

模型實驗에 의한 軟弱粘土地盤의 變形解析

An Analysis of Deformation on Soft Clay Layer by Model Test

姜 秉 宣*

Kang, Byung-Sun

Abstract

Constitutive models based on plasticity have been widely used to describe the stress-strain behavior of geological materials. This paper presents a deformation study for a soft clay layer loaded by a geological structure such as embankment or rigid footing. For this study, a two dimensional physical model has been constructed. The test results are compared with numerical results obtained by using the following models; Original Cam-clay, modified Cam-clay and Elasto-Viscoplasticity based on the critical state concept. The mathematical characterization of the constitutive model is given by the constitutive equation expressed in a form suitable for direct numerical implementation. The study shows that the modified Cam-clay model is better than the original Cam-clay model for predicting the displacements of the tested models. The elasto-viscoplastic model (time dependent) is not appropriate for representing the short term condition of the experiment performed for this research. However, this model must be considered for field conditions where long term behavior is examined.

要 旨

基礎地盤에 대한 應力·變形率關係를 規明하기 위하여 塑性論에 기초를 둔 構成方程式이 폭넓게 이용되고 있다. 本文은 盛土나 剛性基礎와 같은 地盤構造物을 [軟弱粘土地盤에 축조하였을 때에 發生하는 變形에 關於 研究코지 한 것이다 本 研究를 爲하여 2次元模型土槽를 製作, 再壓密한 試料를 載荷實驗을 통하여 沈下, 隆起, 側方變位등을 測定하고 이들을 여러構成式과 비교고찰하였다. 構成式으로서는 限界狀態概念에 근거를 둔 Cam-clay, Modified Cam-clay 그리고 時間依存性を 고려한 彈·粘塑性 model인 Sekiguchi model을 이용하고 이들을 數値解를 통해 高찰하였다. 本 模型實驗에 의하면 變形을 예측하는데 있어서 Modified Cam-clay model이 Original Cam-clay model보다 실측치에 가까웠으며 또한 時間依存성을 고려한 彈·粘塑性 model인 Sekiguchi model는 本 實驗에서처럼 단기간의 實驗에서는 變形의 creep 조건을 만족시키지 못하므로 現場조건에 따라 判斷하여 적용하여야 할 것으로 판단 된다.

1. 序 論

地盤材料에 대한 力學的舉動을 規明하기 위해 應力 變形率關係에 대한 構成方程式의 解析과 그 適用性에 대해 많은 연구가 시도되고 있으며

이는 특히 構造物의 安全性 및 情報化施工 관리 측면에서도 매우 중요하다고 할 수 있다.

本 研究는 基礎地盤의 變形解析을 위하여 개발한 限界狀態概念에 근거를 둔 構成 model을 전산화하여 이를 模型實驗을 통한 결과와 비교함으로써 開發 program의 精度 및 各 구성식

* 正會員, 松源專門大學 土木科, 助教授

간의 特性을 규명하고 장차 이를 실제지반의 변형해석에 적용시키고자 한 것이다.

本 模型實驗을 위해 2次元模型土槽를 製作하고 그 안에 점토를 remoulding 한 후 재압밀하여 제조한 연약포화점토에 대해 재하실험을 하였다. 연약점토의 變形舉動을 해석하기 위한 흙의 구성방정식으로서는 塑性理論에 기초를 둔 Roscoe(1963)²⁾ 등이 제안한 Cam-clay model과 Roscoe & Burland(1968)³⁾에 의한 modified Cam-clay 理論, 여기에 dilatancy의 時間效果를 고려하여 파괴에측을 연구발표한 탄·점소성 model인 Sekiguchi model(1980)⁷⁾을 適用하고 실험모형을 有限要素化하여 상기 이론들과 비교 解析코져 한 것이다.

본 연구에서는 압밀에서부터 平面變形率條件인 2次元載荷實驗까지 一貫性있게 실험할 수 있도록 模型土槽를 제작, 연구하였다.

2. 應力—變形率관계식

2.1. Original Cam-Clay Model의 降伏函數

Roscoe(1963)²⁾등이 제안한 限界狀態理論에 의하면 하중을 받고 있는 흙이 잔단파괴에 이르면 주응력비가 일정한 값이 되며 이때 유효응력과 체적의 변화없이 무한한 전단변형만 일어난다고 보고 실험을 통해 다음과 같은 항복함수를 수학적으로 유도하였다.

$$F = \frac{q}{p} + \left(\frac{\lambda - k}{1 + e_0} \right) \ln \frac{p}{p_0} = 0 \quad (2-1)$$

여기서 $q = \sigma_1 - \sigma_3$, $p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3)$

λ : $e - \ln p$ 정규압밀곡선의 기울기

k : $e - \ln p$ 곡선에서 除荷—再壓縮曲線의 기울기

e_0 : 초기간극비 p_0 : 경화매개변수

2.2. Modified Cam-Clay Model의 降伏函數

앞에서 서술한 Original Cam-clay model은 점토가 전단하는 동안 소비되는 에너지는 체적 변형률에 의존하지 않는다고 가정한 반면 Burland(1968)³⁾등은 소비에너지는 소성체적변형률과 소성전단변형률에 함께 영향을 주고 있다고 주장하고 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$F = q^2 - M^2 p_0 p + M^2 p^2 \quad (2-2)$$

여기서 M 은 限界狀態기울기이고 p_0 는 $p - q$ 면에서 등방압밀선인 p 축과 항복곡선의 교차점에서 p 값이고 항복곡선은 $p_0/2$ 를 중심으로 하는 타원형의 방정식으로 표현된다.

2.3. 彈粘塑性 Model의 降伏函數

粘土의 變形에 관하여 시간의존성을 고려한 體積 Creep 方程式을 Sekiguchi(1977)⁸⁾는 다음과 같은 식으로 유도하여 제안하였다.

$$V = \frac{\lambda}{1 + e_0} \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) + D \left(\frac{q}{p} - \eta_0 \right) - \alpha \ln \left(\frac{\dot{V}}{V_0} \right) \quad (2-3)$$

여기서 η_0 : 유효 응력비 q/p 의 초기치

α : 2차 압축지수

D : dilatancy 계수

\dot{V} : 체적 변형률속도

V_0 : 초기 체적 변형률속도

式(2-3)에서 하중이 재하된 직후는 탄성상태에 있다고 보고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V^* = \frac{k}{1 + e_0} \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (2-4)$$

또한 소성체적 변형률 V^p 는 $V - V^*$ 이므로 다음과 같다.

$$V^p = \frac{\lambda - k}{1 + e} \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) + D\eta - \alpha \ln \left(\frac{\dot{V}}{V_0} \right) \quad (2-5)$$

式(2-5)를 정리하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F = \alpha \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{\dot{V} t}{\alpha} \right) \exp \left(\frac{f}{\alpha} \right) \right] = V^p \quad (2-6)$$

여기서 F : Visco-plastic potential 로써 scalar 함수

t : 경과 시간

$$f = \frac{\lambda - k}{1 + e_0} \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) + D \left(\frac{q}{p} - \eta_0 \right) \quad (2-7)$$

2.4. 2次元 Plane-Strain 條件에서의 應力—變形率관계

2次元 plane-strain 條件에서 應力—變形率의 관계를 나타내던 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} L+2G & L & 0 \\ & L+2G & 0 \\ L & L & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \\ -\frac{C_5}{C_4} \begin{pmatrix} C_1^2 & C_1 C_2 & 2G f_{xy} C_1 \\ C_1 C_2 & C_2^2 & 2G f_{xy} C_2 \\ C_1 C_3 & C_2 C_3 & 2G f_{xy} C_3 \\ 2G f_{xy} C_1 & 2G f_{xy} C_2 & 2G^2 f_{xy}^2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \\ -\frac{C_5}{C_4} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ 2Gf \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (2-5) \end{aligned}$$

여기서 $f_{xy} = \frac{\partial f}{\partial \tau_{xy}}$

L, G 는 Lamé 정수로서 $L = \frac{D(1-e_0)}{K} - \frac{2}{3}G$,

$G = G_0 \cdot \exp\left(-\frac{e-e_0}{\lambda}\right)$, G_0 : 초기강성률

$$C_1 = L \frac{\partial f}{\partial p} + 2G \frac{\partial f}{\partial \sigma_x}, \quad C_2 = L \frac{\partial f}{\partial p} + 2G \frac{\partial f}{\partial \sigma_y}$$

$$C_3 = L \frac{\partial f}{\partial p} + 2G \frac{\partial f}{\partial \sigma_x}$$

$$C_4 = \left[L \left(\frac{\partial f}{\partial p} \right)^2 + 2G \left\{ \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{xy}} \right)^2 \right\} \right] C_5 + \frac{\partial f}{\partial p}$$

$$C_5 = 1 - \exp\left(-\frac{Vp}{\alpha}\right)$$

$$C_6 = \frac{\partial F}{\partial t} = \dot{V}_0 \exp\left(-\frac{f-Vp}{\alpha}\right)$$

式(2-5)에서 만약 Creep 영향을 무시하면 2차 壓縮指數 $\alpha=0$, $\frac{\partial F}{\partial t}=0$ 이고 $C_5=1$, $C_6=0$ 이 되어, 彈塑性式이 되어 Original Cam-clay model의 stress-strain 관계가 된다.

한편 Modified Cam-clay model에 있어서의 구성관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\{\sigma\} = \left([D] - \frac{1}{\beta} \{d\} \{d\}^T \right) d\{\epsilon\} \quad (2-6)$$

$$\{d\} = [D] \{a\}$$

$$\beta = A + \{a\}^T \{d\}$$

式(2-6)의 A 와 $\{a\}$ 는 상태경계면에서 曲面의 形狀에 의존하며 式(2-2)는 다음과 같이 $\{a\}$ 의 성분으로 나타낼 수 있다.

$$a_i = \left(\frac{\lambda-k}{p} \right) \left[\frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{M} \right) - \frac{3}{2qM} (\sigma_i + p) \right]_{i=x,y,z} \quad (2-7)$$

$$a_j = - \left(\frac{\lambda-k}{p} \right) \left[\frac{\sigma}{p(M^2-n^2)} \tau_j \right]_{j=xy} \quad (2-8)$$

$$A = - (1-e_0) \left(\frac{\lambda-k}{p} \right) \left(\frac{M^2-n^2}{M^2+n^2} \right) \quad (2-9)$$

式(2-7), (2-8), (2-9)를 式(2-6)에 代入하여 應力-變形率의 관계로 나타낼 수 있다.

3. 模型驗實

3.1. 模型土槽의 製作

載荷에 따른 粘土地盤의 變形과 諸般 현상을 관찰 및 측정할 수 있도록 정면과 배면양방향에 두께 2cm인 투명아크릴판을 120cm×25cm로 만들어 재하에 따른 토조내 지반의 변형을 측정토록 하였다. 양측면과 저면은 충분한 강성을 갖는 강재 Channel로 두께 2cm, 저면 120cm×15cm, 측면 25cm×15cm로 Fig. 3-1과 같다.

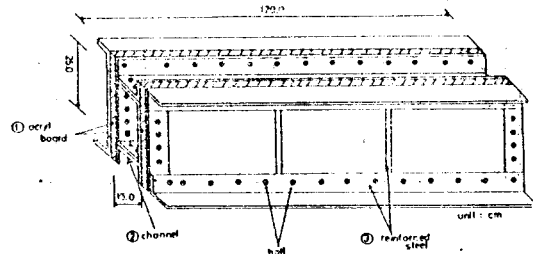


Fig. 3.1 (Isolated) Consolidation apparatus.

3.2. 시료의 조제

실험에 사용된 시료는 영산강하류에서 반입된 층적점토로써 水槽에 투입 완전히 攪拌시킨뒤 No120체를 통과시켜 Slurry 상태로 하여 大型 壓密槽에 넣어 1.0kg/cm²의 압력으로 壓密, 再生한 점토로써 압밀기간은 약 2개월간이다. 압밀조의 구성은 Fig. 3.2와 같이 길이 120cm, 폭 25cm 높이 15cm의 소형압밀조 4개를 결합하여 압밀한 후에 실내로 운반하여 Channel을 풀고 빗금친부분의 압밀시료 1조의 상하면을 절단하여 떼어낸 후 높이 25cm, 폭 15cm가 되도록 90° 회전시킨다. 다음 절단면에는 재하에 의한

Table. 1 Physical properties of soil

Molsture content (%)	LL(%)	PI(%)	No. 200 Sieve passing	U.S.C.S	M	λ	k
43	52	21	90	CH	1.34	0.146	0.023

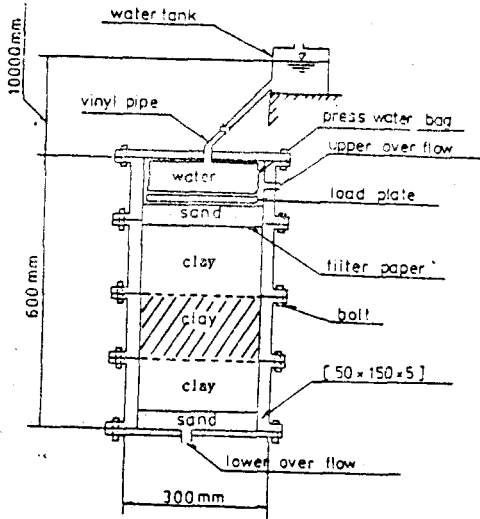


Fig. 3.2 Consolidation apparatus.

변형과정을 측정하고 유한요소해석을 위해 시료 면을 수치해석시의 요소와 같게 표시한 후 아크릴판을 씌운다. 한편 실험에 이용된 시료의 물리적 성질 및 재료정수들은 table 1 과 같다.

3.3. 模型實驗

연약한 점성토와 같은 토질재료로 구성된 자연지반상에 성토구조물이나 剛性基礎와 같은 하중이 작용하였을 때 토질공학측면에서 생각할 수 있는 현상들은 지중응력, 침하 및 측방변위 거동으로 나타낼 수 있다. 이들의 측정을 위해 실험은 응력제하방식을 택하여 각 지점의 침하 및 측방변위를 측정하여 본 연구에서 도입된 구성식들의 해석치와 비교하였다. 해석을 위한 구성방정식으로는 彈塑性理論에 기초한 Cam-clay model 과 시간의존성을 고려한 彈粘塑性 model 인 Sekiguchi model 을 이용하였다.

實驗方法은 전술한 바와 같이 압밀이 완료된 시료질단면에 요소격자망을 만들고 재하를 단계적으로 실시하였다. 하중재하는 매단계 0.1kg/cm²

cm²씩 점진적으로 가했으며 예상되는 파괴하중에 비해 아주 작으리라 예상되는 초기재하단계에서는 재하시간을 8시간으로 하고 0.4kg/cm² 이상부터는 매단계 12시간의 간격으로 1.5kg/cm²까지 지반에 일정한 하중을 전달할 수 있도록 應力制御方法을 택하였다. 다음 재하에 따른 변형거동 및 현상들은 정면과 배면에 부착한 아크릴판측창을 통해 지반내의 임의점을 선정하여 연직침하, 측방변위 및 지표면의 용기를 측정하였다.

4. 模型實驗 및 數值解析結果考察

4.1. 入力資料 및 要素分割

1) Fig. 4.1 과 같이 전폭 120cm 를 반분하여 높이 25cm, 길이 60cm 의 장방형으로 유한요소화하고 2) 경계조건은 바닥은 고정, 양측면은 연직변위허용, 지반상부는 배수조건이다. 3) 하중은 매단계 0.1kg/cm²씩 1.5kg/cm² 까지 증가시킨다. 단 0.4kg/cm²까지는 단계마다 8시간씩 재하시간을 두었으며 그 이후는 12시간의 간격을 두었다. 4) 3축압축시험을 통하여 결정된 토질상수는 전층에 대해 동일하며 다음 표 2와 같다.¹⁰⁾

표에 나타난 주요재료상수는 다음과 같다.

G_o: 초기전단탄성계수

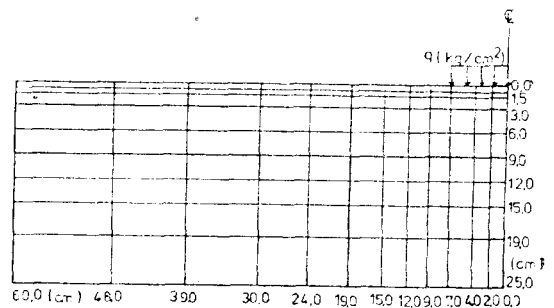


Fig. 4.1 F.E.M grid.

Table 2. Material parameters used in calculation

λ	k	M	C_α	G_0	ν	σ'_{v0}	K_{0c}	σ'_{vc}	K_0	e_0	γ_t	$\dot{\nu}_0$	λ_k	K_{x0}	K_{y0}
0.146	0.023	1.34	0.048	150	0.333	1.0	0.597	1.0	0.597	0.972	1.8	0.1×10^{-6}	0.146	3.75×10^{-7}	3.75×10^{-7}

- σ'_{vc} : 先行압밀시의 유효연직응력
- K_{0c} : 先行압밀시의 정지토압계수
- ν : poisson 비
- σ'_{v0} : 현재의 유효연직응력
- K_0 : 정지토압계수
- e_0 : 초기간극비
- $\dot{\nu}_0$: 초기체적변형률속도
- K_{x0} : 초기수평방향의 투수계수
- K_{y0} : 초기연직방향의 투수계수

4.2. 實驗結果 및 數值解析結果考察

1) 측정변위

Fig. 4. 2(a)(b)는 하중 $q=0.4\text{kg/cm}^2, 0.8\text{kg/cm}^2$ 일때의 측방변위를 나타낸 것으로 측정치와 3모델간의 해석치를 나타낸 것이다. 어느 경우

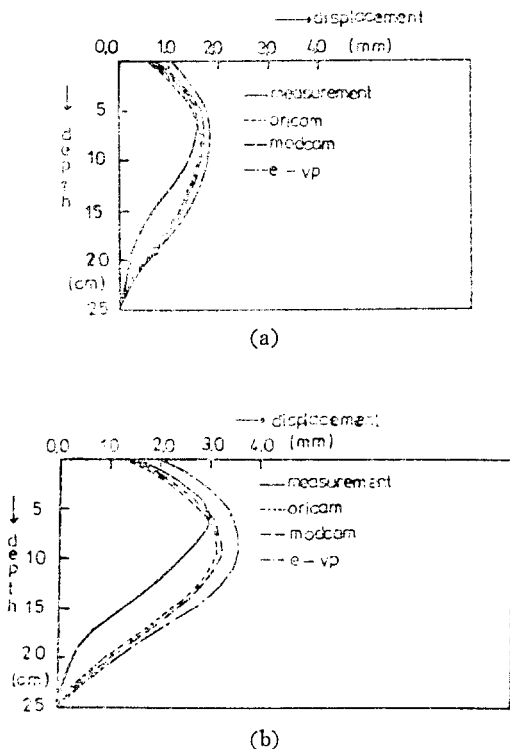


Fig. 4-2 Lateral displacement at (a) 0.4kg/cm^2 (b) 0.8kg/cm^2

나 지표면으로부터 7cm 깊이까지는 실측치와 해석치가 큰 차이가 없으나 그 이하에서는 차이를 보이고 있다. 최대측방변위는 작은 재하상태에서는 큰 차이가 없으나 하중이 클수록 실측값은 크게 변하지 않는 반면 해석치는 크게 나타나고 있다. 이는 실측치는 모형을 작고 측면마찰의 영향이 있는 것으로 보고 있다. 한편 creep 항까지 고려한 Sekiguchi model에 의한 해석치는 실측치보다 또한 다른 두 model에 비해 크게 나타나고 있다. 이는 실험에서 지반이 creep 변형을 일으킬만한 충분한 재하시간을 두지 않았으나 해석에서는 creep 항까지 고려한 영향으로 판단된다.

2) 침하

Fig. 4. 3, Fig. 4. 4는 하중 $q=0.8\text{kg/cm}^2$ 에서의 침하로써 Fig. 4. 3은 지표면에서의 침하이며 Fig. 4. 4는 지표면아래 3cm 지점에서의 침하

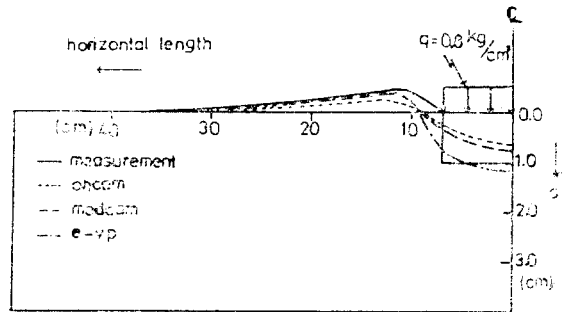


Fig. 4.3 Settlement on surface

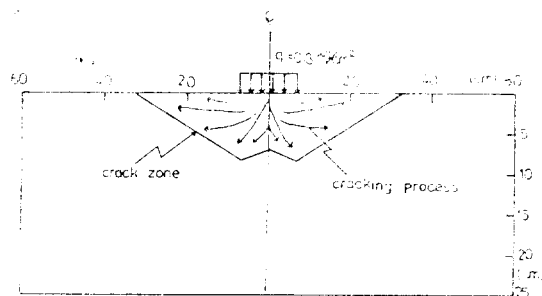


Fig. 4.4 Settlement at 3cm depth

로써 측정치와 해석치와를 비교한 것이다. Fig. 4.3에 나타난바와같이 실측한 기초아래의 침하 및 기초의측의 용기현상을 잘 표현해 주고 있다. 수정 Cam-clay model과 Sekiguchi model에 의한 해석치는 침하 및 용기에 있어서 실측치와 거의 비슷한 양상을 보여주는데 이중 변형의 시간의존성을 고려한 Sekiguchi model에 의한 해석이 실측치보다 약간 크게 침하가 일어나고 있다.

한편 기초아래서의 沈下에 대해 실측치는 전기 초폭에 걸쳐 동일하게 변형이 일어나지만 해석치는 완만하게 곡선을 이루다가 기초중앙에서 실측치와 접근하고 있다. 이것은 변위의 경계조건을 剛性기초에서는 equal strain을 성토와 같은 可變性기초가 축조되었을 때는 free strain을 별개로 구별하여 고려함이 타당함을 예시하고 있다. 본 해석에서는 free strain을 고려하였기 때문에 沈下양상에 차이를 미친것으로 판단된다. 반면 지표면 3cm 이하에서는 沈下양상이 실측치와 해석치가 상호 좋은 관계를 보여주고 있으며 변형의 경계조건이 소실되고 있음을 보여준다.

3) 變位 Vector

Fig. 4.5는 0.8kg/cm^2 하중재하단계에서 지반내 진단파괴영역을 나타낸 것으로 재하로 인한 crack의 진행도 함께 보여주고 있다. 그림에 나타난바와 같이 기초直下에서는 crack이 아래로 향한 반면 기초밖에서는 水平 및 負(-)의 방향으로 진행되어 용기를 일으키는 것이 확인된다.

또한 Fig. 4.6은 해석에 의한 변위Vector로써 Fig. 4.5의 crack 진행방향과 비교해 볼때 방향이 유사한 좋은 대응성을 보여주고 있다. 여

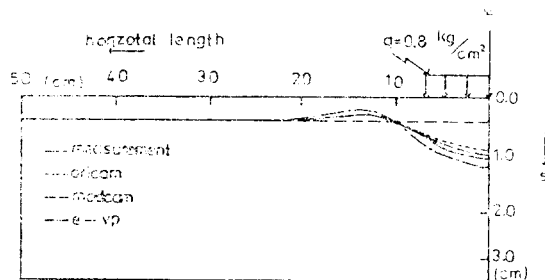


Fig. 4-5 Region of shear failure

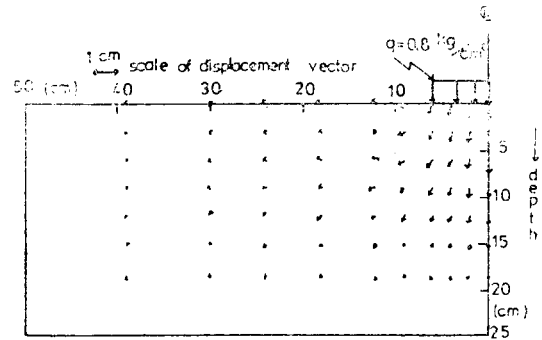


Fig. 4.6 Displacement vector

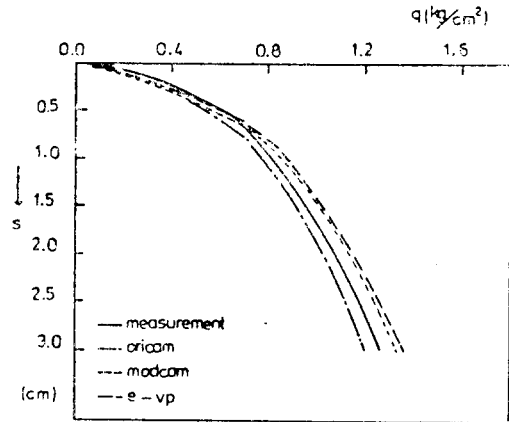


Fig. 4.7 Load-Settlement relation

기서 나타낸 변위 Vector는 modified Cam-clay model에 의한 해결결과지만 다른 두 model에 의한 결과 역시 거의 동일하다.

4) 荷重—沈下관계

Fig. 4.7은 하중—침하관계곡선이다.

original Cam-clay model과 modified Cam-clay model에 의한 해석치는 실측치와 초기에는 거의 일치하나 후반(파괴이후)에서 약간 차이가 나며 Sekiguchi model에 의한 해석은 측정치보다 침하가 약간 크게 발생하고 있다 이것은 Sekiguchi model이 creep항까지 고려한 영향이라고 판단된다. 한편 Fig. 4.7에서 알 수 있듯이 본 시험지반의 파괴하중은 0.8kg/cm^2 정도로 나타나고 있으며 대략 이값은 모두 유사하다고 볼 수 있다.

5. 結 論

본 연구를 위해 模型土槽를 제작하여 실험한 결과치와 여러 구성식의 해석치와 비교 고찰하여 전체적으로 좋은 대응관계를 얻었으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 측방변위는 Sekiguchi model (탄·점소성 model)을 제외하고는 비교적 얇은 깊이(기초폭의 $\frac{1}{2}$)에서는 일치하나 그보다 아래에서는 해석 결과가 더 크게 나타나고 있다. 이점은 실험시의 벽면마찰감소등의 영향으로 검토를 요한다.

2) 침하에 있어서는 실측치와 해석치간에 좋은 관계를 이루고 있다. 다만 수치계산에 있어서 기초형태에 따라 경계조건의 적용에 유의할 필요가 있다.

3) 재하실험결과 기초지반의 파괴는 10cm 깊이까지 확인되고 그 이하에서는 $\epsilon_h = \epsilon_v = 0$ 이다. 그러나 해석결과는 관측의 2배깊이까지 변위가 계산된다. 따라서 지반의 소성영역을 기초폭의 대략 2배(14cm×2)로 보는 관용값보다 약간 작지만 측면마찰을 고려한다면 타당하다고 판단된다.

5) 실험치와 세구성식에 의한 해석결과는 하중을 받는 지반의 변형거동을 표현하는데 있어 modified Cam-clay model에 의한 해석이 original Cam-clay model보다 적용성이 좋다고 판단된다. 그리고 Sekiguchi model(탄·점소성 model)은 지반의 시간의존적 변형성질을 잘 표현해주는 식이지만 이와같이 단기간의 실험에서는 변형의 조건을 만족하지 못하므로 현장조건에 따라 잘 판단하여 적용하여야 할 것으로 판단된다.

※ 本 文은 “1986년도 문교부자유과제 학술연구조성비”의 지원으로 연구되었으며 同部에 심심한 謝意를 표한다.

1. Christian, J.T. and J.W. Boehmer. 1970. "Plane strain consolidation by finite elements." Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE. No. 96, SM4. July, pp.1435~1457.
2. Roscoe, K.H. and H.B. Poorooshasb, 1963. "A theoretical and experimental study of strain in triaxial tests on normally consolidated clays." Geotechnique, London, England, Vol.13, pp.12 ~38.
3. Roscoe, K.H., A.N. Schofield and A. Thrairajah. 1963. "Yielding of clays in states wetter than critical," Geotechnique, Vol.13, pp.211~240.
4. Roscoe, K.H., A.N. Schofield, and C.P. Wroth. 1958. "On the yielding of soils," Geotechnique, Vol.8, No.1, March. pp.22~53.
5. Roscoe, K.H. and J.B. Burland, 1968. "On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay," Engineering plasticity, Cambridge Univ. press, pp.535~609.
6. Schofield, A.N. and C.P. Wroth. 1968. "Critical state soil mechanics." McGraw-Hill Book Co. Ltd. London, England.
7. Shibata, T. and H. Sekiguchi. 1980. "A method of predicting failure of embankment foundation based on elasto-viscoplastic analysis." JSCE. Vol. 301, pp.93~104.
8. Sekiguchi, H., "Rheological Characteristics of clays," proc. 9th. Int. conf. SMFE., 1977, Vol. 1, pp.289~290.
9. Zienkiewicz, O.C. and D.J. Nayler 1971. "The adaption of critical state soil mechanics theory for use in finite elements. stress-strain Behavior of soils."
10. 鄭鎮燮, 1983, "飽和粘土의 應力-變形率에 관한 研究," 工學博士學位論文, 全南大學校 大學院.
11. 李汶樹, 1984, "有限要素法에 의한 多次元 壓密的 變形解析," 工學博士學位論文, 高麗大學校 大學院.
12. 姜秉宜, 1985, "彈塑性 MODEL에 의한 複合軟弱 地盤의 變形에 관한 數值解析研究," 工學博士學位論文, 全南大學校 大學院.

(접수일자 1988. 11. 18)