

## 연약지반개량에 대한 신뢰성해석 간편법의 적용성 연구

### A Study on the Application of Simple Reliability Analysis for Soil Improvement

장연수<sup>1)</sup>, Yeon-Soo Jang, 박준모<sup>2)</sup>, Joon-Mo Park

<sup>1)</sup> 동국대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Dongguk University

<sup>2)</sup> (주)건일엔지니어링 지반공학부 과장, Senior Engineer, Geotechnical Engineering Division, Kun-IL Engineering Co. Ltd.

**SYNOPSIS** : Recently, there is a trend to introduce a reliability approach to the design of al large scale improvement of weak ground due to the uncertainty of the influence factors in the consolidation. Since the reliability analysis is not easily adopted to geotechnical engineers because of some difficulties in working up the theories, Duncan(2000) proposed a simplified method for using reliability method to gootechnical problems. In this study, the applicability of Duncan's simplified reliability approach is evaluated by comparing the traditional reliability results with Duncan's. In the sensitivity analysis, the two results were quite similar. However, the probability of failure showed an error range of 20~50% and further Duncan's approach could not make a distinction for the distribution of geotechnical random variables. The simplified reliability method seems to be used properly in preliminary design if it is used supplementary with the deterministic method.

**Keywords** : Simplified reliability analysis, improvement of weak ground, consolidation, sensitivity analysis, probability of failure.

**개요** : 대규모 연약지반개량 설계는 압밀영향인자의 불확실성으로 대부분 신뢰성해석을 도입하여 설계를 수행하는 추세이다. 신뢰성해석은 이론습득의 어려움으로 인하여 실무 기술자들에게 범용되지 못하고 있다. Duncan(2000)이 제안한 간편하고 유용하게 사용할 수 있는 신뢰성해석 간편법과 전통적인 신뢰성해석법의 해석결과를 비교하여 간편법의 적용성을 평가하였다. 민감도분석에서는 동일한 경향을 보였으나, 파괴확률은 약 20~50%의 오차를 보이고 확률변수의 확률분포에 따른 적용성이 떨어지는 것으로 평가되었다. 신뢰성해석 간편법은 개략설계시 결정론적해석과 상호 보완적으로 적용한다면 최적설계가 이루어질 수 있을 것으로 사료된다.

**주요어** : 신뢰성 해석 간편법, 연약지반개량, 압밀, 민감도해석, 파괴확률

## 1. 서론

최근 연약지반개량 설계에서는 설계정수들을 분산성을 갖는 확률변수(random variable)로 취급함으로써 설계정수의 불확실성을 보다 합리적으로 고려할 수 있는 신뢰성해석(reliability analysis)을 도입하여 안전율 개념을 기초로 하는 결정론적해석방법(determinant analysis)이 지닌 불확실성의 한계를 보완하는 것이 일반적인 추세가 되었다. 신뢰성해석에서는 압밀침하에 영향을 미치는 주요 영향인자에 대한

통계학적 특성값을 산정하고, 일계 및 이계신뢰성분석법(first and second reliability method), 시뮬레이션(simulation techniques) 등의 신뢰성해석법을 이용하여 파괴확률을 검토하여 보다 합리적인 설계가 이루어지도록 하고 있다.

연약지반개량에 대한 신뢰성해석에 관한 연구는 Chang(1985), Hong(1992) 등의 1차원 압밀해석에서 지반정수의 불확실성에 관한 연구와 Koppula(1987)의 압밀에 관한 신뢰성해석으로부터 진행되어 왔다. 연약지반개량에서 연직배수재를 이용한 압밀의 불확실성에 대한 연구는 Hong and Shang(1998)에 의해 수행된 바 있다. Zhou et al.(1999)은 연직배수재가 설치된 연약지반개량 설계에서 수평 및 수직압밀계수( $c_h$ ,  $c_v$ ), 교란영향( $k_h/k_s$ ), 배수저항( $k_h/q_w$ ) 등 압밀영향인자들의 확률밀도함수의 종류와 불확실성의 정도에 따른 신뢰성해석을 수행하고, 수평압밀계수( $c_h$ )가 주요 영향인자임을 밝혔다. 이를 이용하여 수평 압밀계수를 확률변수로 하여 목표압밀도에 도달할 확률을 비교적 간단하게 산정할 수 있는 도표를 작성하였다. Zhou et al.(1999)은 연직배수재 간격과 압밀영향인자의 불확실성으로 인한 압밀지연으로 발생하는 손실에 대한 경제적 분석을 추가적으로 수행함으로써 신뢰성설계를 통한 최적설계방법을 제시하였다.

국내에서는 이송 등(2004)이 광양지역의 연약지반을 대상으로 압밀 영향인자들에 대한 실험과 연직배수재 타설간격 결정을 위한 신뢰성해석을 수행하였으며, 강기민 등(2006)은 시화지역의 연약지반개량에 관한 신뢰성해석을 수행하여 압밀영향인자에 대한 민감도 분석, 연직배수재 타설간격에 대한 신뢰성해석을 수행하였다. 김방식 등(2007)은 압밀영향인자의 불확실성을 고려하여 민감도분석과 신뢰성해석을 수행하였다.

2008년 국토해양부에서 항만 구조물 신뢰성해석 표준서(안)가 개발되고, 최근 설계·시공 일괄계약(turn-key)을 시행하는 대형공사 설계에서 중요 구조물에 대한 안정성 검토에는 대부분 신뢰성해석을 채택하고 있는 등 활발하게 이용되고 있다.

신뢰성해석이 설계정수의 불확실성을 고려하여 안정성을 평가하고, 설계정수의 상대적인 불확실성의 정도를 비교하여 최적화된 설계를 수행할 수 있음에도 불구하고 실무 기술자들에게 범용되지 못하는 이유는 확률 통계학적 용어와 이론 습득에 많은 시간과 노력이 필요하며, 실제 현장에서 얻는 자료 보다 더 많은 사전자료와 분석기간이 필요로 하기 때문이다. 따라서 실무 기술자들이 간단하고 편리하게 사용할 수 있는 합리적인 신뢰성해석법이 필요한 실정이다.

Christian et al.(1994), Tang et al.(1999), Duncan(2000) 등은 결정론적 사면안정해석과 유사한 정도의 노력을 통하여 개략적이거나 매우 유용하게 사용될 수 있는 파괴확률 및 신뢰도 분석을 수행하였으며, 지반공학의 전반적인 분야에 적용할 수 있는 신뢰성해석 간편법(simple reliability method)을 제시하였다. 간편법은 신뢰도지수 및 파괴확률을 안전율과 안전율에 대한 분산계수를 산정하여 Taylor 급수를 수치 해석적인 기법을 적용하여 결정하는 방법으로 기술자들이 전통적인 신뢰성해석 보다 쉽게 접근할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 연약지반개량 설계에 대한 신뢰성해석 간편법을 제시하고, 일반적인 신뢰성해석 결과와 비교하여 기술자들이 신뢰성해석을 보다 쉽게 사용할 수 있는 신뢰성해석 간편법의 적용성을 평가하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 결정론적 압밀해석

연직배수재가 설치된 지반의 압밀침하에 관한 이론적인 배경은 Terzaghi가 제시한 1차원 압밀이론 이후 방사형 배수재 설치에 대한 Barron, Yoshikuni, Hansbo, Ounoue, Zeng-Xie, Lo 등의 연구가 있으며, 제안식의 기본 가정사항의 차이로 인해 해석결과에 차이가 있다. 본 연구에서는 식 (1)과 같이 교란영역(smear zone) 및 배수저항(well resistance)을 고려할 수 있으며, 실무에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 Hansbo(1981)의 압밀이론을 사용하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F_n + F_s + F_w}\right) \quad (1)$$

$$F_n = \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4}, \quad F_s = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1\right) \cdot \ln\frac{r_s}{r_w}, \quad F_w = \pi z(2L - z)\frac{k_h}{q_w} \quad (2)$$

여기서,  $T_h$ 는 수평방향 시간계수,  $r_e$ 는 영향반경(radius of soil with impermeable perimeter),  $r_w$ 는 연직배수재의 등가유효반경(equivalent radius of vertical drain),  $k_h$ 는 불교란 영역의 수평투수계수,  $k_s$ 는 교란영역(smear zone)의 수평투수계수,  $r_s$ 는 교란영역의 반경(radius of zone of smear),  $z$ 는 배수경계면으로부터의 거리,  $L$ 은 연직배수거리,  $q_w$ 는 연직배수재의 통수능(discharge capacity of a vertical drain)이다.

## 2.2 확률론적 압밀해석

### 2.2.1 신뢰성해석의 개념

연직배수재가 설치된 연약지반개량 설계에서 일정 공기( $t_s$ ) 내에 목표압밀도  $U_s(t_s)$ 에 도달하기 위한 연직배수재의 설치간격을 결정해야 한다. 확률론적 개념으로 접근하면 정해진 연직배수재의 설치간격에 대하여 압밀도  $U(t_s)$ 는 압밀영향인자의 불확실성으로 인하여 목표압밀도에 도달할 수도 도달하지 못할 수도 있으며, 압밀영향인자는 불확실성을 고려하기 위하여 확률변수로 구성된다. 파괴확률(probability of failure,  $P_f$ )은 식 (4)와 같이 한계상태함수가 0 보다 작거나 같을 확률, 즉 압밀도가 목표압밀도에 도달하지 못할 확률로 다중적분식으로 정의된다. 일반적으로 한계상태함수를 구성하는 확률변수(압밀영향인자)들의 결합확률밀도함수(joint probability density function)를 정의하고 다중적분을 수행하는 것은 거의 불가능하므로 대부분의 경우 확률변수들의 2차 모멘트 정보인 평균과 분산을 이용하여 적분값을 근사화하거나 시뮬레이션기법을 이용한다. 대표적인 방법으로 적분값을 근사화하는 기법으로 일계신뢰성 해석법(first-order reliability method, FORM)이 있으며, 시뮬레이션기법에는 몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo simulation, MCS)이 있다. 연약지반개량에 대한 신뢰성해석에서는 종종 식 (5)와 같이 파괴확률 보다는 일정 공기 내에 압밀도가 목표압밀도에 도달할 확률  $P_s$ 가 관심 대상이 되기도 한다.

$$Z = U(t_s) - U_s(t_s) \quad (3)$$

$$P_f = P(Z \leq 0) \quad (4)$$

$$P_s = P(U(t_s) \leq U_s(t_s)) \quad (5)$$

### 2.2.3 신뢰성해석 간편법

신뢰성해석 간편법은 Christian et al.(1994), Tang et al.(1999), Duncan(2000) 등에 의해 제안되었으며, 일반 안전율의 개념의 해석과정과 거의 동일하다. 신뢰성해석 결과의 정확성은 일반 안전율 개념의 해석결과와 큰 차이가 없으며, 두 해석결과가 서로의 문제점을 보완할 수 있다고 하였다.

간편법의 해석과정은 Duncan(2000)의 연구결과에서 상세하게 설명되어 있으며, 설계정수의 불확실성을 산정하고, 침하량과 침하량에 대한 분산계수( $COV_s$ )가 결정되면 신뢰도와 파괴확률을 산정한다. 이때 침하량에 대한 분산계수는 Taylor 급수를 사용하여 다음과 같이 산정한다.

- (1) 압밀해석에 사용되는 압밀영향인자 중에서 불확실성을 갖는 압밀영향인자에 대해 표준편차를 산정한다. 표준편차를 산정하는 방법은 통계적인 평가와 제안치에 근거한 평가, 3σ 법칙 등을 이용할 수 있다.
- (2) Taylor 급수를 이용한 기법(Wolff, 1994)을 사용하여 침하량에 대한 표준편차와 분산계수를 식 (6)~(7)과 같이 산정한다. 여기서,  $\Delta S_1 = (S_1^+ - S_1^-)$ 이며,  $S_1^+$ 와  $S_1^-$ 는 첫 번째 압밀영향인자를 각각 1σ 만큼 증가시키고, 감소시킨 상태에서의 침하량이다.  $S_1^+$ 와  $S_1^-$  산정시 다른 모든 압밀영향인자는 최빈값(most likely value)으로 유지시킨 상태에서 침하량을 산정한다. 나머지  $\Delta S_2 \sim \Delta S_N$ 도 동일한 방법으로 해당 압밀영향인자를 1σ 만큼 증가·감소시킨 상태에서의 침하량을 산정한다.  $S_{MLV}$ 는 압밀영향인자들의 최빈값들로 계산된 침하량으로 확정론적 해석으로 산정된 침하량과 동일하다.
- (3)  $\Delta S_2 \sim \Delta S_N$ 을 식 (6)에 대입하여 침하량의 표준편차를 산정하고, 식 (7)을 이용하여 침하량을 분산계수를 산정한다.
- (4) 최빈값을 이용한 침하량( $S_{MLV}$ )과 목표압밀도에 해당하는 침하량( $S_{target}$ )의 비를 침하량비(SR)로 식 (8)과 같이 정의하여, 식 9와 같이 신뢰지수를 산정함으로써 파괴확률을 결정할 수 있다. 침하량의 확률분포는 정규대수분포(lognormal distribution)로 가정하였는데, Duncan(2000)은 이에 대해서 특별히 증명할 수는 없지만 타당한 것으로 생각되며, 압밀영향인자들이 정규대수분포를 보인다는 것을 의미하지는 않는다고 하였다.

$$\sigma_s = \sqrt{\left(\frac{\Delta S_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_2}{2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta S_N}{2}\right)^2} \quad (6)$$

$$COV_s = \frac{\sigma_s}{S_{MLV}} \quad (7)$$

$$SR = \frac{S_{MLV}}{S_{target}} \quad (8)$$

$$\beta_N = \frac{\ln(SR \sqrt{1 + COV_F^2})}{\sqrt{\ln(1 + COV_F^2)}} \quad (9)$$

## 2.3 압밀영향인자

신뢰성해석에서 모든 불확실성을 확률변수로 고려하여 해석하는 것이 정확할 것으로 기대되지만, 실제 해석에서는 확률변수가 지나치게 많을 경우 한계상태함수가 비선형성이 증가하여 해석의 정확도가 감소할 수도 있으므로 불확실성이 상대적으로 큰 압밀영향인자를 선택하는 것이 중요하다. Hong and Shang(1998), 이송 등(2004), 김방식 등(2007)의 연구결과에 의하면 연직배수재가 설치된 지반의 압밀도에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 수평압밀계수( $c_h$ )이며, 교란영역 투수계수비( $k_h/k_s$ ), 배수재의 통수능( $q_w$ )을 신뢰성해석시 확률변수로 고려하고 있다.

## 3. 신뢰성해석

연약지반개량 설계에서 연직배수공법의 주요 설계내용은 연직배수재의 설치간격을 결정하는 것이므로 본 연구에서는 압밀영향인자의 평균값을 이용한 결정론적해석과 불확실성을 고려한 신뢰성해석을 수행

하였다. 신뢰성해석에서는 전통적인 신뢰성해석법과 신뢰성해석 간편법으로 각각 해석을 수행하고, 결과를 비교함으로써 신뢰성해석 간편법의 적용성을 평가하였다.

### 3.1 신뢰성해석 검토조건

본 연구에서는 인천신항 컨테이너부두 축조공사 중 연약지반개량 설계에 적용된 지반특성 및 압밀영향인자에 대하여 전통적인 신뢰성해석 및 신뢰성해석 간편법을 적용하였다. 연구대상 위치도를 그림 1에 나타내었으며, 연약지반의 물리적 특성은 표 1과 같이 CL로 구성되어 있다.

표 1. 물리적 특성

| USCS | 함수비 (W <sub>n</sub> , %) | 액성한계 (LL, %) | 소성지수 (PI, %) | 포화단위중량 ( $\gamma_{sat}$ , kN/m <sup>3</sup> ) | 초기간극비 (e <sub>0</sub> ) | 압축지수 (c <sub>c</sub> ) |
|------|--------------------------|--------------|--------------|---|-------------------------|------------------------|
| CL   | 35.2%                    | 37.2%        | 15.0%        | 18.3  | 1.00                    | 0.27                   |

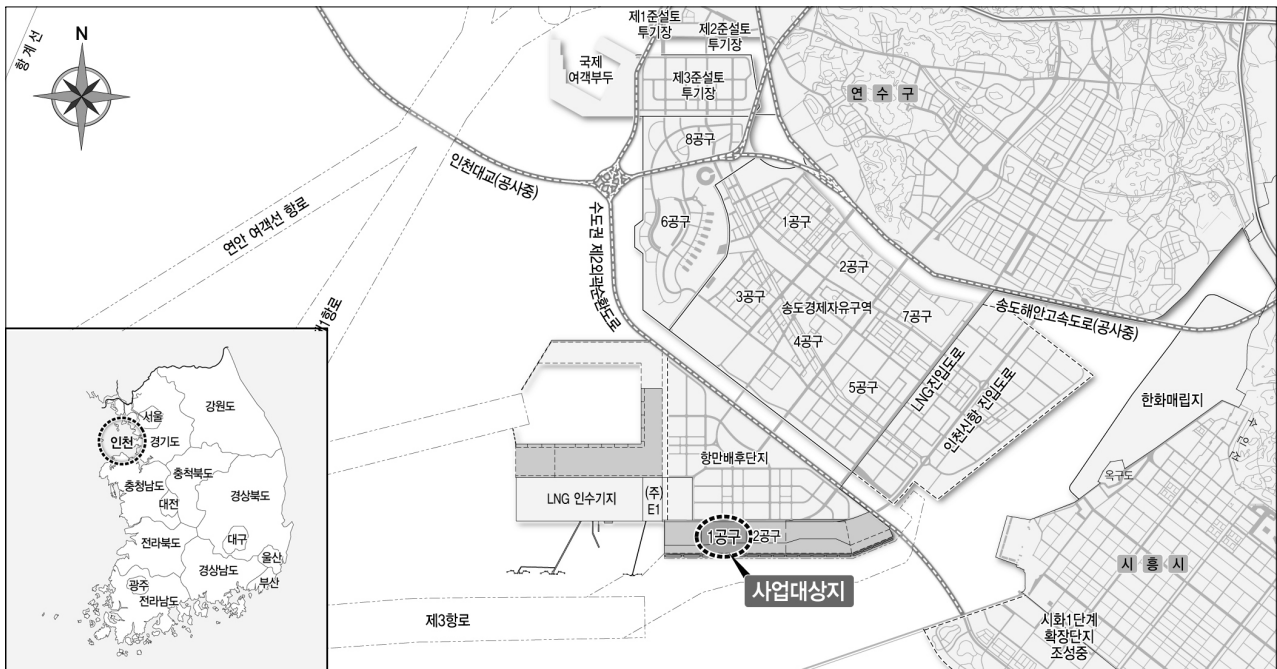


그림 1. 연구대상 위치도

연약지반개량공법 적용 구역 중에서 압밀침하량이 가장 큰 구역을 대표구간으로 선정하였으며, 설계 조건은 표 2와 같다. 대상구역의 원지반 연약층후는 12.7m, 연직배수재 설치간격은 1.8m로 5개월의 연약지반개량 기간 동안 허용잔류침하량을 만족하기 위한 목표압밀도는 98.8%이다. 압밀영향인자 중에서 비교적 불확실성이 큰 수평압밀계수( $c_{h1}$ ), 교란영역 투수계수비( $k_{h1}/k_s$ ), 배수저항( $k_{h1}/q_w$ )을 표 3과 같이 확률변수로 고려하여 신뢰성해석을 수행하였다. 확률변수는 대수정규분포인 것으로 가정하였다.

표 2. 연직배수공법 설계조건

| 연직배수재 | 배수재 타설간격 | 연약층후  | 개량기간 | 목표압밀도 |
|-------|----------|-------|------|-------|
| PBD   | 1.8m     | 12.7m | 5개월  | 98.8% |

표 3. 확률변수

| $c_h(m^2/sec)$        |           | $k_h/k_s$   |           | $k_h/q_w(1/m^2)$      |           |
|-----------------------|-----------|-------------|-----------|-----------------------|-----------|
| 평균( $\mu$ )           | 분산계수(COV) | 평균( $\mu$ ) | 분산계수(COV) | 평균( $\mu$ )           | 분산계수(COV) |
| $1.66 \times 10^{-6}$ | 0.45      | 2.0         | 0.5       | $4.16 \times 10^{-3}$ | 0.5       |

### 3.2 민감도 분석

확률변수의 파괴확률에 미치는 영향을 평가하는 민감도 분석은 확률변수로 정의된 압밀영향인자의 분산계수를 일정 비율로 변화시키면서 파괴확률의 변화 정도를 파악하는 정성적인 방법과 일계신뢰성분석법에서 한계상태면 위의 설계점(design point)을 탐색하는 과정에서 얻어지는 정량적인 방법이 있다. 정량적인 방법은 설계점을 향하는 각 확률변수의 벡터의 크기를 측정하여 상관도를 고려한 민감도 벡터를 산정하므로 각 확률변수의 상대적인 민감도 크기를 알 수 있는 장점이 있다.

신뢰성해석 간편법을 이용한 정성적인 방법으로 민감도 분석을 수행하였으며, 평균값과 분산계수 변화에 대한 신뢰지수 및 파괴확률의 변화를 표 4에 나타내었다. 정량적인 방법은 일계신뢰성해석에 의해 신뢰지수 및 파괴확률에 대한 평균값( $\mu$ )과 표준편차( $\sigma$ )의 민감도가 산정되었으며, 그 결과를 표 5에 나타내었다. 정성적인 방법과 동일한 경향을 보이고 있으나, 교란영향과 배수저항은 수평압밀계수에 비하여 민감도가 크게 낮아 산정되지 못하였다. 수평압밀계수의 평균값이 증가할수록 파괴확률은 감소하였으며, 교란영향과 배수저항의 평균값이 증가할수록 파괴확률은 증가하였다. 분산계수에 대한 파괴확률의 민감도는 확률변수에 상관없이 분산계수가 증가할수록 파괴확률이 증가하였다. 신뢰지수와 파괴확률 변화에 가장 큰 영향을 미치는 확률변수는 수평압밀계수로 기존 연구자들의 연구결과와 일치하였다. 교란영향과 배수저항은 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 연약지반개량 설계에서 수평압밀계수는 압밀영향인자로서 불확실성을 고려한 설계가 이루어져야함을 나타내고 있다.

표 4. 신뢰성해석 간편법에 의한 민감도 분석

| 확률변수      | 평균값의 민감도              |                  |                    | 분산계수의 민감도  |                  |                    |
|-----------|-----------------------|------------------|--------------------|------------|------------------|--------------------|
|           | 평균 (Mean, $\mu$ )     | 신뢰지수 ( $\beta$ ) | 파괴확률 ( $P_f, \%$ ) | 분산계수 (COV) | 신뢰지수 ( $\beta$ ) | 파괴확률 ( $P_f, \%$ ) |
| $c_h$     | $1.49 \times 10^{-6}$ | 0.820            | 20.61              | 0.2        | 3.163            | 0.08               |
|           | $1.66 \times 10^{-6}$ | 1.213            | 11.26              | 0.3        | 1.701            | 4.45               |
|           | $1.83 \times 10^{-6}$ | 1.798            | 3.61               | 0.4        | 0.864            | 19.38              |
|           | $1.99 \times 10^{-6}$ | 2.665            | 0.38               | 0.5        | 0.436            | 33.14              |
| $k_h/k_s$ | 1.80                  | 1.510            | 6.55               | 0.2        | 1.226            | 11.01              |
|           | 2.00                  | 1.213            | 11.26              | 0.3        | 1.221            | 11.10              |
|           | 2.20                  | 0.996            | 15.96              | 0.4        | 1.213            | 11.26              |
|           | 2.40                  | 0.833            | 20.24              | 0.5        | 1.203            | 11.45              |
| $k_h/q_w$ | $3.74 \times 10^{-3}$ | 0.901            | 18.38              | 0.2        | 1.215            | 11.22              |
|           | $4.16 \times 10^{-3}$ | 0.833            | 20.24              | 0.3        | 1.214            | 11.24              |
|           | $4.57 \times 10^{-3}$ | 0.774            | 21.95              | 0.4        | 1.213            | 11.26              |
|           | $4.99 \times 10^{-3}$ | 0.721            | 23.55              | 0.5        | 1.212            | 11.28              |

표 5. 일계신뢰성해석법에 의한 민감도 분석

| 확률 변수     | 신뢰지수에 대한 민감도                |                                | 표준편차에 대한 민감도               |                               |
|-----------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
|           | $\partial\beta/\partial\mu$ | $\partial\beta/\partial\sigma$ | $\partial P_f/\partial\mu$ | $\partial P_f/\partial\sigma$ |
| $c_h$     | 2.329                       | -2.563                         | -5.070                     | 5.580                         |
| $k_h/k_s$ | -*                          | -                              | -                          | -                             |
| $k_h/q_w$ | -                           | -                              | -                          | -                             |

\* 민감도가 무시할 수 있을 정도로 적음.

### 3.3 신뢰성해석 간편법의 적용성 평가

압밀영향인자의 평균값에 대한 결정론적해석의 경우 압밀도는 99.9%로 계산되어 목표압밀도를 충분히 만족하는 것으로 평가되었으나, 압밀영향인자를 확률변수로 고려한 신뢰성해석 간편법에서 압밀도가 목표압밀도에 도달하지 못하는 파괴확률은 11.25%로 산정되었다(표 6).

신뢰성해석 간편법의 적용성은 전통적인 신뢰성해석법인 일계 및 이계신뢰성분석법(FORM, SORM), 몬테카를로 시뮬레이션(MCS)을 이용하여 신뢰성해석을 수행하고, 신뢰성해석 간편법의 파괴확률과 비교함으로써 평가하였다. FORM, SORM, MCS에 의해 산정된 파괴확률은 표 7과 같이 13.55~13.69%로 거의 동일한 값으로 산정되었다. 신뢰성해석 간편법에 의한 파괴확률 보다 전통적인 신뢰성해석의 결과가 약 20% 정도 크게 산정되었다.

표 6. 신뢰성해석 간편법에 의한 파괴확률 산정

| 확률 변수                   |                | 적용값                   | 침하량<br>( $S^+$ , $S^-$ ) | 편차<br>( $\Delta S$ )  | 표준편차<br>( $\sigma_s$ ) | 분산계수<br>( $COV_s$ )   | 신뢰지수<br>( $\beta$ ) | 파괴확률<br>( $P_f, \%$ ) |
|-------------------------|----------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| 수평압밀계수<br>( $c_h$ )     | $\mu + \sigma$ | $2.41 \times 10^{-6}$ | 1.650                    | $2.26 \times 10^{-2}$ | $1.63 \times 10^{-2}$  | $9.99 \times 10^{-3}$ | 1.213               | 11.25                 |
|                         | $\mu - \sigma$ | $9.13 \times 10^{-7}$ | 1.627                    |                       |                        |                       |                     |                       |
| 교란영향<br>( $k_h/k_s$ )   | $\mu + \sigma$ | 3.00                  | 1.646                    | $3.97 \times 10^{-3}$ |                        |                       |                     |                       |
|                         | $\mu - \sigma$ | 1.00                  | 1.650                    |                       |                        |                       |                     |                       |
| 배수저항영향<br>( $k_h/q_w$ ) | $\mu + \sigma$ | $6.24 \times 10^{-3}$ | 1.648                    | $1.62 \times 10^{-3}$ |                        |                       |                     |                       |
|                         | $\mu - \sigma$ | $2.08 \times 10^{-3}$ | 1.650                    |                       |                        |                       |                     |                       |

표 7. 간편법과 전통적인 신뢰성해석법에 의한 파괴확률 비교

| 해석방법    | FORM  | SORM  | MCS   | 간편법   |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 신뢰지수    | 1.101 | 1.098 | 1.094 | 1.213 |
| 파괴확률(%) | 13.55 | 13.62 | 13.69 | 11.25 |

확률분포의 특성에 따른 적용성을 평가하기 위하여 확률변수를 정규분포로 가정하여 신뢰성해석을 수행하였다(표 8). 확률분포를 정규분포로 가정하였을 경우 전통적인 신뢰성해석에 의한 파괴확률이 16.91~16.92%로 산정되었으며, 간편법에 비해 약 50% 정도 크게 산정되었다.

표 8. 확률변수의 특성에 따른 파괴확률 비교

| 해석방법    | 대수정규분포 |       |       | 정규분포  |       |       | 간편법   |
|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         | FORM   | SORM  | MCS   | FORM  | SORM  | MCS   |       |
| 신뢰지수    | 1.101  | 1.098 | 1.094 | 0.958 | 0.958 | 0.957 | 1.213 |
| 파괴확률(%) | 13.55  | 13.62 | 13.69 | 16.91 | 16.91 | 16.92 | 11.25 |

신뢰성해석 간편법은 전통적인 신뢰성해석법에 비해 파괴확률이 낮게 산정되어 불안전축의 결과를 나타내고 있다. 그러나 표 4와 같이 민감도 분석의 결과가 거의 일치하고, 수평압밀계수의 평균값이 10% 변화할 때 파괴확률은 50% 이상 변화하는 것을 미루어 볼 때, 신뢰성해석 간편법은 정확도가 떨어지지 만 전통적인 신뢰성해석에 근접한 결과를 얻을 수 있다고 할 수 있다. 따라서 신뢰성해석 간편법은 상세설계 보다는 개략설계 단계에서 많은 시간과 노력을 들이지 않고, 결정론적해석과 상호 보완하는 차원에서 적용된다면 보다 최적화된 설계가 이루어질 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 실무 기술자들이 간편하고 유용하게 사용할 수 있는 신뢰성해석 간편법을 소개하고, 연약지반개량 설계에 대한 신뢰성해석 간편법의 적용성을 평가하였다. 인천지역의 연약지반개량 설계시 적용된 압밀영향인자의 불확실성을 고려한 전통적인 신뢰성해석(FORM, SORM, MCS)을 수행하여 민감도 분석 및 파괴확률 산정 결과를 비교함으로써 적용성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 민감도 분석으로부터 수평압밀계수가 압밀침하에 가장 큰 영향을 미치는 압밀영향인자로 나타났으며, 전통적인 신뢰성해석 결과와 간편법의 결과는 동일한 경향을 보였다.
- (2) 목표압밀도에 도달하지 못할 파괴확률은 간편법에서 11.25%, 전통적인 신뢰성해석법에서는 13.55~13.69%로 약 20%의 오차를 나타내었다.
- (3) 확률변수의 확률분포가 정규분포인 경우, 전통적인 신뢰성해석법과는 약 50%의 오차가 발생하여 확률분포에 대한 적용성은 낮은 것으로 평가되었다.
- (4) 신뢰성해석 간편법은 개략설계시 결정론적해석과 상호 보완적으로 적용한다면 최적설계가 이루어질 수 있을 것으로 사료된다.
- (5) 본 연구에서는 압밀영향인자의 특정 값으로 적용성을 평가한 바, 다양한 적용값 및 확률분포 적용시 연구결과가 차이를 보일 수 있으므로 상세한 적용성의 평가가 요구된다.

#### 참고문헌

1. 강기민, 김지용, 김홍석, 김래현(2006), "확률론적 접근법을 이용한 연직배수공법 설계의 신뢰성 분석", **한국지반공학회지**, Vol. 22, No. 8, pp. 15-23.
2. 김방식, 김병일(2007), "지반 불확실성을 고려한 연직배수재 배치간격의 확률론적 해석과 결정", **한국지반공학회논문집**, 제23권, 제4호, pp. 125-132.
3. 이송, 최우진, 이장덕(2004), "PBD 타설간격결정을 위한 확률론적 해석방법", **대한토목학회논문집**, 제 24권, 제2C호, pp. 81-87.
4. Chang, C. S.(1985), "Uncertainty of one-dimensional consolidation analyses", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, pp. 1141-1424.
5. Christian, J. T., Ladd, C. C. and Baecher, G. B.(1994), "Reliability applied to slope stability analysis", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, pp. 2180-2207.
6. Duncan, J. M.(2000), "Factors of safety and reliability in geotechnical engineering", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 126, pp. 307-316.



7. Hansbo, S.(1981), "Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains", *Proc. of 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, Stockholm, Vol. 3, pp. 677-682.
8. Hong, H. P.(1992), 'One-dimensional consolidation with uncertain properties", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 29, pp. 161-165.
9. Hong, H. P. and Shang, J. P.(1998), "Probabilistic analysis of prefabricated vertical drains for soil improvement", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, pp. 666-677.
10. Koppula, S. D.(1987), "Probabilistic consolidation analysis" *Proc. ICASP5*, Institute for Risk Research, University of Waterloo.
11. Tang, W. H., Stark, T. D. and Angulo, M.(1999), "Reliability in back analysis of slope failures", *Journal of the Japanese Geotechnical Society of Soil Mechanics and Foundations*, Vol. 39, No. 5, pp. 73-80.
12. U.S. Army Corps of Engineers(1998)
13. Wolff, T. F.(1994), "Evaluation the reliability of existing levees", *Rep., Res. Proj. : Reliability of existing levees*, prepared for U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Geotechnical Laboratory, Vicksburg, Miss.
14. Zhou, W., Hong, H. P. and Shang, J. Q(1999), "Probabilistic design method of prefabricated vertical drains for soil improvement", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 125, pp. 659-664.