

대형토조시험을 이용한 모래다짐말뚝이 적용된 복합지반의 침하 및 하중전이특성 The Characteristics of the Composite Ground with Sand Compaction Pile(SCP) using Large Soil Box

김우석¹⁾, Oo-Seok, Kim, 박언상²⁾, Eon-Sang, Park, 김재권³⁾, Jae-Kwon, Kim, 김수삼⁴⁾, Soo-Sam, Kim

¹⁾ 한양대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng. Univ. of Hanyang

²⁾ 한양대학교 토목환경공학과 박사과정, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Eng. Univ. of Hanyang

³⁾ (주)삼성물산 상무, Manager Director, Civil Division, Samsung Corporation

⁴⁾ 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng. Univ. of Hanyang

SYNOPSIS : Because general laboratory tests for sand compaction pile method including unit-cell test device have fixed outside diameter, as area replacement ratio increase, diameter of sand pile increase. These condition can bring about overestimation of stiffness of composite ground. In addition, existing large soil box which consist of bellows type loading plate can occur serious mistake in checking the amount of drained water because there are additional drainage along the inside wall in device. Overcoming these shortcoming, this paper developed modified large scale soil box consist of piston type load plate. In this study, using this device, series of modified large scale soil box tests were performed, and investigated the settlement and stress transportation characteristics with area replacement ratio in sand compaction pile method.

Key words : Sand Compaction Pile(SCP), Large Soil Box, Area Replacement Ratio, Settlement Reduction Factor, Stress Concentration Ratio

1. 서론

지금까지 모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile : 이하 SCP) 공법 적용지반의 거동특성 파악을 위한 실내시험은 단위셀(unit cell) 형태의 시험과 대형토조를 이용한 시험, 그리고 원심모형시험으로 크게 구분되어 실시되어왔다. 이중 대형토조시험은 수치해석의 적용성을 고려하여 주로 원통형 셀 시험기의 형태로 제작되어 왔으며, 시험기 제작 및 시험의 용이성을 추구하기 위해 대부분 벨로우즈(bellows) 형태의 재하장치를 이용하고 있는 실정이다. 즉, 초기 시료타설과 시험 후의 해체시 용이성을 위해 대부분 높이별 2~3개의 분할된 셀의 형태로 제작하게 되는데, 이 경우 분할된 셀의 내경을 진원(real circle)으로 제조하기 난해하기 때문에 벨로우즈 형태의 재하판을 구성하게 되는 것이다. 그러나, 이러한 형태의 시험기를 이용하는 경우 모래말뚝을 이용하여 배수되는 간극수의 일부가 시험기의 안쪽 측벽을 타고 벨로우즈 측면으로 흡수되어 엄밀한 시험조건을 구축하기 어렵다는 점이 관찰되었다. 따라서, 본 연구에서는 정밀가공을 통하여 실린더 내부의 진원을 확보하고 상부 재하판 형태를 측벽 밀착식 피스톤 형태로 적용한 원형 대형토조를 제작하여 치환율에 따른 SCP 복합지반의 침하특성과 하중전이특성을 파악하고자 하였다.

2. 실험내용 및 방법

2.1 시료특성

본 연구에서는 점성토 지반에 대해 카올리나이트를 이용하였고, 모래말뚝에 대해서는 주문진 표준사를 이용하여 실험을 실시하였다. 표 1에는 카올리나이트의 시료특성을 제시하였다. 카올리나이트 점성토 지반의 경우, 초기 액성한계의 1.5배로 타설하여 교반한 후 49.05kPa의 압력 하에서 예압밀을 실시하여 정규압밀 지반을 조성하였다. 예압밀 종료시의 압밀도는 대략 95%에 해당한다.

한편, 표 2에는 주문진 표준사의 기본 물성을 제시하였다.

표 1. 카올리나이트의 시료특성

Liquid Limit(%)	Plastic Limit(%)	Plastic Index(%)	Specific Gravity	Unit Weight (kN/m ³)	USCS
38.7	22.2	16.5	2.56	15.555	CL

표 2. 주문진 표준사의 시료특성

	Specific Gravity	2.63
Density test	Maximum dry density(g/cm ³)	1.669
	Minimum dry density(g/cm ³)	1.375
	Maximum void ratio	0.913
	Minimum void ratio	0.576
Sieve	Uniform Coefficient (Cu)	1.294
	Coefficient of Curvature(Cc)	1.02
Analysis	Effective Size D10 (mm)	0.2
	Diameter Corresponding to 30% finer D30 (mm)	0.23
	Diameter Corresponding to 60% finer D60 (mm)	0.26
friction angle(°)		38.1
Unified System ASTM D2487		SP

2.2 대형토조시험

2.2.1 실험장비

대형토조 실험기는 그림 1과 같이 직경 600mm, 높이 1200mm의 크기로 제작하였으며, 시료의 타설과 해체가 용이하도록 3단으로 제작하였다. 재하방식은 측벽 밀착형 피스톤 방식이며, 피스톤 행정시 측벽과의 양호한 밀착을 위하여 실린더 안벽을 공차 ϕ 0.1mm 이하로 정밀가공하였으며, 2중 V-packing을 적용하였다. 피스톤은 실린더 상판으로부터 공급되는 공기압에 의해 유동하도록 구상하였으며, packing에 의한 압력손실은 15%에 해당한다. 상판에는 디지털 변위계와 디지털 압력조절장치를 부착하였다. 또한, 응력계와 간극수압계의 배선을 유도하기 위해 3개의 노즐을 설치하였다. 하판에는 십자 형태와 중앙으로 총 5개의 배수 밸브가 설치되어 있으며, 이중 중앙 배수밸브는 상부 피스톤 로드와 함께 양면배수 조건에서 간극수의 배수로 역할을 수행하게 되며, 나머지 4개의 콕크는 하부에서의 간극수압 측정용 포트 이용된다. 본 시험기는 두께 15mm의 유압 실린더용 셀로서, 총 10MPa의 압력에도 변형과 누수가 발생하지 않도록 설계되어 있다. 그림 2에는 대형토조시험에 이용된 각종 계측장비를 제시하였다.

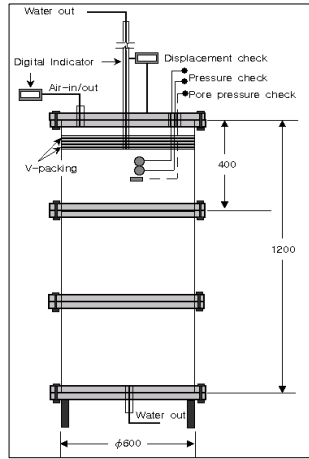


그림 1. 대형토조 시험기 전경



(a) 매설형 토압계(직경4cm)



(b) 변위측정장치



(c) 응력 및 간극수압 측정장치

그림 2. 대형토조 시험의 계측장비

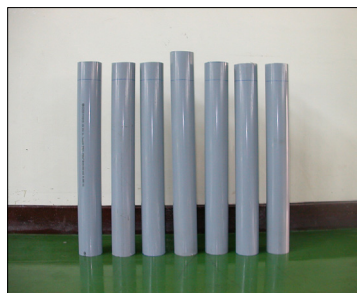
표 3. 원형 대형토조 시험용 계측기 사양

계측항목	계측기기명	측정개소	용 량	정밀도
모래말뚝 및 지반의 수직응력	pressure cell meter	2개소	10 kg/cm ²	0.01kg/cm ²
모래말뚝 및 지반의 침하량	Displacement transducer	1개소	0mm ~ 500mm	0.01mm

동결말뚝조성용 케이싱의 제작 동기는 관입용 케이싱에 직접 다짐모래말뚝을 성형하여 동결시킬 경우 케이싱으로부터 모래말뚝을 추출하기가 매우 곤란한 상황이 발생하였는데, 이러한 문제점을 해결하고자 분리를 용이하게 하기 위해 3개의 편(片)으로 제작하였다. 또한, 3개의 편(片)으로 제작되어 있기 때문에 관입용 케이싱과의 체적 보정이 필요하였고 이에 따라 동결말뚝조성용 케이싱에 물을 채워서 체적을 산정함으로써 관입용 케이싱과 동결말뚝조성용 케이싱 간의 단면적 차이에 의한 체적 산정의 오차를 보정하였다. 그림 3은 동결말뚝용 케이싱과 동결 이후 말뚝의 형태를 제시하였다.



(a) 동결말뚝조성용 케이싱



(b) 말뚝 관입용 케이싱



(c) 동결말뚝($\phi=7.2\text{cm}$)

그림 3. 말뚝용 케이싱과 동결말뚝

2.2.2 실험방법

예압밀을 실시한 후, 철재 틀로 제작한 대형토조에 조건별 치환율에 해당하도록 관입용 케이싱을 관입하고 케이싱 내 점토를 제거한 뒤 동결말뚝을 타설하여 개량지반을 조성하였다. 이후 모래말뚝과 점토지반 상부에 토압계를 매설하고 피스톤을 조립하였다. 실험조건은 강성과 연성재하의 두 가지 조건으로 실시하였으며, 연성재하조건에서는 피스톤을 조립하기 전 복합지반의 상부에 15cm의 모래층을 포설하였다. 상관의 조립이 완료된 후 24시간 동안 비배수 재하를 실시함으로써 동결말뚝의 융해와 함께 점토지반과 말뚝의 경계면 밀착 과정을 진행하였다. 이후 공기압 98.1kPa, 196.2kPa의 조건을 단계적으로 재하하였으며, 피스톤 마찰에 의한 압력손실을 15%를 고려하면 83.39kPa, 166.77kPa에 해당한다. 하중 지속기간은 매 단계별 7일을 적용하였다. 시험이 진행되는 동안 상부와 하부의 양면배수 조건을 부여하였으며, 일정 시간 간격으로 변위 및 토압, 배수량을 측정하였다.

표 4. 치환율에 따른 모래말뚝 간격

치환율, a_s (%)	10	20	30
모래말뚝간 거리, x (mm)	216	153	125

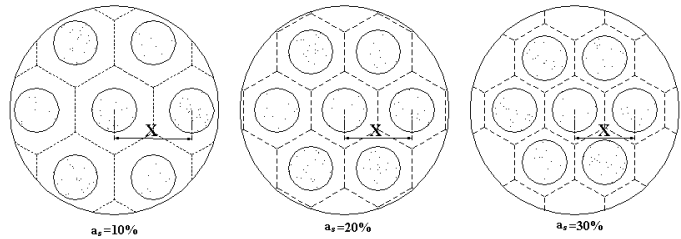


그림 4. 말뚝 배치형상

표 5. 실험조건

치환율(%)	모래말뚝 상대밀도(%)	재하조건	하중단계
10, 20, 30	70~75	강성재하, 연성재하	단계재하 83.39kPa→166.77kPa

3. 실험결과

3.1 침하특성

본 연구는 재하형태를 강성재하와 연성재하로 나누어 실험을 실시하여 저치환율 범위에 있는 치환율 10%, 20%, 30%에 대한 침하 양상을 그림 5에 도시하였다. 하중단계별 7일의 재하기간을 부여한 결과, 각각의 침하곡선은 초기에 급격한 침하를 보인 후 점차 완만해지는 전형적인 시간-침하거동을 보이고 있으며, 침하량은 치환율이 증가할수록 점차 작아지는 경향을 나타내었다.

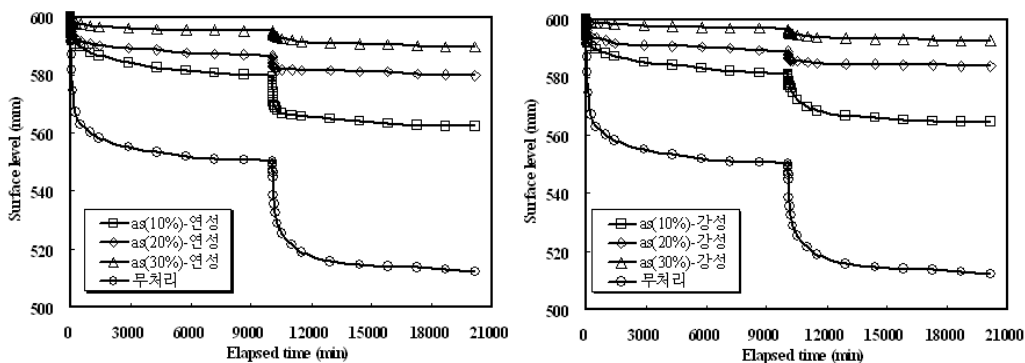


그림 5. 복합지반의 표면고 변화

3.2 복합지반 내 모래말뚝 및 점토부에서의 응력

복합지반 내에서 강성재하와 연성재하에 따라 각각에 작용하는 응력을 측정된 결과를 그림 6과 그림 7에 도시하였다. 시간경과에 따라 점토부와 모래말뚝에 작용하는 응력은 서로 상이한 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 즉, 점토부에 대한 그림 6에서는, 하중 재하 직후부터 시간이 경과함에 따라 응력이 증가하여 일정 시간이 경과되면 큰 변화가 없이 유지하는 것으로 나타났다. 이는 점토부의 압밀에 의한 응력거동특성으로서 압밀의 진행에 따라 점토부의 응력이 증가하다가 압밀이 종료되어감에 따라 점토부가 담당하는 응력에 큰 변화가 없음을 나타낸다. 모래말뚝에 대한 그림 7의 경우, 하중 재하 직후에 최대응력을 분담하며 시간이 경과됨에 따라 점차 감소하다가 일정해지는 경향을 보이고 있어 점토부에서와 상반된 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 복합지반에서 하중전이특성의 단편적인 예를 보여주는 것으로, 재하초기에는 대부분의 응력을 모래말뚝이 담당하지만 말뚝을 통한 배수효과로 인하여 점성토 지반이 개량되면서 점차 점토지반이 담당하는 응력이 증가됨을 제시한다.

그림 8과 그림 9는 점토부와 모래말뚝에서 재하하중에 대한 응력감소계수와 응력집중계수의 변화를 도시하였다. 점토지반의 개량에 따른 하중전이특성으로 인해 점토부의 응력감소계수는 시간에 따라 증가한 반면, 말뚝부의 응력집중계수는 시간에 따라 감소하고 있음을 알 수 있다. 특히, 연성재하의 경우에는 강성재하조건에 비해 점토부의 응력감소계수가 더욱 크게 나타나고 있을 뿐만 아니라, 치환율 30%의 166.77kPa 하중에서 거의 1에 근사한 값을 갖는 점으로 미루어보아, 30%의 치환율에서 아칭효과가 극대화되었으며, 이로 인해 점토지반의 전단강도 증가가 가장 컸음을 알 수 있다.

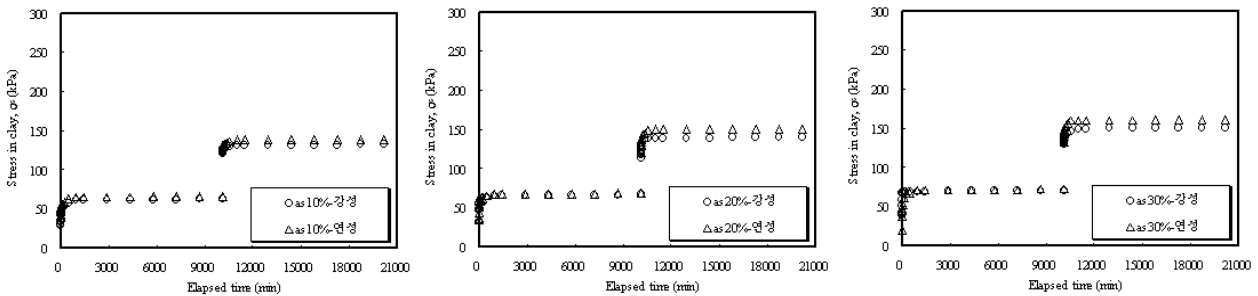


그림 6. 시간에 따른 복합지반 내 점토부의 응력변화

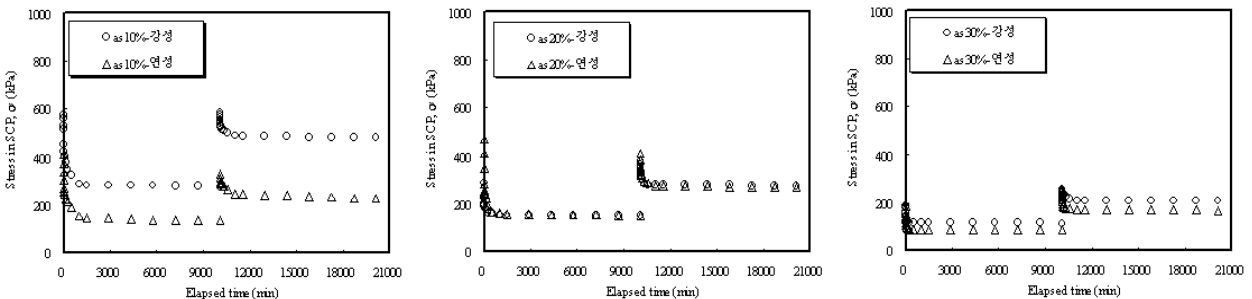


그림 7. 복합지반 내 모래말뚝의 응력변화

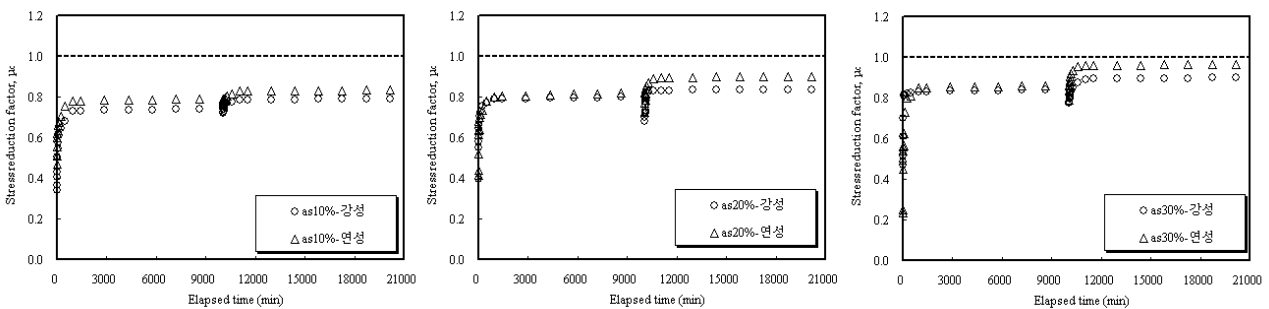


그림 8. 시간에 따른 복합지반 내 점토부의 응력감소계수 변화

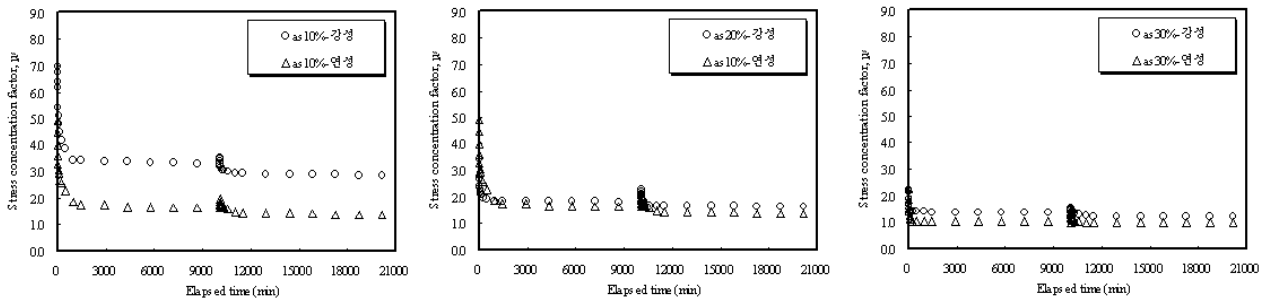


그림 9. 복합지반 내 모래말뚝의 응력집중계수 변화

4. 결과분석

4.1 복합지반의 치환율에 따른 침하특성

그림 10은 치환율에 따른 하중단계별 침하특성을 나타내었다. 하중단계 83.39kPa과 166.77kPa 모두 치환율이 증가함에 따라 침하량이 감소되고 있으며 치환율에 따른 침하저감효과는 비교적 선형을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 침하저감효과는 그림 11의 치환율에 따른 침하저감계수 변화경향으로부터 보다 명확히 입증된다. 또한, 강성재하조건에 비해 연성재하조건에서의 침하량이 보다 크게 나타났으며, 이로 인하여 침하저감계수는 연성재하조건이 강성재하조건에 비해 큰 것으로 조사되었다. 즉, 연성재하조건에서는 앞서 그림 6과 그림 8에서 살펴본 바와 같이, 점토부에 작용하는 응력이 강성재하조건에 비해 상대적으로 크고, 이로 인해 점토부의 개량이 상대적으로 원활히 이루어지게 되어 침하량이 크고 침하저감계수가 크게 산정된다고 할 수 있다.

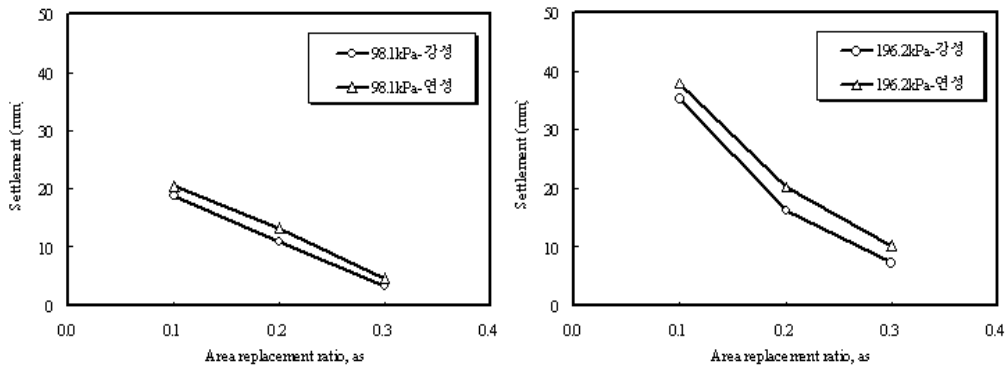


그림 10. 치환율에 따른 복합지반의 침하특성

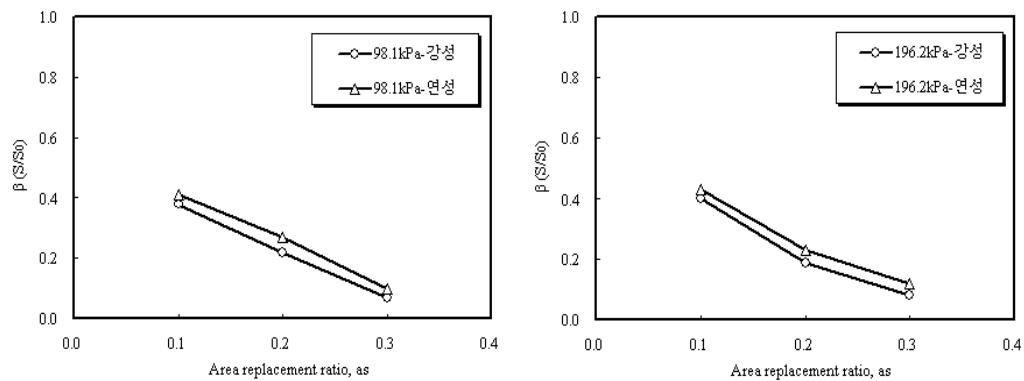


그림 11. 치환율에 따른 복합지반의 침하저감계수 변화

4.2 장기침하예측기법을 통한 복합지반의 압밀도 산정

지반의 압밀특성은 일반적으로 시간에 따른 간극수압의 소산 정도로 판단하게 된다. 그러나, SCP 복합지반의 경우 초기 비배수 재하 상태에서의 과잉간극수압은 배수밸브를 개방함과 동시에 거의 전체가 소산되어 0에 가까운 값을 나타내었다. 이는 복합지반 내의 점토부에 존재하던 과잉간극수압이 모래말뚝을 통해 순간적으로 소산되었기 때문이며, 이로 인해 과잉간극수압을 이용한 압밀도의 산정은 불가능하였다. 따라서, 장기침하 예측기법을 이용하여 최종침하량을 예측하고 이로부터 최종침하량에 대한 현재의 침하량의 비로 압밀도를 산정해야 할 필요가 있다. 따라서, 본 절에서는 기존 토질역학 분야에서 널리 사용하고 있는 Asaoka법과 Hoshino법, 쌍곡선법, \sqrt{S} 법을 이용하여 장기침하를 예측하고, 그 경향으로부터 적정 최종 침하량을 결정한 후, 다시 압밀도를 산정하는 방법을 이용하였다.

그림 12는 강성재하 조건에과 연성재하조건에 대해 치환율별로 각 장기침하예측기법을 통하여 산정된 최종침하량이다. 네 가지의 예측기법들은 대부분 비슷한 최종 침하량을 추정했으며, Asaoka법이 치환율 10%에 대해 약간 큰 예측치를 나타내기는 하였으나, 그 범위가 크지 않아 네 가지의 기법으로 산정한 최종침하량의 평균값을 최종침하량으로 산정하고 이를 이용하여 압밀도를 계산하였다.

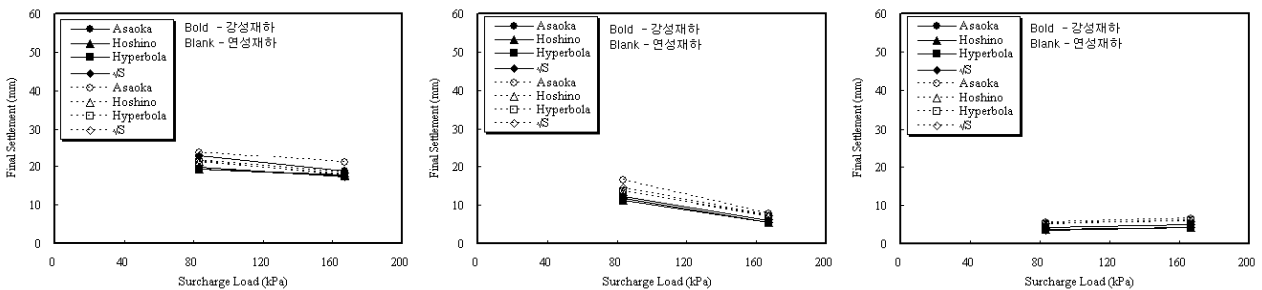


그림 12. 치환율별 하중크기에 따른 예측 최종침하량

그림 13은 각각 강성재하조건과 연성재하조건에 대한 시간-압밀도 관계를 도시한 것이다. 동일 경과 시간에서 복합지반 자체의 압밀도는 전체적으로 하중강도가 높은 경우가 다소 높은 것을 알 수 있으며, 강성재하에 비해서는 연성재하를 적용한 경우에 높은 압밀도를 나타내었다.

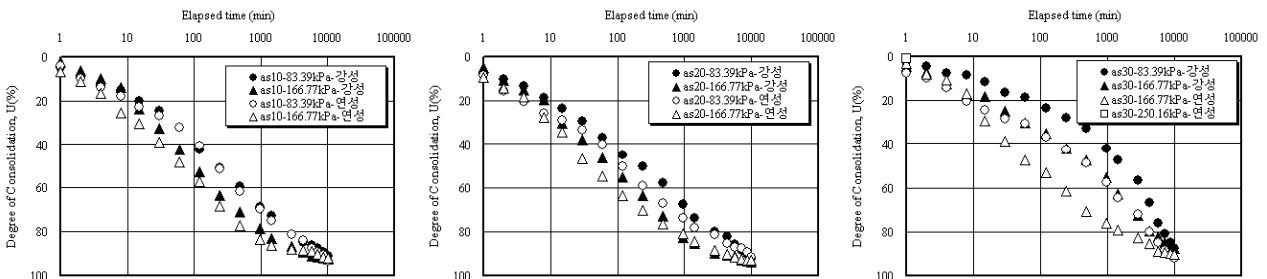


그림 13. 치환율별 압밀도 변화 특성

4.3 복합지반의 응력분담비

그림 14는 치환율별 하중크기에 따른 응력분담비 특성을 나타낸 것이다. 하중단계가 진행될수록 응력분담비는 약간 감소되는 경향을 나타내었으며, 강성재하 조건인 경우, 치환율 10%에서 가장 높은 응력분담비를 나타내었다. 이는 치환율이 작을수록 모래다짐말뚝으로의 하중전이현상이 두드러지게 나타난다는 것을 의미한다. 그러나 연성재하인 경우, 응력분담비가 1~2정도에 분포되어 있으며, 치환율에 따른 응력분담비의 변화도 작게 나타났다. 그림 15는 하중크기별 치환율에 따른 응력분담비 특성을 나타

낸 그림으로서, 강성재하 조건에서는 치환율이 증가함에 따라 응력분담비가 감소되는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 앞서 살펴본 바와 같이 하중강도가 큰 경우 압밀도가 큰 점을 고려하면, 복합지반의 압밀도가 증가함에 따라 응력분담비는 감소하며, 이는 점토지반의 강도증가에 기인한 것이라 할 수 있다.

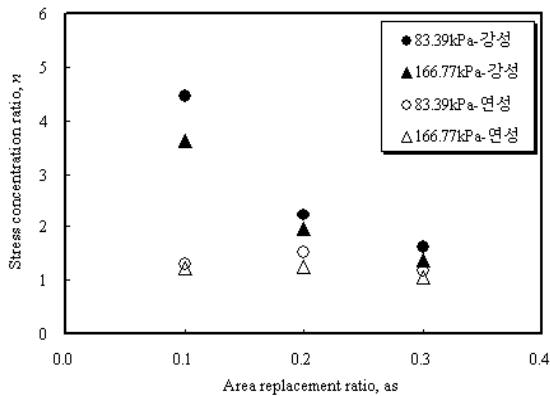


그림 14. 치환율에 따른 응력분담비 변화

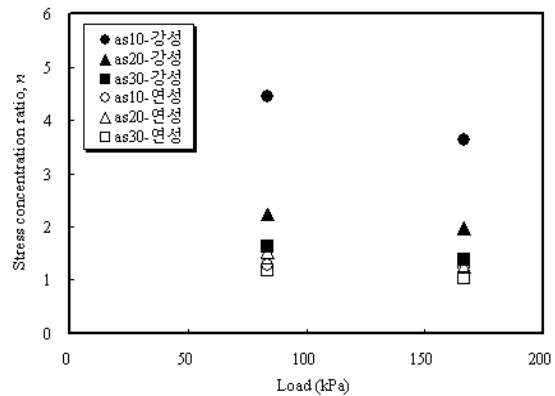


그림 15. 하중강도에 따른 응력분담비 변화

5. 결론

본 연구는 측벽 밀착형 피스톤 재하방식의 수정된 형태의 원통형 대형토조시험기를 이용하여 SCP 복합지반에 대한 재하시험을 실시하였으며, 이로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 저치환율 SCP가 적용된 복합지반에서의 침하량과 침하저감계수는 치환율이 증가할수록 감소하였다.
- 2) 모래말뚝과 점성토 상부에 설치한 응력계 계측결과, 모래말뚝의 응력은 초기에 크고 시간의 경과에 따라 감소한 반면, 점토부에 작용하는 응력은 시간의 경과에 따라 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이는 초기에 말뚝이 전담하던 응력이 점토부의 압밀에 의한 전단강도 증가로 인해 점차 점토 쪽으로 전이되었기 때문이다. 한편, 모래말뚝이 분담하는 응력은 강성재하조건이 연성재하조건에 비해 크다.
- 3) 저치환율 범위 내에서의 응력분담비는 강성재하조건 하에서는 치환율이 증가할수록 감소하며 하중강도가 증가할수록 증가한다. 연성재하 조건에서는 치환율과 하중강도에 관계없이 거의 일정한 응력분담비를 갖는다.

참고문헌

1. 김재권 (2003), “연약지반에 타입된 모래다짐말뚝의 하중전이 특성에 관한 연구”, 연세대학교 박사학위논문
2. 寺師昌明, 北詰昌樹 (1990), “低置換率SCP工法により改良された粘性土地の支持力”, 港湾技術研究所報告 第29卷 第2号, pp. 119-148
3. Jung, J. B., Moriwaki, T., Sumioka, N., Kusakabe, O. (1998), "Consolidation behavior of composite ground improved by sand compaction piles", **Centrifuge 98**, pp.825-830
4. Yamazaki, H., Morikawa, Y., Koike, F. (2003), "Study on Effect of K0-Value on SPT N-Value Prediction after Densification by Sand Compaction Pile Method", **Proceedings - JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS**, No. 750, pp.231-236