

깊이에 따른 소금의 고결화 강성특성

Stiffness Characteristics of Salt Cementation according to Depth

엄용훈¹⁾, Yong-Hun Eom, 변용훈²⁾, Yong-Hoon Byun, 쯡광홍³⁾, Q. Hung Truong, 이종섭⁴⁾, Jong-Sub Lee

¹⁾ 동명기술공단 터널부 사원, Engineer, Dept. of Tunnel Engineering, Dongmyeong Engineering

²⁾ 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

³⁾ 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정, Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

⁴⁾ 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

SYNOPSIS : Cementation phenomenon has a huge influence on geotechnical stiffness and strength under low confining pressure. The goal of this study is to evaluate the characteristics of stiffness according to the depth. The piezo disk elements are installed at each layer of the cell for the detection of the compressional waves. The change of compressional wave velocity is classified by three stages. The compressional wave velocities are shown different according to the depth. The compressional wave velocity is especially influenced by cementation, effective stress, and coordinate number. Furthermore, the electrical conductivity and cone tip resistance are measured according to the depth. The electrical conductivity and the cone tip resistance show the similar trend with the compressional wave velocity. This study shows that the cementation by salt is affected by the depth on the granular materials.

Keywords : Cementation, Compression wave, Stiffness, Capillary force

1. 서론

급격한 기후 변화로 인해 과거에는 해저지반이었으나 급격한 기후 변화로 인해 강수량이 증발량에 비해 턱없이 부족한 지역들이 나타나게 되었으며, 이러한 지반은 지반내 소금과 같은 용해가능한 물질을 다량 포함하고 있다. 이들 지반의 경우 지반내 수분이 증발하면서 용해된 성분들에 의해서 고결화가 발생되어지는데, 이때 발생하는 고결화의 특징은 아주 적은 고결성분으로도 미소변형강성 및 액상화에 대한 저항력을 크게 향상시킨다(Yun and Santamarina 2005). 즉, 고결화의 발생시 흙의 강도는 증가되고 압밀량은 감소되어 결과적으로 흙의 강도를 증가시키는 중요 요인이라 할 수 있다(Asghari 등 2003). 교량이나 대규모 구조물의 시공시 빈번히 사용되는 말뚝의 경우, 이러한 용해가능 물질이 포함된 지반에서 시공되어질 때 장마철과 같은 기후 조건과 장기간의 공사기간으로 인하여 시간 경과시 지지력이 감소함에 따라 구조물의 안정성에 치명적인 결함원인이 될 수 있다(Bell 2007). 그러나 장마철이 지나 수분의 유입이 더 이상 발생되지 않고, 기후 변화에 의해 수분이 증발하게 되는 경우와 화학적 작용이나 물리적 작용이 끝나게 되면 이러한 용해가능 물질들은 고결화를 발생시키는 재료가 된다. 이러한 현상이 발생되면 시간이 경과함에 따라 지지력이 다시 증가하는 현상이 나타난다. 이러한 지지력의 향상의 원인은 고결화 현상에 의한 것이라 할 수 있다.

일반적으로 고결화라 함은 탄산칼슘과 같은 대표적 용해가능 물질이 특정한 화학작용 및 물리작용에 의해 다른 물질의 입자사이나 입자표면에 고착되거나 같은 물질끼리 덩어리로 뭉쳐지게 되어 입자간 결합력과 강성을 크게 향상시키는 것을 의미한다. 거시적 관점에서는 조그만 입자가 거대한 연속체인 암석이 되는 과정을 말한다. 해안 연안 지역의 경우 탄산칼슘과 같은 용해 가능성분 이외에 염화나트륨과 같은 염분을 포함하고 있다. 염분은 고결화를 발생시키는 중요한 재료로 가장 용이하게 고결화에 대한 영향을 관찰할 수 있다는 장점이 있다. 그럼에도 불구하고 염분을 이용한 고결화에 대한 연구는 미비한 상황이다. 따라서 본 논문에서는 이전 연구에서 수행된 다양한 입자 크기의 글라스비즈와 소금을 이용한 시료의 고결화 실험을 바탕으로 깊이에 따른 고결화의 강성특성을 서술하였다.

2. 실험적 연구

본 연구에서는 여러 층으로 구성된 셀을 사용하여 각각의 높이에 벤더 엘리먼트와 피에조 디스크 엘리먼트를 설치하여 시료의 깊이별 고결화 특성을 알아보고자 하였다. 따라서 깊이에 따른 고결화 특성 변화 및 모세관 현상에 의한 탄성파의 양상을 파악하기 위해 여러층으로 구성된 셀을 제작하여 연구를 수행하였다. 본 연구에 사용된 시료의 특성, 시료의 조성 그리고 실험 과정과 압축과 측정방법은 다음과 같다.

2.1 시료의 기본특성

본 연구에 사용된 글라스비즈는 평균입경이 0.50mm인 글라스비즈로 형상은 그림 1과 같다. 입자의 형상에 대한 영향을 최소화하기 위해 글라스비즈를 사용하였으며 이들 입자의 원형률과 구형도는 거의 1의 값을 나타낸다. 사용된 입자의 크기에 대한 영향을 조사하기 위해 세 가지 시료들의 곡률계수와 균등계수가 거의 1.16의 값을 나타내는 입자의 크기가 균등한 시료를 사용하였다. 사용된 글라스비즈의 성분은 이산화규소(SiO_2), 산화칼슘(CaO), 산화나트륨이 90%이상을 차지하며 70%가 넘는 이산화규소를 함유한 실리카질 글라스비즈로써 비중은 2.52이다. 사용된 소금은 염화나트륨 함유율이 90%이상인 것을 사용하였고, 비중은 2.16이다.

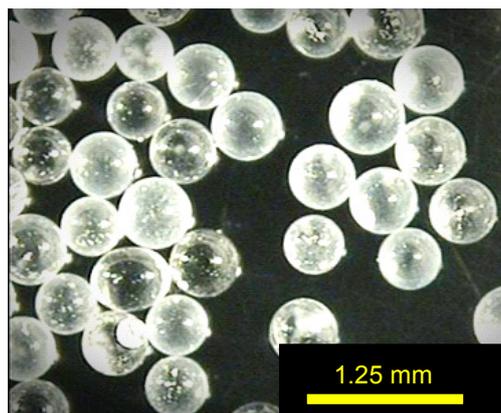


그림 1. 글라스비즈의 크기별 입자모양($D_{50}=0.50\text{mm}$).

2.2 시료조성

평균입경이 0.50mm인 시료를 사용하였으며, 소금의 농도는 0.5M로 고정하여 소금물에 수중강사시켜 시료를 조성하였다. 조성된 글라스비즈 시료를 건조기에 넣어 완전 건조시켜, 입자사이에 존재할 수 있는 수분으로 인하여 소금물과의 혼합시 농도가 변하는 것을 방지하였다.

각각의 농도에 따른 소금물 조성시 증류수를 이용하여 이온화에 대한 변수를 최소화하였다. 건조된 시료는 수중에서 퇴적된 자연상태 흙의 구조를 가장 잘 모사할 수 있는 시료조성 방법인(Chaney 등 1978; Vaid and Negussey 1984) 수중강사법을 사용하여 시료가 100%포화되도록 하였다. 수중강사법은 고결화에 영향을 미치는 상대밀도에 대한 영향을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다.

시료 조성시 변화할 수 있는 상대밀도의 영향을 최소화시키기 위해 사용된 시료의 무게에 대한 부피도 일정하게 고정함으로서 상대밀도에 대한 조건도 동일하게 조정하였다. 또한 수중강사법은 퇴적 과정에서 재료분리를 일으킬 수도 있으나 본 실험에서는 입자크기가 균등한 재료만을 사용함으로써 이 문제도 최소화시키고자 하였다.

사용된 시료의 양은 1000g이며 사용된 셀은 그림 2와 같이 내부의 가로와 세로 길이가 각각 94mm이며, 두께는 10mm, 전체 높이는 135mm이고, 바닥면의 두께는 5mm로 구성되어 있다. 재질은 투명 아크릴을 사용하였다. 아크릴 셀의 바닥으로부터 25mm, 50mm, 75mm, 105mm인 지점에 각각 피에조 디스크 엘리먼트를 설치하였다. 이는 각각의 높이에 따라 모세관력에 의한 소금 농도와 유효응력에 대한 고결화 현상을, 압축과 속도를 측정하여 분석하기 위한 것이다.

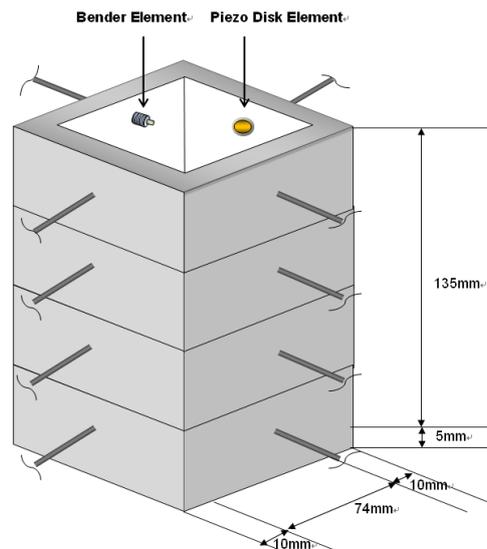


그림 2. 벤더 엘리먼트(BE) 및 피에조 디스크 엘리먼트(PDE) 가 설치된 다단셀.

2.3 실험과정

조성된 시료가 준비된 아크릴 셀을 건조기에 넣어 시료를 건조시키면서 전체 셀의 무게 변화를 측정하여 포화도 변화를 평가하였다. 또한 포화도가 변화하면서 시료가 건조되므로 각각의 포화도에서 시료의 압축파를 측정하여 시료고결화에 따른 강성특성을 조사하였다.

최초 시료 조성시 상대밀도와 수위를 동일하게 유지하였으며 시료 내 소금물이 완전히 건조되어 더 이상의 무게 변화가 발생하지 않는 시점까지 실험을 수행하였다. 건조기의 온도는 70℃를 유지하였으며 무게측정 시에는 외부충격에 의한 입자의 재배열과 간극비의 변화가 없도록 하였다. 또한 실험은 혼합 시료의 고결화 과정에 따른 전해질 용액의 변화를 최소화시키기 위해 외부 온도를 25℃와 습도를 50%

이하로 일정하게 유지하였다. 조성된 시료의 자유구속하중 하에서 모세관력과 고결화에 따른 특성평가를 위해 각각의 높이에 맞게 설치된 피에조 디스크 엘리먼트를 이용하여 압축파를 동일한 포화도에서 측정하였다. 그러나 실험을 진행하던 중 표면부에 소금막이 형성되었다. 이 소금막이 수분 증발을 방해하여 총 실험 수행시간이 2주가 넘어서면서 소금과의 화학적 반응으로 인해 설치되어 있던 네 쌍의 벤더 엘리먼트와 한 쌍의 피에조 디스크 엘리먼트가 작동을 멈추었다. 따라서 부득이하게 남은 세 쌍의 피에조 디스크 엘리먼트만을 이용하여 결과 분석을 실시하였다.

2.4 압축파 측정

조성된 시료의 고결화에 따른 강성특성 거동평가를 위해 압축파(Compressional wave) 측정이 가능한 피에조 디스크 엘리먼트를 셀의 양쪽 벽면에 설치하였다. 압축파 측정을 위하여 피에조 디스크 엘리먼트를 이용하였다. 피에조 디스크 엘리먼트는 그림 2에 설치된 모습과 같이 원형의 금속판의 한쪽 면에 압전 세라믹 소자가 덮여있다. 압전 세라믹소자의 직경은 11mm, 금속판의 직경은 15mm, 그리고 두께는 0.45mm이다. 압축파는 신호발생기(Agilent 33220A)를 사용하여 20Hz의 사각파의 전기 신호를 발신 피에조 디스크 엘리먼트에 전달하게 된다. 발신 피에조 디스크 엘리먼트에 전달된 전기적 신호는 물리적 신호로 바뀌어 시료를 통과하여 수신 피에조 디스크 엘리먼트를 통해 다시 전기적 신호로 획득된다. 전달된 신호의 증폭 및 잡음 제거를 위하여 필터(Krohn-Hite 3364)를 이용하였다. 필터링 과정을 거친 신호는 오실로스코프를 통해 저장하였다. 이때 신호의 불필요한 잡음 제거와 선명한 신호를 획득하기 위해 1024개의 신호를 평균하여 저장하였다. 아크릴 셀을 통한 직접파의 전달을 피하기 위하여 셀과 임피던스가 차이가 큰 재료인 실리콘을 사용하여 고정하였다. 압축파 속도(V_p)는 획득된 신호를 이용하여 식(1)과 같이 계산하였다(Lee and Santamarina 2005).

$$V_p = \frac{L_p}{t_p} \quad (1)$$

여기서, L_p 는 발신 피에조 디스크 엘리먼트와 수신 피에조 엘리먼트간의 거리를 말하며, t_p 는 압축파의 이동시간을 의미한다.

3. 실험결과

3.1 탄성파를 이용한 특성파악

3.1.1 압축파 신호

사용된 시료의 압축파 신호양상을 그림 3에 나타내었다. 평균입경이 0.50mm인 시료의 압축파 신호양상은 3단계로 구분되어진다. 첫 번째 단계는 100% 포화시 유체에서 가장 빠른 속도를 보이는 압축파의 초기도달시간이 가장 빠르게 도착한 것을 볼 수 있으며 피에조 디스크 엘리먼트가 설치된 위치와 상관 없이 동일한 결과를 보인다. 이후 포화도가 점차 감소하여 약 90%에 이를 때까지 초기도달시점은 급속하게 증가한다. 두 번째 단계는 포화도가 약 90%에서 10%가 되는 시점에서 나타나는데 이 구간에서는 포화도의 변화량에 비해 초기도달시간은 소폭의 감소만 발생하는 안정화 단계이다. 마지막 세 번째 단계는 포화도가 약 10%에서 완전 건조시점인 0%에 이르는 시점이다. 이는 기존의 한 단 셀과 동일한 양상을 보이는 것을 알 수 있다.

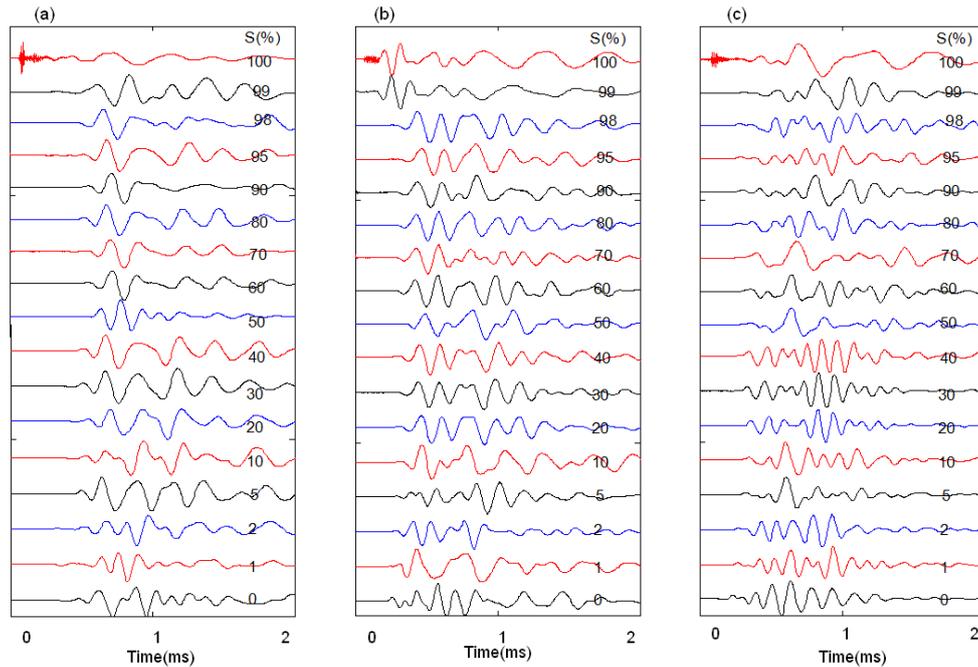


그림 3. 다단셀의 위치별 압축파 속도: (a) Depth=20mm; (b) Depth=85mm; (c) Depth=115mm.

3.1.2 압축파 속도

그림 3에서 얻어진 초기 도달 시간을 이용하여 포화도에 따른 압축파 속도의 변화 양상을 그림 4에 나타내었다. 압축파의 속도변화는 3단계로 구분된다. 먼저 표면으로부터 20mm 깊이에 설치된 피에조 디스크 엘리먼트의 결과는 최초 완전 포화시 고주파수의 속도로써 약 1700m/s로 측정되었으며 이후 포화도가 약 90%까지 압축파의 속도는 약 270m/s까지 급격한 감소를 보인다. 두 번째 단계에서는 포화도가 90%에서 60%로 감소할 때 압축파의 속도가 약 170m/s까지 감소한다. 이후 서서히 증가하여 포화도가 약 10%인 시점일 때 다시 약 200m/s까지 증가한다. 마지막 세 번째 단계인 포화도가 약 10%에서 완전 건조시점인 0%에서는 급격한 속도의 증가로 약 340m/s까지 도달하게 된다. 이것은 엄용훈 등 (2009)의 연구에서 동일한 조건에서의 수행된 실험 결과와 거의 유사함을 보여준다.

다음으로 표면으로부터 85mm 위치에 설치되어진 피에조 디스크 엘리먼트의 결과도 동일하게 3단계로 나타난다. 첫 번째 단계는 표면으로부터 20mm 위치의 피에조 디스크 엘리먼트의 결과와 동일한 양상을 보이며, 포화도가 90%까지 감소하는 동안 압축파의 속도는 약 300m/s까지 감소하며, 이후 두 번째 단계에서 포화도가 약 10%로 감소하는 동안 250m/s까지 감소하게 된다. 마지막 세 번째 단계에서는 속도가 다시 회복되어 약 380m/s까지 증가하는 양상을 보인다.

마지막으로 표면으로부터 115mm 높이에 설치된 피에조 디스크 엘리먼트의 경우에도 앞선 두 경우와 동일한 양상으로 3단계로 구분된다. 첫 번째 단계는 앞서 설명한 두 경우와 동일하게 완전 포화상태에서 약 1700m/s를 보이며 포화도가 90%까지 감소하는 동안 약 300m/s까지 감소한다. 두 번째 단계에서는 포화도가 90%에서 10%까지 감소하는 동안 거의 300m/s로 일정하게 유지되는 안정화 단계를 거치게 된다. 마지막 단계인 포화도가 10%미만인 영역에서는 속도가 급격히 상승하여 포화도가 0%인 완전 건조 시점에는 압축파의 속도가 약 500m/s까지 도달하였다.

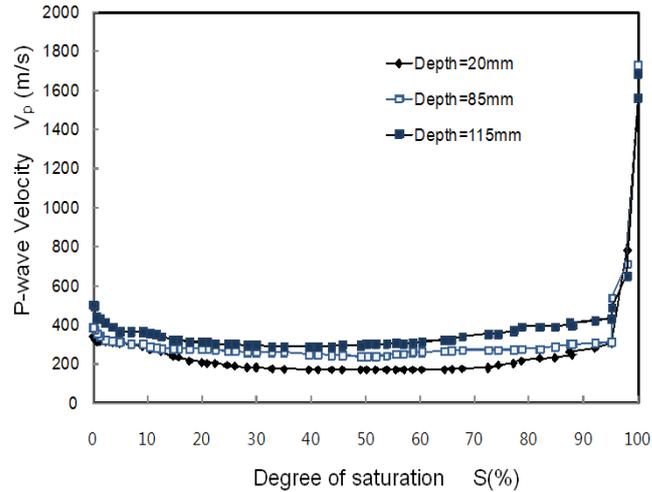


그림 4. $D_{50}=0.50\text{mm}$ 시료의 NaCl 0.5M에 대한 깊이별 탄성과 속도.

3.1.3 압축과 결과 분석

입자의 크기와 소금물의 농도가 동일한 조건에서 깊이에 따른 고결화 영향 및 유효응력의 영향을 분석하였다. 유효응력의 영향으로 고결화 진행과정 중 두 번째 단계인 안정화 단계에서 압축파의 속도는 피에조 디스크 엘리먼트의 설치 위치에 따라 표면으로부터 20mm에서는 200m/s, 85mm에서는 250m/s, 그리고 마지막 115mm에서는 300m/s를 보임으로써 유효응력에 따른 압축파 속도의 결과가 다르게 나타났다.

고결화의 진행이 가장 활발히 나타나는 영역으로 판단되는 세 번째 단계에서 표면으로부터 20mm와 85mm에서의 압축파 속도를 살펴보면 포화도가 약 10%에 도달하면서 압축파의 속도가 거의 동일하게 나타난다. 이후 포화도가 약 1%로 감소할 때까지 계속해서 거의 동일한 값을 보이다가 완전 포화시점에서는 약 30m/s의 차이를 보인다. 이는 고결화 현상에 의해 포화도가 10%에서 1%로 감소하는 동안 유효응력의 차이를 극복하였으나 완전 포화시에는 유효응력의 차이를 완전히 극복하지 못하고 두 번째 단계보다는 50m/s의 차이보다 적은 30m/s로 줄어든 것으로 판단된다.

표면으로부터 85mm 위치에서의 압축파 속도와 20mm에서의 압축파 속도를 비교해 보면 완전 건조시에 85mm의 압축파 속도는 약 500m/s이고, 20mm의 압축파 속도는 약 340m/s이다. 이는 115mm의 경우 유효응력이 85mm보다 크고, 시료 속에 잔류되는 소금의 함유량도 크게 되어 고결화 현상도 크게 나타난다. 따라서 셀의 바닥에서 압축파의 속도는 유효응력과 고결화에 대한 복합적인 작용으로 인해 가장 큰 속도를 나타나는 것으로 분석된다.

3.2 깊이에 따른 전기전도도(Conductivity)

3.2.1 전기전도도 실험

깊이에 따른 전기전도도 실험을 위해 그림 5와 같이 높이가 208mm이고 두께가 8mm인 가로, 세로의 길이가 56mm인 정사각형 아크릴 셀을 이용하였다. 평균입경이 0.26mm, 0.50mm, 1.29mm인 글라스비즈에 대하여 소금농도 0.5M에서의 전기전도도를 측정하였다. 시료 조성 방법은 앞서 실시한 방법과 동일한 수중강사법을 사용하여 아크릴 셀 안의 시료가 완전 포화되도록 하였다. 시료의 높이는 13.5cm로 고정하였다. 셀을 건조기에 넣어 중량의 변화가 없는 시점인 완전 건조상태를 확인한 후 각각 일정한 높이에서 각각 3g을 채취하여 준비된 50g의 증류수에 넣어 잘 혼합시켰다. 전기전도도는 전기전도도계(Omega CDB 387)를 이용하여 측정하였다.

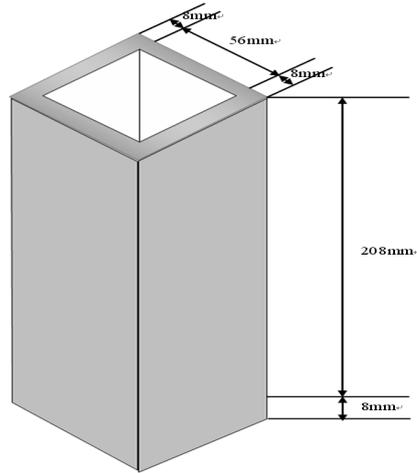


그림 5. 깊이별 전기전도도 측정을 위한 아크릴 셀.

3.2.2 실험 결과

시료의 각각의 높이에 따른 전기전도도 측정값을 그림 6에 나타내었다. 전기전도도는 입자크기와 상관없이 거의 동일한 경향을 나타내었다. 바닥면에서 높게 나타났던 전기전도도 측정값은 바닥으로부터 약 5cm까지 감소하다가 5cm 이상이 되면 다시 서서히 증가한다. 시료 높이가 8cm에서 10cm까지 급격한 증가를 보인다. 이후 13.5cm까지 증가하는 양상을 나타낸다. 이것은 모세관력에 의해 시료의 중간 지점의 소금 용액은 위쪽으로 이동하고, 그렇지 못한 소금 용액은 중력에 의해 바닥면으로 이동하게 되어 이와 같은 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 입자의 크기가 클수록 시료 높이가 8cm이후부터 가장 적은 전기전도도 측정값의 증가량을 보인다. 이는 입자의 크기가 크면 클수록 모세관력에 의한 소금의 상승 범위가 줄어들기 때문이다.

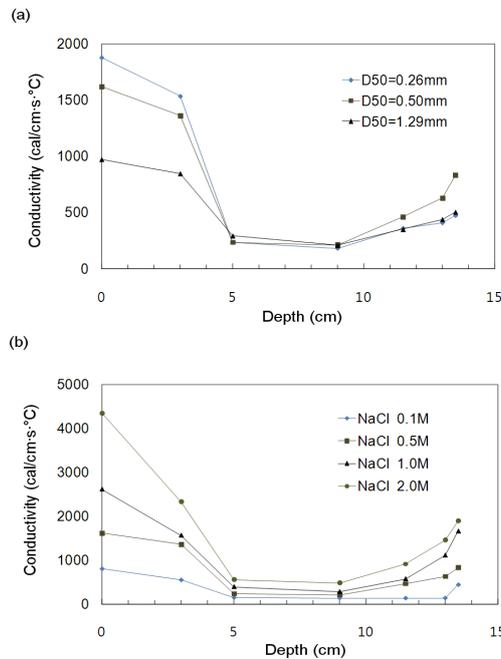


그림 6. 시료 깊이별 전기전도도 변화: (a) 입자크기에 따른 분류(NaCl 0.5M); (b) NaCl 농도에 따른 분류(D₅₀=0.5mm).

3.3 깊이에 따른 원추 관입저항력

3.3.1 광섬유 마이크로 콘 관입 실험

콘 관입시험은 지반에 대한 연속적인 데이터를 빠르고 정확하게 획득할 수 있고, 기계적 교란을 최소화 할 수 있기 때문에 국내외에서 널리 활용되는 현장조사 시험법이다. 획득된 시험결과를 바탕으로 지층을 비교적 정확하게 판단할 수 있고 강도 및 압밀특성까지 분석할 수 있어 지반조사에 필수적인 실내 실험 및 현장실험으로 인식되고 있다.

본 실험에 사용된 콘은 직경이 3mm인 초소형 마이크로 콘으로 광섬유 센서를 이용하여 제작되었다. 이는 기존 콘장비의 문제점인 교란범위를 최소화하기 위해 고안되었으며, 온도에 대한 영향도 보상하는 개량된 장비를 적용하였다(김래현 등 2009). 사용된 광섬유 마이크로 콘을 사용하여 그림 7과 같은 직경이 150mm, 높이가 90mm인 아크릴 셀에 시료를 조성하여 실험을 실시하였으며, 시료의 높이는 75mm로 고정하였다. 같은 시료에 대해 두 번에 걸쳐 콘 관입을 실시하였다.

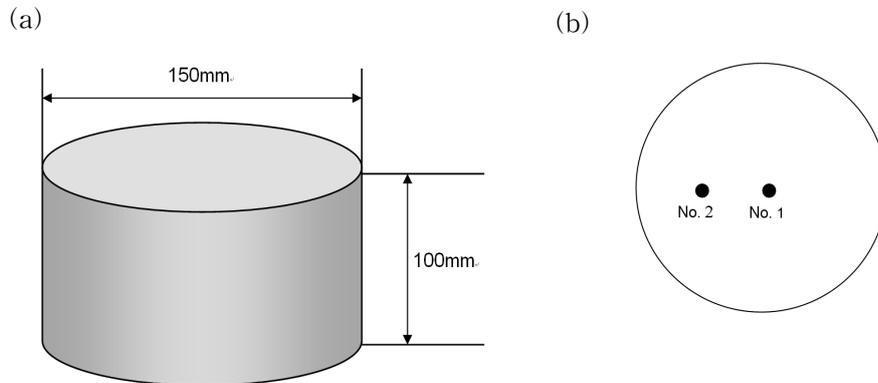


그림 7. 광섬유 콘 실험을 위한 아크릴 셀: (a) 아크릴 셀; (b) 콘 관입위치.

3.3.2 실험 결과

소금의 농도가 높으면 높을수록 즉, 고결화 발생 물질이 증가할수록 해당 지반의 강성이 강하다는 것을 의미한다. 따라서 이에 대한 증명을 위해 마이크로 콘을 사용하여 실험을 실시하였다. 콘관입 실험을 실시한 결과를 그림 8에 나타내었다. 콘 관입 저항치는 콘이 관입되는 표면에서 선단저항력(q_c)이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이후 약 8mm근처에서 가장 큰 선단저항력을 보였다. 이는 앞서 설명한 전기전도도 측정값에 의해 표면부분이 고결화에 대한 영향으로 가장 강한 강성을 갖는다는 결과와 동일한 양상을 보인다. 마이크로 콘이 더 관입되면서 선단저항력은 급격히 감소하게 되고 관입깊이가 50mm 부터 바닥면까지 다시 서서히 증가하는 경향을 보인다. 바닥면의 선단저항력의 결과도 앞서 설명한 전기전도도 측정값에서의 결과와 유사한 결과를 보였다.

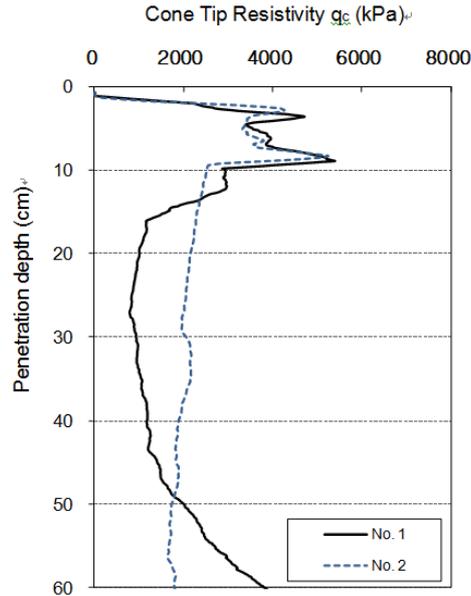


그림 8. 깊이에 따른 광섬유 원추 관입 저항값.

4. 요약 및 결론

실험 결과, 포화도에 따른 압축파의 속도는 3단계로 나타났다. 첫 번째 단계는 포화도가 100~90%인 구간으로써, 포화도가 감소함에 따라 압축파의 속도는 급격히 감소한다. 두 번째 단계는 포화도가 90~10%인 구간으로써, 포화도가 감소해도 압축파 속도는 크게 변화하지 않는 구간이며, 마지막 세 번째 단계는 포화도가 10~0%인 구간으로써, 입자와 입자사이에서 소금의 고결화 및 모세관력에 의한 유효응력에 영향을 받아 압축파의 속도가 급격히 증가하는 구간으로 나타났다. 깊이에 따른 압축파 속도의 변화는 고결화가 발생하는 동안 유효응력의 지배범위를 크게 벗어나지 못하는 것이 원인이 되어 높이별로 속도의 차이를 보였으며, 표면에서 가장 큰 변화를 일으킨 것은 소금의 집중으로 표면부에서 강성이 가장 크게 나타났기 때문이다.

입자크기별 고결화 평가시 중요요소인 모세관력의 영향범위를 알아보기 위하여 정사각형의 높이 208mm인 실린더 모양의 셀을 이용하여 입자크기가 각각 다른 시료에 대하여 전기전도도를 측정하였다. 실험 결과 일정 높이 이상에서 급격히 줄어든 전기전도도 측정값이 셀의 상부로 올라갈수록 급격히 증가하는 경향을 알 수 있었다.

마지막으로 본 연구실이 개발 중인 직경이 3mm인 광섬유 마이크로 콘을 이용하여 선단저항력을 측정하여 전기전도도 측정값과 다단으로 구성된 셀에서의 결과를 비교 분석을 실시하였다. 실험 결과 표면부에서 가장 높은 선단저항력을 보였으며 표면부 10mm를 통과하면서 급격히 감소하여 바닥면에 가까울수록 다시 증가하는 경향을 보였다. 이로써 전기전도도 측정값과 다단으로 구성된 셀에서의 결과와 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2009년 한국과학재단 일반연구자지원-기본연구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구(2009-0075809)이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 엄용훈, 쯡광홍, 변용훈, 이종섭 (2009), “용해된 소금의 고결화에 따른 탄성과 특성”, *한국지반공학회 논문집*, 제 25권, 제 5호, pp 75~86.
- 김래현, 이우진, 윤형구, 이종섭 (2009), “광섬유를 이용한 온도 보상형 마이크로콘의 개발”, *대한토목학회 논문집* (Accepted).
- Asghari, E., Toll, D. G., and Haeri, S. M. (2003), “Triaxial behaviour of a cemented gravely sand, Tehran alluvium”, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 21, pp.1-28.
- Bell, F. G. (2007), *Engineering Geology - 2nd edition*. Elsevier, Great Britain.
- Chaney, R. and Mulilis, P. J. (1978), “Suggested method for soil specimen remolding by wet raining”, *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, Vol. 11, No.2, pp.107-108.
- Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2005), “Bender elements: performance and signal interpretation”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 131(9), pp.1063-1070.
- Vaid, Y. P. and Nequsse, D.(1984), “Relative density of air and water pluviated sand”, *Soils and Foundations*, Vol. 24, No.2, pp.101-105.
- Yun, T. S. and Santamarina, J. C. (2005), “Decementation, softening, and collapse: changes in small-strain shear stiffness in k_0 loading”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 131(9), pp. 350-358.