

지반조사분야의 최근 연구 및 기술동향(1)

지반조사기술위원회

1. 서론

근번 우리 학회지인 “지반” 6월호 특집기사로 “지반조사” 분야가 채택되어 지반조사위원회는 구조물 주체별 지반조사기술의 최신 연구 및 기술동향을 준비하였습니다. 2002년을 가장 바쁘게 보낸 지반조사운영위원회는 무엇보다도 전임 학회장이신 연세대 김수일교수님께서 강조하신 “사이버 교육교재” 시범사업에 모든 운영위원이 헌신적으로 참여하여 성공적으로 “사이버교재 - 현장지반조사편”을 완성하였습니다. 지반조사 실무 운영위원들의 열성으로 사이버교재 집필을 마치고 우리학회에서 매년 진행하는 사업으로서 2월에 있었던 계속교육으로 “지반조사편”이 기다리고 있어 20여명의 강사 및 집필진이 참여하여 국내 지반기술 발전을 위하여 헌신적으로 교육 및 집필을 완성하였습니다.

지반조사운영위원회는 “지반조사분야의 최근 연구 및 기술동향”의 집필내용이 얼마나 새롭고 신선한 내용을 포함하고 있는지 회원여러분의 질책에 두려움이 앞섭니다. 하지만 다양한 주제를 찾고자 노력했으며 미흡하지만 최선을 다해 준비하였습니다. 이번 특집준비는 지반조사운영위원회 간사를 맡고 있는 중앙대학교 조성호 교수께서 담당하여 개인적으로 매우 바쁜 가운데 많은 노력과 헌신적인 봉사를 해주셨음에 감사드립니다. 근번 원고를 준비하고 집필하는데 적지않은 고민이 있었습니다. 왜냐하면 이미 지반조사운영위원회는 2월의 계속교육 및 사이버교재에서 지반조사 대부분을 교육하고 많은 내용을 다뤘기 때문입니다. 그래서 이번 특집에서는 운영위원들과의 토의를 거쳐 보다 구체적

인 내용으로 준비하고자 현재 국내에서 토목구조물별 터키나 대안 설계시 적용되는 지반조사의 기술을 소개하기로 결정했습니다. 그리고 추가적으로 현재 국내 연구기관에서 진행되는 지반조사 관련 추진내용을 제한적으로 소개하였습니다. 본 특집교재를 준비하면서 아쉬운 점은 가급적 해외의 최신 기술 및 연구동향에 대한 조사 및 분석도 심도있게 준비하고자 했으나, 미처 다루지 못한 점이 아쉽게 생각됩니다. 근간의 해외의 기술동향 및 연구사례 분석은 추후 지반조사특집이나 우리학회 학술발표회를 통하여 소개할 것을 약속드립니다.

본 특집 원고에서 기술되어 있는 내용은 해양지반 조사 분야, 터널 시공 및 유지관리 분야, 암반조사 분야, 육상 물리탐사 및 지하매설물 조사 분야 및 도로포장 및 하부지반 조사 분야로 구분하여 준비하였습니다. 이러한 내용이 최신 지반조사기술의 동향 전체를 대변하기에는 역부족이라고 판단되지만, 회원 여러분의 양해를 바라며 마지막으로 매우 바쁜 시간에도 집필원고를 준비하여 주신 운영위원 및 집필자에게 감사의 표시를 표하여 본 특집기사가 우리학회 회원 여러분에게 미력하나마 실무에 혹은 연구추진에 도움이 되기를 바랍니다.

윤길립, 한국해양연구원

2. 해양 및 해저지반 조사기술의 동향

해양에서는 해수라는 독특한 매질로 인한 정보전달과 탐사의 어려움, 그리고 10m에 1기압씩 증가

하는 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. 본 고에서는 해양지반조사기법의 측면에서 해저지구물리 탐사기술과 보링공을 이용한 지반조사기술로 구분하여 소개하고자 한다.

2.1 해저지구물리 탐사기술

2.2.1 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.

해상 탄성과 탐사는 해상에서 사용되는 반사법 탄성과 탐사의 일종으로 음파 탐사라고도 하며 주로 천부의 해저 지질조사에 사용되고 있다. 탐사선이 향해하면서 반사와 기록을 실시간으로 얻기 때문에 효율적인 측정이 가능하고 개략 탐사로부터

정밀 탐사에 이르기까지 폭 넓게 사용되고 있다. 해수면 부근에서 P파를 발생시키고 해저면 하부로부터 반사된 미약한 신호를 한 그룹의 수신기로 수신하여 왕복시간과 그 강약을 기록장치로 연속적으로 표시하는 방법이다. 탐사선을 일정한 속도로 이동시킴으로써 해저면 하부의 지질구조나 퇴적구조를 연속으로 단기간에 탐사할 수 있다. 그러나 단일 채널 탄성과 탐사는 간접적인 방법이기 때문에 지층의 역학적 특성을 직접적으로 파악할 수는 없다. 또한 음파가 투과하지 않는 단단한 지층 내의 정보는 얻어지지 않는다.

다중 채널 탄성과 탐사는 하나의 음원에서 발파한 음파를 여러 개의 수신기로 수신하여 디지털로 수록한 후 자료처리에 의하여 심부까지의 반사기록을 얻는다. 단일 채널 탄성과 탐사는 한 그룹의 수신기로 수신하여 그 신호를 디지털로 기록한다. 다중 채널 탄성과 탐사에 비해 장비가 소규모이고 소형의 탐사선에 탑재할 수 있어 적은 비용으로 조사가 가능하다.

해상 탄성과 반사법 탐사법은 일반적으로 송신기의 주파수 및 형태에 따라 분류할 수 있으며 수신기에 따른 분류는 single channel receiver 또는 multi-channel receiver 2가지 방법이 있다. single channel receiver를 이용하는 방법에는 1개의 receiver(hydrophone)를 사용하는 Chirp와 같은 장비가 있으며, 5~30개 정도의 hydrophone chain을 합성해서 single channel의 자료로 사용하는 방법들이 있다. multi-channel 방식은 여러 개의 hydrophone chain을 group으로 묶어서 한 채널씩 형성하는 후자의 방식과 동일하며 이러한 group hydrophone을 수~수십개를 사용하는 방법이다. Chirp에 비해서는 group hydrophone 방식이, group hydrophone에 비해서는 multi-channel hydrophone 방식이 신호대 잡음비나 자료처리 등의 기법을 적용할 수 있는 여지가 훨씬 많으나 채널이 많아질수록 길이가 길어져서 배 후미에 수십~수백 미터가 되는 hydrophone chain을

끌어야 한다는 단점이 있다.

우리나라의 경우 근해에는 양식장 및 부표 등의 장애물이 많아서 hydrophone chain이 너무 길면 조사하기가 어려운 경우가 많다. 탄성과 탐사의 결과는 지층을 구분하여 나타내는데, 단일 채널 해상 탄성과 탐사의 경우 탄성과 속도를 알기 어려우므로 인근의 시추공이 있으면 시추 주상도로부터 탄성과 속도를 역계산하여 해석하거나 소닉 로깅이나 다운홀 등의 자료를 이용하여 자료처리를 수행한다. 일반적으로 토목분야에 탄성과 탐사를 적용하기 위하여 간단하고 빠르게 적용할 수 있는 Chirp, 그리고 시추 자료 없이 정밀한 분석 및 해석이 가능한 다중 채널 탄성과 탐사에 대한 연구가 국내에서 많이 진행되고 있다.

2.1.2 MBES (Multi-Beam Echo Sound)

최근에 소나 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 ping(송신)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 필요하며 해저에서 반사된 빔의 forming에 복잡한 수학 연산 과정이 필요하며 배의 특성으로 인한 기계적 잡음을 제거하기 위하여 patch test를 반드시 수행하여야 한다는 단점이 있다.

단채널 음향 측심기에 비해 다중채널 음향 측심기는 수심~수백배에 달하는 자료를 획득하게 되

며, 이를 처리하는 과정과 3차원으로 영상화하는 기법들이 최근에 많이 연구되고 있다. 이러한 3차원 영상 처리 기법은 Lidar 자료나 육상 지형 자료(DTM)까지도 처리를 할 수 있으며, 전자 해도(electronic nautical chart) 및 인공위성 영상을 포함하여 항공사진 등까지 layer 개념을 도입하여 VR(Virtual Reality) 기법을 이용하는 연구가 많이 수행되고 있다. 다중채널 음향측심기(MBES)는 GPS의 오차를 1cm 이내로 유지하면서 10노트 이상의 운항속도로 조사를 할 수 있는 방법에 대해 연구가 진행되고 있다. 이에 대해 세계 유수 기관들이 관련 포럼을 만들어 GPS의 프로토콜에 대한 협의가 진행되고 있으며 이는 프랑스에서 주관하여 시행되는 갈릴레오 GPS 프로젝트와 맞물려 연구가 수행되고 있다. 또한 전자 해도에 대한 표시 기법에 대한 논의도 포럼을 통하여 활발히 논의되고 있다.

2.2 보링공을 이용한 지반조사기술

해상에서 이루어지고 있는 보링공을 이용한 지반 조사는 일반적인 보링 및 샘플링을 비롯하여 표준 관입시험, 콘관입시험, 공내재하시험, 현장배인시험 등 육상에서 활용 중인 시험기법들이 거의 대부분 적용될 수 있지만, 육상의 경우에 비해서 능률이 나 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 얕을 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 바닥면에서 직접 관입시키는 방식이다.

2.2.1 천해의 지반조사

천해의 지반조사는 일반적으로 가설작업장을 이용하여 이루어지는데, 육상에서 사용되는 모든 지반조사 기법이 활용될 수 있다. 여기서, 가설작업장은 안전, 능률, 조사성과의 품질확보에 적절하게 기능하는 것이 중요하다. 가설작업장에는 여러 가지 형식이 있고 조사목적, 수심, 해상조건, 교통 선박의 운행빈도, 조사현장에서 수배가 가능한 크레인의 규모, 게다가 경제성이 가미되어 선정되는 것이 보통이다.

해상 가설작업장의 종류와 적용수심에 대해서 분류하면 표 1과 같은데, 크게 부체작업장과 고정작업장으로 구분할 수 있다. 부체작업장은 고정작업장의 설치가 곤란한 대수심이나 정온인 해역에서 이용되는 것으로, 선박식 및 반잠수식이 있다. 선박식은 상하(pictching)나 좌우(rolling)에 흔들리기 때문에 보링이나 샘플링에 악영향을 주는 가능성이 높고, 특히 교란되지 않은 샘플링을 수반하는 조사에서는 부적절하다고 말할 수 있다.

고정작업장은 해상에서 토질조사에는 필수적인

것이다. 항만공사 시방서에 의하면 해상작업에서 작업장은 작업의 안전 및 조사 정도를 확보할 수 있는 구조의 보링작업용 작업장을 이용하는 것으로 한다로 되어 있다. 고정작업장에는 대표적인 강제작업장과 스팟트식 작업장(소형SEP)이 대표적이다. 그림 1은 SEP 바지 위에서 수행하고 있는 해양 콘관입시험을 나타낸 것이다.

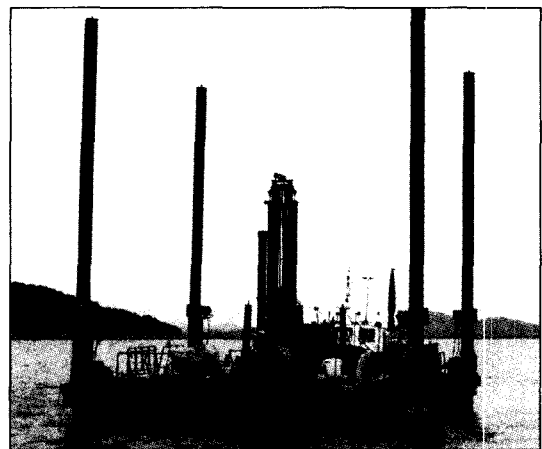


그림 1. SEP barge 위에서 수행중인 해양 콘관입시험

표 1. 해상 가설작업장의 종류와 적용수심(日本土質工學會, 1994)

| 구분 | 작업장 종류 | 구조 형식 | 적용수심(m) | 적용 크레이션 능력(tf) | |
|-----------|----------|--------|----------|----------------|------------|
| 부체 작업장 | 선박식 작업장 | 선박방식 | 100~200 | | |
| | | 대선방식 | 5~30 | | |
| 고정 작업장 | 강제 작업장 | 이동방식 | 5~30 | 5~10m(수심) 50 | |
| | | | | 10~20m(수심) 100 | |
| | | | | 20~30m(수심) 300 | |
| | 스팟트식 작업장 | SEP방식 | | 10~20 | (트럭크레인 45) |
| | | | | 10~15 | (트럭크레인 30) |
| | | | | 5~10 | (트럭크레인 25) |
| | 파이프식 작업장 | | 대형SEP방식 | 10~30 | |
| | | | 현지조립장식 | 2~5 | 10 |
| | 원통형 작업장 | | 육상조립설치방식 | 5~10 | 50~100 |
| | | | 원통단체방식 | 50~100 | |
| 원통·대선조합방식 | | | | | |
| 경동자재형공법 | | | 30~50 | 30 | |
| 부이식 작업장 | | 서스펜드공법 | 20~40 | 10 | |
| | | 슈퍼부이방식 | 20~60 | 50 | |

2.2.2 심해의 지반조사

가. 다운홀 방식(downhole type)

다운홀 방식의 해양 지반조사 시험기는 드릴에 의해 굴착된 굴착면에서부터 관입이 이루어진다. 즉, 원하는 깊이까지 선상의 동력장치나 시험기 자체의 동력원에 의해 드릴링 작업이 이루어진 후, 관입이 이루어지는 방식이다. 다운홀 방식의 시험장비는 근본적으로 드릴링에 의한 지반의 관입이 발생하기 때문에 현재 이용 중이거나 개발중인 대부분의 장비들이 지반의 교란을 최소화하는 방향으로 목표를 잡고 있다. 그림 2는 네덜란드의 Fugro사에서 현재 XP라 불리는 다운홀 방식의 콘관입 시험 장비를 보여주고 있다. 해저지반 조사에 일반적으로 사용되는 콘은 선단면적이 1cm²(표준콘의 경우 10mm²)인 소형으로서, 현재는 통상적인 조사가 가능한 깊이가 10m 이내에 머무르고 있다. 현재 개발중인 가장 발전적인 형태의 다운홀 방식의 콘관입시험 장비는 이탈리아의 SPG사와 스웨

덴의 ENVI사에 의해 공동으로 개발되고 있다. 이 시스템은 드릴링을 위한 비트 앞에 관입을 위한 콘이 부착되어 드릴링과 동시에 콘의 관입이 이루어지는 방식이다.

나. 착저형 방식(seabed type)

가설작업장을 이용한 해양조사시 수심, 조류, 파랑 등의 영향 및 해상 가설 작업장의 위험성과 비능률성을 줄이고자 하는 목적으로 조사기기를 해저면에 가라 앉혀 모선에서 원격조정에 의한 방법이 고안되었다. 해저 착저형 보링장치는 해저의 암반 코어링에 원비트런방식(코어링이 종료하면 1회마다 장치 전체를 들어올려 코어를 회수한다.)이 이용된 것이 최초이고, 그 후 항만지역에 있어서 대수심 해역의 연약지반에서 교란되지 않은 시료의 샘플링을 목적으로 해저착저형 장치의 연구개발이 활발히 이루어졌는데, 그림 3은 해저 착저형 샘플링 장치를 보여주고 있다.

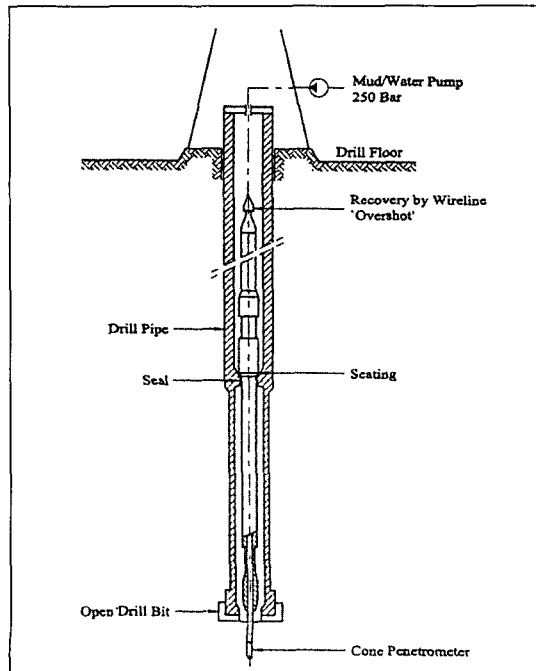


그림 2. Downhole XP system (Fugro사)

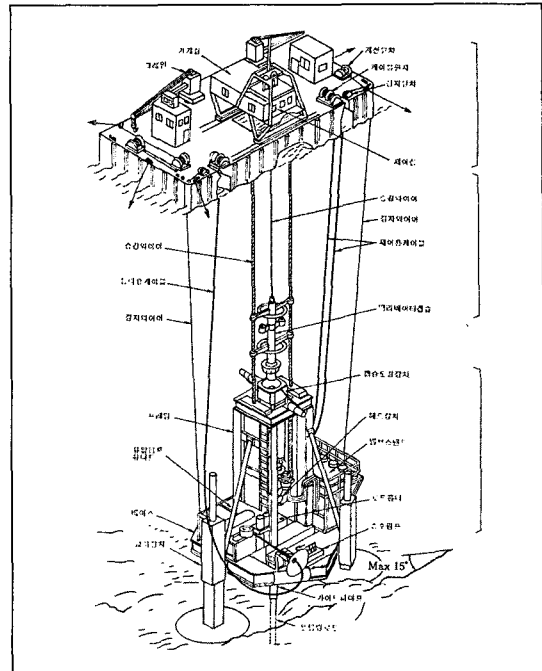


그림 3. 해저착저형 샘플링장치의 개요도

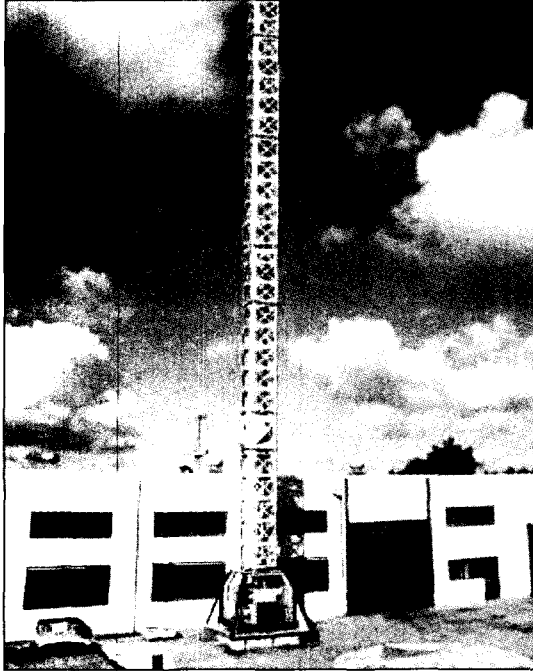


그림 4. 10ton 용량의 ROSON rigs

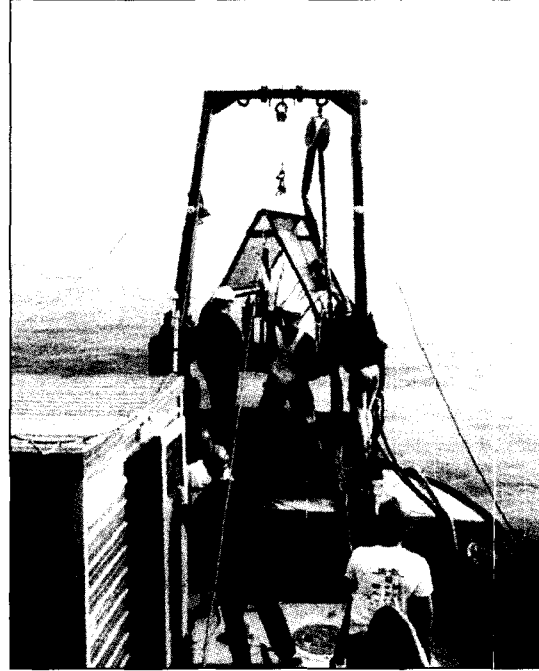


그림 5. 소형콘을 이용한 콘관입시험기 (SAGE, 미국)

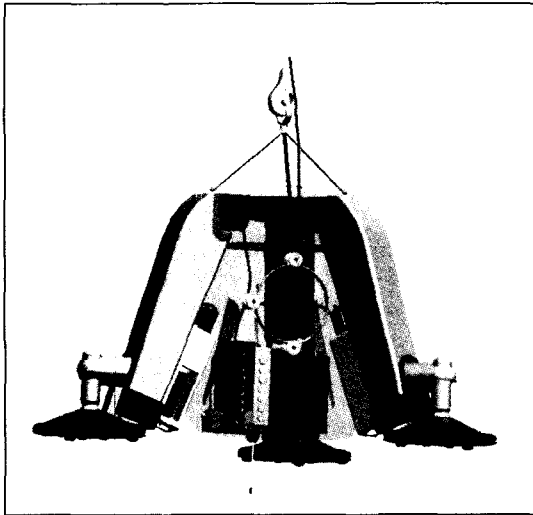


그림 6. 무인 착저형 콘관입시험기 개념도(한국해양연구원)

착저형 방식의 콘관입시험기의 경우, 콘의 단면적이 10cm^2 인 표준콘을 적용한 착저형 시험기 이외에도 최근에는 해저의 파이프라인이나 케이블 때

설의 증가로 인하여 소형의 시험장비들의 사용이 더욱 증가하는 추세로서 $1\sim 5\text{cm}^2$ 의 소형콘을 적용한 콘관입시험기가 많이 사용되고 있다. 그림 4은 네덜란드 A.P. van den Berg사에서 개발한 10톤 규모의 표준콘을 이용한 해양콘관입시험기를 나타내고, 그림 5는 미국 SAGE사에서 사용하고 있는 것으로, 코일형태의 룯드에 소형콘을 연결시킨 해양콘관입시험기이다.

한편, 한국해양연구원에서는 새로운 형태의 착저형 해양 콘관입시험기를 연구개발 중에 있다. 이 장비는 코일형태의 룯드를 사용함으로써 장비의 대형화를 피할 수 있을 뿐만 아니라 표준 크기(10cm^2)의 콘을 적용함으로써 실험결과를 기존의 해석방법에 그대로 적용하여 보다 신뢰성 있는 시험이 될 수 있을 것으로 기대된다(그림 6).

장인성, 권운순(해양연구원), 조성민(한국도로공사), 하희상(지오맥스)

3. 터널 시공중과 유지관리를 위한 지반 조사 분야

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. 본고에서는 최근 새롭게 개발된 지구물리학적 방법의 터널 막장전방 지반조사기술에 대하여 소개하였다. 이와 더불어, 유지관리시에 비교적 손쉽게 콘크리트 라이닝의 진단을 할 수 있는 새로운 기술에 대하여도 간단히 소개하였다.

3.1 TBM 탑재형 터널 막장전방 조사기술

국내 지반조건은 일본에 비해 상대적으로는 터널을 굴착하기 좋은 조건이지만, 기계화 시공법 즉, Open TBM 또는 쉘드TBM 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. 본 절에서는 NATM 터널 뿐만 아니라 특히 기계화 시공법을 이용하는 터널굴착에 사용되는 지구물리학적 조사기술에 대하여 소개하였다.

3.1.1 SSP 시스템

SSP(Sonic Soft Ground Probing)는 독일의 Herrenknecht사, Philipp Holzmann사 Zublin사와 TSP장비를 개발한 스위스 AMT사의 합작으로

개발되었다. 특히, Herrenknecht사는 TBM장비 제조 및 시공업체로 유명한 곳으로 SSP시스템을 쉘드TBM의 전면 커터 휠(cutter wheel)에 탑재하여 실적용한 바 있다.

SSP시스템은 기본적으로 반사탄성과 탐사법의 원리를 이용하고 있다(그림 7참조). 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 Seismic Prediction, 약 100~200m)에 비하여는 작으나 지반의 상태에 따라 막장전방 40m이상까지도 가능하다.

3.1.2 유사기술개발 현황

독일의 SSP시스템과 같은 방식의 TBM장착형 탐사시스템은 쉘드TBM 장비개발이 가장 활발한 일본에서도 개발되어 활용되고 있다. 일본의

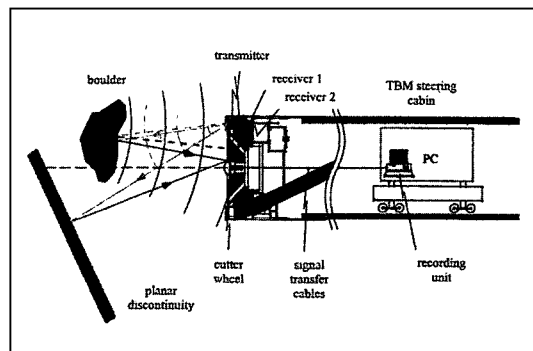


그림 7. SSP 시스템의 작동원리

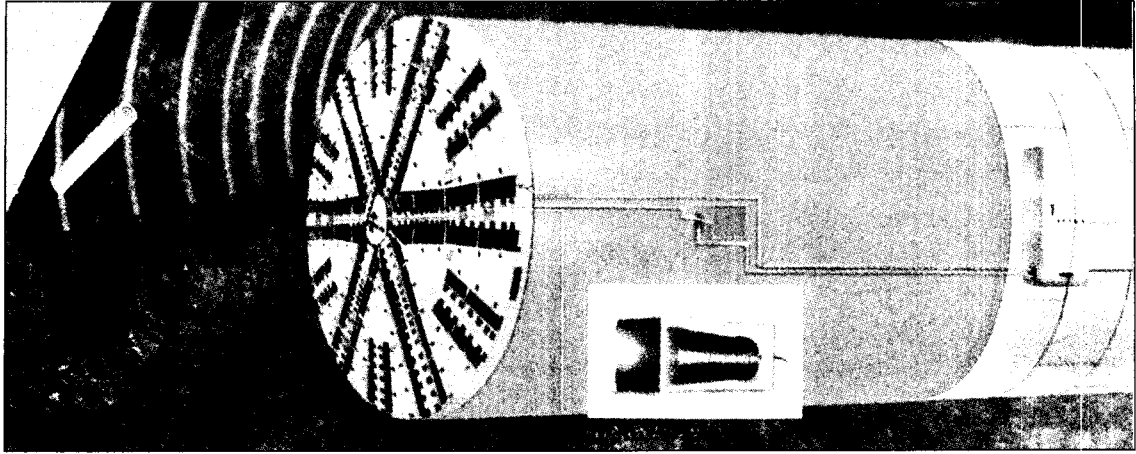
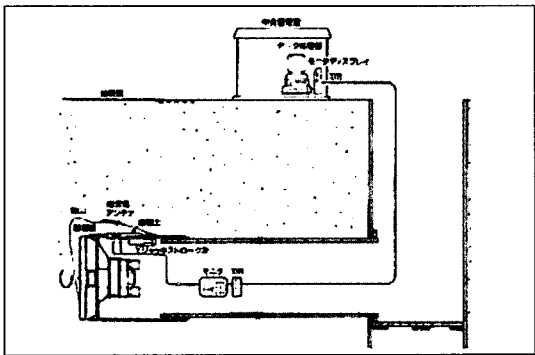
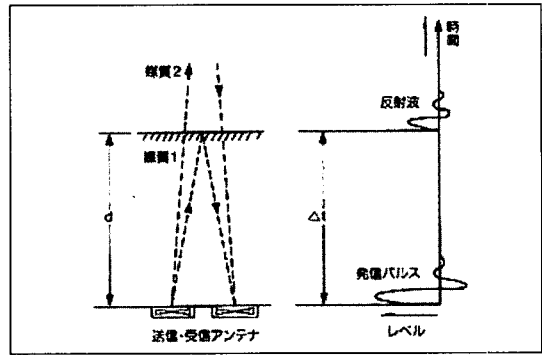


그림 8. 쉴드TBM의 음파반향 장치(Hitachi Zosen Co.)



(a) 시스템 개요



(b) 작동원리

그림 9. 미쯔이의 탐사시스템 개요와 작동원리

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 8참조).

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 9, 10참조). 이 조사방법은 외경 3.7m의 쉴드TBM 장비

를 사용하는 하수도관거 축조공사에 실제로 사용되어 좋은 성과를 거둔 바 있다.

3.2 TSP203

TSP(Tunnel Seismic Profilling)탐사는 기본적으로 지상에서 수행하는 탄성과 반사법을 터널에 응용한 것이다(그림 10참조). 대표적인 TSP탐사 장비로는 스위스 AMT(Amberg Measuring Technique)사에서 1990년에 TSP202(Tunnel Seismic Prediction)라는 이름으로 개발한 것들을 수 있으며 세계 여러 나라에서 활용되고 있다.

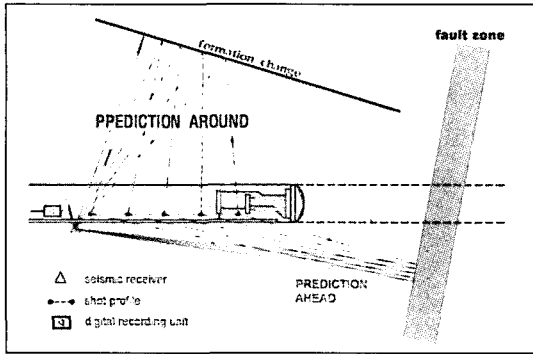


그림 10 TSP 탐사법의 개념도

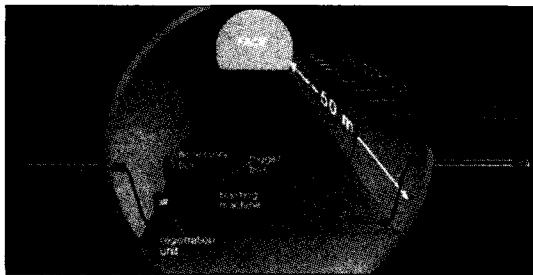


그림 11. TSP 장비 설치도

국내에서도 90년대 중반부터 여러 터널현장에 적용되어 비교적 좋은 성과를 거둔바 있다. 그러나 첫 선을 보인 이후 장비를 설치하고 측정하여 결과를 얻는데까지 많은 시간이 걸리는 문제로 인해 시공에 오히려 장애가 될 수 있다는 점, 2차원적으로 탐사결과를 보여 주기 때문에 신뢰성이 다소 떨어진다는 점, TBM과 같은 기계화 시공법을 사용하는 터널에서는 설치장소가 협소하다는 문제점 등이 드러났다. 최근 2000년에는 지속적인 개선을 거듭하여 TSP203을 개발하여 선보였으며 국내에서도 도입, 적용되고 있다.

TSP203의 장비구성이나 수진공, 발파공의 배열은 그림 11와 같으며, 이는 TSP 202와 유사한 구성이다. 그러나 기존의 TSP202는 터널축방향과 터널 연직 방향의 2성분의 반사파 데이터만을 이용해 해석을 실시하는데 비해, 새로운 TSP203는 터널축방향, 터널연직방향 및 터널직교방향의 3성분의 반사파 데이터를 이용해 막장전방의 지질 상황

을 3차원적으로 추정한다. 따라서 지금까지는 할 수 없었던 지질 불연속면(지층 경계, 단층 파쇄대 등)의 방향과 기울기를 알 수 있으며, 막장전방 지반의 탄성과 속도나 탄성계수, 포아송비 등의 물성치 추정도 가능하도록 하였다. 측정장치도 기존에 비해 컴팩트화하여 현장에의 운반이나 취급도 용이하도록 하였으며, 해석에 이용하는 소프트웨어도 조작이 매우 간편해 사용하기 쉽도록 개선하였다.

3.3 VIBSIST-20(Vibration Swept Impact Seismic Technique)

VIBSIST-20은 Swept Impact Seismic Technique(SIST)에 기초를 두어 핀란드 Terraplus 사에서 개발한 파동발생기이다. SIST는 바이브로사이즈(Vibrosize) 기술과 Mini-Sosie 기술을 조합한 기술이다. 바이브로사이즈는 vibrator로 장시간동안 지속적으로 주파수를 변화시키며 사인파(sinusoidal wave)를 발생시키는 sweep 방법의 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 발휘하여 보다 작은 impact수로 시간, 비용절감 및 잡음의 영향을 최소화하여 좋은 고해상도의 결과를 얻을 수 있도록 한 것이다.

VIBSIST는 SIST기술을 활용하여 가탐심도, 탐사대상 등에 따라 VIBSIST-20, 50, 100의 세가지 모델이 개발되어 있다. VIBSIST는 탄성과 탐사의 파동원을 발생시켜주는 장비이기 때문에 특별히 터널내에서 만의 지반조사기술이라고는 할 수 없으나, 이중에서 VIBSIST-20은 핸드드릴정도의 크기로 수작업이 가능하여 터널내에서 행하여지는 조사



그림 12. VIBSIST-20를 현장적용하는 모습

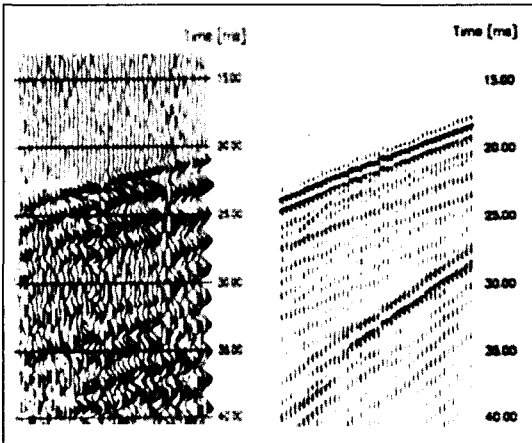


그림 13. 10kg 해머(a)와 VIBSIST-20(b)를 이용한 터널내 탐사자료비교

의 탄성과 탐사 파동원으로 사용하기에 유리하다 (그림 12 참조).

그림 13은 터널 내에서 파동원을 보편적인 음원인 10kg의 해머(a)와 VIBSIST-20으로 두 가지로 하여 탐사한 탐사기록을 비교한 것이다. 측정방법은 TSP탐사법과 유사하게 터널의 길이방향으로 1m 간격으로 파동원을 주고 터널측벽부에 3성분 가속도계를 설치하였다. 그림 13에서 보는 바와 같이 기존의 single pulse source에 의한 탐사기록에 비해 잡음이 많이 제거되고 매우 좋은 해상도의 결과를 얻을 수 있었다.

3.4 콘크리트 라이닝 진단 신기술

본절에서는 터널 유지관리에 수행되는 비파괴 검사방법중에 하나인 해머 타격음 진단의 방법의 새로운 기술을 소개하고자 한다. 타격음 진단 기술은 각종 구조의 안전진단에 사용하는 진단기술 중에 가장 경제적이고, 간편하며, 확실한 방법이라 할 수 있다. 그러나 타음진단법은 인력에 의한 작업으로 진단자에 따라서 오차가 발생할 수 있으며, 정량적인 판단이 곤란하고, 기록이 남지 않는 문제점이 있다. 따라서 타음 진단결과를 정량적이고 객관적으로 분석하고 또한, 기록·보관이 가능할 수 있는 시스템이 요구되었다.

일본에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 90년대 후반부터 소날라이저, 소닉마에스터 등 다양한 시스템을 개발하여 실무에 적용하고 있다. 국내에서도 2000년부터 건설교통부의 건설기술개발사업을 통해 유사한 시스템을 개발하여 실무적용단계에 있다.

3.4.1 소날라이저(sonalyser)

일본의 물리탐광주식회사의 타음진단시스템인 소날라이저는 전술한 바와 같이 타격음 진단 결과를 객관적으로 분석하고 기록보전이 가능하도록 하기 위한 목적으로 개발하여 상품화 하였다. 그림 14는 소날라이저 장비 구성으로써 마이크로폰, 해머, 분석소프트웨어가 탑재된 노트북으로 구성되어 있다.

소날라이저에 사용된 분석 방법은 기존의 FFT 방식이 아닌 웨이브렛변환(wavelet transform)방식을 채택하였다. 웨이브렛 변환방법은 최근에 들어서 많은 관심이 집중되고 있는 신호처리기법으로써 그 활용분야는 기계, 전자, 컴퓨터, 토목분야 등 대단히 폭넓다. 특히, 신호처리, 영상처리, 신호인식 분야에서 각광을 받고 있는 방법으로 음의 특징을 악보와 같이, 음의 높이, 강함, 길이로 분해하고 분석하는 방법이다. 일반적으로 지금까지 많이 사용되어 온 신호처리분야의 기법은 푸리에해석이 주로 적용되어 왔으나, 이는 time-domain의 신호를

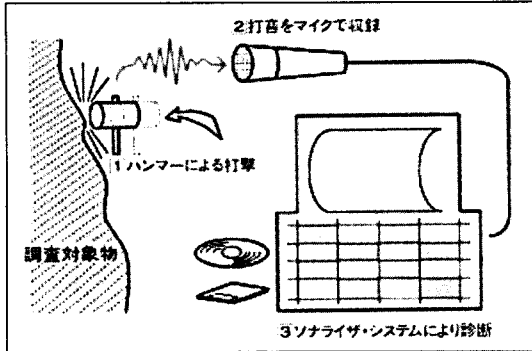


그림 14. 소나라이저 시스템의 개요 및 장비구성

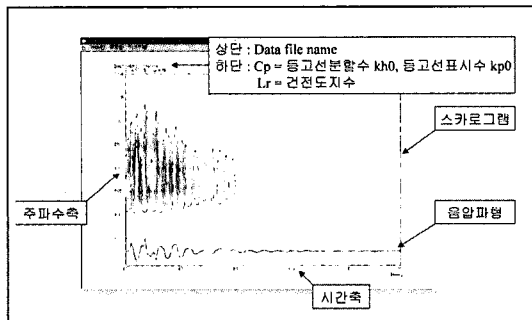


그림 15. 소나라이저를 이용한 타격실험 결과

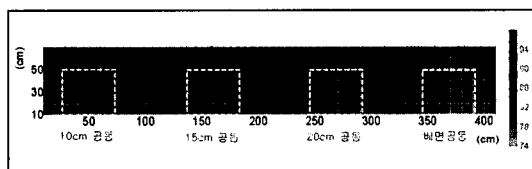


그림 16. 국내 개발 장비를 이용 진단한 콘크리트 벽체의 건전도지수 분포도

주파수 신호로 변환하여 분석을 실시하므로 시간에 따른 신호의 변화를 파악하는데 문제점이 있으나, 웨이브렛변환의 경우는 시간-주파수 해석이 가능하므로 이를 해결할 수 있다.

그림 15는 소나라이저를 이용하여 콘크리트 라이닝을 진단한 사례이다. 콘크리트 라이닝에 타격 지점이 결함있는 부분일수록 그림에서 저주파 부분의 등고선이 많고 타격음의 기록시간이 길게 나타나게 되며, 건전한 부분일수록 고주파성분이 짧게

나타나 건전도를 판단할 수 있다. 그러나 소나라이저의 타격음 분석방법에서 건전도 지수는 저주파영역이 차지하는 면적과 전체 윈도우의 크기의 비에 적절한 가중치를 두어 산출하는 것으로써 신뢰성이 매우 낮아 정량화에는 무리가 따르며 결함부를 파악에도 다소 어려움이 있는 것으로 평가되고 있다. 가탐심도는 타격에너지가 인력에 의한 것으로 비교적 작기 때문에 약 30cm 정도로 알려져 있다.

국내에서도 2000년부터 자체적으로 연구에 착수하여 소나라이저와 유사한 시스템을 최근 개발하여 실적용단계에 있다. 타격방법이나 기록방법, 그리고 웨이브렛변환을 이용하는 분석방법은 일본의 소나라이저와 같다. 그러나 국내에서 개발된 시스템의 특징은 건전도를 평가하는 방법을 달리하여 웨이브렛 변환으로 나타나는 스칼로그래프(scalogram)의 리지해석(ridge analysis)을 통하여 보다 객관적이고 정량적인 결과를 도출할 수 있도록 하였다. 그림 16은 국내 장비에 의한 타격음 진단 결과를 보여주고 있다.

3.4.2 소닉마에스터(sonic meister)

일본의 다이세이건설 주식회사는, (재)도로보전 기술센터와 공동으로, 터널콘크리트 라이닝의 건전성을 자동 진단하는 타음 진단기 소닉마에스터를 개발하였다. 이 장비는 소나라이저와 같이 타격음 진단결과를 기록, 보전이 가능하도록 하며, 객관화

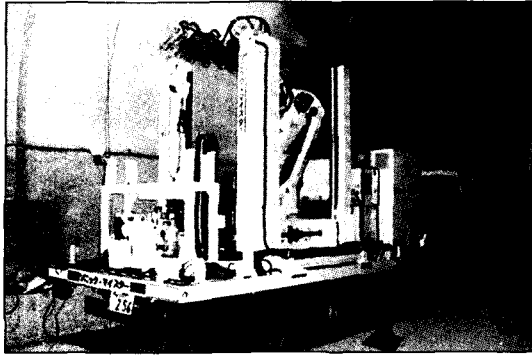


그림 17. 소닉마에스터 장비

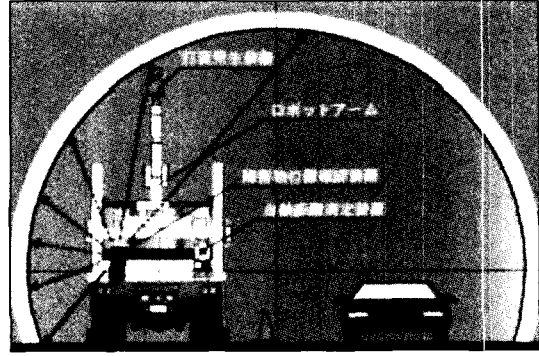


그림 18. 소닉마에스터 진단방법

하고자 하는데 목적을 두고 개발하였으며, 또한 작업환경이 좋지 않은 터널내에서 장시간동안 작업을 하는 문제점을 동시에 해결하고자 하였다.

소닉마에스터는 유압 구동의 타격 장치를 이용하여 큰 에너지로 자동타격하기 때문에 인력에 의한 것보다 심부까지 진단이 가능한 것으로 소개하고 있다. 또한 그림 17과 그림 18에서 보는 바와 같이 타음기록장치 5개와, 산업용 로봇의 팔을 선단에 장착하여 터널 벽면 원주 방향을 따라 이동시키면서 진단할 수 있다. 진단위치는 레이저를 이용한 측량장치에 의해 자동적으로 계측된다. 한 스팬(span)의 진단이 종료되면 전체를 다음 스팬 위치에 이동하고 동일한 작업을 반복하여 터널 콘크리트 라이닝 전면을 진단할 수 있다.

진단 결과는 건전부, 결함부의 판정 결과를 진단 위치측량 정보와 조합하여 도표상에 출력시킨다. 진단속도는 30cm 격자간격으로의 진단의 경우, 시간당 400㎡(도로 한쪽 차선에서 약 50m/시간)로 고속 진단이 가능하다.

이성원(한국건설기술연구원)

참고문헌

2. 해양 및 해저지반 조사기술의 동향

1. 이호영, 구남형, 박근필, 유동근, 강동효, 김영건, 서갑

석, 황규덕, 김종천, 김지수, 2003, 고해상 다중채널 탄성파 탐사 자료취득 변수에 따른 천부 해저 지층 영상의 해상도: 물리탐사 제 6권 제 2호

2. 한국해양연구원(1999), "지구환경 변화사와 해저자원", 해양과학총서 5, pp. 120~145

3. 日本土質工學會 (1994), "海の構造物と基礎", 土質工學ライブラリー-39, 320p

4. 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. 9pp

5. Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell, J. J. M.(1996), Cone penetration testing in geotechnical practice, Blackie Academic & Professional, 312p

6. Lunne, T.(2001), "In situ tesing in offshore geotechnical investigation," Proceedings of International Conference on Insitu Measurement of Soil Properties and Case Histories, Bal', pp. 61-81

7. Monahan,I.L. and Monahan, D., 2001,The quality control cycle in the age of electronic chart production, contracted work and ISO certification : United States Hydrographic Conference Proceeding, CDROM. 18PP

8. Tumay, M.T. and Kurup, P.U.(2001), "Develop-

- ment of a continuous intrusion miniature cone penetration test system for subsurface explorations," Soils and Foundations, Vol. 41, No. 6, pp. 129-138
9. Wroth, C. P. (1984), "The interpretation of the in situ soil test," 24th Rankine Lecture, Geotechnique, 34(4), pp. 449-489
- 3. 터널 시공중과 유지관리를 위한 지반 조사 분야**
10. 고려대학교, 한국건설기술연구원(2002), 음향분석기법을 이용한 지하구조물 비파괴조사기술개발, 건설교통부 산학연공동연구개발사업 최종보고서.
11. 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
12. http://www.amberg.ch/amberg/amt/sites/esite_geo.htm
13. http://www.herrenknecht.de/en/3_tunnelvortrieb/html/35_forschung.html
14. <http://www.hitachizosen.co.jp/ss/kenki/kenki/catalog/cat-shield1.htm#シールド総合カタログ>
15. http://www.ltmtunneling.com/business_tspset.html
16. <http://www.n-buturi.co.jp/business/environment/sonalyser/index.htm>
17. <http://www.smcon.co.jp/technology/engineering/shieldtunnel/jiyamasousa.html>
18. <http://www.taisei.co.jp/release/2001/nov/nov04.html>

회비 납부 안내(지로 및 온라인)

학회 사무국에서는 연중 수시로 학회비를 수납하고 있사오니, 회원여러분의 적극적인 협조를 부탁드립니다. 문의사항이 있으면 사무국으로 연락하여 주시기 바랍니다.

• **은행 무통장(타행) 입금**

국민은행 계좌번호 : 534637-95-100979 예금주 : 한국지반공학회

• **지로용지 납부**

2003년 5월 20일부터 금융결제원에 승인을 받아 한국지반공학회 회비도 지로용지 납부를 할 수 있게 되었습니다.

• **지로용지 기입시 유의점**

- 지로 장표상의 금액과 납부자 관련정보(회원번호, 성명, 납입금 종류 등)는 흑색볼펜으로 글씨체는 정자로 표기해 주시기 바랍니다.

- 납부금액란에는 정확한 위치에 정자로 아라비아 숫자만 기입합니다.

납부금액 앞뒤에 특정기호(W, -, * 등)를 표시 할 수 없습니다.)

* 지로용지를 못 받으신 분은 지반공학회 사무국(02-3474-4428/양윤희)으로 전화주세요