

花崗岩質風化土의 力學的 性質에 關한 研究¹

— 剪斷強度의 影響要素와 堅密度에 對하여 —

曹 熙 科²

Studies on the Mechanical Properties of Weathered Granitic Soil¹

— On the Elements of Shear Strength and Hardness —

Hi Doo Cho²

要 約

花崗岩質風化土의 未攪亂 試料을 使用하여 一面 直接 剪斷試驗으로 測定한 剪斷強度와 含水比, 間隙比, 乾燥密度, 比重과의 關係를 統計·分析하였고, 花崗岩質風化土의 砂防施工地에 植栽된 리기다소나무林과 리기테-다소나무林에서 土壤斷面을 만들어 山中式土壤硬度計로 土壤의 堅密度를 測定하고 樹根分布를 調查하여 統計·分析한 結果 다음과 같다. 1) 含水比, 間隙比와 剪斷強度 間에는 有意의인 負의 相関이며 直線的인 關係에 있었다. 2) 乾燥密度와 剪斷強度 사이에는 正의 相関이며 直線的인 關係에 있었다. 3) 比重과 剪斷強度 間에는 有意의인 相関關係를 認定할 수 없었다. 4) 剪斷強度에 影響을 미치는 影響要素의 直接效果의 크기는 含水比 > 間隙比 > 乾燥密度의 順位이다. 5) 多重線型 回歸方程式의 分散分析結果 含水比 만이 回歸性이 認定되므로 含水比를 獨立變數로 하여 剪斷強度를 推定하기 위한 回歸方程式은 制限된 乾燥密度의 範圍內에서 適合度가 매우 높게 評價되었다. 6) 土壤의 堅密度는 土深이 깊어짐에 따라 높아진다. 7) 土壤의 指標硬度和 樹根數 間에는 有意의인 負의 相関이며 直線的인 關係에 있었다. 8) 리기다소나무와 리기테-다소나무의 樹根은 土深 20cm 까지에 대부분 分布하고 있었다. 9) 리기다소나무林과 리기테-다소나무林에서 測定한 土壤의 指標硬도를 獨立變數로한 回歸方程式으로 樹根數를 推定할 수 있었으나 낮은 適合度를 나타내었다.

ABSTRACT

It is very important in forestry to study the shear strength of weathered granitic soil, because the soil covers 66% of our country, and because the majority of land slides have been occurred in the soil. In general, the causes of land slide can be classified both the external and internal factors. The external factors are known as vegetations, geography and climate, but internal factors are known as engineering properties originated from parent rocks and weathering. Soil engineering properties are controlled by the skeleton structure, texture, consistency, cohesion, permeability, water content, mineral components, porosity and density etc. of soils. And the effects of these internal factors on sliding down summarize as resistance, shear strength, against silding of soil mass. Shear strength basically depends upon effective stress, kinds of soils, density (void ratio), water content, the structure and arrangement of soil particles, among the properties. But these elements of shear strength work

¹ 接受 8月 20日, Recieved August 20, 1984.

² 全南大學校 農科大學 College of Agriculture, Chonnam National University, Kwangju, Korea.

not all alone, but together. The purpose of this thesis is to clarify the characteristics of shear strength and the related elements, such as water content (w_0), void ratio (e_0), dry density (γ_d) and specific gravity (G_s), and the interrelationship among related elements in order to decide the dominant element chiefly influencing on shear strength in natural/undisturbed state of weathered granitic soil, in addition to the characteristics of soil hardness of weathered granitic soil and root distribution of *Pinus rigida* Mill. and *Pinus rigida* x *taeda* planted in erosion-controlled lands. For the characteristics of shear strength of weathered granitic soil and the related elements of shear strength, three sites were selected from Kwangju district. The outlines of sampling sites in the district were: average specific gravity, 2.63 ~ 2.79; average natural water content, 24.3 ~ 28.3%; average dry density, 1.31 ~ 1.43 g/cm³, average void ratio, 0.93 ~ 1.001; cohesion, 0.2 ~ 0.75 kg/cm²; angle of internal friction, 29° ~ 45°; soil texture, SL. The shear strength of the soil in different sites was measured by a direct shear apparatus (type B: shear box size, 62.5 x 20mm; σ , 1.434 kg/cm²; speed, 1/100mm/min.). For the related element analyses, water content was moderated through a series of drainage experiments with 4 levels of drainage period, specific gravity was measured by KS F 2308, analysis of particle size distribution, by KS F 2302 and soil samples were dried at 110 ± 5°C for more than 12 hours in dry oven. Soil hardness represents physical properties, such as particle size distribution, porosity, bulk density and water content of soil, and test of the hardness by soil hardness tester is the simplest approach and totally indicative method to grasp the mechanical properties of soil. It is important to understand the mechanical properties of soil as well as the chemical in order to realize the fundamental phenomena in the growth and the distribution of tree roots. The writer intended to study the correlation between the soil hardness and the distribution of tree roots of *Pinus rigida* Mill. planted in 1966 and *Pinus rigida* x *taeda* in 1959 to 1960 in the denuded forest lands with and after several erosion control works. The soil texture of the sites investigated was SL originated from weathered granitic soil. The former is situated at Pyöngchangri, Kyöm-myön, Kogsöng-gun, Chöllanam-do (3.63 ha; slope, 17° ~ 41°; soil depth, thin or medium; humidity, dry or optimum; height, 5.66/3.73 ~ 7.63 m; D.B.H., 9.75/8.00 ~ 12.00 cm) and the latter at changun-dong Kwangju-shi (3.50 ha; slope, 12° ~ 23°; soil depth, thin; humidity, dry; height, 10.47/7.25 ~ 12.79 m; D.B.H., 16.94/14.3 ~ 19.4 cm). The sampling areas were 24 quadrats (10m x 10m) in the former area and 12 in the latter expanding from summit to foot. Each sampling trees for hardness test and investigation of root distribution were selected by purposive selection and soil profiles of these trees were made at the downward distance of 50 cm from the trees at each quadrat. Soil layers of the profile were separated by the distance of 10 cm from the surface (layer I, II,). Soil hardness was measured with Yamanaka soil hardness tester and indicated as indicated soil hardness at the different soil layers. The distribution of tree root number per unit area in different soil depth was investigated, and the relationship between the soil hardness and the number of tree roots was discussed.

The results obtained from the experiments are summarized as follows. 1. Analyses of simple relationship between shear strength and elements of shear strength, water content (w_0), void ratio (e_0), dry density (γ_d) and specific gravity (G_s). 1) Negative correlation coefficients were recognized between shear strength and water content, and shear strength and void ratio. 2) Positive correlation coefficients were recognized between shear strength and dry density. 3) The correlation coefficients between shear strength and specific gravity were not significant. 2. Analyses of partial and multiple correlation coefficients between shear strength and the related elements: 1) From the analyses of the partial correlation coefficients among water content (x_1), void ratio (x_2), and dry density (x_3), the direct effect of the water content on shear strength was the highest, and effect on shear strength was in order of void ratio and dry density. Similar trend was recognized from the results of multiple correlation coefficient analyses. 2) Multiple linear regression equations derived from two independent variables, water content (x_1) and dry density (x_2) were found to be ineffective in estimating shear strength (\hat{Y}). However, the simple linear regression equations with an independent variable, water content (x) were highly

efficient to estimate shear strength (\hat{Y}) with relatively high fitness. 3. A relationship between soil hardness and the distribution of root number: 1) The soil hardness increased proportionally to the soil depth. Negative correlation coefficients were recognized between indicated soil hardness and the number of tree roots in both plantations. 2) The majority of tree roots of *Pinus rigida* Mill. and *Pinus rigida* x *taeda* planted in erosion-controlled lands distributed at 20 cm deep from the surface. 3) Simple linear regression equations were derived from indicated hardness (x) and the number of tree roots (Y) to estimate root numbers in both plantations.

Key words: Weathered granitic soil; shear strength; water content; void ratio; dry density; specific gravity; soil hardness; tree roots.

緒 論

花崗岩質風化土(花崗土, 花崗腐蝕土)는 他 岩石에 比하여 風化를 받기 쉬운 花崗岩, 花崗閃綠岩 등 花崗岩質 岩石의 結晶性 深成岩과 이와 同質의 花崗片麻岩이 風化되어 그 자리에 殘留造成된 殘積土, 崩積土를 말하며, 風化의 깊이가 수m에서 수십m에 이르는 例도 있다.^{35, 40, 50, 61, 63)}

花崗岩質 岩石의 風化過程에서는 石英, 正長石, 斜長石, 黑雲母, 角閃石 등 一次礦物과 Kaolinite, Halloysite, Illite, Sericite, Vermiculite 등 二次礦物이 形成되며 다른 岩石과는 달리 岩塊가 形成되지 않고 粗粒土에서 細粒土에 이르기까지 粒度分布의 範圍가 넓으며 沖積土와 같은 標準的인 粒度分布는 存在하지 않는다.^{9, 25, 35, 37, 70)} 특히 花崗岩의 風化度는 母岩의 性質에 따라 다르고 平坦하고 地形이 緩한 곳이 風化가 잘 되는 등³⁶⁾ 地形에 따라 風化에 따른 礦物組成變化나 變質의 程度가 크며 分布地域이나 採取場所에 따라 粒徑, 強度, 透水性이 다르다.⁵¹⁾ 또 花崗岩質 風化土의 粒子는 運積砂에 比하여 破碎되기 쉬우며 一次礦物中 石英을 除外한 長石, 雲母는 風化되기 쉬워 이들이 風化에 따른 空隙의 增大, 脆弱性을 나타내어 적은 壓力下에서도 破碎가 쉽게 일어난다.²⁸⁾

花崗岩質 風化土는 二次礦物의 組合이나 變質의 程度에 따라서 工學的 性質이 달라진다. 即 長石比重인 2.5附近 以下에서는 砂質土이면서도 오히려 細粒粘性土와 같은 性質,³²⁾ 또 어떤 경우에는 普通土와 같은 變質되지 않은 여러 性質을 나타내고 普通土에서는 어느 程度 問題가 되지 않는 粒子礦物의 種類나 그 變化의 程度가 花崗岩質風化土에서는 特別히 重要한 要素가 된다.³¹⁾ 따라서 다른 흙에 比하여 우리나라에 分布量이 많고 工學的 性質이 多樣的인 花崗岩質風化土에 對한 研究, 특히 自然狀態의 未攪亂 花崗岩質風化土의 力學的 性質의 究明과 그의 應用,

그 中 剪斷強度와 緊密度에 對한 研究는 林學에서는 대단히 重要하다고 思料된다.

山地에 있어서 花崗岩質 風化土의 崩壞形式은³⁹⁾ 重力 potential에 依한 土砂의 不可逆的 輸送現象으로 볼 수 있으나 여러가지 要因이 複合하여 發生하고 있다.^{39, 47)} 花崗岩地帶에 있어서 崩壞危險地 判別解析에서 素因으로 地形因子와 誘因으로는 植生因子를 들고 있으며,^{21, 53)} 年 降水量이 같은 地域이면 降雨量과 降雨強度에 따라서 表層崩壞가 決定된다고⁵²⁾ 하나 崩壞를 일으키는 要因으로서 흙의 力學的 性質은 崩壞할 때 滑動面에서 崩壞를 일으키는 外力에 對抗하여 發生하는 摩擦抵抗 即, 剪斷強度이다.

剪斷強度는 母岩의 性質이나 風化度^{40, 57)} 即, 有效應力, 흙의 種類, 密度, 間隙比, 含水比, 土粒子의 構造 樣式 또는 土粒子의 配列狀況에 크게 影響을 받는 것으로 알려져 있으며^{18, 29, 38, 43)} 本論에서는 含水比, 間隙比, 乾燥密度, 比重을 剪斷強度의 影響要素로 하여 剪斷強度와의 關係를 單純相關分析, 偏相關分析, 重相關分析, 回歸分析을 하여 이들 影響要素들이 剪斷強度에 影響하는 程度와 影響要素中 어느 要素가 主因子인가를 알므로서 우리나라에 있어서 花崗岩質風化土의 山地에서 崩壞의 機構를 把握하는 基礎로 하고자 한다.³⁾

樹根의 生長에 크게 影響하는 因子는 土壤의 物理的 性質中에서 含水量과 空隙量이며 또 土壤의 緊密度와 絶對的인 含水關係에 있다. 한편 樹根은 土壤의 粒子를 溶解하는 化學的 作用도 알려져 있으나²⁰⁾ 一般的으로 力學的 힘에 依하여 土粒子에 抵抗하면서 生長함으로 土壤의 力學的 性質中 緊密度는 樹根의 生長과 分布에 큰 關係가 있다.

土壤의 硬度는 粒徑組成, 空隙量, 容積重, 含水量 등을 總合的으로 나타낼 수 있다고 하였으며⁶⁴⁾ 한편, 土壤의 支持力 判定에도 利用되고 있다.²⁾ 土壤斷面에 있어서 各 土層의 硬軟을 硬度로서 表示하는 것은 土壤의 力學的 性質을 間接的으로 把握하는 가장

簡便한 方法이므로 本 研究에서는 花崗岩質風化土의 硬도가 樹根의 分布에 어떻게 影響을 미치는가를 分析하기 爲하여 砂防施工地에 植栽된 리기다 소나무와 리기테 하나 소나무林을 對象으로 하였다. 따라서 이들 森林에서 土壤의 物理的 性質을 總合的으로 把握할 수 있는 土壤의 堅密度를 各 土壤斷面에서 測定하여 堅密度의 크기와 分布를 測定·調査하고 堅密度가 樹根의 分布에 미치는 影響의 程度를 알아서 山地崩壞의 危險性을 豫測하여 崩壞를 豫防할 수 있는 基礎資料를 얻고자 相關分析과 回歸分析을 하였다.

研 究 史

內田 等⁶⁵⁾은 花崗岩質風化土는 顯著하지 않기는 하나 内部摩擦角 ϕ 가 含水比의 增加에 따라서 $45^{\circ} 31' \sim 33^{\circ} 09'$ 의 範圍로 減少하고 粘着力 C에 있어서는 含水比의 增加에 따라서 減少하였으며 特히 含水比가 20%를 넘으면 急激히 減少한다고 하였다. 鬼塚 等⁴⁸⁾은 花崗岩質風化土를 水浸, 非水浸 兩試料로 一面 剪斷試驗한 結果 水浸後의 剪斷應力, 粘着力, 剪斷抵抗角, Dilatancy 特性은 初期含水比의 影響을 거의 받지않고 이들의 값은 非水浸의 것과 比較하여 모두 低下하였다고 하였으며 水의 潤滑作用에 依한 剪斷低下를 考慮할 必要가 있다고 報告하였다. 林²⁴⁾은 花崗岩質風化土의 剪斷抵抗角은 含水比가 增加함에 따라 거의 直線的으로 減少하며 같은 含水比에 對하여는 長石分이 많은 變이 약간 크고 粘着力은 最適含水比일 때 最大가 되며 浸水가 되는 경우 같은 含水比에 對하여는 雲母分이 많은 것이 훨씬 크다고 報告하였다. 또 長石分이 많은 흙의 粘着力은 浸水되면 急激히 減少하며 飽和前에 거의 降이 되지만 雲母分이 많은 것은 比較的 서서히 減少하여 飽和狀態가 되어 비로소 零에 가까운 값을 取한다고 하였다. 林²⁴⁾은 花崗岩質風化土는 飽和度를 32%, 71%, 92%로 增加시켰을 때 剪斷強度定數 ϕ_d 는 減少하는 一般的인 傾向을 보이고 있으며 粘着力 C_d 는 32% 以下의 경우에 減少하였다가 增加하여 어느 限界에서 다시 減少되어 질 것으로 보인다고 하였다. 福田 等⁹⁾은 不飽和 花崗岩質風化土의 正規壓密의 경우 強度定數 ϕ_d , 初期含水比 W_o 에 그만큼 影響을 받지 않고 不飽和土의 浸水後 正規壓密土의 剪斷試驗 結果 水浸土의 剪斷抵抗角 $\phi_{d(sub)}$ 는 初期含水比 W_o 에 關係없이 一定值를 나

타냈으며 $\phi_{d(sub)}$ 와 不飽和土의 ϕ_d 를 相對的으로 觀察하니 花崗岩質風化土에서는 $\phi_d > \phi_{d(sub)}$ 로 되고 W_o 가 큰만큼 兩者의 差는 적다고 하였다. 또 一面 直接剪斷試驗을 浸水條件에 알맞도록 試作하여 一定垂直壓力와 剪斷應力이 作用하는 不飽和土에 浸水하면 얼마만큼의 剪斷抵抗力이 低下하는가를 測定한 바 過壓密 花崗岩質風和土($\sigma_v = 5.0 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_h = 0.5 \text{ kg/cm}^2$)의 結果例에서 浸水에 依하여 顯著한 剪斷抵抗力의 低下가 있었다고 報告하였다. 內田 等⁶⁵⁾은 花崗岩質風化土의 三軸壓縮試驗에서 締固密度가 적고 含水比가 크게 되니 間隙水壓은 增大하고 強度定數인 粘着力 C와 剪斷抵抗角 ϕ 가 감소하여 浸水에 依하여 力學的 特性은 相當히 낮아지는데 浸水에 依한 崩壞實驗에서 確認된다고 하였고 米田 等⁵⁶⁾도 剪斷應力 變形曲線에서 보면 含水比가 클수록 peak 點이 점점 稀薄해지고 剪斷抵抗角 ϕ_d 에 크게 影響하는 것은 含水比라고 報告하였다. 또 都⁶¹⁾는 花崗岩質風化土에 있어서 다짐含水比도 壓縮強度에 미치는 重要한 要素로서 最適含水比인 W_{op} 보다 濕潤側 일수록 다짐 Energy의 增加에 따라 過轉壓 現象과 더불어 다짐密度가 낮아지고 剪斷強度의 低下와 더불어 結果的으로 壓縮強度가 低下되므로 可及的으로 W_{op} 附近의 含水比로 調節하여 다지는 것이 重要하다고 報告하였다. 따라서 福田⁹⁾은 花崗岩質風化土의 締固가 不足하여 密度가 낮은 흙에서는 浸水時 土粒子는 容易하게 移動하여 粒子가 安定된 狀態로 될 때까지의 剪斷抵抗은 顯著하게 低下한다고 하였다. 西田⁴⁴⁾도 花崗岩質風化土의 自然 含水比試驗과 剪斷 中 浸水試驗이 다같이 peak 點이 나타났다가 減少하고 浸水에 依한 未攪亂 花崗岩質風化土의 強度低下는 過壓密相當領域에서 顯著하다고 報告하였다.

종래 砂土의 剪斷強度는 含水比와 密度만이 重視되었음은 自明한 事實로서 松尾 等³⁰⁾은 締固不飽和 粘性土나 密度가 낮은 砂土 等에 對하여 一面 剪斷試驗이나 三軸壓縮試驗을 한 結果 水平變位나 軸變形的 顯著한 增大에도 不拘하고 剪斷應力—水平變位曲線인 $\tau - \Delta u$, 혹은 軸差應力—變形曲線인 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon$ 曲線에 peak 點이 나타나지 않은 경우가 종종 있다고 報告하였다. 眞井²⁶⁾ 等은 密度가 높은 砂와 密度가 낮은 砂를 直接 剪斷試驗을 實施하여 본 結果 密度가 큰 砂에서는 剪斷抵抗角 ϕ 가 供試體 直徑 D와 두께 H에 그다지 關係가 없고 密度가 낮은 砂에서는 D 및 H가 상당히 強하게 作用

하여 D 및 H가 적은만큼 ϕ 가 크다고 하였다. Lee 등²³⁾은 初期密度에 있어서 砂土는 適切한 拘束壓力에서는 剪斷破碎時에 體積變化가 일어나지 않는다고 하였으며 庄野 등⁵⁴⁾은 花崗岩質風化土의 攪亂된 試料에 의한 三軸壓縮試驗에서 變形係數 E_{50} 에 對한 最大要因은 突固Energy 即, 密度이며 試驗法(剪斷方法)에 의한 效果는 認定할 수 없을 程度로 그 影響은 근소하였고, 따라서 含水比에 의한 效果는 이 試驗에서는 飽和時 乾燥密度 γ_d 에 따라 直線的으로 內部摩擦角(ϕ)이 커졌다고 報告하였다. 谷本⁵⁹⁾은 乾燥密度가 크게 되니 復元的(彈性的) 變形率과 塑性的 變形率은 적게되고 載荷回數가 增加함에 따라서 乾燥密度의 影響은 적게 나타났다고 報告하였다. 網子⁶²⁾ 등은 花崗岩質風化土의 三軸剪斷試驗結果 低應力에서의 剪斷強度 中 粘着力成分이 매우 적는데 이는 採取時 弛緩의 影響으로 생각되며 先行壓密力에 의한 事前壓密을 加함으로서 相當히 合理的인 強度定數를 얻을 수가 있으며 福田³⁹⁾은 A型 一面剪斷試驗機로 同一垂直應力 條件下의 剪斷試驗에 있어서 正規壓密土와 過壓密土에 의하여 浸水에 따른 剪斷性狀이 틀려 過壓密土는 正規壓密土보다 剪斷抵抗이 크고 過壓密土에서도 過壓密比가 큰 만큼 正規壓密土와의 差異는 크다고 하였다.

Lumb²⁵⁾은 花崗岩質風化土가 密度가 낮은 경우 剪斷強度는 粗粒土에 支配되는데 이는 粗粒土의 경우 有效間隙比가 높기 때문으로서 이 때의 剪斷強度는 낮으며 密度가 높으면 砂粒子가 緻密하고 silt 粒子가 間隙에 견고하게 充填되기 때문에 剪斷強度는 粗粒分과 細粒分에 의하여 支配되기 때문에 높게 된다고 報告하였고 內田 등⁶⁴⁾은 飽和도가 同一하면 間隙比의 增大에 따라서 內部摩擦角도 減少한다고 하였으나 그는 間隙比가 적고 飽和도가 낮은 때는 剪斷特性에 미치는 軸變形率의 速度의 影響이 明白하지 않다고 하였다. Matsuo 등³³⁾은 花崗岩質風化土의 強度는 土粒의 結合力과 土粒에 固有한 龜裂 및 粒子間 間隙比에 支配된다고 하였으며 또 Tanimoto 등⁵²⁾은 花崗岩質風化土의 一面直接剪斷 試驗結果 內部摩擦角은 初期間隙率의 減少에 따라서 增加하고 直線的인 傾斜角으로 變化한다고 하였으며 Hardin 등¹⁷⁾은 剪斷彈係數는 未攪亂 粘性土의 間隙比가 增加하면 減少한다고 하였다. Onodera 등⁴⁹⁾은 花崗岩質風化土의 剪斷強度는 風化指標인 間隙率에 따라 다르다고 報告하였다. 따라서 網子 등⁶²⁾은 花崗岩質風化土의 自然試料의 三軸壓縮試驗에서

間隙比가 적게되니 強度가 점점 增加한다고 하였다. 松尾³¹⁾은 長石比重의 減少는 結晶內部 構造의 變化를 意味하고 이는 粒子強度에도 表現된다고 하였으며 金屬棒으로 壓縮했을 때 破壞強度를 測定하여 보면 長石比重이 增加하면 強度도 增加하지만 長石比重 2.45를 境界로 하여 2 以下에서는 強度가 極端的인 比重의 差에 의한 強度의 變化는 적지만 2.45 以上에서는 急激히 增加한다고 하였고 結晶에는 方向性이 있어서 壓縮方向에 의한 強度는 偏倚를 나타내지만 平均直를 보면 長石比重 2.5로부터 2.6을 境界로 거의 直線的으로 變化한다고 報告하였다. 花崗岩質風化土의 主一次礦物은 石英, 長石, 雲母이므로 이들이 風化變質되면 比重의 變化로서 나타날 것이 豫想된다. 그러나 사⁵⁰⁾에 의하면 KS F 2308의 規定에 의하여 比重을 測定하여 보면 큰 차이가 없고 一定한 값에 머물게 된다고 하며, 그 理由는 長石이나 雲母가 變質되고 동시에 一部가 分解容脫되므로 相對的으로 風化에 對하여 安定한 石英粒子가 比率로 增加되어 石英의 比重인 2.65를 中心으로 거의 一定한 값에 收斂한 듯 한다고 報告하였다. 福田³⁹⁾은 花崗岩質風化土 및 流紋岩系風化 砂質土에서는 보통 砂土와 比較하니 母岩中의 比重이 틀린 礦物粒子의 結合이 風化作用에 의하여 分解된 그대로 남아있는 것으로 平均比重이 2.60~2.70이며 보통 計算은 2.65를 採用하면 거의 誤差가 없을 것이라고 報告하였다.

土壤의 硬度를 測定하여 土壤의 物理的 性質을 綜合的으로 判定할 수 있다고 하였는데^{5, 69)} 特性, 粒徑組成, 孔隙量, 容積重(現地填充密度), 含水狀態 뿐만 아니라 植物의 生育을 直接 支配할 土壤의 透水性, 通氣性의 大小나 土壤의 生成過程과 土壤의 生化學的 立場에서 볼 때 盤層, 緻密層의 存在를 알 수 있다고 山中 등⁶⁹⁾은 말하였는데 瀧木 등¹⁸⁾은 押込式 土壤硬度計를 試作하여 洪積層土壤과 沖積層土壤의 貫入抵抗과 含水率, 粒보기 比重과의 關係를 分析한 結果, 1) 沖積層土壤에 있어서는 含水率 및 比重이 거의 一定하여도 貫入抵抗은 依然하게도 直線的으로 上昇하는 傾向이 있다. 即, 洪積層土壤에 있어서는 貫入抵抗—含水率—比重 사이에 相關關係가 있지만 沖積層土壤에 있어서는 貫入抵抗은 含水率 및 比重 以外の 因子에 의하여 影響을 받는 것 같으며, 2) 含水率이 낮은 만큼 粒보기 比重의 增加에 의한 貫入抵抗의 增加는 急激하고, 3) 粒보기 比重이 一定한 경우는 水分의 增加에 의한

貫入抵抗은 減少한다고 報告하였다. 山中 等⁶⁹⁾도 粗填充의 狀態의 土壤의 球粒子를 最密填充으로 壓縮하는 경우에는 粒子を 移動시키기 爲한 抵抗은 粒子の 移動距離와 粒子 사이에 粒子 자체의 摩擦抵抗에 比例하지만 含水狀態에 있어서는 土壤孔隙內의 水分을 外部로 押出하기 爲한 抵抗 및 土壤粒子 사이에 作用하는 凝集力에 比例하기 때문에 土壤의 硬度を 測定하는 경우 가장 問題가 되는 것은 含水量이라고 하였다. 即 絕對硬도(kg/cm³)나 指標硬도(mm)는 含水量의 變化에 對하여 直線的인 關係가 명백하다고 하였고 硬도의 크기는 대개 粒徑組成의 細粗와도 일치한다고 하였다. 그러나 現實적으로 試坑調査는 調査直前에 土壤斷面을 만드는 것이 前提이므로, 특히 崖側 等に 依한 調査 以外에는 下層土는 거의 圃場含水量 前後인 어느 程度 安全한 狀態에 있는 含水狀態로서 測定하는 것이 普通인 것으로서 特殊한 경우 以外는 含水量을 고려할 必要가 없다고 報告하였다.

本多 等¹¹⁾은 日本産 때는 1日, 20~千數回의 踏壓에서는 土壤의 固結은 表面 10cm 程度이며 根에 對한 影響은 적지만 根數에 있어서 減少하는 傾向을 나타낸다고 하였으며 北村¹⁹⁾는 一般적으로 踏壓이 適當하면(1日, 1~5回) 때의 길이, 分枝莖數, 節數, 成葉數, 根數 等이 增加하나 過度하면 減少한다고 報告하였다. 또 近藤 等²²⁾은 芝生地의 限界收容力은 單純踏壓 回數를 16回, 土壤硬도 表示하면 山中式 土壤硬도計의 指標硬도 27mm 이고, 適正收容力은 踏壓回數로는 7回, 指標硬도로서는 23mm 일 때라 하였다. 三浦³⁹⁾는 表層滑落型 崩壞地를 表層, 中間帶, 基岩의 三部分으로 나누어 硬도를 測定한 바 中間帶에 있어서 木次驛裏 花崗閃綠岩이 0.3kg/cm³, 上佐世 花崗閃綠岩 1.1kg/cm³, 加茂大竹 黑雲母花崗岩이 2.1kg/cm³, 宍道黑雲母花崗岩 1.4kg/cm³로 各各 地域에 따라 또 基岩에 따라 그 크기가 다르다고 하였으며, 樹根의 成長發達은 土壤의 硬도에 따라서 支配되는 것으로 알려져 있다고 土壤安定材料委員會는 報告하였는데⁶⁾, 北村 等²⁰⁾은 은행나무, 동백나무의 根部 生長은 高硬도區(指標硬도, 30~31mm)에서는 나쁘고 低硬도區(指標硬도, 23~25mm)에서는 生長이 좋았고, 또 高硬도區에서는 生長이 나쁘지만 豫想外로 根이 伸長하고 地下部發達度(地下部/全體)도 컸으며 低硬도區는 根의 狀態는 좋지만 地下部發達度는 적었다고 發表하였다. 金 等¹⁶⁾은 서울 어린이 大公園을 대상으로 林地와

林間休憩所에 生育하고 있는 리기다소나무 1 生長差를 究明함에 있어 踏壓이 없는 林地에서의 直徑成長이 6.5% 높다고 하였으며 寺田⁶⁰⁾는 東京樹理立地에 造成된 勝島綠道公園 等 6個所에서의 樹木根系의 伸長成長이나 分枝性도 土壤의 緊密度가 크면 阻害를 받으므로 樹木의 根系의 生長은 土壤의 緊密度에 支配된다고 하였다.

材料 및 方法

1. 剪斷試驗과 物理性測定試料 採取地 및 緊密度測定地 概況

1) 剪斷試驗 및 物理性 測定試料 採取地

剪斷試料는 A試料, B試料, C試料로 大別되는데 이들 剪斷試料는 採取場所가 各기 다르다.

① A試料(Table 1)는 光州市 北區 文化洞 所在의 無林地인 草生地이며 開發地域으로 宅地造成을 위하여 切開한 切開地인데 方位 S 52°E이며 切開幅은 200m, 높이는 平均 4m의 곳에서 採取한 것이며

② B試料(Table 2)도 A試料와 同一한 地域이나 方位가 N 38°E 方位에 있고 切開地의 幅 150m, 平均 높이 3m 程度의 곳에서 採取한 試料이다.

③ C試料(Table 1)는 光州市 東區 池元洞 所在 路邊 崩壞地로서 天然生소나무 稚樹疎生地이며 方位는 S 16°W이다.

2) 緊密度 測定地

硬도測定地域은 A地區와 B地區로 나누어 各各 測定하였다.

① A地區(Table 2)는 全南 谷城郡 兼面 平章里 山 13番地(面積, 3.63ha)에 所在하고 있으며 花崗岩을 母岩으로 하는 砂壤土의(國際法에 依한 分類⁴⁶⁾) 瘠薄한 林地이다. 1966年 山地砂防事業을 實施하여 리기다소나무 2,370本, 아카시나무 1,810本, 오리나무 1,270本을 植栽하였으나 現在는 리기다소나무 單純林을 이루고 있다. 土壤堆積樣式은 殘積土 또는 崩積土로서 多少의 腐植을 含有하고 있으나 一定한 森林土壤으로 分類하기에는 未洽한 林地이다.

② B地區(Table 2)는 光州市 北區 장운동 山 273番地의 3.5ha에 1959~1960年에 造林한 리기다소나무(*pinus rigida* × *taeda*, 林木育種研究所産) 林이 生育하고 있으며 地床植物은 거의 없고 基岩은 花崗岩이며 土性은 砂壤土(國際法에 依한 分類)로서 一部 表土에 落葉이 堆積한 곳도 있으나 거의 表土

Table 1. Characteristics of the mechanical properties of the soil in the experimental sites for shear strength.

Number of Soil layer	Soil layer	Soil texture	Specific gravity ⁺ (Gs)	Natural water content ⁺ (w_n)	Cohesion ⁺ (C)	Angles of shearing resistance ⁺ (ϕ)
A ₁	Upper Layer	SL	2.66	25.15 %	0.75 kg/cm ³	35° 15'
A ₂	Lower Layer	SL	2.63	24.54	0.25	45° 00'
B ₁	Upper Layer	SL	2.69	28.30	0.20	36° 00'
B ₂	Lower Layer	SL	2.65	24.30	0.67	29° 00'
C ₁	Upper Layer	SL	2.79	27.41	0.20	29° 00'
C ₂	Lower Layer	SL	2.69	27.69	0.40	42° 00'

+, Averages of 12 samples.

가 裸出되어 있는 林地이다. 1958년에 上流水源 養養事業의 一環으로 石留土工 等 簡單한 土木工作物 施工과 함께 砂防用 導入草種을 播種하였고, 그 후 1959년과 1960년 兩년에 걸쳐 山 269番地에 1.5 ha, 3,470本, 山 273番地에 2.0ha, 4,800本の 리기테-나들을 造林하여 6~7年後인 1966년에 採種 林으로 指定되었고 無育間伐을 實施하여 4,290本の 林木이 生育하고 있으며 사방오리나무, 아까시나무가 下層木으로 黏在하고 있다.

2. 試料採取, 浸水 및 脫水

花崗岩質風化土는 未攪亂의 自然狀態와 攪亂된 狀態에서는 工學的 性質이 相當히 相異한 것으로 알려져 있다.^{43, 54)} 따라서 本研究에서 影響要素들의 分析은 崩壞의 機構에 對한 基礎的 研究로 試圖하였으므로 自然狀態에 있어서 이들 影響要素들에 對하여 研究, 分析되어야 하기 때문에 剪斷試驗을 室內에서 實施할 경우에는 試料을 攪亂되지 않게 即 自然狀態의 構造나 性狀이 破壞되지 않게 試料을 採取하여야 한다. 著者は 이와 같은 생각으로 自然狀態를 破壞하지 않고 供試體를 採取하기 위하여 銅製圓筒¹⁵⁾ (100 cm² × 4 cm)를 製作하여 光州市 隣近 崩壞地 및 切開地에서 崩壞 및 切開斷面을 水平으로 上層과 下層으로 區分하여 地域番號인 A, B, C에 上層을 1, 下層을 2로 記號를 附記하여 A₁, A₂, B₁, B₂, C₁, C₂로 記號를 붙여(Table 1) 各層에서 15個씩 合計 90個의 自然試料을 採取하였다. 또 各層에서 3개씩 合計 18個는 自然含水比 狀態로 粘着力 C, 剪斷抵抗角 ϕ 의 測定用 試料로 使用하였으며 나머지인 各層에서 12個씩 合計 72個는 浸水하여 含水比調整을 한 후 一面 直接 剪斷試驗을 實施하였다.

試料圓筒에 採取된 土柱는 上部和 下部를 平滑하

게 切斷하여 上蓋를 덮고 網蓋에 5A filter paper를 끼워서(C, ϕ 測定用試料는 filter paper를 끼우지 않는다) 網蓋를 씌우고 下蓋를 덮은 後 水分蒸發을 막기 爲하여 cellophane tape로 密封하여 實驗室로 運搬하였다. 實驗室로 運搬된 試料는 秤量하여 自然狀態의 試料의 重量을 測定하여 C, ϕ 測定用試料 18個는 剪斷試驗을 實施하고 나머지 72個는 含水比를 調整하기 爲하여 浸水시킨 후 脫水하여 剪斷試驗을 하였다. 浸水時間은 24時間을 基準으로 하였으며 浸水槽를 水道栓에 連結하여 물이 槽內에서 0.5 cm의 水位를 維持하도록 排水裝置를 하였다. 따라서 試料圓筒은 上蓋와 下蓋를 열고 網蓋 위에 filter paper를 올려놓은 後 浸水시켜 完全히 飽和시킨다. 24時間 浸水·飽和된 試料의 重量을 秤量하였으며 濾過 깔대기를 脫水臺 위에 올려놓고 浸水시켜 飽和된 試料를 含水比를 調整하기 위하여 地域別 斷面位置別로 3個를 1組로 하여 第1組는 30時間, 第2組는 70時間, 第3組는 120時間, 第4組는 180時間 脫水시켰다. 各各 脫水後 秤量하여 上蓋, 下蓋, 網蓋를 씌워서 蒸發을 막기 爲하여 cellophane tape로 密封한다. 이와 같이 密封된 試料를 一面 直接 剪斷試驗에 使用하였다.

3. 一面直接剪斷試驗

本 試驗에서는 三軸壓縮試驗이나 花崗岩質風化土의 現地 剪斷試驗機^{34, 63)}에 依하지 않고 小型 直接剪斷試驗機에 依하여 試驗하였는데 이는 實際上 試驗이 簡便하고 量的인 利點이 있을 뿐만 아니라 小型直接剪斷試驗에서 求한 剪斷抵抗角 ϕ_t 에서 剪斷箱의 側面摩擦의 影響을 除去하면 三軸壓縮試驗에서 求한 ϕ_t 와 거의 일치한다고 생각되고 이 側面摩擦의 問題는 剪斷箱이 上部 固定型인 A형, 一面 直接剪斷試驗機가 三軸壓縮試驗機에 依한 較보다 砂

土의 경우 0°~20°의 範圍에서 더 크기 때문에 問題가 있고^(41, 46) 또 二面剪斷試驗機에서도 剪斷抵抗角 ϕ_f 가 三軸壓縮試驗에서 얻은 값보다 작은 것으로 알려져 있으나⁵⁵⁾ B型試驗機는 砂土의 경우 密度가 높으면 ϕ_f 가 거의 三軸壓縮試驗에서 얻은 ϕ_r 와 같은 값을 얻을 수 있고, 密度가 낮은 것은 三軸壓縮試驗에서 얻은 값이 1°~3° 程度 크므로^(41, 46) 이들은 서로 큰 差異가 없는 것으로서 三軸壓縮試驗이나 B型 一面直接剪斷試驗은 거의 同一한 結果를 얻

을 수 있다고 생각한다.^(12, 27, 41, 46)

Onodera 等⁽⁴⁹⁾의 試驗結果에 따르면 花崗岩質風化土의 경우 plaster cover를 사용한 試料와 사용하지 않은 試料에 있어서 剪斷強度에 미치는 影響이 없는 것으로 結論되었으므로 花崗岩質風化土 特有의 試驗方法을 採用하지 않고 剪斷箱內徑 62.5 mm 높이 20 mm의 變形制御型 B型 一面 直接剪斷試驗機로 剪斷試驗을 실시하였다. 浸水시키지 않는 試料 18個는 C, ϕ 를 測定하기 爲한 試驗을 실시하였고

Table 2. Topographical and vegetational characteristics of the two sites for the soil hardness test.

Quadrat No.	Position	Slope form	Soil depth	Slope (°)	Exposure	Humidity	Tree height	D.B. H.
A - 1	foot	concave	medium	20	S 30° W	dry	5.27 m	11.1 cm
A - 2	hillside	"	thin	20	S 30° W	"	5.28	11.4
A - 3	summit	"	"	26	S 30° W	"	5.20	10.1
A - 4	foot	"	deep	17	S 42° W	"	5.64	11.3
A - 5	hillside	"	medium	17	S 42° W	"	5.16	11.2
A - 6	summit	"	thin	28	S 42° W	"	3.73	8.5
A - 7	foot	"	deep	17	S 49° W	optimum	4.97	8.5
A - 8	hillside	"	"	17	S 49° W	"	4.85	8.0
A - 9	summit	"	medium	29	S 49° W	"	4.79	8.6
A - 10	foot	"	deep	17	S 51° W	"	5.64	10.0
A - 11	hillside	"	medium	23	S 51° W	"	6.15	9.5
A - 12	summit	"	thin	29	S 51° W	"	4.04	6.5
A - 13	foot	compound	medium	22	N 21° W	"	7.14	9.3
A - 14	hillside	"	deep	26	N 21° W	dry	5.81	8.5
A - 15	summit	"	medium	32	N 21° W	"	3.24	8.2
A - 16	foot	"	"	23	N 23° W	optimum	6.60	8.0
A - 17	hillside	"	thin	17	N 23° W	"	6.80	12.0
A - 18	summit	"	"	26	N 23° W	dry	4.04	7.5
A - 19	foot	"	medium	41	N 5° W	optimum	8.60	12.5
A - 20	hillside	"	deep	12	N 5° W	"	5.85	12.0
A - 21	summit	"	medium	26	N 5° W	dry	7.63	10.5
A - 22	foot	"	"	23	N 26° W	optimum	6.32	10.5
A - 23	hillside	"	"	20	N 26° W	dry	6.26	10.0
A - 24	summit	"	"	34	N 26° W	"	6.92	10.3
B - 1	foot	concave	medium	18	E	dry	9.06	14.3
B - 2	hillside	"	thin	20	E	"	7.25	19.2
B - 3	summit	"	"	18	E	"	11.90	19.4
B - 4	foot	convex	"	23	W	"	11.50	17.8
B - 5	hillside	"	"	20	W	"	10.29	17.7
B - 6	summit	"	"	23	W	"	10.70	15.6
B - 7	foot	"	medium	13	S	"	10.15	14.0
B - 8	hillside	"	thin	12	S	"	14.09	18.5
B - 9	summit	"	"	13	S	"	7.90	16.2
B - 10	foot	concave	medium	19	N 21° W	"	12.79	15.9
B - 11	hillside	"	"	21	N 21° W	"	11.02	17.5
B - 12	summit	"	thin	19	N 21° W	"	8.93	17.2

Notes: site A, *Pinus rigida* Mill.; site B, *Pinus rigida* × *taeda*; Soil texture, SL.

나머지 72個 浸水試料는 垂直荷重 44kg($\sigma=1.434$ kg/cm²)로 固定하여 剪斷強度를 測定하였다. 剪斷速度는 1/100mm/min.로 剪斷하였다.

4. 密度 및 含水比 測定

剪斷試驗時 剪斷箱 內에서 粒子破碎와 Dilatancy 가 일어나기 때문에 剪斷에 使用한 試料는 使用치 않고 剪斷試料를 使用하고 남은 試料를 乾燥機에서 110 ± 5°C로 12時間 以上 恒量이 될 때까지 乾燥하여 密度와 含水比를 測定, 計算하였다.

5. 比重試驗

KS F 2308 에 依하여 比重試驗을 실시하였는데 朴⁵⁾에 依하면 通常의인 KS F 2308에 依하여 比重測定法을 正確히 履行하는 것이 오히려 混亂을 막고 合理的이라 하였다.

6. 粒度分析

KS F 2302 에 依하여 粒度分析을 하였다.

7. 堅密度 測定

有意抽出法에 依하여 A地區에서 24個 標本地, B地區에서 12個의 標本地를 選定하였는데 A地區에서는 SW方位에서 12個所, NW方位에서 12個所, B地區에서는 4方位에서 12個所를 各各 山麓, 山腹, 山峯의 位置로 나누어 10m×10m의 方形區를 設定하고 標本木을 選定하여 이 標本木의 樹高 및 胸高直徑을 測定하였으며(Table 2) 樹根數의 分布調査와 土壤의 堅密度를 測定하였다.

土壤의 堅密度測定과 樹根數의 分布調査는 根系의 發達이 傾斜 上側보다 傾斜下側이 더 많이 發達하므로¹⁴⁾ 標本木에서 50cm 떨어진 傾斜下側을 環狀

으로 Trench를 挖서 土壤斷面을 만들었다. 90cm×100cm의 網을 10cm×10cm 間隔의 小方形區로 區分하여 土壤斷面에 錐여서 깊이別로 表土로부터 0~10cm 깊이, 10~20cm 깊이, …… , 90~100cm 깊이로 나누어 各 土層에 I, II, …… , IX의 記號를 붙여서 土壤斷面에서 各 土層別로 9個의 小方形區 中 3個(2, 5, 8번號)에서 山中式 土壤硬度計^{5, 6, 49, 50)}로 堅密度를 各各 3回 測定하여 指標硬度(mm)로 表示하여 平均하고 各土層別로 測定한 3個의 小方形區의 平均指標硬度를 다시 平均하여 各 土層에서의 堅密度로 하였다. 樹根數의 分布調査도 土壤의 堅密度調査에서와 같이 깊이別로 土層을 區分, 各 土層의 小方形區 3個를 選定 各各 小方形區에 나타난 樹根의 數를 調査하여 이를 平均하여 各 土層의 樹根數로 하였다.

結果 및 考察

1. 剪斷強度의 影響要素分析

複雜한 山地崩壞의 機構를 把握하는 基礎的 段階는 崩壞를 일으키려는 힘에 抵抗하는 自然斜面的 剪斷強度를 支配하는 內的 影響 要素들에 對한 研究일 것이다. 本 研究에서는 이들 影響要素를 初期含水比, 初期間隙比, 乾燥密度, 比重으로 생각하여(Table 3) 이들이 剪斷強度에 미치는 影響을 統計的 方法에 依하여 分析, 檢討하였다(以下 初期含水比, 初期間隙比는 含水比, 間隙比라 한다).

供試土壤의 粒徑分布는 花崗岩質風化土의 特有한 粒徑分布로서 粒徑分布의 範圍가 넓어서 粘土에서 粗砂에 이르기까지 分布하고 있으며 粒徑加積曲線의 傾斜가 急하지 않는 것으로 보아(Fig. 1) 分布의 比率의 均一함을 알 수 있다. 그러나 分析測定 結果

Table 3. Shear strength (τ_f), water content(ω_0), void ratio(e_0) and dry density(γ_d) in different soil layers of three sites.

Soil layer Elements	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂
kg/cm ² Shear strength	1.24 ± 0.07	1.11 ± 0.03	1.63 ± 0.06	1.30 ± 0.10	1.18 ± 0.05	1.26 ± 0.06
% Water content	29.18 ± 1.73	29.58 ± 1.74	25.8 ± 1.57	27.08 ± 2.37	29.32 ± 1.99	34.19 ± 2.31
Void ratio	1.01 ± 0.03	0.94 ± 0.09	0.93 ± 0.02	0.93 ± 0.50	0.95 ± 0.06	0.92 ± 0.07
g/cm ³ Dry density	1.32 ± 0.02	1.39 ± 0.02	1.41 ± 0.01	1.42 ± 0.03	1.43 ± 0.04	1.41 ± 0.42

Notes: Specific gravity can be referred to Table 1. Data are averages of 12 samples.

Table 4. Samples rejected by Matsuyama method

Sample No.	τ_f kg/cm ²	ω_o %	e_o	γ_d g/cm ³	T - test	Rejected factors
A ₂₋₁₀	1.063	31.00	1.0569	1.3392	$t=3.535 > t_{10,0.05} = 2.228$	τ_f
B ₁₋₁	1.454	29.00	0.8660	1.4578	$t=2.449 > t_{9,0.05} = 2.262$	γ_d
B ₁₋₃	1.648	28.30	0.8991	1.4609	$t=2.615 > t_{9,0.05} = 2.262$	γ_d
C ₁₋₃	1.374	32.83	1.0222	1.3913	$t=2.6404 > t_{9,0.05} = 2.262$	τ_f
C ₁₋₈	1.425	21.20	0.9474	1.4481	$t=3.330 > t_{9,0.05} = 2.262$	τ_f

Notes: τ_f , shear strength; ω_o , water content; e_o , void ratio; γ_d , dry density.

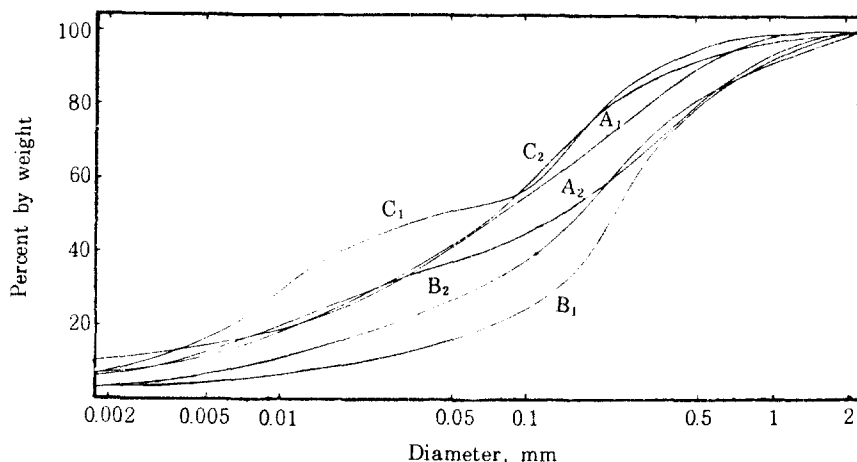


Fig. 1. Particle size distribution curves in the different soil layers of three sites.

얻어진 剪斷強度, 含水比, 間隙比, 乾燥密度, 比重等 要素의 資料가 不良標本에서 얻어진 것이라 思料되는 資料는 增山 棄却檢定方法에 依하여 棄却하여 分析資料에서 除外하였다. 即 A₁, A₂, B₁, B₂, C₁, C₂의 標本가운데 5個標本을 棄却하고 나머지 67個標本을 供試體로 使用하였다(Table 4).

各土層의 土性은 國際法⁴⁶⁾에 依한 土性區分三角圖에 依하여 分類하여 보니 砂質壤土이고(Table 1) 花崗岩質風化土는 飽和되면 粘着力이 거의 零이 되는데 本 試驗에서 粘着力 C의 값은 自然含水比狀態에 있어서 0.2 kg/cm²~0.75 kg/cm²으로 나타났으나 崩壞에 對한 安定된 값은 0.35 kg/cm²~0.45 kg/cm²으로 알려져 있다.⁴²⁾ 또 보통 日本 花崗岩質風化土는 内部摩擦角이 30°~45°인데⁴²⁾ 本 試驗에서도 ϕ 가 29°~45°로서 地域에 따라 상당히 큰 差가 있다(Table 1). 福田⁹⁾에 依하면 火成岩風化砂質土의 地山에 있어서 自然含水比 W_n는 風化程度, 地形, 길이, 植生 및 水理, 氣象條件에 따라 틀리나 測定結果 5~10%라고 報告하였는데 本 試料에서

自然含水比는 작은 것은 24.30%이고, 큰 것은 28.30%로서 대단히 큰 값이다.

1) 剪斷試料의 脫水 및 含水比調整

連續降雨量이 增加하면, 即 含水量이 增加하면 崩壞의 程度는 크게 되는데⁵²⁾ 土壤內 含水量이 增加하여 滑落面의 摩擦抵抗인 剪斷強度가 低下하기 때문이다. 特히 花崗岩質風化土는 風化되면 細粒化되어 比表面積이 增大하여 吸水能力이 커지고 容水量이 적어 豪雨時 쉽게 飽和되는 性質이 있어 自然狀態의 含水量이 여러 段階가 되도록 試料採取를 하거나 自然狀態에서 含水量 調節을 하는 것은 심히 困難하다. 福田⁹⁾은 花崗岩質風化土의 壓密試料를 特별히 設計된 A형 一面剪斷試驗을 浸水條件에 따른 剪斷強度와의 關係를 實驗한 바 있으나 未攪亂 自然試料를 任意의 含水量으로 調節하는 것은 容易한 것이 아니라고 생각한다. 本 試驗研究는 自然狀態에 있어서 剪斷強度의 影響要素들에 關한 研究이므로 未攪亂 供試試料를 採取하여 室內에서 含水量 調節을 하기 위하여 試料圓筒에 담겨져 있는대로

Table 5. Water content adjusted by several drainage time with different soil layers in three sites. (%)

Drainage time \ Soil layer	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂
30	32.70	32.73	29.00	30.10	33.89	37.07
70	30.30	29.34	28.00	29.60	28.54	36.10
120	27.30	28.91	24.30	26.50	28.10	32.67
180	26.39	26.30	24.07	22.07	27.88	30.94
Range	6.31	6.43	4.93	8.03	6.01	6.13

Table 6. Correlation coefficients between water content, void ratio, dry density and specific gravity and shear strength in different layers of three sites.

Soil layer	Water content	Void ratio	Dry density	Specific gravity
A ₁	-0.8803**	-0.5092	0.7226**	0.4168
A ₂	-0.7965**	-0.6800*	0.6615*	-0.5059
B ₁	-0.6437*	-0.7943**	0.5448	-0.5197
B ₂	-0.9110**	-0.5957*	0.5347	-0.4946
C ₁	-0.9127**	-0.8947**	0.8758**	-0.9032**
C ₂	-0.9092**	-0.9087**	0.8700**	-0.0704

24時間 浸水飽和시킨 後, 적당한 時間差를 두어 脫水시켰다. 즉 한 斷面層에서 12個 試料을 3個씩 30시간, 70시간, 120시간, 180시간 동안 脫水하면 適切한 含水比로 調節된다(Table 5).

2) 含水比와 剪斷強度的 單純相關分析

含水比가 調整된 試料을 一面直接剪斷을 실시하여 含水比(調整含水比)와 剪斷強度的 單純相關分析을 하여 相關係數들에서 보면(Table 6) 모두 負의 相關關係에 있으며 全區에서 有意의 또는 매우 有意의 이다.

調整된 含水比가 4.93~8.03%의 근소한 差에서도(Table 5) 含水比와 剪斷強度的 單純相關關係는 強한 負의 相關關係에 있으며 含水比가 높으면 剪斷強度는 低下하고 反對로 含水比가 낮아지면 剪斷強度는 커지는 直線的인 關係에 있다(Table 11).

土粒子間의 剪斷抵抗力 要素는 meniscus에 依한 吸着力, 土粒子間의 粘着力 및 摩擦力이라고 생각되는데 粒子는 위로부터 垂直力을 받을 때 밑에서는 反力이 생기며 이에 따라 接觸面에 剪斷力과 剪斷抵抗力이 생기게 된다. 浸水를 받게되면 meniscus는 消失되고 粒子間의 粘着力이 低下하며 물의 潤滑的인 役割에 따라 摩擦力도 低下하기 때문에 含水比가 높아지면 剪斷強度가 低下하게 된다. 그러므로 含水比의 增加는 剪斷抵抗角 ϕ 와 粘着力 C의 減少를 意味하게 된다.

3) 間隙比와 剪斷強度的 單純相關分析

間隙比와 剪斷強度와의 單純相關分析 結果 相

關係數는 Table 6과 같다. 間隙比와 剪斷強度는 負의 相關關係에 있고 A₁區만 除外하고는 有意의 또는 매우 有意의이며 間隙比와 剪斷強度는 直線的인 關係에 있다(Table 6, 11). 따라서 一般的으로 間隙比가 크면 剪斷強度가 低下하고, 반대로 間隙比가 적으면 적을수록 剪斷強度는 增加한다고 본다.

花崗岩質風化土는 상당히 깊이 風化가 進行되고 自然試料은 風化度에 따라 空隙量이 달라져 風化度가 적은 것은 空隙徑이 큰 것이 많고, 風化度가 큰 것이나 有色礦物이 많은 것은 空隙量은 많으나 空隙徑이 작다.⁷⁾ 따라서 剪斷強度는 空隙量에 關係가 있어 間隙比가 적으면 적을수록 剪斷強度가 점점 增加한다.^{25, 62, 64)}

4) 乾燥密度와 剪斷強度와의 單純相關分析

乾燥密度와 剪斷強度와의 單純相關分析(Table 6)에서 보면 乾燥密度는 含水比와 間隙比와는 달리 相關係數가 모두 正의 相關關係에 있으나 B₁, B₂區에서는 有意의 이 아니었다. 다시 말하면 A₁, B₂, C₁, C₂區에서는 相關係數가 有意의 또는 매우 有意의이며 乾燥密度와 剪斷強度는 直線的인 關係에 있어 (Table 6, 11) 乾燥密度가 크면 클수록 剪斷強度도 크게 되는데 B₁, B₂區와 같이 반드시 相關이 있다고 할 수 없는 例外가 있다.

花崗岩質風化土의 自然試料은 風化度에 따라 乾燥密度가 달라진다. 即 風化가 잘 되어 있으면 空隙徑이 작아지는 반면 空隙量이 많아짐으로 風化度가 작은 것이 乾燥密度가 크다.⁷⁾ 그러므로 空隙量이 風

化度の判定에 對한 指標가 되어 實際적으로 風化程度를 把握하는 손쉬운 方法이기도 하다.

5) 比重과 剪斷強度의 單純相關分析

比重과 剪斷強度와의 單純相關係數는 相關의 方向이 一定치 않아 A₁은 相關係數가 正의 값이고 기타 모두가 負의 相關關係에 있으며 이들은 C₁區만 除外하고는 모두 有意의이 아니다(Table 6). 다시 말해서 C₁區만 除外하고는 比重과 剪斷強度는 相關이 있다고 할 수가 없다. 이와 같이 相關關係를 認定할 수 없는 理由는 花崗岩質風化土의 比重은 보통 2.65 (石英比重)을 中心으로 變動하게 되는데^{8, 50)}

Table 7. Partial correlation coefficients between four variables, shear strength(x_1), water content(x_2), void ratio(x_3) and dry density(x_4) in different layers of three sites.

Soil layer	Coefficients	df	Significance
A ₁	$r_{12, 34} = -0.7356$	8	0.008
	$r_{13, 24} = -0.2360$		0.256
	$r_{14, 23} = -0.1778$		0.312
A ₂	$r_{12, 34} = -0.8052$	7	0.004
	$r_{13, 24} = -0.5939$		0.046
	$r_{14, 23} = -0.4813$		0.095
B ₁	$r_{12, 34} = -0.1724$	6	0.342
	$r_{13, 24} = -0.6865$		0.030
	$r_{14, 23} = -0.4217$		0.149
B ₂	$r_{12, 34} = -0.8762$	8	0.001
	$r_{13, 24} = -0.1733$		0.316
	$r_{14, 23} = -0.0191$		0.479
C ₁	$r_{12, 34} = -0.5163$	6	0.095
	$r_{13, 24} = -0.3746$		0.180
	$r_{14, 23} = -0.2899$		0.243
C ₂	$r_{12, 34} = -0.8216$	8	0.002
	$r_{13, 24} = -0.7139$		0.010
	$r_{14, 23} = -0.4216$		0.112

그 變動의 幅이 좁아서 剪斷強度에 影響을 미치는 程度가 미약하기 때문에 意料된다.

花崗岩質風化土의 主一次 礦物은 石英, 長石, 雲母이며 이들이 風化되므로서 比重도 이에 따라 變化하게 된다. 松尾³¹⁾에 依하면 長石比重이 風化에 依하여 減少하면 粒子의 強度는 低下하고 比重이 增加하면 粒子의 強度가 增加하나 長石比重 2.45를 境界로 하여 그 以下에서는 強度가 極斷의으로 적고 比重의 差에 依한 強度의 變化는 적지만 2.45 以上에서는 급격히 強度가 增加한다고 報告하였다. 따라서 花崗岩質風化土의 比重은 長石이나 雲母分은 風

化에 의한 比重의 差가 심하여서 風化가 어려운 石英比重인 2.65를 중심으로 하여 變化를 보인다(Table 1).

6) 剪斷強度와 影響要素들 間의 偏相關 및 重相關 分析

單純相關分析에서 比重은 相關係數의 陰陽의 方向도 一定하지 않을 뿐만 아니라 C₁區만 除外하고 모두 有意的이 아닌 것으로 나타났으므로 偏相關 및 重相關分析에서 剪斷強度의 影響要素로서 除外하고 含水比, 間隙比, 乾燥密度 3個 要素만을 影響要素로 考察코자 하는데 單純相關分析에서 相關係數들은 影響요소들의 相互作用이 內在되어 影響을 미친다고 생각되므로 전단강도와 이들 변수들 間에 相關의 程度를 完全히 把握할 수 없으므로 偏相關 및 重相關分析을 通해서 剪斷強度의 影響要素들 중 다른 變數의 影響을 除去한 單獨影響과 다른 變數의 影響을 併合시킨 併合影響으로 나누어서 考察코자 한다.

(1) 剪斷強度와 影響要素들 間의 偏相關分析

影響要素인 3個의 變數中 2個의 變數의 影響을 除去한 어느 하나의 變數가 剪斷強度에 影響을 미치는 程度를 알기 위하여 剪斷強度를 x_1 , 含水比 x_2 , 間隙比 x_3 , 乾燥密度를 x_4 로 하여 偏相關分析을 하였다(Table 7).

Table 7에서 보면 모든 區에서 含水比와 剪斷強度의 偏相關係數인 $r_{12, 34}$ 는 陰의 相關關係에 있고 그 값은 다른 變數와 剪斷強度와의 偏相關係數인 $r_{13, 24}$ $r_{14, 23}$ 보다 크고 B₁, C₁區에서 有意的이 아닌 것으로 나타났으나 모든 其他의 區에서는 有意的으로 나타났다.

또 間隙比와 剪斷強度의 偏相關係數인 $r_{13, 24}$ 는 A₂, B₁, C₂ 區에서 有意的인 것으로 나타났으나 其他의 區에서는 有意性이 없었다. 그리고 乾燥密度와 剪斷強度의 偏相關係數 $r_{14, 23}$ 은 含水比와 間隙比의 影響을 除去한 것으로서 모두 有意的이 아니다. 따라서 含水比, 間隙比, 乾燥密度와 剪斷強度의 偏相關係數의 크기와 有意水準에서 考察하여 볼 때 $r_{12, 13} > r_{13, 24} > r_{14, 23}$ (B₁區 例外)의 關係에 있으므로 剪斷強度에 미치는 影響은 含水比가 제일 큼을 알 수 있다.

(2) 剪斷強度와 影響要素들 間의 重相關分析

偏相關分析에서 보면 剪斷強度의 影響要素中 自然狀態에 있어서는 含水比가 剪斷強度에 미치는 影響의 程度가 다른 2要素보다 더 큰 것으로 나타났

Table 8. Multiple correlation coefficients between four variables, shear strength(x_1), water content(x_2), void ratio(x_3) and dry density(x_4) in different layers of three sites.

Soil layer	Coefficients	Soil layer	Coefficients
A ₁	$R_{1.23} = 0.8834^{**}$	B ₂	$R_{1.23} = 0.9243^{**}$
	$R_{1.24} = 0.8803^{**}$		$R_{1.24} = 0.9218^{**}$
	$R_{1.34} = 0.7300^*$		$R_{1.34} = 0.6094^*$
A ₂	$R_{1.234} = 0.8869^{**}$	C ₁	$R_{1.234} = 0.9337^{**}$
	$R_{1.23} = 0.8674^{**}$		$R_{1.23} = 0.9269^{**}$
	$R_{1.24} = 0.8423^{**}$		$R_{1.24} = 0.9218^{**}$
B ₁	$R_{1.34} = 0.6800^*$	C ₂	$R_{1.34} = 0.9011^{**}$
	$R_{1.234} = 0.8931^{**}$		$R_{1.234} = 0.9324^{**}$
	$R_{1.23} = 0.8165^{**}$		$R_{1.23} = 0.9647^{**}$
	$R_{1.24} = 0.7208^*$		$R_{1.24} = 0.9394^{**}$
	$R_{1.34} = 0.8344^{**}$		$R_{1.34} = 0.9087^{**}$
	$R_{1.234} = 0.8536^{**}$		$R_{1.234} = 0.9707^{**}$

는데 이들이 서로 다른 變數와 併合하여 影響을 미치는 程度를 把握하기 爲하여 剪斷強度의 影響要素와 剪斷強度 間에 重相關分析을 한 結果 Table 8과 같다. 여기서 剪斷強度를 x_1 , 含水比 x_2 , 間隙比 x_3 , 乾燥密度를 x_4 로 한다.

Table 8에서 $R_{1.23}$, $R_{1.24}$, $R_{1.34}$, $R_{1.234}$ 는 모두 有意의이고 이들 影響要素들은 併合하여 影響하면 그 影響의 程度가 크며 이들은 B₁區는 例外로 $R_{1.34} > R_{1.23} > R_{1.24}$ 의 關係에 있으나 모두 $R_{1.23} > R_{1.24} > R_{1.34}$ 의 關係에 있는데 이는 含水比와 間隙比가 併合할 때 含水比와 乾燥密度, 間隙比와 乾燥密度가 併合할 때 보다 重相關係數가 더 크므로 影響要素中 含水比의 影響이 더 큰 것임을 알 수 있다. 또 $R_{1.234}$ 의 相關係數가 큰 값임을 2개의 變數를 併合한 것보다 3개의 變數가 併合하여 影響하면 더 큰 相關이 있음을 뜻한다.

이와 같은 關係에서 볼 때 偏相關分析에서도 確認된 바이지만 未攪亂 花崗岩質風化土에 있어서 剪斷強度의 影響要素는 影響의 程度에 따라서 含水比 > 間隙比 > 乾燥密度의 關係에 있다.

7) 剪斷強度와 影響要素들 간의 回歸分析

含水比, 間隙比, 乾燥密度를 獨立變數로 하여 回歸方程式에 依하여 自然狀態에 있어서 剪斷強度를 推定하는데 있어서 間隙比는 그 計算式에서 알 수 있는 바와 같이 比重의 測定과 乾燥密度의 測定을 함으로서 間隙比의 計算이 可能하여서 比重試驗과 測定 및 計算이 繁雜하고 많은 時間과 勞力이 所要되기 때문에 間隙比를 剪斷強度를 推定하는 獨立變

Table 9. ANOVA table for multiple linear regression equations derived from water content (X_1) and dry density (X_2) to estimate shear strength in different soil layers of three sites.

Source of Variation	A ₁		A ₂		B ₁		B ₂		C ₁		C ₂	
	F ₀	F _(a)	F ₀	F _(a)	F ₀	F _(a)	F ₀	F _(a)	F ₀	F _(a)	F ₀	F _(a)
X ₁ Considered first												
Regression due to X ₁	34.42, F ₀ (0.01) = 10.04	15.57, F ₀ (0.05) = 5.12	5.65, F ₀ (0.05) = 5.32	48.75, F ₀ (0.01) = 10.04	39.67, F ₀ (0.01) = 11.26	47.66, F ₀ (0.01) = 10.04						
Additional regression due to X ₂	< 1, F ₀ (0.05) = 5.12	2.05, F ₀ (0.05) = 5.32	1.53, F ₀ (0.05) = 5.59	1.19, F ₀ (0.05) = 5.12	< 1, F ₀ (0.05) = 5.59	4.28, F ₀ (0.05) = 5.12						
X ₂ Considered first												
Regression due to X ₂	10.93, F ₀ (0.01) = 10.04	7.03, F ₀ (0.05) = 5.12	3.38, F ₀ (0.05) = 5.32	4.00, F ₀ (0.05) = 4.96	26.25, F ₀ (0.01) = 11.26	31.13, F ₀ (0.01) = 10.04						
Additional regression due to X ₁	10.11, F ₀ (0.05) = 5.12	7.44, F ₀ (0.05) = 5.32	3.25, F ₀ (0.05) = 5.59	33.75, F ₀ (0.01) = 5.12	3.05, F ₀ (0.05) = 5.59	9.61, F ₀ (0.05) = 5.12						

數로 參與시키는 것은 適合치 못하다고 생각한다. 따라서 含水比와 乾燥密度는 重相關分析에서 알 수 있는 바와 같이 $R_{1.24}$ 는 높은 相關關係에 있고 有意의이므로 이들을 獨立變數로 하여 回歸分析할 수 있으리라 생각하여 含水比와 乾燥密度를 獨立變數로 한 從屬變數인 剪斷強度를 推定함에 있어서 多重回歸分析의 適合性 與否를 判定하기 위한 分散分析을 한 結果(Table 9), 含水比를 主要因으로 하는 分散分析에서 含水比는 全區에서 有意의이나 乾燥密度에 依한 Additional regression은 全區에서 有意의이 아니고 乾燥密度를 主要因으로 한 分散分析에서 乾燥密度는 B_1, B_2 區에서 有意의이 아니고

含水比에 依한 Additional regression은 B_1 區, C_1 區에서 有意의이 아닌 것으로 나타났으므로 B_1, B_2 區 및 C_1 區에서 回歸性을 認定할 수 없다.

그러므로 剪斷強度를 推定하기 위하여 獨立變數로 參與될 影響要素는 間隙比는 물론, 乾燥密度도 回歸分析을 위한 分散分析 結果, 回歸性을 認定할 수 없는 區가 있으므로 多重回歸分析은 不可能하며 含水比는 全區에서 回歸性이 認定되므로(Table 9) 含

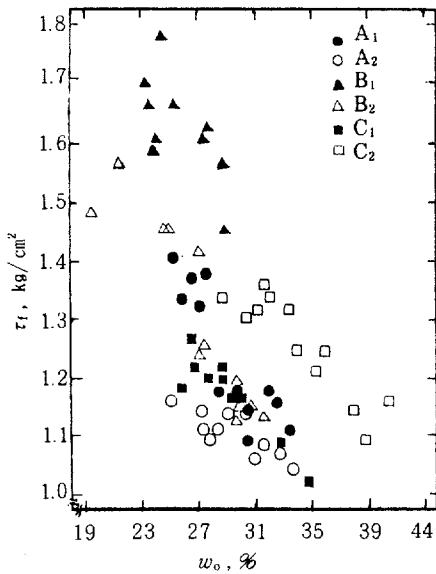


Fig. 2. Relationship between water content(w_o) and shear strength(τ_f) of all samples from different three sites.

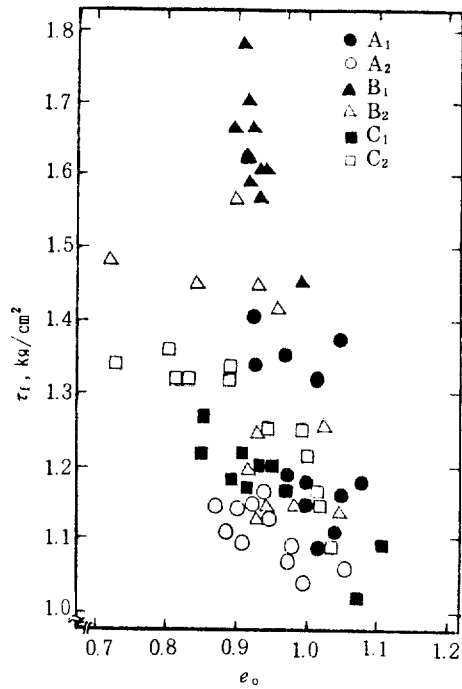


Fig. 3. Relationship between void ratio(e_o) and shear strength(τ_f) of all samples from different three sites.

Table 10. ANOVA table for simple linear regression equations derived from water content, void ratio and dry density to estimate shear strength of all samples from three sites.

Elements	Source of Variation	df	SS	MS	F_o	$F_{(\alpha)}$
Water content	Regression	1	0.8324	0.8324	36.51	$F_{65}^1(0.01)=7.04$
	Residual	65	1.4847	0.0228		
	Total	66	2.3171			
Void ratio	Regression	1	0.3792	0.3792	12.72	$F_{65}^1(0.01)=7.04$
	Residual	65	1.9379	0.0298		
	Total	66	2.3171			
Dry density	Regression	1	0.2789	0.2789	8.88	$F_{65}^1(0.01)=7.04$
	Residual	65	2.0382	0.0314		
	Total	66	2.3171			

水比를 獨立變數로 하여 回歸分析하는 것이 타당하다고 思料되나 回歸方程式으로 剪斷強度를 推定할 때 乾燥密度를 指標로 하여 該當 乾燥密度의 地域에 局限하여 適用할 것을 提案하는 바이다.

또 A₁, A₂, B₁, B₂, C₁, C₂ 區에서 採取한 試料가 한 母集團에서 標本抽出된 것으로 생각하고 回歸方程式을 만들고자 影響要素인 含水比, 間隙比, 乾燥密度와 剪斷強度 사이에 回歸性的 有無를 檢定하기 위하여 全標本을 資料로 하여 分散分析한 結果 (Table 10) 含水比, 乾燥密度, 間隙比는 매우 有意的이어서 回歸性を 認定할 수 있다. 그러나 全標本을 資料로 한 含水比, 間隙比, 乾燥密度와 剪斷強度의 相關圖(Fig. 2, 3, 4)에서 보면 A₁, A₂, B₁, B₂, C₁, C₂ 區에서 標本抽出한 資料의 Plot 가 相互混在되어 있지 않고 一部分이 混在되어 있는데, 이와 같은 현상은 花崗岩質風化土의 各 區에서 採取한 試

料가 礦物組成, 母岩의 性質, 風化度가 各기 틀려서 工學的 性質을 달리 함으로서 剪斷強度에 差異가 나타난 것인데³⁸⁾ 花崗岩質風化土는 이와 같은 地域의 일 特性이 있다. 따라서 土壤의 不連續性を 確信할 수 있으므로 各區의 標本을 組合하여 한 母集團에서 抽出한 標本을 보고 統計·分析하는 것은 意義가 없으므로 各區마다 別個의 母集團으로 하여 回歸分析하여야 한다. Table 11은 含水比를 獨立變數로 한 剪斷強度를 推定하는 回歸方程式이다. 前述한 바와 같이 花崗岩質風化土는 工學的 性質에 있어서 地域의 特性이 있으므로^{33, 61)} 乾燥密度를 指標로 하고 含水比를 獨立變數로 하여 花崗岩系를 母岩으로 하고 있는 地域을 地域別로 區分하여 乾燥密度에 따른 剪斷強度의 回歸方程式을 구하여 剪斷強度를 推定하면 대단히 便利하리라 思料된다.

다라서 回歸方程式에 依한 剪斷強度의 推定值에 대한 適合度를 百分率 誤差로 表示하면 Table 11과 같으며 百分率 誤差가 대단히 낮아서 適合度가 높음을 알 수 있다.

2. 土壤의 堅密度와 樹根分布 分析

A地區는 主林木인 리기다 소나무의 鬱閉度가 낮고 下層植生이 不良하여 地表가 裸出되어 있는 곳이 대부분으로 表土가 不安定하여 土砂流出의 危險이 많은 林地이며 山麓은 土壤의 堆積樣式이 崩積으로서 土深이 中程度여서 土深이 中~淺인 山腹이나 山峯에 比하여 根系의 發達이 상당한 깊이에 이르고 있으나, 이에 比하여 山腹이나 山峯의 部位에서는 根系의 發達이 깊지 못하여 地表에 露出되어 匍匐하고 있는 例도 흔히 볼 수 있다. 土壤斷面調査에서 上層 VI層(50~60cm)과 VII層(60~70cm)에 樹根이 나타난 標本地는 4, 7, 8로 3個所이며 VIII層(70~80cm)에는 標本地 4에서 土深이 깊어 但 1個所만 樹根이 나타나서 本 研究에서는 土層 VI, VII, VIII의 測定值는 分析對象에서 除

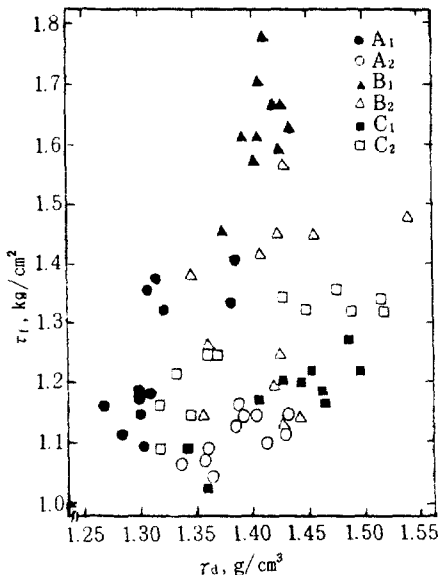


Fig. 4. Relationship between dry density (γ_d) and shear strength (τ_f) of all samples from different three sites.

Table 11. Regression equations, confidence limits of coefficients and fitness of the equations with *ad hoc* dry density in different soil layers of three sites.

Soil layer	Regression equation	95 % confidence limit of coefficient	Fitness %	Dry density (99 %) g/cm^3
A ₁	$\hat{Y} = 2.30840 - 0.03671x$	0.03671 ± 0.01396	0.59	1.31698 ± 0.02173
A ₂	$\hat{Y} = 1.48118 - 0.01255x$	0.01255 ± 0.00718	2.32	1.38946 ± 0.02147
B ₁	$\hat{Y} = 2.30788 - 0.02632x$	0.02632 ± 0.02155	13.72	1.41186 ± 0.01287
B ₂	$\hat{Y} = 2.36657 - 0.03928x$	0.03928 ± 0.01252	5.32	1.42035 ± 0.03278
C ₁	$\hat{Y} = 1.86618 - 0.02352x$	0.02352 ± 0.00860	2.68	1.43462 ± 0.03565
C ₂	$\hat{Y} = 2.02989 - 0.02247x$	0.02247 ± 0.00725	3.11	1.41185 ± 0.42250

外하였다.

B地區는 主林木이 리기테-다이고 採種林으로서 砂防施工地에 後植된 곳인데 A地區와 같이 下層 植生이 不良하여 地表가 裸出되어 있고 落葉이 堆積되어 있는 곳은 落葉의 分解가 不進하여 菌絲의 發達이 旺盛한 곳이 많았다. 또 表土의 土砂流出이 심하여 山麓, 山腹, 山峯 多같이 土深은 낮았다. 土壤斷面 調査에서 土層 I(0~10cm), II(10~20cm), III(20~30cm), IV(30~40cm), V(40~50cm) 까지 樹根이 分布하고 있으나 土層 IV는 標本地, 1, 7, 11에 土層 V에서는 標本地 7, 11에만 樹根이 分布하고 있어 土層 IV, V의 測定値는 分析對象에서 除外하였다.

1) 土深과 土壤의 堅密度

土壤의 成質은 母岩의 物理化學的 組成과 成分에 支配되고 特히, 堅密度는 物理的 性質에 支配되기 때문에 一定 깊이에 있어서 土壤堅密度는 그 位置에 따라서 母岩의 性質이나 土壤形成過程에 있어서 風化의 程度에 따라 다르기 때문에 어느 깊이에 있어서 堅密度의 크기를 一括的으로 表示하기는 대단히 困難하다. 調査地인 A, B地區는 土深이 깊지 않음에도(A地區 平均土深 45.7cm, B地區 22.2cm) 不拘하고 樹根이 分布하고 있는 層位의 堅密度를 比較하여 보니 A地區는 土層 I(0~10cm)에서 低硬

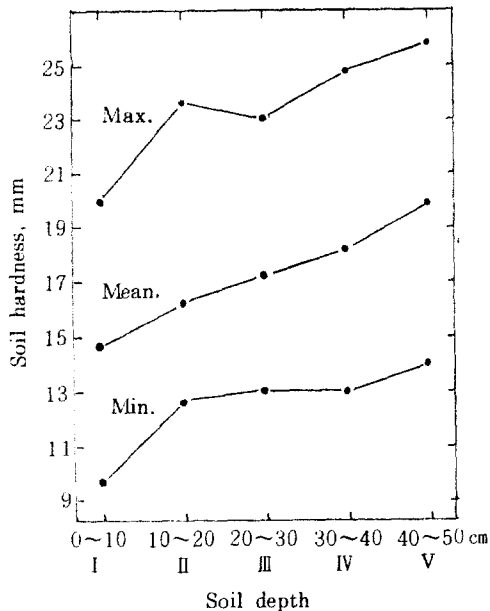


Fig. 5. Changes in indicated soil hardness against the different soil depth in site A. (mean with min. -max. limits)

度는 指標硬度 9.7mm로 가장 낮고, II層(10~20cm)에서 12.5mm, III層(20~30cm)에서 13mm, IV層(30~40cm)에서 13mm, V層(40~50cm)에서 14mm 順으로 높아졌으며 高硬度가 역시 I層에서 19.8mm, II層에서 23.6mm, III層에서 22.9mm, IV層에서 24.7mm, V層에서 25.8mm로서 低硬度和 같이 土層이 깊어짐에 따라서 값이 커져갔다(Fig. 5).

B地區도 低硬度가 土層 I(0~10cm)에서 指標硬度 6.95mm로 가장 낮고, II層(10~20cm)에서 11.7mm, III層(20~30cm)에서 14.67mm로 높아졌으며 高硬度는 I層에서 20.39mm로서 가장 낮고 II層에서 23.17mm, III層에서 22.3mm로서 一般的으로 土深이 깊어짐에 따라서 硬度가 큰 값을 認定할 수 있다(Fig. 6). 그러므로 A, B地區에 있어서 低硬도나 高硬도 다같이 대체로 土深이 깊어짐에 따라서 점점 커져가는 傾向이 있다.

各層位別 平均 堅密度는 A地區에 있어서 土層 I(0~10cm)에서 14.6mm, II層(10~20cm)

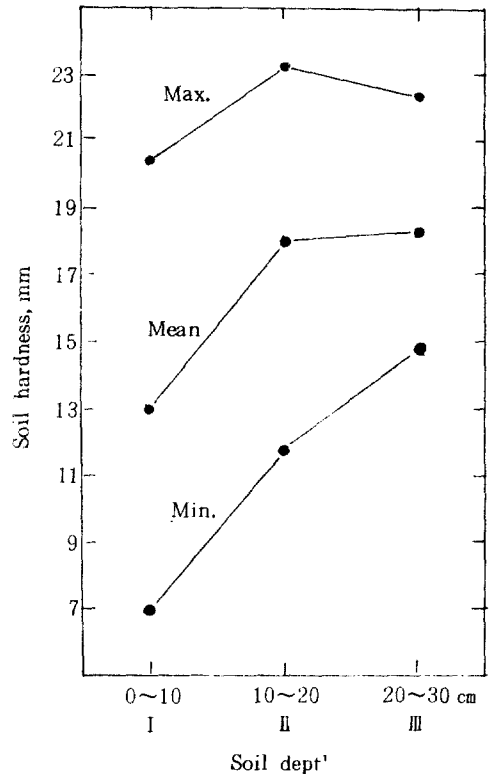


Fig. 6. Changes in indicated soil hardness against the different soil depth in site B. (mean with min. -max. limits)

에서 16.2 mm, Ⅲ層(20~30 cm)에서 17.2mm, IV層(30~40cm)에서는 18.3mm, V層(40~50cm)에서 19.8로서 土層이 깊어짐에 따라서 平均堅密度도 커져 갔으며(Fig. 5), B地區에서도 平均堅密度는 土層 I(0~10cm)에서 13.04mm Ⅱ層(10~20cm)에서 18.05mm, Ⅲ層(20~30 cm)에서 18.26 mm로서 層位가 깊어짐에 따라서 점차로 B地區에 있어서도 平均堅密度가 높아졌다. 그러나 A地區의 平均堅密度는 거의 直線的으로 增加하는데(Fig. 5), B地區의 平均堅密度는 直線성이 없다. 즉 B地區에서는 Ⅱ層과 Ⅲ層의 平均堅密度의 差가 크지 않았다(Fig. 6). 土層의 깊이에 따라서 高硬度, 低硬도와 같이 平均硬도도 그 크기가 높아졌다.

2) 土層別 土壤의 堅密度와 樹根의 分布

1) 土層別 樹根의 分布

根의 運動現象은 주로 外部로부터 刺戟을 받아서 그 結果 屈地性, 屈化性, 屈混性 등 樹根은 生長에 있어서 方向性을 認定할 수 있다.¹¹⁾ 리기타 소나무나 리기타-다 소나무는 소나무, 곰솔과 같이 根系型이 赤松型으로 稚苗때는 主根의 生長이 旺盛하여 速히 心土에 達하여 主根의 先端에 가까운 곳에서 점차로 枝根이 分枝하고 이 枝根은 다시 一次側根, 二次側根으로 점차 分枝가 發達하여 疎放型으로 根系을 形成하게 되는데 水平的으로는 分散型으로 되며 成木으로 되어 樹齡이 增加함에 따라서 根의 伸長成長은 抑制되고 主根의 主體가 不明瞭하게 되는 경우가 많다. 土層이 깊어지면 土壤의 堅密度가 높고 通氣가 不良하므로 樹根의 生長에 適合치 못하

고 側根 등 枝根의 發達이 旺盛하여 生理的으로 主根生長이 抑制된다. 따라서 土深이 깊지않은 中程度의 土深에서도 枝根의 發達이 活潑하다.¹⁴⁾ 新田¹⁵⁾에 依하면 指標硬도 27 mm 以上에서는 樹根의 生長이 困難하다고 報告하였는데¹¹⁾ A地區에서는 硬도 範圍가 9.7~25.8mm, B地區에서는 6.95~23.17 mm이므로 樹根生長에 困難한 指標硬도보다는 낮다.

土層別로 樹根數의 分布를 보면 上層에서 下層에 이룸에 따라서 樹根數가 減少한다.

A地區에서 리기타 소나무林的 樹根數의 分布를 보면 Fig. 7에서와 같이 地表面에서 40 cm까지는 直線的으로 減少하였으나 그 以下에서는 樹根數의 變化를 認定할 수 없었다. 그러나 B地區의 리기타-다 소나무林에서도 樹根分布는 地表面에서 20 cm까지는 현저히 減少하였으나 그 以下에서는 差異를 認定할 수 없었다.

이러한 地域間的 樹根分布의 差異는 두 地區의 土壤斷面 特性과 樹種의 樹根分布에 있어서 習性和 關聯이 있는 것으로 보인다.¹⁴⁾ 따라서 下層에 이룰수록 樹根數가 減少하는 傾向은 前述한 바와 같이 下層에 이룰수록 土壤의 堅密度가 높아지고 通氣가 不良한데 原因이 있으리라 思料된다.

樹根數의 土層別 分布比를 보면 土層 I을 1로 했을 때 A地區의 리기타 소나무林에 있어서 土層 II는 0.84, Ⅲ層은 0.6, IV層은 0.4, V層도 0.4. B地區의 리기타-다 소나무林에 있어서는 土層 II는 0.4, Ⅲ層에서 0.2이며(Fig. 8) 이를 百分比로 보면 A地區에서는 土層 I에 31%, 土層 II에서 26%, Ⅲ層에서 18%, IV層에서 12%, V層에서 13%의 樹

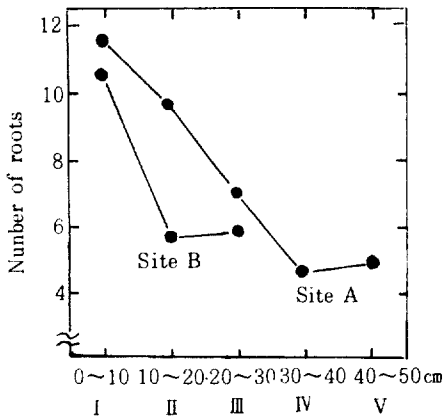


Fig. 7. Distribution of tree roots per 10 cm² on the profile in contrast to soil depth in two sites.

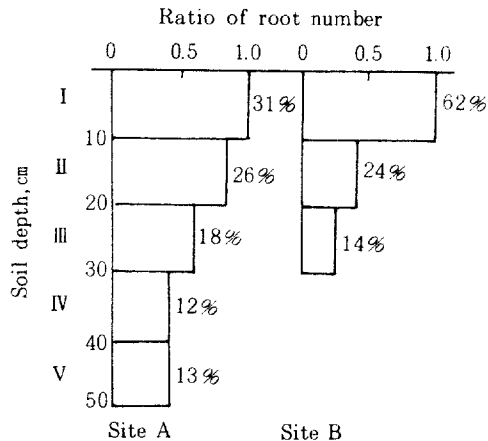


Fig. 8. Relative distribution of tree roots at the different depth in two sites.

根이 分布하고 있어 土層 I, II에 즉 土深 20 cm 部位까지에 57%가 分布하고 있으며, B地區에 있어서는 土層 I에 62%, II層에 24%, III層에 14%의 樹根이 分布하고 있어 土層 I, II, 즉 土深 20 cm 部位까지에 86%가 分布하고 있어서 A, B地區 多같이 表土에 가까운 곳에 樹根이 대부분 分布하고 있고 土深이 깊어짐에 따라서 樹根의 數가 減少함을 알 수 있다(Fig. 8).

(2) 土壤의 堅密度와 樹根分布의 單純相關分析

土層別로 土壤의 指標硬度和 樹根數의 相關關係를 分析한 結果 A地區의 리기다 소나무林에서나 B地

Table 12. Correlation coefficients between soil hardness and number of tree roots unit area at the different depth in two sites.

Sites	Soil depth	Correlation coefficient
Site A	I, 0-10 cm	-0.3675
	II, 10-20	-0.5299**
	III, 20-30	-0.5573*
	IV, 30-40	-0.6922**
	V, 40-50	-0.7325*
Site B	I, 0-10	-0.7758**
	II, 10-20	-0.7014*
	III, 20-30	-0.9169*

Table 13. Regression equations, confidence limits of coefficients, and fitness of the equations derived from soil hardness(x) to estimate the number of tree roots(Y) at the different soil depths in two sites.

Sites	Soil depth	Regression equation	95% confidence limit of coefficient	Fitness
Site A	II, 10~20 cm	$Y=17.7669-0.4957x$	0.4957 ± 0.3600	26.28 %
	III, 20~30	$Y=12.8043-0.3423x$	0.3423 ± 0.2525	23.58
	IV, 30~40	$Y=12.2813-0.4209x$	0.4209 ± 0.2326	33.11
	V, 40~50	$Y=14.4781-0.4904x$	0.4904 ± 0.4551	36.10
Sits B	I, 0~10	$Y=19.5618-0.7075x$	0.7075 ± 0.4504	23.77
	II, 10~20	$Y=11.3799-0.3298x$	0.3298 ± 0.3236	24.80
	III, 20~30	$Y=11.6751-0.3327x$	0.3327 ± 0.2658	10.68

區의 리기테-다 소나무林에서 모두 負의 相關關係에 있으며 A地區의 土層 I(0~10cm)만 除外하고 有意的 또는 매우 有意的이었다(Table 12).

A地區의 리기다林的 土層 I에서 相關係數가 -0.3675이고 有意的이 아니었는데 이 土層에 A層이 發達하여 土壤의 物理的 性質에 變化를 주고 土壤斷面을 만들때나 硬度 測定時 土層 I은 最上位에 있는 層이기 때문에 土壤의 結合力이나 構造가 人爲的으로 破損된 結果가 아닌가 생각된다. 土層이 깊어짐에 따라 指標硬度和 樹根數의 相關係數가 큰 값을 나타낸 것은(B地區의 리기테-다林的 土層 II 除外) 土壤의 堅密度가 樹根의 分布에 미치는 影響이 土層이 깊어짐에 따라서, 即 堅密度의 크기가 커짐에 따라서 점차 增加함을 알 수 있다. 또 指標硬도가 높아지면 樹根數가 減少하게 되는데 이와 같이 硬도가 높아지면 점차로 樹根生長을 抑制한다고 생각한다.

(3) 樹根의 分布와 土壤堅密度의 回歸分析

土壤의 指標硬도와 리기다 소나무林 및 리기테-다 소나무林的 土壤斷面에 있어서 樹根數와는 A地

區의 리기다 소나무林에 있어서 土層 I(0~10cm)만 除外하고는 모두 負의 相關關係에 있고 이들은 有意的 또는 매우 有意的이므로 樹根數의 分布를 推定하고자 土壤의 指標硬도를 獨立變數로 하고 樹根數를 從屬變數로 하여 回歸分析을 한 結果 A地區의 리기다 소나무林과 B地區의 리기테-다 소나무林的 回歸方程式은 Table 13과 같으며 이 回歸式으로 土壤斷面에 있어서 樹根數를 推定할 수 있다고 생각되나 推定值에 對한 百分率 誤差의 값이 커서 回歸方程式의 適合度는 낮은 便이다.

結 論

光州地域의 花崗岩質風化土의 崩壞地 및 切開地에서 自然狀態의 未攪亂 試料를 사용하여 適切한 含水比로 調整하고 B型 一面 直接剪斷試驗을 實施하여 剪斷強度를 測定하였다. 그리고 比重試驗과 粒度分析 등 附帶試驗을 實施하여 含水比, 間隙比, 乾燥密度, 比重 등을 測定하였으며 剪斷強度에 미치는 影響要素를 分析키 위하여 剪斷強度와 이들에 대하여

單純相關分析, 偏相關分析, 重相關分析과 回歸分析을 하였다. 또한 花崗岩質風化土에 있어서 土壤의 堅密度와 樹根의 分布를 測定, 調査하기 위하여 全南 谷城郡 兼面 平章里에 所在한 砂防施工地에 植栽된 리기다 소나무林에서 24個所의 方形區를 設定하고, 光州市 北區 장운동에 所在한 砂防施工地에 後植된 리기테-다 소나무林에서 12個所의 方形區를 設定하여 各己 標本木에서 山下쪽으로 50 cm 에 環狀의 土壤斷面을 만들어 各 斷面을 表土로부터 10cm 간격으로 層位를 區分하고 各 層位에 10個의 小方形區로 만들어 山中式 土壤硬度計로 堅密度를 測定하고 樹根數를 調査하여 堅密度와 數根數와의 關係를 究明하였다.

研究結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 含水比, 間隙比, 乾燥密度, 比重과 剪斷強度와 單純關係(單純相關分析): 1) 含水比와 剪斷強度, 間隙比와 剪斷強度間에는 有意的인 負의 相關을 나타내었으며 直線的인 關係에 있었다. 2) 乾燥密度와 剪斷強度 間에는 正의 相關을 나타내었으며 直線的인 關係에 있었다. 3) 比重과 剪斷強度 間에는 有意的인 相關關係를 認定할 수 없었다. 그러므로 比重은 剪斷強度의 影響要素라 할 수 없다.

2. 剪斷強度(x_1)와 含水比(x_2), 間隙比(x_3) 및 乾燥密度(x_4)와의 複合關係(偏相關과 重相關分析): 1) 含水比(x_2), 間隙比(x_3), 乾燥密度(x_4) 중에서 剪斷強度에 影響을 미치는 直接效果의 크기는 含水比 > 間隙比 > 乾燥密度 順位였다. 이러한 關係는 重相關分析에서도 같은 結果를 나타내었다. 2) 含水比(x_1)와 乾燥密度(x_2)를 獨立變數로 하고 剪斷強度를 從屬變數로 한 多重線型 回歸方程式의 分散分析 結果 含水比만이 回歸性이 認定되었으므로 含水比를 獨立變數로 하여 剪斷強度를 推定하기 위한 回歸方程式은 制限된 乾燥密度의 範圍內에서 適合度가 매우 높게 評價되었다.

3. 樹根分布와 土壤의 堅密度와의 關係: 1) 土壤의 堅密度는 土深이 깊어짐에 따라 높아지며 指標硬度和 樹根數 間에는 有意的인 負의 相關關係를 認定할 수 있었으며 直線的인 關係에 있었다. 2) 리기다 소나무와 리기테-다 소나무의 樹根은 土深 20 cm 까지에 대부분 分布하고 있었다. 3) 리기다 소나무林과 리기테-다 소나무林에서 測定, 調査한 土壤의 指標硬도를 獨立變數로 한 回歸方程式으로 樹根數를 推定할 수 있었으나 낮은 適合度를 나타내었다.

引用 文 獻

1. Baver, L. D. 1968. Soil Physics. John Wiley & Sons, Inc. pp. 81~198, 224~303.
2. Baver, L. D., W. H. Gardner and W. R. Gardner. 1972. Soil Physics. John Wiley & Sons, Inc. pp. 130~229, 317~391.
3. Chowdhury, R. N. 1978. Slope Analysis. Elsevier Scientific Publishing Co. pp. 78~172.
4. 鄭寅暎, 金翊圭. 1978. 土質力學. 東明社, pp. 112~140
5. 土壤物理性測定委員會. 1972. 土壤物理性測定法. 養賢堂. p. 308.
6. 土壤安定材料委員會. 1979. 斜面安定工法. 鹿島出版會. pp. 146~148.
7. 福田 護. 1973. 마사土의 유니스텐션과 工學的 性質에 對하여. 日本土質工學會 第18會土質工學シンポジウム發表論文集 25~30.
8. 福田護. 1975. 火成岩系風化砂質土의 工學的性質에 對하여. 土と基礎 23(2): 13~18.
9. 福田護. 1978. 浸水に伴う土의 せん斷抵抗의 低下와 盛土斜面의 一安定解析—まさ土のような風化砂質土を對象として—. 日本土質工學會論文報告集 18(3): 75~82.
10. Hardin, B. O and V. R. Drnevich. 1972. Shear Modulus Damping in Soils ; Measured and Parameter Effects. ASCE, SM 6: 603~624.
11. 本多 侅, 山野邊 寔. 1959. 日本芝の生育に及ぼす踏壓の影響. 造園雜誌. 22(4): 16~20.
12. 井上廣胤. 1964. 砂の直接せん斷에 對하여. 土と基礎 12(9): 3~7.
13. 籾木豪夫, 金子卓爾. 1950. 新たい試作した土壤硬度計에 對하여. 關東東山農業試驗場農機具部農業機械學會誌 11(4): 143~145.
14. 荀住舜. 1979. 樹木根係論說. 誠文堂 新光社, pp. 357~515.
15. 河田弘, 小島俊郎. 1977. 環境測定法IV. 共立出版社, pp. 88~92.
16. 金榮南, 洪性珏, 趙台煥. 1977. 土壤堅密度가 樹木生長에 미치는 影響. 韓林誌. 36: 47~55.
17. Kirkhan, D. and W. L. Powers. 1972. Advanced Soil Physics. Wiley-Interscience,

- pp. 235~365.
18. 岸上定男, 高橋悟, 1976. 粘土の力學的性質に及ぼす含水量の影響に関する實驗的研究. 日本土質工學會論文報告集 16(3): 87~96.
 19. 北村文雄. 1965. 日本芝園藝品種栽培の基礎的研究(1). 造園雜誌. 28(3,4): 12~17.
 20. 北村文雄, 野田坂 伸也, 1975. 造園樹木の生長におよぼす土壌硬度の影響. 造園雜誌. 38(4): 32~37.
 21. 駒村富士彌, 渡邊武夫, 1977. 樹木の斜面安定効果. 日林誌. 59(9): 338~340.
 22. 近藤三雄, 小澤知雄. 1977. 芝生地の収容力に関する基礎的研究. 造園雜誌. 4(3): 11~23.
 23. Lee, K. L. and H. B. Seed. 1967. Drained Strength Characteristic of Sands. ASCE, SM 6: 117~140.
 24. 林炳祥. 1974. 물이 花崗岩의 工學的 性質에 미치는 影響. 大韓土木會誌 22(2): 75~81.
 25. Lumb, P. 1962. The Properties of Decomposed Granite. A. M. I. C. E. Geotechnique, 12(3): 226~243.
 26. 眞井耕象, 北郷繁, 四方哲雄. 1962. 各種 セン断試験の比較(第 2 報). 土と基礎 10(2): 14~19.
 27. 眞井耕象, 北郷繁, 土岐祥介. 1958. 各種セン断試験の比較. 土の基礎 10(2): 14~19.
 28. 松尾新一郎, 澤孝平. 1973. マサ土粒子の選擇破砕. 日本土質工學會 第 18 回土質工學シンポジウム發表論文集 37~44.
 29. 松岡考朗, 入江恒爾, 荒井克彦. 1981. 含水比が締固め土の性質に及ぼす影響について. 日本土質工學會 第 16 回土質工學研究發表會講演集 737~740.
 30. 松尾稔, 輕部大藏. 1966. 室内セン断試験結果の設計への適用に際する 2,3 の問題點. 日本土質工學會 第 11 回土質工學會シンポジウム發表論文集 91~100.
 31. 松尾新一郎, 西田一彦. 1967. マサ土粒子の物理化學的性質について. 日本土質工學會 第 2 回土質工學研究發表會講演集 1~6.
 32. 松尾新一郎, 西田一彦. 1967. マサ土の風化度と工學的性質について. 日本土木學會關西支部講演集 213~214.
 33. Matsuo Shin-Ichiro and Nishida Kazuhiko. 1968. Physical and Chemical Properties of Decomposed Granite Soil Grains. Soils and Foundations 8(4): 10~20.
 34. 松尾新一郎, 西田一彦, 福田 護. 1968. マサ土用簡易セン断試験機について. 日本土木學會誌關西支部年次學術講演會 講演概要集 3(3): 1~2.
 35. 松尾新一郎, 1975. マサ土の特性と問題點. 土と基礎, 23(2): 1~6.
 36. 松尾新一郎, 澤孝平. 1975. マサ土の 突固め試験における土粒子破砕について. 日本土質工學會 第 10 回土質工學研究發表會 講演集 369~372.
 37. 松浦誠, 芳賀保夫. 1973. 直接基礎の基礎としてのマサ地盤. 日本土質工學會 第 18 回土質工學シンポジウム發表論文集 89~92.
 38. 三笠正人, 木下哲生, 望月秋利. 1968. マサ土のセン断特性. 第 23 回 日本土木會年次學術會講演集Ⅲ 171~174.
 39. 三浦 清, 1966. 豪雨によつて發表する花崗岩山地の崩壊現象とその性質. 應用地質 7(3): 145~158.
 40. 中井喜一郎. 1973. マサ土の風化について(深層風化). 日本土質工學會 第 18 回土質工學シンポジウム發表論文集 1~11.
 41. 日本土質工學會. 1968. 土のセン断試験法に関する基礎的研究. 日本土質工學會 pp. 3~8, 41~46, 101~102.
 42. 日本土質工學會. 1979. 風化花崗岩とまさ土の工學的性質とその應用. 日本土質工學會 p. 89, pp. 279~280.
 43. 日本土質工學會事業普及委員會. 1981. N値およびCとφの考え方. 日本土質工學會 pp. 53~58, 87~94.
 44. 西田一彦, 青山千彰, 中山義久. 1981. 亂さない不飽和まさ土のセン断強度特性. 日本土質工學會 第 16 回土質工學研究發表會 講演集, 533~536.
 45. 新田伸三. 1976. 土木工事ののり面保護 I. 鹿島出版會, pp. 70~71.
 46. 農林省 林業試験場 土壌調査部編. 1959. 林野土壌とそのしらべ方. 林野共濟會, pp. 102~120.
 47. 大村 寛, 高橋敏男. 1976. 山崩れの認識方法に關する一試論. 日林誌. 58(2): 69~76.
 48. 鬼塚克忠, 原祐. 1974. 水浸時の締固め土の力學的性質. 日本土質工學會 第 9 回土質工學會 研究發表會 287~290.

49. Onodera Tōru, Oda Masanobu and Minami Kazumi. 1976. Shear Strength of Undisturbed Sample of Decomposed Granite Soil. *Soils and Foundation* 16(1): 17~26.
50. 朴炳基. 1973. 花崗岩質風化土の特性研究, 大韓土木學會誌 21(4): 37~50.
51. 朴炳基. 1974. 花崗岩質風化土の剪斷特性研究, 大韓土木學會誌 22(3): 55~66.
52. 下川悦郎. 1976. 降雨條件と山地崩壊. 日林誌, 58(4): 136~140.
53. 志水準夫. 1977. 花崗岩地帯の斜面の安定性に関する統計的解析. 日林誌, 59(5): 186~190.
54. 庄野久人, 佐佐木清, 藤原茂範. 1975. 亂さない風化花ユウ岩試料の特性について. 土と基礎 23(2): 19~24.
55. 須藤清次. 1976. 二面剪斷試験について. 日本土質工學會 第11回土質工學シンポジウム發表論文集 101~104.
56. 玉田文吾, 福田順二. 1977. 地すべり面の滑動時におけるセン斷抵抗. 日本土質工學會 第12回土質工學研究發表會 講演集 897~900.
57. 田中彌壽男, 高橋 悟. 1981. 吸水量を用いたまさ土の風化度判定法について. 日本土質工學會第16回研究發表會 講演集 149~152.
58. Tanimoto Kiichi and Nishi Masaru. 1969. On some Properties of "Masado" (Weathered Granite Sand). 建設工學研究會報告 4: 197~214.
59. 谷本喜一. 1973. マサ土の工學的性質について, 動的性質. 日本土質工學會 第18回シンポジウム發表論文集 45~50.
60. 寺田正男. 1980. 土壌の堅密度と樹木の根系生長. 日林誌, 62(4): 153~155.
61. 都徳鉉. 1978. 花崗岩質風化土の道路基層利用에 關한 研究. 建設研究所, 51: 45~46.
62. 綱干壽夫, 中田雅博. 1977. マサ土自然斜面の崩壊と自然試料のセン斷強度について. 日本土質工學會 第12回研究發表會 講演集 885~888.
63. 海堀正博, 佐佐恭二. 1981. 砂防調査用現場一面セン斷試験機の試作と崩壊調査への適用. 東京大學農學部演習林報告 53: 144~151.
64. 内田一郎, 松本鍊三, 鬼塚克忠. 1967. 不飽和土のセン斷強度について. 日本土質工學會 第2回土質工學研究發表會 講演集 101~106.
65. 内田一郎, 松本鍊三, 江頭素樹, 山田義生. 1968. マサ土の工學的性質におよぼす微粒子の影響について. 日本土質工學會 第23回 年次學術講演會 講演概要集 177~178.
66. 内田一郎, 鬼塚克忠, 平田 登基男. 1975. マサ土を用い盛土斜面の室内崩壊實驗. 土と基礎 23(2): 33~40.
67. 八幡敏雄. 1977. 土壌の物理. 東京大學出版會, pp. 7~22.
68. 山村和也. 1975. 土の直接セン斷試験に關する考察. 土と基礎 13(1): 21~26.
69. 山中金次郎, 松尾憲一. 1961. 土壌硬度に關する(第1報). 日本土壤肥料學會雜誌 33(7): 343~347.
70. 山下新平. 1968. 黑雲母花崗岩の風化作用とその影響. 愛媛大學 紀要第Ⅲ部(工學) 6(1): 129~136.