Cap Model을 利用한 基礎地盤의 數値解析(Ⅱ)

——汎用프로그램의 檢證과 數値計算例——

朴 炳 基*
Park, Byong-Kee
鄭 鎭 燮**
Jeong, Jin-Seob
李 汶 樹***
Lee, Moon-Soo
姜 秉 宣****
Kang, Byung-sun
梁 炳 貫*****
Yang, Byung-Kwan
李 鎭 洙******
Lee, Jean-Soo

Abstract

This paper aims at investigating the characteristics of soil deformation by finite element method (FEM) coupling the cap model with the multi-purpose program developed by authors for the analysis of foundation displacement.

The cap model as the constitutive equation has proved to be very useful to a partially saturated soils as well as rocks with high accuracy.

As described in the previous paper (Park et al 1987), there exist some difficulties in the determination of soil parameters in order to use the cap model at present. However the authors have been studying to seek the method for the determination of the soil parameters from the laboratory results of conventional cylindrical triaxial test.

Though the computer program advocated by foreign scholars has been kept secret, authors accomplished in performing the FEM analysis by the algorithm and program developed by authors for the cap model.

Good results are obtained compared with those published already by Desai(1981)

The main conclusions analyzed are as follows:

* 正會員, 全南大學校 工科大學 敎授
** 正會員, 圓光大學校 工科大學 副敎授
*** 正會員, 全南大學校 農科大學 助敎授
**** 正會員, 松源實業專門大學 助敎授
***** 正會員, 東新實業專門大學 助敎授
****** 正會員, 全南大學校 大學院 博士課程

1. The cap model can be coupled with the multi-purpose computer program of authors based on the Biot's consolidation theory without loss of generality.

2. Big difference appears in the settlement of center of the embankment between the cap model and the modified Cam clay model in undrained conditions. The more study on which is more accurate should be performed in this respect.

要　　旨

本文은 不飽和土나 岩石등에 利用할 수 있는 Cap-model을 필자들이 開發하고 있는 汎用프로그램에 수용하여 FEM 解析한 結果를 보인 것이다.

Cap-model은 발표당시부터 그 有用性이 인정되고 있으나 入力에 필요한 土質媒介變數와 그 確定이 어렵고 또한 解析方法이 알려져 있지 않는 狀態에서 소프트 웨어 상태로 각 연구자에 의해 보존되고 있다. 필자들은 이 모델을 이미 발표한 바 있는 汎用 프로그램에 의해 상식적으로 演算할 수 있도록 하기 위하여 Cap-model의 알고리즘을 開發하여 이를 入力하므로써 Desai 등이 발표한 結果와 매우 근접한 結果를 얻었다.

아직은 精度面에서 좀더 보완을 요하지만 성취가능성이 보이고 있어 앞으로는 土質媒介變數의 간략화의 연구와 더불어 보다 더 完全한 汎用프로그램의 完成을 기하고자 한다.

1. 序　　論

Cap model은 첫번째 論文(I)에서 論述한 바와 같이 不飽和土를 포함하는 넓은 範圍의 土質材料에 대해서 그 有用性이 매우 크다. 그러나 이 모델은 土質媒介變數를 決定하기 위한 實驗이나 그 計算方法이 매우 複雜하고 難澁하여 비록 몇가지 簡易한 方法이 있다고 하나 筆者들이 그 方法을 試圖한바로서는 많은 缺陷이 발견되어 理論的으로 理解하기 어려울 뿐만 아니라 精度도 낮다. 따라서 原點으로 돌아가 이들 媒介變數의 簡素化나 省略은 現段階로서는 精度와 관련하여 더 많은 研究가 必要하다. 한편 이들 媒介變數를 그대로 利用하여 이 構成式을 利用한다 하여도 地盤의 解析方法이나 또는 支配方程式이 秘事項의 Soft ware化가 되어 있어 실질적으로 Cap model을 이용한 地盤解析은 불가능한 실정이다.

筆者들은 韓國科學財團의 支援을 받아 軟弱地盤改良工法에 利用될 汎用프로그램의 開發을 試圖하고 있는데 이 프로그램에는 土質特性에 따라 自由롭게 構成式을 選擇하여 入力하거나 部位에 따라 複數의 構成式도 入力할 수 있도록 되어있고 나아가 Cap model과 같이 特殊한 構成式도 수용할 수 있도록 연구하고 있다. 本文은 Cap model의 媒介變數決定에 대한 研究와는 별도로 이 모델을 汎用프로그램에 수용하여 地盤解析이 가능하도록 알고리즘을 개발하고 그 결과를 *Desai* (1981) 등의 연구와 비교하여 그 精度를 확인하고 數値計算例를 보인 것이다.

2. Cap model을 이용할 汎用프로그램 概要

2-1. 汎用프로그램

여러가지 土質의 材料的 特性을 表現하는 各種構成式과 結合하여 地盤變形解析을 遂行하는 支配方程式으로서 Biot의 壓密方程式을 프로그램의 主脈으로 하고 있다. Biot 方程式은 원래 多次元壓密解析을 위한 것이지만 基本的으로는 應力一變形方程式이고 周知하다시피 그 解析解는 극히 制限된 경우에 限하고 또한 彈性解에 적용된 것이다. 따라서 이를 有限要素法으로 解析하므로써 廣範圍하게 여러 地盤의 變形解析에 利用할 수 있도록 構成式을 선택하여 入力하므로써 彈性 以外의 모델에도 擴張된다. 有限要素法의 解析技法은 Christian-Boehmer의 方法에 의하고 특히 Cap model과 같이 不飽和土의 경우는 排水條件解析(Drained Analysis)(Borja and

Kavazanjian 1984)으로 解析하게 된다. 이 汎用 프로그램의 槪要는 이미 發表한바 있고 詳細히는 李(1984)에 수록되어 있다. 이 프로그램의 使用次元은 平面變形 및 軸對稱問題를 選擇的으로 使用할 수 있고, 入力할 수 있는 應力一變形關係 즉 構成式은 彈性解析의 경우는 不飽和土에 利用될 ϕ model, 그외에 全應力 및 有效應力解析을 選擇的으로 使用할 수 있도록 線形彈性構成式 또는 非線形彈性構成式을 入力할 수 있고 彈塑性問題에 있어서는 構成式으로서 대표적으로 修正 Cam-clay model, Cap model 등, 彈粘塑性問題에서는 또한 Sekiguchi model 등이 入力解析된다. 여기서 같은 不飽和土에 대한 ϕ-model과 Cap model은 構成式의 차이로서 선택 이용한다.

2-2 Cap model의 알고리즘槪要

1) Cap model의 增分理論

彈塑性硬化狀態에 있는 材料의 降伏函數 F는 應力 Tensor σ_{ij} 및 塑性體積變形率 ε_v^p의 함수로서 다음 (1)식과 같고 塑性變形率增分 $d\varepsilon_{ij}^p$에 關聯流動則을 假定하면 (2)식과 같다.

$$F=F(\sigma_{ij},\ \varepsilon_v^p) \cdots\cdots(1)$$

$$d\varepsilon_{ij}^p=\lambda\frac{\partial F}{\partial\sigma_{ij}}=\lambda A_{ij} \cdots\cdots(2)$$

λ는 正의 scalar 量, $A_{ij}=\frac{\partial F}{\partial\sigma_{ij}}$, 따라서

$$dF=A_{ij}d_{ij}+\frac{\partial F}{\partial\varepsilon_v^p}d\varepsilon_v^p=0 \cdots\cdots(3)$$

그런데 $d\varepsilon_{ij}^e=d\varepsilon_{ij}-d\varepsilon_{ij}^p$ ……(4)

$\therefore\ d\sigma_{ij}=C_{ijkl}\ (d\varepsilon_{kl}-d\varepsilon_{kl}^p)$ ……(5)

여기서 C_{ijkl} : 탄성변형의 계수행렬, (5)식을 (3)식에 대입하면 (6)식을 얻는다. (6)식을 변형하여 (7)식을 얻고 (5)식에 (2)식과 (7)식을 대입하여 降伏函數를 사용하는 應力變形率增分關係式 (8)을 얻는다.

$$dF=A_{ij}C_{ijkl}(d\varepsilon_{kl}-d\varepsilon_{kl}^p)+\frac{\partial F}{\partial\varepsilon_v^p}d\varepsilon_v^p=0 \cdots\cdots(6)$$

$$\lambda=A_{ij}C_{ijkl}d\varepsilon_{kl}/\left(A_{ij}C_{ijkl}A_{kl}-\frac{\partial F}{\partial\varepsilon_v^p}A_{ii}\right) \cdots\cdots(7)$$

$$d\sigma_{ij}=\left[C_{ijrs}-\frac{C_{ijkl}A_{kl}A_{mn}C_{mnrs}}{A_{mn}C_{mnrs}A_{rs}-\frac{\partial F}{\partial\varepsilon_v^p}A_{ii}}\right]d\varepsilon_{rs} \cdots\cdots(8)$$

또는 $d\sigma_{ij}=C^{ep}{}_{ijrs}d\varepsilon_{rs}$ 로 표현한다. 이 關係를 Matrix 形態로 表現하면 다음과 같다.

$$[C^{ep}]=[C^e]-\left[\frac{[C^e][A][A]^T[C^e]}{[A]^T[C^e][A]-\frac{\partial F_c}{\partial\varepsilon_v^p}\cdot[A_{11}+A_{22}+A_{33}]}\right] \cdots\cdots(9)$$

여기서 $[C^e]$는 彈性構成 Matrix이고

$[A]^T=[A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{12}, A_{23}, A_{13}]$ 이는 또한

$$[A]^T=\left[\frac{\partial F}{\partial\sigma_{11}},\ \frac{\partial F}{\partial\sigma_{22}},\ \frac{\partial F}{\partial\sigma_{33}},\ \frac{\sigma F}{\partial\sigma_{12}}+\frac{\partial F}{\partial\sigma_{21}}\ \frac{\partial F}{\partial\sigma_{23}}+\frac{\partial F}{\partial\sigma_{32}},\ \frac{\partial F}{\partial\sigma_{13}}+\frac{\partial F}{\partial\sigma_{31}}\right]$$

와 같다.

Cap model인 경우에 利用하면 彈塑性構成關係式이 그 應力狀態가 F_f와 F_c의 어느 面위에 놓이느냐에 따라 다른 形態를 취한다(本題目(I), Fig-1 참조).

만약 $C<J_1$이면

$A_{ij}=\frac{\partial F_c}{\partial\sqrt{J_{2D}}}\cdot\frac{\partial\sqrt{J_{2D}}}{\partial\sigma_{ij}}+\frac{\partial F_c}{\partial J_1}\cdot\frac{\partial J_1}{\partial\sigma_{ij}}$이고

이 때의 $\frac{\partial F_c}{\partial\varepsilon_v^p}=\frac{\partial F_c}{\partial C}\cdot\frac{\partial C}{\partial\varepsilon_v^p}$

구체적으로 $\frac{\partial C}{\partial\varepsilon_v^p}=\frac{1}{1+\gamma\beta Re^{-\beta C}}\left[\frac{1}{DWe^{-DX}}\right]$

$\frac{\partial F_c}{\partial C}=2\gamma\varepsilon R^2e^{-\beta C}(\gamma e^{-\beta C}-\alpha)-2(J_1-C)$이다.

그리고 만약 $C>J_1$이면 降曲面 F_F를 使用하여

$$A_{ij}=\frac{\delta_{ij}}{2\sqrt{J_{2D}}}-(\gamma\beta e^{-\beta J1})\delta_{ij} \cdots\cdots(10)$$

이 때는 $\frac{\partial F_F}{\partial\varepsilon_v^p}=0$이다.

이들 關係를 plane strain 條件과 axisymatric 條件에 맞도록하여 구체적으로 表現하면 다음과 같다.

固定降伏面에 대한 $\{A\}$는

$$A_{ij}=\frac{\delta_{ij}}{2\sqrt{J_{2D}}}-(\gamma\beta e^{-\beta 1J}+\theta)\delta_{ij} \cdots\cdots(11)$$

移動降伏面에 대한 $\{A\}$는

$$A_{ij}=R^2S_{ij}+2(J_1-C)\delta_{ij} \cdots\cdots(12)$$

또한 $\frac{\partial f_c}{\partial\varepsilon_v^p}=\frac{\partial f_c}{\partial C}\cdot\frac{\partial C}{\partial\varepsilon_v^p}$

$$\frac{\partial f_c}{C}=2\gamma\beta R^2e^{-\beta C}(\gamma C^{-\beta C}-\alpha)-2(J_1-C)$$

$$\frac{C}{\partial\varepsilon_v^p}=\frac{1}{[1+\gamma\beta Re^{-\beta C}]}\left[\frac{1}{DWe^{-DX}}\right]$$

$$\frac{\partial f_f}{\partial\varepsilon_v^p}=0$$

全體的인 彈塑性構成 Matrix

$$C^{ep}=\begin{bmatrix}L+2G & L & 0 & L\\ L & L+2G & 0 & L\\ 0 & 0 & G & 0\\ L & L & 0 & L+2G\end{bmatrix}-\frac{1}{C_6}\begin{bmatrix}C_1^2 & C_1C_2 & C_1C_3 & C_1C_4\\ C_1C_2 & C_2^2 & C_2C_3 & C_2C_4\\ C_1C_3 & C_2C_3 & C_3^2 & C_3C_4\\ C_1C_4 & C_2C_4 & C_3C_4 & C_4^2\end{bmatrix}\cdots\cdots(13)$$

여기서 $L=\frac{P(1+e_0)}{K}-\frac{2}{3}G$

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

$$C_1=L(A_{11}+A_{22}+A_{33})+2GA_{11}$$
$$C_2=L(A_{11}+A_{22}+A_{33})+2GA_{22}$$
$$C_3=GA_{12}$$
$$C_4=L(A_{11}+A_{22}+A_{33})+2GA_{33}$$
$$C_5=C_1A_{11}+C_2A_{22}+C_3A_{12}+C_4A_{33}$$
$$C_6=C_7(A_{11}+A_{22}+A_{33})$$
$$C_7=\frac{\partial f_c}{\partial\varepsilon_v^p}\text{ or }\frac{\partial f_f}{\partial\varepsilon_v^p}$$
$$C_8=C_5-C_6$$

2) 알고리즘

Cap model의 알고리즘을 開發함에 있어서 非線形問題의 解析은 위 增分理論方法을 使用하였다. 또한 構成 matrix는 變形의 特性이 應力과 變形率에 대해서 變化하므로 各荷重의 增分때마다 다시 만들어 진다. 알고리즘은 먼저 材料常數 및 荷重條件에 따라서 初期應力 σ_{ij}^0가 만들어지고 여기서 $3P_0$ 값을 X_0 값으로 使用하여 modified regula falsi 方法을 使用하여 C_0 값을 구하고 初期 C^{ep} Matrix를 만들어 1段階荷重增加에 따른 變形解析으로부터 求한 $d\varepsilon_v^p$를 使用하여 $\varepsilon_{vn}^p=\varepsilon_{von-1}^p+d\varepsilon_{vn}^p$ 값을 얻는다. 이 값을 使用 $X_n(\varepsilon_{vn}^p)$값을 구하고 이 $X_n(\varepsilon_{vn}^p)$를 알고리즘의 最終段階에서 各 Time step 끝에서의 σ_{ij}, ε_{ij}를 計算하는 방식이다. 破壞面의 領域을 規定하기 위하여 應力不變量 J_1 값을 使用한다. 이때 J_1의 狀態에 따라서 ① tension Cut off 區間($J_1\leqq T$), ② failure surface 區間($T<J_1<C$), ③ Cap surface 區間($J_1\geq C$)으로 나눈다. 이들을 具體的으로 表現하면 다음과 같다.

① 破壞區間(failure surface)

$T<J_1<C$의 區間이다. 이 區間에서는 固定降伏面式

$$f_f(J_1,\sqrt{J_{2D}})=\sqrt{J_{2D}}-\{\alpha+\theta J_1-\gamma\exp(-\beta J_1)\}\cdots\cdots(14)$$

가 使用된다. 만약 $f_f\geq 0$이면 彈塑性構成 matrix C^{ep}를 使用하고 $f_f<0$이면 彈性構成 matrix C^e를 使用한다.

② Cap 面區間(Cap Surface)

$J_1\geq C$의 區間이다. 이 區間에서는 移動降伏面式인

$$f_c(J_1,J_{2D},X)=R^2J_{2D}-(X-C)^2+(J_1-C)^2\cdots\cdots(15)$$

의 降伏函數가 使用되며 만약 $f_c\geq 0$이면 彈塑性構成 matrix C^{ep}를 使用하고 $f_c<0$이면 彈性構性 matrix C^e를 使用한다.

③ Tension Cut off 區間

$J_1<T$의 區間으로 이 區間에서는 軸差應力 $S_{ij}=0$이고

$$f_T(J_1)=J_1-T\cdots\cdots(16)$$

또한 모든 體積應力 및 軸差應力은 J_1이 T에 接近할 때 없어지며 $\sigma_{11}=\sigma_{22}=\sigma_{33}=\frac{T}{3}$이고 以外에서 $\sigma_{ij}=0$이다.

3. Cap-model 프로그램의 檢證

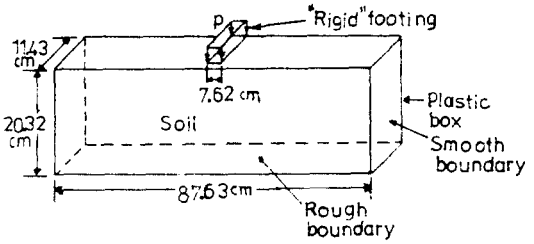
筆者들은 言及한 바와 같이 汎用 프로그램의 일환으로 不飽和土에도 적용할 수 있도록 Cap-model도 포함시켜 보다 더 多樣한 土質條件에도 適用할 수 있도록 노력하고 있다.

本章에서는 構成式으로서 Cap-model을 入力하여 演算할 경우 그 精度가 어느 程度인가를 確認하기 위하여 *Desai et. al* (1981)이 試驗土槽에서 實測한 結果와 그들의 開發프로그램에 의해 數値解析한 결과를 比較한 硏究結果와 本 프로그램과 比較한다. 따라서 그들이 使用한 土質常數를 本 프로그램에 入力하여 그 結果를 직접 比較하게 된다.

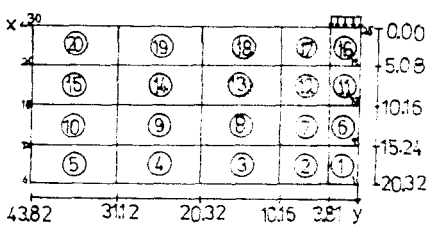
Desai 등에 의해 수행된 試驗土槽의 규격 및 數値計算에 적용된 경계조건과 土質常數등은 다

음과 같다.

3-1 試驗土槽



(a)



(b)

Fig. 3-1. (a), (b) Finite Element Mesh Used for the Model Footing : (a) Test Model, (b) Finite Element Mesh.

1) 試驗土槽는 Fig. 3-1(a)와 같이 길이 87.63 cm, 높이 30.50cm, 폭 11.43cm의 사각형 土槽이다. 시험은 20.32cm 높이까지 흙을 채우고 길이 11.43cm, 높이 1.90cm, 폭 7.62cm의 기초(footing)를 中央上部에 위치하게 하고 鉛直增分荷重(每段階 0.1kg/cm² 씩 12段階)을 基礎에 가하여 荷重載荷每段階마다 흙의 鉛直變位를 測定한다.

2) 유한요소 해석에 사용한 mesh는 Fig. 3-1. (b)에 나타낸 바와 같으며 경계조건으로 側面은 鉛直變位만 許容하고, 바닥은 rough하며 載荷中에 간극수압은 發生하지 않도록 完全排水條件으로 한다.

3) 시험 및 數値計算에 使用한 土質材料는 다음의 특성을 갖는다.

E ; parameter in cap- model : 281.43kg/cm²

ν ; poisson's ratio : 0.35

C ; cohesion : 0.00

ϕ ; angle of friction : 35°

λ ; slope of consolidation curve : 0.11

κ ; slope of swelling curve : 0.001

α ; parameter in Drucker-prager model : 0.394kg/cm²

θ ; parameter in cap-medel : 0.11

γ ; 〃 : 0.394kg/cm²

β ; 〃 : 0.881[kg/cm²]$^{-1}$

D ; 〃 : 0.711[kg/cm²]$^{-1}$

W ; 〃 : 0.18

R ; ratio of semi-major to semi-minor axes of yield ellipse : 2.0

3-2. 結果 및 考察

Fig. 3-2는 荷重—鉛直變位關係曲線으로 Drucker-prager model, cap model 및 本 開發프로그램을 이용 解析한 結果와 Desai et al (1981)이 試驗을 통하여 얻은 實驗値와를 比較한 것이다.

그림에 나타난 바와 같이 Drucker-prager model에 의한 解析値는 實驗結果와 큰 差異를 보이고 있으며 限界狀態모델은 實驗値와 比較的 좋은 상호관계를 나타내고 있으나 초기하중단계 이상 부분에서는 實驗曲線과 상당한 差異가 발생한다.

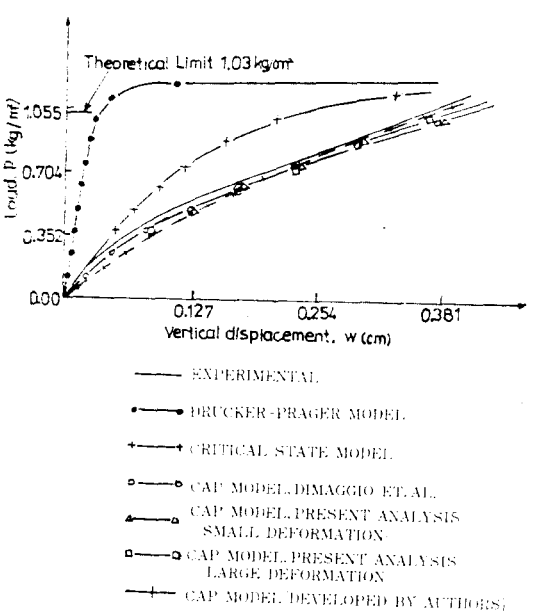


Fig. 3-2. Comparisons Between Predictions from Various Modes and Observations.

한편, Cap-model (DiMaggio et al)과 또 하나의 Cap-model (small deformation and large deformation analysis ; Desai)에 의한 解析結果와 實驗値와를 比較分析해 볼 때 매우 우수한 상호관계가 나타남을 알 수 있으며 段階的인 荷重載荷增加와 더불어 점진적으로 硬化되어가는 土質材料에 대한 擧動豫測에 매우 뛰어난 適用可能性을 생각할 수 있다.

그리고 筆者들의 Cap-model 프로그램에 의한 解析結果 역시 Desai 등에 의한 數値計算結果 및 實驗値간에 좋은 관계를 나타내고 있으며 초반보다 후반에서 그 精度가 매우 높다고 認定된다 다만 초반에서는 조금 精度가 떨어지고 있으나, 이는 解析過程에서 本 프로그램은 增分理論에만 의존한데 比하여 Desai 등은 여기에 다시 한번 반복법을 適用한 차이이다. 따라서 초기부분에 이 方法을 利用할 것을 검토중이다(Owen, Hinton, 1980, p. 79).

Fig. 3-3. (a), (b)는 最終荷重段階(p=1.2kg/cm²)에서 Drucker-prager model, Cap-model, (Desai et al, 1981) 및 本 開發 Cap-model 프로그램에서 얻은 각 節點變位 vector를 나타낸 것이다.

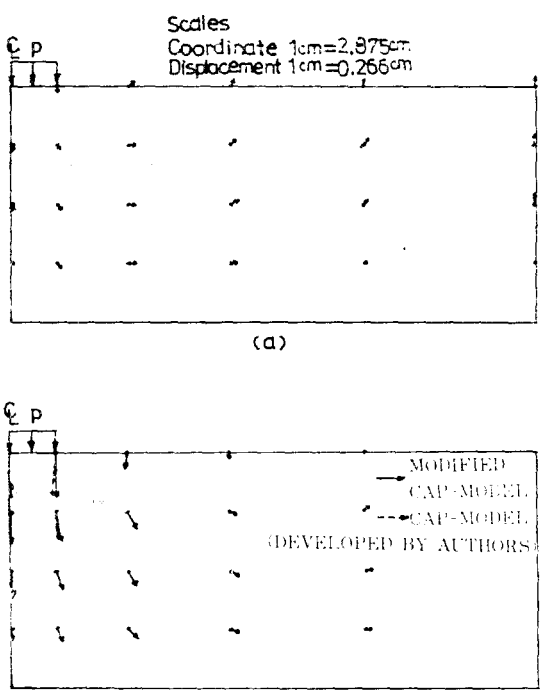


Fig. 3-3. Comparisons of Displacement Patterns: (a) Drucker-Prager Model P=1.13kg/cm², (b) Modified Cap-Model and Cap-model (Developed by Authors) P=1.2kg/cm².

먼저 Drucker-prager에 의한 그림 (a)를 살펴보면 기초의 直下, 近接 및 周邊 各 地域에서 거의 비슷한 크기의 擧動을 보이고 있다. 또한 重要한 事實은 基礎 바깥부분에서는 隆起를 발생시키고 있다.

반면에 Desai et al에 의한 Cap-model (그림 (b)의 실선 Vector) 및 本 硏究에서의 프로그램 (그림 (b)의 점선 Vector)에서의 變位 Vector는 거의 완전하게 일치하고 있으며 基礎直下 및 近接地域에서 Drucker-prager에 의한 것 보다 더 큰 움직임이 일어나고 周邊地域에서는 매우 작은 움직임을 보여주고 있다.

이러한 事實에 대한 타당성 입증은 Desai et al (1981)에 의해 실시된 세단계 荷重載荷를 선택한 사진촬영(문헌 2, Fig. 13. 참조)에서 확인할 수 있다.

지금까지 Drucker-Prager model, 限界狀態모델 및 Cap-model에 의한 解析結果를 實驗結果(Desai et al)와 比較해 볼 때 불포화토가 하중증가와 더불어 점진적인 硬化擧動을 나타내는 土質材料에 대해서는 Cap-model에 의한 解析이 매우 타당하다고 판단된다.

또한 本 硏究에서 開發한 Cap-model 프로그램 역시 Desai 등에 의한 數値解析結果와 實驗値比較에서 좋은 關係를 나타내고 있다.

4. 模型地盤에의 適用

4-1 模型地盤의 解析條件

1) 模型地盤의 解析영역은 폭 30m, 깊이 5m로 하고 6층, 66개의 要素, 84節點으로 분할하였으며 Fig. 4-1과 같다.

2) 基礎幅은 4m로 총 50t/m²의 荷重을 每段階 2t/m²씩 증가 시켰다.

3) 模型地盤의 境界條件은 바닥이 rough하며 側面은 鉛直變位만 許容한다.

4) 數値解析에 사용한 土質常數는 3-1절의 3)항과 同一하다.

Table. 4-1. The Classification Based on the Bottom and Drain.

Case	Condition in Bottom of Footing	Drain condition	Legend	Model Type
Case-1	Rigid	Drain	○—○ 10(t/m²) △—△ 20(〃) □—□ 30(〃)	Cap-Model
	Non-Rigid	Drain	●—● 10(〃) ▲—▲ 20(〃) ■—■ 30(〃)	
Case-2	Rigid	Undrain	○—○ △—△ □—□	
	Non-Rigid	Undrain	●—● ▲—▲ ■—■	
Case-3	Rigid	Drain	○—○ △—△ □—□	
	Rigid	Undrain	●—● ▲—▲ ■—■	
Case-4	Non-Rigid	Drain	○—○ △—△ □—□	
	Non-Rigid	Undrain	●—● ▲—▲ ■—■	
Case-5	Rigid		Water Table (m): 0.0 ○—○; 1.0 △—△; 2.0 □—□; 3.0 ●—●	
	Rigid			
Case-6	Rigid	Undrain	○—○ △—△ □—□	
	Rigid	Undrain	●—● ▲—▲ ■—■	Modified Cam-clay model

* Conventions (○—○, △—△, □—□ (●—●, ▲—▲, ■—■)) Means P=10, 20, 30t/m² Respectively Unless Specified Otherwise in the Legend.

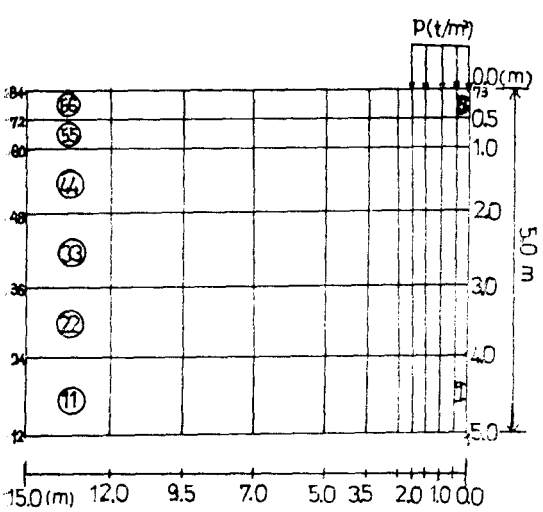


Fig. 4-1. Finite Element Mesh.

5) 地盤의 變形解析에 쓰일 項目은 표 4-1.과 같다.

또한 표에 나타난 바와 같이 Cap-model과의 비교를 위해 Modified cam-clay-model의 경우에도 계산한다. 基礎低面은 剛性을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해서 計算을 수행하되 飽和土를 대상으로 하는 非排水條件解析(undrained analysis)과 不飽和土가 대상이 되는 排水條件解析(drained analysis)으로 나누어 각각 수행한다.

또한 地盤의 깊이에 따라 地下水位를 變化시킬 경우와 두 model간의 解析結果를 比較검토한다.

4-2 解析結果 및 考察

1) Case-1

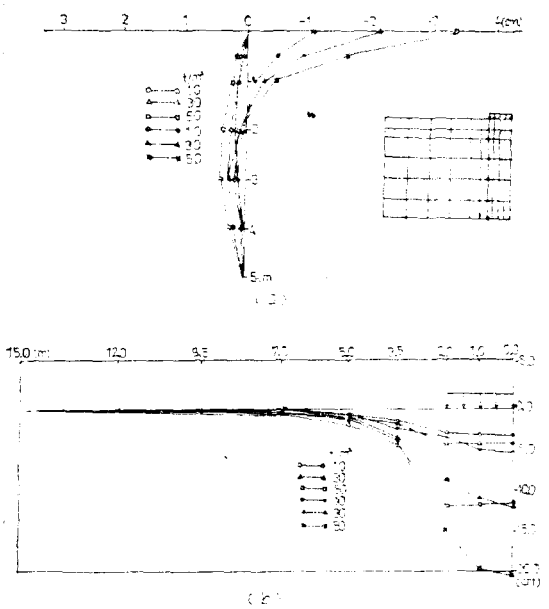


Fig. 4-2. (a) Lateral Displacement of Case-1. (b) Settlement of Case-1.

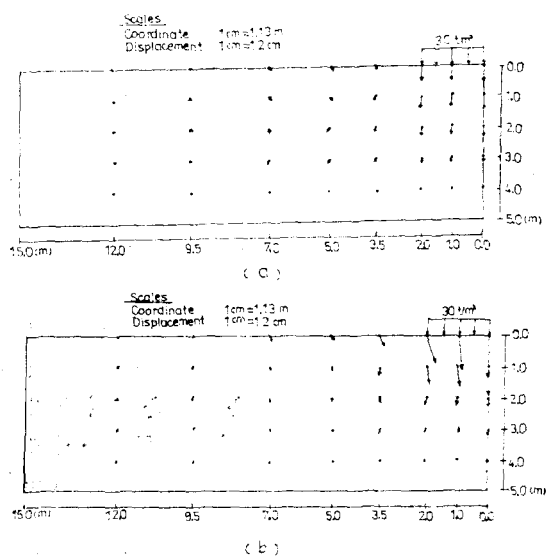


Fig. 4-3. (a) Displacement Patterns with Rigid Condition of Case-1, (b) Displacement Patterns with Non-rigid Condition of Case-1.

배수상태(不飽和土)에서 Cap-model에 의한 有限要素解析結果의 側方變位를 단계별 재하하중별로 그리고 기초에 강성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 나누어 Fig. 4-2(a)에 나타낸다.

강성을 고려한 경우 盛土下端部의 水平變位가 억제되어서 變位量이 0이다. 地表에서 멀어짐에 따라 재하외측으로 약간의 變位를 일으킨다. 이와 반대로 강성을 고려하지 않는 경우 地表에서 가장 큰 변위를 보이며 약 2m 깊이에서 재하 하중의 크기에 관계없이 變位가 거의 없는 상태가 되고 있다. 그 아래 부분에서는 外側으로 약간의 變位를 나타내며 5m 아래에서는 구속조건(수평 방향 및 鉛直方向拘束)에 의해서 변위가 없다.

Fig. 4-2(b)에는 모든 하중단계에서 기초강성의 有無에 의한 연직변위 즉 침하를 나타낸다. 강성이 없는 경우가 있는 경우보다 약 2배의 침하량을 보이며 성토면 하중 폭과 같은 수평거리에서는 침하량이 급격히 감소하고 있다.

Fig. 4-3(a), (b)에는 30t/m²의 盛土荷重일 때 變位 Vector를 강성을 고려할 때와 고려하지 않을 때 별로 나타냈다.

앞에서 기술한 바와 같이 침하는 후자가 원래의 약 2배를 나타내지만 水平變位는 그 變位의 양상이 양자간에 크게 다르므로 강성이 없을 경우 荷重直下部를 中心으로 Vector方向이 내측으로 향하고 있다.

2) Case-2

비배수상태(飽和土)에서의 水平變位의 解析結果를 Fig. 4-4(a)에 나타낸다. Case-1과 比較하여 주목할만한 사실은 變位方向이 모두 外側으로 向한다는 것이다. 강성이 있을 경우 억제효과로 인하여 變位가 작지만 강성을 고려하지 않는 경우에는 하중의 크기 순으로 水平變位가 증가하여 地表의 약간 아래에서 가장 큰 값을 보이고 있는 것과 대조적이다.

Fig. 4-4(b)에는 침하량을 나타낸다. 비배수상태에서 강성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우와는 상당한 차이가 나타나고 있다. 그런데 盛土下端部外側에서 기초폭의 1/2 정도의 거리를 넘어서면 거의 같은 양의 융기량을 나타내며 최대치가 나타난다. 이점에서는 강성유무에 크게 관계 없다는 것이 주목된다.

Fig. 4-5(a), (b)에 30t/m² 성토하중시의 變位 Vector를 나타낸다. 특징은 모두 방향이 外側을

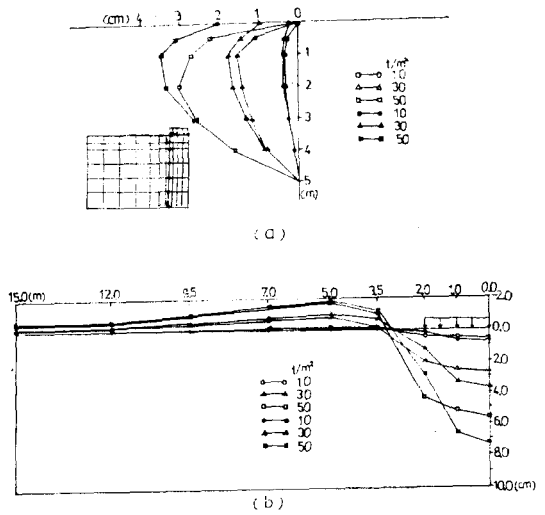


Fig. 4-4. (a) Lateral Displacement of Case-2, (b) Settlement of Case-2.

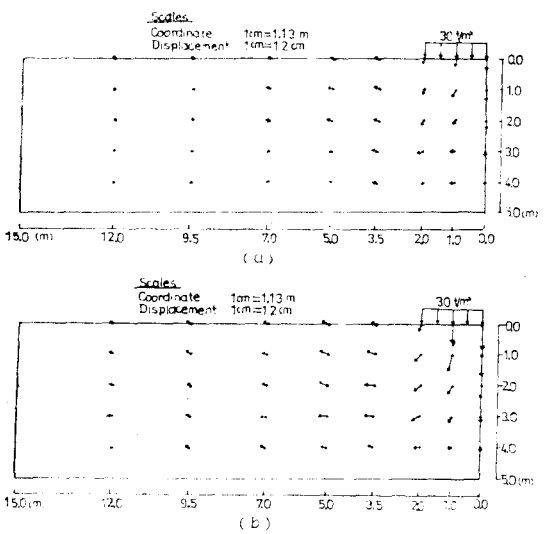


Fig. 4-5. (a) Displacement Patterns with Rigid Condition of Case-2. (b) Displacement Patterns with Non-rigid Condition of Case-2.

向하고 있는 것이 Case-1과 다르며 이는 강성을 고려하지 않은 경우가 더 현저하다.

3) Case-3

강성을 고려하는 경우의 배수와 비배수 상태를 Fig. 4-6(a), (b)에 나타낸다.

Fig. 4-6(a)에는 강성의 효과 때문에 성토단부에서의 변위가 억제되고 있으나 비배수의 경우

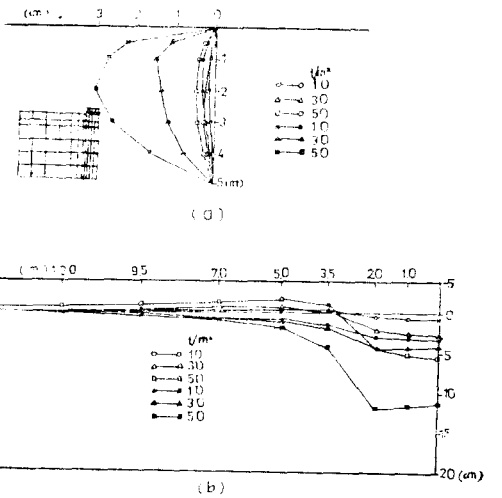


Fig. 4-6. (a) Lateral Displacement of Case-3. (b) Settelment of Case-3.

는 外側으로 큰 變位를 나타내고 있다. 排水의 경우는 Case-1에서와 같이 水平變位량이 아주 작게 나타난다. Fig. 4-6(b)는 배수와 비배수상태에서의 침하정도를 나타낸 것인데 非排水狀態가 排水狀態의 경우보다 아주 적게 나타나고 있다. 다만 非排水의 경우는 융기현상이 현저하게 나타나고 있다.

4) Case-4

기초의 강성을 고려하지 않는 경우 排水와 非

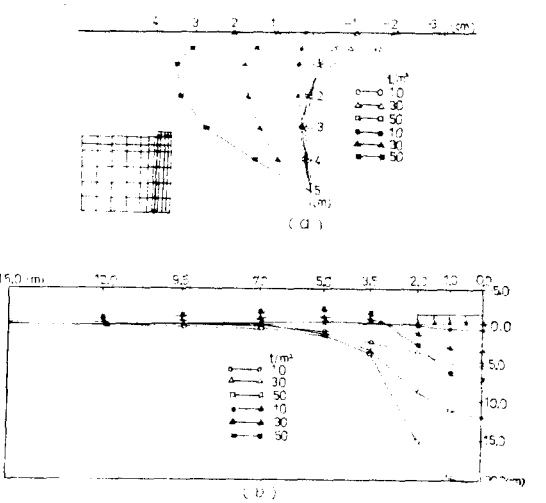


Fig. 4-7. (a) Lateral Displacement of Case-4, (b) Settlement of Case-4.

排水의 水平變位差異를 검토하기 위하여 Fig. 4-7(a)에 水平變位를 Fig. 4-7(b)에 침하를 나타낸다. 배수의 경우 水平變位는 內側으로 이동하지만 모든 荷重段階의 약 2m 아래에서 方向을 바꾸어 外側으로 옮겨진다.

한편 非排水의 경우는 모두 外側으로 변위가 발생하고 최대는 地表에서 1m 아래에서 발생하고 있다.

非排水의 경우 盛土部外側에서 융기가 일어나고 排水의 경우는 침하만이 일어나고 있다. 盛土中央部의 침하량은 역시 非排水의 경우 排水狀態보다 훨씬 적다.

5) Case-5

이는 地下水位의 有無에 따른 변위를 살펴본 것이다. Fig. 4-8에 地下水位의 變動(즉, 排水條件의 變化)에 따른 침하량을 나타낸 것이다. 30t/m²를 載荷했을 때 地下水位가 상승함에 따라 침하량이 줄어들며, 水位가 中央部까지 상승할 때는 地盤의 융기현상이 일어나지 않으나 이보다 더 상승하면 약간의 융기현상이 보인다.

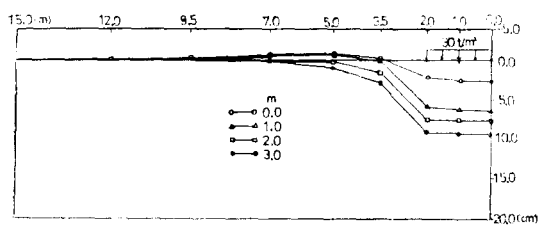


Fig. 4-8. Settlement of Case-5.

6) Case-6

Fig. 4-9.에는 非排水의 경우 강성을 고려할 때 Cap-model과 修正 Cam-clay model에 의한 침하량을 비교한 것이다. 주목할 점은 Cap-model

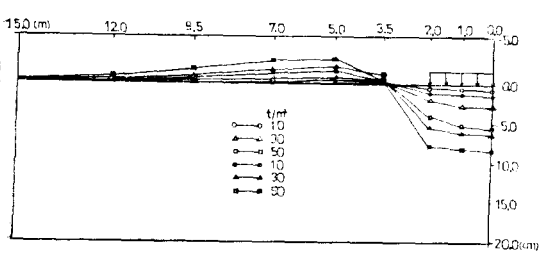


Fig. 4-9. Settlement of Case-6.

에 의한 침하량이 修正 Cam-clay model에 의한 침하량보다 아주 작게 나타난다.

이 점은 아직 比較한 研究가 없으므로 다음 기회에 實驗을 통해 그 結果를 발표할 계획이다.

5. 結　論

構成式으로서 Cap-model을 利用하는 地盤變形解析 FEM 프로그램을 開發하여 그 結果를 利用 二次元地盤문제에 대하여 해석한 結果 다음과 같은 結果를 얻었다.

1) 필자들이 研究하고 있는 汎用프로그램에도 Cap-model에 대한 構成式項의 알고리즘을 入力하므로서 무리없이 計算이 수행되고 精度도 높다.

2) 二次元문제의 數値解析을 不飽和土의 경우는 排水條件解析(drained analysis)으로 入力하므로서 Cap-model에 대한 數値計算이 가능해짐을 알았고 전체의 汎用프로그램을 바꾸지 않아도 된다.

3) 二次元문제의 數値解析結果 基礎地盤의 강성유무에 따른 침하, 水平變位의 解析結果는 침하의 경우 排水條件解析이 가장 크고 本例에서는 基礎의 강성을 고려하지 않을 경우 50t/m²의 경우 最大 약 20cm 정도의 不飽和土 침하가 발생한다. 水平變位는 剛性을 고려하지 않는 경우 排水條件일 때 盛土地盤內部로 向하여 이 때 發生하는 침하와 더불어 陷沒하는 傾向을 보인다.

4) modified Cam-clay와 비교할 때 Cap-model의 沈下가 전자보다 非排水條件일 때 훨씬 작게 나타나고 있다.

謝　辭

本 研究는 韓國科學財團의 1987年度 研究費支援에 의해 수행되었으며 깊은 感謝말씀 올린다. 또한 本 研究를 위해 모든 努力을 아끼지 않은 全南大 大學院 康權修, 車福滴, 黃淳鍾君, 그리고 圓光大 南宮玟先生에게 다시한번 감사드립니다.

參 考 文 獻

1. Desai, C.S. and Siriwardane, H.J, "Constitutive Law

for Engineering Materials," prentice-Hall, Inc., 1984.
2. Desai, C.S., Phan, M.V., and Sture, S., "Procedure Selection and Application of Plasticity Models for a Soil," Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 5, 1981, pp. 295~311.
3. DiMaggio, F. L., and Sandler, I.S., "Material Model for Granular Soils, J. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol. 97, No. EM3, 1971, pp. 935~950.
4. Owen, O.R.J and Hinton, E., Finite Elements in Plasticity, Pineridge press, 1980.
5. Sandler, I.S., and Rubin, D., "An Algorithm and a Modular Subroutine for the Cap Model," Int, J. for Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 3, 1979, pp. 173~186.
6. Sandler, I.S., DiMaggio, F.L., and Baladi, G.Y., "Generalized Cap Model for Geologic Materials," J. Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 102, No. GT7, July 1976, pp. 683~699.
7. Siriwardane, M.J., and Desai, C.S.," Computational Procedures for Non-Linear Three-Dimensional Analysis with Some Advanced Constitutive Laws," Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 7, 1983, pp. 143~171.
8. Siriwardane, H.J., and Desai, C.S., "Evaluation of Constitutive Parameters for Geologic Media; Modified Cam Clay and Cap Model," proc. Workshop Session,Symp. Implementation of Computer Procedure and Stress-Strain Laws in Geotech. Eng., Chicago, Aug. 1981.
9. Zaman, M.M., Desai, C.S., and FaruQue, M.O., "An Algorithm for Determining Parameters for Cap Model from Raw Laboratory Test Data," proc. 4th. Int. Conf. Numer. Methods Geomech., Edmonton, Canada, 1982.
10. 李汶樹, 有限要素法에 의한 多次元 壓密의 變形解析, 工學博士學位 論文, 高麗大學院, 1984.
11. 朴炳基, 鄭鎭燮, 李汶樹, 妻秉宣, 梁炳賈, Cap Model을 利用한 基礎地盤의 數値解析(I) 大韓土質工學會誌, Vol. 3, No. 1, 1987, pp. 65~75.