

SCP와 GCP의 압밀촉진효과에 관한 비교 고찰

A Comparative Study on the Effect of Promoting Consolidation between SCP and GCP

유 승 경^{1*} You, Seung-Kyong

ABSTRACT

In this paper, a series of model tests were performed in laboratory to evaluate promoting consolidation of compaction pile methods for soft ground improvement. For the model tests, composite soil samples that have 10% replacement area ratio were prepared by using sand, gravel, and sandy gravel for the materials of compaction piles. After loading to each composite soil sample, the excess pore pressure dissipation and settlement were investigated. In addition, the behavior of clay mixed with each compaction pile was also monitored at the end of consolidation to evaluate clogging phenomenon. As a test result, the effects for decreasing settlement and promoting consolidation by GCP were prominent, and the mixed clay was not monitored in all of the three compaction piles.

요 지

본 논문에서는 연약지반개량을 위한 다짐말뚝공법들의 압밀촉진효과를 파악하기 위하여 일련의 실내모형실험을 실시하였다. 모형실험에서는 다짐말뚝의 재료로써 모래, 쇄석, 모래질 쇄석을 사용하여 치환율이 10%인 복합지반을 조성하였다. 각각의 복합지반에 하중을 재하 한 후 시간의 경과에 따른 침하량 및 점토부의 과잉간극수압 소산 거동을 관측하였으며 간극막힘 현상에 대한 검토를 위하여 압밀 종료 후 각각의 다짐말뚝에 대한 점토 혼입 양상을 관찰하였다. 실험 결과 쇄석다짐말뚝에 의한 침하저감효과와 압밀촉진효과가 가장 크게 나타났으며 압밀 종료 후 세 가지의 다짐말뚝 모두 점토의 혼입 양상은 관측되지 않았다.

Keywords : Discharge capacity, Compaction pile, Clogging, Model test, Consolidation, Soft clay ground

1. 서 론

최근 우리나라에서는 해안지역(Water front)의 개발이 확대 되고 있으며 따라서 연약한 해저 점토지반이나 매립으로 조성된 연약지반 상에 다양한 건설 사례가 급증하고 있다. 이러한 건설 현장에서는 지지력 부족이나 과도한 침하 등의 지반 공학적 문제들이 발생되고 있으며 이는 우리 토목공학자들이 적극 해결하여야 하는 과제로 늘 존재하고 있다.

연약점토지반의 침하저감 및 지지력 증대, 압밀촉진을 목적으로 채택되고 있는 개량공법에는 천연모래를 이용하

는 모래다짐말뚝(이하 SCP라고 칭함)공법이 일반적으로 적용되고 있으며 본 공법에 의한 개량효과에 대하여 다수의 연구자들에 의해 실험적, 수치해석적 연구가 활발히 진행되어 왔다(Murayama et al., 1973; Ishizaki et al., 1989; 유승경, 2003; You et al., 2006). 그러나 최근 천연모래의 부족으로 인한 재료비의 급증과 환경파괴라는 쟁점으로 인해 그 적용이 한계에 다다르고 있는 실정이며 따라서 최근에는 천연모래의 대체 재료로써 건설 발생토 등에서 얻을 수 있는 쇄석을 다짐말뚝 재료로 이용하는 쇄석다짐말뚝(이하 GCP라고 칭함)공법의 적용사례가 점점 증가하고 있는 추세이다. GCP공법은 SCP공법과 비교하여 말뚝재

^{1*} 정회원, 명지전문대학 토목공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Myongji College, E-mail: yousk@mjc.ac.kr)

료의 입경이 크고 조성된 다짐말뚝의 강성이 크기 때문에 지지력 증대나 침하저감 효과가 우수하다고 할 수 있다. 그러나 최근의 다짐말뚝공법은 치환율 약 30% 이하의 저치환율 공법이 육상공사는 물론 해상공사에서도 그 적용 사례가 증가하고 있다(北詰昌樹, 1994). 따라서 두 공법 모두 저치환율로 시공될 경우 개량된 연약점토지반은 복합지반의 특성을 갖게 되며 그에 따라 연약지반에서는 다짐말뚝과 점토부의 강성 차이로 인한 응력분담거동과 다짐말뚝의 연직배수재 역할로 인한 압밀축진현상이 발생되게 된다. SCP공법과 GCP공법에 의한 응력분담거동 특성에 대해서 필자는 수치 해석적으로 검토하여 비교·평가한 바 있다(유승경 등, 2005). 그러나 압밀축진효과 즉, 두 다짐말뚝의 통수능 차이에 대하여는 아직 충분히 규명되어 있지 않다. 특히 GCP공법의 경우 다짐재료의 입경이 상대적으로 크기 때문에 주변 연약점토에 의한 말뚝표면의 간극막힘(Clogging) 현상이 우려되지만 이 또한 아직 명확히 밝혀지지 않은 현상이다. 따라서 실무에서는 GCP공법의 간극막힘 현상을 극소화시키고자 하는 노력의 일환으로 쇄석에 소정 비율의 모래를 혼합하여 다짐말뚝을 생성시키는 방법 등을 적용하고 있지만 이 또한 경험적인 방법으로 수행되고 있는 실정이며 그 효과에 대해서는 아직 정량적으로 명확히 규명되어 있지 않은 상태이다.

본 논문에서는 저치환율의 SCP와 GCP, GCP에 소정의 모래를 혼합한 형태의 공법(이하 SandyGCP라고 칭함)에 대한 압밀축진효과를 비교·평가하기 위하여 각각의 다짐말뚝이 적용된 복합지반에 대한 일련의 실내모형실험을 수행하였다. 모형실험에서는 다짐말뚝의 재료로서 모래, 쇄석, 모래질 쇄석을 사용하여 치환율이 10%인 복합지반을 조성하였으며 각각의 복합지반에 하중을 재하 한 후 시간의 경과에 따른 침하량 및 점토부의 과잉간극수압 소산 거동을 관측하였다. 또한 복합지반의 압밀이 종료된 후 각각의 다짐말뚝에 대한 주변 점토의 혼입 양상을 관찰하였다.

2. 실내모형실험 개요

2.1 모형실험 장치 및 계측시스템

그림 1과 그림 2는 각각 본 연구에서 사용한 실내모형실험장치의 모습과 상세도를 나타내고 있다. 실험에 사용된 원형 토조는 내경 280mm, 내부심도 280mm이고 토조 내부의 측면마찰을 저감시키기 위해 크롬으로 표면처리를

하였다. 토조의 하부는 배수용 파이프를 설치하여 모형지반의 하부로부터 배수를 가능하게 하였다. 또한, 재하판에는 직경 2mm의 구멍을 다수 만들어 모형지반 상부로 부터의 배수성을 확보하였다. 모형지반에 대한 하중재하는 소정의 중량을 갖는 추를 이용하여 재하 축에 전달된 하중이 재하판을 통해 모형지반에 전달되도록 수행하였다. 하중이 전달되는 재하축은 원형 토조에 고정시킨 가이드를

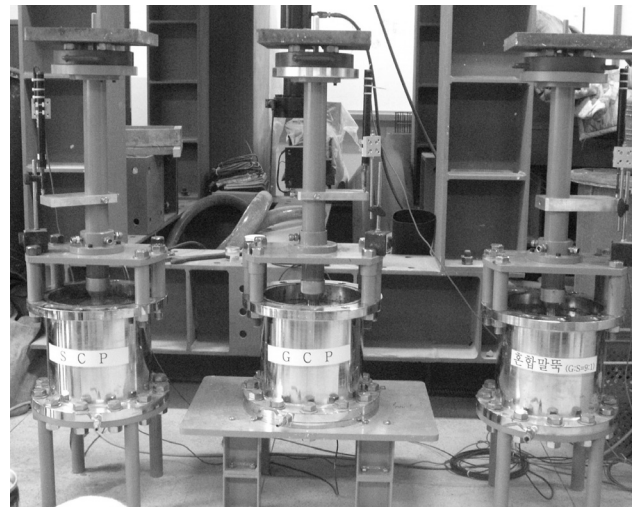


그림 1. 실내모형실험장치의 모습

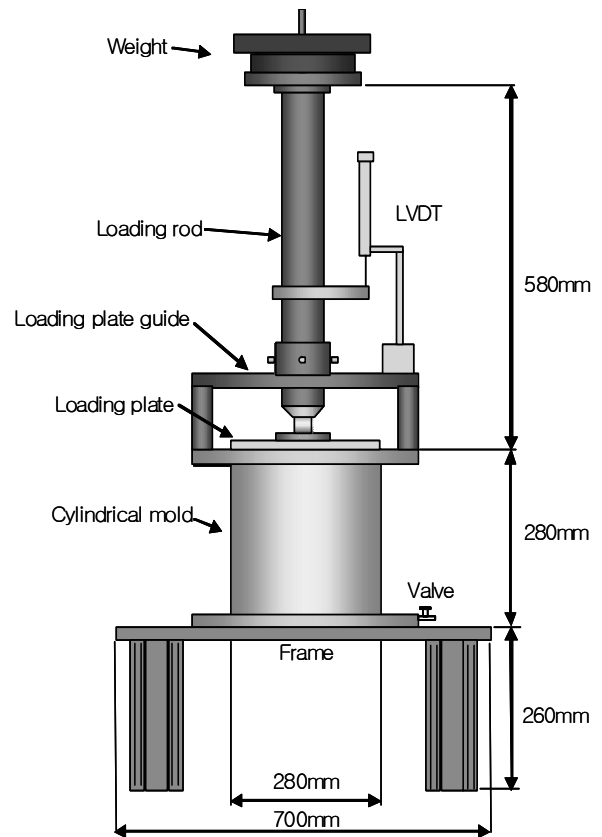


그림 2. 실내모형실험장치의 상세도

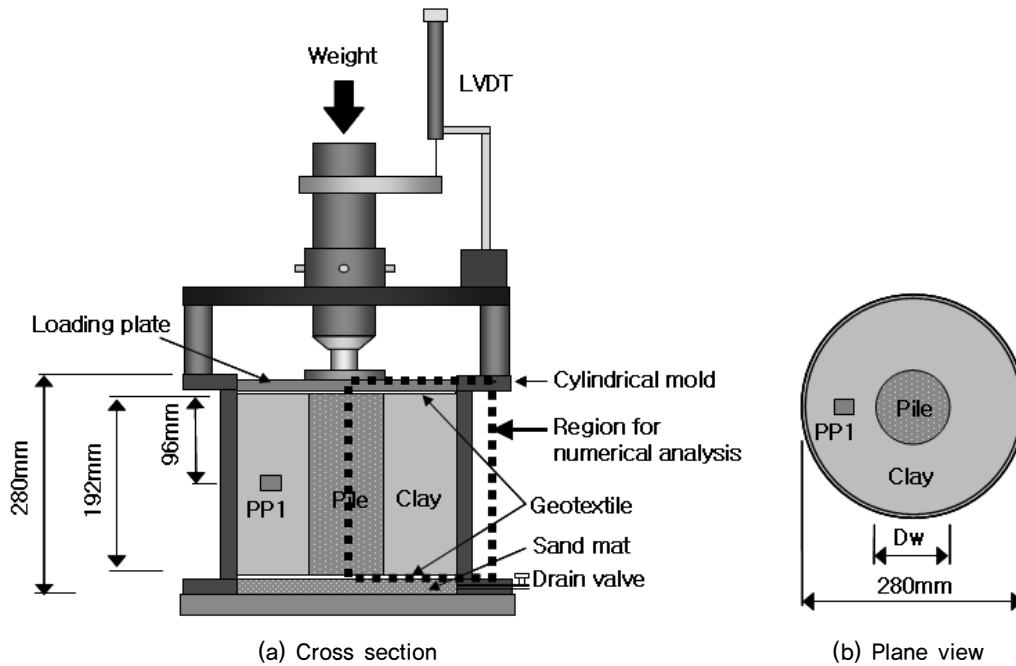


그림 3. 모형실험의 계측기 설치 위치

표 1. 측정항목과 계측기

Measurng items	Measuring instruments
Applied load	Weigt
Settlement	LVDT
Excess pore pressure	Pore pressure trasducer (BED-A-200kPa)

통하여 재하판과 연결시킴으로써 원형 토조의 저면부와 수평을 유지하도록 하여 재하 중 재하판의 편심을 최소화 하였고 복합지반의 침하량 계측을 위해 재하축에 고정시킨 침하판 위에 LVDT를 설치하였다. 또한 상재하중에 의한 복합지반의 과잉간극수압을 측정하기 위해 점토부의 중간 심도에 간극수압계를 설치하였다. 표 1은 모형실험에서의 측정항목과 각각의 항목에 대응하는 계측기를 나타내고 있으며 그림 3은 모형실험에서의 계측기들의 설치 위치를 나타내고 있다. 점토부에 간극수압계를 설치할 때는 점토의 충전 시 간극수압계의 이동을 최대한 방지하기 위하여 가능한 한 균등하게 소량으로 점토를 충전하였다. 또한, 본 실험을 수행하기 전에 압력용기를 이용하여 간극수압계의 캘리브레이션을 실시하여 각각의 교정계수를 산정하였다.

2.2 사용시료 및 모형지반 제작

본 모형실험에서는 부산 지역의 자연점토를 사용하였

표 2. 자연점토의 물리적 특성

G_s	W_L	W_p	I_p	C_c
2.68	41.8%	20.2%	21.6	0.5535

으며, 본 점토의 물리적 특성은 표 2에 나타난 바와 같다. 또한 실험에서는 다음의 순서에 의해 모형지반을 제작하였다. 우선, 자연 점토의 이물질을 제거하기 위해 눈금 4.76mm의 체로 체가름을 실시하였고 균등한 함수비를 갖는 모형지반 조성을 위해 진공상태로 배합할 수 있는 교반기를 이용하여 85%의 함수비로 반죽하였다. 토조 저면부에는 약 30mm 높이의 배수용 모래층을 포설하고 토조 내부에 240mm의 높이가 되도록 교반된 점토를 충전 하였으며 이때 점토부의 소정의 위치에 간극수압계를 설치하였다. 그 후 9.8kPa의 조건에서 예비압밀을 실시하여 약 2.34의 간극비를 갖는 점토지반을 조성하였다. 그 후 점토지반의 중심에 소정의 치환율에 상당하는 원형 케이싱을 삽입하면서 주변의 점토가 교란되지 않도록 굴삭하고 생성된 원형의 구멍에 미리 준비된 다짐말뚝 재료를 다져 넣어 복합지반을 제작하였다. 이때 SandyGCP의 경우 쇄석과 모래의 혼합 중량 비율을 9:1로 적용하였다. 다짐말뚝의 조성 후 다시 상재압 9.8kPa로 압밀을 실시함으로써 말뚝 타설에 의한 응력변동을 제거하여 모형지반의 제작을 완료하였다.

2.3 모형실험 조건

표 3은 본 연구에서 수행한 실험조건을 나타내고 있다. 본 모형실험에서는 SCP, GCP, SandyGCP의 지반개량 효과를 비교하기 위해 모든 케이스에 대하여 치환율은 10%, 복합지반의 초기 응력상태는 9.8kPa, 재하압력증분은 10.2kPa의 동일한 조건으로 수행하였다.

3. 다짐말뚝으로 개량된 모형지반의 거동

3.1 침하량의 시간에 따른 변화

그림 4는 모형실험에서 측정한 복합지반 침하량의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 모든 경우에서 침하량의 시간에 따른 변화 양상은 복합지반의 압밀거동을 보이고 있으며 발생한 침하량은 SCP, SandyGCP, GCP의 순으로 크게 발생되고 있지만 일차압밀이 종료되는 시점은 그와 반대로 GCP, SandyGCP, SCP의 순으로 관측되고 있다. 한편 모든 경우의 복합지반에서는 일차압밀침하가 종료된 이후에도 2차압밀이 발생되고 있음을 알 수 있으며 발생한 2차 압밀 침하량은 SCP, SandyGCP, GCP의 순으로 크게 발생되고 있다. 이러한 사실들로부터 GCP에 의해 개량

된 복합지반에서 일차압밀에 대한 침하저감효과가 비교적 탁월함을 알 수 있으며 2차 압밀 침하에 대해서도 저감효과가 크게 나타남에 따라 압밀침하거동에 대한 장기적 안정성 확보에 유리하다고 판단할 수 있다.

3.2 과잉간극수압의 시간에 따른 변화

그림 5는 모형실험에서 측정한 복합지반 점토부에서의 과잉간극수압의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 모형실험에서 과잉간극수압은 재하 직후로부터 약 10분 정도까지 증가하지만 그 후 감소로 전화되고 있다. 이것은 모형지반 중 그리고 간극수압계에 미소량의 기포가 존재하여 완전하게 포화되지 못했기 때문이라고 생각된다. 그러나 경과시간 약 10분 이후부터는 모형지반에서 발생된 과잉간극수압이 소산되면서 복합지반에서 압밀이 진행되고 있음을 알 수 있다. 한편 각각의 모형지반에서 발생된 최대 과잉간극수압의 크기는 SCP, SandyGCP, GCP의 순으로 크게 발생되고 있다. 이는 침하량의 변화 특성에서 알 수 있듯이 복합지반의 압밀 변형량이 SCP, SandyGCP, GCP의 순으로 크게 발생되었기 때문에 그에 상응하여 점토부의 과잉간극수압도 같은 순서로 크게 발생되었다고 판단된다.

표 3. 모형실험 조건

Test Case	Replacement Area Ratio (%)	Pressure before Applying Surcharge (kPa)	Total Surcharge (kPa)	Increment Pressure (kPa)	Initial Height of Model Ground (mm)
SCP	10	9.8	20	10.2	222
GCP		9.8	20	10.2	221
SandyGCP		9.8	20	10.2	220

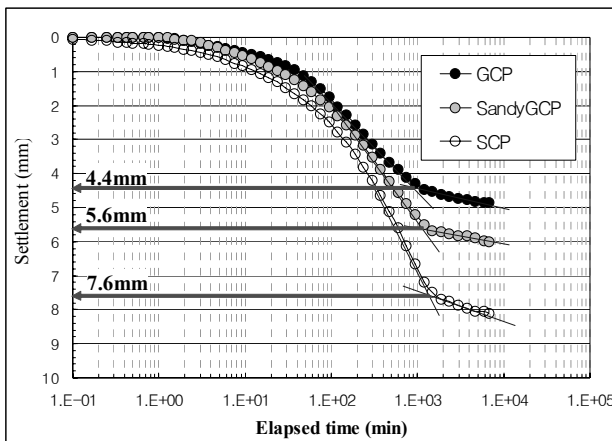


그림 4. 침하량의 시간에 따른 변화

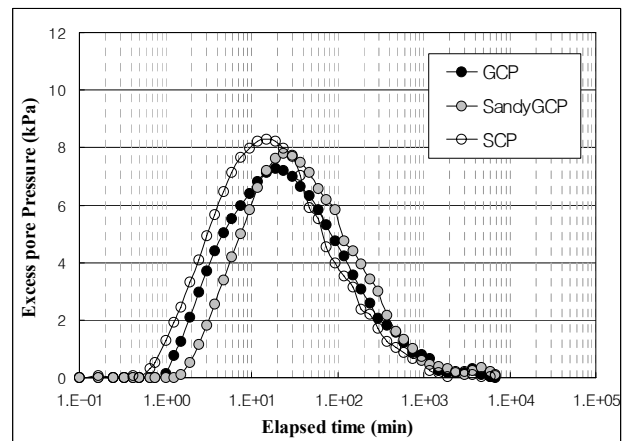


그림 5. 과잉간극수압의 시간에 따른 변화

4. 점토지반에 타설된 다짐말뚝의 통수능 비교·분석

압밀이 빠르게 진행됨을 알 수 있다.

4.1 복합지반의 압밀도 비교·분석

그림 6은 실내모형실험 결과로부터 얻은 복합지반의 압밀도가 시간의 경과에 따라 변화하는 양상을 보여주고 있다. 여기서 압밀도 U_s 는 복합지반의 침하량의 시간에 따른 변화로부터 산정하였으며, 일차압밀종료시간은 점토부의 과잉간극수압이 거의 소산된 시점의 경과시간으로 결정하였다.

$$U_s(\%) = \frac{s}{s_f} \times 100 \quad (1)$$

여기서, s 및 s_f 는 각각 임의의 시간에서의 침하량과 일차압밀종료시점에서의 침하량을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 GCP, SandyGCP, SCP에 의한 복합지반 순으로

4.2 압밀시간의 비교·분석

그림 7은 실내모형실험 결과로부터 얻은 복합지반의 압밀시간을 나타내고 있다. 즉, 각각의 경우에 대하여 압밀도 50%인 경우의 시간(t_{-50}), 압밀도 70%인 경우의 시간(t_{-70}), 압밀도 90%인 경우의 시간(t_{-90})을 나타내었다. 모형실험으로부터 얻은 압밀시간은 GCP, SandyGCP, SCP의 순으로 빠른 압밀시간을 보이고 있다. 따라서 복합지반에서의 압밀은 GCP로 개량된 경우가 가장 신속하게 발생되었음을 알 수 있다.

4.3 간극막힘(Clogging)현상에 대한 확인

본 연구의 목적 중 하나는 각종 다짐말뚝(GCP, SandyGCP,

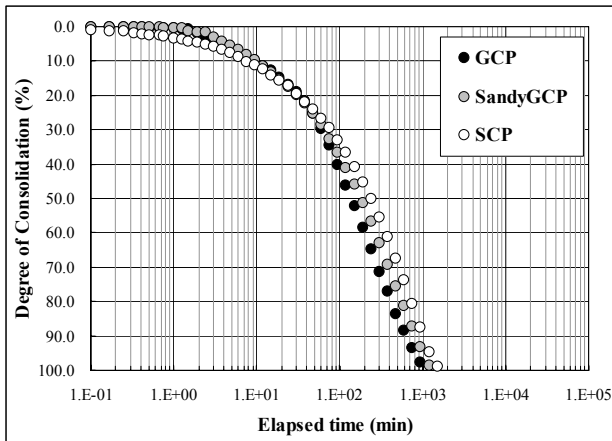


그림 6. 복합지반 압밀도의 시간에 따른 변화

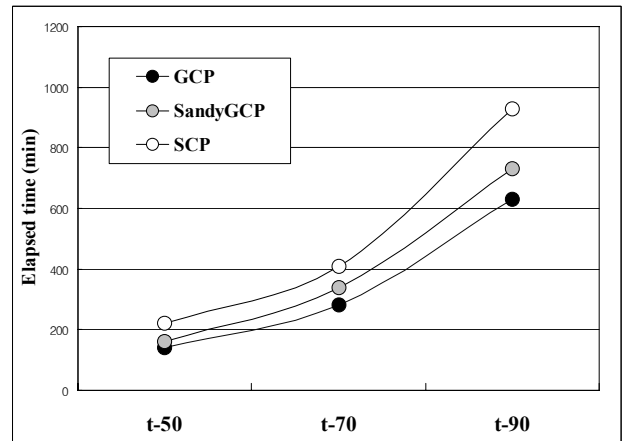


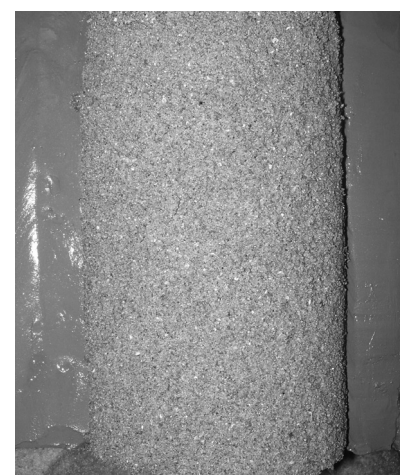
그림 7. 복합지반의 압밀시간



(a) GCP



(b) SandyGCP



(c) SCP

그림 8. 압밀 종료 후 복합지반의 종단면 모습

SCP)으로 개량된 복합지반에서 압밀이 진행됨에 따라 각각의 다짐말뚝에 의한 통수성능의 차이가 발생되느냐에 대한 여부를 확인하는 것이다. 현재까지 다짐말뚝에 의한 배수축진 기능성에 대하여 여러 가지 추측이 난무하지만 명확히 규명되어 있지 않은 상황이며 특히 GCP의 경우 복합지반의 압밀 진행에 따라서 SCP에 비하여 상대적으로 큰 간극을 갖는다는 이유로 주변 점토입자가 다짐말뚝의 표면 간극을 막는 Clogging현상에 대한 우려가 주장되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 사항에 대한 검토를 수행하고자 실내모형실험이 완료된 후 모형 실험 장치를 해체하여 각각의 다짐말뚝과 주변 점토부의 형상을 확인하였다. 그림 8은 모형실험 종료 후 각각의 다짐말뚝에 의한 복합지반 종단면의 모습을 나타내고 있다. 모든 다짐말뚝에 대하여 주변 점토의 혼입 형상은 확인 할 수 없으며 따라서 본 모형실험의 범위에서는 Clogging현상이 발생되지 않았음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 저치환율의 GCP와 SandyGCP, SCP에 의한 복합지반의 압밀거동을 분석하고 각각의 다짐말뚝에 의한 통수능력을 비교 평가하기 위하여 원통형 실내모형 실험을 실시하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 복합지반의 침하량은 SCP, SandyGCP, GCP의 순서로 크게 발생되었지만 일차압밀이 종료되는 시점은 그와 반대로 GCP, SandyGCP, SCP의 순서로 빠르게 나타남을 알 수 있었다. 한편, 모든 경우의 복합지반에서는 일차압밀침하가 종료된 이후에도 2차압밀이 지속적으로 발생되고 있음을 알 수 있었으며 발생한 2차 압밀 침하량은 SCP, SandyGCP, GCP의 순서로 크게 발생됨을 확인하였다.
2. 복합지반의 침하 거동을 분석한 결과 GCP에 의해 개량된 복합지반에서 일차압밀에 대한 침하저감효과가 탁월함을 알 수 있으며 2차 압밀 침하에 대해서도 저감효과가 크게 나타남에 따라 GCP공법이 SandyGCP공법이나 SCP공법에 비하여 압밀침하거동에 대한 단기적 안정성 및 장기적 안정성 확보에 유리함을 알 수 있었다.
3. 각각의 다짐말뚝에 의한 복합지반의 압밀도를 산정하

여 비교한 결과 GCP, SandyGCP, SCP에 의한 복합지반 순으로 압밀이 빠르게 진행됨을 알 수 있었다. 또한 각각의 다짐말뚝에 의한 압밀의 진행에 따른 압밀시간을 산정하여 비교한 결과 압밀도 50%, 70%, 90%인 경우의 시간 모두 GCP, SandyGCP, SCP에 의한 복합지반 순으로 빠르게 나타났다. 따라서 복합지반에서의 압밀은 GCP로 개량된 경우가 가장 신속하게 발생되고 있음을 알 수 있었다.

4. 실내모형실험에서 복합지반의 일차압밀이 종료된 후 복합지반의 종단면의 모습을 확인한 결과 모든 다짐말뚝에 주변 점토가 혼입된 모습을 관찰할 수 없었다. 따라서 본 연구의 범위에서는 다짐말뚝에 대한 Clogging 현상이 발생되지 않았으며 압밀 초기부터 종료 시 까지 모든 다짐말뚝의 통수성능이 일정하게 유지되었음을 알 수 있었다. 그러나 금번 모형실험에서 적용한 상재하중은 비교적 적은 수준에서 결정되었으므로 제약된 결과를 얻었다고 생각할 수 있다. 따라서 추후에는 보다 전반적인 결과를 얻기 위해서 적용하중의 규모를 크게 하여 고찰할 계획이다.

참고문헌

1. 유승경 (2003), “저치환율 모래다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담거동에 대한 실험적 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제19권, 제5호, pp.253-261.
2. 유승경, 조성민, 김지용, 심민보 (2005), “모래와 쇄석을 이용한 저치환율 다짐말뚝공법의 응력분담특성에 관한 비교 연구”, *한국지반공학회 공동 학술대회 논문집*, pp.305.
3. 北詰昌樹 (1994), “低置換率SCP工法の開發と港灣工事への適用”, *土と基礎*, Vol.42, No.2, pp.31-36.
4. Ishizaki N., Matsuoka, M., and Nakai, S. (1989), “Characteristic of stress-strain behavior under axi-symmetric pressure of clay ground improved by sand pile”, *Journal of Geotechnical Engineering*, JSCE, No.406/III-11, pp.127-136.
5. Murayama, S. and Matsuoka, M. (1973), “Analysis on composition ground based on relationship of stress-strain behavior of soils”, *Proc. 8th Japan National conf. on SMFE*, pp. 407-410.
6. You, S. K., Oda, K. and Kim, T. H. (2006), “Stress Sharing Behavior and Its Mechanism during Consolidation Process in Composite Ground Improved by Sand Compaction Piles with Low Replacement Area Ratio”, *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol. 24, No. 4, pp.287-304.

(논문접수일 2009. 5. 18, 심사완료일 2009. 6. 23)