

표면파 탐사 기법을 이용한 락필댐 사력재의 전단파 속도 획득

김종태¹⁾, 박헌준¹⁾, 김경섭¹⁾, 김동수¹⁾

¹⁾한국과학기술원 건설 및 환경공학과, greatrok@kaist.ac.kr

Evaluation of Vs profile of Rock-fill Zone using Seismic Surface wave Method

Jongtae Kim¹⁾, Heonjoon Park¹⁾, Gyeongseob Kim¹⁾, Dongsoo Kim¹⁾

¹⁾Dept. of Civil & Environmental Engineering, KAIST

요약 : 댐체의 내진설계를 위해서 각 부분의 정확한 동적 물성치 산정이 매우 중요하다. 그러나 기존 국내 댐의 내진설계의 경우 합리적이고 경제적인 물성치 산정에 있어 많은 어려움이 있었다. 특히, 댐 전체 부피의 80%이상을 차지하며 강성유지에 주요한 역할을 하는 사력존의 경우, 현장 시험결과없이 가정 물성을 이용하여 해석을 수행하여 신뢰성 있는 결과를 도출하지 못하였다. 따라서 현장 실험을 통하여 사력재의 전단파속도로 대표되는 동적물성치를 효율적으로 획득해야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 표면파 탐사 기법을 사력부에 적용하여 락필댐 사력재의 전단파 속도를 도출하고자 하였다. 대표적인 표면파 기법인 SASW기법과 새롭게 개발된 HWAW 기법을 이용하여 2개 댐의 사력부에서 시험을 수행하여 전단파 속도를 획득하였으며, 결과의 비교를 통하여 향후 D/B 제안의 가능성을 확인하였다.

주요어 : 사력재, 동적물성치, 전단파 속도, 표면파 기법, SASW, HWAW

Abstract : It is very important to measure reliable properties of each zones in dam for seismic design. But, rock-fill zone which have 80% of total volume and support maintenance mainly during earthquake has little property by field test and seismic design was performed using assumed value. So, it is required that reliable properties have to be evaluated by in-situ test. In this study, surface wave method, which is nondestructive such as SASW and HWAW, was applied to dam to evaluate rock-fill zone of dam. In 2 dams, Vs profiles were evaluated reliably and possibility of suggestion of D/B was verified.

Keywords : rock-fill zone, dynamic properties, shearwave velocity, surface wave method, SASW, HWAW

1. 서론

최근 들어 국외는 물론 국내에서도 지진의 발생빈도 및 규모가 증가하고 있고 지진에 대한 피해는 대비태세의 유무에 따라 극명하게 달라져 내진설계에 대한 필요성은 아무리 강조해도 지나치지 않는다. 사회 중요구조물이며 파괴시 큰 피해를 유발하는 댐의 경우

에도 거동을 미리 예측하여 댐의 붕괴 방지 및 피해를 최소화하기 위한 내진성능 평가가 절대적으로 필요하다. 지진에 의해 발생하는 지반운동이나 구조물의 거동은 국지적인 지반조건에 의해 매우 크게 좌우되므로 신뢰성 있는 필댐의 동적물성치 산정을 위한 연구가 필요시 된다. 댐체의 내진설계에서 필요로 하는 대표적인 동적 지반물성치는 전단탄성계수, 포아송비, 감쇠비 등이며, 댐 구조물의 심벽(코어), 사력 부분의 재료 및 기초 지반의 동적 물성치에 따라 동하중에 대한 필댐의 거동 특성이 매우 다르므로 각 부분의 신뢰성 있는 정확한 동적 물성치 산정이 매우 중요하다. 그러나 기존 국내 댐의 내진설계의 경우 합리적이고 경제적인 물성치 산정에 있어 많은 어려움이 있었다. 특히, 댐 전체 부피의 80%이상을 차지하며 강성유지에 주요한 역할을 하는 사력존의 경우, 사석을 이용하여 시공되므로 시추공확보에 어려움이 있다. 그러므로 시추공을 이용하는 기존 현장 탄성과 시험 수행 및 현장 시료채취의 한계성으로 인한 실내시험의 수행이 쉽지 않아 동적물성을 가정하여 해석하는 경우가 많고, 재료의 이질성, 거동특성의 비선형성 등으로 신뢰성이 높은 내진성능 평가 결과를 얻지 못하고 있는 실정이다. 따라서 신뢰성 있는 현장 실험을 통하여 사력재의 전단파속도로 대표되는 동적물성치를 효율적으로 획득해야 한다.

이를 위하여 본 연구에서는 표면에서 비파괴적으로 수행되는 표면파 탐사 기법을 적용하여 락필댐 사력재의 전단파 속도를 도출하고자 하였다. 대표적인 표면파 기법인 SASW 기법과 새롭게 개발된 HWAW 기법을 이용하여 2개 댐의 사력부에서 시험을 수행하여 전단파 속도를 획득하였으며, 향후 D/B 제안의 가능성을 살펴보았다.

2. 사력부 전단파 속도 획득을 위한 표면파 탐사 기법의 적용

(1) 전단파 속도를 획득할 측선 및 시험장비의 선정

락필댐의 사력부는 큰 암석과 자갈이 섞인 사력부의 재료 구성 및 경사진 표면으로 인하여 표면파 시험 수행 조건이 좋지 않은 편이다. 따라서 사력재의 전단파 속도를 획득하기 위해서는 시험을 수행할 측선의 선정이 우선적으로 필요하다. Fig.1에 나타난 바와 같이 댐체에서 사력재의 물성을 구할 수 있는 측선은 사면의 소단, 댐마루의 가장자리, 사력부의 경사면 3곳 정도로 압축할 수 있다. 소단의 경우 수평으로 평탄한 구조를 가지고 있어 감지기의 설치 및 가진 등 시험수행이 용이하나, 존재하지 않는 댐이 많이 존재하며 소단의 폭이 좁은 경우도 있다. 댐마루의 가장자리는 탐사를 위한 접근성이 좋고 감지기의 설치 및 가진을 안정적으로 용이하게 할 수 있으나 대상댐의 단면 정보가 없는 경우 심벽부(core) 및 사력부의 경계를 파악할 수 없어 사력재의 물성을 신뢰성있게 파악하기 힘들게 된다. 사력부의 경사면의 경우 감지기의 설치 및 가진에 어려운 점이 있으나 모든 댐에서 시험이 가능한 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 대상댐의 소단이 있는 경우 소단에서 시험을 우선적으로 수행하였으며, 그 다음으로 경사면에서 시험을 수행하여 사력재의 전단파 속도를 도출하였다.

일반적으로 표면파 탐사 기법에서는 감지기로서 속도계를, 가진원으로 슬래지해머 및 추를 사용하여 시험을 수행하게 된다. 그러나 사면의 경우 감지기를 사면에 수직인 방향, 즉, 중력에 경사진 방향으로 설치해야 하기 때문에 수직성에 민감한 속도계의 경우 사용이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 속도계 대신 Fig. 2(a)와 같은 수직성에 영향을 받지 않는 저주파 가속도계를 이용하여 시험을 수행하였다. 암석과의 접촉을 위하여 Fig. 2(a)에서 나타난 바와 같이 찰흙을 이용하여 표면에 고정시켰다. 또한 경사면 및 암석 위에서 중추 및 기존의 슬래지 해머를 사용할 경우, 파의 발현이 제대로 이뤄지지 않거

나 안정성에 문제가 발생하는 경우가 생겨 본 연구에서는 Fig. 2(b)와 같은 우레탄 해머를 사용하여 안정적인 가진을 발생하였다.



(a) berm of dam (b) edge of crest (c) slope of rock-fill zone

Fig. 1. Practicable survey line to evaluate Vs ad rock-fill zone



(a) urethane sledge hammer



(b) low hertz accelerometer

Fig. 2. Suitable source and receiver

(2) 적용된 표면파 탐사 기법

표면파 탐사 기법은 다수의 감지기를 이용하는 다채널 기법과 두 개의 감지기만을 이용하는 2채널 기법으로 구분할 수 있다. 다채널 기법으로 현업에서 널리 사용되고 있는 MASW(multi-channel analysis of surface waves) 기법이 있으며(Park *et al.*,1999), 2채널 기법으로는 기존의 SASW(spectral analysis of surface waves) 기법(Nazarian and Stokoe,1984)과 최근 개발된 HAWW(harmonic wavelet analysis of wave) 기법(박형춘과 김동수, 2004; 박형춘 등, 2004)이 현업에 사용되고 있다. 사력부와 같이 표면의 조건이 좋지 않은 부지의 경우 MASW와 같이 24개 이상의 감지기가 필요한 경우 각 감지기를 등간격으로 축선에 설치하기가 매우 어렵다. 이에 반해 2개의 감지기만 이용하는 기법의 경우 두 감지기를 지반의 국부적인 조건에 따라 설치하고 사이의 거리를 알면 시험 수행이 가능하다는 장점이 있다. 또한 위 절에서 언급한 바와 같이 경사면의 경우 가속도계를 이용하여 시험을 수행해야 하나, 속도계에 비해 상대적으로 가격이 비싼 가속도계를 이용하여 MASW 기법을 수행하게 되면 비용이 크게 증가하게 된다. 더욱이 HAWW 기법의 경우 타 기법에 비해 작은 가진 에너지로 시험 수행이 가능하여(박형춘 등,2008), 타격이 어려운 댐체에서 장점을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 SASW 및 HAWW 기법을 이용하여 사력재의 진단과 속도를 도출하였다.

3. 현장 적용 사례

(1) ○○댐

소단이 존재하지 않는 ○○댐에서 경사사면에 축선을 위치시킨 후 감지기를 경사면의 법선방향으로 설치하고 SASW 및 HAWW 시험을 수행하였다(Fig. 3.(a)). SASW 기법은

감지기 간격을 2, 4, 8, 16m 로 늘려가며 시험을 수행하였고, HWAW 시험의 경우 최적의 시험구성을 위해 감지기 간격 2, 4, 6m, 첫 감지기- 가진원 거리 6, 8, 10, 20m 등으로 변화시키며 시험을 수행하여 최종적으로 감지기 간격 2m, 가진거리 10m 구성에서 결과를 획득하였다. Figs. 3.(b),(c)는 SASW 및 HWAW 시험결과를 나타낸다. 현장에서 약 20~30m 영역까지 분산곡선을 도출하였으며 역산과정을 통하여 사력재의 전단파 속도 주상도를 도출하였다(Fig. 3.(d)). 그림에서 나타난 바와 같이 사력존은 매우 큰 바위부터 조그만 자갈까지 입도분포가 다양하며 상부의 경우 영성하게 채워져 공극이 큰 상태로 존재하였다. 그래서 여러 방법으로 가진을 하여도 실제 타격에너지가 크게 발현되지 않아 장과장 영역의 분산곡선을 획득하지 못하였다. 또한 사력재의 불균진한 구성으로 인하여 표면 단과장 영역의 결과는 신뢰성이 떨어진다고 판단된다. 이러한 분산곡선으로부터 구한 전단파 속도의 주상도는 약 12m 깊이까지 도출하였으며 전단파 속도는 상부 200m에서 하부 400m 범위에서 존재하였다.

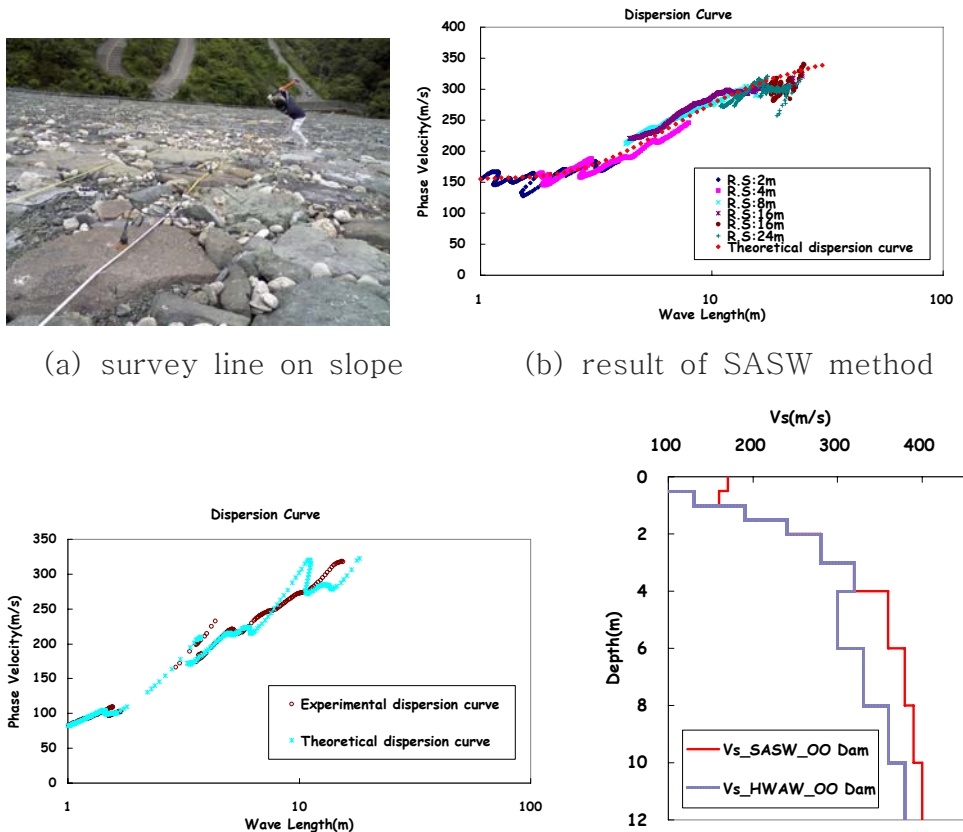


Fig. 3. Field application of surface wave method on OO dam

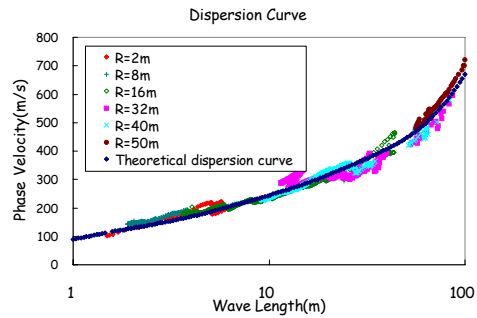
(2) ◇◇댐

소단이 존재하는 ◇◇댐에서 사면의 경사가 급하여 표면과 기법을 소단에서만 수행하였다(Fig. 4.(a)). SASW기법은 감지기 간격을 2m부터 50m까지 늘려가며 시험을 수행하였다. 일반적인 지반의 경우 슬래지 해머나 추로 가진할 경우 32m 이상 감지기 간격에서 양질의 결과를 얻기 힘들다, 본 현장에서는 추 가진을 이용하여 과장 100m까지의 분산곡선을 도출하였다(Fig. 4.(b)). ○○댐과는 다르게 ◇◇댐 표면의 사력재의 입도분포

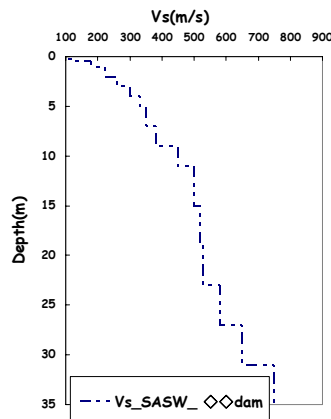
가 비교적 균등하고 잘 다져져 있어 추 가진시 타격에너지가 잘 발현되었기 때문이라 판단된다. 이는 사력부에서 상부에서 가진문제만 해결하면 신뢰성있는 동적물성치를 산정할 수 있다는 것을 의미한다. 획득한 분산곡선을 이용하여 산정된 전단파 속도를 Fig. 4.(c)에 나타내었다. 깊이 35m까지 전단파 속도를 도출하였으며 깊이에 따라 200m/s에서 700m/s까지 범위에 존재하였다.



(a) survey line on berm



(b) result of SASW method



(c) Vs profiles of rock-fill zone

Fig. 4. Field application of surface wave method on ◇◇ dam

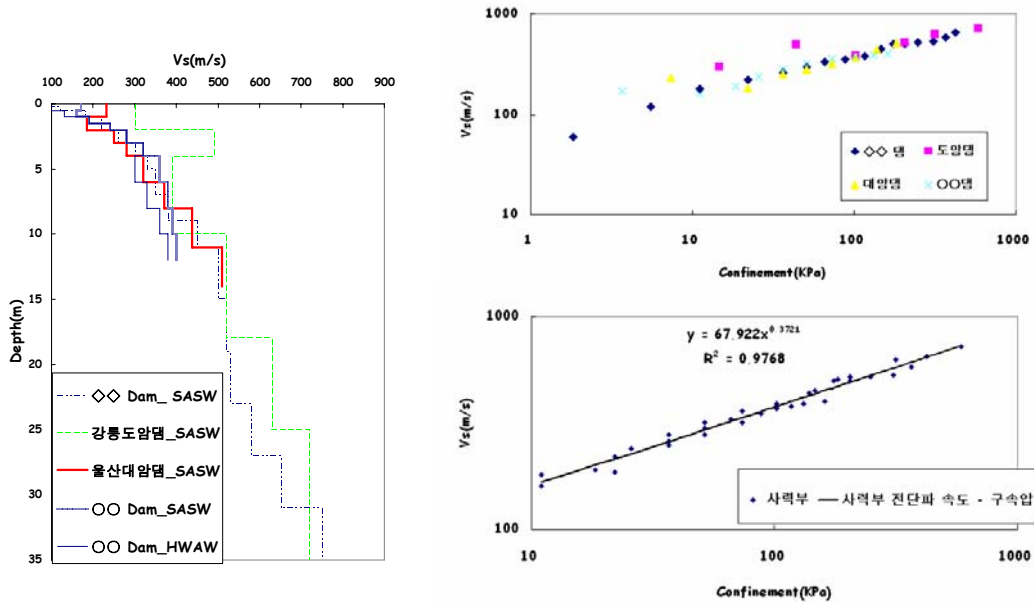
4. 사력재의 전단파 속도 분포

본 연구팀에서 과거에 수행하였던 도암댐 및 대암댐 결과와 이번 연구를 통해 획득한 2개 댐의 결과를 Fig. 5(a)에 도시하였다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 사력재의 종류에 큰 영향을 받지 않고 깊이에 따라 일정하게 증가하는 경향을 가지는 것을 알 수 있다. 구속압에 따른 속도의 변화를 확인해 보기 위하여 밀도를 2.2ton/m^3 로 가정하여 전체결과를 구속압-전단파 속도의 관계로 도시하였다(Fig. 5(b)). 지표면 1m 표층에 해당하는 구속압 10kPa 이하 부분을 제외하고 추세선을 구해본 결과 구속압에 따른 전단파 속도의 분포가 좋은 상관관계를 가짐을 확인하였다. 따라서, 향후 추가 부지에서 시험을 수행하여 양질의 D/B를 구축하게 되면 이를 이용하여 신뢰성있는 내진성능평가를 수행할 수 있을 것이라 판단된다.

5. 결론

표면파 기법(SASW, HWAW)을 이용하여 락필댐 사력존의 전단파 속도를 도출하였다.

시험은 사력부의 사면 및 소단에서 우레탄해머와 가속도계를 이용하여 수행하였으며, 깊이 에 따라 200~700m/s 에 해당하는 전단파 속도 분포를 도출하다. 기존 시험결과 및 본 연구에서 획득한 결과를 비교분석한 결과, 사력재의 전단파 속도는 댐 재료의 특성에 따라 크게 변하지 않고 구속압에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 이러한 특성을 이용하여 향후 양질의 D/B를 구축할 시 이를 이용하여 필댐의 신뢰성있는 내진성능평가를 수행할 수 있으리라 판단된다.



(a) comparison of Vs profiles (b) correlation of Vs and confinement

Fig. 5. Vs profiles of rock-fill zone in several dams

감사의 글

본 연구는 한국시설안전공단의 시험 부지 협조와 스마트 사회기반시설 연구센터 (SISTeC)의 연구비 지원으로 이루어진 연구 성과의 일부로 이에 감사를 포함합니다.

참고문헌

- 박형춘, 김동수, 2004, HWAW 방법을 이용한 새로운 탄성과 지반조사기법의 개발(II) : 실험 구성 및 역산과정, 대한토목학회 논문집, Vol. 24, No. 2C, pp. 117-124,
- 박형춘, 김동수, 이병식, 2004, HWAW (Harmonic Wavelet Analysis of Wave) 방법을 이용한 새로운 탄성과 지반조사기법의 현장 적용, 한국지반공학회 논문집, 제20권, 6호, pp. 1-9.
- 박형춘, 김동수, 김종태, 박헌준, 방은석, 2008, HWAW기법을 이용한 지반의 전단파 속도 2-D 영상화. 한국지반공학회 봄학술발표회, 지반공학회
- Nazarian, S. and Stokoe, KH., 1984, In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface wave, Proc., 8th Conf on Earthquake Eng, S.Francisco, pp. 31-38,
- Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J., 1999, Multi-channel analysis of surface waves, *Geophysics*, Vol. 64, No. 3, pp. 800-808,