

성토가 주변지반에 미치는 영향에 대한 해석적 검증과 실측치의 비교분석 Comparison between 2D FEM Analysis using Elastic (visco)-plastic model and In-situ Behavior

황 성춘¹⁾, Seong-Chun Hwang, 김 승렬²⁾, Seung-Ryul Kim.

1) 경주대학교 건설환경시스템공학부 전임강사, Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Kyongju Univ.

2) (주) 에스코 컨설턴트 대표이사, President, Esco Consultant Co. Ltd.

SYNOPSIS : In this paper, comparison of the observed and the predicted ground deformations due to the construction of road embankment with peck drain near the construction site was made. Measurement of the ground deformation at the gasoline stand due to the construction of road embankment was made and it was compared with the predicted deformation results of Finite Element Method analysis made with Elasto-plastic and Elastic visco-plastic models. A well agreement was obtained between the measured and predicted ground deformations.

Key Words : Consolidation, Soft Clay, FEM, Lateral Displacements, Settlements

1. 서론

일반적으로 우리나라의 서해안 및 남해안과 4대강 하구부에는 광범위하게 연약한 점성토 지반이 분포하고 있다. 특히, 이들 지역에 자리잡고 있는 연약 점성토 지반은 다른 나라의 점성토 지반과 달리 실트성 점토를 많이 포함하고 있는 것이 그 특징이라고 말해진다. 이와 같은 점성토 지반은 역학적으로 매우 작은 전단 강도를 가지며, 동시에 매우 큰 압축성을 나타내기 때문에 공학적으로 불안정한 지반으로 분류하여 과거의 여러 건설 공사에서 가능한 이용을 회피해 온 것이 사실이었다. 그러나, 현재와 같이 인구의 급속한 증가와 이에 따른 도시의 인구 집중화에 의한 토지의 부족과 경제 발전에 따른 문화 생활의 확대에 의한 인구 1인당의 공간 점유율이 많아지게 되었고, 이에 따라 연약한 점성토 지반을 대상으로 한 건설공사들이 증가하고 있는 추세이다. 또한, 공학적인 측면에서의 연약 점성토 지반에 성토와 같은 시공을 실시하는 경우 문제가 되는 것은 압밀량(침하량), 측방 변위(유동), 히빙, 성토에 따른 안정도 등을 예로 들 수 있다. 특히, 요즈음과 같이 토지 부족으로 인하여 구조물에 근접하여 성토를 시공하는 경우에는 성토에 따른 지반 변위가 주위 구조물에 대하여 악영향을 미치는 경우가 종종 발생하고 있다. 이와 같은 악영향을 미연에 방지하기 위하여 성토부 바로 아랫부분이나 성토와 인접 구조물의 사이에 지반 개량 공법을 실시하는 것이 일반적이며, 동시에 변위 억제 효과를 미리 파악하기 위해 (점)탄소성 유한요소해석과 같은 고도의 수치해석 기법을 사용하여 성토에 따른 영향을 철저히 분석하는 것이 그 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

따라서, 본 논문은 성토가 주변 지반에 미치는 영향을 사전에 철저히 고려하지 않은 상태에서 시공을 실시하고 동시에, 시공시에 있어서 계측 관리 또한 철저히 못해 인접 구조물들에 막대한 경제적 손실을 가져 온 실제 예를 소개함과 동시에, 그 실제 예에서 그나마 부분적으로 이루어진 계측 결과 및 실내 그리고 현장 시험 결과를 중심으로 하여 일련의 1, 2차원 수치 해석을 수행하여 성토가 주변 지반에 미치는 영향을 명확히 함과 동시에 연약 지반에 있어서의 현장 계측의 중요성 및 실내, 현장 시험의 정

확성 확보의 필요성과 수치해석에 의한 성토에 따른 주변 구조물에 미치는 영향의 파악이 매우 유용한 하나의 수단이 될 수 있다는 것을 제시하고자 한다.

2. 대상 지역의 지질 및 관측점 위치

2.1 지질 및 지반 조건

그림-1에서 개략적인 지질상황과 성토 및 관측점 위치를 나타내었다. 본 논문에서 인용한 현장은 우리 나라의 대표적인 연약 점성토 지반인 낙동강 하구의 삼각주에 위치하며, 행정 구역상으로는 부산광역시 사하구 하단동에 속하는 곳이며, 이 곳의 지질학적인 특징으로는 낙동강의 상류로부터 운반되어 온 막대한 양의 하상 쇄설물이 퇴적된 곳으로 약 100m정도의 층적층으로 구성되어 있다. 또한, 현장 조사 결과에 의하면 성토부 바로 아랫부분의 원지반의 지층 구성은 약 10m의 두 모래 층에 끼인 상태로 존재하는 점토층(약 20m)으로 이루어지며 이 점토 층이 주요 해석대상으로서 이 점토 층의 N값은 그림-1에서도 알 수 있는 것과 같이 2~3정도로 매우 연약하며, 비배수 강도(q_u)는 $0.2-0.3\text{kgf/cm}^2$ 정도이다. 또한 성토시 성토 바로 아랫부분은 압밀 촉진공법으로서 Pack Drain이 채택되었다.

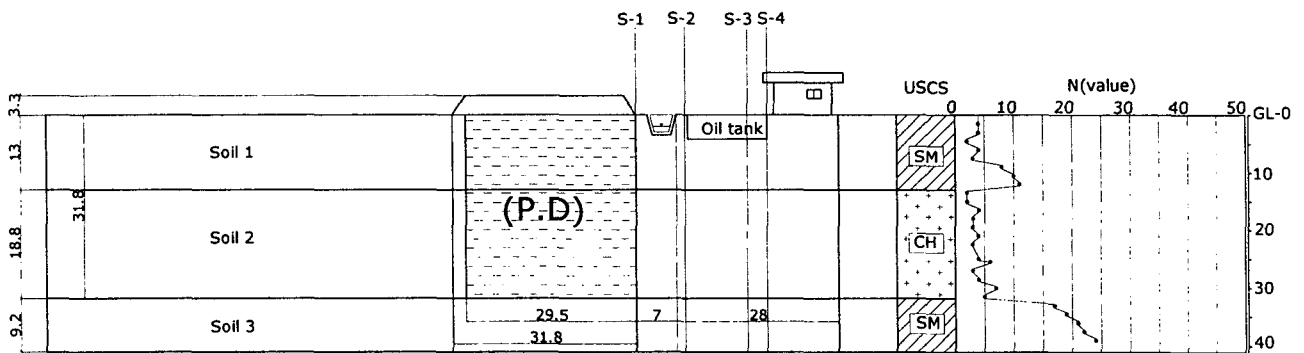


그림-1 성토부의 지질상황 및 관측점 위치도

2.2 현장 사이트 개요

본 논문에서 인용한 현장은 낙동강변을 따라 길게 이어지는 공항로 확장공사에 따른 공항로 주변에 위치하는 4곳의 주유소 구조물의 부등침하에 따른 캐노피의 기울어짐, 지하 기름 탱크 벽의 균열에 의한 우수 혼입, 주유소 관리 건물 벽의 균열 등의 피해(접속부 5cm 정도 이격 및 균열)가 발생하여 원인 규명 및 피해 정도를 규명하기 위해 일련의 연구 조사를 수행한 곳이다. 그러나, 불행하게도 본 현장의 경우는, 계측은 유일하게 지표면 침하(계측점 수준 측량에 의함.)결과뿐이며, 층별 침하계, 지표 변위 말뚝 혹은 지중 경사계 및 간극 수압계를 설치하지 않아 층별 침하, 측방 변위, 간극 수압 등을 파악하는 것이 전혀 불가능했으며, 동시에 지표면 침하량도 관측결과를 종합적으로 분석해 보면 신뢰성에 확신을 두기가 어려웠음이 솔직한 심정이었다. 이와 같은 열악한 계측 환경에도 불구하고 본 현장을 연구 대상으로 선택한 것은 ① 연약 점성토 지반에 시공된 성토의 영향으로 인접 구조물에 확실한 악영향이 나타남을 인지할 수 있고, ② 특히, 본 현장과 같이 측방 변위에 기인하는 부등침하가 그 원인으로 여겨지는 조건의 보고된 현장은 거의 없으며, ③ 우리나라의 대표적인 연약 점성토 지반인 낙동강 하구에 위치하고 있다는 점 등을 그 이유로 들 수 있다. 그리고, 본 현장에서의 성토 높이는 약 3.3m로 시공되었고, 관측 지점은 그림-1에서 표시한 것과 같이 지하 기름 탱크 주위의 2개소로 성토부 쪽의 기름 탱크 가장자리에 해당하는 지점이 S-2 지점이고, 기름 탱크의 중앙부에서 약간 우측(약 2m)으로 이동한 지점이 S-3 지점이다.

3. 해석 이론

3.1 해석 이론 및 구성 방정식

본 연구에서 채택한 이론은 1차원 관용법과 2차원 유한요소법을 사용하였으며, 또한, 사용된 유한요소법은 탄소성 모델(Modified Cam-Clay Model)과 점탄소성 모델(Ohta-Sekiguchi Model)의 2종류이다.

먼저, 1차원 관용법에서 모래 지층은 De Beer식을 사용하여 즉시 침하량을 산출하였고, 점토층은 Cc법을 사용하여 압밀 침하량을 계산하였다.

따라서, 이들 식들은 다음과 같이 정의된다.

De Beer 식을 이용한 계산은

$$S = 0.4 \cdot \frac{P_0}{N} \cdot \log_{10} \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \cdot H \text{ (cm)} \quad \dots \dots \dots (1)$$

이다.

여기서, N : N 값

P_0 : 유효 상재압(kgf/cm²)

ΔP : 성토하중으로 인한 증가량(kgf/cm²)

H : 압밀층의 두께(cm)

Cc법을 이용한 계산은

1) $P_0 < P_C$, $P_0 + \Delta P \leq P_C$ 의 경우

$$S = \frac{C_{c2}}{1 + e_0} \cdot H \cdot \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0 + q_0}$$

2) $P_0 \geq P_C$, $P_0 + \Delta P > P_C$ 의 경우 $\dots \dots \dots (2)$

$$S = \frac{C_{c1}}{1 + e_0} \cdot H \cdot \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0 + q_0}$$

3) $P_0 < P_C$, $P_0 + \Delta P > P_C$ 의 경우

$$S = \frac{1}{1 + e_0} \cdot H \cdot \left(C_{c2} \cdot \log \frac{P_C}{P_0 + q_0} + C_{c1} \cdot \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_C} \right)$$

이다.

여기서, S : 압밀 침하량 (cm)

C_{c1} : 압축 지수 (정규압밀 영역)

C_{c2} : 압축 지수 (과압밀 영역)

P_C : 압밀 항복응력 (tf/m²)

P_0 : 유효 상재압 (tf/m²)

ΔP : 연직 증가 응력(tf/m²)

q_0 : 선행 압밀하중에 의한 연직 증가 응력의 증가량(tf/m²)

H : 압밀층의 두께(cm)

(단, $P_0 + \Delta P > P_0 + q_0$)

그리고, 유한 요소법에 사용된 흙의 구성 방정식은 각각 다음과 같다.

탄소성 모델은 Modified Cam-Clay Model을 사용한 것으로서 Roscoe 등은 Cam-Clay를 이용하여 다음과 같은 항복 함수를 유도했다.

$$f(\sigma) = \frac{(\lambda-x)}{(1+e_0)} \cdot \left\{ \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + \frac{\eta}{M} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

여기서, λ : 응력의 자연수에 대한 압축 지수 ($\lambda=0.434Cc$)

x : 응력의 자연수에 대한 팽창 지수 ($x=0.434Cs$)

e_0 : 초기 간극비

p : 평균 주응력 $p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$

p_0 : 초기 평균 주응력

η : 응력비 $\eta = \sqrt{\frac{3}{2(\eta_{ij} - \eta_{i0})^2}}$

$\eta_{ij} = \frac{S_{ij}}{p}$, $\eta_{i0} = \frac{S_{i0}}{p_0}$

S_{ij} : 편차 응력 $S_{ij} = \sigma_{ij} - p$

$S_{i0} = \sigma_{i0} - p_0$

M : 한계 상태에 있어서의 응력비 ($M = \frac{q}{p} = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi}$)

식 (3)의 항복 함수에 의해 나타내어지는 항복면은 $p - q - e$ 공간에 있어서 그림-2와 같이 주어진다.

또한, 점탄소성 모델은 동남 아시아 및 일본에서 풍부한 현장 적용 실적을 가지고 있는 Ohta-Sekiguchi Model로서 지반의 구성식은

$$\{d\sigma\} = [\bar{D}] \cdot (\{d\epsilon\} - d \bar{t} \left\{ \begin{matrix} VP \\ \epsilon \end{matrix} \right\}) \dots \dots \dots (4)$$

여기서, $[\bar{D}] = \left([D^e]^{-1} + \bar{d} \bar{t} \left[\frac{\partial \cdot \epsilon^{VP}}{\partial \sigma} \right]^{-1} \right)$

로 나타내어진다.

Ohta-Sekiguchi Model 에 있어서 항복 함수 f 는

$$f = \frac{\lambda-x}{1+e_0} \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + D \cdot \eta^* - V^P$$

로 나타내어지며, 또한, 파괴 기준을 나타내는 파라미터 M 은

$$M = \frac{(\lambda-x)}{D(1+e)}$$

로 표현되어지지만, 등방 압밀, 축대칭 조건 아래에서는 Cam-Clay Model 과 동일하게

$$M = \frac{q}{p} = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi}$$

로 되어진다. 이 모델에서는 변형율을 ϵ 으로 가정한다면, 탄성 변형율 ϵ^e 과 점소성 변형율 ϵ^{VP} 에서 $\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^{VP}$

로 나타내어져, 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\epsilon^e = \left(\frac{x}{1+e_0} \right) \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad \left(E = (1+e_0) \cdot \frac{\sigma v}{x} \right)$$

$$\epsilon^{VP} = \alpha \cdot \ln \left[1 + \frac{\dot{\nu}_0}{\alpha} \cdot \frac{t}{\alpha} \cdot \exp \left(\frac{\frac{\lambda - x}{1 + e_0} \cdot \ln \frac{p}{p_0}}{\alpha} \right) \right]$$

Ohta-Sekiguchi Model 의 입력 정수값으로서는 다음과 같은 데이터가 필요하게 되어진다.

λ : 응력의 자연대수에 대한 압축지수 ($\lambda=0.434C_c$)

x : 응력의 자연대수에 대한 팽창지수 ($x=0.434C_s$)

M : 한계 상태 (파괴시)의 응력비

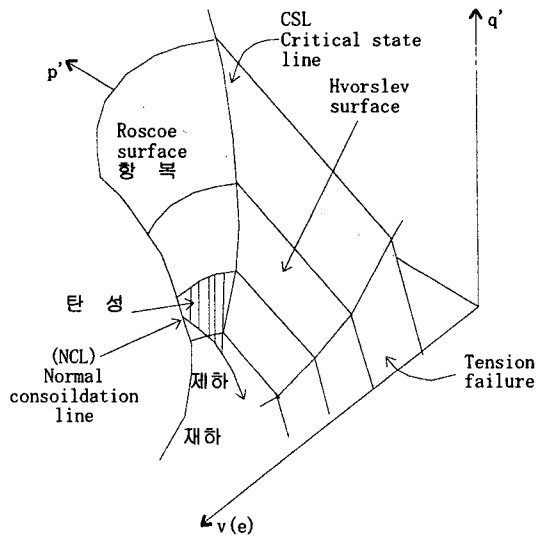
α : 시간의 자연 대수에 대한 2차 압축 지수

$\dot{\nu}_0$: 재하 및 제하 직전의 점소성 변형률 속도 (1/day)

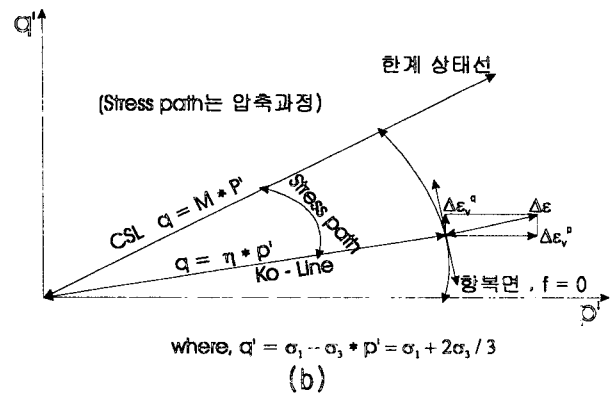
e_0 : 초기 간극비

η_0 : 선행 압축 종료 뒤의 응력비 (이방성을 지시하는 지수)

그림-2의 (b) 는 Ohta-Sekiguchi Model 의 개념을 나타내고 있다.



The Complete state boundary surface in $q':p:v$ space
(a)



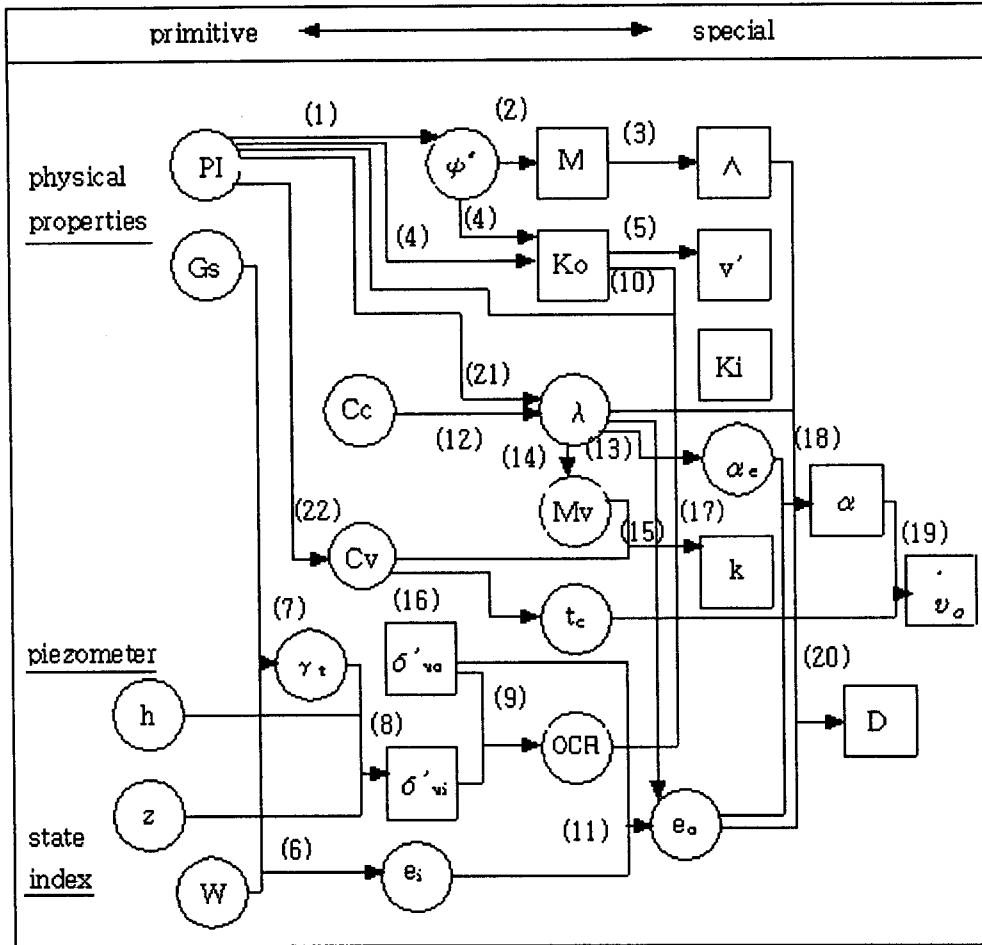
where, $q' = \sigma_1 - \alpha_3$, $p' = \sigma_1 + 2\alpha_3 / 3$
(b)

그림-2 Cam-Clay 및 Ohta-Sekiguchi Model의 항복면과 응력경로도

3.2 흙의 구성 방정식에 이용되어진 토질 정수의 결정법

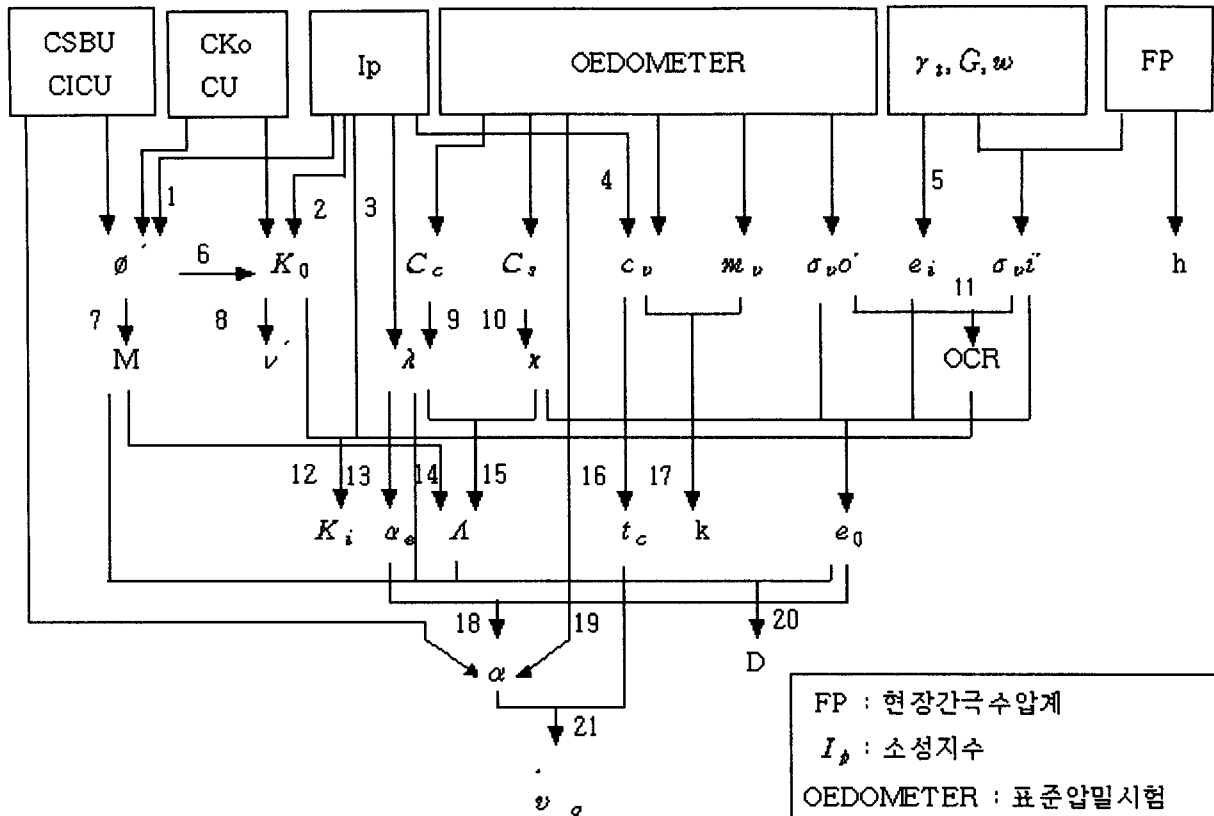
일반적으로 1차원 관용법에 사용되어지는 토질 정수의 결정은 몇 가지의 기본적인 물성 및 역학 시험만으로 결정하는 것이 가능하다. 그러나, 탄소성 및 점탄소성의 유한요소법에서는 고도의 실험장치의 사용이 필요할 뿐만 아니라 정밀한 역학 시험에 의존되어지는 부분이 많아 비현실적이고 비경제적인 어려움을 가지고 있어 이러한 토질 시험이 실시되어지는 예는 매우 적은 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 Iizuka, Ohta 등에 의해 제안된 토질 정수 간이 결정법을 사용하여 입력 파라미터를 결정하였다.

이 방법은 PI 를 주체로 하여 간이적으로 입력 정수를 설정해 가는 방법으로서 각 정수의 설정 순서는 그림-3 및 그림-4 에서 표시한 것과 같이 PI 등의 물리 정수 값으로부터 각 정수를 설정할 수 있다.



- (1) $\sin \theta' = 0.81 - 0.233 \log PI$ Kenney(1969)
- (2) $M = \frac{6 \sin \theta'}{(3 - \sin \theta')}$
- (3) $A = \frac{M}{1.76}$ Karube(1975)
- (4) $K_1 = 0.44 + 0.42 \times 10^{-4} PI$ Massaroch(1979)
- (5) $v' = \frac{K_1}{1 + K_1}$
- (6) $e_s = u G_s$
- (7) $\gamma_s = \frac{G_s \gamma (1 + W)}{1 + G_s W}$
- (8) $\sigma'_{va} = \gamma_s z$
- (9) $OCR = \frac{\sigma'_{va}}{\sigma'_o}$
- (10) $K_2 = K_1 OCR^{1.18 - \frac{OCR}{2}}$ Alpan(1967)
- (11) $a_1 = a_2 - \lambda(1 - A) \ln(\frac{OCR}{\bar{OCR}})$ $\bar{OCR} = \frac{1 + 2.75}{1 + 2.75} OCR$
- (12) $\lambda = 0.434 C_c$
- (13) $a_2 = 3.78 \lambda + 0.75$
- (14) $\alpha_o = \frac{3\lambda}{[(1 + a_1)(1 + a_2)(1 + 2.75) \sigma'_o]}$
- (15) $k = \alpha_o c_o \gamma_s$
- (16) $t_c = t_{c0} \frac{H^3 T_c (U=90\%)}{c_o}$
- (17) $\frac{\alpha}{\lambda} = 0.05 \pm 0.02$ (clay) Mesri & Godlewski(1977)
- (18) $\alpha = \frac{\alpha_e}{1 + \alpha_e}$ Sekiguchi(1977)
- (19) $v_o = \frac{\alpha}{1 + \alpha}$ Sekiguchi(1977)
- (20) $D = \frac{M}{[1.8(1 + a_1)]}$ Ohta(1971)
- (21) $\lambda = 0.015 + 0.0077 PI$
- (22) $\log c_o (cm/min) = -0.025 PI - 0.25 \pm 1$

그림-3 입력 파라메터의 결정순서도



FP : 현장간극수압계
 I_p : 소성지수
 OEDOMETER : 표준압밀시험
 CK_0CU : K_0 압밀 · 비배수압축
 $CSBU$: 압밀 · 응체적일면전단
 $CICU$: 등방압밀 · 비배수

①과거의 유효응력 : $\sigma_v' = K_1 \sigma_v$

②현재의 초기응력 : $\sigma_v' = K_2 \sigma_v - A$

③토질정수 : 압축 · 전단 $A \cdot M \cdot D$ 시간의 함수 $\alpha = \frac{t}{t_c}$, 투수계수 k .

- | | |
|--|--|
| 1. $\sin \theta' = 0.81 + 0.233 \log I_p$ Kenney(1963) | 2. $K_1 = 0.44 + 0.42 I_p \times 10^{-1}$ Massarech(1979) |
| 3. $\lambda = 0.015 + 0.007 I_p$ Isaka & Ohta(1987) | 4. $\log c_v = -0.025 I_p - 0.25(\pm)$ (u^2/min) Isaka & Ohta(1987) |
| 5. $e_s = u G_s$ | 6. $K_1 = 1 - \sin \theta'$ Jaky(1944) |
| 7. $M = \frac{6 \sin \theta'}{(3 - \sin \theta')}$ | 8. $v' = \frac{K_1}{(1 + K_1)}$ |
| 9. 10. $\lambda = 0.434 C_c$, $\lambda = 0.434 C_c$ | 11. $OCR = \frac{\sigma_{v0}'}{\sigma_{vm}'} - 1$ |
| 12. $K_2 = K_1 OCR^{1.5 \log \frac{1}{OCR}}$ Alpan(1967) | 13. $\frac{c_v}{\lambda} = 0.05 \pm 0.02$ (clay) Memi & Godewski(1977)
$= 0.07 \pm 0.02$ (sand) |
| 14. $A = \frac{M}{1.75}$ Karube(1975) | 15. $A = 1 - \frac{K_1}{2}$ |
| 16. $t_c = \frac{H^2 T_v(50\%) }{Z_v}$ Sekiguchi | 17. $k = m_v c_v \gamma_w$ |
| 18. 19. $\alpha = \frac{c_v}{1 + e_s}$, $\alpha = \frac{d\sigma_v'}{d\log t}$ Sekiguchi(1977) | 20. $D = \frac{d\sigma_v'}{k(1 - \frac{e_s}{e_p})}$ Shibata(1963) $D = \frac{1A}{[M(1 + e_s)]}$ Ohta(1971) |
| 21. $v_1 = \frac{\alpha}{T_c}$ Sekiguchi(1977) | |

그림-4 토질정수의 추정방법

4. 해석 조건

해석에 이용한 토질 물성 데이터의 일람을 표-1 및 표-2 에 나타내었다. 본 연구에서 대상으로 한 지반에 대해서 토질 조사가 이루어져 일련의 간단한 실내 시험이 이루어져 있으나 이용 가능한 데이터는 극히 빈약한 관계로 인하여 본 연구에서는 실내 시험을 참고로 하여 앞에서 인용한 물리 시험 결과를 중심으로 하는 간이결정법에 의해 주로 토질 정수를 결정하였다.

1차원 해석은 Cc 법과 De Beer 법이 계산 가능한 상용 Code (제품명 ; Decalto)를 사용하였고, 해석 단면 설정, 물성값 등은 2차원 해석에 준했다.

2차원 해석의 유한 요소법은 Christian 의 방법에 따라 Code화 한 것으로서 요소는 4절점 4각형의 아이소파라메트릭 요소를 이용하여 기초 지반과 성토를 모델화 가능한 상용 Code (제품명 ; AFIMEX (압밀 옵션인 DACSAR를 사용))를 사용하였다.

그림-5는 성토와 기초 지반의 유한 요소 분할도를 나타내었다. 모든 요소수는 405 개 이고 모든 절점수는 460 개 이었고 동시에, 그림-5에서 나타낸 바와 같이 성토부가 중앙부에 오도록 모델을 작성하였다.

경계 조건은 변형에 대해서는 좌우측 경계에서 수평 변위를 고정으로 하고, 동시에 저면 경계에서 연직 및 수평 변위를 고정 경계로 설정했다. 그리고, 배수 조건은 좌우측과 저면 경계에서 배수 및 비배수 양방향으로 해석을 실시하였고, 지표면 (지하수위) 에서는 배수만을 고려하였다. 또한, 성토 내부는 비연성 조건으로서 변형만을 해석 대상으로서 고려했다. 그리고 지반 이력에 대해서는 토성도(그림-1) 및 지금까지 알려진 낙동강 하구언의 지질 및 토질 시험 결과로부터 정규 압밀 지반으로 가정하여 해석을 수행하였다.

표-1 관용법 1차원 해석에 적용한 토질상수

	γ_{sat} (t/m ³)	γ_t (t/m ³)	Cc	Cv(m ² /day)	e ₀	N값	투수계수 (×10E-6cm/day)
Sand 1	1.90	1.85	-	-	-	4	
Clay 1	1.96	1.90	0.565	0.165	1.37	-	2.31
Sand 2	1.90	1.85	-	-	-	20	
oil tank	2.5	2.5	-	-	-	45	
성토	1.97	1.97	-	-	-	-	

표-2 2차원 탄소성 및 점탄소성 유한요소법 해석에 적용한 토질상수

	Sand 1	Clay	Sand 2	PD공법	성토	oil tank	
단위체적중량(γ_{sat})	1.9	1.96	1.9	1.96	1.97	2.5	
다이레턴시계수(D)	-	0.059	-	0.059	-	-	
비가역계수(λ)	-	0.643	-	0.643	-	-	
한계상태계수(M)	-	1.126	-	1.126	-	-	
포아송비(ν)	-	0.345	-	0.345	-	-	
X방향투수계수(m/day)	0.0864	0.00003	0.0864	0.00003	0.864	0.00003	
Y방향투수계수(m/day)	0.0864	0.00003	0.0864	0.00003	0.864	0.00003	
정지토압계수(K ₀)	0.6	0.526	0.49	0.526	0.3	0.2	
유효상재압(σ_v)	5.85	20.724	34.013	20.724	-	2.1	
현장정지토압계수(K _i)	-	0.25	-	0.25	-	-	
이차압밀계수(α)	-	0.00724	-	0.00724	-	-	
초기체적변형률속도(v_0)	-	0.00013	-	0.00013	-	-	
압축지수(λ)	-	0.245	-	0.245	-	-	
초기간극비(e ₀)	1.0	1.37	0.56	1.37	0.85	0.5	
라미정수	λ	1382	-	4053	-	3979	84571
	μ	3979	-	1382	-	1995	69525

5. 사후 해석 결과와 실측값의 비교

그림-5는 탄소성 및 점탄소성 유한 요소법의 모델도와 점탄소성 모델의 각각 111, 368, 968일의 침하 및 측방 유동의 변위도를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 점토층이 상하 양면의 모래층에 끼워 존재하기 때문에 일반적으로 볼 수 있는 것과 같이 성토 사면 바로 끝 부분에서 급격한 허빙 현상은 발생하지 않으며 오히려 일반적으로 수행되어지는 전응력 해석 결과와 비슷한 양상을 보이며, 또한 중간점의 점토층에서 측방 유동이 비교적 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 상부에 모래층이 존재하지 않거나 얇게 존재하는 경우에는 일반적으로 성토 사면 시작 부분의 바로 아랫부분에서 가장 큰 측방 유동이 발생하는 것이 일반적이나 본 연구 대상 현장에서는 성토부에서 약간 떨어진 곳(A-A'단면의 오른쪽 부근)에서 가장 크게 발생함을 알 수 있었다. 이와 같은 침하 메카니즘에 의해 기름 탱크가 있는 곳은 콘크리트 박스 구조물의 강성에도 불구하고 부등 침하가 심하게 발생하여 기름 탱크 벽에 균열을 초래한 원인으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

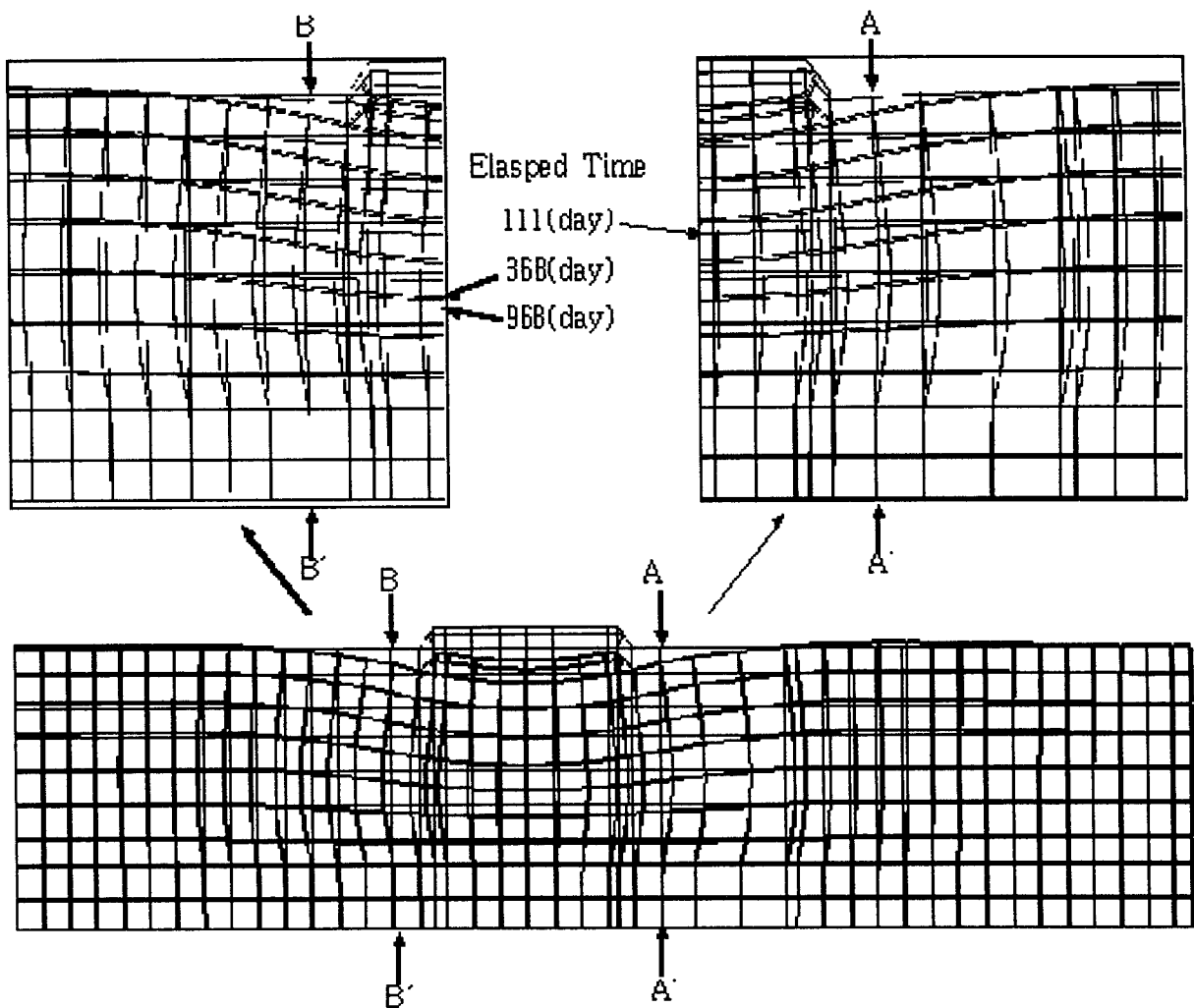


그림-5 연직 및 측방 변위도

그림-6 및 그림-7은 본 연구 대상 현장에서 유리하게 관측되어진 두 지점 즉, S-2 및 S-3 지점의 관측값 및 해석값을 비교한 그림이다. 먼저, S-2 지점에 있어서는 1차원 및 2차원의 탄소성 및 점탄소성의 결과가 관측 결과와는 좋은 일치를 이루고 있으나 2차 압밀 영역에 들어서부터는 2모델의 유한 요소 해석 결과 보다도 크게 침하하고 있음을 알 수 있다. 관측 결과가 비교적 단기간에 끝났기 때문에 어느

쪽의 해석 결과가 더 적합한지는 알 수 없으나 연성 압밀 해석에서 전형적으로 나타나는 경향처럼 일차원의 해석 결과의 침하량이 가장 크고 그 다음이 2차원의 탄소성 그리고 점탄소성의 순서를 보이고 있음을 알 수 있다. 그림-7은 S-3 지점의 시간 및 침하량의 결과로서 관측 결과와 상당히 차이가 있음을 보여 주고 있다. 이와 같은 결과의 원인으로 추측 가능한 것은 지하 기름 탱크의 상부에서 관측된 결과를 사용하여 실제 토층과 지하 기름 탱크의 저면과의 이격 및 기름 탱크의 균열 등에 의한 측정 오차에 기인한다고 생각되어진다. 이것은 플롯되어진 계측 결과의 불정연성이 매우 잘 나타내고 있다. 또 하나, 그림-7에서 흥미로운 사실은 1차원 관용법에 의한 해석은 1차원 해석의 전형적인 결과를 보여 주고 있음을 알 수 있다.

그림-8은 좌우 양면 및 저면을 배수 및 비배수 조건으로 해석을 수행하여 그때의 시간 및 침하 곡선 관계를 보여 주고 있다. 비배수쪽이 관측 결과와 좋은 일치성을 보여 주고 있으나 점토층이 모래층에 포위되어 있는 지층의 조건에 의해 배수 및 비배수의 침하량 및 침하속도에 큰 차이가 나타나지 않음을 알 수 있다. 동시에, 2차 압밀을 포함하여 해석 대상을 고려했을 경우에는 침하량이 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

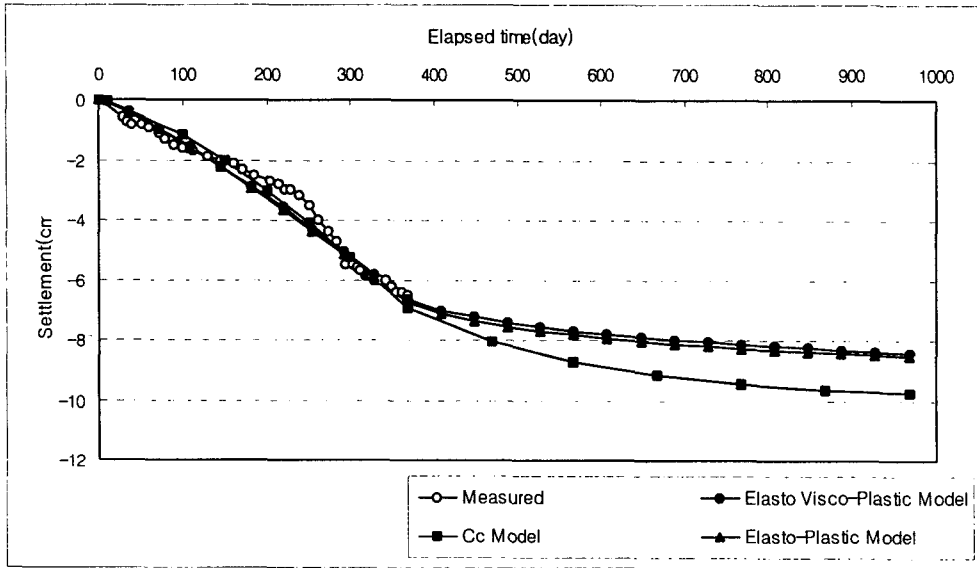


그림-6 S-2 지점의 침하도

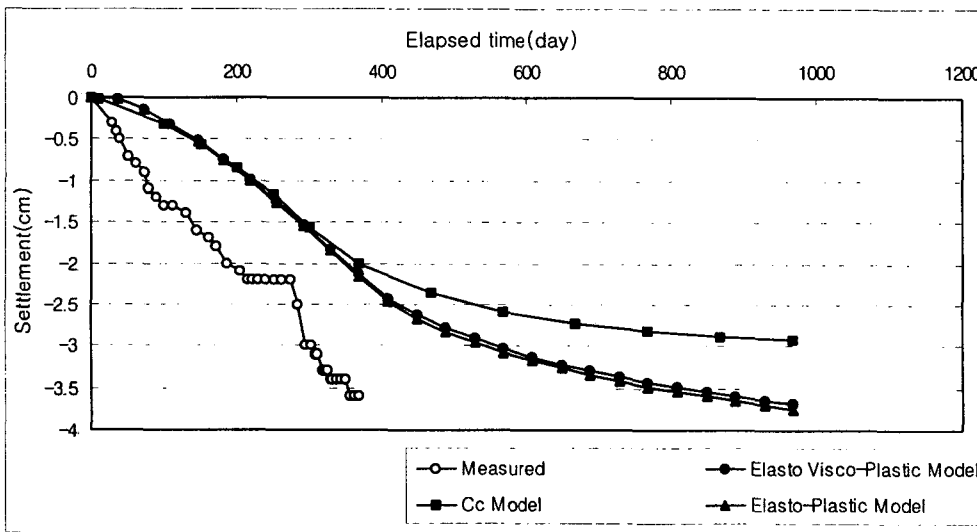


그림-7 S-3 지점의 침하도

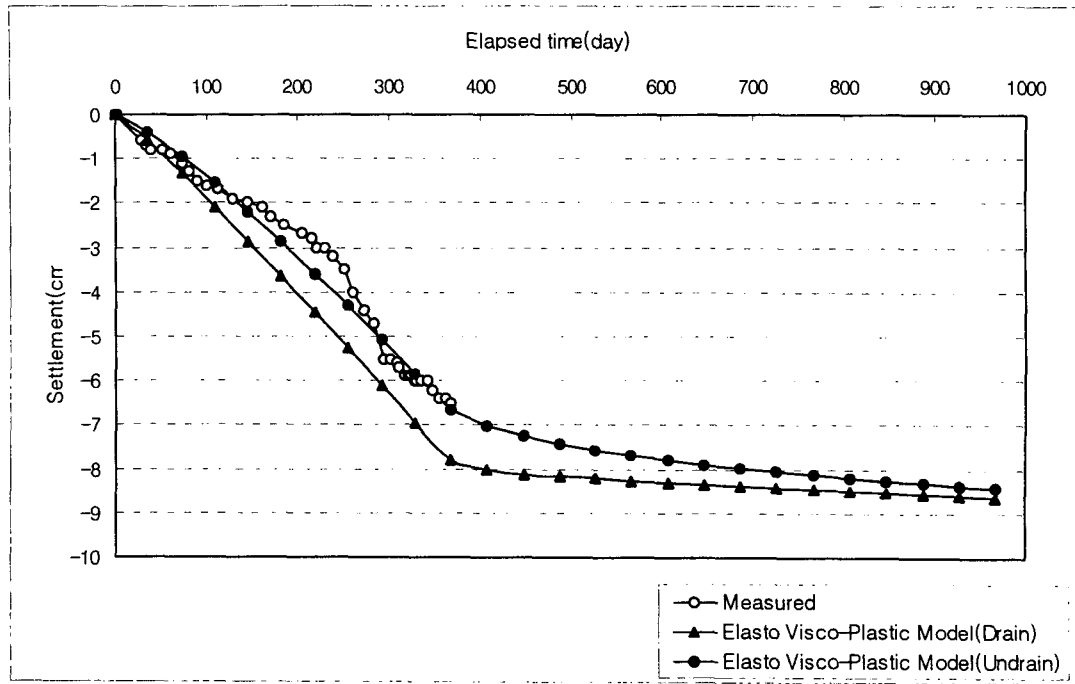


그림-8 배수 및 비배수 경계조건에 있어서의 침하도

그림-9는 S-2 지점에 있어서의 탄소성 및 점탄소성 모델의 109, 219, 368일 때의 측방 유동 곡선을 나타내고 있다. 탄소성과 점탄소성이 거의 같은 경향과 크기로 분포하고 있음을 알 수 있다. 하부 모래층에서는 거의 측방 유동이 발생하지 않으며 중간 점토층에서 매우 큰 규모로 일어나고 있음을 알 수 있다 또한, 약간 탄소성 모델의 측방 유동(368일)이 크게 발생함에 주목할 필요가 있다. 이와 같은 현상은 그림-6 및 그림-7에서의 시간 및 침하 곡선에서 탄소성 모델이 약간 크게 침하하는 것과 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

그림-10은 365일에 있어서의 S-1, S-2, S-4 지점에 있어서의 탄소성 및 점탄소성 모델의 측방 유동을 보여 주고 있다. 전체적인 경향은 그림-9와 동일하게 탄소성이 점탄소성보다 약간 측방 유동이 크게 발생하고 있으며, 동시에 해석한 3 지점 모두의 최대 측방 유동이 거의 같은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 그림-5의 변위도와 좋은 일치성을 보여 주고 있다.

그림-11은 지하 기름 탱크의 저면부의 부등 침하 형상을 시간에 따라 나타낸 것이다. 성토부쪽으로 급격히 부등침하가 발생함을 알 수 있고 또한, 점탄소성 보다 탄소성 모델이 부등 침하가 약간 크게 발생함을 알 수 있다. 본 연구 현장의 피해 보고서에 의하면 기름 탱크에 균열이 발생하여 우수기에 우수가 유입했다고 보고되고 있는 바, 해석 결과의 부등 침하량이면 균열의 발생을 초래할 위험을 내포하고 있음을 알 수 있다.

그림-12는 상부 모래층 중앙부와 점토층 중앙부의 p-q 곡선을 나타내고 있다. 두 곡선 모두 CSL을 초월하지 않고 있음을 인지할 수 있다.

그림-13은 비배수 조건에서의 146, 368일에 있어서의 변위 벡터를 나타낸 것으로서 비배수 경계조건의 유한요소 해석의 전형적인 형태를 보여 주고 있다. 동시에, 히빙이 성토부로부터 꽤 떨어진 곳에서 발생함을 보여주고 있다.

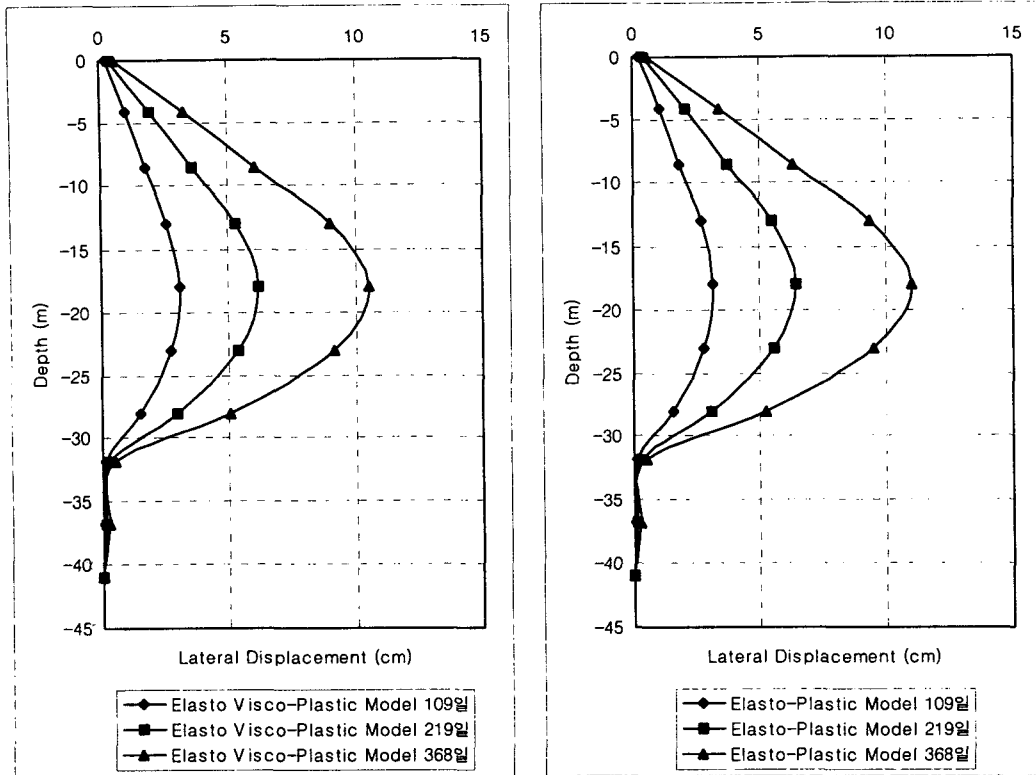


그림-9 S-2 지점의 시간별 측방 변위

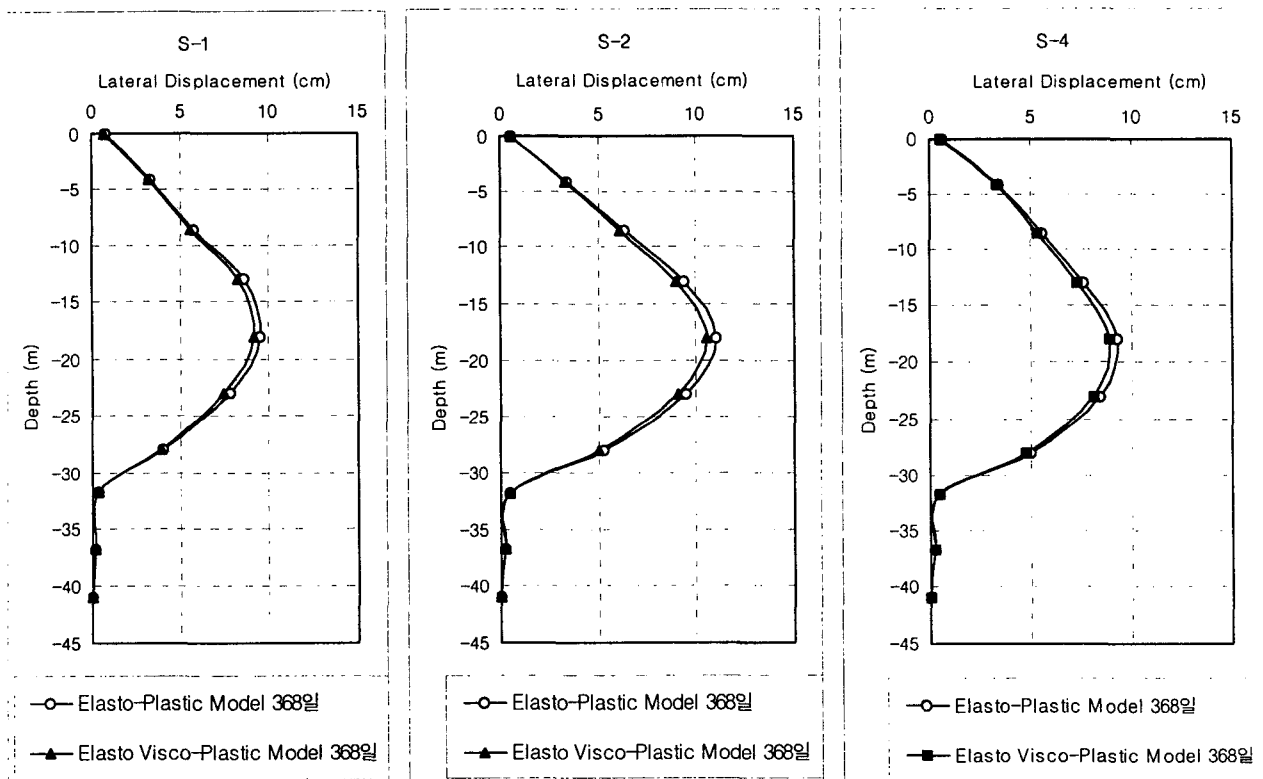


그림-10 지점별 측방 변위

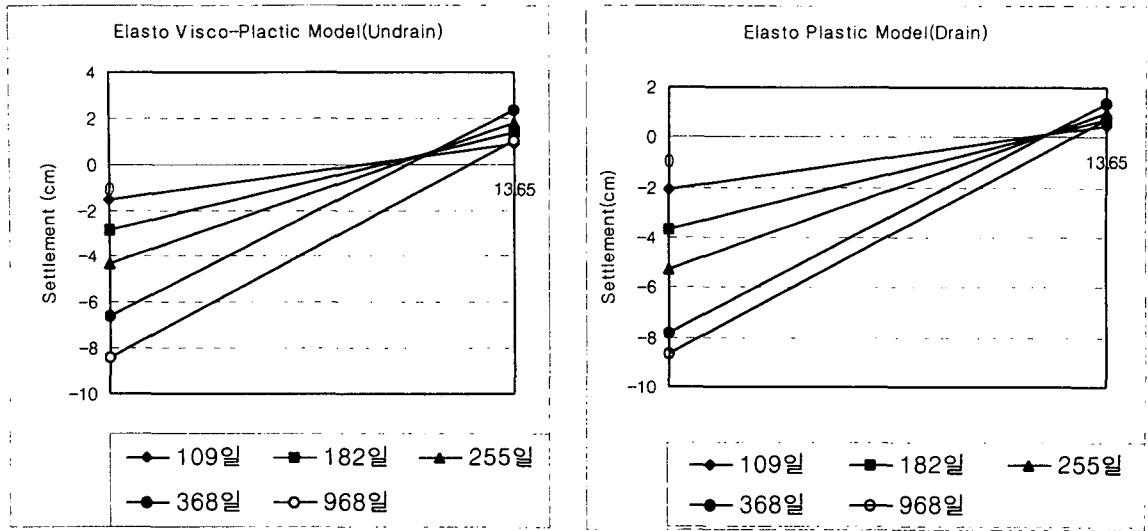


그림-11 지하 기름 탱크 부등침하량

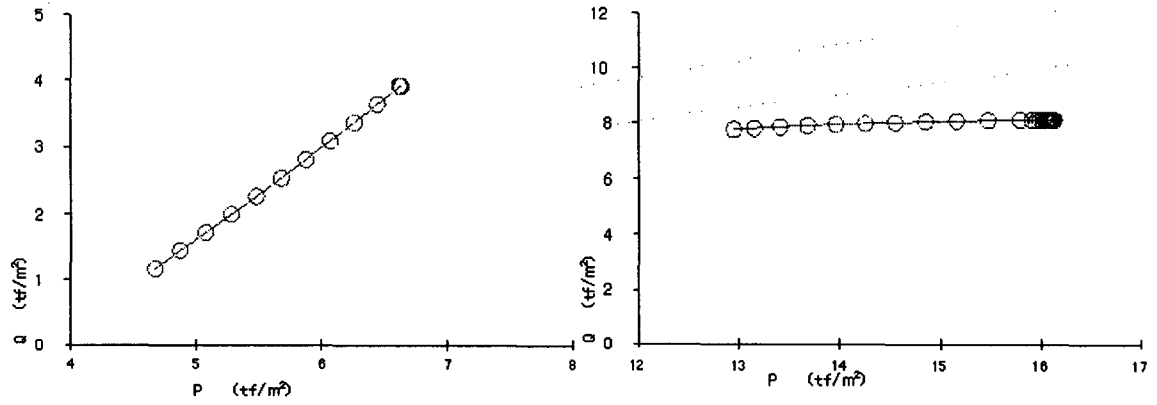
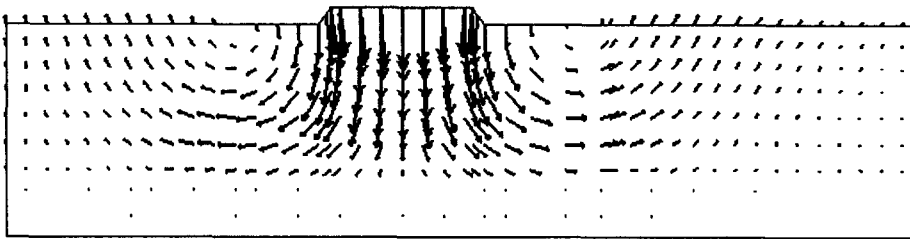


그림-12 p-q 곡선

146일 경과



368일 경과

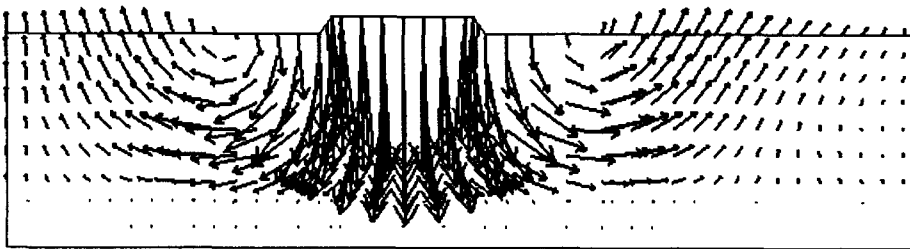


그림-13 수평 및 연직변위 벡터도

6. 결론

본 연구에서는 연약한 점성토 지반 위에 성토를 실시할 때, 주변 구조물에 미치는 영향을 알아보기 위해 성토 주변의 구조물 및 근방에서 관측한 관측값과 3가지 경우의 해석값을 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 일반적으로 1차원 관용법, 2차원 탄소성, 2차원 점탄소성 모델에 의한 유한 요소 해석의 순서로 침하가 크게 발생함을 알 수 있었다.
2. 모래층에 협재되어 있는 점토층의 경우에 있어서는, 배수 및 비배수 경계조건의 뚜렷한 차이를 구별하는 것이 어려웠다. 특히, 펌 드레인에 의해 개량된 지반일 경우 이 경향이 뚜렷이 나타남을 알 수 있었다.
3. 모래층에 협재되어 있는 점토층의 경우에 있어서는, 측방 유동의 발생 메카니즘이 약간 다르게 발생함을 알 수 있었다. 즉, 성토 사면의 바로 아랫부분에서 최대값이 발생하는 것이 아니라 성토부 가장자리로부터 꽤 떨어진 부분의 직하부에서 발생함을 알 수 있었다.
4. 측방 유동 또한, 점탄소성보다 탄소성 모델에서 약간 크게 발생함을 알 수 있었고 특히, 모래층 지반에 비해 점성토 지반에서 특히, 많이 발생하여 전단 파괴가 발생했다고 볼 수 있으며 따라서, 주의 구조물에 약영향을 미치는 중심 원인임을 추측해 볼 수 있었다.
5. 이번 연구에 있어서, 매우 부족한 계측 결과로 인하여, 정확히 관측치와 해석치를 비교하여 결론을 도출하기에는 약간의 무리가 있었으나, 종합적인 판단에 있어 일익을 담당하는 것은 가능하다고 사려된다. 앞으로 이런 세미나 자리를 빌어 토론 및 보다 나은 데이터의 축적으로 정확한 사전 규명 및 예측이 필요하다고 본다.

7. 참고문헌

1. Iizuka, A. & Ohta, H. : A Determination Procedure of Input parameters in Elasto-viscoplastic Finite Element Analysis, Soils & Foundations, Vol. 27, No. 3, pp. 71-87.
2. Sekiguchi, H. & Ohta, H. : Induced Anisotropy and Time Dependency in Clays, Proc. Speciality Session 9, 9th ICSMFE, Tokyo, pp.229-239, 1977.
3. Ohta, H. and Sekiguchi, H. : Constitutive Equations Considering Anisotropy and Stress Reorientation in Clay, Proc. 3rd ICNMG, Vol. 1, Aachen, pp.475-484, 1979.
4. Sekiguchi, H. & Shibata, T. : 성토기초지반의 측방유동해석상의 문제점, 흙과 기초(일본), Vol. 30, No. 5, pp. 47-54, 1982.(in Japanese)
5. Christian, J. T. : Undrained Stress Distribution by Numerical Method, Proc. ASCE, No. SM6, pp. 1333-1345, 1968.
6. 정성교, 백승훈, 김규종, : 낙동강 하구의 삼각주에서 실시된 성토에 따른 침하예측 및 현장계측, 한국지반공학회 연약지반처리위원회, 1999년도 학술발표회 논문집, pp 48-61, 1999.
7. 공항로 주변4개 주유소 피해진단 및 대책수립 보고서, (주)정신 엔지니어링, 1999. 5.