

SCP

A Study on the Consolidation Behavior of Cohesive Soils Improved by Penetrated and Partly Penetrated Sand Compaction Piles

¹⁾, Young-Nam Kim, ²⁾, Young-Su Chae, ³⁾, Kang-II Lee

- ¹⁾ () , Director, Dong-Shin Engineering Consultants Co., LTD
²⁾ , Professor, Dept. of Civil Engineering, Suwon University
³⁾ , Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University

SYNOPSIS : This paper introduced an alternative method called USCP (Unpenetrated Sand Compaction Pile). In USCP, the toe of the sand pile does not reach to the lower supporting layer. Hence it is possible to reduce the amount of sand required. However, the degree of improvement could not be the same as SCP. Effective soil improvement, nevertheless, might be possible by combining both methods. In this paper, an improved method that cross over both SCP and USCP was discussed. And in order to verify applicability to a clay layer, consolidation behaviors with different conditions were analyzed and compared using FEM(Finite Element Method) based on the elasto-viscosity theory.

From the results, it is concluded for the characteristic of settlement of USCP that the lower degree of replacement and the smaller ratio of penetration(H_d/H), the larger is the settlement of the lower part of the clay layer comparing to the layer with no improvement. It is also concluded that the ratios of allotment of stress (m) calculated from the final settlements with 30% of degree of replacement are 1.8~3.3 for $H_d/H=100\%$, 1.8~4.0 for $H_d/H=75\%$, and 1.8~3.8 for $H_d/H=50\%$. Besides, the ratio of allotment of stress decreased as the degree of replacement decreased.

Key words : sand compaction pile, consolidation behavior, unpenetrated sand compaction pile, finite element method, the ratio of allotment of stress

1. 서 론

산업의 성장과 더불어 기능상 연안해에 위치해야 하는 각종 산업시설의 부지확보 차원에서 우리나라에서는 주로 서남해안을 중심으로 해안 및 연안부의 평야부가 발달해 왔다. 그러나 이와 같은 평야부의 많은 부분은 연약한 충적토가 퇴적되고 안전한 구조물을 지지할 수 있는 지반은 그리 많지 않다. 이와 같은 지리적인 배경뿐만 아니라 급격한 경제성장과 맞물려 연약지반 개량공법 중 하나인 모래다짐말뚝(sand compaction pile, 이하 SCP) 공법은 지반개량의 필요불가결한 시공법이 되고 있다. 그러나 SCP공법은 시공에 수반된 대량의 모래를 사용하는 것 때문에 근년의 모래부족의 영향을 크게 받고, 종래방식에 의한 시공이 갈수록 어렵게 되고 있다. 또한 건설비용 축소에 따른 SCP공법은 그의 설계·시공의 합리화가 절실히 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 SCP공법의 경제적 또는 효과적인 타설방법 중 하나로 미관통 SCP와 관통 SCP를 상호교차 하면서 타설하는 개량형식에 착안하여 점성토 지반에 대하여 그 적용성을 연구하였다.

본 논문에서 다루는 미관통 SCP공법은 모래말뚝을 하부지지층까지 도달시키지 않고 타설하는 것이기

때문에 미관통부의 모래의 사용량을 절약하는 것이 가능하다. 그리고 미관통에 의한 것으로부터 그 개량효과는 감소한다고 추정되지만, 종래의 관통 SCP공법과 병용하는 것으로 효율적인 지반개량이 가능하다고 생각된다. 그러나 미관통 SCP만에 의한 개량지반에서는 미관통부의 연약점토 지반내에서 미개량층이 형성되어 잔류침하의 영향이 염려된다. 이 점을 개선하기 위하여 본 연구에서는 미관통 SCP와 관통SCP를 상호 교차하면서 타설하는 개량형식에 착안하여 SCP지반의 압밀거동 비교연구를 탄·점소성 유한요소법을 통하여 조사하였다.

2. 미관통 SCP공법에 대한 고찰

2.1 종래의 SCP공법과의 차이

미관통 SCP공법은 개량 대상지반인 연약점토층 밑에 존재하는 지지층까지 모래말뚝을 관통시키지 않고 미관통 상태 그대로 SCP를 지반중에 조성하는 공법이다. 또한 미관통 SCP를 조성하는 형식은 무수히 존재한다(그림 1참조). 그러나 이 공법에 의한 개량효과는 아직 상세히 해명되어 있지 않고 기술자의 경험적인 예측에 의존하여 시공되고 있는 것이 현실이다. 본 공법이 적용되는 이유로는 시공기계의 시공가능심도의 제약성, 경제적 제약, 하부 모래자갈층에서 SCP로 지하수의 유입방지, SCP로부터 지하수의 오염물질 유입방지 등을 들 수 있다.(平林岳樹, 2001)

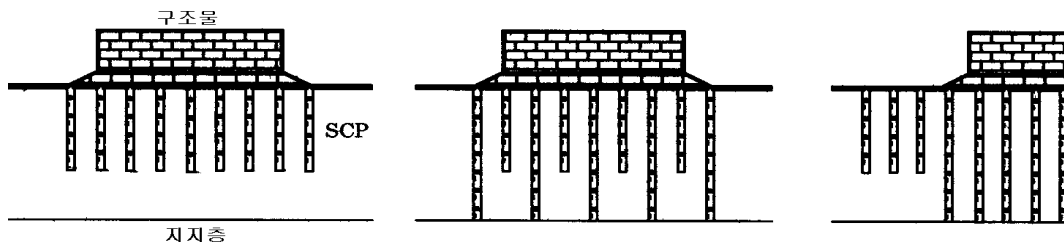


그림 1. 미관통 SCP의 적용 예

2.2 미관통 SCP공법의 실적

미관통 SCP에 관한 시공실적이나 연구 발표 등 최근 25년간 일본의 지반공학회의 연구보고서에서 발표된 숫자를 SCP의 관통율별로 분리해서 정리한 것이 표 1이다. 이 표를 보면 미관통 SCP공법이 상당수를 점하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 미관통 SCP에 의한 개량지반의 압밀침하 시스템은 대단히 복잡하고 그 해명을 위해서는 향후 지속적인 데이터의 집적 및 연구가 필요하다.

표 1. 최근 25년간 일본의 SCP의 관통율 추이

연도 \ 관통율	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)

3. SCP 지반에 대한 유한요소 모델링

3.1 해석모델링 및 해석조건

본 연구에서 사용한 수치해석프로그램은 AFIMEX에 내장되어 있는 압밀 전용 해석솔버인 DACSAR(Deformation Analysis Considering Stress Anisotropy and Reorientation)를 사용하였으며 점성토에 적용한 구성식은 세키쿠치-오오타(關口-太田)모델이다. 본 연구에서 대상으로 하는 미관통 SCP와 관통SCP에 대한 유한요소 모델링은 그림 2와 같이 굵은 선의 구조가 반복되어 배치되도록 하였으며 그림 속의 굵은 선의 요소단면을 확대하여 모형지반의 치환율로 SCP직경을 설정하였다. 본 연구에서 적용한 유한요소 메쉬 및 모델링에 대한 경계조건과 배수조건은 그림 3과 같고 해석조건은 표 2와 같으며 모래의 상대밀도는 70%, 점토의 목표압밀도는 50%이며 평면변형을 조건으로 탄·점소성 해석을 수행하였다.

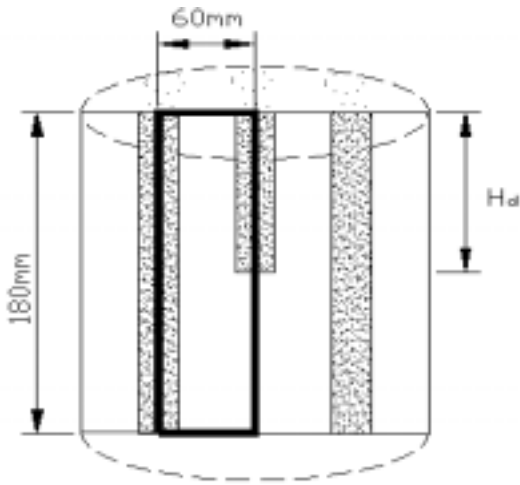


그림 2. 해석모델지반

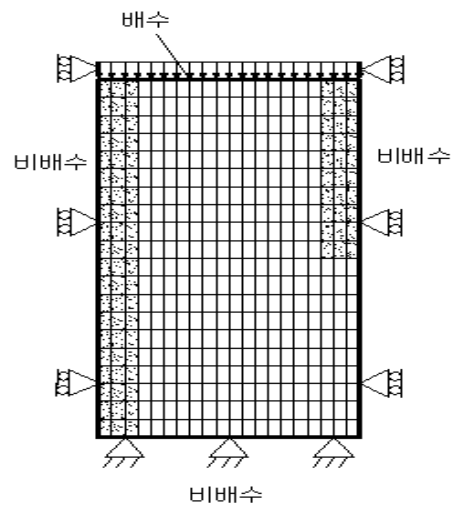


그림 3. 경계조건 및 배수조건

표 2. 해석조건

치환율(a_s)	작용하중(t/m^2)	관통율(H_d/H)
30	1.0	50
		75
		100
70	1.0	50
		75
		100
무처리	1.0	-

3.2 해석에 적용한 매개변수

본 연구에 적용된 토질매개변수는 남해안 OO지역의 SCP개량 점성토 지반의 토질특성을 대상으로 하였으며 매개변수는 표 3 및 표 4와 같다.

표 3. 해석에 적용된 물성값(모래지반)

$\lambda(t/m^2)$	$M(t/m^2)$	$\sigma_{vi}(t/m^2)$	K_i	$e(\lambda\kappa)$
1786.07	1190.71	6.36	0.63	0

여기서,

$$\lambda : \text{라메의 정수}, \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$M : \text{라메의 정수}, M = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

K_i : 토압계수

$e(\lambda\kappa)$: $\ln(\kappa)$ 에 대한 e 의 경사

σ_{vi} : 유효상재하중

표 4. 해석에 적용된 물성값(점토지반)

D	Λ	M	ν'	$\sigma_{vo}(t/m^2)$
0.0776	0.5703	0.9980	0.3639	3.07

$k_x(m/day)$	$k_y(m/day)$	K_o	$\sigma_{vi}(t/m^2)$	K_i
8.4672×10^{-5}	8.4672×10^{-5}	0.572	3.07	0.572

α	ν_o	λ	e_o	$e(\lambda\kappa)$
0.006789	0.0064047	0.477	2.516	0

여기서,

D : 다일레이턴시계수

Λ : 비가역비

M : 한계응력비

ν' : 유효포아송비

α : 2차압밀계수

ν_o : 초기체적변형율속도

λ : 압밀지수

4. 수치해석 결과

4.1 침하특성

그림 4는 관통SCP개량지반의 치환율의 변화(30%, 70%)에 따른 시간-침하곡선을 비교 분석한 것이다. 본 그림에서 침하량 산정 지점은 모형지반의 중앙($y/H=0.5$) 지점을 선택하였으며 그림 4(a),(b)에 서와 같이 침하량의 크기는 무처리지반, 개량점토지반, SCP지반 순으로 나타났지만 무처리지반에 비하여 SCP로 개량된 점토지반의 침하량이 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 치환율에 따른 SCP지반 및 개량점토지반의 침하량은 치환율이 커질수록 침하량은 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 동일한 하중에 대하여 치환율이 증가함에 따라서 점토지반과 모래말뚝 지반사이에 작용하는 응력분담 비가 서로서로 분담되는 양이 다르기 때문이다. 치환율이 증가함에 따라 모래말뚝-지반의 침하차가 감소하는 이유는 치환율이 증가하게 되면 상대적으로 점토지반의 면적이 감소하므로 치환율이 작을 때에 비하여 점토지반에서의 전단변형이 감소하기 때문이다.

미관통($H_d/H=50\%$)SCP는 점토지반을 SCP로 상호 교차하면서 부분적으로 점토지반을 미개량(미관통) 상태로 두는 경우를 말한다. 그림 5(a),(b)는 SCP개량지반에 대하여 미관통 상태에서 관통율($H_d/H=50\%$)이 50%인 경우 중에서 치환율이 30%, 70%인 경우에 대한 시간-침하곡선을 분석한 것이

다. 침하분석 지점은 모형지반의 중앙지점($y/H=0.5$)을 선택하였으며 분석대상은 SCP지반, 개량부 점토지반, 관통율이 50%인 SCP와 점토지반의 경계부인 하단 점토지반을 각각 대상으로 하였다. 관통율이 100%인 SCP 지반에 대한 침하특성은 치환율의 증가와 더불어 침하량이 약간 감소하지만 관통 SCP의 침하와 거의 비슷한 특성을 보이고 있다. 또한 개량점토 지반도 치환율이 증가함에 따라서 침하량이 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 관통율이 50%인 미관통 SCP지반의 하단부 점토지반의 침하량은 SCP지반 및 개량 점토지반에 비하여 상당히 큰 침하가 발생하였다. 이는 관통율이 50%인 미관통 SCP부분에 하중이 재하될 경우 SCP상부에 하중이 집중되어 점토지반에 응력이 크게 전달되어 초기에 침하가 무처리 점토지반보다 더 많이 발생되지만 반대로 상부의 50% SCP관통부의 모래말뚝 때문에 배수가 빠르게 진행되고 있음을 알 수 있다.

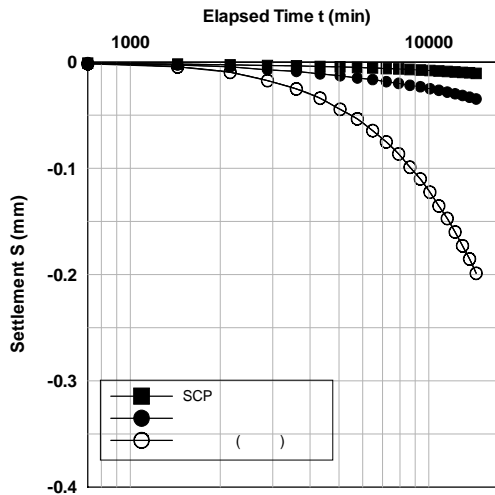


그림 4(a) 관통SCP의 시간-침하곡선 ($H_d/H=100\%$, $a_s=30\%$)

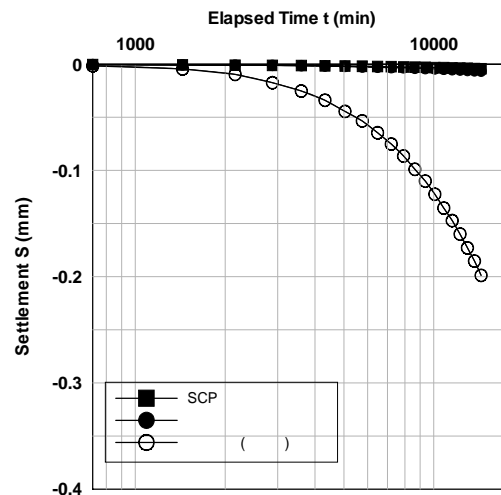


그림 4(b) 관통SCP의 시간-침하곡선 ($H_d/H=100\%$, $a_s=70\%$)

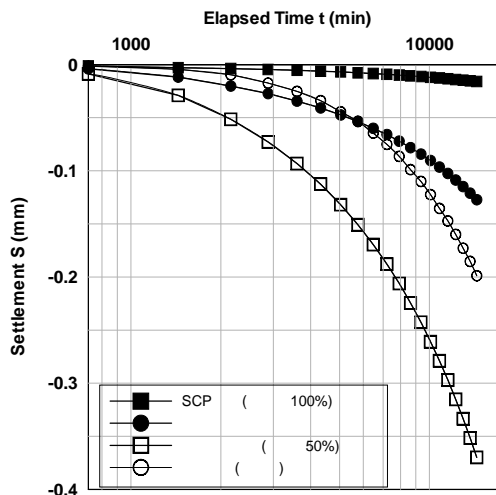


그림 5(a) 미관통SCP의 시간-침하곡선 ($H_d/H=50\%$, $a_s=30\%$)

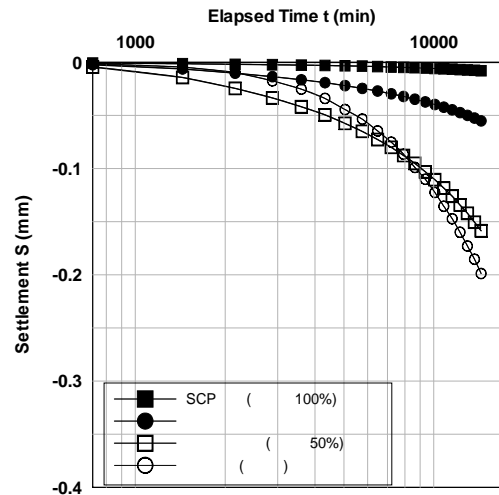


그림 5(b) 미관통SCP의 시간-침하곡선 ($H_d/H=50\%$, $a_s=70\%$)

4.2 전응력 특성

그림 6은 관통SCP지반중 치환율에 따른 개량점토지반 및 SCP지반의 전응력을 심도별로 그 특성변

화를 분석한 것이다. 개량점토지반의 경우는 치환율의 증가와 더불어 전응력이 약간 감소해 가지만 그 변화량은 크지 않다. 그러나 SCP지반의 경우는 그림에서 보는 바와 같이 치환율의 증가와 함께 전응력이 점점 감소해가며 고치환율에 비하여 저치환율에서 전응력이 크게 발생되고 있다. 또한 심도별로는 개량점토지반에서는 상부지표면에서 SCP지반에서는 하부지반에서 최대 전응력이 발생되지만 최소 전응력은 그와 반대의 위치에서 발생되고 있다.

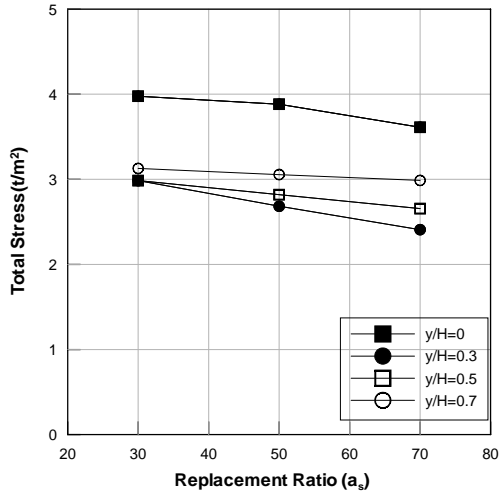


그림 6(a) 관통SCP 지반중 개량점토 지반의 전응력 비교

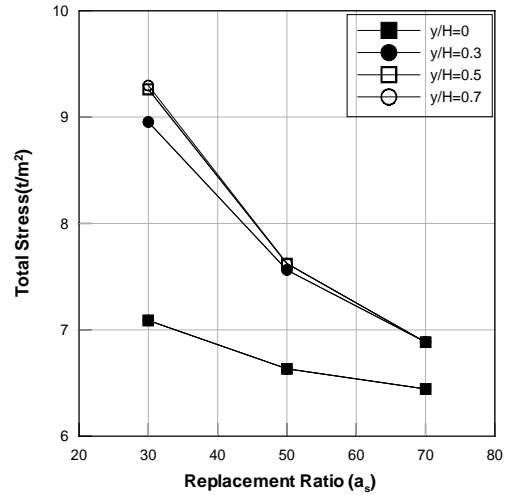


그림 6(b) 관통SCP 지반중 SCP지반의 전응력 비교

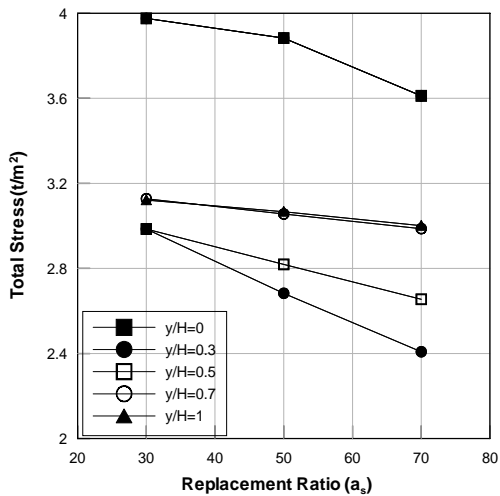


그림 7(a) 미관통 SCP지반중 개량점토 지반의 전응력 비교($H_d/H=50\%$)

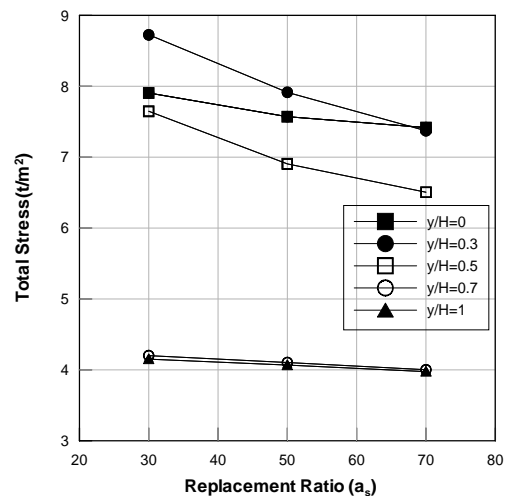


그림 7(b) 미관통 SCP지반중 관통율이 50%인 SCP지반의 전응력 비교($H_d/H=50\%$)

그림 7(a)는 치환율에 따른 미관통 복합지반의 개량점토지반에 대한 전응력특성을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 치환율이 증가함에 따라서 관통SCP의 전응력 특성과는 달리 전응력이 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 심도별 전응력 변화는 상부지표면에서 최대가 발생되지만 최소는 $y/H=0.3\sim 0.5$ 범위에서 나타나고 있다. 그림 7(b)는 관통율이 50%인 SCP지반에 대한 전응력 특성을 나타낸 것이다. 치환율이 증가됨에 따라서 전응력이 대부분 감소한다. 본 해석의 경우는 그림에서와 같이 SCP지반과 점토지반(미개량부)이 함께 공존하기 때문에 관통부와 미관통부의 전응력차가 명확히 구분되어 나타

나고 있다. 미관통 SCP의 전응력 특성을 종합해보면 어느 해석의 경우든지 모두 치환율의 증가와 더불어 전응력이 감소해 가지만 관통SCP 보다는 미관통 SCP지반에서의 전응력 변화량의 폭이 더 작게 감소해감을 알 수 있었다.

4.3 응력분담비 특성

수치해석 결과 분석시 응력분담비는 점토부분의 응력과 모래다짐말뚝 부분의 응력을 각각 평균하여 산정 하였다. 그림 8은 관통SCP지반에 대하여 심도의 변화에 따른 응력분담비를 치환율(30%, 50%, 70%)에 따라서 분석한 것 이며, 그림 9는 응력분담비를 치환율에 따라 심도별(0, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0)로 정리한 것이다. 해석 결과를 보면 지표면에서는 치환율에 상관없이 거의 일정한 응력분담비를 보이지만 깊이가 증가할수록 응력분담비가 증가하다가 지표로부터 $y/H=0.3\sim 0.4$ 부근부터 거의 일정한 응력분담비를 보이고 있다. 또한 심도방향 $y/H=0.3$ 이하 부터는 치환율이 증가할수록 응력분담비는 감소하지만 지표면부근에서는 치환율에 관계없이 거의 일정한 패턴을 보이고 있다.

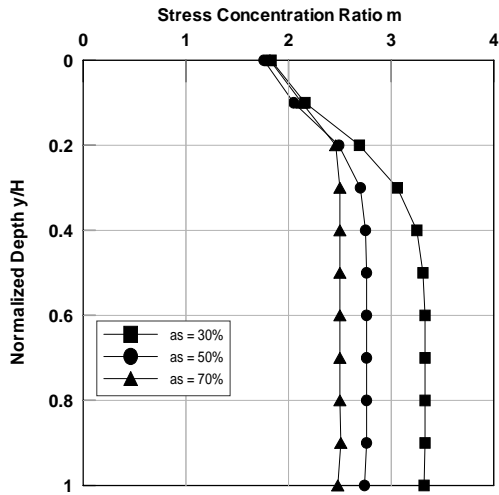


그림 8. 관통SCP에 대한 응력분담비 변화

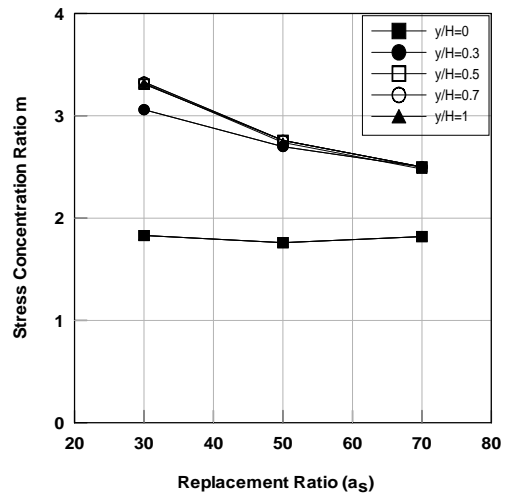


그림 9. 관통SCP에 대한 응력분담비 비교

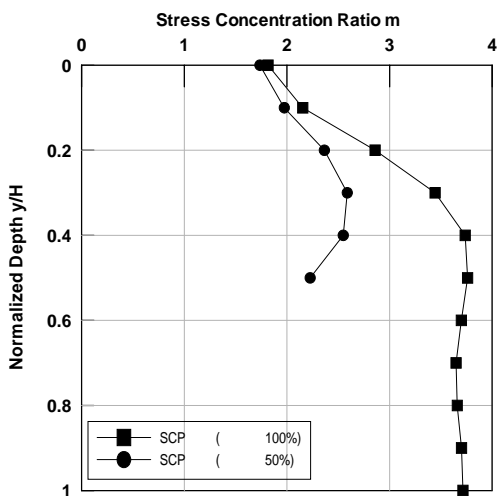


그림 10(a) 미관통 SCP에 대한 응력분담비 변화 ($H_d/H=50\%$, $a_s=30\%$)

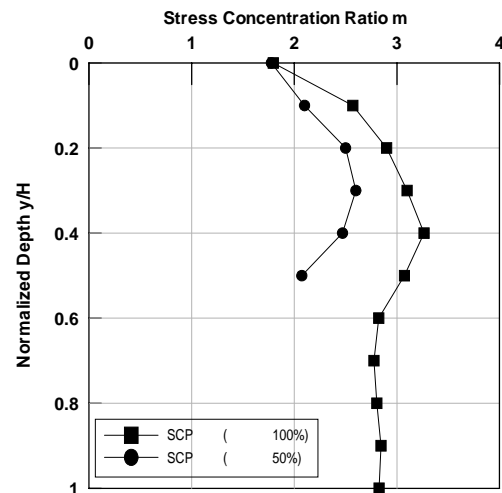


그림 10(b) 미관통 SCP에 대한 응력분담비 변화 ($H_d/H=50\%$, $a_s=70\%$)

그림 10(a),(b)은 관통율이 50%인 경우 치환율별로 깊이에 따른 응력분담비 변화를 나타낸 것이다. 해석결과 관통율이 50%인 SCP지반에서는 0.35부근에서 최대응력분담비가 발생하지만, 관통율이 100%인 SCP지반에서는 치환율에 관계없이 최대응력분담비는 약 $y/H=0.4$ 부근에서 발생된다. 전반적으로 관통율의 크기에 관계없이 응력분담비의 변화 양상은 지표부근에서는 두 경우 거의 일정하게 나타나고 있지만 심도의 증가와 더불어 관통율이 100%인 경우에 비해 관통율이 적을수록 응력분담비가 감소해 가는 경향을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구는 관통 및 미관통 SCP 개량지반의 압밀거동을 비교 연구한 것이다. 이의 연구를 위해 OO 지역의 토질특성 매개변수를 이용하여 지반을 모델링하고 SCP를 교호로 타설한 개량지반을 FEM해석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 미관통 SCP의 침하특성은 저치환율 일수록 관통율(H_d/H)이 적을수록 무처리지반에 비하여 하단 점토지반의 침하량이 더 크게 발생되고 있다. 이는 관통부의 SCP에 하중이 집중되어 하단점토지반에 그 응력이 전달되기 때문으로 판단된다.
2. 미관통 SCP의 전응력은 치환율의 증가와 함께 전반적으로 감소해 가며 미관통을 포함한 복합지반중 관통 SCP에서는 상단부보다 하단부의 응력이 크게 발생하고 있다. 이는 압밀이 진행됨에 따라서 미관통 SCP를 포함한 복합지반의 하부에서 응력재분배가 왕성하게 이루어 지기 때문으로 판단된다.
3. 미관통 SCP지반의 응력분담비는 치환율에 관계없이 거의 일정한 양상을 보이며 관통율이 50%인 SCP지반보다 75% SCP지반에서 더 크게 발생하고 있다.

참고문헌

1. 김재권외(2002), “연약지반에 타입된 모래다짐말뚝의 하중-침하특성”, 대한토목학회논문집, 제22권, 제4-C호, pp.423~432.
2. 해양수산부(1999), “대수심 방파제 및 연약지반 관련 기술(II)”, 한국해양연구소 p.5~56.
3. 福田和國, 二木正則, 室田傳文, 金亨柱(1991), “高置換と低置換を併用したSCP工法により改良れ地盤の特性” 第26回土質工學研究發表會, pp.1971~1972.
4. 平林岳樹(2001), “未貫通 SCPを含む複合地盤の壓密沈下予測法に関する研究”, 廣島大學大學院碩士卒業論文.
5. GIT(1983), “Design and construction of stone column”, Vol. I, ASCE, Atlanta.
6. Jung, J. B., Moriwaki, N., Sumioka, N., Kusakabe, O.(1998), “Consolidation behavior of composite ground improved by sand compaction piles”, International Conference Centrifuge 98 (IS-Tokyo 98).