

지반조사 연구 및 기술 동향

지반조사기술위원회

1. 서론

댐, 터널, 도로, 교량 등의 모든 토목구조물은 지반위 또는 지반 내에 위치하고 있다. 지반조사의 목적은 이들 토목구조물의 설계와 시공에 관한 정확한 지반 정보를 얻는 데 있다. 지반은 어느 정도 물리적 특성을 조절할 수 있는 스틸, 콘크리트, 목재 등의 다른 토목재료들과 그 성질이 판이하게 다르다. 토목구조물 시공중 지반과 관련된 많은 위험이 있는데 지반의 성질을 제대로 이해하지 못하고 시공을 하는 경우, 상당한 위험이 따를 수 있다. 또한, 기초의 붕괴, 시공지연, 공사비용의 초과 등이 지반의 성질을 잘 파악하지 못하거나 부적절한 지반조사의 결과로 인해 기인되는 경우가 상당히 많다. 지반조사는 구조물을 경제적으로 설계하고 시공하기 위해서 필요한 기초 자료, 즉 지반의 특성 및 지층의 상태, 침하산정에 필요한 기본자료 등을 준비하는 데에 그 목적이 있다. 구조물을 설계할 때에는 구조물 하중에 의한 지반의 침하를 허용치 이내로 하고, 기초에 가해지는 하중이 허용 지지력을 초과하지 않도록 하는 것이 중요하다. 따라서 지반조사를 통하여 지반침하의 계산에 필요한 자료, 즉 각각의 지층의 형상, 두께 및 경사의 특성을 파악해야 하며, 그밖에 구조물의 안전에 영향을 미칠 수 있는 지반에 대한 모든 형태의 정보를 취득해야 한다. 지반조사 작업은 세심하게 수행해야 하며 구조물과 기초의 종류, 시공방법, 건설재료 등을 결정할 수 있도록 조기에 실시해야 한다. 지반조사가 늦어지면 공사기일에 쫓겨서 지반 조사를 세심하게 수행할 수 없게 되어 경제적인 해결책을 찾기 어렵게 된다. 지반조사의 비용은 전체 공사비의 1~2%에 불과하나 이 비용을 아끼면 전체 구조물이 손상되는 피해를 입을 수 있다. 즉, 적절한 지반조사를 통해서 공사비를 상당히 감소시킬 수가 있으며 지반에 대한 불확실성이나 위험을 어느 정도는 줄일 수가 있다. 공사비의 증가는 부적절한 지반조사로부터 기인하는 경우가 많은데 이는 지반조사에 대한 신뢰성 부족으로 과잉설계 및 공기지연 이로 인한 공사비 증가를 초래하기 때문이다. 최근 들어 국내의 지반조사 기술이나 장비도 괄목할 만한 성장을 하였다. CPT, PMT, 탄성과 시험 장비등 최첨단 장비들이 국내의 지반조사에 활용되고 있으며 지반조사에 대한 중요성도 점차 증가하는 추세에 있다. 또한, 지반조사 기술은 단지 시료를 채취하거나 물성치를 파악하는데 국한되지 않고 지반의 오염정도의 판단 및 치유를 위한 환경적인 목적으로 확대되어 활용되고 있다.

그러나 아직도 지반조사 분야의 중요성에 대한 이해 부족으로 충분치 못한 조사비용이 투입되고 있으며 조사에 참여하는 인력 또한 하급 기술자들이 주를 이루고 있다. 경험있는 지반기술자나 지질

기술자들에 의해서 잘 계획되고 시행된 적절한 지반조사를 통해서 공사비를 절감할 수 있을 뿐만 아니라 구조물의 안정성 까지 증진시킬 수 있다는 점에서 지반조사의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다고 본다.

국내의 지반조사 현황 및 문제점을 살펴보고 현재 사용되고 있는 지반조사 장비 및 최신 지반조사 기술을 소개하고 향후 지반조사 분야의 전망에 대해서 간단한 기술하고자 한다.

2. 국내 지반조사의 현황

지반은 그 구성 재료가 다양하고 성질이 매우 복잡하기 때문에 지반재료의 거동 및 특성의 고유치를 결정하기가 매우 어렵다. 특히, 한정된 지반조사와 시료채취 및 운반에 따른 시험오차등을 고려할 때 세심한 조사계획과 주의가 필요하다고 할 수 있다.

최근 들어 국내에서도 지반조사분야가 양적이나 질적으로 괄목할 만한 성장을 하고 있으며 조사 및 분석기술도 상당한 수준에 도달하였다. 그러나 아직도 개선해야할 미흡한 부분이 많이 있는 것도 사실이다.

지반조사의 일반사항으로 조사수량의 부족 및 누락에 따른 분석 미실시로 인해 지반에 대한 충분한 정보 없이 제한된 시험 데이터나 문헌에 있는 기존의 자료를 그대로 적용하는 경우가 많다. 이는 시공 중에 설계변경의 원인이 되어 공사비를 증가시키는 주원인이 되고 있다. 또한, 지반조건에 따른 조사 방법의 적정성을 고려하지 않고 획일적인 방법으로 조사 방법을 정하는 경우도 많이 있다. 그리고, 경우에 따라서 지반조사자와 설계자의 상호 기술적인 대화 없이 설계자가 임의로 시험 결과치와는 상관없이 설계지반정수를 적용하는 경우가 있는데 이는 앞으로 보완해야할 중요한 문제이다. 특히, 조사자와 설계자간에 상호 교류 없이 설계정수 결정 및 적용을 하였을 경우, 향후 구조물의 붕괴 등의 문제가 발생하는 경우, 책임소재의 분쟁이 될 수도 있기 때문이다. 또한, 설계를 위한 조사가 아닌 형식적인 조사를 하는 경우, 예산 절감의 명목으로 조사비를 삭감하여 과업지시서와 내역서가 불일치 하는 경우, 조사수량의 증감 및 조사에 따른 부대시설의 설치비 등에 따른 비용을 고려해 주지 않는 경우 등 아직도 보완해야 할 점이 많이 있다. 조사 비용에 있어서도 과거에 비해서 많이 증가되었으나 아직도 조사에 대한 충분한 비용이 책정되어 있지 않다. 예를 들면, 직접경비와 시험비의 조사용 제경비, 기술료, 기술검토에 들어가는 직, 간접비용이 고려되고 있지 않으며 대부분 조사업체의 영세성으로 인하여 주로 하청에 의한 조사가 이루어지기 때문에 지반조사가 부실해 지는 경우가 상당히 많이 있다. 또한, 발주처별로 지반분류기준이 상이한 점도 앞으로 보완되어야 할 사항이다. 현재, 국내 지반 조사에 첨단장비들이 많이 사용되고 있지만 대부분이 외국에서 비싼 외화를 주고 수입된 장비를 사용하고 있다. 따라서 유지 관리 측면에서 상당한 어려움이 있는 것도 사실이다. 이에 국내에서 새로운 장비를 개발하려고 시도하는 경우, 정부차원에서의 재정적 재원이 필요하다고 본다.

토목공사에 대한 턴키 제도의 도입은 국내의 토목기술, 특히, 지반조사나 설계기술의 도약적인 발전에 크게 기여한 것이 사실이다. 그러나 무분별한 지반조사, 특히 아직 적용성이나 신뢰성이 입증되지 않은 지반조사는 경제적인 낭비를 초래하므로 새로운 조사기법을 도입하여 적용하는 경우에는

국내 기준에 맞는 적용성을 세우고 시험 결과치에 대한 신뢰성 문제를 확인한 후에 적용하는 것이 바람직하다고 본다.

3. 일반적인 현장지반조사 기법

여러 가지 현장시험법들이 지층을 파악하거나 직접적인 방법으로 흙의 특성이나 지반정수를 파악하기 위해 사용되고 있다. 가장 보편적으로 사용되고 있는 현장시험들에는 표준관입시험(SPT), 콘관입시험(CPT), 피조콘(CPTu), 딜라토미터(DMT), 프레스 미터(PMT) 그리고 베인전단(VST)시험 등이 있다. 상기의 각 시험방법들은 각기 다른 하중을 적용, 이에 따른 흙의 반응을 측정하여 흙의 강도와 강성도 같은 재료적인 특성을 평가한다. 그림 1은 이들 시험장치들과 방법을 단순화 시켜 놓은 것이다.

표준관입시험이나 일반적으로 사용되는 PMT, VST 시험에서는 보오링 홀이 필요하다. 따라서 이들 시험을 위해서는 로타리 보오링 장치가 필수적으로 사용된다. CPT, CPTu 그리고 DMT 시험에서는 보오링 홀이 필요하지 않기 때문에 이들은 직접관입(direct-push)시험이라고도 한다. 특별히 제작된 PMT나 VST는 보오링 홀 없이 직접 시험을 수행할 수 있다. 이와 같이 이들 시험장치는 표준 드릴리그나 콘 트럭에 장착된 유압 시스템을 이용하여 시험을 수행한다. 직접관입 시험법은 지반을

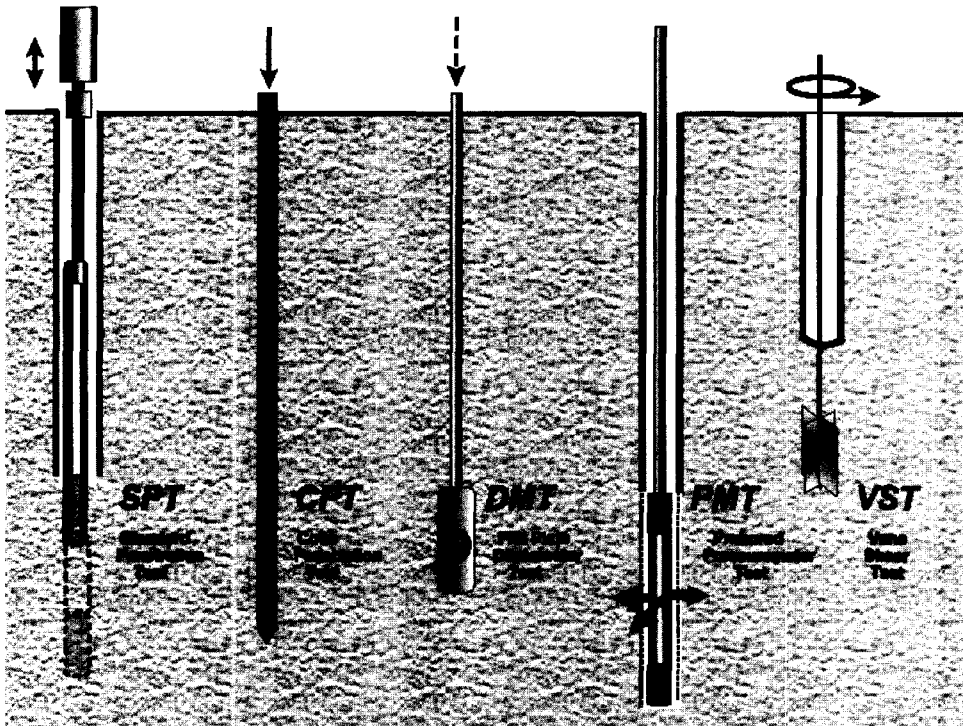


그림 1. 지반조사를 위한 현장시험 장비

굴착할 필요가 없다는 장점이 있는 반면 고화된 지층이나 기반암층을 관입할 수 없다는 단점이 있는데 이러한 경우 보어링 홀 방법을 이용하는 것이 일반적이다.

4. 해양 및 해저지반 조사기술

해양에서는 해수라는 독특한 매질로 인한 정보전달과 탐사의 어려움, 그리고 10m에 1기압씩 증가하는 엄청난 수압 등으로 인해 해저지반조사는 많은 장벽에 가로막혀 왔다. 그러나 최근 과학의 발달로 각종 탐사·관측 장비의 비약적인 발전을 이루었으며, 인공위성에 의한 원격탐사기술 등과 같은 첨단 탐사기술이 연구에 활용되고 있다. 해양에서 사용되고 있는 조사기법으로는 해류나 조류, 파랑 등 복잡한 해양물리환경을 조사 관측하는데 사용되는 해양관측기술, 해저의 지질학적 구조를 파악하는데 사용되는 해저지구물리 탐사기술, 해양지반의 지층구조 파악을 위한 보링기법, 해저지반의 시료 채취를 위한 샘플링 기술, 그리고 해저지반의 공학적 물성 파악을 위한 원위치 시험기법 등이 있다.

4.1 해상 탄성과 반사법 탐사

단일 채널 해상 탄성과 탐사는 해상, 하천, 호수와 늪 등의 수상에서 실시하는 천부 반사법 탐사이다. 다중 채널 해상 탄성과 탐사에 비해 간편한 장비를 사용하므로 기동성이 있는 측정이 가능하고 비교적 적은 비용으로 해저면 하부의 지질 상황을 파악할 수 있다.

수면 밑의 지형을 측정하는 데는 음향측심기가 사용된다. 음향측심기는 해수면(하천, 호수 등에서도 동일한 방법의 탐사가 이루어지지만, 이하에서는 해상에서의 탐사를 가정하고 기술한다) 부근에서 수백 kHz의 음파를 일정한 간격으로 해저로 향하여 보내고 해저면으로부터 반사된 파의 왕복시간을 측정하여 수심을 측정하는 방법이다.

4.2 MBES(Multi-Beam Echo Sound)

최근에 sonar 기술과 위치정보에 대한 기술, 그리고 컴퓨터 프로세싱 기술의 급격한 발전으로 인해 해저 지형 조사방법에 있어서 획기적인 진전이 있었다. 이러한 발전으로 인해 정밀 해저 지형 조사를 위한 방법으로 일반적인 단채널 음향 측심기(echo sounder)에서 다중채널 음향 측심기(multi-beam echo sound)로 점차 옮겨가고 있다. 다중 채널 음향 측심기의 특징은 한번의 송신(ping)으로 수심의 2~7배 정도 되는 지역에 대한 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있고 초음파 대역의 고주파를 사용하므로 정밀한 해저 지형자료를 획득할 수가 있다는 것이다. 일반적인 원리는 단순하지만 다중 채널 음향 측심기는 해수의 심도별 음파 속도 및 navigation시에 배의 움직임(roll, pitch, heave) 및 조석의 정밀한 관측이 필요하고 해저에서 반사된 빔의 forming에 복잡한 수학 연산 과정이 필요하며 배의 특성으로 인한 기계적 잡음을 제거하기 위하여 patch test를 반드시 수행하여야 한다는 단점이 있다.

4.3 보링공을 이용한 지반조사

해상에서 이루어지고 있는 보링공을 이용한 지반조사는 일반적인 보링 및 샘플링을 비롯하여 표준

관입시험, 콘관입시험, 공내재하시험, 현장배인시험 등 육상에서 활용 중인 시험기법들이 거의 대부분 적용될 수 있지만, 육상의 경우에 비해서 능률이나 정도가 자연조건에 의해 크게 좌우된다. 이는 조류나 파랑, 항적파 등 육상에서는 생각할 필요가 없는 장애를 가지고 있기 때문인데, 시험위치의 수심에 따라서 작업 방법에 큰 차이가 있다. 수심이 비교적 얇을 경우 주로 작업 공간을 위한 가설작업장을 활용하는 반면, 수심이 깊은 위치에서는 가설작업장의 적용이 힘들기 때문에 다운홀 방식이나 착저형(seabed) 방식 등의 기법이 활용된다. 여기서, 다운홀 방식은 굴착된 보어홀의 바닥으로부터 장비를 관입시키는 방식이고, 착저형 방식은 해저 바닥 면에서 직접 관입시키는 방식이다.

5. 터널 시공중과 유지관리를 위한 지반 조사

터널 시공중 지반조사는 막장전방 또는 주변의 지반상태를 파악하는 것이 주이며, 막장전방 또는 주변의 지반상태를 사전에 정확히 파악할 수 있다면, 보다 신속한 대처로써 시공성, 경제성 및 안전성 측면에서 많은 이득을 얻을 수 있을 것이다. 최근에 들어서 많이 활용되고 있는 터널 막장전방의 지반조사기술은 시공관리나 계측, 그리고, 막장면의 상태를 근거로 하여 막장전방의 지질을 예측하는 방법과 선진보링을 통한 물리적 방법, 그리고, 탄성과 또는 전자파를 이용하는 지구물리학적 방법이 대부분이다.

5.1 TBM 탑재형 터널 막장전방 조사기술

국내 지반조건은 일본에 비해 상대적으로는 터널을 굴착하기 좋은 조건이지만, 기계화 시공법 즉, Open TBM 또는 쉴드TBM 등을 사용할 경우 간헐적으로 출현하는 대규모의 파쇄대와 심한 지층의 변화로 인해 고전을 겪기도 한다. 막장의 상태를 직접 파악하기 어려운 기계화 시공법에서는 특히, 지구물리학적 방법의 지반조사기술이 효과적으로 사용될 수 있다.

5.1.1 SSP 시스템

SSP(Sonic Soft Ground Probing)는 독일의 Herrenknecht사, Philipp Holzmann사 Zublin사와 TSP 장비를 개발한 스위스 AMT사의 합작으로 개발되었다. 특히, Herrenknecht사는 TBM장비 제조 및 시공업체로 유명한 곳으로 SSP시스템을 쉴드TBM의 전면 커터 휠(cutter wheel)에 탑재하여 실 적용한 바 있다.

SSP시스템은 기본적으로 반사탄성과 탐사법의 원리를 이용하고 있다(그림 2 참조). 작동원리는 TBM(Tunnel Boring Machine)의 커터 휠에 장착된 진동발생기(electromagnetic shaker)에서 고주파수(kHz 범위)의 P-파를 막장전방으로 방사하여 반사계수가 큰 경계부에서 되돌아오는 반사파를 가속도계에 의해 기록하는 방식으로 전방의 파쇄대, 거대전석, 공극 등을 감지한다. 음원(音源)으로 확성기(loudspeaker)를 이용하는 방식도 있으며 이 경우에는 음파(sound wave)를 발생시키고 마이크로폰으로 수신하여 전방의 지반자료를 획득한다. 탐사는 연속적으로 이루어져 TBM이 굴착을 진행하는 동안에도 계속 전방 탐지를 수행할 수 있다는 장점이 있다. 탐사가능 범위는 TSP(Tunnel

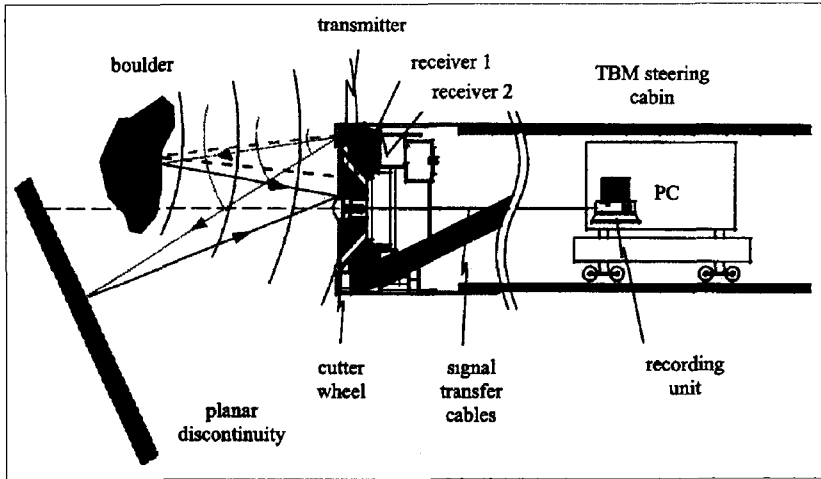


그림 2. SSP 시스템의 작동원리

Seismic Prediction, 약 100~200m)에 비하여는 작으나 지반의 상태에 따라 막장전방 40m이상까지도 가능하다.

5.1.2 유사기술개발 현황

독일의 SSP시스템과 같은 방식의 TBM장착형 탐사시스템은 쉴드TBM 장비개발이 가장 활발한 일본에서도 개발되어 활용되고 있다. 일본의 Hitachi Zosen사에서는 잠수함의 수중음파탐지(sonar) 원리를 이용한 장치를 커터부분에 장착한 쉴드TBM을 선보였다. 음원으로는 압전소자(piezo-electric ceramic)을 이용하는 이 장치는 음파의 반향원리를 이용하는 것으로서 지하수위면 아래에서 보다 큰 효과를 볼 수 있다(그림 3 참조).

또한, 일본의 미쯔이(三井)건설에서는 GPR(Ground Penetrating Radar)과 같은 전자파 송수신 안테나를 쉴드TBM 헤드(head)부의 앞면이나 상부에 장착하여 이완된 부분이나 붕괴된 부분을 탐지하는 시스템을 개발하였다.

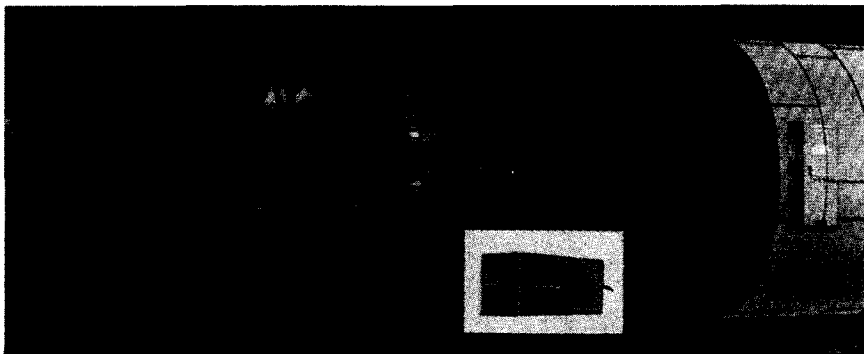


그림 3. 쉴드TBM의 음파반향 장치(Hitachi Zosen Co.)

5.2 TSP203

TSP(Tunnel Seismic Profilling)탐사는 기본적으로 지상에서 수행하는 탄성과 반사법을 터널에 응용한 것이다(그림 4 참조). 대표적인 TSP탐사장비로는 스위스 AMT(Amberg Measuring Technique)사에서 1990년에 TSP202 (Tunnel Seismic Prediction)라는 이름으로 개발한 것을 들 수 있으며 세계 여러 나라에서 활용되고 있다. 국내에서도 90년대 중반부터 여러 터널현장에 적용되어 비교적 좋은 성과를 거둔바 있다. 그러나, 첫선을 보인 이후 장비를 설치하고 측정하여 결과를 얻는데 까지 많은 시간이 걸리는 문제로 인해 시공에 오히려 장애가 될 수 있다는 점, 2차원적으로 탐사결과를 보여주기 때문에 신뢰성이 다소 떨어진다는 점, TBM과 같은 기계화 시공법을 사용하는 터널에서는 설치 장소가 협소하다는 문제점 등이 드러났다. 최근 2000년에는 지속적인 개선을 거듭하여 TSP203을 개발하여 선보였으면 국내에서도 도입, 적용되고 있다.

5.3 VIBSIST-20(Vibration Swept Impact Seismic Technique)

VIBSIST-20은 Swept Impact Seismic Technique(SIST)에 기초를 두어 핀란드 Terraplus 사에서 개발한 파동발생기이다. SIST는 바이브로사이즈(Vibroiseis) 기술과 Mini-Sosie 기술을 조합한 기술이다. 바이브로사이즈는 Vibrator로 장시간동안 지속적으로 주파수를 변화시키며 사인파(sinusoidal wave)를 발생시키는 Sweep방법의 음원이지만, 지반과의 coupling 문제가 있으며 고가인 단점을 가지고 있다. Mini-Sosie는 천심도 반사탐사에서 가장 보편적으로 이용되며 지반과의 coupling 문제가 없고 수백~수천의 low-power impact 소스를 발생시키지만, 분석에 어려움이 있고 많은 impact수가 필요하다는 단점이 있다. 즉, SIST는 바이브로사이즈의 swept 주파수 신호발생과 Mini-Sosie의 임팩트기술을 장점을 발취하여 보다 작은 impact수로 시간, 비용절감 및 잡음의 영향을 최소화하여 좋은 고해상도의 결과를 얻을 수 있도록 한 것이다.

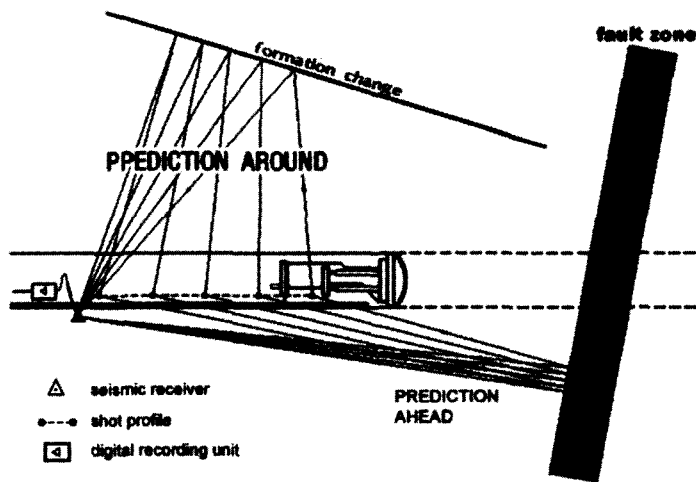


그림 4. TSP 탐사법의 개념도

6. 암반조사

암반은 대략 불연속, 이방성, 불균질하며 탄성적이지 않다. 또한 지구조 이동, 지진, 융기, 침강 등 지구의 상부지각의 동적인 움직임에 의하여 계속적으로 응력을 받고 있다. 암반은 물, 유류, 천연가스, 공기 등을 함유하고 있는 균열이 있는 다공성매질이다. 따라서 이와 같은 암반을 특성화 하는 것은 쉬운 일이 아니다. 현재 외국에서 사용중인 암석 및 암반의 규정된 시험방법들은 다음 표 1과 같다. 이밖에 많은 시험방법들이 제안되고 있으나 아직은 국제적으로 공인받지는 못하고 있다.

암반의 굴착능력은 암석물성 관련 영향요소로서 연약면의 형태, 빈도수, 방향과 암석의 굴착성능 등에 좌우되며 또한 장비관련 요소로는 Thrust level, Cutter size & type, Average cutter spacing, Machine diameter, Torque capacity 등이 있다. 암석의 굴착성능평가에는 다음 시험들이 주로 사용되고 있다.

① DRI(Drilling Rate Index), ② BWI(Bit Wear Index), ③ CLI(Cutter Life Index), ④ Cherchar Abrasiveness Index(CAI), ⑤ Brittleness Values S20, ⑥ Sievers J Value (SJ), ⑦ Abrasion Value (AV), ⑧ Abrasion Value Steel (AVS), ⑨ Quartz Content (%)

국외에서 널리 사용하고 있는 암반평가기법들로서는 ① RMR, ② Q-system, ③ RCR(Rock

표 1. 암석 및 암반에 대한 ISRM 및 ASTM시험방법

International Society for Rock Mechanics (ISRM) test methods	American Society for Testing and Materials(ASTM) test methods
<ul style="list-style-type: none"> · Petrographic description · Hardness and abrasivity · Monitoring rock movements using borehole extensometers · Determining sound velocity · Quantitative description of discontinuities · Tensile strength · Uniaxial compressive strength and deformability · Water content, porosity, density,absorption · In-situ deformability of rock · Pressure monitoring of movements across discontinuities · Rock anchorage testing · Point load strength · Deformability using a large flat jack · Deformability using a flexible dilatometer · Rock stress determination · Fracture toughness · Seismic testing within and between boreholes · Laboratory testing of argillaceous swelling rocks · Large-scale sampling and triaxial testing of jointed rock 	<ul style="list-style-type: none"> · Laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants · Creep in uniaxial compression · Creep in triaxial compression · Direct tensile strength · Modulus of deformation using flexible plate loading · Modulus of deformation using rigid plate loading · Rockbolt anchor pull test · Rockbolt long-term load retention test · In-situ deformability and strength in uniaxial compression · Dimensional and shape tolerances of rock core specimens · In situ creep · In situ shear strength of discontinuities · Modulus of deformation using a radial jacking test · Permeability measured by flowing air · Thermal expansion using a dilatometer · Elastic moduli of intact rock core · Transmissivity and storativity of low permeability rocks using the constant head injection test · Transmissivity and storativity of low permeability rocks using the pressure pulse technique · Triaxial compressive strength · Undrained triaxial compressive strength · Unconfined compressive strength · Thermal diffusivity

Condition Rating), ④ N(Rock Mass Number), ⑤ M-RMR(Modified Rock Mass Rating), ⑥ RMi(Rock Mass index), ⑦ L-RMR(Laubscher's Classification), ⑧ Geological Strength Index (GSI), ⑨ Monte Carlo Simulation 등이 사용되고 있으며 이들 분류방법사이의 상호관계를 분석하고 관계식을 도출하여 사용되고 있다.

7. 물리탐사

국내외적으로 많은 분야의 지구물리탐사 중 가장 집중적인 투자가 수행되는 분야는 해상 탄성과 탐사 분야이다. 이 분야의 탄성과 탐사는 주로 부가가치가 높은 석유 자원을 탐지하기 위하여 수행되고 있으며, 부분적으로 지체구조를 밝혀내기 위한 연구의 일환으로 수행되기도 한다. 국내의 경우, 이러한 석유 탐사를 위한 탄성과 탐사는 극소수의 국가 기관에 의해서만 수행되고 있는 실정이다. 이에 비해, 육상에서의 근접 지표 지구물리탐사(near-surface geophysical explorations)는 전세계적으로 투자비는 크지 않지만 그 사업수가 매우 많다. 즉 대부분 소규모 조사에 국한되지만 그 조사 횟수와 사업이 매우 많고도 다양하다. 일반적으로 근접 지표 지구물리탐사의 조사심도는 최대 지표면 하부 수백 미터를 넘지 않으며, 대부분 수십 미터 이내의 지하 매질의 정보를 획득하는데 그 초점이 맞추어져 있다. 최근 들어서는 인공적인 구조물의 안전도 조사 등에 응용되면서 비파괴검사라는 용어로도 불려지며, 크기가 수 cm이내의 인공 구조물에 대하여, 수 cm 정도 크기의 구조나 물성 범위를 조사하는데 이용되기도 한다. 국내외를 불구하고, 1980년대까지 지반 조사 분야에 가장 활발히 적용되던 대표적인 지구물리탐사법은 탄성과 굴절법 탐사법과 수직 전기 비저항탐사법을 들 수 있다. 그러나 오랜 기간 현장 기술자들에 의해 수행된 위의 두가지 탐사법도 정량적 해석을 위해서는, 매우 전문적인 이론 지식과 계산이 요구되므로, 일반적으로 표준 곡선 등의 비교 자료를 통한 해석 방식으로 지하 매질의 정보를 유추하여 왔었다. 이러한 문제로 인해 양질의 조사 자료를 가지고도 정량적 해석치를 산출하지 못하고 잘못된 해석 결과를 도출하기도 하였으며, 잘못 획득된 현장 자료를 그대로 해석에 적용하여 왜곡된 결과를 도출하는 경우가 종종 보고되어 왔다.

1980년대에 들어, 개인 전산기의 보급이 획기적으로 이루어지면서 과거 대규모 석유탐사나 전문 연구자들에 의해 수행되던 각종 기술들이 현장 기술자들에 의해 지질공학적인 조사나 지하수 조사 현장에서도 적용 가능하게 되었으며, 현장 기술자들도 전문적인 수학이나 물리학의 지식이 부족하더라도 현장에서 탐사 자료의 질을 즉시 검증할 수 있는 프로그램과 검증된 양질의 자료를 해석할 수 있는 상용, 혹은 공개 프로그램들이 개발 보급되었다. 결국 개인 전산기의 급속한 보급이 근접 지표 지구물리탐사를 객관적이며, 정량적인 기술로 정착시키고 있으며, 현장 조사 기술자는 기본적인 원리의 숙지만을 통해서도 쉽고 정량적인 자료 획득 및 해석이 가능하게 되었다. 그러나 아무리 발전된 전산기, 프로그램 및 조사장비가 개발 보급된다고 하더라도 다양한 현장 조건을 모두 반영할 수는 없으므로, 현장 기술자는 반드시 자신이 획득하는 계측치가 가지고 있는 물리량을 이해하고 추후 해석 단계가 어느 과정을 통해 수행될 것인지를 감안하여 자료를 획득하여야만 한다.

7.1 전기비저항 및 전자탐사

전기비저항 탐사는 지하매질에 전류를 흘려준 후 지질변화에 따른 전위차를 측정하여 지하 암반상태에 대한 정보를 획득하는 탐사법으로 지하매질의 연속적인 암반상태 파악, 단층, 파쇄대, 탄층, 석회암 공동 등의 연약대 탐지 등에 널리 사용된다. 특히 전기비저항 탐사는 한 지점에서의 물성값만 내주는 시추조사와 달리 측선 하부에 대한 연속적인 영상을 제공하여 좁으므로 조사구간에 대한 전반적인 암반상태를 신속하게 파악할 수 있는 장점을 가지고 있다. 전기비저항 탐사는 지반조사에서 암반분류 결과와의 상관관계를 통한 미시추 구간에서의 암반등급 산정을 통해 터널의 지보형식 선정과 교량의 교각위치 선정 및 보강공법 선정에 대한 기초자료를 제공하여 준다. 한편, 전기비저항 탐사는 현장작업의 특성상 200m이상의 장심도에 대한 정보를 획득하는데 많은 어려움이 따르는 단점이 있어, 200m이상의 장심도 구간에서는 전자탐사가 널리 사용되고 있다. 전자탐사는 자연장 또는 인공 전자파 송신원에 의해 유기되는 전기장과 자기장을 측정하여 지하매질의 전기비저항 분포단면을 획득하는 탐사법으로 측정된 전자기장의 주파수에 의해 해석심도가 결정되기 때문에 수백~수 km 심도에 대한 정보를 손쉽게 측정할 수 있다.

7.2 탄성과 탐사

탄성과 탐사는 다이내마이트나 햄머 등을 이용하여 탄성파를 발생시킨 후 지하매질을 전파해온 탄성파를 측정하여 지하매질에 대한 영상 또는 탄성과 속도 분포단면을 획득하는 탐사법이다. 탄성과 탐사는 이용되는 탄성파의 종류에 따라 굴절법 탄성과 탐사, 반사법 탄성과 탐사와 표면파 탐사로 나눌 수 있다. 굴절법 탄성과 탐사는 가장 먼저 도달하는 직접파와 굴절파의 도달시간을 측정하여 지하매질의 탄성과 속도 분포단면을 획득하는 탐사법으로 지하매질의 연속적인 지층선 작성, 굴착난이도 파악 및 토공량 계산 등에 널리 사용된다. 한편, 굴절법 탄성과 탐사는 송신원이 천부에 위치하여 50m이상의 장심도에 대한 신뢰성 있는 자료의 획득이 어려운 바, 최근 들어서는 지표 뿐만 아니라 시추공에 송·수신원을 위치시켜 50m이상의 심도에서의 탄성과 속도 분포단면을 획득하는 대심도 토모그래피 탐사도 널리 사용되고 있다. 반사법 탄성과 탐사는 암종경계면, 단층, 파쇄대 등의 지하매질의 속도 불연속면에서 반사되어 돌아온 반사파를 측정하여 지하매질의 지층에 대한 영상을

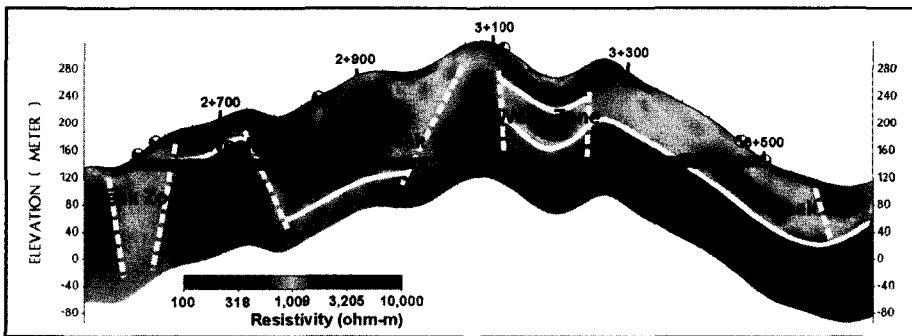


그림 5. 터널예정 지역에서의 전기비저항 분포단면 예

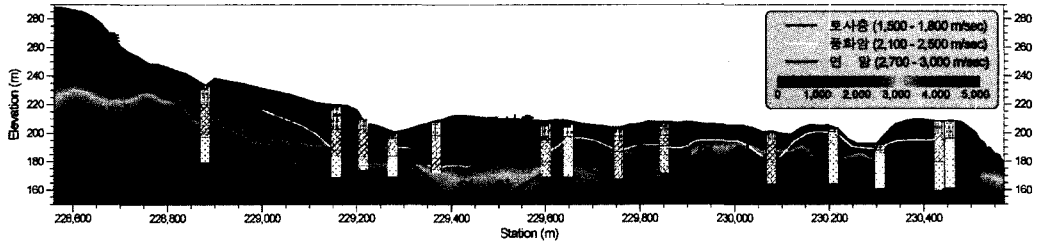


그림 6. 굴절법 탄성파 탐사에 의한 지층상태 추정 단면

획득하는 탐사법으로 지하매질에 대한 정밀 영상을 제공해주는 장점이 있지만, 획득 및 자료처리 시간이 많이 소요되고 탄성파 속도 단면이 아닌 지층 영상을 제공해주는 단점이 있어 핵폐기물 처리장이나 지하저장고 부지조사 등에 제한적으로 사용되고 있다. 표면파 탐사는 지표면을 따라 전달되어 온 표면파를 측정하여 전단파 속도 분포단면을 작성하는 탐사법으로, 체적파와 표면파를 모두 고려하여 2차원 토모그래피 영상을 구할 수 있는 SASW 기법과 표면파의 기본모드를 주로 고려하여 연속적인 속도단면을 획득하는 MASW 탐사법이 있다. 표면파 탐사는 굴절법 탄성파 탐사와 달리 지형 변화가 심하거나 지하매질이 복잡한 지질구조를 보이는 경우에는 적용이 어려운 단점이 있는 단면에 수평 지층 상태를 보이는 아스팔트 등의 포장체 하부 두께 조사, 성토층의 다짐상태 파악 등에는 탁월한 효능을 보여주고 있다.

7.3 단일 시추공 탐사

단일 시추공만을 사용하여 심도에 따른 시추공벽 주변매질의 물성을 측정하는 물리탐사법으로는 밀도검층, 음파 검층, 공내 탄성파 탐사, SPS 탐사, 초음파 주사검층, 시추공 영상촬영 등이 있다. 음파검층, 공내 탄성파 탐사와 SPS 탐사는 사용하는 탄성파의 주파수 및 탐사 방법이 다소 다르지만 모두 시추공벽 주변 매질의 종파 및 횡파 속도를 측정하는 탐사법으로 밀도를 측정하는 밀도 검층과 함께 내진해석에 널리 사용되고 있다. 초음파 주사 검층(Televiewer)과 시추공 영상촬영(BIPS)은 초음파와 광파를 사용하는 차이가 있지만 모두 시추공 벽 주변매질에 분포하는 불연속면을 측정하는 탐사법으로 불연속면의 경사방향 및 경사각, 크기, 간격 등의 특성을 규명하여 3차원 절리 생성과 터널 갱구부 사면, 절토부 사면의 불연속체 해석에 널리 사용되고 있다.

토목설계를 위한 조사, 시공 및 시공관리와 지하수의 이동과 관련된 암반내 균열의 조사에 있어 가장 신뢰할 수 있는 자료는 시추조사 자료 즉, 시추 코아에서 나온다고 해도 과언이 아니다. 비록 시추 코아가 전체 조사지역의 일부 국한된 아주 작은 규모의 영역만을 대변하는 자료이지만 지하의 지질상태를 직접 육안으로 확인할 수 있다는 것만으로는 매우 큰 의미를 내포하고 있다. 상기에 언급된 시추조사는 토목설계 및 지하수 조사에서 귀중한 정보를 제공하지만 시추주상도에 표기된 정보의 불확실성, 코아상자의 보관 및 관리에 대한 제약성, 취급의 불편성을 수반하고 있다. 이러한 문제점을 해결하고 절리의 발달상태를 정량적으로 표현하여 추후 필요시 언제든지 활용할 수 있는 자료의 축적과 정리를 위해 선진 외국에서는 여러 가지 방법이 응용되고 있으며, 이들 중 최근에 각광을 받

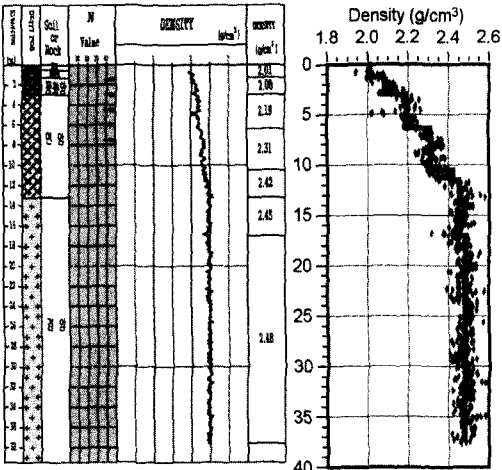


그림 7. 심도별 밀도 분포

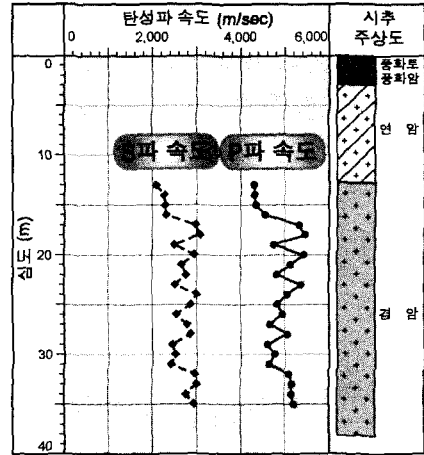


그림 8. 심도별 탄성파속도

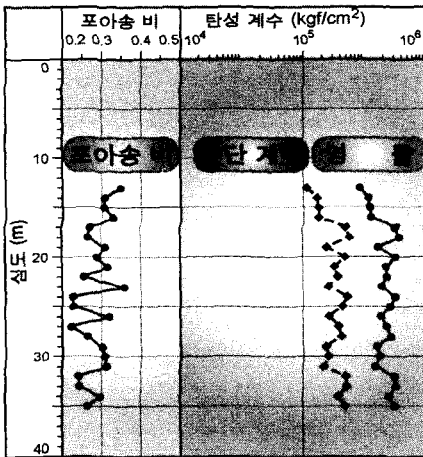


그림 9. 심도별 동적 물성

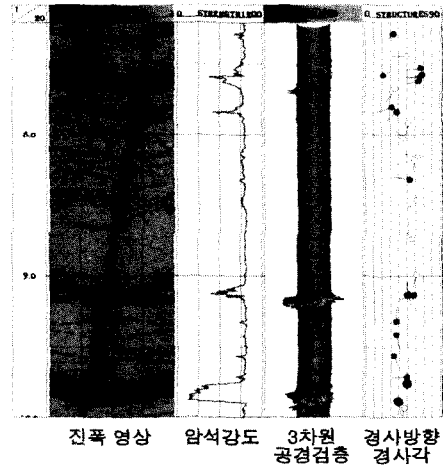
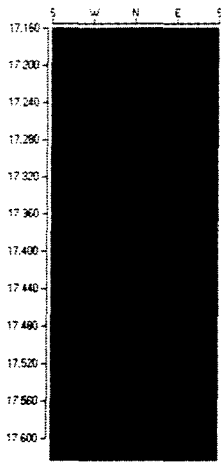
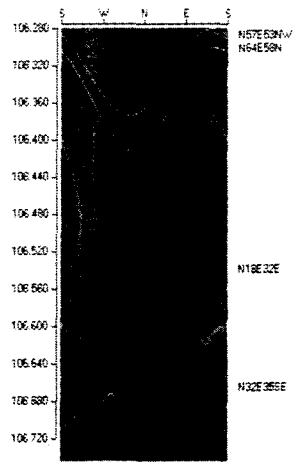


그림 10. 초음파 주사검층에 의한 영상분석

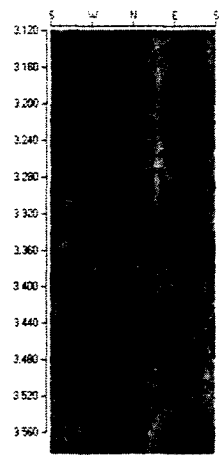
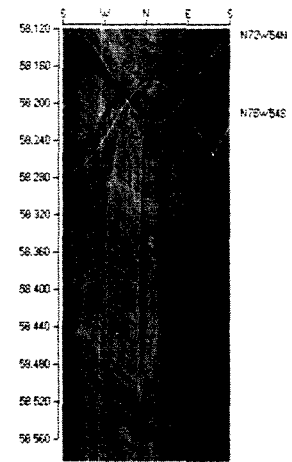
고 있는 방법이 시추공 영상촬영장치(Bips) 및 B/H TV(Borehole Televue), 그리고 이와 유사한 Core Scanner기법이 있지만 여기서는 시추공 영상촬영장치(Bips)만 설명을 하려한다. 실제 이들 시추공 영상장치(BIPS)는 장단점을 가지고 있기 때문에 궁극적으로 지하의 지질상태를 Data Base화 할 수 없으며 지질구조 즉, 절리의 방향성, 지질구조의 발달 상태 등을 정확히 파악할 수 있다는 장점이 있다. 이 장비는 실제 현장에서 시추공 영상촬영시 직접 육안으로 Image화상을 관찰할 수 있으며 전개화상 및 공벽화상 각각을 비디오 테이프에 저장할 수도 있다. 특히 가장 큰 장점은 실제의 지반 상태를 육안으로 확인할 수 있어 시추코아의 육안관찰보다 정밀한 지하지질 구조상태를 파악할 수 있다.



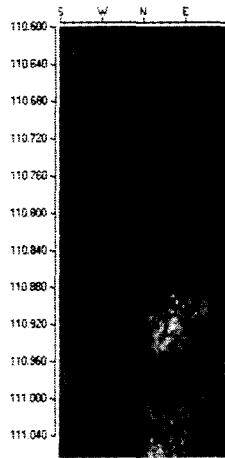
(a) 파쇄대



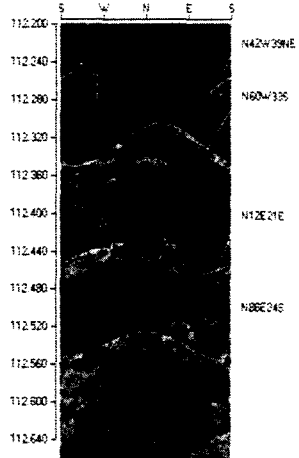
(b) 층리



(c) 절리파쇄대



(d) 암경계



(e) 암구분

그림 11. BIPS 영상촬영 결과

7.4 시추공간 토모그래피 탐사

두 개의 시추공을 사용하여 시추공간 매질에 대한 물성을 측정하는 토모그래피 탐사는 크게 전기비저항 토모그래피, 탄성과 토모그래피, 레이더 토모그래피로 나눌 수 있다. 전기비저항 토모그래피는 시추공간 매질의 전기비저항 분포단면을 작성하는 탐사법으로 탄층과 같이 전기비저항 차이가 큰 물질의 분포양상 파악에 주로 사용되며, 탄성과 토모그래피 탐사는 시추공간 매질의 탄성과 속도 분포단면을 작성하는 탐사법으로 석회암 공동 및 단층, 파쇄대 등의 연약대 파악, 터널 갱구부의 정밀 지층상태 파악 등에 널리 사용된다.

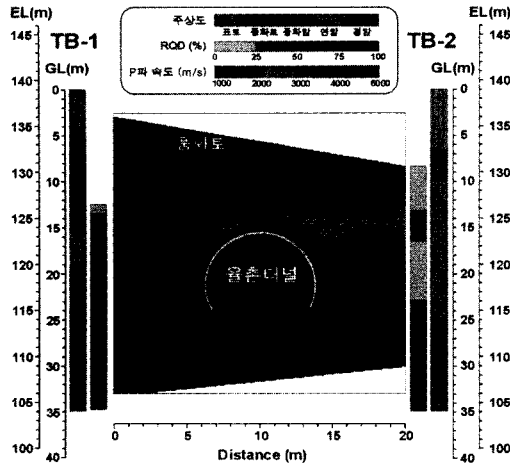


그림 12. 탄성파 토모그래피 해석 단면

7.5 레이더 탐사

레이더 탐사는 수십~수백 MHz 대역의 전자기파를 사용하여 지하매질에 대한 특성을 파악하는 탐사법으로 지표에서 탐사하는 지하탐지 레이더(GPR) 탐사, 단일 시추공을 사용하는 시추공 레이더 반사법 탐사, 두 개의 시추공을 사용하는 레이더 토모그래피 탐사 등이 있다. 지하탐지 레이더 탐사는 지하매질의 불연속면에서 반사되어 돌아온 전자기파를 측정하여 지하매질에 대한 영상을 제공해주는 탐사법으로 고분해능의 영상을 제공해주는 반면에 가탐심도가 수~수십 미터에 불과해 국내에서는 터널 라이닝 두께 검측, 지장물 조사 등에 주로 사용되고 있다. 한편, 전기비저항과 탄성파 탐사와 달리 전자기파를 사용하는 레이더 탐사는 지하매질의 유전율의 변화에 의해 전자기파의 거동 특성이 달라지는 바 석회암 공동, 폐갱도와 같이 지하매질과 유전율 차이가 심한 대상체의 탐지에 탁월한 효능을 보인다.

8. 결 언

토목구조물 공사에서 지반조사의 중요성이 날로 증가되고 있는 것과 더불어 지반조사 및 분석기술도 지속적으로 발전을 거듭하고 있다. 특히, 전자공학기술을 지반조사에 적용함으로써 보다 정확하고 신뢰성 있는 지반조사 데이터를 얻고 있다. 또한, 지반의 강도정수를 구하는데 있어서도 확률통계 기법의 적용 등으로 분석능력도 지속적인 발전을 하고 있는 상태이다. 지반조사 장비의 분야도 지속적인 개발과 성능개선이 되고 있다. 기존의 장비에 추가적인 센서를 부착하여 추가적인 지반 정보를 얻거나 자동화 시스템의 도입을 통하여 조사의 정확도를 높이고 있다. 예를 들어, 기존의 피조콘에 전기비저항, pH, 온도, 감마선, 탄성파 속도 등을 측정할 수 있는 센서를 부착하여 지반의 물성치 파악뿐만 아니라 지반의 오염상태등도 판단할 수 있게 되었다. 특히, GPR, SASW, 전기 비저항 탐사, 전기 비저항 토모그래피, 탄성파 탐사, 탄성파 토모그래피, 고밀도 탄성파 토모그래피 등의 물리

탐사장비에 대한 연구개발 및 활용도가 점차 증가되리라고 판단된다. 그리고 본문에서 언급된 시험법 이외에도 지반조사에 관한 수많은 신기술이 개발되고 있는 중이다.

이미 언급한 봐와 같이 지반조사에 대한 계획, 감독, 해석 등의 일련의 과업들이 경험 있고 숙련된 지반기술자에 의해 이루어져야 하며 현장 조사 또한 현장 경험이 풍부한 기술자들에 의해 이루어져야 할 것이다. 또한, 충분한 시간과 예산, 적절한 시험법의 선정 등을 통해서 신뢰성 있는 지반물성치를 얻을 수 있으며 이를 통해 공사시간 및 비용의 절감과 구조물 자체의 안정성을 확보할 수 있다는 것을 명심해야 할 것이다.

참고문헌

1. 한국해양연구원 (1999), “지구환경 변화사와 해저자원”, 해양과학총서 5. pp. 120-145.
2. 이호영, 구남형, 박근필, 유동근, 강동효, 김영건, 서갑석, 황규덕, 김종천, 김지수 (2003), “고해상 다중채널 탄성파 탐사 자료취득 변수에 따른 천부 해저 지층 영상의 해상도”, 물리탐사 제 6권 제 2호.
3. Hughes Clarke, J.E. and Parrot, R. (2001), “Intergration of dense, time-varying water column information with high-resolution swath bathymetric data”, United States Hydrographic Conference Proceedings, CDROM. 9.pp.
4. 고려대학교, 한국건설기술연구원(2002), 음향분석기법을 이용한 지하구조물 비파괴조사기술개발, 건설교통부 산학연공동연구개발사업 최종보고서.
5. Sager, H. J. and Herrenknecht, M. (1999), “The Westerschelde tunnel: New shield technologies in Europe”, Proc. of the Int. Symp. on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, pp. 287-292.
6. ADSC (1995). “Recommended procedures for the entry of drilled shaft foundations excavations.” The International Association of Foundation Drilling, (IAFD-ADSC), Dallas.
7. American Society for Testing & Materials. (2000). “ASTM Book of Standards”, Vol. 4, Section 08 and 09,
8. Construction Materials, “Soils & Rocks”, Philadelphia, PA.
9. Baguelin, F., Jezequel, J. F., and Shields, D. H. (1978). “The Pressuremeter and Foundation Engineering”, Trans Tech Publication, Switzerland.
10. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M. and LoPresti, D.C. (1989). “Modulus of sands from CPTs and DMTs”, Proceedings, 12 th International Conference on Soil Mechanics & Foundation.
11. Engineering, Vol. 1, Rio de Janeiro, 165-170.
12. Barton, N.R. (1973). “Review of a new shear strength criterion for rock joints.” Engineering Geology, Elsevier, Vol. 7, 287-332.
13. Barton, N.R., Lien, R., and Lunde, J. (1974). “Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support”. Rock Mechanics, Vol. 6 (4), 189-239.