사례를 이용하여 목표신뢰도지수에 해당하는 부분안전계수를 제시하였다. 제안된 부분안전계수는 설계 대상구조물의 설계조건과 목표신뢰도지수 등에 영향을 받으므로 모든 케인식 안벽에 그대로 적용할 수는 없으나 다양한 사례에 대한 연구들 통해 부분안전계수의 표준값을 설정하는데 이용할 수 있다.

2. Level I 신뢰성 설계법

2.1 목표신뢰도지수

Fig. 1에서와 같이 신뢰도지수는 표준확률변수(reduced variable) 평면상에서 원점과 파괴면($g(X')=0$)까지의 최단 거리이다. 파괴점(X'^*)을 가리키는 방향벡터는 한계상태함수의 민감도이므로 신뢰도지수와 민감도를 이용하여 파괴점을 다음과 같이 나타낸다.

$$X'^* = -\beta\alpha_X \tag{1a}$$

$$\text{여기서, } X'^* = [x'_1, x'_2, \dots, x'_n]^T \tag{1b}$$

$$x'_i = \frac{x_i - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \tag{1c}$$

$$\alpha_X = [\alpha_{x_1}, \alpha_{x_2}, \dots, \alpha_{x_n}]^T \tag{1d}$$

$$\mu_{x_i}, \sigma_{x_i}: \text{확률변수 } x_i \text{의 평균 및 표준편차} \tag{1e}$$

Fig. 1에서 점선벡터가 가리키는 위치($X'_d = -\alpha_X\beta$)에 설계점을 설정하여 목표신뢰도지수가 β 이 되도록 한다면 설계점이 원점(평균점)에서부터 더 멀어지므로 한계상태함

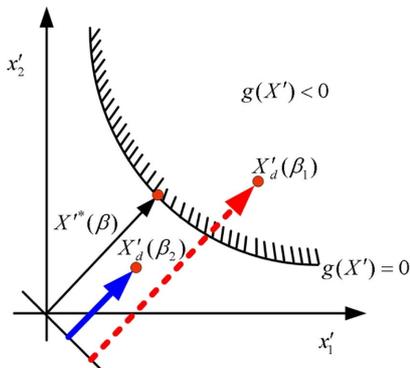


Fig. 1. Stability according to reliability index.

수가 음이 된다. 이 때 안정성을 확보하기 위해서는 설계특성치를 보수적으로 변경하여 한계상태함수가 양이 되도록 설계를 수행한다. 반대로 굵은 실선이 가리키는 위치($X'_d = -\alpha_X\beta_2$)로 목표신뢰도지수(β_2)를 정하면 설계점이 원점에서 가까워지므로 한계상태함수는 양의 값이 되며 설계특성치를 보다 경제적으로 변경하더라도 안정성을 확보할 수 있게 된다. 결국 목표신뢰도지수를 크게하거나 작게하므로써 설계를 보수적으로 또는 경제적으로 수행할 수 있다.

2.2 부분안전계수

파괴면 상의 임의의 확률변수 x_i^* 의 평균과 표준편차를 각각 μ_{x_i} 와 σ_{x_i} 라고 정의하면 표준확률변수(reduced variable)의 변환공식은 다음과 같다.

$$x_i^* = \mu_{x_i} + \sigma_{x_i}x_i^* \tag{2}$$

식 (2)의 우항에 식 (1a)의 i 번째 관계식을 대입하면 다음과 같다.

$$x_i^* = \mu_{x_i} \left(1 - \alpha_{x_i}^* \beta \frac{\sigma_{x_i}}{\mu_{x_i}} \right) \tag{3}$$

이 때 부분안전계수를 특성치(x_{ik})에 대한 설계검토치(x_{id})의 비율로 다음과 같이 정의한다.

$$\gamma_{x_i} = \frac{x_{id}}{x_{ik}} \tag{4}$$

만일, 설계검토치가 파괴점이 된다면 변수 x_i 에 대한 부분안전계수는 다음과 같다.

$$\gamma_{x_i} = \left(1 - \alpha_{x_i}^* \beta \frac{\sigma_{x_i}}{\mu_{x_i}} \right) \frac{\mu_{x_i}}{x_{ik}} \tag{5}$$

여기서 β 는 해당 파괴모드에 대한 신뢰도지수이므로 이 값을 적용하여 부분안전계수를 구하면 설계검토치는 항상 파괴면상에 존재하게 된다. 그러나, Fig. 2에서와 같이 목표수준의 신뢰도지수(β)를 정한 후 부분안전계수를 구하여 설계검토치를 결정한다면 설정한 목표수준의 신뢰성을 갖는지를 판단할 수 있다. 따라서, 일계신뢰도법(FORM)에 의한 부분안전계수는 다음과 같이 정의한다.

$$\gamma_{x_i} = \left(1 - \alpha_{x_i}^* \beta \frac{\sigma_{x_i}}{\mu_{x_i}} \right) \frac{\mu_{x_i}}{x_{ik}} \tag{6}$$

목표신뢰도지수 β 에 의한 부분안전계수를 구하고 이를 이

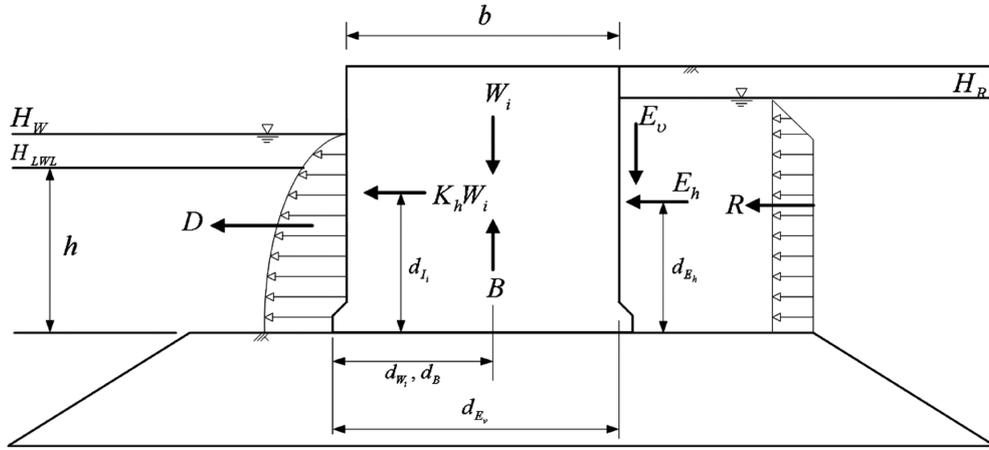


Fig. 2. Caisson type quay wall model.

용한 설계점에서 안정한 것으로 판정되면 목표신뢰도지수 β 에 대한 신뢰성을 확보한 것으로 평가한다.

2.3 수정부분안전계수

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

$$\gamma_{H_w} = \left(1 - \alpha_{H_w}^* \beta_i \frac{\sigma_{H_w}}{\mu_{H_w}} \right) \frac{\mu_{H_w}}{H_{Wk}} \quad (7)$$

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_{HWL})와 전면조위비($R_w = H_w/H_{HWL}$)를 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$H_{wd} = \gamma_{R_w} R_{wk} H_{HWL} \quad (8)$$

여기서 전면조위비의 부분안전계수는 다음과 같다.

$$\gamma_{R_w} = \left(1 - \alpha_{R_w}^* \beta_i \frac{\sigma_{R_w}}{\mu_{R_w}} \right) \frac{\mu_{R_w}}{R_{wk}} \quad (9)$$

식 (9)을 식 (8)에 대입하면 다음과 같다.

$$H_{wd} = \gamma'_{H_w} H_{HWL} \quad (10)$$

여기서, γ'_{H_w} 은 전면조위의 수정부분안전계수로 다음과 같이 정의한다.

$$\gamma'_{H_w} = \left(1 - \alpha_{R_w}^* \beta_i \frac{\sigma_{R_w}}{\mu_{R_w}} \right) \mu_{R_w} \quad (11)$$

이와 같이 전면조위에 대한 수정부분안전계수를 사용하므로써 전면조위 설계치를 저조위로서 0을 사용하는 현행설계법의 방법과 상충하지 않으면서 Level I 신뢰성설계법을 사용할 수 있다. 잔류수위(H_R)에 대하여 같은 방법을 적용하면 수정부분안전계수는 다음과 같다.

$$\gamma'_{H_R} = \left(1 - \alpha_{R_R}^* \beta_i \frac{\sigma_{R_R}}{\mu_{R_R}} \right) \mu_{R_R} \quad (12)$$

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

2.4 안정성 평가식

부분안전계수를 이용한 Level I 신뢰성설계의 활동 및 전도 안정성 평가식은 각각 다음과 같다.

$$g_s^I = f_d (\Sigma W_{id} - B_d + E_{vd}) - (\Sigma I_{id} + E_{hd} + R_d + D_d) \quad (13)$$

$$g_o^I = \Sigma d_{w_i} W_{id} - d_B B_d + d_{E_v} E_{vd} - (\Sigma d_{I_i} I_{id} + d_{E_h} E_{hd} + d_R R_d + d_D D_d) \quad (14)$$

여기서,

$$f_d = \gamma_f f_k \quad (15a)$$

$$W_{id} = \gamma_{W_i} W_{ik} \quad (15b)$$

$$B_d = r_w [(\gamma'_{H_R} H_{HWL} + h)b + v_f] \quad (15c)$$

$$E_{vd} = E_{hd} \tan \delta \quad (15d)$$

$$E_{hd} = \gamma_{E_{st}} E_{stk} + A \gamma_{K_h} K_{hk} \quad (15e)$$

$$I_{id} = \gamma_{K_h} K_{hk} \gamma_{W_i} W_{ik} \quad (15f)$$

$$R_d = 1/2 r_w [(\gamma_{H_R} H_{HWL} + h) - (\gamma_{H_w} H_{HWL} + h)^2] \quad (15g)$$

$$D_d = 7/12 r_w \gamma_{K_h} K_{hk} (\gamma_{H_w} H_{HWL} + h)^2 \quad (15h)$$

위 식에서 f 는 체체와 저면의 마찰계수, W_i 는 체체의 중량, h 는 저면수심, b 는 체체폭, v_f 는 푸팅체적, δ 는 벽면마찰각, r_w 는 해수 단위중량, H_w 는 전면조위, H_R 는 잔류수위, A 지진계수에 대한 동적도압의 기율기, K_h 는 지진계수 등이다. 그리고 첨자 k 는 특성치로써 현행설계법에 의한 설계치를 의미하며 첨자 d 는 설계검토치를 의미한다. 또한, 전도안정성 평가식의 d_i 는 하중 i 의 모멘트 팔 길이를 의미한다. 위 식에서 g_s^l 과 g_o^l 이 양의 값을 가질 때 Level I의 안정성을 확보한다.

3. 설계사례

3.1 설계제원

설계사례의 케이슨식 안벽은 삭망평균만조위가 3.873 m, 삭망평균저조위가 0.0 m, 설치수심은 18.6 m, 체체폭은 16.8 m이다. 전도에 대한 신뢰성설계를 위한 각 하중의 모멘트 팔길이는 $d_{W_i}=10.4$ m, $d_{B_i}=10.4$ m, $d_{E_v}=10.4$ m, $d_{E_s}=18.8$ m, $d_{E_h}=8.02$ m, $d_{R_i}=10.5$ m, $d_{D_i}=22.25$ m, $d_{D_j}=10.5$ m 등이다.

3.2 지진계수

항만 및 어항설계기준(2005)의 재현주기별 지진계수를 이용하여 대상지역(광양 인근)의 지진계수별 초과확률을 구하면 Fig. 3와 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 (16)과 같은 Type III (Weibull) 분포가 가장 오차가 적어 이것을 확률모델로 사용하였다.

$$F_{K_h}(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-c}{b}\right)^k\right] \quad (16)$$

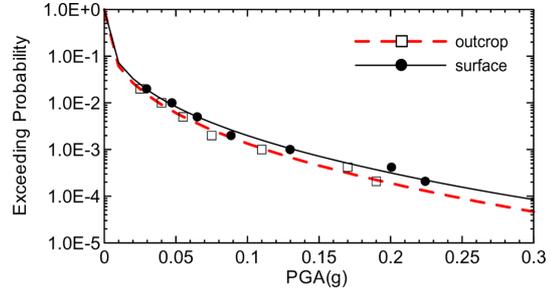


Fig. 3. Exceeding probability of seismic coefficients.

추정결과 b, c, k 는 각각 $7.554 \times 10^{-4}, 0, 0.374$ 이다. 재현주기(T)와 지진계수의 관계를 구하면 식 (17)과 같으며 이를 이용하여 100년 빈도의 지진계수를 구하면 0.0448 이다.

$$K_h^T = b(\ln T)^{1/k} + c \quad (17)$$

3.3 FORM에 의한 신뢰성해석

인감도계수를 구하기 위해 Level II 신뢰성설계법을 수행해야 한다. 이를 위해 활동 및 전도파괴의 한계상태함수를 식 (18) 및 식 (19)와 같으며 각 확률변수의 분포특성은 Table 1과 같다.

$$g_s^II = f(\sum W_i - B + E_v) - (\sum I_i + E_h + R + D) \quad (18)$$

$$g_o^II = \sum d_{W_i} W_i - d_B B + d_{E_v} E_v - (\sum d_{I_i} I_i + d_{E_h} E_h + d_R R + d_D D) \quad (19)$$

여기서,

$$B = r_w [(R_R H_{HWL} + h)b + v_f] \quad (20a)$$

$$E_v = E_h \tan \delta \quad (20b)$$

$$E_h = E_{st} + AK_h \quad (20c)$$

$$I_i = K_h W_i \quad (20d)$$

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	135.7 ton	-	-	(100년빈도)

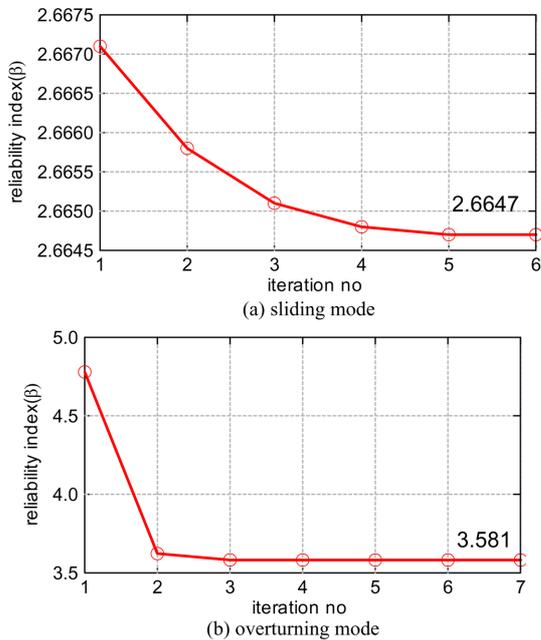


Fig. 4. Reliability index by AFOSM.

$$R = 1/2r_w [(R_R H_{HWL} + h)^2 - (R_R H_{HWL} - h)^2] \quad (20e)$$

$$D_d = 7/12r_w K_h (R_w H_{HWL} + h)^2 \quad (20f)$$

한계상태함수에 일계신뢰도법(FORM)을 적용하여 신뢰성설계를 수행한 결과 활동 및 전도 파괴의 신뢰도지수는 Fig. 4과 같다. 신뢰도지수는 활동과 전도파괴에 대하여 각각 2.6647과 3.581이다.

3.4 부분안전계수

일계신뢰도법으로 구한 민감도계수를 이용하여 각 파괴확률에 대한 부분안전계수를 산정할 수 있다. 활동 및 전도파괴의 목표신뢰도지수를 각각 2.6과 3.0으로 설정한 후 부분안전계수를 구한 결과 소수점 둘째자리까지 나타내면 Table 2와 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.

Level I의 검증 을 위하여 설계특성치는 고정시킨 상태에서 목표신뢰도지수를 변화시켜가면서 얻은 부분안전계수를 이용하여 식 (13)과 식(14)의 g_s^I 과 g_o^I 을 Fig. 5에

Table 2. Partial safety factors

구분	활동($\beta_r=2.6$)		전도($\beta_r=3.0$)	
	α_x	γ_x	α_x	γ_x
마찰계수	0.3048	0.934	-	-
철근콘크리트	0.0049	0.980	0.0029	0.980
무근콘크리트	0.0151	1.019	0.0059	1.020
채움석	0.0840	1.011	0.0050	1.014
전면조위	0.1158	0.546	0.0330	0.582
잔류수위	-0.2447	0.811	-0.1218	0.747
지진계수	-0.9041	1.035	-0.9906	1.651
정적도압	-0.0956	1.030	-0.0128	1.005

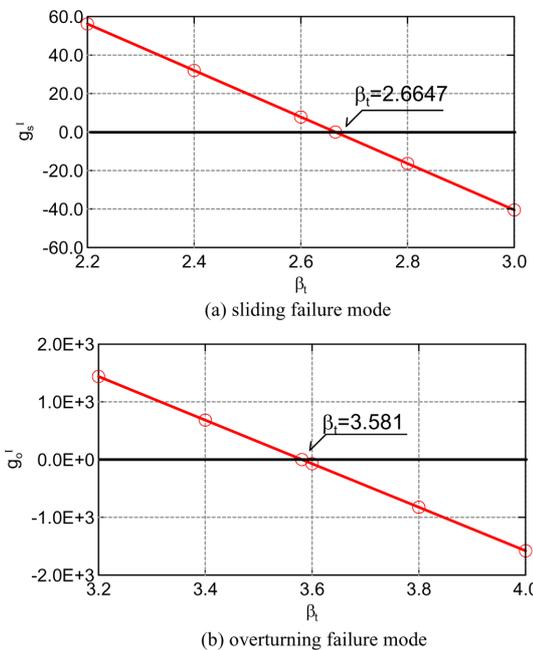


Fig. 5. Limit state function value vs. target reliability index.

나타내었다. 설계특성치를 이용하여 Level II방법으로 구한 신뢰도지수보다 목표신뢰도지수가 작을 때는 Fig. 1에서 설명한 바와 같이 g_s^I 과 g_o^I 값이 양의 값을 가진다. 그러나, 목표신뢰도지수가 이보다 클 때는 g_s^I 과 g_o^I 값이 음의 값을 가진다. 이 과정에서 g_s^I 과 g_o^I 값이 영의 값을 가지는 분기점은 Level II의 신뢰도지수와 Level I의 목표신뢰도지수가 일치하는 점이므로 두 방법을 비교 검증할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 활동파괴 모드에서는 2.6647에서 전도파괴 모드는 3.581에서 각각 일치하고 있다. 따라서, Level I에서 산정한 부분안전계수는 목표신뢰도지수에 해당하는 값을 알 수 있다.

파괴의 Fig. 6는 목표신뢰도지수에 따른 지진계수의 부

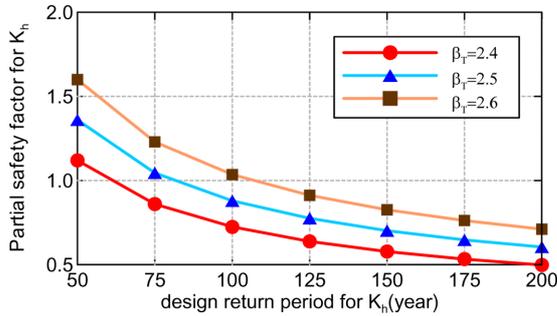


Fig. 6. Design return period vs. partial safety factor.

분안전계수 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.

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 산정하였

다. 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

- Ang, A.H.S. and Tang, W.H. (1975). Probability concepts in engineering planning and design, vol. I & II, basic principles, John Wiley & Sons, Inc.
- 長尾 毅, 吉浪 康行 (2001). 케손식안벽의 외적안정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.
- 長尾 毅 (2001). 케손식안벽의 외적안정にする信頼性設計法の適用手法, 國土技術政策綜合研究報告 No. 2. 2001.
- 해양수산부 (2005). 항만 및 어항 설계기준.

원고접수일: 2009년 3월 12일

수정본채택: 2009년 4월 17일

게재확정일: 2009년 5월 28일