

SASW 시험을 활용한 지반 현장 다짐도 평가

Evaluation of Ground Compaction Using SASW Testing

김건웅^{1*}

Gunwoong Kim^{1*}

¹Member, Postdoctoral Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, KICT, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

ABSTRACT

Compaction is performed in civil engineering sites to secure the stability of the ground and prevent settlement. While the process of compaction is crucial, it is also essential to evaluate the degree of compaction after the completion of the process. In domestic sites, the evaluation of compaction is mainly conducted on a small number of spot using point-based tests such as plate load tests and sand cone tests. The methods presented so far allow assessment of surface compaction, but evaluating compaction in deeper layers poses challenges. Moreover, due to the limited coverage of point-based testing, it is difficult to achieve an overall assessment of compaction. As a solution to these issues, the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) tests were utilized to evaluate compaction. SASW tests offer a broader measurement range compared to point-based tests, and depending on the test setup, this method can provide the stiffness of the ground at greater depths. In this study, SASW tests were conducted in a compacted soil site under different conditions to assess compaction. Additionally, Nuclear Density Gauge tests were conducted concurrently to compare and verify the results of SASW. The research results confirmed the feasibility of evaluating compaction using SASW at the geotechnical site.

요 지

다짐은 토목현장에서 지반의 안정성을 확보하고 침하 방지를 위해 수행된다. 다짐을 수행하는 작업도 중요하지만, 다짐을 완료한 후 지반의 다짐도를 평가하는 것도 매우 중요하다. 국내 현장에서는 주로 평판 재하시험이나 들밀도 시험 등의 포인트 방식의 시험을 통해 다짐 지역의 일부만을 평가한다. 기존에 제시된 방법들은 표면 다짐에 대한 평가가 가능하지만, 좀 더 깊은 지반의 다짐까지 평가하기에는 어려움이 따른다. 또한, 포인트 시험 방식을 통해 평가를 수행하는 면적이 크지 않기 때문에, 전체적인 다짐도의 평가가 어렵다. 이에 대한 해결책으로 표면파를 활용한 SASW 시험을 통해 다짐을 평가하였다. SASW 시험은 포인트 방식의 시험보다 측정하는 범위가 넓고, 시험 세팅에 따라 깊은 심도의 지반에 대한 강성 또한 파악할 수 있다. 다짐 평가를 위해 본 연구에서는 다른 조건으로 다져진 성토 현장에서 SASW 시험을 수행하였다. 또한, Nuclear density gauge 시험을 동반하여 SASW의 다짐 분석 결과와 비교 및 검증을 수행하였다. 이 연구 결과를 통해 SASW를 활용한 지반 현장의 다짐도 평가가 가능함을 확인할 수 있었다.

Keywords : SASW, Seismic testing, Surface wave, Shear wave velocity, Compaction, Nuclear density gauge test, Vs profile

1. 서 론

일반적으로 다짐은 토목 건설 현장에서 지반의 침하 방

지와 안정성을 확보하기 위해 수행된다. 이 작업은 건축 물, 교량, 도로포장 등 토목 구조물을 안전하게 건설하는 데 필요한 단계 중 하나이다. 다짐은 보통 롤러를 활용하여 진동과 하중을 통해 수행되며, 반복적인 다짐을 통해 설계 기준에 필요한 다짐도를 확보하게 된다. 현장에서 다짐을 수행하는 것도 중요하지만, 다짐이 수행된 지반을 평가하는 것 또한 매우 중요하다. 국내에서는 평판 재하시험

Received 17 Nov. 2023, Revised 6 Dec. 2023, Accepted 11 Dec. 2023

*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0553; Fax: +82-31-910-0561

E-mail address: gwkim86@kict.re.kr (G. Kim)

이나 들밀도 시험 같은 포인트 방식의 다짐 평가가 주로 수행되었다. 하지만, 최근 건설장비 자동화에 따라 지능형 다짐 값을 활용한 연속적인 다짐 평가 방식의 연구가 진행되고 있다. 지능형 다짐 장비를 활용한 다짐 평가는 연속적이라는 장점과 실시간으로 자동화된 데이터를 취득 가능하다는 장점이 있지만, 깊은 심도에 위치한 지반에 대한 다짐 평가와 추적이 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 깊은 지반의 다짐 평가를 위해 표면파를 활용한 SASW 시험을 활용하였다. 지능형 다짐에 비해 SASW 시험은 상대적으로 긴 소요 시간이 발생하지만, 1m 이상 또는 더 깊은 지반의 다짐 상태도 파악이 가능하기 때문에 현장 여건에 따라 활용도가 높을 것으로 판단된다.

표면파를 활용한 SASW(Spectral-Analysis-of-Surface-Wave) 시험법은 1980년대에 처음 소개되었다(Nazarian and Stokoe, 1984; Stokoe and Nazarian, 1985). 이 시험 방식은 표면에서 수행되기 때문에 비파괴 시험이다. 따라서 SPT와 CPT 등 직접 관입을 요구하는 지반조사 방식보다 경제적이라는 장점을 갖고 있다. SASW 시험은 분산 곡선이라고 하는 주파수 또는 파장에 따른 레일리파의 위상 속도를 결정하고, 현장 분산 곡선을 이론적 분산 곡선과 일치시켜 현장을 대표하는 Vs profile을 산정하기 위해 수행한다. SASW 시험은 전단파 속도와 전단계수의 산정을 위해 지난 30년 동안 수많은 지반 현장에서 사용되었다(Stokoe et al., 1994; Stokoe et al., 2017). 특히 내진 설계 정수 취득을 위해 많은 현장에서 수행되었으며, 지반개량 의 정도나 지반 상태 변화에 대한 검증 가능성도 기존 연구자들에 의해 논의된 바 있다(Kim et al., 2001; Stokoe et al., 2021; Kim et al., 2022).

본 연구에서는 SASW 방법을 사용하여 다짐된 성토의 Vs profile을 산정하여 다짐 품질에 대한 검증연구를 수행하였다. 시험 성토는 2개의 구역으로 분류되었으며, 각 구역은 진동 다짐 롤러를 사용하여 다짐하였다. 한쪽 구역은 진동롤러를 활용하여 2회 다짐을 수행하였고, 다른 한쪽은 진동롤러를 활용하여 4회 다짐을 수행하였다. 다짐 직후 2회 다짐을 수행한 영역에서 3개의 위치를 선정하여 SASW 시험을 수행하였고, 마찬가지로 4회 다짐을 수행한 영역에서 3개의 위치를 선정하여 SASW 시험을 수행하여 총 6번의 SASW 시험을 수행하였다. 마지막으로 Nuclear density gauge 시험을 추가로 진행하여 다짐 정도를 비교하였다.

SASW를 활용한 현장 지반 다짐 평가를 위해 수행한 본 연구의 기술 순서는 다음과 같다. 우선 SASW와 Nuclear density gauge 시험의 이론적 원리와 시험방법을 서술하였다. 그리고, 시험에 활용된 성토에 관한 구체적인 정보를 제공하였다. 마지막으로 시험 결과들을 정리 및 분석하였다.

2. 시험방법

2.1 SASW 시험

SASW 방법은 지반의 표면을 따라 전파되는 레일리파의 분산 특성을 사용하여 각 층에 있는 재료의 전단파 속도 profile을 산정하는 시험이다(Joh, 1996). SASW 시험에서는 Fig. 1에 그려진 방법을 통해 데이터를 샘플링한

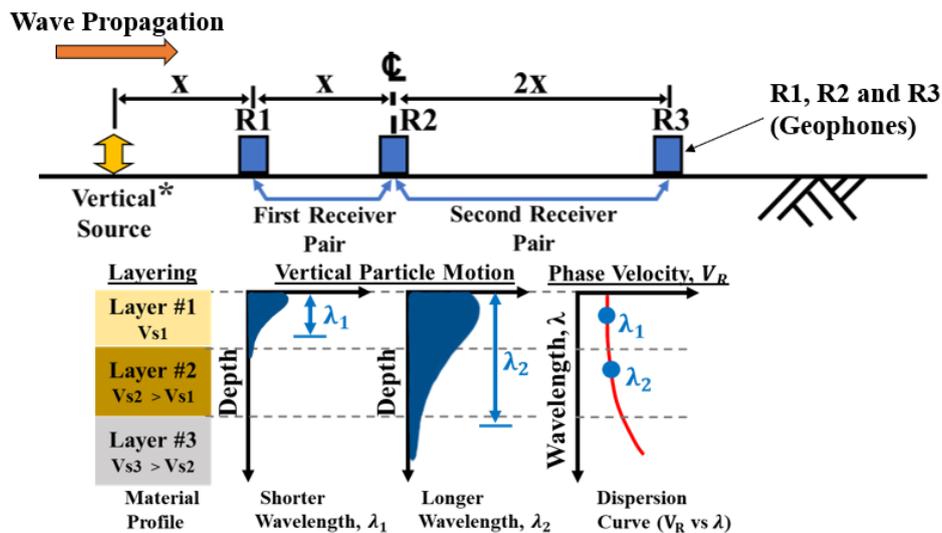


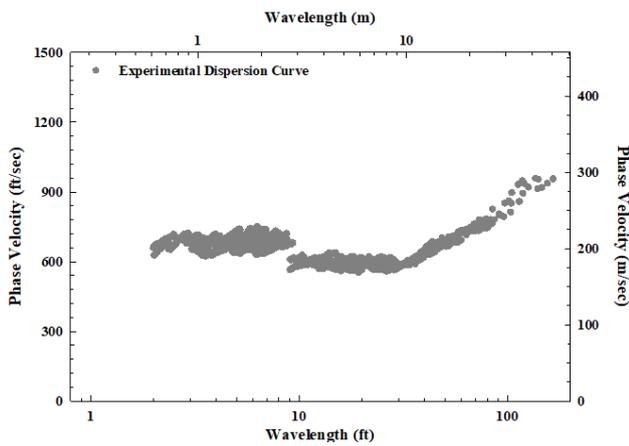
Fig. 1. Generalized SASW testing set-up and schematic of data sampling in a layered system

다. 그림에서와 같이 SASW 시험에는 1개의 에너지원과 3개 혹은 4개의 리시버(지오폰 또는 가속도계)를 사용된다. SASW 시험을 위한 에너지원은 크게 3가지 종류가 존재한다. 첫 번째 에너지원은 얇은 깊이의 지반 정보를 샘플링하기 위해 필요한 망치이다. 망치의 경우 고주파수를 생성할 수 있으며, 상대적으로 시험의 절차가 간편하므로 빠른 시간내에 시험이 가능하다. 가벼운 망치를 사용하면 고주파수 데이터를 생성할 수 있으며, 무게가 큰 망치를 활용하면 상대적으로 저주파수 영역의 에너지를 취득하기 용이해진다. 두 번째 SASW 에너지원으로는 불도저가 있다. 불도저의 경우, 약 10m 이상 50m 이하 깊이의 지반 정보를 취득하기 위해 사용된다. 불도저가 빠르게 움직이다가 급정거할 때 발생하는 진동 에너지를 시험에 활용한다. 불도저를 활용하는 경우도 약 1분 이내로 원하는 데이터를 취득할 수 있다. 마지막 에너지원은 vibroseis 라고 불리는 진동제어 트럭이다. Vibroseis는 주로 50m 이상

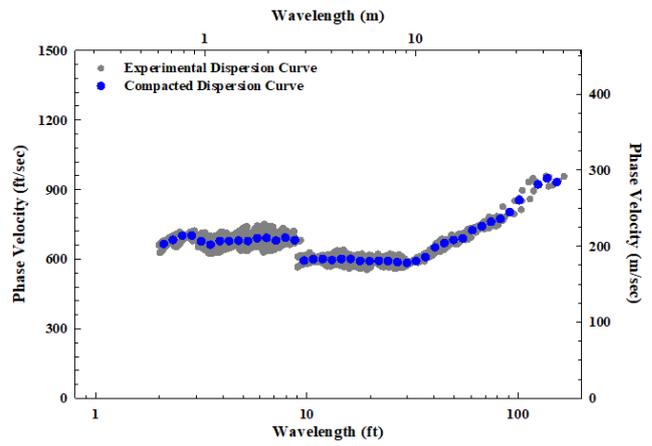
깊이의 지반 정보를 샘플링하기 위해 사용된다. 기기의 종류에 따라 다르지만 현재까지 약 800m 이상의 깊이에 있는 지반 정보도 취득할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이 기기는 주파수를 제어하여 진동을 발생시킬 수 있고, 이를 통해 정확도 높은 시험이 가능하다.

각각의 지오폰들은 그림과 같이 2개의 그룹(R1-R2, R2-R3)을 이루고, 각 그룹에서는 에너지원으로부터 생성된 레일리파의 위상차 정보를 수집한다. 이때 높은 주파수를 갖는 표면파(짧은 파장)를 통해 얇은 깊이의 지반 정보를 샘플링하고, 낮은 주파수를 갖는 표면파(긴 파장)를 통해 깊은 깊이의 지반 정보를 수집한다. 점점 거리 x를 늘려가며 시험을 반복 수행하고, 이에 따른 데이터들을 취득하게 된다. 이렇게 수집된 많은 양의 데이터를 결합하여 Fig. 2(a)와 같은 다양한 파장에 따른 현장의 위상 속도를 나타내는 분산 곡선을 생성한다.

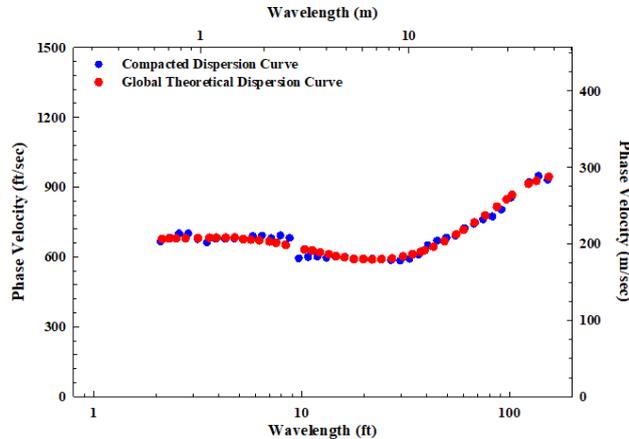
현장 분산 곡선이 생성되면 데이터 피팅에 앞서 moving



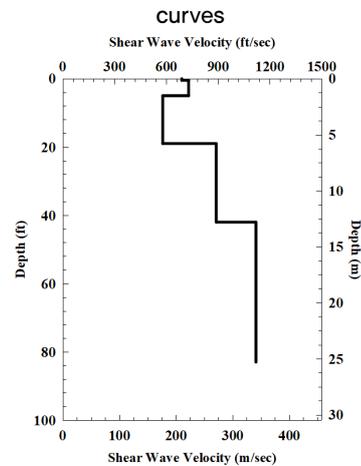
(a) Field experimental dispersion curve created from phase measurements



(b) Field experimental dispersion and compacted dispersion curves



(c) Comparison of the compacted experimental (Field) dispersion curve and the global theoretical dispersion curves



(d) Determined shear wave velocity profile from forward modeling process

Fig. 2. Example of the forward modeling process to determine Vs profile

average 방식으로 대표 분산 곡선을 생성한다(Fig. 2(b)). 생성된 대표 분산 곡선과 유사한 분산 곡선을 생성할 때까지 반복적인 피팅을 통해 RMS(Root mean square)값이 최소화 되게 하는 분산 곡선을 도출하고 이때의 Vs profile을 최종 Vs profile로 결정한다(Fig. 2(c) and Fig. 2(d)). 이때 Vs profile을 도출하기 위해 사용되는 forward 모델링 기법은 강성 매트릭스(Kausel and Roesset, 1981) 접근 방식에 근거하며, 지반의 강성과 두께의 1차원 계층 시스템을 사용하여 대표 분산 곡선에 맞는 이론적 분산 곡선을 계산하는 방법을 의미한다.

이번 연구에서는 다짐도의 평가를 위해 전단계수를 사용하였다. 전단계수는 Vs 값과 지반재료 밀도의 관계를 통해 구할 수 있다. 전단계수를 구하기 위한 공식 (1)은 다음과 같다.

$$G_{\max} = \rho \times Vs^2 \quad (1)$$

여기서, G_{\max} : 전단계수, low strain(MPa)

ρ : 재료밀도(kg/m^3)

Vs : 전단속도, S파 속도(m/s)

2.2 Nuclear Density Gauge 시험

Nuclear density gauge 시험방법은 지반이나 아스팔트 또는 소재의 밀도와 함수비를 구할 수 있는 시험 방법이다. 이 방법은 주로 다짐이 수행된 토질 현장에서 함수비에 따른 지층의 밀도를 산정하여 다짐 평가에 활용된다. 방사선을 활용하기 때문에 인체 안전성에 대한 단점이 존

재하지만 비파괴적이고 빠른 시간에 시험이 가능하며 저렴하다는 장점이 있다. 이 시험은 방사선 원리를 이용하여 지층의 밀도를 측정한다. 일반적으로 사용되는 방사선은 Cs-137 또는 Am-241 이며, 방사선이 지표면 또는 물체를 통과하면서 감쇠되는 정도를 통해 해당 지층의 밀도를 산정한다(Ali, 2022).

Nuclear density gauge 시험방법은 다음과 같다. (1) 우선 Nuclear density gauge 기기를 측정 지점에 위치시킨다. (2) 그 후 방사선을 방출시켜 지반 또는 재료와 상호작용을 통해 변화된 방사선의 흐름을 감지하고 이를 통해 밀도를 계산한다. (3) 계산된 밀도와 함수비를 기록한다. 시험 방식은 크게 두 가지로 분류되는데 Fig. 3에서 나타나듯이 direct transmission 방법과 back scatter transmission 방법이 있다(Ali, 2022). Direct transmission 방법은 관입된 source에서 방출된 방사선 정보를 기기 하단부에 있는 측정기를 통해 취득하는 방식이고, back scatter transmission 방법은 표면에서 방사선을 방출하여 반사된 정보를 측정기로 취득하는 방식이다.

3. 시험 현장 정보

다짐 평가를 위한 현장 test-bed의 정보는 다음과 같다(Fig. 4). 성토는 약 1.4m의 높이로 구성되어 있으며, 상부 노상과 하부노상으로 구성되어 있다. 상부노상은 약 0.4m이며, 2회 다짐을 수행하였고, 하부노상은 약 1m이며 Fig. 4와 같이 두개의 구역으로 나누어 한쪽 구역은 4회 다짐, 다른 한쪽 구역은 2회 다짐을 수행하였다. 노상을 성토하기 전에 노체에 다짐을 수행하였으나, 다짐 횟수에 관한

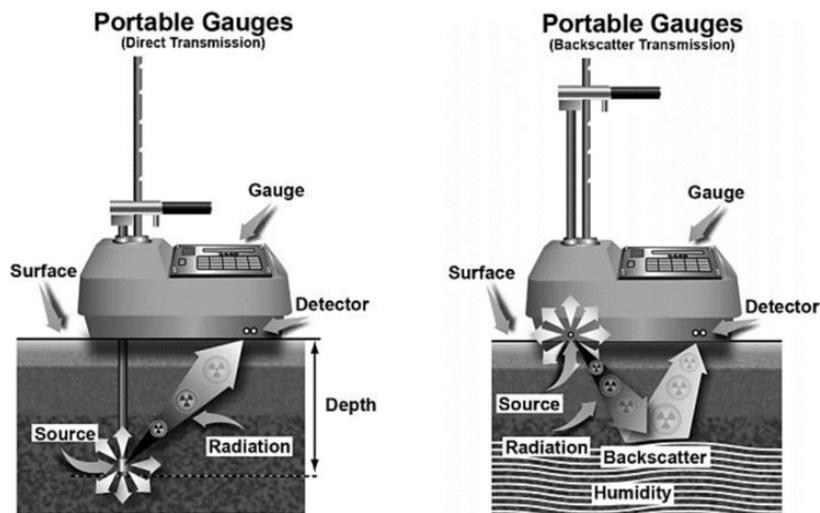


Fig. 3. Nuclear density gauge components and two operation modes (Ali, 2022)

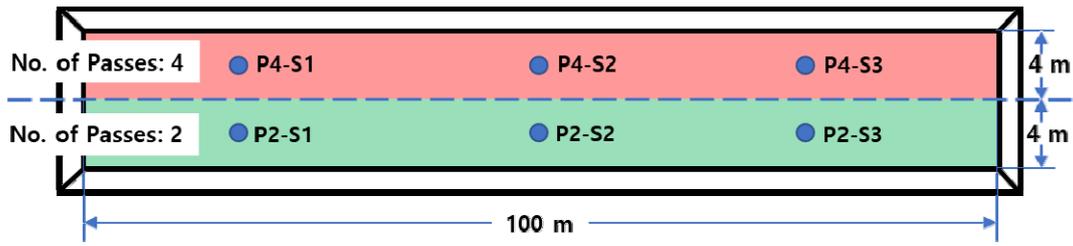


Fig. 4. General information of the testing site

Table 1. Nuclear gauge density test results performed on compacted embankment

No. of Passes		Data 1	Data 2	Data 3	Data 4	Data 5	Data 6	Data 7	Data 8	Data 9	Average
2	Water content, %	-1.6	-0.9	-0.6	-0.1	0.4	0.9	1.3	1.6	1.7	0.3
	Compaction, %	96.0	96.1	94.9	94.5	94.6	95.9	95.7	95.2	96.7	95.5
4	Water content, %	-1.8	-1.3	-1.1	-0.5	0.1	0.3	0.5	1.4	1.9	-0.1
	Compaction, %	96.9	95.9	97.1	96.1	99.7	97.8	97.5	96.7	98.5	97.4

구체적인 정보는 취득하지 못하였다. 다짐 정도를 평가하기 위해 구역별로 9개의 Nuclear density gauge 시험과 3개의 SASW 시험(S1, S2, 그리고 S3)을 수행하였다. 성토에 사용된 재료는 최적 함수비(OMC)는 11.4 %, 최대 건조단위중량($\gamma_{d,max}$)은 19.21 kN/m^3 의 실트질 모래가 활용되었다.

시험 현장의 여건으로 인해, Nuclear density gauge 시험은 하부 노상을 다진 이후에 수행하였고, SASW 시험은 상부노상을 다진 이후에 수행하였다. 다짐 정도의 차이를 준 영역은 하부 노상이기 때문에, 본 연구에서 중점으로 비교 연구를 수행하는 대상은 하부 노상(0.4~1.4m) 구간이다.

4. 시험 결과

4.1 Nuclear density gauge 시험결과

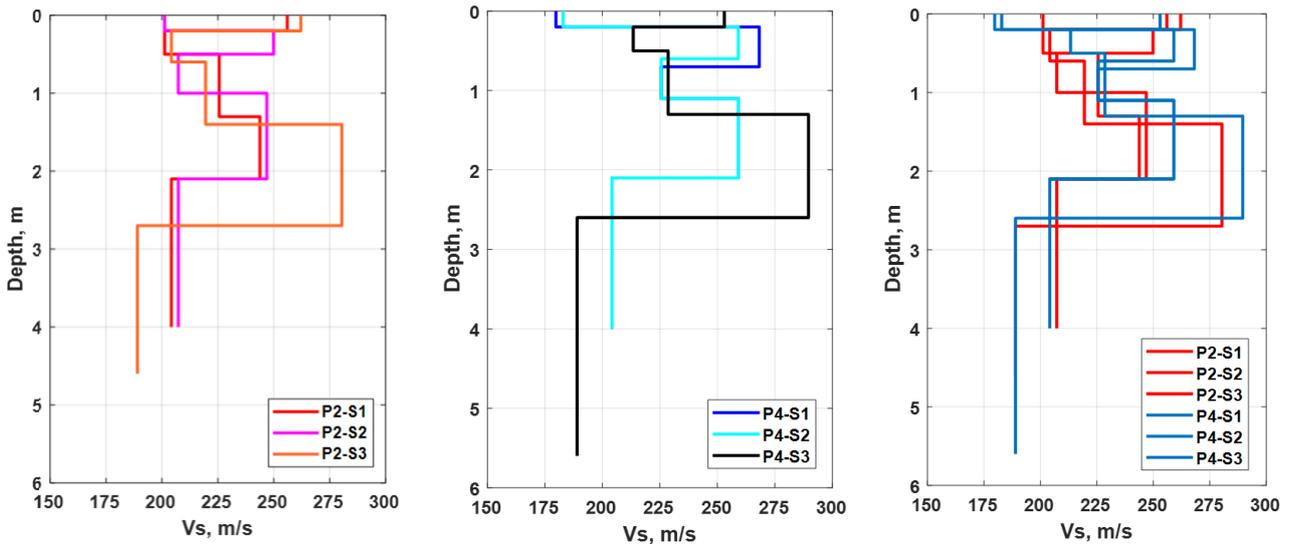
앞서 기술한 대로 구역별로 9개, 총 18개의 위치에서 Nuclear density gauge 시험을 수행하였다. 시험 결과는 Table 1에 정리하였다. 총 18개의 시험에서 함수비는 최적 함수비와 차이가 2% 이내에 포함되어, 큰 차이를 보이지 않았다. 시험 결과는 현장에서 측정된 단위중량을 최대 건조 단위중량 대비 백분율로 환산하여 다짐도로 계산하였다. 시험 결과 2회 다짐을 수행한 구역에서는 평균 95.5%의 다짐도를 보였고, 4회 다짐을 수행한 구역에서는 평균 97.4%의 다짐도를 보여 2회 다짐한 구역과 4회 다짐한 구역에서 약 2%의 다짐도 차이가 발생하였다. 함수비의

경우 두 구역 모두 평균적으로 0에 근접한 값을 보였다.

4.2 SASW 시험결과

2개의 구역에서 총 6개의 SASW 시험을 수행하였다. 한쪽 구역은 진동롤러로 2회 다짐을 수행하였고, 다른 한쪽 구역은 4회 다짐을 수행하였다. 두 구역에서 SASW 시험으로 도출한 Vs profile들을 Fig. 5에 정리하였다. Fig. 5(a)에는 2회 다짐한 구역에서 도출된 3개의 Vs profile (P2-S1, P2-S2, 그리고 P2-S3) 결과를 나타냈고, Fig. 5(b)에는 4회 다짐한 구역에서 도출된 3개의 Vs profile(P4-S1, P4-S2, 그리고 P4-S3) 결과를 나타냈다. 그리고 마지막으로 Fig. 5(c)는 두 지역에서 도출된 6개의 Vs profile들을 함께 비교하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 지표면에서부터 약 0.3m 깊이의 Vs 값 변화가 매우 크다. 이러한 결과가 나온 이유는 2가지로 해석된다. (1) 다짐을 수행할 때 진동과 무게로 인해 지표면 상단부에 크랙이 발생할 수 있고 이로 인한 지지력의 저하가 생길 수 있다. 또한, (2) SASW 시험의 특성상 데이터의 질이 좋지 못한 경우 지표면으로부터 약 0.2~0.25m 정도의 깊이에서는 시험의 정확도가 떨어질 수 있다.

하부노상 깊이 구간(약 0.4~1.4m)의 전반적인 Vs 값을 비교해 보았을 때, 4회 다짐을 한 구역의 Vs 값이 2회 다짐을 한 구역보다 높음을 알 수 있다. 이 구간의 Vs 값을 평균해서 비교해 보면, 2회 다짐을 수행한 영역의 평균 Vs 값은 199.9 m/s , 이고, 4회 다짐을 수행한 영역의 평균 Vs



(a) Vs profiles determined at Location P2 (number of Passes: 2) (b) Vs profiles determined at Location P4 (number of Passes: 4) (c) Comparisons of Vs profiles determined at location P2 and P4

Fig. 5. Vs profiles determined at the compacted site

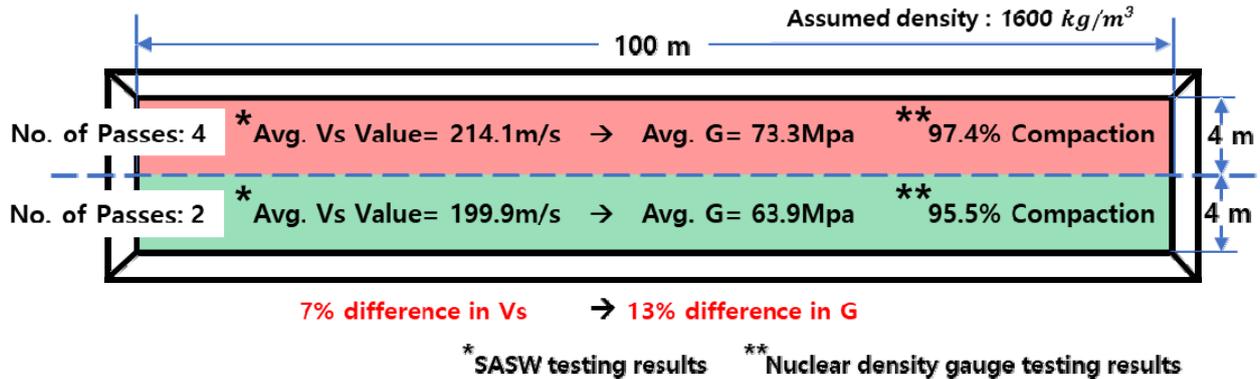


Fig. 6. A summary of SASW and Nuclear density gauge testing results

값은 214.1m/s이다(Fig. 6). 두 영역의 Vs값은 약 7%의 차이를 보이며, 식 (1)을 통해 계산한 결과 두 영역은 약 13%의 전단계수 차이를 보였다. 이러한 결과는 Nuclear density gauge 시험 결과와 흐름을 같이한다. Nuclear density gauge 시험 결과에 의하면 2회 다짐을 수행한 영역이 4회 다짐을 수행한 영역보다 95.5%에서 97.4%로 약 2% 낮은 값을 나타냈다. Yokohama et al.(2014)에 의해 수행된 연구 결과에 의하면 95% 와 97% 다짐도의 차이는 약 12%의 전단계수 차이를 나타낸다고 보고되었다. 그러므로 현장시험 결과로 계산된 두 영역 전단계수의 차이는 합리적이라 판단된다.

현장에서 도출된 Vs profile을 통해 다짐 정보 외에도 추가적인 정보를 취득할 수 있었다. 우선, 성토 높이인 1.4m 이상의 깊이에도 Vs 값이 증가함을 알 수 있었다.

이러한 증가는 노체의 다짐으로 인해 지반 강도가 증가하여 나타난 결과로 분석된다. 약 2m 이상의 깊이에는 오히려 Vs 값이 낮아짐을 확인할 수 있었는데 이는, 2m 이상의 깊이에서는 다짐의 영향을 받지 못하였기 때문에 해당 깊이의 일반적인 Vs 값이 도출된 것으로 분석된다. 마지막으로 P2-S3와 P4-S3의 Vs 값이 약 1.5m 이상에서 다른 4개의 SASW 시험 위치에 비해 특히 높은 값을 나타내다가 낮아지는 경향을 보였다. 이는 Fig. 4 현장 지도에서 오른쪽에 있는 지역의 원지반 강도가 다른 4개의 위치와는 달라 이러한 결과가 나타난 것으로 분석된다.

5. 결론

다짐은 토목 건설 현장에서 지반의 침하 방지와 안정성

을 확보하기 위해 수행된다. 기존에 수행되는 다짐 평가 방식의 단점들을 극복 및 보완하기 위해 표면파를 활용한 SASW(Spectral-Analysis-of-Surface-Wave) 시험으로 다짐을 평가하였다. SASW 시험은 세팅에 따라 원하는 깊이의 지반 강성 평가가 가능하며, 비파괴시험으로 상대적으로 저렴하다. 본 연구에서는 다짐도 분석을 위해 롤러를 활용하여 2회 다짐한 구역과 4회 다짐한 구역에서 총 6개의 SASW 시험과 총 18개의 Nuclear density gauge 시험을 수행하여 다짐을 평가한 후 비교하였다. 시험 결과 비교를 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) SASW 시험을 수행한 결과, 2회 다짐을 수행한 영역에서 평균 Vs 값은 199.9m/s, 4회 다짐을 수행한 영역에서 평균 Vs 값은 214.1m/s로 나타났다. 두 영역은 약 7%의 Vs 값 차이를 나타냈으며, 이는 약 13%의 전단계수 차이를 의미한다.
- (2) 비교 시험으로 수행한 Nuclear density gauge 시험에서는 2회 다짐을 수행한 영역에서는 평균 95.5%의 다짐도를 보였고, 4회 다짐을 수행한 구역에서는 평균 97.4%의 다짐도를 보여 2회 다짐한 구역과 4회 다짐한 구역에서 약 2%의 다짐도 차이가 발생하였다. 두 결과 모두 4회 다짐을 수행한 지반의 강도가 높은 것으로 분석되었으며, 기존 연구 결과에 의하면, 이 다짐도 차이는 전단계수로 환산하면 약 12% 차이가 나는 것으로 보고 되어, SASW를 통한 다짐 평가 결과의 신뢰성을 입증하였다. 또한, SASW 시험을 통해 다짐 평가 외에도 현장의 전반적인 지반 강도를 파악할 수 있어 활용도가 높음을 확인하였다.

SASW 시험을 활용하면 0.5m 이상 또는 더 깊은 지반의 다짐 상태도 파악이 가능하므로, 현장 여건에 따라 기존 다짐 시험과 함께 활용 시 다짐 평가에 대한 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government (Project Number: RS-2020-KA157130).

References

1. Ali, A. M. (2022), "Applications of ground penetrating radar for the assessment of newly paved roads", Master Thesis, *The University of SZEGED*.
2. Joh, S. H. (1996), "Advances in the data interpretation technique for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) measurements", Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, Vol.240.
3. Kausel, E. and Roesset, J.M. (1981), "Stiffness matrices for layered soils", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.71, pp.1743-1761.
4. Kim, D. S., Shin, M. K. and Park, H. C. (2001), "Evaluation of density in layer compaction using SASW method", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.2, pp.39-46.
5. Kim, G., Hwang, S. and Stokoe, K. H. (2022), "Evaluation of the Lateral Variability in the Vs Profiles at Geotechnical Sites using the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) Method", *12th National Conference on Earthquake Engineering*, No.10181.
6. Nazarian, S. and Stokoe, II K. H. (1984), "In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves", *8th World Conference on Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, San Francisco, California, Vol.3, pp.31-38.
7. Stokoe, II K. H., Kim, G. and Hwang, S. (2021), "Shear Wave Velocity Profiling Using the SASW Method at Four Nuclear Power Plant Sites (NPP1, NPP2, NPP3, and NPP4) in Taiwan", *Geotechnical Engineering Report GR21-13*, University of Texas at Austin.
8. Stokoe, K. H. and Nazarian, S. (1985), "Measurement and use of shear wave velocity for evaluating dynamic soil properties", *Use of Rayleigh waves in liquefaction Studies*, in, R.D. Woods, ed., ASCE, New York.
9. Stokoe, K. H., Hwang, S., and Joh, S. H. (2017), "Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) testing to evaluate Vs profiles at geotechnical and geological sites", *16th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile, No.4948.
10. Stokoe, K. H., Wright, S. G., Bay, J. A. and Roesset, J. M. (1994), "Characterization of Geotechnical Sites by the SASW Method", ISSMFE, *Technical Committee 10, Presented at the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi.
11. Yokohama, S., Miura, S. and Matsumura, S. (2014), "Change in the hydromechanical characteristics of embankment material due to compaction state conditions", *Soils and Foundations*, Vol.54, No.4, pp.731-747.