

제방축조재료의 응력-변형거동 예측을 위한 실내시험 및 수치해석

Laboratory Tests and Numerical Simulations for Prediction of Stress-Strain Behavior Using Construction Materials for Embankment

정 상 국¹⁾* 구 자 갑²⁾
Jeong, Sang Guk Koo, Ja Kap

Abstract

The evaluation of the mechanical properties and behavior is very important for the design of embankment using granular materials. In this research, the lab. tests with Nak-dong river sand were conducted to find out mechanical properties related to stress-strain behavior. Also, numerical simulations which can express the behavior of granular material were conducted by distinct element method. Distinct element method can play a import role to predict stress-strain behavior for different confining stress and loading condition if micro-parameters can be estimated in specific condition.

Keywords : Triaxial test, Distinct element method, Micro parameter, Numerical simulation

1. 서론

모래 혹은 자갈 등의 조립재료는 많은 건설현장에서 사용되고 있는 가장 기본적인 건설재료로서 각 재료별 응력 조건에 대한 적정 강도 및 변형특성 파악이 매우 중요시 된다. 이러한 조립재료의 특성과약은 대형 실내시험 및 기존의 경험적 방법에 의존한 개략적 유추를 통해 수행되는 것이 일반적이라 할 수 있다. 개별요소방법은 지반공학적인 측면에서의 미시적 거동 및 전체적 거동의 예측뿐만 아니라, Li & Holt(2002)의 연구와 같은 수치시험실(numerical laboratory)로서 활용되고 있다.

본 연구에서는 개별요소해석 프로그램인 PFC2D(Particle Flow Code, Itasca)를 이용하여 실내 삼축 압축시험에 대한 모델링을 수행하였으며, 실내시험 결과와의 비교, 분석을 통해 개별요소해석의 적용기법 및 응용에 관한 연구를 수행하였다. 실내시험은 낙동강 모래를 이용한 삼축압축시험을 실시하였으며, 각 재료별 입도분포를 모델링 하기위하여 개별요소 팽창기법을 적용하였다.

2. 실내시험

2.1 삼축압축시험

삼축압축시험에 이용된 재료는 낙동강 모래로서, Fig. 1은 입도분포곡선이며 Table 1은 시험재료의 특성값을 나타낸 것이다. 시험재료의 최대간극비(e_{max}) 및 최소간극비(e_{min})는 각각 0.89, 0.56로 나타났으며, 상대다짐도 72~75% 조건에서 시험을 수행하였다. 시료의 크기는 폭 70mm, 높이 140mm이며 전단시험은 0.05MPa, 0.1MPa, 0.2MPa 구속압 조건에 대한 압밀배수전단하에 수행하였다.

Fig. 2는 구속압 조건별 응력-변형에 관한 시험결과를 나타낸 것으로서, 전단시의 최대강도는 축변형률 3% 미만에서 발생했으며, 최대 축차응력 도달 후 약간의 응력 연화현상을 보이고 있다.

1) 정회원, 송원대학 U-건설토목과 교수
2) 정회원, 한경대학교 토목공학과 교수

* Corresponding author : jungsg@songwon.ac.kr 062-360-5911

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

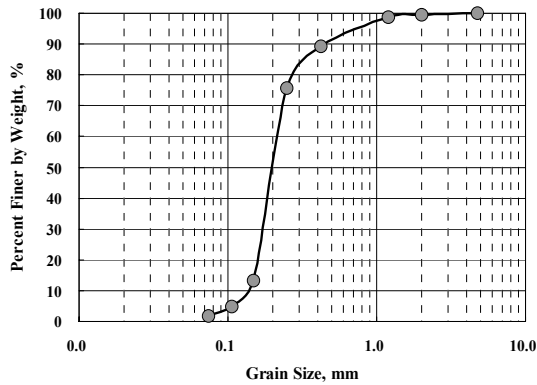


Fig. 1 Grain size distribution of sand at Nak-dong river

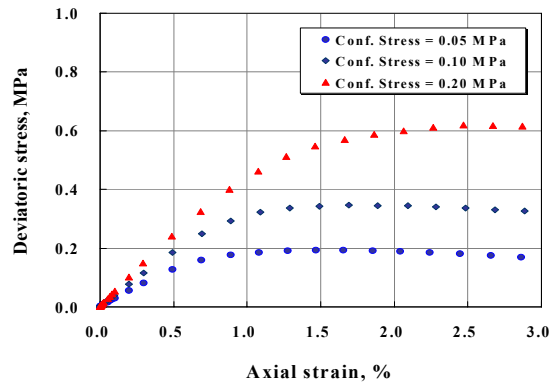


Fig. 2 Deviatoric stress with axial strain by triaxial test using sand

Table 1 Sand properties

항 목	특성값
비 중, G_s	2.68
건조단위중량(t/m^3)	1.57
D_{10} (mm)	0.15
D_{50} (mm)	0.20
균등계수, C_u	1.5
곡률계수, C_g	1.1
USCS	SP

3. 개별요소해석 이론

3.1 개별요소생성

본 연구에 이용된 개별요소해석 프로그램은 PFC^{2D} (Itasca, 2004)로서, 본 프로그램은 각각의 독립적인 입자(particle)들로 전체 모델을 생성하게 되며, 각 입자간 접촉면에서의 하중-변위관계로 표현되는 접촉면 구성모델에 의해 입자 개개의 미시적 거동(micro behavior) 및 전체적인 거동(macro behavior) 해석을 수행하게 된다.

지반공학에서 다루고 있는 조립재료는 세부 입자들의 형상, 거칠기, 배열상태 등과 관련된 입자간의 역물림 및 회전현상 등에 의해 그 강도와 변형특성이 크게 좌우된다.

이는 개별요소해석에서도 동일한 현상으로서, 해석시의 개별요소들은 특정두께를 갖는 디스크(disk) 혹은 구(sphere) 형태로 생성될 수 있으며, 더욱 복잡한 형태의 요소는 클러스터(cluster) 혹은 클럼프(clump) 로직을 통해 생성이 가능하다.

Fig. 3은 실제 조립재료에 대한 개별요소 생성개념을 표현한 것으로서, 조립재료의 입도분포, 간극률 등을 고려한 개별요소의 크기와 개수 등을 결정된 후, 접촉면 응

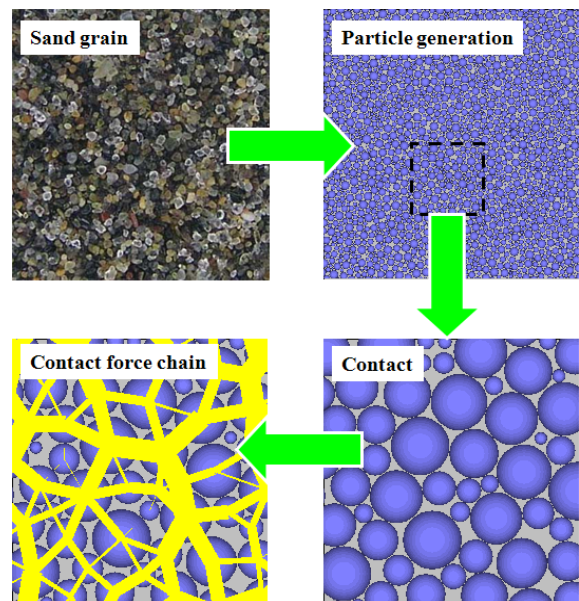


Fig. 3 Construction of particle model (from Jeon et al, 2006)

력상태 확인을 통하여 초기응력조건 및 요소배열상태 등을 만족시켜야 한다.

3.2 접촉면 구성방정식

개별요소들의 접촉면 거동은 크게 본딩(bonding) 거동의 고려 유·무로 구분될 수 있는데, 본딩 거동의 고려는 접촉면에서의 본딩 강성을 고려하는 경우(parallel-bond)와 고려하지 않는 경우(contact bond)로 세분화될 수 있다. 즉, 본딩 강성을 고려하지 않는 경우는 접촉면에서의 방향별 접촉 강성(contact stiffness)만을 고려하여, 접촉면 응력상태에 따른 본딩의 파괴 유·무만을 해석에 반영할 뿐, 접촉면에서의 휨모멘트 저항 및 회전저항 효과는 고려하지 못한다.

본 연구대상인 조립재료와 같이 별도의 본딩효과가 없는 재료들은 인접한 두 개별요소간의 접선 및 법선방향에 대한 접촉하중-상대변위를 선형적 혹은 비선형적 관계식을 통해 표현할 수 있다(Cundall, 1979).

4. 개별요소방법에 의한 실내시험 모델링

4.1 개별요소 생성 및 초기조건 구현

낙동강 모래에 대한 소형삼축압축시험을 모델링하기 위하여, 직경 7cm, 높이 14cm의 직사각형 공간에 원형 디스크 형태의 개별요소들을 생성하였으며, 그들은 상하 및 좌우측면에 총 4개 경계면에 의해 구속되도록 하였다.

본 연구에서는 최소반경(R_{min})을 0.2mm, 최대반경(R_{max})을 0.6mm, 간극률 0.14 조건에 대한 초기 개별요소를 생성하였다.

한편, 3차원 배열형태의 실제 입도조건을 2차원 배형형태의 해석조건으로 변화시키기 위해, 식 (1)과 같이 상대다짐도를 이용하여 3차원 조건에 대한 2차원 조건에서의 간극률(n_{2D})을 산정하였다.

$$n_{2D} = n_{2D, max} - D(n_{2D, max} - n_{2D, min}) \quad (1)$$

여기서, D 는 상대다짐도, $n_{2D, max}$ 는 2차원조건에서 이론적으로 가능한 최대 간극률(=21.46%), $n_{2D, min}$ 는 2차원 조건에서 이론적으로 가능한 최소 간극률(=9.31%)이다.

입의 간극률 및 개별요소 반경에 대한 적정 요소수는 식 (2)에 의해 결정되고, 최종적인 간극률 조건을 만족시키기 위해 기존 생성된 개별요소들의 크기를 변경시키게 된다.

$$N_p = \frac{A}{\pi(\bar{R})^2} [1 - n] \quad (2)$$

여기서, N_p 는 개별요소수(number of particles), A 는 전체 시료면적, \bar{R} 는 평균입자반경(= $(R_{min} + R_{max})/2$), n 은 간극률이다.

4.2 삼축압축시험 모델링

간극률 조건 및 입도분포곡선을 고려한 개별요소들의 생성결과를 이용, 조립재료에 대한 소형 및 대형삼축압축

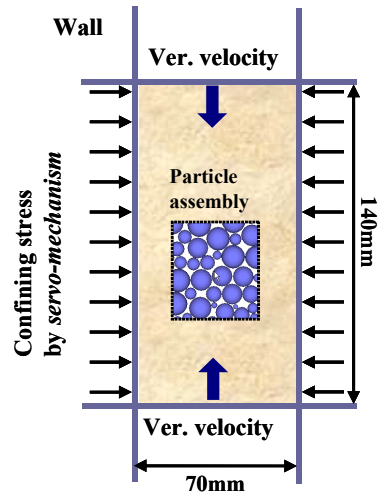


Fig. 4 Modelling of biaxial test

시험 과정을 모델링하였다. Fig. 4에서 보듯이, 초기 시료는 4개의 경계면(wall)안에 위치하게 되며, 각각의 경계면은 입의 응력조건 모델링에 이용되는데, 상부 및 하부 경계면은 축하중을 재하하는 가압판으로 사용되었다.

PFC에서는 경계면을 통한 직접적인 응력재하가 불가능하기 때문에 경계면을 특정 속도로 이동시키며 그 과정에서 경계면에 작용하는 반력을 측정하는 방식으로 축하중 재하를 실시하였다. 또한 해석과정중 일정한 구속압 조건을 유지시키기 위하여, 측부 경계면은 반력과 경계면 속도(wall velocity)의 자동조절을 반복해기는 서보제어 기법을 적용하였으며, 구속압 조건은 실내시험시와 동일하게 적용하였다.

한편, 개별요소방법에서는 일반적인 연속체 해석에서와 같이 미리 정해진 해석대상의 대표 물성치를 이용하는 것이 아닌, 각 입자요소들의 상호거동을 표현하는 미시 물성치를 이용하여 전체적인 역학거동을 해석한다. 즉, 개별요소방법(DEM)은 일반적인 연속체 해석과 달리 해석대상의 전체적 거동을 적절하게 표현할 수 있는 미시 물성치의 산정과정(calibration process)이 매우 중요하다.

본 연구에서는, 특정 구속압 조건에 대하여, 입의 미시 물성치들에 대한 개별요소해석을 수행하되, 그 결과가 실내 삼축압축시험 결과와 유사한 경향을 나타낼때까지 미시 물성치를 변화시켜가며 해석을 반복하였다. 이러한 일련의 과정을 통해 최종 산정된 비접착 모델의 미시 물성치는 Table 2와 같다. 여기서 E_c 는 각 개별요소 접촉면에서의 탄성계수를 의미하는 것으로서, 일반적인 연속체 해석에 이용되는 전체적 거동개념의 탄성계수와는 다

Table 2 Micro-parameters for unbonded model

Micro-parameters	Value
	Sand
Density, $\rho(kg/m^3)$	1,956
Contact modulus, $E_c(Pa)$	7.5×10^7
Normal stiffness, $k_n(N/m)$	1.5×10^8
Shear stiffness, $k_s(N/m)$	1.5×10^8
Friction coefficient, μ	1.3
Stiffness reduction factor	1.0

른 특성치이다. μ 는 개별요소간 혹은 개별요소와 경계면 사이의 미끄러짐저항을 나타내는 미시 물성치로서, 전체 거동에서의 재료강도에 영향을 미친다.

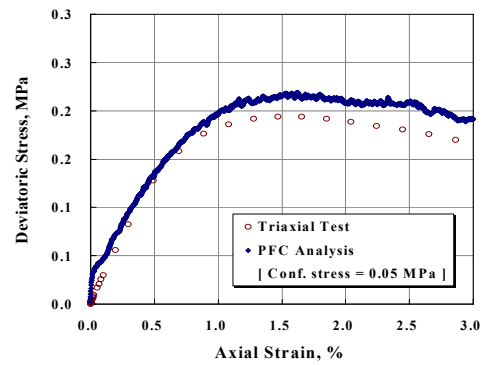
이러한 미시 물성치를 이용하여 본 연구에서는 모든 조건은 동일하게 적용하되, 다른 구속압 조건에 대한 해석을 실시하고 그 결과를 실내시험 결과와 비교, 분석하였다. 또한 반복재하과정에 대한 해석을 통해 특정 조건에 대한 미시 물성치가 다양한 응력조건에 대한 해석과정에 이용될 수 있음을 살펴보았다.

5. 해석결과 및 분석

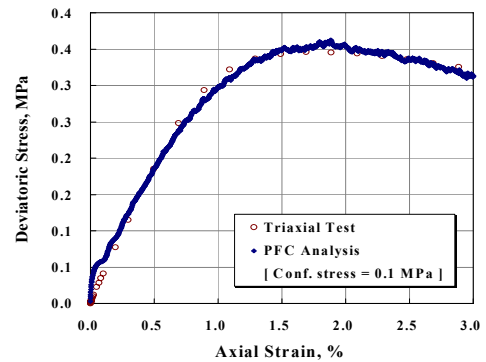
초기 개별요소 생성에 의한 입도분포 모델링, 미시 물성치의 산정과정 등을 기초로 수행한, PFC의 삼축압축시험 모델링 결과와 실내시험 결과는 Fig. 5와 같다.

낙동강 모래에 대한 삼축압축시험의 모델링에 있어, 미시 물성치의 산정은 3가지 구속압 조건 중 0.1MPa 구속압 조건에 대한 실내시험결과를 대상으로, 미시 물성치를 변화시켜가며 해석을 수행한 후 그 중 실내시험결과와 가장 일치하는 값을 선택하는 방식으로 수행하였다. 이러한 미시 물성치 산정과정에 의해 최종 산정된 결과를 이용하여, 모든 해석조건은 동일하게 하되 구속압을 0.05MPa, 0.2MPa로 달리한 상태에서의 개별요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 다시 해당 구속압 조건에 대한 실내시험결과와 비교하였다.

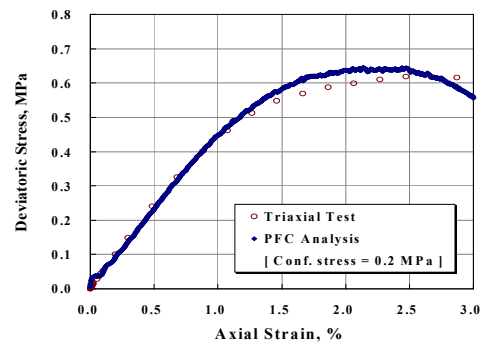
결과에서 알 수 있듯이, 전체적인 응력-변형 거동에 있어 PFC를 이용한 개별요소해석상의 예측결과와 실내시험 결과는 비교적 잘 일치하고 있으며, 특히 초기 탄성영역에서의 탄성계수에 있어서는 PFC가 실제 거동과 매우 유사한 예측결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 단, 구속압이 커짐에 따라 최대축삭응력 도달후의 응력연화현상이 시험결과에 비해 해석결과상에서 크게 나타남을 알 수 있다.



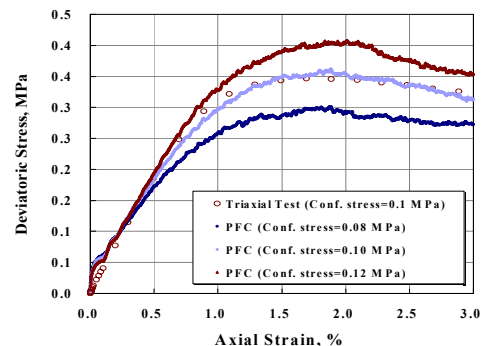
(a) $\sigma_3' = 0.05 MPa$



(b) $\sigma_3' = 0.1 MPa$



(c) $\sigma_3' = 0.2 MPa$



(d) $\sigma_3' = 0.08, 0.12 MPa$

Fig. 5 PFC modeling results for triaxial tests using sand at Nak-Dong river

Fig. 5(d)는 실내시험을 수행하지 않은 구속압 조건에 대한 PFC 해석결과로서, 모든 해석조건은 동일하되 단지 구속압만을 원하는 값으로 변경하여 해석을 수행하였다. 이는 기본적인 실내시험 결과로부터 적정 미시 물성치가 결정된다면 다양한 응력조건에 대한 강도 및 변형 특성과 약이 가능함을 의미한다.

즉, 실내시험 결과와의 비교를 통해 산정된 미시 물성치는 구성재료와 간극률, 입도 등의 초기조건만 동일하다면 다양한 응력조건 및 경계조건에 대한 개별요소해석에 적용될 수 있으며, 이는 유한요소 및 유한차분방법과 같은 기존 연속체 해석으로 표현하기 힘든 지반공학적 예측이 개별요소해석을 통해 가능하다는 것을 의미한다.

6. 결론

최근들어 미시적 거동분석 및 기존 연속체 개념의 해석 방법으로는 표현이 어려운 현상을 대상으로 개별요소방법의 활용이 더욱 증가할 것으로 예상되고 있다(Cundall, 2001).

본 연구에서는 개별요소해석 프로그램 PFC^{2D}를 이용하여 낙동강 모래를 이용한 삼축압축시험을 실시하였으며, 실내 삼축압축시험에 대하여 개별요소방법을 이용한 모델링을 실시하였고, 그에 대한 결론은 다음과 같다. 실내 시험시의 입도 및 간극률 등의 초기조건, 생성된 개별요소간의 접촉면 구성방정식 도입, 실내시험 결과와의 비교를 통한 미시 물성치 산정 등 개별요소방법에 의한 일련의 모델링 과정을 통해 실제 실내시험시의 응력-변형 거동 및 다양한 구속압 조건과 하중재하 조건에 대한 효과적인 예측이 가능함을 알 수 있었다.

특히, 모래와 같이 입도분포가 비교적 균일한 조립재료의 경우, 개별요소 생성결과가 실제 입도분포와 유사하고,

소형삼축압축시험을 통한 실내 시험이 가능하므로 이에 대한 수치모델링에 있어서도 적은 수의 개별요소가 필요하게 된다. 즉, 개별요소해석의 최대 어려움으로 인식되는 연산시간과 초기 입도분포 구현을 고려할때, 모래와 같은 조립재료의 거동평가와 예측에 있어 개별요소방법은 매우 효과적 접근방법이라 할 수 있다.

참고문헌

1. 전제성, 김기영, 신동훈, "개별요소법에 의한 락필재료의 대형 삼축시험 모델링", 한국지반공학학회논문집, 제22권 10호, 2006, pp.111-120.
2. Cundall, P.A., "A discontinuous future for numerical modelling in geomechanics?", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical engineering, Vol.149, No.1, 2001, pp.41-48
3. Cundall, P.A. and Strack, O.D.L., "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies", Geotechnique, Vol. 29, 1979, pp.47-65.
4. Deresiewicz, H. Mechanics of Granular Matter in Advances in Applied Mechanics, Vol. 5, Academic Press, New York, 1958, pp.233-306.
5. Itasca Consulting Group, Inc., PFC2D User's Guide & Fish in PFC2D, Minneapolis, Minnesota, 2004.
6. Li, L. and Holt, R.M., "Development of discrete particle modeling towards numerical laboratory", Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods, Balkema, Lisse, 2002, pp.19-27.
7. Owen, D.R.J., Feng, Y.T. and Cottrell, M.G., "Numerical modeling of industrial application with multi-fracturing and particulate phenomena", Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods, Balkema, Lisse, 2002, pp.3-12.
8. Ting, J.M., Corkum, B.T., Kauffman, C.R. and Greco, C., "Discrete numerical model for soil mechanics", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 115, No. 3, 1989, pp.379-398.

(접수일자 : 2010년 7월 1일)
(심사완료일자 : 2010년 9월 28일)

요 지

본 연구에서는 제방 축조재료로 사용되는 낙동강 모래의 응력-변형 거동특성 파악을 위하여, 삼축압축시험 등을 포함한 실내시험을 실시하였고, 조립재료의 거동 표현에 적합한 개별요소방법을 적용한 수치 모델링을 실시하였다. 개별요소해석은 삼축압축시험 과정을 모델링하였으며, 이때 이용된 미시물성치는 물성치 보정과정을 통해 산정되었다. 특정 구속압조건을 만족시키는 미시 물성치의 산정이 가능하다면, 이 미시물성치의 이용을 통해 다른 구속압조건 및 응력재하 조건에서의 거동예측에 있어, 개별요소방법이 매우 효과적으로 이용될 수 있음을 알 수 있었다.

핵심 용어 : 삼축압축시험, 개별요소방법, 미시물성치, 수치해석