

# 역해석을 이용한 모래다짐말뚝(SCP)으로 개량된 연약점토지반의 압축지수 결정에 관한 연구

## A Study on a Compression Index for Settlement Analysis of SCP Treated Ground Using Back Analysis

황 성 필<sup>1)</sup> · 임 종 철<sup>†</sup> · 권 정 근<sup>2)</sup> · 강 연 익<sup>3)</sup> · 주 인 곤<sup>4)</sup>

Hwang, Sungpil · Im, Jongchul · Kwon, Jeonggeun · Kang, Yeounike · Joo, Ingon

**ABSTRACT** : The paper processed settlement analysis using Finite Elements Method(FEM). Because Stress Distribution Ratio has to be decreased, for settlement analysis of soft clay deposit improved by sand compaction piles(SCP). Back analysis was processed comparing the measured settlements of laboratory model tests and finite element analysis where the SCP treated area was assumed as mixed ground with clay deposit rather than being a composite ground. The paper proposes a methodology which employs a compression index( $C_c$ ) for settlement analysis of soft clay deposit improved by sand compaction piles from the back analysis. This approach is applied to a field measurement case(A revetment founded on the SCP improved clay deposit with the replacement ratio of 45%).

**Keywords** : SCP, Plaxis, Finite element analysis, Settlement analysis, Mixed ground

**요 지** : 모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile, 이하 SCP)으로 개량된 연약점토지반의 침하량 해석시, 근사법을 이용한 해석에서 응력분담비의 불확실성에 의해 발생하는 영향을 줄이고자, 유한요소해석 프로그램을 이용한 수치해석을 수행하였다. 모래다짐말뚝이 타설된 실내 모형압밀실험을 수행하였고, 이를 유한요소 프로그램으로 수치해석을 하였다. 실내실험과 같은 침하량을 도출하기 위해 역해석을 통한 혼합지반의 압축지수( $C_c$ )를 추정하고, 추세를 활용하여 설계압축지수를 산정하는 식을 제시하였다. 또한, 이 식을 치환율 45%인 현장에 적용하여 현장 적용성을 검증하였다.

**주요어** : 모래다짐말뚝, Plaxis, 수치해석, 침하해석, 혼합지반

### 1. 서 론

연약지반의 강도가 적고 심도가 깊은 경우 과도한 침하 등의 변형이 크게 발생하기 때문에 연약지반을 개량하기 위해 시공하는 SCP공법은 안정적이고 경제적인 설계 및 관리를 위해 시공된다. 특히 느슨한 모래나 점토로 구성된 연약지반에 모래를 압입하여 비교적 지름이 큰 모래말뚝을 다져 시공하는 지반개량공법으로써, 연약점토지반에서는 모래말뚝이 원지반과 일체를 이루어 복합지반을 형성하는 공법이다(神田 등, 1990).

현행 SCP 공법의 설계시 지반의 설계법 중 압밀침하해석은 1차원적 해석법을 많이 적용하고 있다. 1차원적 압밀침하해석법은 SCP와 원지반 점토의 강성차로 인한 응력분담비의 개념을 적용하고 있으며, 이는 응력분담비에 의한 침

하저감계수에 전적으로 의존하고 있는 상황이다. 그러나 실제 응력분담비는 구조물의 종류(연성재하와 강성재하)에 따라 달라지며, 또한 압밀과정 중 점토의 강도증가에 의해 지속적으로 변하게 된다. 이미 응력분담비에 대한 여러 가지 연구가 진행되고 있으며, 많은 성과가 이루어져 있다. 하지만 거동양상을 단일양상으로 추정하기는 어려워, 원지반 및 모래다짐말뚝의 강성비, 치환율, 시간에 따른 압밀특성, 재하조건 등 여러 세분화된 조건으로 거동양상을 파악해야 하는 것으로 나타나고 있다(박용원 등, 2001). 따라서 실제 현장에 적용하기에는 전문적인 지식이 필요하여 수월하게 사용할 수 없을 것으로 판단된다.

이를 해결하기 위해 수치 해석적 방법이 적용되고 있지만, 고치환율의 경우 요소수가 많아 복합지반으로 설계시 어려움이 있고, 일부 프로그램에서는 해석이 되지 않는 등

1) 정회원, 부산대학교 토목공학과 석사과정  
† 비회원, 부산대학교 토목공학과 정교수(E-mail : imjc@pusan.ac.kr)  
2) 정회원, 부산대학교 토목공학과 박사과정  
3) 비회원, 삼성건설 토목사업본부 과장  
4) 비회원, 부산정보대학 건축디자인학과 교수

개선사항이 필요하다. 이를 고려하여 간편하게 혼합지반으로 모델링하는 방법이 제안되었고, 지반 물성치를 산정하는 공식이 제안되고 있지만 실제 계측치와 차이를 보이고 있으며, 이에 대한 지반 물성치를 산정하는 방법이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 모래로 치환된 실내 SCP 모형압밀실험(김동호, 2004)의 결과를 바탕으로 2차원 유한요소해석(Finite Element Method)프로그램인 Plaxis-2D V8 Professional을 사용하여 수치해석분석을 수행하고, SCP가 타설된 지반에 작용하는 지반물성치에 대한 민감도를 분석하여, 설계에 사용되는 지반물성치를 산정하는 방법에 대해 고찰하고 실제 현장에 적용시켜 새로운 물성치 산정방법을 제시하였다.

## 2. SCP공법의 개요

### 2.1 SCP공법의 원리 및 특징

SCP에 의한 지반개량의 목적은 사질지반에서는 지지력 증가, 침하 저감, 액상화 방지, 수평저항 증가 등을 들 수 있으며, 점성토지반에서는 지지력 증가, 압밀시간 단축, 침하량 저감 등을 들 수 있다. 지반개량공법의 원리에는 치환, 압밀배수, 다짐, 고결, 보강 등이 있는데, 모래다짐말뚝공법

은 다짐과 보강 및 압밀배수를 기본원리로 하고 있다. SCP 공법은 이러한 기본원리들을 포함하기 때문에 사질지반, 점성토지반, 유기질지반, 암쇄지반, 화산퇴적지반 등 거의 모든 지반에 적용가능하며, 매립지 등의 비교적 느슨한 사질지반, 암쇄지반에 대해서는 모래재료의 진동압입에 의한 원지반의 다짐(밀도증가)에 의해서 지지력 증가, 침하 감소, 액상화 방지, 수평저항 증가 등의 효과를 발휘한다. 한편 점성토, 유기질토지반의 지반개량에 있어서는 단기적으로는 주변점토보다 큰 전단강도를 가진 모래다짐말뚝을 촘촘히 조성해서 모래말뚝과 점토로 된 복합지반을 형성하여 지반의 지지력을 증가시키고, 장기적으로는 모래말뚝의 배수효과와 모래말뚝의 응력분담에 의해 압밀시간을 단축함과 함께 압밀침하량을 감소시키는 역할을 한다.

### 2.2 SCP공법의 치환율

치환율( $a_s$ )이란 지반 면적과 모래말뚝이 차지하는 부분의 면적비로 정의되고, 주로 모래말뚝의 타설 간격에 의해 결정된다. 즉, 원지반 면적을 1.0으로 한 모래말뚝의 단면적과의 비율로써 개량한 정도를 나타내는 값이다.

일반적으로 모래나 육상의 점성토 개량에는 0.4이하, 해저의 점성토 개량에는 0.15~0.8의 범위로 하는 경우가 많다. 또한 치환율은 배치에 따라 정방형, 평행사변형, 삼각형 배치로 나눌 수 있고, 이에 따라 치환율을 산정하는 공식이 달라지게 된다.

정방형과 평행사변형의 경우,

$$a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{A_s}{x^2} = \frac{A_s}{x_1 \times x_2} \quad (1)$$

삼각형배치의 경우,

$$a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{A_s}{x^2} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다.

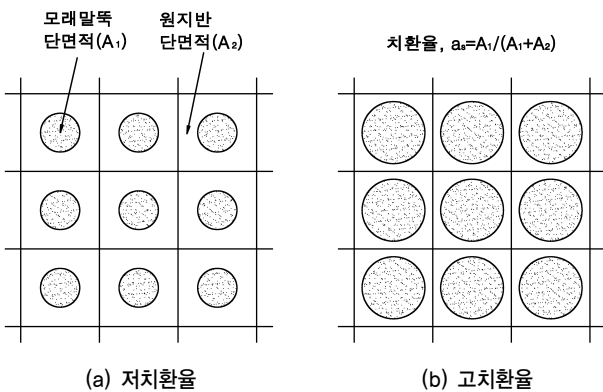


그림1. 치환율( $a_s$ )

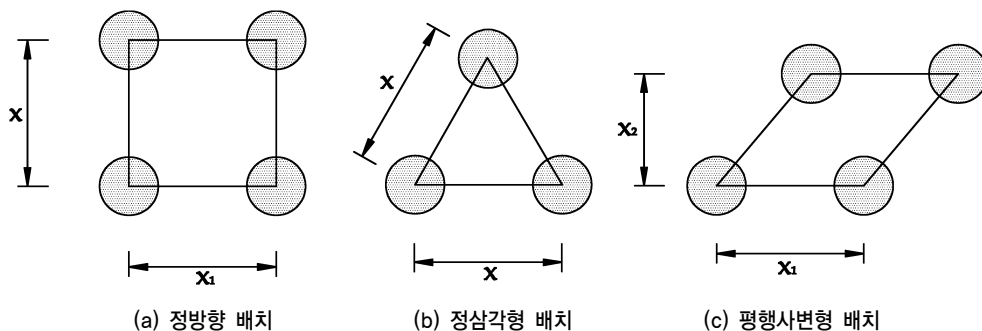


그림 2. SCP 공법의 모래말뚝 배치 예

여기서,

$A_s$ : 모래말뚝 단면적

$A$ : 모래말뚝 1개가 분담하는 면적(분담면적)

$x$ : 말뚝 중심간 거리(그림 2 참조)

### 2.3 근사법을 이용한 침하 해석법

현행 압밀침하해석법 중 하나인 근사법에는 평형법, Priebe 법, Greenwood 법 등이 있다. 평형법에 대해 알아보면, Aboshi 등(1970)과 Barksdale 등(1983)에 의해 제시된 방법인 응력 분담비( $m$ )를 이용하여 복합지반의 침하량을 계산한다. 근사법은 등가유효원주 개념이 전 지반에 적용되고, 등가유효원주에 가해진 상재하중은 점토와 모래말뚝에 발생한 응력의 합과 같으며, 모래말뚝과 점토의 침하량은 같고, 상재압에 의해 모래말뚝에 유발된 응력은 말뚝 전 길이에 걸쳐 일정하거나 압축지층을 몇 개의 요소로 분할하였을 때 요소 내에서 일정하다는 4가지의 가정을 기본으로 한다. 일차원 압밀침하량은 식 (3)으로 나타내었다.

$$S_f = \frac{C_c}{1+e_0} \cdot H \cdot \log_{10} \left( \frac{\sigma'_0 + \mu_c \sigma}{\sigma'_0} \right) \quad (3)$$

무처리 점토지반 침하량에 대한 복합지반 침하량의 비는 식 (4)로 나타내었다.

$$\beta = \frac{S_f}{S} = \log_{10} \left( \frac{\sigma'_0 + \mu_c \sigma}{\sigma'_0} \right) / \log_{10} \left( \frac{\sigma'_0 + \sigma}{\sigma'_0} \right) \quad (4)$$

위 식에서 복합지반의 압밀침하량 저감효과의 영향요소는 점토층 초기 유효응력( $\sigma'_0$ ), 상재압( $\sigma$ )의 크기가 영향을 준다고 볼 수 있다. 유효응력( $\sigma'_0$ )이 매우 크고, 상재압( $\sigma$ )이 작으면  $\beta$  값은 침하저감계수( $\mu_c$ )값에 수렴하여 식 (5)가 성립한다.

$$\beta = \mu_c = \frac{1}{1+(m-1)a_s} \quad (5)$$

체적압축계수,  $m_v$ 를 사용하고 복합지반의 최종침하량을  $S_f$ , 무처리 지반의 최종침하량을  $S_{of}$ 로 하면 각각에 대하여 식 (6), 식 (7)로 표시된다.

$$S_f = \epsilon_z \cdot H = m_v \mu_c \Delta \sigma \cdot H \quad (6)$$

$$S_{of} = m_v \cdot \Delta \sigma \cdot H \quad (7)$$

여기서,  $\epsilon_z$ 는 응력분담이 있을 경우의 점성토의 연직변형률을 나타내고,  $H$ 는 압밀층의 두께,  $m_v$ 는 원지반의 체적압축계수,  $\Delta \sigma$ 는 성토하중에 의한 증가유효응력을 나타낸다.

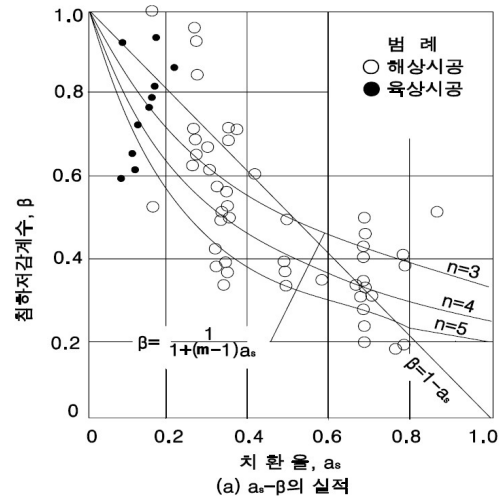


그림 3. SCP의 침하감소효과(일본토질공학회, 1993)

복합지반의 침하량과 무처리지반의 침하량 비를 침하감소계수를  $\beta$ 라고 정의하면 식 (8)과 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$\beta = \frac{S_f}{S_{of}} = \frac{m_v \mu_c \Delta \sigma H}{m_v \Delta \sigma H} \quad (8)$$

$$\therefore S_f = S_{of} \cdot \mu_c \text{ (or } S_{of} \cdot \beta) \quad (9)$$

침하저감계수  $\beta$ 는 저치환개량에서 응력분담효과, 고치환개량에서는 치환효과를 기대하여 식 (10), 식 (11)로 계산한다. 이 침하저감계수의 계산치와 실측치의 비교 예를 그림 3에 나타내었다.

$$\text{저치환개량의 경우 : } \beta = \mu_c = \frac{1}{1+(m-1) \cdot a_s} \quad (10)$$

$$\text{고치환개량의 경우 : } \beta = 1 - a_s \quad (11)$$

여기서,  $a_s < 0.5$ 의 경우 식 (10)에서  $m=3$ 을 사용하고,  $a_s > 0.5$ 인 경우 식 (11)을 이용하는 것을 추천하였다.

### 2.4 FEM에 의한 침하 해석법

SCP나 쇄석기동공법에 대한 FEM 해석에는 재료의 비선형 거동과 다양한 조건의 경계조건을 고려할 수 있다. FEM 해석은 주로 축대칭 모형인 등가원주(unit cell)나 환산등가모래벽을 이용한 2차원 평면변형 문제를 이용한다. 2차원 평면변형 문제로 해석할 경우 모래와 점토가 하나로 혼합된 혼합지반으로 해석하는 방법과 모래기둥의 형상을 그대로 재현시킨 복합지반으로 해석하는 방법으로 구분할 수 있다. 혼합지반으로 해석할 경우 모델링이 간편하지만, 지반 물성치를 산출하는 과정에서 명확한 물성치 산출방법이 제시되지 못하였고, 복합지반의 경우 실제의 형상을 그대로 반영하고 있지만, 모델링이 복잡하고, 고치환의 경우 모델링이 되지 않는 경우

도 있다. 또한 3차원 모형으로 무리말뚝(기둥)해석을 하거나, 외기둥(Balaam 등, 1983)으로 하나의 등가원주해석을 한다.

Aboshi 등(1970)은 평면변형조건으로 해석하였다. 쇄석 기둥과 SCP에 대한 FEM해석의 차이점은 쇄석기둥이 상대적으로 직경이 크고(말뚝이나 기둥의 길이와 직경이 침하량에 뚜렷한 영향을 미친다), SCP의 강성이 쇄석기둥에 비해 작다는 것이다. FEM 해석에서 선형탄성해석과 탄소성해석의 결과는 큰 차이를 보이지 않는다고 보고되었다(GIT, 1983). 선형탄성해석결과 응력분담비  $m$ 은 원지반과 모래말뚝의 강성비  $E_s/E_c$ 와 선형관계를 유지하는 것으로 보고되었다. SCP가 시공된 지반이 고치환일 경우 개개의 말뚝으로 모델링하지 않고 혼합토로 보고 환산강도정수를 이용하여 해석하고 있다. SCP 개량지역의 침하량과 강도에 관계되는 토질정수는 식 (12), 식 (13), 식 (14)와 같이 근사식으로 나타낼 수 있다(임종철 등, 2006).

$$C_{c(SCP)} = (1 - a_s) C'_c \quad (12)$$

$$C_{s(SCP)} = (1 - a_s) C'_s \quad (13)$$

$$G_{0(SCP)} = (1 - a_s) G_{c0} + a_0 G_{s0} \quad (14)$$

여기서,  $C_{c(SCP)}$ ,  $C_{s(SCP)}$ ,  $G_{0(SCP)}$ 는 혼합지반의 수정된 압축지수, 팽창지수, 전단탄성계수이며,  $C'_c$ ,  $C'_s$ ,  $G_{c0}$ 는 원지반 점성토의 토질정수,  $G_{s0}$ 는 SCP의 전단탄성계수,  $a_s$ 는 SCP의 치환율을 나타낸다.

### 3. 모형압밀실험

#### 3.1 모형압밀실험의 개요

치환율에 따른 SCP가 시공된 지반의 침하거동을 분석하

기 위해 치환율 20.3, 36, 56.3, 76.4%의 지반을 조성하여 모형압밀실험을 수행하였다(김동호, 2004). 압밀압력은  $9.8kPa$ ,  $19.6kPa$ ,  $39.2kPa$ ,  $78.5kPa$ ,  $156.9kPa$ ,  $313.8kPa$ 으로 24시간 압밀을 수행하였다. 압밀시험에 사용된 압밀상자의 제원은  $150mm(L) \times 150mm(W) \times 60mm(H)$ 이다. 압밀상자 외부는 그 제원이  $325mm(L) \times 250mm(W) \times 130mm(H)$ 인 수침상자가 감싸고 있어 실험시료를 포화상태로 유지시켜 준다. 압밀상자는 그림 4와 같다.

모형압밀실험에 사용된 점토재료는 부산광역시 감천항(공영수산물 도매시장 건설현장) 해성점토를 이용하였으며, SCP용 치환재료로써는 주문진표준사를 이용하였다. 표준사(SP) 및 해성점토(OH)의 지반공학적 성질은 표 1과 같다.

그림 5는 모형압밀실험에서 조성된 SCP의 치환율별 모래말뚝의 배치를 나타내고 있다.

그림 6은 실내 모형압밀실험에서 치환율별 실제 재료들의 형성모습을 나타내고 있다.

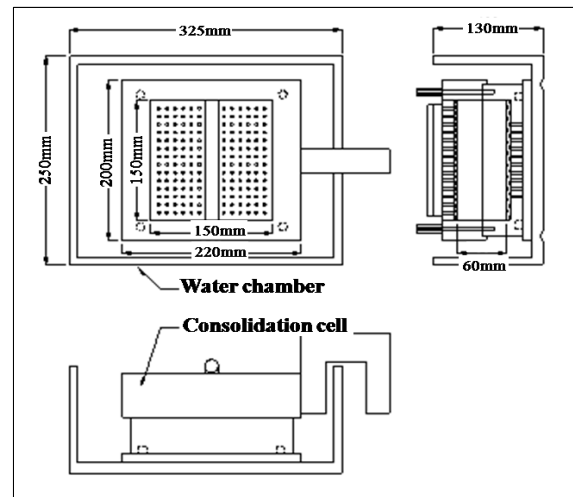


그림 4. 압밀상자

표 1. 주문진 표준사 및 감천항 해성점토의 지반공학적 성질(김동호, 2004)

주문진 표준사(치환재료)			감천항 해성점토(원지반재료)		
물성의 종류	기호	물성치	물성 종류	기호	물성치
최대간극비	$e_{max}$	0.923	비중	$G_s$	2.67
최소간극비	$e_{min}$	0.604	함수비	$w$ (%)	80~85
최대건조밀도	$\gamma_{dmax} (g/cm^3)$	1.652	액성한계	$w_L$ (%)	46.0
최소건조밀도	$\gamma_{dmin} (g/cm^3)$	1.378	소성지수	$PI$ (%)	18.2
비중	$G_s$	2.65	압축지수	$C_c$	0.45
함수비	$w$ (%)	0.30	압밀계수	$c_v (cm^2/sec)$	$2.14 \times 10^{-4}$
평균입경	$D_{50} (mm)$	0.595			
유효입경	$D_{10} (mm)$	0.443			
균등계수	$C_u$	1.402			
곡률계수	$C_g$	0.912			

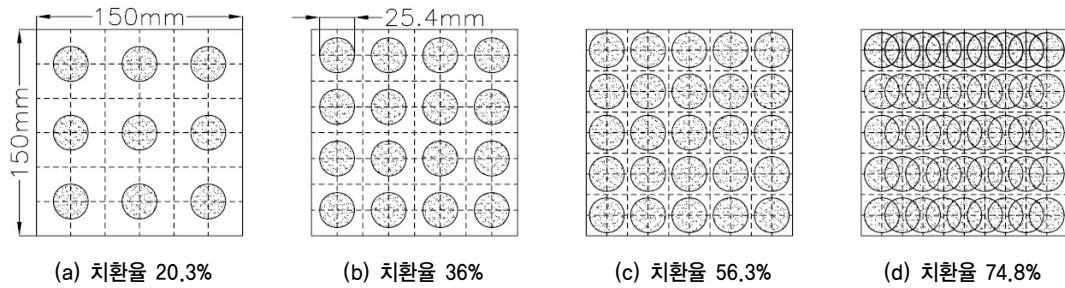


그림 5. 치환율별 모래말뚝의 배치

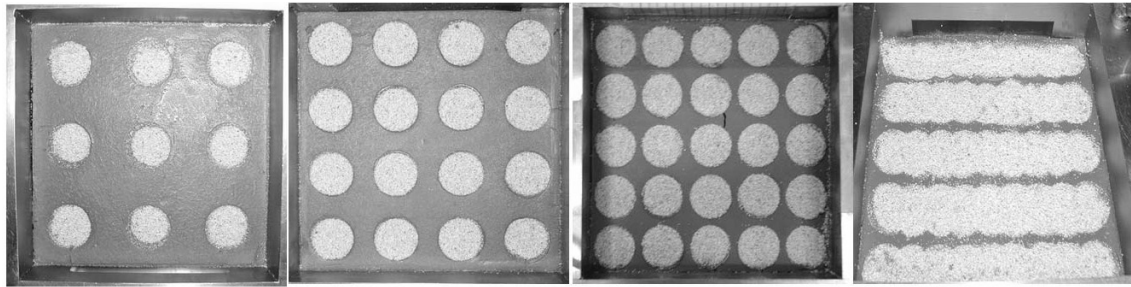


그림 6. 치환율별 모래말뚝의 실제배치형상

표 2. 실내모형실험 결과(김동호, 2004)

치환율	하중단계별 침하량 (cm)					
	9.8 kPa	19.6 kPa	39.2 kPa	78.5 kPa	156.9 kPa	313.8 kPa
무치환	0.197	0.293	0.568	0.960	1.356	1.735
20.3%	0.120	0.230	0.340	0.516	0.765	1.025
36.0%	0.100	0.180	0.283	0.429	0.617	0.853
56.3%	0.027	0.091	0.188	0.298	0.442	0.625
74.8%	0.035	0.079	0.160	0.237	0.328	0.418

### 3.2 모형압밀실험 방법 및 결과

모형압밀실험에 사용된 점토는 교반기로 충분히 교반한 점토를 압밀상자에 채워 수침상자에 넣고, 교반된 슬러리 상태의 점토를 일정강도를 가지는 시료로 만들기 위하여 예비압밀을 수행하였다. 예비실험을 통하여 23.5kPa의 압밀 응력이 24시간 재하 후 비배수점착력  $c_u = 6.85kPa$ 을 갖는 것을 확인한 후 이상상태의 점토를 압밀 초기상태로 하였다. 예압밀 후 시료의 높이는 무치환부터 74.8%까지 5.91cm, 5.94cm, 5.93cm, 6.07cm, 5.93cm로 측정되었다. 예비압밀 후 치환율에 의하여 정하여진 위치에 케이싱(casing)을 압입하고, 모래를 치환하여 복합토의 압밀시료를 제작하였다. 이때 모래의 평균밀도가  $16kN/m^3$ 이 되도록 낙하고를 조절하여 모래를 치환 홀 안쪽으로 낙하시켜 말뚝을 조성하였다. 양면배수를 위하여 시료의 상, 하부에 필터(Filter)와 다공판(Porous stone)을 설치하였다. 하중 재하시는 재하도중에 일어나는 응력집중을 최소화하여 실제 시공과 유사하게 하기 위하여 1cm 두께의 모래를 깔아주고, 다음의 하중단

계 9.8kPa, 19.6kPa, 39.2kPa, 78.5kPa, 156.9kPa, 313.8 kPa에 대한 압밀실험을 실시한다. 각 하중단계의 압밀시간은 24시간으로 하였다.

위 방법으로 실험한 치환율( $a_s$  = 무치환, 20.3%, 36%, 56.3%, 74.8%) 별 결과는 표 2와 같다(김동호, 2004).

## 4. 수치해석

### 4.1 수치해석의 개요

모형압밀실험의 2차원 모델링을 통한 압밀침하해석기법을 수행하기위해 지반 및 해석조건에 따라 Mohr-Coulomb 모델, Hardening Soil 모델, Modified Cam Clay 모델, Soft Soil 모델등을 사용하고, 흙의 배수조건(배수, 비배수, 비간극제)을 고려하여 제방의 단계성토, Tunnel, 제방 및 Dam의 침투수, 연약지반의 압밀, 연약지반상의 보강, 단계별 지하굴착등을 해석할 수 있는 상용프로그램인 Plaxis V8 Professional

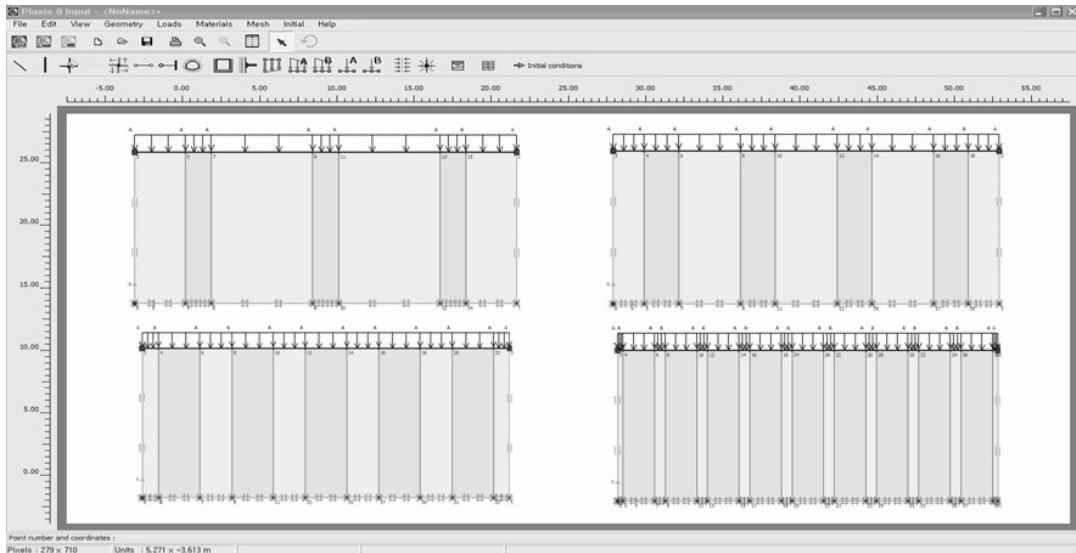


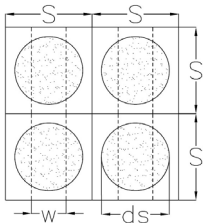
그림 7. 복합토 모델링 형상

표 3. Hardening Soil Model이 적용된 지층의 지반공학적 특성

구분	단위중량 ( $kN/m^3$ )	X방향 투수계수 ( $m/day$ )	Y방향 투수계수 ( $m/day$ )	$C_c$	$C_s$	$\nu_{ur}$	$e_{int}$	점착력, $c$ ( $kPa$ )	내부마찰각, $\phi$ (degree)	$K_0$
해성점토	15.6	0.82	0.82	0.509	0.048	0.2	1.82	3	30	0.5

을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 점토의 수치해석모델은 Hardening Soil 모델을 사용하였다.

복합토는 말뚝 하나하나를 묘사할 수 있는 모델링 방법이다. 복합토로 모델링한 경우 해성점토와 모래로 이루어진 3차원의 모래말뚝을 2차원으로 환산해 주는 작업이 필요하다.



$$w = \frac{\pi d_s^2}{4S} \quad (15)$$

그림 7은 식 (15)를 이용한 복합토 모델링 형상을 나타내고 있다. mesh의 경우 가장 조밀한 very fine 단계로 생성하였고, 경계조건의 경우 좌우측은 horizontal에 대해서 구속하였고, 바닥면은 horizontal과 vertical 모두에 대해 구속을 하였다.

#### 4.2 해석에 사용된 물성치

지반에 분포하는 응력상태 및 지반의 변형거동을 예측하기 위해 수치해석을 이용하는데 있어서, 지반의 물성치를 정확히 적용시키는 것은 매우 중요할뿐 아니라 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 일반적으로 통용되는 값(임종철,

2010; 한국지반공학회, 1997)에 모형압밀실험 전 실시한 기본물성 및 전단시험 등(김동호, 2004)에 의한 값들을 고려하여 입력 물성치를 산정하였다.

#### 4.3 민감도 분석 결과

민감도 분석에 앞서 Plaxis에서 제공하는 여러 가지 수치해석모델중 SCP에 가장 적합한 수치해석모델을 선정하기 위해 Modified Cam Clay, Mohr Coulomb, Hardening Soil model을 이용하여 비교 분석하여 그림 8에 나타내었다.

그림 8에서 나타나듯, Hardening Soil model이 SCP지반

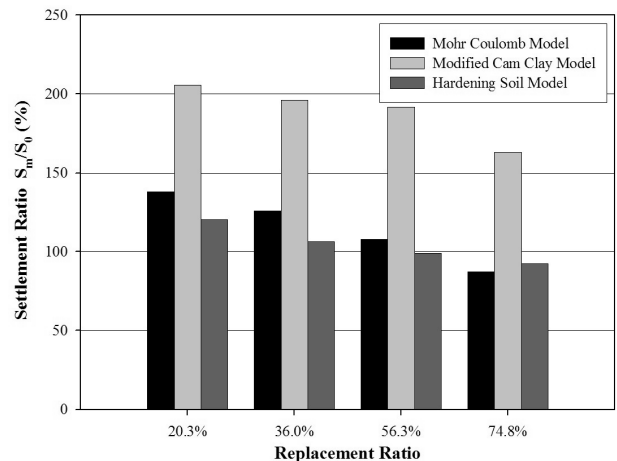


그림 8. 복합토의 해석 침하량

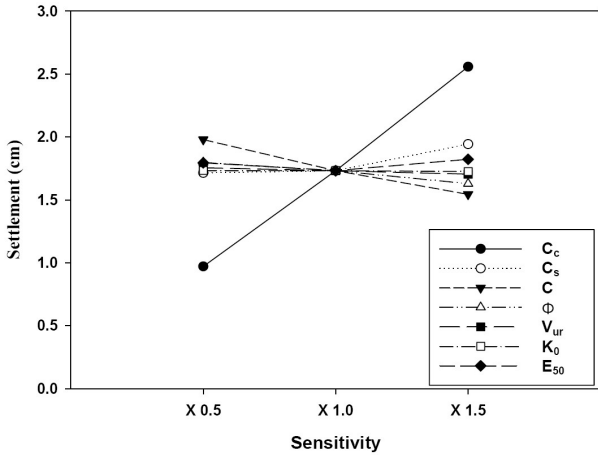


그림 9. 혼합지반 민감도 분석 결과(무치환)

을 실제와 가장 유사하게 해석하는 것으로 나타났다. 따라서 Hardening Soil model을 이용하여 해석을 수행하였다.

혼합지반으로 모델링한 모형압밀실험의 물성치에 대한 민감도 분석을 하기 위하여 원지반 점토의  $C_c$ ,  $C_s$ ,  $c$ ,  $\phi$ ,  $v_{ur}$ ,  $K_0$ ,  $E_{50}$  7개의 물성치에 0.5배, 1배, 1.5배의 값을 입력하여 해석을 수행하였다. 해석 수행결과 다른 값에 대해서는 약 5%내외의 차이를 보인 반면 원지반점토의  $C_c$ 값에 대한 분석에서는 40%이상의 침하량 차이를 나타내었다. 그림 9에서 원지반점토의  $C_c$ 값에 대해 가장 민감하게 침하량이 변하는 것을 확인할 수 있다.

#### 4.4 수치해석 결과 분석

민감도 분석을 통해 원지반점토의  $C_c$ 값에 대해 침하량이 민감하게 반응하는 것을 확인하였다. 혼합지반의 경우 모형 압밀실험과 같은 말뚝으로 형성된 상황에서 지반의 물성치들을 알기 어렵다. 그림 10에 하중증가에 따른 침하량곡선을 log스케일을 사용하여 나타내었다.

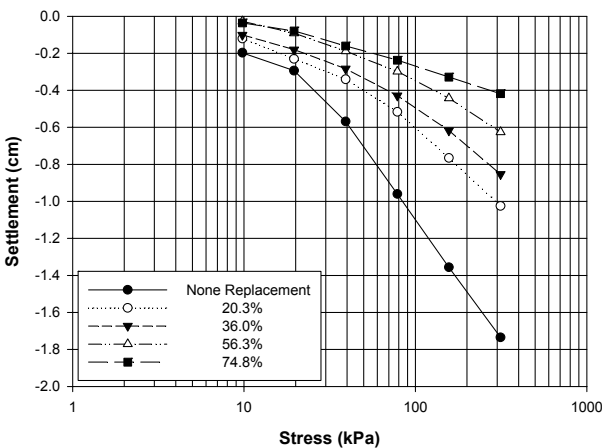


그림 10. 모형압밀실험의 응력-침하량 곡선

모형압밀실험의 결과를 혼합지반으로 해석할 경우 간극비를 알 수 없다. 모형압밀실험의 경우 복합지반으로 형성되어 있어 혼합지반의 간극비를 알기위한 지반의 비중을 측정할 수 없기 때문이다. 따라서 그림 10의 형상처럼 각 치환율별 침하의 양상은 알 수 있지만, 혼합지반의 원지반점토의  $C_c$ 값을 알아낼 수 없다.

따라서 혼합지반 점토의  $C_c$ 값을 알아내기 위해 역해석에 의해 추정하는 방법을 사용하였다. 점토의  $C_c$ 값을 제외한 물성치값은 고정시키고 313.8kPa의 하중단계에서 침하량이 일치하는 점토의 역해석  $C_c$ 값을 구하여 156.9kPa의 하중단계에 입력하여 검증하는 방법을 사용하였다. 그림 11에 각 하중단계에서의 침하량을 실험에서의 실측 침하량으로 나누어 백분율로 표시하였다.

그림 11에서 313.8kPa의 하중단계에서 역해석한  $C_c$ 값이 156.9kPa의 하중단계에서 검증한 결과 침하량의 차이로 판단할 때 타당한 것으로 사료된다. 이 결과를 토대로 지반해

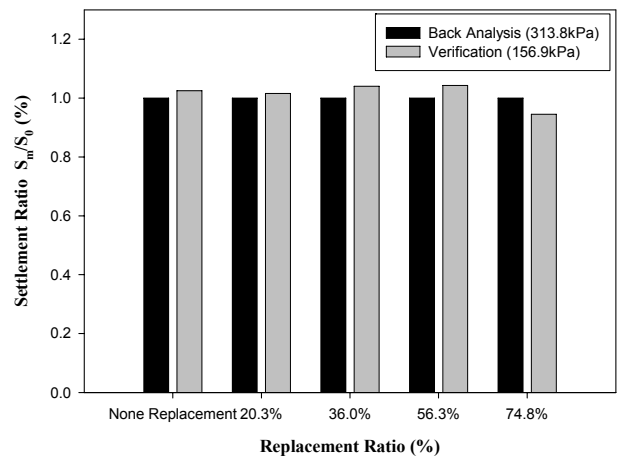


그림 11. 혼합지반 침하수치해석 결과

2D Graph 4

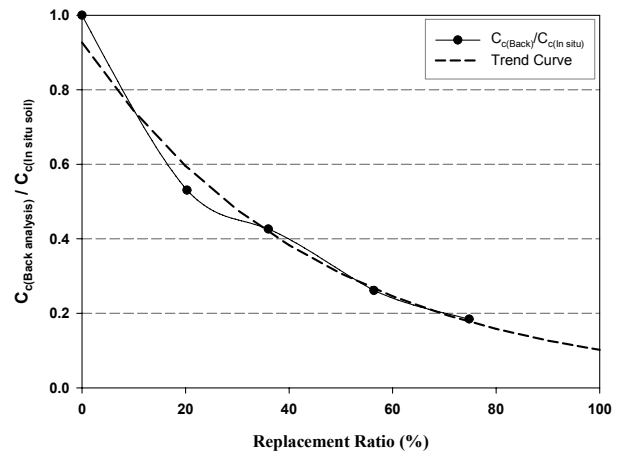


그림 12.  $C_c$ 값에 대한 추세선

석에 필요한 역해석  $C_c$ (SCP Mixed)값에 대한 추세선을 그림 12로 나타낼 수 있고, 추세선의 식은 식 (16)으로 나타낼 수 있다.

$$C_c(\text{SCP Mixed}) = C_c(\text{In situ soil}) \times 0.9267 \exp^{-0.0221a_s} \quad (16)$$

여기서  $C_c$ (In situ soil)값은 해석할 원지반의 일차원 압밀에서 구한  $C_c$ 값을 의미하고,  $a_s$ 는 SCP의 치환율을 의미한다. 이후 SCP로 보강된 지반을 혼합지반으로 해석할 때 혼합지반  $C_c$ (SCP Mixed)값을 산정하는데 식 (16)을 사용할 경우 이전에 사용되던 식 (12)보다 실제 침하량에 가까운 침하량으로 해석할 수 있을 것으로 기대된다.

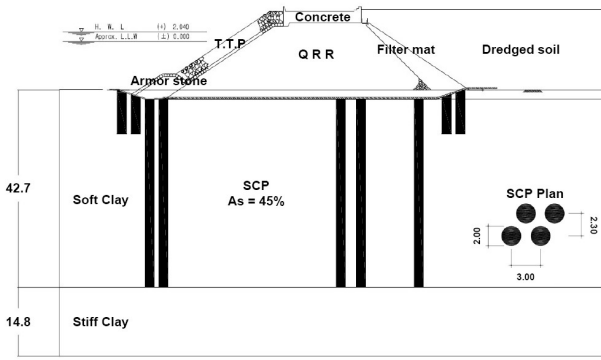


그림 13. OO준설토 투기장 방파제 단면도

#### 4.5 현장 적용성 검토

식 (16)의 현장 적용성을 검증하기 위하여 OO준설토 투기장 현장사례를 검증대상으로 선정하여, 점성토층, 사질층, 토탄층에 대해  $\Delta e$ ,  $M_v$ ,  $C_c$ 법을 사용하여 일차원 압밀침하해석을 수행하는 Delcalto프로그램해석과, Plaxis V8 Professional을 사용한 혼합지반 해석을 하였다. 혼합지반의 입력  $C_c$ 값의 경우 본 연구의 제안식(식 (16))과 기존식(식 (12))을 비교 수행하였다. 검토해석 단면은 그림 13과 같다.

본 현장의 수치해석에 사용된 지반의 물성치는 기존 실시시설계 보고서와 인접 매립지 검토보고서(한국지반공학회, 2004)를 바탕으로 표 4, 표 5, 표 6에 나타내었다.

Plaxis를 이용하여 혼합지반(Mixed Soil)과 복합지반(Composite Soil)으로 모델링한 모습을 그림 14, 그림 15에 나타내었다.

OO준설토 투기장의 침하해석결과는 그림 16과 같다.

현장의 실제 계측결과를 쌍곡선법으로 상치콘크리트 타설 단계까지 예상한 최종침하량이 1.39m로 나타났고, 현장 사례를 이용하여 계측결과와 일치하는 상치콘크리트 타설 단계까지 해석을 수행한 결과 일차원 해석프로그램인 Decalto의 경우 약 3.10m의 침하량을 나타내었다. 이차원 수치해석 프로그램인 Plaxis를 이용한 경우, 기존식(식 (12))를 사용하여 Plaxis 혼합지반으로 해석한 값은 3.93m의 침하량을 나타내었고, 본 연구의 제안식(식 (16))을 사용하여 Plaxis 혼

표 4. Plaxis에 사용될 현장 사용재료의 지반공학적 특성(Mohr Coulomb 모델)

구분	습윤 단위중량 ( $kN/m^3$ )	포화 단위중량 ( $kN/m^3$ )	X방향 투수계수 ( $m/day$ )	Y방향 투수계수 ( $m/day$ )	변형계수 ( $kN/m^2$ )	포아송비	점착력 ( $kN/m^2$ )	내부 마찰각 ( $\phi$ )
SCP	16.0	16.0	8.64	8.64	20000	0.33	0.3	35
근고사석	18	20	8.64	8.64	30000	0.3	10	40
상치con'c	23	23	0.00086	0.00086	25000000	0.22	1000	45
필터사석	18	20	8.64	8.64	30000	0.3	10	35
QRR	18	20	8.64	8.64	30000	0.3	10	40
TTP	11.5	16.5	8.64	8.64	30000	0.3	10	40

표 5. Plaxis에 사용될 현장 점토지반의 지반공학적 특성(Hardening Soil 모델)

구분	단위중량 ( $kN/m^3$ )	X방향 투수계수 ( $m/day$ )	Y방향 투수계수 ( $m/day$ )	$C_c$	$C_s$	$\nu_{ur}$	$\epsilon_{int}$	점착력 ( $kN/m^2$ )	내부 마찰각 ( $\phi$ )	$K_0$
점토층	15.8	0.82	0.82	1.046	0.147	0.2	1.962	1	30	0.5
Stiff Clay	17.0	0.82	0.82	0.958	0.120	0.2	1.632	1	30	0.5
혼합지반 점토층	15.8	0.82	0.28	0.340	0.120	0.2	1.962	1	30	0.5

표 6. Delcalto에 사용될 현장 SCP의 지반공학적 특성

구분	드레인 배치	환산타설간격 (m)	드레인 직경 (cm)	압밀계수 보정치 ( $\alpha$ )	응력분담비 (m)	치환율 (%)	침하저감계수 ( $\mu_c$ )
SCP	정삼각형	2.84	200	0.286	3	0.45	0.53



합지반 해석을 한 결과는 2.76m로 나타났다. 또한 Plaxis 복합지반으로 해석을 수행한 결과는 2.15m가 침하하는 것으로 해석되었다. 식 (16)을 이용한 경우 실제 침하량과 약 2배의 침하량 차이를 나타내고 있다. 하지만 Delcalto 프로그램의 결과, 식 (12)를 사용하여 혼합지반으로 해석한 결과와 비교 하였을 때, 실제 계측침하량과 보다 유사한 결과를 나타내고 있다. 수치해석 결과를 비교해 보았을 때, 지반을 복합지반으로 해석하는 경우가 가장 바람직 할 것으로 판단된다. 하지만 고

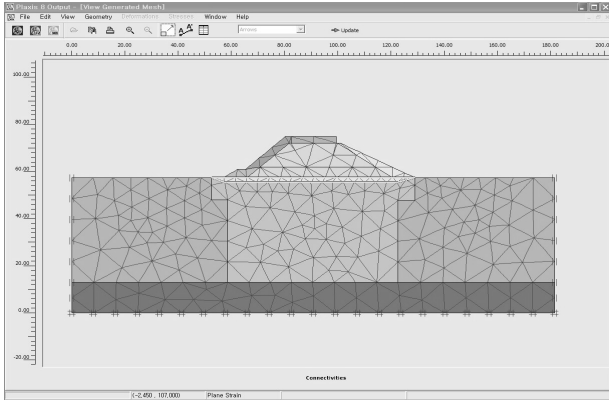


그림 14. 혼합지반 모델링

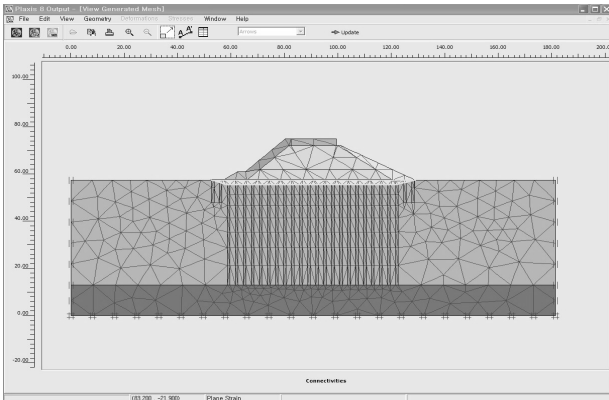


그림 15. 복합지반 모델링

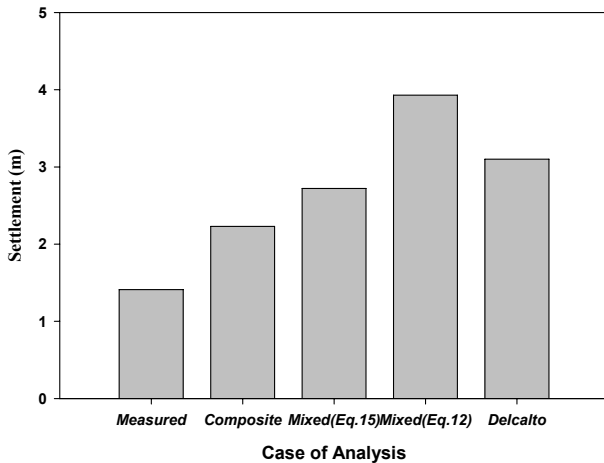


그림 16. OO준설토 투기장 침하해석결과

치환으로 갈수록 복합지반으로 지반을 표현하기 어려운 경우가 발생한다. 이럴 경우 식 (16)을 사용하여 혼합지반으로 해석을 수행하는 것이 가장 좋은 대안으로 판단된다.

본 현장에서 혼합지반 및 복합지반으로 해석을 하였을 때, 계측침하량과 차이가 발생하는 이유를 분석해보면, SCP의 시공시 모래말뚝을 타설하면서 발생하는 확공에 의한 수평응력비의 증가를 고려하여 주지 못한 것이 원인으로 판단되었다. 수평응력비는 하중강도와 치환심도에 영향을 받기 때문에 실내실험의 경우 높은 하중강도에 비하여 치환심도가 6cm로 매우 얇기 때문에 수평응력비에 대한 영향이 그림 9와 같이 미미하게 나타났다. 하지만 현장의 경우 치환심도가 40m를 넘는 대심도이기 때문에 수평응력비에 대한 영향을 고려하여 주어야 한다. 이는 Kirsch의 연구결과를 통해 알 수 있다. Kirsch(2004)의 연구결과에 따르면, 연약점토지반에 Stone Column의 타설시 발생하는 확공에 의해 수평응력비가 증가하게 되고, 이 증가의 양상을 그림 17에 나타내었다.

그림 17에서 a는 Stone column과 계측기 간의 거리이고,  $d_s$ 는 Stone Column의 직경을 나타낸다. 대부분의 결과에서 수평도압이 1.2배에서 많게는 1.7배 까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 수평응력비의 증가는 타설 심도와 치환율에 따라 변화 할 것으로 판단된다. 본 현장에서의 수평응력비는 약 2배

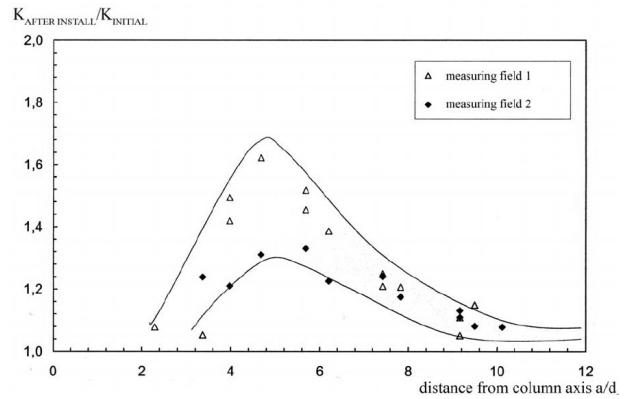


그림 17. 타설에 의한 수평응력비의 변화(점성토)

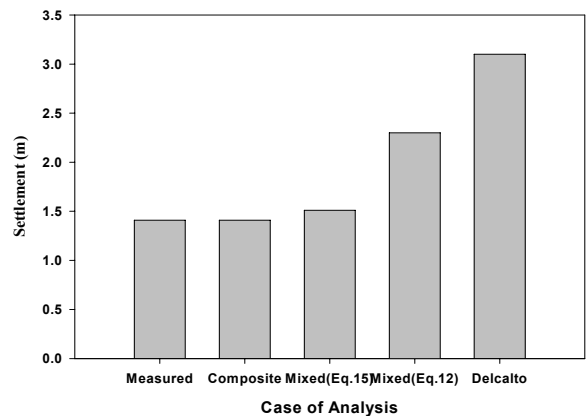


그림 18. 수평응력비를 고려한 침하해석결과

증가하는 것으로 역해석 결과 나타났다. 역해석 결과에 따른 수평응력비의 증가를 고려 수평응력비  $\approx 1$ 로 하여 OO준설 토 투기장의 수치해석 침하량 결과를 그림 18에 나타내었다.

수평응력비를 고려한 이차원 Plaxis의 해석 결과는 식 (12)를 사용하였을 경우 2.3m의 침하가 발생하는 것으로 나타나  $K_0 = 0.5$ 를 사용하였을 경우 3.93m의 침하량과 약 2배에 가까운 차이를 나타내었다. 또한 식 (16)을 사용하여 해석한 결과 1.40m의 결과를 나타내었다. 복합지반으로 해석한 결과의 경우 1.41m로 나타났다. 수평응력비 고려 이전에 비해 측정 침하량인 1.39m에 매우 근접한 침하량 해석결과를 보여주고 있다. 이는 수평응력비의 증가를 반영할 경우 식 (16)을 사용하여 혼합지반으로 해석을 하는 것이, 복합지반으로 해석하는 결과와 일치하여 이후 실제 설계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 SCP를 혼합지반으로 설계 할 때 필요한 지반물성치를 산정하기 위해 실내 모형압밀실험을 이용하여 민감도를 분석하여 지반물성치를 제안하고, 현장의 자료를 이용하여 현장 적용성을 검토하였다. 결론 및 제안은 다음과 같다.

- (1) SCP 실내 모형압밀실험을 Plaxis 프로그램을 사용하여 역해석을 수행하였다. 치환율별 혼합지반의 역해석  $C_c$ 값을 추세선을 사용하여 나타내면,  $C_c(\text{SCP Mixed}) = C_c(\text{In situ soil}) \times 0.9267 \exp^{-0.0221a_s}$ 의 식 (16)으로 나타낼 수 있다. 압밀실험에서 구한 현장의  $C_c(\text{In situ soil})$ 값과 치환율  $a_s$ 를 식 (13)에 대입하여, SCP 개량지반의 침하량을 해석할 경우 사용되는 혼합지반의 설계에 사용될  $C_c(\text{SCP Mixed})$ 값으로 사용할 수 있다.
- (2) 실제 현장에 대한 적용성 검증을 위하여, OO준설토 투기장을 해석하였다. 현장의 침하량은 1.39m로 측정되었다. 식 (12)를 사용하여 Plaxis 혼합지반으로 해석한 결과 3.93m의 침하량을, Delcalto로 해석한 결과는 3.1m의 침하량을 나타내었다. 식 (16)을 Plaxis혼합지반으로 수치해석을 수행한 결과가 측정 침하량에 가장 근접한 2.76m침하가 되었지만 상당한 차이가 발생했다. 이는 하중강도와 치환심도에 영향을 받는 수평응력비를 대심도인 현장에 적용하지 않아 발생한 문제로, 해석시 수평응력비  $\approx 1$ 을 고려한 결과 Plaxis 복합지반으로 해석한 경우 1.41m 침하 하는 것으로 나타났고, 식 (16)을 사용하여 Plaxis 혼합지반으로 해석한 결과 1.40m를 침하하는 것으로 나타나 실제와 매우 유사하였다.
- (3) 치환율이 높아 복합지반으로 해석이 어렵거나, 부득이 혼합지반해석이 필요한 경우에는 혼합지반의 물성치는

본 연구의 제안식인 식 (16)을 이용하고, 수평응력비에 대한 영향을 고려하여 수치해석하면보다 실제에 가까운 값을 얻을 수 있을 것으로 생각한다.

## 감사의 글

본 연구는 2009년 2단계 BK21사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다. 또한 “항만구조물 지반개량공법에 대한 최적설계법 및 통합 시공관리시스템 개발에 관한 연구”에 대한 과업에 관한 연구 성과로 현장자료 등 물질양면 지원을 해준 삼성물산 토목사업부에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 김동호(2004), *모래다짐말뚝(SCP)이 설치된 지반의 압밀침하 특성* 석사학위논문, 부산대학교, pp. 53~73.
2. 박용원, 김병일, 고영현(2001), 모래다짐말뚝(SCP) 개량지반의 응력분담비에 관한 연구, *Journal of the Research Institute of Industrial Technology*, Vol. 20, pp. 177~184.
3. 일본토질공학회(1993), *조사·설계에서 시공까지*, 일본토질공학회, pp. 108~125.
4. 임종철(2010), *토질공학의 길잡이*, 도서출판 새론, pp. 196~256.
5. 임종철, 권정근(2006), *화전지구(산업단지조성)개발사업3공구 현장의 신설도로에 의한 침하영향검토 보고서*, 부산대학교 생산기술연구소, pp. 47~60.
6. 한국지반공학회(1997), *지반공학시리즈 6 연약지반*, 도서출판 구미서관, pp. 382~446.
7. 한국지반공학회(2004), *부산신항 호안 2공구 준설토 투기에 따른 안정성 검토 연구보고서*, (주)삼성물산 건설부문, pp. 35~72.
8. 神田勝己, 寺師昌師(1990), *粘性土地盤を對象とするSCP工法の費用設計と感度分板と賓態調査*, 港滿枝研資料 No. 669, pp. 57~73.
9. Aboshi, H., Yoshikuni, H. and Maruyama, S.(1970), Constant Loading Rate Consolidation Test, *Soil and Foundations*, Vol. 10, pp. 127~135.
10. Balaam, N. P.(1983), The Behavior of Foundations Supported by Stone Columns, *European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol 8, No. 1, pp. 199~204.
11. Barksdale, R. D. and Bachus, R. C.(1983), *Design and Construction of Stone Column*, National Technical Information Service, Springfield, Virginia, Vol. 1, Report No. FHWA/RD-83/026, pp. 35~68.
12. GIT(1983), Design and Construction of Stone Column, *American Society of Civil Engineering*, Atlanta, Vol. 1, pp. 85~135.
13. Kirsch(2004), Numerical Modeling of Stone Columns, *2nd International Workshop of Young Doctors in Geomechanics, Paris*, pp. 1~15.
14. Yamamoto, K., Hukamoto, K.(1982), Stress Ratio of a Sand Pile and Cohesive Soil in Composite Ground, *17th International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference*, pp. 2417~2420.

(접수일: 2009. 10. 27 심사일: 2009. 11. 18 심사완료일: 2010. 6. 7)