

성토에 따른 지반의 측방변위와 지표면 융기량

Lateral Displacement and Ground Rising Movement with Soil Embankment

정지철* · 신방웅** · 오세욱***

Jeong, Ji-Cheol · Shin, Bang-Woong · Oh, Se-Wook

Abstract

During and after the construction of embankment on soft ground, consolidation settlements and lateral displacements develop. But generally it's very difficult to predict the magnitude of lateral deformations and the correct distribution of lateral displacements with depth under the toe of embankment because the consolidation and the shear deformations of soft ground occur simultaneously.

This study shows that later displacements of ground surface arise by embankment loading act on soft clay high water contents in laboratory model testing. The results of model test are observed settlement of embankment, amount of maximum rising and displacement of ground surface with loading velocity. The formula were proposed to predict lateral movement by test series

Keywords : Consolidation settlements, Lateral displacements, Model testing, Displacement of ground surface

요 지

최근 연약지반상에 제체 등을 시공 중이나 시공 후에 압밀침하와 수평변위가 발생한다. 그러나 연약지반상의 압밀침하와 전단변위는 동시에 발생하므로 제체선단 아래 깊이에 따른 수평변위량과 수평변위 분포를 정확히 예측한다는 것은 매우 어려운 일이다.

본 연구에서는 고함수비 연약점토 지반에 성토 재하가 발생하는 경우 주변지반의 변위를 실내 모형 실험을 수행하여 연약토의 층후, 재하하중의 크기 및 재하속도 등이 성토본체의 침하량, 주변 지반의 변위, 지표면최대 융기량, 지표면변위 및 영향범위 등을 규명하고자 한다. 이러한 일련의 모형실험에 의하여 측방유동 예측식을 제안하였다.

주요어 : 압밀침하, 수평변위, 모형실험, 지표면 변위

* 정회원 · 장호 공업고등학교

** 정회원 · 충북대학교 총장

*** 정회원 · 충주대학교 건설도시공학과 겸임교수

1. 서론

연약점토상에 도로성토와 같이 띠모양의 구조물을 시공하는 경우, 침하에 따른 성토 선단 침하나 성토하부 지반의 수평변위에 의해 구조물 주변의 지반이 용기하는 등의 문제가 발생하여 매설 구조물이나 주변 구조물의 파괴에 큰 영향을 미치고 있다.

그러나 측방유동은 지반의 변형과 파괴를 동시에 고려하여야 하는 어려움으로 인하여 고전적인 토질역학 접근방식으로는 충분히 규명되기 어려운 특징이 있다.

지금까지의 성토재하에 따른 측방유동에 대한 연구는 성토하중에 의한 교대배면, 말뚝기초에 작용하는 측방유동압에 대한 연구 등이 많이 행해져 왔다. 그러나 이러한 연구는 성토 선단부 아래의 지중변위에 대해 수행된 것이 많으며 성토의 경계를 넘어선 주변지반의 지표면변위 거동에 대한 연구는 많지 않다. 또한, 지금까지의 연구는 지지력, 파괴, 측방변위압에 대한 것이 대부분이고 활동파괴가 발생하지 않는 조건하에서의 성토재하속도와 주변지반의 변위거동 관계에 관한 연구는 충분치 않은 실정이다.

유한요소법의 발달로 인하여 비배수 하중이나 압밀이 발생하는 지반에서 성토에 의한 연약 점토지층의 측방변위에 대한 수치적 해석이 더욱 용이하게 되었다. 그러나, 여러 경우의 경험을 도합하여 추정하면 이러한 수치해석이 매우 어렵다는 것을 알 수 있었다(Poulos 1972, De Beer 1977). 그러므로 측방변위에 대한 실험적인 접근 방법에 대한 연구가 더욱 진행되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 고탍수비 연약점토 지반에 성토 재하가 발생하는 경우 주변지반의 변위를 실내 모형 실험을 수행하여 연약토의 층후, 재하하중의 크기 및 재하속도 등이 성토본체의 침하량, 주변 지반의 변위, 지표면 최대 용기량, 지표면변위 및 영향범위 등을 규명하고자 한다. 또한 이러한 일련의 모형실험에 의하여 향후 실무에 적용 가능한 예측식을 제안하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 대상지반의 특성

시료는 초기 압밀압력 0.2kgf/cm^2 에서 예압밀된 시료를 사용하였으며, 일축압축시험, 삼축압축시험 및 압밀시

험을 수행하여 시료의 역학적 특성을 구하여 표 2에 나타냈다. 시료의 초기합수비, 초기공극비, 포화도는 예압밀 후의 값을 나타낸 것이다

표 1. 시료의 물리·화학적 특성

물성	기호	단위	측정값
초기합수비	w_o	%	78.8~80.2
단위중량	γ_s	g/cm^3	1.80~1.82
액성한계	W_L	%	45.2
소성지수	I_P	-	27.0
초기공극비	e_o	-	2.11
비중	G_s	-	2.68
포화도	S_r	%	95~98

표 2. 시료의 역학적 특성

구분	기호	단위	측정값
일축압축강도	q_u	kgf/cm^2	0.3
비배수전단강도	c_u	kgf/cm^2	0.2
압축지수	C_c	-	0.31
체적압축계수	m_v	cm^2/kgf	0.05

2.2 실험장치

실험장치 및 계측 장치의 개요는 각각 그림 1에 나타내었다. 모델 실험토조의 전면은 지반의 변위를 관찰하기 위하여 연질의 플렉시글라스(plexiglas)로 제작하였으며 크기는 폭 120cm, 높이 40cm, 폭 20cm이다. 벽면마찰을 최대한 줄이기 위하여 토조의 벽면에 실리콘오일을 도포하였으며, 예비실험을 통해 플렉시글라스 벽면 및 두께 방향의 토조 중앙부가 벽면과 같은 측방변위 거동이 되는지 확인하였다. 재하하중은 정재하 방법으로 재하하였고 하중 및 변위를 기록하기 위하여 로드셀을 재하판과 하중장치 사이에 삽입하여 데이터를 획득하였다.

재하판은 10cm×20cm, 두께 6cm의 아크릴제의 판에 배수구멍을 설치하여 재하시 재하판의 변형을 방지하고 배수를 허용하도록 하였다. 계측 장비는 그림 1에 나타난 바와 같이, 재하하중을 측정할 수 있는 로드셀, 재하에 따른 지표면 변위를 측정하기 위한 1/100mm 정도의 다이알게이지, 용량 1kg/cm^2 의 간극수압계로 구성되어 있으며,

시료의 전면에는 지중의 변위를 계측하기 위한 그리드를 설치하여 지중의 변위에 따라 움직이도록 함으로써 측방변위 형태를 측정하고 관찰할 수 있도록 하였다.

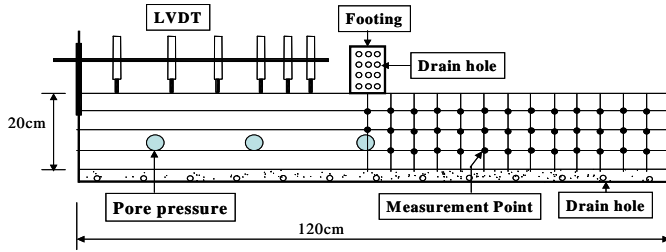


그림 1. 모형실험 장치

2.3 실험방법

실험은 고함수비의 슬러지 상태(준설토 사용)로 실험토조 안에 조심히 투입하여 $P_o=0.2\text{kgf/cm}^2$ 의 압밀압력으로 상부배수가 가능한 재하판을 이용해 7일~1개월간 예압밀한 것이다.

표 3은 각 재하 속도에 따른 재하방식을 나타낸 것으로 토층두께 D_o 와 재하폭 B의 비(D_o/B)를 각각 0.5, 1.0, 2.0로, 재하속도 V_p 는 0.42, 4.2, 42 kgf/hr 로 변화시켜 수행하였다.

재하는 정재하 방법으로 $V_p=0.42\text{kgf/hr}$ 의 실험에서는 하루에 한번씩 10 kgf 의 하중을 재하하여 20일간 총 200 kgf 를 재하한 것이고, $V_p=4.2\text{kgf/hr}$ 의 실험에서는 10 kgf 의 하중을 2.4시간에 한번씩(하루 10번) 재하한 것이며, $V_p=42\text{kgf/hr}$ 의 실험에서는 200 kgf 의 하중을 20번으로 나누어 4.8시간에 재하한 것이다.

재하하중의 크기는 성토고 5m ($P_b=1\text{kgf/cm}^2$)를 기준으로 결정하였으며, $V_p=0.42\text{kgf/hr}$ 의 값은 실공사의 시공속도로 계산하면 약 25 cm/day 이며, 4.2의 재하속도는 급속 시공한 경우를 가정하여 결정하였다. 42 kgf/hr 의 재하속도는 모델토조실험의 실험특성치를 보다 잘 얻기 위해서 결정한 것이다.

표 3. 재하실험

구분	재하속도 V_p (kgf/hr)		
D_o/B	0.42	4.2	42
2.0		Test 1	Test 2
1.0	Test 3	Test 4	Test 5
0.5	Test 6	Test 7	Test 8

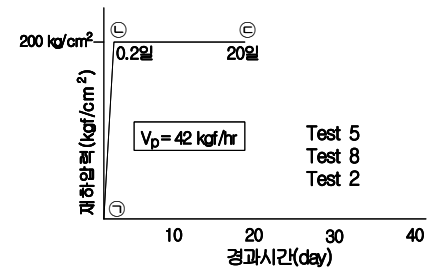
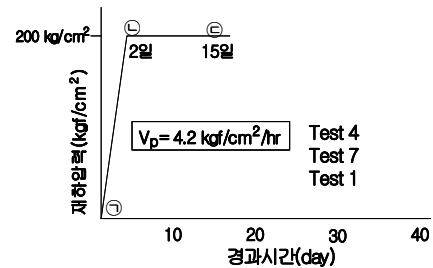
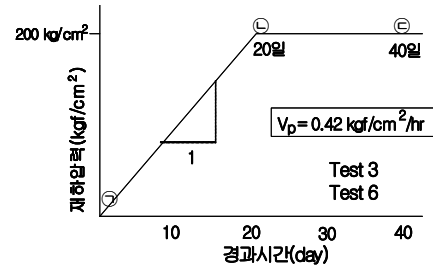


그림 2. 재하속도와 재하압력

3. 실험 결과 및 분석

3.1 재하에 따른 침하율과 공극수압

그림 3은 재하에 의한 재하판 바로 아래 지반의 침하율과 경과시간과의 관계를 나타낸 곡선이다. 침하율은 $\epsilon=(S/D_o)$ 로 나타내고, 여기서 S는 재하판 침하량, D_o 는 초기 토층의 두께이다. 동일한 그림에서 화살표는 재하가 끝난 표시이고 P_b 는 200 kgf/cm^2 의 시점을 나타낸다. $D_o=10\text{cm}$ 의 일정조건은 재하속도 V_p 와의 관계를 보여주고 있으며, V_p 가 작은 쪽이 ϵ 이 작고 V_p 가 크게 됨에 따라 ϵ 은 크게 나타났다.

성토하중재하에 따른 측방변위 거동은 그림 3에서 하중 종료점의 압밀도 $U=90\%$ 의 시점에 착안한 것이다. V_p 가 일정한 조건에서 D_o 를 5, 10, 20 cm 로 변화시킨 경우 재하

초기에는 층두께가 작은 Test 7의 압밀침하가 현저히 나타난다. 이러한 층두께의 변화에 의한 판 바로 아래의 압밀량의 차이에 의한 것으로 사료된다. 그러나 압밀종료후의 침하량은 층두께에 관계없이 근사한 경향을 나타내고 $\epsilon - \log t$ 곡선은 거의 중복되고 있다.

그림 4는 하중재하 중(그림 2의 ㉠~㉡간)의 과잉공극수압 발생율($\Delta U/\Delta p \times 100(\%)$)을 나타낸 것이다. 과잉공극수압의 발생은 재하판 중앙부에서 가장 크게 측정되었고, 재하부분으로부터 떨어질수록 작게된다. 그림 4에서 재하 중앙으로부터 약 20cm떨어진 위치에서 재하압력의 약 3% 정도의 공극수압이 발생되고 있다. 재하속도가 증가함에 따라 과잉공극수압도 증가되며, 완속재하조건인 Test 3의 경우 재하판 중앙 아래에서 과잉공극수압 발생율은 약 20% 정도로 비교적 작은 값을 나타내고 있다. 완속재하의 경우 재하판 바로 아래의 지반은 비배수상태에 가까운 조건이 되기 때문에 판단된다.

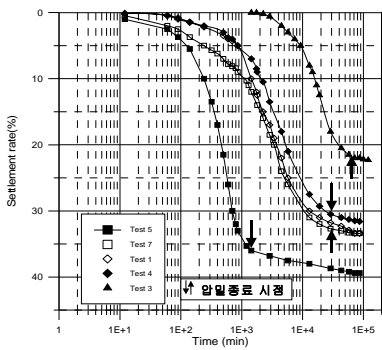


그림 3. 경과시간에 따른 침하율

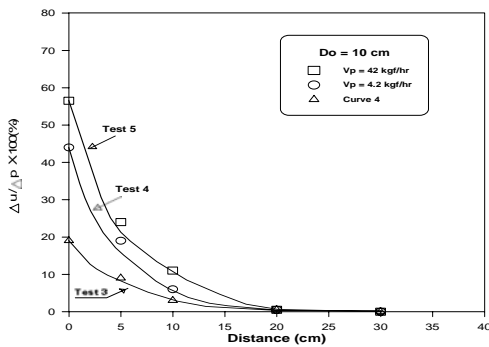


그림 4. 재하에 의한 공극수압의 분포

3.2 주변지반내의 변위거동

재하에 따른 주변지반내의 변위거동은 국수 그리드를 설

치하고 재하 후 그리드의 변위량을 좌표로 정하여 구했다. 지반내의 변위거동은 전체적으로 재하판 부근의 연직 아래 부분의 변위가 보여지면 재하판으로부터 떨어진 곳에서는 수평방향의 변위가 되고 얼마 후 상향의 변위로 된다. 그리고 상향의 변위를 나타내고 있는 근접 지표면의 융기는 최대치를 나타내고 있다.

이 지반내의 거동변위와 재하속도(V_p)와의 관계에서 보면 재하속도가 작은 경우(Test 3)에는 재하판 부근의 1차원 연직 아래 방향의 움직임이 분명하게 발생하고 있으며, 측방변위 지표면 융기량은 작게 된다. 한편 재하속도가 큰 경우(Test 5)는 재하판 끝의 지반변위는 측방변위가 크게 나타나고, 지표면 융기량도 크게 나타난다.

표 4. 실험결과

실험구분		D/B=2.0		D/B=1.0		D/B=0.5			
항 목	기호	1	2	3	4	5	6	7	8
초기 토층 두께 (cm)	D_o	20	20	10	10	10	5	5	5
재하판 폭 (cm)	B	10	10	10	10	10	10	10	10
재하속도 (kgf/hr)	V_p	4.2	42	0.42	4.2	42	0.42	4.2	42
재하판 침하량 (cm)	S_o	8.4	11.4	3.0	4.4	5.9	1.6	2.3	3.3
지표면 최대 융기량(cm)	δ_{v-max}	1.2	1.4	0.17	0.49	0.90	0.1	0.3	0.5
지표면 최대융기 발생거리(cm)	L_2	30.2	18.2	27	20.6	13.8	14.4	11.9	9.4
지표면 변위영향 범위(cm)	L_3	58.4	35	51	42.5	33.5	29.8	24.5	18.8

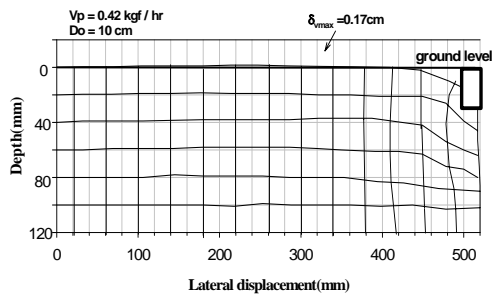
3.3 지표면 융기량

지표면의 변위 거동은 지반 지표면에 1/100mm 까지 읽을 수 있는 다이알게이지를 설치하여 측정하였다. 재하 종료시점의 지표면 변위를 재하판 중심으로부터 거리와의 관계를 그림 5, 6, 7에 나타내었다. 그림 6은 D_o 가 일정하고 V_p 를 변화시킨 경우이고, 그림 7은 V_p 가 일정하고 D_o 를 변화시킨 실험 케이스이다. 재하판으로부터 떨어짐에 따라 지표면의 융기가 현저하게 되고 최대 값을 나타낸 후에 서서히 감소하며, 지표면 변위량은 0이 된다.

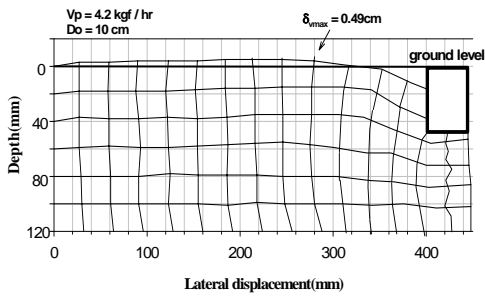
그림 5는 지표면 변위거동과 지중 수평변위를 상세하게 볼 수 있으며, 그림 6에 나타난 바와 같이 D_o 가 일정하고 재하속도를 변화시킨 실험에서는 재하속도가 작을수록

제체선단의 침하영역이 커지는 현상이 나타나고, 지표면 융기량은 작으며, 지표면 변위 영향범위는 크게 나타난다.

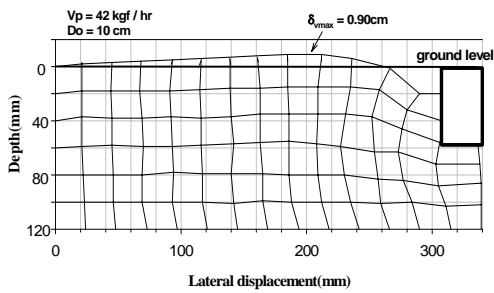
또한, 재하속도가 커지게 되면 선단침하는 작고 지표면 융기량은 크게 나타나며, 지표면 변위거동 범위는 작게 된다. 그림 7에서 재하속도가 일정한 D_o 와의 관계에서 지표면 변위거동을 보면, 재하관 부근에 발생한 선단침하 D_o 가 변화하여도 거의 같은 정도가 된다. 지표면 융기량 및 영향범위는 D_o 가 증가함에 따라 모두 증가하게 된다.



(a) $V_p = 0.42$ kgf/hr



(b) $V_p = 4.2$ kgf/hr



(c) $V_p = 42$ kgf/hr

그림 5. 재하종료 후 지반변위 거동

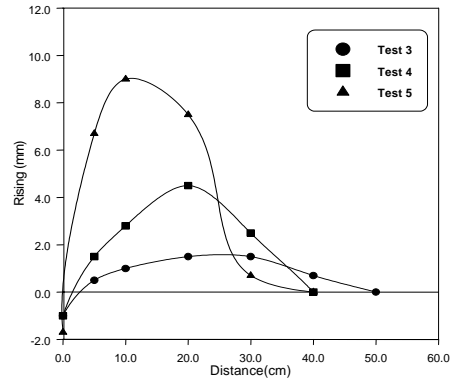


그림 6. 지표면 융기량 및 범위 ($D_o/B=1.0$)

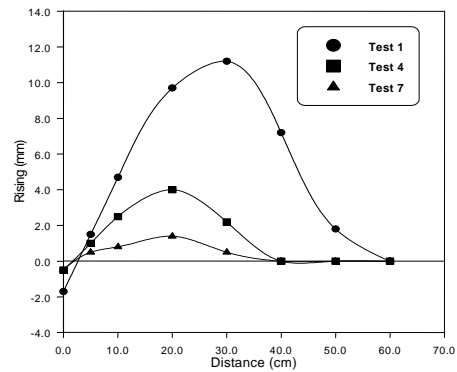


그림 7. 지표면 융기량 및 범위 ($V_p=4.2$ kgf/hr)

3.4 재하속도에 의한 영향

지표면 변위를 추정하는 4가지 값 S_o , δ_{v-max} , L_2 및 L_3 를 초기 토층의 두께 D_o 로 정규화하고, 재하속도와의 관계에서 정리한 것을 그림 8~11에 나타냈다.

그림 8의 재하관 침하량(S_o)에 대해서는 각 재하속도에서 측방변위를 구속한 일차원 압밀시험을 실시하고 결과를 비교하였다. 그림 8에서 침하변형률은 모형토조실험에서는 재하속도에 의한 영향이 현저하게 나타나고, V_p 가 증가함에 따라 침하변형률도 크게 나타났으나 측방변위를 구속한 압밀시험 결과에는 그 영향은 거의 나타나지 않는다.

S_o , δ_{v-max} 에 대해서는 D_o 로 제거하여 정규화하고 백분율로 나타내는 것에 의해서 식 (1)과 식 (2)의 근사식으로 각각 표시할 수 있다. L_2 와 L_3 에 대해서도 같은 양상으로 $D_o/B=0.5, 1.0, 2.0$ 에서 직선식을 구하였다.

얻은 직선식 $L/D = a \times \log V_p + b$ 의 직선의 기울기를 나타내는 계수 a 는 D_o/B 에 대해 일정 값을 나타내고, 또한 $V_p=0.01$ /hr일 때의 큰 값을 나타내는 정수부 b 와

D_o/B 와의 관계를 직선 근사식으로 나타낸 L_2 와 L_3 는 이하의 식 (3)과 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$(S_o/D_o) \times 100(\%) = 6 \cdot \log V_p + 35 \quad (1)$$

$$(\delta_{v-\max}/D_o) \times 100(\%) = 2.6(V_p)^{0.6} \quad (2)$$

$$(L_2/D_o) \times 100(\%) = -29 \cdot \log V_p - 29(D_o/B) + 246 \quad (3)$$

$$(L_3/D_o) \times 100(\%) = -38 \cdot \log V_p - 40(D_o/B) + 478 \quad (4)$$

여기서, S_o : 재하종료시점에서 재하판 침하량(cm)

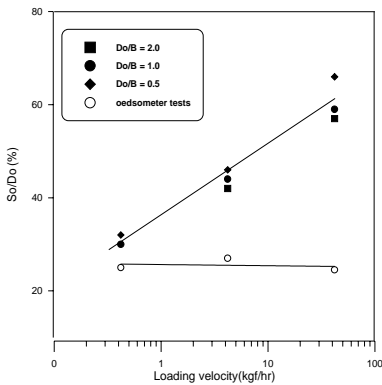


그림 8. 침하율과 재하속도의 관계

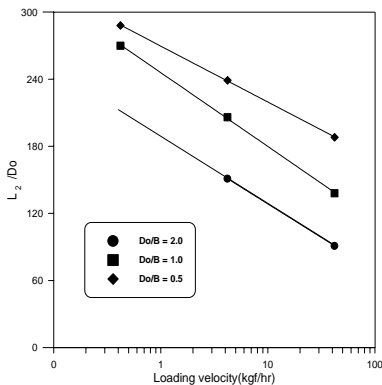


그림 9. 지표면 최대용기거리와 재하속도의 관계

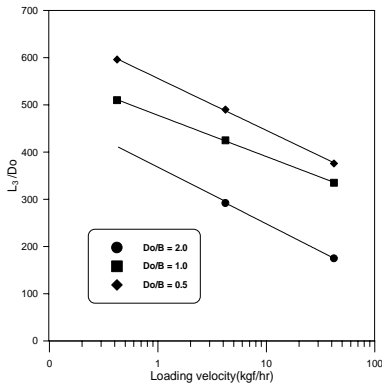


그림 10. 지표면 변위 영향범위와 재하속도의 관계

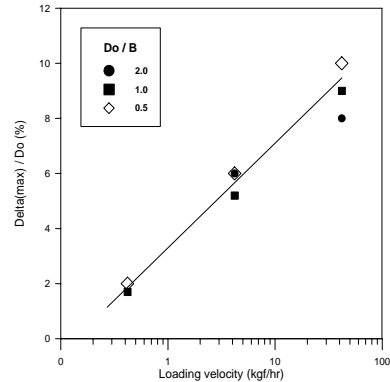


그림 11. 지표면 최대용기량과 재하속도와의 관계

4. 결론

- (1) 재하판 바로 아래 지반의 침하 변형률 ϵ 은 재하속도의 영향을 현저하게 받고 재하속도가 크면 침하변형률도 크게 나타난다.
- (2) 재하속도가 작은 경우 재하판에 근접해서 발생하는 일차원 침하가 뚜렷하게 나타나하고 수평방향 흙의 움직임은 작다. 또한 제체선단 침하영역이 크게 나타나고 지표면 용기량은 작다.
- (3) 지표면 용기의 영향 범위는 재하속도가 작을수록 그 범위는 넓게 나타나고, 토층의 두께가 클수록 지표면 용기량 및 지표면 변위 영향범위가 크게 된다.
- (4) 침하량, 지표면 용기량, 선단침하영역은 동일한 재하속도일 경우 연약토층의 두께로 정규화시켜 비교하면 층 두께의 영향을 받지 않는다는 사실을 알 수 있다. 또한 최대 용기 발생 위치 및 지표면변위 영향범위도 성토폭과 연약토층의 두께에 영향을 받을 수 있다.
- (5) 하중재하에 따른 주변지반의 변위거동 예측은 재하판 침하량, 지표면 최대 용기량, 지표면 최대 용기 발생 거리, 지표면 변위 영향범위의 4가지 특성 값을 나타내고, 식 (1)~(4)의 예측 실험식을 얻었다.

(접수일자 : 2004년 5월 10일)

참 고 문 헌

1. 정형식, 이승호, 황영철(1993), 제방축조에 의한 연약점토지반의 변형해석에 관한 연구, 한국지반공학회지, 제9권 제2호, pp.55~62.
2. 조성민(1998), 국내 연약 점성토 지반의 성토 재하시 변형 특성 분석, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
3. Atsushi Iizuka., and Hideki Ohta.(1987), A Determination Procedure of Input Parameters in Elasto-Viscoplastic Finite Element Analysis, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp.71~87.
4. De Beer, E., and Wallays, M.(1972), Forces Induced in Piles by Unsymmetrical Surcharge on the Soil Around the Piles, 5th ECSMFEE, Madrid, pp. 325~332.
5. Marche, R., and Chapuis, R.(1974), Controlede Stabillite des Remblais Parramesu des Desplacements Horizontaux, Canadian Geotechnical Journal, Vol.11, No.1, pp.182~25.
6. Poulos H.G.(1972), Difficulties in prediction of horizontal deformations of foundations, ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 98(SM8), pp.843~848.
7. Tavenas, F., Mieussens, C. and Bourges, F.(1979), Lateral Displacements in Clay Foundations under Embankments, Canadian Geotechnical Journal, Vol.16, pp.532~550.