

여천지역 준설매립토의 침강·압밀특성

Settling & Consolidation Properties of Hydraulic Fill Materials of Yeochon Industrial Complex

송정락* Song, Chung-Rak*
 백승훈* Baek, Seung-Hoon*
 여유현* Yeoh, Yoo-Hyeon*

* 대우엔지니어링 지반공학부, Geotechnical Engineering Div. Daewoo Engineering Co. Seoul

SYNOPSIS

Hydraulically filled ground is formed by the settling of soil grains from the mixture of soil grains and water. It was generally known that the settling speed of the soil grains is governed by Stokes law. In the case of clayey dredged material, the shape of soil grains is not round, the surface of the soil grains is relatively large compared to the weight of soil grains and inter-grain ionic force is relatively large compared to the weight of soil grains. By this reason the settling behavior of clayey material may be quite different from that of Stokes law. This study investigated the settling and consolidation behavior of hydraulically filled materials of Yeochon industrial complex by large scale laboratory settling & consolidation container.

The test results showed that actual settling speed of soil grains is quite large compared to that of Stokes law. It was turned out that this phenomenon was due to the aggregation of soil grains. Also, it was turned out that the void ratio and water content after the completion of settling process was 8.7 and 322% respectively. The consolidation settlement of clayey hydraulic fill material was predicted better by "incremental small strain" consolidation concept than classical Terzaghi's consolidation concept (infinitesimal strain).

1. 서론

준설매립공법은 수면아래의 지반을 굴착하여 물과 토립자가 섞여진 상태로 배송관을 통하여 준설매립지역으로 이송하여 매립하는 방법이다. 과거의 준설매립공법은 부지 이용을 위한 매립층면 보다는 준설층면이 강조되어 댐등의 저수지나 수로의 수심유지등을 위하여 사용되어 왔다.

그러나 급속한 경제성장으로 인하여 공장용지 및 택지의 부족으로 해안매립사업이 활발하게 실시되어 왔으며, 최근에 이르러는 해안매립사업용 옥상토를 구하기가 어려운 실정에 이르러, 해면아래의 토사를 준설하여 해안매립재료로 사용하기에 이르렀다. 이러한 준설매립은 주로 사질토 지역 지반을 준설·매립하는것이 바람직하나 지역 여건을 고려하여 그 지역에서 경제적으로 취할수 있는 재료를 취하는 것이 통례이다.

본 연구의 대상지역인 여천지역은 준설매립에 의하여 공업단지를 조성할 계획으로 되어 있으나 준설가능한 지역의 지반토가 주로 점성토(불일분류법상 CL 혹은 CH)로 나타나고 있어 준설매립재료로서는 매우 불리한 조건이다. 점성토를 준설매립재료로 사용할 경우 흙입자의 침강소요시간이 길어지게되어 준설작업에 소요되는 시간이 길어지게 되며, 침강되어 형성된 지반 또한 매우 연약한 상태가 되어 지지력 및 침하등 공학적인 특성이 매우 불리한 지반이 형성된다.

이러한 준설토의 특성에 대한 연구는 매우 미약한 상태이나 준설토의 특성이 물도 아니고 흙도 아닌 중간상태로서 지반공학에서도, 수리공학에서도 다양한 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 주로 점성토가 주재료인 준설토의 침강특성 및 침하특성에 대하여 실험적으로 고찰하고자 하였다.

2. 이론

2.1 침강

준설되어 이송된 준설토사는 초기에 토립자+물의 혼합체이며 시간이 경과함에 따라 물속의 토립자가 침강되어 유년기의 지반을 형성한다. 이때 토립자의 침강속도는 토립자의 무게, 농도, 물의 점성저항, 물의 전해질 농도등에 좌우되며 일반적으로 식 (1), (2), (3)과 같이 Stokes 식, Allen 식, Newton 식 등에 의하여 산정된다.

$$\text{Stokes 식 } (R_0 < 0.5)$$

$$v_s = \frac{g}{18} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\mu} \cdot d^2 \quad (1)$$

Allen 식 (30 < R₀ < 500)

$$v_s = \left(\frac{g}{18} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\mu} \right)^{0.667} \cdot \nu^{-0.333} \cdot d \quad (2)$$

Newton 식 (500 < R₀ < 10000)

$$v_s = (3.3 \cdot g \cdot (S_s - 1) \cdot d)^{0.5} \quad (3)$$

여기서,

- R₀ = 레이놀드수 (입자의 지름x속도/동점성계수)
- v_s = 침강속도
- g = 중력 가속도
- ρ_s = 토립자의 밀도
- ρ = 물의 밀도
- μ = 물의 점성 계수
- d = 입자의 직경
- ν = 물의 동점성 계수 (μ/g)
- S_s = 토립자의 비중

식 (1), (2), (3) 은 모두 액체속에서 고체 입자가 침강할때의 속도를 나타내고 있으나 각각 적용되는 레이놀드수가 다르다. 레이놀드수는 작을수록 입자의 침강속도가 느린 상태를 나타내므로, 입자의 침강속도가 매우 느린 점성토의 침강속도를 산정하기 위하여는 식 (1)의 Stokes 법칙이 가장 타당한것으로 판단된다.

토립자의 침전시 입자는 서로 다른 입자와 반발하여 응집하지 않고 단독입자로 침강하는 경우와 입자간의 충돌로 입자들이 응집해서 침강하는 경우가 있으며, 후자의 경우를 간섭침강이라 부르며 이 경우 침강속도는 단독 침강시와 달라지게 된다. Stokes 법칙은 침강되는 입자가 완전한 구형이며, 입자간의 간섭을 무시하는등 몇가지 사항을 가정하고 있어, 모래입자의 침강속도 산정등에는 그 적용성이 양호하나 입자의 형상이 판상이며 입자간의 이온력에 의하여 입자의 운동에 간섭이 발생하는 점성토의 침강속도 산정에는 그 적용성이 문제 될수 있다.

본 연구에서 사용된 점토질 입자의 경우 토립자의 크기가 매우 작아 토립자의 중량은 작고 표면적은 커지는 상태가 된다. 이러한 상태에서는 토립자의 관성력은 작아지고 토립자가 표면의 전하에 의한 운동을 하게 되어 수중에서 입자의 운동은 중력방향으로 침강되는 특정한 방향성을 가지기 보다는 자유로 떠돌아다니는 Brown 운동에 가까운 운동을 한다고 보고되어 있다.⁵⁾

그러나 점토입자들은 Brown 운동에 가까운 운동을 함에도 불구하고 실제로 침강을 하게 되며, 그 이유는 입자의 운동중 점토입자들간의 응집이 발생하여 입자의 크기와 중량이 점점 커지는 간섭침강이 발생하기 때문이다 (직경 0.1 μ 의 입자의 경우 지름 10 mm의 구체내에 1×10^{15} 개의 입자가 포함되고 이때 입자의 총표면적은 31.4 m^2 이며, 응집이 발생치 않을 경우 30.5 cm를 침강하는데 약 230 일이 소요됨)⁵⁾. 입자의 크기가 커지면 전하에 의한 운동력보다 중력에 의한 관성력이 커지게 되어 입자가 중력방향으로 침강하게 된다. 이때 응집된 입자들은 구형이 아니므로(그림 1 참조), Stokes 법칙에 의한 침강속도와 실제 침강속도는 많은 차이가 발생하게 된다. Migniot(1968)¹⁹⁾, Chase(1979)⁸⁾는 실험적 연구를 통하여 점토질 흙 입자의 실제 침강속도는 Stokes 법칙에 의한 것보다 수십배에서 수천 배 큰 것으로 보고한 바 있다.

토립자의 침강에 영향을 미치는 요인으로서 토립자-물 용액의 화학적 특성이 또한 중요한 것으로 알려져 있다.¹¹⁾ 본 연구의 대상지역은 해안매립지역으로서 사용되는 용액은 해수이다. 해수는 비중이 담수보다 크므로 식 (1)에서 토립자의 침강을 지연시키는 작용을 함을 일수있다. 그러나 해수에는 Na^+ , Cl^- 를 비롯하여 Mg^{2+} 등의 각종 이온이 담수보다 다량 함유되어 있으며, 이러한 이온들은 점토질 입자의 전하와 응집하기도 하고 점토질 입자끼리의 응집을 촉진하기도 하는 것으로 알려져 있다.

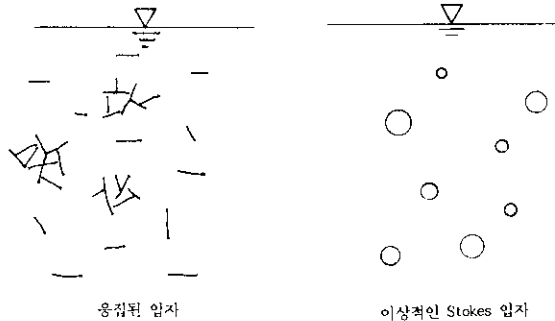


그림 1. 응집된 점토입자와 이상적인 Stokes 입자

해수속에서 점토질의 이러한 응집현상은 해수의 비중이 담수보다 클므로 인한 침강지연 효과를 초월하므로 해수속에서의 침강속도는 담수속에서의 침강속도보다 빠른것으로 나타난다. Hayter(1983)¹¹⁾는 Kaolinite의 침강시험을 함에 있어 소금의 농도가 높을수록 침강이 촉진되는 현상을 보고한바 있다. 또한 우리나라의 남서해안의 점토토에 대하여도 소금의 농도가 클수록 점토입자의 침강이 촉진된다는 연구 결과가 보고된바 있다³⁾.

준설매립은 준설 pump선의 능력이 허용하는 한 토립자의 농도를 진하게 하여 펌핑하는 것이 경제적이므로, 준설선의 토출구로부터 배출되는 토립자-물의 배합비는 약 1:6.5로서³⁰⁾ 토립자의 농도가 매우 높게 된다. 이렇게 입자의 농도가 매우 높은 경우에는 입자간의 충돌의 빈도가 보다 높아지게 되어 간섭침강이 지배적이 된다. 입자의 농도가 높을수록 간섭침강이 활발히 발생하게 되나, 입자의 농도가 더욱 높아지게 되면 입자간의 충돌로 인하여 입자의 운동이 지장을 받게 되고 입자간의 응집이 저해되게 되어 침강속도가 오히려 낮아지게 된다. 이러한 현상은 Kynch(1951)¹⁶⁾, McRoberts & Nixon(1976)¹⁷⁾ 등에 의해 연구된바 있다.

입자의 응집 및 용액의 성질에 좌우되는 이러한 현상은 Stokes 법칙의 적용성에 문제를 야기시키는 요인들이다. Stokes 법칙에 의하지 않고 토립자의 농도, 전하 및 형상을 고려하여 침강속도를 결정하는 방정식 혹은 이론은 여러사람에 의해 연구되었으나, 6), 7), 12), 13), 16), 17), 18), 24), 31) 점토질의 경우 그 구성 광물질에 따라 입자의 전하정도가 다르며 대부분의 점토는 여러가지 광물의 복합체이므로 침강속도를 일률적으로 결정하는 이론의 개발은 매우 어려운 실정이다. 따라서 특정지역 점토의 침강속도는 실험에 의하여 구하는 것이 합리적이라 판단된다.

2.2 압밀침하

일반적으로 토질공학에서 가장 널리 적용되는 압밀이론은 Terzaghi의 1 차원 압밀이론이며, Terzaghi의 압밀이론은 압밀에 의한 지반의 변형이 매우 작은 상태 즉 압밀과정중 지반의 간극비, 부수계수 등 제특성이 변하지 않는다고 하는 극소변형률 (infinitesimal strain) 개념의 압밀이론이다.^{1), 27), 28)} 그러나 점성질 준설토와 같이 초기 간극비가 매우크고 압밀과정중 침하가 심하게 발생하여 간극비, 압축비, 부수계수등이 실질적으로 변하는 경우 극소변형률 개념의 압밀이론보다는 압밀중 지반의 특성변화를 고려해주는 소 변형률 (small Strain) 개념의 압밀이론이 보다 타당할 수 있다.

소 변형률 개념의 압밀이론은 기존의 Terzaghi 압밀이론을 수정한 "단계적 소 변형률 접근법(Incremental small strain)"과 Terzaghi 압밀이론과 별개의 새로운 개념의 "소 변형률 접근법 (small strain or finite strain)"으로 대별된다. 단계적 소 변형률 개념은 압밀층을 여러층으로 나누어 지반의 비등질성을 고려하도록 하고, 압밀과정을 여러시간대로 나누어 어느 시간에서의 압밀침하 계산에서는 Terzaghi 압밀이론을 적용시키고 다음단계로 넘어갈 때에는 침하로 인하여 변경된 지반특성을 적용하는 방식으로 Olson & Ladd(1979)²²⁾, Yong, Siu & Sheeran(1983)³²⁾에 의하여 제안된 바 있다. 소 변형률 접근법은 압밀과정중의 지반특성변화가 방정식속에 포함되어 있는 형태로서, 간극비를 주요변수로서 사용하고 부수계수 혹은 유효응력등을 간극비에 따라 변화시키는 방법(간극비 모델)과 유효응력을 주요변수로서 사용하고 간극비는 유효응력에 따라 변화시키고, 부수계수는 간

극비에 따라 변화시키는 방법(유효응력 모델)이 있다.¹⁵⁾ 소 변형률 개념의 압밀이론은 여러 사람들에 의하여 제안되었으며 9), 10), 14), 20), 21), 23), 25) 단계적 소 변형률 개념에 비해 보다 논리적으로 평가되나 그 내용이 복잡하고, 특히 입력 정수를 결정하는 방법등이 토질공학에서 통상 사용하는 실험의 범위를 넘어서는 것이어서 (Slurry Consolidometer 를 사용해야 하는등 Sheeran & Krizek, 1971)²⁶⁾ 국내 실정상 실제적용이 매우 어려운 상태이다.^{12), 15)}

본 연구에서는 극소변형률 개념의 Terzaghi 압밀이론을 사용 하되, 압밀과정중 지반의 간극비, 부수계수 등 압밀특성의 변화를 어느 정도 반영할수 있도록 Terzaghi 압밀이론을 수정하여 측정자료를 해석 하였다. 즉 본 연구에서는 100% 압밀이 일어나는 과정을 여러 단계로 구분하고 각 단계내에서는 극소 변형률 개념으로 해석하고, 다음 단계로 넘어갈때는 변화된 간극비 및 부수계수등을 사용하는 단계적 소 변형률 접근법으로 압밀을 해석하였다.

본 방법은 침강과정중 퇴적도 자체의 무게에 의한 자중압밀을 계산할수도 있으나 이때에는 침강중의 압밀계수가 필요하며, 본 연구에서는 이에 필요한 자료가 없는 관계로 침강중의 자중압밀은 다루지 않고 침강완료후의 압밀침하만을 다루었다. 본 방법의 흐름도는 그림 2와 같다. 본 방법은 계산과정이 매우 복잡하나 전산 프로그램을 통하여 쉽게 수행될수 있었다.

3. 실험

- 실험장치

Stokes 법칙에 의하지 않고 입자의 침강속도를 산정하는 시험법은 우리나라 표준규정이 없어 본 연구에서는 시험기구를 그림 3과 같이 제작 사용하였다.

- 시료

본 연구에서 사용된 여천지방 준설 매립토는 이미 준설매립이 완료된지 약 2년이 경과된 용성단지 2 차 지역의 표면에서 인력 채취되었으며(교란시료), 전체 지역의 대표성을 위해 인력으로 접근가능한 전체지역에서 골고루 준설토의 덩어리가 채취되었다. 채취된 준설매립토는 실내에서 분쇄되어 해수와 섞어졌다. 본 지역의 매립토는 인근지역의 해저 지반을 준설하여 매립되었으며, 준설전 원지반(준설재료)의 특성은 인근지역의 조사 자료로부터 표 1과 같이 나타났다.

- 실험방법

본 연구에서의 침강시험은 다음과 같은 과정으로 수행되었다.

- ㉔. 현장채취 시료와 해수를 1:6.5 의 중량비로 잘 섞는다. 이때 시료의 덩어리가 발생치 않도록 충분히 잘 섞어야 한다.
- ㉕. 침강시험 수조에 시료+해수의 혼합체를 붓고 48 시간 이상 대

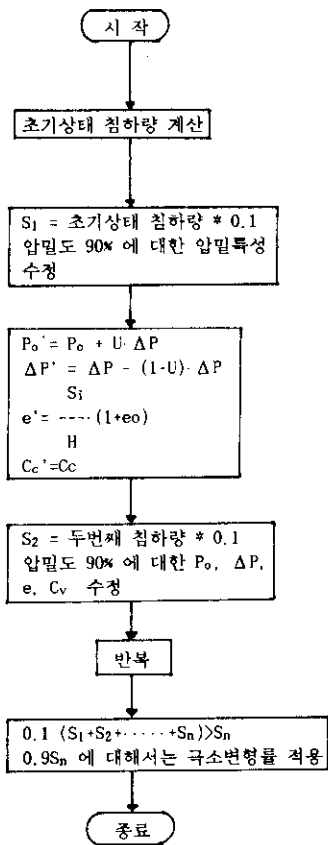


그림 2. 단계적 소 변형을 압밀론의 흐름도

표 1 준설전 원지반의 특성

구분	특성	비고
분류 (USCS)	CH	
점착력 (T/M ²)	1.0	
압축지수	1.3	
간극비	2.3	
함수비(%)	85.0	
액성한계(%)	60.0	
단위중량(T/M ³)	1.5	수면하부
투수계수 (M/S)	10x10 ⁻¹⁰	
압밀계수 (M ² /S)	5x10 ⁻⁸	
물:토립자 비율	6.5 : 1	Whitmann ¹⁴⁾ (1971)
입도분포	그림 4 참조	

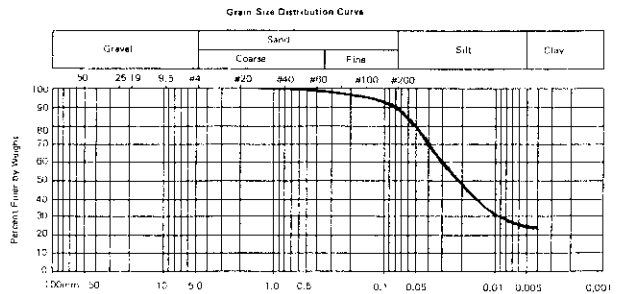


그림 4. 실내제조 준설매립 시료의 입도특성

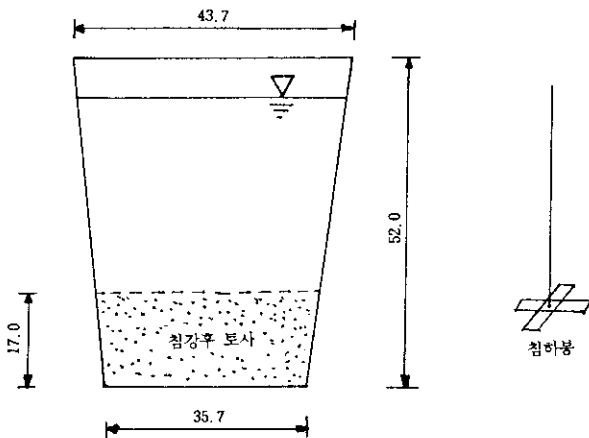


그림 3. 침강시험 구조

기하여 시료내부의 덩어리가 완전히 으깨어 지도록 한다.

- ㉓. 교반봉 (직경 2.5 CM, 길이 약 1.2 M의 PVC 봉)을 사용하여 시료+해수 혼합체를 5 분간 교반하고 교반완료후 시간을 0 으로 Setting 한다.
- ㉔. 교반후 30 분, 1 시간, 2 시간, 4 시간, 8 시간, 16 시간 간격으로 인식표를 낙하시킨다. (인식표는 얇은 아연판 (fastner)을 십자로 묶어서 사용하였음.)
- ㉕. ㉔의 과정을 침강이 완료될때까지 계속한다.
- ㉖. 침강이 완료되면 실내 Vane 시험을 수행한다.
- ㉗. 48 시간동안 방치하여 침강토를 안정시킨다.
- ㉘. 침강토 상부의 맑은물을 Hose를 사용하여 제거한다.
- ㉙. 침강토 상부에 Geotextile을 설치한다.
- ㉚. Geotextile 위에 침하봉을 설치한다. (본 연구에서는 철사를 이용한 자체 제작 침하봉을 사용하였음. 그림 3 참조)
- ㉛. 침강시험용 용에 침하측정용 기준점을 설치한다.
- ㉜. 마른 모래를 Geotextile 위에 조심스럽게 살포한다. (1 차두께 5.0 cm)
- ㉝. 모래 살포가 끝난 직후부터 압밀시험시 수행하는 시간계획에 맞추어 침하봉의 침하상태를 측정한다.
- ㉞. 1 차 2설 모래하중에 대하여 압밀이 완료되었다고 판단되는 시점에서 2 차 모래포설(5.0 cm)을 실시한다.
- ㉟. ㉞의 과정을 반복한다.
- ㊱. 2 차 모래포설에 대한 압밀 완료후 모래 및 Geotextile 을 제거하고 실내 Vane 시험을 실시한다.
- ㊲. 나타난 시료의 일부분을 채취하여 함수비, 간극비를 측정한다.
- ㊳. 시료를 조심스럽게 건어내며 ㉔의 과정에서 낙하시킨 인식표를 찾고, 표면으로부터 인식표의 깊이를 측정하고, 인식표 사이의 시료를 채취하여 입도분석을 실시한다.
- ㊴. 시험을 종료한다.

상기시험은 1991년 11월 24일에 시작되어 1992년 7월 6일까지 약 7개월간에 걸쳐 수행되었다.

4. 실험결과

- 침강속도

실험결과 입자의 침강속도는 그 크기에 따라 그림 5와 같이 나타났다.

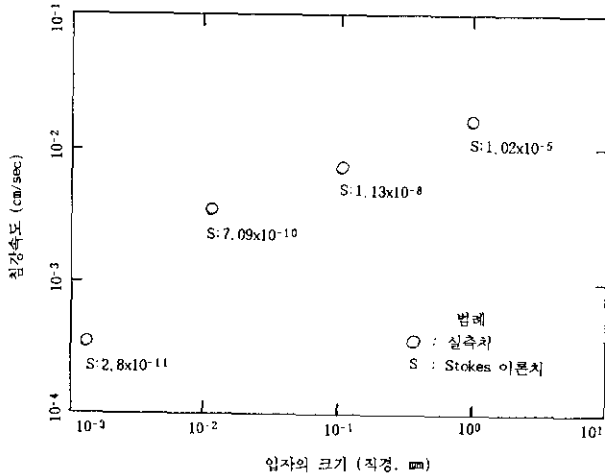


그림 5. 입자의 크기와 침강속도 (입자의 크기는 SEM을 이용하여 측정됨)

상기 그림은 실험방법 ④ - ⑥, ⑦의 과정에서 측정된 결과로부터 얻어졌으며, 입자의 크기가 침강속도에 거의 영향을 미치지 않음을 나타낸다. 즉 본 시료의 침강특성은 Stokes 법칙보다는 입자의 응집에 의한 침하에 지배된다는 것을 나타낸다.

- 물리적 특성

실험결과 시료의 물리적 특성은 표 2와 같은 것으로 나타났다. (실험방법 ⑥에 의해 측정됨)

표 2. 준설패립토의 물리적 특성

구분	특성	비고
함수비 A	322 %	침강직후
함수비 B	135 %	압밀후
간극비 A	8.7	침강직후
간극비 B	3.7	압밀후

*함수비 측정은 전자오븐을 사용하여 수행됨. (김운영)²⁾

표 2는 침강직후 시료의 함수비 및 간극비가 일반적인 토사에서는 상상하지 못할 정도의 매우 큰 상태임을 나타내며, 압밀을 거쳐 정상적 토사와 유사한 상태로 되어감을 알 수 있다. 침강직후 지반의 간극비는 8.7로서 Monte & Krizek(1984)²¹⁾이 Kaolinite의 경우 침강직후의 간극비 = 7x액성한계에서의 간극비 = 7x1.62 = 11.34라고 보고한 값과 유사한 정도를 나타낸다.

준설패립토 시료의 함수비는 액성한계보다 약 5배나 되며 이 수

치는 Verhoeven et al. (1987)²⁹⁾이 액성한계의 2-3 배라고 보고한 값 및 Monte & Krizek (1976)²¹⁾이 액성한계의 약 4-5 배라고 한 값과 유사한 값으로 나타났다 (Monte & Krizek(1979)²¹⁾은 이 함수비를 유체한계(Fluid Limit)라 불렀다.

- 강도특성

시료의 강도특성은 침강직후 및 압밀완료후 실내 Vane 을 이용하여 수행되었다. 이중 침강직후는 그 강도가 너무 약하여 ($C=0.005 T/M^2$ 로 추정, 김재중 (1991)⁴⁾) Vane 으로서 측정할 수 있는 한계 이하이며, Vane 에 의한 강도측정은 불가능하였다. 압밀완료후 수행된 Vane 시험은 시료의 점착력이 0.1 T/M^2 임을 나타내어, 준설퇴원지반보다 현저히 작은 상태 (원지반의 점착력 1 T/M^2) 임을 나타내었다. 이러한 현상은 본 실험에서 압밀 완료후 지반의 간극비는 3.7로서 준설퇴원지반의 간극비 2.3 보다 큰 상태로 아직 매우 느슨한 상태인 때문인 것으로 판단된다.

- 압밀특성

준설패립토는 자중압밀을 겪게되므로 자중압밀이 완료된 뒤의 부 압밀하중이 가해져야 하나, 본 고에서는 침강완료 48 시간후에 압밀하중이 가해진 순간부터 취하였다(자중압밀이 완료된 것으로 가정).

그림 6은 실험과정 ⑥ - ⑦에 의한 측정결과를 나타내고 있다. 그림 6-(a)의 측정결과는 1 단계 하중(실험과정 ①)에 대하여 전술한 바와 같은 Terzaghi 압밀이론을 변형한 단계적 소 변형률 법에 의하여 해석되었으며 그 결과 측정치와 이론치는 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 6-(a)의 압축지수 $C_c=3.0$ 으로서 원지반의 압축지수 $C_c=1.3$ 보다 현저히 크게 나타나며, 압밀계수 $C_v=2.6 \times 10^{-6} m^2/sec$ 으로서 원지반의 압밀계수 $C_v=6.8 \times 10^{-7} m^2/sec$ (현장토의 구속압력을 고려하면 표 1과 같이 $C_v=5 \times 10^{-8} m^2/sec$ 이나 실험시 사용된 침강토는 두께가 얇고 성토하중이 작아(유효수직 응력 $=0.104 T/m^2$) 압밀시험에 의한 최대 압밀계수를 비교함) 보다 현저히 크게 나타나는 현상을 보여 주어 침강토의 초기 압밀은 원지반의 압밀특성을 이용하여서는 정확히 예측하기가 곤란함을 알 수 있다. 그림 6-(a)에서 $C_c=3.0$ 으로 산정된 것은 본 고에서 사용된 단계적 소 변형률 방법에서 압축지수 C_c 를 상수로 사용하였기 때문으로 판단된다. 즉 압축지수 C_c 는 실질적으로는 유효구속압력에 따라 변화할 것으로 판단되나, 그러한 현상을 정확히 할 수 있는 근거가 없어 상수로 입력하였다. 따라서 C_c 를 상수로 사용하지 아니하고, 유효구속압력에 따라 변화하는 변수로 사용할 경우 현장시료와 비슷한 유효구속압력에서는 비슷한 크기의 압축지수가 산정될 수 있을 것으로 판단된다.

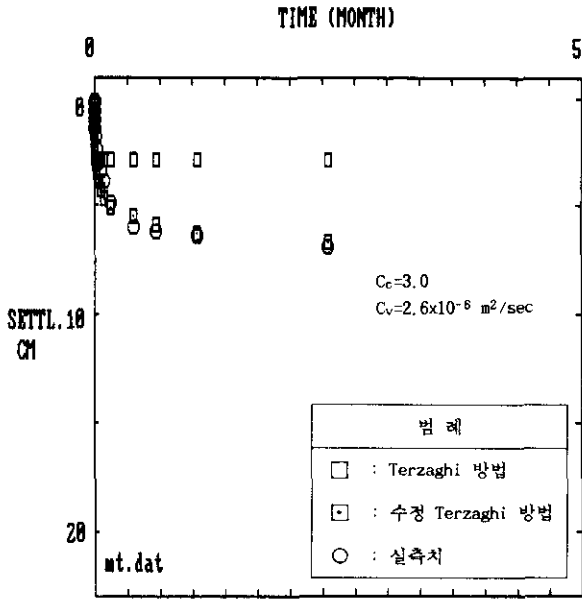
그림 6-(b)에는 1 단계 하중에 대하여 Terzaghi의 원래방법에 의한 이론치와 실측치를 나타내고 있으나 실측치를 Fitting 하기 위한 압축지수(C_c) 및 압밀계수(C_v) 값이 $C_c=7, C_v=2.3 \times 10^{-8} m^2/sec$ 으로서 압축지수가 실질적으로 거의 불가능한 범위인 것으로 판단된다. 그림 6-(a) 및 그림 6-(b)는 침하의 절대량이 커서 압밀과정중 실질적인 특성변화가 발생한 경우 극소변형률 접근법은 그 적용성에 부리가 있으며, 단계적 소 변형률법이 타당한 것을 나타낸다.

그림 6-(c)는 2 단계하중 (실험과정 ⑥)에 대하여 실측치하중과 단계적 소 변형률법 및 극소 변형률법에 의한 침하량을 비교하고 있다. 그 결과 그림 6-(c)는 3 경우 거의 비슷한 침하양상을 나타내고 있어 단계적 소 변형률법 및 극소 변형률법 사이에 큰 차이가 없음을 나타낸다. 이 현상은 압밀층 두께에 비교하여 침하의 절대량이 작아 극소변형률 개념이 성립되기 때문인 것을 판단된다.

6. 결론

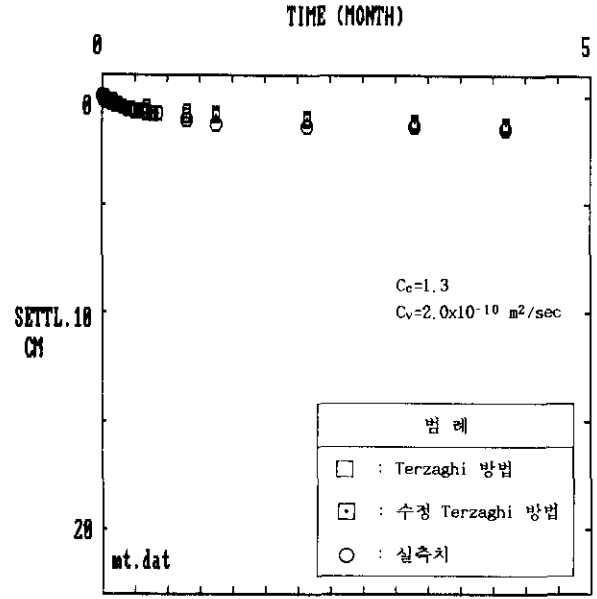
여천지역 준설패립토에 대하여 1991년 11월 24일부터 1992년 7월 6일에 걸친 침강 및 압밀시험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- ①. 점토입자의 침강속도는 Stokes 법칙에 의한 것보다 훨씬 빠르다.
- ②. ①과 같은 결과는 점성토끼리의 응집현상에 기인한다.
- ③. 침강직후 준설패립토는 함수비 322%, 간극비 8.7로서 일반적인 지반상태와는 매우 거리가 먼 유년기 지반의 상태를 나타낸다.
- ④. 침강직후 준설패립토는 거의 강도를 가지지 못하며(통상적 방법으로 측정불가) 압밀후(유효 수직응력 $=0.104 T/M^2$)의 강도는 0.1 T/M^2 를 가지는 것으로 나타났다.
- ⑤. 준설퇴원의 압밀은 비교적 심한 침하를 수반하므로 극소변형률 개념에 입각한 Terzaghi 압밀이론 보다는 이를 수정한 단계적 소 변형률법이 측정치와 보다 좋은 일치를 보여주었다.



PREDICTED SETTLEMENT BY M-TERZAGHI METHOD

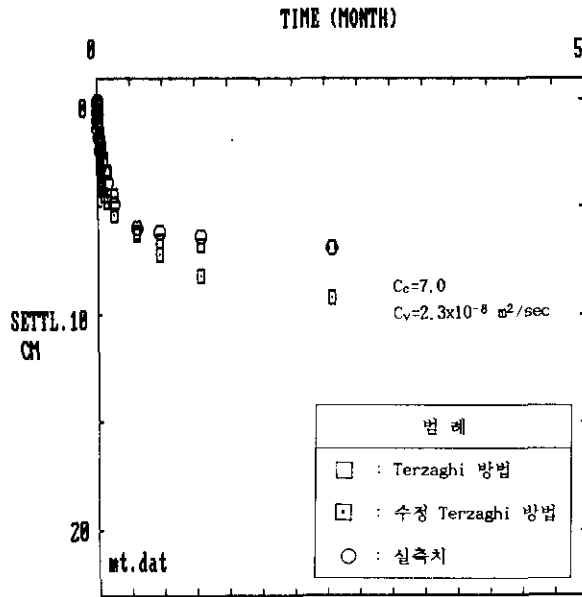
(a) 1 단계 하중 재하 (수정 Terzaghi 방법으로 Fitting)



PREDICTED SETTLEMENT BY M-TERZAGHI METHOD

(c) 2 단계 하중 재하

그림 6. 침하량 측정치 및 이론치



PREDICTED SETTLEMENT BY M-TERZAGHI METHOD

(b) 1 단계 하중 재하 (Terzaghi 방법으로 Fitting)

⑥. 압밀이 어느정도 진행되어 간극비가 3.7 정도가 되었을때(본 연구의 경우) 미소변형률 개념의 Terzaghi 압밀이론 또한 실측치와 심하지 않은 오차를 나타내는 것으로 나타났다.

본 연구는 준설토의 침하는 통상적으로 예상되는 값보다 현저히 빠르며, 이는 논리적으로도 타당하다는 것을 보여 주었다. 따라서 일반적으로 산정되는 준설토의 침강 대기시간중에는 재고의 여지가 있으며, 준설택업 소요시간을 단축시켜 경제성을 높일수 있음을 보여주었다. 또한 극소 변형률 개념의 Terzaghi 압밀이론을 변형한 단계적 소 변형률 압밀 개념으로서 준설토의 압밀침하를 해석하여 실측치와 이론치가 비교적 양호하게 접근하는 결과를 얻었다. 그러나 보다 양호한 결과를 위하여서는 유효응력과 압축지수의 관계에 대한 연구도 선행되어야 할 것이다. 그러나 늘어나는 준설패입지역의 논리적인 압밀 침하를 본격적으로 해석하기 위하여는 소 변형률 압밀이론에 대한 보다 광범위한 연구가 필요하며 이를 위해서는 Slurry Consolidometer, 투수계수-유효응력-간극비 관계시험자료가 필수적이며 이들 새로운 토질 시험에 대한 표준 시험법 제정등이 바람직한 것으로 판단된다.

7. 참고문헌

1. 김수삼 (1987), "반월지역 해성토의 침강특성에 관한 실험적 연구," 대한토질공학회지, 제 3 권, 제 3 호, 9월, pp.49-61
2. 김운영(1992), "
3. 김자겸·이종섭 (1991), "실트질 점토의 침강특성에 관한 연구," 대한토질공학회 논문집 제 11 권 제 3 호, pp.85-93
4. 김재중 (1989), "점성토의 침식 및 퇴적에 관한 연구," 서울대학교 토목공학과 박사학위 논문, pp.32-54
5. 박중현 (1982), 환경위생공학, 동명사, pp.69-73

6. 정인준·유건선(1979), "준설토의 기본적 실험연구," 대한토목학회지, 제 7 권, 제 5 호, 10 월, pp.55-64

7. 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

8. Chase, R.R.P. (1979), "Settling Behavior of Natural Aquatic Particulates," *Limnology and Oceanography*, Vol. 24, No.3, pp.417-426

9. Gibson, R.E. (1958), "The Progress of Consolidation in a Clay Layer Increasing in Thickness with Time," *Geotechnique*, Vol. No. pp. 171-182

10. Gibson, R.E., Schiffman, R.L. and Cargill, K.W. (1981), "The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays. II. Finite Nonlinear Consolidation of Thick Homogeneous Layers," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.18, pp.280-293

11. Hayter, E.J. (1983), "Prediction of Cohesive Sediment Movement in Estuarial Waters", Ph. D. Thesis, University of Florida, Gainesville, Florida

12. Imai, G. (1980), "Settling behavior of clay suspension," *Soils and Foundations*, JSSMFE, Vol.20, No.2, pp.

13. Imai, G. (1981), "Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials," *Soils and Foundations*, Vol.21, No.1, pp.7-20

14. Koppula, S.D. and Morgenstern, N.R. (1982), "On the Consolidation of Sedimenting Clays," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.19, pp.260-268

15. Krizek, R.J. and Somogyi, F. (1984), "Perspectives on Modelling Consolidation of Dredged Material," *Proceedings of a Symposium Sponsored by ASCE Geotechnical Division in Conjunction with ASCE convention in San Francisco, California, Oct. 1, pp.296-332*

16. Kynch, C.J. (1951), "A theory of sedimentation," *Trans. Faraday Soc.* 48, pp.166-177 (after 김수삼, 1987)

17. McRoberts, E.C. and Nixon, J.F. (1976), "A theory of soil sedimentation," *Can. Geotech. J.*, Vol.13, pp.294-310

18. Michaels, A.S. and Bolger, J.C. (1962), "Settling rates and sediment volumes of flocculated kaolin suspensions," *I and EC Fundamentals*, Vol.1, No.1, pp.24-33

19. Migniot, C. (1968), "A Study of the Physical Properties of Different Very Fine Sediments and Their Behavior under Hydrodynamic Action (in French and English Abstract)", *La Houille Blanche*, Vol.7, pp.591-620

20. Mikasa, M and Takada, N. (1984), "Selfweight Consolidation of Very Soft Clay by Centrifuge," *Proceedings of a Symposium Sponsored by ASCE Geotechnical Engineering Division in Conjunction with ASCE Convention in San Francisco, California, Oct.1, pp. 121-140*

21. Monte, J.U. and Krizek, R.J. (1976), "One-Dimensional Mathematical Model for Large-Strain Consolidation," *Geotechnique*, Vol.26, No.3, pp.495-510

22. Olson, R.E. and Ladd, C.C. (1979), "One-Dimensional Consolidation Problems," *J. of GE, ASCE*, Vol.105, No.GT1, pp.11-30

23. Pane, V. and Schiffman, R.L. (1985), "A note on sedimentation and consolidation," *Geotechnique*, Vol. XXXV, No. 1, pp. 69-72

24. Richardson, J.F. and Zaki, W.N. (1954), "Sedimentation and

fluidisation : part 1," *Trans. INSTN, CHEM. ENGRS.*, Vol.32, pp.32-53

25. Schiffman, R.L. (1980), "Finite and Infinitesimal Strain Consolidation," *J. of GT, ASCE*, Vol.106, No. GT2, pp.203-207

26. Sheeran, D.E. and Krizek, R.J. (1971), "Preparation of Homogeneous Soil Samples by Slurry Consolidation," *J. of Materials, ASTM*, Vol.6, No.2, pp.356-373

27. Somogyi, F. (1979), "Analysis and Prediction of Phosphatic Clay Consolidation : Implementation Package, Technical Report, Florida Phosphatic Clay Research Project, Lakeland, Florida

28. Terzaghi, K. (1956), "Theoretical Soil Mechanics," *Chapman and Hall*, pp. 265-296

29. Verhoeven, F.A., De Jong, A.J. & Lugking, P (1988), "The Essence of Soil Properties in Today's Dredging Technology," *Hydraulic Fill Structures*, edited by Van Zyl, D.J.A. & Steven G. Vick, *Geotechnical Special Publication No.21, ASCE*, pp. 1033-1027

30. Whitman, R.V. (1970), "Hydraulic Fills to Support Structural Loads," *J. of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE*, Vol.96, No.SM1, pp. 23-47

31. Work, L.T. and Kohler, A.S. (1940), "Sedimentation of suspensions," *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.32, No.10, pp.1329-1334 (after 김수삼, 1987)

32. Yong, R.N., Siu, S.K.H. and Sheeran, D.E. (1983), "On the stability and settling of suspended solids in settling ponds, Part I. Piece-wise Linear Consolidation Analysis of Sediment Layer," *Canadian Geotech. J.* Vol.20, pp.817-826