한국지반환경공학회 논문집
제12권 제6호 2011년 6월 pp. 25~34

세립분 함량에 따른 준설토의 분리 퇴적 특성

Characteristics of the Segregation Sedimentation for Dredged Soil Depending on Fines Content

박 민 철[1] · 이 종 경[2] · 신 효 희[3] · 이 송†
Park, Minchul · Lee, Jongkyung · Shin, Hyohee · Lee, Song

ABSTRACT : Dredged and reclaimed ground in progress at the West Coast has a high content of coarse particles. There will be different behaviors depending on the location of outlet and engineering properties of soil when its ground is dredged by a pump. Therefore, the experiments were conducted that were manufactured about the chamber equipment of length 2,650mm, width 770mm, height 735mm, experimented step filling method and water content about 300%, 500% and 700% respectively with SM and ML samples in order to realize segregating sediment characteristics of dredged ground with changing much fine. With results of analysis, ML sample by higher initial water content was reached to the period of complete sedimentation and coefficient of sedimentation consolidation increased with increases of diffusion distance. SM samples showed behavior of coarse soil with diffusion distance 120cm, diffusion distance of more than 120cm showed a similar tendency with ML sample under the influence of fines. In ML sample, it could be also found that lower depth and the more increasing diffusion distance increase in percentage of sieve #200 but water content decreases. In SM sample, it could be also found that coarse soil was piled at near the diffusion distance zone but fine soil was piled at the far diffusion distance zone and prominent difference showed between percentage of sieve #200 and water content(%) by boundary point 120cm~160cm of both samples. Also, shear strength was expressed ML-maximum 2.97kPa, SM-maximum 10.2kPa with diffusion distance.

Keywords : Dredged and reclaimed ground, Step filling, Segregation sedimentation, Shear strength

요 지 : 준설매립이 활발히 진행되고 있는 서해안 지역 준설토는 일반적으로 조립분 함량이 높다. 이 지반을 펌프로 준설 시 토출구의 위치 및 흙의 공학적 성질에 따라 다른 거동을 나타낼 것이다. 따라서 본 연구에서는 세립분 함량 변화에 따른 준설토의 분리 퇴적특성을 구현하기 위해서 상사의 법칙을 적용하여 길이 2,650mm, 폭 770mm, 높이 735mm의 모형토조장비를 제작하여 SM과 ML시료로 단계투기방법과 함수비 300%, 500%, 700%에 대하여 실험을 실시하였다. 분석결과, ML시료는 초기함수비가 높을수록 침강완료시간에 빨리 도달하였고 확산거리가 멀어질수록 침강시간은 길어졌다. SM시료는 확산거리 120cm까지 조립토의 거동을 보이며 그 이상의 확산거리에서는 세립분의 영향으로 ML시료와 비슷한 경향을 보였다. 함수비와 세립분 변화 역시 ML시료는 심도가 낮아지고, 확산거리가 멀어질수록 통과율이 커지고 함수비는 작아짐을 확인할 수 있었고, SM시료는 확산거리가 가까운 구역에서는 조립토가 쌓여있고 먼 구역에서는 세립토가 쌓여있어 두 시료의 경계지점인 120cm~160cm을 기준으로 세립분 함유량과 함수비의 큰 차이가 보임을 확인하였다. 또한, 전단강도는 확산거리에 따라 ML-최대 2.97kPa, SM-최대 10.2kPa임을 확인할 수 있었다.

주요어 : 준설매립, 단계투기, 분리퇴적, 전단강도

1. 서 론

준설매립사업은 세계적으로 시행되고 있으나 해안 저습지 개발이나 호안 사업이 대부분이며, 방조제를 축조하여 국토를 확장하고 수자원을 확보하는 등의 종합적이고 체계적인 해면 간척사업을 시행하고 있는 나라는 한국, 네덜란드, 일본 등으로 축약할 수 있다.

국내의 경우 지속적인 준설매립에 힘입어 국토면적은 1950년대 이후 현재까지 제주도의 3.3배, 여의도의 725배만큼 증가하였다. 3면이 바다인 국내의 지역적 특성과 국토의 효율적 이용 및 대단위 기간시설을 수용할 수 있는 부지의 확충, 항만배후부지 개발을 통한 부가가치 극대화를 위하여 부산, 광양, 인천, 평택항 등에 대규모 항만 및 배후부지 개발이 진행되고 있으며 이에 따라 해안지역의 준설매립은 계속적으로 이루어지고 있다.

현재 준설매립에 대한 연구와 시험기술은 소성지수가 큰

1) 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정
2) 비회원, 서울시립대학교 토목공학과 석사
3) 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정
† 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수(E-mail : scugeo@uos.ac.kr)

고소성 준설토를 대상으로 침강 및 압밀특성이 연구되고 있으며, 이러한 준설토의 체적변화량 예측은 주로 Imai(1984) 등에 의해 본격적으로 연구되었다. 국내에서 준설매립이 증가하면서 국내의 토질을 대상으로 해저 퇴적점토에 대한 1차원 체적변화를 실험적으로 김수삼 등(1995), 이송 등(1994, 2002), 김형주 등(2003)에 의해 압밀특성이 규명되었다.

그러나 세립토가 다량 함유된 재료를 준설 매립하는 경우, 펌프준설 토출관에서 배출된 준설토는 배사관의 위치 및 입경, 투입속도, 퇴적거리, 매립지 면적, 매립고에 따라 입도분포가 다른 퇴적층이 조성된다. 즉, 토립자의 크기에 따라 유사거리가 다르므로 토출관 주변에는 조립토가 퇴적되며, 거리에 따라 세립토 및 퇴적물질이 부분적으로 퇴적되어 Silt Poket과 같은 불량토층이 조성되기도 한다.

조립토를 혼합한 이러한 지반에서 토출구로부터 거리별 입도분포의 영향을 고려하지 않으면 침하량 산정 시 과대 혹은 과소평가를 하게 되어 막대한 비용이 추가될 것이고 또한 부등침하로 인해 구조물에 커다란 피해를 줄 수 있다.

이러한 실트층은 조립토와 세립토가 혼재되어 세립토의 비율에 따라 침강특성이 크게 다르게 퇴적되고 있어 분리퇴적에 의한 매립지반 성상예측과 매립지의 체적변화, 침전지의 규모, 양질의 토사를 활용할 수 있는 준설매립기술에 관한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 군산 신항만 지역에서 채취된 ML과 SM시료를 함수비 300%, 500%, 700%로 2차원 분리퇴적 모형실험에 의해 침강특성 및 자중압밀침하량, 분리퇴적 특성 등을 규명하였다.

2. 준설토의 거동 특성

2.1 준설토의 체적변화

그림 1은 준설매립지반에 퇴적하는 흙의 체적변화를 표시한 것으로 토립자의 질량 Ms가 동일하다고 하면, 체적 V_d의 준설토가 매립지 내에 투입되어 자중압밀 종료 시점에서 체적 V_f에 대한 체적변화율 ζ는 식 (1)과 같다.

$$\zeta = \frac{V_d}{V_f} = \frac{A \cdot H_f}{V_d} = \frac{1+\overline{w_r}\, G_S/G_f}{1+\overline{w_d} Gs/Gf} \tag{1}$$

여기서, G_s, G_f는 토립자 및 간극수(해수)의 비중이다. 준설체적과 매립체적의 균형관계에 의해 준설토 체적 V_d에 대한 자중압밀 종료 후, 매립지 체적은 흙의 성질에 의해 실질토량고 H_s의 함수로 H_s는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$Hs = \frac{H_f}{1+\overline{w_r}\times G_s/G_f} = \frac{V_d}{A} \times \frac{1}{1+\overline{w_d}\times G_s/G_f} \tag{2}$$

실질토량고 Hs는 실린더 시험 시 퇴적하는 흙의 실질토량고를 의미하며 최종두께 H_f와 평균함수비 $\overline{w_r}$의 관계는 매립면적 A, 최종두께 H_f, 준설토체적 V_d의 조합에 의해 구해진다. 따라서 실내 실린더시험에 의해 침강 및 자중압밀 종료 시의 계면고(H)와 실질토량(H_s) 관계에 의해 현장의 체적변화(수축침하율)를 구할 수 있다.

2.2 세립분 함유량에 따른 준설토 특성

일반적으로 실트질 모래 준설토에 대한 연구는 세립분 함유량에 따른 연구와 동시에 이루어진다. 이에 대한 연구는 준설매립현장과 관련된 연구와 실내에서 세립분 함유량에 따른 특성과 관련된 연구로 구분된다. 현장과 관련된 연구는 준설매립현장의 심도에 따른 입경 분포에 대한 연구 등이 대부분이며, 실내에서 재현되는 연구는 세립분 함유량에 따른 압축 특성 등에 대한 연구로 구분된다.

실트질 모래 준설토 자체의 침강 및 퇴적 특성 등에 대한 연구는 거의 진행되지 않고 있다. 일반적으로 준설모래는 매립완료 후 체적비가 단기적으로 1.3~1.5의 값을 갖고, 장기적으로 1.1~1.3의 값을 갖기 때문에 준설점토에 비하여 압축량과 압축시간에 대한 연구가 상대적으로 저조한 편이다. 그러나 준설매립이 완료된 현장은 투기높이가 상당히 크기 때문에 작은 체적비를 갖는다 할지라도 일반적으로 큰 압축량이 발생한다.

그림 2와 같이 토출구로부터 멀어짐에 따라 SP-SM(그림 2-NO.4), SM(그림 2-NO.1), ML(그림 2-NO.2)의 순으로 세립분 비율이 증가하며, 350m 지점부터 원지반(그림 2-NO.3)과 같은 지반을 형성함을 알 수 있다(심민보, 2001).

그림 3은 세립분 함유량을 0~100%로 조절하여 표준압밀시험을 통한 압축지수를 나타낸 것이다. 세립분 함유량 15%까지 압축지수의 변화는 거의 없으며, 이후 세립분 함

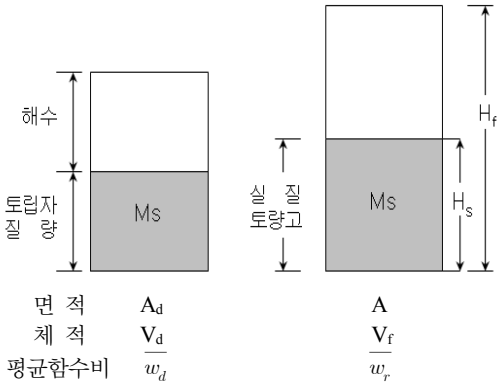


그림 1. 준설매립지반의 체적변화

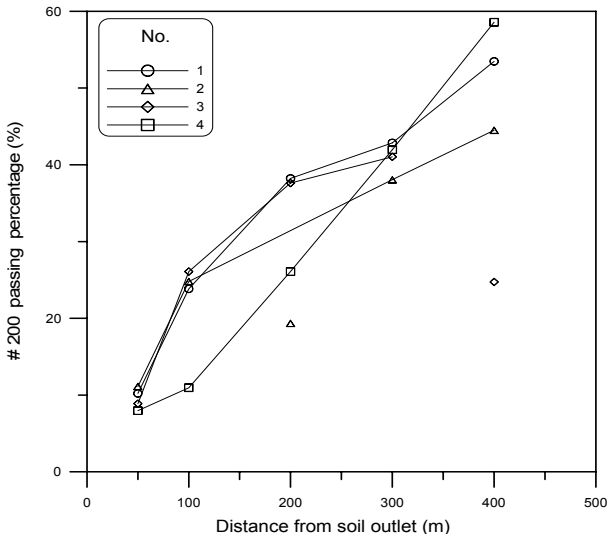


그림 2. 길이에 따른 입도분포

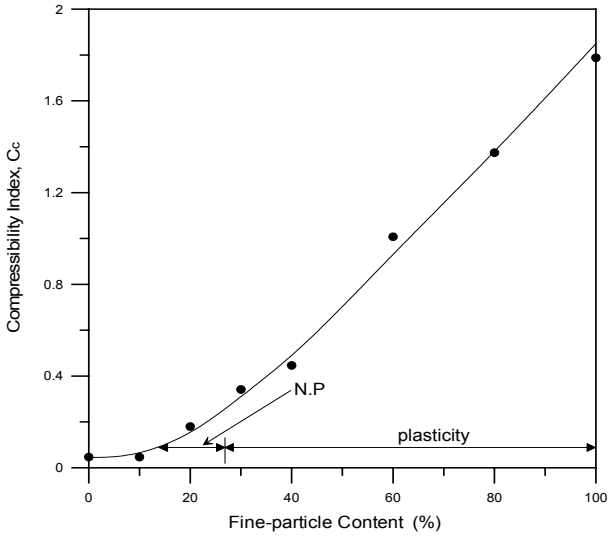


그림 3. 미세입자함유량에 따른 압축지수

유량에 따라 비례하여 선형적으로 증가한다. 이러한 특성 연구에 대하여 국내에서 거의 이루어지지 않고 있다(심민보, 2001).

3. 실내모형실험

3.1 실험개요

본 연구에서는 실제현장조건을 모사하기 위하여 단계투기방법으로 실시하였으며, 토출구로부터의 분리퇴적 현상을 분석하기 위하여 상사의 법칙을 적용하였다. 현장의 준설토 투기 Pond의 20배를 축소시킨 실험장치를 길이 2,650mm, 폭 770mm, 높이 735mm로 제작하여 실내모형실험을 수행하였으며, 투기량과 투기속도, 투기 높이, 토출구 개수 등도 현장의 Scale effect를 고려하여 설계 및 시공계획에 수립된 기준으로 20배 정도를 축소하여 실험을 실시하였다.

실험 시료는 국내에서 준설·매립사업이 가장 활발히 진행되고 있는 서해안 지역의 준설토를 대표하는 군산지역에서 채취한 ML과 SM 시료로 실시하였다. 각각 실험을 통한 시료 고유값인 함수비, 입도시험, 비중, 액·소성한계 등을 구하여 이를 바탕으로 통일분류법에 의해 흙을 분류하였다.

실험 조건은 표 1에 나타낸 것과 같이 함수비는 염분비 0.03 보정을 통하여 현장 준설토의 토출구 함수비와 유사한 300%, 500%, 700%로 정하였으며, 투입량은 0.58m^3/hr로 단계별로 투기하였다.

침강이 종료한 후 표면수를 제거하고 다음 단계 준설토를 투입하는 과정을 반복하여 30cm/day로 4단계로 투기하여 실제현장을 재현하였으며, 투기 후 계면고가 시간 축에 평행하게 Creep 거동을 확인한 후 실험을 종료하였다. 실험이 종료된 준설토에 대해서 심도별, 거리별로 세립토 함유량 및 함수비 분포, 베인전단시험 등을 실시하여 비교·분석하였다.

3.2 토질의 물리적 특성

우리나라에서 준설·매립사업이 가장 활발히 진행되고 있는 지역 중 한 곳인 서해안 지역은 실트, 실트질 모래가 주를 이루고 있다. 본 논문에서는 국내 준설매립 시 분리퇴적 현상을 검증해보고자 서해안 지역의 준설토를 채취하여 실험시료로 선정하였다.

서해안 지역에서 채취한 준설토는 통일분류법상 ML로 분류되는 실트와 SM으로 분류되는 실트질 모래이다. 이들 준설토 시료는 분리퇴적실험에 앞서 기본토질특성시험을 실시하였으며, 그 결과는 그림 4와 표 2에 나타냈다.

기본물성시험은 시험결과에 영향을 미칠 정도의 크기가 큰 자갈이나 조개껍데기 등의 불순물을 제거하여 시료를 준비하였고, 염분이 다량 함유되어 있는 경우, 염분의 함유량은 점토 입자의 흡착력 및 입자 표면의 흡착수, 면모화에 따른 인력 구조 등에 영향을 미치게 되어 비중 값이 달라지기 때문에 이에 대한 영향을 최소화하기 위해 기본 토질특성

표 1. 실험조건

구 분	투기함수비(%)	투입량(m^3)	펌프용량(m^3/hr)	단계별 투기시간(min)	투기조건	투기방법
ML, SM	300, 500, 700	0.58	1.2	28	30cm/day(4일)	단계투기

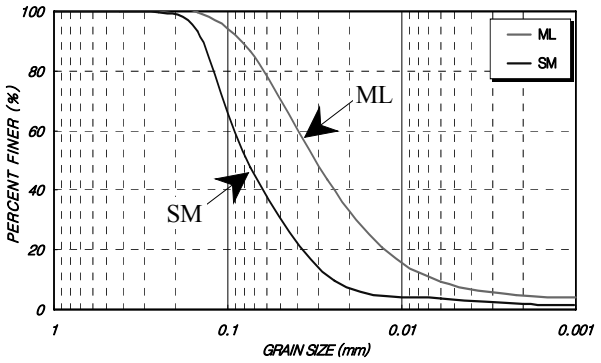


그림 4. 입도곡선

표 2. 시료조건

구 분	G_s	w_n	PI	#200 통과율
ML	2.68	32.8%	N.P	86.7%
SM	2.66	37.6%	N.P	47.6%

시험 시 대상 시료를 물로 충분히 염분을 뺀 후 실험을 실시하였다.

기본물성시험결과 두 시료는 #200체 통과율이 86.7%, 소성지수는 N.P로 통일분류법상 ML과 #200체 통과율이 47.6%와 소성지수는 N.P로 통일분류법상 SM으로 분류되었으며, 전형적인 서해안 준설토의 특성을 보였다.

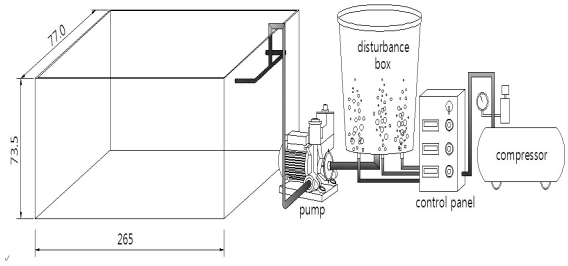
기본물성시험이 완료된 시료를 바탕으로 모든 실험은 염분비 0.03으로 보정한 대표적인 준설함수비인 투기함수비 300%, 500%, 700%로 ML시료와 SM시료로 각각 균질하게 제조하여 실시하였다.

3.3 실험장치 및 구성

준설매립 시 분리퇴적실험을 검증하기 위한 실험 장치는 침강 및 자중압밀 특성을 관찰할 수 있도록 상사의 법칙을 적용하여 전면부는 투명한 아크릴로 제작하였으며 길이 2,650mm, 폭 770mm, 높이 735mm로 제작하였다.

그림 5와 같이 시료를 균등하게 투입할 수 있도록 교반장치 하부에는 3개의 hole을 통해 공기로 혼합할 수 있는 Air 장치와 전동교반기로 동시에 교반할 수 있도록 제작하였고, 교반이 완료되면 전동식 펌프로 준설토를 흡입하여 토조 안으로 투입하였다.

토출관은 실험장치와 실제 현장의 scale을 고려하여 2개를 설치하였고 단계별 시험 종료 후와 전체실험이 종료될 때까지 표면수는 상시 제거한 후 다음 단계를 투기하였다. 총 투기단계는 1일 1단계씩 4일 동안 4단계를 투기하였다.



(a) 실험장치 모식도

(b) 실험종료 후 사진

그림 5. 실험장치 모식도 및 사진

3.4 실험방법

준설매립 시 분리퇴적 현상을 확인하기 위하여 국내 준설현장에서 사용되는 펌프준설방법을 축소 모형화시켜 소형펌프를 이용하여 토조에 단계적으로 투입하는 방법에 의해 수행하였다. 실험에 들어가기 전에는 실험 조건이 상부층의 일차원 배수이기 때문에 토조 연결부에 누수가 생기는 것을 방지하기 위해 실리콘을 이용하여 접합부를 방수처리한 후 물을 부어 누수여부를 확인하였다.

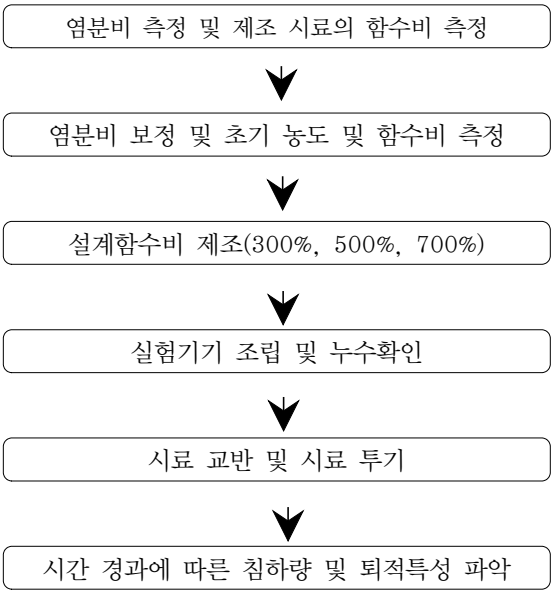


그림 6. 실험순서

준비된 준설토 시료를 전동 교반기를 이용하여 균질하게 교반한 후, 교반된 시료는 노건조로를 이용하여 건조시켜 함수비를 측정하였다. 해저 준설토의 노건조 함수비는 염분을 함유하고 있기 때문에 염분비 0.03으로 함수비를 보정하여 실험하려는 함수비로 균질하게 제조하였다. 시료는 서해안의 대표적인 준설토인 실트질 모래와 실트를 사용하였고, 투입함수비는 현장에서 투기하는 함수비에 거의 비슷한 범위인 300%, 500%, 700%로 결정하였다.

투기에 필요한 전체시료를 제조한 후, 투기 시 시료의 균질성을 확보하기 위하여 Air 장치와 전자동 교반기로 같이 믹싱한 후 펌프를 이용하여 투기하였다. 투기 높이는 현장의 호안 높이에 대한 Scale Effect를 고려한 40cm의 높이에서 실시하였으며, 투기방법은 단계투기로 30cm/day로 4단계에 걸쳐 수행하였다.

투기된 시료는 침강 및 자중압밀을 관찰하기 위하여 초기 2일 동안은 계면고를 육안으로 세밀하게 측정하였고 그 이후로는 1일 주기로 측정하였다. 계면고가 시간 축에 평행하게 Creep 거동을 확인한 후 시험을 종료하였으며 거리별, 심도별 퇴적특성 분석을 위한 시료를 채취하였고, 핸드베인 시험기를 이용하여 전단강도를 구하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 시간경과에 따른 계면고 변화

펌프 준설 시 조립토와 세립토가 거리별로 분리되어 흙의 압축 성질이 바뀌면 거리에 따른 계면고의 변화 역시 다르게 변화하는 2차원 분리퇴적을 확인하기 위하여 거리에 따른 계면고의 변화를 살펴보았다. 통일분류법 ML과 SM으로 분류되는 서해안의 실트와 실트질 모래를 사용하여 투기함수비 300%, 500%, 700%로 SM과 ML 시료에 대해 각각 실험을 수행하였으며, 실제 준설·매립현장의 시공과정을 유사하게 재현하기 위하여 전체투기가 아닌 단계투기 방법을 이용하였다. 또한, 자중압밀의 종료시점은 침강퇴적이 종료된 후에 자중에 의한 압밀침하가 진행되어 침강속도가 현저히 늦어지는 Creep의 형태로 되었을 때 자중압밀 종료시점으로 정하였다.

그림 7은 각각의 시료에 대한 시간 경과에 따른 계면고 변화를 나타내고 있다. ML시료는 SM에 비해 긴 시간에 걸쳐 자중압밀과정이 종료되었으며, 조립토와 세립토의 분류는 명확히 나타나지 않았다. 하지만 SM시료는 확산거리에 따라서 침하량의 차이가 뚜렷하게 나타났으며, 조립토와 세립토의 분리퇴적현상이 이루어짐을 확인할 수 있다. 또한, ML과 SM 두 시료 모두 투기함수비 300%보다 700%의 높은 함수비일수록 짧은 침강단계를 가지며 자중압밀시점에 빠르게 도달함을 확인할 수 있었다.

전체 침하량 중 침강에 의한 침하량이 차지하는 비율도 SM시료가 ML시료에 비해 높았으며, 두 시료의 침하량은 700%의 높은 함수비에서 가장 크게 나타나는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 SM이 ML보다 조립질이 많이 분포되어 있고 이에 따라 무거운 입자들이 빨리 침강하기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 최종계면고

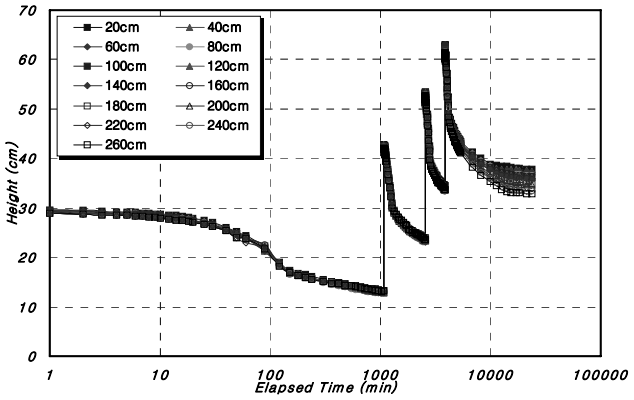
본 연구에서는 준설·매립 시에 발생하는 분리퇴적현상을 확인하고자 서해안의 ML시료와 SM시료를 사용하여 직경 1.5cm의 이송호수를 통하여 초기함수비 300%, 500%, 700%를 균등하게 제조하여 1일 30cm의 단계투기방법에 의하여 실험을 실시하였다. 각 단계별 계면고 변화를 일정한 시간간격에 따라 지속적으로 측정하였으며, 최종계면고 측정 후 전 단계 투기에서 분리된 상등수를 제거한 후 다음 단계의 투기를 실시하였고 마지막 단계인 4단계 투기를 완료한 후 초기 2일 동안은 계면고를 육안으로 세밀하게 측정하였고 그 이후로는 1일 주기로 측정하였다.

그림 8은 최종계면고 결과를 나타내고 있다. ML시료는 모든 함수비에서 3단계까지 퇴적고는 확산거리가 따른 분리퇴적현상이 거의 나타나지 않았으나, 4단계 투기완료 후에는 전 단계와 달리 퇴적고는 토출구로부터 멀어질수록 낮게 측정됨을 확인할 수 있었다.

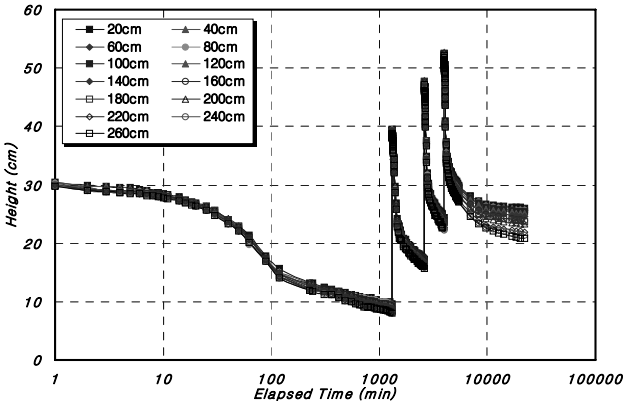
SM시료는 모든 함수비와 4단계까지 0～100cm 근방에서는 퇴적고는 높게 측정되었으며, 함수비가 낮을수록 토출구 바로 앞에 있는 부근에서 매우 많은 흙이 퇴적되어 퇴적고가 다른 함수비보다 높게 측정되었다. 이와 같은 퇴적고 상승의 차이는 투입지점을 경계로 무거운 입자가 빨리 침강되었고, 미세한 입자는 토출구에서 떨어지는 압력 때문에 토출구에서 멀어질수록 미립자가 퇴적되기 때문에 나타난 것으로 판단할 수 있다. 이는 퇴적되어 퇴적고가 다른 함수비보다 높게 측정되었다. 이와 같은 퇴적고 상승의 차이는 투입지점을 경계로 무거운 입자가 빨리 침강되었고, 미세한 입자는 토출구에서 떨어지는 압력 때문에 토출구에서 멀어질수록 미립자가 퇴적되기 때문에 나타난 것으로 판단할 수 있다.

4.3 자중압밀 종료 후 심도별 함수비 분포

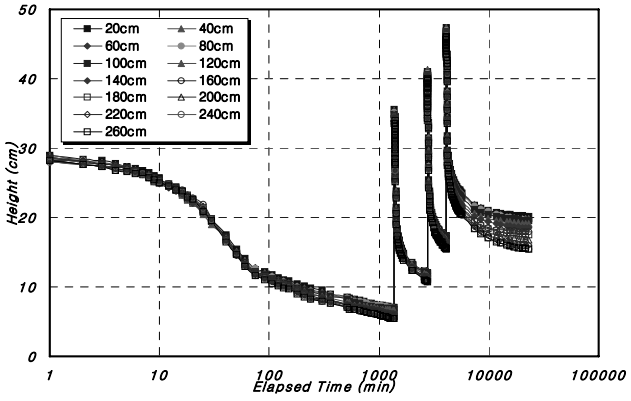
침강압밀곡선에서 자중압밀이 종료되어 계면고가 시간



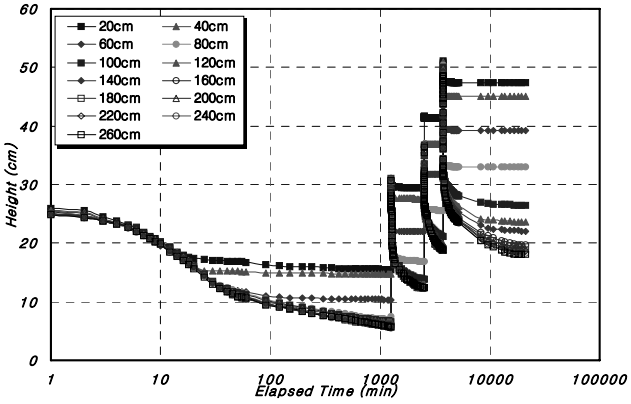
(a) ML시료-300%



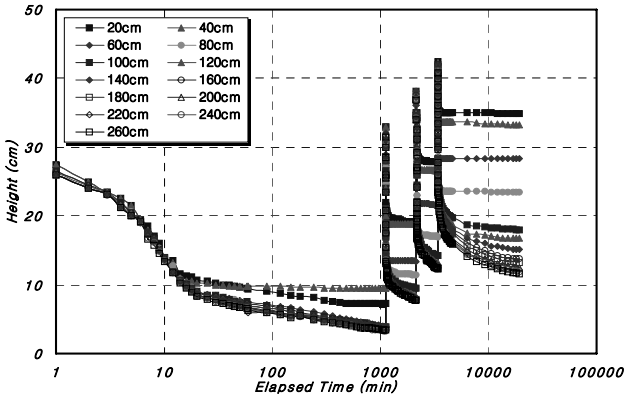
(b) ML시료-500%



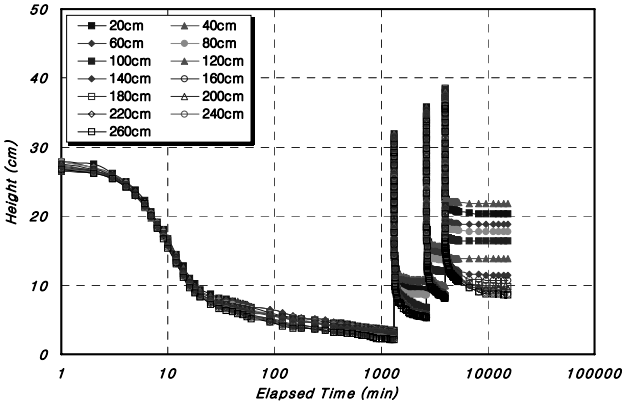
(c) ML시료-700%



(d) SM시료-300%



(e) SM시료-500%



(f) SM시료-700%

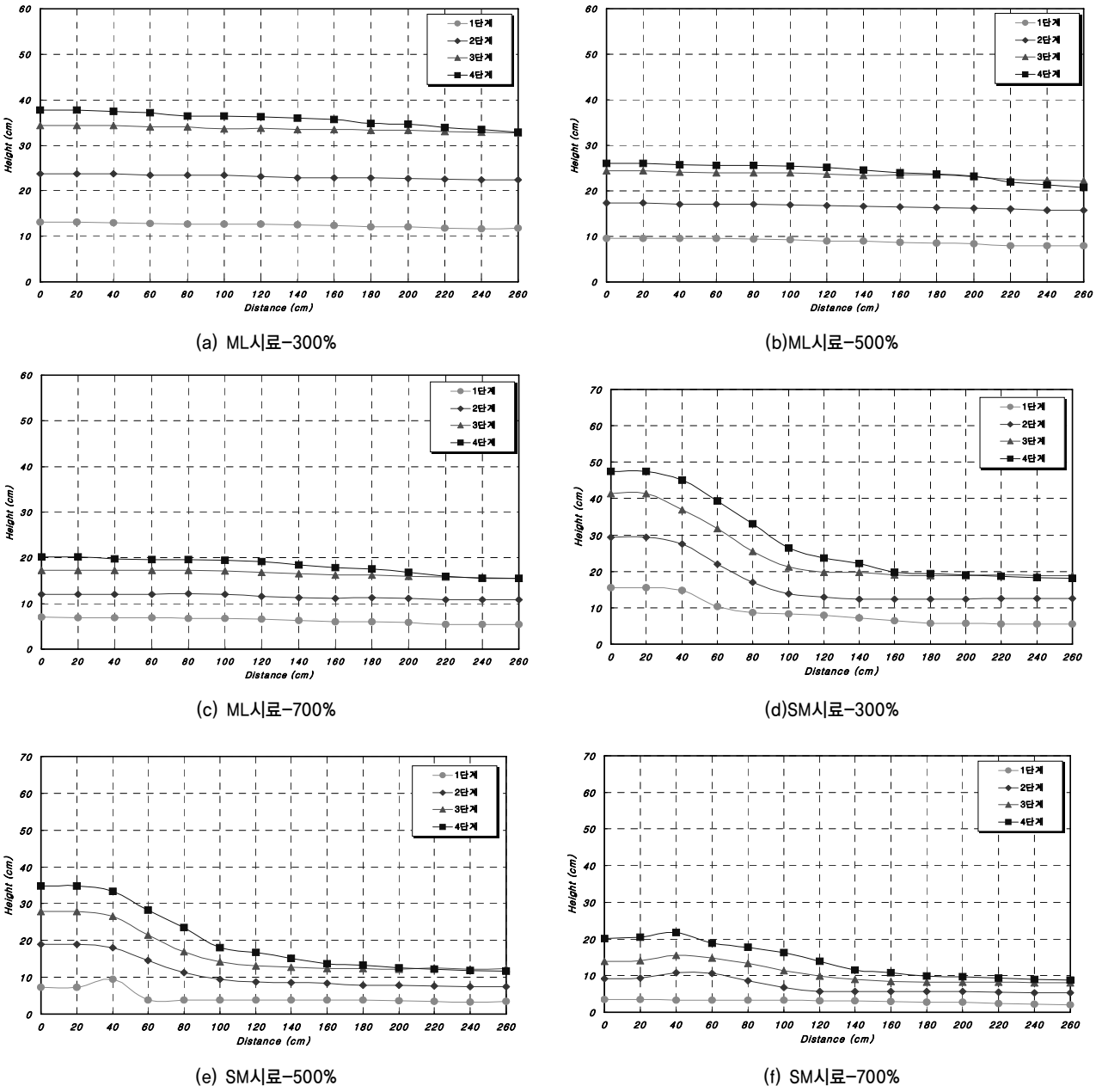
그림 7. 시간에 따른 계면고 변화

축에 평행하게 Creep 거동하는 것을 확인한 후 실험을 종료하였고, 퇴적층에 대하여 그림 9와 같이 거리 400mm, 폭 300mm 마다 심도별로 나누어 함수비를 비교·분석 하였다.

상향 일면배수만을 허용하는 실험의 특성상 모든 시료의 심도가 깊어짐에 따라 함수비가 감소하는 경향을 보였으며, 투기거리와 폭에서의 동일한 심도일 때 함수비 차이는 미비하게 발생하였다.

그림 10은 ML과 SM시료의 자중압밀 종료 후 거리에 따른 높이별 함수비를 나타냈다. 심도가 가장 깊은 40cm 확산거리에서는 ML의 경우 28～31%, SM의 경우 26～30%의 분포를 보였으며, 두 시료의 차이는 거의 발생하지 않았다. 240cm 확산거리에서는 ML-33～57%, SM-131～162%의 분포를 보였으며, SM시료가 ML시료 보다 25～35% 높게 측정되었다. 이는 SM시료는 확산거리에 따라 조립질과 세립질이 명확하게 구분되어 나타난 결과로 판단된다.

두 시료 모두 하부에서 상부로 올라갈수록 함수비가 급



(a) ML시료-300%　(b)ML시료-500%

(c) ML시료-700%　(d)SM시료-300%

(e) SM시료-500%　(f) SM시료-700%

그림 8. ML과 SM시료의 최종계면고

격히 높아졌으며, ML은 최상부위 표층부분에서의 40cm 확산거리 일 때 함수비는 328～385%의 분포를 보였으며, 240cm 확산거리에서는 367～399%의 분포를 보여 거의 차이가 없는 것으로 확인되었다.

하지만 SM의 경우 최상부위인 표층부분 40cm의 확산거리와 240cm의 확산거리에서 29～394%의 함수비 차이를 보여 토출구에서의 거리에 따라 무려 13.6배의 함수비가 차이나는 것으로 확인되었다. 이는 무거운 조립질 입자가 먼저 침강하고 미립자는 토출구에서 떨어지는 압력때문에 토출구에서 원거리에 퇴적되었기 때문이다.

이와 같이 SM시료는 ML시료보다 조립토와 세립토의 구

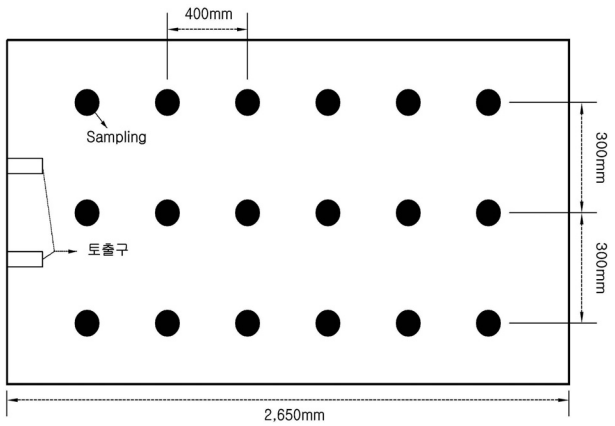
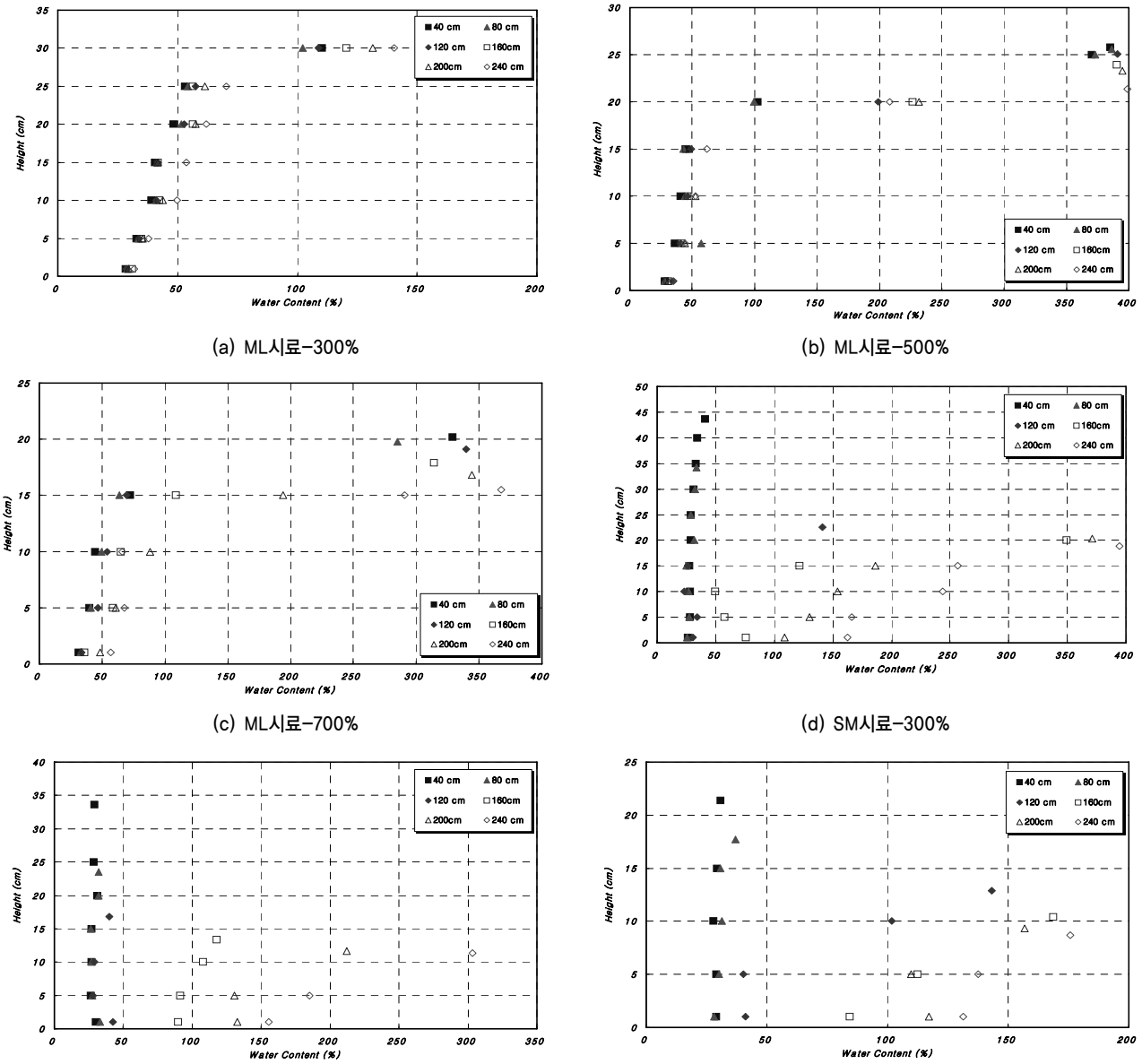


그림 9. 함수비 측정 위치



(a) ML시료-300%

(b) ML시료-500%

(c) ML시료-700%

(d) SM시료-300%

(e) SM시료-500%

(f) SM시료-700%

그림 10. ML과 SM시료의 함수비 측정

분이 확산거리에 따라 명확히 분리되어 퇴적되었다고 판단되며 조립토가 쌓여진 부분에서의 함수비는 높이에 따라 약간의 차이만 보이며 낮은 함수비를 보이고 있으나, 세립분이 쌓여진 부분에서는 함수비 차이가 크게 나타났으며, 함수비가 높게 나타난 것을 확인할 수 있었다.

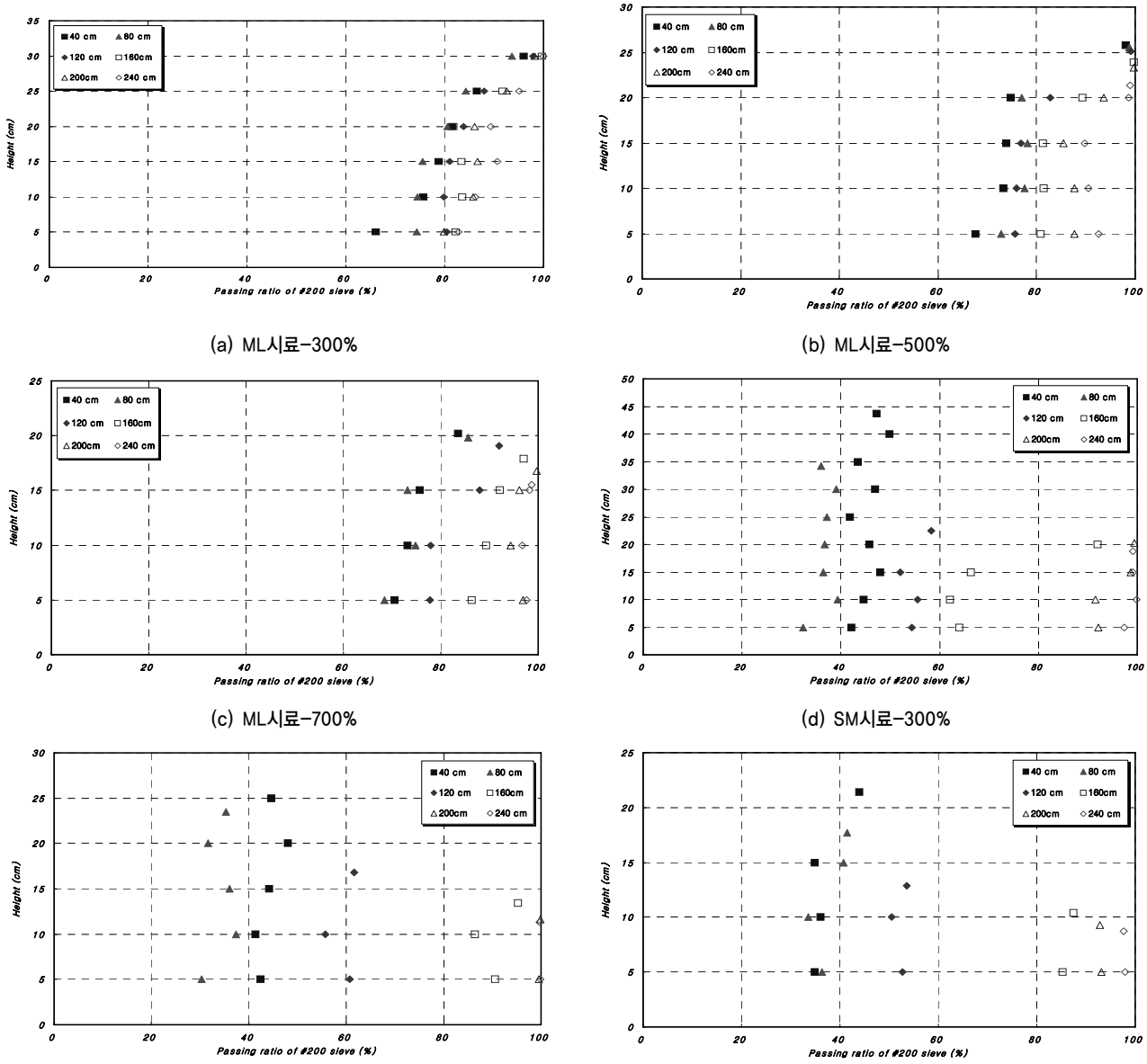
또한, 두 시료 모두 투기함수비와 관계없이 확산거리가 멀어지고 심도가 낮아짐에 따라 함수비가 높아지는 경향을 확인하였다. 조립질 재료일수록 조립토와 세립토가 명확하게 분리되어 퇴적되었음을 확인할 수 있었다.

4.4 자중압밀 종료 후 세립분 함유량 분석

그림 11은 자중압밀의 종료 후 준설토 퇴적층에 대하여 표층에서 하향으로 5cm의 간격으로 시료를 채취하여 #200체 통과량시험 결과를 나타내고 있다.

ML시료의 경우 가장 심도가 깊은 40cm의 확산거리에서 62~71% 통과율을 보였으며, 240cm의 확산거리에서는 82~98% 통과율을 보였다. 또한, 최상부 40cm의 확산거리에서 84~95% 통과율을 보였으며, 240cm의 확산거리에서 거의 99% 통과율을 확인하였다. 심도가 낮아지고 확산거리가 멀어질수록 근거리보다 최대 1.3배 통과율이 커짐을 확인할 수 있었다.

SM시료의 경우 심도가 가장 깊은 40cm의 확산거리에서 35~43% 통과율을 보였으며, 240cm의 확산거리에서 98~99%의 통과율을 보였다. 또한 최상부 표층부위에서 40cm의



(a) ML시료-300%

(b) ML시료-500%

(c) ML시료-700%

(d) SM시료-300%

(e) SM시료-500%

(f) SM시료-700%

그림 11. ML과 SM시료의 #200체 통과율 분석

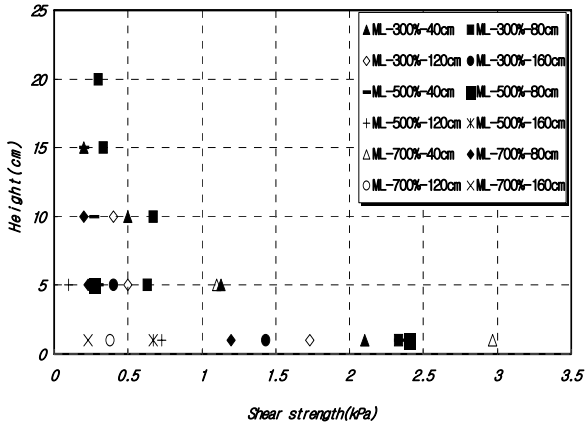
확산거리에서 44~47% 통과율을 보였으며, 240cm의 확산거리에서 98~99%대 통과율을 보여 토출구에서 근거리일수록 최대 2.8배 정도 세립분이 적게 나오는 것으로 확인되었다.

이는 확산거리가 근거리일수록 대부분의 조립토가 쌓여있기 때문이고 심도별로 통과율이 큰 차이가 나지 않았으며, 조립토가 쌓인 부분과 세립토가 쌓인 부분의 경계지점(120cm~160cm)을 기준으로 통과율에 큰 차이가 있었다. 이와 같이 SM시료의 결과는 ML시료의 결과와는 다른 경향을 보였고, SM시료가 ML시료보다 확산거리에 따라 조립질과 세립질이 명확히 구분되어 퇴적되었음을 확인할 수 있었다.

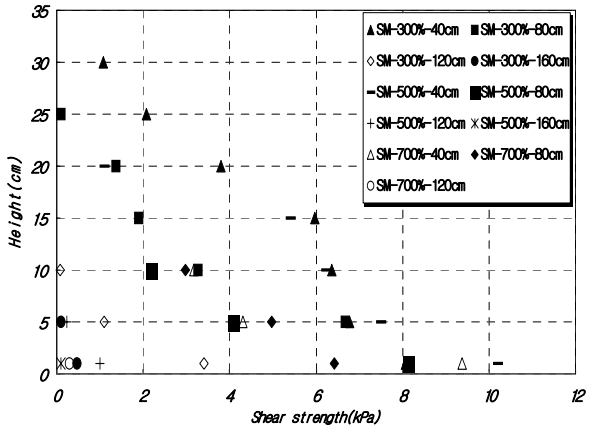
4.5 전단강도 분석

베인시험은 점성토의 전단강도를 원위치에서 측정하는 방법으로 본 논문에서는 간편하고 신속하게 측정할 수 있는 핸드베인을 사용하여 퇴적지역에 40cm의 확산거리마다 5cm의 높이별로 3번씩 실험을 실시하여 평균값을 적용하였다.

그림 12는 자중압밀종료 후 퇴적된 시료에 대한 베인시험의 결과이다. 두 시료 모두 조립토가 퇴적된 120cm의 확산거리 이내에서 전단강도를 측정할 수 있었으며, 그 이상의 확산거리에서는 세립토층의 고함수비의 영향으로 전단강도 값이 거의 나타나지 않아 측정할 수 없었다. 흙의 전단강도는 ML시료에서 최대 2.97kPa의 값이 나타났으며, SM시료에서 최대 10.2kPa의 값이 나타났고, SM시료는 ML시



(a) ML시료



(b) SM시료

그림 12. ML과 SM시료의 전단강도 분석

료보다 3.4배 더 높은 전단강도를 나타냈다. 이는 준설매립 시 조립질 함량 및 펌프 준설선 토출구 위치에 따라 무거운 조립질이 빠르게 침강하면서 확산거리가 짧고, 이와 반대로 가벼운 미립자는 확산거리가 멀리 분포하는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 준설·매립 시 발생되는 분리퇴적현상을 검증 및 분석하기 위해 실내모형실험을 상사의 법칙을 적용하여 길이 2,650mm, 폭 770mm, 높이 735mm의 토조를 이용하여 단계투기 방법에 의한 2차원 분리퇴적실험을 실시하였다. 자중압밀 침하거동을 예측하고 실험 종료 후 퇴적층에 대하여 확산거리에 따른 침강압밀 특성과 확산거리에 따른 높이별 함수비 분포, 통과율 변화, 전단강도 특성을 파악하였다.

(1) SM시료는 ML시료보다 조립질과 세립질의 명확한 분리퇴적으로 인해 확산거리 및 퇴적고에 따라 함수비 변화폭이 큼을 확인할 수 있었으며, ML시료의 경우 심도가 낮아지고, 확산거리가 커질수록 통과율이 커짐을 확인할 수 있었다. SM시료의 경우 조립토와 세립토의 경계지점인 120cm~160cm을 기준으로 통과율의 큰 차이가 보임을 확인하였다. 실제 매립현장은 배사관 유출구 및 여수토 위치에 따라 퇴적상태가 매우 다르게 분포되는 것을 알 수 있다. 따라서 보다 경제적인 매립을 위해 세부적인 토지이용계획을 고려하여 배사관 위치 및 여수토 위치를 결정하는 것이 연약지반 처리비용을 절약할 수 있을 것이다.

(2) 전단강도는 ML시료에서 최대 2.97kPa, SM시료에서는 최대 10.2kPa로 ML시료보다 3.4배 더 높은 전단강도를 나타냈다. SM시료의 전단강도 값들은 조립토가 퇴적된 120cm의 확산거리 이내에서 나타낸 값들이며, 그 이상의 확산거리에서는 세립토 퇴적층의 고함수비의 영향으로 전단강도 값이 거의 나타나지 않아 측정할 수가 없었다. 이는 압축성과 연관되어 지반에 따른 표층처리 및 지반개량에 있어 공법을 달리 해야 함을 판단할 수 있다.

(3) 향후 본 연구 결과값을 실제 준설·매립공사에서 표층처리공법 및 지반개량, 시설물의 종류 등을 결정하는데 있어 방향성을 제시할 수 있을 것으로 판단되며, 이는 설계 및 시공 시 경제성 향상에 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 김수삼, 조용기, 송정락, 정승용(1995), 준설 시 매립층의 퇴적특성에 관한 연구, *학술발표회 논문집*, 대한토목학회, pp. 457~460.
2. 김형주, 이민선, 이용주, 김대우(2003), 준설토의 체적변화 및 2차원 퇴적특성에 관한 연구, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 22, No. 4, pp. 155~165.
3. 심민보(2001), *준설토의 침강 및 자중압밀 특성에 관한 실험적 연구*, 박사학위논문, 서울시립대학교, pp. 41~42.
4. 이송, 양태선, 황규호(1994), 준설매립 연약지반의 자중압밀 특성, *대한토목학회 논문집*, Vol. 14, No. 4, pp. 953~964.
5. 이송, 전종구(2002), 조립토가 혼합된 준설토의 퇴적 및 압밀특성, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 18, No. 2, pp. 75~86.
6. Imai, G.(1984), Applicability of Hydraulic Consolidation Test for Very Soft Clayey Soils, *Soils and Foundations*, Vol. 24, No. 2, pp. 29~42.

(접수일: 2011. 3. 7 심사일: 2011. 3. 30 심사완료일: 2011. 5. 11)