

단계투기법에 의한 준설점토의 체적비 산정

Estimation of Volume Ratio according to Step up Filling Method for a Dredged Clay

이 송*¹ Lee, Song

강 명 찬*² Kang, Myoung-Chan

Abstract

An experimental study on step up filling method is carried out to reinforce the Yano method which is widely used to estimate volume ratio and self-weight consolidation settlement in reclamation area. This method considers actual reclamation construction in which dredged clay is continuously filled and rising of deposit height is presented as a result of volume decrease by height rising and self-weight consolidation. It measured the relationship between filling velocity and deposit rising velocity; calculated the total filling height which is needed to achieve the planned final deposit height, and its solid height and the time which is taken to finish the planned final deposit height; and on the basis of these calculated parameters, predicted the self-weight consolidation and volume change ratio in reclamation construction. Yano method is also used to predict the same conditions. 29.8% in self-weight consolidation, 31.1% in volume ratio, 40% in void ratio and water content is underestimated in Yano method compared to step up filling method.

요 지

준설매립 공사시 자중압밀침하량 및 체적변화비 예측을 위해 사용되는 Yano 방법의 단점을 보완하고 실제 준설매립 공사시 준설토가 연속적으로 투기되며 퇴적고의 상승이 토층의 증가와 침강 및 자중압밀에 의한 체적감소의 결과로 표현되어지는 것을 고려한 단계투기법에 의한 새로운 해석기법에 대한 시험적 연구를 수행하였다. 단계투기시험에 의해 투기속도와 퇴적고 상승속도의 관계를 측정하여 현장 매립계획고에 소요되는 현장투기완료일수를 산정 하였고 그때 소요되는 전체 투기높이 그리고 이에 해당하는 실질토량고를 산정 하여 이를 바탕으로 현장투기완료 후 자중압밀 침하량 및 체적변화비, 함수비, 공극비의 변화를 예측하였고, 전체투기 시험을 통한 Yano법에 의한 산정결과와 비교 분석하였다. 자중압밀 침하량의 경우 약 29.8%, 체적비의 경우 31.1%, 공극비 및 함수비가 약 40% 정도 전체투기에 의한 Yano 법이 단계투기법에 의한 결과보다 작게 평가되었다.

Keywords : Step up filling method, Yano method, Volume ratio, Deposit rising velocity, Filling velocity

*1 정회원, 서울시립대학교 도시과학대학 토목공학과 교수

*2 정회원, 서울시립대학교 도시과학대학 토목공학과 대학원

1. 서론

국내매립 현장에서는 준설물량 산정에 필요한 자중압밀에 따른 체적비 변화를 구하기 위해 실내 침강·압밀 시험을 통한 침강·압밀 곡선에 의한 해석 방법인 Yano의 경험적인 방법을 사용하고 있다. 그러나 Yano의 경험식을 통해 체적비를 예측하는 과정을 보면, 실내 침강·압밀 시험에서 얻은 침강·압밀 곡선에서 자중압밀의 시·종점을 추정하고 그때의 계면고와 실질토량고의 선형적 관계를 이용하여 직선의 기울기 및 절편을 구하고, 이를 바탕으로 현장의 투기완료 후의 최종 퇴적고와 실질 토량고를 예측하여 투기완료 후의 자중압밀 침하 및 체적 변화비를 예측하게 된다. 그러나 자중압밀의 시점에 관해서는 학자들마다 서로 다른 의견을 제시하고 있어 시점의 결정에 있어서 객관성이 떨어진다고 할 수 있다. 또한 Yano의 방법은 투기 기간 중의 자중압밀 효과를 고려하지 않고, 한계고 도달 시간을 선형적인 함수로 가정하기 때문에, 실제 준설공사가 연속적으로 투기되고 퇴적고 상승이 토층의 증가와 침강 압밀에 의한 체적감소의 결과로 표현되는 것을 고려하면 실제 현장과는 차이가 있는 경험적인 방법이라 할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 건조수축과 유실토의 체적변화, 토출구로부터의 입도분리 효과는 고려하지 않고 현장과 유사한 조건을 갖는 단계별 투기에 의한 실내시험을 실시하여 투기 기간동안의 자중압밀 효과를 고려한 투기속도에 따른 퇴적고 상승속도를 측정하여 투기완료 후의 계획하는 최종퇴적고에 소요되는 전체투기높이 및 투기완료 시간과 그때의 실질토량고를 산정하고 산정된 변수를 바탕으로 투기완료 후의 침하량 및 체적변화비를 예측하고 또한, Yano방법에 의한 자중압밀 침하량 및 체적변화비를 예측하여 단계별 투기에 의한 예측치와 비교, 고찰을 실시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 침강압밀 곡선에 의한 이론(Yano 법)

국내 매립현장에서 준설물량 산정을 위한 체적변화비를 구하기 위하여 주로 Yano(矢野弘一郎)가 제시한 경험적인 방법을 사용하고 있다. Yano는 실내 침강·압밀 시험을 통한 침강·압밀 곡선을 바탕으로 자중압밀 산정식을 적용하여 현장 준설 매립지반의 시간경과에 따른 자중압밀 침하량 및 체적변화비를 예측하기 위한 경험적인 방법

을 제시하였다

(1) 자중압밀 산정식

실내에서 침강·압밀시험을 실시하면 투기된 준설점토는 그림 1에서와 같이 침강퇴적, 압밀침강의 과정을 거친다. 점토니수는 우선 flocc를 형성하여 청등수와 현탁액과의 사이에 명료한 계면을 만들고 등속으로 계면이 침강한다. 침강한 퇴적토는 하층에서부터 상승하고 곧이어 현탁액의 계면과 일치하여 침강퇴적의 종료점으로 된다. 침강퇴적이 종료된 후는 자중에 의한 압밀침강이 진행하여 어떤 시점에서는 침강속도가 낮은 creep의 형태로 된다.

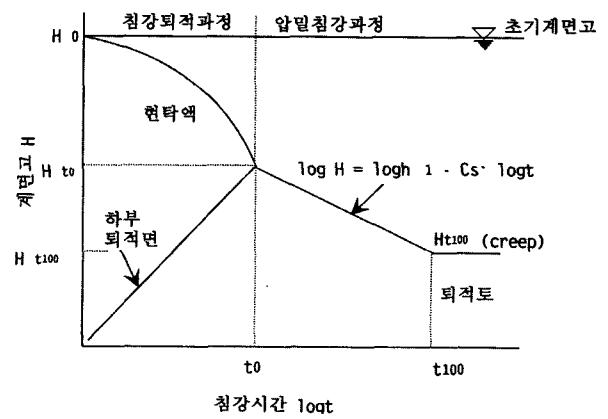


그림 1. 침강퇴적·압밀침강과정의 형태

침강퇴적에서 압밀침강의 과정을 거친 침강조건에 있어서, 압밀침강영역 ($t = t_0 \sim t_{100}$)의 계면고 H와 침강시간 t에서는 식(1)과 같이 직선관계가 얻어진다. 이 직선식을 자중압밀 산정식 이라한다.

$$\log H = \log h_1 - C_s \cdot \log t \quad (1)$$

여기서, H_{t0} : t_0 일때의 계면고 높이

h_1 : $t = 1$ (day)에서 $H = h_1$ 인 상수

C_s : 침강압밀계수 ($\frac{\log(H_{t0}/H)}{\log(t/t_0)}$, cm/day)

(2) 계면고 (H)와 실질토량고 (H_s)의 관계

현장에서 채취한 시료를 이용하여 초기 높이를 변화시키면서 자중압밀 실험을 실시하면 실제 준설토에 함유된 토립자의 양으로부터 구한 실질 토량고와 계면고의 관계는 식 (2)와 같다.

$$H_s = \frac{H}{1 + G_s/G_w \cdot \bar{w}} = \frac{H}{1 + e} \quad (2)$$

여기서, H : 초기 계면고

G_s, G_w : 토립자와 해수의 비중

\bar{w}, \bar{e} : 준설토의 평균 함수비와 간극비

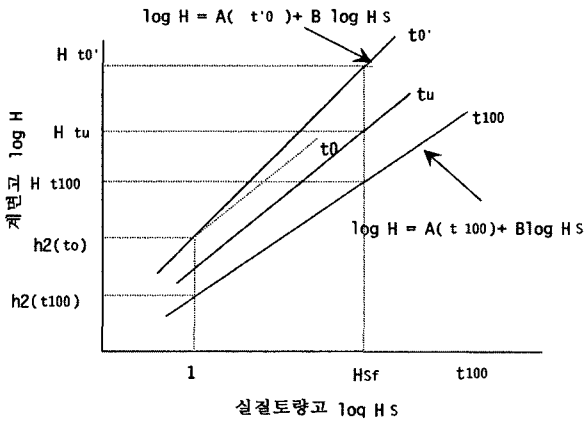


그림 2. 계면고와 실질토량고의 관계

초기함수비가 같고 높이가 다른 니수를 침강시켜 각각 침강곡선에 나타난 자중압밀시점과 creep변형에 들어갈 때인 자중압밀 종점에 대한 계면고를 $\log H - \log H_s$ 로 표시하면 그림 2와 같이 직선적으로 변하는데 이로부터 매립지반의 초기 계면고에 대한 실질토량고를 구할 수 있고, 이들의 관계를 식으로 나타내면 식(3)과 같다.

$$\log H = A + B \log H_s \quad (3)$$

여기서, A, B : 계면고와 실질토량고 그래프의 절편과 기울기

자중압밀 시점(t_0) 및 자중압밀 종점(t_{100})에 대한 $\log H - \log H_s$ 는 함께 직선관계에 있고, 자중압밀 침하에서는 임의의 압밀도에 대해서도 직선관계에 있는 것을 제시하고 있다. 그러나 t_0 시의 직선의 기울기 B가 t_{100} 시의 기울기보다 약간 적은 경향이 있고, H가 크게 되면 t_0 의 직선과 t_{100} 의 직선이 교차하게 되어 불합리하다. 이 이유는 t_0 의 직선은 침강퇴적과정에 대해서도 퇴적고의 상승에 따라 하층에서 압밀이 진행되고 있는 것을 의미하고 있다.

(3) 자중압밀 침하량 및 체적변화비 예측

국내에서 자중압밀침하량 및 체적변화비를 구하기 위해 사용되는 Yano방법은 그림 3과 같은 절차로 수행되어 진다.

실내에서 전체투기에 의한 침강압밀 시험을 실시하여 얻어진 침강곡선에서 자중압밀 시·종점을 결정하고, 시·종점의 기울기로써 압축성을 나타내는 침강압밀계수를 산정 한다. 또한 시·종점의 계면고와 실질토량고를 대수 눈금으로 plotting하여 시·종점의 계면고와 실질토량고의 관계식을 구한다. 실내시험을 통해 산정된 변수를 바탕으로 준설패립지반의 자중압밀침하량 및 체적변화비를 구하기 위하여 현장의 함수비에 대하여 매립 종료시의 계획고, H_i 를 가정한다. 자중압밀 시점에서 식 (3)을 통하여 가정된 H_i 에 대응하는 H_s 를 구하고, 자중압밀 종점에서 식 (3)을 이용하여 동일한 H_s 에 대응하는 자중압밀 종료시의 높이, H_f 를 구할 수 있다. 현장 매립종료 시까지 소요된 투기시간과 매립 종료시의 높이에 의해 식 (1)을 이용하여 h_1 을 구할 수 있으며, 이 h_1 과 각 함수비에 해당하는 침강압밀계수를 이용하여 임의로 가정된 각 경과시간에 대한 매립고의 변화, H를 구할 수 있다. 원지반의 간극비와 비중값을 실내시험을 통하여 산정하고, 시간경과에 따라 예측된 매립고와 산정된 현장 매립고에 대한 실질토량고를 바탕으로 식(2)를 이용하여 시간경과에 따른 매립층의 평균 간극비를 산정 할 수 있다. 산정된 간극비와 비중값을 이용하여 매립층의 평균 함수비를 구할 수 있으며, 원 지반의 체적에 대한 투기완료 후 경과시간에 해당하는 준설패립토의 체적으로 체적비를 구할 수 있다.

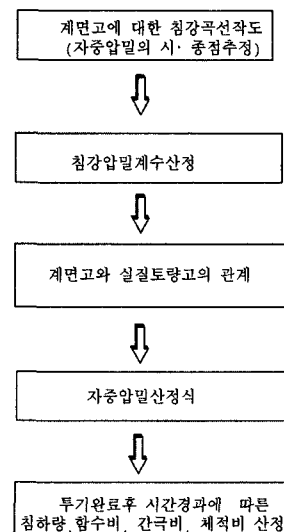


그림 3. Yano의 자중압밀 침하량 예측방법

전체투기 시험에 의한 Yano의 방법은 투기기간 중의 자중압밀 효과를 고려하지 않고, 한계고도달 시간을 선형적인 함수로 가정하기 때문에 실제의 준설매립공사에서 준설점토가 연속적으로 투기되고 퇴적고의 상승이 토층의 증가와 침강·자중압밀에 의한 체적 감소의 결과로서 표현되어지는 것을 고려할 때 실제 현장과는 다소 차이가 있는 방법이라 할 수 있다.

3. 실내 시험

실내시험에서는 군·장지역의 표층에서 채취한 교란된 해상점토를 이용하여 크게 토성시험과 전체투기 및 단계별 투기에 따른 자중압밀 시험을 실시하였다.

3.1 토성시험

준설재료의 컨시스턴시를 파악하기 위하여 토성시험을 실시하였다. 3회의 토성시험의 평균치는 표 1과 같으며 또한 체분석과 비중계분석에 의한 2회의 시험결과 입도분포 곡선은 그림 7과 같다.

3.2 시험장치

전체투기 및 단계별 투기 시험에 의한 시간에 따른 계면고를 측정하기 위한 시험장치는 그림 4와 같다. 시험장치는 직경 20cm, 높이 150cm로 투명한 아크릴로 10cm 단위로 column을 분리할 수 있도록 제작하여 시험종료후의 함수비 및 단위중량을 심도별로 측정할 수 있도록 하였다. 또한 하부에서는 시험직전에 교반할 수 있도록 압축펌프

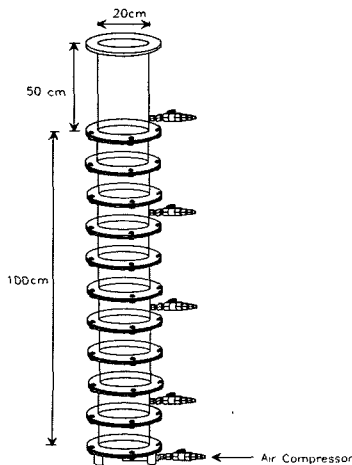


그림 4. 시험 장치

를 연결하여 사용하였다.

3.3 시험 방법

(1) 전체투기에 의한 자중압밀 시험

군·장지역의 준설점토를 실내에서 교반기를 이용하여 균질하게 교반 후, 교반된 시료는 노건조로를 이용하여 건조시킨 후에 함수비를 측정하였다. 노건조 함수비는 염분을 함유하고 있기 때문에 염분비에 의한 함수비를 보정하여 시험하려는 함수비를 제조하였다. 시료를 시험 함수비로 조정 한 후, 투기시료의 균질성을 확보하기 위하여 교반을 실시하였다. 또한 제조된 시험 함수비의 신뢰성 및 초기 간극비를 판단하기 위하여 제조된 시료의 함수비를 측정하였다. 제조된 시료를 현장시공여건을 고려하여 초기 함수비를 700, 1000, 1400%로 하였고 각 함수비별로 초기 투기높이는 현장 계획고에 해당하는 계면고와 실질토랑고의 관계를 얻기 위하여 120, 100, 80, 60cm 높이를 달리하여 총 12회의 시험을 실시하였다. 각 조건별로 투기한 후 시험을 실시하기 전에 초기 간극비가 전체 높이에 대해 일정하도록 Column 하부의 밸브와 압축펌프를 연결하여 압축공기를 주입하여 시료를 교반 하였다. 충분한 교반을 실시한 후 압축공기의 주입을 멈추고 동시에 침강·압밀 시험을 실시하였다. 투기된 시료의 침강 및 자중압밀을 관찰하기 위하여 초기 2일 동안은 계면고를 세밀하게 측정하였고 그 이후로는 1일 주기로 계면고를 측정하였다. 계면고가 시간축에 평행하게 creep 거동을 확인한 후 시험을 종료하여 각 층별 함수비 및 단위중량을 측정하였다. 시험순서는 그림 5와 같다.

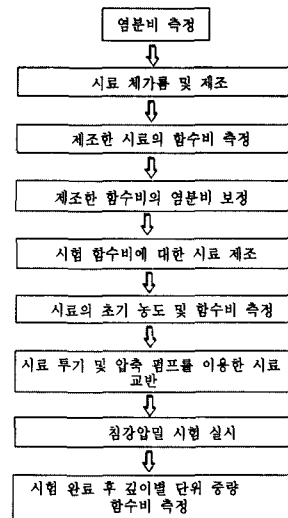


그림 5. 전체투기에 의한 자중압밀 시험 순서

(2) 단계별 투기에 의한 자중압밀 시험

실제의 준설패림공사에서는 준설택토가 연속적으로 투입되므로 퇴적하는 준설택토의 계면상승은 퇴적토층의 증가와 침강·자중압밀에 의한 체적감소의 결과로서 표현된다. 준설택토의 투기에 따른 퇴적고의 상승속도와 투기속도의 관계는 실내 column 시험에서 준설택토를 단계적으로 투기하는 방법을 통해 구할 수가 있다. 투기된 준설택토의 투기속도와 퇴적고 상승속도와 관계 및 투기완료 후의 준설택토의 침하거동을 파악하기 위하여 투기 계획높이를 100cm, 120cm로 하였고, 일일투기 속도는 투기계획높이가 100cm인 경우, 10, 20, 25, 50cm/day로 하였고 투기 계획높이가 120cm인 경우 15, 30, 40, 60cm/day로써 단계별 투기를 실시하였다. 일일 투기 실시 24시간 후의 최종 계면고를 측정하였고, 계획높이 투기완료 후에는 1일 주기로 계면고의 변화를 측정하여 투기완료 후의 자중압밀 거동을 파악하였으며, 시간축에 평행하게 creep 거동을 확인한 후 시험을 종료하여 각 층별 함수비 및 단위중량을 측정하였다.

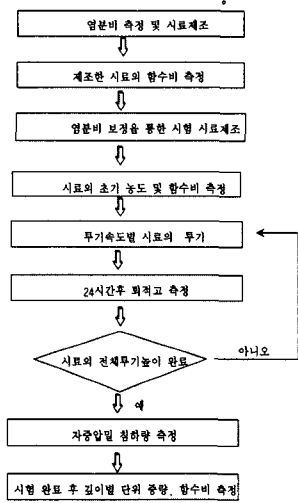


그림 6. 단계별 투기에 의한 자중압밀 시험

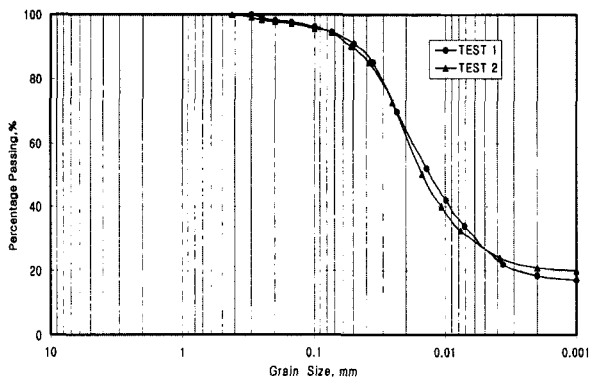


그림 7. 시험 시료의 입도분포곡선

표 1. 준설택토의 토질정수

Wn(%)	LL(%)	PL(%)	PI(%)	Gs	염분비 (%)	#200번체 통과량	USCS
38.3±2	38.9±2	21.1±2	17.8±2	2.70±0.03	2.7	93.6%	CL

3.4 시험조건

전체투기 및 단계투기에 의한 자중압밀 시험은 표 2와 같다.

표 2. 시험조건

구 분	함수비(%)	초기 시료 높이(cm)
전체투기	700	120, 100, 80, 60
	1000	
	1400	
구 분	투기속도 (cm/day)	전체 투기높이(cm)
단계별 투기	10cm/day	100
	20cm/day	
	25cm/day	
	50cm/day	120
	15cm/day	
	30cm/day	
40cm/day		
60cm/day		

3.5 염분비의 보정

시료는 해성 점토이므로 염분이 많이 용해되어 있으므로 해성 점토를 노건조하여 얻은 함수비는 염분이 흡수에 포함되어 있어 실제 값보다 작은 값을 갖는다. 그러므로 바닷물 속에 포함되어 있는 염분의 농도를 측정하여 함수비를 보정하여야 한다. 실제 함수비를 구하는 방법은 다음과 같은 과정으로 이루어진다

(1) 염분비를 구한다.

$$\beta = \frac{W_c}{W_w} \quad (4)$$

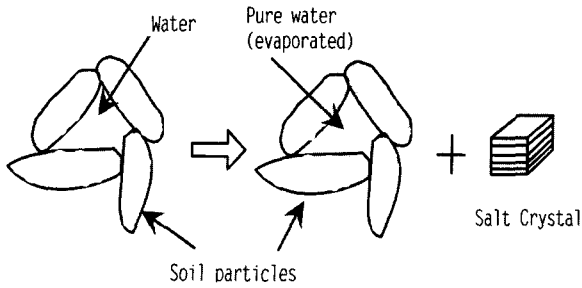
여기서, β : 염분비

W_c : 소금의 무게

W_w : 증류수의 무게

(2) 염분비에 의하여 실제 함수비를 구한다.

건조전에 흙 요소의 삼상관계는 완전 포화되었다고 가정



γ_f, G_f, V_f, W_f	water	pure water (evaporated)	W_w	γ_w
		salt crystal	W_c	
γ_s, G_s, V_s, W_s	soil particles	soil particles	W_s, V_s, G_s, γ_s	

(a) state before drying (b) state after drying
 그림 8. 흙의 건조전·후의 삼상관계

하면, 그림 8(a)와 같이 대략적으로 나타낼 수 있다. 흙 요소에서 액체 부분은 소금이 용해된 물로 채워져 있다. 반면, 고체 부분은 흙 입자로 구성되어 있다. 따라서, 흙 요소와 관련된 된 정확한(correct) 함수비는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$w = \frac{W_f}{W_s} \times 100 \quad (5)$$

흙이 건조되면 삼상관계는 그림 8(b)와 같이 변한다. 소금이 용해된 순수한 물은 증발되고, 순수한 물의 무게, W_w 는 건조되어 없어진다. 반면에, 물속에 용해된 소금은 W_c 의 무게를 갖는 고체로 변한다. 그러므로, 식 (6)이 성립한다.

$$W_f = W_w + W_c \quad (6)$$

현 단계(노건조한 단계)에서 함수비를 결정하고자 하는 경우에 흙 입자의 무게와 소금의 무게는 흙 입자의 무게로써 측정되고, 순수한 물의 무게는 물의 무게로써 측정된다. 이러한 경우 함수비는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$w_m = \frac{W_w}{W_s + W_c} \times 100 \quad (7)$$

측정된 함수비, w_m 는 올바른 함수비를 나타내지 않는다. 정확한 함수비는 염분비를 알지 못하는 경우에 계산할

수 없다. 식 (4)를 W_c 항으로 나타낸후 식(6) 과 (7) 에 대입하고, 식 (7)을 W_s 항으로 나타내어 식(5)에 대입하면 식(5)는 식 (8)과 같이 표현된다. 식(8)을 이용하여 염분비와 노건조함수비를 통하여 원하는 함수비를 보정하여 제조할 수 있다.

$$w = \frac{(1 + \beta)w_m}{1 - \beta w_m} \quad (8)$$

4. 시험결과분석

투기방법에 따른 해석 절차는, 전체투기 방법에서는 그림 3에서 설명한 방식으로 수행할 수 있고 또한 단계투기 방법에서는 그림 9에서 처럼 실내시험에서 얻은 투기속도에 따른 퇴적고의 상승속도의 관계를 통하여 현장투기완료후의 계획고에 소요되는 전체 투기높이 및 투기완료시간을 얻을 수 있으며 산정된 전체투기높이를 바탕으로 식 (2)를 통하여 실질토량고를 얻을 수 있다. 시간에 따른 계면고의 변화를 대수분금으로 나타내었을 때 직선의 기울기인 침강압밀계수를 구하여 자중압밀 산정식을 적용하여 현장투기완료후 시간경과에 따른 침하량 및 체적 변화비를 예측할 수 있다.

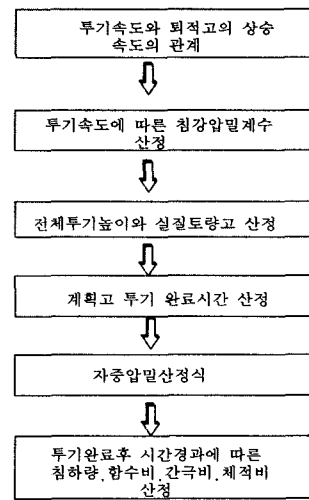


그림 9. 단계투기에 의한 예측법

4.1. 전체투기에 의한 자중압밀 시험결과

(1) 침강속도 특성

함수비 및 초기투기높이를 달리하여 침강·압밀 시험을 실시하여 자중압밀 개시이전의 침강단계에 대해 침강속

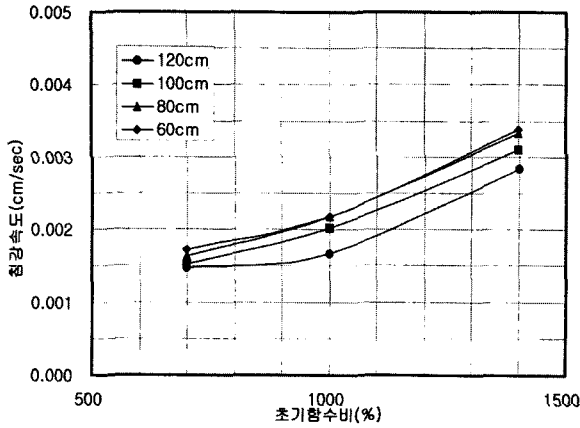


그림 10. 함수비 및 초기투기높이에 따른 침강속도

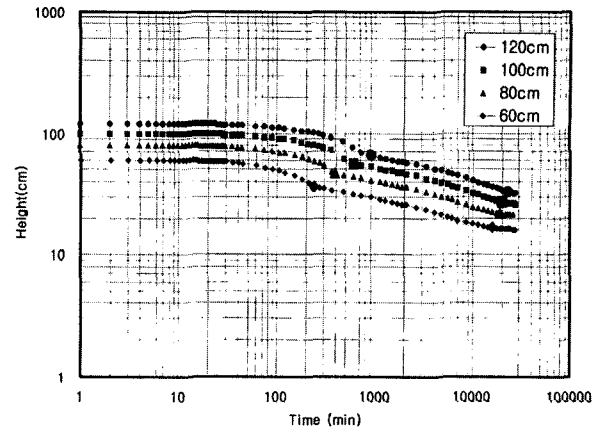


그림 12. 초기함수비에 대한 자중압밀 시·중점 추정(함수비 700%)

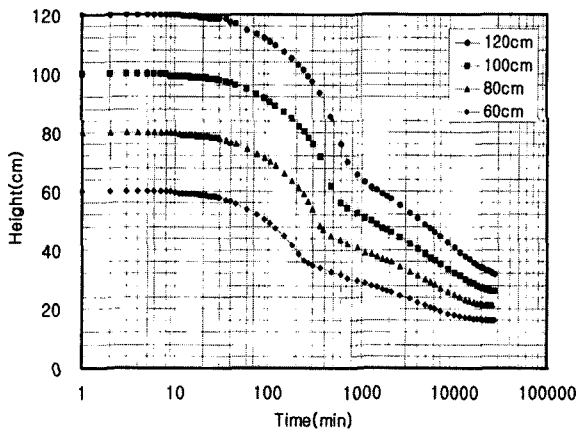


그림 11. 시간경과에 따른 계면고 변화곡선 (함수비 700%)

도 특성을 분석하였다.

그림 10과 같이 동일한 초기투기높이에서는 함수비가 증가할수록 빠른 침강속도를 보여주며, 동일한 함수비인 경우 초기투기높이가 높을수록 침강속도가 감소함을 보여주는데, 이는 투기높이가 증가할수록 흡입자의 간섭으로 인해 침강속도가 늦어지는 것으로 보여진다. 함수비 700%의 경우는 초기투기높이에 따라 침강속도의 변화는 미소함을 알수 있었다. 또한 동일 함수비에서 초기 투기높이에 따른 침강·압밀 특성으로서는 그림 11과 같이 투기높이가 높을수록 침강단계와 자중압밀 개시의 구분점이랄 수 있는 변곡점이 늦게 나타났으며, 또한 동일한 초기 투기높이에서 함수비에 따른 침강·압밀 특성으로서 함수비가 낮을수록 변곡점이 늦게 나타나는 경향을 보여주었다. 이러한 경향은 흡입자의 농도가 높아지게 되면 입자간의 충돌로 입자의 운동이 간섭을 받게되어 입자간의 응집이 저해를 받게 되어 침강속도가 느려지는 것으로 보여진다.

표 3. 자중압밀 시·중점의 추정 (Yano 방법)

w (%)	H_i (cm)	Starting Point		Ending Point	
		t (min)	H (cm)	t (min)	H (cm)
700	60	240	36.4	16150	16.7
	80	390	47.1	19000	21.6
	100	600	56.1	20410	27.0
	120	900	65.8	22720	32.9

(2) 자중압밀 시·중점의 추정

Yano 방법에 의한 투기완료후의 자중압밀 침하량 및 체적 변화를 예측하기 위해서는 자중압밀의 시·중점을 추정해야 한다. 자중압밀의 시작점은 학자들마다 견해가 다소 차이가 있지만 일반적으로 침강·압밀 곡선에서 침강속도가 느려지는 변곡점으로 보고 있다. 본 논문에서는 Yano가 제안한 $\log t - \log H$ 곡선에서 일직선이 시작되는 부분을 자중압밀의 시점으로 보았고 시간축에 평행하게 creep 거동으로 들어가는 시점을 자중압밀의 중점으로 추정하였다. Yano 방법에 의해 자중압밀의 시·중점의 추정결과는 그림 12 및 표 3과 같다. 동일한 함수비에서 초기 투기높이가 낮을수록 자중압밀의 시·중점이 빨리 나타났으며, 동일한 초기 투기높이에서는 함수비가 높을수록 자중압밀의 시·중점이 빨리 나타나는 경향을 보여주었다. 이는 침강·압밀 시험을 통하여 나타나는 일반적 경향과 일치하였다.

(3) 함수비에 따른 침강압밀계수 (C_s)

자중압밀 단계에서의 계면고와 침강시간을 대수눈금으로 표현했을 경우 선형관계가 얻어진다. 이 직선의 기울기를 통하여 준설토 투기 완료후의 시간경과에 따른 자중압밀 침하량을 예측할 수 있다. 그림 13은 각 함수비와 초

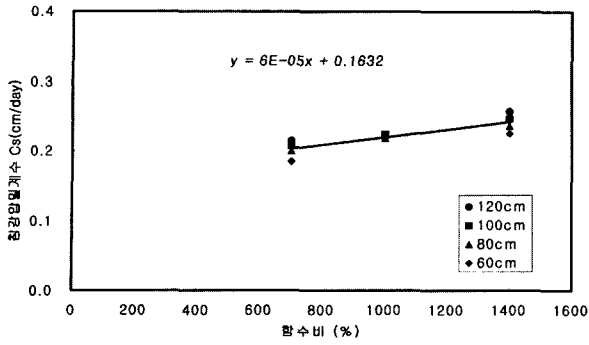


그림 13. 초기 함수비에 따른 침강압밀계수

기높이별로 산정된 침강압밀계수를 나타내며 초기함수비가 높을수록 크고, 동일한 함수비인 경우 초기투기높이에 큰 영향이 없는 경향을 나타냈다. 전체투기에 의한 시험에서 얻어진 함수비와 침강압밀계수의 관계는 $C_s = 6 \times 10^{-5} w(\%) + 0.1632$ 의 관계를 나타냈다.

(4) 계면고와 실질토랑고의 관계

추정된 자중압밀의 시·종점에 해당하는 계면고와 실질토랑고를 각각 종축과 횡축에 대수눈금으로 표현하면 그림 14와 같은 선형관계를 얻을 수 있다. 이 직선의 기울기 및 절편을 통하여 현장 투기완료후의 높이에 해당하는 실질토랑고를 알 수 있으며 이를 바탕으로 투기완료후의 시간경과에 따른 공극비 및 체적비를 예측할 수 있다. 각 함수비별 투기높이에 따른 자중압밀 시·종점의 계면고와 실

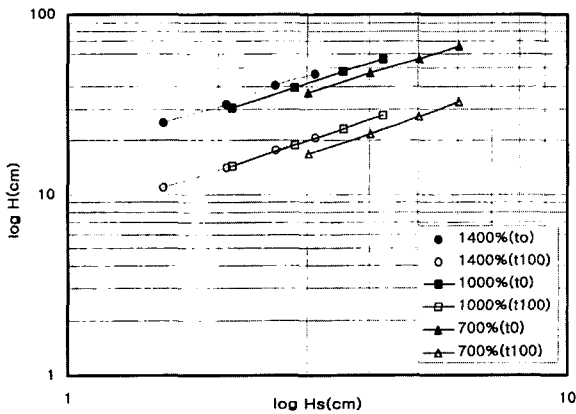


그림 14. 계면고와 실질토랑고 관계

표 4. 계면고 (H)와 실질토랑고 (H_s)

w(%)	자중압밀 시점	자중압밀 종점
700	$\log H_i = 1.1532 + 0.8484 \log H_s$	$\log H_f = 0.7512 + 0.9760 \log H_s$
1000	$\log H_i = 1.1948 + 0.8816 \log H_s$	$\log H_f = 0.8396 + 0.9537 \log H_s$
1400	$\log H_i = 1.2189 + 0.9198 \log H_s$	$\log H_f = 0.8586 + 0.9285 \log H_s$

질토랑고의 관계는 표 4와 같다.

4.2 단계투기에 의한 시험 결과

(1) 투기속도와 퇴적고 상승속도의 관계

투기속도와 퇴적고 상승속도의 관계를 얻기 위하여 투기속도를 달리하여 투기속도에 따른 퇴적고의 상승속도를 관찰하였다. 그림 15에서와 같이 투기속도 따른 퇴적고의 상승은 직선적으로 나타났으며, 동일 투기속도에 따른 1일의 퇴적고 상승속도는 거의 유사하였다. 또한 그림 16에서와 같이 1일 퇴적고의 상승속도와 투기속도를 plotting하여 $v_i = 0.4576 v_r - 0.001$ 인 투기속도와 1일 퇴적고 상승속도 관계를 얻을 수 있었다.

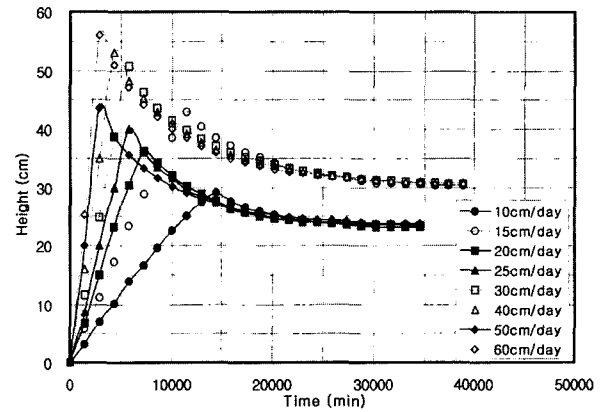


그림 15. 투기속도에 따른 계면고의 변화

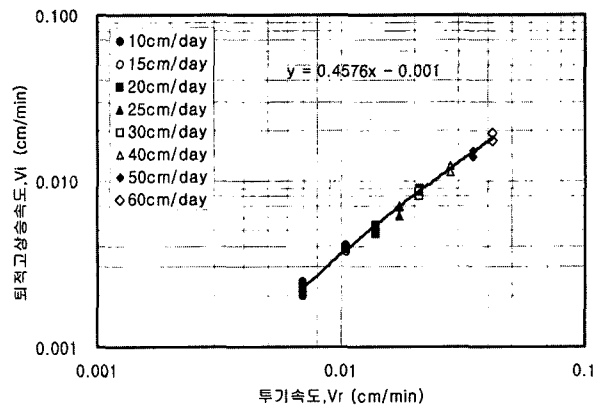


그림 16. 투기속도에 따른 퇴적고 상승속도의 관계

(2) 투기속도 (v_r)와 침강압밀계수 (C_s)의 관계

투기속도를 달리하여 투기속도에 따른 퇴적고의 상승속도를 그림 17과 같이 대수눈금으로 경과 시간에 따른 계면고의 변화를 plotting하면 투기완료 후의 계면고의 변화

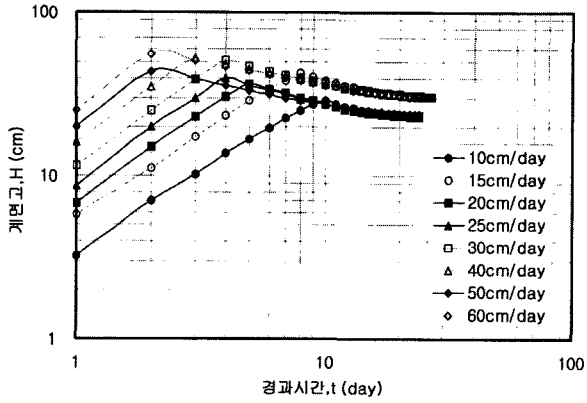


그림 17. 시간경과에 따른 계면고의 변화

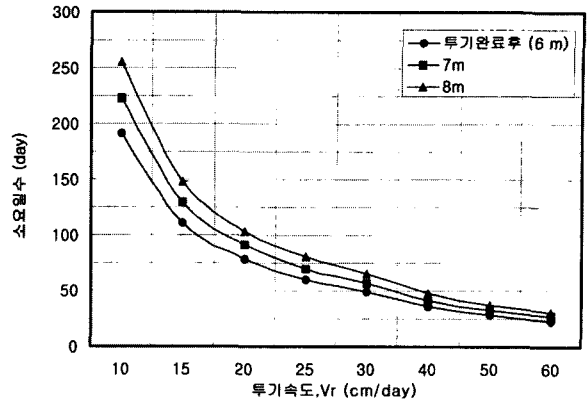


그림 19. 투기속도에 따른 소요 투기일수의 관계

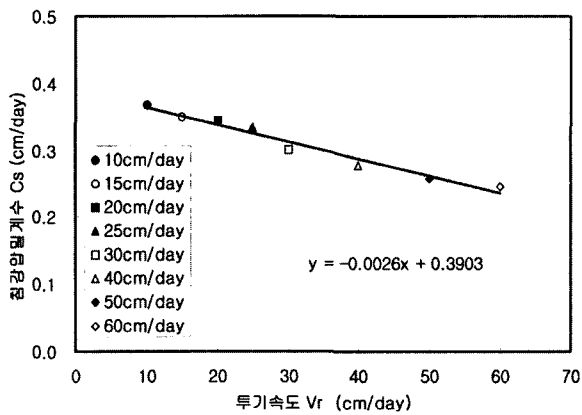


그림 18. 투기속도와 침강압밀계수의 관계

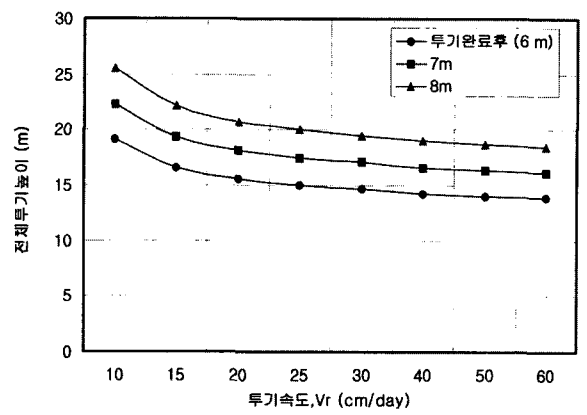


그림 20. 투기속도와 소요 전체투기높이의 관계

는 직선관계를 보여준다. 단계투기 방법에서는 현장의 투기완료후의 자중압밀특성을 파악하기 위하여 실내에서 계획고 투기완료 직후를 자중압밀 시점으로, 그리고 계면고의 변화가 수렴하는 시점을 자중압밀의 종점으로 선택하여 이직선의 기울기를 침강압밀계수(C_s)로 산정하였다. 그림 18은 투기속도에 따라 산정된 침강압밀계수(C_s)를 plotting 한 결과를 나타내며 투기속도가 낮을수록 크게 나타나는 경향을 보여주었다. 그림 18에서 볼수 있는 바와 같이 투기속도와 침강압밀계수의 관계는 $C_s = 0.3903 - 0.0026 v_r$ 의 관계를 나타냈다.

(3) 계획고에 소요되는 전체투기 높이 및 투기 완료 일수의 산정

현장투기완료 후의 계획하는 계면고를 얻는데 소요되는 전체투기높이는 그림 16에서 투기속도(v_r)와 퇴적고 상승속도(v_i)의 관계를 통하여 예측할 수가 있다. 각 투기속도에 따른 퇴적고 상승속도에서 현장 투기완료후 계획하는 계면고를 얻는데 필요한 소요 투기일수를 계산할

수 있으며 산정된 일수와 각 투기속도를 통하여 계획고에 소요되는 전체투기된 높이를 계산할 수 있다. 그림 19는 현장투기속도별 투기완료 후 계획고에 소요되는 투기일수를 보여주고 있으며 그림 20은 현장 투기속도별 투기완료 후 계획고에 소요되는 전체 투기된 높이를 보여주고 있는데 이는 예측된 투기기간 동안 투기된 전체 높이를 의미한다. 예측된 전체투기높이에서 계면고와 실질토랑고의 관계식을 적용하여 투기속도에 따른 실질토랑고를 산정할 수 있다.

4.3 실내시험에 의한 변수산정의 비교

전체투기법과 단계투기법에 의한 현장예측에서 나타나는 차이의 원인을 알아보기 위하여 실내에서 산정된 변수를 비교 검토하였다.

그림 21에서와 같이 침강압밀계수의 경우 동일 높이를 단계적으로 투기할수록 크게 나타났고 일시에 투기할수록 낮아져 0.2부근으로 수렴하는 경향을 보여주었고, 또한 체적비의 산정에 많은 영향을 미치는 실질토랑고의 경

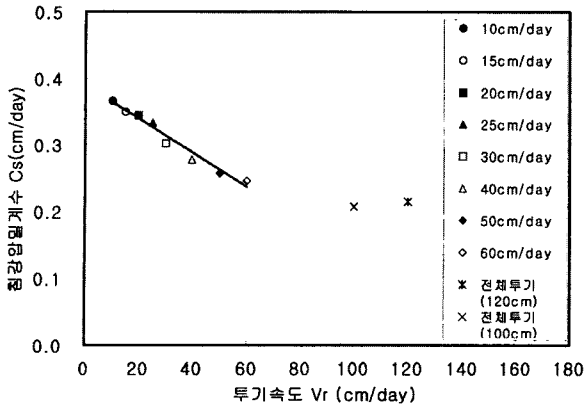


그림 21. 침강압밀계수의 비교

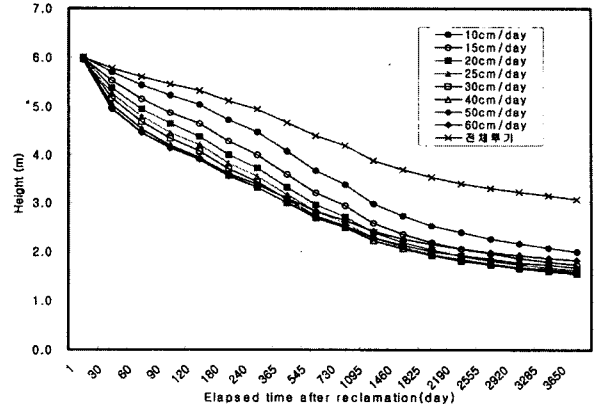


그림 23. 시간경과에 따른 침하량의 변화

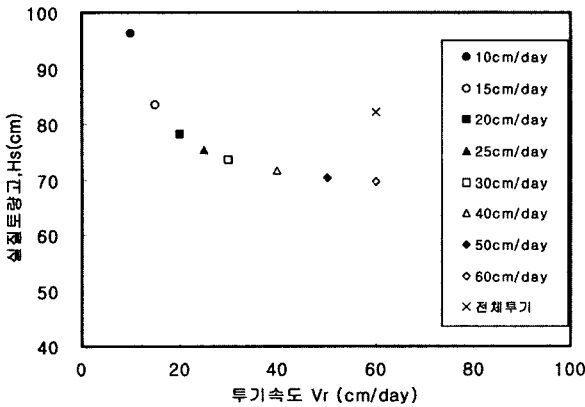


그림 22. 예측된 실질토랑고의 비교

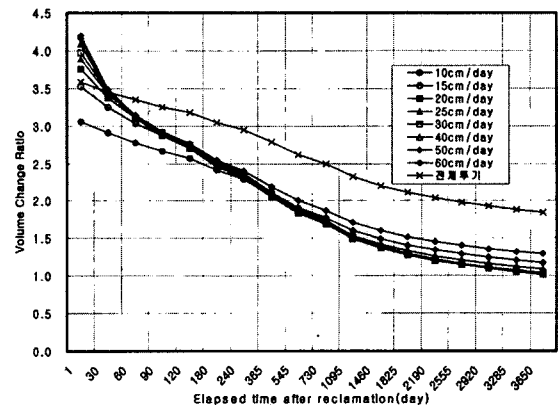


그림 24. 시간경과에 따른 체적비의 변화

우는 그림 22에서와 같이 현장 매립계획고에 해당하는 예측된 실질토랑고는 투기속도가 낮을수록 크게 산정되었고 15cm/day의 경우가 전체투기에 의한 예측치와 유사하여 이를 현장예측치의 비교 대상으로 선정하였다

4.4 현장예측치의 비교

실내에서 전체투기에 의해 산정된 변수를 바탕으로 Yano 법을 적용하여 현장투기완료후의 자중압밀 침하량 및 체적변화비, 함수비, 간극비를 예측하였고, 또한 단계투기시험에 의해 산정된 변수를 바탕으로 단계투기 해석법의 절차에 따른 동일한 예측을 실시하였다.

(1) 자중압밀침하량 및 체적변화비

자중압밀 침하량의 경우, 그림 23에서와 같이 투기완료 후 시간경과에 따라 전체투기에 의한 Yano법이 작게 산정되었고 투기완료 후 1년경과시 전체투기의 경우 4.66m, 단계별투기의 경우 투기속도별로 4.07~3.06m의 범위를

나타냈으며, 투기일수가 유사한 15cm/day의 경우 3.59m로 1.07m의 차이로써 약 29.8%의 차이를 나타냈다.

또한 체적변화비의 경우, 그림 24에서와 같이 전체투기에 의한 Yano법은 2.78, 단계투기는 속도별로 2.05~2.11의 범위를 나타냈고 비교대상인 15cm/day의 경우 2.12로써 약 31.1%정도 전체투기에 의한 Yano법이 과소평가되었다.

(2) 함수비 및 공극비 변화

투기완료 후 시간경과에 따른 전토층의 평균간극비 및 함수비 분포를 예측하였다.

공극비의 경우, 그림 25에서와 같이 투기완료 후 1년경과시 전체투기에 의한 Yano법이 4.66, 단계투기법은 3.18~3.45의 범위를 나타냈으며 15cm/day의 경우는 3.31로써 전체투기 방법이 약 40% 과소평가되었다.

또한 함수비의 경우, 그림 26에서와 같이 투기완료 후 1년경과시 전체투기에 의한 Yano법은 172%, 단계투기법은 투기속도별로 117.7~127.8%의 범위를 나타냈고 15cm/day

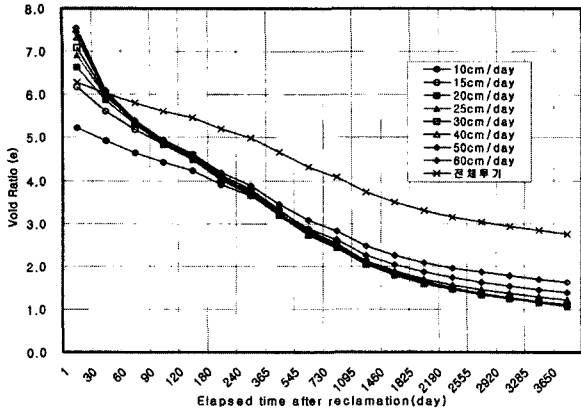


그림 25. 시간경과에 따른 공극비의 변화

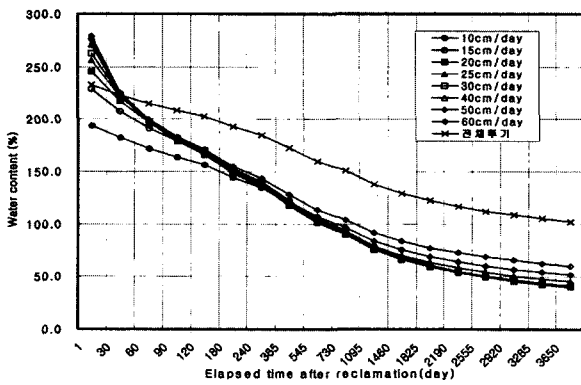


그림 26. 시간경과에 따른 함수비의 변화

의 경우는 123%로써 전체투기법이 약 40%과소 평가되었다.

5. 결론

본 연구에서는 전체투기 및 현장조건과 유사하게 단계별 투기에 의한 자중압밀 시험을 실시하여 전체투기의 경우 Yano 방법에 의한 현장 투기완료 후 경과시간에 따른 자중압밀 침하량 및 체적변화비를 산정하였고, 단계투기 시험의 경우 새로운 해석법에 의해 현장 투기완료 후 경과시간에 따른 자중압밀 침하량 및 체적변화비를 예측하였다. 동일한 현장시료에 대해 시험법 및 해석법을 달리하여 투기완료 후의 자중압밀 침하량 및 체적변화비를 예측하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 단계투기 시험에 의한 투기속도와 퇴적고 상승속도의 관계를 통해 현장 투기완료 후의 계획고에 소요되는 전체 투기높이 및 Yano 방법에서 가정하여 적용하였던 투기완료 시간을 예측할 수 있었다.

- 2) 동일 함수비 700%에 대하여 전체투기법에 의한 침강압밀계수는 초기투기높이에 따라 0.185~0.215cm/day의 범위를 나타냈고 단계 투기법의 경우 $C_s = -0.0026 V_v + 0.3903$ 인 투기속도에 따른 침강압밀 계수의 관계를 나타냈고, 투기속도에 따라 0.247~0.367cm/day의 범위로써 단계투기에 의한 침강압밀계수가 전체투기법의 침강압밀계수 보다 크게 나타났다.
- 3) 두 시험 방법에 의해 산정된 변수를 바탕으로 자중압밀 산정식을 적용하여 투기완료 후의 자중압밀 침하량 및 체적변화비를 예측한 결과 전체투기법이 침하량의 경우 29.8%, 체적비의 경우 31.1% 정도 과소평가 되는 것으로 나타났다. 이는 전체투기시험의 경우 많은 토량이 일시에 투기되어 입도분리 효과로 인해 압축성을 나타내는 침강압밀계수가 단계투기법에 의하여산정된 침강압밀계수 보다 작게 평가되었기 때문으로 사료된다.
- 4) 두 시험 방법에 의한 침하량 및 체적변화비의 차이는 침강압밀계수의 차이에 기인하며, Yano법에서는 투기기간중 고려할 수 없는 자중압밀 효과는 단계투기에 의한 시험방법을 통하여 충분히 고려할 수 있을 것으로 판단된다.
- 5) 단계투기 시험방법을 통하여 전체투기법 에서 구했던 변수들을 객관성 있게 산정 하여 적용 할 수 있었고, 본 실험에 의한 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 현장 계측데이터와의 비교가 수행되어야 할 것이다.

향후 연구방향으로, 준설매립된 지반은 자중압밀 종료 시에도 초연약 지반을 형성하므로 본 공사를 위한 표층의 trafficability 확보를 위한 급속표면 고화처리에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 矢野弘一郎.(1985), " Properties of very soft ground reclaimed by dredged marine clay and their prediction", 土木學會 論文集, 第 364 號, III-4
2. Been, K., and Sills, G. C. (1981) "Self-Weight Consolidation of Soft Soils : An Experiment and Theoretical Study", Geotechnique, 31, pp. 519-535
3. Bosworth R. C. L. (1956), " The Kinetics of Collective Sedimentation" Journal of Colloid Science, Vol. II, pp.496
4. Goro Imai.(1980), "Settling Behavior of Clay Suspension", Soil & Foundations vol.20, No.2, pp.7-20
5. Goro Imai(1981), "Experimental Studies on-Sedimentation Mechanism and Sediment- Formation of Clay Materials", Soil and Foundation, Vol.21, No.1, pp.7-20
6. Goro imai, Kazuo Tsuruya and Kouichiro Yano(1979), "A treatment of

- salinity in water content determination of very soft clay", *Soil & Foundation*, vol.19, No.3, pp. 84-89
7. Johnson, L. D. (1976), "Mathematical Model for Predicting the Consolidation of Dredged Material in Confined Disposal Areas", Technical Report D-76-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
8. Lin, T. W., and Lohnes, R. A. (1981) "sedimentation and Self Weight Consolidation of Dredged Spoil", Conference Proceeding, ASCE pp. 464-480
9. Tan, T. S., Yong, K. Y, Leong, E. C & Lee, S. L. (1990,) "Behaviour of clay slurry", *Soils & Foundations*, Vol.30, No.4, pp.105-118
10. Yasufumi Umehara and Kouki Zen (1982), "Consolidation characteristics of dredged marine bottom sediments with high water content", *Soil & Foundations*, vol.22, No.2, pp. 45-52

(접수일자 1999. 11. 13)