

초음파를 이용한 흙의 동적계수측정에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Ultrasonic Testing for Determining Dynamic Soil Moduli

민 덕 기*¹
Min, Tuk - Ki
김 문 득*²
Kim, Moon - Deuk

Abstract

Determination of dynamic shear modulus of soil was made by measuring directly the velocity of ultrasonic shear waves transmitted through the specimen.

The PUNDIT, a generator and detector of ultrasonic waves, has been used to measure the propagation velocity. Forty-six tests of compacted soil at seven different void ratios and seven varying degrees of saturation with four types of materials were made in this study.

The primary importance in this study was the investigation of the relations among the parameters which influenced G-modulus.

As a results of analysis, the dynamic shear modulus of soil tends to decrease with an increase of void ratio, and also it is affected by soil types. In case of using PUNDIT, the proper range of the specimen length is from 5cm to 8cm. And the degree of saturation doesn't affect the dynamic shear modulus of soil.

요 지

시편을 통과하는 초음파의 속도를 측정함으로써 흙의 동전단 탄성계수의 측정을 시도하였다. 초음파의 발생 및 감지장치인 PUNDIT를 사용하였으며, 4종류의 시료에 따른 공극비 7, 포화도 7종류에 대해서 총 46개의 실험을 실시하였다.

본 연구는 시료의 공극비 및 포화도, 시료의 종류등이 동전단 탄성계수에 미치는 영향에 대해서 분석하였다. 분석 결과, 흙의 동전단 탄성계수는 공극비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 시료의 종류에 의해서도 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다. 또한 본 실험장치인 PUNDIT를 사용할 경우, 시편의 길이는 5cm-8cm가 적당하였으며, 포화도의 영향은 거의 없는 것으로 판단되었다.

*¹ 정희원, 울산대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*² 울산대학교 대학원

1. 서 론

흙이나 암의 동적 거동의 정확한 예측은 내진 설계 뿐만 아니라 기계진동을 받는 기초의 설계나 도로 포장구조의 기층 및 보조기층의 설계 등에 있어서 매우 중요하다. 지금까지 이들 설계에는 정역학적인 해석방법이 주로 사용되어 왔으나, 이는 정적 실험에 근거한 파괴실험, 즉 매우 큰 변형률 상태에서 구한 계수들을 설계에 적용시키고 있기 때문에 실제 동적하중을 받고있는 현장 상태를 대표하고 있다고 하기 어렵다. 일반적으로 현장에서 발생하는 실제 변형률은 매우 낮은 상태로, 이와 같은 변형률 하에서의 각종 동적계수들을 구하는 것은 동적인 문제해석에 있어서 매우 중요하며, 최근 이에 대한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다.

이들 흙의 동적계수를 구하는 방법들로서, 그 대표적인 현장 실험방법으로는 크로스홀 실험(cross-hole method)^{1,2)}, 다운홀 실험(down-hole method)³⁾, SASW(spectrum analysis of surface wave)^{4, 5)} 등이 있으며, 이들은 대부분 충격에 의해 탄성파를 발생시켜 조사 대상의 매질을 통과하는 속도를 측정함으로써, 이로부터 각종 동적계수들을 추정하는 방법이다. 또한 대표적인 실내 실험방법으로는 동적삼축 실험(dynamic triaxial test), 공진주 실험(resonant column test), 초음파 실험⁶⁾(ultrasonic test) 등이 있다. 이들 실험방법들은 일종의 비파괴 실험으로, 한 시료에 대하여 여러번의 실험이 가능하여 동역학적 계수 추정에 널리 사용되고 있다.

본 연구는 이들 실내 실험방법중 초음파를 이용한 흙의 동적 계수의 추정에 대한 것으로, 초음파 실험은 변형률이 매우 낮은 상태에서 진행되기 때문에(일반적으로 10^{-4} 이하) 초음파에 대하여 기존의 탄성이론을 적용시킬 수 있음에도 불구하고 아직까지는 공진주 실험이나 동적삼축 실험등의 이용보다는 그 사용빈도가 적은 실정이다. 1978년 Stephenson⁶⁾은 공극비와 포화도에 따른 동탄성 계수의 영향에 초음파의 이용을 시도하였고, Hugo 등⁷⁾은 초음파 실험의 결과를 동적삼축 실험 및 크로스 홀 실험의 결과와 비교

분석하였으며, Zhao 등⁸⁾은 암의 감쇠효과에 대하여 초음파를 이용하여 연구한 바 있다. 그리고 ASTM⁹⁾에는 초음파를 이용한 암의 탄성계수 측정방법이 규정되어 있으나, 흙에 대해서는 아직까지 그에 대한 규정이 없을 뿐 아니라 연구도 국내외적으로 미미한 실정이다.

본 연구는 초음파 발생기인 PUNDIT를 사용하여 흙 시편의 통과시간을 측정하고 이를 탄성이론에 적용하여 각종 동적계수들을 측정해 보고자 한다. 또한 공극비, 포화도 등의 물성변화 및 시료의 종류, 크기에 따른 이들 계수들의 영향을 밝힘으로써, 초음파의 토질공학 분야에서의 적용 가능성 여부를 검토하고 또 그 이용도를 확장시키는데 본 연구의 목적이 있다. 본 연구에서는 4종류의 시료에 대해서 공극비, 포화도, 시료의 길이 및 시료의 종류 등에 따른 이들 계수들의 변화를 중심으로 실험을 실시하였다.

2. 초음파(ultrasound)의 이론

초음파 실험은 매우 낮은 변형률하(일반적으로 10^{-4} 이하)에서 실험이 실시되는 일종의 비파괴 실험이다. 따라서 탄성이론을 이용하여 각종 계수들을 구할 수 있으며, 측정시 시편의 손상없이 반복실험을 할 수 있다. 대부분의 동역학적 실험방법들은 파의 전달속도로부터 적절한 탄성이론 공식들을 이용하여 필요한 동적계수들을 구하고 있다.

일반적으로 충격등에 의해 발생하는 탄성파는 크게 체적파(body wave)와 표면파(surface wave)의 두그룹으로 나눌 수 있다. 체적파는 다시 압축파(P-wave, compression wave)와 전단파(S-wave, shear wave)로, 표면파는 Raleigh 파와 Love 파로 분류할 수 있다. 이들 중 압축파가 가장 빠르며 전단파, Raleigh 파의 순으로 속도가 빠르다. 탄성이론에 의하면 전파 속도와 매체의 계수들과의 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$E = V_c^2 \rho \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad (2-1)$$

$$G = V_s^2 \rho \quad (2-2)$$

$$\mu = \frac{1-1/2(V_c/V_s)^2}{1-(V_c/V_s)^2} \quad (2-3)$$

여기서 V_c 는 압축파의 속도
 V_s 는 전단파의 속도
 μ 는 포와송 비
 E 는 동탄성 계수
 G 는 동전단 탄성계수
 ρ 는 매질의 밀도

본 연구에서는 초음파 발생장치인 PUNDIT (the potable ultrasonic non-destructive digital indicating tester)¹¹⁾를 이용하여 전파시간을 측정하였으며, 실험의 정확성을 기하고자 오실로스코프(oscilloscope)를 이용하여 PUNDIT의 측정결과와 비교하였다. Hugo등⁷⁾은 PUNDIT를 이용하여 동전단 탄성계수를 측정해 본 결과, 크로스홀 실험의 결과와 잘 일치하고 있음을 밝힌 바 있다. 측정된 전파시간을 시료의 길이로 나누면 전파속도를 구할 수 있고, 상기 식들을 이용하여 동적계수들을 산출할 수 있다.

3. 실험

흙의 동적계수의 추정에는 지진파가 전달되는 상황등에 있어서 흙의 응답을 연구하는 유용한 방법중의 하나이다. 따라서 동적계수에 영향을 주는 변수들을 연구함으로써, 이러한 특성들이 흙의 거동에 어떠한 역할을 하게 되는가를 보다 잘 이해할 수가 있다. 임의의 주어진 시편이 고유한 전단강도를 갖고 있지 않은 것과 같이 동적계수도 고유한 값을 갖고 있지 않다. Whitman¹²⁾은 점성토의 전단강도에 영향을 주는 요소들을 제시한 바 있다. 동전단계수에 대해서도 유사한 관계식으로 나타낼 수 있으며 Hardin과 Black¹³⁾은 동전단 계수에 대해 다음의 식을 제시하였다.

$$G=f(\sigma_0, e, H, S, \tau_0, C, A, F, T, \theta, K) \quad (3-1)$$

여기서 σ_0 는 유효응력, e 는 공극비, H 는 응력이력, S 는 포화도, τ_0 는 전단응력, C 는 토립자의 형상계수, A 는 진폭, F 는 진동주파수, T 는 하중의 크기와 시간에 관계되는 2차 효과, θ 는 흙의 구조, K 는 온도이다. 상기 계수들 중 σ_0 와 e 의 영향은 매우 크며, 다른 계수들의 영향은 그다지

크지 않음이 알려져있다.¹³⁾ 사질토의 경우 Hardin과 Richart¹⁴⁾는 공진주실험을 실시하여 No. 120체에 남은 모래의 입경, 입도분포 및 입자의 형상은 동전단계수에 영향을 거의 주지 못함을 밝힌 바 있으며, 포화도에 대한 영향 역시 낮은 구속응력하에서는 미소한 영향을 줄뿐이고, 가진 주파수의 영향 역시 2500cycles/sec 이하에서는 미미함을 밝힌 바 있다. 점성토의 경우 Lawrence¹⁵⁾는 Kaolinite와 Boston blue clay에 대하여 초음파 실험을, Hardin과 Black¹³⁾과 Humphries와 Wahls¹⁶⁾는 Kaolinite에 대하여 공진주실험을 각각 실시한 결과, 정규압밀점토의 경우 10^{-4} 이하의 낮은 변형률하에서는 동전단계수는 단지 σ_0 와 e 만의 함수로 표시할 수 있음을 제안한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 공극비, e 의 변화에 따른 동전단 계수의 변화에 중점을 두었다.

3.1 측정장치

본 연구에서 실험에 사용된 초음파 발생기는 CNS Inst Ltd.의 PUNDIT로, 내장된 초음파 발생장치(pulse generator)를 이용하여 맥동형의 초음파를 발생시키고, 부속장비인 두개의 변환기(transducer)를 이용하여 송수신되는 파를 감지하여 통과시간을 측정할 수 있도록 되어있다. PUNDIT에서 발생하는 초음파의 주파수는 82kHz이었으며, 시편 통과시간을 0.1 μ sec까지 읽을 수 있다.¹¹⁾ 본 실험에서는 실험의 정확을 기하기 위해, 각파(압축파, 전단파)의 통과시간을 오실로스코프를 이용하여 PUNDIT의 측정결과와 비교하였다.

3.2 시험시료

본 연구에서는 4 종류의 시료에 대해서 실험을 실시하였으며, 이들은 각각 SP, SC, ML, CL로 분류되었다. 아래 표 3.1은 각 시료에 대한 실내 토질시험의 결과를 나타내고 있다.

3.3 시편제작

본 실험에서는 시편 제작을 위해서 직경 5cm,

표 3.1 각 시료에 대한 실내 토질 시험 결과

시료 No.	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성 지수 (%)	비중	통일분류법에 의한 분류
No.1	—	NP	—	2.686	SP
No.2	32.0	15.0	17.0	2.671	SC
No.3	39.5	25.5	14.0	2.694	ML
No.4	37.3	16.9	21.3	2.711	CL

길이 10cm 되는 금형 모울더를 준비하였으며, 미리 결정된 공극비와 포화도로써 시료제작에 필요한 흙과 물의 양을 산출하였으며, 이를 준비한 모울더에 5층 다짐을 실시하여 예정된 시료를 제작하였다. 준비된 4 종류의 시료에 대해서 공극비의 변화는 0.3에서부터 0.8까지 0.1씩, 포화도는 30%에서부터 90%까지 10%씩 증가시키면서 실험 가능한 시편을 제작하였다. 제작된 시편에 대해서 함수비의 변화를 최소화 하기 위해 제작 즉시 실험을 하였다.

또한 시료의 길이에 따른 영향을 알아보고, 적정길이를 구해보기 위하여 각 공극비, 포화도에 대해서 시편의 길이를 2cm 부터 9cm 까지 1cm씩 변화시키면서 실험을 실시하였다.

3.4 실험방법

본 연구에서는 PUNDIT를 사용하여 초음파를 발생시켰으며, PUNDIT에 부착된 감지기를 이용해서 발생된 초음파의 통과시간을 측정하였다. 시편의 통과시간은 PUNDIT를 이용하여 0.1 μ sec까지 디지털로 읽을 수가 있다. 미리 결정한 공극비와 포화도를 이용해서 제작한 시편의 양쪽끝에서 각각 초음파를 발생 및 감지하여 그 통과시간과 시료길이로부터 산술적으로 전파속도를 산정하고 식(2-1), (2-2), (2-3)으로부터 각종 동적계수들을 산출하였다. 이렇게 해서 구한 각종 동적계수들과 이와 관련된 각종 매개 변수들간의 상호관계를 규명하고, 또 이들 변수들의 변화에 따른 흙의 동적계수들의 영향을 밝히고자 하였다.

4. 실험결과 및 분석

전장에서 논의된 바와 같이 동전단 탄성계수는

유효응력, 공극비, 포화도, 시간등의 영향을 받는다는 것으로 알려져있다. 본 연구에서는 동전단 탄성계수에 영향이 크다고 알려져 있는 공극비를 중심으로 실시하였다. 공극비 7, 포화도 7 종류에 대해서 일부 제작이 불가능한 시편을 제외한 총 46개의 시료를 대상으로 실험을 실시하였다.

4.1 공극비의 영향

그림 4.1은 각 시료의 공극비에 따른 동전단 탄성계수의 관계를 보여주고 있다. 그림에서 본 연구의 실험결과는 공극비가 증가함에 따라 동전단계수는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 Stephenson 등 기존의 연구결과와 잘 일치하고 있다. 공극비의 증가에 대해서 계수값이 감소한다는 것은, 같은 재질을 가진 시료에 대해서 공극비의 증가는 주어진 변형률하에서 전단저항을 감소시키고 결과적으로 전단계수를 감소시킨다는 사실을 설명하고 있다. 또한 본 실험에서는 그림 4.1에서 보는 바와같이 SP, SC, ML, CL 순으로 큰 전단 탄성계수 값을 갖는다는 사실을 확인할 수 있었다. 이는 동전단 탄성계수가 시료의 종류에 의해서도 영향을 받는다는 사실을 나타내고 있으며, 조립토에서 세립토로 갈수록

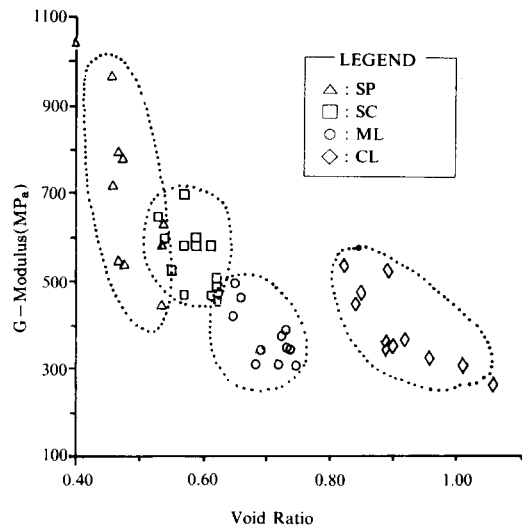


그림 4.1 동전단 탄성계수와 공극비와의 관계

적은 동전단계수값을 가진다는 사실을 알 수 있었다.

그림 4.2는 기존의 자료와 본 실험에서의 결과와 비교 설명하고 있다. 그림에서 점선은 Stephenson의 실험결과의 범위⁶⁾를 보여주고 있다. Stephenson의 실험결과는 낮은 소성을 가진 실트질 점토에 관하여 초음파 실험을 하여 얻은 결과이다. 그림에서 실선은 Hardin과 Black의 실험결과의 범위¹³⁾를 보여주고 있다. Hardin 등은 점성토에 대하여 공진주 실험을 실시하여 얻은 결과이다.

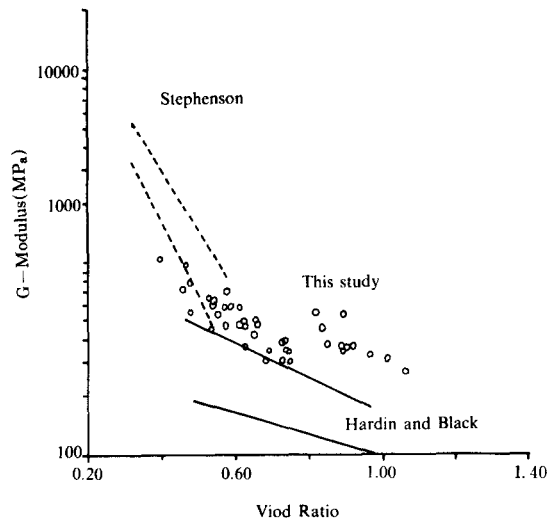


그림 4.2 기존연구와 본 연구 결과와의 비교

본 실험의 결과와 기존 실험의 결과를 직접 비교할 수는 없으나 전체적으로 Stephenson의 실험결과와 Hardin 등의 실험결과의 중간 정도의 값을 나타내고 있다. Hardin 등의 실험결과에 비해 본 실험결과가 약간 큰 값을 나타내고 있는 것은, 초음파 실험은 공진주 실험보다는 낮은 변형률하에서 실험이 진행됨에 기인된 것으로 판단된다. Stephenson의 실험과도 직접적인 비교는 어려우나 같은 범위의 공극비하에서 Stephenson의 실험결과보다 작은 값을 나타내는 것은 실험재료 및 실험기기등에 있어서의 차이때문인 것으로 사료된다.

4.2 포화도의 영향

Hardin과 Black¹⁴⁾은 동전단 탄성계수 G 에 영향을 주는 요소를 식(3-1)로 제시한 바 있다. 그들은 사질토의 경우에는 변형율이 10^{-4} 이하인 범위에서는 유효응력 σ_0 와 공극비 e 를 제외한 나머지 계수들의 영향은 무시할 수 있음을 밝혔으며, Hardin과 Richart¹⁴⁾는 입자의 크기와 모양, 포화도등이 동전단 탄성계수에는 거의 영향을 미치지 않음을 밝힌 바 있다.

Biot¹⁷⁾는 이론적으로 포화매체를 통과하는 파동문제를 다룬 바 있다. 즉 매체속의 공극수의 존재는 압축파속의 경우 중요한 영향을 미치게 되나, 전단파속에는 거의 영향을 주지 못하고 단지 물의 중량 만큼의 영향을 미칠 뿐이다. Hardin과 Richart¹⁴⁾는 Ottawa 모래에 대해 공진주 실험을 실시하여 이를 실험적으로 밝힌 바 있다.

본 연구에서는 포화도의 영향을 알아보기 위해

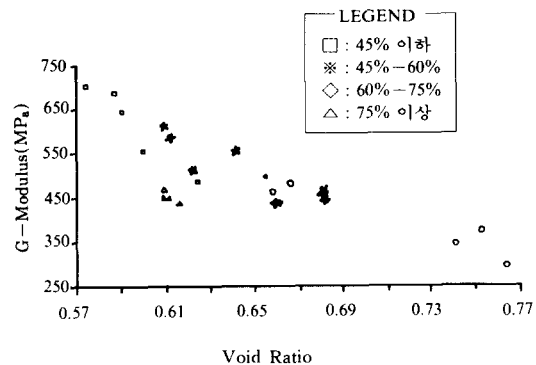


그림 4.3 주어진 포화도 영역내에서의 공극비와 전단계수와의 관계

서, 일정한 공극비에 대하여 포화도를 10%에서부터 90%까지 10%씩 변화시키면서 실험을 실시하였다. 그림 4.3에서 보는 바와 같이 포화도는 동전단 계수와 어떠한 경향을 나타내주지 못하였으며, 그 영향 역시 매우 적은 것으로 판단된다.

4.3 시편길이에 대한 영향

아직까지 실험을 위한 규정이 제정되어 있지 않기 때문에 본 연구에서는 시편 길이의 영향을 알아보기 위해 시편의 길이를 2cm 부터 9cm 까지 1cm씩 변화시키면서 실험을 실시하였다. 그림 4.4는 No.4 시료에서 시편 길이에 따른 동전단계 수값의 변화를 보이고 있다. 그림에서 시편 길이가 5cm 이하되는 지점과 8cm 이상 되는 지점에서 다소 급격한 변화를 보였으며, 그 사이에서는 비교적 일정한 값을 보임을 알 수 있다. 이는 시편의 길이가 너무 짧을 때는 단부영향으로 인하여 정확한 결과를 추정할 수 없으며, 시편 길이가

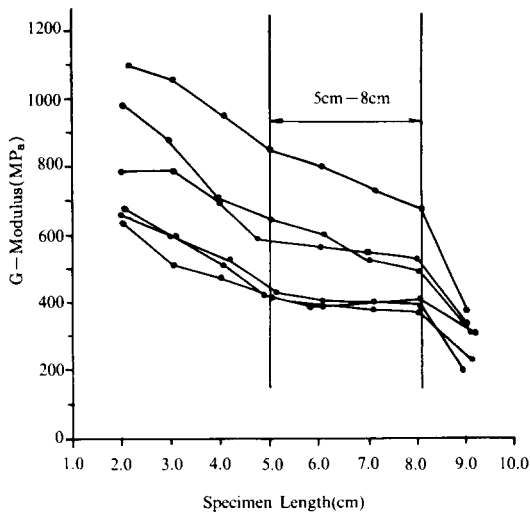


그림 4.4 시편길이와 전단계수와의 관계

긴 경우에는 감쇠효과로 인하여 압축파의 성분을 감지할 수 없기 때문인 것으로 판단된다. 이상에서 본 실험 장비인 PUNDIT를 사용할 경우 시편의 길이는 5cm-8cm가 적당함을 알 수 있었다. Stephenson⁴⁾은 실트질 흙에 대해서 실험한 결과 6.25cm를 최적의 길이로 제시한 바 있다. 이는 본 실험에서의 결과와도 유사하다.

5. 결 론

본 연구에서는 초음파를 이용하여 흙의 동전단

탄성계수의 추정을 시도하였다. 초음파 실험은 매우 낮은 변형률하에서 실험이 실시되므로 한 시료에 손상을 주지않고 반복실험이 가능할 뿐만 아니라 탄성이론의 적용이 가능하며, 계수추정이 신속하고 간편하다는 장점을 갖고있다. 본 연구는 동전단 탄성계수에 가장 크게 영향을 미친다고 알려진 공극비를 중심으로 연구를 수행하였다. 본 실험에서는 SP, SC, ML, CL 등 4 종류의 시료에 대하여 실험을 실시하였다.

실험에 사용된 4 종류의 시료에 대해서 PUNDIT를 이용하여 초음파 실험을 실시 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초음파를 이용하여 흙의 동적 물성의 추정이 가능하다. 초음파 실험은 낮은 변형률하에서 실시되기 때문에 탄성이론을 적용할 수 있으며, 신속 간편하다는 장점을 갖고 있어 앞으로 토질공학 분야에서의 많은 활용이 기대된다.
2. 흙의 동전단 탄성계수는 공극비가 증가함에 따라 감소한다. 이는 기존의 연구결과와도 잘 일치한다.
3. 흙의 동전단 탄성계수는 시료의 종류에 의해서도 영향을 받는다. 이에 대한 본 실험의 결과는 그림 4.1에서 표시하고 있다.
4. 흙의 동전단 탄성계수에 대한 포화도의 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.
5. 본 실험장비인 PUNDIT를 사용할 경우, 시편의 길이는 5cm-8cm 정도가 적당하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 지원(883-1306-010-1)으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사로 드립니다.

참 고 문 헌

1. Stokoe K.H. and Woods R.D., "In-situ Shear Wave Velocity by Crosshole Method," J. of Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol.98, No SM5, 1972, pp. 337-375.
2. Hoar R.J. and Stokoe K.H., "Crosshole Measur-

- ement and Analysis of Shear Waves," Pro. of the Tenth Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Vol.1, 1982, pp.223-226.
3. 김수일, 민덕기, 우제윤, 노광호, "Downhole Method에서 Cross Correlation Technique을 이용한 전단파의 속도 측정에 관한 연구" 산업기술연구 소논문집, 연세대학교, 제26집, 제1권(20), 1984, pp.79-87.
 4. Heisey J.S., Stokoe K.H., Meyer A.H., "Moduli of Pavement Systems from Spectral Analysis of Surface Waves," Tran. Res. Rec., No.852, Tran. Res. Board, Washington DC, 1982, pp.22-31.
 5. Nazarian S. and Stokoe K.H., "Evaluation of Moduli and Thickness of Highway and Pavement Systems by SASW Method," Report No. 256-4, The Texas St. Dep. of Highway and Pubric Trans., Austin, Texas, 1983. 123p.
 6. Stephenson R.W., "Ultrasonic Testing for Determining Dynamic Soil Moduli," Dynamic Getechnical Testing, ASTM STP 654, American Society for Testing and Materials, 1978, pp.179-195.
 7. Hugo F., Engelbrecht J.C., and Du Toit J., "Correlatoin of Elastic Engineering Parameters Obtained from Dynamic Triaxial Tests with Seismic and Ultrasonic tests," Proceedings of the Twelfth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio De Janeiro, 1989, pp.233-238.
 8. Zhao Y. and Li Z., "Ultrasonic Wave Attenuation in Dry and Saturated Rock under Biaxial Pressure," Numerical Methods in Geomechanics, Swoboda(ed.), 1988, pp.1755-1762.
 9. ASTM Designation : D 2845-69, "Standard Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock," Reapproved 1976, pp.425-432.
 10. Richart F.E., Hall J.R. and Wood R.D., "Vibrations and Soil and Foundation," New York, Pretice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 1970, 414p.
 11. Pundit Manual for use with the Portable Uitrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester, CNS Inst. Ltd., London.
 12. Whitman R.V., "Some Considerations and Data Regarding the Shear Strength of Clays," Proceeding, ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohensive Soils, Univ. of Colorado, Boulder, Colo., 1960, pp.581-614.
 13. Hardin B. O. and Black W. L., "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol 94, No. SM2, 1968, pp.353-369.
 14. Hardin B. O. and Richart, F.E,Jr, "Elastic Wave Velocities in Granular Soil," J. of Soil Mech. and Found Div., Proc, ASCE, Vol.89, No.SM 1, 1963, pp.33-65.
 15. Lawrence, F. V., Jr., "Ultrasonic Shear Wave Velocities in Sand and Clay", Rep, R65-05, Dept. of Civil Eng., M.I.T, Cambridge, Mass., 1965.
 16. Humphries, W.K., and Wahls, H.E., "Stress History Effects on Dynamic Modulus of Clay," J. Soil Mech and Found Div, Proc. ASCE, Vol. 94, No.SM2, 1968, pp.371-389.
 17. Boit, M.A., "Theory of Propagation of Elastic Waves in A Fluid-Saturated Porous Solid," J. Acoustical Society of America, Vol.28, 1956, pp. 168-191.

(접수일자 1990. 11. 8)