

포화도, 간극비 및 응력에 따른 주문진사의 탄성파 속도

Elastic Wave Velocity of Jumunjin Sand Influenced by Saturation, Void Ratio and Stress

이 정 훈¹ Lee, Jung-Hwoon

윤 태 섭² Yun, Tae-Sup

Abstract

The penetration testing provides 1 dimensional profiles of properties applicable to limited investigation areas, although N-value has been linked to a wide range of geotechnical design parameters based on empirical correlations. The nondestructive test using elastic waves is able to produce 2 or 3 dimensional property maps by inversion process with high efficiency in time and cost. As both N-value and elastic wave velocities share common dominant factors that include void ratio, degree of saturation, and in-situ effective stress, the correlation between the two properties has been empirically proposed by previous studies to assess engineering properties. This study presents the experimentally measured elastic wave velocities of Jumunjin sands under at-rest lateral displacement condition with varying the initial void ratio and degree of saturation. Results show that the stress condition predominantly influences the wave velocities whereas void ratio and saturation determine the stress-velocity tendency. The correlation among the dominant factors is proposed by multiple regression analysis with the discussion of relative impacts on parameters.

요 지

관입시험은 한정된 범위에서 1차원적 정보를 얻을 수 있으나, N치는 다양한 지반설계정수와 실험적으로 연관되어 있다. 탄성파를 이용한 비파괴 검사는 역산 과정을 통해 비용 및 시간에 효율적으로 2차원 및 3차원 물성에 대한 지도를 얻을 수 있으며, N치와 탄성파 속도는 간극비, 포화도, 유효응력 등에 의해 좌우된다. 따라서 N치와 탄성파 속도간의 경험적 관계들이 제안되어 왔다. 본 연구는 다양한 간극비와 포화도를 갖는 주문진사에 대해 정지토압조건에서 탄성파를 실험적으로 측정하였다. 그 결과 하중 조건이 간극비 및 포화도에 비하여 가장 영향을 주는 요소로 나타났으며, 간극비와 포화도는 응력-속도 관계의 경향에 영향을 주었다. 각 영향인자간의 관계를 다중회귀분석을 통해 상관식으로 나타내었다.

Keywords : Wave velocity, Void ratio, Saturation, Multiple regression

1 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사 (Member, Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ.)

2 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-5805, Fax: +82-2-364-5300, taesup@yonsei.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최현장에서는 표준관입시험 등을 통하여 N값을 용이하게 구할 수 있기 때문에 N 값을 이용하여 지반정수 및 지반공학적 설계값을 산출할 수 있는 경험적인 관계식이 많이 제안되어 왔다. 그러나 N값은 관입시험을 통하여 얻는 1차원 데이터이며, 이를 이용해 광범위한 지역에 적용하기에는 무리가 따른다. 이에 반해 탄성과 실험은 광범위한 지역에서 3차원 정보를 얻을 수 있기 때문에 보다 실용적으로 활용이 가능하다. 탄성과 속도는 간극비, 구속압, 함수비, 점성토의 함유량, 건조단위중량, 선행압밀 하중, 입자 크기 등 다양한 요소에 의해 영향을 받으며, 압축파는 간극수의 포화유무에, 전단파는 간극비와 구속압, 응력 이력, 함수비에 크게 좌우된다(Woods, 1991; Ayres, 1999). 특히 하중이 증가함에 따라 탄성과의 속도는 지수 함수로 증가하며, 그 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다(Santamarina et al., 2001).

$$V[m/s] = \alpha[m/s] \left(\frac{\sigma'_m [kPa]}{1 [kPa]} \right)^\beta \quad (1)$$

여기서 α 는 하중이 1kPa 인 상태에서의 초기 탄성과 속도를 나타내며, 초기 간극비, 입자 배열 및 재료 물성에 따라 좌우된다. β 는 입자간 접촉 상태, 입자 형상, 상대 밀도에 의해 달라진다. σ'_m 은 수직응력과 수평응력의 평균값이다.

탄성과 속도 측정은 광범위한 지역에서 적은 비용으로 빠르게 3차원 정보를 얻을 수 있는 점에서 관입시험보다 유리하나, N값은 다양한 지반정수 및 지반공학설계값과 경험적인 관계식이 많이 제안되어 있기 때문

에 현장에서는 빈번히 쓰이고 있다. 그러나 관입시험을 통한 데이터는 1차원이며, 광범위한 지역에서 정확한 정보를 얻기 위해서는 비용이 매우 크다. 이에 따라 간극비, 포화도, 점성토의 비중 등 다양한 지반 물성과 탄성과 속도의 관계를 경험적으로 규명하는 연구(Han, 1986; Tosaya et al., 1982; Cho and Santamarina, 2000)가 제안되어 왔으며 특히 현장에서 빈번하게 사용되는 N값과의 관계를 규명하는 연구(Ohta and Goto, 1978; Inazaki, 2006; Hasancebi and Ulusay, 2007)가 진행되었다.

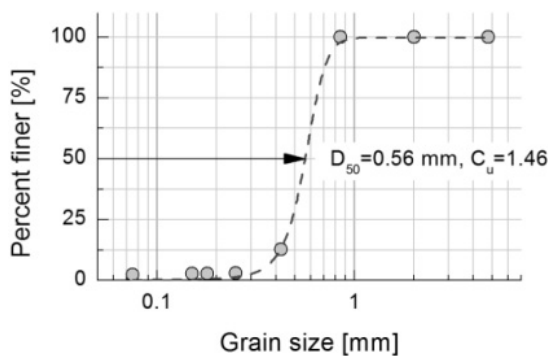
본 연구에서는 주문진사에서 간극비, 포화도 및 하중에 의한 전단파 속도의 변화를 관찰하였다. 간극비와 포화도가 다른 12가지 주문진사 시편을 이용해 정지토압 상태에서 각 하중 단계에 따라 전단파 속도를 측정하였다. 간극비, 포화도 및 하중 단계에 따른 탄성과의 속도 변화를 관찰하고 다중 회귀분석을 통하여 이들 지반 물성치와 전단파 속도와의 관계를 제안하였다.

2. 지반정수 및 탄성과 실험

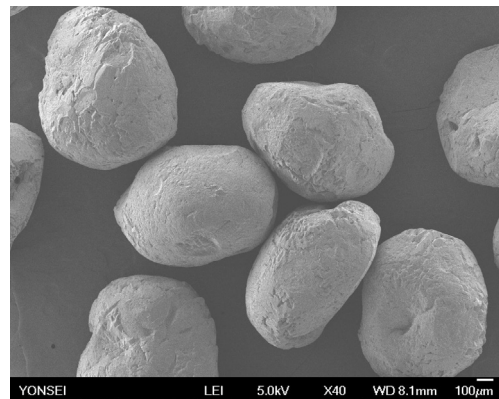
2.1 시료

실험에 사용된 주문진사는 평균 입경 $D_{50} = 0.56\text{mm}$ 이며 균등계수(Coefficient of Uniformity, C_u)는 1.46으로 모난 입자 형상을 가지고 있다. 입도 분포는 Fig. 1의 (a)와 같으며, Fig. 1의 (b)는 사용된 주문진사의 전자주사현미경 이미지를 나타내고 있다.

연구 목적에 따라 포화도 및 간극비의 영향을 보기 위하여 시료는 포화도 및 상대밀도를 다르게 하여 준비하였다. 준비된 시료는 Table 2와 같다. 상대밀도는 지반공학에서 사용되는 다수의 경험식이 상대밀도와 지



(a) GSD Curve



(b) SEM image

Fig. 1. GSD Curve and SEM image of Jumunjin Sand

Table 1. Relation between wave velocity and soil indexes

Proponent	Formula	Related value	Rmks
Ohta and Goto (1978)	$V_s = 85.34N^{0.348}$	N value	
Inazaki (2006)	$N = (1.61)(10^{-6}) V_s^{2.9}$	N value	
Hasancebi and Ulusay (2007)	$V_s = 90N^{0.308}$	N value	
Han (1986)	$V_s = 3.03 - 3.78n$ $V_p = 5.02 - 5.63n$	Porosity	
Hardin and Richart (1963)	$V_s = (m_1 - m_2e)(p')^{0.25}$	Void ratio, effective stress	
Tosaya et al. (1982)	$V_s = 3.52 - 4.19n - 1.89C$	Void ratio, volumetric ratio of clay	C: volumetric ratio of clay
Cho and Santamarina (2000)	$[V_s]_{\max} = 2,200/\sqrt{D_{10}}$	Effective size	$5\mu m \leq D_{10} \leq 300\mu m$

Table 2. Cases in experimentation

Saturation [%]	Initial unit weight [kN/m ³]	Initial void ratio	Compression Index
0	1.485	0.763	0.058
0	1.539	0.702	0.065
0	1.598	0.639	0.049
25	1.519	0.867	0.095
25	1.636	0.710	0.06
25	1.704	0.629	0.059
50	1.675	0.804	0.072
50	1.751	0.730	0.063
50	1.827	0.615	0.049
100	1.914	0.772	0.072
100	1.952	0.701	0.049
100	1.992	0.633	0.039

반설계정수의 상관관계로 나타내지는 만큼 지반재료의 역학적 거동에서 중요하다, 포화도에 따라서 최대 및 최소간극비가 달라지는데 본 실험에서는 포화도가 다른 재료들의 느슨하거나 조밀한 정도를 일괄적으로 나타내기 위하여 간극비로 나타내었다. 포화도는 0, 25, 50, 100%가 되도록 준비하였으며 각 포화도마다 3종류의 간극비를 갖도록 하였다. 시료는 목표한 간극비 및 상대 밀도가 되도록 다짐 또는 건조낙사법(air pluviation)을 사용하여 계측 셀 내에 위치시켰으며, 불포화 시료는 목표 간극비 및 포화도에 기초하여 사전에 물과 주문진사의 중량 비를 결정하고 혼합하였다. 압축지수는 실험 과정에서 하중에 따른 부피 변화를 측정하여 산출하였다.

2.2 실험 장비

계측 셀은 정지토압상 상태에서 수직하중에 따른 시료의 침하, 수직 방향의 전단파 속도를 측정할 수 있도록

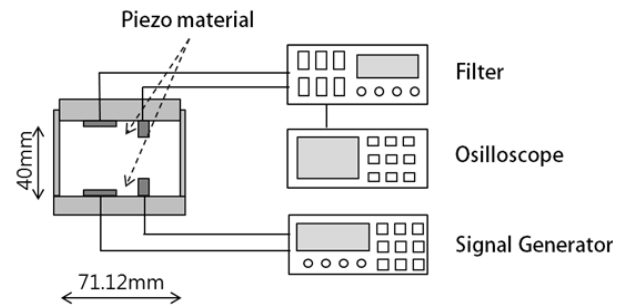


Fig. 2. Experimental setting

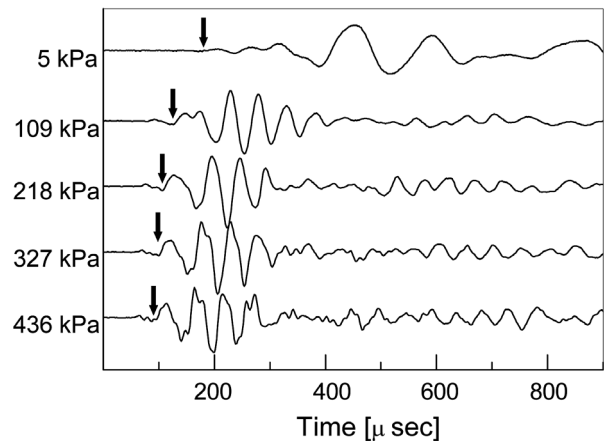


Fig. 3. Wave trace of S-Wave (↓: First arrival)

설계되었다. 셀은 강화 플라스틱 재질로 구성되어 있으며 시료의 직경은 71.12mm, 일반적인 높이는 약 40mm이며 셀의 두께는 10mm로 제작되었다. 시료가 위치하는 하단과 상단에 전단파를 발생시키는 벤더 엘리먼트(Bender Element)를 위치시켰다. 이 때 벤더 엘리먼트의 높이 때문에 실제 전단파가 통과하는 거리는 30mm가 된다. 시료의 상단 및 하단에 다공질 암석판을 배치하여 배수가 이루어지도록 하였다. 실험 셀과 장치의 모식도는 Fig. 2와 같다. 신호는 신호발생기(Agilent, 34401A)

를 통해 25Hz, 5V의 Square형 파형을 생성하였다. 시료를 통과하여 측정 센서를 통해 나온 신호는 filter를 이용해 500Hz~20,000Hz 이외의 신호를 제거한 후 증폭하여 오실로스코프로 확인하였다.

Fig. 3은 포화도 0%, 초기 간극비 0.763의 느슨한 시료에서 하중을 가함에 따라 오실로스코프에서 전단파의 wave trace를 나타낸 것이다. 하중이 가해짐에 따라 신호의 도착시간이 앞당겨지고 있음을 확인할 수 있다. 하중은 최초 탐 캡을 씌운 5kPa부터 109, 218, 327, 436 kPa까지 5단계로 진행하였고, 사질토이기 때문에 각각의 하중 단계마다 15분의 시간을 두어 침하가 충분히 이루어지도록 하였다. 하중 단계마다 시료의 높이, 전단파의 속도를 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 간극비, 포화도 및 하중에 따른 효과

Fig. 4는 포화도는 0으로 같고 초기 간극비가 각각 다

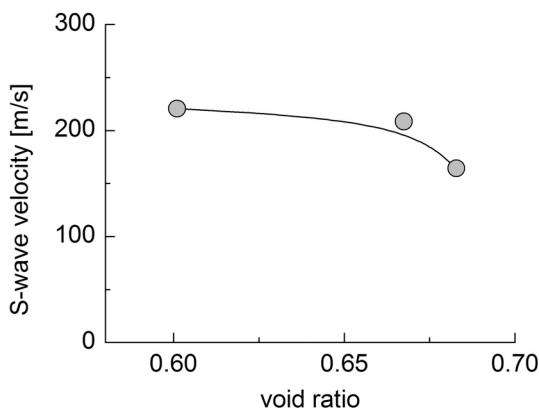


Fig. 4. Evolution of S-wave velocity with varying void ratio (Saturation=0%, Load=109 kPa)

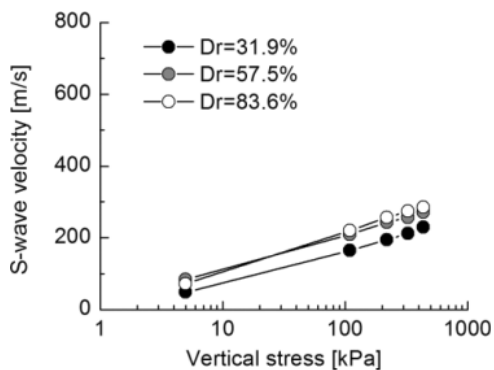


Fig. 5. Evolution of S-wave velocity with varying applied loads

른 시료에서 동일한 하중(109kPa)이 가해졌을 때 전단파 속도를 측정할 것이다. 간극비가 감소함에 따라 탄성파 속도는 증가한다. 시료의 초기 상태에 따라서 탄성파 속도는 달라지며 이는 시료가 조밀할수록 입자간 연결 상태가 좋아지기 때문이다.

탄성파 속도는 하중이 증가함에 따라 지수 함수로 증가하게 된다. Fig. 5는 포화도 0%의 각기 다른 간극비를 갖는 세 시료의 전단파 속도를 나타낸 것이다. 전단파 속도는 로그 스케일의 하중에 대해서 속도가 선형적으로 증가하고 있다. 또한, 이때에도 하중이 가해지지 않아 시료와 셀의 고정이 불확실한 첫 번째 단계를 제외한 모든 하중 단계에서 조밀한 시료일수록 빠른 속도를 갖는다.

Fig. 6은 본 실험에서 사용된 12종 시료에 대해서 간극비에 따른 전단파 속도를 보여주고 있다. 점선으로 연결된 계열은 같은 시료에 대해서 하중이 가해짐을 나타내고, 같은 포화도를 같은 모양으로 나타내었다. 각 포화도에 대한 상대밀도를 같은 색으로 나타내었다. 모든 포화도 및 초기 간극비를 갖는 시료에 대해서 하중이 가해짐에 따라 전단파 속도가 증가하는 양상이 나타난다. 하중이 증가함에 따라서 시료가 압축되어 간극비가 감소한다. 그러나 이 때 감소하는 간극비는 시료의 최초 간극비에 비하면 변화 폭이 작은 데 비하여, 하중이 증가하는 폭은 초기 간극비에 의한 차이보다 대단히 크다. 하중에 의한 간극비 감소 효과도 속도에 영향을 미치나, 간극비 변화보다는 응력 증가에 따른 접촉 면적의 증가로 인해 전단파 속도는 간극비 보다 하중 상태에 민감하게 반응한다. 하중에 따른 간극비 변화와 속도 변화의 기울기는 각기 다른데, 이는 초기 간극비와 포화도에 영향을 받게 된다. 초기 간극비가 클수록 탄성파 속도는 낮지만 하중에 따라 증가하는 속도는 더 크게 나타난다.

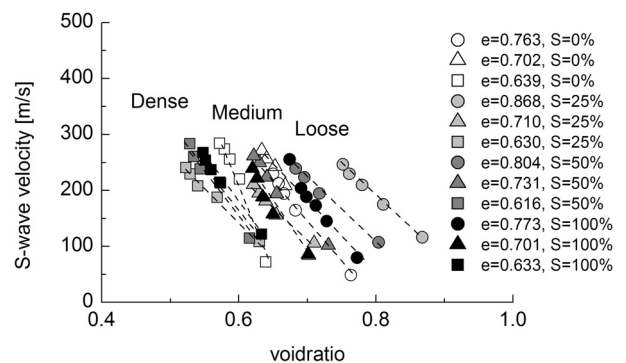


Fig. 6. S-Wave velocity changes with applied and initial conditions

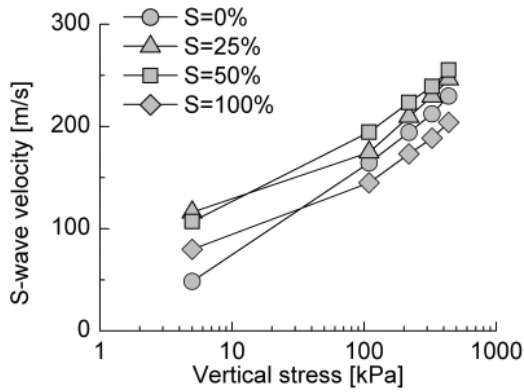


Fig. 7. Evolution of S-wave velocity with varying saturations

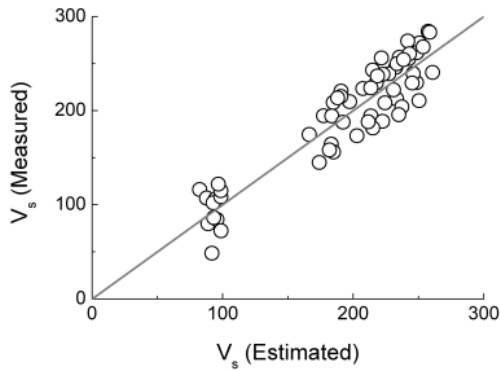


Fig. 8. Comparison with measured and estimated S-Wave velocity

Fig. 7은 느슨한 시료에서 각각의 포화도에 따라 하중에 따른 전단파 속도 변화를 나타낸 것이다. 포화도에 따른 전단파의 속도 변화는 포화도 100%의 경우에서 오히려 가장 느리게 나타난다. 전단파는 물을 통과하지 못하기 때문에 속도에 영향을 주지 못하며 이에 따라 포화도와 속도의 상관성이 낮게 나타난다.

3.2 간극비 및 포화도와 전단파의 경험식

이상의 실험 결과가 나타냄과 같이 탄성파 속도와 간극비, 포화도 및 하중이 관계를 가지고 있기 때문에 다중회귀를 통한 경험식의 산출이 가능하다. 기존 연구 결과와 본 실험에서의 경향을 참고하여 전단파에 대해 다음과 같은 관계식을 산정하였다.

$$V_s = 1.9270(1 - e)^{0.1746} (S/100)^{-0.0250} \sigma^{0.2076},$$

$$R^2 = 0.8613 \quad (2)$$

식 (4)에서 정의한 간극비와 함수비의 항은 식 (1)의 α 계수와 같은 물리적 의미를 갖는다. 즉 이상의 식은

식 (1)에서 α 에 영향을 끼치는 요소 중 포화도 및 간극비를 세분화하여 나타낸 것이다. 위 식을 통해 실험 결과와 비교한 것은 Fig. 8에 나타내었다. 이와 같은 관계식을 통하여 탄성파 측정 실험을 하지 않고도 현장에서 얻을 수 있는 간극비, 포화도, 하중을 통해 탄성파 속도를 예측할 수 있다. 관계식을 통하여 탄성파 속도는 하중에 가장 민감하게 반응하며, 포화도의 경우 전단파는 거의 영향을 미치지 못함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 간극비 및 포화도가 다른 주문진 표준사 시료에 대하여 정지토압 상태에서 하중에 따른 전단파 속도를 측정하였다. 이를 통해 각각의 인자에 따라서 탄성파 속도가 변화하는 양상을 살펴보았다.

간극비가 감소할 경우 전단파 속도는 선형으로 증가하며, 하중이 증가함에 따라서 전단파 속도는 증가한다. 간극비와 하중은 모두 입자의 연결 상태와 관련이 있고 하중에 의해서 간극비 역시 감소하나, 같은 하중 상태에서 간극비에 의한 탄성파의 속도에 비하여 하중에 의한 탄성파 속도가 훨씬 크게 변화한다. 초기 간극비 및 포화도는 하중에 의한 전단파 속도 변화 양상에 영향을 준다. 초기 간극비가 클수록 전단파 속도는 느리지만 하중에 따라서 증가하는 속도는 빨라진다. 포화도에 따른 영향은 전단파에서 거의 드러나지 않는다. 따라서 하중이 지배적인 요소이며, 초기 간극비 및 포화도는 하중에 따른 탄성파 속도의 기울기에 영향을 줄을 확인할 수 있다.

간극비, 포화도, 하중 등을 매개변수로 회귀분석을 통하여 탄성파 속도와 지반정수간의 경험적 관계식을 제안하였으며, 이와 같은 경험식을 이용하여 탄성파 속도를 측정하여 지반정수를 예측할 수 있다. 회귀분석을 통한 결과에서도 하중이 탄성파 속도에 영향을 주는 가장 중요한 요소임을 확인할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 비파괴 융합조사기법 및 지반정수 평가시스템 개발사업의 연구비 지원(11기술혁신 E02)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Ayres, A. and Theilen F. (1999), Relationship between P and S wave velocities and geological properties of near surface sediments of the continental slope of the Barents Sea, *Geophysical Prospecting*, Vol.47, No.4, pp.431-441.
2. Cho, G. C. and Santamarina, J.C. (2001), Unsaturated particulate Materials - Particle Level Studies, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.1, pp.84-96.
3. Han, D. and Nur, A. (1986), The effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones, *Geophysics*, Vol.51, No.11, pp.2093-2107.
4. Hardin, B. and Richart Jr, F. (1963), Elastic wave velocities in granular soils, *Journal of Soil Mechanics & Foundation Div*, Vol. 89, Proc. Paper 3407, pp.33-65.
5. Hasancebi, N. and Ulusay, R. (2007), Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol.66, No.2, pp.203-213.
6. Inazaki, T. (2006), Relationship between S-wave velocities and geotechnical properties of alluvial sediments, *SAGEEP2006*, Environment and Engineering Geophysical Society, pp.1296.
7. Ohta, Y. and Goto, N. (1978), Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes, *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol.6, No.2, pp.167-187.
8. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001), *Soils and Waves: Particulate materials behavior, characterization and process monitoring*, Wiley, New York.
9. Tosaya, C. A. (1982), *Acoustical properties of clay-bearing rocks*, Ph.D thesis, Stanford University.
10. Woods, R. (1991), Soil properties for shear wave propagation, *Shear Wave in Marine Sediments*, pp.29-39.

Received : April 14th, 2014

Revised : April 18th, 2014

Accepted : April 18th, 2014