프리로딩에 의한 2차 압밀침하량 감소에 관한 연구
A Study on the Relaxion of Secondary Compression Settlement using Preloading Method

허익창[1], Ik-Chang Huh, 임종철[2], Jong-Chul Im, 장지건[3], Ji-Gun Chang

[1] 부산대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University
[2] 부산대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University
[3] 부산대학교 생산기술연구소 연구원, (주)광림엔지니어링 이사, Researcher, Pusan National University, Director, Kwanglim Engineering Co.

SYNOPSIS : In soft ground, consolidation settlement is mainly consider. The primary consolidation settlement which is the time when the excess pore water pressure is completely dispersed and the secondary consolidation settlement which follows. Recently as the depth of consolidation layer increases the consideration of not only the primary consolidation settlement but also of the secondary consolidation settlement becomes a very important element. But up to the present there were only a few in-depth study of the secondary consolidation settlement performed.

At present there are a lot of methods available when it comes to the improvement of soft soil. In this study, Preloading Method which is the most commonly used soft soil improvement method locally was used in order to investigate the method for the reduction of secondary consolidation settlement. The objective of this study is to determine the amount of preloading required to reduce secondary consolidation settlement and to determine whether secondary consolidation settlement using standard consolidation test.

Key words : secondary consolidation, preloading method, secondary compression index

1. 서 론

최근 연약지반에 구조물을 축조하는 사례가 증가하고 있다. 연약지반상에서 구조물 축조시 고려하여야 할 사항으로 지지력 및 침하에 대한 문제가 있으므로, 이에 대한 대책을 수립하여 구조물을 축조하여야 한다. 연약지반에서 주로 고려되어야 될 장기침하로서는 과잉간극수압의 소산이 완료되는 1차압밀침하량과 그 이후에도 발생하는 2차압밀 침하량이 있으며 최근 압밀층의 심도가 깊어짐에 따라 1차압밀침하량 뿐만아니라 2차압밀 침하량에 대한 고려가 중요한 요소로 등장하고 있다. 그러나 현재 국내에서는 2차압밀에 대한 깊이 있는 연구가 많이 미진한 실정이다.

이와 같은 배경으로 현재 연약지반개량공법으로는 다양한 방법이 있으나 본 연구에서는 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 프리로딩공법을 이용하여 2차압밀 침하량을 저감하는 방법에 대하여 연구하고자 한다. 어느 정도의 할증되는 프리로딩을 사용하면 2차압밀 침하량이 저감되는지 혹은 발생하지 않는지를 표준압밀시험을 이용하여 분석 평가하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 2차압밀

점토의 압밀중 2차압밀은 일종의 크리프현상으로 볼수 있는데 1976년 Mitchell은 “흙구조의 점성저항(viscous resistance)의 정도에 따라 지배되는 시간에 의존하는 전단 또는 체적변형률”로 정의하였다.

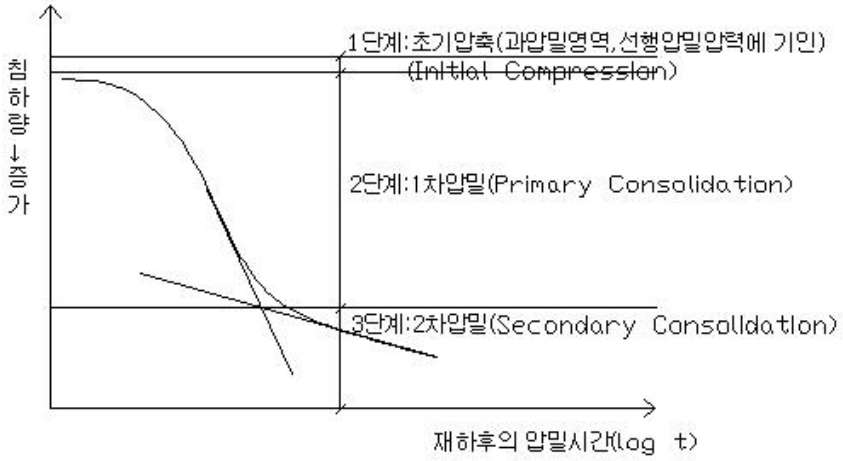


그림 1. 압밀시간-침하량 관계곡선

이차압밀동안 주어진 하중증가에서 $\log t$에 대한 침하(또는 간극비의 변화)는 그림 1과 같이 선형이다. 이 그림에서 이차압축지수(secondary compression index)는 식 (1)과 같이 정의되며, 압밀시험에 의해서 구해진다.

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta e}{\log \frac{t_2}{t_1}} \qquad (1)$$

여기서, C_α : 이차압축지수(secondary compression index)

Δe : t_1, t_2 시간 사이의 간극비의 변화

t_1, t_2 : 시간

이차압밀침하량은 식(2)로 계산하였다.

$$\Delta H_s = \frac{C_\alpha}{1+e_p} \cdot \log \frac{t_2}{t_1} \cdot H \qquad (2)$$

여기서, ΔH_s : 이차압밀침하량

e_p : 어떤 하중증가비에서 일차압밀이 끝난 후의 간극비

H : 일차압밀이 완료된 후의 점토층의 두께

t_1 : 이차압밀침하 계산 시작 시각(일차압밀 완료 시점)

t_2 : 이차압밀침하 계산 종료 시각(언제를 목표로 잡느냐에 따라 달라짐)

여기서, 주의해야 할 점은, 현재는 일차압밀이 완료된 후에 이차압밀이 시작된다고 하여 설계 및 해석하는 것이 일반적이고 간편하지만, 일차압밀 중에도 이차압밀이 포함되어 진행된다고 보는 연구자들도 있다(白子 등, 2001; 寺田, 2001). 그러나 이런 개념을 사용한 정확한 설계법이 제안되어 있지 않고 제안되었더라도 상당히 복잡하여 실용적이지 못한 단점이 있다. 여기서는 일반적인 앞의 개념을 적용하였다.

3. 프리로딩공법

Preloading 공법은 본 구조물 시공에 앞서 구조물 중량과 같거나 그 이상의 하중을 재하하여 기초지반의 압밀침하를 촉진시키는 공법으로 강도증가를 꾀하고 침하량과 강도가 사전에 기대치에 도달한 것을 확인한 후 하중을 제거하고 본 구조물을 건설하는 공법이다. 프리로딩을 설계하는 목적은 다음의 두 가지로 요약될 수 있다. 첫째는 영구하중하에서 예상되는 전 침하량이 주어진 시간하에 일어나게끔 재하하중의 크기를 결정하는 것이고, 둘째는 주어진 과재하중하에서 주어진 침하량까지 도달되는 시간을 결정하는 것이다.

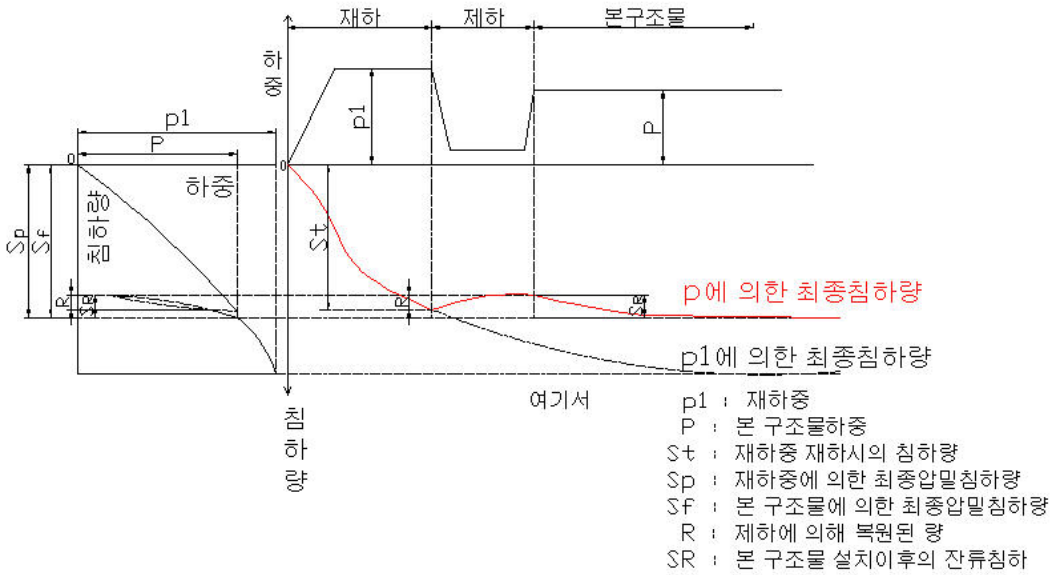


그림 2. 프리로딩 공법에 의한 하중-침하량 관계곡선

4. 시료 및 시험방법

4.1 시료의 물리적 성질

실험에 사용된 시료는 부산시 강서구 범방동 이주단지에서 채취하여 운반된 시료로서 물리적 성질은 다음 표와 같다.

액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수 Ip	비중 Gs	USCS
53.22	30.21	23.02	2.6	MH

표 4.1 시험에 사용된 시료의 물리적 성질

4.2 시험장치

본 연구에서 사용한 단계재하시험 장치는 동아시험기에서 제작한 표준압밀시험 장치(KS F 2316)에 30mm 디지털 다이얼게이지를 설치 변위측정을 하여 압밀량이 GTDL-D300의 Read out 장치에 자동으로 저장되도록 하여 시험을 실시하였으며 시험기의 구조로는 고정링, 압밀링, 가압판, 세라믹 다공판,

필터, 수침상자로 구성되어져 있다. 그리고 압밀량의 직경과 높이가 각각 60mm, 20mm이고 변위측정계는 최대 30mm, 최소 0.001mm까지 측정 가능하며 재하중 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4, 12.8kg/㎠ 가능한 추를 사용하였다.

4.3 시험방법

본 시험에서는 먼저 압밀링으로 시료 성형시 압밀링과의 마찰을 방지하기 위해서 구리스를 바른 후 성형하였다. 시료 상부와 하부에 다공석판과 여과지를 부착하여 양면 배수 조건을 만들고 공기가 제거된 물을 놓고 24시간 동안 포화시켰다.

단계재하시험은 재하시 하중 증가비와 재하시간을 각각 1.0과 24시간으로 하였으며 시료에 0.05kgf/㎠ ~ 6.4kgf/㎠까지 단계적으로 하중을 증분시켰다. 이와 동시에 각 하중단계에서 압밀이 완료될 때까지 시간경과에 따른 시료의 연직 변위량을 측정하였으며, 변형량 측정은 표준압밀시험 방식으로 8초, 15초, 30초, 1분, 2분, 4분, 8분, 15분, 30분, 60분, 120분, 240분, 480분, 1440분으로 측정하였다.

6.4kgf/cm^2 하중단계에서 1차압밀침하량을 산정하고 100년 또는 50년 기준의 2차압밀침하량을 산정하여 1차압밀침하량과 2차압밀침하량을 합한 최종침하량을 산정하였다.

프리로딩 하중 증가분을 0.9kgf/cm^2(14%), 1.6kg/cm^2(25%), 3.2kg/cm^2(50%), 4.8kg/cm^2(75%), 6.4kg/cm^2(100%) 등으로 구분하여 각각의 하중 증가분을 가하여 산정한 최종침하량에 도달할 때 증가된 하중을 제하하여 침하량의 변화를 관찰하였다.

5. 시험결과 및 분석

5.1 최종압밀침하량 산정

6.4kgf/cm^2 하중단계에서 s-logt 곡선을 이용하여, 1차압밀침하량을 구하고, 2차압밀 완료예정시기를 100년 또는 50년 기준으로 정하여 2차압밀침하량을 산정하였다. 그 뒤 1차압밀침하량과 2차압밀침하량을 합하여 최종압밀침하량을 결정하였다.

5.1.1 TYPE 1

1차압밀침하량 산정

하중단계	1차 압밀침하량 도달시간(분)	1차압밀침하량(cm)
6.4kgf/cm^2	48	0.409

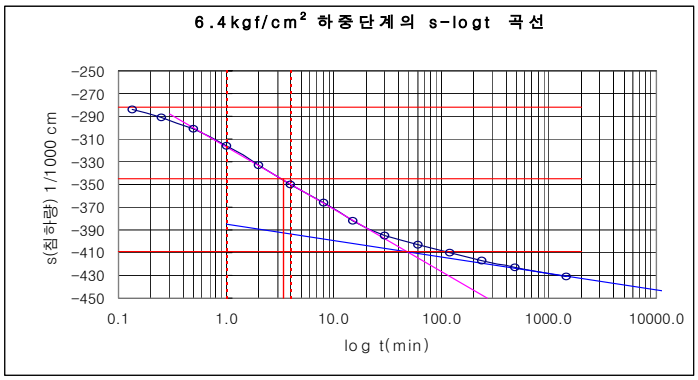


그림 5.1 TYPE 1

2차압밀침하량 산정

$$S_2 = \frac{C_\alpha}{1+e_p} \cdot H \cdot \log\frac{t_2}{t_1} \qquad (1)$$

하중단계	C_α	e_p	H(cm)	t_1(분)	t_2(년)	2차압밀침하량(cm)
6.4kgf/cm^2	0.0196	1.129	1.591	48	100	0.088

최종압밀침하량 산정

1차압밀침하량(cm)	2차압밀침하량(cm)	최종압밀침하량(cm)
0.409	0.088	0.497

5.1.2 TYPE 2

1차압밀침하량 산정

하중단계	1차 압밀침하량 도달시간(분)	1차압밀침하량(cm)
6.4kgf/cm^2	60	0.491

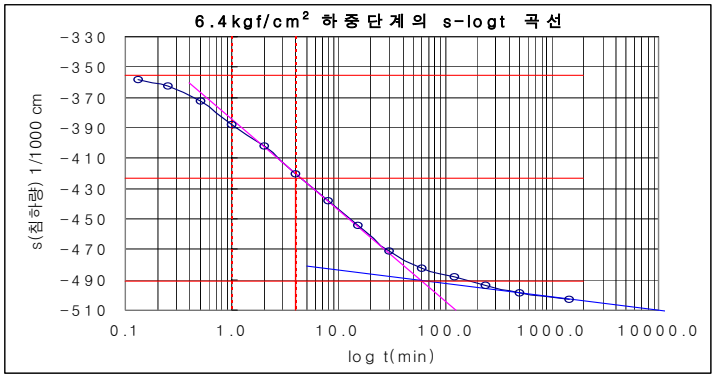


그림 5.2 TYPE 2

2차압밀침하량 산정

하중단계	C_α	e_p	H(cm)	t_1(분)	t_2(년)	2차압밀침하량(cm)
6.4kgf/cm^2	0.0116	1.024	1.509	60	100	0.051

최종압밀침하량 산정

1차압밀침하량(cm)	2차압밀침하량(cm)	최종압밀침하량(cm)
0.491	0.051	0.542

5.1.3 TYPE 3

1차압밀침하량 산정

하중단계	1차 압밀침하량 도달시간(분)	1차압밀침하량(cm)
6.4kgf/cm^2	69	0.438

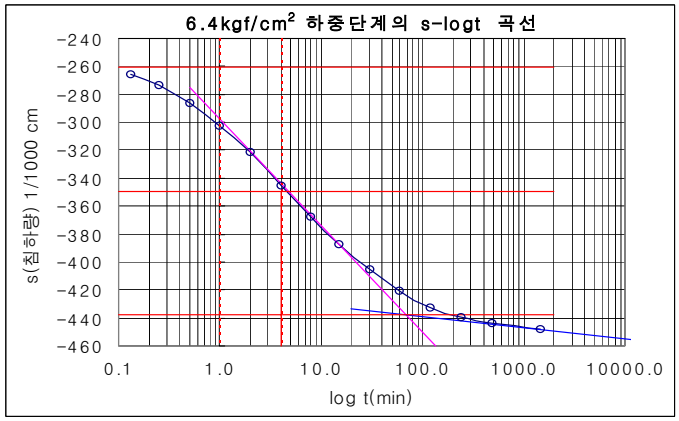


그림 5.3 TYPE 3

2차압밀침하량 산정

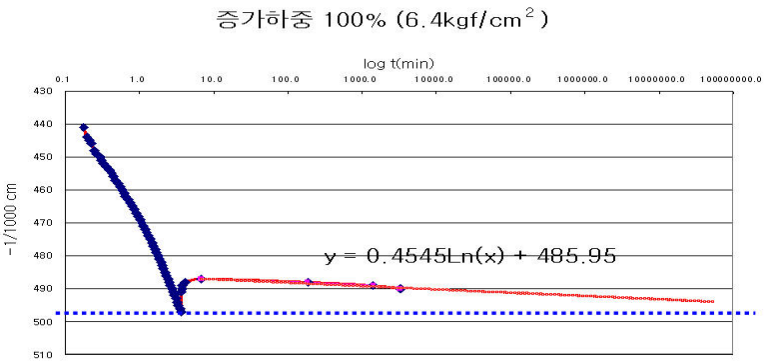
하중단계	C_α	e_p	H(cm)	t_1(분)	t_2(년)	2차압밀침하량(cm)
6.4kgf/cm^2	0.0082	0.642	1.562	69	50	0.044

최종압밀침하량 산정

1차압밀침하량(cm)	2차압밀침하량(cm)	최종압밀침하량(cm)
0.438	0.044	0.482

5.2 프리로딩 하중 증가 변화에 따른 시간-침하 관계 분석

5.2.1 증가하중 100%에 대한 시간-침하 관계 곡선

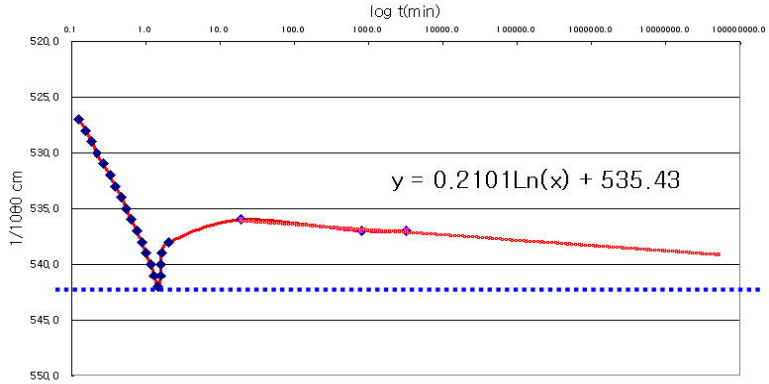


프리로딩 증가 하중을 100% 반영하여 시간-침하량을 관찰하여 최종침하량(0.497cm)에 도달할 때 증가 하중을 제하하여 침하량의 추이를 관찰하였다. 그 결과 그림에서와 같은 추세식을 유추할 수 있었으며, 2차압밀 침하량 발생기간을 100년으로 예상하고 추세선 식에 의한 최종압밀침하량을 유추한 결과 2차압밀은 발생하였으나 목표계획량에는 도달하지 않았다.

6.4kgf/cm^{2}단계에서 100년 후 최종압밀침하량(cm)	목표침하량 도달즉시 프리로딩 제거한 뒤 100년 후 추정 최종압밀침하량(cm)	2차압밀침하량(cm)			분 석 결 과
		계획량 (a)	결과량 (b)	차이 (a)-(b)	
0.497	0.494	0.088	0.085	0.003	프리로딩 제거후에도 2차압밀은 발생하였으나 목표계획량에는 도달하지 않음.

5.2.2 증가하중 75%에 대한 시간-침하 관계 곡선

증가하중 75% (4.8kgf/cm^2)

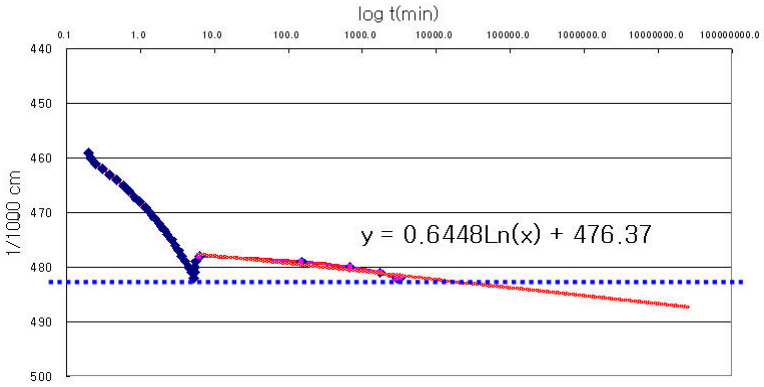


프리로딩 증가 하중을 75% 반영하여 시간-침하량을 관찰하여 최종침하량(0.542cm)에 도달할 때 증가 하중을 제하하여 침하량의 추이를 관찰하였다. 그 결과 그림에서와 같은 추세식을 유추할 수 있었으며 2차압밀침하량 발생기간을 100년으로 예상하고 추세선 식에 의한 최종압밀침하량을 유추한 결과, 2차압밀은 발생하였으나 목표계획량에는 도달하지 않았다.

6.4kgf/cm^{2}단계에서 100년 후 최종압밀침하량(cm)	목표침하량 도달즉시 프리로딩 제거한 뒤 100년 후 추정 최종압밀침하량(cm)	2차압밀침하량(cm)			분 석 결 과
		계획량 (a)	결과량 (b)	차이 (a)-(b)	
0.542	0.539	0.051	0.048	0.003	프리로딩 제거후에도 2차압밀은 발생하였으나 목표계획량에는 도달하지 않음.

5.2.3 증가하중 50%에 대한 시간-침하 관계 곡선

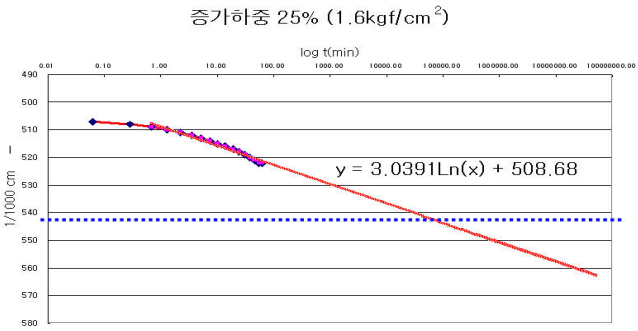
증가하중 50% (3.2kgf/cm^2)



프리로딩 증가 하중을 50% 반영하여 시간-침하량을 관찰하여 최종침하량(0.482cm)에 도달할 때 증가 하중을 제하하여 침하량의 추이를 관찰하였다. 그 결과 그림에서와 같은 추세식을 유추할 수 있었으며 2차압밀침하량 발생기간을 50년으로 예상하고 추세선 식에 의한 최종압밀침하량을 유추한 결과, 2차압밀은 발생하였으며 50년후 예상목표계획량을 0.005cm 초과하여 발생되는 것으로 분석되었다.

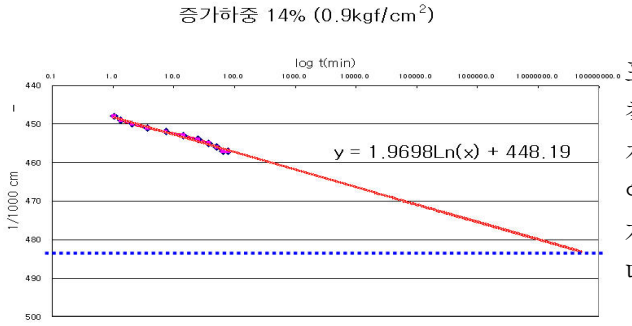
6.4kgf/cm^{2}단계에서 50년 후 최종압밀침하량(cm)	목표침하량 도달즉시 프리로딩 제거한 뒤 50년 후 추정 최종압밀침하량(cm)	2차압밀침하량(cm)			분 석 결 과
		계획량 (a)	결과량 (b)	차이 (a)-(b)	
0.482	0.487	0.044	0.049	-0.005	프리로딩 제거후에도 2차압밀은 발생하였으며 50년후 예상목표계획량을 0.005cm 초과하였음.

5.2.4 증가하중 25%에 대한 시간-침하 관계 곡선



프리로딩 증가 하중을 25% 반영하여 시간-침하량을 관찰하여 최종침하량(0.542cm)에 도달할 때 증가 하중을 제하하여야 하나 초기 침하량이 미미하여 추세식을 구하여 최종침하량이 도달하는 시간을 계산한 결과 제거시기가 577,757분(약40일)이 소요되어 실험을 중단하였다.

5.2.5 증가하중 14%에 대한 시간-침하 관계 곡선



프리로딩 증가 하중을 14% 반영하여 시간-침하량을 관찰하여 최종침하량(0.482cm)에 도달할 때 증가 하중을 제하하여야 하나 초기 침하량이 미미하여 추세식을 구하여 최종침하량이 도달하는 시간을 계산한 결과 제거시기가 28,459,711분(약54.1년)이 소요되어 실험을 중단하였다.

6. 결론

1)최종압밀 침하량은 1차압밀침하량과 2차압밀침하량의 합으로 구하였으며, 1차압밀침하량은 표준압밀시험을 실시하여 s-logt법으로 1차압밀침하량을 산정하였으며, 2차압밀침하량은 상기식을 이용하여 2차압밀완료 예정시기를 100년 혹은 50년으로 정하여 구하였다.

2)프리로딩 하중 증가 변화를 100%, 75%, 50%, 25%, 14% 등으로 구분하여 각각에 대하여 2차압밀침하량 초과 발생 유무에 대하여 관찰한 결과 증가하중 100%, 70%에 대하여는 100년이 경과하여도 최종압밀침하량에 도달하지 않아 2차압밀은 발생하였으나 목표계획량에는 도달하지 않는 것으로 분석되었으며, 증가하중 50%에 대하여는 2차압밀침하량 발생기간을 50년으로 예상하고 추세선 식에 의한 최종압밀침하량을 유추한 결과, 2차압밀은 발생하였으며 50년후 예상목표계획량을 0.005cm 초과하여 발생되는 것으로 분석되었다.

7. 참고문헌

1) 김상규(2001), 토질역학, 청문각, 서울, pp.128~144, pp.399~404.
2) 토목공법연구회(1995), 연약지반대책공법, 창우출판, 서울, pp.41~54.
3) Robert D Holtz, William D. Kovacs(1981), AN INTRODUCTION TO Geotechnical Engineering, Prentice-Hall, New Jersey, pp.376~423.