

표면파기법을 이용한 동다짐에 의한 지반개량효과 평가

Evaluation of Ground Densification Due to Dynamic Compaction using SASW Method

김동수¹⁾, Dong-Soo Kim, 김성인²⁾, Sung-In Kim, 권기철³⁾, Gi-Chul Kweon, 박형춘³⁾, Hyung-Choon Park

¹⁾ 한국과학기술원 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Eng., KAIST

²⁾ 다산건설컨설팅 기술연구소 이사, Director, Technology Institute Dept., DASAN Consultants

³⁾ 한국과학기술원 토목공학과 박사과정, Graduate student, Dept. of Civil Eng., KAIST

개요(SYNOPSIS) : The Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) method has a great potential for rapid determination of layer thickness and small-strain shear wave velocity(V_s) of soil deposit. The SASW method is nonintrusive and nondestructive. It is based on the dispersive characteristics of surface waves. In this paper, the quality and extend of ground improvement due to dynamic compaction was evaluated using SASW method. The shear wave velocity profiles were determined using SASW method before and after compaction. Resonant column tests were performed using reconstituted specimens of various densities and confinement, and V_s -void ratio-confinement correlation was determined. The void ratio profiles before and after compactions were determined using the developed correlations, and compared with those obtained from conventional SPT tests. Based on this study, The SASW method appeared well suited for the rapid quality evaluation of ground densification.

주요어(Key words) : 표면파기법(SASW), 공진주시험(RC test), 동다짐(dynamic compaction), 표준관입시험(SPT), 상대밀도(relative density)

1. 서론

1970년대의 비약적인 경제성장과 더불어 많은 수의 건축구조물과 사회간접시설인 여러 토목구조물의 건설이 활발히 수행됨에 따라 많은 건설부지가 필요하게 되었다. 그러나 양질의 건설부지의 양은 한정되어 있어 불량한 지반에서도 많은 건설이 이루어지고 있다.

사실토로 구성된 불량지반을 개량하는 공법으로 동다짐공법이 있으며 이 공법에 의한 지반의 다짐효과를 평가하는데 일반적으로 표준관입시험(SPT), 콘관입시험(CPT)등이 사용되어 왔다. 그러나 이런 방법은 지반을 직접 천공하여 시험기를 관입시키므로써 시험방법이 복잡하고 시간이 오래걸린다는 단점을 가지고 있으며 대규모 지역의 개량효과 평가를 위하여 많은 실험량이 필요하다. 또한 기존의 방법은 현장시험결과와 지반다짐효과 사이의 경험적인 상관관계에 의존하기 때문에 대상지반에 따라 기존에 제시

된 상관관계를 일률적으로 적용하기에는 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 방법인 SPT, CPT와는 달리 지반에 대한 천공 및 관입없이 지표면에서 적은 노력으로 신속하게 지반의 강성을 알아낼 수 있는 표면파기법(Spectral Analysis of Surface Wave(SASW) Method)을 사용하여 동다짐공법에 의한 지반의 다짐효과를 효율적으로 평가하였다.

다짐전·후에 표면파기법을 이용하여 지반의 전단파속도를 구한 다음 현장에서 채취한 시료를 실내에서 여러 가지 상대밀도로 재성형한 후 공진주시험을 수행하여 현장에서 측정된 전단파속도와 실내시험에서의 전단파속도를 비교하므로써 다짐전·후의 개량정도를 간극비로 나타내었다.

2. 연구배경

2.1 동다짐공법

2.1.1 공법개요

동다짐(dynamic compaction)공법이란 중량물체(pounder 또는 tamper)를 높은 곳에서 자유낙하하여 지반을 강제다짐시켜 밀도를 증가시키는 공법으로써 사질토로 구성된 연약지반을 개량하는 공법의 일종이다. 동다짐공법은 흙의 종류, 타격에너지 및 지하수위등 여러요인이 복합적으로 작용하여 지반개량 효과가 결정되며 식(1)과 같은 경험식을 이용하여 개량깊이를 추정한다.

$$d = \alpha \sqrt{W \cdot H} \quad (1)$$

여기서, d = 개량심도, α = 개량심도계수, W = 탬퍼중량(ton), H = 낙하고(m)

위 식에서 경험적으로 결정하여야 할 변수는 개량심도계수, α 로써 흙의 종류에 따라 0.3~0.8값을 가진다. 본 시험부지는 20ton의 탬퍼를 30m에서 낙하시켰으며 설계당시 α 는 0.6을 적용하였다. 따라서 예상개량심도는 14.7m이다. 현장에 적용한 탬핑현황은 그림 1과 같다.

2.1.2 기존의 개량효과 평가방법

일반적으로 동다짐에 의한 지반의 개량효과를 평가하는 방법으로 표준관입시험(SPT), 콘관입시험(CPT) 또는 공내재하시험(PMT)등이 있다. 동일한 지점에서 개량전·후에 시험을 하여 관입저항치의 증가(SPT의 N 치 및 CPT의 q_c)나 지반변형계수의 증가(PMT의 E_o)를 비교하므로써 개량의 정도를 확인한다. 그러나 이러한 방법은 지반에 대한 천공 및 시험기의 관입이 필요할 뿐만 아니라 시험방법이 복잡하고 시험시간이 오래 걸리는 단점을 가지고 있다. 또한 기존의 시험법은 단지 시험한 위치에 대해서만 개량정도를 파악할 수 있다는 한계를 가지고 있으며 토립자가 크면 과도한 측정치를 나타내는 단점도 가지고 있다. 본 시험부지에서는 표준관입시험을 이용하여 개량효과를 평가하였으며 그 결과는 그림 2와 같다.

2.2 표면파기법

2.2.1 표면파의 특성

매질을 따라 전파하는 응력파는 매질내부를 따라 전파하는 체적파(P파, S파)와 매질표면을 따라 전파하는 표면파(R파)로 구분할 수 있다. 균질한 반무한공간의 표면에 수직방향의 진동을 가하면 체적파와 표면파는 그림 3과 같이 전달되며 이때 입력에너지의 약 67%가 R파이며 전단파와 압축파는 각각 26%

와 7%로 R파의 에너지가 제일 우세하다. 표면파에 의한 입자거동은 수직방향 및 수평방향의 움직임을 모두 가지고 있으며 이 두방향이 결합하여 타원형 형태를 나타낸다. 그러나 깊이가 증가할수록 입자거동은 급격하게 감소되며 그림 4와 같이 파장의 1.5배 정도되는 깊이에서 수직방향요소는 표면에서 크기의 10% 정도로 감소된다.

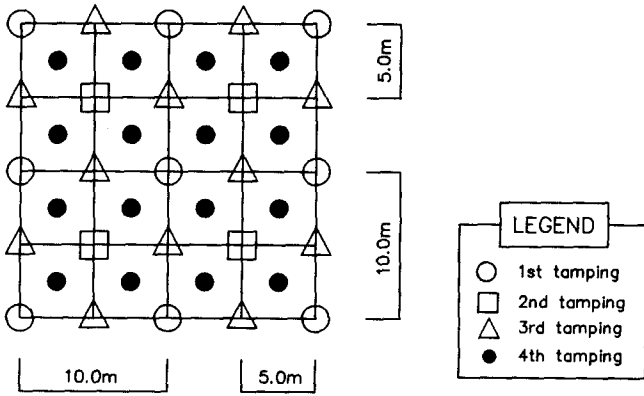


그림 1. 동다짐 탬핑현황

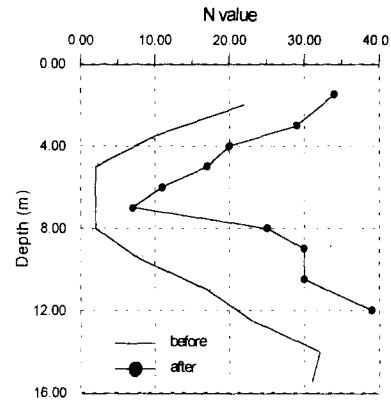


그림 2. SPT를 이용한 개량효과 확인

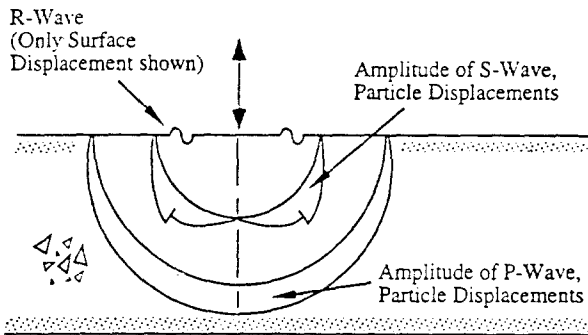


그림 3. 충격하중시 발생하는 응력파의 전파특성

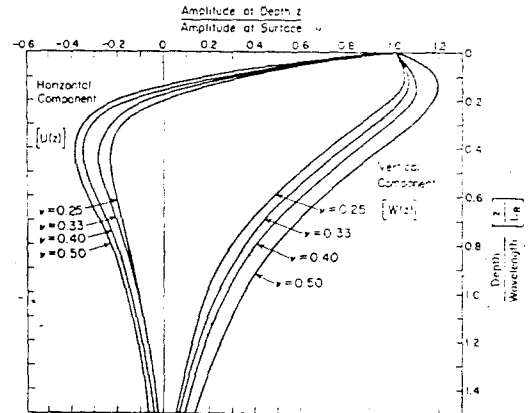


그림 4. 깊이에 따른 표면파에너지의 분포

2.2.2 기본원리

균질한 반무한공간에서의 표면파속도는 주파수(또는 파장)와 무관하게 일정하다. 그러나 지반은 다층 구조로 이루어져 있기 때문에 표면파속도는 일정하지 않고 주파수에 따라 다르게 된다. 이와같이 비균질한 매개체에서 전파속도가 주파수에 지배되는 것을 분산(dispersion)이라 하며 따라서 표면파는 분산 특성을 가지고 있다고 할 수있다.

표면파기법이란 표면파의 분산특성을 이용하여 지반구성재료의 파속도와 강성을 파악하는 현장시험법이다. 다양한 주파수 특성을 가진 표면파를 발생시키기 위하여 충격하중(Impact Load)을 가한다. 이렇게 형성된 표면파는 2개의 수진기에 의하여 감지되고 스펙트럼분석기(Spectral Analyzer)를 이용하여 파진호를 기록한다. 기록된 파는 FFT를 이용하여 주파수영역으로 변환하고 이때 크로스파워스펙트럼(Cross Power Spectrum)의 위상각정보(Phase Information) 및 상관함수(Coherence Function)를 평가하여 위상

각속도(Phase Velocity)와 파장을 계산할 수 있다.

임의의 주파수 f 에서 위상각차를 ϕ , 그리고 주기를 T 라 하면 파의 이동시간, t 는 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$t = \frac{\phi}{360} \cdot T \quad (2)$$

이 때 수신기의 간격을 X 라 하면 위상각속도, V 는 식(3)과 같다.

$$V = \frac{X}{t} \quad (3)$$

따라서 파장, λ 은 파전파 이론을 이용해서 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (4)$$

상기식을 이용하여 위상각속도-파장 관계를 구하며 이것을 분산곡선(dispersive curve)이라 한다. 분산곡선이 정해지면 이 곡선으로부터 각층의 두께 및 강성도를 역산(inversion)에 의하여 구한다. 역산과정은 다음과 같다.

1. 먼저 대상물의 층상구조와 물성치를 가정한다.
2. 가정된 값을 사용하여 이론적인 분산곡선을 구한다.
3. 이론적인 분산곡선과 측정에 의한 분산곡선을 비교한다.
4. 이론분산곡선과 측정분산곡선이 일치할때 까지 가정치를 바꾸어 재계산한다.

본 연구에서는 이론적 분산곡선을 구하기 위하여 Texas 주립대학에서 개발된 WINSASW 프로그램을 사용하였다.

2.2.3 시험장비

(1) 진동원(Source)

진동원은 수신기로 감지할 수 있도록 그 크기가 적당하여야 하며 주파수범위가 넓은 표면파를 발생시킬 수 있어야 하는데 본 연구에서는 근거리 측정시에는 햄머를 사용하였고 장거리 측정시에는 동다짐용 탬퍼를 사용하였다.

(2) 수신기(Receiver)

수신기는 입자속도 측정용 지오폰(geophone)과 가속도계(accelerometer)를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 지오폰의 측정가능 주파수범위는 2~400Hz이며 가속도계의 경우는 0~1kHz이다.

(3) 스펙트럼 분석기

본 연구에서 사용된 분석기는 Hewlett-Packard(HP) 35665A로써 진동파 시간기록을 주파수영역으로 푸리에변환(FFT)이 가능하며 두 수신기에서 포착한 진동파신호의 위상각차를 나타내는 크로스파워스펙

트럼(cross power spectrum)과 데이터의 질을 나타내는 상관함수(coherence function)를 표시할 수 있다.

2.2.4 시험방법

현장시험에 대한 개요는 그림 5와 같고 시험과정은 다음과 같다. 이때 수신기의 간격은 그림 6과 같이 배열하였다.

- (1) 수신기 배열선에 가상의 중앙점을 선정한다.
- (2) 중앙점을 기준으로 거리가 동일한 지점에 수신기를 설치한다.
- (3) 진동원에서 가장 가까운 수신기의 위치는 수신기와 수신기의 이격거리와 동일하도록 한다.
- (4) 햄머를 이용하여 지반에 수직충격을 가한다(forward)
- (5) 이때 5회이상의 충격을 가하여 신호를 평균한다.
- (6) 배열선 반대편에서 충격을 동일한 방법으로 가한다(backward).
- (7) 수신기의 간격을 조정하면서 이 과정을 반복한다.

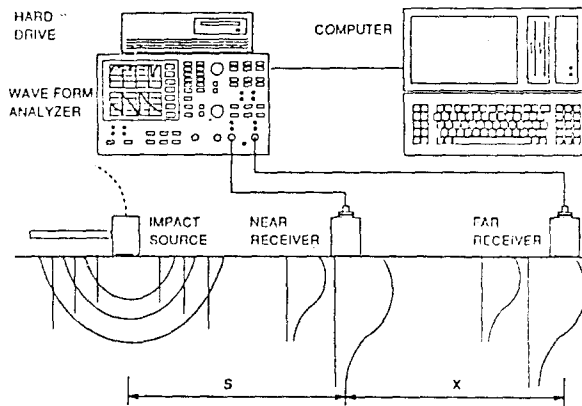


그림 5. SASW기법의 개요도

	-20	-16	-12	-8	-4	4	8	12	16	20	dist. (m)	dist. (m) space
▽ Geophone												2
↓ Source												2
												4
												8
												16

그림 6. 수신기의 배열

2.3 공진주시험

SASW기법으로 현장에서 측정하여 분석한 전단파속도를 간극비로 환원하기 위하여 현장시료를 채취하여 실내에서 공진주시험을 실시하였다. 여러 가지 상대밀도로 성형한 시료에 대해 공진주시험을 실시하여 각 상대밀도에 대한 전단파속도를 구하였다.

본 실험에서는 Stokes식 고정단-자유단 방식 공진주 시험기를 사용하였다. 공시체의 바닥을 고정시키고 코일-자석 시스템을 이용한 진동시스템을 공시체의 상부와 연결하여 진동시 진동판에 부착된 가속도계(accelerometer)로 가속도를 측정한다. 그림 7(a)는 Stokes식 공진주시험기의 개요도이다.

공진주시험의 기본원리는 원통형의 공시체에 진동수를 바꿔가면서 비틀자극(torsional excitation)을 가하여 그림 7(b)와 같이 1차모드의 공진진동수(f_r)와 진동의 크기(A_r)를 구한 후, 시험기의 특성 및 공시체의 크기, 공시체의 무게를 이용하여 전단파속도(V_s), 전단탄성계수(G) 및 전단변형률(γ)을 구한다. 탄성파전달이론에 의한 공진주시험의 지배방정식은 식(5)와 같다.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega \ell}{V_s} \cdot \tan\left(\frac{\omega \ell}{V_s}\right) \quad (5)$$

여기서, $I =$ 공시체의 질량관성모멘트

$I_o =$ 진동시스템의 질량관성모멘트

$\omega =$ 공시체 - 진동시스템의 고유진동수

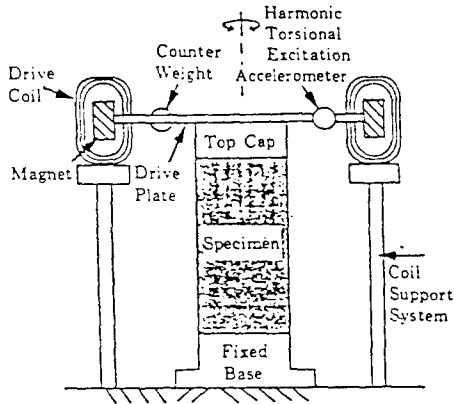
$l =$ 공시체의 길이

$V_s =$ 전단파 속도

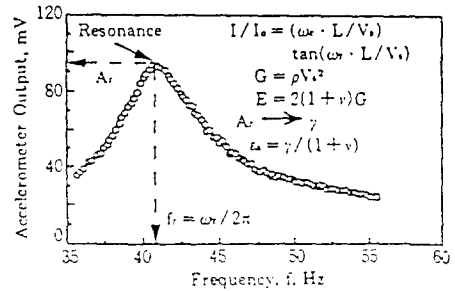
실제, 공진주실험에서는 감쇠고유진동수(ω_r : damped natural frequency)가 얻어지며 큰 오차없이 고유진동수(ω_n : natural frequency)를 대신하여 사용할 수 있다. 식(4)에 의해 전단파속도(V_s)가 구해지면 전단탄성계수(G)를 다음 식(6)으로 구한다.

$$G = \rho V_s^2 \quad (6)$$

여기서, $\rho =$ 질량밀도



a) Specimen in the Resonant Column Apparatus



b) Typical Frequency Response Curve

그림 7 공진주시험기 개요도

3 적용사례

3.1 지반조건

시험부지의 지표는 산토를 이용하여 육상매립된 지층이며 층후는 1.5~2.0m 두께로 분포하고 있다. 육상매립층 하부에는 준설패립토로 형성된 층으로 실트질모래(SM) 또는 모래질실트(ML)이며 그 두께는 5~6m이다. 준설패립층 밑에는 세립모래(SM)로 구성된 해성퇴적층이 발달하고 있다.

다짐대상이 되는 준설패립토의 입도시험결과를 그림 8과 같다.

3.2 표면파시험 결과분석

(1) 분산곡선

동다짐공법에 의한 지반개량전 및 개량후에 표면파를 측정하고 분석한 분산곡선은 그림9와 같다. 개량전의 분산곡선을 보면 산토매립된 표층에 해당되는 파장에서의 표면파속도는 120~200m/sec이며 준설패립층에 해당되는 파장에서의 표면파속도는 110~130m/sec로 깊이에 따라 약간 증가하는 경향을 보

이고 있다.

동다짐시행 완료후의 분산곡선은 그림에서 십자기호로 표시하였으며 그림에서 보는 바와 같이 표층에서의 표면파속도는 120~220m/sec로 거의 변화가 없으나 표층하부에서는 120~170m/sec로 개량전에 비해 표면파속도는 50m/sec이상 증가되었다.

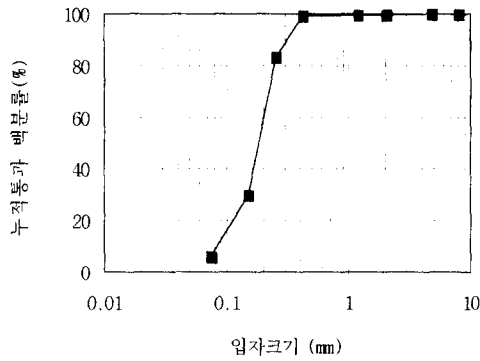


그림 8. 준설패립토의 입도분포곡선

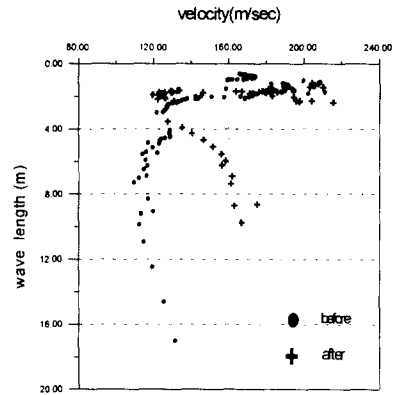


그림 9. 개량전·후의 분산곡선

(2) 역산

역산이란 측정된 분산곡선과 일치하도록 이론적인 분산곡선을 수립하여 지반깊이별 전단파속도 profile을 구하는 과정이다. 그림 10과 그림 11은 개량전후의 분산곡선(이론 및 실측분산곡선)을 각각 나타내었으며 이 역산과정을 통하여 심도별 전단파속도를 나타내면 그림12와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 지반개량전 산토매립된 표층부에 해당되는 2m심도에서는 전단파속도가 170~210m/sec 이며 준설패립층은 100~130m/sec 정도인 것으로 추정된다.

지반개량후 표층부의 전단파속도는 110~220m/sec로 개량전과 거의 유사하거나 다소 느슨해진 것으로 측정된 바 이것은 동다짐시 표층부는 과다짐에 의해 개량효과가 떨어지기 때문이다. 그러나 준설패립층의 경우 전단파속도는 200~220m/sec로 개량전에 비해 거의 2배이상 증가하였다.

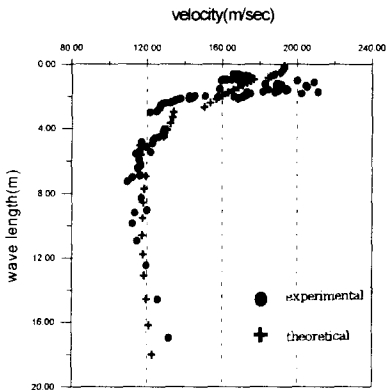


그림 10. 지반개량전의 분산곡선

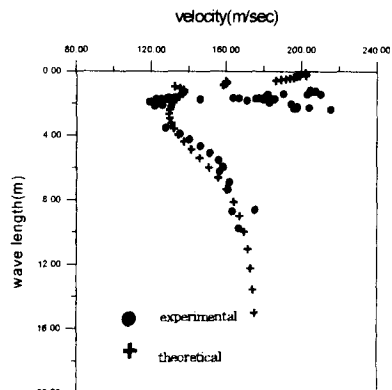


그림 11. 지반개량후의 분산곡선

3.3 공진주시험 결과분석

사질토의 전단파속도는 상대밀도 및 구속응력에 영향을 크게 받는다. 따라서 시험전에 여러 가지 상대밀도를 가진 시료를 준비하고 구속응력을 변화시키면서 공진주시험을 실시하여 전단파속도 및 전단탄성계수를 구하였으며 그 결과는 표 1과 같고 구속응력과 전단탄성계수의 관계 및 간극비와 전단탄성계수의 관계는 그림 13과 같다.

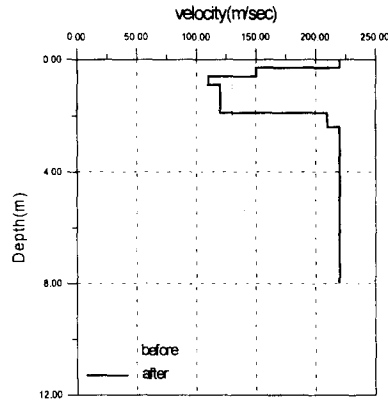


그림 12. 역산에 의한 전단파속도 비교

표 1. 공진주시험을 이용한 전단파속도 및 전단탄성계수

구속응력 (t/m^2)	상대밀도:52%(간극비:0.76)		상대밀도:33%(간극비:0.88)		상대밀도:11%(간극비:1.03)	
	전단파속도 V_s (m/sec)	전단탄성계수 G(MPa)	전단파속도 V_s (m/sec)	전단탄성계수 G(MPa)	전단파속도 V_s (m/sec)	전단탄성계수 G(MPa)
2	159.9	38.46	152.5	31.34	136.5	24.37
4	205.9	63.82	200.3	54.25	172.5	38.95
8	253.6	96.78	248.5	83.54	216.3	61.13

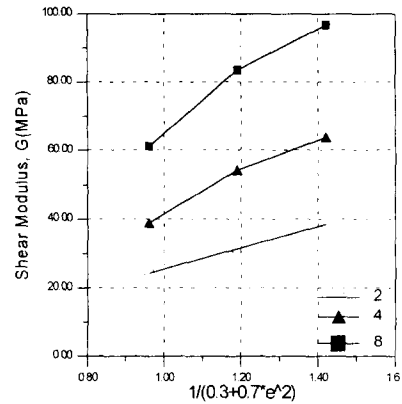
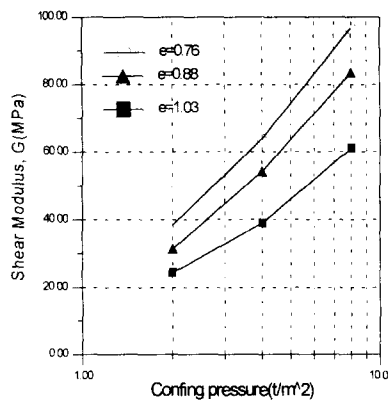


그림 13. 공진주시험에 의한 구속응력,간극비와 전단탄성계수의 관계

Hardin(1978)은 저변형율에서의 사질토의 전단탄성계수(G_{max})와 구속응력과의 관계를 다음과 같이 제안하였다.

$$G_{max} = \frac{A}{(0.3 + 0.7e^2)} \cdot \left(\frac{\sigma_o}{P_a}\right)^n \cdot P_a \quad (7)$$

여기서, A = 상수, e = 간극비, P_a = 대기압(절대압력), $\sigma_o = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ = 평균 유효 주응력

시험결과를 이용하여 식(7)의 상수를 결정하고 간극비와 전단파속도의 관계식을 유도하면 식(8)과 같고 이 식을 이용하여 SASW기법으로 현장에서 측정된 전단파속도로 부터 그림 14와 같이 간극비를 유추하였다.

$$e = \sqrt{1084 \cdot \left(\frac{1}{\alpha}\right) - 0.429} \quad (8)$$

$$\text{여기서, } \alpha = \frac{V_s^2 \cdot \left(\frac{\gamma_t}{g}\right)}{\left(\frac{\sigma_o}{P_a}\right)^{0.68} \cdot P_a}$$

$\gamma_t \equiv$ 흙의 유효단위중량 (kN/m^3)

$g \equiv$ 중력가속도 (9.8 m/sec^2)

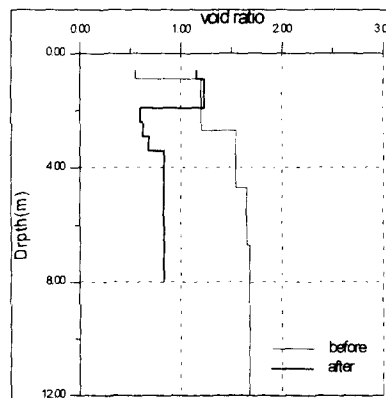


그림 14. 현장측정결과에 의한 개량전·후 간극비의 변화

4. 시험결과의 적용방안 및 향후과제

지금까지의 연구결과에서와 같이 현장에서 표면파시험을 개량 전·후에 실시하여 지반의 전단파속도 profile을 결정하고 실내시험인 공진주시험에서 구한 상대밀도-구속압-전단파속도 관계를 이용하여 지반 개량 전·후의 간극비 변화를 그림 14와 같이 나타낼 수 있었다. 그러나 원지반의 비균질성으로 인해 현장에서 측정된 전단파속도와 실내시험에서 구한 전단파속도는 다소 차이가 나며 또한 실내시험시 시험수량이 다소 부족하여 발생하는 시험데이터의 대표성문제로 인하여 현장측정결과로 추정된 간극비는 어느 정도 오차가 있다.

본 연구과정에서 실험의 신속성을 증진시키기 위한 다채널 표면파기법의 개발, 깊은 지층 평가를 위한 진동원 개발, 표면파기법 신호처리 및 데이터 분석의 자동화, 국내 사질토 지반의 상대밀도-구속압-

전단파속도 관계정립 등 향후과제의 필요성이 인식되었으며 이에 대한 계속적인 연구가 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 표면파기법을 이용한 동다짐 개량효과 평가방법을 살펴보았다. 본 연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 연약 사질토 지반에서 동다짐에 의한 개량정도 및 개량심도를 평가하기 위하여 표면파기법의 적용 가능성을 확인하였다.
2. 표면파시험 결과와 공진주시험을 이용한 대상지반의 간극비-구속압-전단파속도의 관계를 결합하여 개량전·후의 간극비 profile을 얻을 수 있었다.
3. 기존의 개량효과 평가방법은 일점법이라는 한계를 가지고 있으나 표면파기법을 이용하면 시험축선을 따라 넓은 지역의 평균개량효과를 평가할 수 있으므로 대규모 지역의 개량효과를 평가하기 위한 경제적인 방법으로 판단된다.

감사의 글

본 연구를 위해 시험현장을 제공해주신 (주)삼성종합화학 관계자 여러분과 (주)도화지질의 홍륜상무님과 장성호차장님 및 측정장비를 쓸 수 있도록 해주신 경희대 백영식 교수님, 목영진 교수님 그리고 WINSASW 프로그램을 제공해주신 Texas Austin대의 Stokes교수님께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김동수(1995), "공진주/비틀전단(RC/TS)시험기를 이용한 건조 사질토의 변형특성", 한국지반공학회지, 제11권, 제1호, pp101~112.
2. Hardin(1978), "The Nature of Stress-Strain Behavior of Soils", *Proceedings of the Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference*, ASCE, Pasadena, Ca, June 19~21, Vol I, pp.3~90.
3. Nazarian and Stokoe II(1986), "In Situ Determination of Elastic Moduli of Pavement Systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method (Theoretical Aspects)", *FHWA, Report No. FHWA/TX-87/46+437-2*.
4. Nazarian and Stokoe II(1985), "In Situ Determination of Elastic Moduli of Pavement Systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method (Practical Aspects)", *FHWA, Report No. FHWA/TX-86/136+368-1F*.
5. Robert G. Lukas(1986), "Dynamic Compaction for Highway Construction, Vol. 1 : Design and Construction Guidelines", *FHWA, Report No. FHWA/RD-86/133*