

# 改良軟弱地盤의 模型實驗과 變形解釋(I)

## Model Test and Deformation Analysis of the Improved Soft Foundation(I)

李 汶 樹\* · 李 鎮 洙\*\* · 吳 在 和\*\*\*  
Lee, Moon Soo · Lee, Jean Soo · Oh, Jae Hwa

### Summary

This is a fundamental study aiming at scrutinizing the effect of reinforcement and deformation characteristics of soft clayey foundation improved by various technical treatments. Among many methods proposed thus far, geotextile was selected for the purpose of improvement of the model soil foundation on which plate loading test was subsequently performed.

Loading test has been carried out with the variation of the location and number of covering layers of geotextile, and actual values for ground deformation and geotextile effect were secured. As for technique on deformation analysis, elasto-plastic model for soil, elastic model for sand, and beam theory for geotextile were coupled with satisfactory results between observed and numerical values.

### I. 緒 論

地盤의 安定化는 載荷에 따른 軟弱地盤의 과도한 變形을 抑制하거나 支持力을 增加시키기 위하여 實施한다. 이러한 地盤의 安定化 工法은 先行載荷와 병행하여 實施하는 sand compaction pile 등 軟弱地盤의 깊은층 改良과 土木纖維등을 사용하는 地盤의 表層處理 方法으로 分類할 수

있다. 本文은 이와같은 軟弱地盤에 대한 安定化 工法中 一차적으로 表層處理라 말할 수 있는 土木纖維 補強地盤을 選定하여 2次元 模型載荷 實驗을 실시하고, 이를 토대로 각종 改良軟弱 地盤에 대한 變形學動 糾明과 함께 이들 地盤에 대한 變形解釋法의 基礎를 確立하고자 하는 研究目的을 갖고 있다.

이와 같은 土木纖維 敷設地盤에 대한 研究는

\* 全南大學校 農科大學

\*\* 東新大學校 工科大學

\*\*\* 朝鮮大學校 工科大學

키워드: 有限要素法, 構成式, 支持力, 側方變位,  
地盤沈下, 土木纖維

1960年代를 시작으로 지금까지 土木纖維의 物理的 性質과 더불어 敷設效果 등에 많은 研究의 進展을 보고 있다. 그 중에서 Nieuwenhuis<sup>1)</sup>는 土體를 彈性體로 假定하여 土木纖維의 補強效果에 대해 研究를 하였으며, Baker<sup>2)</sup>는 平衡方程式을 고려하지 않은 상태에서 土木纖維가 應力을 받은 後의 變形 모양을 直線으로 假定하여 支持力 補強效果를 研究한 바 있다. 이후 Giroud와 Noiray 등<sup>3)</sup>은 飽和粘土層 위에 敷設된 土木纖維의 變形 모양을 拋物線으로 假定하여 보다 더 進展된 解析法을 提案하였는데 이는 土木纖維의 支持力 補強效果를 膜(membrane) 效果와 隆起抑制 效果에 중점을 둔 研究이다. 이밖에 Nishibayashi와 Yamanouchi 등<sup>4,5,6)</sup>은 模型實驗을 통한 研究와 함께 실제 地盤에서의 實驗 結果들을 토대로 經驗的인 研究를 수행한 바 있다. 그러나 이러한 研究의 대부분이 土木纖維에 대해 平衡式을 이용하고, 土體를 단순히 彈性體, 彈·塑性體, 혹은 粒狀媒介體로 보고 解析한 것으로 실제 地盤의 舉動과는 差異가 있는 것으로 判斷된다. 이와 같은 관점에서 本 研究는 載荷에 따른 土木纖維地盤의 變形舉動을 밝히는데 좀더 실제적으로 接近하고자 模型地盤의 再生成으로 부터 2次元 載荷實驗까지 一貫성 있게 實驗遂行이 가능한 模型土槽를 이용하고, 이 實驗結果를 토대로 土木纖維地盤에 대한 變形解析法의 研究도 함께 이루고자 한 것이다. 이를 위해 本 論文에서는 일차적으로 土木纖維를 軟弱地盤에 敷設함으로써 얻을 수 있는 效果 가운데서 沈下, 側方流動 抑制 및 支持力 補強效果에 主眼點을 두고 載荷實驗을 실시하였다. 또한 土木纖維 補強地盤에 대한 變形解析은 粘土層에 대하여 흙의 應力-變形率 관계를 表現하는 彈塑性 構成式(修正 Cam-clay 모델)을 根幹으로 하고, 여기에 土木纖維에 대해서는 beam 要素를 適用 結合하여 有限要素 解析을 한 것이다.

## II. 有限要素式

### 1. 彈·塑性 構成式

本文의 地盤 變形解析에 適用한 彈·塑性 構成式은 Roscoe 등<sup>7,8,9)</sup>에 의한 修正 Cam-clay 모델을 有限要素 定式化하여 사용한 것이다. 修正 Cam-clay 모델은 飽和正規壓縮粘土와 等方三軸壓縮試驗의 條件에서 1) 體積變形率增分( $d\varepsilon_v$ )은 일부 回復 가능하고 剪斷變形率增分( $d\varepsilon_s$ )은 回復 不可能하며, 2) 剪斷중의 消費에 너지는 塑性體積變形과 塑性剪斷變形에 함께 影響을 주며, 3) 流動測(associated flow rule)이 適用된다는 假定에서 成立한 것으로 降伏하는 동안의 降伏軌跡式은 다음과 같다.

$$P[(q/p)^2 + M^2]/M^2 - p_y = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $p_y$ :  $p$ - $q$  面の 等方壓密曲線과 降伏軌跡의 交叉點의  $p$ 값.

또한 式 (1)은 降伏函數로 定意할 수 있으며 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

여기서,  $q = [3/2 \cdot S_{ij} S_{ij}]^{1/2}$ ,  $p = 1/3 \cdot \sigma_{ii}$ ,

$M$  = 限界狀態線의 기울기 (=  $q/p$ )

$p_0$  = 初期의  $p$

$S_{ij}$  = 軸差應力 텐서(tensor)

다음으로 修正 Cam-clay 모델의 有限要素 適用을 위한 表現은 다음과 같이 彈性舉動과 塑性舉動으로 나누어 나타낼 수 있다.<sup>10,11,12)</sup>

$$d\varepsilon_v^e = d\varepsilon^e / (1 + e_0) = -k / (1 + e_0) \cdot d\sigma_m / \sigma_m \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $\sigma_m$  = 應力不變量,  $k$  = 膨潤指數

$K_0$  = 體積變化係數 (=  $d\sigma_m / d\varepsilon^e = \langle E / (3(1-2\nu)) \rangle$ )

$E$  = 彈性係數 (=  $3P / K \cdot (1-2\nu)(1+e_0)$ )

$$d[\varepsilon]_p = \alpha [a] \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서,  $\alpha$  = 比例常數

다음에 彈性變形率과 塑性變形率 行列로 함께 나타내면 다음과 같다.

$$d[e] = d[\varepsilon]^e + d[\varepsilon]^p \\ = [D]^{-1} d[\sigma] + \alpha [a] \dots\dots\dots (5)$$

式 (5)에서  $[D]$ 는 式 (3)의 彈性係數(E)에 관계하는 行列이다. 또한 塑性問題의 基礎가 되는 降伏面式은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d[\sigma] = ([D] - 1/\beta \cdot [d][d]^T) d[\varepsilon] \dots\dots (6)$$

여기서,  $[d] = [D] [a]$ ,  $[\beta] = A + [a]^T [d]$

$$a_i = ((\lambda - k/\sigma_m) [(M^2 - \eta^2 - 9)\sigma_m + 9 \sigma_i / 3\sigma_m (M^2 + \eta^2)])_{i=x,y,z}$$

$$a_i = (\lambda - k/\sigma_m) \cdot 6\gamma_i / \sigma_m (M^2 + \eta^2), i = yz, zx, xy$$

$$r = -(1 + e_0)(\lambda - k/\sigma_m)(M^2 - \eta^2 / M^2 + \eta^2)$$

### 2. beam 要素理論<sup>13)</sup>

本 研究에서 사용한 beam 要素 理論은 地盤에 敷設된 土木纖維에 適用한 것으로 다음의 支配 方程式을 갖는다.

$$d^2(F(x) \cdot d^2w/dx^2)/dx^2 = P(x) \dots\dots\dots (7)$$

여기서,  $w$ 는 鉛直變位,  $F(x) = EI(x)$  - 剛性度,  $x$ 는 beam의 중심축을 지나는 座標이다.

本文에서 사용한 beam 要素는 6個의 自由圖 ( $w_1, \theta_1, u_1, w_2, \theta_2, u_2$ )를 갖으며, 이 未知數들을 決定하기 위해 軸方向 變位와 bending을 고려하여 結合하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} U(x) \\ W(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [N_a] & [0] \\ [0] & [N_b] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [q_a] \\ [q_b] \end{pmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

여기서,  $N_a, N_b$ 는 보간함수로서  $q(w, \theta)$ 에 관련되고 첨자  $a$ 는 軸方向,  $b$ 는 bending을 意味한다.

다음으로 몇가지 數學的 과정을 거쳐 整理하

면 最終적으로 다음과 같은 beam 要素의 行列을 얻을 수 있다.

$$\begin{pmatrix} 12EI/l^3 & 6EI/l^2 & -12EI/l^3 & 6EI/l^2 & 0 & 0 \\ & 4EI/l & -6EI/l^2 & 2EI/l & 0 & 0 \\ & & 12EI/l^3 & 6EI/l^2 & 0 & 0 \\ & & & & 4EI/l^2 & 0 \\ & & & & & 0 \\ \text{Sym.} & & & & & EA/l & -EA/l \\ & & & & & & EA/l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_1 \\ \theta_1 \\ W_2 \\ \theta_2 \\ U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} pl/2 \\ pl^2/2 \\ pl/2 \\ -pl^2/12 \\ p \\ p \end{pmatrix} \quad (9)$$

### III. 2次元 模型載荷試驗

#### 1. 試驗 目的 및 範圍

本章의 實驗은 軟弱地盤에 대한 많은 補強地盤중 土木纖維 敷設地盤을 選定하여 2次元 模型載荷 實驗을 실시하고, 이 實驗 結果를 토대로 장차 각종 安定化 地盤에 대한 體系의인 模型 實驗 確立, 變形舉動의 特性料明 및 變形解析法의 基礎를 마련하고자 하는 目的을 갖고 있다. 이를 위한 載荷試驗은 일차적으로 4種의 模型地盤을 대상으로 실시되었는데 地盤에 設置한 土木纖維의 敷設位置 및 敷設層數에 따른 補強效果와 變形特性에 主眼點을 두고 이루어 졌다. 또한 本文에서 提示한 變形解析法의 適用性 및 檢證은 模型補強地盤의 載荷에 따른 變形 實測值와 數值解析值의 比較에 의하여 確認하고자 하였다.

#### 2. 2次元 載荷試驗裝置<sup>14)</sup>

本 試驗 裝置는 模型地盤의 再生成으로 부터 2次元 載荷試驗까지 體系의이고 一貫性 있게 遂行할 수 있는 것으로 寫眞 1과 같다. 寫眞에서 보는 바와 같이 本 試驗 裝置는 크게 1) 載荷 裝置 (loading device), 2) 土槽 (soil bin), 3) 計測裝置 (measurement device)로 構成되어 있으며 각 부의 諸元 및 機能은 다음과 같다.

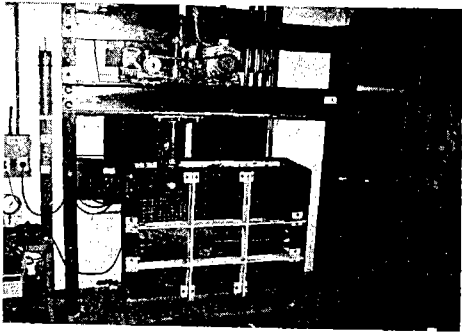


Photo. 1. Two-dimensional model loading apparatus

가. 載荷裝置

1ton 정도의 용량을 갖는 載荷裝置는 載荷速度 調節이 가능한 電氣驅動式으로 載荷틀에 裝着 支持가 되며, 웜-기어(worm-gear)에 달린 피스톤과 이에 연결된 로드-셀(load-cell)을 통하여 地盤에 加壓이 이루어 진다.

나. 土 槽

本土槽의 内部 諸元은 높이 100cm, 길이 120cm, 폭 25cm를 갖는 鋼材 탱크로서, 土槽 後面과 側面은 1.5cm 두께의 鋼板이며, 前面은 載荷에 따른 地盤變形의 觀測 및 測定이 가능하도록 2cm 두께의 透明 아크릴판(觀測窓)으로 構成된다. 또한 試料製作이나 載荷중에 水密性 維持와 觀測窓의 橫方向 變形을 防止하기 위해 각각 0.5cm 두께의 고무板과 格子形 鋼材 補強材로 構成되어 있다.

다. 計測裝置

載荷중에 발생하는 地盤의 變形(沈下 및 側方流動) 및 破壞樣相은 地盤前面의 觀測窓(투명 아크릴판)을 통하여 觀測 및 測定이 가능하며, 地盤支持力 및 地盤內에서 발생하는 應力은 각각 로드-셀(load-cell)과 土槽 後面의 觀測孔을 통하여 測定이 가능하도록 되어 있다.

3. 試料의 調製 및 性質

模型地盤에 사용한 試料는 榮山江 下流에서 採取한 海性粘土로 물과 함께 攪拌시킨 후 No.

100제를 通過한 懸濁液(slurry) 狀態의 試料를 Fig. 1의 土槽에 넣어 0.5kg/cm<sup>2</sup> 壓力으로 4個月間 再壓密 再成形한 것이다. Fig. 1은 模型 土槽(사진 1)의 側面圖를 나타낸 것으로 上下 面의 濾過砂 사이에서 粘土試料를 두는 한편 粘土試料의 4面은 濾過紙를 設置하여 壓密排水가 促進되도록 하였으며, 壓密壓力의 調整은 그림에서와 같이 水頭制御 方式을 택하였다.

壓密이 끝난 후 再成形된 地盤의 前面에서 測定한 含水比(w<sub>n</sub>)와 一軸壓縮強度(q<sub>u</sub>)의 分布는 Fig. 2와 같다. 一軸壓縮強度는 攜帶用貫入 試驗機(pocket penetrometer)에 의해 測定된 값이다. 그림에 나타난 바와 같이 含水比는 52~54%, 一軸壓縮強度는 0.5~0.6kg/cm<sup>2</sup>의 分布로 거의 均一하게 壓密이 이루어 졌다고 볼 수 있다.

다음으로 再成形한 試料에 대한 土性試驗 및 三軸壓縮試驗을 통하여 얻은 土質試驗成果表를 Table-1에 나타낸다.

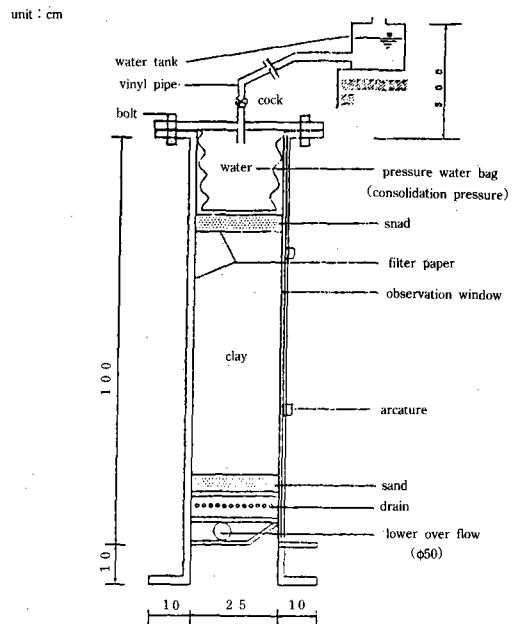


Fig. 1. Apparatus of consolidation(side elevation)

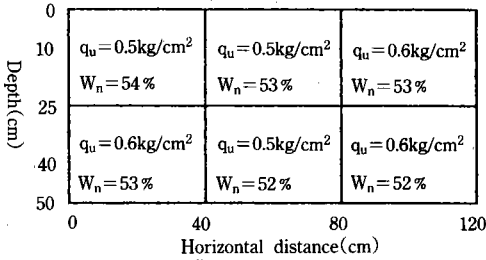


Fig. 2. Results of "site investigation and location"

한편 本 模型地盤에 敷設한 土木纖維의 物理的 性質은 萬能試驗機(Instron製)를 사용하여 얻었으며 Table-2에 나타낸다.

#### 4. 載荷試驗 順序 및 方法

本 論文에서 실시한 模型補強地盤의 載荷試驗은 土木纖維의 敷設位置 및 敷設層數에 따라 4種類이며 이를 Table-3에 나타낸다.

각각의 模型地盤에 대한 載荷前 試驗地盤의 設置 順序는 다음과 같다.

첫째로, 壓密作業이 끝난 후 土槽 앞면을 分解하여 地盤을 水平하게 한 다음에 각 模型地盤의 경우에 따라 土木纖維를 敷設한다.

둘째로, 載荷중에 발생하는 地盤의 沈下 및 側方變位를 測定하기 위하여 寫眞 2와 Fig. 3에서 보는 바와 같이 白色 圓形봉을 이용하여 일정크기의 格子網을 형성한다. 이 格子要素는

장차 有限要素解析을 위한 網(mesh)으로서 活用한다.

셋째로, 地盤中央에 剛性基礎를 設置한 다음 로드-셀(load-cell)을 設置하고, 變形率制御方式으로 荷重을 가한다. 이때의 載荷速度는 0.025mm/min로 地盤이 破壞될 때까지 載荷하며, 일정시간(30分) 혹은 특기 사항이 觀測될 때마다 地盤 前面의 觀測窓을 통하여 地盤에

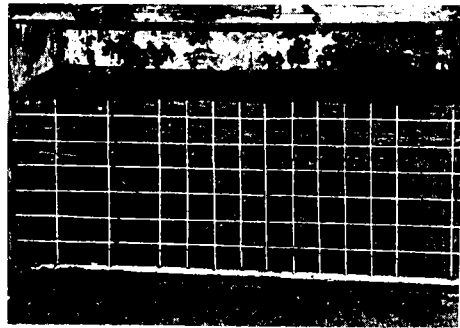


Photo. 2. Element division of model foundation

Table-2. Physical properties of geotextile<sup>15)</sup>

Nomenclature	Tensile strength (t/m)	Weight (g/m <sup>2</sup> )	Tensile strain (%)	Modulus of elasticity (t/m <sup>2</sup> )
SM PP 300	75	220	10-30	8.0×10 <sup>5</sup>

Table-1. Physical properties and soil parameters<sup>15)</sup>

Physical properties	LL (%)	PI (%)	Passing the No. 200 sieve (%)				USCS	Gs
		52	21	62				CH
Soil parameters	*M	*λ	*κ	*E (kg/cm <sup>2</sup> )	*e <sub>0</sub>	*ν	*k (m/day)	*Ko
	1.34	0.325	0.049	180	1.2	0.35	6.55×10 <sup>-4</sup>	0.597

(\*는 彈·塑性 構成式인 修正 Cam-clay 모델에 사용되는 土質常數)

표에서, M : p-q 平面에서 限界狀態線의 기울기(=q/p)

λ : e-ln p 曲線상의 正規壓密 部分의 기울기,

κ : e-ln p 曲線상의 膨潤線의 기울기, E : 彈性係數,

k : 透水係數, Ko : 停止土壓係數, ν : Poisson 比,

e<sub>0</sub> : 初期間隙比

Table-3. Types of reinforced foundation

Model foundation	Case	Reinforcement	Foundation type	Consolidation pressure(kg/cm <sup>2</sup> )
	1	without G/T	rigid footing (15×25×2cm)	0.5
	2	G/T (one layers)		
	3	G/T (two layers)		
	4	G/T (three layers)		

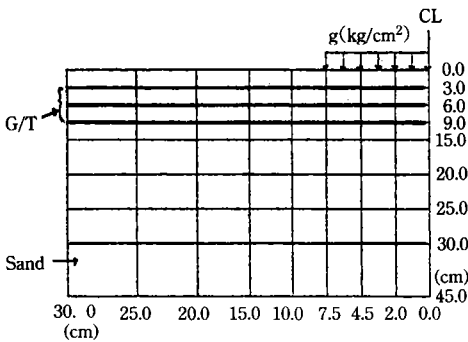


Fig. 3. Grid

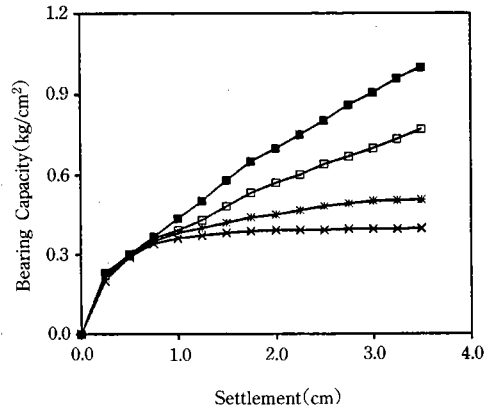


Fig. 4. Settlement vs bearing capacity curves

발생하는 변형과龜裂進展狀況을記錄하고, 地盤支持力은 로드-셀에 連結한 測定裝置 (UCAM-5A)를 통하여 記錄하도록 한다.

#### IV. 試驗 結果 및 考察

앞에서 記述한 바와 같이 本章은 4가지 模型地盤에 대한 2次元 載荷試驗 結果를 중심으로 土木纖維의 敷設條件에 따른 支持力 補強效果, 變形舉動特性과 破壞樣相 등에 대하여 考察하고자 한다.

##### 1. 地盤 支持力

Fig. 4는 土木纖維의 敷設層數에 따른 地盤의 支持力과 沈下量의 關係를 나타낸 것으로 土木纖維 敷設層數의 增加에 따라 地盤의 支持力이

增加하는 傾向을 보이고 있고, 支持力이 0.3kg/cm<sup>2</sup>까지는 그의 影響을 받지 않는 것으로 나타났다. 이 現狀은 支持力과 沈下量이 一定한 값에 이를 때 土木纖維의 抵抗이 發現되는 것으로 判斷된다. 또한 土木纖維가 없는 Case 1에서는 支持力이 沈下에 미치는 影響이 거의 없었고, 土木纖維의 敷設層數가 많을수록 全般 剪斷 破壞의 樣相에서 局部剪斷 破壞의 樣相으로 轉換되고 있는것을 意味한다고 分析된다.

Fig. 5와 Table-4는 土木纖維의 敷設層數에 따른 補強比(BCR=q<sub>r</sub>/q<sub>0</sub>)와 沈下量과의 關係를 나타낸 것으로 같은 沈下量에서 土木纖維의 敷

Table-4. Test results with multiple layers of reinforcement

Settlement (cm)	Case	Bearing capacity $q_R$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Bearing capacity ratio(BCR= $q_R/q_0$ )	Remarks
1	2	0.380	1.056	$q_0 = 0.360$ (kg/cm <sup>2</sup> )
	3	0.390	1.083	
	4	0.435	1.208	
2	2	0.450	1.154	$q_0 = 0.390$ (kg/cm <sup>2</sup> )
	3	0.570	1.462	
	4	0.700	1.795	
3	2	0.500	1.269	$q_0 = 0.394$ (kg/cm <sup>2</sup> )
	3	0.700	1.777	
	4	0.905	2.297	

\* $q_0$  : Bearing capacity of the intact foundation  
 $q_R$  : Bearing capacity of the reinforced foundation

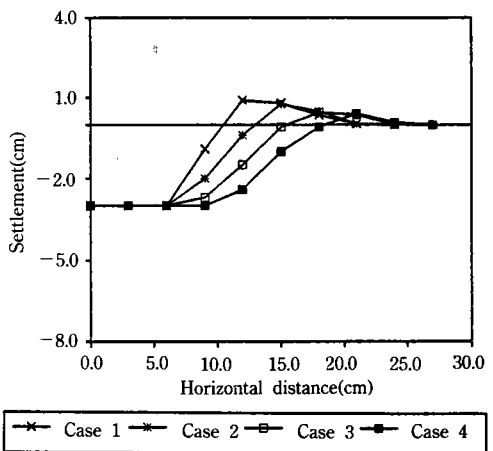
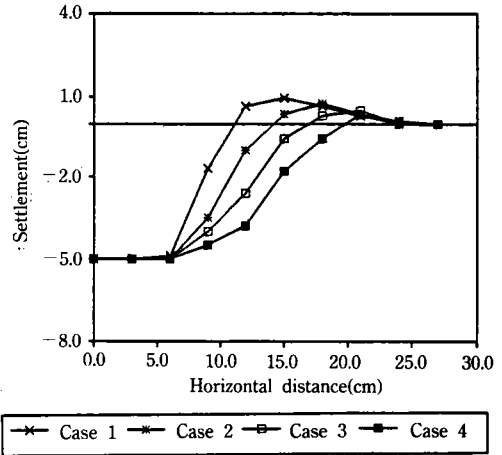
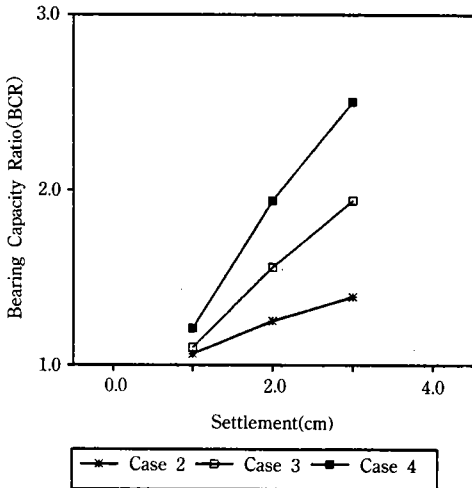


Fig. 5. Effect of reinforcements on bearing capacity

設層數가 많을수록 補強比가 커지고, 沈下量이 커질 수록 補強比도 增加하여 補強效果가 좋아지는 것을 알 수 있다.

2. 鉛直變位와 側方變位

Fig. 6 a), b)는 載荷後 地表面 沈下가 3cm, 5cm 일때 載荷板의 中央으로 부터 水平距離에 따른 地表面의 鉛直變位를 나타낸 것으로 土木纖維로 補強하지 않은 地盤(case 1)에 비해 土

Fig. 6. Settlements a), b)

木纖維를 敷設(Case 2~4)하고 敷設層數가 많을수록 隆起抑制 效果가 있으며, 載荷板으로부터 거리가 增加함에 따라 隆起現象이 발생한다. 이러한 原因은 沈下의 進展에 따른 土木纖維의 抵抗이 隆起에 대한 拘束效果로 나타난 결과로 判斷된다.

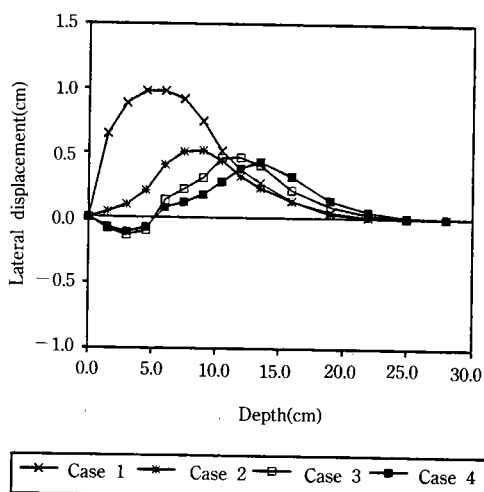
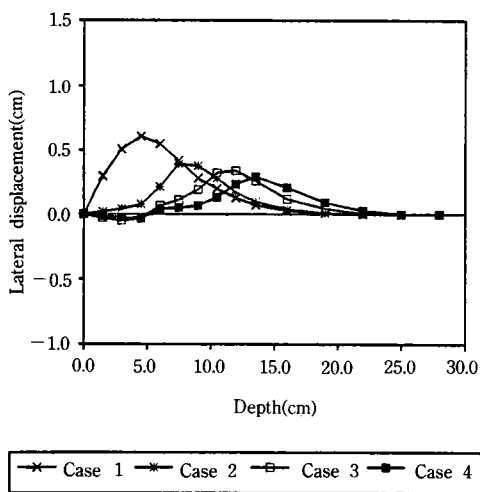
Fig. 7 a), b)는 地表面 沈下가 각각 3cm, 5cm일 때 載荷板 끝에서의 깊이에 따른 側方變位를 보인 것으로 側方變位 樣相은 土木纖維를 敷設하지 않은 地盤(case 1)에 비해 土木纖維를 敷設하고 敷設層數가 많을수록 側方變位는 抑制되고 있으며, 最大側方變位가 일어나는 위치도 달라지고 있다. 이러한 側方變位의 抑制程度와 最大側方 變位가 일어나는 位置를 Table-5에 整理하였다.

Table-5에서 알 수 있는 바와 같이 土木纖維를 1層과 2層으로 敷設한 경우(case 2, 3)에 側方變位의 抑制效果는 매우 크게 나타나며, 反面에 土木纖維를 3層으로 敷設한 地盤(case 4)에서의 側方變位의 抑制效果는 鈍化되고 있음을 알 수 있다. 또한 土木纖維를 敷設한 地盤(case 2~4)에 있어서 土木纖維를 敷設한 깊이까지는 側方變位가 거의 發生하지 않고 가장

**Table-5. Location of maximum lateral displacement and maximum lateral displacement ratio with reinforcement layers**

Case	Location of maximum lateral displacement	Maximum lateral displacement ratio( $L_R/L_0$ )	Remark
1	$z=0.30B$		$z$ =depth, $B$ =width of loading plate,
2	$z=0.50B$	0.65	$L_0$ =maximum lateral displacement of intact foundation,
3	$z=0.80B$	0.56	$L_R$ =maximum lateral displacement of reinforcement foundation
4	$z=0.90B$	0.48	

下段에 있는 土木纖維 아래 일정 깊이에서 側方變位가 일어나고 있다. 이러한 結果는 Fig. 4의 土木纖維 敷設에 따른 支持力 增加效果와 관계된다고 볼 수 있으며, Fig. 6의 沈下의 경



**Fig. 7. Lateral displacements a), b)**



우에서의 같이 土木纖維 敷設層數가 增加할 수록 載荷板 밖의 鉛直變位가 더 크게 발생하는 結果와도 一致한다고 생각할 수 있다. 또한 土木纖維를 敷設한 改良地盤(case 2~4)의 破壞舉動은 土木纖維를 敷設하지 않은 基礎地盤(case 1)의 貫入破壞보다 더 큰 領域에 걸쳐 形成되는데 이는 土木纖維의 抵抗力(粘着力, 혹은 摩擦力)과 拘束에 의해 더 넓은 範圍로 應力이 分散되는 效果때문으로 判斷된다.

### 3. 破壞樣相

Fig. 8과 9는 각각 載荷板 沈下가 3cm일 때의 變位벡터(vector)와 龜裂進展 樣相을 나타낸 것으로 土木纖維를 敷設하지 않은 地盤(case 1)과 土木纖維를 2層으로 敷設한 地盤(case 3)을 대표적으로 選定한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 變位 벡터 樣相은 土木纖維를 敷設한 경우(case 3)가 그렇지 않은 경우(case 1)에 비해 載荷板으로 부터 먼거리에서 上向의 鉛直變位 成分이 더 크며, 相對的으로 載荷板에 가까운 부근에서는 下向의 鉛直變位 成分이 더 강하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 龜裂의 進展樣相도 土木纖維를 敷設한 경우(case 3)가 더 넓은 範圍에 걸쳐 발생하고 있다. 이러한 結果는 앞에서 考察한 沈下와 側方變位의 結果와 比較할 때 一致하는 現象으로 判斷될 수 있다.

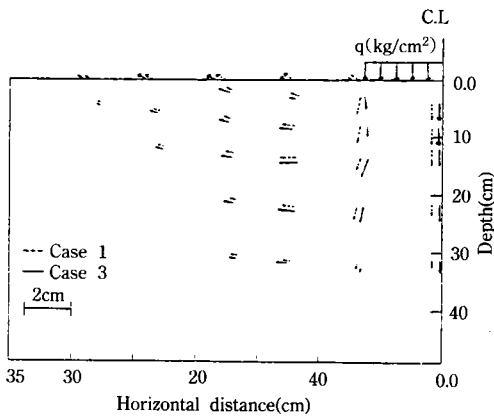


Fig. 8. Pattern of displacement vectors

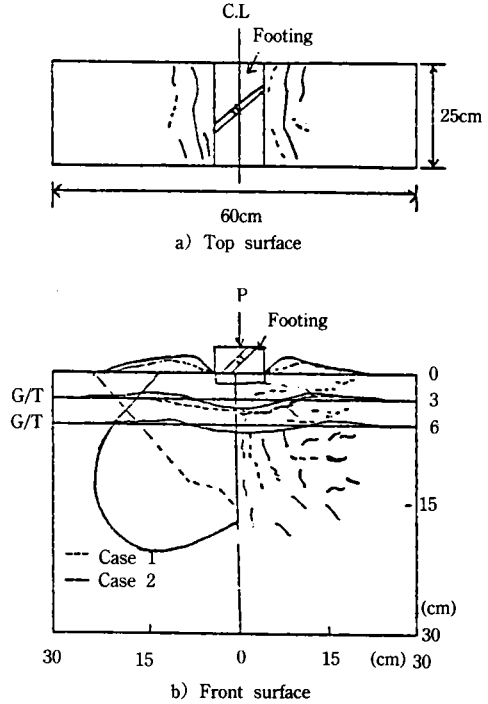


Fig. 9. Pattern of crack and displacement

### V. 試驗 結果와 數值解析 結果의 比較

本章은 4種(Case 1~4)의 模型載荷 試驗가운데서 土木纖維를 敷設하지 않은 地盤(case 1)과 土木纖維를 2層으로 敷設한 地盤(case 3)을 대표적으로 選定하여 數值解析을 適用하였다. 數值解析은 試驗結果中 支持力과 變位에 대하여 遂行되었으며, 이를 통해 本文에서 提示한 變形解析法의 適用性도 함께 檢證하고자 하였다.

#### 1. 解析 條件 및 領域

1) 有限要素解析에 사용한 要素分割은 Fig. 10과 같으며 土木纖維를 敷設한 位置는 굵은 선으로 표시하였다.

2) 解析을 위한 拘束條件으로는 模型地盤 下端과 側面은 固定, 中央鉛直面은 鉛直變位만 許容, 上端은 自由로이 變形할 수 있도록 하

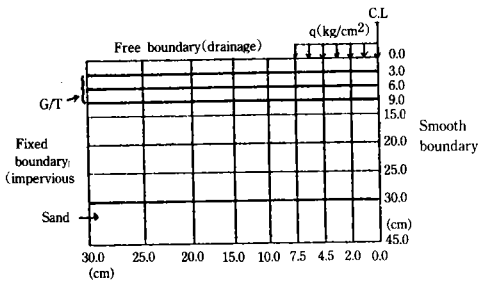


Fig. 10. FEM mesh

였다. 또한 排水條件으로 地盤 上端과 下端은 無限排水로 하였으며, 側面과 中央鉛直面은 非排水로 하였다.

3) 載荷條件으로는 平面變形率 狀態로 解析하였다.

4) 解析에 使用한 理論으로는 模型地盤의 粘土層에 대하여 彈·塑性 構成式을, 모래層에 대하여 彈性理論을, 土木纖維에 대해서는 beam要素 理論을 適用하였다.

5) 解析에 使用한 土質常數와 beam의 材料常數는 각각 Table-1과 2에 나타내었다.

6) 基礎地盤은 正規壓密地盤으로 간주하여 解析에 適用하였다.

2. 實測과 解析結果의 考察

가. 支持力

Fig. 11은 土木纖維를 敷設하지 않은 地盤 (case 1)과 土木纖維를 2層으로 敷設한 地盤 (case 3)의 沈下와 支持力 관계에 대한 實測値와 解析結果를 보인 것으로 實測値와 解析結果間에 全般的으로 동일한 傾向을 보여 그 適用性이 있다고 할 수 있으나 解析結果가 實測値에 비해 크게 나타나고 있다.

나. 鉛直變位와 側方變位

Fig. 12와 13은 土木纖維를 敷設하지 않은 경우(case 1)와 土木纖維를 2層으로 敷設한 경우(case 3) 載荷板 沈下가 3cm일 때의 地表面 鉛直變位와 沈下가 5cm일 때 載荷板 끝에서의 깊이에 따른 側方變位를 각각 나타낸 것으로

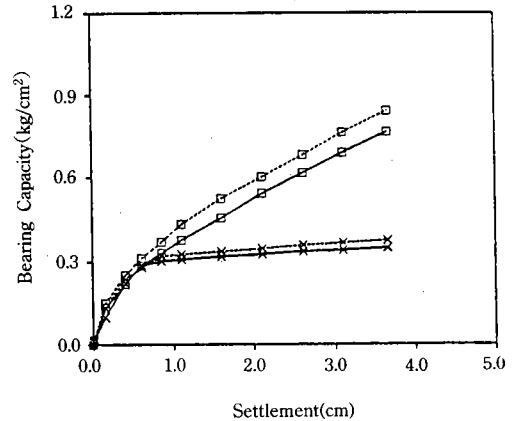


Fig. 11. Comparison of settlement-bearing capacity curves by measurement and FEM solution

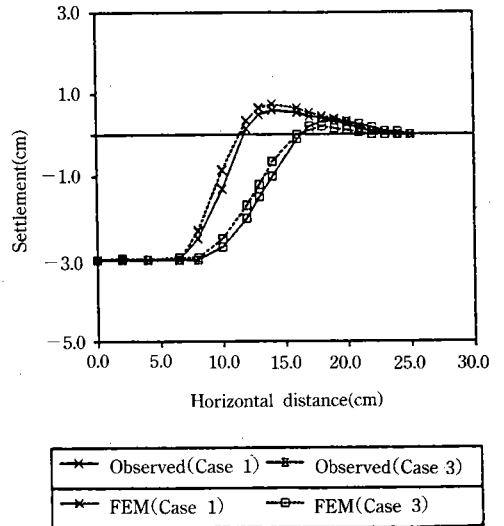


Fig. 12. Comparison of vertical displacement by measurement and FEM solution

鉛直變位와 側方變位 모두 解析結果가 實測値에 비해 작게 나타나고 있지만 매우 유사한 樣相을 보이고 있다. 또한 水平變位の 傾向에 있어서는 解析結果가 實測値에 비해 더 깊은 곳에서 最大側方變位가 일어나고 있다.

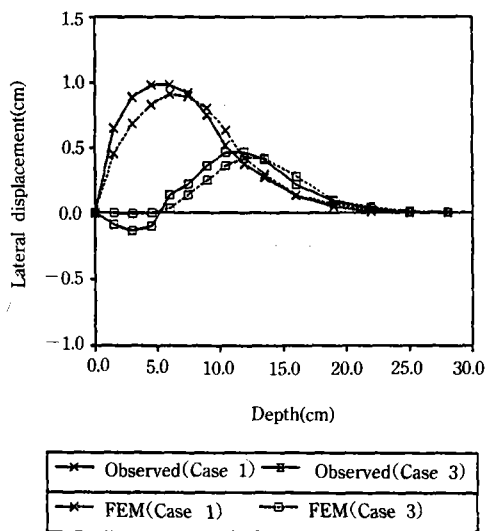


Fig. 13. Comparison of lateral displacement by measurement and FEM solution

이상 本文에서 제시한 變形解析法을 實驗結果와 比較한 바 어느 程度의 適用性을 보였다 할 수 있지만, 앞으로 좀더 精密한 解析을 위해서는 더 많은 實驗結果에의 適用과 함께 解析法의 補完도 있어야 할 것으로 判斷된다.

## VI. 結 論

4種의 模型地盤에 대한 模型實驗과 有限要素 解析을 통하여 얻은 結果를 整理하면 다음과 같다.

1. 土木纖維의 層數에 따라 支持力이 크게 增加하였으나 相對적으로 큰 沈下도 수반하는 것을 알 수 있었다.

2. 支持力과 沈下關係 曲線만을 고려해 볼 때 補強하지 않은 地盤의 파괴모양은 全般剪斷 破壞樣相을 보였으며, 土木纖維의 敷設層數가 增加할 수록 局部剪斷破壞樣相으로 轉換하는 傾向이 있음을 알 수 있었다.

3. 土木纖維의 敷設層數가 增加할 수록 隆起 抑制 效果가 있으며, 이에 따라 補強材料에 의한 變形의 拘束으로 인해 더 큰 範圍에 걸쳐 塑

性領域이 발달하고 應力의 分散을 觀察할 수 있었다. 또한 동일한 沈下에서 隆起나 側方變位의 抑制效果가 地盤의 支持力에 대한 補強效果로 나타남을 알 수 있었으며, 어느 경우나 地盤중에 補強材料(土木纖維)가 敷設된 깊이가 지는 거의 側方變形이 나타나지 않고 最下斷 補強材料아래의 일정깊이(재하폭×(0.3~0.4))에서 最大側方變位가 일어남을 알 수 있었다.

4. 變形解析值를 載荷試驗 實測值와 比較한 結果 좋은 適用性을 보였다라고 判斷된다. 그러나, 보다 精度 높은 解析을 위해서는 몇가지 점에서 補完이 이루어져야 할 것으로 判斷된다.

이상의 研究結果를 살펴 볼 때 土木纖維를 敷設한 地盤의 補強效果와 變形特性 등을 어느 정도 糾明할 수 있었으며, 이와 함께 本 研究에서 提示한 變形解析法이 좋은 適用性을 갖고 있음을 알 수 있었다. 그러나 앞으로 地盤을 構成하는 土質條件, 基礎의 種類, 補強形態 등에 따라서도 더 많은 試驗 및 數值解析을 遂行하여 改良地盤의 補強 또는 變形特性을 좀더 明確히 밝힐 수 있고, 이에 따른 變形解析法의 改善도 있을 것으로 判斷된다.

本 論文은 1992年度 教育部지원 韓國學術 振興財團의 自由公募(地方大學育成) 課題 學術研究造成費에 의해 研究되었으며, 本 財團에 깊은 感謝를 드린다.

## 參 考 文 獻

1. Nieuwenhuis, J. D., "Membrances and the Bearing Capacity of Road Bases", Proc. Int. Conf. on the Use of Fabrics in Geotechnics, Vol. 3. 1, Association Amicale des Ingenieurs Anciens Eleves, Paris, 2 pp 3-8, 1977.
2. Bakker, J. G., "Mechanical Behaviour of Membrances in Road", Proc. Int. Conf. on the use of Fabrics in Geotechnics, Vol. 3.

1. Association Amicale des Ingenieurs Anciens Eelevs, Paris, pp.3-8, 1977.
3. Giroud, J. P. and Noiray, L., "Geotextile Reinforced Unpaved Road Design", J. of the Geotechnical Division, ASCE, Vol. 107, GT. 9, pp. 1233-1254, 1981.
4. Nishibayashi, K., "Surface Layer Stabilization of Soft Ground Using Synthetic Chemical Fiber Sheet", Symp. on Soil & Rock Improvement Techniques Including Geotextile Reinforced Earth and Modern Piling Methods, pp. C-3-1~C-3-22, 1982.
5. Yamanouchi, T. d, Yano, K. and Watari, Y., "Earthwork on Soft Clay Grounds Using Rope-Netted Fabrics", Symp. on Soil & Rock Improvement Techniques Including Geotextile Reinforced Earth and Modern Piling Methods, pp. C-2-1~C-2-17, 1982.
6. Tatsuoka, F. and Miki, G., "Fundamental Experiments on Earth Reinforcement and Practical Uses of the Root Pile Method in Japan". Symp. on Soil & Rock Improvement Techniques Including Geotextile Reinforced Earth and Modern Piling Methods, pp. D-2-1~D-2-21, 1982.
7. Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Wroth, C. P., "On the Yielding of Soils", Geotechnique, Vol. 8, No. 1, March, pp. 22-53, 1958.
8. Roscoe, K. H. and Burland, J. B., "On the Generalized Stress-Strain Behavior of 'Wet' Clay", Engineering Plasticity, Cambridge Univ. Press, pp. 535-609, 1968.
9. Atkinson, J. H. and Bransby, P. L., "The Mechanics of Soils", McGROW-HILL, pp. 184-368, 1978.
10. Christian, J. T. and Boehmer, J. W., "Plane Strain Consolidation by Finite Elements", J. of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, No. 96, pp. 1435-1457, 1970.
11. Zienkiewicz, O. C. and Nayler, D. J., "Stress-Strain Behaviour of Soils -The Adaption of Critical State Soil Mechanics Theory for Use in Finite Elements", G. T. Foulis & Co. Ltd., pp. 537-547, 1972.
12. 李汶樹, "有限要素法에 의한 多次元 壓密의 變形解析", 高麗大學校大學院 博士學位論文, 1984.
13. Desai, C. S., "Elementary Finite Element Method", Prentice Hall, pp. 172-200, 1979.
14. 朴炳基, 康權修, "2次元 載荷試驗裝置의 試作", 大韓土質工學會誌, 第4卷, 第2號, pp. 55-64, 1988.
15. 鄭鎮燮, "飽和粘土의 應力-變形率에 관한 研究", 全南大學校 大學院 博士學位論文, 1983.