

단위셀 시험을 이용한 SCP 공법 적용지반 점성토의 개량특성 The Characteristics of the Improvement of the Clayey soil in the Composite Ground with Sand Compaction Pile(SCP) using Unit-cell test

이동현¹⁾, Dong-Hyun Lee, 신현영²⁾, Hyun-Young, Shin, 한상재³⁾Sang-Jae, Han, 김수삼⁴⁾, Soo-Sam Kim,

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

²⁾ 중앙대학교 토목공학과 박사과정, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Eng. Univ. of Chungang

³⁾ 한양대학교 토목환경공학과 연구교수, Research Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng. Univ. of Hanyang

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

SYNOPSIS : In this study, a series of laboratory tests based on 'Unit-cell concept' are performed to investigate improvement characteristics of clay ground in sand compaction pile method. Settlement reduction characteristics of composite ground and improvement characteristics of clay part could be qualified. In these procedure, the new strain-compression index(C_c) of composite ground are adopted to show compressibility of composite ground according to the area replacement ratio, which is similar to the compression index(C_c) in pure clay ground. Also, using normalization of reduction of water content in composite ground to the initial water content, improvement characteristics of clay part are investigated.

Key words : Sand Compaction Pile(SCP), Unit-cell Concept, Area Replacement Ratio, Relative Density, Settlement Reduction Factor, Stress Concentration Ratio

1. 서론

SCP 공법은 그 적용지반에 따라 점성토와 사질토에 대해 크게 두 부류로 구분되며, 치환율에 따라 다시 고치환 SCP와 저치환 SCP, 그리고 적용지역에 따라 육상 SCP와 해상 SCP 공법으로 구분된다. 고치환율 SCP 공법($a_s > 70\%$)에 대한 이론적인 분석과 현장에 대한 적용성 검토는 거의 완성단계에 있고 실제 설계에 있어서 필요한 설계법 및 설계기준을 건설교통부에서 제정한 구조물 기초설계기준(2003. 2)에서 제시하고 있으나, 저치환율 범위($a_s < 40\%$)에서의 점토부의 개량효과 등에 대한 구체적인 파악은 아직 이루어지지 않고 있는 실정이다. 더욱이 국내 지반조건에 부합하는 SCP 설계기준이 아닌 일본에서 시공된 SCP 공법의 시공실적에 근거한 기준이기 때문에 저치환율 범위에 있는 SCP 공법에 대한 국내 지반조건에 적합한 설계기준 마련이 요구된다.

또한 양질의 모래를 필요로 하는 본 공법에서 재료수급이 어렵다는 단점을 보완하기 위해서는 저치환율 복합지반에 대한 거동을 분석하여 실제 현장에서 최적의 설계를 위한 설계정수를 제시할 필요가 있다.

이상의 목적을 위해 본 논문에서는 단위 셀(Unit cell) 개념을 토대로 원통형 셀 시험기를 제작하여 일련의 실내 시험을 실시하였으며, 치환율과 모래다짐말뚝의 상대밀도에 따른 복합지반의 거동 양상과 점성토 지반의 개량효과를 파악해 보고자 하였다.

2. 실험내용 및 방법

2.1 적용시료

본 연구에 있어서 점성토지반의 조성에는 카올리나이트를 사용하였다. 대상 카올리나이트의 물리적 특성은 표 1과 같다.

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

카올리나이트 시료는 초기 액성한계의 1.5배에 해당하도록 배합한 후 Unit cell 시험기에 타설하였으며, 정규압밀 지반을 구현하기 위해 양면배수 조건하에서 49.05kPa의 압력으로 예압밀을 실시하였다.

한편, 점성토 지반에 타입되는 모래말뚝의 재료로는 주문진 표준사를 사용하였으며, 물리적 특성은 표 2에 제시하였다. 표준사는 동결말뚝 조성용 케이싱(그림 1)을 이용하여 최적함수비(OMC=13.5%)에서 조건별 상대밀도(Dr=70%, 50%, 30%)에 이르도록 다짐을 실시하였다. 다짐실시 후, 영하 20℃ 이하로 24시간이상 동결하고 카올리나이트 공시체에 관입용 케이싱(그림 2)을 이용하여 타설하였다.

표 2. 주문진 표준사의 기본 물성

Specific Gravity	Maximum Dry Density (kN/m ³)	Minimum Dry Density (kN/m ³)	Maximum Void Ratio	Minimum Void Ratio
2.63	16.38	13.49	0.913	0.575



그림 1. 동결말뚝조성용 케이싱



그림 2. 동결말뚝 조성용/관입용 케이싱

2.2 단위셀 실험(Unit-cell test)

2.2.1 실험장비

본 연구에 사용된 Unit cell 시험기는 피스톤을 이용한 강성재하방식이며, 그림 3에는 시험기의 형상을 도식적으로 나타내었다. 또한 Unit cell 시험기를 해체한 모습을 그림 4에 제시하였다. 본 시험기는 Air compressor로 가압하여 압력 조절장치(Pressure Regulator)를 통해 하중을 제어하였다. 간극수압은 측면 및 하부에서 측정이 가능하도록 간극수압 포트(port)를 설치하였다. 침하량은 다이얼 게이지(Dial gauge)를 이용하여 측정하였다. 그림 5에는 Unit cell 시험기를 통한 실험전경을 제시하였다.

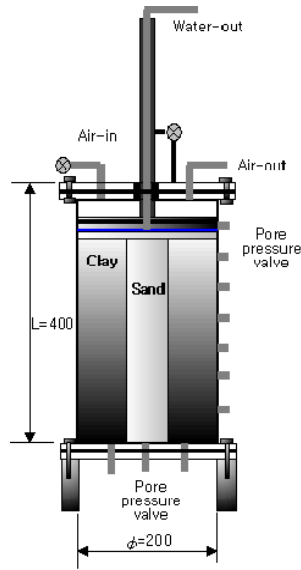


그림 3. Unit cell 시험기

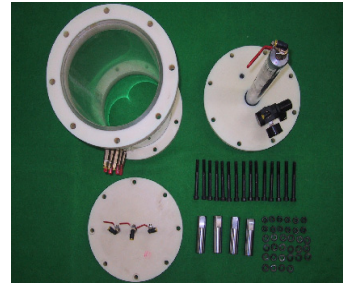


그림 4. Unit cell 시험기 해체 모습



그림 5. 단위말뚝모형실험 전경

2.2.2 실험방법 및 조건

관입용 케이싱을 점토 시료에 관입할 때에는 점토 시료의 교란을 최소화하기 위해 관입속도를 1.0cm/sec 정도로 느리게 하며 연직상태를 유지하도록 주의하여 관입시켰다. 이때, 케이싱 벽면의 마찰을 최소화하기 위해 수용성 윤활제를 케이싱 내측 및 외측 벽면에 도포하였다. 모래말뚝 동결 시에는, 동결에 의한 말뚝의 체적팽창을 막기 위해 동결말뚝용 케이싱의 상·하단을 폐합하였다. 동결과정은 그림 6에 제시하였으며, 카올리나이트 공시체에 말뚝을 설치하는 과정은 관입용 케이싱을 우선 관입시킨 후 케이싱 내에 있는 카올리나이트를 동결모래말뚝으로 치환하였다. 동결말뚝이 설치된 복합 공시체는 19.2kPa의 낮은 압력으로 비배수 재하시켜 해동시켰으며, 그 과정에서 카올리나이트 지반과 모래말뚝 간의 밀착을 도모하고자 하였다. 하중재하는 49.05kPa, 98.1kPa, 196.2kPa, 294.3kPa의 하중으로 단계재하를 실시하였다. 각 하중단계별 재하시간은 24시간으로 일정하게 제어하였다.

모래말뚝의 치환율은 각각 12.69%, 19.85%, 32.75%이며, 모래말뚝의 강성에 의한 지지효과를 분석하기 위해 모래말뚝의 상대밀도를 30%, 50%, 70%(허용오차 5%이내)에 맞춰서 실시하였다. 표 3.3에는 실험조건을 제시하였다.

표 3. 실내 Unit cell 시험의 실험조건

모래말뚝 상대밀도(%)	치 환 율(%)	재하방식/재하응력(kPa)
30, 50, 70	12.69, 19.85, 32.75	강성재하/단계재하(49.05, 98.1, 196.2, 294.3)

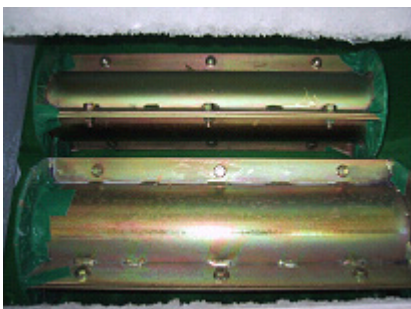


그림 6. 말뚝 동결과정

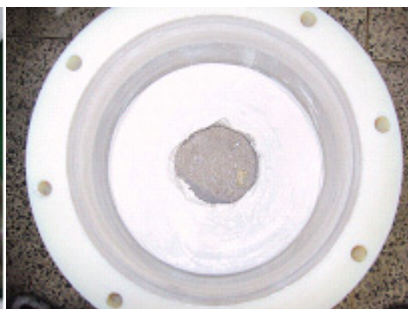


그림 7. 복합지반의 조성

3. 실험결과

그림 8은 SCP가 적용된 복합지반의 침하량 결과를 도시한 그래프로서, 침하저감효과에 의해 치환율이 증가할수록 침하량이 무처리 지반보다 감소되는 현상을 나타내고 있다. 또한 상대밀도가 증가할수록 말뚝의 강성 증가로 인하여 동일 치환율 조건 하에서 침하량이 감소되는 것을 알 수 있다.

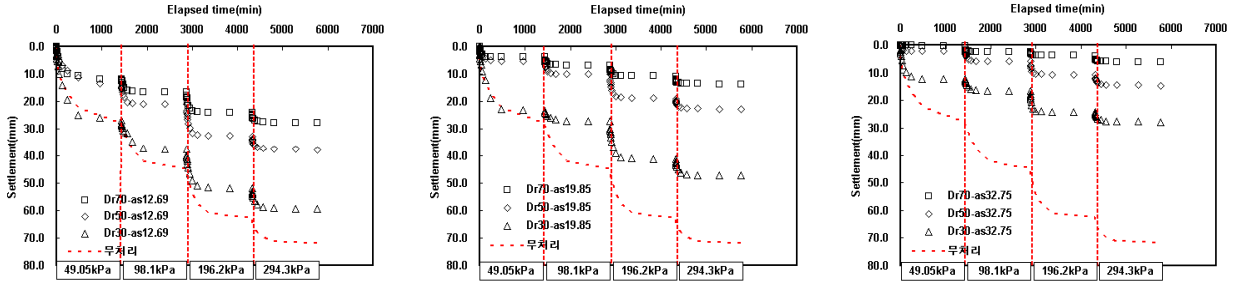


그림 8. 복합지반의 침하량 결과

표 4는 SCP가 적용된 복합지반 내에서 점토부의 실험 초기 함수비와 실험종료 후의 함수비를 수치적으로 나타낸 것이다. 여기서 함수비 변화율(1)은 초기 함수비에 대한 점토부의 함수비 변화량의 비로 나타낸 것으로, 모래말뚝에 의한 점토부의 함수비 감소량을 정량적으로 정규화하여 나타낸 수치이며 수치가 작을수록 초기 함수비에 비해 점토부의 함수비가 적게 감소되었다는 것을 의미한다. 또한 함수비 변화율(2)은 무처리 점성토 지반의 함수비 감소량에 대한 복합지반 내 점토부의 함수비 감소량에 대한 비로서, 모래다짐말뚝에 의한 개량정도를 정량적으로 정규화하여 나타낸 수치이다. 여기서 1보다 큰 수치들은 모래말뚝에 의한 압밀축진효과로 인하여 복합지반 내 점토부의 함수비 감소가 탁월하게 나타났음을 의미한다.

표 4. 복합지반의 함수비 측정결과

구 분	초기 함수비(w_0) (%)	최종 함수비(w_f) (%)	함수비 변화율 (1) ($\Delta w/w_0$)	함수비 변화율 (2) ($\Delta w/\Delta w_c$)
무 처 리	70.538	46.813	0.336	-
Dr30-as12.69	68.775	31.203	0.546	1.818
Dr30-as19.85	69.173	29.091	0.579	1.689
Dr30-as32.75	68.399	25.267	0.631	1.584
Dr50-as12.69	66.709	39.549	0.407	1.282
Dr50-as19.85	69.282	39.858	0.425	1.240
Dr50-as32.75	68.004	37.579	0.447	1.145
Dr70-as12.69	60.339	46.237	0.234	0.501
Dr70-as19.85	58.998	44.022	0.254	0.631
Dr70-as32.75	55.508	43.610	0.214	0.594

4. 실험결과의 분석

4.1 복합지반의 침하특성

그림 9는 복합지반의 침하경향에 대해 시간을 log-scale로 도시하여 나타낸 그림이다. 상대밀도 30%에서 치환율 12.69%와 치환율 19.85%에 대한 초기 하중단계에서의 압밀속도는 무처리 지반보다 빠르게 나타난 것을 확인할 수 있다. 이는 상대밀도가 낮을수록 침하저감효과보다는 배수재로서의 압밀축진효과가 우월하다는 것을 의미한다. 하지만 치환율과 상대밀도가 높아질수록 침하저감효과에 의한 압밀속도의 지연이 발생하는 것을 알 수 있다. 즉, 샌드드레인에 의한 연약지반의 압밀개량 특성과는 달리 SCP에 의한 연약지반의 개량 특성은 모래말뚝에 의한 압밀축진효과뿐만 아니라 모래말뚝의 강성에 의한 복합지반의 침하저감효과도 동시에 기대할 수 있다는 것을 입증한다.

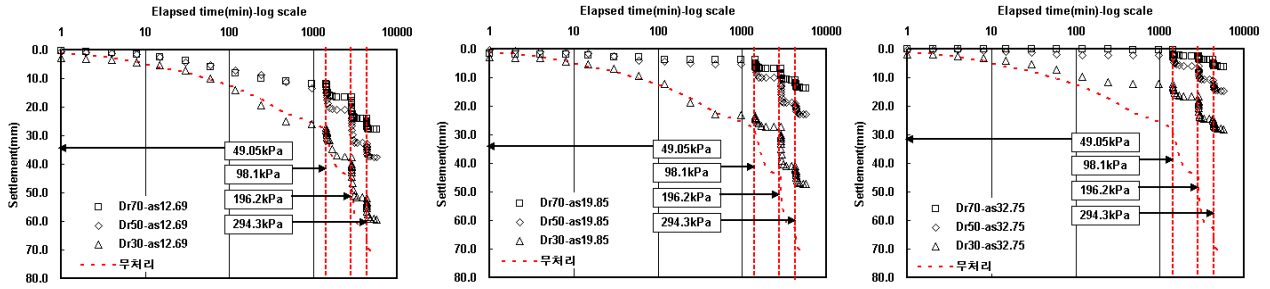


그림 9. 복합지반의 침하특성(log scale)

4.1.1 치환율에 따른 침하특성

그림 10은 치환율에 따른 침하량 변화를 도시한 것으로, 치환율이 증가함에 따라 침하량은 지속적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 그림 11에서는 무처리 지반의 침하량에 대한 SCP 복합지반의 침하량의 비로서, 침하저감계수도 치환율이 증가함에 따라 그림 10과 같은 경향으로 감소하였다. 이처럼 치환율이 증가함에 따라 복합지반의 침하량이 감소하는 것은 재하하중에 대한 모래말뚝의 단면적이 넓어짐에 따라 모래말뚝의 지지효과가 증대되기 때문으로 판단된다.

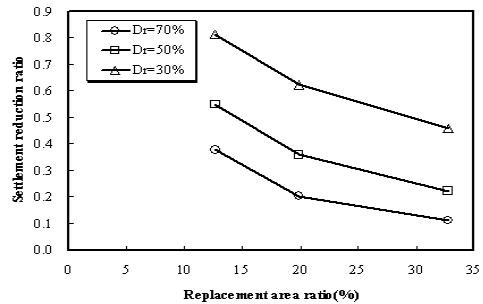
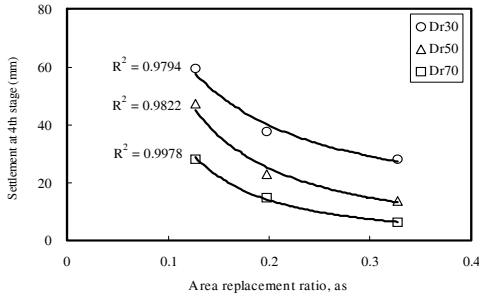


그림 10. 4단계 재하시 치환율에 따른 침하량 변화 그림 11. 치환율에 따른 침하저감계수의 변화특성

4.1.2 모래말뚝의 상대밀도에 따른 침하특성

그림 12와 그림 13은 상대밀도에 따른 복합지반의 침하저감특성을 나타낸 것이다. 모래말뚝의 상대밀도는 모래말뚝의 강성을 나타내는 주요 파라미터로서, 상대밀도가 증가함에 따라 모래말뚝의 강성이 증대되고 이에 따라 복합지반의 침하저감효과가 두드러지게 나타난다는 것을 제시하고 있다. 그림 13에 나타난 바와 같이, 상대밀도의 증가에 따른 침하량 변화 역시 치환율에 따른 침하량 변화와 유사하게 지수적인 감소 형태를 보여주었다.

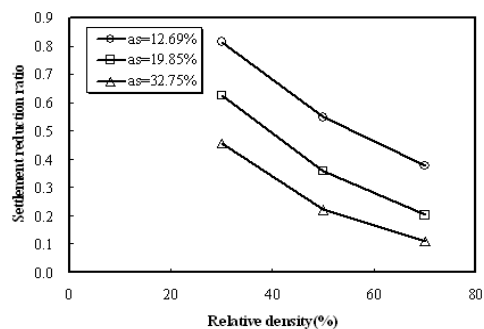
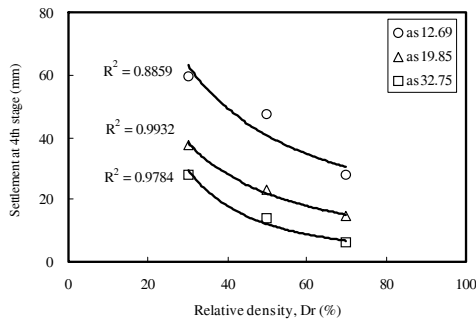


그림 12. 상대밀도에 따른 침하량 변화

그림 13. 상대밀도에 따른 침하저감계수의 변화특성

4.2 복합지반의 압밀특성

장기침하예측기법을 통하여 추정된 무처리 지반 및 복합지반의 최종 침하량에 대한 시험 종료시의 침하량으로서 압밀도를 산정한 결과를 그림 14~그림 16에 걸쳐 도시하였다. 대부분 압밀도 90% 이상 도달된 것을 확인할 수 있었다. 장기침하 예측기법을 이용하여 예측한 최종 침하량으로부터 구한 치환율별 압밀도 변화를 살펴보면, 각각의 하중 단계에서 무처리 지반에 비해 압밀이 촉진되었음을 알 수 있다. 한편, 모래말뚝의 상대밀도 30%에서는 최종 하중단계인 294.3kPa에서 치환율에 따라 압밀도 변화 곡선이 유사한 형태를 보이고 있어, 치환율의 영향이 작은 것을 알 수 있다. 동일한 조건에서 상대밀도가 50%와 70%로 증가함에 따라 치환율의 영향은 점차 증가되었다.

이러한 결과는 모래말뚝의 상대밀도가 복합지반의 압밀 거동에 영향을 미친다는 것을 입증하며, 상대밀도 30%를 갖는 모래말뚝의 경우에는 복합지반의 지지역할보다는 배수기능이 지배적임을 제시하고 있다.

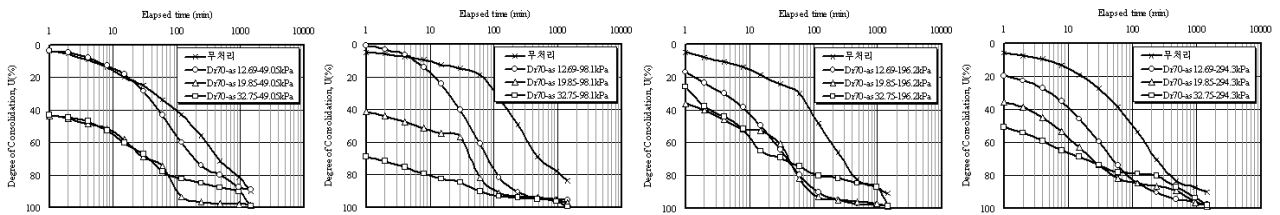


그림 14. 치환율에 따른 하중단계별 복합지반의 압밀도 변화($D_r=70\%$)

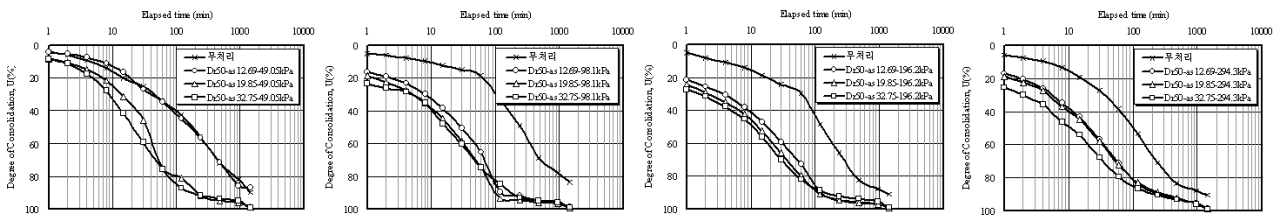


그림 15. 치환율에 따른 하중단계별 복합지반의 압밀도 변화($D_r=50\%$)

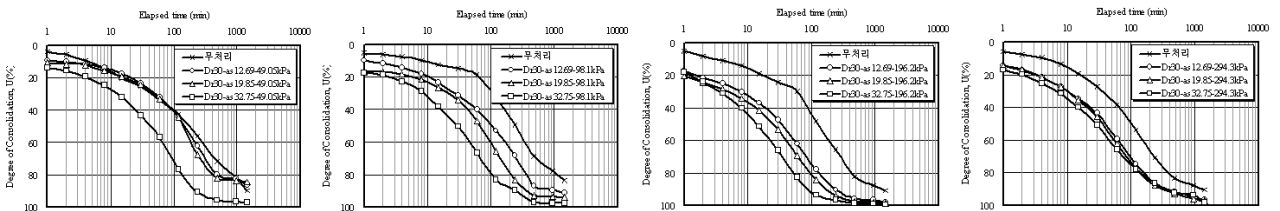


그림 16. 치환율에 따른 하중단계별 복합지반의 압밀도 변화($D_r=30\%$)

4.3 복합지반의 변형률 압축지수(C_c)

균질한 토질의 경우 압축특성을 표현하는 기본적인 파라미터로 압축지수(C_c)가 있으나, 복합지반의 경우에는 모래말뚝부와 점토부의 평균간극비를 산정할 수 없을 뿐만 아니라, 표준압밀시험과는 달리 시료폭과 높이가 크기 때문에 C_c 값을 직접 산정하기 곤란하다. 따라서, 응력변화에 따른 축변형률 변화를 도시하여 그 기울기를 변형률 압축지수(C_c)로 명명하고 그 경향으로부터 압축특성을 살펴보았다.

그림 17~그림 20에 제시한 바와 같이, 변형률 압축지수(C_c)는 무처리 지반의 경우에 비해 치환율과 상대밀도가 증가함에 따라 점차 감소하여 치환율 32.75와 상대밀도 70% 조건에서 최소값을 나타내었으며, 치환율과 상대밀도에 따라 높은 상관성을 보이는 1차 함수의 경향을 나타내었다.

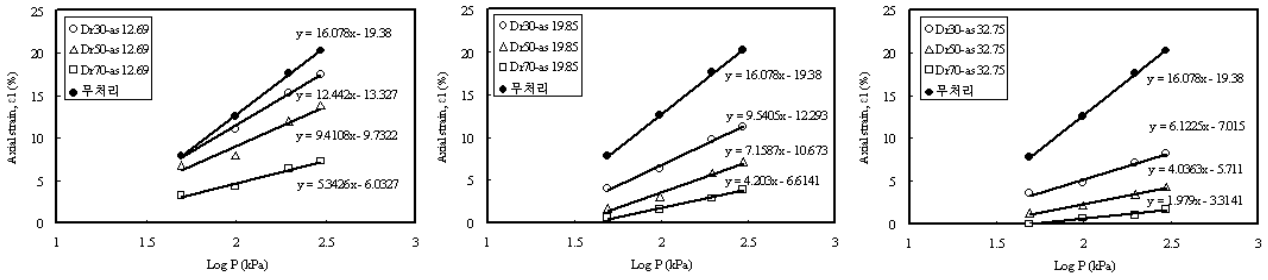


그림 17. 치환율별 상대밀도에 따른 변형률-하중 관계

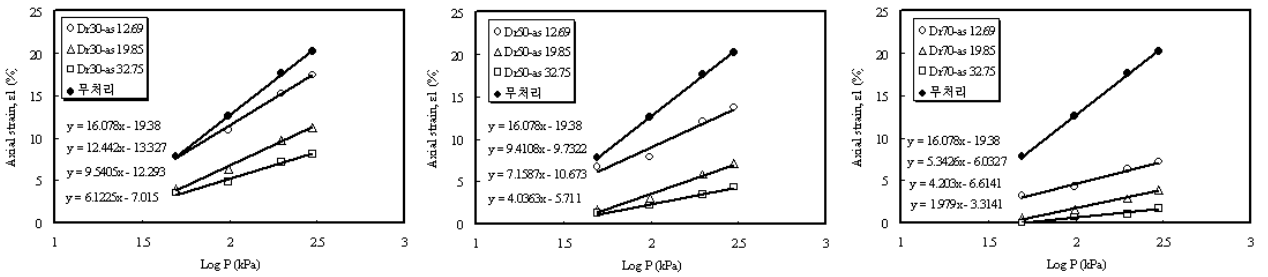


그림 18. 상대밀도별 치환율에 따른 변형률-하중 관계

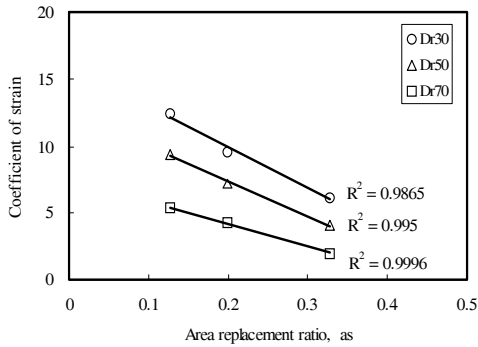


그림 19. 치환율에 따른 변형률 압축지수의 변화

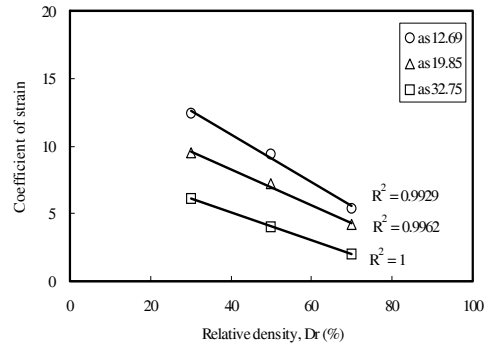


그림 20. 상대밀도에 따른 변형률 압축지수의 변화

4.4 점토부의 개량특성

그림 21에는 복합지반 내 점토부의 초기 함수비(w_0)에 대한 시험 종료 후의 함수비 감소량(Δw)의 비로서 점토부의 개량특성을 도시하였으며, 그림 22는 무처리 지반의 함수비 감소량(Δw_c)에 대한 복합지반 내 점토부의 함수비 감소량(Δw)의 비로 도시하였다. 치환율에 따라서 점토부의 함수비 변화특성은 거의 일정한 반면, 상대밀도에 따른 점토부의 함수비 변화특성은 상대밀도의 증가에 따라 함수비 변화비율이 감소하였으며, 모래말뚝의 상대밀도가 증가함에 따라 점토부의 배수효과가 저하됨을 의미한다.

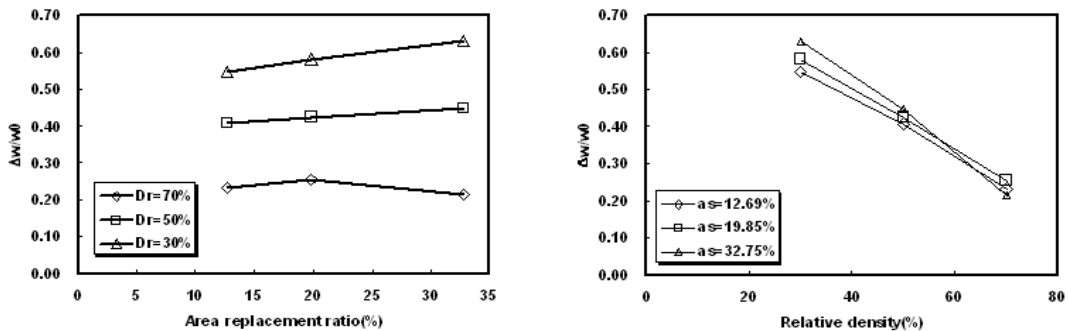


그림 21. 치환율 및 상대밀도에 따른 점토부의 함수비 변화특성($\Delta w/w_0$)

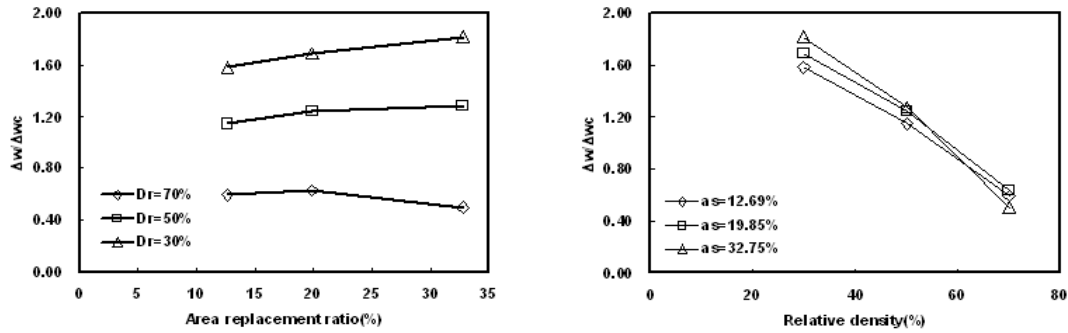


그림 22. 치환율 및 상대밀도에 따른 점토부의 함수비 변화특성($\Delta w/\Delta w_c$)

5. 결론

본 연구에서는 SCP 복합지반 내에서 모래말뚝에 의한 점토부의 개량특성을 알아보기 위해 단위셀 시험을 실시하여 침하량 및 함수비 변화를 측정하였다. 침하량 측정결과로부터 복합지반의 침하저감효과를 정량적으로 파악해 보았으며, 함수비 측정결과로부터 복합지반 내 점토부의 개량효과를 파악해 보았으며, 이로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 치환율 및 상대밀도가 증가함에 따라 복합지반의 침하량은 지속적으로 감소되는 경향을 나타냈으며, 상대밀도 30%인 저밀도 SCP에 있어서 저치환율이 적용된 경우는 초기 재하단계에서 무처리 지반보다 빠른 압밀속도를 나타내었다.
- 2) 복합지반의 $\epsilon_1 - \log p'$ 관계로부터 산정한 변형률 압축지수(C_c)는 무처리 지반의 경우에 비해 치환율과 상대밀도가 증가함에 따라 점차 감소하였다. 이로부터 모래말뚝의 상대밀도가 증가함에 따라 말뚝의 강성은 증가하고 이에 따라 복합지반의 침하저감효과가 증대되는 현상을 정량적으로 제시할 수 있었다.
- 4) 치환율에 따라서 점토부의 함수비 변화특성은 거의 일정한 반면, 상대밀도에 따른 점토부의 함수비 변화특성은 상대밀도의 증가에 따라 함수비 변화비율이 감소하였다. 이로부터, 복합지반에서 점토부의 개량 효과는 모래말뚝의 동일한 상대밀도 조건 하에서는 치환율의 변화에 따른 영향을 크게 받지 않으며, 실제 점토부의 개량특성에는 모래말뚝의 상대밀도가 지배적인 역할을 하는 것을 알 수 있었다.
- 5) 이상의 결과로부터 저치환율 SCP 복합지반의 거동에 있어서, 모래말뚝의 강성과 점토지반의 개량특성은 서로 상반되는 영향을 미치게 되어, 말뚝 강성의 증가는 침하저감과 지지력 증대에 효과적인 반면 점토지반의 개량 측면에서는 오히려 부정적인 영향을 나타낼 수 있음을 알 수 있었으며, 이를 적절히 고려한 설계지침이 요구된다고 할 수 있다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2002), “구조물기초설계기준”
2. 浅岡 顕, 松尾 稔, 野津 光夫 (1994), “SD, SCP における地盤改良原理の考察とその応用”, **土と基礎**, 42-2(433), pp.7-12
3. Jong-Bum Jung, Kang-Il Lee, Jean-Soo Lee (1999), “Consolidation Behavior of Clay Ground Improved by Sand Compaction Piles”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 3, No. 2
4. Asaoka, A., Kodaka, T. and Nozu, M. (1993), "Improvement of Deep Soft Clay with Sand Compactions Piles" *Soft soil engineering*, pp.628-633