

경사제의 다중 파괴모드에 대한 신뢰성 해석 Reliability Analysis of Multiple Failure Modes of Rubble-Mound Breakwaters

이철응*
Cheol-Eung Lee*

요 지 : 다중 파괴모드에 대한 경사제 체체의 시스템적 안정성을 신뢰성 이론으로 해석하였다. 먼저 경사제의 안정성과 관련된 네 개의 단일 파괴모드에 대한 신뢰함수가 수립되었다. 각각의 단일 파괴모드에 대한 AFDA 신뢰성 해석 모형이 개발되었으며, CIAD(1985)의 결과와 비교하여 만족스럽게 검증하였다. 단일 파괴모드에 대한 신뢰성 해석에서는 파괴확률 뿐만 아니라 파괴확률에 영향을 미치는 각 확률변수들의 영향계수를 산정하였다. 한편 경사제의 다중 파괴모드에 대한 신뢰성 해석을 수행하기 위해 세 가지, 일차해석법, 이차해석법 그리고 PNET, 해석법이 적용되었다. 해석 결과에 의하면 일차해석법은 파괴확률을 과다 추정하는 경향이 있다. 따라서 다중 파괴모드를 해석할 때는 각 파괴모드간의 상관성을 고려할 수 있는 이차해석법이나 PNET 해석법을 이용하는 것이 바람직하다. 마지막으로 파괴모드간의 상관성에 기인하는 파괴확률의 추가적인 발생 가능성을 다중 파괴모드 해석을 통하여 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 신뢰성 해석, 다중 파괴모드, 일차해석법, 이차해석법, PNET

Abstract : A reliability analysis has been performed to investigate the systematic stability of multi-failure modes of rubble-mound breakwaters. The reliability functions of four different failure modes are established straightforwardly. AFDA(Approximate Full Distribution Approach) reliability models for each failure modes are directly developed and satisfactorily calibrated through the comparison with CIAD's results. In the reliability analysis of single failure mode, the probabilities of failure are calculated and the influence coefficients of random variables in the failure modes are properly evaluated. Meanwhile, three different models such as uni-modal bounds, bi-modal bounds, and PNET are applied to evaluate the probabilities of failure of multi-failure modes for rubble-mound breakwaters. It may be found that uni-modal bounds tend to overestimate the probability of failure of multi-failure modes. Therefore, for the systematic reliability analysis of multi-failure modes, it is recommended to use bi-modal bounds or PNET which consider the correlation between the failure modes for rubble-mound breakwaters. By introducing the reliability analysis of multi-failure modes, it could be possible to find out the additional probabilities of failure occurred by the multi-failure modes of a multi-component system such as rubble-mound breakwaters.

Keywords : reliability analysis, multiple failure modes, uni-modal bounds, bi-modal bounds, PNET

1. 서 론

단일 파괴모드 개념에 따른 경사제에 대한 신뢰성 해석에서는 주로 피복재의 피해정도에 따른 파괴확률을 산정하였다(이철응, 2001, 2003, 2004; van der Meer, 1995). 그러나 다른 잠재적 파괴모드의 발생으로 경사제가 그 안

정성을 상실할 수도 있다. 경사제는 파랑 에너지를 직접적으로 제어하는 피복재 뿐만 아니라 세굴방지를 위한 소단, 월파를 방지하기 위한 상치 콘크리트 구조물 등 여러 가지 요소들로 구성되어 있다. 따라서 경사제를 여러 가지 요소들로 구성된 하나의 시스템으로 보고, 각각의 요소들 간의 상관성을 해석하여 전체 시스템의 안정성

*강원대학교 공과대학 토목공학과, 교수(Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, 192-1 Hyoja 2-Dong, Chuncheon 200-701, Korea. celee@kangwon.ac.kr)

(systematic stability)을 정량적으로 평가할 필요가 있다.

이와 같은 연구를 수행하기 위해서는 피복재의 안정성이외의 파괴모드들에 대한 물리적 이해를 바탕으로 해석 모형을 수립해야 하며, 모형을 구성하는 각 변수들에 대한 정확한 이해가 필요하다. 또한 현행의 결정론적 해석 방법으로는 각 파괴모드의 안정성을 정량적으로 평가할 수 없으며, 파괴모드들 간의 상관성도 해석할 수 없다. 따라서 관련 변수들을 확률변수로 고려할 수 있는 신뢰성 기법을 이용해서 해석해야만 한다(CIRIA/CUR, 1991). 잠재적 파괴모드들에 따른 경사제 체체의 전반적인 안정성을 체계적으로 해석할 수 있는 신뢰성 기법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 하나는 파괴수형도(fault tree)를 이용하는 방법이고, 다른 하나는 사건수형도(event tree)를 이용하는 방법이다. 이와 같은 해석기법을 일반적으로 다중 파괴모드 해석(analysis of multiple failure modes)이라 한다. CIRIA/CUR(1991)와 Burcharth(2000)가 이에 대한 연구의 필요성과 간단한 해석 예를 제시한 바 있다. 이들의 연구에서는 각 파괴모드간의 상관성에 대한 해석을 수행하지 못했다. 단지 파괴수형도의 기초적 개념만을 이용하여 파괴모드 간 상관성이 완전(perfectly correlated)하거나 독립(statistically independent)이라는 가정 하에 경사제의 안정성을 해석하였다. 그러나 경사제의 안정성과 관련된 모든 파괴모드는 입사파랑의 특성과 반드시 연관성을 갖으며, 또한 파괴모드의 특성에 따라 기학적, 재질적 특성이나 경험상수 등 다른 확률변수가 각기 다르게 포함된다. 이는 각 파괴모드간의 상관성이 완전하지도, 전혀 없지도 않게 된다는 의미이다.

본 논문에서는 경사제 안정성을 다중 파괴모드 개념으로 해석하기 위하여 먼저 CIRIA/CUR(1991)와 Burcharth

(1992)가 사용한 바 있는 일차해석법(uni-modal bounds)을 적용하였다. 또한 일차해석법에서는 규명할 수 없는 파괴모드간의 상관성을 정확히 산정하기 위하여 이차해석법(bi-modal bounds)과 PNET(Probabilistic Network Evaluation Technique)를 적용하였다. 다중 파괴모드를 수행하기 위하여 경사제의 안정성과 관련된 네 개의 단일 파괴모드에 대한 수학적 정의와 해석이 이루어졌다. 하나는 경사제 전면에 거치된 피복재의 안정성과 관련된 파괴모드이며, 다른 하나는 전면 해저에 거치된 소단의 안정성(berm stability)과 관련된 파괴모드이다. 세 번째, 네번째 파괴모드는 경사제 상부에 설치되는 상치 콘크리트 구조물의 활동 및 전도에 대한 것이다.

2. 단일 파괴모드에 대한 신뢰함수의 수립

경사제의 안정성을 위협하는 잠재적 파괴모드들을 Fig. 1에 제시하였다(PIANC, 1992). 크게 구분하면 모두 아홉 개의 단일 파괴모드가 된다. 즉, 경사제 전후면의 피복재 안정성과 관련된 파괴모드, 소단의 안정성과 관련된 파괴모드, 피복재의 구조적 파손에 대한 파괴모드, 상치 콘크리트의 활동 및 전도 등 움직임과 관련된 파괴모드, 지반 침하 등 기초지반과 관련한 파괴모드, 월파 및 처오름과 관련된 파괴모드 등이다. 이 중 본 논문에서는 경사제 체체의 안정성에 중요하며, 입사파랑의 특성과 직접적으로 관련이 있는 네 개의 파괴모드만을 선택하였다. 하나는 경사제 전면에 거치된 피복재의 안정성과 관련된 파괴모드이며, 다른 하나는 경사제 전면 해저에 거치된 소단의 안정성과 관련된 파괴모드이다. 세 번째 파괴모드는 상치 콘크리트의 활동에 대한 것이며, 마지막 파괴모드는 상치 콘

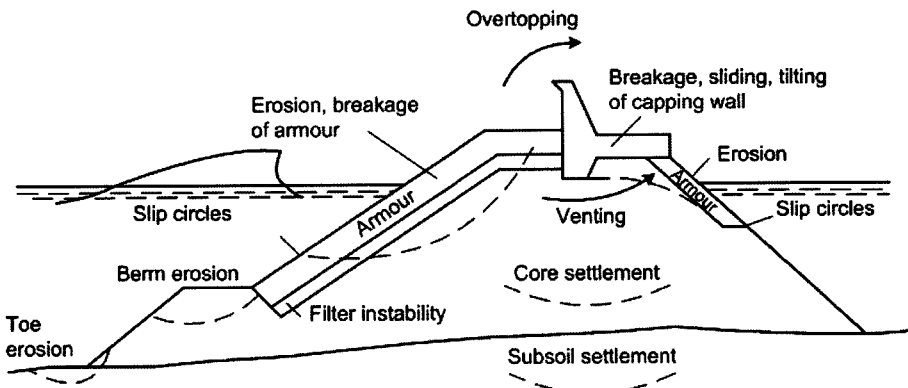


Fig. 1. Failure modes for a rubble-mound breakwaters.

크리트의 전도와 관련된 것이다. 아래에 기존에 제시된 경험식이나 수학적 관계식들을 이용하여 각각의 단일 파괴 모드에 대한 신뢰함수를 수립하였다.

먼저 피복재의 안정성을 확률론적으로 해석하기 위하여 현재 실무에서 피복재의 적정 중량 산정에 가장 많이 사용되고 있는 Hudson의 경험식을 이용하였다. 따라서 피복재의 안정성을 해석하기 위한 신뢰함수는 다음 식 (1)과 같이 정의된다(이철웅, 2000, 2001).

$$g_1(\vec{X}) = \Delta D_n K_1 - (H_s + FH_s) \quad (1)$$

여기서 $K_1 = (K_D \cot \alpha)^{1/3}$, $\cot \alpha$ 는 제체의 경사, K_D 는 피복재의 종류, 쇄파 및 비쇄파, 피복층의 두께, 거치 방법 등에 의하여 결정되는 안정상수이다. $\Delta = \gamma_s / \gamma_w - 1$, γ_s 와 γ_w 는 각각 피복재 및 해수의 단위중량, D_n 는 피복재의 대표크기(nominal diameter), H_s 는 유의설계파고, FH_s 는 파고의 불확실성을 고려하기 위해 도입된 변수이다. 기존의 연구와는 다르게 제체의 경사와 경험식의 불확실성에 대한 영향을 하나의 확률변수로 고려하였다. 이는 이들이 다른 파괴모드와 관계없는 확률변수이기 때문이다.

한편, 피복재의 안정성에 대한 기존의 많은 연구처럼 소단의 안정성을 해석할 수 있는 체계적인 경험식은 거의 제시되어 있지 않다. 다만 몇몇 제한적인 실험 자료가 제시되었을 뿐이다. 따라서 본 연구에서는 이들 실험 자료를 이용하여 얻을 수 있는 일반적인 경험식을 이용하여 소단의 안정성 해석을 위한 신뢰함수를 수립하였다. CIAD (1985)는 경사제 전면의 소단의 대한 수리학적 안정성을 해석할 수 있는 경험식을 수리모형 실험 자료에 근거하여 다음 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$N_s = K_2 \quad (2)$$

여기서 $N_s = H_s / \Delta D_n$ 인 안정수(stability number)이고, K_2 는 피해수준과 관련된 경험상수이다. $K_2 = 4$ 는 초기피해수준이고(initial damage level), $K_2 = 5$ 는 파괴피해수준(failure damage level)에 해당한다. 식 (2)는 안정수로 제시된 피복재의 적정중량 산정식과 동일한 형태를 갖는다. 다만 피해수준을 정의하는 변수가 다를 뿐이다. 따라서 식 (1)을 수립하는 과정에 사용된 개념들을 동일하게 적용하면, 식 (2)를 이용하여 소단의 안정성을 해석할 수 있는 다음 식 (3)의 신뢰함수를 쉽게 수립할 수 있다.

$$g_2(\vec{X}) = \Delta D_n K_2 - (H_s + FH_s) \quad (3)$$

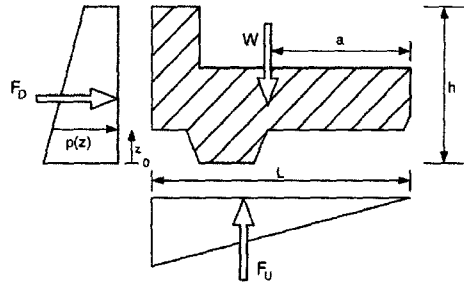


Fig. 2. Forces acting on the concrete crest structure.

식 (3)을 식 (1)과 비교하면 신뢰함수의 형태는 동일하나, 피해수준을 정의하는 확률변수가 다르게 정의되었을 뿐이다.

이상에서와 같이 경사제 전면 피복층의 피복재와 저면 소단에 거치된 피복재의 안정성과 관련된 파괴모드의 신뢰함수가 수립되었다. 따라서 이하에서는 경사제의 상부에 거치되는 상치 콘크리트와 관련된 파괴모드를 해석하고자 한다. Fig. 2에 상치 콘크리트에 작용하는 힘의 관계를 제시하였다. 파압과 자중에 대한 힘의 평형관계를 이용하면 다음 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$f(W - F_U) = F_D \quad (4)$$

여기서 f 는 마찰계수이고, F_D 와 F_U 각각 파랑에 의하여 작용되는 항력과 양력이다. 또한 W 는 상치 콘크리트의 무게이다. 이때 상치 콘크리트가 항상 해수에 잠겨 있지 않기 때문에 부력은 고려하지 않았다. 항력과 양력을 산정하는데 필요한 파압 산정식은 경험식인 다음의 식 (5)를 사용하였다(CIAD, 1985).

$$p(z) = \rho_w g (\alpha_H H_s - z) \quad (5)$$

여기서 ρ_w 와 g 는 각각 해수의 밀도와 중력가속도이며, α_H 는 중복파의 영향을 고려하기 위하여 임의로 도입한 변수이다. 따라서 식 (5)를 식 (4)에 대입하고 정리한 후, 저항력과 하중의 관계를 구분하면 상치 콘크리트의 활동에 대한 신뢰함수를 다음 식 (6)과 같이 쉽게 수립할 수 있다.

$$g_3(\vec{X}) = fW - \rho_w g \alpha_H H_s \left(\frac{1}{2} fL + h \right) + \frac{1}{2} \rho_w g h^2 \quad (6)$$

여기서 L 과 h 는 각각 상치 콘크리트의 길이와 높이이다. 식 (6)은 직립제 케이슨의 활동에 대한 안정성 해석을 위한 신뢰함수와 그 형태가 비슷하다. 따라서 식 (6)을 이용하면 입사파랑 작용에 의하여 발생하는 상치 콘크리트의 활동에 대한 안정성을 해석할 수 있다.

이상에서 상치 콘크리트에 작용하는 힘의 평형 관계를 이용하여 활동에 대한 신뢰함수를 수립하였다. 따라서 이하에서는 상치 콘크리트의 또 다른 파괴모드인 전도에 대한 해석을 수행하겠다. 임의의 회전점(rotation point)을 중심으로 회전 모멘트에 대한 관계식을 이용하면 전도에 대한 다음 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2}Wa = F_D b + F_U \left(\frac{2}{3}L - \frac{1}{2}a \right) \quad (7)$$

여기서 a 는 상치 콘크리트 후단에서 상치 콘크리트의 무게, W 가 작용하는 작용점까지의 거리이며, b 는 임의의 회전점에서 항력이 작용하는 작용점까지의 거리이다. 만약 회전점이 상치 콘크리트의 후단과 자중의 작용점 사이 중간에 있다고 가정하면, 식 (5)를 식 (7)에 대입하여 정리하면 상치 콘크리트의 전도에 대한 신뢰함수를 다음 식 (8)과 같이 얻을 수 있다.

$$g_4(\vec{X}) = \frac{1}{2}Wa - \rho_w g \alpha_H H_s \left(\frac{1}{2}h^2 + \frac{1}{3}L^2 - \frac{1}{4}aL \right) + \frac{1}{3}\rho_w g h^3 \quad (8)$$

따라서 신뢰함수에 포함된 관련 확률변수들의 통계적 특성을 부여하면 상치 콘크리트의 전도에 대한 신뢰성 해석을 올바르게 수행할 수 있다.

3. 다중 파괴모드 해석 모형

전 절에서 제시된 각각의 파괴모드에 대한 신뢰함수와 파괴상태에 대한 사건을 다음 식 (9a) 및 식 (9b)와 같이 정의할 수 있다.

$$g_j(\vec{X}) = f_j(\vec{X}) \quad (9a)$$

$$E_j = g_j(\vec{X}) < 0, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (9b)$$

여기서 $f_j(\vec{X})$ 는 비선형의 형태를 갖는 임의의 함수를 의미한다. Fig. 3에 동일한 공간에 존재할 수 있는 여러 잠재적 파괴모드들의 발생에 대한 개념을 나타내었다. 따라서 해당 시스템에서 하나 이상의 잠재적 파괴모드가 발생할 사건은 다음 식 (10a)와 같이 정의되며, 해당 시스템이 파괴될 확률은 다음 식 (10b)로 부터 산정할 수 있다.

$$E = E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_N \quad (10a)$$

$$P_f = \int \dots \int_{(E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_N)} f_{\vec{X}}(\vec{X}) d\vec{X} \quad (10b)$$

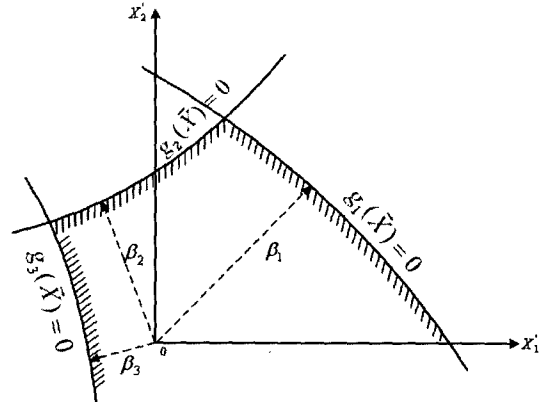


Fig. 3. Multiple modes of failure.

여기서 $f_{\vec{X}}(\vec{X})$ 는 결합확률밀도함수(joint probability density function)이다. 따라서 식 (10)을 이용하면 이론적으로 다중 파괴모드에 대한 신뢰성 해석을 수행할 수 있다. 그러나 식 (10)을 수학적으로, 수치적으로도 해석한다는 것은 거의 불가능하다. 이를 해결하기 위한 여러 가지 근사법들이 제안되었다. 따라서 이하에 현재까지 제시된 근사법, 일차해석법 및 이차해석법 그리고 PNET에 대하여 설명하겠다. 이들 대부분의 다중 파괴모드 해석법에서는 시스템의 파괴확률이 발생될 수 있는 상한치(upper bound)와 하한치(lower bound)를 정의하고 있다. 따라서 이들 다중 파괴모드 해석에서는 어떻게 하면 상하-한치의 간격을 최대한으로 줄일 수 있느냐 하는 것이 연구의 핵심이 된다.

앞에서 언급된 잠재적 파괴모드들이 양의 상관성을 갖는다고 가정하고, Bayes의 개념을 사용하게 되면, 일차해석법에 의하여 다중 파괴모드의 파괴확률을 산정할 수 있는 다음 식 (11)을 얻을 수 있다(Ang & Tang, 1984).

$$\text{Max}_j (P_{f_j}) \leq P_f \leq 1 - \prod_{j=1}^N (1 - P_{f_j}) \quad (11)$$

여기서 P_{f_j} 는 j 번째 단일 파괴모드에 의하여 산정된 파괴확률을 의미하며, 임의의 신뢰성 해석 기법을 이용하면 쉽게 구할 수 있다. 통계적으로 식 (11)의 좌-우변은 각각 파괴모드 간 상관성이 완전한 경우와 독립인 경우에 해당한다. 따라서 일차해석법으로는 임의의 상관성에 대한 해석이 불가능하다. 따라서 이하에 임의의 상관성을 해석할 수 있는 방법을 제시하였다.

다중 파괴모드 해석법 중에서 파괴모드간의 상관성을 해석할 수 있는 모형이 이차해석법이다. 일차해석법에서 사용되었던 식 (9)를 이용하면 이차해석법에 의한 파괴확

들은 다음 식 (12)에 의하여 산정될 수 있다(Ang & Tang, 1984; 이철웅, 2007).

$$P_{f_i} + \text{Max} \left[\sum_{i=2}^N \left\{ P_{f_i} - \sum_{j=1}^{i-1} P(E_i E_j)_L \right\}, 0 \right] \leq P_f \leq \sum_{i=1}^N P_{f_i} - \sum_{i=2, j < i}^N \text{Max}[P(E_i E_j)_U] \quad (12)$$

여기서 $P_{f_i} = P(E_i)$ 는 단일 파괴모드로부터 산정된 i 번째 파괴모드의 파괴확률이다. 따라서 $P(E_i E_j)$ 는 i 번째 파괴모드와 j 번째 파괴모드가 동시에 발생할 확률이다. 따라서 식 (12)를 이용하여 다중 파괴모드의 파괴확률을 산정하기 위해서는 먼저 각 파괴모드에 대한 파괴확률과 $P(E_i E_j)$ 를 계산해야만 한다. 이는 다중 파괴모드를 해석하기 위해서는 고려 중인 모든 단일 파괴모드에 대한 신뢰성 해석이 먼저 수행되어야 한다는 것을 의미한다. 즉, 각 파괴모드의 파괴확률과 확률변수들의 영향계수가 필요하다.

먼저 식 (12)의 좌우변에 있는 i 번째 파괴모드와 j 번째 파괴모드가 동시에 발생할 파괴확률, $P(E_i E_j)$ 는 각각 다음 식 (13a) 및 식 (13b)와 같이 정의된다.

$$P(E_i E_j)_L = P(A) + P(B) \quad (13a)$$

$$P(E_i E_j)_U = \text{Max}\{P(A), P(B)\} \quad (13b)$$

또한 $P(A)$ 와 $P(B)$ 는 다음 식 (14)와 같이 파괴모드간의 상관성이 고려될 수 있도록 정의된다.

$$P(A) = \Phi(-\beta_i) \Phi \left(\frac{\beta_j - \rho_{ij} \beta_i}{\sqrt{1 - \rho_{ij}^2}} \right) \quad (14a)$$

$$P(B) = \Phi(-\beta_j) \Phi \left(\frac{\beta_i - \rho_{ij} \beta_j}{\sqrt{1 - \rho_{ij}^2}} \right) \quad (14b)$$

여기서 ρ_{ij} 는 i 번째 파괴모드와 j 번째 파괴모드 간의 상관계수로서, 파괴점에서 접선면의 방향여현(direction cosine)을 사용하면 쉽게 구할 수 있다. 또한 β_i 는 단일 파괴모드 개념으로 해석된 i 번째 파괴모드의 신뢰성 지수(reliability index)로 표준정규분포함수, $\Phi(x)$ 에 의하여 다음 식 (15)와 같이 정의된다.

$$P_{f_i} = \Phi(-\beta_i) \quad (15)$$

마지막으로 상관계수를 이용하여 다중 파괴모드를 해석할 수 있는 또 다른 해석법이 PNET이다. 이 해석법은 일·이차해석법과 다르게 다중 파괴모드의 대표 파괴확률을 정

량적으로 산정하는 기법이다. PNET 해석법은 다음과 같은 기본 전제에 따라 그 개념이 수립되었다. 임의의 두 파괴모드로부터 계산된 상관계수, ρ_{ij} 가 임의로 주어진 상관계수(demarcating correlation), j 보다 크면 완전한 상관성을 갖는다고 가정하며, 그때 j 번째 파괴모드는 i 번째 파괴모드에 의하여 대표된다고 정의한다. 즉, i 번째 파괴모드의 파괴확률만이 다중 파괴모드의 파괴확률 산정에 고려된다. 그 반대의 경우는 두 파괴모드가 독립이라고 가정하여, 다중 파괴모드의 파괴확률 산정에 고려되지 않는다. 이와 같은 전제를 수학적으로 나타내면 다음 식 (16)과 같이 정의된다.

$$P_f = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - P_{f_j}) \quad (16)$$

여기서 M 은 $\rho_{ij} > \rho_0$ 의 관계를 만족하는 대표 단일 파괴모드의 수를 의미한다. 따라서 PNET를 이용하여 경사제의 다중 파괴모드를 해석하기 위해서는 전 절에서 수립된 각 파괴모드 간의 상관성에 대한 분석이 먼저 이루어져야 한다.

4. 신뢰성 해석 결과

다중 파괴모드에 대한 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 먼저 2절에서 수립된 각각의 단일 파괴모드에 대한 해석이 선행되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 AFDA (Approximate Full Distribution Approach) 신뢰성 해석법을 개발하였다. 이철웅(2000, 2001, 2003, 2004)에 자세히 언급되었듯이 AFDA는 신뢰함수가 비선형이며, 임의의 분포함수를 따르는 확률변수들을 포함하는 경우에도 올바르게 신뢰성 해석을 수행할 수 있는 기법이다. 이하에 먼저 AFDA 신뢰성 해석법에 의하여 수행된 각각의 단일 파괴모드에 대한 해석 결과를 제시하고, 그 결과들을 이용하여 산정된 다중 파괴모드의 신뢰성 해석 결과를 제시하겠다.

먼저 피복재의 안정성에 대한 신뢰성 해석 결과이다. 신뢰성 해석에 사용된 각 확률변수들의 통계적 특성과 확률분포함수들을 Table 1에 제시하였다. 이때 파괴분포는 극치분포의 하나인 다음 식 (17)의 Weibull 분포를 사용하였으며, 그 외 다른 확률변수들은 CIAD(1985)와 동일하게 정규분포를 따른다고 가정하였다.

$$F_{H_s}(H_s) = 1 - e^{-[(H_s - B)/A]^k} \quad (17)$$

여기서 A 는 축척계수(scale parameter), B 는 위치계수

Table 1. Statistical properties and distributions of random variables for armor units

Random variable	Mean	Standard Deviation	Distribution
Δ	1.34	0.027	Normal
$D_n(x)$	2.73	0.055	Normal
K_1	1.82	0.100	Normal
$H_s(m)$	$A = 0.986, B = 3.90, k = 1.0$		Weibull
$FH_s(m)$	0.00	0.70	Normal

Table 2. Results of reliability analysis for armor units

Random variable	Probability of failure of armor units		Influence factor
	Present	CIAD(1985)	
Δ			0.005
$D_n(x)$			0.005
K_1	0.0783	0.079	0.037
$H_s(m)$			0.819
$FH_s(m)$			0.134

Table 4. Results of reliability analysis for front berm

Random variable	Probability of failure of front berm		Influence factor
	Present	CIAD(1985)	
Δ			0.005
$D_n(x)$			0.029
K_1	0.0104	0.011	0.114
$H_s(m)$			0.785
$FH_s(m)$			0.068

(location parameter), 그리고 k 는 형상계수(shape parameter)이다. Table 1에 제시된 자료들은 CIAD(1985)에 제시된 것들로 본 연구에서도 동일하게 사용하였다. 이는 본 연구의 신뢰성 해석 결과를 CIAD(1985)의 결과와 비교하여, 본 연구에서 수립된 AFDA 신뢰성 해석 기법을 검증하기 위함이다. 신뢰성 해석에서 얻어진 결과들을 Table 2에 제시하였다. 파괴확률 뿐만 아니라 각 확률변수들의 영향계수(influence factor)가 함께 제시되었다. 쉽게 알 수 있듯이 CIAD(1985)에서 제시된 파괴확률과 본 연구에서 산정한 파괴확률이 거의 일치하고 있다. 이는 본 연구에서 개발된 AFDA 신뢰성 해석 기법이 올바르게 수립되었음을 의미한다. 한편 각 확률변수들의 파괴확률에 미치는 영향의 정도를 살펴보면, 사고와 관련된 확률변수가 제일 크고, 경험식의 불확실성, 피복재의 재질적·기하학적 특성 순으로 나타나고 있다. 이와 같은 영향계수(influence factor)의 값들은 3절에서 언급된 바와 같이 다중 파괴모드의 파괴모드 간 상관계수를 산정하는데 이용된다.

동일한 과정을 거쳐 전면 소단에 대한 신뢰성 해석이

식 (3)을 이용하여 수행되었다. 또한 신뢰성 해석을 위해 사용된 각 확률변수의 통계적 특성과 분포함수들이 Table 3에 제시되었다. 전면 소단의 안정성에 대한 신뢰성 해석 결과를 Table 4에 제시하였다. 파괴확률과 각 확률변수들의 영향계수가 제시되었다. 파괴확률을 동일한 조건에서 수행된 CIAD(1985)의 결과와 비교하였는데 잘 일치하고 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 전면 소단에 대한 AFDA 신뢰성 해석 기법도 올바르게 수립되었다. 한편 각 확률변수들의 파괴확률에 미치는 영향의 정도를 살펴보면 앞의 결과와 유사하게 사고가 제일 크고, 경험식의 불확실성 등의 순으로 나타났다. 특히 Table 2의 결과와 다른 점은 파괴확률에 미치는 경험식의 불확실성에 따른 영향이 사고와 관련된 변수, FH_s 의 것보다 크게 나타나고 있다는 것이다. 이는 경험식에 많은 불확실성이 내포되었다는 것을 의미한다. 피복재의 적정중량 산정 식은 많은 실험 자료를 바탕으로 유도되었으나, 본 연구에서 사용한 소단의 안정성에 대한 경험식 (2)는 상대적으로 제한된 실험 자료를 바탕으로 얻어졌다. 이와 같은 영향이 신뢰성 해석에서 그대로 나타나고 있는 것이다.

Table 3. Statistical properties and distributions of random variables for front berm

Random variable	Mean	Standard Deviation	Distribution
Δ	1.34	0.027	Normal
$D_n(x)$	1.69	0.085	Normal
K_1	4.00	0.800	Normal
$H_s(m)$	$A = 0.986, B = 3.90, k = 1.0$		Weibull
$FH_s(m)$	0.00	0.70	Normal

Table 5. Statistical properties and distributions of random variables for sliding and overturning of crest structures

Random variable	Mean	Standard Deviation	Distribution
f	0.85	0.085	Normal
a (m)	8.75	0.175	Normal
W (t)	165.138	4.954	Normal
h (m)	8.75	0.175	Normal
L (m)	15.1	0.302	Normal
α	4.00	0.800	Normal
γ_w (t/m^3)	1.03	0.0103	Normal
H_s (m)	$A = 0.986, B = 3.90, k = 1.0$		Weibull
FH_s (m)	0.00	0.70	Normal

Table 6. Results of reliability analysis for sliding and overturning of crest structures

Random variable	Probability of failure				Influence factor	
	Sliding		Overturning		Sliding	Overturning
	Present	CIAD(1985)	Present	CIAD(1985)		
f					0.0428	-
a					-	0.0037
W					0.0060	0.0057
h					0.0002	0.0006
L	0.0167	0.0124	0.0184	0.0129	0.0001	0.0013
α					0.0036	0.0037
γ_w					0.8683	0.9029
H_s					0.0000	0.0000
FH_s					0.0790	0.0820

한편 이미 전 절에서 언급되었듯이 본 연구에서는 경사제의 피복층과 소단에 거치되는 피복재의 안정성 뿐만 아니라 경사제 상부에 설치된 상치 콘크리트 구조물의 활동과 전도에 대한 신뢰성 해석도 수행되었다. 활동에 대한 신뢰함수는 식 (6)이며, 전도에 대한 신뢰함수는 식 (8)이다. 신뢰성 해석에 사용된 이들 신뢰함수와 관련된 확률변수들의 통계적 특성과 분포함수를 Table 5에 제시하였다. 또한 본 연구에서 개발된 AFDA에 의하여 산정된 신뢰성 해석 결과를 CIAD(1985)의 결과와 함께 Table 6에 제시하였다. 활동과 전도 모두에서 파괴확률이 약간 차이를 보이고 있으나, 이는 파괴를 고려하는 방법의 차이에 기인한 것이다. 즉, CIAD(1985)에서는 파괴를 결정론적 상수로 고려하였으나, 본 연구에서는 이를 확률변수로 고려하였다. 따라서 본 연구에서 산정된 파괴확률이 약간 크게 나타나지만 정량적인 크기는 전반적으로 만족할 만한 수준이다. 각 확률변수들의 파괴확률에 미치는 영향의 정도를 살펴보면, 활동 및 전도 모두에서 파괴와 관련된 변수의 영향이 가장 크게 나타나고 있다. 특히 활동 파괴 모드에서는 마찰계수의 영향이 세 번째로 크게 나타나고 있다. 그러나 전도에서는 다른 확률변수의 영향 정도가 상

치 콘크리트의 높이를 제외하고는 거의 동일한 수준으로 나타나고 있다. 한편 상치 콘크리트의 길이, L 에 대한 영향이 활동에서 보다 전도에서 더 크게 나타나고 있는데, 이는 동일한 확률변수라도 파괴모드에 따라 그 영향의 정도가 다르게 나타날 수 있다는 것을 의미한다. 이와 같은 분석은 결정론적 기법에서는 해석할 수 없는 것들이다.

한편 이장에서 얻어진 단일 파괴모드에 대한 결과들을 이용하여 경사제의 다중 파괴모드에 대한 해석을 수행하였다. 다중 파괴모드 해석법은 모두 세 가지로 이미 3절에서 설명한 일차해석법, 이차해석법 그리고 PNET 해석법이다. 먼저 일차해석법에 의한 경사제의 다중 파괴모드 해석 결과를 Table 7에 제시하였다. CIAD(1985)의 결과도 함께 제시하였는데 두 결과가 비교적 잘 일치하고 있다. Table 7에 의하면 다중 파괴모드로 해석 할 경우 경사제의 안정성을 위협하는 파괴확률은 8%에서 12% 사이이다. 즉, 각 파괴모드간의 상관성이 전혀 없는 독립인 경우에는 파괴확률이 12%이고, 각 파괴모드간의 상관성이 완전한 경우에는 8%가 된다는 의미이다. 현재까지 나타난 다중 파괴모드 해석 결과에 의하면 피복재의 안정성에 대한 단일 파괴모드만을 이용하여 경사제의 안정성을

Table 7. Comparison of results of reliability analysis of multiple failure modes for rubble-mound breakwaters calculated by Eq. (11)

Uni-modal bounds	Probability of failure	
	Present	CIAD(1985)
Lower bound	0.0783	0.0760
Upper bound	0.1238	0.1123

평가하는 경우는 다중 파괴모드 해석에서 얻어진 파괴확률의 최소치를 산정하는 것이 된다. 그러나 일차해석법에서는 각 파괴모드간의 상관성을 고려하지 않았기 때문에 파괴확률이 과대 또는 과소평가될 가능성을 배제할 수 없다.

따라서 일차해석법에서는 분석할 수 없었던 각 파괴모드 간의 상관성을 해석하기 위하여 이차해석법을 적용하였다. 먼저 각 파괴모드 간의 상관계수를 Table 8에 제시하였다. 단일 파괴모드에 대한 각각의 신뢰성 해석 결과, 영향계수를 이용하여 상관계수를 산정하였다. Table 8의 상관계수를 보면 전반적으로 본 연구에서 해석한 네 개의 파괴모드들은 각각의 파괴모드에 대하여 높은 상관성을 가지고 있다. 특히 상치 콘크리트의 활동과 전도에 대한 상관성이 제일 높게 나타나고 있다. 이와 같은 상관계수를 가지고 다중 파괴모드에 대한 파괴확률을 직접 산정하기 전에 먼저 식 (13)을 이용하여 각 파괴모드 간의 동시 발생 파괴확률을 계산하여 Table 9에 제시하였다. Table 9에 제시된 결과는 각각 식 (13a) 및 (13b)에 의하여 산정된 값들이다. 결과에 의하면 피복재의 안정성에 대한 파

Table 10. Probability of failure of multiple failure modes for rubble-mound breakwaters calculated by Eq. (12)

Method	Probability of failure	
	Lower bound	Upper bound
Bi-modal bounds	0.04767	0.07945
PNET	0.07827	

괴모드와 상치 콘크리트의 안정성에 대한 전도 및 활동 그리고 전면 소단의 파괴모드가 동시 발생할 확률이 크게 나타났다. 이는 상치 콘크리트의 안정성과 소단의 안정성이 피복재의 안정성에 어느 정도 영향을 준다는 것을 의미하는 것이다. 마지막으로 Table 9의 결과를 가지고 다중 파괴모드 해석을 수행하여 경사제의 안정성에 대한 파괴확률을 계산하였다. 산정된 결과를 PNET의 결과와 함께 Table 10에 제시하였다. PNET에서 $\rho_0 = 0.6$ 를 적용하였는데, 이는 단일 파괴모드에 대한 파괴확률의 정량적 크기에 따라 제시된 기준을 적용한 것이다(Ang & Tang, 1984). 본 해석에서는 식 (16)에서 설명되었듯이 피복재의 안정성에 대한 파괴모드가 다른 모든 파괴모드를 대표한다. 따라서 피복재의 안정성에 대한 단일 파괴모드의 파괴확률이 경사제 제체의 시스템적 안정성을 대표하게 된다. 한편 이차해석법에 의한 해석 결과를 보면, 경사제의 안정성을 위협하는 파괴확률이 약 5%에서 8% 정도임을 알 수 있다. 일차해석법에 의한 결과와 비교하면 파괴확률이 상대적으로 작게 나타나고 있다. 특히 주목할 점은 이차해석법에 의하여 산정된 파괴확률의 최대치가 일차해석법의 최소치보다 약간 크다는 것이다. 이는 파괴모드간의 상관성에 따른 영향임을 쉽게 알 수 있다.

Table 8. Correlation coefficient between multiple modes of failure

Failure mode	Armor units	Front berm	Sliding of crest structure	Overturning of crest structure
Armor units	1.000	0.914	0.946	0.964
Front berm	0.914	1.000	0.899	0.916
Sliding of crest structure	0.946	0.899	1.000	0.976
Overturning of crest structure	0.964	0.916	0.976	1.000

Table 9. Lower and upper bound of simultaneous failure probabilities between multiple failure modes for rubble-mound breakwaters calculated by Eq. (13)

Failure mode	Armor units	Front berm	Sliding of crest structure	Overturning of crest structure
Armor units	-	0.00996 0.01044	0.01613 0.01671	0.01818 0.01843
Front berm	-	-	0.00473 0.00776	0.00551 0.00847
Sliding of crest structure	-	-	-	0.00800 0.01425
Overturning of crest structure	-	-	-	-

최대치를 기준으로 다중 파괴모드 해석법의 결과를 비교하면 일차해석법의 결과는 약간 파괴확률을 과다 추정하는 경향이 있으며, 이차해석법과 PNET의 결과는 유사하게 나타나고 있다. 따라서 다중 파괴모드를 해석할 때는 각 파괴모드간의 상관성을 고려할 수 있는 이차해석법이나 PNET를 이용하는 것이 바람직하다. 마지막으로 이 상에서 제시된 다중 파괴모드 해석 결과를 보면 다음의 두 가지 중요한 사항을 알 수 있다. 먼저 잠재적 파괴모드 중 어느 파괴모드가 주 파괴모드인지를 판정할 수 있다. 본 연구에서는 피복재의 안정성에 대한 단일 파괴모드를 경사제 체체의 시스템적 안정성의 주 파괴모드로 고려할 수 있다. 따라서 이전에 피복재의 안정성에 대한 단일 파괴모드로 연구된 결과들은 경사제에서 발생될 수 있는 많은 잠재적 파괴모드 중 주 파괴모드에 대한 해석으로 생각할 수 있다. 따라서 다중 파괴모드를 해석하게 되면 잠재적 파괴모드에 대한 많은 정보를 이용하여 어느 파괴모드가 주 파괴모드가 되는지를 쉽게 파악할 수 있다. 다른 하나는 파괴에 따른 영향이 상대적으로 큰 중요한 경사식 구조물인 경우는 단일 파괴모드 개념 보다는 다중 파괴모드로 경사제 체체의 안정성을 평가해야 한다는 것이다. 본 연구에서 대상으로 한 경사제 체체의 안정성에 대한 적용에서는 다중 파괴모드 해석으로부터 얻어진 파괴확률이 주 단일 파괴모드, 즉, 피복재의 안정성에 대한 파괴확률과 미소한 차이를 보이고 있다. 비록 약간이지만 파괴확률의 최대치가 단일 파괴모드의 값보다 증가했다. 이는 파괴모드간의 상관성에 기인한 것으로 해석할 수 있다. 따라서 다중 파괴모드로 해석하게 되면 단일 파괴모드로는 해석할 수 없는 파괴모드간의 상관성에 기인하는 파괴확률의 추가적인 발생 가능성을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

경사제 체체의 시스템적 안정성을 해석할 수 있는 다중 파괴모드 해석법이 제시되었다. 다중 파괴모드를 수행하기 위하여 경사제의 안정성과 관련된 네 개의 단일 파괴모드에 대한 정의와 해석이 이루어졌다. 하나는 경사제 전면에 거치된 피복재의 안정성과 관련된 파괴모드이며, 다른 하나는 전면 해저에 거치된 소단의 안정성과 관련된 파괴모드이다. 한편 세 번째, 네번째 파괴모드는 경사제 상단에 거치되는 상치 콘크리트 구조물과 관련된 것으로, 상치 콘크리트의 활동 및 전도에 대한 것이다. 여

러 가지 파괴모드가 있지만 경사제의 안정성 측면이나 기능성 측면에서도 매우 중요하다고 생각되는 파괴모드를 선택하였다. 또한 단일 파괴모드간의 상관성을 해석하기 위해서 세 가지, 즉, 일차해석법, 이차해석법 그리고 PNET의 다중 파괴모드 모형이 사용되었다.

각각의 단일 파괴모드에 대한 신뢰함수와 AFDA 신뢰성 해석 모형을 개발하였으며, 또한 CIAD(1985)의 결과와 비교하여 만족스럽게 검증하였다. 각각의 단일 파괴모드에 대한 신뢰성 해석에서는 파괴확률 뿐만 아니라 파괴확률에 영향을 미치는 각 확률변수의 영향계수가 산정되었다. 각 파괴모드로부터 산정된 파괴확률의 크기는 피복재의 안정성, 상치 콘크리트의 전도, 활동 그리고 전면 소단에 대한 파괴모드 순으로 크게 나타났다. 또한 파괴확률에 미치는 확률변수들의 영향분석에 의하면 전반적으로 파고와 관련된 확률변수의 영향이 제일 크게 나타났다.

한편 단일 파괴모드에 대한 결과들을 이용하여 경사제의 다중 파괴모드에 대한 해석을 수행하였다. 먼저 일차해석법에 의한 결과를 제시하였으며, 다음으로 이차해석법 및 PNET에 대한 결과를 제시하였다. 최대치를 기준으로 다중 파괴모드 해석법의 결과를 비교하면 일차해석법의 결과는 약간 파괴확률을 과다 추정하는 경향이 있으며, 이차해석법과 PNET의 결과는 유사하게 나타나고 있다. 따라서 다중 파괴모드를 해석할 때는 각 파괴모드간의 상관성을 고려할 수 있는 이차해석법이나 PNET를 이용하는 것이 바람직하다. 또한 다중 파괴모드를 해석하게 되면 잠재적 파괴모드에 대한 많은 정보를 이용하여 어느 파괴모드가 주 파괴모드가 되는지를 쉽게 파악할 수 있다. 본 연구에서는 피복재의 안정성에 대한 단일 파괴모드를 경사제 안정성 해석의 주 파괴모드로 고려할 수 있다. 마지막으로 파괴에 따른 영향이 상대적으로 큰 중요한 경사식 구조물인 경우는 단일 파괴모드 개념 보다는 다중 파괴모드로 경사제의 안정성을 평가해야 한다는 것이다. 본 연구의 경사제의 안정성에 대한 적용에서는 다중 파괴모드 해석으로부터 얻어진 파괴확률이 주 단일 파괴모드, 즉, 피복재의 안정성에 대한 파괴확률과 차이를 보였다. 비록 약간이지만 파괴확률의 최대치가 단일 파괴모드의 값보다 증가했다. 이는 파괴모드간의 상관성에 기인한 것으로 해석할 수 있다. 따라서 다중 파괴모드로 해석하게 되면 단일 파괴모드로는 해석할 수 없는 파괴모드간의 상관성에 기인하는 파괴확률의 추가적인 발생 가능성을 확인할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부 첨단항만기술개발 연구과제중 “항만구조물 신뢰성 설계 개발” 과제의 일부임을 밝히며, 국토해양부 및 한국해양수산진흥원의 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 이철웅 (2007). 소단형 방파제의 안정성에 대한 신뢰성 해석, 한국해양-해양공학회지, 19(5), pp. 399-407.
- 이철웅 (2004). 구조적 안정성을 고려한 콘크리트 피복재의 신뢰성 설계, 한국해양-해양공학회지, 16(3), pp. 142-151.
- 이철웅 (2003). 콘크리트 피복재의 단면파괴에 대한 신뢰성 해석 한국해양-해양공학회지, 15(2), pp. 89-96.
- 이철웅 (2001). 안전계수에 따른 경사제 피복재의 파괴확률, 한국해양-해양공학회지, 13(1), pp.9-17.
- 이철웅 (2000). 경사제 피복재의 신뢰성 해석을 위한 직접 계산법의 개발, 대한토목학회논문집, 20(3-B), pp. 387-397.
- Ang, A.H-S., and Tang, W.H. (1984). Probability concepts in engineering planning and design, John-Wiley & Sons, New York.
- Burcharth, H.F. (2000). Reliability based design of coastal structures. Chapter 6 in Coastal Engineering Manual, Part VI(CEM). Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mis. U.S.
- CIAD (1985). Computer aided evaluation of the reliability of a breakwater design, Final Report CIAD Project Group.
- CIRIA/CUR (1991). Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering, Construction Industry Research and Information Association, Special Publication 83.
- PIANC (1992). Analysis of rubble mound breakwaters, Permanent International Association of Navigation Congresses, Report of Working Group No. 12.
- Stuart, A.J. (1958). Equally correlated variates and structural reliability, J. Royal Stat. Soc., Series B, 20, pp. 373-378.
- Thoft-Christensen, P., and Baker, M.J. (1982). Structural reliability theory and its application, Springer-Verlag, New York.
- Van der Meer, J.W. (1995). Conceptual design of rubble mound breakwaters, Advances in Coastal and Ocean Engineering, Vol. 1, World Scientific, Singapore.

부록: Stuart(1958)의 방법에 의한 다중 파괴모드의 파괴확률 산정

시스템이 비교적 단순한 경우에 다중 파괴모드의 파괴확률을 간단히 산정할 수 있는 해석법을 소개하고자 본 부록을 구성하였다. Stuart(1958)는 임의의 시스템이 n 개의 다중 파괴모드를 가질 때 시스템의 파괴확률을 산정할 수 있는 다음 식 (A1)을 제안하였다.

$$P_f = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} \Phi\left(\frac{\beta_e + \sqrt{\rho}x}{\sqrt{1-\rho}}\right)^n \phi(x) dx \quad (A1)$$

여기서 β_e 는 단일 파괴모드의 신뢰지수, $\Phi(x)$, $\phi(x)$ 는 표준정규분포의 분포 및 밀도함수이며, ρ 는 상관계수이다. 식 (A1)은 다음과 같은 네 가지 조건을 반드시 만족하여야 한다. 먼저 하중은 결정론적 상수이어야 한다. 둘째, 각 파괴모드의 저항력에 대한 통계적 특성은 동일하며 정규분포를 따라야 한다. 셋째, 각 파괴모드의 신뢰지수가 모두 β_e 로 동일해야 한다. 마지막으로 파괴모드 사이의 상관계수, ρ 가 동일해야 한다.

해석하고자 하는 문제를 가장 단순화하기 전에는 실제에서 이상의 조건들을 모두 만족시키기가 어렵다. 본 연구에서 대상으로 하는 경사제의 다중 파괴모드 해석에서도 이 네 가지 조건을 하나도 만족하지 않는다. 그러나 앞에서 언급된 조건 중 첫째와 둘째를 만족한다는 가정 하에 셋째와 넷째의 가정은 다음과 같은 방법으로 만족시킬 수 있다. 먼저 세 번째 가정, 즉, 각 파괴모드의 신뢰지수가 동일해야 한다는 조건은 다음 식 (A2)에 제시된 등가신뢰지수(equivalent reliability index), β_{eq} 개념을 사용하면 쉽게 해결될 수 있다(Thoft-Christensen and Baker, 1982).

$$\Phi(-\beta_{eq}) = 1 - [1 - \Phi(-\beta_1)][1 - \Phi(-\beta_2)] \dots [1 - \Phi(-\beta_n)] \quad (A2)$$

각 파괴모드에 대한 신뢰지수, β_i 를 이미 알고 있기 때문에 식 (A2)를 이용하면 등가신뢰지수를 계산할 수 있다. 또한 네 번째 가정, 즉, 각 파괴모드 사이의 상관계수가 동일해야 한다는 가정에 대한 것이다. Table 8에 본 연구에서 대상으로 하는 파괴모드간의 상관계수가 계산되었는데, 표에서 볼 수 있듯이 각 파괴모드간의 상관계수가 각기 다르다. Thoft-Christensen and Baker(1982)는 이 문제를 해결하기 위하여 다음 식 (A3)의 평균상관계수(average correlation coefficient) 개념을 도입하였다.

$$\rho_a = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i,j=1}^n \rho_{ij} \quad (A3)$$

즉, 식 (A3)는 각기 다른 파괴모드간의 상관계수의 평균치를 해석하고자 하는 임의의 시스템의 대표 상관계수로 사용한다는 개념이다. 따라서 식 (A2)에서 산정된 등가신뢰지수, β_{eq} 와 식 (A3)의 평균상관계수, ρ_a 를 식 (A1)에 있는 β_e 와 ρ 에 각각 대입하여 적분을 수행하면, 다중파괴모드의 파괴확률을 비교적 쉽게 산정할 수 있다. 이때 첫째와 둘째의 가정은 반드시 만족해야 된다. 비록 첫째와 둘째의 가정이 만족되지는 않지만, 비교적 쉬운 다중파괴모드 해석법을 소개한다는 의미에서 본문에서 제시된 단일 파괴모드에 대한 결과들을 이용하여 경사제의 다중 파괴모드에 Stuart 방법을 적용하여 보았다.

먼저 파괴모드의 수, $n=4$ 이고, Table 8에 제시된 상관계수를 가지고 식 (A3)에 의하여 산정된 평균상관계수, $\rho_a=0.936$ 이다. 한편 Table 2, 4 그리고 6에 제시된 파괴확률에 해당하는 각 신뢰지수, $\beta_1=1.417$, $\beta_2=2.311$, $\beta_3=2.128$ 그리고 $\beta_4=2.088$ 이다. 따라서 식 (A2)에 의하면 등가신뢰지수, $\beta_{eq}=1.180$ 이 된다. 이상의 결과를 식 (A1)에 대입하면 다중 파괴모드의 파괴확률을 산정할 수 있다. 식 (A1)에서 상관계수를 독립변수로 놓고 산정된 다중 파괴모드의 파괴확률을 Fig. A1에 제시하였다. 상관계수가 커짐에 따라 파괴확률이 급속히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그림에 의하면 평균상관계수 0.936에 해당하는 파괴확률은 0.173이 된다. 이 결과는 본문에서 제시된 다른 해석법들의 결과들과 큰 차이를 갖는다. 이는 앞에서 언급된 첫째와 둘째 조건들이 경사제의 다중 파괴모드 해석에서는 만족하지 않기 때문이다. 따라서 앞에서 언급된

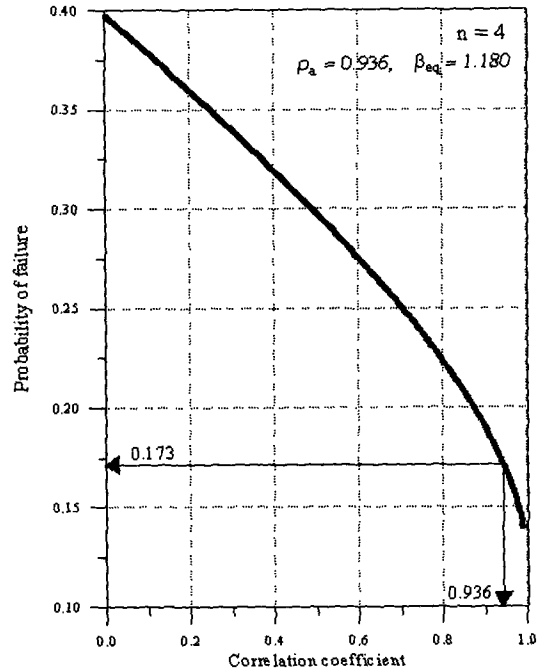


Fig. A1. Probability of failure with respect to correlation coefficient.

조건들을 만족하는 경우에는 식 (A1)~(A3)을 이용하면 본문에서 언급된 해석법보다 간단한 방법으로 다중 파괴모드의 파괴확률을 산정할 수 있다. 또한 Fig. A1에서 볼 수 있듯이 다중 파괴모드에 대한 개념적 이해를 도모할 수 있다. 즉, 다중 파괴모드 해석에 영향을 미치는 각각의 변수에 따른 파괴확률의 거동특성을 파악할 수 있다.