지반의 전단파 속도 도출을 위한 SPT 업홀 기법의 확립 및 검증 Establishment and Verification of SPT-uphole method for Evaluating Shearwave Velocity of a site

방은석¹⁾, Eun-Seok Bang, 김정호²⁾, Jung-Ho Kim, 서원석³⁾, Won-Seok Seo, 김동수⁴⁾, Dong-Soo Kim

- ¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Divisioin, KIGAM
- ²⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원, Principle Researcher, Geotechnical Engineering Divisioin, KIGAM
- ³⁾ 텍사스 주립대학 토목공학과 박사후 과정, Post Doctoral Fellow, Civil, Environmental, Architecture Engineering, University of Texas at Austin (UTA)
- ⁴⁾ 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, KAIST

SYNOPSIS: SPT-Uphole method was introduced for the evaluation of near subsurface shear wave velocity (Vs) profile. In SPT-Uphole method, SPT (Standard Penetration Test) which is common in geotechnical site investigation was used as a source and several surface geophones in line were used as receivers. 1D shearwave velocity profile can be obtained in the manner of downhole method, Vs distribution map which is the triangular shape around the boring point can be developed by tomography inversion. To obtain the exact travel time information of shear wave component, a procedure using the magnitude summation of vertical and horizontal components was used based on the evaluation of particle motion at the surface. It was verified that proposed method could give reliable Vs distribution map through the numerical study using the FEM (Finite Element Method) model. Finally, SPT-Uphole method was performed and the feasibility of proposed method was verified in the field.

Key words : SPT-uphole method, seismic, shearwave velocity, site characterization

1. 서 론

지반의 전단파 속도(V_s)는 공학적으로 중요한 물성치인 전단 탄성계수와 직접적으로 관련되어 있기 때문에 지반공학 분야에 있어서 그 중요성이 증대되고 있으며 적용 범위 또한 확대 되고 있다. 과거에 는 지반의 증폭현상 평가 등의 내진 해석 및 진동 문제 등의 동적 문제에 대해서만 그 적용이 국한되어 있었으나 굴착에 의한 지반 변형 및 기초하부 지반의 침하 등의 정적 문제 해결에서도 전단파 속도(V_s) 가 중요한 변수로 적용되고 있다. 또한 현장 지반의 물성뿐만 아니라 구조적 상태를 전단파 속도가 잘 대변하기 때문에 지반의 다짐 및 연약지반 개량효과 평가, 지반의 층서 확인 및 연약대 파악에도 활용 되고 있다(김동수 등, 1999; Stokoe 와 Rosenblad, 1999). SPT-업홀 기법은 시추와 동시에 수행하는 탄성파 탐사 기법으로 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)시 지중에서 발생되는 진동원에 의해 지표면에 도달한 탄성파의 도달시간 정보를 획득하여 지반의 전단파 속도 정보를 획득한다(김동수 등, 2003). 여러 개의 지표면 감지기를 활용하여 시추공-지표면 주시 토모그래피(Borehole to Surface Traveltime Tomography)을 적용한다면 시추공 근처에 삼각형 형태의 2차원 전단파 속도 분포를 도출 할 수 있다(방은석 등, 2006). 본 논문에서는 SPT 업홀 기법을 적용하는데 있어 현장 실험의 용이성 및 그 결과의 신뢰성을 높이고자 그동안 수행해왔던 연구들을 요약하여 소개하고자 한다. 세부적으로는 기법 소개, 해석 기법의 정립 및 검증, 현장 실험 장비의 구축, 현장 실험을 통한 적용성 평가 등으로 구성되어 있다.

2. SPT 업홀 기법

2.1 개요

SPT-업홈 기법은 일반적인 업홈 기법에서 지중 가진원으로 SPT 타격 에너지를 이용한 것으로 시추 와 동시에 시추공 주변에 지표면 감지기의 설치만으로 전단파 속도 주상도를 획득할 수 있다는 장점이 있다. 국내 지반에서의 지반조사시 표준관입시험은 필수적이며 가진원의 에너지가 풍부하고 강성이 큰 지반에서 가진이 되어 강성이 작은 표층으로 탄성파가 전달되므로 아주 경제적으로 깊은 심도까지 탄성 파 주상도를 획득할 수 있다. 지중 가진에 의해 발생된 진동을 지표면에 설치된 감지기에서 획득하고 획득한 파형을 이용하여 도달시간 정보를 추정하게 된다. 이러한 도달시간 정보를 이용하여 다운홀 결 과 해석 과정과 유사한 방법으로 1차워적인 전단파 주상도를 도출할 수 있으며 제안된 분석방법에는 감 지기간 DT법과 깊이간 DT법이 있다(김동수 등, 2003). 다수의 감지기 정보를 동시에 이용하여 시추공 -지표면 토모그래피 기법을 적용하면 시추공 주변 영역에 있어서 2차원적인 정보를 얻을 수 있다. 기법 특성상 파선 경로의 제한이 있어 삼각형 형태로 결과가 도출되게 되며 정밀한 영상을 얻기 위해서는 정 확한 도달시간 정보의 획득 및 역산이 요구된다. 가진원 및 감지기 위치에 따라 지표면에서의 지반운동 성격이 달라지므로 정확한 압축파 및 전단파의 도달시간 정보를 획득하기 위해 2방향 속도계를 이용하 는 것을 권장하고 결과 해석 과정을 확립하였다(방은석 등, 2006a). 1차원 결과 도출시 도달시간 차이 정보만으로 해석이 가능하므로 전단파 성분의 첫 극대점을 기준으로 용이하게 도달시간 정보를 도출할 수 있다. 반면에 2차원 해석시에는 전단파 성분의 직접도달시간 정보가 필요하므로 적절한 보정 과정이 요구된다(방은석 등, 2006b). 현장 실험을 수월하게 하고 결과의 신뢰성을 높이고자 노트북 기반의 신 호 획득 장비 및 감지기 시스템을 도입하였다. 토모그래피 역산은 기존 연구자들에 의해 많은 연구가 수행되었으며 여러 상용 프로그램으로 개발된 바 있으며 본 연구에서는 현업에서 널리 사용되고 있는 토모그래피 프로그램 중 하나인 GeoTomCG(Tweeton 등, 1992; Tronicke 등, 2001)를 적용하였다.

2.2 기법의 검증

SPT-업홀 기법에 대해서 실험 방법 및 결과 해석 과정을 전체적으로 검증하기 위해서 수치해석을 수 행하였다. 그림 1과 같이 수평 및 경사 지반에 대한 수치모델링을 통해 가상의 업홀 실험을 수행하고 파 형을 획득하였다. 도달시간 정보를 획득한 뒤 1차원 및 2차원 해석 프로그램을 이용하여 속도 분포를 도 출하고 그 결과를 이론적 도달시간 정보 및 해당 지반 모델 값과 비교하는 방식으로 기법 검증을 수행하 였다. 수치해석은 ABAQUS 프로그램을 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 지표면으로부터 1m 간격으 로 심도 15m까지 지중에서 가진을 하고 가상 감지기 위치는 가상의 시추공으로부터 2m, 4m, 6m, 8m, 10m로 거리로 설정하였다. 수평 지반에서의 SPT-업홀 기법의 수치 모델링을 통해 획득한 가상 감지기 위치에서의 파형 일례를 그림 2(a)에 도시하였다. 가진 심도가 깊어질수록 수직 방향에서 수평 방향으로 전단파의 주된 에너지가 전이되는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 2(b)의 공간상에서의 입자 운동 형태에서 확연하게 알 수 있으며 따라서 그림 2(b)의 우측에서와 같이 두 방향 성분을 동시에 사용, 크기합 신호를 통해서 모든 측정 지점에서 전단파 성분의 도달을 더욱 명확하게 측정할 수 있게 된다.





극대점을 기준으로 획득한 도달시간 정보를 주시 토모그래피 기법에 적용하기 위해서는 초동 정보로의 보정이 필요하다. 그림 2(b)의 깊이 8m 가진의 감지기 위치 8m에서 획득한 파형을 보면 수평 및 수직 성분 각각에 있어 첫 극대점이 일치하며 따라서 수평성분과 수직성분을 동시에 활용한 신호에 있어서도 첫 극대점은 같게 된다. 또한 해당 신호에서 초동 지점이 각각의 성분에 있어 매우 확실하며 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 여기서 계산된 극대점과 초동 지점과의 시간차를 전체 도달시간 정보에 대해 보정을 해 주는 방식을 취하면 그림 3.3과와 같이 전체적인 도달시간 정보를 토모그래피 기법 적용을 위 한 초동정보로 변환이 가능하다. 이런 방식은 모든 가진원, 감지기 조합의 획득 신호상에서 전단파 성분 의 주파수 특성이 유사할 경우에만 적용이 가능하나 수치해석에서는 전단파 성분의 주파수 특성이 거의 같으며 실제 현장에서도 가진 깊이별로 토질이 차이가 크지 않을 경우에는 획득신호의 주파수 특성이 유 사하므로 적용이 가능하리라 판단된다. 보정된 초동 정보에서 1m 깊이의 정보는 이론해에 비해 상대적으 로 큰 값이 도출된 것으로 판단되었으며 이는 1m 깊이의 가진에 의한 각 감지기에서의 획득 파형이 얕 은 가진 깊이로 인해 전단파에 비해 표면파 성분이 주되게 되며 여기서 극대점을 이용하여 획득한 도달 시간 정보는 표면파의 도달시간 정보이기 때문으로 판단된다. 일반적으로 표면파 성분의 속도는 전단파 성분의 속도의 0.91배 정도이므로 도달시간 정보에서는 표면파 도달시간 정보에 0.91을 곱해주는 방식으 로 표면파 효과에 대해 보정하였다(그림 3(b)). 이렇게 보정된 도달시간 정보는 앞 절에서 동일한 모델에 서 Snell의 법칙에 근거하여 이론식에 의해 계산된 도달시간 정보와 거의 동일한 결과를 보여주고 있다 (그림 3(c)). 그 외 상향 경사 모델 및 하향 경사 모델에 있어서도 그림 4에서와 같이 거의 동일한 결과 를 보여주고 있다.



(a) 초동 정보로의 변환 (b) 표면파 효과 보정 (c) 이론 해와의 비교를 통한 검증 그림 3. 유한요소 수치해석을 통해 획득한 전단파 성분의 도달시간 정보 (수평모델)



그림 4. 상향 및 하향 경사 모델에 있어 유한요소 수치해석을 통해 획득한 전단파 성분의 도달시간 정보(b)(c) 및 수평 모델 도달시간 정보를 이용하여 1차원 해석한 결과(c)

획득한 초동 정보를 이용하여 수평 모델의 경우 1차원 해석을 수행하였으며 모든 감지기 정보에 있어 서 모델과 동일한 결과를 제공하고 있다(그림 4(c)). 획득한 초동 정보를 이용하여 GeoTomCG 프로그램 을 통해 2차원적인 전단파 속도 분포를 획득하였다(그림 5). 전단파 속도 분포는 수평 모델, 상향 경사 모델 및 하향 경사 모델에 대해서 모두 모델 형상을 잘 모사하고 있는 것으로 보여 진다.



2.3 실험 수행 시스템의 구축

SPT 업홀 기법을 위해서 필요한 장비는 크게 가진원 관련 장비, 감지기 관련 장비, 신호 획득 관련 장 비 및 운영 프로그램으로 구성된다. 본 기법에서 한 측점에서 수직 및 수평 성분을 동시에 측정하는 것 이 유리하므로 보다 정확하게 2방향 거동을 측정하기 위해서 3방향 지표면 감지기를 도입하여 감지기 시 스템을 구성하였다. 집게 형식으로 연결부분이 제작되어 있으며 전개케이블(Spread Cable)을 이용하여 신속하게 신호 획득 장비까지 연결할 수 있다. 신호 획득 시스템을 노트북 기반의 신호 획득 장비 (Notebook based data acquisition system)로 구성함으로써 신호 획득 및 관리를 효율적으로 수행하고 동시에 해석을 수행, 최종 결과를 바로 획득할 수 있도록 하였다. 그림 6은 본 연구를 위해 도입한 노트 북 기반의 신호 획득 장비이다. 일반적으로 탄성과 탐사에 사용되는 진동기록계 계열의 Geode는 노트북 과 연결하여 사용하는 제품이므로 획득한 신호의 저장 및 관리 등의 후처리가 용이하다. 신호 획득 프로 그램과 신호 관리 및 결과 도출 프로그램을 연계하여 더욱 더 효율적으로 SPT업홀 기법을 수행할 수 있 도록 DAQPad 방식의 신호 획득 장비를 사용하여 구성하였다. 현재 보급되고 있는 DAQPad 방식은 16 채널 기준으로 채널당 50k(0.02ms)까지 신호 획득이 가능하다. 따라서 DAQPad를 2개를 이용하게 되면 32채널을 활용할 수 있으므로 12개의 2방향 감지기를 설치하여 SPT-업홀 기법을 수행할 수 있다. 제작 된 신호 획득 및 관리 프로그램과 결과 도출 프로그램을 이용하여 현장에서 최종 결과를 도출하여 지반 상태를 실험과 동시에 바로 평가할 수 있다. 신호 획득 및 관리 프로그램에는 신호 획득에서부터 도달시 간 정보를 자동적으로 도출하도록 구성되어 있다. 이와 같은 SPT-업홀 기법 수행 시스템의 지속적인 개 선을 통해 현장에서 탄성과 탐사 전문가가 상주할 필요 없이 지반조사 실무자들에 의해 시추와 동시에 현장 시험을 간단하게 수행하고 결과를 도출할 수 있도록 할 수 있을 것이며 이는 곧 SPT-업홀 기법이 현업에 널리 사용될 수 있도록 하는 적극적인 해결책이 된다.

3. 현장 검증 및 적용 사례

3.1 경상남도 창원 부지

경상남도 창원 부지에서 1차원 전단파 속도 주상도 도출을 위해 현장시험을 수행하였다. 시추지점으 로부터 수평거리로 8m와 16m 위치에 수직방향 성분(Vertical Component)과 방사방향의 수평성분 (Radial Horizontal Component), 횡단방향의 수평성분(Transverse Horizontal Component)으로 구성 된 3방향 지표면 감지기를 설치하였다. 시추 종료 심도인 깊이 15m까지 총 9회에 걸쳐 표준관입시험을 실시하였으며 그에 따라 지표면에 설치된 감지기로부터 신호를 획득하였다.



그림 7. 2방향 지표면 감지기를 이용하여 경남 창원 부지에서 수행한 SPT-업홀 기법의 획득 신호

대표적 표면파 기법인 SASW 기법을 SPT-업홀 측선을 따라 동시에 수행하였으며 깊이별 SPT-N치와 더불어 SPT-업홀 기법 결과와의 비교 작업을 수행하여 개선된 SPT-업홀 기법에 대한 신뢰성 검증을 하고자 하였다.



그림 8. 2방향 지표면 감지기를 이용하여 경남 창원 부지에서 수행한 SPT-업홀 기법 1차원 해석 결과

창원 시험 부지에서 SPT-업홀 시험을 통해 획득한 감지기 위치 8m 및 16m에서의 깊이별 신호를 수 직성분 및 수평성분, 그리고 수직성분과 수평성분의 크기합에 대해 각각 그림 7에 도시하였다. 깊이별 수직 성분과 수평 성분을 보면 수직 성분에서는 가진 심도가 깊어질수록 전단파에 비해 압축파 성분이 커지는 것을 볼 수 있으며 수평 성분에서는 심도가 깊어질수록 수직 성분에 비해서 전단파 도달 시점이 분명해 지는 것을 알 수 있다. 현장 실험을 통해 획득한 신호를 이용하여 도달시간 정보를 획득하려 할 때 수치해석 결과에서와 같이 수직 성분이나 수평 성분 어느 하나를 이용할 경우 전단파 성분의 첫 극 대점이 모호할 경우가 존재하였으나 2방향 성분을 동시에 활용할 경우에는 전단과 성분의 첫 극대점을 결정하기가 용이한 것을 알 수 있다. 동시에 트리거(Trigger) 보정도 취해 주었으며 이 과정은 트리거 장치를 표준관입시험 장비의 엔빌 하단에 장착할 경우 가진 깊이가 깊어질수록 SPT 로드의 길이가 길 어져 이러한 이유로 타격 시점이 다르게 관측되는 것을 보정하는 것이며 자세한 사항은 기존의 관련 논 문(김동수 등, 2003)에 기술되어 있다. 이렇게 획득한 도달시간 정보를 가지고 깊이간 DT법을 이용하 여 SPT-업홀 1차원 해석을 수행하였으며 그 결과를 동일 부지에서 수행한 SASW 기법 결과와 비교하 여 보았다(그림 8). 감지기 위치 8m의 깊이별 수직 방향 신호 중 깊이 15.00m에서 압축과 성분에 비해 전단파 성분이 작게 도달되어 전단파 성분의 첫 극대점을 파악하기가 용이하지 않았다. 불행히도 동일 지점의 수평 성분 신호에서도 전단파 성분이 잘 획득되지 않아서 2방향 성분을 동시에 활용한 경우에도 전단파 성분의 도달시간 정보를 정확히 획득할 수 없었으며 이는 최종 결과인 전단파 속도 주상도에 영 향을 주어 감지기 위치 8m의 깊이 15.00m의 결과는 16m 위치 결과에 비해 상당히 크며 동일 깊이의 SASW 기법결과와도 차이가 났다. 하지만 다른 깊이에서는 2방향 성분을 같이 활용함으로써 전단파 성 분의 도달시간 정보를 산출하는데 매우 용이하였으며 이는 더욱 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도 도출 로 이어지게 되는 것을 알 수 있었다. 얕은 깊이에서 수평 성분 파형이 양호하지 않아 전단파 성분의 정확한 도달시간 정보 산출이 어려웠으며 SASW 기법 결과 및 다른 결과들과 경향이 일치하지 않는 것 을 볼 수 있다. 특히 16m 위치에서의 수평성분 이용 결과는 획득 파형이 전체적으로 양호하지 않은 이

유로 다른 결과들과 상이한 값을 보인다. 하지만 전체적으로 2방향 성분을 동시에 활용한 결과는 서로 유사하며 SASW 기법 결과와도 유사한 결과를 보여주고 있다. 수직성분만을 이용한 결과도 2방향 성분 을 동시에 이용한 결과와 유사한 것을 알 수 있는데 이는 압축파에 의한 간섭 효과가 많지 않아 수직성 분만으로도 전단파 성분의 도달시간 정보를 신뢰성 있게 획득이 가능하였기 때문이다.

3.2 전라북도 김제 부지

SPT-업홀 토모그래피 기법의 현장 적용성을 평가하기 위하여 실제 현장에서 SPT-업홀 시험을 수행 하여 보았다. 그림 9(a)에 SPT-업홀 기법이 수행된 김제 시험 부지의 현황을 나타내었다. 수평적인 층 상 구조를 파악하기 위하여 총 6개소에서 시추를 수행하였으며 표준관입시험을 1.5m 깊이 간격으로 실 시하였다. 김제 시험 부지는 풍화토가 깊게 형성이 되어 있는 지역으로 시추를 통해 확인해 본 결과 주 상도 상에서도 뚜렷하게 서로 다른 층으로 구분이 되지 않았으며 상부의 약간의 매립토를 제외하고는 시추 영역 전체적으로 통일 분류법 SM으로 구분되는 풍화토 지반으로 확인되었다. 그리하여 본 시험 부지의 수평적 강성 변화를 유추하기 위하여 시추와 동시에 실시된 SPT 결과를 활용하였다. 그림 9(b) 에 각 시추 위치별 SPT-N치를 컨투어링하여 도시하였다. N치가 50이상인 경우 선형적으로 외삽한 결 과를 사용하였다. SPT-N치 결과를 살펴 볼 때 본 시험부지는 남동 방향으로 갈수록 강성이 커지는 즉, 앞절의 수치해석 모델 중 상향 경사 모델과 유사한 것으로 보여 진다.



그림 9. 김제 풍화토 SPT-업홀 부지 개요도(a) 및 해당 측선의 SPT-N치 분포도(b)

SPT-업홀 시험은 BH-2공을 시추하는 동안 수행되었으며 측선은 6개 시추 지점과 나란한 방향으로 설계하였다. 총 4개의 감지기를 설치하였으며 시추 지점으로부터 6m, 9m, 12m, 15m에 위치하였다. 수 평 성분 감지기를 보유하고 있지 않은 상황에서 실험을 수행하게 되어 수직 방향 속도계만을 이용하여 지중의 SPT 가진에 의한 지표면에서의 입자 움직임을 계측하였다. 심도 20m까지 시추를 수행하였으며 총 11회에 걸쳐 시험을 수행하였다. 감지기 간격은 촘촘히 할수록 유리하나 보유하고 있는 감지기 개수 및 평가하고자 하는 부지의 영역 등을 고려하여 적절한 간격으로 배치하는 것이 바람직하다. 그림 10에 각 감지기에서 획득한 시험 깊이별 수직 방향 속도 시간 이력 곡선을 도시하였다(감지기 6m 결과 생 략). 최종 시험 심도가 깊지 않았으므로 수직 성분만을 이용하여도 전반적으로 전단파의 도달시점을 파 악하기가 용이하였지만 6m에 위치한 감지기의 깊은 심도에서의 파형은 압축파의 영향으로 인하여 전단 파 도달시점의 첫 극대점이 불명확하였다. 이러한 현상은 도달시간 정보를 도출하는데 직접적인 영향을 주게 된다. 그림 11(a)에 모든 가진원-감지기 조합에서의 도달시간 정보를 도시하였다. 도시된 정보는 수직성분의 극대점을 기준으로 도출된 도달시간 정보를 앞 절에서 확립한 방법에 근거하여 초동 정보로 보정한 결과이며 동시에 트리거(Trigger) 보정 작업도 취한 결과이다. 극대점 기준 정보의 초동 정보로 보정을 위한 기준은 가장 초동지점을 확실하게 인지할 수 있는 감지기 4(15m)의 가진 깊이 12.41m 신 호를 이용하였으며 첫 가진 깊이가 3.45m로 깊어 표면파 효과에 대한 보정은 제외하였다. 감지기 6m의 가진 깊이 16.91m 및 19.80m의 도달시간 정보는 다른 도달시간 정보의 형태와 비교하여 볼 때 실제보 다 조금 작게 산정된 것으로 판단되며 이는 압축파 간섭으로 인하여 정확한 전단파 성분의 첫 극대점을 판단할 수 없었기 때문이다. 그러므로 해당되는 도달시간 정보는 1차원 및 2차원 해석시 입력값에서 제 외하였다.



그림 11. 김제 풍화토 부지 SPT 업홀 시험 감지기별 전단파 성분의 초동 정보(a) 및 김제 풍화토 부지 SPT 업홀 기법 1차원 해석 결과(b)

기존의 1차원 해석 기법 중 깊이간 DT법을 이용하여 감지기별로 전단파 속도 주상도를 도출하여 비 교하였다(그림 11(b)). 깊이가 증가함에 따라 전단파 속도가 서서히 증가하는 경향을 보였으며 동일 시 험공에서 실시한 다운홀 실험의 결과와도 유사하였다. 다운홀 기법은 시험공 설치 문제로 인하여 5.5m 까지만 시험 수행이 가능하였다. SPT-업홀 1차원 해석을 수행한 4개의 감지기 결과가 모두 유사한 경 향을 보였으므로 시험 부지의 층상이 수평적으로 큰 변화가 없는 것으로 추정되어진다. 전단파 속도의 크기는 지표면에서는 200m/s, 심도가 깊어질수록 점점 커져 심도 12m 이상에서는 360m/s를 초과하는 것을 볼 수 있다. 부분적으로 전단파 속도의 증감 특성이 나타나는데 동일 시험공에서 수행한 SPT-N 치 결과와도 비교하여 볼 때 본 시험부지는 전반적으로 심도가 깊어질수록 강성이 증가하는 지반이나 부분적 불균질 풍화에 의해 약간의 강성의 증감이 존재하는 지반으로 추정된다.

김제 현장 실험을 통해 도출한 모든 가진원-감지기 조합의 도달시간 정보를 활용하여 토모그래피 역 산을 수행, 2차원 전단파 속도 분포를 획득하였다(그림 12). 획득한 2차원 전단파 속도 분포는 심도별 전단파 속도와 증가되는 형상은 1차원 해석 결과와 유사한 것으로 나타났다. 하지만, 기존의 1차원 해 석 기법에서 단지 시험 심도에 따른 강성 변화만을 추정할 수 있었던 것에 비해 더욱 유익한 정보를 획 득 가능하였다. 이 지역이 시추공으로부터 업홀 측선 방향으로 경사진 것으로 나타났으며 그 경사가 지 표면에서는 약간 심하고 지중으로 갈수록 작아지며 따라서 수평적 불균질 정도가 작아지는 것으로 판단 할 수 있다. 2차원 결과에서 시추공-지표면 주시 토모그래피의 한계로 인하여 심도가 깊어질수록 수평 적인 특성을 정확히 도출하기 힘들게 된다. 그러므로 본 시험부지에서 수행한 SPT-업홀 토모그라피 기 법 결과에서도 전단파 속도 분포 형상의 12m이하의 결과로 층의 경사나 지반의 불균질 특성을 추정하 기가 힘들다. 더욱 깊은 심도까지 지반의 수평적 특성을 정확히 파악하기 위해서는 SPT-업홀 시험의 수행 심도를 더욱 깊게 하고 지표면 감지기 개수를 증가하여 측선의 길이를 더 늘려 주여야 한다. 본 현장 적용에서는 비교 대상 영역을 13.5m로 국한시켰으며 이를 위해 SPT-업홀 기법을 20m까지 수행 하였다. 따라서 13.5m까지의 2차원 결과는 어느 정도 신뢰성을 가진다고 판단된다. 본 시험 부지에서 SPT-업홀 토모그라피 기법을 수행을 통해 획득한 전단파 속도 분포 중 신뢰성을 가진다고 판단되는 영 역을 그림 18내에 점선 형태의 사다리꼴로 표기하였다.



그림 12. 김제 풍화토 부지 SPT 업홀 기법 2차원 해석 결과

그림 9(b)의 SPT-N치 결과와 비교하여 보면 SPT-업홀 토모그래피 기법을 통해 도출한 전단파 속도 분포를 통해 도출된 상부 저속도층의 형태와 SPT-N치 분포도의 저강도층의 형태와 매우 흡사한 것을 볼 수 있으며 전체적인 형상에서도 매우 유사한 것으로 판단된다. 즉, SPT-업홀 토모그래피 기법을 통 해 획득한 전단파 속도 분포가 실제 지반의 층상 구조를 잘 모사하고 있는 것으로 보여진다. 그러므로 지반의 수평적 층상 구조를 확인하고자 할 때 SPT-업홀 토모그래피 기법을 사용하게 된다면 적은 수의 시추를 수행하여도 실질적인 지반의 수평적인 층상 구조를 도출이 가능하리라 판단된다.

4. 요약 및 결론

SPT-업홀 기법의 확립을 위해 다양한 수치해석을 통한 검증 및 현장 시험을 실시하였으며 연구된 사항 은 다음과 같다.

- ABAQUS 수치해석을 통해 지중 수직 가진에 의한 지표면 입자 움직임을 살펴 본 결과 지표면 각 위 치에서 가진위치 방향과 나란한 방향으로 압축과 성분이 가진 위치방향과 직교한 방향으로 전단과 성 분의 움직임이 주되게 나타나는 것을 확인하였다.
- 수직성분과 수평성분의 시간 이력곡선 상에서의 크기합 정보의 극대점을 이용하는 방안이 어느 하나 의 성분을 이용하는 방법에 비해 도달시간 정보의 객관적 획득이 가능하며 정확성 또한 뛰어난 것으 로 나타났다.
- 3. 수평 및 경사 지반에 대한 SPT-업홀 기법에 대한 수치 모의 실험을 통해 신호 획득부터 도달시간정 보 도출, 토모그래피 기법 적용을 시도하였으며 정립된 기법이 신뢰성 있는 결과를 주는 것으로 판단 되었다.
- 4. 창원 부지 현장 실험을 통해 2방향 지표면 감지기를 사용하여 SPT-업홀 기법을 수행, 수직방향만을 사용하였을 때 보다 더욱 신뢰성 있는 결과를 보장해 주는 것으로 판단되었으며, 이러한 개선 사항으 로 인하여 향후 SPT-업홀 기법의 현장 적용성을 증대할 수 있으리라 판단된다.
- 5. 김제 풍화토 부지에서의 SPT-업홀 토모그래피 기법의 수행을 통해 1개의 시추공을 이용한 SPT-업홀 시험의 수행만으로 지반의 수평적 층상 구조를 모사하는 것이 가능하며 신뢰성 높은 2차원적인 전단 파 속도 분포를 도출할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 "지하정밀영상화 융합기술 개발"에 의해 수행된 것이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1. 김동수, 박형춘, 김성인(1999), "표면파시험과 공진주시험을 이용한 사질토지반 개량평가 시스템의 개 발", 한국지반공학회논문집, Vol 15, pp. 41-52.
- 김동수, 방은석, 서원석(2003), "표준관입시험을 이용한 업홀시험에서 전단파 속도 주상도의 도출", 한 국지반공학회논문집, Vol 19, pp. 135-146.
- 방은석, 김종태, 김동수(2006a), "2방향 지표면 속도계를 활용한 SPT-업홀 기법 개선 연구", 대한토목 학회논문집, Vol. 26, No. 2c, pp. 109-120.
- 4. 방은석, 김종태, 김동수(2006b), "SPT-업홀 토모그래피 기법을 이용한 지반의 2차원 전단파 속도 분포 의 도출," 대한토목학회 논문집, Vol. 26, No. 3c, pp. 143-155.
- 5. Stokoe, K.H., and Rosenblad, B.L., 1999, Offshore geotechnical investigation with shear waves, in Roesset, J.M., Ed., 1999 Offshore Technology Conference, OTC 10823, 1-9
- 6. Tronicke, J., Tweeton, D.R., Dietrich, P., and Appel, E., 2001, Omproves Crosshole Radar Tomography by using Direct and Reflected Arrival Times. *Applied Geophysics*, Vol 47, pp. 97-1005.
- 7. Tweeton, D.R., Jackson, M.J. and Roessler K.S., 1992, BOMCRATR-A Curved Ray Tomography Computer Program for Geophysical Application, USBM RI 9411.