

국내 해성점토의 침강압밀특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Sedimentation-Consolidation Characteristics for Marine Clay in Korea

전 상 현[†] · 유 남 재¹⁾

Jun, Sanghyun · Yoo, Namjae

ABSTRACT : In this research, settling tests with marine clays in Korea and extensive literature review were performed to investigate the characteristics of sedimentation and consolidation so that their behaviors during dredging and reclamating could be evaluated. Design parameters related to Yano's method (1985), one of experimental approaches having been used widely in Korea to estimate sedimentation and consolidation, were analyzed and their proprieties were reassessed. For samples from four different sites of south and west coasts in Korea respectively, settling tests with 1m height of columns were carried out, changing initial water content and height of sample in order to evaluate settling and consolidation characteristics of them from analyzing test results. More reliable regression curves than values from literature review were obtained as analyzing test results of estimating coefficient of sedimentation/consolidation and initial setting velocity with changing initial water content. Relation between height of soil solid and surface height of slurry at the stages of initiation and termination of consolidation was also assessed. Finally, for marine clays of south and west coasts of Korea, ranges and average values of these design parameters were evaluated and typical empirical equations between these design parameters were also proposed. On the other hand, comparisons of characteristics of sedimentation and consolidation between marine clays from south coast and them from west coast were also performed.

Keywords : Marine clay, Dredging and reclamating, Sedimentation-consolidation

요 지 : 본 연구는 해성점토의 준설매립시 침강 및 자중압밀거동 분석을 위한 침강압밀특성의 평가를 목적으로 국내 해성점토에 대한 침강실험을 실시하고, 기존 자료와 함께 고찰하였다. 침강압밀의 거동은 Yano가 제안한 방법이 국내에서 많이 적용되고 있으므로 본 연구는 이에 대한 특성치를 평가하였다. 침강실험은 남해안 해성점토 4개와 서해안 해성점토 4개에 대하여 초기함수비와 초기높이를 변화하는 조건으로 높이 1m의 Column으로 실험을 수행하였다. 연구결과, 남해안 및 서해안 해성점토 각각에 대한 침강압밀특성을 도출하였다. 초기함수비에 따른 압밀침강계수와 초기침강속도를 분석하고, 이를 기존문헌과 비교하여 보다 높은 상관성을 갖는 회귀식을 산정하였다. 실질토량고와 압밀침강과정 시작 및 종료시 계면고의 관계를 평가하였다. 이와 같은 분석으로 남해안 및 서해안 해성점토 각각에 대하여 침강압밀특성치의 범위와 평균 등을 제안하였으며, 대표적인 관계식을 산정하였다. 또한, 남해안 및 서해안의 해성점토가 갖는 침강-압밀특성을 비교 분석하였다.

주요어 : 해성점토, 준설매립, 침강압밀

1. 서 론

항만시설이나 공항, 공장 및 주거용지 등을 조성하거나 항로유지와 해안구조물의 기초시공 등 해성점토의 준설공사는 계속적으로 발생하고 있다. 준설된 흙은 매립장 투기 또는 외해 투기로 처리하고 있으며, 최근에는 환경적인 문제로 인하여 매립장 투기가 대부분을 차지하고 있다. 해안매립지의 조성을 위하여 매립재로써 해성점토를 사용하는 것 또한 수급조건과 경제성을 고려할 때 불가피한 선택이 아닐 수 없다(한국지반공학회 2004).

해성점토의 준설에서 펌프준설선은 경제성 및 효율성 등의 이유로 다수 적용되고 있으며, 펌프준설선에 의한 투기시 준설토는 점토와 해수가 혼합되어 매우 높은 함수비를 갖게 된다. 준설매립되는 고 함수비의 해성점토는 초연약토로 침강 및 자중압밀이 발생하고, 큰 압밀침하와 매우 낮은 전단강도를 지니게 된다. 초연약점토의 거동 특히, 침강 및 자중압밀 특성을 분석하기 위한 연구는 Mikasa(1963), Gibson 등(1967)이 제안한 대변형을 압밀이론을 기초로 한 연구(유남재 등, 1998; 전제성, 2000; 김형주 등, 1999; 정규향, 2005)와 失野(1985)가 제안한 실험적인 분석법에 대한 연구(이승

† 정희원, 세경대학 토목과 전임강사(E-mail : clays@seakyung.ac.kr)

1) 비회원, 강원대학교 토목공학과 교수

등, 1999; 하영조, 2001; 최성운, 2003; 박진호, 2003)가 국내에서 대표적으로 이루어지고 있다. 특히, 이 중 失野(1985)의 실험적 연구는 국내에서 Yano방법이라 통칭되면서 준설풍토의 침강 및 자중압밀 평가에 다수 적용되었다.

그러므로 본 연구는 국내 해상점토의 침강압밀특성의 기초자료를 제공하고 Yano방법의 적용성을 재조명하는 연구의 일환으로, 국내 남해안과 서해안의 해상점토를 대상으로 침강실험을 실시하고 침강-압밀거동의 특성을 분석하였다. 분석결과를 종합하여 국내 남해안과 서해안 해상점토의 침강-압밀 거동특성을 지시하는 지표에 대한 대표값과 범위, 관계식을 제안하였다.

2. 침강압밀특성 평가방법의 고찰

준설풍토의 초연약점토의 침강-자중압밀 거동을 분석하기 위한 실험적 방법은 언급한 바와 같이 失野(1984, 1985)가 제안한 방법이 Yano법이라 통칭되면서 많이 적용되고 있다. 본 장에서는 먼저 시간에 따른 침하량을 예측하기 위한 Yano의 제안방법에 대하여 살펴보았다. 평가방법의 고찰에서 원저자의 기호 사용을 원칙으로 하였으나, 국내에서 일반적으로 사용하는 기호와 혼선을 방지하기 위해 일부 기호는 변경하여 사용하였다.

失野(1985)는 해수와 혼합된 해상점토의 준설풍토 침강 및 자중압밀과정을 침강퇴적과정과 압밀침강과정으로 구분하고, 그림 1과 같이 시간에 따른 계면고를 양대수 축적으로 도시하여 이를 설명하였다. 그림 1과 같이 초기높이가 H_{00} 인 준설풍토의 침강퇴적과정은 투기 직후 빠른 시간동안 형성된 flocc에 의해 상등수와 현탁액 사이에 명확한 계면이 유발되고, 계면은 등속으로 침강한다. 여기서, flocc은 미세한 점토입자가 전기적 인력에 의해 서로 엉겨 붙어 형성된 큰 입자로 정의할 수 있다(Imai, 1981). 또한, 하부에서는 퇴적

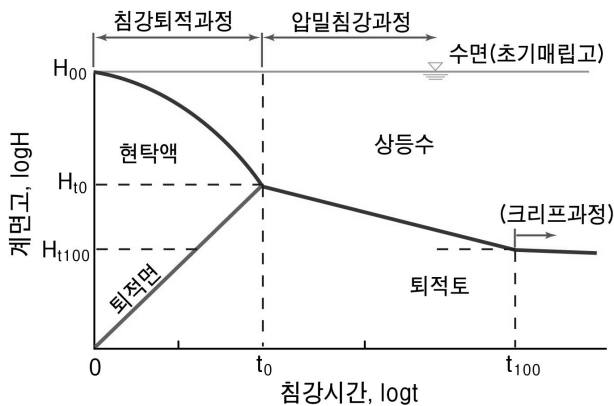


그림 1. 침강퇴적 및 압밀침강과정

이 발생하여 점차 높이가 상승하고, 결국 현탁액의 계면과 일치되면서 침강퇴적과정은 종료된다. 침강퇴적과정의 종료 시점부터 압밀침강과정이 시작되며, 이 시점에서의 시간은 t_0 , 계면고는 H_{10} 이다. 압밀침강과정이 진행되어 자중압밀이 종료되고 크리프에 의한 변형과정으로 전환되는 시점은 t_{100} , 그때의 계면고는 H_{1100} 이다.

失野(1985)은 침강압밀을 예측하기 위하여 내경 12cm, 높이 50~100cm의 투명한 아크릴 실린더를 이용하여 침강실험을 실시하였다. 초기함수비, w_{00} (500, 700, 1000, 1400%)와 실질토량고, H_s (0.976, 1.952, 2.929, 3.906cm)를 실험조건으로 변화한 실험으로 그림 2($w_{00}=1000\%$ 조건)와 같은 결과를 획득하였다.

그림 2와 같이 시간에 따른 계면고의 양대수 축척에서 압밀침강과정($t_0 \sim t_{100}$)은 선형으로 분석되었으며, 시작점(t_0)과 종료점(t_{100})은 실질토량고에 따라 각각 직선으로 연결되었다. 또한, 초기함수비, w_{00} 에 대한 초기침강속도, v_i 를 분석하여 그림 3에 나타내었다. 초기침강속도는 침강퇴적과정이 종료되는 시점(t_0)까지의 침강속도로 식 (1)과 같이 산정한다. 그림 3과 같이 초기침강속도, v_i 는 초기함수비의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 실질토량고에 따라서는 침강속도가 변하지 않는 것으로 나타났다.

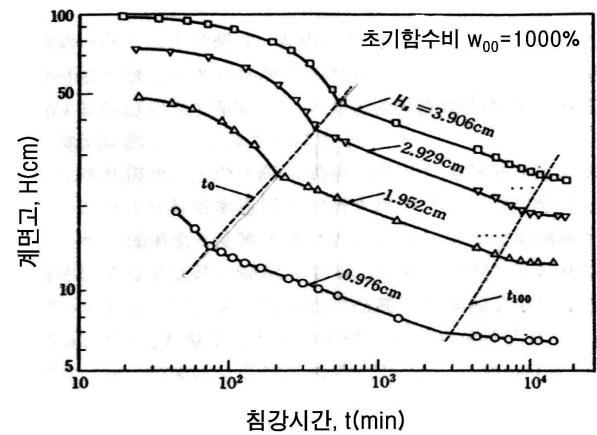


그림 2. 동경점토의 침강곡선

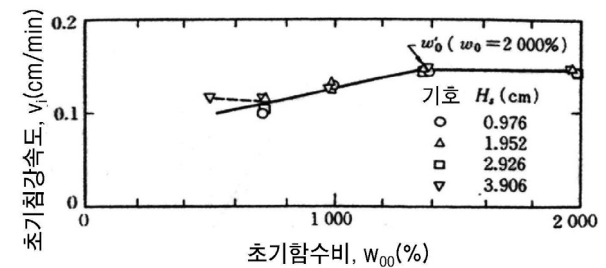


그림 3. 초기함수비에 따른 초기침강속도

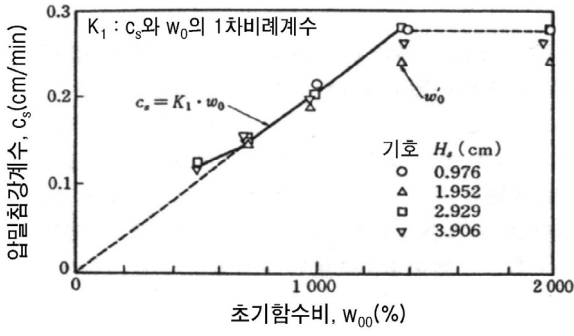


그림 4. 초기함수비에 따른 압밀침강계수

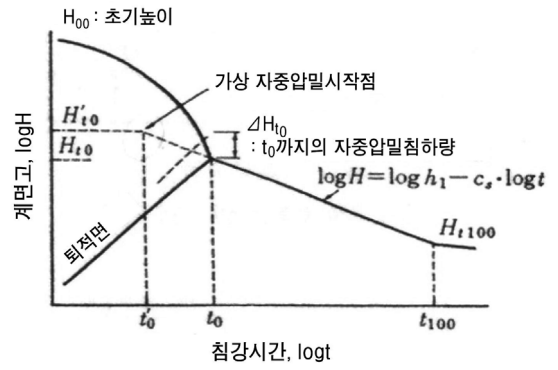


그림 6. 가상의 자중압밀시작점

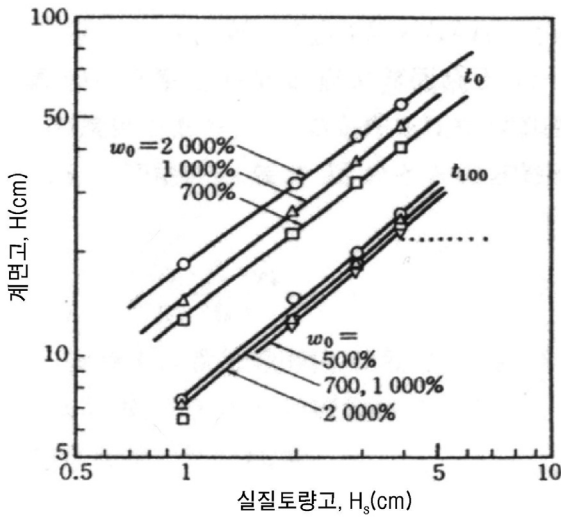


그림 5. 실질토량고에 따른 압밀침강과정 시점과 종점에서의 계면고

$$v_i = \frac{H_{100} - H_{t_0}}{t_0} \quad (1)$$

그림 4의 초기함수비에 대한 압밀침강계수, c_s 는 원점을 지나는 선형으로 분석하였으며, 압밀침강계수는 실질토량고와 관계없이 함수비에 따라 증가하는 경향으로 나타났다. 압밀침강계수, c_s 는 그림 1, 그림 2에서와 같이 압밀침강과정에서 시간과 계면고의 양대수 축척상의 기울기로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

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

이러한 관계로부터 압밀침강과정에서의 시간에 따른 계면고는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\log H = \log h_1 - c_s \cdot \log t \quad (3)$$

여기서, h_1 은 $t=1$ 일 때의 계면고이며, 실험조건 또는 투기조건에 따라 다른 값으로 나타난다.

실질토량고와 압밀침강과정 시작시의 계면고, H_0 또는

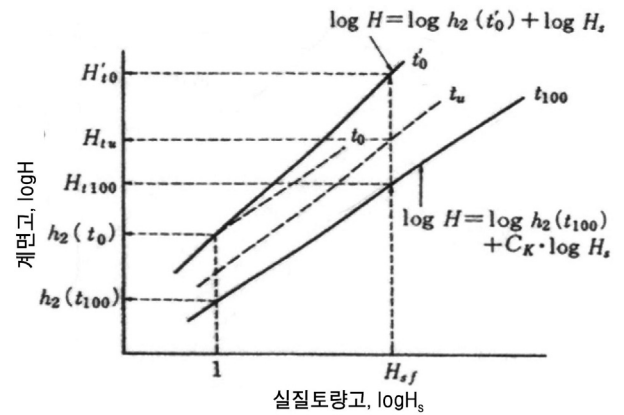


그림 7. 자중압밀구간의 침강시간-계면고

종료시의 계면고, H_{t100} 의 관계를 양대수 축척으로 나타내면 그림 5와 같다. 그림과 같이 함수비 조건별로 $\log H_s \sim \log H_{t_0}$, $\log H_s \sim \log H_{t100}$ 이 각각 선형으로 분석되었으며, 그 선형식은 식 (4)과 같다.

$$\begin{aligned} \log H_{t_0} &= \log h_{2t_0} + C_{Kt_0} \cdot \log H_s \\ \log H_{t100} &= \log h_{2t100} + C_{Kt100} \cdot \log H_s \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, h_{2t_0} 는 압밀시작시 $H_s=1$ 일 때의 계면높이이며, C_{Kt_0} 는 $\log H_s \sim \log H_{t_0}$ 의 기울기이다. h_{2t100} 은 압밀종료시 $H_s=1$ 의 계면높이이며, C_{Kt100} 은 $\log H_s \sim \log H_{t100}$ 의 기울기이다.

자중압밀의 압밀도를 예측하기 위하여 압밀도가 0이 되는 가상의 자중압밀시작점, t'_0 를 그림 6과 같이 제안하였다. 그림 6과 같이 t'_0 는 시간-계면고의 양대수 축척 관계에서 압밀침강과정의 연장선상에 놓이므로 식 (3)을 만족하게 된다. 또한, 가상의 자중압밀시작점, t'_0 에서는 압밀도=0으로 전체높이에 대해 함수비 분포가 동일하게 분포하므로 식 (4)에서 $C_K=1$ 이 된다. 그러므로 그림 7과 같이 실질토량고와 계면고를 양대수 축척으로 나타낼 때, 단위높이($H_s=1$)에서 t_0 와 t'_0 의 계면고는 같게 된다. 즉, 식 (4)에서 $h_{2t_0} = h_{2t'_0}$ 가 된다.

따라서, 가상의 자중압밀시작점은 아래 식 (5)와 같이 산정

할 수 있다.

$$t'_0 = \left(\frac{h_1}{H_{t0}} \right) = \left(\frac{h_1 \cdot f_0}{h_2 \cdot H_0} \right)^{\frac{1}{c_s}} \quad (5)$$

여기서, f_0 는 체적비로 $1+c_0$ 이다.

3. 침강실험 및 기존 자료분석

본 연구를 위하여 남해안 해성점토 분석에는 부산, 광양, 여천, 마산의 4개 지역에서 채취한 시료를 이용하였으며, 서해안은 인천항 근처 4개 지역에서 채취한 시료를 이용하여 침강실험을 실시하였다. 침강실험에 적용된 시료는 모두 준설매립이 예정된 해성점토이다. 또한, 기존 자료로 남해안 해성점토에 대해 침강실험을 수행한 4개 문헌((주)대영엔지니어링 외, 1999; 삼성물산(주) 외, 2002; (주)포스코건설 외, 2003; (주)대영엔지니어링 외 2005)을 참조하여 함께 분석하였다.

3.1 침강실험

3.1.1 해성점토의 물리적 성질

남해안 지역의 침강실험에 사용된 시료는 부산신항에서 채취한 해성점토 A(S-1)와 여천확장단지에서 채취한 해성점토(S-2), 광양항의 해성점토 A(S-3) 및 마산항의 해성점토(S-4)이다. 서해안 지역의 침강실험에 사용된 시료는 인천항에서 채취한 해성점토(W-1), 영종도의 해성점토(W-2), 인천남외항(W-3) 및 인천배후단지(W-4)의 해성점토이다. 시료의 기본물성을 표 1에 정리하였다.

3.1.2 침강실험 조건

침강실험은 그림 8 (a)와 같이 내경 9cm, 높이 100cm인 투명아크릴 실린더 형태의 Column을 이용하였다. 준설토와

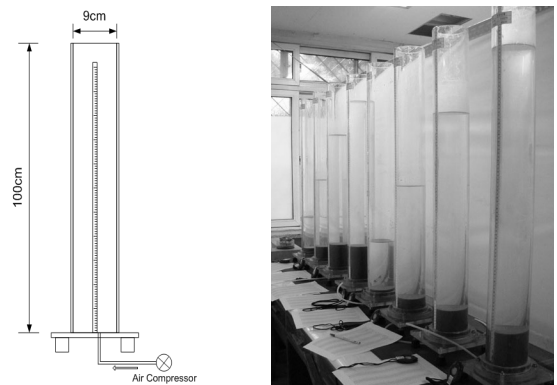
해수를 혼합하여 초기함수비를 실험조건에 맞춘 시료를 Column에 넣고 하부에서 공기압을 가하여 완전히 교반시킨 상태에서 실험시작과 동시에 공기압을 정지시켜 침강 및 압밀을 유도하였다. 그림 8의 (b)에서처럼 초기함수비 및 초기 시료높이(H_{00})를 변화하면서 실험을 수행하였다. 각 시료에 대한 침강실험 조건을 표 2에 나타내었다.

3.1.3 침강실험결과

8개의 해성점토 시료에 대해 침강실험을 수행하여 시간에 따른 침하량을 획득하였으며, 이 중 S-2와 W-3 시료의 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림 9와 같이 초기에 침강이 발생하는 침강퇴적과정의 곡선부로부터 나타내며, 이후 압밀침강과정이 시작되면서 직선형태의 $\log t \sim \log H$ 관계가 나타났다. 이러한 관계로부터 압밀침강과정의 시작되는 시간(t_0)과 계면고(H_{t0}) 및 압밀침강과정의 직선부가 종료되는 시간(t_{100})과 계면고(H_{t100})를 획득하였다.

3.2 침강실험기존 자료분석

국내 남해안지역의 준설대상 해성점토로 침강실험을 수행한 4개(S-5~S-8)시료에 대한 문헌을 함께 분석하였다.



(a) 침강실험용 실린더 모식도 (b) 실험전경

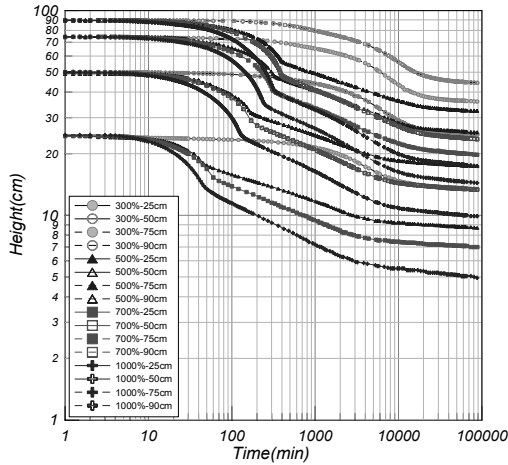
그림 8. 침강실험 기구 및 전경

표 1. 침강실험시료의 물리적 특성

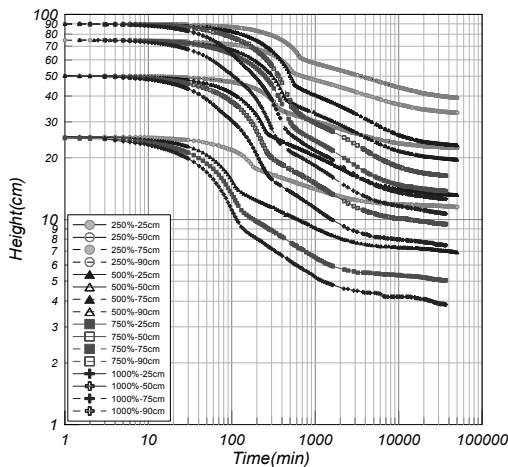
지역	구분	시료채취위치	비중	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수	통일분류
남해안	S-1	부산신항 A	2.72	47.1	26.8	20.3	CL
	S-2	여천확장단지	2.78	47.9	25.5	22.4	CL
	S-3	광양항 투기장 A	2.71	40.5	18.8	21.7	CL
	S-4	마산항	2.71	59.2	29.4	29.8	CH
서해안	W-1	인천항	2.70	35.2	19.1	16.1	CL
	W-2	영종도	2.71	43.8	21.5	22.3	CL
	W-3	인천남외항	2.70	27.8	17.5	10.3	CL
	W-4	인천배후단지	2.70	41.9	19.2	22.7	CL

표 2. 침강실험조건

지역	구분	초기함수비, w_{00} (%)	초기높이, H_{00} (cm)	실험횟수
남해안	S-1	500, 700, 1000, 1400, 2000	25, 50, 75, 90	5×4=20회
	S-2	500, 700, 1000, 1400	25, 50, 75, 90	4×4=16회
	S-3	300, 500, 700, 1000	25, 50, 75, 90	4×4=16회
	S-4	500, 700, 1000, 1500	25, 50, 75, 90	4×4=16회
서해안	W-1	500, 700, 1000, 1500, 2000	25, 50, 75, 90	5×4=20회
	W-2	250, 500, 700, 1000	25, 50, 75, 90	4×4=16회
	W-3	300, 500, 600, 700, 1000	25, 50, 75, 90	5×4=20회
	W-4	500, 700, 1000, 1500	25, 50, 75, 90	4×4=16회

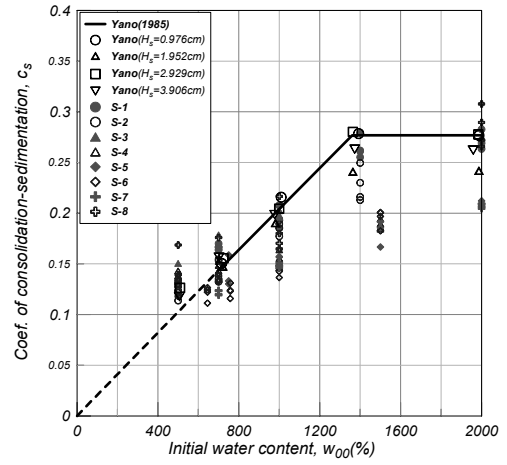


(a) 광양항 투기장 A(S-3)

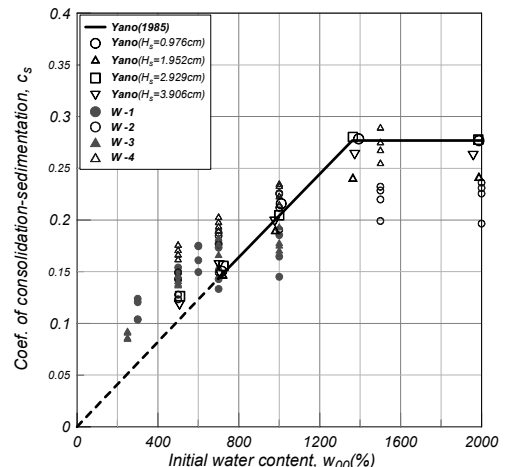


(b) 인천남외항(W-3)

그림 9. 시간에 따른 계면고



(a) 남해안 해성점토



(b) 서해안 해성점토

그림 10. 초기함수비에 따른 압밀침강계수 경향

표 3. 기존자료의 물리적 특성

지역	구분	시료채취위치	비중	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성 지수	통일 분류
남해안	S-5	부산항	2.73	73.5	34.7	38.8	CH
	S-6	광양항 투기장 B	2.71	82.7	52.4	30.3	CH
	S-7	광양 중마부두	2.72	45.9	21.9	24.0	CL
	S-8	부산신항 B	2.71	53.2	28.4	24.8	CH

표 4. 기존자료의 침강실험조건

지역	구분	초기함수비, w_{00} (%)	초기높이, H_{00} (cm)	실험횟수
남해안	S-5	500, 750, 1000, 1500, 2000	45, 70, 90	5×3=15회
	S-6	645, 748, 1000, 1500	55, 70, 90, 110	4×4=16회
	S-7	500, 700, 1000, 2000	60, 80, 100, 120	4×4=16회
	S-8	500, 700, 1000, 2000	25, 50, 75, 100	4×4=16회

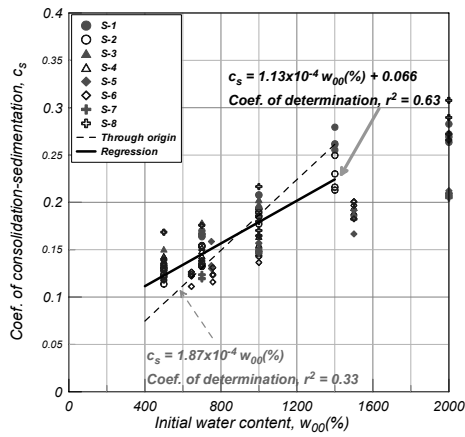
표 3은 분석에 적용된 기존자료의 기본물성이다. 기존자료의 분석에는 그림 9와 같은 시간에 따른 계면고의 결과로 분석하거나 실험자가 산정한 실험조건별 결과를 이용하였다. 표 4는 기존자료에 대한 실험조건이다.

4. 결과분석

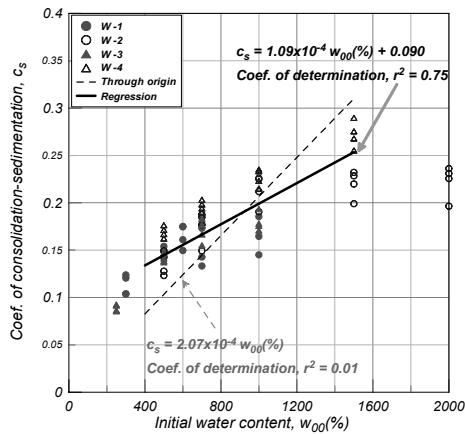
4.1 압밀침강계수

침강압밀실험 결과로부터 분석한 압밀침강계수, c_s 를 투기지의 초기함수비, w_{00} 에 따라 그림 10에 나타내었다. 그림의 범례에서 Yano(1985)가 분석한 그림 4의 실질토랑고에 따른 초기함수비~압밀침강계수의 관계이다. 그림 10에서 보는 바와 같이 함수비의 증가에 따라 압밀침강계수가 1500%까지 증가하는 경향을 보이나, 이후에는 증가량이 감소하거나 거의 없는 것으로 나타났으며, 이는 Yano의 제안과 유사한 경향이다. 남해안 해성점토는 초기함수비 500~1500%에서 침강압밀계수가 0.11~0.28의 범위로 평균은 0.16, 변동계수(Coef. of Variable)는 0.23으로 분석되었다. 서해안 해성점토는 초기함수비 500~1500%에서 침강압밀계수는 0.08~0.29의 범위이며, 평균 0.17, 변동계수는 0.26으로 분석되었다.

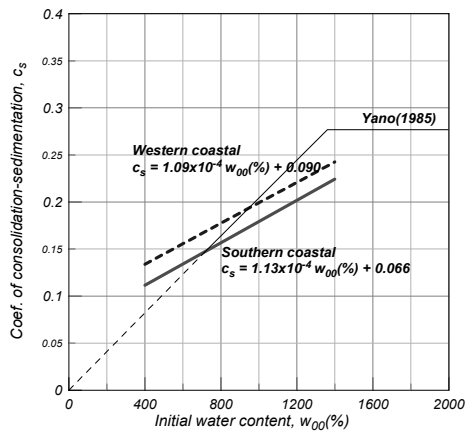
그림 4에서 보는 바와 같이 Yano는 초기함수비와 압밀침



(a) 남해안 해성점토



(b) 서해안 해성점토



(c) 남·서해 해성점토 관계식 비교

그림 11. 압밀침강계수

표 5. 압밀침강계수 분석

구분	구분	지역	회귀분석식	결정계수
Yano제안식	$c_s = K_1 \cdot w_{00}$	남해	$c_s = 1.87 \times 10^{-4} w_{00}(\%)$	$r^2=0.33$
		서해	$c_s = 2.07 \times 10^{-4} w_{00}(\%)$	$r^2=0.01$
최적함수식 (최소자승법)	$c_s = K_1 \cdot w_{00} + B_1$	남해	$c_s = 1.13 \times 10^{-4} w_{00}(\%) + 0.066$	$r^2=0.63$
		서해	$c_s = 1.09 \times 10^{-4} w_{00}(\%) + 0.090$	$r^2=0.75$

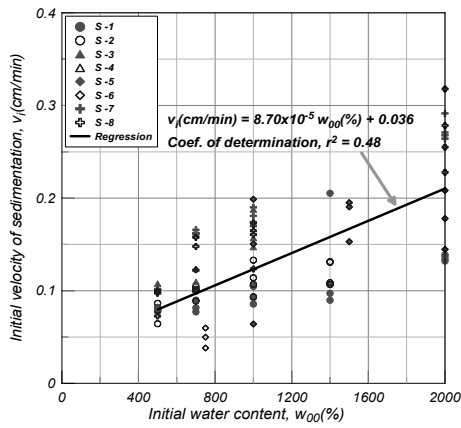
강계수와와의 관계식에 대하여 절편이 0인 직선으로 제안하였으나, 그림 11(a), (b)의 실험결과에서 보는 바와 같이 w_{00} - c_s 의 관계는 양(+)의 절편을 갖는 최적함수의 직선과 가깝게 나타났다. 이러한 경향을 반영한 선형 회귀분석을 수행하여 표 5에 나타내었다. 회귀분석에서 분산이 큰 몇 개의 자료는 제외하였다.

표 5와 같이 침강실험결과, 절편이 0인 Yano 제안식은 결정계수(Coef. of determination), r^2 이 0.01~0.33로 나타났으며, 절편이 양의 값을 갖는 최적함수식은 r^2 이 0.63~0.75로 분석되었다. 국내에서도 이송 등(1999), 김영수(2000), 고영석(2001)의 연구와 같이 대부분 w_{00} - c_s 관계를 양의 절편을 갖는 회귀식으로 분석하였다. 그러므로 절편이 0인 Yano의 제안식보다 절편을 갖는 최적함수식이 보다 근사적으로 초기함수비와 압밀침강계수의 관계를 나타낼 수 있는 것으로 판단된다.

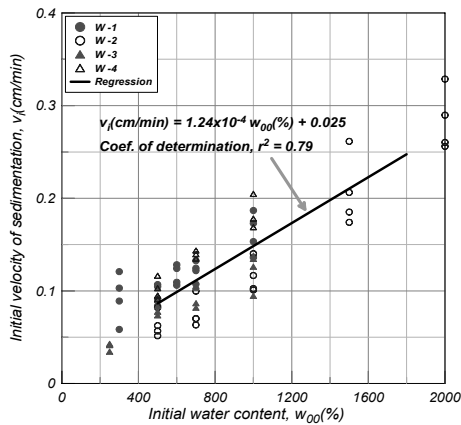
한편, 동일한 함수비 조건에서 그림 11 (c)와 같이 남해안(실선)과 서해안(점선) 해성점토의 w_{00} - c_s 회귀분석식을 비교하면, 기울기는 유사하나 절편에서 서해안이 크게 나타났다. 즉, 함수비의 변화가 자중압밀거동에 미치는 영향은 유사하나 동일한 함수비조건에서 시간에 따른 자중압밀 침하는 서해안 해성점토가 더 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 이는 일반적으로 알려진 바와 같이 우리나라의 서해안 점토가 남해안 점토에 비하여 더 빠른 압밀진행 속도를 보이며, 압밀계수 또한 더 크게 나타나고 있는 경향과 동일하다 볼 수 있다.

4.2 초기침강속도

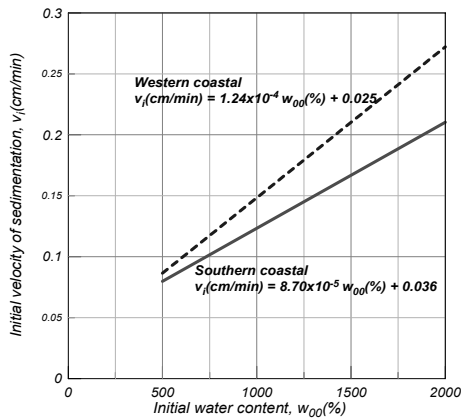
침강실험 시작부터 침강되적과정에서 종료되고 압밀침강과정이 나타나는 t_0 까지의 시간에 따른 침하량 비인, 초기침강속도(v_i)를 초기함수비에 따라 그림 12에 도시하였다. 남해안 해성점토의 침강결과인 그림 12(a)와 같이 초기함수비가 증가함에 따라 초기침강속도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 분산된 몇 개의 결과를 제외하고, $w_{00}=500\sim 1500\%$ 에서 초기침강속도는 0.002~0.318cm/min의 범위로 평균 0.128cm/min, 변동계수는 0.511로 분석되었다. 서해안 해성점토의 침강결과도 w_{00} 의 증가에 따라 v_i 가 증가하는 경향으로 그림 12(b)와 같이 나타났다. 서해안 점토의 초기침강속도는 0.03~0.33cm/min의 범위로 평균 0.122cm/min, 변동계수 0.493으로 분석되었다. 초기함수비와 초기침강속도의 관계에 대하여 최소자승법으로 직선의 회귀분석을 실시한 결과, 표 6과 같이 분석되었다. 초기함수비의 전체범위에 대해 초기침강속도는 증가하는 경향을 보이며, 그림 9의 압밀침강계수처럼 초기함수비 1400%에서의 변곡점은 나타나지 않았다. 失野(1985)는 그림 3,



(a) 남해안 해성점토



(b) 서해안 해성점토



(c) 남·서해 해성점토 관계식 비교

그림 12. 초기침강속도

표 6. 초기침강속도 분석

구분	지역	회귀분석식	결정계수
최적함수식(최소자승법)	남해	$v_i = 8.70 \times 10^{-5} w_{00}(\%) + 0.036$	$r^2 = 0.48$
	서해	$v_i = 1.24 \times 10^{-4} w_{00}(\%) + 0.025$	$r^2 = 0.79$

그림 4와 같이 초기함수비, $w'_0 = 1377 \pm 10\%$ 이하에서 flocc이 형성되면서 등속침강이 되며, 이는 초기함수비에 따른 초기 침강속도 및 압밀침강계수의 관계에서 모두 나타나는 것으로

분석하였다. 그러므로 본 연구에서 압밀침강계수가 그림 11과 같이 $w_{00} = 1400\%$ 에서 변곡점이 발생하였으므로 표 6의 회귀식도 500~1400%의 초기함수비 범위에서 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

그림 12(c)와 같이 남해안(실선)과 서해안(점선)의 해성점토에 대한 초기함수비-초기침강속도 관계식을 비교하면, 투기시 함수비가 낮은 구간에서는 비교적 유사한 침강속도를 보이나 초기함수비가 증가할수록 v_i 의 차이가 벌어지면서 서해안 점토가 증가하는 경향을 보인다. 이는 해성점토의 물리적 성질에 관계된 것으로 유추할 수 있다. 낮은 초기함수비 조건은 토립자간의 간격이 상대적으로 가까우므로 침강시 응집된 flocc 사이에 많은 간섭이 작용하여 토립자의 크기 등의 영향이 미비할 것이다. 높은 함수비에서는 flocc이나 입자간의 간섭이 상대적으로 적기 때문에 비교적 큰 입자가 포함되어 있는 서해안 해성점토에 더 큰 침강속도를 보이는 것으로 판단된다. 이러한 경향성을 유추해 볼 수는 있으나 보다 상세한 검토는 침강시간 및 침전물 위치에 따른 flocc 크기에 대한 비교 등의 다양한 연구를 통하여 명확한 결론을 획득할 수 있을 것이다.

4.3 실질토량고와 계면고 관계

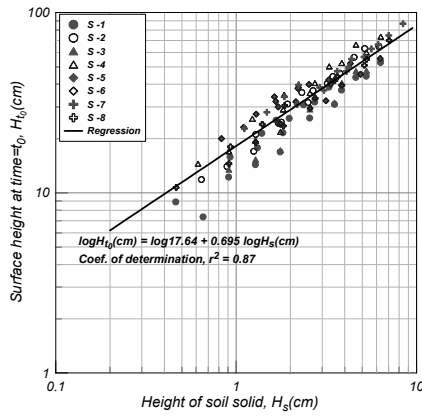
침강실험에 의한 침강-압밀거동의 분석을 위해서는 초기 조건(실질토량고)에 대한 압밀침강과정 시점과 종점의 계면고가 분석되어야 한다. 이는 투기된 실질토량고, H_s 와 압밀침하과정 시·종점의 계면고(H_0 또는 H_{100})가 식 (4) 및 그림 5와 같이 양대수 축척에서 나타나는 선형의 경향으로 추정할 수 있다. 이는 기존의 연구(이송 등, 1999; 김영수, 2000; 고영석, 2001)의 침강실험 결과에서도 나타나고 있다.

4.3.1 압밀시작시점

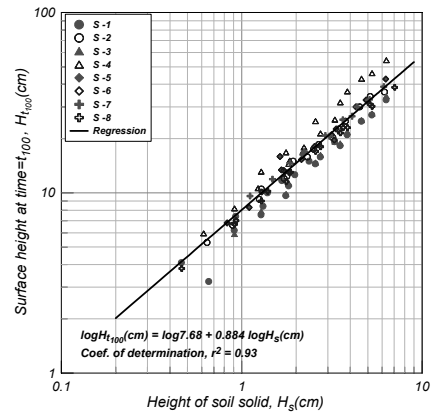
압밀침강과정 시작시(t_0) 실질토량고에 따른 계면고, H_0 를 분석하여 그림 13에 나타내었다. 남해안 해성점토는 그림 13(a)와 같이 $\log H_{10}(cm) = \log 17.64 + 0.695 \log H_s(cm)$ 의 회귀식에서 결정계수, r^2 는 0.87의 값을 보였다. 즉, 식 (4)에서 h_{20} 는 17.64cm, C_{K10} 는 0.695로 분석되었다. 서해안 해성점토는 그림 13(b)와 같이 $\log H_{10}(cm) = \log 10.29 + 0.694 \log H_s(cm)$ 의 회귀식에서 결정계수, r^2 는 0.69의 값으로 h_{20} 는 10.29cm, C_{K10} 는 0.694로 나타났다.

4.3.2 압밀종료시점

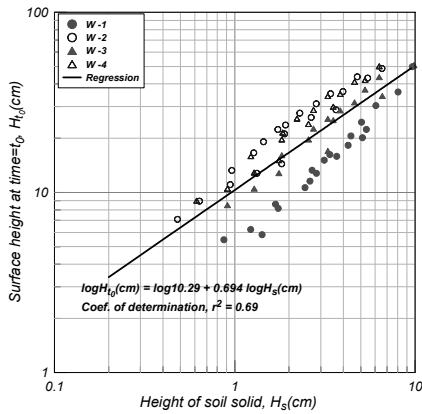
압밀침강과정 종료시점(t_{100})에서 실질토량고에 따른 계면고, H_{100} 는 그림 14와 같은 결과로 도출되었다. 남해안 해성점토는 그림 14(a)와 같이 $\log H_{100}(cm) = \log 7.68 + 0.884$



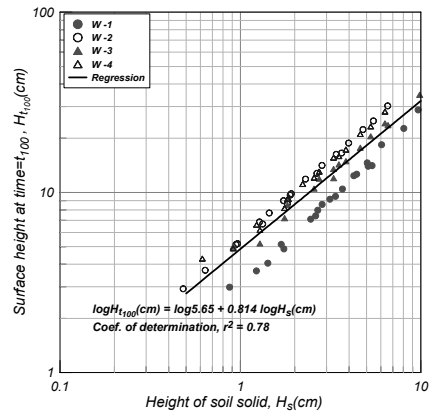
(a) 남해안 해성점토



(a) 남해안 해성점토



(b) 서해안 해성점토



(b) 서해안 해성점토

그림 13. 실질토랑고에 따른 압밀시점의 계면고

그림 14. 실질토랑고에 따른 압밀중점의 계면고

표 7. 압밀시·중점에서 실질토랑고와 계면고

지역	압밀과정	회귀분석식	결정계수
남해안	시점(t_0)	$\log H_{t_0}(\text{cm}) = \log 17.64 + 0.695 \log H_s(\text{cm})$	$r^2 = 0.87$
	중점(t_{100})	$\log H_{t_{100}}(\text{cm}) = \log 7.68 + 0.884 \log H_s(\text{cm})$	$r^2 = 0.69$
서해안	시점(t_0)	$\log H_{t_0}(\text{cm}) = \log 10.29 + 0.694 \log H_s(\text{cm})$	$r^2 = 0.93$
	중점(t_{100})	$\log H_{t_{100}}(\text{cm}) = \log 5.69 + 0.814 \log H_s(\text{cm})$	$r^2 = 0.78$

$\log H_s(\text{cm})$ 의 회귀식에서 결정계수, r^2 는 0.93의 값을 보였다. 즉, 식 (4)에서 $h_{2t_{100}} = 7.68\text{cm}$, $C_{Kt_{100}} = 0.884$ 로 분석되었다. 서해안 해성점토는 그림 14 (b)와 같이 $\log H_{t_{100}}(\text{cm}) = \log 5.69 + 0.814 \log H_s(\text{cm})$ 의 회귀식에서 결정계수, r^2 는 0.78로 $h_{2t_{100}} = 5.69\text{cm}$, $C_{Kt_{100}} = 0.814$ 로 나타났다. 위와 같이 압밀과정 시·중점에서 실질토랑고와 계면고의 관계를 분석한 회귀식을 표 7에 정리하였다.

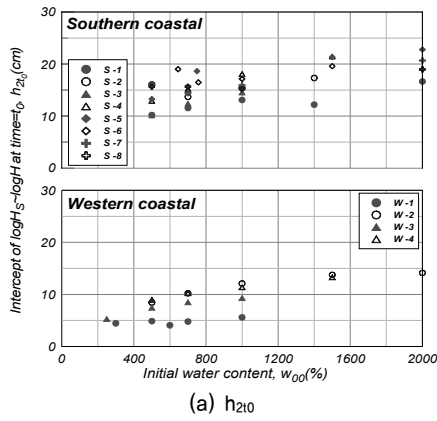
4.3.3 관계식 산정에 대한 제언

일반적으로 $\log H_s - \log H_{t_0}$ 또는 $\log H_s - \log H_{t_{100}}$ 의 관계는 시험시 적용한 초기함수비에 따라 각각 별도로 회귀분석하여 적용하고 있다. 그러므로 초기함수비에 따른 실질토랑고와 계면고의 관계를 분석하기 위하여, 각각의 초기함수비에 따

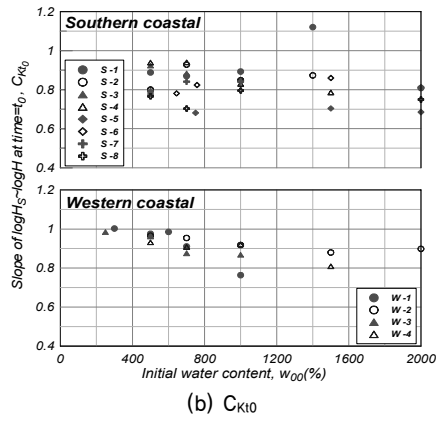
라 식 (4)의 H_2 와 C_K 를 분석한다. 초기함수비별로 분석한 h_2 와 C_K 를 압밀시점은 그림 15에 압밀종료시는 그림 16에 나타내었다. 각 시료에 대하여 압밀시작시 초기함수비에 따른 h_{2t_0} (그림 15(a))와 C_{Kt_0} (그림 15(b))는 w_{00} 변화에 관계없는 경향으로 나타나고 있다. 압밀중점에서조차 마찬가지로 w_{00} 에 따라 $h_{2t_{100}}$ (그림 16(a)) 및 $C_{Kt_{100}}$ (그림 16(b))이 관계없이 일정한 경향으로 나타났다. 즉, 식 (4)와 같은 압밀시·중점의 실질토랑고-계면고 관계를 초기함수비에 따라 각각 분석하지 않고, 전체 초기함수비의 자료를 이용하여 압밀시점과 중점의 관계식을 도출하여도 큰 오차를 수반하지 않을 것이라 판단된다. 전체 초기함수비에 대하여 관계식을 산정하면, 분석시 다양한 초기함수비 조건에서 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4.4 초기높이 실험조건에 대한 분석

앞서 언급한 바와 같이 失野(1985)는 실험조건으로 초기함수비와 실질토랑고의 변화를 제안하였다. 이러한 실험조건으로 수행한 결과, 그림 3, 4와 같이 실질토랑고에 관계없이 초기함수비-실질토랑고, 초기함수비-초기침강속도를 분

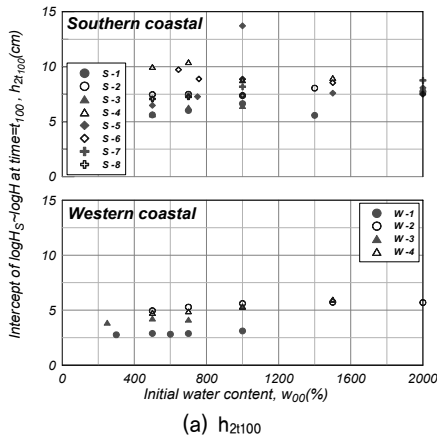


(a) h_{210}

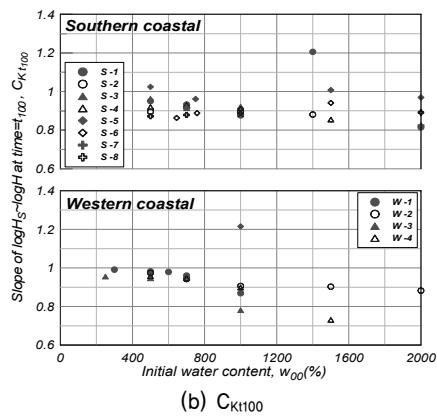


(b) C_{k10}

그림 15. 초기함수비에 따른 $\log H_s - \log H_{t_0}$ 관계식 분석

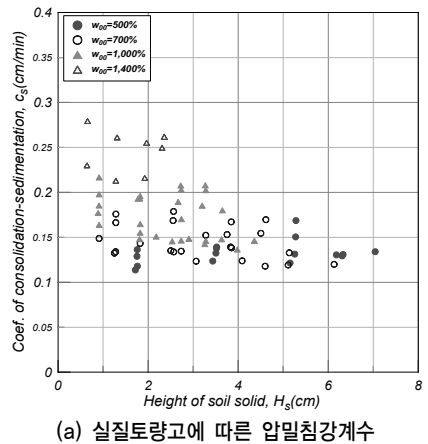


(a) h_{2110}

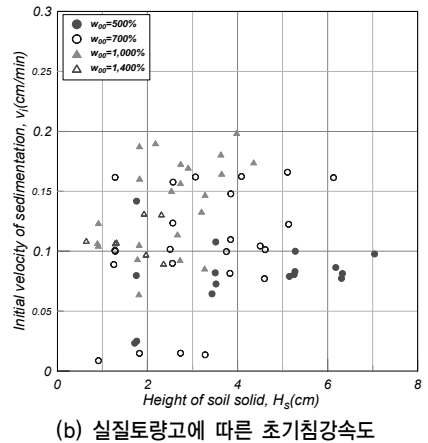


(b) C_{k110}

그림 16. 초기함수비에 따른 $\log H_s - \log H_{t_{100}}$ 관계식 분석



(a) 실질토량고에 따른 압밀침강계수



(b) 실질토량고에 따른 초기침강속도

그림 17. 실질토량고에 따른 압밀침강계수 및 초기침강속도

석하였다. 그러나 본 연구를 비롯하여 국내 대부분의 침강실험에서는 초기함수비와 초기시료높이를 실험조건으로 설정한다. 이러한 실험조건의 차이(H_s 또는 H_{00})에 따른 영향을 분석하기 위하여 남해안 해성점토에 대하여 그림 17과 같이 $H_s - c_s$ 및 $H_s - v_i$ 를 분석하였다. 그림 17(a)에서 보는 바와 같이 다소 분산된 결과를 보이거나 각각의 초기함수비에서 실질토량고와 압밀침강계수는 특별한 관계가 나타나지 않았다. 그림 17(b)에서도 실질토량고와 관계없이 초기침강계수가 나타났다.

그러므로 이와 같은 결과로 볼 때, 초기함수비에 따라 일정한 실질토량고나 초기높이 모두 실험조건으로 적용이 가능할 것으로 판단된다. 즉, 실험조건(H_s 또는 H_{00})에 관계없이 c_s 와 v_i 의 결과가 나타나므로 H_s 또는 H_{00} 를 어느 것을 실험조건으로 하여도 결과에는 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

초기높이를 실험조건으로 설정할 경우는 제한된 높이의 Column에서 좀 더 다양한 실험조건을 수행할 수 있는 장점이 있다. 그러나 그림 3, 4와 같이 Yano의 실험에서는 각각의 초기함수비에서 실질토량고에 따라 압밀침강계수와 초기침강속도의 차이가 미소한 결과를 보이며, H_{00} 를 실험조건으로 하는 국내의 연구에서는 다소 분산된 결과를 보이므로, 향후 다양한 실험조건에 의한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 침강-압밀특성을 분석하기 위하여 남해안 및 서해안의 해성점토에 대하여 침강실험을 실시하였다. 결과분석은 국내에서 많이 사용되는 Yano법에 요구되는 특성치로 평가하였으며, 침강-압밀거동의 예측에 필요한 국내 해성점토의 특성을 제안하고자 하였다. 연구결과 도출된 결론을 아래에 정리하였다.

- (1) 압밀침강계수는 초기함수비 1400%까지 선형으로 증가하는 경향이 나타났으며, 그 이상의 초기함수비에서는 증가량이 감소하는 것으로 나타났다. 초기함수비와 압밀침강계수의 회귀분석에서는 절편이 있는 관계식이 더욱 근접하게 유도되었으며, 서해안과 남해안을 구분하여 초기함수비-압밀침강계수의 관계식을 산정하였다. 초기함수비의 증가에 따라 남해안 및 서해안 점토에서 압밀침강계수의 증가량은 유사하였으나 서해안 점토가 남해안 보다 높은 압밀침강계수의 값을 나타내었다.
- (2) 초기침강속도는 초기함수비의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 남해안 및 서해안 해성점토에 대한 $w_{0.1}-V_i$ 의 관계식을 분석하였다. 초기침강속도는 초기함수비가 증가할수록 서해안의 점토가 남해안에 비하여 더 많은 초기침강속도의 증가를 보였다.
- (3) 압밀침강과정의 시작 및 종료 시점에서 실질토량고와 계면고는 양대수 축척상에서 비교적 상관성이 높은 직선의 경향을 보였다. 남해안 및 서해안 점토로 구분하여 압밀시·종점에서의 $\log H_s - \log H_t$ 의 선형관계식을 유도하였다. 또한, 각각의 초기함수비에 따라 $H_s - H_{t0}$, $H_s - H_{t100}$ 관계는 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다. 그러므로 압밀시·종점의 $H_s - H_t$ 분석시 전체 초기함수비를 대상으로 대표 관계식을 산정할 것을 추천한다.
- (4) 국내에서 주로 적용하는 초기높이를 변화하는 실험조건에 대한 타당성 검토를 위해 실질토량고에 따른 압밀침강계수와 초기침강속도를 분석하였다. 그 결과, 실질토량고와 초기높이를 변화시키는 실험조건 모두 적절한 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구 조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-D00388).

참 고 문 헌

1. 고영석 (2001), *준설매립점토의 침강 및 자중압밀에 대한 실험적 연구*, 석사학위논문, 한경대학교 산업대학원, pp. 36~102.
2. 김영수 (2000), *준설토의 침강·자중압밀 해석에 관한 연구*, 석사학위논문, 중앙대학교 건설대학원, pp. 43~56.
3. 김형주, 오근엽 (1999), 연약한 준설 매립 점성토지반의 자중압밀 과정에 관한 연구, *한국지반공학회 논문집*, 제15권, 제2호, pp. 129~138.
4. 박진호 (2003), *동남임해지역 준설매립토의 침강·자중압밀 특성에 관한 연구*, 석사학위논문, 부산대학교 대학원, pp. 34~563.
5. 삼성물산(주), (주)한아엔지니어링 (2002), *광양항 3단계 준설토 투기장 가호안 축조공사 지반조사보고서(2) 침강 및 자중압밀시험*, pp. 36~41.
6. 유남재, 안중선, 이종호, 유병상 (1998), 준설매립토 지반의 체적변화량 예측, *1998년도 학술발표회 논문집(II)*, 대한토목학회, pp. 307~310.
7. 이송, 이규환, 심민보 (1999), 준설점토의 체적비 산정에 관한 실험적 연구, *대한토목학회 논문집*, 제19권, 제III-5호, pp. 985~994.
8. 전제성 (2000), *연약지반의 압밀거동 예측을 위한 비선형 압밀해석*, 박사학위논문, 서울시립대학교 대학원, pp. 57~97.
9. 정규향 (2005), *고함수비를 갖는 준설점토의 압밀특성*, 박사학위논문, 전남대학교 대학원, pp. 77~87.
10. (주)대영엔지니어링, 한라대학교 산업기술연구소 (1999), *99-5951-2 시설공사 준설토의 침강 및 자중압밀특성연구*, pp. 67~73.
11. (주)대영엔지니어링, 한라대학교 산업기술연구소 (2005), *부산신항 남권 준설토 투기장 준설토 침강 및 자중압밀 분석 연구*, pp. 40~44.
12. (주)포스코건설, (주)대영엔지니어링 (2003), *광양항 중마 일반부두 축조공사 지반조사(개별) 보고서 제8권 연구성과*, pp. 95~105.
13. 최성운 (2003), *준설토의 2차원 퇴적특성에 관한 연구*, 석사학위논문, 군산대학교 산업대학원, pp. 24~39.
14. 하영조 (2001), *준설토의 자중압밀특성에 관한 연구*, 석사학위논문, 동아대학교 산업대학원, pp. 31~69.
15. 한국지반공학회 (2004), *지반공학 시리즈 10 준설매립*, 구미서관, pp. 12~28.
16. 矢野弘一郎, 鶴谷和夫, 山内豊聰 (1984), 浚渫泥土の分離堆積, *土と基礎*, Vol. 32, No. 5, pp. 23~28.
17. 矢野弘一郎 (1985), 浚渫粘土による軟弱埋立地盤の性状とその豫測, *日本土木學會論文集*, Vol. 364, No. III-4, pp. 1~15.
18. Gibson, R. E., England, G. L., Hussey, 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, pp. 261~273.
19. Imai, G. (1981), *Experimental Studies on Sedimentation Mechanism and Sediment Formation of Clay Materials*, *Soil and Foundations*, Vol. 21, No. 1, pp. 7~20.
20. 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.

(접수일: 2009. 6. 22 심사일: 2009. 6. 30 심사완료일: 2009. 7. 22)