

연약지반에 적용된 모래다짐말뚝의 거동특성에 관한 수치해석 연구

A Study on the Behavior of Sand Compaction Piles in Soft Ground

이 정 상¹⁾ · 정 성 래²⁾ · 천 병 식[†]

Lee, Jungsang · Chung, sungrae · Chun, Byungsik

ABSTRACT : Presently, domestic SCP method with low replacement ratio is required as alternative in order to overcome the profitability of the sand resource because of the deficiency phenomenon of the sand resource by the actual condition design and construction is made by SCP method with low replacement ratio more than 70% for the port construction in the safe side. Sand compaction pile(SCP) method has been mainly used to improve the properties of soft clay or loose sandy ground. In design of SCP at soft clay ground, it is very important to determine the stress concentration ratio of composite ground relevant to the area replacement ratio. In this study, 2-dimensional FEM analyses were carried out to evaluate the stress concentration ratio of composite ground depending upon the area replacement ratio. When the interpretation result replacement ratio was 30%, the stress assigned rate showed and as the replacement ratio was high, the stress assigned rate according to the sinkage showed the low stress assigned rate.

Keywords : Sand Compaction Piles(SCP), Replacement ratio, Stress concentration ratio, FEM analyses

요 지 : 현재 국내에서는 항만공사 등에서 안전측으로 70% 이상의 고치환율의 모래다짐말뚝(SCP)공법으로 설계 및 시공이 이루어지고 있는 실정이다. 그러나, 모래자원의 부족현상으로 인한 모래자원의 경제성을 극복하기 위하여 저치환율 모래다짐말뚝공법으로 대체가 요구되고 있는 실정이다. 모래다짐말뚝공법은 연약한 점성토 지반이나 사질토 지반을 개량하기 위하여 사용되고 있다. 점성토 지반의 SCP 설계 시에 가장 중요한 과제의 하나는 치환율에 따른 모래와 점토의 응력분담비를 결정하는 것이다. 본 연구에서는 모래다짐말뚝과 점성토로 이루어진 복합지반에서 치환율에 따라 응력분담비, 침하량을 파악하기 위하여 유한요소해석 프로그램을 사용하여 2차원 수치해석을 실시하였다. 해석결과, 치환율이 30%일때 응력분담비가 가장 크게 나타났고 침하량에 따른 응력분담비는 치환율이 높을수록 낮은 응력분담비를 보였다.

주요어 : 모래다짐말뚝(SCP), 치환율, 응력분담비, 수치해석

1. 서 론

우리나라는 경제성과 국토개발로 인하여 서남해안 연약지반의 활용이 증가하는 추세이며, 구조물의 중량화 및 대규모화에 따라 연약지반의 신속한 강도증가, 또는 시공기간의 단축 등을 위해 한층 더 강력한 개량공법이 요구되고 있다. 연약지반 개량공법 중 하나인 모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile, 이하 SCP)공법은 다수의 시공사례를 통해 개량효과가 충분히 입증되었고, 최근 시공기계의 발달로 깊은 심도까지 쉽게 시공될 수 있어 그 적용범위도 확대되고 있다. 모래다짐말뚝(SCP)공법은 느슨한 모래나 연약한 점성토 지반에 모래를 압입하여 비교적 지름이 큰 모래다짐말뚝을 다져 시공함으로써 느슨한 모래지반에서는 밀도 증대, 액상화 방지, 수평저항력 증가 등의 효과를 얻으며, 연약 점성토 지반에서는 지반 강도 및 지지력 증가, 측방변위 억제, 압밀 침하 저감 등을 목적으로 시공되는 지반개량공법이다(藤田圭

一, 1995). 즉, SCP를 타설하면 원지반과 SCP가 함께 거동하는 복합지반을 형성하여 복합강도를 가지게 되므로 지지력 증대, 침하저감, 측방유동방지 등을 기대할 수 있다.

현재 국내에서는 항만공사 등에서 안전측으로 70% 이상의 고치환율 SCP공법으로 설계 및 시공이 이루어지고 있는 실정으로 모래자원의 부족현상으로 인한 모래자원의 경제성을 극복하기 위하여 저치환율 SCP공법으로 대체가 요구되고 있다.

한편, 복합지반에 대한 연구는 村山朔郎(1957)이 처음으로 모래다짐말뚝에 의한 복합지반의 역학특성에 대하여 언급하였으며 말뚝 타설로 인한 점성토의 교란과 드레인 효과에 의한 강도 증가 및 지지력 특성에 대하여 제안하였다. 복합지반의 거동해석 및 설계를 위해서는 응력전이 특성, 치환율에 대한 응력분담비 등을 정확히 파악해야 한다. 그러나 현재 SCP 설계에서는 단지 경험에 의해 결정된 값들을 사용하고 있으므로 체계적인 연구가 필요하다. 국내에서는

1) 학생회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정

2) 정회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

† 정회원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

Shin 등(1991)은 제철소 건설 시 SCP공법의 타당성을 검증하기 위한 현장실험을 실시하여 SCP공법 적용 후 표준관입시험을 통하여 전단강도가 크게 증가함을 확인하였으며, 김병일 등(2000)은 수치해석을 통하여 치환율에 따른 응력분담비의 변화를 연구하였다. 김재권 등(2002)은 실내모형실험 통하여 치환율에 따라 응력분담비가 증가하는 것을 규명하였으며, 홍의준 등(2003)은 복합지반에 대한 3차원 수치해석을 통하여 치환율이 증가함에 따라 응력분담비가 증가하고 침하량은 감소하는 것을 발표하였다.

본 연구에서는 모래자원의 부족에 따른 경제성과 하중재하폭에 대한 개량폭의 적정범위 등을 규명하기 위하여 수치해석기법을 적용하여 SCP의 치환율에 따른 응력분담비를 비교 분석하고자 하였다. 모래말뚝 및 점토지반의 물성치는 남해안지역에서 일반적으로 설계에 사용하는 값을 사용하였다.

2. 모래다짐말뚝의 개요

2.1 SCP공법의 원리 및 특징

일반적으로 연약지반은 단순히 지반조건 뿐만 아니라 성토나 구조물의 종류, 규모, 지반조건들을 종합적으로 고려하여 상대적인 관점에서 판단해야 한다. 주로 점토나 실트와 같은 미세한 입자의 흙이나 간극이 큰 유기질토, 이탄, 느슨한 모래 등으로 이루어진 토층으로 구성되어 있으며, 지하수위가 높고 성토체나 구조물의 안정과 침하의 문제가 발생하는 지반을 의미한다(이정훈, 2007). 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, 모래다짐말뚝공법은 다짐과 보강 및 압밀배수를 기본원리로 하고 있다. SCP공법은 이러한 기본원리들을 포함하기 때문에 사질지반, 점성토지반, 유기질지반, 암쇄지반, 화산퇴적지반 등 거의 모든 지반에 적용 가능하며, 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 응력

분담에 의해 압밀시간을 단축함과 함께 압밀침하량을 감소시키는 역할을 한다.

2.2 치환율과 응력분담비

치환율(σ_s)이란 지반면적에 대한 모래다짐말뚝이 차지하는 부분의 면적비로 정의되고, 주로 모래다짐말뚝 타설 간격에 의해 결정된다. 성토 등 상부구조물이 비교적 경량인 경우에는 치환율(σ_s)이 20~40% 정도인 저치환율 모래다짐말뚝공법이 많이 사용된다. 모래다짐말뚝공법은 연약지반상에 모래다짐말뚝을 타설하여 원지반과 모래다짐말뚝의 복합강도 발현으로 지지력 증대, 침하 감소를 기대하는 공법이다(中山二郎 등, 1967). 복합지반의 강도는 모래다짐말뚝과 원지반의 응력분담비에 의존하나 모래다짐말뚝은 연약지반보다 상대적으로 강성이 크므로, 상재하중이 재하되는 경우 모래다짐말뚝 사이에 아칭현상이 발생하게 되어 변형이 작은 모래다짐말뚝이 더 큰 연직응력을 분담하게 된다. 식 (1)과 같이 모래말뚝과 원점토지반이 받는 응력의 비를 응력분담비(m)라 한다(村山朔郎 등, 1978).

$$m = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} \quad (1)$$

여기서, σ_s : 상재압에 의해 모래다짐말뚝에 발생하는 연직응력

σ_c : 상재압에 의해 원지반에 발생하는 연직응력

모래다짐말뚝이 연약한 점성토층에 다수 조성되어 이루어진 복합지반 위에 하중이 재하된 경우, 점성토와 압축 조성된 모래말뚝과는 그 물리적, 역학적 성질이 서로 다르기 때문에 각각 분담하는 응력이 다르며, 모래다짐이 점토지반보다 큰 응력을 분담하게 되는 것이다. 이 때문에 점성토에 발생하는 응력이 대폭 감소하게 되고, 지지력 증대, 침하감소 등의 효과로 연약지반의 개량이 가능하게 된다(村山朔郎, 1962). 복합지반의 기본 개념은 그림 1과 같이 지반위에

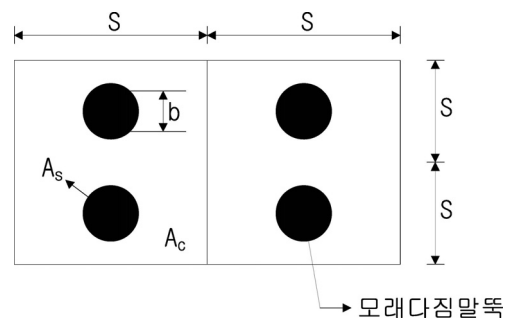


그림 1. 복합지반의 기본개념

평균응력 σ 이 재하되어 지반반력으로 말뚝에 σ_s 의 응력이 발생한다. 또한 각각의 면적 A_s, A_c 의 범위 내에서 응력이 일정하다고 하면 식 (2)와 같이 얻어진다.

$$\sigma A = \sigma_s A_s + \sigma_c A_c \quad (2)$$

($m = \sigma_s / \sigma_c$)를 이용하여 식 (2)를 변형하면 식 (3), (4)와 같은 관계를 얻을 수 있다. 식 (3)은 점토지반의 응력감소계수이고, 식 (4)는 모래지반의 응력증가계수이다.

$$\frac{\sigma_c}{\sigma} = \frac{A}{mA_s + A_c} = \frac{1}{(m-1)a_s + 1} = \mu_c \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_s}{\sigma} = \frac{mA}{mA_s + A_c} = \frac{1}{(m-1)a_s - 1} = \mu_s \quad (4)$$

여기서, a_s : 치환율(A_s/A)

μ_c : 응력감소계수

μ_s : 응력증가계수

A_s : 모래말뚝 면적

A_c : 점토지반 면적

m : 응력분담비

식 (2), (3), (4)를 조합하면 복합지반에 대한 기본적인 식 (5)가 얻어진다(Matsuo 등, 1967; Aboshi 등, 1979).

$$\mu_s a_s + \mu_c (1 - a_s) = 1 \quad (5)$$

한편, 하중이 가해지는 동안 복합지반에 전단응력과 압축응력이 작용하게 되고, 전단변형과 압밀변형에 의한 응력분담이 복합적으로 발생하게 된다. 연약층의 압밀이 진행됨에 응력분담비는 달라지며, 응력분담에 미치는 영향 인자가 불명확하기 때문에 그 값은 현장 경험에 의존하여 결정하고 있다. 따라서 표 1에서 보는 바와 같이 치환율과 응력분담비를 어떻게 결정하느냐에 따라 복합지반의 강도는 상당히

표 1. 치환율과 응력분담비(日本土質工學會, 1988)

치환율(%)	모래다짐말뚝의	응력분담비(m)
	내부마찰각(ϕ_s)	
0~0.4	30°	3
0.4~0.7	30°	2
0.7~	30°~35°	1

표 2. 점토의 물리적 특성

시험 재료	비 중 (Gs)	액성한계 (LL)	소성한계 (PL)	함수비 (w)	단위중량 (γ)	흙의 분류 (USCS)
점토	2.63	52.05%	36.50%	35.07%	13.0kN/m ³	MH

달라지므로 응력분담비의 정확한 산정은 복합지반강도 산정에 매우 중요하다.

3. 실내실험

수치해석 시 지반의 물성을 얻기 위해 단위중량, 함수비 시험, 비중시험, 입도시험, 액성한계시험, 소성한계시험에 대하여 총 6가지 시험을 실시하였다. 한국표준규격 시험법에 의거하여 시험을 수행하였고, 사용된 시료는 전라남도 순천현장에서 채취한 점토를 사용하였다. 표 2는 점토의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

사용된 점토의 단위중량은 13.0kN/m³, 함수비는 35.07%로 평이한 값을 나타내었고, 측정된 비중값은 2.63을 나타내었다.

액성한계 시험결과는 52.05%로 이는 전라남도 광양의 해성점토의 액성한계와 비슷한 양상을 보였으며, 소성한계는 36.50%로 소성이 큰 실트(MH)로 분류되었다.

4. 수치해석

4.1 수치해석 개요

최근 들어 컴퓨터 및 수치해석 기법의 발달로 종래의 이론해로 해결할 수 없었던 매우 복잡한 조건에 대한 해석이 가능하게 되었다. 또한 탄소성모델, 탄점소성 모델 등 진보된 지반구성모델의 개발과 함께 매우 복잡한 경계조건뿐만 아니라 지반의 비등방성, 비균질성, 비선형성, 불연속성 등의 재료특성, 그리고 복잡한 시공과정의 해석도 가능하게 되었다.

수치해석에서는 PLAXIS(ver.8.2)를 사용하였다. 본 연구는 연약지반을 대상으로 하기 때문에 압밀거동 평가와 연계해석이 가능한 수치해석 프로그램의 활용이 필수적이다. 이 프로그램은 한계상태 개념을 이용할 수 있도록 만들어져 있으며 2차원 평면변형률조건과 축대칭 조건에 대해서 배수, 비배수, 압밀문제를 해석할 수 있도록 되어 있다. 사용되는 구성방정식으로는 Linear Elastic, Mohr-Coulomb, Soft-Soil(Cam-Clay) Method, Hardening soil model, Soft-Soil creep model로 이루어져 있다.

4.2 해석조건 및 영역

수치해석에서 30cm, 폭 50cm 두께의 점토지반을 사용하였고, 요소의 경우 매우 조밀하게 생성하였다. 경계조건은 경우 좌우측은 수평방향에 대해서 구속하였고, 바닥면은 수평방향과 수직방향 모두에 대해 구속을 하였다. 치환율 20%~40%에 대해서 상재하중을 적용하여 침하량 및 응력분담비의 값을 결정하였다. 그림 2는 치환율별 모래다짐말뚝의 배치, 그림 3은 하중조건 및 경계조건을 나타낸 것이다.

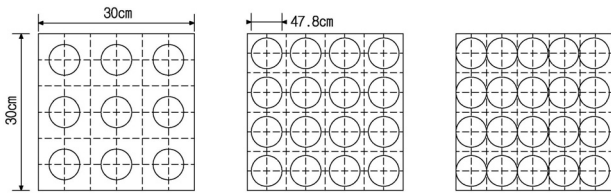


그림 2. 치환율별 모래다짐말뚝의 배치

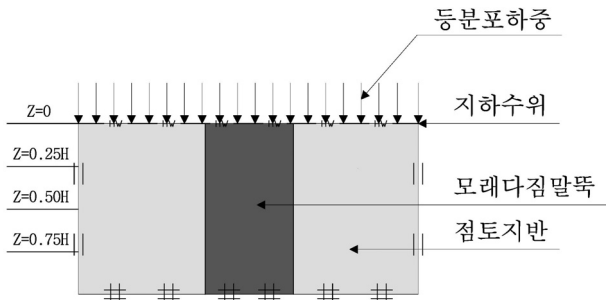


그림 3. 하중재하방식 및 경계조건

표 3. 수치해석에 사용된 물성치

구분	모델	단위중량	탄성계수	c	ϕ	ν	k
		(kN/m^3)	(kN/m^2)	(kN/m^2)	($^\circ$)	-	(cm/s)
점토	Modified Cam-Clay	13.0	$\lambda=0.18, \kappa=0.04, M=1, e=1.514$			0.4	5×10^{-10}
모래다짐말뚝	Mohr-Coulomb	17.4	3200	0	37	0.3	-

표 4. 응력분담비 결과 (10.0kN/m²)

깊이(Z/H)	치환율(%)	응력분담비(m)
Z=0	20	1.4
	30	1.7
	40	1.3
Z=0.25H	20	3.0
	30	3.5
	40	3.2
Z=0.5H	20	2.3
	30	2.7
	40	2.5
Z=0.75H	20	1.7
	30	2.2
	40	1.9

4.3 수치해석 모델링

점토지반 구성모델에 있어 점토지반의 거동을 잘 묘사할 수 있는 Modified Cam-Clay 모델을 적용하여 침하와 압밀에 관한 연약지반의 특성이 묘사되도록 하였다. 본 해석에 사용한 Modified Cam-Clay 모델은(Roscoe 등, 1968) Cam-Clay 이론을 수정하여 타원형의 항복곡선을 갖도록 제안한 모델이다.

수치해석에 사용된 모래다짐말뚝과 점토의 물성치는 실내 시험에서 얻은 결과를 바탕으로 산정하였으며, 표 3과 같다.

5. 수치해석 결과분석

표 4, 5는 모래말뚝 및 점토지반에서 상재하중(10.0kN/m², 20.0kN/m²)과 깊이(Z=0~Z=0.75H)에 대한 응력분담비를 산정한 것이다. 모래말뚝과 점토지반의 응력분담비는 상재하중 10.0kN/m²일 때 상재하중 20.0kN/m²인 경우보다 높게 나타났으며 큰 차이는 없었다. 또한 응력분담비는 치환율 20%일 때 약 1.1~3.0의 범위로 분포하였고, 치환율 30%에서는 1.3~3.5, 치환율 40%에서 1.2~3.2의 정도로 나타났으며 치환율 30%, 깊이 Z=0.25H인 경우에 가장 큰 응력분담비를 보였다. 치환율 30%에서는 아칭현상이 뚜렷하게 발생함으로 인하여 모래말뚝에 작용하는 응력이 커짐으로써 응력분담비가 크게 나타는 것으로 사료된다. 한편 SCP 상부 지반(Z=0.10~Z=0.25H)에 큰 응력집중이 발생하는데 이는

표 5. 응력분담비 결과 (20.0kN/m²)

깊이(Z/H)	치환율(%)	응력분담비(m)
Z=0	20	1.1
	30	1.3
	40	1.2
Z=0.25H	20	2.3
	30	2.6
	40	2.5
Z=0.5H	20	2.0
	30	2.7
	40	1.8
Z=0.75H	20	1.3
	30	1.7
	40	1.7

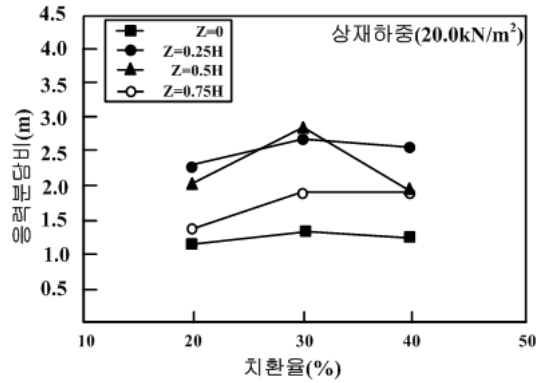
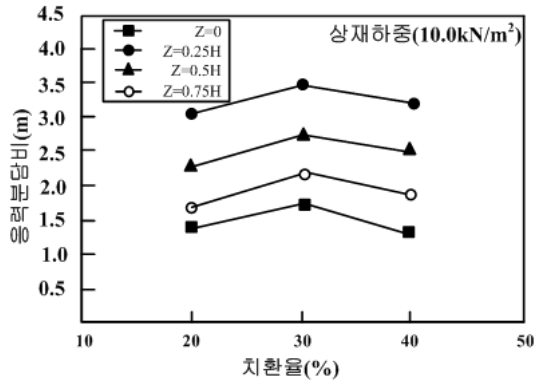


그림 4. 치환율에 따른 응력분담비 분석

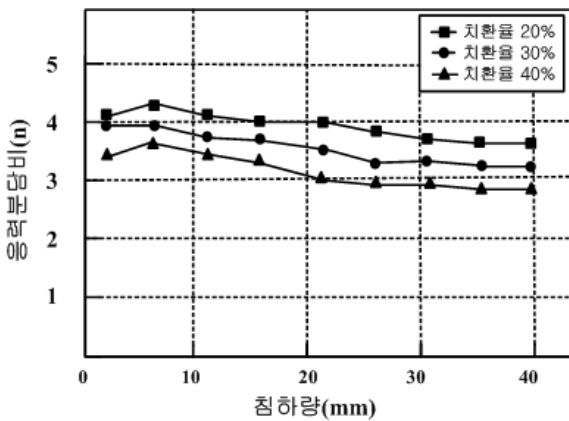


그림 5. 침하량에 따른 응력분담비 분석

상재하중의 작용에 의한 것이라고 사료된다.

그림 4에서 보는 바와 같이 치환율 20~40%의 경우 깊이 Z=0에서 Z=0.25H로 갈수록 응력분담비의 증가를 보이다가 Z=0.25H 이후 상재하중이 모래말뚝을 통하여 하부 깊은 지반까지 응력이 비교적 균등하게 전달되어 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 하중전이현상에 의해서 Z=0.25H 부근에서 응력분담비가 가장 크다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 침하량에 따른 응력분담비를 도시하였다. 치환율 40%일 때 약 2.8~3.6의 범위로 분포하였고, 치환율 30%에서는 약 2.2~2.9, 치환율 20%일 때 3.6~4.3의 범위로 분포하여 치환율이 높을수록 낮은 응력분담비를 보였다. 또한 침하량 5mm까지는 응력분담비가 증가하다가 침하량 5mm 이후에서는 응력분담비가 서서히 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 경향은 SCP 복합지반이 항복에 도달한 이후 응력의 일부가 아직 항복이 발생하지 않은 점토지반으로 전이되어 점토의 수직응력이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

즉, 모래말뚝과 점토지반의 부등침하가 유발되고 이와 같은 부등침하의 크기는 모래지반과 점토지반의 강성도 차이 및 상부 사석의 강성도 뿐만 아니라 응력분담비에 의존한다.

6. 결 론

연약한 점토위에 안정성을 확보하기 위하여 타설된 SCP 개량지반은 모래말뚝과 점토의 복합지반을 형성하므로 상재하중 작용 시 응력전이 거동특성을 나타낸다. 수치해석을 이용하여 치환율에 따른 응력분담비의, 침하량의 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 응력분담비는 치환율 20%일 때 약 1.1~3.0의 범위로 분포하였고, 치환율 30%에서는 1.3~3.5, 치환율 40%에서 1.2~3.2의 정도로 나타났으며 치환율 30%, 깊이 Z=0.25H인 경우에 가장 큰 응력분담비를 보였다.
- (2) 치환율 20~40%의 경우 깊이 Z=0에서 Z=0.25H로 갈수록 응력분담비의 증가를 보이다가 Z=0.25H 이후 상재하중이 모래말뚝을 통하여 하부 깊은 지반까지 응력이 비교적 균등하게 전달되어 서서히 감소한다.
- (3) 침하량에 따른 응력분담비는 치환율 40%일 때 약 2.8~3.6의 범위로 분포하였고, 치환율 30%에서는 약 2.2~2.9, 치환율 20%일 때 3.6~4.3의 범위로 분포하여 치환율이 높을수록 낮은 응력분담비를 보였다. 또한 침하량 5mm까지는 응력분담비가 증가하다가 침하량 5mm 이후에서는 응력분담비가 서서히 감소하는 경향을 보였다.
- (4) 모래다짐말뚝에 대한 복합지반의 적정치환율은 지반개량 목적에 따라 달라질 수 있으므로 치환율과 강도증가, 지지력 증가, 지반유동성 저감, 침하저감 효과 등을 고려하여 결정하여야 한다.

이 연구에서 수행한 수치해석은 단일 모래다짐말뚝에 대한 것이며, 또한 해석시 성토층에 의한 아칭효과는 고려되지 않았다. 실제 현장조건에 부합하는 여러 개의 모래다짐말뚝에 대한 해석 및 아칭효과를 고려한 해석이 향후 필요하다고 본다.

참 고 문 헌

1. 김병일, 박용원, 윤길림, 조성환(2000), 모래다짐말뚝 (SCP)으로 개량된 연약지반의 유한요소 해석, *대한토목학회논문집*, Vol. 4, No. 4-C, pp. 357~366.
2. 김재권, 홍의준, 김수일, 정상섭(2002), 연약지반에 타입된 모래다짐말뚝의 하중-침하 특성, *대한토목학회논문집*, Vol. 22, No. 4-C, pp. 423~432.
3. 이정훈(2007), 수처해석을 이용한 초연약지반의 복토공법 비교 연구, 석사학위 논문, 전남대학교, pp. 4~15.
4. 홍의준, 김재권, 정상섭, 김수일(2003), 연성하중을 받는 모래다짐말뚝(SCP)의 거동분석, *한국지반공학학회 논문집*, Vol. 19, No. 4, pp. 223~233.
5. 中山二郎, 上田皮(1967), 複合地盤における應力分擔比の測定結果について, *土木學會年次學術講演會*, 第22回, 第III部門, pp. 97-1~97-4.
6. 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.
7. 村山朔郎(1957), *Sand Compaction Pile* による軟弱地盤の改良, 大阪建設業協會講演會資料, pp. 1~17.
8. 村山朔郎(1962), 粘性土に對するパイプロコンポ-ザ-工法の考察, *日本建設機械化協會*, Vol. 150, pp. 10~15.
9. 村山朔郎, 大崎順彦(1978), *基礎工學 Handbook*, pp. 750~760.
10. 藤田圭一(1995), *軟弱地盤對策工法* 聽記述, 同和記述, pp. 701~717.
11. Aboshi, H., E. Ichimoto, M. EnoKi, and K. Harada(1979), The Compozer Method to Improve Characteristics of Soft Clays by Inclusion of Larhe Diameter Sand Columns, *Proceedings of International Conference on Soil Reinforcement: Reinforce Earth and Other Techniques*, Paris, Vol. 37, No. 2, pp. 211~216.
12. Roscoe, K.H., Burland, J.B.(1968), *Engineering Plasticity*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 535~609.
13. Mastuo, M., Kuga, S. and Maekawa, Y.(1967), Properties of Clay Installed Sand Pile, *Japan Society of Civil Engineering*, No. 141, pp. 42~55.
14. Shin, E.C., Shin, B.W., and Das, B.M. (1991), *Sand Compaction Piles for the Construction of a Steel Mill Complex*, GEO-COAST91, pp. 381~386.

(접수일: 2011. 4. 11 심사일: 2011. 4. 21 심사완료일: 2011. 7. 13)