

해상 연약지반의 저치환율 개량에 대한 확률론적 최적화

한상현¹ · 김홍연² · 여규권^{2*}

¹서일대학교 토목공학과, ²삼부토건(주) 기술연구소

Probabilistic Optimization for Improving Soft Marine Ground using a Low Replacement Ratio

Sang-Hyun Han¹, Hong-Yeon Kim², and Geu-Guwen Yea^{2*}

¹Department of Civil Engineering, Seoil University

²Technology Research Division, Sambu Construction Co., Ltd.

Received 23 November 2016; received in revised form 2 December 2016; accepted 7 December 2016

본 연구에서는 방파제 하부지반을 저치환율 재료로 보강 및 개량하기 위한 치환율과 재하중 방치기간을 확률론적 최적화 기법을 이용하여 분석하였다. 해석에 필요한 확률변수의 불확실성을 최소화하기 위하여 사전자료를 활용한 베이시안 갱신결과 최대 39.8% 포인트까지 불확실성이 감소하였고, 특히 사전함수의 표본수가 더 많은 구간의 감소폭이 컸다. 치환율 결정을 위하여 저치환율 단면 중 15~40% 범위에서 일계신뢰도법 및 몬테카를로 시뮬레이션 방법에 의해 해석한 결과 목표파괴확률을 만족하는 치환율은 심층고결처리 및 쇄석다짐말뚝 구간에서 각각 20% 및 25% 이상으로 나타났다. 치환율에 대한 최적화를 위하여 생애주기비용 분석을 실시한 결과 목표파괴확률을 만족하는 범위 내에서 최적 치환율이 산정되었으며, 두 구간에서 각각 20% 및 30%가 가장 경제적인 것으로 결정되었다. 재하중의 방치기간에 대한 확률론적 해석결과 3개월 이상인 경우 모두 목표 파괴확률을 만족하는 것으로 나타났다.

주요어: 저치환율, 지반개량, 생애주기비용, 확률론적 해석, 쇄석다짐말뚝

To reinforce and improve the soft ground under a breakwater while using materials efficiently, the replacement ratio and leaving periods of surcharge load are optimized probabilistically. The results of Bayesian updating of the random variables using prior information decrease uncertainty by up to 39.8%, and using prior information with more samples results in a sharp decrease in uncertainty. Replacement ratios of 15%-40% are analyzed using First Order Reliability Method and Monte Carlo simulation to optimize the replacement ratio. The results show that replacement ratios of 20% and 25% are acceptable at the column jet grouting area and the granular compaction pile area, respectively. Life cycle costs are also compared to optimize the replacement ratios within allowable ranges. The results show that a range of 20%-30% is the most economical during the total life cycle. This means that initial construction cost, maintenance cost and failure loss cost are minimized during total life cycle. Probabilistic analysis for leaving periods of shows that three months acceptable. Design optimization with respect to life cycle cost is important to minimize maintenance costs and retain the performance of the structures for the required period. Therefore, more case studies that consider the maintenance costs of soil structures are necessary to establish relevant design codes.

Key words: Low replacement ratio, Soil improvement, Life cycle cost, Probabilistic analysis, Granular compaction pile

*Corresponding author: moonju@sambu.co.kr

© 2016, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

대부분 압축성이 큰 해상 연약지반 상에 놓이는 방파제나 호안구조물은 기초지반의 처리가 매우 중요하다. 기초지반 처리방법으로서 주로 모래다짐말뚝(SCP), 심층혼합처리(DCM), 쇄석다짐말뚝(GCP) 등이 활용되어 왔다. 이러한 방법으로 지반개량을 하면 원지반 점성토와는 성질이 다른 말뚝재료로 이루어진 복합지반이 형성되고 지반은 원지반 점성토와 모래 등 중간적 성질을 가지게 되며 지반공학적으로 어떻게 다루느냐는 매우 중요한 문제이다. 또한, 이러한 성질은 치환율에 따라 응력 및 침하거동이 달라지게 된다. 다짐말뚝이나 심층혼합처리공법을 설계함에 있어서 중요한 요소는 응력분담비와 치환율이다. 재하 시 원지반 점성토와 모래 등 이질의 개량재료가 받는 응력은 응력분담비에 의해 지배된다. 치환율은 개량 원지반 체적에 대한 개량재 재료의 체적 비로서 개량의 정도를 나타내며 주로 개량재료의 타설간격에 의해 결정된다. 과거에는 항만공사에서 주로 70% 내외의 치환율을 갖는 고치환율 공법이 대부분 이용되었으나, 근래에는 모래의 부족현상 등으로 치환율 40% 이하의 저치환율 공법이 늘어가는 추세이다.

쇄석다짐말뚝에 대한 현장시험 및 수치해석을 이용한 연구사례에서는 단일쇄석말뚝에서 치환율이 증가함에 따라 침하량이 감소하는 결과를 보였고, 특히 40% 이하의 저치환율에서는 치환율 증가에 따라 침하량이 급격하게 줄어들었으며, 50% 이상의 고치환율에서는 침하량이 완만하게 줄어들었다. 이러한 경향은 군 쇄석말뚝에서도 비슷하게 나타났다. 현장시험과 수치해석에서는 치환율이 증가함에 따라 응력분담비가 증가하는 것을 알 수 있었으나 그 증가경향은 다소 상이하였다. 현장시험(치환율 20~40%)에서는 응력분담비가 약 1.3~3.0인 반면, 수치해석(치환율 20~70%)에서는 그 범위가 약 3.2~5.5로서, 수치해석에서의 응력분담비가 현장시험에서의 그것보다 다소 크게 나타났다(정성민, 2004). 모래와 쇄석을 이용한 저치환율 다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담 거동은 압밀이 진행됨에 따라 그 특성이 변화하는 경향이 있다(유승경 등, 2005). 실내시험을 통한 DCM 개량지반의 거동파악 연구결과 침하량의 경우 치환율이 증가할수록 감소하고, 간극수압은 치환율이 증가함에 따라 초기 증가값이 작으며, 배수층에 가까울수록 소산속도가 빠른 경향이 있다. 또한, 침하량은 치환율이 증가할수록 작아지지만 응력분담비의 경우 치환율 35%일 때 가장 큰 양상을 보여 가장 효율적이고 경제적인 치환율이라는 연구결과도 있다(남정현, 2012). 쇄석다짐말뚝의 정재하시험 결과를 가지고 비선형 회귀분석을 통하여 극한지지력을 예측하고, 기존의 극한지지력 판정법과 비교함으로써 실제 극한지지력을 예측하는데 적합한 비선형 회귀모형이 제안된바 있다. 또한 극한지지력 판정법이 저항편향계수에 미치는 영향을 분석하

고, 한계상태설계법을 위한 데이터베이스 축적을 목적으로 정재하시험을 계획하는데 필요한 시험조건이 연구되기도 하였다(박준모 등, 2013). 저치환율 SCP(Sand Compaction Pile) 및 GCP(Granular Compaction Pile) 공법에 대하여 1g 모형시험을 수행한 결과에서는 연약지반 개량을 위해서 SCP의 대체공법으로 GCP공법을 적용할 경우 지지력 증가 효과, 침하저감효과 및 압밀축진효과가 SCP공법을 적용한 경우에 비해서 다소 우수한 것으로 나타났다(김병일 등, 2013). 쇄석다짐말뚝의 6개 사례를 가지고 일계신뢰도법을 이용하여 팽창파괴에 대한 목표신뢰도지수도 제안된바 있다(유영권 등, 2014). 반면, 심층고결처리 및 쇄석다짐말뚝의 치환율과 방치기간을 생애주기비용 측면에서 최적화한 연구 사례는 아직까지 미진한 상태이다.

본 연구에서는 방파제 하부지반에 저치환율로 개량된 쇄석다짐말뚝 및 심층고결공법에 대하여 확률론적 최적화 해석을 수행하였다. 먼저 사전정보를 이용하여 시험에서 얻어진 확률변수의 불확실성을 최소화시킨 후 일계신뢰도법과 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 적정한 치환율과 방치기간 범위를 파악하였다. 최종적으로 생애주기비용 최소화기법을 적용하여 치환율을 최적화하였다.

설계 특성치의 결정

확률론적 해석에 있어 특성치(characteristic value)를 선정하는 것은 매우 중요하다. 결정된 특성치에 따라 설계결과와 안정성과 경제성이 지배되기 때문이다. 따라서 적절하고 정밀한 시험에 의해 특성치가 결정되어야 하고 만약 통계적으로 자료의 분산이 큰 경우는 기존의 자료를 활용하는 등 변동성을 최소화하여야 경제적인 설계결과를 얻을 수 있다.

베이저안 이론

베이저안 접근법(Bayesian approach)은 이용할 수 있는 정보가 항상 제한되어있고 때에 따라 주관적 판단이 요구되는 문제에서 모수를 추정하는데 있어 유용하다. 모수를 추정할 때 가능한 값이나 모수의 범위에 대한 경험적 지식을 가지고 어떤 값이 다른 값보다 다소 많이 발생할 것이라는 직관적 판단을 하기도 한다. 여기서는 정규분포를 따르는 표본추출에 대한 베이저안 접근법의 개념을 다룬다.

정규분포에서의 우도함수

정규분포를 따르고 표준편차(σ)가 알려진 모집단의 모수(μ)에 대한 우도함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L(\mu) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - \mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

$$= \prod_{i=1}^n N_{\mu}(x_i, \sigma) \tag{1}$$

여기서, $N_{\mu}(x_i, \sigma)$ 는 평균 x_i , 표준편차 σ 인 μ 의 확률밀도 함수를 의미한다.

평균 μ , 표준편차 σ 인 m 개의 정규분포인 확률밀도함수의 곱 또한 다음과 같은 평균과 분산을 갖는 정규 확률밀도 함수이다.

$$\mu^* = \frac{\sum_{i=1}^m (\mu_i / \sigma_i^2)}{\sum_{i=1}^m 1 / \sigma_i^2}, \quad (\sigma^*)^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^m 1 / \sigma_i^2} \tag{2}$$

따라서, 우도함수 $L(\mu)$ 는 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} L(\mu) &= N_{\mu} \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i / \sigma^2)}{\sum_{i=1}^n (1 / \sigma^2)}, \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (1 / \sigma^2)}} \right) \\ &= N_{\mu} \left(\frac{(1 / \sigma^2) \sum_{i=1}^n x_i}{n / \sigma^2}, \frac{1}{\sqrt{n / \sigma^2}} \right) \\ &= N_{\mu} \left(\bar{x}, \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, \bar{x} 는 표본평균이다.

사후분포의 추정

베이저안 기법은 모수(μ)를 추정하는데 있어 사전정보가 존재하는 경우 그 판단정보를 포함시킴으로써 보다 신뢰도를 높일 수 있다는 것이 전통적인 모수 추정방법과의 차이이다. 이는 사전분포($f'(\mu)$)를 이용하여 직접적으로 이루어진다. 정규분포를 따르는 X 의 분산이 이미 알려져 있는 경우 $f'(\mu)$ 는 $N(\mu', \sigma')$ 로 나타낼 수 있고, 식 (3)의 우도함

수에 대한 μ 의 사후분포는 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} f''(\mu) &= kL(\mu)f'(\mu) \\ &= kN_{\mu} \left(\bar{x}, \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) N_{\mu}(\mu', \sigma') \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)는 2개의 즉, 우도 및 사전분포함수의 정규분포 확률밀도함수의 곱이므로 사후분포 $f''(\mu)$ 역시 정규분포가 되고 평균치와 표준편차는 다음과 같다.

$$\mu'' = \frac{[\bar{x} / (\sigma / \sqrt{n})^2] + [u' / (\sigma')^2]}{[1 / (\sigma / \sqrt{n})^2] + [1 / (\sigma')^2]} = \frac{\bar{x}(\sigma')^2 + u'(\sigma^2/n)}{(\sigma')^2 + (\sigma^2/n)} \tag{5}$$

$$\sigma'' = \sqrt{\frac{(\sigma')^2(\sigma^2/n)}{(\sigma')^2 + (\sigma^2/n)}} \tag{6}$$

식 (5)에서 평균치에 대한 베이저안 추정치는 각각 분산의 역수를 가중인자로 한 사전분포의 평균치 μ' 와 표본평균 \bar{x} 의 평균이다. 사후분포 평균의 추정치는 표본 수 n 이 클수록 표본의 평균에 접근한다. 또한, 사전분포 자료의 표준편차(σ') 또는 변동성이 커 신뢰도가 낮은 경우에도 표본의 평균에 접근하게 되어 표본추출의 효율성이 향상된다. 즉, 식 (5)는 평균치 μ 를 추정하기 위하여 사전정보가 얼마나 관측자료에 체계적으로 결합되는지 보여준다. 식 (6)에서 μ 에 대한 사후분포의 분산은 항상 $(\sigma')^2$ 이나 (σ^2/n) 보다 작다. 즉, 사후분포의 분산은 항상 사전분포나 우도함수의 분산보다 작다.

사전정보를 이용한 특성치 결정

확률변수가 되는 우도함수의 분산보다 작은 사후분포를 추정함으로써 모수의 신뢰도를 높이기 위하여 베이저안 이론을 활용하였다. 연약지반의 침하량과 압밀시간을 계산하는데 필요한 파라미터 중 흙의 단위중량(γ), 압축지수(C_c) 및 초기 간극비(e_0)를 확률변수로 가정하였고, 지반특성이 상이한 두 구간 즉, 심층고결처리(SRC) 및 쇄석다짐말뚝(GCP) 구간의 우도함수 및 사전함수 통계량은 Table 1과 같다. 수평방향 압밀계수(C_h)는 사전함수의 부재로 우도함수의 평균과 표준편차를 그대로 활용하였다. 이들 확률변수의 변동계

Table 1. Basic statistics for random variables

Random variable		SRC area				GCP area			
		μ	σ	COV	n	μ	σ	COV	n
γ (kN/m ³)	Likelihood	15.91	0.36	0.02	6	15.22	0.27	0.02	21
	Prior	14.82	0.16	0.01	16	14.82	0.16	0.01	16
C_c	Likelihood	1.00	0.13	0.13	6	1.09	0.16	0.15	21
	Prior	1.71	0.37	0.21	16	1.71	0.37	0.21	16
e_0	Likelihood	1.89	0.16	0.08	6	2.26	0.21	0.09	21
	Prior	2.48	0.11	0.04	16	2.48	0.11	0.04	16
C_h (cm ² /sec)		-	-	-	-	0.00135	0.0001	0.074	21

Table 2. Typical ranges of soil variability (Han et al., 2012)

Random variable	COV	References
γ	0.03~0.10	Hammitt (1966), Harr (1984), Kulhawy (1992), Lacasse et al. (1996), Phoon et al. (1996), Lumb (1974)
C_c	0.10~0.52	Lumb (1966; 1974), Corotis et al. (1975), Harr (1984), Kulhawy (1992), Duncan (2000)
e_o	0.07~0.32	Lacasse et al. (1996), Corotis et al. (1975), Lumb (1966; 1974), Lee et al. (1983)
C_h	0.25~1.00	Duncan (1999), Lee et al. (1983), Lumb (1974)

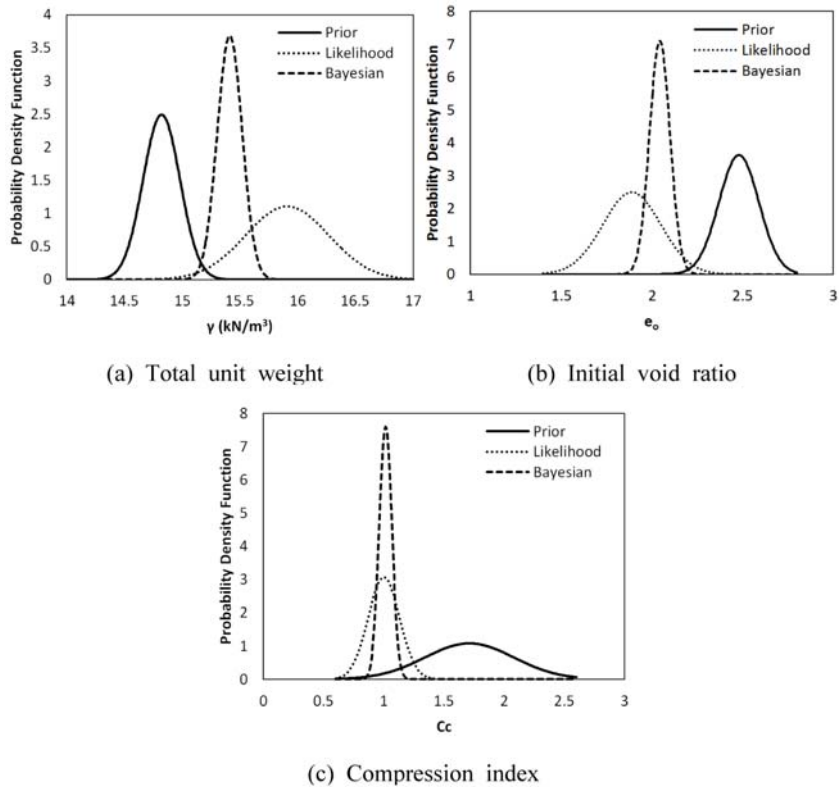


Fig. 1. PDF for prior, likelihood, and Bayesian functions (SRC area).

수는 Table 2의 기존문헌에 나타난 일반적인 범위와 비교할 때 압축지수의 사전함수를 제외하고는 전반적으로 매우 낮은 수준이며 모두 일반적인 범위 내에 있다.

사전함수와 우도함수 및 이를 이용하여 얻은 사후함수의 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)를 Fig. 1과 2에 나타내었다. 그래프의 위치로부터 모든 확률변수의 사후함수는 사전 및 우도함수의 평균치 범위 내에서 산정되었고, 사후함수 그래프의 확률밀도 값이 커짐으로부터 사전 및 우도함수에 비해 분산이 크게 감소하였음을 알 수 있다.

사전 및 우도함수에 비하여 사후함수의 분산이 감소된 것은 불확실성이 감소되었음을 의미하고 각 확률변수의 차원을 정규화한 변동계수(COV)로 나타낼 수 있다. 베이زي안 접근법을 적용하기 전과 후의 변동계수 감소 폭을 Fig. 3에 나타내었다. 우도함수 대비 SRC구간의 변동계수는 31.0~39.8%, GCP구간은 19.9~21.6% 포인트 수준으로 SRC구간

의 감소가 크게 나타난다. 이는 표본 수가 보다 많은 사전함수를 이용했기 때문으로 판단된다.

확률론적 해석

본 연구에 활용한 해석이론

지반개량을 위한 치환율과 압밀기간에 대한 신뢰도지수를 구하기 위하여 한계상태함수를 파괴면 부근에서 1차(first order)근사화 함으로써 해석의 정밀도를 높인 일계신뢰도법을 이용하였고, 직접 파괴확률을 산정하는 시뮬레이션 방법으로 해석결과를 검증하였다. 또한, 최적화를 목적으로 생애주기비용 최소화 방법을 활용하였다.

일계신뢰도법

일계신뢰도법(First Order Reliability Method, FORM)은

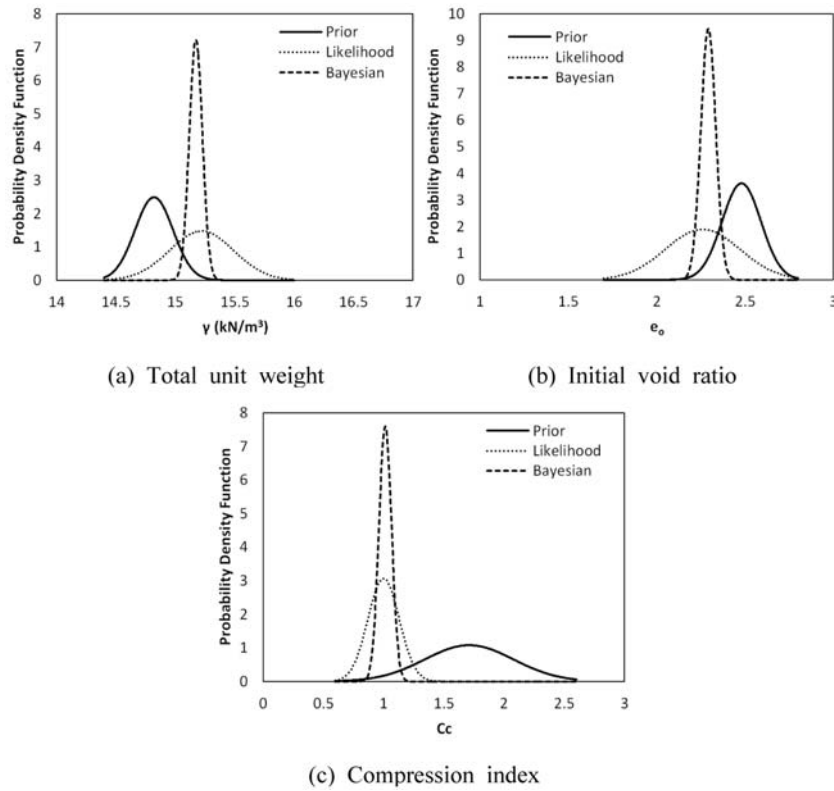


Fig. 2. PDF for prior, likelihood, and Bayesian functions (GCP area).

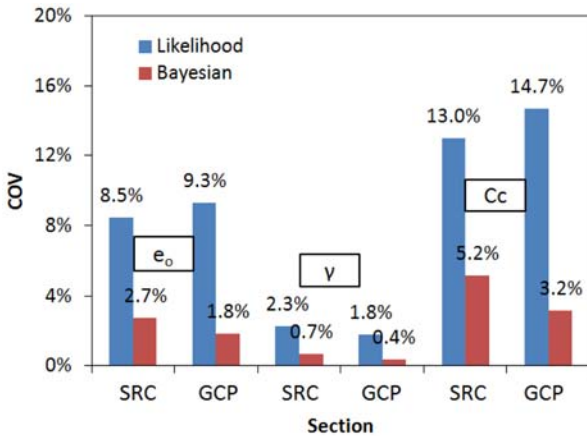


Fig. 3. COV decrease by the Bayesian approach.

설계점(design point) 근처에서 파괴확률을 산정하는데, 먼저 통계적으로 서로 독립인 확률변수 \vec{X}^* 를 식 (7)과 같이 선형변환을 이용하여 표준정규분포의 확률변수 \vec{X}^T 로 변환한다.

$$\vec{X}^T = \frac{\vec{X}^* - \mu_{\vec{X}}}{\sigma_{\vec{X}}} \quad (7)$$

여기서, $\mu_{\vec{X}}$ 는 각 확률변수의 평균, $\sigma_{\vec{X}}$ 는 표준편차를 의미한다.

그리고 식 (8)의 신뢰도지수(reliability index, β)와 각 확

률변수의 민감도지수($\alpha_{\vec{X}}$)의 관계로부터 두 변수의 반복계산을 통하여 일정한 값에 수렴하는 신뢰도지수 값을 결정한다. 식 (8)은 확률변수 사이에 서로 상관성이 없을 때의 관계이며, 표준화된 공간상의 각 확률변수 축에서 신뢰도지수의 방향여현(direction cosine)을 의미한다.

$$\alpha_{\vec{X}} = \left(\frac{\partial Z}{\partial \vec{X}} \vec{X}^* \right) / \sqrt{\sum \left(\frac{\partial Z}{\partial \vec{X}} \right)^2} \vec{X}^* = -\frac{\vec{X}^T}{\beta} \quad (8)$$

또한, 모든 확률변수의 $\alpha_{\vec{X}}$ 는 식 (9)의 관계를 만족하도록 결정해야 한다.

$$\sum (\alpha_{\vec{X}})^2 = 1 \quad (9)$$

몬테카를로 시뮬레이션

몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation, MCS) 기법은 구조물의 파괴에 관계된 모든 확률변수들의 평균과 분산 및 결합 확률밀도함수(Joint PDF)를 이용하여 직접적으로 한계상태함수가 0보다 작을 확률 즉, 파괴확률을 비교적 정밀하게 산정하는 방법이다.

파괴확률은 한계상태함수에 대한 확률밀도함수 $f_X(x)$ 를 알

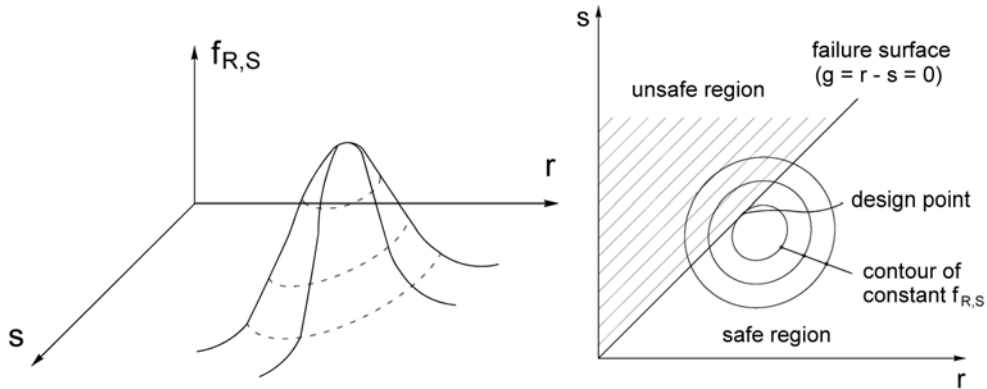


Fig. 4. Two-dimensional joint PDF for load and resistance.

고 있을 때 다음과 같다. 즉, 함수 $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 의 결합 확률밀도함수가 f_X 라면 파괴확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = Prob(g \leq 0) = \int_{R \leq S} f_X(x) dx \tag{10}$$

여기서, x 는 함수 X 를 구성하는 확률변수이며, R 과 S 의 두 개 변수만 고려한다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = \int_{R \leq S} f_{(R,S)}(r, s) dr ds \tag{11}$$

이 식은 Fig. 4와 같이 도식화할 수 있다. 만약, 여기서 변수가 두 개 이상이 된다면 결합 확률밀도함수는 하나의 면으로 나타낼 수 없고 다차원적으로 표현될 것이다. 그림에서 설계점(design point)은 파괴면에서 결합 확률밀도함수가 최대가 되는 점 즉, 가장 높은 확률의 파괴점을 나타낸다. 한편, 결합 확률밀도함수라는 개념은 확률변수들이 서로 상관성 없이 독립적이라 가정하면 식 (10)은 n 개의 적분으로 나타난다.

$$P_f = \iiint_{R \leq S} \dots \int f_{X_1}(x_1) \dots f_{X_n}(x_n) dx_1 \dots dx_n \tag{12}$$

여기서, f_{X_i} 는 변수 X_i 의 주변 확률밀도함수(marginal PDF)라 한다. 일반적으로 위 식에서 변수의 개수 n 이 5보다 커지면 다중적분의 계산량이 막대하게 된다. 뿐만 아니라 결합 확률밀도함수는 모든 확률변수에 대한 복잡한 비선형함수의 형태이므로 이것을 구하는 것도 용이하지 않다. 따라서, 다음과 같은 방법으로 파괴확률을 추정한다.

각 확률변수의 분포특성과 표준편차를 이용하여 평균치를 중심으로 일정개수의 난수(random number)를 발생시킨다. 이렇게 생성된 각 확률변수에 대한 난수를 가지고 한계상태 함수를 모의계산하고 그 계산치가 0보다 작은 개수($N_{g(x) \leq 0}$)

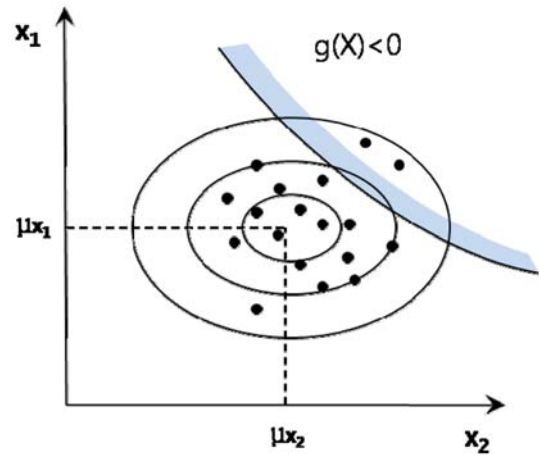


Fig. 5. Calculation of the limit state function with random numbers (Kim, 2010).

를 전체 모의개수(N_{total})로 나누어 식 (13)과 같이 파괴확률을 구한다.

$$P_f = \frac{N_{g(x) \leq 0}}{N_{total}} \tag{13}$$

Fig. 5는 각 모의결과를 평면좌표 상에 점으로 나타낸 예이다. 전체 모의횟수 중 $g(X) < 0$ 인 파괴면내에 위치한 점의 개수는 파괴가 발생한 횟수를 나타낸다.

생애주기비용 최소화 기법

생애주기비용(Life Cycle Cost, LCC) 최소화 분석에서는 설계 공용수명동안 LCC를 최소화하는 것이 가장 바람직하다고 가정하며 그때의 파괴확률로부터 최적의 설계제원을 구하는 것이 목적이다.

LCC란 구조물의 기획 단계에서부터 폐기 처분 시까지의 모든 비용 즉, 계획 및 설계비, 건설비, 운용관리비, 폐기물 처분비용 등을 모두 합한 것으로 시설물의 생애 중 필요한 모든 비용을 말하며, 기대총비용(Expected Total Cost; ETC) 이라고도 한다. LCC의 산정 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

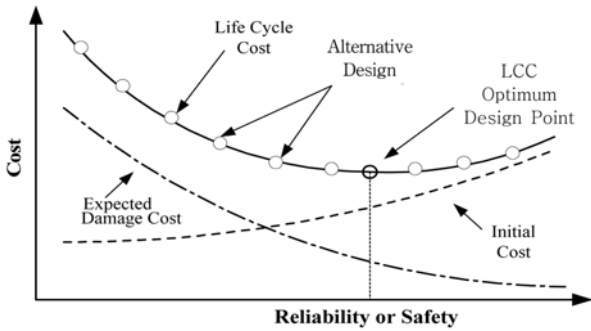


Fig. 6. Optimization of LCC based on reliability.

$$LCC(ETC) = C_I + C_M + C_F \quad (14)$$

여기서, C_I 는 초기건설비용(initial construction cost), C_M 은 유지관리비용(maintenance cost)이고 C_F 는 파괴손실비용(failure loss cost)이다.

Fig. 6에 나타낸 바와 같이 최적 신뢰도지수(또는 파괴확률)는 LCC가 최소가 될 때의 신뢰도지수가 된다. 일반적으로 LCC 곡선에서는 최적 설계점을 기준으로 좌측과 우측이 각각 다른 경향을 나타낸다. 위험측인 좌측에서는 신뢰도지수가 증가함에 따라 LCC는 급격히 증가하여 파괴확률 변화에 대하여 민감하다. 반면, 안전측인 우측에서는 신뢰도지수가 증가함에 따라 LCC는 서서히 증가한다.

초기건설비용(C_I)은 직접비와 간접비를 비롯한 건설비용에 설계 및 감리비와 초기안전점검비가 포함된 비용이다. 이러한 비용은 모두 프로젝트의 초기 즉, 기준시점에 발생한다. 설계공용기간 즉, 미래에 발생할 유지관리비용(C_M)을 정확히 산정하는 것은 쉽지 않으며, 일반적으로 유지관리비용은 점검비용과 직접손실비용의 합으로 나타낼 수 있다. 파괴손실비용(C_F)은 다음 식과 같이 파괴에 의한 연 최대 손실비용(C_f)에 단위 년 파괴확률(P_f)을 곱하여 산정할 수 있다.

$$C_F = C_f \cdot P_f \quad (15)$$

C_f 는 파손 시 단위복구비용과 단위운영손실비용을 합산한 비용이다. 단위복구비용은 물리적인 복구를 위한 비용으로 대규모 재해가 발생한다고 가정할 때 초기건설비용의 약 125~150%로 간주할 수 있다(Nagao, 2000). 단위운영손실비용은 해상교통비용, 해상교통시간비용, 육상교통비용 및 육상교통시간비용의 합으로서(Shibasaki, 2004), 배후지의 조건에 따라 다르지만 단위복구비용의 약 70~150%로 간주할 수 있다(Ozaki 등, 2007).

파괴손실비용 산정 시 해당구조물의 공용기간(N)을 고려하기 위하여 단위 년 파괴확률(P_f)을 이용하여 사용 년 파괴확률(P_f^N)을 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$P_f^N = 1 - (1 - P_f)^N \quad (16)$$

한계상태함수의 수립

신뢰성 해석을 위한 한계상태함수(Z)는 기본적으로 저항값(R)과 하중값(S)의 차로써 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Z = R(X) - S(X) \quad (17)$$

여기서, X 는 각 저항과 하중계산에 포함되는 확률변수이다.

위의 한계상태함수에서 $Z > 0$ 인 경우는 저항값이 하중값보다 커 안전한 조건이고 반대로 $Z < 0$ 인 경우는 안정성이 확보되지 못한 상태이다. $Z = 0$ 인 경우는 저항값과 하중값이 같은 상태로 한계상태(limit state)라 한다.

본 연구에서는 심층고결처리 및 쇄석다짐말뚝으로 개량된 기초지반의 침하량과 그 허용치를 기준으로 적절한 치환율과 압밀기간을 결정하는 것이 목적이므로 다음과 같이 한계상태함수를 수립할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z &= S(C_c, C_h, \gamma, e_o) - S_{target} \\ &= \beta \cdot S \cdot U(T_h) - S_{target} \\ &= \frac{1}{1 + (n-1)a_s} \cdot \frac{C_c}{1 + e_o} \cdot \text{Hlog}\left(\frac{P_o + \Delta P}{P_o}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{8 \frac{C_h t}{d_c^2}}{F(n)}\right) \right] - S_{target} \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, S 는 발생침하량, S_{target} 는 목표 침하량이고 그 차이가 잔류침하량이 된다. β 는 복합지반 및 무처리 지반의 침하량 비 즉, 침하감소계수로서 본 연구와 같은 저치환율 개량에서는 응력분담효과를 나타낸다. $U(T_h)$ 는 Barron에 의한 목표압밀도를 나타낸다. 확률변수는 원지반의 압축지수(C_c), 수평방향 압밀계수(C_h), 단위중량(γ) 및 초기 간극비(e_o)이다. 각 확률변수의 확률분포는 적합도 검증을 통하여 모두 정규분포로 간주하였다.

치환율에 대한 해석

심층고결 처리는 주로 고결체의 강성이 지반개량에 주된 역할을 하는 반면, 쇄석다짐말뚝은 입상재료의 강성과 함께 간극수 배출에 의한 원지반의 강도증가도 개량효과에 기인하므로 응력분담효과가 상이하다. 따라서, 이를 고려하여 적절한 수준의 치환율을 찾아내고자 심층고결 처리되는 점속구간의 치환율은 15~30%까지, 쇄석다짐말뚝으로 개량되는 간부구간은 25~40%까지 변화시키며 해석하였다. 목표파괴확률은 2%로 설정하여 적절한 치환율을 결정하였다. Table 3 및 Fig. 7은 해석결과 파괴확률(허용잔류침하량을 초과할 확률) 및 신뢰도지수를 나타낸다. SRC구간의 경우 치환율 20% 이상일 때, GCP구간의 경우 치환율 25% 이상일 때 최소 파괴확률 1.80~2.10%로 최소한의 안정성 확보가 가능한 것으로 나타났으며, 파괴확률을 신뢰도지수로 나타내면 2.05~2.10 수준이다. SRC구간 및 GCP구간에서 산정된 치환율 20% 및 25% 이상의 범위에서 LCC 분석을 통하여

Table 3. Probability of failure for different replacement ratios (Unit : %)

Area	SRC area				GCP area			
Target probability of failure	$P_{f(target)} = 2.0\%$							
Replacement ratio (%)	15	20	25	30	25	30	35	40
FORM	10.80	2.10	0.30	0.10	2.10	0.90	0.50	0.10
MCS	11.30	1.80	0.20	0.10	1.80	0.70	0.40	0.10

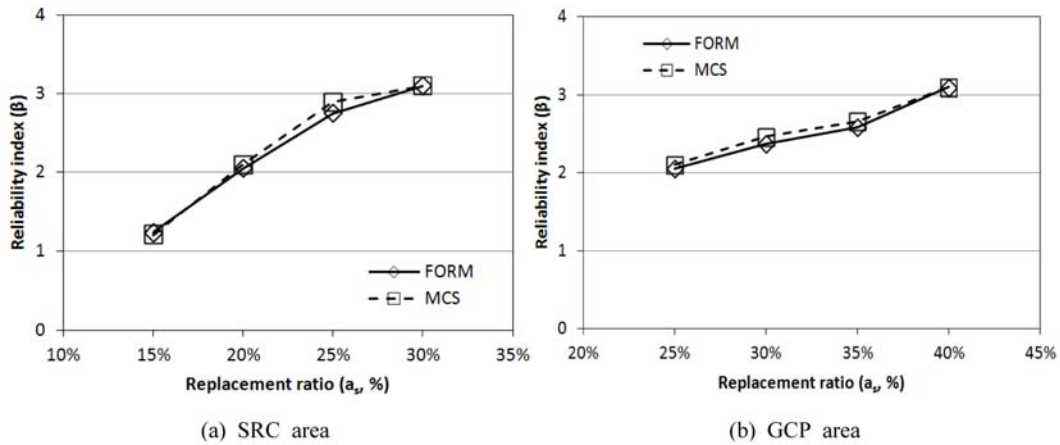


Fig. 7. Reliability index with respect to replacement ratio.

Table 4. Probability of failure for different leaving periods (Unit : %)

Area	GCP area									
	Mid section					End section				
Target probability of failure	$P_{f(target)} = 0.5\%$									
Leaving Period (month)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
FORM	17.30	1.40	0.40	0.10	0.10	2.10	1.90	0.10	0.10	0.10
MCS	16.80	1.00	0.20	0.10	0.10	1.80	1.70	0.10	0.10	0.10

최적의 치환율을 결정하는 것이 타당하다. Fig. 7에서 SRC 구간의 신뢰도지수는 일정하게 증가하다가 치환율 25% 이후로 증가율이 둔화되는 반면, GCP구간은 치환율 35% 이후로 증가율이 커지는 양상을 보인다.

방치기간에 대한 해석

허용잔류침하량(30 cm)을 만족하는 목표압밀도를 기준으로 축조기간(2개월)과는 별도로 방치기간을 2개월에서 4개월까지 변화시키며 요구 압밀도를 만족하는 방치기간을 찾고자 하였다. 방치기간 해석은 쇄석다짐말뚝이 적용되는 구간(간부 및 두부)에 대하여 실시하였으며, 목표파괴확률은 연장에 따른 연약층 침도 차이와 지층의 불균질성으로 인한 침하량 차이를 감안하여 치환율 해석에 적용된 수치보다 다소 안전측인 0.5%를 적용하였다. 해석결과 Table 4에 나타났듯이 파괴확률 0.5%를 만족하는 방치기간은 간부와 두부에서 모두 3개월로 나타났다. 그때의 파괴확률은 0.1~0.4%이고 이는 신뢰도지수 2.66~3.10에 해당한다. Fig. 8은 방치

기간에 따른 파괴확률을 신뢰도지수로 나타낸 것으로 선형에 가깝게 증가하다가 방치기간 3.5개월부터 일정한 신뢰도지수를 유지하는 것으로 나타났고, MCS 해석결과가 상대적으로 안전측으로 나타났다. 그림에서 2개월의 방치기간부터 간부와 두부에서의 신뢰도지수에 차이가 나는 것은 식 (18)의 한계상태함수에서 확정론적 파라미터인 연약층 침도 (H)와 확률변수 γ 의 종속변수인 유효연직하중(P_0)이 위치에 따라 상이하기 때문이다. 또한, 간부는 방치기간 증가에 따라 신뢰도지수가 비교적 완만하게 증가하는 반면, 두부의 경우 2.5개월 이후 급격히 증가하는데 이는 연약층 두께의 차이(간부 약 34 m 이하, 두부 약 18 m 이하)로 인하여 동일한 치환율 및 방치기간에서 두부구간의 압밀침하 속도가 상대적으로 큰데서 기인하는 것으로 보인다.

생애주기비용 최소화를 위한 분석

LCC 분석을 이용하여 치환율을 일정하게 변화시키며 그에 따른 초기공사비와 파괴 손실비용 변화, 그리고 궁극적

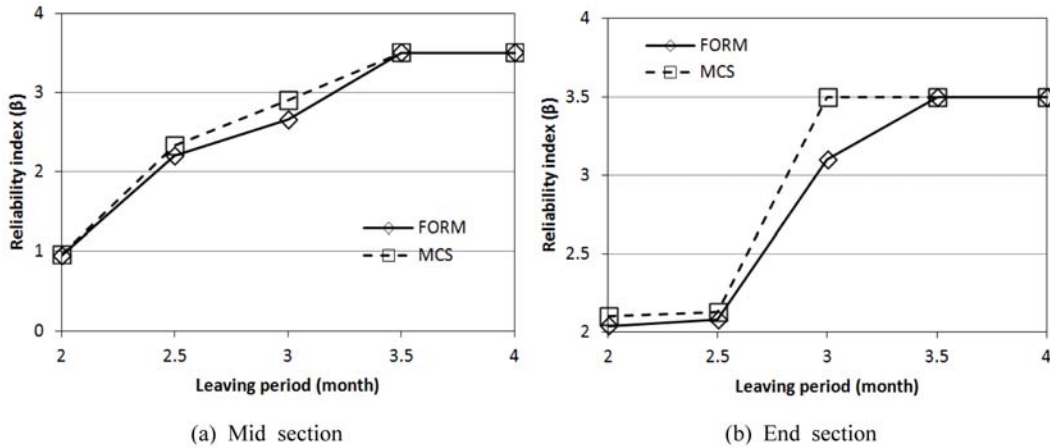


Fig. 8. Reliability index with respect to leaving period.

Table 5. Failure loss costs for different replacement ratios

Replacement ratio (%)	SRC area				GCP area			
	15	20	25	30	25	30	35	40
$C_i (\times 10^4 \text{won/m})$	4,500	5,500	7,350	8,650	4,930	5,280	5,710	6,410
P_f	0.113	0.018	0.002	0.001	0.018	0.007	0.004	0.001
$C_f (\times 10^4 \text{won/m})$	559.35	108.90	16.17	9.52	97.61	40.66	25.12	7.05
$C_F (\times 10^4 \text{won/m})$	10,403.91	2,025.54	300.76	176.98	1,815.62	756.20	467.31	131.15

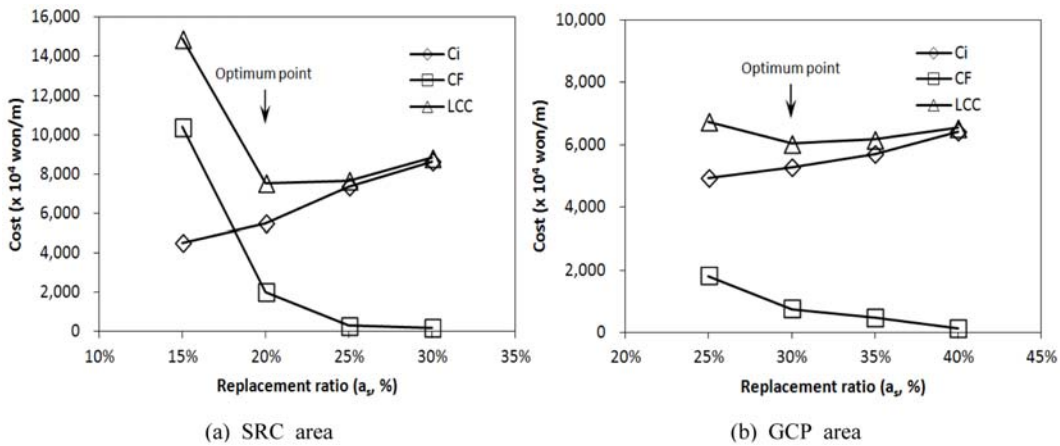


Fig. 9. Estimation of the optimum replacement ratio with LCC.

으로 LCC 변화곡선을 산정하였으며, 그로부터 최소화된 LCC 및 최적 치환율을 얻고자 하였다.

본 연구의 경우 지반 개량재를 분석 대상으로 하므로 식 (14)의 LCC 가운데 유지관리비용(C_M)은 고려하지 않았다. Nagao (2000) 및 Ozaki 등(2007)의 연구결과에 따르면 항만시설물의 파괴에 의한 연 최대 손실비용(C_f)은 초기건설비용의 약 213~375%에 해당한다. 그러나 본 연구에서 다른 방파제 구조물은 단위운영손실비용에 민감하지 않고 단위복구비용은 주로 상부구조물에서 발생하므로 초기건설비용의 110%를 적용하였다. 파괴손실비용(C_F)은 C_f 에 공용기간 및

할인계수를 곱하여 산정하였고 할인계수는 설계당시 시중금리를 고려하여 0.372를 적용하였다. 사용년 파괴확률(P_f^y)을 산정하기 위한 구조물의 공용기간은 국내외에서 통상적으로 간주되고 있는 50년으로 가정하였다.

Table 5는 3.3절에서 다른 치환율에 대하여 초기공사비, 연 최대손실비용 및 파괴손실비용을 산정한 결과이다. SRC 구간과 GCP구간 모두 치환율 증가에 따라 초기공사비는 증가하고, 파괴손실비용은 감소하는 경향을 보인다.

초기공사비와 파괴손실비용을 이용한 치환율별 생애주기비용을 Fig. 9에 나타내었다. 공용기간에 걸친 생애주기비용

이 최저가 되는 치환율은 SRC구간 20%, GCP구간 30%로 나타났다. 앞서 계산한 파괴확률을 감안할 때 SRC구간 20% 및 GCP구간 25% 이상의 치환율이 확보될 때 안정한 것으로 나타났으므로, 안정성 및 생애주기 측면의 경제성을 모두 고려하여 치환율을 결정한다면 SRC구간 20%, GCP구간 30%가 최적화된 치환율로 판단되었다. 한편, 최적 치환율을 중심으로 우측에 비하여 파괴확률이 커지는 좌측구간에서 LCC 곡선을 변화속도가 상대적으로 크게 나타남으로써 기존의 이론과 일치하는 결과를 얻었다.

결 론

확률론적 방법을 통하여 저치환율의 재료로 보강 및 개량된 방파제 하부의 해상 연약지반에서 최적의 치환율과 방치기간을 결정하기 위한 사례연구를 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 확률론적 해석에 있어 중요한 확률변수의 불확실성을 감소시키기 위하여 사전에 조사된 자료를 추가하여 베이지안 방법을 활용한 결과 19.9~39.8% 포인트까지 변동계수가 감소하였고, 특히 사전함수의 표본수가 더 많은 접속구간의 감소폭이 컸다.

(2) 저치환율 단면 중 15~40% 범위에서 FORM 및 MCS 방법에 의해 해석한 결과 치환율에 대한 목표파괴확률 2%를 만족하는 치환율은 SRC구간과 GCP구간에서 각각 20% 및 25% 이상으로 나타났으며, 방치기간에 대하여는 3개월 이상인 경우 목표파괴확률 0.5%를 만족하는 것으로 나타났다.

(3) 치환율에 대한 최적화를 위하여 생애주기비용 분석을 실시한 결과 목표파괴확률을 만족하는 범위 내에서 최적 치환율이 산정되었으며, SRC구간과 GCP구간에 각각 20% 및 30%가 가장 경제적인 것으로 결정할 수 있었다.

(4) 생애주기비용 측면에서의 설계 최적화는 구조물 공용기간 중 유지관리비용 최소화화 and 건전한 성능유지를 위하여 매우 중요하고, 관련된 설계기준 정립을 위하여는 지반구조물의 유지관리비용을 포함하여 보다 많은 사례연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2016년도 서일대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

Refereces

- Han, S. H., Yea, G. G. and Kim, H. Y., 1999, A Case Study on Quantifying Uncertainties of Geotechnical Random Variables, *J. of Engineering Geology*, 22(1), 15-25 (in Korean).
- Jung, S. M., 2004, A study on Bearing Capacity Characteristic and Stress Concentration of Crushed-Stone Column Pile using Finite Element Analysis, Master's thesis, Kyungsoong University, 40-44 (in Korean).
- Kim, H. Y., 2010, Determination of Target Probabilities of Failure and Partial Safety Factors for Reliability Based Design of Gravity Type Quay Walls, Ph.D. dissertation, Inha University, Incheon, Korea, 43-130 (in Korean).
- Kim, B. I., Yoo, W. K., Kim, Y. U. and Moon, I. J., 2013, An Experimental Study on the Behavior of Composite Ground Improved by SCP and GCP with Low Replacement Ratio, *J. of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 14(2), 936-942 (in Korean).
- Nagao, T., 2000, Expected Life-Cost for Breakwaters in terms of Failure Probability, *Proceedings of the 4th Japan Conference on Structural Safety and Reliability*, 441-448.
- Nam, J. H., 2012, Behavior Characteristic of DCM Ground According to Replacement Ratio, Master's thesis, The University of Seoul, 45-59 (in Korean).
- 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*, 1-9.
- Park, J. M., Han, Y. B. and Jang, Y. S., 2013, Estimation of Ultimate Bearing Capacity of Gravel Compaction Piles Using Nonlinear Regression Analysis, *J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 25(2), 112-121 (in Korean).
- Shibasaki, R., 2004, Seismic Design for Port Facilities Considering Economic Loss Cost in Freight Transportation and the Risk Evaluation Characteristics, *Proceedings of Infrastructure Planning*, 21(2), 349-357.
- You, S. K., Cho, S. M., Kim, J. Y. and Shim, M. B., 2005, Comparison Study on Stress Sharing Characteristics of Sand or Gravel Compaction Piles with Low Replacement Area Ratio, *Joint Conference of Geotechnical Engineering*, Korean Geotechnical Society, 443-452 (in Korean).
- You, Y. K., Lim, H. D. and Park, J. M., 2013, Target Reliability Index of Single Gravel Compaction Piles for Limit State Design, *J. of the Korean Geo-Environmental Society*, 15(2), 5-15 (in Korean).

한상현

서일대학교 토목공학과
131-702 서울시 중랑구 서일대학길 22
Tel: 02-490-7444
Fax: 02-490-7241
E-mail: shhan@seoil.ac.kr

여규권

삼부토건(주) 기술연구실
100-804 서울시 중구 퇴계로 63
Tel: 02-3706-2537
Fax: 02-756-3920
E-mail: moonju@sambu.co.kr

김흥연

삼부토건(주) 기술연구실
100-804 서울시 중구 퇴계로 63
Tel: 02-3706-2542
Fax: 02-756-3920
E-mail: hykim74@sambu.co.kr