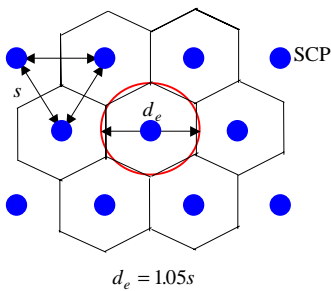


복합지반은 SCP 자체의 강도 변화뿐만 아니라 각 SCP를 중심으로 3차원적인 배수(3-D spatial flow)가 유발되며, 이와 같은 배수특성으로 인하여 3차원적인 압밀거동특성이 함께 일어나는 시간의존적인 거동 특성을 가진다. 따라서 SCP가 설치된 현장지반의 3차원적인 배수 및 거동특성을 비교적 정확히 모사하기 위해서는 실제의 해석대상지반을 3차원 유한요소망으로 구성하여 해석할 필요가 있다. 그러나 안벽 하부 지반에 타설된 SCP 복합지반의 광범위한 해석영역을 3차원 유한요소망으로 모델하여 해석하기 위해서는 많은 시간과 노력이 요구된다.

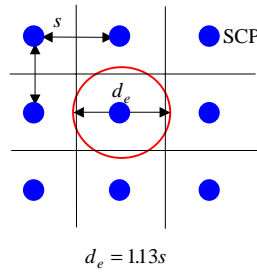
따라서 본 연구의 수치해석에 사용된 해석 대상지반은 그림 1에 표시된 안벽 하부 SCP 복합지반 중에서 하나의 SCP가 영향을 미치는 원통형 실린더 지반으로 선정하였다(그림 4).

일반적으로 콘크리트 블록 혹은 케이슨으로 이루어진 강성 안벽의 침하 및 지지력에 대한 안정성을 확보하기 위해 안벽하부 연약지반에 SCP가 타설되고 사석(Q.R.R., quarry run rock)이 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. 그러나 실제 거동현상을 살펴보면 상부 사석 및 강성 안벽기초의 영향으로 등 변형율(equal strain)과 자유 변형율(free strain)의 중간상태라고 할 수 있다.

본 연구에서는 SCP 및 점토지반 위에 포설된 사석이 침하 및 응력분담비에 미치는 영향을 고려하기 위하여 상부사석을 해석에 포함시킴으로써 현장상태를 보다 정확히 모사하고자 하였다. 해석에 사용된 유한요소 프로그램은 SAGE CRISP이고, 해석단면은 그림 4(a)와 같이 원통형 실린더 지반에 축대칭 압밀해석을 적용하여 거동해석을 수행하였다. 해석에 사용된 축대칭 유한요소망은 그림 4(b)와 같으며, 요소망은 SCP, 점토 및 상부 사석 지반으로 구성되어 있다. 경제조건으로 좌·우측면에서는 횡변위가 구속되었으며, 하부는 선단 지지층까지 SCP가 관입되었다고 가정하여 연직변위를 구속하였으며, 사석 상부층에 지하수위가 존재한다. 케이슨 거치 및 상치구조물 거치에 의한 안벽상재하중은 10일 동안 200kPa 하중이 상부사석에 작용하는 것으로 가정하였다.

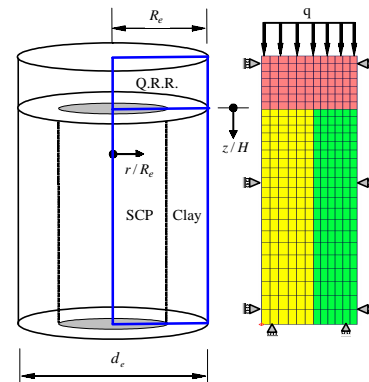


(a) 삼각형 배열



(b) 사각형 배열

그림 3. SCP의 일반적인 배치형태와 영향반경



(a) Unit cell

(b) 축대칭 유한요소망

그림 4. SCP 원통형 실린더 지반의 축대칭 모델

안벽 구조물 하중 재하시 복합지반에서 유발되는 압밀진행에 따른 응력-변형 거동특성을 비교적 정확히 모사하기 위하여 모래말뚝 지반은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델, 점토지반은 수정 Cam-clay 모델, Q.R.R.(사석)은 탄성모델을 각각 사용하였다. 표 1은 축대칭 비선형 압밀해석시 사용된 대상지반의 물성치이다. 해석에 사용된 지반 물성치는 부산신항의 SCP 설계시 적용된 값과 동일하게 사용하였다(부산신항만(주), 1999).

표 1. 수치해석에 사용한 대상지반의 물성치

Soil type	Used model	Parameter	Value	Remark
SCP	Mohr-Coulomb elastic-perfectly plastic	E_o	14000 kPa	높이 H=10m $k_x = k_y$
		ν	0.2	
		c	0	
		ϕ	30 deg	
		γ_{bulk}	19 kN/m ³	
		k_x	0.864m/day	
		k_y	0.864m/day	
Clay	Modified Cam-clay	α	0.04	높이 H=10m $k_x = 2.3 k_y$
		λ	0.265	
		e_{cs}	1.6	
		M	1.02	
		ν	0.2	
		γ_{bulk}	17 kN/m ³	
		k_x	6.26E-5m/day	
		k_y	2.72E-5m/day	
QRR	Elastic	E	14000 kPa	높이 H=1m $k_x = k_y$
		ν	0.3	
		γ_{bulk}	19 kN/m ³	
		k_x	0.864m/day	
		k_y	0.864m/day	

3 SCP 복합지반의 응력-변형 거동 분석

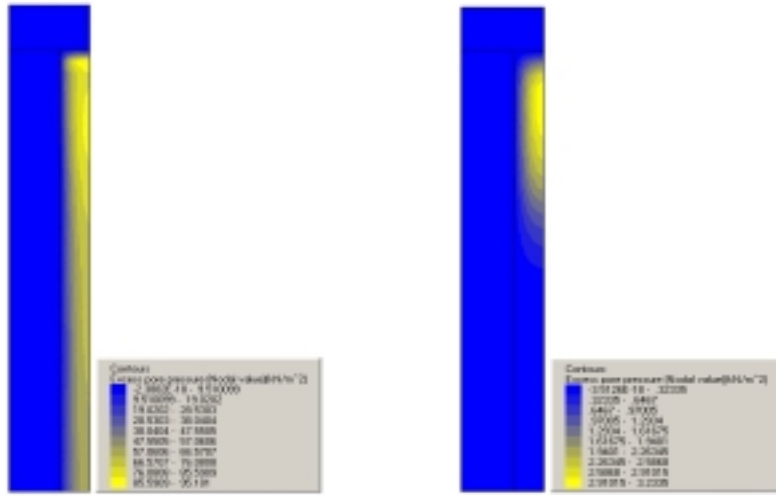
3.1 시간의존적인 압밀거동

SCP 복합지반 위에 안벽구조물을 거치하면 전응력(total stress)이 증가하게 된다. 증가된 전응력에 의해서 하부 복합지반에서 과잉 간극수압이 유발되고, 이 과잉 간극수압은 시간이 경과함에 따라 소산하게 된다. 안벽구조물 거치 후에 전응력은 일정하므로 간극수압의 변화는 유효응력의 변화를 의미한다. 그림 5는 시간에 따른 과잉 간극수압의 등압선(contour)을 나타낸다. 안벽과 같은 상재하중에 의하여 모래말뚝과 점토지반 모두에서 전응력이 증가되지만 모래말뚝에서는 매우 큰 투수계수 값으로 인하여 과잉 간극수압이 생성되지 않고 즉시 유효응력이 증가한다. 그러나 모래말뚝 주변의 점토지반에서는 안벽구조물의 재하단계에서 과잉 간극수압이 유발되며, 시간이 경과함에 따라 과잉 간극수압이 소산되어 유효응력으로 전이된다.

연약지반의 깊이별 과잉 간극수압의 시간에 따른 변화가 그림 6에 도시되었다. 모래말뚝 지반에서는 그림 6과 같이 안벽 상재하중의 증가에도 불구하고 과잉 간극수압은 생성되지 않고 즉시 유효응력의 증가된다. 그러나 모래말뚝의 주변 연약 점토지반에서는 과잉간극수압이 상재하중이 재하되는 10일까지 점진적으로 증가하였다가 시간이 경과함에 따라 소산된다. 연약한 점토지반에서 정규화된 깊이가 0인 점에서는 ($z/H \approx 0$), 즉 사석 바로 밑에서는, 사석까지 배수거리가 짧기 때문에 과잉간극수압이 거의 발생되지 않는다. $z/H=0.25$ 깊이 부근에서 상대적으로 큰 과잉간극수압이 유발되고, 정규화된 깊이가 증가함에 따라 유발되는 간극수압의 크기는 감소한다. 이와 같은 이유는 상재하중에 의한 영향이 하부 연약지반의 깊이가 커짐에 따라 감소하기 때문이다.

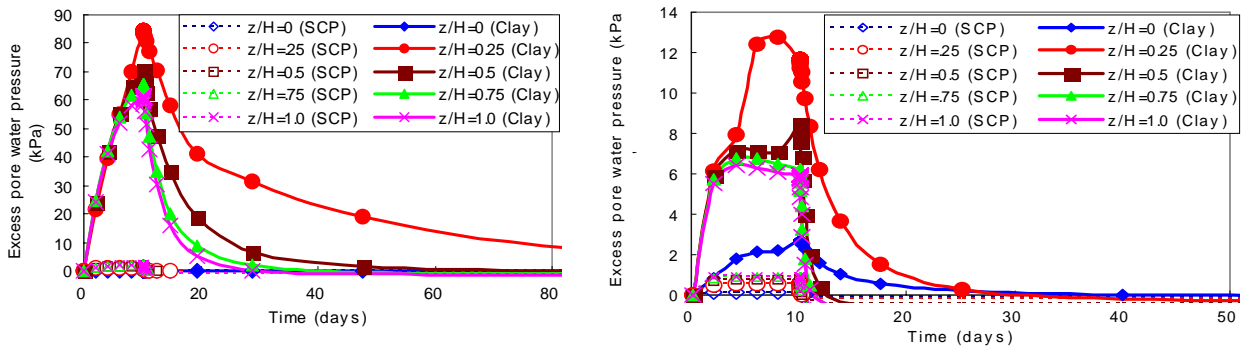
치환율이 70%일 경우에는 그림 6(b)와 같이 연약지반에서 과잉 간극수압의 배수거리가 짧기 때문에

전응력의 증가는 단기간 안에 유효응력의 증가로 전이된다. 또한 생성된 과잉 간극수압의 크기도 매우 작을 뿐만 아니라 상재하중 재하 후 6일 이내에 거의 소산됨을 알 수 있다.



(a) 하중재하 완료 직후에 유발된 간극수압 (b) 압밀경과후의 잔류 간극수압

그림 5, 간극수압의 등압선의 시간에 따른 변화(치환율=40%)



(a) 치환율=40%

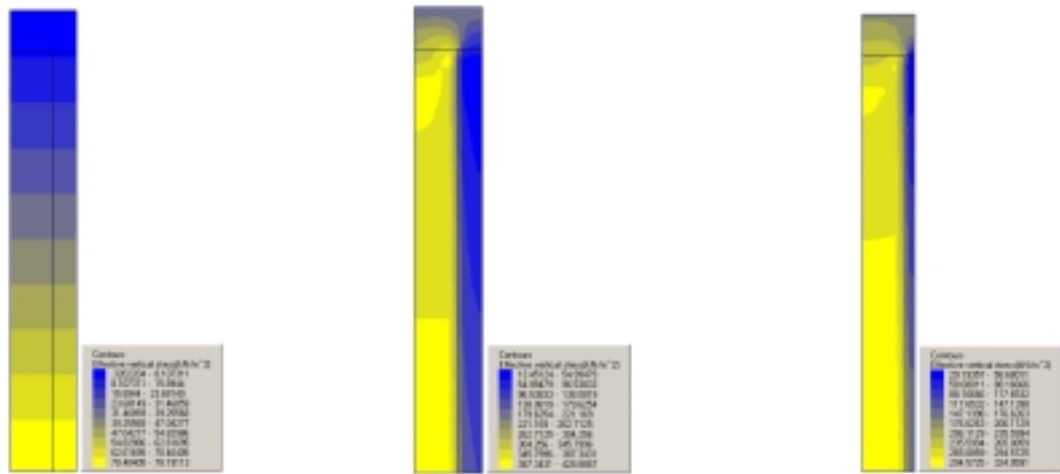
(b) 치환율=70%

그림 6. SCP와 점토지반에서 시간에 따른 과잉 간극수압의 변화

3.2 응력전이 거동

그림 7은 연직 상재하중이 재하되기 전과 재하된 후(압밀이 경과된 후)에 SCP, 점토, 사석 지반에서 유발된 유효응력의 등압선을 보여주고 있다. 연직하중이 재하되기 전에 초기 유효응력은 깊이에 따라 증가하는 상태이다. 상재하중 재하 후에는 그림 7(b)와 7(c)에서와 같이 연직하중 증가로 인하여 SCP의 상단부분에서 많은 응력증가가 유발됨을 알 수 있다. 특히 치환율이 40%일 경우 정규화된 깊이(z/H)가 0.15~0.4인 부분에서 유효응력의 증가가 가장 큼을 알 수 있다. 그러나 그림 7(c)에서와 같이 치환율이 커짐에 따라 상재하중에 의한 응력증가는 모래말뚝전체 깊이로 전이됨을 알 수 있다.

그림 7(b)와 7(c)에서 알 수 있듯이 동일한 깊이에서도 반경방향에 따라 유효응력의 크기가 달라짐을 알 수 있다. 또한 모래말뚝과 점토지반에서 유효응력의 상대적인 크기비는 연약지반의 깊이가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 즉 응력분담비(m)는 모래말뚝과 점토의 상대적인 강성도에 의존할 뿐만 아니라 연약지반의 전체 깊이에서 일정한 값을 갖지 않고, 깊이가 증가함에 따라 감소하는 경향을 가짐을 알 수 있다.

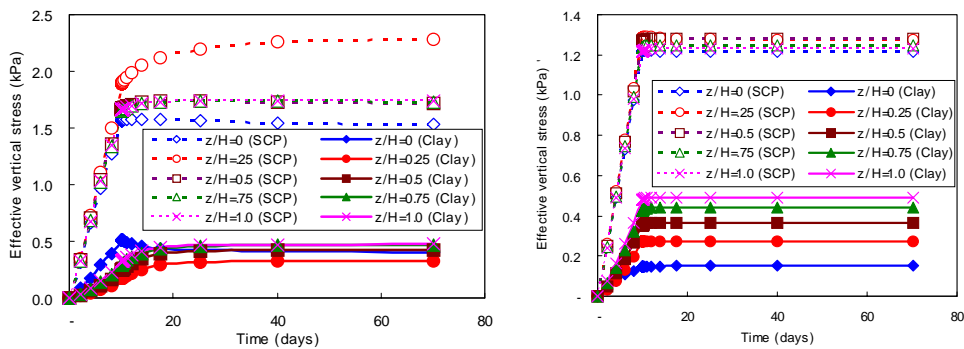


(a) 초기상태 (b) 하중 재하후(치환율=40%) (c)하중 재하후(치환율=70%)

그림 7. 유효응력 등압선의 시간에 따른 변화

상재하중으로 인한 모래말뚝 및 점토지반에서 발현되는 응력전이 특성이 그림 8에 표시하였다. 모래말뚝 지반에서는 상재하중 재하 단계에 전응력의 증가로 인하여 유효응력이 증가하게 된다. 그러나 주변 점토지반에서는 상재하중 재하 단계에 생성된 과잉간극수압이 시간이 경과함에 따라 소산되므로 모래말뚝지반에 비하여 유효응력은 보다 점진적으로 증가된다. 이와 같은 주변 점토지반의 유효응력 증가량은 모래말뚝에서의 유효응력 증가량과 비교할 때 상대적으로 적다.

또한 그림 8(a)에서와 같이 치환율이 40%인 경우 사석 바로 하부 연약지반($z/H \approx 0$)에서는 압밀이 진행됨에도 불구하고 유효응력이 시간이 경과함에 따라 감소함을 알 수 있다. 이것은 점토지반에서는 압밀이 진행됨에 따라 침하가 유발되고, 점토지반의 압밀침하로 인하여 유발된 전단응력 때문에 모래말뚝 지반으로 유효응력이 전이된다. 특히 $z/H=0.25$ 부근에서 모래말뚝으로 많은 응력전이가 크게 유발되었다. 그러나 8(b)에 나타난 바와 같이 치환율이 70%인 경우에는 압밀이 매우 짧은 기간에 종료되고, 부등침하유발이 적으므로 응력전이 현상은 크지 않음을 알 수 있다.

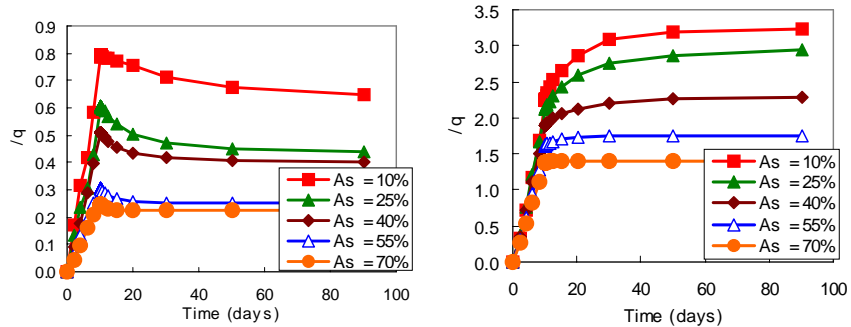


(a) 치환율=40%

(b) 치환율=70%

그림 8. 깊이별 유효응력의 시간에 대한 변화

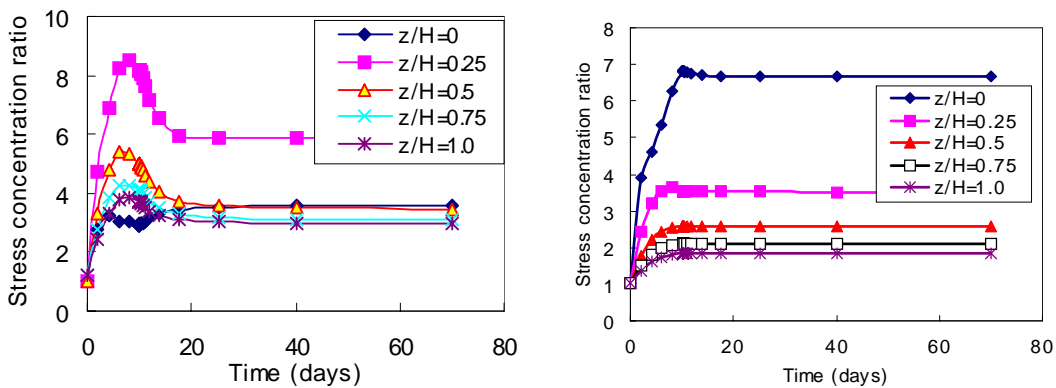
그림 9는 치환율에 따라서 모래말뚝과 점토지반에서 증가된 유효응력을 안벽 구조물 상재하중으로 정규화시킨 ($\Delta \sigma/q$) 그림이다. 모래말뚝(SCP) 지반에서는 치환율이 커짐에 따라 정규화된 유효응력 증가량이 감소함을 알 수 있다. 또한 치환율이 10~55%까지는 $z/H \approx 0$ 의 점토지반에서 상재하중이 재하된 후에 유효응력이 감소함을 알 수 있으며, 감소된 유효응력은 $z/H=0.25$ 부근의 모래말뚝의 유효응력 증가로 전이됨을 알 수 있다. 그러나 치환율이 70%에서는 점토지반의 유효응력 감소량도 미비하며, 모래말뚝 지반이 유효응력 증가량도 미비함을 알 수 있다.



(a) 점토(depth $z/H=0$) (b) SCP (depth $z/H=0.25$)
 그림 9. 치환율에 따른 모래말뚝과 점토지반의 유효응력의 변화

그림 10은 시간의 경과에 따른 모래말뚝 및 점토지반에서의 깊이별 응력분담비를 나타내고 있다. 일반적으로 하중 재하단계에는 모래말뚝이 우선 저항하기 때문에 응력분담비는 증가하다가 압밀이 진행됨에 따라(10일 이후) 점토지반에서 유효응력이 증가되고, 이에 따라 응력분담비는 감소하는 경향을 가진다. 그러나 치환율이 40%인 경우, $z/H \approx 0$ 의 점토지반에서 그림 8(a)에서와 같이 하중재하 후 압밀과정 동안에 유효응력이 모래말뚝으로 크게 전이되어 유효응력이 감소하므로 응력분담비는 증가하게 된다.

또한 그림 10에서와 같이 응력분담비는 깊이에 따라 각각 다른 값을 가짐을 알 수 있다. 응력분담비는 정규화된 깊이가 0.25 부근에서 큰 값을 가지고, 깊이가 증가함에 따라 감소하는 경향이 있다. 이와 같은 경향은 그림 7(b)와 7(c)에서 보여준 유효응력 등압선의 분포에서도 알 수 있다. 압밀이 완료된 후에 응력분담비는 치환율이 40%일 경우에는 2.5~6.0, 치환율이 70%일 경우에는 2~6.5 정도 범위로 수렴됨을 알 수 있다.



(a) 치환율=40% (b) 치환율=70%
 그림 10. 응력분담비의 시간에 대한 변화

4 결론

안벽 구조물 하부가 연약한 지반일 경우에 일반적으로 SCP를 타설함으로써 연약지반을 개량하게 된다. SCP가 타설된 지반은 모래말뚝과 점토의 복합지반을 형성하므로 안벽 구조물의 상재하중에 의해서 시간 의존적인 응력전이 거동특성을 나타낸다. 본 연구에서는 유한요소법을 사용한 수치해석기법을 이용하여 압밀시간 경과에 따른 과잉간극수압, 응력전이 및 응력분담비의 특성을 분석하였으며, 해석결과를 바탕으로 다음과 같은 연구결론을 얻었다.

1. 안벽하중에 의한 연직하중 증가로 인하여 모래말뚝의 상단부분에서 많은 응력증가가 유발되고, 특히 정규화된 깊이(z/H)가 0.15~0.4인 부분에서 유효응력 증가가 가장 큼을 알 수 있다. 그러나 치환율이 커짐에 따라 상재하중에 의한 응력증가는 모래말뚝 전체 깊이로 전이됨을 알 수 있다.
2. 안벽의 상재하중에 의하여 모래말뚝과 점토지반 모두에서 전응력이 증가되지만 모래말뚝지반에서는 매우 큰 투수계수 값으로 인하여 과잉 간극수압이 생성되지 않고 즉시 유효응력이 증가된다. 그러나 주변 점토지반에서는 상재하중 재하단계에 과잉 간극수압이 생성되며, 시간이 지남에 따라 과잉간극수압이 소산되어 유효응력으로 점차적으로 전이된다.
3. 일반적으로 하중이 재하되는 동안에 응력분담비는 모래말뚝이 우선 저항하기 때문에 증가한다. 그러나 압밀이 진행됨에 따라 점토지반에서 유효응력이 증가되고, 이에 따라 응력분담비는 감소하는 경향을 가진다.
4. 복합지반에서 응력분담비는 일정한 값이 아니라 압밀시간 경과에 따라, 연약지반의 깊이에 따라 다른 값을 가진다. 압밀이 완료된 후에 응력분담비는 치환율이 40%일 경우에는 2.5~6., 치환율이 70%일 경우에는 2~6.5 정도 범위에 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. 김병일, 박용원, 윤길림, 조성환 (2000), 모래다짐말뚝(SCP)으로 개량된 연약지반의 유한요소해석, 한국토목학회 논문집, 제20권 제4-C호, pp. 357-366.
2. 박용원, 김병일, 윤길림, 이상인, 문대중, 권오순(2000), 모래다짐말뚝(SCP)의 치환율 변화에 따른 거동특성 연구, 한국지반공학회 논문집, 제 16권, 4호, pp. 117-128.
3. 부산신항만 주식회사 (1999), 북컨테이너터미널 실시설계 보고서 (토목), pp. 6-50~6-59.
4. 유승경, 홍원표, 윤길림, 이영생 (2003) 모래다짐말뚝(SCP)에 의한 복합지반의 응력분담 및 거동연구, 한국지반공학회 연약지반 기술위원회 2003 학술세미나, pp.97-104.
5. 홍의준, 김재권, 정상섭, 김수일(2003), 연성하중을 받는 모래다짐말뚝(SCP)의 거동분석, 한국지반공학회 논문집 제19권 4호, pp. 223-233.
6. Alamgir, M., Miura, N., Poorooshash, H.B. and Madhav, M.R. (1996), Deformation analysis of soft ground reinforced by columnar inclusions, Computers and Geotechnics, Vol. 18, No. 4, pp. 267-290.
7. Asaoka, A., Kodaka, T. and Nozu, M. (1994) Undrained shear strength of clay improved with sand compaction piles, Soils and Foundations, Vol. 34, No. 4, pp. 23-32.
8. Jung, J.B., Lee, K.I. and Lee, J.S. (1999) Consolidation behavior of clay ground improved by sand compaction piles, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 205-212.
9. 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, Vol. 5, No. 2, pp. 165-173.
10. Juran, I. And Guermazi, A. (1988), Settlement response of soft soils reinforced by compacted sand columns. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114, No. 8, pp. 930-943.