

국내 항만의 방파제 피복 블록의 신뢰성 해석 Reliability analysis of breakwater armor blocks of Korean harbors

김승우¹, 서경덕², 이철웅³, 박동현⁴
 Seung-Woo Kim¹, Kyung-Duck Suh², Cheol-Eung Lee³, Dong-Hun Park⁴

1. 서 론

피복 블록의 종류는 Tetrapod, Cube, Dolos 등 여러 가지가 있지만 국내에서는 시공사례가 가장 많은 Tetrapod 사용을 선호하며 국내 무역항과 연안항의 피복 블록은 대부분 Tetrapod이다. 본 연구에서는 Tetrapod에 대해 신뢰성 해석을 수행하고자 한다.

기존 구조물은 모든 설계변수를 상수로 취급하는 결정론적 설계법으로 계산되었다. 그러나 실제 하중 및 저항변수들은 임의의 상수 값을 가지는 것이 아니라 확률분포의 형태로 존재한다. 신뢰성 설계법은 이러한 확률변수의 불확실성을 고려하여 목표수준에 따라 설계하는 방법이다. 국내에서는 김 등(2005)이 동해항 방파제의 피복 블록에 대해 신뢰성 해석을 수행하였고 조 등(2003)은 울산항, 나로도항, 계마항 방파제의 피복 블록에 대해 파괴확률을 산정한 바 있다. 최근 이철웅(2008)은 방파제 위치에서의 파가 심해파와 같다는 가정 하에 무역항 및 연안항의 경사제 피복블록에 대해 부분안전계수를 산정하였다. 국외에서는 PIANC(1992)가 각 국가별 항만에 대한 신뢰성 해석을 적용한 바 있다. 본 연구에서는 국내 무역항 14곳과 연안항 11곳의 방파제 피복블록에 대하여 신뢰성 해석을 수행하여 파괴확률을 계산하였다.

본 연구에서는 Level 2, AFDA(Approximate Full Distribution Approach) 방법과 Level 3, MCS(Monte-Carlo Simulation) 방법을 사용하여 신뢰성 해석을 수행하였다.

2. 대상구조물의 선정

국내 무역항 및 연안항의 피복블록으로 피복된 방파제 중 수심이 깊은 계간부 단면을 대표단면으로 선택하였다. 본 연구에서 적용된 항만은 무역항 14군데, 연안항 11군데이다. 무역항은 속초항, 옥계항, 목호항, 동해항, 삼척항, 포항항, 울산항, 삼천포항, 통영항, 장승포항, 옥포항, 부산항, 제주항, 그리고 서귀포항이다. 또한 연안항은 주문진항, 후포항, 구룡포항, 울릉항, 홍도항, 부산남항, 나로도항, 애월항, 한림항, 화순항, 그리고 추자항이다. 대표적으로 Fig. 1에 무역항인 목호항을 제시하였다. 각 항만별 단면도로 해양수산부(2007)의 자료를 사용하였다.

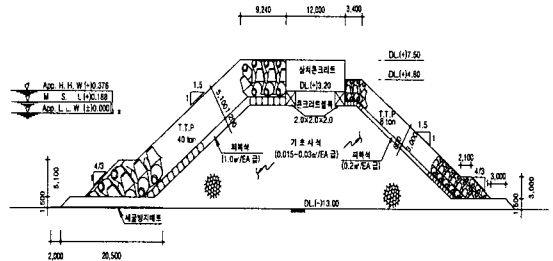


Fig. 1. Cross-section of Sec. 16 in the Mukho breakwater.

3. 설계변수의 통계적 특성치

3.1 심해파고와 주기

심해파 제원은 수산청(1988) 보고서를 사용하

1 발표자: 서울대학교 건설환경공학부 박사과정
 2 서울대학교 건설환경공학부 교수
 3 강원대학교 토목공학과 교수
 4 강원대학교 토목공학과 석사과정

였으며, 이는 국내 무역항 및 연안항의 설계가 대부분 수산청 자료를 이용하였기 때문이다. 심해파고에 대한 단위 년에 대한 극치분포함수는 다음 식 (1)에 정의된 Gumbel 분포를 사용하였다.

$$F(H_0) = \exp[-\exp(-\kappa_0(H_0 - \lambda_0))] \quad (1)$$

여기서 κ_0 는 심해파고 분포의 척도모수이며 λ_0 는 위치모수이다.

심해파고의 사용년수 50년 최대통계량의 평균과 표준편차는 각각 다음 식 (2) 및 (3)과 같다.

$$\mu_{H_0} = \lambda_0 + (\ln 50 + \gamma) / \kappa_0 \quad (2)$$

$$\sigma_{H_0} = \pi / (\kappa_0 \sqrt{6}) \quad (3)$$

여기서 γ 는 오일러 상수(=0.5772)이다. 또한 심해파고의 50년 최대통계량의 변동계수는 다음 식 (4)와 같이 정의된다.

$$COV_{H_0} = \sigma_{H_0} / \mu_{H_0} \quad (4)$$

3.2 방파제 위치에서 파고분포의 모수 추정

신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 파고의 극치 분포가 필요하다. 본 연구에서는 파고분포의 모수를 추정하기 위해 다음 식 (5)와 같이 방파제 위치 파고의 50년 최대통계량 변동계수가 심해파고의 50년 최대통계량 변동계수와 같다는 가정을 사용하였다.

$$COV_{H_s} = COV_{H_0} \quad (5)$$

식 (5)의 가정이 가지는 의미는 심해파고가 천해로 전파하면서 파랑변형을 할 때 평균값이 작아지면서 표준편차도 같이 작아져서 파고의 변동계수가 일정하게 유지된다는 것이다.

따라서 파고의 사용년수 50년 최대통계량의 표준편차와 평균을 각각 식 (6)-(7)과 같이 정의할 수 있다.

$$\sigma_{H_s} = COV_{H_s} \times \mu_{H_s} = \pi / (\kappa \sqrt{6}) \quad (6)$$

$$\mu_{H_s} = \lambda + (\ln 50 + \gamma) / \kappa \quad (7)$$

또한 결정론적 설계법에서 사용하는 재현주기 50년의 파고 H_s 는 Gumbel 분포에서 다음 식 (8)과 같이 방파제 위치 파고의 사용년수 50년 최대통

계량의 mode와 거의 같다.

$$H_s \approx \lambda + \ln 50 / \kappa \quad (8)$$

여기서 κ 와 λ 는 각각 방파제 위치에서 파고분포의 척도 및 위치모수이다. κ 는 식 (7)과 (8)를 식 (6)에 대입하여 구할 수 있고 구해진 κ 를 식 (8)에 다시 대입하면 λ 가 계산된다.

4. 신뢰성 해석

4.1 Hudson 공식

Hudson(1959) 공식을 신뢰함수로 표현하면 식 (9)과 같다.

$$G = A_H D_n \Delta (K_D \cot \alpha)^{1/3} - H_s^T \quad (9)$$

여기서 A_H 는 Hudson 공식 자체가 가지는 불확실성을 나타내는 경험계수이다. H_s^T 의 분포는 년 분포인 $F(H_s)$ 을 T 승한 $[F(H_s)]^T$ 을 이용한다.

Level 2의 AFDA 방법에서는 우선 비정규분포인 파고분포를 Rackwitz-Fiessler 변환법을 이용하여 유사정규분포로 변환해야 한다.

그리고 Table 1의 입력자료를 이용하여 Rackwitz(1976) 알고리즘으로부터 영향계수를 식 (10)과 같이 계산한다.

$$\alpha_i = (\partial G / \partial x_i)_{*} / \sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial G / \partial x_i)^2} \quad (10)$$

여기서 x_i 는 각 설계변수를 의미하고 윗첨자 '은 설계변수를 정규화 한다는 뜻이다. 그리고 아래첨자 *는 설계점을 의미한다.

설계점 P 에서 확률변수 X_i 는 다음 식과 같다.

$$X_i|_P = \sigma_{X_i} X'_i + \mu_{X_i} = \mu_{X_i} - \alpha_i \sigma_{X_i} \beta \quad (11)$$

Table 1. Statistical characteristics of design variables for Hudson(1959) formula

| Name /Variable | Mean | Standard deviation | Coeff. of variation | Distri. | |
|----------------|---------------|-----------------------------------|---------------------|---------|--------|
| M | A_H | 1.00 | 0.180 | 0.180 | Normal |
| | Δ | 1.233 | 0.047 | 0.038 | Normal |
| u | D_n | 2.59 | 0.130 | 0.050 | Normal |
| | $\cot \alpha$ | 1.50 | 0.100 | 0.067 | Normal |
| h | K_D | 8.00 | - | - | - |
| | H_s | $\kappa = 0.972, \lambda = 3.284$ | | | Gumbel |

위 식을 신뢰함수인 식 (9)에 대입하여 신뢰함수

$G=0$ 이 될 때의 신뢰도지수를 구한다. 최종 신뢰도지수를 식 (12)에 대입하면 파괴확률 P_f 를 계산할 수 있다.

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (12)$$

여기서 Φ 는 정규분포의 누적분포함수이다.

한편 Level 3 방법은 구조물의 파괴를 정의하는 신뢰함수가 $G(\vec{x})$ 로 주어지고 확률변수들의 결합 확률밀도함수가 $f_{\vec{x}}(\vec{x})$ 와 같을 때, 파괴확률 P_f 를 다음과 같은 다중 적분형으로 정의한다.

$$P_f = \int_{G(\vec{x}) \leq 0} f_{\vec{x}}(\vec{x}) d\vec{x} \quad (13)$$

MCS 방법은 식 (13)과 같이 정의되는 파괴확률을 근사적으로 추정하는 방법이다. 각 확률변수의 분포특성이 반영된 난수(random number)를 추출하여 충분한 수의 확률변수의 표본집단(set)을 생성한 다음, 생성된 각 확률변수의 값을 차례로 신뢰함수에 대입하여 그 값이 0보다 큰지 작은지, 즉 구조물이 안전한지 파괴되는지를 판단한다. 총 N 번의 경우 중 신뢰함수가 0보다 작은 경우가 n_f 번 관측되었다면 파괴확률 P_f 는 다음과 같은 근사식으로 나타내진다.

$$P_f \approx \frac{n_f}{N} \quad (14)$$

4.2 van der Meer 공식

van der Meer(1988) 공식을 신뢰함수로 표현하면 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G = A_v \left(3.75 \frac{N_0^{0.5}}{N^{0.25}} + 0.85 \right) s_{om}^{-0.2} \Delta D_n - H_s \quad (15)$$

여기서 A_v 은 van der Meer 공식 자체가 가지는 불확실성을 나타내는 경험계수이며 평균은 1.0, 표준편차는 0.1을 사용하였다.

계산에 사용한 AFDA 방법과 MCS 방법은 4.1절의 Hudson 공식과 동일하다. 사용년수 50년 일 때 파괴확률, P_f^{50} 을 계산하였고 사용년수 1년의 파괴확률, P_f^1 은 다음 식을 사용하여 산정하였다.

$$P_f^1 = 1 - (1 - P_f^{50})^{1/50} \quad (16)$$

Table 2는 van der Meer 공식의 각 설계변수의 통계적인 특성치이다.

Table 2. Statistical characteristics of design variables for van der Meer(1988) formula

| Name/ Variable | Mean | Standard deviation | Coeff. of variation | Distri. |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------------------|---------|
| A_v | 1.00 | 0.100 | 0.100 | Normal |
| Δ | 1.233 | 0.047 | 0.038 | Normal |
| D_n | 2.59 | 0.130 | 0.050 | Normal |
| N_w | 1000 | 500 | 0.500 | Normal |
| s_{om} | 0.037 | 0.009 | 0.250 | Normal |
| T_s | 13.00 | - | - | - |
| N_o | 0.30 | - | - | - |
| H_s | $\kappa = 0.972, \lambda = 3.284$ | | | Gumbel |

5. 결 과

Table 3은 Hudson 공식을 사용하여 하중과 저항이 같은 최소중량일 때 산정한 각 항만별 피복재의 파괴확률이다. 사용년수는 50년이고 Level 2 방법을 적용했을 때 무역항의 평균 파괴확률은 58%이며 Level 3 방법의 결과는 61%이다. Level에 따른 파괴확률이 큰 차이를 보이지 않으므로 결과에 대한 상호 검증이 되었음을 확인할 수 있다. 두 방법을 평균하면 약 60%의 파괴확률이 계산된다. 즉 무역항은 50년 동안 5%미만의 피해율이 발생할 정량적 가능성이 60%이다.

Table 3. Probability of failure of armor blocks for Hudson formula(1959)

a. Trade harbors

| Name | 1 year | | | 50 years | |
|-------------|---------|-----------|-----------|-----------|-------|
| | Level 2 | Level 3 | Level 2 | Level 3 | |
| | β | $P_f(\%)$ | $P_f(\%)$ | $P_f(\%)$ | |
| Sokcho | 2.123 | 1.69 | 1.85 | 57.43 | 60.65 |
| Okgye | 2.123 | 1.71 | 1.83 | 57.75 | 60.32 |
| Mukho | 2.113 | 1.73 | 1.88 | 58.22 | 61.22 |
| Donghae | 2.113 | 1.73 | 1.88 | 58.22 | 61.22 |
| Samchuk | 2.111 | 1.74 | 1.88 | 58.45 | 61.35 |
| Pohang | 2.111 | 1.74 | 1.87 | 58.37 | 61.10 |
| Ulsan | 2.123 | 1.72 | 1.86 | 58.06 | 60.85 |
| Samchunpo | 2.130 | 1.66 | 1.80 | 56.77 | 59.68 |
| Tongyoung | 2.104 | 1.77 | 1.87 | 58.96 | 61.01 |
| Jangseungpo | 2.106 | 1.76 | 1.87 | 58.76 | 61.03 |
| Okpo | 2.106 | 1.76 | 1.87 | 58.76 | 61.03 |
| Busan | 2.111 | 1.74 | 1.88 | 58.49 | 61.30 |
| Jeju | 2.125 | 1.68 | 1.80 | 57.04 | 59.72 |
| Seogwipo | 2.130 | 1.66 | 1.79 | 56.65 | 59.39 |
| μ | 2.120 | 1.72 | 1.85 | 58.00 | 60.71 |
| σ | 0.01 | 0.04 | 0.03 | 0.75 | 0.66 |

b. Coastal harbors

| Name | 1 year | | | 50 years | |
|-----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Level 2 | | Level3 | Level 2 | Level 3 |
| | β | $P_f(\%)$ | $P_f(\%)$ | $P_f(\%)$ | $P_f(\%)$ |
| Jumunjin | 2.123 | 1.71 | 1.86 | 57.75 | 60.79 |
| Hupo | 2.111 | 1.74 | 1.87 | 58.41 | 61.12 |
| Guryongpo | 2.111 | 1.74 | 1.89 | 58.53 | 61.42 |
| Ulleung | 2.123 | 1.70 | 1.85 | 57.67 | 60.72 |
| Hongdo | 2.133 | 1.65 | 1.78 | 56.49 | 59.35 |
| N. Busan | 2.109 | 1.75 | 1.88 | 58.57 | 61.29 |
| Narodo | 2.123 | 1.70 | 1.82 | 57.47 | 60.02 |
| Aewol | 2.128 | 1.67 | 1.80 | 57.00 | 59.67 |
| Hanlim | 2.123 | 1.70 | 1.82 | 57.63 | 60.04 |
| Hwasun | 2.140 | 1.62 | 1.75 | 55.78 | 58.57 |
| Chuja | 2.120 | 1.72 | 1.85 | 57.90 | 60.76 |
| μ | 2.120 | 1.70 | 1.83 | 57.56 | 60.34 |
| σ | 0.01 | 0.04 | 0.04 | 0.87 | 0.89 |

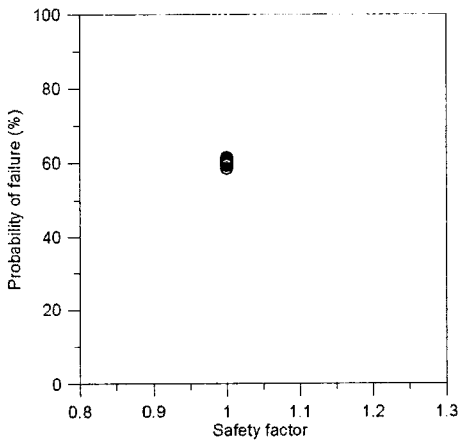


Fig. 2. Probability of failure in trade and coastal harbors for Hudson formula(1959) with service period T=50 yrs.

이 파괴확률을 단위년으로 환산하면 약 2% 정도이다. 매년 2%의 파괴확률을 갖는 구조물의 사용연수 50년 동안의 파괴확률은 60%가 된다(Fig. 2).

연안항의 경우에 사용연수가 50년일 때 Level 2의 평균 파괴확률은 약 58%이며 Level 3은 약 60%이다. 두 방법 모두 표준편차는 0.9 %정도로 편차가 크지 않다. 따라서 현행 설계법으로 설계된 기존 구조물에 대한 신뢰성 해석 결과로 얻어지는 파괴확률은 서로 간의 차이가 크지 않은 일정한 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

결정론적 설계법으로 설계된 피복블록의 파괴확률을 계산함으로써 안정성 평가를 위한 자료를 마련하게 되었다. Hudson 공식을 이용하여 하중

과 저항이 같은 최소중량으로 설계된 경우에 사용연수 50년 동안의 국내 무역항 및 연안항의 파괴확률은 약 60% 정도인 것을 확인했다. 또한 단위년 동안의 파괴확률은 약 2%이다.

한편 van der Meer 공식을 이용하여 하중과 저항이 같은 최소중량으로 설계된 경우의 파괴확률을 살펴보았다. Hudson 공식과 동일하게 약 60% 내외이다. 같은 공식에서 단위년 동안의 파괴확률은 약 2% 내외이다.

따라서 국내 무역항 및 연안항의 방파제 피복블록은 사용연수 50년 동안에 약 60% 정도의 파괴확률을 가진다. 이 결과는 향후 방파제 피복블록의 목표파괴확률을 결정하는 중요한 자료로 사용될 것이다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부 및 한국해양수산진흥원 지원과제인 '항만구조물 신뢰성 설계법 개발' 연구과제(PM48400)와 서울대학교 BK21 안전하고 지속가능한 사회기반건설 사업단의 지원 하에 연구가 수행되었습니다.

참고문헌

김승우, 서경덕, 오영민 (2005). 동해항 방파제를 대상으로 한 신뢰성 설계법의 비교 연구. 1. 피복 블록의 안정성, 한국해양공학회지, 17(3), 188-201.

수산청(1988). 해역별(동해남해) 심해파 추정 보고서.

이철웅(2008). 피복재의 신뢰성 해석과 부분안전계수 산정, 제2회 항만구조물 신뢰성 설계법 기술교육 워크샵, 항만구조물 신뢰성 설계 연구단, 도서출판 사이이알, 145-183.

조용준, 이재일, 권혁주, 유하상(2003). 추계학적 호안구조물 설계기법, 한국해양공학발표논문집, 14, 328-334.

해양수산부(2007). 항만시설물 안정성 평가 및 보수보강 방안 수립 1차년도 보고서, 세광종합기술단 및 해인ENC.

Hudson, R. Y. (1959). Laboratory investigation of rubble mound breakwaters, J. Waterway and Harbors Division, ASCE, 85(WW3), 93-121.

PIANC (1992). Analysis of rubble mound breakwaters, Rep. of Working Group No. 1 of PTC II, Belgium.

Rackwitz, R. (1976). Practical probabilistic approach to design, Bulletin 112, Comite European du Beton, Paris, France.

van der Meer, J. W. (1988). Stability of Cubes, Tetrapods and Accropods, Proc. of the Breakwaters '88 Conference; Design of Breakwaters, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, London, 71-80.