

흡입자 강도와 압축특성을 이용한 모래의 파쇄성 지표

A Crushability Index of Sands Using Particle Strengths and Compressibility Characteristics

곽 정 민*
Kwag, Jung - Min

Abstract

Crushable sandy soil grounds are widely found along the coast throughout the world. The ground composed of lime sand, which is characterized by the material with high compressibility due to particle crushing contains carbonate calcium.

In this study, in order to clarify the characteristics of the particle crushing as related to the strength and deformation properties of sands, isotropic compression test was carried out on three different types of carbonate sands and a silica sand. A crushability index, K, is proposed in connection with the yielding and particle crushing stress of sands at various relative densities under isotropic compression. It is concluded that the representative crushability index, K, associated with the soil particle strength, can be a key factor in preliminary parameters in evaluating soil crushability.

요 지

파쇄성 사질토 기반은 세계각지의 해안을 중심으로 넓게 분포되어 있고, 칼슘성분을 다량 함유한 석회질 모래지반은 입자파쇄의 영향으로 높은 압축성을 나타내는 특징이 있다.

본 연구에서는 모래의 강도-변형특성에 관여하는 입자파쇄의 특성을 명백히 하기 위하여, 세가지 종류의 카보네이트계 모래와 실리카계의 모래를 이용하여 광범위한 응력영역에 대한 등방압축시험을 실시하였다. 다양한 상대밀도에 대한 등방압축 조건에서 압축 항복응력과 입자 파쇄응력과의 관계로부터 파쇄성지표 K를 제안하였다. 제안된 파쇄성지표 K는 흡입자 강도와도 밀접한 관계를 가지며, 흙의 파쇄성을 평가하기 위한 중요한 인자로 사료된다.

Keywords : Crushability of soil, Carbonate sand, Isotropic compression test, Yielding stress, Crushability index, Soil particle strength

* 정희원, 순천대학교 공업기술연구소 전임연구원

1. 서론

모래와 같은 입상체에 있어서 압축성이나 전단강도 등의 기본적인 역학특성은 흙입자의 물리적 성질, 흙입자의 크기나 형상, 간극비 등의 기본적 성질에 의존한다. 또한 구속압 등의 응력 조건에 의해서도 모래의 응력-변형률 거동은 변화하며, 아울러 입자의 파쇄도 역학거동에 영향을 미치는 하나의 요인이다.

입자의 파쇄에 관한 선구적 연구로서는 Terzaghi (1948)의 연구를 들 수 있고, Miura (1971)는 견고한 흙입자라 해도 높은 압력 하에서는 입자파쇄가 두드러지게 발생하며, 그 입자파쇄가 모래의 역학특성에 크게 영향을 준다는 것을 확인했다. 그 후 많은 연구자들에 의해 구속압 수준에 의한 입자파쇄의 특성이나, 낮은 구속압에 있어서도 입자파쇄가 일어나는 약한 모래의 역학특성이 조사되어지고 있다. 예를 들면, 화강암계 풍화 퇴적토인 화강풍화토 (Miura and O-hara, 1979), 화산재 사질토인 일본의 시리수 (Haruyama and Kitamura, 1984), 조개나 산호의 유해로 이루어진 카보네이트계 모래 (Golightly and Hyde (1988), Coop, (1990)) 등은 낮은 구속압 아래에서도 입자파쇄가 발생하고, 입자파쇄가 발생함으로써 높은 압축성을 나타내기 때문에 입자파쇄의 영향을 강도·변형특성에 고려해야 한다는 중요성이 지적되고 있다. 특히, 탄산질 모래 (carbonate sand) 지반이나 석회질모래 (calcareous sand) 퇴적지반은 세계의 해안에 넓게 분포되어 있고, 해양구조물 건설의 기초 지반으로서 널리 이용되고 있으므로 이 종류의 지반에 대한 입자파쇄를 고려한 강도·변형특성을 명확히 하는 것은 지반공학 상 중요한 과제의 하나이다.

입자파쇄리는 현상은 단순히 입도의 변화, 입자형상 등의 변화를 의미하는 것만이 아니고 퇴적구조의 변화나 체적변화를 동반하기 때문에 모

래의 상대량을 변화시킨다. 그 결과 모래지반의 강도, 압축성, 침투성과 같은 흙의 공학적 제 성질의 변화를 일으켜 원래의 성질이 변화하는 경우도 있다. 그러므로, 이러한 사질토의 입자파쇄에 관한 연구는 성토재와 같은 재료의 선정이나 토질시험 결과의 해석에 있어서도 중요하다. 그러나, 흙의 공학적 제 성질에 미치는 입자파쇄의 영향은 발생한 입자파쇄의 정도에 의해 다르고, 심각한 경우도 있고 완전히 무시해도 상관없는 경우도 있다. 따라서, 입자파쇄와 그 공학적 성질에의 영향에 대한 관련성을 정량적으로 파악하기 위해서는 먼저 입자파쇄의 정도를 나타내는 합리적이고 간단한 지표가 필요하다. 현재까지 많은 파쇄성을 나타내는 지표가 제안되어 있지만, 이러한 파쇄성 지표들은 구해진 변수를 하나의 특정 값으로서 강도특성의 해명 등에 직접 반영시키기 어렵고, 같은 조건에서 파쇄량의 대소를 나타내는 하나의 기준으로 취급되고 있다.

본 논문에서는, 모래를 구성하고 있는 입자의 단단함, 형상, 입경 등이 입자파쇄에 크게 관련되어 있기 때문에, 그러한 구성 흙입자의 강도를 기초적인 입자파쇄의 척도로 보고, 모래의 전단강도에 미치는 영향요인의 하나로서 모래 입자의 파쇄성에 따른 검토를 위해 실용적인 파쇄성 지표를 제안 하고자 한다. 먼저, 기존의 모래 입자의 파쇄 정도를 나타내는 지표에 관해 간단히 기술하고, 다양한 상대밀도 및 광범위한 구속응력에 대한 압축시험을 수행했다. 그리고, 등방응력 상태에 있어서 입자파쇄의 특성을 압축 항복응력과 초기 상대밀도의 관계로부터 검토해서 모래의 압축특성과 단입자 강도에 기인한 새로운 파쇄성 지표를 제안했다.

2. 입자파쇄를 나타내는 기존의 파쇄성 지표

입자파쇄의 평가가 지반공학 분야에 있어서 특별한 의미를 가지는 것은, 흙입자 또는 암석 조각의 집합체를 재하하거나 수침 시킨 경우에 입자의 파쇄가 발생하고, 이 입자파쇄로 인해 당초의 흙이나 암석질 재료 등의 입도 조성에 변화가 발생함으로써 변형, 강도 또는 투수성에 영향을 주게 되므로 입자파쇄가 생기는 재료의 공학적 성질을 검토할 필요가 있다. 이러한 파쇄성 재료의 공학적 성질을 조사하기 위해서는, 먼저 각 재료에 있어서 입자의 파쇄정도를 파악하는 것이 중요하다. 입자파쇄의 발생은 입자파쇄 후에 입경가적 곡선이 초기에 비하여 세립측으로 이동하는 것에 의해 알 수 있는데, 입자파쇄의 정도와 공학적 성질의 관련성을 검토하는 데는 입자파쇄의 정량화가 필요하다.

입자파쇄의 정도는 파쇄 전후의 입도변화에 근거하여 검토되고 있고, 이들 제안된 지표는 입경가적 곡선에서 점의 이동에 근거한 지표, 입경가적 곡선에 의해 둘러싸인 면적으로부터 구해진 지표, 입자 표면적의 증가에 기인한 지표 등으로 크게 나눌 수 있다 (그림 1. 참조). 그 중 대표적인 지표를 간단히 설명하면 다음과 같다.

1) 입자파쇄 전 후의 $75\mu\text{m}$ 체의 통과량의 차 F_c (Taniguthi, 1979) : 파쇄전의 입경이 $75\mu\text{m}$

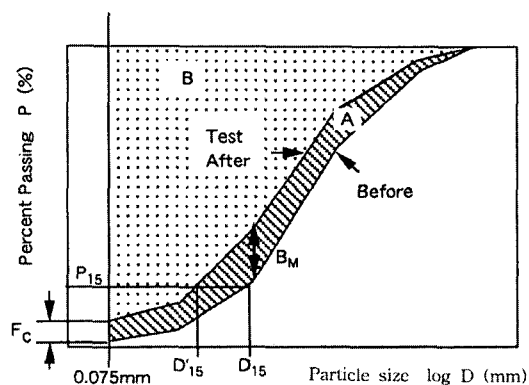


그림 1. 기존의 주요 파쇄성 지표

보다 큰 경우는 파쇄 후의 $75\mu\text{m}$ 체의 통과량으로 정의한다. F_c 값은 0~100%의 범위에 있다.

2) 15% 통과율에 대응하는 입자파쇄 전 후의 입경비 $B_D = D_{15}' / D_{15}$ (Lee and Farhoomand, 1967) : B_D 는 0~1의 값으로 표시되고, 표준 체가름에서 $75\mu\text{m}$ 체의 통과량이 15% 이상인 경우는 $D_{15} = 75\mu\text{m}$ 로 한다.

3) Marsal (1975)의 입자파쇄율 B_M : B_M 은 입자파쇄 전 후에 있어서 입경가적 곡선간의 최대 통과율 폭을 나타낸다.

4) Harden (1985)의 입자 파쇄율 $B_R = A / (A+B)$: B_R 은 입자파쇄 전 후의 입경가적 곡선 및 $75\mu\text{m}$ 입경으로 둘러싸인 면적 A 를 척도로 하여, 파쇄 전의 입경가적 곡선에 의해 형성된 기준면적 $(A+B)$ 으로 나눈 값으로서, 1이하의 값으로 나타낸다.

5) Miura (1977)의 입자파쇄 전 후에 있어서 비표면적의 차 $\Delta S (\text{cm}^2/\text{cm}^3) = S - S_0$: 비표면적 S 는 입경 $75\mu\text{m}$ 이상의 입자에 대해서는 각 입경별로 그 평균입경의 입자를 구형으로 간주하여 구하고, 입경 $75\mu\text{m}$ 이하의 입자에 대해서는 공기투과법에 의해 구한다.

3. 시료 및 시험

3.1 사용시료

본 연구에 사용한 시료는 파쇄성이 다르다고 생각되는 3종류의 카보네이트계의 모래 즉, Dogs Bay 모래, Quiou 모래 및 Amami 모래와 실리카계의 Toyoura 모래를 이용했다. Dogs Bay 모래와 Quiou 모래는 파쇄성 사질토의 연구용 시료로 기준이 되는 것으로서 세계적으로 널리 이용되고 있다. 이들 시료의 물리적 성질, 입도분포 및 입자형상에 대한 특성은 앞의 논문을 참조하기 바람. 또한 시료의 단입자 파쇄시험으

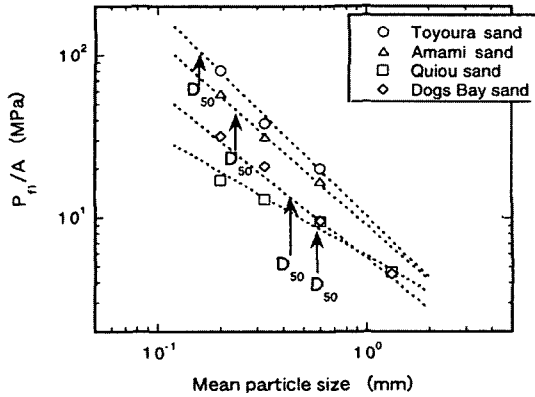


그림 2. 단입자 파쇄응력과 입경과의 관계

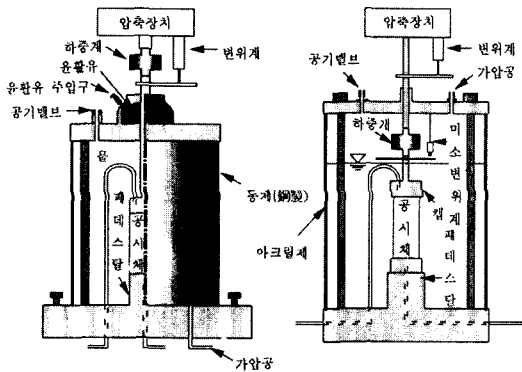


그림 3. 저·중압 삼축 시험용 셀의 모식도

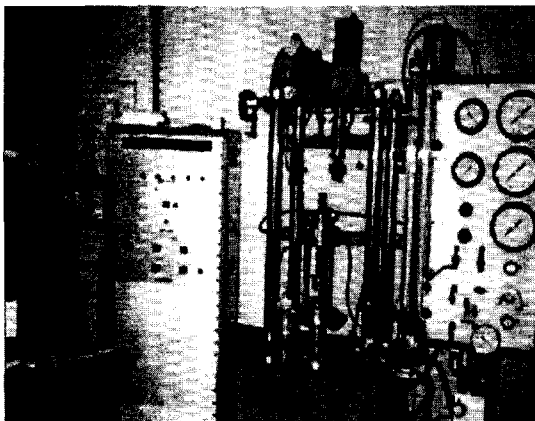


사진 1. 저·중압 삼축 시험장치

로부터 구한 단입자 파쇄응력과 입경과의 관계는 본 논문에서 인용되므로 그림 2.에 나타냈다.

3.2 등방압밀 시험

3.2.1 저·중압 삼축시험 장치

본 연구에서 이용한 저·중압 삼축시험 장치는 파쇄성 시료의 입자파쇄 특성을 조사하기에 적절한 응력영역을 대상으로 설계·제작되었다. 본 시험장치의 주요 특징으로서는 50kPa~4.0MPa의 비교적 광범위한 응력의 삼축시험이 수행 가능하고, 시험공간은 작업공간을 포함해서 2m×3m의 소공간을 이용할 수 있도록 설계했다. 삼축 셀은 구속압 50kPa~800kPa 까지를 대상으로 한 저압용 셀과 500kPa~800kPa 까지를 대상으로 한 중압용 셀로 구성되었지만, 배관은 가능한 한 공유하도록 간소화시켰다. 제어방식은 컴퓨터에 의한 자동제어를 위주로 했고 필요시 수동제어가 선택 가능하도록 하였다. 중압용 시험은 공기압을 5배의 수압으로 변환하는 부스터를 이용했고 재하능력은 $5 \times 10^4 \text{N}$ 까지이며, 제어방식은 변형률 제어와 응력 제어가 가능하다. 그리고 비접촉형 변위계를 사용해 전단초기에 10^{-5}mm 정도의 미소변위가 측정 가능하도록 하였다. 이상의 특징을 가진 저·중압 삼축 시험기의 개요를 사진 1.에, 이용한 삼축 시험용 셀의 모식도를 그림 3.에 나타냈다.

3.2.2 공시체 작성 및 등방압축시험

시험의 정밀도를 높이기 위해서는 먼저 포화도를 높이고 상대밀도를 일치시킨 균일한 공시체를 작성할 필요가 있다. 공시체 작성은 일반적인 모래의 경우 공중낙하법에 의해 작성해도 무관하지만, 카보네이트계 모래는 입자내부에 많은 공극을 포함하고 있어 공중낙하법으로 작성한 공시체는 포화도를 높이기가 곤란하다. 따라

서, 본 연구에서는 삼축시험 전체의 공시체를 수중낙하법에 의해 작성했다. 수중낙하법은 각 시료를 약 30분~1시간 물 속에서 끓여 탈기시킨 후 수중 보존하고, 증류수를 채운 몰드에 약 5~7층으로 나누어 스푼으로 떠서 조심히 흘러내리게 하는 방법으로서 상대밀도는 기본적으로 40%, 65%, 95%의 3종류가 되도록 수중낙하 후 나무햄머로 수회 진동을 주어 목표로 한 상대밀도를 조정했다.

등방압축시험은 위의 방법으로 작성한 공시체를 부압 20~30kPa로 자립시키고, 공시체 치수를 측정 후 2중 부압을 이용해 1~2시간 동안 공시체 내부를 포화 시켰다. 그리고 공시체에 배압(저압역은 300kPa, 중압역은 500kPa)과 함께 축압을 걸어 간극수압계수 B치를 측정하고, 응력 제어 방식으로 등방압축을 100kPa 또는 1MPa씩 단계적으로 수행하였다. 모든 공시체는 간극수압계수 B치가 0.95이상의 포화도를 확인한 후 시험을 수행하였으며, 압축종료 시간은 3T법에 의해 결정했는데 입자파쇄가 현저한 모래일수록 압축종료 시간이 길어지기 때문에 기본적으로 주 변위량의 증분이 1시간에 0.01mm 이내가 되면 압축을 종료하였다.

4. 항복응력의 특성을 이용한 파쇄성 지표의 제안

4.1 등방압축에 있어서의 항복응력

각 압축응력과 간극비를 양 대수 그래프로 나타내면 일반적으로 응력의 증가와 함께 간극비가 급격히 감소하는 지점 즉, 그림 4에 나타낸 것과 같이 구부러지는 점을 가진다. Lee and Seed (1967), Miura(1976)의 보고에서 모래의 압축성은 입자파쇄가 발생하면 현저하게 증가하고, 그 결과로서 등방 압축과정에 있어서 $e - \log p'$ 관

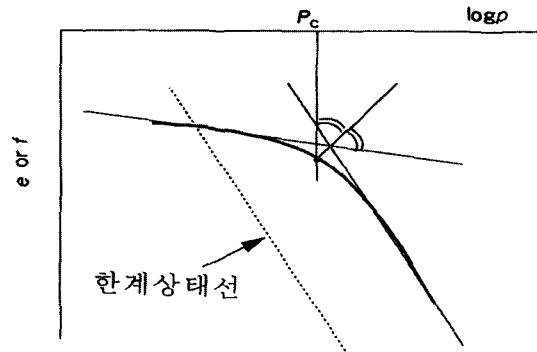


그림 4. 압축 항복응력의 정의

계는 명확히 구부러지는 점을 가진 곡선이 되며, 이 구부러지는 점 이후의 곡선 기울기는 정규압밀 점토의 곡선 기울기와 근사하다고 알려져 있다 (Miura, 1976, Yasufuku, 1991). 이러한 구부러지는 점을 압축 항복응력 P_c (본 논문에서는 이후 편의상 P_c 로 표기함)라고 부르며, 압축에 있어서 압력과 간극비의 관계가 탄성영역에서 소성영역으로 이동할 때의 압축응력이라고 정의되어 있다 (토질시험법, 1979). 본 연구에서는 양대수의 $\ln e - \ln p'$ 관계곡선으로부터 그림 4에 나타나 있는 것과 같은 방법을 이용하여 간극비가 급격히 감소하는 점을 구해 압축 항복응력이라고 간주했다. 이 방법에 의한 압축 항복응력은 Casagrande (1936)에 의한 선행 압밀응력 보다 약간 작은 값으로 나타났다.

4.2 파쇄성 모래의 항복응력 특성

여기서는 본 연구에서 이용한 연약한 카보네이트계 모래와 Toyoura 모래의 간극비와 압축응력과의 곡선으로부터 구한 항복응력과 파쇄응력의 상관관계를 검토하였다. 그림 5에서 (a)는 Toyoura 모래, (b)는 Amami 모래, (c)는 Dogs Bay 모래, (d)는 Quiou 모래의 등방압축 과정에 있어서 대표적인 (느슨한 상태) 간극비와 압축응

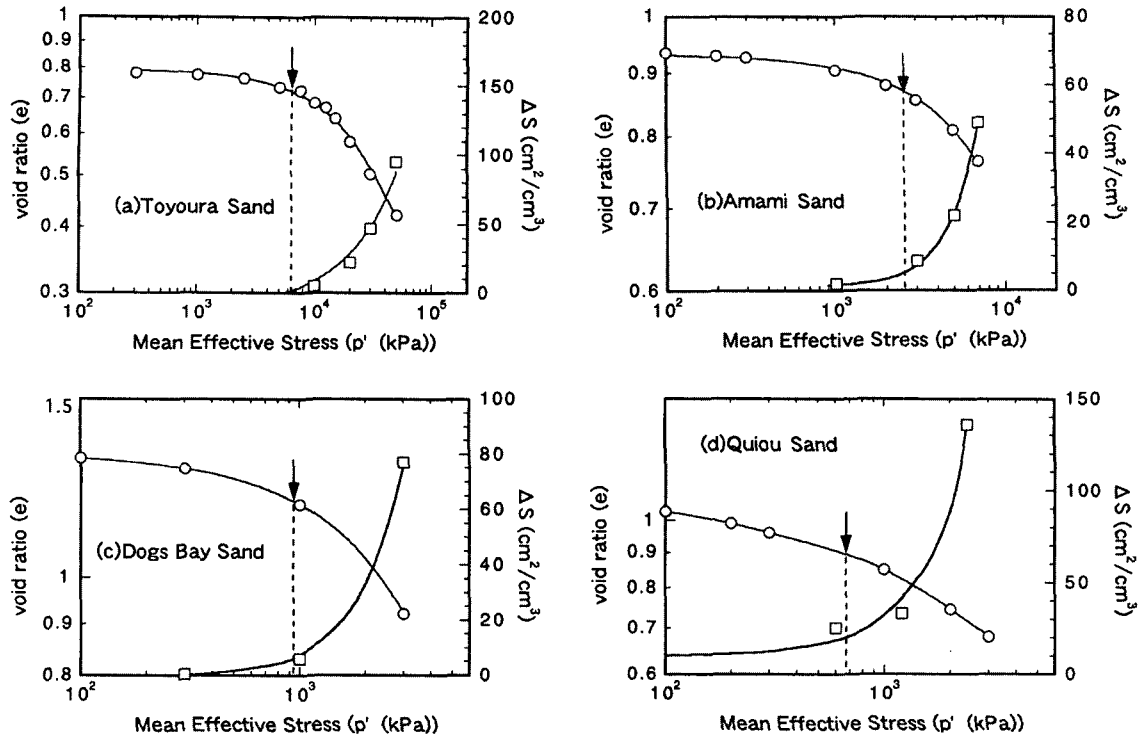


그림 5. 압축응력과 간극비 및 입자 파쇄량의 관계

력과 관계를 양 대수 그래프로 나타내었으며, 또한 같은 유효응력 수준에서 대수 표시된 ΔS (cm^2/cm^3)의 관계를 나타낸 것이다. 여기서, ΔS 는 앞 절에서 간단히 설명한 압축 전후에 있어서 표면적증가량이고, 입자 파쇄량을 정량적으로 나타내는 지표로서 널리 이용되고 있다 (Miura, 1971). 또 그림 5. 중에는 그림 4의 모식도에 의해 구한 항복응력 P_c 값을 표시하고 있는데 이 그림 5.로부터 다음 사항을 알 수 있다.

- ① Miura등 (1971)이 지적한 바와 같이, 압축응력이 P_c 값을 넘으면 모든 시료가 두드러진 압축성을 나타내고 있는데 이 압축성은 각 재료에 따라 다르게 나타난다.
- ② Toyoura 모래에 비해 Dogs Bay 모래와

Quiou 모래의 항복응력은 매우 작다.

- ③ 모든 모래에 있어서 항복응력의 위치는 입자 파쇄가 현저히 발생하기 시작하는 위치와 거의 일치하고 있다.

또 그림 6.은 그림 5. 중의 $\Delta S - \ln p'$ 그래프에서 입자파쇄가 급격히 증가하기 시작하는 지점의 응력을 구하여 압축 항복응력 P_c 와의 관계를 나타낸 것이다. 그림 6.로부터, 입자파쇄가 급격히 증가하기 시작하는 응력과 압축 항복응력 P_c 의 위치는 거의 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 압축 항복응력은 모래의 입자파쇄와 밀접한 관계가 있다고 할 수 있다. 이러한 결과로부터 등방압축 과정에 있어서 $\ln e - \ln p'$ 관계에 의해 결정된 항복응력 P_c 는 입자파쇄에 기인

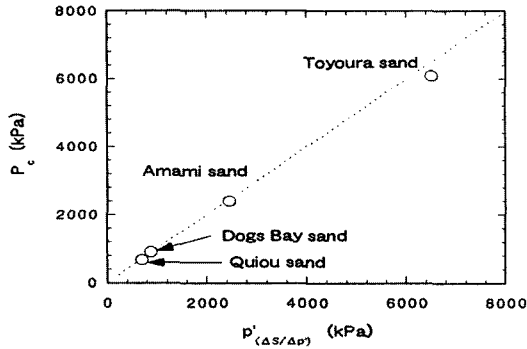


그림 6. 압축 항복응력과 입자파쇄가 현저해지는 응력과의 관계

한 항복응력이라고 판단된다.

4.3 항복응력의 특성을 나타내는 재료정수

앞에서, 임의의 상대밀도에서의 항복응력은 입자파쇄가 현저히 발생하는 응력과 거의 일치한다는 것을 알았다. 여기서는 한 재료에 있어서 항복응력과 각각의 상대밀도와의 관계를 검토하고, 항복응력의 특성을 나타내는 재료정수 즉, 새로운 파쇄성 지표를 제안하고 그 특성을 서술하고자 한다.

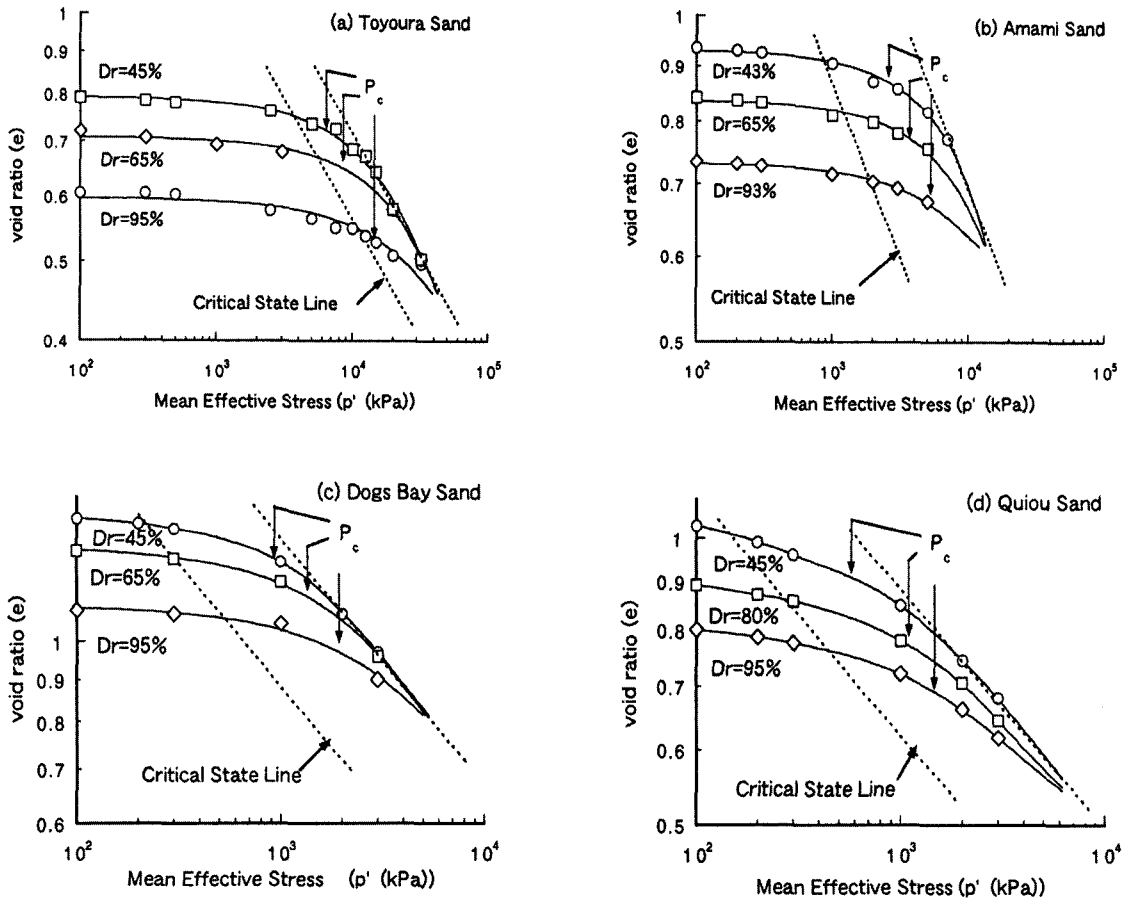


그림 7. 각 시료의 초기 상대밀도에 따른 압축시험 결과

그림 7.의 (a)~(d)는 각 시료의 등방압축에 의한 $\ln e - \ln p'$ 의 관계를 초기 상대밀도에 착안해서 나타낸 그래프이다. 각 그림에는 전단시험 후의 간극비와 평균 유효응력에 기인한 한계상태선을 표시했는데, 이 한계상태선은 소성영역의 $\ln e - \ln p'$ 곡선에 거의 평행선이 된다고 알려져 있다(일본 지반공학회, 1987). 본 연구에서는, 압축응력이 증가하는 것과 함께 중압영역을 넘는 응력역에서의 압축곡선은 한계상태선과 평행한 선에 근접한다고 가정하여 연장시켰다. 또한 그림 7.에는 그림 4.의 모식도에서 구한 항복응력 P_c 도 함께 나타냈다. 그림 7.에 의하면, 각 재료에 있어서 압축곡선은 각각 다른 양상을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 항복응력도 재료에 따라 각각 다른 값을 나타내고 있으며, 상대밀도가 같은 경우에 흙입자 강도가 큰 재료일수록 항복응력도 큰 값을 나타내는 경향을 보였다. 더욱이, 같은 재료인 경우에는 상대밀도가 클수록 큰 항복응력을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.

그림 8.은 그림 7.의 결과를 이용하여 각 시료의 항복응력과 상대밀도의 관계를 나타낸 것이다. 그림 8.로부터, 대수 표시된 P_c 와 상대밀도 사이에 직선적인 관계가 성립되는 것을 알 수 있다. 이 관계는 근사적으로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_c = \exp(A \cdot D_r + K) \quad (1)$$

여기서 A는 계수, K는 재료정수이다. 즉, A는 그림 8.에서 직선의 기울기를 나타낸다. 각 재료의 흙입자 강도(Kwag, 1998)와 직선의 기울기 A값을 비교하면 그림 9.와 같다. 이 그래프로부터, 직선의 기울기 A는 각 재료의 흙입자 강도와 상관없이 거의 일정 값을 나타내고 있다는 것을 알 수 있었다. 또, 재료정수 K는 $D_r=0\%$ 일 때의 $\ln P_c$ 의 값에 의해 정해진다.

그림 8.과 식 (1)에서, 두 정수 A와 K의 특성으로부터 다음 사항을 알 수 있다.

- ① 계수 A는 시료에 의존하지 않는 일정한 값을 가지며 항복응력을 kPa로, 상대밀도를 1/100(%)로 표시한 경우 근사적으로 A=1.5가 된다.
- ② 정수 K는 재료에 따라 다르고, Toyoura 모래가 8.03, Amami 모래가 7.15, Dogs Bay 모래가 6.15, Quiou 모래가 5.80로 되며, 응력 차원을 갖는다.
- ③ 정수 K와 D_r 에 의해서 항복응력이 결정될 수 있으며 정수 K는 그 재료의 항복응력 특성을 나타내는 재료정수임을 의미한다.

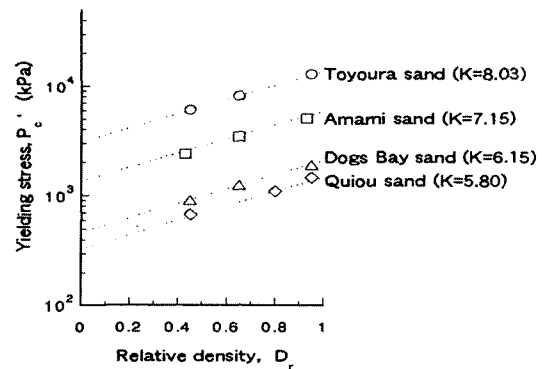


그림 8. 초기 상대밀도와 항복응력과의 관계에 의한 재료정수

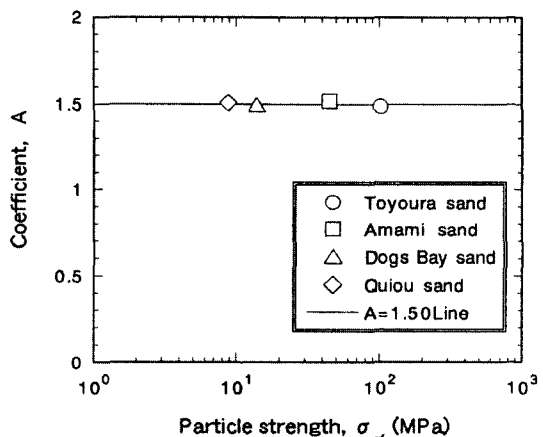


그림 9. 그림 8.의 직선기울기와 흙입자 강도의 관계

A=1.5일 때 식 (1)을 K에 대해 정리하면, 항복 응력의 특성을 나타내는 재료정수로서의 K는 D_r 과 그에 대응하는 P_c 에 의해 다음 식과 같이 주어진다.

$$K = \ln P_c - 1.5 D_r \quad (2)$$

여기서, 재료정수 K의 물리적 의미는 상대밀도 $D_r = 0\%$ 인 아주 느슨한 상태에서의 항복응력 P_c 의 대수표시라는 형태로 주어진다. 즉,

$$K = \ln P_c \text{ (at } D_r = 0\%) \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)의 특징은 각 재료에 따라 정수 K값을 알게 되면 임의의 상대밀도에 있어서 항복응력 즉, 입자파쇄가 현저하게 일어나는 파쇄성 정도를 표현할 수 있게 된다. 다시 말하면, K값은 그 재료의 파쇄되기 쉬운 정도를 나타내는 지표로서 생각할 수 있다. 이 K는 식 (3)에서 알 수 있듯이 응력 차원을 가지고 있기 때문에, 흙입자 강도 및 집합체로서의 모래 강도와도 비교가 용이한 지표이다. 식 (2)를 이용하면, 2종류

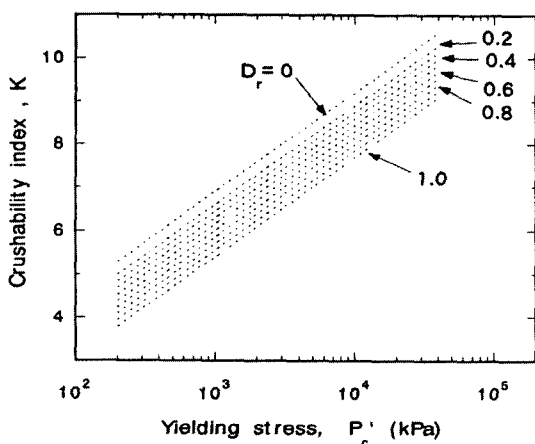


그림 10. 파쇄성 지표 K와 항복응력 P_c 의 관계

이상의 상대밀도에 대한 등방압축 시험 결과가 있으면 그 모래 재료의 파쇄성이 파쇄성 지표 K로서 결정된다. 그림 10.은 K와 P_c 의 관계를 정리한 그래프로서, K값이 결정되면 그 재료의 항복응력 P_c 의 범위가 각 상대밀도 D_r 의 함수로서 구할 수 있다.

5. 파쇄성 지표와 흙입자 강도와와의 관계

입도분포 곡선의 D_{50} 에 대응하는 단입자 파쇄 응력이 집합체로서 모래의 파쇄성을 나타내는 특정 값이라고 가정했을 때, 그 값은 시료의 물리적 성질에서의 D_{50} 과 그림 2.의 단입자 파쇄 시험 결과를 이용하여 구하면 Toyoura 모래가 102 MPa, Amami 모래가 45MPa, Dogs Bay 모래가 14MPa 및 Quiou 모래가 8.8MPa이다. 이 값과 압축 항복 응력의 특성을 나타내는 파쇄성 지표 K와의 관계를 비교하면 그림 11.과 같다.

이 그래프에 의하면, D_{50} 에 대응하는 흙입자 강도 σ_{sf} 는 파쇄성 지표 K와 정비례 직선 관계를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 흙입자의 강도가 지반재료의 파쇄성과 밀접한 관계가 있음을 나타내고, 단입자 파쇄시험을 통해서 그

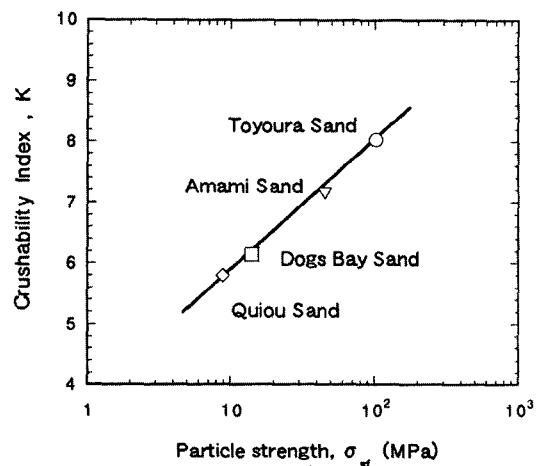


그림 11. 흙입자 강도의 대표 값과 파쇄성 지표의 관계

재료의 항복응력을 구할 수 있는 가능성을 시사하고 있다.

사질토의 압축특성을 반영한 파쇄성 지표 K는 흙입자 강도와도 밀접한 상관관계를 나타내며, 그 재료의 파쇄되기 쉬운 정도를 나타내고 있다. 이 파쇄성 지표 K는 석영을 주성분으로 한 입자파쇄가 쉽게 발생하지 않는 모래인 경우에 대략 8.0 이상을 나타내고, 연약하고 파쇄되기 쉬운 모래가 대략 6.0정도를 나타낸다. 이 파쇄성 지표 K는 모래의 파쇄 정도를 숫자로 나타낼 수 있기 때문에 파쇄성의 대소를 쉽게 알 수 있고, 응력 차원의 지표이므로 강도정수와의 비교에도 이용될 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 모래의 입자파쇄를 규정하는 기존의 지표를 개략적으로 설명하고, 압축 특성과 관계 있는 새로운 모래의 파쇄성 지표를 제안했다. 이 지표는 모래의 등방압축응력 상태에 있어서 입자파쇄의 특성에 대하여 검토한 결과 $lne - lnp'$ 곡선의 특성과 입자파쇄 응력과의 관계로부터 구했다. 더욱이, 흙입자 강도와 집합체의 파쇄성 지표와의 관계를 검토하여 그들의 관련성을 나타냈다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 등방압축 과정에 있어서 $lne - lnp'$ 곡선은 각 재료에 따라 형태가 다르게 나타나고, 곡선이 급격히 구부러지는 점을 구하여 항복응력 P_c 로 간주했다. 또한 항복응력 P_c 는 입자파쇄가 현저히 발생하기 시작하는 파쇄응력과 거의 일치하고 있다는 것을 명백히 하였으며, 여기서의 항복응력 P_c 는 입자파쇄에 기인한 항복응력으로 판단할 수 있었다.
- 2) 각 시료의 등방압축 시의 항복응력과 초기 상대밀도와는 일정한 직선 관계가 있고, 특히 상

대밀도를 0으로 했을 때의 항복응력 값은 각 재료의 항복응력 특성을 표현하는 재료정수로서 항복응력과 입자파쇄가 현저히 증가하기 시작하는 응력과 밀접한 관련이 있으므로, 이 재료정수 K를 그 지반 재료의 파쇄되기 쉬운 정도를 나타내는 지표로 제안했다.

- 3) 입도분포 곡선의 D_{50} 입경에 대응하는 단입자 파쇄응력과 파쇄성 지표 K의 관계로부터, 흙입자 강도로서 표현되는 특성값과 K값은 밀접한 상관 관계를 나타내며, 이 파쇄성 지표는 석영을 주성분으로 한 입자파쇄가 쉽게 발생하지 않는 모래인 경우 대략 8.0 이상을 나타내고 약하고 파쇄되기 쉬운 모래가 대략 6.0정도를 나타냈다. 이 파쇄성 지표는 모래의 파쇄되는 정도를 쉽게 알 수 있고, 응력 차원의 지표이므로 강도 정수와의 비교에도 이용될 수 있음을 시사한다.

참 고 문 헌

1. 谷口秀男(Tanikuchi, S.) (1979), "締固めによる組粒火山灰の粒子破砕が締固め密度におよぼす影響", 土と基礎, Vol. 27, No. 6, pp. 29-34
2. 土質試験法(1979), 日本 土質工學會
3. 土の強さと地盤の破壊入門(1989), 日本 地盤工學會
4. 三浦哲彦(Miura, N.) (1976), "高壓下における砂の挙動に関する基礎的研究", 九州大學博士論文
5. 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
6. 安福規之(Yasufuku, N.) (1991), "廣範な應力域における異方壓密砂の降伏特性と弾塑性構成式に関する研究", 九州大學博士論文
7. Coop, M. R.(1990), "The mechanics of uncemented carbonate sands", Geotechnique, Vol. 40, No. 4, pp. 607-626
8. Golightly, C. R. and Hyde, A. F. L.(1988), "Some fundamental properties of carbonate sands", Proc. Int Conf. Calc. Sedimentes, Perth, Vol. 1, pp. 69-78
9. Hardin B O.(1985), "Crushing of Soil Particles",

- Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 11, No. 10, pp. 1177-1192
10. Kwag, J. M., Ochiai, H., Yasufuku, N. and Ohno, S.(1998), "Strength parameter of sands in relation to soil crushability", TR. of Kyushu U., Vol 70, No. 4, pp 93-97
 11. Lee, K. L. and Seed, H. B.(1967), "Cyclic stress conditions causing liquefaction of sand", JSMFD, ASCE, Vol. 92, No. SMI, pp. 47-70
 12. Lee, K. L. and Farhoomand, I.(1967), "Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 4, no. 1, pp. 68-86
 13. Lees, G.(1964), "The measurement of particle shape and its influence in engineering materials", Journ. Brit. Graniteand Whine stone Federation, Vol. 4, No. 2
 14. Marsal, R. J.(1965), "Soil properties - Shear Strength and consolidation", Proc. 6th Int. Conf. S.M.F.E., Vol. 3, pp. 310-316
 15. Miura, N. and Yamanouchi, T.(1977), "The effecting of the particle crushing on the shear characteristics of a sand", Proc. JSCE, 260, pp. 109-118, (in Japanese)
 16. Miura, N. and O-hara, S. N.(1979), "Particle crushing of a decomposed granite soil under shear stresses", Soils and Foundations, Vol. 19, No. 3, pp. 1-14
 17. 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)