

대입경 락필재료에 대한 수치시험실 활용해석

Application simulations as numerical laboratory for large diameter rockfill materials

전제성¹⁾, Je-Sung Jeon

¹⁾ 인덕대학 건설정보공학과 전임강사, Full-time Lecturer, Dept. of Construction Information Engineering, Induk Univ.

SYNOPSIS : Numerical simulations for large scale triaxial tests with large diameter rockfill materials are conducted using distinct element method. For generation of compacted assembly with specific grain size distribution and initial material porosity, the clump logic method and expansion of generated particles are adapted. With micro parameters which are chosen by calibration process, discrete particle modelling of triaxial test in case of other confining stress and cyclic loading condition were conducted. Also numerical simulations of fluid injection into particulate materials were conducted to observe cavity initiation and propagation using distinct element method. The fluid scheme solves the continuity and Navier-Stokes equations numerically, then derives pressure and velocity vectors for fixed grid by considering the existence of particles within the fluid cell.

Keywords : distinct element method, rockfill material, triaxial test, fluid coupling, numerical method

1. 서론

댐 및 제방 축조 등 토목공사에 널리 사용되고 있는 대입경 락필재료는 입도 규모 및 조건을 고려할 때 역학특성 파악을 위한 대형실내시험의 적용이 필수적이다. 그러나 대형시험을 수행할 경우, 대규모의 시료조성, 각 시험경우별 동일 초기조건 구현, 응력조건 구현 등에 많은 시간과 노력이 요구된다. 이는 경제적 부담과 연관되며 이러한 점들은 대형실내시험의 제한적 적용에 대한 원인이 되기도 한다. 최근 들어 조립재료의 역학적 특성치 산정과 전체적인 거동예측에 개별요소법에 의한 수치해석적 접근이 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 개별요소해석 프로그램인 PFC를 이용하여 실내 대형삼축압축시험에 대한 모델링을 수행하였다. 또한 기존 개별요소방법에 수리연동 기법을 적용하여 수압조건별 지반의 공동생성 및 확장에 대한 모델링을 실시함으로써 개별요소해석의 적용기법 및 응용에 관한 연구를 수행하였다.

2. 대형삼축압축시험

대형삼축압축시험에 이용된 재료는 댐 축조용 대입경 암성토재료(rockfill material)이며, 상사입도 조정법에 의한 락필재료의 입도분포와 입자형상은 그림 1과 같다. 실내시험은 대형 삼축압축시험기에 의해 수행되었으며, 0.196MPa, 0.392, 0.588MPa의 구속압 및 압밀배수 조건으로 수행하였다. 그림 2는 구속압 조건별 응력-변형 관계를 나타낸 것으로서 최대 축차응력은 대략 축변형률 10% 부근에서 나타났으며, 고밀도 조건의 시료조건에도 불구하고 재성형 시료에서 일반적으로 나타나는 응력경화현상만 보일뿐, 최대강도 이후의 응력연화현상은 보이지 않음을 알 수 있다.

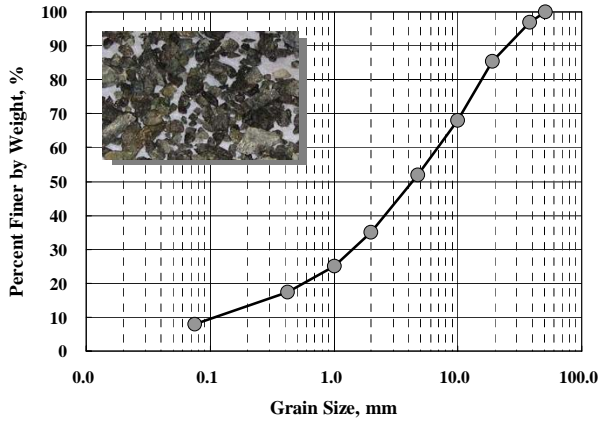


Fig. 1. Grain shape and size distribution of large diameter rockfill materials

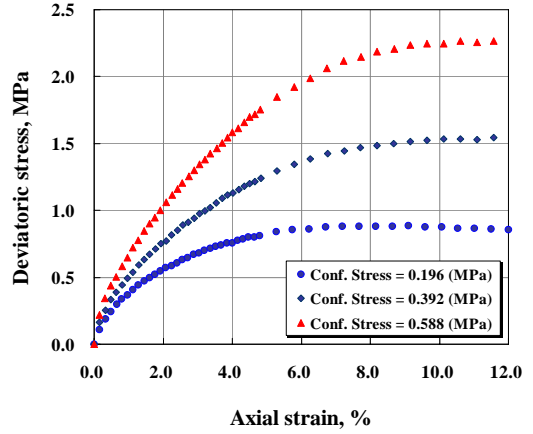


Fig. 2. Deviatoric stress with axial strain by large triaxial test using rockfill materials

3. 실내시험 모델링

3.1 초기 입도분포 생성

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(contact force)-변위(displacement)관계로 표현되는 접촉면 구성모델에 의해 입자 개개의 미시적 거동(micro behavior) 및 전체적인 거동(macro behavior) 해석을 수행하게 된다. 일반적 조립재료는 세부 입자들의 형상, 거칠기, 배열상태 등과 관련된 입자간의 역물림 및 회전현상 등에 의해 그 강도와 변형특성이 크게 좌우된다. 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.

본 연구에서도 초기 생성요소를 바탕으로, 입도분포 및 불규칙한 입자형상을 모델링하는데 있어 clump logic을 사용하였다. 단, 불규칙한 입자형상을 표현하는데 있어, 임의 형태의 입자형상이 아닌 기본적으로는 원형의 입자형상을 가정하되, 입자표면의 굴곡을 통해 거칠기를 표현하는 방식으로 개별요소를 생성하였다. 일단 난수발생기법에 의해 시료내 임의 위치를 선정 후, 아래 식과 같은 방식으로 기존 clump와의 중복을 피하도록 특정입경의 원형 clump를 생성하였다. 신규 생성된 clump 조건을 포함한 입경별 통과중량 백분율(p_{clp-n})을 계산한 후, 원하는 통과중량 백분율(p_f)조건을 만족할때까지 특정입경에 대한 clump 생성을 반복하였다.

$$d(clp_n, clp_o) \geq c_\alpha [R_{clp-n} + R_{clp-o}]$$

여기서, $d(clp_n, clp_o)$: 신규생성된 clump와 기존 clump의 중심간 거리

c_α : clump간 거리 할증계수

R_{clp-n}, R_{clp-o} : 신규 및 기존 clump 반경

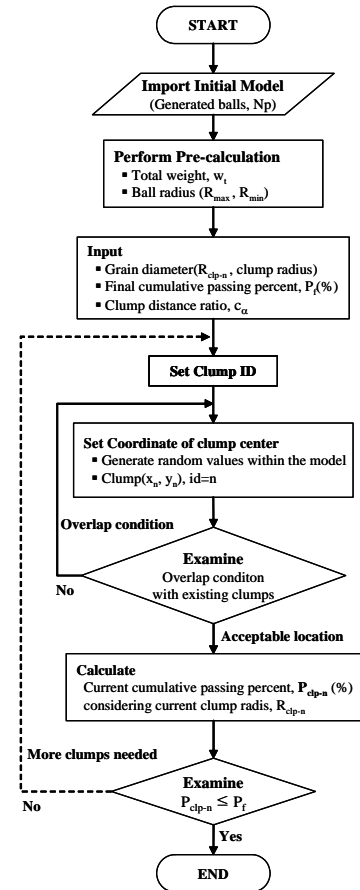


Fig. 3. Clump logic for generating grain size distribution

Table 1. Number of particles and clumps used in calculation

Number of particles used in calculation		Number of clumps	Clump distance ratio	Ball radius after adjustment	
Initial sample	After adjustment	clp_n	c_α	$R_{min}(mm)$	$R_{max}(mm)$
60,125	30,856	4,927	1.0~1.3	0.56	2.08

3.2 시험모델링 및 해석결과

간극률 조건 및 입도분포곡선을 고려한 개별요소들의 생성결과를 이용, 조립재료에 대한 대형삼축압축 시험 과정을 모델링하였다. 초기 시료는 4개의 경계면(wall)안에 위치하게 되며, 각각의 경계면은 임의의 응력조건 모델링에 이용되는데, 상부 및 하부 경계면은 축하중을 재하하는 가압판으로 사용되었다. 경계면을 특정 속도로 이동시키며 그 과정에서 경계면에 작용하는 반력을 측정하는 방식으로 축하중 재하를 실시하였다. 또한 측부 경계면은 반력과 경계면 속도의 자동조절을 반복해가는 servo-mechanism을 적용하였다. 미시 물성치 산정과정에 의해 최종 산정된 결과를 이용하여, 모든 해석조건은 동일하게 하되 구속압을 0.196MPa, 0.588MPa로 달리한 상태에서의 개별요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 다시 해당 구속압 조건에 대한 실내시험 결과와 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.

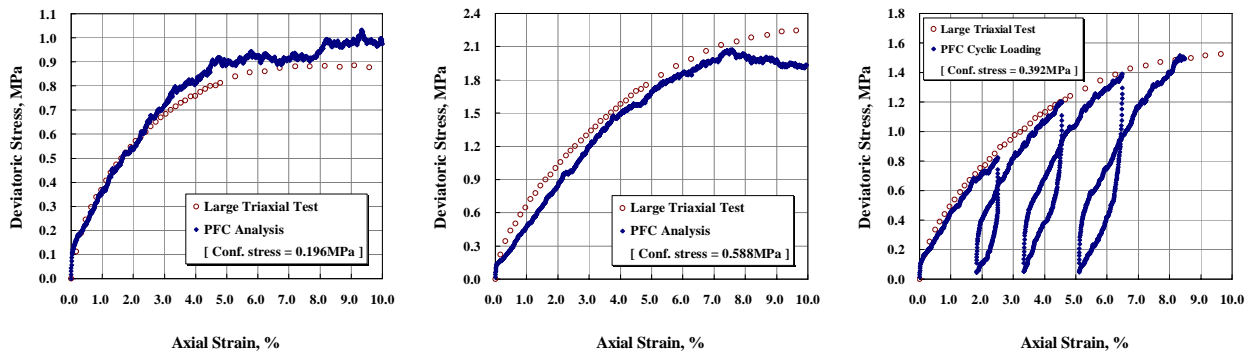


Fig. 4. Simulation results at each confining stress and cyclic loading condition

4. 수리거동 모델링

4.1 수리거동 및 입자유동의 상호작용

개별요소해석에 수리거동을 접목시키는 가장 일반적 방법은 오일리언 좌표계에서 압력과 속도를 계산하기 위한 연속방정식을 풀어가는 것이며, 이때 Darcy 방정식은 유량과 속도의 선형적 관계를 표현하는데 사용되어 진다. 다공체 통과시의 압력경사를 표현하는 경험식으로서 PFC^{2D}에서는 기본적으로 Ergun의 방정식을 이용하되, 투수계수와 간극률의 상관식인 Kozeny-Carman 방정식을 적용하고 있다. 본 연구에서는 길이 100mm, 높이 80mm의 직사각형 해석영역에 최소반경 0.5mm, 최대반경 0.8mm의 개별요소를 초기간극률 0.15 조건으로 생성하여 초기 수치모델을 구성하였다.

4.2 수리거동 모델링 및 해석결과

수리연동해석에 이용된 모델은 초기조건 및 특정 구속압조건을 만족시키는 개별요소모델을 이용하되, 특정위치에서의 임의 유속 재하조건에 대한 수리연동 모델을 적용하였으며, 기본 모델에 수리연동해석을 위한 수리연산 요소망을 그림 4과 같이 x-방향 17개(i=1~17), y-방향 15(j=1~15)개로 구성하였다. 또한 모델 외곽에는 수리연동 해석시의 경계조건 부여를 위한 별도의 요소망(i=0, i=18, j=0, j=16)이 배치되어 있다. 유속

재하는 기본적으로 전체 모델의 좌측 경계면의 중앙부 1개 지점에 적용되었으며, 유속의 크기($v_{f\ inj}$)를 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210m/s 로 증가시켜며 해석을 실시하였다. 해석모델의 구속압($\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$)은 0.1MPa, 0.5MPa의 두가지 경우에 대해 해석을 실시하였다. 수리거동 해석 경계조건으로서, 우측 경계면에서의 간극수압은 항상 0.0으로 유지하고 그 이외의 경계면은 불투수층으로 고려하였다. 각 경우별 수리연동해석을 통해 해석영역내 위치별 침투유량 및 수압, 침투유속, 흐름벡터 변화 등을 살펴보았으며 유속 재하 부근에서의 공동생성과 확장, 이로 인한 각 결과의 변화를 분석하였다. 구속압 0.5MPa 조건에서 중앙부 1개 지점($i = 0, j = 8$)에 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210m/s 크기의 유속($v_{f\ inj}$)을 재하했을 경우, 모든 단계에 있어 안정된 흐름상태를 유지하고 있었다. 이는 0.5MPa의 구속압 효과로 인해 별다른 개별요소 유동이 발생하지 않음을 나타낸다. 반면, 구속압을 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 0.1MPa$ 로 적용시킨 결과, 재하 유속의 크기가 60m/s의 경우는 별다른 개별요소 유동이 나타나지 않지만 그 크기가 120m/s로 증가하면서 유속 재하지점을 중심으로 공동이 발생하기 시작함을 알 수 있다. 재하 유속이 180m/s를 넘어서부터 유량은 급격히 증가하며, 기존의 초기 공동이 상당한 규모로 확장되었다. 재하 유속 210m/s 단계에서는 재하 직후 일시적 유량의 급상승이 보이지만, 확장된 공동의 추가 공동확장으로 인한 추가 유량상승 없이 최종 유량은 기존 180m/s 단계와 비슷한 값으로 수렴하게 된다.

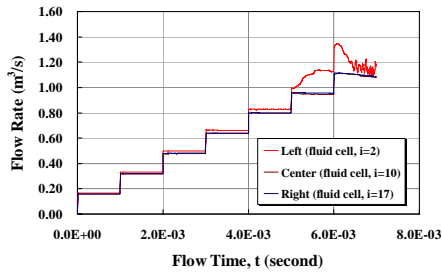


Fig. 5. Flow rate history for confining stress 0.1MPa and the injection velocities

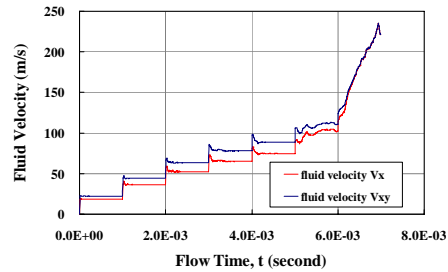


Fig. 6. Flow velocity history for confining stress 0.1MPa and the injection velocities

5. 결론

본 연구에서는 개별요소방법을 이용하여 특정 입도분포와 초기조건에 대한 대형삼축압축시험 모델링 및 기존 개별요소방법에 수리연동 기법을 적용한 수리거동 모델링을 수행하였다. 개별요소방법을 통해 실내시험시의 응력-변형 거동 및 다양한 구속압 조건과 하중재하 조건에 대한 효과적 예측이 가능함을 알 수 있었으며, 기존 개별요소 방법에 수리연동 기법이 적용된 모델링을 통해, 구속압 및 수압조건에 따른 지반내 입자유동과 공동생성 및 확장, 유량 및 유속변화 결과 등을 통해 공동생성이 발생하는 한계 압력 등을 예측할 수 있었다.

본 연구는 국토해양부 산하 건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업(09기술혁신F045)의 지원을 받아 수행되고 있습니다.

참고문헌

1. Cundall, P.A., and Strack, O.D.L. (1979), "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies", *Geotechnique*, 29, pp.47-65.
2. Itasca Consulting Group, Inc. (2004), *PFC2D User's Guide & Optional Features*, Minneapolis, Minnesota
3. Tsuji, Y., Kawaguchi and T. Tannta (1993), "Discrete Particle Simulation of Two-Dimensional Fluidized Bed", *Power Tech.*, 77, pp.79-87.