

서울시립대학교 도시과학연구원
도시과학논총 제31권 2005년 12월
The Journal of Urban Science
The University of Seoul
Vol.31, No.1, December 2005

세립분 함유량에 따른 준설토의 침강 및 자중압밀 특성

이 범 준, 이 송
(서울시립대학교 토목공학과)

The Characteristics of Settling and Self-weight Consolidation
for Dredged Soil depending on Fines Grained Content

Lee, Bum Jun Lee, Song

Abstract

A lot of dredging and reclaiming projects are recently under way in our country for the efficient use of limited land space. In case of a confined disposal of dredged soils by a pump dredger, generally coarse grained soils are separated from fines with dropping at the near outlet of the pump dredger. It makes coarse grained soils sediment first, and the other soils are composed of fines with very high water contents.

In the real dredging and reclaiming field, a fines content increases in order of SP-SM, SM, ML with a distance from the outlet of the pump dredger. This increase has stopped at approximately 350m, and then the dredged soil has become same with the original soil. But a study on the characteristics of settling and self-weight consolidation for a dredged soil depending on a fines content hasn't been done actually.

In this study, laboratory self-weight consolidation tests have been conducted and the characteristics of settling and the change of tendency were observed for consideration

of a totally filling method and grain size distributions with a distance from the outlet. After finishing filling, grain size distributions, the characteristics of consistency and the influence of the water content and the fines content on the coefficient of sedimentation and consolidation have been compared and analyzed.

Keywords: Dredging and reclaiming, Settling, Self-weight consolidation

1 서론

최근 우리나라는 국토의 효율적인 활용을 위해서, 남해안을 중심으로 해안매립을 활발하게 실시하고 있다. 인천국제공항, 울진공단, 부산 신항, 군장 국가공단 등을 개발하여 공업용지 및 주거용지를 확보하고, 증가하고 있는 공항 및 항만 등의 수요를 충족시키기 위하여 해안매립을 통한 부지개발이 이루어지고 있다. 이처럼 바다와 인접하며, 국토면적이 한정되어 있는 나라에서는 해안매립이 유용한 방법으로 선택될 수 있다.

국내에서의 초기 매립공사는 매립에 이상적인, 투수성이 좋고 압축성이 작은 쇄석이나 산토, 해성모래를 이용하여 매립하였다. 하지만 점점 재료의 구입이 어려워지며 그 가격 또한 상승하고 있고, 자연경관훼손, 생태계파괴 등의 환경적 문제가 대두됨에 따라 삼면이 바다로 둘러싸여 재료수급이 원활한 우리나라에서는 대부분의 공사가 준설토 매립으로 진행되고 있다. 우리나라는 주산맥과 하천수계의 방향 등에 따라 서, 남, 동해안 모두 다른 해저지질특성을 가지고 있으며 그 중 서해안 지역의 해저바닥에 분포하는 원지반은 실트질 모래 또는 모래질 실트가 남해안과 동해안에 비해서 많이 분

포하여 있고, 연안에 비해 입자 또한 크다. 이러한 특성을 지닌 준설토는 토출구의 거리에 따라 다양한 입도분포곡선을 가지며 침강과 압밀의 과정도 준설퇴토와 다른 거동 특성을 가짐에도 불구하고, 이에 대한 침강 및 퇴적, 자중압밀 특성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.

일반적으로 모래와 점토의 압밀거동은 각각 다른 간극비와 투수계수를 갖는 흙에 발생하는 간극수압의 소산속도 때문에 발생한다. 이러한 압축특성의 차이를 고려하지 않는 대단위 준설퇴토매립사업일 경우 침하를 잘못 평가하게 된다면 준설퇴토매립지 사업에 수백억의 비용손실이 발생할 것이다. 또한, 침하가 계속되고 있는 상황에서도 시설물을 설치하고 사용해야만 할 때가 많으므로 압밀침하의 양과 속도를 추정하여 침하를 줄이거나 침하로 인한 피해를 피할 수 있는 적정의 설계형태를 적용할 수 있는 능력이 중요하다. 그러므로 토출구로부터 거리별 입도분포의 영향을 고려하지 않으면 침하량 산정 시 과대 혹은 과소평가를 하게 되어 막대한 비용이 추가 될 것이고 또한 부등침하로 인한 구조물에 커다란 피해를 줄 수 있다.

본 연구에서는 토출구로부터 거리별 입도분포를 고려하기 위하여 준설퇴토의 세립분

혼합비율을 각각 달리하여 실내 침강 및 자중압밀시험을 실시하였고 압밀종료 후 준설토 퇴적토의 퇴적특성과 그 변화양상을 관찰하였다. 투기완료 후의 계면고, 함수비, 간극비, 그리고 체적비 변화를 비교, 분석하고, 세립분 함유량과 침강압밀계수와의 관계를 식으로 표현하여, 차후에 다른 준설토 매립 현장에 대한 자중압밀시험 시 원지반의 세립분 함유량 및 관계식을 이용하여 거동을 예측하는데 연구의 목적이 있다.

2 이론적 배경

1. 준설토의 침강특성

매립지에 투기된 준설토는 시간경과에 따라 침강 및 압밀, 퇴적 과정을 거친다. 현탁액 속의 토립자는 초기에는 입자간의 상호작용을 받지 않는 자유침강이 발생한다. 일정 시간이 경과하게 되면 토립자간의 상호작용으로 인해 플록을 형성한다. 이들이 모여 토체를 구성하여 청등수와 현탁액과의 사이에 명확한 경계면을 형성하며, 등속으로 경계면이 변화한다. 동시에 하부에서는 퇴적이 발생되며, 퇴적층 내에 자중압밀이 시작되면서 퇴적 형성선이 증가하여 상부 경계면과 만나면서 침강속도가 감소하고 침강 및 퇴적단계는 종료된다. 침강속도의 감소와 더불어 투기된 시료 전체는 자중압밀 단계에 들어간다. Fig. 1.은 침강 및 퇴적, 자중압밀과정의 상태를 계면침강곡선으로 나타낸 것이다.

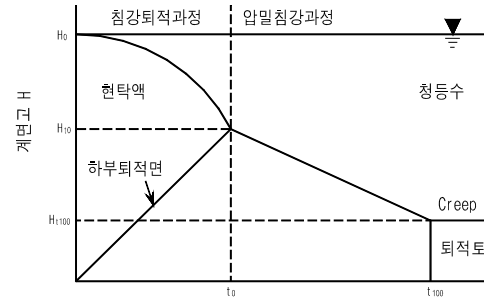


Fig. 1. 침강퇴적, 자중압밀과정의 형태

2. 자중압밀 특성

1) 자중압밀의 시점과 종점

침강과 동시에 퇴적이 발생하여 하부에서부터 자중압밀이 시작되며, 경계면이 생긴 후 자중압밀 시점에서 자중압밀속도가 감소하기 시작한다. 고함수비의 준설토는 투기 후에 침강 단계를 거쳐 자중압밀단계로 진행되며, 두 단계 구분은 유효응력 존재 유무로 결정해야 한다. 그러나, 실제로 이것을 측정하기는 매우 어려우므로 침강곡선에서 속도 변화를 이용하여 간접적으로 판단한다.

자중압밀 시점은 학자마다 다소 차이가 있지만 일반적으로 침강곡선에서 침강속도가 느려지는 변곡점으로 보고 있다.

2) 가상의 자중압밀 시점

실내 원형토조내의 계면침강 현상에서 침강속도가 일정한 점을 침강 및 퇴적 단계와 압밀침강 단계의 경계로 보았으며, 이 때의 침강시간을 압밀침강 개시시간, 즉, 겉보기 자중압밀 시점으로 정의할 수 있다. Yano는 침강과정 중 자중압밀 시점으로 정의하는 상태는 존재하지 않으므로 전 퇴적토층의

유효응력이 0인 상태에 있고, 자중압밀이 개시되는 가상점을 산정하여 그 때의 시간을 Fig.2와 같이 가상의 자중압밀 시점, t_0' 라 정의하였다.

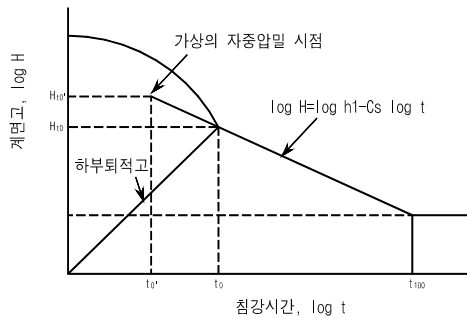


Fig. 2. 가상의 자중압밀 시점

3) 자중압밀 산정식

구간 침강의 형태를 지니는 준설토가 침강 및 퇴적 단계를 거치게 되면 시간 경과에 따라 자중압밀 단계에 진입한다. 계면고와 침강시간사이에는 식(1)과 같이 직선관계가 얻어지며, 이를 자중압밀 산정식이라 한다.

$$\log H = \log h_1 - C_s \log t \quad (1)$$

침강압밀계수는 식(1)에서 C_s 를 말하며, Fig.2. 에서 자중압밀 부분의 직선의 기울기를 말한다. 즉 침강압밀계수는 얼마나 자중압밀이 빠르게 진행되는지를 나타내는 속도개념의 계수이다.

3 실내시험

1. 시험시료

현장에서 채취한 준설점토와 사용된 모래

시료에 대한 물성실험결과를 표 1과 입도분포를 Fig.3.에 각각 나타내었다.

표1. 시험시료의 물성치

구분	Gs	LL	PI	D ₅₀	#200	USCS
점토	2.72	39.5	16.8	—	99.2%	CL
모래	2.65	—	—	0.67	2.7%	SP

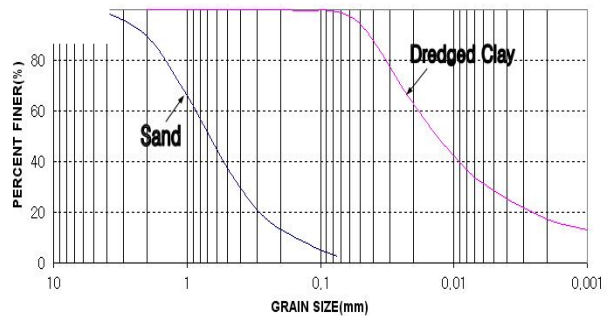


Fig.3. 시험시료의 입도분포 곡선

2. 시험장치

시간경과에 따른 계면고를 측정하기 위한 시험장치는 Fig.4.와 같이 마찰저항이 작고 계면고 변화를 관찰하기 용이하며 조립이 간단한 원형아크릴로 된 Column을 사용하였다. 시험장치는 직경 20cm, 높이 150cm로 된 아크릴로 10cm 단위로 Column을 분리할 수 있도록 제작하여 시험 종료 후의 시료를 채취할 때 용이하도록 하였다.



Fig.4. 시험장치의 모식도

3. 시험방법

1) 시험개요

시험시료는 통일분류법상 CL 계열의 준설퇴토와 SP 계열의 사질토를 혼합하여 함수비 600%, 1000%에 맞는 시료를 염분을 고려하여 제조하였으며 시험장치는 직경 20cm, 높이 150cm 크기의 아크릴 Column 으로 하단에서 10cm 단위로 분리할 수 있도록 하였다.

모래와 실트를 포함한 점토의 구분을 AASHTO법 및 통일분류법에서 규정한 0.074mm로 구분 했으며, 시험에 사용된 모래는 #200체를 이용하여 잔류한 시료만을 이용하였다. 준설토 전체건조시료중의 세립분 함유량을 각각 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95%, 100%로 맞추어 전체투기방법에 의한

침강 및 자중압밀시험을 실시하였다.

전체투기높이를 120cm의 경우로 일정하게 설정하였고, 염분비는 0.020 ~ 0.030의 범위를 갖는 서해안 지역의 일반적인 염분을 평균치, 0.025로 고려하였으며, 함수비는 염분이 포함된 혼합된 시료를 600%, 및 1000%로 만든 후 정확한 양을 제조하여 투기하였으며 투기 초기 2일 동안은 계면고를 세밀하게 측정하였고 그 이후로는 1일 주기로 계면고를 측정하여 퇴적고 상승을 관찰하였다.

Yano의 방법을 이용하여 해석을 실시하였으며 시간에 따른 계면고로 얻어진 침강 압밀 곡선을 통해 준설퇴토의 자중압밀 특성을 파악 하였다.

투기 완료 후 어느 정도 시간이 지난 후에 계면고가 일정한 높이로 수렴하는 크리프상태에 도달하였을 때 시험을 종료하고 심도별 함수비, 단위중량, 액.소성한계, #200체 통과율을 측정하였다.

2) 시험절차

시험 시 원하는 세립분 함유량으로 시료를 제작하고 제작된 시료가 균질하게 섞여 있는 것이 가장 중요하므로 투기 전에 교반기로 충분히 교반을 해야 하며, 제조된 시료의 신뢰성을 위해서 다시 한번 체분석을 통해 세립분 함유량을 확인해야 한다.

- ① 대상이 되는 시료의 함수비를 보정하여 초기함수비를 3회 측정하여 평균치를 측정한다.
- ② 측정된 초기함수비를 바탕으로 시험함수비를 제조한다.
- ③ 대상이 되는 초기함수비의 시료를 채취

하여 시료의 무게를 파악하고 순수한 점토의 건조중량을 측정한다.

- ④ 투기시료의 균질성을 확보하기 위하여 제조된 시험 함수비 시료를 교반기를 이용해 교반을 실시한다.
- ⑤ 제조된 시험함수비의 신뢰성 및 초기 간극비를 판단하기 위하여 제조된 시료의 함수비를 측정한다.
- ⑥ 제조된 시료를 투기고 120cm에 맞게 Column에 투기한다.
- ⑦ 초기 간극비가 전체 높이에 대해 일정하도록 Column 하부의 밸브와 압축펌프를 연결하여 압축공기를 주입해 시료를 교반을 실시한다.
- ⑧ 충분한 교반을 실시한 후 압축공기의 주입을 멈추고 동시에 침강·압밀 시험을 실시한다.
- ⑨ 초기 2일 동안은 계면고를 세밀하게 측정하고, 그 이후로는 1일 주기로 계면고를 측정한다.
- ⑩ 계면고가 시간축에 평행하게 Creep거동을 확인한 후 시험을 종료하여 각 층별 함수비 및 단위중량을 측정한다.

4 실내시험 결과 및 분석

1. 함수비에 따른 침강압밀계수

세립분 혼합비율과 함수비를 달리하여 제조된 준설토를 전체투기 방법으로 투기한 후 침강자중압밀 곡선을 도식하였다. 곡선에서 침강이 종료되어 자중압밀이 시작되고 끝나는 두개의 변곡점을 각각 자중압밀 시점과 종점으로 구분하고, 선형적으로 계면고가 감소되는 자중압밀부분의 기울기 침강압밀계수를 산정하였다. 다음 Fig.5.는 시험 종료 후의 침강자중압밀 곡선 중 하나를 나

타낸 것이다.

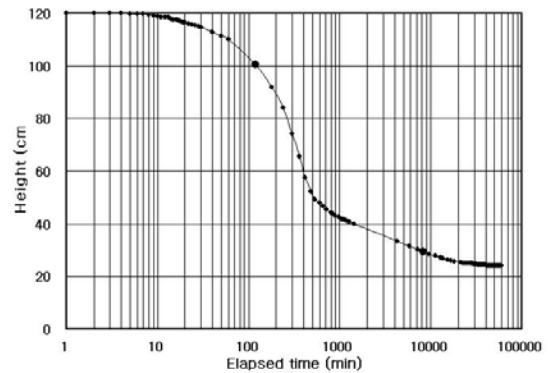


Fig.5. 침강자중압밀 곡선

같은 세립분 함유량에 대해서 함수비를 600%, 1000%로 달리 하여 시험하였으므로, 산정된 침강압밀계수를 통해서 함수비가 침강압밀계수에 미치는 영향에 대해 알 수 있다. 다음 Fig.6.은 같은 세립분 함유량을 갖는 준설토에 대해 함수비를 달리 하였을 때 그에 따라 달라지는 침강압밀계수의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 함수비가 높을수록 침강압밀계수도 그에 따라 값이 커짐을 알 수 있다. 즉, 함수비가 클수록 자중압밀이 더 빠르게 진행된다는 것을 의미한다.

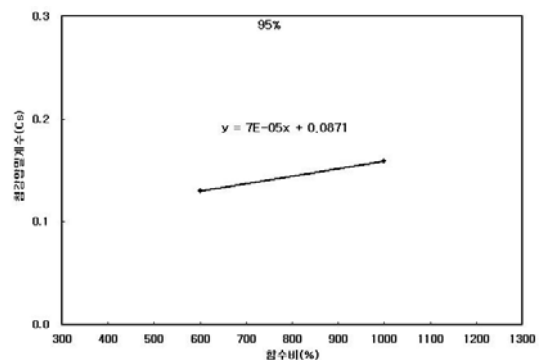


Fig.6. 함수비에 따른 침강압밀계수

2. 세립분 함유량에 따른 침강압밀계수

같은 세립분 함유량으로 제조된 준설토를 함수비를 각각 600%, 1000%로 달리 하여 침강압밀계수를 산정하였으며, 산정된 침강압밀계수의 평균값을 이용하여 침강압밀계수에 대한 세립분 함유량의 영향에 대해 비교해 보았다. 또한 실제 현장 준설토 시 준설토의 함수비가 500%~2000%임을 감안하여, Fig.6.에서 나타난 함수비와 침강압밀계수와의 상관관계식을 이용하여 세립분 함유량별로 함수비 500%일 때 예상되는 침강압밀계수와 2000%일 때 예상되는 침강압밀계수를 구하여 함께 비교해 보았다. 이는 이 논문의 목적인 차후에 세립분 함유량으로만 침강압밀계수를 예측하는데 있어서 보다 용이한 사용을 가능케 하기 위함이다.

Fig.7.은 자중압밀 시험으로 산정한 함수비 600%, 1000%의 침강압밀계수 평균값들과 함수비 500%, 2000%의 예상되는 침강압밀계수들을 세립분 함유량에 따라 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 침강압밀계수와 세립분 함유량은 세립분 함유량 50%~60%에서 최대 침강압밀계수를 갖는 위로 볼록한 2차원 곡선식의 관계가 있다. 실제 침강자중압밀 시험에 있어서 세립분 함유량이 적을수록, 즉 조립분 함유량이 많을수록 침강자중압밀이 더 빨리 종료된다. 그림에도 불구하고, 세립분 함유량이 많을수록 침강압밀계수가 더 작아지는 1차원 직선식의 관계가 아닌 위로 볼록한 2차원 곡선식의 관계가 있는 이유는 세립분 함유량이 아주 적은 경우에는 무게가 무거운 조립분은 투기 초기에 침강이 종료되며 자중압밀도 일어나지 않고, 그 위에 적은양의 세립분만이 천천히 자중압밀이 진행되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 세립분이 워낙 적기 때문에 압밀에 영향을 주는 자중의 영향도 작아 압

밀침강이 더딘 것으로 보인다.

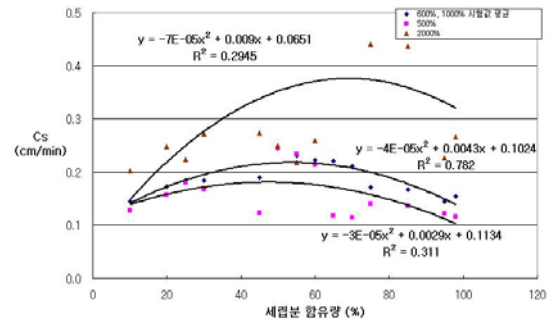


Fig.7. 함수비에 따른 침강압밀계수

3. 세립분 함유량에 따른 침강속도

앞에서 우리는 세립분 함유량이 극히 적고 대부분이 모래인 조립토로 구성된 준설토를 침강자중압밀 한 경우에 침강자중압밀 시험은 일찍 종료되었음에도 불구하고, 침강자중압밀 계수는 작게 나타남을 알 수 있었다. 이는 앞서 언급했듯이 무게가 상대적으로 무거운 조립토는 투기 초기에 모두 다 가라앉고 남은 세립토만이 천천히 침강자중압밀 되었기 때문으로 판단된다.

이렇듯 침강자중압밀 시험이 종료되는 시점은 자중압밀이 얼마나 빠르게 진행 되는가도 중요하겠지만, 침강이 얼마나 빨리 진행되는가도 중요하다 할 수 있다. 실제 준설토에 있어서도 투기된 준설토의 침강속도가 수위의 증가속도보다 커야만 준설토가 침강되지 못한 상태에서 여수토로 율류되지 않고 침강이 발생할 수 있다. 앞에서 자중압밀의 진행되는 속도를 나타내는 침강자중압밀 계수를 알아보았으니, 이번 절에서는 침강이 얼마나 빨리 진행되는가를 나타내는 침강속도에 대해 알아보겠다. 또한 세립분 함유량에 따라 침강속도가 어떻게 변하였는지도 보이겠다. Fig.8.은 Fig.5.

에서 구해진 각각의 침강압밀곡선들로 부터 투기부터 침강종료까지의 시간 및 계면고를 Plotting해서 얻어진 추세선을 나타낸 것이다. 여기서의 추세선의 기울기가 바로 준설토의 침강속도를 의미한다. 그림에서 보듯이 세립분 함유량이 많아질수록 준설토의 침강속도는 줄어주는 것을 알 수 있다. 특히 세립분 함유량 5%~10%에서의 침강속도가 확연히 빠르며 20%~40%에서 점진적으로 줄어들다가 40%~100%에는 미세한 차이로 줄어드는 경향을 보였다.

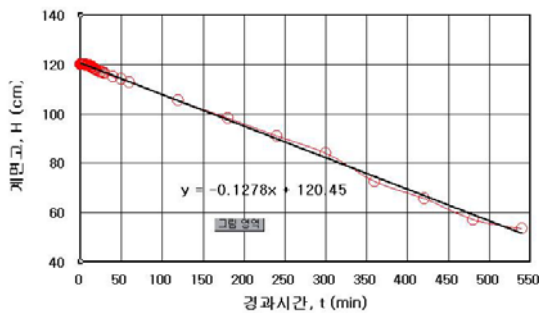


Fig.8. 침강속도 산정

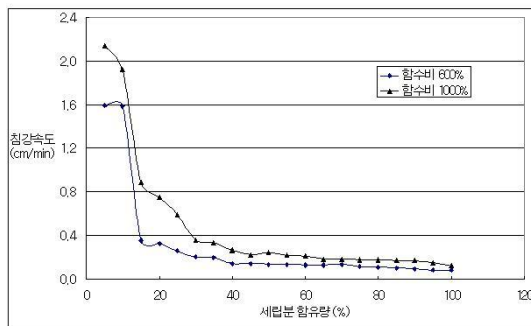


Fig.9. 세립분 함유량에 따른 침강속도

5 결론

본 연구에서는 국내 현장조건과 서해안지역의 특성을 고려한 퇴적 및 압밀특성을 파악하기 위하여 준설토의 전체건조시료 중 세립분 혼합비율을 각각 5%, 10%, 15%,

20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95%, 100%로 제조하여 전체투기방법에 의하여 침강 및 자중압밀 시험을 실시하였다. 함수비에 따른 침강압밀계수와 세립분 함유량에 따른 침강압밀계수를 예측, 비교 하였으며, 압밀이 종료된 후 침도별 퇴적 및 컨시스턴시 특성을 파악했다. 시험결과에 대한 각 조건의 결론을 요약, 정리하면 다음과 같다.

1. 같은 세립분 함유량의 준설토를 자중압밀 시험한 결과 함수비가 높을수록 침강압밀계수가 크게 나타났다. 이것은 같은 입도분포를 갖는 준설토이더라도 함수비가 높을수록 침강자중압밀이 더 빨리 진행된다는 것을 의미한다.

2. 같은 함수비의 준설토를 자중압밀시험한 결과 세립분 함유량 50%~60%정도에서 침강압밀계수가 최대가 되는 위로 볼록한 2차원 곡선식의 관계를 가짐을 알 수 있었다. 세립분 함유량이 적고 대부분이 조립토로 구성된 준설토의 경우 침강자중압밀이 빨리 종료됨에도 불구하고 작은 침강압밀계수를 갖는 이유는 무게가 상대적으로 무거운 조립토는 투기 초기에 모두 침강이 되어 더 이상의 자중압밀은 발생되지 않고, 나머지 적은양의 세립분만이 천천히 자중압밀되기 때문인 것으로 판단된다.

3. 같은 함수비의 준설토를 자중압밀시험한 결과 세립분 함유량이 많아질수록 투기 후부터 침강이 완료되어 자중압밀이 시작되는 시점까지 도달하는데 소요되는 시간이 길어짐을 알 수 있었다. 즉, 세립분 함유량이 많아질수록 침강속도가 느려지고, 이는 세립토에 비해 상대적으로 무거운 조립토는 투기직후 바로 가라앉지만 나머지 세립토는

플록을 형성해서 천천히 침강하기 때문인 것으로 판단된다.

추후 연구과제로는 세립분 함유량 외에 더 다양한 침강자중압밀의 영향인자를 고려하여 그에 맞는 물성치를 가진 준설토를 이용해 장시간 단계에서의 적용성과 토출구로부터 거리별로 계측한 현장데이터와 비교하여 그 신뢰성을 검증하여야 한다고 생각된다.

Reference

1. Been, K. and Sills, G. C., 1981, "Self-Weight Consolidation of Soft Soils : An Experiment and Theoretical Study ", Geotechnique, 31, pp.519-535
2. Imai, G., Tsuruya, K. and Yano, K., 1979, " A Treatment of Salinity in Water Content Determination of Very Soft Clays", Soil & Foundations, Vol.19, No.3, pp.84-89
3. Imai, G., 1980, "Settling Behavior of Clay Suspension", Soil and Foundation Vol. 20, No.2, pp.7-20
4. Imai, G., 1981, "Experimental Studies on Sedimentation Mechanism and Sediment Formation of Clay Materials", Soil and Foundation, Vol. 21, No.1, pp.7-20
5. 방준호, 1995, " 준설토의 퇴적특성에 관한 연구 ", 서울시립대학교 토목공학과 석사학위논문
6. 심민보, 2001, "준설토의 침강 및 자중압밀 특성에 관한 실험적 연구", 서울시립대학교 토목공학과 박사학위 논문
7. 김자겸, 이종섭, 1991, " 실트질 점토의

침강특성에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제 11권 제 3 호, 85-93쪽

8. 이송, 심민보, 전종구, 2001, "국내 퇴적층의 토질특성 및 지반개량 대책 ", ISSMGE ATC-7 심포지움, 131-161쪽
9. 이송, 심민보, 2001, "비소성 준설토의 침강 및 퇴적 특성", 한국지반공학회 논문집, 제 17권, 2호, 21-32쪽
10. 이종호, 2000, "준설패립지반의 압밀특성에 관한 수치해석 및 실험적 연구", 강원대학교 토목공학과 박사학위 논문