

PDF 공법을 이용한 자중압밀 촉진효과

Acceleration Effect of Self-Weight Consolidation using PDF Method

이범준¹⁾, Bum-Jun Lee, 박민철²⁾, Min-Chuk Park, 이 송³⁾, Song Lee

¹⁾ 서울시립대학교 토목공학과 박사과정, Ph.D Candidate, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul

²⁾ 서울시립대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul

³⁾ 서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul

SYNOPSIS : Dredging and Reclamation which have been conducted steadily for creation of new coastal area have demerit that takes a long time. Hence, a lot of researches on acceleration of self-weight consolidation is proceeding continuously. In this paper, 30 cases of laboratory self-weight consolidation tests were conducted to understand application of PDF method, one of the self-weight consolidation acceleration methods, to domestic dredged soils. Acceleration effect of self-weight consolidation was confirmed through comparison and analysis on completion time and settlement of self-weight consolidation for none installed case and 4 kinds of common used PBD installed cases.

Keywords : Self-weight consolidation, PDF method, Acceleration effect, PBD

1. 서론

산업규모의 확대에 따라 대단위 기간시설을 수용할 수 있는 부지의 확충을 위하여 대규모 매립사업이 지속적으로 진행되어오고 있다. 매립에 가장 이상적인 재료는 투수성이 좋고 압축성이 작은 쇄석이나 산토가 되겠으나, 이들 매립재료의 수급의 불균형·불확실성과 자연환경 훼손 등의 문제점들로 인하여 최근의 거의 모든 매립사업들은 인근 해역의 준설토를 이용하여 이루어진다. 하지만, 준설토는 물량수급은 용이하지만 투수성이 낮고 압축성이 커서 많은 침하량이 오랜 시간에 걸쳐 진행된다는 단점이 있다. 이처럼 세립분 함유율이 높은 준설토의 자중압밀은 비교적 짧은 시간에 이루어지는 침강단계와 오랜 시간이 소요되는 자중압밀 단계로 구분이 되는데, 이들 단계에서의 준설토는 매우 연약한 상태이므로 압밀을 촉진하기 위한 어떠한 재하중도 가하지 못하고 긴 시간이 경과한 후 Trafficability가 확보될 정도의 표층강도가 발현될 때가 되어야 장비를 이용하여 연직배수공법 및 Pre-loading공법 등을 이용하여 압밀을 촉진시키게 일반적이다. 하지만, Trafficability가 확보될 만큼의 표층강도 발현까지의 시간도 준설토의 종류나 매립 규모에 따라 최소 수개월에서 수년의 시간이 소요되기 때문에 준설토의 자중압밀을 촉진시켜 매립공사 공기의 단축은 물론, 시설비용이 많이 필요한 준설토 처분지의 경우 기존 처분지의 수명을 연장시킬 필요성이 대두된다.

이에 본 연구에서는, 준설토의 자중압밀을 촉진시키는 공법중 하나인 해상 연직배수공법(PDF공법, Plastic board Drain by Floating system)의 국내 준설토에 대한 적용성을 파악하기 위하여 무처리 상태의 경우와 국내 현장에서 많이 이용되고 있는 4가지 종류의 PBD가 미리 타설된 경우에 대하여 실내 자중압밀 실험을 수행하였고 압밀 종료 후 준설토의 퇴적특성과 그 변화 양상을 분석하였다. 또한, 국내의 거의 모든 매립공사가 집중되어 있는 서해안과 남해안의 대표 준설토로서 공학적 특성이 상이한 서해안 실트와 남해안 점토를 대상으로 실험하여 준설토 종류에 따른 본 공법의 효과에 대하여 파악하고자 한다.

2. 실내 침강 및 자중압밀실험

본 연구에서는 PBD가 미리 타설된 준설토의 자중압밀 촉진효과를 파악하기 위하여 무처리 상태의 경우와 국내 현장에서 많이 이용되고 있는 4가지 종류의 PBD를 미리 타설한 경우에 대하여 실내 자중압밀실험을 수행하였다. 실험은 국내에서 준설·매립사업이 가장 활발히 진행되고 있는 남해안 지역의 점토와 서해안 지역의 실트를 각각 대표하여 부산 응동지구에서 채취한 통일분류법 CL로 분류되는 점토와 인천신항 대상지역에서 채취한 통일분류법 ML로 분류되는 실트를 대상으로 실시하였다. 실험시료에 대한 기본물성 시험 결과는 다음 표 1에 나타내었다. 또한, 실험에는 PBD는 필터 내에 코어의 형상에 따라 구분되는 H형 PBD, X형 PBD, 실린더형 PBD, 이중코어 PBD를 이용하였다. 현장에서의 배수재 타설 간격을 120cm로 한다는 가정으로 20cm Column직경에 맞춰 10cm의 PBD폭을 1.3cm로 축소시켜 실험에 이용하였다.

실험 결과를 바탕으로 실제 현장에서의 준설토 침하거동을 예측해보기 위하여 Yano(1985)가 제시한 전체투기에 의한 방법으로 해석하였으며, 현장조건은 계획투기고 12m, 준설토 투기일수 365일로 가정하였다. 실험은 함수비나 투기고에 의한 영향을 배제하고 배수재의 유무에 따른 영향만을 고려하기 위하여 모든 경우에 동일하게 염분비 0.03으로 보정한 500%의 함수비에 80cm, 100cm, 120cm의 투기고로 수행하였다. 제조한 시료를 투기한 후 시간 경과에 따른 계면고의 변화를 측정하여 시간-계면고의 침강압밀곡선을 얻었으며, 자중압밀이 종료된 후에는 퇴적된 준설토에 대하여 심도별로 함수비를 측정하여 퇴적특성 분석 및 촉진 메카니즘을 확인해 보았다.

표 1. 각 case에 대한 모든 가능한 변수선택 결과

Sample	Gs	wn	PI	#200 통과율	USCS
부산점토	2.70	57.6 %	18.4 %	91.8 %	CL
인천실트	2.69	37.8 %	N.P	86.3 %	ML

3. 실험결과 및 분석

3.1 침강압밀곡선

무처리 상태의 경우와 4가지의 PBD가 미리 타설된 조건의 경우에 대하여 각각 통일분류법 CL로 분류되는 부산지역 점토와 ML로 분류되는 인천지역 실트로 투기고 80cm, 100cm, 120cm로 침강 및 자중압밀실험을 실시하여 총 30개의 침강압밀곡선을 도시하였다. 자중압밀의 시·종점은 유효응력의 유무로 판단하여야 하나 실제로 정확한 측정이 어렵기 때문에 Yano가 제안한 방법에 따라 침강압밀곡선을 기준으로 침강속도의 변화가 생기는 변곡점을 각각 자중압밀 시점 및 종점으로 결정하였다. 침강압밀곡선을 보면, CL시료는 ML시료에 비해 짧은 시간의 침강단계를 경험하며 침강에 의한 침강침하량도 확연하게 작은 것을 확인하였다. 전체 침하량 중 CL시료는 약 51% 정도의 침하량이 침강에 의한 침하량이었으며, ML시료는 약 70% 정도의 침하량이 침강에 의한 침하량이었다. 다음 그림 1에 대표적으로 초기투기고 120cm에 대한 점토 및 실트의 침강압밀곡선을 나타냈다.

3.2 PDF공법에 의한 자중압밀 촉진효과

3.2.1 침강속도

시간 경과에 따른 계면고의 변화를 측정하여 도시한 침강압밀곡선을 통해 침강속도의 변곡점으로 침강 구간과 자중압밀구간을 구분하였다. 고함수비 준설토의 침강은 현탁액 속의 토립자간의 상호작용을 받지 않는 자유침강단계를 거쳐 일정 시간의 경과 후 토립자간의 상호작용으로 플록을 형성하고, 이들이 모여

토체를 구성하여 청등수와 현탁액 사이에 명확한 경계면을 형성하며 가라앉게 된다. 일반적으로 침강속도는 플록을 형성하는데 비교적 오랜 시간이 소요되는 CL시료에 비하여 ML시료가 빠르며, 본 연구의 실험 결과에서도 이를 확인할 수 있었다. 무처리 상태에서의 ML시료의 평균 침강속도는 0.0636cm/min로 CL시료의 0.0585cm/min보다 다소 빨랐지만, 배수재가 설치된 상태에서는 두 경우의 평균 침강속도는 CL시료 0.0786cm/min(34% 상승), ML시료 0.0791cm/min(24% 상승)로 거의 비슷해지는 것을 확인하였다. 배수재는 H형 PBD가 타설된 경우의 침강속도가 CL시료에서 0.0868cm/min(48% 상승), ML시료에서 0.0832cm/min(31% 상승)로 가장 빠른 침강속도를 보였다. 각 실험조건에 따른 침강속도에 관한 실험결과들은 다음 표 2에 정리하였다.

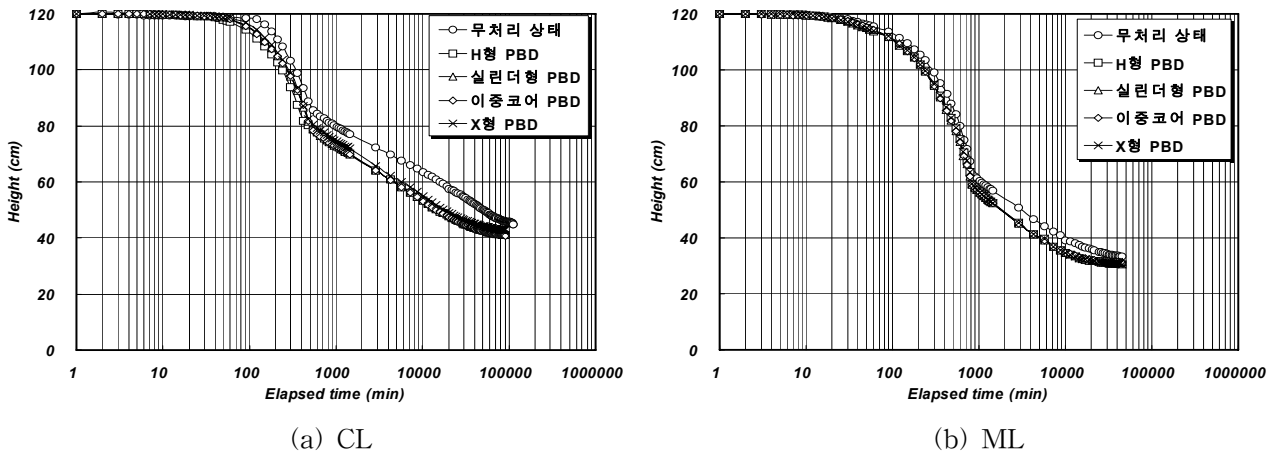


그림 1. 침강압밀곡선 (투기고 120cm)

표 2. 실험조건에 따른 침강단계 소요시간 및 침강침하량

조건	침강종료시점	무처리	H형	실린더형	이중코어	X형
CL 120cm	시간 (min)	600 (t_1)	480	600	600	540
	시간 / t_1	1	0.8	1	1	0.9
	침하량 (cm)	35.6 (s_1)	39.9	42.4	42.8	39.95
	침하량 / s_1	1	1.12	1.19	1.20	1.12
CL 100cm	시간 (min)	480 (t_1)	360	420	420	480
	시간 / t_1	1	0.75	0.875	0.875	1
	침하량 (cm)	29 (s_1)	31.3	29.1	33.4	33.9
	침하량 / s_1	1	1.08	1.003	1.15	1.17
CL 80cm	시간 (min)	420 (t_1)	300	360	360	360
	시간 / t_1	1	0.71	0.86	0.86	0.86
	침하량 (cm)	22.6 (s_1)	20.3	23.5	24.25	23.7
	침하량 / s_1	1	0.90	1.04	1.07	1.05
ML 120cm	시간 (min)	840 (t_1)	840	900	840	840
	시간 / t_1	1	1	1.07	1	1
	침하량 (cm)	57 (s_1)	60.8	62.1	60.85	60.85
	침하량 / s_1	1	1.07	1.09	1.07	1.07
ML 100cm	시간 (min)	660 (t_1)	660	660	660	660
	시간 / t_1	1	1	1	1	1
	침하량 (cm)	45.9 (s_1)	50.2	50.4	50.4	50.4
	침하량 / s_1	1	1.09	1.10	1.10	1.10
ML 80cm	시간 (min)	540 (t_1)	540	480	480	480
	시간 / t_1	1	1	0.89	0.89	0.89
	침하량 (cm)	38.15 (s_1)	39.9	38.71	38.75	38.75
	침하량 / s_1	1	1.05	1.02	1.02	1.02

3.2.2 자중압밀 종료시점 및 자중압밀침하량

침강압밀곡선의 자중압밀구간에서의 속도변화를 통하여 자중압밀과 Creep단계를 구분하였다. 기존의 연구결과들과 마찬가지로 비소성 ML시료의 자중압밀 종료시점이 CL시료에 비하여 매우 빨랐으며, 압밀 변형률($\frac{\Delta H}{H}$) 역시 큰 것을 확인했다. CL시료의 경우 무처리 상태에서 평균 61%의 압밀 변형률을 보였으며 배수재가 설치된 상태에서는 62~63%의 압밀 변형률을 보여 무처리 상태와 비교해 큰 차이를 보이지는 않았다. 하지만 자중압밀 종료시간은 무처리 상태에 비해 평균 52% 정도의 시간만이 소요되어 약 1.92배 정도의 자중압밀 촉진효과를 보였다. 또한, ML시료의 경우 무처리 상태에서 평균 71%의 압밀 변형률을 보였으며 배수재가 설치된 상태에서는 72%의 압밀 변형률을 보여 CL시료의 경우와 비슷한 정도의 증대효과를 확인하였다. 자중압밀 종료시간은 무처리 상태에 비해 평균 69% 정도의 시간이 소요되어 약 1.45배 정도의 자중압밀 촉진효과를 보였다. 각 실험조건에 따른 자중압밀 종료시간 및 최종침하량은 다음 표 3에 정리하였다.

표 3. 실험조건에 따른 자중압밀 종료시간 및 최종침하량

조건	침강종료시점	무처리	H형	실린더형	이중코어	X형
CL 120cm	시간 (min)	76380 (t ₁)	46260	41870	45120	43200
	시간 / t ₁	1	0.61	0.55	0.59	0.57
	침하량 (cm)	73.3 (s ₁)	77.1	76.4	77.1	75.8
	침하량 / s ₁	1	1.05	1.04	1.05	1.03
CL 100cm	시간 (min)	66255 (t ₁)	30240	40320	30240	36120
	시간 / t ₁	1	0.46	0.61	0.46	0.55
	침하량 (cm)	60.45 (s ₁)	62	63	62.5	62.7
	침하량 / s ₁	1	1.03	1.04	1.03	1.04
CL 80cm	시간 (min)	60480 (t ₁)	30240	28880	28880	27420
	시간 / t ₁	1	0.5	0.48	0.48	0.45
	침하량 (cm)	48.7 (s ₁)	49.7	48.4	48.95	48.3
	침하량 / s ₁	1	1.02	0.99	1.01	0.99
ML 120cm	시간 (min)	24480 (t ₁)	15855	15855	15855	15855
	시간 / t ₁	1	0.65	0.65	0.65	0.65
	침하량 (cm)	85 (s ₁)	87.6	87.22	87.25	87.25
	침하량 / s ₁	1	1.03	1.03	1.03	1.03
ML 100cm	시간 (min)	17160 (t ₁)	12960	12960	12960	12960
	시간 / t ₁	1	0.76	0.76	0.76	0.76
	침하량 (cm)	70.1 (s ₁)	72.3	72.38	72.4	72.4
	침하량 / s ₁	1	1.03	1.03	1.03	1.03
ML 80cm	시간 (min)	17160 (t ₁)	11540	11540	11540	11540
	시간 / t ₁	1	0.67	0.67	0.67	0.67
	침하량 (cm)	56.5 (s ₁)	57.5	57.48	57.5	57.5
	침하량 / s ₁	1	1.02	1.02	1.02	1.02

3.2.3 침강압밀계수(Cs)

Yano가 제안한 침강압밀계수(Cs)는 침강압밀곡선에서 자중압밀 시·종점 사이의 직선의 기울기 ($C_s = \frac{\log(H_{t_0}/H)}{\log(t/t_0)}$)로서 Curve fitting을 통해 산정할 수 있다. 침강압밀계수가 크다는 것은 자중압밀 진행 속도가 빠르고 자중압밀 침하량이 크다는 것을 의미하며, 이를 이용하여 투기 완료 후의 경과시간에 대한

자중압밀 침하량을 예측할 수 있다. 실험결과, 더 많은 자중압밀 침하량이 더 짧은 시간에 완료된 ML시료의 침강압밀계수가 CL의 것보다 약 44% 정도 크게 산정되었다.

CL시료의 경우 무처리 상태에서 0.12096cm/min로 침강압밀계수가 산정되었으며, 배수재가 설치되었을 경우에는 평균 0.13605cm/min로 산정되어 약 12% 정도의 증대효과를 확인할 수 있었다. ML시료의 경우에는 무처리 상태에서 0.17438cm/min, 배수재가 설치되었을 경우에는 평균 0.19618cm/min로 역시 12% 정도의 증대효과를 확인할 수 있었다. 다음 그림 2에 각 실험조건에 따른 침강압밀계수를 정리하였다.

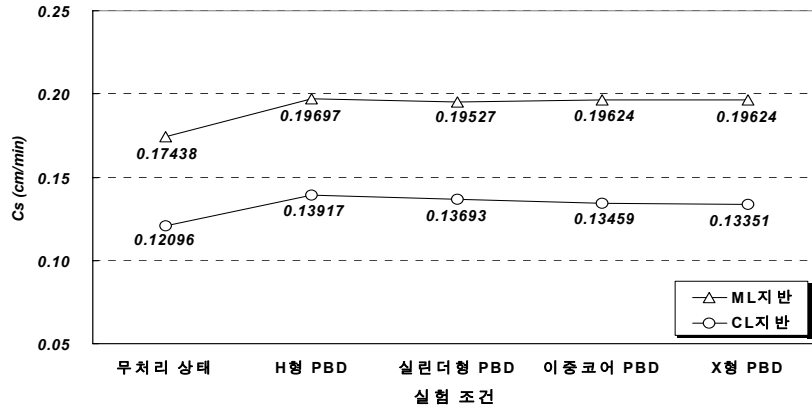


그림 2. 실험조건에 따른 침강압밀계수(Cs) 변화

3.2.4 Yano방법에 의한 전체투기방법 해석

실제 현장에서 본 연구의 대상 준설토를 이용하여 매립을 할 경우 시간 경과에 따른 준설토의 거동을 Yano가 제시한 전체투기 해석방법을 통하여 예측해 보았다. 현장 조건은 CL시료, ML시료에 모두 동일하게 호안 내 목표 투기고 12m, 투기일수 365일로 가정하였다. 실제 계면고(H)와 실질토랑고(Hs) 사이의 관계(α)를 이용하여 80cm, 100cm, 120cm로 각기 다른 투기고에 대한 실험에서 결정된 자중압밀 시·종점의 실질토랑고와 계면고를 대수눈금으로 Plotting하여 직선식을 얻고 이 직선식을 이용하여 투기 완료 후의 경과시간에 대한 자중압밀 침하거동을 예측하였다. 투기 완료 후 3년 동안 방치를 한다면, CL지반은 무처리 상태의 경우 1.85m 정도의 자중압밀 침하가 발생하여 10.15m의 계면고를 형성할 것으로 예측되었으며, 해상 연직배수공법을 적용하였을 경우에는 배수재 종류에 따라 10~14% 정도의 자중압밀 침하가 더 발생하는 것으로 예측되었다. 또한, ML지반은 무처리 상태에서 2.58m의 자중압밀 침하가 발생하여 9.42m의 계면고를 형성할 것으로 예측되었으며, 해상 연직배수공법을 적용하였을 경우에는 배수재 종류에 따라 9~11% 정도의 자중압밀 침하가 더 발생하는 것으로 예측되었다. 투기일수 365일 후 초기 매립고 12m 조성 후의 각 조건별로 시간경과에 따른 자중압밀 침하거동 예측결과를 다음 그림 3에 나타냈다.

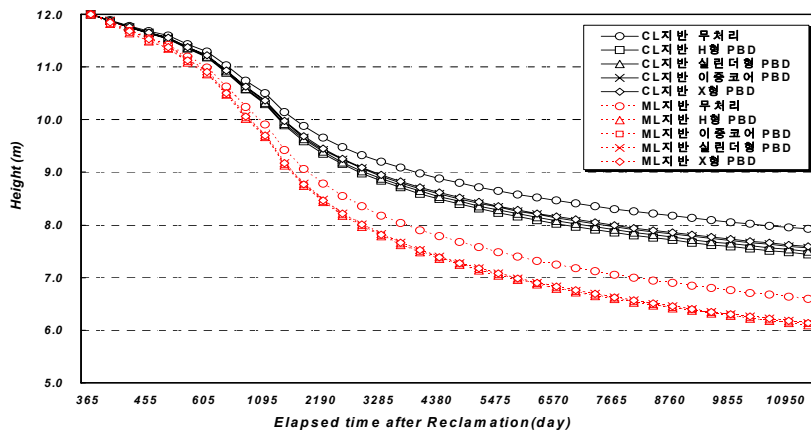
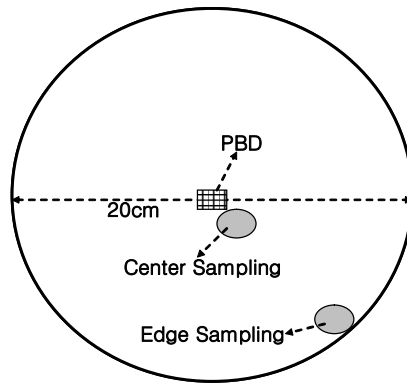


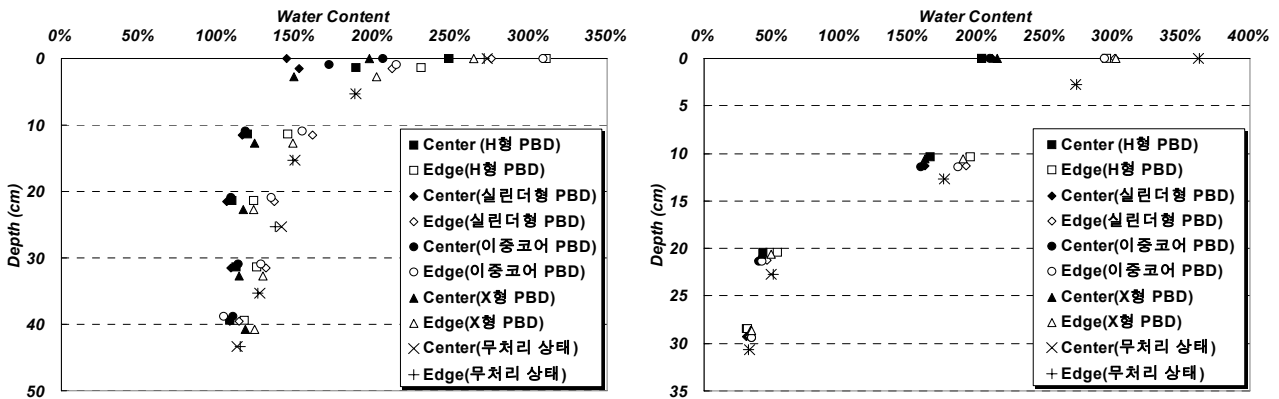
그림 3. 실험조건에 따른 자중압밀 침하거동 예측(Yano 해석)

3.3 준설토의 퇴적특성

침강압밀곡선에서 자중압밀이 종료되어 계면고가 시간축에 평행하게 Creep거동하는 것을 확인한 후 실험을 종료하여 퇴적층에 대하여 심도별로 함수비 시험을 실시하여 그림 4-(a)와 같이 동일 심도에서 배수채 근처의 Column 중앙부분(Center)과 Column 가장자리 부분(Edge)에서의 함수비를 비교하여 차이를 확인하였다. 상향 일면배수만을 허용하는 실험의 특성상 모든 경우에서 동일하게 상부에서 하부로 심도가 깊어짐에 따라 함수비가 감소하는 특징을 보였으며, 동일 심도에서는 Column의 중앙과 가장자리의 함수비 차이가 없었던 무처리 상태의 경우에 비해 PBD가 설치된 모든 경우에는 PBD 근처인 중앙부 함수비가 가장자리 함수비에 비하여 확연하게 낮았으며, 이 결과를 통해 PBD를 따라 준설토 내의 물이 빨리 배수되어 자중압밀을 촉진시켜주는 해상 연직배수공법의 메카니즘을 확인할 수 있었다. 다음 그림 4에 대표적으로 초기투기고 120cm에 대한 자중압밀 종료 후의 심도별 함수비 분포를 나타냈다.



(a) 자중압밀 종료 후 함수비 Sampling 위치



(b) CL

(c) ML

그림 4. 자중압밀 종료 후 심도별 함수비 분포 (투기고 120cm)

4. 결론

본 연구에서는 해상 연직배수공법(PDF공법, Plastic board Drain by Floating system)의 자중압밀 촉진 효과를 국내 준설토에 대한 실내 자중압밀 실험을 통해 파악하였다. 실험결과를 통한 결론을 요약·정리하면 다음과 같다.

- (1) 무처리 상태에 비하여 PBD가 설치된 경우의 평균 침강속도가 CL시료의 경우 약 34%, ML시료의 경우 약 24% 정도의 상승효과가 있었으며, H형 PBD가 설치된 경우에서의 침강속도가 가장 빨랐음을 확인하였다.

- (2) 무처리 상태에 비하여 PBD가 설치된 경우의 압밀 변형률은 CL시료와 ML시료의 경우에서 동일하게 약 1~2%의 증대효과가 있었으나, 자중압밀 종료까지의 소요시간은 무처리 상태에 비하여 CL시료의 경우 약 52%, ML시료의 경우 69%정도만이 소요되어 확실한 자중압밀 촉진효과를 확인하였다.
- (3) 무처리 상태에 비하여 PBD가 설치된 경우의 침강압밀계수는 CL시료와 ML시료의 경우에서 동일하게 약 12%정도의 증대효과를 확인하였다.
- (4) 목표 투기고 12m, 투기일수 365일로 가정하여 투기 완료 3년 후 자중압밀 침하거동을 Yano의 전체 투기에 의한 해석결과, CL지반의 경우 해상 연직배수공법을 적용하면 약 10~14%정도, ML지반의 경우 9~11% 정도의 자중압밀 침하가 더 발생할 것으로 예측되었다.
- (5) 자중압밀 종료 후 퇴적토에 대한 심도별 함수비 시험결과, PBD가 설치된 모든 경우에서 PBD 근처 중앙부분의 함수비가 PBD에서 멀리 떨어진 가장자리 부분의 함수비에 비하여 현저하게 낮음을 확인하여, 해상 연직배수공법의 메카니즘을 확인할 수 있었다.

아직까지 국내에서의 해상 연직배수공법의 시공사례가 없지만, 향후에 본 연구를 초석으로 일본에서의 성공 시공사례를 답습하여 국내 현장에 적용할 수 있다면 공기를 단축시키고 준설토 처분지의 수명을 연장시켜 준설패립 공사의 시간적, 경제적 절약에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 김재영 등(2005), 준설패립지의 압밀촉진과 투기량 증대를 위한 지하수위 저하공법과 PDF공법의 적용, 地盤, Vol.21, No.8, pp.18-24
2. 이무철(2009), 침투압을 이용한 PBD 타입 준설패립지반의 압밀효과, 박사학위논문, 서울시립대학교
3. 이용(2001), 연직배수재를 이용한 준설패립토의 자중압밀 촉진효과, 석사학위논문, 중앙대학교, pp.42-44
4. 한라대학교(2000), 준설패립지의 규모설계 및 준설패립토의 자중압밀침하에 관한 연구(최종 보고서), 현대건설주식회사 기술연구소, pp. 68-71
5. 天野弘一郎(1985), “浚渫粘土による軟弱埋立地盤の性状とその豫測”, 土木學會 論文集, 第 364號, pp.1-14
6. Been, K. and Sills, G. C.(1981). "Self-weight consolidation of soft soils : An experiment and theoretical study," *Geotechnique*, 31, pp.519-535.
7. K. Sato and N. Yoshida(2000), "Self-weight consolidation of dredged clay with plastic board drain", *The International Symposium on Coastal Geotechnical Engineering in Practice*, A. Nakase and T. Tsuchida ed., Yokohama, pp.501-506