

## 단입자파쇄강도에 기초한 화강풍화토의 압축특성에 미치는 수분의 영향

### Influence of Water on Compression Characteristic of Decomposed Granite Soil Based on Single Particle Crushing Strength

함 태 규<sup>1</sup> Ham, Tae-Gew

김 옥 기<sup>2</sup> Kim, Uk-Gie

#### Abstract

In order to investigate the influence of the water on compression characteristic of decomposed granite soils, a single particle crushing test and one-dimensional compression tests were carried out on three decomposed granite soils and Silica sand. The initial fracture strength for single particle reduced and variability of the strength increases due to weakening by existing water. Moreover, it was recognized that one-dimensional compression characteristic was related to the initial fracture strength characteristic, and the initial fracture strength also has the effect of weathering.

#### 요 지

수분에 기인한 화강풍화토의 압축성 변화정도를 명확히 밝히기 위하여 풍화도가 서로 다른 3종류의 화강풍화토와 실리카를 이용해, 기건상태와 습윤상태에서 단입자파쇄시험과 일차원압축시험을 실시했다. 실험결과, 입자가 침수됨에 따라 입자표면의 강도를 나타내는 제1파쇄강도가 현저히 저하 되고, 일차원적인 압축성이 증가되는 것이 확인되었다. 이와 같은 결과는 입자가 침수됨에 따라 입자강도가 저하되어 입자파쇄가 증가하는 것에 기인하는 것으로 평가되었다.

**Keywords** : Decomposed granite soil, One-dimensional compression test, Seepage, Single particle crushing test, Weatehering

#### 1. 서 론

입자특성에 관한 연구는 20세기 중반부터 고체물리학의 급속한 발전과 더불어 활발히 진행되었고, 八幡(1986)를 시작으로 한 많은 연구자들에 의해 현재에 이르기까지 활발히 진행되고 있다. 최근 토질역학분야에서는 입자의 미시적인 입자파쇄특성과 압축특성 및 역학특성과 같은 거시적인 특성과의 관계를 규명하기 위한 연구(Nakata 등, 1999, 2001; 福本·原健, 1998; 加

登 등, 2001, 2002) 가 활발히 진행되고 있다. 加登 등(2001, 2002)은 지반을 구성하고 있는 입자특성을 명확히 규명하는 것은 거시적인 지반압축특성을 예측하는데 유효한 지표가 되는 것을 실내시험결과를 통해 정성적으로 제시하였다. 그러나 이러한 연구의 대부분은 기건상태의 입자특성에 주목되어 있으며, 수분이 입자파쇄특성에 미치는 영향 및 그 변화정도에 대한 검토는 충분히 이루어져 있지 않다.

한편, Miura 등(1975, 1983)은 함수비의 변화에 의한

1 정회원, 한국건설기술연구원 토질 및 기초연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher in Chief, Geotechnical Engrg. Division, Korea Institute of Construction Technology, hamtg@kict.re.kr, 교신저자)

2 정회원, 일본야마구치대학교 지반공학연구실 연구원 (Member, Researcher, Department of Civil and Environmental Engrg., Faculty of Engrg., Yamaguchi Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

모래지반의 입자파쇄효과가 전단강도에 미치는 영향을 조사하여, 침수로 인해 입자파쇄량이 증가되는 것을 확인하였다. 그러나 화강풍화토의 풍화정도 및 광물조성비와 침수로 인해 발생하는 입자파쇄량의 정량적인 관계는 조사되어 있지 않다.

본 연구에서는 풍화도와 광물조성이 서로 다른 3종류의 화강풍화토와 석영으로 구성되어 있는 Silica를 대상으로, 기진, 습윤상태의 단입자파쇄시험과 일차원압축시험을 실시하여 수분에 의해 야기되는 압축특성의 변화정도를 입자파쇄강도에 주목하여 규명하였다. 침수로 인한 화강풍화토의 입자강도특성 변화정도와 압축특성과의 관계를 명확히 하는 것은 화강풍화토의 물리적 특성을 더욱 명확히 이해할 뿐 아니라, 화강풍화토를 이용해 제작된 토목구조물의 호우로 인해 발생하는 침하거동을 예측하는데 중요한 정보를 제공한다고 할 수 있다.

## 2. 시험에 사용된 화강풍화토의 일차적 특성평가

본 연구에서는 풍화도가 서로 다른 3종류의 화강풍화토의 2mm체 통과분과, 비교를 목적으로 0.18~2.0mm로 입도분포를 조정한 비교적 입자강도가 강한 三河珪砂(Mikawakeisa)의 실리카(Silica)를 시험에 사용하였다.

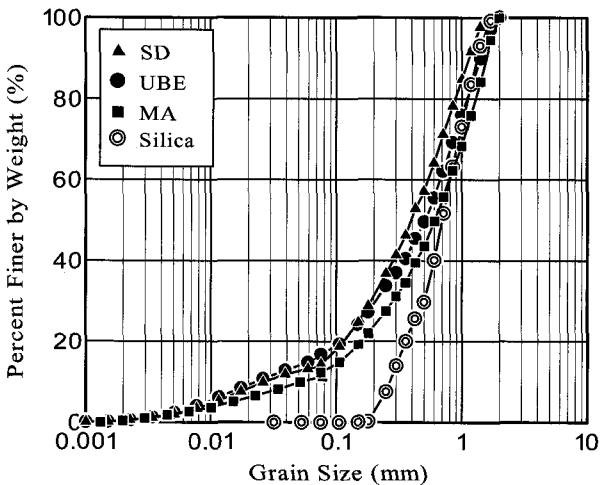


그림 1. 시료의 초기입도분포곡선

사용된 화강풍화토는 인천시 송도에서 채취한 송도화강풍화토, 일본 야마구치현(山口県) 우베시(宇部市)에서 채취한 우베화강풍화토, 그리고 시마네현(島根県) 마츠에시(松江市)에서 채취한 마츠에화강풍화토로 이하 3종류의 화강풍화토를 “SD”, “UBE”, “MA”, 三河珪砂를 “Silica”라고 칭한다. 표 1에 본 연구에서 사용된 시료의 물리적 특성을 나타내었고, 그림 1에 시료의 초기입도분포 곡선을 나타내고 있다.

본 연구에서는 시료에 함유되어 있는 1차광물 및 점토광물의 종류를 조사하기 위하여 X선회절시험을 실시

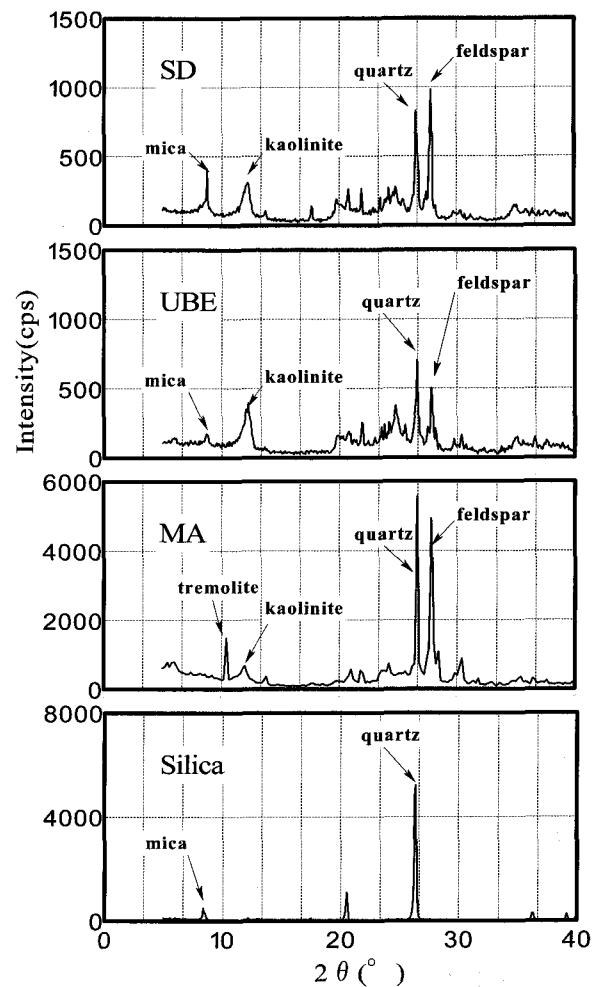


그림 2. XRD회절시험 결과

표 1. 시료의 물리적 특성

Sample	Grain size (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Coefficient of Uniformity U <sub>c</sub>	θ <sub>max</sub>	θ <sub>min</sub>	Ignition loss (%)	W <sub>opt</sub> (%)	ρ <sub>dmax</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
SD	~2.0	0.394	2.698	20.72	1.44	0.89	5.29	16.0	1.73
UBE	~2.0	0.509	2.649	29.58	1.31	0.81	3.99	15.0	1.79
MA	~2.0	0.600	2.690	15.59	1.17	0.64	1.76	14.2	1.82
Silica	0.18~2.0	0.736	2.650	2.19	0.93	0.58	1.18	-	-

하였다(그림 2 참조). 그림 2로부터 Silica는 석영과 운모로 구성되어 있고, SD와 UBE, MA는 모두 석영, 장석, 운모, 그리고 점토광물인 카올리나이트(kaolinite)로 구성되어 있는 것으로 확인되었다. X선 회절 결과를 이용해 각 시료의 평균입경  $D_{50}$ 을 분리시켜, 광물을 석영, 장석, 유색광물의 3종류로 분류한 후 각 광물의 질량을 측정함으로써 각 시료에 포함되어 있는 광물의 조성비를 조사하였다. 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3으로부터 Silica는 석영이 96%로 광물의 대부분이 석영으로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 또한, UBE와 SD는 비슷한 광물조성을 나타내며, MA는 장석이 70%를 차지하고 있는 것으로 확인되었다.

Matsuo 등(1979)은 풍화정도가 높은 시료일수록 높은 보습성을 나타내고, 비표면적, 강열감량, 흡수율 등은 화강풍화토의 풍화도를 판단하는 지표로 적정하다는 결론을 도출하였다. 또한 그 적용성은 Yasuhuku 등(1985)과 村田 등(1987)에 의해 확인되었다. 본 연구에서는 실험방법이 용이한 강열감량을 이용하여 본 연구에서 사용된 화강풍화토의 풍화도를 조사하였다. 강열감량은 JIS A 1226 (KS F 2104)에 의거하여 실시되었고, 건조로에서 건조시킨 시료를 750°C의 강열감량형 건조로에서 한 시간 건조시킨 후 강열전후의 질량차로 조사되었다. 그 결과를 표 1에 나타내었다. 실험결과로부터 강열감량은 SD, UBE, MA, Silica 순으로, SD의 풍화도가 가장 높은 것을 확인할 수 있다.

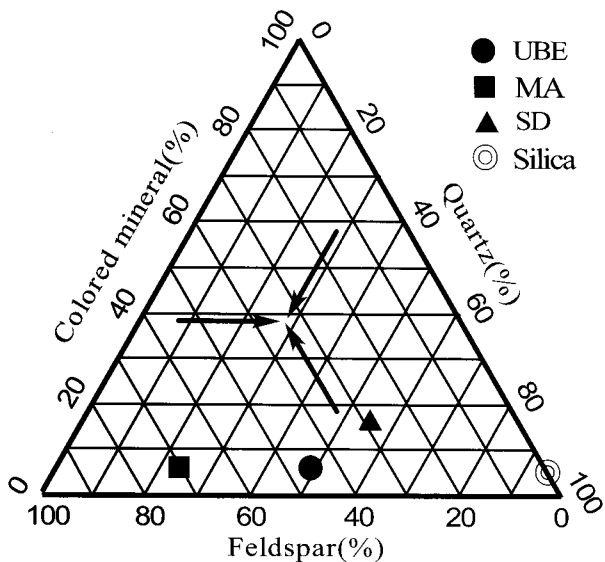


그림 3. 광물 조성비

### 3. 단입자파쇄시험

각각의 재료를 구성하고 있는 입자에 대해 단입자파쇄시험(Nakata 등, 1999, 2001; 加登 등, 2001; 威太圭 등, 2002)을 실시하였다. 단입자파쇄시험은 그림 4에 나타내고 있는 시험장치를 이용해 입자를 하부 재하판에 가장 안정된 방향으로 배치시킨 후 상판을 일정한 속도(0.1mm/min)로 하강시켜 입자를 파쇄시키는 시험이다. 시험 중 축하중과 축변위는 컴퓨터를 이용해 자동으로 측정 기록된다.

본 연구에서는 단입자파쇄강도에 미치는 물의 영향을 조사하기 위하여 각 시료에 포함되어 있는 광물(석영, 장석, 유색광물)별로 30개 이상의 입경  $D_{50}$ 에 해당하는 입자에 대하여 기건 및 습윤 상태에서 단입자파쇄시험을 실시하였다. 또한 입자파쇄 패턴의 가시화를 위하여 Silica와 SD에 대해서는 입경  $D_{90}$ 에 상응하는 1.0mm~1.5mm의 입자에 대하여 기건 및 습윤상태에서 동일한 시험을 수행하였다.

본 연구에서는 그림 5(a)와 같이 대기 중에서 자연 건조시킨 시료를 “기건상태”, 시료를 1주일간 수중에 수침시킨 후 시험 중 단입자 주위를 물로 채운 상태를 “습윤상태”(그림 5(b))로 정의하였다.

그림 6과 같이 하중과 변위 관계에 있어 최초로 출현되는 피크하중을  $F_0$ , 최대피크하중을  $F_1$ 로 정의하고 이

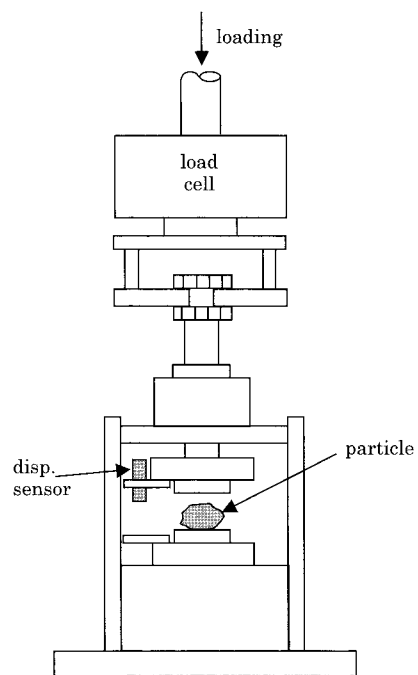


그림 4. 단입자강도시험기 개요

것을 이용하여 단입자파쇄시험 결과를 분석하였다.

단입자파쇄강도의 산출방법으로는 파쇄하중을 입자 체적의 2/3승으로 나누는 방법(山口·西松, 1971), 파쇄하중을 직접 측정할 수 있는 가압판을 이용해 얻은 파쇄하중을 입자의 접촉면적으로 나누는 방법(Hobbs, 1963), 입자를 14면체로 가정하여 가압판과 입자의 접촉면적을 산출하여 파괴하중을 구하는 방법(福本·原, 1998) 등이 있다. 본 연구에서는 加登 등(2001)과 같이 재하하중을 입자 초기높이 자승으로 나누는 방법(MecDowll 등, 1996)을 적용시켜 식 (1)을 이용해 최대파쇄강도  $\sigma_f$ 를 정의하였다.

$$\sigma_f = \frac{F_f}{h_0^2} \quad (1)$$

식 (1)에서  $F_f$ 는 시험 중에 출현되는 최대하중,  $h_0$ 는 입자의 초기높이를 의미한다.

또한 식 (2)와 같이 시험 중 최초로 발생하는 피크하중  $F_c$ 을 입자 초기높이 자승으로 나누어 제1파쇄강도  $\sigma_c$ 를 산출하였다.

$$\sigma_c = \frac{F_c}{h_0^2} \quad (2)$$

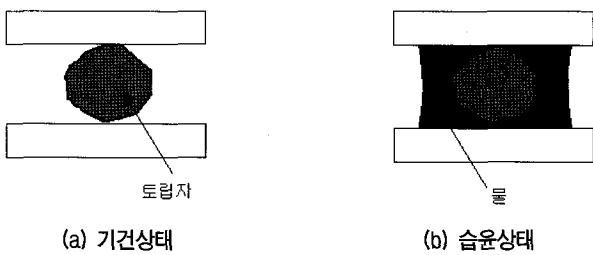


그림 5. 단입자파쇄실험에 사용한 입자의 모식도

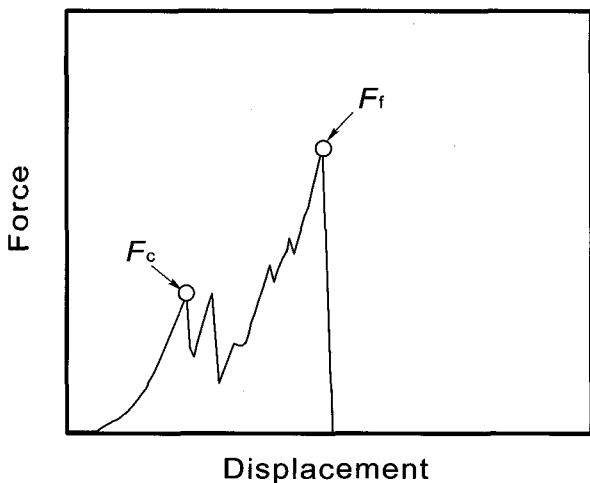


그림 6.  $F_c$  및  $F_f$ 의 모식도

식 (2)에서  $F_c$ 는 시험 중에 출현되는 최초의 피크하중을 의미한다.

그림 7에 SD의  $D_{90}$ 에 상응하는 1.0mm~1.5mm의 석영, 장석, 유색광물 입자에 대하여 실시한 단입자파쇄시험의 대표적인 결과를 응력  $\sigma$ 과  $\delta h/h_0$ 의 관계로 나타내고 있다.  $\delta h/h_0$ 는 단입자파쇄시험 중 입자파쇄로 인한 입경의 감소율을 의미한다. 그림 7로부터 석영은 기건 및 습윤상태 모두 하중이 증가됨에 따라 1회의 피크가 출현되고 최대피크하중에서 2, 3개의 입자로 파쇄가 일어나는 패턴(즉  $\sigma_f$  만이 출현되는 패턴)과 하중 증가에 따라 입자의 끝단이 서서히 파쇄된 후 입자의 중심이 파쇄되어 이때 최대피크하중이 출현되는 패턴(즉  $\sigma_c$  이 나타난 후  $\sigma_f$ 가 나타나는 패턴)의 두 가지 패턴이 주류를 이루고 있는 것을 알 수 있다. 습윤상태에 있어서 석영의 최대피크하중은 기건상태와 비교해 약간 큰 입자파쇄로 인한 입경의 감소율( $\delta h/h_0$ )에서 출현되는 경향이 있는 것으로 확인되었다. 또한 장석에 있어서는 기건, 습윤상태 모두 하중이 증가됨에 따라 입자의 돌기부분의 파쇄가 발생된 후 중심부분의 파쇄가 발생되어 피크하중이 출현되는 패턴(즉  $\sigma_c$ 이 나타난 후  $\sigma_f$ 가 나타나는 패턴)이 주류를 이루고 있는 것으로 확인되었다.

유색광물은 피크하중이 출현되지 않고 하중이 증가됨에 따라 입자가 서서히 파쇄되는 패턴만을 나타내는 것으로 확인되었다.

그림 8은 Silica의 석영과 SD의 장석, 유색광물의 입경  $D_{90}$ (1.0mm~1.5mm)의 입자를 사용해 실시한 단입자파쇄시험 결과를 최대파쇄강도의 범위( $\sigma_{fmin} \sim \sigma_{fmax}$ ), 제1파쇄강도의 범위( $\sigma_{cmin} \sim \sigma_{cmax}$ )와 그 평균값의 관계로 나타낸 것이다. 그림 8로부터 Silica의 석영, SD의 장석

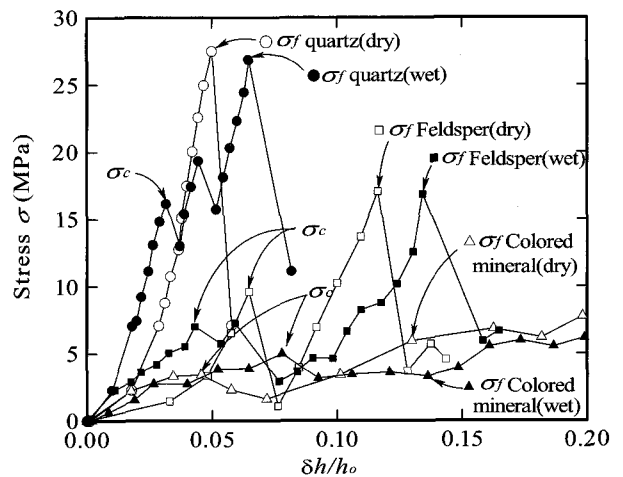


그림 7. 응력  $\sigma$ 과  $\delta h/h_0$ 의 관계

모두, 건조(dry), 습윤(wet)상태의 결과가 거의 흡사한 평균 최대파쇄강도( $\sigma_m$ )를 나타내었고, 이로써 최대 단입자파쇄특성에는 침수의 영향이 미미한 것을 알 수 있다. 반면 Silica의 석영과 SD의 장석의 평균 제1파쇄강도( $\sigma_{cm}$ )는 기건상태보다 습윤상태에 있어 그 값이 현저히 저하되는 것을 알 수 있다. 또한 유색광물은 석영, 장석에 비해 제1파쇄강도( $\sigma_c$ )가 현저히 작은 값을 나타내며, 기건, 습윤상태 모두 동일한 평균 제1파쇄강도( $\sigma_{cm}$ )를 나타내고 있다. 유색광물에서는 석영, 장석의 제1파쇄강도특성에 보이는 침수의 영향은 확인되지 않았다.

본 연구에서 사용된 시료의 입경  $D_{50}$ 의 입자를 대상으로 실시한 단입자파쇄시험의 결과에 있어서도 입경  $D_{90}$ 의 Silica의 석영, SD의 장석, 유색광물의 결과와 동일한 경향을 나타내고 있다. Nakata 등(1999, 2001)은 입자의 재질이 동일하다면 단입자파쇄강도와 입경과의 관계에는 선형적인 관계가 존재하고 입경에 관계없이 입자파쇄 패턴은 동일하다는 결론을 도출하고 있다. 이

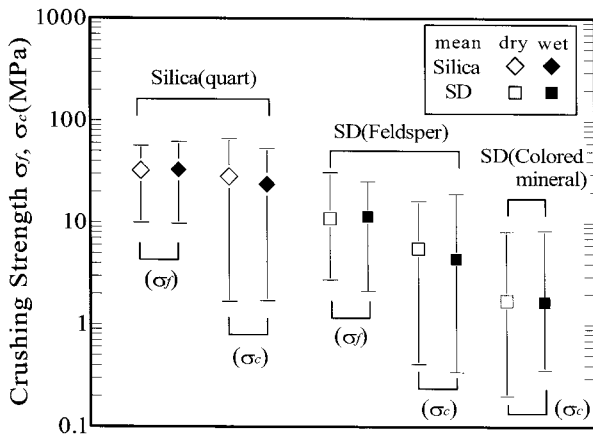


그림 8. Silica와 SD의  $D_{90}$ 에 상응하는 시료의 최대파쇄강도  $\sigma_f$  및 제1파쇄강도  $\sigma_c$ 를 나타내는 범위와 평균값

표 2. 각 시료의  $D_{50}$ 에 상응하는 입자의 평균 제1파쇄강도

Sample	$\sigma_{cm}(\text{dry})$ (MPa)	$\sigma_{cm-all}(\text{dry})$ (MPa)	$\sigma_{cm}(\text{wet})$ (MPa)	$\sigma_{cm-all}(\text{wet})$ (MPa)
SD	Quart	12.35	12.75	8.55
	Feldspar		4.40	
	Colored mineral		1.65	
UBE	Quart	15.34	17.01	11.89
	Feldspar		8.45	
	Colored mineral		1.12	
MA	Quart	17.97	23.53	14.47
	Feldspar		14.00	
	Colored mineral		1.097	
Silica	Quart	43.89		39.86

로써 본 연구에서 사용된 시료의  $D_{50}$ 과  $D_{90}$  입자의 파쇄 패턴은 재질이 동일하다고 가정한다면 동일한 파쇄 패턴을 나타낸다고 할 수 있다.

이상의 결과로부터 석영과 장석의 최대파쇄강도특성에 침수의 영향이 확인되지 않는 반면, 입자표면의 강도를 의미하는 제1파쇄강도특성에는 침수의 영향이 현저히 나타나는 것으로 평가되었다.

Yasuhara 등(1999)의 연구결과로부터 제1파쇄강도는 모래의 종류뿐 아니라 입자크기에 의존되며, 입자파쇄특성을 명확히 밝히기 위해 유효한 파라미터인 것으로 확인되었다. 본 연구에서는 입자표면의 단입자파쇄특성을 의미하는 제1파쇄강도특성에 주목해 입자의 파쇄특성에 미치는 수분의 영향을 조사하였다.

표 2에 각 시료의 평균 제1파쇄강도( $\sigma_{cm}$ )를 나타내고 있다. 제1파쇄강도( $\sigma_{cm}$ )는 각각의 광물(석영, 장석, 유색광물)  $D_{50}$ 에 상응되는 입자를 사용해 실시한 광물별 제1파쇄강도의 평균값을 의미하고,  $\sigma_{cm-all}$ 은 광물별 평균값( $\sigma_{cm}$ )과 그림 2에 나타내고 있는 광물조성의 중량비를 고려하여 산출한 평균 제1파쇄강도를 의미한다. 본 연구에서는  $\sigma_{cm-all}$ 을 이용하여 광물조성이 서로 다른 화강풍화토의 단입자강도특성을 평가하였다. 표 2로부터 전 시료에 있어 정도의 차이는 있으나 평균 제1파쇄강도특성에는 침수로 인한 영향이 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 9에는 강열감량과 기건, 습윤상태에서의 각 시료의 광물조성을 고려한 평균 제1파쇄강도와, 습윤상태의 평균 제1파쇄강도  $\sigma_{cm-all}(\text{wet})$ 를 기건상태의 평균 제1파쇄강도  $\sigma_{cm-all}(\text{dry})$ 로 정규화시킨 결과를 나타내고 있다. 여기에서  $\sigma_{cm-all}(\text{wet})/\sigma_{cm-all}(\text{dry})$ 는 광물조성을 고려한 침수로 인한 평균 제1파쇄강도의 저하정도를 의미한다. 강열감량과 평균 제1파쇄강도로부터 기건, 습윤상

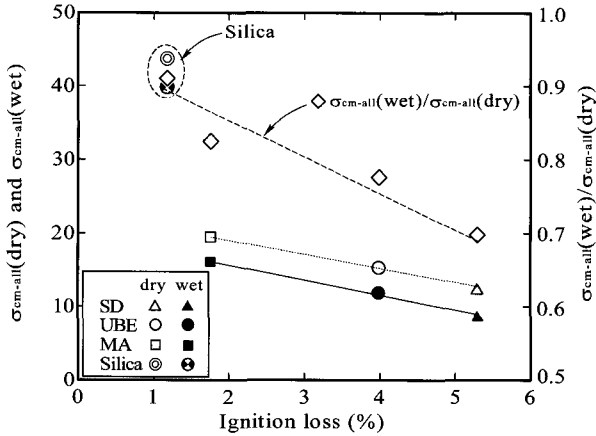


그림 9. 광물조성을 고려한 평균 제1파쇄강도 및 습윤상태의 평균 제1파쇄강도  $\sigma_{cm-all}(wet)$ 를 기건상태의 평균 제1파쇄강도  $\sigma_{cm-all}(dry)$ 로 정규화시킨 결과

태 모두 강열감량이 큰 화강풍화토는 작은 평균 제1파쇄강도를 나타내는 좋은 상관관계가 확인되었다. 또한, 모든 시료에 있어 습윤상태의 평균 제1파쇄강도는 기건상태보다 저하되는 경향을 보였고, 이것은 久保(1971)에 의해 밝혀진 기계화학(Mechanochemistry) 개념 중 “물은 입자표면의 에너지를 저하시키는 작용이 강한 액체”인 것에 그 원인이 있다고 할 수 있다. 침수로 인한 평균 제1파쇄강도 저하정도를 의미하는  $\sigma_{cm-all}(wet)/\sigma_{cm-all}(dry)$ 는 Silica가 0.9, MA가 0.82, UBE가 0.77, SD가 0.69로, 광물조성을 고려하여 산정한 평균 제1파쇄강도는 입자가 침수됨에 따라 저하되고, 풍화가 진행된 화강풍화토일수록 그 저하정도가 큰 것으로 평가되었다.

#### 4. 일차원압축특성

일차원압축시험은 직경 50mm의 링 안에 높이 10mm로 소정의 상대밀도를 목표로 공시체를 제작하여 재하 속도 0.1mm/min으로 연직하중을 증가시키는 시험으로, 본 연구에서는 일차원압축특성에 미치는 물의 영향을 조사하기 위하여 기건상태와 습윤상태의 공시체를 사용하여 최대하중 90MPa까지 시험을 실시하였다. 본 연구에서는 건조시킨 시료를 상대밀도  $Dr=90\%$ 가 되도록 탬핑법으로 제작한 공시체를 “기건상태”, 건조시킨 시료에 포화도  $Sr=100\%$ 가 되도록 물을 첨가하여 기건상태와 동일한 에너지로 탬핑법에 의해 제작한 시료를 “습윤상태”로 정의하였다.

그림 10에 기건(dry), 습윤(wet)상태에서 실시한 일차원압축시험 결과를 축변형률( $\epsilon_a$ )과 연직응력( $\sigma_v$ )과의 관

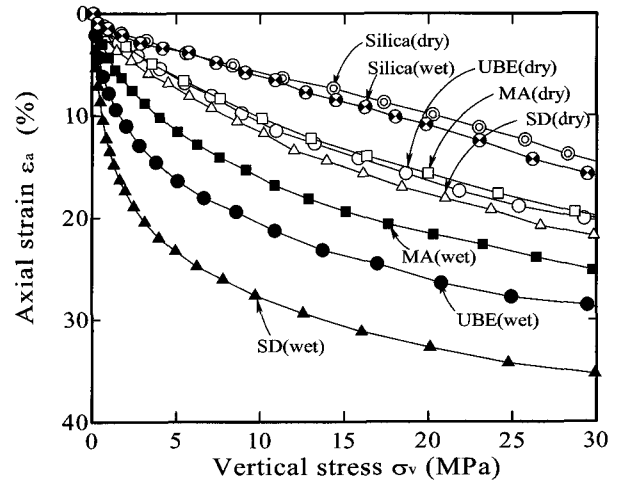


그림 10. Silica와 SD의  $D_{90}$ 에 상응하는 시료의 최대파쇄강도 및 제1파쇄강도를 나타내는 범위와 평균값

계로 나타내고 있다. 그림 10으로부터 Silica는 기건, 습윤상태 모두 동일한 곡선을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 3종류의 화강풍화토는 기건상태에서는 거의 동일한 압축특성을 나타내는 반면, 습윤상태에서의 압축성은 모든 시료에 있어 기건상태보다 증가하고 있으며, 시료의 종류에 따른 압축특성의 차이가 현저히 나타나는 것을 알 수 있다. 연직응력( $\sigma_v$ ) 20MPa에 있어, 습윤상태의 축변형률( $\epsilon_a$ )은 Silica는 11.3%, MA는 21.65%, UBE는 26.18%, SD는 32.73%로, Silica, MA, UBE, SD의 순으로 그 값이 증가하고 있으며, 이것은 표 1의 강열감량 순서와 동일하다.

본 연구에서 실시한 일차원압축시험 중 기건상태는 포화도( $Sr$ )가 0%, 습윤상태는 포화상태( $Sr=100\%$ )에 매우 가까우므로 공시체에 작용하는 석션의 영향은 무시할 수 있을 만큼 적다고 할 수 있다. 즉, 일차원압축시험 중 침수로 인해 압축성이 증가하는 것은 석션 이외의 다른 요인에 의한 것으로 추론할 수 있고, 본 연구에서는 일차원압축시험 시 발생하는 입자파쇄특성에 주목하여 연구를 진행하였다. 일차원압축시험 중에 발생하는 파쇄량을 조사하기 위하여 표면적증가량(三浦·山内, 1977)을 이용하여 정리하였다.

그림 11은 Silica와 MA의 축변형률( $\epsilon_a$ )과 연직응력( $\sigma_v$ )과의 관계를 나타내고 있고, 연직응력  $\sigma_v=0.5, 3, 9, 30MPa$ 에서 일차원압축시험을 중단시켜 입도분포를 조사하여 얻은 표면적증가량을 함께 나타내고 있다. 三浦·山内(1977)에 의해 Toyoura사를 사용하여 실시한 등방압축시험 후 조사된 표면적증가량을 그림 11에 나타내고 있다. 그림으로부터 Silica는 연직응력 10MPa 부근에서 표

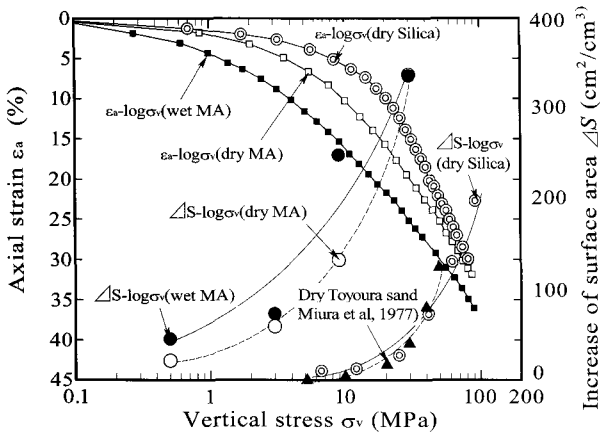


그림 11. 연직응력과 축변형률 및 표면적증가량 관계

면적이 증가되고 있으며, 三浦·山内(1977)의 시험결과와 거의 동일한 결과를 나타내고 있다. 또한 MA는 기건, 습윤상태 모두 낮은 응력영역(0.5MPa) 부근에서 입자파쇄가 발생되며, 기건과 습윤상태를 비교해 보면 연직응력 0.5MPa 부근에서는 습윤상태의 표면적증가량은 기건상태의 2배, 3MPa에 있어서는 1.2배, 10MPa에서는 1.9배를 나타내고, 20MPa에서는 거의 동일한 값을 나타내고 있다.

三浦 등(1983)은 물은 입자파쇄를 촉진시키는 작용이 강한 액체인 것을 지적하고 있으며, 화강풍화토는 그 영향을 받기 쉬운 시료인 것을 실험을 통해 확인하였다. MA의 일차원압축시험 중에 발생하는 침수로 인한 압축성의 증가는 입자강도의 저하로 인한 입자파쇄의 증가가 원인인 것으로 결론내릴 수 있다.

## 5. 단입자파쇄특성과 일차원압축특성 관계

그림 12에 표 2에 나타난 각 시료의 입경  $D_{50}$  입자의 평균 제1파쇄강도와 그림 10에서 기건, 습윤상태의 일차원압축시험결과에 있어서의 소정의 축변형률에 대응하는 연직응력  $\{(\sigma_v)\epsilon_{a=X}, X=0.5, 1.5, 3, 5, 10\%$ 과의 관계를 나타내고 있다. 또한 표 3에는 그 측정값을 나타내고 있다.

그림 12로부터 각 시료의 광물조성을 고려하여 산출한 평균 제1파쇄강도( $\sigma_{cm-all}$ )와 소정의 축변형률에 대응하는 연직응력  $\{(\sigma_v)\epsilon_{a=X}, X=0.5, 1.5, 3, 5, 10\%$ 에는 양대수상 선형적인 관계에 있는 것이 확인되었다. 또한 그 기울기는 기건상태 보다 습윤상태에 있어 더욱 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

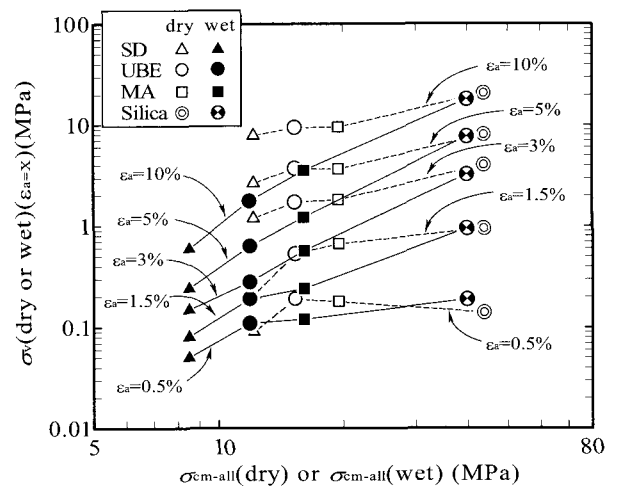


그림 12. 기건, 습윤상태의 각 시료에 대한 광물조성을 고려한 평균 제1파쇄강도와 소정의 축변형률에 대응하는 연직응력( $\sigma_v$ )과의 관계

표 3(a). 일차원압축시험 결과에 있어서의 소정의 축변형률에 대응하는 연직응력(기건상태)

$\sigma_v (\epsilon_{a=X})$	0.5% (MPa)	1.5% (MPa)	3.0% (MPa)	5.0% (MPa)	10.0% (MPa)
Silica	0.14	0.94	4.03	8.02	20.59
MA	0.18	0.67	1.82	3.68	9.58
UBE	0.19	0.53	1.72	3.70	9.40
SD	0.09	0.21	1.19	2.67	7.85

표 3(b). 일차원압축시험 결과에 있어서의 소정의 축변형률에 대응하는 연직응력(습윤상태)

$\sigma_v (\epsilon_{a=X})$	0.5% (MPa)	1.5% (MPa)	3.0% (MPa)	5.0% (MPa)	10.0% (MPa)
Silica	0.18	0.94	3.22	7.67	18.00
MA	0.12	0.24	0.57	1.21	3.55
UBE	0.11	0.19	0.28	0.63	1.75
SD	0.05	0.08	0.15	0.24	0.59

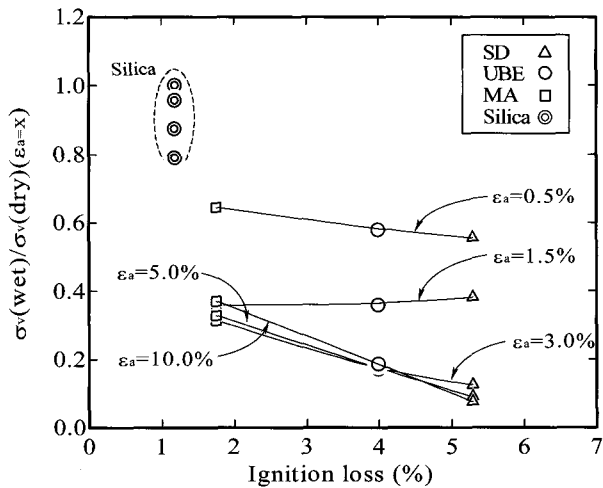


그림 13. 강열감량과 습윤상태에서 소정의 축변형율에 대응하는 연직 응력( $\sigma_v$ )으로 정규화시킨 기건상태의 연직응력( $\sigma_v$ )과의 관계

마지막으로 일차원압축특성과 풍화도와의 상관관계를 조사하기 위하여 그림 13에 강열감량과 습윤상태에서 소정의 축변형율에 대응하는 연직응력( $\sigma_v$ )으로 정규화시킨 기건상태의 연직응력( $\sigma_v$ )과의 관계를 나타내고 있다.  $\{\sigma_v\}_{\epsilon_a=x, (wet)} / \{\sigma_v\}_{\epsilon_a=x, (dry)}$ 는 일차원압축시험에 있어 침수로 인한 소정의 축변형율에 대응하는 연직응력의 저하정도를 의미한다. 그림으로부터 축변형율 0.5%, 1.5%에서는 침수로 인한 소정의 축변형율에 대응하는 연직응력의 저하정도가 시료에 무관하게 동일한 값을 나타내는 반면, 3.0%, 5.0%, 10%에 있어서는 강열감량이 큰 시료일수록 현저히 저하되는 경향이 있는 것으로 확인되었다. 이로써, 일차원압축특성에 나타나는 침수로 인한 압축성의 증가정도는 평균 제1파쇄강도특성에 의존되며, 그 증가정도는 풍화가 진행된 화강풍화토일수록 현저히 나타나는 결론을 도출할 수 있다.

이상의 결과는 화강풍화토를 사용한 성토와 같은 토 구조물에 있어 화강풍화토의 종류에 있어서는 예측할 수 없는 침하를 유발할 가능성이 있다는 것을 시사한다.

## 6. 결론

본 논문에서는 침수로 인한 화강풍화토의 압축성의 변화정도를 명확히 하기 위하여, 입자강도특성에 주목해 단입자파쇄시험 및 일차원압축시험을 실시하였다. 본 연구에서 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 석영과 장석의 최대파쇄강도특성에 침수의 영향이

확인되지 않는 반면, 입자표면의 강도를 의미하는 제1파쇄강도특성에는 침수의 영향이 현저히 나타나는 것으로 확인되었다.

- (2) 기건, 습윤상태 모두 강열감량이 큰 화강풍화토는 광물조성을 고려하여 산정한 평균 제1파쇄강도가 작은 값을 나타내는 상관관계가 확인되었다.
- (3) 광물조성을 고려하여 산정된 평균 제1파쇄강도는 입자가 침수됨에 따라 저하되고, 풍화가 진행된 화강풍화토일수록 그 저하정도는 크다.
- (4) 화강풍화토의 일차원압축시험 중에 발생하는 침수로 인한 압축성의 증가는 입자강도의 저하로 인한 입자파쇄 증가가 주요원인이다.
- (5) 일차원압축특성에 나타나는 침수로 인한 압축성의 증가정도는 평균 제1파쇄강도특성에 의존되며, 그 증가정도는 풍화가 진행된 화강풍화토일수록 현저하게 나타난다.

## 감사의 글

본 연구에 아낌없이 조언을 해 주신 일본 야마구치(山口)대학교 Masayuki Hyodo교수님, Yukio Nakata 조교수님께 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

## 참고 문헌

1. 八幡三郎 (1986), 粉砕と粉体物性, ケミカルエンジニアリング・シリーズ培風館, pp.54-100.
2. Nakata, Y., Hyde, A.F.L., Hyodo, M., and Murata, H. (1999), "A probability approach to sand particle crushing in the triaxial test." *Geotechnique*, Volume 49, No.5, pp.567-583.
3. Nakata, Y., Kato, Y., Hyodo, 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.
4. 福本武明, 原健夫 (1998), 粒状体の粒子破砕強度分布に関する研究, *土木学会論文集*, No.596, III-43, pp.91-99.
5. 加登文学, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一 (2001), 地盤材料の単粒子破砕特性, *土木学会論文集*, No.673/III-54, pp.189-193.
6. 加登文学 (2002), 単粒子の形状および強度に基づく破砕性材料の力学特性に関する研究, *土木学会論文集*, pp.28-29.
7. Miura, N. and Yamanouchi, T. (1975), "Effect of Water on the Behavior of a Quartz-Rich Sand under High Stresses", *Soils and Foundations*, Vol.15, No.4, pp.23-34.
8. 三浦哲彦, 村田秀一, 原田敦 (1983), 含水比変動に伴う破砕性土のせん断特性変化, *土木学会論文集*, No.336, pp.105-112.
9. Matsuo, S., Nishida, K. and Sasaki, S. (1979), "Physical Properties of Weathered Granite Soil Particles and Their Effect on Permeability", *Soils and Foundation*, Vol.19, No.1, pp.13-22.



10. Yasufuku, N. and Kwag, J. M. (1999), "Significance of soil particle fragmentation strength related to soil crushability", *Eleventh Asian Regional Conf on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp.149-152.
11. 村田秀一, 兵動正幸, 安福規之 (1987), 風化度に着目した乱さないま  
さ土の圧縮・せん断特性, *土木学会論文集*, No.382/III-7, pp.131-140.
12. 威太圭, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一, 加登文学 (2002), まさ土  
の絞固め特性に及ぼす破碎の影響, *地盤と建設*, Vol.20, No.1,  
pp.61-69.
13. McDowell, G. R., Bolton, M. D. and Robertson, D. (1996), "The  
fractal crushing of granular materials", *J. Mech Phys. Soils*, Vol.44,  
No.12, pp.2079-2102.
14. 久保輝一郎 (1971), *メカノケミストリー概要*, 東京化学同人, pp.  
22-106.
15. 三浦哲彦, 山内豊聰 (1977), 砂のせん断特性におよぼす粒子破碎  
の影響, *土木学会論文集*, No.260, pp.109-118.

(접수일자 2008. 8. 6, 심사완료일 2008. 9. 29)