

Vanishing 혼합재의 강성 특성 Stiffness Characteristics of Vanishing Mixtures

쥡팡흥¹⁾, Q. Hung Truong, 엄용훈²⁾, Yong-Hun Eom, 이창호³⁾, Changho Lee, 이종섭⁴⁾, Jong-Sub Lee

¹⁾고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정, Ph.D. Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.

²⁾고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정, Master Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.

³⁾고려대학교 건축·사회환경공학과 박사 후 연구원, Postdoctoral Fellow, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.

⁴⁾고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수, Associate Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.

SYNOPSIS : Microstructural changes may arise due to the particle vanishing, fluid diffusion, heating, etc. This study focuses on the changes in small-strain shear stiffness in k_0 loading produced by local straining in particular system made of sand-salt mixtures. Local strains were induced by dissolution of salt particles. Experiments were carried out in a conventional oedometer cell equipped with bender elements. Axial displacement and shear wave signals are recorded at each loading stage and during saturation process. Experimental data showed that microstructural changes due to particle vanishing were clearly captured by using shear wave measurement. Saturation of sand-salt mixture at a larger axial stress did not always create a more condense soil at the end of loading stage. Sand-salt mixture is useful for laboratory test on controlled artificial specimen.

Key words : Dissolution, K_0 loading, Local void, Shear wave, Stiffness, Vanishing, Vertical strain

1. 서 론

입상 물질의 미세구조를 변화시키는 입자용해는 물질의 특성에 큰 영향을 주는 국부 간극의 증가를 일으킨다. 과거 많은 광산 개발 시 사용되었던 특정 화학 약품들과 지하수로 인한 광물의 용해나 염분이 섞인 준설풀의 재활용으로 인한 지반 내 소금의 용해는 지하 공간 내에 vanishing 현상이 발생 시킬 수 있다. 또한, 대기 오염으로 인하여 지구온난화가 가속화되어 지구 전체의 온도상승으로 인해 해수면 상승이 연간 4cm를 기록하고 있으며 극지방의 지하공간에 얼어있던 지반을 녹이고 있다. 이러한 온도 상승은 동결토 내 국소 변형을 발생시켜 지반 구조의 불균형을 초래할 수 있다.

본 연구에서는 모래로 이루어진 시료의 국부 간극비의 변화가 미소변형을 강성에 미치는 영향을 조사하였다. 모래와 소금의 혼합시료를 조성하여 실내 시험을 실시하였으며, 혼합시료를 포화시켜 소금을 용해하여 시료 내 국소변형을 발생시켰다. 시간에 따라 미립자의 구조 변화의 양상을 살펴보았으며, 전단파 속도 및 간극비의 변화도 관찰하였다. 측정 결과를 바탕으로 응력에 따른 간극비, 각 시료의 전단파 신호, 응력에 따른 전단파 속도, 횡방향구속탄성계수, 그리고 시간에 따른 vanishing 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험재료

본 연구에는 사진 수세식 체가름을 통하여 분류한 평균유효입경 (D_{50}) 0.36mm의 모나고 균등한 주문진 모래를 이용하였다. 준비된 모래는 시험 전 건조로를 이용하여 완전히 건조 시킨 후 사용하였으며 비중은 2.62이다. 소금 ($D_{50}=0.25\text{mm}$)은 염화나트륨 함량이 90%인 것을 사용하였고 비중은 2.16이다. 모래와 소금입자의 크기비 ($D_{\text{sand}}/D_{\text{salt}}$)는 약 1.5이며 그림 1은 각각 모래와 소금 입자를 보여준다.

모래부피비 (sand volume fraction, $sf=V_{\text{sand}}/V_{\text{total}}$)가 0.9가 되도록 모래와 소금을 준비한 후 약 5분 이상 균질하게 잘 혼합하였다. 혼합된 시료를 재료분리에 유의하면서 압밀셀에 부어 넣은 후 탬핑 방법을 이용하여 시료를 조성하였다.

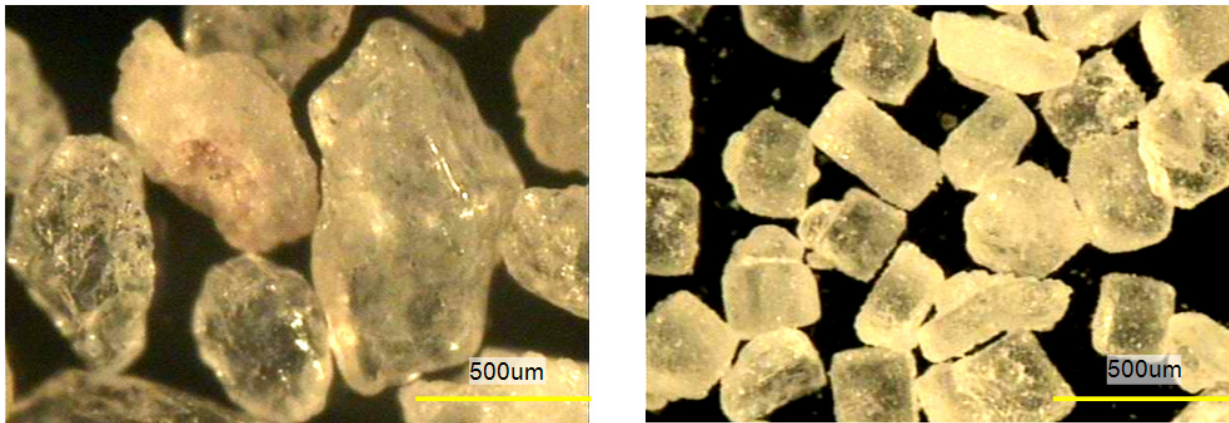


그림 1. 모래와 소금의 입자 모양: (a) 모래, (b) 소금.

2.2 실험장비

사용한 장비의 모식도는 그림 2와 같다. 내부 직경이 74mm, 높이가 63mm인 압밀셀과 전단파를 발생시키기 위한 트랜서듀서로 벤더 엘리먼트 (Piezo system, PZT5H4E Y-Poled)를 사용하였다. 흙 및 전해질 용액을 통한 트랜서듀서 간 전기적 간섭 (cross-talk) 현상을 방지하기 위하여 전기적 차폐 및 접지를 실시하였으며, 압밀셀을 통한 직접파의 전달을 방지하기 위하여 셀과 임피던스 차이가 큰 나일론 재질의 스크류를 이용하여 벤더 엘리먼트를 고정하였다. 벤더 엘리먼트는 압밀셀의 상부캡과 하부판에 각각 설치하였으며, 흙과의 접촉을 위하여 캔틸레버 형식으로 약 5mm가 돌출되도록 설계하였다.

신호발생기 (Agilent 33220A)에서 생성된 정방형 신호 (square wave)를 입력신호로 사용하였다. 생성된 입력신호는 발신 벤더 엘리먼트에서 물리적 신호로 변환된 후 시료를 통해 전파된다. 전파된 신호는 수신 벤더 엘리먼트에서 획득된 후 전기적 신호로 전환된다. 획득된 전기적 신호의 증폭 및 잡음 제거를 위하여 Filter-Amplifier (Krohn-Hite 3364)를 이용하였으며 고주파수 차단 필터는 100kHz를 적용하였다. 처리된 신호는 오실로스코프 (Agilent 54624A)를 통하여 디지털화 하였다. 불규칙한 잡음 (random noise)를 제거하기 위하여 각 신호를 평균하여 저장하였다.

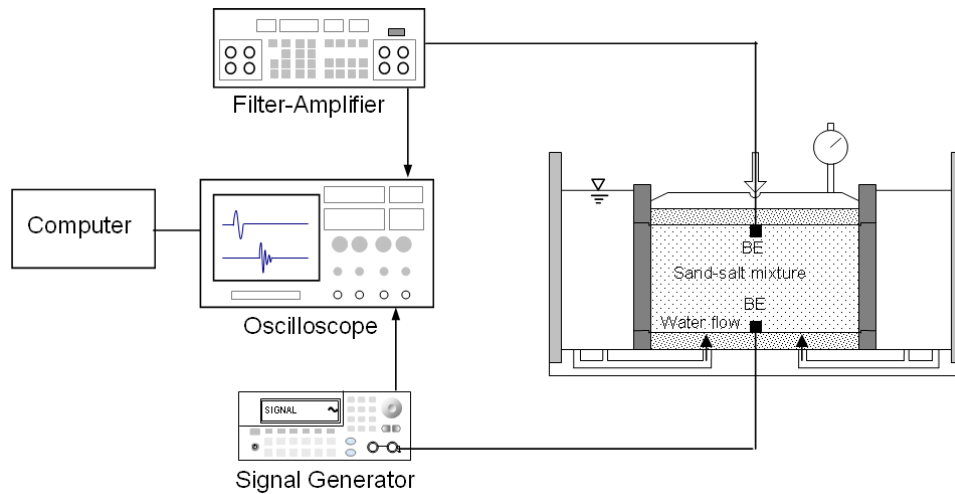


그림 2. 시험 장비 모식도.

2.3 실내시험

압밀셀에 조성된 모래-소금 혼합 시료에 대하여 각 하중 단계를 30분간 유지하면서 최대 수직응력이 약 629kPa에 도달할 때까지 재하-제하-재재하 시험을 실시하였다. 하중 단계는 각 단계별로 2배씩 증가시켰다. 유사한 초기 간극비 및 동일한 모래부피비를 가지는 5개의 시료를 준비하여 실험을 수행하였다. 1번의 실험은 기준값 획득을 위하여 건조 상태에서 실험을 수행하였다. 나머지 4번의 실험은 응력 조건에 따른 vanishing 특성을 조사하기 위하여 서로 다른 하중 단계에서 시료를 포화시켜 소금을 용해시키며 실험을 실시하였다. 포화 시의 하중 (σ_{sat})은 각각 약 41kPa, 80kPa, 158kPa, 315kPa이다. 주입된 물의 양은 포화 시 시료 내 소금이 완전히 녹으면 전해질 용액의 농도가 0.01M이 되도록 고정하였다. 미소변형 강성 측정을 위한 전단파 속도와 간극비 변화 파악을 위한 수직변위는 각 하중 단계 재하 및 제하 직전에 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 응력에 따른 간극비의 변화

그림 3은 수직 응력에 증가에 따른 혼합 시료의 간극비 변화를 보여 준다. 그림 3(a)와 같이 포화 시 전까지 시험에 이용된 모든 시료의 응력에 따른 간극비의 변화는 거의 유사함을 알 수 있다. 포화에 의해 간극을 채우고 있던 소금 입자의 용해는 동일한 구속응력 하에서 급격한 간극비의 증가를 보여준다. 입자 용해에 의한 간극비 증가 이후 유효응력이 증가함에 따라 간극비는 감소하는 경향을 보인다. 포화 하중 약 315kPa의 간극비는 포화하중 158kPa의 간극비보다 더 큰 것으로 측정되었고, 이는 더 큰 하중에서 포화 시켰을 때의 입자 용해는 항상 더 단단한 시료를 형성하는 것이 아님을 알 수 있다. 그림 3(b)는 건조 시료와 포화 하중 80kPa 시료의 재하-제하-재재하 단계의 응력에 따른 간극비 변화를 보여준다. 시료의 포화에 의하여 소금 입자의 용해에도 불구하고 제하 및 재재하 단계의 혼합 시료의 응력에 따른 간극비 변화는 건조 시료와 유사함을 알 수 있다.

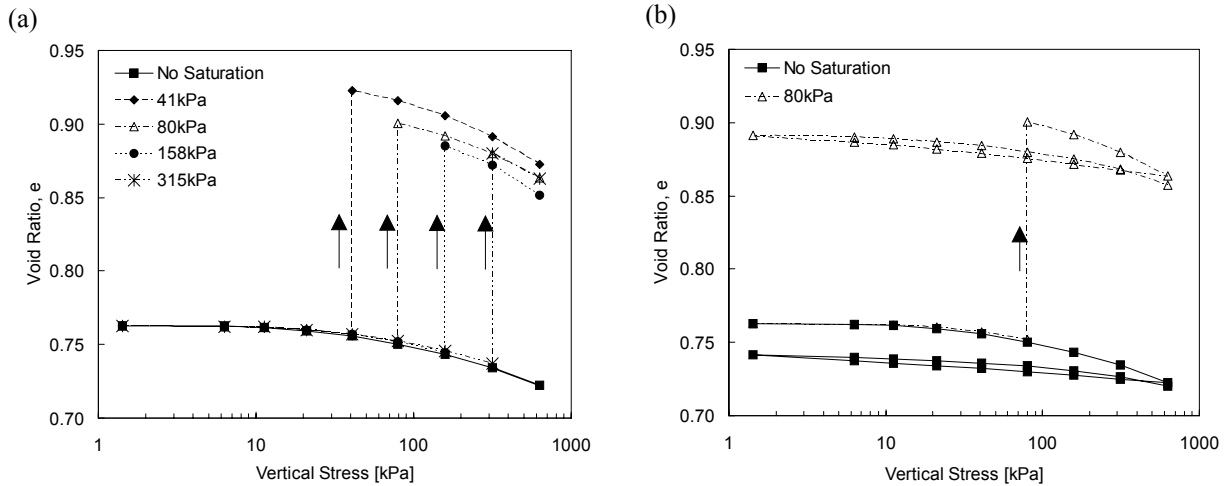


그림 3. 응력에 따른 간극비의 변화: (a) 재하 시 포화 응력 (σ_{sat})에 따른 간극비의 변화; (b) 건조 시료 및 포화응력 80kPa 시료의 재하-제하-재재하 시 간극비 변화.

3.2 전단파 신호

그림 4는 압밀시험동안 얻어진 건조 시료와 약 80kPa에서 포화 시킨 시료의 대표적 전단파 신호를 보여 준다. 두 시료 모두 수직 응력의 변화에 따라 전단파의 도달 시간 역시 변화를 보이며 건조 시료와 비교하여 그림 4(b)에서 나타난 바와 같이 포화 응력 하에서 시료의 포화되어 소금이 용해되면 급격한 전단파 도달시간의 감소를 보인다. 포화에 따른 전단파 도달 시간의 급격한 감소 이후에는 건조 시료와 유사하게 수직응력에 증가 및 감소에 따라 전단파 도달시간 역시 증가 및 감소를 보인다. 소금이 용해된 후의 전단파 신호는 용해가 일어나기 전의 시료보다 경사가 완만하게 나타나며 이는 소금의 용해에 의하여 시료가 용해 전보다 더욱 균질해 지기 때문이다. 또한 건조 시료와 동일한 시료 조성, 벤더 엘리먼트, 그리고 고주파수 차단 필터를 사용했음에도 불구하고 포화 이후 포화 시료의 전단파 신호는 건조 시료의 전단파 신호와 비교하여 고주파수 잡음이 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이는 시료에 비하여 상대적으로 큰 물의 댐핑이 고주파수 차단 필터와 같이 작용한 것으로 판단된다.

3.3 수직응력에 따른 전단파 속도 (V_s - $\log \sigma_v$)

전단파 속도는 측정된 전단파 신호의 초동과 이동거리로부터 식 (1)과 같이 산정하였다.

$$V_s = L_{tip-to-tip} / \Delta t \quad (1)$$

여기서, $L_{tip-to-tip}$ 은 벤더 엘리먼트의 tip-to-tip거리 (Dyvik and Madshus 1985; Viggiani and Atkinson 1995; Fernandez 2000)이며 Δt 는 전단파 이동시간이다. 전단파 신호의 초동은 근접장 효과 (near field effect)를 고려하여 선택하였다 (Sánchez-Salineró et al. 1986; Lee and Santamarina 2005).

그림 5는 측정된 전단파 신호의 초동 시간과 이동거리를 고려하여 산정한 전단파 속도를 나타낸다. 그림 5와 같이 각 시료의 전단파 속도는 수직응력이 증가함에 따라 증가하는 양상을 보였으며 포화응력에서 소금 입자의 용해에 의하여 급격한 감소를 보인다. 이는 소금이 용해됨으로 벤더 엘리먼트의 tip-to-tip 간의 거리가 줄어들어도 불구하고 그림 4(b)에서 전단파 초동 시간의 증가가 상대적으로 더 크기 때문이다. 그림 3과 비교할 때 수직 응력에 따른 간극비의 변화는 상당히 안정적인 반면 전단파 속도의 양상은 불안정하다. 이는 중간 변형율 (intermediate strain level)의 수직변형에 의한 간극비 변화보다 미소변형율 (small strain)의 전단파 속도의 변화가 소금 용해에 의한 국부적인 입자 구조의 변화를 더욱 잘 보여 준다고 할 수 있다.

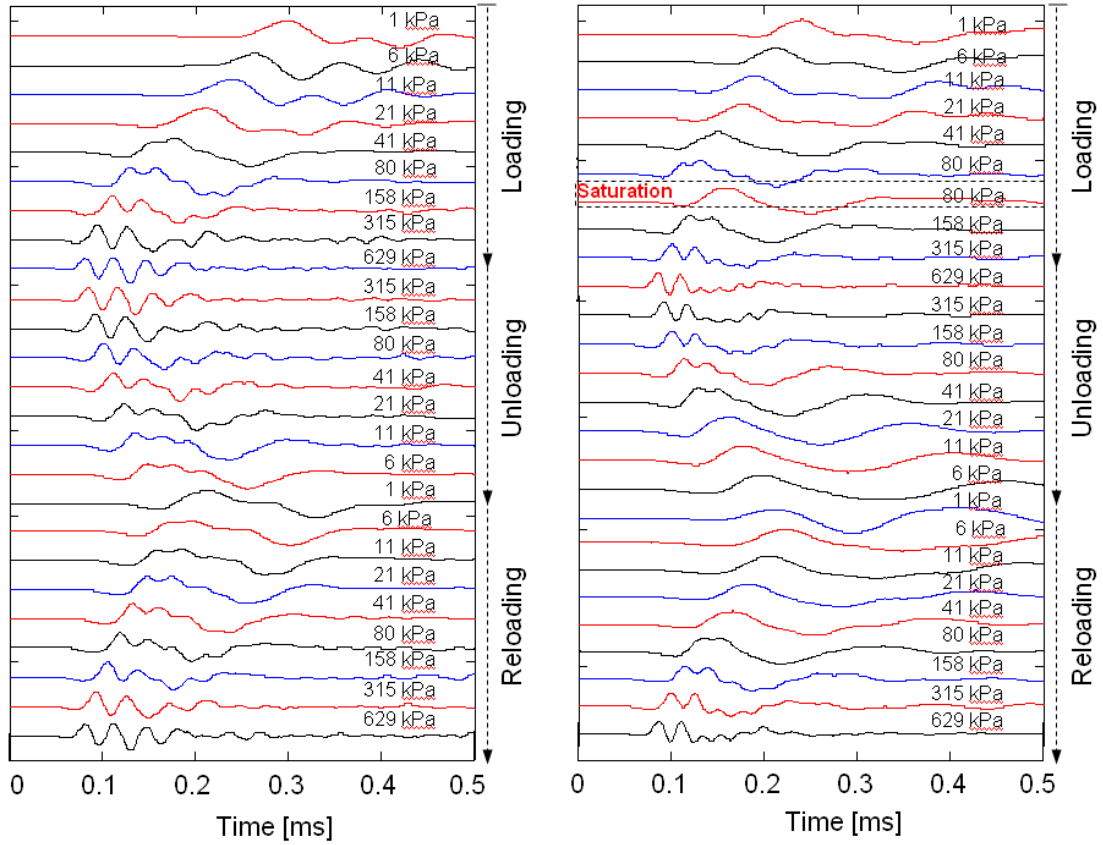


그림 4. 압밀 실험 시 측정된 대표적 전단파 신호: (a) 건조 시료; (b) 포화 시료 ($\sigma_{sat} = 80\text{kPa}$).

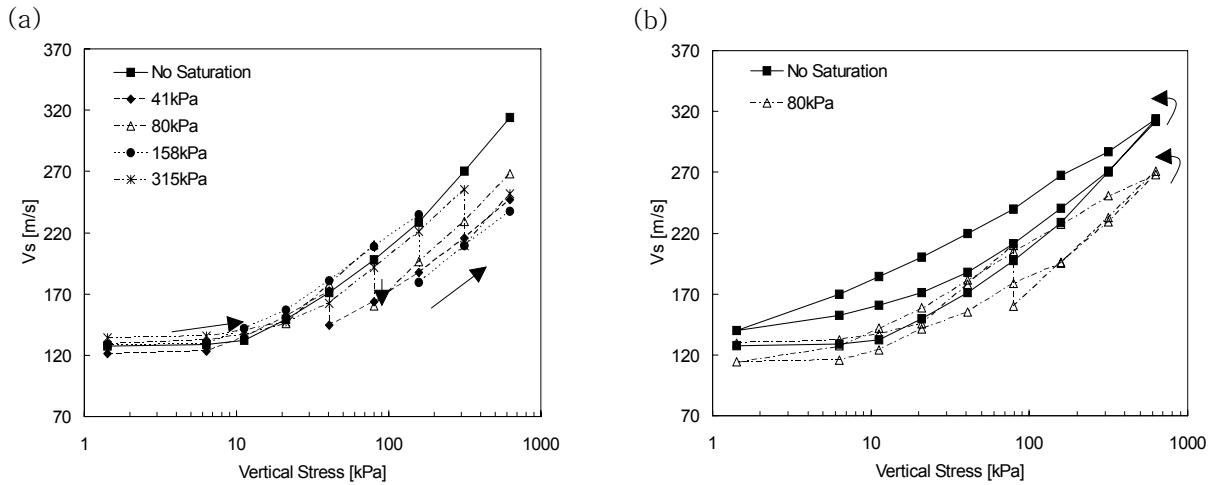


그림 5. 전단파속도: (a) 수직 응력에 따른 전단파속도; (b) 건조 및 포화응력 80kPa시료의 전단파속도.

3.4 횡방향구속탄성계수 (M)

응력-변형 곡선의 각 하중 단계별 기울기는 횡방향구속탄성계수로 정의되며, 그림 6은 모든 시료의 재하과정동안 횡방향구속탄성계수의 변화를 보여준다. 각 하중 단계에서의 횡방향구속탄성계수는 평균 수직응력을 하중 증가 동안 측정된 수직변형으로 나누어 계산하였다 ($M = \Delta\sigma_{avg} / \Delta\varepsilon_v$). 건조시료의 경우 평균수직응력이 증가함에 따라 횡방향탄성계수는 증가하는 경향을 보였다. 4개의 포화 시료의 횡방향구속탄성계수는 초기 낮은 응력수준에서 건조시료와 약간의 차이를 보이거나 응력이 증가함에 따라 건조시

료의 횡방향구속탄성계수와 유사한 값을 보였다. 각 포화응력에서의 소금의 용해는 급격한 횡방향구속탄성계수의 감소를 일으켰다. 포화응력의 크기가 클수록 큰 횡방향구속탄성계수의 감소를 보였으며 포화에 의해 소금이 완전히 용해된 이 후, 다음 하중 단계에서 급격한 횡방향구속탄성계수의 증가를 보였다. 포화 이후 추가적인 하중의 증가에 따라 횡방향구속탄성계수는 건조시료와 유사하게 증가하는 경향을 보였다. 그러나 포화 시료의 횡방향구속탄성계수는 건조시료의 횡방향구속탄성계수와 유사한 크기까지 회복되지 않았다.

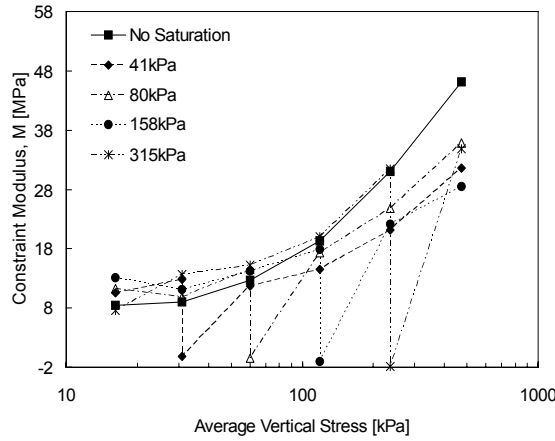


그림 6. 횡방향구속탄성계수

3.5 Vanishing

그림 7은 시간에 따른 수직 변형율과 전단파 속도의 변화를 보여준다. 시료가 포화되는 동안 발생하는 수직 변형과 전단파의 속도의 변화는 세 단계로 구분되어진다. 첫 번째 단계는 포화 직후 0~0.2분 사이에 발생되어지며 소금 입자의 용해에 의한 수직 변형율의 급격한 증가와 전단파 속도의 급격한 감소가 관찰된다. 두 번째 단계는 포화 후 0.2~10분 사이에 일어나며 수직변형의 증가율은 1단계보다 줄어들며, 전단파의 속도는 천천히 감소하다가 다시 증가하는 양상을 보인다. 2단계에서 처음 전단파 속도가 감소하는 이유는 소금이 용해되면서 간극비가 증가하기 때문이며, 그 후 하중에 의해 입자 구조의 재정렬로 인하여 다시 전단파 속도는 증가하게 된다. 마지막 단계는 포화 후 약 10분경과 후 관찰되며, 수직 변형과 전단파 속도는 거의 일정한 값으로 수렴되는데 이는 소금이 모두 용해되어 완전히 새로운 입자 구조를 형성했기 때문이다.

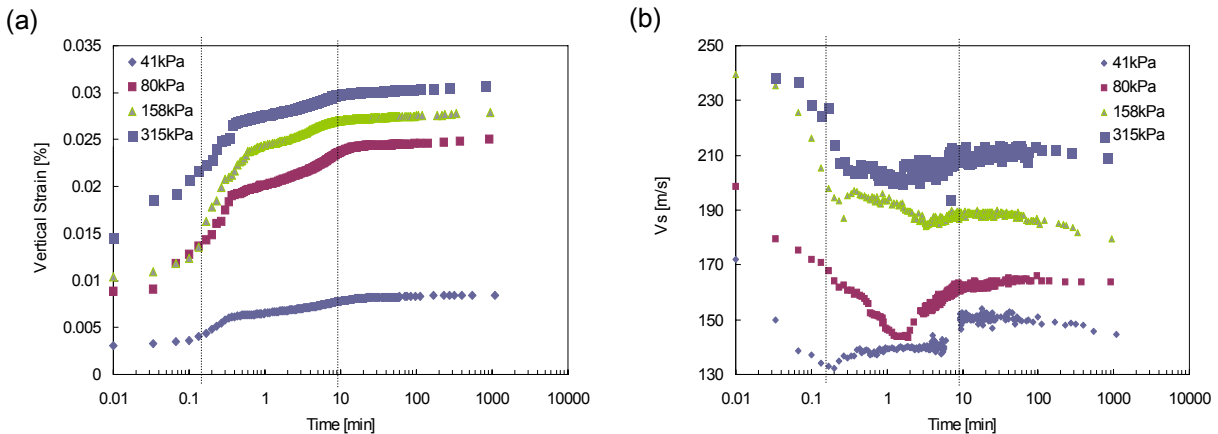


그림 7. 시간에 따른 수직 변형율과 전단파 속도: (a) 수직 변형; (b) 전단파 속도.

4. 결론

국부적인 간극비의 변화가 미소변형 강성에 미치는 영향을 K_0 조건하에서의 압밀실험을 실시하여 간극비 변화를 관찰하였으며 동시에 벤티 엘리먼트를 이용하여 전단파를 측정하고 분석하였다. 국부적인 간극비 변화를 모사하기 위하여 모래-소금 혼합시료를 조성하여 실내 시험을 실시하였으며, 혼합 시료를 포화 시켜 소금을 용해하여 시료 내 국소변형을 발생시켰다. 시험에 따른 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 포화에 의한 소금 입자의 용해는 급격한 간극비의 증가를 보여주나 더 큰 포화 하중 (σ_{sat})하의 입자 용해가 항상 더 조밀한 구조를 형성하는 것은 아니다. 시료의 포화에 의하여 소금 입자의 용해에도 불구하고 제하 및 재재하 단계의 혼합 시료의 응력에 따른 간극비 변화는 건조 시료와 유사함을 알 수 있다.
- 시료 포화에 의하여 전단파 신호의 도달시간은 급격한 감소를 보이며, 포화 이후 물에 의한 댐핑 효과로 인하여 포화 시료의 전단파 신호는 건조 시료의 전단파 신호와 비교하여 고주파수 잡음이 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있었다.
- 중간 변형을 (intermediate strain level)의 수직변형에 의한 계산된 간극비 변화보다 미소변형을 (small strain)의 전단파 속도의 변화가 소금 용해에 의한 국부적인 입자 구조의 변화에 더 민감하게 반응한다.
- 시간에 따른 소금 입자의 용해 양상은 크게 3단계로 구별되며 단계별로 각각 다른 수직 변형 및 전단파 변화 양상을 보였다.
- 모래-소금 혼합시료는 실내시험 시 인위적으로 구성된 실험을 하는데 효과적임을 알 수 있었다.

5. 참고문헌

1. Dyvik, R. and Madshus, C. (1985). "Lab measurements of G_{max} using bender element." *Proc. ASCE convention on Advances in the art of testing soils under cyclic conditions*, pp.186-196.
2. Fam, M. A., Cascante, G., and Dusseault M. B. (2002). "Large and Small Strain Properties of Sands Subjected to Local Void Increase." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 128(12), pp.1018-1025.
3. Fernandez, A. L. (2000). "Tomographic imaging the state of stress." PhD thesis, Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, 298p.
4. Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2005). "Bender elements: performance and signal interpretation." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 131(9), pp.1063-1070.
5. Sanchez-Saliner, I., Rosset, J. M., and Stokoe, K. H. II., (1986). "Analytical studies of body wave propagation and attenuation", *Report GR-86-15*, University of Texas, Austin. 272p.
6. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001). *Soils and Waves - Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*. John Wiley and Sons. New York.
7. Viggiani, G. and Atkinson, J. H. (1995). "Interpretation of bender element tests." *Geotechnique*, 45(1), pp.149-154.