

고성토 제방의 부지응답해석을 위한 전단강성 평가

Evaluation of Stiffness Profile for Site Response Analysis of Highly-Elevated Earth-fill Embankment

조성호† 노리나* 하사눌*
Sung-Ho Joh Norinah Abd Rahman Raja Hassanul

ABSTRACT

High rock-fill embankment is relatively flexible, which makes crest of embankment subject to excessive amplification in displacement due to earthquake loading. To overcome problems related with site response in high embankment, it is essential to evaluate shear-wave velocity profile of the embankment with improved accuracy and reliability. In this aspect, an experimental research was performed to answer how to perform surface-wave tests and to analyze measurements at an embankment site with a sloping ground surface. Unlike flat ground surface, sloping ground may hamper and slow down propagation of surface waves due to multiple reflections and refractions in embankment. To figure out this reasoning for the effect of multiple reflections and refractions due to sloping surface, surface wave tests were performed at a reservoir embankment of Chung-Song in North KyeongSang Province. Parameters involved in surface wave tests at non-flat surface, including source directionality, geometry-related constraint and frequency components in source function, were investigated using field measurements.

1. 서론

대표적인 지반공학 구조물의 하나인 성토제방은 철도나 도로와 같은 물류의 이동을 위해서 또는 물을 장기간 저장하기 위해서 오랜 역사를 두고 활용되어 왔다. 특히 최근에는 비교적 직선의 선형을 요구하는 고속전철의 노체를 형성하기 위해서, 또는 대용량의 물을 저수하기 위해서 성토고의 높이는 더욱 높아져 가고 있다. 토사 혹은 암괴로 조성된 고성토 제방은 비교적 연성의 구조물이기 때문에, 지진하중이 가해졌을 때 성토체 상단에서의 변위 증폭은 우려할 정도의 수준에 도달할 가능성이 있다. 따라서 내진 성능 1등급 구조물인 고속전철이나 댐 구조물의 경우 내진성능을 확보할 필요가 있으며, 내진성능 평가를 위한 성토제방 부지응답해석의 신뢰성도 제고될 필요가 있다. 고성토 제방의 부지응답해석을 위해 요구되는 가장 중요한 입력자료는 전단파 속도 주상도로서, 본 연구에서는 전단파 속도 주상도의 평가를 위한 비파괴 표면파 기법의 신뢰성 제고에 주안점을 두었다. 즉 반무한체가 아닌 부정형의 지반구조물 표면에서 표면파 기법을 어떻게 적용하고 그 측정결과를 어떻게 해석하여야 부지응답해석에 합리적인 전단파 속도 주상도를 결정할 수 있을 것인지에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 이는 그림 1에서 확인할 수 있는 것처럼 표면파가 전파될 때 표면파의 에너지는 수직 방향뿐만 아니라 횡방향으로도 퍼져나가게 된다. 이 때 표면파를 전달시키는 매질이 지표면까지 연결되어 있지 않고 제한된 경사면으로 국한될 때, 표면파의 전파특성은 달라지게 되어, 측정되는 표면파 속도에도 변화가 있게 된다.

이를 위하여 본 연구에서는 경상북도 청송군에 위치한 실제 사력댐에서 표면파 시험을 수행하였고, 실제 측정 자료를 확보하였다. 이를 이용하여 표면파 시험에서 발진원의 탄성과 에너지의 방향성, 댐 구

† 정희원, 중앙대학교, 건설환경공학과, 교수
E-mail : shjoh@cau.ac.kr
TEL : (02)820-5894 FAX : (02)812-6397
* 학생희원, 중앙대학교, 토목공학과, 대학원생

조체의 부정형에 따른 구속조건, 발진원의 주파수 성분 등이 표면파 시험으로 획득하게 되는 전단파 속도 주상도에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

2. 표면파 전파특성

고성토 제방과 같이 횡단면이 무한 수평면이 아니고 사면으로 형성되어 있는 경우, 그 기하학적 형상이 표면파의 전파에 어떠한 영향을 미치는지 이해하기 위해, 반무한 지층구조에 대하여 표면파 수직변위의 횡방향 분포에 관한 정량적인 연구를 수행하였다. 표면파 수직변위의 횡방향 분포를 정량적으로 결정하기 위하여, 그림 1(a)의 균질한 반무한 지반의 전형적인 지반구조를 설정하였다. 이 경우에 대하여 동강성 행렬법을 적용하여 (Kausel and Peek, 1982) 수직변위의 횡방향 분포를 평가한 결과는 그림 1(b)에 제시한 바와 같다.

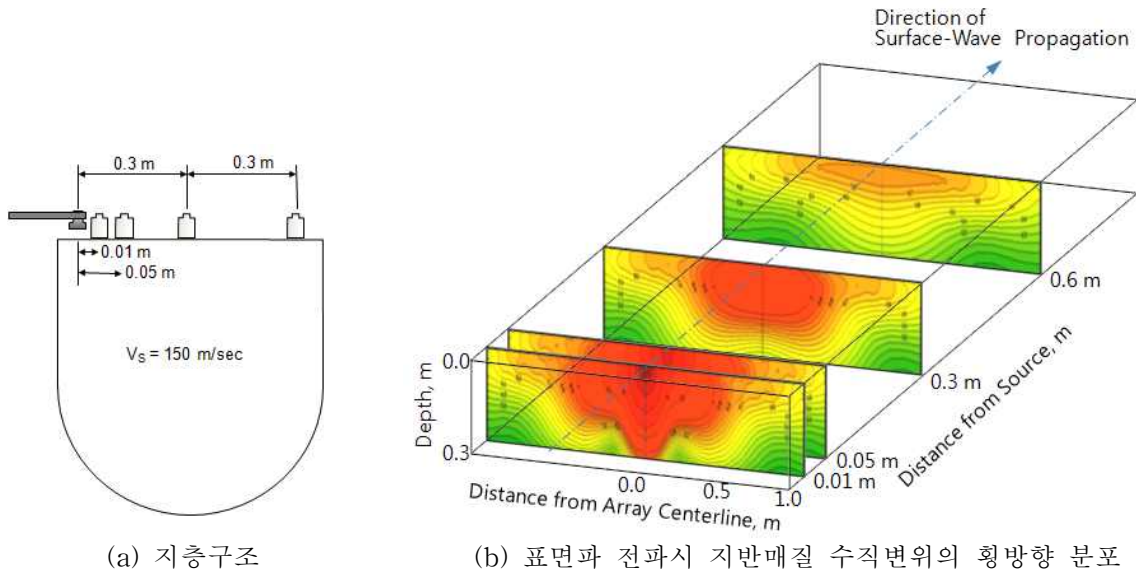


그림 1. 표면파 전파시 발생하는 지반매질 수직변위의 횡방향 분포

지반 매질의 전단파 속도가 150 m/sec로 균질한 반무한 탄성체에 대하여 동강성 행렬법으로 표면파 수직변위를 계산하였다. 발진원은 주파수 435Hz의 조화진동을 가하여 파장 0.3m의 표면파를 발생시켰고, 발진원에서 0.01, 0.05, 0.3, 0.6 m 떨어진 위치에서 표면파 수직변위의 횡방향 분포를 구하였다. 표면파의 수직변위를 계산한 매질의 범위는 수직방향으로 표면파의 파장 0.3 m에 해당되는 심도까지, 횡방향으로는 축선에서 횡방향으로 1m 떨어진 위치까지의 직사각형 영역에 해당된다. 그림 1(b)의 그림을 살펴보면, 발진원에서 멀어질수록 수직변위의 크기가 감소하는 것이 확실하게 나타나고 있으며, 중심선에서 횡방향으로 멀어질수록 수직변위가 감소하는 것을 알 수 있다. 그런데 그림 1(b)에서 확인할 수 있는 매우 중요한 사실은 깊이 방향보다는 표면파 전파방향의 횡방향 또는 종방향으로의 에너지 감쇠가 현저히 작다는 것이다. 발진원에서 0.01m 떨어진 곳에서 파장의 크기와 동일한 심도에서의 수직변위의 크기를 1로 하였을 때, 동일한 크기가 관찰되는 횡방향 위치를 표 1에 정리하였다.

표 1. 한 파장 깊이에서의 수직변위와 동일한 수직변위를 가지는 지점 (측선 중심에서 횡 방향으로의 이격거리)

발진원에서의 종방향 이격 거리 (파장으로 정규화)	한 파장 깊이에서의 수직변위와 동일한 수직변위를 가지는 횡방향 이격거리 (파장으로 정규화)
0.033	1.4
0.167	1.4
1	> 4
2	> 4

표 1을 살펴보면, 깊이방향보다 횡방향으로의 에너지 감쇠가 현저히 작음을 알 수 있다. 예를 들어, 발진원에서 파장의 2배 떨어진 경우, 측선 아래 파장크기와 동일한 심도에 해당되는 수직변위의 크기는 측선에서 파장의 4배이상 떨어진 곳에서 거의 동일한 크기의 수직변위가 관찰된다. 따라서 균질한 반무한체에서 표면파가 전파하는 경우, 수직방향 보다는 수평방향으로 에너지 손실이 적으며, 훨씬 멀리까지 전파되고 있음을 알 수 있다.

이상의 해석결과로부터 유추해 볼 때, 횡방향의 표면파 에너지가 충분히 소멸되지 않은 상태에서 외부 지표면이 사면형태로 하강하는 경우, 수평면의 외부지표면의 경우와 다른 형태로 표면파 전파가 이루어질 것이라고 판단할 수 있다. 즉 표면파가 횡방향으로 거의 소멸되기도 전에 외부 지표면의 형상이 하강하기 때문에, 하강 경사면에서 표면파 에너지가 반사되어 체적파가 발생하고 이 체적파가 감진기로 전파되면 표면파 신호의 교란되어 신호 품질이 저하되게 될 것이다. 또한 표면파와 체적파의 다중 모드가 중첩되어 해석에 매우 어려움을 갖게 될 것이라고 판단된다.

한편으로는 하강 경사면의 횡단면은 무한 수평면의 횡단면과 비교하여 보았을 때, 표면파 전파 측면에서 비구속 상태가 되기 때문에 표면파의 전파속도가 저하될 것이라는 추론도 가능하다고 판단된다. 즉, 지반 매질의 비구속 상태는 매질의 탄성계수를 저하시키고 결과적으로 탄성과 속도도 저하될 것이라는 결론에 도달하게 된다. 따라서 상기의 표면파 전파의 수치모델링을 통하여 추론 할 수 있는 것은 첫째, 표면파와 체적파의 다중 모드 간섭으로 인하여 표면파 신호 품질이 저하될 것이고, 둘째, 하강 경사면의 횡단면을 갖게 되는 고성토 제방 상단에서는 무한 수평면의 횡단면에서보다 낮은 표면파 속도를 측정하게 될 것이라는 것이다.

3. 고성토 제방에서의 표면파 시험

본 논문에서 연구하고자 하는 하강 경사면의 횡단면이 표면파 전파 속도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 15m 높이의 사력댐인 경상북도 성덕댐의 상단에서 표면파 시험을 수행하였다. 성덕댐의 횡단면은 상단의 경우 약 5m 폭을 가지고 있으며 15m 아래 하부는 약 40m 정도의 폭을 가지고 있다. 본 연구에서 채택한 표면파 시험은 CapSASW (조성호 등, 2005) 시험이며, 부정형 구조가 표면파 전파속도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 영향인자 연구를 실험적으로 수행하였다. 본 연구에 포함된 영향인자로는 발진원의 탄성과 에너지의 방향성, 댐 구조체의 부정형에 따른 구속조건, 발진원의 주파수 성분 등이다.

CapSASW 시험에서는 감진기 간격으로 2 m를 사용하였으며, 발진원의 위치는 감진기간 간격의 1, 2, 4, 8, 16 배 등으로 변화시켜 가면서 그 영향을 평가하여 보았다. 또한 발진원의 종류도 슬래지 해머에 의한 충격하중, 50kg 하중의 충격하중, 백색 잡음을 모사하는 호미 등으로 다양화하여 각각의 영향을 평가하였다. 또한 제체 사면의 경계효과 및 구속효과의 영향을 평가하기 위하여 점토코아 상단 및 사면 경계면 상부에 시험측선을 설치하여 표면파 시험을 수행하였다.



그림 2. 표면파 전파의 영향인자 연구를 수행한 경상북도 성덕댐

4. 표면파 속도에 대한 부정형 구조의 영향

4.1 발진원의 탄성파 에너지의 방향성

지표면에서 발진된 탄성파는 발진원의 접지 면적에 따라서 탄성파의 전파 패턴이 달라지게 된다 (Malhotra and Carino, 2004). 그림 3을 참고해 보면, 탄성파의 직경이 파장의 4배에 이르게 되면, 발생된 탄성파는 거의 수직방향으로 좁은 영향범위를 이루면서 전파되고, 발진원의 직경이 거의 0에 가까운 경우 이를테면 점 발진원인 경우는 횡방향으로 넓게 확산되어 탄성파가 전파된다. 따라서 고성토체와 같이 비교적 좁은 단면을 가지고 있는 지반구조물의 경우, 지표면에서의 발진원 직경에 따라 탄성파 전파속도에 영향을 주게 되는 매질의 횡방향 범위가 달라지게 된다. 이와 같은 영향범위를 평가하기 위하여 직경 6.5cm의 슬레지해머, 직경 30cm의 중추를 사용하여 각각에 대한 표면파 전파특성을 평가하여 보았다.

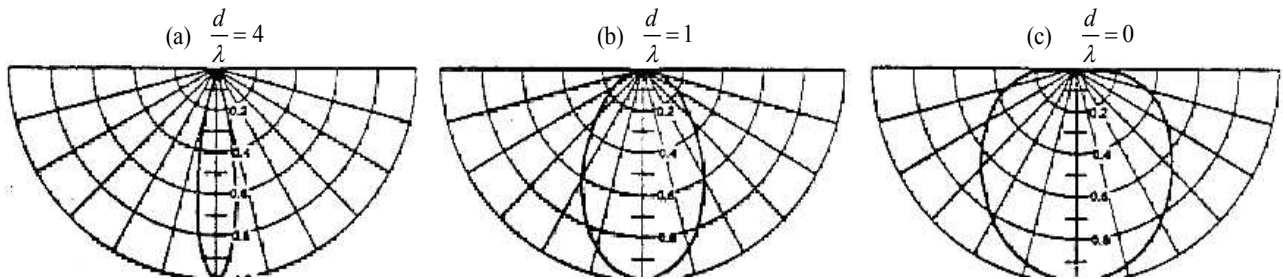


그림 3. 발진원의 직경에 따른 탄성파 전파 패턴 (Malhotra and Carino, 2004)

성덕댐 상단의 중심축선에서 시험한 결과를 그림 4에 도시하였다. 발진원으로는 직경이 작은 발진원으로 해머, 직경이 큰 발진원으로 중추를 사용하였으며, 발진원의 위치는 첫 번째 감진기에서 18m 떨어진 위치에 설정하였다. 두 시험결과와 차이는 위상각 스펙트럼, 거보 스펙트럼 모두에서 분명한 차이를 보이고 있다. 해머의 경우 18, 30 Hz 등에서 0.15초 이후에 도착하는 파 그룹이 존재하고, 25 Hz 인근에 존재하는 파 그룹의 에너지도 비교적 약한 것을 볼 수 있다. 한편 중추의 경우는 18 Hz 인근에서는 0.15 초보다 먼저 도착하는 파 그룹이 존재하고 30 Hz에서는 비교적 약한 파 그룹이 0.15 초 이후에 도착하며, 25 Hz 인근의 파 그룹은 비교적 강한 에너지로 도착하고 있다. 즉, 해머의 경우는 0.15초 이전에 직접 도착하는 파 그룹보다는 0.15 초 이후에 도착하는 파 그룹이 지배적이고, 중추의 경우는 0.15초 이전에 도착하는 파 그룹이 지배적이라는 것을 알 수 있다. 직접 전달되는 파 그룹은 두 감진기

사이에 존재하는 매질을 따라 전파되는 파 그룹이고, 비교적 늦게 도착하는 파 그룹은 다중 반사 또는 우회 경로를 통해서 전달되는 파 그룹으로 인지할 수 있다. 따라서 표면과 에너지의 방향성의 측면에서 이해할 때, 중추로 발생된 표면파의 정보가 더욱 신뢰성이 높은 것임을 추론 할 수 있다. 한편 그림 4(a)와 (c)에 도시된 위상스펙트럼에 점선으로 표시된 위상각 스펙트럼이 있는데, 이 점선은 IRF (조성호, 1996) 기법으로 추론된 위상각 점프에 관한 정보이다. 이를 참고로 하여 판단해 보면, 해머로 측정된 위상각 스펙트럼은 18Hz에 존재하는 점프를 실제 점프로 이해하고 19~22 Hz 대역의 위상각 데이터를 처리하여 표면파 속도를 결정하게 되는 문제점이 존재한다. 따라서 거보스펙트럼과 위상각 스펙트럼을 이용하여 분석해 본 바에 의하면, 직경이 큰 발진원을 사용할수록 더 신뢰성이 높은 표면파의 정보를 분석해 낼 수 있으며, 위상각 스펙트럼에 대한 잘못된 분석을 하게 되는 문제점을 피할 수 있도록 하는 것을 알 수 있다.

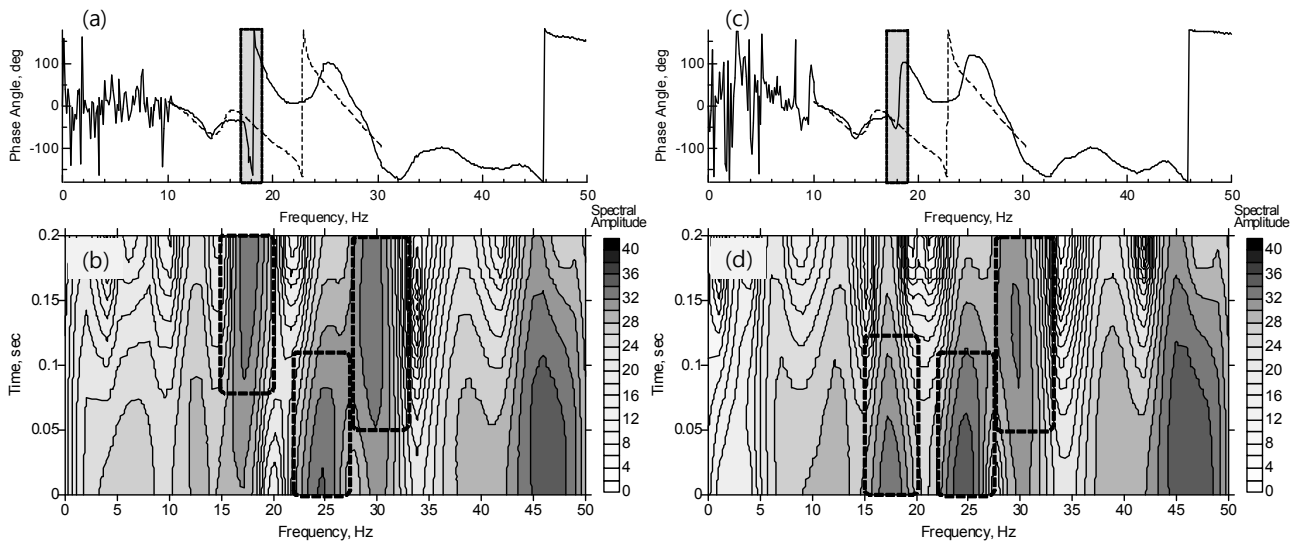
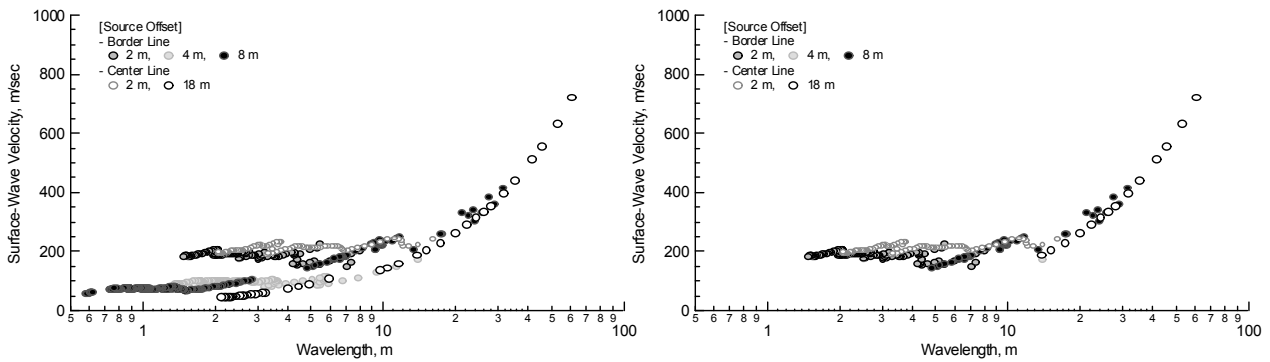


그림 4. 발진원의 직경에 따른 표면파의 전파패턴: (a) 해머에 대한 위상각 스펙트럼, (b) 해머에 대한 거보스펙트럼, (c) 중추에 대한 위상각 스펙트럼, (d) 중추에 대한 거보스펙트럼

4.2 댐 구조체의 부정형에 따른 구속조건과 경계조건

성덕댐의 경우는 중심에 점토 코어가 설치되어 있는 사력댐이다. 본 연구에서는 댐 내부의 점토코아와 점토코아 외곽 즉 사면의 경계면에 있는 암버럭의 전단파 속도를 별도로 측정하여야 하기 때문에, 점토코아 중심에 해당되는 댐 중심선과 점토코아 외곽의 암버럭 상부 즉, 성토체 사면의 상단 경계선에 각각 측선을 설정하였다. 본 연구에서는 두 가지 영향인자에 대한 평가를 수행하였다. 즉 첫 번째는 두 개의 매질이 인접하여 횡방향으로 이종의 매질이 접해있는 경우 파장에 따른 표면파 속도의 변화, 두 번째는 외곽 측선이 하강하는 사면에 인접하여 있기 때문에 중심측선에 비하여 상대적으로 매질의 구속 효과가 작음으로 인하여 야기되는 표면파 속도의 변화이다.

그림 5와 6에 도시된 측선은 모두 감진기간 간격을 2m로 하였고, 단지 발진원 위치만 변경하여 시험을 수행하였다. 그림 5를 살펴보면, 점토코아가 위치한 중심측선에서의 시험결과와 암버럭이 위치한 외곽측선에서의 시험결과는 거의 동일하게 나타났다. 즉 발진원이 가까울 때 표면파 속도가 약 200 m/sec로 측정되었고 발진원이 멀리 떨어져 있을 때 표면파 속도가 약 100 m/sec로 느리게 측정되었다. 또한 중심측선이든 외곽측선이든 관계없이, 그리고 점토코아 상단이든 암버럭 상부이든 관계없이 거의 유사한 표면파 속도로 측정된 것이다. 그러나 파장이 10m를 초과하면서부터 표면파 속도는 측선 조건, 발진원위치와 관계없이 동일한 표면파 속도를 나타내고 있다.



(a) 현장조건을 고려하지 않은 원시 분산곡선 (b) 현장조건을 고려하여 수정한 최종 분산곡선

그림 5. 구속조건, 경계조건에 따른 표면파의 전파 속도

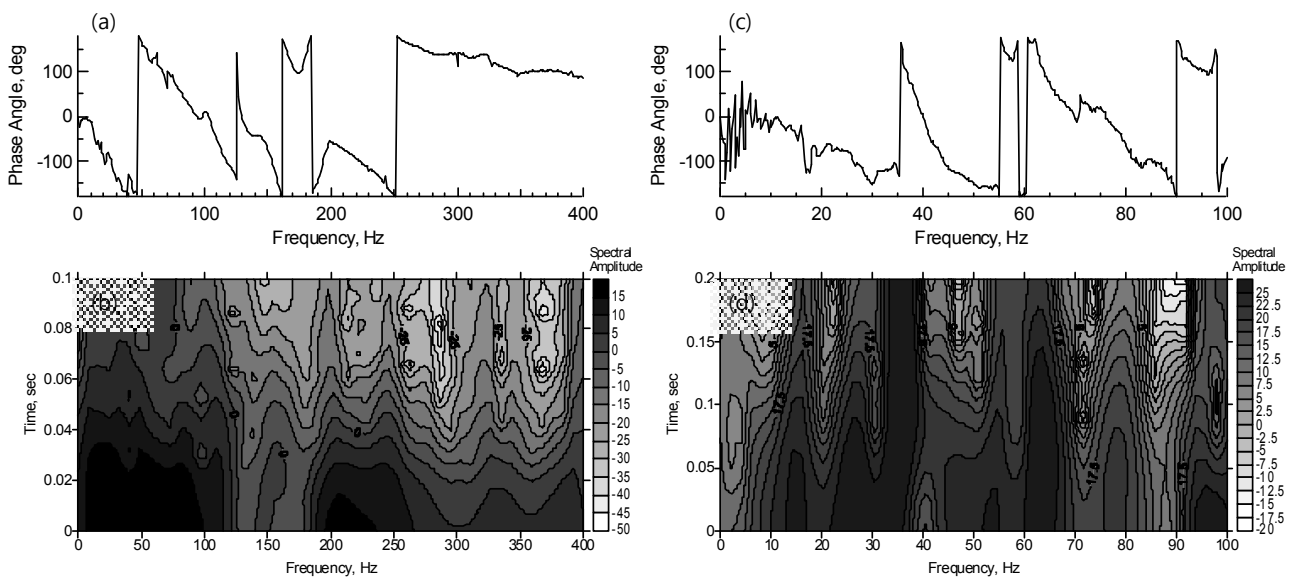


그림 6. 구속조건, 경계조건에 따른 표면파의 전파패턴: (a) 발진원과 감진기간 간격이 2m일 때의 위상각 스펙트럼, (b) 발진원과 감진기간 간격이 2m일 때의 거보스펙트럼, (c) 발진원과 감진기간 간격이 8m일 때의 위상각 스펙트럼, (d) 발진원과 감진기간 간격이 8m일 때의 거보스펙트럼

이와 같은 특이 현상을 이해하기 위하여 그림 6의 위상각 스펙트럼과 거보스펙트럼을 분석하여 보았다. 그림 6(a)와 6(b)는 발진원이 2 m 위치에 떨어져 있을 때이고, 그림 6(c)와 6(d)는 발진원이 8 m 떨어져 있을 때이다. 감진기는 여전히 2 m 간격으로 떨어져 있기 때문에, 그림 6(b)와 6(d)에 도시된 충격응답에 대한 거보스펙트럼의 시간축은 변함이 없는 상태이다. 그런데 관심의 중심이 되는 그림 5의 파장 1.5~10m 대역은 주파수로는 약 20~70 Hz 대역인데, 이 대역에서의 파 그룹의 중심은 그림 6(b)의 경우는 0.01초 이하, 그림 6(d)의 경우는 0.05~0.1초 이상에 해당된다. 이처럼 파 그룹의 전파시간을 보더라도 발진원이 멀어지게 되면 표면파의 전파시간이 늦어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 표면파의 전파경로와 연관이 있다고 판단된다. 즉 암버력 위 외곽측선은 점토코아 중심과 약 2m 정도 이격되어 있는데, 이를 고려할 때 발진원 이격거리 2 m는 발진원에서 출발한 표면파가 첫 번째 감진기를 통과하여 두 번째 감진기까지 직선 경로를 거쳐서 전파되어 0.01초 이하의 비교적 단시간에 도달하는 것으로 파악된다. 그리하여 그림 5에서와 같이 약 180~200 m/sec의 표면파 속도로 측정되었다. 반면 발진원 이격거리가 4, 8, 18 m 인 경우는 암버력의 불연속성 때문에 표면파의 에너지는 빨리 감쇠되어 버리고 오히려 점토코아층으로 전달된 에너지가 감진기로 굴절되어 전파되어 간 것이 표면파 속도로 결

정된 것으로 판단된다. 이러한 경우 직접전달파보다 전파경로가 우회경로로 더 시간이 걸리기 때문에 그림 6(d)에서와 같이 늦게 도착하는 파그룹이 선명하게 존재하며, 반면 직접 도착하는 파그룹은 매우 미약하게 나타나고 있는 것으로 파악된다.

따라서 점토코아층에 대한 중심축선의 표면파 속도는 파장 1~10m 구역에서 발진원 이격거리 2m에 대한 속도 즉 200m/sec 영역을 포함시켜야 하고, 암버력층에 대한 외곽축선의 표면파 속도에서도 파장 1~10m에서 발진원 이격거리 2m에 대한 속도 즉 180~200m/sec 영역을 포함시켜야 한다. 발진원 이격거리 4, 8, 18m에 대한 속도 50~100m/sec는 합리적이지 않은 왜곡된 속도로 판단되어 최종 분산곡선에 포함시키지 않아야 하는 것으로 평가된다. 이러한 분석하에 정리된 최종 분산곡선은 그림 5(b)에 도시한 바와 같다.

4.3 발진원의 주파수 성분

표면파 탐사는 다양한 주파수 성분을 한 번에 발생시키고 이에 대한 지반의 응답을 측정하도록 하는 것이 핵심이다. 그리하여 일반적으로 표면파 시험에서 사용하는 발진원은 충격파를 이용하는데 주로 해머타격이나 중추낙하와 같은 방법을 사용한다. 그런데 고성토 제체의 경우 충격에너지가 너무 크게 되면 반사파의 영향으로 표면파의 전파가 교란이 되는 문제가 발생할 우려가 있어서, 충격 발진원에 대한 대안으로 낮은 에너지의 랜덤진동원을 도입하여 그 가능성을 평가하여 보았다.

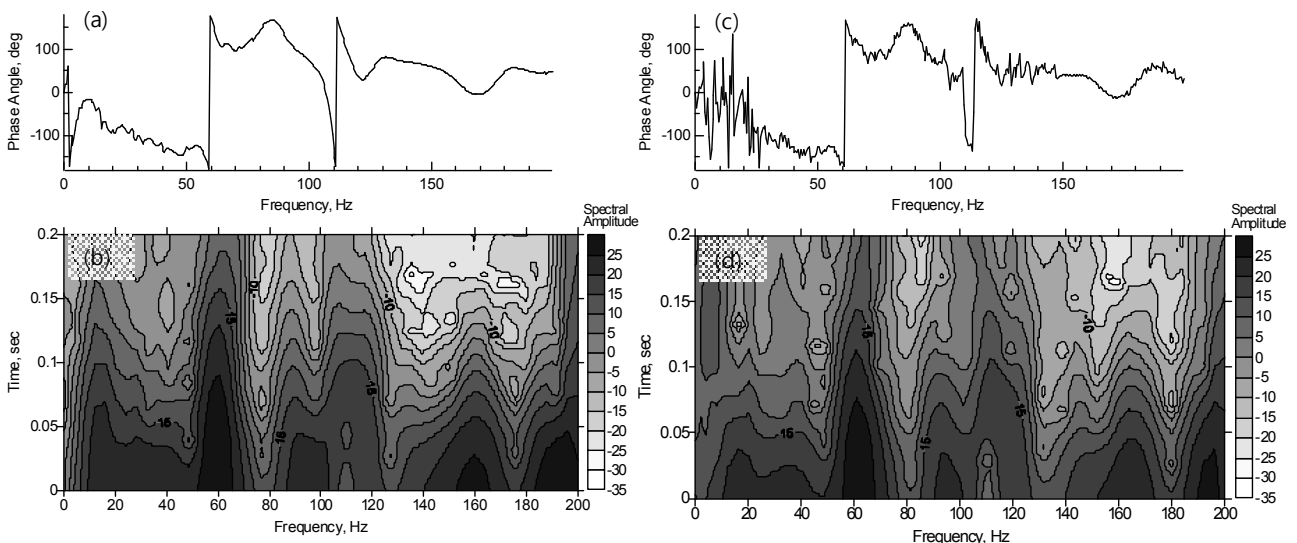


그림 7. 발진원의 주파수 성분에 따른 표면파의 전파패턴: (a) 호미진동에 대한 위상각 스펙트럼, (b) 호미진동에 대한 위상각 거보스펙트럼, (c) 해머타격에 대한 위상각 스펙트럼, (d) 해머타격에 대한 거보스펙트럼

본 연구에서 채택한 랜덤진동원은 지표면에 호미를 접촉시킨 후 반복하여 굽는 작업으로 단순한 미소 진동을 발생시키는 과정이다. 그러나 호미진동을 약 50회 정도 반복 진행하여 앙상블평균을 취하면 주로 신호성분만 남게 된다. 점토코아 상단의 중심축선에 1m 간격의 감진기 구성에 대해 해머타격과 호미진동에 대한 위상각 스펙트럼과 거보스펙트럼을 그림 7에 비교하였다. 그림 7(a)와 7(b)는 호미진동으로 측정된 결과로서 그림 7(c)와 7(d)의 해머타격에 의한 결과와 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 위상각 스펙트럼의 경우 호미진동의 신호품질이 해머타격의 신호품질보다 더 양호하게 측정되었으며, 특히 10~50 Hz 저주파 대역구간에서는 호미진동의 신호품질이 탁월하게 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 이러한 양호한 신호품질에 대한 이유는 그림 7(b), 7(d)의 파그룹 에너지 분포를 참고할 때 더욱 명확하게 확인할 수 있다. 즉 주파수 10~50 Hz 구간에서 호미진동의 파그룹 에너지가 비교적 분명하게 형성되어 있으나, 해머타격의 파그룹 에너지는 다소 미약하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 그리고 해머타격에 대

한 거보스펙트럼을 살펴보면 주파수 0~10 Hz, 도달시간 0.1~0.2초 구간에 미약하지만 직접파보다 늦게 도착하는 파그룹이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이와 더불어 전 주파수 구간에 있어서 도달시간 0.1~0.2초 구간을 살펴보면, 호미진동의 경우는 집중된 거보스펙트럼 에너지를 볼 수 있으나 해머타격에 대한 거보스펙트럼 에너지 분포는 산만하게 흐트러져 있음을 알 수 있다. 해머타격에 대한 거보스펙트럼에 있어서 관찰되는 이러한 분포는 체적파의 다중반사파의 영향이라고 판단된다. 따라서 고성토 제체와 같이 표면파 발진을 위한 충격파가 체적파의 다중반사파를 부차적으로 발생시킬 수 있는 경우에는 호미진동과 같은 낮은 에너지의 랜덤진동이 더 효과적인 표면파 발진원이라고 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 고속전철, 댐 구조물 등과 같은 고성토 제체의 현장진단과속도를 고품질로 평가를 위한 영향인자 연구를 수행하였다. 일반 평지에서 수행하도록 되어 있는 표면파 시험을 고성토 제체에서 수행하고자 하였을 때, 탄성과 발진원의 방향성, 고성토 제체의 구속조건과 경계조건, 발진원의 주파수 성분 등의 측면에서 정확성과 신뢰성을 제고할 수 있는 방법을 모색하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 탄성과 발진원의 접지면적이 넓을수록 표면파의 직진성이 확보되기 때문에, 표면파가 영향범위가 횡방향으로 확산되어 고성토 제체 사면에서 체적파의 다중반사파를 유발하지 않으려면 가급적 넓은 접지면적의 발진원을 사용하는 것이 바람직하다.
- 고성토 제체가 사력댐과 같이 두 가지 이상의 다른 매질로 구성되는 경우, 발진원 이격거리가 멀리 떨어져 있을수록 성토재료의 특성에 따라 표면파의 전파경로가 왜곡될 수 있다. 즉 암성토 사면인 경우 암벽의 불연속성 때문에 표면파의 에너지는 빨리 감쇠되어 버리고 오히려 점토코아층으로 전달된 에너지가 감진기로 굴절되어 전파되어 간 것이 표면파 속도로 결정될 수 있다.
- 고성토 제체와 같이 표면파 발진을 위한 충격파가 체적파의 다중반사파를 부차적으로 발생시킬 수 있는 경우에는 작은 에너지의 랜덤진동이 더 효과적인 표면파 발진원이라고 할 수 있다.

참고문헌

1. 조성호, 장대우, 강태호, 이일화, CapSASW 기법에 의한 지반단면의 전단강성구조 평가, 한국지반공학회 논문집, 제 21권 4호, pp.71-81, 2005.
2. E. Kausel and R. Peek, "Dynamic loads in the interior of a layered stratum: an explicit solution," Bull. Seismol. Soc. Am. Vol. 72, pp.1459-1508, 1982.
3. S.-H. Joh, Advances in interpretation and analysis techniques for spectral-analysis-of-surface-waves (SASW) measurements, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, p.240, 1996.
4. V. M. Malhotra and N. J. Carino, Handbook on nondestructive testing of concrete, CRC Press, p.384, 2004.