

안벽기초 구조물의 신뢰성설계를 위한 목표파괴확률 결정

Target Probability of Failure of Quay Wall Foundation for Reliability-Based Design

윤길림¹⁾, Gil-Lim Yoon, 윤여원²⁾, Yeo-Won Yoon, 김홍연³⁾, Hong-Yeon Kim

¹⁾ 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 책임연구원, Principal Researcher, Coastal Engineering & Ocean Energy Research Dept., Korea Ocean Research & Development Institute(KORDI)

²⁾ 인하대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Inha University

³⁾ 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 연구원(인하대학교 박사과정), Researcher, Coastal Engineering & Ocean Energy Research Dept., KORDI

SYNOPSIS : It is very important to determine a target probability of failure in reliability based design such as an allowable factor of safety in working stress design because they are indices to judge the stability of structures. We have carried out reliability analyses of nationwide gravity type quay walls and found that sliding and foundation failures of quay walls were dominant failure modes for every case of loads. And a target probability of failure for bearing capacity of foundation of quay wall was also determined in this study. Of several approaches which have been suggested until now, a couple of reasonable approaches were used. Firstly, in order to consider the safety margin of structures which have been executed so far, the reliability levels of existing structures were assessed. And then a mean probability of failure for the quay walls was estimated. In addition, life cycle cost(LCC) analyses for representative structures were performed. Probabilities of failure for several quay walls were calculated with changing the width of each quay wall section. LCC of quay wall which is requiring case by case during the service life was evaluated, and also the optimum probability of failure of quay wall which minimizes LCC was found. Finally, reasonable target probabilities of failure were suggested by comparing with mean probability of failure of existing structures.

Keywords : Quay wall, Target probability of failure, Life cycle cost, Safety margin, Reliability based design, Foundation failure

1. 서론

근래에 나타나고 있는 해수면 상승 및 기상이변으로 발생하는 자연재해는 항만시설에도 많은 피해를 야기하고 있다. 일본의 고베항 지진피해, 한신 대지진 피해, 부산항 태풍피해 등이 안벽구조물과 관련하여 파괴를 일으킨 대표적인 예다. 특히, 최근에 발생하고 있는 한반도 주변의 지진도 항만 지반구조물의 위험도를 증가시키고 있다. 한편, 최근 들어 각종 토목구조물에 합리적인 설계를 위하여 신뢰성 이론(reliability theory)이 도입되고 있다. 이는 현행 설계법에서 반영하지 못하는 자연재해로 인한 하중의 불확실성뿐 아니라 재료적인 불확실성도 통계적으로 정량화하여 설계에 고려할 수 있다는 점에서 중요성이 크다 하겠다.

현행 허용응력 설계법(working stress design)에서의 안전율과 마찬가지로 신뢰성 설계법에서 목표파

파괴확률(target probability of failure)의 결정은 안정성 판단의 지표라는 측면에서 매우 중요하다. 정해진 목표신뢰도수준에 의해 설계자는 설계결과의 타당성을 판단하게 되고 결국 그 기준을 따라 설계되는 모든 구조물의 안전여유(safety margin)가 좌우되기 때문이다. 그럼에도 불구하고 아직 국내에서는 신뢰성 설계법 도입이 미비한 관계로 목표신뢰도수준의 의미가 크게 인지되지 못하고 있다.

국내에서는 현재까지 안벽 및 그 기초지반의 신뢰성 해석과 관련한 연구(김 등, 2003; 김, 2006)와 LCC 분석에 관하여는 연구된바 있으나(안 등, 2006; 김 등, 2008), 안벽구조물 기초의 목표파괴확률과 관련된 연구는 거의 전무한 실정이다. 한편, 일본에서는 파괴확률 및 LCC 관계, 파괴된 안벽으로부터의 목표안전지수 추정, 하중계수 산정 등 관련된 연구 실적이 있다(Nagao 등, 2001; Yoneyama 등, 2000).

국내 다수의 중력식 안벽에 대하여 신뢰성 해석한 결과 모두 활동 및 기초의 지지력 파괴가 전체 구조물의 안정성을 지배하는 파괴모드임이 확인되었다. 따라서, 본 연구에서는 항만의 안벽기초 구조물의 지지력 파괴모드를 중심으로 목표파괴확률을 결정하였다. 국내 실정에 적합한 목표파괴확률을 결정하기 위하여 현재까지 제시된 여러 가지 목표신뢰도수준 결정기법 중 비교적 합리적으로 판단되는 두 가지 방법을 사용하였다. 첫째로, 기존구조물의 신뢰도수준을 평가함으로써 그와 유사한 안전여유를 고려하고자 현재까지 시공된 안벽시설물에 대하여 해석하고 평균의 파괴확률을 산정하였다. 더불어 이와 동시에 대표 안벽구조물에 대하여 생애주기비용(life cycle cost; LCC) 분석을 실시하였다. 이를 위하여 사례별로 단면을 변화시키며 파괴확률을 계산하고, 각 구조물의 공용수명 동안에 소요되는 생애주기비용을 산정하여 이 비용이 최소가 되는 파괴확률을 찾아내었다. 이렇게 산정한 최적 파괴확률과 기존구조물의 파괴확률 분석결과를 비교함으로써 최적의 목표파괴확률을 제시하였다.

2. 안벽기초의 파괴모드와 목표신뢰도

2.1 안벽기초의 지지력 파괴

안벽구조물의 파괴는 크게 활동, 전도, 마운드 및 지반지지력, 마운드 직선활동과 원호활동 파괴로 구분된다. 이들 파괴는 단독으로 발생되기도 하지만 많은 경우 두 가지 이상의 파괴모드가 복합적(coupled)으로 일어나는 것으로 알려져 있다. 하지만, 복합파괴에 대한 기구(mechanism)는 정확히 규명하기 어려워서 아직도 실무에서는 단일파괴만이 발생한다는 가정 하에 설계하는 것이 일반적이다.

안벽기초의 지지력 파괴는 구조물의 자중 및 그 상부에 작용하는 하중에 의해 기초지반 상에 유발되는 지반반력이 허용지반반력을 초과할 때 발생한다. 중력식 안벽은 자중, 연직토압 및 상재하중 등의 연직력과 수평토압, 잔류수압, 견인력, 관성력 및 동수압 등의 수평력이 동시에 발생하여 편심 및 경사하중을 받는 항만구조물이다. 이러한 경우, 기초의 지지력에 대한 안정성은 당연히 편심 및 경사하중을 고려하여 검토하여야 한다(해양수산부, 2005). 편심 및 경사하중이 작용하는 항만구조물 기초의 안정검토는 간편 Bishop법 또는 하중분산법에 의해 검토하도록 되어있다.

간편 Bishop법을 이용하여 원호활동에 의한 편심 및 경사하중이 작용하는 기초의 신뢰도지수는 다음 방정식 (1)의 한계상태함수(limit state function)부터 계산할 수 있다. 그리고 항만구조물에 적용되는 사석마운드와 원지반의 이층기초에서는 대부분 원호활동 해석이 실제 현상을 보다 잘 재현할 수 있다고 알려져 있다.

$$Z_{S.Bishop} = \frac{\sum (c'b + W'\tan\phi')\sec\alpha}{1 + (\tan\alpha\tan\phi')} - \sum W'\sin\alpha + \left(\frac{1}{R}\right)\sum Ha \quad (1)$$

여기서, W' 는 단위길이 당 분할편의 유효중량, α 는 분할편 저면이 수평면과 이루는 각도, R 은 활동원의 반경, H 는 활동원 내의 토괴에 작용하는 수평외력, a 는 수평외력 작용점에서 활동원 중심까지의 거리, c' 는 비배수 전단강도(점성토) 또는 겉보기 점착력(사질토), b 는 분할편의 폭, ϕ' 는 사질토 지반의 내

부마찰각이고 $F.S$ 는 간편 Bishop법에 의한 안전율이다.

하중분산법에 의한 지반지지력은 사석마운드 상부에서의 지지력과 마운드 하부 원지반에서의 지지력으로 대별된다. 사석마운드의 지지력 파괴시 한계상태함수에서 저항치는 미리 설정된 사석지반의 허용 지지력이고 하중값은 총 연직하중이다. 그러므로 신뢰성 해석을 위한 한계상태함수는 다음 방정식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$Z_B = q_a - \begin{cases} \frac{F_V}{B_c} \left(1 + \frac{6e}{B_c}\right) & (e < \frac{B_c}{6}) \\ \frac{4F_V}{3(B_c - 2e)} & (e > \frac{B_c}{6}) \end{cases} \quad (2)$$

여기서, q_a 는 허용지지력, F_V 는 연직합력, B_c 는 안벽의 폭이고, e 는 편심거리로 다음 식 (3)으로 구한다.

$$e = \frac{B_c}{2} - \frac{M_Y - M_X}{F_V} \quad (3)$$

여기서, M_Y 는 저항모멘트의 합, M_X 는 외력모멘트의 합이다.

한편, 사석마운드 하부 원지반의 지지력 검토를 위한 한계상태함수에서 저항치는 미리 설정된 원지반의 허용지지력이고 하중값은 마운드 상부로부터 전달된 연직하중이 된다. 따라서 한계상태함수는 다음 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$Z_G = q_a - \frac{b}{L} p_1 + \gamma_1' D \quad (4)$$

그림 1에 나타난 바와 같이 γ_1' 은 사석의 수중단위중량이고, b 는 사석마운드 상부에서의 지반반력 분포 폭으로써, 삼각형 분포일 때 $b = 3(B_c/2 - e)$, 사다리꼴 분포일 때 $b = B_c$ 이다. e 는 하중 R 의 편심거리이고, L 은 기초지반 상부의 하중분포 폭으로 다음 식(5)로부터 구해진다.

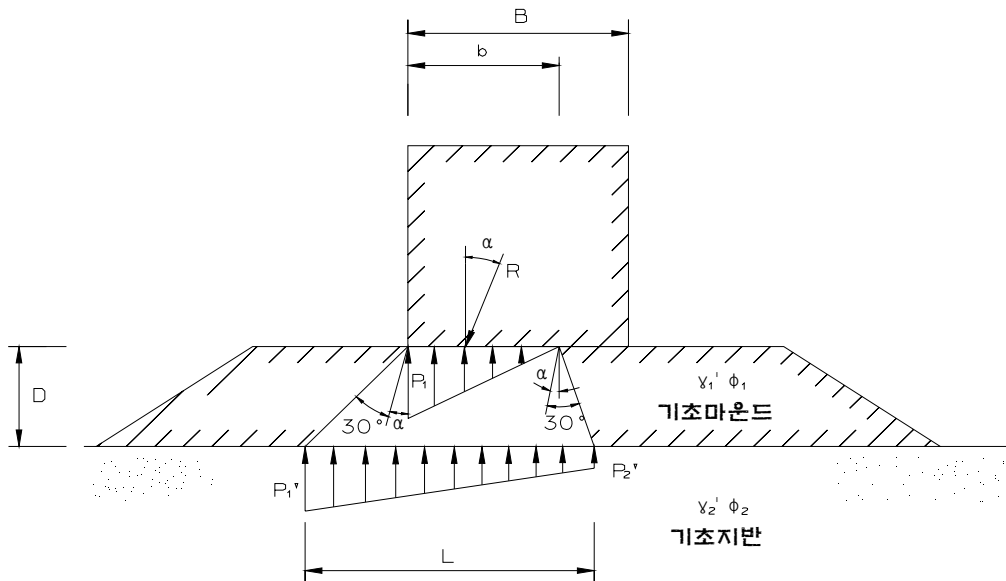


그림 1. 기초마운드 상부 및 하부에서 지반지지력 산정(해양수산부, 2005)

$$L = b + D[\tan(30^\circ + \alpha) + \tan(30^\circ - \alpha)] \quad (5)$$

2.2 목표신뢰도수준

구조물의 목표신뢰도수준을 설정하기 위하여 현재까지 다양한 방법들이 제시되었으며 각 방법의 개념을 요약하면 다음과 같다.

2.2.1 과거의 사고통계에 기초한 방법

과거의 사고통계에 기초한 방법에서 목표신뢰도수준은 통계적 데이터로부터 산정된 사고 및 파괴의 연 발생확률(probability of annual occurrence)에 기초하여 결정된다.

2.2.2 기존구조물의 신뢰도수준 평가에 의한 방법

기존구조물의 신뢰도수준 평가에 의한 방법에서 목표신뢰도수준은 현재 설계기준에 기초하여 설계된 구조물의 안전도를 근거로 결정된다. 지금까지 국외에서 개발된 다수의 신뢰성 설계기준은 이 방법을 이용하였다. 이 방법은 현재 설계법에서 충분한 자료를 축적하였거나 신뢰도가 검증된 경우에 유용한 방법이나, 현재의 설계기준이 최적의 해답이라는 것은 주장할 수 없다. 일반적인 보정방법은 현재 설계기준에 정의된 바와 유사한 안전여유 수준에서 신뢰성 설계법의 평균 신뢰도수준 값을 이용하는 것이다.

2.2.3 다른 재해 위험도와의 비교에 의한 방법

다른 재해 위험도와의 비교에 의한 방법은 구조적 파괴에 의해 발생된 1인당 기대 사망률은 자연 또는 기타재해로 인한 영향 하에 있다는 개념에서 출발한다.

2.2.4 인적 손실 위험도 저감에 필요한 투자효과에 의한 방법

인적 손실 위험도 저감에 필요한 투자효과에 의한 방법은 구조적 파괴에 의해 발생된 1인당 기대 사망률을 줄이기 위해 요구되는 비용이 평가기준으로 이용된다.

2.2.5 LCC 최소화에 기초한 방법

LCC 분석은 구조물의 공용기간 동안 발생 가능한 최소의 LCC에 따른 파괴확률을 고려하여 최적의 구조형식과 단면을 결정하는 최적화 설계를 수행하기 위한 분석이다. 그림 2에 나타난 바와 같이 최적 파괴확률은 LCC가 최소가 될 때의 파괴확률이 되고, LCC는 초기건설비용(initial construction cost), 유

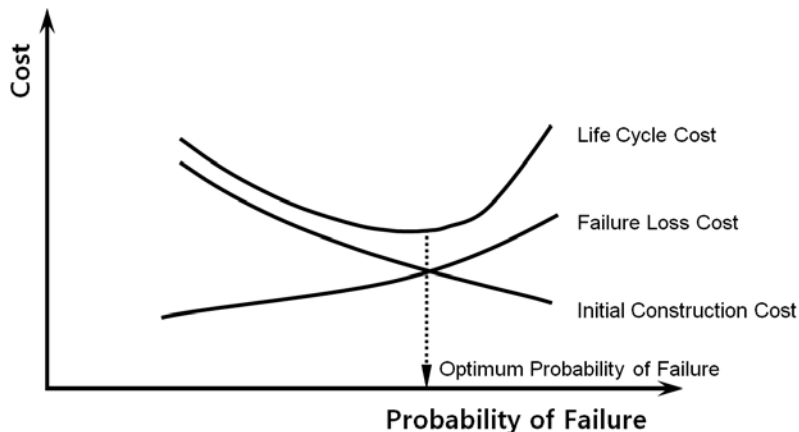


그림 2. 파괴확률과 생애주기비용

지관리비용(maintenance cost)과 파괴손실비용(failure loss cost)의 합이다.

그림 2에서 LCC의 최소값을 기준으로 좌측의 LCC는 우측의 LCC와 다른 경향을 보인다. 위험측인 우측에서 파괴확률이 증가함에 따라 LCC는 급격히 증가하여 파괴확률 변화에 대하여 민감하다. 반면, 안전측인 좌측에서는 파괴확률이 감소함에 따라 LCC는 서서히 증가한다.

3. 목표신뢰도수준의 평가

앞 절에서 기술한 여러 가지 목표신뢰도수준 평가방법 중 일반적으로 기존구조물의 신뢰도수준 평가에 의한 방법 및 LCC 최소화에 기초한 방법이 현재 가장 합리적인 것으로 알려져 본 연구에서도 이 방법으로 목표신뢰도수준을 설정하고자 한다. 국내 항만구조물 중에서 다수의 중력식 안벽구조물을 각 파괴모드에 대하여 해석하고 평균 신뢰도지수 분석결과를 그림 3에 나타내었다. 그림과 같이 신뢰도지수(β)의 평균은 전도, 마운드 직선활동, 원지반 지지력, 활동 및 마운드 지지력의 순으로 크게 나타났다. 즉, 마운드 기초의 지지력 파괴가 최소의 안전여유를 가지는 것으로 파악되었다. 따라서, 본 연구에서는 식 (2)의 하중분산법을 이용하여 지지력을 계산할 때 가장 큰 파괴확률을 갖는 마운드 지지력 파괴를 기준으로 목표신뢰도수준을 결정하고자 한다.

3.1 기존구조물의 신뢰도수준 평가를 통한 접근

이 방법은 북미의 LFRD를 포함하여 신뢰성에 기반한 설계기준을 개발하기 위해서 가장 많이 이용되어 온 접근법이다. 이 방법에 의해 개발된 목표신뢰도수준은 현재까지 이용되어 온 설계사례에 반영된 불확실성 수준을 보정하여 설정하게 된다. 이 방법의 핵심은 과거의 설계기준에 의해 안전하다고 인정된 사례를 재현하여 구성하고 이것을 그대로 새로운 설계기준의 수정 및 보정을 위한 시발점으로 사용할 수 있다는 것이다. 이렇게 반영된 신뢰도수준은 차후에 신뢰성 설계기준을 사용할 때 설계결과들 사이의 신뢰도에 대한 일관성을 부여하기 위하여 조정이 필요하다.

본 논문에서는 목표신뢰도수준을 결정하기 위하여 현존하는 국내 항만시설 중 36개의 안벽구조물에 대하여 Level 2 신뢰성해석을 수행하고 신뢰도수준을 조사하였다. 그리고 해석된 자료 중 지배적인 파괴모드인 마운드 지지력 파괴를 기준으로 목표신뢰도지수 및 파괴확률을 결정하였다. 각 설계사례를 항만지역별로 분류하여 기존 설계법에 의한 최대지반반력(q_u)과 신뢰도지수(β) 및 파괴확률(P_f)을 산정하였다. 기존 설계법의 경우 q_u 가 허용지반반력(q_a)을 초과하지 않을 때 안정한 것으로 판단하므로 안전여유를 q_a/q_u 로 나타내었다.

표 1에서 신뢰도지수 β 가 큰 지역의 안벽기초는 안전여유 q_a/q_u 도 크게 나타남으로써 기존의 허용응

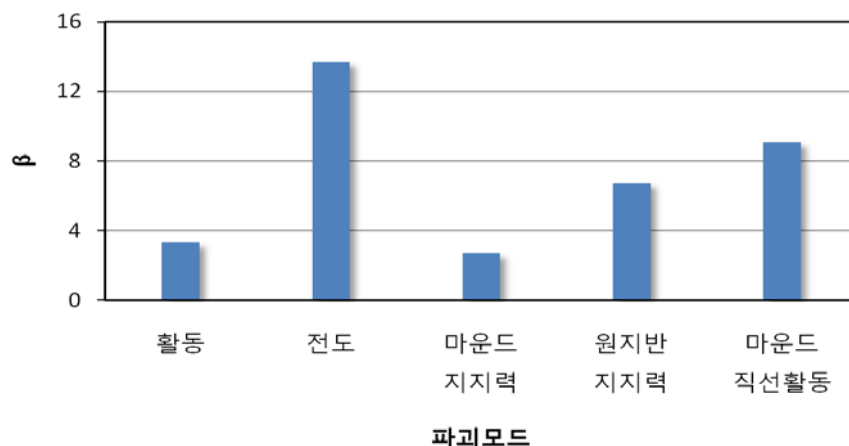


그림 3. 국내 중력식 안벽의 파괴모드별 평균 신뢰도지수

표 1. 안벽의 지역별 평균 안전여유 q_a/q_u 및 신뢰도수준

지역	q_a/q_u	β	$P_f(\%)$
제주항	1.608	3.332	0.0431
인천항	1.169	1.212	11.276
대산항	1.157	1.718	4.290
광양/여수/완도/통영항	1.705	4.428	0.000476
목포항	1.214	1.542	6.150
울산/포항/부산/목호항	1.475	3.224	0.0633
평균	1.388	2.576	3.637

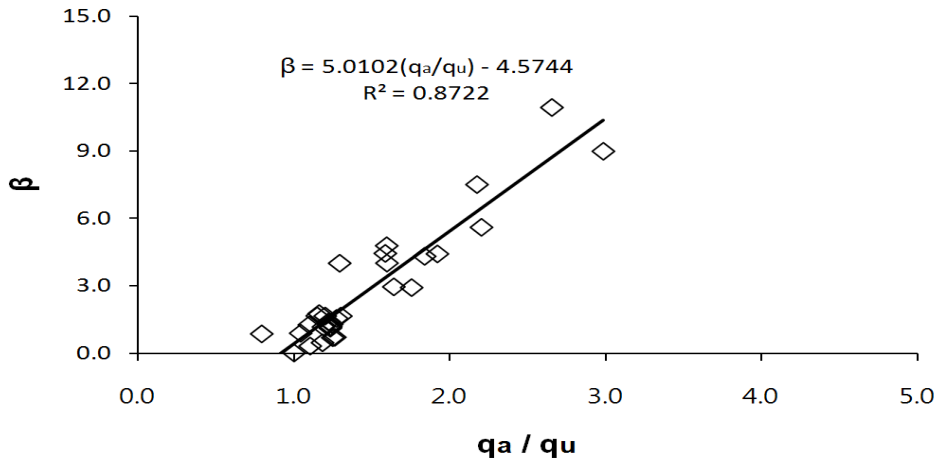


그림 4. β 및 q_a/q_u 상관관계

력 설계법 및 신뢰성 설계법 판단지표 사이에 일관성이 존재함을 알 수 있었다. 또한, 기존 설계법에서는 모든 안벽의 안전여유 q_a/q_u 가 1.0보다 크므로 안전하나 파괴확률 P_f 는 다소 크게 산정된 경우도 있다. 이러한 결과는 신뢰성 해석 시 고려되는 확률변수의 분포와 변동성이 실제 물리적 현상 또는 하중 재하 조건과 서로 일치하지 않는 등의 원인에서 찾을 수 있다고 판단된다.

그림 4에 나타났듯이 마운드 기초의 설계 시 회귀분석으로부터 기존 설계법과 신뢰성 설계법 사이의 안전여유에 대한 선형 상관관계가 매우 높다는 것을 파악하였다. 따라서, 그림 4의 관계식을 이용하면 신뢰성 해석을 수행하기 전에 예비단계에서 기존 설계법에 의해 얻어진 안전여유 q_a/q_u 로부터 대략적인 신뢰도지수 및 파괴확률을 추정하는 것이 가능한 것으로 판단되었다.

3.2 LCC 최소화기법을 통한 접근

LCC 분석에서는 설계 공용수명동안 LCC를 최소화하는 것이 가장 바람직하다고 가정하며 파괴확률을 구하는 것이 목적이다. 본 연구에서는 LCC 분석이론을 이용하여 안벽과 기초의 폭을 일정하게 변화시키며 그에 따른 초기공사비와 파괴 손실비용 변화, 그리고 궁극적으로 LCC 변화곡선을 산정하였으며, 이로부터 최소화된 LCC 및 파괴확률을 얻었다.

3.2.1 LCC(생애주기비용)

LCC란 구조물의 기획 단계에서부터 폐기 처분 시까지의 모든 비용 즉, 계획 및 설계비, 건설비, 운용 관리비, 폐기물 처분비용 등을 모두 합한 것으로 시설물의 생애 중 필요한 모든 비용을 말하며, 기대총 비용(expected total cost; ETC) 이라고도 한다. 기대총비용은 다음 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$ETC(LCC) = C_I + C_M + C_F \quad (6)$$

여기서, C_I 는 초기건설비용, C_M 은 유지관리비용이고 C_F 는 파괴손실비용이다.

3.2.2 초기건설비용

초기건설비용(C_I)은 직접비와 간접비를 비롯한 건설비용에 설계 및 감리비(엔지니어링 사업대가 기준 및 건설공사 감리대가 기준)와 초기안전점검비가 포함된 비용이다. 이러한 비용은 모두 프로젝트의 초기 즉, 기준시점에 발생한다.

3.2.3 유지관리비용

설계공용기간 즉, 미래의 유지관리비용(C_M)을 정확히 산정하는 것은 쉽지 않다. 일반적으로 유지관리 비용은 다음 식과 같이 점검비용(C_{ins})과 직접손실비용(C_{rep})의 합으로 나타낼 수 있다. 점검비용은 정기 및 정밀점검과 정밀안전진단비용을 포함하며 ‘건설공사 안전점검대가 산정기준’에 의해 산정할 수 있다. 직접손실비용은 보수 및 보강에 소요되는 비용으로써 정확한 추정을 위해서는 과거의 유지보수자료나 산정기준 등에 근거하여 결정되어야 한다.

$$C_M = C_{ins} + C_{rep} \quad (7)$$

항만시설의 유지관리비용은 과거의 통계자료를 이용함으로써 추정할 수 있다. 다음 표 2는 항만예산에 대한 유지관리비(준설포함) 비율을 나타낸다. 이 자료는 시설물 유지관리 관련 법령 및 기존의 연구결과와 잘 일치하므로 본 연구에서는 과거 5년간 유지관리비의 평균치인 10.06%를 이용하였다.

3.2.4 파괴손실비용

파괴손실비용(C_F)은 다음 식과 같이 파괴에 의한 최대 손실비용(C_f)에 단위 년 파괴확률(P_f)을 곱하여 산정할 수 있다.

$$C_F = C_f \cdot P_f \quad (8)$$

C_f 는 파손시 단위복구비용과 단위운영손실비용을 합산한 비용이다. 단위복구비용은 물리적인 복구를 위한 비용으로 대규모 재해가 발생한다고 가정할 때 초기건설비용의 약 125~150%로 간주할 수 있다(Nagao, 2000). 본 연구에서 단위복구비용은 기존 Ozaki 등(2007)의 연구결과를 참고하여 초기건설비용의 150%로 가정하였다. 단위운영손실비용은 해상교통비용, 해상교통시간비용, 육상교통비용 및 육상교통시간비용의 합이다(Shibasaki, 2004).

부두의 수심과 단위운영손실비용은 양의 상관관계가 있다고 알려져 있다. 즉, 부두의 수심이 증가함에 따라 대형선박의 입항이 가능하게 되고 배후지역은 경제적으로 더욱 중요하게 된다. 또한, 수심이 증가함에 따라 단위운영손실비용의 변화는 더욱 커지게 된다. 이는 안벽의 파괴로 그 운영이 불가능해질

표 2. 항만예산대비 유지보수비 비율(한국해양수산개발원, 2003)

년도	1,999	2,000	2,001	2,002	2,003
비율(%)	9.3	10.3	11.8	9.4	9.5

때 대체 교통수단과 관련된 조건의 편차가 보다 커지기 때문이다. 따라서, 단위운영손실비용은 중요 항만에서 $\mu + \sigma$ 라면 중요도가 매우 높은 항만에서는 $\mu + 3\sigma$ 가 된다.

한편, 단위운영손실비용은 배후지의 조건에 따라 다르지만 단위복구비용의 약 70~150%로 간주할 수 있으므로(Ozaki 등, 2007), 본 연구에서는 단위복구비용의 150%로 가정하였다. 파괴손실비용 산정 시 해당구조물의 공용기간(N)을 고려하기 위하여 단위 년 파괴확률(P_f)을 이용하여 사용 년 파괴확률(P_f^N)을 다음 식을 이용하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 중력식 안벽구조물의 공용기간을 EU에서 제안하는 “빌딩 및 일반구조물의 설계공용연수”에 해당하고 국내외에서 통상적으로 적용하고 있는 50년으로 가정하여 P_f^N 을 계산하였다.

$$P_f^N = 1 - (1 - P_f)^N \quad (9)$$

3.2.5 LCC 분석결과

안벽과 마운드 기초의 폭을 변화시키며 신뢰성 해석을 하여 각 단면 폭에서의 파괴확률을 구하고 상기의 비용 산정방법으로 각 안벽의 폭에 따른 C_I , C_F 및 C_M 과 ETC를 계산하였다. 그리고 최종적으로 파괴확률과 각 비용의 관계곡선을 작성하였다.

그림 5에 나타난바와 같이 모든 분석사례에서 이론과 일치되는 경향을 보였다. 즉, ETC(또는 LCC)의 추세는 최저점을 기준으로 안전측인 좌측으로 갈수록 완만하게 증가하는 반면, 위험측인 우측으로 갈수록 파괴확률 증가에 따라 민감하게 증가하는 양상을 보인다. 궁극적으로 ETC 곡선 최저점에서의 파괴확률이 각 구조물 기초의 설계수명동안 가장 경제적인 파괴확률이 되고 이 값을 목표파괴확률로 결정할 수 있다. 곡선의 최저점에서 생애주기비용이 가장 적게 발생하기 때문이다. 그림에서 초기건설비용 C_I 는 파괴확률이 증가함에 따라 점차 감소하는데 이는 구조물 기초의 단면이 작아질수록 파괴확률은 커지는 반면, C_I 는 감소하기 때문이다. 파괴손실비용 C_F 는 파괴확률이 증가함에 따라 함께 증가하는데 이는 파괴규모가 커질수록 그에 따른 복구비용과 운영손실비용이 증가하기 때문이다.

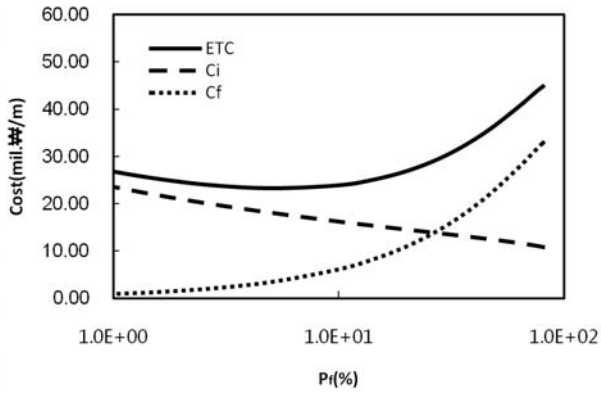
각 사례별 ETC 곡선으로부터 구한 최적파괴확률의 분포와 기초통계량을 그림 6과 표 3에 나타냈다. 공용년 최적파괴확률은 약 1.2~5.5%의 범위에 있고 이는 안벽의 규모와 용도, 수심 및 지반여건뿐 아니라 설계 시 단면선정에 따른 안전여유 차이에 의존할 것으로 판단된다. 최적파괴확률의 평균치는 단위년 및 공용년에 각각 0.0775%와 3.958%로 나타났고 변동계수(COV)는 50.9%와 38.9%로 다소 크게 나타났다.

4. 목표파괴확률 결정

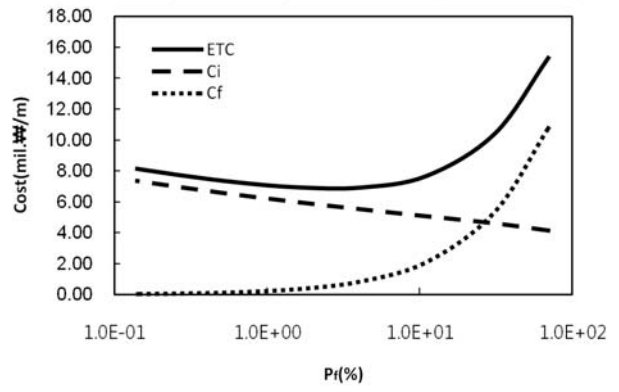
국내에 현존하는 안벽구조물의 신뢰성 해석으로 신뢰도수준을 파악한 결과, 평균 파괴확률은 3.637%로 나타났다. 반면, LCC 분석을 통한 최적신뢰도수준을 평가한 결과, 공용 년에 대한 최적파괴확률의 평균치는 3.958%로써 두 결과 사이의 상대오차는 약 8.8%이다. 한편, 케이슨식 안벽에서 벽체를 제외한 현행 설계법에 의한 파괴확률은 미미한 것으로 알려져 있으며 LCC에 의한 최소 파괴확률에 비해 작거나 같다고 보고된바 있다(Ozaki 등, 2005). 따라서, 본 연구에서 얻은 현행 설계법에 의한 파괴확률 3.637%와 LCC 분석에 의한 최소 파괴확률 3.958%는 그와 일치한다.

Nagao 등(2001)에 따르면 중력식 안벽의 일종인 케이슨식 안벽에 대하여 실제 재해로부터 평가된 파괴확률은 5%로 나타났다. 또한, Ozaki 등(2005)은 항만의 중요도에 따라 좌우되는 파괴시 단위운영손실비용을 기준으로하여 목표신뢰도지수를 중요한 항만의 경우(단위운영손실비용: $\mu + \sigma$) 2.70, 매우 중요한 항만의 경우(단위운영손실비용: $\mu + 3\sigma$) 3.10로 산정하였다. 이들을 파괴확률로 환산하면 각각 0.347% 및 0.0968%이다. 한편, Meyerhof(1970)에 의하면 기초의 파괴확률은 0.1~0.01% 범위가 적합하다.

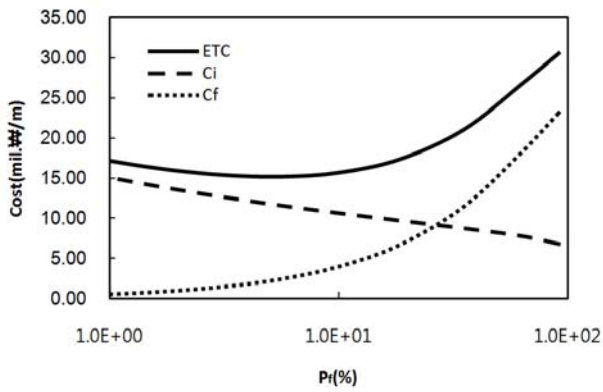
결과적으로, 국내 안벽의 마운드 기초 지지력에 대한 목표파괴확률은 현행 설계법에 의한 평균 파괴



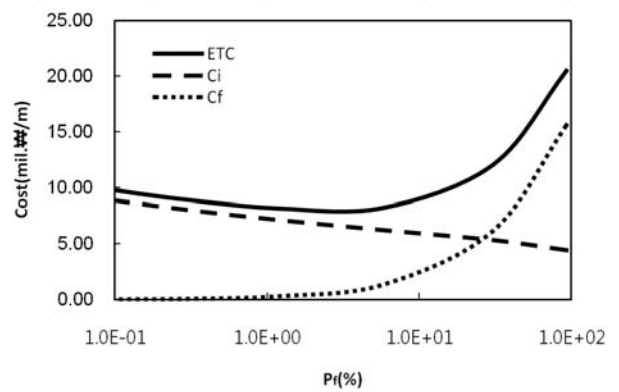
사례 1



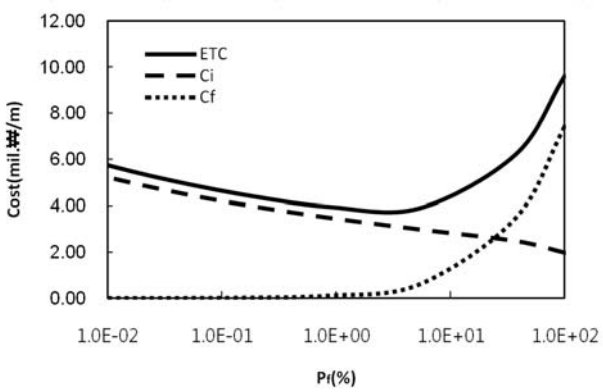
사례 2



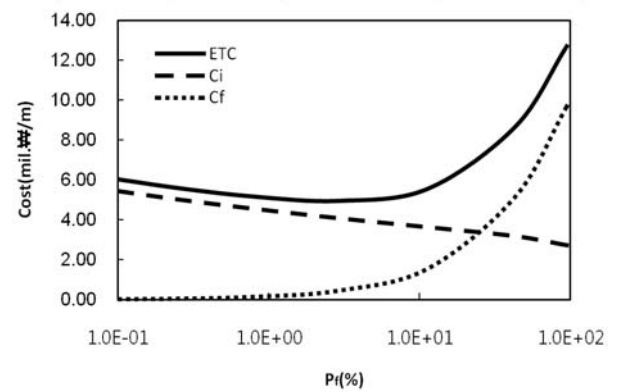
사례 3



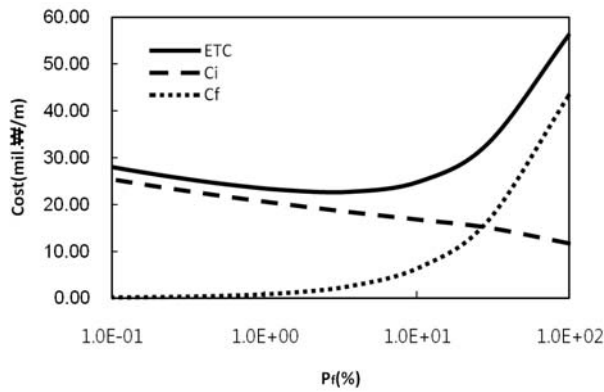
사례 4



사례 5



사례 6



사례 7

그림 5. 사례별 파괴확률-비용 관계곡선

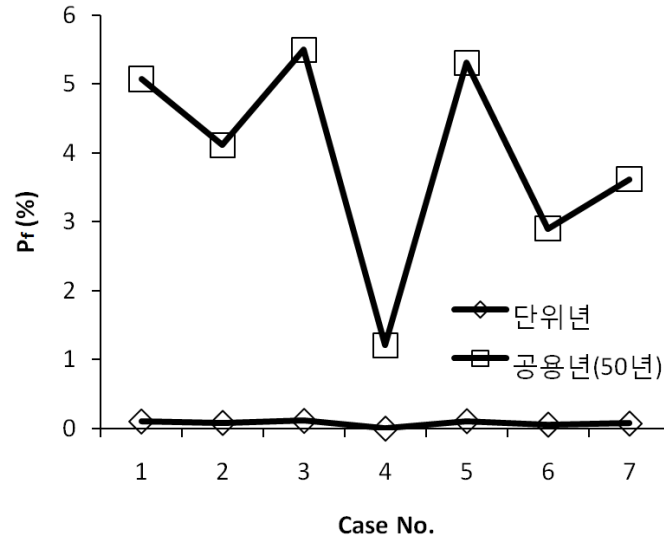


그림 6. 사례별 최적파괴확률 분포

표 3. LCC 분석으로부터 구한 최적파괴확률 특성

	최적파괴확률(%)	
	단위년	공용년(50년)
평균	0.0775	3.958
표준편차	0.0394	1.541
COV	0.509	0.389

확률과 LCC 분석에 의한 최소 파괴확률을 포함하는 기대수명 간 4.0% 수준에서 결정할 수 있고 이를 단위년 파괴확률로 환산하면 0.0816%가 된다. 또한, 이들을 신뢰도지수로 나타내면 표 4와 같다.

5. 결론

국내 중력식 안벽기초의 신뢰성 설계 시 구조물의 안정성 판단의 지표가 되는 목표신뢰도수준을 결정하였다. 목표신뢰도수준을 결정하기 위하여 가장 합리적이라 알려진 기존구조물의 신뢰도수준 평가와 LCC 최소화기법에 의한 평가방법을 이용하였다. 이를 위하여 전국 부두안벽의 마운드 기초에 대하여 기존 설계법에 의한 최대지반반력과 신뢰성 설계법에 의한 신뢰도지수를 계산하였다. 신뢰성 해석한 모든 경우에서 신뢰도지수가 큰 지역의 안벽기초는 q_a/q_u 도 크게 나타남으로써 기존 설계법 및 신뢰성 설계법 판단지표 사이에 일관성이 있음을 알 수 있었다.

그리고 기존 설계법에서 구한 q_a/q_u 와 신뢰성 설계법에서 얻은 신뢰도지수 자료를 이용하여 회귀분석한 결과, 상호간의 안전여유는 매우 양호한 선형 상관관계를 가짐이 파악하였다. 또한, 선형 관계식을 이용하면 신뢰성 해석을 하기 전 예비단계에서 q_a/q_u 를 이용하여 개략적인 신뢰도지수 및 파괴확률을

표 4. 목표신뢰도수준 설정결과

	단위년	공용년(50년)
목표파괴확률, P_f^T	0.0816%	4.0%
목표신뢰도지수, β_T	3.150	1.751

추정하는 것이 가능하다고 판단되었다.

LCC 분석을 통하여 파괴확률 변화에 따른 초기건설비용, 파괴손실비용 및 LCC 변화를 관찰한 결과, 모든 사례에서 이론과 잘 일치하는 경향을 보였다. 구조물의 기대수명인 50년 동안의 최적파괴확률을 산정한 결과, 평균 약 3.958%을 얻었다. 이는 기존 설계법에 의한 구조물의 평균 파괴확률인 3.637%보다 커 문헌에 나타난 경향과 일치하였다. 결론적으로 국내 실정을 고려한 중력식 안벽기초의 목표파괴확률과 목표신뢰도지수를 제안하였다. 이는 현재까지 신뢰성 설계 시 일본 등 국외의 안정성 지표를 준용해 왔다는 점에서 그 의미가 크다고 판단된다.

참고문헌

1. 김동현, 윤길림, 박우선(2003), “지진토압의 위상차를 고려한 케이슨안벽의 신뢰성 해석”, 한국해양해양공학회지, 제15권 제4호, pp.242~248.
2. 김영상(2006), “심층혼합처리된 지반상의 안벽에 대한 내적 신뢰성해석”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.1854~1857.
3. 김홍연, 윤길림, 윤여원(2008), “안벽 설계변수의 신뢰성 해석과 생애주기비용 분석”, 한국지반공학회가을학술발표회 논문집, pp.508~518.
4. 안종필, 박주원, 유덕찬(2006), “안벽시설물의 퍼지신뢰성 기반 LCC 및 통합 가치분석 모델”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.601~605.
5. 한국해양수산개발원(2003), 항만개발사업의 경제적 타당성 평가의 개선방안 연구.
6. 해양수산부(2001), 전국 주요 항만 안벽구조물 간이평가 보고서.
7. 해양수산부(2004), 차세대 항만 설계기술 개발(IV), pp. 195~216.
8. 해양수산부(2005), 항만 및 어항 설계기준(상권).
9. Meyerhof, G.(1970), “Safety Factors in Soil Mechanics”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 349~355.
10. Nagao T.(2000), “Expected Life-Cost for Breakwaters in terms of Failure Probability”, Proceedings of the 4th Japan Conference on Structural Safety and Reliability, pp. 441~448.
11. Nagao T., Yoshinami Y., Sanuki T. and Kamon M.(2001), “Application of a reliability-based design method to the external safety of caisson breakwaters”, Journal of Structural Engineering, Vol. 47A, pp. 293~304.
12. 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”, ICOSAR 2005, pp. 1285~1292.
13. Ozaki R. and Nagao T.(2007), “Application of Reliability-based Design Method to Circular Arc Slip Failure of Breakwaters”, Application of Statistics and Probability in Civil Engineering, pp.1~9.
14. Paikowsky, S. G.(2004), Load and Resistance Factor Design for Deep Foundations, NCHRP Report 507, Transportation Research Board, Washington, DC.
15. Shibasaki R.(2004), “Seismic Design for Port Facilities Considering Economic Loss Cost in Freight Transportation and the Risk Evaluation Characteristics”, Proceedings of Infrastructure Planning, Vol. 21, No. 2, pp. 349~357.
16. Yoneyama, H., Shiraishi, S. and Uwabe, T.(2000), “A Study on Load Factors of Seismic Loads on Limit State Design Method for Port and Offshore Structures in Japan”, 8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability.