

하수준설토의 체적변화에 관한 연구

A Study on the Volumetric Change of Sewage Dredged Soils

이 송¹⁾, Song Lee, 이무철²⁾, Moo-Chul Lee

¹⁾ 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

²⁾ 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

SYNOPSIS(개요) : This paper describes on the volume change of Sewage Dredged Soils by using laboratory test and volumetric change test. The tremendous change of Moisture Content occurred in the Sewage Dredged Soils during the Elapsed Time. The Unit Weight increases during the normally shrinkage limit void ratio and then the unit weight decrease. A volume of Sewage Dredged Soils according to the moisture content is a difference maximum 2.5 times. And there is the difference 3.5 times according to the change of unit weight. Therefore, the moisture content and unit weight computation are very important for the computation on the volume of Sewage Dredged Soils.

Key words : sewage dredged soils, volumetric change, moisture content, shrinkage limit, elapsed time

1. 서론

도시화와 산업화는 오·폐수의 증가를 가져왔으며 이를 흡수하고 처리하는 하수도 기능은 도시편의시설의 필수요소가 되었다. 이러한 하수관로에는 오·폐수뿐만 아니라 다량의 우수가 유입되는 과정에서 도로상의 모래, 자갈, 토사, 쓰레기 등이 유입되어 하수관로내에 퇴적물을 형성시킨다.

이렇게 형성된 하수관로의 퇴적물 및 준설토는 관거단면의 축소, 하수나 우수의 원활한 흐름을 방해하여 강우시 침수의 한 원인을 제공하며 하수 정체로 인한 퇴적물의 악취를 발생시켜 도시민에게 불쾌감을 주게 된다. 또한 우수에 의한 준설토의 하천 배출은 수질오염의 한 원인이 되고 있다.

이러한 문제점들을 사전에 방지하기 위해서 연 1회 이상 하수관로의 청소 및 준설계획을 수립하여 하수관로내의 토사 및 협잡물을 제거하고 있다.

그러나 매년 적지않은 예산과 인력을 투입하여 하수관 및 하수 BOX 준설을 하고 있지만 체적량 산정법이 합리적으로 마련되어 있지 않고 준설토의 특성을 고려하지 않은 일률적인 적용으로 인해 체적산정과 정산의 과정에서 분쟁이 발생하고 있다.

따라서 본 논문에서는 하수준설토에 대한 실내실험을 통하여 하수준설토의 체적변화와 그 영향인자를 파악하고자 한다.

2. 현행 준설물량 체적산정방식

현재의 준설토 관리 공정에서는 현장에서 수거한 준설토는 12시간 방치한 후 중간집하장으로 적하된다. 이 때 적하된 준설토는 반입 직후에 함수비를 측정하고 일주일 간 방치한 후 최종처리장으로 반출되기 전에 반출시의 계근량과 함수비를 측정한다.

이 반출시의 계근량을 반출시의 함수비와 작업시의 함수비를 고려하여 준설물량을 구하게 된다. 체적량의 산정은 총 3단계를 거쳐 역산에 의하여 산출되는데 우선 반출시 계근량과 함수비를 통하여 토사만의 무게를 구한다. 산정식은 (1)과 같다.

$$W_s = \frac{W_o}{1 + w_o/100} \quad (1)$$

W_s 는 토사만의 무게, W_o 는 반출시 계근량, w_o 는 반출시 함수비를 나타낸다.

다음 단계로서 토사만의 무게와 작업시의 함수비를 통하여 작업량을 구한다. 산정식은 식 (2)와 같다.

$$W_i = W_s \times (1 + w_i/100) \quad (2)$$

여기서 W_i 는 작업량, W_s 는 토사만의 무게, w_i 는 작업시의 함수비를 나타낸다.

마지막 단계로서 작업량과 작업시 단위중량을 통하여 작업부피량을 산정한다. 산정식은 식 (3)과 같다.

$$V_i = W_i / \gamma_i \quad (3)$$

여기서 V_i 는 작업부피량, W_i 는 작업량, γ_i 는 작업시 단위중량을 나타낸다. 이 때 단위중량은 1.5 - 1.6 t/m³ 내지는 1.9t/m³을 적용한다.

3. 현행 체적량 산정의 문제점

현재 체적량 산정의 문제점은 체적량이 작업시의 함수비 및 단위중량의 적용기준에 따라 크게 변화한다는 것이다.

함수비는 시료의 토질특성 및 채취위치, 준설 직후로부터 중간집하장으로 반입시와 최종처리장으로 반출시까지 시간의 경과에 따라 변화하게 된다. 적용기준이 되는 함수비에 따라 준설물량이 크게 차이가 있다. 또한 함수비에 따라 준설토의 단위중량은 변화하며 준설토의 물성에 따라 같은 함수비에서도 단위중량은 다른 값을 나타낸다. 이러한 특성에 따라 정확한 함수비의 적용과 단위중량의 정확한 산정이 체적량의 산정에 가장 중요한 요소이다.

4. 실내시험

하수준설토의 성분 및 함수비의 변화에 따른 체적변화를 분석하기 위하여 준설직후의 시료를 채취하여 기본물성시험 및 건조수축시험, 자연건조시의 시간경과에 따른 함수비 변화측정 등의 실내시험을 실시하였다.

4.1 기본 물성시험

대상지역의 하수준설토의 특성을 파악하기 위하여 비중시험, 액·소성시험, 입도분석, 유기물 함량시험

을 실시하였다.

4.2 체적변화시험

4.2.1 건조수축시험

지반의 수축특성은 토양학적 측면에서는 3차원적으로 해석하며, 이때 비포화 부분이 관심의 대상이 된다. 정규수축한계를 나타내는 수직선은 포화조건에서의 압밀한계를 나타내며, 잔류수축구간은 비포화 조건에서 발생할 수 있는 수축량의 범위를 나타낸다. 따라서, 정규수축한계간극비는 유효응력조건에 의해 변화할 수 있는 간극비의 한계로도 해석할 수 있다.

준설토의 수축특성을 구하기 위하여 건조수축시험을 실시하였다. 건조수축시험의 목적은 간극비 변화에 대한 흙의 체적변화의 관계를 조사하기 위한 것이며, 시험시료를 자연건조 시켰을 때 체적변화를 측정하여 해당시점의 간극비 또는 함수비를 계산하는 것이다. 시료의 성형은 직경 10cm, 높이 15cm의 용기에 내측벽과 하부 받침대의 표면에 얇게 기름칠을 한 실린더에 3~3.5cm 높이로 시료를 성형한 후, 실린더 중앙 상부에 장착된 다이얼게이지 및 캘리퍼스를 이용하여 건조수축이 진행되는 동안 시간대별로 시료의 높이 및 직경을 측정하였다.

평균 20℃의 실내온도를 유지하였으며, 시료의 높이는 중앙부를 중심으로 V자 형상으로 수축되기 이전에는 다이얼게이지 읽음 값으로부터 결정하였고, 그 이후의 높이는 시료를 돌려가면서 캘리퍼스로 측정한 값과 다이얼게이지 읽음을 통해 얻어진 중앙부 측정값의 평균으로 결정하였다. 또한 시료의 직경은 캘리퍼스를 이용한 측정값의 평균으로, 체적은 직경 및 높이의 측정값을 토대로 결정하였으며, 그림 1에 실험장치를 나타내었다.

시료가 더 이상의 체적변화를 나타내지 않는 수축한계까지 지속적인 측정을 시행한 후, 24시간 동안 노건조하여 함수비 및 중량을 결정하고, 이를 토대로 시료의 수축한계간극비를 최종 평가하였다.

4.2.2 시간경과에 따른 함수비 변화측정

하수준설토는 준설직후의 함수비, 중간집하장 반입시의 함수비, 탈수 후 최종처리장 반출시의 함수비로 크게 3가지 경우를 비교할 때 함수비의 변화 폭이 상당히 크게 발생하게 된다. 본 연구에서는 준설직후의 함수비와 중간집하장 반입시 함수비(12시간 경과 함수비), 약 7일 방치후 최종처리장에 반출시 함수비의 변화를 측정하였다.

5. 실내시험결과

5.1 기본물성시험

표 1. 기본물성시험결과

Sample	Wn %	Gs	LL	PI	No.200	Gravel (G)	Sand (S)	Silt (M)	Clay (C)	Cu	Cc	유기물함량, %	USCS
1	74.22	2.65	N.P	N.P	5.2	2.54	92.26	5.20		4.24	1.00	0.72	SP-SM
2	100.04	2.66	N.P	N.P	10.3	19.00	70.70	10.30		-	-	2.74	SP-SM

5.2 함수비 변화시험

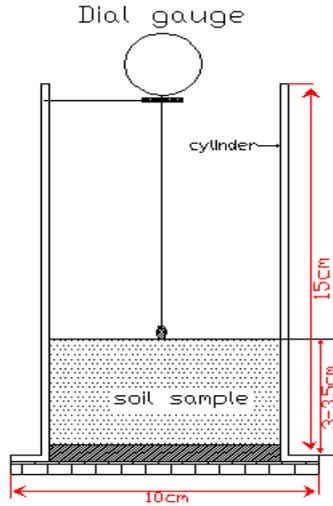


그림 1. 건조수축시험장치

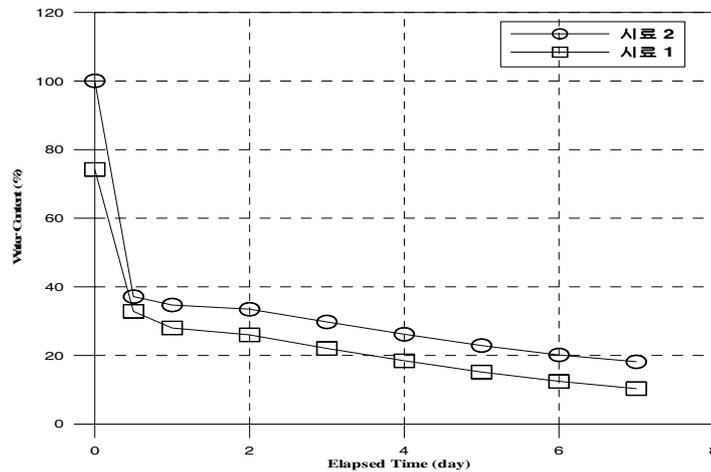


그림 2. 시간경과에 따른 함수비 변화

7일간의 자연건조를 실시하면서 경과일수에 따른 함수비의 저하를 파악하였다. 시험결과 그림 2와 같이 12시간 경과시의 함수비가 가장 크게 저하되었다.

5.3 건조수축시험

건조수축시험의 목적은 함수비 변화에 대한 흙의 체적변화의 관계를 조사하기 위한 것이며, 시험시료를 자연건조 시켰을 때 체적변화를 측정하여 해당시점의 간극비와 함수비를 계산하였다. 또한 실험 값을 토대로 함수비와 단위중량 사이의 관계를 산출하였다.

5.3.1 함수비와 간극비와의 관계

건조과정에서 이 값들의 변화는 그림 3에서와 같이 수축특성곡선에 적용하여 표시하였다.

수축특성곡선도에서 정규수축구간은 함수량 감소와 체적의 감소가 일치하는 범위이며, 잔류수축구간은 함수량 감소가 체적감소보다 크게 일어나는 범위, 영수축구간은 함수량 감소량이 토립자의 체적과

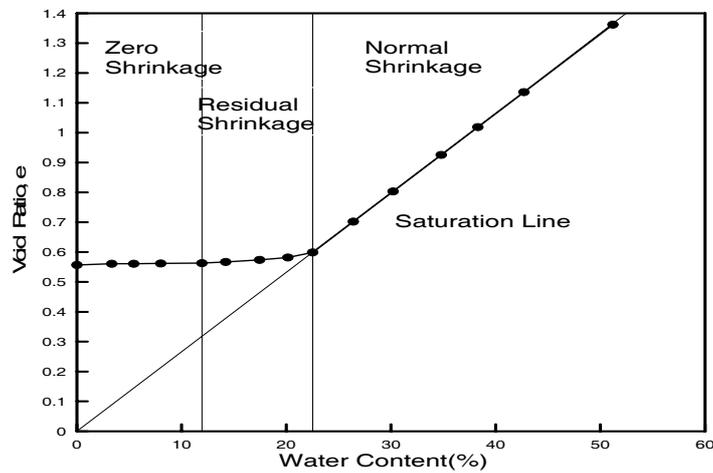
관계없이 공기의 체적으로 대체되는 범위를 나타낸다.

수축특성곡선도에서 함수비가 0인 경우의 간극비는 수축한계간극비, e_{sh} 가 된다. 수축한계간극비는 더 이상의 체적변화가 없는 상태에서 함수비만 감소하게 되는 과정의 한계에서의 간극비로 규정하며 이 때는 체적이 일정한 상태에서 함수비만 감소하게 되므로 단위중량은 감소하게 된다.

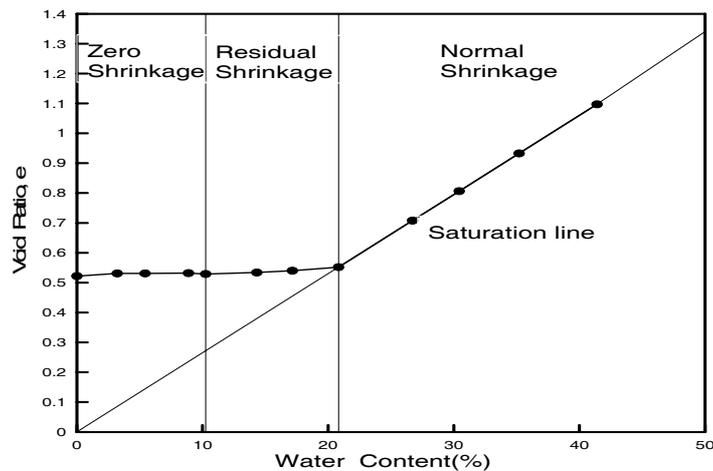
그림에서 흙의 건조수축 특성을 구분하는 3개의 수직경계선 중 정규수축구간과 잔류수축구간의 경계선이 각 수축특성곡선과 만나는 점의 간극비를 정규수축 한계간극비, e_{ns} 라고 규정하면, 이때의 간극비는 건조로 인해 포화상태의 수축이 종료되고, 공기가 유입되는 시점 즉, Air Entry Point가 된다. 건조수축시험을 실행한 각 대표시료의 수축한계간극비, e_{sh} 와 정규수축 한계간극비, e_{ns} 는 그림 3과 표 2에 나타나있다.

표 2. 건조수축시험의 결과

채취위치	수축한계간극비 e_{sh}	정규수축한계	
		간극비 e_{ns}	함수비 w
1	0.522	0.552	20.83
2	0.557	0.599	22.52



(a) 시료 1



(b) 시료 2

그림 3. 건조수축특성도

5.3.2 함수비와 단위중량과의 관계

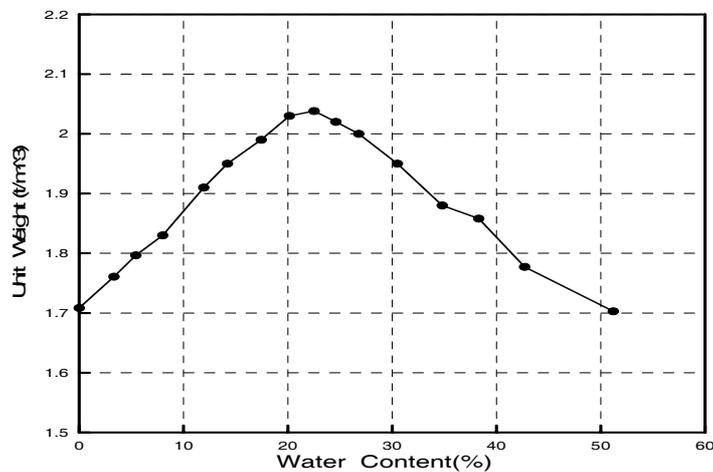
고함수비 상태에서 흙을 자연건조시키면 정규수축구간에서 함수량 감소와 체적의 감소가 일치하는 포화상태에서 수축이 발생하게되고 일정한도의 함수비에 도달하게 되면 포화상태의 수축이 종료되며, 공기가 유입되기 시작하게 되는 정규수축한계간극비에 도달하게 된다.

정규수축한계 이상의 함수비에서는 포화도가 100%라 할 수 있으므로 단위중량은 일반적인 포화단위중량 산정식에 의해 별도 체적측정 없이 함수비와 비중 값을 이용하여 구할 수 있다.

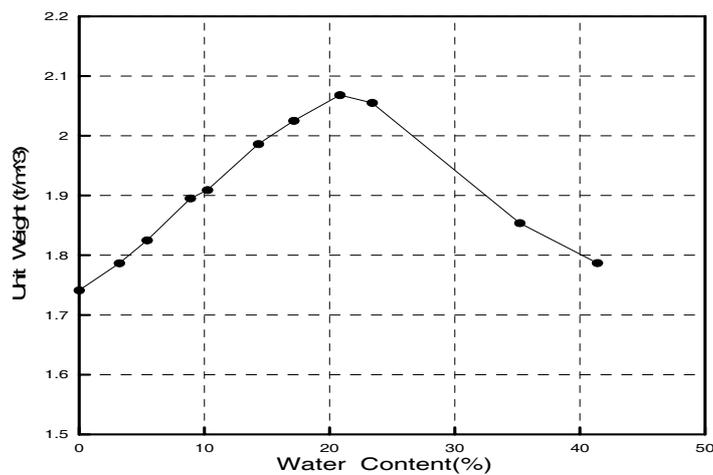
반면 정규수축한계 이하의 함수비에서는 불포화 상태이므로 건조수축시험 등과 같은 함수비에 따른 실제 체적을 구하여 산정하여야 한다.

그림 4는 건조수축시험 결과를 토대로 구한 함수비와 단위중량과의 관계를 나타낸 그래프이다. 단위중량은 정규수축한계 이상의 함수비에서는 함수비 감소에 따라 단위중량이 계속해서 증가하였으며 잔류수축구간에 접어들면서 최대단위중량 값을 나타낸 후 이 후 점차 단위중량은 낮아지는 경향을 보인다.

정규수축한계일 때의 함수비는 표 2의 결과와 같으며 준설직후의 함수비에 대응하는 단위중량은 포화 단위중량식을 이용하여 산정할 수 있다.



(a) 시료 1



(b) 시료 2

그림 4. 함수비와 단위중량의 관계

5.4 적용조건에 따른 체적의 변화

체적량은 적용하는 함수비와 단위중량에 따라 크게 변화한다. 작업시 함수비를 30~200%로 적용하고 반출시 함수비를 5%, 반출시 계근량이 10,000ton, 비중 2.65, 단위중량을 일괄적으로 $1.6t/m^3$ 을 적용하였을 때 체적량을 식(1)~(3)에 따라 산정하고 두 번째로 같은 조건에서 함수비에 따른 단위중량의 변화를 고려하여 포화단위중량에 따른 체적량 변화를 살펴보았다.

첫 번째로, 작업시 함수비의 적용에 따른 체적량의 변화를 표 3에 나타냈다. 표 3에 나타낸 것과 같이 작업시 함수비를 어떤 값을 적용하느냐에 따라 준설물량은 최대 2.3배 차이가 발생함을 알 수 있다.

두 번째로, 함수비의 변화에 따른 단위중량의 변화를 적용하여 체적량의 변화를 산정하여 표 4에 나타냈다. 단위중량의 변화에 따라 체적량은 최대 3.5배 차이가 발생함을 알 수 있다.

표 3. 함수비에 따른 체적량 변화

작업시 함수비(%)	단위중량 (t/m^3)	토사중량 (ton)	체적량 (m^3)
30	1.6	9523.8	7738.1
50	1.6	9523.8	8928.6
70	1.6	9523.8	10119.0
90	1.6	9523.8	11309.5
110	1.6	9523.8	12500.0
130	1.6	9523.8	13690.5
150	1.6	9523.8	14881.0
170	1.6	9523.8	16071.4
200	1.6	9523.8	17857.1

표 4. 단위중량에 따른 체적량 변화

작업시 함수비(%)	단위중량 (t/m^3)	토사중량 (ton)	체적량 (m^3)
30	1.92	9523.8	6451.0
50	1.71	9523.8	8355.8
70	1.58	9523.8	10260.6
90	1.49	9523.8	12165.3
110	1.42	9523.8	14070.1
130	1.37	9523.8	15974.8
150	1.33	9523.8	17879.6
170	1.30	9523.8	19784.4
200	1.26	9523.8	22641.5

6. 결론

본 논문에서는 하수준설토의 기본물성을 파악하고 하수준설토의 단위중량변화와 함수비 변화를 분석하여 하수준설토의 체적산정시 고려해야 할 사항에 대하여 연구하였다. 현장에서 하수준설토를 채취하여 기본물성시험 및 함수비변화시험, 건조수축시험을 통하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 준설토의 단위중량은 정규수축한계간극비에 이를 때 까지 증가한 후 감소하였으며 이를 통해 체적의 산정시 준설토의 현재 상태에 맞는 단위중량을 적용하여야 할 것으로 판단된다.
- 2) 하수준설토는 시간의 경과에 따른 함수비 변화의 폭이 크며 함수비의 감소에 따라 그 체적도 큰 감

소를 나타내었다. 따라서 현 상태의 함수비를 파악하는 것이 체적의 산정에 있어서 가장 중요한 영향인자인 것으로 나타났다.

- 3) 작업시 함수비를 30~200%로 적용하고 반출시 함수비를 5%, 반출시 계근량이 10,000ton, 중 2.65일 때 함수비에 따른 단위중량의 변화를 고려하여 작업물량의 변화를 살펴본 결과, 함수비와 적용단위중량에 따라 각각 최대 2.3배, 3.5배의 차이가 발생함을 알 수 있었다. 이와 같이 함수비와 단위중량의 개념을 이용하는 정산방식은 함수비와 단위중량에 따라 체적량의 차이가 매우 크게 나타나므로 체적량 산정시 일련의 작업환경을 대변할 수 있는 함수비와 단위중량을 적용하여야 할 것이다.
- 4) 준설물량의 산정에 있어서 사용한 포화단위중량은 본 논문에서 제시한 바와 같이 함수비 및 간극비에 따라 크게 변하는 특성을 나타내고 있다. 적용함수비가 체적량의 산정에 결정적인 영향을 미치는 요소이므로 고정된 단위중량을 기준으로 체적량을 산정하는 것은 체적의 변화과정을 합리적으로 표현할 수 없는 것으로 나타났다.

이상의 연구에 의하여 하수준설토의 준설물량 산정 시의 영향인자를 파악하였으며 시간경과에 의한 함수비의 변동과 그에 따른 단위중량을 산정하였다. 이에 따라 산정된 준설물량과 현재의 산정방안에 의한 준설물량을 비교하여 보다 합리적인 산정방안을 제안하였다.

이번의 연구는 제한된 지역의 준설토에 대한 Sampling만으로 실험을 하였으나 향후 본 연구를 바탕으로 준설토의 조건 및 현장여건에 따른 다양한 실험을 하여 보다 더 신뢰성있는 체적변화량을 산정하는 방법을 지속적으로 연구하면 더욱 실용적이고 합리적인 결과가 도출되리라 판단된다.

7. 참고문헌

1. 이송, 이재영, 채점식, 이옥환(2001), “토목재료로서 하수준설토의 재활용 연구”, **대한토목학회 논문집**, 제 21권, 제 5-C호, pp.597~604.
2. Dong-hee. Lim, jang-young. Lee and Song. Lee(2001), "The evaluation of recycling dredged soils for construction materials", *The international conference on municipal solid wastes treatment and recycling thesis*, Guang Zhou, China, pp.483~490
3. Hanafy, E, A, D, E(1998), “Testing Forum Ring Shrinkage Test for Expansive clay” ; A suggested simple test method for determining vertical, lateral and volumetric shrinkage method, *Geotechnical Testing Journal*, Vol, 14, No.2, pp.69~72.
4. Shridharan, A. and K, Prakash(1998), “Mechanism controlling the shrinkage limit of soils” , *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 21, No. 3, pp.240~250
5. Shridharan, A. and G. Venkatappa Row(1971), “Effective stress theory of shrinkage phenomena” , *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 8, No. 4, pp.503~513.
6. Shridharan, A. and G. Venkatappa Row(2000), “Shrinkage limit of soil Mixtures” , *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 23, No. 1, pp.3~8