Journal of the Korean Geo-Environmental Society
15(3): 49～55. (March, 2014) http://www.kges.or.kr
ISSN 1598-0820
DOI http://dx.doi.org/10.14481/jkges.2014.15.3.49

원심모형실험을 통한 준설토의 퇴적 특성

Sedimentation Characteristics of Dredged Soil by Geo-Centrifuge

안 광 국† · 이 규 환[1] · 허 열[2] · 강 홍 식[2]
Kwangkuk Ahn · Kyuhwan Lee · Yol Heo · Hongsig Kang

Received: December 12th, 2013; Revised: December 23rd, 2013; Accepted: January 27th, 2014

ABSTRACT : Characteristics of sedimentation of dredged soil is depended on the field condition and characteristics of dredged soil because dredged fill ground was formed by various field condition, sedimentation and self-weight consolidation process of dredged soil. Dredged fill ground is formed as separated sedimentary layer by characteristics of dredged soil. Therefore, it requires some special test method to consider a various field condition, characteristics of sedimentation and self-weight consolidation of dredged soil. In this study, in order to identify the characteristics of sedimentation of dredged soil with disposing velocity geo-centrifuge test and laser particle size analyzer were performed. As a results, river and mixed dredged soil show the separation sedimentation by soil particle size. And sedimentation of clayey dredged soil is parallel to the bottom surface of dredged fill space.

Keywords : Dredged soil, Sedimentation, Geo-Centrifuge, Laser particle size analyzer

요 지 : 준설매립지반은 다양한 현장조건과 준설토의 침강-퇴적-자중압밀 과정에서 형성되기 때문에 현장조건 및 준설토의 특성에 따라 준설매립지반의 거동이 좌우된다. 준설매립지반은 준설토의 특성에 따라 서로 다른 분리퇴적층이 조성되기 때문에 다양한 현장조건과 준설토의 침강-퇴적-자중압밀특성을 고려할 수 있는 실험방법이 필요하다. 이에 본 연구에서는 현장조건인 펌프의 투기속도와 준설토의 특성에 따른 준설토의 침강-퇴적 양상을 확인하기 위하여 원심모형실험과 Laser Particle Size Analyzer를 수행하였다. 그 결과 모래 준설토 및 조립질과 세립질 흙이 혼합된 준설토는 입자에 따라 분리 퇴적되는 양상으로 나타났으며, 점성 준설토는 매립공간의 바닥면과 평행하게 퇴적되는 양상으로 나타났다.

주요어 : 준설토, 침강-퇴적, 원심모형실험, 레이저 입도분석기

1. 서 론

세계적으로 해양·항만과 관련된 준설매립사업이 지속적으로 증가하면서 국제 준설매립 시장의 규모는 거대해지고 있다. 지속적으로 증가하고 있는 국제 준설매립시장을 미국, 유럽, 일본 등 주요 국가와 기업들이 보유한 기술력을 바탕으로 국제 준설매립 시장을 점유하고 있는 상황에서 국내 준설매립 기술력의 상승은 국제 준설매립 시장에 진출할 수 있게 되었으나 2000년 이후 국내 기술의 정체로 인해 국내 자체 기술력만으로는 해외 선진기술들과 경쟁을 통한 국제 준설매립 시장 점유가 어려워지고 있는 실정이다. 준설매립기술과 관련하여 현장에서 형성되는 준설매립지반은 다양한 현장조건과 일괄적인 준설토의 침강-퇴적-자중압밀 과정에서 형성되며, 이러한 현장조건 및 준설토의 침강-퇴적-자중압밀 특성에 따라 매립기간 및 준설매립지반의 거동이 좌우되게 된다. 준설매립지반을 계획하기 위한 설계정수 산정은 준설토의 침강-압밀특성을 확인하기 위한 연구 Kim(2006), Yoo & Kim(2000), Kim(2010), Yoon(2010), Yoo et al.(2005) 등이 실내실험인 Column 시험 및 표준압밀시험, CSR 압밀실험, 원심모형 자중압밀실험과 수치해석을 통한 준설토의 침강-압밀특성을 확인하는 연구가 수행되었다. 또한 배사관의 위치, 투입속도, 퇴적거리, 매립지 면적, 매립고 등의 현장조건과 준설토의 침강-퇴적-자중압밀의 일련의 과정을 고려한 준설토의 퇴적특성을 확인하기 위하여 Choi(2009) 및 Choi(2003), Lee(2005), Yoon(2002) 등이 실내 대형모형토조를 이용하여 현장조건을 고려한 준설토의 확산 및 분리퇴적 특성에 대한 연구가 수행되었다. 다양한 현장조건과 준설토의 침강-퇴적-자중압밀의 일련 과정을 통해 이루어진 준설매립지반은 준설토의 특성에 따라 서로 다른 분리퇴적층이 조성되기 때문에 다양한 현장조건과 준설토의 침강-퇴적-자중압밀특성을 고려한 합리적인 준설매립지반의 특성을 확인하기 어렵다. 이에 보다 합리적으로

† School of Civil Engineering, Chungbuk National University (Corresponding Author : akk@chungbuk.ac.kr)
1) Department of Civil and Environmental Engineering, Konyang Universiy
2) School of Civil Engineering, Chungbuk National University

준설매립지반 특성을 확인하기 위해 다양한 현장조건과 준설토의 침강-퇴적-자중압밀 과정을 일괄적으로 고려할 수 있는 실험방법이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 현장조건인 펌프의 투기속도와 준설토의 특성에 따른 준설토의 침강-퇴적 양상 및 원심모형실험과 준설토에 의해 형성된 준설매립지반의 입도분포를 확인하기 위한 Laser Particle Size Analyzer를 수행하였다.

2. 준설토의 퇴적 특성

비교적 균질하고 세립분을 많이 함유하고 있는 준설토를 펌핑에 의해 매립지 내로 이송하는 경우 시간의 변화에 따라 퇴적 상태는 토출구의 위치에 가까운 지역에서부터 토립토가 분리되면서 토립자의 중량에 의해 침강하는 현상과 유기속도에 의해 흘러가는 동안에 세립토가 입자간의 상호작용에 의해 floc을 형성하고 이것이 침강하는 현상으로 나타난다. 그 결과 매립지반을 구성하는 입도조성은 준설된 원지반과는 다르게 되며, 대략적으로 다음과 같이 구분할 수 있다. 폰드 내 토출구 부근에서는 입도분리현상이 발생하고 그로 인해 조립분이 바로 퇴적하는 반면에 그 외 지역은 해수와 혼합된 고함수비의 세립분으로 이루어지게 된다. 또한 매립지가 평면적으로 구획화되어 있고 구획 간에 중간 여수토가 있는 경우에는 그 하류에 있는 매립지 또한 매립 침전지는 세사가 거의 혼합되어 있지 않은 세립분으로 이루어진 지반이 Fig. 1과 같이 형성된다.

3. 실내모형실험

3.1 실험에 사용된 준설토 특성

본 원심모형실험에 사용된 국내 대표적인 준설토는 시료의 크기가 0.075 mm를 기준으로 통과량이 약 20 %인 조립질의 모래 준설토와 시료의 크기가 0.075 mm를 기준으로 통과량이 약 90 %인 세립질인 점성 준설토로 분류하여 모래 준설토의 경우 충북 청원군 소재의 미호천에서 채취한 Fig. 2(a)와 같은 입도분포를 갖는 시료를 사용하였으며, 점성 준설토는 남해안 광양에서 채취한 Fig. 2(b)와 같은 입도분포를 갖는 시료를 사용하였다.

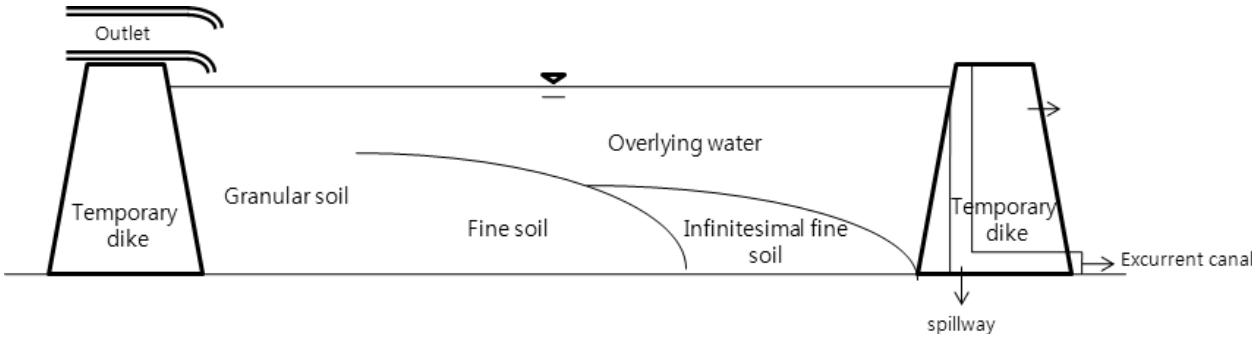
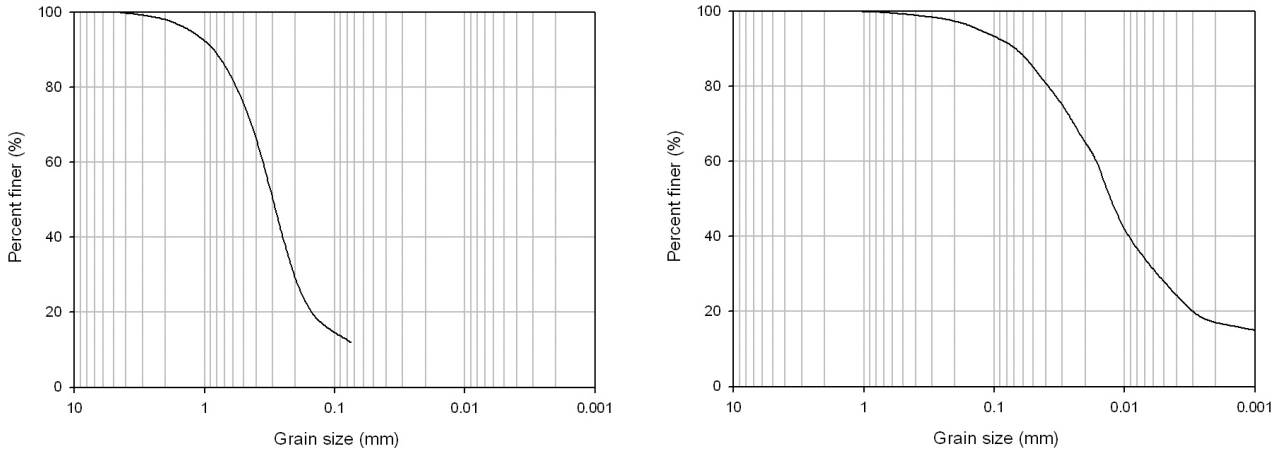
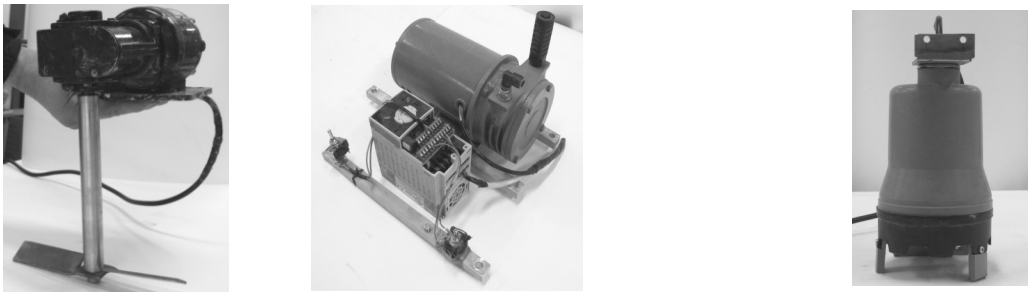


Fig. 1. Sedimentation processes of dredged soil



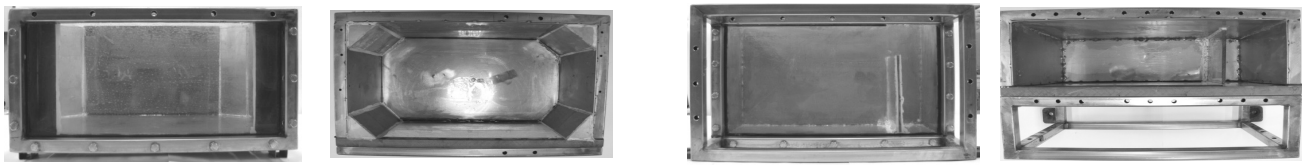
(a) Sandy dredged soil (b) Clayey dredged soil

Fig. 2. Used dredged soil for tests



(a) Stirring apparatus (motor & pump)　　(b) Disposing pump

Fig. 3. Subsidiary equipment



(a) Stirring model box　　(b) Sedimentation model box

Fig. 4. Model box for centrifugal test

3.2 실험장치 및 구성

본 실험에 사용된 원심모형실험기의 최대원심가속도는 200 g-level, 최대용량은 25 g·tonf이고, 중심축에서 힌지까지의 거리가 920 mm, 스윙바스켓 저면까지의 거리는 1,280 mm이다. 준설매립현장조건을 고려하기 위해 20 g-level의 중력수준에서 현장과 동일하게 준설토를 함수비 600 % 이상의 현탁액상태로 교반하기 위하여 3,000 rpm의 모터와 제트펌프로 구성된 Fig. 3(a)와 같은 교반장치를 제작하였다. 그리고 현탁액상태의 준설토를 매립공간에 투기하기 위한 Fig. 3(b)와 같은 투기장치를 제작하여 사용하였다. 준설토의 투기속도는 20.4 cm/s의 투기속도를 유지하도록 제작하였다.

투기속도를 고려한 준설토의 침강-퇴적 양상을 확인하기 위하여 교반장치 및 투기장치를 설치하고 600 % 함수비의 준설토를 실험 동안 지속적으로 교반시키기 위해 Fig. 4(a)와 같은 교반토조를 제작하였다. 또한 준설토를 투기하여 준설토의 침강-퇴적 양상을 확인하기 위해 Fig. 4(b)와 같은 침강-퇴적토조를 제작하였다. 교반토조 및 침강-퇴적토조의 3면과 밑면은 2 mm 두께의 스테인레스로 제작하였으며, 실험 중 측방 관찰을 하기 위하여 전면판은 20 mm 두께의 투명아크릴판으로 제작하였다.

또한 원심모형실험 동안 준설토의 침강-퇴적양상을 확인하기 위하여 Fig. 5와 같은 사진 계측장비를 이용하여 사진계측을 수행하였다. 사진 장비는 GoPro사의 HERO3+로 동영상 및 사진촬영이 가능하며, Wi-Fi 기능으로 외부에서 다수의 카메라를 원격 제어할 수 있다.

(a) GoPro HERO3+　　(b) Remote control

Fig. 5. Photogrammetric equipment

3.3 실험내용 및 방법

본 실험에서는 현장조건을 고려한 준설토 침강-퇴적 특성을 확인하기 위하여 20 g-level의 중력수준에서 원심모형실험을 수행하였다. 원심모형실험 흐름은 Fig. 6과 같이 침강-퇴적토조의 매립공간에 상등수를 상부 토조로 공급하기 위한 수중펌프를 설치하고 상부 교반토조와 결합한 후 교반토조 및 침강-퇴적토조에 교반장치 및 투기장치, 사진측량장치 및 LED를 설치하였으며 상부 교반토조에 600 % 함수비의 준설토를 투기한 완성된 모형토조를 원심모형실험기의 스윙바스켓에 설치하였다. 그리고 전기공급장치와 연결시켜 20 g-level의 중력수준에서 교반토조의 현탁액상태 준설토를 침강-퇴적토조로 투기시켜 준설토의 침강-퇴적 양상을 사진측량을 통해 확인하는 원심모형실험을 수행한 후 원심모형실험 중 형성된 준설매립지반의 위치별 입도분포를 확인하기 위해 Laser Particle Size Analyzer를 통해 분석을 수행하였다. 그리고 원심모형실험 데이터는 상사성을 고려하여 비교·분석하였다.

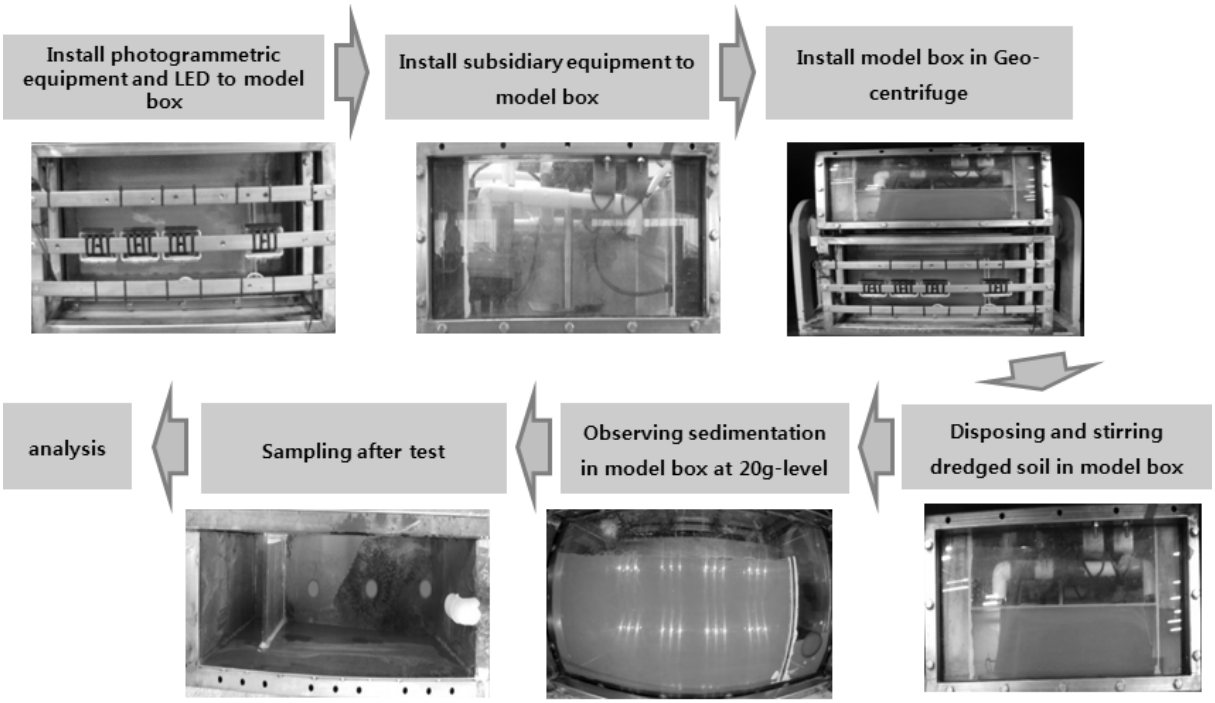
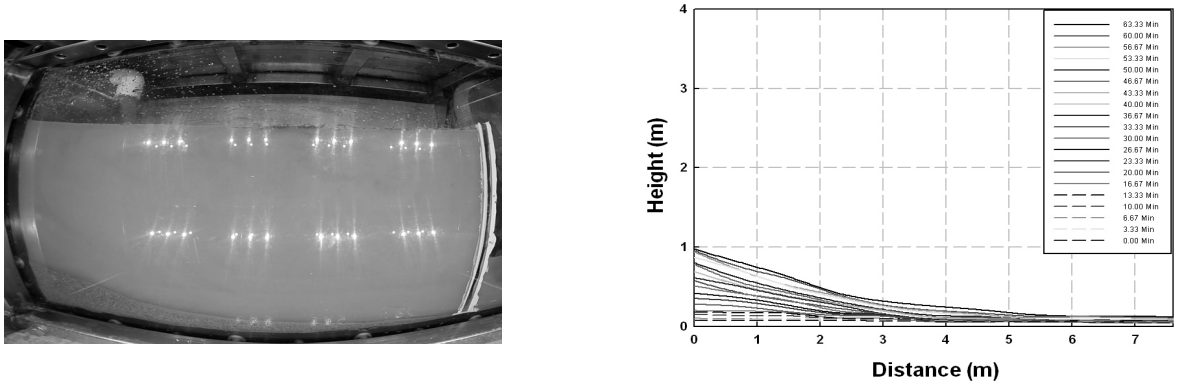


Fig. 6. Process of centrifugal test



(a) Final sedimentation (b) Sedimentation with lapsed time

Fig. 7. Sedimentation of sandy dredged soil

4. 실험 결과 및 분석

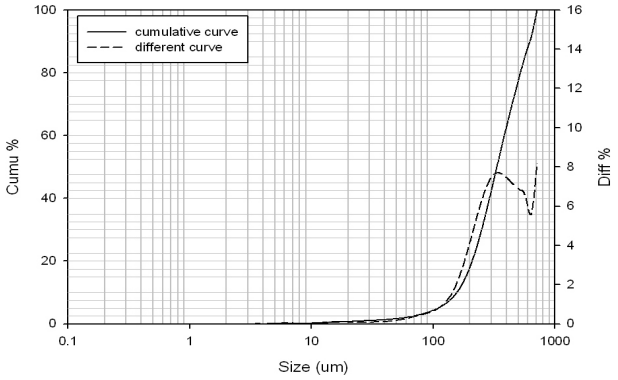
4.1 모래 준설토의 침강-퇴적 특성

600 % 함수비의 모래 준설토를 20.4 cm/s의 투기속도로 매립공간에 투기하는 원심모형실험을 수행한 결과 모래 준설토의 침강-퇴적 양상은 Fig. 7과 같이 나타났다. Fig. 7과 같이 시간이 경과함에 따라 토출구의 위치로부터 입경이 큰 토립자가 쌓이고, 거리가 멀어짐에 따라 입경이 작은 토립자가 쌓이는 분리 퇴적 양상으로 나타났으며, 입자의 분포는 0~2.6 m의 범위는 직경이 0.25 mm 이상의 조립토가, 2.6 m~6.6 m의 범위는 직경이 0.25 mm~0.075 mm의 조립토가, 6.6~7.6 m 범위에선 입자의 직경이 0.075 mm 및 0.075 mm 이하의 세립토가 분포하는 것으로 나타났다.

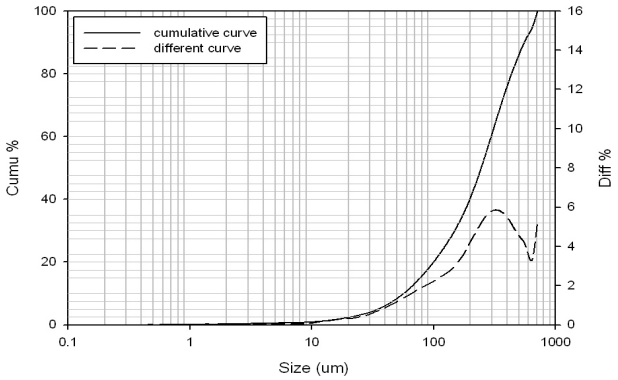
또한 Laser Particle Size Analyzer를 통한 모래 준설토 매립지반하부의 입도분포는 Fig. 8과 같이 나타났으며, y축에서 좌측은 입도의 누적백분율이며, 우측은 입도의 개별백분율이다. 모래 준설토 매립지반의 0.6 m 지점에서 조립토의 분포가 크게 나타났으며, 거리가 멀어질수록 세립토의 분포가 증가하는 원심모형실험과 동일한 양상으로 나타났다.

4.2 점성 준설토의 침강-퇴적 특성

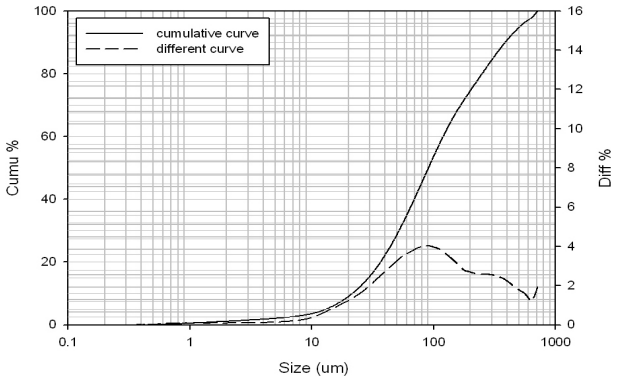
점성 준설토의 침강-퇴적 특성을 확인하기 위해 600 % 함수비의 현탁액상태 점성 준설토를 매립공간에 투기하는 원심모형실험 결과는 Fig. 9와 같으며, 시간이 경과함에 따라 일률적으로 매립공간 바닥면과 평행하게 침강-퇴적되는 양상으로 나타났다.



(a) at 0.6 m from outlet

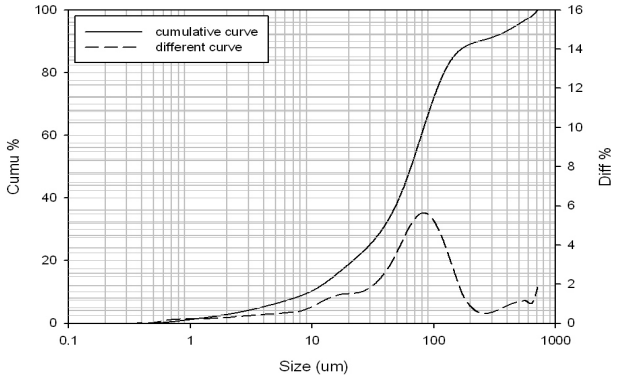


(b) at 3.8 m from outlet

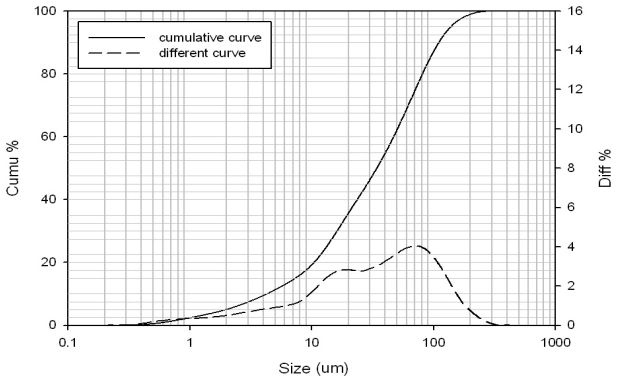


(c) at 6.6 m from outlet

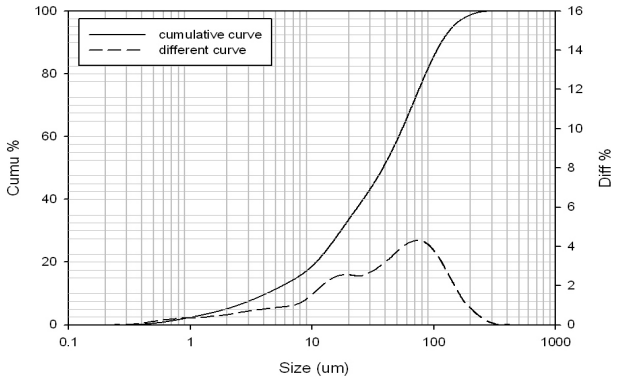
Fig. 8. Particle size distribution curve at bottom of model box (sandy soil)



(a) at 0.6 m from outlet

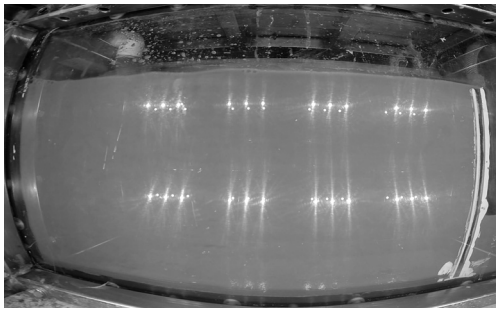


(b) at 3.8 m from outlet

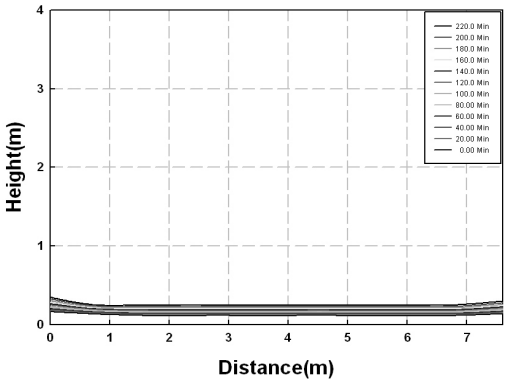


(c) at 6.6 m from outlet

Fig. 10. Particle size distribution curve at bottom of model box (clayey soil)

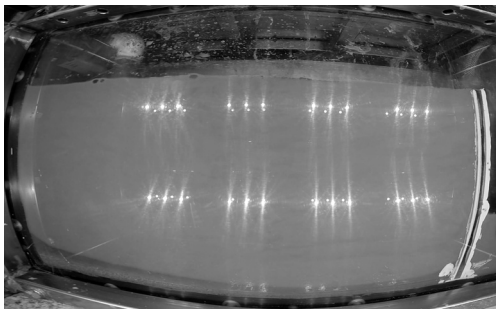


(a) Final sedimentation

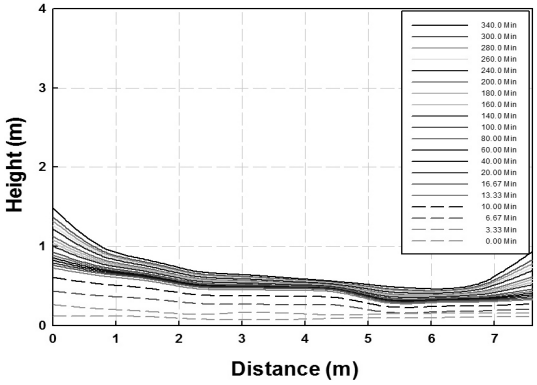


(b) Sedimentation with lapsed time

Fig. 9. Sedimentation of clayey dredged soil

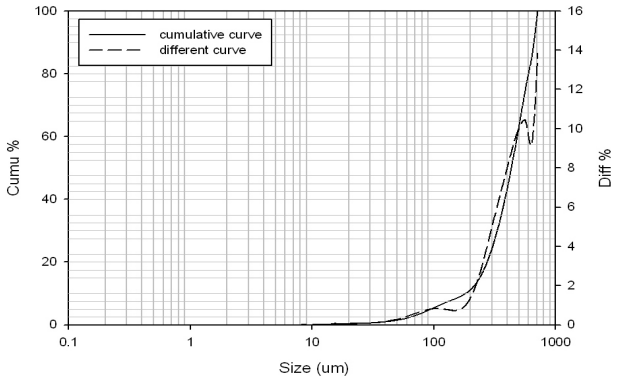


(a) Final sedimentation

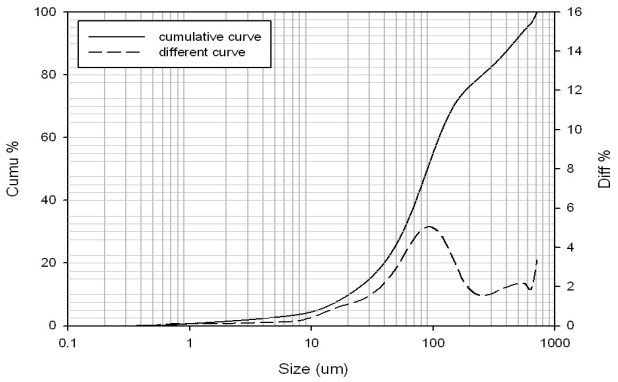


(b) Sedimentation with lapsed time

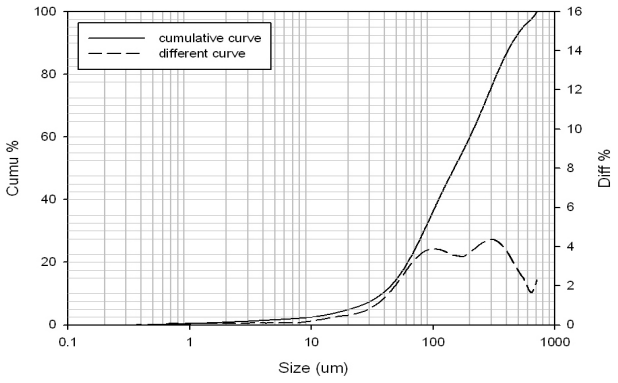
Fig. 11. Sedimentation of mixed dredged soil (sandy and clayey soil)



(a) at 0.6 m from outlet



(b) at 3.8 m from outlet



(c) at 6.6 m from outlet

Fig. 12. Particle size distribution curve at bottom of model box (sandy and clayey soil)

또한 점성 준설토 매립지반하부의 입도분포를 분석하기 위해 Laser Particle Size Analyzer를 수행한 결과는 Fig. 10과 같이 나타났으며, 점성 준설토 매립지반 하부의 입도분포는 위치에 관계없이 세립토가 유사하게 분포되는 것으로 나타나 매립지반 퇴적현상이 균등하게 발생하는 원심모형실험과 유사한 양상으로 나타났다.

4.3 조립·세립 혼합 준설토의 침강-퇴적 특성

준설토의 침강-퇴적 양상을 확인하기 위해 준설토의 구성인 조립·세립토를 50:50으로 혼합한 혼합 준설토의 침강-퇴적 특성을 확인하고자 원심모형실험을 수행한 결과 Fig. 11과 같이 나타났다. Fig. 11과 같이 조립·세립 혼합 준설토는 0~3.6 m 범위에서는 주로 조립토가 퇴적하고, 조립토 퇴적이 완료된 후 세립토가 조립토 상부에 균등하게 퇴적되는 양상을 보였으며, 모래 준설토 보다 세립토의 함량이 크기 때문에 세립분의 퇴적 양상이 뚜렷하게 나타났다.

또한 조립·세립 혼합 준설토 매립지반하부의 입도분포를 분석하기 위한 Laser Particle Size Analyzer를 수행한 결과 Fig. 12와 같이 나타났으며, 모래 준설토 매립지반과 유사하게 토출구로부터 거리가 멀어짐에 따라 세립토의 분포가 증가하는 것으로 나타나 모래 준설토의 경우와 유사하게 매립지반이 분리퇴적 되는 원심모형실험과 동일하게 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 현장조건인 투기조건을 고려한 준설토의 침강-퇴적 양상을 확인하기 위한 원심모형실험과 준설매립지반의 깊이에 따른 입도분포를 확인하기 위한 Laser Particle Size Analyzer를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 모래 준설토의 침강-퇴적 특성은 원심모형실험과 Laser Particle Size Analyzer를 통한 결과, 시간 경과에 따라 토출구의 위치로부터 큰 흙입자가 퇴적되며, 거리가 멀어질수록 작은 흙 입자가 퇴적되는 분리퇴적 양상으로 준설매립지반을 형성하는 것으로 나타났다.

(2) 점성 준설토의 침강-퇴적 특성은 시간 경과에 따라 일률적으로 매립공간의 바닥면과 평행하게 퇴적되는 양상으로 균등한 준설매립지반이 형성되는 것으로 나타났으며, 점성 준설토 매립지반 하부의 입도분포는 위치에 관계없이 흙 입자가 유사하게 분포되는 것으로 나타났다.

(3) 조립·세립 혼합 준설토의 침강-퇴적 특성은 모래 준설토의 특성과 유사하게 분리 퇴적되는 양상과 점성 준설토의 특성과 유사하게 토립자가 균등하게 퇴적되는 양상이 나타났다. 조립·세립 준설토 매립지반 하부의 입도분포는 모래 준설토의 경우와 유사하게 분리 퇴적되는 매립지반이 형성되는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 “환경친화적 준설토 확보, 매립 및 운송거리 30 km 이상급 이송 기술 개발(12기술혁신E12)”의 연구성과의 일부임을 밝히며, 재정지원에 감사드립니다.

References

1. Choi, J. Y. (2009), A study of consolidation analysis and diffusion characteristics of dredging-reclaimed clayey soil, Ph D dissertation, Kunsan National University, pp. 4~46 (in Korean).
2. Choi, S. W. (2003), A study on the two dimensional sediment characteristics of dredged silty clays, Master's thesis, Kunsan National University, pp. 3~40 (in Korean).
3. Kim, H. S. (2006), A study of behavior on dredged fill using geotechnical centrifuge, Ph D dissertation, Seoul National University, pp. 51~131 (in Korean).
4. Kim, K. H. (2010), A study on the characteristics of sedimentation and self-weight consolidation for dredged soil, Master's thesis, Korea University, pp. 3~75 (in Korean).
5. Lee, B. J. (2005), The characteristics of sedimentation and self-weight consolidation for dredged soils depending on fines content, Master's thesis, Seoul National University, pp. 5~47 (in Korean).
6. Yoo, N. J. and Kim, K. S. (2000), Centrifuge test of obtaining constitutive relation of dredged and reclaimed clay with hight water content, Korean Society of Civil Engineers Conference, Korean Society of Civil Engineers, pp. 71~74 (in Korean).
7. Yoo, N. J., Lee, J. H., Jeong, G. S. and Park, B. S. (2005), Centrifuge model experiments and numerical analysis consolidation behaviour of dredged and reclaimed, Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 25, No. 4C, pp. 241~247 (in Korean).
8. Yoon, S. M. (2002), Settling mode and segregating sedimentation of the dredged soil, Ph D dissertation, Seoul National University, pp. 4~138 (in Korean).
9. Yoon, K. H. (2010), A numerical study on settlemen characteristics of dredged and reclamation ground due to disposal rate, Master's thesis, Incheon University, pp. 4~107 (in Korean).