

원심모형실험을 이용한 방수제 안정성 검토

Centrifuge Model Experiments on Behavior of Waterproof Dike in Progress of Construction

유 남 재* 김 동 건** 이 동 원***
Yoo, Nam-Jae Kim, Dong-Gun Lee, Dong-Won

Abstract

This paper is results of centrifuge model experiment of investigating geotechnical engineering behavior of waterproof dike, located in soft grounds, in Saemankem in progress of construction. Centrifuge test with artificially increased gravitational level of 50g were performed to find ground settlements and excess pore-pressures developed during construction of waterproof dike by simulating the construction stages being predicted to occur in field so that the stability of waterproof dike could be assessed.

키워드 : 방수제, 연약지반, 원심모형실험

Keywords : *waterproof dike, soft ground, centrifuge model test*

1. 서론

새만금 간척사업은 그 규모면에서 기존 또는 현재 개발중인 간척지와는 차원을 달리하고 있으며, 간척공법에 있어서도 심해간척 개념을 도입하고 있어 차별적인 개발과 노력이 필요하다. 외해로부터 간척지를 보호하는 체질 방조제의 규모도 거대하지만 담수호로부터 내부간척지를 보호하는 방수제도 중소규모 간척지 방조제 단면에 필적하는 규모로 축조되었다. 이에 하천수역에서 내부개발지(제내지) 보호라는 방수제 목적상 침투류에 대한 안정성이 중요하므로, 본 연구에서는 방수제 축조에 따른 지반 거동분석을 위하여 단계별로 방수제 축조를 모사하여 50g 중력수준의 원심모형실험을 수행함으로써 방수제 축조에 대한 안정성을 검토

하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 원심모형실험

2.1.1 기본원리

원심모형실험의 기본원리는 축소된 모형의 자중을 인위적으로 증가시킨 자중효과로 상쇄시킴으로써 힘의 평형관계를 유지하는데 있다. 그림 1과 같이 2차원 평면 변형상태에서 임의의 요소에 작용하는 힘의 평형식은 다음과 같다.

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 강원대학교 토목공학과 박사과정

*** 강원대학교 토목공학과 석사과정, 교신저자

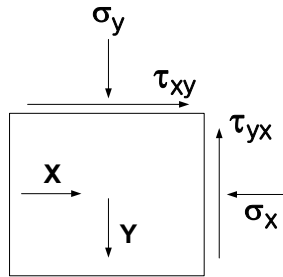


그림 1 힘의 평형상태

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y = 0 \quad (1)$$

여기서, X, Y는 X, Y방향의 자중이다.

이와 같은 평형식에서 원심모형실험에서는 1/N의 축소된 모형을 사용하고 흙의 자중을 N배 가속 시킴으로써 평형관계식이 다음과 같다.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial (x/N)} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial (y/N)} + N \cdot X = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial (x/N)} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial (y/N)} + N \cdot Y = 0 \quad (3)$$

위와 같은 관계식에서 N값은 서로 상쇄되어 일반적인 힘의 평형방정식과 동일하게 된다. 따라서 원심모형실험에서는 축소된 모형으로 흙의 자중을 인위적으로 증가시켜서 현장 원형구조물의 초기 응력 상태를 재현시키고 어떠한 형태의 경계조건에서 응력이 가하여져도 기본적인 힘의 평형 관계식을 만족시킴으로써 원심모형실험에서 현장과 동일한 재질의 시료를 사용하여 시험을 수행하면 현장 구조물과 같은 응력-변형 거동을 원심모형실험에서 재현시킬 수 있다(Schofield, 1988; Ko, 1988).

모형실험에서 원형구조물의 거동을 정확히 재현시키기 위하여 상사성(Similarity)이 만족되는 조건에서 원형의 거동을 지배하는 요소가 모형실험에서 모사되어야 한다. 원형과 모형의 상사관계 및 축척관계는 차원해석(Dimensional Analysis)이나 미분 방정식(Differential Equations)을 사용하여 구할 수 있다. 차원해석은 어느 변수들에 의하여 표시되는 자연현상의 물리적 관계를 나타내는 방정식은 동차원이어야 한다는 차원의 동차성 원리(Principle of Dimensional Homogeneity)에 근거한다.

2.1.2 원심모형실험기 제원

사용된 원심모형시험기의 용량은 20g · ton이며 시험가능 한 모형 토조의 크기는 500×500×600mm 이고, 원심모형기의 중심축으로부터 Hinge까지의

거리가 1m, Swing Basket의 저면 까지 거리는 1.35m이다. Slip Ring은 총 40개의 Channel이고 Conditioner의 구동 및 Video Camera의 전원을 공급하는 Slip Ring을 분리 설치하였으며, 2개의 유압식 Slip Ring은 원심모형시험기의 하단에 설치하였다. 또한 Zoom기능과 위치조절기능을 갖춘 폐쇄 회로(CCTV)와 35mm SLR Camera가 원심모형시험기의 중심 축 좌우에 설치되어 45° 각도로 설치된 반사경을 통해 실험과정을 Monitoring할 수 있으며, CCTV의 경우 Slip Ring을 통해 외부에 비치된 VTR과 TV와 연결되어 있어 실험과정을 녹화할 수 있다.

강원대학교 토목공학과 지반공학연구실에 위치한 원심모형실험기는 연약지반의 압밀거동에 관한 연구(강대수, 1977 ; 전동욱, 1997), 역T형 옹벽의 거동특성(엄재경, 1996), 사면에 인접한 옹벽의 거동특성(이명욱, 1998), 모래다짐말뚝의 특성연구(김상진, 2002)등 다양한 지반공학 거동특성 연구에 사용되어 왔다.

3. 실험 방법

3.1 기본물성실험

과업대상 시료의 비중을 측정하기 위하여 KS F 2308에 의거하여 비중시험을 총 3회 수행하였고, 입도분포를 파악하기 위하여 KS F 2302에 의거하여 체분석시험 실시하였다. 또한 대상시료의 세립자 입도분포에 대한 상세조사를 위하여 최신 X-ray 입도분석을 수행하여 0.1~80.0µm 입경 범위를 100개로 나누어 각 입경에 대한 중량함유율을 분석하였다.

3.2 최대최소밀도실험

지반 및 성토재의 상대밀도 조건을 수립하기 위하여 KS F 2345에 의거 최대최소밀도실험을 수행하였다. 두 실험 모두 각 실험방법 중 C 방법으로 수행하였다.



그림 2 최대밀도실험 방법

3.3 원심모형실험

방수제 축조로 발생될 수 있는 문제를 실험적으로 평가하기 위하여 50g 원심모형실험을 수행하고자 검토단면을 1/200 축소모형으로 조성하며, 현장토를 적용하여 모형 원지반을 형성하였다. 모형실험은 현장 및 설계조건으로 모사하며, 원지반 조성 후 방수제의 단계별 축조를 고려하였다. 단면지층은 N=6~13의 SM층 12m, N=4~32의 ML층 17.5m, N=28~50의 GP층 8.5m 그 아래 풍화암으로 구성되어 있다.

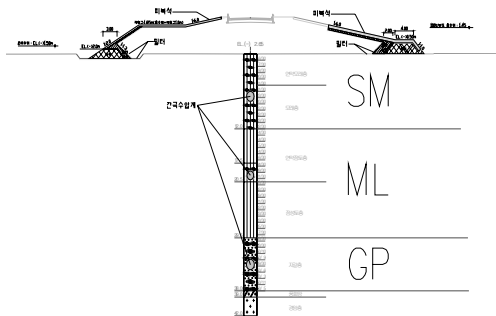


그림 3 검토 단면

3.3.1 원지반조성

풍화암은 강성의 MC관을 이용하여 모사하였고, GP층은 진동다짐으로 현장단위중량에 맞게 모사하였고, ML층은 설계 간극비를 갖고, 중간 높이에 간극수압계를 설치하였으며, 50g 중력수준에서 정규압밀 상태에 빠르게 도달할 수 있도록 공기압을 통해 강제압밀 수행하였다. 또한 SM층은 단위중량을 맞추면서, 하부 ML층에 혼합되지 않도록 공기압으로 압축하여 조성하였고, 원지반 조성 후 원심모형시험기로 자중압밀을 수행하여 과잉간극수압이 완전히 소산되도록 지반을 조성하였다.

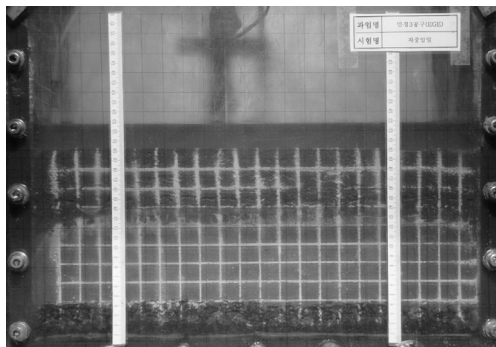


그림 4 원지반 조성완료

3.3.2 단계별 방수제 축조

방수제는 현장에서 준설하여 축조 시 사용될 실투질 모래의 현장토를 적용하였고, 설계된 방수제 단면과 최대한 유사하게 모사하였으며, 필터, 사석 및 도로 등도 제체와 함께 모델링하였다.

사석쌓기 완료 후 원심모형시험기를 이용하여 90일간의 방치기간을 적용하여 시공조건과 동일하게 방수제 성토를 3단계로 나누어 수행하였고, 각 단계마다 시공기간을 적용하였다. 수위조건은 관리수위 조건으로 유지하여 원심모형실험을 수행하였다. 아래 표 1은 시공단계별 시공기간 및 적용시료를 나타내고 있다.

표 1 단계별 모형실험

시 공 단 계	적용 시료	시공 기간	모형실험시간
사석쌓기	사 석(소)	1시간	-
방치기간	-	90일	52분
1단계 성토	SM 시료	17일	10분
2단계 성토	SM 시료	12일	7분
3단계 성토	SM 시료	7일	4분

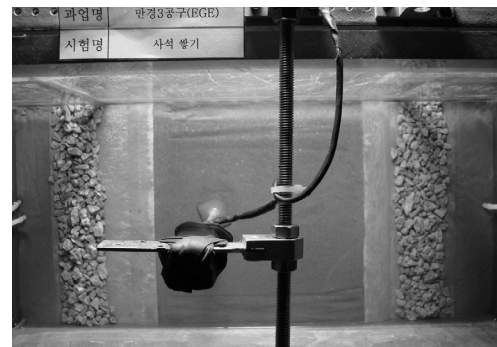


그림 5 사석층 조성

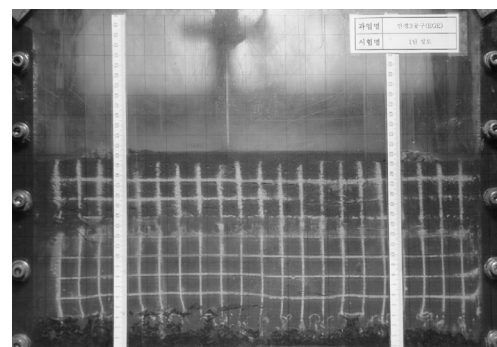


그림 6 방수제 1단계 성토

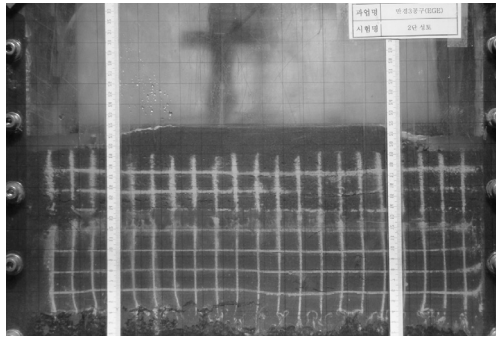


그림 7 방수제 2단계 성토

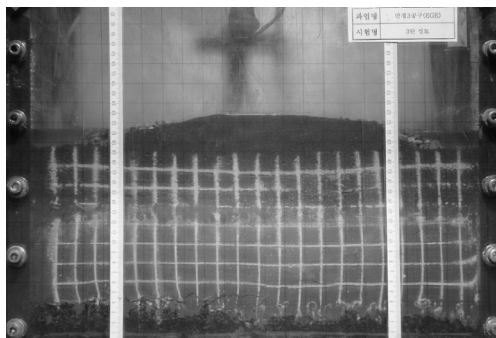


그림 8 방수제 3단계 성토

4. 실험 결과

4.1 기본물성실험 결과

비중실험 결과, 2.68-2.69의 범위로 나타났으며, 평균 2.68, 표준편차는 0.0036으로 분석되어 평균값 2.68을 대상시료의 비중값으로 적용하였다.

입도분석실험 결과, #200체 통과율이 26.7%, 균등계수 2.72, 곡률계수 1.34로 분석되었고, 통일분류상 SM으로 나타났다.

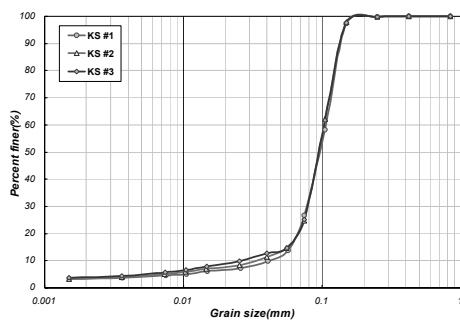


그림 9 입경가적곡선

X-ray 입도분석장치(Masterize2000)를 이용하여 입경별 중량백분율을 도출한 결과 아래 그림 10과 같이 나타났고, 실트함유율은 16.92~21.72%, 점토 함유율은 0.62~0.79%로 나타났다.

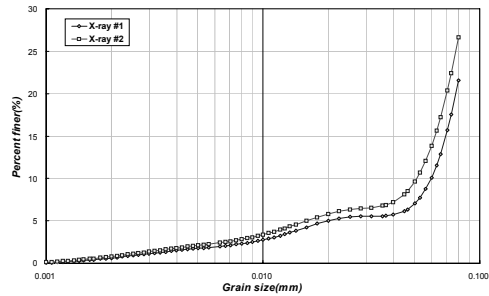


그림 10 X-ray 분석 결과

4.2 최대최소밀도실험 결과

최대최소밀도실험을 수행한 결과, 최대단위중량은 15.73kN/m³, 최소단위중량은 11.69kN/m³으로 나타났고, 최대 간극비는 1.293, 최소 간극비는 0.704로 분석되었다.

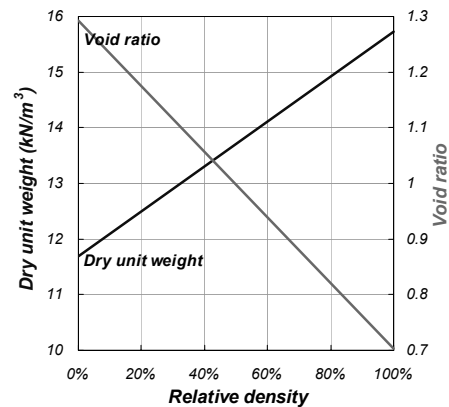


그림 11 상대밀도 그래프

4.3 원심모형실험 결과

4.3.1 원지반 조성단계

원지반 조성 후 50g의 중력가속도로 원심모형 실험을 수행하여 침하량 및 간극수압 검토를 통하여 원지반 지층현황을 검토한 결과, 3600일 경과시 약 1.6m의 침하량일 발생하는 것으로 나타났고, 자중 압밀에 따른 각 지층별 간극수압을 측정된 결과 SM층과 GP층에서는 간극수압 변화가 거의 나타나지 않으며, ML층에서 약 160kPa의 과잉간극수압이 발생한 후 이후 소산되어 나타났다.

산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제31권 A호, 2011.
 원심모형실험을 이용한 방수제 안정성 검토

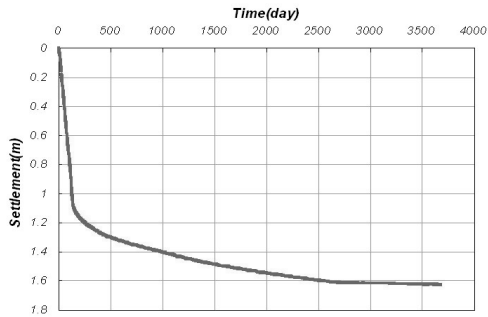


그림 12 원지반 조성단계 침하량

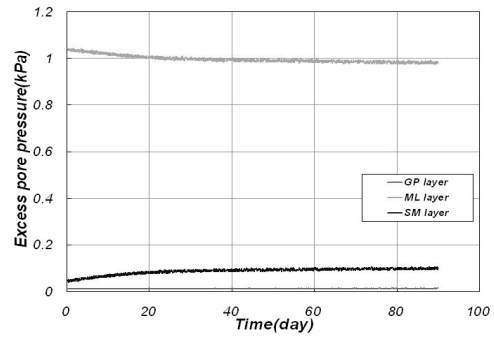


그림 15 사석층 조성단계 과잉간극수압

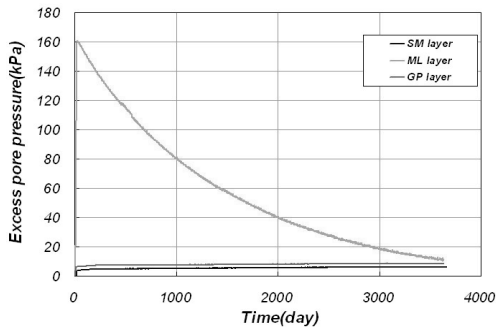


그림 13 원지반 조성단계 과잉간극수압

4.3.3 방수제 1단계 성토

방수제 1단계 성토에 따라 17일동안 44.1mm의 침하가 발생하였고, GP층, SM층에서의 과잉간극수압은 매우 작게 나타났다. ML층에서 과잉간극수압이 13.4kPa까지 상승하며 계속적으로 증가하는 경향을 보였다.

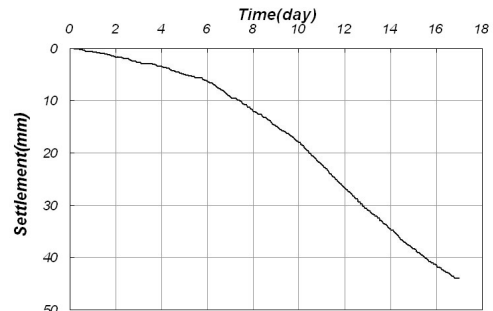


그림 16 방수제 1단계 성토 침하량

4.3.2 사석층 조성단계

사석층 조성 후 방치기간에 대한 실험을 수행한 결과, ML층에서 연직변위 8mm가 발생하였고, 90일 동안 사석조성에 따른 용기가 발생하였으며, 각 지층별 과잉간극수압은 1kPa 내외로 매우 작게 나타났다.

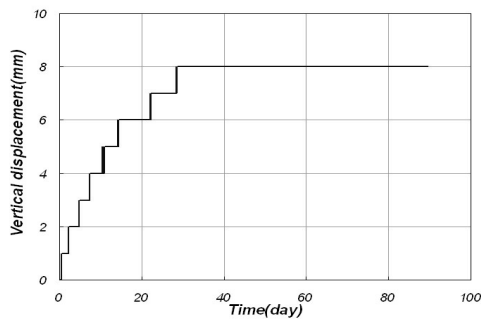


그림 14 사석층 조성단계 침하량

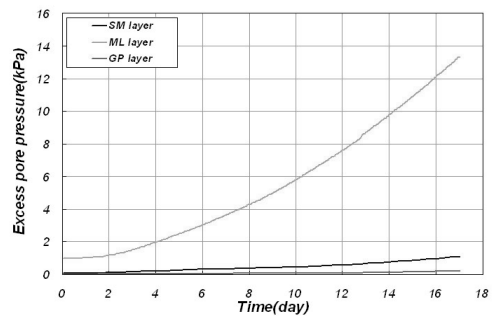


그림 17 방수제 1단계 성토 과잉간극수압

4.3.4 방수제 2단계 성토

방수제 2단계 성토 후 원심모형실험을 수행한 결과 12일간 59.7mm의 침하가 발생하였고, 과잉간

극수압은 GP층 및 SM층은 거의 변화가 없고, ML층에서 37.9kPa까지 상승하며 계속적으로 증가하는 경향을 보여 1단계 성토와 유사한 경향을 나타냈다.

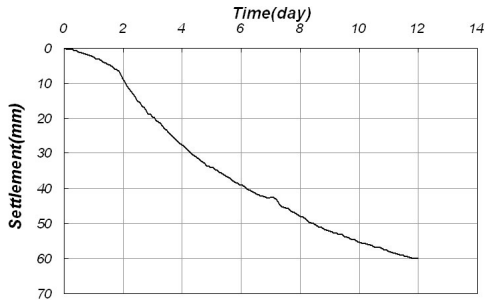


그림 18 방수제 2단계 성토 침하량

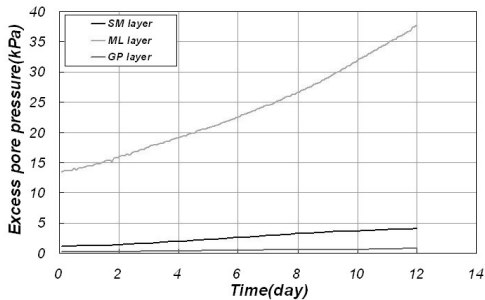


그림 19 방수제 2단계 성토 과잉간극수압

4.3.5 방수제 3단계 성토 후 방치

방수제 3단계 성토 모델링을 완료하고, 원심모형실험을 수행한 결과, 7일간 34.1mm의 침하가 발생하였고, 성토 후 장기간 방치결과 0.754m의 최종 침하량이 발생하였다. 과잉간극수압은 ML층에서 62.8kPa까지 발생하였고, 약 1300일 경과 시 과잉간극수압의 약 90%가 소산되는 것으로 나타났다.

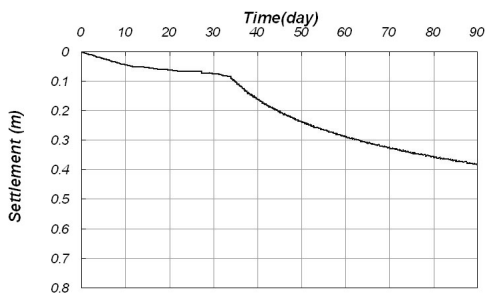


그림 20 방수제 3단계 성토 침하량

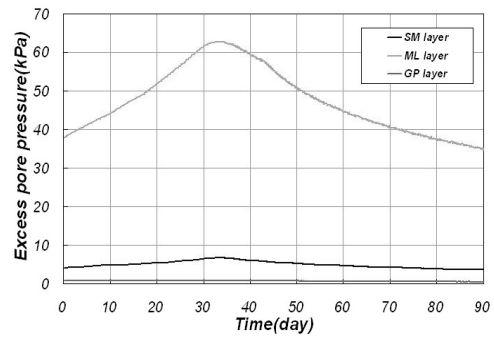


그림 21 방수제 3단계 성토 과잉간극수압

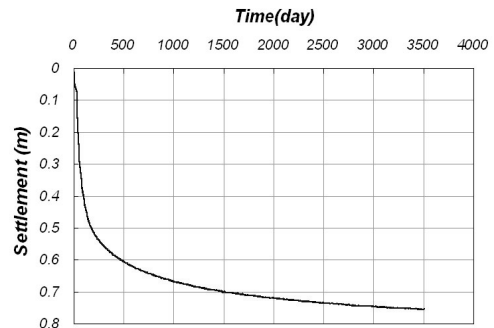


그림 22 방수제 3단계 후 방치 침하량

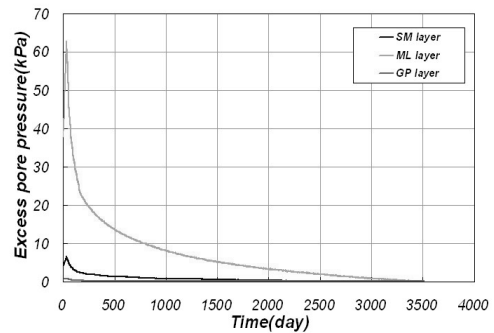


그림 23 방수제 3단계 후 방치 과잉간극수압

4.3.6 방수제 축조 전체 단계 분석

방수제 축조에 의한 각 단계별 침하량은 아래 표 2와 같고, 축조 전체 단계에서 발생한 총 침하량은 0.754m이며, 50g 중력수준에서 지속적인 모니터링 결과 활동 등의 파괴 가능성이 나타나지 않았다. 과잉간극수압은 ML층에서 최대 62.8kPa까지 나타났으며, 90% 압밀도는 방수제 축조 완료 후 1300일 경과시점에서 나타났다.

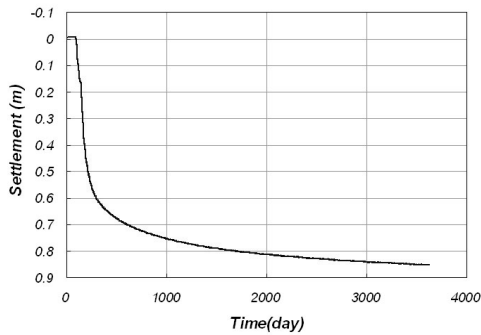


그림 24 방수제 축조 전단계 침하량

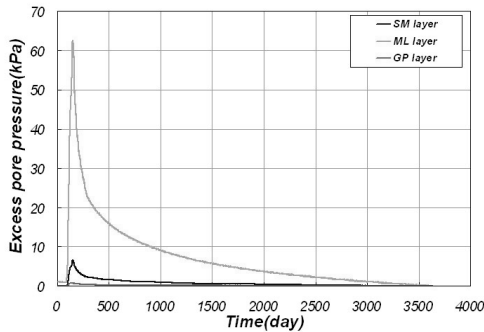


그림 25 방수제 축조 전단계 과잉간극수압

표 2 방수제 축조 전체단계 분석

단 계	시 간 (일)	단계별 침하량 (mm)	누적 침하량 (mm)	최대과잉간극수압 (kPa)		
				SM층	ML층	GP층
사 석	90	8.0	8.0	0.1	1.0	0
1단계 성토	17	44.1	52.1	1.1	18.4	0.2
2단계 성토	12	59.7	111.8	4.1	37.9	0.8
3단계 성토	7	34.1	145.9	4.6	44.1	0.8
최종 방치	3600	총침하량 : 0.754m		6.8	62.8	0.8

5. 결론

연약지반 위에 설치되는 방수제의 지반 거동 분석을 목적으로 수행한 본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 원지반은 강제압밀에 의한 공기압 재하와 50g 중력수준의 자중압밀을 통하여 현장의 응력조건을 모사하여 조성되었으며, 총 1.6m의 침하량이 발생하였다.

둘째, 원지반 상부에 사석층을 현장조건과 동일하게 조성하여 90일간 방치한 결과, 원지반 중앙에서 8mm의 용기가 발생하였고, 지층 별 과잉간극수압은 1kPa 내외로 매우 작게 나타났다.

셋째, 단계별 방수제 축조에 따라 원심모형실험을 수행한 결과, 0.754m의 최종 침하량이 발생하였고, 과잉간극수압은 ML층에서 최대 62.8kPa까지 나타났으며, 약 1300일 경과시 90% 이상의 압밀도를 보일 것으로 분석되었다.

넷째, 모형실험을 통한 침하량 및 간극수압 모니터링 결과, 방수제 축조에 의해 지반의 활동 및 파괴동 징후는 나타나지 않았다.

참 고 문 헌

- [1] 강대수, “연약점토의 2차원 압밀에 관한 원심모형실험”, 석사학위논문, 강원대학교, 1997.
- [2] 김경석, “유한요소해석을 이용한 암반근입말뚝의 지지력 비교”, 석사학위논문, 서울대학교, 1997.
- [3] 엄재경, “상재하중하 역T형 옹벽의 골동거동에 관한 원심모형실험”, 석사학위논문, 강원대학교, 1996.
- [4] 이명옥, “사면에 인접한 옹벽의 원심모델링”, 공학박사학위논문, 강원대학교, 1998.
- [5] 전동욱, “원심모형실험에 의한 연약점토의 자중압밀에 관한 연구”, 석사학위논문, 강원대학교, 1997.
- [6] Bloomquist, D. G., and Townsend, F. C., “Centrifugal Modeling of Phosphatic Clay Consolidation”, *Sedimentation/Consolidation Models*, pp. 565-580, 1984.
- [7] Dafalias, Y. F. and Herrmann, L. R., “Bounding Surface Plasticity II : Application to Isotropic Cohesive Soils”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.112, EM12, pp. 1263-1290, 1986.
- [8] Desai, C. S. and Siriwardane, H. J., *Constitutive Laws for Eng. Materials*, Prentice-Hall, pp. 204-245, pp. 282-295, 1984.
- [9] Hsieh, H. S., Kavazanjian jr. E. and Borja,

산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제31권 A호, 2011.
유 남 재, 김 동 건, 이 동 원

- R. I., "Double-Yield-Surface Cam-Clay Plasticity Model I: Theory", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.116, No.9, pp.1381-1401, 1990.
- [10] Jafroudi, S., "Experimental Verification of Bounding Surface Plasticity Theory for Cohesive Soils", *Ph D Thesis of University of California*, Davis, 1983.
- [11] Schofield, A. N. and Wroth C. P., *Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, 1968.
- [12] Townsend, F. C., "Centrifuge Modeling of Time-dependent Deformations", *Sedimentation/Consolidation Models*, pp. 60-64, 1984.