

입자법을 이용한 지반공학 대변형 문제 해석

Analyses of Large Deformation Problems in Geotechnical Engineering using Particle Method

박성식¹⁾, Sung-Sik Park

¹⁾ 원광대학교 토목환경도시공학부 조교수, Assistant Professor, Div. of Civil, Environmental & Urban Engineering, Wonkwang University

SYNOPSIS : Many problems in geotechnical engineering such as slop failure, debris flow, ground heaving due to embankment, and lateral flow caused by liquefaction are related to large deformation rather than small deformation. Traditional numerical methods such as finite element and finite difference methods have a difficulty to solve such large deformations because they use grids. A particle method was developed for fluid dynamics. The particle method can solve large deformation problems because it uses particles to discretize differential equations. It can also include soil constitutive model and thus solve soil behavior on various boundary conditions. In this study, a particle method, which is based on particles rather than grids, is introduced and used to simulate large deformation including soil failure. The developed method can be applied for various large deformation problems in geotechnical engineering because it incorporates soil constitutive models.

Keywords : Large deformation, Particle method, Constitutive model

1. 서론

지반공학에서 흙의 파괴이후에 일어나는 대변형(large deformation) 문제 가운데는 다음과 같은 세 가지 중요한 사례들이 있다. 첫째, 사면의 붕괴 또는 산사태로 인한 토사의 흐름, 둘째, 연약지반에서 이루어지는 말뚝시공, 사석투입, 샘플링 등으로 인한 지반의 융기나 교란, 셋째, 성토나 액상화로 인한 측방유동 현상이다. 국토의 약 70%가 산지인 우리나라에는 많은 자연사면과 인공사면이 있으며, 강우나 토목공사로 인한 사면 붕괴가 자주 발생하고 있다. 이와 같은 사면 재해는 흙의 변형 정도나 흐름이 미치는 범위에 따라 그림 1(a)와 같이 크고 작은 재산 및 인명 피해를 일으키고 있다. 삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라에서 최근 항만 개발이나 해안 매립공사로 연약지반 개량이 활발하다. 연약지반 개량을 위하여 시공되는 모래다짐말뚝이나 사석투입은 많은 양의 지반을 융기시키며 또한 교란시킨다. 이때 지반의 정확한 지지력과 침하량 계산을 위하여 사석이나 말뚝의 시공 깊이와 지반의 변형 정도를 파악하는 것은 아주 중요하다. 그리고 성토 시 연약지반 내의 간극수압 증가에 따른 유효응력 감소나 지진으로 인한 지반의 유동 현상은 그림 1(b)와 같은 피해를 일으킬 수 있다. 특히 액상화된 지반의 측방유동으로 기초구조물이 변형되거나, 말뚝에 작용하는 수평응력이 증가하여 상부구조물이 파괴되거나 그 기능을 상실하는 경우도 있다. 따라서 흙의 파괴로 인한 토사의 변형 정도나 유동 범위를 경험적 또는 수치해석 방법으로 정확하게 예측하여 지반구조물 설계에 반영하거나 기존 구조물을 보강하여 지반의 대변형으로 인한 피해를 방지해야 한다.

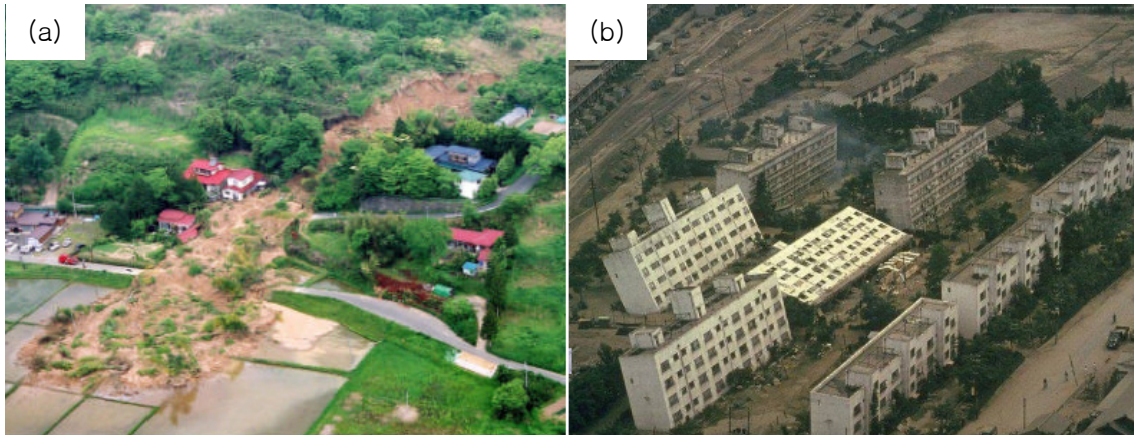


그림 1. 지반공학 대변형 문제: (a) 산사태로 인한 토사의 흐름, (b) 지반의 액상화로 기울어진 아파트

2. 입자법

2.1 소개

흙의 거동을 예측하기 위하여 사용되는 수치해석 방법은 흙을 연속체로 간주하는 유한요소법과 유한차분법, 그리고 흙을 이산체로 간주하는 개별요소법(Cundall and Strack, 1979)이 대표적이다. 유한요소법과 유한차분법은 지반을 요소나 격자로 나눈 뒤 탄소성모델을 비롯한 흙의 구성식을 이용하여 연구뿐만 아니라 실무에서도 널리 사용되고 있다. 하지만 지반의 대변형과 파괴 후 흙의 흐름과 같은 해석에서 격자를 사용할 경우 격자가 꼬이거나 뒤틀리기 때문에 계산되는 변위에 한계가 있을 뿐만 아니라 변형으로 인한 계산 정확도가 현저히 떨어지게 된다. 한편 격자를 사용하지 않는 개별요소법은 지반구조물의 대변형 해석이 가능하지만, 유한요소법이나 유한차분법과 같이 흙의 구성관계를 적용하기가 어렵다. 특히 일부 입력변수는 흙의 물성치와는 관계없기 때문에 변수 결정이 애매모호하다는 단점이 있다. 따라서 유한요소법이나 유한차분법 그리고 개별요소법과 같은 전통적인 수치해석 방법을 이용하여 지반공학에서 일어나는 대변형 문제를 해석하는 데는 한계가 있다.

입자법(Particle Method)은 연속체역학의 수치 시뮬레이션법으로 연속체의 거동을 유한개의 입자 운동으로 계산하는 방법이다. 입자로 해석 영역을 구성하므로 공간이 새롭게 형성되는 대변형 문제 해석에 적합하여 유체의 분열 또는 합체와 같은 비선형 자유표면을 시뮬레이션하는 유체역학에서 오래전부터 연구되었다(Daly et al., 1965). 입자법은 파도나 쓰나미의 거동 해석, 유체와 선박과 같은 구조물과의 상호작용 등 유체의 흐름을 해석하는 유체역학과 고체의 파괴나 균열과 같은 연속체의 대변형 등 고체역학 분야에 널리 응용되고 있다. 하지만 이와 같은 장점을 가진 입자법을 유체와 고체의 성질을 동시에 가지고 있는 흙의 대변형 문제에 적용하기 위한 연구는 최근 일본의 몇몇 연구자에 의해 시작되었다(Bui et al., 2008; Maeda and Sakai, 2004; Naili et al., 2005).

지반공학 분야에서는 입상체역학(모래나 돌과 같은 알갱이 모양 물질의 집합체 거동을 연구하는 학문)을 연구하는 나고야공업대학의 Maeda교수, 츠크바대학의 Matsushima교수, 기후대학의 Yashima교수와 같은 연구자에 의해서 입자법이 지반공학에 응용되기 시작하였다. 이들 대부분의 연구자들은 Liu and Liu(2003)가 유체 및 고체역학에 적용하기 위하여 개발한 SPH법을 바탕으로 지반공학 분야에 응용하기 위하여 흙의 구성식을 추가하는 연구를 하고 있다. 현재 SPH법을 지반공학에 적용하기 위한 연구는 콘크리트의 슬럼프 실험과 유사하게 실내에서 점토나 모래가 중력에 의해 유동하는 현상 또는 지반에 강체를 관입시키는 실험을 시뮬레이션하는 정도이다. 나고야공업대학의 Maeda교수는 2005년 흙과 물의 상호작용을 고려한 모래지반의 침투파괴 해석 연구를 실시하였다. 최근 리즈메이칸대학 Bui박사는 유체역학을 위한 SPH법을 기초로 탄완전소성모델인 Drucker-Prager모델을 비롯한 흙의 대표적인 탄소

성모델인 수정 Cam-Clay모델까지 적용하였으며, 흙과 물의 상호작용 관계까지 고려하였다. 이와 같이 Bui박사 등이 개발한 지반공학용 SPH법은 사면붕괴, 토석류 해석의 가능성을 보여 주었다. 그림 2는 SPH법이 알루미늄 봉으로 모사한 흙기둥의 붕괴실험 결과를 예측한 사례를 보여주고 있다.

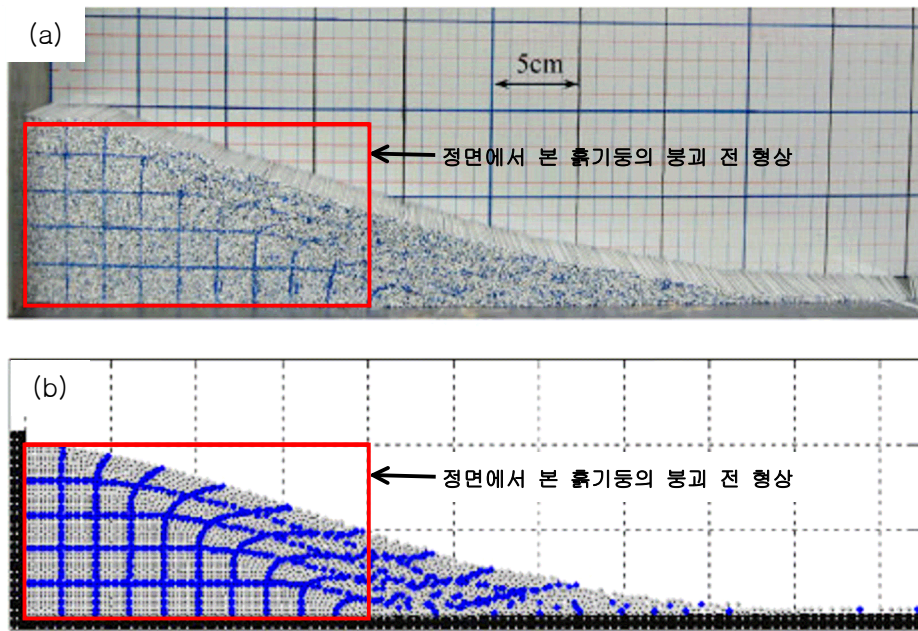
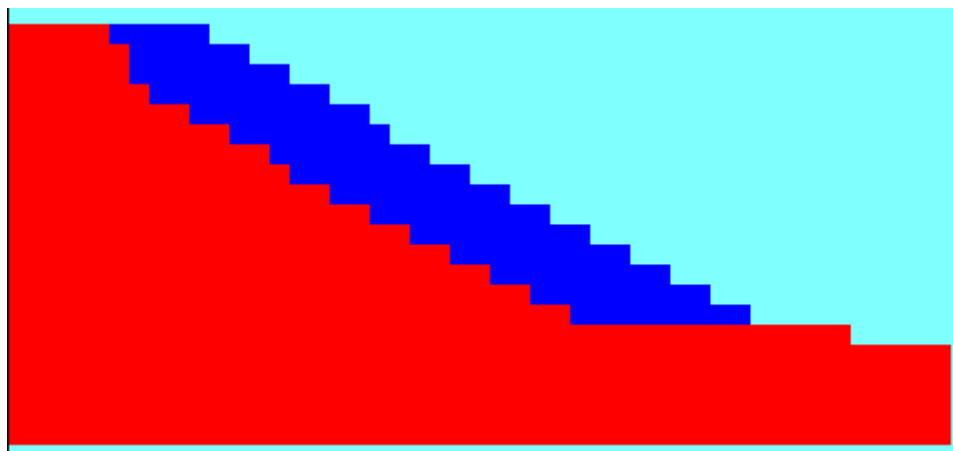


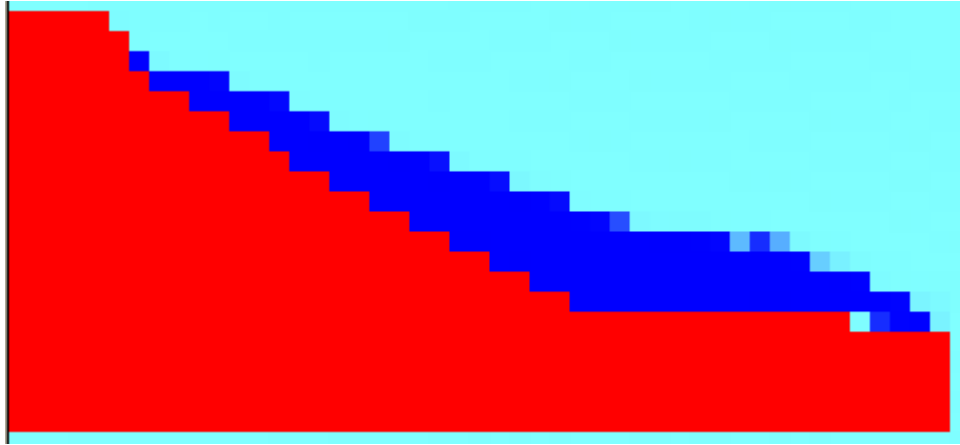
그림 2. 흙기둥 모형의 붕괴: (a) 실험 결과, (b) SPH법의 시뮬레이션 결과(Bui et al., 2008)

3. 입자법을 이용한 해석 사례

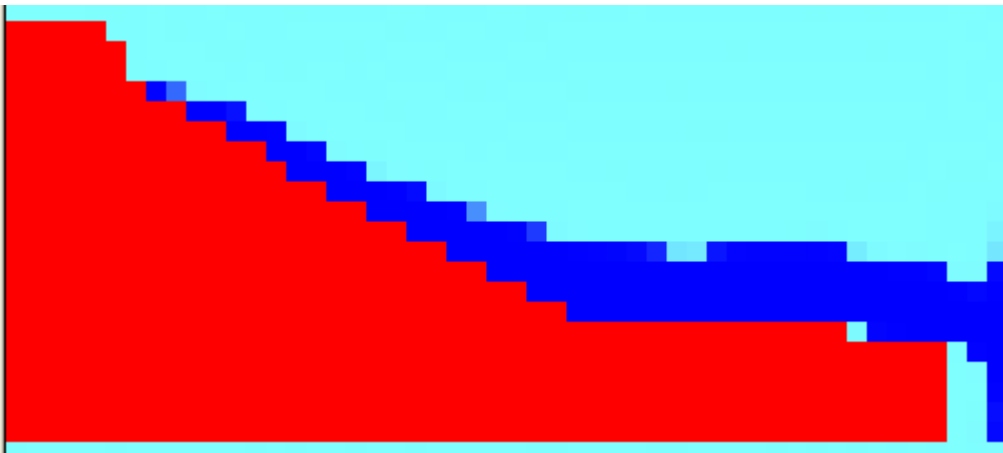
본 연구에서는 입자법의 정식화를 비롯한 구성관계는 생략하였으며, 간단한 해석 사례를 소개하였다. 유체역학에 기초한 2차원 지반유동해석 프로그램인 G-FRIC/2D(지층과학연구소, 2006)를 이용하여 사면의 흐름을 해석하였다. 사면에서 토사가 흘러내리는 해석을 완만한 사면과 급경사 사면을 대상으로 실시하였다. 그림 3에 있는 완만한 사면의 해석 사례에서 붕괴되는 토사는 Bingham유체로 해석하였으며 움직이지 않는 부분은 강체로 해석하였다. 유체의 밀도는 $2,000\text{kg/m}^3$, 점성계수는 $10,000\text{Pa}\cdot\text{s}$ 로 설정하였다. 그림 3(a)는 사면의 최초 모습이며, 그림 3(c)는 사면의 표면 부분이 흘러내린 상황을 보여 주고 있다. 그림 4는 급경사 사면의 붕괴 전과 후의 해석 모습을 보여주고 있다.



(a) 사면이 붕괴되기 전 모습



(b) 사면이 붕괴되기 시작하는 모습



(c) 사면이 완전히 붕괴된 모습

그림 3. 완만한 사면의 붕괴 해석 사례

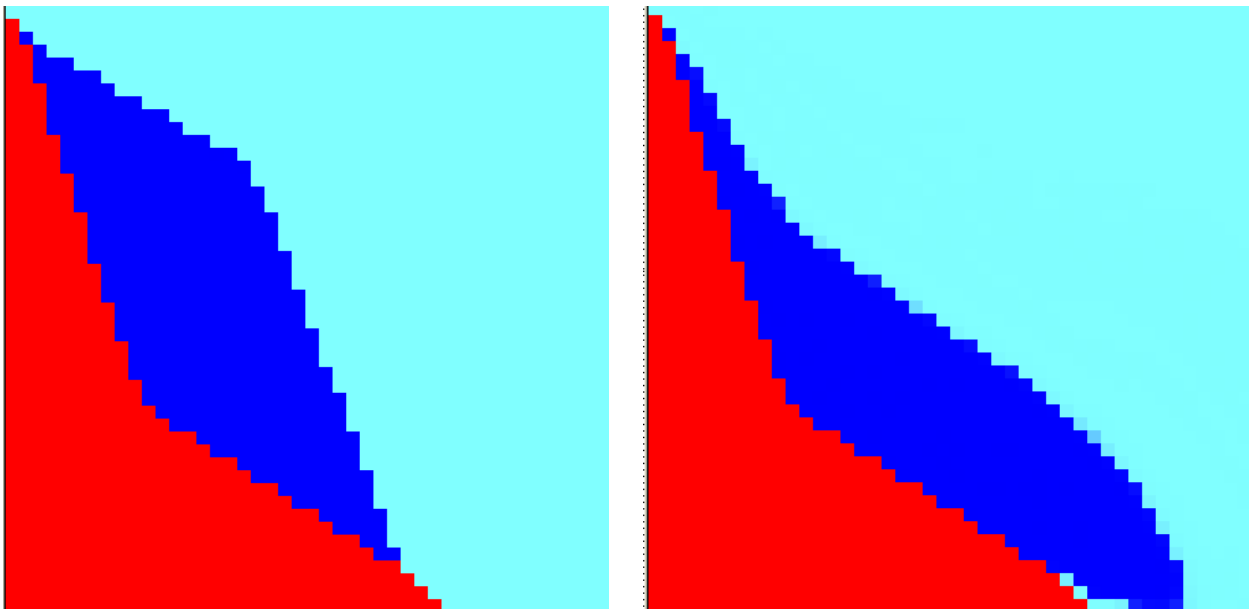


그림 4. 급경사 사면의 붕괴 해석 사례: 붕괴 전(왼쪽)과 후(오른쪽)

이와 같은 유체의 흐름을 해석하기 위하여 개발된 입자법은 유체의 운동량보존법칙을 나타내는 Navier-Stokes 방정식과 질량보존법칙을 만족하도록 구성되었다. 또한 연속체를 유한 개의 입자로 이산화하여 계산하게 되므로 다양한 지반공학의 대변형 문제 해석에 적용 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

유체의 다양한 경계치 문제에 적용되는 입자법을 지반공학의 대변형 문제에 적용시키고자 하는 연구가 일본을 위주로 진행되고 있다. 개별요소법은 대변형 해석이 가능하지만 흙의 구성관계를 도입하기가 어렵다. 하지만 입자법은 대변형 해석이 가능하면서도 흙의 구성관계를 도입할 수 있다는 큰 장점이 있다. 따라서 앞으로 입자법을 지반공학의 대변형 문제에 적용시키고자 하는 연구가 많이 시도될 것으로 기대된다. 본 논문에서는 입자법의 구체적인 정식화보다는 간단한 해석사례를 통하여 입자법의 적용 가능성을 검토, 소개하고자 하였다.

참고문헌

1. 지층과학연구소(2006), G-FRIC/2D.
2. Bui, H.H., Fukagawa, R., Sako, K., and Ohno, S. (2008), Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil constitutive model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 32, pp. 1537-1570.
3. Cundall, P.A. and Strack, O.D.L. (1979), A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, 29(1), pp. 47-65.
4. Daly, B.J., Harlow, F.H., Welch, J.E., Wilson, E.N. and Sanmann, E.E. (1965), Numerical fluid dynamics using the Particle-and-Force Method, LA-3144.
5. Liu, G.R. and Liu, M.B. (2003), Smoothed particle hydrodynamics: A meshfree particle method, World Scientific.
6. Maeda, K. and Sakai, M. (2004), Development of seepage failure analysis procedure of granular ground with Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method, Journal of Applied Mechanics, JSCE, Vol. 7, pp. 775-786 (in Japanese).
7. Naili, M., Matsushima, T., Yamada, Y. (2005), A 2D Smoothed Particle Hydrodynamics method for liquefaction induced lateral spreading analysis, Journal of Applied Mechanics, JSCE, Vol. 8, pp. 591-599.