

부산지역 준설매립지반의 압밀거동 특성 분석

Analyses on Consolidation Characteristics of Dredged and Reclaimed Soils in Busan Area

유 남 재* 김 동 건** 황 희 석***
Yoo, Nam-Jae Kim, Dong-Gun Hwang, Hee-Seok

Abstract

For soils with high void ratios, the inverse method of utilizing results obtained from centrifuge model test was used to find the constitutive relation of effective stress - void ratio - permeability whereas conventional oedometer test and constant rate of strain consolidation(CRS) test about settlement of interface and pore pressure and distribution with time were compared with numerically estimated values to confirm such a constitutive relation as obtained from the inverse method. As results of numerical method, the volumetric ratio and reclamation velocity were obtained for the reclamation condition.

키워드 : 준설매립토, 원심모형실험, 역해석기법

Keywords : *Dredged and Reclaimed Soil, Centrifuge Model Test, Inverse method*

1. 서론

해안지역에서 활용가능한 지반의 한계로 인하여 해안매립에 의한 부지조성이 많이 활용되고 있다. 이와 같은 해안매립사업 수행시 부지조성을 위하여 해상에서 점토 또는 세립질의 흙을 준설하여 매립하거나, 양호한 입도의 육상 흙을 운반, 다짐, 성토할 때 준설매립토 자체의 압밀침하 또는 지반 성토에 따른 하부 연약지반의 압밀거동 특성 파악은 효율적인 매립지 설계 및 경제적인 시공관리상 매우 중요한 의미를 지닌다.

특히, 준설토의 자중압밀이 진행되는 동안 침하

량과 전단강도 변화를 예측하는 것은 매립물량의 산장, 다이크의 높이 결정, 준설 매립 공사기간 결정, 그리고 그에 따른 시공비 결정 등에 큰 영향을 미치는 중요한 사항이다.

따라서 본 연구에서는 부산지역의 준설매립지반에 대하여 기본물성시험과 역학시험을 병행하여 대상시료의 물리적 특성을 파악하고, 원심모형실험과 역해석 기법을 이용하여 유효응력-간극비-투수계수의 구성관계를 추정함으로써, 투기조건에 따른 준설매립토 지반의 압밀특성을 분석하였다.

2. 이론적 배경

해성점토를 준설하여 매립장에 투기시 매립토는 높은 함수비의 액상상태를 지닌다. 이러한 액상상태의 흙은 자중하에 침강시 평형상태에 도달할 때까지 액체상태를 유지하며 떠있다. 흙입자의 현탁

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사, 교신저자

** 강원대학교 대학원 토목공학과, 박사과정

*** 강원대학교 대학원 토목공학과, 석사과정

액은 상부에서는 중력에 의해 침전과 하부에서는 침전물의 누적에 따른 압밀이 진행된다. 이러한 침전-압밀의 메카니즘에 관하여 Imai(1981)는 아래 그림 1에 보인 바와 같이 그 과정을 세 단계로 구별하여 제시하였다.

일반적으로 준설패립토의 침강-압밀 과정은 세 가지 단계로 나타나는데 초기단계에서는 침강이 발생하지 않고 미세한 점성 토립자의 Floc형성과 정이며, 중간단계는 응집된 토립자가 점차로 침강하여 침전물의 층을 형성하고, 함수비는 감소하여 압밀하에 놓이게 된다. 따라서 상부의 침전구역과 침전물 사이의 경계는 새로운 침전물이 발생한다. 침전물이 점진적으로 증가하면서 상부의 침전지역은 점점 얇아지게 되며 결국은 사라지게 된다. 최종단계는 모든 침전물이 자중압밀하에 있게 되며 결국은 자중압밀이 완료된 평형상태에 도달하게 된다. 따라서, 준설패립토의 침강-압밀 과정은 침강, 침전물의 형성, 압밀층의 형성단계로 구별할 수 있다. 이러한 슬러리상의 초기함수비를 지닌 흙의 침강-압밀 현상은 준설패립토의 침강-압밀 뿐만 아니라, 광재에서 광재의 침강퇴적 현상, 하수 및 정수장의 슬러지의 침전에 적용된다.

준설패립 투기장은 일반적으로 준설토의 퇴적과 유출, 수질의 정화기능으로 분류할 수 있다. 두 기능은 준설토·패립토의 침강특성, 퇴적과정과 직접적으로 관련 있으며 투기장의 용량산정에 중요한 설계변수가 된다. 특히 지속적인 준설토의 투기장내의 투여와 적절한 유출수질의 유지를 위하여 슬러리의 준설토류의 체류시간 산정과 관련한 준설토의 침강속도와 준설패립토의 침강-압밀에 의한 체적 변화량 결정은 매우 중요한 사항이다.

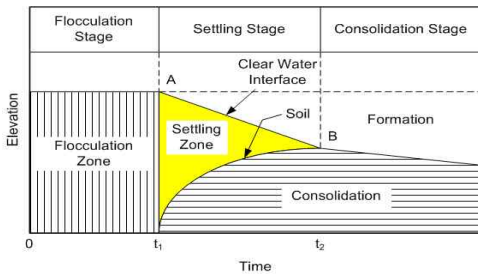


그림 1. 침전-압밀의 메카니즘 (Imai,1981)

준설토의 침강-압밀특성에 관한 이론적 배경은 고함수비 슬러리의 침강과 압밀 과정으로 구별될 수 있다. 침강에 관한 내용은 주로 상하수도 공학의 상·하수 정수장 시설별 설계 개념에서 주로 침강속도와 관련하여 이론적 전개 및 발전을 하였으며 준설패립토의 거동과 같이 슬러리의 압밀현상에 관하여는 지반공학과 관련하여 이론적으로

발전하였다.

3. 시험방법

3.1 기본물성 시험

본 연구에 사용된 준설패립토는 연약지반 상부에서 채취한 점토시료를 해수와 혼합하여 교반한 후 10번체(0.20mm)를 통과시켜 불순물과 입경이 큰 입자를 제거함으로써 시료의 균질성을 확보하였다. 시료의 물리적 성질을 파악하기 위해서 비중 시험(KSF 2308), 입도분석시험(KSF 2302), 액·소성 시험(KSF 2304, KSF 2304)을 수행하였다. 이중 입도분석시험은 시료의 대부분이 No.200체(0.074mm)를 통과하는 조건을 감안하여 시험은 KS A 5101-1에 규정한 시험용 체를 이용하여 씻기방법으로 #200번체 통과량을 구하였다. 비중계분석에서는 소성지수(Ip)가 20이상이므로 시료의 면모화를 방지하기 위하여 B방법에 명시된 바와 같이 헥사메타인산나트륨(Na6P6O18)용액을 분산제로 사용하였다.

3.2 표준압밀 시험

표준압밀시험은 시료에 점증적으로 하중을 가하여 시료의 압밀을 유도하는 단계별 점증하중 재하 방법으로 KS F 2316에 규정되어 있으며, 시험을 통하여 압축지수, 체적압축계수, 압밀계수 등의 압밀정수를 구할 수 있다. 시험에는 균질하게 혼합된 자연함수비 조건의 교란시료를 압밀셀에 재성형하여 적용하였다. 압밀하중은 5kPa에서 1,280kPa까지 하중증분비 1의 조건으로 단계별 재하>Loading)를 실시하였다.

3.3 일정변형률(CRS) 압밀시험

3.3.1 개요

준설패립토와 같이 큰 간극비를 갖는 고함수비 연약점토의 압밀특성을 파악하기 위하여 전용압밀셀을 이용하여 일정변형률(Constant Rate of Strain, CRS) 압밀시험(또는 일정변위 압밀시험, Constant Rate of Displacement Consolidation Test)을 실시하였다. 본 연구에 적용한 CRS 압밀시험의 특징은 ①초기 침하에 민감한 상부 재하판의 자중 영향이 없으며, ②배압을 작용시켜 시료내의 공기를 제거하여 포화도를 높이며, ③압밀셀의 직경(150mm)을 대형화하여 낮은 수준의 유효응력에 대한 간극비와 투수계수의 관계를 측정할 수 있다. 본 연구에서는 SGI, NGI의 표준속도인 $2 \times 10^{-6} / s = 0.0024 \text{ mm/min}$ 의 변형률속도를 적용하였다.

3.3.2 시험준비

간극수압계에 공기가 완벽히 제거(de-Aired)되었는지 물이 새지 않는지 확인한 후, 시료 내에 공기가 갇히지 않도록 조심스럽게 압밀셀 안에 시료를 넣는다. 초기에 준비한 시료의 무게를 재고 압밀셀에 시료를 넣고 난 후 시료의 무게를 측정하여 압밀셀에 들어간 시료의 무게를 계산한다. 모든 계측기의 영점을 맞춘 후 시료의 상하로 동시에 배압을 점차 증가시키면서 시료를 포화시킨다.

3.3.3 하중재하

시험준비가 완료되면, 상부의 Load Cell과 하중판이 달는 순간부터 순하중, 변위, 과잉간극수압, 경과시간등을 연결되어 있는 컴퓨터에 30초 간격으로 기록한다. 원하는 최대하중이나 일정한 변위에 도달했을 때 하중판을 잠그고 Loading Frame을 정지시키고 밸브를 열므로써 과잉간극수압을 소산시킨다. 하중이 증가된 속도와 동일하게 시료에 작용하는 하중을 감소시키며(변위조절이 아닌 응력조절 방법을 사용하여), 상기와 같이 기록한다. 하중이 최초의 Seating Pressure로 돌아오게 되면, 어떠한 과잉간극수압도 남지 않도록 소산시켜서 일정한 축하중이 유지되도록 한다.

4. 시험결과

4.1 기본물성

현장에서 교란채취된 준설패립 해성점성토시료에 각 구간별로 기본물성시험을 수행한 결과, 표 1과 같이 분석되었다. 흙의 분류는 모두 통일분류(USCS)상 CH로 나타났다.

표 1. 기본물성시험 결과

구분		결과	
초기함수비	W _n	85.47%	
#200체 통과량	P _{0.075}	96.56%	
비중	G _s	2.71	
액·소성한계	액성한계	LL	54.08%
	소성한계	PL	17.61%
	소성지수	PI	36.47
흙의 분류-통일분류법(USCS)		CH	

4.2 표준압밀 시험

현장에서 채취한 준설패립토를 교반하여 압밀셀에 초기 간극비 2.232~2.319, 평균 2.276으로 형성된 시료에 대하여 시험을 수행하였다. 그림 2는 간극비(e)-유효응력(logp')

시험결과, 압축지수 C_c는 0.437~0.658의 범위로 평균 0.575로 분석되었다.

간극비에 따른 투수계수는 그림 3에서 나타났다. 간극비 증가에 따라 투수계수가 증가하며, 2.41×10⁻⁸~5.74×10⁻⁷cm/sec의 범위를 보이고 있다.

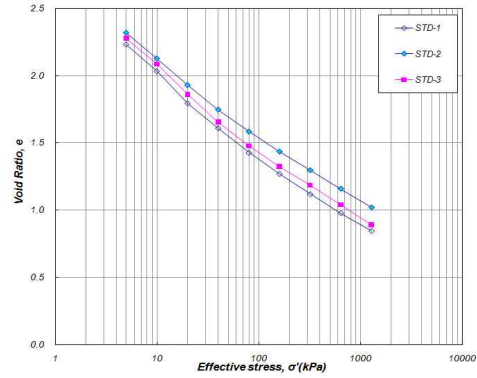


그림 2. e-logp' 곡선

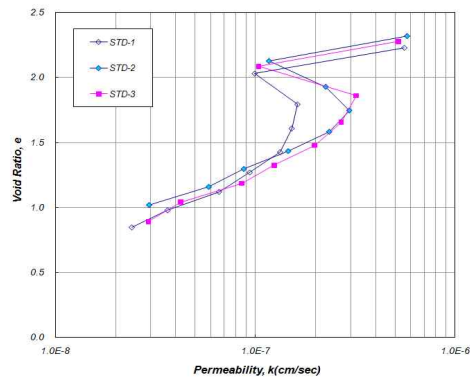


그림 3. e-logk 곡선

4.3 일정변형률(CRS) 압밀 시험

현장에서 교란 채취한 준설패립토를 교반하여 직경 D=150mm의 압밀셀에 150%, 200% 함수비 조건으로 제성형한 시료에 대하여 일정변형률 압밀시험을 각각 1회씩 수행하며 아래와 같은 결과를 획득하였다. 그림 4는 일정변형률 압밀시험으로 분석된 간극비(e)-유효응력(logp')

이며 증가하고 있다.

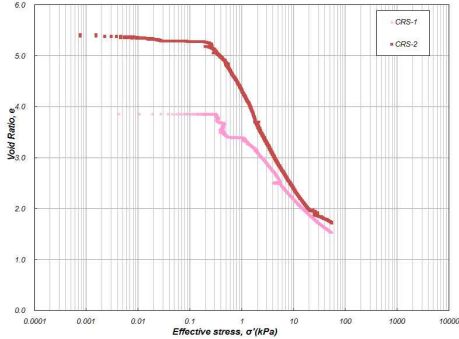


그림 4. 간극비(e)-유효응력(logp')

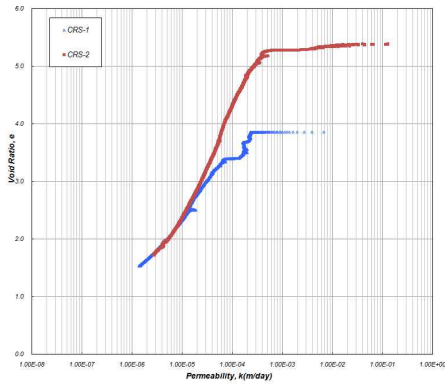


그림 5. 간극비(e)-투수계수(logk)의 변화

4.4 원심모형시험 결과

준설매립 대상 시료에 대해 함수비 및 초기높이를 다르게 하여 표 2와 같은 조건에서 원심모형시험을 수행하였다.

표 2. 원심모형 시험조건

구분	TEST1	TEST2
중력수준	50G-Level	50G-Level
함수비조건	170%	230%
배수 조건	일면배수	일면배수
시료높이 (모사높이)	20.0cm (20.0cm×50G=10.0m)	20.0cm (20.0cm×50G=10.0m)

그림 6과 그림 7은 각각의 실험조건에 따라 수행한 원심모형 자중압밀실험(Centrifuge-1)에서의 시간에 따른 침하량 결과이다. 함수비 170%조건은 50g의 중력수준에서 2,280분간 가속하였으며,

9.71cm의 침하량을 보였으며, 시료높이에 따른 침하발생비(=Δh/H0)는 48.6%로 분석되었다. 반면에 함수비 230%조건은 동일한 중력수준에서 1,770분간 11.35cm의 침하량을 보였다. 시료높이에 따른 침하발생비(=Δh/H0)는 56.8%로 분석되었다. 시험 완료 후 심도별로 함수비를 채취한 결과, 최종함수비는 170%조건은 60.24~157.49%(평균78.19%), 230%조건은 41.88~184.62%(평균 89.57%)의 분포를 보였다.

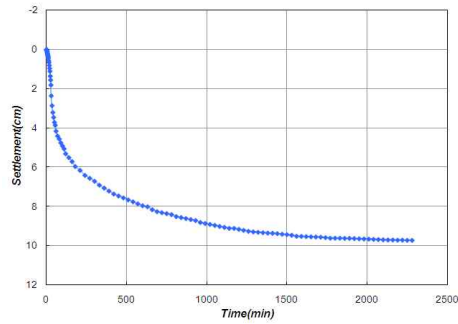


그림 6. 시간-침하 곡선(170%)

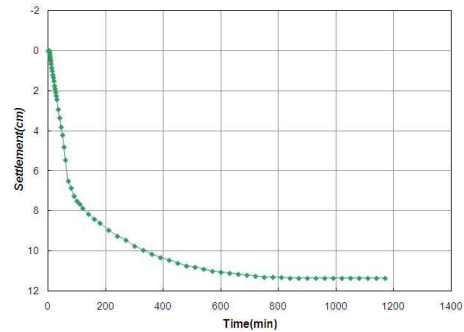


그림 7. 시간-침하 곡선(230%)

5. 역해석에 의한 구성관계 산정

400~1,000% 정도의 높은 함수비(간극비)를 갖는 준설매립구간에 대한 압밀거동 평가를 위해서는 고함수비의 간극비-유효응력-투수계수의 구성관계의 획득이 중요하다. 그러나 이러한 고함수비 범위에서는 실내 및 현장에서 시험을 수행하여 한 구성관계를 획득하는 것이 시험기술 및 장비의 제약 등의 문제로 인하여 현실적으로 매우 어렵다. 본 연구에서는 고함수비 조건을 갖는 준설매립토의 압밀거동을 분석하기 위하여 원심모형시험의 시간에 따른 침하량 결과에 역해석 기법을 적용하

여 구성관계식을 산정하였다.

5.1 산정방법

구성관계식 산정방법은 먼저 비교적 작은 간극비에 대한 간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 구성관계를 표준압밀시험과 일정변형을 압밀실험 등을 통하여 획득한다. 이 자료를 기지점으로 하여 지수함수의 구성관계식 식 (1)을 사용하여 개략적인 관계를 산정한다. 개략적인 구성관계식 산정 후 식 (2), 식 (3)과 같은 정교한 지수함수를 사용하여 구성식을 완료한다.

$$\begin{cases} e = A(\sigma)^{-B} \\ k = C(e)^D \end{cases} \quad (1)$$

$$e = \frac{AA + BB \times \ln(\sigma')}{1 + CC \times \ln(\sigma') + DD \times (\ln \sigma')^2} \quad (2)$$

$$e = \frac{EE + FF \times \ln(k)}{1 + GG \times \ln(k) + HH \times (\ln k)^2} \quad (3)$$

원심모형시험 결과의 역해석을 위해 자중압밀 거동 분석에 적용된 유한변형을 압밀이론은 2차 편미분 방정식으로 압밀량의 경우 초기시간에 대하여 급격히 비선형으로 변하고, 시간이 지남에 따라 기울기가 완만해지는 특성이 있다. 특히, 간극비가 큰 경우에는 시간변화에 따라 압밀량이 크게 변하는데, 이러한 특성에 맞는 적절한 구성식을 식 (2)와 식 (3)과 같은 지수함수형태로 표현함으로써, 간극비의 폭이 클 경우에도 식의 상수 값만으로 임의의 미분점을 구할 수 있도록 단순화하였다. 또한, 위의 구성관계식을 적용함으로써 변곡점에서의 수치해석상 오차를 방지할 수 있어 해의 안정성을 도모하였으며, 수행시간의 단축 등의 장점이 있다.

표준압밀시험과 일정변형을 압밀시험 등을 통하여 획득한 기지점으로부터 기울기를 달리하여 식 (1)을 이용하여 여러 개의 구성식을 추정한다. 이후 식 (2), 식 (3)으로부터 구성식의 상수(AA~HH)값을 획득하여 원심모형시험과 동일한 조건으로 유한변형을 압밀이론을 통한 자중압밀 거동해석을 실시한다. 이 해석결과와 원심모형시험에서 획득한 시간경과에 따른 계면고의 변화를 비교하여 가장 근접한 결과를 도출하는 간극비-유효응력-투수계수의 관계를 산정한다.

5.2 구성관계식 산정

그림 8은 간극비-유효응력의 구성관계를 표준압밀시험과 일정변형을 압밀시험의 간극비-유효응력

결과를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 간극비 증가에 따라 비선형적으로 유효응력이 감소함을 알 수 있으며, 저함수비에서는 표준압밀시험결과(STD 1~3) 및 일정변형을 압밀시험결과(CRS 1~2)와 부합되어 나타난다.

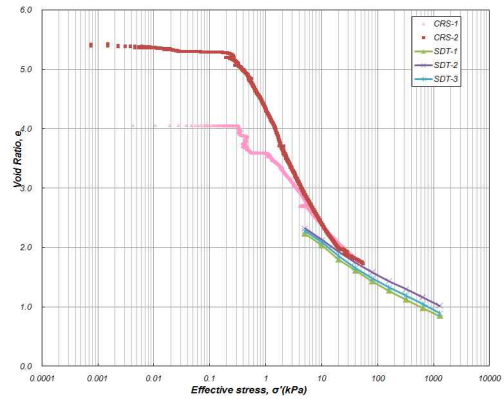


그림 8. 간극비-유효응력 구성관계

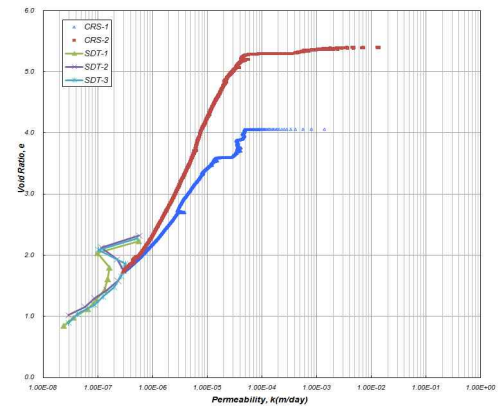


그림 9. 간극비-투수계수 구성관계

간극비-투수계수의 구성관계를 표준압밀시험과 일정변형을 압밀시험의 간극비-투수계수 결과와 함께 그림 9에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 간극비 증가에 따라 비선형적으로 투수계수가 증가함을 알 수 있으며, 낮은 간극비에서는 표준압밀시험결과(STD 1~3) 및 일정변형을 압밀시험결과(CRS 1~2)의 범위내로 구성관계가 형성되어 나타난다.

그림 8과 그림 9에서 산정된 간극비-유효응력(tf/m^2)-투수계수(m/day)의 구성관계식을 아래 식 (4)와 식 (5)에 각각 나타내었다.

$$e = \frac{2.0204 - 0.1007 \times \ln(\sigma')}{1 + 0.0810 \times \ln(\sigma') - 0.002111 \times (\ln \sigma')^2} \quad (4)$$

$$e = \frac{9.972 + 0.5193 \times \ln(k)}{1 - 0.1516 \times \ln(k) + 0.0183 \times (\ln k)^2} \quad (5)$$

5.3 원심모형시험과 구성관계식

그림 10에서 보는 바와 같이 원심모형시험에 의한 시험결과와 수치해석에 따른 해석결과가 모두 유사하게 나타나고 있다. 표 3에서와 같이 원심모형시험으로부터 추정된 최종침하량과 산정된 구성관계식을 적용하여 구한 수치해석의 최종침하량이 0.9~2.46%의 비교적 낮은 편차로 유사하게 분석되었으므로 구성관계식이 높은 신뢰도로 분석되었다고 판단된다.

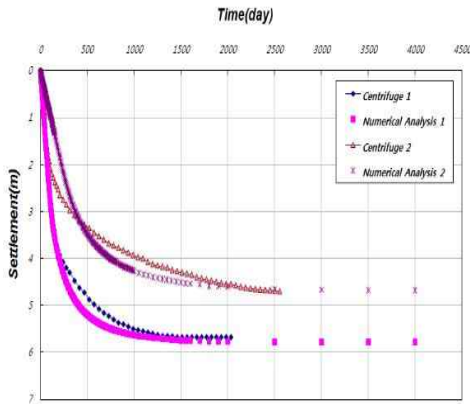


그림 10. 시험 및 수치해석 결과 비교

표 3. 시험 및 수치해석에 의한 최종침하 비교

구 분	Centrifuge 1	Centrifuge 2
시험조건	230%-20cm-50g	170%-20cm-50g
실험결과	5.675m	4.750m
수치해석	5.818m	4.705m
편 차	2.46%	0.95%

6. 투기조건에 따른 체적변화비 산정

6.1 산정개요

준설토는 펌프준설시에 함수비의 증가로 인하여 원지반의 부피보다 훨씬 큰 부피를 갖게 되며, 토

출관을 통해 매립장내 투기시에는 침강과 압밀과정에 의해 초기에 급격하게 침하하게 된다. 이러한 과정에 의해 계획된 준설량은 투기장내에 매립되면, 원지반 보다는 큰 체적을 보인다 시간이 지남에 따라 점차 감소하여 원지반의 체적과 유사하게 된다. 즉, 임의의 시점에서 준설매립토의 체적을 산정함으로써 투기장 크기의 적정성이나 계획된 준설량을 모두 매립할 수 있는지 등을 확인할 수 있게 된다.

6.2 입력 조건

본 연구 대상지역 준설토 투기장의 체적변화비 산정을 위한 수치해석 조건은 아래와 같이 설정하였다.

표 4. 준설토 및 원지반 조건

구분	함수비	비중	원지반 간극비	투기 준설토 간극비
입력 조건	60.0%	2.71	1.85	16.0

표 5. 매립지 조건

구분	매립지 원지반고	준설토 투기고
입력 조건	DL.-4.5m	DL.+7.0m

6.3 해석 결과

6.3.1 14개월 투기 후 방치 조건

14개월 투기 후 방치 조건으로 침하해석을 수행한 결과 투기완료시와 이후 시간경과에 따른 체적 변화비 변화가 아래 표와 같이 나타났으며, 14개월 간 DL+7.0m까지 채우기 위한 투기속도는 0.107m/day로 나타났다.

표 6. 매립지 조건

구 분	매립 완료시	17개월 경과시	36개월 경과시	자중압밀 종료시	투기 속도
기간(일)	420	510	1080	-	0.107 m/day
매립고	6.893	6.317	4.914	4.467	
압밀량 (m)	33.547	34.123	35.526	35.973	
체적 변화비	1.512	1.436	1.250	1.190	

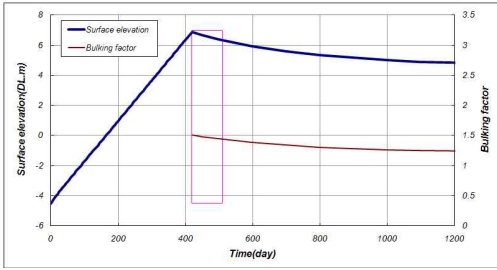


그림 11. 시간-지반고-체적변화비(c-1)

6.3.2 7개월 투기/3개월 방치/4개월 투기 조건
7개월 투기 후 3개월 방치하고, 다시 4개월간 투기 조건으로 침하해석을 수행한 결과 투기완료 시와 이후 시간경과에 따른 체적변화비 변화가 아래 표와 같이 나타났으며, DL+7.0m까지 채우기 위한 투기속도는 0.136m/day로 나타났다.

표 7. 매립지 조건

구 분	매립 완료시	17개월 경과시	36개월 경과시	자중압밀 종료시	투기 속도
기간(일)	420	510	1080	3000	0.136 m/day
매립고	6.909	6.298	4.904	4.447	
압밀량 (m)	33.471	34.083	35.476	35.933	
체적 변화비	1.516	1.435	1.250	1.189	

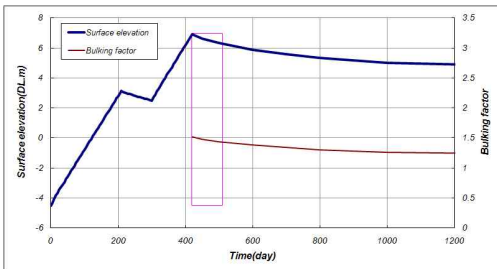


그림 12. 시간-지반고-체적변화비(c-2)

6.3.3 3개월 투기/7개월 방치/4개월 투기 조건
3개월 투기 후 7개월 방치하고, 다시 4개월간 투기 조건으로 침하해석을 수행한 결과 투기완료 시와 이후 시간경과에 따른 체적변화비 변화가 아래 표와 같이 나타났으며, DL+7.0m까지 채우기 위한 투기속도는 0.150m/day로 나타났다.

표 8. 매립지 조건

구 분	매립 완료시	17개월 경과시	36개월 경과시	자중압밀 종료시	투기 속도
기간(일)	420	510	1080	3000	0.150 m/day
매립고	6.981	6.342	4.936	4.469	
압밀량 (m)	33.520	34.158	35.565	36.031	
체적 변화비	2.174	2.053	1.787	1.698	

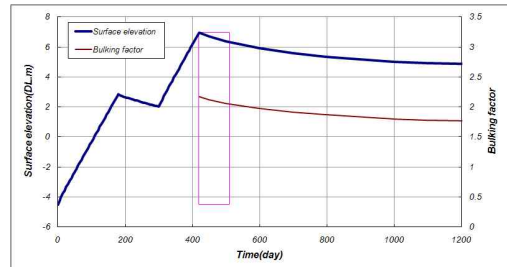


그림 13. 시간-지반고-체적변화비(c-3)

7. 결론

본 논문에서는 준설토의 침강 및 압밀특성을 예측하기 위하여 기본물성시험, 압밀시험, 원심모형 시험 및 수치해석에 의한 역해석을 실시하고, 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 제공된 시료에 대한 기본물성시험결과, 비중 2.71, 액성한계 및 소성한계, 소성지수는 각각 54.08%, 17.61%, 36.47로 분석되었다. 입도분석 시험결과 200체 통과량이 96.56%로 나타나 대상시료는 통일분류상 CH로 분석되었다.

둘째, 교란된 시료를 재성형하여 초기간극비 2.232~2.319, 평균 2.276 조건의 표준압밀시험결과, 압축지수는 0.437~0.658의 범위에서 평균 0.575로 분석되었으며, 하중단계별로 연직압밀계수(Cv)는 $1.57 \times 10^{-4} \sim 3.03 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 로 나타났다. 또한 일정 변형률 압밀시험을 수행한 결과, 간극비 증가에 따라 유효응력($\log p'$)은 비선형적으로 감소하며, 투수계수($\log k$)는 비선형적으로 증가하는 것으로 분석되었다.

셋째, 초기함수비를 230%, 170%로 하여 총 2회에 걸쳐 일투기 원심모형시험을 수행하였다. 수행결과, 원심모형시험 1(초기함수비 230%, 초기높이 20cm, 중력수준 50g) 조건에서는 11.35cm의 침

하량이 산정되었으며, 원심모형시험 2(초기함수비 150%, 초기높이 20cm, 중력수준 50g) 조건에서는 9.71cm의 침하량이 나타났다.

넷째, 일시투기로 수행된 2개 조건의 원심모형 시험에 의한 자중압밀 침하량 및 압밀시험결과를 반영하여 유한변형률 압밀이론의 수치해석을 이용한 역해석을 수행하여 간극비-유효응력(tf/m²)과 간극비-투수계수(m/day)와의 현장 적용에 합리적인 구성관계식을 획득하였다.

$$e = \frac{2.0204 - 0.1007 \times \ln(\sigma')}{1 + 0.0810 \times \ln(\sigma') - 0.002111 \times (\ln \sigma')^2}$$

$$e = \frac{9.972 + 0.5193 \times \ln(k)}{1 - 0.1516 \times \ln(k) + 0.0183 \times (\ln k)^2}$$

다섯째, 산정된 구성관계식을 이용하여 현장조건에 대한 투기계획을 수립하여 이에 따른 준설압밀량 및 체적변화량을 산정하였다. 각 투기 조건에 따라 투기기간, 방치기간, 36개월 경과 기간에 대하여 투기속도를 산출한 결과가 다음과 같다.

구분	투기 속도 (m/d ay)	매립 완료시		17개월 경과시		36개월 경과시	
		지반고 (DL.m)	체적 변화 비	지반고 (DL.m)	체적 변화 비	지반고 (DL.m)	체적 변화 비
C-1	0.107	6.893	1.512	6.317	1.436	4.914	1.250
C-2	0.136	6.909	1.513	6.298	1.435	4.904	1.250
C-3	0.150	6.981	2.174	6.342	2.053	4.936	1.787

참 고 문 헌

[1] Been, K. and Sills, G. C., "Self-weight Consolidation of Soft Soils: An Experimental and Theoretical Study", *Geotechnique*, Vol.31, pp.519~535, 1981.

[2] Bloomquist, D. G., and Townsend, F. C., "Centrifugal Modeling of Phosphatic Clay Consolidation", *Sedimentation/Consolidation Models*, pp.565~580, 1984.

[3] Camp, T. R., "A Study of the Rational Design of Settling Tanks", *Sewage Works Journal*, Vol.8, No.6, pp.742~758, 1936.

[4] Gibson, R. E., Schiffman, R. L. and Cargill, K. W., "The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clay II : Finite

Non-linear Consolidation of Thick Homogeneous Layers", *Canadian Geotechnique Journal*, Vol.18, pp.280~293, 1981.

[5] Imai, G., "Experimental Studies on Sedimentation Mechanism and Sediment Formation of Clay Materials", *Soil and Foundations*, Vol.21, No.1, pp.7~20, 1981.

[6] Mikasa, M., "The Consolidation of Soft Clay - A New Consolidation Theory and Its Application", *Kajima Institution Publishing Co., Ltd.*, (In Japanese), 1963.

[7] Schiffman, R. L. and Gibson, R. E., "Consolidation of Non-homogeneous Clay Layers", *Journal of The Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 90, SM5, Proceedings Paper 4043, pp.1~30, 1964.

[8] Townsend, F. C., "Centrifuge Modeling of Time-dependent Deformations", *Sedimentation/Consolidation Models*, pp.60~64, 1984.

[8] Vesilind, P. A., Design of Thickeners from Batch Tests, *Water and Sewage Works*, Vol.115, No.9, 1968.

[9] Yong, R. N., "Particle Interaction and Stability of Suspended Solids", *ASCE, Special Publication on Sedimentation/Consolidation Models*, pp.35~38, 1984.