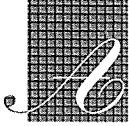




동적물성치 산정을 위한 현장시험방법에 대해 알려주세요.



최충락(선진엔지니어링 차장, 토질 및 기초 기술사)

1. 개요

지반의 동적물성치는 최근 지반동역학 및 지진 공학과 관련한 문제인 지반진동, 내진설계, 액상화평가 및 건설시공관리 등 다양한 영역에서 동적 물성치가 요구되고 있으며 주로 전단탄성계수(G), 포아송비(ν), 감쇠비(D), 액상화관계수 및 변형 속도에 따른 전단강도 등의 동적지반계수이다.

동적물성치는 전단변형율에 따라 적용하는 범위가 달라지며, 동적물성치를 획득할 수 있는 방법으로는 탄성파(Seismic)를 이용한 크로스홀(Cross Hole) 시험, 다운홀(Down Hole) 시험, Seismic CPT, 탄성파 굴절법(Seismic Refraction), Rayleigh파 기법, SASW(Spectral Analysis of surface Waves), Suspension Logging 등과 같은 현장시험방법이 있다.

참고로 공진주 시험(Resonant Column Test), 비틀전단시험(Torsional Shear Test), 진동삼축 압축시험(Cyclic Triaxial Test) 등과 같은 실내시험 등이 있으며, 실내시험으로는 선형거동을 하는 저변형(전단변형율 10⁻³% 이하)부터 비선형거동을 하는 고변형(전단변형율 10⁻³% 이상)까지 측정이 가능하다.

2. 현장시험

2.1 파(Wave)의 종류

매질을 따라 전파하는 응력파는 매질내부를 전파하는 체적파와 표면을 따라 전파하는 표면파로 나눌 수 있으며, 파의 구분은 전파속도와 파의 전파에 따른 입자의 거동특성에 의해 구별된다.

1) 체적파

매질내부를 전파하는 체적파(P파, S파)는 압축파(P파), 전단파(S파)로 구분되며, 압축파는 전단 변형없이 체적변형만을 발생시키며 전단파(S파)는 체적변형없이 전단변형만을 발생시킨다.

$$\text{압축파 ; } V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \text{식 (1)}$$

$$\text{전단파 ; } V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{식 (2)}$$

여기서, M ; 구속탄성계수, E ; 탄성계수,

ρ ; 밀도, ν ; 포아송비

G ; 전단탄성계수($\frac{E}{2(1+\nu)}$)

2) 표면파

매질의 표면을 따라 전파하는 표면파(R파)는 깊



이가 증가함에 따라 진폭이 지수함수적인 감소를 보이는 것이 특징이며, 포아송비와 S파의 속도로 부터 구할 수 있다.

$$\text{표면파} ; V_R = \frac{0.87+1.12v}{1+v} V_S \quad \text{식 (3)}$$

2.2 크로스홀(Cross Hole)시험

1) 시험방법

크로스홀(Cross Hole)시험은 아래 그림 1과 같이 지반에 두개이상의 Hole을 천공하고 한쪽Hole에는 발진기(Source)를 다른 나머지 Hole에는 수신기(Receiver)를 설치하여 발진기에서 발생하는 진동에 의한 파가 지반을 통과하여 수신기로까지 도달하는 파의 속도를 측정하여 지반의 동적물성치를 추정하는 기법이다.

2) 결과정리

크로스홀(Cross Hole)시험으로 P파와 S파 모두 측정가능하며, 특히 S파는 발진기와 수신기의 설치방향에 따라 SV파와 SH파의 측정도 가능하며,

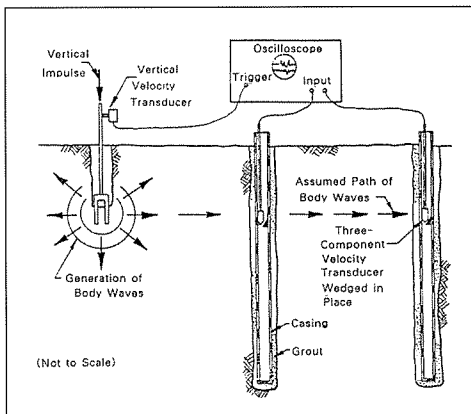


그림 1. 크로스홀 시험방법

P파와 S파가 측정되면 아래와 같은 식에 의하여 전단탄성계수, 구속탄성계수, 포아송비, 영탄성계수 등을 구할 수 있다.

$$\text{전단탄성계수}(G) = \rho V_S^2 \quad \text{식 (4)}$$

$$\text{구속탄성계수}(M) = \rho V_P^2 \quad \text{식 (5)}$$

$$\text{포아송비}(v) = \frac{0.5(V_P/V_S)^2 - 1}{(V_P/V_S)^2 - 1} \quad \text{식 (6)}$$

$$\text{영탄성계수}(E) = 2\rho V_S^2(1+v) \quad \text{식 (7)}$$

여기서, ρ 는 매질의 질량, V_P 는 P파 속도, V_S 는 S파 속도

또한, 크로스홀 시험은 지반의 탄성파속도 이외에도 감쇠계수를 측정하기 위한 연구도 계속 진행되고있다(Hoar and Stokoe, 1984; Mok et al., 1988; EPRI, 1993).

크로스홀 시험의 정확성은 Hole의 수직성여부, 측정장비의 보정, 인접층과 경계면에서의 굴절 가능성 등에 의해 정밀도가 좌우되므로 이에 유의하여야 한다.

2.3 다운홀(Down Hole)시험

1) 시험방법

다운홀 시험은 하나의 시추공을 이용하여 P파와 S파 속도를 구하는 현장시험방법이며 크로스홀시험과 달리 단 한개의 시추공만으로도 시험이 가능하므로 경제적이어서 일반적으로 많이 활용되는 기법이다. 시추공 내에 3방향 수신기를 설치

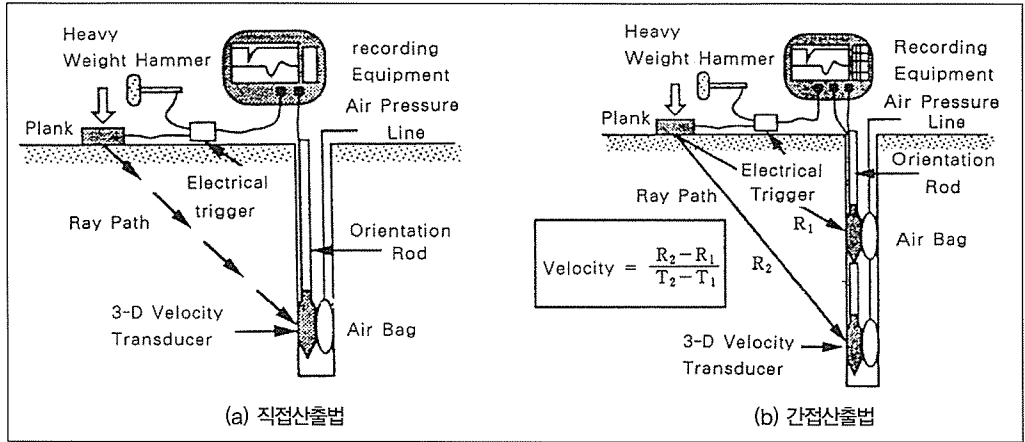


그림 2. 다운홀 시험방법

하여 지표면에서 충격에 의한 탄성파를 발생시켜 파의 속도를 측정하는 방법이다.

2) 결과정리

시험결과정리는 발진기에서 발생한 탄성파가 발진기와 수신기 사이의 경사거리(전파경로)를 주파하는데 걸리는 시간을 측정하는 직접법(Direct Measurement)과 두 감지기를 서로 다른 깊이에 설치하여 발진기와 각 수신기사이의 직접통과시간을 측정하는 간접산출법(Interval Time Measurement) 등이 대표적이다.

▷직접법(Direct Measurement)

$$T_c = D \frac{T}{R} \quad \text{식 (8)}$$

여기서, D = 수신기 설치깊이

R = 경사진 전파경로의 거리

T = 탄성파가 경사진 전파경로를 통과하는데 걸리는 시간

▷간접산출법(Interval Time Measurement)

$$V = \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} \quad \text{식 (9)}$$

여기서, V = 탄성파속도

R₁ = 발진기와 위 수신기사이의 직선거리

R₂ = 발진기와 아래 수신기사이의 직선거리

또한, Snell의 법칙을 이용하여 다운 홀 시험 데이터를 분석하기 위한 시도가 Mok(1987)에 의해 시도되었으며, Joh(1998)에 의해 최대공산법을 사용 최적화기법을 이용한 역산방법 등으로 데이터를 분석하려는 연구도 계속 진행되고 있다.

2.4 크로스홀 시험과 다운홀 시험의 비교

크로스홀과 다운홀 시험의 장단점은 표 1과 같으며 크로스홀 시험은 다운홀 시험에 비하여 시험 장치의 구성이 복잡하고 많은 비용이 들지만 보다 좋은 양질의 시험결과 얻을 수 있다.



표 1. 크로스홀 시험과 다운홀 시험의 비교

크로스홀 시험	다운홀 시험
<ul style="list-style-type: none"> • 두 개 이상의 시추공 • 간단한 공내발진자 • 주로 P파와 SV파 사용 • 전단파의 극성특성이음 • 파의 진행경로 길이가 일정 • 시추공 casing의 영향이 적다. • 모든 깊이에서 신호와 잡음의 비가 높음 • 파의 전파속도가 낮은 층 감지 가능 • 자세한 지층구조 조사가능 • 파의 굴절 문제 발생가능 • 잡음이 많은 지역에서도 사용가능 • 제한된 공간에서 작업가능 • 비용이 비교적 큼 	<ul style="list-style-type: none"> • 한 개의 시추공 • 간단한 표면발진자 • 주로 P파와 SA파 사용 • 전단파의 극성특성이음 • 깊이에 따라 진행경로 길이가 증가함 • 시추공 casing의 영향이 가능 • 신호와 잡음이 비가 깊이에 따라 감소함 • 파의 전파속도가 낮은 층 감지가능 • 평균적인 지층구조로 조사됨 • 파의 굴절 문제가 적음 • 잡음이 많은 지역에서도 사용가능 • 제한된 공간에서 작업가능 • 비용이 비교적 작음

2.5 SASW(Spectral Analysis of surface Waves)시험

1) 시험방법

SASW시험방법은 비파괴 현장시험방법으로 지표면에서 물리적 충격 및 진동을 가하여 응력파를 발생시켜, 발생된 응력파가 지반을 통하여 전파되어 나가는 것을 발진기에서 일정거리만큼 떨어진 수신기에서 지반의 진동을 측정하는 방법이다.

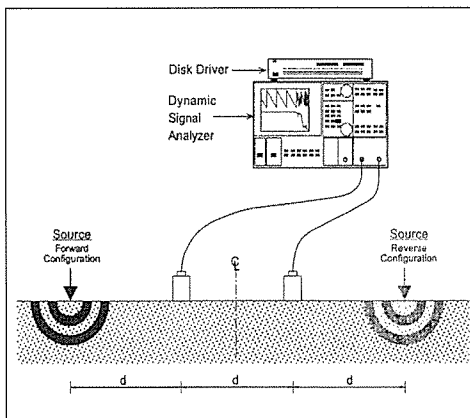


그림 3. SASW(Spectral Analysis of surface Waves) 시험방법

2) 결과정리

SASW시험에 의한 응력파의 속도결정은 특정 주파수를 가지는 파에 대하여 주지점에서 기록된 응력파 진동간의 위상각차이(Phase Difference)를 측정하는 것에 의해서 가능하며, 수신기간 거리를 달리하여 수행된 각 SASW 시험으로부터 결정된 모든 위상속도를 취합하여 실험분산곡선을 얻게되고, 분산곡선이 결정되면 이 곡선으로부터 지반의 물성치를 역산(Inversion)에 의하여 구한다.

3. 실내시험

실내시험에 의한 동적물성치 결정방법은 크게 2가지로 구분할 수 있으며, 저변형율에서 동적물성치를 평가할 수 있는 실내시험법과 고변형율에서 동적물성치를 평가할 수 있는 시험법으로 구분할 수 있다. 또한 반복재하식(Cyclic Test)과 동적 시험방법(Dynamic Test)으로도 구분할 수 있다. 변형률 크기에 따른 시험방법 구분은 그림 4와 같으

며, 반복재하식 방법에는 비틀전단시험(Torsional Shear), 진동삼축시험(Cyclic Triaxial), 진동단순 전단시험(Cyclic Simple Shear), 진동탁자시험 (Shaking Table) 등이 있고, 동적시험방법에는 전파속도측정(Pulse Test), 공진주(Resonant Column)시험 등이 있다.

또한 각 시험법으로 결정 가능한 지반물성치는 표 2와 같으며, 실내시험중 가장 많이 수행되고 있는 공진주/비틀전단시험에 대하여 간략하게 소개하였다.

▷공진주/비틀전단시험(Resonant Column/ Torsional Shear Test)

공진주/비틀전단시험은 지반의 동적물성치를 구하기 위하여 가장 널리 사용되는 실내시험방법

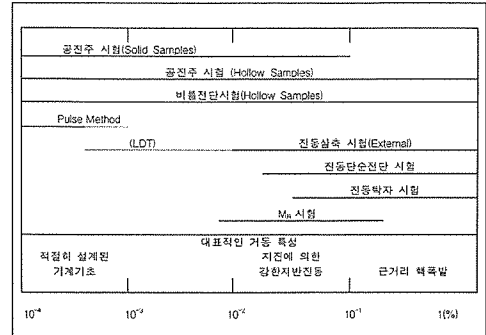


그림 4. 실내시험별 변형률의 크기

중의 하나로 흙의 전단탄성계수와 재료감쇠비를 측정하는 시험법이다.

공시체 바닥을 고정시키고 코링-자석 시스템을 이용한 진동시스템(Driving System)을 공시체의 상부와 연결하여 진동시 진동판에 부착된 가속도계(Accelerometer)로 가속도를 측정한다(그

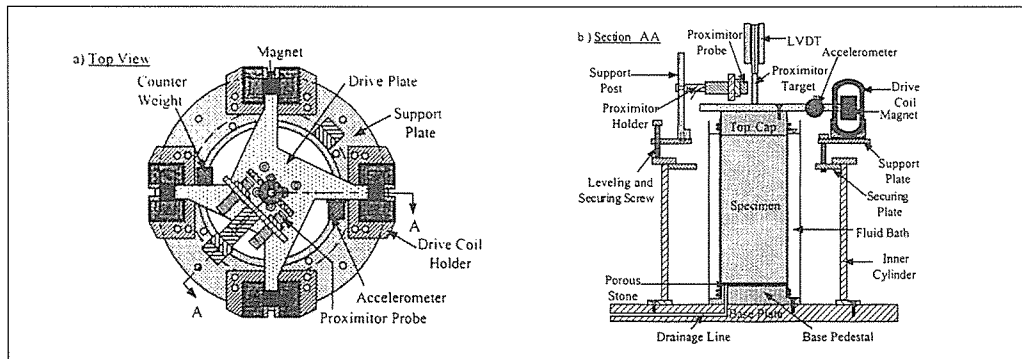


그림 5. 공진주 시험기 모식도(stokoe)

표 2. 각 시험별 측정가능한 동적물성치

구 분	전단탄성계수	탄성계수	감쇠비	지반특성	Attenuation
공진주시험	○	○	○		○ (보조장치설치시)
전파속도시험	○	○			○
진동삼축시험		○	○	○	
진동단순전단시험	○		○	○	
비틀전단시험	○		○	○	
진동탁자시험	○			○	



림 5 참조).

시험원리는 원동형의 공시체에 진동수를 바꿔가면서 비틀자극(Torsional Extation)을 가하여 1차 모드의 공진진동수(fr)와 진동의 크기(Ar)를 구한 후 시험기의 특성 및 공시체의 크기, 공시체의 무게를 이용하여 전단파 속도(Vs), 전단탄성계수(G) 및 전단변형률(γ)을 구한다.

다음 식 (10)에 의해서 공시체의 전단파속도가 결정되면, 식 (11)을 이용하여 전단탄성계수를 결정할 수 있다.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega L}{V_s} \cdot \tan\left(\frac{\omega L}{V_s}\right) \quad \text{식 (10)}$$

여기서, I = 공시체의 질량관성모멘트

I_0 = 진동시스템의 질량관성 모멘트

ω = 공시체-진동시스템의 자연진동수

L = 공시체의 길이, V_s = 전단파속도

$$G = \rho V_s^2 \quad \text{식 (11)}$$

여기서, ρ = 질량밀도

4. 결론

지진하중과 같은 동하중에 대한 지반의 안정성을 평가하기 위해 필요한 동적물성치 측정방법 중 현장시험방법을 위주로 설명을 하였고 가장 널리 사용되는 실내시험방법인 공진주 시험을 소개하였다.

지반의 동적물성치(전단탄성계수, 감쇠비 등)는 전단변형률, 구속응력, 응력이력, 동하중의 주파수 특성 및 흙의 공학적 특성에 따라 영향을 받게 되므로 동적물성치를 측정하고 산정할 때는 이에 대한 고려가 반드시 이루어져 하며, 내진해석 등에 활용할 때는 이러한 인자들에 대해 충분히 인지한 후 적용하는 것이 매우 중요하다고할 수 있다.

동하중에 의한 지반의 평가를 하기 위하여는 현장시험 뿐만아니라 실내시험과 종합 비교 분석하여 적용하는 것이 필요하다.

[참고문헌]

1. 황선근, 목영진, 조성호 (2001), "내진설계를 위한 토질정수의 산정", 2001년도 지반진동위원회 Workshop, 한국지반공학회 지반진동위원회, 서울, pp.1~15
2. 한국지반공학회 (1997), 지반공학시리즈.8 진동 및 내진설계, 구미서관, pp.61~85