花崗岩質 風化土의 破碎性에 關한 硏究

The study on the Crushability of Weathered Cranite Soils

都 德 鉉*·姜 乂 默**
Duek Hyon Do, Yea Hook Kang

Summary

The weathered granite soil involves problems in its stability in soil structures depending upon the reduction of soil strength due to the water absorption, crushability, and content of colored mineral and feldspar.

As an attemt to solve the problems associated with soil stability, the crushability of weathered granite soil was investigated by conducting tests such as compaction test, CBR test, unconfined compression test, direct shear test, triaxial compression test, and permeability test on the five soil samples different in weathering and mineral compositions. The experimental results are summarized as follows:

The ratio of increasing dry density in the weathered granite soil was high as the compaction energy was low, while it was low as the compaction energy was increased.

The unconfined compressive strength and CBR value were highest in the dry side rather than in the soil with the optimum moisture content, when the soil was compacted by adjusting water content. However, the unconfined compressive strength of smples, which were compacted and oven dried, were highest in the wet side rather than in soil with the optimum moisture content.

As the soil becomes coarse grain, the ratio of specific surface area increased due to increased crushability, and the increasing ratio of the specific surface area decreased as the compaction energy was increased.

The highest ratio of grain crushability was attained in the wet side rather than in the soil with the optimum moisture content. Such tendency was transforming to the dry side as the compaction energy was increased.

The effect of water on the grain crushability of soil was high in the coarse grained soil. The specific surface area of WK soil sample, when compacted under the condition of air dried and under the optimum moisture content, was constant regardless of the compaction energy.

When the weathered granite soil and river sand with the same grain size were compacted with low compaction energy, the weathered granite soil with crushability had higher dry density than river sand. However, when the compaction energy reached to certain point over limitation, the river sand had higher dry density than the weathered granite soil.

The coefficient of permeability was lowest in the wet side rather than in the optimum moisture content, when the soil was compacted by adjusting soil water content. The reduction of permeability of soil due to the compaction was more apparent in the weathered granite soil than in the river sand.

The highly significant correlation coefficient was obtained between the amount of particle breakage and dry density of the compacted soil.

*國立建設硏究所 土質科
**忠南大學校 農科大學

Ⅰ. 緖 論

花崗岩質 風化土란 大氣中에서 他岩石에 比하여 風化되기 쉬운 花崗岩質 岩石의 結晶性 深成岩 卽 花崗岩, 花崗閃綠岩과 花崗斑岩, 石英斑岩, 閃綠玢岩等의 半深成岩 및 이와 同質의 片麻岩이 風化되어 그 자리에 殘留되어 있는 殘積土 또는 이에 의하여 形成된 崩積土 等을 말한다.

花崗岩質 風化土를 土質工學的 견지에서 體系的인 硏究가 始作된 것은 1955年頃부터로서[69] 이의 語源을 살펴보면 英語로서는 "weathered granite soil" 혹은 그存在狀態에 따라 "decomposed granite", "residual granite soil", 日本에서는 "眞砂土"로 불리워지고 있다.

우리나라에서는 "花崗土", "花崗腐蝕土", "花崗岩質 風化土"等으로 불리워지고 있으나 本 硏究에서는 "花崗岩質 風化土"로 부르기로 한다. 花崗岩質 風化土의 特徵은 粒狀化와 深層風化로서 Austria[42]에서는 50~180m, Hong Kong[46]에서는 60m以上의 깊은곳에 이르는 風化層이 있음이 報告되었으며 그 原因은 母岩의 構成鑛物과 構造 및 組織의 特性 卽 節理나 破碎帶 等에 影響이 있음을 指摘하고 있다.[40] 花崗岩質 風化土는 대부분 石英, 長石, 雲母 角閃石, 橄欖石 等의 鑛物로 構成되어 있으나 母岩의 分布地域이나 採取場所에 따라 鑛物의 組合이 다르며 이중에서도 石英은 比較的 安定性이 높으나 長石의 性質과 有色鑛物(雲母·角閃石·橄欖石等)의 量 또는 이들의 化學的 變質에 의한 여러 種類의 粘土鑛物의 生成은 工學的 性質에 큰 影響을 미친다. 또 風化의 程度에 따라 岩石에 가까운 것에서부터 점토에 이르기까지 넓은 범위로 存在하며 粒徑은 勿論이고 强度, 透水性 및 壓縮性 等에 큰 變化를 가져온다. 特히 물에 대한 安定性이 적어 含水比의 增加에 따라 剪斷强度, 一軸壓縮强度 等이 急激히 弱化되며 따라서 乾燥時와 水浸時의 工學的 性質이 달라지므로 安定과 不安定의 兩相을 띄운다.

흙을 다졌을 때의 工學的 性質은 그 흙의 粒度 配合, 含水比, 土粒子의 表面積 및 形狀等의 因子에 의하여 決定되나 花崗岩質 風化土의 경우는 衝擊的인 外力이나 作業機械에 의한 攪亂, 로울러의 轉壓, 施工後의 交通荷重 等에 따라 土粒子가 破碎되며 道路나 鐵道路線과 같은 흙 쌓기의 높이가 큰 區間 또는 earth dam 等에 使用하는 경우에는 築堤中 堤體 自重에 의하여 壓碎될 뿐만 아니라 宅地造成, 埋立材料 및 安定處理 工法에 利用될 경우에도 土粒子의 破碎가 顯著하여 그 結果로 粒子構造 및 粒子內의 空隙의 變化를 가져오고 過轉壓의 우려가 커진다. 또 이와같은 粒子 破碎, 特히 長石 粒子의 破碎는 排水溝나 fill dam의 piping을 誘引하므로 흙 構造物의 長期的인 安定性이나 耐久性을 減少시킬 우려가 있으며 더우기 風化가 계속 진행되고 있는 不安定한 흙이므로 外的 條件에 의하여 항상 變化되는 材料라는 점에서 보통흙과는 根本的으로 다른 特性을 가지고 있다.

日本에서는 이를 特殊土로 取扱하여 物理的 化學的 試驗方法을 별도로 規定하고 있다.[60] 따라서 花崗岩質 風化土를 實際工事에 利用할 경우에는 工事의 目的과 規模에 適合한 轉壓機械를 使用하고 다짐含水比, 다짐두께, 轉壓回數等의 確認 및 轉壓된 層의 均質性의 管理가 다른 흙에 비하여 더한층 必要하다고 생각된다.

또 土粒子의 破碎는 透水性에도 輕視할 수 없는 影響을 미치므로 earth dam의 코아材料로서 粘土含有量이 적어도 花崗岩質 風化土의 粒子破碎를 促進시켜 透水性을 低下시키므로서 코아材料로 使用可能할 것으로 생각된다.

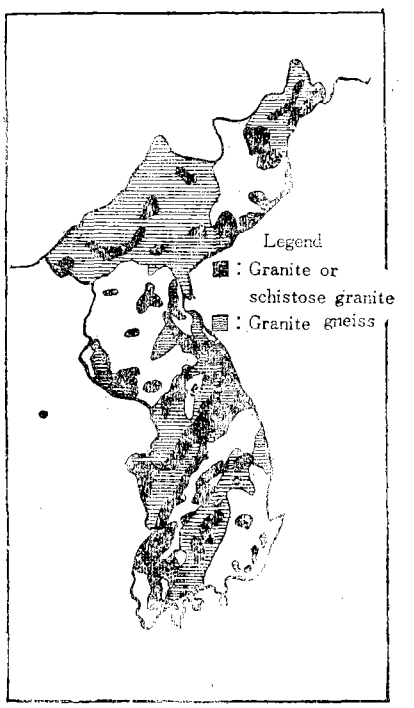


Fig. 1. Geologic map of Korea

우리나라에서는 그림 1과 같이 全國에 걸쳐 花崗岩質 岩石이 分布되어 있다 即 慶尙道 一帶의 玢岩및 堆積岩類를 除外하고 湖南, 中部에 이르는 대부분의 地域에 花崗岩 또는 片狀花崗岩, 北韓에도 花崗岩 또는 花崗片麻岩이 大規模로 分布되어 있으며 中國, 日本을 비롯하여 全世界에서 그 量이 가장 많은 岩石이다.

지금까지 花崗岩質 風化土를 道路工事에서는 大部分 路體와 路床에만 利用되어 왔으나 모래, 강자갈 等 良質骨材의 確保가 점차 어려워짐에 따라 이를 基層 또는 補助基層 材料로서의 代用이 불가피할 것으로 생각되어 이에 대한 工學的 性質의 解明이 切實하게 되었다. 特히 花崗岩質 風化土는 다짐에 의한 土粒子의 破碎性이 크므로 實驗室에서의 動的인 다짐과 現場에서의 轉壓에 의한 靜的인 다짐과의 差異點이 보통흙에 比하여 큰것으로 이들사이의 連繫性의 究明이 切實히 要求되고 있다. 또 이와같은 連繫性을 調査하기 위하여는 實驗室에서의 다짐에의한 土粒子의 파쇄성에 관한 解明이 必要할 것으로 생각된다.

따라서 本硏究에서는 花崗岩質 風化土의 다짐에 의한 破碎性을 究明하기 위하여 5種類의 試料를 採取하여 다짐試驗, CBR試驗, 三軸壓縮試驗, 直接剪斷試驗, 一軸壓縮試驗 및 透水試驗을 하여 花崗岩質 風化土의 基本的 性質을 調査하고 含水比와 다짐에너지의 變化에 따른 土粒子의 破碎性에 대하요 고찰하였다.

Ⅱ. 硏究史

花崗岩質 岩石의 風化는 物理的 崩壞作用(disintegration)과 化學的 風化作用(chemical weathering 또는 decomposition)으로 大別할 수 있으며 物理的 風化의 原因은 地下 깊은 곳에서 高壓下에 生成된 花崗岩이 地表에 露出될 때의 除荷現象, 물의 凍結作用 및 日射에 의한 溫度變化 等을 들수 있고 化學的 風化의 因子로서는 雨水 또는 空氣를 媒介體로하는 酸化還元作用, 融解作用, ion交換, 加水分解 等의 化學反應을 들 수 있다[48]

Griggs[10]는 岩石의 風化過程을 調査하기 위하여 新鮮한 花崗岩에 대한 加熱 冷却의 反復試驗을 한 結果 乾燥條件에서는 變化가 적으나 濕潤狀態에서는 상당히 變質되며 岩石의 剝離現象은 물의 作用과 溫度變化가 重要한 要素라고 하였고, Jenny[7]는 岩石의 風化에 의한 흙의 生成은 氣候, 母岩, 生物活動, 地形, 時間 等의 因子에 影響된다고 하였다.

Ruxton[46,47]은 Hong Kong과 Sudan의 花崗岩 風化地帶의 地下浸蝕 機構에 關한 硏究結果 豪雨時 물이 地下水로 流出될 때 風化된 長石을 溶液 또는 懸濁狀으로 浸蝕하여 空隙을 增大시키므로서 壓縮되는 現象을 밝힌바 있다.

이와같은 風化過程을 거쳐 特히 化學的 風化에 의한 化學成分이 점차 變化됨에 따라 母岩 鑛物中의 長石, 雲母 等은 粘土鑛物로 점차 變하는데 이 중에서도 雲母는 粘土鑛物의 生成이 多樣하다. 즉 Grim[11], Kerr[16] 等에 의하면 黑雲母는 그 形態를 變化시켜 綠色의 vermiculite가 되고 그후 gel狀態의 物質을 經過하여 kaolinite가 된다고 하였고, Wager[64]및 Walker[65]는 黑雲母는 風化의 初期段階에서는 結晶光軸角의 變化, 比重과 屈折率의 減少, 多色性의 損失, $Fe^{+2}\rightarrow Fe^{+3}$로의 變化, Mg,K,Na等의 減少 및 水分의 增加 等을 確認하고 그 中間 生成物로서 vermiculite, chlorite, 加水黑雲母 等의 段階를 거쳐 kaolinite가 된다고 하였다.

山下[67]는 黑雲母 花崗岩의 風化土에서 kaolinite sericite, vermiculite, illite, gibbsite, chlorite가 檢出되었으며 또 黑雲母花崗岩中의 biotite는 母岩 biotite→biotite, 水酸化 biotite의 中間體→水酸化 biotite→vermiculite→chlorite의 生成過程을 거친다고 하였다. 이외에도 Goldich[9], Onodera[43], Stephen[50] 管野[51,52,53] 等의 重要한 一次鑛物의 化學的 風化에 대한 硏究結果를 綜合하면 다음과 같다.

石 英 : 機械的 風化에 의하여 상당히 細粒化되며 特히 破碎帶의 石英은 이러한 傾向이 크나 化學的 變化는 거의 없다.

長 石 : 正長石은 물과 炭酸gas와의 作用에 의하여 다음과 같은 反應을 나타내며 粘土化되고 金屬 ion을 分離한다.

$K_2O\cdot Al_2O_3\cdot 6SiO_2+2H_2O+CO_2\rightarrow Al_2O_3\cdot 2SiO_2\cdot 2H_2O+4SiO_2+K_2CO_3$

斜長石은 正長石보다 더 分解되기 쉬우며 Na, Ca가 分離되고 SiO_2의 一部도 離脫하여 kaolin鑛物(kaolinite, halloysite)로 變하며 最終的으로는 gibbsite ($Al_2O_3\cdot 3H_2O$) 等이 된다.

黑雲母 : Mg, Na의 置換 및 溶脫에 의해서 illite, chlorite, vermiculite 混合層 鑛物을 거쳐 vermiculite→halloysite 等이 된다.

이와 같이 風化가 繼續되고 있는 花崗岩質 風化

土는 土性面에서 普通흙에 比하여 特異한 性質을 가지고 있다.

Vargas[63], 後藤[17] 等에 의하면 花崗岩質 風化土는 結晶性 片麻岩에 比하여 比較的 塑性이 낮다고 하였다.

또 花崗岩質 風化土는 實際로는 塑性이 存在하면서도 土質試驗法에 따르면 非塑性으로 나타냄을 着眼하여 箭內[68]는 fall cone에 의해서 液性限界와 塑性限界를 求하는 方法을 提案하였고, 松尾[28]는 슬럼프試驗方法으로 간편하게 流動限界를 測定할 수 있다고 하였으며 그 適合性이 認定되어 利用되고 있다.

Magee[26]는 花崗岩質 風化土는 그 鑛物組成에 있어 雲母 含有量이 많으면 다짐密度가 낮고 最適 含水比는 增加하며 石英 및 風化度가 높지 않은 長石의 含有量이 많은 試料는 다짐密度가 높으나 長石의 風化가 상당히 進展된 試料는 粒子의 破碎가 顯著하여 過轉壓 現象의 우려가 크다고 하였다.

Lumb[25]는 花崗岩質 風化土는 不飽和試料는 약간 粘着力이 있으나 飽和試料는 粘着力이 없다고 하였고 內田[61]도 飽和度의 증가에 따라 粘着力이 감소되는 경향이 있으며 剪斷抵抗角도 飽和度의 영향이 크다고 하였다.

Lee[22]는 剪斷强度는 滑動摩擦에 의한 强度와 dilatancy의 效果 및 粒子破碎와 再配列에 의한 效果로 區分할 수 있으며 特히 粒子破碎가 容易한 花崗岩質 風化土에서는 剪斷 에너지의 一部가 土粒子의 破碎에 消耗되므로 粒度와 間隙比가 동일한 상태이면 土粒子의 破碎性이 큰 花崗岩質 風化土가 河川砂보다 剪斷强度가 크게 나타난다고 하였다. 또 荒卷[1]는 花崗岩質 風化土를 直接剪斷 試驗을 할때 土粒子의 破碎性을 調査한 結果 有色鑛物 粒子는 吸水에 依하여 심하게 弱化되므로 破碎性이 크다고 하였다.

谷本[6]는 花崗岩質 風化土의 破碎는 다짐 含水比의 影響을 크게 받으며 最適含水比보다 乾燥側에서 破碎率이 작게 나타났다고 하였다.

土粒子의 破碎는 外力의 種類에 따라서도 다른 것으로 松尾[38]는 총 다짐에너지를 일정하게 가하였을 때는 다짐 回數를 增加시킬수록 乾燥密度의 增加率이 커졌고, 래머의 落下高를 變化시켰을 때는 破碎性은 變化되지 않았으나 래머의 重量을 增大시켰을 때는 破碎性이 컸다고 하였다. 그리고 同一한 다짐에너지에서는 粒度分布가 良好할수록 破碎性이 작았다고 하였다. 또 土粒子의 破碎는 透水性을 低下시키므로 普通흙보다 破碎가 容易한 花崗岩質 風化土는 다짐에너지를 增加시키므로서 土粒子의 破碎를 促進시켜 堤體의 코아材料로서 使用할 수 있다고 하였다.[20]

또 山梨縣 企劃局의 報告[66]에 의하면 花崗岩質 風化土를 堤體의 코아材料로서 使用할 경우 長石의 溶解에 기인되는 piping의 抵抗性에 대한 우려가 있음을 고려하여 loam質土와 혼합사용하는 방안이 검토된바 있다.

우리나라에서도 花崗岩質 風化土를 外力으로 細粒化시키고 含水比의 調節에 의하여 코아材料로 使用하므로서 工費를 節減시킨 예가 있다.[15]

今後 花崗岩質 風化土를 效果的으로 利用하기 위하여는 보다 合理的이고 實用的인 各種調査法, 試驗法, 設計法 等이 마련되어야 할 것으로 생각되며 特히 鑛物組成 및 變化等 複雜性에 비추어 花崗岩質 風化土의 工學的 性質을 解明하기 위하여는 物理的 化學的 性質은 勿論이고 地質學, 鑛物學 等의 諸 要素와도 關聯하여 綜合的인 硏究가 必要할 것으로 생각된다.

Ⅲ. 材料 및 試驗方法

1. 使用材料

本硏究에 使用된 試料는 風化度와 鑛物組成이 다른 5種類의 花崗岩質風化土로서 이중 4種類는 大甫系 花崗岩(AA,WK,SA,DJ)이고 나머지 1種類는 佛國寺系 花崗岩(CJ)이며 이들의 粒度分布는 Fig. 2와 같다.

AA 및WK試料는 서울 城北區 安岩洞 및 東大門區 徽慶洞 建設硏究所 進入路에서 採取한 黑雲母 花崗岩과 花崗斑岩으로 構成되어 있다. SA試料는 忠南 禮山郡 新岩面에서 採取한 粗粒質 黑雲母 花崗岩이고 DJ試料는 大田 第2工業團地에서 採取한

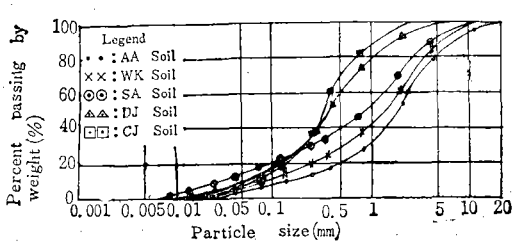


Fig. 2. Grain size distribution curves of soils used

Table-1. Physical Properties of soils used

Test item / Soil type	Specific gravity	Apparent specific gravity	Specific gravity of feldspars	Moisture content of undisturbed soil %	Dry density of undisturbed soil %	Void ratio of undisturbed soil	Percent of absorption (%)
AA	2.645	2.512	2.563	3.9	2.177	0.215	1.90
WK	2.630	2.388	2.519	7.5	1.963	0.339	3.68
SA	2.674	2.261	2.434	10.1	1.521	0.758	4.82
CJ	2.658	2.310	2.476	9.0	1.540	0.726	2.30
DJ	2.651	2.376	2.506	6.6	1.873	0.415	2.36
River sand	2.630	2.568	—	—	—	—	0.94

Rate of abrasion (%)	Atterberg limit			Flow limit by slump test (%)	Max. grain size (mm)	Mechanical analysis				
	L.L (%)	P.L (%)	P.I			Gravel (above 2mm)	Sand (2~0.074 mm)	Silt (0.074-0.005 mm)	Clay (below 0.005 mm)	Coeff. of uniformity ($\frac{D_{60}}{D_{10}}$)
54.9	—	—	N.P	21.2	19.1	46.50	46.97	6.53	—	17.1
56.6	29.6	—	N.P	27.9	9.5	40.52	50.56	8.92	—	23.8
59.5	43.8	34.3	9.5	40.8	9.5	30.65	48.25	16.57	3.53	107.2
79.4	36.7	—	N.P	32.4	4.8	5.65	81.77	12.58	—	9.8
—	—	—	N.P	32.6	2.2	0.22	88.59	11.19	—	6.3
35.2	—	—	N.P	—	9.5	40.52	50.56	8.92	—	23.8

Coeff. of curvature $\frac{(D_{30})^2}{D_{10}\times D_{60}}$	Soil classification		Max. dry density (g/cm³)	Opt. moisture Content (%)	Coefficient of permeability (cm/sec)	Modified CBR (%)	Unconfined compressive Strength (kg/cm²)	Cohesion (kg/cm²)	Angle of shearing resistance (degree)
	U.S.C.S	AASHTO							
1.7	SW-SM	A-1-b	1.904	10.1	1.69×10^{-4}	28.2	0.17	0.03	51.4
1.6	SW-SM	A-1-b	1.864	13.2	3.64×10^{-5}	27.8	1.01	0.35	35.0
6.0	SM	A-2-5	1.749	14.1	5.14×10^{-7}	12.4	3.34	0.77	24.2
2.5	SM	A-2-5	1.693	14.7	6.26×10^{-5}	13.9	1.33	0.18	28.5
1.8	SW-SM	A-2-4	1.689	15.2	4.06×10^{-6}	18.0	0.46	0.14	32.0
1.6	SW-SM	A-1-b	1.936	12.0	9.39×10^{-4}	—	—	—	—

Analysis of mineral composition

Primary minerals			Secondary minerals		
Quartz (%)	Feldspar (%)	Colored mineral (%)	Kaolinite	Sericite	Muscovite
49.7	36.8	13.5	—	—	—
40.1	44.2	15.7	—	—	—
31.2	45.6	24.2	○	—	—
33.8	34.9	31.3	—	○	○
39.6	37.7	22.7	○	—	—
—	—	—	—	—	—

Table-2. Chemical analysis of soils used

Composition / Soil type	Ignition loss(%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	FeO (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)	pH
AA	0.94	76.70	14.98	0.11	0.78	0.99	0.55	4.25	0.29	6.14
WK	2.34	71.82	19.70	0.11	0.87	1.39	0.82	4.27	0.28	5.88
SA	4.04	68.73	23.20	0.07	1.68	1.45	0.89	4.52	0.43	5.31
DJ	3.59	69.70	23.04	0.11	1.79	2.06	0.82	2.18	0.32	5.38
CJ	2.80	71.03	20.74	0.18	1.25	0.92	0.53	4.50	0.26	5.54

複雲母 花崗岩이며 CJ試料는 忠北 淸州 郊外의 宅地造成 工事場에서 採取한 斑狀花崗岩이다. 또 花崗岩質 風化土의 破碎性을 檢討하기 위하여 漢江의 石英質 河川砂를 採取하여 WK試料의 粒度와 同一하게 調製하여 使用하였으며 이들의 物理的 性質 및 化學的 成分은 table 1 및 table 2와 같다.

2. 試驗方法

(1) 長石比重 試驗

長石比重은 自然試料를 0.074~0.42mm範圍의 粒子로 粉碎하여 이를 물과 메칠 알콜로 씻어 105~110°C의 오븐에 乾燥시킨후 이중 3g을 比重이 調整된 bromoform($CHBr_3$)에 混合하였다. 여기에 沈澱된 石英 및 有色鑛物 粒子를 分離시킨後 나머지 長石溶液에 메칠 알콜을 稀釋하여 長石粒子가 溶液속에 均等하게 分散될때의 平均比重을 測定하였다.

(2) 磨耗試驗

磨耗試驗은 KS F 2508에 준하여 4番체에 殘留하고 10mm체를 通過하는 C等級의 試料 5,000g을 調製하여 로스안젤스 磨耗試驗機에 試料와 8個의 철구(直徑 47.5mm 全體무게 3330g)를 넣고 32回/分으로 500回 回轉시켰다. 이를 12番체로 가름하여 이에 殘留하는 試料를 물로 씻고 105~110°C의 오븐에 乾燥시킨후 무게를 달아 試驗前 試料에 대한 磨耗率을 計算하였다.

(3) 强熱減量 試驗

磁材도가니를 一定한 量이 될때까지 强熱시킨後 이에 200番체 通過試料 1g을 넣어 900~1,000°C로 15分間 强熱하고 5分間씩 一定한 量이 될때까지 强熱을 되풀이하였다. 이를 데시케이트에 冷却시킨후 重量을 달아 試驗前 試料에 대한 減量의 比率을 計算하였다.

(4) 流動限界試驗

流動限界試驗은 10番체 殘留試料를 除去하고 KS F 2402에 規定된 슬럼프 試驗器에 含水比를 여러가지로 變化시킨 試料를 3층으로 나누어 넣어 各層을 2.5kg의 다짐봉으로 10cm 높이에서 25回 落下시킨후 몰드를 수직으로 빼올릴때 試料의 圓錐가 흘러내린 높이 및 含水比를 測定하였다. 試驗結果 圓錐가 흘러내린 높이를 縱軸, 含水比를 橫軸에 취하여 슬럼프 曲線을 그리고 슬럼프 높이 3cm에 상당하는 含水比를 流動限界値로 測定하였다.

(5) 1次 鑛物分析 試驗

試料를 0.074~0.42mm 範圍의 粒徑으로 粉碎하여 이중 2g을 55% 弗化水素酸으로 씻고, 코발트 亞硝酸 나트리움 2% 水溶液으로 着色시켰다. 이를 顯微鏡으로 觀察하여 灰色은 石英, 白色 및 黃色은 長石, 黑色은 有色鑛物로 分類하여 1次 鑛物 含有量을 分析하였다.

(6) X-Ray 廻折分析 試驗

X-Ray 廻折 分析 試料는 Schmazu會社의 試驗機(Cu=1.5418Å)를 使用하였다.

mounting은 試料를 200番체에 통과되도록 粉碎하여 aluminum holder에 dry powder press 方法으로 하였으며 試驗結果를 Bragg의 公式 $\lambda=2d\sin\theta$를 使用하여 d(Å)를 기록차드에 나타나는 2θ 角으로 計算해서 試料中에 包含된 各種 鑛物을 檢出하였다.

(7) 化學成分 分析

化學成分中 SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO 等은 試料를 0.074mm 以下로 粉碎하여 105~110°C의 오븐에 乾燥시킨 後 定量을 달아 KS L 5120에 準하여 分析하였다.

K_2O Na_2O는 試料 0.5g을 10m*l*의 鹽酸으로 處理하여 蒸溜水로 稀釋한 後 A—A(原子 吸光分析法)로 定量 分析하였다.

FeO는 試料 0.5g을 白金도가니에 黃酸 10m*l*과 弗酸(H_2BO_4) 5m*l*로 完全溶解시키고 이 溶液에 燐酸 10m*l*, 硼酸 2g을 넣고 蒸溜水로 稀釋하여 溶液이 250m*l*가 되도록 하였다. 여기서 50m*l*을 비커

에 取하여 0.1 normal Cr_2O_7 (중크롬산 카리) 液으로 滴定하여 이에 所要된 중크롬酸의 量으로 FeO를 計算하였다.

(8) 透水 試驗

花崗岩質 風化土中 破碎性이 比較的 큰 WK試料와 이와 同一하게 粒度를 調製한 河川砂를 KS F 2322에 準하여 含水比를 여러가지로 變化시킨 試料를 몰드에 3層으로 나누어 넣고 다짐回數를 各層 10, 25, 55, 110回로 다져서 變水位 透水試驗을 하였다.

(9) CBR 試驗

CBR試驗은 KS F 2320에 準하여 몰드의 直徑 15cm, 래머 重量 4.5kg을 使用하여 다짐 含水比를 變化시키면서 落下高를 45cm로 하여 5층으로 나누어 各層 10, 25, 55回로 다진 供試體를 製作하고 이를 4日間 水浸後 試驗을 하였다.

(10) 一軸壓縮 試驗

一軸壓縮 强度 試驗은 KS F 2312에 規定된 흙의 다짐試驗中 A—1 方法으로 다짐試驗을 하여 여러가지 含水比에 대해서 求한 密度에 相當하는 試料量을 달아 이를 直徑 7cm 높이 14cm의 몰드에 3層으로 나누어 넣고

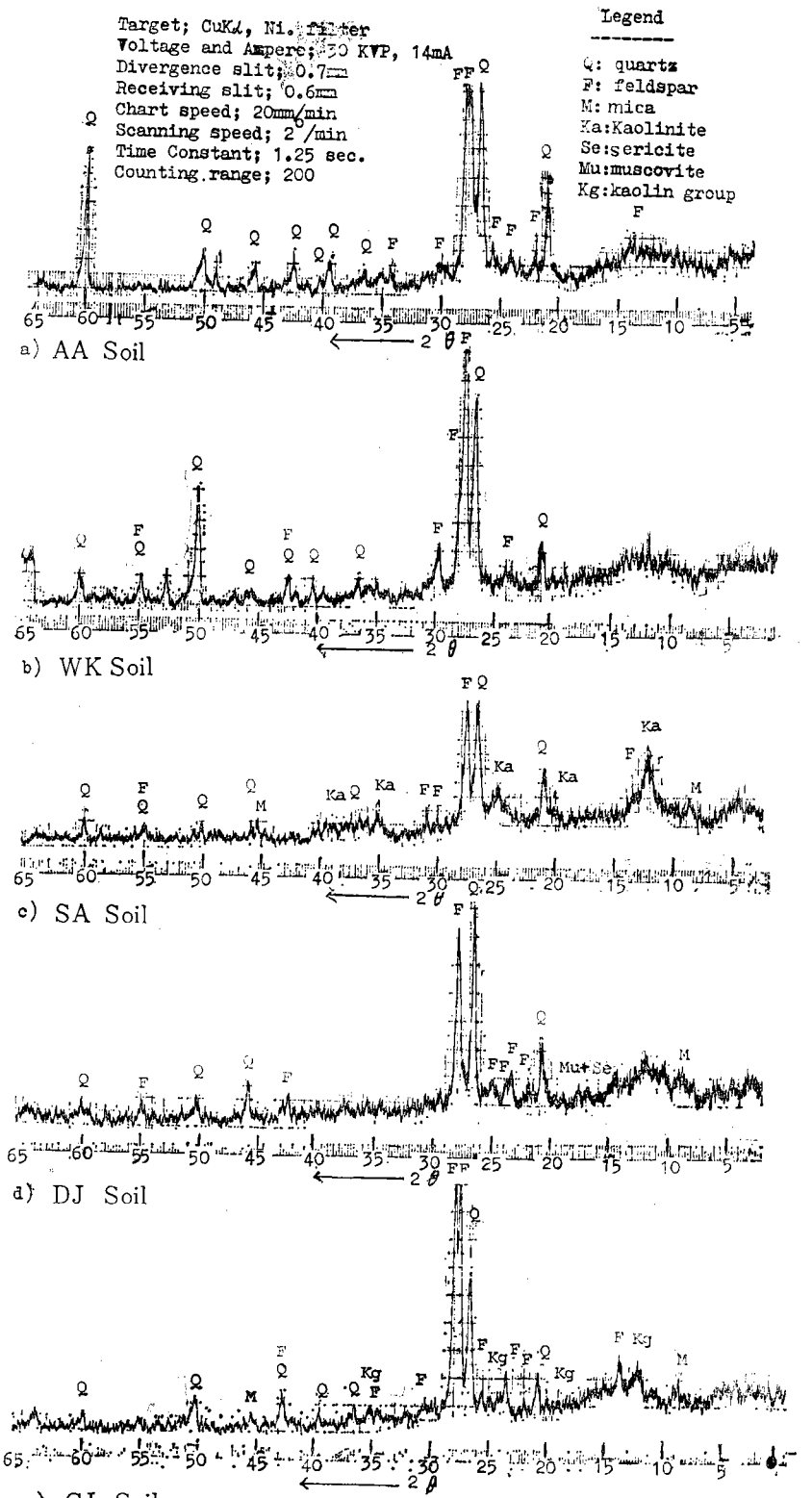


Fig.3. X-ray differaction curve of the weathered granite soils

各層을 適當히 다진 후 上下에서 壓縮하여 供試體를 製作하였다. 이를 KS F 2314에 準하여 變位速度를 供試體 높이의 1%/min으로 調節하여 一軸壓縮 試驗하였다.

(11) 直接剪斷 및 三軸壓縮 試驗

三軸壓縮 試驗用 供試體의 成形이 不可能한 AA 試料에 대하여는 直接剪斷試驗을 하였으며 그 以外의 試料는 三軸壓縮 試驗을 하였다.

直接 剪斷 試驗은 一軸壓縮 試驗에서와 같은 方法으로 다짐試驗에서 여러가지 含水比에 대하여 求한 密度에 相當하는 試料量을 달아 斷面積 31.66 cm^2 두께 2.54cm의 剪斷상자에 넣고 다짐 시험에서 求한 密度와 同一하도록 다진후 이를 變形制御 方法으로 試驗하였으며 剪斷速度는 1.27mm/min으로 하였다.

三軸壓縮試驗은 試料를 KS F 2312의 다짐試驗中 A—1方法으로 여러가지 含水比로 調節하여 다진후 이 試料를 추출해서 직경 4.8cm, 높이 9.6cm 規格으로 깎아 變形制御 方法으로 非壓密 非排水剪斷試驗(UU)을 하였다.

이때 壓力室 壓力은 1.5, 3, 4.5, 6kg/cm^2로 하였으며 壓縮變形 速度는 供試體높이의 1%/min으로 하였다.

(12) 破碎試驗

破碎試驗은 直徑 101.6mm, 높이 116.4mm의 몰드에 含水比를 여러가지로 變化시킨 試料를 三層으로 나누어 넣어 各層의 다짐 回數를 10, 25, 55, 110, 200, 400, 回로 變化시키면서 다지고 다짐過程에서 생기는 粒子破碎의 程度를 粒度分析試驗에 의하여 調査하였다.

또 花崗岩質 風化土와 河川砂의 破碎性을 比較 檢討하기 위하여 河川砂를 WK試料의 粒度와 同一하도록 調節하여 위와 같은 方法으로 破碎試驗을 하였다.

Ⅳ. 結果 및 考察

1. 花崗岩質 風化土의 基本的 性質

(1) 風化度

風化度의 測定方法으로서는 化學成分의 變化에 의하는 方法과 物理的 性質의 變化에 의하는 方法으로 대별할 수 있으며 化學成分의 變化에 의한 方法으로서는 Carroll[7] 및 三浦[37]가 提案한 바와같이 風化가 진전됨에 따른 SiO_2 Al_2O_3, Fe_2O_3등 化學成分의 變化를 測定하여 이를 數式으로 計算하는 方法이 있다. 또 物理的 風化度의 測定方法으로서는 間隙比[12] 또는 空隙率[49] 彈性波의 縱波速度[2], [36]等에 의하는 方法이 있으며 松尾[32]에 의하면 長石의 比重에 의하여 風化度를 判定할 수 있다고 하였다.

本 硏究에서는 5種類의 花崗岩質 風化土에 대하여 X-ray 廻折分析 試驗을 한 結果 Fig. 3과 같이 地形이 平坦한 곳에서 採取한 CJ. DJ 및SA試料는 風化가 상당히 進展되어 kaolinite, sericite 및 muscovite等의 粘土鑛物이 存在하고 있으며 地形의 傾斜가 심한 곳에서 採取한 AA 및 WK試料는 200번체 통과율이 9%이하로서 風化度가 낮았다.

또 Table—1에서 보는바와 같이 200番체 통과율이 比較的 많은 CJ,DJ 및 SA試料는 間隙比와 自然含水比가 크고 겉보기 比重 또는 長石比重은 작은 傾向을 나타내고 있다. 이와같은 現象은 風化가 進展됨에 따라 土粒子內의 K^+, Na^+, Ca, Mg等 構成鑛物이 溶脫되어[64], [66] 土粒子內의 空隙이 增大되므로 間隙比가 커지며 따라서 겉보기比重 特히 風化가 容易한 長石의 比重이 작아지는 것으로 생각된다.

(2) Consistency 特性

一般的으로 液性限界 및 塑性指數는 細粒土含有量에 比例하여 增加한다.[62] 本硏究에 使用된 試料에 대하여 KS F 2303 및 KS F 2304에 따라 consistency 試驗을 한 結果 WK, SA 및 DJ試料는 液性限界가 29.6~43.8%로서 比較的 큰 값을 나타내었으나 200番체 通過率이 6.5%이고 均等係數가 17.1%인 AA試料와 200番체 通過率이 11.19%로서 均等係數가 6.3인 CJ試料는 液性限界도 測定되지 않았다. 이는 花崗岩質 風化土의 consistency는 粒度 이외의 要素에도 影響을 받음을 의미하는 것으로 생각된다.

福田[12], 松尾[28]等의 硏究에 의하면 콘크리트 슬럼프 試驗方法에 의하여 測定한 流動限界는 粒度뿐만 아니라 鑛物組成 및 2次鑛物의 影響도 감안되어 나타난다고 하였으므로 이에 의하여 流動限界를 測定한 結果 KS F에 規定된 試驗方法으로 測定한 流動限界値보다 약간 작은값을 나타내었으나 KS F의 方法으로는 測定되지 않은 AA 및 CJ試料도 流動限界値를 求할 수 있었다. 여기서 SA試料와 같이 細粒土 含有量이 많을수록 流動限界가 큰 이유는 土粒子 사이의 水分의 影響은 물론이고 風化가 進展되어 細粒으로 되면 單位重量當 土粒子의 表面積도 커지므로 이들이 流動에 關與하기 때문인 것으로 생각된다.

한편 DJ 試料와 같이 有色鑛物 含有量이 많을수록 流動限界가 커지는 傾向을 보이고 있는데 이의 이유는 有色鑛物粒子는 板狀構造로서 粒度가 同一하다 하여도 水分을 吸着하는 表面積이 크고 粒子의 形으로 보아 土粒子 相互間의 移動에 대한 抵抗性이 크기 때문인 것으로 생각된다.

(3) 다짐 特性

最適含水比로 다짐回數를 10, 25, 55, 110, 200, 400회로 變化시키면서 다짐試驗을 한 結果 各 試料의 乾燥密度는 Fig. 4와 같이 다짐 回數가 增加함에 따라 增大되었고 特히 粗粒質인 AA 및 WK試料에서 乾燥密度는 큰값을 나타내었다.

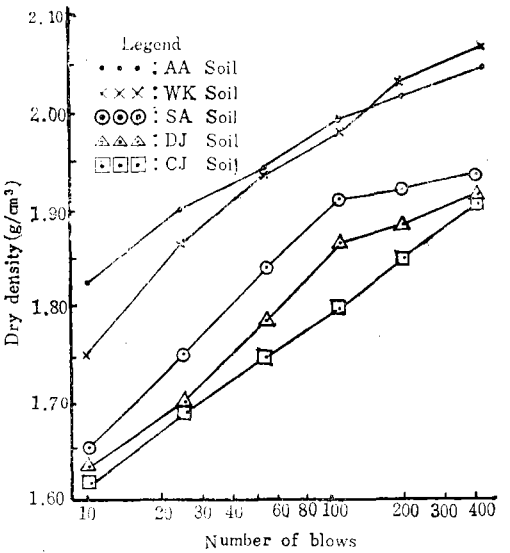


Fig. 4. Relationship between compaction energy and dry density.

흙을 다지면 10番체 殘留量과 binder의 역할을 하는 200番체 通過量이 適當히 混合된 粒度配合이 良好한 흙에서 乾燥密度는 最大로 된다고 하였으나[18] 本硏究에서는 粗粒質인 AA 및 WK試料는 다짐에 따른 土粒子의 破碎에 의하여 乾燥密度가 크게 나타나는 粒度에 接近하게되어 乾燥密度의 값이 큰것으로 생각된다.

또 다짐 에너지가 增加되면 最適含水比는 減少하고 最大 乾燥密度는 增大하나 다짐 회수 110회 이상에서는 最大 乾燥密度의 增加率이 比較的 완만하며 特히 200番체 通過率이 20%以上인 SA試料는 다짐회수 200回 以上에서는 密度가 거의 增大되지 않고 있다. 이는 다짐회수가 많아짐에 따라 細粒化 現象이 顯著하여 over compaction의 領域에 接近함을 의미하는 것으로[35]-[41] 어느 限界以上의 다짐 에너지를 增加시키면 密度는 오히려 低下될 것으로 생각된다.

Fig. 5는 含水比의 變化에 따른 修正 CBR(最大乾燥密度의 95%)의 變化를 나타낸 것으로 修正 CBR은 最適含水比보다 약간 乾燥側에서 가장 큰 값을 나타내었고 이는 다짐密度가 큰 試料일 수록 큰 값을 나타내며 이때의 飽和度는 60~80%의 範圍에 屬하였다.[8]

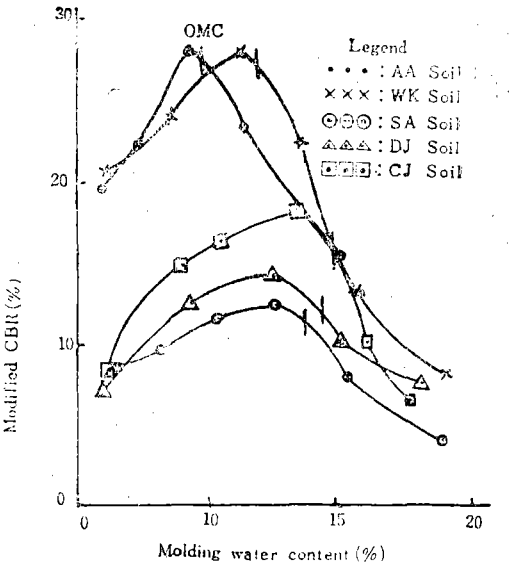


Fig. 5. Relationship between molding water content and modified CBR.

(4) 强度 特性

Fig.6은 含水比의 變化에 따른 剪斷抵抗角 및 粘着力과의 關係를 나타낸 것으로 剪斷抵抗角은 含水比의 增加에 따라 減少되는 傾向을 나타내었으며 粘着力은 最適含水比 부근에서 가장 컷고 이로부터 含水比가 增減됨에 따라 減少되었다.

이와같은 現象은 谷本[6] 久保田[10] 河上[14] 等의 硏究에서도 같은 結果를 나타내고 있다. 또 長石의 含有量이 많은 SA試料의 粘着力은 最適含水比보다 濕潤側에서는 含水比가 增加됨에 따라 급격히 減少되었고 有色鑛物 含有量이 많은 DJ試料는 그 減少率이 완만하였다. 이는 長石은 水蝕性이 크기 때문에 일단 吸水되면 强度가 급격히 弱化됨에 반하여 有色鑛物은 前述한 바와 같이 板狀構造이고 風化가 進行됨에 따라 劈開面이 發生되어 이에 吸着된 물은 吸着水로 되며 潤滑水로는 되지 않으므로[24] 含水比가 增加되어도 强度의 減少率이 작은 것으로 생각된다.

Fig. 7은 含水比의 變化에 따른 一軸壓縮强度를

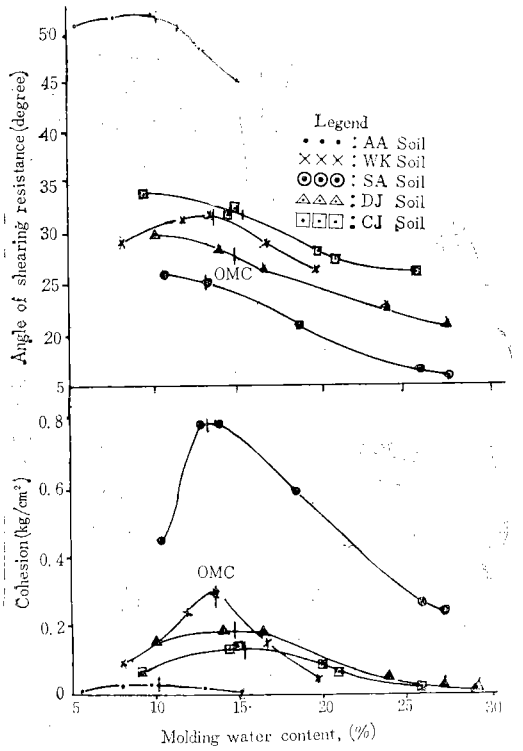


Fig. 6. Correlation of molding water content, angle of shearing resistance and cohesion.

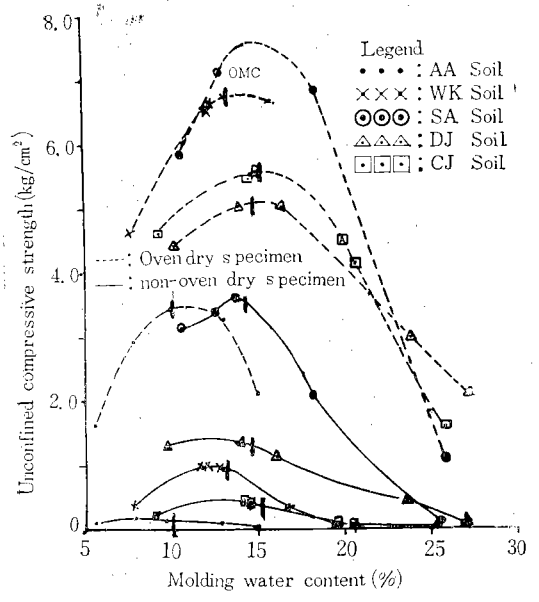


Fig. 7. Relationship betteen molding water content and unconfined compressive strength of oven dry and non-oven dry specimen.

나타낸 것으로 最適含水比보다 약간 乾燥側에서 一軸壓縮强度는 가장 큰 값을 나타내며 含水比가 最適含水比보다 많아짐에 따라 一軸壓縮 强度는 감소되는 경향을 나타내었다. 이는 다짐含水比의 變化에 따른 土粒子의 構造와 配列[38)60)]에 基因되는 것으로 흙의 强度는 粘着力과 剪斷抵抗角이 複合되어 나타나나 Coulomb의 規準에 依하여 두개의 强度定數 卽 粘着力과 剪斷抵抗角으로 分離시켜 생각할 수 있다.

一軸壓縮强度가 最適含水比보다 乾燥側에서 最大로 되는 이유는 Fig. 6에서와 같이 粘着力은 最適含水比에서 最大로 되나 剪斷抵抗角은 含水比의 增加에 따라 減少되기 때문인것으로 생각된다.

한편 含水比의 變化가 흙의 强度에 미치는 영향을 檢討하기 위하여 위와같은 方法으로 製作한 一軸壓縮試驗用 供試體에 대하여 48時間 爐乾燥시킨후 一軸壓縮 試驗을 한 結果 粗粒土의 含有量이 많을수록 爐乾燥後의 一軸壓縮强度 增加率이 컸다. 또 最適含水比 부근에서는 含水比의 增減에 따른 一軸壓縮强度의 低下率이 완만하였고 一般的으로 最大 一軸壓縮强度를 나타내는 含水比는 最適含水比보다 약간 濕潤側이었다. 이는 最適含水比보다 약간 큰 含水比로 다진흙은 土粒子의 破碎가 가장크므로 細粒子가 많아져서 空隙이 작아지고 比表面積이 커지므로 물이 증발하면 土粒子 表面사이의 接着力이 커지기 때문인 것으로 생각된다.

以上의 結果를 綜合하면 花崗岩質 風化土의 大部分은 土性面에서 砂質土에 屬하고 따라서 非塑性을 나타내므로 安定性이 높을 것으로 豫想되나 實際로는 不安定하여 特殊土로 取扱되는 이유는 花崗岩質 風化土 特有의 鑛物組成 卽 長石의 風化度와 有色鑛物의 含有量, 그리고 이들의 破碎性이 工學的 性質에 큰 影響을 미치기 때문인 것으로 생각된다.

2. 土粒子 破碎의 表現法

土粒子의 形狀은 外形으로부터 表面狀態에 이르기까지 連續的으로 變化하는 量을 外形, 形狀, 角의 程度, 表面의 粗滑等 4가지로 區分하여 表現하는 것이 適當하다.[34)] 花崗岩質 風化 殘積土는 風化가 계속 進行中에 있어 化學的으로 安定한 石英과 化學的 變質이 容易한 長石粒子間의 結合力이 弱化되어[4)] 크고 작은 空隙이 發生될 뿐만 아니라 內部構造가 상당히 複雜하고 또 粒子가 破碎되기 쉬운 要因을 많이 가지고 있기 때문에 그 力學的 性質이

複雜하며 따라서 破碎前後의 工學的 性質을 완벽하게 解明하기는 어려울 것으로 생각된다.

여기서 破碎性이란 土粒子의 破碎에 기인되는 物理的 化學的 諸 性質의 變化를 總稱하여 使用하는 用語로서, 土粒子의 破碎性의 대표적 表現方法은 破碎形狀을 確率統計的 觀點에서 解析하는 方法[55]과 破碎 前後의 粒度變化를 基礎로 하는方法[56]等을 들 수 있겠으며 Leslie [23]는 最少 使用체의 눈금(0.074mm) 이하의 細粒分의 增加量 으로서 破碎量을 定義한 바 있고, Marsal[27]과 森[36]은 各 체에서 破碎試驗後의 殘留率과 試驗前의 殘留率의 差를 求하여 負符號의 差의 總和로서 定義하였다. 또 吉越[60]은 소정의 粒經 以上의 領域에서 破碎前後의 粒度 曲線間의 範圍에 屬하는 部分 의 面積을 破碎量의 尺度로 생각하였다.

本 硏究에서는 위의 事項中 가장 合理的인 表現方法으로 생각되는 다짐에 의한 土粒子 比表面積의 變化를 基礎로 하여 花崗岩質 風化土의 破碎性을 檢討하고자 한다. 卽 土粒子의 破碎는 粒子數의 增加에 따라 表面積이 增大되며 破碎前後의 表面積의 變化率은 破碎의 程度를 나타내는 尺度가 될 수 있다. 여기서 初期土粒子의 比表面積은 大小 土粒子를 球形으로 假定하여 다음 理論에 의하여 誘導한 式으로 算出한다.

土粒子의 單位重量을 γ_s(g/cm³)라 하면 1g 當의 實體積은 $\frac{1}{\gamma_s}$(cm³)이고 1個의 實體積은 $\pi d^3/6$(cm³)이다. 또 1g當의 土粒子의 數는 $6/(\pi d^3\cdot\gamma_s)$가 된다. 이때 土粒子 1個의 表面積은 πd^2(cm²)이므로 흙 1g當의 粒子 全表面積 Sw(cm²)는 다음 式으로 求할 수 있다.

$$Sw=\pi d^2\times\frac{6}{\pi d^3\gamma_s}=\frac{6}{\gamma_s}\cdot\frac{1}{d}\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

그러나 實際로 흙은 大小 混合粒經으로 構成되어 있으며 이의 平均經(假想的인 대표 平均 球形粒子)을 dw라 하면 全表面積은 다음과 같다.

$$Sw=\frac{6}{\gamma_s}\cdot\frac{1}{dw}=\frac{6}{\gamma_s}\cdot U\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

여기서 dw는 Zunker의 有效直經이며 이의 逆數 $\frac{1}{dw}=U$를 比表面(cm²/g)이라 한다.

한편 福本[55]은 단위 重量에 대한 土粒子의 全表面積을

"① 原材料의 粒度는 對數正規型으로 試驗後에도 變化하지 않으며

② 土粒子의 比重과 形狀은 粒經의 大小에 따라서도 變化하지 않고

③ 粒度分析 試驗에 使用된 체 눈금의 比는 ½이다."

라는 假定하에 對數正規分布의 幾何平均經과 幾何標準偏差를 使用한 다음式에 의하여 算出할 수 있다고 하였다.

$$Sw=10\,\phi_s\,Ds^2/Gs\,\phi_v\,D_v^2\cdots\cdots\cdots(3)$$

여기서 ϕ_s,ϕ_v : 面積形狀 係數와 體積形狀係數.

Ds, D_v : 個數分布에 따른 面積 및 體積平均經(mm)

또 試驗前後의 全表面積(Sw,Sw')을 重量分布로 나타내어 試驗前後의 差를 求하고 이에 幾何平均經(Dg,Dg') 및 幾何標準偏差($\sigma g,\sigma g'$)를 代入하여 整理하면 初期粒子에 대한 破碎試驗後의 比表面積比는 다음과 같은 指數公式을 近似的으로 얻을수 있다.

$$(Sw'/Sw)\fallingdotseq(\sqrt[3]{2})^{SI}\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

여기서 $SI\fallingdotseq2(P_2'-P_2)-(P_1'-P_1)(P_1'+P_1-2)$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

Sw, Sw' : 破碎前後의 比表面積(cm²/g)

P_1, P_1' : 破碎前後의 加積通過率의 總和의 $\frac{1}{100}$

P_2, P_2' : 破碎前後의 加積通過率의 總和에서 當初의 各체 눈의 加積通過率을 減한 값의 總和의 $\frac{1}{100}$

SI: 粒子破碎量

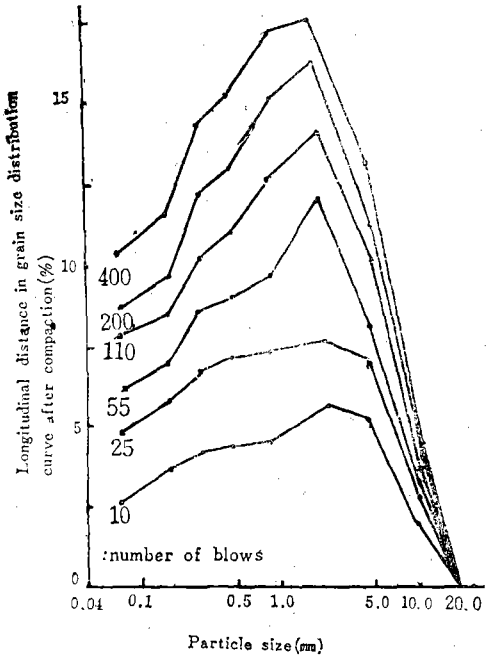
3. 試料의 粒度 및 다짐에너지와 破碎性

Fig. 8은 粒度와 破碎性사이에 潛在하는 規則性을 밝히기 爲하여 5種類의 花崗岩質 風化土와 河川砂에 對하여 最適含水比 狀態에서 다짐에너지를 變化시키면서 다졌을때 粒經加積曲線間의 縱距의 差를 粒經에 對하여 累積하여 그린것이다.

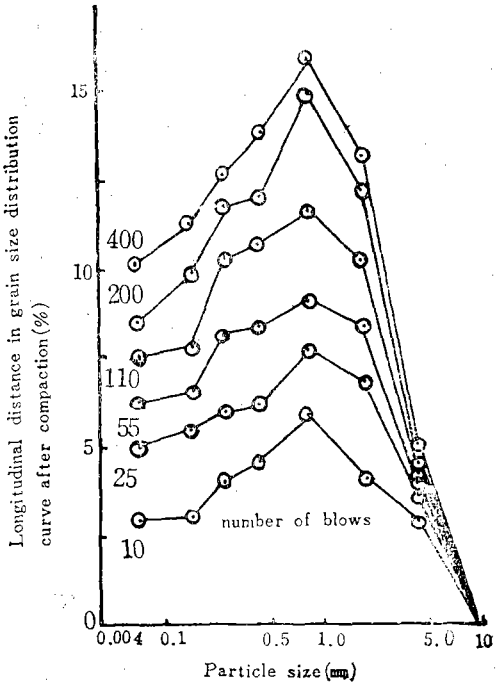
여기서 曲線은 試料에따라 예민하거나 또는 완만한 現象을 보이고 있으며 peak의 위치와 크기도 試料의 種類에 따라 다르게 나타나고 있다. 一般的으로 다짐에 의한 土粒子의 破碎는 AA 및 WK試料와 같은 粗粒質이거나, CJ試料와 같이 均等係數가 낮아 粒度配合이 不良한 試料에서 크게 나타나는 傾向을 보이고 있다. 따라서 이와 같은 試料는 다짐 후의 粒度曲線의 差가 크게 나타나서 peak가 큰 傾向을 보이고 있다.

또 最大縱距는 다짐回數의 增加에 따라 增大되므로 細粒化의 程度를 나타내는 尺度로 생각할 수 있다.

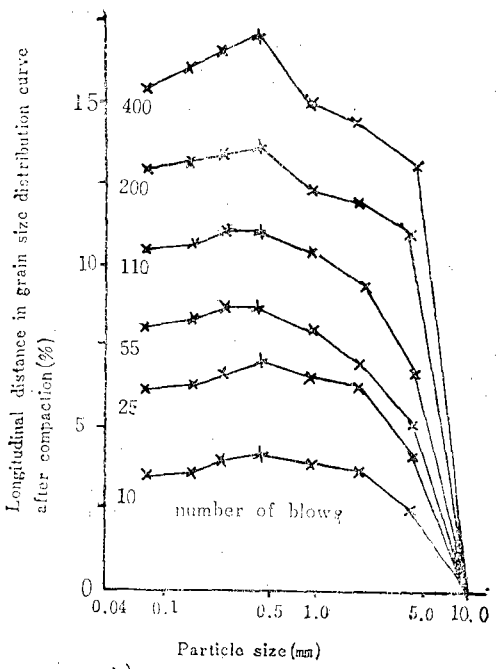
한편 曲線의 左端의 縱距 卽 200番체 通過率의 增加量은 破碎의 程度를 나타내는 尺度가 될 수도 있겠으나 試料의 粒度 및 鑛物組成에 따라 細粒化의 樣相이 다르므로 모든 試料의 破碎性의 基準은



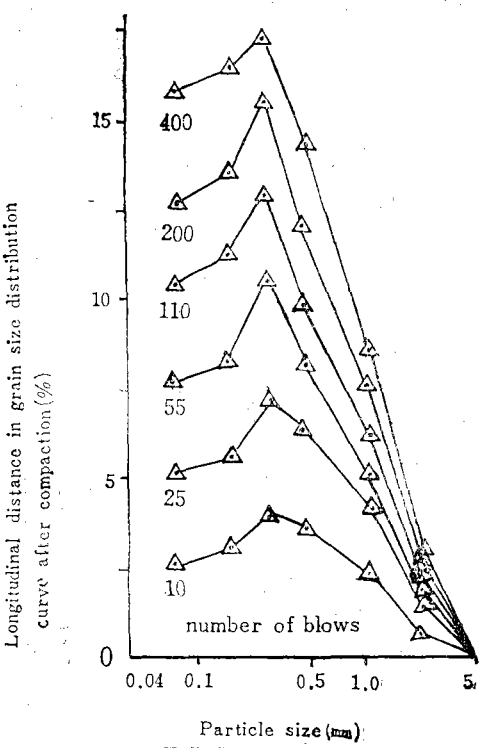
a) AA Soil



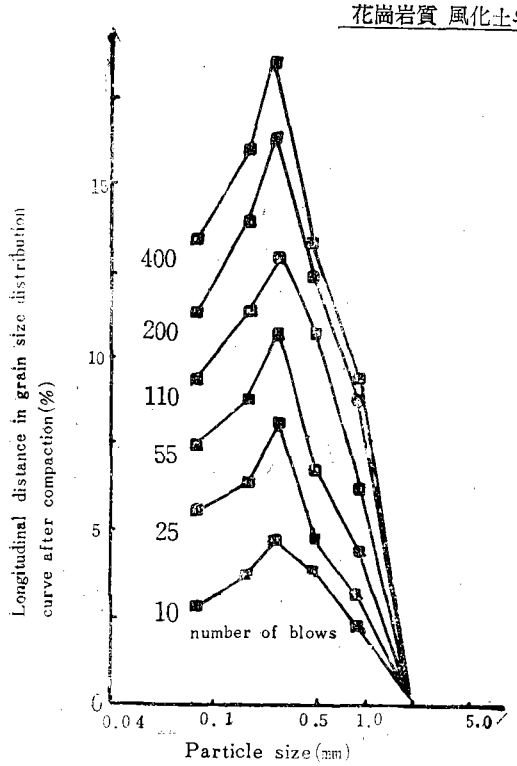
c) SA Soil



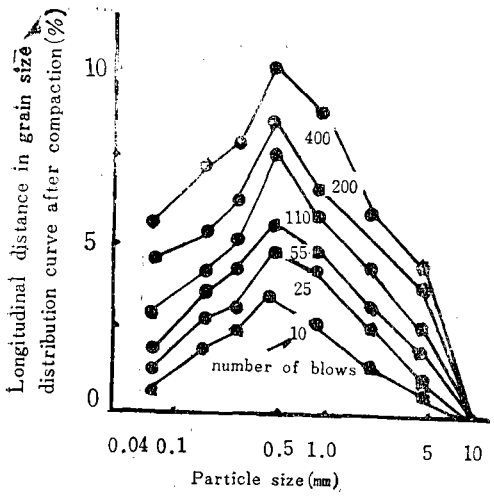
b) WK Soil



d) DJ Soil



e) CJ Soil



f) River sand

Fig. 8. Variation of longitudinal distance in grain size distribution curve and particle size in various soils after compaction

될 수 없을 것으로 생각된다.

Fig. 9.는 다짐에너지와 土粒子의 比表面積比와의 關係를 나타낸 것으로 다짐회수 10~110회까지의 보통 다짐에너지에서 比表面積比의 增加率이 컸고 그 이상의 다짐 에너지에서는 이의 增加率이 낮았다. 단 AA 및 WK 等 粗粒質의 試料는 다짐에너지가 增加되어도 比表面積比의 增加率은 SA, DJ, CJ等 細粒質試料에 比하여 그 低下率이 완만하였다.

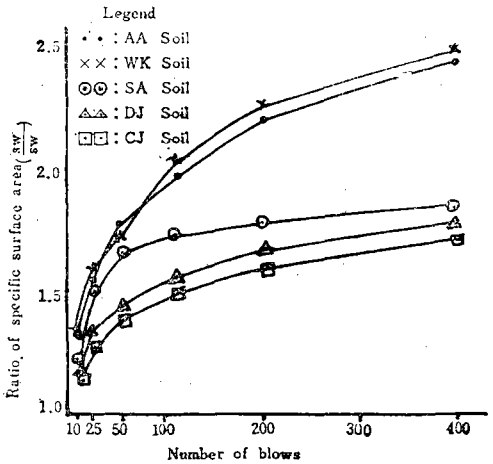


Fig. 9. Relationship between compaction energy and ratio of specific surface area.

이는 風化가 進展된 長石이나 有色鑛物粒子는 작은 다짐에너지에서도 破碎性이 크기 때문인 것으로[67] 생각되며 細粒化 現象이 어느 限界에 이르면 다짐 에너지를 增加하여도 土粒子의 破碎는 거의 일어나지 않음을 의미하는 것으로 생각된다.

Fig. 10.은 다짐에너지의 增加에 따른 다짐前과 後의 50%徑 및 比表面積의 變化를 나타낸 것으로 다짐회수의 增加에 따른 比表面積과 50%徑은 松尾[29]가 指摘한 바와 같이 一定한 方向性을 가지고 增減하는 傾向을 나타내고 있다. 即 粗粒土일수록 50%徑의 減少率은 크게 나타났으며 細粒土에서는 적게 나타났다.

粗粒土일수록 破碎率이 큰 原因은 몰드내의 土粒子의 總數가 작아서 土粒子間의 接觸面積이 작아지므로 各粒子間의 다짐에너지의 負擔이 크기 때문인 것으로 생각되며 또 花崗岩質 風化土의 경우는 粒子의 形狀이나 粒子內의 空隙 또는 鑛物組成 等의 諸 性質이 粒子의 大小에 따라 상당히 다르므로[29] 粒子 自體의 强度도 破碎에 影響을 미치기 때문인 것으로 생각한다. 한편 河川砂의 경우는 50%徑의 減少가 완만하므로 破碎性이 작은 흙임을 알 수 있다

Fig. 11은 最適含水比로 다졌을 때의 다짐에너지의 變化에 따른 均等係數의 變化를 나타낸 것으

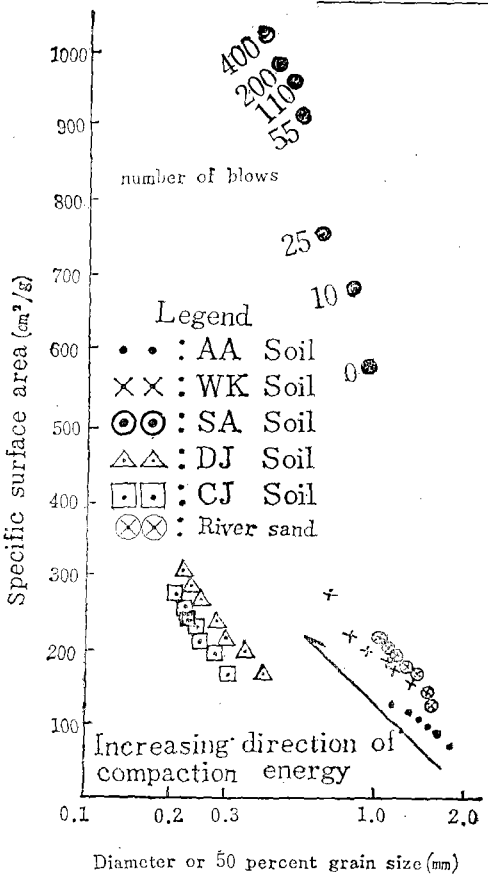


Fig. 10. Relationship between diameter of fifty percent grain size and specific surface area by various compaction energy

로 다짐에너지가 增加됨에 따라 均等係數는 增加되었으며 그 增加率은 다짐에너지가 커짐에 따라 減少되었다.

이상과 같이 다짐에너지의 增加에 따른 粒子 破碎의 程度를 三角座標에 나타내면 Fig 12와 같다.

卽 다짐에 의한 粗粒子의 減少와 細粒子의 增加比率이 顯著한데 反하여 中粒子의 變化는 크지 않다. 이는 中粒子가 破碎되어 細粒子로 移動하는 量을 粗粒子가 破碎되어 中粒子에 補充되기 때문에 結果的으로 中粒子의 變化가 적은것으로 생각된다.

Fig. 13은 WK試料에 對한 0.84~2.0mm 범위의 均一粒徑 및 이와 同一한 粒度의 河川砂에 대하여 最適含水比에서 다짐前後의 粒度曲線의 變化를 나타낸 것으로 花崗岩質 風化土인 Wk試料는 다짐後의 粒度曲線이 Talbot曲線과 비슷한 形을 이루고 있으나 反對로 河川砂의 破碎는 거의 일어나지 않고 있다.

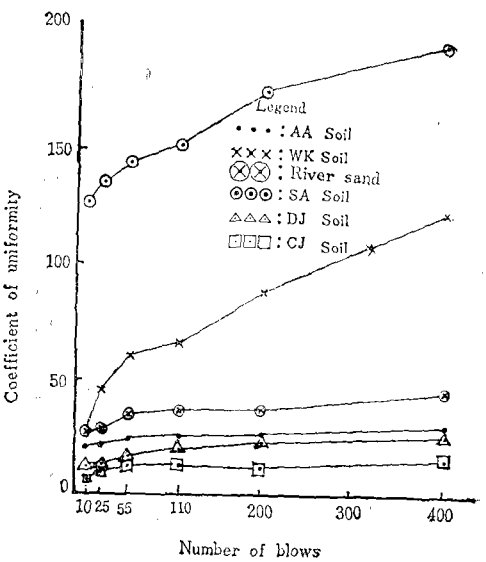


Fig. 11. Relationship between compaction energy and coefficient of uniformity after compaction

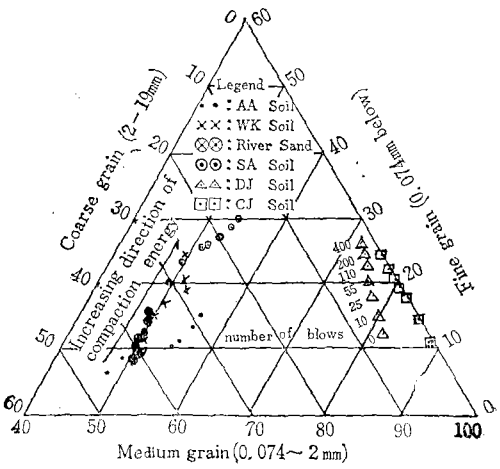


Fig 12. Variation of grain size distribution by various compaction energy.

均一粒徑의 다짐에 의한 破碎性은 破碎率과 移動率로서 簡便하게 表現할 수 있다[30].

$$\left.\begin{aligned} \text{卽 破碎率 } \alpha &= \frac{A-B}{A}\times 100(\%) \\ \text{移動率} \beta &= \frac{C}{A}\times 100(\%) \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (6)$$

여기서 A : 破碎前의 0.84~2mm 粒子重量(g)

B : 破碎後의 〃

C : 破碎後의 0.84~0.42mm 粒子重量(g)

위 式에서 破碎率은 初期粒子의 다짐에 의한 破

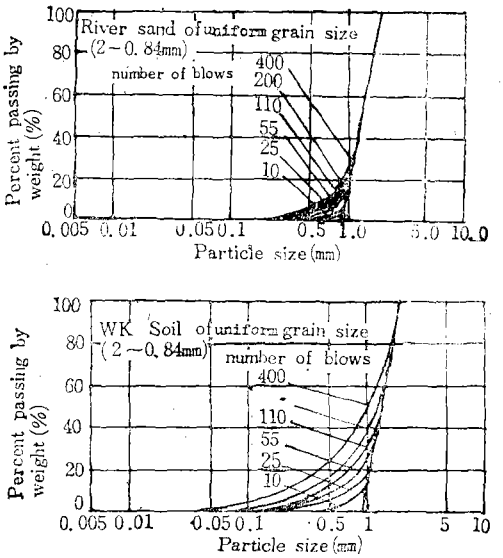


Fig 13. Variation of uniform grain size distrbution curve by various compaction energy

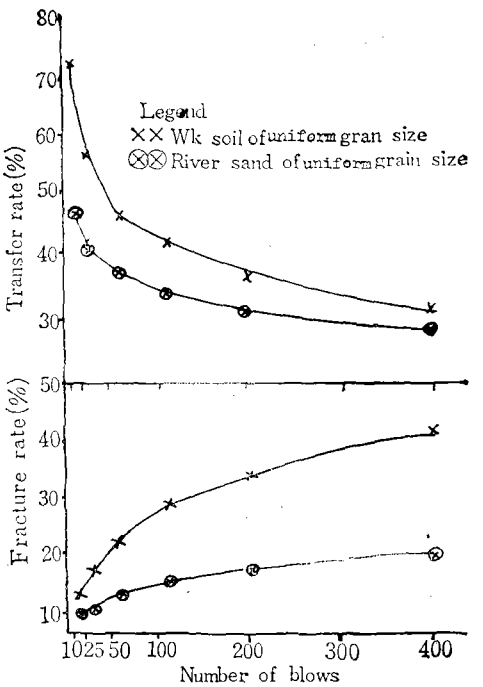


Fig. 14. Correlation of compaction energy, fracture rate, and transfer rate

碎의 量的 表現이며 移動率은 다진後의 大小 粒子의 分布程度를 나타내는 것으로 移動率이 크면 破碎粒子의 대부분이 破碎前의 바로 밑 粒徑範圍로 많이 남아 있고 細粒子로는 거의 破碎되지 않음을 意味하는 것이다.

Fig. 14는 위의 試料에 대하여 다짐에너지의 增加에 따른 破碎率과 移動率의 變化를 나타낸 것으로 河川砂에 比하여 花崗岩質 風化土는 破碎率이나 移動率이 큼을 알 수 있다. 그리고 다짐回數 110회까지는 破碎性이 顯著하나 그 이상에서는 破碎性이 완만하여 粒子破碎는 普通의 다짐에너지에서 대부분 이루어지고 있음을 알수 있다.

一般的으로 다짐試驗에서 가해지는 總에너지는 密度를 增加시키는데 消耗하는 密度 增加에너지와 土粒子를 破碎시키는데 消耗하는 破碎에너지 및 기타에너지로 區分할수 있다.

Fig. 15는 最適含水比에서 다짐에너지의 變化에 따른 乾燥密度와 破碎率 및 移動率과의 關係를 나타낸 것으로 花崗岩質 風化土는 破碎에너지가 크므로 河川砂에 比하여 破碎率 및 移動率이 顯著하게 크다.

또 花崗岩質 風化土中 風化度가 높은 長石이나 有色鑛物은 前述한 바와같이 작은 다짐에너지에서 粒子破碎의 대부분이 이루어짐으로 Fig. 16에서와 같이

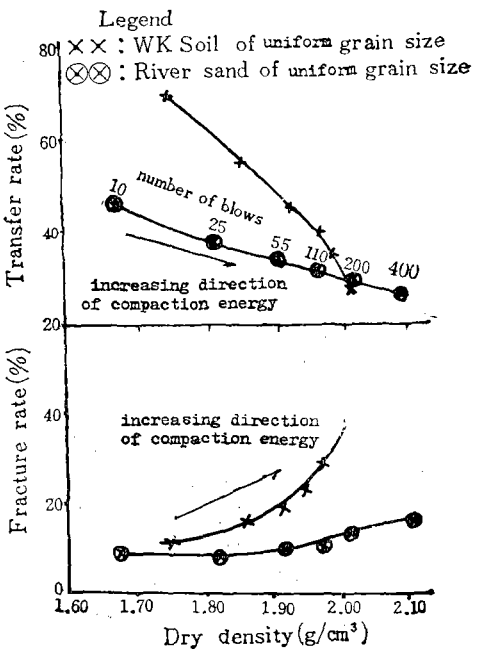


Fig. 15. Correlation of dry density, fracture rate, and transfer rate

작은 다짐에너지에서는 河川砂에 比하여 乾燥密度의 增加率이 크나 어느限界 이상의 다짐에너지에서는 乾燥密度의 增加率이 완만하여 河川砂보다 오히려 작게 나타나고 있다.

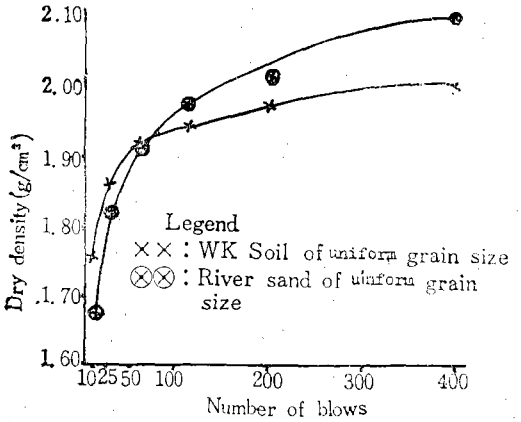
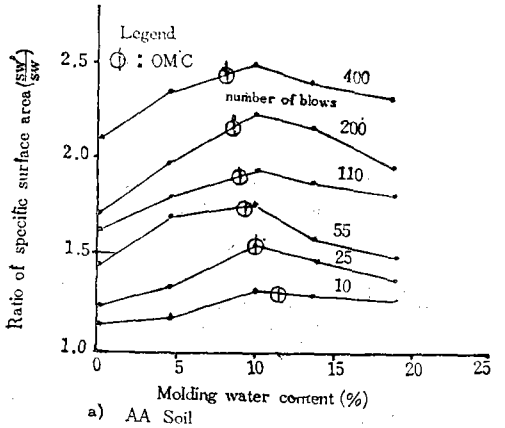


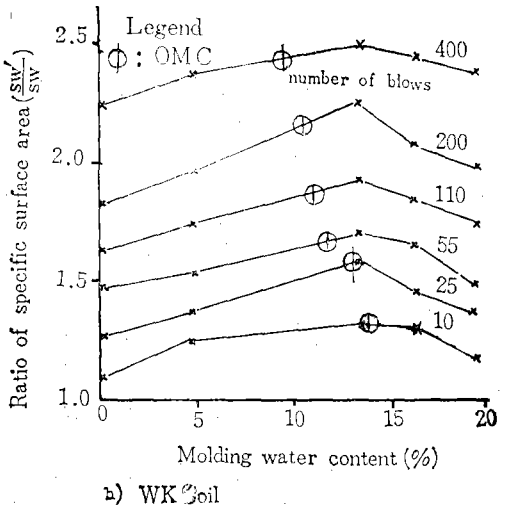
Fig. 16. Relationship between compaction energy and dry density

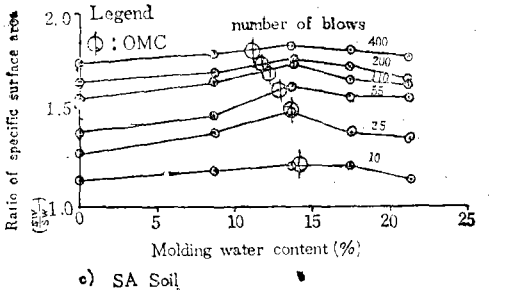
4. 다짐含水比와 破碎性

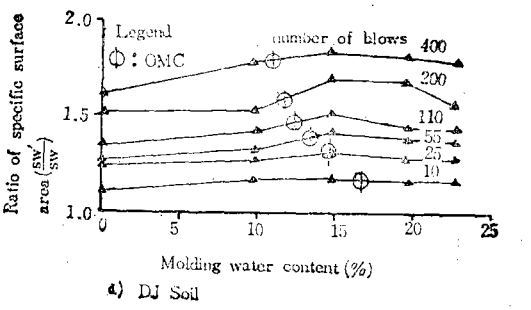
Fig. 17은 물이 花崗岩質 風化土의 破碎性에 미치는 影響을 調査하기 爲하여 含水比의 變化에 따른 土粒子 比表面積比의 變化를 나타낸 것이다.

이와같은 曲線을 一般的으로 破碎曲線이라 하며 破碎曲線의 形狀은 다짐曲線과 같이 試料의 粒度와 鑛物組成에 따라 다르다. 또 最大破碎를 나타내는 含水比는 最適含水比보다 약간 濕潤側이었고 다짐에너지의 增加에 따라 점차 乾燥側으로 移動하는 傾向을 보이고 있다. 最大破碎를 나타내는 含水比가 最適含水比보다 濕潤側에 있는 이유는 土粒子의 破碎는 吸水에 의한 土粒子 自體의 强度 低下에 의









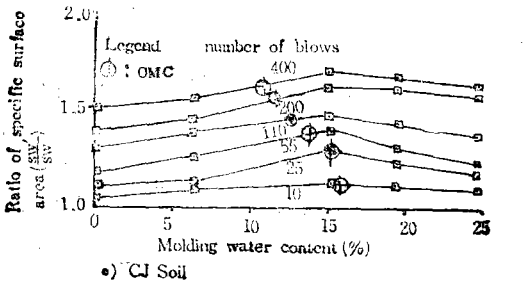


Fig. 17. Relationship between molding water content and ratio of specific surface area by various compaction energy

한 原因과 다짐때의 衝擊 및 磨耗에 의한 原因으로 區分하여 생각할 수 있다.

花崗岩質 風化土는 風化途中에 있는 흙이므로 물을 흡수하면 土粒子 自體의 强度가 多少弱化되어 다짐때 粒子破碎에 영향을 약간 미칠 것으로 생각되나 破碎의 主原因은 最適含水比보다 약간 濕潤側의 含水比로 다졌을때 흙의 構造가 다짐에너지의 傳達이 가장 良好한 狀態로 되기 때문인 것으로 생각된다.

또 이보다 含水比가 더 增大되면 破碎率이 減少되는데 이는 土粒子사이에 存在하는 물이 다짐에 따른 衝擊에너지를 흡수 할 뿐만 아니라 이때 間隙水壓도 作用하여 土粒子間의 衝擊 에너지의 傳達效果를 減少시킴은 勿論이고 물이 土粒子間의 潤滑作用을 하여 磨耗破碎도 減少시키기 때문인 것으로 생각된다.

Fig 18은 WK試料에 대하여 空氣乾燥 및 最適含水比 狀態에서의 다짐에너지의 增加에 따른 比表面積比의 變化를 나타낸것으로 물이 粒子 破碎에 미치는 影響은 다짐에너지의 다소에 관계없이 거의 一定하였다.

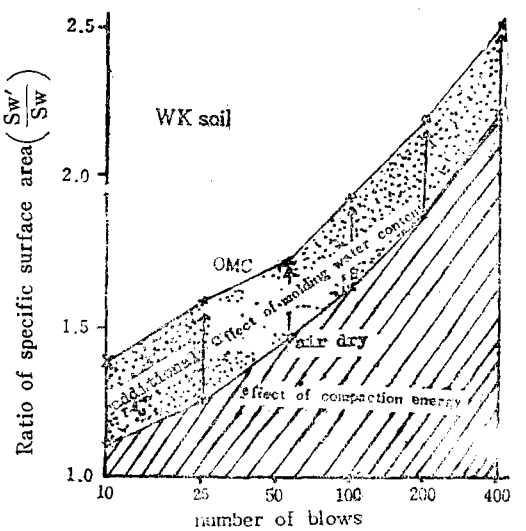


Fig. 18. Relationship between Compaction energy and ratio of specific surafce area in air dry and OMC condition

table. 3은 空氣乾燥 및 最適含水比로 調整하여 110회 다졌을 때의 試料別 比表面積比의 變化를 나타낸것으로 粗粒土일수록 물의 添加로 因한 破碎效果가 細粒土보다 比較的 크게나타나는 傾向을 보이고 있다.

Table-3. Ratio of specific surface area in OMC and air dry condition(110 blows)

Soil type / Molding water content	AA	WK	SA	DJ	CJ
Air dry condition	1.632	1.618	1.557	1.325	1.310
OMC condition	1.922	1.919	1.729	1.531	1.491

5. 土粒子破碎에 따른 密度增加量의 推定

松尾[31]는 崗岩質 風化土를 다짐때의 乾燥密度(γ_d)는 다음 3인자에 의하여 決定된다고 하였다.

$$\gamma_d=\gamma_{d\min}+\gamma_{dr}+\gamma_{df}$$

여기서 $\gamma_{d\min}$: 最少密度

γ_{dr} : 土粒子의 再配烈에 의한 密度增加量

γ_{df} : 土粒子破碎에 의한 密度增加量

花崗岩質 風化土를 다짐때 粒子破碎로 因한 密度增加量을 推定하기 위하여는 破碎性이 낮은 河川砂의 다짐特性과의 關係를 物理的 觀點에서 比較 檢討함으로써 可能할 것으로 생각된다. 卽 花崗岩質 風化土의 無破碎狀態의 最小密度를 $\gamma_{d\min}$, 河川砂의 最小密度를 $\gamma_{ds\min}$, 다진後의 花崗岩質 風化土의 乾燥密度를 γ_d라 하고 河川砂의 乾燥密度를 γ_{ds}라 하면 花崗岩質 風化土를 다진後의 無破碎狀態의 乾燥密度 γ_d'는 $\left(\frac{\gamma_{d\min}}{\gamma_{ds\min}}\right)\gamma_{ds}$로 나타낼 수 있다. 따라서 粒子 破碎에 따른 密度增加量 $\gamma_{df}=\gamma_d-\gamma_d'$가 된다.

但 $\frac{\gamma_{d\min}}{\gamma_{ds\min}}$는 花崗岩質 風化土와 破碎性이 낮은 河川砂와 材質의 差異를 補正하여 比較한 材質補正値이다.

위와 같은 方法에 따라 WK試料에 대하여 다짐에너지를 變化시켰을 때의 密度增加量(γ_{df})을 計算하면 表 4와 같다.

Fig. 19는 table 4에서 土粒子의 破碎量(SI)과 이에 따른 密度 增加量(γ_{df})과의 關係를 나타낸것으로 破碎量이 增加됨에 따라 密度增加量은 曲線關係를 이루며 增加되고 있다. 여기서 다짐回數를 消去하여[31] 密度增加量과 粒子破碎量과의 關係式으로 나타낼 수 있다.

卽 Fig. 20은 γ_{df}의 逆數 $\frac{1}{\gamma_{df}}$를 縱軸으로 하고 SI의 逆數 $\frac{1}{SI}$를 橫軸으로 나타낸 것으로 $\gamma_{df}=\frac{4.12(SI)}{2.14+(SI)}$의 直線關係式이 성립되었으며 이때의 相關係數 r=0.994의 높은 相關性이 認定되었다.

Table 4. Estimate of increasing dry density according to particle breakage after compaction

Soil type	Number of blows	Molding water content (%)	Dry density (g/cm^3)	SW′/SW	SI	γ_{ds} (g/cm^3)	$\frac{\gamma_{dmin}}{\gamma_{dsmin}}$	γ_{d}' (g/cm^3)	γ_{df} (g/cm^3)
WK	10	13.2	1.746	1.326	1.221	1.865	0.89	1.659	0.087
	25	13.2	1.854	1.583	1.989	1.955	0.89	1.740	0.114
	55	13.2	1.903	1.702	2.330	1.996	0.89	1.776	0.127
	110	13.2	1.957	1.919	2.821	2.043	0.89	1.818	0.139
	200	13.2	1.983	2.252	3.231	2.062	0.89	1.835	0.148
	400	13.2	2.022	2.495	4.291	2.101	0.89	1.870	0.152

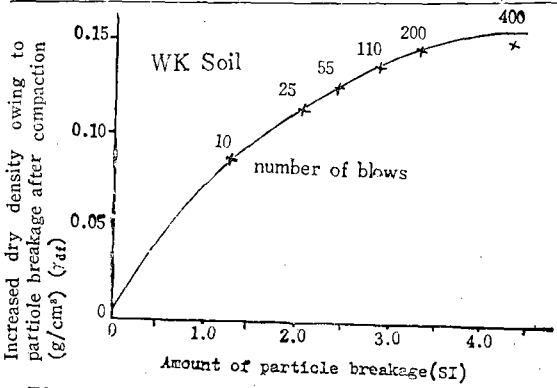


Fig. 19. Relationship between amount of particle breakage and increasing dry-density owing to particle breakage after compaction

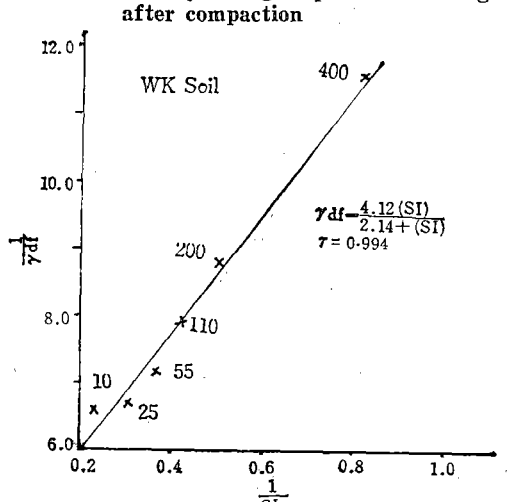


Fig 20. Relationship between $\frac{1}{SI}$ and $\frac{1}{\gamma_{df}}$

이 式을 一般化하여 $\gamma_{df}=\frac{a(SI)}{b+(SI)}$의 關係式으로 表現할 수 있겠으며 여기서 a 및 b는 土質에 따라 決定되는 係數이다.

이상의 結果에 의하면 다짐에 의한 土粒子의 破碎狀況은 粒子 自身의 風化度와 鑛物組成, 含水比 및 다짐에너지에 密接한 關係를 나타내고 있는 것으로 試驗室에서의 動的인 다짐에 의한 破碎性이 花崗岩質 風化土는 河川砂에 比하여 顯著히 큼을 考慮할 때 이를 現地工事에 利用할 경우 普通흙에 比하여 破碎性이 클것으로 判斷되므로 다짐에 의하여 細粒化된 後의 흙 構造物의 長期的인 安定性이 考慮된 設計 및 施工이 要望된다.

6. 土粒子破碎에 따른 透水性의 低下

Fig. 21은 WK試料와 이와 同一粒度로 調製한 河川砂에 대하여 含水比와 다짐에너지의 變化에 따른 透水係數의 變化를 나타낸 것으로 透水係數는 含水比와 다짐에너지의 影響을 크게 받고 있다. 즉 最適含水比의 乾燥側에서부터 透水係數가 低下되기 시작하여 最適含水比의 약간 濕潤側에서 최소로 되었고 그후부터 透水係數는 다시 增大하였다.

이의 原因은 最適含水比보다 다짐含水比가 적을

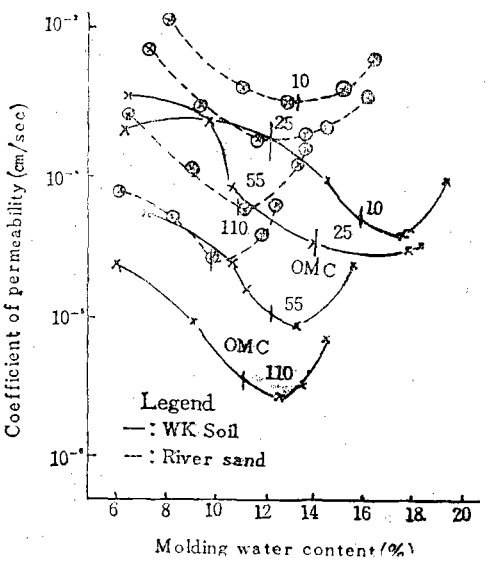


Fig. 21. Relationship between molding water content and coefficient of permeability by various compaction energy

때에는 다져진 흙의 粒子配列이 명어리로 뭉친 團粒構造이나 含水比가 最適含水比보다 增大됨에 따라 粒子가 單粒構造로 變化되어 粒子配列이 均一하게 되므로[8)18)21)44)] 粒子사이의 空隙이 작아지기 때문인 것으로 생각된다. 또 花崗岩質 風化土는 粒子破碎가 顯著하여 破碎性이 比較的 낮은 同一粒度에서의 河川砂에 비하여 透水係數가 상당히 작다는 것이 明白하게 나타나고 있다.

Fig. 22는 最適含水比로 다졌을 때의 比表面積과 透水係數와의 關係를 나타낸 것으로 다짐回數의 增加에 따라 土粒子가 破碎되어 比表面積이 增大되므로 透水係數가 低下되었으며 다짐回數 110回以上에서는 粗粒質인 AA試料를 除外하고는 透水係數는 1×10^{-6}cm/sec이하로 減少되었다. 또 透水係數와 比表面積과는

$$\log k=-3.2\log A+2.61 \text{---} (7)$$

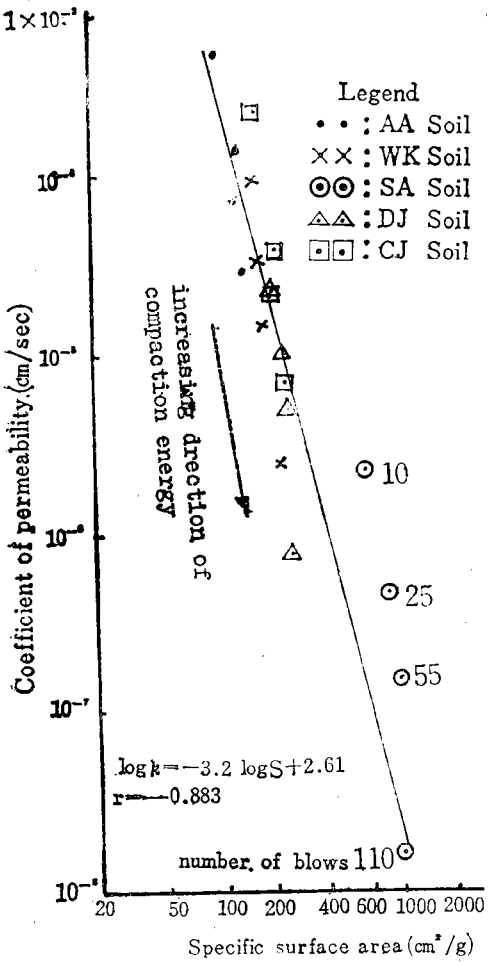


Fig. 22. Relationship between specific surface area and coefficient of permeability by various compaction energy

의 關係式이 成立되었으며 相關係數 $r=-0.883$의 높은 相關性을 나타내었다.

Taylor[68]는 Darcy가 提案한 透水係數(k)를 다음式으로 表現하였다.

$$k=D_s^2\frac{\gamma_w}{\eta}\cdot\frac{e^3}{1+e}C \quad \cdots\cdots(8)$$

D_s : 體面積平均徑

γ_w : 물의 單位體積重量

η : 粘性係數

e : 間隙比

C : 상기 이외의 要因 卽 粒子破碎, 粒度, 飽和度, 間隙構造(間隙의 形狀 및 配列, 通路의 形狀)등의 影響을 포함한 係數이다.

또 體面積平均徑(D_s)과 比表面積(Sw)과의 사이에는 $D_s=\frac{6}{G_s Sw}$의 關係가 成立되므로 이를 (7)式에 代入하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k=\frac{1}{K.Sw^2}\cdot\frac{e^3}{1+e} \quad \cdots\cdots(9)$$

여기서 $K=\frac{\eta\, Gs^2}{36.\gamma_w}\cdot\frac{1}{C}$

花崗岩質 風化土의 透水係數와 間隙比는 그때 그때의 粒子 破碎後의 것이므로 (9) 式中의 比表面積(Sw)은 破碎後의 값(Sw')을 使用하는 것이 타당할 것으로 생각된다. 따라서 (9)式의 Sw대신 Sw'

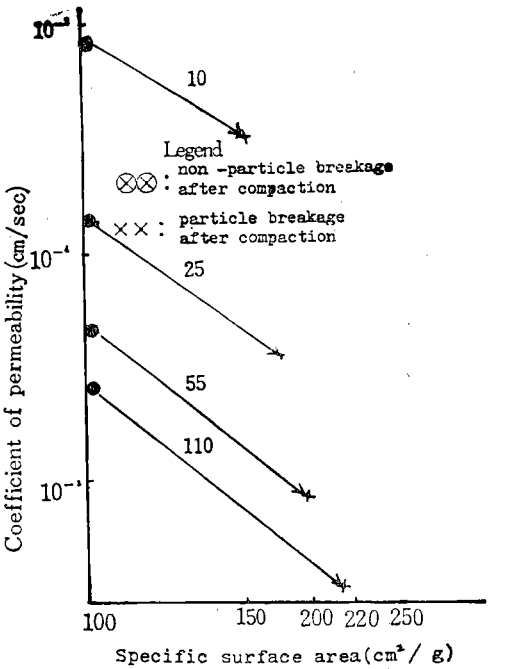


Fig. 23. Variation of specfic surface area and coefficient of permeability before and after particle breakage by various compaction energy

Table 5. Coefficient of permeability of non-particle breakage affecting on number of blows.

Number of blows (N)	Dry density(γ_d) (g/cm³)	Void ratio (e)	Coefficient of permeability (k) (cm/sec)
10	1.746	0.506	3.45×10^{-4}
25	1.854	0.418	3.64×10^{-5}
55	1.903	0.382	8.76×10^{-6}
110	1.957	0.343	3.55×10^{-6}

Degree of saturation(Sr) (%)	Specific surface area of non-compaction(Sw) (cm²/g)	Specific surface area after compaction(Sw′) (cm²/g)
90.5	113.46	150.45
91.6	113.46	174.50
94.7	113.46	193.11
96.2	113.46	217.73

Coefficient after compaction(k) $\left(\frac{e^3}{\frac{e+1}{k\cdot Sw'^2}}\right)$	Dry densify of river sand(γ_{ds}) (g/cm³)	Dry density of non-particle breakage after compaction(γ_d') (g/cm³) $\left(\gamma_{ds}\cdot\frac{\gamma_{dmin}}{\gamma_{dsmin}}\right)$
0.0110	1,865	1,659
0.0467	1,955	1,740
0.1224	1,996	1,776
0.1794	2,043	1,818

Void ratio of non-particle breakage (e_0)	Coefficient of permeability of non-particle breakage(k_0) (cm/sec) $\left(\frac{e_0^3}{\frac{1+e_0}{K\cdot Sw^2}}\right)$	$\frac{k}{k_0}$
0.585	8.91×10^{-4}	0.382
0.511	1.46×10^{-4}	0.249
0.480	4.74×10^{-5}	0.185
0.446	2.65×10^{-5}	0.134

를 代入하면 粒子 破碎後의 係數(K)는 다음과 같이 된다.

$$K=\frac{1}{k(Sw')^2}\cdot\frac{e^3}{1+e} \quad \cdots\cdots(10)$$

그러므로 다진 後 粒子破碎에 따른 透水性의 低下量은 前述한 粒子破碎로 因한 密度 增加量의 推定方法으로 無破碎狀態의 透水係數를 算出하여 推定할 수 있다.

여기서 無破碎狀態의 透水係數는 (9)式에 無破碎狀態의 比表面積(Sw)과 이때의 간극비($e_0=\frac{G_S\gamma_w}{\gamma_d'}-1$)를 代入하여 다음式으로 나타낼 수 있다.

$$k=\frac{1}{K\cdot Sw^2}\cdot\frac{e_0^3}{1+e_0} \quad \cdots\cdots(11)$$

단 K는 前述의 가정을 基準하여 다졌을때 破碎後의 값을 使用하였다. 여기서 K속에 包含된 C값은 破碎前의 값과 다를 것으로 생각되나 近似的으로 같다고 가정하여 考察하였다.

(11)式에 의하여 WK試料를 最適含水比에서 다짐回數를 變化시켰을 때의 無破碎狀態의 透水係數를 計算하면 Table 5와 같다.

Fig. 23은 WK試料에 대한 最適含水比에서의 다짐回數의 變化에 따른 無破碎狀態의 透水係數(k_0)와 破碎後의 實測된 透水係數(k) 및 比表面積과의 關係를 나타낸 것으로 다짐回數의 增加에 따라 比表面積은 커지고 透水係數의 減少도 커짐을 알 수 있다.

V. 結 論

花崗岩質 風化土의 破碎性을 調査하기 爲하여 風化度와 鑛物組成이 다른 5種類의 試料에 對하여 試驗한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 花崗岩質 風化土는 다짐에 의한 破碎性이 顯著하므로 다짐에너지가 작을때는 乾燥密度의 增加率이 比較的 크나 다짐에너지가 增加됨에 따라 乾燥密度의 增加率은 완만하였다.

2. 花崗岩質 風化土의 一軸壓縮强度 및 CBR값은 普通흙에서와 같이 最適含水比보다 약간 乾燥側에서 最大로 되었으나 燻乾燥한 供試體의 一軸壓縮强度는 最適含水比보다 약간 濕潤側에서 最大로 되었다.

3. 粗粒土일수록 破碎性이 커서 細粒土에 比하여 比表面積의 增加率이 컸고 다짐에너지가 增加될수록 比表面積의 增加率은 작게 나타났다. 또 粒子破碎가 가장큰 試料의 含水比는 最適含水比보다 약간 濕潤側이었고 다짐에너지가 增加됨에 따라 이는 乾燥側으로 점차 移動하는 傾向을 보였다.

4. 다짐에 의한 粒子破碎는 粗粒土일수록 물의 影響이 크게 나타났고 WK試料 에대하여 空氣乾燥狀態와 最適含水比 狀態로 다졌을 때 比表面積比의 差는 다짐에너지에 關係없이 거의 一定한 값을 나타냈다.

5. 다짐에너지의 增加에 따른 乾燥密度의 增加率은 다짐에너지가 작을때는 破碎性이 큰 花崗岩質 風化土가 컸으나 다짐에너지가 어느 限界以上으로 增大되면 河川砂의 乾燥密度의 增加率이 큰 값을 나타냈다.

6. 透水係數는 最適含水比보다 약간 濕潤側에서 가장 작은값을 나타냈으며 花崗岩質 風化土는 河川砂에 比하여 다짐에 의한 透水係數의 低下率이 顯著하였다. 또 花崗岩質 風化土는 다짐에너지가 增加됨에 따라 透水係數는 減少되어 다짐回數 110回에 달하면 風化度가 낮은 AA試料를 除外하고는 透水係數는 1×10^{-5}cm/sec 以下로 되었다.

7. WK試料의 破碎量(SI)과 이에 따른 密度增加量(γ_{df})과는 $\gamma_{df}=\frac{4.12(SI)}{2.14+(SI)}$의 關係式이 成立되었다.

8. 위의 結果로 미루어 보아 花崗岩質 風化土는 破碎性이 그의 風化度에 따라 크게 變化하므로 破碎後의 工學的 性質을 基準으로 하여 흙 構造物의 目的에 適應하도록 施工해야 할것으로 생각된다.

參 考 文 獻

1. 荒卷清一, 村上幸利 ; マサ土に おける 浸水時間とセン斷過程中の 粒子破碎との 關連性, 第14回 土質工學 硏究發表會, 481—484 (1979)
2. 竹中準之介, 渡邊興一 ; マサ土中の 切取斜面, 第22回 土木學會 年次學術講演會 槪要集, Ⅲ—33 (1967)
3. 竹下春見, 網干壽夫 ; 眞砂土の 最適含水比 附近の 透水性について, JSCE Trans, 38(2), 6—12 (1953)
4. 田中達夫, 川合清一 ; 粉碎性の 異なる 2種物質の混合粉碎における 選擇性と 臨界粒徑比について, 化學工學, 26(2), 792—799 (1966)
5. 谷本喜一, 岩崎照昌, 西勝, 藤吉芳男 ; 突固めによる 土粒子の 破碎について, 第7回 道路會議論文集, 258—260 (1963)
6. _____, 蔭山平八郎 ; 砂質土の セン斷抵抗について, 土と基礎, 5(4), 10—14 (1957)
7. Carroll, D. 著, 松尾新一郎監譯 ; 岩石の風化, ラテイス社, p. 18, 88—99 (1974)
8. 都德鉉 : 花崗岩質 風化土의 CBR特性, 大韓土木學會誌, 27(2), 67—78 (1979)
9. Goldich, S. S.; A study in rock-weathering, Jour. Geol., 46, 17—58 (1938)
10. Griggs, D.T.; The factor of fatigue in rock exfoliation, Jour. Geol., 44, 783—796 (1936)
11. Grim, R.E., R.H. Bray and W.F. Bradley; The mica in argillaceous sediments, Amer. Miner., 22, 13—29 (1937)
12. 福田護 ; 火成岩系 風化 砂質土の 工學的性質について, 土と基礎, 23(2), 13—18 (1975)
13. 姜乂默 ; 흙의 粒度分布가 다짐效果와 壓縮强度 및 透水係數에 주는 影響에 關한 硏究, 忠南大學校 大學院 硏究報告集, 第1輯, 7—50(1972)
14. 河上房義 ; アースダム (土質工學設計および施工法), 鹿島建設技術硏究所 出版部, 9—62 (1954)
15. 建設部, 產業基地開發公社 ; 安東多目的댐 工事誌, 293—339, 665—705 (1977)
16. Kerr, P.F.; Kaolinite from a Brooklyn subway tunnel, Amer. Miner., 15, 144—158

(1930)
17. 後藤 清；基礎地盤の成因と分類について(Ⅲ)，工學研究，15(6)，51—55 (1966)
18. Kubota, K. ;Permeability of compacted soil, Kyoto Univ. Rept. Training Institute for Engineering Teachers, 5, 35～46 (1968)
19. 久保田敬一，左藤忠信；突き固め土の强度に關する 實驗的研究，京大 工業教員養成所 研究報告，第3號，21—26 (1966)
20. Lamb, D. W. ; Decomposed granite as fill material with particular reference to earth dam construction, Symposium on Hong Kong Soils, 57—71 (1962)
21. Lambe, T.W. ;The permeability of compacted fine-grained soils, Special Technical Publication, ASTM, 163, 56—67 (1954)
22. Lee, K.L. and H. B. Seed ; Drained strength characteristic of sands, Proc. ASCE, 93 (SM6), 117—141 (1967)
23. Leslie, D.D. ;Large scale triaxial test on gravelly soils, Proc. 2nd Pan-American Conf. SM 1, (1963)
24. 林炳祚；물이 花崗土의 工學的 性質에 미치는 영향—特히 剪斷特性의 變化에 對하여—大韓土木學會誌，22(2)，75—81 (1974)
25. Lumb, P. ;The properties of decomposed granite, Geotechnique, 12(3), 226—243 (1962)
26. Magee, D.O.A. ;The behaviour of decomposed granites of the snowy mountains area as pavement materials, Proc. 3rd. Aust. New Zealand Conf. SM & FE, 111—116 (1960)
27. Marsal, R.J. ; Soil properties-shear strength and consolidation—, Proc. 6th. Int. Conf. SM & FE. Ⅲ. (1965)
28. 松尾新一郎；マサ土の特性と問題點，土と基礎，23(2)，1—8 (1975)
29. _____；マサ土の 風化と破碎性の關係，土質工學會論文報告集，17(4)，99—106，(1977)
30. Matsuo, S., K. Sawa; Study of the crushability of decomposed granite soil grains, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 11, 71—76 (1975)
31. 松尾新一郎，福本武明；マサ土の破碎性に影響する諸要因，土質工學會 論文報告集，16(4)，85—92(1976)
32. Matsuo, S.,K. Nishida; Physical and chemical properties of the decomposed granite soil grains with special reference to engineeing classification, Report of the Training Ins. for Eng. Teachers Kyoto Univ., 4, 59—67(1968)
33. 松尾新一郎，澤孝平；締固め エネルギーと マサ土粒子の 破碎性の 關係について，第13回 土質工學 研究發表會，629—632 (1978)
34. 三笠正人，高田直俊，望月秋利；粒子形狀の表現法と試驗法について，第6回土質工學研究發表會，49—52，(1971)
35. 三嶋信雄；路床 路盤材としてのマサ土の安定處理効果と耐久性，土と基礎，23(2)，26—31(1975)
36. 水本信男，宮原健二；風化花ユウ岩地帶における切取り斜面と盛土，土と基礎，24(12)，9—16 (1976)
37. 三浦清；深成岩類の 風化に關する研究；第1報 新第3紀末の 赤色風化作用による 江津 深成岩體の風化，應用地質，4(3)，1—16(1973)
38. 森麟，近藤義正；締固め土の 壓縮强度の異方性と その成因，土と基礎，15(6) (1967)
39. 林滿雄；火山 レキの締固め 特性と支持力(その2)，土と基礎，13(7)，3～7 (1965)
40. 中井喜一郎；マサ土の 風化について，深層風化，第18回土質工學シンポジウム(マサ土)，1—11 (1963)
41. Nagarai, T.S. ; Influence of initial soil structure on stabilization, Proc. of the 2nd A.R.C. on Soil Mech. and Found. Eng., 1, 394—399, Japan(1963)
42. Ollier著；松尾新一郎監譯；風化—その理論と實態，ラテイス社，6—12，110—140，169，(1971)
43. Onodera, T., M. Oda and K. Minami;Shear strength of undisturbed sample of decomposed granite soil, Soil and Foundation, 16(1), 17—26 (1976)
44. 朴炳基；花崗岩質 風化土의 特性研究 -光州地域 透水 및 다짐特性을 中心으로- 大韓土木學會誌 22(2)，83—95 (1974)
45. Ruxton, B.P. and L. Berry; Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong,Bull. Geol. Soc. America, 68,

1263—1291 (1957)

46. _____, _____; Notes on weathering zones and soils on granite rocks in two tropical regions, Jour. Soil Sci., 10(1), 54—63 (1959)
47. _____; Weathring and subsurface erosion in granite at piedmont Agnle, Balos, Sudan, Geol. Magasine, 95(5), 353—377 (1958)
48. 齊藤實；カコウ(花崗)岩の マサ狀風化，土と基礎，4(3)，32—33 (1956)
49. 澁谷長美；岩石の 風化と 空隙率(花崗岩について)，應用地質，1(3)，12—18(1965)，
50. Stephen, I. ;A study of rock weathering with reference to the soil of the Malvern Hills, Jour. Soil. Sci. 3(2) pt. 1., 20～23, pt.2, 219—237 (1952)
51. 菅野一郎,本壯吉男，有村玄洋；花崗岩類に由來する赤黃色土の 粘土鑛物(第1報)，土壤肥料，28(2)，9—12 (1957)
52. _____, _____；德留昭一，有村玄洋；花崗岩類に由來する赤黃色土の粘土鑛物(第2報),土壤肥料，28(2)，13—16 (1957)
53. _____, _____，桑野幸田，有村玄洋，德留昭一；花崗岩類に 由來する 赤黃色 土の粘土鑛物(第3報)，土壤肥料，29(2)，11—14 (1958)
54. _____, _____，有村玄洋；花崗岩に由來する赤黃色土中の 黑雲母の風化，粘土科學の進步，2，217—228 (1960)
55. 福本武明；粒子破碎量の表現法に關する一考察，第6回土質工學硏究發表會，77—80 (1971)
56. _____；締固めに マサ土の破碎特性 -巨視的立場からの 考察- 第15回土質工學シンポジウム(マサ土) 論文集，31—36 (1973)
57. _____；締固めたマサ土の 密度に關する粒子破碎の影響，土質工學會論文報告集，12 (3)，55—63 (1972)
58. Taylor, D.A.; Foundamental of soil mechanics. John Wiley and sons, Inc. 104—109(1948)
59. 土質工學會編；日本の特殊土，ライブラリ出版委員會，113—114 (1974)
60. 內田一郎，松本鍊三，鬼塚克忠，田原賢二，三浦功；締固めた不飽和粘土のセン斷特性について，土と基礎，17(8)，31—39 (1969)
61. _____，鬼塚克忠，平田登基男；マサ土の 盛土斜面の 崩壞に關する實驗的硏究，第18回土質工學シンポジウム，59—66 (1973)
62. 檜下協，淺井武彦；統一分類と 土の 諸性質との關係，土と基礎，18 (8)，33—41 (1970)
63. Vargas, M.; Some engineering properties of residual clay soils occurring in Southern Brazil, Porc. 3rd. Int. Conf. SM & FE, 67—71 (1953)
64. Wager, L.R. ;A stage in the decomposition of biotite from the Shap granite, Proc. Yorkshire Geol. Soc., 25, 366—372 (1944)
65. Walker, G.F.; The decomposition of biotite in the soil, Miner. Mag., 28. 693—703 (1949)
66. 山梨縣企業局；ダム堤體材料調査(マサ土)，1966年度 笛吹川廣瀨ダム實施調査報告，69—88 136(1967)
67. 山下親平；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—(1968)
68. 前內寬治，橫山金德； マサ土の コンシステンシー測定の 一例，第5回土質工學硏究開發表會，45—48 (1970)
69. 吉越洋；レキの大型 三軸試驗，第5回土質工學硏究發表會概要集，(1970)