

## 압밀도 및 치환율 변화에 따른 미관통 SCP 지반의 압밀해석

### Consolidation Analysis of Soils Improved by Partly Penetrated SCP with Degree of Consolidation and Replacement Ratio

이 강 일<sup>1\*</sup> Lee, Kang-Il  
임 은 상<sup>3</sup> Im, Eun-Sang

이 재 옥<sup>2</sup> Lee, Jae-Wook  
주 경 원<sup>4</sup> Ju, Kyung-Won

#### ABSTRACT

Partially penetrated SCP method is to install sand compaction piles in a soft clay layer not penetrating to the bed layer. In this study, consolidation behaviors of soft grounds improved by both partially and fully penetrated SCP methods are presented. When the replacement ratio is low, the settlement characteristic of the ground improved by fully penetrated SCP method seems to be consistent regardless the degree of consolidation. On the other hands, the ground improved by partially penetrated SCP method appears to decrease depending on the degree of consolidation. In addition, the settlement of upper clay layer is more increasing as the penetration ratio ( $H_d/H$ ) is decreasing. No effect of stress concentration at the lower part of the partially penetrated SCP method is developed. The ratio of stress sharing appears to be almost consistent regardless the degree of consolidation.

#### 요 지

미관통 SCP공법은 개량 대상지반인 연약점토층 밑에 존재하는 지지층까지 모래말뚝을 관통시키지 않고 미관통 상태 그대로 SCP를 지반 중에 조성하는 공법으로 본 연구에서는 저치환율인 경우 압밀도에 따른 미관통 SCP공법과 관통 SCP 공법을 병용한 복합지반의 압밀침하 거동을 수치해석을 통해 비교 하였다. 본 연구결과 관통 SCP지반의 침하특성은 압밀도에 상관없이 거의 일정하나 미관통 SCP지반의 침하특성은 압밀도가 감소하고 관통율( $H_d/H$ )이 감소할수록 상부점토지반의 침하량이 더 크게 증가되었다. 또한 미관통 SCP의 하단부에는 응력집중효과가 발휘되지 않았으며 응력분담비는 압밀도에 관계없이 거의 일정한 양상을 보였다.

**Keywords** : Sand compaction piles, Partially and fully penetrated SCP method, Replacement ratio, Stress concentration

#### 1. 서 론

모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile, 이하 SCP)공법은 연약지반에 모래를 압입하여 큰 직경의 다져진 모래말뚝을 조성하여 지반의 강도를 증가시키고 보강하는 공법이다. SCP공법의 핵심은 지반개량 목표에 부합되는 적절한 치환율을 결정하는데 있으나 현재의 기술수준은 아직 치환율에 대한 신뢰성 있는 설계지침이 제시되지 못하고 있

으며 또한 SCP공법에 사용되는 양질의 모래자원도 부족한 현실이다.

일반적으로 SCP공법은 개량하고자 하는 점토층의 하부 지반 전체를 관통하여 지반을 개량하고 있다. 그러나 본 연구에서는 저치환율 SCP공법을 점토지반 전체에 관통시키지 않고 미관통 상태로 남게 함으로서 시공비의 감소, 시공기계의 한계성, 하부 모래자갈층에서 SCP로 지하수의 유입으로 인한 문제 등을 방지할 수 있는 미관통 SCP

1\* 정회원, 대전대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Daejin Univ., E-mail: kilee@daejin.ac.kr)

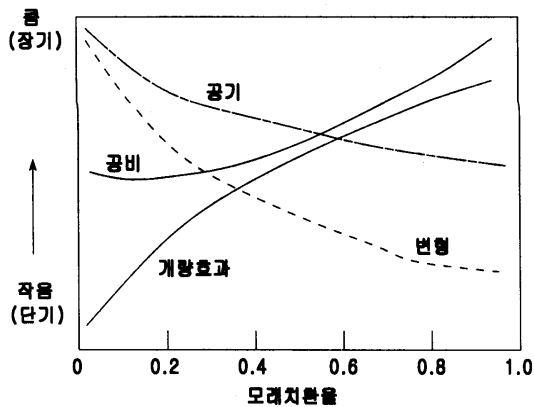
2 비회원, 대림산업 토목사업본부 부장 (Non-Member, General Manager, Civil Business Division, Daelim Industrial Co., Ltd.)

3 비회원, 한국수자원공사 K-water 연구원 기반시설연구소 선임연구원 (Non-Member, Researcher, Infrastructure Technology Center, Kwater)

4 비회원, 대전대학교 토목공학과 공학석사 (Non-Member, Dept. of Civil Engrg., Daejin Univ.)

모델지반에 대하여 탄·점·소성 유한요소해석을 실시하였다(Jung, 1998).

松尾稔 등(1968)은 점성토 단독지반과 복합지반의 압밀시험 결과에 근거하여 복합지반에 있어서 모래말뚝에 응력이 분담하고, 압밀도와 시간의 관계에서 모래말뚝에 의한 압밀 촉진효과가 있다고 하였다. 또한 Oda 등(2001)은 저치환율 SCP에 의한 복합지반에서 모델시험과 수치해석을 통하여 압밀거동의 메커니즘을 규명하였으며, Han 등(2002)은 압밀도에 따른 쇄석기동말뚝의 교란 및 저항효과를 이론적으로 정립하였다. 최근 유승경(2003)은 저치환율 SCP 복합지반에 대한 응력분담비와 그 메커니즘에 대하여 연구하였고, 정종범 등(1999)은 미관통 및 관통 SCP 개량지반에 일차원 압밀거동을 조사하기 위하여 실내모형실험을 실시하여 압밀침하량 및 응력분담비등을 측정하였다. 또한 김재권 등(2002)은 치환율을 변화시키면서 모형토조실험을 실시하여 모래말뚝과 지반의 상호작용을 분석하고 말뚝주면에서의 하중전이 특성을 규명하였다. 본 연구는 유한요소해석을 이용하여 저치환율일 경우



무처리	SD	저치환율 SCP	고치환율 SCP	급속치환
-----	----	----------	----------	------

그림 1. 치환율에 따른 비교(해양수산부, 1999)

표 1. 여러 가지 조건에 따른 개략적인 치환율 범위(해양수산부, 1999)

지반조건	목적	구조물 형식	치환율( $a_s$ )
해상점토	안정, 침하	중력식 호안, 방파제	0.3~0.8
육, 해상모래	액상화	널말뚝	0.05~0.25
육상점토	안정, 침하	성토	0.1~0.3
육상점토, 모래	안정, 침하, $k_v$ , 액상화	교대, 교각, 배면성토	0.1~0.3
육상점토, 모래	액상화, 침하, 안정, $k_v$	탱크건설	0.05~0.3
육상점토, 모래	액상화, 토압, 응기	지하매설물	0.05~0.3

(주)  $k_v$ 는 횡방향 지반반력계수

압밀도에 따른 미관통 SCP공법과 관통 SCP 공법을 병용한 복합지반의 압밀침하 거동을 비교평가 하였다. 이를 위해 사전에 작성된 모델지반을 대상으로 관통율, 치환율 그리고 압밀도등을 달리한 수치해석을 실시하여 모래말뚝과 점성토 지반의 침하량, 유효응력특성 및 응력분담비 특성 변화를 분석 고찰하였다.

## 2. SCP공법

### 2.1 SCP공법의 치환율

치환율( $a_s$ )이란 지반면적과 모래말뚝이 차지하는 부분의 면적비로 정의되고, 주로 모래말뚝 타설간격에 의해 결정된다. 성토 등 상부구조물이 비교적 경량인 경우에는 치환율이 20~40% 정도인 저치환율 SCP공법이 많이 사용되고 있다. 그러나 항만공사 등 모래말뚝 자체로 지지력, 전단강도 증가효과 등을 발휘해야 하는 경우에는 치환율이 70% 정도인 고치환율 SCP공법이 사용되지만 최근 모래의 부족현상으로 치환율 30~40% 정도인 저치환율 SCP공법도 꾸준히 증가하고 있다(柳生忠言, 1989).

저치환율 SCP공법은 고치환율 SCP공법에 비해서 모래말뚝 사이 점성토의 압밀에 의한 강도 증가, 모래말뚝과 점성토의 응력분담비( $m$ ) 등이 해명되지 않은 부분이 많다. 일반적으로 치환율은 육상의 경우 0.4이하, 해저의 경우는 0.15~0.8의 범위가 많다. 그림 1은 치환율에 따른 공사기간, 비용, 개량효과 등을 나타낸 것이며 표 1은 지반조건, 개량목적 그리고 시공되는 구조물 형식에 따른 일반적인 치환율 범위를 나타낸 것이다.

### 2.2 미관통 SCP공법에 대한 고찰

미관통 SCP공법은 개량 대상지반인 연약점토층 밑에

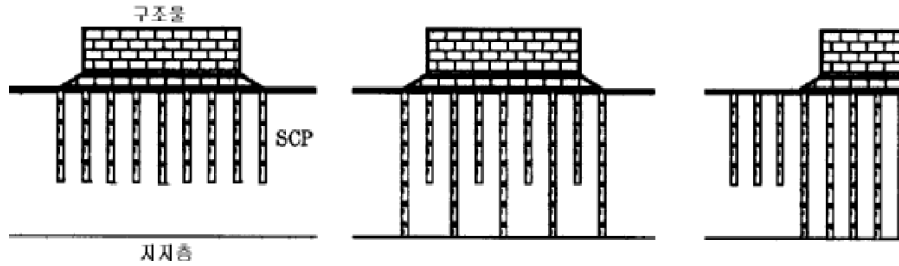


그림 2. 미관통 SCP의 적용 예(平林岳樹, 2002)

표 2. 최근 25년간 일본의 SCP의 관통률 추이(平林岳樹, 2002)

연도	관통률	100%	100~80%	80~60%	60%미만
1976~1980(13)		30.8(4)	30.8(4)	7.7(1)	30.8(4)
1981~1985(6)		50(3)	50(3)	-	-
1986~1990(7)		71.4(5)	14.3(1)	14.3(1)	-
1991~1995(15)		-	20(3)	55.3(8)	26.7(4)
1996~2000(12)		83.3(10)	-	8.3(1)	8.3(1)
비고		( )는 SCP공법에 대한 시공건수 임			

존재하는 지지층까지 모래말뚝을 관통시키지 않고 미관통 상태 그대로 SCP를 지반중에 조성하는 공법이다. 또한 미관통 SCP를 조성하는 형식은 많이 존재한다(그림 2 참조). 그러나 이 공법에 의한 개량효과는 아직 상세히 해명되어 있지 않고 기술자의 경험적인 예측에 의존하고 있다. 본 공법의 적용 이유는 시공기계의 시공심도 제약성, 경제적 제약, 하부 모래자갈층에서 SCP로 지하수의 유입방지 등을 들 수 있다.

표 2는 미관통 SCP에 관한 시공실적이나 연구발표 등 최근 25년간 일본의 지반공학회의 연구보고서에서 발표된 숫자를 SCP의 관통률별로 분리해서 정리한 것이다. 이 표를 보면 미관통 SCP공법이 상당수를 점하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 미관통 SCP에 의한 개량지반의 압밀 침하 시스템은 대단히 복잡하고 그 해명을 위해서는 향후 국내에서도 지속적인 데이터의 집적 및 연구가 필요하다.

### 3. 유한요소 모델링

#### 3.1 해석모델링 및 해석조건

본 연구에서 사용한 수치해석 프로그램은 AFIMEX에 내장되어 있는 압밀전용 해석 솔버인 DACSAR(Deformation Analysis Considering Stress Anisotropy and Reorientation)를 사용하였으며 점성토에 적용한 구성식은 세키쿠치-오오타(關口-太田)모델로 탄·점·소성 해석을 수행하였

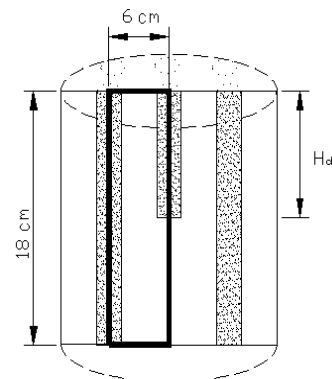


그림 3. 해석모델지반

다. 본 연구에서 대상으로 하는 미관통SCP와 관통SCP에 대한 유한요소 모델링은 그림 3과 같이 굵은 선의 구조가 반복되어 배치되도록 하였으며 그림 속의 굵은 선의 요소 단면을 확대하여 모형지반의 치환율로 SCP직경을 설정하였다. 본 연구는 향후 1-G상태의 모형실험과 원심모형실험을 실시하기 위한 기초연구이기 때문에 소규모 모델을 수치해석 한 것이다.

본 연구에서 적용한 유한요소 메쉬 및 모델링에 대한 경계조건과 배수조건은 그림 4와 같이 양 측면은 연직방향만 자유단이며 하부지반은 고정으로 하였다(김영남 등 2004; 平林岳樹, 2002). 또한 모델링지반의 하단은 모래다짐말뚝이 풍화암까지 근입되는 현장조건을 고려하여 하부에서 침하가 발생하지 않도록 하였으며 측면은 하중이 재하될 때 팽창하지 않으면서 침하는 발생할 수 있도록 하였

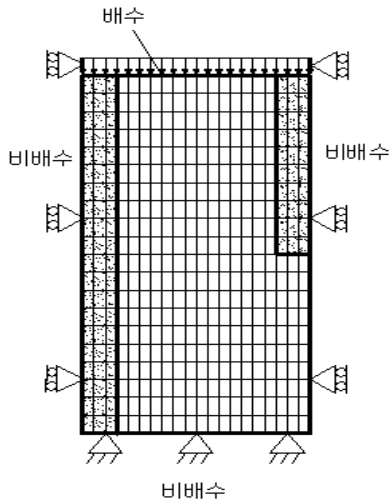


그림 4. 경계조건 및 배수조건

표 3. 해석조건

조건	관통율(%)	압밀도(%)	치환율(%)
압밀도를 중심으로	0	30, 50, 90	30
	50		
	75		
	100		
치환율을 중심으로	0	90	15, 30, 45
	50		
	75		
	100		
비고	상재하중은 1.0t/m <sup>2</sup> , 모래의 상대밀도는 70%임		

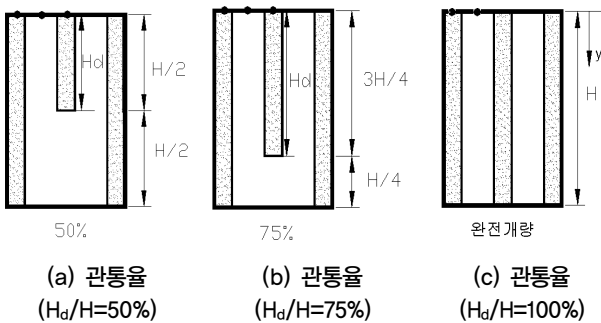


그림 5. SCP지반 관통율 조건(그림속의 ●은 침하량의 해석지점을 의미하며 y는 지표로부터 임의의 지점까지의 심도임)

다. 배수조건으로 양 측면 및 하부는 비배수조건, 상부는 배수조건으로 하였다. 해석조건은 표 3과 같으며 그림 5와 같이 관통율( $H_d/H$ )은 완전개량 지지층까지 모래말뚝의 길이( $H$ )에 대한 필요한 개량대상층까지의 모래말뚝 길이의 비를 의미하며 심도( $y/H$ )는 완전개량 모래말뚝 길이( $H$ )에 대한 상부표면( $y=0$ )으로 부터의 비를 나타낸다.

표 4. 해석에 적용된 토질매개변수(모래지반)

$\lambda$ (t/m <sup>2</sup> )	M (t/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{vi}$ (t/m <sup>2</sup> )	$K_i$	$e$ ( $\lambda\kappa$ )
1153.85	769.23	1.09	0.41	0

여기서,  $\lambda$  : 라메의 정수,  $\lambda = \frac{vE}{(1+v)(1-2v)}$

M : 라메의 정수,  $M = \frac{E}{2(1+v)}$

$\sigma_{vi}$  : 유효상재하중,  $K_i$  : 토압계수,  $e(\lambda\kappa)$  :  $\ln(\kappa)$ 에 대한 e의 경사

표 5. 해석에 적용된 토질매개변수(점토지반)

D	$\Lambda$	M	$v'$	$\sigma_{vo}$ (t/m <sup>2</sup> )
0.06	0.66	1.15	0.34	1.06

$k_x$ (m/day)	$k_y$ (m/day)	$K_o$	$\sigma_{vi}$ (t/m <sup>2</sup> )	$K_i$
$7.78 \times 10^{-5}$	$7.78 \times 10^{-5}$	0.52	1.06	0.52

$\alpha$	$v_o$	$\lambda$	$e_o$	$e$ ( $\lambda\kappa$ )
0.01	0.03	0.27	1.45	0

여기서,

D : 다일레이턴시계수     $\Lambda$  : 비가역비    M : 한계응력비

$v'$  : 유효포아송비     $\alpha$  : 2차압밀계수

$v_o$  : 초기체적변형률속도     $\lambda$  : 압밀지수

### 3.2 해석에 적용한 토질매개변수

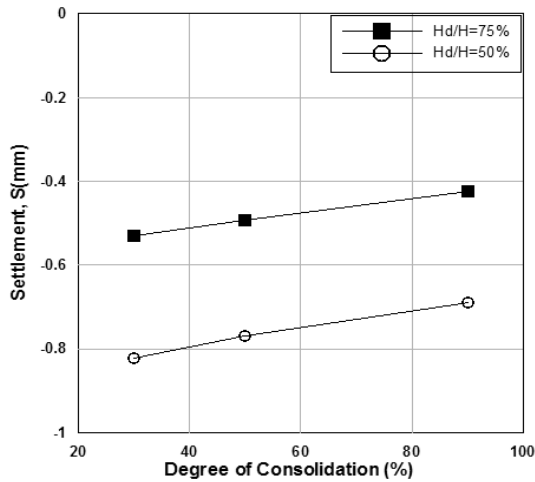
본 연구에 적용된 모래의 토질매개변수는 표 4와 같이 해양수산부(1999)에서 연구한 주문진 표준사의 탄성지반의 물성값을 사용하였고 점토지반은 표 5와 같이 포항종합제철주식회사(1990)의 점성토 지반의 토질특성을 대상으로 하였다.

## 4. 압밀도 변화에 따른 해석결과 분석

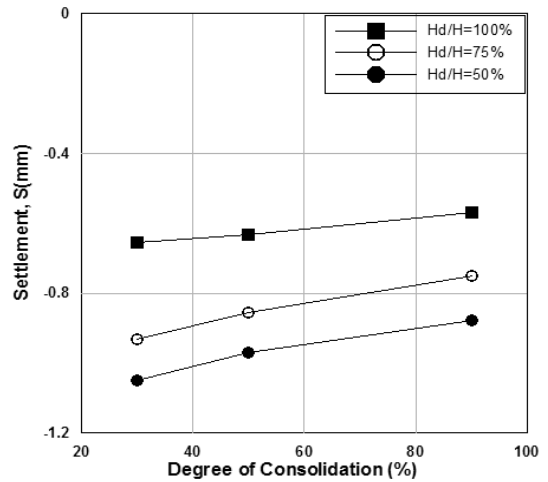
본 절은 저치환율을 갖는 관통 및 미관통 SCP개량지반에서 치환율이 30%, 상재하중이 1t/m<sup>2</sup>일 경우로 국한하여 압밀도 변화에 따른 SCP지반의 거동특성을 비교 분석한 것이며 각 침하량과 유효응력은 압밀시간의 경과가 고려된 압밀도별 침하량 및 유효응력의 변화를 관찰할 수 있도록 그 값을 증분비로 도시하였다.

### 4.1 압밀도에 따른 침하특성

그림 6은 압밀도에 따른 침하량을 증분비로 분석한 것이며 침하해석 지점은 그림 5에서 미관통 SCP지반은 미관통된 SCP지반 상부, 개량 점토지반은 점토지반 상부에서의 침하량이다. 침하량은 그림에서와 같이 관통율 및 압

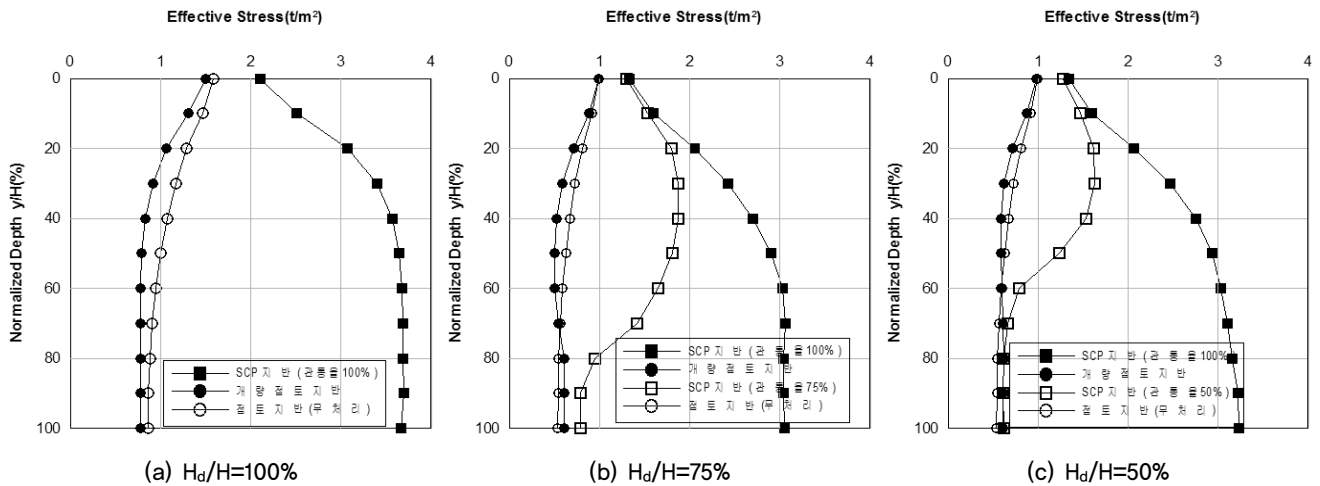


(a) 미관통 SCP지반



(b) 개량 점토지반

그림 6. 압밀도에 따른 침하량비교



(a)  $H_d/H=100\%$

(b)  $H_d/H=75\%$

(c)  $H_d/H=50\%$

그림 7. 심도에 따른 유효응력 분포(압밀도 90%)

밀도가 증가할수록 침하량 선형적으로 감소하고 있다. 이는 SCP지반의 응력분담비 및 미관통된 하부점토지반의 침하량의 차이로 판단된다.

#### 4.2 압밀도에 따른 유효응력 특성

그림 7(a)는 관통 SCP개량지반( $H_d/H=100\%$ )에 대하여 심도방향으로 유효응력 변화특성을 나타낸 것이다. 개량 점토지반의 경우는 무처리지반과 유사하게 상부에서 유효응력이 가장 크게 발생되어 점점 감소하는 일정한 특성을 보이며 무처리 점토지반에 비하여 유효응력 변화가 더 적게 나타났다. 이는 개량지반의 경우 응력분담을 SCP지반에서 대부분 받고 있기 때문으로 판단된다. 그리고 관통 SCP 지반은 개량된 점토지반의 특성과 정 반대의 경향을 나타내었다. 즉, 상부에서 하부로 갈수록 유효응력이 증가

하다가  $y/H=60\%$ 지점 이후부터 거의 일정한 유효응력 특성을 보인다.

그림 7(b)와 (c)는 관통율이 75%, 50%인 경우 심도별 유효응력특성을 나타낸 것으로서 개량점토지반의 유효응력은 관통SCP지반(그림 7(a))과는 다르게 상부에서 하부로 갈수록 유효응력이 감소하다가 다시 증가한 후 일정해지는 포물선 형태를 보이고 있다. 그리고 미관통 SCP지반의 유효응력특성은 상부에서 하부로 갈수록 유효응력이 증가하다가 다시 감소해서 SCP지반이 끝나는 하단 점토부에 이르러서는 유효응력의 변화가 급속히 감소해서 개량된 점토지반에서 받고 있는 유효응력과 거의 동일한 양상을 나타내고 있다.

이와 같이 개량점토지반 및 미관통SCP지반의 경우 SCP 타설 길이 내에서 서로 다른 포물선 형태를 보인 것은 SCP 하단부에 존재하는 미개량층이 받고 있는 하중 및 간극수

압 그리고 아칭효과의 영향으로 평가된다. 또한 심도별 개량 점토지반과 SCP지반의 유효응력은 SCP 지반에 집중되며 관통율이 증가할수록 응력집중은 더 커짐을 알 수 있으며 상기의 결과들은 정종범 등(1999) 및 平林岳樹(2002) 등의 전응력으로 표현된 연구 결과와 비슷한 양상을 보이고 있다.

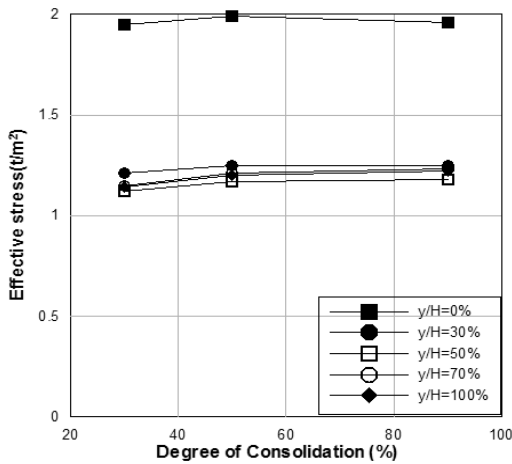
그림 8은 관통율이 50% 및 75%인 모델지반(그림 5(a)와 (b))의 개량점토지반에서 압밀도별 유효응력특성을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 압밀도가 증가함에 따라서 유효응력이 약간 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 심도별 유효응력은 지표면에서 가장 크고 심도별로는 관통율이 75%인 경우가 50%인 경우보다 더 작은 값을 보였는데 이는 미관통 하부 점토지반의 영향으로 판단되며 미관통 SCP지반 상부에서의 응력집중효과는 모두 주변점토와의 마찰과 응력재분배에 의해서 지지되고 있다는 것을 의미

한다.

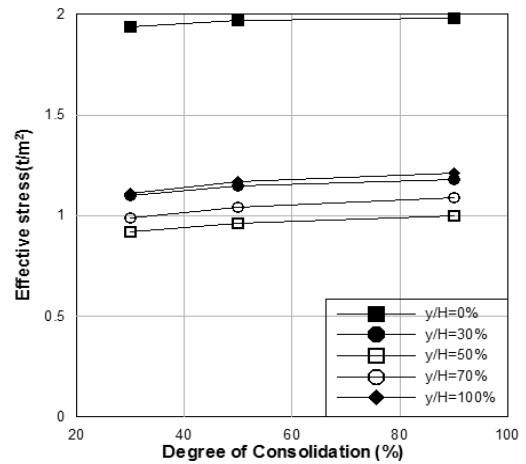
그림 9는 관통율이 50% 및 75%인 모델지반(그림 5(a)와 (b))의 SCP지반에서 압밀도별 유효응력특성을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 압밀도가 증가됨에 따라서 유효응력변화는 거의 없었다. 이는 SCP지반의 경우 초기하중에 의해 대부분 간극수압이 소산되었기 때문으로 판단된다. 그리고 관통율이 커질수록 최대유효응력도 증가하는 것을 볼 수 있다.

### 4.3 압밀도에 따른 응력분담비 특성

그림 10(a)는 관통율( $H_d/H$ )이 100%인 경우 응력분담비( $m=\sigma_s/\sigma_c$ )를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 상단부에서 하부로 갈수록 급격한 응력분담비의 증가가 나타나다가 지표로부터  $y/H=0.8$  부근부터 거의 일정한 응력분담비를

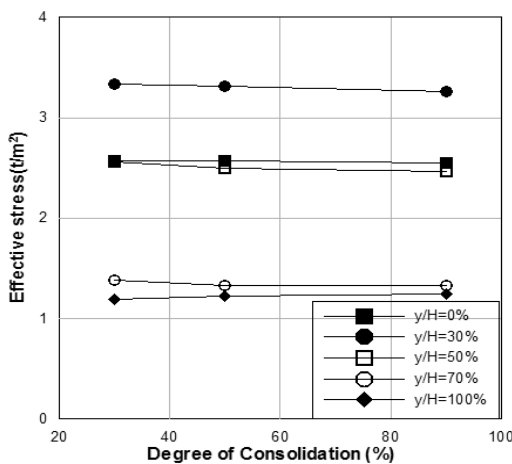


(a)  $H_d/H=50\%$

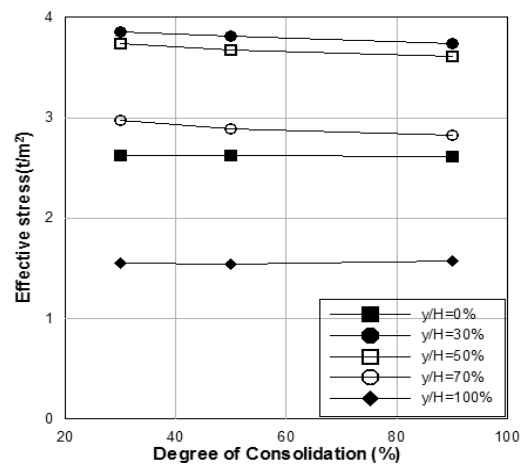


(b)  $H_d/H=75\%$

그림 8. 미관통 개량점토지반의 유효응력 비교



(a)  $H_d/H=50\%$



(b)  $H_d/H=75\%$

그림 9. 미관통 SCP지반의 유효응력 비교

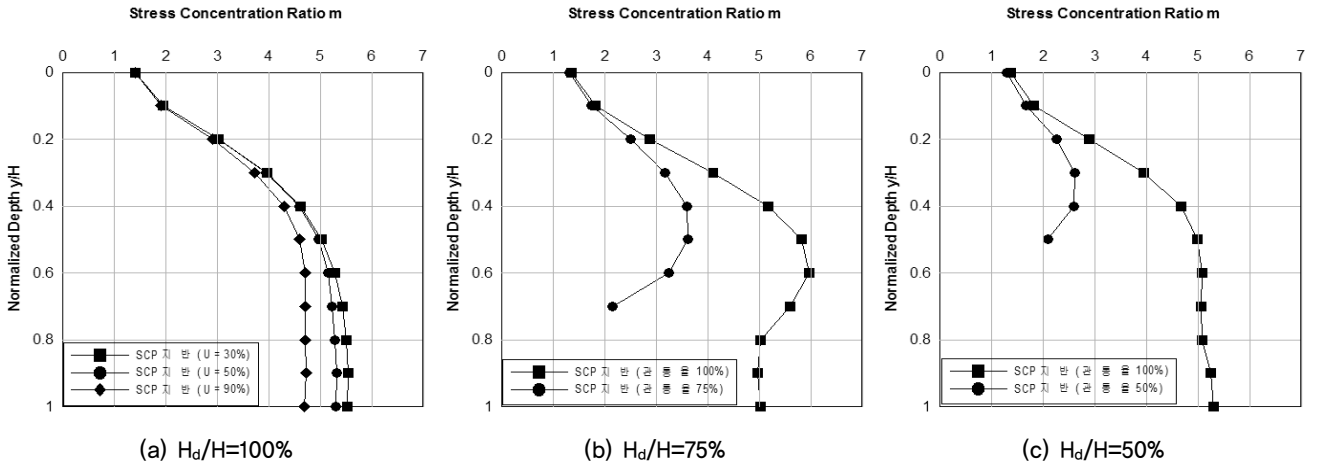


그림 10. 심도에 따른 응력분담비 분포(압밀도가 90%인 경우)

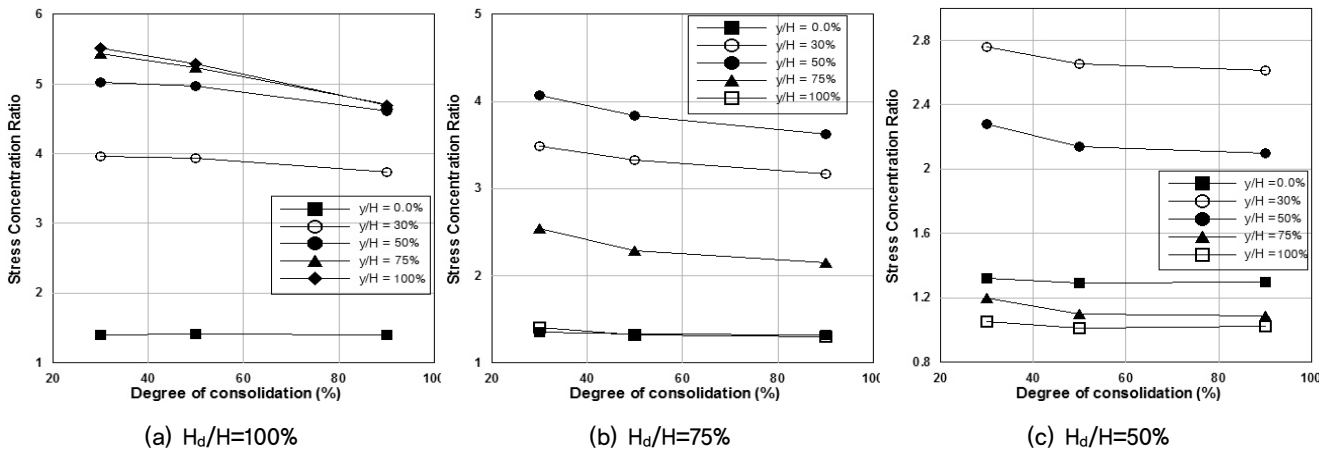


그림 11. 심도 및 압밀도에 따른 응력분담비 변화

보이고 있다. 상단부에서 부터 급격한 응력분담비 변화는 상단부의 배수면 때문에 주변점토의 압밀이 순간적으로 종료되며 이로 인한 점토의 강도가 증가되었기 때문으로 생각된다. 또한 그림 10(b)와 (c)는 관통율( $H_d/H$ )이 75% 및 50%인 지반의 경우로서 지표로부터  $y/H=0.4$  부근과  $y/H=0.3$  부근에서 최대응력분담비를 보이며 그 형태는 포물선 모양을 하고 있다. 이는 4.2절의 압밀도에 따른 유효응력 특성결과와 동일한 결과를 보였다.

그림 11은 관통율에 따라서 압밀도에 따른 응력분담비를 심도별로 분석한 것이다. 그림 11(a)에서와 같이 상부에서는 압밀도에 관계없이 거의 일정한 양상을 보이고 있으며 심도가 깊어질수록 응력분담비가 증가하고, 압밀도가 증가함에 따라 응력분담비가 감소한다. 또한 그림 11(b)와 (c)에서와 같이 압밀도의 증가와 더불어 응력분담비가 감소해가고, 미관통SCP지반 아래의 복합지반에서는 응력분담비가 1에 가까워진다는 것을 알 수 있다. 이는 응력집중효과가 미관통SCP지반의 저부에서는 없어진다고

생각되며, 미관통 SCP지반의 하부부근에서 주변점토나 관통SCP지반의 응력으로 전환된다고 생각된다. 또한  $H_d/H=75\%$ 의 SCP지반이 전반적으로  $H_d/H=50\%$ 인 SCP지반의 응력분담비보다 다소 크게 발생되고 있다.

이와 같이 응력분담비는 압밀도가 증가함에 따라 감소한다는 것을 알 수 있고, 상부에서는 관통율 및 압밀도에 관계없이 거의 일정한 값을 보이지만, 관통SCP지반에서는 심도가 증가함에 따라 응력분담비도 증가하며, 압밀도가 증가하면서 관통된 SCP지반의 응력분담비도 점점 감소해 간다. 그러나 미관통부의 SCP지반의 경우는 압밀도에 관계없이 거의 일정한 양상을 보이고, 미관통SCP지반의 하부에서의 응력분담비가 1에 가까워진다는 것을 알 수 있다.

## 5. 치환율 변화에 따른 해석결과 분석

본 절은 저치환율을 갖는 관통 및 미관통 SCP개량지반

에서 압밀도가 90%, 상재하중  $1t/m^2$ 일 경우로 국한하여 치환율 변화에 따른 거동특성을 비교 분석하였으며 각 치환율별 침하량 값은 증분비로 도시한 것이다.

### 5.1 치환율에 따른 침하량 특성

그림 12는 SCP지반의 침하량을 치환율에 따라 증분비로 모델지반 상부에서 비교 분석한 것이다. 그림에서와 같이 미관통SCP지반 및 개량점토지반 모두 관통율과 치환율이 증가함에 따라서 침하량이 감소하고 있다. 이는 점토지반과 모래말뚝 지반에 작용하는 응력분담비가 관통율 및 치환율이 증가함에 따라 달라지기 때문이라고 판단된다.

표 6은 그림 12(b)의 개량점토지반의 침하량을 관통율이 100%인 경우를 기준으로 상대침하율로 나타낸 것이며 관통율이 75%인 경우는 12.8~34.1%, 관통율이 50%인 경우는 33.3~51.1% 정도 더 큰 침하가 발생됨을 알 수 있다. 표에서와 같이 전반적으로 치환율과 관통율이 증가함에 따라 침하량은 감소하고 있으며 치환율보다 관통율이 침하량에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

표 6. 개량점토지반의 상대침하율

치환율(%)	상대침하율(%)	
	$H_d/H=75(\%)$	$H_d/H=50(\%)$
15	34.1	51.1
30	20.3	40.2
45	12.8	33.3

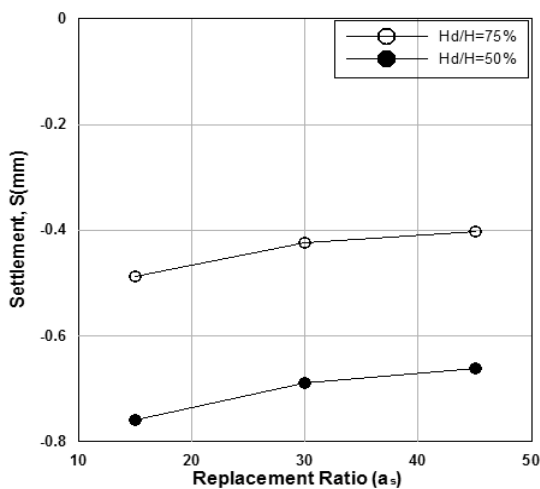
### 5.2 치환율에 따른 응력분담비 특성

표 7 및 그림 13은 관통율이 다른 복합지반 중 미관통 SCP지반에 대하여 치환율에 따른 응력분담비를 심도별로 분석한 것이다. 그림 13(a)에서와 같이 응력분담비는 상부 지표면에서 치환율에 따라서 큰 변화는 없지만 하부로 갈수록 치환율이 증가함에 따라서 응력분담비가 더 감소해 가는 양상을 보였다. 또한 그림 13(b)와 (c)의 미관통 SCP지반의 경우는 미관통 SCP지반의 중앙부근( $y/H=50\%$ )에서 응력분담비의 최대값을 나타내고 있다. 표 7에 의하면 응력분담비는  $H_d/H=100\%$ 인 경우 5.6~1.3,  $H_d/H=75\%$ 인 경우는 1.2~4.1,  $H_d/H=50\%$ 인 경우는 1.0~2.8의 범위에 있다. 日本土質工學會(1988)에 의하면 치환율이 0~40%일 경우 3을 추천하고 있고, 이정상 등(2001)에 의하면 수치해석 결과에 의하면 응력분담비는 1.1~3.5 범위에 있는 것으로 연구된바 있으며 박용원 등(2000)은 원형모형토조 실험을 통해 치환율에 따라 응력분담비는 7.7~1.0까지 변화됨을 연구하였으며 본 연구에서도 다소 차이는 있지만 이러한 연구결과와 유사한 거동을 보였다.

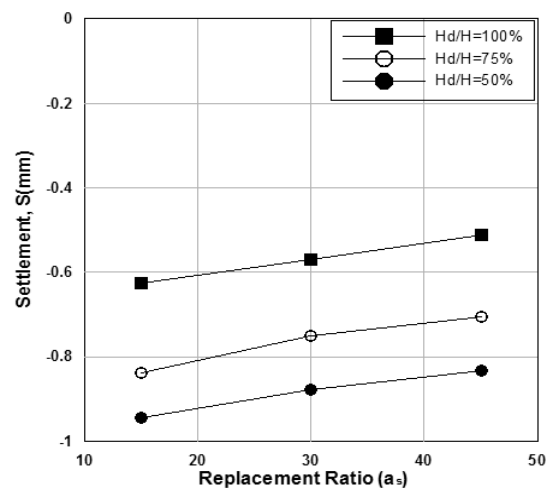
또한 응력분담비의 크기는 심도에 따라서 차이는 있지만 전반적으로 관통SCP지반, 관통율 75%인 SCP지반, 관통율 50%인 SCP지반 순으로 크게 발생되고 있다.

## 6. 결론

본 연구는 경제적이고 효과적인 SCP 타설방법을 제안하기 위해 미관통 SCP 복합지반의 압밀해석을 연구한 것



(a) 미관통 SCP지반



(b) 개량점토지반

그림 12. 치환율에 따른 침하량 비교



표 7. 응력분담비(m) 해석결과

관통율 및 치환율		관통율( $H_d/H$ , %)		
		100	75	50
심도( $y/H$ , %)	치환율( $a_s$ , %)	응력분담비(m)	응력분담비(m)	응력분담비(m)
0	15	1.5	1.4	1.3
	30	1.4	1.3	1.3
	45	1.3	1.2	1.2
30	15	4.2	3.5	2.8
	30	3.7	3.2	2.6
	45	3.4	3.1	2.5
50	15	5.4	4.1	2.2
	30	4.6	3.6	2.1
	45	4.1	3.5	1.9
70	15	5.6	2.4	1.1
	30	4.7	2.1	1.1
	45	4.1	1.9	1.1
100	15	5.6	1.3	1.1
	30	4.7	1.3	1.0
	45	4.1	1.3	1.1

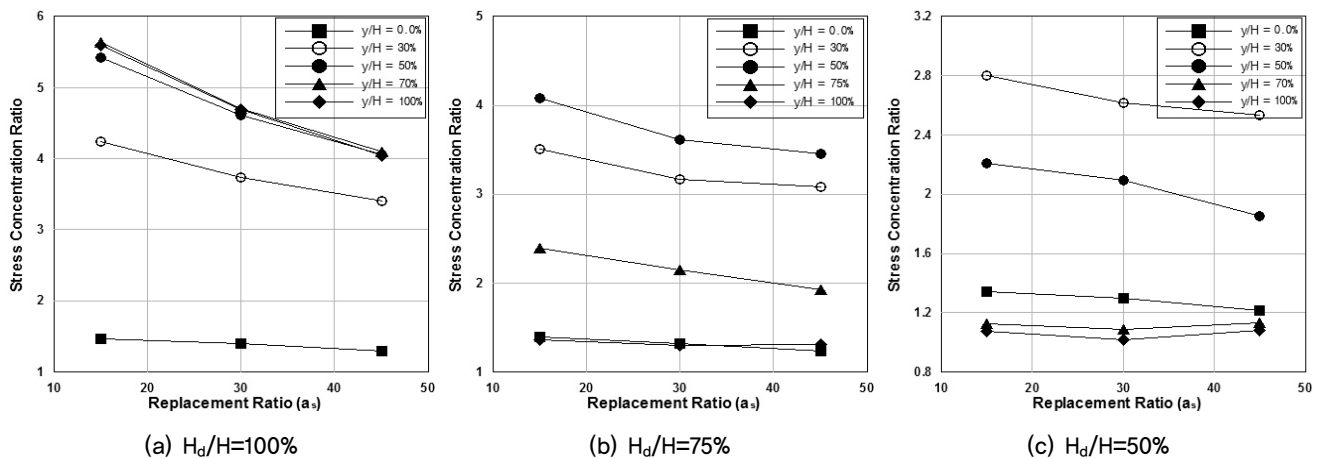


그림 13. SCP지반에 대한 심도에 따른 응력분담비 변화

으로 이를 위해 관통SCP와 미관통SCP를 교호로 타설하는 개량방법에 착안하여 FEM해석을 통하여 침하량, 유효응력, 응력분담비의 특성을 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 미관통 SCP를 포함하는 복합지반의 침하저감효과는 미관통SCP지반의 관통율이 줄어들수록 감소한다. 이 현상은 주로 관통율 감소로 인한 미개량지반에서의 침하증가에 기인하고 있다.
- (2) 미관통 SCP의 유효응력은 압밀도의 증가와 함께 감소하고 미관통부를 포함한 복합지반 중 관통 SCP에서는 상단부보다 하단부의 응력이 크게 발생하고 있다. 이

는 압밀이 진행됨에 따라서 미관통 SCP를 포함한 복합지반의 하부에서 응력 재분배가 왕성하게 이루어지기 때문으로 판단된다.

- (3) 미관통SCP의 하단부에서는 응력집중효과는 발휘되지 않았으며 응력분담비는 압밀도에 관계없이 거의 일정한 양상을 보이며 관통율이 클수록 더 크게 발생하였다.
- (4) 관통 SCP지반과 가장 유사한 양상을 보이는 경우는 치환율이 30%정도인 경우 중 관통율이 75%인 경우로 해석되었다.

본 연구는 미관통 SCP지반에 대한 모형지반의 수치해

석 연구로서 향후 압밀도, 상재하중 및 치환율 등 다양한 조건이 변할 경우에 대한 추가적인 수치해석 및 1-G상태의 모형실험과 원심모형실험을 통한 비교분석 연구가 필요하다.

## 감사의 글

이 논문은 2012학년도 대진대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

## 참고문헌

- 김재권, 홍의준, 김수일, 정상섭 (2002), “연약지반에 타입된 모래다짐말뚝의 하중-침하특성”, *대한토목학회논문집*, 제22권, 제2-C호, pp.423-432.
- 김영남, 채영수, 이강일 (2004), “관통 및 미관통 SCP 개량지반의 압밀거동 비교 연구”, *한국지반공학학회 봄학술발표회 논문집*, pp.706-713.
- 박용원, 김병일, 윤길림, 이상익, 문대중, 권오순 (2000), “모래다짐말뚝(SCP)의 치환율 변화에 따른 거동특성 연구”, *한국지반공학학회논문집*, 제16권, 제4호, pp.117-128.
- 유승경 (2003), “저치환율 SCP에 의한 복합지반의 압밀 과정중에 발생하는 응력분담거동과 그 메커니즘”, *한국지반공학학회논문집*, 제19권, 제5호, pp.301-310.
- 이정상, 정성래, 천병식 (2011), “연약지반에 적용된 모래다짐말뚝의 거동특성에 관한 수치해석 연구”, *한국지반환경공학학회논문집*, 제12권, 제8호, pp.33-38.
- 정종범, 이강일, 강권수, 박병기 (1999), “미관통과 관통 SCP지반에 대한 압밀 거동의 실내모형실험”, *한국지반공학학회논문집*, 제15권, 제3호, pp.3-16.
- 포항종합제철주식회사 (1990), *광양제철소 연약지반처리공사 침하안정관리 종합보고서*, pp.11-452.
- 해양수산부 (1999), *대수심 방파제 및 연약지반 관련 기술(II)*, 한국해양연구소, pp.5-144.
- 柳生忠言 (1989), “Sand Compaction Pileによつて改良された粘土地盤上の港灣構造物の舉動に關する研究”, pp.4-38.
- 松尾稔, 稻田直治, 寺材昌忠 (1968), “複合地盤の支持力に關する研究 (その 1)”, *土と基礎*, Vol.16, No.20, pp.11-19.
- 平林岳樹 (2002), “未貫通SCPを含む複合地盤の壓密沈下豫測法關する研究”, *廣島大學大學院碩士學位論文*, pp.1-95.
- 日本土質工學會 (1988), *軟弱地盤對策工法, 調査設計から施工まで*, pp.127-128.
- Han, J. and Ye, S. L. (2002), “A Theoretical Solution for Consolidation rates of Stone Column-reinforced Foundations Accounting for Smear and Well Resistance Effect”, *The International Journal of Geomechanics*, Vol.2, pp.135-151.
- Jung (1998), *Study on Consolidation Behavior of Clay Ground Improved by the Partly Penetrated Sand Compaction Piles*, Ph.D Thesis, Hiroshima University, Japan, pp.16-151.
- Oda, K., Matsui, T. and You, S. K. (2001), “Model Test and Numerical Simulation on Consolidation Behavior of Clay Ground Improved by SCP with Low Replacement Area Ratio”, *International Symposium on Recent Development of Ground Improvement*, pp.9-12.

(논문접수일 2012. 5. 18, 심사완료일 2012. 6. 15)