

지반특성의 불확실성과 신뢰성 기법을 고려한 압밀해석

Analysis of Consolidation considering Uncertainties of Geotechnical Parameters and Reliability method

이 규 환*

Lee, Kyu-Hwan

Abstract

Geotechnical performance at the soft ground is strongly dependent on the properties of the soil beneath and adjacent to the structure of interest. These soil properties can be described using deterministic and/or probabilistic models. Deterministic models typically use a single discrete descriptor for the parameter of interest. Probabilistic models describe parameters by using discrete statistical descriptors or probability distribution density functions. The consolidation process depends on several uncertain parameters including the coefficients of consolidation and coefficients of permeability in vertical and horizontal directions. The implication of this uncertain parameter in the design of prefabricated vertical drains for soil improvement is discussed. A sensitivity analysis of the degree of consolidation and calculation of settlements to these uncertain parameters is presented for clayey deposits.

요 지

연약지반에 시공된 지반구조물의 거동은 구조물 하부의 연약지반이나 인접 지반의 특성에 크게 영향을 받는다. 지반 구조물 설계시 사용되는 지반 특성치는 결정론적인 모델이나 확률론적인 모델을 이용하여 나타낼 수 있다. 일반적인 지반구조물 설계시 사용되는 결정론적인 모델은 설계 파라메타로 단 하나의 대표값을 사용하는 반면, 확률론적인 모델은 이산통계나 확률 밀도함수를 이용한다. 연약지반의 압밀도나 침하량등의 산정 결과는 간극비, 압밀계수, 연직 및 수평방향 투수계수등의 불확실성 요소에 영향을 받는다. 본 연구에서는 연직 드레인을 이용한 개량지반에 대한 침하해석시 사용되는 불확실성 인자들에 대한 영향을 분석하여 보았다. 또한, 변동계수가 침하량에 미치는 영향을 분석하였으며 이들 파라메타들이 압밀도나 침하계산시 미치는 영향에 대한 민감도 분석을 실시하였다.

Keywords : Consolidation, Deterministic model, Probabilistic model, Uncertainty, Sensitivity

핵심 용어 : 압밀, 결정론적 모델, 확률론적 모델, 불확실성, 민감도

* 정회원, 건양대학교 건설시스템공학과 교수, 공학박사

E-mail : khlee@konyang.ac.kr 041-730-5337

•본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 2007년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

과거 수십 년 동안 한국, 일본, 중국, 홍콩 등의 동남아 지역에서 연약지반 개량 및 준설매립공사가 활발히 진행되어 왔다. 이들 국가들의 해안선을 따라 형성되어 있는 해저지층은 두꺼운 해저 퇴적층으로 구성되어 있다. 이들 지역에서는 부지조성을 위한 매립공사 시 연약지반을 개량하거나 해저에 퇴적된 점토층을 준설하여 사용하는 경우가 많다. 이 경우, 연약지반이나 준설매립 지반에 구조물이 시공되기 전에 지반의 압밀을 촉진시키고 지지력을 증대시키기 위한 목적으로 드레인 보드, 진공압밀, 프리로딩 공법 등의 다양한 연약지반 개량공법이 적용 된다. 이러한 연약지반 개량공사에서 가장 중요한 요소 중 하나는 침하량 예측과 압밀도 산정이다. 압밀도 및 침하량 예측 결과에 따라서 공사기간이나 공사비용뿐만 아니라 구조물의 안정성까지 영향을 받게 된다. 그러나 국내뿐만 아니라 외국의 경우에도 마찬가지로 특히, 연약점토지반의 경우, 예측치와 실측 침하량 사이의 오차가 상당히 크게 발생하여 공사기간의 연장, 이에 따른 공사비의 증가 등 여러 가지 문제들을 발생시키는 경우가 종종 있다. 실제로 부산지역에서 기 시공된 낙동강 하구연안의 대규모 매립공사에서 실제 침하량이 설계 추정치의 132~287%로 크게 발생하여 공사비의 증가와 함께 압밀기간이 장기화되면서 택지의 분양시기가 늦어져 경제적, 사회적인 많은 애로를 겪은 적이 있었다.

그 동안 압밀 침하량이나 압밀도 산정을 위해 일반적으로 적용된 방법은 주로 결정론적인 방법으로 지반 특성이나 드레인과 관련된 설계 파라메타의 불확실성 요소들을 고려하지 않았다.

본 연구에서는 연직 드레인을 이용한 연약지반 개량 지반에 대한 침하해석시 사용되는 불확실성 인자들에 대한 영향을 간단한 신뢰성 해석기법을 이용하여 분석하여 보았다. 또한, 변동계수가 침하량에 미치는 영향을 분석하였으며 이들 파라메타들이 압밀도나 침하량 산정에 미치는 영향에 대한 민감도 분석을 하였다.

2. 불확실성

2.1 지반특성의 불확실성

대부분의 지층은 여러 가지 복잡한 퇴적환경에서 형성되었다. 그러므로 흙의 공학적 특성은 위치마다 달라지는데 이러한 특성은 비교적 균질한 흙에서도 존재한다. 이러한 흙 특성의 변동성은 지반구조물 해석시 불확실성을 발생시키는 주요한 원인이 된다. 실내시험 결과 대부분의 흙의 물리적 공학적 특성은 정규분포나 로그분포 형태의 확률분포를 갖는 것으로 조사되었다. 현장의 흙은 여러 가지 복잡한 요인으로 연직이나 수평방향으로 그 특성이 변화한다. 이때 흙이 가지는 공간적인 변동성은 여러 가지 요소로 구성되는데 간단한 모델로 표현하면 다음과 같다(Phoon and Kulhawy, 1999).

$$\xi(z) = t(z) + w(z) + e(z) \quad (1)$$

여기서, ξ = 현장 흙의 특성, t = 결정론적 경향 요소, w = 확률요소, e = 측정오차, z = 깊이를 나타낸다. 실내 및 현장시험시 발생하는 측정오차도 흙의 특성에 추가적인 변동성의 원인이 되는데 측정오차는 실험장비, 장비의 작동, 실험법의 선택 등의 원인으로도 발생한다.

2.2 해석모델의 불확실성

지반구조물 해석모델에서 고려할 수 있는 불확실성 요소 중 대표적인 것에는 지반의 비선형 거동으로 인한 파라메타의 선정, 지반의 공간적 변동성, 실험과정에서 발생하는 분산 오차, 기본물성치를 이용한 파라메타 추정시 발생하는 오차, 실제 문제 해석에 사용된 단순화된 모델 오차등 여러 가지 요소가 있다. 지반구조물 설계시 파괴확률은 선택된 입력함수의 확률분포에 민감한 영향을 받는다. 따라서 신뢰성 해석을 위한 입력파라메타의 확률분포 결정시에도 그 파라메타가 가지는 특성을 고려하여 입력 분포를 결정해야 한다. Table 1은 연속확률변수에 대한 일반모델을 나타낸 것으로 지반특성을 나타내기 위한 모델로 정규분포와 로그정규분포가 가장 일반적으로 사용되는 확률분포이다.

Table 1 연속확률변수에 대한 일반 모델

분포	확률밀도함수	비 고
균등	$f_X(x) = \frac{1}{b-a}, \quad a \leq x \leq b$	시험 편차
삼각	$f_X(x) = \frac{2}{b-a} \left(\frac{x-a}{u-a} \right) \quad a \leq x \leq u$ $f_X(x) = \frac{2}{b-a} \left(\frac{b-x}{b-u} \right) \quad u \leq x \leq b$	공사 비용
지수	$f_X(x) = \nu e^{-\nu x}, \quad x \geq 0$	지진 주기
정규	$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$ $-\infty < x < \infty$	흙의 강도
로그 정규	$f_X(x) = \frac{1}{x\sigma\ln X\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu\ln X}{\sigma\ln X}\right)^2}$ $x \geq 0$	투수 특성

2.3 설계변수의 불확실성

압밀 투수 특성은 정량적인 흙의 응력-변형 관계나 시간에 따른 거동을 파악하는데 중요한 요소이다.

Lacasse & Nadim(1996)은 점토에 대한 과압밀 비의 확률밀도 함수가 정규 또는 로그정규 분포하며 모든 종류의 흙에 대한 간극비, 간극률, 초기 간극비는 정규분포 한다는 연구 결과를 제시하였다. Table 2는 압밀침하량 계산시 주요 설계변수인 압축지수 C_c , 선행압밀 압력 p'_c , 과압밀비 OCR, 투수계수 k , 압밀계수 c_v , 간극비 e , 간극률 n 에 대한 변동계수(COV)값을 보여주고 있다.

Table 2 압밀-투수 파라메타에 대한 변동계수

흙의 특성치	변동계수(%)	비 고
C_c	10~37	Kulhawy(1992)
p'_c	10~35	Harr(1984)
OCR	10~35	Lacassa & Nadim(1996)
k (불포화지반)	130~240	Harr(1984)
k (포화지반)	68~90	Benson et al(1999)
c_v	33~68	Duncan(2000)
e, n, e_o	7~30	Lacassa & Nadim(1996)

연약지반 개량시 연직드레인을 사용하는 경우, 드레인재와 관련된 불확실성 요소들을 살펴보면 다음과 같다. 연직배수재인의 경우, 원통형보다는 밴드형이 주로 사용되고 있다. Hansbo(1979)는 직경이 γ_w 인 원통형 드레인과 등가의 직경을 나타내기 위해서 밴드형 배수재의 경우 $l/(2\pi)$ 을 사용하였다. 그러나 Rixner (1986)등은 대략 $l/4$ 값을 적용하였다. 여기서 l 은 밴드의 윗변을 나타낸다. 연직배수재 타설 장치인 맨드릴을 이용하여 배수재를 타입 하는 과정에서 주변지반이 교란된다. 이때 γ_m 을 맨드릴의 단면적과 동일한 면적을 갖는 원의 직경이라 가정하면 교란영역의 직경 γ_s 와 γ_m 사이에서 $\gamma_s = 2.5 \sim 3.0 \gamma_m$, $\gamma_s = 2.0 \gamma_m$ 의 두 가지 관계가 존재한다(Hansbo, 1987). 연직배수재의 유출량은 웰저항 계수 F_r 을 평가하는데 사용한다. Rixner 등(1986)은 유출량 q_w 은 수평 구속압에 의해 영향을 받는데 보통 수평 구속압은 불확실성을 지니는 값이기 때문에 유출량도 불확실성 설계변수라고 한다.

제성형 또는 교란된 흙은 기계적인 교란에 의해 응집구조가 붕괴되기 때문에 투수계수가 감소한다. 연직배수재 설치시 발생하는 주변지반의 교란영역으로 인하여 투수계수가 감소하는데, 만약 실험 결과가 없는 경우 k_h/k'_h 는 대략 2.0을 사용한다. 다층지반에서 연직방향 압밀계수 c_v 는 대표적인 불확실성 설계변수이다. 압밀계수의 불확실성은 퇴적지반 고유의 변동성과 측정오차로 발생되며 압밀계수의 변동계수는 현장 특성에 의존하는 설계변수이다. 예를 들면, c_v 의 변동계수는 멕시코 점토는 0.12, 샌프란시스코 점토는 0.35, 이탈리아 피사점토는 0.69, 그리고 일본의 가와사키 점토는 0.31이다. 본 연구에서는 0.30을 사용하였다. 수평방향 압밀계수 c_h 값은 실내시험이나 흙의 다른 성질을 이용하여 추정할 수가 있다. 즉, 압밀계수와 투수계수의 관계식에서

$$c_h = (k_h/k_v) c_v \quad (2)$$

여기서, k_v 는 연직방향의 투수계수로 k_h/k_v 의 변

동성은 흙의 종류에 따라 달라진다. Terzaghi 등은 (1996) k_h/k_v 의 비를 해석점토는 1.0, 하천의 호상 점토는 5.0의 범위에 있다고 하였다. 그러나 k_h 나 k_v 는 불확실성 요소가 가장 큰 파라메타 중 하나이다.

압밀도에 대한 경우, Rixner 등(1986)은 시간에 대한 압밀도 $(U_h(t))$ 를 해석하는 경우, r_e , r_e/r_w , r_s/r_w , c_h 그리고 k_h/k'_h 등의 영향요소에 대한 민감도 분석결과 연직배수재의 압밀도 해석시 가장 영향을 크게 미치는 요소는 수평압밀계수로 확인하였다.

3. 신뢰성 기법을 이용한 침하해석

3.1 연약지반상의 침하해석

정규압밀된 연약지반에 성토하중이 작용하는 간단한 경우에 대한 압밀 침하 해석을 위해 기본적인 신뢰성 해석기법인 일계 불확실성 해석법을 적용하여 보았다. 전체적인 불확실성에 대한 상대적인 비율은 예민계수와 각 변수들의 불확실성에 영향을 받는다. 압밀이론에서 침하량은 간단한 압밀침하방정식인 아래 식(3)을 이용하여 구하였다.

$$S = N \left(\frac{C_c}{1+e_0} \right) H \log_{10} \left(\frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \right) \quad (3)$$

여기서, N 은 모델오차, C_c 는 압축지수, p_0 는 임의 심도에서의 유효응력, 그리고 Δp 는 임의 심도에서의 응력 증가량이다.

Table 3 압밀침하량 산정을 위한 설계변수

변수	평균	표준편차	COV
N	1.0	0.100	0.1
C_c	0.750	0.187	0.25
e_0	2.185	0.327	0.15
H	199.7cm	9.98	0.05
p_0	4.23tf/m ²	0.211	0.05
Δp	1.50tf/m ²	0.300	0.20

본 연구에서는 침하해석을 위해 국내 남해안 지역 연약지반 현장에서 채취된 시료의 압밀실험 결과 값을 이용하였다. 변동계수는 기존에 제시된 연구결과와 현장에서 분석된 결과를 이용하였으며 그 결과는 Table 3과 같다. 불확실성 파라메타를 이용한 일계 신뢰성 해석방법을 간단히 나타내면 다음과 같다. 만약, $Y = g(X_1, X_2, \dots, X_m)$ 인 경우, Y 에 대한 일계 평균추정치는 μ_Y 이고 그 변동계수가 δ_Y 라면

$$\mu_Y = g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_m}) \quad (4)$$

$$\delta_Y^2 = \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial g}{\partial X_j} \right)^2 \mu_{X_j}^2, \quad \delta_j^2 = \sum_{j=1}^m S_j^2 \delta_j^2 \quad (5)$$

이 경우, Table 3의 설계 파라메타에 대하여 압밀 침하량 산정식 (3)을 이용하여 구한 침하량(μ_s)은 약 6.21cm가 된다.

만약, $S_j = (\partial S / \partial X_j)(\mu_{X_j} / \mu_s)$ 라 정의하면 유효응력에 대한 일계 미분방정식은 다음 식 (6)과 같다.

$$\left(\frac{\partial S}{\partial X_j} \right) = -N \frac{C_c}{1+e_0} h \frac{1}{\ln 10} \frac{\Delta p}{(p_0 + \Delta p) p_0^0} \quad (6)$$

일계 신뢰성해석 결과, 침하량 S에서 설계파라메타의 불확실성 요소에 대한 영향정도를 구하면 Table 4와 같다.

침하량에 대한 신뢰성 해석결과 변동계수는 0.342로 압축지수와 하중증분값에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

Table 4 침하량 산정시 불확실성 영향요소

X_j	μ_{X_j}	δ_j	S_j	$S_j^2 \delta_j^2$	%
N	1.0	0.10	1.0	0.01	8.5
C_c	0.750	0.25	1.0	0.0625	53.3
e_0	2.185	0.15	-0.686	0.0105	9.0
H	199.7	0.05	1.0	0.0025	2.1
p_0	4.23	0.05	-0.862	0.00186	1.6
Δp	1.50	0.20	0.862	0.0297	25.4

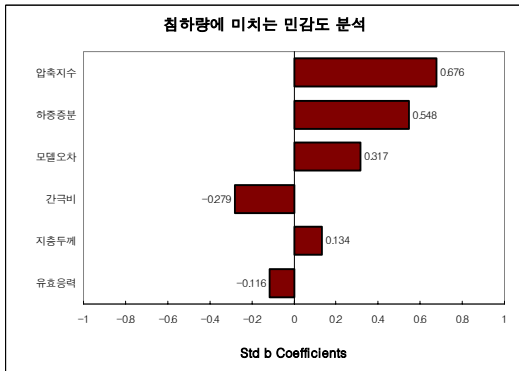


Fig. 1 전체 침하량에 미치는 민감도 분석

침하량에 미치는 민감도 분석결과는 변동계수의 크기에 따라 어느 정도 영향을 받기는 하지만 일반적으로 압축지수, 하중중분, 모델오차, 간극비의 순으로 나타났다.

3.2 지반조사의 영향

3.2.1 최적 불편향 추정치

크리깅이라고 알려진 최적 불편향 추정치를 사용하는 목적은 이미 알고 있는 데이터들 사이에 있는 구하고자 하는 흙의 최적의 특성을 구하기 위한 것이다. 기본적인 개념은 각각의 관찰지점에서 X 의 가중 선형 조합치를 이용하여 임의의 점에 대한 $X(x)$ 를 추정하는 것이다. 여기서 X_1, X_2, \dots, X_n 은 점 x_1, x_2, \dots, x_n 에서의 확률장 $X(x)$ 의 관찰 값이다. 이때 x 에서 $X(x)$ 의 BLUE는 다음과 같다.

$$\widehat{X}(x) = \sum_{i=1}^n \beta_i X_i \quad (7)$$

여기서, n 개의 미지의 가중치 β_i 를 결정할 수 있다. 그리고 회귀분석의 목적은 평균의 전체적인 경향을 추정하기 위한 것이다. 여기서의 목적은 특정한 점에서 최적의 값을 예측하는 것이다. 만약, 관찰점에서 매우 가까운 점 x 를 X_k 라 하면 X_k 와 관련이 있는 가중치 β_k 의 정도는 높을 것이다. 만약, $X(x)$ 와

X_k 가 다른 토층에 있는 값인 경우, β_k 의 정도는 작게 나타난다. 그리고 식 (7)의 가중치를 결정하는데 거리를 이용하는 것 보다 두 지점사이의 상관성을 이용하는 것이 나은 것으로 평가되고 있다. 만약 평균값을 회귀 분석식으로 나타낼 수 있다면 식(8)과 같다.

$$\widehat{\mu}_X(x) = \sum_{k=1}^M a_k g_k(x) \quad (8)$$

이때, 미지의 가중치는 식(9)와 같이 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$K\beta = M \quad (9)$$

여기서, K 는 연역지반 심도와 관련된 크리깅 행렬 식이며 M 은 조사 위치에 대한 크리깅 행렬식이다.

3.2.2 예측오차

유한개의 관찰된 데이터에서 추정된 값들은 확률오차와 관련이 있다. 이 오차는 추정 값의 정확도를 판별하는데 사용된다. 추정치 $\widehat{X}(x)$ 사이의 차를 오차라 정의하고 그의 참값을 $X(x)$ 라고 하면 추정평균과 이에 대한 오차의 분산값은 다음과 같다.

$$\mu_{\widehat{X}}(x) = E[\widehat{X}(x)] = E[X(x)] = \mu_X(x) \quad (10)$$

$$\sigma_E^2 = E[\widehat{X}(x) - X(x)]^2 = \sigma_X^2 + \underline{\beta}_x^T (K_{n \times n} \beta_n - 2M_n) \quad (11)$$

여기서, $\underline{\beta}_x$ 과 M_n 은 $\underline{\beta}$ 과 M 의 첫 번째 요소이다. 그리고 $K_{n \times n}$ 은 변동계수값을 포함하는 K 의 서브 매트릭스이다. 본 연구에서는 Table 3의 자료와 인접 지역의 자료에 대하여 불편향 추정치를 고려한 크리깅 기법을 적용, 지반특성의 공간적 변화에 따른 영향을 파악 하였다. 이를 위해 4개 지점을 선정하였으며 이들의 변수값들은 공간적으로 변화하는 것으로 나타났다.

Table 5 침하계산을 위한 파라메타

시료	C_c	e_o	H(cm)	p_o (tf/m ²)
1	0.948	2.885	201	4.20
2	0.782	2.140	198	4.35
3	0.425	1.485	195	4.15
4	0.848	2.230	205	4.22
μ	0.750	2.185	199.75	4.23
σ^2	0.0518	0.328	18.25	0.007

실험결과에서 설계변수를 얻을 때 발생하는 추정오차는 현장의 변동성과 비교하여 무시할 만하다고 가정하여 가정시 발생하는 불확실성은 무시하였다. 모델오차 N 은 평균 1.0, 표준편차 0.1을 가지는 일반적인 확률변수라 가정 하였다. Table 5는 4개의 지점에서 구한 데이터들을 정리해 놓은 것이다. Table 6은 크리깅 기법을 이용하여 얻은 결과로서 4개의 시료에 대한 확률장은 공간적으로 일정한 평균과 분산을 갖는 것으로 가정하였다. 식(9)의 행렬식을 이용하여 연역지반 두께에 대한 크리깅 행렬식과 M 을 이용하여 β 을 구하면

$$\beta = \begin{pmatrix} 0.192 \\ 0.150 \\ 0.265 \\ 0.393 \end{pmatrix}$$

식 (9)를 이용하여 상기의 β 값을 설계변수에 대해 적용하면 Table 6과 같이 가중치를 고려한 값을 구할 수가 있다.

기초위치에 대한 최적불편향 추정치를 구하기 위해 압밀침하식에 사용되는 설계변수들은 크리깅 기법을 이용하여 추정하였다. Table 6의 변동계수에서 알 수 있듯이 크리깅 기법을 통해서 불확실성이 약간 감소하

Table 6 크리깅 기법에 의한 압밀 설계변수

설계변수	평균	표준편차	COV
N	1.0	0.1	0.100
C_c	0.745	0.162	0.217
e_o	2.145	0.174	0.128
H	200.5cm	8.422	0.042
p_o	4.22tf/m ²	0.181	0.043
Δp	1.50tf/m ²	0.30	0.200

였음을 확인할 수 있었다. 압밀 침하량에 대한 일계 해석 결과 평균침하량(μ_s)은 6.28cm로 나타났다. 침하에 대한 변동계수 값을 추정하기 위해서 제 일계 해석을 적용하면

$$\delta_s^2 = \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial S}{\partial X_j} \frac{\mu_{X_j}}{\mu_s} \right)^2 \mu, \quad \delta_j^2 = \sum_{j=1}^m S_j^2 \delta_j^2 \quad (12)$$

여기서, 도함수의 아래첨자 μ 는 모든 확률변수의 평균에서 평가 된다는 것을 의미한다. 또한, 변수 X_j 는 N, C_c 등으로 변환된다. 평균에서 도함수에 대한 값은 Table 7과 같다.

따라서 변동계수에 대한 제곱은 식 (13)과 같게 된다.

$$\delta_s^2 = \sum_{j=1}^m S_j^2 \delta_j^2 = 0.0976 \quad (13)$$

식(13)에서 침하량에 대한 변동계수는 0.312이다. 이 값은 인접지역에 대한 데이터의 관찰 없이 구한 값과 비교하여 약 11%정도 감소한 것이다. 비록 이 값이 계산과정의 복잡성에 비교하여 중요하지 않다고 판단할 수도 있지만 모델오차 N 값과 하중증분 Δp 에서 기인한 침하량의 불확실성이 전체의 40%에 달한다는 점을 고려할 때 무시할 수 없는 요소라 판단된다. N 값과 Δp 에 대한 개선된 정보가 없는 경우에도 기초에 인접하여 보다 많은 정보를 이용하여 변동계수를 최소 0.212까지 감소시킬 수 있다. 만약, 시료채취 횟수를 4회에서 기존 시료채취 구역의 중심으로 50개의 시료를 추가로 채취한다면 추정치의 변동계수 값은

Table 7 침하량 산정시의 불확실성 요소

X_j	μ_{X_j}	δ_j	S_j	$S_j^2 \delta_j^2$	%
N	1.0	0.10	1.0	0.01	10.2
C_c	0.745	0.217	1.0	0.0471	48.3
e_o	2.145	0.128	-0.682	0.0076	7.8
H	200.5	0.042	1.0	0.0018	1.8
p_o	4.217	0.043	-0.862	0.0014	1.4
Δp	1.50	0.200	0.862	0.0297	30.5

0.719에서 0.46으로 감소한다. 그리고 침하량에 대한 변동계수는 0.285로 감소한다. 이러한 결과를 판단해 보면 추정오차는 오직 분산구조와 평균값에 대한 가정된 함수에만 의존하므로 실제 샘플링을 수행하기 전에 변동계수의 감소 값을 구할 수 있음에 주목해야 한다. 따라서 크리깅 기법은 샘플링 위치 간에 추정오차가 최소화 되도록 최적의 샘플링 위치를 정하는데도 사용할 수 있다.

4. 설계파라메타에 대한 민감도 분석

4.1 침하량 및 압밀도

연약지반의 침하량 산정은 Terzaghi(1943)의 일차원 압밀방정식을 이용하였으며 압밀도 산정은 Hansbo(1979)가 제안한 방법으로 연직배수재의 설치시 지반이 교란되는 영향 및 배수재의 저항등을 고려하여 임의의 깊이에서의 압밀도를 계산하는 방법을 사용하였다.

$$U_{(z, T_h)} = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F}\right) \quad (14)$$

여기서, $F = F_o + F_s + F_r$ 이고, F_o : 드레인 간격의 영향, F_s : 교란의 영향, F_r : 배수저항의 영향을 나타낸다.

4.2 민감도 분석

연직 드레인이 타설된 연약지반의 전체 침하량, 잔류침하량, 압밀도에 대한 입력 파라메타의 영향요소를 알아보기 위해 Fig. 2와 같은 표준단면을 이용하여 민감도 분석을 하였다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 해석 대상지반의 토층구성은 0.0~5.0m까지는 과압밀지반, 5.0~22m까지는 정규압밀 지반으로 구분하여 해석을 하였다. 민감도 분석을 위해 사용된 대표적인 입력 파라메타는 Table 8과 같으며 각각의 파라메타는 정규분포 하는 것으로 가정 하였다. 전체침하량과 잔류침하량 해석을 위해 사용된 설계파라메타의 중요도 분석을 위해 영향인자

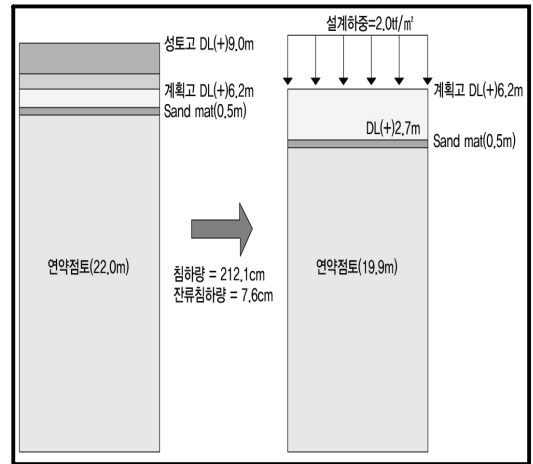


Fig. 2 연약지반 표준단면

Table 8 민감도 분석을 위한 설계파라메타

설계변수	평균	COV
선형압밀하중(p_c)	5.5tf/m ²	0.25
초기간극비(e_o)	2.547	0.2
압축지수(C_c)	1.008	0.23
C_v (cm ² /sec)	0.833×10^{-3}	0.30
C_h (cm ² /sec)	1.666×10^{-3}	0.30
k_h (cm/sec)	1.40×10^{-7}	0.75

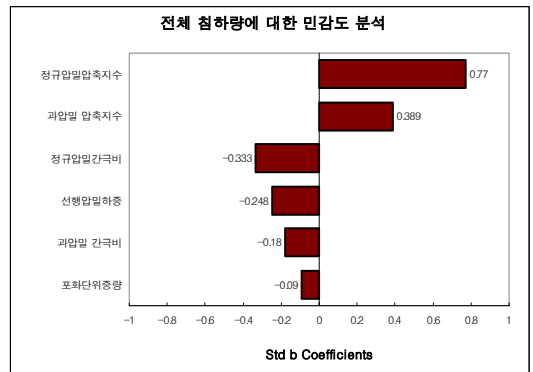


Fig. 3 전체침하량에 대한 민감도

들에 대한 민감도 분석을 하였다. 침하량 산정을 위해 식 (3)에 제시된 일차원 압밀 방정식을 이용하였다. 민감도 분석을 통해 전체 침하량과 잔류 침하량에 미치는 영향인자들의 중요도를 파악하여 설계 결과의 보정에 활용할 수 있다.

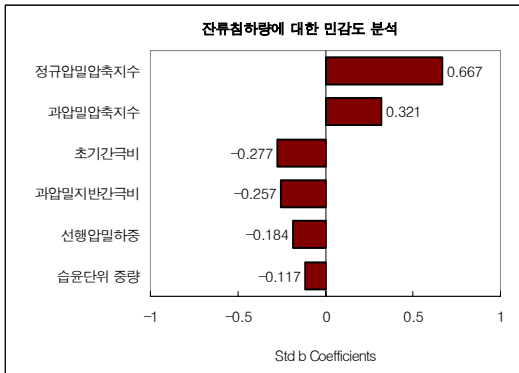


Fig. 4 잔류 침하량에 대한 민감도 분석

해석결과에서 알 수 있듯이 압축지수, 성토고, 선행 압밀 압력의 순으로 전체침하량 미치는 영향이 큰 것으로 나타났으며 이중 정규압밀지반 압축지수의 민감도가 0.77로 과압밀지반의 압축지수나 간극비등에 비해 상당히 크게 나타남을 알 수 있었다. 잔류침하량의 경우에는 전체침하량의 경우와 유사하게 압축지수, 간극비, 선행압밀허중, 습윤단위중량의 순으로 잔류침하량 산정에 미치는 영향이 크게 나타남을 알 수 있었다.

특히, 연약지반 설계시 평가 기준이 되는 잔류침하량에 대하여 지반정수들의 분포형태와 지반정수끼리의 상관관계성을 고려하여 지반개량후의 잔류침하량에 대한 허용치 초과확률에 대한 분석하여 보았다. Fig. 5에서와 같이 결정론적 설계방법에 의한 계산 결과, 잔류침하량 허용치가 10cm 이내로 설계기준을 만족했으나 입력파라메타의 불확실성을 고려한 확률론적인 접근법

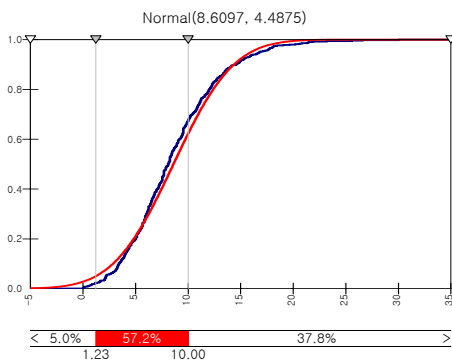


Fig. 5 잔류침하량 초과확률

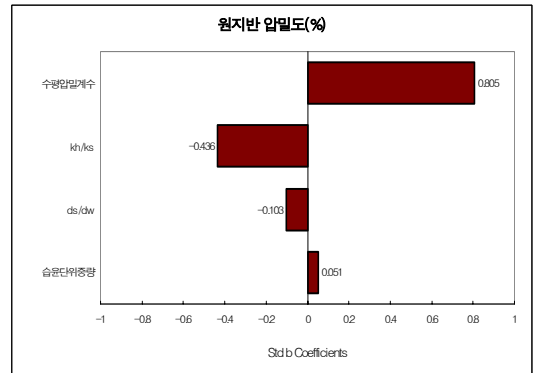


Fig. 6 압밀도에 대한 민감도 분석

에 의한 해석결과, 입력 파라메타의 불확실성에 크게 영향을 받아 잔류침하량이 설계기준을 초과하는 확률이 37.8%로 매우 크게 나타났다. 따라서 잔류침하량 기준 산정시에도 지반특성의 불확실성을 반영한 해석결과를 고려해야 할 것으로 판단된다. 또한, 신뢰성 설계시 입력파라메타의 확률분포 선정에도 영향을 받는 것으로 나타나 국내 신뢰성 설계시 일반적으로 사용되는 있는 입력 파라메타의 정규 확률분포의 선택도 각 파라메타의 특성을 파악하여 적용해야 할 것으로 판단되었다.

압밀도에 대한 민감도 분석결과는 수평압밀계수, 투수계수 감소비, 드레인 간격비등의 순으로 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히, 수평압밀계수가 가장 중요한 요소로 작용하는 것으로 나타났다. 민감도의 크기와 중요도는 침하해석시 사용되는 입력 값들의 분산 정도에 따라 약간씩 변동 될 수는 있으나 전체적인 경향은 변동계수 값에 크게 영향을 받지 않고 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 신뢰성 해석 기법을 이용, 지반특성의 불확실성을 고려한 압밀침하량 산정 및 압밀도에 대한 영향을 분석하여 보았다. 또한, 침하량 산정시 지반특성의 불확실성 및 공간적 변화에 따른 영향을 파악하였다.

- 1) 일차원 압밀식을 적용하여 침하량을 산정하는 경우, 입력 파라메타의 불확실성에 대한 영향은 압축 지수와 하중증분, 모델오차의 순으로 나타났다.
- 2) 압밀해석시 설계파라메타로 평균값을 적용하는 것 보다는 불확실성과 공간적 변화를 고려한 설계파라메타의 재 산정을 통해 구한 값을 적용하므로 신뢰성을 높일 수 있는 것으로 나타났다.
- 3) 연직드레인 타설 지반의 전체침하량에 대한 민감도 분석결과, 불확실성과 데이터의 분산정도에 따라 약간의 차이는 있으나 압축지수, 간극비, 선행압밀 하중 순으로 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 4) 잔류침하량에 대한 민감도 분석결과도 전체 침하량과 유사하게 압축지수, 간극비등의 순으로 미치는 영향이 크게 나타났으며 잔류침하량도 지반 특성의 불확실성에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 5) 연직드레인 타설 지반의 압밀도에 대한 민감도 분석결과, 수평압밀계수의 영향이 가장 크게 나타나 신뢰성 증대를 위해서는 수평 압밀계수의 불확실성을 최소화해야 할 것으로 판단된다.
- 6) 압밀도나 침하량 산정시 민감도 분석을 통해 파라메타의 영향정도를 파악하여 설계 값의 보정에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-D00706)에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이규환, 윤길립, "지반공학에서 한계상태 설계법의 신뢰성 연구" 구조물 진단학회 학술발표회, 2005, 9.
2. 윤길립, 이규환, 채광석, "확률 및 신뢰성 개념을 도입

한 지반설계 사례연구", 한국지반공학회 지반조사위원회 특별세미나, 2004, pp.73-110.

3. Ang, H.S. and Tang, W.H. "Probability concepts in engineering planning and design", vol. 2-Decision, risk, and reliability. John Wiley, New York, 1984.
4. Fenton, G.A. "Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering," ASCE GeoLogan. 97 Conference, Logan, Utah, 1997.
5. Hansobo, S. "Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains". In Proceedings of the 10th ISSMFE, Stockholm. Vol. 3, 1981.
6. Hansbo, S. "Consolidation of clay by bandedshaped prefabricated drains," Ground Engineerign, 12(5): 1979, pp. 16-25.
7. Lacasse, S. and Nadim, F. "Uncertainties in characterizing soil properties." Uncertainty in the Geologic Environment, Madison, ASCE : 1996, pp. 49-75.
8. Lumb, P. "Safety factors and the probability distribution of soil strength," Canadian Geotechnical Journal, 7: 1970, pp. 225-242.
9. Phoon, K. K., and Kulhawy, F.H. "Characterization of geotechnical variability," Canadian Geotechnical Journal, 36: 1999, pp. 612-624.
10. Rixner, J.J., Kraemer, S.R., and Smith, A.D. "Prefabricated vertical drains," Vol. I, Report No. FHWA/RD-86/168, 1986.
11. Tang, W. H. "Reliability of geotechnical performances considering geologic anomalies." Workshop on Dynamic Effects of Structures and Earthquake Engineering, Taiwan: 1990, pp. 13-14.
12. Terzaghi, K., Peck, R.B., and Mesri, G. "Soil mechanics in engineering practice 3rd ed," Wiley Interscience, New York. 1996.
13. Terzaghi, K., "Theoretical soil mechanics," John Wiley & Sons, New York. 1943.

(접수일자 : 2006년 11월 29일)