

## 단계 성토 하중에 의한 개량된 연약지반의 거동 분석 Behavior of Soft Ground Improved by Weight of Embankment

전남수<sup>1)</sup>, Nam-Soo Jeon, 박영<sup>2)</sup>, Young Pak, 임희대<sup>3)</sup>, Hui-Dae Im

<sup>1)</sup> (주) 네스지오 부장, General Manager, Nesgeo

<sup>2)</sup> 한국수자원공사 부장, General Manager, Korea Water Resources Corporation

<sup>3)</sup> 충남대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Chung-Nam University

**SYNOPSIS :** 본 연구에서는 점토층의 자중압밀을 시행하여 현장강도를 구현하기 위하여 1/70로 축소 모델링하여 원심모형실험을 수행하였으며, 점토구간에 PBD 타설시의 연약지반의 압밀침하거동을 분석하기 위하여서는 1/100로 축소모델링하여 원심모형실험과 전산해석을 실시하였다. 전산해석결과 성토체 중심아래의 점토지반의 침하량은 1단계 성토제방하중 하에서 4.8개월 경과 후 최대 침하량은 41.1cm, 2단계 성토하중에서 4.2개월 경과 후의 최대침하량은 78.8, 3단계 성토하중에서 6개월 경과후의 침하량은 93.5cm의 침하가 발생하는 것으로 나타나 수치해석 결과와 원심모형실험결과 값의 유사한 경향을 확인하였다.

**Keywords :** Embankment, Sort Ground Improvement, Numerical Analysis, Centrifuge Model Test

### 1. 서론

우리나라의 서해안 및 남해안 지역의 상당부분이 해성점토인 연약지반으로 구성되어 있으며, 동해안과 내륙지방의 일부지역에서도 연약지반이 존재한다. 이들 지역의 연약지반은 이탄, 이회토, 무기질 실트 및 점토 등 다양한 토질로 구성되어 있어 도로와 같은 성토공사를 시행할 경우 연약한 기초지반의 특성으로 지반의 과도한 침하 발생과 지지력 부족으로 인한 성토체의 전단파괴 등 여러 가지 문제가 발생할 수 있다. 이들 지역에 대해서는 경제성, 시공성 뿐만 아니라 안정성을 고려하여 연약지반의 적절한 대책공법의 선정과 적용이 필요하다. 본 연구에서는 연약지반개량공법 중 국내 시공실적이 가장 풍부한 압밀축진공법중의 하나인 기성 연직 배수재를 적용한 경우에 대한 실시설계 기초 자료를 얻기 위한 것으로, 실내실험 중에서 현장의 상태를 재현하기에 가장 적합하고 유효한 방법 중 하나인 원심모형실험을 통하여 도로성토에 따른 연약지반의 응력과 변형에 필요한 기초 데이터를 얻고자 원심모형실험과 전산해석을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 기성 연직 배수재는 천연자원의 사용에 따른 자원고갈 및 경제성 저하에 따른 대체공법이라 할 수 있는 PBD를 사용하였다.

### 2. 전산해석(CRISP)

#### 2.1 개요

연약지반(점토층 두께 약 12m) 상에 높이 약12m의 3단계 성토를 하는 경우의 원지반 침하해석과 안정성 검토를 수행하였다. 성토과정은 3단계로 이루어지며, 성토고는 각각 5m, 4m, 1.7m 등 합계 10.7m에 이른다. 각 성토단계는 쌓기과정과 방치과정으로 구분되는데, 쌓기기간 중에도 압밀침하가 발생할 것으로 예상하여 침하해석에 있어서 즉시침하량과 압밀침하량을 동시에 구하였다. 이를 위해, 한계상태모델인 수정 Cam-Clay 모델을 상부점토층 및 하부점토층에 적용하였으며, 지반의 변형특성, 전단강도특성 뿐만 아니라 압밀특성을 동시에 고려하였다.

## 2.1.1 시공조건 및 수치모형

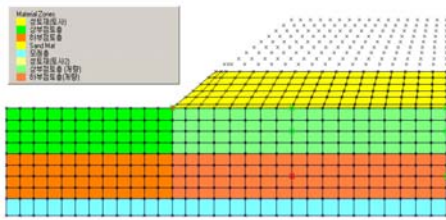


그림 1. 1단계 성토기간(3.3개월) + 방치기간(1.5개월)

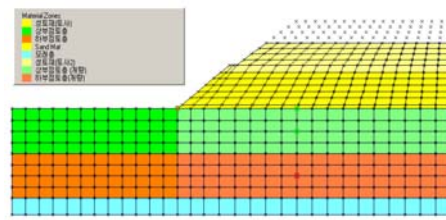


그림 2. 2단계 성토기간(2.7개월) + 방치기간(1.5개월)

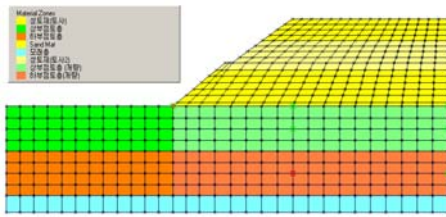


그림 3. 3단계 성토기간(1.1개월) + 방치기간(4.9개월)

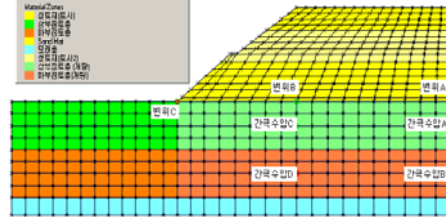


그림 4. 수치모형 및 해석결과 위치

## 2.1.2 지반물성치

표 1. 점토층 Cam-Clay 모델 물성치

토 층	포아슨비 (v)	e <sub>0</sub>	E (tf/m <sup>2</sup> )	단위 중량 (tf/m <sup>3</sup> )	지반투수계수		C <sub>c</sub>	C <sub>s</sub>	φ	φ'
					수평k <sub>x</sub> (cm/sec)	수직k <sub>y</sub> (cm/sec)				
점토층		심도 ≤ 6.0m	250	1.66	3.39x10 <sup>-7</sup>	1.25x10 <sup>-7</sup>	0.27	0.067	18	28
		심도 > 6.0m		1.07						
모래	0.3	-	1500	1.80	1.50x10 <sup>-3</sup>		-	-	28	
풍화토	0.33	-	4500	1.90	4.0x10 <sup>-4</sup>		-	-	28	
성토	0.3	-	1400	1.90	4.0x10 <sup>-4</sup>		-	-	25	
비고	• PBD 설치간격: 1.5m x 1.5m, • PBD 투수계수 : K=0.15 cm/sec									

## 2.2 해석결과

### 2.2.1 침하량 및 과잉간극수압의 변화

쌓기기간 중에는 즉시침하와 압밀침하가 포함되어 있으며, 방치기간 중에는 순수한 압밀침하만이 포함되었다. 원지반 침하량은 성토체 중심, 노견하부 및 사면의 하부선단에서 구하였으며, 과잉간극수압은 상부점토층의 중심부와 하부점토층의 중심부에서 4지점에서 구하였다.

표 2. 과잉간극수압 및 침하량 최대값

해석결과 항목	위치	최대값
과잉간극수압 (KN/m <sup>2</sup> )	간극수압A (상부점토층)	22.6 KN/m <sup>2</sup>
	간극수압B (하부점토층)	16.3 KN/m <sup>2</sup>
	간극수압C (상부점토층)	10.4 KN/m <sup>2</sup>
	간극수압D (하부점토층)	8.3 KN/m <sup>2</sup>
원지반 지표침하량 (cm)	변위A	93.5 cm
	변위B	73.4 cm
	변위C	8.0 cm

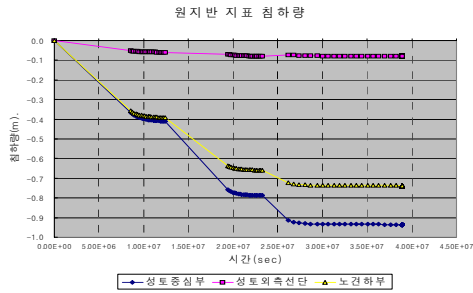


그림 5. 원지반 지표 침하량 (단위: m)

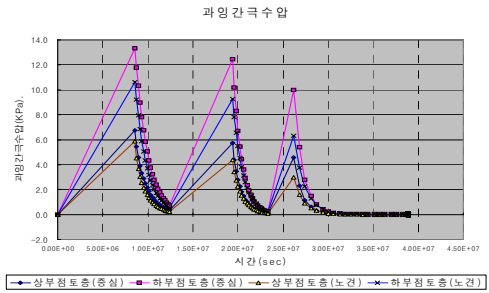
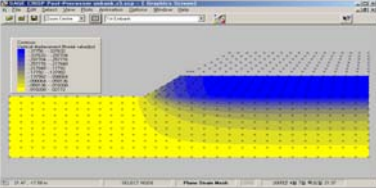
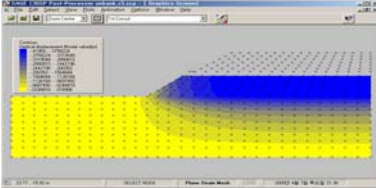


그림 6. 과잉간극수압 변화 (단위: kPa)

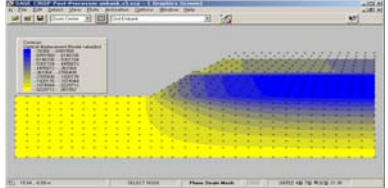
1단계 성토단계 직후 연직침하량



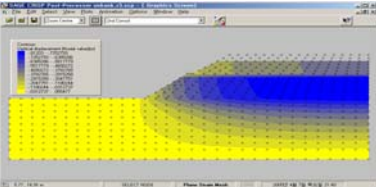
1단계 방치기간 직후 연직침하량



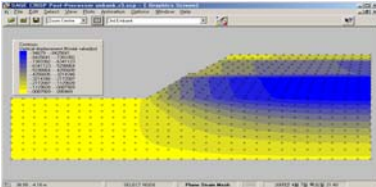
2단계 성토단계 직후 연직침하량



2단계 방치기간 직후 연직침하량



3단계 성토단계 직후 연직침하량



3단계 방치기간 직후 연직침하량

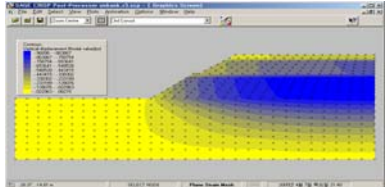
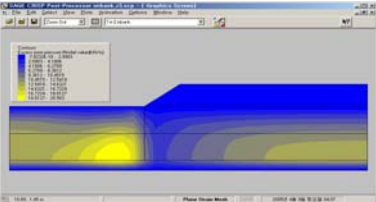
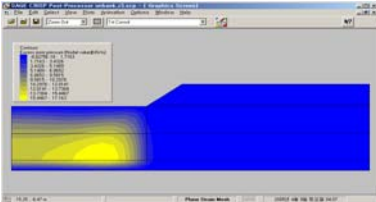


그림 7. 단계별 연직침하량

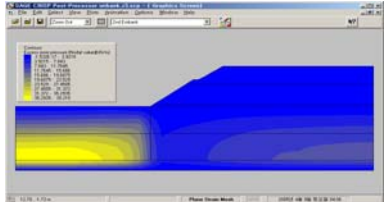
1단계 성토 직후 과잉간극수압



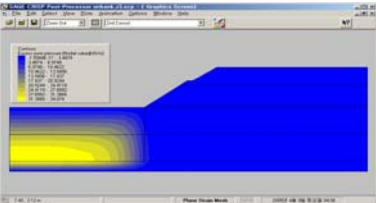
1단계 방치 직후 과잉간극수압



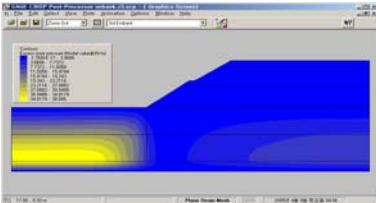
2단계 성토 직후 과잉간극수압



2단계 방치 직후 과잉간극수압



3단계 성토 직후 과잉간극수압



3단계 방치 직후 과잉간극수압

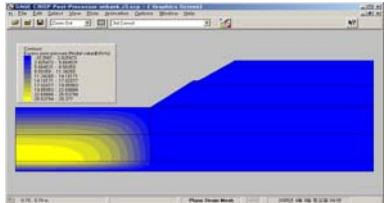


그림 9. 단계별 과잉간극수압

### 3. 원심모형실험 결과

#### 3.1 성토체 지반의 표면침하

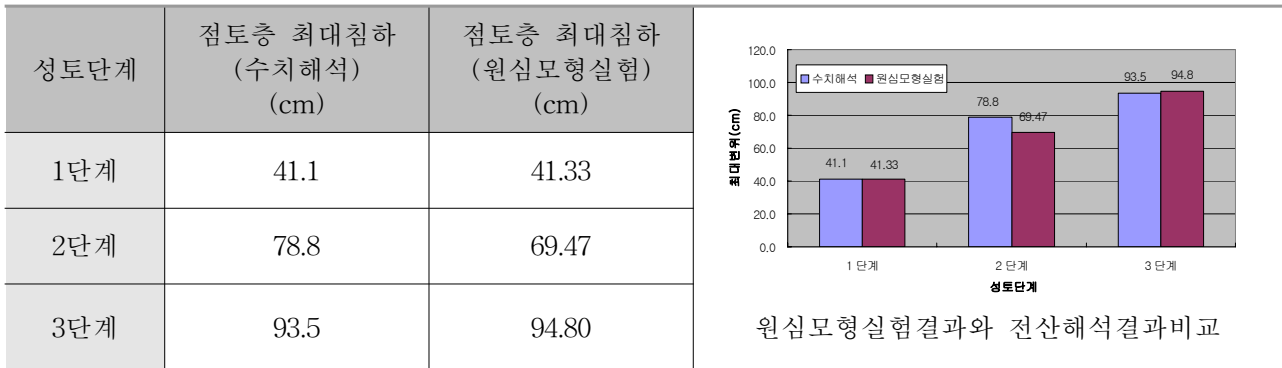
PBD 시공 후 성토 단계별 시간경과에 따라 측정된 성토체의 표면침하를 나타낸 것으로 시간경과 따라 점진적으로 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 1단계 성토 실험(성토고 5.0m)에서 100g-level에 도달된 직후 성토체의 중앙단면에서 측정된 침하량은 43.47cm, 2단계 성토 실험(성토고 4.0m)에서 측정된 경과 시점에서의 침하량은 78.27cm, 3단계 성토 실험(성토고 1.7m)에서 측정된 경과시점에서의 침하량은 113.73cm로 나타났다. 제방 성토체의 침하량은 총 3단계에 걸쳐서 시간 경과에 따라(총 15개월)

113.73cm가 될 것으로 추정된다.

### 3.2 점토층지반의 압밀침하 변위양상

1단계 성토 실험(성토고 5.0m)에서 100g-level에 도달된 직후 성토체의 중앙단면에서 측정된 침하량은 41.33cm, 2단계 성토 실험(성토고 4.0m)에서 측정된 경과시점에서의 침하량은 69.47cm, 3단계 성토 실험(성토고 1.7m)에서 측정된 경과시점에서의 침하량은 94.80cm로 나타났다. 이상과 같이 제방 성토에 의한 점토지반의 침하량은 총 3단계에 걸쳐서 시간의 경과에 따라 94.80cm(총 15개월)가 발생할 것으로 추정된다. 전체적인 침하발생 경향은 성토재하 중심에서 가장 크고, 재하중심에서 거리가 멀어질수록 침하가 감소하는 경향을 보였다.

표 3 성토단계별 최대침하량



### 4. 결 론

본 연구에서는 점토층의 자중압밀을 시행하여 현장강도를 구현하기 위하여 1/70로 축소모델링하여 원심모형실험을 수행하였으며, 점토구간에 PBD 타설시의 연약지반의 압밀침하거동을 분석하기 위하여서는 1/100로 축소모델링하여 원심모형실험과 전산해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 원심모형실험결과 1단계 성토제방하중 하에서 4.8개월 경과 후 최대 침하량은 중심단면에서 현장지반 조건으로 환산하여 43.47cm 발생하였으며, 2단계 성토하중에서 4.2개월 경과 후의 최대침하량은 78.27로 나타났다. 3단계 성토하중에서 6개월 경과후의 침하량은 113.73cm로 추정된다.
2. 원심모형실험 결과 1단계 성토하중 하에서 점토지반의 침하량은 4.8개월 경과 후 중심단면에서 현장 지반조건으로 환산하여 41.33cm 발생하였으며, 2단계 성토하중에서 6개월 경과 후의 최대압밀침하량은 69.47cm로 나타났다. 3단계 성토하중에서 6개월 경과후의 침하량은 94.80cm로 추정된다.
3. 전산해석결과 성토체 중심아래의 점토지반의 침하량은 1단계 성토제방하중 하에서 4.8개월 경과 후 최대 침하량은 중심단면에서 현장지반조건으로 환산하여 41.1cm 발생하였으며, 2단계 성토하중에서 4.2개월 경과 후의 최대침하량은 78.8로 나타났다. 3단계 성토하중에서 6개월 경과후의 침하량은 93.5cm의 침하가 발생하였다.

### 참고문헌

1. Hansbo, S. (1983) How to evaluate the properties of prefabricated drains, Proc. of the 8th ECSMFE, pp. 621-626.
2. Rixner, J. J., Kremer S. R. and Smith, A. D. (1986) Prefabricated vertical drains, Vol 2 : Summary of Research Effort, FHWA, Research Report No. FHWA/RD-86/169, Washington.