

최소기대비용에 의한 연직배수시설의 설계

Minimum Expected Cost based Design of Vertical Drain Systems

김 성 필*[†] · 손 영 환** · 장 병 옥***

Kim, Seong-Pil · Son, Young-Hwan · Chang Pyung-Wook

Abstract

In general, geotechnical properties have many uncertain aspects, thus probabilistic analysis have been used to consider these aspects. It is, however, quite difficult to select an appropriate target probability for a certain structure or construction process. In this study, minimum expected cost design method based on probabilistic analysis is suggested for design of vertical drains generally used to accelerate consolidation in soft clayey soils.

A sensitivity analysis is performed to select the most important uncertain parameters for the design of vertical drains. Monte Carlo simulation is used in sensitivity analysis and probabilistic analysis.

Total expected cost, defined as the sum of initial cost and expected additive cost, varies widely with variation of input parameters used in design of vertical drain systems. And probability of failure to get the minimum total expected cost varies under the different design conditions. A minimum value of total expected cost is suggested as a design value in this study.

The proposed design concept is applicable to unit construction process because this approach is to consider the uncertainties using probabilistic analysis and uncertainties of geotechnical properties.

Keywords : Expected cost, Vertical drains, Probabilistic analysis, Sensitivity analysis, Monte Carlo simulation

1. 서 론

지반의 성질은 많은 원인들에 의해서 불확실성을 가지며 이러한 불확실성을 반영하기 위하여 확률론적 해석을 설계에 반영하고자 하는 노력이 진행되어 왔다(Christian, J. T. et al., 1994; Lacasse, S., 1996; Phoon, K. K., 1999). 그러나 특정 구조물, 공정 및 공법에 적합한 목표확률을 선정하는 문제에

있어서는 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 연약지반의 처리공법으로 이용되는 연직배수공법에 대하여, 확률론적 해석을 바탕으로 한 기대비용의 개념을 도입하고, 이를 최소화하는 설계를 제안하였다.

본 연구에서 적용하고자하는 최소기대비용설계는 확률론적 해석을 기본으로 하기 때문에 먼저 연직배수공법에 대한 확률론적 설계에 대하여 고찰하였으며, 총기대비용을 초기비용과 기대추가비용의 합으로 정의하였다. 그리고 해석모델을 구성하는 변수들에 대한 민감도분석을 실시하고, 이를 이용하여 모델을 수정하였다.

본 연구에서 제안된 최소 기대비용에 의한 설계는 확률론적 해석을 바탕으로 지반성질의 불확실성을 반

* 서울대학교 대학원 학사 후 연구원

** 미 워싱턴대 박사 후 연구원

*** 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부

† Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4593

Fax: +82-2-873-2087

E-mail address: agsol@hanmail.net

영하면서 비용을 최소화하는 설계로 단위공정 및 공법에 있어서 적용이 가능할 것으로 판단된다. 특히, 이러한 설계는 정해진 공기에 정해진 품질을 다음의 공정에 전달하는 것을 목적으로 하는 단위공정에 있어서 불확실성을 반영하면서 비용을 최소화할 수 있는 설계가 될 수 있을 것이다.

II. 연직배수공법의 최소기대비용 설계

1. 수평압밀해석모델의 개요

가. 수평압밀에 대한 Hansbo의 이론해

연직배수재에 의한 연약지반의 압밀도를 산정하는 이론해는 많은 연구자들에 의해 제시되었다(Barron, R. A., 1944; Hansbo, S., 1979, 1981; Olson, R. E., 1977). 본 연구에서는 현재 많이 사용되고 있으며 배수재의 통수저항과 스미어 효과를 동시에 고려할 수 있는 Hansbo의 식을 이용하였다. 연직배수공법에 있어서 깊이 z 의 수평방향의 평균압밀도 $U_h(t)$ 는 다음과 같이 주어진다(Hansbo, S., 1979, 1981).

$$U_h(t) = 1 - \exp\left(-\frac{2c_h t}{r_e^2 F}\right) \quad (1)$$

여기에서, c_h 는 수평압밀계수이고, t 는 압밀도에 도달하는 시간이며, r_e 는 Fig. 1에서 정의되는 바와 같이

배수재의 영향반경이다. F 는 다음과 같다.

$$F = F_o + F_s + F_r \quad (2)$$

$$F_o = \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} \quad (2a)$$

$$F_s = \left(\frac{k_h}{k_h'} - 1\right) \ln\left(\frac{r_s}{r_w}\right) \quad (2b)$$

$$F_r = \pi z(2L - z) \frac{k_h}{q_w} \quad (2c)$$

식 (2)에서 F_o , F_s 및 F_r 은 각각 드레인 간격(drain spacing factor), 스미어 효과(soil disturbance(smear) factor) 그리고 드레인의 통수저항(well-resistance factor)에 대한 영향을 나타내는 변수들이다. 여기에서 r_w 는 연직배수재의 반경으로 원형이 아닌 경우에는 등가환산반경을 사용하며, k_h/k_h' 는 스미어효과에 의한 수평투수계수의 감소비, r_s 는 스미어영역의 반경, L 은 배수재의 길이를 나타내며 q_w 는 연직배수재의 통수능을 나타낸다.

식 (1)과 식 (2)에 나타난 기하학적 변수들을 Fig. 1(a)에 나타내었다. L 은 연직배수 경로, z 는 연직배수재의 상단에서 부터의 심도, k_h 는 원지반의 수평방향의 투수계수, k_h' 는 교란된 지반(smear zone)의

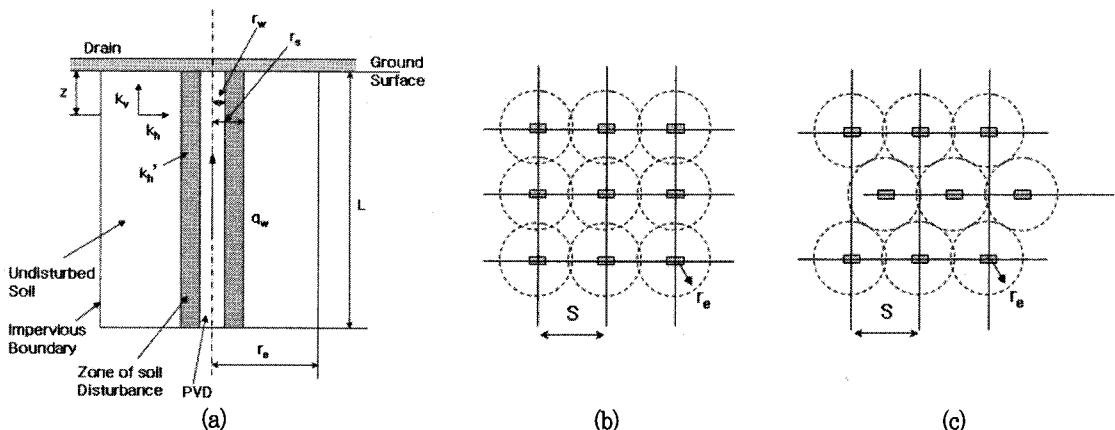


Fig. 1 Schematic of PVD and drain patterns (a) schematic of smear zone and well resistance (b) square pattern (c) triangular pattern

수평방향 투수계수, r_s 는 스미어 영역의 반경, q_w 는 연직드레인의 연직방향 투수능을 의미한다.

나. 입력변수의 불확실성

흙의 특성의 불확실성은 크게 흙의 고유한 특성으로서의 불확실성(inherent uncertainty)과 오차(systematic error)에 의한 것으로 나눌 수 있다(Christian et al. 1994). 본 연구에서 대상으로 하는 연약지반의 특성치는 이러한 불확실성을 모두 가진다고 볼 수 있다. 식 (1)과 식 (2)에서 연직배수재의 등가환산 반경 r_w , 스미어 영역의 반경 r_s , 연직배수재의 투수능 q_w , 스미어 영역에서의 투수계수 감소비 k_h/k_h' , 그리고 수평압밀계수 c_h 가 불확실성을 고려할 변수이다. r_e 는 설계의 목표 압밀도가 주어지면 그에 따라서 구해지는 결과값이다. 본 연구에서는 불확실성을 가지는 확률변수를 평균 μ 와 표준편차 σ 를 이용하여 정규(normal)분포와 로그정규(lognormal)분포로 가정하였다. 불확실성의 크기는 일반적으로 많이 사용되는 변동계수(coefficient of variation, COV)를 이용하였다. 변동계수는 표준편차를 평균으로 정규화한 무차원의 통계값으로 값이 클수록 변동성이 크다.

2. 상관분석

본 연구에서는 모든 변수를 확률변수로 고려하지 않고 압밀도와 가장 상관정도가 높은 변수를 선정하기 위하여 상관분석(correlation analysis)을 실시하였다. Table 1에서 보듯이 모든 변수들의 분포를 일반적으로 많이 사용되는 정규 또는 로그정규분포로 가정하고 변동계수 COV는 0.3으로 하여 변수들과 압밀도 사이의 회귀분석을 실시하고 상관계수를 구하였다. 실제로 각 변수들의 COV는 연구자들이 제시한 값(Phoon, K. K., 1999)과 일치하지는 않지만 해석결과에 가장 큰 영향을 미치는 변수를 선정하기 위한 것이므로 Table 1에서 가정한 평균값과 변동계수 및 분포의 현실성은 문제가 되지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 2에 상관분석의 결과를 나타내었다. r_e 는 설

Table 1 Input parameters used in correlation analysis

parameters	mean value	coefficient of variance(COV)	distribution function
$r_e(m)$	1	deterministic	deterministic
r_e/r_w	40	0.3	normal
r_s/r_w	3	0.3	normal
$L(m)$	15	0.3	normal
$c_h(m^2/year)$	2	0.3	lognormal
k_h/k_h'	2.0	0.3	lognormal
k_h/q_w	0.0003	0.3	lognormal
$t(year)$	3	-	-

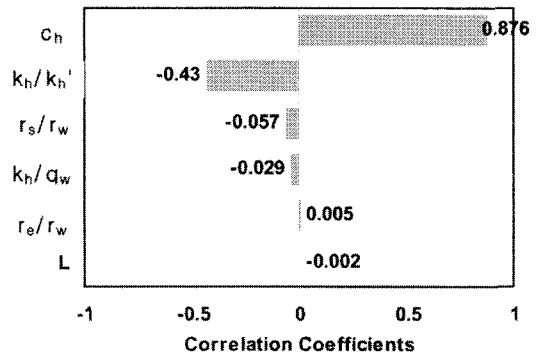


Fig. 2 Correlation analysis with input parameters and degree of consolidation

계의 목표값이므로 상관분석에서 제외하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 압밀도에 가장 크게 영향을 미치는 변수는 c_h , k_h/k_h' 및 r_s/r_w 순이며, r_s/r_w 를 비롯하여 나머지 변수들은 상관정도가 매우 작은 것으로 나타났다.

3. 확률론적 설계

앞서 상관도 분석의 결과를 근거로, 본 연구에서 선정한 해석 모델인 식 (1)을 확률변수 c_h 와 k_h/k_h' 를 하나의 설계변수 F_c 로 하여 다시 쓰면 다음의 식과 같다.

$$U_h(t) = 1 - \exp\left(-\frac{2t}{r_e^2} F_c\right) \tag{3}$$

여기에서, $F_c = c_h/F$ 이고 나머지 변수는 식 (2)와 같

다. 여기에서 제안된 변수 F_c 는 두 확률변수 $C_h(\mu_{ch}, \sigma_{ch})$ 와 $k_h/k_h'(\mu_k, \sigma_k)$ 로 구성된다. 두 변수가 서로 독립이라고 가정하는 경우, 변수 F_c 의 분포는 다음과 같이 표현된다.

$$\mu_{F_c} = \frac{\mu_{ch}}{\mu_F}, \quad \sigma_{F_c} = \frac{\sqrt{(\mu_{ch}^2 \sigma_F^2 + \mu_F^2 \sigma_{ch}^2)}}{\mu_F^2} \quad (4)$$

압밀도 $U_h(t)$ 는 확률변수 F_c 의 단조증가함수(monotonic increasing function)이므로 다음과 같은 관계가 성립된다(Benjamin and Cornell, 1970).

$$P_s = P[U_h(t) \leq U_h(t_s)] = P(F_c \leq F_{cp}) \quad (5)$$

$P(F_c \leq F_{cp})$ 는 F_c 가 특정의 F_{cp} 보다 작거나 같은 확률을 나타낸다. 따라서 P_s 는 특정시간 t_s 에 특정압밀도 $U_h(t_s)$ 에 도달하지 못할 확률을 나타낸다. 본 연구에서 F_c 는 로그정규분포를 가지는 것으로 가정하였다. 따라서 위의 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_s = P(F_c \leq F_{cp}) = \Phi \left[\frac{\ln(F_{cp} \sqrt{1 + COV_{F_c}^2} / \mu_{F_c})}{\sqrt{\ln(1 + COV_{F_c}^2)}} \right] \quad (6)$$

여기에서 $\Phi(\cdot)$ 은 표준정규분포함수(standard normal distribution function)이다.

4. 총기대비용

총기대비용은 초기비용과 기대추가비용으로 구분할 수 있다. 초기비용은 공정의 종류 및 규모 등에 따라서 달라지며 장비 및 재료비용 등이 포함된다. 기대추가비용은 반드시 지출되는 비용이 아니라 목표품질에 도달시키지 못한 경우에 발생하는 비용이다. 따라서 총기대비용은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$C_T = C_i + C_d \quad (7)$$

여기에서 C_T 는 총기대비용(total expected cost),

C_i 는 초기비용(initial cost) 그리고 C_d 는 기대추가비용(expected additive cost)이다. 연직배수공법에 있어서 초기비용은 배수재의 타설비용을 의미한다. 실제로 특정지역에 연직드레인의 타설을 일정기간 내에 완료한다거나, 그러기 위하여 몇 대의 장비를 이용한다거나, 기타 드레인의 타설비용을 산정하기 위하여 고려해야할 사항이 많지만 본 연구에서는 단위면적($A=1$)에 드레인을 타설하는데 소요되는 비용을 초기비용으로 하기로 한다.

이와 같이 가정하면, 연직배수공법에서 초기비용 C_i 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C_i = \frac{C_o A}{s^2} \quad (8)$$

여기에서 C_o 는 장비 및 재료비용을 포함한 연직배수재의 설치비용이며, A 는 연직배수재를 설치할 현장의 면적을 나타낸다. s 는 연직배수가 사이의 실제 간격이며, 배수재의 설치형태에 따라서 r_e 와 관계된다. 연직배수재의 설치형태가 사각형인 경우 $r_e=0.565s$ 이고 삼각형인 경우 $r_e=0.525s$ 이다. 식 (1)을 r_e 에 대하여 표현하고 식 (8)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$C_i = \frac{C_o A}{\left[\frac{2t_s F_c}{\ln[1 - U_h(t_s)] 0.565^2} \right]} ; \text{square pattern}$$

$$= \frac{C_o A}{\left[\frac{2t_s F_c}{\ln[1 - U_h(t_s)] 0.525^2} \right]} ; \text{triangular pattern} \quad (9)$$

식에서 알 수 있듯이 설치형태에 따라서 정도의 차이는 있겠으나 초기비용은 설계에서 구해진 r_e 의 값에 따라 감소한다.

기대비용(expected cost)은 한 공정에 대하여 반드시 지출되는 비용이 아니라 공정이 발생한 경우에 지출되는 비용이다. 따라서 공정이 발생할 확률과의 곱으로 표현되며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$C_{\text{expected}} = P_{\text{event}} \times C_{\text{event}} \quad (10)$$

C_{expected} 는 한 공정에 대한 기대비용이며, P_{event} 는 공정이 발생할 확률, 그리고 C_{event} 는 공정에 소요되는 비용을 의미한다. P_{event} 는 공정이 발생할 확률이므로 본 연구에서는 설계에서 제시된 시간 t_s 동안에 목표압밀도 $U_h(t_s)$ 에 도달하지 못할 확률, 즉 $P[U_h(t) \leq U_h(t_s)]$ 을 의미한다. 그리고 C_{event} 는 압밀도에 도달하지 못한 경우 또는 못할 것으로 예상되는 경우에 추가로 방치시간을 뒀으로써 뒤이은 공정이 시작되지 못함으로 인해 발생하는 피해비용 및 목표압밀도에 도달시키기 위하여 추가로 행해지는 공정에 필요한 비용을 의미한다.

특정시간 t_s 가 경과된 후 특정압밀도에 도달하지 못한 경우에 추가로 방치시간을 두기로 결정하였다면, 추가비용(additive cost)은 추가로 방치되는 기간 동안의 시간에 대한 함수로 표현되며, 이를 $C_a(t)$ 라고 하고 추가비용이 발생할 확률을 곱하면 다음과 같이 기대추가비용(expected additive cost)로 정의될 수 있다.

$$C_a = \int_{t_s}^{\infty} C_a(t) P[U_h(t) \leq U_h(t_s)] dt \quad (11)$$

특정시간 t_s 에서 압밀도에 도달하지 못할 확률은 식 (6)과 같으므로 식 (11)은 다음과 같다.

$$C_a = \int_{t_s}^{\infty} C_a(t) \Phi \left[\frac{\ln(F_c \sqrt{1 + COV_{F_c}^2} / \mu_{F_c})}{\sqrt{\ln(1 + COV_{F_c}^2)}} \right] dt \quad (12)$$

만약, 부지를 사용하지 못해 발생하는 비용이 시간에 대하여 일정하다고 하면 $C_a(t) = C_a$ 이며, 압밀도에 도달하지 못할 경우 추가적으로 지출되는 비용은 C_a 와 같다. 따라서 식 (12)는 다음과 같다.

$$C_a = C_a \Phi \left[\frac{\ln(F_c \sqrt{1 + COV_{F_c}^2} / \mu_{F_c})}{\sqrt{\ln(1 + COV_{F_c}^2)}} \right] \quad (13)$$

여기에서 C_a 는 추가공법에 따라서 다를 수 있으나 추가로 투입되는 장비 및 재료, 토취장 등의 부대시설 등을 포함하는 값이다. 총기대비용을 초기비용과 기대추가비용으로 정의하였다. 따라서 본 연구에서 총기대비용(total expected cost, C_T)은 다음과 같다.

$$C_T = \frac{C_o A}{s^2} + C_a \Phi \left[\frac{\ln(F_c \sqrt{1 + COV_{F_c}^2} / \mu_{F_c})}{\sqrt{\ln(1 + COV_{F_c}^2)}} \right] \quad (14)$$

확률변수 c_h 와 k_h/k'_h 의 분포 lognormal(μ_{ch}, σ_{ch}) 및 lognormal(μ_k, σ_k)와 결정론적변수를 이용하여 μ_{F_c} 와 COV_{F_c} 를 구할 수 있으며, 이를 식에 대입하면 F_c 에 따른 총기대비용 C_T 를 구할 수 있다. 수평방향 압밀도 $U_h(t)$ 는 F_c 의 단조증가함수이므로 F_c 의 확률분포는 $U_h(t)$ 의 확률분포와 동일하다. 따라서 각 F_c 에 대한 확률은 목표압밀도에 도달하지 못할 확률 $P[U_h(t) \leq U_h(t_s)]$ 과 같다. 따라서 $r_e^2 = (-2t F_c) / \ln[1 - U_h(t)]$ 의 관계에서 각 F_c 에 대한 r_e 를 구하면

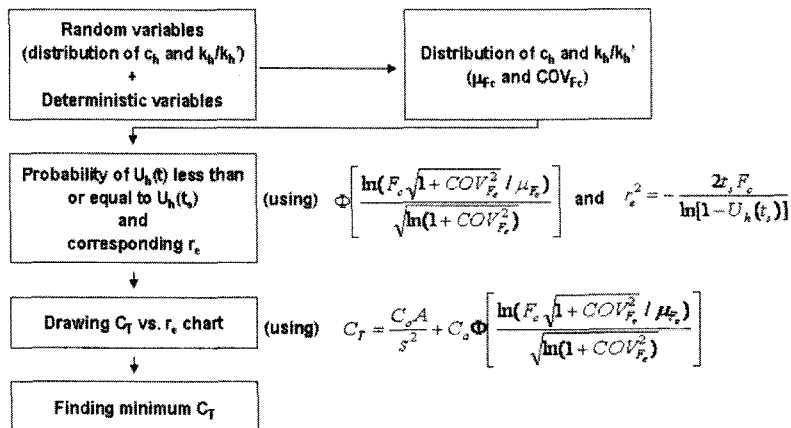


Fig. 3 Flow chart of minimum expected cost based design

결국 r_e 에 따른 총기대비용의 곡선을 구할 수 있다. Fig. 3은 이상의 설계과정을 도식화한 것이다.

III. 최소기대비용 설계의 적용 및 고찰

1. 적용조건

Fig. 3에서 제시한 흐름을 따라서 최소 총기대비용 설계를 적용하기 위하여, 초기비용 중에서 장비 및 재료비용을 포함한 연직배수재의 설치비용인 C_0 와 적용면적 A 를 단위값(1)으로 두었다. 그리고 설치형태가 사각형인 경우로 $r_e=0.565s$ 를 적용하였다. Table 2는 결정론적 설계변수이며, Table 3은 확률론적 설계변수를 나타낸다. 그리고 기대추가비용인 C_a 의 값을 C_0 와 달리하여 초기비용과 기대추가비용과의 상대적인 크기에 따라서 r_e 의 변화와 총기대비용 C_T 의 변화를 살펴보았다.

2. 초기비용과 기대추가비용의 상대적 크기에 따른 총기대비용의 변화

Fig. 4는 C_a 가 C_0 에 비하여 매우 작아서 0에 가깝다고 판단되는 경우에 대한 총기대비용과 r_e 의 관

Table 2 Deterministic parameters for application of minimum expected cost based design

parameters	mean value	distribution function
r_e/r_w	20	deterministic
r_s/r_w	8	deterministic
L (cm)	1,000	deterministic
k_h/q_w	1.0E-07	deterministic
t (year)	1	-
target U_h (%)	95	-

Table 3 Random parameters for application of minimum expected cost based design

parameters	mean value	COV	distribution function of F_c
case1	C_h (cm ² /sec)	0.006	lognormal $\mu_{F_c} = 0.000557$ $COV_{F_c} = 0.4169$
	k_h/k_h'	5.0	
case2	C_h (cm ² /sec)	0.009	lognormal $\mu_{F_c} = 0.001985$ $COV_{F_c} = 0.8141$
	k_h/k_h'	2.0	

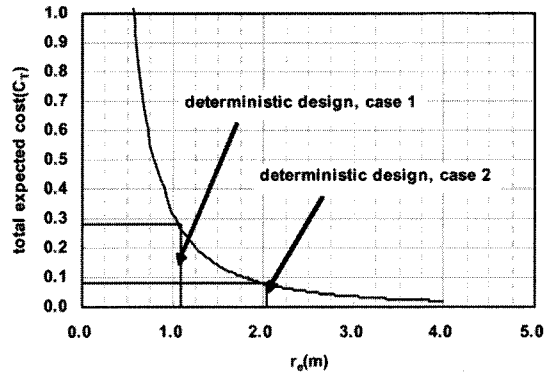


Fig. 4 Total expected cost vs. r_e ($C_0 \gg \gg C_a$, case 1,2)

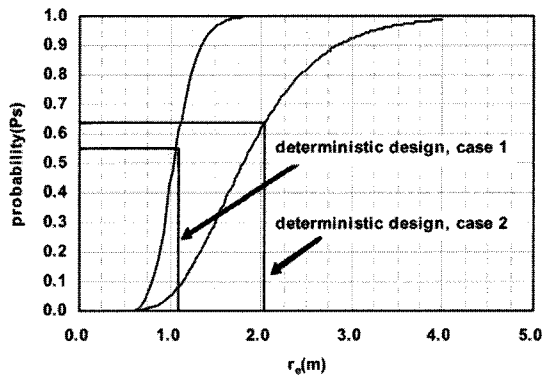


Fig. 5 Probability less than target degree of consolidation vs. r_e ($C_0 \gg \gg C_a$, case 1,2)

계이다. 이 경우는 압밀도에 도달하지 못하여 발생할 수 있는 비용에 대한 위험도가 없으므로 r_e 의 증가에 대하여 총기대비용은 지속적으로 감소한다. 이러한 경우라면 그림에 함께 나타난 결정론적 설계결과를 설계값으로 사용할 수 있을 것이다. Fig. 4에서 case 1과 case 2의 경우에 r_e 에 따른 총기대비용의 감소는 동일하다. 이는 Fig. 4는 단지 r_e 의 변화에 따른 초기비용만을 보여줄 뿐, 설계정수 및 압밀도에 도달하지 못할 확률을 반영하고 있지 않기 때문이다.

Fig. 5는 case 1과 case 2에서 $C_0 \gg \gg C_a$ 인 경우에 r_e 의 변화에 따른 P_s 의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 case 1과 case 2의 경우 r_e 의 변화에 따라서 목표압밀도에 도달하지 못할 확률의 변화는 차이가 발생한다. 이는 입력된 설계정수 중에서 확률변수의 평균 및 표준편차를 반영하는 것이다. case 1의 경우 r_e 가 약 1.8m 이상이면 $t_s=1$ year에서 $U_h(t_s) = 95\%$

에 도달하지 못할 확률이 거의 1에 가깝다. 이때 결정론적인 설계값은 $r_e=1.08\text{m}$ 이다. case 2의 경우에는 $r_e=4.0$ 이상에서 $t_s=1\text{year}$ 에서 $U_h(t_s)=95\%$ 에 도달하지 못할 확률이 거의 1에 가깝게 되며, case 2에서 결정론적인 설계값은 2.04 m이다. Fig. 5의 결과는 Fig. 4에 나타난 초기비용과는 무관하다. 즉 r_e 의 변화에 따라서 변화되는 목표압밀도에 도달하지 못할 확률의 증가는 초기비용이 아닌 기대추가비용에 기여하는 값이다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 case 1과 case 2에서 $C_a=0.5C_o$ 의 경우에 대한 총기대비용과 r_e 의 관계이다. Table 4는 설계값에 대하여 초기비용과 기대추가비용 및 총기대비용을 정리한 것이다.

그림에 r_e 에 따른 총기대비용의 변화와 함께 결정론적 설계값과 P_s (목표압밀도에 도달하지 못할 확률)을 근거로 한 확률론적 설계값을 함께 나타내었다. case 1에서 결정론적 설계값인 $r_e=1.08\text{ m}$ 를 적용한 경우에 총기대비용은 약 0.56으로 최소 총기대비용인 0.51에 비하여 약간 크다. 결정론적 설계에 의한

총기대비용은 r_e 가 크기 때문에 초기비용 C_i 는 0.28로 가장 작으나 목표압밀도에 도달하지 못할 확률을 고려한 기대추가비용이 0.28로 가장 크기 때문이다. 결정론적 설계값 이외의 확률론적 설계값과 최소 총기대비용에 의한 설계값은 확률론적 설계값 중에서 기대추가비용의 발생확률이 0.2인 경우가 최소 총기대비용에 가깝다. 그러나 압밀도에 도달할 확률을 높여서 설계하는 경우에는 오히려 최소 총기대비용이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 압밀도 도달확률을 만족시키기 위하여 r_e 를 줄임으로써 초기비용이 크게 증가한 반면에 기대추가비용이 감소되는 정도는 그리 크지 않기 때문이다. 이는 C_a 가 C_o 에 비하여 상대적으로 작기 때문이다. 따라서 이러한 경우에 있어서 $P[U_h(t) < U_h(t_s)] = 0.2$ 보다 높은 신뢰수준 즉, 압밀도에 도달할 확률 80% 이상을 적용하여 설계하는 것은 기대비용의 측면에서 보면 타당하지 않다. 이러한 경향은 case 2에서도 유사하게 나타났다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 $C_a=2.0C_o$ 의 경우에 대한 총기대비용과 r_e 의 관계를 나타내었다. Table 5에 설

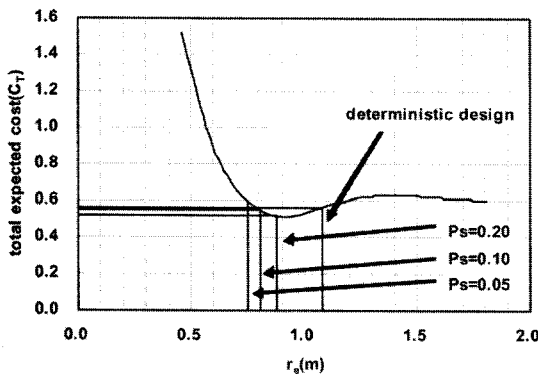


Fig. 6 Total expected cost vs. r_e ($C_a=0.5 C_o$, case1)

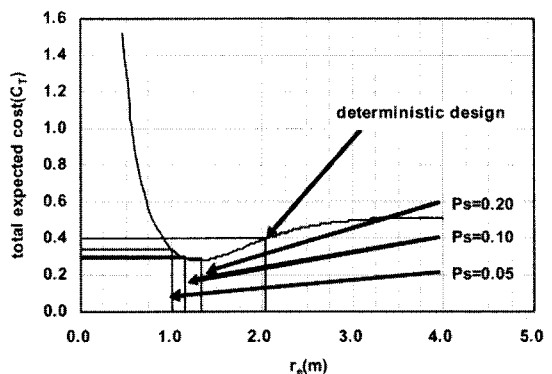


Fig. 7 Total expected cost vs. r_e ($C_a=0.5 C_o$, case2)

Table 4 Cost and r_e with design methods($C_a=0.5 C_o$)

design methods	case 1				case 2				
	r_e	C_i	expected C_a	expected C_T	r_e	C_i	expected C_a	expected C_T	
Deterministic design	1.08	0.28	0.28	0.56	2.04	0.076	0.322	0.398	
Probability based design	$P_s=0.20$	0.88	0.41	0.11	0.52	1.33	0.178	0.101	0.279
	$P_s=0.10$	0.80	0.51	0.04	0.55	1.14	0.245	0.051	0.295
	$P_s=0.05$	0.75	0.58	0.02	0.60	1.00	0.303	0.029	0.332
Minimum expected cost design	0.90	0.38	0.13	0.51	1.30	0.190	0.090	0.280	

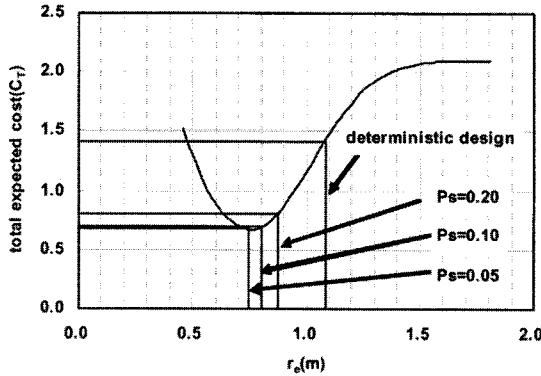


Fig. 8 Total expected cost vs. $re(C_a=2.0C_o, \text{case1})$

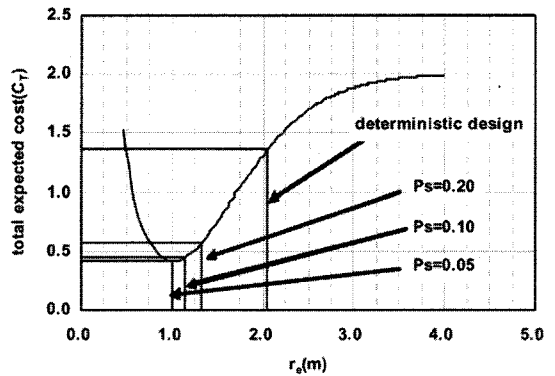


Fig. 9 Total expected cost vs. $re(C_a=2.0C_o, \text{case2})$

Table 5 Cost and r_e with design methods($C_a = 2.0C_o$)

design methods	case 1				case 2				
	r_e	C_i	expected C_a	expected C_T	r_e	C_i	expected C_a	expected C_T	
Deterministic design	1.08	0.27	1.17	1.44	2.04	0.076	1.286	1.362	
Probability based design	$P_s=0.20$	0.88	0.41	0.41	0.82	1.33	0.178	0.405	0.583
	$P_s=0.10$	0.80	0.50	0.19	0.69	1.14	0.234	0.227	0.460
	$P_s=0.05$	0.75	0.56	0.11	0.67	1.00	0.303	0.115	0.418
Minimum expected cost design	0.75	0.56	0.11	0.67	1.03	0.303	0.114	0.417	

계값에 대하여 초기비용과 기대추가비용 및 총기대비용을 정리하였다. 결정론적 설계값을 적용한 경우에 총기대비용은 최소기대비용에 비하여 약 2.0배에서 3.0배 정도 크다. 이는 앞선 경우와 마찬가지로 결정론적 설계에 의한 초기비용은 가장 작으나 목표압밀도에 도달하지 못할 확률에 대한 비용이 매우 크기 때문이다. 이 경우에는 앞선 경우와 달리 압밀도에 도달하지 못할 확률이 0.05인 경우가 최소 총기대비용과 일치한다. 이는 앞서의 경우와 달리 상대적으로 C_a 가 크기 때문이다. 따라서 이 경우라면 압밀도에 도달하지 못할 확률 $P_s = 0.05$ 또는 최소 총기대비용에 따른 설계가 최적의 설계라고 할 수 있다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 지반정수들의 불확실성을 고려하지 못하는 현재의 결정론적 해석(deterministic analysis)과 이를 기반으로 하는 설계의 단점을 극복하기 위한 대안으로 연직배수공법에 대하여 확률론적 해석

과 이를 기반으로 한 최소 기대비용에 의한 설계(minimum expected cost-based design)를 제안하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 연직배수공법의 설계에 사용되는 변수들의 불확실성에 대하여 고찰하였으며, 이들 변수들과 계산된 압밀도와의 상관분석을 통하여, 가장 영향이 큰 변수를 확률변수로 선정하고, 이들 확률변수를 고려하여 목표압밀도에 도달하지 못할 확률을 고려한 설계를 제안하였다. 그리고 기대비용의 개념을 도입하여 이를 최소화하는 설계법을 제안하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 확률론적 해석을 위하여 수평압밀도에 영향을 미치는 많은 변수들에 대한 분석을 실시하여 확률변수로 수평압밀계수 c_h 와 스미어 효과 k_h/k_h' 를 선정하였으며, Hansho의 간편해를 확률변수 F_c 을 이용하여 수정하였다.
2. 확률론적 해석을 바탕으로 기대비용을 산정하기 위하여 연직배수공법의 비용을 초기비용과 기대추가비용으로 구분하였다. 초기비용은 장비 및 재료비

용을 포함한 연직배수재의 설치비용이며, 기대추가비용은 압밀도에 도달하지 못할 확률과 이때 발생하는 추가비용의 곱으로 정의하였다.

3. 초기비용과 기대추가비용의 합인 총기대비용은 배수재의 영향반경 r_e 가 증가하면서 최소점을 지나 증가하는 형태로 나타났다. 초기의 총기대비용의 감소는 배수재 간격의 증가에 따른 초기비용의 감소에 기인한 것이며, 최소점을 지난 증가부분은 기대추가비용의 증가에 기인한 것이다. 총기대비용의 증가 정도는 위험도(기대추가비용의 초기비용에 대한 비)가 클수록 증가하였다.

4. 확률론적 해석에 있어서 파괴확률을 결정하는 경우와 달리 기대비용을 적용한 본 연구에서는 비용을 최소화하는 문제이므로 보다 합리적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

References

1. Barron, R. A. 1944, The Influence of Drain Wells on the Consolidation of Fine-grained Soils, Diss, Providence (R. I.) District, U.S. Engineering Office.
2. Benjamin, J. R., and Cornell, C. A., 1970, Probability, statistics, and decision for civil engineers, McGraw-Hill Book Co., New York.
3. Chai, J. C., and Miura, N., 1999, Investigation of factors affecting vertical drain behavior, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 125(3), pp.216- 226.
4. Christian, J. T., Ladd, C. C., and Baecher, G. B., 1994, Reliability applied to slope stability analysis, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 120(12), pp.2180-2207.
5. Hansbo, S., 1979, Consolidation of clay by band shaped prefabricated drains, Ground Engineering, 12(5), pp.16-25.
6. Hansbo, S., 1981, Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains, 10th ICSMFE, 3, pp.677-682.
7. Lacasse, S., and Nadim, F., 1996, Uncertainties in characteristic soil properties, Proceedings of Uncertainty'96, Geotechnical Special Publication No. 58, ASCE, 1, pp.49-75.
8. Olson, R. E., 1977, Consolidation under time dependent loading, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103(GT1), pp.55-60.
9. Phoon, K. K., and Kulhawy, F. H., 1999, Characterization of geotechnical variability, Canadian Geotechnical Journal, 36(4), pp.612-624.