

VI. 지반 동적 물성치 측정을 위한 탄성파 기법과 결과의 이용

조성호^{*1}, 목영진^{*2}, 장현삼^{*3}

1. 개요

최근 지반 지진공학 및 지반 동역학 관련 문제인 지반진동 평가, 내진설계, 액상화 평가, 건설시공관리 등 다양한 영역에서 탄성파 조사의 필요성이 증가하고 있다. 이는 지반 지진공학 및 지반 동역학의 문제들은 지반의 동적 물성치, 즉, 전단탄성계수, 감쇠비 등을 필요로 하고, 탄성파 기법들은 P-파, S-파 등과 같은 탄성파 속도 측정에 의해서 이러한 동적물성치를 평가할 수 있기 때문이다.

탄성파의 전파특성을 이용하여 지반매질의 물성치를 조사하는 탄성파 기법(seismic methods)들은 비교적 얇은 심도에 있는 지반 물성의 깊이별 변화를 조사하기 위하여 널리 적용되어 왔다. 특히, 지반 지진공학과 지반 동역학에서는 지반의 탄성파 속도(즉, 탄성계수)를 깊이별로 평가하기 위하여 탄성파 기법을 사용하여 왔으며, 그 예로 크로스홀 시험, 다운홀 시험, Seismic CPT, 탄성파 굴절법, Rayleigh 파 기법, Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) 기법, Suspension Logging 등이 있다. 이들 기법 중 일반 현업에서 가장 널리 사용되는 기법으로 크로스홀 시험과 다운홀 시험을 들 수 있으며, 특히 크로스홀 기법은 모든 탄성파 기법 중에서 가장 신뢰성 있는 방법이라고 할 수 있다. 크로스홀 시험, 다운홀 시험과 같이 시추공을 필요로 하는 기법 이외에도, 시추공을 필요로 하지 않고 지표면에서 비

파괴적으로 수행되는 표면파 기법이 있다. 이러한 표면파 기법으로는 SASW 기법이 신뢰성 높은 기법 중의 하나이다. SASW 기법은 최근 비파괴적·비관입적 특성 때문에 널리 적용되고 있는 기법으로, 단일 정현파를 측정하는 Rayleigh 파 기법 (Steady-State Rayleigh Wave Method)을 발전시킨 방법이라 할 수 있다. SASW 기법은 지표면에서 비파괴적, 비관입적으로 수행되며, 실험 측선 하부 매질의 평균 물성치를 측정할 수 있다. 최근 관련 이론의 발전으로 SASW 실험결과의 신뢰성이 현저히 향상되어 적용사례가 증가하고 있는 추세이다. 이와 더불어, 기존의 시추공법을 대체할 수 있는 방법으로 Seismic CPT 와 Suspension Logging 등이 있으며, 최근 효용성과 기법상의 장점 때문에 적용사례가 급속히 증가하고 있다.

본 고에서는 앞에서 언급한 여러 탄성파 기법 중에서 지반의 동적 물성치를 필요로 하는 영역에 활용될 수 있는 탄성파 기법인 크로스홀 시험, 다운홀 시험, SASW 실험 등을 중점적으로 고찰하였다.

2. 크로스홀 시험 (Crosshole Testing)

2.1 크로스홀 시험의 개요

크로스홀 시험은 지반의 P-파 속도 및 S-파 속도를 깊이별로 측정할 수 있는 현장 시험법이다 (Stokoe and Hoar, 1978). 크로스홀 시험을 위해서는 기본적으로 약 3 m 간격의 2 개 또는 3 개의 시추공을 필요로 하며, 시추공이 합몰되지 않도록

*1 정희원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 조교수

*2 정희원, 경희대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*3 ThreeTECH Co. 대표이사

PVC 케이싱을 설치하여야 한다. 또한, 탄성파의 전파를 확실하게 하기 위해, 벤토나이트나 그라우팅제에 의한 PVC 케이싱과 인접 지반매질과의 완전한 커플링이 확보되어야 한다.

크로스홀 시험은 그림 1에 도시한 바와 같이, 하나의 시추공에서 체적파를 발생시키고 그 체적파가 지반 매질을 수평방향으로 전파하여 다른 시추공에 도달하는 시간을 측정함으로써, 체적파의 전파속도를 계산하는 방법이다. 탄성파를 발생시키는 발진원과 탄성파를 감지하는 감진기는 동일 심도에 설치하여 탄성파의 속도를 측정하도록 하는데, 측정심도는 일반적으로 0.5 m 간격으로 표층에서 지반 하부로 증가시킨다. 이렇게 여러 심도에서 탄성파 속도를 측정함으로써, 깊이별 탄성파 속도의 변화를 알 수 있는 탄성파 속도 주상도를 구할 수 있다. 대표적인 크로스홀 실험결과는 그림 2에 도시한 S-파 속도 주상도와 같으며, 크로스홀 실험결과가 공진주 실험결과와 비교되어 있다(Fuhriman, 1993).

일반적으로는 크로스홀 시험은 그림 1의 크로스홀 시험구성과 같이 두 개의 시추공만으로도 수행할 수 있지만, 지층간의 강성차이로 인한 굴절파의 간섭, 케이싱과 그라우팅제, 지반의 비등방성 등의 영향을 최소화하기 위하여 세 개의 시추공을 사용하는 것이 바람직하다. (Stokoe and Hoar, 1978)

2.2 크로스홀 시험의 발진원

크로스홀 시험시 탄성파를 발생시키기 위한 방법으로는 화약발파, 기계식 충격원, 압축공기 등 여러 방법이 있다. 기계식 충격원으로는 SPT 해머의 타격, 시추공 패커나 잭에 연결된 붐을 이용한 충격, 시추공 바닥에 설치한 장치에 대한 비틀 충격 (Hoar and Stokoe, 1978) 등 다양하지만, 가장 바람직한 발진원은 충격방향을 전환하여 반대방향으로도 충격을 줄 수 있는 경우이다. 이는 전파된 탄성파중 S-파의 인식을 위한 것으로, 발진원의 타격방향을 반전할 경우, S-파의 부호도 반전되는 특성을 활용하기 위함이다. 그림 3에 P-파와 S-파의 대표적인 측

정기록이 도시되어 있는데, P-파의 경우와는 달리 S-파는 나비날개 모양으로 발진원의 타격방향의 반전에 따라 S-파 기록의 부호도 반전됨을 확인할 수 있다.

용이하게 타격방향을 반전할 수 있는 기계식 발진원으로는 췌기형 발진기 (Mok, 1987), 전자석을 이용한 Dizzy 발진기 (Fuhriman, 1993), 압전소자

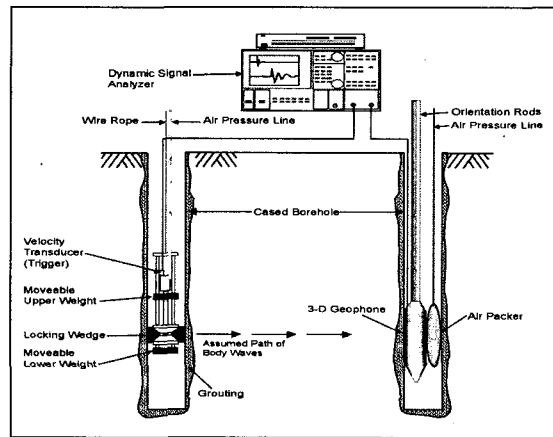


그림 1. 크로스홀 시험 구성

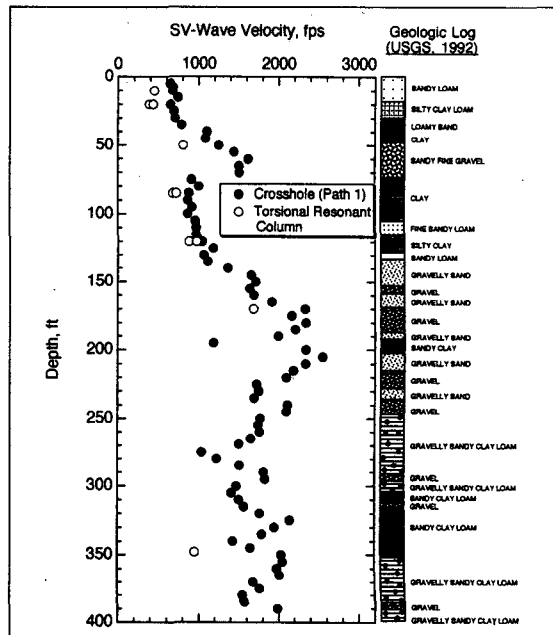


그림 2. 전형적인 크로스홀 시험결과 (Fuhriman, 1993)

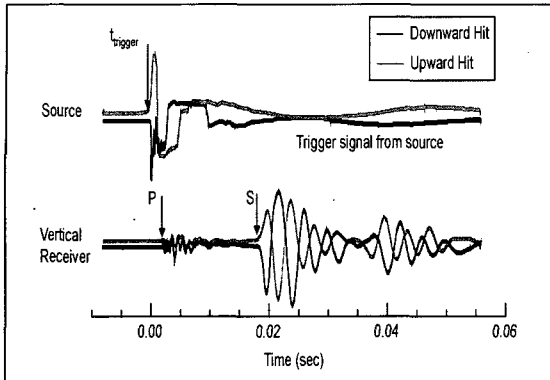


그림 3. 크로스홀 시험에 의해 측정된 P-파와 S-파의 파형

를 이용한 발전기인 BeBop(Roble, 1990)과 GeoPing (Mok, 1998) 등을 예로 들 수 있다. 이 중 썩기형 발전기와 전자석 발전기는 지반에서 주로 사용되는 발전기이고, BeBop과 GeoPing은 고주파의 탄성파를 발생시키는 특성으로 인하여 암반에서 주로 사용된다. 이렇게 기계식 발전기는 탄성파의 측정에 있어서 S-파의 인식을 가능하게 하는 장점 때문에, 화약발파에 의한 발전원보다 많이 선호되고 있다.

2.3 크로스홀 시험에 의한 측정결과

상기한 바와 같이 크로스홀 시험으로 P-파와 S-파 모두 측정 가능하지만, 특히, S-파의 경우 발전원과 감진기의 설치방향에 따라 SV파 및 SH파의 측정도 가능하다. SV파는 탄성파의 전파방향에 대해 수직으로 진동하는 S-파이고, SH파는 탄성파의 전파방향과 평행하게 진동하는 S-파이다 (그림 4). 즉, SV파는 탄성파의 전파방향과 수직방향으로 매질의 전단변형을 유발시키고, SH파는 탄성파의 전파방향과 평행하게 매질을 전단변형시킨다. 따라서, SV파의 속도와 SH파의 속도는 서로 동일한 매질에 대한 탄성파 속도이지만, 서로 방향성이 다른 매질의 특성이 다. 만일 SV파의 속도와 SH파의 속도가 동일하다면, 그 매질은 전단변형특성에 있어서는 등방성인 매질이라고 할 수 있고, SV파의 속도와 SH파의 속도가 다르다면, 매질은 비등방성인 매질이 된다. 일단 P-파 속도와 S-파 속도가 측정되면, 전단탄성계수,

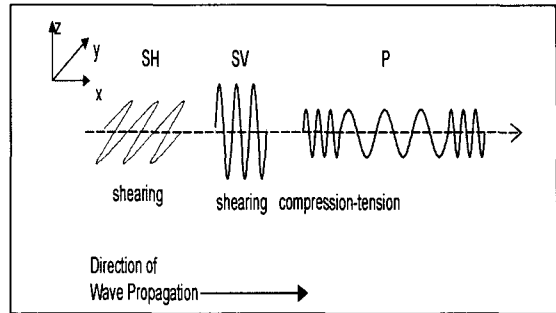


그림 4. P-파, SV-파, SH-파에 의한 매질의 변형

구속탄성계수, 포아송비, 영탄성계수 등을 식 1~4에 의해서 계산할 수 있다.

$$G = \rho V_s^2 \quad (1)$$

$$M = \rho V_p^2 \quad (2)$$

$$\nu = \frac{0.5 (V_p/V_s)^2 - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1} \quad (3)$$

$$E = 2\rho V_s^2 (1 + \nu) \quad (4)$$

여기서, ρ 는 매질의 질량, V_p 는 P-파 속도, V_s 는 S-파 속도, ρ 는 포아송비, G 는 전단탄성계수, M 은 구속탄성계수, E 는 영탄성계수를 의미한다.

이러한 공학적 물성이외에도 P-파 속도를 살펴보면, 지반내 지하수위 위치를 확인할 수 있다. P-파는 매질의 가장 빠른 부분을 통해서 압축-인장의 축방향 변형을 통해서 전파되는데, 흙으로 구성된 대부분 지반의 경우 P-파 속도는 물의 P-파 속도인 1500 m/sec 보다 매우 작은 값을 갖기 때문에, P-파 속도 주상도에서 어느 심도이하의 P-파 속도가 일정하게 1500 m/sec를 갖게 되면, 그 심도가 지하수위 위치가 된다.

크로스홀 시험은 지반의 탄성파 속도이외에도 지반의 감쇠계수(material damping)를 측정하기 위해서도 사용되어왔다 (Hoar and Stokoe, 1984; Mok et al., 1988; EPRI, 1993). 지반의 감쇠계수의 측정은 탄성파 측정을 위한 감진기의 정밀한 검증

과 정확한 감진기 설치를 필요로 한다. 탄성파의 전파를 직선이라고 가정하고, 측정된 탄성파의 진폭성분에서 기하학적 감쇠(spatial damping, 또는 geometric damping) 성분을 분리하여 낸 후의 진폭을 분석하여 재료 감쇠성분을 평가할 수 있다. 이 방법은 비교적 지반이 균질한 반무한체에 효과적으로 적용되어 왔다. 크로스홀 시험으로 지반의 감쇠비를 측정하는 방법으로는 Mok(1987)에 의해서 제안된 방법을 발전시킨 스펙트럼 비 방법(spectral ratio method)과 Redpath(1982)와 Redpath 및 Lee (1986)이 제안한 스펙트럼 경사법 (spectral slope method)이 있다. 스펙트럼 비 방법은 주파수에 따라서 감쇠비가 변한다고 가정하고, 스펙트럼 경사법에서는 주파수와 무관하게 감쇠비는 일정하다고 가정하고 있다. 스펙트럼 비 방법에 의한 대표적 측정 사례와 스펙트럼 경사법에 의한 측정사례를 소개하면 각각 그림 5와 6에 보인 바와 같다. 두 결과는 모

두 Gilroy No. 2 지역의 깊이 15 ft (4.5 m)에서 수행된 크로스홀 시험데이터를 이용한 것으로서 각각 4.6%, 7.3%의 감쇠비를 보여주고 있다. 한편, 실내 공진주 실험에 의하면 주파수가 39 Hz, 중간유효응력 6 psi의 조건하에서 감쇠비는 3.9%이었다 (Fuhriman, 1993).

2.4 크로스홀 시험결과의 영향인자

크로스홀 시험의 정밀도는 여러 인자에 의해서 좌우되는데, 그 중 일반적으로 간과하기 쉬운 것들로서 시추공의 수직여부, 크로스홀 측정장비의 하드웨어 보정, 인접 층과 경계면에서의 탄성파 굴절 가능성 등이 있다. 크로스홀 시험결과의 정확성에 영향을 주는 상기 인자중 가장 중요한 것은 시추공의 경사이다. 대체적으로 시추공은 수직으로 설치되지만, 경우에 따라서 약간의 경사를 가지고 설치되는 경우가 가능하다. 특히, 시추공의 깊이가 약 15 m 이상을 초과하는 경우, 시추공이 경사지게 설치되었다면 시추공 하부에서의 시추공간 수평거리는 지표면에서의 시추공간 거리와 큰 차이를 보일 수도 있다. 따라서, 탄성파 속도 계산시 지표면에서의 시추공간 거리를 이용하게 되면, 잘못된 거리를 사용하는 것이 되므로, 계산된 탄성파의 속도 또한 정확하지 않게 된다. 따라서, 시추공의 깊이가 대략 15 m 이상을 초과하게 되면, 경사계 (slope indicator) 등을 이용하여 시추공간 거리를 각 측정심도에서 정확하게 확인할 필요가 있다.

크로스홀 시험결과의 정확성에 영향을 주는 인자로서 크로스홀 측정장비의 하드웨어 보정은 실험결과의 정밀성을 보장하기 위하여 결코 누락시키지 말아야 하는 항목이지만, 비교적 용이하게 수행될 수 있다. 크로스홀 시험은 기본적으로 탄성파가 지반을 통과하여 전파하는 시간을 측정하는 것이므로, 탄성파가 발진원의 트리거 센서나 감진기 유니트의 속도계에 도달하기 위하여 거쳐야 하는 크로스홀 하드웨어 여러 부품에 대한 통과시간은 탄성파의 전파시간에 포함시키지 말아야 한다. 따라서, 그림 7에서와

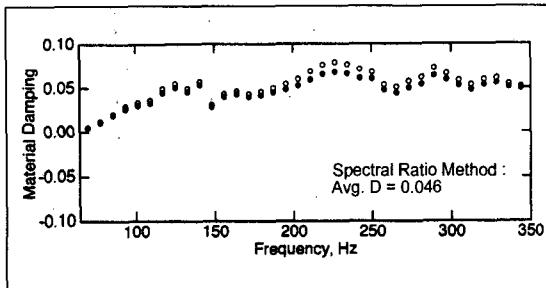


그림 5. 크로스홀 시험데이터를 이용한 지반의 감쇠비 추정 : 스펙트럼 비 방법 (Spectral Ratio Method)

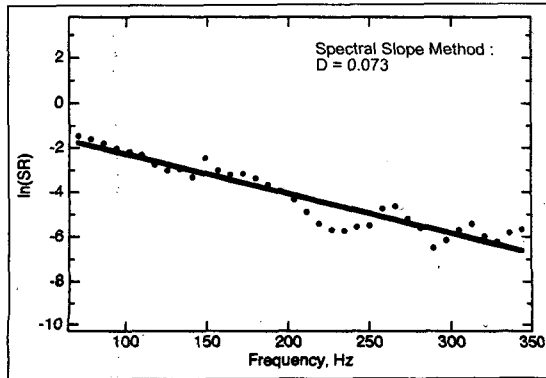


그림 6.

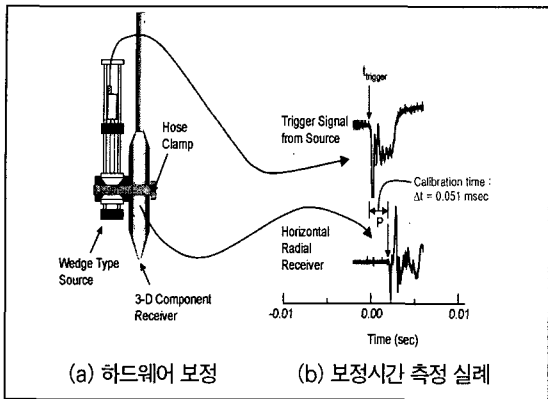


그림 7. 크로스홀 하드웨어 보정

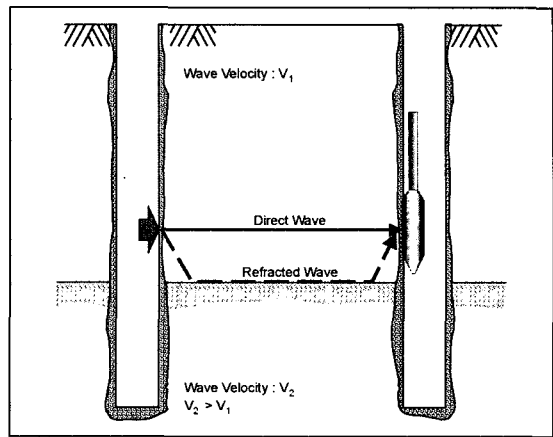


그림 8. 크로스홀 시험에서 굴절파에 대한 고려

같이 크로스홀 발진기에 감진기를 완벽하게 밀착시켜 지반을 배제한 상태에서 탄성파의 도달시간을 측정하면, 크로스홀 하드웨어에서 소요하게 되는 탄성파 전달시간, 즉, 크로스홀 하드웨어 보정시간을 구할 수 있게 된다.

지반이 강성이 다른 여러 개의 지층으로 구성되어 있는 다층구조인 경우, 크로스홀 시험에서 기본적으로 가정하는 수평방향의 탄성파 전파경로, 즉 직접전달파의 가정은 위배될 수 있다. 이는 전단강성의 차이가 큰 두 개의 지층이 접하고 있는 경우, 전단강성이 작은 지층내에서의 탄성파는 수평방향으로 직접 전파되기 보다는 전단강성이 큰 인접지층과의 경계면에 임계각으로 굴절된 파가 훨씬 더 빨리 전파될 수 있다 (그림 8). 특히, 암반층이나 포장층이 인접해 있는 경우, 상기와 같은 탄성파 전파유형이 지배적일 수 있기 때문에 이러한 경우에 대한 고려는 정확한 크로스홀 시험에 필수적인 요소라고 할 수 있다. 따라서, 크로스홀 시험자료를 분석할 때, 모든 가능한 전파경로를 고려하여 발진원을 출발한 탄성파가 가장 최소의 시간에 감진기에 도달할 수 있는 전파경로를 모색하여야 하며, 이를 기준으로 탄성파 전파속도를 결정하여야 한다. 모든 가능한 전파경로를 고려하여 각 층의 탄성파 속도를 결정하는 방법으로 역산해석을 사용하는 방법이 제안되어 있다 (Joh, 1996).

2.5 크로스홀 시험 적용사례

크로스홀 시험의 전형적인 응용은 지반의 P-파 또는 S-파 속도 주상도 (즉, 영탄성계수 또는 전단탄성계수의 깊이별 변화)를 평가하여, 상부구조물을 지지하는 기초의 정적 및 내진설계, 부지의 지진 및 인위적 진동에 대한 동적거동특성 평가 등을 예로 들 수 있다. 이러한 전형적인 응용사례 이외에 최근에는 지반구조물 시공관리에 적용되는 경우가 증가하고 있는데, 그 한 예로 미국 JFK 공항의 활주로 하부에 마이크로터널링(micro-tunneling) 공법에 의해 설치된 전력구 시공전후의 활주로 하부지반 강성평가를 들 수 있다.

활주로 하부지반은 준설매립에 의해 조성된 연약한 사질토 지반으로, 마이크로터널링 공법을 적용하여 활주로 하부지반을 관통하는 약 5 ft (1.5 m) 직경의 전력구를 설치하였다. 마이크로터널링 시공시 콘크리트 관을 굴진시키기 위하여 사용된 고압의 벤토나이트 슬러리는 연약한 활주로 하부지반을 교란시켜 결과적으로 상부구조물인 활주로에 구조적 손상을 초래될 가능성이 있었다.

따라서, 마이크로터널링으로 인한 활주로의 안정성을 평가하기 위하여 터널시공 전후의 지반강성을 평가하기 위하여 크로스홀 시험과 SASW 시험이 적용되었는데, 그림 9~11에 크로스홀 시험 결과를 제

시하였다. 그림 9~10은 터널링 전후 크로스홀 시험에 의해 측정된 시계열 데이터이고, 이를 분석하여 평가한 S-파 속도 주상도는 그림 10에 보인 바와 같다. 지반의 구조적 성능을 평가하기 위하여 여기서는 S-파 속도만을 이용하고 P-파 속도는 이용하지 않았는데, 이는 S-파가 지반매질에 전단변형을 일으

키면서 전파되는 것이어서, 전단변형에 저항력이 없는 물은 S-파를 전달시키지 못하기 때문에, 지반의 유효응력 상태를 평가하기 위하여는 P-파 보다는 S-파를 사용하여야 하기 때문이다. 결과적으로 그림 11의 결과를 참고하면, 개략적인 터널위치 상하부 지반에서의 S-파 속도에 터널 시공전후 큰 변화가 없었기에, JFK 활주로 하부에 시공된 마이크로 터널링 시공으로 활주로 하부지반이 활주로의 구조적 안정성에 영향을 줄 정도로 교란되지 않았을 것으로 판단되었다. 또한, 크로스홀 시험으로 측정된 S-파 속도 주상도는 JFK 공항 활주로 부지특성을 고려한 S-파 속도-SPT N 치 관계식(식 5와 6)에 의하여 SPT N 치 주상도로 변환되었다. S-파 속도-SPT N 치의 JFK 공항 부지고유 관계식은 크로스홀 시험이 시행된 동일 시추공에서, 시추공 굴착시 수행된 SPT 시험 결과와 마이크로 터널링 전의 크로스홀 시험결과를 이용하여 구한 관계식이었는데, 이 식을 이용하여 변환한 SPT-N 치 또한 활주로 지반의 안정성을 확인하여 주었다 (Stokoe, Joh and Bay, 1994).

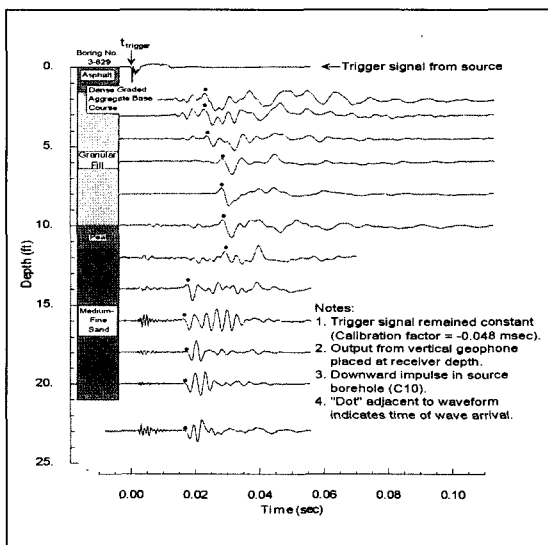


그림 9. 마이크로터널링 전의 크로스홀 시험결과

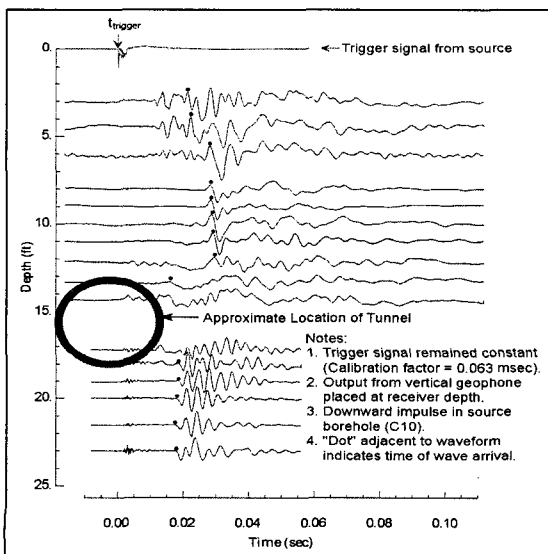


그림 10. 마이크로터널링 후의 크로스홀 시험결과

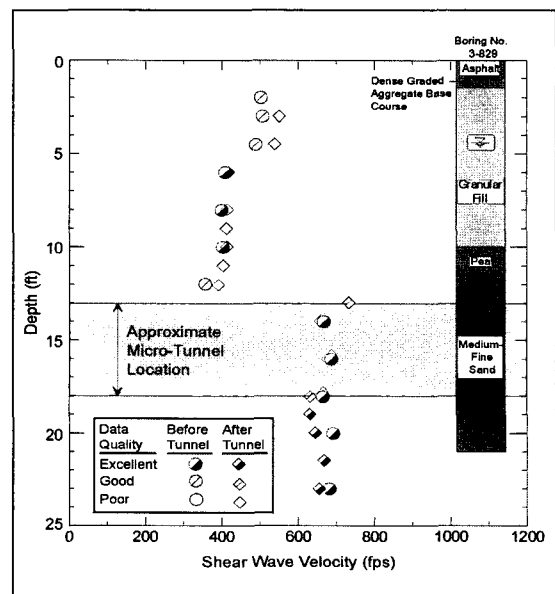


그림 11. 크로스홀 시험에 의해서 구한 마이크로터널링 전후 S-파 속도의 비교 (Stokoe, Joh and Bay, 1994)

강좌

• 준설매립된 사질토층 (깊이 < 10 ft) :

$$N = (V_s / 259)^{3.455} \quad (5)$$

• 중간-가는 입자의 사질토층 (깊이 ≥ 10 ft) :

$$N = (V_s / 277.5)^{3.417} \quad (6)$$

여기서, V_s (ft/sec) ≤ 750 ft/sec이고, N 치는 에너지 보정을 하지 않은 값이다.

3. 다운홀 시험 (Downhole Testing)

3.1 다운홀 시험의 개요

다운홀 시험은 하나의 시추공을 이용하여 지반의 P-파 속도 및 S-파 속도를 구하는 현장 시험법이다 (Stokoe and Hoar, 1978). 두 개 이상의 시추공을 필요로 하는 크로스홀 시험과는 달리 단 한 개의 시추공만 필요로 하기 때문에, 크로스홀 시험보다는 경제적이어서 일반적으로 많이 활용되는 기법이다. 다운홀 시험에서는 기본적으로 지표면에서 가해지는 발진원에 의해 발생된 체적파가 발진원으로부터 지반 속의 감진기까지 전파되는 시간을 측정하고, 체적파의 전파경로의 길이와 측정된 전파시간으로부터 체적파의 전파속도를 결정하는 방법이다. 개략적인 다운홀 시험의 개념도는 그림 12에 도시한 바와 같으며, 다운홀 시험으로 측정된 전형적인 실험결과인 P-파 및 S-파의 주시곡선과 P-파, S-파 속도 주상도가 그림 13에 나타나 있다.

다운홀 시험의 개념도는 그림 12에 도시한 바와 같다. 다운홀 시험을 위해서는 우선적으로 시추공을 설치하여야 하는데, 다운홀 시험이 시행되기 수일전에 착공을 하고, 케이싱을 설치한 후, 그라우팅제를 이용하여 케이싱이 인접지반매질과 커플링이 확실히 유지될 수 있도록 하여야 한다. 다운홀 시험에서 사용하는 시추공은 크로스홀 시험의 시추공과 동일하기 때문에, 경우에 따라서는 다운홀 시험과 크로스홀

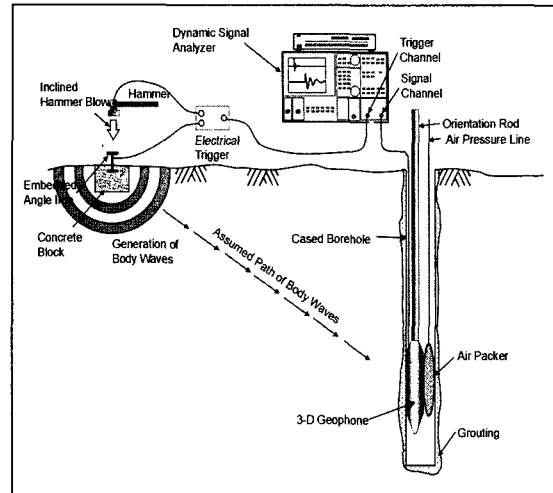


그림 12. 다운홀 시험의 개념도

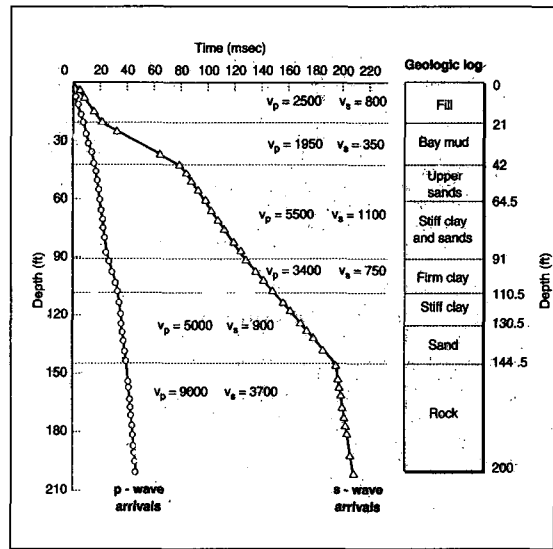


그림 13. 전형적인 다운홀 시험결과

시험을 동일 시추공에 대하여 수행하여, 측정결과의 신뢰성을 높이기도 한다. 다운홀 시험에서 탄성파의 발진은 시추공으로부터 약 0.5 m~2.5 m 정도 떨어진 곳에 콘크리트 블록이나 나무블록을 지반 속에 매립하여 그 표면이 지표면과 일치하도록 고정시키고, 고정된 블록을 타격함으로써 이루어진다. 일반적으로 콘크리트 블록이나 나무블록에는 해머로 타격하

기 쉽게 형강이나 철판을 부착시키는데, 이는 해머로 블록을 타격할 때, 충격에너지가 확실히 지반 속으로 전달될 수 있도록 하기 위함과 또한 해머의 금속 성분과 형강이나 철판의 금속성분이 접촉함으로써 전기 트리거가 작동하여 탄성과의 발진을 기록하기 위함이기도 하다.

3.2 다운홀 시험 절차

다운홀 시험을 위한 시추공과 탄성과 발진용 블록이 설치되면, 시추공내에 P-파, SV-파, SH-파를 감지할 수 있는 3방향 감진기를 공압장착장치(air packer)에 의해 측정심도에 고정시킨다. 측정심도는 일반적으로 지표면에서부터 0.5 m 간격으로 증가시키는데, 측정간격이 작을수록 더 정확한 결과를 얻을 수 있다. P-파 및 SV-파 속도의 측정은 탄성과 발진용 블록으로부터 P-파 및 SV-파를 발생시켜 이를 3방향 감진기의 P-파 성분, SV-파 성분 감진기를 이용하여 탄성과를 측정하여야 한다. P-파 및 SV-파는 해머로 탄성과 발진용 블록에 수직방향으로 타격함으로써 발생시킬 수 있는데, 이는 수직방향의 충격이 탄성과 전파방향(발진용 블록→3방향 감진기)에 연직방향으로 진동하는 S-파를 발생시키기 때문이다. 또한, SH-파의 발생은 탄성과 발진용 블록의 측면(발진용 블록과 시추공을 잇는 직선의 직각방향)을 해머로 타격 함으로써 매질의 전단변형을 탄성과 전파방향과 평행한 방향으로 유도할 수 있다. 이렇게 각 측정심도에서 세 가지 탄성과를 모두 획득한 후, 다음 측정심도로 3방향 감진기를 이동시키고, 동일한 절차를 반복하여 탄성과 속도를 측정한다.

다운홀 시험으로부터 측정된 전형적인 주시곡선(travel time record)은 그림 14와 같다. 그림 14에는 두 개의 주시곡선이 도시되어 있는데, 이들은 탄성과 발진용 블록(플랭크)의 양 측면에 해머로 각각 타격을 가함으로써 측정된 기록들이다. 즉, 위 부분의 주시곡선과 아래 부분의 주시곡선은 발진용 블록에 대하여 서로 반대방향으로 타격함으로써 얻어진 것이다. P-파와 달리 S-파의 경우는 탄성과 발진을

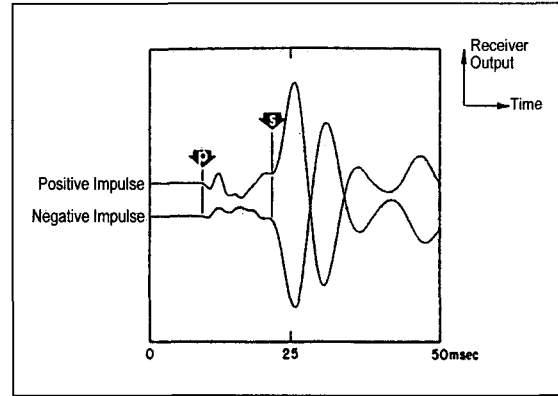


그림 14. 다운홀 시험으로 측정된 전형적인 주시곡선

위한 타격방향에 따라 주시곡선의 부호가 달라지게 되는 특성이 있으므로, 이를 이용하면, S-파가 도착하는 시점을 파악할 수 있다 (Schwarz and Musser, 1972).

다운홀 시험은 원칙적으로 시추공에 하나의 3방향 감진기를 설치하여 탄성과 전파를 측정하는 것이지만, 하나의 시추공에 두 개의 3방향 감진기를 설치하여 두 감진기에 도착하는 탄성과의 시간차를 측정함으로써 지반매질의 탄성과 속도를 측정하는 방법도 있으며(Stokoe and Hoar, 1978; Hoar and Stokoe, 1980; Patel, 1980), 전자를 직접측정 (direct measurement), 후자를 시간차 측정(interval measurement)이라고 한다. 그림 15에 전형적인 시간차 측정에 의한 대표적 주시곡선의 예가 도시되어 있다. 두 개의 감진기를 이용한 시간차 측정은 탄성과 발진시점의 기준과 관련된 문제와 탄성과의 전파경로와 관련된 문제를 제거할 수 있는 장점이 있다. 시간차 측정방법으로 다운홀 시험을 수행할 때, 두 감진기 간격의 결정에 다소 유의할 필요가 있다. 두감진기 간격은 각 감진기에 도달하는 시간차이를 정확하게 결정할 수 있을 정도로 충분히 커야 하며, 또한 지반의 세부 지층변화를 확인할 수 있도록 적당히 좁아야 한다. 그러나, 일부 지반에서는 이러한 두 가지 요건을 동시에 충족시킬 수 없는 경우도 있으므로, 그러한 경우 시간차 측정을 수행할 수 없게 된다. 일반

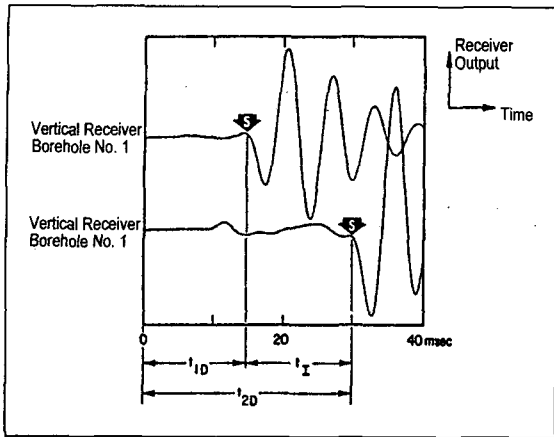


그림 15. 다운홀 시험에서 두 개의 감진기로 측정된 주시곡선

적으로 지표면에 가까운 심도 (약 15 m 보다 얇은 심도)에서는 1.5~3.0 m의 간격을 유지하는 것이 바람직하며, 15 m 이상되는 심도에서는 두 감지기간 간격도 이보다 증가되어야 한다.

3.3 다운홀 시험의 자료분석 및 해석 방법
3.3.1 직접법 (Direct Measurement)

직접법은 하나의 감진기를 이용하여 발진원으로부터의 탄성과 도달시간을 측정함으로써 탄성과 전파 속도를 결정하는 방법이다. 직접법에서는 그림 16에서와 같이 지반의 지층구조에 관계없이, 탄성파가 직선경로를 따라서 전파된다고 가정하고 있다. 지반의 탄성과 속도를 계산하기 위해서 우선적으로 직선 전파경로에 대한 전파시간은 시추공 표면에서 감진기까지의 수직거리에 대한 전파시간으로 환산되어야 한다. 이를 환산전파시간(corrected travel time)이라고 하였을 때, 각 측정깊이와 그 깊이에서 구한 환산전파시간간의 관계를 그림으로 나타내었을 때, 대부분의 경우 몇 개의 직선으로 간략화 될 수 있다. 환산전파시간은 다음 식 7에 의해서 결정된다.

$$t_c = \frac{D}{L} \cdot t \quad (7)$$

여기서, t_c 는 환산전파시간,

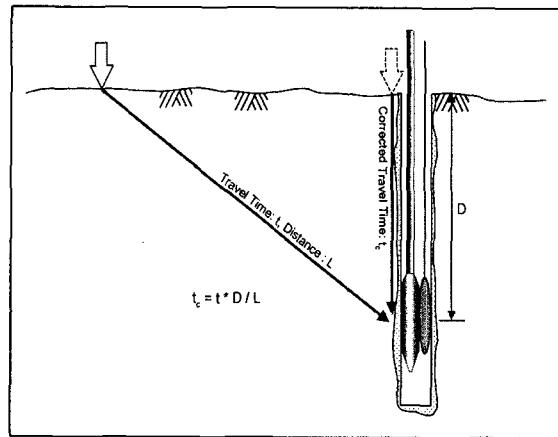


그림 16. 직접법(Direct Measurement)에 대한 개념도

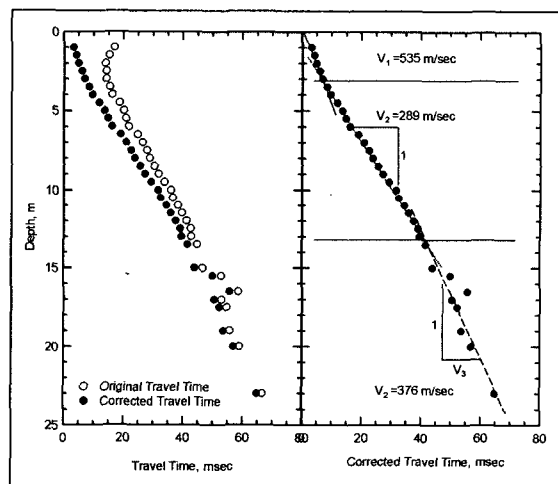


그림 17. 직접법에 의한 탄성과 속도의 계산

- D : 측정심도,
- L : 발진원에서 감진기까지의 수직거리,
- t : 다운홀 시험으로 측정된 탄성과 전파시간 등이다.

그림 17에 충청남도 홍주중학교에서 수행한 다운홀 시험결과가 도시되어 있다. 다운홀 시험으로 측정한 탄성과 도달시간으로부터 환산전파시간을 식 7에 의해 계산하였고, 환산전파시간을 측정깊이에 대한 도시한 결과도 원도달시간(original travel time)과 함께 나타나 있다. 이러한 환산전파시간-깊이의

관계로부터 직선 기울기의 역수를 구하면, 그 기울기의 역수가 바로 그 해당심도에 해당하는 지반의 탄성파 속도가 된다.

3.3.2 시간차법 (Interval Time Measurement)

시간차법이란 두 개의 감진기를 사용하여 다운홀 시험을 수행하였을 때, 위의 감진기와 아래의 감진기에 도달하는 탄성파 도달시간의 차이를 이용하여 지반의 탄성파 속도를 평가하는 기법을 일컫는다. 그림 18에 시간차법의 개념도에 대해서 개략적으로 언급되어 있는 바와 같이, 지표면 발진원에서 위의 감진기까지의 거리를 L_1 , 탄성파 도달시간을 T_1 , 아래 감진기까지의 거리를 L_2 , 탄성파 도달시간을 T_2 라고 했을 때, 위의 감진기와 아래의 감진기 사이에 존재하는 지층의 탄성파 속도는 다음 식 8에 의해서 평가된다.

$$V = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1} \quad (8)$$

3.3.3 수정 시간차법 (Modified Interval Measurement)

수정 시간차법(Batsila, 1995)은 시간차법과 근본적으로 동일하다. 두 방법 모두 탄성파의 전파경로

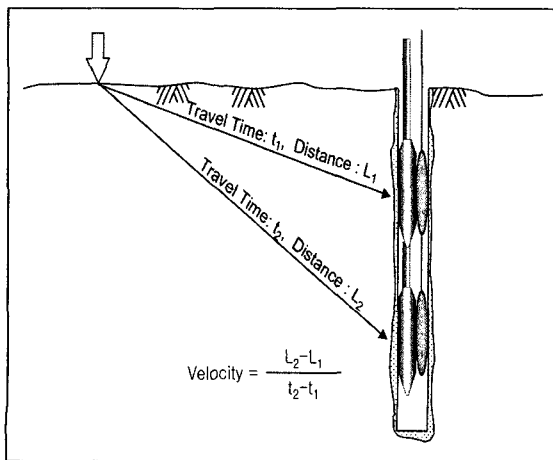


그림 18. 시간차법 (Interval Measurement)의 개념도

를 직선으로 가정하고, 또한 탄성파의 속도계산시 위 감진기와 아래 감진기에 도착하는 시간차를 이용하고 있다. 그러나, 수정시간차법은 지반이 여러 개의 지층으로 구성하고 있다고 가정하여 탄성파의 전체 전파시간 계산을 위하여 각 개별 층의 통과에 필요한 시간을 별도로 계산한다.

그림 19에 수정시간차법에 의해 분석한 다운홀 시험결과가 직접법에 의한 결과와 비교되어 있다. 동일 시추공을 사용하여 수행된 크로스홀 시험결과가 가장 정확하다고 가정하였을 때, 직접법보다는 수정 시간차법이 전반적으로 더 크로스홀 시험결과에 근접하고 있는 사실을 참고하여 보면, 수정시간차법이 직접법보다 더 정확한 해석법임을 알 수 있다. 그림 19의 경우 약 8 m 까지의 천층에서 다운홀 시험결과가 크로스홀 시험결과보다 큰 탄성파속도를 제시하고 있는 것은 시추공과 인접지반사이의 커플링을 위한 시멘트 그라우팅재의 영향이라고 판단된다. 즉, 지반매질보다 더 강성이 큰 그라우팅재를 사용하였을 때는, 지표면에서 발생된 탄성파가 지반을 통과하여 직선 전파경로를 거쳐서 감진기에 도착하기 보다는 그라우팅재를 타고 감진기로 전파되는 경우가 더 시간이 적게 소요되기 때문에, 자료분석시 오류가 발생할 수 있다. 따라서, 시추공을 충전하는 그라우팅재로는 지반매질과 강성이 유사한 그라우팅재를 선택하여야 정확한 다운홀 시험을 수행할 수 있다.

3.3.3 Snell의 법칙을 사용하는 역산해석 방법

다운홀 시험 데이터를 분석하기 위한 새로운 시도가 Mok(1987)에 의해서 시도되었었다. Mok은 역산해석기법에 의해서 지반내 각 지층에서의 탄성파 속도를 구하고자 하였다. 역산해석이란 실험으로 구한 측정치(예, 탄성파 속도)와 이론적 모델링으로 구한 이론치가 일치하게 되는 모델(예, 지층구조 및 각 층의 탄성파 속도)을 최적화기법으로 찾아내는 해석법이다. 다운홀 시험의 역산해석에서 사용한 이론적 모델링은 Snell의 법칙에 의해 탄성파 전파경로를

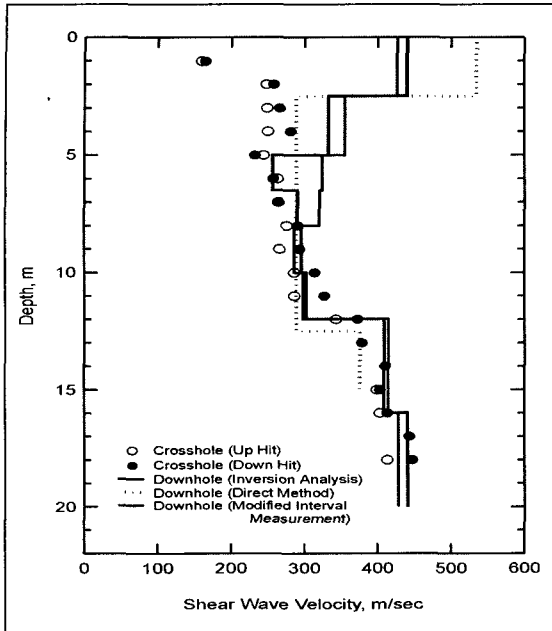


그림 19. 크로스홀 시험결과와 다운홀 시험 결과의 비교

가정하고, 가정된 전파경로에 대해서 전파시간을 결정하는 알고리즘에 의해서 구축되었다. 또한, 역산 해석시 최적해를 찾아내는 최적화 기법으로 Mok은 최소자승법을 사용하였는데, 이는 전체 최소치(global minimum)만 존재하고, 국부 최소치(local minima)가 존재하지 않는 모델의 경우 매우 뛰어난 성능을 보이지만, 국부 최소치가 존재하는 경우는 전체 최소치를 찾지 못하고 국부 최소치로 갇혀 버리는 현상이 발생한다. 따라서, Joh (1998)는 전체 최소치를 찾는데 있어서 보다 뛰어난 성능을 가지는 최대 공산법(maximum likelihood approach)을 사용하는 최적화 기법을 적용하였다. 그림 17에 도시된 충청남도 홍성에서 수행한 다운홀 시험데이터에 대해서 Joh의 알고리즘으로 역산해석을 수행한 결과가 그림 19에 크로스홀 시험과 다른 다운홀 해석법에 의한 결과와 비교되고 있다. 비교된 여러 방법 중 가장 크로스홀 시험결과와 유사하게 일치하고 있는 것은 역산해석에 의한 결과이다. 따라서, 다운홀 시험의 해석결과를 해석하는 가장 정확한 해석법은 역

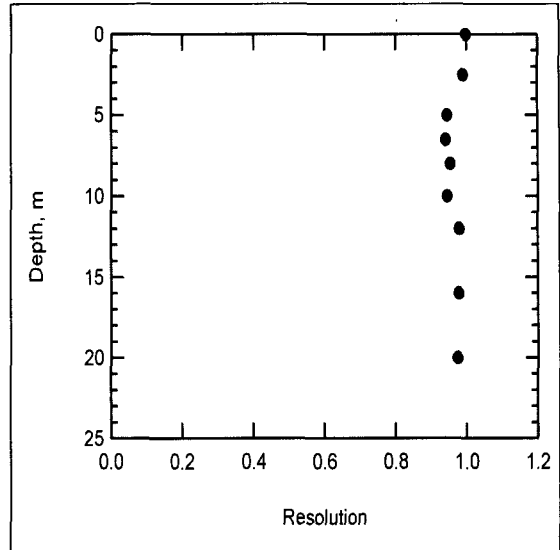


그림 20. 다운홀 시험데이터의 역산해석 결과에 대한 모델 해상도

산해석이라고 할 수 있다. 역산해석법은 타 방법보다 더 정확한 결과를 도출할 뿐만 아니라, 계산한 결과에 대한 상대적인 신뢰성을 판단할 수 있는 모델 해상도 행렬(model resolution matrix)의 계산으로 역산해석 결과에 대한 신뢰성 판단을 할 수 있는 장점도 있다. 그림 20에 다운홀 데이터의 역산해석에 대한 모델해상도의 예가 도시되어 있는데, 이를 참고하면, 모든 측정 심도에서 매우 높은 해상도를 가지고 있음을 알 수 있고, 결과적으로 모든 층에서의 탄성과 속도를 신뢰할 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

4. SASW 실험

4.1 SASW 실험의 개요

SASW (Spectral-Analysis-of-Surface-Waves) 기법은 지반이나 구조물에 대하여 전단 강성의 깊이 별 변화를 추정하기 위하여 비파괴적으로 수행하는 현장 실험법이다. SASW 실험은 기본적으로 지표면이나 구조물의 표면에서 물리적인 충격이나 진동을 가하여 응력파를 발생시키는 것으로 시작이 된다.

충격이나 진동에 의해서 발생한 응력파는 지반이나 구조물의 매체를 통하여 사방으로 전파되어 나가는데, 진동원에서 일정 거리만큼 떨어진 지표면에 설치한 진동 감진기에 의해 지반이나 구조물의 진동을 측정하게 된다. 이렇게 지표면에서 응력파를 발생시키고 일정 위치만큼 떨어진 곳에서 진동에 의한 지반의 진동을 측정하여 하부지반의 지층구조와 깊이에 따른 S-파 속도분포를 구하는 것이 SASW 실험이라고 할 수 있다. 그림 21에 기본적인 SASW 실험방법이 설명되어 있고, SASW 실험결과의 한 예가 그림 22에 도시되어 있다. 그림 22의 SASW 실험은 미국 California의 Treasure Island에서 수행된 것으로, 인접 시추공에서 수행된 크로스홀 시험 결과와 비교되어 있다.

4.2 SASW 실험의 분석 및 해석방법

충격 또는 진동에 의해 시작된 응력파 전파의 측정은 발진원과 일직선 상에 위치한 두 지점에서 이루어지는데, 이는 충격 지점에서 출발하여 전파되어 가는 응력파가 첫 번째 감진기에서 두 번째 감진기까지 도달하는데 소요되는 시간을 측정하여 응력파 전파 속도를 측정하기 위함이라고 할 수 있다. 이러한 응력파 전파 속도의 결정은 신호해석 기법인 FFT (Fast Fourier Transform)의 도움으로 여러 가지 주파수 성분의 정현파에 대해 동시에 이루어지게 되는데(그림 23의 단계 A), 일반적으로 약 400~800 개 주파수의 정현파에 대한 전파 속도를 단 한번의

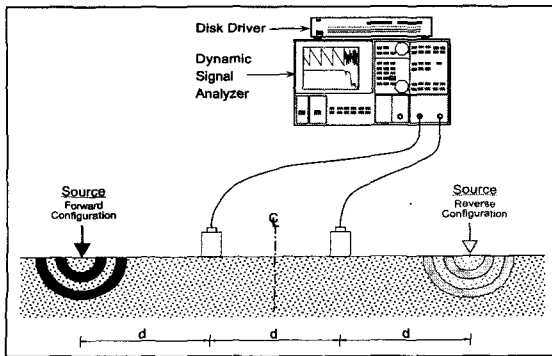


그림 21. 기본적인 SASW 실험장비와 구성

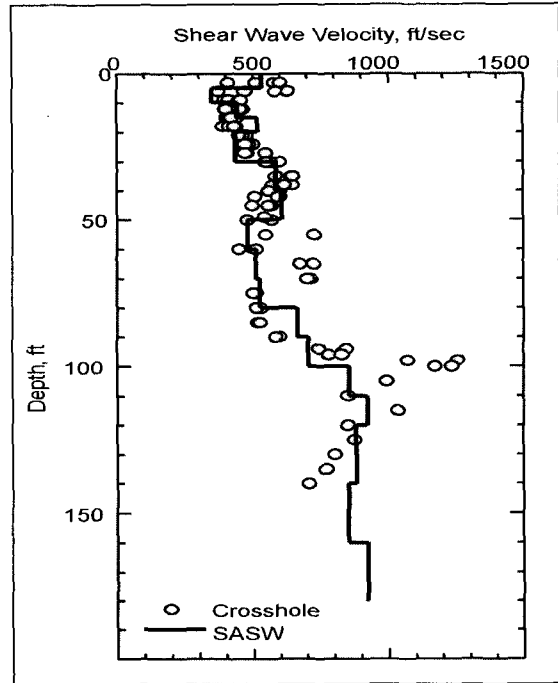


그림 22. 전형적인 SASW 실험결과: 미국 California의 Treasure Island

실험으로 구할 수 있다.

SASW 실험에 의한 응력파의 속도 결정은 특정 주파수를 가지는 정현파에 대하여 두 지점에서 기록된 응력파 진동 간의 위상각 차이(phase difference)를 측정하는 것에 의해서 가능하다. 즉, 두 지점을 통과하는 특정 주파수를 가지는 정현파의 속도 결정은 각 지점에서 측정한 정현파 간의 위상각 차이를 측정하여 정현파의 도달 시간을 계산함으로써 속도 계산이 가능한데, 정현파 간의 위상각 차이는 동적신호분석기 (dynamic signal analyzer)에 의해서 실시간으로 측정가능하다(그림 23의 단계 B). 일반적으로 FFT 해석에 의해서 결정된 위상각 차이는 -180° 에서 180° 사이의 값을 갖는 비전개위상각 (wrapped phase angle)이라고 하는데, 탄성파의 전파속도를 계산하기 위해서는 $\pm 180^\circ$ 내의 값으로 접혀 있는 값을 풀어줄 필요가 있으며, 이를 위상각 전개(phase unwrapping)라고 한다(그림 23의 단

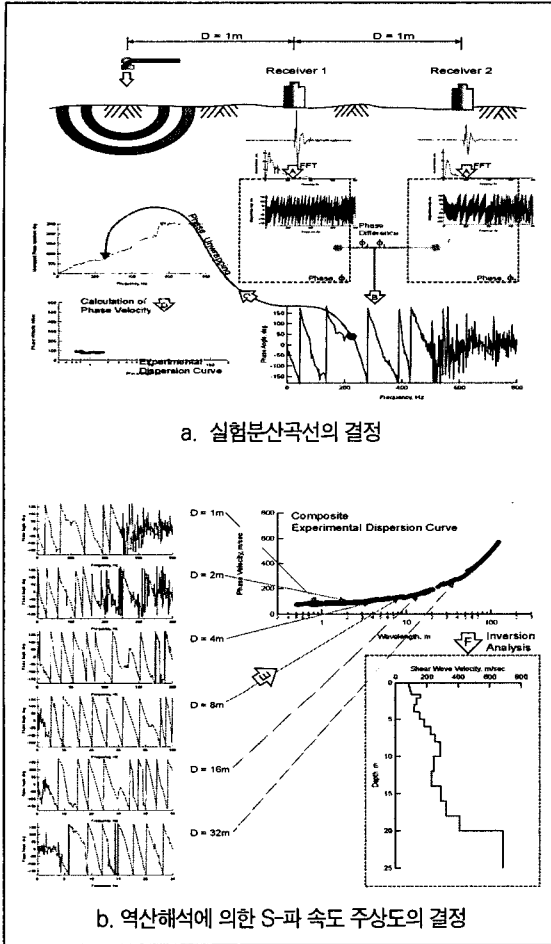


그림 23. SASW 실험의 자료분석 및 해석방법

계 C). 위상각 전개 작업에는 위상스펙트럼의 불량 데이터를 제거하는 것과 또한 -180° 에서 $+180^\circ$ 로 위상각이 급전하는 부분에 대한 판독 작업이 동반되어야 하며, 이러한 과정을 마스킹 (masking)이라고 한다. 이렇게 마스킹과 위상각 전개 과정을 마친 후 식 9에 의해서 탄성파의 전파속도를 계산할 수 있다 (그림 24의 단계 D). 이러한 정현파의 전파 속도는 위상각을 이용하여 결정되는 것이기에 일반적으로 위상속도 (phase velocity)라고 한다.

$$V_{ph} = \frac{f \cdot d}{\phi / 360^\circ} \quad (9)$$

여기서, V_{ph} 는 위상속도, f 는 탄성파의 주파수, d 는 두 감지기간 거리, ϕ 는 전개위상각이다.

특정 주파수에 대해서 계산된 위상속도는 주파수 (f) · 위상각 속도 (V_{ph}) · 파장 (λ) 간의 관계식인 식 (10)를 이용하여 파장과의 관계로 표현될 수 있다.

$$V_{ph} = f \cdot \lambda \quad (10)$$

즉, SASW 실험에 의해서 결정된 약 400~800 개의 위상각 속도는 상응하는 파장과 유일한 관계를 이루게 되는데, 일련의 파장(wavelength)에 대한 응력파의 위상속도(phase velocity)의 관계를 분산곡선(dispersion curve)이라고 한다. 이 분산곡선은 평가 대상인 부지의 서명(書名)파도 같은 것으로, 특정 부지에 대해서 분산곡선은 유일하게 결정되어진다. 현장에서 실험에 의해 결정된 분산곡선은 실험 분산곡선(experimental dispersion curve)이라고 하며, 이 실험분산곡선은 부지의 S-파 속도 주상도 (shear wave velocity profile), 즉, 깊이에 따른 S-파 속도의 분포를 도출하는데 사용이 된다.

실험분산곡선은 조사하고자 하는 지반의 심도에 적합한 탄성파 파장의 범위에 해당하는 데이터를 포함하고 있어야 한다. 예를 들어, 심도 약 30 m 까지 지반조사하고자 하면, 실험분산곡선에는 탄성파의 파장 약 90 m 까지에 대한 위상속도 데이터가 포함되어 있어야 한다. 따라서, 지반조사 깊이가 깊어질수록, 큰 파장에 대한 위상속도를 구하기 위하여 감지기간 거리를 확장하여 SASW 실험을 수행할 필요가 있다. 감지기간 거리를 달리하여 수행된 각 SASW 실험으로부터 결정된 모든 위상속도 데이터를 취합하면, 최종적으로 복합실험분산곡선을 얻게 된다 (그림 23의 단계 E).

이렇게 복합실험분산곡선을 결정한 후, S-파 속도 주상도의 도출을 위한 역산해석(inversion analysis)이나 반복적 정모델링 해석(iterative forward modeling analysis)을 수행하게 된다 (그림 23의 단계 F). 이는 근본적으로 S-파 속도 주상도를 가정하

고 그에 대하여 이론적으로 계산된 분산곡선, 즉, 이론분산곡선(theoretical dispersion curve)과 실험 분산곡선이 일치될 때까지 반복적으로 S-파 속도 주상도의 가정을 변화시켜나가는 것이다. 이러한 S-파 속도 주상도의 가정에 대한 수정이 최적화 이론에 의해서 수행이 되면 이를 역산해석이라고 하고, 인위적으로 인간의 판단에 의해서 수정이 되면 반복적 정모델링 해석이라고 한다. 반복적 정모델링 해석은 인간의 판단에 의해 수행되기 때문에 무수히 많은 횟수의 시행오차를 거쳐야 하고 그 결과의 신뢰성도 높지 않다고 할 수 있다. 반면, 역산해석에 의한 기법은 최적화 알고리즘에 의하여 가장 적합한 해를 찾기 때문에 객관성 및 높은 정밀도를 유지할 수 있는 장점이 있으며, 또한 S-파 주상도를 구하는 과정에 있어서 반복적 정모델링 기법의 경우처럼 시행오차를 거치지 않기 때문에 시간적인 면에서도 상당히 경제적이라고 할 수 있다.

4.3 SASW 기법의 적용사례

SASW 기법이 개발된 초기에는 아스팔트 포장층의 두께, 강성, 보조기층 및 기층의 건전도 상태를 평가하는데 SASW 기법이 활용되었었고, 이후 SASW 기법은 보다 본격적으로 토목공학의 기타 분야로 확대 적용되었다. 최근까지의 적용사례를 보면, 그림 24에 도시된 바와 같다. 본고에서는 그림 24에 소개된 사례 중 SASW 기법이 성공적으로 적용

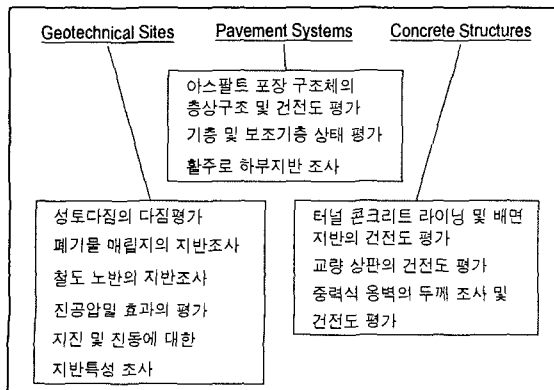


그림 24. SASW 기법의 적용사례

된 지반, 포장 구조체, 콘크리트 구조물에 대한 대표적 사례를 고찰하였다.

4.3.1 지반

미국 LA에서는 1994년 Northridge 지진이후 근교에 위치한 쓰레기 매립장에 대해 집중적으로 지진 특성 조사를 수행하였다. 이는 대부분의 쓰레기 매립장의 높이가 30~50 m에 이르고 있고, 지진시 쓰레기 매립장이 붕괴될 때 인근 지역의 고속도로, 주택, 공공시설 등의 도시 시설이 붕괴될 수 있으며, 사후 복구를 위한 상당한 노력과 경비에 대한 부담이 크기 때문이다. 지반의 지진특성 분석을 위해서는 S-파 속도 주상도가 입력변수로 사용되어야 하기 때문에, S-파 속도 주상도를 추정하기 위한 SASW 실험이 매립장 상부 지표면에서 시행되었고, 쓰레기 매립장에 시추공을 설치하여 OYO사의 PS 검층(Suspension Logging)이 수행되었다. 상부 150 ft

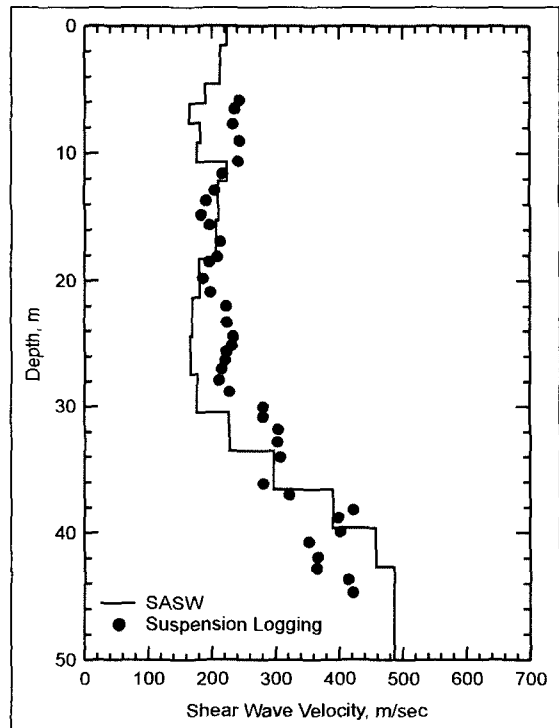


그림 25. 미국 LA의 이 쓰레기 매립장에 대한 SASW 실험결과와 OYO Suspension Logging 결과의 비교

까지의 SASW 실험과 PS 검층으로 구한 S-파 속도의 비교가 그림 25에 제시되어 있다. S-파 속도의 전체적인 경향은 대체적으로 일치하나, 국부적으로 다소간의 차이를 보이고 있는데, 이는 쓰레기 매립장이 그 특성상 상당히 불균질한 매질로 구성되어 있으며, SASW 실험으로는 실험 축선에 대한 평균물성을 제시하지만, PS 검층은 시추공 주위 인접 매질의 물성만 제시하기 때문이다.

최근에 건설되는 폐기물 매립장은 유출수의 방지 및 오염원 누출의 제어를 위하여 상부 토피 뿐만 아니라 하부 바닥에도 FML(Flexible Membrane Lining)을 설치하는데, PS 검층과 같이 시추공을 필요로 하는 경우 시추공의 설치시 FML을 파괴시키기 때문에, 정상적인 폐기물 매립장의 경우 PS 검층에 의한 지반조사는 허용되지 않는다. 이러한 경우 S-파 속도 주상도를 평가하기 위해서는 SASW 실험이 유일한 방법이 된다.

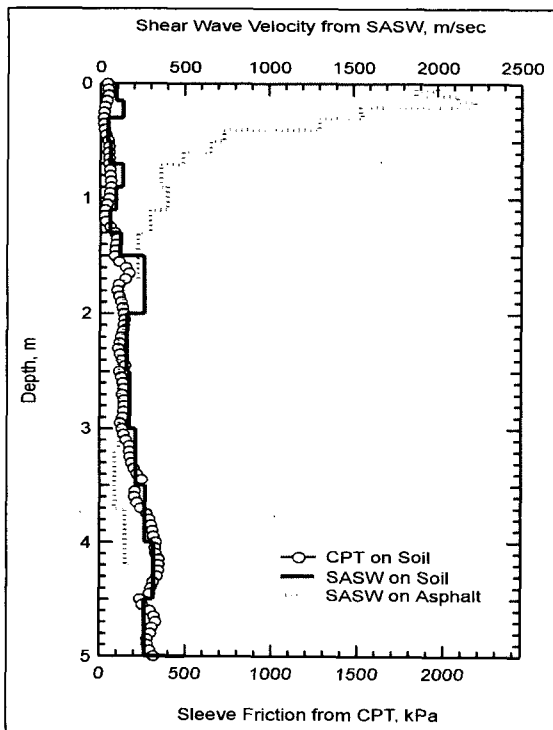


그림 26. 경기도 양지의 포장도로에 대한 SASW와 CPT 실험 결과의 비교

4.3.2 포장 구조체

아스팔트 포장 도로의 유지관리는 포장층의 두께, 포장층의 강성 그리고 보조기층·기층의 강성 및 상태에 대한 평가를 필요로 한다. 포장 도로의 경우 SASW 기법으로 평가하여야 할 심도가 작아서 실험과 자료분석에 작은 노력이 소요된다. 그러나, 강한 포장층 (1000~2000 m/sec)과 상대적으로 연약한 보조기층·기층(약 300 m/sec 이하)의 강성대비는 표면파의 전파를 매우 복잡하게 만들어, 포장 구조체 내의 복잡한 표면파 전파 메커니즘에 대한 이해없이는 정확한 자료 분석이 용이하지 않다. 포장구조체의 경우와 같이 강성대비가 큰 경우에 있어서는 Joh(1996)가 제안한 배열역산 (array inversion) 해석이 SASW 결과에 대한 정확도를 높여줄 수 있다.

경기도 죽산-양지간 도로 확장 및 포장 공사 현장에서 교대 구조물의 기초인 말뚝을 시공하기 위하여 오거링을 하던 도중 연약지반이 발견되었다. 그리하여, 보강토 옹벽 형태의 교대 구조물이 위치하게 되는 지반의 주위 지역에 대해서 연약지반층에 대한 정밀 지반조사가 필요하게 되었다. 기존의 포장층을 파괴하지 않고 지반조사를 수행하기 위해서 SASW 실험이 도입되었고, 보조 자료를 제공하기 위하여 CPT 시험도 병행되었다. SASW 실험은 교대 인근의 원지반과 아스팔트 포장 위 두 축선에서 시행하였고, CPT 시험도 SASW 실험축선에 인접한 원지반에서 수행하였다. 그 결과 SASW에 의해 구한 S-파 전단파 속도 주상도와 CPT에 의해 구한 측면 저항(fs)은 그림 26에 도시한 바와 같다. 그림 26에 의하면, 포장층 표면하 2~3.7 m 심도에 연약층이 존재하는 것을 알 수 있는데, 이러한 사실은 SASW결과와 CPT결과에 있어서 공통적으로 일치되고 있는 사항이다. SASW결과와 CPT결과와의 유사성은 포장층 위에서 수행한 비파괴, 비관입 시험인 SASW 기법의 신뢰성을 확인하고 있다.

4.3.3 콘크리트 구조물

지반에서 성공적으로 전단강성을 평가하는데 적용

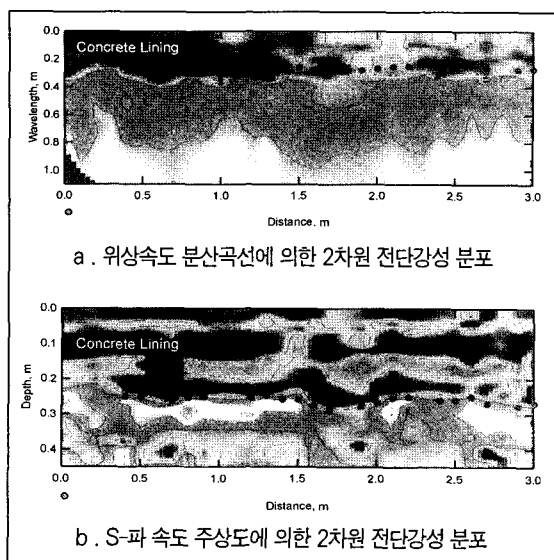


그림 27. 강원도 ○○터널 콘크리트 라이닝에 대하여 SASW 실험으로 구한 2차원 전단강성 분포

되었던 SASW 기법은 1990년대 들어서 콘크리트 구조물의 건전도 평가에 활용되기 시작하였다. 구체적인 예로는 콘크리트 중력식 댐, 터널의 콘크리트 라이닝, 교량의 콘크리트 상판 등이라고 할 수 있는데, 이 중 터널의 콘크리트 라이닝에 대한 영역은 근래 관심이 고조되고 있으며, 터널의 국부정밀 안전진단에의 활용을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 최근 강원도 ○○터널에서 터널벽체에 대하여 일련의 SASW 시험을 수행하였다. SASW 실험은 0.1 m 간격으로 모두 31개 지점에서 수행하였으며, 그 결과 그림 27과 같은 거리-깊이 차원에서 2차원적 위상속도 분산곡선 및 2차원적 S-파 속도 분포를 구할 수 있었다. 그림 8은 전체 3 m 구간에서 콘크리트 라이닝의 건전도 상태를 시각화하여 주며, 콘크리트 라이닝 및 그 배면 상태에 대해서도 개략적인 상태에 대한 파악을 가능하게 한다. 그림 27의 컨투어 도표에 의하면 콘크리트 라이닝과 방수막 사이의 경계를 추정하는 것이 가능한데, 방수막의 경우 전단강성이 매우 작고 또한 방수막과 부직포가 배면의 1차 라이닝과 완전 밀착되어 있지 않을 수도 있기 때문에, 그

경계면에서는 전단강성의 불연속성이 존재할 수 있다. 이러한 사실을 염두에 두고 전단강성의 급격한 변화가 일어나는 곳을 찾아 보면, 그림 27에 검은 점으로 표시한 것과 같은 방수막과 콘크리트 라이닝의 경계면을 추정해 볼 수 있다. 이러한 2차원적 강성 분포이외에도 SASW 실험에 의해서 방수막 밀착상태, 콘크리트 라이닝의 평균 강성 (S-파 속도), 콘크리트 라이닝 두께 등을 평가하는 것이 가능하다.

참고문헌

1. 목영진, 백영식, 임수빈 (1998). "탄성파 시험을 이용한 그라우팅 성과 평가," 한국지반공학회 학술발표회 논문집, pp.85-92.
2. Batsila, Evanthia (1995), Investigation of Ray Path Attenuation Assumptions on Downhole Velocity Profiles, M.S. Thesis, The University of Texas at Austin.
3. Fuhriman, M. D. (1993), Crosshole Seismic Tests at Two Northern California Sites Affected by the 1989 Loma Prieta Earthquake, Master Thesis, The University of Texas at Austin.
4. Heisey, J. S., Stokoe, K.H., II, Hudson, W. R. and Meyer, A. H. (1982). "Determination of in situ shear wave velocities from Spectral-Analysis-of-Surface-Waves." Research Report No. 256-2 Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
5. Hoar, R.J., Stokoe, K.H., II (1978), "Generation and Measurement of Shear Waves in Situ," Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, ASTM, pp.3-29.
6. Joh, S.-H. (1996), Advances in Data Interpretation Technique for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) Measurements, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin.

7. Joh, S.-H., and Mok, Y.J. (1998), "Development of an Inversion Analysis Technique for Downhole Testing and Continuous Seismic CPT," Journal of Korea Geotechnical Society, pp.95-108.
8. Kramer, S.L. (1996), Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, 653p.
9. Mok, Y.J. (1987), "Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods," Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 266p.
10. Patel, N.S. (1980), "Generation and Attenuation of Seismic Waves in Downhole Testing," M.S. Thesis, The University of Texas at Austin.
11. Redpath, B.B., et al. (1982), "Development of Field Techniques to Measure Damping Values of Near-Surface Rocks and Soils," Unpublished Report Prepared by URS/John A. Blume & Associates, NSF Grand No. PFR-7900192.
12. Redpath, B.B. and Lee, R.C. (1986), "In Situ Measurements of Shear-Wave Attenuation at a Strong-Motion Recording Site," Unpublished Report Prepared by URS/John A. Blume & Associates, USGS Contract No. 14-08-001-21823.
13. Roblee, C.J. (1990), "Development and Evaluation of a Tomographic Seismic Imaging Techniques for Characterization of Geotechnical Sites," Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 680p.
14. Schwarz, S.C. and Musser, J.M. (1972), "Various Techniques for Making In Situ Shear Wave Velocity Measurements-A Description and Evaluation," Proceedings of the International Conference on Microzonation for Safer Construction, Research and Application, Vol. 2, Seattle, Washington, pp.593-608.
15. Stokoe, K.H., II, and Hoar, R. J. (1978), "Variables Affecting In Situ Seismic Measurements," Proceedings of the Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE Geotechnical Engineering Division, Vol. II, pp.919-939.
16. Stokoe, K.H., II, Joh, S.H., and Bay, J.A. (1994), SASW Test Results: O.I.I. Landfill, Monterey Park, California, Report for Environmental Solutions, Inc.
17. Stokoe, K.H., Joh., S.H. and Bay, J.A. (1994), Evaluation of Subgrade Stiffness Before and After Tunneling Operations at Joh F. Kennedy Airport, Geotechnical Engineering Report GR93-8.

지반공학회 Home Page 안내

Domain Name : <http://www.kgshome.org>

E-mail Address : webmater@kgshome.org

homepage유지 관리를 위하여 학회 내에 홈페이지 관리 위원회를 둘 예정이며, 관심을 가지고 봉사할 회원은 지반공학회(Tel: 02-3474-4428, Fax: 02-3474-7379, E-mail: kgssmfe@chollian.net 또는 webmater@kgshome.org)로 연락하여 주시기 바랍니다.

※자세한 내용은 지반1월호 59쪽을 참고하시기 바랍니다.