

낮은 구속압에서 고결화 혼합재의 미소변형강성

Small Strain Stiffness of Salt-Cemented Granular Media under Low Confining Pressure

쥙꽁훙¹⁾, Q. Hung Truong, 변용훈²⁾, Yong-Hoon Byeon, 째밍콰²⁾, M. Khoa Tran, 이종섭³⁾, Jong-Sub Lee

¹⁾ 고려대학교 건축사회환경공학부 박사후연구원, Post Doctoral Fellow, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.

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

³⁾ 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.

SYNOPSIS : The mechanical behavior of granular soils is affected by particle bonding including natural cementation. This study addresses a simple model of small strain stiffness and salt concentration based on wave measurements of salt-cemented particulate media. Published models of artificially cemented soils with different curing methods and several types of cementation agents are reviewed. Glass beads with the median diameter of $D_{50} = 0.5\text{mm}$ are prepared in rectangular cells using the water-pluviated method in salt water with different concentrations. Piezo disk elements and bender elements embedded in the cell are used for the measurements of compressional and shear waves. The relationships between elastic wave velocities and salt concentration show an exponential function. The measured small strain stiffness matches well the predicted small strain stiffness based on micromechanics for simple cubic monosized sphere particles. This study demonstrates that the salt concentration in salt-cemented specimen may be evaluated by using elastic wave velocities.

Keywords : Compressional wave, Salt-cemented soils, Shear wave, Small-strain stiffness, Unsaturated soil

1. 서론

자연적인 고결화 현상은 소금, 탄산염, 산화철, 알루미늄, 유기물질 또는 점성토 같은 고결화제로 인하여 발생한다(Carraro and Salgado 2004; Mitchell and Soga 2005). 교란된 상태에서, 자연적으로 발생하는 고결된 결합은 파괴될 수 있으며, 강도의 감소를 초래할 수 있다(Mitchell and Soga 2005). 따라서, 강도를 증가시키거나 liquefaction의 가능성을 감소시키는 인공의 고결화제에 대하여 많은 연구가 수행되어 왔다. 그러나, 인공적인 고결화 작용은 자연상태에서 흔하게 나타나지 않는다.

자연적으로 고결된 조립토의 상태는 실내실험(Sangrey 1972; Leroueil and Vaughan 1990; Ismael 2001)이나 현장실험(Fonseca et al. 1997; Consoli et al. 1998; Walsh et al. 1995; Cuccovillo and Coop 1997, 1999)을 통하여 지반재료의 특성을 평가하는 방법으로 연구되어 왔다. 소금의 고결현상이 대표적이고 흔한 자연적인 고결화 현상이다. 하지만, 이전까지의 연구에서는 소금의 고결화 현상에서 흙의 거동을 조사하는 것으로 제약되었다. 여기서, 소금으로 고결된 혼합재의 특성은 압축성과 파괴(Abduljawad and Al-Amoudi 1995), 그리고 미소변형률에서의 강성(Truong et al. 2009)을 관찰함으로써 연구되어 왔다.

고결된 조립토의 강성을 조사하기 위하여 몇 가지 모델들이 제안되어 왔다. 이 모델들은 맥파(pulse wave)속도시험(Khan et al. 2006) 및 공진주파수시험과 같은 실내실험에 근거해 있다. 미세역학의 이론은 Chang et al. (1990)과 Fernandez and Santamarina (2001)에 의해 사용되어 왔으며, Pestana and Salvati (2006)은 단순모델을 증명하기 위해 실험데이터를 사용했다. 여기서, 고결화제는 포트랜드 시멘트와 석고, 그리고 석회석과 같은 인공의 재료였다. 그러나, 아직까지 소금으로 고결된 흙에 대해서는 연구되지 않았다.

본 연구의 목적은 탄성과 기법을 이용하여 낮은 구속압상태에서 소금-조립토 혼합재의 고결된 소금농도에 근거한 미소변형률의 강성을 평가하는 단순모델을 만드는 데 있다. 본 논문은 먼저 미소변형률에서의 강성, 고결화제 함유량, 그리고 구속응력에 근거하여 이전에 제안된 모델들을 고찰하는 것으로 시작한다. 다음에는, 소금농도의 영향으로 인한 탄성과속도의 전개를 평가하기 위하여 실험절차가 소개된다. 마지막으로, 소금농도에 따른 미소변형률에서의 강성을 평가하기 위한 단순모델에 대한 설명으로 구성된다.

2. 문헌 고찰

입상체의 미소변형률에서의 강성에 영향을 주는 주요 요소로는 고결화제의 종류와 함유량, 입도분포, 흙의 패킹된 밀도, 그리고 고결-응력이 있다. 고결화된 입상체의 미소변형률에서의 강성을 예측하는 다양한 모델들이 제안되어 왔다(Acar and El-Tahir 1986; Saxena et al. 1988; Chang et al. 1990; Fernandez and Santamarina 2001; Pestana and Salvati 2006).

2.1 미세역학 모델

미소변형률에서의 강성에 대한 고결작용의 효과는 단일구형입자를 이용한 정규 및 비정규 패킹의 미세역학에 근거하여 Chang et al. (1990)와 Fernandez and Santamarina (2001)에 의해 연구되었다. Fernandez and Santamarina (2001)에 의해 제안된 모델은 다음과 같다.

$$\frac{E_T}{G} = \frac{3}{2} \left[\frac{2}{3(1-\nu)} \right]^{2/3} \left[\frac{2}{3(1-\nu)} \frac{[(cc+1)^{2/3} - 1]^{3/2}}{(cc+1)^{1/3}} + \frac{\sigma_0}{G} \right]^{1/3} \quad (1)$$

여기서, E_T 는 접선탄성계수이고, G 는 입자의 전단탄성계수이며, ν 는 포아송비, cc 는 중량에 의한 시멘트 함유량, 그리고 σ_0 는 등방구속압이다. 식 (1)은 이상적인 가정을 갖으며, 공진주시험의 결과와 일치한다. 입자들의 모임으로서 모래를 다루는 미세역학의 적용은 입자 특성, 접촉점수, 간극비의 영향(Chang et al. 1990)과 고결된 물질의 거동(Fernandez and Santamarina 2001)에 대한 연구에 도움을 주게 된다.

2.2 경험적 모델

미소변형률에서의 강성, 고결화제 함유량, 그리고 구속압에 관련된 경험적 모델들은 고결된 조립재료의 공진주시험을 사용함으로써 Acar and El-Tahir (1986)와 Saxena et al. (1988)에 의해 제안되었다. Pestana and Salvati (2006)는 고결화제 함유량에 따른 고결 모델 및 비고결 모델로부터 도출한 최적의 매개변수에 기초하여 단순하고 효과적인 모델을 제시하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

$$\frac{G_c}{p_a} = G_b e^{-1.3} \left(\frac{p}{p_a} + a_{cc} cc^2 \right)^n \quad (2)$$

여기서, G_c 는 고결된 모래의 전단탄성계수, G_b 는 재료의 최대전단탄성계수, e 는 모래혼합재의 간극비, p 는 평균유효응력, p_a 는 대기압, a_{cc} 는 고결화제와 고결화 작용에 따른 정수, cc 는 중량에 의한 고결화제 함유량, 그리고 n 은 접촉점수이다.

또한, 맥파(pulse wave)속도는 미소변형률에서의 강성에 대한 고결화 작용의 효과를 측정하는데 사용되었다(Khan et al. 2006). 맥파(pulse wave)속도시험은 경험적 모델과 분석적 모델에 의해 결정된 속도가 실험에 의해 얻어진 속도의 약 60%라는 것을 보여주었다. 낮은 속도는 구속된 압력으로 인해 고결된 접촉부의 미세파괴를 증가시키는 것으로 나타났다. 또한, Khan et al. (2006)은 탄성과 속도가 낮은 구속압에서 고결화 작용에 의해 지배되는 것을 나타내었다.

3. 실험적 연구

소금으로 고결된 조립토의 미소변형률의 강성은 고결화제 함유량에 따라 탄성과 기법을 이용하여 측정되었다. 실험은 셀의 벽에 벤더 엘리먼트와 피에조 디스크 엘리먼트가 설치된 직사각형의 셀 안에서 수행되었다. 고결화 작용은 오븐 안에 소금물로 포화된 흙 시료를 넣은 뒤, 용해된 소금을 건조시킴으로써 발생시켰다.

3.1 시료의 기본 특성

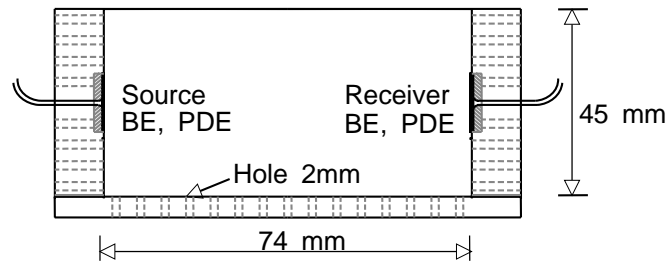
구형도와 원형도가 1인 글라스비즈를 사용함으로써 입자형상에 의한 효과를 최소화하였다. 글라스비즈는 미세역학의 가정을 위하여 적절한 모델을 제공하는 것으로 사용되어 왔다. 실험에 사용된 글라스비즈의 평균직경(D_{50})은 0.5mm이고, 비중은 2.52이다. 고결화제는 비중이 2.16인 소금이 사용되었다.

3.2 시료 조성

글라스비즈는 직사각형의 아크릴 셀 안에 조성된다. 셀 내부의 치수는 74mm× 74mm× 45mm(너비× 길이× 높이)이고, 바닥판의 두께는 5mm이다. 측정장치로 벤더 엘리먼트와 피에조 디스크 엘리먼트를 사용하여 셀 벽면의 중앙에 부착한 후, 전단파와 압축파의 속도를 평가하였다. 네 개의 셀벽과 바닥판은 각각 분리할 수 있도록 제작되어 조립되었고, 그림 1(a)와 같이 건조과정동안 일정한 건조상태를 유지할 수 있도록 직경 2mm의 구멍들을 만들었다.

시료는 0.0M, 0.01M, 0.05M, 0.1M, 0.2M, 0.5M, 1.0M, 2.0M 농도의 소금물에 수증강사법을 이용하여 조성된 후, 2시간동안 수침시켰다. 그 후, 구멍이 뚫린 직사각형 셀 안에 글라스비즈를 담는다. 여기서 주의할 점은 셀의 벽과 바닥부에 여과지를 놓아야 한다는 것이다. 시료는 30분간 공기중 건조 후, 건조하기 위해 오븐에 넣게 된다. 시료의 초기 간극비는 0.67이었다.

(a)



(b)

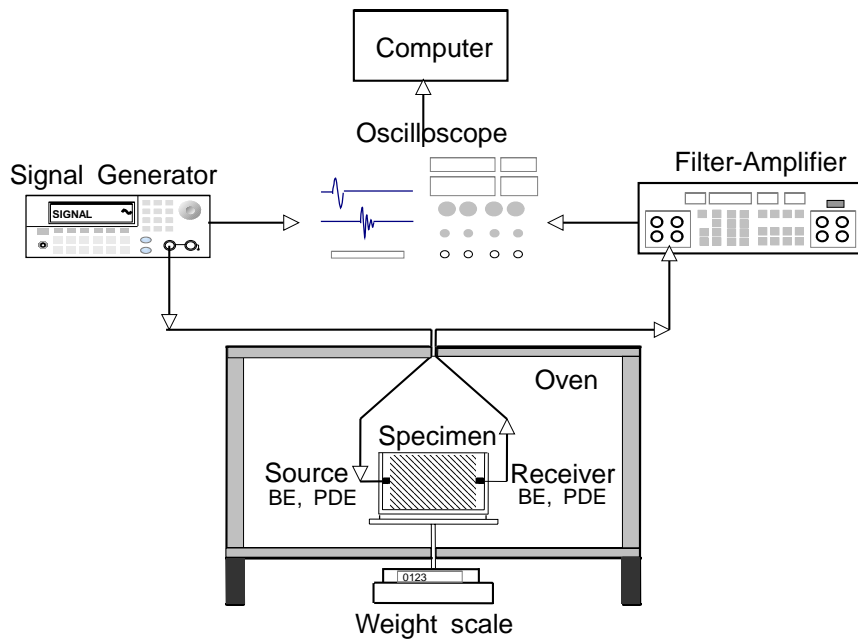


그림 1. 실험 구성도: (a) 건조 셀; (b) 탄성과 모니터링 시스템. 여기서, BE와 PDE는 벤더 엘리먼트와 피에조 디스크 엘리먼트를 나타냄

3.3 탄성과 모니터링 시스템

전단파와 압축파를 발생시키고 감지할 수 있는 벤더 엘리먼트와 피에조 디스크 엘리먼트는 그림 1(a)와 같이 셀의 양쪽벽면에 마주 보도록 설치되었다. 벤더 엘리먼트는 폭과 길이가 각각 5mm인 캔틸레버보 형태로 설치된다. 피에조 디스크 엘리먼트는 원형의 금속평판에 압전물질로 덮여 있다. 압전물질은 직경 11mm이고, 금속평판의 직경은 15mm이다. 발신기로부터 수신기에 직접 전달되는 잡음을 제거하기 위하여, 피에조 디스크 엘리먼트와 셀 벽 사이에는 실리콘을 댄핑재료로 사용한다. 시료에 탄성파를 발생 및 감지하기 위한 측정장비는 신호발생기, 필터, 오실로스코프로 구성된다(그림 1(B)). 신호는 잡음을 제거하기 위해 1024개의 신호를 평균하여 획득되었다.

3.4 실험 절차

글라스비즈를 아크릴셀 안에 조성한 후, 고결작용을 위해 오븐을 이용하여 60°C에서 건조시킨다. 건조과정동안 일정시간마다 전단파와 압축파 그리고 시료의 무게를 기록하였다. 실험완료 후, 시료는 완전히 건조시켰다.

4. 실험 결과

4.1 소금 농도

글라스비즈가 완전히 건조된 후, 셀에서 빼내어 1L의 증류수에 24시간동안 혼합하였다. 소금물의 전기전도율은 건조하여 고결된 시료의 소금농도를 평가하기 위해 측정되었다. 또한, 시료에 포함된 소금의 양을 측정하였다. 고결된 시료의 소금농도와 초기 소금물농도의 관계를 그림 2에 나타내었다. 그림 2는 시료내부에 남아있는 소금의 양이 초기 소금물농도의 64%정도임을 보여준다(포화도 100%).

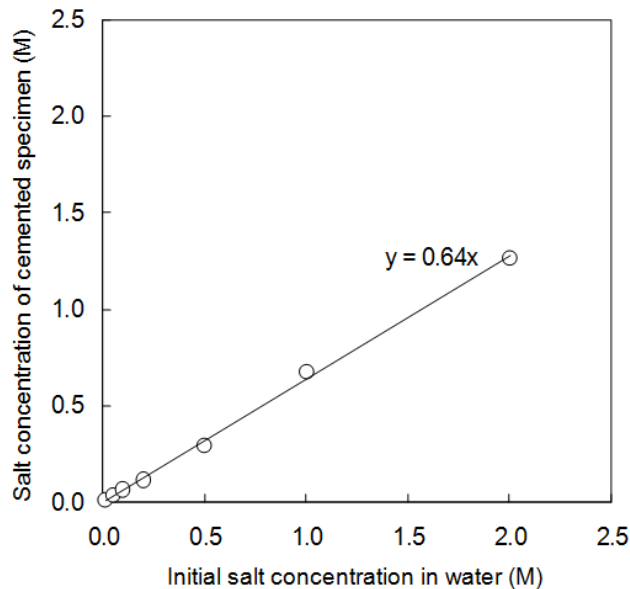


그림 2. 건조 후 고결된 시료의 소금농도와 초기 소금물농도의 관계

4.2 전단파 속도

여러 가지 농도의 소금물에서 전단파 속도와 포화도의 관계를 그림 3(a)에 나타내었다. 그림 3(a)는 고결화제의 함유량이 증가됨에 따라 미소변형률에서의 강성이 증가됨을 분명하게 보여준다. 전단파속도의 전개는 미량의 소금(0.007M보다 더 작은)을 포함한 시료와 비고결된 시료에서의 거동이 거의 동일함을 보여준다(Cho and Santamarina 2001). 3~5%의 포화도에서, 미량의 소금을 포함한 시료의 전단파속도는 모세관력의 영향으로 가장 높은 값에 도달한다(Cho and Santamarina 2001; Truong et al. 2009). 그러나, 0.034M 이상의 농도에서 소금이 고결될 때, 전단파 속도의 전개에 있어 고결작용의 효과는 분명히 나타난다.

포화도가 2~5%이하일 때, 모세관력은 입상체의 강성을 증가시킨다. 조립토의 구조는 건조 후 모세관력이 없어진다 할지라도 고결작용의 효과로 인하여 유지된다. 소금의 고결작용은 거의 건조된 상태의 미소변형률에서의 강성에 대한 모세관력의 효과를 유지하며, 더욱 결합력이 커짐에 따라 강성을 증대시킨다. 소금의 고결작용은 낮은 구속압하에 있는 조립재의 거동에 주요한 역할을 한다. 하지만 고결화 현상이 발생함에 따라, 시료 안에 존재하게 되는 소금으로 인한 흡입력의 증가는 뚜렷이 관찰되지 않았다.

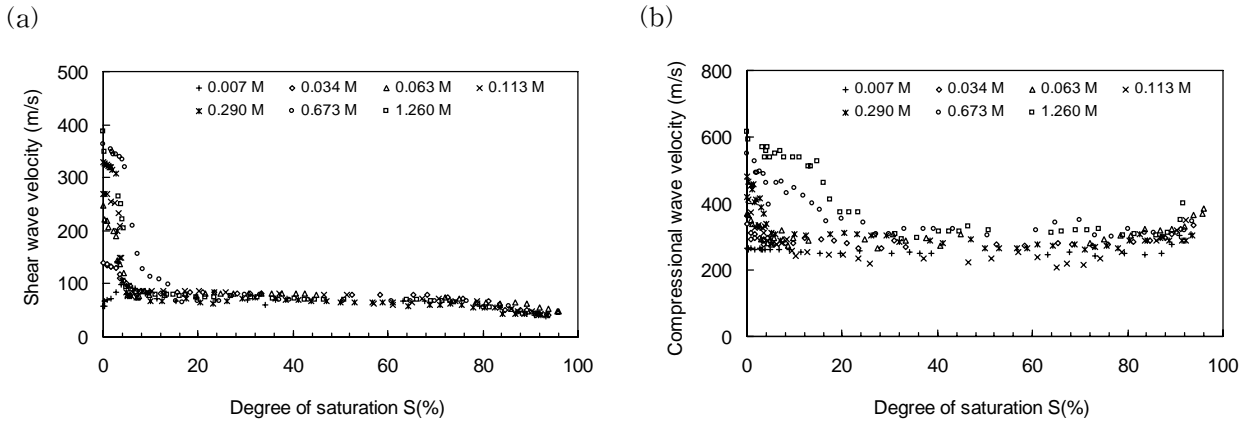


그림 3. 소금의 고결작용에 따른 탄성과 속도와 포화도의 관계: (a) 전단파 속도; (b) 압축파 속도

4.3 압축파 속도

포화도가 90%보다 작은 경우, 소금물의 농도에 관계없이 물이 증발하는 동안 압축파의 속도는 안정적이고 거의 일정하다. 소금농도가 0.673M보다 낮은 경우, 압축파 속도의 변화는 거의 같았다. 포화도에 따른 압축파의 속도변화는 포화도에 따른 전단파의 속도변화와 유사한 경향을 보였다. 포화도 감소에 따른 압축파속도의 변화는 포화도가 약 15~10%인 곳에서부터 크게 바뀌게 된다. 그러나, 소금농도가 0.673M보다 높은 시료에서는 압축파의 속도가 급격하게 변하는 포화도는 20~25%로 나타났다.

소금농도에 따른 전단파와 압축파사이의 속도 변화의 차이점은 주로 파장과 센서 크기의 차이로부터 발생한다. 일반적으로, 벤더 엘리먼트의 공진주파수는 약 5kHz이고 전단파 속도는 약 70~90m/s이므로, 전단파의 파장은 약 14~18mm이다. 또한, 일반적인 피에조 디스크 엘리먼트의 주파수, 압축파 속도, 그리고 파장은 각각 약 20kHz, 250~350m/s, 13~18mm이다. 따라서, 프레넬 영역(Fresnel zone)의 크기는 전단파와 압축파가 유사하다. 그러나, 피에조 디스크 엘리먼트의 크기가 벤더 엘리먼트보다 상당히 크기 때문에, 발신기로부터 수신기까지의 영향구역은 피에조 디스크 엘리먼트에서 훨씬 크다. 결과적으로 건조중인 시료의 속도변화는 피에조 디스크 엘리먼트가 더 예민하게 측정한다. 소금의 고결현상은 모세관력에 의해 시료전체에서 비균질하게 발생할 것으로 판단된다. 국부적인 고결작용은 예민한 트랜스듀서에 의해 더 빨리 포착할 수 있을 것이다.

4.4 소금 농도와 탄성과 속도의 관계

응력을 고려하지 않은 미소변형율에서의 강성과 고결된 정도를 예측하기 위하여 확립된 모델은 소금물의 농도(sc) 또는 등가고결화제 함유량(cc)에 기초를 두고 있다. 여기서 고결화제 함유량이란 건조된 입상재료에 대한 고결화제의 중량비이다. 탄성과 속도와 소금농도 혹은 고결화제 함유량은 거듭제곱 관계식으로 관계지을 수 있다(Nasser and Al-Manasser 1987).

$$V_{s(p)} = A(sc)^B \quad (3)$$

또는

$$V_{s(p)} = a(cc)^b \quad (4)$$

여기서, A, B, a, 그리고 b는 실험적으로 결정되는 상수이다. 측정된 전단파 및 압축파의 속도와 소금농도 또는 고결화제 함유량의 관계를 그림 4에 나타내었다. 추가적으로, 식 (3), (4)에 근거한 고결된 시료의 회귀분석 모델도 그림 4에 나타내었다. 실험결과, 상수 A, B, a, 그리고 b의 값은 각각 380, 0.15,

350, 0.16이었고, 소금농도 또는 고결화제 함유량에 대한 전단파 속도는 그림 4(a)에 나타내었다. 압축파 속도의 경우, 상수 A, B, a, 그리고 b의 값은 각각 600, 0.17, 550, 0.17이었으며, 그림 4(b)에 나타내었다.

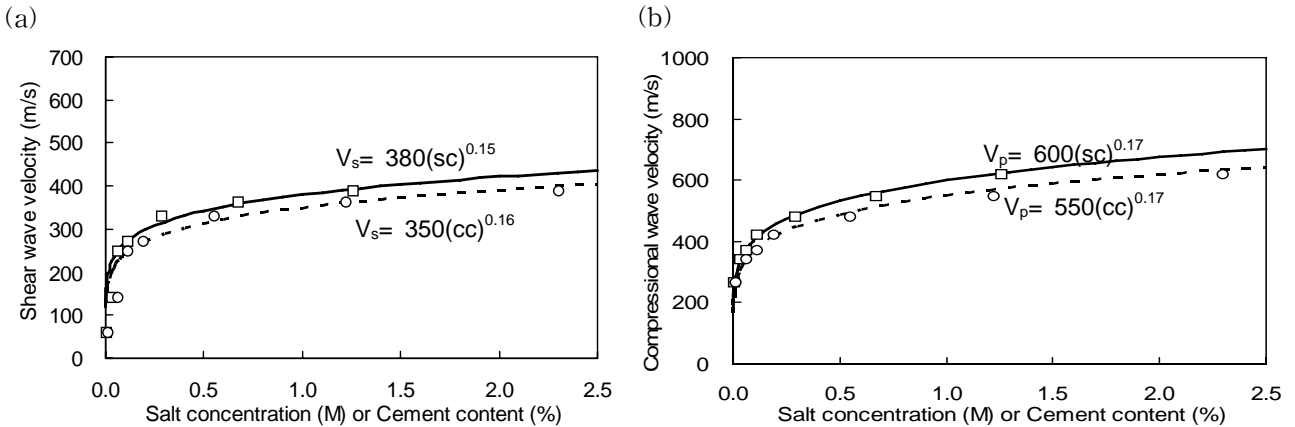


그림 4. 탄성과 속도와 소금농도(sc) 또는 고결화제 함유량(cc)의 관계: (a) 전단파 속도; (b) 압축파 속도

4.5 미소변형률에서의 강성

실험결과 얻어진 미소변형률에서의 강성과 미세역학 모델(Fernandez and Santamarina 2001)에 기초하여 산정된 강성을 그림 5에 나타내었다. 해석적 방법으로 계산하기 위해, 입자의 비중은 $G_s=2.52$, 체적변형계수 $B_g= 4.5 \times 10^9$ Pa, 그리고 포아송비는 $\nu_g=0.25$ 로 가정하였다. 흙 입자구조의 포아송비는 측정된 전단파 및 압축파 속도에 기초하여 산정되었다. 높은 소금농도의 시료에서, 강성은 등방구속압에 독립적이었다. 그러나, 낮은 소금농도의 시료에서는 소금의 고결작용이 지반의 강성에 거의 영향을 주지 않았다.

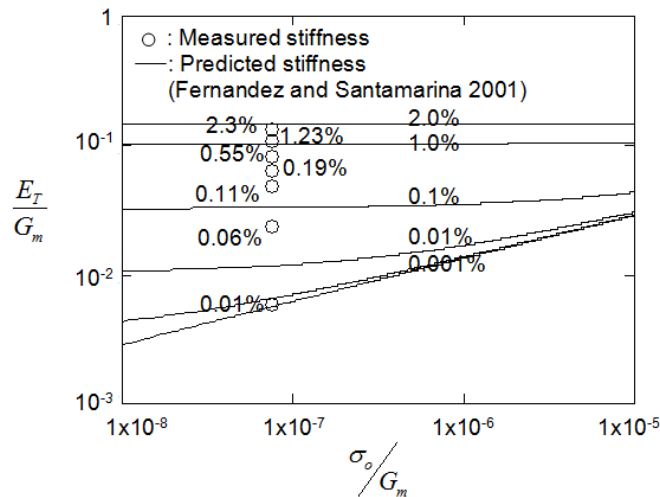


그림 5. 미소변형률에서의 강성 비교

5. 결론

고결된 소금-조립토의 미소변형률에서의 강성은 실험적인 방법으로 연구되었다. 평균직경이 0.5mm 인 글라스비즈를 다양한 농도의 소금물로 포화시켰다. 구멍이 뚫린 셀은 소금의 고결작용이 더 균등하게 발생하도록 설계되었다. 전단파와 압축파는 각각 벤더 엘리먼트와 피에조 디스크 엘리먼트를 사용하여 건조과정동안 지속적으로 측정하였다. 건조완료 후, 고결된 시료안의 소금은 시료의 전기전도율을 측정하여 남아 있는 소금의 양을 결정하였다.

가볍게 고결된 시료의 경우(소금 농도 $\leq 0.007M$), 탄성파의 속도는 시료가 완전히 건조되었을 때 모세관력에 의해 영향을 받는다. 만약 소금농도가 $0.034M$ 보다 크다면, 고결작용은 조립토의 강성에 큰 영향을 끼치기 시작한다. 건조과정의 마지막 단계($S=0\sim 5\%$)에 도달하면, 고결작용으로 인하여 흙 구조에서 모세관력의 영향은 지속된다. 미소변형률에서의 강성은 고결정도가 증가함에 따라 증가한다. 실험 데이터의 회귀분석결과는 낮은 구속압에서 탄성파의 속도가 소금농도 또는 고결화제 함유량의 증가함에 따라, 거듭제곱의 관계를 나타내며 증가한다는 것을 보여준다. 고결된 시료의 강성은 미세역학에 근거하여 해석적인 방법으로 산정된 결과와 매우 잘 일치하였다.

감사의 글

본 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2009-0075809)을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

엄용훈, 쯡광홍, 변용훈, 이종섭 (2009), “용해된 소금의 고결화에 따른 탄성파 특성”, *한국지반공학회 논문집*, 제 25권, 제 5호, pp 75~86.

Abduljawwad, S. N., and Al-Amoudi, O. S. B. (1995), “Geotechnical behaviour of saline sabkha soils”, *Geotechnique*, 45(3), 425-445.

Acar, Y. B. and El-Tahir, E. A. (1986), “Low strain dynamic properties of artificially cemented sand”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 112(11), 1001 - 1015.

Carraro, J. and Salgado, R. (2004), “Mechanical behavior of non-textbook soils”, Joint Transportation Research Program, Project No. C-36-50X, Purdue University.

Chang, C. S., Misra, A., and Sundaram, S. S. (1990), “Micromechanical modelling of cemented sands under low amplitude oscillations”, *Geotechnique* 40(2), 251-263.

Chang, T. S. and Wood, R. D. (1992), “Effect of particle contact bond on shear modulus”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 118(8), 1216-1233.

Cho, G. C. and Santamarina, J. C. (2001), “Unsaturated particulate materials - particle-level studies”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 127(1), 84-96.

Consoli, N. C., Schnaid, F., and Milititsky, J. (1998), “Interpretation of Plate Load Tests on Residual Soil Site”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 124(9), 857-867.

Cuccovillo, T., and Coop, M. R. (1997), “Yielding and pre-failure deformation of structured sands”, *Geotechnique*, 47(3), 491-508.

Cuccovillo, T., and Coop, M. R. (1999), “On the mechanics of structured sands”, *Geotechnique*,

49(6), 741-760.

- Fernandez, A. L. and Santamarina, J. C. (2001), "Effect of cementation on the small-strain parameters of sands", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 38(1), 191-199.
- Fonseca, A. V. D., Fernandes, M. M., and Cardoso, A. S. (1997), "Interpretation of a footing load test on a saprolitic soil from granite", *Geotechnique*, 47(3), 633-651
- Ismael, N. F. (2001), "Axial Load Tests on Bored Piles and Pile Groups in Cemented Sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127(9), 766-773.
- Khan, Z., Majid, A., Cascante, G.; Hutchinson, D. J., and Pezeshkpour, P. (2006), "Characterization of a cemented sand with the pulse-velocity method", *Canadian Geotechnical Journal*, 43(3), 294-309.
- Leroueil, S. and Vaughan, P. R. (1990). "The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks", *Geotechnique*, 40(3), 467-488.
- Mitchell, J. K. and Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc
- Nasser, K. W., and Al-Manasser, A. A. (1987). Comparisons of nondestructive testers of hardened concrete. *ACI Material Journal*, 85(5): 374 - 380.
- Pestana, J. M. and Salvati, L. A. (2006), "Small-strain behavior of granular soils. I: Model for cemented and uncemented sands and gravels", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 132(8), pp. 1071-1081.
- Sangrey, D. A. (1972), "Naturally cemented sensitive soils", *Geotechnique*, 22(1), 139-152.
- 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.
- Saxena, S. K., Avramidis, A. S., and Reddy, K. R. (1988), "Dynamic moduli and damping ratios for cemented sands at low strains", *Canadian Geotechnical Journal*, 25(2), 353 - 368.
- Truong, Q. H., Eom, Y. H. and Lee, J. S. (2009), "Characteristics of Elastic Waves according to Cementation of Dissolved Salt", *Vadose Zone Journal* (Submitted).
- Walsh, K. D., Houston, S. L., and Houston, W. N. (1995), "Development of t-z Curves for Cemented Fine-Grained Soil Deposits" *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 121(12), 886-895.