

## 유전자 알고리즘 기법에 근거한 SCP 복합지반의 침하 예측 Prediction of Settlement of SCP Composite Ground using Genetic Algorithm

박현일\* · 김윤태\*\* · 이형주\*\*\*

Hyun-Il Park\*, Yun-Tae Kim\*\* and Hyung-Joo Lee\*\*\*

**요 지 :** SCP 공법(Sand Compaction Pile Method)은 안벽구조물 하부 지반이 연약할 경우에 압밀침하 속도를 증가시키고, 침하를 감소시키며, 지지력을 증가시키기 위하여 널리 적용되어 왔다. 연약지반에 타설된 모래말뚝과 주변 연약지반으로 구성된 SCP 개량지반 상부에 상부 케이슨과 상치구조물이 설치됨에 따라, SCP 복합지반에서는 모래말뚝에 의한 즉시침하와 함께 주변 점토지반의 압밀침하가 복합적으로 유발하게 된다. 본 연구에서는 SCP 복합지반에 대한 기존의 탄성침하 및 압밀이론에 근거하여 침하 예측기법을 제안하였다. 제안된 침하모델의 모델정수값들의 산정하기 위하여 유전자 알고리즘에 근거한 역해석 기법을 적용하여 최적화 과정을 수행하였다. 국내 SCP 복합지반에 대한 예제해석을 수행하여 제안된 침하예측기법의 적용성을 검토하였다.

**핵심용어 :** SCP, 침하, 유전자 알고리즘, 압밀

**Abstract :** In order to accelerate the rate of consolidation settlement, to reduce settlement, and to increase bearing capacity for soft ground under quay wall, sand compaction pile method (SCP) has widely been applied. Improved ground is composite ground which is consisted of the sand pile-surrounding clayey soil. As caisson and upper structures are installed on SCP composite ground, the settlement is compositively occurred by elastic compression of sand compaction piles and also consolidation of the surrounding clay ground. In this study, the combined settlement model is proposed to predict the settlement of SCP composite ground in basis of elastic theory for sand compaction pile and consolidation theory for marine soft clay. Optimization technique was performed based on back-analysis so that real coded genetic algorithm was applied to estimate the parameters of the proposed settlement model. Case analysis was carried out for a domestic SCP composite ground to examine the applicability of the proposed prediction technique.

**Keywords :** SCP, settlement, genetic algorithms, consolidation

### 1. 서 론

안벽구조물 하부 연약지반에서 우려되는 지지력 파괴, 활동, 전도, 사면파괴 등으로부터 안벽구조물의 안정성을 확보하기 위하여 다양한 지반개량공법을 적용하여 하부 연약지반을 개량한 후에 안벽 구조물을 시공한다. Fig. 1은 케이슨(caisson) 안벽 구조물의 일반적인 표준단면도를 보여주고 있다. 하부 연약한 해성 점토지반에 SCP 공법

(Sand Compaction Pile Method)을 적용하여 연약지반을 개량한 후 상부에 사석(quarry run rock, Q.R.R.)을 포설하고 콘크리트 케이슨을 거치하도록 설계되어 있다. Fig. 1에서와 같이 흔히 사용되는 SCP 공법은 큰 직경의 잘 다져진 모래 말뚝을 지중에 조성하여 지반을 개량하는 공법으로서 느슨한 모래지반과 연약한 점토지반과 같이 침하가 과다하게 우려되는 연약지반에 적용되고 있다. SCP 공법은 1950년대 일본에서 개발된 후, 육상 및

\*한국과학기술원 토목공학과 연수연구원(Corresponding author, Civil & Envir. Engrg, KAIST, Kusong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-701, Korea. gomdori7@empal.com)

\*\*부경대학교 해양공학과(Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University)

\*\*\*삼성건설 토목영업팀(Engineering & Construction Group, Samsung Corporation)

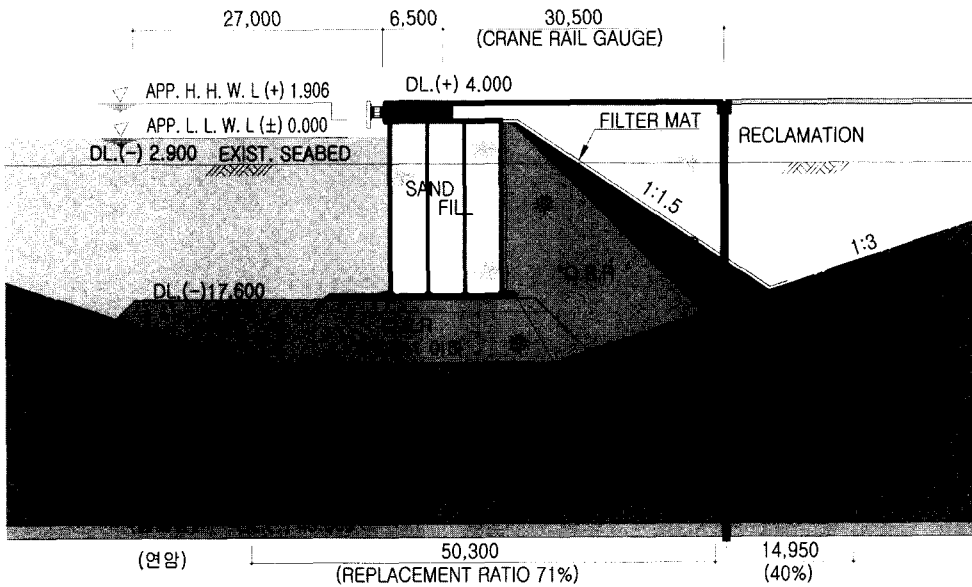


Fig. 1. Schematic representation of quay wall structure.

해상공사에서 하부 연약지반을 개량하기 위해서 많이 사용되어 왔고, 광양제철소, 인천 남항, 부산 신항만 등에 적용되었다.

안벽 구조물 하부 연약지반에 SCP 공법을 적용함으로써 상당량의 침하 억제를 기대할 수 있으나, 사석층(QRR) 및 케이슨 거치와 같은 큰 응력 수준의 상재하중이 작용될 경우 모래 다짐 말뚝의 탄성거동에 의한 즉시침하와 주변 연약점토층에서의 장기적인 압밀 침하가 복합적으로 유발하게 된다. 이와 같은 SCP 복합지반의 거동특성은 모래와 점토의 상호작용(interaction)에 의한 응력전이(stress transfer) 거동, 치환율(area replacement ratio), 응력분담비(stress concentration ratio), 모래말뚝으로 반경방향의 배수에 의한 연약지반의 압밀특성 등과 같은 요소에 의존하는 것으로 알려져 있지만, 이러한 거동 특성을 대표하는 물성 특성에 대한 연구는 미진한 상황이다. 유한요소법과 같은 수치해석방법을 통한 해석을 수행하고자 할 경우 중요설계 물성치들의 추정이 불확실함으로 인하여 신뢰성 있는 예측이 어렵다. 따라서 실제 시공단계에서 관측된 거동이 수치해석을 통하여 예측된 거동과 상이한 경우가 일반적이다.

SCP 복합지반의 거동 특성이 일반적인 연약 점토층과 상이하고, 특히 불균질한 복합지반을 대표할 수 있는 신뢰성 있는 지반물성치 도출은 더욱 어렵다고 할 수 있다. 따라서, 신뢰성 있는 SCP 복합지반의 거동해석을 위해서는

정교하며 복잡한 수치해석기법의 적용보다는 신뢰성 있는 설계 물성치에 대한 도출이 우선되어야 한다고 할 수 있다. 이와 같이 실제 현장에서 실측된 침하와 같은 계측자료를 사용하여 대상시스템의 중요 물성치를 구하는 방법을 일반적으로 역해석이라 한다(Gioda and Sakurai, 1987; Sakurai and Takeuchi, 1983).

Gioda(1985)는 시공단계에서 계측된 자료를 이용하여 현장지반의 물성치를 역해석하는 방법들을 크게 역순법, 직접법, 및 통계학적인 방법으로 분류하였다. 이 가운데 직접법은 계측치와 예측치와의 오차로 정의된 목적함수(objective function)를 최소화하는 방법이며, simplex 방법, conjugate gradient, quasi-Newton 방법과 같은 최적화 기법들이 주로 적용되었다(Sakurai and Takeuchi, 1983; 김운태 등, 1994; 김문겸 등, 1995). 이와 같은 최적화 기법들을 사용할 경우 설계 변수에 대한 초기 값 설정이 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히 최적화 과정에 적용되는 설계변수의 수가 증가할수록, 지역해(local solution)에 수렴될 우려가 크다고 할 수 있다. 본 연구에서는 직접법에 사용되는 최적화 기법으로서 지역해(local solution)로의 수렴을 피하며, 안정적으로 전체해(global solution)로 수렴할 수 있는 견고한(robust) 최적화 기법으로 알려진 실수형 유전자 알고리즘(real coded genetic algorithms)을 적용하고자 하였다.

본 연구에서는 연약점토지반에 다짐모래말뚝이 설치된

복합지반의 침하거동을 모사하기 위하여 Chow (1996)의 탄성이론에 근거한 SCP 복합지반 침하식과 근사적인 개념에 근거한 복합지반의 압밀침하식(Aboshi et al., 1979) 및 Barron (1948)의 압밀이론을 조합하여 SCP 복합지반의 침하양상을 모사할 수 있는 침하예측기법을 제안하였다. 유전자 알고리즘에 근거한 최적화 기법과 제안된 침하예측기법에 근거하여 SCP 복합지반의 침하자료에 적용함으로써 SCP 복합지반의 탄성계수( $E$ ), 응력집중계수( $m$ ), 점토지반의 압축계수( $C_c$ ) 및 수평방향 압밀계수( $c_v$ )와 같은 지반 물성치를 역해석하여 구하고자 하였다. SCP 복합지반의 침하거동을 모사하는 이론식들에 근거하여 제안된 침하예측기법을 사용하여 삼성중공업(2003)의 해안 SCP 개량공사 현장(A 현장)에서 계측된 침하자료에 대한 분석을 수행하여 적용성을 검토하고자 하였다.

## 2. SCP 복합지반의 침하

### 2.1 탄성 침하

현재까지 다짐모래 말뚝으로 개량된 점토지반의 침하를 예측할 수 있는 여러 방법들이 제안되었다(Aboshi et al., 1979; Balaam and Booker, 1981; Balaam and Poulos, 1983; Hughes et al., 1975; Priebe, 1976; Van Impe and De Beer, 1983).

본 연구에서는 Chow(1996)에 의해 제안된 탄성이론에 근거한 간편식을 적용함으로써 하중재하에 따른 즉시침하를 고려하고자 하였으며, 이론적 배경을 살펴보면 다음과 같다. 아래 Fig. 2에는 모래말뚝으로 개량된 지반의 개략도가 나타나 있다. SCP 개량지반이 일차원 하중을 받는다는 가정하에 단일 모래말뚝 셀의 거동이 전체 거동을 모사한다고 가정하였다.

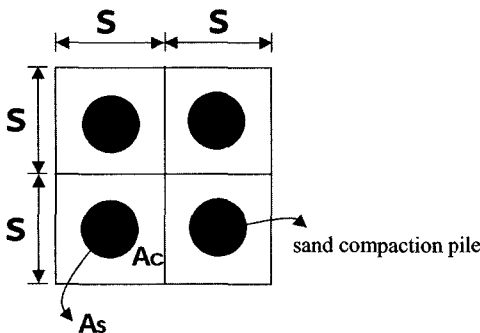


Fig. 2. Schematic representation of soil improved with sand compaction piles.

모래말뚝셀에서의 힘의 평형으로부터 다음 식 (1)을 산정할 수 있다.

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

여기서,  $\sigma$  = 작용된 수직응력,  $A_s$  = 모래말뚝의 면적,  $A_c$  = 주변 점토지반의 면적,  $\sigma_s$  = 모래말뚝에 전달되는 응력,  $\sigma_c$  = 점토에 전달되는 응력이다.

다짐모래말뚝과 주변점토지반과의 변위적합조건과 일차원 구속압축조건으로부터 다음과 같은 식 (2)를 구할 수 있다.

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_c} = \frac{M_s}{M_c} = m \quad (2)$$

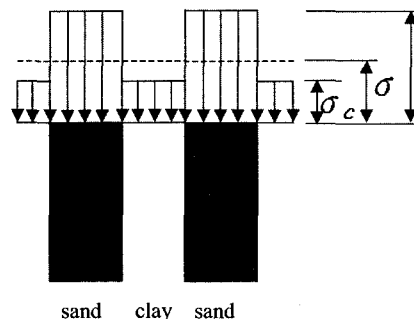
여기서,  $m$  = 응력집중비(Stress concentration ratio),  $M_s$  = 모래다짐말뚝의 배수구속변형계수(Drained constrained modulus),  $M_c$  = 점토지반의 배수 구속변형계수(Drained constrained modulus)이다. 또한  $M = E(1-\nu)A(1+\nu)(1-2\nu)$ 이며,  $E$  = 탄성계수이며,  $\nu$  = 포아송비를 의미한다.

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

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \frac{m \cdot \sigma}{[1 + (m-1)a_s]} = \mu_s \cdot \sigma, \\ \sigma_c &= \frac{m \cdot \sigma}{[1 + (m-1)a_c]} = \mu_c \cdot \sigma \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $a_s = A_s/(A_s + A_c)$ 로서 면적치환비율을 의미하며  $\mu_c$  = 응력저감계수,  $\mu_s$  = 응력증가계수를 나타낸다.

따라서, 다짐모래말뚝과 점토지반으로 구성된 단위셀의 탄성침하는 다음 식 (4)와 같이 정리될 수 있다.



$$S = \frac{\sigma H}{M_c} \left( \frac{1}{1 + (m-1)a_s} \right) \quad (4)$$

여기서,  $H$  = 복합지반의 깊이이다.

### 2.2 압밀침하

다짐모래말뚝의 주변에 있는 점토지반의 압밀침하 거동은 수직배수재가 설치된 점토지반의 경우와 큰 차이를 보이지 않는다. Aboshi et al.(1979)은 근사적인 개념에 근거하여 복합지반의 압밀 침하량을 산정하였으며, 다음과 같은 가정사항을 필요로 하였다. 첫째, 등가유효원주 개념이 전 지반에 적용된다. 둘째, 등가유효원주에 가해진 상재하중은 점토와 모래말뚝에 발생한 응력의 합과 같다. 셋째, 모래말뚝과 점토지반에서는 동일한 침하가 발생한다. 넷째, 상재압에 의해 모래말뚝에 유발된 응력은 말뚝 전길이에 걸쳐 일정하거나 압축지층을 몇 개의 분할 요소로 나누었을 때 요소 내에서 일정하다.

SCP 복합지반에서 유발되는 침하량은 다음 식 (5)와 같이 정리될 수 있다.

$$S_f = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot H \cdot \log \left( \frac{\sigma'_o + \mu_c \Delta \sigma}{\sigma'_o} \right) \quad (5)$$

여기서,  $c_c$  = 압축지수,  $e_0$  = 초기간극비,  $H$  = 점토지반층의 두께,  $\sigma'_o$  = 초기유효응력,  $\Delta \sigma$  = 추가적인 상재응력,  $\mu_c$  = 응력저감계수를 의미한다.

모래말뚝이 설치되어 있는 점토지반의 시간에 따른 압밀도를 평가하기 위해 Barron(1948)의 압밀 이론식을 사용하였으며, 수평방향의 등가압밀도,  $U_{av}$ 는 다음 식 (6.1)과 같이 표현될 수 있다.

$$U_{av} = 1 - \exp \left[ \frac{-8T}{F(n)} \right] \quad (6.1)$$

$$F(n) = n^2 / (n^2 - 1) \cdot \ln(n) - (3n^2 - 1) / (4n^2), \quad (6.2)$$

$$n = d_e / d_w, n = d_e / d_w, T_h = \frac{c_h \cdot t}{d_e^2}$$

여기서,  $d_e$  = 모래말뚝의 유효직경,  $d_w$  = 모래말뚝의 직경,  $c_h$  = 수평방향 압밀계수를 의미한다.

## 3. 제안된 침하예측기법

### 3.1 침하예측 모델

본 연구에서는 앞에서 설명된 각각의 하중재하에 따른

탄성침하와 압밀침하를 독립적으로 고려하여 누적된 침하량으로 다단계 하중재하에 따른 전체 침하양상을 모사하고자 하였다.

두단계의 하중재하가 적용되었을 경우 하중재하에 따른 침하량을 표현하면 다음 식 (7.1)과 같다. 본 연구에서 제안된 침하모델은 4개의 모델변수를 포함하고 있다.

$$S(t) = S_{el-1} + S_{con-1}(t) + S_{el-2} + S_{con-2}(t) \quad (7.1)$$

$$S_{el-1} = \frac{\sigma_1 H}{M_c} \left( \frac{1}{1 + (m-1)a_s} \right), \quad (7.2)$$

$$S_{el-2} = \frac{\sigma_2 H}{M_c} \left( \frac{1}{1 + (m-1)a_s} \right)$$

$$S_{con-1}(t) = S_{f-1} \cdot U_{av-1}, S_{con-2}(t) = S_{f-2} \cdot U_{av-2} \quad (7.3)$$

여기서,  $\sigma_1$  = 첫번째 하중,  $\sigma_2$  = 두번째 하중이고,  $S_{el-1}$  = 첫번째 하중 재하에 따른 탄성침하량,  $S_{el-2}$  = 두번째 하중 재하에 따른 탄성침하량,  $S_{con-1}(t)$  = 시간  $t$ 에서 첫번째 하중재하에 따른 압밀침하량,  $S_{con-2}(t)$  = 시간  $t$ 에서 두번째 하중재하에 따른 압밀침하량을 의미한다.

### 3.2 제안된 침하모델 정수 값들의 산정

본 연구에서는 직접법에 근거하여 예측 침하량과 제안된 침하모델에 따른 예측 침하량과의 차의 제곱으로서 목적함수를 다음 식 (8)과 같이 구성하였다. 제안된 침하모델에서는 탄성계수( $E$ ), 응력분담비( $m$ ), 압축계수( $c_c$ ) 및 압밀계수( $c_v$ )와 같은 4개의 모델 정수 값들이 적용되었으므로, 최적화 기법의 적용에 따라 예측침하양상을 정확히 모사할 수 있는 모델 정수값들에 대한 전역해(global solution) 보다는 부분해(local solution)로 수렴되는 결과를 산정할 우려가 크다. 따라서 적용되는 함수의 모델 정수값들이 많을 수록 전역해로의 수렴성이 다른 최적화 기법에 비해 견고한(robust)것으로 알려진 실수형 유전자 알고리즘을 적용하였다.

$$\text{목적함수, } ObjV = \sum_{i=1}^{Num} [S(i) - \hat{S}(i)]^2 \quad (8)$$

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

### 3.3 실수형 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 유전자들(chromosomes)로 구성된

모집단이 무작위로 생성되어 재생산(reproduction) 및 돌연변이(mutation)와 같은 유전자 조작(genetic operator)을 통하여 보다 해에 근접한 개체군으로 발전된다는 개념이다. 즉 다음 세대의 새로운 집단(population)은 이전 세대로부터 재생산과 돌연변이 과정을 거친 후 선택(selection) 과정을 거쳐서 생성된다. 유전자 알고리즘(GA)은 이와 같이 자연 선택 및 자연 유전자와 같은 생물학적 진화 이론 개념에 근거한 확률론적 최적화 기법으로 전역적이며 견고한 해를 구할 수 있다(Goldberg, 1989; Holland, 1975). 즉 각 세대에서의 개체들은 순위적합선별을 통하여 무작위로 선별된 이후 재생산과 돌연변이 과정을 거친 후에 다음 세대에 포함되게 된다. 이러한 과정을 거친 후에 최종 세대의 최적 개체가 최적화 문제의 최종 해로서 채택되며, 해석과정을 설명하면 다음과 같다.

설계변수를 표현하기 위하여 이진수를 사용하는 이진수형 유전자 알고리즘에 비해 실수형 유전자 알고리즘은 설계변수를 나타내는 개수를 표현하기 위하여 실수 벡터를 사용한다. 본 논문에서와 같이 4개의 설계변수를 갖는 개의 개체군을 사용할 경우 다음 식 (9)와 같은 개체수의 모집단이 생성된다.

$$\begin{aligned} P^1 &= \begin{bmatrix} a_1^1 & a_2^1 & a_3^1 & a_4^1 \end{bmatrix} \\ P^2 &= \begin{bmatrix} a_1^2 & a_2^2 & a_3^2 & a_4^2 \end{bmatrix} \\ &\vdots \\ P^q &= \begin{bmatrix} a_1^q & a_2^q & a_3^q & a_4^q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

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

최적화되는 목적함수는 각 개체를 평가하는 메커니즘을 제공한다. 이때 각 개체의 적합도에 근거하여 유전적 처리과정(genetic manipulation process)에 사용될 개체들을 선별하게 된다. 본 연구에서는 순위적합선별법이 사용되었다(Back and Hoffmeister, 1991). 순위적합선별법에서는 개체들이 목적함수의 순위에 따라 정렬되는데, 각 개체의 적합도는 실질적인 목적함수의 값보다는 개체군의 순위로서 표현된다.

재생산(reproduction)은 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 논문에서는 중간 재조합(intermediate recombination) 방법을 사용하여

두 개체(parents) 즉,  $P_1$  및  $P_2$ 로부터 새로운 개체(offspring)를 다음 식 (10)과 같이 생산하게 된다(Muhlenbein and Schlierkamp-Voosen, 1993).

$$offspring = P_1 + \alpha \cdot (P_2 - P_1) \quad (10)$$

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(mutation)이 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.

## 4. 사례 해석

### 4.1 SCP 복합지반 침하자료

A 현장의 피솔 돌핀식 안벽 조성공사는 연약한 해성 점토층을 SCP 공법에 의해 개량(치환율=71%)한 후 상부 콘크리트 케이슨(25 m × 15 m × 13.1 m) 및 상치구조물(H = 2.5~3.0 m)을 거치하도록 설계되었다. 그러나 현장 작업 여건상 하부 케이슨 본체를 거치한 후 프리캐스트로 제작된 상부 콘크리트를 설치하도록 되어 있어 치환층 상부에 케이슨 거치와 상부 콘크리트 거치에 따른 SCP 개량지반의 침하정도와 해성점토층의 잔류침하량을 파악하여 케이슨 구조물의 거동에 따른 안정성을 파악하고자 하였다(삼성중공업, 2003). 시공단계별 침하량을 예측하여 잔류침하량과 최종침하량을 예측하기 위하여 Fig. 3에 나타난 바와 같이 각각의 콘크리트케이슨 바닥에 침하판 2개를 설치하여 상부 콘크리트 거취 후, 0~10일 동안 일 1회 계측되었고, 11~60일 동안 주 1회 계측되었다. 또한 부등침하에 의한 케이슨의 기울기를 측정하기 위하여 각각의 콘크리트케이슨에 경사계 4개가 설치되어 침하판과 동일한 계측 빈도를 가지며 계측되었다.

총 6개의 침하판이 설치되었으며, 2003년 5월 4일부터 2003년 6월 28일까지 55일 동안 침하계측이 이루어졌으며, 침하량과 경과일수와의 관계가 Fig. 4에 나타나 있다. 하중재하는 두단계로 나뉘어서 작용되었다. 먼저 케이슨

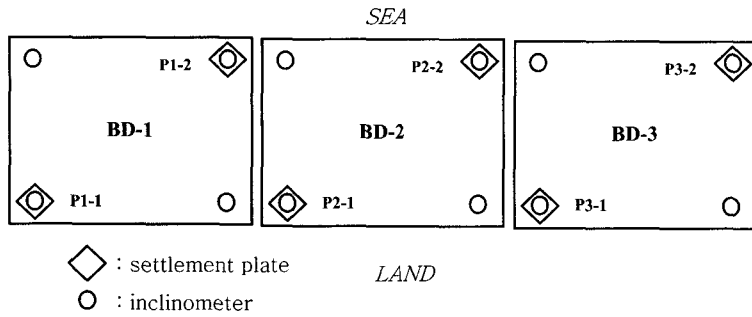


Fig. 3. Schematic diagram of measurement.

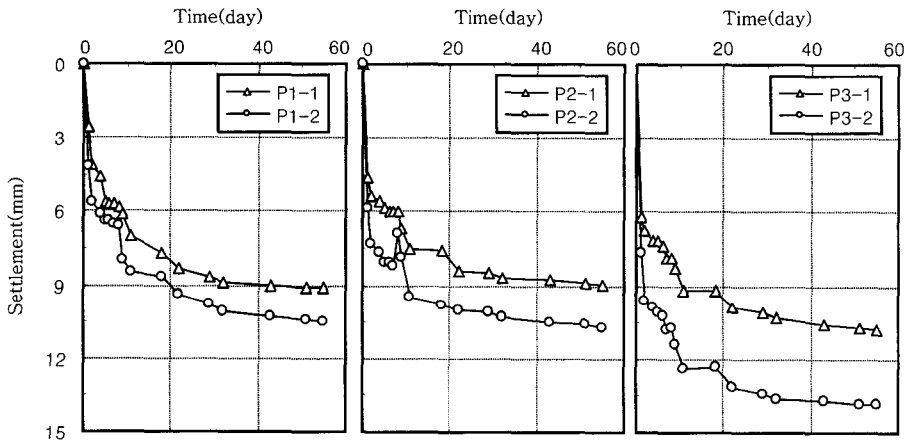


Fig. 4. Relationship of measured settlement and time.

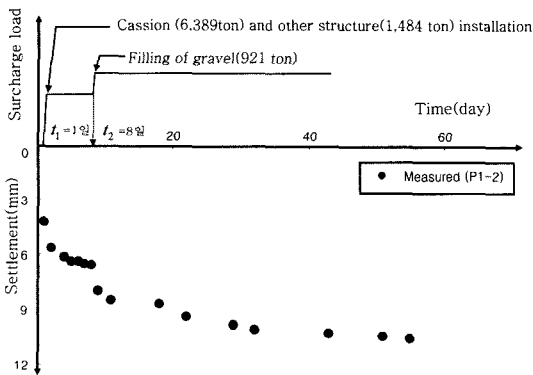


Fig. 5. Behavior of predicted settlement with construction sequence.

거치 및 상치구조물에 의한 첫번째 상재하중이 작용하였으며, 8일 경과 후에 골조채움에 따라 두번째 상재하중이 작용하였다(Fig. 5참고). 예측된 침하양상을 살펴보면 첫번째 하중재하에 따라 즉시 침하가 유발된 이후 압밀에 의한 침하가 유발되다가 두번째 하중재하에 따른 즉시침

하 후에 침하가 점차 수렴하는 양상을 보이고 있다.

#### 4.2 산정된 모델 변수 값들

유전자 알고리즘을 최적화 과정에 적용할 경우 개체수 (no of individual)와 세대수에 대한 적절한 선택이 필요하다. Fig. 6에서는 두번째 케이슨에서 예측된 침하자료 (P2-1)에 대하여 개체수와 세대수의 변동에 따른 목적함수의 수렴양상과 예측침하곡선을 살펴보았다. Fig. 6(a)에서 세대수 100에 대하여 개체수가 1000을 초과하는 이전에 예측침하곡선이 예측자료에 이미 수렴되는 양상을 보이고 있다. Fig. 6(b)에서 개체수 1000에 대하여 세대수가 50을 초과하면서 예측곡선의 변화는 더 이상 나타나지 않음을 알 수 있다.

Fig. 7에서는 개체수 1000인 경우에 모델 정수값들 및 목적함수 값이 세대수가 증가함에 따라 수렴되는 양상이 나타나 있으며, 개체수가 50보다 클 경우 각각의 모델 정수 값들은 거의 수렴된 값에 도달됨을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 개체수 1000에 대하여 100번째 세대

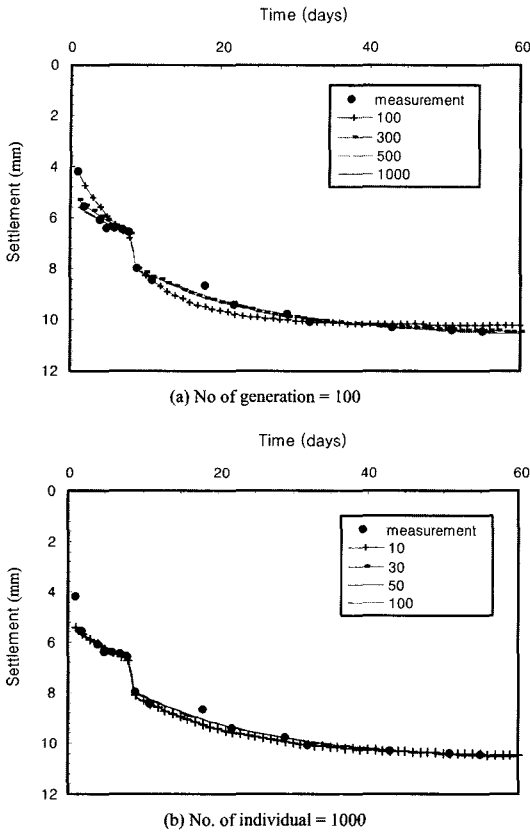


Fig. 6. Predicted settlement curves with variation of no. of individual and generation.

에서의 최적의 개체값을 최종 수렴해로 간주하였다.

4.3 제안된 침하모델을 통한 계측결과와의 비교

실수형 유전자 알고리즘에 근거한 최적화 기법을 사용하여 구해진 모델 정수 값들이 Table 1에 정리되어 있다.

탄성침하식에 포함되는 모델 정수 값들을 살펴보면, 점토지반의 탄성계수,  $E_c$  값은  $400\sim 1000t/m^2$ 의 범위를 갖

Table 1. Model parameters estimated through optimization process

		$E_c(t/m^2)$	$m$	$c_c$	$c_v \times 10^{-4} (m^2/day)$
BD-1	P1-1	1020	3.08	0.02	11.0
	P1-2	594	3.79	0.02	6.76
BD-2	P2-1	725	3.22	0.02	6.02
	P2-2	622	2.92	0.01	25.6
BD-3	P3-1	5.73	3.11	0.02	4.03
	P3-2	389	3.29	0.01	4.16

고, 평균적으로  $600t/m^2$ 의 값을 갖는다. 응력분담비,  $m$  값은 대체로 3 정도의 수렴되는 값으로 산정되었다. 특히 응력 분담비의 경우 연약지반과 모래다짐말뚝이 갖고 있는 정량적 물성치 및 치환율,  $a_s$  등에 영향을 받으며, 또한 점토지반의 압밀이 진행됨에 따라 변동하게 된다. 이와 같이, 응력분담비에 영향을 미치는 인자가 다양하며, 현장 경험에 따르면 대략 2~6에 분포하는 것으로 알려져 있다. 점토지반의 압축계수,  $c_c$  값은 0.01~0.02이며, 수평방향 압밀계수,  $c_h$  값은  $4\sim 25 m^2/day$ 으로 구해졌다. SCP 복합지반에서 계측된 침하자료에 대하여 쌍곡선법과 같은 현장경험식을 적용할 경우 단순한 압밀도를 평가는 가능하지만, 산정된 모델 정수의 값들이 물리적인 의미를 갖지 않기 때문에, SCP 복합지반의 거동분석은 불가능하다. 본 논문에서 제안된 예측침하기법과 유전자 알고리즘에 근거한 역해석을 통하여 SCP 복합지반의 탄성침하 산정에 필요한 탄성계수와 응력분담율을 산정하였으며, 또한 주변 점토지반에서 유발되는 압밀침하에 필요한 압밀 계수 및 압축계수를 산정할 수 있었다.

Fig. 8에는 두단계 하중재하(케이스 및 상치구조물 거치와 골재채움)에 대하여 유발된 계측침하량과 본 연구에서 제안된 침하모델을 통한 예측침하량이 서로 비교되어 있으며, 단계별 하중재하에 따른 침하양상을 매우 정확하

Table 2. Comparison with the proposed settlement model and hyperbolic method

		Hyperbolic method		This study		Design value
		Consolid. ratio (%)	Remained settlement (mm)	Consolid. ratio (%)	Remained settlement (mm)	
BD-1	P1-1	90.5	9.6	92.9	7.5	90 %
	P1-2	90.1	11.5	97.9	2.3	
BD-2	P2-1	88.9	11.2	97.5	2.3	90 %
	P2-2	96.0	4.5	100.0	0	
BD-3	P3-1	89.2	13.1	95.2	5.4	90 %
	P3-2	93.0	10.4	97.0	4.3	

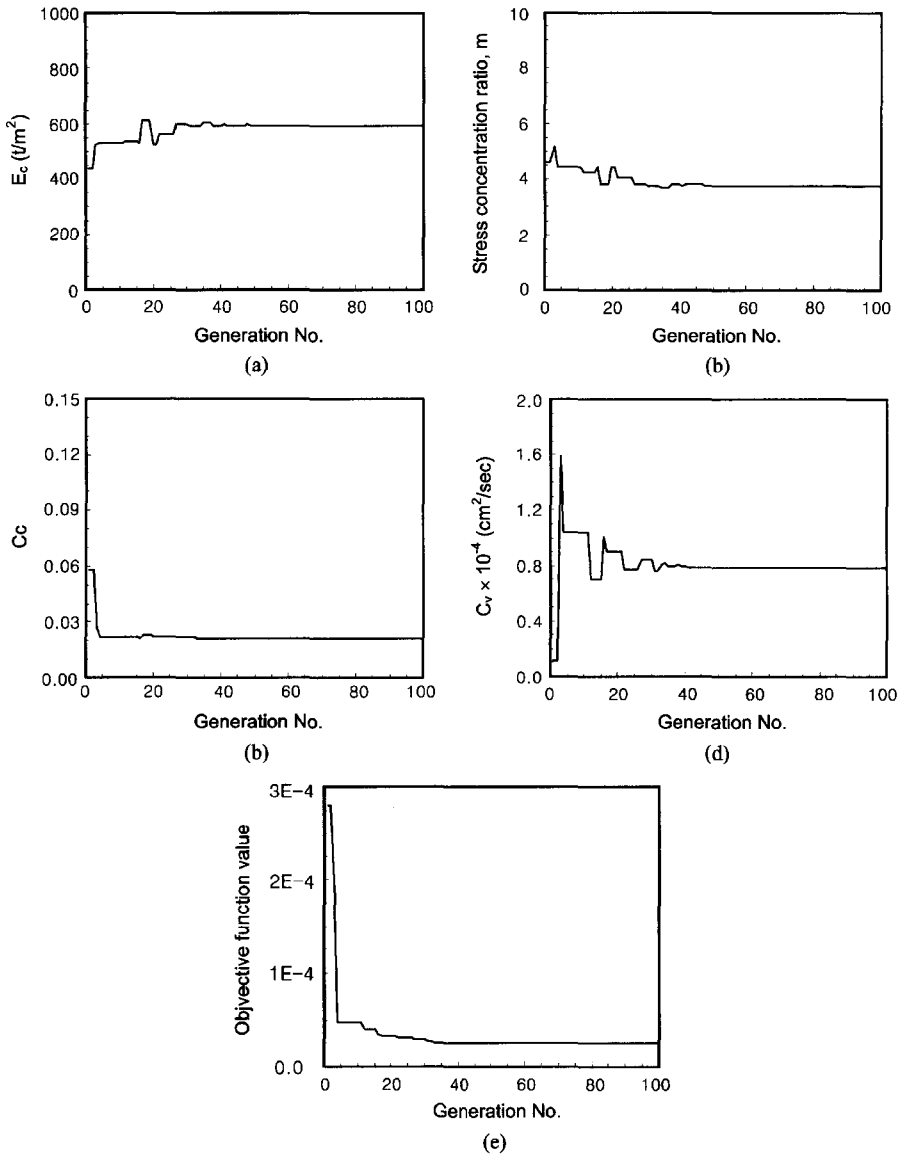


Fig. 7. Model parameter and objective function values with variation of generation.

계 예측함을 알 수 있다. 예측된 침하양상에서도 나타난 바와 같이 예측침하곡선에서도 단계별 하중재하에 따라 즉시침하가 유발된 이후에 압밀 침하가 빠른 시일 내에 완료되는 것으로 예측되었다.

Table 2에서는 일반적으로 수직배수재가 설치되어 있는 점토지반의 압밀도 평가에 적용되는 쌍곡선법을 사용하여 산정된 압밀도와 본 연구에서 제안된 예측기법에 의한 압밀도 값들이 서로 비교되어 있다.

산정된 압밀도에서는 서로 큰 차이를 보이지 않음을 알

수 있는데, 이러한 이유는 SCP 치환율을 70%로 적용된 A 현장의 경우 예측된 침하자료의 침하규모 자체가 매우 작기 때문에 침하기법의 적용에 따라 예측결과에서의 큰 차이를 보이지 않는 것으로 사료된다. 특히 제안된 침하 기법과 쌍곡선법의 경우 일반적인 압밀도 평가방법인 발생된 현재 침하량을 발생가능한 총침하량으로 나누어 적용하였다. 일반적인 점토지반의 경우 하중재하에 따라 유발되는 비배수 탄성압축에 의한 즉시침하량의 양은 압밀 배수에 의한 침하량에 비하여 매우 작다고 할 수 있



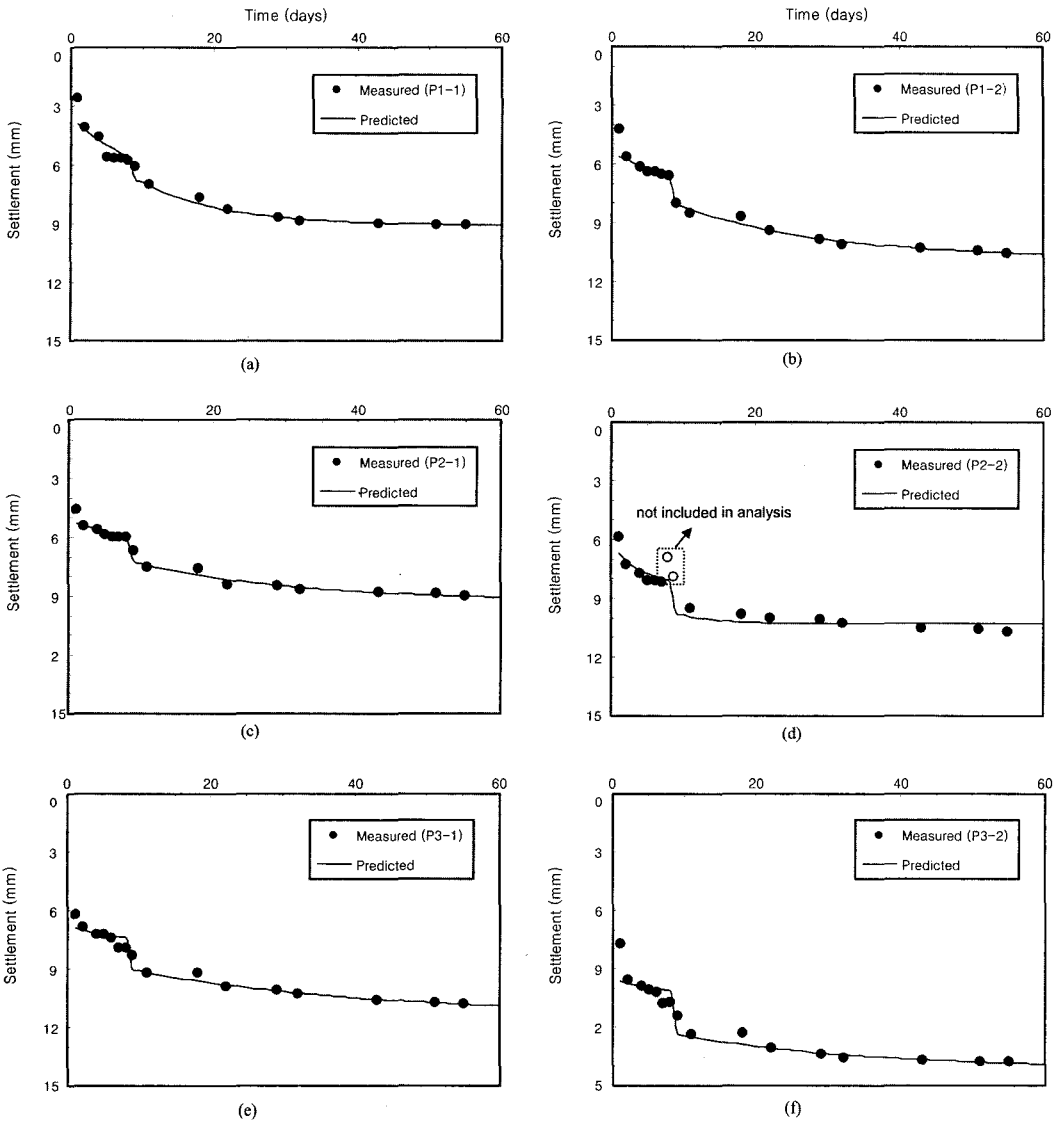


Fig. 8. Comparison with predicted curves and measurements.

다. Table 3에 나타난 바와 같이 SCP 복합지반의 경우, 설치된 다짐모래말뚝에 의하여 탄성압축에 의한 침하가 압밀침하에 비하여 작지 않게 나타났다. 따라서 점토지반에 적용되는 압밀도 평가방법을 사용할 경우, 압밀도를 과다 평가할 가능성이 있다. 본 해석예제의 침하자료와 달리 압밀경과기간이 긴 저치환율을 갖는 SCP 복합지반의 경우, 본 연구에서 제안된 침하기법과 같이 즉시침하량과 압밀침하량을 함께 산정하여 압밀침하량에 근거한 압밀도를 평가함으로써 보다 안전측의 압밀도 평가가 가능하리라 사료된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 SCP 복합지반에서 계측된 침하자료를 분석할 수 있도록 제안된 침하예측 기법과 유전자 알고리즘에 근거한 최적화 기법을 사용하여 역해석을 수행하여 예제해석을 수행하였으며, 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 하중재하에 따른 즉시침하량과 압밀침하량을 독립적으로 고려하여 전체 침하양상을 모사할 수 있는 새로운 침하모델을 제안하였다. 각 하중재하에 따른 SCP 개량지반의 즉시 침하량은 탄성이론에 근거한 침하식을 이용하

**Table 3.** Predicted settlement by proposed prediction method

		Predicted settlement				Present measured sett.(mm) (at t = 55day)
		Total predicted sett. (mm)	Elastic sett. (mm)	Total consol. sett. (mm)	Present consol. sett. (mm) (at t = 55day)	
BD-1	P1-1	91.0	47.9	43.1	36.6	91.0
	P1-2	107.3	68.4	38.9	36.6	105.0
BD-2	P2-1	92.3	64.8	27.5	25.2	90.0
	P2-2	103.0	82.4	20.6	20.6	107.0
BD-3	P3-1	113.4	84.6	28.8	23.4	108.0
	P3-2	142.8	118.5	24.3	20.0	138.0

였으며, SCP 개량지반의 압밀 침하량을 모사하기 위해 다짐모래 말뚝에 의한 응력저감효과를 고려한 압밀 근사식과 Barron의 수평방향 압밀이론을 적용하였다.

2) 직접법에 근거한 역해석 기법을 적용하여 4개의 모델정수 값들을 산정하고자 하였으며, 최적화 기법의 적용시에 전역해에 대한 수렴을 견고하게 수렴시킬 수 있는 최적화 기법인 실수형 유전자알고리즘을 적용하였다. 따라서, 계측자료로부터 SCP 복합지반의 대표적인 물성값들인 탄성계수( $E_s$ ), 응력분담비( $m$ ), 압축계수( $c_c$ ) 및 압밀계수( $c_v$ )값을 도출할 수 있었다.

3) 제안된 침하모델을 사용하여 A 현장 SCP 복합지반에 적용된 두단계 하중재하에 따른 즉시침하량과 압밀침하량을 구분하여 예측하였으며, 전체 침하량은 9~14 cm 정도이며, 즉시침하량은 2.9~6.7 cm이며, 압밀침하량은 4.4~6.7 cm으로 산정되었다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학기술재단 목적기초연구(R01-2003-000-10635-0)지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌

김문걸, 장정범, 박태균 (1995). 탄소성 지반내 터널굴착에 따른 역해석. 대한토목학회 논문집, 15(2), 483-490.  
 김윤태, 이승래, 도남영, 이영남 (1994). 배수재가 설치된 압축성 지반의 효율적인 압밀해석 및 역해석. 한국지반공학회 '94 가을학술발표회 논문집, 175-181.  
 삼성중공업 (2003). G 축조공사 기본계획 및 안벽실시설계 용역(PART-1) 지반조사 보고서.

Aboshi, H., Ichimoto, E., Enoki, M. and Harada, K. (1979). The composer-a method to improve characteristics of soft clay by inclusion of large diameter sand columns. Proc. of International Conference on Soil Reinforcements: Reinforced Earth and Other Techniques, Paris, 1, 211-216.  
 Bäck, T. and Hoffmeister, F. (1991). Extended Selection Mechanisms in Genetic Algorithms. 4<sup>th</sup> Int. Conf. of Genetic Algorithm, San Mateo, California, USA, 92-99.  
 Balaam, N.P. and Booker, J.R. (1981). Analysis of rigid rafts supported by granular piles. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 5(4), 379-403.  
 Balaam, N.P. and Poulos, H.G. (1983). The behaviour of foundations supported by caly stabilized by stone columns. Proc. of 8<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: Improvement of Ground, Helsinki, 1, 199-204.  
 Barron, R.A. (1948). Consolidation of fine grained soils by drain wells. Trans. ASCE, 113(2346), 718-742.  
 Chow, Y.K. (1996). Settlement analysis of sand compaction pile. Soil and Foundations, 36(1), 111-113.  
 Goldberg, D.E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. New York, Addison-Wesley.  
 Gioda, G. and Sakurai, S. (1987). Back analysis procedures for the interpretation of field measurements in geomechanics. Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 11, 555-583.  
 Holland, J.J. (1975). Adaptation in natural and artificial systems. The University of Michigan Press.  
 Hughes, J.M.O., Withers, N.J. and Greenwood, D.A. (1975). A field trial of reinforcing effects of stone columns in soil. Geotechnique, 25(1), 31-44.  
 Muhlenbein, H. and Schlierkamp-Voosen, D. (1993). Predictive Models for the Breeder Genetic Algorithm: I. Continuous Parameter Optimization. Evolutionary Computation,

- 1(1), 25-49.
- Priebe, H. (1976). Estimating settlements in a gravel column consolidated soil. *Die bautechnik* 53, 160-162.
- Sakurai, S. and Takeuchi, K. (1983). Back Analysis of Measured Displacement of Tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engerring* 16, 173-180.
- Van Impe, W. and De Beer, E. (1983). Improvement of settlement behaviour of soft layers by means of stone columns. *Proc. of 8<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering; Improvement of Ground*, Helsinki, 1, 309-312.
- 

Received November 19, 2003

Accepted February 27, 2004