

생애주기비용을 이용한 잔교식 안벽의 신뢰도지수 최적화 Reliability Index Optimization for Pier Type Quay Walls Using Life Cycle Cost

김동현* · 윤길림**
Dong Hyawn Kim* and Gil Lim Yoon**

요 지 : 잔교식 안벽의 생애주기비용(Life Cycle Cost, LCC)을 이용하여 신뢰도지수의 최적값을 구하였다. 응답면 기법을 이용한 신뢰성해석을 통해 횡잔교와 돌계식 잔교의 파괴확률을 산정하였다. 파괴확률은 잔교의 파괴 시 복구 비용을 산출하는데 활용하였으며 초기공사비와 유지관리비를 모두 고려한 LCC를 최소화시킬 수 있는 신뢰도지수를 찾았다. 지진하중과 접안하중에 대한 다양한 조건에서의 최적 신뢰도지수를 구하였고 이를 통해 신뢰성설계에 사용할 수 있는 목표신뢰도지수를 제안하였다.

핵심용어 : 잔교, 횡잔교, 신뢰성해석, 응답면기법, 생애주기비용, 목표신뢰도지수

Abstract : Optimal reliability indices were found by optimizing life cycle cost(LCC) of pier type quay walls. Failure probability of pier and shore bridge were calculated by response surface method. Then, they were used to obtain recovery cost after damage. Costs for initial construction and maintenance were also considered in finding optimal reliability indices. Target reliability indices which may be used in reliability based design were suggested by numerical examples under seismic load and ship load.

Keywords : Pier, Shore bridge, Reliability analysis, Response surface method, Life cycle cost, Target reliability index

1. 서 론

항만구조물의 신뢰성설계는 외력 및 저항변수에 포함된 불확실성을 설계에 반영하여 일정수준 이상의 신뢰성이 확보된 구조물을 설계하기 위한 것이다. 이 때 목표하려는 신뢰도지수의 수준을 설정하는 문제는 다양한 측면의 고려가 있어야 한다. 그 첫째 방법으로 결정론적 설계법으로 설계된 기존 구조물들의 신뢰도지수를 참고할 수 있다. 물론, 결정론적 설계법에는 설계 변수에 대한 불확실성이 고려되지 않았으므로 기존에 건설된 구조물들이 가지는 신뢰도 지수는 폭 넓게 분포할 것이다. 그러나 설계기준의 변경과정에서 기존의 설계기준이 가지는 신뢰도수준과 매우 동떨어지게 설계하여 신뢰도가 급격히 높아지거나 낮아지는 것 또한 바람직하지 않으므로 자연스럽게 기존 구조물들의 신뢰도 수준을 참고할 수 있다. 둘째, 구조물이 설계 시공되어 그 수명을 다하기까지 투여되는 모든 비용 즉, 생애주기비용(Life cycle cost, LCC)이 최소화 되도록 목표신뢰도수준을 결정하는 것이다. 이 방법은 항만구조물의 초기공사비와 유지관리비 및 자연재해에 시 복구 및 재시공 비용을 모두 고려하므로 경제적 측면에서 최선의 선택이 될 수 있다. 본 연구에서는 항만구조물 중에서도 잔교식

안벽구조물의 목표신뢰도지수를 결정함에 있어 두 번째 방법인 생애주기비용 최적화 방법을 적용하고자한다.

잔교식 안벽의 신뢰성해석은 중력식 항만구조물과 달리 한계상태함수가 음함수로 정의된다. 잔교식 안벽의 신뢰성해석에 관한 기존 연구로는 Nagao and Fujimori(2007), 이 등(2010)이 있으며 김 등(2007)은 취약도에 근거한 위험도 해석을 수행하였다. 이들의 연구에서는 구조물의 파괴확률을 추정함에 있어 구조해석기법을 사용하였다. 본 연구에서는 잔교식안벽을 대상으로 응답면기법에 기반한 신뢰성해석을 수행하고 이를 생애주기비용 최소화기법에 접목시켜 최적신뢰도지수를 산정하였다. 수치해석에서는 돌계식 잔교와 횡잔교를 이용하였으며 지진하중과 접안하중에 대한 최적신뢰도지수를 산정하였다.

2. 잔교식 안벽의 신뢰성해석

2.1 신뢰성해석

잔교식 안벽의 신뢰성해석은 Level II 방법의 일종인 FORM (First Order Reliability Method)을 적용하였다. 이 방법은 표준확률변수 공간에서 일차근사화된 한계상태함수가 만드는 파괴면에서 원점까지의 거리를 이용하여 신뢰도지수를 추정

*군산대학교 해양건설공학과

**한국해양연구원 연안개발에너지연구부(Corresponding author: Gil Lim Yoon, Coastal Development & Ocean Energy Research Dept., KORDI, 787 Haeanro, Ansan, Gyeonggi 426-744, Korea, glyoon@kordi.re.kr)

하며 신뢰도지수를 다음 식으로 표현한다(Ang and Tang, 1975).

$$\beta = \frac{-\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i}\right)^* X_i^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i}\right)^2}} = -\sum_{i=1}^n \alpha_i X_i^* \quad (1)$$

여기서, β 는 신뢰도지수, $g(\cdot)$ 는 한계상태함수, X_i^* 은 평균과 표준편차가 각각 0과 1인 표준확률변수, α_i 는 파괴면의 방향여현이다. 또한, 별표(*)는 파괴면에서 산정한 값을 의미한다. 위 식에서 한계상태함수가 비선형일 때 파괴면은 근사함수를 구하는 기준점(파괴점)을 어디에 두느냐에 따라 달라지므로 신뢰도지수 또한 영향을 받으며 최종 신뢰도지수는 반복해석으로 구할 수 있다. 수립된 최종 신뢰도지수를 이용하여 면 파괴확률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (2)$$

여기서, $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 누적확률밀도함수이다. 한편, 신뢰도지수 산정 과정에서 지진계수와 같이 정규분포를 따르지 않는 확률변수는 파괴면에서 해당 확률변수가 다음과 같은 등가의 평균($\mu_{X_i}^{eq}$)과 표준편차($\sigma_{X_i}^{eq}$)를 갖는 정규분포를 따른다고 가정한다(Rackwitz and Flessler, 1978).

$$\sigma_{X_i}^{eq} = \frac{\phi[\Phi^{-1}\{F_{X_i}(x_i^*)\}]}{f_{X_i}(x_i^*)} \quad (3)$$

$$\mu_{X_i}^{eq} = x_i^* - \Phi^{-1}[F_{X_i}(x_i^*)] \sigma_{X_i}^{eq} \quad (4)$$

여기서, F_{X_i} 는 누적확률분포, f_{X_i} 는 확률밀도함수를 각각 나타내며 $\phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 확률밀도함수이다.

2.2 응답면기법

중력식 구조물은 그 특성상 외력이 작용했을 때 구조물의 변형이 발생하기 보다는 힘의 균형이 깨짐으로 인해 전체 구조물이 움직이기 때문에 힘의 평형조건으로 한계상태를 정의하는 것이 일반적이다. 그러나, 잔교식 안벽과 같은 유연구조물은 단순히 힘의 평형조건으로 한계상태를 규정짓기 어려우며 힘의 평형이 무너지기 이전에도 본래의 성능을 발휘하기 어렵기 때문에 변위나 응력을 이용하여 한계상태를 정의해야 한다. 만일 잔교식 안벽의 한계상태를 변위 또는 응력으로 정의한다면 이 값들은 힘의 균형방정식이 아닌 구조해석과정을 통해서만 얻을 수 있기 때문에 한계상태함수가 설계변수의 음함수(implicit function)로 존재한다. 따라서, FORM을 적용하여 신뢰도지수를 바로 구할 수 없으며 이 과정에서 음함수인 한계상태함수를 양함수로 변환하여야 한다. 이와 같이 음함수로 정의된 한계상태함수를 양함수로 변환하여 신뢰도지수를 구하는 해석법이 이른바 응답면기법(response surface method)이다(Haldar and Mahadevan, 2000). 응답면이란 구조물의 거동을 표현하

는 미소구간의 특정 응답을 구조해석으로부터 구하고 이를 설계변수의 저차함수로 근사화한 면을 말한다. 응답면을 구하면 FORM을 그대로 적용하여 신뢰도지수를 구할 수 있으므로 교량, 건축물 등 유연구조물의 신뢰성해석에 자주 사용된다.

응답면 기법에 의한 한계상태함수를 설계변수의 음함수 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$g(X) = R(X_1, X_2, \dots, X_n) - S(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (5)$$

여기서, $R(\cdot)$ 는 저항함수, $S(\cdot)$ 는 하중함수를 의미하며 각각 설계변수 X_i 의 함수이다. 이를 일차함수로 근사화한다면 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$g(X) = c_0 + c_1 X_1 + c_2 X_2 + \dots + c_n X_n \quad (6)$$

여기서 c_0, c_1, \dots, c_n 은 구조해석을 통해서 구할 수 있으며 보다 고차의 근사함수로 변환하면 한계상태함수를 정밀하게 추정할 수 있다.

3. 생애주기비용

항만구조물의 생애주기 동안 발생할 수 있는 총 비용 즉, 초기건설비(C_i)와 유지관리비(C_m) 및 재해 시 복구 비용(C_f) 등을 합산한 것을 생애주기비용으로 다음과 같이 정의 한다.

$$LCC = C_i + C_f + C_m \quad (7)$$

Fig. 1을 보면 초기공사비가 증가할수록 안전성이 높아지므로 신뢰도지수가 증가하지만 그만큼 파괴확률이 낮아지므로 재해 시 기대복구비용 등은 감소한다. 반대로 초기공사비를 적게 투입한다면 신뢰도지수는 낮아지고 기대복구 비용은 증가하게 된다. 따라서 모든 비용을 고려한다면 투입비용을 최

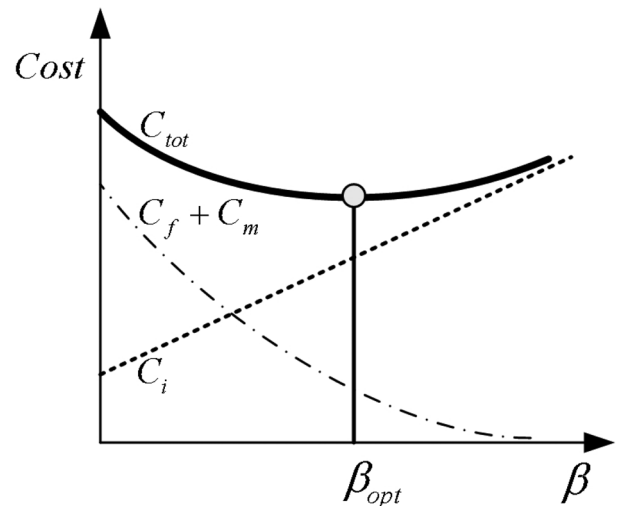


Fig. 1. Reliability index vs. LCC.

소화시킬 수 있는 신뢰도지수가 존재한다.

한편, 생애주기비용을 구성하는 각 비용들은 발생하는 시기가 각기 다르다. 초기공사비는 건설초기에 발생하나 유지관리비용은 매년 발생한다. 또한, 파괴 시 복구비용은 생애주기동안 언제라도 발생할 개연성이 있다. 이런 비용을 합산하기 위해서는 모두 같은 시점으로 환산해야 한다. 특히, 모든 비용을 건설 초기 시점으로 환산하는 방법(현재가치화법)을 사용하면 파괴 시 비용은 다음과 같이 표현할 수 있다(조 등, 2008).

$$C_f = \sum_{i=1}^T k_f C_i P_f \left(\frac{1+i}{1+r} \right)^i \quad (8)$$

여기서, k_f 는 초기공사비와 복구 및 재시공 비용의 비율, i 와 r 은 각각 인플레이션율과 할인율, T 는 생애주기이다. 또한, 유지관리비용이 초기공사비에 비례한다고 가정하면 현재가치는 다음과 같다.

$$C_m = \sum_{i=1}^T k_m C_i \left(\frac{1+i}{1+r} \right)^i s \quad (9)$$

여기서 k_m 은 초기공사비에 대한 유지관리비의 비율을 나타낸다. 두 가지 비용과 초기공사비를 모두 합한 생애주기비용을 현재가치화 면 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$LCC = (1 + k_f P_f A_p + k_m A_p) C_i \quad (10)$$

여기서 A_p 는 현재가치화 계수로서 다음과 같다.

$$A_p = \left(\frac{1+i}{r-i} \right) \left[1 - \left(\frac{1+i}{1+r} \right)^T \right] \quad (11)$$

4. 수치해석

4.1 응답면기법의 적용

신뢰성설계 사례로 Fig. 2와 같은 단면을 가지는 돌체식 잔교 구조물을 사용하였다. 이 구조물은 횡방향 4개와 종방향 18개, 총 72개의 강관파일로 구성된 직항식 구조물로서 약최저저조위 아래 27.2 m의 암반층까지 시공되며 상판으로는 철근콘크리트가 사용되었다. 그리고 상판 양단에는 방충재 설치가 가능하도록 철근콘크리트 구조물을 상판과 연결하였다. 각 부위별 규격 및 단면특성은 Table 1, 지반심도별 반력계수는 Table 2와 같다.

잔교식 안벽이 지진하중 등의 수평하중을 받을 때 나타날 수 있는 한계상태로는 말뚝과 상판의 접합부에서 발생하는 최대 응력에 의한 파괴와 파일의 인발로 인한 파괴 등을 들 수 있다. 그 중에서도 본 연구에서는 응력한계상태를 고려하여 다음 식과 같은 한계상태를 정의하였다.

$$g(X) = f_y - f_{max}(K_b k_h) \quad (12)$$

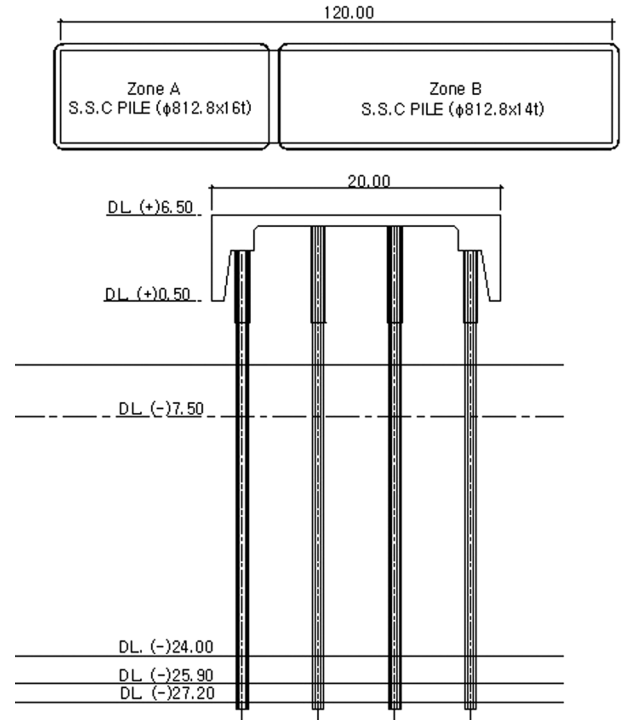


Fig. 2. Plan and front view of pier structure.

Table 1. Dimensions of the pier

type	position	dimension	
piles	row 1~7	Ø812.8 × 16t	corrosion thickness 2 mm
	row 8~18	Ø812.8 × 14t	
beam	row 1~17	1200 × 800	
	row A~D	1200 × 800	
slab		800 mm thk.	

Table 2. Material properties of soil layers

soil type	coeff. subgrade reaction (kN/m ³)	depth (m)
clay	1,500	(0~9)
clay	8,000	(9~18)
silty sand	39,000	(18~20)
gravel	57,000	(20~21)
soft rock	500,000	(21~)

여기서, f_y 는 부재의 항복응력, f_{max} 는 부재의 최대응력, K_b 는 지진계수, k_h 는 선형의 지반반력계수이다. 물론 설계확률변수에 부재의 두께, 탄성계수 등을 포함할 수 있으나 본 연구에서는 제외하였다. 지반반력계수를 모두 각기 독립적인 확률변수로 고려하면 확률변수의 수가 지나치게 많아져 해석이 복잡하게 된다. 이것을 방지하기 위해 지층별 대표값(K_{b0})과 지반반력계수비(a_k)를 이용하여 지반반력계수(k_h)를 정의하였다.

$$k_h = a_k k_{b0} \quad (13)$$

여기서, 지층별 대표값 k_{60} 는 상수이며 지반반력계수비 a_k 는 대수정규분포를 따르는 확률변수이다.

한계상태함수에서 부재의 최대응력은 지진계수 K_h 와 지반반력계수 k_h 의 음함수이므로 근사함수를 이용하여 양함수형태의 한계상태함수로 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$g(f_y, K_h, k_h) = f_y - (c_1 + c_2 K_h + c_3 a_k + c_4 K_h^2 + c_5 a_k^2 + c_6 K_h a_k) \tag{14}$$

여기서, 계수 c_1, c_2, \dots, c_6 은 구조해석으로부터 추정할 수 있는 값들이다. 한계상태함수가 양함수로 변환되었기 때문에 신뢰도지수를 구하는 과정은 FORM방법을 따르면 된다.

지진계수는 극치분포(type II)를 따르며 지반조건을 S_D (단단한 토사)로 가정할 때 증폭비가 1.46이므로 형상모수(k)와 척도모수(v)는 Table 3과 같이 구할 수 있다(해양수산부, 2005). 지반반력계수비(a_k)와 항복응력(f_y)은 각각 대수정규분포와 정규분포를 따른다.

FORM을 이용하여 정적 지진하중에 대한 신뢰성 해석을 수행한 결과 신뢰도지수가 Fig. 3과 같이 2회 반복 후에 수렴하였으며 그 값은 3.4473이었다.

검증을 위해 중요도추출법을 이용하여 Level III 신뢰성 해석을 수행하였다(김 등, 2009). 2000회의 해석 후 Fig. 4와 같은 수렴곡선을 얻었고 최종 신뢰도지수는 3.4658이었다. 응답면기법의 결과와 비교해도 그 오차가 0.5%정도로 매우 작았다.

4.2 돌제식잔교의 LCC최적화

돌제식 잔교의 LCC분석을 수행하였다. 구조물의 신뢰도 수준을 변화시키기 위하여 강관파일의 두께를 달리하였다. 지진계수는 1000년 재현빈도의 크기가 0.11인 극치분포를 사용

Table 3. Random variables used in numerical analysis

random variables	characteristic value (X_i)	mean (μ_x)	COV (V_x)	distribution
K_h	0.061	($k = 2.2194, v = 0.0056$)		type II
a_k	1.0	1.0	0.755	lognormal
f_y	315.0	377.0	0.08	normal

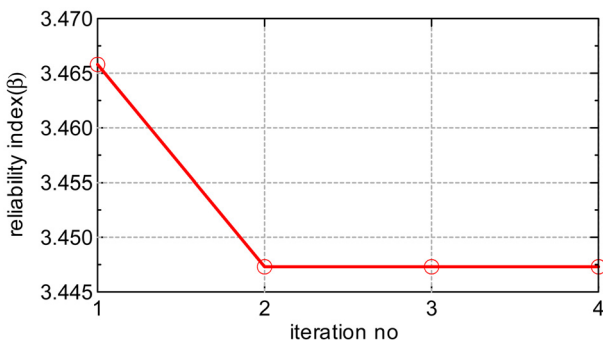


Fig. 3. Reliability index by FORM.

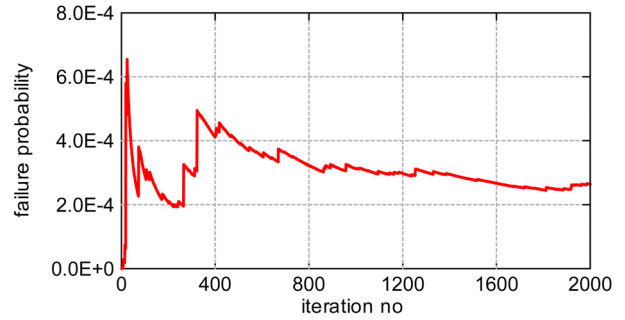


Fig. 4. Reliability index by importance sampling.

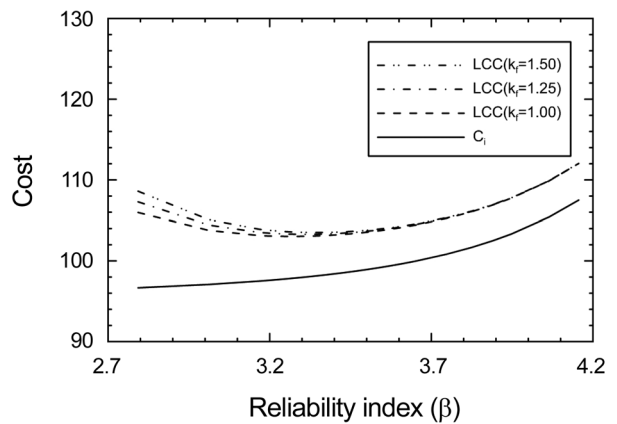


Fig. 5. LCC variation of the pier under earthquake.

하였으며 지반조건은 단단한 토사지반(S_D)으로 가정하였다. 인플레이션율과 할인율은 지난 10년간의 평균을 사용하여 각각, 0.02717과 0.06958을 사용하였다(조 등, 2008). 유지관리비용은 초기공사비의 10.06%를 적용하였다. Fig. 5는 강관파일의 두께가 1.4 cm, 초기공사비를 100으로 했을 때 신뢰도지수에 따른 초기공사비 및 LCC의 변화를 보여주고 있다. 파괴 시 복구비용과 초기공사비의 비율(k_f)을 1.0, 1.25 및 1.5로 변화시켜 피해수준에 따른 차이를 확인하고자 하였으며 LCC의 최소값은 신뢰도지수가 각각 3.269($k_f = 1.0$), 3.315($k_f = 1.25$), 및 3.350($k_f = 1.5$)으로 나타났다. 지진으로 인한 재해가 커서 복구비용이 증가할수록 목표신뢰도지수가 커지는 것을 확인하였다. 즉, 지진으로 인한 복구비용이 크게 예상될수록 처음부터 안전하게 짓는 것이 LCC를 줄이는 방법으로 보인다.

LCC를 최소화시키는 신뢰도지수는 여러 조건에 의하여 달라질 수 있다. 그 중에서도 지반조건은 최적신뢰도지수에 영향을 미치는 중요한 요인 중 하나이다. Fig. 6은 모든 지반조건($S_A \sim S_E$)에 대하여 LCC최적화를 수행한 결과를 보여주고 있다. 증폭계수가 지반상태에 따라 증폭계수가 0.8~2.0으로 변하고 k_f 가 1.5일 때 LCC를 최소화시키는 최적신뢰도지수는 3.350~3.162로 달라진다. 즉, 지반조건이 열악해질수록 연약지반에 의한 지진의 증폭이 초기공사비의 증가를 초래하고 결과적으로 최적 신뢰도지수도 감소하게 된다.

접안시 잔교의 신뢰성해석은 식 (12)의 지진계수 대신 접

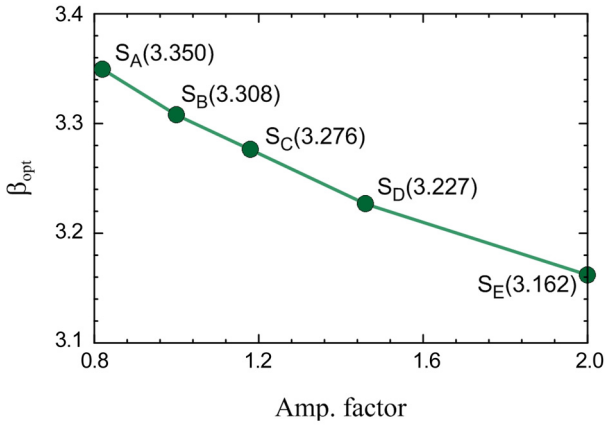


Fig. 6. Optimal reliability indices of the pier.

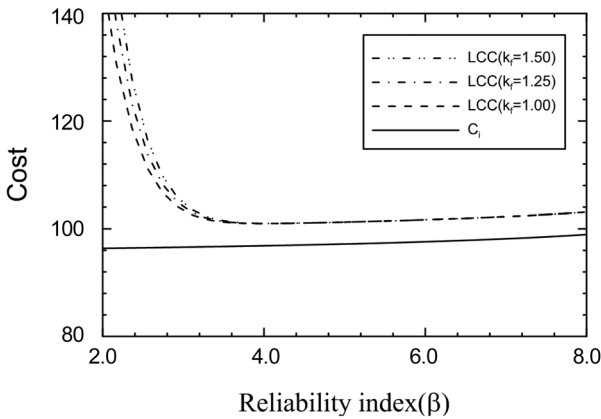


Fig. 7. LCC variation of the pier under ship load.

안하중을 적용하여 구할 수 있다. 본 연구에서 접안력은 특성치가 2000 kN일 때 평균치비는 0.87, 변동계수는 0.25를 적용하였다. 선박접안하중에 대한 신뢰도지수와 LCC의 관계는 Fig. 7과 같다. 접안력 재하 시 응력 한계상태의 파괴확률에 대한 신뢰도지수의 변화에 따른 LCC변화를 계산하였으며 k_f 값이 1.0, 1.25, 1.5일 때 신뢰도지수의 최적값(β_{opt})이 각각 3.978, 4.022, 4.065임을 보여주고 있다.

4.3 횡잔교의 LCC최적화

횡잔교의 LCC 최적화를 위해 Fig. 8와 같은 사항식 횡잔교를 해석하였다. 지진계수, 수평지반반력계수, 항복응력 등의 확률분포는 직항식 잔교와 동일하게 적용하였으며 지반조건은 단단한 토사지반(S_D)을 적용하였다. 원 설계의 강관파일 두께(1.6 cm)로 시공되었을 때의 초기 공사비를 100.0으로 가정하여 비용을 계산하였으며 신뢰도지수에 따른 초기공사비 및 LCC변화는 Fig. 9과 같다. 초기건설비에 대한 복구비용의 비율(k_f)에 따른 최적신뢰도지수는 각각 3.269($k_f=1.0$), 3.315($k_f=1.25$), 3.350($k_f=1.5$)이다. 또한, 일 때 지반조건에 따른 최적신뢰도지수는 Fig. 10과 같다.

횡잔교에 대한 접안시의 LCC 변화는 Fig. 11과 같다. 접

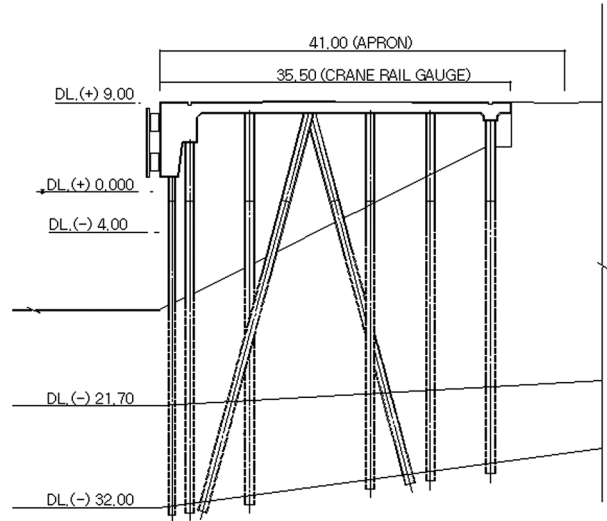


Fig. 8. Shore bridge with inclined piles.

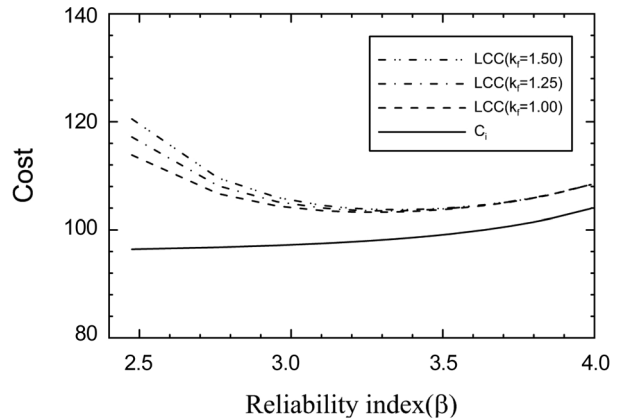


Fig. 9. LCC variation of the pier under earthquake.

안력의 확률변동성은 돌체식 잔교와 동일하게 적용하였고 최적 신뢰도지수는 복구비용의 비율(k_f)에 따라서 각각 4.168 ($k_f=1.0$), 4.224($k_f=1.25$), 4.252($k_f=1.5$)이다.

4.4 토의

돌체식 잔교 및 횡잔교의 지진시 및 접안시의 LCC분석에 의한 최적신뢰도지수는 지진의 재현주기 및 복구비용의 비에 따라 각기 다르다. 이것은 어떤 지역에 잔교가 설치되는 지와 파괴의 규모가 어느 정도냐에 따라 최적의 신뢰도지수가 다르다는 것을 의미한다. Fig. 12는 1000년 재현주기 지진계수와 복구비용의 비율에 따라 돌체식(P) 및 횡잔교(S)의 최적신뢰도지수를 보여주고 있다. 신뢰도지수의 최적값은 작게는 돌체식의 경우 3.081에서 3.350까지 다양하게 분포하며 횡잔교의 경우 3.209에서 3.450까지 분포하고 있다. 이렇듯 최적 신뢰도지수는 피해의 정도 및 지반조건에 따라 다양한 분포를 가지므로 이를 모두 수용하면서 최소의 안전도를 확보하기 위하여 최적의 값을 선정해야 한다.

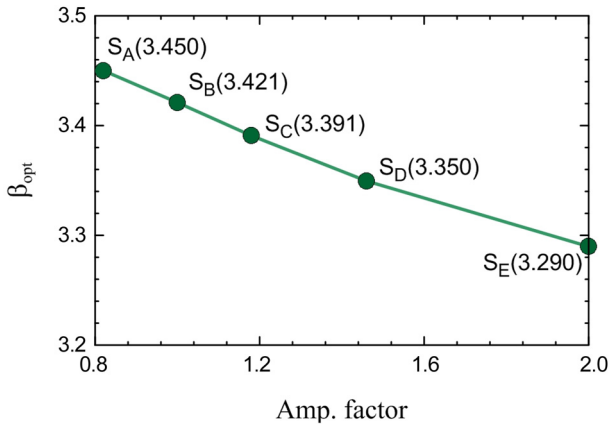


Fig. 10. Optimal reliability indices of the shore bridge.

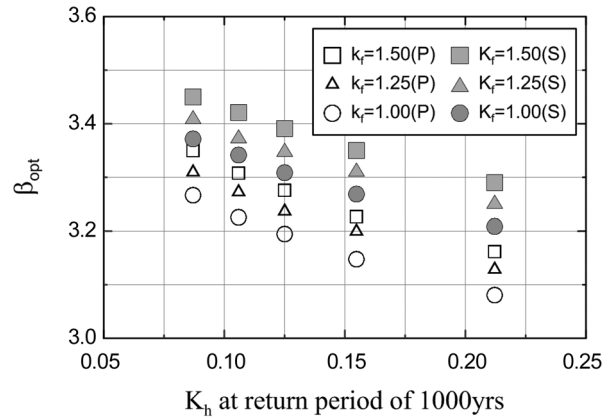


Fig. 12. β_{opt} according to K_h at 1000yr of return period.

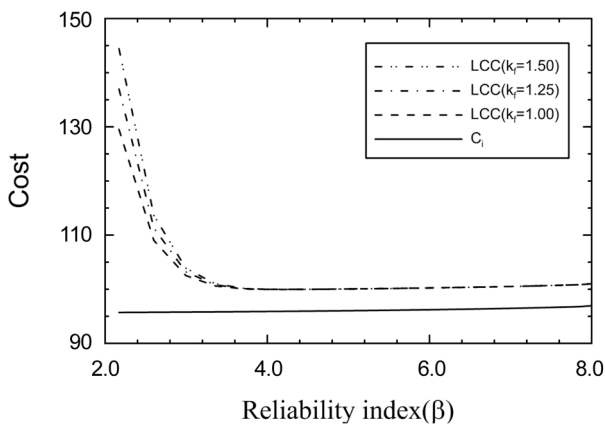


Fig. 11. LCC variation of the pier under ship load.

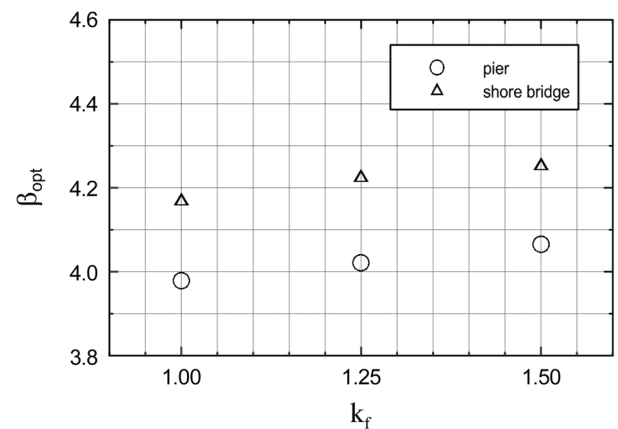


Fig. 13. vs. under ship load.

접안시의 잔교설계에 대한 최적신뢰도지수는 지진시에 비하여 매우 큰 값을 보였다. Fig. 13는 돌제식 및 횡잔교에 대한 최적신뢰도지수를 복구비용비에 대하여 보여주고 있다. 작게는 3.978에서부터 크게는 4.252까지의 분포를 보여준다.

잔교식 안벽은 지진시 피해수준 및 지반 조건에 따라 최적 신뢰도지수가 넓게 분포하며 다양한 조건을 포함하면서 경제적 단면을 얻기 위해서 목표신뢰도지수를 3.0으로, 접안시에는 3.8로 정할 수 있다. 그러나, 이 값은 특정 잔교에 대한 분석 결과이므로 다른 잔교의 설계에 직접 적용하기보다 여기서 제시된 값을 참고하되 설계하고자 하는 항만지역의 현재 신뢰도수준을 구체적으로 파악하고 가정된 단면의 초기공사비용을 기준으로 LCC에 기초한 최적파괴확률을 산정하여 이들을 비교함으로써 목표파괴확률을 결정함이 바람직할 것이다.

5. 결 론

돌제식 잔교 및 횡잔교에 대한 LCC 최적화를 수행하였으며 지진하중 및 접안하중에 대한 최적 신뢰도지수를 구하였다. 신뢰성해석에는 FORM과 응답면기법을 적용하였으며 중요도 추출법으로 해석의 정확성을 검증하였다. 돌제식 및 횡잔교에 대한 실물 모델을 이용하여 확률변수에 의한 파괴확률을

구하고 파괴시 복구비용 계산에 이용하였다. LCC는 초기공사비, 유지관리비 및 파괴시 복구비용을 모두 합한 비용으로 계산하였으며 현재가치화법을 적용하여 동일시점에서의 비용으로 환산한 후 최적화를 수행하였다. 해석결과 LCC를 최적화할 수 있는 신뢰도지수는 지진하중에 대해서는 최소 3.0, 접안하중에 대해서는 최소 3.8을 적용하는 것이 타당한 것으로 확인되었다. 물론 최적 신뢰도지수라는 것은 적용모델과 지진 조건 등의 다양한 변수에 영향을 받기 때문에 경우에 따라서는 본 연구에서 제안한 신뢰도지수와 다소 차이가 발생할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2011년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제명: 항만구조물 신뢰성설계법 개발).

참고문헌

김동현, 조흥연, 김두기, 조병일 (2007). 잔교식 안벽구조물의 확률론적 지진위험도 평가, 한국해양·해양공학회지, 19(3), 237-243.
이상근, 김동현, 윤길림 (2010). 잔교식 안벽구조물의 신뢰성설계,

- 한국해양 · 해양공학회 학술발표회, 9, 105-108.
- 조효남, 임종권, 최영민, 박경훈 (2008). 기반시설물의 생애주기 비용분석, 구미서관.
- 해양수산부 (2005). 항만 및 어항 설계기준.
- Ang, A.H.S. and Tang, W.H. (1975). Probability concepts in engineering planning and design. vol. I & II, John Wiley & Sons, Inc.
- Haldar, A. and Mahadevan, S. (2000). Reliability assessment using stochastic finite element analysis. John Wiley & Sons, Inc.
- Nagao, T. and Fujimori, S. (2007). A study on the estimation of failure probability of pile-supported wharves against a level one earthquake ground motion by using first order second moment method. Technical note of national institute for land and infrastructure management.
- Rackwitz, R. and Flessler, B. (1978). Structural reliability under combined random load sequences. Computers and Structures, 9(5), 489-494.
-
- 원고접수일: 2011년 8월 5일
수정본채택: 2011년 10월 15일
게재확정일: 2011년 11월 25일