

준설토의 체적변화 및 2차원 퇴적특성에 관한 연구

A Study on the Sediment Volume Change and Two-dimensional Deposited Characteristics of Pumping-dredged Soil

김 형 주*¹ Kim, Hyeong-Joo

이 민 선*² Lee, Min-Sun

이 용 주*³ Lee, Young-Joo

김 대 우*⁴ Kim, Dae-Woo

Abstract

A series of one-dimensional cylinder sedimentation test, seepage consolidation test and two-dimensional deposition model test were conducted to examine the characteristics of deposition and volume change of dredged soils containing the high water content, and these experimental results were compared with the sedimentary conditions of actual dredged-reclaimed fields to obtain the relations of a volume change by settling what is required for design. In addition, the change of water content and the distribution of fine grained soils after sedimentation were investigated. Thus, it was concluded that deposition height increased lineary as substantial soil volume increased, and also the elevation of interface increasea proportionately at both the starting time and the finishing time of virtual self-weight consolidation in one-dimensional sedimentation. Furthermore, the two-dimensional model test results were shown to describe the plain distribution of water content and fine grained silt where dredged soil was deposited by two dimensional flowing, and the water content was distributed to wide range from the minimum water content 30% to maximum 180% according to the passed amount of No.200 sieve percentage.

요 지

본 연구는 고함수비의 액상준설토의 체적변화 및 퇴적특성을 파악하기 위해 일련의 실린더침강시험, 침투압밀시험과 2차원퇴적모형실험이 실시되었다. 그리고 실험결과는 실제 준설매립현장의 퇴적상태와 비교됨으로써 설계시에 필요한 침강에 의한 체적변화량을 구할 수 있도록 하였으며, 퇴적후의 세립토의 분포와 함수비 변화 등이 함께 조사되었다. 따라서 1차원 침강시는 실질토량이 증가 할 수록 퇴적고는 선형적으로 증가하며, 자중압밀개시시 및 완료시의 계면고도 또한 실질토량에 비례하여 증가되고 있다. 한편 2차원 퇴적모형실험에 의해 함수비의 분포와 세립토의 퇴적상태를 제시하였으며, 퇴적층의 함수비는 #200체의 통과량에 따라 다르며 최소 30%에서 최대 180%까지 폭넓게 분포되고 있다.

Keywords : Cylinder sedimentation test, Dredged soils, Fine grained soils, Settling characteristics, Substantial soil volume, Two-dimensional deposition model test

*1 정회원, 군산대학교 공과대학 토목공학부 부교수 (Member, Associate prof., Civil Engrg., Institute of Technology, Kunsan National Univ., kimhj@kunsan.ac.kr)

*2 군산대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. Civil of Engrg., Kunsan National Univ.)

*3 정회원, 군산대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. Civil of Engrg., Kunsan National Univ.)

*4 정회원, 군산대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. Civil of Engrg., Kunsan National Univ.)

1. 서론

최근 임해산업단지의 조성은 해저에 퇴적된 점성토를 펌프준설에 의해 매립 후, 용지를 확보하고 동시에 해상수송 환경을 정비하고자 항로 및 박지준설도 함께 도모하고 있다. 또한 대규모 매립장의 경우 펌프준설선의 시공능력 향상 및 연약한 하상점토의 부족 등을 고려하여 N치 10~20정도의 다소 견질의 해성 퇴적토층의 실트질 점토까지 준설되는 경우가 증가하고 있다. 이러한 준설토는 1,200%정도의 슬러리 상태로 배사관의 위치 및 입경, 투입속도, 매립지의 면적, 매립고, 투입함수비 등에 따라 침강 및 자중압밀특성이 다르므로 설계시 검토되는 수축침하율과 유실율도 상이하다. 그러나 국내 항만설계기준에 의하면 수축침하율과 유보율을 토질 및 입경별과 N치에 의해 구분하여 일률적으로 적용하고 있어 이에 대한 과학적이고 공학적인 접근 방법을 통한 설계기준과 준설기법, 준설물량산정에 대한 연구가 필요시 되고 있다. 따라서 준설토의 침강-자중압밀특성을 규명하고자 초기함수비와 투입고를 다양하게 변화시켜 실내침강과 자중압밀시험에 의해 침강특성이 여러 연구자(1979, 정등; 1987, 김등; 1991, 김등; 1994, 김; 1998, 유; 1998, 김; 1999, 김등; 1999, 이등; 2002, 이등)에 의해 파악되어 왔다. 그러나 최근 실제 매립현장은 평면적이고 매립심도가 깊어지기 때문에 분리퇴적과 건조수축의 영향, 저응력에서 고응력 상태까지 일련의 토질특성의 연속적인 변화의 적용 등에 대한 연구가 매립현장과 대비되어 확대되고 있는 추세이며, 이러한 다양한 연구로 홍등(1999)은 Abu-Hejleh와 Znidarcic (1996)가 제안한 건조수축 침하이론을 실내시험과 국내 현장의 침하 데이터와 비교함으로써 점토함유율이 표토층의 건조수축특성에 미치는 영향 등을 제시하였다.

그러므로 본 연구에서는 군산외항 준설토(군장산업단지 조성현장)를 이용하여 1차원 침강-자중압밀과정을 관찰하고 수축침하율을 현장매립심도까지 확장하여 검토하였으며 2차원 연속퇴적모형시험에 의해 퇴적상황 등을 고찰함으로써 투입함수비 및 투입고에 따른 침강 특성, 압밀침강계수, 자중압밀개시시간, 체적비-유효응력관계 등에 의한 수축침하율과 퇴적상황 등을 제시하였다. 이러한 연구결과는 준설매립현장의 설계 및 시공 관리시 필요한 설계정수 도입 및 준설기법 등의 기술을 향상시킬 것이다.

2. 준설토의 침강 및 압밀특성에 관한 연구

2.1 실린더 실험에 의한 침강형식

침강형식에 관하여 처음으로 Kynch(1952)가 폐수 슬러지와 같이 입자의 형상과 크기가 동일한 현탁액이 국부적인 농도에 따라 함수비가 변화하면서 어느 단계에서 일정하게 침전선을 형성하는 간섭침강(계면침강)특성을 명확하게 제시한 이후 McCroberts와 Nixon(1976)은 초기농도에 따라 간섭침강 후 농도가 공간적-시간적 분포에 의해 변화된다고 발표하였다. 이러한 연구결과는 매립분야에 응용이 되면서 Imai(1981)는 일본내 여러지역의 준설토에 대한 실험에 의해 함수비와 염분농도에 따라 4개의 침강패턴, 즉 각각 단입자 자유침강, 응집성 자유침강, 간섭침강, 자중압밀침강으로 분류하였다. 한편, Mikasa(1965)는 도쿄만 점토에 대하여 원심력을 이용한 강제적인 자중압밀시험법을 고안하고 실내와 원위치 사이의 상대법칙을 성립시켜 자중압밀시험시 침강곡선의 초기부분을 초기침강과정, 그 후 부분을 광의의 압밀과정으로 분류하였으며 초기침강과정에서도 부분적인 자중압밀과정과 동일한 메커니즘이 연속되고 있음을 제시하였다. 그 후의 연구(Imai, 1981; Yano, 1985)도 이와 동일한 연구결과를 제시하고 있다. 이러한 연구는 기존압밀이론을 응용하여 액상준설토에 대한 자중압밀해석까지 가능하게 되었다.(Mikasa, 1965; Been & Sills, 1981; Abu-Hejleh & Znidarcic, 1996)

2.2 준설토의 체적 변화

그림 1은 준설매립지반에 퇴적하는 흙의 체적변화를 표시한 것으로 토립자의 질량 M_s 이 동일하다고 하면, 체적 V_d 의 준설토가 매립지내에 투입되어 자중압밀 종료시점에서 체적 V_f 에 대한 체적변화율 ξ 는 식 (1)과 같다.

$$\xi = \frac{V_d}{V_f} = \frac{A \cdot H_f}{V_d} = \frac{1 + \overline{w}_r G_s/G_f}{1 + \overline{w}_d G_s/G_f} \quad (1)$$

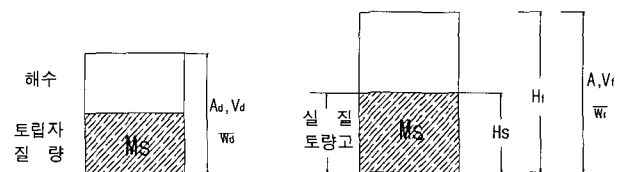


그림 1. 준설 매립지반의 체적변화

여기서, G_s , G_f 는 토립자 및 간극수(해수)의 비중이다. 준설체적과 매립체적의 균형관계에 의해 준설토체적 V_d 에 대한 자중압밀 종료 후, 매립지체적은 흙의 성질에 의해 실질토량고 H_s 의 함수로 H_s 는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$H_s = \frac{H_f}{1 + w_r \cdot G_s/G_f} = \frac{V_d}{A} \cdot \frac{1}{1 + w_d \cdot G_s/G_f} \quad (2)$$

실질토량고 H_s 는 실린더 시험시 퇴적하는 흙의 실질토량고를 의미하며 최종두께 H_f 와 평균함수비 \bar{w}_r 의 관계는 매립지의 매립면적 A , 매립층 두께 H_f , 준설토 체적 V_d 의 조합에 의해 구해진다. 따라서 실내 실린더시험에 의해 침강 및 자중압밀종료시의 계면고(H)와 실질토량(H_s) 관계에 의해 현장의 체적변화(수축침하율)를 구할 수 있다.

2.3 자중압밀 개시시간(t_0)의 검토

일반적으로 준설토 침강시험에서 압밀개시시간 t_0 는 투입순간부터 자중압밀이 진행되므로 자중압밀이 개시되는 가상의 점에 대한 침강시간을 자중압밀 개시시간 t_0 로 하여 대응하는 계면고를 Yano(1985)방법에 의해 구하고 있다. 즉 가상의 자중압밀 개시점은 실질토량고

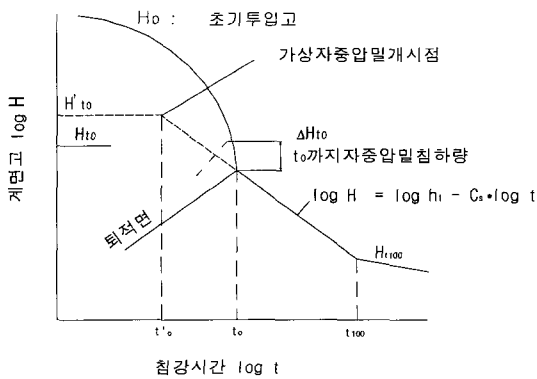


그림 2. 가상 자중압밀 개시점, Yano(1985)

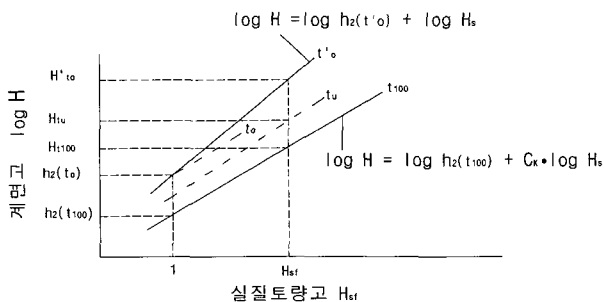


그림 3. 자중압밀 영역의 침강시간-계면고 관계, Yano(1985)

(H_s)와 계면고(h) 관계에 의해 얻어지는 구배계수(C_k)를 이용하며, 실험에서 구한 t_0 시의 $\log H \sim \log H_s$ 관계로부터 $H_s=1\text{cm}$, 계면고 h_2 , $C_k=1$ 에 의한 가상의 자중압밀 개시점에서 계면고 H 와 실질토량고 H_s 의 관계는 다음과 같다.

$$t'_0 = \left(\frac{h_1}{H_{t_0}} \right)^{\frac{1}{C_s}} = \left(\frac{h_1 \cdot f_0}{h_2 \cdot H_0} \right)^{\frac{1}{C_s}} \quad (3)$$

따라서 식 (3)에 의해 Yano(1985)는 가상의 자중압밀 개시점 t'_0 및 계면고 H'_{t_0} , 실질토량고(H_{st})와 계면고(H) 관계를 그림 2, 3과 같이 제시하고 있다.

2.4 액상준설토의 침투압밀시험

준설토와 같은 액상점토의 수중단위중량은 투입함수비 1,200%에서 0.27g/cm^3 정도이고 본 연구지역의 현장 매립심도는 대략 10m이하이므로 평균심도 5m에 대한 유효응력은 0.135kg/cm^2 로 표준압밀시험에 압밀정수를 구하기 곤란하다. Peynircioglu(1973)는 초기 500%의 액상시료를 자중압밀종료 후 모래와 미소한 재하판을 점진적으로 증가시키면서 평균함수비와 재하하중 관계를 제시하였고, 그 후 Monte and Krizek(1976)는 입자상호간의 접촉응력이 시작되는 초기간극비 $e_0=7$ 을 Fluid Limit라고 정의하여 자중압밀종료시 점토층 상부는 투입 초기간극비와 동일하다고 하였다. 이러한 연구 등은 액상점토에 대한 압밀정수를 구하기 위한 최초의 시도이지만 압밀종료 후, 점토층 내부의 함수비 변화 및 다양한 초기함수비에 대한 압축곡선을 제시하지 못하였다. 그 후 Imai(1981)는 침투압밀시험에 의해 일정 응력하에 점토층 내부의 함수비에 따른 유효응력 및 저응력 범위에서 투입함수비 변화에 의한 압축곡선 및 압밀정수 등을 제시하기에 이르렀다. 이러한 침투압밀시험은 동수구배차이에 의한 침투력이 토립자 자체에 체적력(Body force)을 발생시켜 압밀정수를 구함으로써 표준압밀시험과 CRS시험의 직접적인 표면재하에 의한 동수구배의 발생과는 다르다. 따라서 그림 4와 같이 지속적인 물의 하향흐름을 통한 시료의 각 요소에 있어서의 응력 상태는 식 (4)와 같이 점토에 작용되는 침투수압과 자중을 고려한 수중단위중량의 합으로 나타내며 유효응력이 심도에 따라 변화되고 있다.

$$\frac{d\sigma'}{dz} = j + \gamma' \quad (4)$$

그림 4. 정상침투수압 작용시 점토층의 응력상태

표 1. 균산외항 준설토의 물리적 성질

w ₀ (%)	1.175
LL(%)	19.79
PL(%)	NP
G _s	2.695
#200(%)	88.52
USCS	ML

3. 액상점토의 침강-압밀시험과 고찰

3.1 시험시료의 물리적 성질

시험에는 균산외항 준설토 매립현장에서 채취한 시료를 이용하였고 물리적 성질은 해수와 혼합된 액상점토를 각각의 목적에 따라 시험을 실시하였으며 표 1과 같다. 또한 준설토배사관에서 유출시 측정된 함수비(w₀)는 1.175%정도로, 매립과 같이 함수비가 높은 액상준설토를 취급하는 경우는 물에 포함된 염분의 값에 크게 영향을 받기 때문에 함수비는 염분보정(JIS A-1203)을 하였고, 측정된 해수의 염분비 β는 평균 0.0224이다.

3.2 표준압밀시료제작 및 압밀특성

표준압밀시험을 위한 재성형 공시체는 함수비 50%

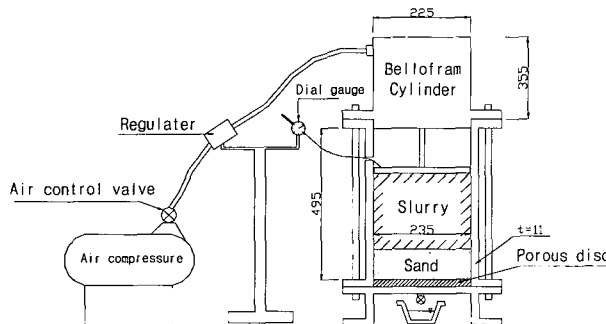


그림 5. 공시체 제작을 위한 예압밀 시험장치

정도의 액상상태에서 교반기를 이용하여 교반시킨 후 압밀용기에 공기가 유입되지 않도록 서서히 투입하여 시료가 안정된 상태에서 그림 5와 같은 예압밀 시험장치에 의해 단계적으로 하중을 가해 액상시료의 유출을 방지하였다. 단계적으로 0.05kg/cm², 0.1kg/cm², 0.2kg/cm²의 하중을 총 20일 동안 서서히 재하하면서 침하량과 시간관계를 측정하여 반대수 용지상에서 3T_E 방법(일본토질공학회)으로 압밀종료시점을 결정하였다. 제작된 재성형 공시체를 추출하여 표준압밀링에 성형시켜 표준압밀시험을 실시한 결과 e₀=0.866, C_c=0.156, C_s=0.028, c_v=1.13 × 10⁻²cm²/sec로 평가되었다.

3.3 침강시험

3.3.1 투입 함수비 변화시험

침강시험방법에는 그림 6과 같이 높이 200cm, 100cm, 50cm, 내경이 15cm인 아크릴 용기를 이용하였고 시험시료의 함수비는 400%, 900%, 1,400%, 1,800%가 되도록 인위적으로 해수를 가하여 조정하였다. 그리고 각각의 시료를 충분히 교반하여 초기시료높이가 200cm, 100cm, 50cm가 되도록 아크릴 용기에 투입한 후 시험전 진공펌프를 이용하여 균등하게 침강조건을 유지하였으며 시험시 침강에 의한 계면고를 측정하였다. 이와 같이 각각의 시험조건은 표 2와 같다.

그림 7(a)은 대표적으로 투입고 200cm 대한 계면고-시간관계를 정규좌표로, 그림 7(b)는 대수시간 좌표로 각각 표시하였다. 그 외의 투입고 100cm, 50cm의 경우는 유사한 거동을 나타내고 있어 지면상 그림을 생략하

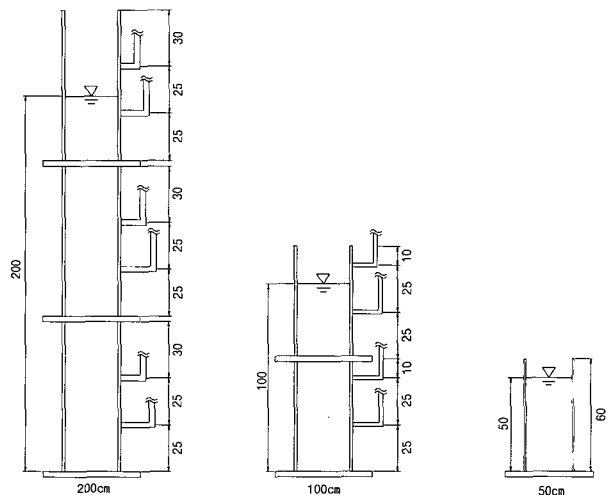


그림 6. 침강시험 장치

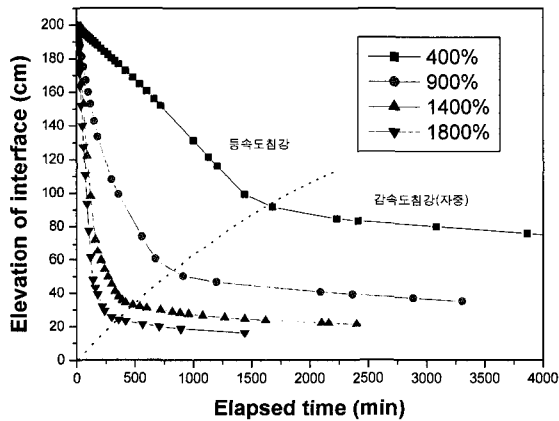
였다. 그림에서와 같이 침강과정의 초기에는 등속도 침강과정이 나타나고 시간이 경과되면서 계면고의 저하 속도가 감소하는 감속도 침강과정에 들어가고 있다. 이 등속도 침강과정은 대수시간으로 표시하면 일정시간동안 변화가 보이지 않다가 일정시간 경과 후 급격하게 침강된다. 초기함수비가 작을수록 초기침강과정이 길어지지만 함수비 900%이상부터는 짧아지면서 경계면이 명확하게 시간에 비례하여 나타나고 있다. 따라서, 시간이 경과되면서 급격하게 응집(floc)을 형성하고 일정속도로 침강하는 간섭침강형태를 나타내고 있다.

이러한 침강형태는 시료 투입두께 및 시료 초기함수비에 관계없이 공통적으로 나타나고 있어 Yano는 초기침강과정과, 자중압밀과정, Creep(2차 자중압밀)과정으로 분류하였다. 또한, Mikasa(1963)는 연약점토의 자중압밀 과정의 초기에 간섭침강이 발생하지 않더라도 침강이 이루어지므로 초기침강과정과 광의의 압밀과정으로 구별하였다.

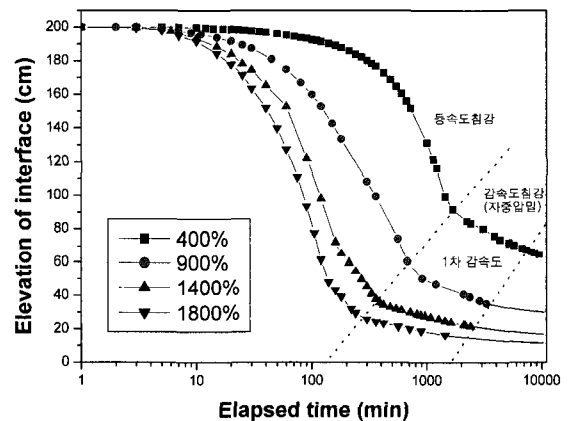
한편 본 준설토는 정규좌표에서 침강과정의 종료점은 그림 7(a)에 표시하는 것과 같이 등속도 침강곡선의 직선부의 연장선과 감속도 침강곡선의 종료부분의 접선과의 교점을 구해 그 교점으로부터 그은 2등분선이 침강곡선의 절점으로 하였다. 그리고 침강개시부터 이 종료점까지를 평균 침강속도로 하였다(초기침강과정). 또한 같은 감속도 침강과정의 종료점은 그림 7(b)와 같이 1차 감속도 침강곡선의 직선부의 연장선과 2차 자중압밀(Creep과정)곡선의 종료부분의 접선과의 교점을 구해 그 점으로부터 그은 교각의 2등분 선과 침강곡선이 만나는 점으로 하였다.

3.3.2 투입고 변화시험

그림 8은 대표적으로 투입함수비 900%에 대한 투입고 변화시(50cm, 100cm, 200cm) 계면고와 경과시간 관계를 표시하였으며 그 외의 함수비에 대하여는 지면상 생략하였다. 정규좌표에서와 같이 전반적으로 투입고에

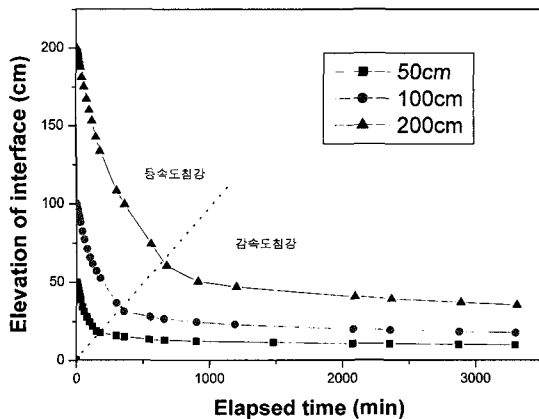


(a)

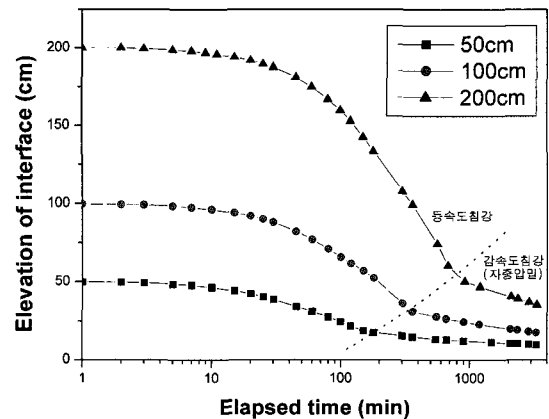


(b)

그림 7. 투입고($H_0=200\text{cm}$)에 대한 침강곡선



(a)



(b)

그림 8. 투입함수비($w_0=900\%$)에 대한 투입고 변화 침강곡선

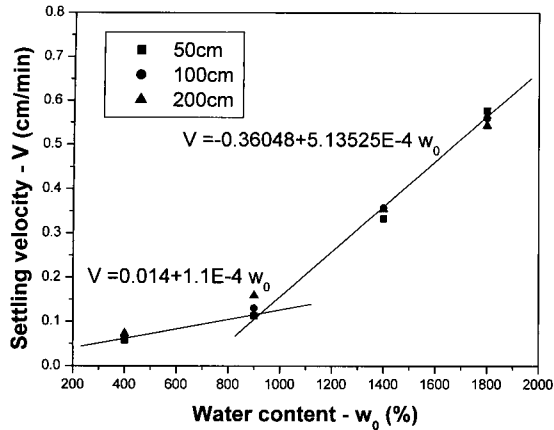


그림 9. 침강속도와 투입시의 함수비 관계

관계없이 일정하게 침강하고 있으나, 대수좌표로 표시한 그림 8(b)는 투입고가 높을수록 응집형성시간이 소요되며, 시간이 경과함에 따라 침강되는 간섭침강을 나타내고 있다.

그림 9는 투입 초기함수비와 등속도 침강과정에서 구한 침강속도를 투입함수비와 대비하여 표시한 결과로 함수비가 900% 이상부터 침강속도가 급격하게 증가되고 그 이하에서는 침강속도가 비교적 적게 증가되고 있다. 따라서, 간섭침강을 일으키는 함수비 영역이 2가지로 구분되며 어느 일정 함수비 이상 되면 침강속도가 크게 증가된다. 이러한 절점부의 변이영역은 응집성이 강해 간극이 크게 발달되어 명확하게 응집침강속도가 증가되는 경계점이다. 따라서 함수비 변화에 대한 침강속도관계는 회귀분석에 의해 식 (5)와 같이 제시된다.

$$V = 0.014 + 1.1E-4 w_0 \quad (w_0 < 900\%)$$

$$V = -0.3605 + 5.1353E-4 w_0 \quad (w_0 \geq 900\%) \quad (5)$$

3.3.3 압밀침강계수

자중압밀 침강계수(C_s)와 투입시의 함수비 관계를 조사하기 위하여 투입시 함수비가 400%, 900%, 1,400%, 1,800% 중 초기투입함수비 900%를 대상으로 계면고와 경과 시간관계를 그림 10에, 초기 투입고 200cm에 대한 계면고와 시간관계를 그림 11에 각각 표시하였다. 초기 침강으로부터 자중압밀 과정의 침강시간 $t=t_0 \sim t_{100}$ 에 대한 계면고(H)와 침강시간(t)은 직선관계가 인정되므로 그 직선구배를 압밀침강계수 C_s 로 정의하였다. 그림 10, 11에서 투입 함수비가 클수록 침강개시시간(t_0)이 짧아지며 동일한 함수비에서는 투입고의 변화에 따라 t_0 와 t_{100} 이 일정하게 변화되고 있다. 그러나 그림 10, 11에서 t_0

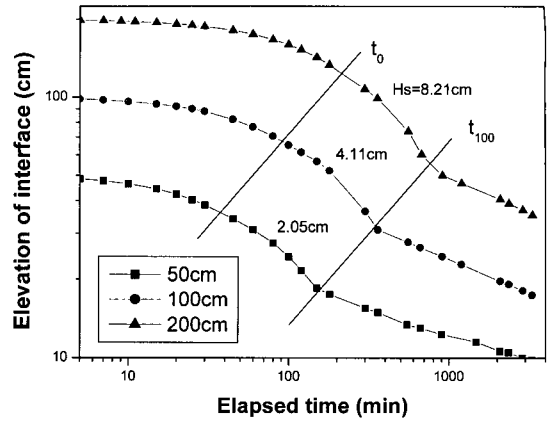


그림 10. 초기투입함수비 900%에 대한 시간-계면 변화곡선

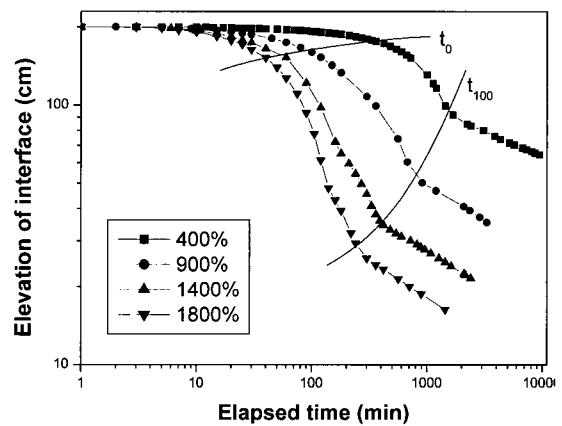


그림 11. 투입고($H_0=200$ cm)에 대한 침강곡선

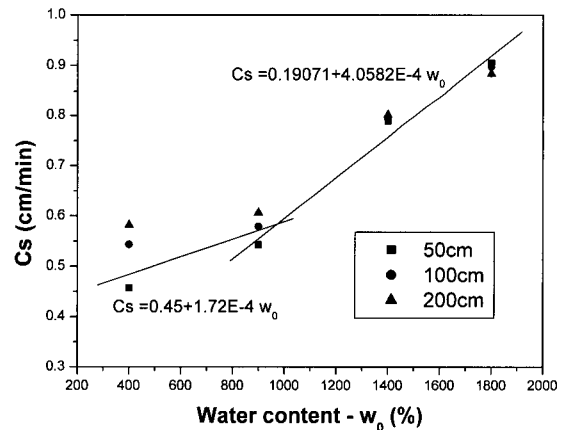


그림 12. 압밀침강계수(C_s)와 투입시의 함수비 관계

와 t_{100} 의 점의 연결선이 함수비가 증가할수록 분산폭이 큰 것은 입자의 flocc 형성 시간이 높이의 영향을 크게 받고 준설토층 두께에 따라 입자의 배열과정이 다르기 때문이다.

그림 12의 압밀침강계수 C_s 는 초기 투입함수비가 클수록 증가되지만 특히 $w_0 > 900\%$ 부터 크게 증가되고 있는 것은 고함수비 일수록 응집(floc) 형성이 크기 때문이

다. 따라서 균산외항 준설토에 대한 압밀침강계수 C_s 와 투입함수비 관계는 식 (6)과 같이 제시된다.

$$C_s = 0.191 + 4.058E-4 w_0 \quad (w_0 \geq 900\%)$$

$$C_s = 0.45 + 1.72E-4 w_0 \quad (w_0 < 900\%) \quad (6)$$

3.3.4 투입함수비-실질토량-체적관계

침강시험에 대한 체적변화(수축침하율, 자중압밀침하량)를 검토하기 위해 실시된 12개의 실린더 시험에 대하여 계면고(H)와 실질토량(H_s) 관계는 Yano방법(1985)에 의해 압밀침강 개시시간 t_0 (자중압밀 개시시간)와 종료시간 t_{100} (자중압밀 완료시간)을 기준으로 그림 13에 요약 표시하였다. 그림에서와 같이 계면고와 실질토량 관계에서 투입함수비에 따라 자중압밀 개시시간(t_0)은 분산폭이 크나 자중압밀 완료시간(t_{100})에서 실질토량이 증가할수록 일정하게 초기함수비에 관계없이 계면고가 증가되고 있는데 이는 투입함수비 변화에 따른 flocc 형성 시간의 영향보다 자중압밀시 입자배열의 영향이 크기 때문이다. 가상 자중압밀개시시 t'_0 에서 계면고 $H_{t'_0}$ 는 가상 자중압밀 개시시의 실질토량고 $H_s=1$ 로 하여 그림 13의 투입함수비 400%, 900%, 1,400%, 1,800%에서 $H_s=1$ 에 대한 계면고 $h_2(t_0)$ 를 구하여 $C_k=1$ 의 $H_{t'_0}$ 좌표 및 계면고 H를 이용한 직선식을 그림 14에 함께 표시하였다. 한편, 계면고 H는 H_f 와 증가하므로 자중압밀 개시시간(t_0)의 계면고를 H_{Rt_0} , 자중압밀 완료시간(t_{100})에서의 계면고를 $H_{Rt_{100}}$ 으로 하면 입자배열에 의한 수축침하량 즉, 자중압밀 침하량은 $S_s=H_{Rt_0}-H_{Rt_{100}}$ 으로 표시할 수 있다. 본 현장의 실질토량을 구하기 위해 매립지 중앙에서 현장 Boring 조사를 실시하여 매립토층의 구성상태를 파악한 결과 퇴적층두께 $H_f=800\text{cm}$ 이며, 평균함수비 \bar{w} ,

$=1.175\%$, 해수의 비중 G_r 는 염분비 $\beta=0.0224$ 를 이용하여 $\beta=1.467(G_r-1)$ 관계(Imai; 1981)에 의해 각각의 값을 식 (2)에 대입하면 실질토량고 $H_s=24.9\text{cm}$ 를 구할 수 있다. 따라서 그림 14에서 $H_s=24.9\text{cm}$ 에 대응하는 t'_0 와 t_{100} 의 차이는 침강에 의한 자중압밀침하량으로 $S_s=169.2\text{cm}$ 로 평가된다.

3.4 액상준설토의 침투압밀시험

일반적으로 사용되는 표준압밀시험은 재하링 사이로 시료가 유출되어 액상시료에 대한 시험이 불가능하다. 본 현장과 같이 8.0m 이상 매립되는 경우 하부층의 유효 응력은 매우 크고 대형 실린더 시험이 불가능하므로 현장과 유사하게 응력을 가해 압밀과정(체적변화)을 파악할 수 있는 시험으로 침투압밀시험을 수행하였다.

슬러리 상태에서 체적변화를 구하기 위해 액상시료를 초기함수비 $w_0=43\%$ 로 침투압밀용기에 투입하여 2일 동안 방치시킨 후, 수두차에 의해 재하를 하였고 용기 측면에 설치된 스탠드파이프에 의해 점토층의 간극수압을 측정하였다. 그림 15는 초기함수비 $w_0=43\%$, 초기시료높이 41.3cm, 침투수두 4.5m에 대한 압밀시간-침하량 관계이다. 여기서 4.5m 수두압은 8.0m 심도에서 매립층의 유효응력 즉, 습윤단위중량 1.8t/m^3 이므로 $1.8 \times 2.0\text{m} + 0.8 \times 5.5\text{m} = 9.0\text{t/m}^2$ 에 대한 평균값 4.5t/m^2 을 기준으로 하였다. 자중압밀이 종료한 상태의 시료높이는 각각 35.3cm, 34.4cm로 배수속도 v_0 가 일정하고 압밀이 종료한 상태, 즉 정상상태가 되었을 때 시험을 종료하고 상등액을 제거한 후 시료상부에서부터 시료를 제거하면서 함수비를 측정하였다. 그림 16은 침투압밀이 종료된 후에 공시체 상부부터 측정된 함수비이며 매립현장

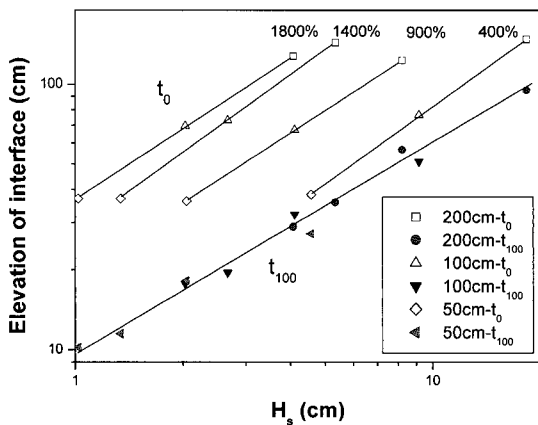


그림 13. 실질토량고와 계면고와의 관계

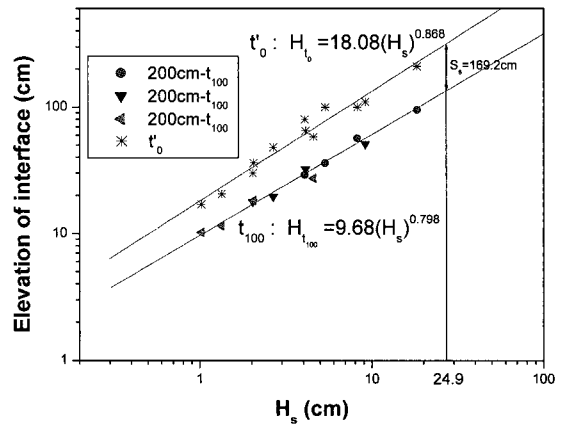


그림 14. 침강시험에 의한 수축침하율

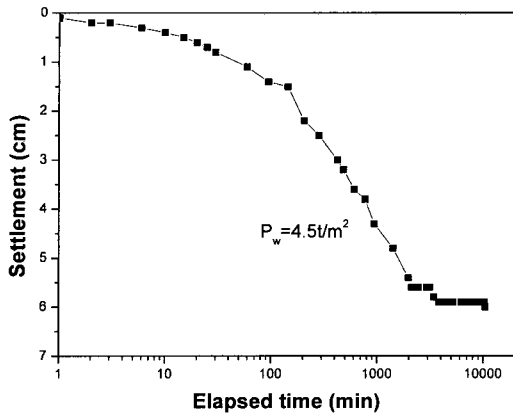


그림 15. 침투수압 작용시 침하-시간곡선

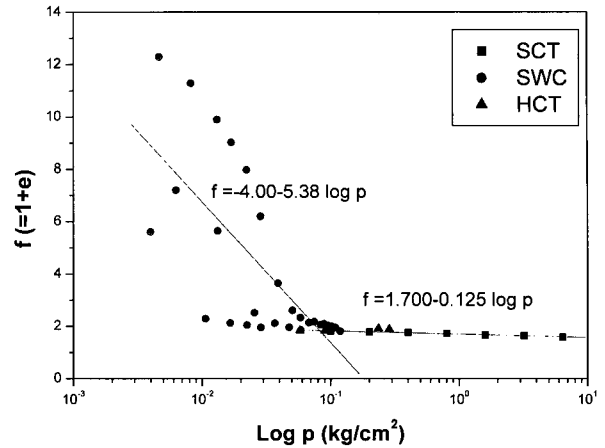


그림 17. 체적비-유효응력 관계

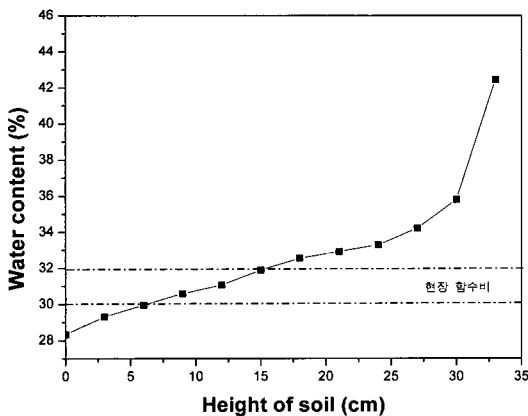


그림 16. 침투압밀 시험 후 공시체의 함수비 분포

의 함수비도 함께 표시하였다. 맨 위층의 함수비는 42% 정도로 투입시의 초기함수비와 유사하며 심도에 따라 급격하게 감소하면서 최하층의 함수비는 28.3% 정도로 크게 저하되었다. 또한 평균함수비는 35% 정도로 현장의 함수비보다 3~4% 정도 크게 조사되었으나, 4m 정도 굴착 후 비교적 건조된 상태에서 측정되어 낮게 평가된 조건을 고려한다면 현장 퇴적상태를 정확하게 예측할 수 있는 시험이다.

3.5 준설토의 체적비-유효응력 관계

현재까지 실시된 군산외항 준설토에 대한 실린더 침강, 자중압밀시험(SWC) 중 투입함수비 400%, 투입고 200cm에 대한 시험결과를 자중압밀 종료시에 측정된 함수비를 이용하여 수중단위중량을 구해 유효응력으로 변화시켜 체적비($f=1+e$)-유효응력 관계를 나타냈으며 앞서 설명한 중간응력의 침투압밀 시험결과(HCT)와 고응력의 표준압밀 시험결과(SCT)도 함께 병행하여 그림

17에 표시하였다.

일련의 시험에서 체적비 $f=1.9$ 에서의 변곡점이 발생하는데 함수비로 고려하면 함수비 33.4%에서 발생한다. 또한 본 시료의 액성한계(19.8%)와의 관계를 살펴보면 액성한계의 1.5배에서 변곡점이 발생되고 있다. 이러한 현상은 시간이 소요된 연대 퇴적토와는 달리 침강퇴적에 의한 입자의 배열이 진행되고 있기 때문이다. 식 (7)은 군산외항 점토에 대한 체적비-유효응력 관계식이다.

$$f = -4.00 - 5.38 \log P \quad (f \geq 1.9 \text{ 자중압밀}) \quad (7.1)$$

$$f = 1.700 - 0.125 \log P \quad (f \leq 1.9 \text{ 침투압밀, 표준압밀}) \quad (7.2)$$

4. 2차원 퇴적모형실험

그림 18은 준설토 2차원 퇴적모형토조(70cm×300cm×70cm)로 실제 현장의 펌프준설시 침강 및 퇴적상태를 유사하게 관찰할 수 있도록 투명아크릴에 의해 제작되었다. 사용된 시료는 #200체 통과량이 45.1%로 실트질 모래(SM) 시료를 사용하였으며, 먼저 현장배사관 유출함수비와 동일한 1,200%~1,300%로 시료를 교반하여 대형 시료용기에 옮긴 후 용기내의 시료퇴적을 방지하기 위하여 교반기와 진공펌프를 이용하여 교반하면서 직경 1.5cm의 이송호수를 통하여 1.08m³/hr로 일정하게 투입하였다. 1단계 투입하여 침강이 종료한 후에 표면수를 제거하고 2단계 준설토를 투입하는 과정을 반복하여 연속적으로 8단계까지 투입하였다. 각 단계의 투입 슬러리는 0.63m³이며 단계별 소요시간은 180분으로 일정한 간격으로 투입하였다.

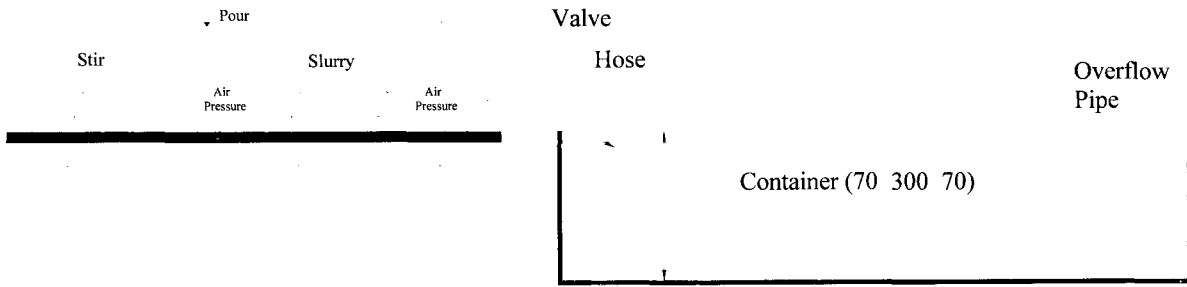


그림 18. 준설토 2차원 흐름 모형 실험장치

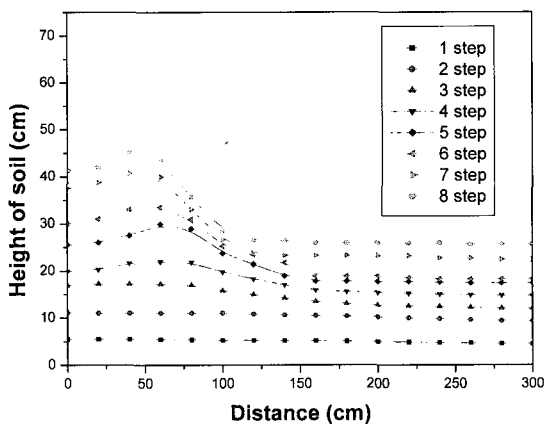


그림 19. 각 단계별 시험 종료 후의 침강특성

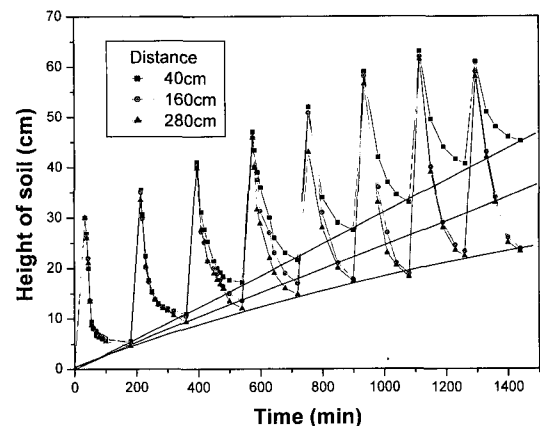


그림 20. 시간에 따른 침강특성

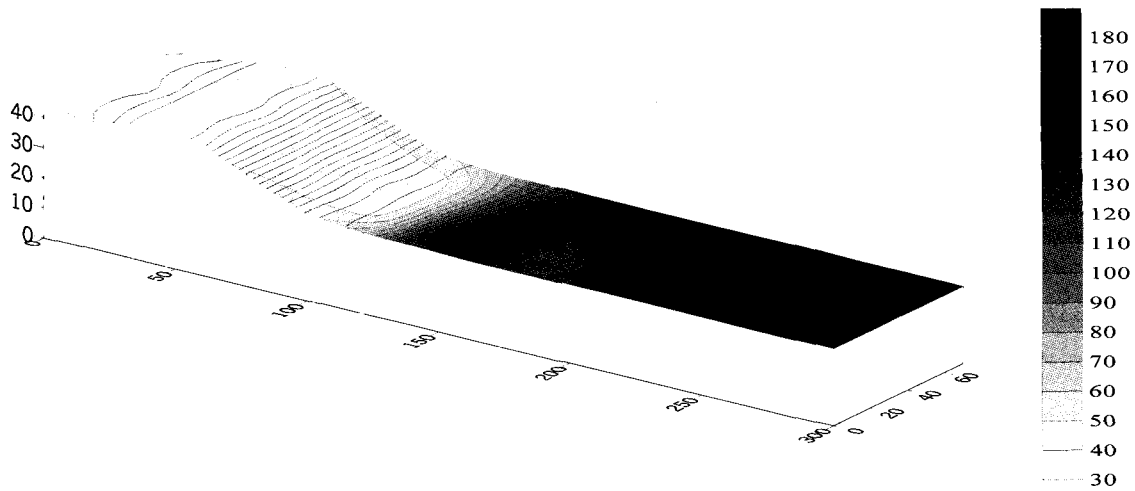
4.1 침강특성

그림 19는 퇴적종료 후 단계별 퇴적상태를 나타낸 것으로서 3단투입부터 투입지점 0cm에서 40cm지점까지 서서히 퇴적고가 곡선형으로 분포로 상승하면서 그 이후부터 감소하며, 150cm지점부터는 세립토의 침강에 의해 퇴적고가 최종 여수토 지점까지 거의 유사하게 증가되고 있다. 또한 그림 20은 투입지점에서 40cm, 160cm, 280cm지점을 시험시작부터 8단계 시험 종료까지 침강과정으로 각각 60분정도에서 초기침강은 끝나고 자중압밀이 지속되고 있다. 그러나 투입구로부터 40cm 지점은 조립토 영향으로 계면고가 투입횟수에 비례하여 급속도로 증가되고 있지만 비교적 세립토사가 퇴적된 160cm, 180cm, 지점은 자중압밀이 진행되어 퇴적고의 증가속도가 느리다.

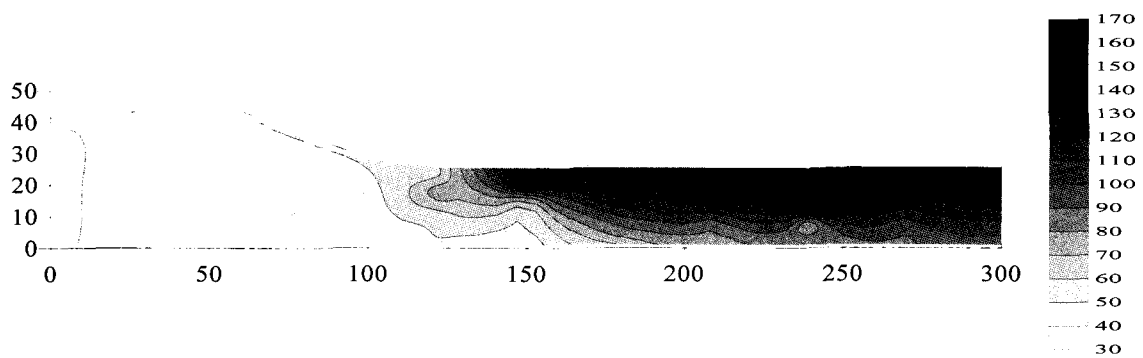
4.2 퇴적시료의 함수비 및 #200체 통과량 분포

그림 21(a)는 자중압밀종료 후 상등수를 제거한 후 측

정된 퇴적된 시료의 표면함수비 분포이고, 그림 21(b)는 내측 총 163지점의 단면함수비 분포이다. 전반적으로 약 30%~180%의 함수비 분포를 보이며, 투입지점으로부터 거리가 멀수록 세립토 영향으로 함수비가 크고 투입지점과 가까운 지점은 조립토 영향으로 현장함수비와 유사한 약 30%~40%정도이다. 그림 21(b)에서와 같이 함수비 분포를 시료높이별로 보면 투입지점으로부터 100cm까지는 약 30%로 일정하며 투입지점으로부터 멀리 떨어진 곳은 지층 하부로 내려갈수록 약 50%까지 함수비가 저하되지만 현장 함수비보다 증가하고 있다. 그림 22는 함수비 크기에 크게 영향을 미치고 유보율을 좌우하는 지표로 사용되는 #200체 통과율의 분포를 표시하였다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 투입구로 위치부터 다소 이격된 60cm 지점에서 최소 20%분포이고 여수토 지점에 인접할수록 최대 99.8% 분포를 보이고 있어 앞에서 설명한 함수비 분포와 유사한 경향을 나타내므로 #200체 통과율이 함수비 크기에 절대적인 영향을 미치고 있다. 그러므로 실제 매립현장은 배사관 유출구 및 여수토 위치에 따라 퇴적상태가 매우 다르게 분포되는



(a) 퇴적시료의 표면 함수비 분포



(b) 퇴적시료의 높이별 함수비 분포

그림 21. 2차원 흐름모형 시험 후 퇴적시료의 함수비 분포

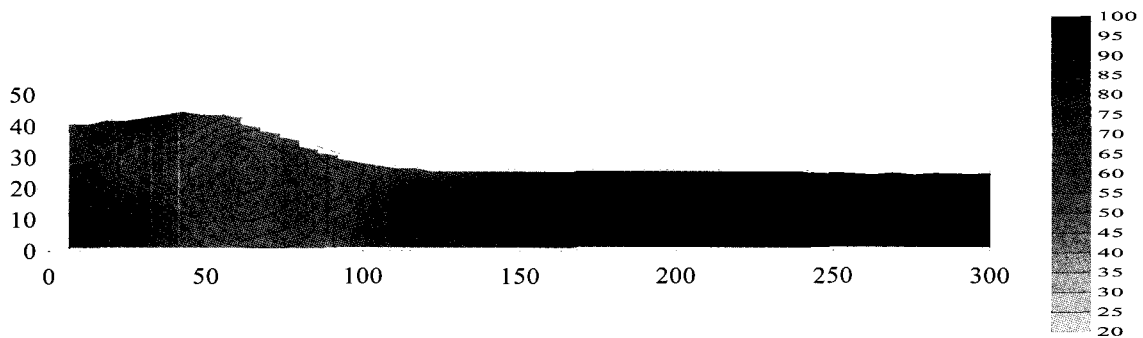


그림 22. 2차원 흐름모형 시험 후 퇴적시료의 #200체 통과율 분포

것을 알 수 있다. 따라서 보다 경제적인 매립방법은 세부적인 토지이용계획을 고려하여 배사관 위치 및 여수토 위치를 결정하는 것이 연약지반 처리비용을 절약할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 군산외항 준설토의 1차원 침강-자중압밀

특성을 규명하고자 투입함수비(w) 및 투입고(H_0)를 각각 $w=400\% \sim 1800\%$, $H_0=50\text{cm} \sim 200\text{cm}$ 변화시켜 실린더 침강시험을 실시하여 침강특성과 체적변화 관계를 고찰하였고, 침투압밀 및 표준압밀시험을 실시하여 폭넓은 응력범위에서 체적비-유효응력관계를 검토하였다. 그리고 실제 현장의 펌프준설 퇴적상황을 재현하기 위한 2차원 퇴적모형 실험을 실시하여 침강 및 퇴적 상태를 파악하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 액상준설토는 투입직후 응집형성에 필요한 초기 침강 개시시간과 시간이 경과되면서 경계면이 명확하게 나타나는 간섭침강 형태로 침강과정은 초기침강(등속도침강)과 자중압밀(감속도침강) 과정으로 구분된다. 투입 함수비가 400%에서 1,800%까지 증가할수록 침강속도 및 압밀침강계수는 비례하여 증가되며, 특히 투입함수비 900% 이상부터는 입자의 응집이 크게 형성되기 때문에 더욱 크게 증가한다.
- (2) 초기투입고를 50cm~200cm 변화시킨 침강시험에 의 실질토량과 가상자중압밀 개시시(t_0) 및 자중압밀 완료시(t_{100})에서의 계면고는 비례관계를 나타내므로 자중압밀 침하량(수축침하율)을 현장의 매립 심도와 대비하여 구할 수 있다.
- (3) 침강시험-침투압밀시험-표준압밀시험에 의해 구해진 체적비(f)-유효응력(P) 관계는 현장함수비가 액성한계의 1.5배 지점에서 입자배열에 의해 변곡점이 발생되므로 비선형거동을 고려한 압밀해석이 이루어져야 한다.
- (4) 함수비가 1,250% 정도 연속적으로 투입되는 2차원 퇴적모형시험에 의한 자중압밀종료시의 표면함수비는 세립토영향으로 30%~180%까지 변화되며, 투입지점 부근은 조립토 영향으로 퇴적고가 투입횟수에 비례하여 증가하고 실제 매립 현장함수비와 유사한 약 30%~40%범위이다. 그 외의 지역은 퇴적층 하부에서 약 50%까지 함수비가 저하되지만 세립토 영향으로 현장 함수비보다 다소 크게 분포되고 있다.

참 고 문 헌

1. 김수삼(1987), "반월지역 해성토의 침강특성에 관한 실험연구", 대한토질공학회지, 제3권, 제3호, pp.49-61.
2. 김자겸, 이종섭(1991), "실트질 점토의 침강특성에 관한 연구", 대한토목학회지, 제11권, 제3호, pp.85-93.

3. 김형주(1994), "준설점성토의 압밀특성에 미치는 시간효과", 한국지반공학회지, 제10권, 제1호, pp.71-81.
4. 김형주(1998), "양면배수에 의한 준설점성토의 자중압밀과정", 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp.303-306.
5. 김형주, 오근엽(1999), "연약한 준설매립 점성토 지반의 자중압밀 과정에 관한 연구", 한국지반공학회 논문집, 제15권, 제2호, pp.129-138.
6. 유남재, 안중선, 이종호, 유병상(1998), "준설매립토 지반의 체적 변화량 예측", 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp.307-310.
7. 이송, 이규환, 심민보(1999), "준설점토의 체적비 산정에 관한 실험적 연구", 대한토목학회지, 제19권, 제III-5호, pp.985-994.
8. 이송, 전중구(2002), "조립토가 혼합된 준설토의 퇴적 및 압밀특성", 한국지반공학회지, 제18권, 제2호, pp.75-86.
9. 정인준, 유건선(1979), "준설토의 기본적 실험연구", 대한토목학회지, 제7권, 제5호, pp.55-64.
10. 홍병만, 김상규, 김석열, 김승욱, 김홍택, 강인규(1999), "준설매립지반의 건조수축특성에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제15권, 제6호, pp.219-238.
11. 日本土質工學會論(1987), 土質試驗法, pp.6-2-13~6-2-14.
12. 矢野弘一郎(1985), "浚渫粘土による軟弱埋立地盤の性状豫測", 日本土木學會 論文集, No.364, pp.1-15.
13. Abu-Hejleh, Znidarcic(1996), "Consolidation Characteristics of Phosphatic Clays", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122, No.4, pp.295-301.
14. Been, K. and Sills, G. C.(1981), "Self Weight Consolidation of Soft Soils: an Experimental and Theoretical Study", *Geotechnique*, Vol.31, No.4, pp.519-535.
15. Imai, G.(1981), "Experimental Studies on Sedimentation Mechanism and Sediment Formation of Clay Materials", *Soils and Foundations*, Vol.21, No.1, pp.7-20.
16. Imai, G.(1984), "Applicability of Hydraulic Consolidation Test for Very Soft Clayey Soils", *Soils and Foundations*, Vol.24, No.2, pp.29-42.
17. Kynch, G. J.(1952), "A Theory of Sedimentation", *Trans Faraday Soc.*, 48.
18. McCroberts, E. C. and J. F. Nixon(1975), "A Theory of Soil Sedimentation", *Can. Geotechn. J.*, Vol.13, pp.294-310.
19. Mikasa, M.(1963), "The Consolidation of Soft Clay-A new consolidation theory and Its application", *Tokyo Kajima Shupan-kai*, pp.56-86.
20. Peynircioglu, A. H.(1973), "Performance of Very Soft Muds Under Very Light Loads and Consolidation of a Muddy Bottom Under a Wide Sand Fill", *Proc. 8th I.C.S.M.F.E.*, Vol.22, pp.159-163.

(접수일자 2003. 2. 10, 심사완료일 2003. 4. 29)