

土木纖維補強構造物の應力 및 舉動 解析

An Analysis of Stresses and Behaviors in the Geotextile-Reinforced Soil Structures

高 弘 錫*
Goh, Hong Seok

Summary

The use of geotextile as reinforcing materials in soil structures has become widespread throughout the world. Geotextile reinforcement has been used in retaining walls, roadbed, embankment stabilization and especially reinforcement of soft foundation, and so on. In the past, however, its design and construction have been performed empirically. In this study, laboratory model tests were carried out in order to investigate the effects of geotextile reinforcement on vertical and horizontal displacement and other characteristics in soft foundations. The experiments were executed in eight treatments: no geotextile between embankment and subsoils, and seven geotextiles with different tensile strength. And such factors as the loading conditions, the tensile strength of geotextiles, the ingredient of geotextiles and the elapsed time were investigated in this study.

And the analytical method were executed in order to study the stress and behavior of geotextile-reinforced soil structure by the nonlinear elasto-plastic finite element model.

The following conclusions were drawn from this study.

1. Geotextile reinforcement reduced the effects of banking loads on subsoils more effectively with the increase of their tensile strength.
2. As the tensile strength of geotextiles was increase, the rate of the initial vertical displacements of loading plate was reduced inverse proportional to loads. However, the effect of loading was reduced when the loads exceed a certain limits.
3. The effect of reinforcement of nonwoven geotextile was 1.5-4.5 times larger than that of the woven geotextile with equivalent tensile strength.
4. The increased bearing capacity and the reduced settlement are proportioned as the tensile strength of geotextile.
5. The settlement at the long time loading were developed almost all, were completed after 10 days and the additional settlement were not developed since then.
6. The nonlinear elasto-plastic finite element method are accurate to predict the stresses and behavior of geotextile-reinforced soil structures.

* 全北大學校 農科大學

I. 緒 論

最近 産業의 발달로 國土利用率이 높아짐에 따라 土木工事が 이루어지는 地盤이 軟弱地盤으로 形成된 경우가 날로 빈번해지고 특히 대규모 干拓事業이 활발히 進行되고 있는 근래에는 軟弱地盤 改良工法이 중요한 課題로 대두되고 있다. 이러한 軟弱地盤을 解決, 補強하기 위해서 置換工法, Prelading 工法, Drain工法, 浸透圧工法(MAIS) 등이 사용되어 왔으나 工費가 비싸고 施工이 용이하지 않은 점 등의 문제점을 내포하고 있어서 실제 非合理的인 경우가 많았다.

이러한 工法의 代用方法으로 工費가 저렴하고 施工이 용이한 土木纖維 工法이 開發¹⁾되어 스웨덴을 비롯한 프랑스, 미국, 일본에서 1970년 이후 여러 構造物에 사용되어 왔고, 우리나라에서는 湖南, 南海 高速道路 軟弱地盤 盛土工事에 土木纖維를 사용함으로써 실질적인 사용이 시작되었다.

한편 農業土木 분야에서는 1970년대 초반에 大單位 農業開發事業이 활발해지면서 평택, 삼교천, 영산강 2단계, 대호지구 등의 防潮堤工事 등에 이 土木纖維를 사용하여 그 효과를 立証한 바 있다.

土木纖維의 設計 및 施工은 초기에는 纖維生産業體에서 自社製品의 販促을 위하여 試驗 施工한 報告書를 經驗적인 設計基準으로 하였으나, 이는 構造物의 種類, 工事現場 條件, 施工方法 등 여러가지 여건에 따라서 設計基準이 달라져야 하기 때문에 이에 만족하지 못한 土木技術者들이 土木纖維 효과에 대한 定量的인 해석을 위하여 研究를 시작하게 되었다.

그리하여 1983년 11월에 설립된 國際土木纖維學會(IGS: International Geotextile Society)는 그동안 3차례의 國際學術會議을 1977, 1982, 1986년에 파리, 라스베가스, 비엔나에서 각각 개최하고 그동안의 研究 結果를 발표한 바 있다.

또한 膜에서 土木纖維를 이용한 事例²⁾는, 1959년 이태리에서 높이 26m의 Contrada Sabetta 膜에 2mm 두께의 부틸라이너 약 4,000m²를 上流側 止水材로 이용하였고, 캐나다의 Terzaghi 膜에서는 1960년에 圧密을 촉진하고 인장균열을 억제하기 위하여 경사 코어부에 0.75mm 두께의 PVC 필름을 布設하였으며, 1968년에 축조된 LaMiel 膜에서는 上流側 止水材로 1mm 두께의 부틸 필름을 사용하였고, 1970년 Valcors 膜에서는 不織布를 사용하여 傾斜面의 保護役割인 分離材로 이용한 바

있다.

1987년 Cazzuffi¹⁾는 止水材로서의 Geomembrane 施工 成功 事例를 발표한 바 있고, Biche⁶⁾는 모로코의 多目的인 Ait Chouarit 膜에서 土木纖維가 필터재, 排水材, 地盤 補強材로 사용된 實例를 報告하였으며, Martin 등²⁴⁾ Tong-Kang 등²⁹⁾은 각각 독일과 중국에서 土木纖維를 膜에 사용한 結果를 발표한 바 있다. 그러나 國內에서는 아직까지 土木纖維의 設計 및 施工에는 만족할만한 資料가 부족한 형편이며 經驗적인 범주를 벗어나지 못하고 있는 실정이다.

따라서 合理的인 設計모델을 開發하여 土木技術者에 의한 示方書가 提示되어야 하며 그러한 設計모델이 開發됨으로써, 그동안 土木纖維의 장점은 인정하면서도 設計法이 미비하고, 사용했을 때의 定量的인 효과를 판단할 수 없어서 그 사용을 주저하였던 施工業界의 절실한 욕구를 충족시킬 수 있을 뿐만 아니라 실제 土木纖維 사용에 따른 공사기간의 단축과 공사비의 절감을 꾀할 수 있을 것이다.

有限要素法은 컴퓨터의 발전과 더불어 航空機工學, 構造工學, 熱力學, 流體力學 등 전체 工學분야에 널리 이용되고 있는 解析技法으로서, 특히 靜的 및 動的인 土質工學 문제를 解析하는데 그 正確性和 汎用性 때문에 완벽한 手段으로 널리 인정되어 왔다.

본 研究는 帶狀基礎에 대한 模型實驗을 수행하여 土木纖維 補強 構造物의 沈下 및 支持力에 미치는 영향을 究明하고, 이 土木纖維 補強 構造物의 應力-變形率의 舉動을 豫測할 목적으로 有限要素 모델을 開發하는데 있다.

II. 材料 및 試驗 方法

1. 模型

模型은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 2차원 平面變形率(2-Dimensional plane strain) 형태의 帶狀基礎 模型으로 作用荷重 및 盛土荷重에 의하여 模型 자체의 變形이 생기지 않도록 鈹製틀로 模型의 크기는 가로 120cm, 세로 30cm, 높이 90cm로 제작하였다.

또한 前面과 양쪽 側面에는 模型內의 變形을 직접 관찰할 수 있고 写真撮影에 의해서 變位를 測定할 수 있도록 두께 12.5mm의 특수강화유리를 설치하고 유리와 철제틀 사이에는 漏水가 생

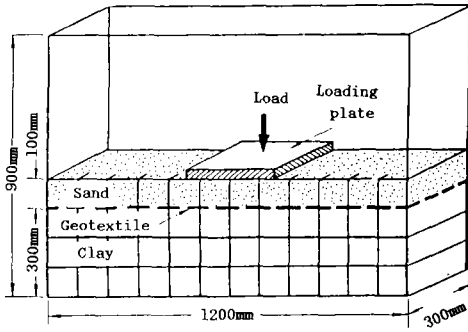


Fig. 1. Structure of model.

기저 압도록 실리콘으로 접촉시켰다.

또한 前面에는 가로, 세로 각각 10cm 간격으로 선을 그리고 그 格子點을 기준으로 하여 模型內의 變位를 측정하였다.

2. 使用材料

Fig. 1에서 보는 바와 같이 模型 內에 軟弱한 粘土를 30cm 두께로 쌓고 그 위에 土木纖維를 布設한 후, 10cm 두께로 모래를 盛土하였으며 이들 재료의 製반 性質을 다음과 같다.

가. 성토재료

성토재인 모래는 Fig. 2의 粒度曲線에 나타

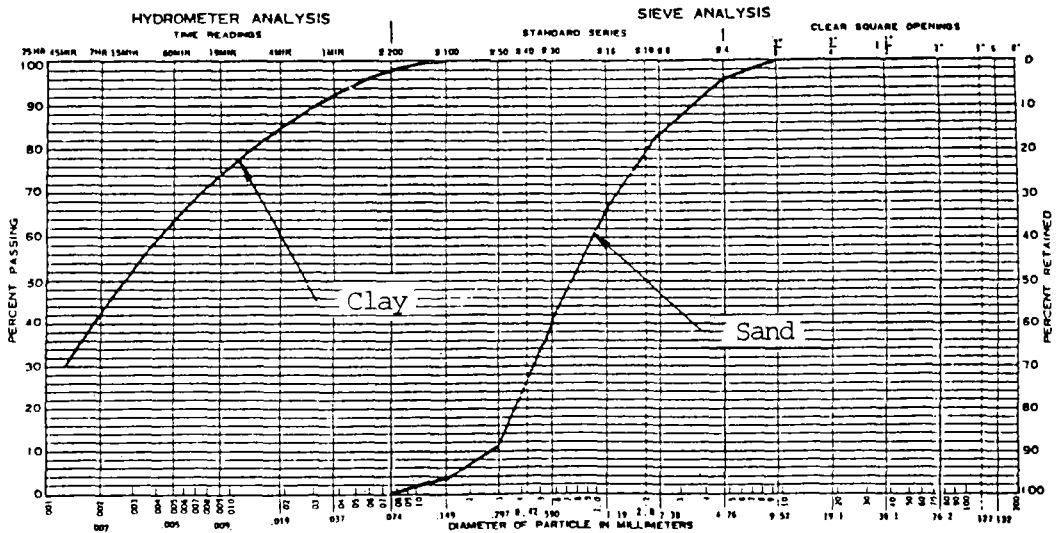


Fig. 2. Gradation curves of sand and clay.

난 바와 같이 粒度가 均等한 모래로써 粒度의 범위는 0.05~4.76mm이며, 그 物理的 性質은 Table-1과 같다.

나. 기초지반

軟弱地盤으로 사용한 粘土의 粒度曲線은 Fig. 2와 같으며 그 物理的, 力學的 性質은 Table-2와 같다.

다. 土木纖維

土木纖維의 組織과 引張強度의 變化에 따른 補強 효과를 비교하기 위하여 成分이 Polyester인 織布와 Polypropylene인 不織布 2종류를 사용하고 다시 그 引張強度를 64~381kg/in 범위의 7종류로 구분하였다. 실험에 사용한 土木纖維는 국내에서 市販되는 제품이며 製備회사에서 제공한

Table-1. Physical properties of sand tested.

Moisture Content %	Specific Gravity	Unit Weight g/cm^3	Void ratio		Uniformity Co-efficient (C_u)	Angle of Internal Friction ϕ_u (°)
			Max.	Min.		
3.64	2.62	1.65	0.78	0.59	1.20	38

Table-2. Physical and mechanical properties of clay tested.

Grain size Percent (%)			Atterberg Limit (%)			Specific Gravity	Unit Weight (g/cm ³)
Sand	Silt	Clay	LL	PL	PI		
2.40	55.45	42.15	48.31	19.24	29.07	2.644	1.450

Triaxial Compression Test		Permeability (cm/sec)	Classification
Angle of Internal Friction ϕ_u (°)	Cohesion Cu (kg/cm ²)		
4	0.035	2.2×10^{-8}	CL

Table-3. Properties of geotextiles.

Trade Name	Structure	Material	Weight (g/m)	Tensile Strength(kg/in)	Permeability (cm/sec)
KP 2500	Woven	Polyester	90	77	0.00001
KP 5001	Woven	Polyester	140	102	0.00001
KP30003	Woven	Polyester	250	178	0.0001
KP30001	Woven	Polyester	300	254	0.0001
KP60001	Woven	Polyester	600	381	0.0001
TS 500	Nonwoven	Polypropylene	140	64	0.232
TS 700	Nonwoven	Polypropylene	280	102	0.154
Test method			KS K 0514	KS K 0520	KS F 2322

시험자료는 Table-3과 같다.

3. 試驗方法

가. 모형의 설치

模型內에 상당한 量의 粘土를 물과 섞어 잘 휘저어서 방치한 후 일주일 지난 다음 밑에서 30cm까지만 남겨놓고 그 위의 흙과 물을 조심스럽게 제거하였다. 이 때의 密度를 측정하여 보니 1.450g/cm³ 정도였으며, 다시 전체 높이가 40cm될 때 까지 물을 채운 다음 거둬 휘저어서 흙의 上部面이 30cm로 圧密될 때 까지 기다린 다음, 뜬 물을 제거하였다. 그 위에 가로 120cm, 세로 30cm 크기로 자른 土木纖維를 조심스럽게 깔고 지시 못을 놓은 후 모래 63.5kg ($\gamma_t = 1.764\text{g/cm}^3$)을 10cm 두께로 盛土하였다. 이 때 盛土層이 균일한 密度가 되도록 하기 위하여 적은 量의 모래를 고르게 편 다음 가로 60cm, 세로 30cm, 두께 3cm로 제작한 다짐판 2개를 이용하여 모래의 두께가 10cm가 되도록 다진 후 格子點 위에 못을 놓았다.

나. 載荷

Fig. 1에서 보는 바와 같이 가로 세로 30cm, 두께 2.5cm의 나무로 된 荷重板을 模型의 중앙에 설치하고, 그 위에 한 개의 중량이 10kg인 추를 매시간 10kg씩 증가시키면서 100kg이 될 때까지 載荷하였다.

또한 長期荷重에서의 模型의 變形을 측정하기 위하여 最大荷重인 100kg이 載荷된 상태에서 매일 동일한 시간인 10시에 變位를 사진 촬영하여 30일 동안 계속하였다. 단 시험기간의 제약으로 시험은 土木纖維가 KP5001, KP60001, TS700의 3경우에 한정하였다.

다. 變位 測定 및 分析

模型內의 變位를 측정하는 방법은 Binguet등⁷⁾, Guido등¹³⁾, Holtz등¹⁵⁾, Lee등²³⁾, Petrik등³¹⁾이 사용한 Strain gauge등의 埋設計器에 의한 방법, Schwab등³⁶⁾, Smith등³⁸⁾이 사용한 흙 내부에 납조각을 埋設하고 X-Ray 촬영을 하는 방법이 있으나 본 실험에서는 Bell등⁵⁾, McGown등^{25,26,27)}, Schlo - sser등³⁵⁾이 사용한 사진촬영 방법을 이용하였다.

模型의 중앙 위치에서 2.45m 떨어진 곳에 카메라를 고정시키고 荷重이 10kg씩 증가할 때마다 載荷 순간, 1분, 5분, 10분, 1시간의 간격으로 사진을 촬영하였다. 이 때 사진의 解像力을 높이기 위해서 필름은 FUJI HR400을 사용하였다. 사진으로 나타난 模型의 變位는 模型과 사진의 縮尺에 따라 환산하였으며, 模型이 左右 대칭이므로 중앙점을 기준으로 좌우의 變位量을 평균하여 이 평균값을 分析에 사용하였다.

Ⅲ. 有限要素 解析

1. 要素의 분할

가. 高 要素

高 要素는 4-節點, 四邊形 等係數要素로 하였으며 일반적인 剛性行列은 다음과 같다.

$$[K_e] \{ \delta_e \} = \{ P_e \} \dots \dots \dots (1)$$

여기서 $[K_e]$: 要素의 剛性行列

$\{ P_e \}$: 節點 變位 벡터

$\{ \delta_e \}$: 節點力 벡터

이 等係數要素는 Fig. 3 과 같으며 補間函數는 式(2)와 같다.

$$\begin{aligned} h_1 &= 0.25(1+r)(1+s) \\ h_2 &= 0.25(1-r)(1+s) \\ h_3 &= 0.25(1-r)(1-s) \\ h_4 &= 0.25(1+r)(1-s) \end{aligned} \dots \dots \dots (2)$$

이 要素의 座標補間은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x &= 0.25(1+r)(1-s)x_1 + 0.25(1-r)(1+s)x_2 \\ &+ 0.25(1-r)(1-s)x_3 + 0.25(1+r)(1-s)x_4 \end{aligned}$$

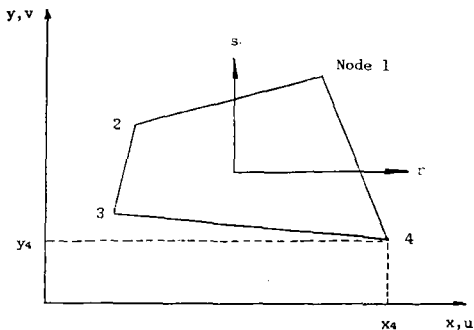


Fig. 3. Four-node two-dimensional element.

$$\begin{aligned} y &= 0.25(1+r)(1-s)y_1 + 0.25(1-r)(1+s)y_2 \\ &+ 0.25(1-r)(1-s)y_3 + 0.25(1+r)(1-s)y_4 \end{aligned} \dots \dots \dots (3)$$

그리고 變位補間은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} u &= 0.25(1+r)(1+s)u_1 + 0.25(1-r)(1+s)u_2 \\ &+ 0.25(1-r)(1-s)u_3 + 0.25(1+r)(1-s)u_4 \\ v &= 0.25(1+r)(1+s)v_1 + 0.25(1-r)(1+s)v_2 \\ &+ 0.25(1-r)(1-s)v_3 + 0.25(1+r)(1-s)v_4 \end{aligned} \dots \dots \dots (4)$$

要素의 變形率은 다음과 같다.

$$\epsilon^T = [\epsilon_{xx} \ \epsilon_{yy} \ \gamma_{xy}] \dots \dots \dots (5)$$

여기서 $\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}$, $\epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}$, $\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$ 이다.

變位 導函數를 계산하면,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (6)$$

$$\text{또는 } \frac{\partial}{\partial \gamma} = J \frac{\partial}{\partial x}$$

여기서

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial r} &= 0.25(1+s)x_1 - 0.25(1+s)x_2 \\ &- 0.25(1-s)x_3 + 0.25(1-s)x_4 \\ \frac{\partial x}{\partial s} &= 0.25(1+r)x_1 + 0.25(1-r)x_2 \\ &- 0.25(1-r)x_3 + 0.25(1+r)x_4 \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial r} &= 0.25(1+s)y_1 - 0.25(1+s)y_2 \\ &- 0.25(1-s)y_3 + 0.25(1-s)y_4 \\ \frac{\partial y}{\partial s} &= 0.25(1+r)y_1 + 0.25(1-r)y_2 \\ &- 0.25(1-r)y_3 - 0.25(1+r)y_4 \end{aligned}$$

그러므로 어떤 값 r 및 s에 대하여 $(-1 \leq r \leq +1)$ 그리고 $(-1 \leq s \leq +1)$ Jacobian Operator J는 $\frac{\partial x}{\partial r}$, $\frac{\partial x}{\partial s}$, $\frac{\partial y}{\partial r}$, $\frac{\partial y}{\partial s}$ 를 사용하여 표시할 수 있다.

要素 變形率을 계산하기 위하여 式(8)을 사용하여 式(9)와 (10)을 계산한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial r} &= 0.25(1+s)u_1 - 0.25(1+s)u_2 \\ &- 0.25(1-s)u_3 + 0.25(1-s)u_4 \\ \frac{\partial u}{\partial s} &= 0.25(1+r)u_1 + 0.25(1-r)u_2 \\ &- 0.25(1-r)u_3 - 0.25(1+r)u_4 \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial v}{\partial r} = 0.25(1+s)v_1 - 0.25(1+s)v_2 - 0.25(1-s)v_3 + 0.25(1-s)v_4$$

$$\frac{\partial v}{\partial s} = 0.25(1+r)v_1 + 0.25(1-r)v_2 - 0.25(1-r)v_3 - 0.25(1+r)v_4$$

따라서

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{bmatrix} \text{at } r=r_i, s=s_j = 0.25J_{ij}^{-1} \begin{bmatrix} 1+s_j & 0 & -(1+s_j) & 0 \\ 1+r_i & 0 & 1-r_i & 0 \\ 0 & -(1-s_j) & 0 & 1-s_j \\ 0 & -(1-r_i) & 0 & -(1+r_i) \end{bmatrix} \hat{u} \dots \dots \dots (9)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \text{at } r=r_i, s=s_j = 0.25J_{ij}^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 1+s_j & 0 & -(1+s_j) \\ 0 & 1+r_i & 0 & 1-r_i \\ 0 & -(1-s_j) & 0 & 1-s_j \\ 0 & -(1-r_i) & 0 & -(1+r_i) \end{bmatrix} \hat{u} \dots \dots \dots (10)$$

여기서, $\hat{u}^T = [u_1 v_1 \ u_2 v_2 \ u_3 v_3 \ u_4 v_4]$
위의 식(9)와 식(10)의 관계를 계산함으로써 點 (r_i, s_j) 에서의 變形率-變位の 變換行列을 얻을 수 있다.

$$\epsilon_{ij} = B_{ij} \hat{u} \dots \dots \dots (11)$$

여기서 i, j 는 變形率-變位の 點 (r_i, s_j) 에서 계산되었다는 것을 나타낸다.

따라서 行列 F_{ij} 는 다음과 같다.

$$F_{ij} = B_{ij}^T [C] B_{ij} \det J_{ij} \dots \dots \dots (12)$$

여기서 $[C]$ 는 재료特性行列이며 平面-變形率條件에서는 식(13)과 같다.

$$[C] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (13)$$

平面-變形率條件에서 函數 F 가 要素두께에 따라서 一定하다고 하면 平面 r, s 에서 數值積分을 하면 要素의 剛度行列은 다음과 같다.

$$[K] = \sum t_{ij} \alpha_{ij} F_{ij} \dots \dots \dots (14)$$

平面-變形率 解析에서는 $t_{ij} = 1.0$ 이다. 行列 F_{ij} 가 주어지고 Weighting Factors α_{ij} 가 결정되면 剛度行列 $[K]$ 는 계산된다.

나. 土木纖維 要素

土木纖維는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 彎강성이 없는 線形의 線要素로 지정하며 이 要素는 단지 軸方向으로만 變形이 생기고 그 變位函數는 線形이다. 여기에 사용된 剛性行列을 增分形態로 표시하면

$$\begin{bmatrix} dF_x^1 \\ dF_y^1 \\ dF_x^2 \\ dF_y^2 \end{bmatrix} = \frac{AE_t}{L} \begin{bmatrix} C^2 & SC & -C^2 & -SC \\ SC & S^2 & -SC & -S^2 \\ -C^2 & -SC & C^2 & -SC \\ SC & -S^2 & SC & S^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} du_1 \\ dv_1 \\ du_2 \\ dv_2 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (15)$$

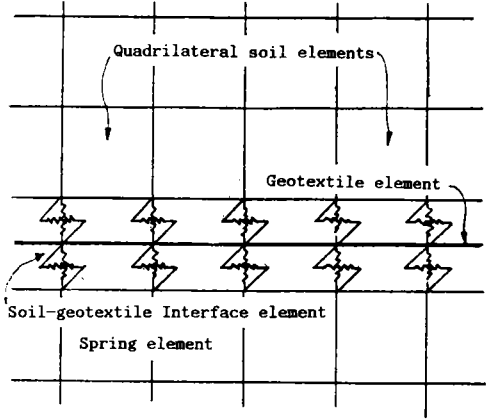


Fig. 4. Elements used in the analysis.

式(15)와 같고 간단히 기술하면 식(16)과 같다.

$$\{dF\} = [K_e] \{d\delta_e\} \dots \dots \dots (16)$$

여기서, $\{dF\}$: 節點力 增分 벡터

$[K_e]$: 剛性行列

$\{d\delta_e\}$: 節點變位 增分 벡터

E_t : 要素의 순간 彈性係數

A : 要素의 斷面積

L : 要素의 길이

S : $\sin \alpha$

C : $\cos \alpha$

α : 要素와 x 축 사이의 傾斜角

다. 흙-土木纖維 Interface要素

흙-土木纖維 Interface는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 흙과 土木纖維 要素 사이에 連結된 節點 거리가 零인 스프링 要素로 하고 剛性行列을 増分 形態로 표시하면 式(17)과 같다.

$$\begin{bmatrix} dF_x^1 \\ dF_y^1 \\ dF_x^2 \\ dF_y^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n S^2 + K_v C^2 & K_n SC - K_v SC \\ & K_n C^2 + K_v S^2 \\ \text{Symm} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} du_1 \\ dv_1 \\ du_2 \\ dv_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (17)$$

이식을 다시 간단히 표시하면 式(18)과 같다.

$$\{dF\} = \{K_e\} \{d\delta_e\} \quad \dots\dots\dots (18)$$

- 여기서, $\{dF\}$: 節點力 増分 벡터
- $\{K_e\}$: 剛性行列
- $\{d\delta_e\}$: 節點變位 増分 벡터
- K_n : 土木纖維 平面内の 스프링剛性
- K_v : 土木纖維에 直角方向의 스프링剛性
- S : $\sin \alpha$
- C : $\cos \alpha$
- α : 要素와 x 축 사이의 傾斜角

2. 応力-變形率 關係

가. 흙 要素의 応力-變形率 關係

흙의 応力-變形率의 舉動을 표현하기 위하여 非線形 雙曲線 모델¹²⁾을 사용하였다. 이 모델은 初期 接線係數(E_t)는 式(19)와 같이 拘束應力(σ_3)과 關係가 된다 하였다.

$$E_t = K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad \dots\dots\dots (19)$$

여기서, P_a : 대기압 (= 1.033)

K 및 n : 無次元 常數

또한 임의의 變形에 대한 순간 接線係數(E_t)는 다음 式(20)과 같이 표현할 수 있다.

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2 C \cos \phi + 2 \sigma_3 \sin \phi} \right]^2 K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad \dots\dots\dots (20)$$

여기서, R_f : 極限主應力差에 대한 破壞時의 主應力差의 比

C : 흙의 粘着力

ϕ : 흙의 内部摩擦角

또한 포아손비도 같은 방법으로 다음과 같이 표현된다.

$$\nu_t = \frac{G - F \log \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)}{\left[1 - \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2 C \cos \phi + 2 \sigma_3 \sin \phi} \right]} \right]^2} \quad \dots\dots\dots (21)$$

흙의 應力-變形率 關係를 増分 形態로 표현하면

$$\begin{bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_B + M_D & M_B - M_D & 0 \\ M_B - M_D & M_B + M_D & 0 \\ 0 & 0 & M_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (22)$$

와 같으며

여기서, $d\sigma_x$: x 방향의 増分 應力

$d\sigma_y$: y 방향의 増分 應力

$d\tau_{xy}$: 増分 剪斷應力

$d\varepsilon_x$: x 방향의 増分 變形率

$d\varepsilon_y$: y 방향의 増分 變形率

$d\gamma_{xy}$: 増分 剪斷變形率

또한 순간 剪斷係數 M_D 는

$$M_D = \frac{E_t}{2(1 + \nu_t)} \quad \dots\dots\dots (23)$$

이고 순간 體積壓縮係數 M_B 는

$$M_B = \frac{E_t}{2(1 + \nu_t)(1 - 2\nu_t)} \quad \dots\dots\dots (24)$$

이 된다.

나. 土木纖維의 應力-變形率 關係

土木纖維의 引張試驗에 의하면 非線形 舉動을 하므로 다음과 같은 多項式으로 표현할 수 있다.

$$T = A \sigma = a_1 \varepsilon^1 + a_2 \varepsilon^2 + a_3 \varepsilon^3 + \dots + a_n \varepsilon^n \quad \dots\dots\dots (25)$$

여기서, T : 土木纖維에 作用하는 軸方向 荷重

A : 土木纖維의 初期 斷面積

σ : 土木纖維의 應力

ϵ : 土木纖維의 軸方向 變形率

$a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$: 多項式的 常數

式(25)를 變形率(ϵ)에 대하여 微分하면 순간 接線係數(E_t)와 初期 斷面積(A)의 式(26)과 같은 關係가 성립된다.

$$\frac{dT}{d\epsilon} = \frac{d(A\sigma)}{d\epsilon} = \frac{Ad\sigma}{d\epsilon} = AE_t = A(a_1 + 2a_2\epsilon + 3a_3\epsilon^2 + \dots + na_n\epsilon^{n-1}) \dots \dots \dots (26)$$

따라서 式(26)에서 구한 AE_t 는 式(15) 土木纖維 要素의 剛性行列을 계산하는데 직접 이용될 수 있으며 常數 a_1, a_2, \dots, a_n 은 引張試驗의 應力-變形率 曲線으로 부터 구할 수 있다.

다. 흙-土木纖維의 剪斷應力-變形率 關係

흙-土木纖維의 Interface에서의 舉動은 다음과 같은 雙曲線 모델을 채택하였다.

$$\tau = \frac{\delta_r}{b_1 + b_2\delta_r} \dots \dots \dots (27)$$

여기서,

τ : 剪斷應力

δ_r : 法線應力(δ_n)에 대한 Interface에 相對變位

b_1 : 常數 (= $1/k_i$)

b_2 : 常數 (= $1/\tau_{uet}$)

k_i : 單位面積당 순간接線剛性

τ_{uet} : 雙曲線에서의 漸近線

한편 순간 接線剛性(k_i)은 法線應力(σ_n)과 關係가 있으며 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$k_i = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_n}{P_a} \right)^{n_1} \dots \dots \dots (28)$$

여기서, k_1 과 n_1 : 常數

같은 방법으로 Interface에서 순간 接線剛性은

$$k_i = 1 - \frac{R_{f1}^2}{\sigma_n \tan \delta} k_1 P_a \left(\frac{\sigma_n}{P_a} \right)^{n_1} \dots \dots \dots (29)$$

으로 표현된다. 여기서 R_{f1} 은 Interface에서 極限 剪斷應力에 대한 破壞 剪斷應力比이며, δ 는 흙과 土木纖維 사이의 摩擦角이다.

VI. 結果 및 考察

1. 荷重과 沈下의 關係

軟弱地盤을 土木纖維로 補強하였을 때 支持力

증가 및 沈下量 감소 경향을 분석하기 위하여 荷重板의 荷重-沈下 曲線을 圖示하면 織布의 경우 Fig. 5 이고 不織布의 경우는 Fig. 6 과 같다. Fig. 5 와 Fig. 6 에서 보는 바와 같이 土木纖維의 引張強度가 커지면 織布, 不織布 두

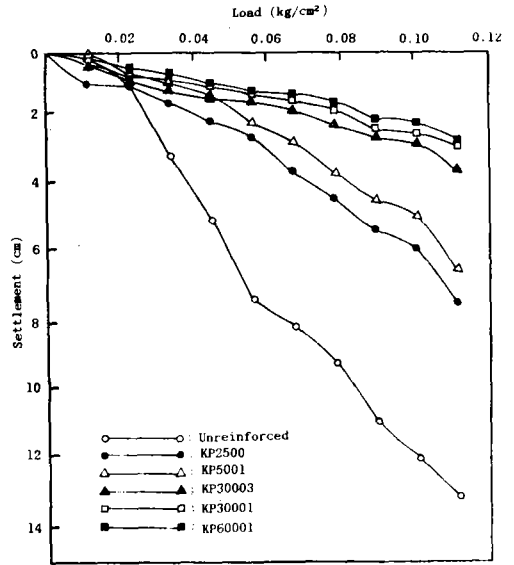


Fig. 5 . Relation between load and settlement (woven).

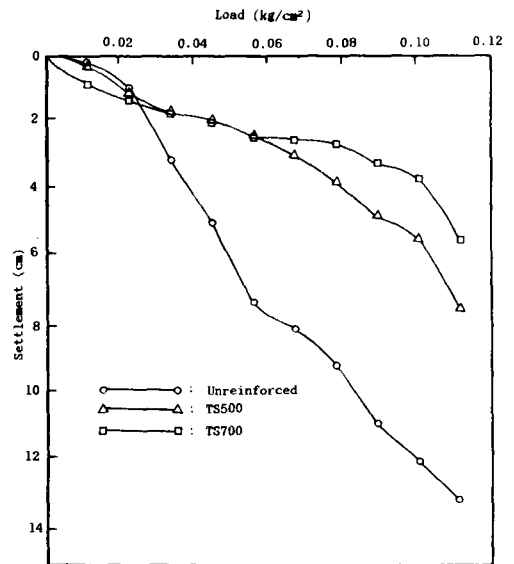


Fig. 6 . Relation between load and settlement (nonwoven).

경우 똑같이 沈下量이 감소하고 支持力이 증가하며 이 때 沈下量은 최대 1/6로 감소하였다.

Binquet등⁷⁾은 補強한 帶狀基礎에서 土木纖維로 補強한 경우가 非補強한 경우에 비하여 1/2~1/4로 沈下量이 감소된다고 하였고, 그 감소되는 정도는 補強材의 引張強도와 흙의 密度, 補強材 사이의 수직 간격에 따라서 증가한다고 보고한 바 있다. 그러나 본 실험 결과는 최대 1/6로 침하량이 감소되어 이 Binquet등⁷⁾의 결론보다 오히려 더 큰 효과가 있는 것으로 분석되었다. 이러한 沈下量의 감소는 土木纖維에 誘發된 引張力이 盛土荷重을 分散시키며 地盤의 支持力을 증대시켜 주기 때문인 것으로 판단되며 이 결과는 Kinney²⁾, Yamanouchi⁴²⁾, Yasuhara⁴³⁾ 등의 실험 결과와 일치하였다.

또한 土木纖維 種類에 따른 荷重-沈下 曲線의 차이를 분석하기 위하여 土木纖維의 引張強도가 같은 KP5001(織布, 引張強度 102kg/in)과 TS700(不織布, 引張強度 102kg/in)을 비교하여 圖示하면 Fig. 7 과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 荷重이 0.06kg/cm² 이하에서는 不織布가 織布에 비하여 沈下가 더 작게 발생하는 것으로 나타났고, 또한 전체적인 荷重-沈下 曲線의 경향도 그림에서 보는 바와 같이 不織布는 완만하게

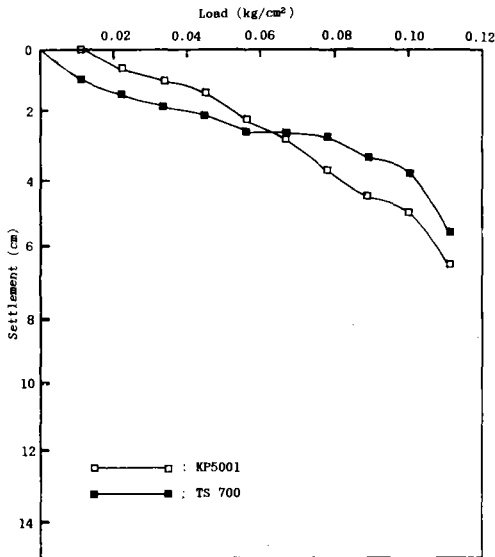


Fig. 7. Comparison of settlement between woven and nonwoven geotextiles. (KP5001 = 102kg/in, TS700 = 102Kg/in)

沈下量이 증가되는데 비하여 織布는 급하게 沈下量이 증가되는 것으로 나타났다. 따라서 荷重이 큰 상태에서는 不織布가 織布에 비하여 沈下が 적게 발생할 것으로 생각되었다.

2. 盛土面の 鉛直變位

荷重 段階別 盛土面の 鉛直變位는 Fig. 8 부터 Fig. 15 과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 荷重이 작용하는 바로 아래 위치에서는 壓縮이 생기고 荷重이 작용하는 곳에서 약간 떨어진 곳에서는 轉位가 생겨서 Heaving 現象이 뚜렷하게 나타나고 있다. 이러한 경향은 Kinney²¹⁾, Yamanouchi⁴²⁾, Yasuhara⁴³⁾ 등의 연구 결과와 일치하였다.

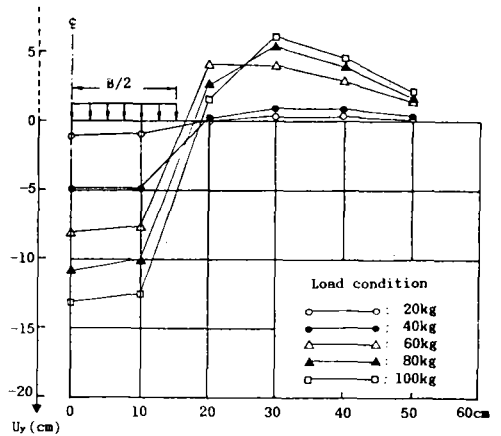


Fig. 8. The vertical displacement of soil surface in the model. (Unreinforced)

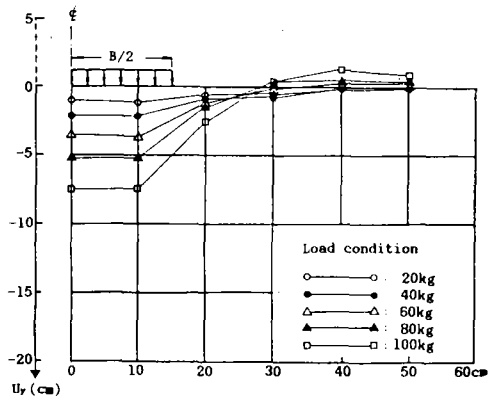


Fig. 9. The vertical displacement of soil surface in the model. (KP2500)

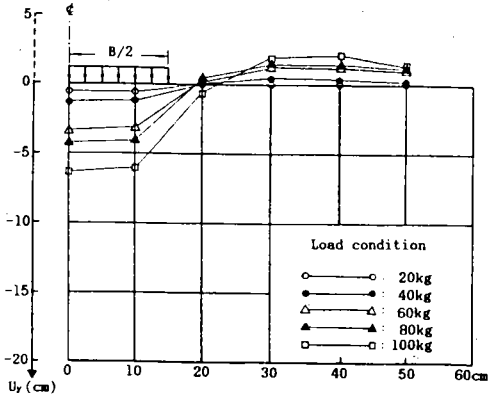


Fig. 10. The vertical displacement of soil surface in the model. (KP5001)

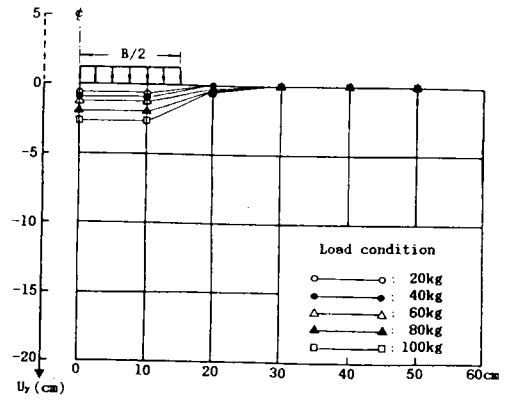


Fig. 13. The vertical displacement of soil surface in the model. (KP60001)

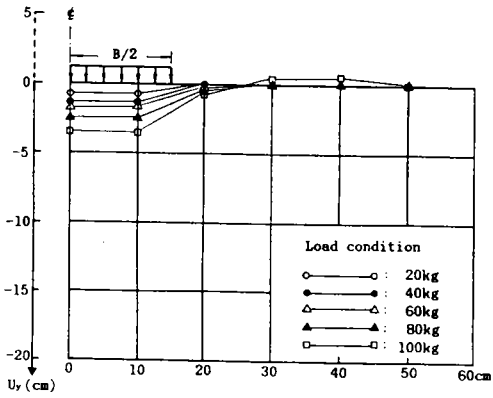


Fig. 11. The vertical displacement of soil surface in the model. (KP30003)

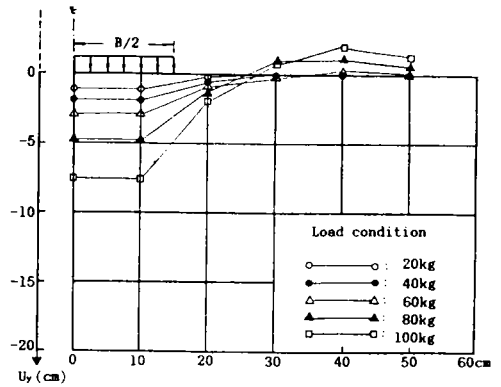


Fig. 14. The vertical displacement of soil surface in the model. (TS500)

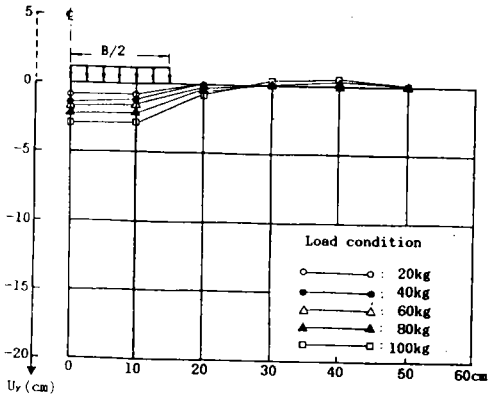


Fig. 12. The vertical displacement of surf surface in the model. (KP30001)

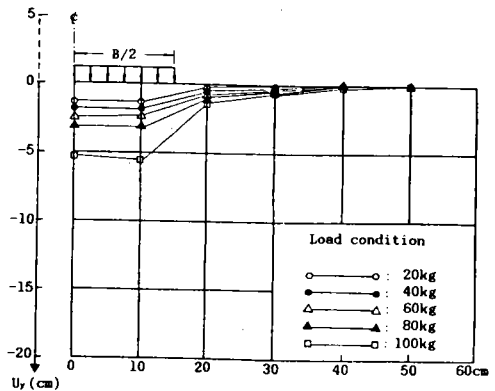


Fig. 15. The vertical displacement of soil surface in the model. (TS700)

또한 이 盛土面의 鉛直變位의 크기는 非補強에 비하여 土木纖維로 補強한 경우가 작게 나타났으며 전체적인 傾向으로 보아 土木纖維의 引張強度에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

따라서 土木纖維 引張強度 크기에 따른 盛土面의 鉛直變位를 서로 比較하기 위하여 荷重이 60kg 및 100kg이 載荷되었을 때 盛土面의 鉛直變位線圖를 圖示하면 각각 Fig. 16 과 Fig. 17 과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 荷重이 60kg일 때는 非補強과 土木纖維로 補強한 경우를 서로 비교하면 補強한 경우의 鉛直變位量이 뚜렷하게 작은 것으로 나타나지만 土木纖維 引張強度의 크기에 따른 變化는 거의 구분이 어려울

만큼 작은 차이를 보이고 있다.

그러나 荷重이 100kg으로 증가된 상태에서는 土木纖維 引張強度의 크기에 따른 鉛直變位量의 차이가 뚜렷하여짐을 볼 수 있었다. 이러한 傾向으로 미루어 볼 때 荷重이 큰 경우가 작은 경우보다 木纖維의 引張強度에 크게 영향을 받을 것으로 思料되었다.

3. 長期荷重에서의 沈下曲線

長期荷重에서 土木纖維 補強 構造物의 舉動을 분석하기 위하여 KP5001, KP60001, TS700의 경우에 대하여 30일 동안 계속하여 100kg의 荷重이 載荷된 상태에서 매일 變位를 측정하고 時間에 따른 沈下曲線을 圖示하면 Fig. 18 과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 沈下는 載荷 初期에 대부분 발생하고 10일경에는 거의 沈下가 終了되며 그 이후에는 큰 變動이 없는 것으로 나타났으며, 30일 동안에 발생한 長期 沈下量에서 하루 동안에 발생한 沈下量을 뺀 量은 어떤 種類의 土木纖維에서도 거의 같은 값을 보이고 있기 때문에 KP5001과 KP60001를 比較하여 보면 土木纖維의 引張強度가 크게 長期荷重 상태에서도 沈下量은 작게 나타났고, 동일한 引張強度(102kg/in)인 KP5001과 TS700을 比較하면 不織布는 織布에 비하여 長期荷重 상태에서도 短期荷重에서

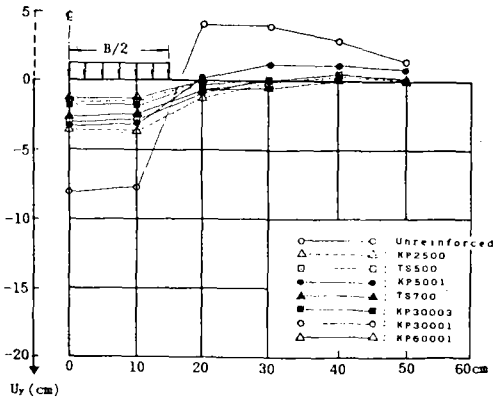


Fig. 16. The vertical displacement of soil surface in the model. (Load 60kg)

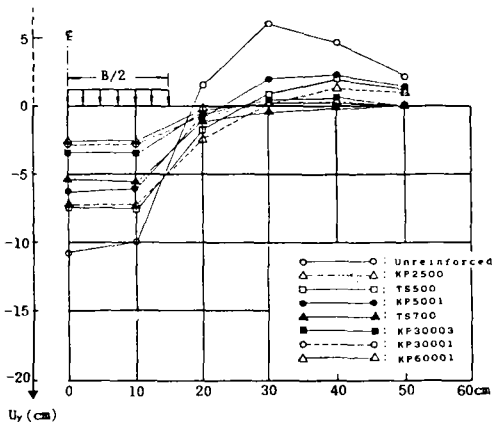


Fig. 17. The vertical displacement of soil surface in the model. (Load 100kg)

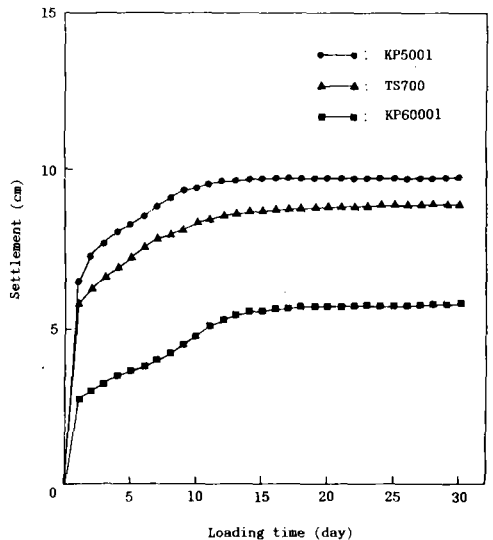


Fig. 18. Relation between loading time and settlement.

와 같이 전반적으로 沈下量이 작게 나타났다. 이 결과는 Holtz 등¹⁵⁾이 土木纖維로 補強한 모래의 長期荷重에서의 Creep 舉動 解析의 결과와 거의 일치하였다.

이러한 결과로 미루어 볼 때 長期의 持續荷重을 받는 土木纖維 補強 構造物에서도, 彈性解析의 방법으로 계산이 가능한 初期 沈下量에 적당한 安全率을 곱하여 設計한다면, 耐久性에 있어서 큰 문제가 없을 것으로 판단되며, 그 安全率은 土木纖維의 種類나 引張強度에 관계없이 거의 동일한 값을 적용하더라도 큰 誤差가 없을 것이다.

4. 有限要素에 의한 解析

平面 變形率 상태에서 흙은 4-節點 等係數要素, 土木纖維는 단지 引張力만 받는 線要素, 흙-土木纖維 Interface는 두 개의 수직 및 수평의 스프링 要素로 하여 Fig. 19에서 보는 바와 같이 有限要素모델의 檢證을 위하여 模型實驗에서와 동일한 치수로 要素를 분할하였다. 각 재료의 特性值들은 흙의 三軸壓縮試驗, 土木纖維의 引張試驗 및 흙-土木纖維의 剪斷試驗에서 얻은 結果值를 사용하였다.

가. 標型實驗에 의한 實測值와 有限要素法에 의한 豫測值의 比較

土木纖維로 補強하지 않은 경우의 模型實驗에서의 盛土 表面의 實測 變位量과 有限要素法에 의하여 計算된 變位量을 比較하기 하여 圖示하면 Fig. 20과 같다.

그림에서 보는 바와 같이 實測值에 비하여 有限要素法에 의하여 計算된 豫測值가 약간 작게 타났으나 變位의 傾向은 거의 비슷한 결과를 보

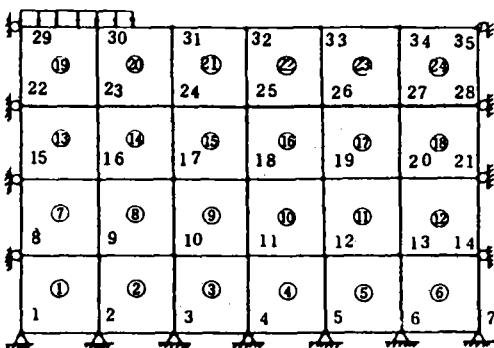


Fig. 19. Elements in model test.

였다. 이때의 正確度는 거의 92%에 달하였으며 이는 이미 Duncan¹²⁾ 및 Ozawa 등³⁰⁾에 의하여 증명된 바 있다.

또한 Fig. 21은 土木纖維 KP30003을 布設한 경우에 實測值와 有限要素法에 의한 計算 결과를 比較한 것으로 右側 隆起部分에서 약간 두 값에 차이가 크게 나타났지만 전반적으로 豫測值가 實測值의 85%에 달하는 正確性을 보이고 있기 때문에 이 有限要素 모델은 土木纖維 補強 構造物의 應力 및 舉動을 解析하는데 적합할 것으로 판단되었다.

나. 軟弱地盤 盛土에 有限要素法 적용

軟弱地盤 위에 道路, 댐 등을 築造하는 경우에 발생되는 沈下量을 豫測하기 위하여 軟弱層

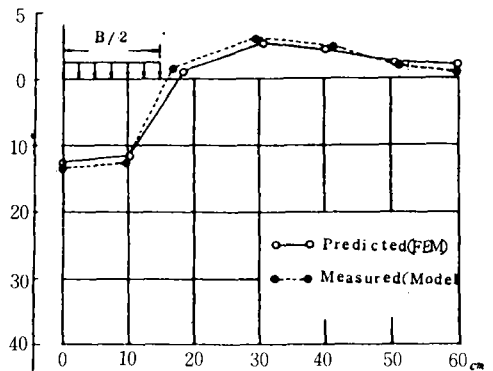


Fig. 20. The predicted and measured diplacement of model. (Unreinforced)

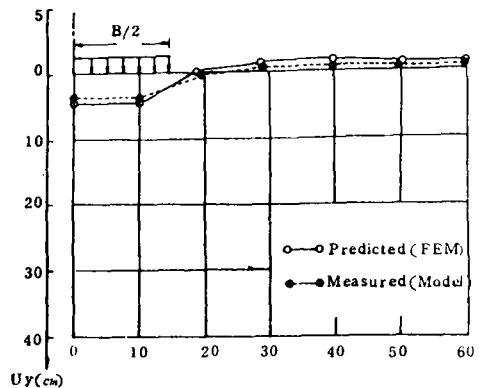


Fig. 21. The predicted and mesured disured displacement of model. (KP 30003)

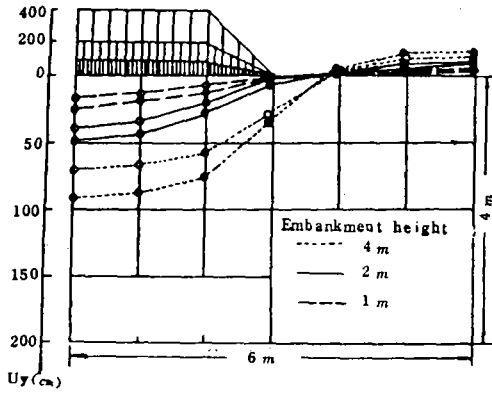


Fig. 22. Comparison of settlements of unreinforced and of geotextile-reinforced soil surface for three different embankment heights.

의 깊이가 4m인 곳에 土木纖維 KP3003을 布設한 경우와 布設하지 않은 경우에 대하여 盛土 높이에 따른 變位量을 計算하여 나타낸 것이 Fig. 22이다.

그림에서 보는 바와 같이 盛土 높이가 1m인 경우에는 土木纖維를 布設한 경우 沈下量이 27%가량 감소되었고, 盛土 높이가 2m에서 4m로 높아감에 따라서 각각 18%, 11%로 감소되어 그 효과가 떨어지는 경향을 보이고 있다.

따라서 土木纖維의 補強 효과는 낮은 堤防의 盛土에서 클 것으로 판단되었으며, 이 결과는 Jewell²⁰⁾, Murray²⁸⁾, Hird¹⁴⁾, Watari⁴⁰⁾ 등의 限界平衡理論에 의하여 解析한 결과와 비교할 때 거의 일치하였다.

V. 結 論

土木纖維 補強 構造物의 設計 및 施工에는 作用荷重에 대한 흙 및 土木纖維의 應力의 變化와 補強 效果를 豫測할 수 있어야 한다.

특히 土木纖維의 補強이 軟弱地盤의 改良工法으로 사용될 경우 粘土에서의 土木纖維의 補強 效果가 究明되어야 하기 때문에 이를 위하여 帶狀基礎에 대한 模型實驗 및 有限要素 解析을 수행한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 土木纖維 布設에 의한 支持力 增加 및 沈下量 減少는 土木纖維의 引張強度에 比例하였다.

즉 模型實驗에서 引張強度가 클수록 基礎地盤에 미치는 盛土荷重의 影響은 현저히 減少하였다.

2. 不織布는 동일한 引張強度의 織布보다 鉛直 및 水平 變位를 抑制시키는 效果가 더 큰 것으로 나타났다.

3. 長期荷重에 대한 沈下의 傾向은 初期에 거의 대부분이 발생하고 10일경에는 거의 沈下가 終了되며 그 이후에는 큰 變動이 없는 것으로 나타났다.

4. 非線形 彈塑性 有限要素 解析 모델은 土木纖維 補強 構造物의 舉動을 豫測하는데 상당히 正確한 모델임이 立證되었다.

5. 軟弱地盤 위의 盛土에서 盛土高가 높아지면 土木纖維 布設 效果가 떨어지기 때문에 낮은 堤防에서의 土木纖維利用이 有利할 것으로 생각되었다.

이 논문은 1986년도 문교부 자유과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

參 考 文 獻

1. Andrawes, K. Z., A. McGown, M. M. Mashhour and R. F. Wilson-Fahmy. 1980. Tension resistant inclusions in soils, *J. of the Geot. Eng. Div., ASCE*, Vol. 106, No. GT12 : 1313-1326.
2. _____, R. F. Wilson-Fahmy and M. M. Mashhour. 1982. The finite element methods of analysis applied to soil-geotextile systems, *Proc. of the 2nd Int'l. Conf. on Geotextile*, Vol. 3 : 695-700.
3. Barksdale, R., Q. Robnett, J. Lai and A. Zeevaert-Wolff. 1982. Experimental and theoretical behaviour of geotextile reinforced aggregate soil system, *Proc. of the 2nd Int'l. Conf. on Geotextile*, Vol.2 : 375-380.
4. Bell, J. R., D. R. Greenway and W. Viescher. 1977. Construction and analysis of a fabric reinforced low embankment, *Cr. Coll. Int. Sols., Textiles, Paris* : 71-76.
5. _____ and J. E. Steward. 1977. Construction and observation of fabric retained soil walls, *Cr. Coll. Int. Sols., Textiles, Paris* : 123-128.

6. Biche, A. 1987. Triple use of a geotextile at Ait Chouarit, Int. Water Power and Dam Construction : 22-23.
7. Binquet, J. and K. L. Lee. 1975a. Bearing capacity tests on reinforced earth slabs(I), J. of the Geot. Engg. Div., ASCE, Vol. 101, No. GT12 : 1241-1255.
8. _____, 1975b. Bearing capacity analysis of reinforced slabs(II), J. of the Geot. Engg. Div., ASCE, Vol. 101, No. GT12 : 1257-1276.
9. Boutrup, E. and R. D. Holtz. 1983. Analysis of embankments of soft ground reinforced with geotextiles, Proc. 8th European Conf. SM and FE, Helsinki, Vol. 2 : 469-472.
10. Butterfield, R., R. M. Harkness and K. Z. Andrawes. 1970. A stereo-photogrammetric method for measuring displacement fields, Geotechnique, Vol.20 : 308-314.
11. Cazzuffi, D. 1987. The use of geomembranes in Italian dams, Int. Water Power and Dam Construction : 17-21.
12. Duncan, J. M. and C. K. Chang. 1970. Non-linear analysis of stress and strain in soils, J. of the SM and Found. Div., ASCE, Vol. 96, No. SM 5 : 1629-1653.
13. Guido, V. A., G. L. Biesidecki and M. J. Sullivan. 1985. Bearing capacity of a geotextile-reinforced foundation, Proc. of the 11th Int'l. Con. on SM and FE, San Francisco, Vol. 3 : 1777-1780.
14. Hird, C. C. 1986. Stability charts for reinforced embankments on soft ground, Geotextiles and Geomembranes, Vol. 4 : 107-127.
15. Holtz, R. D. 1977. Laboratory studies of reinforced earth using a woven polyester fabric, Cr. Coll. Int. Sols, Textiles, Paris : 149-154.
16. Ingold, T. S. 1981. A laboratory simulation of reinforced clay walls, Geotechnique, Vol. 31 : 399-412.
17. _____, 1982. An analytical study of geotextile reinforced embankments, Proc. of the 2nd Int'l. Conf. on Geotextile, Vol. 3 : 683-688.
18. _____, 1982. Reinforced earth, Thomas Telford Ltd., London.
19. Jewell, R. A. and C. J. F. P. Jones. 1981. Reinforcement of clay soils and waste materials using grids, Proc. 10th Int. Conf. SM and FE, Stockholm, Vol.3 : 701-706.
20. Jewell, R. A. 1982. A limit equilibrium design method for reinforced embankments on soft foundations, Proc. of the 2nd Int'l. Conf. on Geotextile, Vol. 3 : 671-676.
21. Kinney, T. C. 1979. Fabric induced changes in high deformation soil-fabric-aggregate system, Ph. D. Thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign.
22. Kutara, K., M. Gomadou and T. Takeuchi. 1986. Deformation analysis of geotextiles in soils using the finite element method, Geotextiles and Geomembranes, Vol.4 : 191-205.
23. Lee, K. L., B. D. Adams and J. J. Vagneron. 1973. Reinforced earth retaining walls, J. of the Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol. 99, No. SM10 : 745-764.
24. Martin, S. and F. Sanger. 1987. Developments in geocomposite research in the GRD, Int. Water Power and Dam Construction : 24-26.
25. McGown, A. and K. Z. Andrawes. 1977. The influences of nonwoven fabric inclusions on the stress-strain behavior of a soil mass, Cr. Coll. Int. Sois., Textiles, Paris, Vol.1:161-167.
26. _____, M. M. Mashhour and B. Myles. 1981. Strain behaviour of soil-fabric model embankments, proc. of the 10th Int'l. Conf. on SM and FE, Stockholm : 739-744.
27. _____, L. Hytiris and F. B. Mercer. 1985. Soil strengthening using randomly distributed mesh elements, Proc. of the 11th Int'l. Conf. on SM and FE, San Francis : 1735-1738.
28. Murray, R. T. 1982. Fabric reinforcement of embankments and cuttings, Proc. of the 2nd Int'l. Conf. on Geotextile, Vol. 3 : 703-713.
30. Ozawa, Y. and J. M. Duncan. 1973. ISBILD : A computer program for analysis of static stress and movements in embankment, Report No. TE 73-4, Dept. of Civil Eng., Univ. of California, Berkeley.
31. Petrik, P. M., R. Baslik and Leitner. 1982.

- The behavior of reinforced embankment, Proc. of the 2nd Int'l. Conf. on Geotextile : 631-634.
32. Raumann, G. 1982. Geotextiles : Construction materials in evolution, Proc. of the 2nd Int'l. Conf. on Geotextile, Vol. 4 : 10-14.
 33. Rowe, R. K. 1984. Reinforced embankments : analysis and design, J. of the Geot. Engg. Div., ASCE, Vol. 110, No. 2 : 231-246.
 34. _____ and K. L. Soderman. 1985. An approximate method for estimating the stability of geotextile-reinforced embankments, Canadian Geotechnical J., Vol. 22 : 392-398.
 35. Schlosser, F. and N. T. Long. 1974. Recent results in French research on reinforced earth, J. of the Construction Div., ASCE, Vol. 100, No. 100, No. CO3 : 223-237.
 36. Schwab, E. F., O. Pregl and B. B. Broms. 1977. Deformation behavior of reinforced sand at model tests measured by the X-Ray technique, Cr. Coll. Int. Sols., Textiles, Paris : 105-112.
 37. Sembenelli, P. 1987. Geosynthetics in dam construction : progress and prospects, Int. Water Power and Dam Construction : 16.
 38. Smith, A. K. C. and P. L. Bransby. 1976. The failure of reinforced earth walls by overturning, Geotechnique : 376-381.
 39. Tong-Kang, T., Z. Zhao-Chang and T. Ren-Nam. 1987. Recent applications of geotextile filters in China, Int. Water Power and Dam Construction : 35-39.
 40. Watari, Y. and H. Aboshi. 1986. Field studies of the behavior of geogrids and very soft ground, 3rd Int'l. Conf. on Geotextiles, Vol. 2 : 187-191.
 41. _____ and Y. Higuchi. 1986. Behavior and analysis of geotextiles used on very soft ground for earth filling works, Geotextiles and Geomembranes, Vol. 4 : 179-189.
 42. Yamanouchi, T. 1982. Recent development of the use of synthetic geotextile fabrics, Symp. on Soil & Rock Improvement Techniques including geotextiles reinforced earth and modern piling methods : C-1.
 43. Yasuhara, K. and Y. Ysukamoto. 1982. A rapid banking method using the resinous mesh on a soft reclaimed land, Proc. of the 2nd Int'l. Conf. on Geotextile, Vol. 3 : 635-640.
 44. _____. 1985. Some aspects of the use of geotextiles in Japan, Cont. on Geotextiles, Singapore : 15-37.
 45. _____, K. Hirao, N. Miura, T. Yamanouchi and K. Ryokai, 1986. The use of geotextile against settlement of soft clay under cyclic loading, 3rd Int'l. Conf. on Geotextiles, Vol. 2 : 193-198.
 46. Zeevaert, A. E. 1980. Finite element formulation for the analysis of interfaces, nonlinear and large displacement problems in geotechnical engineering, Ph. D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Ga.,