

선행하중의 제거-재압축에 따른 점성토의 거동

Behaviour of Soft Clay on Removal of Preloading and Recompression

이 남 기¹⁾, Nam-Ki Lee, 조 기 영²⁾, Ki-Young Cho, 유 갑 용³⁾, Gap-Yong Yoo, 정 성 교⁴⁾, Sung-Gyo Chung

¹⁾ 동아대학교 토목공학과 대학원 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ.

²⁾ 동아대학교 토목공학과 대학원 박사과정, Graduate student, Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ.

³⁾ 한국토지공사 양산직할사업단 과장, Manager, Korea-Land Corporation.

⁴⁾ 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ.

SYNOPSIS : Little has been known about the characteristics of short-term and long-term resettlements of overconsolidated soft clay due to elastic behaviour and secondary compression since partial removal of preloading. In this study, laboratory experiment on a natural soft clay was performed for different types of tests. As the results of the experiments, the characteristics of short-term and long-term resettlements such as rebound ratio, resettlement point and rate of secondary compression were expressed with the overconsolidation ratio(OCR) and preloading time. The above correlations showed all the linear relations and were used for obtaining the amounts of resettlement, secondary compression and heaving in the field. And the settlement increased with increasing strain rate.

KEYWORDS : Rebound ratio, Resettlement point, Secondary compression, Preloading time, Strain rate.

1. 서 론

최근 국내에서는 전역에 걸쳐 대단위 주거시설의 확충 및 공공시설부문에 대한 사회간접자본의 투자가 확대되고 있다. 이러한 과업 중에서 상당부분은 해안 및 강변을 따라 연약지반 위에 건설 중에 있다. 이때 연약지반의 개량을 위하여 주로 연직배수공법과 선행재하공법이 병행되어 사용되고 있다. 선행재하공법이 적용될 경우에 선행하중에 의한 압축만 고려하는 것이 일반적이다. 그러나 중요구조물이 위치할 경우에는 선행하중의 제거에 따른 팽창과 구조물의 설치에 따른 재압축을 고려하여야만 설치되는 구조물의 안정성을 보장할 수 있을 것이다. 선행하중의 제거에 따른 각종 특성들에 대한 연구로는 Fukazawa & Kurihara(1985, 1991), Kamao, Yamada, Satoh & Aita(1995) 및 Yoshikuni, Moriwaki & Ikegami(1995) 등에 의하여 적용된 바 있으나, 국내에서는 거의 전무한 상태이다.

본 연구에서는 낙동강 하구부에 위치하고 있는 을숙도에서 실시되고 있는 선행재하-제거-구조물 축조에 따른 점성토의 압축-팽창특성을 유추하기 위하여 현장에서 불교란 시료를 채취하여 실내압밀실험을 통한 선행하중의 재하시간, 선행하중의 제거량 및 재하방법에 따른 영향을 규명하며, 그 실험결과를 이용하여 실제현장조건에 대한 적용성을 평가하는데 주목적을 두고 있다.

2. 실 험

2.1 불교란 시료

본 연구에 사용된 시료의 채취장소는 부산광역시 사하구 하단동 일운도일대의 OO신축공사가 실시되

고 있는 현장으로서 낙동강 최하구부에 위치하여 바다와 연해있다.

본 지역의 지질은 백악기 경상계 중성화산암류를 관입하여 있는 불국사 화강암류와 이 관입암체를 관입해있는 마산암을 기반암으로 하여 상당한 깊이로 제 4기 충적층이 넓게 분포하고 있다. 이러한 충적층은 본 연구대상지역을 포함한 낙동강 하구일대에 폭넓게 분포하고 있으며, 충적퇴적물은 대개 점성토와 미세한 모래로 구성되어 있다.

지층구조는 상부로 부터 모래층이 상당한 두께로 형성되어 있으며, 그 아래로 점토층, 모래층이 형성되어 있으며, 최하단부에는 자갈 및 모래가 혼재되어 있는 지층형태를 보이고 있다. 그리고 부분적으로 3~4m의 모래층이 존재하고 있으나 이 층의 연속성에 대해서는 불분명하다.

본 연구에 사용된 시료의 기본적인 물성치를 알기 위하여 직경 76mm의 piston-sampler(NX size)에 의하여 채취된 불교란 시료를 이용하여 물리적 시험을 실시하였다. 이 실험결과와 이 지역에서 수행되었던 점성토의 역학적 시험결과를 요약하면 표 1과 같다.

표 1. 조사대상지역의 물리적 및 역학적특성

구 분	특 성	범 위
물 리 적 특 성	자연함수비 (%)	39.75 ~ 47.95
	액성한계 (%)	38.80 ~ 42.40
	소성지수 (%)	10.91 ~ 14.47
	점도함량 (%)	38.00 ~ 47.00
	비 중 (Gs)	2.658 ~ 2.675
	초기간극비 (e_0)	1.210 ~ 1.290
압 축 특 성	압축지수 (C_c)	0.508 ~ 0.801
	팽창지수 (C_s)	0.032 ~ 0.094
	선행압밀용력 (kg/cm^2)	1.050 ~ 1.800
	과압밀비 (OCR)	0.410 ~ 0.700
역 학 적 특 성	수평투수계수 (cm/sec)	2.400×10^{-8} ~ 2.890×10^{-7}
	연직투수계수 (cm/sec)	2.950×10^{-8} ~ 4.544×10^{-7}
	일축압축강도 (kg/cm^2)	0.791 ~ 1.526
	한계상태 내부마찰각(ϕ_{cr})	32.30 ~ 45.92
	한계상태선의 기울기 (M)	1.300 ~ 1.780

2.2 실험장치

본 논문에 사용된 시험기기는 1968년에 일본 Marui社에서 제작된 표준압밀시험기(Conventional Oedometer Test, COT)를 이용하여 실내 선행재하시험을 수행하였다.

본 압밀시험기기의 cell은 직경이 6.0cm, 높이 2.0cm인 압밀링으로 구성되어 있으며, 시료면의 상부 및 하부를 통하여 양면배수가 가능하도록 고안되어져 있는 고정링(fixed ring)형태를 취하고 있다. 시료면의 상부 및 하부 다공판에 미세한 토립자로 인한 clogging방지를 위하여 시료의 상부 및 하부 배수면에 filter paper를 사용하였다. 또한, 실험 시료면과 압밀링 사이에서 압축량에 상당히 큰 영향을 미칠 수 있는 주면마찰력(skin friction)을 최소화 하기 위하여 silicone grease로 얇게 처리하여 실험을 수행하였다.

2.3 실험방법

본 논문의 대상지역인 OO신축공사 현장의 불교란 시료를 이용한 실내 선행재하실험을 위하여 사용된 시료는 직경 6.0cm, 높이 2.0cm 크기의 시편을 이용하여 실험시편을 제작하였으며, 현장의 포화를 유지하기 위하여 실험전 실내에서는 수침을 통한 포화를 유지하였다. 그리고 시료 setting후 포화 확인을 위하여 기존의 연구(정성교 등, 1996)에 근거하여 자연 포화기간을 7일 이상으로 한 후, 선행하중의 재하시간(t_p), 선행하중의 제거량에 따른 과압밀비(OCR) 및 선행하중의 재하방법에 따른 영향으로 각각

나누어 실내 선행재하실험을 수행하였다.

2.3.1 선행하중의 재하시간(t_p)에 따른 실험

선행하중의 재하시간(t_p)에 따른 압축곡선의 분석을 위하여 표 2에 보여지는 바와같이 선행하중의 제거량을 $8.0t/m^2$ 로써 일정하게 하고, 각각 선행하중의 제거시기를 1차 압밀의 50%에 달하는 t_{50} , 1차 압밀이 완료되는 t_{100} (EOP) 및 선행하중을 재하한 후 7일이 경과한 후 하중을 제거하는 $t_{7일}$ 로 하여 실험을 수행하였다.

표 2. 선행하중의 재하시간(t_p)에 따른 실험종류

Test No.	Sample No.	$\sigma_{vo}' (t/m^2)$	$\sigma_p (t/m^2)$	$\Delta\sigma_p (t/m^2)$	$t_p (min.)$
CASE I - 1	P - 2	25.0	16.0	8.0	0
CASE I - 2					t_{50} (9.00)
CASE I - 3					t_{100} (260)
CASE I - 4					$t_{7일}$ (10080)
CASE I - 5	P - 6	20.0	16.0	8.0	0
CASE I - 6					t_{50} (10.0)
CASE I - 7					t_{100} (240)
CASE I - 8					$t_{7일}$ (10080)
CASE I - 9	P - 7	20.0	16.0	8.0	0
CASE I - 10					t_{50} (8.20)
CASE I - 11					t_{100} (270)
CASE I - 12					$t_{7일}$ (10080)

2.3.2 선행하중의 제거량에 따른 실험

선행하중의 제거량에 따른 압축곡선의 분석을 위하여 표 3에 나타낸 바와같이 선행하중의 제거시기를 유효연직응력과 선행하중($\sigma_{vo}' + \sigma_p$)하의 압축곡선으로부터 1차 압밀이 완료되는 t_{100} (EOP)까지 일정하게 재하한 후, 선행하중의 제거량을 0.0, 4.0, 8.0, $16.0t/m^2$ 로 각각 달리 제하(unloading)하여 실험을 수행하였다.

표 3. 선행하중의 제거량에 따른 실험종류

Test No.	Sample No.	$\sigma_{vo}' (t/m^2)$	$\sigma_p (t/m^2)$	$t_p (min.)$	$\Delta\sigma_p (t/m^2)$	OCR*
CASE II - 1	P - 2	25.0	16.0	t_{100} (260)	0.0	1.000
CASE II - 2					4.0	1.108
CASE II - 3					8.0	1.242
CASE II - 4					16.0	1.640
CASE II - 5	P - 6	20.0	16.0	t_{100} (240)	0.0	1.000
CASE II - 6					4.0	1.125
CASE II - 7					8.0	1.286
CASE II - 8					16.0	1.800
CASE II - 9	P - 7	20.0	16.0	t_{100} (270)	0.0	1.000
CASE II - 10					4.0	1.125
CASE II - 11					8.0	1.286
CASE II - 12					16.0	1.800

$$* \text{OCR} = \frac{\sigma_{vo}' + \sigma_p U}{\sigma_{vo}' + \sigma_p U - \Delta\sigma_p}$$

2.3.3 선행하중의 재하방법에 따른 실험

선행하중의 재하방법에 따른 압축곡선의 경향에 대하여 분석하기 위하여 표 4에 나타난 바와같이 선행하중을 일시에 재하하였을 경우와 실제 현장에서의 단계성토를 통한 하중재하를 고려하여 유효연직응력과 선행하중($\sigma_{vo}' + \sigma_p$)하의 압축곡선으로부터 1차 압밀이 완료되는 시점(EOP)까지의 시간을 등간격으로 세분화하여 하중을 단계적으로 재하하는 경우에 대하여 실험을 수행하였다.

표 4. 선행하중의 재하방법에 따른 실험종류

Test No.	Sample No.	σ_{vo}' (t/m ²)	EOP(min.)	σ_p (t/m ²)	t_p (min.)
CASE III - 1	P - 6	20.0	t_{100} (240)	2.0	0 ~ 60
CASE III - 2				4.0	61 ~ 120
CASE III - 3				8.0	121 ~ 180
CASE III - 4				16.0	180 ~ 240
CASE III - 5	P - 7	20.0	t_{100} (270)	2.0	0 ~ 67
CASE III - 6				4.0	67 ~ 135
CASE III - 7				8.0	136 ~ 203
CASE III - 8				16.0	203 ~ 270

3. 실험결과 및 분석

3.1 실내 선행재하시험 결과

3.1.1 선행하중의 재하시간 (t_p)에 따른 영향

선행하중의 재하시간 (t_p)에 따른 영향을 관찰하기 위하여 상기의 표 2에 나타난 실험종류 중에서 대표적으로 P-2에 대한 압축곡선을 그림 1과 같이 나타내었다. 여기서 제거시키는 각각 1차 압밀이 완료되는 t_{100} (EOP)과 1차 압밀의 50%에 해당되는 t_{50} 및 선행하중을 재하한 후 7일이 경과한 $t_{7일}$ 에 대하여 선행하중의 제거량 ($\Delta\sigma_p$)을 $8.0t/m^2$ 로서 일정하게 유지하였다.

그림에서 알 수 있는 바와같이 최종 압축량은 각 실험시료에 따라 약간씩의 차이를 보이고 있으며, 각각의 선행재하시간 (t_p)에서 하중제거를 실시한 후의 재압축곡선의 경향은 일정기간까지는 비선형적인 거동을 보이나 시료의 종류에 무관하게 장기간이 경과한 후에는 거의 직선적인 증가경향을 보여주고 있다. 그리고 부분적으로 선행하중의 제거에 따른 비선형거동은 선행하중 제거시기가 짧을수록 뚜렷하게 나타나고 있다.

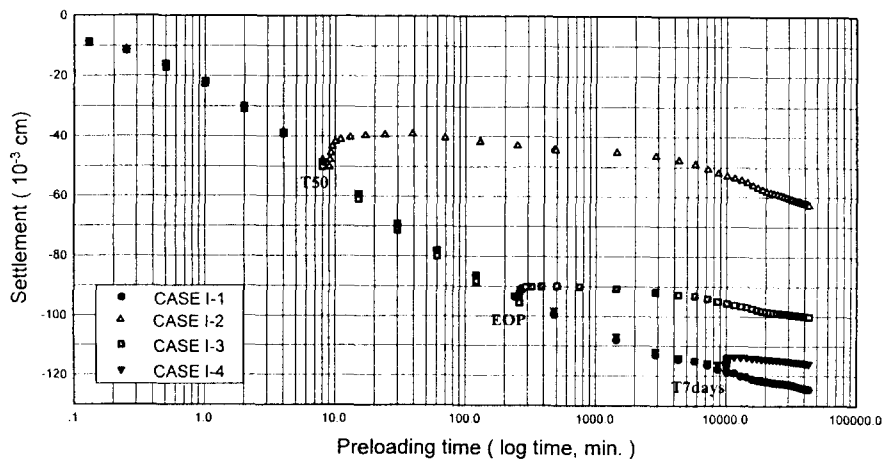


그림 1. 선행하중의 재하시간에 따른 압축곡선

3.1.2 선행하중의 제거량에 따른 영향

선행하중의 제거량($\Delta\sigma_p$)에 따른 과압밀비(OCR)의 영향을 관찰하기 위하여 표 3의 실험종류를 이용하여 선행재하시간(t_p)을 1차 압밀이 완료되는 시점 (EOP)까지 일정하게 재하한 후, 선행하중의 제거량을 각각 0.0, 4.0, 8.0 및 16.0t/m²로 하여 수행한 결과 대표적인 압축곡선은 그림 2에 나타난 바와 같다.

그림에서 알 수 있는 바와같이 선행하중의 제거량이 증가함에 따라 시료의 탄성거동에 따른 팽창량이 크게 발생되고 있으며, 실험시료의 종류에 따라 약간씩의 정량적인 차이를 나타내고 있다. 그리고 그림 1의 재하시간에 따른 영향에서 나타난 것과 같은 압축곡선의 비선형적인 경향은 선행하중의 제거량이 증가함에 따라 거의 발생되지 않고 있으며, 선행하중의 제거량이 작은 경우에는 부분적으로 비선형적인 경향을 보이나 재하시간에 따른 영향에 비하여 비교적 직선적인 경향을 보여주고 있다.

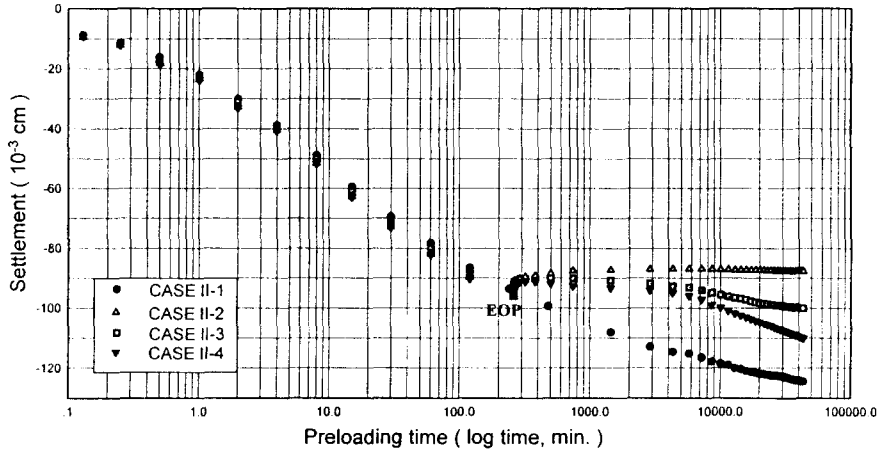


그림 2. 선행하중의 제거량에 따른 압축곡선

3.1.3 선행하중의 재하방법에 따른 영향

선행하중을 재하할 경우 실제 현장에서는 성토체의 안정관리 및 기타 여러문제를 고려하여 단계성토를 이용하여 선행하중을 재하한다. 따라서 본 절에서는 표 4의 실험종류와 같이 선행하중을 일시에 재하하지 않고 유효연직응력과 선행하중을 동시에 재하한 경우에 대한 1차 압밀이 완료되는 시점(EOP)까지의 시간을 등간격으로 세분화하여 하중을 재하하여 그림 3과 같은 대표적인 압축곡선을 얻었다. 그림에서 알 수 있는 바와같이, 1차 압밀이 완료되는 EOP까지의 압축량은 선행하중을 일시에 재하한 경우가 압축이 크게 발생되는 경향을 보여주고 있으나, 일정기간이 경과한 후에는 오히려 단계하중을 고려한 압축곡선이 일시재하를 고려한 경우에 비하여 약간 큰 압축을 보이고 있으며 거의 직선적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

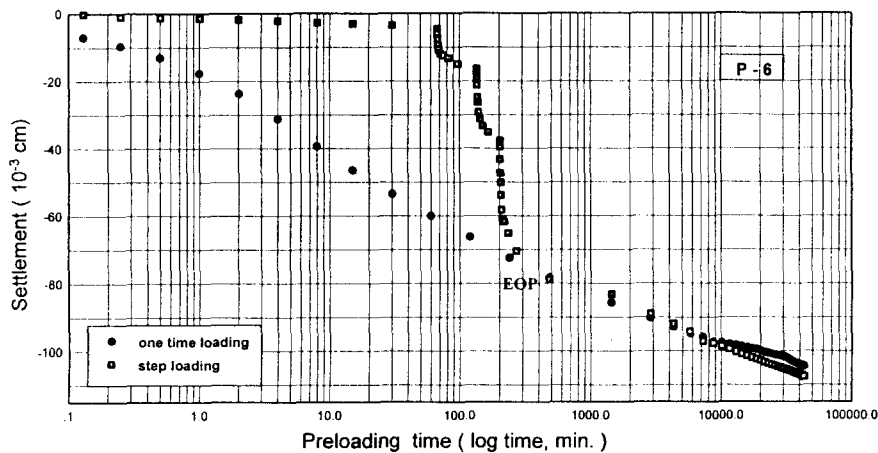


그림 3. 선행하중의 재하방법에 따른 압축곡선

3.2 결과분석

3.2.1 반발비

선행하중의 재하시간(t_p) 및 선행하중의 제거량에 따른 과압밀비(OCR)의 변화로 인한 반발비(ϵ_R)를 나타내면 각각 그림 4 및 그림 5와 같다.

그림 4에서는 3.1.1절 그림 1의 선행하중의 재하시간에 따른 압축곡선으로부터 선행하중의 재하시간(t_p)과 반발비(ϵ_R)의 관계로서, 선행재하시간이 증가함에 따라 토립자 사이의 고결작용의 영향으로 인하여 대수선형적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 Kamao, Yamada, Satoh & Aita(1995)의 연구결과와 상당히 유사한 결과를 나타내고 있다.

그림 4에서 보여주는 선행하중의 재하시간(t_p)과 반발비(ϵ_R)의 관계를 이용하여 1차 대수함수식으로 정리하면, 아래의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \log \epsilon_R &= a \cdot \log t_p + b \\ &= -0.11146 \cdot \log t_p - 0.15839 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1).$$

그림 5에서는 3.1.2절의 그림 2에서 산정된 반발비(ϵ_R)와 선행하중 제거량($\Delta\sigma_p$)에 따른 과압밀비(OCR)의 관계이다. 여기서 보면, 선행하중의 제거량이 증가함에 따라 반발비는 대수선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 Fukazawa & Kurihara(1991)의 연구결과와 상당히 유사한 경향을 보여주고 있다.

그림 5에서 보여주는 선행하중의 제거량에 따른 과압밀비(OCR)와 반발비(ϵ_R)의 관계를 이용하여 1차 대수함수식으로 정리하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \log \epsilon_R &= a \cdot OCR + b \\ &= 0.65221 \cdot OCR - 1.37189 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2).$$

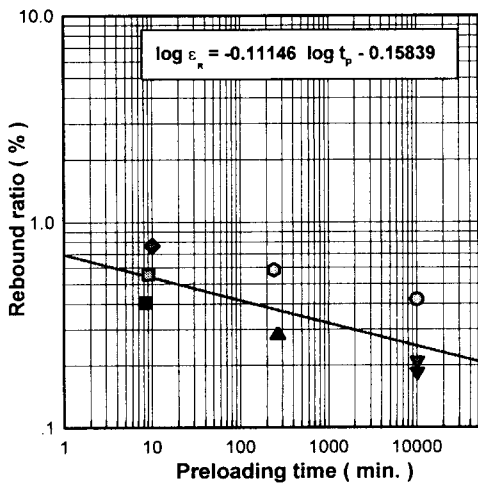


그림 4. 선행하중의 재하시간에 대한 반발비

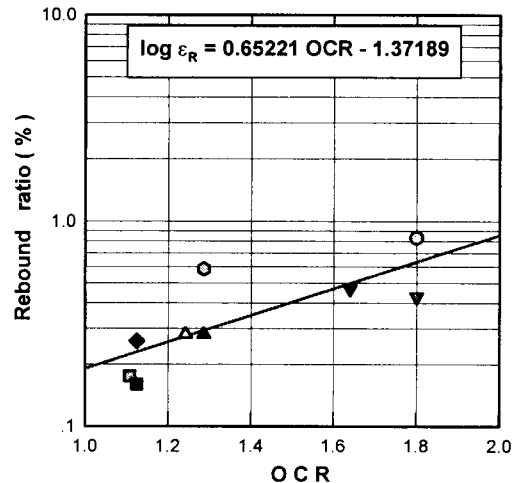


그림 5. 선행하중의 제거량에 대한 반발비

3.2.2 재압축점

선행하중의 재하시간(t_p)과 선행하중의 제거량에 따른 과압밀비의 변화로 인한 재압축점의 변화를 그림 6 및 그림 7에 각각 나타내었다.

그림 6에서는 3.1.2절에서 나타난 선행하중의 재하시간에 따른 압축곡선으로부터 산정된 선행하중의 재하시간(t_p)과 재압축점(R_p)의 관계를 나타낸 것이다. 여기서는 재하시간의 증가로 인한 토립자 사

이의 고결영향으로 Kamao, Yamada, Satoh & Aita(1995)의 연구결과와 유사하게 재하시간이 증가함에 따라 대수선형적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다.

그림 6에서 나타낸 선행하중의 재하시간(t_p)과 재압축점(R_p)의 관계를 이용하여 1차 대수함수식으로 정리하면 식 (3)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \log R_p &= a \cdot \log t_p + b \\ &= 0.49762 \cdot \log t_p + 1.13023 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3).$$

그림 7에서는 3.1.2절에서 나타낸 선행하중의 제거량에 따른 압축곡선으로부터 선행하중의 제거량에 따른 과압밀비(OCR)와 재압축점(R_p)의 관계를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 선행하중의 제거량이 증가함에 따라 재압축점은 대수선형적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향은 Kamao, Yamada, Satoh & Aita(1995)의 연구결과와 상당히 좋은 일치를 보여주고 있다.

그림 7에서 나타낸 과압밀비(OCR)와 재압축점(R_p)의 관계를 이용하여 1차 대수함수식으로 정리하면 다음의 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \log R_p &= a \cdot OCR + b \\ &= 2.75311 \cdot OCR - 1.04094 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4).$$

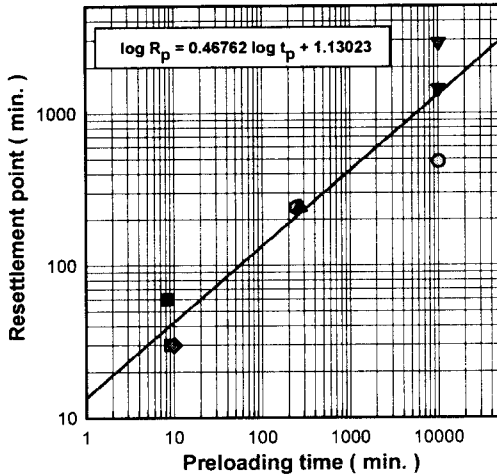


그림 6. 선행하중의 재하시간에 따른 재압축점

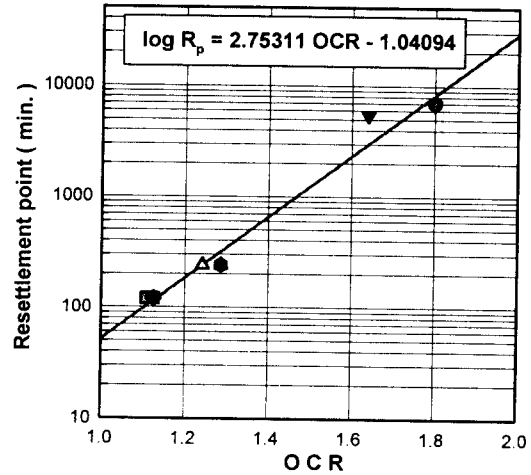


그림 7. 선행하중의 제거량에 따른 재압축점

3.2.3 2차 압축률(ϵ_a)

선행하중의 재하시간(t_p)과 선행하중의 제거량에 따른 과압밀비(OCR)의 변화로 인한 2차 압축률(ϵ_a)의 경향은 그림 8 및 그림 9에 각각 나타내었다. 각 경우의 반발곡선의 형태가 비선형적인 경향을 보이므로 반발곡선의 기울기로써 표현되는 2차 압축률을 정의함에 상당한 어려움이 있다. 따라서 Kamao, Yamada, Satoh & Aita(1995)의 연구에서는 재하시간이 $10^4 \sim 10^5$ (min.)의 측정값을 이용하여 2차 압축률(ϵ_a)을 정의하였다. 본 연구에서도 반발곡선이 직선적인 경향을 보이지 않아 대체적으로 직선적인 증가경향을 보이는 $2.16 \times 10^4 \sim 4.32 \times 10^4$ (min.)의 측정값을 이용하여 2차 압축률(ϵ_a)에 대하여 정의하였다.

그림 8에서는 3.1.1절에서 나타낸 선행하중의 재하시간에 따른 압축곡선의 관계로부터 선행하중의 재하시간(t_p)과 2차 압축률(ϵ_a)의 관계를 보여주고 있다. 여기서 보면, 선행하중의 재하시간이 증가함에 따라 토립자 사이의 고결작용으로 인하여 2차 압축률은 상대적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 Kamao, Yamada, Satoh & Aita(1995)의 연구결과와 상당히 좋은 일치를 보여주고 있다.

그림 8의 선행하중의 재하시간(t_p)과 2차 압축률(ϵ_a)의 관계를 이용하여 1차 대수함수식으로 정리하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \log \varepsilon_a &= a \cdot \log t_p + b \\ &= -0.19294 \cdot \log t_p + 0.11891 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5).$$

그림 9에서는 3.1.2절에서 나타난 선행하중의 제거량에 따른 압축곡선으로부터 산정된 2차 압축률과 선행하중의 제거량에 따른 OCR의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 선행하중의 제거량에 따른 과압밀비(OCR)가 증가함에 따라 2차 압축률(ε_a)은 대수선형적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 Kamao, Yamada, Satoh & Aita(1995) 및 Kurihara & Hukazawa(1991)의 연구결과와 상당히 좋은 일치를 보여주고 있다.

그림 9에서 보여주었던 선행하중의 제거량에 따른 과압밀비(OCR)와 2차 압축률(ε_a)의 관계를 이용하여 1차 대수함수식으로 정리하면 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \log \varepsilon_a &= a \cdot \text{OCR} + b \\ &= -1.34647 \cdot \text{OCR} + 1.33502 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6).$$

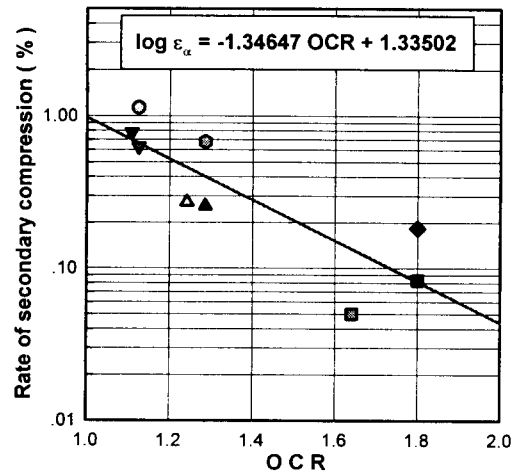
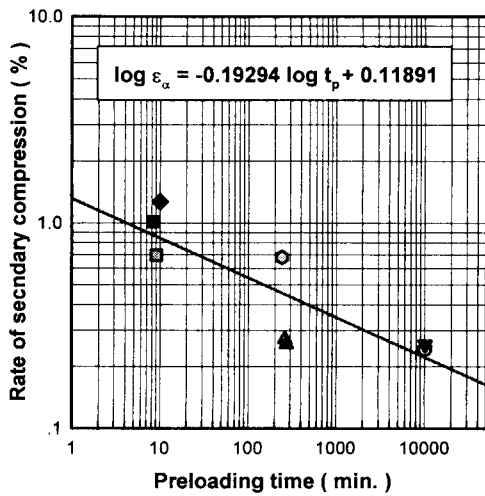


그림 8. 선행하중의 재하시간에 따른 2차 압축률

그림 9. 선행하중의 제거량에 따른 2차 압축률

4. 실제현장에 대한 침하예측

OO신축공사 현장에서 채취된 불교란 시료를 이용하여 선행하중의 제거 및 지반굴토로 인한 팽창량, 건물하중에 의한 재압축량 및 지반 굴토후 시간경과에 따른 2차 압축량을 산정하기 위하여 실내 선행재하실험 결과로부터 산정된 각종 1차원 함수식을 이용하여 실제 현장의 선행재하조건에 적용함으로써 각종 재압축특성들을 산정하고자 한다.

4.1 현장조건

선행하중의 제거량에 따른 실험결과를 이용하여 실제현장의 지반에 대한 재압축특성을 산정하기 위하여 그림 10에 나타난 바와같이 지하수위는 지표면과 일치하며, 기존의 지반상에 점성토층의 개량을 위하여 성토고 8.0 m의 선행재하를 실시한 후, 건물신축을 위하여 기존 지표면아래 12.0 m까지 굴착을 실시하는 조건을 이용하였다.

그림 11에서는 상기의 실제 현장조건에 대한 $e - \log \sigma_v'$ 의 관계를 나타내고 있다.

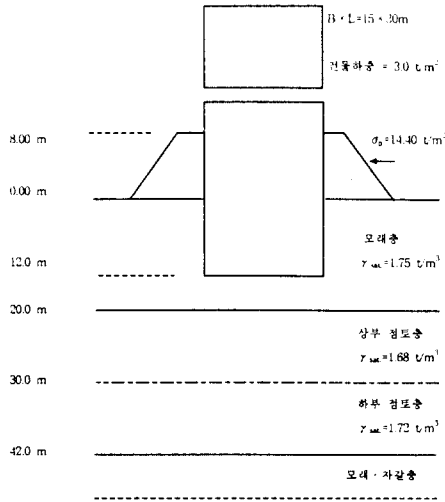


그림 10. 침하예측에 적용된 현장조건

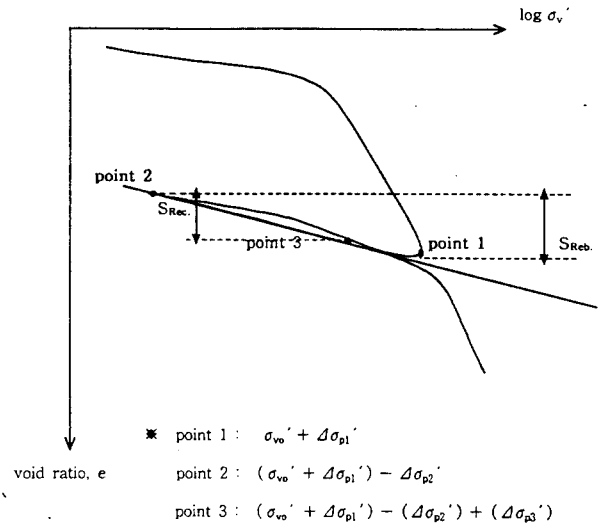


그림 11. 현장조건에 대한 e - log σ_v' 관계

4.2 각종 적용식

4.2.1 팽창량의 산정식

선행하중의 제거량에 따른 OCR과 각종 재압축특성의 관계식을 이용하여 그림 10에 나타난 현장조건을 이용하여 점토층에 대하여 굴토응력으로 인한 팽창량의 산정을 위하여 적용된 수식은 다음의 식 (9) 및 (10)과 같다. 식 (9)는 그림 11에 나타난 e - log σ_v' 관계로부터 point 1에서 굴토응력으로 인한 응력감소에 따라 point 2까지의 탄성거동에 따른 일시적 팽창량을 산정하는 식이며, 식 (10)은 3.2.1절의 그림 5에 나타난 선행하중의 제거량에 따른 반발비의 관계식으로 부터 얻어진 1차 지수함수식을 이용한 팽창량 산정식이다.

$$S_{Reb}^1 = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{C_{si}}{1 + e_{li}} \right) \cdot H_{li} \cdot \log \left(\frac{(\sigma_{vo}' + \Delta\sigma_{p1}') - \Delta\sigma_{p2}'}{\sigma_{vo}' + \Delta\sigma_{p1}'} \right) \right] \dots\dots\dots (9)$$

$$S_{Reb}^2 = \sum_{i=1}^n (\epsilon_{Ri} \cdot H_{li}), \quad \epsilon_{Ri} = 10^{(0.65221 \cdot OCR - 1.37189)} \dots\dots\dots (10)$$

여기서, $OCR = \frac{\sigma_{vo}' + \Delta\sigma_{p1}' \cdot U}{(\sigma_{vo}' + \Delta\sigma_{p1}' \cdot U) - \Delta\sigma_{p2}'}$

4.2.2 재압축량의 산정식

건물하중에 의한 재압축량의 산정시 적용된 수식은 다음의 식 (11) 및 (12)와 같다.

식 (11)은 그림 11에 나타난 e - log σ_v' 의 관계로부터 지반굴토에 의한 point 2로부터 건물하중을 고려한 point 3까지의 재압축량에 대하여 산정하는 식을 나타내고 있다. 그리고 식 (12)는 그림 2의 선행하중의 제거량에 따른 압축곡선으로부터 산정된 반발비를 이용한 식으로서 선행하중의 제거에 따라 지반이 탄성거동을 하기 때문에 유효응력의 감소로 인한 팽창량 산정식과 동일하게 적용하되, OCR산정시 건물하중에 의한 지반내의 응력증가를 고려한 반발비를 산정하여 적용하는 식이다.

$$S^1_{Rec.} = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{C_{si}}{1 + e_{2i}} \right) \cdot H_{2i} \cdot \log \left(\frac{(\sigma_{vo}' + \Delta\sigma_{pl}') - \Delta\sigma_{p2}' + \Delta\sigma_{p3}'}{(\sigma_{vo}' + \Delta\sigma_{pl}') - \Delta\sigma_{p2}'} \right) \right] \dots\dots\dots (11)$$

$$S^2_{Rec.} = \sum_{i=1}^n (\epsilon_{Ri} \cdot H_{2i}), \quad \epsilon_{Ri} = 10^{(0.65221 \cdot OCR - 1.37189)} \dots\dots\dots (12)$$

여기서, $OCR = \frac{\sigma_{vo}' + \Delta\sigma_{pl}' \cdot U}{(\sigma_{vo}' + \Delta\sigma_{pl}' \cdot U) - \Delta\sigma_{p2}' + \Delta\sigma_{p3}'}$

4.2.3 선행하중의 제거에 따른 2차 압축량(creep)의 산정식

연직응력을 제거한 후에 외적하중을 전혀 작용하지 않은 상태, 즉 동일한 유효연직응력상태하에서 시간의 변화에 의한 점소성적인 성질에 기인하여 발생하는 2차 압축량을 산정하기 위하여 적용된 수식은 다음의 식 (13)과 같다. 식 (13)은 그림 2에서와 같은 선행하중의 제거량에 따른 팽창곡선으로부터 얻어진 식 (6)의 2차 압축률에 대한 1차 지수함수식을 이용하여 산정하는 식이다.

$$S^1_{Sec.} = \sum_{i=1}^n (\epsilon_{\alpha i} \cdot H_{2i} \cdot \log t), \quad \epsilon_{\alpha i} = 10^{(1.34647 \cdot OCR - 1.33502)} \dots\dots\dots (13)$$

여기서, $OCR = \frac{\sigma_{vo}' + \Delta\sigma_{pl}' \cdot U}{(\sigma_{vo}' + \Delta\sigma_{pl}' \cdot U) - \Delta\sigma_{p2}'}$

4.3 계산결과 및 분석

4.3.1 팽창량(반발량)

선행하중을 재하한 후 일정기간이 경과한 후 건물신축을 위하여 지반 굴토작업을 수행하였을 경우, 굴착저면지반에서의 유효응력의 감소로 지반의 탄성거동에 의하여 발생하는 일시적인 팽창량(반발량)을 식 (9) 및 (10)을 이용하여 산정한 결과를 표 5에 나타내었다. 이 표에서 알 수 있는 바와같이 굴토응력에 따른 점토지반의 전팽창량은 Cs값을 이용한 식 (9)의 결과가 실험결과를 이용한 식 (10)의 결과에 비하여 약간 크게 나타나고 있다.

그림 12에서는 이들의 깊이에 따른 분포를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 식 (9)를 이용한 경우 점토층의 선정된 팽창지수(Cs)에 상당히 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 팽창지수가 큰 값으로 선정된 경우 그 층의 팽창량은 비교적 크게 분포하고 있음을 알 수 있다. 하지만, 실험결과를 이용한 식 (10)을 이용한 경우 팽창지수의 영향에 무관하게 깊이에 따라 비선형적으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이것은 선행하중의 재하량 및 제거량에 따른 지반내의 응력변화에 따라 비교적 영향이 작게 미치는 하부 점토층일수록 팽창량이 작게 발생하고 있다.

표 5. 반발량(팽창량)의 산정결과

심도 (m)	H ₁ (cm)	C _s	e ₁	σ _{vo} ' (t/m ²)	Δσ _{pl} '*1 (t/m ²)	Δσ _{p2} '*2 (t/m ²)	OCR*3	최대팽창량 (cm)	
								식(9)	식(10)
20.0~23.0	290.052	0.094	1.300	16.02	4.392	9.00	1.789	- 2.993	- 1.810
23.0~26.0	293.195	0.064	1.248	18.06	4.003	9.00	1.689	- 1.900	- 1.574
26.0~30.0	390.402	0.075	1.157	20.44	3.614	9.00	1.598	- 2.726	- 1.804
30.0~33.0	295.620	0.041	1.365	22.88	3.293	9.00	1.524	- 0.938	- 1.239
33.0~36.0	296.252	0.041	1.370	25.04	3.054	9.00	1.471	- 0.860	- 1.146
36.0~39.0	295.311	0.064	1.175	27.20	2.843	9.00	1.428	- 1.343	- 1.072
39.0~42.0	296.664	0.046	1.176	29.36	2.658	9.00	1.391	- 0.899	- 1.018
Σ								- 11.659	- 9.663

(주) ; *1 총성토고의 응력(by Osterberg's chart, 1957)

*2 굴착토의 응력

$$*3 \frac{\sigma_{vo}' + \Delta\sigma_{p1}' \cdot U}{(\sigma_{vo}' + \Delta\sigma_{p1}' \cdot U) - \Delta\sigma_{p2}'}$$

4.3.2 재압축량

굴토작업을 수행한 후 건물을 신축할 경우 건물하중에 의한 일시적 탄성압축량에 해당되는 재압축량을 산정한 결과는 표 6에 나타내었다. 이 표에서 알 수 있는 바와같이 Cs값을 이용한 식 (11)의 결과가 건물하중을 고려한 OCR을 적용한 식 (12)에 비하여 상당히 작게 발생하고 있다.

그림 13에서는 이들 재압축량의 깊이별 분포를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 식 (11)을 이용한 경우 건물하중에 의한 영향이 어느 정도 크게 미치는 상부점토층에서는 팽창지수의 크기에 따라 재압축량의 분포에 상당한 영향을 미치고 있다. 그리고 식 (12)를 이용한 경우에는 팽창지수와는 무관하게 선행하중의 재하 및 제거량의 영향을 비교적 크게 받은 상부점토층에서는 재압축량이 크게 발생하고 있으며, 비교적 선행하중의 재하 및 제거량의 영향을 작게 받은 하부점토층에서는 비교적 재압축이 작게 발생하고 있는 경향을 보이고 있다.

표 6. 재압축량의 비교결과

심도 (m)	H ₂ (cm)	C _s	e ₂	σ _{vo} ' (t/m ²)	Δσ _{p1} ' ^{*1} (t/m ²)	Δσ _{p2} ' ^{*2} (t/m ²)	Δσ _{p3} ' ^{*4} (t/m ²)	OCR ^{*5}	재압축량 (cm)	
									식 (11)	식 (12)
20.0~23.0	293.04	0.094	1.324	16.02	4.392	9.00	2.100	1.511	0.869	1.204
23.0~26.0	295.10	0.064	1.263	18.06	4.003	9.00	1.704	1.494	0.444	1.180
26.0~30.0	393.13	0.074	1.172	20.44	3.614	9.00	1.356	1.466	0.502	1.510
30.0~33.0	296.558	0.041	1.373	22.88	3.293	9.00	1.032	1.438	0.130	1.091
33.0~36.0	297.112	0.041	1.377	25.04	3.054	9.00	0.864	1.408	0.100	1.046
36.0~39.0	296.654	0.064	1.185	27.20	2.843	9.00	0.840	1.373	0.148	0.991
39.0~42.0	297.563	0.046	1.183	29.36	2.658	9.00	0.636	1.354	0.074	0.964
Σ									2.267	7.986

(주) ; *4 건물하중에 의한 응력(Fadum's chart, 1948)

$$*5 \frac{\sigma_{vo}' + \Delta\sigma_{p1}' \cdot U}{(\sigma_{vo}' + \Delta\sigma_{p1}' \cdot U) - \Delta\sigma_{p2}' + \Delta\sigma_{p3}'}$$

4.3.2 선행하중의 제거에 따른 2차 압축량(creep)

건물신축을 위한 굴토작업을 실시한 후, 동일한 유효응력하에서 시간의 경과에 따라 발생하는 2차 압축량을 1년의 경과시간에 대하여 산정한 결과 표 7에 나타낸 바와같다. 이 표에서 알 수 있는 바와같이 상기의 굴토응력에 의한 팽창량 및 건물하중에 의한 재압축량에 비하여 상당히 큰 압축량이 발생하고 있음을 알 수 있다.

그림 14에서는 2차 압축량의 깊이에 따른 분포를 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 2차 압축량은 깊이가 증가함에 따라 비선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 깊이가 증가함에 따라 선행하중의 재하 및 제거에 따른 영향을 작게 받게 됨에 따라 OCR의 감소로 인하여 2차 압축량은 깊이에 따라 증가하였다. 특히, 4.3.1절의 건물하중에 의한 응력증가로 인한 탄성압축량에 비하여 외적하중을 전혀 고려하지 않은 2차 압축량이 오히려 상당히 크게 나타나고 있다. 따라서, 실무에서는 건물하중에 의한 일시적 탄성압축량만을 고려할 것이 아니라 동일한 유효연직응력 하에서 시간의 경과에 따라 발생하는 2차 압축량에 대해서도 고려해야 할 것이다.

표 7. 2차 압축량의 산정결과

심도 (m)	H ₂ (cm)	e ₂	σ _{vo} ' (t/m ²)	Δσ _{p1} ' ^{*1} (t/m ²)	Δσ _{p2} ' ^{*2} (t/m ²)	OCR ^{*3}	2차 압축량(cm)
							식(13)
20.0~23.0	293.040	1.324	16.02	4.392	9.00	1.789	1.414
23.0~26.0	295.100	1.263	18.06	4.003	9.00	1.689	1.942
26.0~30.0	393.130	1.172	20.44	3.614	9.00	1.598	3.430
30.0~33.0	296.558	1.373	22.88	3.293	9.00	1.524	3.257
33.0~36.0	297.112	1.377	25.04	3.054	9.00	1.471	3.841
36.0~39.0	296.654	1.185	27.20	2.843	9.00	1.428	4.378
39.0~42.0	297.563	1.183	29.36	2.658	9.00	1.391	4.936
Σ							23.199

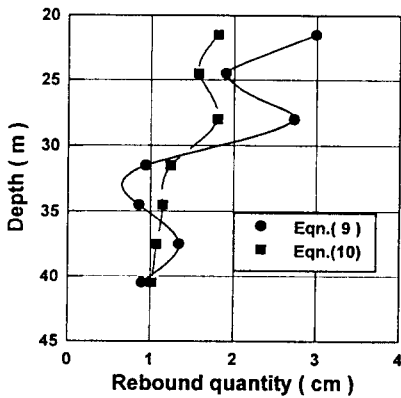


그림 12. 깊이에 따른 팽창량

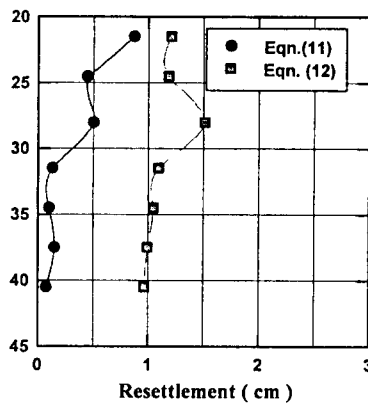


그림 13. 깊이에 따른 재압축량

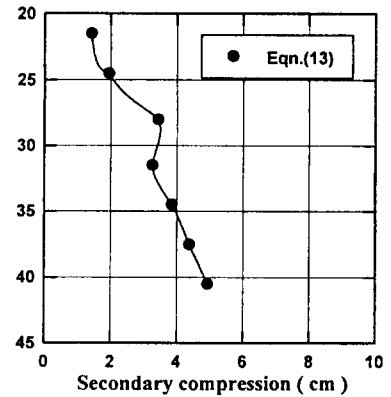


그림 14. 깊이에 따른 2차 압축량

5. 결 론

OO신축공사 현장에서 채취된 불교란 시료를 이용하여 선행하중의 제거시기, 제거량 및 재하방법에 따른 영향에 대하여 실내 선행재하실험을 수행하였으며, 실험결과로부터 산정된 여러 1차 함수식들을 이용하여 실제 현장조건에 대한 적용성을 검토한 결과 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 선행하중의 재하시간이 증가함에 따라 탄성거동에 의하여 일시적으로 발생되는 팽창량은 감소하였으며, 팽창이후 외적하중에 의한 응력의 증가없이 다시 압축이 발생하는 재압축점은 지연되어 발생하였다. 또한, 재하시간이 증가함에 따라 팽창량은 재하시간에 따라 대수적으로 반비례하며, 2차 압축률은 감소하는 경향을 나타냈다.
- (2) 선행하중의 제거량이 증가함에 따라 응력감소에 의한 탄성팽창량은 증가하였으며, 다시 압축이 발생하는 재압축점은 지연되어 발생되었다. 또한, 반발비는 과압밀비(OCR)에 따라 대수적으로 비례하는 경향을 나타냈으며, 2차 압축률은 감소하였다.
- (3) 선행하중의 재하시 단계하중재하와 일시하중재하에 대한 압축곡선에 대하여 비교한 결과, 유효연직응력과 선행하중 하의 압축곡선에서 1차 압밀이 완료되는 시점(EOP)까지는 일시재하조건 의 경우가 압축이 크게 발생하였으나, 장시간 경과한 후에는 오히려 단계하중조건을 적용한 경

우에 압축이 크게 발생하였다.

- (4) 선행하중의 제거량에 따른 각종 실험결과식들을 이용하여 실제 현장조건에 대한 적용성을 검토한 결과, 지반굴토로 인한 유효응력의 감소에 따른 탄성거동에 따른 일시적 팽창량 및 건물하중에 의한 재압축량산정에 대한 적용이 가능하였으며, 동일한 유효응력하에서 발생하는 2차 압축량의 산정도 가능하였다.

참 고 문 헌

1. 김명모(1987). "연약지반공법 - Preloading공법", 대한토목학회지, 제 35권, 6호, pp. 21~24.
2. 이남기 · 이대명 · 유갑용 · 정성교(1996). "양산 · 물금지역의 충적점토에 대한 일정변형률 압밀특성", '96학술발표회 논문집, 한국지반공학회, 연약지반(II), pp. 267~276.
3. Aldrich, H. P.(1965). "Pre-compression for support of shallow foundations", Journal of Soil Mechanics and Foundations Div., ASCE, Vol. 91, SM2, pp. 5~20.
4. Buisman, A. S. K.(1936). "Results of long duration settlement tests", Proc., First International conf. on Soil Mechanics and Foundation Engrg., Vol. 1, pp. 103~107.
5. Bjerrum, L.(1936). "Embankments on soft ground", Proc. of Special Conference on the Performance of Earth and Earth Supported Structures, Lafayette Indiana, Vol. 2, pp. 1~54.
6. Fadum, R. E.(1948). "Influence values for estimating stresses in elastic foundations, Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol.3, pp.236~268.
7. Fukazawa, E. & Kurihara, H.,(1985). " Long-term consolidation test of peat and silt ", Proc. of 21st Japan National Conference of JSSMFE, pp.65~73.
8. Fukazawa, E. & Kurihara, H.,(1991). " Field measurement of long-term settlement", Tsuchi-to-Kiso, JSSMFE Series 403, Vol. 39, No. 8, pp.103~117.
9. Hansbo, S. C.(1960). "Consolidation of clays, with special reference to influence of vertical sand drains", Proceedings, Swedish Geotechnical Institute, No. 18, pp.45~50.
10. Heifei, R. & Schaad, W.(1948). "Time effects in connection with consolidation tests", Proceedings, 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engrg., Vol. 3, pp.23~29.
11. Johnson, S. J.(1970), "Precompression for improving foundation soils", Journal of the Soil Mech. and Foundations Div., ASCE, Vol. 96, pp. 111~144.
12. Kamao, S., Yamada, K. & Aita, K.,(1995). " Characteristics of long-term resettlement of soft ground after removal of the preload ", Compression and Consolidation of Clayey Soils, Balkema Press, pp. 75~78.
13. Koppejan, A. W.(1948). "A formula combining the Terzaghi's load - compression relationship and the Buisman secular time effects", Proceedings, 2nd International conf. on Soil Mechanics and Foundation Engrg., Vol.3, pp.32~37.
14. Leonards, G. A. & Ramiah, B. K.(1960). "Time effects in the consolidation of clays", Symposium on Time Rate of Loading in Testing Soils, ASTM, Special Tech. Pub., No.254.
15. Lo, K. Y.(1961). "Secondary compression of clays", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Div., ASCE, Vol.87, No.SM4, Proc. paper 2885, pp.61~87.

16. Marsal, M. J., Sandoval, R. & Hifiart, F.(1950). "Time - deformation curves in clays from valley of Maxico", Ingenieria Civil, Ano II, No. V, Colegio de Ingenierios Civiles de Maxico, Maxico City, VII - 17.
17. Osterberg, J. O.(1957). "Influence values for vertical stresses in semi-infinite mass due to embankment loading", Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol.1, p.393.
18. Pilot, G.(1981). Soft Clay Engineering. Edited by E. W. Brand and R. P. Brenner, Elsevier Scientific Publishing Company, Chapter 9, pp. 635~696.