

원심모형실험을 이용한 준설토의 침강압밀 거동 특성

A Study on Characteristic of Sedimentation-Consolidation Conduct for Dredged Soil through Geo-Centrifuge Test

박 헌 철¹⁾ · 강 홍 식²⁾ · 선 석 윤³⁾ · 박 종 서⁴⁾ · 안 광 국[†]

Hunchul Park · Hongsig Kang · Seokyeun Sun · Jongseo Park · Kwangkuk Ahn

Received: December 23rd, 2016; Revised: January 18th, 2017; Accepted: January 25th, 2017

ABSTRACT : The costal reclamation construction is for making reclaimed land by dredging marine clay with seawater, and then bringing the dredged soil into the reclaimed land. During the process, the dredged soil in the reclaimed land undergoes the sedimentation-consolidation process. Among the processes, the consolidation is a very critical factor when planning reclaimed land because of its requiring time and settlement. In order to predict the requiring time and settlement, the Column test, which was suggested by Yano, has been usually used in the nation. However, the test method needs a very long time to identify the characteristic of sedimentation-consolidation of dredged soil. Therefore, in this study, in order to supplement the weakness of the Column test which needs such a long time, and in order to identify the characteristic of the sedimentation-consolidation for dredged soil in a short time, the Geo-centrifuge test was examined as an alternative method. The result considered that Geo-centrifuge test would be useful to identify the characteristic of sedimentation-consolidation for dredged soil efficiently.

Keywords : Dredged soil, Sedimentation, Consolidation, Column test, Geo-Centrifuge

요 지 : 해양 매립 공사는 해저의 해성점토를 해수와 함께 준설하여 매립지로 이동시켜 매립지를 형성시키는 공사이다. 매립지가 형성되는 과정에서 준설토는 침강-퇴적-압밀 과정이 진행되며 이 과정에서 압밀과정은 소요되는 시간과 침하량이 크기 때문에 매립지를 계획하는 해양 매립 공사에서 매우 중요한 결정인자로 사용하게 된다. 준설토의 침하량과 소요되는 시간을 예측하기 위한 방법으로 국내에선 Yano가 제안한 Column 실험이 보편적으로 사용되고 있다. 그러나 Yano의 Column 실험은 준설토의 침강압밀 특성을 확인하기 위해 장시간이 필요한 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 장시간이 소요되는 Column 실험의 단점을 보완해 단시간에 준설토의 침강압밀특성을 확인하기 위한 방법으로 원심모형실험을 활용하였다. 그 결과 효율적으로 준설토의 침강압밀특성을 확인하기 위해 원심모형실험을 활용할 수 있는 것으로 사료된다.

주요어 : 준설토, 침강, 퇴적, Column 실험, 원심모형실험

1. 서 론

최근 해양 매립 공사는 해저의 해성점토를 해수와 함께 준설하여 매립지로 이동시켜 매립지를 형성시킨다. 이 과정에서 해성점토는 해수와 함께 섞여 고함수비 슬러리 상태로 운송되며, 매립지 내부에서는 침강-퇴적-압밀 과정을 거쳐 매립지반을 형성시킨다. 이러한 매립지반형성 과정에서 발생하는 압밀 과정은 소요되는 시간과 침하량이 크며, 이는 매립지를 계획하는 데 중요한 결정인자로 사용하게 된다. 준설 매립된 해성점토의 침하량과 소요되는 시간을 예측하기 위한 연구는 Mikasa(1963) 및 Gibson et al.(1967)이 제안한 대변형률 압밀이론과 Yano(1985)가 제안한 실험적 분석방법

이 활용되어 다양한 연구가 수행되고 있다(Kim et al., 2003; Jun & Yoo, 2009; Lee & Lee, 2011; Choi et al., 2012; Lee et al., 2015; Lee & Choi, 2016). 국내에선 Yano(1985)가 제안한 실험적 방법이 보편적으로 사용되고 있다. Yano(1985)의 실험방법은 현장조건을 고려하기 위해 내경이 120mm, 높이 500mm 이상인 실린더를 이용하는 Column 실험이 보편적으로 수행되고 있다. 준설토의 침하량과 소요시간을 예측하기 위해 준설토의 침강압밀특성을 확인하기 위한 Yano의 Column 실험은 준설토의 침강압밀특성을 확인하기 위해 장시간이 필요한 단점이 있다. 준설토의 침강압밀 특성을 확인하는데 소요되는 시간을 단축시키기 위한 방법으로 본 연구에서는 구조물의 거동을 짧은 시간에 파악할 수 있

1) Ssangyong Engineering & Construction Co. Ltd.

2) Chungbuk National University of Civil Engineering

3) Dongyang Engineering & Construction Group

4) Korea Expressway Corporation

† Chungbuk National University of Civil Engineering (Corresponding Author : akk@chungbuk.ac.kr)

는 장점이 있는 원심모형실험장치를 이용하였다. 원심모형 실험장치를 이용한 준설토에 대한 연구는 압밀특성을 확인 하기 위한 연구만 수행되었을 뿐 침강압밀특성을 확인하기 위한 연구는 미비한 실정이다(Jun et al., 2008). 따라서 본 연구에서는 준설토의 침강압밀특성을 단시간에 확인하기 위한 방법으로 Yano의 Column 실험에 원심모형실험장치 의 이용 가능성을 확인하기 위해 준설토의 초기함수비와 실 질토량고를 변화시켜 원심모형실험을 수행하였다. 그리고 Yano가 제안한 분석 방법에 의해 실험결과를 분석하였다.

2. Yano(1985)의 준설토 침강압밀 특성

Yano(1985)가 제안한 준설토의 시간에 따른 침하량 예측 을 위한 실험적 방법은 투명한 아크릴 실린더(내경 12cm, 높이 50, 100cm)를 이용해 초기함수비와 실질토량고를 변 화시켜 약 250시간에 걸쳐 침강압밀실험을 수행하였다. 실험결과, 해수와 혼합된 해성점토인 고탄수비 준설토의 시간 에 따른 침하량은 양대수 축척으로 표시하여 Fig. 1과 같이 나타났으며, Fig. 2와 같이 Yano(1985)은 해수와 혼합된 해 성점토 준설매립 시의 침강 및 자중압밀과정을 침강퇴적과정 과 압밀침강과정으로 구분하였다.

침강속도는 침강 초기(t_{00})부터 침강퇴적과정이 종료되는 시점(t_{100})까지의 시간에 따른 계면고 변화를 비로 표현(Eq. (1))되며 초기함수비에 대하여 침강속도는 Fig. 3과 같이 나

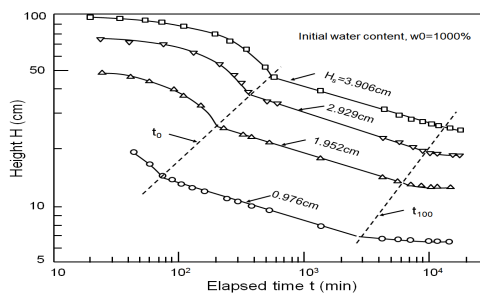


Fig. 1. Curve of sedimentation and consolidation on Tokyo clay (Yano, 1985)

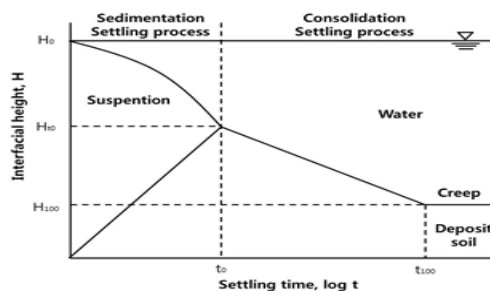


Fig. 2. Sediment process and consolidation-settling process (Yano, 1985)

타났다. 침강속도는 초기함수비가 증가함에 따라 선형적으 로 증가하는 것으로 나타났다.

$$V_i = \frac{(H_{t_0}/H)}{t_0} \quad (1)$$

침강압밀계수는 압밀침강과정에 대한 시간과 계면고의 양대수 축척상의 기울기(Eq. (2))로 표현하였으며, 초기함수 비에 따른 침강압밀계수는 Fig. 4와 같이 나타났다. 초기함 수비에 대한 침강압밀계수는 실질토량와 관계없이 함수비 에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

$$C_s = \frac{\log(H_{t_0}/H)}{\log(t/t_0)} \quad (2)$$

3. 원심모형실험을 이용한 준설토의 침강압밀실험

3.1 원심모형실험 장치와 부속장치

본 연구에 사용한 원심모형실험장치의 최대 원심가속도는 200g-level이며 최대용량은 25g·ton이고 실험 가능한 모형토 조의 최대크기는 580*340*500mm인 Fig. 5와 같은 구성으로 이루어진 원심모형실험장치를 이용하였다(Ahk et al., 2014). 원심모형실험 내에서 준설토의 침강압밀 거동을 확인하기 위 한 모형토조은 Fig. 6과 같이 제작하였다. 모형토조 내 Column

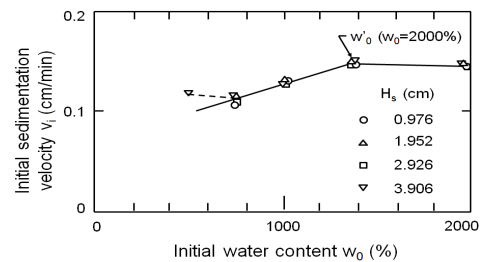


Fig. 3. Initial sedimentation velocity by initial water content (Yano, 1985)

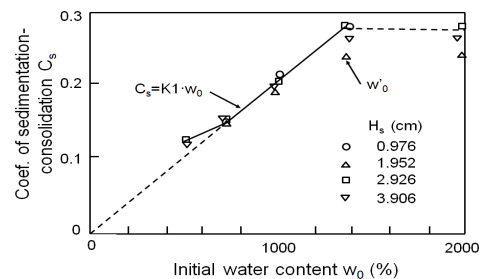


Fig. 4. Coef. of sedimentation consolidation by water content (Yano, 1985)

은 원심모형실험장치의 최대용량과 소요 가능한 가속도를 고려해 20g의 중력수준으로 선정하였으며, 20g의 중력수준에서 혼탁액의 자중에 의한 실험기기의 안전과 침강압밀 양상을 관측하기 위해 두께 0.5cm의 투명 아크릴을 이용해 제

작하였다. 그리고 Column의 높이와 직경은 실험기에서 허용 가능한 최대 크기로 높이 50cm, 직경 20cm로 제작하였다. 원심모형실험 중 준설토의 침강압밀 양상을 확인하기 위한 계측장비는 Fig. 7과 같이 GoPro사의 HERO3+ 카메라를 사용하였으며 Fig. 6의 모형토조 내 column 정면에 설치하여 실시간으로 준설토의 침강압밀 양상을 측정하였다.

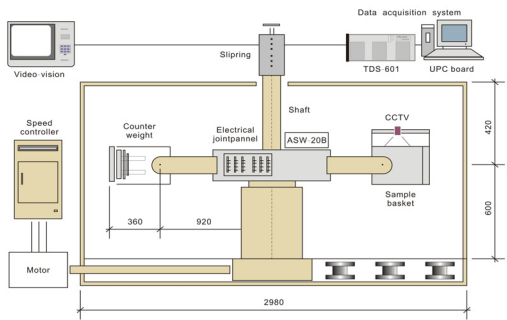


Fig. 5. Geo-Centrifuge

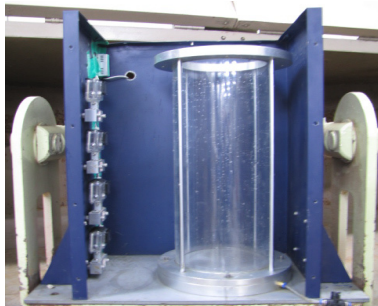


Fig. 6. Model box



Fig. 7. GoPro HERO3+

3.2 실험에 사용한 준설토

원심모형실험을 이용하여 준설토의 침강압밀특성을 확인하기 위해 사용된 준설토는 부산 인근에서 채취한 해상점토를 사용하다. 채취한 부산 준설토의 자연함수비는 72%이며, 비중은 2.7, 간극비는 1.93이고 입도특성은 Fig. 8과 같다.

3.3 실험내용 및 방법

침강압밀특성을 확인하기 위해 소요되는 시간을 단축시키기 위한 원심모형실험은 20g의 중력수준에서 Fig. 9와 같이 수행하였다. 원심모형실험에 사용된 준설토인 해상점토는 완전히 건조시켜 Table 1과 같은 실험조건으로 해수와

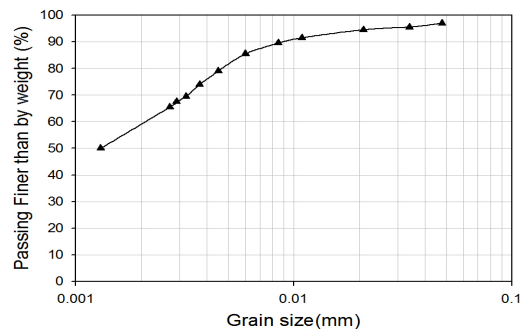


Fig. 8. Busan dredged soil

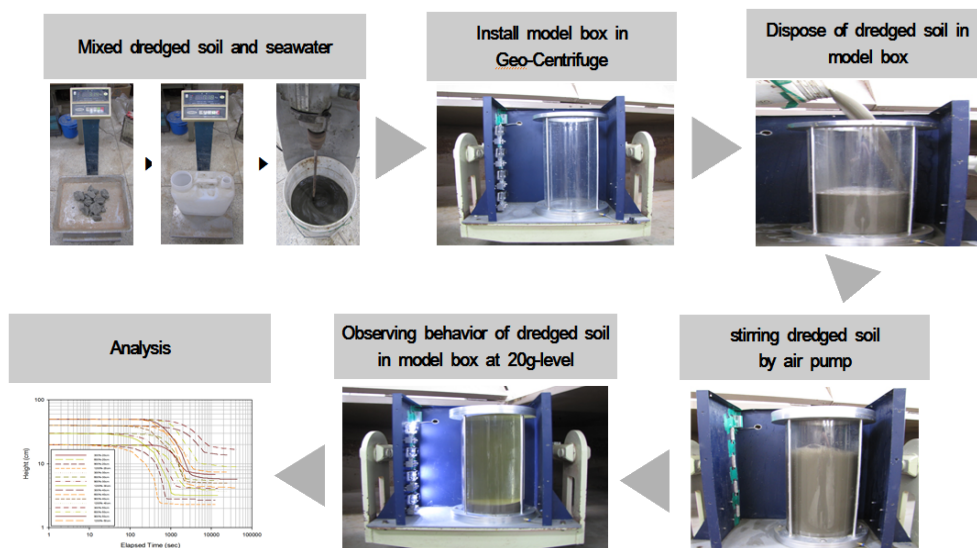
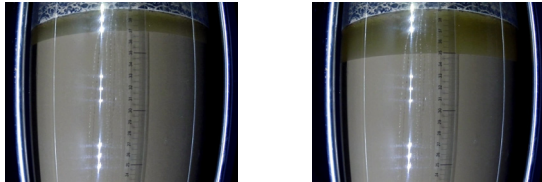


Fig. 9. Testing procedure of Geo-centrifuge

Table 1. Testing condition of Geo-centrifuge

Interface height (cm)	Water content (%)
50	300
40	600
30	900
20	1,200



(a) 813sec (b) 135sec

Fig. 10. Case of interface height with time ($w=300\%$, $h=40$ cm)

배합하여 충분히 교반한 슬러리 상태의 시료를 원심모형실험에 사용하였다. 원심모형실험 외부에서 교반된 슬러리 상태의 시료를 원심모형실험장치에 설치된 모형 Column에 투입하고 실험준비가 완료되기 전까지 시료가 침강하지 않도록 외부에 설치된 air pump를 이용해 지속적인 교반을 수행하였다. 실험준비 완료 후 air pump를 정지시키고 준설토의 압밀완료 시간을 고려해 12시간 동안 원심모형실험을 수행하였다. 준설토의 침강압밀 양상은 모형토조에 설치된

카메라를 통해 동영상으로 촬영하였으며 이를 계측하여 준설토의 침강압밀특성을 분석하였다. 원심모형실험 중 1g에서 20g의 중력수준까지 도달하는 데 2분이 소요되었으며 그 동안 시료는 미소하게 침강하는 것으로 나타났다. 그러나 전체 침강 변화에 영향을 미치지 않는 것으로 판단되어 결과분석에 포함시켜 분석을 수행하였다. Fig. 10은 원심모형실험 중 시료의 침강거동을 측정할 예시이다.

4. 실험결과 및 분석

원심모형실험은 20g의 중력수준에서 Table 1과 같이 초기함수비와 실질토량고를 변화시켜 준설토의 침강압밀실험을 수행하였다. 원심모형실험을 이용한 침강압밀실험의 종료 시점은 실질토량고에 따라 함수비가 300%인 경우를 기준으로 분석하였으며, 준설토 침하량의 변화가 미소하게 발생하는 시간을 실험 종료 시간으로 결정하여 원심모형실험을 수행하였다. 실험 결과의 분석은 20g의 중력수준에서 1g의 조건으로 환산한 결과를 바탕으로 분석을 수행하였다.

4.1 자중압밀의 시·종점

준설토의 침강압밀실험 결과, 초기함수비별 실질토량고

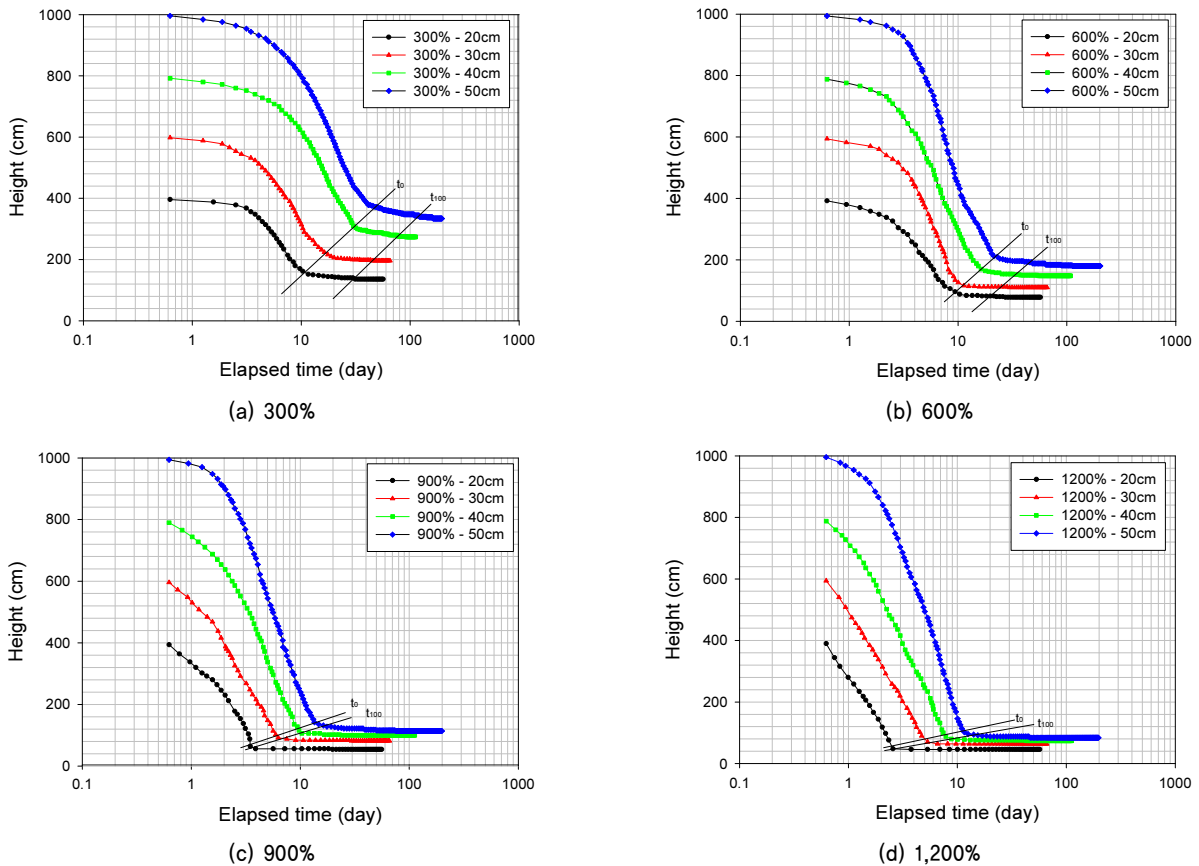


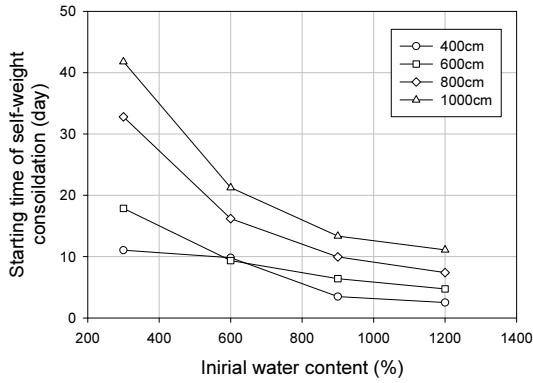
Fig. 11. Starting and ending of consolidation by water content

에 따른 준설토의 침강 자중압밀 거동은 Fig. 11과 같이 나타났으며 Yano(1985)가 제안한 방법을 이용해 자중 압밀의 시점과 종점을 표기하였다. 자중압밀시점과 종점에 대한 결과는 초기함수비 및 실질토량고로 구분하여 Fig. 12 및 Fig. 13과 같이 나타내었다. 초기함수비가 증가할수록 자중압밀시점은 0.11-0.77배, 자중압밀종점은 0.14-0.90배 감소하는 것으로 나타났으나 실질토량고가 증가할수록 자중압밀시점

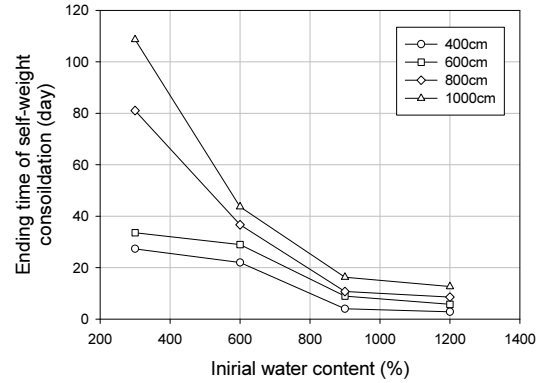
은 0-3.44배 증가하였으며, 자중압밀종점은 0.21-3.42배 증가하는 것으로 나타났다.

4.2 침강 속도

준설토의 침강시점부터 자중압밀시점까지 시간에 따른 계면고의 변화인 침강속도를 초기함수비 및 실질토량고로 구분하여 Fig. 14와 같이 나타내었다. 초기함수비에 따른 침

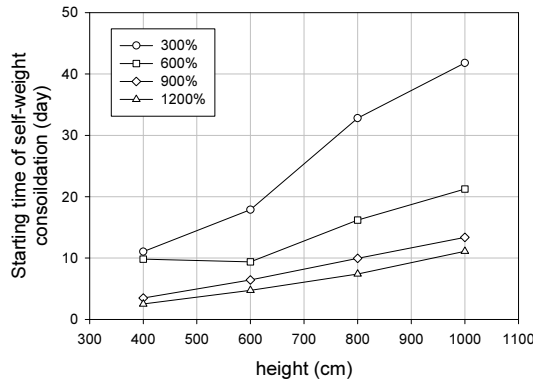


(a) Starting

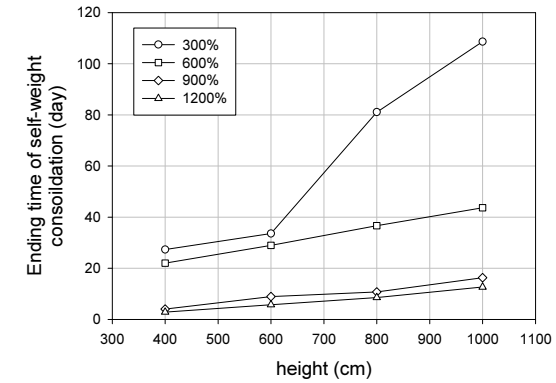


(b) Ending

Fig. 12. Starting and Ending consolidation of dredged soil by water content

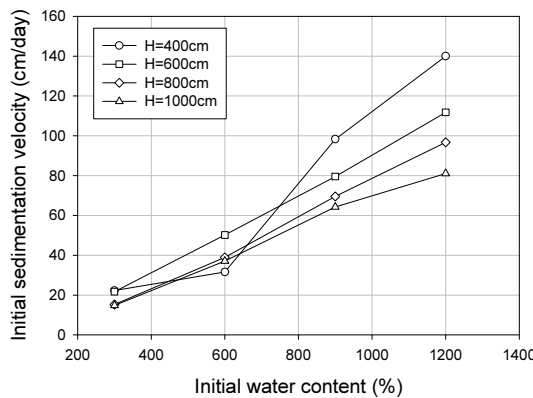


(a) Starting

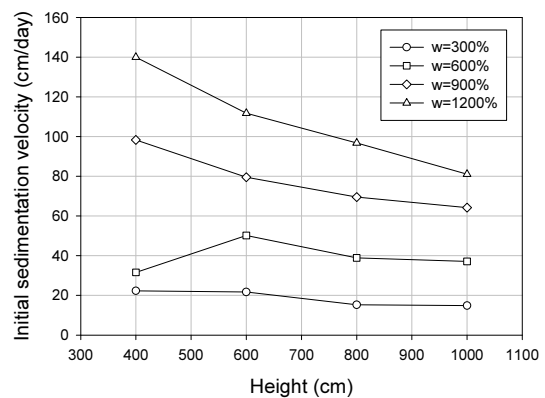


(b) Ending

Fig. 13. Starting and Ending consolidation of dredged soil by interface height

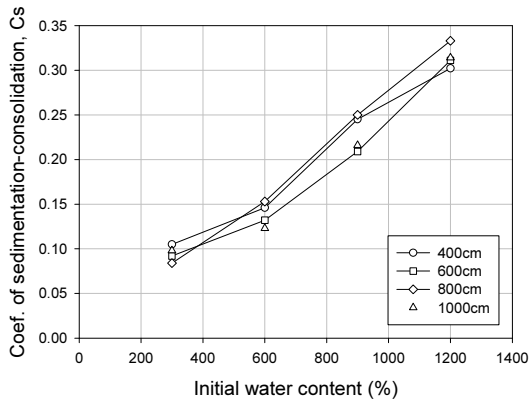


(a) Initial water content

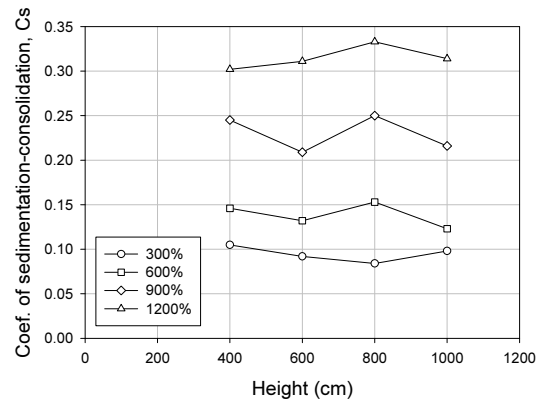


(b) Initial interface height

Fig. 14. Initial sedimentation velocity



(a) Initial water content



(b) Initial interface height

Fig. 15. Coefficient of sedimentation consolidation

강속도는 초기함수비가 증가할수록 0.42-5.35배 증가하였으나 실질토량고가 증가할수록 0-0.42배 감소하는 것으로 나타났다.

4.3 침강압밀계수

침강압밀계수는 Yano가 제안한 Eq. (2)를 이용하였으며, 초기함수비 및 실질토량고에 따라 Fig. 15와 같이 나타내었다. 초기함수비에 따른 침강압밀계수는 초기함수비가 증가할수록 0.4-2.96배 증가하였으나 실질토량고가 증가할수록 침강압밀계수는 초기함수비가 300%인 경우 평균 0.094로, 600%인 경우 0.138, 900%인 경우 0.230, 1,200%인 경우 0.315로 유사하게 나타났다.

5. 결 론

단시간에 준설토의 침강압밀 특성을 확인하기 위한 방법으로 원심모형실험의 활용성을 확인하기 위해 준설토의 초기함수비와 실질토량고를 변화시켜 Yano의 Column 실험을 20g의 중력수준에서 원심모형실험을 수행하였으며, 그 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 원심모형실험에서 준설토의 침강압밀거동은 Yano가 수행한 준설토의 침강압밀거동과 유사한 경향으로 준설토의 초기함수비가 증가할수록 준설토의 자중압밀 시점 및 종점은 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 준설토의 실질토량고가 증가할수록 준설토의 자중압밀 시점은 증가하고 자중압밀 종점은 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) 원심모형실험을 통한 준설토의 침강속도는 실질토량고가 증가하면 감소하는 것으로 나타났으나 초기함수비

가 증가하는 경우는 선형적으로 증가하는 것으로 나타났고 침강압밀계수도 초기함수비가 증가하면 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 초기함수비가 증가함에 따라 준설토의 침강속도 및 침강압밀계수의 증가는 Yano가 수행한 실험 경향과 유사한 것으로 사료된다.

- (3) 그러므로 이상과 같이 장시간에 걸쳐 도출된 Yano의 침강압밀특성과 단시간에 도출한 원심모형실험의 침강압밀특성이 유사하게 나타남에 따라 준설토의 침강압밀특성을 단시간에 확인하기 위해 원심모형실험을 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 보다 정확한 침강압밀특성을 확인하기 위한 원심모형실험은 다양한 조건을 고려한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

References

1. Ahk, K. K., Lee, K. H., H. Y. and Kang, H. S. (2014), Sedimentation characteristics of dredged soil by geo-centrifuge, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 15, No. 3 pp. 49~55 (In Korean).
2. Choi, H. S., Kwak, T. H., Lee, D. S., Lim, J. H., Stark, T. D. and Choi, E. S. (2012), 2-D axisymmetric non-linear finite strain consolidation model considering self-weight consolidation of dredged soil, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 28, No. 8, pp. 5~19 (In Korean).
3. Gibson, R. E., England, G. L. and Hussury, M. J. L. (1967), The theory of one-dimensional consolidation of saturated clay I: Finite Non-linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers, Geotechnique, Vol. 17, No. 3, pp. 261~273.
4. Jun, S. H. and Yoo, N. J. (2009), An experimental study on sedimentation-consolidation characteristics for marine clay in Korea, Journal of the Korea Geo-Environmental Society, Vol. 10, No. 6, pp. 89~98 (In Korean).
5. Jun, S. H., Yoo, N. J. and Park, B. S. (2008), Evaluation of constitutive relationships and consolidation coefficients for prediction of consolidation characteristics of dredged and reclaimed

- ground, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 9, No. 6, pp. 31~41 (In Korean).
6. Kim, H. J., Lee, M. S., Lee, Y. J. and Kim, D. W. (2003), A study on the sediment volume change and two-dimensional deposited characteristics of pumping-dredged soil, *Journal of Geotechnical engineering Society*, Vol. 19, No. 4, pp. 155~165 (In Korean).
 7. Lee, C. W. and Choi, H. S. (2016), Experimental and numerical studies for sedimentation and consolidation characteristics of dredged soil in Songdo Area, Incheon, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 17, No. 2, pp. 13~22 (In Korean).
 8. Lee, S. H. and Lee, J. H. (2011), An experimental research about setting and consolidation characteristic of dredged soil in West Coast, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 12, No. 5, pp. 29~36 (In Korean).
 9. Lee, S. W., Gu, B. H., Choi, C. S. and Lee, J. H. (2015), The characteristics of sedimentation-consolidation and surface strength for dredging and landfill areas in Each Coast, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 16, No. 7, pp. 15~22 (In Korean).
 10. Mikasa, M. (1963), The consolidation of soft clay-a new consolidation theory and its application, Kajima Institution Publishing Co., Ltd., Tokyo, Japan, pp. 126~140 (In Japanese).
 11. Yano, K. (1985), Properties of very soft ground reclaimed by dredged marine clay and their prediction, *Trans. Japan Society of Civil Engineering*, Vol. 364, pp. 1~14 (In Japanese).