

재하속도와 지반용기 특성의 상호관계

The Relationship between Loading Velocity and Ground Heaving Characteristics

오세욱*

Oh, Se-Wook

Abstract

The purpose of this study is to analyze lateral displacement behavior of clay layers in case of the banking in soft ground through model tests. Seven model tests varying with thickness of soft clay and loading velocity are performed to correlate between ground heaving and loading velocity. In case of low loading velocity, vertical settlement below loading plate and small ground heaving are obviously observed. In case of the high loading velocity, it is shown that both soil displacement at the end of a loading plate and surface heaving are large. In addition, the calculated displacements show good agreement with three cases of field measurements in clay with high moisture contents so that we can predict the range of heaving area and the amount of heaving.

Keywords : Lateral displacements, Surface heaving, Loading velocity, Model tests

요 지

본 연구의 목적은 연약점토층에 성토하는 경우 하중속도에 따른 수평변위거동을 모형실험을 이용하여 분석하고자 하는 것이다. 모형실험은 연약점토층의 두께와 하중속도를 고려한 7가지 경우로 구성되어있으며, 모형실험의 결과로부터 지반변위 거동과 재하속도와의 관계를 규명하였다. 연약토의 두께와 재하속도에 변화를 주어 모형실험을 실시한 결과, 재하속도가 작은 경우에는 재하판 부근의 1차원 연직 아래 방향의 움직임이 분명하게 발생하였으며, 지표면 용기량은 작게 발생되었다. 재하속도가 큰 경우에는 재하판 끝의 지반변위는 측방변위가 크게 나타나고 지표면 용기량도 크게 발생하였다. 현장적용성을 확인하기 위하여 지표면 변위가 관측된 3가지 사례에 대하여 비교 검토한 결과 고탍수비 점토지반에서 실측 값과 계산 값이 비교적 잘 일치하였고, 지표면 용기영역과 용기량 등의 변위를 예측할 수 있다는 것을 알았다.

주요어 : 수평변위, 지표면용기, 재하속도, 모형실험

1. 서론

최근 고속도로망의 정비, 도시근교의 택지개발 등에 있어서는 잘 이용하지 않던 습지나 늪의 고함수비 연약점토 위에도 성토 시공이 시행되고 있다. 고함수비 연약점토상에 도로성토와 같은 대상(띠모양)의 성토재하가 이루어지는 경우 양측의 주변지반에 성토침하에 따른 인입 침하(성토 선단부에서 밑으로 빨려 들어가는 침하)나 성토아래 지반의 측방으로의 밀림에 의한 지반의 융기 등이 발생하여 주변 구조물의 경사나 매설 구조물의 파괴 등에 영향을 미치고 있다.

지금까지의 성토재하에 따른 측방유동에 대한 연구는 성토하중에 의한 교대배면, 말뚝기초에 작용하는 측방유동압에 대한 연구 등이 많이 행해져왔다(Poulos H.G., 1972). 그러나 이러한 연구는 성토 선단부 아래의 지중변위에 대해 수행된 것이 많으며 성토의 경계를 넘어선 주변지반의 지표면 변위거동에 대한 연구는 많지 않다.

또한, 과거의 연구는 지지력, 파괴, 측방변위압에 대한 것이 대부분이고 활동파괴가 발생하지 않는 조건하에서의 성토재하속도와 주변지반의 변위거동관계에 관한 연구는 충분치 않은 실정이다(Tavenas, 1979). 본 연구에서는 고함수비 연약점토 지반에 성토 재하가 발생하는 경우 주변지반에의 측방변위를 실내 모형토조 실험에 의해 실험적으로 검토하였다.

이 실험에 의하여 연약토의 종류, 층후, 재하하중의 크기 및 재하속도 등이 성토본체의 침하량, 주변 지반의 인입 침하량, 지표면 최대융기량, 지표면 변위 및 영향범위에 미치는 영향 등을 규명하였다. 또한 지반보정계수를 도입하여 지반변위 예측식을 제안하고 이를 현장계측 결과와 비교하였다.

2. 지반의 특성

2.1 대상지반의 특성

표 1은 대상지반에 대한 기본물성실험을 통해 얻은 결과이다. 시료는 초기 압밀압력 0.2 kgf/cm²에서 예압밀된 시료를 사용하였으며, 일축압축시험, 삼축압축시험 및 압밀시험을 수행하여 시료의 역학적 특성을 표 2와 같이 얻었다. 시료의 초기함수비, 초기공극비, 포화도는 예압밀 후의 값을 나

타낸 것이다.

본 연구에서는 보완실험과 보정계수를 도입하여 수정된 측방변위 예측식을 제안하고 이를 계측결과와 비교하였다(정지철 등, 2004).

표 1. 시료의 물리·화학적 특성

물성	기호	단위	측정값
초기함수비	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

구 분	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

그림 1은 본 실험에 사용된 모형실험장치로 토조의 전면은 지반의 변위를 관찰하기 위하여 연질의 플렉시글라스(plexiglas)로 제작하였으며 크기는 길이 120cm, 높이 40cm, 폭 20cm이다. 벽면마찰을 최대한 줄이기 위하여 토조의 벽면에 실리콘 오일을 도포하였으며, 예비실험을 통해 플렉시글라스 벽면 및 두께 방향의 토조 중앙부가 벽면과 같은 측방변위거동이 되는지 확인하였다. 재하판은 10cm×20cm, 두께 6cm의 아크릴제의 판에 배수구멍을 설치하여 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 1kgf/cm²의 간극수압계로 구성되어 있으며, 시료의 전면에는 지중의 변위를 계측하기 위한 그리드를 설치하여 지중의 변위에 따라 움직이도록 함으로써 측방변위 형태를 측정할 수 있도록 하였다.

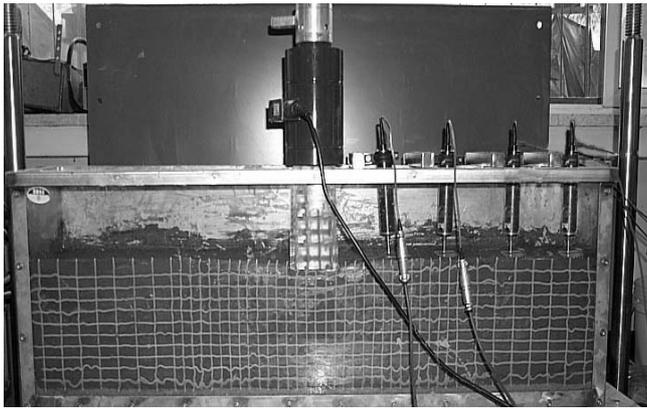


그림 1. 모형실험 장치

3. 결과 및 분석

3.1 재하속도에 따른 지반의 변위특성

그림 2~그림 4는 재하속도에 대한 침하-최대용기량, 침하-최대용기 발생거리 및 침하-최대용기 범위의 관계를 나타낸 것이다. 그림 5에서는 최대용기량과 침하량의 변화 경향을 표현해 보기 위해 최소자승법을 이용한 직선 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석 결과 직선의 기울기는 지반상태에 따라 0.11에서 0.26까지의 범위를 갖고 분포하고 있으며 평균 0.18, 표준편차 0.04의 값을 나타내고 있다.

만일 연약지층이 전체적으로 정규압밀 상태로 존재하는 경우 그림 2에 정규압밀선으로 표시한 바와 같이 기울기가 1인 직선으로 표현할 수 있다. 그림 2에 나타나 있듯이 재하속도가 느린 경우 시공 초기 배수압밀 상태임을 알 수 있다. 반면 시공 속도가 클수록 비배수 압밀조건에 가까운 경향을 나타내고 있다. 지층이 정규압밀선에 가까운 상태로 존재하게 되면 지표면 용기량도 매우 크게 분포하게 된다. 그림 3는 침하와 지표면 최대용기량 발생위치와의 관계를 나타낸 것으로 시공속도가 증가함에 따라 정규압밀선에 가까운 거동을 보이고는 있으나 용기량의 경우에 비해 영향은 현저하게 받고 있음을 알 수 있다.

그림 4는 침하와 지표면 변위범위의 관계를 도시한 그림으로 마찬가지로 시공속도가 증가함에 따라 정규압밀선에 가까운 거동을 보이고는 있으나 침하-최대용기량의 경우나 침하-최대용기량 발생거리에 비해 영향은 적게 받고 있음을 알 수 있다.

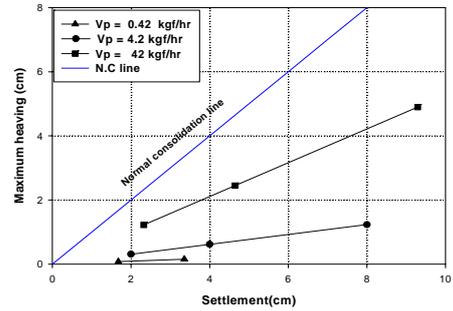


그림 2. 최대용기량과 침하량

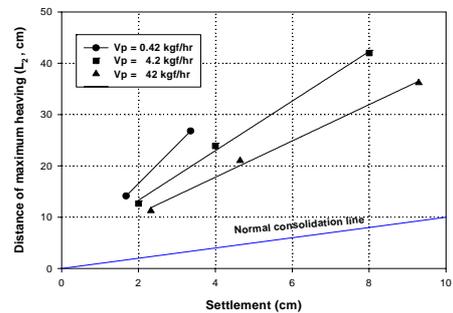


그림 3. 지표면 최대용기량 발생거리와 침하량

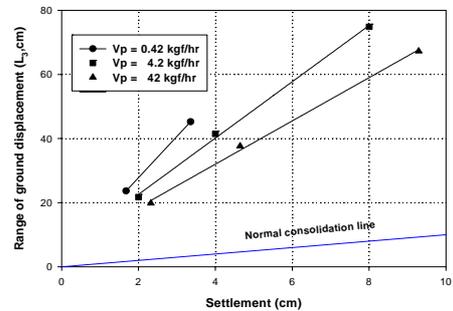


그림 4. 지표면 변위발생영역범위와 침하량

3.2 지반변위 예측

3.2.1 지반거동 예측식

지표면 변위를 추정하는 4가지 값 침하량(S_0), 최대용기량(δ_{v-max}), 지표면 최대용기발생거리(L_2) 및 지표면 변위영향 범위(L_3)를 초기 토층의 두께(D_0)로 정규화하고, 재하속도와 관계에서 정리하여 다음과 같은 식을 도출하였다(정지철, 2004).

$$(S_0/D_0) \times 100(\%) = 6 \cdot \log V_p + 35 \quad (1)$$

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

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

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

여기서,

D_o : 초기 토층 두께 (cm)

B : 재하판 폭 (cm)

V_p : 재하속도(kgf/hr)

S_o : 재하판 침하량(cm)

$\delta_{v-\max}$: 지표면 최대 용기량(cm)

L_2 : 지표면 최대용기발생거리(cm)

L_3 : 지표면 변위영향 범위(cm)

3.2.2 흙의 압밀특성 및 재하하중의 크기에 따른 보정계수

지표면 변위거동은 흙의 종류 및 재하하중의 크기(p_p)의 영향을 받으므로 흙의 종류와 재하하중의 크기를 고려하여 보정계수를 도출하였다.

지표면 변위곡선을 나타내는 4가지 특성 값 중 침하량과 지표면 최대용기량은 재하에 따른 즉시적인 측방변형과 그 후의 압밀침하에 의한 것도 있다(紫田徹 등, 1980). 측방변형은 재하속도에 의해 주로 영향을 받는 것으로 고려하였고, 압밀침하에 대해서는 흙의 종류와 재하하중의 크기를 고려하였다.

지표면 최대 용기발생거리와 지표면 변위 영향 범위에 대해서는 재하단계에 따른 지반용기를 관측한 시험결과로부터 재하하중의 크기에 따른 영향은 최종 지반변위에 큰 영향을 미치지 않으므로 그 영향은 고려하지 않았다. 따라서, 침하량과 지표면 최대용기량에 관한 것은 흙의 종류 및 재하하중의 영향을 받게 되므로 모형실험 조건에서 현장의 특성을 반영하기 위해서는 지반의 압축지수(c_c)를 보정하는 것이 필요하다.

본 실험에 이용된 시료의 특성 값($c_c=0.81$, $e_o=2.11$), 하중재하 조건(p_p 는 p_o 의 5배, $p_p=98.1$ kPa)에 기초하여 아래의 식(6)에 표시하였고, 보정계수(α)를 결정하였다.

이 방법은 우선 식(5)와 같이 압축지수를 이용하여 침하량 산정식으로부터 본 실험에 사용한 조건(흙의 물성치 및 재하조건)에서 침하량과 일반식

에 표시된 침하량 비를 보정계수(α)로 가정하였다.

보정계수 α 는 식(5)를 식(6)처럼 변형하여 구한다. 이렇게 제안한 예측식은 먼저 구한 재하에 따른 예측실험식(5)와 식(6)에 보정계수를 곱한 것이고, 흙의 종류 및 재하하중을 고려한 지표면 변위 거동의 예측식이 된다. 여기서, 예압밀압력(p_o)와 압밀항복응력(p_c)의 값은 같다고 가정하였다. 또한 실험 데이터와의 비교는 동일한 압밀도($U=90\%$)의 시점에서 수행한 것이다.

$$\frac{c_c}{1+e_o} \log(p_p/p_c) = \alpha \left\{ \frac{0.81}{1+2.11} \cdot \log(98.1/19.6) \right\} \quad (5)$$

α 에 대하여 변형하여 정리하면

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{6.5c_c}{1.94(1+e_o)} \cdot \frac{\log(p_p/p_c)}{\log(98.1/19.6)} \\ &= \frac{2.68}{1+e_o} \times c_c \times \log(p_p/p_c) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,

α : 보정계수

c_c : 지반의 압축지수

e_o : 초기 공극비

p_p : 재하하중(kPa)

p_o : 예압밀압력(kPa)

p_c : 압밀항복응력(kPa)

3.2.3 지반거동 예측 제안식

모형토조실험의 결과로부터 지반변위 거동과 재하속도와의 관계를 실험식(1)~(4)에 나타냈고, 흙의 종류와 재하하중의 크기에 대한 보정정수를 식(6)에 나타냈다. 이를 검토 분석하여 현장에서 성토재하에 따르는 주변지반 지표면의 변위거동을 식(7)~(10)에 제안하였다.

$$S_o = \alpha \cdot D_o (6.44 \log V_p + 56) / 100 \quad (7)$$

$$\delta_{v-\max} = \alpha \cdot D_o \{ 3 \cdot (V_p)^{0.4} \} / 100 \quad (8)$$

$$L_2 = D_o \{ -39 \log V_p - 30(D_o/B) + 304 \} / 100 \quad (9)$$

$$L_3 = D_o \{ -80 \log V_p - 90(D_o/B) + 578 \} / 100 \quad (10)$$

여기서,

- α : 흙의 종류·재하하중에 의한 보정계수
- V_p : 재하속도(kgf/hr)
- D_o : 초기 토층 두께
- B : 재하폭(cm)

3.2.4 현장계측결과와 예측식과의 비교

제안식의 유용성을 검증하기 위하여 실제 공사에서 계측한 보고서에 있는 고탍수비 지반의 성토재하에 의한 침하 및 주변지반의 변위거동의 데이터 3개의 예에 대하여 이번 제안의 지표면 변위거동 예측식(7)~(10)을 이용하여 비교·검토하였다.

실측 데이터는 재하속도가 사례와 다르기 때문에 모형토조 실험과 비교하여 성토 중앙부 지반의 시간~침하량 관계보다 압밀도 $U=90\%$ 전후의 점에서 비교하는 것으로 하였다. 각 사례의 성토침하량 및 지표면 용기량 등은 보고서의 도표로부터 얻은 것도 있다.

사례 1(吉國洋 등, 1981)은 일본 東名 고속도로에서 수행한 시험 성토의 계측 데이터이다. 함수비 350~400%의 고탍수비 점토층($D_o=5.35m$)이 퇴적된 지반에 폭 $B=26.2m$ 높이 $H=4.5m$ 의 성토시공이 17일간 행하여졌다. 재하속도를 단위시간당으로 계산하면 $V_p=0.20$ kPa/hr가 된다. 성토재하종료 시점의 압밀도는 $U=70\%$ 이고 재하종료로부터 30일 후의 시점에서 $U=90\%$ 가 된다.

성토체체의 침하량을 지표로부터 30cm 위치에 설치한 침하판으로 측정하였으며 주변지반의 변위를 성토 법면 끝으로부터 20m 정도까지 변위말뚝으로 계측하였다.

그림 7은 예측식을 적용한 결과와 실측값을 비교한 결과를 보여주고 있으며, 연직침하량과 지표면 최대 용기량은 예측식에 의해 산정된 값에 비해 각각 약 25%정도의 차이를 보이고 있으나 안정적인 측면에서 비교적 잘 일치한다고 판단된다. 영향범위는 실측값과 예측값이 거의 정확하게 일치하고 있어 용기 영향범위를 파악하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

사례 2(吉國洋 등, 1981)는 주택조성에 대한 시험성토 계측사례이다. 함수비 200~300%의 점토가 혼합된 고탍수비 점토층($D_o=3.0m$)이 퇴적된

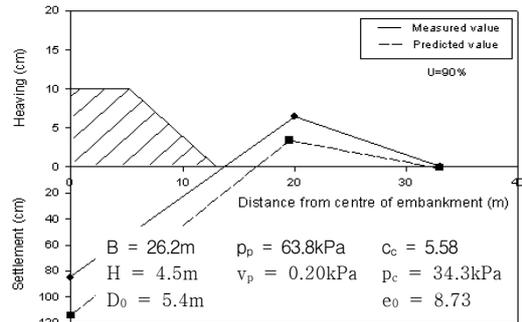


그림 7. 현장계측결과와 예측식의 비교(사례 1)

지반에 폭 $B=10m$ 높이 $H=1.7m$ 의 성토시공을 8일간 시공하였다. 재하속도를 단위시간당으로 계산하면 $V_p=0.19$ kPa/hr가 된다. 성토재하종료 시점의 압밀도는 $U=80\%$ 이고 재하종료로부터 26일 후의 시점에서 $U=93\%$ 가 된다. 성토 중앙과 사면 머리 부근에 침하계를, 법면 선단으로부터 10m까지의 범위에 지중변위계를 설치하여 관측하였다. 본 사례에 있어서도 실측값과 추정값이 비교적 일치하고 있으며, 정도가 높은 것으로 나타났다.

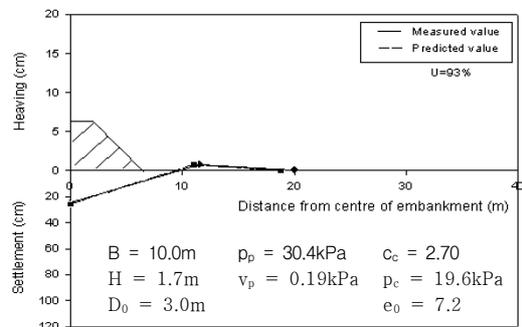


그림 8. 현장계측결과와 예측식의 비교(사례 2)

사례 3(吉國洋 등, 1981)은 倉敷市内에서 수행한 시험 성토의 계측사례이다. 대상지반은 함수비 30~50%의 연약 점토층($D_o=5.9m$)이고 이 지반상에 폭 $B=22m$, 높이 $H=5m$ 의 시험성토시공을 53일간 행하였다. 재하속도를 단위시간당으로 계산하면 $V_p=0.07$ kPa/hr가 된다. 성토재하종료 시점의 압밀도는 $U=75\%$ 이고 재하종료로부터 20일 후의 시점에서 $U=90\%$ 가 된다. 성토 중앙과 사면머리 부근에 침하판을, 비탈면 선단으로부터 20m의 범위에 대하여 지표면 변위 말뚝 및 지중 변위계를 설

치하여 관측하였다. 본 사례에 제안한 예측식을 적용한 것이 그림 9에 있다. 본 사례에서는 본 예측식을 실트지반에 적용한 것이 있으며, 동일한 그림에 나타난 것과 같이 성토 침하량은 실측 값은 40cm, 예측식에 의한 값은 38.2cm로 거의 유사하게 나타났으며 최대 융기가 발생하는 거리의 경우 실측 값은 성토사면 선단으로부터 약 2m, 예측 값은 8.5m로 나타나 오차가 발생하였다. 그러나 지반 융기가 발생하는 범위는 일치하고 있음을 알 수 있다.

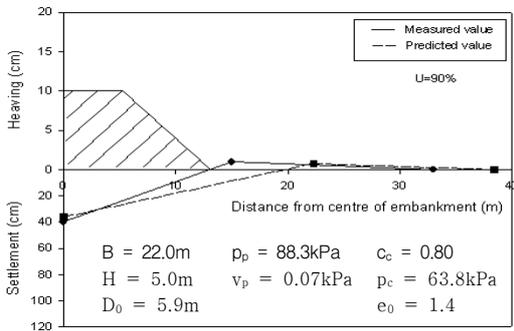


그림 9. 현장계측결과와 예측식의 비교(사례 3)

지표면 변위가 관측된 3가지 사례에 대하여 비교 검토한 결과 고함수비 점토지반에서 실측값과 계산 값이 비교적 잘 일치하였고, 지표면 융기영역과 융기량 등의 변위를 예측할 수 있다는 것을 알았다.

성토침하량에 관한 예측 값이 대체로 작은 값이 되는 것은 본 모형실험의 조건이 성토본체의 변형을 허용하지 않은 조건에 대하여 수행하였기 때문인 것으로 사료된다. 또한 대상토를 고함수비 점토에 교반하여 실험·검토하여 사례3의 경우와 같이 실트지반에의 적용도 압축지수(c_c)를 보정함으로써 개략적인 변위를 추정하는 가능하다는 것을 확인하였다.

4. 결론

하중재하에 따른 고함수비 지반의 측방변위 거동 예측방법을 목적으로 한 실내모형실험을 수행하여 주변지반의 지표면 변위 예측식을 제안하였다. 그리고 현장계측치와 예측식에 의한 지표면 변위량을 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 도

출하였다.

- (1) 고함수비 지반에서 하중재하에 따른 주변지반의 변위거동 예측은 재하판 침하량, 인입 침하영역, 지표면 최대 융기량, 지표면 최대 융기발생 거리, 지표면 변위 영향범위의 5가지 특성 값을 나타내고, 흙의 종류 및 재하 하중의 크기를 고려하여 검토한 결과 다음과 같은 예측 실험식을 얻었다.

침하량

$$S_o = \alpha \cdot D_o (6.44 \cdot \log V_p + 56) / 100 \quad (7)$$

지표면 최대 융기량

$$\delta_{v-max} = \alpha \cdot D_o \{3 \cdot (V_p)^{0.4}\} / 100 \quad (8)$$

지표면 최대 융기발생거리

$$L_2 = D_o \{-39 \cdot \log V_p - 30(D_o/B) + 304\} / 100 \quad (9)$$

지표면 변위영향 범위

$$L_3 = D_o \{-80 \cdot \log V_p - 90(D_o/B) + 578\} / 100 \quad (10)$$

- (2) 제안한 주변 지반 지표면 변위 거동 예측식 (7)~(10)를 이용하여 현장에 대한 관측 데이터 3개 사례와 비교·검토하였다. 대비 검증은 현장에 대한 성토 중앙부의 최종 침하량에 대한 압밀도 $U=90\%$ 부근의 데이터를 이용한 예측식과 대비하였다. 그 결과 사례 1)의 경우 침하량과 융기량의 차이는 약 25%정도 발생하는 것으로 나타났으나 변위 영향범위는 거의 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 사례 2)와 사례 3)의 경우 침하량과 지반 변위가 발생하는 범위를 $\pm 3\%$ 이내에서 정확하게 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

- (3) 제안된 예측식은 함수비 100%이상인 고함수비 점토지반에서 성토시공 속도와 지반변위와의 관계를 예측하는데 적합성이 좋을 수 있다.

- (4) 향후 많은 시공 및 계측사례를 분석하여 고함수비 연약지반에서 시공속도가 지반변위에 미치는 영향을 규명할 필요가 있다.

(접수일 : 2006. 3. 7. 심사완료일 : 2006. 5. 11.)

참고문헌

1. 정지철, 신방웅, 오세욱(2004), 성토에 따른 지반의 측방변위와 지표면 융기량. 한국지반환경공학회 논문집, 제5권 제2호, pp. 63~69.
2. 정지철, 이봉직, 오세욱, 신방웅(2004), 체체의 시공속도가 압밀침하 및 지표면 융기량에 미치는 영향. 한국지반환경공학회 학술발표회 논문집, pp. 203~209.
3. 정형식, 이승호, 황영철(1993), 제방축조에 의한 연약점토지반의 변형해석에 관한 연구. 한국지반공학회지, 제9권 제2호, pp. 55~62.
4. 吉國洋, 井上年行, 住岡宣博, 原久夫(1981), 現場計測法による壓密沈下豫測法の特性. 土と基礎, Vol. 29, No. 8, pp. 7~13.
5. 紫田徹, 關口秀雄(1980), 盛土基礎地盤の彈粘塑性舉動解析と破壞豫測. 土木學會論文報告集, 第301號, 9月, pp. 93~104.
6. Katsuhiko Arai, Hideki Ohta., and Keisuke Kojima.(1984), Estimation of Soil Parameters Based on Monitored Movement of Subsoil Under Consolidation, Soils and Foundations. Vol. 24, No. 4, pp. 95~108.
7. 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.
8. Tavenas, F., Mieussens, C. and Bourges, F.(1979), Lateral Displacements in Clay Foundations under Embankments. Canadian Geotechnical Journal, Vol.16, pp. 532~550.