

PFC를 이용한 입자와 비파쇄 평면과의 접촉면에서의 전단 거동

김은경¹, 이정학², 이석원^{3*}

Shear behavior at the interface between particle and non-crushing surface by using PFC

Eun-Kyung Kim, Jeong-Hark Lee, Seok-Won Lee

ABSTRACT The shear behavior at the particle/surface interface such as rock joint can determine the mechanical behavior of whole structure. Therefore, a fundamental understanding of the mechanisms governing its behavior and accurately estimation of the interface strength is essential. In this paper, PFC, a numerical analysis program of discrete element method was used to investigate the effects of the surface roughness on interface strength. The surface roughness was characterized by smooth, intermediate, and rough surface, respectively. In order to investigate the effects of particle shape and crushing on particle/surface interface behavior, one ball, clump, and cluster models were created and their results were compared. The shape of particle was characterized by circle, triangle, square, and rectangle, respectively. The results showed that as the surface roughness increases, interface strength and friction angle increase and the void ratio increases. The one ball model with smooth surface shows lower interface strength and friction angle than the clump model with irregular surface. In addition, a cluster model has less interface strength and friction angle than the clump model. The failure envelope of the cluster model shows non-linear characteristic. From these findings, it is verified that the surface roughness and particle shape effect on the particle/surface interface shear behavior.

Keywords: Discrete element method, particle flow code 2D, particle/surface interface, surface roughness, particle crushing

요약 암반 절리면과 같이 입자와 연속체 평면의 접촉면에서의 전단거동은 전체 구조물의 거동을 지배할 수 있다. 암반 설계의 효율을 높이기 위해서는 입자와 연속체 평면의 접촉면 전단거동 메커니즘에 대한 기초적인 이해와 접촉면 전단강도를 정확하게 산정하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 연속체 평면의 표면 거칠기의 영향을 알아보기 위하여 개별요소법 수치해석 프로그램인 PFC^{2D}를 사용하였다. 이 때 표면 거칠기는 매끄러운 평면, 중간 거칠기 평면, 거친 평면의 세 가지로 구분하였다. 접촉면 전단시험에서 입자 형상 및 입자 파쇄의 영향을 연구하기 위하여 one ball 모델과 clump 및 cluster 모델을 형성하여 상대적으로 비교·분석하였다. 이 때 입자의 형상은 원형, 삼각형, 직사각형, 정사각형으로 모델링하였다. 수치해석 결과, 표면 거칠기가 클수록 접촉면 전단강도 및 마찰각이 크게 나타났으며, 또한 간극률이 크게 증가하였다. 표면이 매끄러운 one ball 모델보다 작은 입자들의 결합으로 이루어져 표면이 굴곡진 모델, 즉 clump 모델의 접촉면 전단강도 및 마찰각이 크게 나타났다. 입자의 결합이 파괴되는 모델, 즉 cluster 모델의 접촉면 전단 강도 및 마찰각이 같은 형상의 clump 모델보다 작게 나타났으며, 파괴포락선은 비선형으로 나타났다. 이러한 결과로부터 연속체 평면의 거칠기 및 입자의 형상이 입자와 평면의 접촉면 전단거동 특성에 미치는 영향을 확인하였다.

주요어: 개별요소법, PFC^{2D}, 입자/평면 접촉면, 표면 거칠기, 입자 파쇄

접수일(2012.06.15), 수정일(2012.06.22), 게재확정일(2012.06.26)

¹건국대학교 사회환경시스템공학과 석사

²대림산업(주) 부장

³건국대학교 사회환경시스템공학과 부교수

*교신저자: 이석원 (E-mail: swlee@konkuk.ac.kr)

1. 서론

흙 입자와 절리면, 흙 입자와 콘크리트 표면, 흙 입자와 토목섬유 등과 같이 입자/평면 접촉면에서의 전단거동 특성은 지반 공학적 문제에 많은 영향을 미친다. 예를 들어, 암반 절리면, 터널 라이닝, 깊은 기초(말뚝 기초), 옹벽 구조물 등과 같은 많은 지반 구조물의 안정성을 결정하는 중요한 요소가 된다. 입자/평면 접촉면에서 전단 강도를 결정하는 데는 시험 조건뿐만 아니라 입자 및 평면 물성이 크게 영향을 미치며, 따라서 이에 대한 연구가 활발하게 이루어져 왔다(이성원 등, 2009; 조인성 등, 2010; 김도훈 등, 2011; Potyondy, 1961; Brumund and Leonards, 1973; Uesugi et al., 1988; Paikowsky et al., 1995; Dove et al., 1997; Lee, 1998; Frost et al., 1999).

흙 입자와 절리면과 같은 연속체 평면과의 접촉면에서의 전단 거동은 입자의 형상, 입자의 파쇄 여부, 표면의 거칠기, 표면의 파쇄 유무 등에 밀접한 관계를 가지고 있다. 예를 들어, 입자 파쇄 관점에서 보면 입자/평면 접촉면에서 외부로부터 작용되는 응력에 의하여 입자 구조가 파쇄될 수 있으며, 이러한 입자의 파쇄는 전체 지반의 특성을 변화시키고 구조물의 불안정성을 유발할 수 있다. 응력 상태 및 재료의 물리·화학적 특성에 따라 정도의 차이는 있겠지만 입자 파쇄가 점진적으로 진행되면서 입자 구조는 세립화 되고, 입자 사이의 간극을 세립화 된 입자들이 메우면서 체적 압축이 발생하고 조밀한 상태가 된다. 이처럼 입자 파쇄가 지반 특성에 미치는 영향은 체적 압축에 의한 추가적 침하뿐만 아니라 간극의 감소로 인한 투수성의 감소 그리고 입자/평면 접촉면 전단강도 특성 변화에 따른 접촉면 마찰각 감소 등을 들 수 있다. 이러한 입자 파쇄의 시각화를 위하여 Cundall and Strack(1979)에 의해 개발된 개별요소법(DEM, Distinct Element Method)이 널리 이용되고 있다(Lobo-Guerrero and Vallejo, 2005; Fedá, 2002; Jensen, 1998).

본 연구에서는 개별요소법을 기반으로 하는 수치해석 프로그램인 PFC^{2D}(Particle Flow Code)를 이용하여 입자/연속체 평면 접촉면에서의 전단거동 특성을 연구하였다. 이를 위하여, 입자 형상은 네 가지로 즉 원형의 단일 입자 모델과 각각 입자 2개, 3개, 4개의 결합으로 이루어진 입자 결합모델을 구성하였다. 입자 결합모델은 결합 형태에 따라 clump 모델과 cluster 모델로 구분할 수 있는데, clump 모델은 입자 간 결합이 영구적으로 유지되는 비파쇄 입자 모델이고, cluster 모델은 입자 간 접촉점에 부여한 결합강도 이상의 외력을 받으면 결합이 파괴되는 파쇄 입자 모델이다. 이러한 모델링을 이용하여 입자의 파쇄가 접촉면 전단거동에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 입자 모델링과는 달리 연속체 표면의 경우는 PFC^{2D}에서 지원하지 않는 파쇄가 불가능한 특징을 가지는 경계요소(wall)로 모델링 하였다. 이때, 평면은 세 가지 거칠기(매끄러운 평면, 중간 거칠기 평면, 거친 평면)를 가지는 형상을 각각 구현함으로써 표면 거칠기가 접촉면 전단 거동에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 해석 프로그램

본 연구에서는 개별요소법(DEM)을 기본으로 하는 상용해석 프로그램인 PFC^{2D}를 이용하여 입자/평면 접촉면 전단 거동에 관한 연구를 수행하였다. 개별요소법은 해석 대상의 구조체를 개별적인 구형 입자의 집합체로 모델화 한다. 개개의 구형 입자는 운동방정식에 따라 독립적으로 운동하며, 이 때 발생하는 입자의 상호작용을 기본으로 해석이 이루어진다. 개별요소법을 이용하여 접촉면 전단영역에서 발생하는 입자의 맞물림(interlocking) 효과, 입도분포 및 간극률의 영향 등을 고려할 수 있고 입자의 파쇄를 정량적으로 관찰할 수 있다.

PFC^{2D}에서 입자들은 상호간 접촉에서 전개되는 힘을 통하여 다른 입자 및 벽과 상호 작용하고, 접촉은 반드시 두 개의 요소들(ball-ball or ball-wall)과 관련되어 있으며, 하나의 점에서 발생한다. 입자의 기본 형상이 원형인 PFC^{2D} 내에서 입자간 접촉에서의 결합으로 불규칙 형상의 입자를 모델링할 수 있으며, 불규칙 형상이 가능하도록 하는 것은 clump와 cluster 개념이다. 여기서 clump 모델은 영구적인 결합력으로 인하여 파쇄 모사가 불가능한 반면, cluster 모델은 유한한 결합력을 부여하여 그 이상의 외력을 받으면 결합이 파괴되어 입자 파쇄 모사가 가능하다. 접촉 결합은 수직 성분(normal component)과 전단 성분(shear component)으로 나누어 계산된다. 그림 1(a)는 접촉점에서의 인장력이 수직방향의 결합강도 즉, 인장강도에 도달하면 결합이 깨지고 수직 및 전단 접촉력은 상실됨을 나타낸다. 그림 1(b)의 전단성분도 마찬가지로 전단 접촉력이 전단방향의 결합강도 즉, 전단강도에 도달하면 결합은 깨지만 접촉력은 그대로 존재함을 나타낸다.

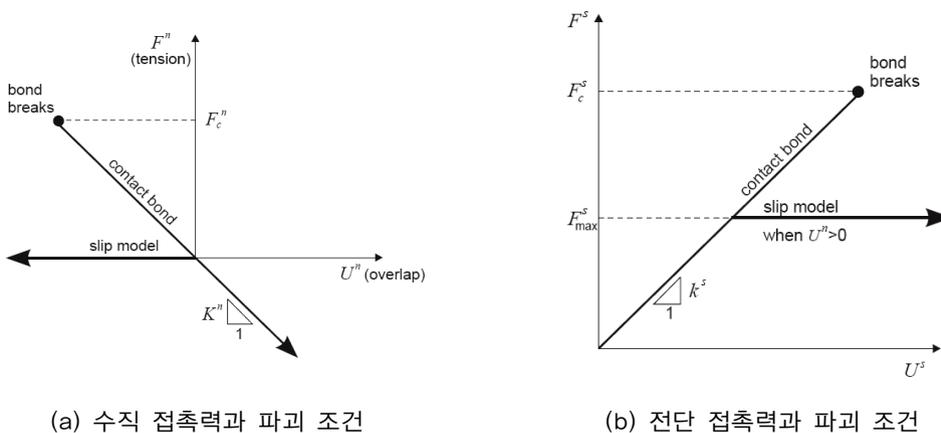


그림 1. 접촉점에서의 구조적 거동 (Itasca Consulting Group, 2004)

3. 수치해석 모델

3.1 입자 모델링

PFC^{2D} 내에서 지원되는 입자는 원기둥 또는 구형으로 2차원일 경우 단위 폭을 갖는 원기둥으로 간주되며, 3차원에서는 구로서 모델링 되며 각각의 입자들에 물성을 부여하게 된다. PFC^{2D}의 입자에 관한 입력 변수로는 입자의 크기, 강성, 마찰계수, 입자간의 결합력 등이 있다. 본 수치해석에 사용된 입자 형상은 그림 2와 같이 원형의 단일입자(그림 2(a)) 외에 세 가지 형상의 입자 결합 모델을 구성하였다. 여기에서 2ball(그림 2(b))은 직사각형, 3ball(그림 2(c))은 삼각형, 4ball(그림 2(d))은 정사각형으로 간주할 수 있다. 하나의 입자 형상을 형성하는 개개의 볼들은 단위 두께를 갖는 원기둥으로서 볼들의 면적의 합은 모두 동일하게 적용하였다. 볼 입자의 크기는 기존의 연구결과(Jo et al., 2011)를 토대로 국부적 간극비의 변화를 세밀하게 관찰할 수 있도록 반지름을 0.36 mm로 결정하였다.

입자 결합 상태에 따라 비파쇄 입자 모델과 파쇄 입자 모델로 구분하여 모델링하였다. 1ball은 단일입자로 비파쇄 입자 모델에 속하고, 2ball, 3ball, 4ball은 결합 형태를 달리 하여 비파쇄 입자 모델인 clump 모델과 파쇄 입자 모델인 cluster 모델로 각각 모델링하였다. 이때 cluster 모델의 결합강도는 Jo et al.(2011)의 연구 결과를 바탕으로 200 kPa과 800 kPa을 각각 부여하여 입자 파쇄 정도(결합강도 정도)에 따른 전단거동을 분석하였다.

따라서 one ball 모델과 clump 모델의 결과를 비교함으로써 입자 형상의 변화가 입자/평면 접촉면 전단거동에 미치는 영향을 연구하였고, clump 모델과 cluster 모델을 비교함으로써 입자 파쇄가 입자/평면 접촉면 전단거동에 미치는 영향을 연구하였다. 입자 생성은 전단박스 범위에서 무작위 생성 원리를 이용하고, Hainbuchner et al. (2002)의 연구결과를 바탕으로 간극률 (n)은 상대밀도 80%를 기준으로 하여 0.135(간극비, $e = 0.156$)를 적용하였다. 그 밖에 입력 변수들은 수치해석 보정과정(calibration)을 통하여 적절한 값을 산정하였고, 최종적으로 얻은 입자의 물성은 표 1과 같다. 여기에서 입자간의 수직 및 전단 강성은 기존의 연구결과(Jo et al., 2011)를 토대로 결정하였다.

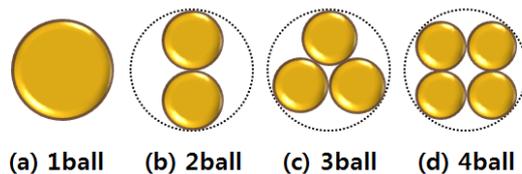


그림 2. 수치해석에 적용한 입자 형상

표 1. 입자와 연속체 평면 접촉면 모델의 입력 물성

| 입력 변수 | 값 |
|---------------------------|--------------------|
| 입자 밀도(kg/m ³) | 2,650 |
| 입자의 수직/전단 강성(N/m) | 1×10 ⁸ |
| 입자의 마찰계수 | 0.75 |
| 평면의 수직/전단 강성(N/m) | 1×10 ¹⁰ |
| 평면의 마찰계수 | 0.364 |
| 중력(m/s ²) | 9.81 |
| 입자 반지름(mm) | 0.36 |
| 입자 초기 간극률 | 0.135 |
| 입자 결합강도(kPa) | 200/800 |

3.2 연속체 평면 모델링

연속체 평면 모델링은 그림 3에 나타난 바와 같이, 특정 각도의 돌출부가 연속체 평면 전체에 반복적으로 형성되도록 하였다. 돌출부 각도는 0°, 15°, 30°로 모델링하여, 정성적 표현으로 각각 매끄러운 평면, 중간 거칠기 평면, 거친 평면을 대표할 수 있도록 하였다. 그 밖에 입력 변수들은 수치해석 보정과정(calibration)을 통하여 적절한 값을 산정하였고, 최종적으로 얻은 평면의 물성은 표 1과 같다. 또한 표 2에 연속체 표면 형상 특성을 나타냈다.

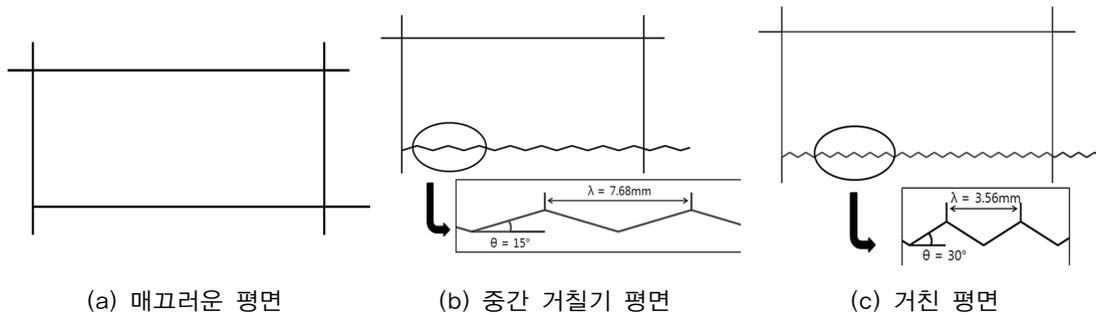


그림 3. 연속체 평면 모델링

표 2. 연속체 표면의 형상 특성

| | 격자 각도(°) | 격자 간격(mm) | 격자 높이(mm) |
|-----------|----------|-----------|-----------|
| 매끄러운 평면 | - | - | - |
| 중간 거칠기 평면 | 15 | 7.68 | 1.03 |
| 거친 평면 | 30 | 3.56 | 1.03 |

그림 3은 입자/연속체 평면 접촉면 모델의 개략도를 나타낸 것으로, 경계요소로 구성된 연속체는 고정시킨 채, 입자 집합체의 경계를 막고 있는 3 개의 벽을 우측으로 이동시킴으로써 접촉면에서의 전단이 발생하게 하였다. 전단박스의 크기는 폭 60 mm, 높이 20 mm로 3차원상의 박스를 2차원의 직사각형 단면으로 모델링하였다. 이 때 최대 전단 변위는 80 mm로 충분히 전단시켜 잔류 응력이 나타날 수 있도록 하였다. 또한 상부벽은 상하로 이동이 자유로우며, servo-controlled system(Itasca Consulting Group, 2004)에 의하여 수직응력을 일정하게 유지시키는 역할을 한다.

다시 말해, 모델링에 사용된 입자의 형상은 그림 2에 표시되어 있고, 사용된 평면은 그림 3에 도시되어 있다. 이러한 입자와 평면을 실험 조건에 맞게 도시하여 놓은 것이 그림 11이다.

4. 입자/연속체 평면 접촉면 모델의 해석 결과

4.1 비파쇄 입자 모델에 대한 전단거동 특성

그림 2에 제시한 4가지 입자 형상을 비파쇄 입자(clump model)로 모델링한 후 직접전단 수치해석을 수행하였다. 그림 4는 대표적으로 수직응력이 100 kPa일 때, 표면 거칠기에 따른 비파쇄 입자/평면 접촉면의 수평변위와 전단응력과의 관계를 나타내고 있다. 매끄러운 평면으로 수행한 그림 4(a)에서 모든 형상의 입자는 전단 초기에 일정 전단강도 값에 수렴하는 것을 볼 수 있는데, 이는 매끄러운 평면 위에서는 입자 형상에 관계없이 모든 입자 모델은 미끄러지기 때문이다. 그림 4(b), (c)와 같이 어느 정도 거칠기를 가지는 두 평면에서는 모두 one ball 모델이 뚜렷이 가장 작은 전단강도 범위를 보이고, 나머지 세 입자 형상의 모델은 비슷한 강도 범위에서 진동하고 있다. 이것은 one ball 모델은 입자의 표면이 매끄러운 반면, clump 모델들은 작은 입자들의 결합으로 인해 입자의 표면이 굴곡져 있어 맞물림(interlocking) 현상이 발생하기 때문에 나타나는 결과라고 판단된다. 전체적으로 보면, 예상되었듯이 연속체 평면의 표면 거칠기가 커질수록 모든 입자 형상 모델에서 최대 접촉면 전단강도가 증가하였으며, 또한 모든 평면조건에서 수직응력이 증가할수록 최대 접촉면 전단강도가 증가하였다.

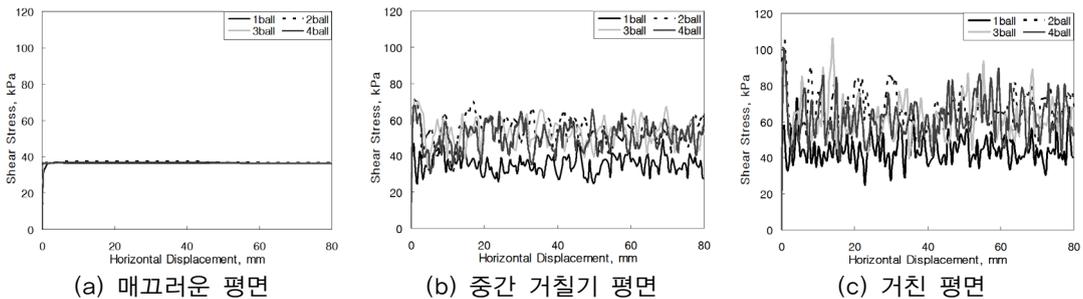


그림 4. 표면 거칠기에 따른 비파쇄 입자 모델의 응력-변위 곡선

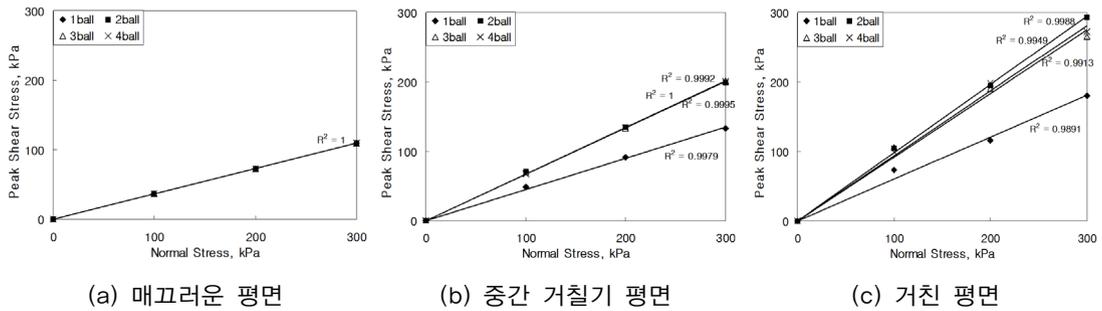


그림 5. 비파쇄 입자 모델의 파괴포락선

표 3. 비파쇄 입자 모델의 마찰각(°)

| 입자 형상 \ 표면 거칠기 | 매끄러운 평면 | 중간 거칠기 평면 | 거친 평면 |
|----------------|---------|-----------|-------|
| 1ball | 20.04 | 23.93 | 31.09 |
| 2ball | 20.04 | 33.81 | 44.47 |
| 3ball | 20.04 | 33.93 | 42.52 |
| 4ball | 20.04 | 33.83 | 43.16 |

응력-변위 곡선으로부터 그림 5와 같이 Mohr-Coulomb 파괴포락선을 도출하였으며, 이를 이용하여 표 3에 비파쇄 입자 모델의 연속체 평면의 표면 거칠기 및 입자 형상에 따른 접촉면 마찰각을 나타내었다. 매끄러운 평면과 접촉하는 모든 입자들의 마찰각은 동일하게 산정되었다. 반면, 거칠기가 존재하는 중간 거칠기 평면과 거친 평면에서는 모두 one ball 모델이 다른 입자 형상 모델보다 뚜렷이 작은 마찰각을 보였으며, one ball 모델을 제외하고는 입자 형상에 관계없이 유사한 마찰각을 나타냈다. 같은 입자 형상에 대하여 연속체 평면의 종류에 따라 비교하였을 때, 거친 평면과 접촉하는 경우의 마찰각이 중간 거칠기 평면과 접촉하는 경우보다 약 7 ~ 11° 정도 크게 나타났다. 따라서 연속체 평면의 격자 각도가 커서 표면 거칠기가 큰 경우는 입자와 평면과의 접촉면에서 입자의 맞물림 현상을 증대시켜 큰 마찰각이 나타나게 하는 것이라 판단된다.

4.2 파쇄 입자 모델에 대한 전단거동 특성

Cluster 모델은 입자 형상을 구성하는 입자 간에 일정한 결합강도를 부여함으로써 입자 파쇄의 모사가 가능하다. 본 연구에서는 그림 2에 제시한 세 가지 입자 형상(그림 2(b), (c), (d))에 대하여 각각 두 가지 결합강도(200 kPa과 800 kPa) (Jo et al., 2011)에 대한 파쇄입자 모델링을 수행하였다. 그림 6은 대표적으로 수직하중이 100 kPa일 때 표면 거칠기에 따른 파쇄 입자/평면 접촉면 모델의 응력-변위 곡선을 나타내고 있다. 매끄러운 평면에서는 미끄러짐 현상이 발생함을 알 수 있다.

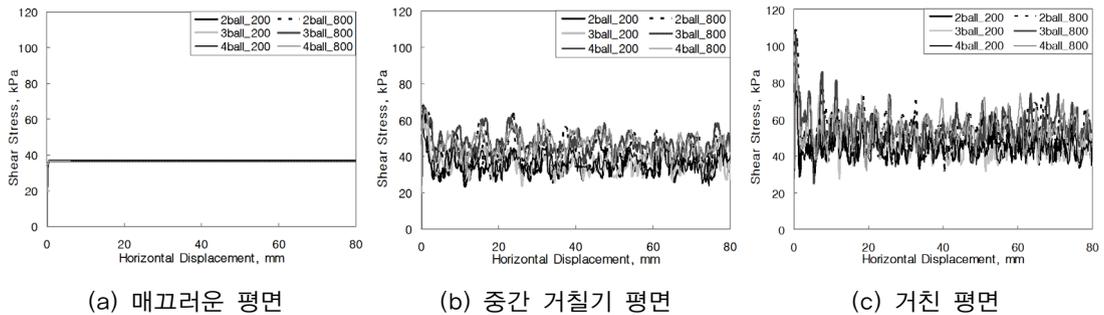


그림 6. 표면 거칠기에 따른 파쇄 입자 모델의 응력-변위 곡선

거칠기가 존재하는 평면 형상의 경우는 비파쇄 입자 모델에서와 같이, 모든 입자 모델에서 중간 거칠기 평면과의 접촉면에서보다 거친 평면과의 접촉면에서 전단강도가 더 크게 나타났으며, 또한 더 뚜렷한 최대 전단강도 값을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 연속체 평면이 거칠수록 전단박스 내에서 거동하는 입자들 간의 맞물림 현상을 증대시킨다는 것을 알 수 있다. 같은 형상의 입자 모델에서 결합강도가 200 kPa인 경우가 800 kPa인 경우보다 전단강도가 작게 나타났다. 이는 결합강도가 200 kPa로 작은 경우에는 입자의 파쇄가 상대적으로 많이 발생하여 결합이 파괴된 작은 원형 입자들이 날개로 거동하게 되어 전체적으로 표면이 매끄러운 작은 원형 입자들이 많아짐으로써, 이 입자들이 간극을 메워 맞물림 현상이 적게 발생하기 때문이다. 한편 비파쇄 입자 모델의 응력-변위 곡선과 비교했을 때, 파쇄 입자 모델의 응력 범위가 전체적으로 더 작은 값에 집중되는 것을 알 수 있다. 이 또한 입자 파쇄의 영향으로 설명될 수 있으며, 같은 형상 조건에서 결합이 영구적으로 지속되는 clump 모델(비파쇄 입자 모델)의 접촉면 전단강도가 가장 크고, 결합강도가 800 kPa로 입자의 파쇄가 상대적으로 적게 발생하는 cluster 모델, 결합강도가 200 kPa로 입자의 파쇄가 많이 발생하는 cluster 모델 순으로 나타났다.

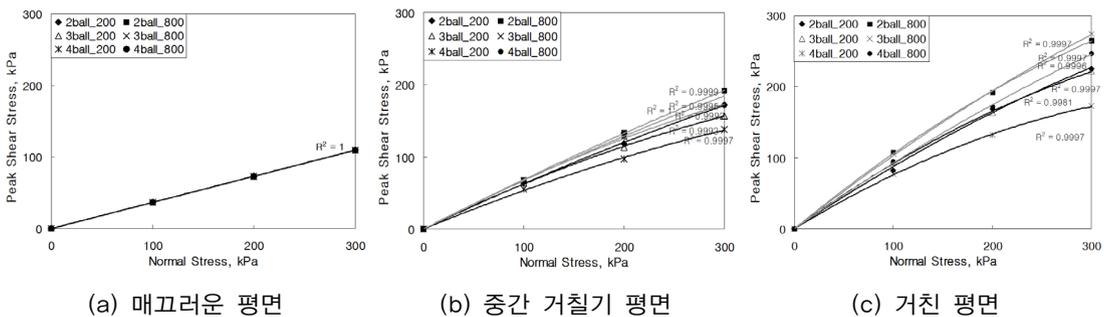


그림 7. 파쇄 입자 모델의 파괴포락선

표 4. 파쇄 입자 모델의 마찰각(°)

| 입자형상 | 결합강도(kPa) | 매끄러운 평면 | 중간 거칠기 평면 | 거친 평면 |
|-------|-----------|---------|-----------|-------|
| 2ball | 200 | 20.07 | 30.31 | 38.06 |
| 3ball | | 20.05 | 28.58 | 37.81 |
| 4ball | | 20.05 | 25.4 | 31.54 |
| 2ball | 800 | 20.05 | 33.06 | 42.6 |
| 3ball | | 20.06 | 33.04 | 43.14 |
| 4ball | | 20.05 | 30.94 | 40.12 |

그림 7은 파쇄 입자 모델의 파괴포락선을 나타낸 것으로 비파쇄 입자 모델과는 달리 비선형적 관계를 보이고 있다. 그 이유는 전단에 의한 입자 파쇄가 전단 저항각의 저하를 유발하고, 수직응력이 증가하면 그만큼 더 많은 입자의 파쇄 및 재배열이 발생하게 되어 dilation 현상이 감소하기 때문이라고 판단된다. 따라서 이러한 파쇄 입자 모델, 즉 cluster 모델의 결과는 clump 모델보다 입자의 전단 거동 및 파쇄 현상을 실제와 더 유사하게 표현할 수 있음을 보여주는 결과이다. 그림 7의 파괴포락선으로부터 구한 각 모델의 접촉면 마찰각을 계산하여 표 4에 나타내었다. 매끄러운 평면에서 모든 입자들의 마찰각은 비파쇄 입자 모델의 마찰각과 거의 유사하게 나타났다. 또한 모든 입자 형상에 대하여 결합강도가 200 kPa인 모델의 접촉면 마찰각이 결합강도 800 kPa인 모델보다 작았고, 비파쇄 입자 모델에서와 같이, 거친 평면과의 접촉면 전단시험에서 얻은 마찰각의 크기가 중간 거칠기 평면과의 접촉면 전단시험에서 얻은 값보다 약 6 ~ 10° 정도 크게 나타났다.

5. 수치해석 결과 분석

5.1 입자 모델에 따른 수직 변위

각 모델의 팽창 정도를 알아보기 위하여 전단에 따른 수직변위의 변화 양상을 조사하여 보았다. 그림 8은 수직응력 조건이 100 kPa일 때 연속체 평면의 표면 거칠기에 따른 연속체 평면과 비파쇄 입자의 접촉면 전단시험으로부터 얻은 수직변위 곡선을 나타내고 있다. 매끄러운 평면에서의 수직변위는 중간 거칠기 및 거친 평면에서의 수직변위에 비해 매우 작았으며, one ball 모델의 수직변위는 다른 입자 형상의 clump 모델의 수직변위의 절반 이하로 나타났다. 또한 평면의 표면 거칠기 정도에 따른 결과를 비교했을 때, 같은 형상의 입자일 경우 거친 평면에서의 수직변위가 중간 거칠기 평면에서보다 크게 나타났으며, 전단 초기에 전단변위에 따른 수직변위가 더 급격하게 증가하여 곡선의 기울기가 더 크게 나타났다.

그림 9는 수직응력이 100 kPa일 때, 파쇄 입자 모델의 표면 거칠기에 따른 수직변위 곡선을 나타내고 있다. 같은 형상의 입자 모델에서 결합강도가 작아 입자의 파쇄가 많이 발생하는 모델들의 수직변위의 증가량이 결합강도가 큰 모델의 수직변위 증가량보다 작게 나타났다. 이는 파쇄된 입자들이 간극을 메우면서 팽창을 억제하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 비파쇄 입자 모델의 경우와 마찬가지로, 평면의 표면 거칠기의 영향을 살펴보았을 때는 거친 평면의 경우가 중간 거칠기 평면보다 입자들의 맞물림 현상을 증가시켜 수직변위가 더 크게 나타났다.

그림 10은 중간 거칠기 및 거친 평면에 대하여 수직응력이 100 kPa일 때 원형의 단일 입자인 one ball 모델과 3ball 형상을 가진 clump 모델 및 결합강도가 각각 200 kPa, 800 kPa인 cluster 모델에 대한 수직변위 곡선을 비교해 놓은 것이다. 결합강도가 200 kPa인 cluster 모델은 입자 파쇄의 발생으로 원형의 작은 입자들이 많아져 처음부터 원형의 단일입자인 one ball 모델과 유사한 거동을 보였고, 결합강도가 800 kPa로 입자 파쇄 발생이 적은 cluster 모델은 결합이 영구적으로 유지되는 clump 모델과 유사한 거동을 하는 것으로 나타났다. 이 네 가지 모델 중 가장 큰 수직변위를 보인 것은 clump 모델이며, 결합강도가 200 kPa인 cluster 모델은 clump 모델과 비교했을 때 팽창량이 clump 모델의 약 30% 정도에 불과하며, 결합강도가 800 kPa인 cluster 모델은 clump 모델의 약 88% 정도 팽창하였다.

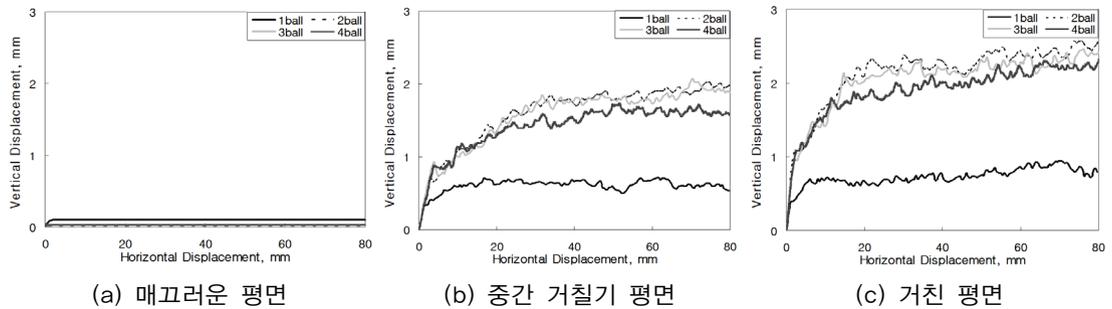


그림 8. 비파쇄 입자 모델의 수직변위 곡선

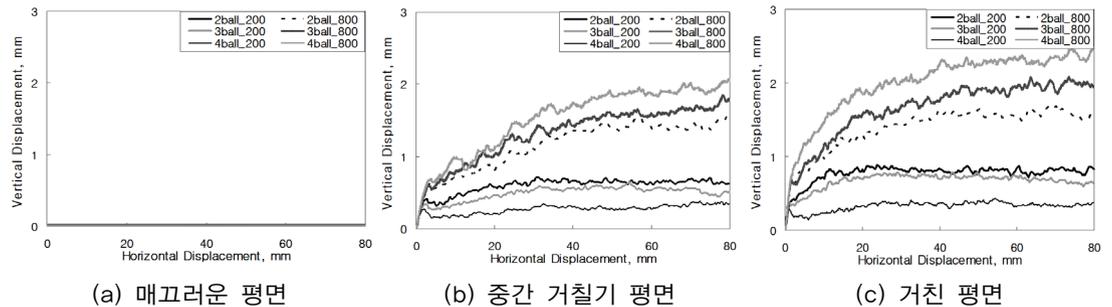


그림 9. 파쇄 입자 모델의 수직변위 곡선

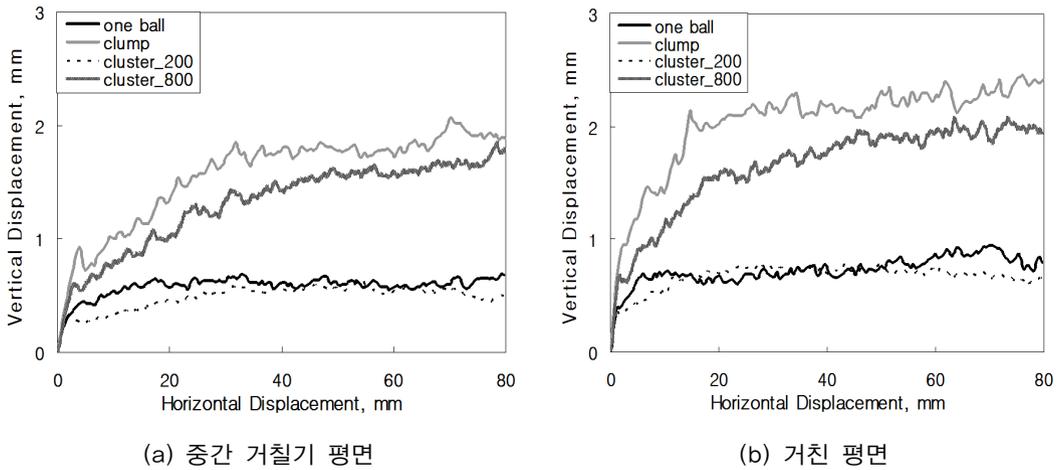


그림 10. 1ball 모델과 3ball 모델의 수직변위 곡선

5.2 입자 모델에 따른 전단 중 간극률 변화

입자와 평면의 접촉면 전단 시에 전단의 영향 범위(전단대)를 파악하기 위하여, 각각의 접촉면 전단시험 해석에서 전단이 진행됨에 따른 상부 전단박스 입자들의 층별 간극률 변화를 살펴보았다. 그림 11과 같이 한 층의 높이를 1.44 mm로 하여 총 14개의 층으로 나누어, 전단 시험 중에 특정 전단 변위에서 각 층에서의 간극률을 측정하여 도시하였다. 단, 첫 번째 층과 마지막 층은 경계면의 영향을 받아 분석에서 제외하였다. 또한 PFC^{2D} 내에서는 층을 나누었을 때 그 층에 포함된 입자의 일부분만이 아니라, 입자의 중심이 속해 있는 층으로 입자의 면적 전체가 포함되어 계산되므로, 보다 신뢰성을 증가시키기 위하여 계산 대상층과 아래·층, 즉 세 개 층의 평균으로 간극률을 계산하였다.

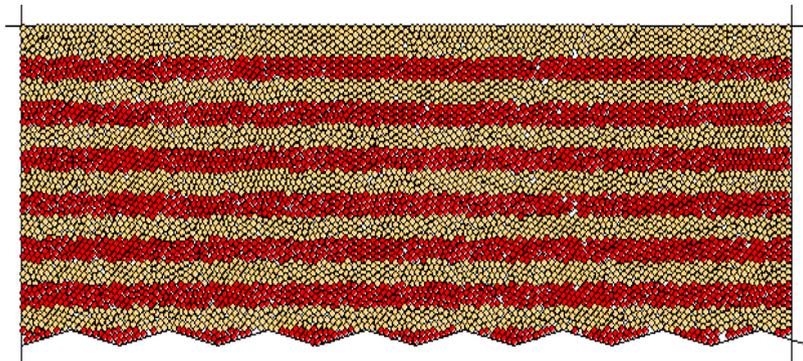


그림 11. 상부 전단박스 입자들의 층 구분

그림 12 ~ 그림 14는 연속체 평면이 각각 매끄러운 평면, 중간 거칠기 평면, 거친 평면에서의 각 입자 모델별 간극률 변화를 나타내고 있다. 예를 들어, 그림 13의 (a)는 one ball 입자와 중간 거칠기 평면과의 접촉면 전단시험 중, 전단 변위가 각각 0 mm(전단 시작 전), 0.77 mm(최대 전단응력 발생), 10 mm, 80 mm(전단 완료)일 때 시료 높이에 따라 측정된 간극률 분포를 보이고 있다. 여기서 간극률 측정은 네 개의 전단 변위 측정점에서 이루어졌는데, 이는 전단 시작 전, 최대 전단응력 발생 지점, 10 mm, 전단완료 지점이다.

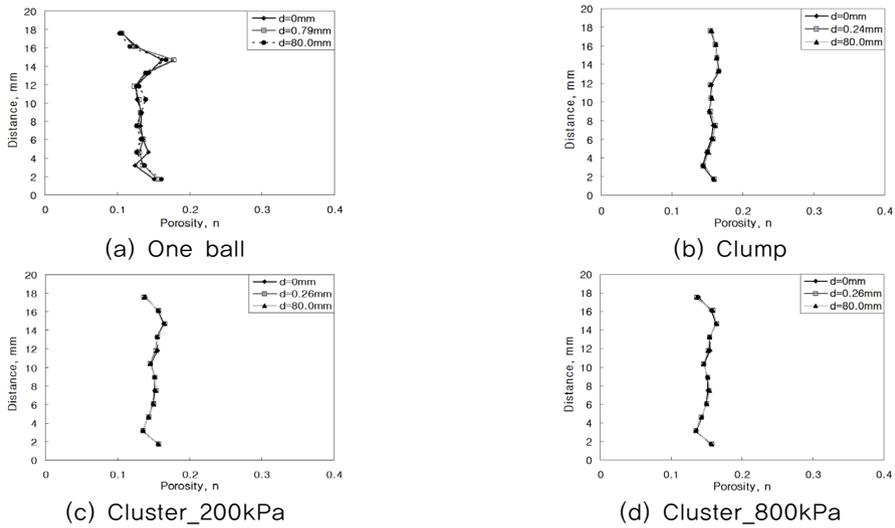


그림 12. 매끄러운 평면과 각 입자 모델에 따른 간극률 변화

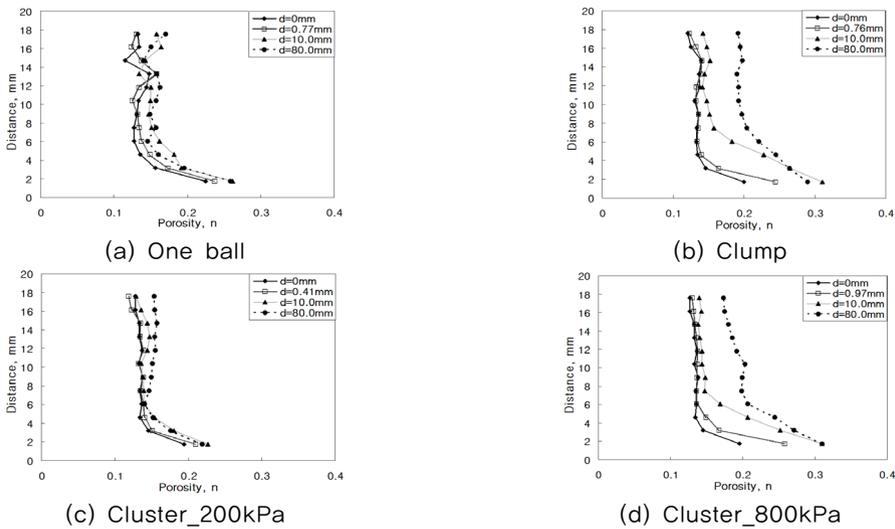


그림 13. 중간 거칠기 평면과 각 입자 모델에 따른 간극률 변화

매끄러운 평면에서는 모든 입자 모델의 간극률의 층별 차이가 크지 않고, 전단변위에 따른 간극률의 변화도 거의 발생하지 않았다. 반면, 연속체 평면에 돌출부가 존재하는 중간 거칠기 및 거친 평면에서는 공통점을 발견할 수 있는데, 입자 표면이 매끄러운 원형의 단일입자인 one ball 모델과 결합강도가 200 kPa로 입자 파쇄 발생이 활발한 cluster 모델의 간극률 변화 곡선이 유사하게 나타났으며, 입자 표면이 굴곡지고 파쇄가 발생하지 않는 clump 모델과 입자 파쇄 발생이 적게 일어나는 결합강도 800 kPa인 cluster 모델의 곡선이 유사하다는 것이다. 이는 clump 및 결합강도 800 kPa인 cluster 모델이 one ball 및 결합강도 200 kPa인 cluster 모델에 비해 전단이 진행됨에 따라 맞물림 현상이 활발하게 일어나기 때문으로 판단된다.

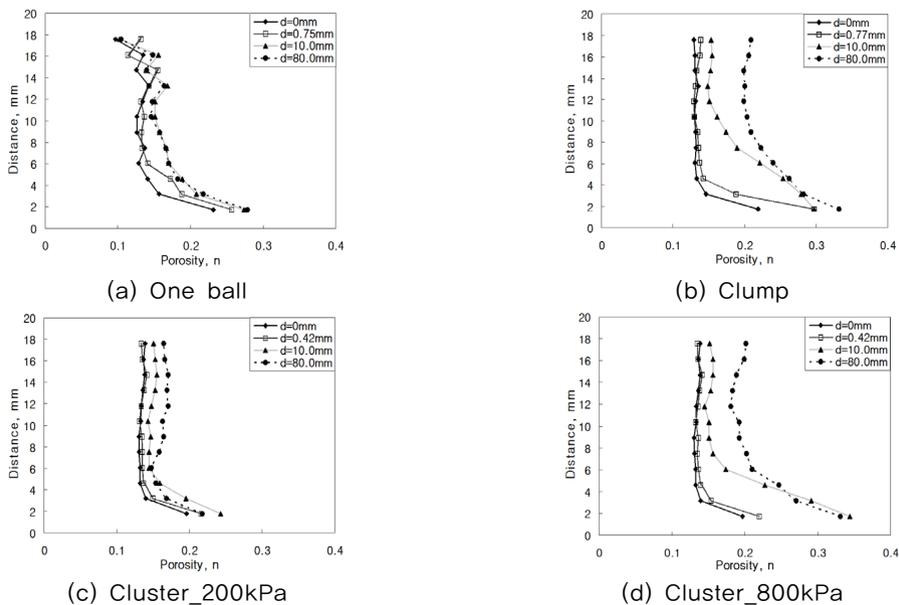


그림 14. 거친 평면과 각 입자 모델에 따른 간극률 변화

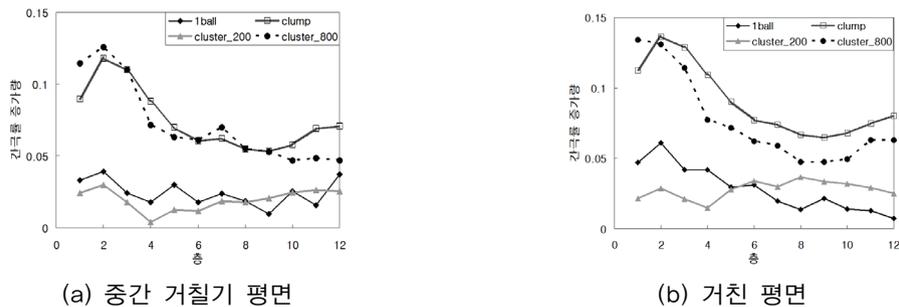


그림 15. 각 층에서의 간극률 증가량 (3ball 모델)

한편 각 층에서의 간극률 증가량을 쉽게 알아보기 위하여, 대표적으로 3ball 모델에 대하여 초기 간극률에서 전단 완료 시까지의 간극률 증가량을 그림 15에 도시하였다. 그 결과, 접촉면에 가까운 층에서 간극률이 크게 증가하였으며, 연속체 평면의 표면 거칠기가 거친 평면의 간극률 증가량이 중간 거칠기 평면보다 약간 더 크게 나타났다. 또한 one ball 모델과 결합강도가 200 kPa인 cluster 모델의 간극률 증가량이 유사하고, 결합강도가 800 kPa인 cluster 모델과 clump 모델의 간극률 증가량이 유사하다고 할 수 있다. 다만, 결합강도 200 kPa인 cluster 모델의 파쇄된 입자는 one ball 모델의 입자 크기보다 작아 더 많은 간극을 매우므로 one ball 모델보다 간극률 증가량이 작고, 결합강도가 800 kPa인 cluster 모델은 어느 정도 입자 파쇄가 발생하여 파쇄가 전혀 발생하지 않는 clump 모델의 간극률 증가량보다 작게 나타난다.

6. 결 론

본 연구에서는 연속체 평면의 거칠기 변화에 따른 입자와 평면의 접촉면 전단거동 특성을 분석하기 위하여 개별요소법 프로그램인 PFC^{2D}를 사용하였다. 이 때 세 가지 표면 거칠기를 갖는 연속체 평면 형상은 경계요소(wall)로 모델링하였고, 입자는 형상 및 결합 형태에 따라 다양한 입자 모델을 구성하여 접촉면 전단거동에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 경계요소인 wall로 연속체 평면을 비파쇄 표면으로 모델링한 경우, 표면 형상이 평평한 매끄러운 평면의 접촉면 전단강도는 입자 형상에 관계없이 거의 유사한 값을 가지며, 전단초기에 최대 접촉면 전단강도에 도달하여, 전단완료 시까지 그 강도를 유지하는 것으로 나타났다. 이는 입자와 매끄러운 평면의 접촉면 전단거동의 주요 메커니즘은 미끄러짐 현상으로, 접촉면 상부에 존재하는 입자들이 동시에 전단방향으로 이동하기 때문이다. 반면, 격자가 존재하는 연속체 평면의 표면 형상, 즉, 중간 거칠기 및 거친 평면의 응력-변위 곡선은 매끄러운 평면처럼 일정하지 않고 진동(fluctuation)되며, 표면이 거칠수록 최대 접촉면 전단강도가 커짐을 알 수 있다.
2. 입자 형상이 접촉면 전단거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 one ball 모델과 clump 모델을 비교해 보면, 입자 표면이 매끄러운 one ball 모델의 접촉면 전단강도 및 마찰각이 작은 입자들의 결합으로 이루어져 표면이 굴곡진 clump 모델보다 더 작게 나타났다. 또한 입자 파쇄가 가능한 cluster 모델은 결합이 영구적인 clump 모델에 비해 접촉면 전단강도 및 마찰각이 작게 나타났다. 결합강도 800 kPa인 cluster 모델보다 입자 파쇄가 상대적으로 많이 발생하는 결합강도 200 kPa인

cluster 모델의 접촉면 전단강도 및 마찰각이 작았다. 이는 입자의 파쇄로 인해 본래 입자 형상에서 떨어져 나온 작은 입자들이 원형의 매끄러운 모양으로 바뀌게 되고 또한 입자 간 맞물림 (interlocking) 현상을 제한시키기 때문인 것으로 판단된다.

3. 접촉면으로부터 어느 높이까지 전단의 영향을 미치는지 파악하기 위하여 전단박스를 14개의 층으로 나누어 전단이 진행됨에 따른 각 층에서의 간극률을 계산하여 보았다. 매끄러운 평면에서는 모든 입자 모델에서 유사한 간극률 변화 곡선을 얻었다. 즉, 각 층별 간극률의 차이가 작았고, 전단변위에 따른 간극률 변화가 거의 나타나지 않았다. 그러나 중간 거칠기 및 거친 평면에서는 접촉면에 가까운 층에서 간극률이 크게 증가하였고, one ball 모델 및 결합강도 200 kPa인 cluster 모델보다 clump 모델 및 결합강도 800 kPa인 cluster 모델의 간극률 증가량이 컸다. 이 때 전단변위에 따른 간극률 변화는 접촉면에서 가까운 층에서부터 주로 이루어졌다. 또한 같은 입자 모델에 대하여 연속체의 평면이 거칠수록 간극률 증가량도 크게 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 건국대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 논문임. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김도훈, 이강현, 이인모 (2011), “침투를 고려한 원형수직터널 거동특성 연구”, 한국터널지하공간학회논문집, 제13권, 제6호, pp. 431-450.
2. 이성원, 정재형, 김창용, 배규진, 이주공, 박경호 (2009), “원형터널에서 지반-라이닝 상호작용에 대한 수학적 해석해에 관한 연구”, 한국터널지하공간학회논문집, 제11권, 제4호, pp. 427-435.
3. 조인성, 박정준, 김종선, 이인모 (2010), “천공홀 가압 팽창 개념을 도입한 터널 보조 신공법 연구”, 한국터널지하공간학회논문집, 제12권, 제6호, pp. 407-416.
4. Brumund, W.F., Leonards, G.A. (1973), “Experimental study of static and dynamic friction between sand and typical construction materials”, ASTM Journal of Testing and Evaluation, Vol. 1, No. 2, pp. 162-165.
5. Cundall, P.A., Strack, O.D.L. (1979), “A discrete numerical model for granular assemblies”, Geotechnique, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65.
6. Dove, J.E., Frost, J.D., Han, J., Bachus, R.C. (1997), “The influence of geomembrane surface roughness on interface strength”, Proc. Geosynthetics '97, Vol. 2, pp. 863-876.

-
7. Fedá, J. (2002), "Notes on the effect of grain crushing on the granular soil behavior", *Engineering Geology*, Vol. 63, pp. 93-98.
 8. Frost, J.D., Lee, S.W., Cargill, P.E. (1999), "The evolution of sand structure adjacent to geomembranes", *Proc. Geosynthetics '99*, Vol. 1, pp. 559-573.
 9. Hainbuchner, E., Potthoff, S., Konietzky, H., te Kamp, L. (2002), "Particle based modeling of shear box tests and stability problems for shallow foundations in sand", *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods*, Vol. 1, pp. 151-156.
 10. Itasca Consulting Group, Inc. (2004), "Particle flow code in 2-dimensions, Ver.3.1 User's manual".
 11. Jensen, R.P. (1998), "Numerical and analytical modeling of the microstructural behavior of a particulate media-structure interface", Ph. D. Thesis, School of Civil Engineering, University of Wisconsin-Madison, 121p.
 12. Jo, S.A., Kim, E.K., Cho, G.C., Lee S.W. (2011), "Particle shape and bonding state effects on particle crushing in PFC", *Soils and Foundations*, Vol. 51, No. 4, pp. 701-712.
 13. Lee, S.W. (1998), "Influence of surface topography on interface strength and counterface soil structure", Ph.D. Thesis, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA, 336p.
 14. Lobo-Gurrero, S., Vallejo, L.E. (2005), "Crushing a weak granular material: experimental numerical analyses", *Geotechnique*, Vol. 55, No. 3, pp. 245-249.
 15. Paikowsky, S.G., Player, C.M., Connors, P.J. (1995), "A dual interface apparatus for testing unrestricted friction of soil along solid surfaces", *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol. 18, No. 2, pp. 168-193.
 16. Potyondy, J.G. (1961), "Skin friction between various soils and construction materials", *Geotechnique*, Vol. 11, pp. 339-355.
 17. Uesugi, M., Kishida, H., Tsubakihara, Y. (1988), "Behavior of sand particles in sand-steel friction", *Soils and Foundations*, Vol. 28, No. 1, pp. 107-118.