

침투압밀공법을 이용한 준설투기용량 산정

Assessment for Amount Increment of Dredged Soil using infiltrated consolidation method

곽노경¹⁾, No-Kyung Kwak, 이무철²⁾, Mu-Cheol Lee, 이송³⁾, Lee Song

¹⁾ 서울시립대학교 토목공학과 석사과정, Master course, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul

²⁾ 서울시립대학교 토목공학과 박사과정, Ph.D. course, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul

³⁾ 서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul

SYNOPSIS : In this study, an experimental research on the acceleration effect of dredged soil's self weight consolidation with seepage consolidation and PBD was conducted. The middle-sized consolidation equipment had been manufactured in order to investigate the acceleration of sedimentation and self-weight consolidation by PBD and a lower drainage. Seepage pressure was applied to the PBD installed in the center of the test equipment and a drainage by seepage pressure was allowed. The comparison between cases with and without PBD and seepage pressure reveals that the quantity of drained water and the amount of settlement was nearly 1.2 times to 3.68 times greater in the case with PBD and seepage. Early consolidation completion and the use of reclaimed site are expected due to the acceleration of settlement and increase of the quantity of reclamation if PBD is installed while being reclaiming using the result of the research.

Keywords : Dredging and reclamation, Acceleration of consolidation, PBD, Quantity of reclamation

1. 서론

현재 우리나라에서는 제한된 국토의 효율적 이용 및 부족한 산업부지 확충 등의 목적으로 인근 해안의 해성 점토를 준설했던 다음 이를 원하는 지역에 매립하는 형식의 대규모 부지 조성 사업이 이루어지고 있으며, 선박의 대형화, 공유수면매립 및 토사의 이동에 따른 항만수심의 증가에 의한 대규모 무역항에서의 꾸준한 수심확보를 위한 항로의 생성과 유지를 위해 항로준설했, 증심준설했 등을 통하여 현재 준설토가 다량 발생하고 있는 실정이다. 또한 내륙지역의 도시화에 따라 강 하구지역에서 다량의 토사가 유입되고 대부분 강 하구에 입지하고 있는 항만의 경우 많은 양의 준설토로 인한 곤란을 겪고 있다. 이를 처분하기 위하여 전국 30여 개소의 무역항 및 연안항에는 비교적 큰 규모의 준설투기장이 형성되어 있으며 이 외에도 예정지로 지정되거나 지정을 요구하는 지역이 다수 상재한다.

한편 준설토의 외해 투기의 경우, 환경보전의 측면이 중요시되면서 해상매립에 대한 런던협약 등 국제 조약의 비준 및 높은 비용으로 준설토 투기에 많은 곤란을 겪고 있으며 이에 따라 처분지의 부족이 문제화되고 있다.

따라서 처리장에 투기한 준설토나 매립지 조성 중에 있는 준설했점을 압밀 촉진시켜 침하시킬 수 있다면 기존 처분지의 수명을 연장시킬 수 있으므로 유용하게 활용이 가능하며 부지조성 시, 호안 축조 높이를 증대시키지 않고도 준설했 매립용량의 증대가 가능하게 되어 증대한 매립 용량만큼 모래 포설량을 경감할 수 있어 경제적으로도 유용하리라 판단된다.

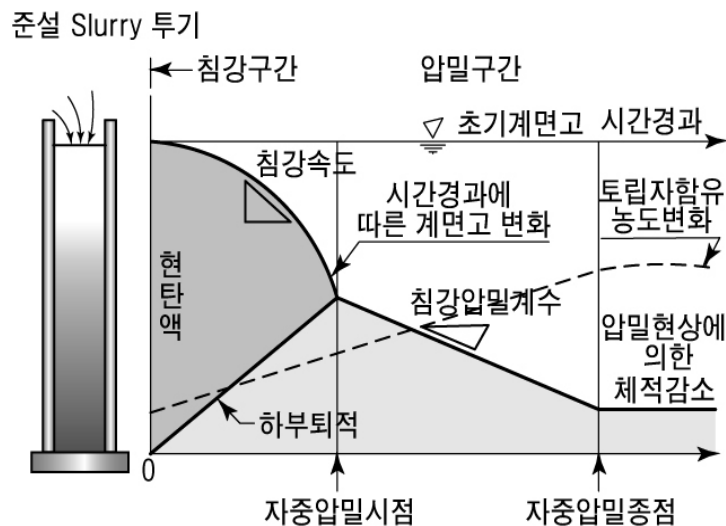
본 논문은 실내모형실험을 통하여 재하중을 사용하지 않고 침투압밀과 PBD를 병행하여 준설매립 단계에서의 자중압밀 침하를 촉진시키고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 준설토 거동 특성

2.1.1 준설매립에 따른 세립토의 침강현상

중력장 하에서 매립지 내에 투기된 현탁액은 결코 안정한 상태에 있을 수 없다. 현탁액 속의 토립자는 초기에는 입자간의 상호작용을 받지 않는 자유침강이 발생하다가 어느 정도시간이 경과함에 따라 토립자 간의 상호작용으로 인해 flocc을 형성하고 이것들이 모여 토체를 구성하여 상부층에 물과 준설토의 경계면이 생기고 서서히 침강을 시작한다. 동시에 퇴적이 발생되며 저부에서부터 자중압밀이 시작되어 경계면이 생긴 후 자중압밀 속도가 감소한다.



2.2 자중압밀 이론

2.2.1 유한변형률 압밀이론

1) Mikasa의 압밀이론

Terzaghi 압밀이론의 가정 중 점토는 균질하며 완전 포화되어 있고, 토립자의 압축은 1차원이며, 물의 흐름은 점토의 압축 방향과 일치한다는 가정을 받아들였다. 또한 토립자와 물은 비압축성이고 Darcy의 법칙이 성립한다는 가정은 받아들이고 그 외의 함수비가 크고 변형이 큰 해성점토와 같은 초연약 점토에는 맞지 않는 가정 사항 대신에 초연약점토의 실제거동을 모사하기 위하여 흙의 압축성과 투수계수를 시간과 관계가 없는 체적비의 함수로 가정하였으며 유효응력이 없는 soil suspension은 제외하였다.

2) Gibson의 압밀이론

1967년 Gibson, England, Hussey 는 압축성과 투수성의 변화를 고려하고 Darcy 법칙을 흙 골격과 간극수의 상대속도로 전환하여 포화된 얇은 점토(자중은 상재하중에 비해 무시할 만하다) 층에 대한 1차원 유한 변형률 압밀이론을 제안하였다. 또한 1981년 Gibson et al 초기에 충분히 자중에 의해 압밀되

고, 큰 변형이 발생하는 두꺼운 점토층에 대한 유한 변형압밀이론을 발표하였다.

3) Been & Sills의 압밀 이론

1981년 *Been & Sills* 는 실제로 간극비-유효응력, 간극비-투수계수 관계는 선형이 아니지만 압밀계수 C_F 가 실험적으로 거의 일정한 것으로 보고 흙의 특성치와 경계조건을 정하여 준설매립지반의 일면 배수조건에서 초기 간극비를 $e_i(z, 0) = e_{00}$ 로 나타내고 전체에 걸쳐 간극비 분포는 동일하다는 가정 하에 경계조건의 해를 구하였다.

2.2.2 침강·압밀 곡선에 의한 이론

1) 자중압밀의 시·종점

압밀의 구분은 유효응력의 존재 유무이지만 실제로 이것을 측정하기는 매우 어려우므로 침강곡선에서 속도의 변화를 보고 간접적으로 구할 수 있다. 압밀의 시작점은 학자마다 다소 차이가 있지만 일반적으로 침강곡선에서 침강속도가 느려지는 변곡점으로 보고 있다. *Kynch* 는 현탁액 상부에서 침강속도가 변곡될 때 자중압밀이 시작된다고 하였으며, *McRoberts* 와 *Nixon*은 경계면이 생긴 후 일정속도로 침하될 때 자중압밀이 시작된다고 하였다. 또한, *Monte & Kriizek*는 응력이 형성되는 한계유동상태부터 압밀이 시작된다고 하였다.

2) 자중압밀산정식

실내에서 침강실험을 실시하면 투기된 준설점토는 그림 1과 같이 침강퇴적, 압밀침강의 과정을 거친다. 점토이수는 우선 flocc를 형성하여 청등수와 현탁액과의 사이에 명료한 계면을 만들고 등속으로 계면이 침강한다. 침강한 퇴적토는 하층에서부터 상승하고 곧이어 현탁액의 계면과 일치하여 침강퇴적의 종료점으로 된다. 침강퇴적이 종료한 후는 자중에 의한 압밀침강이 진행하여 어떤 시점에서는 침강속도가 비상이 늦은 Creep의 형태로 된다.

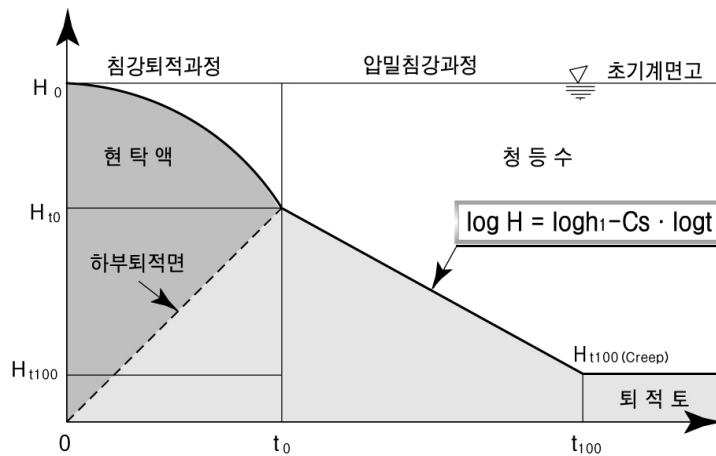


그림 1. Yano의 자중압밀 산정식

3) 계면고와 실질토량고의 관계

준설토 체적과 매립토 체적의 관계를 구하는 중에, 계면고와 실질토량고의 관계도를 작성하고 실질토량고에 의해 체적변화를 비교할 필요가 있다. 현장에서 채취한 시료를 이용하여 초기 높이를 변화시키면서 자중압밀 실험을 실시하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. 실제 준설토에 함유된 토립자의 양으로부터 구한 실질 토량고와 계면고의 관계는 식 (1)과 같다.

$$H_s = \frac{H}{1 + G_s/G_w \cdot \bar{w}} = \frac{H}{1 + e} \quad (1)$$

초기함수비가 같고 높이가 다른 다수의 이수를 침강시켜 각각 침강곡선에 나타난 압밀침강 개시시간과 creep변형에 들어갈 때의 시간에 대한 계면고를 $\log H \sim \log H_s$ 로 표시하면 직선적으로 변하는데 이로부터 매립지반의 초기 계면고에 대한 실질토량고를 구할 수 있고, 이들의 관계를 식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\log H = A + B \log H_s \quad (2)$$

압밀침강영역에 대해서, 자중압밀 시점 및 종점에 대한 $\log H \sim \log H_s$ 는 직선관계에 있고, 자중압밀 침하에서는 임의의 압밀도에 대해서도 직선관계에 있는 것을 제시하고 있다. 그러나, t_0 의 직선의 기울기 B가 t_{100} 의 기울기보다 약간 적은 경향이 있고, H가 크게 되면 t_0 의 직선과 t_{100} 의 직선이 교차하게 되어 불합리하다. 이 이유는 t_0 의 직선은 침강퇴적과정에 대해서도 퇴적고의 상승에 따라 하층에서 압밀이 진행하고 있는 것을 의미하고 있다. 즉 계면침강현상에서 압밀 침강과정에 들어간 시간 t_0 에서는 그 퇴적토의 평균 압밀도가 0을 의미하지 않는다.

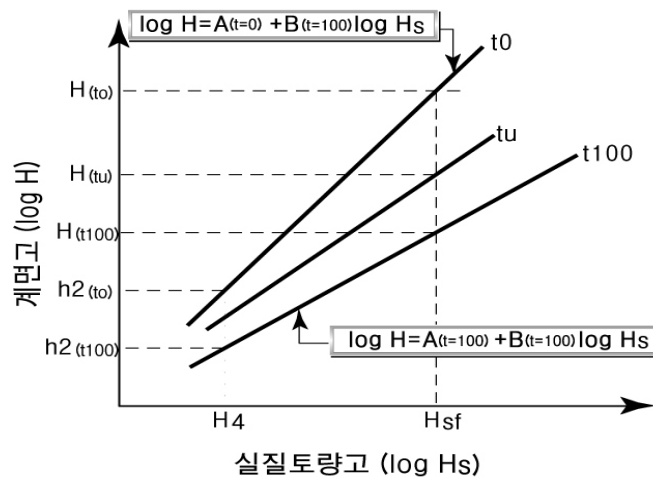


그림 2. 계면고와 실질토량고의 관계

2.2.3 침투압밀 실험

침강 및 퇴적과정을 통하여 매립된 점토는 초기에 매우 연약한 상태이다. 일반적으로 자중압밀은 높은 함수비와 저응력 상태에서 출발하기 때문에 압밀 중 매우 큰 변형을 경험한다. 이러한 압밀 과정을 예측하기 위하여 슬러리 상태의 연약층에 대한 침투력을 이용하는 침투압밀 시험이 제안되었다.

표준압밀시험은 재하 하중을 시료 표면에 단계적으로 가하여 압밀은 표면력에 의하여 이루어진다. 그러나, 침투압밀 시험에서는 시료의 모든 요소는 각 요소에 작용하는 침투력, 즉, 체적력에 의하여 압밀이 이루어진다. 침투력에 의해 압밀되는 역학적인 측면을 알기 위하여 침투력이 유효압밀응력으로 변화하는 과정을 살펴보아야 한다.

3. PBD 중형자중압밀 축진 시험

3.1 개요

실내 시험은 부산 및 광양, 군장, 서해안 지역에서 채취한 해성 점토를 이용하여 먼저 토성시험과 전체

투기를 이용한 자중압밀 시험인 column test를 실시하였으며, 산정된 자중압밀 시점의 함수비의 범위를 파악하여 대형컬럼을 이용한 PBD 자중압밀 촉진 시험의 설계 함수비를 산정하여 실험을 실시하였다.

표 1. 연구의 실험 순서

1단계	- 염분비 측정, 제조시료의 함수비측정
2단계	- 염분비 보정을 통한 시험시료제조 - 시료의 초기농도 및 함수비측정
3단계	- 염분비 측정 및 보정 - 설계함수비제조
4단계	- 실험기기조립 및 배수재 설치
5단계	- 시료투기 및 압축펌프를 이용한 시료교반, 상부 침투압밀 하중제하
6단계	- 시간경과에 따른 침하량 측정 - 배수재 및 하부유출구의 유출량 측정

3.2 대상시료의 특성

본 시험에서는 부산 및 광양, 군장, 서해안 지역 해안의 해성 점토를 사용하였으며, 시험결과의 신뢰성 확보를 위하여 각 시료별 3회의 토성시험을 실시하였다. 토성시험결과는 표 2와 같다.

표 2. 시료의 토성값

항목 \ 수	G _s	W _n	LL	PI	#200	USCS
부산	2.70	109.71	38.98	16.54	96.55	CL
광양	2.70	92.62	50.47	25.33	95.33	
군장	2.70	86.70	38.42	16.20	93.92	
태안	2.70	58.45	31.55	8.86	84.39	

3.3 전체투기 및 단계별 투기에 의한 자중압밀 시험

3.3.1 시험장치

전체투기 및 단계별 투기 시험에 의한 시간에 따른 계면고를 측정하기 위한 시험 장치는 그림 3.2와 같다. 시험 장치는 직경 20cm, 높이 150cm로 투명한 아크릴로 10cm 단위로 column을 분리할 수 있도록 제작하여 시험 종료 후의 함수비 및 단위중량을 심도별로 측정할 수 있도록 하였다. 또한 하부에서 는 시험 직전에 교반할 수 있도록 압축펌프를 연결하여 사용하였다.

3.3.2 시험방법

(1) 전체투기에 의한 자중압밀

현장의 준설점토를 실내에서 교반기를 이용하여 균질하게 교반 후, 교반된 시료는 노건조로를 이용하여 건조시킨 후에 함수비를 측정하였다. 노건조 함수비는 염분을 함유하고 있기 때문에 염분비에 의한 함수비를 보정하여 시험하려는 함수비를 제조하였다. 시료를 시험 함수비로 조정된 후, 투기시료의 균질성을 확보하기 위하여 교반을 실시하였다. 또한 제조된 시험 함수비의 신뢰성 및 초기 간극비를 판단하기 위하여 제조된 시료의 함수비를 측정하였다. 시료를 각 전체 투기높이별로 투기한 후 시험을 실시하기 전에 초기 간극비가 전체 높이에 대해 일정하도록 column 하부의 밸브와 압축펌프를 연결하여 압축공기를 주입하여 시료를 교반 하였다.

충분한 교반을 실시한 후 압축공기의 주입을 멈추고 동시에 침강·압밀 시험을 실시하였다. 투기된 시료의 침강 및 자중압밀을 관찰하기 위하여 초기 2일 동안은 계면고를 세밀하게 측정하였고 그 이후로는 1일 주기로 계면고를 측정하였다. 계면고가 시간축에 평행하게 Creep거동을 확인한 후 시험을 종료하여 각 층별 함수비 및 단위중량을 측정하였다.

(2) 시험조건

전체투기 및 단계투기에 의한 자중압밀 시험은 표 3과 같다.

표 3. 전체투기 및 단계별투기에 의한 자중압밀 시험조건

구 분	함수비(%)	초기 시료 높이(cm)
전체투기	567	120, 100, 80, 60
	700	
	1000	
	1200	
	1400	

(3) 염분비의 보정

시료는 해성 점토이므로 염분이 많이 용해되어 있으므로 해성 점토를 노건조하여 얻은 함수비는 염분이 흙 속에 포함되어 있어 실제 값보다 작은 값을 갖는다. 그러므로 바닷물 속에 포함되어 있는 염분의 농도를 측정하여 함수비를 보정 하여야 한다. 실제 함수비를 구하는 위해, 식 3을 이용하여 염분비를 구한 후 계산된 염분비에 의하여 실제 함수비를 구한다.

$$\beta = \frac{W_c}{W_w} \tag{3}$$

건조 전에 흙 요소의 삼상관계는 완전 포화되었다고 가정하면, 그림 3.4와 같이 대략적으로 나타낼 수 있다. 흙 요소에서 액체 부분은 소금이 용해된 물로 채워져 있다. 반면, 고체 부분은 흙 입자로 구성되어 있다.

따라서, 흙 요소와 관련된 정확한 함수비는 식 (4)와 같이 정의된다.

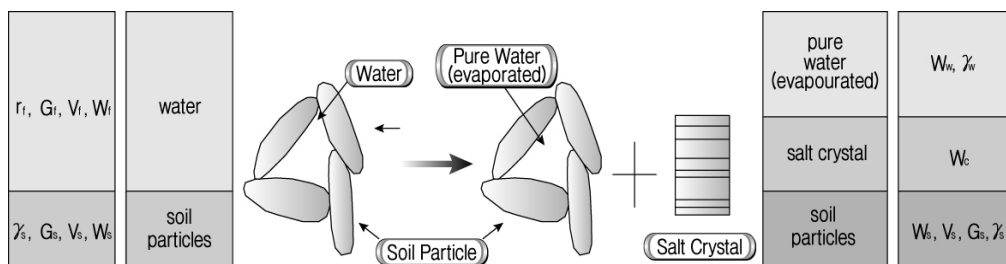


그림 3. 흙의 건조 전·후의 삼상관계

$$w = \frac{W_f}{W_s} \times 100 \tag{4}$$

흙이 건조되면 삼상관계는 변하며, 소금이 용해된 순수한 물은 증발되고, 순수한 물의 무게, W_w 는 건

조되어 없어진다. 반면에, 물속에 용해된 소금은 W_c 의 무게를 갖는 고체로 변한다. 그러므로 식 (5)가 성립한다.

$$W_f = W_w + W_c \quad (5)$$

현 단계(노건조한 단계)에서 함수비를 결정하고자 하는 경우에 흙 입자의 무게와 소금의 무게는 흙 입자의 무게로써 측정되고, 순수한 물의 무게는 물의 무게로써 측정된다. 이러한 경우 함수비는 식 (6)와 같이 표현된다.

$$w_m = \frac{W_w}{W_s + W_c} \times 100 \quad (6)$$

측정된 함수비, w_m 는 올바른 함수비를 나타내지 않는다. 정확한 함수비는 염분비를 알지 못하는 경우에 계산할 수 없다. 따라서 변환 공식을 통하여 식 (4)는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$w = \frac{(1 + \beta)w_m}{1 - \beta w_m} \quad (7)$$

또한, 간극비도 위와 같은 방법으로 재정의 할 수 있다. 물이 차지하는 체적은 V_f 로 표현되고 흙 입자는 V_s 로 표현될 때, 정확한 간극비는 식 (8)과 같이 정의된다.

$$e = \frac{V_f}{V_s} = \frac{(\frac{W_f}{\gamma_f})}{(\frac{W_s}{\gamma_s})} = \frac{\gamma_s}{\gamma_f} w \quad (8)$$

일반적으로 간극비는 식 (9)과 같이 잘못 계산된다.

$$e_m = \frac{\gamma_s}{\gamma_f} w_m \quad (9)$$

이 경우 정확한 간극비는 함수비를 보정한 방법과 동일하게 전개하여 식 (10)과 같이 표현된다.

$$e = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_f}\right) \frac{1 + \beta}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_f}\right) - \beta} e_m \quad (10)$$

3.4 중형자중압밀 촉진 시험

Column test를 실시한 후 Yano 과 Lin & Lohnes 방법에 의하여 자중압밀 시점의 함수비 및 간극비와 자중압밀 종점의 간극비 및 함수비를 산정하였다. 실험을 통해 파악된 자중압밀 시점의 최대 함수비 이하에서 함수비 50% 간격으로 시험을 실시하였다.

시험 과정은 원통형 실린더를 조립한 후 먼저 누수를 확인하기 위해 셀 내부에 물을 채우고 장비 자체의 방수능력을 확인한다. 실린더의 누수 확인이 끝나면 간극수압계를 선정된 측정위치에 설치하고 배수재를 클램프에 연결한 후 하부 바닥에 고정시킨다. 이 후 간극수압 측정 장치의 보정을 위하여 소정

의 압력을 가한 후 보정을 실시한 후 간극수압계를 포화시키는 과정을 수행한다. 이 과정이 끝나면 현장에서 채취한 시료를 설계 함수비로 충분히 교반한 후 실린더 내부에 투입한다.

본 연구는 설계함수비에 따른 자중압밀 촉진효과를 파악하기 위하여 하부원지반의 배수를 허용하고 PBD의 효용성을 파악하기 위하여 배수재 하부에서의 배수도 허용하였다. 자세한 시험 조건은 표 4와 같다.

표 4. 시험조건

구 분	PBD
전체투기	30cm
시험 길이	30cm
상부 물하중 초기 높이	50cm
간극수압계 높이	10cm, 20cm, 30cm, 40cm
간극수압계	매 1초당
초기함수비	400%부터 50% 씩 감소

3.5 시험장치 및 구성

3.5.1 대상시료의 특성

시험결과에 영향을 미칠 정도의 크기가 큰 자갈이나 조개껍데기 등의 불순물을 제거하면서 이와 동시에 시료채취지점과 동일한 위치에서 운반되어온 해수를 첨가하여 입자간의 포화도를 높이면서 고함수비 상태의 시료를 준비하였다.

3.5.2 시험기기 및 설계

PBD 공법 및 탈수공법을 모델화하여 실내에서 배수재와 하부배수에 의한 침강 및 자중압밀의 촉진효과를 조사하기 위하여 원형의 토조를 제작하여 원형 토조의 중앙에 설치된 배수재에 침투압을 작용시켜 침투압에 의한 배수가 이루어지도록 설계하였다.



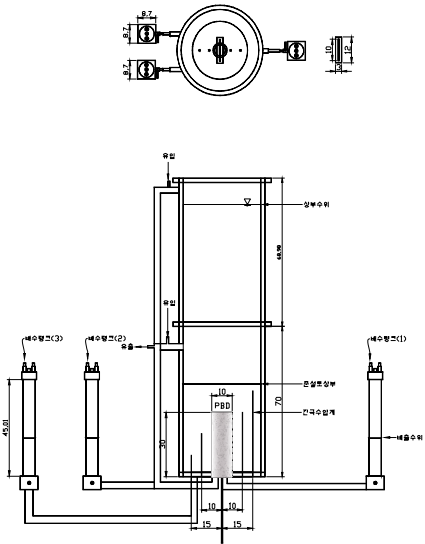
그림 4. 중형압밀 시험전경

시험에 사용된 대형 자중압밀시험기는 직경 38cm, 높이 80cm인 강성의 아크릴 재료로 만들어져 침하량을 직접 육안으로 확인할 수 있는 원통형 실린더, 상부 수위 유지를 위한 유입구 및 하부 배수량의

측정을 위한 3개의 유출구 및 배수탱크, 각 위치에 따른 간극수압의 측정을 위한 간극수압계, 간극수압을 디지털로 전환하여 저장하는 컨트롤 박스와 컴퓨터 시스템, 기타 장비로 구성되어 있다. 시험 중 배수재의 상하부 유입·유출 관로에 점토 유입을 차단하고 배수재의 이탈을 방지하기 위한 목적으로 프레임 상·하부에 각각 클램프를 설치하였다.

배수재가 설치된 후에 원통형 셀에 설계함수비로 조제한 준설점토를 포설하고 상부 물 하중에 의한 침투압이 가해질 수 있도록 하였다. 배수재와 하부 지반에서 배수된 간극수를 저장하여 유량을 계측하기 위한 배수 실린더를 대형 자중압밀 시험 토조와 직접 연결되어 있다.

3.5.3 시험방법 및 절차



본 시험은 단일의 배수재가 설치된 준설매립지반의 형상을 모형화하여 수직배수재 및 침투 압력과 하부배수에 의한 침강 및 자중압밀 촉진효과를 파악하기 위한 시험으로서, 준설시료의 침강 및 자중압밀은 준설시료 자체의 자중과 침투 압력의 작용, 그리고 하부 배수에 의해 발생한다. 그러나, 실제 지반에서 배수재를 통해 배수되는 양과 그 효과를 정량적으로 예측하기는 어려우므로, 본 시험에서는 단일 배수재를 원래의 크기대로 토조에 설치하여 이상적인 조건하에서의 배수재의 압밀촉진 효과를 검증하고자 하였으며 실험 중에 경과시간에 따른 표층의 계면고와 하부 배수량을 측정하였다.

실험에 사용되는 PBD는 시험에 적용하고자 하는 길이인 30cm의 크기에 맞게 재단하고 드레인재 끝단은 재봉하여 봉합한다. 대형 모형 토조에 투기된 준설점토는 고풍수이며 매우 연약하여 배수재가 자립할 수 없기 때문에 배수재의 상부를 시험기 상부에 고정시켰다.

4. 중형자중압밀시험의 결과 분석

4.1 전체투기 결과의 분석

PBD를 이용한 중형 자중압밀 촉진 시험의 설계 함수비 산정을 위한 전체투기에 의한 자중압밀 시험을 통해 나온 결과를 해석하였다. 결과시간과 계면고의 그래프를 통해 각 시간별 함수비를 구할 수 있으며, 침강압밀 곡선에 의한 방법인 Yano의 시점 및 종점 추정 방식을 이용하여 자중압밀 시점 및 종점을 추정하였다.

분석결과 자중압밀 시점 및 종점의 함수비로서 자중압밀 시점의 함수비는 229%~680%의 분포도를 보이고 있으며, 자중압밀 종점의 함수비는 156%~290%의 함수비 분포를 나타냈다. 이것은 일반적인 시점, 종점 함수비 범주에 포함이 되는 것으로서 분석을 통하여 재검증을 하는 기회가 있었다.

한편 종점에 이르는 압밀 시간의 경우, 지역별 최하 10일에서 약 30일의 기간이 경과 한 후에 안정된 모습을 보였다. 세립분 함유량이 90%이상으로 거의 유사하였으며, 비중값이 2.70으로 유사한 경향을 보이는 지역별 유사 물성 특성에도 불구하고 광양 지역과 부산지역의 시점, 종점 함수비는 일반적인 범주 내에서 약간의 차이가 발생하였다. 광양지역의 시점함수비는 평균 510% 내외로 나타났으며, 부산지역의 시점함수비의 경우는 평균 400% 내외로 나타났다. 또한 종점함수비에 있어서 광양지역의 함수비는 평균 255% 내외로 나타났으며 부산지역의 경우 평균 160%의 함수비를 나타내었다. 입자내의 미세광물의 영향으로 인한 물리, 화학적 결합 요소로 인하여 침강에 영향을 미쳤을 것이며, 지역별 미세 입자에 의한 컨시스턴시가 미세하게 영향을 주었으리라 판단되었다.

4.2 중형자중압밀시험

4.2.1 시험결과 및 분석

중형자중압밀시험과의 비교를 위하여 기존의 자중압밀 시험 중, 계면고가 50cm인 경우의 결과를 분석하였다. 645%, 758%, 1000%, 1500%의 함수비에 대하여 실험한 결과 자중압밀 종점에 이르는데 걸리는 시간은 약 1달 정도의 시간이 걸리는 것으로 나타났다.

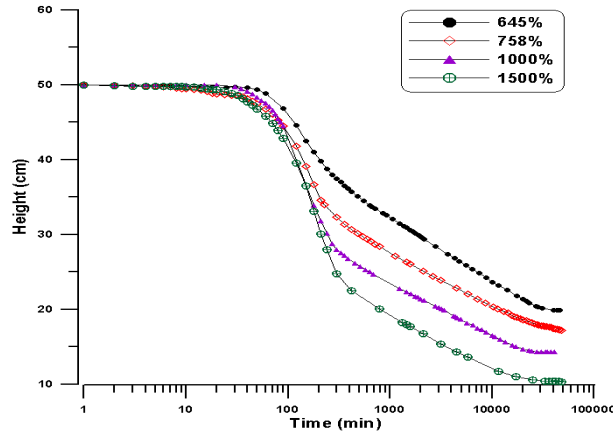


그림 5. column test를 이용한 전체투기시험

연직배수재 및 침투압에 의한 하부배수를 허용하지 않고 자중에 의해 발생하는 침하를 측정함으로써 실제 연직배수재 및 침투압밀에 의한 지반의 침강 및 자중압밀침하 촉진효과를 파악하고자 하였다.

초기 함수비를 달리하여 실험 한 경우, 자중압밀 시점 및 자중압밀 종료점은 초기 함수비가 낮을수록 빨리 일어났으며, 최종침하량의 경우 실질토랑고가 가장 적은 1500%에서 침하가 가장 많이 발생하였으며, 실질토랑고에 대한 최종침하비는 실질 토랑이 가장 많은 645%에서 가장 작은 경향을 보였다. 이는 실질토랑이 많은 만큼 상부하중이 증가하여 실질토랑에 비하여 침하량이 커진 것으로 판단된다.

W_n	최종계면고 (H_f)	실질토랑고 (H_s)	H_f/H_s	H_s Ratio	H_f Ratio	압축률	H_f/H_s
645	19.90	2.77	7.17	1.00	1.00	60.20	7.18
758	17.10	2.39	7.14	1.16	1.16	65.80	7.15
1000	14.30	1.82	7.82	1.51	1.39	71.40	7.82
1500	10.30	1.23	8.36	2.25	1.93	79.40	8.34

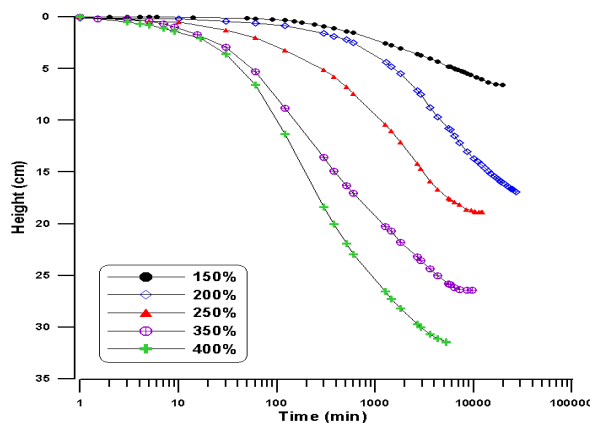


그림 6. 시간에 따른 침하량 변화 (중형자중압밀시험)

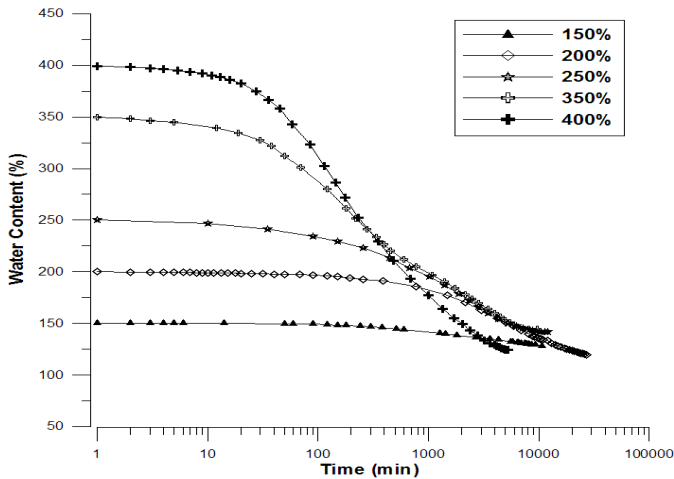


그림 7. 시간에 따른 함수비 변화

경우, 기존의 자중압밀 이론에서 연구되었던 바와 같이 상대적으로 고함수비인 400%, 350%가 250%, 200%에 비하여 그 침강속도가 빨리 나타났으며 400%, 500%의 경우, 전형적인 침강 자중압밀 특성을 보이는 한편, 실질토량이 가장 적은 400%의 시험 시료가 일정시간 동안 큰 함수비 변화속도를 갖는다는 것을 알 수 있다. 또한, 고함수비인 400%일 때, 일정시간에 따른 간극비 변화 속도가 가장 크고, 자중압밀 종료시점인 150%일 때 간극비 변화속도가 가장 느린 것을 알 수 있다. 하지만 결국 자중압밀이 종료됨에 따라 최종 간극비는 일정하게 수렴하는 경향을 보인다.

한편, 토조 내에서의 배수 과정은 크게 두 가지로 발생한다고 추정할 수 있다. 첫째는 배수재를 통한 배수이며, 두 번째는 침투압밀 및 자중 압밀 진행에 따른 간극수압의 소산 과정에서 발생하는 하부 지반으로의 배수이다.

수직배수재 타설 및 침투압에 의한 하부 배수를 실시한 지반은 침투압 및 상부 하중으로 인하여 지반 내에서는 배수재를 향한 물의 흐름 및 하부방향의 흐름이 발생하게 된다. 이와 함께 점토 입자는 수직배수재로 향하는 수평방향 및 침투압 및 자중에 의해 수직방향(중력방향)으로 이동하게 되는데 대부분의 토립자는 배수재 필터를 통과하지 못하므로 필터 주변에 달라붙게 되고, 축압이 커질수록 이들은 서로 더 강하게 결합하게 된다. 이로 인해 배수재 인접 지반의 투수계수가 크게 감소하게 되며 연직배수공법의 효율을 저감시키는 원인으로 고려되고 있으며 침투압밀의 경우도 지반의 압밀도가 높아질수록 clogging 현상의 발생으로 투수속도가 저하될 것으로 판단된다. 한편, 침하속도의

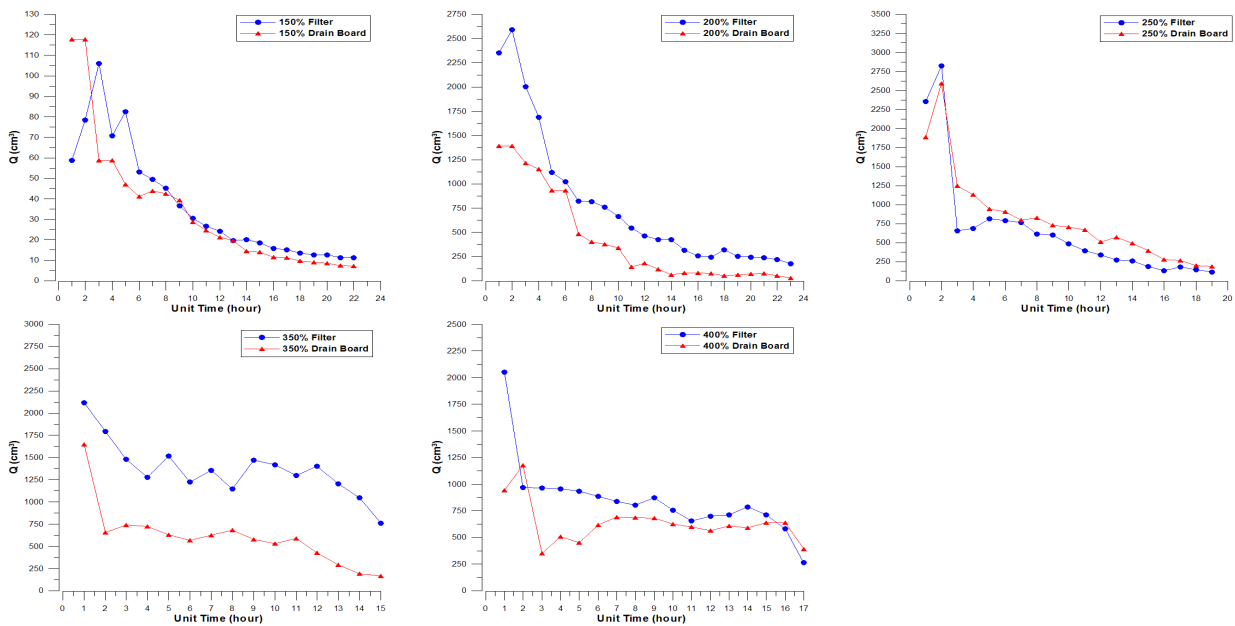


그림 8. 필터와 배수재의 시간에 따른 유량변화

그림 8. 필터와 배수재의 시간에 따른 유량변화를 살펴보면, 일반적으로 침투압의 증가 의한 클로킹 현상으로 인하여 배수재의 투수계수가 작아짐에 따라 단위시간당 유량이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 한편 침투압에 의한 클로킹 현상이 발생하여 수직배수재의 통수분담률이 일반적으로 필터재보다 작게 작용하였다.

5. 결론

본 연구에서는 고태수비를 갖는 매립지 조성 중에 있는 준설 매립 지반에 대한 PBD 및 침투압밀의 효과를 확인하기 위하여 소형 Column test 및 PBD와 침투압밀을 적용시킨 중형 Column test를 실시하였다. Column test, 중형 test 시험에 의한 침강 및 자중압밀특성과 적용성을 판단하여 다음과 같은 결론을 도출하였으며, 전체 매립공사 공기를 단축시킬 수 있으며, 투기 준설토량을 경제적으로 증대시킬 수 있을 것으로 기대한다.

- (1) 중형 column test 실험결과, 준설 매립 지반에 대한 PBD 및 침투압밀의 효과를 확인하였다. PBD와 침투압에 의한 배수효과에 의하여 자중압밀 침하량은 비조건에 비하여 빠른 시간에 압밀 종료점에 도달하였으며 침하량도 크게 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) PBD와 침투압에 의한 배출수량과 침하량을 비교한 결과, 침투압밀의 효과가 약 1.2~3.68배 정도 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 침투압밀의 효과는 함수비가 낮아질수록 작아지는데 이는 함수비가 낮아질수록 지반의 투수계수가 작아지면서 침투압의 효과가 떨어지는 것으로 판단되며 지반의 정도에 따라서 적용하는 침투압을 달리 적용하여야 할 것으로 판단된다.
- (3) 시험시료의 함수비 변화를 살펴보면, 시험 실시 전 선행분석한 일반적인 자중압밀 종료시점(150%)에 수렴하는 경향을 보이며, 실질토량이 가장 적은 고태수비의 시료일수록 일정시간 동안 큰 함수비 변화속도를 갖는다는 것을 알 수 있다. 또한, 고태수비일수록 일정시간에 대한 간극비 변화 속도가 크다.
- (4) 일반적으로 침투압의 증가에 의한 클로킹 현상으로 인하여 배수재의 투수계수가 작아짐에 따라 단위시간당 유량이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 또한 자중압밀의 진행 및 종료에 따른 간극비의 감소로 인한 투수계수의 감소로 인하여 필터재를 통한 배수량도 줄어들고 있다.
- (5) 필터재와 배수재의 배수량을 비교해보면, 침투압에 의한 클로킹 현상이 발생하여 수직배수재의 통수분담률이 일반적으로 필터재보다 작게 작용함을 알 수 있다. 따라서 수평배수재의 연계설치를 통한 침투압의 분산을 통한 클로킹 현상 감소방안을 추가 연구할 필요가 있다.
- (6) 실험 결과를 이용하여 매립용량이 자연 방치의 경우에 비하여 증대되는 것을 확인할 수 있었다. 증대된 매립 용량만큼의 준설토 투기가 가능하여 준설토 투기장의 효율을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이 송, 양태선, 황규호, 1994, “준설매립 연약지반의 자중압밀 특성”, 대한토목학회 논문집, 제14권, 4호, pp.953-964
2. Koppula, S.D. and Morgenstern, N.R., 1982, “On The Consolidation of Sediments Clays”, Can. Geotech. J., Vol.19, pp.260-268.