# SCP가 타설된 모형지반의 압밀거동에 관한 수치해석적 연구
# Study on the Numerical Analysis of Model Ground with SCP

황성필[1], Sung-Pil Hwang, 임종철[2], Jong-Chul Im, 강연익[3], Yeoun-Ike Kang,
권정근[4], Jeong-Geun Kwon, 주인곤[5], In-Gon Joo

[1] 부산대학교 토목공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil Engineering, Pusan University
[2] 부산대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan University
[3] 삼성건설 토목사업본부 과장, Manager, Samsung Engineering & Coperation
[4] 부산대학교 토목공학과 박사과정, Ph.D. candidate, Dept. of Civil Engineering, Pusan University
[5] 부산정보대학 건축디자인학과 교수, Professor, Dept. of Archteccture Design, Busan Info-tech College

**SYNOPSIS :** 1D Analysis have been using Design of SCP in order to improve the soft ground. But 2D Analysis is researching and developing to get more accurate results. Using 2D Analysis, suitable Numerical Analysis Model should be selected and be tested in many situations. In this study, Laboratory Model Tests are analyzed by Numerical Analysis Method. After selecting Numerical Analysis Model, it is being tested many conditions.

**Keywords :** SCP, Laboratory Consolidation Model Test, Numerical Analysis Model, 2D Analysis

## 1. 서 론

연약지반을 개량하기 위해서 시공하는 SCP설계시 지반의 설계법에 있어 압밀침하해석은 대부분 1차원적 해석법을 적용하고 있으며, 이는 복잡한 구조물의 형상 및 지반을 효과적으로 반영하지 못하고 있다. 1차원적 압밀침하해석법은 SCP와 원지반 점토의 강성차로 인한 응력분담비의 개념을 적용하고 있으며, 이는 응력분담비에 의한 침하저감계수에 전적으로 의존하고 있는 상황이다. 그러나 실제 응력분담비는 구조물의 종류 즉, 연성재하와 강성재하에 따라 달라지며, 또한 압밀과정중 점토의 강도증가에 의해 지속적으로 변하므로 적절한 응력분담비를 산정하기에는 많은 가정이 필요하여 아직 명확히 규명되지 못하였다(Yamamoto and Hukumoto, 1982).

현재 이를 해결하기 위해 수치해석적 방법이 적용되고 있지만, 고치환율의 경우 요소수가 많아져 설계시 많은 시간과 노력이 필요하며, 일부 프로그램에서는 해석이 되지 않는 등 개선사항이 필요하다. 이를 고려한 혼합지반으로 모델링하는 방법이 제안되었지만 실제 계측치와 차이를 보이고 있으며, 이에 대한 지반물성치의 보정이 필요한 실정이다. 또한 개개의 말뚝으로 모델링 되어지는 복합지반으로 모델링하는 방법의 경우도 현재 연구가 미미하여 이를 적절히 적용하고 있지 못하다. 이에 본 연구에서는 모래로 치환된 실내 SCP 모형지반의 압밀실험(서주영, 2003)의 결과를 바탕으로 Plaxis 프로그램을 사용하여 수치해석분석을 수행하고, 이를 통해 복합지반과 혼합지반의 치환율별 압밀양상을 알아보고자 한다.

## 2. 모형압밀실험

### 2.1 모형압밀실험의 개요

치환율에 따른 SCP가 시공된 지반의 침하거동을 분석하기 위해 치환율 20.3, 36, 56.3, 76.4%의 지반을 조성하여 모형압밀실험을 수행하였다(서주영, 2003). 압밀압력은 9.8 $kPa$, 19.6 $kPa$, 39.2 $kPa$, 78.5 $kPa$, 156.9 $kPa$, 313.8 $kPa$으로 24시간 압밀을 수행하였다. 압밀시험에 사용된 압밀상자의 제원은 150 $mm$(L)×150$mm$(W)×60$mm$(H)이다. 압밀상자 외부에는 그 제원이 325$mm$(L)×250$mm$(W)×130$mm$(H)인 수침상자가 감싸고 있어 실험시료를 포화상태로 유지시켜 준다. 압밀상자는 그림 1과 같다.

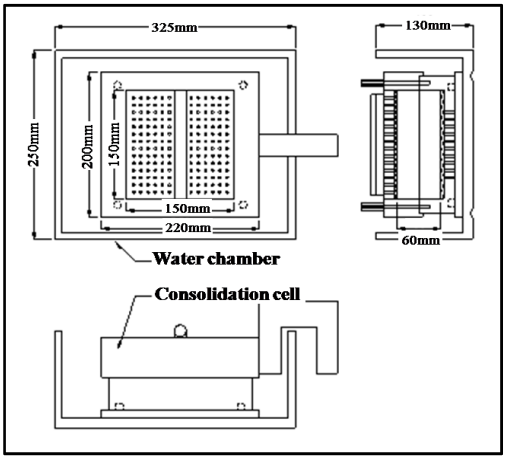


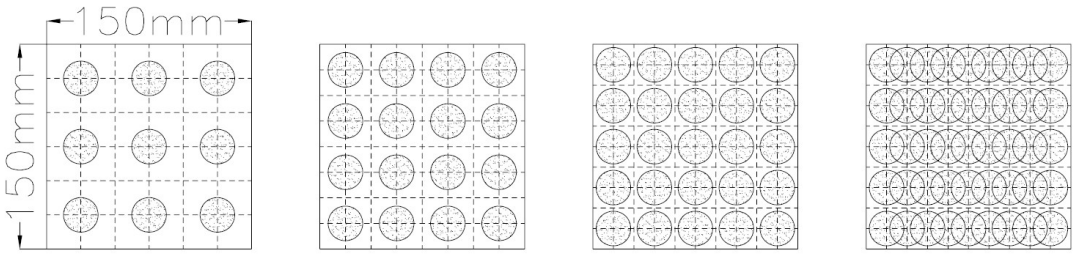

그림 1. 압밀상자

모형압밀실험에 사용된 점토재료는 부산광역시 감천항(공영수산물 도매시장 건설현장) 해성점토를 이용하였으며, SCP용 치환재료로서는 주문진표준사를 이용하였다. 표준사 및 해성점토의 지반공학적 성질은 표 1과 같다.

표 1. 주문진 표준사 및 감천항 해성점토의 지반공학적 성질(서주영, 2003)

| 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 | $c_v(cm^2/\sec)$ | 2.14×10-4 |
| 평균입경 | $D_{50}$ ( $mm$) | 0.595 | | | |
| 유효입경 | $D_{10}$ ( $mm$) | 0.443 | | | |
| 균등계수 | $C_u$ | 1.402 | | | |
| 곡률계수 | $C_g$ | 0.912 | | | |

그림 2는 모형압밀실험에서 조성된 SCP의 치환율별 모래말뚝의 배치를 나타내고 있다. 모래말뚝의 직경은 25.4mm이다.




치환율 20.3% 치환율 36% 치환율 56.3% 치환율 74.8%

그림 2. 치환율별 모래말뚝의 배치

## 2.2 모형압밀실험 실험방법 및 결과

모형압밀실험에 사용된 점토는 교반기로 충분히 교반한 점토를 압밀상자에 채워 수침상자에 넣고, 교란된 슬러리 상태의 점토를 일정강도를 가지는 시료로 만들기 위하여 예압밀을 수행하였다. 예비실험을 통하여 23.5 $kPa$의 압밀응력이 24시간 재하 후 비배수점착력 $c_u$ = 6.85 $kPa$을 갖는 것을 확인한 후 이 상태의 점토를 압밀 초기상태로 하였다. 예압밀 후 치환율에 의하여 정하여진 위치에 케이싱(casing)을 압입하고, 모래를 치환하여 복합토의 압밀시료를 제작하였다. 이때 모래의 밀도가 평균적으로 0.16 $kPa$의 주변값을 갖도록 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 1$cm$ 두께의 모래를 깔아주고, 다음의 하중단계 9.8 $kPa$, 19.6 $kPa$, 39.2 $kPa$, 78.5 $kPa$, 156.9 $kPa$, 313.8 $kPa$에 대한 압밀실험을 실시한다. 각 하중단계의 압밀시간은 24시간으로 하였다.

위 방법으로 실험한 치환율 $a_s$ = 무치환, 20.3%, 36%, 56.3%, 74.8%의결과는 표 2와 같다.

표 2. 실내모형실험 결과(서주영, 2003)

| 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. 모형압밀실험의 수치해석

## 3.1 수치해석의 개요

모형압밀실험의 2차원 모델링을 통한 압밀침하해석기법 수행하기위해 Plaxis 프로그램을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 점토의 수치해석모델은 Mohr Coulomb 모델, Modified Cam Clay 모델과 Hardening Soil 모델을 사용하였으며, 모래의 수치해석모델은 Mohr Coulomb 모델을 사용하였다. 또한 모델링 방법은 혼합지반와 복합지반, Axisymmetry로 생성하여 해석을 수행하였다.

## 3.2 해석에 사용된 물성치

지반에 분포하는 응력상태 및 지반의 변형거동을 예측하기 위해 수치해석을 이용하는데 있어서, 지반

의 물성치를 정확히 적용시키는 것은 매우 중요할 뿐 아니라 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 일반적으로 통용되는 값(임종철, 2001, 임종철, 2005, 한국지반공학회, 1997)에 모형압밀실험 전 실시한 기본물성 및 전단시험 등(서주영, 2003)에 의한 값들을 고려하여 입력 물성치를 산정하였다.

표 3. Mohr-Coulomb Model이 적용된 지층의 지반특성치

| 지 반<br>구 분 | 습윤<br>단위중량<br>$(kN/m^3)$ | 포화<br>단위중량<br>$(kN/m^3)$ | X방향<br>투수계수<br>$(m/day)$ | Y방향<br>투수계수<br>$(m/day)$ | 변형계수<br>$(kPa)$ | 포아송비 | 점착력, $c$<br>$(kPa)$ | 내부마찰각, $\phi$<br>(degree) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 주문진<br>표준사 | 16.5 | 16.5 | 8.64 | 8.64 | 17500 | 0.30 | 0.3 | 20 |
| 해성점토 | 15.6 | 15.6 | 0.82 | 0.82 | 665 | 0.35 | 3 | 30 |

표 4. Hardening Soil Model이 적용된 지층의 지반특성치

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

표 5. Modified Cam-Clay Model이 적용된 지층의 지반특성치

| 구분 | 단위중량<br>$(kN/m^3)$ | X방향<br>투수계수<br>$(m/day)$ | Y방향<br>투수계수<br>$(m/day)$ | $\lambda$ | $\kappa$ | $\nu_{ur}$ | $e_{int}$ | 점착력, $c$<br>$(kPa)$ | 내부마찰각, $\phi$<br>(degree) | 한계<br>응력비<br>(M) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 해성점토 | 15.6 | 0.82 | 0.82 | 0.25 | 0.025 | 0.2 | 1.82 | 3 | 30 | 1.20 |

## 3.3 혼합지반해석

해성점토로만 이루어지는 혼합지반으로 해석을 하려면 치환율의 변화에 따라 달라지는 지반변형계수 및 압축지수에 대한 변화를 알 수 없다. 따라서 Mohr Coulomb 모델의 경우 해성점토의 지반변형계수(E) 값을 역해석 하였고, Modified Cam Clay 모델의 경우 해성점토의 한계상태 압축지수($\lambda$)값을 역해석 하였다. 또한 Hardening Soil 모델의 경우 해성점토의 압축지수($Cc$) 값을 역해석으로 구하였다. 역해석의 경우 최종하중단계인 313.8 $kPa$에서 해석하였고, 이를 검증하기위해 156.9 $kPa$에서 해석을 실시하였다. 그림 3에서 각 해석모델별 검증결과를 나타내고 있다.

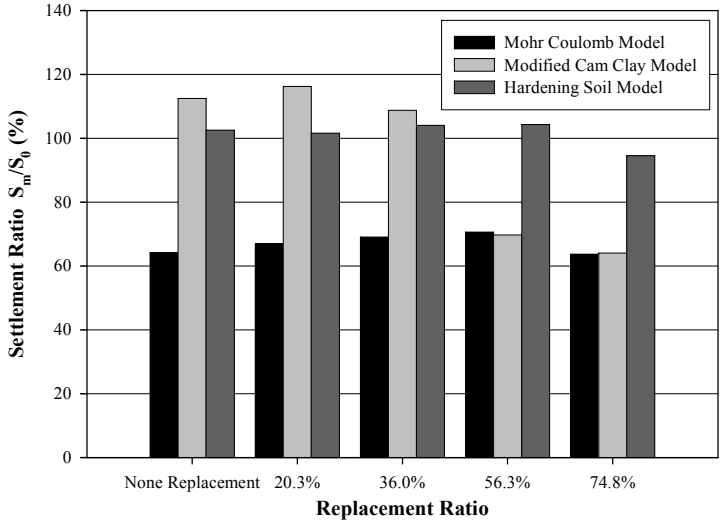



그림 3. 혼합지반 해석결과

그림 3은 각 치환율별로 해석침하량을 실내실험의 계측침하량으로 나눈 침하량의 비를 나타내고 있다. 그림 3에서 Hardening Soil 모델이 다른 두 수치해석 모델에 비하여 좋은 결과를 보여주고 있다. 각 치환율별로 나타나는 침하량의 수치가 모형실험의 실측 침하량과 5%내외의 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. SCP시공지반을 혼합지반으로 모델링을 할 경우 Hardening Soil 모델을 사용하는 것이 가장 적절해 보인다.

### 3.4 복합지반해석

복합지반은 혼합지반과 달리 말뚝 하나하나를 묘사할 수 있는 모델링 방법이다. 복합지반으로 모델링한 경우 해성점토와 모래로 이루어진 3차원의 모래말뚝을 2차원적의 평면으로 환산해 주는 작업이 필요하다. 그림 4는 그림2의 실내모형실험을 모델링을 위한 2차원으로 환산한 단면의 모습이다.

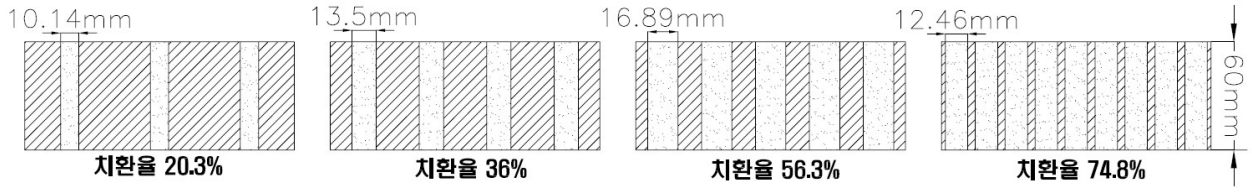



그림 4. 복합지반의 모델링

그림 4와 같이 모델링된 지반을 표 3, 4, 5의 물성치를 이용하여 해석을 수행하였으며, 그 결과는 그림 5와 같다.

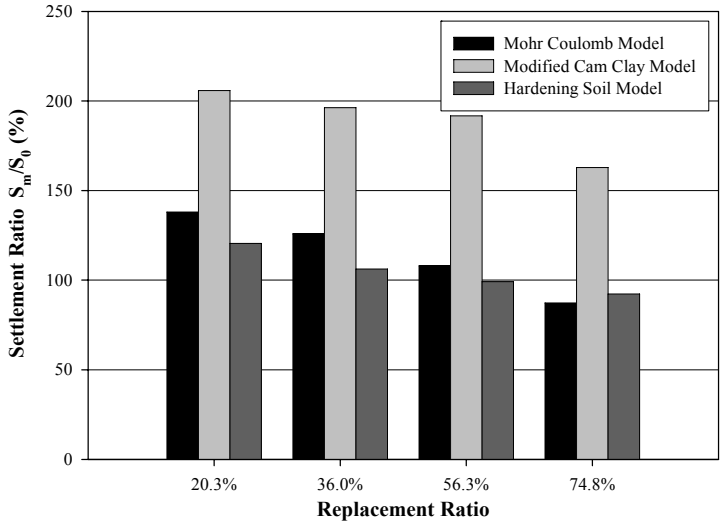



그림 5. 복합지반 해석결과

그림 5는 각 치환율별 해석침하량을 실내실험의 계측침하량으로 나눈 침하량의 비를 나타내고 있다. 그림 5에서도 혼합지반과 마찬가지로 Hardening Soil 모델에서 가장 좋은 결과를 나타내고 있다. 다른 두 모델과 비교해서 실측 침하량과 10%내외에서 안정적인 결과값을 나타내고 있다. 결과적으로 SCP가 타설된 지반에서는 Hardening Soil 모델을 사용하는 것이 해석의 정확성을 높이는데 유리하다고 할 수 있다.

Hardening Soil 모델의 검증과 여러 조건에서의 변화를 알아보기 위하여 몇 가지 경우에 대하여 비교

분석을 수행하였다. 먼저 Plane Strain과 Axisymmetric으로 모델링한 경우를 비교 해석하였다.

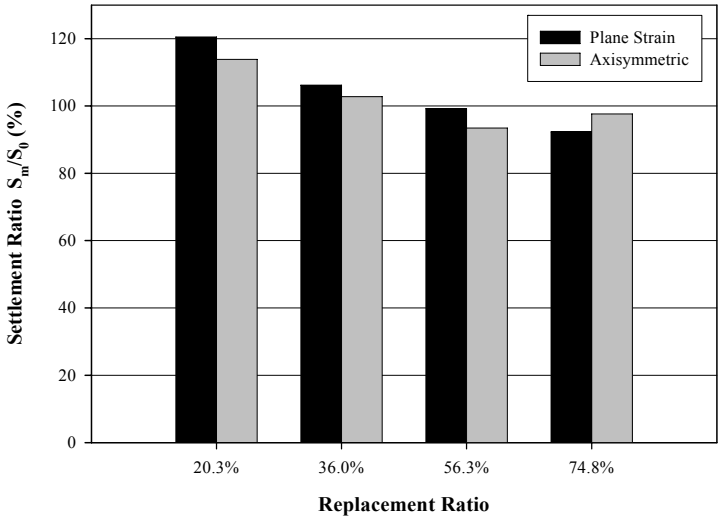



그림 6. Plane strain과 Axisymmetric 모델링의 비교

2차원 모델링 방법인 Plane strain 방법의 정확성을 확인하기 위하여 1개의 말뚝을 3차원으로 해석하는 Axisymmetric 방법과 비교해 보았다. 결과는 두 경우 거의 차이가 없을 정도로 미미한 차이를 나타내었고, 실측침하량과 비교에서도 두 모델의 경우 근소한 차이를 나타내어 여러 개의 말뚝으로 구성되어있는 SCP지반의 설계에서 Plane strain 방법의 사용이 문제가 없을 것으로 판단된다.

다음으로 Plaxis의 해석방법 중 압밀해석과 배수해석을 비교하여 보았다.

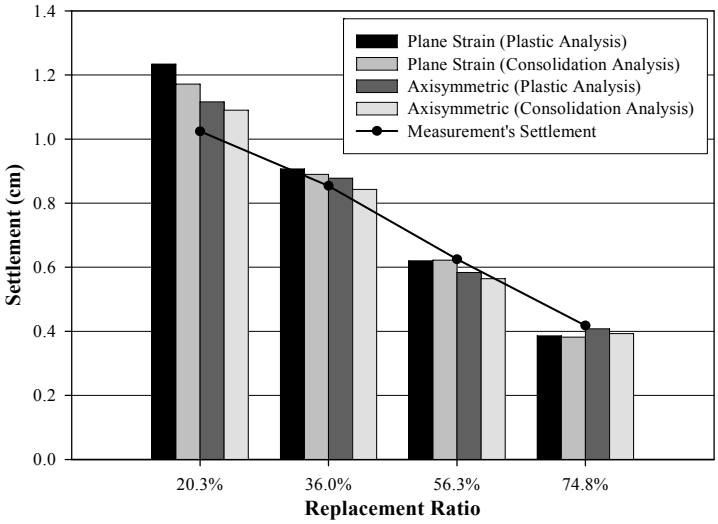



그림 7. 압밀해석과 배수해석의 침하량 비교

그림 7과 같이 Hardening Soil 모델의 비교에서 압밀해석과 배수해석 상호간에 약 3~4% 정도의 차이를 나타내고 있고 압밀해석이 조금 적은 침하량을 나타내고 있다. 비교적 적은 심도의 경우 비슷한 결과를 나타낼 것으로 판단되지만, 대심도의 경우 침하량 예측에 다소 영향이 있을 것으로 예상된다. 따라서 대심도지반의 해석에 있어서 Hardening Soil 모델을 사용할 경우 압밀해석과 배수해석을 병행하는 것이 나을 것으로 판단된다.

마지막으로 점토지반에 타설된 모래말뚝의 지반변형계수(E)에 대한 민감도를 해석해 보았다.

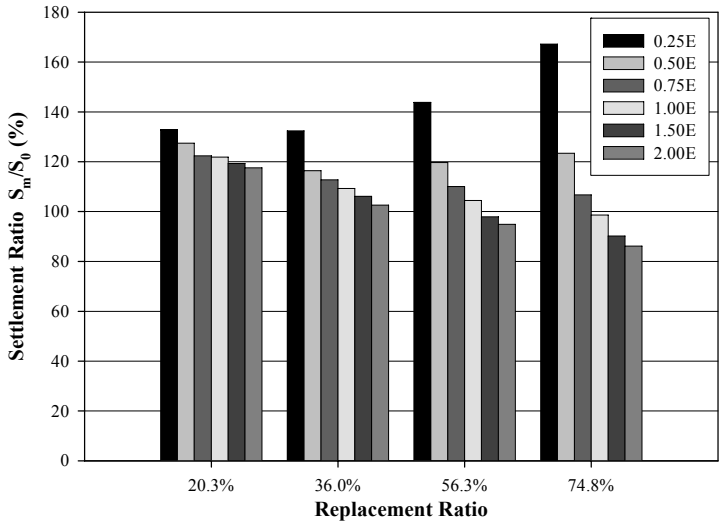



그림 8. 지반변형계수에 대한 민감도

그림 8은 점토의 물성치는 그대로 둔 상태에서 모래의 지반변형계수만 0.25배~2배까지 변화를 준 해석결과이다. 모래의 지반변형계수에 대한 민감도는 모래의 양이 많아지는 고치환으로 갈수록 민감한 결과를 나타내고 있다. 지반변형계수가 커질 경우에 비해 작아질 경우 더욱 민감해지는 것으로 판단되었다. 따라서 고치환로 치환된 지반을 해석해야 될 경우 모래의 지반변형계수에 주의를 기울이고, 특히 지반변형계수의 값이 적어서 침하량에 영향을 주는 일이 없도록 주의를 해야 하겠다.

## 4. 결 론

(1) 혼합지반으로 모델링된 지반을 3가지의 수치해석 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. Mohr Coulomb 모델의 경우 지반변형계수(E)값에 민감하게 반응을 하였고, Modified Cam Clay 모델의 경우 한계상태 압축지수($\lambda$)값에, Hardening Soil 모델은 압축지수($Cc$)에 가장 민감하게 반응하였다. 이에 이 값에 대해 역해석을 수행하였다. 역해석 수행 후 검증을 거친 결과는 Hardening Soil 모델이 실제 계측치와 가장 유사한 결과를 나타내었다. 따라서 혼합지반으로 모델링을 할 경우 Hardening Soil모델을 사용하는 것이 가장 바람직 할 것으로 판단된다.

(2) 복합지반으로 모델링된 지반역시 3가지의 수치해석 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 해석결과 혼합지반과 유사하게 Hardening Soil 모델에서 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 복합지반 역시 Hardening Soil모델을 사용하는 것이 가장 바람직 할 것으로 판단된다. 이후 여러 가지 상황에서 Hardening Soil모델의 변화를 알아보기 위해 몇 가지 해석을 수행하였다.

(3) 복합지반의 모델링을 Plane strain 방법과 Axisymmetric 방법으로 모델링한 차이는 미미한 것으로 나타났다. 일반적인 경우 지반을 그대로 2차원적인 Plane strain 방법으로 모델링 하는 것에 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

(4) 복합지반의 해석을 배수해석(plastic analysis)과, 압밀해석(consolidation analysis)방법으로 해석방법에 대해 비교해 보았다. 배수해석에 비해 압밀해석의 방법이 침하량이 조금 적은 것으로 나타났다. 하지만 그 차이가 크지 않고 실측 침하량과 비교하여 정확도가 비슷하여, 어떤 한 방법이 정확한 방법이라고 표현하기에는 다소 무리가 있었다. 다만 실내압밀 실험의 경우만 보았을 경우 저치환율에서는 해석침하량이 크게 나왔고, 고치환율에서는 해석침하량이 적었다. 따라서 저치환율에서는 압밀해석을, 고치환율에서는 배수해석을 사용하는 것이 적절한 것으로 보인다. 하지만 이는 단편적인 결과여서 이후 여러 현장의 결과를 분석하여 다시 판단해야 할 것으로 생각된다.

(5) 모래말뚝의 지반변형계수에 대한 민감도 분석결과 치환율이 커질수록 모래의 양이 많기 때문에 민

감하게 반응하는 결과를 나타내었다. 따라서 고치환을 해석할 경우 모래의 지반변형계수에 정확하게 입력해 줄 필요성이 있다고 할 수 있다. 또한 모래의 지반변형계수가 적을수록 더욱 민감해 지므로 모든 치환율에서 지반변형계수가 실제값 보다 적게 입력되는 것에 주의를 기울여야 할 것이다.

## 참고문헌


1) 서주영(2003), “모래다짐말뚝(SCP)의 치환율과 혼합율에 따른 전단강도 특성의 비교연구”, 부산대학교, 공학석사논문
2) 임종철(2005), ‘토질공학의 길잡이’, 샤론, 서울
3) 임종철(2001), ‘軟弱地盤 處理 工法’, 부산대학교 대학원 강의교재
4) 한국지반공학회(1997), ‘지반공학시리즈 6 연약지반’, 구미서관, pp. 382～446
5) Yamamoto, K., and Hukumoto, K. (1982), “Stress ratio of a sand pile and cohesive soil in composite ground”, 17th JSSMFE Conf, pp2417-2420.