

제방축조에 의한 연약지반의 변위특성

Displacement Characteristics of Soft Ground by Embankment Construction

안 광 국[†] · 배 우 석¹⁾

Ahn, Kwangkuk · Bae, Wooseok

ABSTRACT : In this study, the centrifugal tests were fulfilled to analyze the displacement characteristics caused by the embankment construction on soft ground. Embankment of height, undrained shear strength and with or without geotextile were selected to evaluate the displacement characteristics of soft ground by embankment. As a result, the replacement section without geotextile showed the parabola shape. The replacement section with geotextile showed the trapezoidal shape which represents the uniform settlements. The replacement angle is increasing nearly linearly with increasing the height of embankment and G-level. The position, where the maximum horizontal displacement occurred, was between $0.24H_0$ and $0.35H_0$ and was at $0.3H_0$ on the average. In the case of with and without geotextile, the relationship between the maximum settlement of ground(S) and maximum horizontal displacement(δ_m) was $\delta_m = 0.60S$, $\delta_m = 0.54S$, respectively.

Keywords : Centrifuge model test, Embankment construction, Soft ground, Geotextile, Undrained shear strength

요 지 : 본 연구에서는 제방축조에 의해 연약점토지반에서 발생하는 지반의 변위 및 변형형태를 파악하기 위하여 제방높이, 지반의 비배수 전단강도, geotextile의 설치여부와 중력수준을 변화시키면서 원심모형시험을 실시하였다. 실험결과, 제방하중에 의한 지반의 치환단면은 geotextile을 설치하지 않은 경우 포물선 형태를 나타내었고, geotextile을 설치한 경우에는 제방하부에서 균일한 침하단면을 나타내는 사다리꼴 형태를 나타내었다. 치환각도는 제방높이와 중력수준이 증가할수록 그리고 지반의 비배수 전단강도가 작을수록 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 최대 수평변위가 발생하는 위치는 지표면에서 점토층 깊이의 $0.24 \sim 0.35H_0$ (H_0 : 초기 모형지반의 높이) 지점으로 평균 $0.3H_0$ 인 것으로 나타났으며, geotextile을 설치하지 않은 경우 지반의 최대침하량(S)과 최대 수평변위(δ_m)는 $\delta_m = 0.54S$, geotextile을 설치한 경우에는 $\delta_m = 0.60S$ 의 관계를 나타내었다.

주요어 : 원심모형시험, 제방축조, 연약지반, 지오텍스타일, 비배수전단강도

1. 서 론

우리나라는 지형적인 특성으로 서, 남해안 지역은 이를 덮고 있는 해성퇴적층이 연약한 해성실트질 점토로 이루어진 경우가 대부분이다. 또한, 내륙의 하천 인근지역에도 광범위한 점성토 지반이 형성되어 있으며, 이 중 상당 부분은 과압밀비가 2 이하로 정규압밀 또는 약간 과압밀된 상태에 있으며 자연함수비와 액성한계가 비슷한 것으로 보고되고 있다(조성민, 1998). 이들 점성토 지반은 큰 압축성과 작은 전단강도 등 공학적으로 취약한 특성을 가지고 있어 과거의 각종 건설 공사시에는 이들 지반을 이용하는 것을 회피하여 왔다. 그러나 인구 증가와 경제 규모의 확대에 의해 공학적으로 불리한 조건에 있는 지반에서의 건설 공사와 해안 매립 사업이 증가하고 있는 실정이다. 현

재 연약지반 구간을 통과하는 고속도로나 철도가 지속적으로 건설되고 있으며, 서해와 남해 연안에서는 바다를 매립하여 부지를 조성해서 항만이나 공항 또는 공업단지를 건설하는 대규모 건설공사들이 진행되고 있다.

이들 건설 공사시에는 연약지반상에 제방축조 등 성토 시공이 수반된다. 연약지반상에 성토를 하는 경우 성토하중에 의한 침하와 함께 전단 변형의 결과로 많은 지중 횡변위가 발생하게 되며, 심할 경우 지반의 전단 파괴로 상부구조물이 붕괴될 수도 있다. 이에 따라 실제 시공시에는 지반 파괴 및 과다 변형을 억제하고, 안정적이고 신속한 시공을 도모하기 위해 여러 종류의 지반개량공법을 적용하고 있다. 국내에서는 지중에 모래 또는 인공재료를 이용하여 연직 방향의 배수 통로를 형성하여 지반의 압밀을 촉진하는 연직배수공법을 보편적으로 사용하고 있다. 또한

† 정희원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 전임강사(E-mail : akk@chungbuk.ac.kr)

1) 정희원, 청주대학교 이공대학 토목환경공학과 전임강사

간극수의 원활한 배출과 지반 보강을 위하여 성토체 하단에 모래 매트와 geotextile을 포설하는 경우가 많으며, 성토 시공시에는 하부 지반의 급격한 전단 변형을 방지하기 위하여 임의의 높이마다 단계를 설정하여 완속 재하한다. 또한, 연약점토를 성토자중이나 폭파 등으로 연약토를 횡방향으로 강제적으로 압출하여 양질토로 치환하는 강제치환공법도 제방, 도로, 호안 등의 연약지반을 개량하는 곳에 널리 이용되고 있다. 연약지반상 강제치환 거동에 대한 연구와 수평변위에 대한 연구는 많이 진행되어 왔지만(Yashuhara와 Tsukamoto, 1982, ; 이승호, 1992 ; 이승원 등, 2000 ; Tavenas 등, 1979), 성토하중에 의한 지반변형과 변위 특성에 관한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 성토에 의해 발생하는 연약지반의 거동 특성을 파악하기 위하여 연약지반상에 제방축조에 대한 원심모델링을 수행하였다. 제방높이, 지반의 비배수 전단강도, geotextile의 포설조건 등을 실험변수로 하여 제방축조에 의한 지반의 변위와 변형 특성을 연구하였다.

2. 원심모형실험

2.1 대상시료의 특성

본 연구에서 모형실험시 지반형성 재료로는 남해안 지역에 걸쳐 널리 분포하고 있는 해성점토를 재성형하여 사용하였다. 실험에 사용된 대상 시료에 대한 물성실험 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. 점토의 물리적 특성

구분	측정값
비중	2.70
No.200체 통과율(%)	93.1
액성한계, LL(%)	53.8
소성지수, PI(%)	26.1
자연함수비, ω (%)	51.7
통일분류법	CH
전체단위중량(tf/m^3)	1.78

표 2. 원심모형실험에서의 상사법칙

Quantity	Prototype	Model	Quantity	Prototype	Model
Length	1	$1/n$	Force	1	$1/n^2$
Area	1	$1/n^2$	Stress	1	1
Volume	1	$1/n^3$	Strain	1	1
Velocity	1	1	Mass density	1	1
Acceleration	1	n	Time (dynamic)	1	$1/n$
Mass	1	$1/n^3$	Time (consolidation)	1	$1/n^2$

2.2 실험장치 및 기구

2.2.1 원심모형시험기

본 연구에서 사용한 원심모형시험기의 최대 원심가속도는 200g-level, 최대용량은 25g·ton으로 실험 가능한 모형토조의 최대크기는 500×500×300mm이고, 중심축에서 힌지까지의 거리가 920mm, 스윙바스켓 저면까지의 거리는 1280mm로 제작되었다(허열 등, 2006).

원심모형실험은 실내에서 축소모형을 사용하여 인위적으로 모형을 가속시켜 흡입자의 자중을 증가시킴으로서 현장상태의 응력을 재현하여 경제적으로 실험을 수행할 수 있는 효율적인 실험기법으로 원심모형실험에서 모형과 현장조건에서의 상사법칙은 표 2와 같다. 원심모형실험의 원리, 지반공학적 활용 등에 대해서는 Atkinson(1993), Taylor(1995), 이처근(2001)의 연구결과에 자세히 설명되어 있다.

2.2.2 모형토조

2차원 평면변형률 조건을 모사하기 위한 모형토조는 3면과 밑면은 2mm 두께의 스테인레스로 제작되었으며, 실험중 측방관찰을 할 수 있도록 모형토조의 전면은 20mm 두께의 투명아크릴 판으로 제작하였다. 본 실험에서 사용한 토조의 외부 크기는 가로 57cm, 세로 25cm, 높이 37.5cm이며, 내부크기는 가로 52cm, 세로 17cm, 높이 35cm이다.

2.3 실험방법

본 실험에서는 제방높이, 지반의 비배수 전단강도, geotextile의 부설 조건을 변화시키면서 총 12회의 원심모형실험을 수행하였으며, 표 3은 모형실험조건을 나타낸 것이다. 또한 모형실험은 중력수준을 40, 60, 80g-level로 변화시켜 실시하였다. 단, 본 연구에서는 제방축조 직후에 발생하는 변형형태를 파악하기 위하여 비배수조건으로 지반의 압밀을 고려하지 않는 실험을 실시하였다. 그림 1은 모형지반형성후의 모형토조의 개요도를 나타낸 것이다.

본 실험에서 자중압밀완료 후 연약점토지반의 높이는 17cm로 일정하게 하였다. 모형실험에서 제방을 축조하기

위하여 입자크기가 0.4~2mm인 모래를 사용하였으며, 제방높이(H)는 4, 6, 8cm로 하였으며, 제방축조 후 단위중량은 1.67~1.7gf/cm³ 정도로 모든 실험에서 일정하게 하였다. 제방축조시 제방 하부의 폭은 18cm로 항상 일정하게 하였으며, 사면부의 경사는 1:1로 축조하였으며, 제방높이가 4cm인 경우 상부 제방의 폭은 10cm이다. 모형실험에서 제방높이 6cm는 중력수준 40, 60, 80g-level에서 현장조건으로 환산하면 2.4, 3.6, 4.8m에 해당된다.

지반의 비배수 전단강도(c_u)는 1.5, 4.5kPa로 하였으며, 비배수 전단강도는 점토층 중앙에서 측정된 값을 기준으로 하였다. Geotextile은 인장강도가 5tf/m인 제품을 사용하였으며, 지표면에 포설하였으며, Geotextile의 특성은 표 4와 같다. 실험 CE 1~4는 제방높이 4cm인 경우, 실험 CE 5~8은 제방높이 6cm인 경우, 실험 CE 9~12는 제방높이

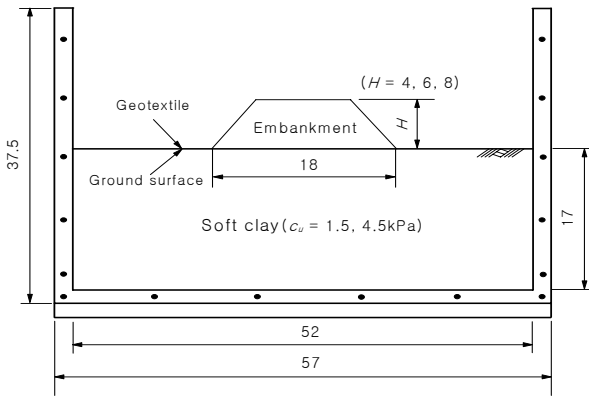


그림 1. 원심모형지반단면

표 3. 원심모형실험 조건

Test no.	Embankment height (cm)	Undrained strength (kPa)	Geotextile
CE 1	4	1.5	-
CE 2	4	4.5	-
CE 3	4	1.5	Geotextile
CE 4	4	4.5	Geotextile
CE 5	6	1.5	-
CE 6	6	4.5	-
CE 7	6	1.5	Geotextile
CE 8	6	4.5	Geotextile
CE 9	8	1.5	-
CE 10	8	4.5	-
CE 11	8	1.5	Geotextile
CE 12	8	4.5	Geotextile

표 4. Geotextile의 특성

중량 (g/m ²)	비중	인장신도 (%)	투수계수 (cm/sec)	재질
150	1.36	10~30	$\alpha \times 10^{-4}$	Polyester

8cm인 경우에 대한 것으로 지반강도와 geotextile의 설치 유무에 따른 지반의 변위 및 변형 양상을 파악하기 위하여 실시하였다.

본 모형실험은 자중압밀, 지반변위 측정을 위한 정방형 격자설치, 제방축조, 원심모형시험기 스윙바스켓 탑재, 중력수준을 40, 60, 80g-level까지 가속하여 모형실험을 실시하였다. 실험완료 후에 제방하중에 의해 변형된 지반의 변위와 변형형태를 측정하였다.

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 지반의 침하와 융기

본 연구에서는 제방축조에 의한 연약지반의 변형특성을 분석하기 위하여 제방높이, 지반의 비배수 전단강도, geotextile의 설치여부와 중력수준을 변화시키면서 원심모형실험을 실시하였다. 그림 2~그림 13은 모형실험에서 측정된 지반의 침하와 융기를 나타낸 것이다.

그림 2는 제방높이 4cm, 비배수 전단강도 c_u 가 1.5kPa인 실험 CE 1에서 측정된 침하와 융기를 중력수준에 따라서 나타낸 것이다. 이로부터 중력수준이 증가할수록 침하와 융기가 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉, 중력수준 40, 60, 80g-level에서 최대침하량은 각각 2.27, 2.81, 3.12cm로 거의 비례적으로 증가하고, 최대 융기량은 1.13, 1.53, 1.8cm로 최대침하량의 50~57% 정도가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 치환단면의 형상은 포물선 형태로 제방중심 아래 부분에서 최대 침하를 나타내고 제방 끝부분에서는 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 최대융기량의 발생위치는 제방 중심으로부터 1.25~1.36B(여기서, B는 제방의 하부폭) 정도 떨어진 지점에서 발생하였다.

그림 3은 실험 CE 2($H=4$ cm, $c_u=4.5$ kPa)에서 측정된 침하

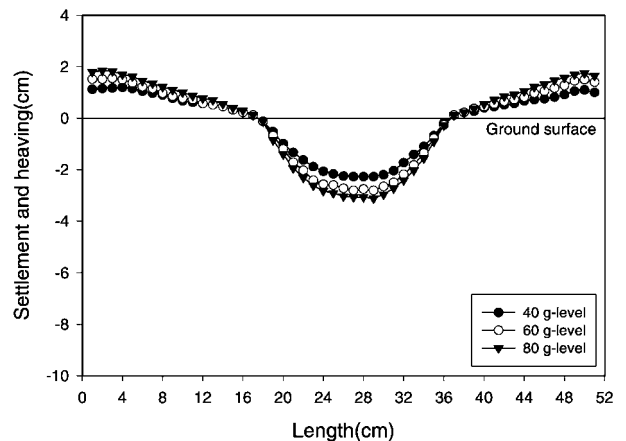


그림 2. 지반침하와 융기(CE 1, $H=4$ cm, $c_u=1.5$ kPa, without geotextile)

와 용기를 나타낸 것으로 중력수준에 따른 영향과 치환단면의 형상, 최대 침하량 및 용기량 발생위치는 실험 CE 1과 유사한 경향을 나타내고 있으며, 중력수준에 따른 최대침하량은 각각 1.75, 2.25, 2.55cm로 CE 1보다 18.3(80g-level)~23(40g-level)% 정도 작게 나타났다. 중력수준 증가에 따른 지반의 최대 용기량은 0.7, 1.01, 1.26cm로 최대침하량의 40~49% 정도를 나타내었다.

그림 4는 비배수 전단강도가 1.5kPa인 연약지반위에 geotextile을 포설한 후 제방을 4cm 높이로 축조한 실험 CE 3에서 측정된 지반침하와 용기를 나타낸 것이다. 제방하중에 의한 치환단면의 형상은 사다리꼴 형태로 제방 중심에서 0.58~0.67B 범위에서 균등한 침하분포를 보이고 있으며, 중력수준 증가에 따라 그 폭이 약간 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 인장력이 큰 geotextile의 설치로 인한 막효과 등에 의해 제방하중에 의한 응력이 분산되기 때문인 것으로 판단된다. 중력수준에 따른 최대침하량은 각각 1.87, 2.45, 2.65cm 정도로 중력수준이 증가함에 따라 크게 나타났으며, geotextile을 설치하지 않은 실험 CE 1에 비해 13~18% 정도 감소하였다.

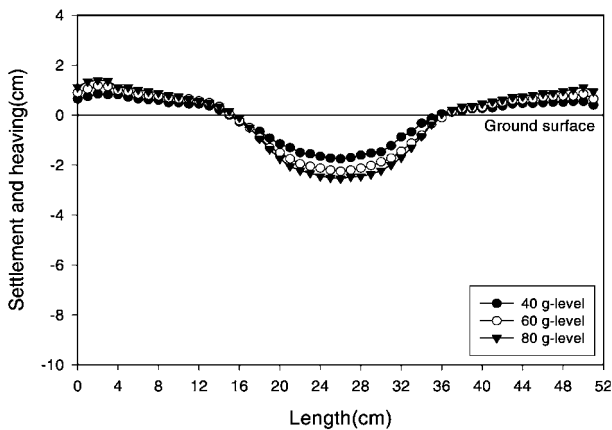


그림 3. 지반침하와 용기(CE 2, H=4cm, $c_u=4.5\text{kPa}$, without geotextile)

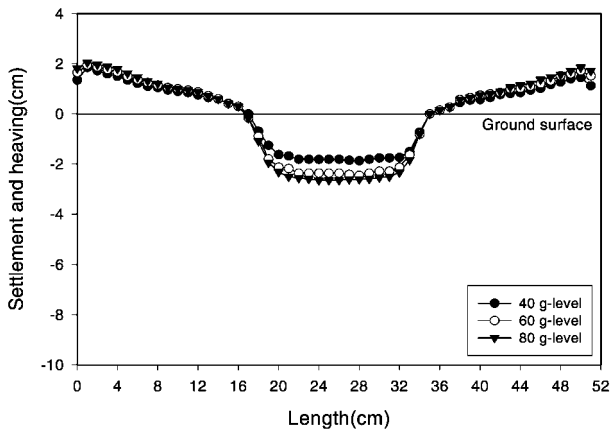


그림 4. 지반침하와 용기(CE 3, H=4cm, $c_u=1.5\text{kPa}$, with geotextile)

그림 5는 실험 CE 4(H=4cm, $c_u=4.5\text{kPa}$, geotextile 포설)에서 얻어진 결과를 나타낸 것으로 제방하중에 의한 치환단면의 형상, 침하와 용기의 전반적인 경향은 실험 CE 3와 거의 유사하게 나타났다. 중력수준이 40, 60, 80 g-level인 경우 최대침하량은 각각 1.52, 2.05, 2.36cm로 지반강도가 1.5kPa인 실험 CE 3보다 11(80g-level)~19(40g-level)% 정도 작게 나타났으며, geotextile을 설치하지 않은 실험 CE 2보다 8~13% 정도 작게 측정되었다. 중력수준에 따른 최대용기량은 0.86, 1.19, 1.30cm로 최대침하량의 55~58% 정도를 나타내었다. 제방하중에 의한 치환단면의 형상은 사다리꼴 형태로 균등한 침하분포를 보이는 범위는 0.58~0.67B 정도로 지반강도가 1.5kPa인 경우와 일치한다.

그림 6은 실험 CE 5(H=6cm, $c_u=1.5\text{kPa}$)에서 측정된 침하와 용기를 중력수준에 따라서 나타낸 것으로 치환단면의 형상은 포물선 형태로 제방중심 아래 부분에서 최대 침하를 나타내고, 중력수준이 증가할수록 침하와 용기가 증가하고 있음을 알 수 있다. 중력수준에 따른 지반의 최대 침하량은 각각 3.4, 3.7, 4.12cm로 거의 비례적으로 증가하고, 최대용기량은 1.45, 1.66, 1.96cm로 최대침하량의 43~

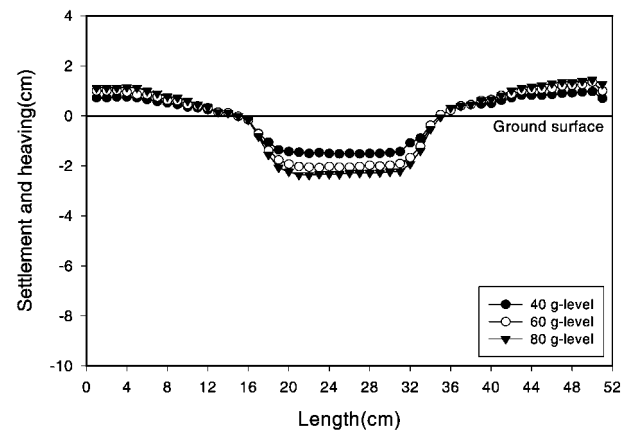


그림 5. 지반침하와 용기(CE 4, H=4cm, $c_u=4.5\text{kPa}$, with geotextile)

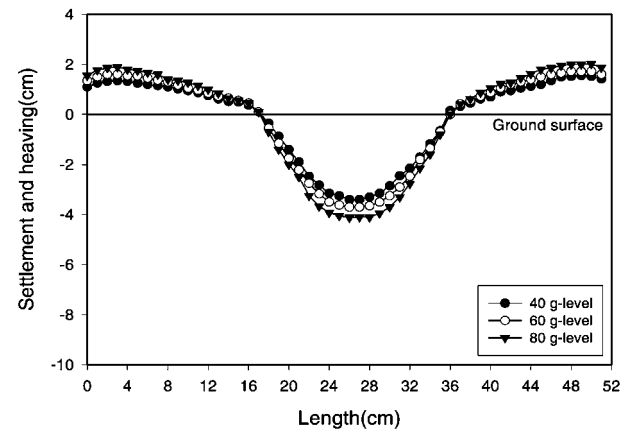


그림 6. 지반침하와 용기(CE 5, H=6cm, $c_u=1.5\text{kPa}$, without geotextile)

48% 정도인 것으로 나타났다. 또한, 최대융기량의 발생위치는 제방 중심으로부터 1.2~1.36B(여기서, B는 제방의 하부폭) 정도 떨어진 지점에서 발생하였다.

그림 7은 실험 CE 6($H=6\text{cm}$, $c_u=4.5\text{kPa}$)에서 측정된 침하와 융기를 나타낸 것으로 중력수준에 따른 영향과 치환단면의 형상, 최대 침하량 및 융기량 발생위치는 실험 CE 5와 유사한 경향을 나타내고 있다. 중력수준에 따른 지반의 최대침하량은 각각 2.27, 2.90, 3.3cm로 실험 CE 5에 비해 20(80g-level)~33(40g-level)% 정도 작게 발생하였으며, 최대융기량은 0.92, 1.23, 1.49cm로 최대침하량의 41~45% 정도로 나타났다.

그림 8은 실험 CE 7($H=6\text{cm}$, $c_u=1.5\text{kPa}$, geotextile 포설)에서 측정된 지반의 침하와 융기를 나타낸 것이다. 제방하중에 의한 치환단면의 형상은 사다리꼴 형태로 제방 중심에서 0.56~0.58B 범위에서 균등한 침하분포를 보이고 있다. 중력수준에 따른 최대침하량은 각각 2.62, 3.15, 3.5cm 정도로 중력수준이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였으며, geotextile을 포설하지 않은 실험 CE 5에 비해 15~23% 정도 감소하였다. 한편, 지반의 최대융기량은 각

각 1.45, 1.66, 1.84cm로 CE 5와 거의 일치하였다.

그림 9는 실험 CE 8($H=6\text{cm}$, $c_u=4.5\text{kPa}$, geotextile 포설)에서 얻어진 결과를 나타낸 것으로 제방하중에 의한 치환단면의 형상, 침하와 융기의 전반적인 경향은 실험 CE 7과 거의 유사하게 나타났다. 균등한 침하분포를 나타내는 범위는 약 0.56B 정도로 지반강도가 1.5kPa인 경우와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 중력수준이 40, 60, 80g-level인 경우 최대침하량은 각각 2.07, 2.6, 3.17cm로 지반강도가 1.5kPa인 실험 CE 7보다 10(80g-level)~21%(40g-level) 정도 작게 나타났으며, geotextile을 설치하지 않은 실험 CE 6보다 4~9% 정도 작게 측정되었다. 중력수준에 따른 최대융기량은 0.89, 1.20, 1.38cm로 최대침하량의 43~46% 정도이며, 실험 CE 7에 비해 25(80g-level)~39(40g-level)% 정도 감소하였다.

그림 10은 실험 CE 9($H=8\text{cm}$, $c_u=1.5\text{kPa}$)에서 측정된 침하와 융기를 나타낸 것이다. 이로부터 제방축조에 의한 연약지반 치환단면의 형상은 포물선 형태를 보이고 있으며, 중력수준이 증가할수록 침하와 융기가 증가하고 있음을 알 수 있다. 중력수준에 따른 지반의 최대침하량은 각각 3.77, 4.12, 4.47cm로 거의 비례적으로 증가하고, 최대융기량은

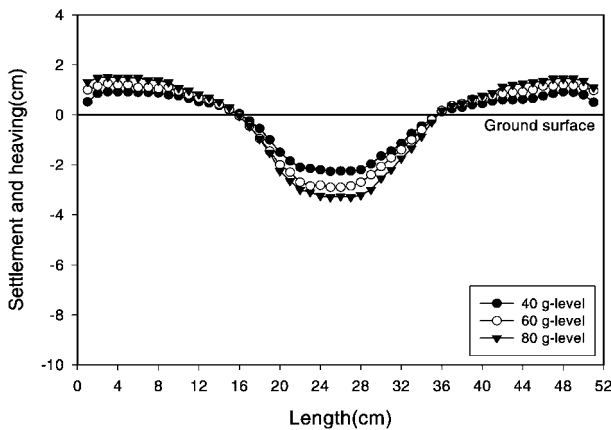


그림 7. 지반침하와 융기(CE 6, $H=6\text{cm}$, $c_u=4.5\text{kPa}$, without geotextile)

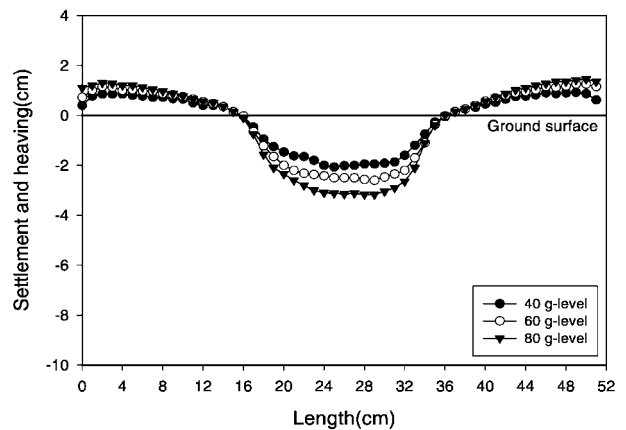


그림 9. 지반침하와 융기(CE 8, $H=6\text{cm}$, $c_u=4.5\text{kPa}$, with geotextile)

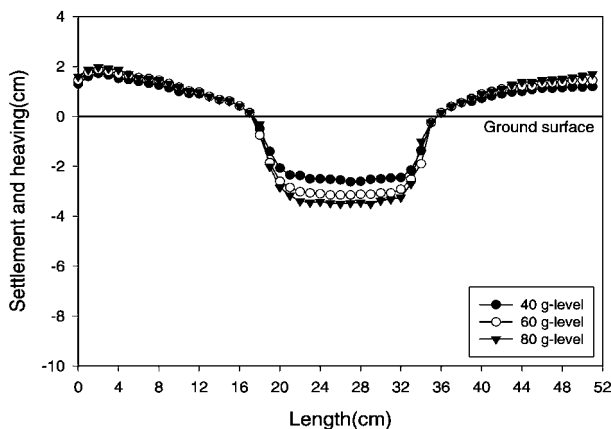


그림 8. 지반침하와 융기(CE 7, $H=6\text{cm}$, $c_u=1.5\text{kPa}$, with geotextile)

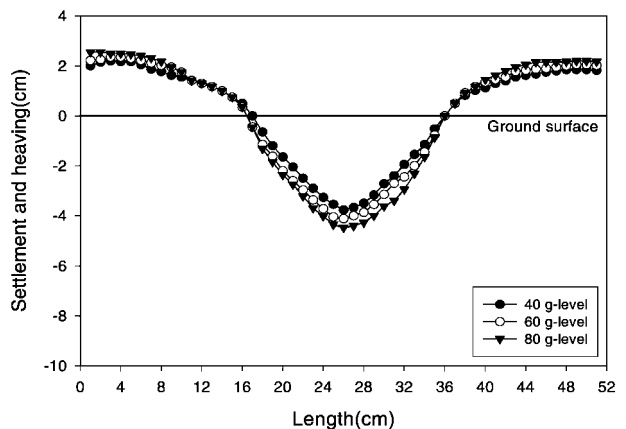


그림 10. 지반침하와 융기(CE 9, $H=8\text{cm}$, $c_u=1.5\text{kPa}$, without geotextile)

2.03, 2.20, 2.38cm로 최대침하량의 53~54% 정도를 보이고 있다. 또한, 최대침하량은 제방중심 아래 부분에서 발생하고, 제방 선단부분에서는 거의 변형이 발생하지 않았다. 최대용기량은 제방 중심으로부터 1.2~1.36B(여기서, B는 제방의 하부폭) 정도 떨어진 위치에서 발생하였다.

그림 11은 제방높이 8cm, 비배수 전단강도 4.5kPa인 실험 CE 10에 대한 실험결과와 지반의 침하와 용기 양상을 나타낸 것으로 중력수준에 따른 영향과 치환단면의 형상, 최대 침하량 및 용기량 발생위치는 실험 CE 9와 유사하다. 그림 11로부터 중력수준이 40, 60, 80g-level인 경우 지반의 최대침하량은 각각 2.55, 3.15, 3.67cm로 중력수준에 따라 비례적으로 증가하며, 지반의 비배수 전단강도가 1.5kPa인 실험 CE 9에 비해 18(80g)~32(40g)% 정도 작게 발생한다는 것을 알 수 있다. 한편, 지반의 최대용기량은 1.24, 1.49, 1.70cm로 최대침하량의 46~48% 정도를 보이고 있으며, 실험 CE 9에 비해서 23~39% 정도 최대용기량이 감소하는 것으로 나타났다.

그림 12는 실험 CE 11(H=8cm, $c_u=1.5kPa$, geotextile 포설)에 대한 실험결과와 연약지반의 침하와 용기를 나타낸 것

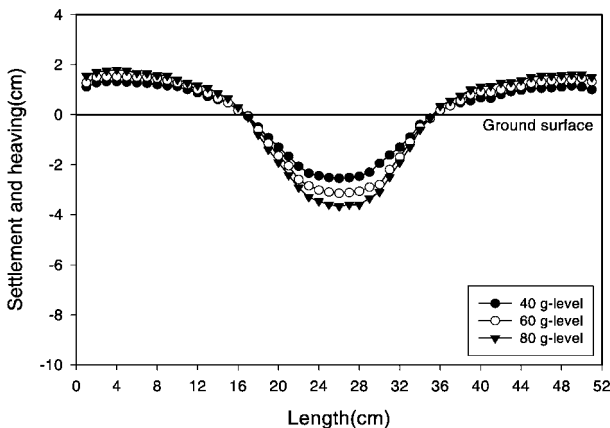


그림 11. 지반침하와 용기(CE 10, H=8cm, $c_u=4.5kPa$, without geotextile)

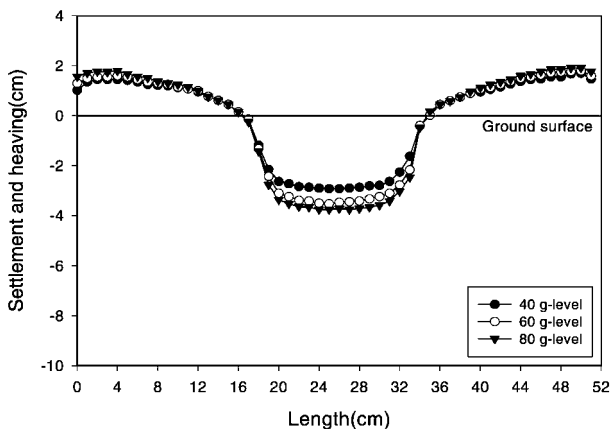


그림 12. 지반침하와 용기(CE 11, H=8cm, $c_u=1.5kPa$, without geotextile)

이다. 제방하중에 의한 치환단면의 형상은 사다리꼴 형태로 제방 중심에서 0.47~0.53B 범위에서 균등한 침하분포를 보이고 있다. 중력수준 증가에 따른 최대침하량은 각각 2.92, 3.47, 3.75cm 정도로 지반의 비배수 전단강도가 1.5kPa이고 geotextile을 포설하지 않은 실험 CE 9에 비해 16~23% 정도 감소하였다. 한편, 제방하중에 의한 지반의 최대용기량은 각각 1.58, 1.70, 1.86cm로 최대침하량의 49~54% 정도를 나타내었다.

그림 13은 실험 CE 12(H=8cm, $c_u=4.5kPa$, geotextile 포설)에서 측정된 지반의 침하와 용기분포를 나타낸 것이다. 이로부터 제방하중에 의한 치환단면의 형상, 침하와 용기의 전반적인 경향은 실험 CE 11과 거의 유사함을 알 수 있다. 제방하중에 의해 균등한 침하분포를 나타내는 범위는 $c_u=1.5kPa$ 인 실험 CE 11과 일치한다. 중력수준 증가에 따른 지반의 최대침하량은 각각 2.32, 2.85, 3.37cm로 지반강도가 1.5kPa인 실험 CE 11에 비해 10(80g-level)~21%(40g-level) 정도 작게 나타났으며, geotextile을 설치하지 않은 실험 CE 10보다 8~9% 정도 작게 측정되었다. 중력수준이 40, 60, 80g-level인 경우 지반의 최대용기량은 각각 0.95, 1.33, 1.58cm로 최대침하량의 44~47% 정도를 보이고 있으며, 실험 CE 10에 비해 8(80g-level)~23(40g-level)% 정도 작게 발생되었다.

또한, geotextile을 포설하지 않은 경우에는 초기 제방의 폭보다 실험후 측정된 제방의 폭은 1.06~1.08B 정도로 초기 제방폭보다 약간 증가하였으며, geotextile을 설치한 경우에는 0.94~0.97B 정도로 초기 제방폭보다 약간 감소하였다. 이것은 geotextile의 설치로 인해 균등한 침하가 발생하면서 제방의 사면부가 초기에 근접한 상태를 유지하였기 때문인 것으로 생각된다. 이로부터 Geotextile의 설치가 제방단면의 안정에도 기여한다는 것을 알 수 있다. Geotextile을 부설한 경우 제방하중에 의해 균일한 침하분포를 나타

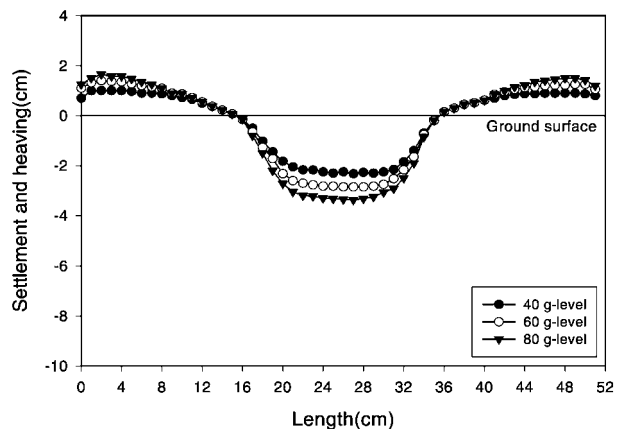


그림 13. 지반침하와 용기(CE 12, H=8cm, $c_u=4.5kPa$, without geotextile)

내는 범위는 제방높이가 높을수록 감소하였다.

3.2 치환각도

제방축조에 의해 발생한 지반의 변형단면으로부터 수평면과 치환단면이 이루는 치환각도를 측정하였으며, 그 결과를 그림 14~그림 15에 나타내었다.

그림 14는 geotextile을 부설하지 않은 지반에서 측정된 제방높이에 따른 치환각도를 보여주고 있으며, 이로부터 제방높이와 중력수준이 증가할수록 치환각도가 거의 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한, 지반의 비배수 전단강도가 클수록 치환각도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 중력수준 및 제방높이가 증가할수록 지반의 침하가 크게 발생하기 때문이다. 지반의 비배수 전단강도가 4.5kPa인 경우 제방높이 및 중력수준에 따른 치환각도는 26~46°로 나타났으며, 비배수 강도가 1.5kPa인 경우 치환각도(36.5~54°)에 비해 15~29% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

그림 15는 geotextile을 부설한 지반에서 측정된 제방높이, 중력수준, 비배수강도에 따른 치환각도를 보여주고 있으며, 이로부터 제방높이와 중력수준이 증가할수록 치환각

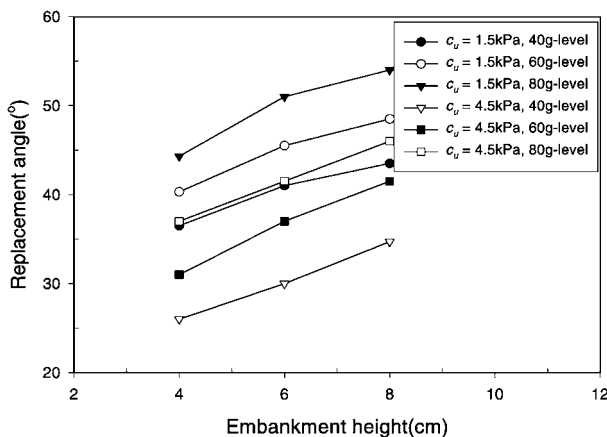


그림 14. 성토고에 따른 치환각도(without geotextile)

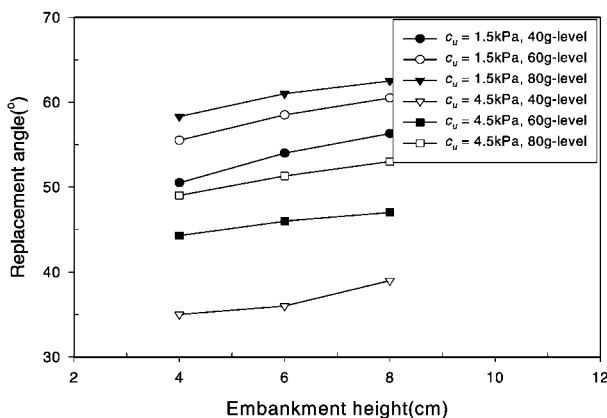


그림 15. 성토고에 따른 치환각도(with geotextile)

도가 거의 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 지반의 비배수 전단강도가 4.5kPa인 경우 제방높이 및 중력수준에 따른 치환각도는 35~53°로 나타났으며, 비배수 강도가 1.5kPa인 경우 치환각도(50.5~62.5°)에 비해 15~33% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

그림 14~그림 15로부터 동일한 지반강도에서 geotextile을 설치한 지반의 치환각도가 geotextile을 부설하지 않은 지반에 비해 약 1.13~1.42배 정도 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 치환단면의 형태에 기인하는 것으로 판단된다.

3.3 지반 변위

본 시험에서 제방축조에 의해 발생한 지반의 변형 형태와 변위 양상을 파악하기 위하여 모형지반의 자중압밀이 완료된 후에 모형토조 전면의 아크릴판을 분리한 다음 점토지반 표면에 약 2cm 간격으로 정방형의 격자망을 설치하였다. 지반의 변위양상은 시험완료 후에 변형된 격자의 좌표를 읽어 측정하였다. 본 시험에서는 각각의 시험조건에 대하여 지반변위를 측정하였지만, 전반적인 변위의 발생경향이 유사하므로 여기서는 지반강도가 4.5kPa이고 중력수준이 80g-level에 대한 것을 설명하였다.

그림 16~그림 18은 geotextile을 설치하지 않은 $c_u=4.5\text{kPa}$ 인 지반에서 제방을 4, 6, 8cm 높이로 축조한 모형에 대한 시험결과 지반의 변위벡터를 나타낸 것이다. 제방하중에 의해 발생한 전체적인 변위벡터의 양상은 제방중심을 기준으로 좌우 대칭의 경향을 보이고 있다. 또한, 제방 중심에서는 수평방향으로 변위가 발생하고, 제방 선단부 아래에서는 수평방향의 변위를 나타내며, 제방 선단부에서 거리가 증가함에 따라 변위의 방향이 지표면을 향하여 발생하는 대수나선 형태의 변위벡터 분포를 나타내고 있다. 그림

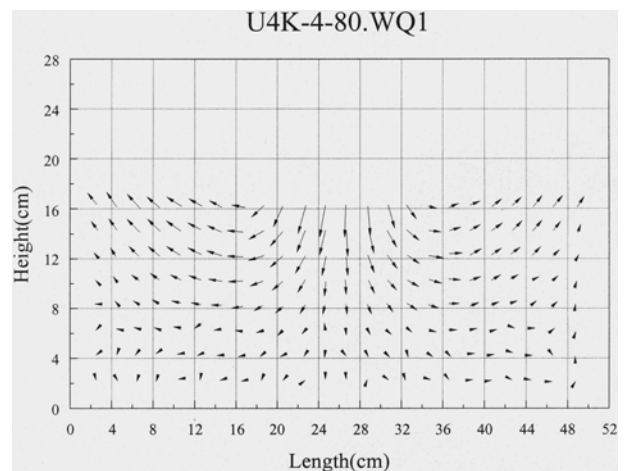


그림 16. 지반의 변위벡터(H=4cm, $c_u=4.5\text{kPa}$, 80g-level, without geotextile)

16~그림 18로부터 제방높이에 따른 최대 연직변위벡터의 크기는 1.8, 2.1, 2.45cm로 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 한편, 제방높이 증가에 따른 최대 수평변위는 1.55, 1.8, 1.9cm 정도로 제방높이에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 제방높이에 따른 최대 수평변위가 발생하는 깊이비(z/H_0)는 각각 0.28, 0.31, 0.35로 제방높이가 높을수록 증가하였다. 여기서, z 는 지표면으로부터 최대 수평변위가 발생하는 지점까지의 깊이, H_0 는 초기 모형지반의 높이를 의미한다. 지표면에 가장 인접한 부분에서 최대 변위벡터는 제방 선단부로부터 $0.6\sim 0.7B$ 떨어진 지점에서 발생하였으며, 그 크기는 최대 수평변위보다 약간 작게 나타났다.

그림 19~그림 21은 지반의 비배수 전단강도가 4.5kPa, geotextile을 포설한 경우 제방높이($H=4, 6, 8\text{cm}$)에 따른 지반의 변위벡터를 나타낸 것이다. 최대 변위벡터의 발생 위치, 제방 저면에서의 위치에 따른 변위양상 등 전반적인 변위의 발생경향은 geotextile을 설치하지 않은 경우와 유사하다.

단, 제방 하부에서 최대 변위벡터가 나타나지만 geotextile의 설치로 인해 일정한 폭에 걸쳐 비교적 균등한 변위벡터를 보이고 있으며, 균등한 변위가 발생하는 폭은 $0.47\sim 0.67B$ 정도로 중력수준과 제방높이가 증가할수록 그 폭이 감소하는 경향을 나타내었다. 제방높이($H=4, 6, 8\text{cm}$)

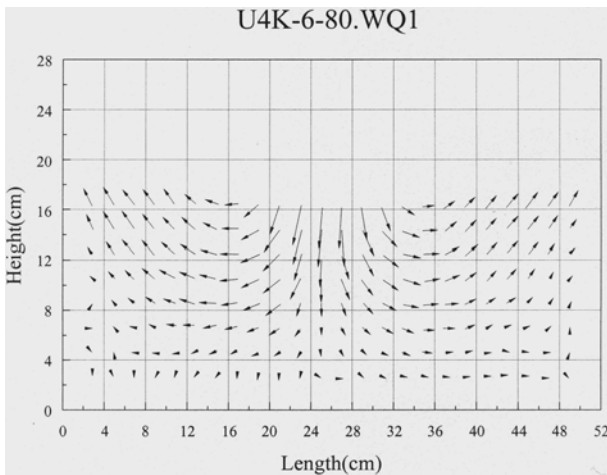


그림 17. 지반의 변위벡터($H=6\text{cm}$, $c_u=4.5\text{kPa}$, 80g-level, without geotextile)

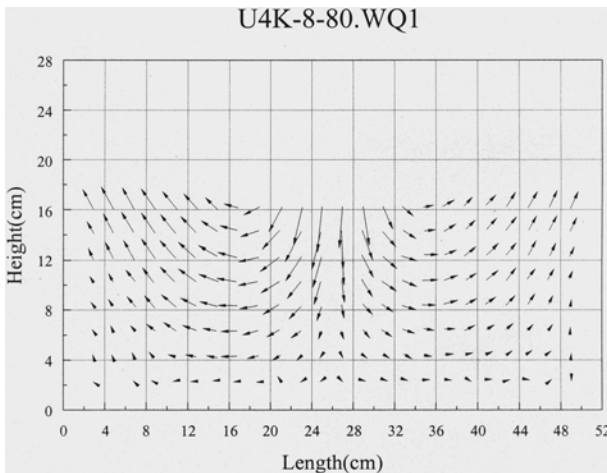


그림 18. 지반의 변위벡터($H=8\text{cm}$, $c_u=4.5\text{kPa}$, 80g-level, without geotextile)

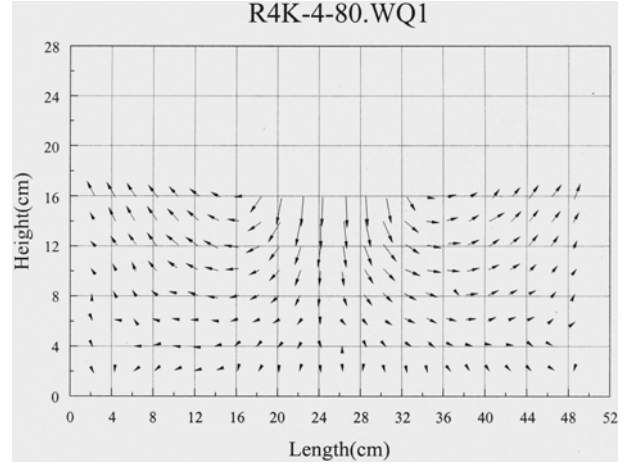


그림 19. 지반의 변위벡터($H=4\text{cm}$, $c_u=4.5\text{kPa}$, 80g-level, with geotextile)

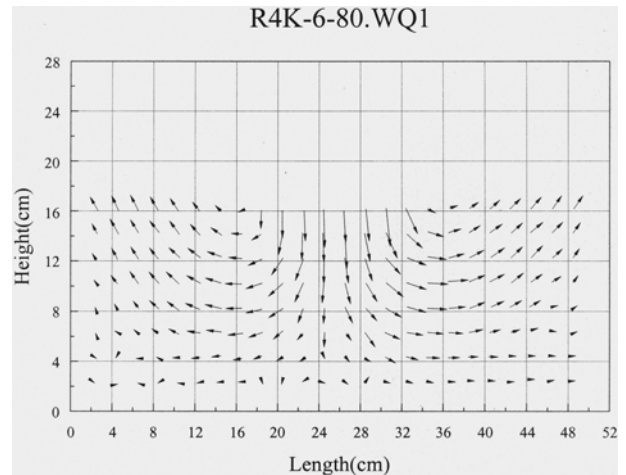


그림 20. 지반의 변위벡터($H=6\text{cm}$, $c_u=4.5\text{kPa}$, 80g-level, with geotextile)

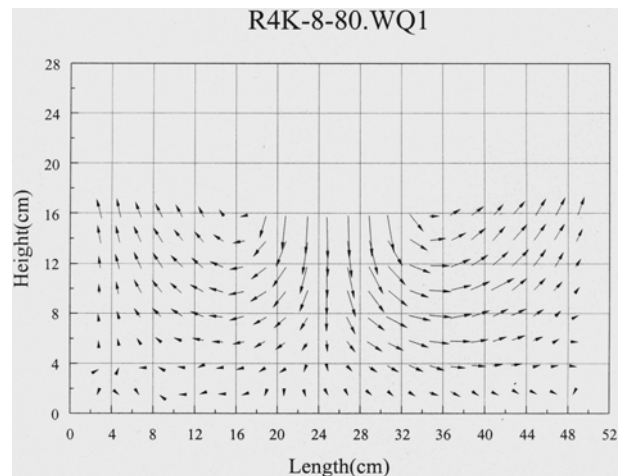


그림 21. 지반의 변위벡터($H=8\text{cm}$, $c_u=4.5\text{kPa}$, 80g-level, with geotextile)

에 따른 최대 수평변위의 크기는 각각 1.45, 1.83, 1.94cm 정도로 geotextile을 설치하지 않은 경우($c_u=4.5kPa$)와 거의 일치하였다. 최대 수평변위는 제방 선단부 아래 깊이비 (z/H_0)가 0.30~0.35인 위치에서 발생하였다. 최대 변위벡터의 크기는 2.45, 3.0, 3.37cm 정도로 제방높이가 높을수록 크게 나타났다.

3.4 지반의 변형형태

그림 22~그림 26은 본 원심모형시험에서 제방축조에 의해 발생한 지반의 변형형태를 나타낸 것이다. 단, 여기서는 중력수준이 80g-level, 비배수 전단강도는 1.5kPa인 지반에 대한 시험결과만을 나타내었다.

그림 22~그림 26으로부터 제방축조에 의해 발생한 전반적인 지반의 변형형태는 지반의 변위벡터에서 기술한 바와 같이 제방 중심 아래에서는 거의 연직방향으로 변형이 발생하고 있으며, 지표면으로부터 깊이가 증가할수록 변형이 감소되어 모형지반하부에서는 거의 변형이 발생되지 않음을 알 수 있다. 또한, 제방 중심으로부터 수평방향으로 거리가 멀어짐에 따라 변위의 방향이 연직방향에서 수평방향으로 변하면서 제방 선단부 아래 부분부터는 제방하중에 의한 수평방향 응력의 증가로 인해 흙요소가 연직방향으로 팽창이 발생되어 지표면까지 확장되고 있다. 제방하중에 의해 변형된 격자의 형태로부터 제방 아래의 흙요소는 하중에 의해 지반이 압축되어 주동상태를 나타내고 있으며, 제방 선단부 바깥쪽의 지반은 연직방향으로 팽창되어 수동상태를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

그림 22~그림 26에 나타난 변형된 격자의 형태로부터 제방 중심아래에서 깊이에 따른 수평변위는 거의 발생하지 않으며, 중심으로부터 거리가 증가함에 따라 수평방향 변위가 증가하여 제방선단부 아래부분에서 최대 수평변위를 보이고, 제방중심에서 1B(여기서, B는 초기 제방단면의 하부폭) 정도 떨어진 지점까지는 깊이에 따라 비선형 형태의

수평변위를 나타내고 있는 반면, 그 이후부터는 깊이에 따른 수평변위가 선형적인 형태를 보이고 있으며, 지표면 부분에서 최대 연직방향 팽창이 발생한다는 것을 알 수 있다.

그림 22와 그림 23으로부터 geotextile을 설치하지 않은 경우 동일한 지반강도에서 제방높이가 높을수록 제방 하부에서 주동상태를 나타내는 깊이가 증가하고 있으며, 또한, 지반요소의 횡방향 팽창이 크게 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 성토높이가 4cm인 경우 깊이비(z/H_0) 0.53이하, 성토높이가 6cm인 경우에서는 깊이비 0.76 이하에서는 요소의 변형이 거의 발생하지 않았다. 제방하중에 의한 치환단면 형상은 제방중심 아래에서 변형이 가장 크게 발생하는 포물선 형태를 나타낸다.

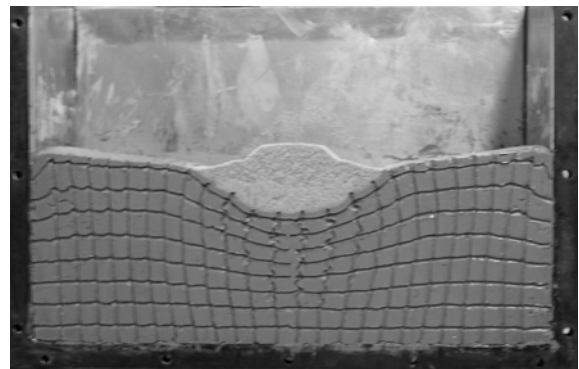


그림 23. 지반의 변형형태($H=6cm$, $c_u=1.5kPa$, without geotextile)

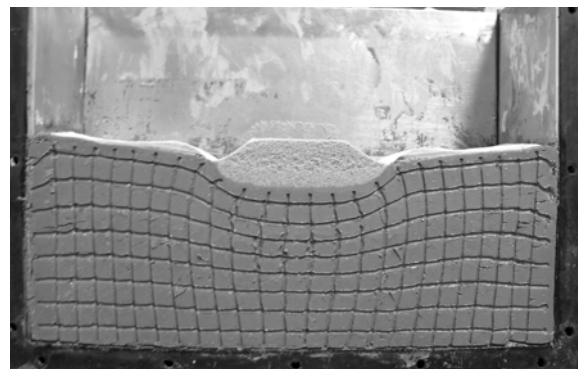


그림 24. 지반의 변형형태($H=4cm$, $c_u=1.5kPa$, with geotextile)

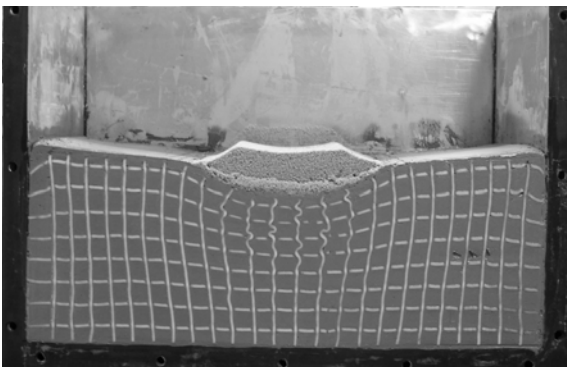


그림 22. 지반의 변형형태($H=4cm$, $c_u=1.5kPa$, without geotextile)

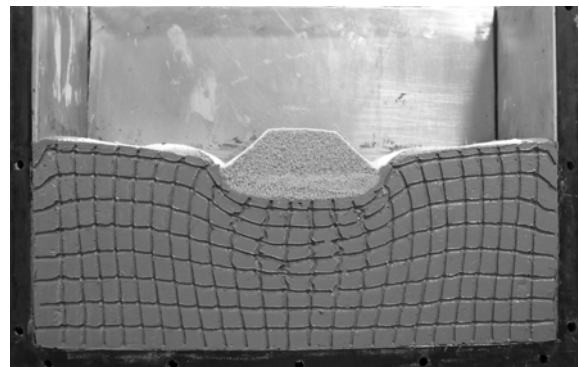


그림 25. 지반의 변형형태($H=6cm$, $c_u=1.5kPa$, with geotextile)

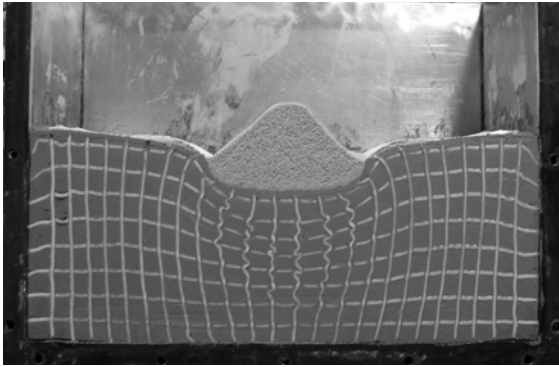


그림 26. 지반의 변형형태(H=8cm, $c_u=1.5kPa$, with geotextile)

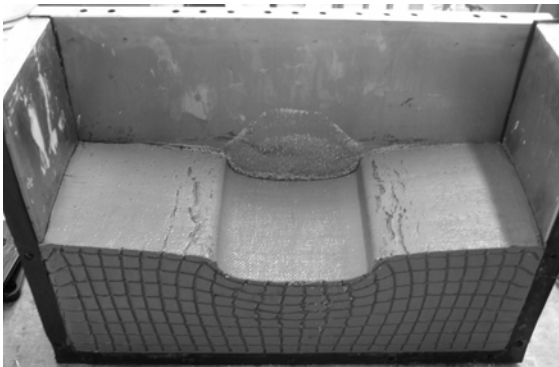


그림 27. 지반의 변형형태(H=6cm, $c_u=1.5kPa$, with geotextile)

그림 24~그림 26은 geotextile을 설치한 경우 제방높이(H=4, 6, 8cm)에 따른 지반의 변형형태를 나타낸 것으로 제방하부에서 비교적 균등한 치환단면 형태를 보이고 있다. 제방높이가 높을수록 제방 하부에서 주동상태를 나타내는 깊이가 증가하고 있으며, 또한, 제방하부 흡요소의 수평방향 팽창이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 제방 중심아래에서 깊이에 따른 지반의 변형 형태로부터 최대 수평방향의 팽창은 깊이비(z/H_0)가 약 0.4인 지점에서 발생하고 있다. 여기서, z 는 지표면으로부터의 깊이이고, H_0 는 초기 모형지반의 높이를 나타낸다. 그림 24~그림 26으로부터 geotextile의 설치한 경우 제방높이에 관계없이 시험완료 후의 제방단면이 초기단면에 근접한 상태를 보이고 있다.

그림 27은 시험완료 후 상부의 제방을 제거한 후 모형지반의 상부의 변형형태를 나타낸 것으로 모형토조의 폭방향으로 제방축조에 의한 변형단면이 일정한 것으로 나타나 벽면마찰이 거의 없는 상태에서 시험이 수행되었음을 확인할 수 있다. 또한, 이러한 경향은 시험후 모형단면을 폭방향으로 절개하여 확인한 결과에서도 동일하게 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 제방축조에 의해 연약점토지반에서 발생

되는 지반의 변위 및 변형형태를 파악하기 위하여 제방높이, 지반의 비배수 전단강도, geotextile의 설치여부와 중력수준을 변화시키면서 원심모형시험을 실시하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제방하중에 의한 지반의 치환단면은 geotextile을 설치하지 않은 경우 포물선 형태를 나타내었고, geotextile을 설치한 경우에는 제방하부에서 균일한 침하단면을 나타내는 사다리꼴 형태를 나타내었다. 균일침하분포가 발생하는 범위는 $0.47 \sim 0.67B$ 정도로 제방높이에 따라 증가하였다.
- (2) 제방축조에 의한 지반의 최대침하량은 제방중심 아래에서 발생하였으며, 최대용기량은 최대침하량의 49% 정도로 제방중심에서 $1.2 \sim 1.36B$ 떨어진 지점에서 발생하였다.
- (3) 치환각도는 제방높이와 중력수준이 증가할수록 그리고 지반의 비배수 전단강도가 작을수록 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 동일 지반강도에서 geotextile을 포설한 지반의 치환각도가 geotextile을 부설하지 않은 지반에 비해 약 1.13~1.42배 정도 증가하였다.
- (4) 제방하중에 의한 지반의 변위는 제방중심 아래에서 거의 연직방향의 변위를 일으키며, 중심으로부터 거리가 멀어짐에 따라 변위의 방향이 연직방향에서 수평방향으로 변하면서 제방 선단부 아래 부분에서 최대 수평방향의 변위를 일으키는 대수나선형태로 지표면까지 발생됨을 확인할 수 있었다.
- (5) 최대 수평변위가 발생하는 위치는 지표면에서 점토층 깊이의 $0.24 \sim 0.35H_0$ 지점으로 평균 $0.3H_0$ 인 것으로 나타났으며, geotextile을 설치하지 않은 경우 지반의 최대 침하량(S)과 최대 수평변위(δ_m)는 $\delta_m = 0.54S$, geotextile을 설치한 경우에는 $\delta_m = 0.60S$ 의 관계를 나타내었다.
- (6) 지반의 변형형태로부터 제방중심에서 $1B$ 정도 떨어진 지점까지의 수평변위는 깊이에 따라 비선형적인 형태를 나타내지만, 그 이후부터는 깊이에 따른 수평변위가 선형적인 형태를 나타내었으며, 제방 중심아래에서 최대 수평방향의 팽창은 지표면으로부터 약 $0.4H_0$ 인 지점에서 발생하였다.

참 고 문 헌

1. 이승원, 이영남, Allersma, H. G. B.(2000), 원심모형실험을 통한 연약지반의 강제치환거동 연구, 한국지반공학회 논문집, 제 16권, 제6호, pp. 141~151.
2. 이승호(1992), 토질구조물 축조에 의한 연약 점토지반의 변형

- 에 관한 연구, 한양대학교 박사학위논문, pp. 1~75.
3. 이치근(2001), 원심 및 수치모델링에 의한 화강토 지반상 Diaphragm Wall의 거동, 충북대학교 대학원 박사학위논문, pp. 70~90.
 4. 조성민(1998), 국내 점성토지반의 성토재하시 변형특성 분석, 서울대학교 박사학위논문, pp. 1~42.
 5. 허열, 정소전, 이치근, 안광국(2006), SCP 및 GCP로 개량된 복합지반의 변위양상에 관한 원심모델링, 한국지반환경공학회 논문집, 제7권 제5호, pp. 57~66.
 6. Atkinson, J.(1993), *An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations Through Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, pp. 316~323.
 7. Tavenas, F., Mieussens, C., and Bourges, F.(1979), Lateral Displacement in Clay Foundations under Embankments, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 16, No. 4, pp. 532~550.
 8. Taylor, R.N.(1995), *Geotechnical Centrifuge Technology*, Chapman & Hall, London, pp. 1~115.
 9. Yashuhara, K., and Tsukamoto, Y.(1982), A Rapid Banking Method Using the Resinous Mesh on Soft Reclaimed Land, *Second International Conference on Geotextiles*.
- (접수일: 2007. 1. 2 심사일: 2007. 1. 2 심사완료일: 2007. 3. 7)