

모래의 파쇄성과 단입자강도 특성에 관한 기초적 연구

A Basic Study on Crushability of Sands and Characteristics of Particle Strength

곽 정 민*
Kwag, Jung - Min

Abstract

Particle crushing is an important and essential factor in interpreting the strength and deformation properties of granular materials in the case of geotechnical problems related to soil crushability. As a recent field problem, the exploitation of offshore oil reserves in tropical and sub-tropical coastal shelf areas has shown that the behaviour of soils containing carbonates is markedly different from predominantly silica sands.

In this study, as a first step in making a mechanical framework of granular materials incorporating the soil crushability, single particle fragmentation tests were carried out on four different types of sands in order to clarify the characteristics of the single particle fragmentation strength as related to soil crushability. The single particle strength was considered with the influence of the particle shapes, the amount of mineral components and the particle sizes. The soil particle strength corresponding D_{50} of soil distribution curve has shown the lower value, the more the carbonate component and the more angular the particle shape.

요 지

흙의 파쇄성과 관련된 지반공학적 문제에 있어서 입상재료의 강도-변형특성을 해명하기 위한 중요한 인자의 하나로 흙입자의 파쇄를 들 수 있다. 최근, 열대·아열대 지방의 해안을 중심으로 거대한 해양 유전개발이 진행되고 있으며 이 지역에 넓게 분포된 카보네이트계 모래의 거동이 기존의 실리카계 모래의 거동에 비해 두드러지게 다르다는 것이 현장에서의 문제로 대두되고 있다.

본 연구에서는 흙의 파쇄성과 연관지어 입상재료의 역학특성을 정립하는 첫 단계로서, 흙 입자파쇄의 기본이 되는 개별입자의 파쇄 강도특성을 명백히 하기 위하여 4종류의 서로 다른 모래를 이용하여 단입자

* 정회원, 순천대학교 공업기술연구소 전임연구원

파쇄시험을 수행하였다. 단입자 파쇄강도는 모래의 입자형상, 광물성분 및 입경의 영향을 고려하였으며, 입도분포 곡선의 D_{50} 에 대응하는 흙입자 강도는 카보네이트성분의 함유량이 많을수록, 입자형상이 뾰족할수록 작은 값을 나타냈다.

Keywords : Chrusability of soil, Carbonate sand, Single particle fragmentation test (stress), Soil particle strength

1. 서론

모래는 흙입자의 집합체로서 형태를 유지하고 있으며 통상 그 입자는 견고하고 파쇄되지 않는다는 가정 하에 역학체계가 구성되어 있다. 하지만 견고한 흙입자로 구성 되어있는 모래지반이라 할지라도 외부에서 받는 응력의 크기에 따라 흙입자는 파쇄한다. 또한 같은 응력을 받는다 할지라도 입자의 재질, 형상, 입경 등에 따른 모래의 종류에 의해, 흙입자의 파쇄가 발생하는 정도가 다르다. 이러한 외력이나 재료특성에 의해 입자의 파쇄가 발생하면, 모래는 세립화 되고 간극이 메워지면서 체적 압축이 발생하게 된다. 흙입자의 파쇄가 두드러지게 발생하는 지반의 경우, 때때로 큰 압축변형이 문제가 되고 구조물 기초지반의 침하나 지지력의 평가가 어려워지는 공학적 문제를 일으킨다.

흙입자가 쉽게 파쇄되는 모래로서는 탄산칼슘을 많이 포함하고 있는 카보네이트계 모래, 화강암의 풍화 생성물인 화강풍화토 등이 알려져 있다. 특히 카보네이트계의 모래는 흙입자가 조개나 산호 등 생물의 유해로 이루어진 모래로서, 열대·아열대 지역의 대륙붕을 중심으로 세계 각지에 넓게 분포되어 있다. 최근 이러한 해역에서 대형 해양구조물을 건설하는 기회가 증가하고 있으나, 이와 같은 지반의 기초 지지력 평가를 합리적으로 수행하기 위한 입자파쇄를 고려

한 강도·변형특성의 해명이 아직은 명백히 규명되어 있지 않은 실정이다.

토질역학에 있어서 입자파쇄에 관한 문제는 대형 기초지반이나 필댐 (fill dam) 저부에서의 침하에 대한 압축이나 전단과정 및 지지력 발현 과정 등에서 검토되고 있고, 주로 모래입자들로 구성된 집합체로서의 파쇄특성에 대하여 관심을 기울여왔다. 이 집합체의 파쇄 (이하, 집합파쇄)에는 외력에 의한 파괴기구의 요인과 입자자체의 파쇄성에 기인한 요인이 혼재한다. 그 중 개별입자의 파쇄를 다루는 입자자체의 파쇄는 입자의 파쇄성에 관한 요인만을 추출해서 파괴현상을 관찰 할 수 있는 특징이 있다. 따라서 입자의 파쇄를 동반한 흙의 역학현상을 이와 같은 단입자 파쇄의 측면에서 고찰하는 것도 공학적으로 중요하다고 사료된다.

이러한 관점에서 본 연구는 사질토의 파쇄성을 규명하기 위한 기초적 연구로서 단입자의 파쇄특성에 미치는 영향요인을 실험적으로 검토했다. 구체적으로 흙입자가 파쇄되기 쉬운 특징을 대상으로 입경, 입자의 성분 및 입자의 형상에 중점을 두고 흙입자 강도의 특성을 밝혔다.

2. 시료의 특성 및 파쇄되기 쉬운 흙입자의 특징

2.1 시료의 특성

표 1. 시료의 물리적 성질

시료	ρ_s (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}	D_{50} (mm)	U_c	C _a CO ₃ 함유량 (%)
Toyoura Sand	2.640	0.985	0.606	0.16	1.6	0
Amami Sand	2.753	1.114	0.711	0.22	2.2	50
Dogs Bay Sand	2.717	1.720	1.080	0.42	2.3	93
Quiou sand	2.697	1.303	0.786	0.58	4.3	81

본 연구에 사용된 시료는 파쇄성이 틀린 3종류의 카보네이트계의 모래 즉 Dogs Bay 모래, Quiou 모래 및 Amami 모래와 실리카계인 Toyoura 모래를 이용했다. 여기서 카보네이트계 모래는 일반적으로 탄산칼슘을 많이 포함한 모래의 통칭으로서 탄산칼슘 함유율이 50% 이상인 것을 카보네이트계 모래 (carbonate sand), 50% 이하인 것을 석회질 모래 (calcareous sand) 라고 한다.

Dogs Bay 모래와 Quiou 모래는 파쇄성 사질토의 연구용 시료로 기준이 되는 모래로서 세계적으로 널리 이용되고 있는데, 이 두 종류의 모래는 입자의 형상이 크게 다르다. Dogs Bay 모래는 칼슘성분을 93% 포함하고 있고, 모래입자의 대부분이 조개의 파편과 같은 편평한 형상을 이루고 있다. Quiou 모래는 칼슘성분이 약 81%이고, 다양한 형상의 입자를 포함하고 있으며 그림 1.의 입도분포곡선에서 나타난 것처럼 세립분이 많고 입도분포가 매우 좋은 모래이다. Toyoura 모래는 실리카계의 일본 표준사로서 알려져 있고, 입도는 다른 시료에 비해 비교적 균질한 편이며 주로 석영으로 이루어져 있다. 또 화학적으로 안정되어 있고 경도 6~7의 매우 단단한 결정구조를 가지고 있으며, 뾰족한 부분이 적은 입자구조 때문에 10MPa를 넘는 고압까지는 파쇄가 쉽게 발생하지 않는다고 알려져 있다 (Miura, 1971). Amami 모래는 일본의 서남부 군도에 분포하는

카보네이트계의 모래로서 50%의 칼슘성분과 50%의 실리카 성분으로 구성되어 있으며, Toyoura 모래보다 각진 입자를 많이 포함하고 있다. 각 시료의 물리적 성질은 표 1.에 나타낸 바와 같다.

2.2 시료의 입도분포 및 형상분류

2mm이하로 입도 조정을 한 시료의 입도분포 곡선은 그림 1.과 같다. 이 입도분포 곡선에서는 각 시료의 50%입경 D_{50} 을 알 수 있는데, Toyoura 모래의 D_{50} 값이 가장 작은 값을 나타내고 있다. 입자형상의 불규칙성을 간편히 숫자로 표시하는 방법은 많은 연구자로부터 제안되어 있는데, 이 논문에서는 그 중에서 널리 이용되고 있는 Lees (1964)의 형상계수 (shape factor)를 사용했다. 그림 2.에서는 현미경 관찰을 통해 흙 입자의 치수를 결정하는 방법을 모식적으로 나타냈다. 입자의 최대길이를 L, 중간길이를 B, 최단길이를 입자의 두께 T로 할 경우, Elongation Ratio (E_R), Flatness Ratio (F_R), Shape Factor (S_F)는 다음 식으로 주어진다.

$$E_R = B/L \quad (1)$$

$$F_R = T/B \quad (2)$$

$$S_F = F_R/E_R = B^2/(L \cdot T) \quad (3)$$

본 연구에 사용한 4종류의 시료에 대한 입자

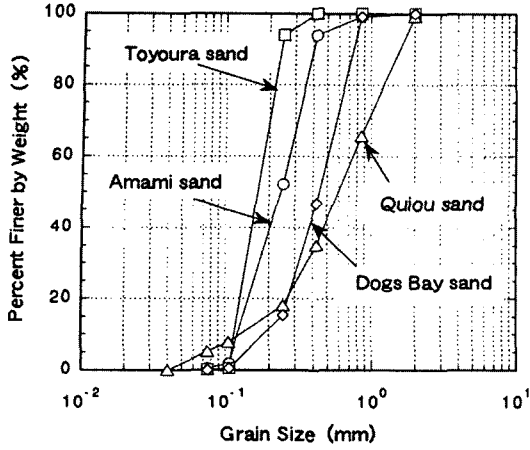


그림 1. 시료의 입도분포곡선

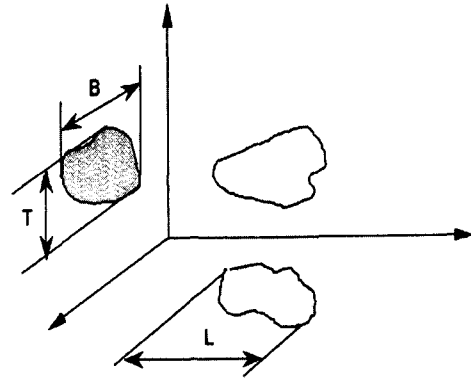


그림 2. 입자형상 정의의 모식도

형상분류의 결과는 그림 3.과 같다. 그림 3.에 나타난 자료의 범례표시는 각 시료에 있어서 약 50 개정도의 입자에 대한 평균값이다. 종 좌표인 Elongation Ratio (E_R)과 횡 좌표인 Flatness Ratio (F_R)은 그림 2.와 식 (1)~(3)에 의한 값이다. 이 지표들은 모두 입자형상의 특성을 평가하는 값으로, 양 좌표는 1에 가까워질수록 편평한 형상 또는 봉 형태가 구형(정다면체)이 되는 것을 의미한다. 그림 3.에는 각각의 모래에 대한 E_R 과 F_R 의 비로서 주어지는 Shape Factor (S_F) 값

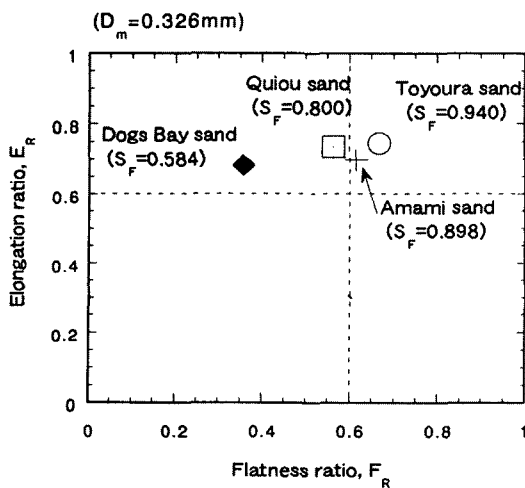


그림 3. 시료의 입자형상 분류도

이 나타나있는데 이 S_F 가 1에 가까워질수록 입자형상은 구형에 근접된다고 할 때, Dogs Bay 모래가 가장 편평율이 높고, Toyoura 모래가 가장 구형에 가까운 입자형상을 나타내고 있다. 그림 3.의 형상분류도에서는 나타나지 않는 입자형상의 특징을 현미경 관찰에 의해 설명하면, Dogs Bay 모래, Amami 모래, Toyoura 모래는 대부분 하나의 성분으로 이루어진 입자구조를 가진 반면, Quiou 모래는 재결정된 단체입상구조의 입자가 많았다. 또한 Dogs Bay 모래의 대부분 입자는 조개나 산호의 파편으로 이루어져 있기 때문에 편평한 입자형상을 가진다. Quiou 모래는 그림 3.에서 Toyoura 모래와 형상이 거의 일치하고 있지만, 작은 입자들이 재결정된 형태의 입자가 많으므로, 입자의 표면은 뾰족한 형태인 것을 알 수 있었다.

2.3 파쇄되기 쉬운 모래의 특징

지반공학적으로 사질토의 입자파쇄에 대한 문제는 주로 집합파쇄의 형태로서 취급되고 있고, 입자파쇄를 개별 입자의 파쇄 측면에서 고찰할 필요성이 있다는 것은 앞 절에서 서술했다. 이 절에서는 기존의 집합파쇄에 대한 연구결과

로부터 파쇄되기 쉬운 흙입자의 특징을 예로서 들고, 모래의 입자파쇄에 미치는 영향요인을 검토하였다.

모래의 입자파쇄에 관한 연구는 Terzaghi와 Peck (1948)로부터 시작되었으며, 이들은 일차원 압축시험에서 입자파쇄의 발생을 확인하였고, 입자파쇄에 의해 재하응력의 대수와 간극비의 관계곡선 기울기가 응력의 증가에 따라 급격히 커지는 것을 알 수 있었다. De Souza (1958)는 입경과 입자형상이 다른 3종류의 입상재료를 이용한 일차원 압축시험을 수행하여, 입자파쇄에 있어서 파쇄응력의 존재를 명백히 했다. 그는 파쇄응력의 전 후에서 압축특성이 달라지고 파쇄응력 이하에서는 입자파쇄가 대단히 적으며, 입자가 뾰족할수록 파쇄응력은 작아지고 파쇄되는 양은 많아진다는 것을 구명하였다. 또한 이와 유사한 시험재료를 이용하여 삼축압축시험을 수행한 Kjamsli와 Sande (1963)도 De Souza와 같은 결과를 나타내고 있다. Miura와 Yamanouchi (1971)는 모래입자의 파쇄 정도를 상세히 조사해서 입자의 입경이 클수록, 각이 많아지고 뾰족할수록, 입자강도가 작을수록, 모래의 균등계수가 작을수록 입자파쇄가 발생하기 쉽다고 밝히고 있다.

파쇄성 사질토는 화강풍화토나 카보네이트계 모래에서 나타나는 바와 같이 구성입자의 결정이 약하고 입자의 형상이 둥글지 않다는 것을 알 수 있다. 또한 입경이 비교적 크다는 특징 등을 들 수 있다. 그 중 입자의 성분은 광물의 결정성분에 기인한 정도에 의해 개략적으로 나타낼 수 있다. 그림 4에서 알 수 있듯이 광물의 결정성분은 카보네이트계 모래의 흙입자 파쇄에 있어 하나의 주원인이 된다. 그림에 나타나 있는 화살표는 경도가 작아지는 방향으로 모래에 포함된 광물성분의 양에 따라 파쇄되기 쉬워지는 방향을 나타내고 있다.

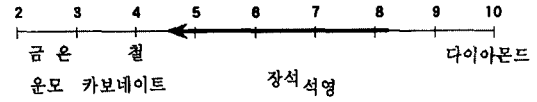


그림 4. 광물 결정성분의 정도에 나타난 파쇄되기 쉬운 정도

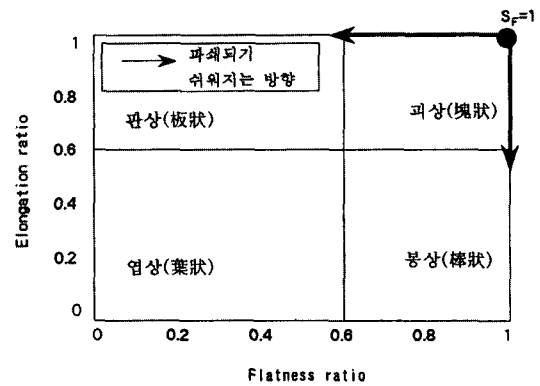


그림 5. 흙입자 형상분류도에 나타난 파쇄되기 쉬운 정도

또 입자의 광물성분이 같다면, 입자형상이 각이 져 있을수록 예각부에 응력 집중이 생기기 쉽기 때문에 입자가 쉽게 파쇄된다. 지반재료의 입자파쇄에서는 접촉하고 있는 구조적으로 약한 부분이 먼저 파쇄되기 때문에 입자파쇄에 따른 입자형상의 영향이 크다고 생각된다. 이러한 입자형상이 입자파쇄에 주는 영향을 Lees (1964)의 형상분류에 의해 모식적으로 나타내면 그림 5와 같다. 이 그림 5는 종축에 입자의 최대길이와 중간길이의 비, 횡축에 중간길이의 최대길이의 비를 나타내었다. 그림 5.중에는 입자의 파쇄가 일어나기 쉬워지는 방향이 나타나있다. 모래가 파쇄되기 쉬운 정도에는 입자의 광물성분에 따른 영향도 크지만, 입자의 광물성분이 같은 경우에는 각이 진 형상을 가진 입자가 더욱 파쇄되기 쉽다고 할 수 있다. 이것은 뒷장의 단입자 파쇄시험 결과에서도 명백히 나타난다.

Miura (1971)의 연구보고를 기초로 하여 본 연

구에서 사용한 4종류 모래의 흙입자 특성으로부터 파쇄되기 쉬운 정도를 나타내면 다음과 같다.

- 입경의 크기 : Quiou 모래 > Dogs Bay 모래 > Amami 모래 > Toyoura 모래
 입자의 편평도 : Dogs Bay 모래 > Quiou 모래 > Amami 모래 > Toyoura 모래
 입자의 성분 : Dogs Bay 모래 > Quiou 모래 > Amami 모래 > Toyoura 모래

여기서, 입자의 크기는 입도분포 곡선의 D_{50} 에 해당하는 값이고, 편평도는 그림 2의 형상분류 결과에서의 형상계수를, 입자의 성분은 칼슘 결정 성분의 함유량을 나타낸다.

이들의 결과로부터 알 수 있듯이 모래의 파쇄성은 입자의 형상과 강도, 강도의 요인이 되는 광물성분 등에 중점을 두면, 대체로 파쇄되기 쉬운 정도를 정성적으로 알아 볼 수 있다. 그러나, 파쇄성을 역학특성에 직접 반영시키는 데는 많은 지배인자의 영향을 고려할 필요가 있다.

3. 단입자 파쇄응력

3.1 단입자 파쇄시험의 개요

단입자 파쇄시험은 비교적 큰 흙입자가 파쇄되기까지의 최대강도를 구하는 시험으로서, 선구적 연구는 Marsal (1975) 등에 의해 수행되었다. 그들은 크기가 같은 3개의 입자를 재하판 사이에 놓고 파괴한 후, 그 평형관계로부터 개별입자의 강도를 구하는 방법을 보고했다. 본 연구에서는 Lee (1992)와 같은 방법으로 그림 6.에서 나타내고 있는 바와 같이, 한 개의 입자를 재하판 사이에 놓고 변형제어의 조건으로 재하하는 방법을 이용했다. 또, 그림 7.은 일반적인 시험결과에 대한 모식도로서 여기서는 Lee (1992)가

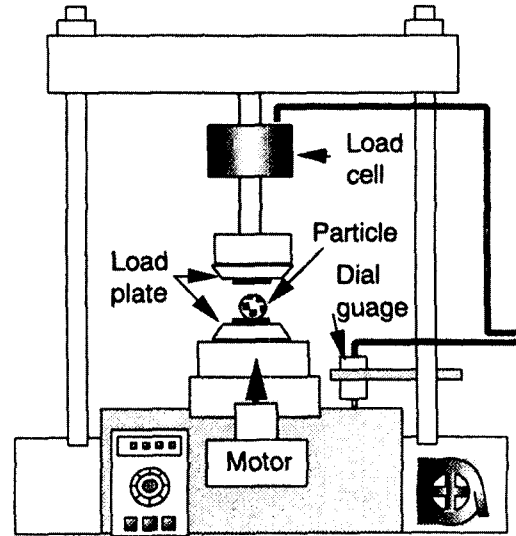


그림 6. 단입자 파쇄시험 장치의 모식도

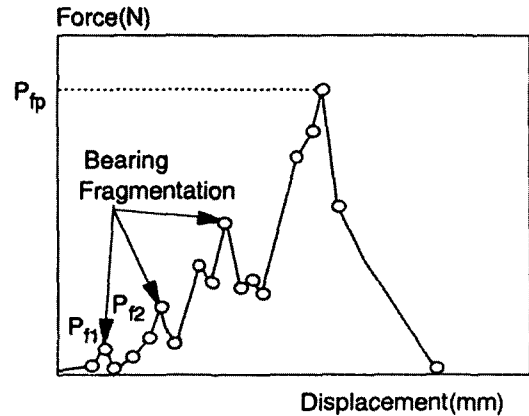


그림 7. 단입자 파쇄시험의 일반적인 결과

나타낸 바와 같이 그림 7.중의 P_{11} 을 최초에 나타나는 부분파쇄력, P_{fp} 를 피크의 파쇄력이라 규정하고, 본 시험결과를 이용한 흙입자의 강도에 대해 고찰했다.

시험에 사용한 시료는 표준 체를 통과시켜 (A) 0.075 ~ 0.106mm, (B) 0.106 ~ 0.25mm, (C) 0.250 ~ 0.425mm, (D) 0.425mm ~ 0.85mm, (E) 0.85mm ~ 2.0mm의 각 급으로 분류하고, 입자의 체눈의 크기

를 $d_i(\text{mm})$ 로 하여 각 체에 남는 시료를 대상으로 각 급에서의 평균입경을 다음과 같이 산출했다.

$$d_m = \sqrt{(d_i \times d_{i+1})} \quad (4)$$

시험은 각 그룹별로 무작위로 추출한 50개 이상의 흙입자를 대상으로 수행하였다. 또한 시험의 편의상 시료의 직경이 0.1mm 이상만을 대상으로 하였다.

3.2 단입자 파쇄모드

단입자의 파쇄되는 형태는 입자의 광물성분에 따라 다르고, 또한 같은 성분의 입자라고 할 지라도 입자의 형상에 따라 다르다. 여기서는 표 2에 나타낸 것과 같이 입자의 성분은 석영모래와 카보네이트 모래로 분류하고 입자의 형상을 둥근 형상과 각진 형상 및 편평한 형상으로 나누어 파쇄모드를 관찰했다. 표 2로부터 석영 모래는 편평한 흙입자가 없다는 것을 알 수 있다. 이렇게 구분한 파쇄모드를 기초로하여 단입자 파쇄응력의 결정법에 대하여 서술하고자 한다.

그림 8~그림 10.은 각 입자의 대표적인 파쇄모드의 스케치와 하중-변위 관계를 나타낸 것이다. 그림 8.(a), (b)는 대부분 Toyoura 모래에 포

표 2. 단입자 파쇄모드에 고려한 항목

광물성분		석영	카보네이트계
입자형상	둥근 형상	(○)	(○)
	각이진 형상	(○)	(○)
	편평한 형상	(×)	(○)

함된 비교적 단단한 실리카계의 입자에 대한 하중과 변위의 관계로서, 각각 둥근 입자와 각이진 입자형상의 결과를 나타내고 있다. 또한 그림 9.(a), (b)는 카보네이트계의 약한 입자로 형성된 Quiou 모래의 둥근 형상과 각진 형상의 결과를 나타낸 것이다. 그리고, 그림 10.은 약한 카보네이트계의 편평한 입자형상을 가진 Dogs Bay 모래에서 측정된 하중과 변위의 관계이다.

그림 8.에서 Toyoura 모래의 파괴형태는 하중의 피크 시에 입자전체가 3~4개로 부서지는 압력 인장파괴로 나타났다. (a)에 나타난 둥근 입자의 경우, 피크파괴력 P_{fp} 는 부분 파괴력 P_{f1} , P_{f2} 가 나타난 후 P_{fp} 에 도달했다. 그림 9.의 Quiou 모래에서 주로 나타나는 카보네이트계 모래의 파괴형태는 하중의 증가와 함께 조금씩 부서져 양 재하판 사이에 구속되어 눌리는 압축형태의 파괴가 주로 관찰되었다. 그 결과, 하중과 변위의 관계에서는 입자가 부분적으로 파괴되는 순간 첨

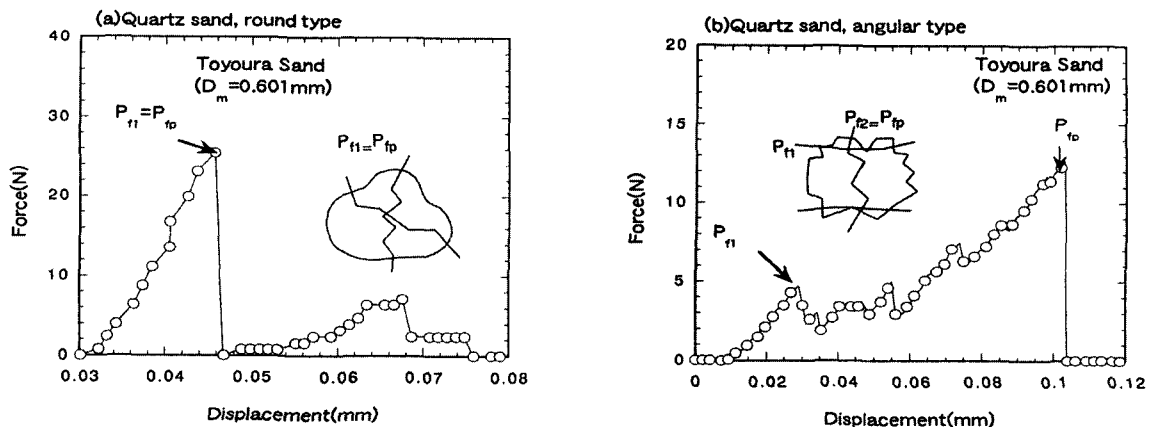


그림 8. 석영모래의 단입자 파쇄시험 결과와 파쇄모드의 스케치

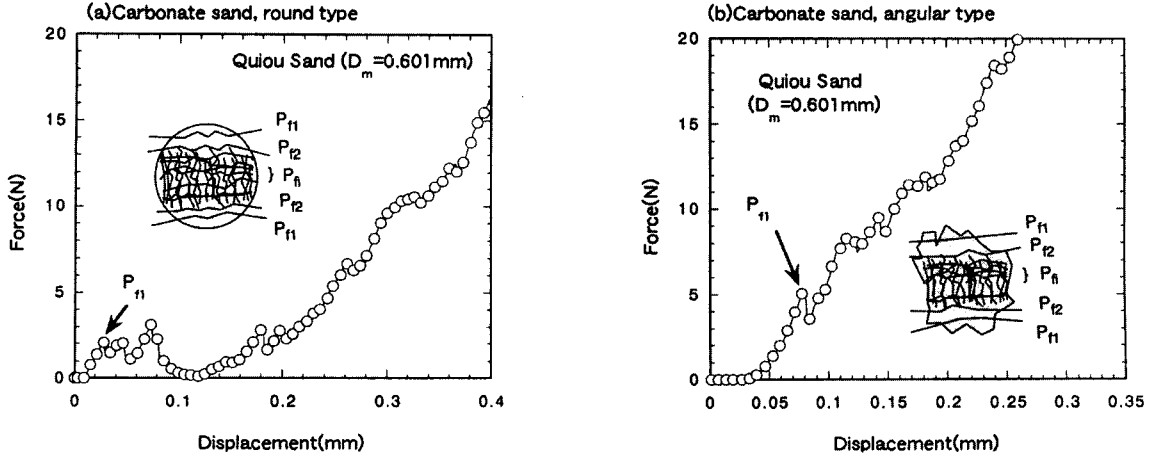


그림 9. 카보네이트계 Quiou 모래의 단입자 파쇄시험 결과와 파쇄모드의 스케치

두강도에 도달하게 되고, 곧바로 경화하는 형태의 단계적 증가 파괴를 나타냈다. 이러한 경우에는 그림 9.(b)의 하중과 변위의 관계에서 볼 수 있는 바와 같이 피크가 명확히 나타나지 않았다.

또, 그림8과 그림 9.(a)에 나타난 바와 같이 입자형상이 둥근 경우의 파쇄모드는 하중의 첨두값에 도달한 후 거의 0까지 급격한 하중감소가 나타나지만, 그림 8.과 그림 9.(b)에서 나타내는 입자형상이 뾰족한 입자의 파쇄모드는 입자 자

신의 부분적인 압력 인장파괴가 단계적으로 발생하고, 그 결과로서 하중과 변위의 관계는 파형을 나타낸다. 한편, 그림 10.에 나타난 Dogs Bay 모래에 대한 파괴모드의 경우, 입자전체가 부서지지 않고 재하판에 닿은 부분이 두 조각 나는 파쇄의 형태를 나타냈다.

이상의 입자가 파쇄하는 현상을 면밀히 관찰하여 파쇄모드의 특징을 고찰할 때, 흙입자의 광물성분과 형상이 다른 여러 가지 시료를 피크하중에서 비교하기는 매우 곤란하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 하중과 변위의 관계에서 최초로 나타나며 각 입자의 가장 약한 부분의 파쇄에 대응한다고 생각되어지는 부분파쇄하중 P_{f1} 을 단입자 파쇄하중이라고 정의하고, 그 파쇄하중 P_{f1} 과 파쇄면적 $A(\text{mm}^2)$ 에서 단입자의 파쇄응력 σ_{sf} 를 다음과 같이 정의했다.

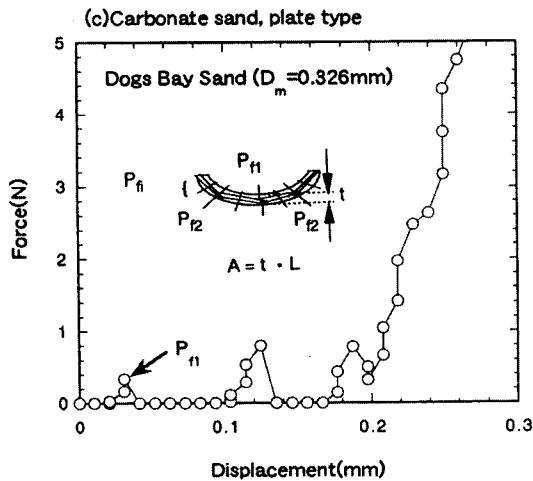


그림 10. 카보네이트계 Dogs Bay 모래의 단입자 파쇄시험 결과와 파쇄모드의 스케치

$$\sigma_{sf} = P_{f1} / A \quad (5)$$

여기서, 파쇄면적 A 는 Toyoura 모래, Amami 모래 및 Quiou 모래의 경우, 평균입경 d_m 에 대해 $A = \pi \cdot d_m^2 / 4$ 로서 산정했다. 한편, Dogs Bay 모래의 경우에는 거의 편평한 입자형상때

문에 각 평균입경의 그룹에서 입자의 두께를 측정해서 그 평균값을 t_i 라 했을 때, 원형의 곡률을 무시하고 평균입경 d_{mi} 를 짧은쪽 길이 L 로 생각해서 $A = t_i \cdot L$ 로 산정했다.

3.3 단입자 파쇄응력과 평균입경과의 관계

입의 입경의 모래에 대하여 단입자 파쇄응력의 대표값을 구하기 위해서는, 단입자 파쇄응력의 불규칙한 분포를 확인할 필요가 있다. 여기서는 각 평균입경 d_{mi} 가 0.326mm인 시료에 대하여 랜덤하게 추출한 시료의 수에 대한 누적표본수와 평균 파쇄하중의 변화를 그림 11에 나타냈다. 이 결과로부터 모든 모래의 경우, 입자 갯수가 적을 때는 P_{fi} 의 변동이 매우 크지만, 입자 갯수가 증가하면 P_{fi} 의 값은 어떤 일정값에 수렴되어 가는 것을 알 수 있었다. 따라서, 적어도 30개 이상의 시험결과로부터 각 입경 그룹에서의 입자에 대한 평균적인 강도를 구할 수 있다는 것이 판단되었다. 본 연구에서의 단입자 파쇄응력은 각각의 평균입경 d_{mi} 의 입자에 대해 50개 이상의 파쇄시험 결과에 기인해서 산정했다.

그림 12는 평균입경 d_{mi} 가 0.326mm인 Amami 모래의 단입자 파쇄응력의 도수분포를 나타낸 것이다. 다른 모래의 경우에도 거의 같은 분포 형상을 보였으며 여기서도 단입자 파쇄응력의 분포가 매우 불규칙한 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 그림 12의 도수분포에서 95% 신뢰구간의 실험값을 대상으로 하여 평균값을 구하고 그 값을 어떤 평균입경 d_{mi} 를 가진 그룹의 모래에 있어서의 단입자 파쇄응력의 대표값으로 간주했다.

그림 13은 그 파쇄응력과 평균입경 d_{mi} 의 관계를 나타낸 것이다. 사용한 모든 시료에 대해 평균입경이 커질수록 입자의 강도는 저하하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한 그 저하경향은 양 대수 그래프에서 직선적으로 나타났다. 따라

서, 평균입경과 파쇄응력과의 관계는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{fi}/A = \sigma_{sf} = Z \cdot d_m^b \quad (6)$$

여기서, Z 는 재료정수로서 단위입경($d_m=1mm$)에 있어서 단입자 파쇄응력으로서 주어진다. 또한 계

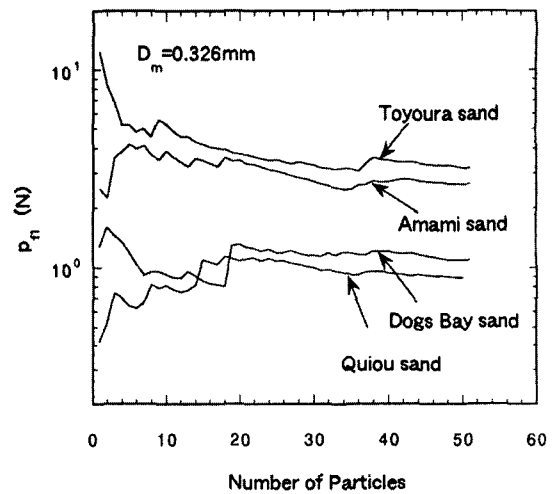


그림 11. 입자 갯수의 누적표본수 증가에 따른 누적 파쇄하중의 변화

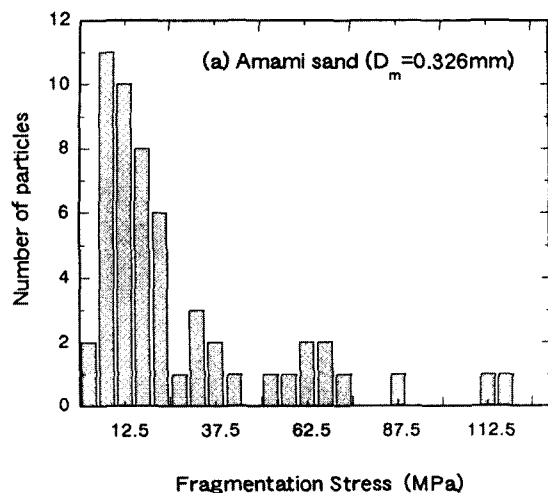


그림 12. 단입자 파쇄응력의 도수분포

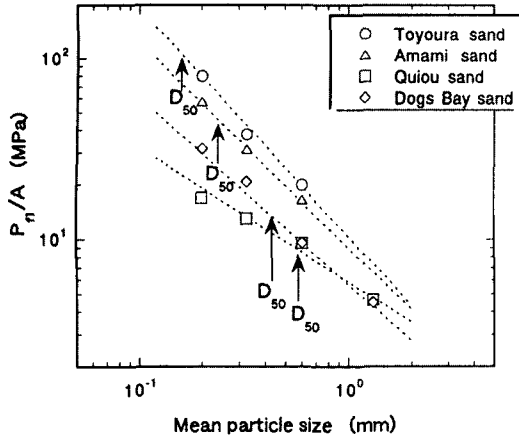


그림 13. 각 시료의 단입자 파쇄응력과 평균입경 (d_m)과의 관계

수 b 는 그림 13.에서의 각 시료에 의한 시험결과와 기울기를 나타낸다. 이와 비슷한 경향은 비교적 큰입자의 모래와 자갈재료를 중심으로 측정된 Lee의 결과에도 나타났으며, 그림 13의 경향은 균질재료의 입경효과라는 입장에서 설명된다. 즉, 한 개의 입자는 성분이 같으면 큰 입자가 많은 균열을 포함하고 있다고 할 수 있고, 이들 균열이 재료전체의 강도로서는 낮은 인장응력을 나타내는 요인이라

고 생각된다. Griffith (1921)는 이러한 입경과 응력의 관계를 식 (6)에서의 계수 $b = -0.5$ 가 된다고 다음 식을 제시하였다.

$$\sigma_{sf} \propto 1/\sqrt{d} \quad (7)$$

이 특성에 기인하면 식 (6)의 관계는 모래의 단입자 파쇄응력의 일반적인 특성이라고 생각할 수 있으며, 그림 13.의 시험결과에서 b, z 등의 재료정수를 알고 있다면 입자의 입경에 있어서 단입자 파쇄응력을 추정할 수 있고, 대상으로 한 입경 범위 내에서 입자파쇄응력의 대소관계는 대체로 Toyoura 모래, Amami 모래, Dogs Bay 모래, Quiou 모래의 순서로 나타난다.

4. 흡입자 강도의 대표값과 입자성분 및 형상과의 관계

4.1 모래의 파쇄성을 평가하기 위한 흡입자 강도의 대표값

그림 13.과 같은 단입자 파쇄시험의 결과를 이용하면, 구한 식 (6)에서의 재료정수 z 및 b 의 값

표 3. 단입자 파쇄시험 결과

시료	입경 그룹 (mm)	P_{n1}/A (MPa)	직선기울기(b)	재료정수(z)	$\sigma_{sf(D50)}$ (MPa)
Toyoura Sand	B	80.29	-1.26	10.23	102
	C	38.02			
	D	20.06			
Amami Sand	B	57.67	-1.14	8.98	45
	C	31.40			
	D	16.68			
Quiou Sand	B ($D_m=0.200$)	17.01	-0.74	5.32	8.8
	C ($D_m=0.326$)	13.04			
	D ($D_m=0.601$)	9.56			
	E ($D_m=1.304$)	4.66			
	F ($D_m=3.082$)	2.08			
Dogs Bay Sand	B ($t=0.10$)	31.70	-1.04	5.78	14
	C ($t=0.13$)	20.85			
	D ($t=0.15$)	9.66			
	E ($t=0.18$)	4.54			

을 구할 수 있고, 모래의 각 입경에 있어서의 흙입자 강도를 규정할 수 있다. 원래 모래지반은 구성하고 있는 재료에 의해 입도분포가 다르기 때문에 단입자 파쇄응력을 나타내는 특정한 값으로서, 지반 물성치와의 대응을 생각할 경우에는 지반을 구성하는 모래입경의 대표값을 규정할 필요가 있다. 여기서는 입도분포를 나타내는 입경가적곡선에서의 50%입경 D_{50} 을 대표입경으로 하고 그 값에 대응하는 파쇄응력을 그 모래의 단입자 파쇄응력의 대표값으로 규정한다. 그러므로 앞 절에서 나타낸 D_{50} 값으로부터 단입자 파쇄응력을 그림 13.의 선형 하강관계직선을 이용해 구하면, Toyoura 모래가 102MPa, Amami 모래가 45MPa, Dogs Bay 모래가 14MPa 및 Quiou 모래가 8.8MPa로 결정되어진다. 이 D_{50} 값에 대응하는 파쇄응력의 결과를 그 모래의 강도로 생각하고, 시험으로부터 구한 주요결과를 나타내면 표 3.과 같다.

4.2 흙입자 강도의 대표값과 입자성분 및 형상의 관계

흙입자의 파쇄에서는 흙입자의 성분과 입자형상의 영향을 크게 받는다. 단입자 파쇄응력과 입경의 관계에서 구한 흙입자 강도의 대표값은 구성입자의 성분과 형상을 반영한 값이라 할 수 있다. 입자의 성분을 칼슘성분의 함유량에 착안하고 입자형상을 형상계수에 착안하여, 사용시료에 대한 칼슘성분의 함유량과 그림 3.에서 나타낸 형상분류 결과를 이용하여 성분·형상과 흙입자 강도와의 비교를 수행했다. 그림 14.는 횡축에 칼슘함유량을, 종축에 흙입자 강도의 대표값을 나타낸 그래프이다. 이 그림으로부터 모래에 칼슘(CaCO_3) 성분이 많을수록 흙입자 강도는 대체로 저하하고 있는 것을 알 수 있었다. 흙입자 강도와 입자형상의 관계는 그림 3.에서의 형상분류계수 S_F 값을 이용해 그림 15.에 나

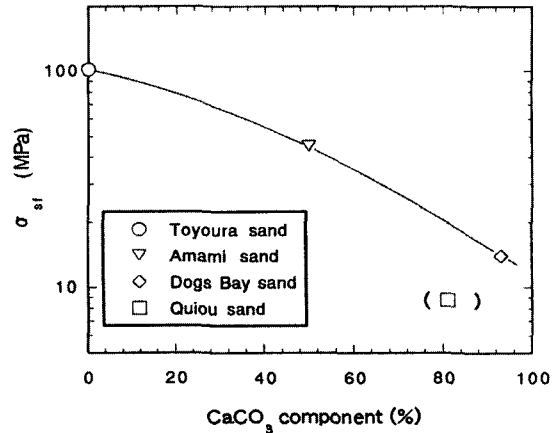


그림 14. 칼슘 함유량과 흙입자 강도 관계

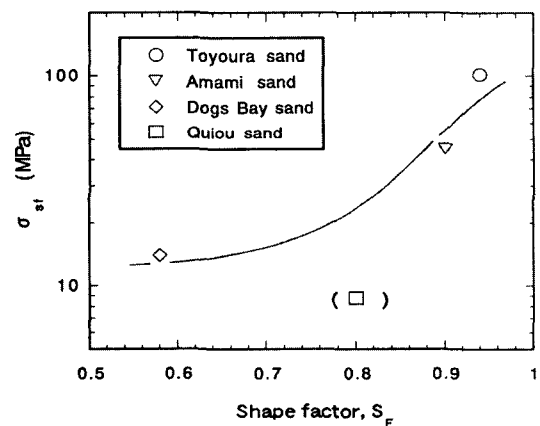


그림 15. 입자 형상계수와 흙입자 강도 관계

타냈다. 형상계수 S_F 값은 1에 가까운 값일수록 구체(정다면체)의 입자형상을 나타내므로, 그림 15.로부터 흙입자의 강도는 입자형상이 구체에 가까워질수록 큰 값을 나타낸다.

한편 Quiou 모래는 2.2절의 현미경 관찰에서 설명한 바와 같이, 재결정되어 있는 구조의 입자가 많고 각이진 곳이 많기 때문에 그림 14.와 그림 15.에서 나타내는 것처럼 흙입자 강도에 칼슘 성분과 형상계수가 직접 반영된다고 제한하기 어렵고, 결정구조 등이 다른 요인을 포함하고 있다고 생각되어진다.

5. 결론

본 연구는 모래의 파쇄성에 대한 기본적 특성을 흙입자 자체의 파쇄에 착안해서 입자의 성분, 형상, 사이즈 그리고 입도분포를 고려한 흙입자 강도를 구하는 단입자 파쇄시험의 개요 및 단입자 파쇄응력의 규정법 등을 정리했다. 또한 흙입자 강도와 모래의 칼슘성분 함유량 및 입자형상의 관계를 검토했다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 모래의 파쇄성은 흙입자의 파쇄에서부터 검토할 필요성이 있고, 흙입자가 파쇄하기 쉬운 주요 조건으로 입자의 광물 결정성분의 강도, 입자형상의 각이 진 정도를 들 수 있다.
- 2) 각 시료의 단입자 파쇄응력을 구하는 시험방법을 명료하게 나타내었으며, 결과의 불규칙한 분포를 유효하게 이용하기 위해서는 각 입경의 흙입자에 대해 적어도 30개 이상의 시험이 필요하다는 것을 알았다.
- 3) 단입자 파쇄는 입자의 성분 및 입자형상에 의해 파쇄모드가 다르게 나타났다. 이러한 파쇄모드를 고려하면 입자의 성분, 형상이 다른 각 시료의 입자파쇄응력은 입자의 가장 약한 부분의 파쇄를 나타내는 최초의 파쇄하중과 파괴면적을 이용하여 P_n/A 로서 단입자 파쇄응력을 정의할 수 있다.
- 4) 단입자 파쇄응력과 입경과는 양 대수에서 직선적인 감소관계를 나타내며, 입경이 작은 흙입자일수록 큰 강도를 가지고 있다는 것을 입증하였다. 단입자 파쇄응력과 입경의 관계를 나타내는 그림 13.과 식 (6)으로부터, 임의의 입경에 있어서 흙입자 강도를 규정시킬 수 있다는 것을 명백히 하였다.

- 5) 흙입자 강도의 대표값은 단입자 파쇄시험 결과를 이용하여 입경가적곡선에서의 50%입경 D_{50} 을 대표입경으로 하고 그 값에 대응하는 파쇄응력으로 가정한 값으로서, 입자의 성분, 형상, 입도분포, 입자의 크기를 고려한 값이다. 이 흙입자 강도는 모래의 칼슘성분 함유량과의 관계 및 입자형상과의 관계로부터 약한 입자성분의 함유량이 많을수록, 입자형상이 편평할수록, 또한 구형(정다면체)에서 멀어질수록 작은 값을 나타낸다는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 三浦哲彦, 山内豊聰 (Miura, N. and Yamanouchi, T.) (1971), "高拘束壓における豊砂浦の排水剪断特性について", 日本土木工學論文集, Vol. 193, pp. 69-79, 1971
2. De Souza J. M.(1958), "Compressibility of sand at high pressure", MS thesis Massachusetts Institute of Technology, pp. 63-64
3. Griffith, A. A.(1921), "The phenomena of rupture and flow in solid". Phil. Tran. Royal Society (London), Series A, Vol. 221, pp. 163-198
4. Kjaernsli and Sande(1963), "Compressibility of some coarse-grained materials", Proc. European Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Wesbaden, Germany, pp. 245-251
5. Lee, D. M. (1992), "The angles of friction of granular fills", PhD dissertation, Cambridge University.
6. Lees, G.(1964), "The measurement of particle shape and its influence in engineering materials", Journ. Brit. Graniteand Whinestone Federation, Vol. 4, No. 2
7. Marsal, R. and Resendiz, D.(1975), "Presas de tierra y enrocamiento", pub. Editorial Limusa, Mexico, D. F., pp. 548
8. Terzaghi K. and Peck R. B. (1948), Soil mechanics in engineering practice, 1st Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 61,

(접수일자 1999. 5. 17)