

단입자파쇄특성에 기초한 화강풍화토의 압축특성에 관한 연구

A Study on the Compression Characteristics of Decomposed Granite Soil Based on Single Particle Crushing Property

함 태 규¹ Ham, Tae-Gew
조 용 성² Cho, Yong-Seong
김 유 성³ Kim, You-Seong

Abstract

There are some problems in evaluating the bearing capacity of decomposed granite soils by general equations on account of their inherent compressibility and crushability. In order to investigate this kind of the engineering characteristics on decomposed granite soils in detail, it is necessary to know the micro property of the single particle composing the granite soils, and then the relevance to the macro characteristics of the soils has to be cleared. The reason why the single particle properties are not studied is first the difficulty to find out some regulating parameters, and secondly little understanding of its significance. Furthermore, the water in the decomposed granite soils accelerates the particle crushing. Consequently, increasing of compressibility and decreasing of shear strength would occur. Actually, when the ground settlement is a big issue in the embanked ground using the decomposed granite soils, the sensitive change of compressibility due to the change of water content in the ground becomes conspicuous. In this study, the single particle strength characteristics are studied and microscopic particle shape analyses are performed. In addition the compressibility of the decomposed granite soils and water content effect on the compressibility are analysed based on the test results.

요 지

화강풍화토는 특유의 파쇄성과 압축성이 높은 이유로 일반적으로 사용되는 산정식에 의해 지지력 등을 산출하기 곤란한 문제점이 있다. 이러한 화강풍화토의 공학적 특성을 보다 상세히 밝히기 위해서는 우선 미시적인 입자자체의 특성을 충분히 검토한 후, 입자 집합체의 거시적인 거동특성과의 관련성을 우선 규명하여 한다. 그러나 지금까지 지반공학 분야에서는 하나하나의 입자에 작용하는 응력상태의 중요성에 대한 인식이 없었고, 또한 일련의 법칙성을 발견하기 어렵다는 이유로 단일의 입자특성은 다루어지지 않았다. 그러나 특유한 입자파쇄성과 고압축성을 갖는 화강풍화토의 정확하고 자세한 역학특성을 밝히기 위해서는 미시적인 입자의 특성을 조사해 지반거동에 미치는 영향을 조사할 필요가 있다. 또한 지반내에서의 수분의 존재는 입자파쇄의 활성화를 촉진시키고, 그 결과 압축성의 증가와 전단강도의 저하를 일으키는 요인이 된다. 사실상 실제로, 화강풍화토를 재료로 한 성토지반에서 지반침하가 심각한 문제로 대두되는 경우는 주로 화강풍화토 지반의 함수비 변화에 따른 압축특성의 민감한 변화의 결과로 추정하고 있다. 본 연구에서는 현미경 관찰을 통한 미시적인 입자형상 분석과 단입자 강도시험을 통한 입자강도특성을 조사하여 화강풍화토의 압축특성과의 관련성 및 입자의 파쇄성과 화강풍화토의 압축특성에 미치는 수분의 영향에 대하여 조사하였다.

Keywords : Compression characteristics, Crushing strengths, Decomposed Granite soil, Particle crushing property

1 정희원, 일본 야마구치대학 공학부 토목공학과 박사과정 (Non-Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Yamaguchi at Japan, hamtg@hotmail.com)

2 정희원, 전북대학교 공과대학 토목환경공학부 박사수료 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Chonbuk Univ.)

3 정희원, 전북대학교 공과대학 토목환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Chonbuk Univ.)

1. 서론

화강풍화토는 한국, 일본을 비롯해 전 세계에 널리 분포되어 있으며, 양호한 다짐효과로 인해 예로부터 성토용 재료로 널리 사용되어 왔다. 반면 화강풍화토는 광물의 조성이나 풍화의 정도가 채취하는 장소나 깊이에 따라 현저히 다르고, 그 공학적 성질이 복잡하여 다른 재료에 비해 현재에 이르기까지 그 공학적 특성이 확실히 밝혀지지 않은 토질재료이다. 석영, 장석, 유색광물 등의 광물로 구성되어 있는 화강풍화토는 압축성이 크다. 그러나 화강풍화토의 큰 압축성은 입자의 파쇄가 주원인이라고 할 수 있고, 그 입자파쇄는 수분량에 많은 영향을 받고, 결과적으로 다짐에 영향을 미치게 된다. 그러나 현재에 이르기까지 화강풍화토의 미시적인 입자파쇄특성과 파쇄에 미치는 수분 및 이들이 화강풍화토의 공학적특성에 미치는 영향에 대한 연구는 충분히 이루어졌다고 할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 한국과 일본에서 채취한 광물조성과 풍화도가 다른 3종류의 화강풍화토를 이용해 단입자파쇄시험, 일차원압축시험을 실시해 화강풍화토의 파쇄성과 수분의 양이 단입자 파쇄특성과 압축특성에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

2. 사용한 시료 및 시험

2.1 사용한 시료의 물성치

본 연구에서는 인천시 송도에서 채취한 송도화강풍화토와 일본 야마구치현 우베에서 채취한 우베화강풍화토, 그리고 시마네현 마츠에시에서 채취한 마츠에화강풍화토의 2mm체 통과분을 시료로 사용하였다. 또한 이들 화강풍화토와의 비교를 목적으로 0.18~2.0mm로 입도분포를 조정한 비교적 강한 단입자 강도를 지닌 三河珪砂(Mikawakeisa)의 실리카(silica)사(砂)를 사용하였다. 이하 3종류의 화강풍화토를 “SD”, “UBE”, “MA”, 三河珪砂를 “Silica”라고 칭한다. Table 1에 사용한 시

Table 1. Physical property of the Soils

Sample	Grain Size (mm)	G_s	e_{max}	e_{min}	D_{50}	C_u	Ignition loss (%)
SD	~2.0	2.698	1.44	0.89	0.394	20.72	5.29
UBE	~2.0	2.649	1.31	0.81	0.509	29.58	3.99
MA	~2.0	2.690	1.18	0.64	0.600	15.59	1.76
Silica	0.18~2.0	2.650	0.93	0.58	0.736	2.19	1.18

료의 물성치를 나타내었다.

2.2 기본물성 시험내용

본 연구에서는 화강풍화토의 기본물성을 조사하기 위해 입도분석, 강열감량, X선 회절, 광물조성 시험을 실시하였다. 또한 조성입자의 파쇄강도를 조사하기 위해 단입자 파쇄강도시험, 각 시료의 압축특성을 조사하기 위해 일차원 압축시험을 실시하였다.

3. 화강풍화토의 기본적 물성

3.1 입도분포

화강풍화토는 단일의 입자만으로 구성되어 있지 않고 몇 개의 입자가 단립화(團粒化)되어 하나의 입자를 형성하고 있다. 따라서 본 연구에서는 3종류의 화강풍화토에 대하여 입도분석 과정에서 물을 흘려보내며 세립분과 조립분을 분류시켰다. 입도 분포를 조사하기 위해 입경이 75 μ m이하인 세립분에 대해서는 레이저 해석법을 사용하였고, 입경이 75 μ m이상 2mm이하의 조립분

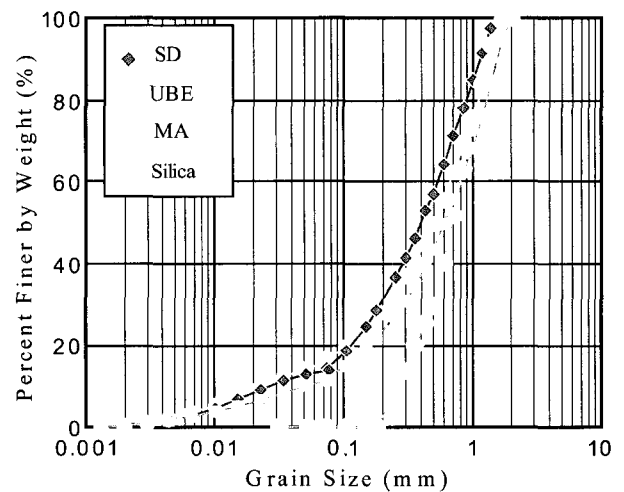


Fig. 1. Grain size distribution curve

에 대해서는 일본공업규격 JIS A 1204에 의거 입도분포를 구하였다. 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

3.2 풍화도

강열감량시험을 통해 화강풍화토의 풍화정도를 평가하였다. 강열감량법은 일본규격 JIS A 1226에 의거 실시하였고, 건조로에 일정한 질량이 되기까지 건조시킨 시료를 증발접시에 넣어 750°C의 건조로에 한 시간 건조시킨 후 강열전후의 질량차를 조사하였다. Table 1에 그 결과를 나타내었다. 이 연구에서 사용한 3종류의 화강풍화토는 SD, UBE, MA의 순으로 강열감량 값이 나타나, 같은 순으로 풍화가 진행되어 있는 것으로 판단할 수 있다.

3.3 광물조성

본 연구에서 사용하고 있는 화강풍화토의 일차광물과 점토광물을 조사하기 위해 X선 회절시험을 실시하였다. X선 회절시험은 각 시료의 75µm이하의 세립분을 사용하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 Silica에는 석영과 운모가 포함되어 있는 것이 확인되고

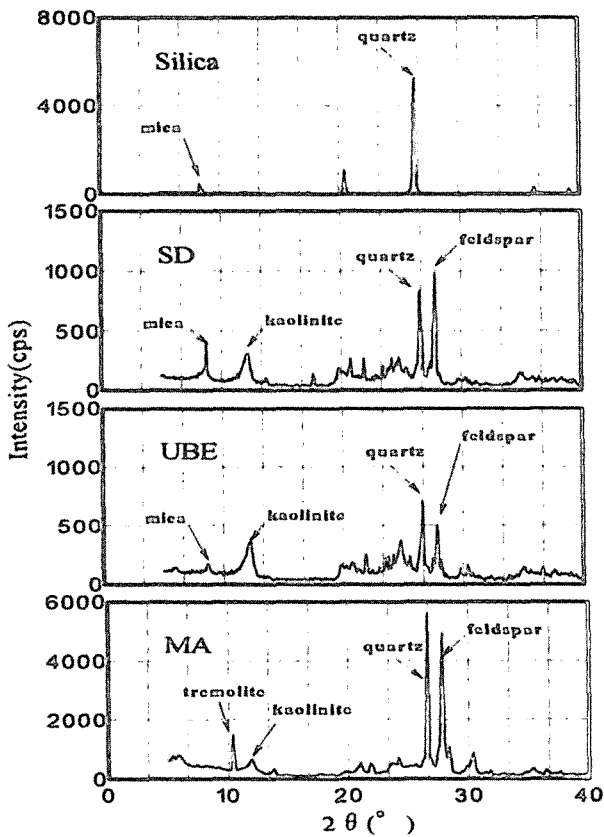


Fig. 2. X-ray diffraction curve of the soils used

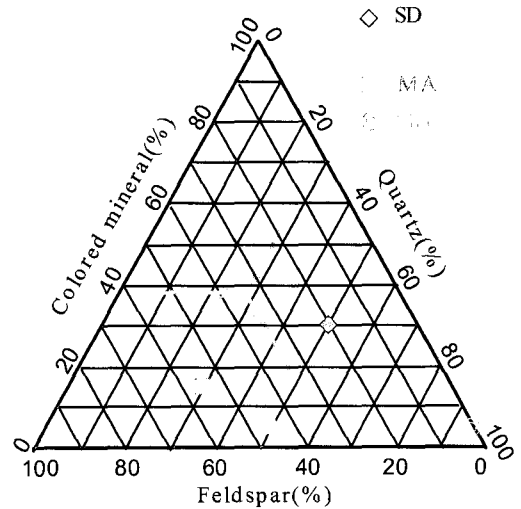


Fig. 3. Primary mineral compositions

있고, SD와 UBE, MA에는 모두 석영, 장석, 운모, 그리고 점토광물인 카올리나이트(kaolinite)가 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 이 결과를 이용해 각 시료의 평균입경 D_{50} 을 분리시켜 광물을 석영, 장석, 유색광물의 3종류로 분류하여 각 광물의 질량을 구하여 광물의 조성비를 조사하였다. 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 Silica는 석영이 96%를 차지하고 있어 광물의 대부분이 석영으로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 또한, 이 연구에서 사용하고 있는 화강풍화토 중에는 SD가 유색광물의 비율이 가장 높은 결과를 보였다.

3.4 입자 형상의 평가

모래입자의 형상은 밀도와 같이 모래의 역학특성에 많은 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 따라서 입자 형상을 모래의 일차적 성질의 하나로 생각해 수치적으로 표현하는 것은 큰 의미가 있다고 할 수 있다. 본 연구에서는 입자의 형상을 정량적으로 평가하기 위해 원형계수(Roundness coefficient, R_c)와 종횡비(Aspect ratio, A_r)를 이용하였다. 원형계수[Kato(2001)]는 다음 식에 의해 정의된다.

$$R_c = \frac{L^2}{4\pi A} \quad (1)$$

여기서, L 은 투영입자의 주위 길이, A 는 투영입자의 단면적을 나타내고 있다. 원형계수는 그 값이 1에 가까울수록 입자가 원에 가까운 형상이라는 것을 의미한다. 그리고 그 값이 클수록 입자의 표면이 거칠고, 각이 쳐

있는 것을 의미한다. 또한 종횡비는 다음 식에 의해 정의된다.

$$A_r = \frac{b}{a} \quad (b \geq a) \quad (2)$$

여기서, b 는 투영입자의 가장 긴축의 길이, a 는 가장 짧은 축의 길이로 종횡비의 값이 크면 클수록 입자 의형상이 타원형이라고 할 수 있다. 타원의 면적을 " $\pi \times (a/2) \times (b/2)$ ", 투영입자의 주위길이를 " $\pi \times \sqrt{(a^2 + b^2)}/2$ "라고 하면 식 (1), 식 (2)로부터 타원의 원형계수 $(R_c)_{ellipse}$ 와 종횡비의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$(R_c)_{ellipse} = \frac{1 + (A_r)^2}{2(A_r)} \quad (3)$$

그림 4에서 $(R_c)_{ellipse}$ 로 표시된 곡선은 식 (3)을 의미한다. 실험에 있어 평균입경 D_{50} 에 해당하는 입자를 이용해 각각 30개 이상의 입자에 대해 현미경을 이용해 관찰을 실시하였다. Fig. 4에 시험시료의 원형계수와 종횡비의 관계를 나타내었으며, 이 그림에서의 값은 관찰 시료의 평균값을 의미한다. 또한 이 그림에서 비교를 위해 비교적 입자 형상이 복잡한 카보네이트(carbonate) 모래인 치비시(chiibishi) 모래를 함께 나타내었다. 사진 1에 그림 4에 나타낸 시료의 현미경 사진을 나타내었다. 사진 및 그림에서 알 수 있듯이, 입자형상이 가장 복잡한 치비시(chiibishi) 모래는 원형계수와 종횡비의 값이

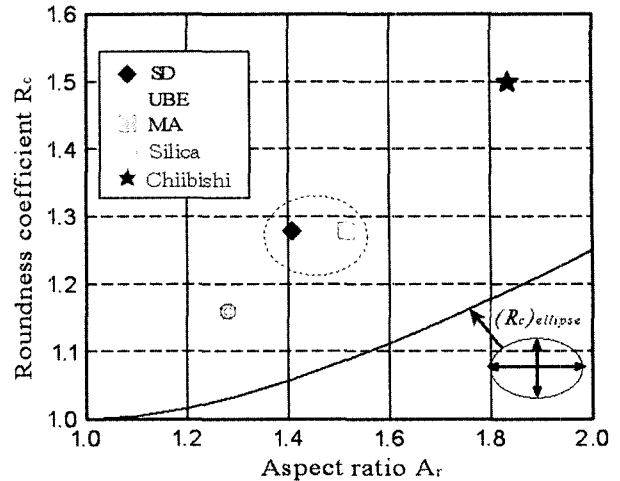


Fig. 4. Relationship between R_c and A_r .

가장 크고, 입자의 형상이 비교적 원에 가까운 Silica는 원형계수와 종횡비의 값이 가장 작은 것을 알 수 있다. 이 연구에서 사용하고 있는 화강풍화토는 모두 원형계수와 종횡비의 값이 거의 비슷한 값을 보이고 있는 것으로 입자형상에는 큰 차이를 보이지 않는다는 것을 알 수 있다.

4. 단입자 파쇄강도

각각의 재료를 구성하고 있는 모래입자에 대해 단입자 강도시험을 실시하였다. 단입자 강도시험은 Fig. 5의 장치를 이용해 단일의 입자를 재하판에 가장 안정된 방향으로 배치시킨 후 상판을 일정한 속도로 하강시켜 입

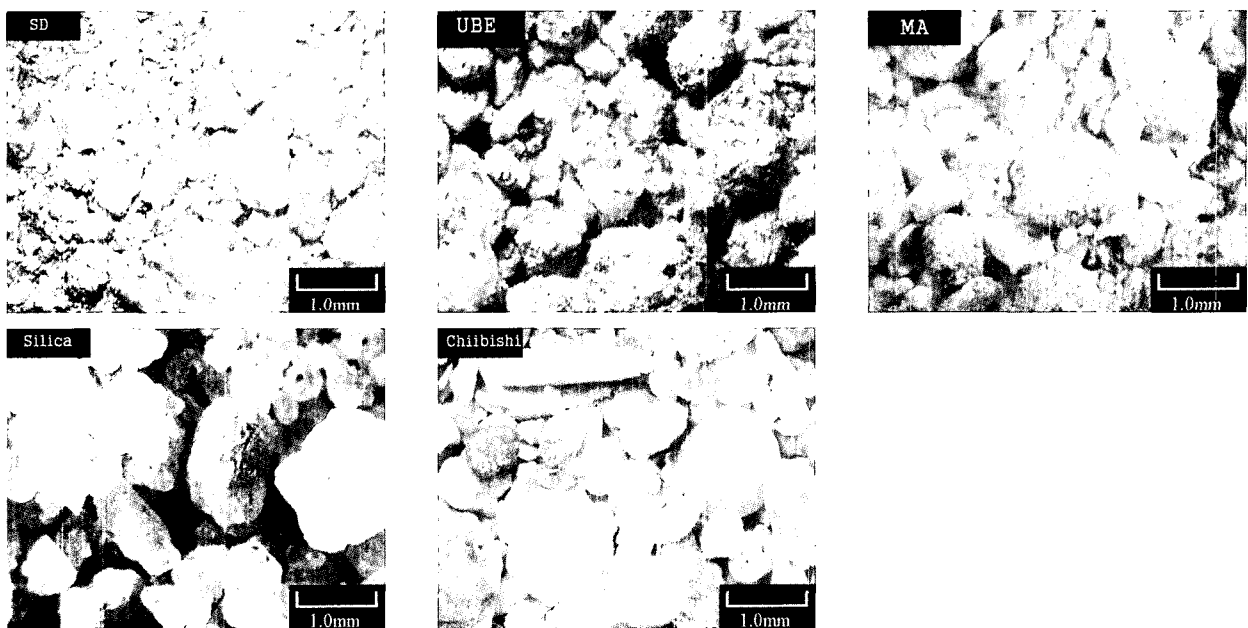


Photo 1. Sample of the tests

자를 파쇄시키는 시험이다. 시험중 축하중과 축변위는 컴퓨터에 의해 자동으로 측정결과를 기록하였다. 유색 광물인 운모는 다른 광물과 달리 결정구조가 샌드위치와 같이 층상으로 이루어져 있어 층과 층을 잇는 인력이 약해 재하판에 가장 안정된 방향으로 배치한 후 실험을 시행하면 단입자 파쇄강도가 과대평가 될 가능성이 있다. 본 연구에서는 운모에 관해서는 Fig. 5와 같이 재하판에 수직된 방향으로 배치시킨 후 단입자 파쇄시험을 실시하였다. 각 시험에서의 재하속도는 0.1mm/min로 하였고, 하중은 측정정도가 $9.81 \times 10^{-3} N$ 이고 최대 $4.91 \times 10^2 N$ 까지 측정 가능한 하중계(load cell)에 의해 측정하였다. 변위는 측정정도가 $1.0 \times 10^{-3} mm$, 최대 2.0mm까지 측정 가능한 비접촉변위계를 사용하였다. 파쇄강도를 구하는 방법은 파괴하중을 입자 체적의 2/3제곱으로 나누는 방법, 파괴하중을 직접 측정한 가압판과 입자의 접촉면적으로 나누는 방법, 입자를 14면체로 가정해 가압판과 입자의 접촉면적을 산출해 이것으로 파괴하중을 나누는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 입자의 파괴하중을 입자 높이의 2제곱으로 나누는 방법으로 산출하였다. 입자를 완전한 구(球)로 가정하면 압축으로 인해 입자내에서 발생하는 인장응력이 그 입자의 인장강도와 같은 크기가 될 때 파쇄가 일어난다. 입자내에서 발생하는 인장응력은 하중(F)과 입경(d)에 의해 다음 식으로 표시된다.

$$\sigma = \frac{XF}{d^2} \quad (4)$$

여기서, x 는 정수이고 그 값은 Billam(1971)에 의하면 $X=2.0/\pi$, Hiramatu(1965)에 의하면 $X=0.7/(\pi/4)$ 로 정의된다. 본 연구에서는 각 시료의 파쇄강도를 상대적으로 비교하는 것을 목적으로 하고 있으므로 편의상 Hiramatu(1965)의 X 에 가까운 값인 $X=1$ 로 했을 때의 σ 를 파쇄강도로 정의하였다. 따라서 최대 하중 F_f 의 최대파쇄강도 σ_f 는 다음 식에 의해 구해진다.

$$\sigma_f = \frac{F_f}{d_0^2} \quad (5)$$

여기서, F_f 는 시험중의 최대하중, d_0 는 입자를 가장 안정한 상태로 놓았을 때의 초기높이이다. 본 연구에서는 단입자 강도에 미치는 수분의 영향을 조사하기 위해 각 시료에 포함되어 있는 광물별로 30개 이상의 입자에 대해 건조상태와 수침상태에 대해 단입자 강도실험을 실시하였다. 본 연구에서는 대기중에서 자연 건조한 시료

를 건조상태, 시료를 수중에 일주일간 수침시킨 후 시험중 단입자 주위를 물로 채운 상태를 수침상태라고 정의하고 있다. Fig. 6에 건조상태와 수침상태에서 실시한 SD의 단입자 강도시험의 결과 중 대표적인 결과(건조 5개, 수침 5개)를 응력과 $\delta d/d_0$ 의 관계로 나타내고 있다. 여기서 응력(σ)은 F/d_0^2 로 나타내어진다. Fig. 6에서 건조상태의 입자는 $\delta d/d_0$ 가 0.1(10%)이하에서 최대강도를 보이고 있으나, 침수상태의 입자는 $\delta d/d_0$ 가 0.3(30%)이상에서 최대강도가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 차이점은 다음과 같이 유추할 수 있다.

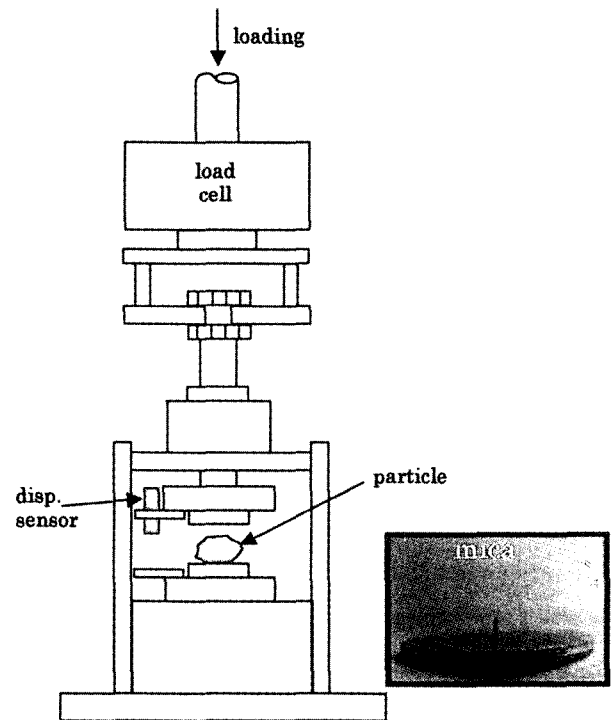


Fig. 5. Schematic diagram of particle crushing testing apparatus

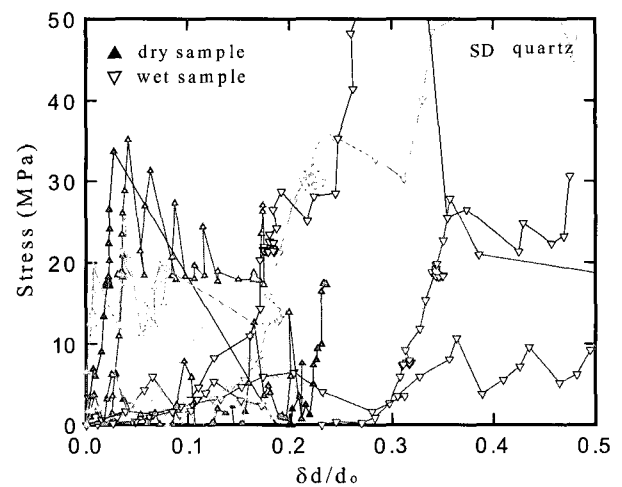


Fig. 6. Single particle crushing tests for SD quartz particles

건조입자는 취성파괴를 보이거나, 수침입자는 연성파괴 현상을 보이는 것은 침수로 인해 입자표면에 얇은 약층이 형성되어 이로 인한 강성의 저하가 주원인 것으로 판단되고, 침수시 입자는 파쇄 후, 파쇄입자 분리현상이 건조시 입자에 비해 매우 작아, 이로 인해 대변형 후의 강도가 크게 나타나는 것으로 판단된다. 10% 이상의 파쇄는 고유 입자파쇄의 의미가 상실되고 있으므로 본 연구에서는 건조시와 수침시의 단입자 강도를 비교하기 위해 $\delta d/d_0$ 가 0.1이내에서 출현하는 피크(Peak)강도를 최대파쇄강도 $\sigma_{f(\delta d/d_0=0.1)}$ 로 나타내었다.

$$\sigma_{f(\delta d/d_0=0.1)} = \frac{F_{f(\delta d/d_0=0.1)}}{d_0^2} \quad (6)$$

여기서, $F_{f(\delta d/d_0=0.1)}$ 는 $\delta d/d_0$ 가 0.1 이내에서의 최대하중, d_0 는 입자의 초기높이를 나타내고 있다. Gumbell (1958)은 단입자 파쇄시험에서 입자가 파쇄되지 않을 확률 P_s' 을 다음 식과 같이 나타내었다.

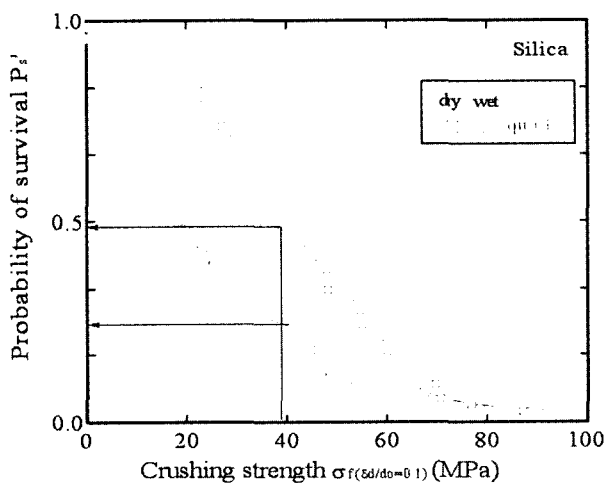
$$P_s' = 1 - \frac{i-0.3}{N+0.4} \quad (7)$$

여기서, i 는 파쇄강도 σ 의 높은 값에서 낮은 값으로의 내림차순서, N 은 시험 갯수를 나타낸다. 식 (7)을 이용해 Silica와 SD에 있어서 어떤 강도에서 입자가 파쇄되지 않을 확률과의 관계를 나타낸 것이 Fig. 7(a), (b)이다. Fig. 7(a), (b)에서 거의 석영으로 구성되어 있는 Silica는 건조상태에 있어 파쇄강도가 약 40MPa에서 입자파쇄를 일으키는 입자가 전체의 약 50%이고, 수침상태에 있어서는 전체의 80%를 차지하고 있다. 그러나 SD는

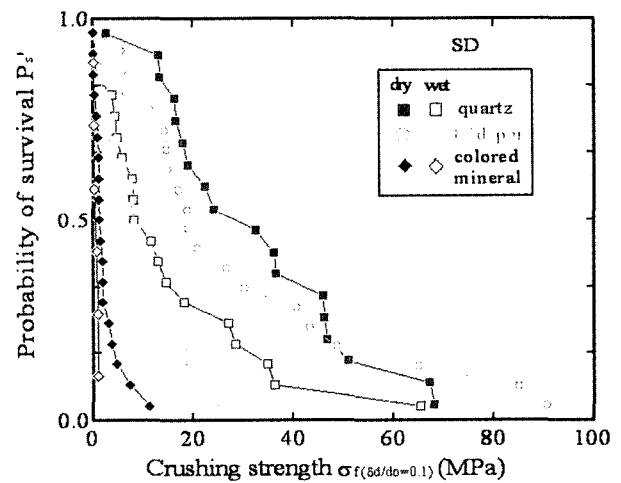
Silica와 비교해 파쇄강도가 작은 유색광물에서 파쇄강도가 높은 석영에 이르기까지 복수의 광물에 의해 구성되어 있어 다소 복잡한 양상을 보이고 있다. 이러한 경향은 다른 화강풍화토(UBE, MA)에서도 나타나고 있으며, 이것이 화강풍화토의 단입자 파쇄강도를 복잡하게 하는 이유라고 판단된다. 또한, 건조상태와 수침상태를 비교해 보면 전 시료에 있어 정도의 차이는 있지만 건조상태의 곡선보다 수침상태의 곡선이 전체적으로 왼쪽으로 이동해 있는 것을 알 수 있다. 이것은 입자가 수침되어짐에 따라 입자강도 자체가 저하되고 있는 것을 의미하나, 이것이 화강풍화토의 특이한 특성의 원인이 되는 것으로 판단된다.

5. 일차원 압축특성

일차원압축시험은 직경 50mm의 링(ring)안에 높이 10mm인 소정의 상대밀도를 목표로 동적방법(tamping)을 이용해 작성한 시료를 배치하여 재하속도 0.1mm/min의 연직하중을 가하는 방법으로 하였다. 하중은 측정정도가 $6.42 \times 10^5 N$ 으로 최대 $1.96 \times 10^5 N$ 까지 측정 가능한 하중계(load cell)에 의해 측정하였다. 또한 변위는 측정정도가 $1.00 \times 10^{-3} mm$ 이고 최대 5.00mm까지 측정 가능한 접촉변위계에 의해 측정하였다. 시험 중의 하중과 변위는 자동 측정하여 컴퓨터에 기록하였다. Fig. 8은 건조상태에 있어서 상대밀도가 90%인 시료에 대해 실시한 일차원 압축시험의 결과를 간극비와 연직응력의 상관관계로 나타낸 것이다. 압축항복응력은 casagrande법을 이용하여 구하였다. 그림에서 silica는 연직응력이



(a) Silica



(b) SD

Fig. 7. Relation of probability of survival P_s' against crushing σ_f

20MPa 부근에서 항복점이 출현되는 것에 비해 3종류의 화강풍화토는 작은 응력에서 항복점이 출현되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 항복점이 출현되는 응력은 MA, UBE, SD의 순서로 그 값이 작고, Fig. 7에 나타내고 있는 $\sigma_{f\delta d/d_0=0.1}$ 의 순서와 동일한 것을 알 수 있다. Fig. 9는 건조상태에서 상대밀도 90%의 시료에 대해 실시한 Silica와 SD, 그리고 포화도 100%를 목표로 물의 양을 증가시켜 건조상태와 같은 에너지로 제작한 수침상태의 Silica와 SD에 대해 실시한 일차원압축시험의 결과를 나타내고 있다. 그 결과 Silica는 건조, 수침상태가 모두 연직응력이 20MPa 부근에서 항복점을 보이고 있으며, 건조 및 수침상태에서 일차원압축곡선의 차이가 보이지 않았다. 그러나 SD는 수침상태에 있어서 초기간극비가 0.87로 건조상태의 초기간극비와 비교하여 0.13 정

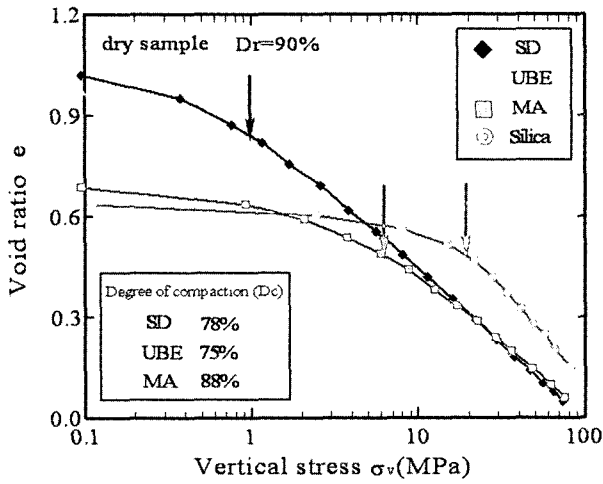


Fig. 8. $e-\log \sigma_v$ curves

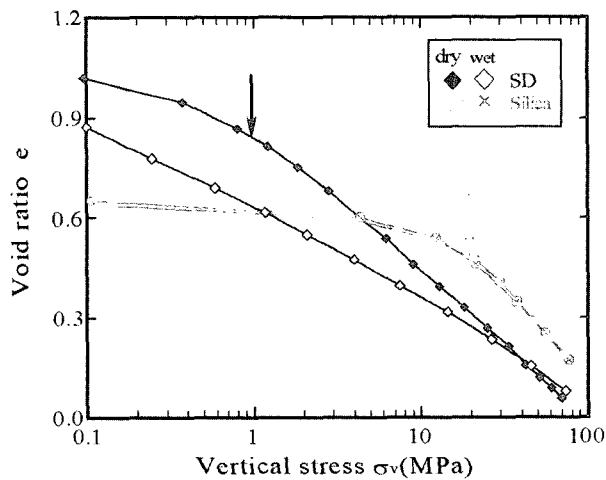


Fig. 9. Change of $e-\log \sigma_v$ curves due to wetting

도 감소해 있는 것을 알 수 있으며, 건조상태에 비해 명확한 항복점이 출현하지 않고 일차원곡선이 거의 선형적인 것을 알 수 있다. 시험결과 UBE, MA도 SD와 같은 경향을 나타내고 있다. Fig. 10에 다음 식으로 얻어지는 $e-\log \sigma_v$ 곡선의 접선기울기인 압축지수와 연직응력과 관계를 나타내고 있다.

$$C_c' = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma_v} \quad (8)$$

그림으로부터 건조상태에서는 Silica, MA, UBE, SD의 순서로 작은 응력상태에서 높은 압축지수를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이것을 정확히 평가하기 위하여 그림 11에 건조상태의 압축지수 ($C_c' = 0.1, 0.2, 0.3$)에 있어서 연직응력과 평균단입자 파쇄강도 σ_f 에 대해

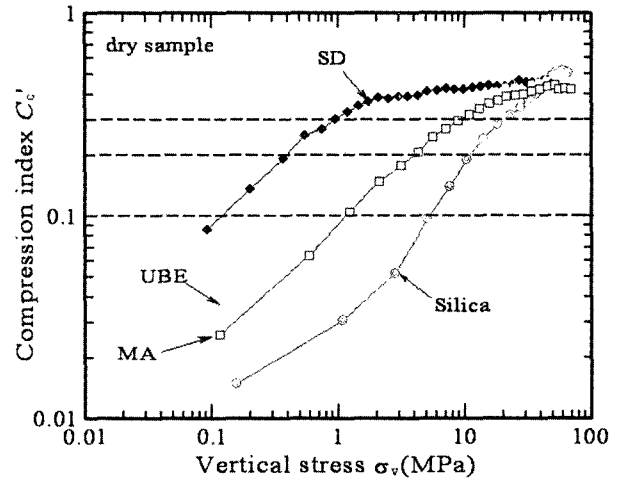


Fig. 10. Compression index related to vertical stress for dry samples

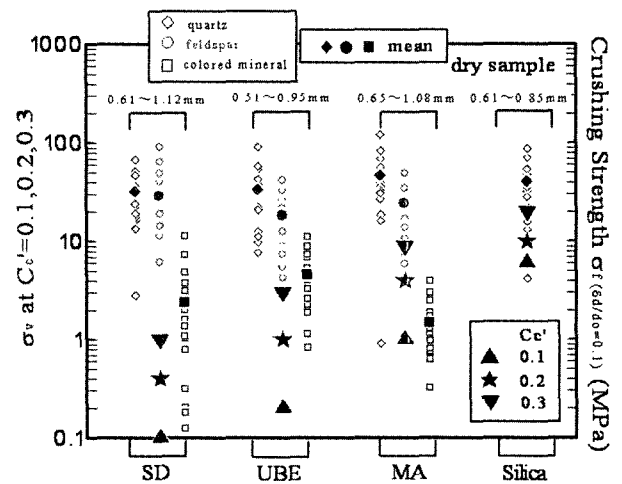


Fig. 11. Compression properties related to crushing strength for dry conditions

나타내고 있다. 압축지수(C_c')가 0.1에 있어서 단입자 파쇄강도 $\sigma_{f(d_1/d_0=0.1)}$ 가 큰 시료일수록 큰 연직응력을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 압축지수(C_c')가 0.2, 0.3에 있어서도 같은 결과를 보이고 있다. 또한 3종류의 화강풍화토는 압축지수(C_c')가 0.1, 0.2, 0.3에 있어서의 연직응력은 10MPa 보다 작은 값을 보이고 있는 것에 비해 Silica는 C_c' 가 0.3에 있어서 연직응력이 20MPa를 보이고 있다. 이와 같은 결과에서 화강풍화토는 Silica와 비교해 압축성이 큰 시료이고, 그 압축성은 단입자 파쇄강도와 관련되어 있는 것을 시사하고 있다. 파쇄량을 나타내는 파라메타로 비표면적과 비표면적 증가량을 본 연구에서는 사용하고 있다. 비표면적 S 는 다음 식으로 계산되어진다.

$$S = \sum \frac{R}{100} \cdot \frac{4\pi(d_m/2)^2}{(4/3)\pi(d_m/2)^3 G_s \gamma_w} \quad (9)$$

여기서, R 은 각 입경의 시료의 잔류율을 나타내고 있고, γ_w 는 물의 단위체적중량(kN/m^3), d_m 은 평균입경을 나타내고 있다. 또한 $d_m = \sqrt{d_1 \cdot d_2}$ (d_1, d_2 는 각각의 체눈금)이다. 비표면적의 값은 입자파쇄가 일어나면 그 값이 증가한다. 비표면적 증가량 ΔS 은 시험전후의 비표면적의 차로 다음 식으로 계산되어진다.

$$\Delta S = S_{after} - S_{before} (cm^2/g) \quad (10)$$

여기서, S_{before} 은 시험전의 비표면적, S_{after} 는 시험후의 비표면적을 나타내고 있다. Fig. 12는 Silica와 MA의 $e - \log \sigma_v$ 곡선과 동시에 입자파쇄의 진행상황을 나타내고 있다. Silica는 연직응력 10MPa에서 입자파쇄가 일어나고 있는 것에 비해 MA는 건조 및 수침상태 공히 작은 응력에서 입자가 파쇄되는 것을 알 수 있다. 또한 MA는 건조상태보다 수침상태에 있어서 보다 현저히 입자가 파쇄되고 있다. 이 결과로 집합체에 있어서도 단입자 시험의 결과와 같이 단입자 강도가 약한 화강풍화토는 작은 응력에서부터 입자파쇄가 일어나 높은 압축성을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 또한 화강풍화토는 수침됨에 따라 단입자 강도가 저하되어 입자파쇄로 인해 압축성이 더욱 증가하는 것이 확인되었다. Fig. 13은 상대밀도가 120%인 화강풍화토의 기건, 침수상태의 시료에 대해 실시한 일차원 압축시험의 결과를 축변형률과 연직응력의 관계로 나타내고 있다. 그림에서 건조상태의 결과에 있어 3종류의 화강풍화토는 같은 응력에서 항복

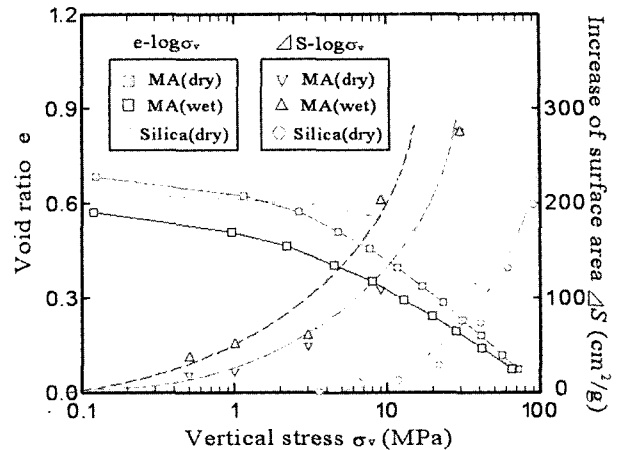


Fig. 12. $e - \log \sigma_v$ curves and Increase of surface area

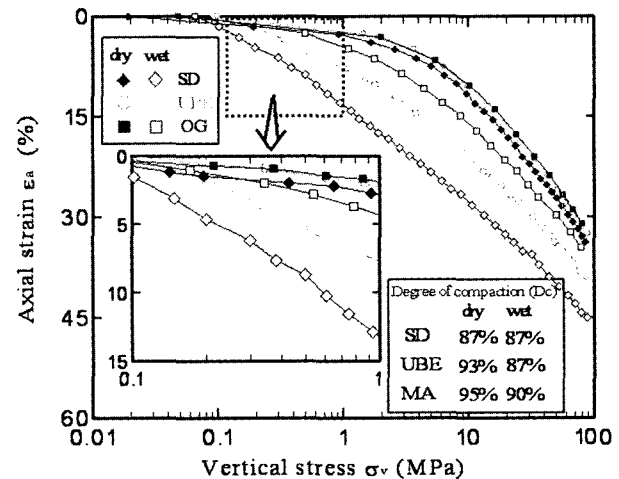


Fig. 13. Relationship between Axial strain and Vertical stress

점을 보이고 있고, 시료에 따른 압축성의 차이는 보이지 않는다. 그러나 수침상태에 있어서는 모든 시료에서 건조상태보다 압축성이 더욱 증가되어 있고 시료에 따른 압축성의 차이가 현저히 나타나고 있다. 특히 SD는 이번에 사용한 시료중에 수침상태에 있어서 가장 큰 압축성을 보이고 있다. 이것은 다짐 화강풍화토를 이용해 건설한 성토에 있어서 수침에 의해 화강풍화토의 종류에 따라서 성토지반이 예상보다 크게 침하할 수 있다는 것을 시사하고 있다.

6. 결론

본 논문에서는 광물조성과 풍화도가 다른 화강풍화토를 이용해 단입자특성에 미치는 화강풍화토의 파쇄성과 수분영향의 정도를 밝히고 또한 단입자 강도에 주목한 화강풍화토의 압축특성에 대해 조사하였다. 본 연

구에서 밝혀진 결과는 다음과 같다.

- (1) 화강풍화토는 파쇄강도가 작은 유색광물에서 파쇄 강도가 큰 석영에 이르기까지 복수의 광물로 구성되어 있고, 각 광물의 파쇄를 일으키는 입자강도가 서로 다르다. 또한 입자강도는 입자가 수침되어지면 그 값이 감소된다.
- (2) 일차원 압축시험에서 얻어진 항복응력은 평균 단입자 강도에 의존하고, 평균 단입자 강도가 작을수록 낮은 응력에서 항복점이 나타난다.
- (3) 화강풍화토의 높은 압축성은 입자파쇄가 주원인이고, 그 입자파쇄는 수침에 의해 더욱 증가하며 압축성도 더욱 커지게 된다.

참 고 문 헌

1. 土質工學會:風化花崗岩とまき土の工學的性質とその應用 (1980), 土質基礎工學ライブラリー16, pp.175-183.
2. 加登大學, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一 (2001), 地盤材料의 斷粒子破碎特性, 土木學會論文集, No.673/III-54, pp.189-914.
3. 加登大學 (2002), 斷粒子의 形狀および強度に基づく破碎性材料의 力學特性に関する研究, 山口大學博士論文, pp.28-29.
4. 加登大學, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一 (2002), 破碎特性材料의 粒子特性と一次元壓縮特性, 土木學會論文集, No.701/III-58, pp.343-355.
5. 堀秀道 (1992), 楽しい鑛物圖鑑, 草思社, p.181.
6. 山口梅太郎, 西松裕一 (1971), 岩石力學入門, 東京大學出版會, pp.153-159.
7. 福本武明, 原健夫 (1998), 粒狀体の粒子破碎強度分布に関する研究, 土木學會論文集, No.596/III-43, pp.91-99.
8. 平松良雄, 岡行俊, 木山英朗 (1965), 非整形試驗片による岩石の引張り強さの迅速試験, 日本鉱業會誌, Vol.81, No.932, pp.1024-1030.
9. Billam, J. (1971), Some aspects of the behaviour of granular materials at high pressures, *Proceeding of the Roscoe Memorial Symposium*, Cambridge, pp.69-80.
10. Cox, E.P. (1927), A Method of Assigning Numerical and Percentage Values to the Degree of Roundness, *Journal Paleon*, Vol.1, pp.170-183.
11. Gumbell, E.J. (1958), *Statistics of extremes*. New York, Columbia University Press.
12. Nakata, Y., Kato, Y., Hyode, M., Hyde, A. F. L., and Murata, H. (2001), One dimensional compression behaviour of uniformly graded sand related to single particle crushing strength, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.2, pp.39-51.
13. Hobbs, D. W. (1963), A Simple Method for assessing the Uniaxial Compressive Strength of Rock, *Int. J. Rock Mech. Mining. Sci.*, Vol.1, pp.5-15.
14. McDowell, G.R., Bolton, M. D. and Robertson, D. (1996), The fractal crushing of granular materials, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.44, No.12, pp.2079-2102.
15. Nakata, Y., Kato, Y., Hyodo, M., Hde, A.F.L., and Murate, H.. (2001), One dimensional compression behaviour of uniformly graded sand related to single particle crushing strength, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.2, pp.39-51.
16. Nakata, Y., Hyde, A.F.L, Hydo, M. and Murata, H. (1999), A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test, *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.567-583.
17. Webibull, W. (1951), A statistical distribution function of wide applicability, *Journal of Appl. Mech*, Vol.18, pp.293-297.

(접수일자 2004. 6. 30, 심사완료일 2004. 9. 30)