

국내 서해안 준설토의 침강압밀특성에 관한 실험 연구

Experimental study on characteristics of sedimentation and consolidation for dredged clay in the west coastal of Korea

전상현¹⁾, Sang-Hyun Jun, 유남재²⁾, Nam-Jae Yoo

¹⁾ 세경대학 건설환경과 전임강사, Full-time Lecturer, Dept. of Civil & Environ., Saekyung College

²⁾ 강원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National Univ.

SYNOPSIS : Design parameters related to Yano's method(1984, 1985), one of experimental approaches having been used widely in Korea to estimate sedimentation and consolidation of dredged and reclaimed ground, were analyzed and their propriety were reassessed in this paper.

Data analyses were performed on the basis of the settling test results using samples from the west coastal area of Korea. From analysis of results, for specific characteristics of these dredged and reclaimed marine soft clays, co-relations of initial water content - coefficient of sedimentation/ consolidation - initial setting velocity were evaluated. Relation between height of soil solid and surface height of slurry at the stages of initiation and termination of consolidation was also assessed. Finally ranges and average values of these design parameters were evaluated and typical empirical equations between these design parameters were also proposed.

Keywords : Marine clay, Dredged-Reclaimed soil, Sedimentation-Consolidation, Yano method

1. 서론

해성점토의 준설토 및 투기는 다양한 방법으로 이루어지고 있으나 경제성 및 준설토효율성 측면에서 펌프 준설토에 의한 준설토가 많이 적용되고 있다. 펌프준설토에 의한 투기시에는 준설토가 해수와 혼합되면서 높은 함수비를 가지게 된다. 준설토매립된 높은 함수비의 초 연약지반에 대한 침강 및 자중압밀에 대한 연구는 Mikasa(1963), Gibson 등(1967)이 제안한 대변형을 압밀이론을 기초로 한 연구(유남재 등, 1998; 전제성, 2000 ; 김형주, 오근엽, 1999 ; 정규향, 2005)와 失野弘一郎(1985)가 제안한 실험적인 분석법에 대한 연구(이송 등, 1999 ; 하영조, 2001 ; 최성운, 2003 ; 박진호, 2003)가 국내에서 대표적으로 이루어지고 있다. 특히, 이 중 失野弘一郎의 실험적 연구는 국내에서 YANO방법이라 통칭되면서 준설토의 침강 및 자중압밀 평가에 다수 적용되었다.

본 연구는 이러한 실험적 방법에 적용되는 침강압밀특성에 대한 연구를 위해 서해안 지역에서 채취한 준설토매립토를 이용하여 실험을 수행하고, 이를 분석하여 서해안 지역의 침강압밀 특성을 제안하고자 한다.

2. 침강-압밀 평가방법

준설토 후 투기된 해성점토의 침강-자중압밀 거동을 분석하기 위한 실험적 방법은 언급한 바와 같이 失野弘一郎(1984, 1985)가 제안한 방법이 YANO방법이라 통칭되면서 자주 적용되고 있다. 아래에는 시간

에 따른 침하량 예측을 위한 矢野弘一郎의 제안방법을 간단하게 정리하였다. 다만, 원저자의 기호를 사용하는 것을 원칙이나, 국내의 적용 기호와의 혼선이 예상되는 기호는 일부 변경하여 사용하였다.

矢野弘一郎(1985)은 해수와 혼합된 해성점토 준설토의 시간의 따른 계면고 변화에 대하여 그림 1과 같이 양대수 축척상에서 침강퇴적과정과 압밀침강과정 등으로 구분하였다. 초기높이 H_{00} 인 준설토의 침강퇴적과정은 투기직후 빠른 시간에 형성된 flocc에 의해 청등수와 현탁액 사이에 명확한 계면이 유발되고, 등속으로 계면이 침강한다. 또한, 하부에서는 퇴적이 발생하여 점차 높이가 상승하고 결국 현탁액의 계면과 일치되면서 침강퇴적과정이 종료된다. 이때 압밀침강과정이 시작되며 이 시점에서의 시간은 t_0 , 계면고는 H_{t_0} 이다. 압밀침강과정이 진행되어 자중압밀이 종료되고 크리프에 의한 변형과정으로 전환되는 시점은 t_{100} , 그때의 계면고는 $H_{t_{100}}$ 이다.

矢野弘一郎(1985)는 침강압밀을 예측하기 위하여 투명한 아크릴 실린더(내경 12cm, 높이 50, 100cm)를 이용하여 초기함수비, w_{00} (500, 700, 1000, 1400%)와 실질토량고, H_s (0.976, 1.952, 2.929, 3.906cm)의 변화를 조건으로 하는 침강실험을 실시하였다. 실험결과, 그림 2와 같이 시간에 따른 침하량은 양대수 축척으로 도시할 때 압밀침강과정($t_0 \sim t_{100}$)에서는 선형으로 분석되었으며, 시작점(t_0)과 종료점(t_{100})을 실질토량고의 높이에 따라 직선으로 연결할 수 있었다.

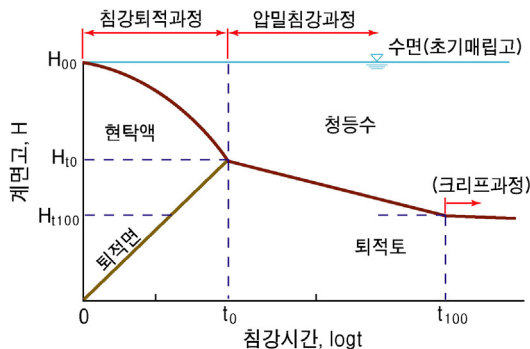


그림 1. 침강퇴적 · 압밀침강과정

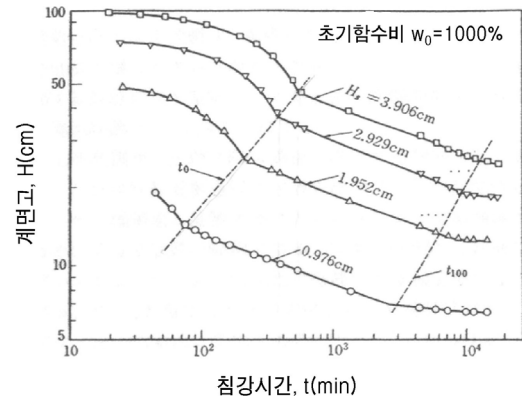


그림 2. 동경점토의 침강곡선

초기함수비, w_{00} 에 대한 초기침강속도, v_i 를 분석하여 그림 3에 나타내었다. 초기침강속도는 침강퇴적과정이 종료되는 시점, t_0 까지의 침강속도로 $v_i = (H_{00} - H_{t_0})/t_0$ 의 관계로 산정된다. 그림 3에서 보는 바와 같이 v_i 는 w_{00} 의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 경향으로 나타났으며, 실질토량고에 따라서는 침강속도가 변하지 않는 것을 보여주고 있다.

그림 4의 w_{00} 에 대한 압밀침강계수, c_s 는 원점을 지나는 선형으로 분석하였으며, c_s 는 실질토량고와 관계없이 함수비에 따라 증가하는 경향으로 나타났다. 압밀침강계수는 그림 1, 그림 2에서와 같이 압밀침강과정에 대한 시간과 계면고의 양대수 축척상의 기울기로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$c_s = \frac{\log(H_{t_0}/H)}{\log(t/t_0)} \quad (1)$$

이러한 관계로부터 압밀침강과정에서의 시간에 따른 계면고는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\log H = \log h_1 - c_s \cdot \log t \quad (2)$$

여기서, h_1 은 $t=1(\text{min})$ 일 때의 계면고 높이이며, 실험조건 또는 투기조건에 따라 다른 값으로 나타난다.

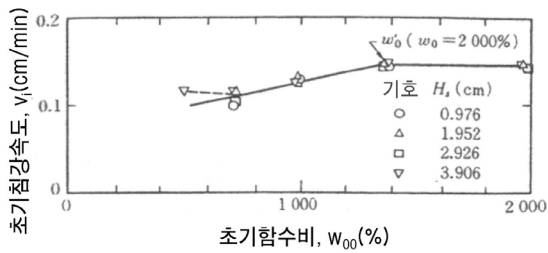


그림 3. 초기함수비, w_0 - 초기침강속도, v_1

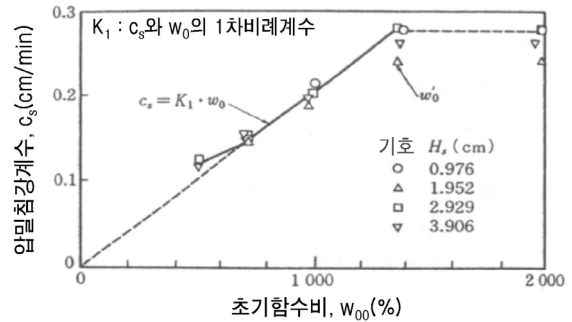


그림 4. 초기함수비, w_0 - 압밀침강계수, c_s

실질토량고, H_s 와 압밀침강과정 시작시의 계면고, H_{t_0} 또는 종료시의 계면고, $H_{t_{100}}$ 과의 관계를 양대수 축척으로 나타내면 그림 5와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 함수비 조건별로 $\log H_s \sim \log H_{t_0}$, $\log H_s \sim \log H_{t_{100}}$ 이 각각 선형으로 분석되었으며, 그 직선식은 식 (3)과 같다.

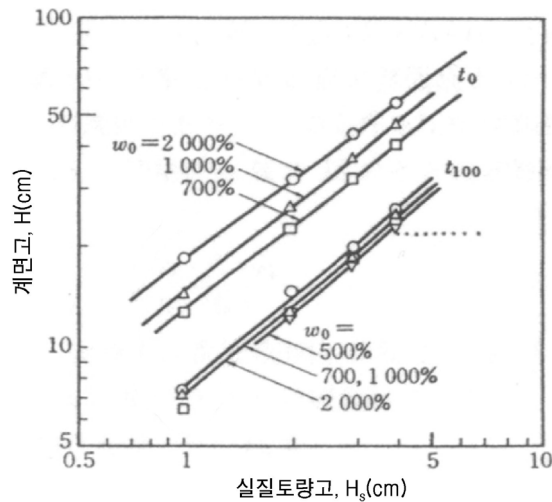
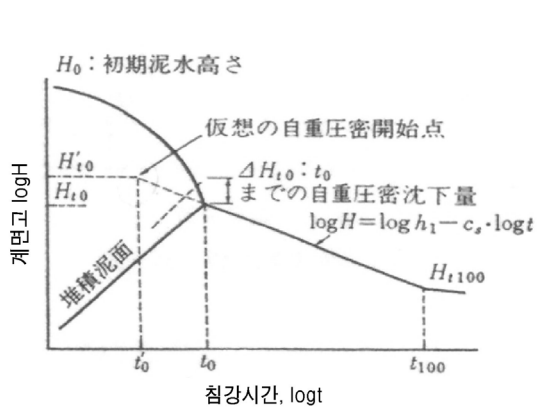


그림 5. 실질토량, $H_s \sim$ 계면고, H

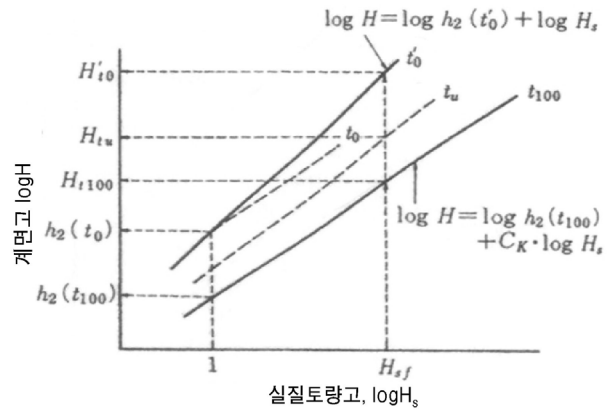
$$\begin{aligned} \log H_{t_0} &= \log h_{2t_0} + C_{Kt_0} \cdot \log H_s \\ \log H_{t_{100}} &= \log h_{2t_{100}} + C_{Kt_{100}} \cdot \log H_s \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, h_{2t_0} 는 $\log H_s \sim \log H_{t_0}$ 에서 $H_s=1(\text{cm})$ 일 때의 계면높이, H_{t_0} 이며, C_{Kt_0} 는 양대수상의 $\log H_s \sim \log H_{t_0}$ 의 기울기이다. $h_{2t_{100}}$ 은 $\log H_s \sim \log H_{t_{100}}$ 에서 $H_s=1(\text{cm})$ 일 때의 계면높이, $H_{t_{100}}$ 이며, $C_{Kt_{100}}$ 은 양대수상의 $\log H_s \sim \log H_{t_{100}}$ 의 기울기이다.

또한, 자중압밀에서의 압밀도를 예측하기 위하여 실제 압밀도가 0이 되는 가상의 압밀개시점, t'_0 를 그림 6과 같이 제안하였다. t'_0 의 산정을 위해서, 압밀도가 0에서는 전체 높이에 대해 함수비 분포가 동일하고, 실질토량고가 단위높이($H_s=1\text{cm}$)에 있을 때, 식 (4)에서의 h_{2t_0} 와 $h_{2t'_0}$ 가 같은 것으로 가정하였다. 이를 정리하면 식 (4)와 같이 실질토량고와 압밀도 0에서의 가상압밀시작 계면고, $H_{t'_0}$ 의 관계가 나타난다.



(a) 가상의 자중압밀개시점



(b) 자중압밀영역의 침강시간~계면고

그림 6. 가상의 자중압밀개시점

$$\log H = \log h_{2t'_0} + \log H_s = \log h_{2t_0} + \log H_s \quad (4)$$

3. 침강실험

3.1 실험조건

본 연구를 위해 인천의 3개 지역의 준설토를 채취하여 침강실험을 실시하였다. 침강실험에 적용한 시료는 인천항, 영종도, 인천남외항에서 채취한 시료이며, 기본물성은 표 1과 같이 나타났다.

표 1. 대상시료의 기본물성

Site	시료명	기본물성				
		비중	액성한계(%)	소성한계(%)	소성지수	통일분류
1	인천항	2.70	35.2	19.1	16.1	CL
2	영종도	2.71	43.8	21.5	22.3	CL
3	인천남외항	2.70	27.8	17.5	10.3	CL

침강실험은 내경 9cm, 높이 100cm의 투명아크릴 실린더로 제작된 시험기를 이용하였다. 대상시료와 해수를 실험조건에 함수비로 조성한 후 하부에서 공기압을 가하여 준설토와 해수가 완전히 교반되도록 하여 준비하였다. 실험은 초기함수비 w_{00} , 초기높이 H_{00} 를 변화하면서 수행하였으며, 이를 표 2에 정리하였다.

표 2. 침강실험조건

Site	시료명	실험조건	
		초기함수비, w_{00} (%)	시료높이, H_s (cm)
1	인천항	500, 700, 1000, 1500, 2000	25, 50, 75, 90
2	영종도	250, 500, 700, 1000	25, 50, 75, 90
3	인천남외항	300, 500, 600, 700, 1000	25, 50, 75, 90

3.2 실험결과

3가지 현장 채취 시료를 이용한 침강실험 결과인 시간에 따른 계면고를 그림 7~그림 9과 같이 양대수 축척으로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 초기에 침강이 발생하는 침강퇴적과정의 곡선부로부터 나타난 이후 압밀침강과정이 시작되면서 양대수상 직선의 시간-계면고가 나타났다. 이 직선의 초기에서의 시간(t_0)과 계면고(H_{t_0}) 및 직선부가 종료되는 점에서의 시간(t_{100})과 계면고($H_{t_{100}}$)를 획득하였다

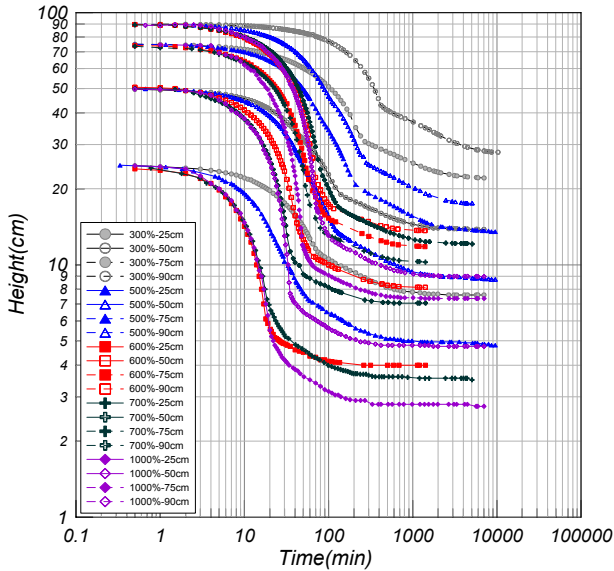


그림 7. 인천항 시료(Site 1)의 시간에 따른 계면고

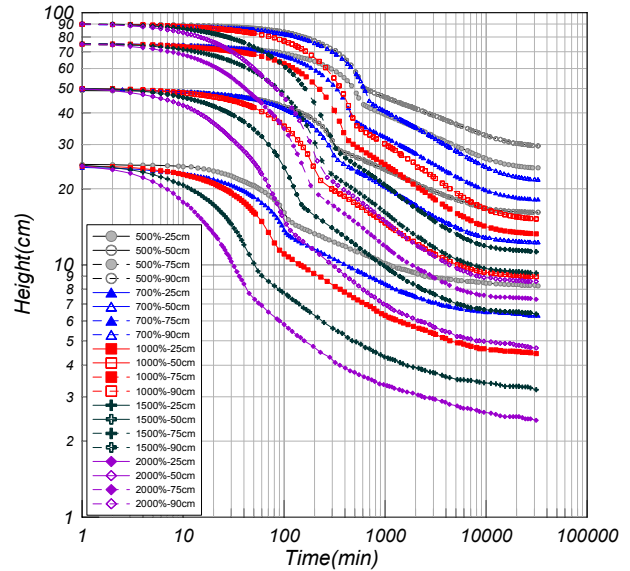


그림 8. 영종도 시료(Site 2)의 시간에 따른 계면고

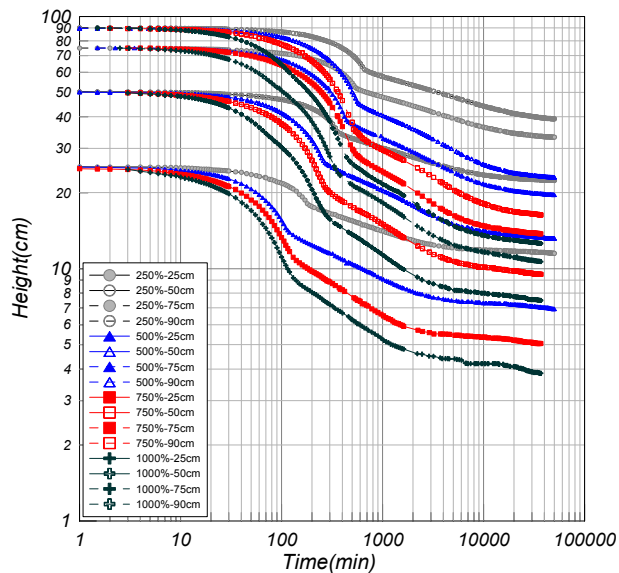


그림 9. 인천남외항 시료(Site 3)의 시간에 따른 계면고

4. 결과분석

4.1 침강압밀계수, c_s

침강압밀실험결과 분석된 압밀침강계수, c_s 는 그림 10와 같이 투기시의 초기함수비와 같이 분석되었다. 그림에서 보는 바와 같이 1000%까지는 초기함수비에 따라 증가하는 경향을 나타내나, 더 큰 초기함수비에서는 초기함수비에 관계없이 일정한 경향으로 나타났다. 침강압밀계수는 0.086~0.24cm/min의 범위로 평균 0.16cm/min으로 나타났다. 초기함수비 250~1000%의 적선부에서 초기함수비와 침강압밀계수의 관계는 아래 식 (5)와 같이 분석되었으며, 이 때 결정계수, R^2 는 0.71로 나타났다.

$$c_s (\text{cm/min}) = 1.21 \times 10^{-4} \cdot w_{00} (\%) + 0.078 \quad (5)$$

그림 10에서 보는 바와 같이 Yano의 분석과 같이 영점을 지나는 직선회귀식 보다 절편을 갖는 직선회귀식이 초기함수비와 침강압밀계수의 관계를 잘 나타내는 것으로 분석되었다. 영점을 지나는 회귀식의 결정계수는 0.09로 매우 낮게 나타났다.

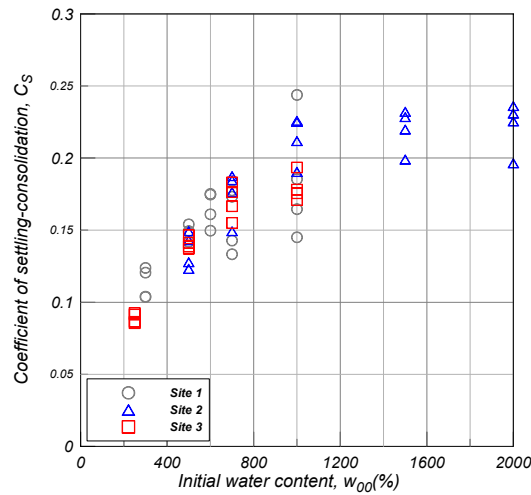


그림 10. 초기함수비에 따른 침강압밀계수

4.2 초기침강속도, v_i

침강실험이 시작하여 침강퇴적과정이 종료되고, 압밀침강과정이 시작되는 시간까지의 침하량비를 나타내는 초기침강속도 분석하여 초기함수비에 따라 그림 11에 나타내었다. 초기함수비의 증가에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 나타내고 있으며, v_i 의 범위는 0.03~0.33cm/min이고, 평균은 0.12cm/min으로 나타났다. 초기함수비에 따라 초기침강속도의 관계식을 최소자승법으로 회귀분석한 결과 식 (6)과 같이 획득하였으며, 이 식의 결정계수는 0.82로 분석되었다.

$$v_i (\text{cm/min}) = 1.24 \times 10^{-4} \cdot w_{00} (\%) + 0.0197 \quad (6)$$

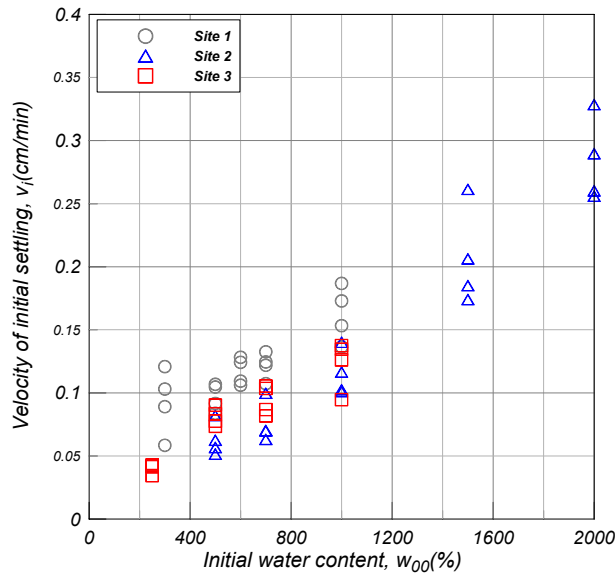


그림 11. 초기함수비에 따른 초기침강속도

4.3 압밀침강과정 시·종료시점의 계면고

침강압밀분석을 위해서는 투기된 실질토량고, H_s 에 따른 압밀침강과정이 시작되는 시점에서의 계면고, H_{t_0} 가 필요하다. 이를 분석하기 위해 그림 12와 같이 실질토량고에 따른 H_{t_0} 를 양대수 축적으로 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 직선의 관계로 분석되었다. 이 직선관계에 대한 회귀분석은 식 (7)과 같으며, 결정계수는 0.74로 나타났다. 그러므로 h_{2t_0} 는 9.55cm, C_{Kt_0} 는 0.70으로 분석되었다.

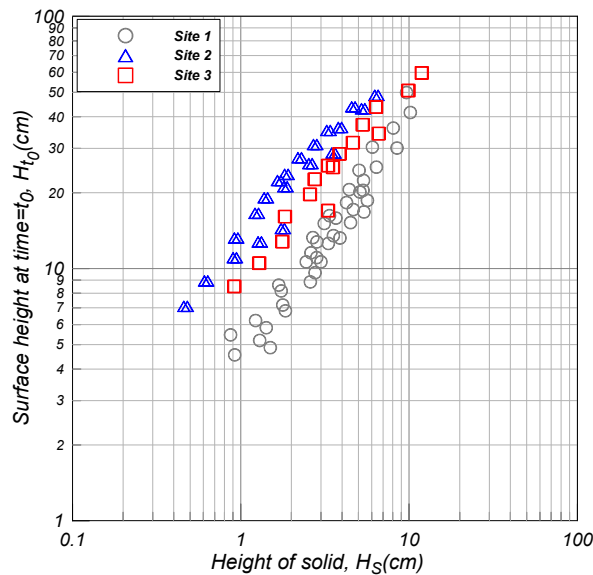


그림 12. 실질토량고에 따른 압밀침강과정 시작시점에서의 계면고

$$\log H_{t_0} (cm) = \log 9.55 + 0.70 \cdot \log H_s (cm) \quad (7)$$

또한, 자중압밀이 종료되는 t_{100} 에서의 계면고, $H_{t_{100}}$ 과 실질토량고의 관계를 그림 13에서와 같이 양대수 축적으로 나타내었다. 그림과 같이 양대수 축척상에 직선형태의 관계를 보이고 있으며, 회귀식은

식 (8)로 분석되었고, 결정계수는 0.88로 나타났다. 회귀식으로부터 $h_{2t_{100}}$ 는 4.62cm, $C_{Kt_{100}}$ 는 0.83으로 분석되었다.

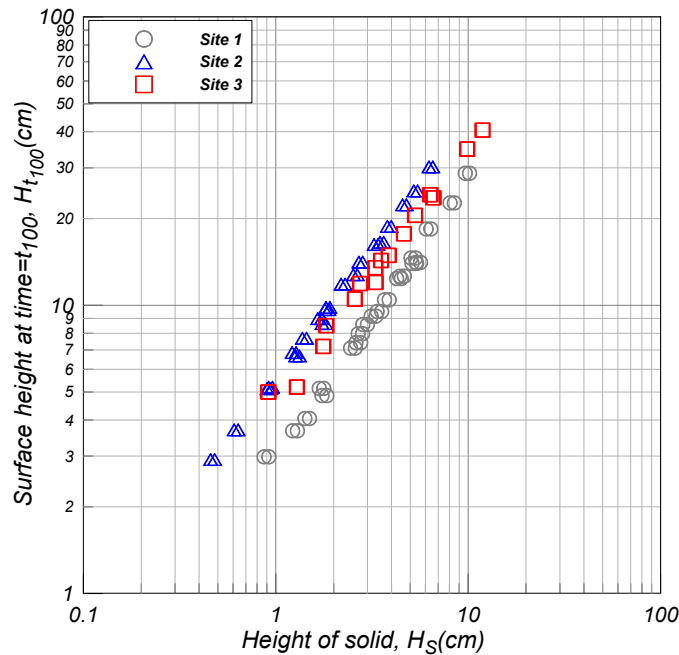


그림 13. 실질토랑고에 따른 압밀침강과정 종료시점에서의 계면고

$$\log H_{t_{100}}(cm) = \log 4.62 + 0.83 \cdot \log H_s(cm) \quad (8)$$

5. 결론

본 연구에서는 해상점토가 준설매립될 때의 침강-압밀거동을 실험적으로 예측하는 矢野弘一郎(1985) 제안식의 특성값을 분석하기 위해 국내 서해안 인천지역의 점토를 채취하여 침강실험을 실시하고, 그 결과를 분석하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 압밀침강계수, c_s 는 1000%의 초기함수비까지 증가하다 이후 일정해지는 경향이 나타났다. 250~1000%의 초기함수비에서 c_s 는 0.086~0.24cm/min의 범위로 평균 0.16cm/min로 나타났다. 또한, 초기함수비, w_{00} 와의 회귀분석식은 $c_s(\text{cm/min}) = 1.21 \times 10^{-4} w_{00}(\%) + 0.078$ 으로 나타났다.
- 2) 초기함수비 250~2000%에서 초기침강속도, v_i 는 0.03~0.33cm/min 범위로 평균 0.12cm/min으로 분석되었으며, w_{00} 와 v_i 에 대하여 선형 회귀분석에서는 $v_i(\text{cm/min}) = 1.24 \times 10^{-4} w_{00}(\%) + 0.0197$ 로 분석되었다.
- 3) 시간에 따른 계면고가 직선으로 시작되는 압밀침강과정 시작 시점, t_0 에서의 계면고, H_{t_0} 와 실질토랑고, H_s 의 관계식은 $\log H_{t_0}(\text{cm}) = \log 9.55 + 0.70 \log H_s(\text{cm})$ 으로 나타났다. 또한, 자중압밀 종료 시점, t_{100} 에서의 계면고, $H_{t_{100}}$ 와 실질토랑고, H_s 의 관계식은 $\log H_{t_{100}}(\text{cm}) = \log 4.62 + 0.83 \log H_s(\text{cm})$ 으로 분석되었다.