

# 複合軟弱地盤의 變形解析에 관한 數值解析

Numerical Analysis on Deformation of Soft Clays  
Reinforced with Rigid Materials

姜 秉 宣\*

Kang, Byung Sun

朴 炳 基\*\*

Park, Byung Kee

鄭 鎭 燮\*\*\*

Chung, Jin Seob

---

## ABSTRACT

This study aims at the development of computer program for the deformation analysis of soft clay layers, and using this computer program, study the constraint effect of deformation-heaving, lateral displacement—of the soft clay layers reinforced with sheet pile at the tip of banking or improvement of soft clay layer up to hard strata, under intact state (natural) and the state of vertical drain respectively. For this study, Biot's consolidation theories and modified Cam-clay theory for constitutive equation for FEM were selected and coupled governing equation, and Christian-Boehmer's technique was applied to solve the coupled relationship.

The following results are obtained.

1. Sheet pile or improvement of soft clay layer to the hard strata work well against the settlement of neighboring ground.
2. In view of restriction of heaving or lateral displacement, sheet pile is not supposed to be of use.
3. Sheet pile is of effect only when vertical drain is constructed for acceleration of consolidation and load increases gradually.
4. The larger the rigidity of improvement of layer to hard strata is, the less settlement occurs.

## 要 旨

本稿는 軟弱地盤變形解析에 利用될 汎用 program 을 개발하고 이를 利用하여 盛土部끝에 sheet pile 을 打設하거나 혹은 盛土部아래의 軟弱粘土地盤을 改良하였을 때의 變形抑制效果를 研究한 것이다. 本稿에 適用된 壓密理論으로서 Biot 의 壓密方程式과 構成方程式으로서 彈塑性理論에 근거한

---

\* 正會員·松源專門大學 土木科 教授

\*\* 正會員·全南大學校 工科學 教授

\*\*\* 正會員·圓光大學校 工科學 助教授

modified Cam-clay 理論을 適用하였고 有限要素解析으로서는 Christian-Boehmer 系를 導入하여 program 化한 것이다. 그 主要한 結論은 다음과 같다.

1. 周邊地盤의 沈下效果에 關係서는 sheet pile 이나 深層混合處理깊이를 支持層까지 貫入하여 施工하고 그 自身の 沈下が 없을 경우에만 有效하다.
2. 흔히 使用되는 sheet pile 對策工法은 통상의 steel sheet pile 의 剛性으로서는 盛土直後의 隆起, 側方變位の 抑制效果는 期待할 수 없다.
3. Sheet pile 에 대한 效果的인 使用方法은 盛土下部에 壓密을 촉진하기 위해 vertical drain 을 設置하고 漸增載荷 方法만이 확실한 效果가 있다.
4. 深層混合處理工法은 豫想한 바와 같이 그 自體가 剛性이 클수록 沈下抑制效果가 있다. 特別 grouting 을 통한 地盤強化가 곧장 周邊地盤의 變形抑制效果가 있다고 단정하는 것은 그 剛性과 관련하여 신중히 고려하여 決定해야 한다.

## 1. 序 論

本稿는 軟弱地盤解析에 利用될 汎用 program 의 開發을 통하여 同一한 軟弱粘土地盤 위의 既設構造物周邊에 盛土나 構造物 등을 近接施工함으로써 유발되는 地盤의 變形에 의하여 周邊構造物에 미칠 影響을 밝히고자 한 것이다.

近接施工時의 各種 對策으로써 sheet pile 이나 深層混合處理工法 그 외에 格子型 slab 工法 등 여러 가지가 있다. 여기서는 經濟性, 施工性 등을 考慮하여 가장 많이 쓰이는 sheet pile 工法 이나 深層混合處理工法 그리고 이들의 對策效果를 높이기 위해 盛土層下部에 vertical drain 을 배치하였을 경우에 대한 模型地盤의 變形을 이미 發表한 바 있는 汎用프로그램을 이용하여 數值實驗을 통해 複合構造物의 地盤變形特性을 밝히고자 한 것이다.

本稿의 變形解析에 適用된 理論은 Biot 의 壓密理論과 彈塑性理論을 근거한 Cam-clay model 을 補完한 modified Cam-clay model 을 導入하여 有限要素解析을 한 것이다. 또한 開發된 program 의 精度와 그 妥當性을 確認하기 위해 불란서의 Magnan(1982) 등이 研究目的으로 Qubzacles-Ponts 에서 試驗盛土한 實測資料를 같은 條件하에서 그들의 土質常數를 本 program 에 適用 比較하여 그 精度를 이미 確認한 바 있다. (朴海根 其他 1985)

## 2. Modified Cam-clay 理論

限界狀態理論은 彈塑性變形率硬化材料로 보는 正規壓密土와 過壓密土에 대하여 一般的인 應力變形率理論을 適用하여서 normality condition (塑性變形率增分 vector 는 어디서나 降伏軌跡에 垂直하다는 規準)을 만족하는 flow rule 이 適用된다고 假定하여 Roscoe 와 Schofield(1963)에 의해 original Cam-clay model 이라는 理想上體를 數學的으로 誘導하였다. 그러나 그후 Roscoe 와 Burland(1968)에 의해 應力增分 동안에 消散된 일에 관한 새로운 式을 導入하여 修正提案된 것이 modified Cam-clay 理論이다. 다음(Fig. 2-1)은 이들 理論을 說明하기 위하여 狀態曲面 (state boundary surface), 正規壓密曲線(normal consolidation line), 膨潤曲線(swelling line), 膨潤壁(swelling wall), 降伏曲線(yield locus), 限

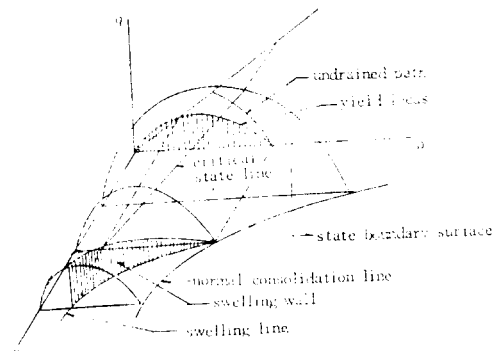


Fig. 2-1. State boundary yield

界狀態線(critical state line) 및 非排水經路(undrained path) 등을 空間座標에 模式的으로 나타낸 것이다.

Roscoe 등은  $p, q, dv^p, d\varepsilon^p$ 의 變數를 써서 等方連續體가 變形하는 동안에 消散되는 일의 增分量은 다음과 같다고 하였다.

$$\delta w = p \cdot dv^p + q \cdot d\varepsilon^p (= \sigma_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij}^p) \quad (2-1)$$

여기서 提案된 model은 等方應力( $q=0$ ) 아래서 變形이 없다( $d\varepsilon=0$ )는 것을 전제로 하고 있으므로 式(2-1)은 다음과 같다.

$$\delta w_{q=0} = p \cdot \delta v^p \quad (2-2)$$

限界狀態에서는  $q/p=M$ ,  $\delta v^p=0$  이므로 式(2-1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta w_{(q=M \cdot p)} = p \cdot M \delta \varepsilon^p \quad (2-3)$$

이들 두 條件을 一般化하면

$$\delta w = p \cdot \sqrt{(\delta v^p)^2 + (M \cdot \delta \varepsilon^p)^2} \quad (2-4)$$

$\sqrt{(\delta v^p)^2 + (M \cdot \delta \varepsilon^p)^2}$ 은 一般化된 塑性變形率增分量이고 全塑性變形率增分量 tensor  $\delta \varepsilon_{ij}^p$ 의 不變量이다. 이 量은 應力 vector( $p+1/M \cdot q$ )와 유일하게 關係되는 塑性變形率增分量 vector( $\delta v^p + M \cdot \delta \varepsilon^p$ )의 比와 같고 이들 scalar 積은 消散된 일의 增分量과 같다.

式(2-1)과 式(2-4)로부터 다음 式을 얻을 수 있다.

$$\frac{dv^p}{d\varepsilon^p} = \frac{M^2 - (q/p)^2}{2(q/p)} \quad (2-5)$$

式(2-5)에 normality condition(直交條件)을 適用하면

$$\frac{dv^p}{d\varepsilon^p} = -\frac{dq}{dp} \quad (2-6)$$

式(2-5)와 式(2-6)으로 부터

$$\frac{dq}{dp} = -\frac{M^2 - (q/p)^2}{2(q/p)} \quad (2-7)$$

또한  $\eta = \frac{q}{p}$  에서  $dq/dp = d\eta \frac{p}{dp} + \eta$  이므로 式(2-7)을 代入하면

$$\frac{dp}{p} = -\frac{2\eta}{M^2 + \eta^2} d\eta \quad (2-8)$$

式(2-7)을 積分하면

$$\ln(M^2 + \eta^2) + \ln p = \text{inc} \quad (2-9)$$

이고  $\eta=0$  일 때  $p=p_0$  이므로 다음 式을 얻는다.

$$p_y = p \left[ \frac{(q/p) + M^2}{M^2} \right] \quad (2-10)$$

여기서  $p_y$ 는  $p \cdot q$  면에서 等方壓密曲線과 降伏軌跡의 交差點의  $p$  값이며 式(2-9)는  $p \cdot q$  면에서 中心을  $\frac{p_y}{2}$  로 하는 橢圓方程式이고 이 橢圓이 곧 降伏軌跡이며(Fig. 2-2) 等方壓密線과 膨潤線에 대한 方程式에 式(2-6)을 結合하면 다음과 같은 狀態限界面에 대한 式을 얻을 수 있다.

$$p_c = p \left[ \frac{(q/p)^2 + M^2}{M^2} \right]^{(1-\kappa/\lambda)} \quad (2-11)$$

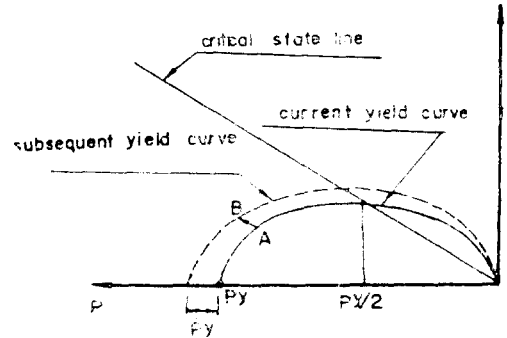


Fig. 2-2. Modified Cam-clay yield

式(2-7)과 式(2-11)은 粘土가 降伏하는 동안의 應力-變形率 舉動을 完전하게 定義하는 表現式이다.

以上 構造物에 使用된 主要 材料常數는 다음과 같다.

$\lambda$ : 壓縮指數       $\kappa$ : 膨潤指數

$$p = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \quad q: \sigma_1 - \sigma_3$$

$\delta v^p$ : 塑性體積變形率 增分量

$\delta \varepsilon^p$ : 塑性剪斷變形率 增分量

$M$ : 限界狀態線의 기울기

$\sigma_{ij}$ : cronecker's delta

### 3. Biot 壓密理論의 有限要素解析

地盤構成이나 複雜한 境界條件을 함께 考慮하여 近似解를 얻는 數值解析法으로써 Biot의 壓密理論을 有限要素解析하였다. 여기에 有效應力原理를 利用한 非排水變形 즉 即時沈下의 問題를 풀기 위하여 平面變形率條件에서의 Christian(1968)의 方法을 利用한다. 이 方法은 彈性變形 즉 即時沈下를 구하기 위해 四角型要素를 4개의 三角型要素로 分割 各 節點의 變位를 구하여 이를 condensation에 의해 中央節點의 變位를 소

거하고 間隙水壓은 四角型要素內에서 一定하다고 假定한 方法이다. 또한 時間增加와 더불어 間隙水의 흐름은 Darcy의 法則을 適用하여 間隙水의 排出과 粘土骨格의 體積變化量이 같다는 連續條件式에 의해 壓密沈下를 求하여 合成하도록 한다. 먼저 要素內의 任意의 節點에서 變位와 作用하는 힘 사이의 關係를 假想일의 原理에 利用하면 平衡條件式으로 부터 다음과 같은 matrices 式을 얻을 수 있다. (Christian-Boehmer 1969)

$$[K]\{u\} = \{p\} \quad (3-1)$$

여기서  $\{u\}$ 는 節點變位 vector

$[K]$ 는 stiffness matrix

$\{p\}$ 는 節點에 作用하는 힘의 vector

다음 時間增加와 더불어 發生하는 間隙水壓과 變位를 求하기 위해 Darcy의 連續方程式을 導入하여 體積變化增分  $\Delta v$ 을 求하면 다음과 같다.

$$\Delta v = -\frac{\Delta t \cdot v}{r_w} \left( k_x \frac{\partial^2 u_e}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 u_e}{\partial y^2} \right) \quad (3-2)$$

$u_e$ : 過剩間隙水壓

式(3-2)를 풀기 위해 任意의 要素  $i$ 의 體積變形率 速度는 그 주위의 4개 要素의 間隙水壓分布로 부터 決定하고 間隙水壓分布가 一定한 4변형 요소의 任意點의 間隙水壓은 다음과 같은 多項式으로 나타낸다.

$$u_e = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 y^2 \quad (3-3)$$

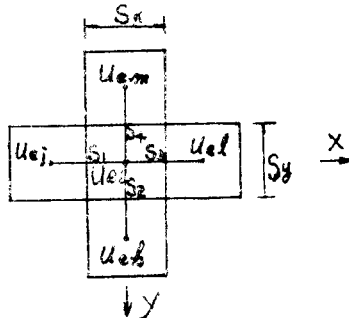


Fig. 3-1

여기서 5개의  $\alpha$  값은 (Fig. 3-1)와 같이 사변형요소  $i$ 와 이를 둘러싸고 있는  $jklm$ 의 要素에 의해 決定될 未定係數이고 要素中央點의 間隙水壓  $u_e$ 는 式(3-3)을 適用하여 나타낼 수 있다.

$$\{u_e\} = [A_p]\{\alpha\} \quad (3-4)$$

$$\{\alpha\} = [A_p]^{-1}\{u_e\} \quad (3-5)$$

$[A_p]$ 는 式(3-3)의 多項式과 그림에서와 같은 構成을 갖는 行列이다. 즉

$$A_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3^2 & y_3^2 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4^2 & y_4^2 \end{pmatrix}$$

式(3-3)을 式(3-2)에 代入하고 式(3-5)를 考慮하면 다음 式을 얻을 수 있다.

$$\Delta v = -\frac{2\Delta t \cdot v}{r_w} (k_x \alpha_4 + k_y \alpha_5) \quad (3-6)$$

여기서  $\alpha_4$ 와  $\alpha_5$ 는  $[A_p]^{-1}$ 의 4行과 5行의 vector로서 이를 풀면 다음과 같다.

$$\Delta v = -\beta u_e - \sum_{i=1}^4 \beta_i u_{ei} \quad (3-7)$$

式(3-7)을 全구간에 대해 積分하고 有限差分解를 導入하면

$$\int_v \Delta v_j dv = \int_v (v_j - v_{j-1}) dv = -\beta u_{ei}^* - \sum_{i=1}^4 (\beta_i u_{ei})_j \quad (3-8)$$

여기서  $\beta_i = \frac{k \cdot \Delta t}{r_w} \frac{s_j s_z}{s_1}$ ,  $\beta_j = \frac{k \cdot \Delta t}{r_w} \frac{s_x s_z}{s_2}$

$$\beta_k = \frac{k \cdot \Delta t}{r_w} \frac{s_y s_z}{s_3}, \beta_l = \frac{k \cdot \Delta t}{r_w} \frac{s_x s_z}{s_4}$$

$$\beta = \frac{k \cdot \Delta t}{r_w} \sum_{i=1}^4 \beta_i, u_{ei}^*; \text{要素中心에서의}$$

間隙水壓

$s_x, s_y$ ; 4변형요소의 각 변장

$s_z$ ;  $s_x, s_y$ 면에 垂直한 方向의 單位길이

$s_i$ ; 中心要素와 인접要素  $i$ 의 中心間距離

또한 定義에 의해 要素內의 體積變化는

$$\Delta v = [K]\{\Delta u_e^*\} \quad (3-9)$$

式(3-8)을 式(3-9)에 代入하고 間隙水壓을 나타내는 coupling matrix를 利用하면 다음과 같다.

$$\{L\}^T \{\Delta u\}_j + \beta u_{ej}^* + \sum_{i=1}^4 \beta_i (u_{ei}^*)_j = 0 \quad (3-10)$$

여기서  $L$ ; coupling matrix

따라서 問題를 풀기 위해서는 式(3-8), (3-9)를 全要素에 대하여 중첩하여 얻어지는 全體 剛性方程式을 遂次解로 풀어 나간다. 즉

$$\begin{bmatrix} [K] & [L] \\ [L]^T & [H] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_j \\ \Delta u_{ej} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta R_j + L u_{ej-1}^* \\ \sum_{i=1}^4 (\beta_i u_{ei})_j \end{bmatrix}$$

여기서  $[H]$ 는 앞의  $\beta_i$ 에 의해 構成되는 行列이며 인접 두 要素間의 間隙水와 平行하며 對稱行列이 된다. 計算 step  $j$ 에서 一次未知量인 變位增分과 過剩間隙水壓을 求하려면  $j-1$  step에서

의 값을 基本으로 gauss 소거법으로 풀어간다.

#### 4. 模型 Model 및 數值解析

盛土에 의한 周邊地盤의 變形防止對策으로써 (이를 補強對策이라고 함) 盛土部끝에 sheet pile 을 打設하거나 深層混合處理를 하였을 때 또 이들의 效果的인 地盤補強을 위해 vertical drain 을 併設하는 경우에 대한 沈下, 側方變位, 隆起 現象 등의 變形을 比較分析한다.

##### 4-1. 模型地盤의 條件

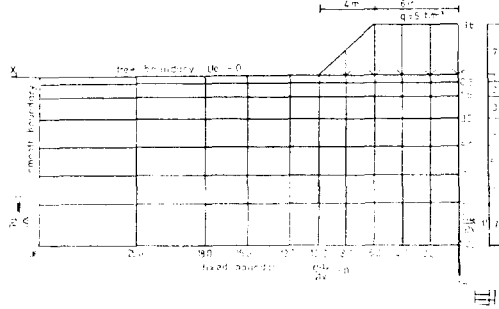


Fig. 4-1. F.E.M. grid in nature state

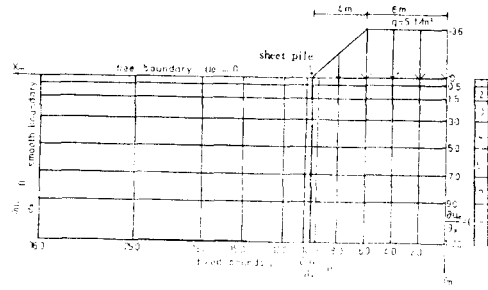


Fig. 4-2. F.E.M. grid reinforced in sheet pile

1. 盛土基礎地盤의 要素分割은 (Fig. 4-1)과 같으며 層두께 12m 基礎幅 72m 를 半分하여 7層 10列로써 70要素 88節點의 長方形要素이다.
2. 盛土部底幅은 20m 로써 盛土荷重  $q=6\text{ t/m}^2$  를 시간  $\Delta t$  마다  $0.5\text{ t/m}^2$  로 1層씩 增加시킨다.
3. 排水條件은 바닥과 측면은 非排水, 基礎地盤上部는 排水條件이고, 變形條件은 바닥 固定, 측면은 鉛直變位를 허용한다.

Table 4-1. Material properties & parameters used in calculation

layer	$\lambda$	$\kappa$	$M$	$C_\alpha$	$G_0$	$\nu$	$\sigma_{vc}$	$K_{oc}$	$\sigma_{z0}$
1	0.29	0.03	1.4	0	50	0.374	2.5	0.597	2.5
2	0.29	0.03	1.4	0	59	0.374	2.9	0.597	2.9
3	0.29	0.03	1.4	0	78	0.374	3.7	0.597	3.7
4	0.29	0.03	1.4	0	96	0.374	4.5	0.597	4.5
5	0.29	0.03	1.4	0	122	0.374	5.5	0.597	5.5
6	0.29	0.03	1.4	0	145	0.374	6.3	0.597	6.3
7	0.29	0.03	1.4	0	178	0.374	7.8	0.597	7.8

layer	$K_0$	$e_0$	$r_c$	$V_0$	$\lambda_k$	$k_{x0}$	$k_{y0}$
1	0.597	1.92	1.7	$0.1 \times 10^{-4}$	0.29	$0.470 \times 10^{-3}$	$0.470 \times 10^{-3}$
2	0.597	1.87	1.7	$0.1 \times 10^{-4}$	0.29	$0.396 \times 10^{-3}$	$0.396 \times 10^{-3}$
3	0.597	1.79	1.7	$0.1 \times 10^{-4}$	0.29	$0.300 \times 10^{-3}$	$0.300 \times 10^{-3}$
4	0.597	1.73	1.7	$0.1 \times 10^{-4}$	0.29	$0.244 \times 10^{-3}$	$0.244 \times 10^{-3}$
5	0.597	1.66	1.7	$0.1 \times 10^{-4}$	0.29	$0.192 \times 10^{-3}$	$0.192 \times 10^{-3}$
6	0.597	1.61	1.7	$0.1 \times 10^{-4}$	0.29	$0.161 \times 10^{-3}$	$0.161 \times 10^{-3}$
7	0.597	1.55	1.7	$0.1 \times 10^{-4}$	0.29	$0.131 \times 10^{-3}$	$0.131 \times 10^{-3}$

(Unit ; Length : m, Mass : ton, Time : day)

前記 Table 中の 주요 材料常數는 다음과 같다.

$\lambda$ :  $e-\ln p$  曲線의 正規壓密曲線의 기울기 (0.29, 통상 0.14~0.34 범위)

$\kappa$ :  $e-\ln p$  曲線의 膨潤-再壓縮曲線의 기울기

$M$ :  $p-q$  平面에서 限界狀態線의 기울기 (1.4)

$G_0$ : 初期剪斷彈性係數(通常值를 택함)

$\sigma_{ve}$ : 先行荷重의 有効鉛直應力

$\nu$ : poisson 比(0.374)

$\sigma_{v0}$ : 現在의 有効鉛直應力

$K_0$ : 靜止土壓係數(0.597)

$e_0$ : 初期間隙比

$v_0$ : 初期體積變形率速度( $0.1 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ )

$\lambda_k$ :  $e-\ln K$  曲線의 기울기 (0.29)

$k_{z0}, k_{y0}$ : 初期水平, 鉛直方向의 透水係數

4. Sheet pile 을 打設한 경우 要素分割은 (Fig. 4-2)와 같이 sheet pile 의 좌우로 要素를 細分化하여 그 特性을 명확히 하도록 한다.

5. Vertical drain 은 盛土部아래 基礎地盤에 間 2 m 간격으로 設置한다.

6. 粘土層은 等方正規  $K_0$  壓密層이며 各層에 對한 材料定數는 표 (4-1)과 같다.

7. 粘土層의 깊이에 따라 變하는 材料定數 즉 剪斷彈性係數( $G$ ), 間隙比( $e$ ), 透水係數( $k_v$ )는 다음 式에 의해 구한다.

$$G = G_0 \cdot \exp((e - e_0) / \lambda)$$

$$e = e_0 - \left( \lambda \ln \frac{p}{p_0} \right)$$

$$k_v = k_{v0} \cdot 10^{(e - e_0) / 0.3}$$

#### 4-2. 基礎補強對策 및 載荷方法

1. 基礎地盤의 補強對策工으로써 다음 두 경우를 기본 對象으로 한다.

① Sheet pile 을 使用하는 경우(Beam 系補強對策이라 함)

② 幅과 깊이를 變化시켜 地盤의 剛性을 높인 경우(深層混合處理라 함)

2. 또한 上기 1항의 補強對策工의 各 경우에 對하여 다음과 같은 載荷方法을 導入한다.

① 無改良地盤에 即時載荷하는 경우(自然狀態)

② 盛土아래 基礎地盤을 2 m 간격으로 vertical drain(V.D)를 設置하고 漸增載荷하는 경우(Fig. 4-1, Fig. 4-2 참조)

3. 對策工의 剛性(Table 4-2 參照)

Beam 系와 深層混合處理系의 剛性을 다르게 하고 特히 深層混合處理系는 彈性係數 및 處理幅을 變化시킨다.

4. 對策工의 施工位置는 (Fig. 4-3)과 같이 5 m, 9 m, 12 m 이다.

5. Vertical drain 은 盛土部아래의 基礎地盤

Table 4-2. Rigidity of Sheet pile & Deep Mixed Method

Impr oved Method	BEAM			DEEP MIXED METHOD(D.M.M.)				
	II Type Sheet pile	III Type Sheet pile	Z <sub>32</sub> Type Sheet pile	G=200 kg f/cm <sup>2</sup>		G=1000 kg f/cm <sup>2</sup>		G=4000 kg f/cm <sup>2</sup>
				B=4 m	B=6 m	B=4 m	B=6 m	B=6 m
E(tf/m <sup>2</sup> )	2.1×10 <sup>7</sup>	2.1×10 <sup>7</sup>	2.1×10 <sup>7</sup>	5.2×10 <sup>3</sup>		2.6×10 <sup>4</sup>		1.04×10 <sup>5</sup>
I(m <sup>4</sup> /m)	3.1×10 <sup>-5</sup>	1.167×10 <sup>-4</sup>	5.5×10 <sup>-4</sup>	5.333	18.0	5.333	18.0	18.0
EI(tfm <sup>2</sup> /m)	6.51×10 <sup>2</sup>	2.45×10 <sup>4</sup>	1.16×10 <sup>4</sup>	2.77×10 <sup>4</sup>	9.36×10 <sup>4</sup>	1.39×10 <sup>5</sup>	4.68×10 <sup>5</sup>	1.87×10 <sup>6</sup>
EI	0.3	1	5	11	38	57	191	764
A(m <sup>2</sup> /m)	1.53×10 <sup>-2</sup>	2.425×10 <sup>-2</sup>	2.693×10 <sup>-2</sup>	4	6	4	6	6
$\nu$	0.333			0.333				

에 2 m 간격으로 배치하는데 이 위치는 바로 요소의境界가 된다. 그리고 이境界는排水條件으로 보고 入力하여 해석한다.

漸增載荷條件은 다음 두 가지 경우로 나누어 해석한다.

- ① 5 cm/day의 盛土速度로 載荷하는 경우 60일 載荷
- ② 1.6 cm/day의 盛土速度로 載荷하는 경우 180일 載荷

以上을 要約하면 Table 4-3과 같다.

### 4-3. 數值計算 및 結果考察

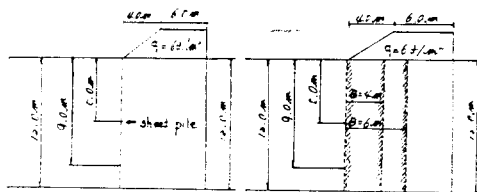
#### 1. 地盤의 變形概要

表 4-3에 요약된 內容으로 數值計算하여 20개의 Model 별로 圖示한다. 그 代表例로서 Beam系에서 Model 4, D.M.M.系에서 Model 18을 나타내면(Fig. 4-4)와 (Fig. 4-5)와 같다. Model 4 및 18은 側方變位  $\Delta H$ 가 盛土直後  $t=0$ 日,

Table 4-3. List of Models used in calculation

對策工		Beam系			深層混合處理系(D.M.M.)					無對策	
計算條件		II Type Sheet pile	IV Type Sheet pile	Z <sub>32</sub> Type Sheet pile	G=200 kg/cm <sup>2</sup> (E=520 kg/cm <sup>2</sup> )		G=1000 kg/cm <sup>2</sup> (E=2600 kg/cm <sup>2</sup> )		G=4000 kg/cm <sup>2</sup> E=10,400 kg/cm <sup>2</sup> B=6 m		
載荷條件	地有盤改良의 無	剛性貫入有長의 無				改良幅 B=4 m	B=6 m	B=4 m	B=6 m		
						即時載荷	無改量	l=12 m	③		④
		l=9 m		⑤		⑫					
		l=5 m		⑥		⑬		⑱			
漸增載荷	盛V改土D良	l=12 m		⑦※		⑭		⑲			②
				⑧							
		l=5 m		⑨※							

※ : t=180日 載荷, ②⑧⑭⑲ : t=60日 載荷



(a) Sheet pile (b) Deep mixed method

Fig. 4-3. Type of D.M.M. & Sheet pile

200日, 10000日에 해당되는 것을 보인다. 어느 경우나 時間이 지남에 따라  $t=0$ 의 경우에서 外側으로 變形이 發生하여 200日에 最大가 되고 그 以後 차차 內側으로 수렴된다. 다만 Model 18은 Vertical Drain의 영향으로  $t=120$ 日에서 최대가 되고 이들 變位量은 후자가 작다. 鉛直變位는 堤體寬(10 m)에서는 隆起가 있고 이들全體의 變位量은 時間의 經過에 따라 隆起는 減少되고 盛土部아래 沈下量은 增加한 후 壓密이 終了된다.

다음은 이들 Model을 詳細하게 項目別로 比

較 및 考察을 하여 본다.

- 1) 對策工의 比較分析方法은 다음 項目에 의한다.
  - ① 貫입깊이에 대한 比較(Fig. 4-6~Fig. 4-9)
    - ② I형 sheet pile, ③ 深層混合處理(DMM) (B=4 m, G=200, 1000 kg/cm<sup>2</sup>)
    - ④ 漸增載荷(t=180일 vertical drain 일 때) I형 sheet pile
  - ② 剛性效果에 관한 比較(Fig. 4-10~Fig. 4-12)
    - ② Sheet pile系(l=12 m), ③ 深層混合處理系(l=12 m)
    - ④ 漸增載荷(t=60, 180일)
  - ③ 漸增載荷效果에 대한 比較(Fig. 4-13~Fig. 4-15)
    - ② Sheet pile(l=12 m I型)
    - ③ 深層混合處理系 (G=200 kg/cm<sup>2</sup>, B=4 m)
    - ④ 深層混合處理系 (G=1,000 kg/cm<sup>2</sup>, B=4 m)

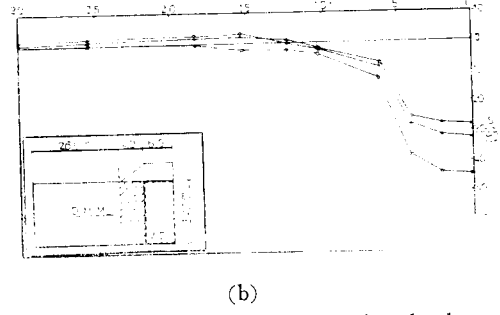
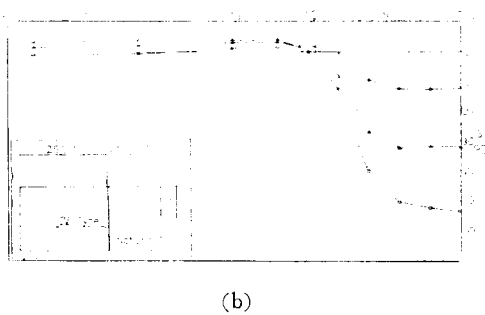
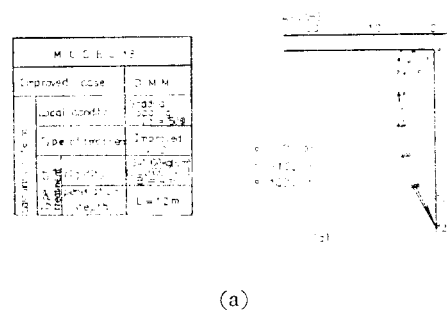
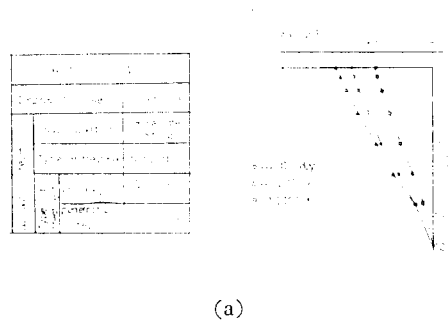


Fig. 4-4 (a) Lateral displacement of embankment tip  
(b) Shape of settlement in surface

Fig. 4-5. (a) Lateral displacement of embankment tip  
(b) Shape of settlement in surface

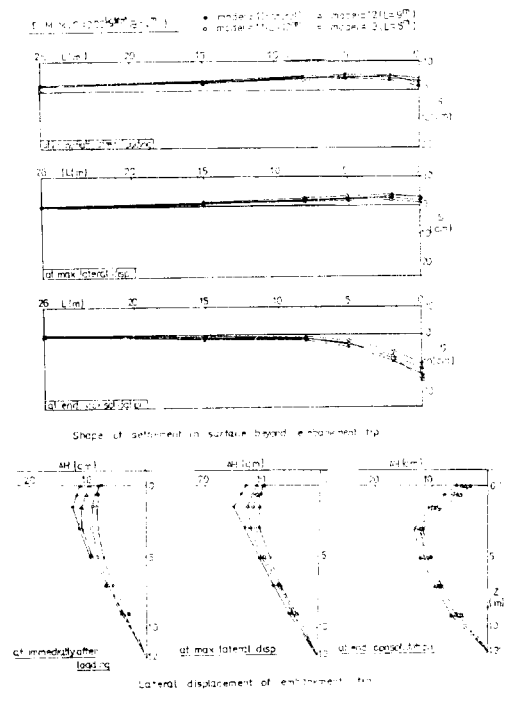
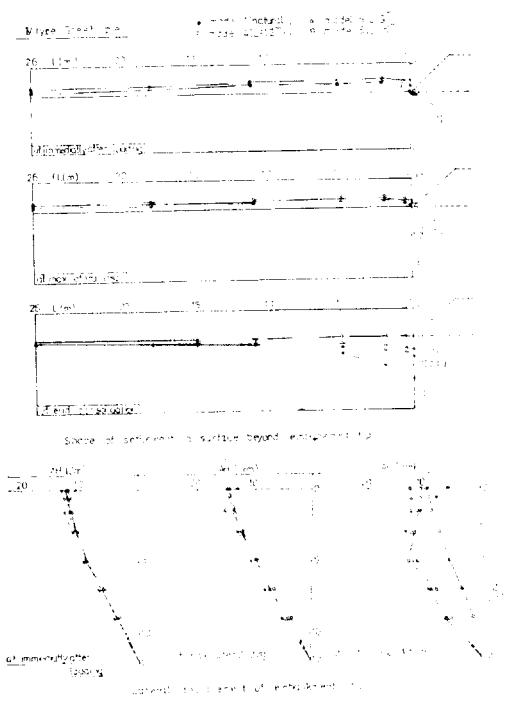


Fig. 4-6. Diagram due to effect of various penetration

Fig. 4-7. Diagram due to effect of various penetration



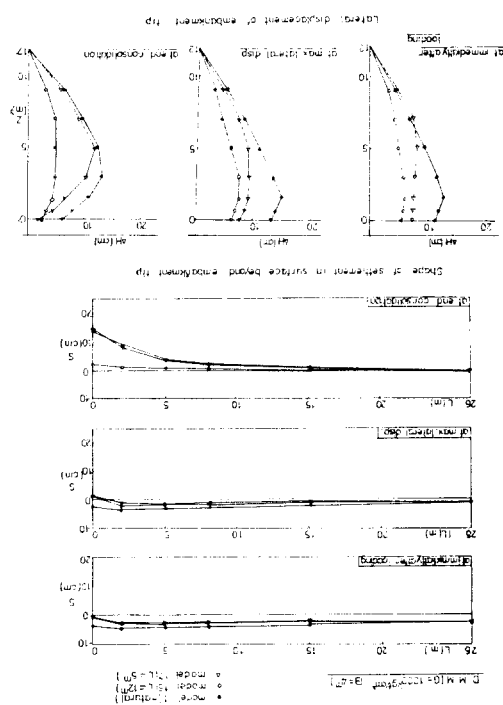


Fig. 4-8. Diagram due to effect of various penetration

## 2. 比較 및 考察

1) 貫入効果(Ⅱ형 sheet pile Fig. 4-6 參照)

① Ⅱ형 鋼 sheet pile의 깊이에 따른 最終壓密時의 壓密沈下効果는 盛土部(0점)에서 멀리 떨어진 곳(15m)에서는 어느 경우도 無對策時와 沈下量이 거의 一致하고 貫入效果에는 큰 差異가 없다. 그러나 盛土部에 접근할수록 貫入깊이에 따라 차이가 있다. model 4( $l=12$  m, Table 4-3 참조)는 거의 0에 가깝다. 側方變位는 貫入깊이에 관계없이 어느 경우나 거의 一致하고 貫入效果는 期待할 수 없다.

② 深層混合處理 ( $G=200$  kg/cm<sup>2</sup>,  $B=4$  m, Fig. 4-7 참조) 改良깊이에 따른 壓密沈下量은 큰 차이없이 나타나고 있으므로 貫入效果는 거의 없고 그 아래 그림의 側方變位는 모두다 sheet pile系와 같은 영향이고 차이가 미소하여 貫入效果는 期待할 수 없다.

③ 深層混合處理( $G=1000$  kg/cm<sup>2</sup>,  $B=4$  m, Fig. 4-8 참조)  $l=12$  m에서는 貫入에 의한 壓密沈下抑制效果가 있으며 沈下量은 盛

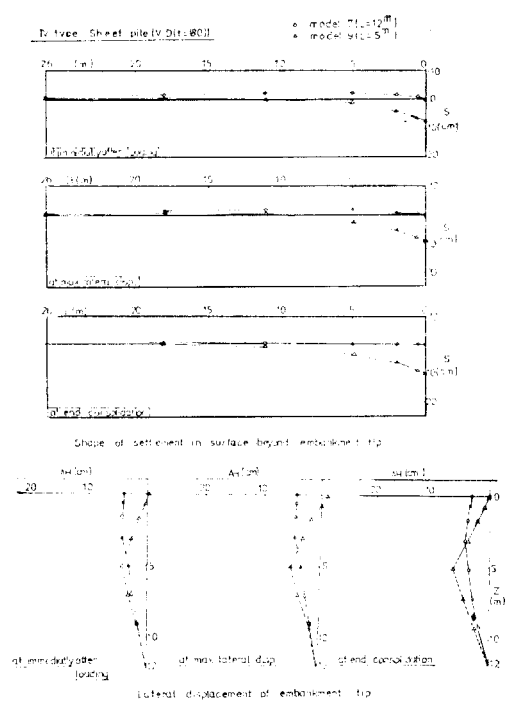


Fig. 4-9. Diagram due to effect of various penetration

土部 끝 근방을 최대로 하여 차츰 감소되어 간다. 彈性沈下는 맨윗 그림처럼 盛土直後に 隆起가 일어나는데 그 값은 미소하다. 이는 貫入效果라기 보다는 後述한 剛性의 效果에 의한 것이다. 아래 그림의 側方變位를 살펴보면 側方變位の 抑制效果를 貫入깊이에 따라 기대할 수 있다. 그러나 Model 17은 點線으로 表示한 것처럼 時間이 지나감에 따라 外側으로 밀려나가고 있어 貫入깊이의 不充分으로 回轉하고 있다. 이는 Fig. 4-7 Model 13과 比較할 때 剛性에 차이가 있어 剛體回轉과 같은 것으로 해석된다.

④ 漸增載荷( $t=180$ 日, Ⅱ형 sheet pile, Fig. 4-9 참조)  $t=180$ 일에 걸쳐 대단히 천천히 盛土施工한 경우로  $l=12$  m(model 7)에서 沈下抑制效果가 있는데 이는 上述한 深層混合處理( $G=1000$  kg/cm<sup>2</sup>,  $B=4$  m)와 유사하다. 그러나  $l=5$  m(model 9)에서는 model 2(V.D) 또는 無對策時(model 1)와 같이 거의 效果가 없다. 側方變位抑制效果는  $l=12$  m(model 7)인 경우 無改良(model 4)에 비

해 다소의 효과는 있으나 크게 기대할 수 없다. 또한  $l=5\text{ m}$  인 경우는 sheet pile 자체가剛體回轉하고 있음을 나타내고 있다.

以上の貫入効果を分析하면 다음과 같다.

a) Sheet pile은 下部의 견고한 地盤까지貫入시켜 sheet pile의 沈下를 抑制하는 것 만이 周邊地盤의 沈下抑制効果を 거둘 수 있으며 側方變位抑制効果는 貫入길이에 期待할 수 없다.

b) 深層混合處理는 우선 그 自身の 壓縮沈下가 적도록 強度(彈性係數)를 높일 필요가 있다. 그렇지 않을 경우는 上記 a)인 sheet pile의 경우와 같다.

### 3) 剛性の 効果

剛性を 變化시켰을 때의 영향은 다음과 같다.

#### ① Sheet pile( $l=12\text{ m}$ Fig. 4-10 참조)

盛土直後の 隆起, 壓密完了後에 있어서의 沈下, 側方變位 모두 剛성이 커짐에 따라 變位の減少效果가 있다.

#### ② 深層混合處理( $l=12\text{ m}$ Fig. 4-11 참조)

深層混合處理인 경우 各 model 11, 15, 16, 19, 20과 같이 剛성에 따라 현저하게 差異가 있다.

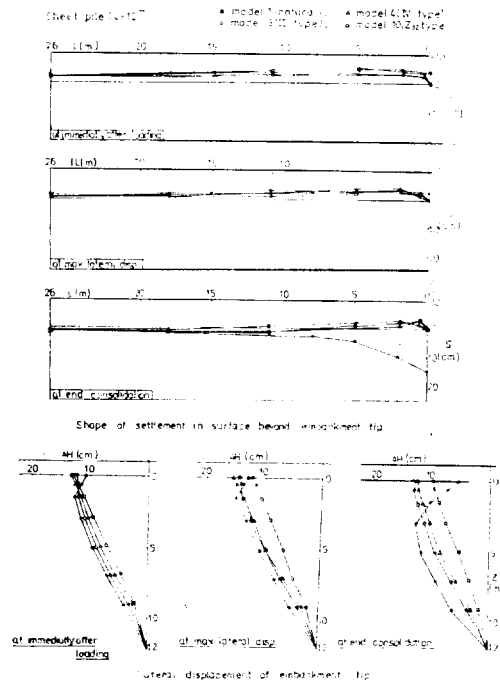


Fig. 4-10. Diagram due to effect of various rigidity

즉 剛性を 높임에 따라 變形抑制效果가 크다.

#### ③ 漸増載荷( $t=60\text{日}$ vertical drain, $l=12\text{ m}$ Fig. 4-12 참조)

載荷期間이 60日일 때 深層混合處理의 경우는 ②와 같은 傾向을 나타내고 있다. Model 8( $V$ 형 sheet pile)은 深層混合處理에 비해 剛성이 작음에도 불구하고 變位가 적은데 그 理由는 深層混合處理의 改良領域이 地盤部와 거의 같은 程度의 透水係數이므로 盛土를 하면 그 部分이 非排水에 가까운 狀態로 있다가 剪斷變形을 일으킨다. 따라서 深層混合處理 편이 變位가 크다. Model 2의 경우가 model 14에 비해 變位가 적은데 이것도 역시 같은 理由이다. 以上을 綜合하면 剛性效果에 대해 다음과 같이 整理할 수 있다.

a) Sheet pile, 深層混合處理는 剛성이 커짐에 따라 周邊地盤의 隆起, 沈下, 側方變位の 抑制效果가 있다.

b) 따라서 深層混合處理로서 충분히 剛性を 높일 수 있는 工法이면 거의 完璧하게 周邊地盤의 影響을 防止할 수 있다.

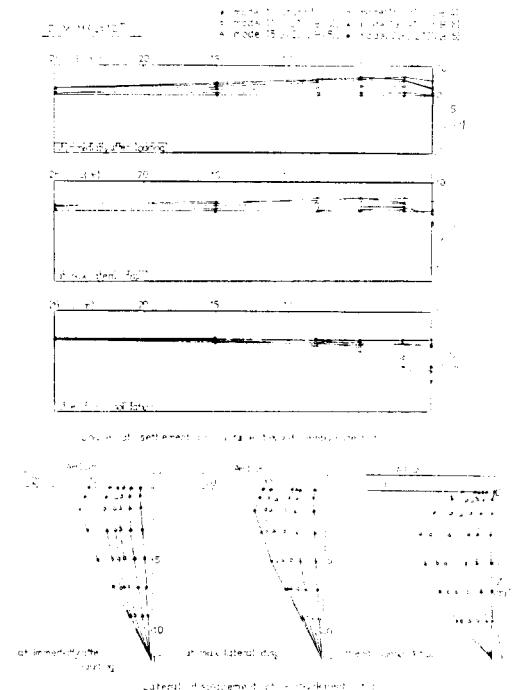


Fig. 4-11. Diagram due to effect of various rigidity

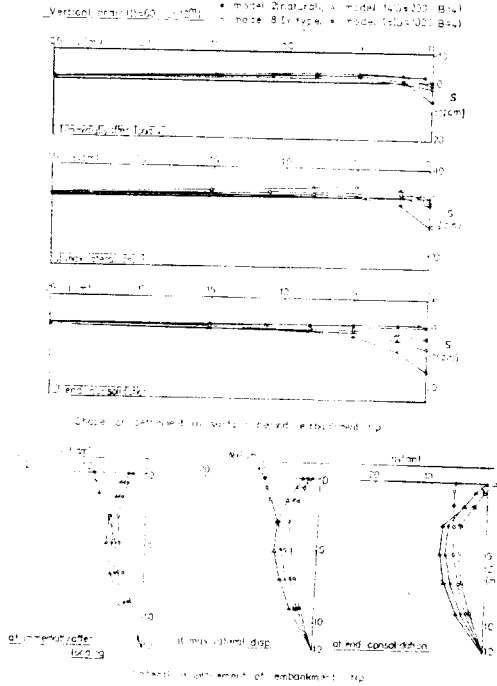


Fig. 4-12. Diagram due to effect of various rigidity

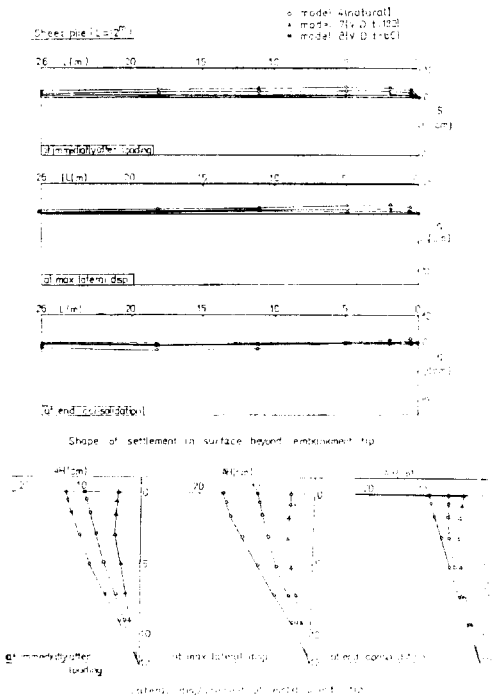


Fig. 4-13. Diagram due to effect of gradual loading

#### 4) 漸增載荷의 效果

載荷速度를 變更하였을 경우를 比較하면 다음과 같다.

① Sheet pile ( $l=12$  m, W型 sheet pile Fig. 4-13 참조)

盛土直後の 隆起, 壓密完了時의 沈下, 側方變位 모두 載荷速度를 지연시킴으로써 變形이 減少하고 있다. 즉 vertical drain 效果와 더불어 剪斷變形을 抑制함으로써 全體의 變形抑制의 效果가 있다.

② 深層混合處理 ( $G=200$  kg/cm<sup>2</sup>,  $B=4$  m,  $l=12$  m, Fig. 4-14)

上記 sheet pile ( $l=12$  m, W형 sheet pile)과 경향이 같다.

③ 深層混合處理 ( $G=1,000$  kg/cm<sup>2</sup>,  $B=4$  m,  $l=12$  m Fig. 4-15) model 16(即時載荷, 無改良)과 model 18(漸增載荷  $t=60$ 日 vertical drain)

모두 變位量에 큰 差異가 없다. Fig. 4-14와 比較하여 다른 點은 剛性이 크다는 點이다. 그러나 剛性이 어느 이상 커지면 載荷速度는 意義

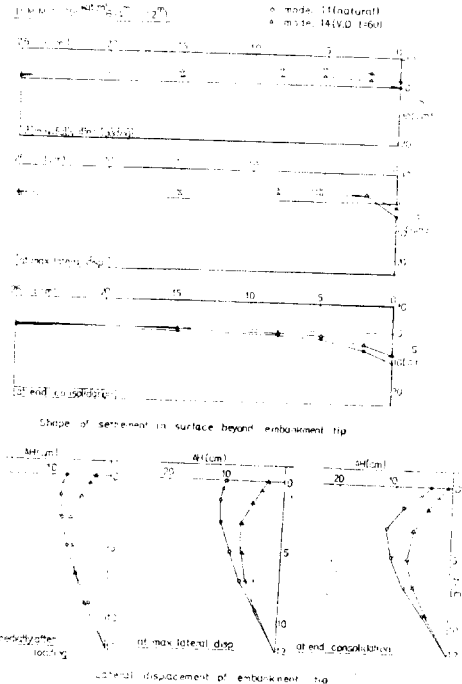


Fig. 4-14. Diagram due to effect of gradual loading

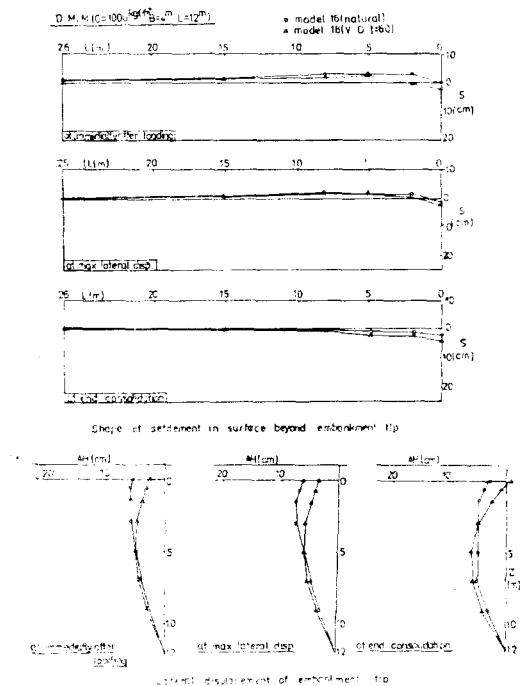


Fig. 4-15. Diagram due to effect of gradual loading

가 있을 만큼의 차는 생기지 않는다는 것을 보여준다.

以上 model 別 結果에서 漸增載荷의 效果에 대해 無對策時와 比較하여 整理하면 漸增載荷方式은 vertical drain 效果와 더불어 剪斷變形을 抑制하고 全體의 變形抑制에 效果가 있다.

## 5. 結 論

軟弱粘土地盤에 荷重이 載荷될 때 또는 軟弱粘土地盤上的 既設構造物에 近接 施工할 때 地盤의 強化나 側方變位 및 隆起에 대한 補強對策으로써 여러가지 工法이 利用되고 있다.

本文은 그들 工法 중 特히 施工性, 經濟性이 좋은 sheet pile 工法이나 深層混合處理工法 등을 길이나 剛性 등을 變化시키고 또한 이들 補強工法의 效果를 높이기 위해 基礎地盤을 vertical drain 으로 打設하였을 때에 地盤의 補強效果와 有効性 등을 ① 地盤의 壓密解는 Biot의 壓密方程式과 ② 構成方程式으로서는 彈塑性理論에 근거한 modified Cam-clay model을 結合시켜, ③

이들 理論을 Christian-Boehmer 系의 有限要素 技法을 導入하여 program 化한 것이다.

그 主要한 結論은 다음과 같다.

1. 周邊地盤의 沈下效果에 관해서는 sheet pile 이나 深層混合處理 깊이를 支持層까지 貫入하여 施工하고 그 自身の 沈下가 없을 경우에 만 有效하다.
2. 흔히 使用되는 sheet pile 對策工은 通상의 steel sheet pile 의 剛性으로서는 盛土直後의 隆起, 側方變位の 抑制效果는 期待할 수 없다.
3. Sheet pile 에 대한 效果的인 使用方式은 盛土下部에 壓密을 촉진하기 위해 vertical drain 을 設置하고 漸增載荷方法만이 확실한 效果가 있다.
4. 深層混合處理工法은 豫想한 바와 같이 그 自體가 剛性이 클수록 沈下抑制效果가 있다. 特히 grouting 을 통한 地盤強化가 周邊地盤의 變形抑制效果가 있다고 단정하는 것은 그 剛性效果를 신중히 고려하여 결정해야 한다.

## 謝 辭

本 研究는 1985年度 韓國科學財團의 研究費支援의 일환으로 이루어진 것으로 同財團에 深甚한 感謝를 포함합니다.

## 參 考 文 獻

1. Atkinson, J.H. & Bransby "The mechanics of soils", An introduction to critical state soil mechanics. McGraw Hill, 1978.
2. Biot, M.A., "General theory of three-dimensional consolidation", Journal of Applied physics, Vol. 12, 1941, pp. 155~164.
3. Christian, J.T. & J.W. Boehmer, "plane strain consolidation by finite elements", Journal of the soil mechanics and Foundation Division. ASCE, No. 96, SM4, July, 1970 pp. 1435~1457.
4. Magnan, J.P., A. Belkeziz, P. Humbert & A. Mouratidis, "Finite element analysis of soil consolidation with special reference to the case of strain hardening elastoplastic stress-strain model", Numerical Methods in Geomechanics,

- Ebmonton, 1982, pp. 327~336.
5. Roscoe, K.H. & J.B. Burland, "on the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay", Engineering plasticity. Cambridge Univ. Press, 1968, pp. 535~609.
  6. Roscoe, K.H., A.N. Schofield & A. Thirairajah, "Yielding of clays in states wetter than critical", Geotechnique Vol. 13, 1963, pp. 211~240.
  7. 朴海根, 朴炳基, 鄭鎮燮, "二次元壓密解析法の比較研究" 大韓土木學會論文集 Vol. 5, No. 3, 1985, p. 39~48.
  8. 鄭鎮燮, "飽和粘土의 應力-變形率에 관한 연구" 博士學位論文, 全南大學院, 1983.
  9. 朴炳基, 鄭鎮燮, 李汶樹, 姜秉宜, "限界狀態概念에 의한 飽和粘土의 剪斷特性에 관한 연구", 大韓土木學會論文集, 3卷 2號, 1983.
  10. 李汶樹, "有限要素法에 의한 多次元壓密의 變形解析" 博士學位論文, 高麗大學院, 1985.
  11. 朴炳基, 鄭鎮燮, "多次元壓密의 數值解析과 그 適用에 관한 考察", 大韓土質工學會發表講演集, 1984, pp. 74~112.
  12. 姜秉宜, "彈塑性 model에 의한 複合較弱地盤의 變形에 관한 數值解析研究", 博士學位論文, 全南大學校 大學院, 1985.
  13. 鄭鎮燮, 姜秉宜, 南宮坎, "非線形 Model에 의한 多次元壓密의 數值解析", 大韓土質工學會誌, 創刊號, 1985.