

입도분포를 고려한 다짐된 지반재료의 역학적 거동 평가

Mechanical Evaluation of Compacted Granular Materials Considering Particle Size Distribution

박 형 민¹ Park, Hyung-Min
박 현 수² Park, Hyun-Su
박 성 완³ Park, Seong-Wan

Abstract

Generally, conventional transport infrastructures consist of compacted granular materials. Their stiffness and response greatly depend on the particle sizes and distributions, and application of loading on the surface over a foundation may induce deformation in both the surface and the underlying foundations. Therefore, a better understanding of the deformation characteristics on granular materials and the prediction are needed. For this reason, an attempt to evaluate and predict deformation of coarse materials based on the discrete element method is presented in this paper. An algorithm for particle distribution curve analysis was formulated and incorporated into the discrete element program. The results show that the discrete element model with particle distribution curve is suitable for estimating stress deformation in a pre-peak response. Unlike conventional uniform or random particle distribution, the response can be obtained by the use of the proper model and approach.

요 지

일반적인 교통시설물 기초들은 다짐된 조립재료로 구성되는데 강성과 변형은 입자의 크기들이나 분포, 그리고 표면 하중에 의하여 많은 영향을 받아 변형을 유발하게 된다. 따라서 조립재료에 대한 변형 특성 이해와 해석 예측이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 목적을 위하여 개별요소법을 도입하였다. 조립재료의 입자분포를 고려할 수 있는 알고리즘을 수립하고 이를 수치해석에 적용하였고, 삼축압축시험의 응력-변형곡선과 결과를 비교하여 적용 방법의 타당성을 평가하였다. 그 결과 입도분포를 잘 반영하는 해석이 매우 적합한 결과를 보여주고 있으며 하중과 입자의 각 조건을 적용하여 관련 영향들을 살펴보았다.

Keywords : Coarse granular materials, Discrete element method, Gradation characteristics, Stress-strain behavior

1 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 공학석사 (Member, Master of Eng., Dept. of Civil & Environment Eng., Dankook Univ.)

2 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environment Eng., Dankook Univ.)

3 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environment Eng., Dankook Univ., Tel: +82-31-8005-3472, Fax: +82-31-8021-7213, spark@dankook.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

일반적으로 교통지반 구조물의 지반공학적 측면의 해석은 재료를 연속체로 가정하는 경우가 많으며, 입력변수인 탄성계수나 강도정수는 실내시험 또는 현장시험으로부터 획득하기에 유리한 장점을 가지고 있다. 그러나 조립재료로 구성된 지반은 입자의 크기나 분포, 입자간 마찰력, 공극률 등이 재료의 응력-변형 거동에 많은 영향을 미치며, 이러한 이유로 절리면이 무수히 많은 암반이나 조립재료와 같이 불연속면이 존재하는 비연속체를 해석하는 경우 개별요소법을 활용하고 있다(Cundall and Strack, 1979; Owen et al., 2003).

조립재료의 거동특성에 영향을 주는 인자를 고려할 수 있는 개별요소법을 활용한 연구로 국내에서는 조립재료를 초기 간극률 조건 및 상사입도 조정에 따른 연구(Koo et al., 2007)와 입자형상 및 입자파쇄에 따른 재료의 전단거동에 대한 연구(Jo et al., 2009) 등이 있으며, 최근에 일본에서 조립재료의 강도특성에 대한 연구(Ueda et al., 2011)가 수행되는 등 국내외적으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 입자를 생성하는 과정에서 일반적으로 D_{50} 에 해당하는 입도를 균일하게 적용시키거나 프로그램에서 제공하는 무작위 생성원리를 이용하는데 이는 조립재료의 거동특성에 영향을 미치는 요인 중에 하나인 입자의 분포를 고려할 수 없다는 문제점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 조립재료 거동특성에 영향을 미치는 입자 분포를 고려할 수 있는 알고리즘을 수립하여 실내실험과 비교 검증과정을 실시하고, 다양한 입도 분포와 응력 조건에서 발생하는 조립재료의 거동 특성에 대한 영향을 추정해 보았다.

2. 수치해석 프로그램

본 연구에서 활용한 PFC(Particle Flow Code)는 1979

년 Cundall and Strack에 의하여 개발되어 불연속면이 존재하는 요소들의 집합체나 무수히 많은 절리를 가지는 대상을 해석하는데 유리하다고 알려져 있다. 모델을 구성하는 요소는 입자와 경계면이 있으며 매 시간의 증분에 따른 입자와 입자, 입자와 경계면 사이의 접촉은 입자와 경계면의 위치에 따라 형성된다. 힘과 변위의 관계식으로부터 접촉점에서 발생한 중첩량은 접촉력으로 전환되고, 이는 두 입자의 접촉과 구성형태에 따른 상대운동으로부터 이루어진다. 이후 운동방정식에 의하여 각각의 입자는 접촉력과 물체력으로 발생한 외력과 모멘트로부터 입자의 속도와 위치가 계산된다. 전체적인 계산과정은 Fig. 1과 같이 이뤄진다.

개별요소해석은 연속체 해석과 달리 입자 상호간의 거동을 나타내는 물성을 입력변수로 사용하며, PFC의 대표적인 입력변수로는 입자의 강성과 크기, 입자간의 마찰계수 그리고 공극률 등이 있다. 그러나 이러한 입력변수를 결정하기 위한 연구가 국내외적으로 진행되고 있으나, 정확히 제시된 방법은 없는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 실내시험의 응력-변형 거동과 비교하여 보정과정을 실시한 후 입력 변수를 결정하였다.

3. 입도분포를 고려한 삼축압축시험 모델링

3.1 입도분포를 적용하는 알고리즘 생성

PFC-2D의 입력변수 중에서 입자의 크기를 결정하는 일반적인 방법으로는 입도분포곡선상의 D_{50} 에 해당하는 입경을 균일하게 분포시키는 방법과 원하는 입경 범위 사이에서 무작위로 생성시키는 방법이 있다. 하지만 이러한 방법들은 알고리즘 없이 입자생성이 가능하지만, 입도분포의 변화에 대한 영향을 고려할 수 없는 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 자체 전산언어인 Fish함수를 이용하여 입도분포를 고려할 수

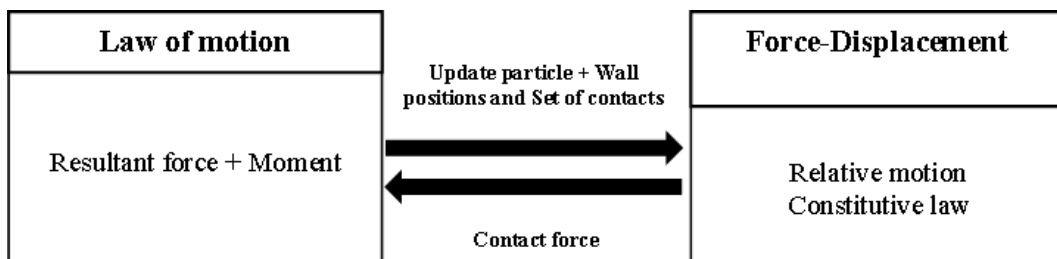


Fig. 1. Mechanism of PFC (Itasca, 2008)

있는 알고리즘을 생성하고, 재료의 실제 입도를 수치해석에 적용하여 입도분포가 조립재료에 미치는 영향을 확인하였다.

입도분포를 고려하는 알고리즘의 원리는 입도분포를 임의의 범위로 나누고, 임의의 범위내의 최소 입자 크기와 최대 입자 크기가 갖는 비율이 입도분포곡선과 동일한 비율을 갖도록 산정하여 준다. 임의의 범위내의 입자는 Fig. 2와 같이 Gauss분포를 갖으며 입도분포곡선이 생성되어진다. 각각의 구간과 구간의 비율은 원하는 입도분포에 따라 변경 될 수 있도록 구성하였다.

Gauss 분포를 나타내는 함수식은 식 (1)과 같다. a, b, c는 상수로써 0보다 큰 값을 가지며, e는 오일러 수 (2.718281828)를 의미한다. Fig. 2의 입자 최대 함유량은 상수 a, 입자 크기의 중심이 되는 $D_{average}$ 에 해당하는 입경은 상수 b, 그리고, 이로부터 각각 a는 입자 최대 함유량, b는 입경 범위의 중심이 되는 $D_{average}$ 에 해당하는 입경, c는 종의 너비에 해당하는 입경의 범위를 의미한다.

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{c^2}} \quad (1)$$

3.2 삼축압축시험 모델링

수치해석은 삼축압축시험과 동일한 상태를 구현하기 위해서 4개의 경계면을 갖도록 하였으며, 경계면 내부에 모사되는 입자는 구형으로 생성되어진다. 생성되어지는 경계면은 직경 50mm, 높이 100mm이며, 경계면 내부의 입자는 입도분포와 간극률 등을 고려하여 생성된다. 생

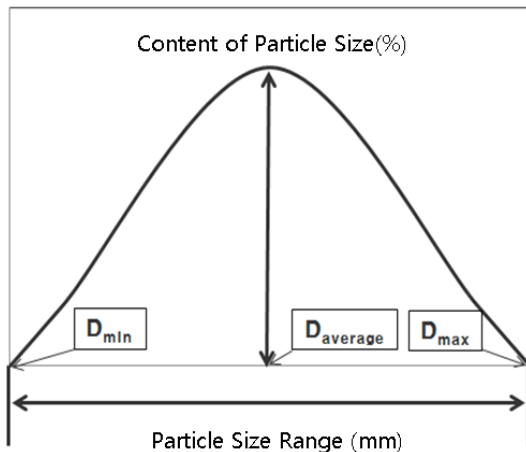


Fig. 2. Particle formation using the Gauss distribution

성된 입자들은 각 경계면에 작용하는 Servo-Mechanism에 의해 일정한 구속압을 받으며, 상하부 경계면에 속도를 부여하여 전단과정을 실시한다. 경계면의 이동으로 인해 입자간의 접촉면에서는 하중-변위관계로 구성된 접촉면 구성모델이 발생하며, 각각의 입자 거동에 의해 해석이 이뤄진다. 입도분포의 영향을 확인하여 보기 위해 Fig. 4와 같이 무작위, 균일입도, 실제 입도분포를 고려하여 내부를 생성하였으며, 동일한 구속압에서 전단과정을 실시하여 전단과정에서 발생하는 힘과 변형률, 부피변화와 변형률의 관계를 측정하였다.

3.3 입도분포 및 입력변수 결정

개별요소 해석에서 사용되는 입력변수는 일반적인 유한요소 해석의 입력변수와 달리 각각의 입자의 마찰계수, 탄성계수, 전단탄성계수 등을 입력변수로 사용한다. 하지만 현재 입력변수를 결정하는 방법에 대한 연구가 미흡하므로, 본 연구에서는 개별요소 해석에서 일반적으로 적용되고 있는 실내시험의 응력-변형 거동을 토대로 보정과정을 거쳐 수치해석의 결과가 유사한 거동을 보일 때의 입력변수를 최종적으로 선택하여 해석에 적용하는 방법을 사용하였다. 구자갑(2007)의 연구에 의하면 초기 조건이 일정하면 다양한 응력조건에서 유사한 거동을 보인다고 보고 하였다. 따라서 본 논문에서는 조립토인 전북 태인 지역의 풍화토를 대상으로 구속압 100kPa조건인 실내 삼축압축시험 결과로 입력변수를 결정하고, 응력조건의 변화를 통해 타당성을 평가하였다.

입자의 생성은 체가름시험의 결과를 식 (2)에 적용하

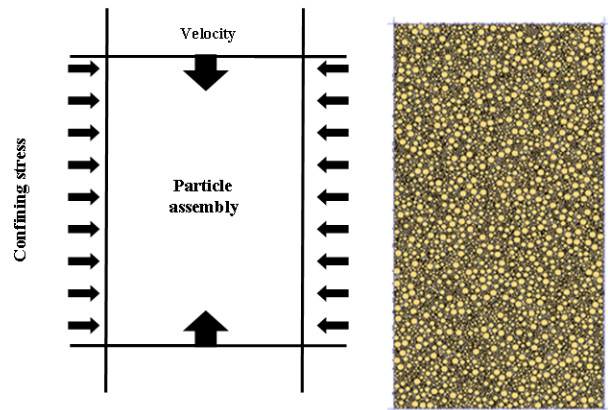


Fig. 3. Boundary condition, loading condition and initial condition in analysis model

여 잔류율을 계산하고, Table 1과 같이 3개구간의 함유량을 결정한다. 각각의 구간은 Gauss분포로 생성되어 입도분포곡선을 반영할 수 있도록 하였다.

$$\text{잔류율} = \frac{\text{각 체의 잔류량}}{\text{전체시료의 무게}} \times 100(\%) \quad (2)$$

실내 삼축압축시험은 10번체(2mm) 이하의 입경을 대상으로 시험하므로 2mm 이상의 입경은 제외하였다. 또

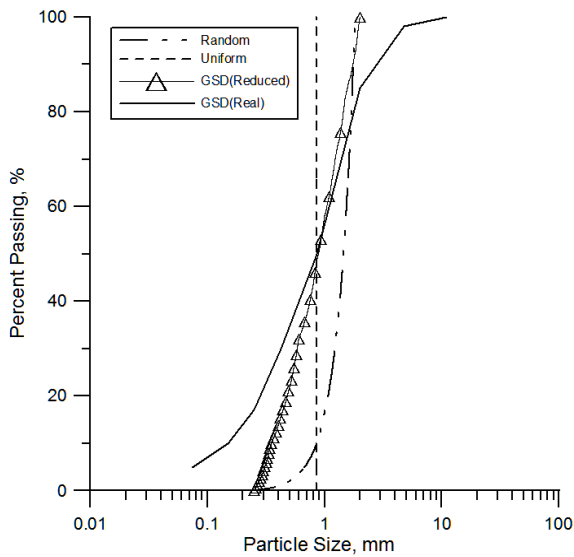


Fig. 4. Grain size distribution curve

Table 1. Particle size distribution used

Specimen	Weathered soil in Taein area		
	Sieve No.	Particle size (mm)	Mass retained (g)
10	2	0	0
20	0.8	207.0	52
40	0.425	128.7	32
60	0.25	65.7	16
Total		401.4	100

Table 2. Parameters of soil

	Uniform size distribution	Grain size distribution	Random distribution
Density (kg/m^3)	2650	2650	2650
Normal stiffness (N/m)	1.2×10^8	1.2×10^8	1.2×10^8
Shear stiffness (N/m)	1.2×10^8	1.2×10^8	1.2×10^8
Normal/shear stiffness ratio	1	1	1
Friction coefficient	1.1	1.1	1.1
Particle size (mm)	0.85	Table 1	0.25~2
Initial porosity	0.12	0.12	0.12
Ball number	7753	13717	4426

한 100체(0.25mm) 이하의 작은 입경까지 전부 고려하여 해석을 수행하면 해석되는 입자의 개수가 프로그램상의 한계입자수(100,000개)를 초과하기 때문에 해석이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 0.25mm 이상의 조립재료를 고려하여 해석하였다. 0.25mm 이하의 입경이 재료의 거동특성에 영향을 주는 요인임에는 틀림없지만, 기존의 연구방법과 해석상의 한계를 고려한다면 감수할 만한 사항이라고 판단되어 해석에서 제외하였다.

타당성 평가를 위한 해석대상 재료인 태인지역의 풍화토에서 해석에 고려된 입도분포 구간은 Fig. 4의 실선에 해당하는 0.25~2mm이며, 등분포와 무작위 생성의 입도분포도 각각 나타나 있다. 또한 수치해석 대상의 시료가 조립재료이므로 점착력은 없는 것으로 가정하였다. 해석에서 점착력은 입자간 붙는 힘인 점착력을 발생하게 되는데 본 연구에서는 점착력이 거의 없는 조립재료를 대상으로 하여 고려하지 않았다. 입자의 강성과 입자간의 마찰계수는 실내시험 결과를 토대로 보정과정을 실시하여 산정하였다. 조성된 시료의 강성과 마찰계수는 직접 실험 보다는 상대적으로 수월한 방법인 역해석을 활용하여 100kPa의 구속압 조건의 실제 삼축시험 결과를 비교하여 계수들을 추정된 후 보정과정을 거쳤다. 추정 시 탄성계수와 마찰계수를 반복적으로 조정하여 실제 결과와 일치하는 계수들을 얻었으며 이러한 보정계수들을 활용하여 200과 300kPa 구속압 조건에 동일하게 적용하였다.

개별요소 해석에서 입도분포를 고려한 경우가 기존에 사용되어진 D_{50} 의 균일 입도로 생성하는 경우와 무작위로 생성하는 원리를 이용한 경우의 차이를 확인하기 위해 각각 모델링하였다. 입력변수는 초기값을 산정한 뒤, 각각의 조건에 대한 수치해석 값이 실내삼축시험 값과 일치하도록 입력변수를 변경하여 일치하는 값을 Table 2와 같이 도출하였다.

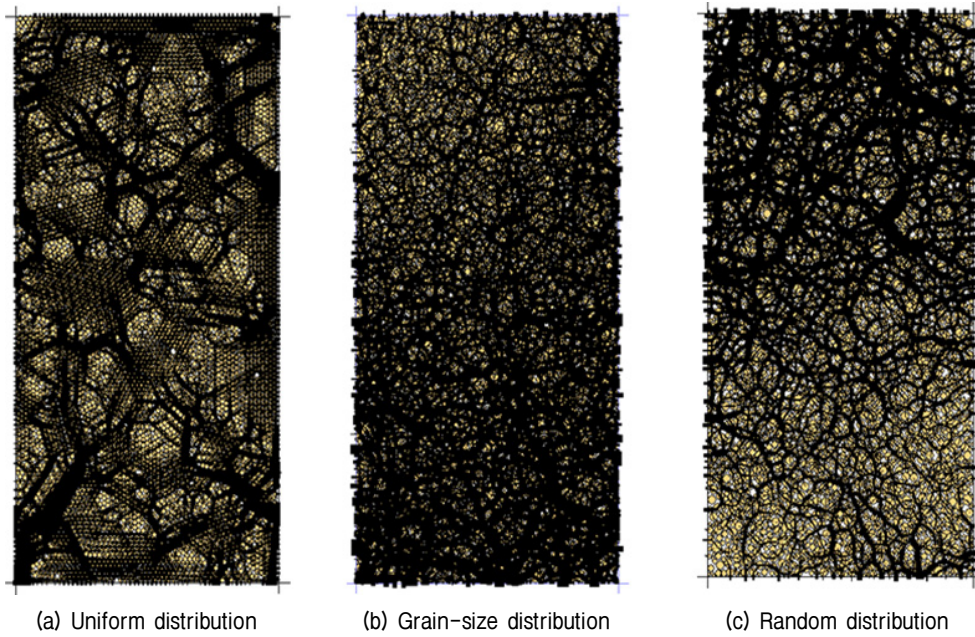


Fig. 5. Stress distribution of the initial conditions

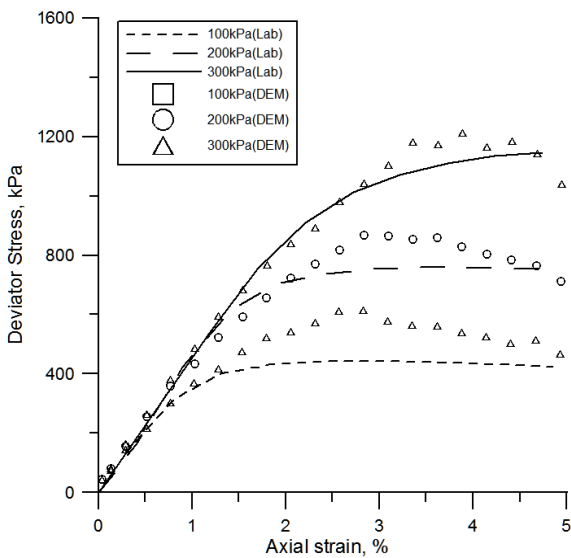


Fig. 6. Stress-strain behavior of uniform distribution

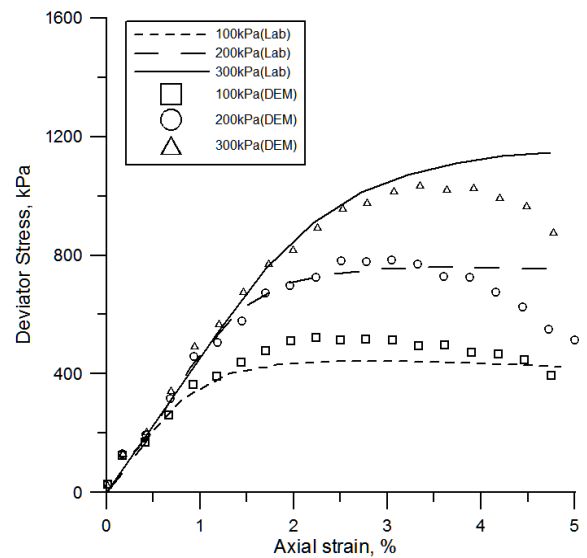


Fig. 7. Stress-strain behavior of using grain size distribution

4. 입도분포 알고리즘을 적용한 해석의 타당성 평가

Fig. 5는 동일하게 구속압 100kPa을 적용한 상태에서 입도분포를 고려한 경우(b)와 기존의 방법인 입도가 D_{50} 으로 균일한 경우(a), 프로그램상에서 제공되는 무작위 생성원리를 이용한 경우(c)의 초기조건 완료 시 내부응력의 분포를 비교한 그림이다. 입도분포가 균일한 경우에 발생된 내부응력의 분포로부터 응력이 집중되거나 제대로 전달되지 못하는 것을 확인할 수 있다. 무작위생

성원리를 이용한 경우도 응력의 분포가 고르지 못한 것을 확인할 수 있다. 하지만 입도분포가 고려된 경우에는 크고 작은 입자의 재배치로 인하여 재료 내부의 응력이 상대적으로 고르게 분포하며 실제 재료의 응력분포를 보다 현실적으로 반영하고 있음을 시각적으로도 판단할 수 있다.

수치해석 결과의 타당성을 평가하기 위하여 실내 삼축압축시험(CD-Test)을 실시하여 응력-변형곡선을 얻었으며, 실내시험의 결과와 수치해석 결과는 각각 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8과 같다. 결과에 나타나듯이 균일한 입

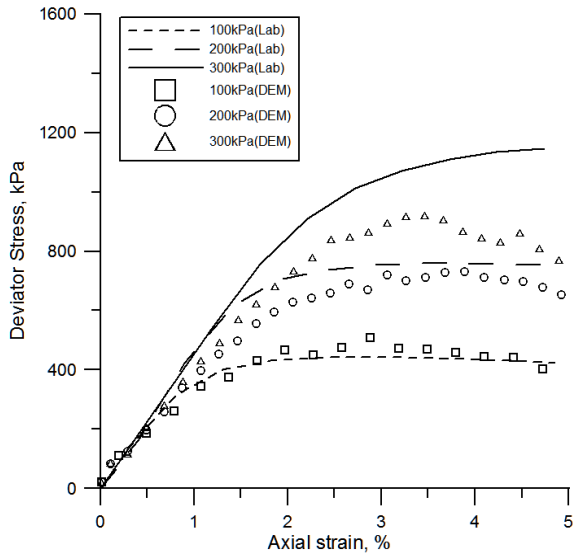


Fig. 8. Stress-strain behavior of random distribution

도를 사용한 경우 기존의 실험 값보다 대체적으로 크게 상정되는 결과를 볼 수 있으며, 무작위 생성 결과는 기존의 실험 결과보다 작게 산정되는 것을 볼 수 있다. 반면에 입도분포를 고려한 경우는 실내시험의 응력-변형 곡선과 개별요소해석의 결과가 유사한 거동을 보이는 것을 확인할 수 있다. 하지만 변형률이 약 3% 이후에서는 최대강도 이후의 강도가 감소하는 경향이 있으며, 구속압의 증가에 따라 그 감소폭이 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 입도분포를 고려하여 입자를 생성하는 과정에서 해석의 한계로 인하여 제외된 0.25mm 이하의 작은 입경의 영향과 실제 입도와 해석입도의 차이로 인한 오차라고 판단된다. 하지만 이러한 해석상의 한계를 감안 하여도, 대체적으로 비슷한 결과를 나타내므로 조립재료의 수치해석 기법으로써 활용도가 높음을 결과를 통하여 확인할 수 있다.

5. 입도분포가 다른 모델생성

조립재료의 입도분포가 강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 서로다른 입도분포를 생성하여 비교하였다. 입도분포는 총 3가지 방법으로 구분하여 각 입경에 해당하는 함유량을 달리 적용하였고, 입도분포를 제외한 재료의 입력변수들은 Table 2와 같이 각각 동일하게 적용하였다. 각각의 방법에 따른 입도별 함유량은 Table 3과 같으며, 그에 따르는 재료의 입도분포는 Fig. 9와 같다.

생성된 임의의 재료들은 재료를 구성하는 입경의 비율을 서로 다르게 적용한 것으로, Fig. 10과 같이 Case

Table 3. Distribution of particle size for each case

Particle size (mm)	Distirbution of particle size		
	Case 1	Case 2	Case 3
0.8~2	10%	33%	60%
0.425~0.8	30%	33%	30%
0.25~0.425	60%	33%	10%

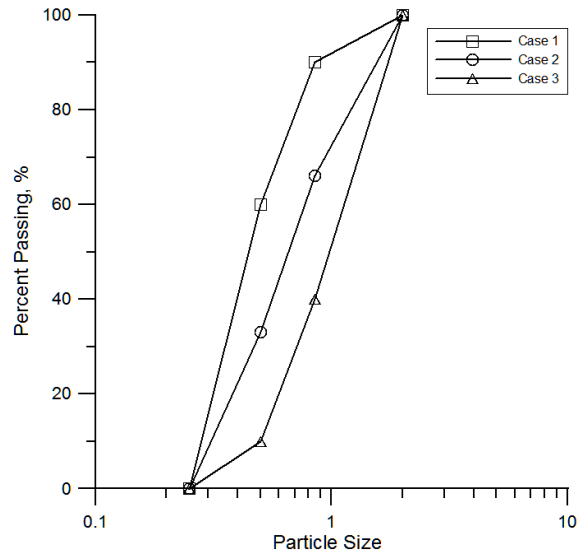


Fig. 9. Grain size distribution for each case

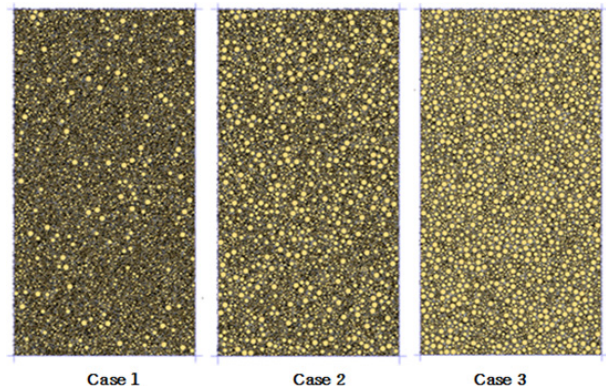


Fig. 10. Design of particle distribution for each case

1의 경우에는 작은 입자들 사이에 상대적으로 굵은 입자가 떠있으며, Case 2의 경우에는 크고 작은 입자가 적당히 맞물려 있는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 Case 3의 경우에는 굵은 입자간의 맞물림이 많은 것을 확인할 수 있는데, 이러한 재료의 구성에 따라 결과에 미치는 영향을 확인하였다.

6. 수치해석 결과

Case별로 구속압 25kPa, 50kPa의 저구속압 상태와 구

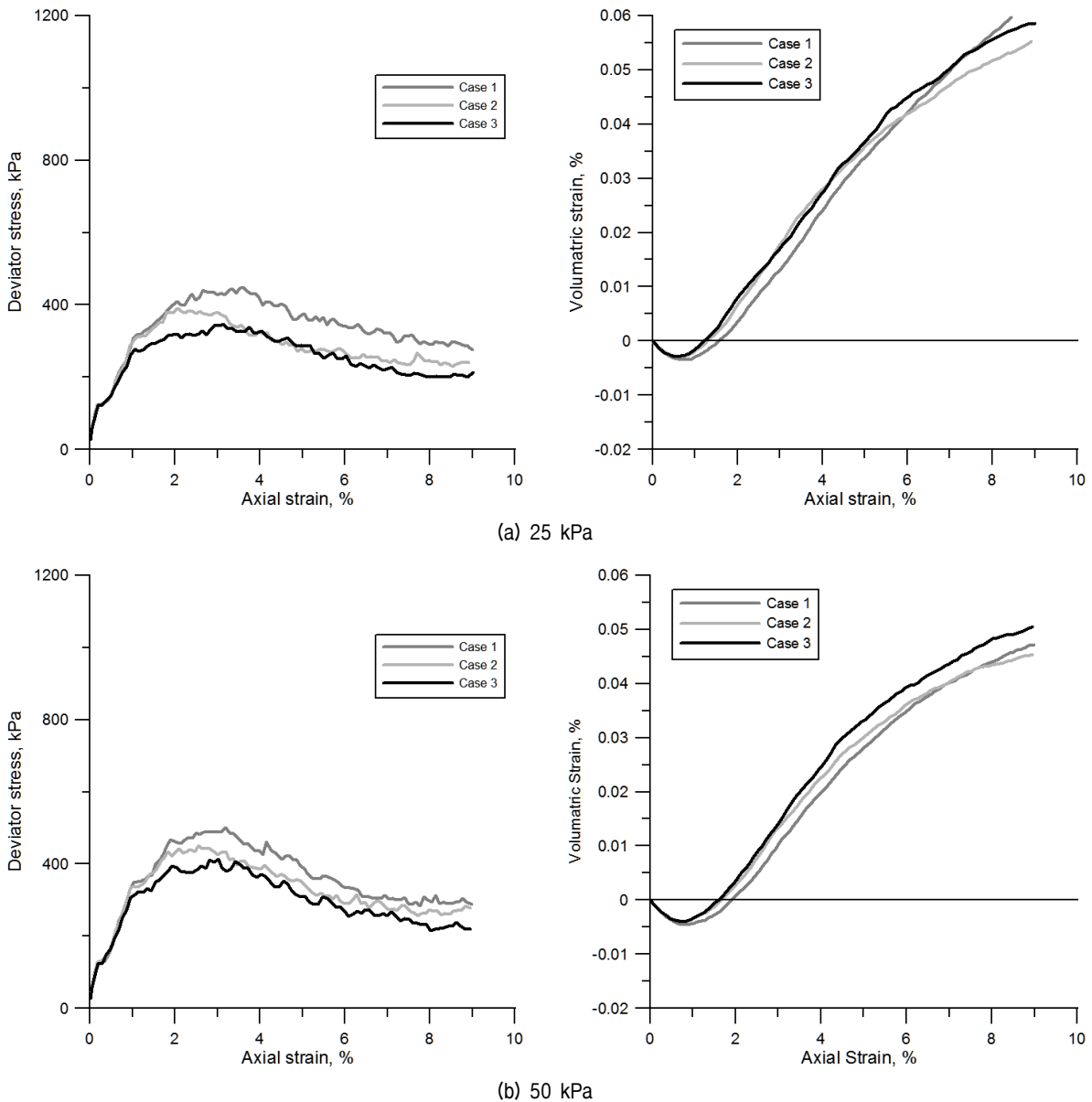


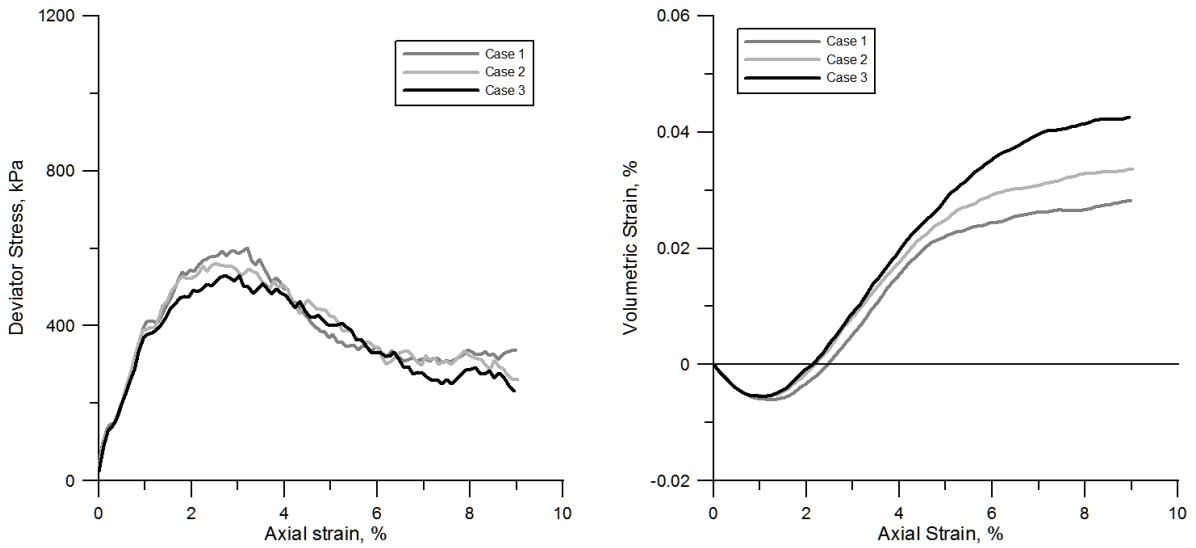
Fig. 11. Stress-strain behavior of coarse grain at low confining pressure

속압 100kPa, 200kPa, 300kPa의 고구속압 상태로 나누어 수치해석을 실시하였다. 각 Case별 세립분(0.25~0.425mm) 함유량은 Case1, Case2, Case3의 경우 각각 60%, 33%, 10%이다.

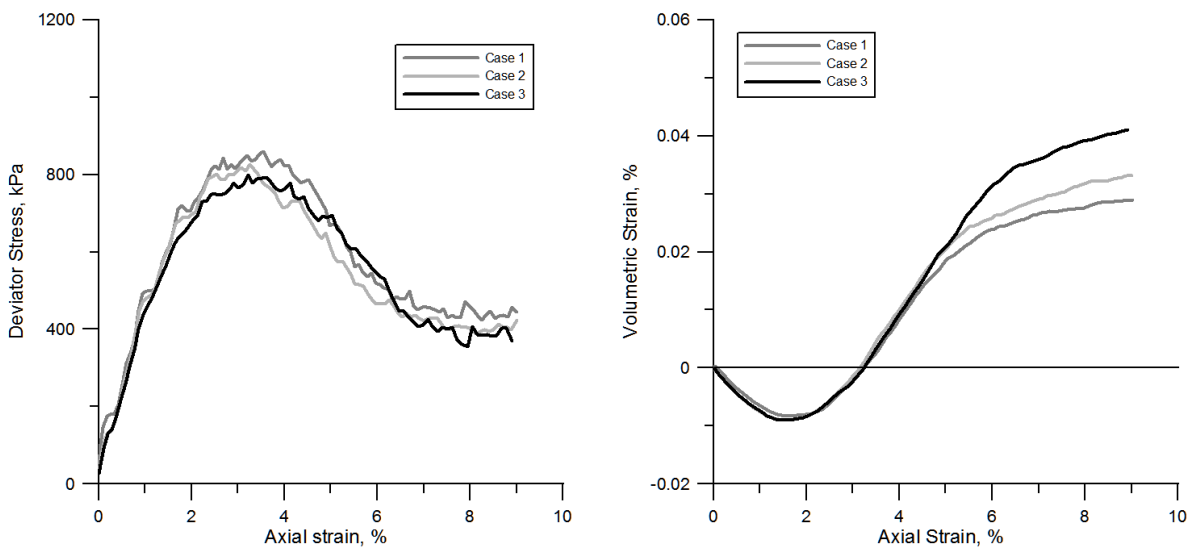
저구속압 상태에서는 작은 입자가 많이 포함될수록 재료의 강도가 크게 발생하며, 부피의 변형도 적게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 구속압 100kPa이 적용된 해석결과에서도 입도분포에 의한 강도 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있으나, 저구속압에 비해 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 구속압이 300kPa일때는 Case3이 현저하게 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 Case3의 경우 세립분의 함유량이 현저하게 떨어지기 때문이라

고 생각되어지고, 이는 입자간의 맞물림 현상이 작게 일어나기 때문이라고 생각되어진다. 저구속압과 고구속압에서 전체적으로 Case 1의 입도분포가 강도가 크게 나타나며, 이는 입자간의 맞물림이 적절히 되어 있기 때문이라고 생각되어진다.

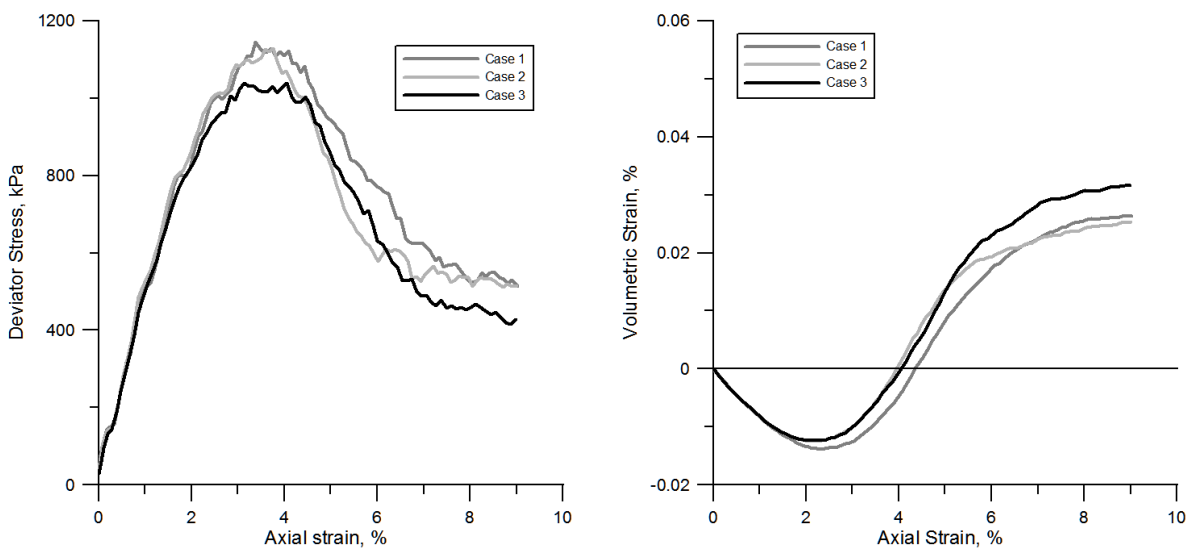
이 결과는 구속압 조건에 따라 재료의 거동에 영향을 미치는 입경의 범위가 있다고 판단되며, 또한 초기 강성과 잔류강도에도 차이가 발생하는 것으로 보아 조립재료의 경우 입도분포의 영향이 재료의 거동특성에 크게 영향을 미치는 것을 수치해석을 통하여 확인하였다.



(a) 100 kPa



(b) 200 kPa



(c) 300 kPa

Fig. 12. Stress-strain behavior of coarse grain at high confining pressure

7. 결론

재료의 특성이나 모델을 구성하는 입자와 경계면, 또는 입자와 입자 간의 상호적인 물리적 특성을 고려할 수 있는 개별요소법을 이용하여 조립재료의 입도분포를 고려함으로써 실내시험과의 타당성을 평가하고, 각기 다른 입도분포를 생성하여 재료의 거동특성의 변화를 확인하였다. 연구 내용에 대한 결과는 다음과 같다.

- (1) 조립재료의 입도분포를 고려한 해석을 위하여 알고리즘을 생성 및 적용하였으며, 수치해석과 실내 압밀배수 삼축압축시험을 각각 수행하여 응력-변형곡선을 비교한 결과 서로 유사한 거동을 보이고 있다.
- (2) 입도분포의 영향을 평가하기 위해 구속압의 크기별로 해석을 수행하였으며, 저구속압이 적용된 경우 0.25~0.425mm의 작은 입자가 많이 함유된 Case 1의 경우가 상대적으로 큰 강도를 나타내며, 재료의 파괴변화도 작은 것으로 평가되었다.
- (3) 구속압 100과 200kPa에서 0.25~0.425mm의 작은 입자가 많이 함유될수록 상대적으로 큰 강도와 작은 파괴변화가 일어났다. 낮은 구속압(25kPa, 50kPa) 조건과 비교하면 높은 구속압조건인 경우 잔류영역에서 더 작은 강도차이가 발생하였다. 이때 각 Case별 파괴변형률의 차이는 상대적으로 높은 구속압조건에서 낮은 구속압 조건 보다 큰 것을 확인하였다.
- (4) 고구속압이 적용된 결과에서는 구속압 300kPa의 구간에서 Case 3의 입도분포의 강도가 현저히 떨어지는 결과를 확인할 수 있으며, Case1, Case2의 침두지점과 비교하였을 때 각각 10.1%, 8.5% 낮은 수치를 보였다. 이는 세립분 함유량이 작아 입자간의 맞물림이 작게 일어나는 것이라고 판단되어진다. 반면에 Case 1과 Case 2는 전체적으로 비슷한 거동을 보이는 것을 통해, 세립분 함유량이 강도에 미치는 영향이 있다는 것을 수치해석적인 결과로 확인할

수 있었다.

- (5) 종합적으로 조립재료의 입도분포가 재료의 거동특성에 미치는 영향을 수치해석적으로 추정할 수 있는 알고리즘을 생성하여 적용함으로써, 개별요소해석을 통해 현장 및 실내시험에서 조립재료의 입도분포의 고려에 대한 선행 정보를 제공할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2013년 교육부(한국연구재단)의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2013R1A1A2058564).

참고문헌 (References)

1. Cundall, P. A. and Stark, O. D. L. (1979), "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies", *Geotechnique*, Vol.29, pp.47-65.
2. Itasca Consulting Group, Inc. (2008), "Particle Flow Code in 2dimensions", Ver.4.0 User's manual.
3. Jo, S. A., Cho, G. C., and Lee, S. W. (2009), "Evolution of Particle Crushing and Shear Behavior with Respect to Particle Shape Using PFC", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.10, pp.41-53.
4. Koo, J. K. and Jeon, J. S. (2007), "Application of Distinct Particle Modelling to Evaluate Geotechnical Parameters", *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol.27, No.1, pp.61-68.
5. Owen, D.R.J., Feng, Y.T., and Cottrell M.G. (2002), "Numerical Modeling of Industrial Application with Multi-fracturing and Particulate Phenomena", *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods*, A. A. Balkema, Lisse, pp.3-12.
6. Takao UEDA, Takashi MATSUSHIMA and Yasuo YAMADA (2011), "DEM Simulation of the Shear Strength and Shear Band Development of Well-graded Granular Materials", *International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, Seoul, Korea, pp.520-525.
7. Zeghal, Morched (2004), "Discrete-element Method Investigation of the Resilient behavior of Granular Materials", *Journal of Transportation Engineering* 130.4, pp.503-509.

Received : November 23rd, 2015

Revised : December 30th, 2015

Accepted : December 31st, 2015