韓國海岸·海洋工學會誌
第 16 券 第 1 號, pp. 18~26, 2004年 3月

치환율에 따른 안벽구조물 하부 SCP 복합지반의 응력분담비

Variation of Stress Concentration Ratio with Area Replacement Ratio for SCP-Reinforced Soils under Quay Wall

김 윤 태*
Yun Tae Kim*

要 旨 : SCP 공법(Sand Compaction Pile Method)은 안벽구조물 하부 지반이 연약할 경우에 압밀침하 속도를 증가시키고, 침하를 감소시키며, 지지력을 증대시키기 위하여 널리 적용되어 왔다. SCP 개량지반은 연약지반에 타설된 모래말뚝과 주변 연약지반으로 구성된 복합지반을 형성한다. 이와 같은 복합지반의 설계 및 해석시 가장 중요한 요소는 치환율에 따른 응력분담비이다. 본 연구에서는 수치해석기법을 사용하여 복합지반에 대한 응력분담비 특성을 검토하였다. 치환율에 따른 응력분담비는 상수값이 아니라 연약지반의 깊이, 압밀과정에 의존한다. 또한 하중재하 단계에 응력분담비는 복합지반의 응력전이 특성에 의하여 증가하며, 재하 완료 직후에는 치환율에 따라 2.5~12의 값을 가진다. 그러나 과잉간극수압이 소산되어 점토지반의 유효응력이 증가되는 압밀과정 동안에는 감소하여 압밀 완료 후에는 치환율에 관계없이 2.5~6정도 범위로 수렴한다.

핵심용어 : SCP, 응력분담비, 치환율, 압밀

Abstract □ In order to accelerate the rate of consolidation settlement, to reduce settlement, and to increase bearing capacity for soft ground under quay, sand compaction pile method (SCP) has usually been applied. SCP-reinforced ground is composite soil which consists of the sand pile and the surrounding soft soil. One of main important considerations in design and analysis for SCP-reinforced soils is stress concentration ratio according to area replacement ratio. In this paper, the numerical analysis was conducted to investigate characteristics of stress concentration ratio in composite ground. It was found that stress concentration ratio of composite ground is not constant as well as depends on several factors such as area replacement ratio, depth of soft soil, and consolidation process. The values of stress concentration ratio increase during loading stage due to stress transfer of composite soil, and reach up to 2.5~12 according to area replacement ratio at the end of construction. After the end of consolidation, however, these values are converged to 2.5 to 6.0 irrespective of area replacement ratio due to increase in effective stress of soft soil during consolidation process.

Keywords : SCP, stress concentration ratio, area replacement ratio, consolidation

1. 서 론

SCP 공법(Sand Compaction Pile Method)은 큰 직경의 모래 말뚝을 지중에 압입하여 지반을 개량하는 공법으로서 안벽구조물 하부 지반이 연약한 해성점토일 경우에 압밀침하 속도를 증가시키고, 침하를 감소시키며, 지지력을 증가시키기 위하여 널리 적용되어 왔다. Fig. 1은 케이슨(caisson) 안벽 구조물의 일반적인 표준단면도이다. 연약한 해성 점토지반에 SCP 공법을 적용하여 연약지반을 개량한 후 상부에 사석(quarry run rock, Q.R.R.)을 포설하고 콘크리트 케이슨을 거치하도록 설계되어 있다. SCP 공법은 1950년대 일본에서 개발된 후, 육상 및 해상공사에서 하부 연약지반을 개량하기 위해서 많이 사용되어 왔고, 광양제철소, 인천 남항, 부산 신항만 등에 적용되었다.

*부경대학교 해양공학과(Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University, 599-1, Daeyeon 3-Dong, Nam-Gu, Busan, 608-737, Korea. yuntkim@pknu.ac.kr)

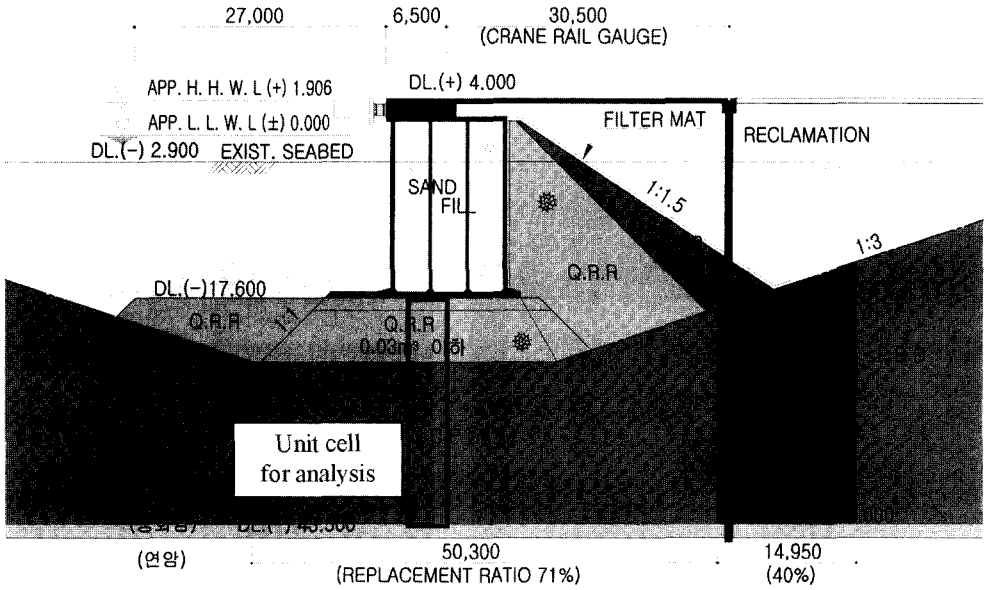


Fig. 1. Typical section of quay wall.

SCP 개량지반은 모래말뚝과 주변 점토로 이루어진 복합지반(composite soil)을 형성한다. 복합지반의 거동해석 및 설계를 위해서는 응력전이(stress transfer) 특성, 치환율(area replacement ratio)에 대한 응력분담비(stress concentration ratio) 등을 정확히 파악해야 한다. 그러나 현재 SCP 설계에서는 단지 경험적으로 결정된 값들을 사용하고 있는 실정이므로 이와 같은 것들에 대한 연구가 필요하다.

SCP가 타설된 복합지반의 거동특성분석을 위해 기 수행된 연구로서 실내모형실험을 통하여 치환율 변화에 대한 거동 연구(Juran 등, 1988; 박 등, 2000; 김 등, 2002), 실내모형실험 결과를 수치해석을 통해 응력분담특성을 분석한 연구(김 등, 2000; 유 등2003), 유한요소법을 적용하여 모래와 지반의 상호작용에 의해 모래말뚝-지반 접촉면에서 전달되는 전단응력을 고려한 연구(Alamgir 등, 1996; 홍 등, 2003), 관통 및 미관통 SCP의 압밀거동에 대한 모형실험 및 수치해석 연구(Jung 등, 1999; 2001), 연약지반 비배수 강도증가에 대한 연구(Asaoka 등, 1994), Terzaghi와 Barron의 해를 이용하여 압밀속도를 구할 수 있는 간편해를 제시한 연구(Han 등, 1999) 등이 있다.

대부분의 기존 수치해석 연구에서 사용한 해석모델을 살펴보면, 복합지반이 균질하고 탄성이라고 가정하던지(Alamgir 등, 1996), 점토지반을 등방탄성이나 Mohr-Coulomb의 탄소성 모델(김 등, 2000; 홍 등, 2003), 혹은 등변형율과 자유변형조건을 부과하여 Cam-clay 모델(Jung 등, 2001) 등을 사용하여 거동특성을 고찰하였다.

SCP가 타설된 복합지반은 안벽구조물 하중 작용시 주변 점토지반에서 생선된 과잉 간극수압이 소산함에 따라 시간의존적인(time-dependent) 비선형 압밀거동 특성을 나타낼뿐만 아니라, 연약 점토지반에서 시간경과에 따른 압밀거동시 복합적인 응력전이 특성은 모래말뚝과 점토지반의 강성도, 변형특성, 압밀특성, 치환율 등에 의존한다. 따라서 보다 경제적이고 합리적인 SCP 설계를 위하여 지속적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용한 수치해석기법을 적용하여 SCP 복합지반의 압밀시 유발되는 시간의존적인 비선형 거동특성을 파악하였다. 특히 모래말뚝과 주변 점토지반의 응력전이거동으로부터 치환율에 따른 응력분담비의 특성에 대한 연구를 수행하였다.

2. SCP 복합지반의 응력분담비

SCP 개량지반은 Fig. 2와 같이 모래말뚝과 주변 연약지반으로 구성된 복합지반을 형성한다. 복합지반의 응력-변형 특성은 모래말뚝과 주변 연약지반의 상대적인 강성도 및 변형특성의 차이, 압밀특성, 치환율 등에 의존한다.

치환율(a_s)은 식 (1)과 같이 SCP 개량지반에서 전체면적에 대한 모래말뚝 면적의 비로서 표현된다. Barksdale

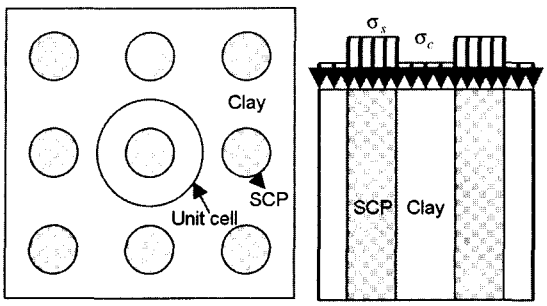


Fig. 2. Composite soil consisted of SCP and surrounding soil.

등(1983)에 의하면 쇄석다짐말뚝(stone column)과 연약지반의 일반적인 탄성계수값의 비는 10~20 정도이다. 안벽 구조물 하중 재하시 모래말뚝과 점토지반은 강성도 및 변형특성의 차이에 의해서 Fig. 2와 같이 서로 다른 응력을 분담하게 된다. 이와 같은 응력의 비를 응력분담비(m)라고 하며 식 (2)와 같이 표현된다.

$$a_s = \frac{A_s}{A_s + A_c} \tag{1}$$

$$m = \sigma_s / \sigma_c \tag{2}$$

여기서, A_s = 모래말뚝의 면적, A_c = 주변 점토지반의 면적, σ_s = 모래말뚝에 전달되는 응력, σ_c = 점토에 전달되는 응력이다.

Table 1는 치환율에 따른 응력분담비를 나타내고 있다. 또한 Fig. 3은 SCP 시공사례에 나타난 응력분담비로서 주로 1~7 정도가 많이 사용되어 왔다. Table 1 및 Fig. 3에서 알 수 있듯이 기존의 문헌조사 및 시공사례를 살펴보면, 응력분담비는 치환율 및 지반조건에 따라 경험적으로 선택되어 사용되었다. 따라서 합리적이고 경제적인 SCP 설계를 위해서는 응력분담비에 대한 연구가 필요하다.

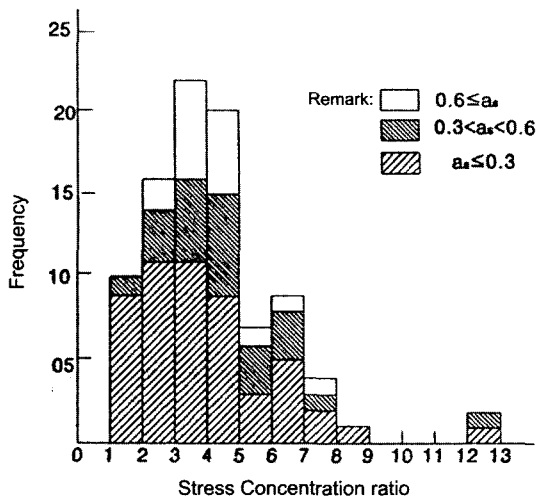


Fig. 3. Frequency of use of stress concentration ratio.

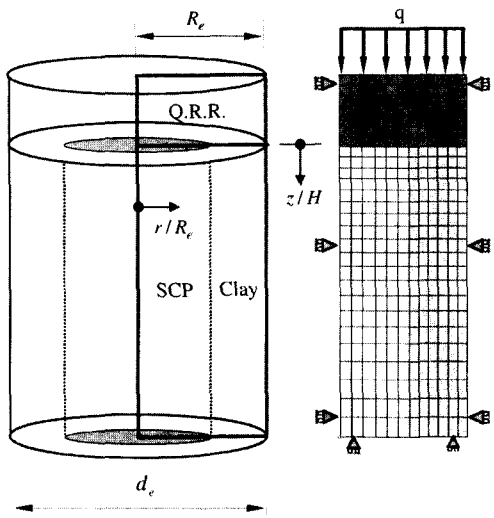
3. SCP 복합지반의 수치해석 모델

SCP의 일반적인 배치형태는 삼각형 또는 사각형 격자형태로 설치된다. SCP가 타설된 복합지반은 각 SCP를 중심으로 3차원적인 배수(3-D spatial flow)가 유발되며, 이와 같은 배수특성으로 인하여 3차원적인 압밀거동이 함께 일어나는 시간의존적인 거동 특성을 가진다. 따라서 SCP가 설치된 현장지반의 3차원적인 배수 및 거동특성을 비교적 정확히 모사하기 위해서는 실제의 해석대상지반을 3차원 유한요소망으로 구성하여 해석할 필요가 있다. 그러나 안벽하부 지반에 타설된 SCP 복합지반의 광범위한 해석영역을 3차원 유한요소망으로 모델하여 해석하기 위해서는 많은 시간과 노력이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 1에 표시된 안벽 하부 SCP 복합지반 중에서 하나의 SCP가 영향을 미치는 원통형 실린더 지반을 해석 대상지반으로 선정하였다(Fig. 4).

일반적으로 콘크리트 블록 혹은 케이슨으로 이루어진

Table 1. Examples of stress concentration ratio

Stress concentration ratio(m)	Area replacement ratio(a_s)	Remark	Reference
3	a_s = 0.0~0.4	ϕ (deg) = 30	Japanese Geotechnical
2	a_s = 0.4~0.7	ϕ (deg) = 30	Society (1988)
1	a_s > 0.7	ϕ (deg) = 30~35	
2.5	a_s = 0.1~0.5	= 2	神田 *et al.* (1990)
2.5	a_s = 0.4, 0.71		Busan New Port (1999)
2~6	-	usually 3~4	Mitchell (1981)
2.5~3.5	-		Aboshi *et al.* (1984)



(a) Unit cell (b) Finite element mesh

Fig. 4. Axisymmetric finite element mesh for cylinderical composite ground.

강성 안벽의 침하 및 지지력에 대한 안정성을 확보하기 위해 안벽하부 연약지반에 SCP가 타설되고 사석이 두껍게 포설된 후에 강성 안벽이 설치된다. 기존의 문헌연구를 고찰하면 SCP가 타설된 점토지반을 등 변형율(equal strain)이나 자유 변형율(free strain) 상태로 가정하여 해석하였으며(Alamgir 등, 1996; 김 등, 2000), 가정된 변형율 조건에 따라 응력분담비도 상당히 달라지게 된다.

본 연구에서는 SCP 및 점토지반 위에 포설된 사석이 침하 및 응력분담비에 미치는 영향을 고려하기 위하여 사석을 해석에 포함시킴으로써 현장상태를 보다 정확히 모사하고자 하였다. 해석에 사용된 유한요소 프로그램은 CRISP(Britto 등, 1987)이고, Fig. 4(a)와 같은 원통형 실린더 지반에 축대칭 압밀해석을 적용하여 거동해석을 수행하였다. 해석에 사용된 축대칭 유한요소망은 Fig. 4(b)와 같으며, 요소망은 SCP, 점토 및 상부 사석 지반으로 구성되어 있다. 경계조건으로 좌·우측면에서는 횡변위가 구속되었으며, 하부는 선단 지지층까지 SCP가 관입되었다고 가정하여 연직변위를 구속하였으며, 안벽구조물의 해수면 아래에 존재하므로 사석 상부에 지하수위가 존재하는 것으로 가정하였다. 따라서 사석의 상부면은 간극수압이 0이다. 또한 해석에 사용된 대상지반의 높이 $H = 5$ m이고, SCP설치간격은 2.1 m로서 하나의 원통형 실린더의 등가영향직경은 2.273 m(D_e = 1.13s)이다. 따라서 축대칭 유한요소망의 반경은 1.187 m이다. Mesh의 크기는 약 0.099 m정도이다. 케이슨 및 상치구조물 거치에 의한 안벽 상재하중(q)은 10일 동안 200 kPa 하중이 사석에 작용하는 것으로 가정하였다.

안벽 구조물 하중 재하시 복합지반에서 유발되는 압밀

Table 2. Material properties for numerical analysis

Soil type	Used model	Parameter	Value	Remark
SCP	Mohr-Coulomb elastic and plastic	Eo	14000 kPa	
		ν	0.2	
		c	0	
		ϕ	30, 35 deg	
		γ_{bulk}	19 kN/m^3	
		k_x	0.864 m/day	
		k_y	0.864 m/day	$k_x = k_y$
Clay	Modified Cam-clay	κ	0.04	
		λ	0.265	
		e_{cs}	1.6	
		M	1.02	
		ν	0.2	
		γ_{bulk}	17 kN/m^3	
		k_x	6.26E-5 m/day	
		k_y	2.72E-5 m/day	$k_x = 2.3\ k_y$
Q.R.R.	elastic	E	27000 kPa	
		ν	0.3	
		γ_{bulk}	20 kN/m^3	
		k_x	0.864 m/day	
		k_y	0.864 m/day	$k_x = k_y$

진행에 따른 응력-변형 거동특성을 비교적 정확히 모사하기 위하여 모래말뚝 지반은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델, 점토지반은 수정 Cam-clay 모델, 사석은 탄성모델을 각각 사용하였다. Table 2는 축대칭 비선형 압밀해석시 사용된 대상지반의 물성치이다. 해석에 사용된 지반 물성치는 부산신항의 SCP 설계시 적용된 값과 동일하게 사용하였다(부산신항만(주), 1999). 부산신항만 보고서에 의하면 지반특성은 현장실험(시추조사, SPT, 공내재하시험, 베인전단시험, CPTU 등)과 실내시험(물리시험, 역학시험, 압밀시험)을 실시하여 산정되었다. 특히 투수계수는 Rowe-cell 시험 및 압밀시험, 탄성계수와 포아송 비는 삼축압축시험(CD test)으로 각각 산정되었다.

4. SCP 복합지반의 응력-변형 거동특성

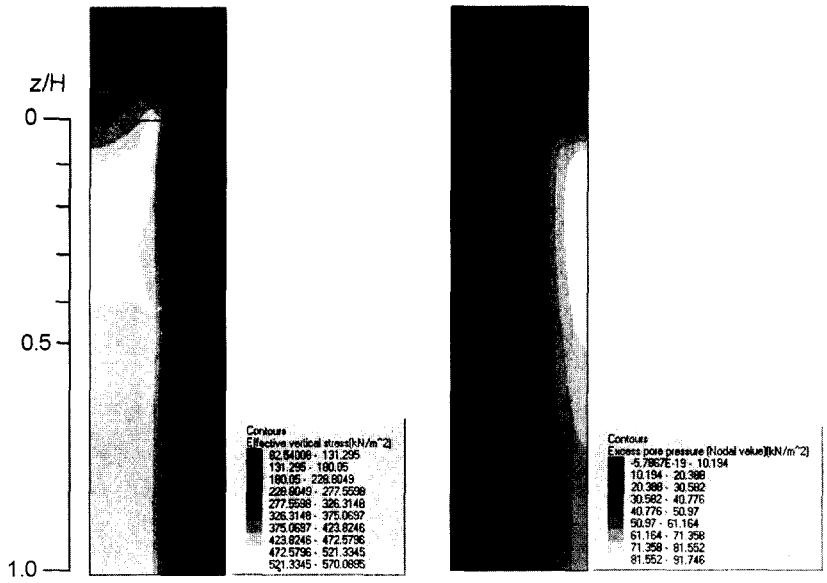
4.1 유효응력-간극수압의 거동

SCP 복합지반 위에 안벽구조물을 거치하면 전응력(total stress)은 상재하중만큼 증가하게 된다. 증가된 전응력에 의해서 하부 복합지반에서 유효응력과 과잉 간극수압의 증가가 발생된다. Fig. 5는 상재하중 재하 완료 직후 유효응력과 과잉 간극수압의 등압선(contour)을 나타낸다. 안벽의 상재하중에 의하여 모래말뚝과 점토지반에서 전응력이 증가되지만 모래말뚝(Fig. 5(a))에서는 매우 큰 투수계수 값으로 인하여 과잉 간극수압이 생성되지 않고 즉시 유효응력이 증가한다. 그러나 모래말뚝 주변의 점토지반(Fig. 5(b))에서는 전응력의 증가에 의해서 안벽구조물이 재하되는 동안 과잉 간극수압이 유발되며, 시간이 경과함에 따라 과잉 간극수압이 소산되어 유효응력으로 전이된다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 연직하중 증가로 인하여 모래말뚝의 상단부분에서 많은 응력증가가 유발되고, 정규화된 깊이(z/H)가 0.1~0.4인 부분(특히 z/H = 0.25부분)에서 유효응력 증가가 큼을 알 수 있다.

Fig. 6은 정규화된 깊이가 z/H=0.25인 점토지반(최외각 적분점)에서 안벽구조물 하중에 의해서 생성된 과잉 간극수압의 크기를 나타내고 있다. 하중재하 단계에도 압밀에 의해 과잉 간극수압이 소산되므로 생성된 간극수압(Δu)은 재하된 하중보다 일반적으로 작다. 또한 치환율이 커짐에 따라 모래말뚝까지의 배수거리가 짧아서 압밀이 빨리 일어나므로 보다 적은 과잉간극수압이 생성된다.

모래말뚝의 주변 연약 점토지반(z/H=0.25)에 대한 과잉간극수압의 시간에 따른 소산곡선은 Fig. 7에 도시되었다. 과잉간극수압은 상재하중이 재하되는 10일까지 점진적으로 증가하였다가 시간이 경과함에 따라 소산된다. Fig. 7에서와 같이 치환율 10%인 경우 0.8정도의 과잉간극수압이 생성되고, 치환율이 커짐에 따라 생성되는 과잉간극수압이 크기가 적어진다. 치환율이 70%일 경우에는 점토지반



(a) Effective stress contour (b) Excess pore water pressure contour

Fig. 5. Contours of effective stress and excess pore water pressure after the end of construction (a_s = 30%).

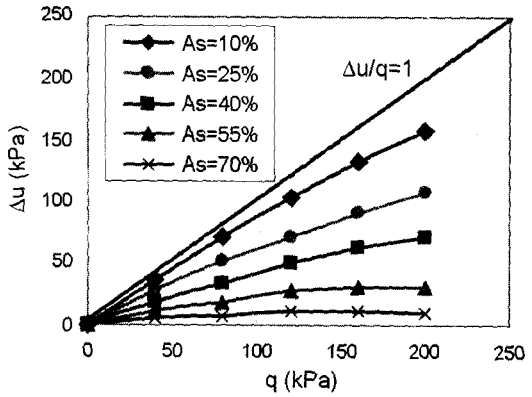


Fig. 6. Generated excess pore water pressures in soft clay at depth z/H = 0.25.

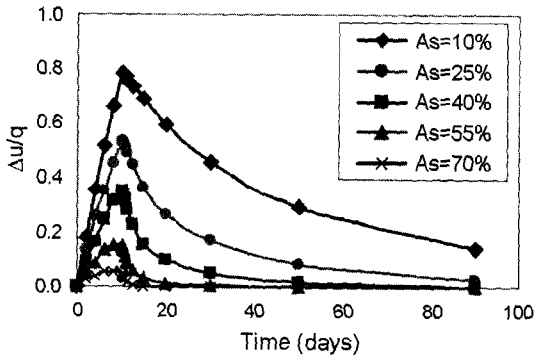


Fig. 7. Normalized excess pore water pressure ($\Delta u/q$) with time at depth z/H=0.25.

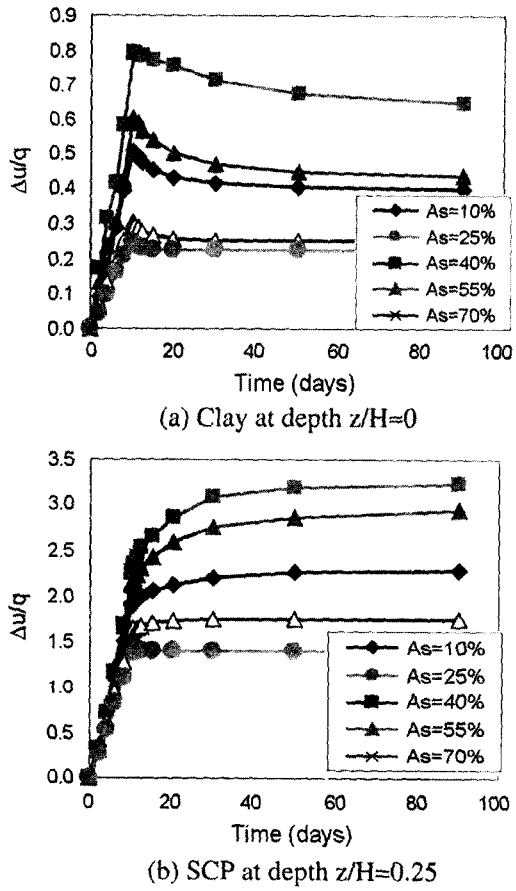


Fig. 8. Variations of normalized effective stresses at SCP and clay deposits.

에서 과잉 간극수압의 배수거리가 짧기 때문에 생성된 과잉 간극수압의 크기도 매우 작을 뿐만 아니라 상재하중 재하 완료 후 6일 이내에 거의 소산된다.

Fig. 8은 치환율에 따라서 모래말뚝과 점토지반에서 증가된 유효응력($\Delta\sigma$)을 안벽 구조물 상재하중으로 정규화시킨($\Delta\sigma/q$) 그림이다. Fig. 8(a)와 같이 깊이 z/H≈0(지표면 근처 적분점)의 점토지반에서 유효응력은 상재하중 재하 완료 후에 감소됨을 알 수 있으며, 이와 같이 감소된 유효응력은 Fig. 8(b)와 같이 z/H=0.25 부근의 모래말뚝의 유효응력 증가로 전이됨을 알 수 있다. 모래말뚝지반으로 유효응력이 전이되는 이유는 모래말뚝과 점토지반의 강성도, 변형특성, 압밀특성 등의 차이로 인하여 부등침하가 일어나고, 이로 인하여 모래말뚝과 점토지반사이에서 전단응력이 발생하므로 응력이 전이되는 것으로 사료된다.

또한 치환율이 커짐에 따라 모래말뚝 지반으로 전이되는 유효응력은 감소함을 알 수 있다. 치환율이 70%일 경우에는 점토지반의 유효응력 감소량도 미비하며, 모래말뚝 지반의 유효응력 증가량도 미비함을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 Figs. 6과 7에서 알 수 있듯이 치환율이 커짐에 따라 생성되는 과잉 간극수압과 부등침하량이 작아지기 때문이다.

4.2 침하특성

시간경과에 따라 유발된 압밀침하(St)가 Fig. 9에 나타나 있다. 치환율이 10~40%인 경우에는 압밀침하가 점진적으로 유발되지만, 치환율이 55~70%인 경우에는 하중재하 단계에 침하가 거의 완료되는 양상을 보이고 있다. Fig. 10은 SCP로 개량된 복합지반에서 정규화된 반경(r/Re)에 따라 최대 침하량(Smax)에 대한 최종 침하량(S)의 비(S/Smax)을 나타낸 그림이다. 경계모래말뚝과 점토지반에서 부등침하가 유발되므로 현장상태의 응력-변형거동 특

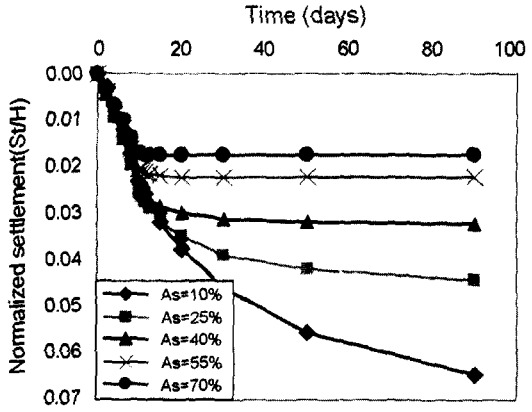


Fig. 9. Variation of normalized settlements(S_t/H) with time.

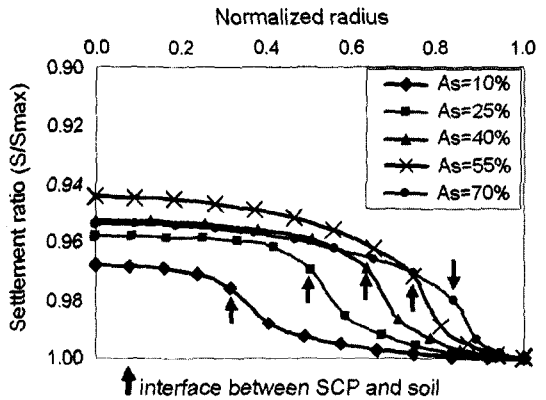


Fig. 10. Normalized settlement (S/S_{max}) distributions with radius at depth z/H=0.

성은 자유 변형율(free strain) 상태와 같다고 할 수 있다. 그러나 이와 같은 부등침하 크기는 모래지반과 점토지반의 강성도 차이 및 상부 사석의 강성도 뿐만 아니라 응력분담비 등에 의존한다. Fig. 10에서와 같이 모래말뚝과 점토지반의 경계부분에서 침하량의 급격한 변화가 유발됨을 알 수 있고, 유효응력의 변화도 경계면에서 급격히 일어나는 경향이 있다(Fig. 5(a)참조).

Fig. 11은 상재하중으로 정규화된 축차응력과 연직 변형율의 관계를 나타내고 있다. 치환율이 커짐에 따라 동일한 크기의 하중이 재하될 경우에(본 해석의 경우 200 kPa) 모래말뚝지반에서 유발되는 축차응력과 변형율은 작아짐을 알 수 있다. 또한 점토지반에서는 모래말뚝지반보다 훨씬 작은 축차응력이 유발되었다.

4.3 응력분담비 변화

Fig. 12는 모래말뚝 및 점토지반에서 압밀시간 경과에 따른 응력분담비의 변화를 나타내고 있다. 일반적으로 하중재하 단계(10일 전)에 모래말뚝이 우선 저항하기 때문에 초기값 1을 가지는 응력분담비는 증가한다. 그러나 재하 완료 후 압밀이 진행됨에 따라(10일 이후) 점토지반에

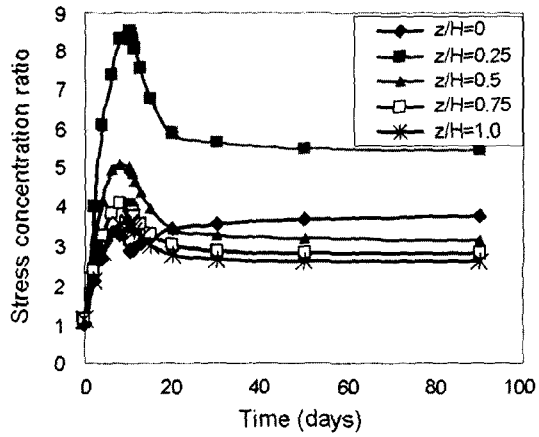


Fig. 12. Stress concentration ratio with time (a_s= 25%).

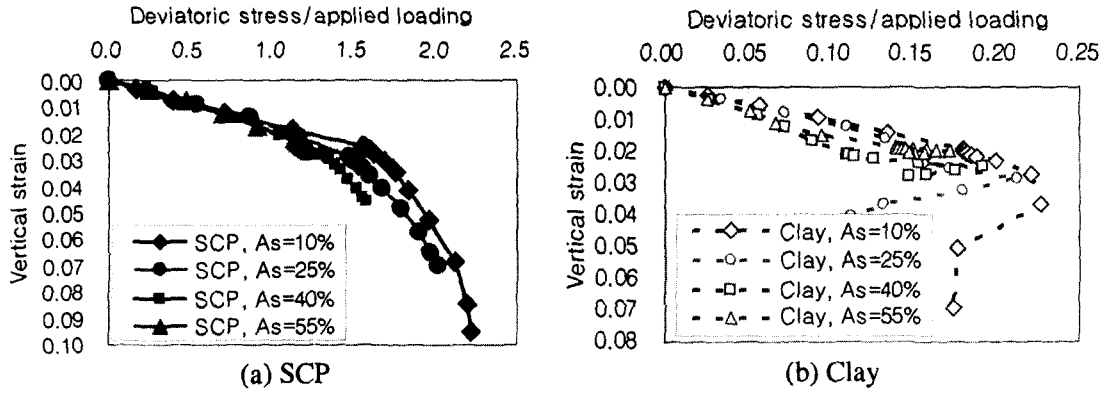


Fig. 11. Normalized deviatoric stress (q/p) with strain at z/H=0.25.

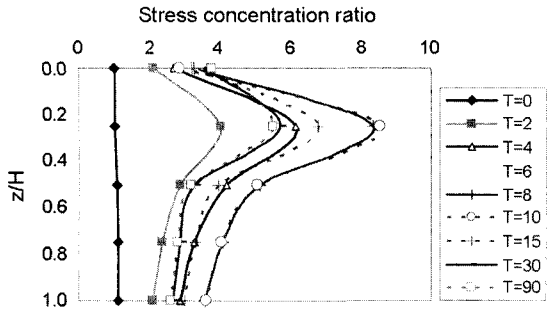


Fig. 13. Stress concentration ratio with depth (a_s = 25%; T = time (days)).

서 과잉간극수압의 소산으로 유효응력이 증가되고, 이에 따라 응력분담비는 감소하는 경향을 가진다. 과잉 간극수압이 빨리 소산되는 압밀초기에 응력분담비의 감소비율도 매우 크며, 시간이 경과함에 따라 서서히 감소된다.

그러나 z/H≈0의 점토지반에서는 Fig. 8에서와 같이 하중재하 완료 후 압밀과정 동안에 유효응력이 모래말뚝으로 전이되어 유효응력이 감소하므로 응력분담비는 Fig. 12에서와 같이 증가하게 된다.

깊이에 따른 응력분담비는 Fig. 13에 도시하였다. 그림과 같이 응력분담비는 깊이 및 압밀시간에 따라 각각 변화함을 알 수 있다. 응력분담비는 정규화된 깊이가 0.1~0.4인 부근에서 큰 값을 가지고, 깊이가 증가함에 따라 감소하는 경향이 있다. 이와 같은 경향은 Fig. 5(a)에 나타난 유효응력 등압선의 분포에서도 알 수 있듯이 상재하중의 작용으로 인하여 SCP의 상부지반(0.1~0.4인 부근)에 큰 응력집중이 발생하기 때문이라고 사료된다.

치환율에 따른 응력분담비의 변화는 Figs. 14 및 15에 도시하였다. 하중재하 완료 직후에는 Fig. 14와 같이 치환율이 증가함에 따라 응력분담비는 감소하는 경향이 있

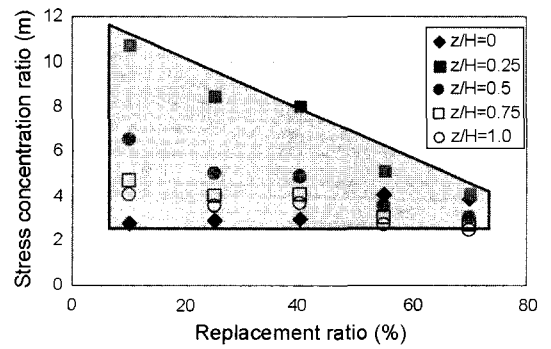


Fig. 14. Variations of stress concentration ratio with area replacement ratio (at the end of construction).

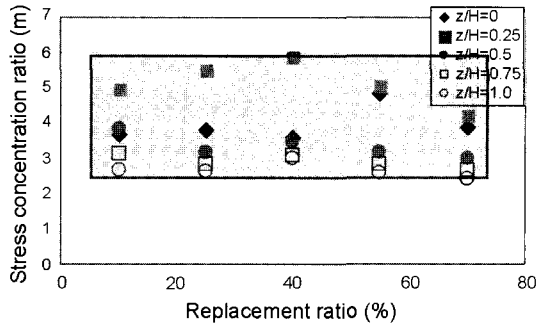


Fig. 15. Variations of stress concentration ratio with area replacement ratio (after the end of consolidation).

다. 이것은 치환율이 증가함에 따라 상재하중이 모래말뚝을 통하여 하부 깊은 지반까지 응력이 비교적 균등하게 전달됨을 의미한다. 그러나 저치환율일 경우에는 상재하중이 모래말뚝상부에 집중되므로 응력분담비도 깊이에 따라 큰 변화를 가진다. 예로서 치환율이 70%일 경우에 응력분담비는 2.5~4.0, 치환율이 10%일 경우에는 2.5~12의 값을 가진다.

압밀 완료 후에 응력분담비는 Fig. 15에서와 같이 치환율에 크게 상관없이 2.5~6.0정도 범위로 수렴됨을 알 수 있다. Figs. 14 및 15로부터 정규화된 깊이 z/H=0.25부근에서의 응력분담비가 응력전이현상에 의해 가장 큼을 알 수 있다.

부산신항의 SCP 설계시 적용된 지반물성치를 사용할 경우, 응력분담비는 압밀완료후에 2.5~6의 범위에 있고, 이것으로부터 모래에 작용하는 응력이 주변 점토지반의 응력보다 2.5배이상 큼을 알 수 있다. 또한 Mitchell(1981)과 기타 많은 현장실험결과에 의하면 응력분담비는 일반적으로 2~6범위에 있는 것으로 보고되었으므로, 본 연구결과와 비슷하다고 할 수 있다.

5. 결 론

연약한 해성 점토위에 설치되는 안벽 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 타설된 SCP 개량지반은 모래말뚝과 점토의 복합지반을 형성하므로 안벽 구조물의 상재하중 작용시 시간 의존적인 응력전이 거동특성을 나타낸다. 유한요소법을 사용한 수치해석기법을 이용하여 치환율에 따른 응력분담비의 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 본 수치해석에서는 부산신항만의 SCP 설계시 적용된 지반물성치를 사용하였다.

(1) 모래말뚝 주변 점토지반에서 압밀이 진행됨에 따라 점토지반에서 모래말뚝으로 응력전이가 유발되며, 치환율이 커짐에 따라 모래말뚝 지반으로 전이되는 유효응력은 감소한다.

(2) 안벽 구조물 하중재하 완료 직후에는 치환율이 증가함에 따라 응력분담비는 감소하는 경향이 있으며, 치환율에 따라 2.5~12의 값을 가진다. 그러나 압밀 완료 후에는 치환율에 상관없이 2.5~6.0정도 범위로 수렴됨을 알 수 있다.

(3) 안벽 구조물과 같은 상재하중이 작용시 모래말뚝의 상단부분에서 많은 응력증가가 유발되고, 특히 정규화된 깊이(z/H)가 0.1~0.4인 부근에서 유효응력 증가가 큼을 알 수 있다. 이 부분의 응력분담비도 응력전이 특성에 의하여 큰 값을 가진다. 또한 응력분담비는 하중전이특성에 의해서 정규화된 깊이(z/H)가 0.25 부근까지 증가하다가, 깊이가 깊어짐에 따라 감소하는 경향을 가진다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10635-0)지원으로 수행되었으며, 부산신항 관련자료를 제공해 준 김상규 교수님, 삼성건설 이형주 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

김병일, 박용원, 윤길림, 조성환, 2000. 모래다짐말뚝(SCP)으로 개량된 연약지반의 유한요소해석, **한국토목학회 논문집**, **20**(4-C): 357-366.

박용원, 김병일, 윤길림, 이상인, 문대중, 권오순, 2000. 모래다짐말뚝(SCP)의 치환율 변화에 따른 거동특성 연구, **한국지반공학회 논문집**, **16**(4): 117-128.

부산신항만 주식회사, 1999. **북컨테이너터미날 실시설계 보고서(토목)**: 6-50~6-59.

유승경, 홍원표, 윤길림, 이영생, 2003. 모래다짐말뚝(SCP)에 의한 복합지반의 응력분담 및 거동연구, **한국지반공학회 연약지반 기술위원회 2003 학술세미나**: 97-104.

홍의준, 김재권, 정상섬, 김수일, 2003. 연성하중을 받는 모래다짐말뚝(SCP)의 거동분석, **한국지반공학회 논문집**, **19**(4): 223-233.

Alamgir, M., Miura, N., Poorooshash, H.B. and Madhav, M.R., 1996. Deformation analysus of soft ground reinforced by columnar inclusions, *Computers and Geotechnics*, **18**(4), pp. 267-290.

Asaoka, A., Kodaka, T. and Nozu, M., 1994. Undrained shear strength of clay improved with sand compaction piles, *Soils and Foundations*, **34**(4), pp. 23-32.

Barksdale, R.D. and Bachus, R.C., 1983. *Design and construction of stone columns*, Vol. 1, Report No FHWA/RD-83/026, National Technical Information Service, Springfield, VA.

Britto, A.M. and Gunn, M.J., 1987. *Critical state Soil Mechanics via Finite Elements*. Horwood, Chichester.

Han, J. and Ye, S.L., 1999. Simplified Method for Consolidation rate of Stone Column Reinforced Foundations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**(7), pp. 597-603.

Jung, J.B., Lee, K.I. and Lee, J.S., 1999. Consolidaiton behavior of clay ground improved by sand compaction piles, *KSCE Journal of Civil Engineering*, **3**(2), pp. 205-212.

Jung, J.B., Lee, K.I., Lee, J.S. and Chang, Y.C., 2001. Numerical analyses of composite ground improved by fully and partly penetrated sand compaction piles, *KSCE Journal of Civil Engineering*, **5**(2), pp. 165-713.

Juran, I. and Guermazi, A., 1988. Settlement response of soft soils reinforced by compacted sand columns. *Journal of Geotechnical Engineering*, **114**(8), pp. 930-943.

Poorooshasb, H.B., Alamgir, M. and Miura, N., 1996. Negative skin friction on rigid deformable piles, *Computers and Geotechnincs*, **18**(2), pp. 109-126.

Japanese Geotechnical Society, 1988. **軟弱地盤口策工法 - 調査・設計から施工まで-**, 383 p.

神田 勝己, 寺師 昌師, 1990. 粘性土を對象とするSCP工法の實用設計法, **港滿 技術資料**, **669**: 20-50.

Received November 14, 2003
Accepted January 30, 2004