

경사제 피복재의 예방적 최적 유지관리를 위한 추계학적 기대비용모형의 개발

Development of Stochastic Expected Cost Model for Preventive Optimal-Maintenance of Armor Units of Rubble-Mound Breakwaters

이철웅
Cheol-Eung Lee*

요지 : 비선형 누적피해모형과 경제성 모형을 결합하여 경사제 피복재를 예방적으로 최적 유지관리할 수 있는 추계학적 기대비용모형을 제안하였다. 기존 모형과의 비교를 통해 만족스럽게 검증되었으며, 관련 변수들의 민감도 분석도 자세히 수행하였다. 구조물의 중요도, 피해강도함수 그리고 저항한계에 따른 단위시간당 기대비용이 최소가 되는 최적의 보수·보강 시간을 산정할 수 있었다. 마지막으로 개발된 추계학적 기대비용모형을 경사제 피복재에 적용하였다. 구조물의 유지관리 비용과 편익을 최적화하여 어느 시점에 설계 당시 수준으로 보수·보강이 이루어져야 하는지를 정량적으로 결정할 수 있었다.

핵심용어 : 추계학적 기대비용모형, 누적피해, 경사제 피복재, 예방적 최적 유지관리

Abstract : A stochastic expected cost model has been suggested by combining the nonlinear cumulative damage model with the expected cost model together which can be useful for doing the preventive optimal-maintenance of the armor units of rubble-mound breakwaters. The suggested model has been satisfactorily calibrated by comparison of the results from others models, also the sensitivity analysis has been carried out in detail under the variation of the associated parameters with the model. The optimal repair times can be directly evaluated by minimizing the expected cost rates that depend on the social importances, damage intensity functions and resistance limits. Finally, the present cost model has been straightforwardly applied to the armor units of rubble-mound breakwaters. Based on the assumption of turning the damaged structure back to the state as good as new after repairs, the required optimal repair times and magnitudes can be determined quantitatively in terms of the optimum balance between the costs and benefits on the preventive maintenance.

Keywords : stochastic expected cost model, cumulative damage, armor units of rubble-mound breakwaters, preventive optimal-maintenance.

1. 서 론

모든 토목 구조물은 시간이 진행됨에 따라 일반적으로 성능이 감소된다. 성능 감소는 해당 구조물의 사용성이나 안정성에 중대한 영향을 미치게 된다. 따라서 장래의 환경 변화에 따라 구조물을 올바르게 유지관리 하는 것이 필요하다. 특히 토목 구조물의 경우 파괴에 따른 사회적 영향 정도가 다른 시스템 보다 크기 때문에 유지관리의 중요성이 높다. BS3811(1984)에 의하면 유지관리란 해당 시설물이 요구되는 기능을 올바르게 수행할 수 있는 상태를 유지하거나 복구하는 기술적·행정적 관련 행위들이라 정의하고 있다. 이와 같은 정의에 의하면 유지관리는 두 가지 관점으로 구분 할 수 있다. 하나는 임의의 시스템이 파괴되면 복구행위에 의해 해당 시

스템을 원래 상태로 되돌리는 것이고, 다른 하나는 파괴되기 전에 예방적으로 시스템이 그 기능을 유지하도록 관리하는 것이다. 전자의 경우는 전구의 교환과 같은 단순 시스템인 경우에 적용되고, 토목 구조물과 같이 복잡하고 파괴에 따른 영향의 정도가 큰 경우는 후자의 예방적 유지관리(preventive maintenance)가 적용되어야 한다. 우리나라에서도 시설물의 안전관리에 관한 특별법(시특별)을 만들어 중요 구조물을 예방적으로 유지관리 하도록 하고 있다. 단순히 시설물의 종류와 현장점검을 통하여 정성적으로 평가된 안전등급에 따라 유지관리의 시기와 정도를 결정하고 있다. 너무 자주 유지관리를 수행하면 관련 비용이 증가하고 그 반대의 경우는 예기치 못한 파괴로 인한 피해비용이 커질 수 있다. 따라서 최소의 비용으로 설계 당시 설계기준에 의하여 부여된 구조물의 고유

*강원대학교 토목공학부(Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Gangwon 200-701, Korea. Tel: +82-33-250-6238, Fax: +82-33-256-6235, celee@kangwon.ac.kr)

한 성능을 가능하면 최대수준까지 끌어올려야 한다. 즉, 비용과 성능이 균형된 최적화된 기준으로 어느 시점에 어느 정도의 보수·보강이 이루어져야 하는지를 결정해야 한다.

지금까지는 일반적으로 구조물의 파괴거동을 알고 있다는 가정하에 일정시간 간격에 따라 의무적으로 유지관리하는 방법들이 주로 사용되어 왔다. 그러나 환경변화에 따른 파괴거동들이 복잡해지고 경제성에 대한 요구가 높아지면서 그 방법의 비효율적성이 지적되었다(Pintelon and Gelders, 1992). 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 두 가지 문제가 동시에 고려되어야 한다. 하나는 시간에 따른 파괴거동에 대한 올바른 예측이고 다른 하나는 유지관리에 대한 경제성 분석이다. 그러나 지금까지는 각각을 구별하여 별도로 연구되어 왔다. 일반적으로 전자를 누적피해모형(cumulative damage model)이라 하며 Mori and Ellingwood(1994), van Noortwijk and Klatter(1999), Speijker et al.(2000), Li and Zhao(2010), Sanchez-Silva et al.(2011), Lee(2012, 2013) Lee and Kim(2013), Lee et al.(2013) 등이 해석방법을 달리하여 경사제 등 여러 토목 구조물에 대한 누적피해의 거동특성에 대한 연구를 수행하였다. 또한 파괴 발생 사상에 대한 분포함수를 알고 있다는 가정하에 경제성에 대한 연구도 수행되었다. Barlow and Hunter(1960)를 시작으로 Nguyen and Murthy(1981), Jardine and Buzacott(1985) 등이 비용 최적화 유지관리 방안에 대하여 연구하였다. 최근 Ito and Nakagawa(2011) 그리고 van der Weide and Pandey(2011)도 누적피해모형을 다르게 가정하여 경제성을 고려할 수 있는 방법론적인 연구를 수행하였다. 그러나 아직까지는 경사제와 같이 실제 향만 구조물을 대상으로 누적피해모형과 경제성을 결합한 적용 사례가 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 Lee and Kim(2013)에 제시된 비선형 누적피해모형에 경제성 모형을 결합하여 추계학적 기대비용모형을 개발하고 이를 경사제 피복재에 적용하였다. 즉, 현행 설계 규준에 맞춰 비용과 성능이 균형된 최적화된 기준으로 어느 시점에 어느 정도의 보수·보강이 이루어져야 하는지를 결정하였다. 먼저 제 2절에 비선형 누적피해모형을 이용하여 시간에 따른 기대비용을 산정할 수 있는 수학적 모형을 수립하였다. 제 3절에서는 선형 누적피해모형의 결과와 비교하여 본 연구에서 개발된 모형을 검증하고 민감도 분석도 수행하였다. 제 4절에서는 개발된 추계학적 기대비용모형을 경사제 피복재에 적용하였다. 경사제를 최적 유지관리를 할 수 있는 보수·보강 시점과 최초상태로 되돌릴 수 있는 보수·보강규모를 정량적으로 제시하였다. 마지막으로 제 5절에 결론을 언급하였다.

2. 추계학적 기대비용모형의 개발

파괴에 따른 사회적 파장이 큰 토목 구조물의 경우 파괴가 발생된 후의 복구비용보다는 파괴가 발생되기 전에 예방적으로 보수·보강을 수행하는 비용이 더 경제적이다(Pintelon and Gelders, 1992; Dekker, 1996). 따라서 얼마의 시간 간격으로

예방적 보수·보강을 수행할지에 대한 기준을 결정하는 문제가 중요하다. 우리나라의 시트법과 같이 단순히 일정시간 간격으로 보수·보강을 시행하도록 규정하는 방법이 현재 가장 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 이 방법은 유지관리에 따른 경제적 가치를 고려하지 않고 있어 최적화된 방법이라 생각할 수 없다. 본 절에서는 RRP(Renewal Reward Processes) 개념(Ross, 1980)을 도입하여 유지관리에서 가장 중요한 최적화된 보수·보강 시점을 결정할 수 있는 경제성 모형을 수립하였다.

먼저 구조물의 수명에 해당하는 임의의 시간 간격 T_p 로 구조물을 새 것 처럼 보수·보강해야 하는 경우를 가정하면 다음과 같은 두 가지를 생각할 수 있다. 하나는 구조물의 내용년수, t 가 T_p 보다 길어 정해진 T_p 시간에 보수·보강을 수행하는 경우이고, 다른 하나는 T_p 시간 이내에 파괴가 발생하여 즉시 복구하는 경우이다. 즉, 재령기반 보수·보강(age-based maintenance) 기법과 상태기반 보수·보강(condition-based maintenance) 기법을 함께 고려한다는 의미이다. 이는 두 가지 경우가 앞에서 언급한 바와 같이 각기 다른 경제적 가치를 갖기 때문이다. 따라서 이 두 가지 경우를 모두 고려하여 경제성 관점에서 유지관리 비용이 최소가 되는 최적의 보수·보강 시점을 산정할 수 있는 모형이 수립되어야 한다.

만약 구조물의 내용년수를 임의의 분포함수를 따르는 추계학적 확률변수라 생각하면 앞의 두 가지 경우에 따라 보수·보강을 위한 총 기대비용(total expected cost), $C_T(T_p)$ 는 다음 식 (1)과 같이 정의된다(Nguyen and Murthy, 1981).

$$C_T(T_p) = C_p[1 - P_f(T_p)] + C_f P_f(T_p) \quad (1)$$

여기서 C_p 는 파괴가 발생되기 전에 T_p 간격으로 예방적 보수·보강을 수행하는데 소요되는 비용이고, C_f 는 T_p 이전에 파괴가 발생하여 즉시 복구하는데 소요되는 비용으로 $C_f = C_R + C_B$ 이다. 여기서 C_R 과 C_B 는 각각 구조물을 처음 상태로 복구하는데 소요되는 복구비용과 파괴에 따른 간접 피해비용이다. 일반적으로 $C_p < C_f$ 의 관계가 성립한다. 그러므로 식 (1)을 이용하여 총 기대비용을 산정하기 위해서는 $P_f(T_p)$ 를 먼저 해석해야 한다. 즉, 하중의 발생과정(counting process)과 하중에 의한 피해과정(damage process)을 함께 고려할 수 있는 추계학적 신뢰성 해석이 수행되어야 한다. Fig. 1에 제시된 바와 같이 시간에 따른 파괴확률 $P_f(t)$ 는 구조물의 누적피해(stochastic cumulative damage), $Z(t)$ 와 저항한계, L_s 에 의하여 다음 식 (2)와 같이 정의된다.

$$P_f(t) = 1 - P\{Z(t) \leq L_s\} \quad (2)$$

식 (2)에서 저항한계는 사용성 또는 안정성과 관련하여 각각 사용한계 또는 극한한계로 정의할 수 있다. 또한 구조물의 추계학적 누적피해는 하중 발생개수, $N(t)$ 와 각각의 하중에 의

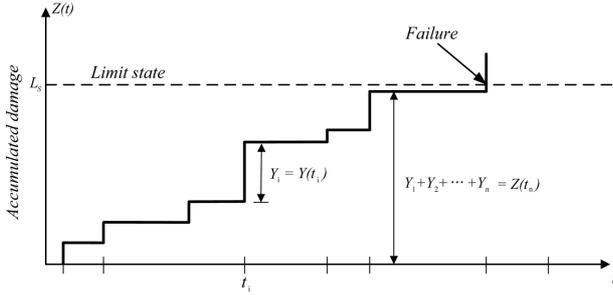


Fig. 1. Definition of cumulative damage processes.

한 피해, Y_k 에 의해 다음 식 (3)과 같이 정의된다.

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

따라서 하중의 발생개수, $N(t)$ 와 누적피해, $Z(t)$ 를 독립이라 가정하면 사용년수 t 까지 누적된 피해가 저항한계, L_S 를 넘어 구조물이 파괴될 확률, $P_f(t)$ 는 다음 식 (4)와 같이 정의된다.

$$P_f(t) = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} P\left\{ \sum_{k=0}^{N(t)} Y_k \leq L_S | N(t) = n \right\} P\{N(t) = n\} \tag{4}$$

여기서 $P\{N(t) = n\}$ 은 t 시간 동안 하중이 n 개 발생할 확률로 하중발생 간격(inter-arrival time)이 임의의 분포함수 $G(x)$ 를 따른다고 가정하면 다음 식 (5)와 같이 정의된다.

$$P\{N(t) = n\} = G^{(n)}(t) - G^{(n+1)}(t) \tag{5a}$$

$$G^{(n)}(t) = \int_0^t G^{(n-1)}(t-x)dG(x) \tag{5b}$$

만약 $G(x) = 1 - e^{-\mu x}$ 의 지수분포를 따르면 식 (5a)는 포아송 분포(Poisson distribution)를 따르는 PP(Poisson Process)가 된다. 여기서 μ 는 발생강도(occurrence intensity)로 단위시간에 발생하는 하중의 개수를 의미한다. 현재까지 미래의 하중발생 사상을 가장 잘 나타낼 수 있는 추계학적 모형이 DSPP(Doubly Stochastic Poisson Process)이다. 발생강도를 상수로 고려하면 HPP(Homogeneous Poisson Process)가 되고, 임의의 함수로 고려하면 NHPP(Non-Homogeneous Poisson Process)가 된다. 또한 HPP에서 발생강도를 임의의 분포함수를 따르는 확률변수로 고려하면 DSPP는 MPP(Mixed Poisson Process)가 된다. 따라서 DSPP를 사용하면 하중발생사상을 시간의 함수로 나타낼 수 있을 뿐만 아니라 그것의 불확실성도 고려할 수 있다.

한편 n 개의 하중에 의한 누적피해가 저항한계보다 작을 확률은 다음 식 (6)과 같이 정의할 수 있다.

$$P\left\{ \sum_{k=0}^{N(t)} Y_k \leq L_S | N(t) = n \right\} = \int_{-\infty}^{\infty} F_Y^{(n)}(L_S) f_{L_S}(x) dx \tag{6}$$

식 (6)은 각각의 하중에 의하여 발생한 피해, $Y_i (i = 1, 2, \dots)$ 가 서로 독립이며 동일한 분포, $f_Y(y)$ 를 갖는다는 가정하에 합성

(convolution)하여 얻어진 결과이다. 여기서 $f_{L_S}(x)$ 는 저항한계, L_S 의 불확실성을 고려하기 위하여 도입된 임의의 분포함수이다.

만약 HPP에 의하여 발생된 각각의 하중에 의한 피해 Y 가 균일한 피해강도(constant damage intensity) λ 를 갖는 지수분포, $f_Y(y) = \lambda e^{-\lambda y}$ 를 따른다고 가정하고 식 (5)와 식 (6)을 식 (4)에 대입하면 다음 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$P(t) = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{k=n}^{\infty} \frac{(\lambda L_S)^k}{k!} e^{-\lambda L_S} \right\} f_{L_S}(x) dx \right] [G^{(n)}(t) - G^{(n+1)}(t)] \tag{7}$$

따라서 식 (7)을 식 (1)에 대입하면 총 기대비용을 쉽게 산정할 수 있다. 그러나 RRP에서는 식 (1)의 총 기대비용을 직접 사용하지 않고 T_p 의 기대시간으로 나눈 단위시간당 총 기대비용(expected cost rate)을 사용한다(Ross, 1980). 따라서 T_p 의 기대시간을 산정해야 한다. T_p 의 평균 기대시간은 다음 식 (8)을 이용하면 산정할 수 있다.

$$E[T_p] = \int_0^{T_p} [1 - P_f(t)] dt \tag{8}$$

따라서 식 (1)을 식 (8)로 나누게 되면 단위시간당 기대비용, $C(T_p)$ 을 다음 식 (9)와 같이 정의할 수 있다.

$$C(T_p) = \frac{C_p [1 - P_f(T_p)] + C_f P_f(T_p)}{\int_0^{T_p} [1 - P_f(t)] dt} \tag{9}$$

마지막으로 식 (9)를 T_p 에 대하여 미분하면 단위시간당 총 기대비용을 최소화하는 최적 T_p 를 쉽게 산정할 수 있다. 비록 수학적 모형을 기술하는 과정은 약간 다르지만 동일한 개념 하에 Ito and Nakagawa(2011)도 식 (9)와 동일한 연구를 수행하였다. 이들은 저항한계 L_S 를 결정론적 상수로 취급하여 불확실성의 영향을 고려하지 못하였으나 본 연구에서는 L_S 를 임의의 분포함수를 따르는 확률변수로 취급하여 불확실성을 고려하였다.

이상의 결과는 식 (7)에서 알 수 있듯이 각각의 하중에 의하여 발생한 피해 Y 가 일정한 피해강도, 즉 선형의 누적피해(additive cumulative damage)를 따른다고 가정한 경우이다. 그러나 실제 구조물에서는 대부분 피해강도가 균일하지 않는 비선형의 누적피해 거동이 나타난다. 이와 같은 특성을 고려하기 위하여 본 연구에서는 van der Weide and Pandey(2011)가 제시한 다음 식 (10)의 구조물 내용년수, t 의 분포함수를 이용하였다.

$$f_T(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\mu t \lambda_{L_S})^n}{(n!)^2} \mu e^{-\mu - \lambda_{L_S} t} \tag{10}$$

여기서 λ_{L_S} 는 피해강도함수, $\zeta(x) = ax^b$ 에 의하여 다음 식 (11)과 같이 정의되는 비선형 피해강도이다.

$$\lambda_{L_S} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_0^{L_S} \zeta(x) dx \right] f_{L_S}(y) dy \tag{11}$$

만약 식 (11)의 피해강도함수에서 $b = 0$ 이라 가정하면 식 (11)의 $\lambda_{LS} = aE[L_S]$ 가 된다. 식 (7)의 $\lambda = a$ 로 정의하면 식 (10)과 식 (7)은 동일한 조건, 즉 선형의 누적피해에 대하여 해석하게 된다.

따라서 구조물의 내용년수에 대한 확률밀도함수를 이용하면 보수·보강 시기, T_p 의 평균은 다음 식 (12)와 같다.

$$E(T_p) = T_p[1 - F_T(T_p)] + \int_0^{T_p} t f_T(t) dt \quad (12)$$

식 (12)는 구조물의 내용년수 t 가 T_p 보다 큰 경우, $t > T_p$ 와 작은 경우, $t \leq T_p$ 로 구분하여 정리한 결과이다. 따라서 식 (12)를 이용하면 단위시간당 기대비용은 다음 식 (13)과 같이 된다.

$$C(T_p) = \frac{C_p + [C_f - C_p]F_T(T_p)}{T_p[1 - F_T(T_p)] + \int_0^{T_p} t f_T(t) dt} \quad (13)$$

그러므로 선형 누적피해를 해석할 수 있는 식 (9)와 동일하게 식 (13)을 T_p 에 대하여 미분하면 비선형 누적피해에 대해 단위시간당 기대비용이 최소화되는 최적 T_p 를 쉽게 산정할 수 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 최소의 비용으로 설계 당시 설계 기준에 의하여 부여된 구조물의 성능을 가능하면 최대수준까지 끌어올리는 것이 예방적 유지관리의 목표이다. 즉, 비용과 성능이 균형된 최적화된 기준으로 얼마의 시간 간격으로 어느 정도의 보수·보강이 이루어져야 하는지를 결정해야 한다. 이상에서는 단위시간당 기대비용을 최소화하는 개념으로 최적의 보수·보강이 이루어져야 하는 시간이 결정되었다. 따라서 유지관리의 또 다른 한 축인 어느 정도의 보수·보강이 이루어져야 하는지, 즉 보수·보강의 규모를 합리적으로 결정해야 한다. 이를 위해서는 추계학적 누적피해과정, $Z(t)$ 의 확률적 특성을 알아야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 van der Weide and Pandey(2011)가 제시한 다음 식 (14)를 사용하였다.

$$E[Z^n(t)] = \frac{n!}{a^n} \left(\frac{b+1}{a} \right)^{n/(b+1)-1} \times \sum_{k=1}^{\infty} \left(\sum_{m=0}^{k-1} \frac{\Gamma[m+n/(b+1)]}{\Gamma(m+1)} \right) \frac{(\mu t)^k}{k!} e^{-\mu t} \quad (14)$$

식 (14)에서 $b = 0$ 인 경우는 선형 누적피해에 대한 결과이다. 따라서 식 (14)는 선형 뿐만 아니라 비선형의 피해과정을 모두 해석할 수 있다. 그러므로 식 (14)를 이용하면 비선형성을 고려하여 시간에 따른 누적피해의 평균과 분산 등 확률적 특성들을 쉽게 구할 수 있다. 즉, 식 (13)에서 결정된 최적의 보수·보강 시점에 해당하는 누적피해를 식 (14)로부터 산정하여 현실적으로 보수·보강의 규모를 결정하면 된다.

이상과 같이 기대비용 최소화 기법으로 최적의 보수·보강 시간과 규모를 결정할 수 있는 추계학적 수학적 모형이 수

립되었다. 특히 본 연구에서 개발된 모형은 선형 뿐만 아니라 비선형 누적피해과정도 해석할 수 있는 모형이다. 또한 관련된 모든 변수들을 확률변수로 취급해 불확실성을 고려하였다. 수립된 모형을 바로 경사제 피복재에 적용하기 전에 먼저 기존의 결과들과 비교하여 검증하였다. 또한 관련 변수들의 변화에 따른 민감도 분석을 통하여 각 변수들의 물리적 특성이 해석되었다.

3. 모형의 검증 및 민감도 분석

앞에서 수립된 최적의 보수·보강 시간과 규모를 결정할 수 있는 추계학적 기대비용모형은 피해강도함수, $\zeta(x)$ 에 의존한다. 따라서 피해강도함수의 형태에 따른 영향을 해석할 필요가 있다. 먼저 Ito and Nakagawa(2011)가 사용한 조건에 대하여 해석하였다. HPP를 따르는 하중의 발생강도, $\mu = 2$, 피해강도, $\lambda = 2$ 로 가정한 경우다. $L_S = 5.0$ 인 경우에 대하여 C_f/C_p 에 따른 결과를 Fig. 2에 제시하였다. 이때 저항한계 L_S 는 변동계수가 0.25인 대수정규분포를 따른다고 가정하였다. 모두 3가지 경우, 식 (9), 식 (13) 그리고 Ito and Nakagawa(2011)의 결과를 비교하였다. 실선이 식 (13)의 결과로 세 결과가 정확히 일치하며 저항한계의 불확실성에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 식 (14)에 의하여 산정된 사용년수에 따른 누적피해를 Fig. 3에 제시하였다. Ito and Nakagawa(2011)의 결과와 비교하였는데 매우 잘 일치한다. 이상의 결과를 이용하여 산정된 최적 보수·보강 시기와 규모를 Table 1에 제시하였다.

Table 1에서 볼 수 있듯이 C_f/C_p 의 값이 커질수록 최적 보수·보강 시기는 짧아지고 단위시간당 기대비용은 커짐을 알 수 있다. 이는 복구비용, C_R 이 일정할 때 파괴에 따른 손실,

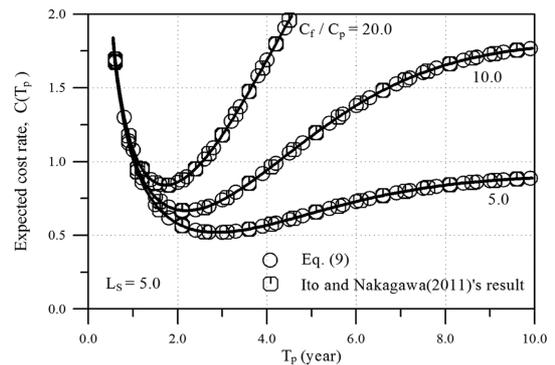


Fig. 2. Comparison of three expected cost rates.

Table 1. Minimum expected cost rate, optimum maintenance period and statistical properties of cumulative damage with respect to C_f/C_p

C_f/C_p	$C(T_p^*)$	T_p^* (year)	$E[Z(T_p^*)]$	$\sqrt{Var}[Z(T_p^*)]$
5.0	0.520	2.9	2.90	1.70
10.0	0.668	2.2	2.20	1.48
20.0	0.840	1.7	1.70	1.30

C_p 가 큰 구조물의 경우는 그렇지 않은 구조물 보다 자주 보수·보강을 실시해야 한다는 것을 의미한다. 또한 그에 따라 단위시간당 기대비용도 커진다. 그러나 경제성을 고려하지 않고 Fig. 3의 누적피해만을 이용하여 저항한계를 초과하는 시간에 보수·보강을 실시한다고 가정하면 C_f/C_p 에 상관없이 $T_p^* = 5.0$ 년이 된다. 이를 동일한 기준에서 자세히 분석하기 위하여 본 연구에서는 위험도(risk)를 산정하였다. 위험도는 다음 식 (15)와 같이 구조물이 파괴될 확률과 그로 인한 경제적 손실의 곱으로 정의된다.

$$R_k(T_p^*) = P_f(T_p^*)C(T_p^*) \quad (15)$$

Table 2에서 볼 수 있듯이 경제성 모형을 이용한 결과는 구조물의 중요도에 따라 위험도가 감소하나 누적피해모형에 의한 결과는 오히려 위험도가 증가한다. 또한 누적피해모형에 의한 결과는 동일한 조건에서 경제성 모형을 이용한 결과보다 위험도가 최소 5배에서 56배까지 커진다.

한편 Fig. 4에 동일한 C_f/C_p 에 대하여 저항한계 L_s 를 변화시키면서 계산한 결과를 제시하였다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 L_s 가 커짐에 따라 최적 보수·보강 시기는 길어지고 단위시간당 기대비용은 작아진다. 그림에서 $L_s = 10, 13$ 그리고 16일 때 최적 보수·보강 시기는 각각 5.9, 8.0 그리고 10.1년이다. 또한

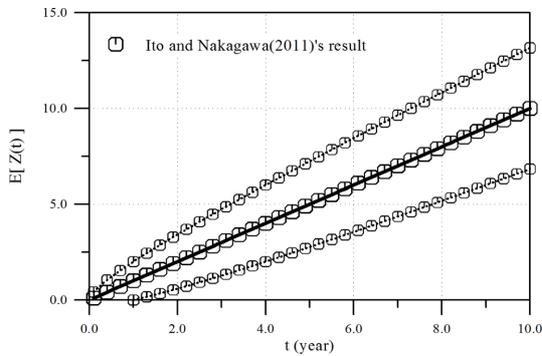


Fig. 3. Comparison of expected cumulative damages.

Table 2. Risks with respect to

(a) In case of the expected total cost model

C_f/C_p	$C(T_p^*)$	$P_f(T_p^*)$	$R_k(T_p^*)$
5.0	0.520	0.116	0.060
10.0	0.668	0.050	0.033
20.0	0.840	0.022	0.018

(b) In case of the cumulative damage model

C_f/C_p	$C(T_p^*)$	$P_f(T_p^*)$	$R_k(T_p^*)$
5.0	0.650	0.455	0.296
10.0	1.174	0.455	0.534
20.0	2.222	0.455	1.011

단위시간당 기대비용은 각각 0.212, 0.152 그리고 0.118이다.

이상의 결과는 피해강도, $\lambda = 2.0$ 인 선형의 누적피해에 대한 결과이다. 이를 식 (11)에 있는 피해강도함수와 비교하면 $\lambda = a = 1.0, b = 0.0$ 에 해당한다. 따라서 이하에 $b \neq 0.0$ 인 비선형 누적피해에 따른 영향을 해석하였다. 모두 두 가지를 해석하였는데 하나는 $b = 0.5$ 다른 하나는 $b = 1.2$ 에 대한 것이다. 먼저 Fig. 5에 사용년수에 따른 평균 누적피해의 거동특성을 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 피해강도함수에서 a 가 일정할 경우, b 가 커짐에 따라 시간에 따른 누적피해는 초기에 크게 발생하다가 점진적으로 감소함을 알 수 있다. 식 (13)을 이용하여 산정된 각각의 경우에 대한 경제성 모형의 결과를 Fig. 6에 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 b 가 커

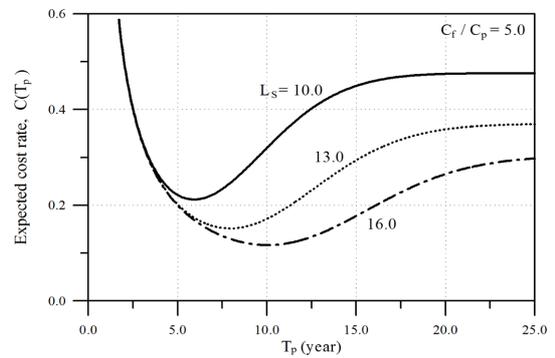


Fig. 4. Expected cost rates with respect to the limit states.

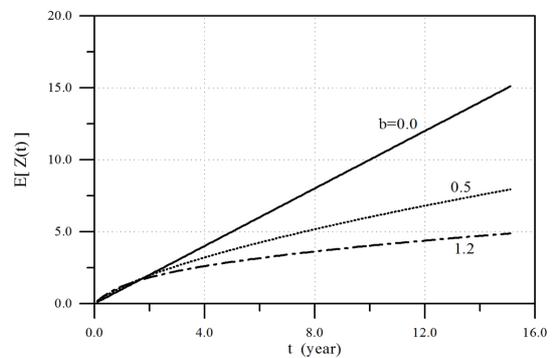


Fig. 5. Expected cumulative damage with respect to damage intensity function.

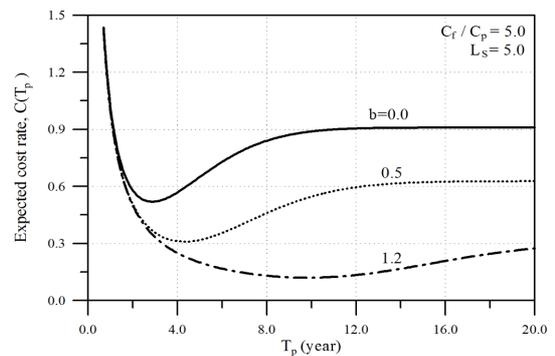


Fig. 6. Expected cost rates with respect to damage intensity function.

Table 3. Minimum expected cost rate, optimum maintenance period and statistical properties of cumulative damage with respect to the parameter b of damage intensity function

b	$C(T_p^*)$	T_p^* (year)	$E[Z(T_p^*)]$	$\sqrt{Var}[Z(T_p^*)]$
0.5	0.309	4.3	3.373	1.115
1.2	0.119	9.8	3.986	0.592

짐에 따라 최적 보수·보강 시간은 길어지고 단위시간당 기대비용은 작아진다. $b = 0.5$ 와 1.2 에 대하여 산정된 유지관리에 필요한 결과들을 Table 3에 정리하였다.

이상과 같이 본 연구에서 수립된 추계학적 기대비용모형이 만족스럽게 검증되었으며, 관련 변수들의 민감도 분석을 통하여 중요한 거동특성들도 확인하였다. 따라서 이하에 수립된 경제성 모형을 경사제에 처음 적용하여 피복재의 피해에 따른 최적 보수·보강 시점과 규모를 결정할 수 있는 방법을 기술하였다.

4. 경사제 피복재에 대한 적용

앞에서 수립된 추계학적 기대비용모형을 경사제 피복재에 올바르게 적용하기 위해서는 제체의 안정성과 관련된 피해에 대한 정의와 피해강도함수를 올바르게 추정해야 한다. 먼저 피해에 대한 정의로 본 연구에서는 van der Meer(1988)가 제안한 다음 식 (16)의 피해수준(damage level)을 사용하였다.

$$S = \frac{A_e}{D_n^2} \tag{16}$$

여기서 A_e 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. Lee and Kim(2013)은 식 (16)의 피해에 대한 정의와 Melby(1999)의 Series C'과 E'에 대한 실험자료를 이용하여 다음 식 (17)과 같은 피해강도함수를 추정하였다. 단위 년에 하나의 태풍(annual maximum)이 내습한다는 가정하에 누적피해의 평균을 비교하는 방법을 사용하였다.

$$\zeta_C(x) = 0.45x^{0.01} \tag{17a}$$

$$\zeta_E(x) = 2.00x^{0.1} \tag{17b}$$

수심이나 피복재의 대표직경 등 기하학적 변수들을 고정시킨 상태에서 각기 다른 유의파고와 평균주기를 갖는 태풍들이 연속으로 내습할 때 관측된 누적 피해수준 자료를 이용하였다. 특히 Series C'는 $1.69 \leq N_s \leq 2.49$ 에 해당하는 자료이다. 여기서 $N_s = H_s / \Delta D_m$, $\Delta = \rho_s / \rho_w - 1$, ρ_s 와 ρ_w 는 각각 피복재와 해수의 밀도이다. 한편 Series E'은 $0.85 \leq N_s \leq 1.70$ 에 해당하는 자료로 상대적으로 Series C'보다 N_s 가 작은 경우가

다. 기하학적 조건이 동일할 때 N_s 가 작다는 의미는 유의파고가 상대적으로 작은 경우를 의미한다. 따라서 식 (17)을 이용하여 해석하면 각기 다른 특성을 갖는 태풍에 대한 최적의 보수·보강 시점과 규모를 해석할 수 있다. 우리나라의 경우 동해, 남해, 서해 등 권역별로 하중발생 사상에 따른 영향을 해석할 수 있다.

한편 경사제 피복재를 해석하기 위하여 저항한계, L_S 를 다음과 같이 세 가지로 구분하여 정의하였다. 허용한계, S_A , 사용한계, S_M 그리고 극한한계, S_F 이다. 허용한계는 최초 설계시 부여된 피해의 허용수준이고, 사용한계는 기능을 올바르게 유지하는데 필요한 피해수준이다. 마지막으로 누적피해수준이 극한한계 이상이 되면 경사제 제체는 파괴된다. 현재 경사제를 설계할 때도 허용한계와 사용한계 그리고 극한한계를 함께 사용한다. 구조물의 피해수준 관점에서 보면 극한한계가 가장 높고 그 다음이 사용한계 그리고 허용한계 순이다. 본 연구에서는 PIANC(1992)에서 정의한 $S_A = 2.0$, $S_M = 6.0$ 그리고 $S_F = 14.0$ 을 적용하였다. 본 연구에서는 허용한계를 이용하여 설계 당시 수준으로 보수·보강 규모를 결정할 수 있는 방법을 제안하였다. 이는 보수·보강을 하고 나면 구조물의 안정성이 최초 설계 당시 수준으로 회복됨을 의미한다.

사용한계와 극한한계는 변동계수 0.15를 갖는 대수정규분포를 따른다고 가정하였다. Series C'에 대한 추계학적 기대비용모형에 의한 결과를 Fig. 7에 제시하였다. 사용한계와 극한한계에 대한 결과이다. 전반적으로 제 3절에서 분석된 결과와 유사한 특징과 경향을 나타내고 있다. Table 4에 사용

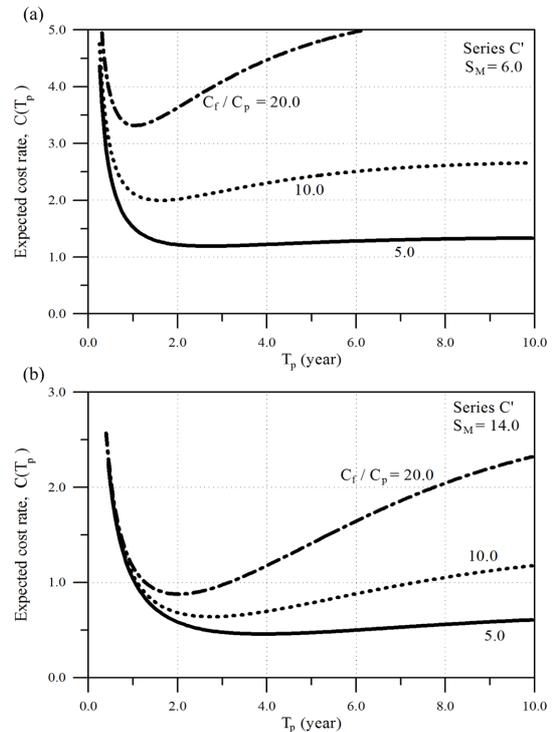


Fig. 7. Expected cost rates with respect to C_f/C_p (a) on the serviceability limit state and (b) the ultimate limit state for Series C'.

Table 4. Optimum repair time and risks with respect to C_f/C_p for $S_M = 6.0$ of Series C'

C_f/C_p	$C(T_p^*)$	T_p^* (year)	$P_f(T_p^*)$	$R_k(T_p^*)$
5.0	1.190	2.7	0.408	0.486
10.0	1.999	1.6	0.212	0.424
20.0	3.314	1.1	0.125	0.414

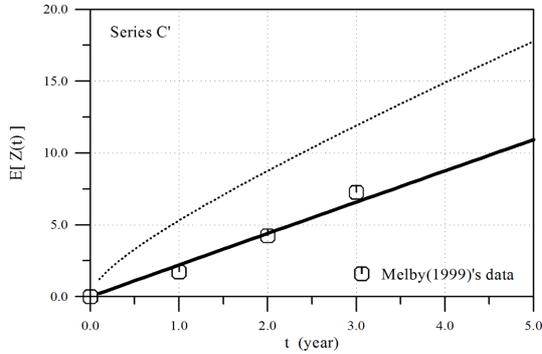


Fig. 8. Expected cumulative damage for Series C'.

Table 5. Repair level with respect to C_f/C_p for $S_M = 6.0$ of Series C'

C_f/C_p	As good as new level
5.0	$8.995D_n^2$
10.0	$5.438D_n^2$
20.0	$3.679D_n^2$

한계에 대한 단위시간당 기대비용이 최소가 되는 최적 보수·보강 시점과 위험도를 제시하였다. 따라서 유지관리의 다른 한 축인 보수·보강의 규모를 결정해야 한다. 이를 위해서는 사용년수에 따른 누적피해의 거동을 알아야 한다. 식 (14)와 식 (17)을 이용하여 산정된 경사제 피복재의 사용년수에 따른 누적피해를 Melby(1999)의 실험자료와 함께 Fig. 8에 제시하였다. 비록 실험자료의 수가 적지만 두 결과가 잘 일치한다. 실선은 사용년수에 따른 누적피해의 평균이고, 점선으로 표시된 결과는 표준편차 만큼 더한 값이다. Fig. 8의 점선을 이용하여 앞에서 제시한 설계 당시 수준(as good as new level)에 해당하는 보수·보강의 규모를 산정하여 Table 5에 제시하였다. 누적피해의 통계적 변동성을 고려하고 안정적으로 산정한 결과이다. 따라서 Table 4와 Table 5의 결과를 이용하면 최적의 보수·보강 시간과 규모를 결정할 수 있다. 예로 $C_f/C_p = 5.0$ 의 경우 최적 보수·보강 시기는 2.7년이고 그 규모는 약 $8.995D_n^2$ 이 된다.

한편 Series E'의 사용한계와 극한한계에 대한 추계학적 기대비용모형에 의한 결과를 Fig. 9에 제시하였다. 사용한계에 대한 단위시간당 기대비용이 최소가 되는 최적 보수·보강 시점과 위험도를 제시한 Table 6을 보면 Series C' 보다 상대적으로 최적의 보수·보강 시간은 길고 위험도는 작다. 이는 이미 앞에서 언급한 바와 같이 Series C' 보다 유의과고가 작아 피복재의 누적피해가 완만히 발생하기 때문이다. 보수·

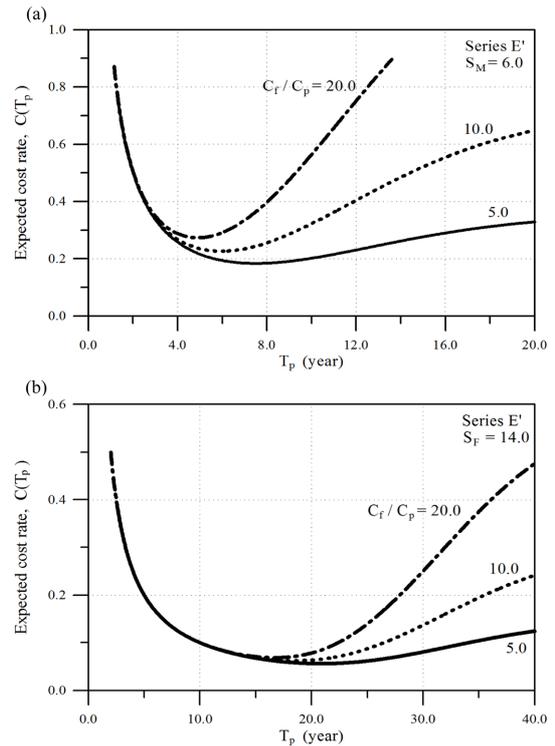


Fig. 9. Expected cost rates with respect to C_f/C_p (a) on the serviceability limit state and (b) the ultimate limit state for Series E'.

Table 6. Optimum repair time and risks with respect to C_f/C_p for $S_M = 6.0$ of Series E'

C_f/C_p	$C(T_p^*)$	T_p^* (year)	$P_f(T_p^*)$	$R_k(T_p^*)$
5.0	0.184	7.5	0.089	0.016
10.0	0.227	6.0	0.039	0.009
20.0	0.274	4.9	0.018	0.005

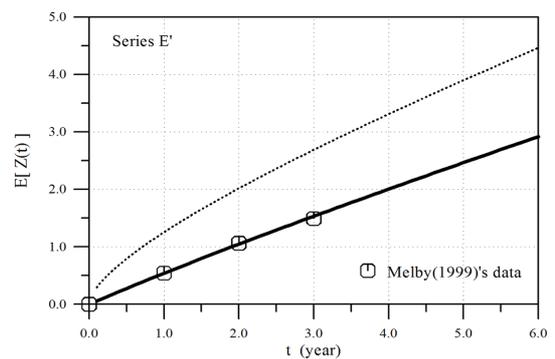


Fig. 10. Expected cumulative damage for Series E'.

보강의 규모를 결정하는데 필요한 누적피해를 Fig. 10에 제시하였다. 동일하게 실선은 사용년수에 따른 누적피해의 평균이고, 점선으로 표시된 결과는 표준편차 만큼 더한 값이다. 점선을 기준으로 설계 당시 수준에 해당하는 보수·보강의 규모를 산정하여 Table 7에 제시하였다.

이상에 제시한 경사제 피복재에 대한 적용 결과를 보면 중

Table 7. Repair level with respect to C_f/C_p for $S_M = 6.0$ of Series E'

C_f/C_p	As good as new level
5.0	$3.281D_n^2$
10.0	$2.465D_n^2$
20.0	$1.841D_n^2$

요도에 따라 보수·보강 시점과 규모가 다르게 산정되었다. 중요도가 상대적으로 높은 구조물일 수록 자주 보수·보강하는 것이 바람직하다는 정성적인 결과 뿐만 아니라 보수·보강 시점과 규모에 대한 정량적 결과를 얻을 수 있었다. 앞으로 개발된 최적화 모형의 현장 적용성을 높이기 위해서는 실측자료를 이용한 지속적인 연구가 필요하다. 또한 경제적 관점에서 시투법에 정의된 유지관리 시기와 정도에 대한 재평가도 이루어져야 한다.

5. 결 론

비선형 누적피해모형과 경제성 모형을 결합하여 추계학적 기대비용모형을 개발하고 이를 경사제 피복재에 적용하였다. 또한 현행 설계 기준에 맞춰 비용과 성능이 균형된 최적화된 기준으로 어느 시점에 어느 정도의 보수·보강이 이루어져야 하는지를 결정할 수 있는 방법론을 제시하였다.

본 연구에서 개발된 추계학적 기대비용모형이 만족스럽게 검증되었으며, 관련 변수들의 민감도 분석을 통하여 중요한 거동특성들도 확인하였다. 극한한계를 초과하는 파괴가 발생된 후 복구하는 비용이 클 수록 예방적 유지보수를 위한 최적 보수·보강 시간은 짧아지고 단위시간당 기대비용은 커진다. 선형 및 비선형 누적피해에 대한 해석 결과에 의하면 동일한 비용조건에서 피해강도함수의 a 가 일정할 경우, b 가 커짐에 따라 최적 보수·보강 시간은 길어지고 단위시간당 기대비용은 작아진다. 또한 저항한계 L_s 가 작아짐에 따라 최적 보수·보강 시기는 짧아지고 단위시간당 기대비용은 커진다.

마지막으로 추계학적 기대비용모형을 경사제 피복재에 처음으로 적용하였다. 피복재의 대표입경이 주어졌을 때 각기 다르게 내습하는 태풍의 규모에 따른 해석을 수행하였다. 또한 사용한계 및 극한한계 등 저항한계에 따른 경제성 분석도 동시에 수행하였다. 특히 본 연구에서는 허용한계를 이용하여 설계 당시의 수준으로 보수·보강하는 방법을 제안하였는데 하중 및 저항조건 뿐만 아니라 구조물의 중요도에 따라 보수·보강 시점과 규모가 각기 다르게 산정되었다. 따라서 본 연구에서 개발된 추계학적 기대비용모형을 이용하면 내습하는 태풍의 규모나 설계조건에 따라 경사제를 최적 유지관리를 할 수 있는 보수·보강 시점과 보수·보강규모를 쉽게 추정할 수 있다.

앞으로 개발된 최적화 모형의 현장 적용성을 높이기 위해서는 실측자료를 통한 추가적인 검증과 시간에 따른 비용의 가치변화에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- Barlow, R.E., and Hunter, L.C. (1960). Optimum preventive maintenance polices, *Op. Res.*, 8, 90-100.
- British Standards Institution (1984). BS3811 Glossary of maintenance terms in Tero- technology, BSI, London.
- Dekker, R. (1995). Applications of maintenance optimization models: a review and analysis, *Rei. Eng. and Sys. Saf.*, 51, 229-240.
- Ito, K., and Nakagawa, T. (2011). Comparison of three cumulative damage models, *Qual. Tch. & Quant. Mang.*, 8(1), 57-66.
- Jardine, A.K.S., and Buzacott, J.A. (1985). Equipment reliability and maintenance, *European J. of Op. Res.*, 19, 285-296.
- Lee, C.-E. (2012). Stochastic reliability analysis of armor units of rubble-mound breakwaters subject to multiple loads, *Journal of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(2), 138-148. (in Korean).
- Lee, C.-E. (2013). Development of stochastic Markov process model for maintenance of armor units of rubble-mound breakwaters, *Journal of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 25(2), 52-62. (in Korean).
- Lee, C.-E. and Kim, S.U. (2013). Stochastic probability model for preventive management of armor units of rubble-mound breakwaters, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 33(3), 1007-1015. (in Korean).
- Lee, C.-E., Kim, G. and Kim, S.U. (2013). Stochastic reliability analysis of armor units of rubble-mound breakwaters under the multiple loads, *J. of Coastal Res.*, 65, 308-313.
- 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, 136(2), 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, 120(3), 824-845.
- Nguyen, D.G., and Murthy, D.N.P. (1981). Optimal preventive maintenance policies for repairable systems, *Op. Res.*, 29(6), 1181-1194.
- PIANC (1992). *Analysis of rubble mound breakwaters*, Supplement to Bull. N. 78/79, Brussels, Belgium.
- Pintelon, L.M., and Gelders, L.F. (1992). Maintenance management decision making, *European J. of Op. Res.*, 58, 301-317.

- Ross, S.M. (1980). Introduction to probability models, Academic Press, N.Y.
- Sanchez-Silva, M., Klutke, G-A., and Rosowsky, D.V. (2011). Life-cycle performance of structures subject to multiple deterioration mechanisms, *Struct. Saf.*, 33, 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.*, 14(1), 101-121.
- Taylor, H.M., and Karlin, S. (1984). An introduction to stochastic modeling, Academic Press, N.Y.
- 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, 203-211.
- van der Meer, J.W. (1988). Deterministic and probabilistic design of breakwater armor layers, *J. Waterway, Port, Coast., and Ocn. Eng.*, ASCE, 114(1), 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, 619-626.

원고접수일: 2013년 8월 6일

수정본채택: 2013년 9월 11일

게재확정일: 2013년 10월 2일