

## 경사제 피복재의 유지관리를 위한 추계학적 확률모형

이철응\* · 김상욱\*\*

Lee, Cheol-Eung\*, Kim, Sang Ug\*\*

# Stochastic Probability Model for Preventive Management of Armor Units of Rubble-Mound Breakwaters

### ABSTRACT

A stochastic probability model based on the non-homogeneous Poisson process is represented that can correctly analyze the time-dependent linear and nonlinear behaviors of total damage over the occurrence process of loads. Introducing several types of damage intensity functions, the probability of failure and the total damage with respect to mean time to failure has been investigated in detail. Taking particularly the limit state to be the random variables followed with a distribution function, the uncertainty of that would be taken into consideration in this paper. In addition, the stochastic probability model has been straightforwardly applied to the rubble-mound breakwaters with the definition of damage level about the erosion of armor units. The probability of failure and the nonlinear total damage with respect to mean time to failure has been analyzed with the damage intensity functions for armor units estimated by fitting the expected total damage to the experimental datum. Based on the present results from the stochastic probability model, the preventive management for the armor units of the rubble-mound breakwaters would be suggested to make a decision on the repairing time and the minimum amounts repaired quantitatively.

**Key words :** Stochastic probability model, Total damage, Armor units of rubble-mound breakwaters, Probability of failure, Preventive management.

### 초 록

하중 발생과정에 따른 누적피해의 선형뿐만 아니라 비선형 거동을 해석할 수 있는 추계학적 확률모형이 수립되었다. 여러 종류의 피해강도함수를 도입하여 내용년수의 파괴확률과 비선형 누적피해의 거동이 자세히 해석되었다. 특히 본 연구에서는 저항한계를 임의의 분포함수를 갖는 확률변수로 취급하여 한계상태의 불확실성을 고려하였다. 또한 피복재에 대한 피해수준을 이용하여 처음으로 추계학적 확률모형을 경사제에 적용하였다. 실험 자료와의 비교를 통해 추정된 경사제 피복재에 대해 피해강도함수를 이용하여 내용년수에 따른 파괴확률과 비선형 누적피해의 거동을 해석하였다. 마지막으로 해석 결과를 이용하여 경사제 피복재의 보수·보강 시점과 최소한의 보수·보강규모를 정량적으로 산정할 수 있는 예방적 유지관리 방법을 제시하였다.

**검색어 :** 추계학적 확률모형, 누적피해, 경사제 피복재, 파괴확률, 예방적 유지관리

\* 정희원 · 강원대학교 공과대학 토목공학과 교수 (celee@kangwon.ac.kr)

\*\* 정희원 · 교신저자 · 강원대학교 공과대학 토목공학과 조교수 (Corresponding Author · Assistant Professor, Kangwon National University · sukim70@kangwon.ac.kr)

Received October 17 2012, Revised January 17 2013, Accepted April 5 2013

## 1. 서론

경사제와 같은 항만 구조물은 매년 내습하는 태풍으로 인하여 피해를 입게 된다. 시간이 진행됨에 따라 누적된 피해가 저항력의 한계인 극한한계를 넘게 되면 해당 구조물은 궁극적으로 파괴된다. 그러므로 장래의 환경 변화에 따라 적절한 시점에 일정 규모 이상을 보수·보강을 해야 한다. 유지관리의 목표는 최소의 비용으로 설계 당시 설계기준에 의하여 부여된 구조물의 고유한 성능을 가능하면 최대수준까지 끌어올리는 것이다. 즉, 최적화된 기준으로 어느 시점에 어느 정도의 보수·보강이 이루어져야 하는지를 결정하는 것이다. 이를 위해서는 추계학적 확률모형을 이용하여 사용년수에 따른 구조물의 성능이 얼마인지를 정확히 예측할 수 있어야 한다.

Rosenblueth and Mendoza(1971), Nakagawa(1976), Rosenblueth (1976), Mori and Ellingwood(1994), van Noortwijk and Gelder (1996), van Noortwijk and Klatter(1999), Speijker et al.(2000), van der Weide et al.(2008), Li and Zhao(2010), Sanchez-Silva et al.(2011) 그리고 이철웅(2012) 등은 피해강도가 균일(homogeneous)하다는 가정 하에 PP(Poisson Process)를 이용하여 경사제를 비롯한 다양한 구조물의 누적피해에 대한 추계학적 거동특성을 연구하였다. 최근 van der Weide and Pandey(2011)는 피해강도의 비균일성(non-homogeneous)을 고려할 수 있는 새로운 개념을 제시하였다.

본 연구에서는 이와 같은 비균일 추계학적 확률모형을 경사제에 처음 적용하여 피복재의 사용년수에 따른 누적피해를 예측하고 사용한계와 극한한계의 한계상태별 파괴확률을 산정하였다. 또한 초기 저항력의 크기를 확률변수로 취급하여 van der Weide and Pandey(2011)가 고려하지 못한 한계상태의 불확실성을 고려하였다.

특히 동일한 단면에 대해 시간에 따라 각각 다르게 내습하는 현장관측자료를 활용하는 것은 현재 국내·외에서 현실적으로 어려운 형편이므로, 실험에 의존한 자료를 사용하는 것이 통상적이다. 따라서 본 연구에서도 Melby(1999)의 실험자료와의 비교를 통하여 피복재의 피해강도함수를 올바르게 추정할 수 있었으며, 경사제 피복재의 보수·보강 시점과 최소한의 보수·보강규모를 정량적으로 산정할 수 있는 예방적 유지관리 방법을 제시하였다.

먼저 제 2절에 임의의 저항한계를 초과하는 내용년수의 평균과 사용년수에 따른 누적피해의 확률적 거동특성을 해석할 수 있는 추계학적 확률모형을 수학적으로 수립하였다. 제 3절에서는 다양한 형태의 피해강도함수를 도입하여 구조물의 사용년수에 따른 선형, 비선형 등 누적피해의 거동특성을 비교 분석하였다. 특히 내용년수에 따른 한계상태별 파괴확률과 누적피해를 이용하여 구조물을 올바르게 보수·보강할 수 있는 유지관리 방안을 제시하였다. 제 4절에는 앞에서 수립된 추계학적 확률모형을 처음으로 경사제 피복재에 적용하였다. 마지막으로 제 5절에 결론을 언급하였다.

## 2. 추계학적 확률모형의 수립

구조물을 올바르게 유지관리하기 위해서는 해당 구조물의 내용년수와 사용년수에 따른 누적피해를 정확히 평가하는 것이 필요하다. 전자는 보수·보강 시점을 결정하기 위함이고 후자는 보수·보강의 규모를 결정하기 위함이다. 먼저 내용년수,  $T$ 는 구조물이 그 기능을 올바르게 수행하는 시간으로 정의되는 확률변수이다. 구조물이 그 기능을 올바르게 수행한다는 것은 사용년수,  $t$ 까지의 누적피해가 임의의 저항한계를 초과하지 않았다는 의미이기 때문에 다음 식 (1)이 성립한다(Taylor and Kalin, 1984).

$$E[T] = \int_0^{\infty} \{1 - P_f(t)\} dt \quad (1)$$

여기서  $P_f(t)$ 는 구조물의 사용년수에 따른 누적피해,  $Z(t)$ 가 임의의 저항한계,  $L_s$ 를 초과할 확률로 다음 식 (2)와 같이 정의된다.

$$P_f(t) = P[Z(t) \geq L_s] \quad (2)$$

구조물의 기능성을 평가할 때는 사용한계(serviceability limit)를 저항한계로 사용할 수 있으며, 안정성을 평가할 때는 극한한계(ultimate limit)를 사용하면 된다. 또한 식 (2)에 포함된  $Z(t)$ 는 사용년수에 따른 누적피해로 시간에 따라 발생된 하중을 사용하여 다음 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$Z(t) = \sum_{k=0}^{N(t)} Y_k \quad (3)$$

여기서  $N(t)$ 는 사용년수  $t$ 시간까지 발생한 하중의 개수이며,  $Y_k$ 는  $k$ 번째 하중에 의하여 발생한 피해를 의미하고  $N(t)$ 와 는 독립이다. 따라서 각각의 하중에 의하여 발생한 피해  $Y$ 가 서로 독립이며, 동일한 분포를 가진다는 가정 하에 식 (2)는 다음의 식 (4)와 같이 정의될 수 있으며, 식 (4)의 우변 중  $P[Z(t) \leq L_s | N(t) = n]$ 은  $Z(t)$ 와  $N(t)$ 의 합성(convolution)과정을 통해 식 (5)로 표현될 수 있다.

$$P_f(t) = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} P[Z(t) \leq L_s | N(t) = n] P[N(t) = n] \quad (4)$$

$$P[Z(t) \leq L_s | N(t) = n] = \int_0^{\infty} F_Y^{(n-1)}(L_s - x) dF_Y(x) \quad (5)$$

보수·보강 시점을 결정하는데 중요한 자료로 사용될 수 있는 내용년수의 평균을 산정하기 위해서는 식 (4)에서 나타낸 하중의 발생과정( $N(t)$ )에 따른 누적피해과정( $Z(t)$ )을 해석하여야 하며,

일반적으로 하중 발생과정과 누적피해과정을 어떻게 해석하느냐에 따라 추계학적 확률모형이 구분된다. 즉 최종적인 추계학적 모형은 두 가지의 추계학적 과정인 ‘counting process’와 ‘damage process’로 구성되어야 하는데, 본 연구에서는 이와 같은 추계학적 모형을 하중 발생과정(counting process)은 PP를 따르고, 이에 따른 누적피해과정(damage process)는 지수분포를 따른다고 가정하여 모형을 구성하였다.

따라서 식 (4)와 식 (6)에서 하중 발생과정은 PP (Poisson Process)를 따르고, 각각의 하중에 의하여 발생한 피해,  $Y_k$ 는 균일한 피해강도(damage intensity)  $\lambda$ 를 갖는 지수분포를 따른다고 가정하고,  $t$ 시간까지  $n$ 개의 하중이 발생된다는 조건부 확률에 Bayesian 정리와 전확률법칙(total probability law)을 사용하면 최종적으로 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$P_f(t) = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=n}^{\infty} \left[ \int_0^{\infty} \frac{(\lambda L_S)^k}{k!} e^{-\lambda L_S f} f_{L_S}(x) dx \right] \frac{(\mu t)^n}{n!} e^{-\mu t} \quad (6)$$

여기서  $\mu$ 는 하중 발생율(mean occurrence rate)로 단위시간에 발생하는 하중의 개수를 의미하고,  $f_{L_S}(x)$ 는 저항한계,  $L_S$ 의 불확실성을 고려하기 위하여 도입한 임의의 분포함수이다. 또한 식 (4)에서  $\lambda$ 는 피해 단위의 역수로써, 본 연구에서는 무차원의 피해수준을 사용하였기 때문에 물리적 단위는 무차원이다.

최종적으로 식 (6)을 식 (1)에 대입하면 보수·보강의 시기와 관련된 내용년수의 평균을 산정할 수 있다. 한편 올바른 유지관리를 위해서는 보수·보강의 시기 뿐만 아니라 보수·보강의 규모도 합리적으로 결정해야 한다. 이를 위해서는 사용년수에 따른 누적피해의 통계적 특성을 알아야 한다. 이를 위해 식 (3)을 이용하면 다음 식 (7)과 같이 사용년수에 따른 누적피해의 평균과 분산을 정의할 수 있다(Taylor and Kalin, 1984).

$$E[Z(t)] = E[Y_k] E[N(t)] \quad (7a)$$

$$Var[Z(t)] = E[N(t)] Var[Y_k] + E[Y_k]^2 Var[N(t)] \quad (7b)$$

이상의 결과는 피해강도가 모든 하중사상에 대하여 균일하다는 가정하에 유도된 것이다. 그러나 실제 현상에서는 피해가 선형 뿐만 아니라 비선형 형태로도 다양하게 나타날 수 있다. 본 연구의 목적은 비선형 누적피해에 대한 추계학적 확률모형을 수립하고 경사제 피복재에 적용하는 것이다. van der Weide and Pandey (2011)가 제안한 내용년수의 확률밀도함수를 이용하면 비선형 누적피해의 파괴확률은 다음 식 (8)과 같이 정의된다. 구조물의 내용년수가 임의의 사용년수  $t$ 보다 작다는 의미는  $t$  시간 이전에 파괴가 발생하였다는 물리적 의미를 이용하였다.

$$P_f(t) = \int_0^t I_0(2\sqrt{\mu\tau\lambda_{LS}}) \mu e^{-\mu\tau - \lambda_{LS}} d\tau \quad (8a)$$

$$\lambda_{LS} = \int_0^{\infty} \left[ \int_0^{L_S} \zeta(x) dx \right] f_{L_S}(y) dy \quad (8b)$$

여기서  $\zeta(x) = ax^b$ 로 정의되는 임의의 피해강도함수이다. 만약  $b=0$ 이고  $a=\lambda$ 라면 식 (8)은 식 (6)과 일치한다.  $I_\nu(x)$ 는 다음 식 (9)와 같이 정의되는 제 1종 수정 Bessel 함수(modified Bessel function of the first kind)이다.

$$I_\nu(x) = \left(\frac{x}{2}\right)^\nu \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(x^2/4)^k}{k! \Gamma(\nu+k+1)} \quad (9)$$

따라서 식 (8)을 식 (1)에 대입하면 비선형 누적피해에 대한 내용년수의 평균을 산정할 수 있다. 또한 사용년수에 따른 비선형 누적피해,  $Z(t)$ 의 확률적 특성은 다음 식 (10)을 이용하여 산정할 수 있다(van der Weide and Pandey, 2011).

$$E[Z^n(t)] = \frac{n}{a} \left(\frac{b+1}{a}\right)^{n/(b+1)-1} \sum_{k=1}^{\infty} \left( \sum_{m=0}^{k-1} \frac{\Gamma[m+n/(b+1)]}{\Gamma(m+1)} \right) \frac{(\mu t)^k}{k!} e^{-\mu t} \quad (10)$$

여기서  $\Gamma(x)$ 는 gamma 함수이다.  $b=0$ 이라 가정하고 식 (10)을 이용하여 1차 모멘트와 2차 모멘트를 구하면, 식 (7)과 동일한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 식 (10)은 피해강도가 일정하다는 가정하에 유도된 식 (7)을 내포하게 된다. 따라서 식 (10)을 이용하면 선형의 누적피해 모형에서는 해석할 수 없는 왜도나 첨도 같은 고차항의 통계적 특성도 해석할 수 있는 장점이 있다.

### 3. 피해강도함수에 따른 해석

이상에서 수립된 추계학적 확률모형은 피해강도함수,  $\zeta(x)$ 에 의존한다. 따라서 피해강도함수의 형태에 따른 해석을 먼저 수행하였다. 본 연구에서는 구조물의 시간에 따른 피해의 거동을 생각하여

Table 1. Several types of damage intensity function,  $\zeta(x) = ax^b$

| Case | $a$ | $b$ | Type of damage intensity function |
|------|-----|-----|-----------------------------------|
| 1    | 0.5 | 0.0 | Uniform                           |
| 2    | 0.5 | 0.5 | Hyperbola                         |
| 3    | 0.5 | 1.0 | Linear                            |
| 4    | 0.5 | 1.5 | Parabola                          |

Table 1에 제시된 바와 같이 모두 4가지 경우에 대하여 해석하였다. 하나는 피해강도가 일정하고, 나머지 3개는 피해강도가 선형, 쌍곡 선이나 포물선의 형태로 증가하는 경우이다. 해석을 위해 하중 발생률,  $\mu = 2.0$ , 저항한계,  $L_S$ 는 사용한계( $Z_M$ )와 극한한계( $Z_F$ )로 구분하여 각각 2.0과 6.0으로 가정하였다. 또한 본 연구에서는 사용한계와 극한한계를 확률변수로 취급하여 불확실성을 고려하였다. 변동계수가 0.25인 대수정규분포를 따른다고 가정하였다 (Sanchez-Silva et al., 2011).

먼저 피해강도가 균일한 경우 식 (8)을 이용하여 산정된 한계상태별 내용년수에 따른 확률밀도함수를 Fig. 1에 제시하였다. 그림에서 점선이 사용한계에 대한 결과이고 실선이 극한한계에 대한 결과이다. 각 한계상태에 대한 내용년수의 평균은 사용한계와 극한한계에 대하여 각각 1.0년과 2.0년이다.

피해강도가 균일하다는 가정하에 유도된 식 (6)의 결과와 일치한다. 또한 사용년수에 따른 누적피해의 평균과 분산이 Fig. 2에 제시되었다. 여기서는 식 (7)과 식 (10)을 이용하여 산정된 두 가지 결과를 비교하였다. 기호로 표시된 결과가 식 (7)로부터 산정

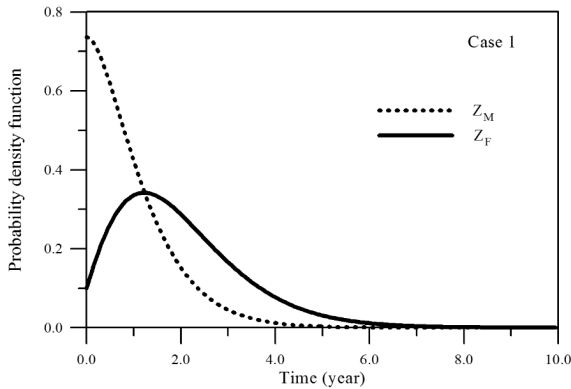


Fig. 1. PDF of mean time to failure on the limit states of  $Z_M$  and  $Z_F$

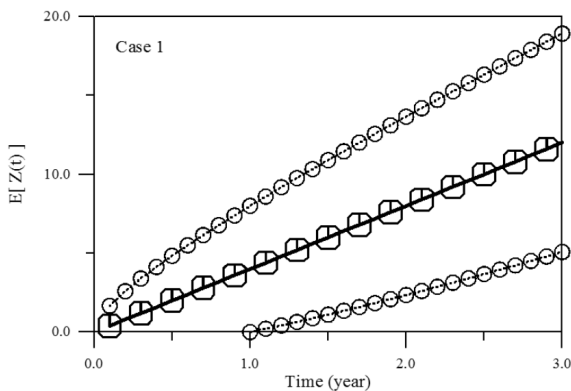


Fig. 2. Expected values of total damage with respect to the elapsed lifetime

된 선형 누적피해의 결과이다. 사용년수에 따른 평균과 표준편차를 나타낸 것으로 두 결과가 동일하다. 따라서 피해강도가 균일한 경우는 내용년수의 평균과 사용년수에 따른 누적피해의 통계적 특성들이 동일 조건에서 수학적으로 수립된 식 (6)과 식 (7)의 결과와 정확히 일치하는 것을 알 수 있다.

그러나 식 (6)을 이용하면 내용년수의 평균만을 산정할 수 있으나 식 (8)을 이용하면 한계상태별 분포함수도 쉽게 알 수 있다. 이는 시간에 따른 한계상태별 파괴확률을 산정할 수 있다는 의미이다. Fig. 1로부터 산정된 시간에 따른 각 한계상태별 파괴확률을 Fig. 3에 제시하였다.

예방적 유지관리(preventive maintenance)의 목적이 최소의 비용으로 구조물의 성능을 최대수준까지 끌어올리는 것이다. 즉, 최적화된 기준으로 어느 시점에 어느 정도의 보수보강이 이루어져야 하는가를 결정하는 것이다. 이를 위해서는 사용년수에 따른 구조물의 성능/누적피해와 파괴확률을 정확히 예측할 수 있어야 한다.

이미 언급되었듯이 본 연구는 추계학적 확률모형을 이용하기 때문에 사용년수에 따른 구조물의 누적피해와 파괴확률을 산정할 수 있다. 따라서 이 결과를 이용하여 체계적 유지관리를 수행할 수 있는 두 가지 방법을 제시하였다.

첫째는 사용한계상태에 대한 내용년수의 평균과 사용년수에 따른 누적피해의 통계적 특성을 이용하는 방법이다. 이 방법은 사용한계상태에 대한 내용년수의 평균에 누적된 피해를 사용한계 이하가 되도록 보수·보강하는 방안이다. 앞의 결과를 이용하여 예를 들면 Fig. 1과 Fig. 2에 따라 사용한계의 내용년수의 평균은 1년, 누적피해는 4.0이다. 따라서 1년이 되는 시점에 누적피해 4.0이 사용한계 2.0 이하가 되도록 보수·보강을 해야 한다. 둘째는 사용년수에 따른 파괴확률이 유지관리를 위한 목표파괴확률에 도달하는 시점과 그 시점의 누적피해의 통계적 특성을 함께 이용하는 방법이다. 만약 유지관리를 위한 목표파괴수준을 60%라 하면 보

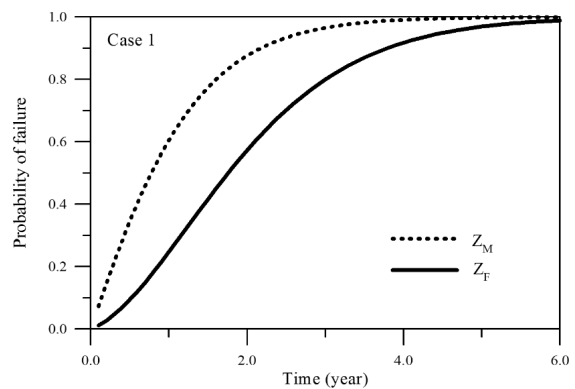


Fig. 3. Probability of failure with respect to the lifetime of structure on the limit states of  $Z_M$  and  $Z_F$

수·보강시점은 Fig. 3에 의하여 0.9년이 된다. 따라서 Fig. 2로부터 0.9년에 해당하는 누적피해 3.6이 사용한계 2.0 이하가 되도록 보수·보강을 하면 된다.

한편 피해강도가 균일하지 않고 선형 또는 쌍곡선이나 포물선의 형태로 증가하는 경우에 대하여도 앞에서 언급한 결과들을 모두 계산하였다. 먼저 Fig. 4에 극한한계에 대한 내용년수의 확률밀도함

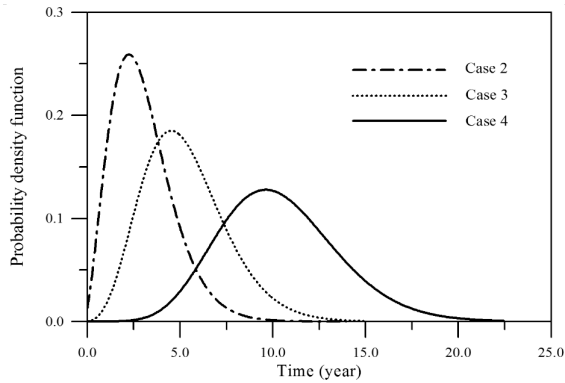


Fig. 4. Probability density functions of mean time to failure on the limit state,  $Z_F$  for the various damage intensity functions

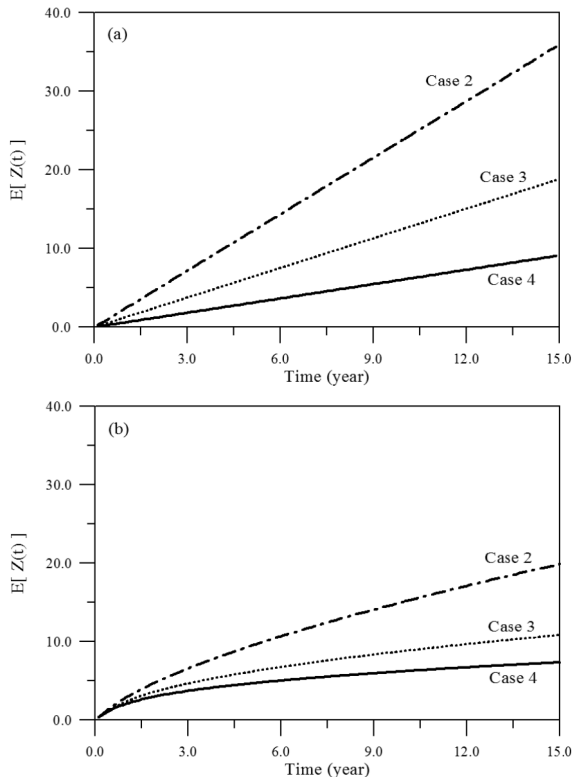


Fig. 5. Expected values of total damage with respect to the elapsed time; Fig. 5(a) and Fig. 5(b) are evaluated by eq. (7a, 7b) and Fig. 5(b) for the various damage intensity functions, respectively

수를 제시하였다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 피해강도의 증가율이 커질수록 내용년수는 늦게 발생한다.

Fig. 5에 제시한 사용년수에 따른 누적피해 평균의 거동특성도 동일한 경향을 나타내고 있다. 즉, 피해강도의 증가율이 커질수록 사용년수에 따른 누적피해의 평균이 완만히 증가한다. Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 각각 식 (7)과 식 (10)에 의하여 산정된 결과이다. 두 결과 모두 Case 4인 포물선 형태의 피해강도함수를 사용하였을 때 시간에 따른 누적피해의 평균이 가장 완만하게 증가하고 있다.

그러나 Fig. 5(a)와 같이 피해강도를 균일하다고 가정하게 되면 시간에 따른 누적피해는 항상 선형의 거동을 하게 되고 실제 피해를 과대평가할 수 있다. Table 2에 각각의 경우에 대한 한계상태별 내용년수의 평균을 제시하였다. 여기서 HPP(Homogeneous Poisson Process)는 피해강도가 균일하다고 가정한 식 (6)에 의하여 산정된 결과이고 NHPP(Non-Homogeneous Poisson Process)는 피해강도의 비균일성을 고려한 식 (8)에 의한 결과로 두 결과가 매우 잘 일치하고 있다. 따라서 피해강도를 균일하다고 가정하는 경우에는  $\lambda = \lambda_{LS}/L_S$ 의 피해강도를 사용하게 되면 내용년수의 평균은 비교적 정확하면서 간단히 예측할 수 있다.

마지막으로 Fig. 6에 극한한계에 대한 사용년수에 따른 파괴확률을 제시하였는데 피해강도함수에 따라 결과가 다르게 나타난다.

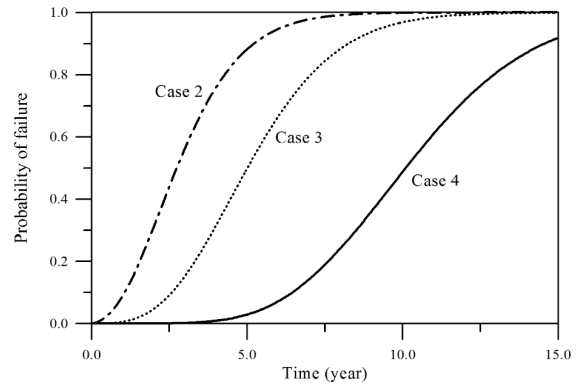


Fig. 6. Probability of failure with respect to the lifetime of structure on the limit state,  $Z_F$  for the various damage intensity functions

Table 2. Comparison of mean time to failure for the serviceability limit state,  $Z_M$  and the ultimate limit state,  $Z_F$  (Unit : year)

| Case | $Z_M$ |       | $Z_F$  |        |
|------|-------|-------|--------|--------|
|      | HPP   | NHPP  | HPP    | NHPP   |
| 1    | 1.000 | 1.000 | 2.000  | 2.000  |
| 2    | 0.983 | 0.983 | 3.002  | 3.003  |
| 3    | 1.032 | 1.032 | 5.275  | 5.274  |
| 4    | 1.135 | 1.135 | 10.364 | 10.343 |

이는 앞에서 수립된 추계학적 확률모형을 실제 구조물에 적용하기 위해서는 먼저 피해강도함수가 올바르게 추정되어야함을 의미한다.

이상과 같이 피해강도가 균일하지 않은 실제 구조물에서 내용년수의 확률밀도함수와 사용년수에 따른 누적피해의 통계적 특성 및 파괴확률을 해석할 수 있는 수학적 모형이 수립되었으며, 여러 피해강도함수에 따른 결과가 자세히 해석되었다. 따라서 이하에서는 수립된 모형을 경사제 피복재에 적용하였다.

#### 4. 경사제 피복재에 대한 적용

앞에서 수립된 추계학적 해석 모형을 경사제 피복재에 올바르게 적용하기 위해서는 제체의 안정성과 관련된 피해에 대한 정의와 피해강도함수를 올바르게 산정해야 한다. 본 연구에서는 경사제 제체의 누적피해를 산정하기 위하여 van der Meer(1988)가 제안한 다음 식 (11)의 피해수준(damage level)을 이용하였다.

$$S = \frac{A_c}{D_n^2} \quad (11)$$

여기서  $A_c$ 와  $D_n$ 은 각각 피복재의 피해면적(cross-sectional eroded area)과 대표직경이다. 일반적으로  $S$ 는 단위중량, 투과계수, 기울기 등의 기하학적인 특성과 내습하는 파랑, 즉, 유의파고,  $H_s$ , 평균주기,  $T_m$  그리고 파랑의 지속시간 등에 의존한다. Melby(1999)는 van der Meer(1988) 공식을 이용하여 시간에 따른 피복재 피해수준,  $S$ 의 진행과정을 산정하기 위하여 다음 식 (12)를 제시하였다.

$$S(t) = a_s N_s^5 \left( \frac{t}{T_m} \right)^{b_s} \quad (12)$$

여기서  $a_s$ 와  $b_s$ 는 경험상수,  $N_s = H_s / \Delta D_n$ ,  $\Delta = \rho_s / \rho_w - 1$ ,  $\rho_s$ 와  $\rho_w$ 는 각각 피복재와 해수의 밀도이다. 일반적으로 각각의 태풍사상에 의하여 발생된 피해수준,  $S(t)$ 는 시간이 진행됨에 따라 계속 누적된다. 만약 이와 같이 누적된 피해수준,  $S(t)$ 가 임의의 시간에서 극한한계  $S_F$ 를 넘게 되면 경사제는 그 시점에서 파괴된다. 이는 경사제의 파괴가 태풍 등의 하중 발생과정과 피복재의 피해과정에 의해 발생됨을 의미한다. 따라서 앞에서 수립된 추계학적 확률모형을 이용하여 해석될 수 있다.

한편 경사제 피복재의 시간에 따른 피해수준의 평균과 분산 등 통계적 거동특성과 한계상태에 따른 내용년수의 확률밀도함수 등을 추계학적 확률모형으로 해석하기 위해서는 식 (8)에 정의된 피해강도함수가 올바르게 추정되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 Melby(1999)의 모형실험 관측결과를 이용하였다. 단위 년에 하나의 태풍이 내습한다는 가정하에 식 (10)에 의하여 산정된 누적피해

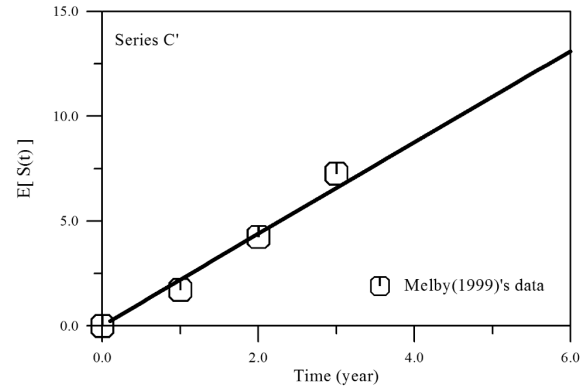


Fig. 7. Comparison of expected values of total damage calculated by eq. (8) with Melby(1999)'s experimental data of Series C'

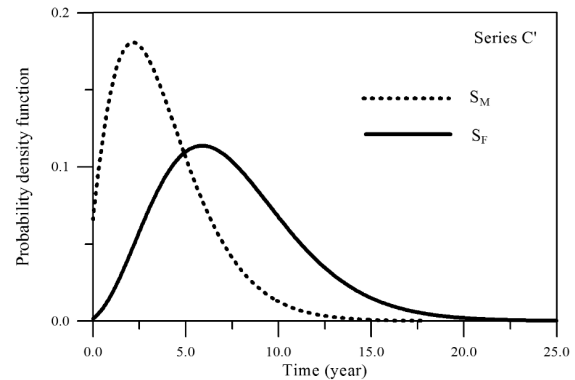


Fig. 8. Probability density functions of mean time to failure on the limit states  $S_M$  and  $S_F$  for the experimental case of Series C'

의 평균을 비교하는 방법으로 피해강도함수를 추정하였다. 본 연구에서는 수심이나 피복재의 대표직경 등 기하학적 변수들을 고정시킨 상태에서 각기 다른 유의파고와 평균주기를 갖는 태풍들이 연속으로 내습할 때 관측된 누적 피해수준 자료, Series C'과 Series E'를 사용하였다.

먼저 Series C'은 식 (12)에서 정의된 안정수가  $1.69 \leq N_s \leq 2.49$ 에 해당하는 자료이다. 식 (10)에 의하여 산정된 시간에 따른 누적 피해수준의 평균을 관측자료와 함께 Fig. 7에 비교하였다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 시간에 따른 누적 피해수준의 평균이 Melby(1999)의 실험 자료와 비교적 잘 일치하고 있다.

계산치와 관측치의 오차가 최소가 되는 피해강도함수,  $\zeta(x) = 0.45x^{0.01}$ 로 추정되었다. 따라서 사용한계,  $S_M = 6.0$ 과 극한한계,  $S_F = 14.0$ 에 대한 내용년수의 확률밀도함수를 Fig. 8과 같이 산정할 수 있다. 이때 사용한계와 극한한계는 변동계수 0.15를 갖는 대수정규분포를 따른다고 가정하여 한계상태의 확률실성을 고려하였다.

내용년수의 평균은 사용한계와 극한한계에서 각각 3.7년과 7.4

년으로 산정되었다. 또한 사용연수에 따른 파괴확률을 Fig. 9에 제시하였다. 예방적 유지관리 차원에서 만약 사용한계의 내용년수의 평균, 3.7년을 보수·보강 시점으로 선택한다면 그 시점까지 발생한 누적피해수준 8.1을 사용한계 6.0 이하가 되도록 보수·보강을 수행하여야 한다. 이때 식 (11)의 피해수준에 대한 정의를 이용하면 최소한의 보수·보강 규모,  $A_c = 2.1D_n^2$ 를 결정할 수 있다. 즉,  $A_c = 2.1D_n^2$  이상의 피복재 피해면적을 보수·보강하면 경사제 피복재의 누적 피해수준이 사용한계 이하로 떨어진다. 이는 경사제의 안정성이 그만큼 증가한다는 의미이다. 한편 사용한계의 파괴확률이 50% 이상인 시점을 보수·보강 시점으로 선택한다면 약 3.2년이 되는 시점에 보수·보강이 이루어져야 한다. 3.2년까지의 누적 피해수준이 7.0이기 때문에 6.0 이하가 되는 최소한의 보수·보강 규모,  $A_c = 1.0D_n^2$ 이 된다.

한편 Series C'과 다르게 Series E'은  $0.85 \leq N_s \leq 1.70$ 에 해당하는 자료로 상대적으로  $N_s$ 가 작은 경우이다. 식 (12)에서 알 수 있듯이 기하학적 조건이 동일할 때  $N_s$ 가 작다는 의미는

유의파고가 상대적으로 작은 경우의 결과이다. 따라서 시간에 따른 누적 피해수준이 완만하게 증가할 것으로 예상된다. 앞에서 수행하였던 방법과 동일하게 계산치와 관측치의 오차가 최소가 되는

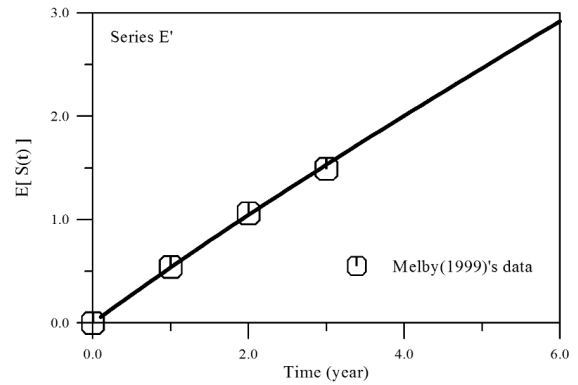


Fig. 11. Comparison of expected values of total damage calculated by eq. (12) with Melby(1999)'s experimental data of Series E'

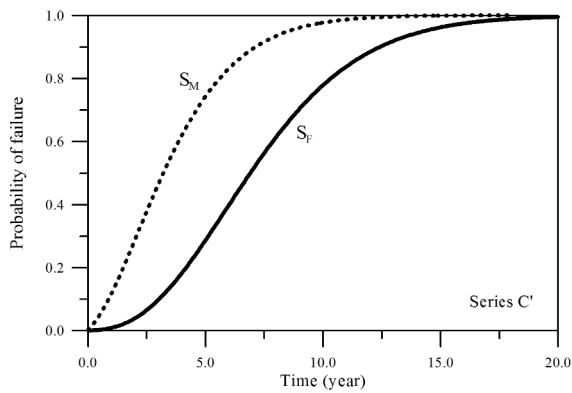


Fig. 9. Probability of failure with respect to the lifetime of structure on the limit states  $S_M$  and  $S_F$  for the experimental case of Series C'

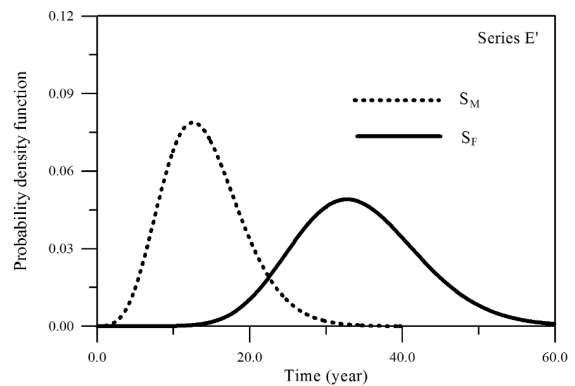


Fig. 12. Probability density functions of mean time to failure on the limit states  $S_M$  and  $S_F$  for the experimental case of Series E'

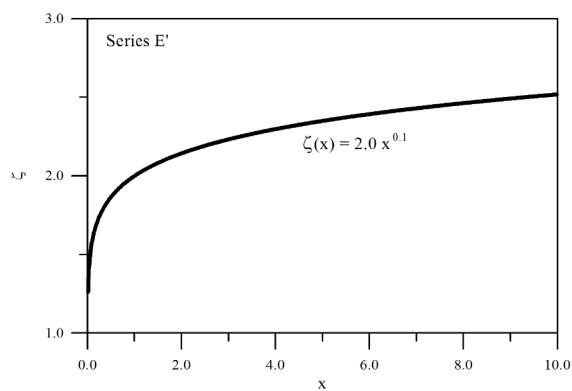


Fig. 10. Estimated damage intensity function for the experimental case of Series E'

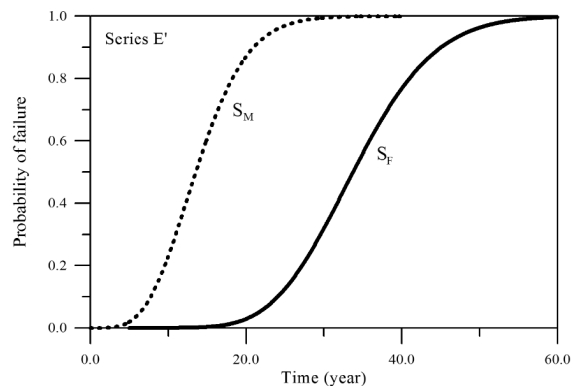


Fig. 13. Probability of failure with respect to the lifetime of structure on the limit states  $S_M$  and  $S_F$  for the experimental case of Series E'

Table 3. Repairing times and minimum amounts repaired for the preventive management of armor units of rubble-mound breakwaters

| Items                                | Series C'             |                                   | Series E'             |                                   |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
|                                      | Repairing time (year) | Minimum amount repaired ( $m^2$ ) | Repairing time (year) | Minimum amount repaired ( $m^2$ ) |
| Mean time to system failure on SLS*) | 3.7                   | $2.1D_n^2$                        | 14.1                  | $0.4D_n^2$                        |
| Target probability of failure on SLS | 50%                   | $1.0D_n^2$                        | 13.6                  | $0.2D_n^2$                        |
|                                      | 60%                   | $2.5D_n^2$                        | 15.0                  | $0.8D_n^2$                        |

\*) SLS : Serviceability Limit State

파해강도함수,  $\zeta(x) = 2.0x^{0.1}$  를 추정하여 Fig. 10에 제시하였다. 또한 Fig. 11에 사용년수에 따른 누적 피해수준의 평균을 Melby(1999)의 실험 자료와 함께 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 앞의 Fig. 7의 결과와 비교하면 시간에 따른 누적 피해수준의 평균이 Series C' 보다 상대적으로 작게 예측될 뿐만 아니라 Melby(1999)의 실험 자료와도 매우 잘 일치한다.

Series C'과 동일한 사용한계와 극한한계에 대해 산정된 내용년수의 확률밀도함수를 Fig. 12에, 사용년수에 따른 파괴확률을 Fig. 13에 제시하였다. 내용년수의 평균은 사용한계와 극한한계에 대해 각각 14.1년과 34.1년으로 산정되었다. Series E'에서는 시간에 따른 누적피해가 매우 완만하게 진행되기 때문에 사용한계의 파괴 확률이 60%일 때 보수·보강을 한다고 가정하면 보수·보강시점은 약 15년이 된다. 따라서 누적 피해수준 6.8을 6.0 이하로 보수·보강하면 된다. 즉, 최소한의 보수·보강 규모,  $A_e = 0.8D_n^2$  이 된다.

따라서 본 연구에서 수립된 추계학적 확률모형을 이용하면 경사제 피복재의 합리적인 유지관리를 위한 보수·보강 시점과 최소한의 보수·보강 규모를 정량적으로 결정할 수 있다. 이상의 결과들을 이용하여 산정된 보수·보강 시점과 보수·보강의 규모를 정리하여 Table 3에 제시하였다. 예방적 유지관리 차원에서 사용한계에 대한 목표수준을 50%와 60%로 높게 설정하여 세분화하였다. 표에서 쉽게 알 수 있듯이 보수·보강 시점에 따라 보수·보강의 규모가 달라짐을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 이와 같은 방법을 이용하면 식 (12)와 관련된 경사제 피복재의 다양한 조건들을 고려하여 예방적 유지관리 방안을 정량화할 수 있다.

특히 이와 같은 방법을 실무에 적용하기 위해서는 정기점검에서 확인된 피해율을 이용하여 내용년수에 대한 확률적 특성을 먼저 산정하여야 한다. 또한 내용년수의 평균에 해당하는 시점에 대한 피해의 규모를 추계학적 확률모형으로 예측하여야 한다.

이때 예측된 피해가 사용한계를 넘는 경우는 그 시점에 예방적 유지보수를 수행해야한다. 유지보수의 규모를 결정하기 위해서는 목표수준을 정의하여야 하는데 일반적으로 사용한계, 허용한계 아니면 허용한계 이하로 할지는 구조물의 중요도에 따라 결정한다. 다만, 유지보수의 규모는 경제적 제약성이 존재하는 경우에는 최소

사용한계수준까지라도 전면적인 보수보강을 해야 한다는 의미이지, 구조물의 특정부분만을 보수해야 한다는 의미는 아니다.

구조물의 중요도가 매우 높아 설계 성능 이상으로 보수·보강하기 위해서는 허용한계 이하로 보수·보강하면 된다. Series C'와 Series E'에서 내용년수의 평균을 이용하는 경우를 예로 들면 최대 보수·보강의 규모는 각각  $8.1D_n^2$ 과  $6.4D_n^2$  이 된다. 보수·보강이 만족스럽게 완료되면 그 시점부터 새로운 유지관리 절차가 시작된다. 앞에서 언급한 방법에 따라 식 (12)를 이용하여 내습한 태풍에 대한 피해율을 새롭게 산정하고 내용년수의 확률적 특성과 시간에 따른 피해의 규모가 추계학적 확률모형에 의하여 다시 산정되어야 한다.

비록 이상과 같이 경사제 피복재를 합리적으로 유지관리를 할 수 있는 두 가지 방법을 제시하고 정량적으로 분석하였으나 이상에서 제시한 유지관리 방안에는 경제성을 고려하지 않았기 때문에 최적화된 모형이라 할 수 없다. 따라서 유지관리에 따른 경제적 가치를 고려할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다. 또한 실측자료를 이용한 추계학적 확률모형의 현장 적용성을 높여주는 연구가 지속되어야 한다.

## 5. 결론

사용년수에 따른 한계상태별 파괴확률과 누적피해의 통계적 특성을 이용하여 경사제 피복재를 올바르게 보수·보강할 수 있는 유지관리 방법을 제시하였다. 먼저 임의의 저항한계를 초과하는 내용년수의 평균과 사용년수에 따른 누적피해의 확률적 거동특성을 해석할 수 있는 균일, 비균일 해석 모형이 수립되었다. 균일 해석모형은 저항한계별 내용년수의 평균만을 산정할 수 있으나 비균일 해석모형은 내용년수에 대한 확률밀도함수도 산정할 수 있다. 따라서 내용년수에 따른 한계상태별 구조물의 파괴확률을 산정할 수 있다. 특히 비균일 모형에서는 구조물의 피해 발생거동 특성에 따라 피해강도를 다양한 형태의 함수로 고려할 수 있다.

먼저 피해강도함수를 상수로 고려한 경우에 대한 비균일 모형의 해석 결과를 균일 모형의 해석 결과와 비교하였다. 내용년수의



평균과 사용년수에 따른 누적피해의 확률적 거동이 매우 잘 일치하였다. 따라서 누적피해가 선형적으로 거동하는 경우는 피해강도를 일정하다고 가정할 수 있다. 그러나 누적피해가 비선형적으로 거동하는 경우에 피해강도를 균일하게 가정하면 실제 누적피해를 과대평가할 수 있다.

마지막으로 비균일 추계학적 확률모형을 처음으로 경사제 피복재에 적용하였다. 경사제 피복재의 피해수준과 실험자료를 이용하여 피해강도함수를 추정하였다. 유의파고 수준에 따라 각기 다르게 추정된 피해강도함수를 이용하여 내용년수에 따른 파괴확률과 사용년수에 따른 누적피해의 통계적 특성을 이용하여 경사제를 합리적으로 유지관리를 할 수 있는 보수·보강 시점과 최소한의 보수·보강 규모를 정량적으로 산정할 수 있었다. 보수·보강 시점을 어떻게 결정하느냐에 따라 보수·보강의 규모가 어떻게 달라지는지를 정량적으로 확인할 수 있었다. 그러나 이상에서 제시한 유지관리 방안에는 경제성을 고려하지 않았기 때문에 이에 대한 연구가 추가적으로 필요하다. 또한 실측자료를 이용한 추계학적 확률모형의 현장 적용성을 높이려는 연구가 지속되어야 한다.

## References

- Ang, A. H-S., and Tang, W. H. (1975). *Probability concepts in engineering planning and design*, Vol. 1, John Wiley & Sons, N.Y.
- Lee, C-E. (2012). "Stochastic reliability analysis of armor units of rubble-mound breakwaters subject to multiple loads." *Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 24, No. 2, pp. 138-148 (in Korean).
- Li, C. Q., and Zhao, J. M. (2010). "Time-dependent risk assessment of combined overtopping and structural failure for reinforced concrete coastal structures." *J. Waterway, Port, Coast., and Ocn. Eng.*, ASCE, Vol. 136, No. 2, pp. 97-103.
- Madsen, H. O., Krenk, S. and Lind, N. C. (1986). *Methods of structural safety*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Melby, J. A. (1999). *Damage progression on breakwaters*, Ph.D. thesis, Dept. of Civ. Engrg., Univ. of Delaware, USA.
- Melchers, R. E. (1999). *Structural reliability analysis and prediction*, Wiley, Chichester.
- Mori, Y., and Ellingwood, B. R.(1994) "Maintaining reliability of concrete structures. I. Role of inspection/repair." *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 120, No. 3, pp. 824-845.
- Nakagawa, T. (1976). "On a replacement problem of cumulative model." *Op. Res. Quart.*, Vol. 27, No. 4, pp. 895-900.
- Rosenblueth, E. (1976). "Optimum design for infrequent disturbances." *J. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 102, No. ST9, pp. 1807-1825.
- Rosenblueth, E., and Mendoza, E. (1971). "Reliability optimization in isostatic structures." *J. Eng. Mech. Div.*, ASCE, Vol. 97, No. EM6, pp. 1625-1642.
- Sanchez-Silva, M., Klutke, G.-A., and Rosowsky, D. V. (2011). "Life-cycle performance of structures subject to multiple deterioration mechanisms." *Struct. Saf.*, 33, pp. 206-217.
- Speijker, L. J. P., van Noortwijk, J. M., Kok, M., and Cooke, R. M. (2000). "Optimal maintenance decisions for dikes." *Prob. Eng. and Inf. Sc.*, Vol. 14, No. 1, pp. 101-121.
- Taylor, H. M., and Karlin, S. (1984). *An introduction to stochastic modeling*, Academic Press, N.Y.
- van der Meer, J. W. (1988). "Deterministic and probabilistic design of breakwater armor layers." *J. Waterway, Port, Coast., and Ocn. Eng.*, ASCE, Vol. 114, No. 1, pp. 66-80.
- van der Weide, J. A. M., and Pandey, M. D. (2011). "Stochastic analysis of shock process and modelling of condition-based maintenance." *Rel. Eng. and Sys. Saf.*, 96, pp. 619-626.
- van der Weide, J. A. M., Suyono, and van Noortwijk, J. M. (2008). "Renewal theory with exponential and hyperbolic discounting." *Prob. Eng. and Inf. Sc.*, Vol. 22, No. 1, pp. 53-74.
- van Noortwijk, J. M., and Gelder, P. H. (1996). "Optimal maintenance decisions for berm breakwaters." *Struct. Saf.*, Vol. 18, No. 4, pp. 293-309.
- van Noortwijk, J. M., and Klatter, H. E. (1999). "Optimal inspection decisions for the block mats of the Eastern-Scheldt barrier." *Rel. Eng. and Sys. Saf.*, 65, pp. 203-211.