

울촌지역 준설매립토의 침강·압밀특성에 관한 연구

A Study on Sedimentation & Consolidation Properties of Dredged Soil in Yulchon Industrial Complex

지성현⁽¹⁾, Sung-Hyun Jee, 이승원⁽²⁾, Seung-Won Lee, 이영남⁽³⁾, Young-Nam Lee

⁽¹⁾ 현대건설 기술연구소 연구원, Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology

⁽²⁾ 현대건설 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology

⁽³⁾ 현대건설 기술연구소 수석연구원, Senior Researcher in Chief, Hyundai Institute of Construction Technology

SYNOPSIS :

The purpose of this paper is to evaluate the characteristics of sedimentation and self-weight consolidation of extremely soft clay and is to find the way of applying model test result of reconstructing the in-situ condition to practical design. So, several lab. cylinder tests and in-situ model tank tests were carried out as changing drainage condition. And we analyzed the test results, and compared those with calculated results by numerical analysis based on finite strain consolidation theory. And we verified drainage and desiccation effect of trench on surface of dredged material.

주요어 : 준설매립, 침강, 자중압밀, 실내실린더시험, 모형토조시험, 트렌치공법

1. 서론

근래 한정된 국토의 효율적인 이용을 위해 공단부지, 주택단지, 위락단지 조성을 위한 대규모의 해안매립공사가 활발히 계획, 진행되고 있다. 해안매립공사는 주로 토취장을 개발하여 육상토를 이용하거나, 인근 해안의 사질토를 준설하여 매립하는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구 대상지역인 전라남도 울촌은 지역여건상 육상토 및 해안 사질토의 충분한 공급이 불가능하여, 함수비가 수 백 %에 달하는 해성점토를 준설매립하여 약 260만평의 면적에 달하는 공단부지를 조성하고 있다. 울촌지역의 준설토에 대해 실내 실린더시험 및 현장 모형토조시험을 실시하여 침강·압밀특성을 파악하였으며, 이들 시험결과에 근거해서 준설성토지반의 표층을 신속히 고화처리할 수 있는 신공법(Progressive Trenching 방법)을 도입한 기본개념 설계를 완료하였다.

본 연구에서는 실내에서 실린더를 이용한 침강시험을 여러 조건에서 실시하여 준설토의 기본성질을 구한 후, 현장에서 모형토조시험을 실시하여 배수조건과 시간에 따른 침하량 및 깊이별 함수비·간극수압의 변화를 구하였으며, 실린더시험과 모형토조시험, 그리고 유한변형을 압밀이론식에 근거한 수치해석 결과를 상호 비교함으로써 준설토의 침강·압밀특성을 분석하였다. 또한 토조의 상부표면에 모형 트렌치를 성형하고 함수비 및 전단강도의 변화를 측정하여 수평배수효과를 검증하였다.

2. 자중압밀 이론

고전적인 압밀해석 이론인 Terzaghi의 이론에서는 투수계수나 압밀계수를 상수로 하고 하중의 증가에 따른 체적의 변화를 일정하다고 가정하고 있다. 그런데 압밀변형이 큰 초연약 점토에서는 투수계수나 압밀계수, 체적변화계수 등이 간극비나 응력상태에 따라 비선형적인 관계를 보이므로 이들 관계를 Terzaghi의 이론식에 그대로 적용할 수

는 없다. 따라서 이런 Terzaghi 압밀이론의 모순을 수정, 보완한 것이 Mikasa(1963)와 Gibson(1967)의 유한변형을 압밀이론(Finite Strain Consolidation Theory)인데, 본 논문에서는 실내 시험 및 현장 토조 시험 결과를 Gibson의 압밀이론을 이용하여 검증하였다. Gibson, England, Hussey(1967)가 개발한 유한변형 압밀이론에 근거한 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{1+e} \right] \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \frac{de}{dz} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

여기서, γ_s : 흙의 단위중량, γ_w : 물의 단위중량, e : 간극비, σ' : 유효응력,
 $k(e)$: 간극비의 함수로 표현된 흙의 투수계수, z : 수직좌표, t : 시간

이 방정식은 준설패류재와 같이 매우 연약하고 균질한 흙의 압밀 거동을 예측하는데 매우 중요한 변수가 되는 다 음의 네 가지 요소를 모두 고려하고 있다.

1) 자중압밀 2) 간극비에 따른 투수계수의 변화 3) 간극비와 유효응력간의 비선형 관계 4) 대변형(large strain) 조건
 본 논문에서는 식 (1)의 지배방정식의 해를 양해 유한차분법(explicit finite difference method)으로 구하는 수치해 석 프로그램인 PCDDF(미공병단에서 1989년 개발)를 이용하여 실험결과와 비교하였다. PCDDF에서는 실험을 통해 구한 간극비-유효응력, 그리고 간극비-투수계수 관계를 이용하여 압밀층의 시간에 따른 간극비의 변화를 구하고, 그에 따른 유효응력 및 간극수압의 분포를 구하게 된다.

3. 실내 시험

현장에서 이루어질 대형 토조모델시험의 선행 작업으로 기본물성시험을 통하여 시료의 특성을 파악한 후, 아크릴 실린더를 이용한 침강·압밀 시험을 실시하여 침강속도 및 압밀특성을 파악하였다. 그리고 실린더에 시료를 재성형 하여 여러 함수비에 대한 실내 배인시험을 실시하여 함수비 변화에 따른 전단강도의 변화 양상을 분석하였다.

3.1 사용된 시료의 기본 물성 시험 결과

본 연구에 사용된 시료는 실제 준설이 이루어질 지역중 4곳에서 채취한 해성점토를 혼합하여 만든 것으로, 그 기본적인 물성치와 입도분포는 표 1, 그림 1과 같다.

표 1. 기본 물성 시험 결과

자연함수비	비 중	액성한계	소성한계	#200제 통과량	흙의 분류
96.71 %	2.63	68.60 %	35.93 %	88 %	CH

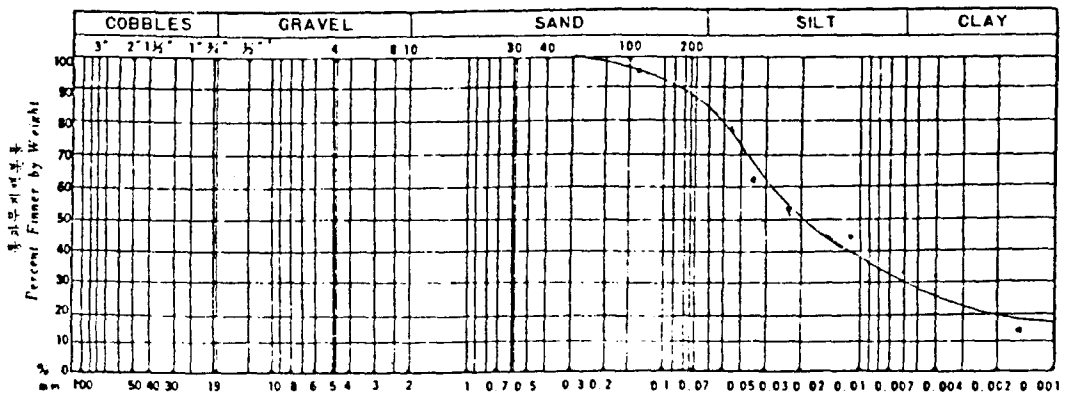


그림 1. 시료의 입도분포

3.2 침강 시험

본 연구에서는 배수조건과 시료의 농도에 따른 침강 특성을 규명하기 위한 시험을 수행하였다.

3.2.1 배수조건에 따른 침강시험

시료의 함수비를 준설토기 상태인 1000 %로 맞추어 침강시험을 수행하였으며, 하부 배수조건 및 비배수 조건에 대한 침강 속도를 측정하였다. 그림 2는 26일까지 측정된 결과를 나타낸 것인데, 실린더 하부 배수의 경우가 비배수 의 경우보다 30 % 가량 침하량이 크게 나타나 배수조건에 따른 효과가 우수하다고 판단되었다.

3.2.2 시료 농도에 따른 침강시험

시료의 농도를 각각 50, 75, 100, 125, 150, 175 g/l (함수비로 나타내면, 2000 %, 1333 %, 1000 %, 800 %, 667 %, 571 %)로 혼합하여 침강이 종료될 때까지 시간별로 침강량을 측정하여, 준설토의 농도에 따른 침강속도를 구하였다. 여기서 시료의 농도는 식 (2)와 같이 구하였다.

$$\text{시료의 농도} = \frac{\text{건조시료의 중량 (g)}}{\text{해수의 부피 (1000 ml)}} \quad (2)$$

각 시료의 농도별 침강곡선과 침강속도는 그림 3, 표 2와 같은데, 시료의 농도가 커질수록 침강속도는 감소함을 알 수 있다. 이는 시료의 농도가 커질수록 입자간의 간섭에 의한 영향이 커지기 때문이다.

표 2. 농도별 침강속도

농도(g/l)	50	75	100	125	150	175
속도(cm/h)	29.23	17.39	12.40	9.25	6.29	3.89

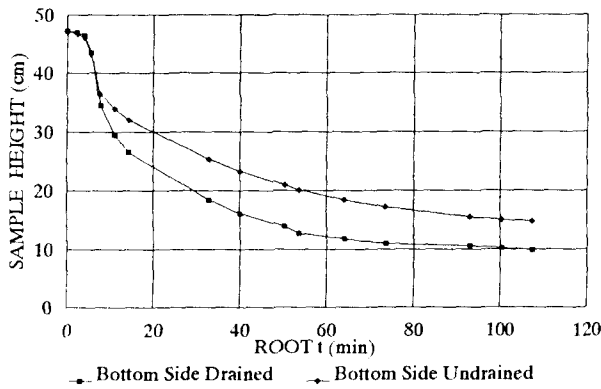


그림 2. 배수조건에 따른 침강·압밀 곡선

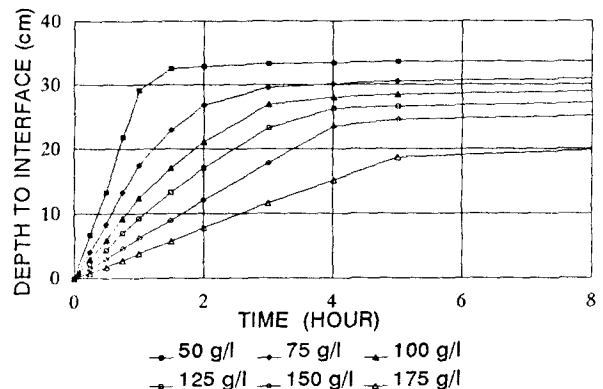


그림 3. 시료의 농도에 따른 침강곡선

3.3 배인 시험

본 연구에서는 함수비의 변화에 따른 강도 변화 특성을 파악하기 위하여 함수비 1000 %인 시료를 10개의 실린더 에서 침강시킨 후, 침강이 완료된 시료를 상온에서 건조시켜가며 1주일에 1개의 시료씩 실내 배인시험기로 전단시험을 수행하였다. 이 시험 결과는 그림5와 같은데, 함수비가 150 % 이상에서는 전단력이 측정되지 않았고, 액성한 계인 68 % 부근에서 전단강도가 급격히 증가함을 알 수 있었다.

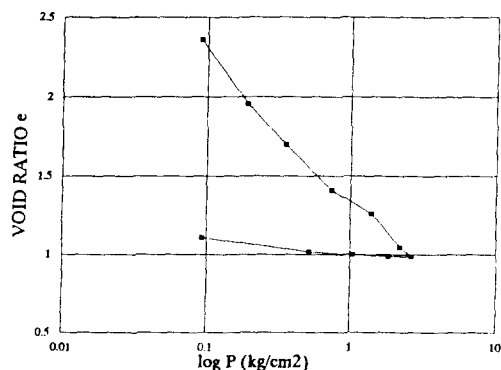


그림 4 e-log P 곡선

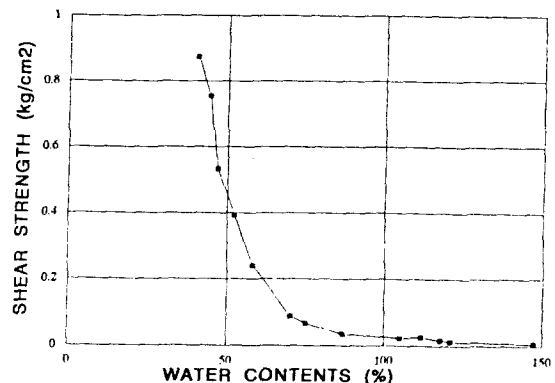


그림 5 함수비에 따른 전단강도

4. 현장 토조 시험

4.1 시험 개요

본 연구에서는 실제 준설매립시의 상황을 모델링하기 위하여 현장에 대형 토조를 설치하여 2차에 걸친 현장 토조 시험을 수행하였으며, 이 시험 결과로부터 준설매립후의 흙입자의 이동, 시간에 따른 침강·압밀특성을 보다 정확히 파악하고, 실내 실린더 시험결과와 비교하여 Scale에 대한 영향을 알아보았다. 현장 토조시험에 사용된 시료는 실내 시험과 동일한 시료를 사용하였고, 토조 높이의 제약상 1차 토조시험에서는 준설시작부터 투기 완료시까지의 상황을, 2차 토조시험에서는 투기완료 이후의 상황을 재현하여 시험하였다.

4.2 시험 장비

본 현장토조 시험에 사용된 시험 장비와 그 제원은 표 3과 같으며, 토조의 구조도는 그림 6과 같다.

표 3. 토조 시험장비 및 제원

구 분	제 원	수 량	비 고
대형 토조	가로 1.1m × 세로 1.1m × 높이 1.5m	3	
간극수압계	0 ~ 100 Kpa	4	RST사 제작
마노메타	수두측정 높이 100 cm	24	
베인시험기	0 ~ 26 t/m ²	1	Geonor사 제작

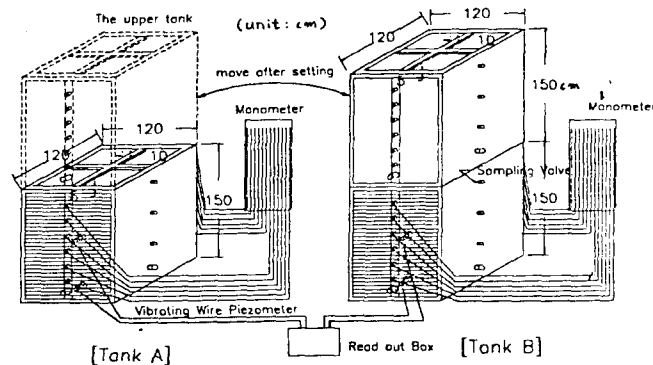


그림 6 대형 토조 구조도

4.3 1차 토조시험

4.3.1 시험 방법

(1) 토조 setting

해수 혼합 함수비를 500 %로 맞춘 시료를 토조에 채워 넣은 후 토조 A에서는 하부배수 조건으로, 토조 B에서는 하부비배수 조건으로 침강시켰으며, 시료가 침강됨에 따라 발생하는 상부의 해수는 계속해서 뽑아내며 자연건조시켰다.

(2) 측정 일정

침강 및 압밀량은 30분, 1시간, 4시간, 1일, 2일, 4일, 8일, 그리고 그 이후부터는 8일 간격으로 측정하였으며, 간극수압은 시료 침강 1일 후 부터 1일 1회씩 측정하였다. 그리고 깊이에 따른 시료의 입도분석과 함수비는 1일, 3일, 7일, 15일, 그 이후에는 10일 간격으로 측정하였다.

4.3.2 시험 결과 분석

(1) 침강 및 압밀 거동 분석

1차 토조 시험으로 얻어낸 시료의 침강 및 압밀 거동은 그림 7과 같은데, 실내 실린더 시험 결과와 비교하기

위해서 실린더 실험 결과도 같이 도시하였다. 자중 압밀은 침강 시작 2일 후부터 시작되었으며, 60일 경과 후의 전체 침강 및 압밀량은 초기 시료 높이의 약 70 % 정도였다. 또한 10일 경과 후부터 하부배수조건과 비배수조건간의 압밀량의 차이가 측정되었으며, 시험종료까지 그 차이가 15 % 정도로 실내 실린더시험 보다 작게 나타났다.

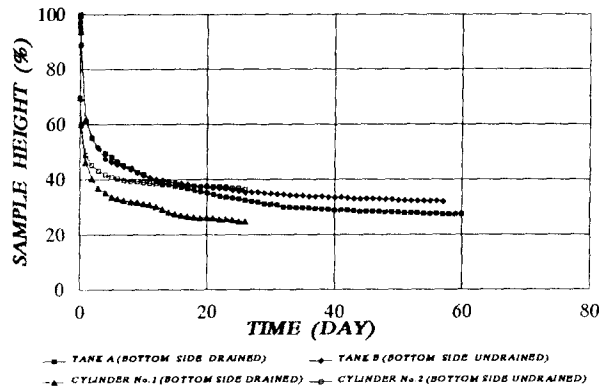


그림 7 실린더시험과 토조시험 침강·압밀량 비교

(2) 함수비 변화 분석

침강시작후 30일까지는 깊이별 함수비의 변화가 토조 A, B 모두 비슷한 경향을 보였으나, 75일 경과시에는 하부의 함수비가 배수조건시 80 %, 비배수조건시 160 %로 2배의 차이가 나타났다. 이때의 평균함수비는 배수조건에서 105 %, 비배수조건에서 155 %로 배수조건이 비배수조건에 비하여 약 50 % 정도 함수비가 낮았다.

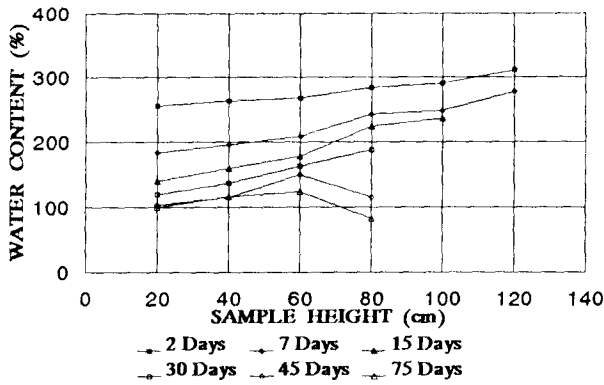


그림 8 토조 A의 깊이별 함수비의 변화

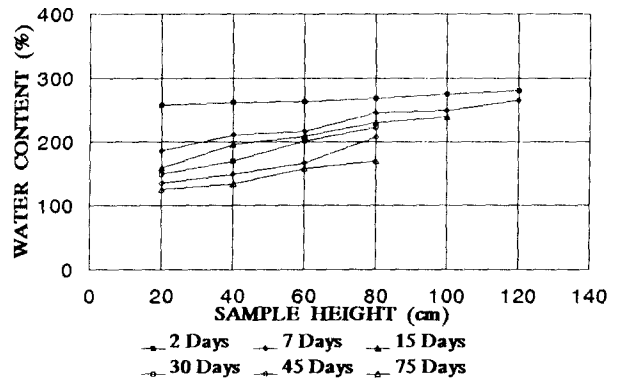


그림 9 토조 B의 깊이별 함수비의 변화

(3) 간극수압 변화 분석

토조 A(배수조건)의 경우, 하부의 과잉간극수압이 초기에는 3 Kpa에서 60일 경과후에 -2.5 Kpa로 낮아졌는데, 이 원인은 하부밸브로 물이 계속 빠져나가 음(-)의 간극수압이 측정된 것으로 판단된다. 토조 B(비배수조건)의 경우, 하부의 과잉간극수압이 2 Kpa에서 0.5 Kpa로 낮아졌는데, 압밀기간에 따라 일정한 속도로 감소하였다.

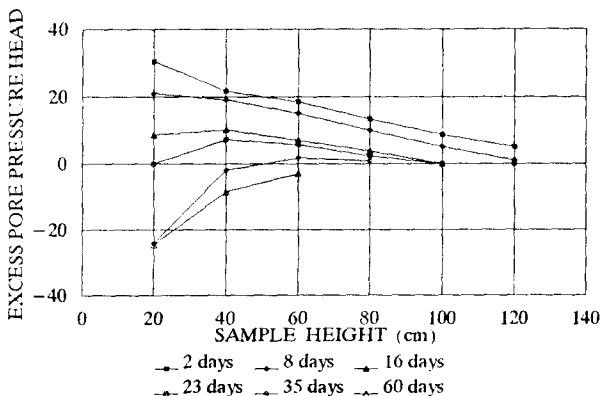


그림 10 시간에 따른 과잉간극수압의 변화(토조 A)

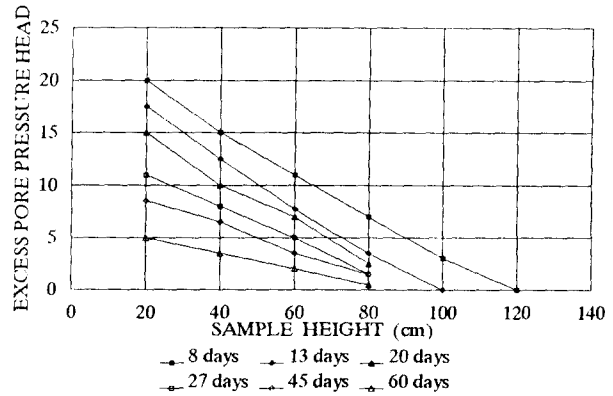


그림 11 시간에 따른 과잉간극수압의 변화(토조 B)

4.4 2차 토조시험

4.4.1 시험 방법

(1) 토조 setting

2차 토조 시험에서는 준설 투기가 완료된 상태에서의 자중압밀 거동을 관측하기 위하여 함수비를 180 %로 맞추어 비배수조건에서 시험하였다. 또한 표층 트렌치에 의한 배수 및 건조 효과를 알아보기 위해서 토조 setting 후 80일 경과 후에 토조 중앙에 모형 트렌치를 만들어 그 효과를 관측하였다.

(2) 측정 일정

침강 및 압밀량은 30분, 1시간, 4시간, 1일, 2일, 4일, 8일(이후부터는 8일 간격) 간격으로 측정하였으며, 배인시험은 Geonor Hand Vane시험기를 사용하여 10일 간격으로 수행하였고, 시료의 입도분석과 함수비는 1일, 3일, 7일, 15일, 그리고 그 이후에는 10일 간격으로 측정하였다.

4.4.2 시험 결과 분석

(1) 자중압밀량

그림 12는 1, 2차 토조시험에서 얻은 시간에 따른 자중압밀량과 미공병단에서 준설매립 공사를 위해 개발한 수치해석 프로그램인 PCDDF의 결과를 비교한 것이다. 1, 2차 토조시험은 초기 setting시의 함수비가 각각 500 %와 180 %로 달리 시작되었으므로, 1차 토조시험의 평균함수비가 180 %일때의 높이에 대한 비율로 환산하여 비교하였다. 그 결과 1, 2차 토조시험은 자중압밀에 의한 침하속도가 비교적 일치하는 경향을 보였으나, PCDDF 해석결과와는 초기 침하속도가 실측치보다 크게 나타났다.

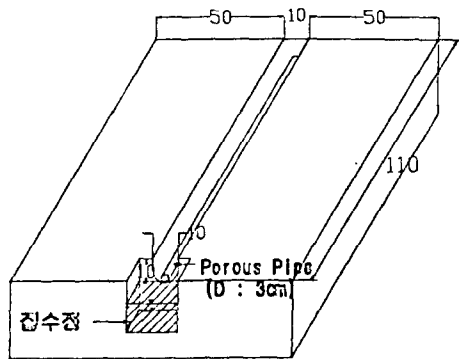


그림 12. 모형 트렌치 구조도

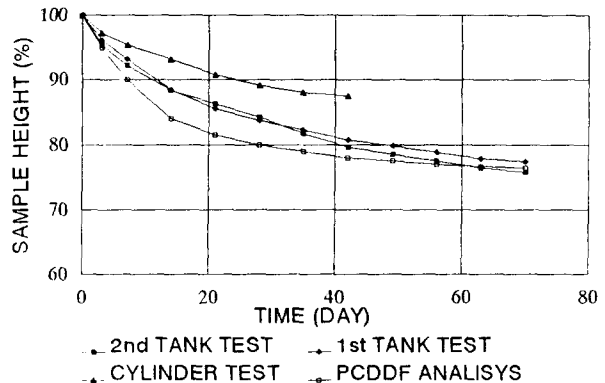


그림 13. 1, 2차 토조시험과 PCDDF 해석결과와의 압밀량 비교

(2) 함수비 변화 분석

토조 setting 초기에는 시료를 인력으로 여러번에 나누어 투기한 관계로 깊이별 함수비가 불규칙하였으나 시간이 지나 상부 단면배수의 압밀이 이루어지면서 함수비가 하부에서 상부보다 10~20 % 정도 낮게 측정되었다. 토조의 층별 평균함수비는 초기에 180 %에서 70일 후에 124 %로 측정되었고, 함수비가 감소되는 경향은 자중압밀 속도가 감소되는 경향과 비슷하였다. 2차 토조시험 초기 setting으로부터 80일이 경과한 후에 모형 트렌치를 토조상부 표면에 설치하였으며, 트렌치 성형 40일 전후의 토조표면의 평균함수비는 그림 15와 같았다. 트렌치 성형이전 40일 동안은 비교적 완만한 곡선을 보이다 성형직후 부터 급격한 함수비의 감소가 나타났다. 트렌치 성형이후 평균함수비의 변화를 살펴보면, 성형직후 표면함수비가 117 %, 20일 경과후에 90 %로 27 % 감소하였으며, 트렌치 성형 40일 경과 후 평균함수비는 54. %로 초기보다 63 % 정도 감소하였다. 상기의 결과로 트렌치의 성형이 표면수 제거 및 지하수위 저하, 그리고 신속한 표층 건조에 상당한 효과가 있다고 판단된다.

그림 16은 모형 트렌치 성형에 따른 토조상부 표면수의 이동을 도시한 것이다. 이 그림에서 보면, 시작단계에서 전체적으로 함수비가 불규칙적이었으며 표면의 상단과 우측면이 투명한 아크릴로 되어 있어 직사광선에 의해 보다 많이 건조되었고, 표면수가 고여있었던 좌측중앙에 150 %의 높은 함수비가 측정되었다. 트렌치 성형 20일 경과 후

토조표면 중앙이 130 %의 함수비가 측정된 것으로 보아 트렌치를 따라 표면 배수효과가 나타난 것으로 판단되며, 집수정의 배수를 지속적으로 한 관계로 건조상태가 오히려 중앙보다 우수하였다. 40일 경과 후의 전체적인 함수비 분포 형태를 보면, 표면수가 집수정으로 모이는 것을 확실히 알 수 있다.

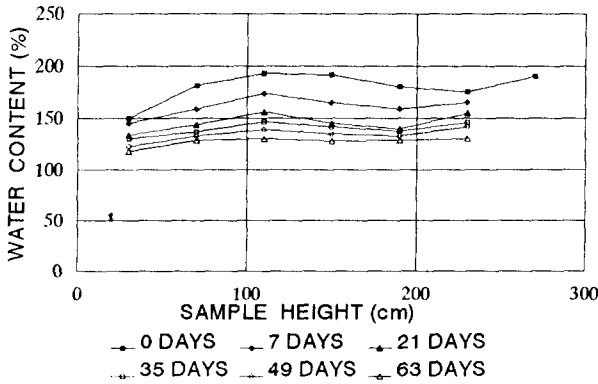


그림 14 시간에 따른 깊이별 함수비의 변화

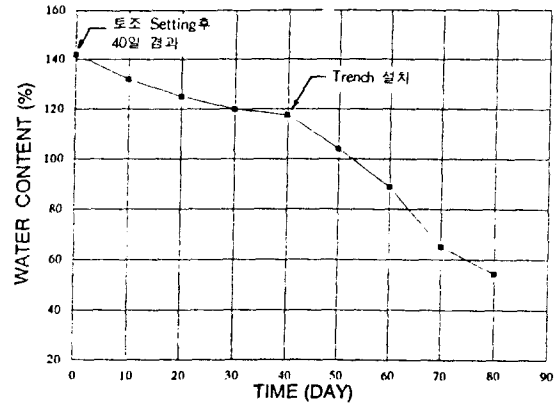
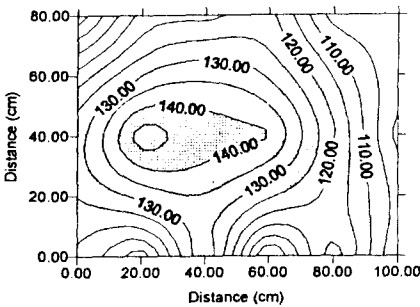
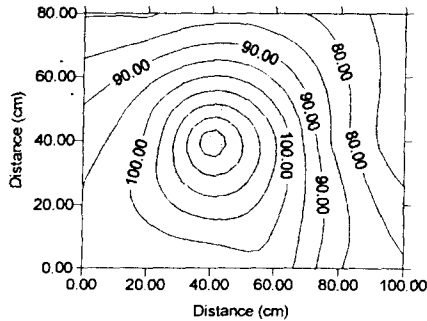


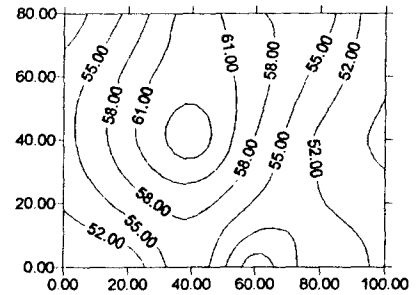
그림 15 트렌치 성형에 따른 토조표면 평균함수비 변화



0 Days



20 Days



40 Days

그림 16 트렌치 성형에 따른 토조상부 함수비의 변화

(3) 전단강도 특성 분석

토조상부 표면에서의 함수비에 따른 배인시험 결과는 그림 17과 같다. 함수비가 90 % 이상일 때에는 시험기의 측정용량 이하로 전단력이 측정되지 않았으며, 본 토조시험에 사용되었던 준설토의 액성한계인 약 68 % 부근에서 전단강도의 증가가 크게 나타났다.

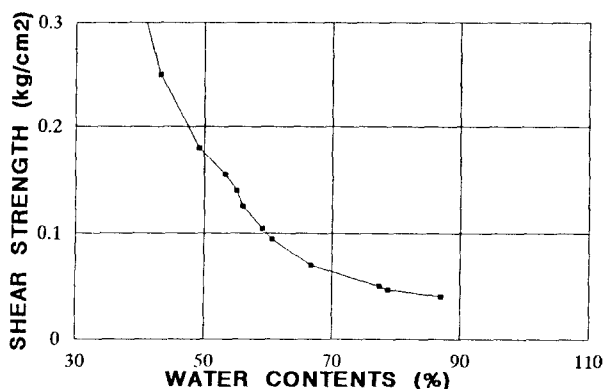


그림 17 함수비에 따른 전단강도

5. 결론

- 1) 하부배수조건과 비배수조건간의 압밀효과를 비교하면, 실내 실린더 시험에서는 30 %, 현장 토조시험에서는 15 % 정도 하부배수에 의한 압밀 증대 효과를 보였는데, 시험 기구의 크기가 클수록 하부배수에 의한 압밀효과가 작게 나타났다.
- 2) 초기 침강속도는 시료의 농도에 반비례하는데, 시료의 농도가 50 g/l 일 때가 175 g/l 일 때보다 약 7.5배 정도 침강속도가 빨랐다. 그 원인은 입자간의 간섭 효과에 기인한 것으로 판단된다.
- 3) 실내 실린더와 현장 토조에서 함수비 변화에 따른 배인시험 결과, 전단응력은 시료의 액성한계인 68 % 정도의 함수비에서 급격한 증가를 보였다.
- 4) 실내 실린더에서 측정된 전단응력이 현장 토조에서 측정된 값보다 2배 이상 크게 나타났는데, 이는 현장 토조 상부가 건조되면서 표면이 갈라져 균열이 심해진 상태에서 배인시험이 실시되었기 때문으로 판단된다.
- 5) 1차와 2차 현장 토조시험에서의 자중압밀에 의한 침하속도는 거의 일치하였다. 그러나 PCDDF를 이용한 수치 해석 결과는 현장 토조시험보다 초기 침하속도가 빠르게 나타났으나, 70일 경과 후의 침하량은 현장 토조 시험 결과와 유사하게 나타났다.
- 6) 2차 토조시험에서 실시된 트랜치의 성형이 표면수 제거 및 지하수위 저하, 그리고 신속한 표층 건조에 상당한 효과가 있다고 판단된다.

6. 참고문헌

1. 김수일, 이준환, 이승래, 정상섭(1994), "수정압밀이론을 이용한 연약지반의 압밀해석", 제14권 제3호, pp.565~572
2. 김차금, 이종섭(1991), "실트질 점토의 침강특성에 관한 연구", 제11권, 제3호, 대한토목학회지
3. 이규환, 황규호, 이송(1995), "침투압을 이용한 준설매립 지반의 압밀특성 연구", 한국지반공학회 '95 춘계학술발표회 논문집, pp.181~190
4. 송정락, 백승훈, 여유현(1992), "여천지역 준설매립토의 침강·압밀 특성", 한국지반공학회 '92 추계학술발표회 논문집, pp.55~60
5. 이송, 윤돈규, 백영식(1994), "준설연약점토의 전단강도 특성에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제10권, 제4호, pp.153~166
6. 이송, 양태선, 황규호(1994), "준설매립점토의 자중압밀 특성에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제14권, 제4호, pp.953~963
7. 정인준, 유건선(1979), "준설토의 기본적 실험연구", 대한토목학회지, 제27권, 제5호, pp.55~64
8. 한영철, 송정락(1992), "군산지역 준설토의 퇴적특성", 한국지반공학회 '92 추계학술발표회 논문집, pp.61~64
9. Abu-Hejleh, A. N., Znidarcic, D.(1995), "Desiccation Theory for Soft Cohesive Soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.121, No.6, pp.493 ~502
10. Been, K., Sills, G. C.(1981), "Self-weight Consolidation of Soft Soil : an experimental and theoretical study", *Geotechnique*, Vol.31, No.4, pp.519~535
11. Goro, I.(1981), "Experimental Studies on Sedimentation Mechanism and Sediment Formation of Clay Materials", *Soil and Foundations*, Vol.21, No.1, pp.7~20
12. Raymond, N. Y., Frank, C.(1984), Sedimentation Consolidation Models, *Proceeding of a Symposium*, ASCE
13. Timothy D. S.(1991), *Program Documentation and User's Guide : PCDDF89, Primary Consolidation and Desiccation of Dredge Fill*, US Army Corps of Engineers Report
14. US Army Corps of Engineers(1987), Confined Disposal of Dredged Material, *EM 1110-2-5027*
15. Yasufumi, U., Kouki, Z.(1982), "Consolidation Characteristics of Dredged Marine Bottom Sediments with High Water Content", *Soil and Foundations*, Vol.22, No.2, pp.40~54