

입자 결합 및 파쇄 형태에 따른 전단거동 특성

Characteristics of Shear Behavior According to State of Particle Bonding and Crushing

정 선 아¹ Jeong, Sun-Ah
김 은 경² Kim, Eun-Kyung
이 석 원^{3*} Lee, Seok-Won

ABSTRACT

In order to analyze the influence of particle bonding and crushing on the characteristics of shear behavior, especially residual shear behavior of granular soil, ring shear test was simulated by using DEM(Discrete Element Method)-based software program PFC(Particle Flow Code). Total four models including two non-crushing models and two crushing models were created in this study by using clump or cluster model built in PFC. The applicability of Lobo-crushing model proposed by Lobo-Guerrero and Vallejo(2005) was investigated. In addition, the results of ring shear test were analyzed and compared with those of direct shear test. The results showed that the modelling of ring shear test should be conducted to investigate the residual shear behavior. The Lobo-crushing model cannot be applied to investigate the residual shear strength. Finally, it can be concluded that the numerical models excluding Lobo-crushing model suggested in this study can be used extensively for other studies concerning the residual shear behavior of granular soil including soil crushing.

요 지

조립재료의 입자 결합 및 파쇄 형태가 전단거동 특히 잔류 전단거동 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 개별요소법(DEM, discrete element method)에 기초를 둔 프로그램인 PFC(Particle Flow Code)를 이용하여 링 전단시험을 수치해석적으로 모델링 하였다. 본 연구에서는 PFC내의 clump 모델 및 cluster 모델을 이용하여 두 개의 비파쇄모델 그리고 두 개의 파쇄모델을 포함한 총 네 개의 모델을 제시하였다. Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)가 제안한 Lobo-crushing 모델의 적합성을 검토하였다. 또한 링 전단시험 모델링의 결과 분석을 통하여 직접전단시험 모델링 결과와 비교하였다. 연구 결과, 잔류 전단거동 분석을 위해서는 링 전단시험의 모델링이 필수적임을 알 수 있었다. 또한 잔류 전단강도 분석을 위해서는 Lobo-crushing 모델이 부적합함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제시한 수치해석 모델은 향후 입자 파쇄를 포함한 조립재료의 잔류 전단강도 특성 연구에 다양하게 적용될 수 있다고 판단된다.

Keywords : Ring shear test, Particle crushing, Residual strength, PFC^{2D}, DEM

1. 서 론

기초 지반이나 댐, 사면 등을 형성하는 조립 재료는 다

양한 토목 구조물의 안정성에 영향을 미친다. 특히, 쇄석이나 모래와 같은 조립 재료들의 접촉면에서 외부로부터 작용되는 응력에 의해 입자 구조가 파괴될 수 있으며, 이

1 비회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사 (Non-member, Master, Civil and Environ. System Engrng., Konkuk Univ.)

2 비회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사 (Non-member, Master, Civil and Environ. System Engrng., Konkuk Univ.)

3* 정회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Civil and Environ. System Engrng., Konkuk Univ., E-mail: swlee@konkuk.ac.kr)

러한 입자의 파쇄는 전체 지반의 특성을 변화시키고 구조물의 불안정성을 유발한다(Bolton, 1986; Feda, 2002). 따라서 불연속 요소를 도입한 개별요소법(DEM, Discrete Element Model)을 이용해 입자 파쇄에 대한 많은 연구들이 이루어지고 있으며, 기존의 입자 재료를 기초로 한 연구들을 살펴보면 실험적 연구 및 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 입자 재료의 파쇄가 어떻게 전개되는지에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구들로부터 입자 파쇄가 입자크기, 입도분포, 입자강도, 간극비, creep에 영향을 받는다는 것이 밝혀졌다(Hagerty et al., 1993; Hardin, 1985; Lade et al., 1996; McDowell and Bolton, 1998).

본 연구에서는 위와 같은 입자 파쇄 전개 및 이에 따른 전단 강도 특성의 변화를 관찰하고자 개별요소법(DEM, Discrete Element Method)을 이용하였다. 불연속 요소를 도입하는 개별요소법은 입자의 고유특성인 마찰력 효과, 간극률의 영향 등을 고려할 수 있으며, 해석 과정에서 모델의 거동에 대해 시각적으로 잘 묘사할 수 있다는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 대변형을 받는 입자의 파쇄 유무에 따른 전단 강도의 특성을 비교하기 위해 개별요소법을 기반으로 하는 수치해석 프로그램인 PFC^{2D}(Particle Flow Code)를 이용하여 링 전단시험을 재현하였다. 이를 입자의 파쇄 모델과 비 파쇄 모델로 구분하여 결과를 분석하였으며, 잔류 응력을 검토함으로써 링 전단시험에 대한 수치해석의 유용성을 검증해보고자 하였다. 본 연구에서 사용한 비 파쇄 모델로는 원형모양의 단일 입자모델인 one ball 모델과 8개의 원형입자를 서로 결합시켜 접촉점에서의 파괴가 영구적으로 발생하지 않는 모델인 clump 모델을 만들었으며, 이를 이용하여 입자 형상의 영향을 연구하였다. 파쇄 모델로는 8개의 원형입자가 일정한 접촉강도로 결합되어 있으며 접촉강도 이상의 외력을 받으면 결합이 파괴되는 모델인 cluster 모델과 원형의 입자가 입자의 허용 인장강도 이상의 외력을 받으면 8개의 작은 입자로 대체되는 모델인 Lobo-crushing 모델(Lobo-Guerrero and Vallejo, 2005)을 만들었으며, 비 파쇄 모델과 파쇄 모델을 비교함으로써 입자 파쇄가 전단거동에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 상대밀도가 20%일 때와 90%일 때 두 가지 경우로 구분하여 각각 느슨한 사질토와 조밀한 사질토를 묘사하여 결과를 비교하였다. 본 논문에서 적용한 상대밀도 90%는 일반적으로 매우 조밀한(very dense) 상태로 분류되나 편의상 조밀한 사질토 또는 dense 상태라 표기하였다.

2. 수치해석 모델링

2.1 PFC(Particle Flow Code) 개요

Cundall and strack(1979)에 의해 정의된 개별요소법을 기반으로 하는 PFC는 일반적으로 임의의 형태를 가지는 입자의 집합체로 구성되는 대상 모델의 역학적 거동을 묘사하는데 이용되며 모델을 구성하는 입자들은 유한한 강성(stiffness)을 갖는 강성체로 가정되어 두 입자 사이의 접촉점(contacts)을 통해서만 상호작용이 이루어진다. 이 강성 입자들은 접촉점에서 어느 정도의 중첩을 허용하며, 이 중첩량은 접촉력과 힘-변위 관계식에 의해 계산되는데 그 정도는 입자의 크기에 비해서 상대적으로 미소한 양이다. 기본적으로 각 입자는 운동방정식에 의해서 외력, 속도, 모멘트와 위치가 계산되고, 그로 인해 발생하는 입자들의 접촉에서 힘-변위 관계식을 적용하여 접촉력으로 전환되는데 매 시간 단계(time-step)에 따라 이 과정을 반복하게 된다. 이 때 해석의 안정성과 정확성을 위해서는 충분히 작은 시간 증분을 필요로 한다. 이 계산 과정은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

입자들은 상호간 접촉에서 전개되는 힘을 통하여 다른 입자나 벽과 상호작용한다. 접촉은 반드시 두 개의 요소들(볼-볼 또는 볼-벽)과 관련되어 있으며, 하나의 점에서 발생한다. PFC 내에서 접촉모델은 임의의 접촉에서 일어나는 물리적인 거동을 의미하며, 요소들의 접촉 모델은 (i) 접촉-강성 모델(contact-stiffness model), (ii) 미끄러짐-분리 모델(slip-separation model), (iii) 결합 모델(bonding model)로 구분된다.

입자 간 접촉에서는 결합을 허용하며 기본적으로 접촉 결합 모델과 병렬결합 모델을 지원한다. 접촉결합 모델은 무한히 작은 점에 가까운 면상에 일정한 수직 및 전단 강성을 갖는 한 쌍의 탄성 스프링으로 표현된다. 반면, 병렬

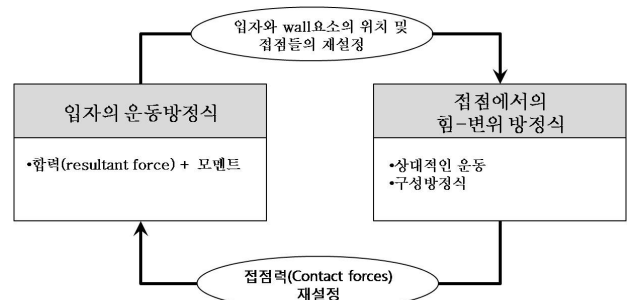


그림 1. PFC 해석의 기본적인 계산 과정 (Itasca Consulting Group, 2004)

결합 모델은 두 볼 사이에서 시멘트와 같은 역할을 수행하며 결합된 입자에서 미끄러짐 발생을 허용하고 힘과 모멘트 모두를 전달한다(Itasca Consulting Group, 2004).

2.2 입자 모델

본 연구에서는 입자 결합 및 파쇄 형태에 따른 전단거동 특성을 관찰하기 위해 PFC^{2D}에서 그림 2와 같이 네 가지 형태의 입자를 모델링하였다. 입자의 형상은 원형과 8개의 입자 결합으로 이루어진 것으로 나누어지고, 그 중 입자 결합 모델은 입자 결합의 방식에 따라 세 가지로 나누어진다.

PFC^{2D}는 기본적으로 원형 모양의 단일 입자 모델만을 지원하며 입자의 파쇄는 고려되지 않는다. 본 연구에서 입자 표면의 굴곡을 모사하기 위해서 clump 개념을 이용하여 clump 모델을 적용하였다. Clump 모델은 2개 이상의 원형 입자들을 서로 결합시켜 접촉점의 파괴가 영구적으로 발생하지 않도록 함으로써 입자가 전단거동 과정에서 자신의 모양을 그대로 유지하는 모델이다. 따라서 입자 형상의 영향에 대하여 연구하기 위하여 원형의 단일 입자로 구성된 원형입자(one ball) 모델과 8개의 입자를 결합하여 영구적으로 결합파괴가 발생하지 않는 clump 모델을 비교하였다. 또한 입자 파쇄를 고려하기 위하여 cluster 모델과 Lobo-crushing 모델을 적용하였다. Cluster 모델은 8개의 원형입자가 일정한 접촉강도로 결합되어 있으며 결합강도 이상의 외력을 받으면 결합이 파괴되는 모델이고, Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)가 제안한 Lobo-crushing 모델은 허용인장강도 이상의 외력을 받으면 8개의 작은 입자들의 집합으로 대체되는 모델이다. 정리해보면 비 파쇄 모델에는 one ball 모델과 clump 모델이 해당되고, 파쇄 모델에는 cluster 모델과 Lobo-crushing 모델이 해당된다. 각 모델을 구성하는 입자는 단위 두께를 갖는 원기둥으로

one ball 모델의 단일입자 면적과 clump 모델, cluster 모델의 8개 입자 면적의 합이 동일하도록 모델링 하였다. 반면, Lobo-crushing 모델의 경우 전단 과정 중 여러 개의 작은 입자로 대체되는 모델의 특성으로 인해 원래의 원형입자 크기의 테두리에서 벗어나지 않도록 입자를 생성함으로써 Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)가 지적한 바와 같이 원래의 면적에 비해 생성된 8개의 입자 면적이 작아지는 단점이 있다.

따라서 수치해석 모델을 입자의 형상 및 결합 상태에 따라 비 파쇄 모델과 파쇄 모델로 구분하여, 각각의 모델에 대해 링 전단시험을 모델링한 수치해석을 수행하고 이에 대한 결과를 전단거동 관점에서 분석하였다.

2.3 링 전단 모델

링 전단 수치해석은 일반적인 링 전단시험기의 전단박스를 2차원 단면으로 모델링하였으며 폭 6cm, 높이 3cm의 직사각형 단면이다. 이 때, 전단박스를 모사한 경계요소와 시료를 모사한 입자요소 사이에서 전단이 발생하는 것을 막기 위해 상·하부 벽의 모양을 톱니 모양으로 구성하였다. 이는 실제 현재 사용되고 있는 링 전단시험기와 동일한 조건이다. 그림 3에서 보는 바와 같이, 톱니의 높이는 0.2cm이고 파장(wave length)은 1cm로 하였다. 이 때 상부 wall이 $1 \times 10^{-7} m/step$ 의 속도로 좌측으로 이동하며, 상부 wall은 servo controlled system(Itasca Consulting Group, 2004)에 의해 y축 방향으로 움직이고 연직응력을 일정하게 유지시키는 역할을 한다. Wall의 강성은 반복 보정과정(calibration)을 통해 $1 \times 10^{10} N/m$ 를 적용하였으며, 입자의 잔류응력을 정확히 나타내기 위해 최대 전단변위는 10cm를 적용함으로써 충분한 변위로 전단시켰다.

링 전단 수치해석에서는 대 변위 적용을 가하기 위해 좌우의 수직 벽에 periodic boundary(Itasca Consulting

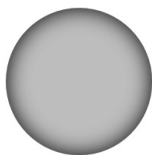
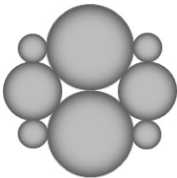
| | | |
|-------|---|---|
| 입자 형상 |  |  |
| 모델명 | One ball(비파쇄모델) | Clump(비파쇄모델) Cluster(파쇄모델) Lobo-crushing(파쇄모델) |

그림 2. 모델별 입자형상

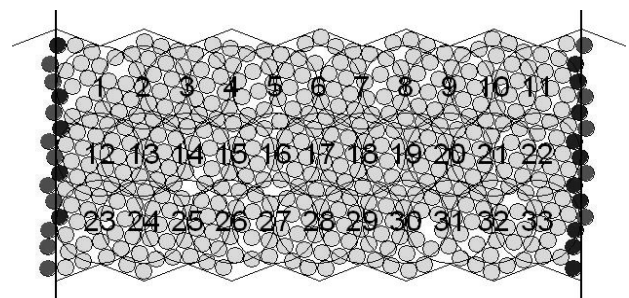


그림 3. 링 전단 수치해석 모델

Group, 2004)를 이용하였다. Periodic boundary는 공간상 해석하는 입자를 반복적으로 이용할 경우 유용하게 사용되는 FISH code로 입자가 순환적으로 반복될 때 입자수를 줄임으로써 컴퓨터의 해석시간을 단축시키며 원리는 다음과 같다. Periodic space 안에 포함된 입자들 중 좌우 수직 벽과 맞닿아 있는 입자의 중심좌표가 periodic boundary의 내부에 있는 경우 반대편 경계면에 같은 물리적인 성질을 지닌 가상의 입자가 생성된다. 반대편 경계면에 생긴 가상 입자의 중심좌표는 periodic boundary의 외부에 존재하게 되고 입자의 이동으로 이 중심좌표가 periodic boundary의 내부로 들어오면 다시 실제 입자로 작용하게 된다. 수치해석이 진행되는 동안 periodic space 내부에서는 이러한 현상이 반복되며 따라서 무한한 축방향의 경계조건을 갖게 된다. 이처럼 periodic boundary는 경계부분에서의 불필요한 영향을 제거하게 되어 해석의 정확성을 높일 수 있으며, 따라서 본 연구에서는 periodic boundary의 원리를 이용하여 링 전단 수치해석의 대 변위를 모사하였다.

2.4 수치해석 방법 및 범위

PFC 내에서 지원하는 입자는 원형으로써 2차원일 경우, 단위 두께를 갖는 원기둥으로 3차원에서는 구로써 모델링 된다. 이 때, 생성된 입자들은 각각 물성이 부여된다. PFC^{2D}의 입자에 관한 입력변수로는 입자의 크기, 강성, 마

찰계수, 입자간의 결합력 등이 있다. 모델링한 재료는 조립토로서 입자 크기는 모두 균일한 값을 적용하였고, 해석 시간 단축을 위해 입자 반지름을 1mm로 scale-up하여 적용하였다. 입자 생성은 전단박스 범위에서 무작위 생성원리를 이용하였으며 fish function을 이용하여 간극률을 조정하였고 입자간 겹침이 발생하지 않도록 충분한 강성을 갖도록 설정하였다. 또한 입자간 발생하는 힘을 줄이기 위해 입자생성과정 중에는 입자간 마찰을 '0'으로 설정하였고, 완전히 평형상태를 이룬 후에는 입자의 마찰계수 0.75를 적용하였다. 그 밖에 입력변수들은 보정과정(calibration)을 통하여 적절한 값을 산정하였고, 최종적으로 얻은 입력 물성치는 표 1과 같다.

전술한 바와 같이 네 가지 모델에 대하여 상대밀도, 결합강도, 인장강도, 수직응력 등을 변화시켜가며 링 전단모델의 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 모델별 수치해석 범위를 요약하면 표 2와 같다.

단, 본 연구는 특정 실내 전단시험 결과를 토대로 보정과정(calibration procedure)을 통하여 미시변수(micro-parameter)를 결정함으로써 실내시험을 수치해석적으로 분석하고자 한 연구가 아님을 밝히고자 한다. 즉, 본 연구의 주된 목적은 수치해석 수행을 통하여 사용하고자 하는 수치해석 틀인 PFC 링 전단모델에 대한 신뢰성을 확립하고, 이를 사용하여 본 연구에서 정량화 한 입자 형상에 따른 상대적인 입자 파쇄의 전개 및 잔류 전단거동의 변화를 고

표 1. 수치해석에 사용된 물성치

| Micro properties | | Value |
|------------------------------|-------------|--|
| Density (kg/m ³) | | 2,650 |
| Normal stiffness (N/m) | | 1X10 ⁸ |
| Shear stiffness (N/m) | | 1X10 ⁸ |
| Normal/shear stiffness ratio | | 1 |
| Friction coefficient | | 0.75 |
| Gravity (m/s ²) | | 9.81 |
| R (mm) | | 1 |
| Parallel bond | Normal (Pa) | 2.5X10 ⁵ or 1X10 ⁸ |
| | Shear (Pa) | 2.5X10 ⁵ or 1X10 ⁸ |

표 2. 모델별 입자 형상과 수치해석 수행 방법 및 조건

| Ring Shear Model | | 상대밀도 | 결합/인장강도(Pa) | 수직응력(kPa) |
|------------------|---------------|----------|--|---------------|
| 비파쇄모델 | One ball | 20%, 90% | - | 100, 200, 300 |
| | Clump | 20%, 90% | - | |
| 파쇄모델 | Cluster | 90% | 2.5X10 ⁵ or 1X10 ⁶ | |
| | Lobo-crushing | 90% | 2.5X10 ⁵ or 1X10 ⁶ | |

찰하고자 하였다. 따라서 본 연구에서 사용한 모델링이 모든 조건의 링 전단시험 모델링에 적용될 수 없음을 밝히고자 한다.

3. 비 파쇄 모델에 대한 전단거동 특성

입자 형상 변화에 따른 전단거동 특성의 변화를 연구하기 위하여 원형입자 모델인 one ball 모델과 비 파쇄 결합 입자모델인 clump 모델을 이용하여 상대밀도, 수직응력을 변화시켜가며 링 전단 모델의 수치해석을 수행하였다.

3.1 One ball 모델

그림 4는 one ball 모델을 사용해 링 전단시험을 수행한 후 이를 시각적으로 나타낸 것이며 시료 전체에 분포한 접촉력을 보여주고 있다. 링 전단모델의 경우 좌우 측벽이 periodic boundary로 구성되어 있어 측벽부에 경계요소가 없기 때문에 상부에서 하부로 연결되는 접촉력을 볼 수 있다. 또한 상부 wall이 좌측 방향으로 이동하고 있기 때문에 전체적인 접촉력의 방향은 우측에서 좌측을 향하고 있다.

그림 5는 one ball 모델의 링 전단시험으로부터 얻어진 전단응력과 수평변위와의 관계를 나타낸 것으로 (a)는 상대밀도가 20%인 경우의 응력-변위곡선이다. 전체적으로 그래프의 변동 폭이 큰 편이며 이는 입자의 크기가 상대적으로 크기 때문으로 판단된다. 또한 그래프의 변동을 감안할 경우 전단변위가 증가함에 따라 전단응력이 어느 정도 수렴되는 것을 볼 수 있다. (b)는 상대밀도가 90%인 경우이며 이 경우 역시 그래프의 변동 폭이 크지만 파괴점이 뚜렷이 나타나며 잔류응력의 경우 수직응력이 높아질수록 변동 폭이 커지지만 수렴되는 양상을 확인할 수 있다. (c)는 one ball 모델의 파괴포락선으로 20%와 90%의 상대밀도에서 25.78°와 30.38°의 내부마찰각을 보인다. 이를 상

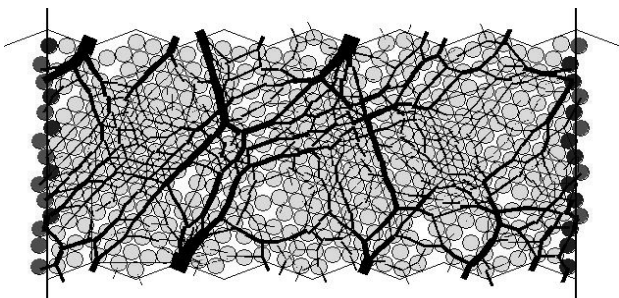
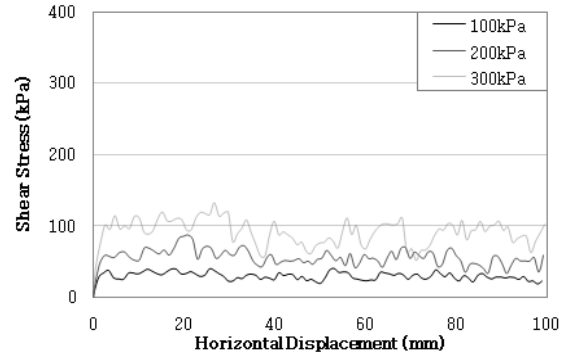
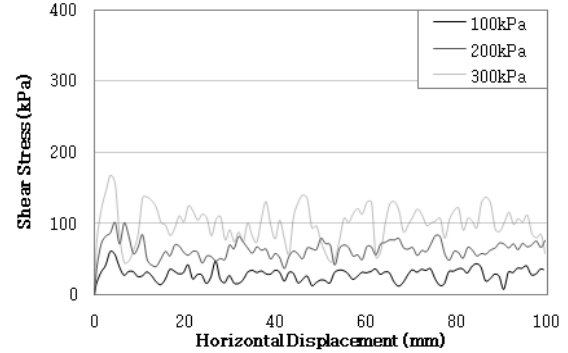


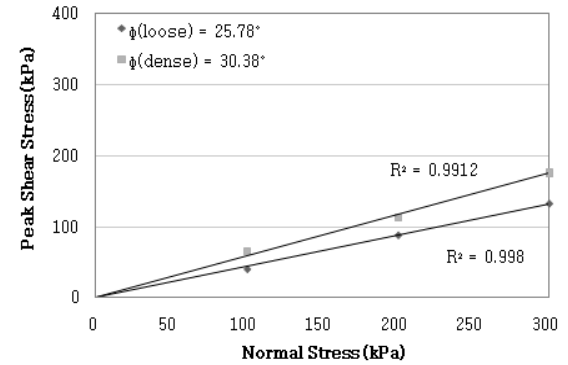
그림 4. 링 전단모델의 접촉력 분포 양상



(a) 상대밀도 20%



(b) 상대밀도 90%



(c) 파괴포락선

그림 5. One ball 모델의 응력-변위 곡선과 파괴포락선

대밀도의 차이와 비교했을 때 그 크기가 비교적 작은 차이를 나타내고 있으며 이는 입자의 크기와 형상에서 기인한 것으로 판단된다. 입자요소의 크기가 경계요소의 크기에 비해 상대적으로 크며 또한 표면이 매끄러운 원형 입자이기 때문에 입자의 맞물림 효과가 발생하지 않아 조밀한 상대밀도에서도 비교적 낮은 크기의 내부마찰각이 나타난 것으로 보인다.

3.2 Clump 모델

Clump 모델의 경우 8개의 입자가 하나의 단위로 거동을 하는 비 파쇄 결합입자모델로 입자들이 영구적으로 분리되지 않는 개념의 모델이다. 그러나 periodic boundary

의 원리는 입자의 중심 좌표만을 이용해 반대편 경계면에 동일한 입자를 생성시키는 것으로 이 경우 clump와 같은 입자 사이의 영구결합을 반대편으로 연결시키지 못하는 단점이 있다. 따라서 clump를 PFC^{2D}에서 지원하는 그대로 사용할 경우 periodic boundary를 거치면 영구결합이 해제되어 입자가 날개로 거동하게 된다. 이러한 한계를 극복하고 clump 모델을 링 전단 수치해석에 적용하기 위해서는 사용자의 새로운 FISH 개념이 필요하다.

본 연구에서는 clump 입자가 영구결합을 유지한 상태로 periodic boundary를 통과하기 위해 다음과 같은 개념을 도입하였다. Periodic boundary를 통과할 경우 영구적인 결합이 유지되어야 하는 clump 모델이라도 입자의 중심 좌표만을 이동시키는 periodic boundary의 원리상 입자의 결합이 해제되기 때문에 원래의 입자 결합 형상을 그대로 유지한 채 다시 clump 모델로 재결합 시키는 것이 불가능하다. 따라서 본 clump 모델의 경우 영구 결합이 아닌 병렬결합으로 입자를 결합시킨 후 그 결합강도를 충분히 크게 주는 방법으로 입자들이 영구적으로 분리되지 않는 모델을 완성시켰다. 전단이 진행되는 과정에서 매 스텝 당 periodic boundary의 범위 내에 새로운 병렬결합이 계속해서 생성되도록 정의하였으며 그 결과 입자들의 결합이 계속해서 유지되는 것을 확인하였다.

그림 6은 위와 같은 방법으로 clump 모델의 수치해석을 수행한 결과이며 clump 모델의 전단응력과 수평변위의 관계를 나타내었다. (a)는 상대밀도가 20%인 경우의 응력-변위 곡선으로 상대밀도가 작을수록 일반적인 느슨한 사질토의 거동이 아닌 피크점이 나타나는 거동을 보이고 있다. 이는 one ball 모델과 마찬가지로 입자의 크기와 형상 때문에 발생하는 현상으로 판단된다. 입자의 크기가 상대적으로 크며 입자의 형상 관점에서 볼 때 입자의 표면 굴곡의 증가로 인해 전단이 진행되는 동안 입자 사이의 맞물림 효과가 증대되기 때문에 전단변위가 증가할수록 입자들 사이에 전단에 대한 저항이 커져 피크점이 나타나는 것으로 해석이 가능하다. 느슨한 사질토의 경우 전단이 진행되면서 입자 사이에 다른 입자들이 채워지는 현상이 발생해야 하지만 입자의 크기와 표면 형상 때문에 이러한 현상보다는 맞물림(interlocking) 현상이 어느 정도 발생하게 된다. 그리고 입자 내부에 존재하는 간극을 시료 전체의 간극 안에 포함시켜 계산하기 때문에 실제로 입자의 거동에 영향을 주는 간극률이 상대밀도 20%보다는 더 조밀한 상태일 수밖에 없는 것을 감안해야 할 것이다. (b)는 상대

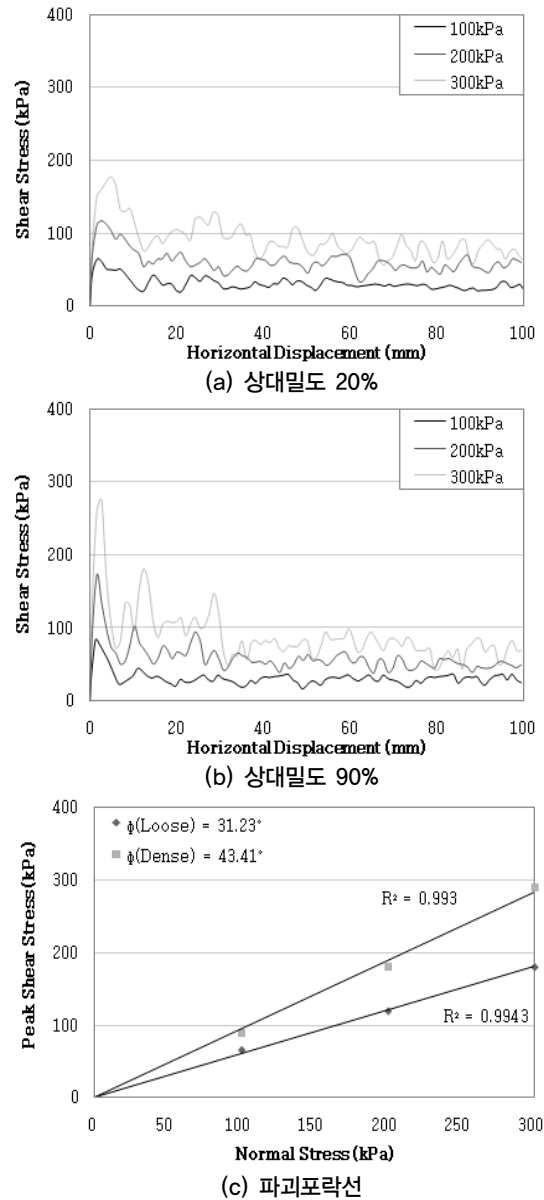


그림 6. Clump 모델의 응력-변위 곡선과 파괴포락선

밀도가 90%인 경우의 응력-변위 곡선으로 일반적인 조밀한 사질토의 거동처럼 피크점이 뚜렷이 나타나는 거동을 보인다. 두 경우 모두 전단변위가 증가할수록 수렴되는 양상을 보이고 있으며 수직응력이 증가할수록 수렴이 일어나는 구간이 늦게 발생하는 것을 확인할 수 있다. (c)는 clump 모델의 파괴포락선으로 여기에서 도출된 내부마찰각은 상대밀도 20%에서 31.23°, 상대밀도 90%에서 43.41°로 약 12° 정도의 차이를 보인다. One ball 모델의 경우 매끄러운 표면으로 인해 상대밀도 20%와 90%의 내부마찰각 차이가 크게 발생하지 않았지만 표면 형상의 변화로 인해 각각의 상대밀도에서 내부마찰각의 차이가 크게 발생했음을 알 수 있다.

4. 파쇄 모델에 대한 전단거동 특성

실제 입자의 파쇄는 응력의 이방성, 입자의 물리적·화학적 특성, 기하학적 형상 등 많은 내적·외적요인들로 인해 다양하게 나타나기 때문에 정확한 파괴강도나 파괴 정도를 예측하기가 매우 어렵다. 본 연구에서는 이러한 문제들을 단순화하여 신뢰할 만한 결과를 얻고자 PFC를 이용한 cluster 모델(파쇄입자 모델)을 도입하였으며, Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)가 제안한 방법으로 미리 파괴 기준을 정의하고 입자가 파괴되면 파괴되기 전의 입자와 동등한 여러 작은 입자들의 집합으로 대체하는 Lobo-crushing 모델을 적용하여 입자 파쇄에 대한 연구를 진행하였다.

4.1 Cluster 모델

Cluster 모델은 원형 입자 사이의 접촉이 유한한 파쇄 결합 모델로 결합강도 이상의 외부 응력을 받을 때 접촉이 분리되어 입자의 파쇄를 모사하는 모델이다. 그러나 위에서 언급했듯이 링 전단 수치해석에서 사용하는 periodic boundary에서는 입자의 중심 좌표를 이용해 반대편 경계면에 입자만을 새로 생성시키기 때문에 결합에 대한 부분은 지속시킬 수가 없다. 따라서 clump 모델과 같은 개념의 FISH를 도입하였으며 이 결과 입자들의 결합이 계속해서 유지되는 것을 확인하였으며, 본 연구에서는 이와 같은 logic을 이용해 cluster 모델의 링 전단 수치해석이 가능하

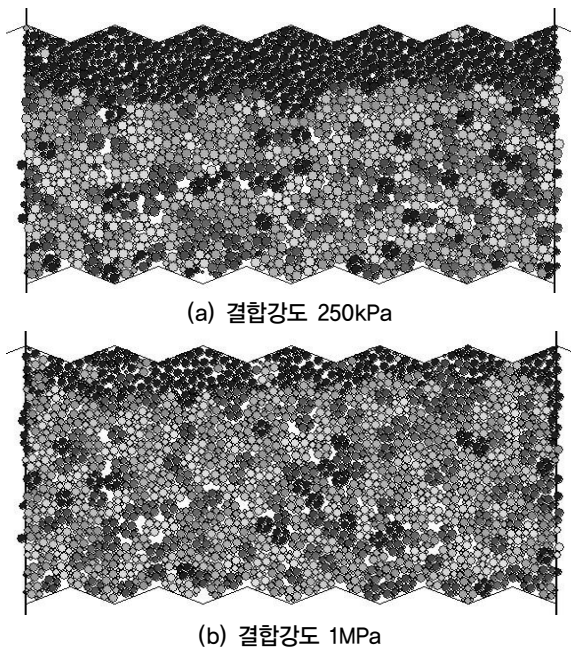


그림 7. Cluster 모델의 입자 파쇄 양상

도록 하였다.

하나의 단위입자 내부의 결합은 병렬결합으로 본 연구에서 수치해석에 적용한 입자 크기에 따른 결합강도와 최대응력의 상관성을 분석한 결과 가장 민감한 영역은 100kPa과 3MPa 사이에 존재함을 밝혔다. 따라서 본 연구에서는 이 값의 20%와 80%에 해당하는 250kPa과 1MPa의 결합강도를 적용하였다. 그림 8은 cluster 모델의 링 전단시험으로부터 얻어진 전단응력과 수평변위와의 관계를 나타낸 것으로 (a)는 결합강도가 250kPa인 경우의 응력-변위곡선이다. 이 경우 그림 7의 (a)에서 볼 수 있듯이 상당한 입자의 파쇄가 발생하였고, 입자 파쇄는 주로 상부에 집중되어 있으며 이는 상부 wall이 좌측으로 이동하면서 전단 변형을 발생시키기 때문이다. 그림 8의 (b)는 결합강

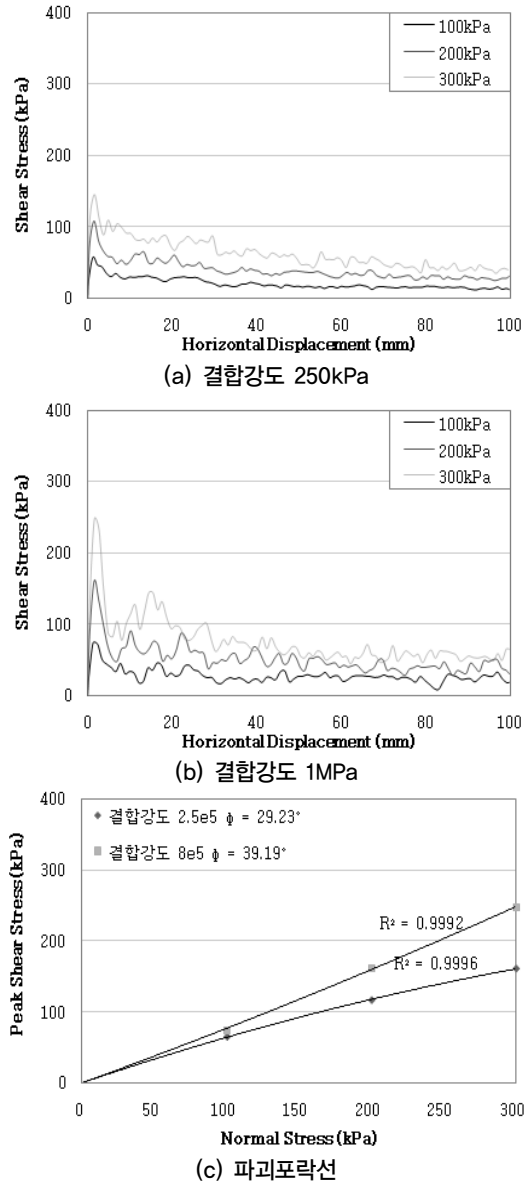


그림 8. Cluster 모델의 응력-변위 곡선과 파괴포락선

도가 $1MPa$ 인 경우의 응력-변위곡선으로 파괴점이 더욱 뚜렷이 나타나며 입자의 파쇄 정도는 그림 7의 (b)와 같다. 이 경우 비교적 적은 입자의 파쇄가 발생하며 전체적인 파쇄부가 상부 wall에 좀 더 밀착된 것을 확인할 수 있다. 그림 8의 (c)는 cluster 모델로부터 얻은 파괴포락선이다. 기존 연구결과에 의하면 입자의 파쇄가 발생할 경우 포락선이 비선형적으로 변한다고 밝혀져 있다(Bolton, 1986; Feda, 2002). 본 연구결과 그림 8의 (c)에서 볼 수 있듯이, 입자 파쇄가 이루어지는 cluster 모델은 비 파쇄 모델과는 달리 파괴포락선이 비선형적으로 나타났으며, 내부마찰각이 상당히 감소하면서 기존 결과들에 부합하였다. 파괴포락선이 비선형적으로 나타나는 것은 입자 파쇄로 인한 전단저항의 상대적 감소 및 수직응력의 증가에 따른 입자 파쇄 및 재배열의 가속화에 의한 것으로 이는 팽창(dilatancy) 현상의 감소도 유발한다. 결국 비 파쇄 모델보다 파쇄 모델이 실제 입자 파쇄가 발생하는 조립토의 거동을 좀 더 유사하게 표현하는 것으로 나타났다. 또한 결합강도가 작아지고 수직응력이 높아질수록 입자와 경계요소 사이에 입자 결합이 파괴되는 영역이 넓어지며 이를 토대로 모델의 전단대를 유추할 수 있다.

4.2 Lobo-crushing 모델

Lobo-crushing 모델은 Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)가 제안한 모델로 입자에 파괴 기준 이상의 힘이 가해질 경우 8개의 작은 입자로 대체되는 모델이다. 본 모델의 경우 기존의 입자가 파쇄되어 새로운 입자들을 생성시키는 입자파쇄 모사 과정에서 기존의 입자와 새로운 입자 사이의 접촉력이 연계되지 않으며 입자의 파쇄가 진행될수록 입자의 면적이 감소한다는 단점이 있다. 따라서 다른 모델보다 결과 값이 작게 나오는 경향이 있으며 상당히 작은 내부마찰각을 보인다. 그러나 이러한 문제 해결을 위해 본 입자의 테두리를 벗어나는 동일 면적의 8개 입자를 생성하면 이 또한 다른 문제점을 발생하게 된다.

Lobo-crushing 모델의 파쇄 원리의 기본은 접촉력에 기인하며 PFC^{2D}에서의 접촉력이란 입자 사이의 반발력을 기준으로 계산하는 것이다. 전단이 진행되는 과정에서 입자가 없어지고 새로 생기는 모델의 특성상 새로 생성되는 입자는 그림 9의 (b)와 같이 원래의 크기를 벗어나고 인접해 있는 다른 입자와 겹쳐진 상태로 생성이 되며 이로 인해 과도한 접촉력이 발생하게 된다. 생성된 입자와 기존의

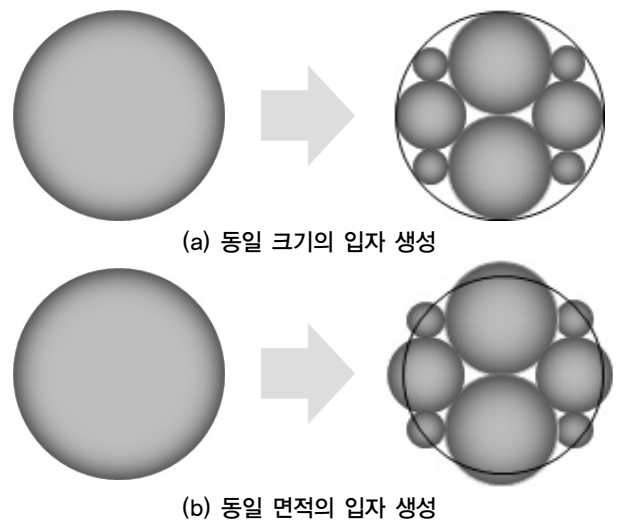


그림 9. Lobo-crushing 모델의 입자 생성 방법에 따른 차이

인접 입자의 겹쳐진 부분에서의 접촉력은 미리 정의해 놓은 허용인장강도보다 크게 발생하며 따라서 전단으로 인한 파괴가 아닌 다른 원인의 입자 파괴가 진행되는 것이다. 이러한 문제를 방지하기 위해 같은 면적을 가진 입자를 생성하는 것이 아닌 그림 9의 (a)와 같이 원래 입자의 내부에서 8개의 입자가 생성되는 형태로 수치해석을 진행하였다.

본 연구에 사용한 Lobo-crushing 모델은 파쇄 모델간의 비교를 위해 cluster 모델의 결합강도와 동일한 $250kPa$ 과 $1MPa$ 을 허용인장강도로 적용하였다. Lobo-crushing 모델은 입자의 허용인장강도 기준으로 파쇄를 결정하고 cluster 모델은 입자 간의 결합강도를 기준으로 파쇄를 결정하기 때문에 결과적으로 두 모델의 파괴 기준에 대한 비교가 가능할 것이다.

그림 11은 Lobo-crushing 모델의 링 전단 수치해석으로부터 얻어진 전단응력과 수평변위와의 관계를 나타낸 것으로, (a)는 인장강도 $250kPa$ 인 경우의 응력-변위곡선이다. 이 경우 그림 10의 (a)와 같이 상당한 양의 입자 파쇄가 발생하였으며, 시료 전체 면적의 약 10%가량이 감소하였다. (b)는 인장강도 $1MPa$ 인 경우의 응력-변위곡선으로 약 29° 의 내부마찰각을 가지며, 두 경우 모두 입자의 파쇄 발생으로 인해 파괴포락선은 비선형적으로 나타난다. 인장강도 $1MPa$ 인 경우 입자의 파쇄 정도는 그림 10의 (b)에 나타나 있으며, 같은 파쇄 모델인 cluster 모델과 비교해 볼 때 입자의 파쇄 양상이 비슷하고, 두 모델 모두 상부 경계요소에 인접한 부근에서 파쇄가 발생하였으며 파쇄의 범위 및 정도가 유사하다. 이로 미루어 볼 때, 링 전단시험

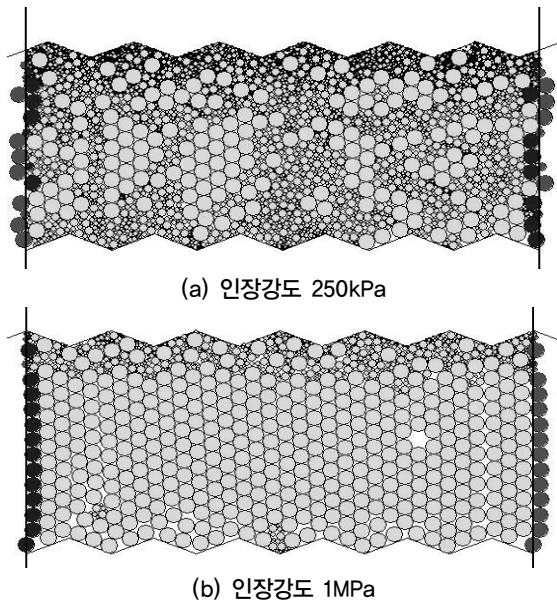


그림 10. Lobo-crushing 모델의 입자 파쇄 양상

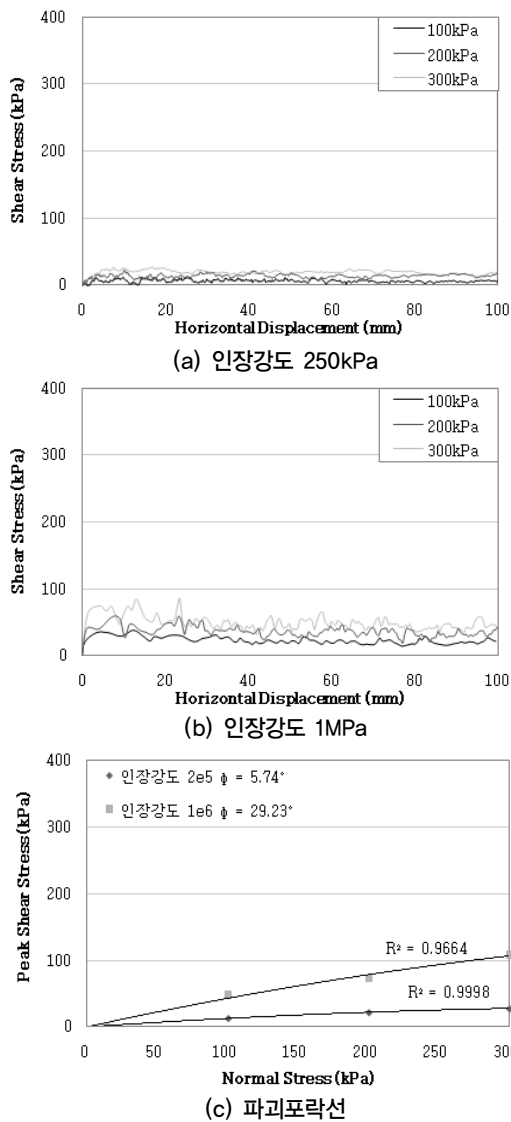


그림 11. Lobo-crushing 모델의 응력-변위 곡선과 파괴포락선

에서의 파쇄는 수평 변위를 가해주는 상부 경계에서부터 시작되며, 전단대는 입자의 파쇄 정도에 따라 점점 증가하는 것을 유추할 수 있다. Lobo-crushing 모델은 입자의 파쇄 양상에 대한 결과를 확인하는 경우에는 적합하지만 상기에 서술한 것처럼 입자가 대체되는 모델이므로 접촉력의 연계가 되지 않으며, 과도한 파쇄 발생 시 시료 전체에서 발생하는 면적의 감소가 전단응력에 영향을 줄 수 있는 양이기 때문에 본 모델은 입자의 전단응력을 연구할 경우의 파쇄 모델로는 적합하지 않다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)가 제시한 모델을 검토한 결과, 실제적으로 링 전단 모델로는 적합하지 않다는 결론을 얻을 수 있었다.

5. 결과 분석

5.1 비 파쇄 모델과 파쇄 모델의 내부마찰각 비교

표 3은 상대밀도 90%일 때의 비 파쇄 모델과 파쇄 모델의 내부마찰각을 비교한 결과이다. 각 모델 별 내부마찰각의 크기를 분석해보면 입자 표면에 굴곡으로 인해 맞물림(interlocking) 효과가 발생하는 비 파쇄 모델의 clump 모델이 가장 크고 입자 표면에 굴곡이 있으며 파쇄 현상이 발생하는 cluster 모델, 표면의 굴곡이 없으며 파쇄가 발생하지 않는 one ball 모델, 표면의 굴곡이 없으며 파쇄가 발생하는 Lobo-crushing 모델 순이다. 입자의 형상만을 분석하는 관점에서 one ball 모델과 clump 모델을 비교해 보면 약 13° 정도의 차이가 발생한다. 그리고 입자 파쇄 유무에 대해 분석할 수 있는 모델인 one ball 모델과 Lobo-crushing 모델의 분석에서 Lobo-crushing 모델의 인장강도 250kPa 인 경우는 입자의 과도한 파쇄로 인해 아주 작은 내부마찰각이 도출되었기 때문에 이 결과를 제외한 인장강도 1MPa에 대한 결과를 분석하도록 하겠다. 인장강도 1MPa의 경우 변위가 가해지는 상부 경계요소에서 다량의 입자 파쇄

표 3. 링 전단모델의 비 파쇄 모델과 파쇄 모델의 내부마찰각

| Ring Shear Model | | Friction angle | | |
|------------------|---------------|----------------|--------|--------|
| 비파쇄모델 | One ball | 30,38° | | |
| | Clump | 43,41° | | |
| 파쇄모델 | Cluster | 결합강도 | 250kPa | 29,23° |
| | | | 1MPa | 39,19° |
| | Lobo-crushing | 인장강도 | 250kPa | 5,74° |
| | | | 1MPa | 29,23° |

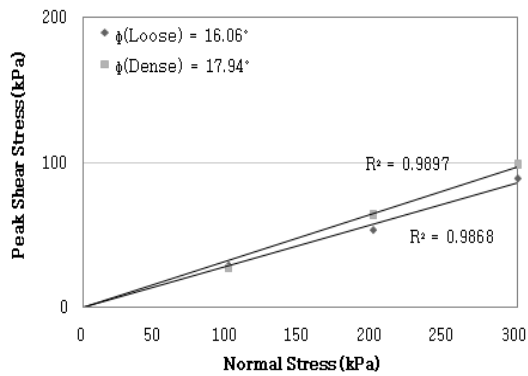
가 발생하였으며, one ball 모델보다 1° 가량 작은 내부마찰각이 도출되었다. 또한 표면에 굴곡이 있는 입자의 파쇄 유무에 대한 내부마찰각을 분석할 수 있는 모델인 clump 모델과 cluster 모델의 경우 입자의 파쇄가 상대적으로 적게 발생하는 cluster 모델(결합강도 1MPa)은 clump 모델과의 내부마찰각이 약 4° 정도의 차이를 보이며, 파쇄가 많이 발생하는 cluster 모델(결합강도 250kPa)의 경우 clump 모델과의 내부마찰각은 약 14° 정도 차이가 나타난다.

정리해보면, 순수하게 입자 형상의 굴곡 유무만을 고려한 내부마찰각의 차이는 약 13°, 입자에 굴곡이 있으며 파쇄가 적게 발생하는 경우 파쇄 유무에 대한 내부마찰각의 차이는 약 4°, 입자에 굴곡이 있으며 파쇄가 많이 발생하는 경우 파쇄 유무에 대한 내부마찰각의 차이는 약 14°로 요약할 수 있다.

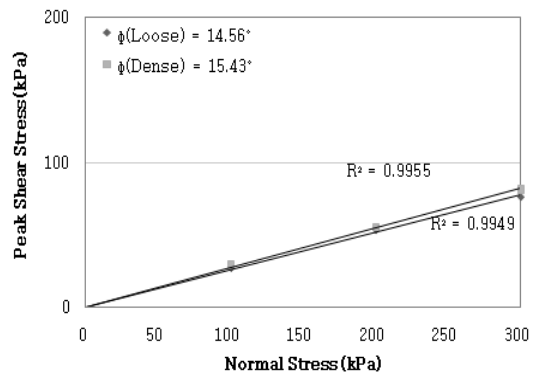
5.2 모델별 잔류응력 비교

링 전단 수치해석을 수행하는 근본적인 이유는 시료의 잔류응력에 대한 검토이다. 직접전단모델의 경우 제한적인 전단변위로 인해 응력이 수렴하는 부분의 전단거동 검

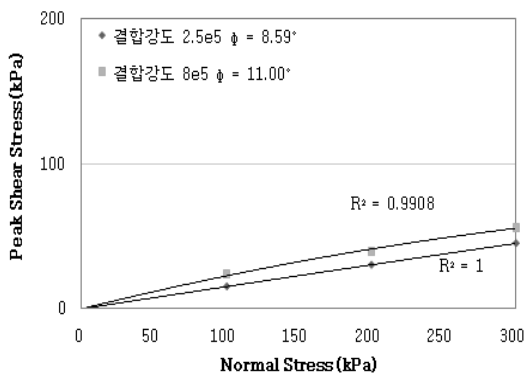
토가 어려우며 따라서 대 변위 수치해석이 가능한 링 전단 모델을 사용해 시료의 잔류응력에 대한 분석을 실시하였다. 그림 12는 각 모델별 전단응력이 수렴하는 부분의 응력을 이용해 도시한 Mohr-Coulomb 파괴포락선이다. 비파쇄모델인 one ball 모델과 clump 모델의 경우 20%와 90%의 상대밀도에서 거의 같은 내부마찰각을 보이고 있으며, 이는 상대밀도에 관계없이 대변위로 전단이 진행될 경우 잔류전단응력은 거의 같은 값으로 수렴한다는 것을 알 수 있는 결과이다. 파쇄모델의 경우 입자의 형상이 매끄러운 것으로 파쇄 유무만을 비교할 수 있는 one ball 모델과 Lobo-crushing 모델을 살펴보면 one ball 모델에 비해 Lobo-crushing 모델이 상당히 작은 내부마찰각을 보이고 있다. 또한 입자의 표면에 굴곡이 있는 것으로 파쇄 유무만을 비교할 수 있는 clump 모델과 cluster 모델 역시 파쇄가 일어나는 cluster 모델이 작은 내부마찰각을 갖는다. 이는 입자의 파쇄로 인해 내부마찰각이 감소한다는 것을 보여주는 결과이며 입자의 파쇄가 발생할 경우 파쇄가 좀 더 많이 발생하는 경우가 잔류응력에서도 내부마찰각이 작아지는 것을 알 수 있다.



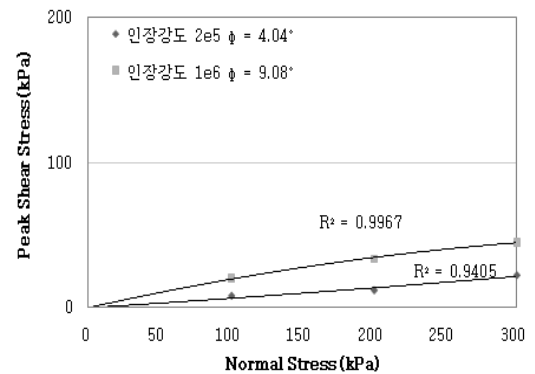
(a) One ball 모델



(b) Clump 모델



(c) Cluster 모델



(d) Lobo-crushing 모델

그림 12. 모델별 잔류응력에 대한 파괴포락선

6. 링 전단모델과 직접 전단모델의 비교

링 전단모델과 직접 전단모델을 비교함으로써 직접 전단모델에서 적용되는 수평 변위 내에서 입자의 잔류응력이 나타나는지를 검토해 볼 수 있으며, 직접 전단모델처럼 임의로 결정한 전단면에서의 전단응력과 링 전단모델에서 나타나는 실제 전단면에서의 전단응력의 차이를 확인할 수 있다. 직접 전단모델의 경우 최대 전단변위는 6mm이고 링 전단모델의 경우는 100mm로, 링 전단모델의 경우 전단변위가 직접 전단모델의 15배 이상이므로 해석 시간을 고려해 입자의 반경이 직접 전단모델의 입자에 비해 약 3배가량 크다.

링 전단모델의 경우 전단변위가 제한적인 직접 전단모델에서는 확인할 수 없는 대변위의 잔류응력을 확인할 수 있는 장점이 있다. 또한 직접 전단모델의 경우 파괴면이 미리 가정되어 있기 때문에 실제 파괴면에서의 전단거동을 나타내기 어려운 반면, 링 전단모델의 경우는 파괴면이 미리 정의되어 있지 않기 때문에 실제 시료의 전단거동을 모사하기 쉽다. 표 4에 직접전단모델과 링 전단모델의

Mohr-Coulomb 파괴포락선으로부터 얻은 내부마찰각을 나타내었다. 전체적으로 직접전단모델의 내부마찰각이 링 전단모델의 내부마찰각보다 평균적으로 6°가량 크게 나타났다. 이 비율은 약 0.85정도로 나타났다. 이는 서민우 등(2009)이 실시한 직접전단시험과 대형 삼축압축시험의 전단강도 비율과 거의 일치하는 것으로 본 수치해석에 신뢰성이 있음을 보여준다.

다음은 직접 전단모델과 링 전단모델의 잔류응력에 대한 분석이다. 직접 전단모델의 전단변위 내에서도 응력이 수렴하는 양상을 볼 수 있으며, 이때 수렴되는 응력을 실제 대변위에서 나타나는 잔류응력으로 간주할 수 있는지에 대해 알아보았다. 표 5는 직접 전단모델과 링 전단모델의 잔류 내부마찰각에 대한 비교로 여기서 잔류 내부마찰각의 비율과 표 4의 최대 내부마찰각의 비율을 비교해 보았을 때, 그 차이가 현저히 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 직접 전단모델의 경우 응력이 수렴되지 않는 상태로 수치해석이 종료되는 것을 보여주는 것이며, 따라서 잔류 응력을 도출해야 하는 경우 직접 전단모델이 아닌 링 전단모델을 사용해 잔류응력을 구해야 하는 것을 알 수 있다.

표 4. 직접전단모델과 링 전단모델의 최대 내부마찰각

| | | | Direct shear Friction angle | Ring Shear Friction angle | ϕ (Ring) ϕ (Direct) |
|---------------|------|-----|--------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| One ball | 상대밀도 | 20% | 20.33° | 25.78° | 1.26 |
| | | 90% | 36.81° | 30.38° | 0.85 |
| Clump | 상대밀도 | 20% | 43.5° | 31.23° | 0.72 |
| | | 90% | 50.66° | 43.41° | 0.85 |
| Cluster | 결합강도 | 20% | 31.92° | 29.23° | 0.92 |
| | | 80% | 43.86° | 39.19° | 0.89 |
| Lobo-crushing | 인장강도 | 20% | 20.25° | 5.74° | 0.28 |
| | | 80% | 35.93° | 29.23° | 0.81 |

표 5. 직접 전단모델과 링 전단모델의 잔류 내부마찰각

| | | | Direct shear Friction angle | Ring Shear Friction angle | ϕ (Ring) ϕ (Direct) |
|---------------|------|-----|--------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| One ball | 상대밀도 | 20% | 17.54° | 16.06° | 0.91 |
| | | 90% | 23.02° | 17.94° | 0.78 |
| Clump | 상대밀도 | 20% | 31.25° | 14.56° | 0.46 |
| | | 90% | 35.70° | 15.43° | 0.43 |
| Cluster | 결합강도 | 20% | 29.06° | 8.59° | 0.3 |
| | | 80% | 37.13° | 11.0° | 0.3 |
| Lobo-Crushing | 인장강도 | 20% | 10.80° | 4.04° | 0.37 |
| | | 80% | 20.34° | 9.08° | 0.45 |

7. 결론

본 연구에서는 입자 결합 및 파쇄 형상이 조립재료의 전단거동 특성에 미치는 영향을 DEM 기법을 이용하여 수치 해석을 수행하였다. 링 전단시험을 PFC^{2D}로 모델링하여 전단거동을 연구함으로써 기존에 밝혀졌던 지반 공학적 연구 결과들을 재확인하였으며 새로운 연구에 대한 기반을 마련하였다. 본 연구에서 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 구축한 링 전단 수치해석 모델의 타당성을 검토하기 위하여 직접전단 수치해석 모델과 결과를 비교하였다. 그 결과, 전체적으로 직접전단 모델의 내부마찰각이 링 전단 모델의 내부마찰각보다 평균적으로 6° 가량 크게 나타났으며 그 비율은 약 0.85 정도로 나타났다. 이는 서민우 등(2009)이 실시한 직접전단시험과 대형 삼축압축시험의 전단강도 비율과 거의 일치하는 것으로 본 수치해석에 신뢰성이 있음을 알 수 있다.
- (2) 링 전단 수치해석으로부터 얻은 네 가지 모델의 내부마찰각 순서는 Clump 모델 > Cluster 모델(결합강도 1MPa) > One ball 모델 > Lobo-crushing 모델(인장강도 1MPa) > Cluster 모델(결합강도 250kPa) > Lobo-crushing 모델(인장강도 250kPa) 순이며 전체를 비교해봤을 때 원형 입자모델보다 입자 결합 모델이, 파쇄모델보다 비 파쇄모델의 내부마찰각이 크게 나타났다.
- (3) 대 변위 수치해석이 가능한 링 전단모델로 시료의 잔류응력에 대해 분석한 결과, 상대밀도에 관계없이 대변위로 전단이 진행될 경우 잔류 전단응력은 거의 같은 값으로 수렴하였다. 또한 입자 파쇄가 발생한 경우 잔류내부마찰각이 감소하며, 파쇄가 좀 더 많이 발생하는 경우가 잔류응력에서도 내부마찰각이 더 작아지는 것을 알 수 있었다.
- (4) 입자 파쇄모델인 Lobo-crushing 모델의 경우 미리 파괴 기준을 정의하고 입자가 파괴되면 파괴되기 전의 입자와 동등한 8개의 작은 입자들의 집합으로 대체되는 방법을 사용하여 입자 파쇄 전후의 접촉력이 연계가 되지 않는 문제점이 있으며, 입자의 파쇄 전후 형상이 매끄러운 원형이기 때문에 실제 시료를 모사하는데 적합하지 않다. 또한 대체되는 8개의 입자 면적의 총 합은 파쇄 전 입자의 면적보다 약

17% 가량이 감소하게 된다. 그리고 Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)의 논문에서는 파쇄로 인해 발생하는 시료 전체의 면적 감소량이 3% 미만이므로 이를 감안할 수 있다고 밝혔지만, 본 연구에서 검토한 결과 입자 파쇄 발생이 많을 경우 시료 전체의 면적 감소량이 10% 이상이며 따라서 예상되는 전단응력보다 훨씬 작은 값이 도출되었다. 이러한 결과들을 종합해 볼 때 Lobo-Guerrero and Vallejo(2005)가 제안한 모델은 단순히 입자의 파쇄 양상만을 연구하기 위함이 아닌 전단거동에 대한 연구를 위한 모델로는 적합하지 않다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-331-D00475).

참고문헌

1. 서민우, 김범주, 하익수 (2009), “대형 직접전단시험과 대형 삼축압축시험에 의한 조립재료의 전단강도 비교”, *한국지반환경공학회 논문집*, 제10권, 제1호, pp.25-34.
2. Bolton, M.D. (1986), “The strength and dilatancy of sands”, *Geotechnique*, Vol.36, No.1, pp.65-78.
3. Cundall, P.A. and Strack, O.D.L. (1979), “A discrete numerical model for granular assemblies”, *Geotechnique*, Vol.29, No.1, pp.47-65.
4. Fedá, J. (2002), “Notes on the effect of grain crushing on the granular soil behavior”, *Engineering Geology*, Vol.63, No.1, pp.93-98.
5. Hagerty, M.M., Hite, D.R., Ulrich, C.R. and Hagerty, D.J. (1993), “One dimensional high pressure compression of granular media”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119, No.1, pp.1-18.
6. Hardin, B.O. (1985), “Crushing of soil particles”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.111, No.10, pp.1177-1192.
7. Itasca Consulting Group, Inc. (2004), “Particle Flow Code in 2dimensions, Ver.3.10, User’s manual”, Minneapolis, Itasca.
8. Lade, P.V., Yamamuro, J.A. and Bopp, P.A. (1996), “Significance of particle crushing in granular materials”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122, No.4, pp.309-316.
9. Lobo-Guerrero, S. and Vallejo, L.E. (2005), “Analysis of crushing of granular material under isotropic and biaxial stress conditions”, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.4, pp. 79-87.
10. McDowell, G.R. and Bolton, M.D. (1998), “On the micro-mechanics of crushable aggregates”, *Geotechnique*, Vol.48, No.5, pp.667-679.

(논문접수일 2011. 3. 16, 심사완료일 2011. 6. 10)