

다중 채널 표면파(MASW: Multichannel Analysis of Surface Wave) 시험에 의한 지반 전단파속도 측정

원경식*, 조중각**, 장기영**, 박상욱**

1. 서 론

지반 동적 해석을 위한 동적변형계수값을 측정하기 위한 시험방법은 동적 실내시험(진동탁자시험, 비틀전단, 공진주시험등)과 현장시험(Down-hole Test, Cross-hole Test, Surface wave Test등)으로 구분된다. 국내의 경우 실무적 관점에서 과거 동적 실내시험은 장비의 특수성등에 비추어 주로 연구 목적으로 적용되는 경향이 많아왔으며, 반면에 현장 시험은 그 간편성에 의해 실무적 측면에서의 적용이 다소 많아 왔던 것으로 보여진다

현장 동적 시험은 물리적 탐사 기법을 이용한 것으로 시추공에서 수행하는 방법과 시추공이 없이 지표면에서 수행하는 방법으로 구분할 수 있다. 전자의 방법으로는 Down-hole Test, Suspension-PS검층, Cross-hole Test 등을 들수 있으며, 후자로는 표면파 특성을 이용한 탐사 시험법으로 표면파 스펙트럼 해석(SASW: Spectrum Analysis of Surface Wave) 시험, 연속표면파(Continuous Surface Wave) 시험, 다중채널 표면파 시험(MASW: Multi-channel Analysis of Surface Wave Test)을 들 수 있다. 전자의 방법은 시험공이 필요함에 따라 토사층 보다는 주로 시험공의 유지가 수월한 암반층을 대상으로 적용되어 왔으며, 후자의 방법은 시험공이 필요

없으며 표면파의 특성을 이용함에 따라 천부의 토사층 지반을 대상으로 연구되어 효과적으로 적용되어 왔다.

본 고에서는 토사층에 대한 지반 전단파 속도 측정을 주 목적으로 표면파(Surface Wave) 탐사법의 하나인 다중채널 표면파 시험(Multi-channel Analysis of Surface Wave Test)을 적용한 최근 국내 실 적용사례 결과에 대해 정리 소개하고자 한다.

2. 다중 채널 표면파 시험(MASW)

2.1 배경

진동파는 크게 P파, S파로 구분되는 체적파(body wave)와 러브파(love wave), 레일리파(rayleigh wave)로 구분되는 표면파(surface wave)로 구성되며 그 에너지 비율을 보면 체적파가 33%, 표면파가 67%로 표면파가 차지하는 비중이 매우 큼에도 불구하고 과거 탄성파탐사에 있어서는 단지 소음(noise)으로 취급되어 왔다.

표면파는 지표면을 따라 전파되는 탄성파로 이중 러브파는 특별한 지층구조에서만 존재하며 레일리파는 모든 자유지표면이 있을 경우 항상 발생 존재하는 탄성파로 통상 표면파라함은 레일리파를 말한다.

표면파는 주파수에 따라 그 전파속도 및 과정이 변화하며 또한 그 에너지는 지표면 부근에 집중되며 지표면 하부 심도로 갈수록 지수함수적인 감쇠를 나타

* 정회원, 지오텍 컨설턴트(주) 대표이사

** 정회원, 지오텍 컨설턴트(주) 이사

** 지오텍 컨설턴트(주) 사원

** 지오텍 컨설턴트(주) 사원

내에 대략 한 파장(wave length) 정도의 심도이상에서는 거의 소멸되는 특성을 갖고 있다. 이를 분산 특성(dispersion characteristic)이라하며, 이는 표면파의 전파속도는 한 파장 이내의 심도 구간 지층상태에 따라 영향을 받게됨을 의미한다

MASW 시험법(Park et al. 1999)은 이러한 표면파의 분산특성을 이용하여 지층의 전단파 속도 분포 파악 및 간접적인 지층 상태를 파악하기 위한 시험방법으로 미국 Kansas 지질연구소에서 1990년대 후반에 개발된 시험법으로 국내에서는 2000년 후반에 도입되어 적용되어 오고 있다. 이와 동일한 원리의 시험방법으로 이전에 국내에도 간간히 적용되어왔던 표면파에 대한 스펙트럼분석 기법을 적용하여 원부 지층의 전단파속도(V_s) 추상을 유도하는 SASW 시험법(Heisey et al. 1982, Nazarian et al., 1983, Stokoe et al. 1988)과, 국내에 적용사례는 없으나 보다 폭넓은 주파수를 갖는 진동파를 발생시킬수 있는 주파수 조절진동기(frequency-controlled vibrator)를 진동원으로 사용하여 다양한 주파수대역의 위상속도 추출을 가능하게 하는 CSW시험법(Abbiss C. P 1981, Tokimatsu K. et al. 1991, Matthews et al. 1996)등이 있다.

이들 각각의 시험방법은 시험방법과 해석기법에서

다소의 차이가 있을뿐 근본적으로 표면파의 분산특성을 나타내는 주파수 또는 파장과 위상속도(Phase velocity)간의 관계를 나타내는 분산곡선을 결정한 후 이에 대한 역산 과정을 통해 최종의 지반 전단파속도 추상을 획득한다는 점에서는 거의 유사하다.

MASW 시험법과 상대적으로 국내에서 많이 알려져있는 표면파 해석 시험법인 SASW와의 비교를 나타내면 표 1과 같다

2.2 시험방법

MASW 시험에 사용되는 장비는 통상의 탄성과 탐사 장비가 이용되며 대신 상대적으로 저속도, 저주파 특성을 갖는 표면파 수진을 위해 저주파 지오폰(보통 4.5Hz 이하)이 사용된다

MASW 시험과정은 크게 현장에서의 탄성과 자료 획득(data acquisition), 수집된 자료의 분산 해석(dispersion analysis), 역해석(inversion analysis)의 3단계로 구분되며 다음과 같다.

1. 축선 설정 및 탄성파 자료 획득(Data Acquisition)

- 저주파수(4.5Hz 이하) 수진기(Geophone)를 시험목적 및 현장 여건을 감안하여 지표면상에 일정 등간격(0.5m, 1.0m...)으로 설치 후 가장

표 1. MASW와 SASW의 비교

구분	MASW (Multichannel Analysis of Surface Wave)		SASW (Spectral Analysis of Surface Wave)	
	구분	특징	구분	특징
장비	축진장비	탄성파 탐사기	속도계(Dynamic Signal Analyzer)	
구성	수진기배열	Multichannel(12, 24, 48)	2개 또는 4개 이상의 수진기	
해석과정	해석과정	· 현장 탄성파 자료 획득	· 현장 탄성파 자료 획득	· 위상각 스펙트럼 분석
		· 분산 분석		· 실험분산 곡선 작성
특징	특징	· 역산	· 표면산 곡선 결정	· 역산
		· V_s -profiling		· V_s -profiling
특징	특징	· Patten 분석	· 반복측정 및 계산	· source offset에 의한 후분적인 분산곡선 선정
		· 정확한 분산곡선 선정		· S-wave 선정
		· S-wave 선정		· 일차원 V_s -profiling
		· 일차원, 이차원 V_s -profiling		



그림 1. 저주파 Geophone (4.5Hz) 등간격 설치



그림 2. Source 발진(SPT weight hammer)

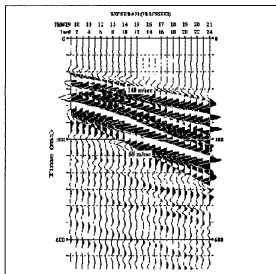


그림 3. 현장 획득 탄성파 자료 주파수 영역대 결정

적절한 파형 수집이 가능한 발진원의 위치(offset)를 수회의 시험 발진을 통해 결정 한다. (탄성파 source는 hammer, weight hammer, shot gun 등을 사용)

- 탄성파 자료 획득은 신뢰성있는 결과 도출을 위해 최소한 12개 이상의 트레이스를 갖는 자료 획득이 필요하며 이를 위해 일반적 탄성파 수진 장비인 다채널 Seismograph가 사용될 수 있다.

2. 분산 해석 (Dispersion Analysis)

- 현장 시험을 통해 수집된 탄성파 수진 자료로부터 주파수 영역대를 결정
- 결정된 주파수 영역에 대한 오버톤(overtone) 분석을 실시하여 표면파 영역에 해당되는 주파수 영역과 위상속도 범위를 선정하여 최종 분산 곡선을 도출한다.
- 이때 분산곡선의 신호대 잡음비(signal to noise ratio, s/N)가 0.5이상일 경우 적절한 해석이 이루어진 것으로 간주한다.

3. 역산해석 (Inversion Analysis)

- 결정된 분산곡선상의 주파수와 위상속도 값을

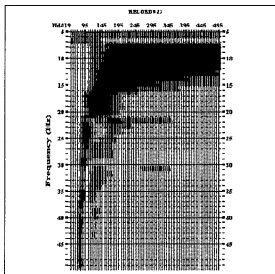


그림 4. 결정된 주파수 영역에 대한 Overtone 분석

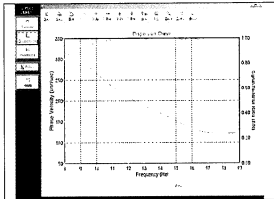


그림 5. 최종 분산곡선(Dispersion curve) 도출

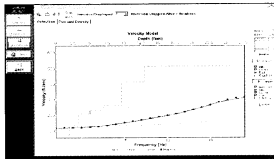


그림 6. 역산 해석 결과

토대로, 지반지층별 프아송비(ν), 밀도(ρ)값을 가장 입력하여 반복과정에 의한 역해석 실시

- 반복 계산은 이론적 분산곡선과 시험 분산곡선의 RMSE(Root Mean Square Error)가 최소화 될 때 까지 수행되어 최종 심도별 전단파속도 값을 도출

4. 전단파속도(V_s) 2차원 분포 단면 작성

- 최종 역산해석에 의한 각 축선내 등간격 지점의 심도별 전단파속도 추상의 작성 및 각축선에 대한 2차원 전단파속도 분포 단면이 작성된다.
- 작성된 전단파속도 단면에 의해 개략적 지반 상태 파악 및 속도 값을 이용 지층별 동적 변형계수 값을 산정할 수 있다.

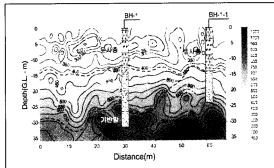


그림 7. 전단파속도 2차원 분포단면

3. 현장 적용 사례

3.1 시험수행 현황

현장 적용사례로서 교량 구조물 1개소, 서울 지하철 1개 공구 건설 예정지등 두개 지역에 대해 토사층에 대한 지반의 전단파속도 측정을 위해 본 MASW 시험을 수행 하였다. 본 현장들에 대한 MASW 시험시 사용된 장비는 표 2와 같으며 동상의 일반 탄성파 장비를 사용하되 시험 특성상 4.5Hz의 저주파 수신기를 사용하였다. 또한 시험 결과의 해석은 본 MASW시험법의 개발자인 미국 Kansas 지질 연구소에서 MASW 해석을 위한 전용 프로그램으로 개발한 Surfseis ver 1.01을 사용하였다. 본 2개 지역에 대한 MASW 시험 수행 현황을 정리하면 다음과 같다(표 3)

표 2. MASW 시험 사용장비

구 분	구성장비 규격 및 제원
Seismograph	StrataView R48 (미국 Geometric 사)
	Sample rate : 31.25~2,000, μ sec Filtering : Lowcut - 10~400Hz, Highcut - 250~1,000Hz Notch - 50~180Hz
Receiver	Geophone cable(24Channel), geophone : $f_0 = 4.5$ Hz
사용 Seismic Source	SPT weight Hammer
자료해석 프로그램	Surfseis 1.01

표 3. MASW 시험 구간 수행현황

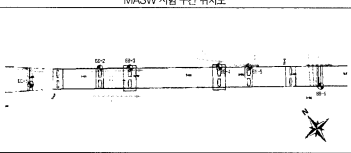
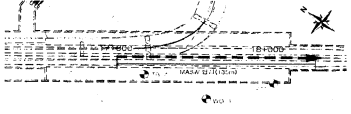
구분	MASW 시험 구간 위치도	시험 수행현황
현장 A (교량)		<ul style="list-style-type: none"> ▶ 축선수 축선 No.1,2 : 95.0m 축선 No.3:24.0m 축선 No.4:24.0m 축선 No.5:24.0m 축선 No.6:24.0m ▶ Geophone 간격: 1.0m ▶ Source : SPT weight hammer ▶ offset: 30.0m
현장 B (지하철)		<ul style="list-style-type: none"> ▶ 축선수 탐사 축선 연장 : 135.0m ▶ Geophone 간격: 1.0m ▶ Source : SPT weight hammer ▶ offset: 10.0m, 20.0m

표 4. 시험지역 지반 현황

현장 A	현장 B
<ul style="list-style-type: none"> · 신생대 제 4기지층으로 하천 범람에 의해 형성된 충적층이 상부의 토사층을 구성 · 기반암: 화강암질 편마암, 흑운모 화강암으로 구성 · 구성토질 - 충적층: 점토, 실트 우세, 모래층 일부 합재 - 풍화토층: 실트질 모래 · 조성상태 - 점토, 실트의 총질 점성토층은 중간 견고 이상의 상태를 나타내고 있음 - 실트질모래의 풍화토층은 매우 조밀한 상태로 조성 	<ul style="list-style-type: none"> · 제 4기 지층으로 하천 범람에 의해 형성된 충적층이 토사층 주 구성 · 기반암: 호상 흑운모 편마암 · 구성토질 - 충적층: 모래, 모래질 자갈로 구성 - 풍화토층: 실트질 모래 · 조성상태 - 모래, 모래질 자갈의 충적층은 느슨 내 지 조밀한 폭넓은 조성상태를 보이나 자갈의 영향으로 N치는 불규칙적인 것으로 나타남. - 실트질모래의 풍화토층은 매우 조밀한 상태로 분포

3.2 시험 지역 지반 현황

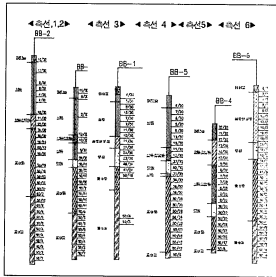
시험이 수행된 2개 지역은 신생대 제 4기 지층의 지역으로 화강암질 편마암 및 흑운모 화강암(현장 A), 흑운모 편마암(현장 B)의 기반암이 분포하고 있다. 토사층은 하천 인접지역임에 따라 점토, 실트, 모래, 모래질 자갈 등의 토질로 구성된 충적층이 상부지층으로 분포하고 있으며 하부에 기반암이 풍화되어 잔류된 실트질모래의 풍화토층으로 구성되어

있다. 시험 지역 지반 현황 및 시추조사결과에 의한 지층 현황을 정리하면 표 4, 그림 8과 같다.

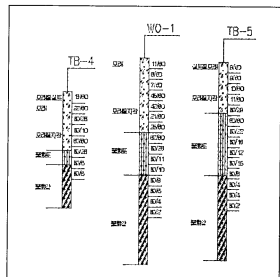
4. 시험 결과

4.1 지층별 전단파 속도 분포

MASW시험 해석 결과는 그림 3, 4와 같이 축선별



(a) 현장 A



(b) 현장 B

그림 8. MASW 시험 현장 시추조사 결과

표 5. 지층별 진단파속도(V_s) 분포

지층별	현장 A	현장 B
토사층	125 ~ 440 m/sec	110 ~ 310 m/sec
풍화암층	325 ~ 520 m/sec	280 ~ 485 m/sec
기반암층	520 m/sec 이상	435 ~ 578 m/sec 이상

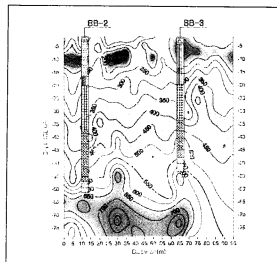
심도에 대한 2차원 진단파 속도 분포 단면으로 최종 출력 정리되며 이에 의해 각 지층의 진단파 속도 분포는 물론 하부 지반에 대한 개략적인 지층 조성 상태에 대한 상대적인 추정 파악이 가능하다.

각 축선별 수행된 해당 시추조사 결과와 각 축선의 진단파 속도 분포 값을 토대로 지층별 진단파속도별 위 값을 정리하면 토사층의 경우 $V_s=110\sim 440$ m/sec, 풍화암층의 경우 $V_s=280\sim 520$ m/sec, 기반암의 경우 $V_s=435\sim 500$ m/sec 이상의 속도값 범위로 나타났다(표 5).

4.2 토사층 진단파속도 분석 결과

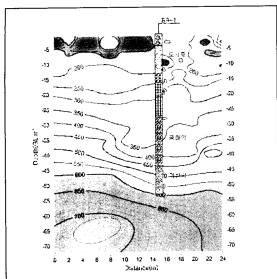
지반의 진단파 속도는 매질의 종류 및 상태 즉 지층의 토질 종류 및 조성, 응력이력 상태 등 많은 요

소에 의해 영향을 받게 된다. 이러한 요소중 지반의 조성상태를 나타내는 현장의 대표적 원위치 시험방법중 하나인 표준관입시험(SPT) 결과와 연계하여 표준관입시험치(N)와 진단파속도(V_s)와의 상관관

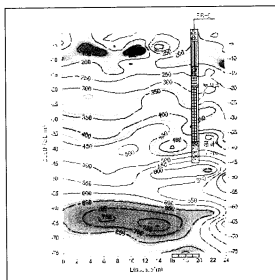


(a) 축선 No. 2

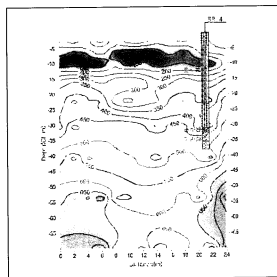
그림 9. 각 시험 축선 심도별 진단파속도 분포 단면(현장 A)



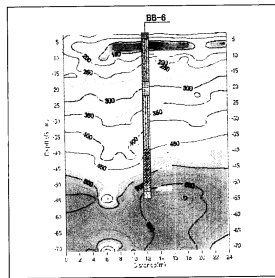
(b) 축신 No.3



(c) 축신 No. 4



(d) 축신 No.5



(e) 축신 No.6

그림 9. 각 시험 축신 심도별 전단파속도 분포 단면(현장 A)

계에 대해 많은 분석이 있어 왔다. 이러한 N치를 이용한 지반 토질별 전단파속도(V_s) 대표적 경험적 추정식을 정리하면 표 6과 같다. 특히 최근 R.D Verastegui 등(2001)은 SAS시험에 의해 측정된

점토 지반 전단파 속도값과 표준관입시험치(N)와의 관계를 大場, 烏海(1990), Imai(1982)식 등과 비교한 결과 비교적 잘 일치됨을 밝혀 표면파기법을 이용한 지반 전단파속도 측정의 실용성을 간접적으로 입

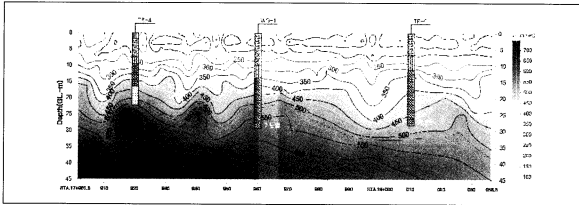


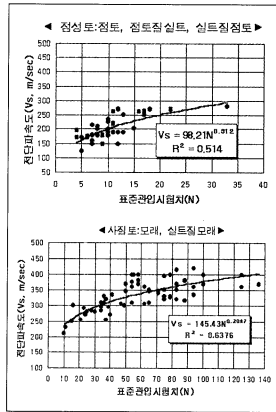
그림 10. 심도별 전단파속도 분포 단면(현장 B)

표 6. 표준관입시험치(N)와 전단파속도(V_s) 경험적 추정식
(社団法人 地盤工學會, 1998)

제안자	토질 종류	
	점성토	사질토
今井, 吉村 (1970)	$V_s = 76 N^{0.23}$	
Imai(1962)	$V_s = 97.0 N^{0.234}$	
岡本(1989)	$V_s = 125 N^{0.3}$	
大場, 鳥海 (1990)	$V_s = 84 N^{0.21}$	
今井(1997)	$V_s = a \cdot N^b$ a=102, b=0.29 (층적점토) a=114, b=0.29 (흙적점토)	$V_s = a N^b$ a=81, b=0.33(층적사) a=97, b=0.32(흙적사)

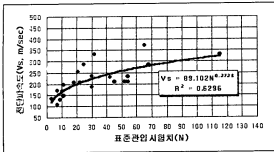
증한 바도 있다.

따라서 본 MASW 시험에 의해 측정된 토사층 심도별 전단파 속도 값과 해당위치에 대한 심도별 표준관입시험치와의 비교·분석 하였으며 그 결과 전단파 속도와 깊은 지반의 조성상태가 양호할수록 증가하는 양상으로 나타나며 상관성은 다소 떨어지나 표준관입시험치(N)와도 비교적 양호한 상관관계가 성립되는 것으로 나타나고 있다(그림 11). 현장별 분석 결과중 현장 B지역의 경우 상대적으로 A 지역에 비해 다소의 자료 분산이 나타나며 다소 낮은값의 경향



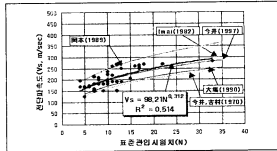
(a) 현장 A 지역

그림 11. 시험현장별 전단파속도(V_s)와 표준 관입시험치(N) 관계 분석 결과



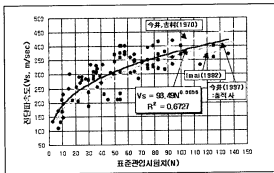
(b) 현장 B 지역(사질토: 모래, 모래질 자갈, 실트질모래)

그림 11. 시험현장별 전단파속도(V_s)과 표준 관입시험치(N) 관계 분석 결과



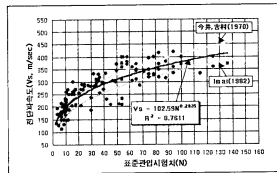
(a) 현장 A 점성토 (점토, 점토질실트, 실트질점토)

그림 12. 시험결과와 경험적 추정식과의 비교 분석 결과



(b) 현장 A, B 사질토 (모래, 실트질모래, 모래질 자갈)

그림 12. 시험결과와 경험적 추정식과의 비교 분석 결과



(c) 현장 A, B 사질토 및 점성토

을 보였으며 이는 지층에 함유된 자갈입자들에 의한 비균질성으로 다소의 표준관입시험치(N)의 불규칙성에 의한 것으로 판단된다(그림 11(b)).

MASW시험에 의해 측정된 두 현장의 토질종류별 표준관입시험치(N)에 따른 전단파속도값 관계를 표 6의 기존의 토질별 경험적 전단파속도 추정식과 비교한 결과 그림 6과 같다.

점성토의 경우 본 시험결과에 의한 상관 관계곡선 값은 Imai(1982)식과, 今井(1997)의 층적점토 추정식 결과와 거의 일치되는 것으로 나타나고 있으며, 두 현장의 사질토에 대한 전체 결과의 상관관계곡선 값은 今井(1997)의 층적사에 대한 산정식과 가장 잘 일치되는 것으로 나타났다(그림 12 (a), (b)).

또한 두 현장에 대한 점성토, 사질토의 구분없이

종합하여 도시·분석한 상관관계 곡선의 값을 토질 종류 구분없이 산정·제한되어있는 今井,吉村(1970)식, Imai(1982)식과 비교한 결과 두 경험식과 유사한 양상으로 범위내에 분포하는 것으로 나타났다(그림 12 (c)).

경험식들은 많은 현장 탐사시험 결과를 토대로 회귀분석식을 통하여 제안된 식으로 (예를 들면 Imai(1982)식의 경우 1654개의 측정 자료들에 대한 분석을 통해 도출된 경험식임) 다소의 분산은 있으나 실측결과를 근거로 제시된 것이라는 점에서 적용에 대한 신뢰성은 있는 것으로 볼 수 있다. 따라서 본 MASW 시험에 의해 측정 분석된 토사층 지반의 전단파속도 값 또한 기존의 경험적 추정식과 거의 유사한 양상으로 분석됨에 따라 그 측정 결과에 대해

신뢰할 수 있을것으로 판단되어 지반 동적특성 파악을 위한 유용한 자료로 사용하였다.

5. 결론

종래의 현장 전단파속도 측정을 위한 Down-hole test, Cross-hole test 등은 시험공의 준비가 필요하며 시추어린상 시험공 유지의 어려움으로 인해 토사층의 적용보다는 주로 암반층을 대상으로 시험이 수행 되어왔다. 표면파 탐사기법을 이용한 MASW 시험방법은 지표면상에서 간편히 실시되므로 별도의 시험공없이 수행 가능하다는 잇점이 있으며 다중 채널을 통한 보다 많은 지반 탄성파속도 자료가 수집 분석됨에 따라 그 결과의 신뢰성도 높고 시험 축선 하부지층에 대한 2차원 전단파속도 분포 단면의 출력에 손쉽게 이루어져 시험 지반의 개략적인 지층 구성 및 조성상태까지도 파악이 가능한 장점이 있다.

따라서 MASW 시험방법은 본 두 개 현장에 대해서 원지반 토사층에 대한 지반 전단파속도 측정을 위해 간편하고 효율적인 현장시험 방법으로 적용할 수 있었으며, 또한 시험 결과 측면에서 비록 한정된 적용사례이기는 하나 두개 현장의 시험사례 분석 결과를 볼 때 다소의 분산은 있으나 비교적 일정한 경향을 보이고 있고 기존의 경험적 추정식들과도 유사한 양상을 보여 비교적 시험 결과에 대한 신뢰성도 있는 것으로 판단되었다.

MASW 시험방법은 시험 시추공 유지가 어려운 원지반 토사층에 대한 지반 전단파속도 측정을 위해 간편하고 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 생각되며 이를 위해서는 앞으로도 보다 많은 적용 및 결과에 대한 분석도 아울러 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Choon B. Park et al.(1999), "Multichannel analysis

of surface waves", Geophysics, Vol.64, No.3, P.800-808

2. Nazarian S. and Stokoe K. H.(1984), "In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves", Proc. 8th. World Conf. on Earthquake Eng., Vol. 3, P.31-38

3. Abbiss C. P.(1981), "Shear wave measurement of the elasticity of the ground", Geotechnique, Vol. 31, No.1, P.91-104

4. Tokimatsu K., Kuwayama S., Tamura S. and Miyadera Y. (1991), "Vs determination from steady state Rayleigh wave method", Journal of Soils and Foundations, Vol.31, No.2, P.153-163

5. R. D. Verastegui and W. F. Van Lrpe (2001), "Local soil conditions and earthquake damage in the town of Aiquile-Bolivia", Proc. of 15th Int. conference on soil mechanics and Geotechnical Eng., at Istanbul Turkey, Vol.1, P.535-538

6. 社團法人 地盤工學會(1998), "Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards" p.28

7. 社團法人 地盤工學會(1998), "N치와 c 0의 활용법", p.102

사무국 동절기 근무시간 변경 안내

2001년 11월 1일부터 2002년 2월28일 까지 사무국의 근무시간이 아래와 같이 변경됩니다. 참고하시기 바랍니다.

- 아 래 -

- 평 일 : 09:00~17:00
- 토요일 : 09:00~13:00