

# SCP 복합지반 침하거동에측을 위한 새로운 침하모델의 개발

## Development of New Settlement Model for Prediction of Settlement Characteristics of SCP Composite Ground

유 상 호<sup>1</sup> You, Sang-Ho

박 현 일<sup>2</sup> Park, Hyun-Il

임 중 철<sup>3</sup> Im, Jong-Chul

박 이 근<sup>4</sup> Park, Lee-Keun

### Abstract

In this study, the reliable and simple analysis method was proposed to predict the settlement characteristic of composite ground in stage of design and construction of sand compaction pile (SCP). Model parameters could be obtained by the optimization process based on genetic algorithm. In order to examine the proposed method, laboratory consolidation tests on the settlement characteristic of SCP composite ground were performed for various replacement ratio of sand such as 0 (no replacement), 20, 36, and 56%. The proposed model showed very good agreements with measured data in the relation of void ratio-log scaled stress and time-compression for each replacement ratio.

### 요 지

본 연구에서는 모래 다짐말뚝 공법의 설계 및 시공단계에서 침하거동 예측에 활용될 수 있는 합리적이고 간편한 해석기법을 제안하였으며, 모델 계수값들은 유전자 알고리즘에 근거한 최적화 과정을 통하여 구할 수 있다. 제안된 기법의 검증을 위하여 0(무치환), 20, 36 및 56%의 다양한 모래 치환율에 대한 SCP 복합지반의 침하거동에 관한 실내압밀실험이 수행되었다. 제안된 모델은 각 치환율에 대하여 간극비-대수응력 관계 및 시간-압축 관계에서 계측값과 매우 일치되는 경향성을 보였다.

**Keywords :** Consolidation, Genetic algorithm, Reinforcement, Sand compaction pile, Settlement

### 1. 서 론

다짐 모래 말뚝(Sand Compaction Pile, SCP) 공법은 점토로 구성된 연약지반 내에 강관을 관입시킨 후에 모래를 다짐하면서 투입함으로써 연약지반을 개량하는 공법이다. 다짐 모래말뚝이 설치된 점토지반(SCP 복합지반)은 점토와 모래라는 두 종류의 이질적인 재료로 구성된 복합재료의 압축특성을 보이기 때문에 점토지

반의 압밀해석에 비해서 침하거동 해석이 매우 어렵다. 즉, SCP 복합지반에 가해지는 상재하중이 하중분담비율에 따라 점토와 모래에 서로 다른 비율로 분배됨에도 불구하고, 상재하중이 증가함에 따라 하중분담비율이 변화되는 양상이 명확히 규명되지 않은 상황이다(Shin, 2005; Yamagata와 Hukumoto, 1982). 또한, 점토에 분담되는 하중으로 인해 SCP 복합지반은 시간의존적 침하거동을 보이기 때문에 SCP 복합지반의 침하거동을 신

1 정회원, 부산대학교 사회환경시스템 공학부, 박사과정 (Member, Graduate Student, Dep. of Civil Engr., Pusan Univ.)

2 정회원, 삼성건설 기술연구소, 수석연구원 (Member, General Manager, Research Center, Samsung E & C, gomdori7@empal.com, 교신저자)

3 정회원, 부산대학교 사회환경시스템 공학부 교수 (Member, Prof., Dep. of Civil Engr., Pusan Univ.)

4 정회원, (주)지오알앤디 대표이사 (Member, CEO, Geor&D)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

뢰성 있게 모사하기란 쉽지 않은 상황이다.

이러한 SCP 복합지반의 침하거동 해석을 위하여 상용 유한요소해석기법들이나 실내모형실험들에 근거한 연구들이 수행되고 있다(Han 등, 2007; Cho 등, 2005; Jung, 1999; Kim, 2003; 등). 이러한 정교한 해석기법들로부터 얻어진 해석결과들은 모래와 점토 및 모래-점토 접촉면 거동모사에 적용된 구성모델에 따라 크게 영향을 받으며, 또한 추정되어야 하는 구성모델 계수들의 수가 많기 때문에 해석결과에 대한 신뢰성이 기술자의 전문성에 크게 의존할 수 밖에 없다. 실내모형실험에 근거한 연구들 간에 있어서도 거동양상에 대한 견해들이 서로 차이가 나기 때문에(Yamagata와 Hukumoto, 1982), 상용 유한 요소해석기법들을 SCP 복합지반의 해석에 적용함에 있어서 기술자의 전문성이 보다 요구되는 실정이다.

본 연구에서는 SCP 복합지반의 설계 및 시공단계에서 기술자의 전문성에 크게 의존하지 않으면서도 SCP 복합지반의 침하거동을 신뢰성 있게 모사할 수 있는 간편한 해석기법을 제안하였으며, 기법의 검증을 위하여 SCP 복합지반의 다양한 치환율에 대하여 실내압밀실험을 수행하였다. 이를 정리하면 다음과 같다. 첫째로, SCP 복합지반의 침하거동을 모사할 수 있는 모델을 제안하였으며, 제안된 모델에는 SCP 복합지반의 침하해석에 필요한 SCP 복합지반의 응력분담비율과 점토의 시간의존적 침하거동을 모사하는데 필요한 간극비와 상재하중에 대한  $e$ -log  $p$  관계 및 작용하중에 따른 점토의 시간의존적 침하관계가 포함되어 있다. 둘째로, 제안된 모델에 사용되는 설계변수들에 대한 적합한 추정방법에 관한 것이다. 기존의 상용 유한요소기법들을 활용할 경우 적합하게 가정되어야 하는 모델계수 값들의 수가 매우 많다. 따라서, 실내실험에서 얻어진 침하자료에 제안된 모델이 사용된 최적화 과정을 적용하여 해석에 필요한 모델 계수 값들을 간편하게 도출 하는 것을 목표로 하고 있다. 셋째로, SCP 복합지반의 치환율이 각각 0(무보강), 20, 36, 56 및 76%로 조성된 시료에 대한 실내실험을 수행하였으며, 최적화 과정을 통하여 예측침하거동모사에 필요한 모델 계수값들을 추정하였다. 이를 바탕

으로 각 치환율에 대한 하중단계별 침하거동을 예측함으로써 제안된 기법의 적용성을 검증하고자 하였다.

## 2. 실내 모형 실험

본 연구에서는 SCP 복합지반의 침하거동을 살펴보기 위하여 실내모형 압밀실험을 수행하였다. 압밀실험에 사용한 재료는 원지반용 점토로는 부산광역시 감천항 인근 현장의 해성점토(표 1 참고)를 이용하였으며, SCP 용 재료로는 주문진 표준사를 사용하였다. 그림 1에는 압밀실험에 사용된 시험장치기 구조가 도시되어 있으며, 그림 2에는 모래말뚝이 설치된 점토시료에 대한 단면이 나타나 있다. 모래말뚝의 치환율을 각각 0%(무치리), 20%, 36%, 56%로 변화시켜, 무치리지반과 모래말뚝이 시공된 지반에 대한 압밀침하량을 측정하였다. 또한 하중단계를

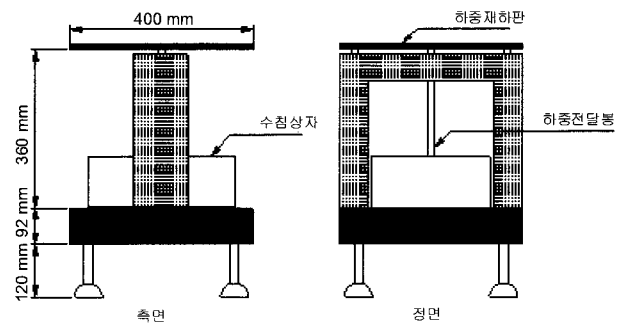


그림 1. 압밀 시험장치

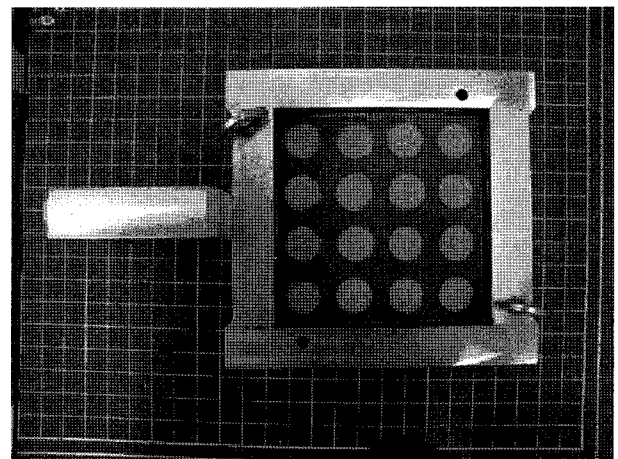


그림 2. 모래말뚝이 설치된 점토시료 단면도(치환율 36%)

표 1. 사용된 점토의 물성 값

Specific Gravity, $G_s$	Liquid limit, $w_L$ (%)	Plastic Index, PI	Coefficient of Consolidation, $c_v$ ( $m^2/day$ )
2.67	46.0	18.2	0.00185

총 6 단계로서 9.8, 19.6, 39.2, 78.5, 160.0, 314.0kN/m<sup>2</sup>으로 증가시키면서 압밀시험을 실시한다. 각 하중단계의 압밀시간은 24시간으로 하였다.

실험을 통해 얻어진 각각의 치환율에 대한 간극비-대수응력( $e$ - $\log p$ ) 관계가 그림 3에 나타나 있고, 각 치환율에 대한 하중단계별 침하자료는 그림 4에 나타나 있

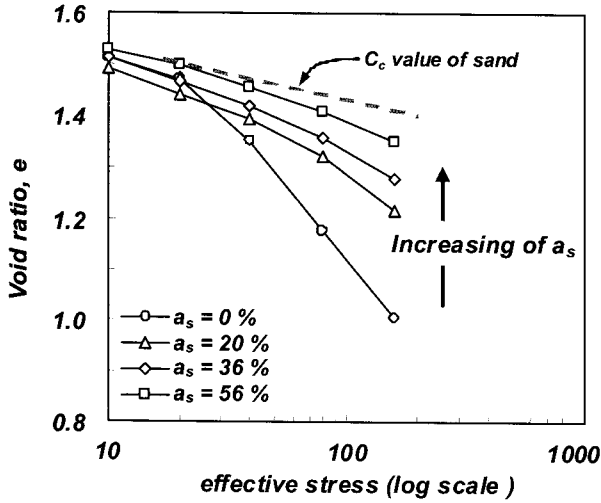


그림 3. SCP 복합지반의 간극비-대수응력 관계

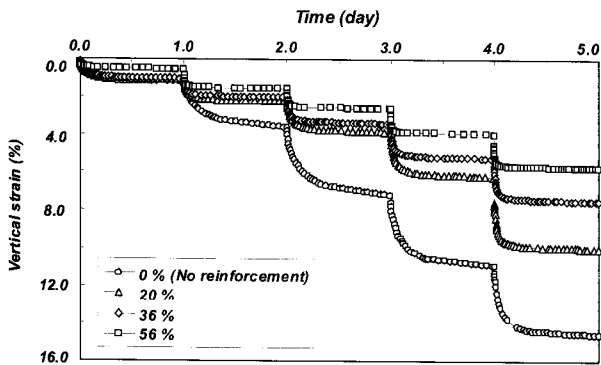


그림 4. 치환율별로 모래말뚝이 설치된 점토시료에 대한 시간-변형률 관계

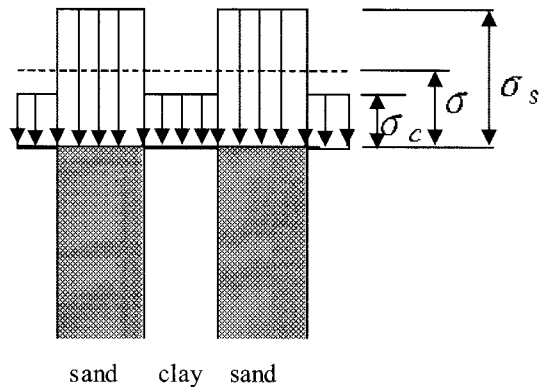
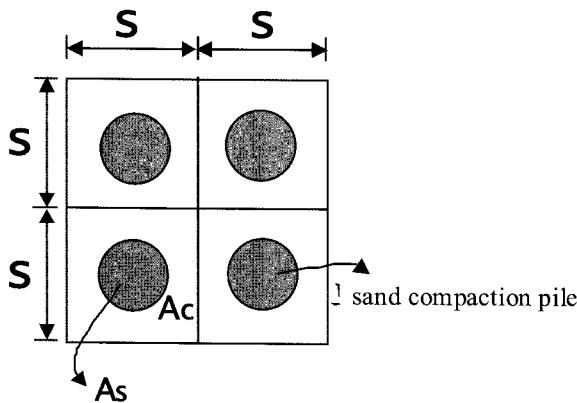


그림 5. 모래말뚝으로 개량된 지반의 개략도

다. 그림 3에서 치환율 0%에서는 전형적인 점토시료의 선형적인  $e$ - $\log p$  관계를 보여주고 있다. 그러나 모래로 일부 치환된 점토시료의  $e$ - $\log p$  관계에서는 압축지수곡선이 비선형적인 형태를 보이며, 치환율 값이 증가함에 따라서 압축지수 곡선의 형태도 점차 완만해 지는 경향성을 보였다. 이후에 치환율이 100%에 가까워 질수록 시료의 압축지수 값은 모래의 선형적인 압축 지수 값 ( $C_c$ )에 거의 도달될 것으로 사료된다.

### 3. 거동 모델

#### 3.1 복합지반의 하중전달 메커니즘

Chow(1996)는 탄성론에 근거하여 SCP 개량지반이 일차원 하중을 받는다는 가정하에 단일 모래말뚝 셀의 거동이 전체 거동을 모사한다고 가정하였다. 모래말뚝 셀에서의 힘의 평형으로부터 식 (1a)을 산정할 수 있으며, 다짐모래말뚝과 주변점토지반과의 응력 분담비( $m$ ) 값은 식 (1b)와 같이 정의할 수 있다(그림 5 참고).

$$\sigma(A_s + A_c) = \sigma_s A_s + \sigma_c A_c \quad (1a)$$

$$m = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} \quad (1b)$$

여기서,  $\sigma$  = 작용된 수직응력,  $A_s$  = 모래말뚝의 면적,  $A_c$  = 주변 점토지반의 면적,  $\sigma_s$  = 모래말뚝에 전달되는 응력,  $\sigma_c$  = 점토에 전달되는 응력,  $m$  = 응력분담비(Stress concentration ratio)이다.

상재하중이 SCP 복합지반에 가해졌을 경우 점토와 모래에 전달되는 응력 분담비,  $m$ 의 변화에 따라 SCP 복합지반의 침하양상은 크게 달라진다.  $m$  값은 모래말뚝

의 내부마찰각, 치환율, 모래말뚝과 주변지반의 강도 차이, 상재하중 크기 및 치환 깊이 등에 의존하며, 현장 및 실내 실험 계측에 따르면 대략 2~6 사이에 분포한다고 보고되었다(Aboshi 등, 1970, 1982; Kitazume 등, 1995; Jung 1998; Cho 등, 2005). 그림 6(a)에는  $m$  값과 응력수준과의 관계에 관하여 기존 문헌 연구결과들이 정리되어 있다. 응력분담비가 응력수준에 따라 증가 혹은 감소하거나, 영향을 받지 않는 등의 다양한 경향성이 보고되고 있다. 본 연구에서는 응력수준에 따른  $m$  값의 변화양상을 간편하게 모사하기 위하여 그림 6(b)에 나타난 바와 같이 값이 응력 값의 선형함수 형태를 갖는다고 가정하여  $m$  값이 응력의 연관성을 찾고자 하였다(식 (2) 참고). 각 치환율에서 구해진 SCP 복합지반 침하계측자료에 대한 최적화 과정을 통하여  $m$  값을 구하도록 하였다.

$$m(\sigma) = m_o + m_{slope} \cdot \frac{\sigma_o + \Delta\sigma}{\sigma_o} \quad (2)$$

여기서,  $m_o$ 와  $m_{slope}$  = 응력분담비 계수,  $\sigma_o$  = 초기응력,  $\Delta\sigma$  = 응력 증가분을 의미한다.

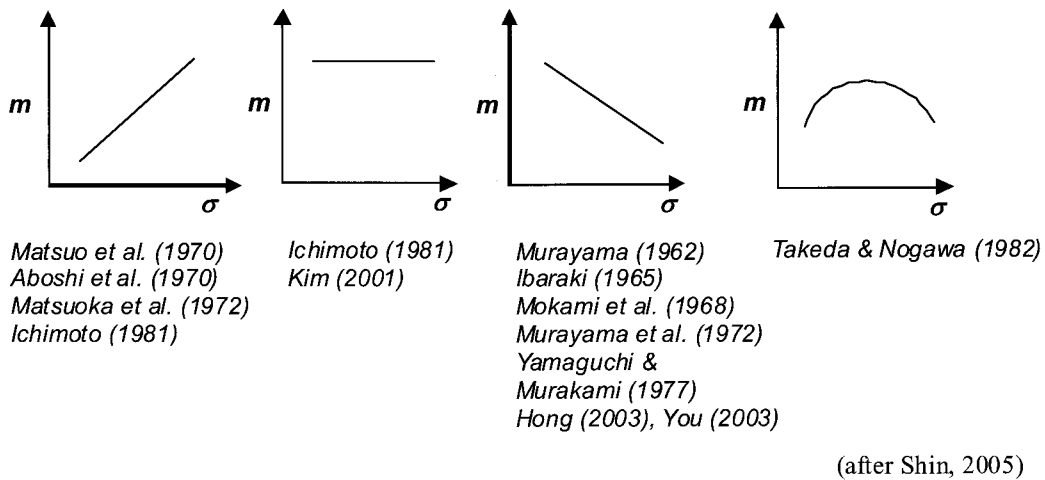
다짐모래말뚝과 점토지반에 작용하는 응력은 식 (1)과 식 (2)로부터 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\sigma_s = \frac{m \cdot \sigma}{[1 + (m-1)a_s]}, \quad \sigma_c = \frac{m \cdot \sigma}{[1 + (m-1)a_c]} \quad (3)$$

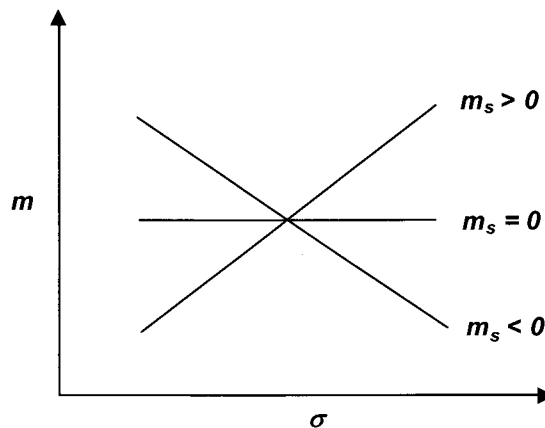
여기서,  $a_s = A_s / (A_s + A_c)$ ,  $a_c = A_c / (A_s + A_c)$ 로서 면적치환비율을 의미한다.

### 3.2 SCP 복합지반의 응력-변형률 관계

정규 압밀 점토지반의 일차원 침하거동은 하중 재하



(a)



(b)

그림 6. 응력수준에 따른 응력 분담비의 변화

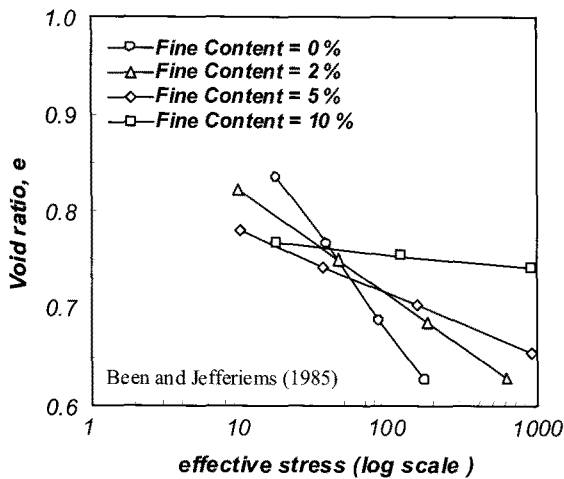
시 Terzaghi의 압밀이론에 근거하여 대수응력-변형을 관계에서 선형적인 거동을 갖는다. 이에 반하여 점토지반에 모래 말뚝이 설치된 복합지반의 경우 대수 응력-변형을 관계에 대한 명확한 규명이 현재 이루어 지지 않은 실정이다. 대부분의 연구들은 주어진 응력상태 및 치환율에서 복합지반의 침하발생량을 미치환 점토지반의 침하발생량으로 나눈 침하저감계수를 활용하여 복합지반의 침하거동양상을 검토하였다. 침하저감계수 값은 응력 수준 및 치환율에 따라서 비선형적으로 변화하며 경향성에 대한 분석이 명확하지 않기 때문에, 설계 및 시공 시 발생된 침하거동 분석 단계에서 적합한 계수 값 선정이 쉽지 않다. 또한 시간에 따른 침하량 산정이 어려우므로 유한요소해석과 같은 수치해석적인 접근이 수행되고 있다(Cho 등, 2005). 따라서, 본 연구에서는 모래말뚝이 설치된 점토지반의 시간에 따른 침하거동을

보다 간편하게 모사하기 위하여 먼저 응력 변형을 관계를 다음과 같이 가정하였다.

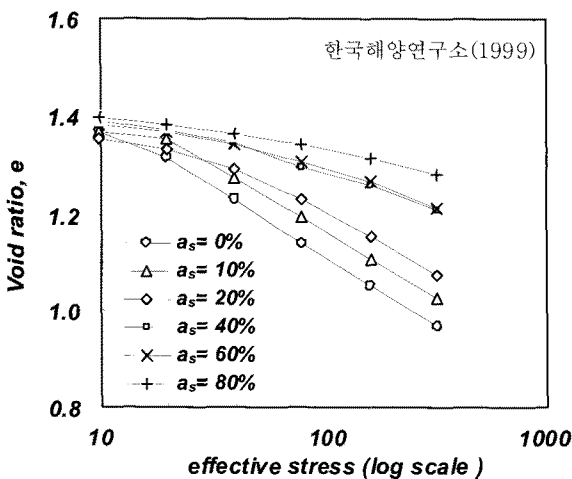
모래와 점토와 같은 이질적인 재료들로 구성된 복합 재료의 응력-변형을 관계에 대한 연구들은 다음과 같이 제한적으로 수행되었다(Been과 Jefferies, 1985; Graham 등, 1989; 한국해양연구소, 1999; 윤현석, 2004). 그림 7에 나타난 바와 같이 간극비-대수시간 관계에서 SCP 복합지반은 점토의 일반적인 선형거동과는 달리 비선형적인 압축거동을 보이며, 특히 치환율에 따라서 압축곡선의 형태가 크게 의존하는 것으로 나타났다. Been과 Jefferies(1985)는 세립분이 모래의 압축특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 실트질 성분을 0에서 10%로 증가시키면서 모래와 실트질이 혼합된 시료에 대한 압축특성을 살펴보았다. 실트질 함량이 증가함에 따라 압축지수 값이 점차 증가하는 양상을 보였다. 한국해양연구소(1999)은 실내실험을 통하여 모래 함량을 0에서 80% 까지 증가시키면서 실내압밀 실험을 수행하였다. 그림 7(a)에 나타난 바와 같이 치환율이 증가함에 따라 압축지수 값이 급격히 감소하였다. 또한 치환율이 0%인 경우에는 정규압밀거동인 선형적인 압축특성을 보였지만, 치환율에 증가함에 따라 다소 비선형적인 거동 양상을 보였다.

따라서, 본 연구에서는 그림 SCP 복합지반의  $e-\log p$  관계에서의 압축특성을 모사하기 위하여 응력 수준에 따른 복합지반의 압축지수 값이 그림 8에 나타난 바와 같이 치환율에 따라 비선형적으로 변화한다고 가정하였다. 제안된 압축지수  $C_m$  값은 식 (4)와 같이 가정되었다.

$$C_m = C_{sa} + (C_{cl} - C_{sa}) \times K \quad (4)$$



(a)



(b)

그림 7. 세립분 함량에 따른 모래의 압축특성 변화

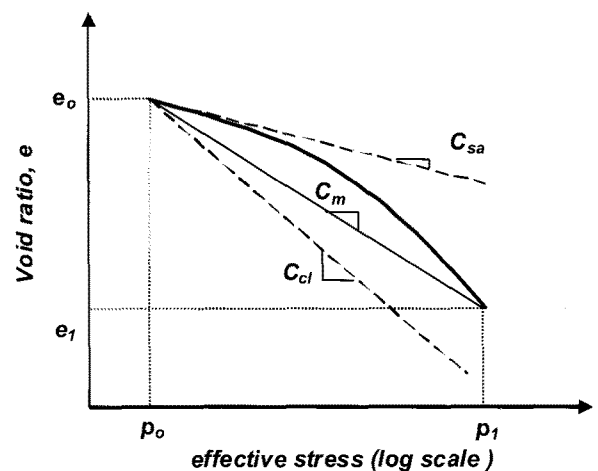


그림 8. 제안된 모델에서의 점토-모래 복합지반의  $e-\log p$  관계

여기서,  $C_m = e \cdot \log p$  관계에서 초기값과 최종값의 기울기 값,  $C_d =$  점토의 압축지수 값,  $C_{sa} =$  모래의 압축지수 값,  $K =$  압축지수 치환율 계수이다.

### 3.3 복합지반의 시간의존적 거동

복합지반에 하중이 가해지면 하중전달 메커니즘에 따라 점토지반에 일부하중이 전달되며 이로 인해 시간의존적 거동이 나타나게 된다. 본 연구에서는 점토의 시간의존적 거동을 모사하기 위하여 Barron(1948)의 축대칭 압밀이론을 적용하였다. Barron(1948)은 Terzaghi의 일차원 압밀이론을 토대로 지반을 자유변형률 조건과 등변형률 조건으로 구분하여, 연직배수재가 설치된 지반의 압밀 해석식을 제안하였다. 실제 설계 및 해석 시에는 등변형률 조건을 가정하는데, 이는 이론적으로는 적합하지 않지만 상대적으로 간편하고 실용적이다. 초기에 재하되는 상재하중은 모두 과잉간극수압으로 작용하며, 모든 변형율은 연직방향으로만 작용하고 각 배수재의 영향범위는 원형이라고 가정하였다.

연직배수재 설치 시 압밀에 걸리는 시간은 다음 식 (5a)와 같으며, 수평방향 평균압밀도와 시간계수와 관계는 다음 식 (5b)로 표현될 수 있다.

$$T_h = \frac{c_h \cdot t}{d_e^2} \quad (5a)$$

$$U_{av} = 1 - \exp\left[\frac{-8T_h}{F(n)}\right] \quad (5b)$$

$$F(n) = n^2 / (n^2 - 1) \cdot \ln(n) - (3n^2 - 1) / (4n^2), \quad n = d_e / d_w \quad (5c)$$

여기서,  $c_h =$  수평압밀계수,  $T_h =$  시간계수,  $t =$  경과된 시간,  $d_e =$  배수재의 유효직경,  $d_w =$  배수재의 직경  $U_{av} =$  점토지반의 평균압밀도를 의미한다.

## 4. 최적화 과정을 통한 모델 계수의 추정

### 4.1 목적함수 정의

본 연구에서 목적함수값은 계측 침하량과 침하모델에 따른 예측 침하량과의 차의 제곱으로서 다음 식 (6)과 같이 정의되었다. 제안된 모델에서는 구해져야 되는 설계변수들은 총 4개로서 압축지수 치환율 계수  $K$ , 압밀계수 관련 변수  $c_h$ , 응력분담비 관련 변수  $m_o$ 와  $m_{slope}$ 이다. 계측

침하양상을 정확히 모사할 수 있는 모델 정수값들을 추정하기 위해서는 전역해(global solution)로의 수렴성이 확보된 최적화기법의 적용이 필요하다고 할 수 있다. 따라서 적용되는 함수의 모델 계수값들이 많을 수록 전역해로의 수렴성이 다른 최적화 기법에 비해 견고한(robust) 것으로 알려진 실수형 유전자 알고리즘이 적용되었다.

$$\text{목적함수, } ObjV = \sum_{i=1}^{Num} [S(i) - \hat{S}(i)]^2 \quad (6)$$

여기서,  $Num =$  계측 자료 개수,  $S(i) = i$ 번째 계측 침하량,  $\hat{S}(i) = i$ 번째 계측 시점에서의 예측 침하량이다.

### 4.2 최적화 알고리즘

유전자 알고리즘은 무작위로 생성된 유전자들(chromosomes)로 구성된 모집단이 재생산(reproduction) 및 돌연변이(mutation)와 같은 유전자 조작(genetic operator)을 통하여 해에 보다 근접한 개체군으로 발전된다는 개념이다. 유전자 알고리즘(GA)은 이와 같이 자연 선택 및 자연 유전자와 같은 생물학적 진화 이론 개념에 근거한 확률론적 최적화 기법으로서 전역적이며 견고한 해를 구할 수 있다(Goldberg 1989, Holland 1975). 본 연구에서는 순위적합선별(rank-based fitness assignment) 방법이 확률론적 비례 추출(stochastic universal sampling)방법과 연계되어 사용되었다. 즉 각 세대에서의 개체들은 순위적합선별을 통하여 무작위로 선별된 이후 재생산과 돌연변이 과정을 거친 후에 다음 세대에 포함된다. 이러한 과정을 거친 후에 최종 세대에서의 최적 개체가 최적화 문제의 최종 해로서 채택된다.

초기 개체군 생성을 위하여 본 연구에서는 6개의 설계변수를 갖는  $q$ 개의 개체군을 사용할 경우 다음 식 (7)과 같은 개체수의 모집단을 생성하였다.

$$\begin{aligned} P^1 &= [a_1^1 \quad a_2^1 \quad \cdots \quad a_6^1] \\ P^2 &= [a_1^2 \quad a_2^2 \quad \cdots \quad a_6^2] \\ &\vdots \\ P^q &= [a_1^q \quad a_2^q \quad \cdots \quad a_6^q] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $a_j^i$ 는  $i$ 번째 개체의  $j$ 번째 설계변수를 의미한다.

각 개체의 적합도에 근거하여 유전적 처리과정(genetic manipulation process)에 사용될 개체들을 선별하게 된다. 이전 세대와 동일한 개체수를 갖는 다음 세대를 생

산하기 위하여 개체들이 각 적합도에 근거하여 선정되므로, 이전 세대보다 평균적으로 해에 보다 근접된 개체들로 구성될 수 있다. 이를 위해 여러 선택방법들이 개발되어 있으며, 본 연구에서는 순위적합선별법이 사용되었다(Bäck와 Hoffmeister, 1991). 순위적합선별법에서는 개체들이 목적함수의 순위에 따라 정렬되는데, 각 개체의 적합도는 실질적인 목적함수의 값보다는 개체군의 순위로서 표현된다.

재생산은 선택된 개체군에서 무작위로 두 개체(parents)를 선택하는 것을 포함한다. 이와 같이 선택된 두 개체(parents)는 다음 세대에 적용될 새로운 개체(offspring)를 생산하기 위하여 교배된다. 본 연구에서는 중간 재조합(intermediate recombination) 방법을 사용하여 두 개체(parents) 즉,  $P_1$  및  $P_2$ 로부터 새로운 개체(offspring)를 다음 식 (8)와 같이 생산하게 된다(Mühlenbein와 Schlierkamp-Voosen, 1993).

$$offspring = P_1 + \alpha \cdot (P_2 - P_1) \quad (8)$$

여기서,  $\alpha$ 는 구간  $[-d, 1+d]$ 에서 무작위로 균일하게 선택하는 비례계수이다.

다른 영역에 존재하는 해에 가장 근접한 개체가 현 세대의 개체군에 포함되어 있지 않은 경우에는 재생산 과정을 거치더라도 해에 보다 근접한 개체로 발전될 수 있는 가능성은 매우 낮다. 이 경우에 돌연변이 과정을 통하여 개체군과 다른 영역에 존재하는 개체를 생성시킴으로써 유전자 알고리즘의 조기 수렴을 방지할 수 있다.

선택, 재생산 및 돌연변이 과정은 매 세대에서 반복적으로 수행되며, 마지막 세대에서의 최적 개체가 해로 선정된다.

## 5. 분석 결과

본 연구에서는 치환율 20, 36 및 56%인 실내실험 침하자료에 대하여 제안된 모델의 계수값들을 산정하기 위

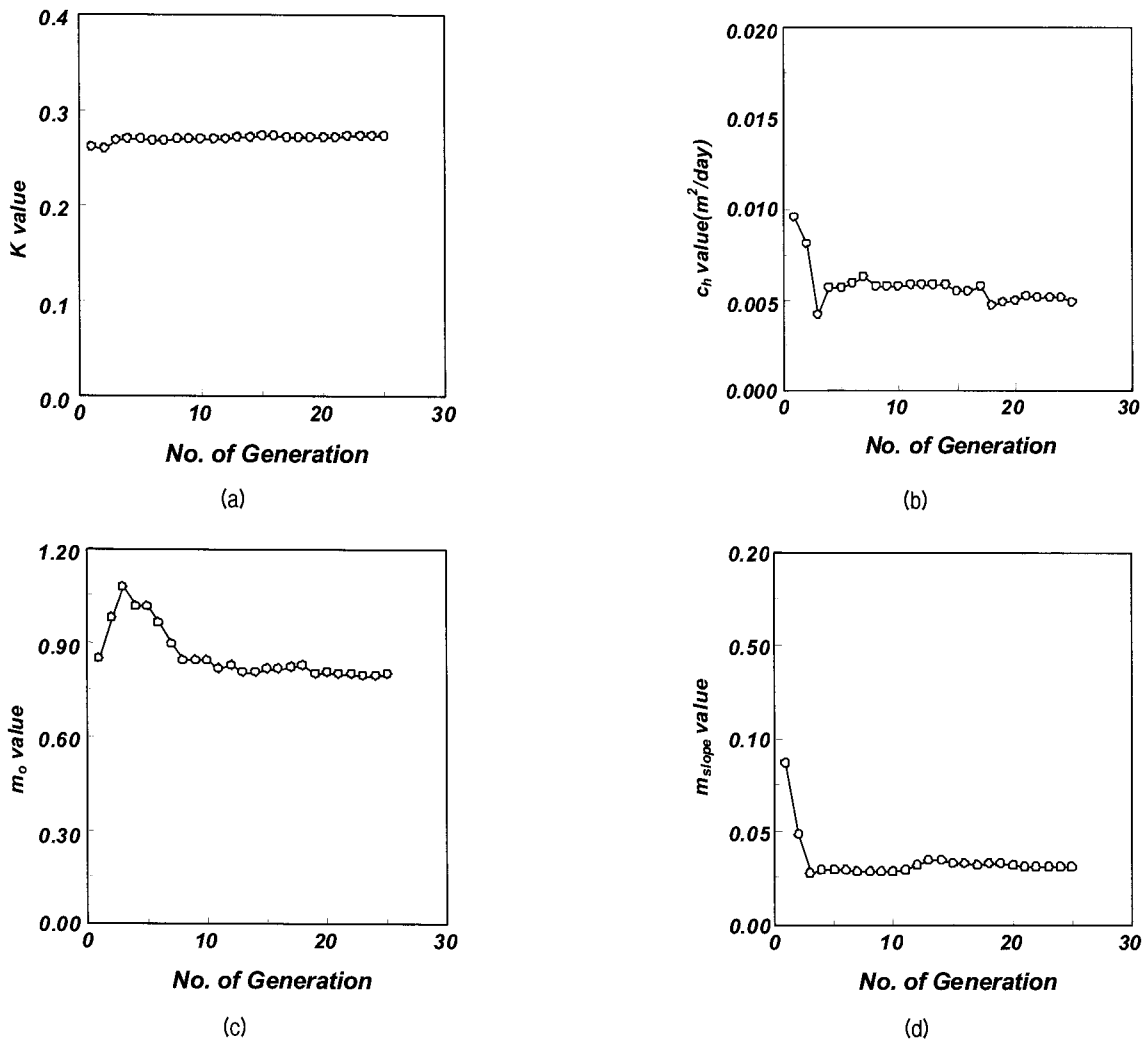


그림 9. 최적화 과정을 통한 제안된 모델의 계수 추정과정(계속)

표 2. 최적화 과정을 통해 구해진 제안된 모델 계수 값들

치환율(%)	K	$C_h$ (m <sup>2</sup> /day)	$m_o$	$m_{slope}$
20	0.272	0.0049	0.796	0.031
36	0.148	0.0052	1.915	0.048
56	0.100	0.0060	0.715	0.010

하여 침하자료에 최적화 과정을 적용하였다. 그림 9에는 치환율 20% 인 경우에 대하여 유전자 알고리즘에 근거한 최적화 과정이 나타나 있으며, 세대수 증가에 따른 각각의 모델 계수 값들 압축지수 치환율 계수(K), 압밀계수( $C_h$ ), 응력분담비( $m_o$ ) 및 응력분담비 기울기 계수( $m_{slope}$ )의 수렴과정이 나타나 있다. 세대수가 20을 넘어서면서 각각의 설계변수 값들이 대체적으로 수렴됨을 알 수 있다. 따라서, 각각의 치환율에 대하여 세대수 25인 경우에 얻어진 모델 계수 값들이 표 2에 정리되어 있다.

치환율이 증가함에 따라서 치환율 계수 값이 점차 감소하는 양상을 보이고 있으며, 이는 치환율 증가에 따라 압축특성이 감소함으로 인하여 간극비-유효응력 곡선 양상이 점차 완만해 지는 것을 의미한다. 구해진 응력분담비,  $m$  값은 0.7~2.0의 범위에 존재하며, 압밀계수,  $C_h$  값은 0.0049~0.0060m<sup>2</sup>/day의 범위로 구해졌다. 그림 10에서는 본 연구에서 실내실험결과에 대한 최적화 과정을 통하여 얻어진 응력수준과 응력분담비의 관계가 기존 문헌결과들과 비교되어 있다. 그림 6에서 언급한 바와 같이 기존 문헌 결과들에서 응력수준에 따른 응력분담비의 경향성을 찾기가 어렵다. 이는 문헌 결과들에서 응력범위의 폭이 좁기 때문에 전체적인 응력수준에서의 경향성을 찾기가 다소 어렵다고 사료된다. 본 연구에서 얻어진 해석결과를 살펴보면 응력이 증가함에 따라서 값이 미소하게 증가하는 경향성을 보였다.

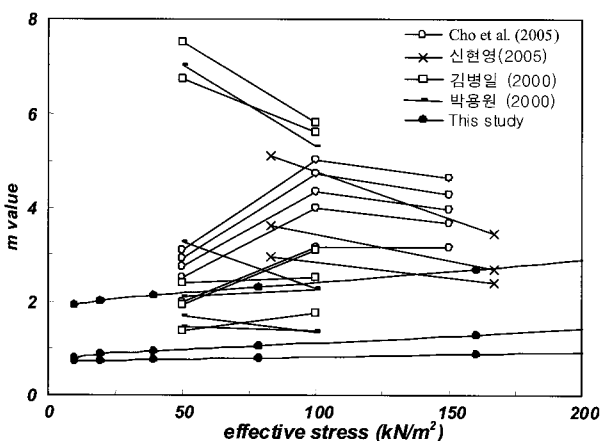


그림 10. 응력수준에 따른 응력 분담비의 변화

그림 11에는 치환율의 변화에 따른  $m$  값의 변화양상이 나타나 있다. 기존 문헌결과들을 살펴보면, 일부 실험자료의 경우  $m$  값이 응력수준이 증가함에 증가하거나 감소하는 경향을 보이고, 그외의 많은 연구결과들에서는 치환율이 증가함에 따라 증가하였다가 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 본 연구에서도 도출된  $m$  값과 치환율의 상관관계는 해양연구소(1999)등의 연구결과들과 유사하게 응력 수준의 증가에 따라 증가 이후 감소하는 경향성을 보였다. 이는 저치환율에서는 모래말뚝 상부에서 응력수준이 커짐에 따라서 말뚝의 벌징(bulging)이 발생하여 말뚝지지력 이상의 응력을 분담할 수 없기 때문에 응력분담비가 증가하기 않으며, 고치환율의 경우에는 점토지반에 비하여 모래말뚝이 차지하는 전반적으로 면적이 매우 크기 때문에 점토지반으로부터 아칭효과로 전달되는 응력분담율이 상대적으로 작기 때문인 것으로 사료된다. 이와 달리 치환율 30~40%에서는 아칭현상이 뚜렷하게 발생함으로 인하여 모래말뚝에 작용하는 응력이 커짐으로 인하여 응력분담비가 크게 나타나는 것으로 사료된다. 치환율 30~40%에서는 기존 실험의 결과에 비하여 본 연구결과의  $m$  값이 작게 나타나는 것은 모래말뚝의 직경에 비하여 말뚝이 길이가 짧게 적용됨으로 인하여 아칭효과에 의한 점토지반 응력을 분담하는 비율이 작기 때문인 것을 사료된다.

각 치환율에 대하여 구해진 모델 계수값들을 이용하여 예측된 결과들이 그림 12와 13에 나타나 있다.

그림 12에는 각각의 치환율에 대한 예측된 간극비-대수응력 관계와 제안된 모델들에 의하여 예측된 간극비-

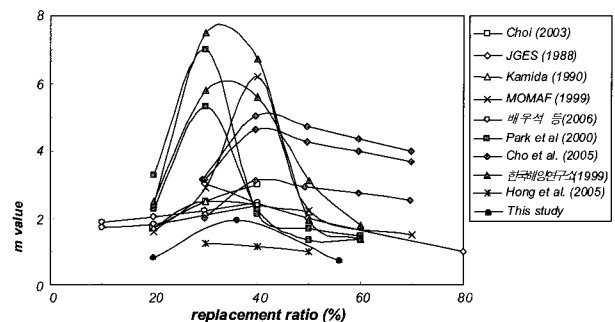


그림 11. 치환율이 응력분담비에 미치는 영향



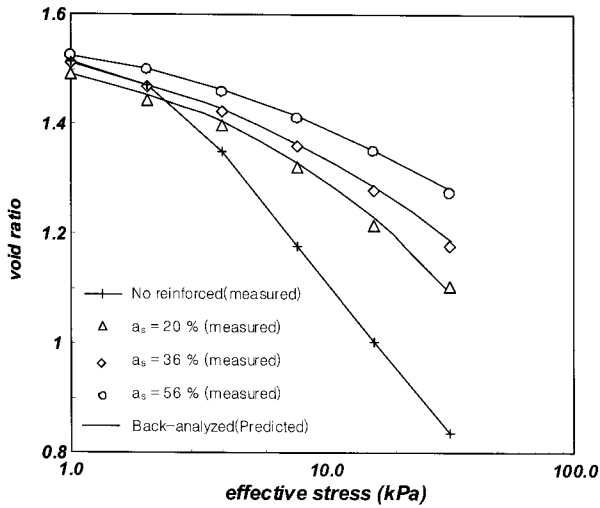


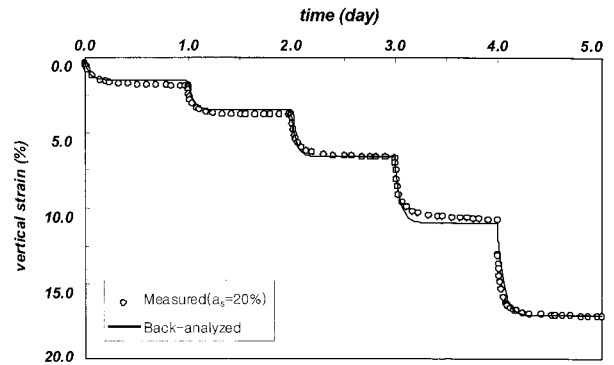
그림 12. 간극비-대수응력 관계에 대한 계측치와 예측치의 비교

대수응력 관계가 서로 비교되어 있다. 그림에 나타난 바와 같이 제안된 모델이 SCP 복합지반 재료의 비선형적인 간극비-대수시간 관계를 매우 정확하게 묘사하고 있음을 확인하였다. 그림 13에는 침하-시간 관계의 계측자료들에 대하여 제안된 모델을 사용한 예측결과들이 각각의 치환율에 대하여 나타나 있다. 하중이 단계별로 증가함에 따라 유발되는 시간 의존적인 압밀거동을 전체적으로 매우 정확하게 묘사하고 있음을 확인하였다.

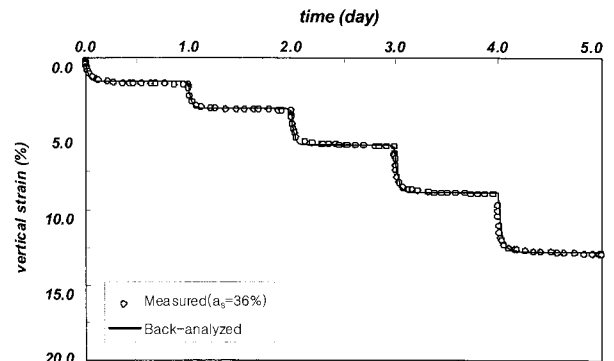
본 연구에서는 SCP 복합지반의 침하거동을 보다 신뢰성 있게 예측하기 위하여 SCP 복합지반 침하모델을 제안하였는데, SCP 복합지반의 설계 및 시공 관리 시에 다음과 같이 활용될 수 있으리라 사료된다. 설계 단계에서 현장에서 채취된 시료에 대하여 본 연구에서 수행된 실내 압밀시험이나 실내 모형 셀 실험 등을 통하여 주어진 치환율에 대하여 압밀시험을 수행할 수 있을 것이다. 얻어진 침하자료에 대하여 제안된 침하모델을 사용한 최적화 과정을 적용하면 SCP 복합지반에 관한 실내실험 침하거동을 동일하게 묘사할 수 있는 모델계수 값들을 얻을 수 있으며, 따라서 설계 단계에서 SCP 복합지반에 대한 보다 신뢰성 있는 침하 해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 시공 단계에서 현장에서 시공 초기에 계측된 SCP 복합지반의 실제 침하자료에 대하여 제안된 모델의 계수 값들을 최적화 과정을 통해 구한 다음에 향후 침하양상을 예측한다면 보다 신뢰성 있고 효율적인 시공관리가 가능하리라 사료된다.

## 6. 결론

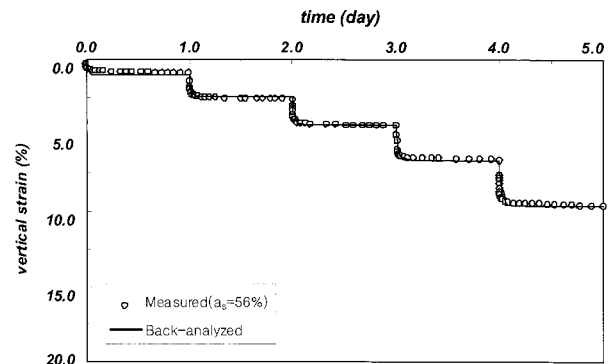
본 연구에서는 SCP 복합지반의 침하거동을 예측할 수



(a)  $a_s = 20\%$



(b)  $a_s = 36\%$



(c)  $a_s = 56\%$

그림 13. 각 치환율 별로 제안된 모델을 사용하여 예측된 침하양상

있는 새로운 침하모델을 제안하였으며, 모델 변수 값들은 유전자 알고리즘에 근거한 최적화 기법을 사용하여 구할 수 있다. 수행된 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) SCP 복합지반의 응력에 따른 비선형적 압축양상을 묘사하기 위하여 간극비-대수응력 관계에서 원호형태의 압축지수곡선을 제안하였다. 또한 작용하는 상재하중에 대하여 모래와 점토에 분담되는 하중 비율을 의미하는 응력분담비 값이 응력수준에 따라서 변화하며, 압밀과정 중에 점토의 압밀계수 값도 응력수준에 의존하는 것으로 가정하였다.

- (2) 제안된 모델에서 사용되는 총 5개의 모델 계수 값들은 최적화기법을 사용하여 산정하였으며, 전역 해에 견고하게 수렴시킬 수 있는 최적화 기법인 실수형 유전자알고리즘이 적용되었다.
- (3) 제안된 모델을 사용하여 실내모형실험 침하자료들에 적용한 결과, 치환율 20, 36 및 56%인 경우에 간극비-대수응력 관계에서 비선형적인 압축특성을 매우 정확하게 묘사할 수 있으며, 시간-침하 관계에서 상재하중이 증가함에 따른 침하경향도 매우 정확하게 예측하고 있음을 확인하였다.
- (4) SCP 복합지반의 설계단계에서 제안된 모델은 대상 현장지반에서 채취된 시료에 대한 실내모형 실험 침하자료를 활용하여 필요한 모델계수 값들을 구하여 설계에 요구되는 침하해석이 가능하다. 또한 시공 과정 중에 현장에서 계측된 침하자료에 제안된 모델을 적용할 경우, 계측된 침하양상을 대변하는 모델계수 값들을 구할 수 있기 때문에 시공 중에 최종 침하양상을 보다 정확히 예측할 수 있다는 점에서 효율적인 침하관리기법으로 활용될 수 있으리라 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. 김병일, 박용원, 윤길립, 조성환 (2000), “모래다짐말뚝(SCP)으로 개량된 연약지반의 유한요소해석”, 대한토목학회논문집, 제 20권, 제 4C호, pp.357-366.
2. 박용원, 김병일, 윤길립, 이상인, 문대중, 권오순 (2000), “모래다짐말뚝(SCP)의 치환율 변화에 따른 거동특성 연구”, 한국지반공학학회논문집, 제 16권, 제 4호, pp.117-128.
3. 배우석, 오세욱, 신방웅 (2006), “모래다짐말뚝으로 개량된 복합지반의 거동에 관한 원심모형실험-응력집중을 중심으로”, 대한토목학회논문집, 제 26권, 제 1C호, pp.19-24.
4. 신현영 (2005), 지치환율 SCP 복합지반의 거동 해석, 박사학위논문, 중앙대학교.
5. 윤현석 (2004), “굴패각 혼합토의 역학적 거동에 관한 연구”, 박사학위논문, 서울대학교 대학원.
6. 한국해양연구소 (1999), “대수침 방파제 및 연약지반 관련기술(2)”, 해양수산부.
7. Aboshi, H., Yoshikumi, H., and Harada, K. (1970), “Ko-consolidation of clay with large sand pile”, 5<sup>th</sup> JSSMFE Conf., pp.397-400.
8. Barron, R.A. (1948), “Consolidation of fine grained soils by drain wells”, *Trans. ASCE*, Vol.113, paper No. 2346, pp.718-742.
9. Been, K., and Jefferies, G. (1985), “A state parameter for sands”, *Geotechnique*, Vol.35 pp.99-112.
10. Cho, S. M., Kim, B. I., Kim, Y. U., and Lee, S. H. (2005), “Effect of soil compaction piles on settlement reduction in soft ground”, *Int. Journal of Offshore and Polar Engineers*, Vol.15, No.3, pp.235-240.
11. Chow, Y. K. (1996), Settlement analysis of sand compaction pile, *Soil and Foundations*, 36(1): 111-113.
12. Goldberg, D.E. (1989), Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, New York: Addison-Wesley.
13. Han, S. J., Kim, S. S., and Rye, H. K. (2007), “Behavior of composite ground reinforced by sand compaction piles”, *Int. Journal of Offshore and Polar Engineers*, Vol.17, No.3, pp.233-239.
14. Holland, J. J. (1975), Adaptation in natural and artificial systems, The University of Michigan Press.
15. Hong, Y. K. (2003), “A study on characteristics of bearing capacity and stress concentration of clay ground improved with sand compaction piles”, Phd dissertation, Kangwon Nat Univ, Korea, pp. 201-213.
16. Ibaraki, T. (1965), “An experimental research of composite ground by direct shear test”, *JSSMFE*, Tsuchi-to-Kiso, Vol.13, pp.33-39.
17. Ichimoto, E. (1981), “Results of design and construction of sand compaction pile method, 36<sup>th</sup> JSCE Conf discussion”, pp.51-55.
18. Jung, J. B. (1999), “Study on consolidation behavior of clay ground improved by the partly penetrated sand compaction piles”, Ph. D dissertation, Hiroshima Univ., pp.153-155.
19. Kim, J. K. (2003), “Load transfer characteristics of sand compaction piles in soft ground”, Ph. D dissertation, Yonsei Univ., Korea, pp. 105-106.
20. Kim, T. W. (2001), “Numerical analysis of the behavior of sand compaction pile in clay”, Masters’s thesis, Dankook Univ, Korea.
21. Matsuo, M., Kuga, S., and Nishikawa, M. (1970), “Test on stress distribution of composite ground, 25<sup>th</sup> JSCE Conf.”, pp.421-424.
22. Matsuoka, T., Tsukai, M., and Harada, K. (1972), “On Characteristics of settlement of ground by improved vibro-compozer method”, 7<sup>th</sup> JSSMFE Conf., pp.391-394.
23. Mokami, T., Nakayama, J., Ueda, S., Kuwada, H., Kamada, H., and Taguchi, T. (1968), “Model test on composite ground”, *JSSMFE*, Tsuchi-to-Kiso, Vol.16, No.8, pp.9-17, No.1, pp.5-7.
24. Mühlenbein, H. and Schlierkamp-Voosen, D. (1993), Predictive Models for the Breeder Genetic Algorithm: I. Continuous Parameter Optimization. *Evolutionary Computation*, 1 (1): 25-49.
25. Murayama, S. (1962), “A Consideration on Vibro-compozer Method, Mechanization of Construction Works”, PUBLICATION, No.150, pp.10-15.
26. Murayama, S., Suemastu, N., and Mustueka, G. (1972), “Ananalysis of Composite Ground with Stress-strain Relation of Sand Pile”, 7<sup>th</sup> JSSMFE Conf., pp.721-724.
27. Shin, H. Y. (2005), “Analysis on the behavior of composite ground reinforced by sand compaction pile with low area replacement ratio”, PhD dissertation, Chungang Univ, Korea, pp.225-226.
28. Park, Y. W., Kim, B. I., Yoon, G. L., Lee, S. I., Moon, D. J., and Kwon, O. S. (2000), “Behavior characteristics of sand compaction pile with varying area replacement ratio”, *J. of Korea Geotech. Soc.*, Vol.16, No.4, pp.117-128.
29. Takeda, N., and Nogawa, H. (1982), “Compressibility of clayey containing and compaction piles”, *JSSMFE*, Tsuchi-to-Kiso, Vol.30, No.2, pp.47-54.
30. Yamagata, K., and Hukumoto, K. (1982), “Stress ratio of a sand pile and cohesive soil in composite ground”, 17<sup>th</sup> JSSMFE Conf., pp.2417-2420.
31. You, S. K. (2003), “Stress sharing behavior and its mechanism during consolidation process of composite ground improved by sand compaction piles with low replacement area ratio”, *J. Korean Geotech Soc.*, Vol.19, No.5, pp.301-310.

(접수일자 2008. 2. 25, 심사완료일 2009. 7. 28)