

일본에서의 토목·건설 지반조사를 위한 물리탐사 활용 현황

박삼규 (농림수산성 삼립총합연구소), 김희준 (부경대학교 탐사공학과)

The State-of-the-Art of Geophysical Exploration Technology applied to Site Characterization in Civil Engineering and Construction in Japan

Park, Sam Gyu¹⁾and Kim, Hee Joon²⁾

¹⁾Forestry and Forest Products Research Institute, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Japan ; ²⁾Department of Exploration Engineering, Pukyung National University

요약 : 일본에서는 오래 전부터 물리탐사 기술을 토목·건설분야에 널리 활용해왔다. 특히 굴절법 탄성파탐사는 지반조사법으로 이미 확립되었다고 해도 과언이 아닐 정도로 산악 터널, 댐, 산사태 등의 조사에 주로 사용되었다. 그러나 사회의 가치관의 변화와 환경문제가 대두되면서 사용되는 물리탐사기술 및 그 적용범위가 많이 다양해졌다. 그리고 컴퓨터를 비롯한 디지털기술의 발달에 힘입어 측정기술과 해석기술이 발전함에 따라 짧은 시간에 대량의 데이터를 측정할 수 있으며, 객관성과 신뢰성이 높은 해석결과를 얻을 수 있게 되었다. 또한 지반의 가시화기술로 탐사결과를 보다 알기 쉽게 영상화할 수 있게 되었다. 최근에는 지반개량 효과의 판정, 터널 막장의 전방탐사, 지하수의 거동, 오염 및 정화 과정의 모니터링 등에 관한 물리탐사기술이 눈부시게 발전하고 있으며, 자연재해 방지를 위한 지반조사에도 널리 사용되고 있다. 현재는 3차원의 물리탐사기술이 완성단계에 이르러 이의 토목·건설분야에 대한 활용이 눈앞에 와 있다.

주요어 : 물리탐사, 지반조사, 토목·건설, 일본

Abstract : In Japan, geophysical exploration methods have been widely applied to civil engineering and construction fields for a long time. In particular, seismic refraction has long played a significant role in geotechnical site investigations for tunnels, dams and landslides. However, our growing interest on the social and natural environment makes the methods available and its application fields diversify. Digital technologies such as personal computer have revolutionized our ability to acquire large volumes of data rapidly, and to produce more reliable results for subsurface image. Also, color graphics easily visualizes survey results in a more understandable manner. These days geophysical methods are essential to assessing grouting effects, predicting the front of tunnel cutting face, monitoring the movement, pollution and purification process of groundwater. Now three-dimensional exploration techniques have developed for the site characterization in civil engineering and construction needs.

Keywords : geophysical exploration, ground survey, civil engineering and construction, Japan

서 론

일본은 새로운 조산대에 위치하고, 좁고 긴 국토의 중앙을 표고 2000~3000m의 산맥이 달리고 있기 때문에 전 국토의 67%가 급준한 산악지형으로 형성되어 있다. 또 화산 및 지진 활동에 의한 지각변동으로 복잡한 지질구조와 화산쇄설성 퇴적물과 제3기층의 지역이 국토의 약40%를 차지하고 있다. 이러한 지형 및 지질조건으로 인하여 단층 파쇄대 및 변질대가 많이 분포하고 있다.

한편, 토목·건설 시공현장에 있어서는 단층 파쇄대 및 변질대와 같은 지질구조와 연약지반의 캐다란 장애물이 되고 있으며, 특히 단층 파쇄대를 따라 대량으로 유출되는 지하수는 시공기간을 지연시킬 뿐만 아니라 이로 인하여 안전성의 위협을 받아 막대한 경제적 손실을 가져오게 된다. 그러므로 사전 지반조사 단계에서 복잡한 지질구조와 지하수의 분포상태 등을 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다.

일본에서는 종래의 사전 지반조사로서 주로 지질답사, 시추조사 및 콜절법 탄성파탐사가 널리 사용되어 왔다. 그러나, 암반분류, 복잡한 지질구조 및 지하수의 분포상태 등이 충분히 파악되지 않는 경우가 많았다. 특히 연암의 경우는 암반의 상태에 따라 속도차이가 크지 않아 경암에 비해 암반평가가 쉽지 않고, 또 고속도 층의 하부에 저속도 층이 존재할 경우 저속도 층에 대한 해석상의 한계를 가지고 있는 결점도 있다. 그래서, 최근 들어 이러한 문제점을 해결하기 위하여 전자공학의 발달과 정보처리 기술에 힘입어 2차원 및 3차원의 물리탐사 기술이 고도화되어 실제의 지반조사에 활용되고 있다.

본 논문에서는 일본에 있어서의 토목·건설 지반조사를 위한 물리탐사의 활용 현황을 서술하고, 터널을 비롯한 댐, 산사태 등의 지반조사와 암반 및 지반구조물의 안정성 평가에 있어서 각종 물리탐사 기술의 적용사례를 소개한다.

물리탐사의 활용 현황

일본은 토목·건설분야에 있어서 옛날부터 물리탐사 기술을 지반조사에 활용해 왔다. 주로 지하의 구조조사를 목적으로 발전해 온 물리탐사는 차츰 지반물성을 파악하는데도 적용되어, 최근에는 방재·환경분야 등에 대해서도 일부의 탐사법이 적용되고 있고, 지반의 물성과 상태의 시간적 변화의 추적에도 그 유효성이 인정되고 있다. 또 사회의 필요성이 다방면으로 확산됨에 따라 물리탐사의 종류도 각 분야에 있어서 각각의 목적에 따라 다양한 종류로 발전되고 있으며, 이것은 현장의 측정기술의 향상과 해석기법의 고도화에 힘입어, 탐사결과의 신뢰성이 높게 평가받기 때문이라고 생각된다.

Fig. 1은 1948년부터 1991년까지의 일본에 있어서의 물리탐사의 활용건수를 나타내고 있다. 이 그림에 의하면, 1950년부터 물리탐사의 활용건수가 급격히 증가를 보이고 있으며, 1965년부터 토목·건축분야에서의 활용건수가 비약적으로 늘고 있다. 이 중에서 토목·건축분야에서의 실시건수를 보면, 터널, 댐 및 도로가 주체를 이루고 있고, 그 외로서 산사태 및 택지조성 공사가 약10%를 차지하고 있다. 건축분야에서는 물리탐사의 실시 건수가 많지 않지만, 1975년부터 진동·소음의 분야에 초점을 맞추어 상시미동 측정과 건축시의 진동 및 소음 측정이 증가하고 있고 이 분야는 지진 방재면에서 볼 때 앞으로도 증가 할 추세이다.

최근의 물리탐사의 특징으로는 디지털기술의 발달이 물리탐사 기술의 발전과 밀접한 관계를 맺고 있고, 현장에서의 측정뿐만 아니라 해석에 있어서도 최근에는 개인용 컴퓨터에서 해석이 가능하게 되었다. 또 1980년 초부터 발달해 온 지오토모그래피와 종래의 2차원 탐사를 3차원으로 확장시키고 있으며, 탐사 결과를 칼라로 알기 쉽게 시각화하는 기법이 박차를 가하고 있다.

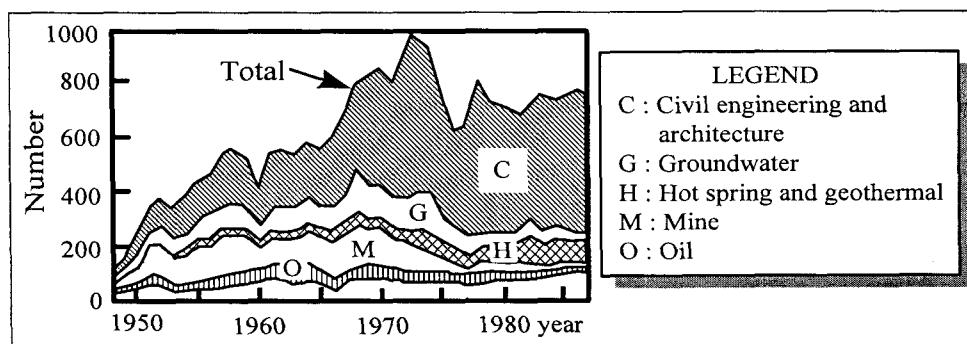


Fig. 1. Application situation of geophysical exploration in Japan (Fujimura et al., 1997).

공사 단계별 물리탐사의 적용 실태

일본의 지반공학회의 물리탐사 기술의 지반공학에의 활용에 관한 연구위원회가 1997년에 토목·건설 분야에 있어서 물리탐사의 활용 현황을 조사하기 위하여 각종 기관 및 개인 등에 설문지를 배포하여 약 750건의 회답을 분석한 결과 Fig. 2에 표시한 바와 같다 (일본 지반공학회, 1997). 이것에 의하면, 굴절법 탄성파탐사, PS검층 및 전기탐사 등의 종래의 탐사기법이 많지만, 2차원 비저항탐사, 지오토모그래피 등의 비교적 새로운 탐사기법도 많이 활용되고 있다. 그 외의 30% 안에는 장래의 탐사기술로서 CSAMT법 (Controlled Source Audio-frequency Magnetotellurics), HSP법 (Horizontal Seismic Profiling) 및 TSP법 (Tunnel Seismic Profiling), 3차원 비저항 토모그래피 등의 활용성이 포함되어 있다.

토목·건설의 대상 구조물에 있어서의 물리탐사 활용 현황을 Table 1에 나타내고 있다. 산악터널, 댐 및 지하공간 등의 구조물에는 굴절법 탄성파탐사, 2차원 비저항탐사 및 토모그래피가 많이 활용되고 있고, 교량, 굴착 및 연약지반 등에는 PS검층과 전기검층 등이 많이 활용되고 있다. 또 환경오염 등에 전기탐사가 활용되고 있으며, 하천이나 Shield에 지표 레이다탐사가 활용되고 있다.

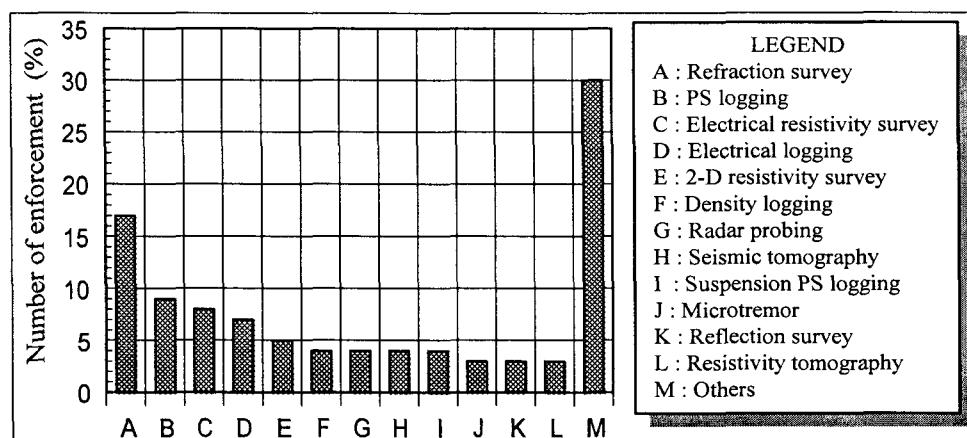


Fig. 2. Enforcement number of geophysical exploration methods in field of civil engineering and construction (Kuwahara et al., 1997).

Table 1. Using frequency of geophysical exploration methods in civil engineering projects (Kuwahara et al., 1997)

대상 구조물	제 1 위	제 2 위	제 3 위
산악 터널	굴절법 탄성파탐사	2차원 비저항탐사	PS검층
댐	굴절법 탄성파탐사	탄성파 토모그래피	전기탐사
지하공간	탄성파 토모그래피	굴절법 탄성파탐사	비저항 토모그래피
교량	PS검층	굴절법 탄성파탐사	상시미동 측정
항만·해양	음파탐사	자기탐사	Suspension PS검층
굴착	PS검층	전기검층	굴절법 탄성파탐사
Shield	지표 레이다탐사	PS검층	전기검층
환경·오염	전기탐사	전기검층	2차원 비저항탐사
하천	지표 레이다탐사	전기탐사	
사방	굴절법 탄성파탐사	전기탐사	
토구조물	굴절법 탄성파탐사	전기탐사	전기검층
연약지반	PS검층	전기검층	전기탐사

한편, 토목·건설의 계획, 조사·설계 및 시공단계에 있어서의 조사 목적별 물리탐사 활용 현황을 Table 2에 나타낸다. 각 단계의 조사 목적별로 보면, 계획단계에 있어서 지질구조 및 암반분류에는 굴절법 탄성파탐사가 많이 활용되고 있고, 지하수 특성에 있어서는 전기탐사가 많이 활용되고 있고, 최근에는 2차원 비저항탐사와 탄성파 토모그래피도 활용되고 있다. 조사·설계 단계에 있어서도 계획단계와 같이 지질구조 및 암반분류 관련에는 굴절법 탄성파탐사가, 지하수 관련에는 전기탐사가 많이 활용되고 있다. 정·동적 지반특성에는 PS검층과 밀도 검층이 활용되고 있으며, 공동 및 매설물 탐사에는 지표 레이다탐사가 활용되고 있다. 시공단계에 있어서는 특히 막장 전방탐사에 HSP법이 활용되고 있고, 지반개량 효과에 비저항 토모그래피 등이 활용되고 있다. 그러나, 사회 환경과 가치관의 변화에 따라 앞으로 중요시되고 있는 시공관리, 유지관리 및 환경분야에서는 활용되는 탐사기법이 적다. 또 최근에 발달된 2차원 비저항탐사와 지오토모그래피 등은 탐사정도가 높음에도 불구하고 활용빈도가 낮은 것은 조사비용이 기존의 탐사법에 비해 많이 들기 때문에 현장에서의 활용 보급이 뒤떨어지는 것으로 분석된다.

Table 2. Using frequency of geophysical exploration methods in civil engineering and construction steps (Kuwahara et al., 1997)

단계	목적	제 1 위	제 2 위	제 3 위
계획	지질구조	굴절법 탄성파탐사	전기탐사	PS검층
	지하수 특성	전기탐사	전기검층	2차원 비저항탐사
	암반분류	굴절법 탄성파탐사	PS검층	탄성파 토모그래피
	기설 구조물	지표 레이다탐사		
조사·설계	지질구조	굴절법 탄성파탐사	전기탐사	PS검층
	수리수문 특성	전기탐사	전기검층	2차원 비저항탐사
	단층 파쇄대	굴절법 탄성파탐사	방사능탐사	2차원 비저항탐사
	균열 특성	전기검층	PS검층	굴절법 탄성파탐사
	수맥	전기검층	전기탐사	온도검층
	정적 특성	밀도검층	PS검층	Suspension PS검층
	동적 특성	PS검층	상미동측정	Suspension PS검층
	암반분류	굴절법 탄성파탐사	PS검층	
	공동조사	지표 레이다탐사	미중력탐사	
	매설물 검출	지표 레이다탐사	자기탐사	
시공	암반분류	굴절법 탄성파탐사		
	지하수 거동	전기검층		
	정·동적 특성	PS검층	TSP법	
	막장전방탐사	HSP법	전기탐사	
	공동분포	지표 레이다탐사	비저항 토모그래피	
	지반개량 효과	전기탐사	지표 레이다탐사	밀도검층
	매설물 검출	자기탐사		
유지관리	변형 거동			
	지하수 거동			
	오염물질 거동			
	장기적 노화현상	지표 레이다탐사		
	구조물 검사	지표 레이다탐사	미중력탐사	

토목·건설분야에 활용되는 물리탐사의 분류

현재 일본에서 토목·건설분야에 많이 활용되고 있는 물리탐사를 수법 별로 정리하면 Table 3과 같다. 아래에서 각 물리탐사 수법의 적용 실태를 간단히 서술한다.

Table 3. Major applied geophysical exploration methods in field of civil engineering and construction (Fujimura et al., 1997)

탐사장소	탐사수법	탐사결과	이 용 범 위	적 용 분 야	
공중에서 의 탐사	원격탐사	스펙트럼 화상	• 고유의 디지털 데이터로부터 지질구조 등을 파악함.	산사태 지진	
	공중전자 탐사법	비저항	• 겉보기비저항의 차이를 이용해서 지열, 지하수 분포를 파악함	지하수, 지열 산사태	
해상에서 의 탐사	반사법 탄성파탐사	속도총단면	• 해저의 지질구조 조사 • 신기 퇴적물의 퇴적상황과 상태변화를 조사함	교량, 해저터널 해양구조물 발전소	
지표에서 의 탐사	굴절법 탄성파탐사	탄성파속도	• 지반의 속도총 구조로부터 터널의 암반분류와 굴착성 등을 파악함 • 저속도대의 분포로부터 단층 및 파쇄대를 파악함	산악 터널, 댐 발전소, 절토사면 대규모 암반공동 산사태	
	천총반사법 탄성파탐사	탄성파속도	• 천부의 지질구조 탐사에 많이 이용됨 • 최근에는 내진 설계에 직접 이용 할 수 있는 S파 탐사도 이용됨	댐 산악 터널 대규모 암반공동 도시토목	
	2차원 비저항탐사	비저항	• 단층, 지하수맥을 검출함 • 최근에는 암반분류의 수법도 연구하고 있음	산악 터널, 댐, 발전소, 산사태 대규모 암반공동	
	전자탐사법	비저항	• 10m~1km의 탐사 심도에 적용 가능함 • 겉보기비저항의 차이에 의해 단층 및 지하수의 분포를 파악함	댐 산악 터널 대규모 암반 공동	
터널 및 시추공을 이용한 탐사	HSP법 TSP법	탄성파속도	• 탄성파를 사용하여 터널 막장 전방의 암반내부 구조를 파악하여 굴착에 따른 영향을 평가하여 시공관리에 반영 시킴	산악 터널	
	PS검총 (Downhole method)	P파 속도 S파 속도	• 지층구분 및 암반분류의 지표로 이용됨 • 암석시험 결과를 이용한 균열계수로부터 지반의 역학적 상수를 산출함	절토사면, 교량 산악 터널, 댐 대규모 암반공동 항만, 해양구조물	
	BIP	화상	• 암반의 균열 상태를 파악함	대규모 암반공동	
	지 오 토 모 그 래 피	탄성파	P파 속도	• 공간의 탄성파속도 분포도를 구함 • 지질구조, 암반분류 및 지반개량 효과 판정에 이용됨	댐, 산악 터널 대규모 암반공동 지반개량
		비저항	비저항	• 공간의 비저항 분포도를 구함 • 단층 및 파쇄대의 검출, 지반개량 효과의 판정, 지하수 변화 등의 모니터링에 이용됨	절토사면, 댐 산악 터널 대규모 암반공동 지반개량

공중에서의 탐사

공중에서의 탐사는 항공기와 인공 위성을 이용하고 있기 때문에 광범위하게 탐사가 가능하고, 토목분야에 있어서 원격탐사는 주로 지표 지질조사와 GPS (Global Positioning system)를 이용한 산사태의 동태관측, SAR (Synthetic Aperture Radar)에 의한 광범위의 지형변화 등의 방재조사로서 많이 실시되고 있다. 공중전자 탐사법 (Airborne Electromagnetic Method)은 소형 비행기나 헬리콥터에 전자법의 측정기를 탑재하여 비교적 천부의 비저항을 신속하게 광범위하게 mapping 하는 방법이다. 1980년까지는 주로 자원 탐사에 많이 사용되어 왔지만, 최근에는 지하수 및 지열 조사 뿐만 아니라 토목분야의 지표 지질조사에도 많이 응용되고 있다.

해상에서의 탐사

해상에서의 탐사로서 가장 많이 사용되고 있는 반사법 탄성파탐사는 원래 석유자원 탐사를 주 목적으로 발전되어 왔지만, 최근 해안부나 매립지를 이용한 발전소, 장대 대교 및 인공섬 등 해상에서의 대규모 토목 구조물이 건설됨에 따라 입지선정 및 해저의 지질구조를 파악하는데 많이 이용되고 있다.

지표에서의 탐사

지표에서의 탐사는 토목·건설 분야에서 가장 많이 이용하고 있는 탐사기술로서 아래의 4종류를 들 수 있다.

- 1) 굴절법 탄성파탐사
- 2) 천층반사법 탄성파탐사
- 3) 2차원 비저항탐사
- 4) 전자탐사법 (주로 CSAMT법)

굴절법 탄성파탐사는 인공적으로 발생시킨 지진파의 초동주시로부터 지하의 속도구조를 구하는 방법으로 토목분야에서 가장 많은 실적이 축적되어 있다. 이 탐사의 특징으로 단층 및 파쇄대를 검출하기 쉽고, 탄성파속도로부터 암반분류가 용이하다. 그러나, 고속도 층의 하부에 저속도 층이 존재할 경우 저속도 층의 해석이 어려운 단점이 있어, 토목분야의 적용에 있어서는 그 해석정도를 충분히 고려할 필요가 있다.

천층반사법 탄성파탐사는 원래 석유탐사 분야에서 지하심부 탐사에 이용되어 왔던 반사법의 기술을 지하 200~300m이상의 상세한 지질구조 탐사에 이용한 것으로, 최근에는 P파뿐만 아니라 S파를 사용한 탐사도 증가하고 있다. 이 탐사법은 주로 연약지반의 구조탐사나 도시부에서의 단층 조사, 공동탐사에 활용되고 있고, 특히 1995년에 발생한 한신 대지진(阪神 大地震)을 계기로 그 수요가 급증하고 있다.

2차원 비저항탐사는 종래의 수평 및 수직 전기탐사를 동시에 실시할 수 있는 측정기술이 발달되어 대량의 데이터를 손쉽게 얻을 수 있고, 역해석기술이 도입되어 지반의 비저항 분포를 구할 수 있다. 다른 탐사법에 비하여 단층과 지하수맥의 검출에 우수하며, 최근에는 굴절법 탄성파탐사와 동시에 실시되는 경우가 많다. 또 비저항치로부터 암반분류 등의 지표로 활용하기 위해서 많은 연구가 이루어지고 있다.

전자탐사법은 전기탐사와 같이 대지의 비저항을 조사하여 지하구조를 추정하는 기법으로 자연 혹은 인공의 전자장을 이용해서 비저항분포의 영향을 측정한다. 여기서는 CSAMT법에 대해서 언급한다. CSAMT법은 인공전류를 대지에 흘러 보냄으로서 형성되는 전자장을 신호원으로 하여 대

지의 곁보기비저항을 측정하여, 지하의 비저항구조를 추정하는 기법이다. 토목분야에서는 아직까지 이용빈도가 적지만, 앞으로는 활용 건수가 증가 할 것으로 생각된다.

터널 및 시추공을 이용한 탐사

터널을 이용한 HSP법 및 TSP법은 시공중의 터널 쟁내에서 실시하는 조사법으로 탄성파를 이용하여 막장 전방의 암반구조를 영상화하여, 굴착의 영향을 평가하여 시공과정에 이를 반영시키는 탐사기술이다. HSP법은 Sattel, et al. (1992)이 제안한 TSP법에 비해 대량의 데이터를 얻을 수 있고, 해석영역도 막장의 전방뿐만 아니라 측방영역 또는 임의의 방향으로도 탐사가 가능하다. TBM (Tunnel Boring Machine) 및 NATM (New Austrian Tunneling Method) 공법의 산악 터널에 주로 사용되고 있다.

시추공을 이용한 탐사수법은 여러 종류가 있지만, 여기서는 대표적인 것으로서 BIP (Borehole Image Processing), PS검출과 지오토모그래피를 서술한다. BIP는 시추공을 이용하여 공벽의 가시화에 의한 지반상태를 직접적으로 파악할 뿐만 아니라 코어 관찰에서 얻을 수 없는 여러 가지 정보를 제공받을 수 있다. 종래에는 텔레비전 카메라를 공내에 삽입하여 카메라로부터 촬영한 화상을 관찰함과 동시에 비디오에 녹화시키는 방식이지만, 최근에는 BIP와 같이 공내 주위를 전개 화상으로서 촬영하는 방식이 도입되어, 촬영한 화상은 디지털처리에 의해 시추공벽의 평면상의 전개 화상을 얻을 수 있다. 주로 단층의 방향 등 지질구조의 판정에 활용되어 왔지만, 최근에는 대규모 지하 공동주변의 이완영역 관측, 암반개량 효과 판정 등에 활용되고 있다.

PS검출은 지표에 설치한 진원으로부터 P파 및 S파를 발생시켜, 공벽에 압착되어 있는 수신기로 관측한 파동기록으로부터 주시곡선을 작성해 구간속도를 구한다. 최근에는 내진 설계상 깊은 심도에 있어서의 P파 및 S파의 속도, 특히 S파 속도의 필요성이 요구되고 있다.

지오토모그래피는 지표뿐만 아니라 시추공이나 조사갱 등을 이용하여 입체적으로 다수의 송신점과 수신점을 설치하여 탄성파 및 전기, 전자파를 이용하여 대량의 데이터를 계측하여, 컴퓨터를 사용해서 역해석기술로 지하의 물리상수 및 구조를 구하는 방법이다. 일반적으로 탄성파와 비저항을 이용한 것이 많고, 주로 댐 사이드에 많이 활용하고 있다.

새로운 물리탐사 기술의 적용 사례

최근에 컴퓨터와 디지털기술이 발달됨에 따라 물리탐사도 계측 및 해석 기술이 발전하고 있다. 또 사회의 가치관의 변화와 환경문제가 대두되면서, 탐사의 목적도 다양화되고 있다. 여기서는 최근의 물리탐사 기술을 산악 터널, 댐 사이드, 산사태, 암반 사면 및 지반개량 효과 판정 등에 활용한 사례를 소개한다.

산악 터널 조사

종래의 산악 터널 시공을 위한 사전 지반조사로서 지표지질 답사, 시추조사 및 굴절법 탄성파 탐사 등이 실시되어 왔다. 그러나, 복잡한 지질구조, 지하수의 분포 특성 및 암반분류에 많은 문제점을 가지고 있어 이를 해결하기 위하여 2차원 비저항탐사가 기존의 조사기법과 함께 많이 실시되고 있다.

Fig. 3은 터널을 가로지르는 방향으로 2차원 비저항탐사를 실시한 결과이다. 조사지는 중생대 백악기의 화강암이 분포하고, 단층 파쇄대 및 변질대가 많이 분포되어 있다. 특히 항공사진과 지표 지질답사의 결과로부터 터널 방향으로 4개의 단층이 거의 평행하게 발달되어 있어, 터널 굴착

중에 대량의 지하수가 용출 될 것으로 추정되었고, 이 때문에 설계와 시공에 상당한 어려움이 따를 것으로 예상되었다. 그래서 사전에 단층 파쇄대 및 변질대를 파악하기 위하여 2차원 비저항탐사를 실시했다. 탐사 결과를 보면, 지표 지질답사로부터 파악한 4개의 단층 및 파쇄대가 분포하는 곳에 비저항이 상대적으로 낮게 분포하고 있으며, 변질정도가 심해 점토분이 많이 함유할 것으로 추정되는 곳에 $200\Omega\text{m}$ 이하의 낮은 비저항이 분포하고 있다. 이러한 결과로부터 2차원 비저항탐사가 단층 파쇄대 및 변질대를 파악하는데 유효하다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 터널의 길이 방향으로 약 2400m에 걸쳐 실시한 2차원 비저항탐사 및 굴절법 탄성파탐사의 결과를 나타낸다. 2차원 비저항탐사 결과를 보면, 주위에 비해 고비저항과 저비저항이 맥상, 렌즈상 등으로 분포하고 있고, 이러한 분포는 풍화 및 변질정도, 지하수의 분포 등의 영향에 의한 것으로 생각된다. 저비저항대는 변질에 의한 점토의 함유량이 많고, 단층 파쇄대 및 변질대의 존재를 시준하고 있다. Park and Matsui (1998)에 의하면, 암반의 비저항은 공극율, 지하수의 비저항, 포화도 및 점토함유량에 의해 크게 영향을 받지만, 지하수로 포화되어 있는 암반의 비저항은 공극율과 점토의 함유량에 의해서 거의 좌우된다는 사실이 Fig. 4의 해석을 뒷받침하고 있다.

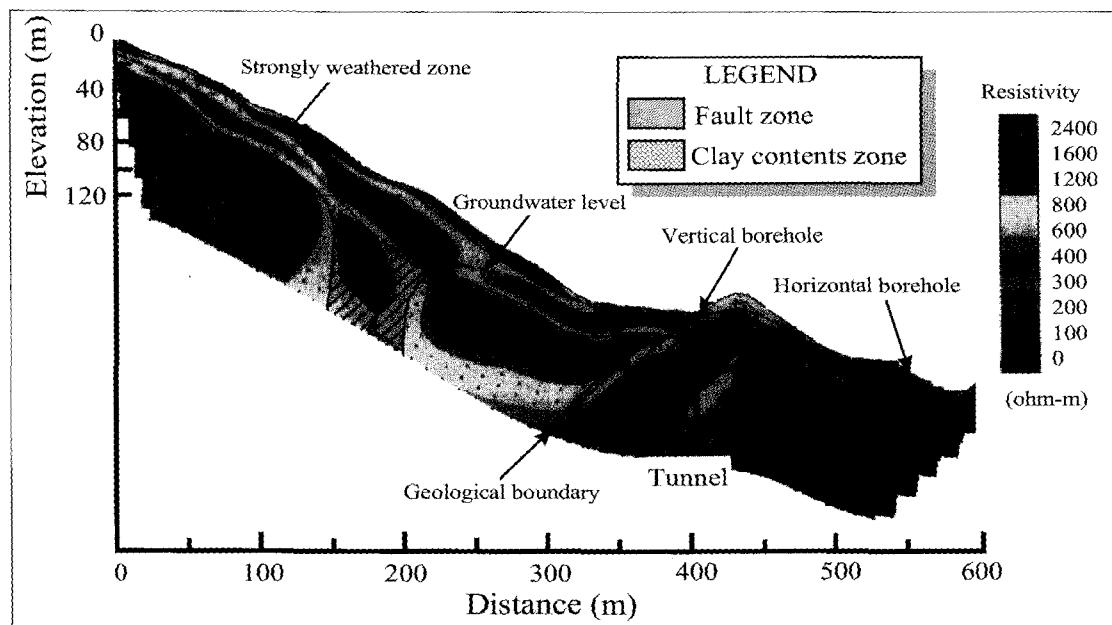


Fig. 3. Resistivity distribution in the tunnel survey area (Matsui et al., 1997).

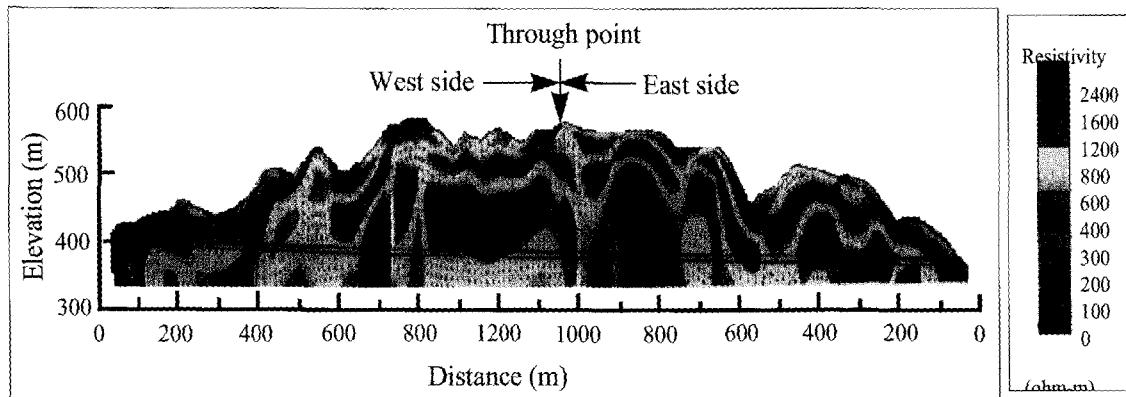


Fig. 4. Resistivity distribution along the tunnel route (Matsui et al., 1997).

또한 2차원 비저항 탐사 결과를 이용해 수문해석 및 암반분류를 시도하고 있다. Matsui et al. (1997)에 의하면, 터널굴착에 따른 지하수위 저하, 쟁내의 용수량 등을 파악하여 설계 및 시공단계에 있어서의 배수공법 등을 검토하기 위하여 암반의 비저항치와 수리정수의 관계를 인출하여 지하수 유동해석의 지반 변수로 사용했다.

Fig. 5는 암반의 비저항치와 투수계수의 관계를 나타낸다. 조사지의 지하수의 비저항을 측정한 결과 $77\Omega\text{m}$ 이었고, 이를 이용하여 지층 비저항계수를 구하여 투수계수와의 관계를 검토하였다. 그 결과 아래와 같이 암반의 비저항치로부터 구간별 투수성 및 투수계수를 결정 할 수 있었다.

- 1) A Zone : 암반의 비저항이 $150\Omega\text{m}$ 이하의 저비저항대, 점토분이 많아 투수성이 낮다. 투수계수는 $2 \times 10^{-5}\text{cm/sec}$ 로 결정했다.
- 2) B Zone : 암반의 비저항이 $150\sim 450\Omega\text{m}$ 의 범위로 투수성은 중간 정도이다. 부분적으로 풍화·변질대가 협재되어 있으며, 그러한 부분에는 투수성이 낮다. 투수계수는 $5 \times 10^{-5}\text{cm/sec}$ 로 결정했다.
- 3) C Zone : 암반의 비저항이 $450\sim 800\Omega\text{m}$ 의 범위로 균열이 발달되어 있어 투수성이 높다. 투수계수는 $1 \times 10^{-4}\text{cm/sec}$ 로 결정했다.
- 4) D Zone : 암반의 비저항이 $800\Omega\text{m}$ 이상의 고비저항대로, 암반의 상태가 양호하고 지하수가 그다지 부존해 있지 않으므로 투수성이 낮다. 투수계수는 $1 \times 10^{-5}\text{cm/sec}$ 로 결정했다.

Fig. 6은 상기의 암반의 비저항치로부터 투수계수를 산출하여 지하수 유동 해석을 한 결과이다. 해석구간은 Fig. 4에 표시한 동쪽 구간으로 터널 굴진장에 따라 쟁내 용수량의 실측치와 계산치를 나타내고 있다. 항내 용수량은 터널 입구로부터 200m까지는 수평 시추에 의한 배수의 영향으로 실측치의 용수량이 적다. 집중용수는 터널 입구에서 655~685m 구간, 860~870m 구간 및 930~960m 구간에서 발생하고, 이들 구간은 비저항치가 급격히 변화하는 구간과 일치하고 있다. 또 계산치와 실측치를 비교해 보면, 집중용수가 발생하는 구간뿐만 아니라 용수량까지도 거의 일치하고 있다. 단, 터널의 관통점 부근에서는 실측용수량이 계산치 보다 많은 것은 당초 동쪽과 서쪽의 관통시점이 같을 것으로 예상해서 해석 조건을 설정했지만, 시공기간의 차이로 서쪽으로 유출되어야 할 지하수가 동쪽으로 유출되었기 때문으로 생각된다.

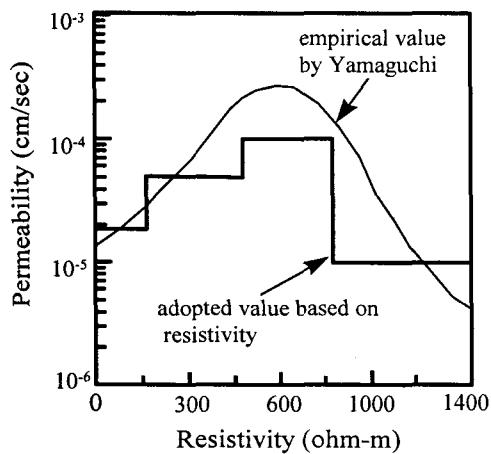


Fig. 5. Relationship between resistivity and permeability in the tunnel survey area (Matsui, et al., 1997).

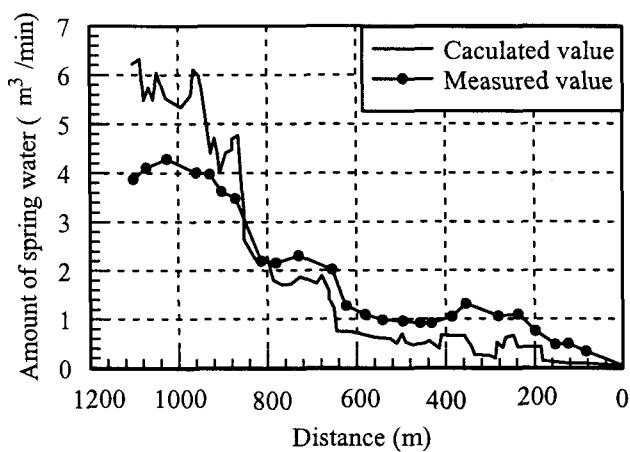


Fig. 6. Comparison between measured and calculated amounts of spring water accompanied by tunnel excavation (east side of Fig. 4).

Matsui and Park (1996)은 암석의 비저항과 탄성파속도가 각각 공극율과 밀접한 관계가 있다는 사실에 착안하여 암석의 비저항을 탄성파속도로 환산하는 실험식을 확립하고, 이 수법에 근거하여 대상 터널의 암반 비저항으로부터 탄성파속도를 산출해 도로 및 철도 터널의 암반 분류법에 따라 암반을 분류하는 정량적 암반분류법을 제안하고 있다. 이 기법은 기존의 암반분류법의 지표로 널리 이용되어 왔던 탄성파속도가 안고 있는 문제점을 해결하기 위한 방법으로 제안되어, 실제의 도로 및 철도 터널 시공현장에서 적용되고 있다.

Fig. 7은 도로 및 철도 터널에 있어서 암반의 비저항에 기인한 정량적 평가에 의한 암반분류법의 흐름도를 나타낸다. 일본에 있어서는 도로 및 철도 터널의 설계 및 시공을 위한 암반분류 기준이 정해져 있고, 이들은 각각 암반의 등급과 판정기준이 다르지만, 기본적으로는 탄성파속도와 암종을 암반분류의 지표로 삼고 있다. 따라서 터널 시공위치의 탄성파속도에 의해서 암반의 등급이 분류되고, 이에 따라 지보공을 설정하게 되어있다. 그러나, 경암의 경우에는 별다른 문제가 없지만, 연암의 경우에는 굴절법 탄성파탐사로 구한 속도가 실제의 암반의 탄성파속도와는 큰 차이가 있어, 암반등급을 낮추거나 지보공을 1등급 높게 설정하여 시공하는 것이 일반적이다.

Fig. 8은 암반의 비저항을 탄성파속도로 환산하여 철도 터널의 암반분류 기준에 따라 암반을 분류해 실제의 지보공과 비교한 결과를 나타낸다. 이 결과를 보면, 터널 위치를 따라 탄성파속도는 2.4~3.4km/sec의 범위로 분포하고, 비저항은 60~400Ωm의 범위로 분포하고 있다. 실제 지보공과 제안한 기법에 의한 암반분류를 비교하면, 이들 모두 I~III등급으로 분류되어 있고, 전체를 통해서 양자가 거의 일치하고 있다.

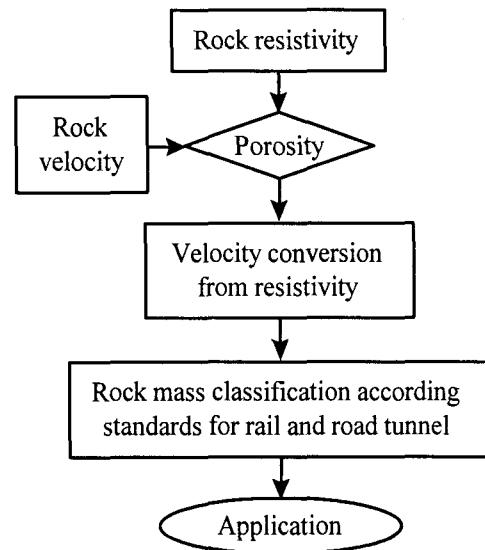
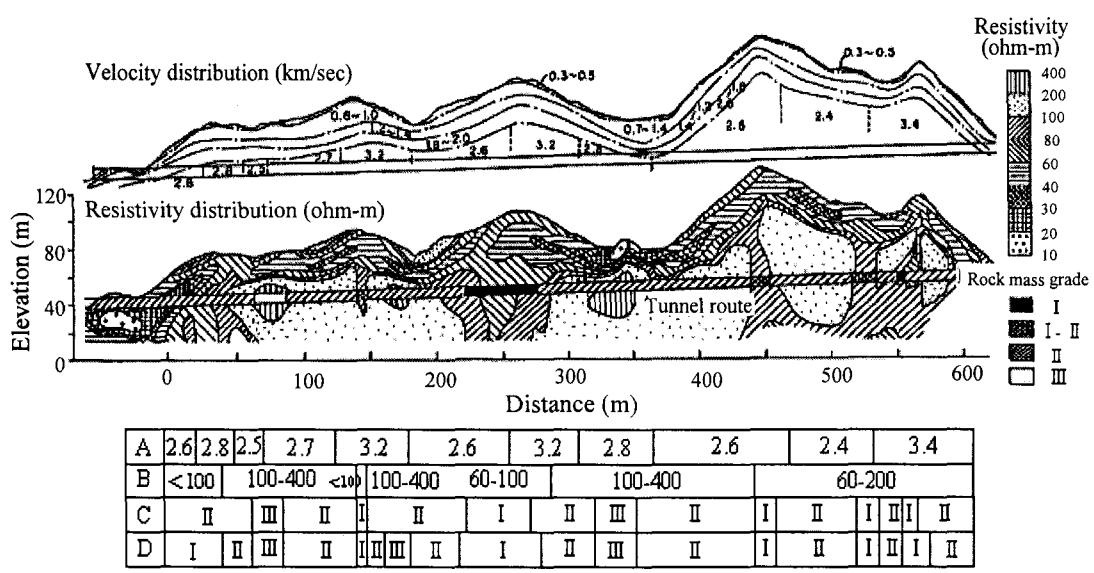


Fig. 7. Flow chart of rock mass classification based on resistivity for tunnelling (Matsui et al., 1997).



A:velocity (km/sec), B:resistivity (ohm-m), C:actual support patterns, D:estimated support patters

Fig. 8. Comparison between actual support patterns and estimated ones by a quantitative evaluation technique based on resistivity for railway tunnelling (Matsui and Park, 1996).

터널의 시공 도중의 암반붕괴 및 돌발용수의 사고는 대부분 무 지보상태의 막장에서 발생하기 때문에 터널굴착시 가장 큰 문제가 되고 있다. 그러므로 터널 막장 전방의 암반상태, 특히 시공상 큰 문제가 되고 있는 단층 및 파쇄대 등의 지질구조를 사전에 파악하여 막장에서의 공사 안전성을 확보하고, 또 연약대에 대한 대책을 사전에 수립하여 적절한 시공을 함으로서 경제적 효과를 얻을 수 있다. 최근 일본에서는 터널 HSP 공동 연구회가 발족되어 Sattel et al. (1992)의 아이디어를 확장시켜 “다점기신·다점수신”의 계측 배치가 가능한 탐사기법을 개발했다. 이 탐사는 대량의 데이터를 중합함으로써 S/N비를 개선할 수 있고, 해석영역도 막장의 전방뿐만 아니라 측방 영역 또는 임의의 방향으로도 탐사가 가능해 TBM 및 NATM공법의 산악 터널의 막장전방 탐사로서 널리 사용되고 있다.

Fig. 9는 산악 터널의 항내에서 실시한 HSP탐사 결과를 나타낸다. 조사지는 일본 열도의 중앙을 달리고 있는 가장 큰 구조선인 중앙구조선이 터널의 중앙부근에서 교차하고 있다. 이 구조선은 폭이 수100m의 단층대를 형성하고 있고, 암상의 변화가 심해 터널 시공시에 파쇄대 및 대량의 지하수가 용출해 막장붕괴 등의 사고를 일으킬 것으로 예상되었다. 그래서 개 입구로부터 207m에 달하는 지점에서 HSP탐사를 실시했다. 탐사결과를 보면, 탐사지점에서 약 50m 전방부터 터널의 진행방향과 저 각도로 교차하는 A~I의 9곳에서 반사면이 검출되었다. 터널을 시공한 결과, 이들 반사면과 개내에서 확인한 지하수의 용출 지점을 비교해보면 거의 일치하고 있다. 또 막장관찰 기록에 의한 균열대의 분포와 지하수의 용출 지점이 일치하고 있어 균열대를 따라 많은 양의 지하수가 용출되었다는 사실을 확인 할 수 있었다.

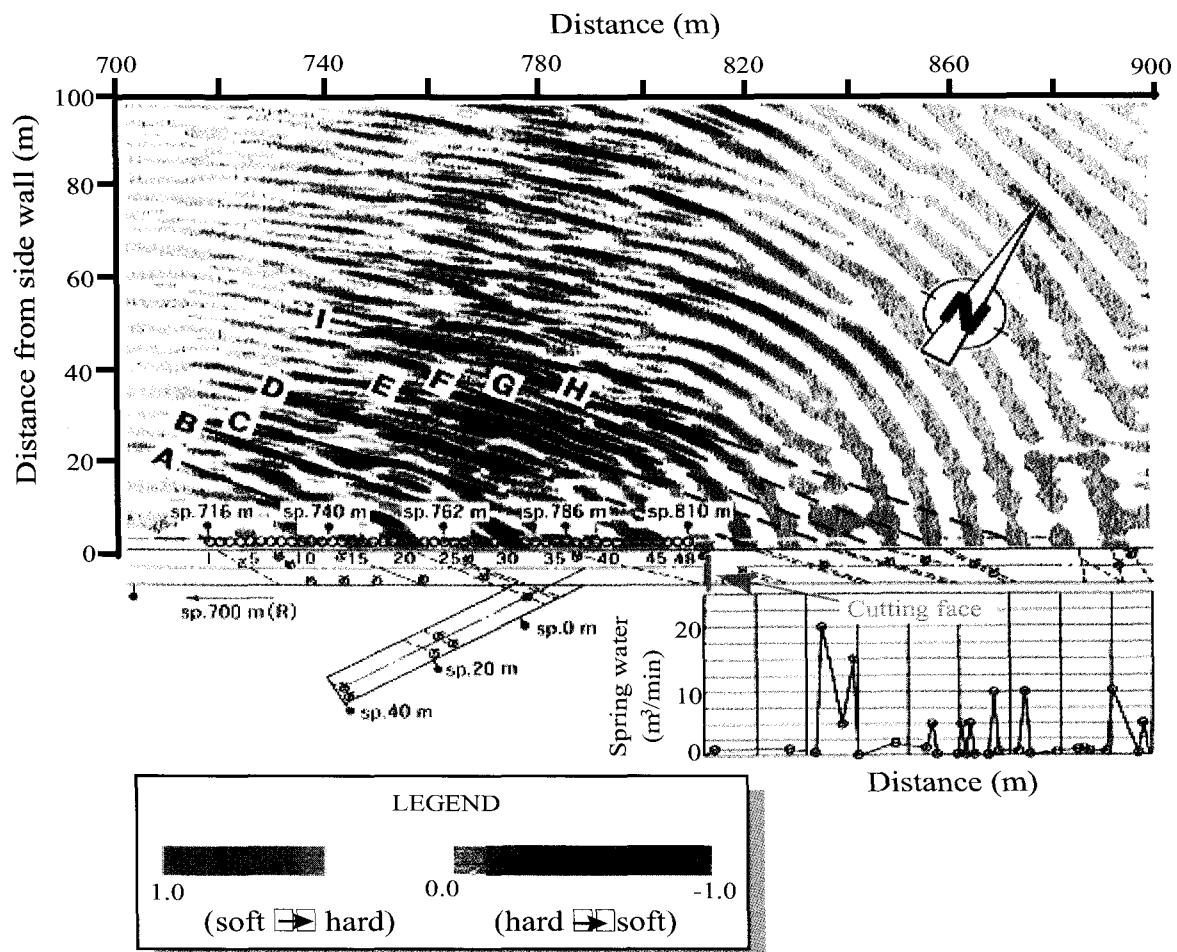


Fig. 9. Predictions of spring water and cracks by HSP method (Inazaki, 1997)

댐 사이드 조사

댐 사이드 조사를 위한 물리탐사는 탄성파탐사와 전기탐사가 일반적으로 많이 사용되어 왔으며, 주로 댐의 기초 및 저수지 주변지반의 투수성을 상세히 파악하기 위해서 실시되고 있다.

Fig. 10은 댐 사이드에서 실시한 탄성파 토모그래피의 결과를 나타낸다. 조사지의 지질은 화강 섬록암이 분포하고 있고, 거의 경사면과 평행하게 단층이 발달되어 있어 부분적으로 균열이 발달되어 있을 것으로 추정되었다. 그래서 수직 및 수평 시추공을 이용하여 탄성파 토모그래피를 실시하여 속도 분포도를 구했다. 탐사 결과와 시추조사 결과로부터 종합적으로 판단하면, 탄성파속도가 1.8km/sec 이하로 분포하는 삼각형 영역은 다른 영역에 비해 암반등급이 낮고, 단층과 균열이 밀접하게 분포하는 등 복잡한 지질상태를 보이고 있어 탄성파속도 분포와 잘 대응하고 있다. 조사지역의 상부에 분포하는 탄성파속도가 약 2.0km/sec 전후의 영역은 기존의 조사결과에 의하면 높은 암반등급으로 구분되어 있었지만, 탄성파속도를 고려하면 기존의 조사결과보다 암반등급이 낮을 것으로 생각된다.

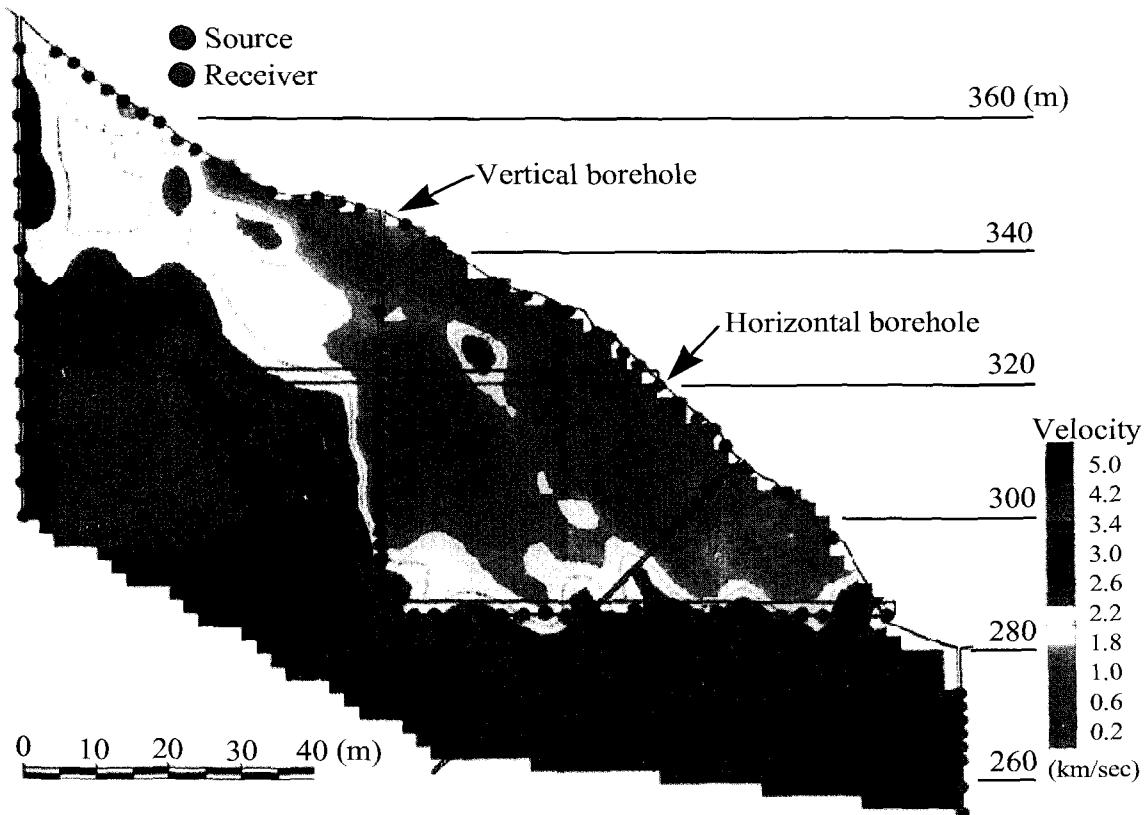


Fig. 10. Distribution of seismic velocity by tomography in the dam site
(물리탐사 핸드북, 1998).

Fig. 11은 댐 건설에 있어서 기초암반의 지수성과 강도를 개량하기 위해서 실시한 약액주입의 효과를 나타낸다. 약액에 3색의 형광물질을 섞어 암반균열에 주입하여 가시광 및 적외선 borehole 카메라를 사용하여 관측했다. 그림중 A, C는 가시광을 이용한 화상이고, B, D는 적외선을 이용한 화상으로, 후자로부터 암반의 균열을 따라 주입된 약액의 상태를 선명하게 관찰할 수 있다.

Fig. 12는 지하심부의 비저항분포를 상세히 얻기 위해서 2차원 비저항탐사와 시추공을 이용해 비저항 토모그래피를 실시한 결과이다. 비저항이 $1200\Omega\text{m}$ 이상을 나타내는 신선한 암반 속에 부분적으로 $500\Omega\text{m}$ 이하의 저비저항이 분포하고 있다.

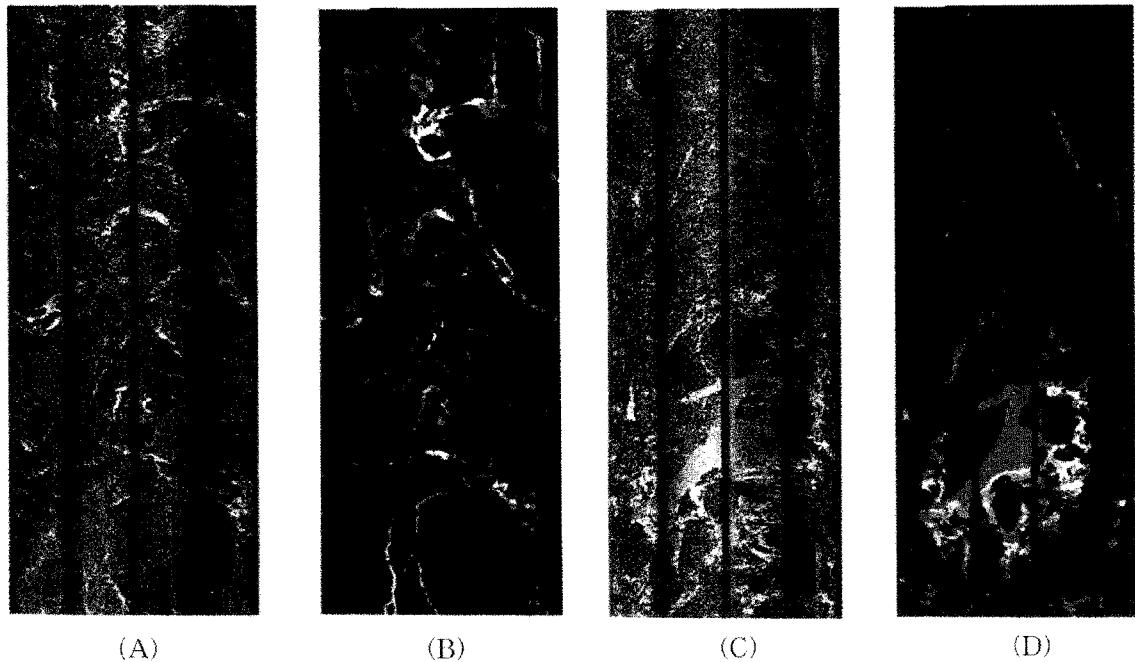


Fig. 11. Grouting observation by borehole camera. A and C, B and D are pictures of visible and infrared camera, respectively (Terada, et al., 1999).

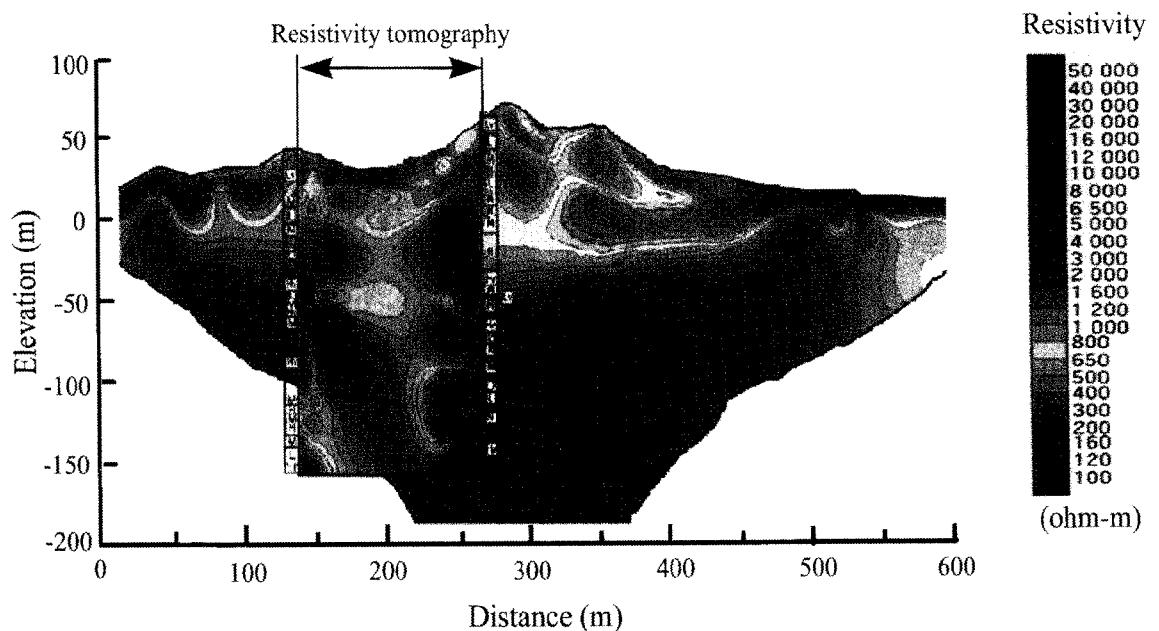


Fig. 12. Resistivity distributions in the underground storage site (Hoshino, et al., 1999)

산사태 조사

일본은 붕괴하기 쉬운 화산쇄설성 퇴적물과 제3기층의 지역이 국토의 약40%를 차지하고 있고, 연평균 강수량이 1700mm 정도의 다우국이다. 이러한 자연조건 때문에 산사태가 많이 발생하고 있다. 산사태를 발생시키는 원동력은 지하수이고, 산사태 방지를 위한 대책공사도 지하수를 강제로 배수시키는 것이 대부분이다. 따라서 산사태 방지를 위한 대책공사의 입안을 설정하기 위해서는 지하수의 분포상태를 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다.

Fig. 13은 산사태지의 지하수분포 상태를 파악하기 위하여 실시한 2차원 비저항탐사 결과와 시추조사 결과를 표시한 것이다. 조사지의 지질은 지표부근에 신생대 제4기의 화산쇄설성 퇴적물이 40~80m의 두께로 분포하고, 그 하부에 제3기의 응회질사암과 사질이암이 분포하고 있다. 상부의 화산쇄설성 퇴적물이 하부의 사질이암층을 경계로 1년에 수cm~수m으로 이동하고 있고, 산사태의 상단부에는 대 규모의 힘물이 일어나고 있다. 그래서 산사태 방지를 위한 대책공사의 수립을 위해 2차원 비저항탐사를 실시해 지하수의 분포 상태를 파악했다. 탐사결과로부터 지하수의 분포 상태를 파악하기 위해 현장의 화산쇄설성 퇴적물을 채취해 배수공에서 채취한 지하수로 포화시켜 비저항을 측정했다. 그 결과 공시체의 다짐정도에 따라 차이는 있지만 온도 8.5°C에서 350~450Ωm의 범위였다. 이러한 실험 결과를 고려해 비저항이 1000Ωm 이상으로 분포하는 상부의 화산쇄설성 퇴적물은 불포화상태일 것으로 추정되고, 비저항이 500Ωm의 등치선이 지하수면과 대응할 것으로 생각되었다. 이는 각 시추공에서 관측한 지하수위와 거의 일치함을 보였다.

사면 안정성 조사

도로 및 철도 건설, 택지조성 개발 등에 의한 인공사면이 매년 늘고 있고, 암반의 경우에 콘크리트 및 모르타르로 시공하는 경우가 많다. 최근 일본에서는 전국 각지에 노화된 암반사면이 심각한 상황에 도달해 있고, 보수를 필요로 하는 곳도 점점 늘고 있는 실정이다. 특히 콘크리트나 모르타르에 의해서 시공되어 있기 때문에 눈으로는 노화된 부분을 찾기 어렵지만, 실제로 암반과 시공면 사이에 공동이 형성되어 있어 상당한 위험을 안고 있는 곳이 많다. 이러한 암반 사면의 안정성을 조사하기 위해서 최근에 열적외선 영상법이 개발되었다.

열적외선 영상법은 대상물을 열적외선 영상장치로서 촬영하여, 지면의 미소한 온도차로부터 물체의 성질이나 물체내부의 상태를 비접촉·비파괴로 조사하는 기법이다. 열적외선 영상장치는 물체의 가시상을 화상화하는 통상의 카메라와는 달리 물체의 온도를 면적으로 화상 처리할 수 있다. 한편, 콘크리트 및 모르타르에 의해 시공된 면에 태양의 일사 에너지가 입사되면 일부는 반사하고 일부는 흡수된다. 모르타르로 시공된 면에 흡수된 열은 온도구배에 의해서 암반으로 이동하게 되는데 이 때 시공된 면 뒤에 공동이나 습윤부가 존재할 경우, 열의 이동에 변화가 일어나고 결과적으로 온도차가 나게된다. 예를 들면, 공동내의 공기 층은 열전도율이 작고, 열용량도 작다. 그렇기 때문에 일사 에너지가 모르타르의 시공면에서 암반으로 열전달이 잘 되지 않아 건전부에 비교해서 공동부의 표면온도가 높게 나타난다.

Fig. 14는 열적외선 영상법에 의한 암반사면의 조사예를 나타낸다. 조사지는 암반사면으로 모르타르에 의해서 시공되어 있거나 상당히 노화된 상태이다. 따라서 열적외선 영상법에 의해 사면의 노화된 부분을 검출하여 적절한 보수대책을 수립하는 것이 조사목적이다. 조사결과를 보면, 오전 6시와 오후 3시의 두 차례에 걸쳐 열적외선 영상법으로 사면의 온도분포를 구해, 각각의 열화상에 있어서 고온부와 저온부를 추출한다. 다음으로 추출한 부분의 온도차를 화상 처리하여 그 결과로부터 공동부, 토사부, 습윤부 및 건전부로 판정한다. 그림에서 빨간 색으로 표시한 부분이 공동이 분포하는 부분으로서 시추 및 목시관찰로 확인되었다.

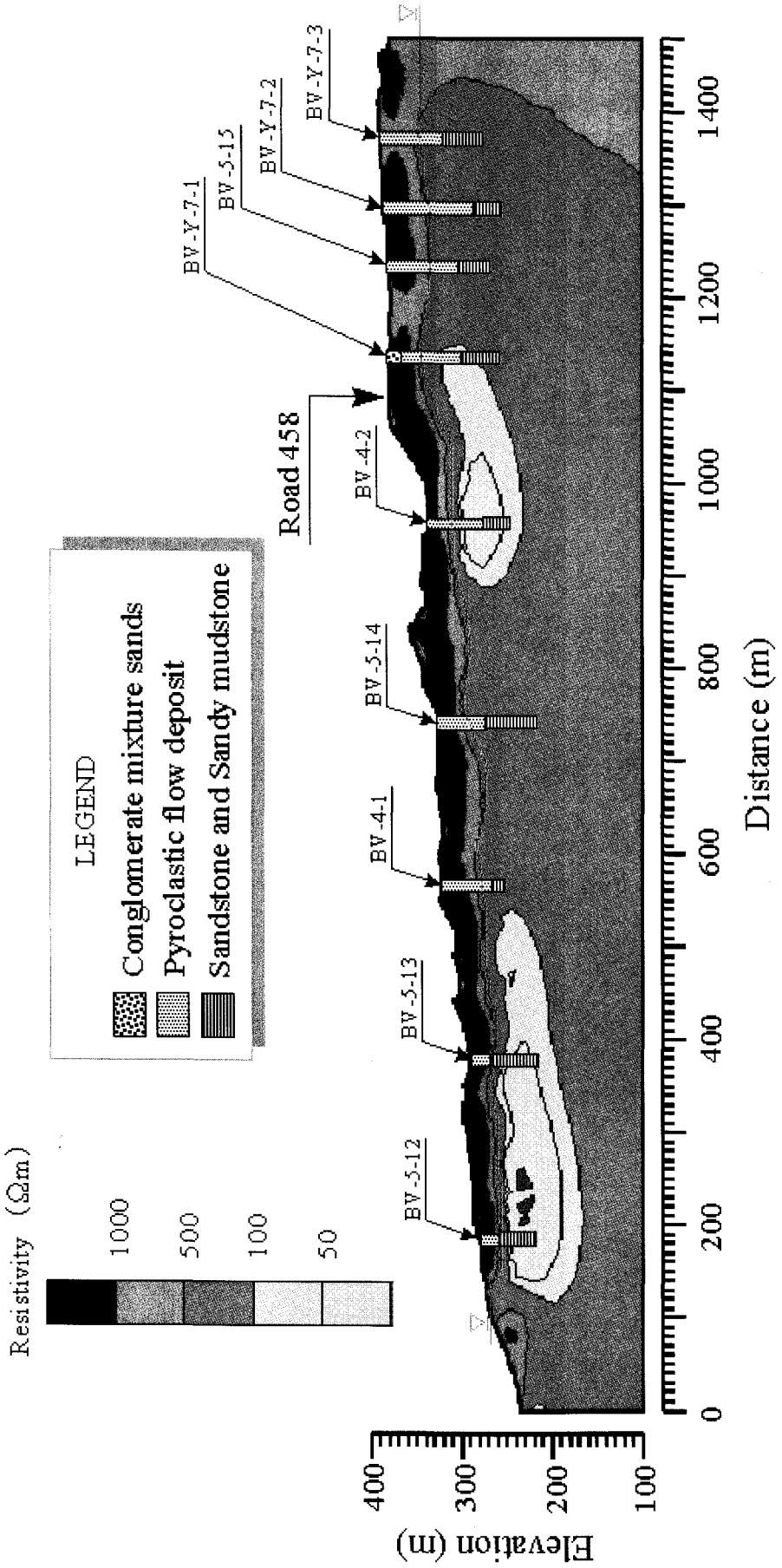


Fig. 13. Resistivity distribution in the landslide area. A red line is groundwater level.



Photograph of survey slope surface

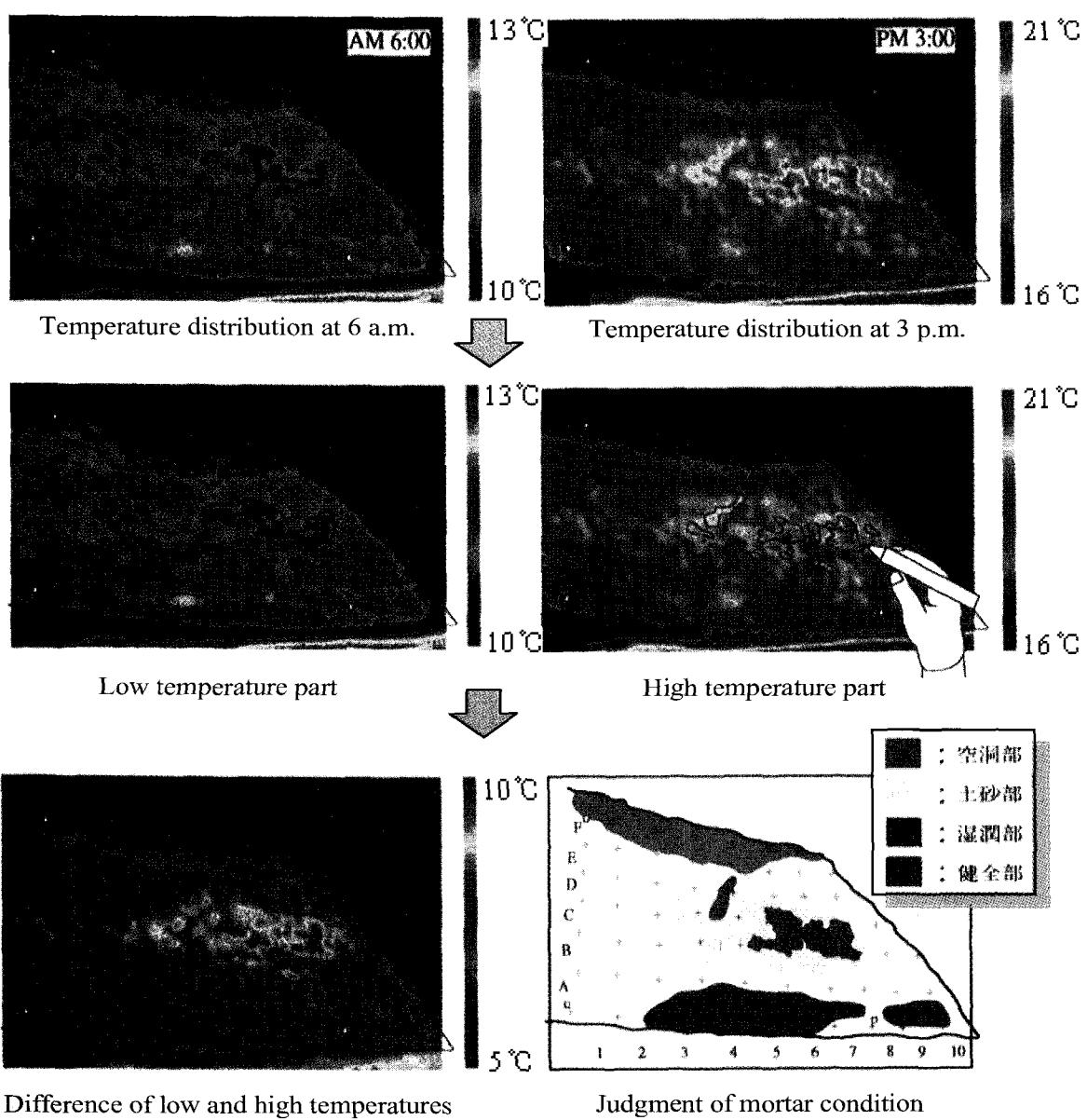


Fig. 14. Judgement of mortar condition on rock masses by thermo-tracer
(건설성 토목연구소, 1996).

지반개량 효과 판정

지하철 공사 등에서는 연약지반의 개량공법으로 약액 주입공법이 널리 사용되고 있다. 그러나, 설계대로 지반이 개량되었는지 시공후 그 효과를 확인하기가 어렵다. 최근에 지오토모그래피를 이용해 약액주입에 의한 지반개량 효과를 확인하는 사례가 늘고 있다. 여기에 사질토에서 동적 주입공법에 의한 지반개량 효과를 평가하기 위해서 실시한 비저항 토모그래피의 사례를 소개한다. 조사지는 사질토가 분포하는 지반으로 주입범위로부터 1m 떨어진 위치에 측정공을 이용하여 약액주입 전후 두 차례에 걸쳐 비저항을 측정했다. 약액주입 전의 측정은 자연상태에 있어서의 비저항분포를 약액주입 후의 측정은 물유리계 용액형의 주입제가 충분히 고화된 후에 비저항분포를 파악했다. 또 이들의 약액주입 전후의 비저항 변화율을 구해 주입범위를 확인했다.

Fig. 15와 Fig. 16은 약액주입 전의 자연상태와 약액주입 후의 비저항분포를 각각 나타내고 있다. 이들 그림으로부터 약액이 주입된 부분은 낮은 비저항이 분포하고 있고, 주입제가 전기전도성이 높은 물질임을 알 수 있다. 또 Fig. 17은 약액주입 전후의 비저항 변화율을 나타낸다. 이 결과로부터 알 수 있듯이 약액이 주입된 부분, 즉 지반이 개량된 부분은 음의 변화율을 나타내고 있다.

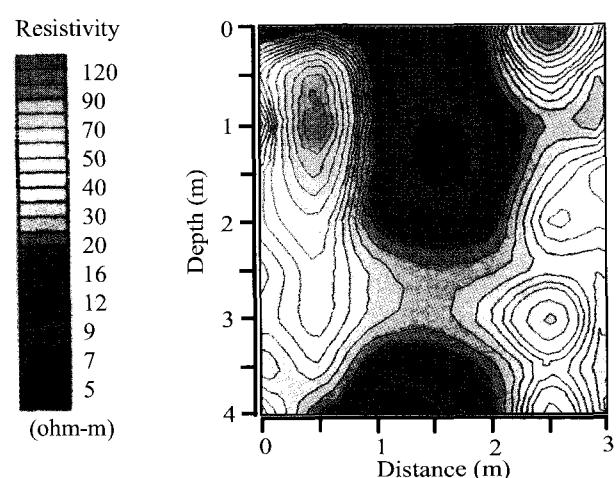
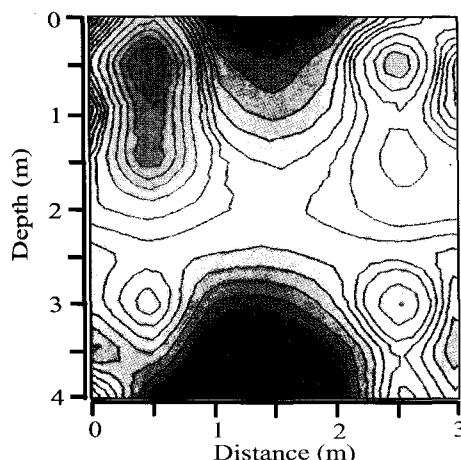


Fig. 15. Resistivity distribution of before grouting. Fig. 16. Resistivity distribution of after grouting.

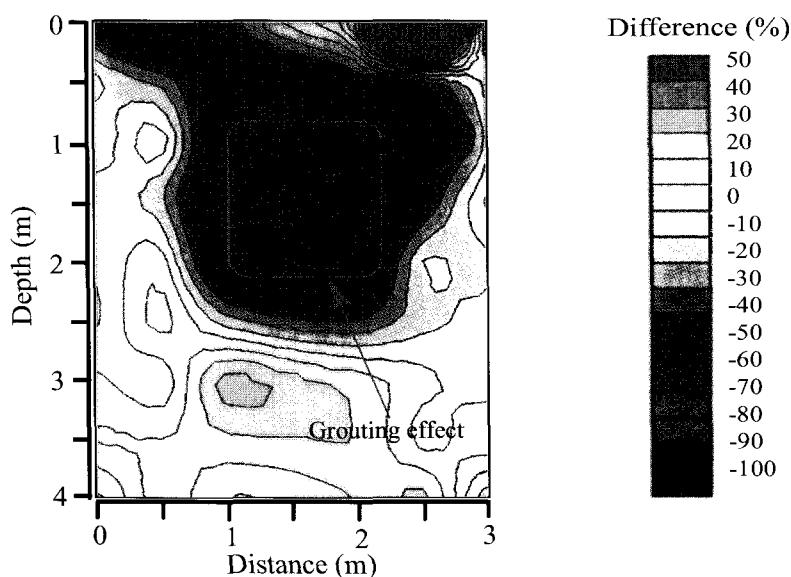


Fig. 17. Distribution of resistivity change ratio in the before and after grouting.

토목·건설분야에 있어서의 과제

최근의 물리탐사 기술은 2차원에서 3차원으로 발전되었고, 사회의 가치관의 변화와 환경문제가 대두되면서 물리탐사의 기법도 다양화되었다. 지반개량 효과의 판정, 터널 막장의 전방탐사 및 지하수 거동, 지하수 오염 및 정화 과정의 모니터링 등이 눈부시게 발전하고 있으면, 자연재해 방지를 위한 물리탐사기술도 개발에 박차를 가하고 있다. 측정기술과 해석기술에 있었어도 컴퓨터 및 디지털기술의 발달에 힘입어 단시간에 대량의 측정 데이터를 얻을 수 있고, 개인용 컴퓨터를 사용하여 객관성과 신뢰성이 높은 해석결과를 얻을 수 있게 되었다. 또 측정방법에 있어서도 종래에는 자연상태 그대로를 측정하는 것이 상식이었지만, 최근에는 인공적으로 자연의 현상을 변화시켜 필요한 정보를 탐사하는 방법도 사용하고 있다.

물리탐사 기술면에서의 과제

토목·건설분야에 있어서 물리탐사의 목적은 지반의 구조나 물성을 평가해 계획·설계·시공의 각 단계에 있어 필요한 정보를 제공하는 것이다. 이를 위해서는 물리탐사의 측정(measurement)·해석(analysis)·평가(interpretation)의 3요소 기술을 고도화시키지 않으면 안된다.

1) 측정기술 : 현장 측정 데이터는 해석결과에 영향을 미치기 때문에 높은 질의 데이터를 얻는 것이 무엇보다도 중요하다. 따라서, 지형의 변화와 같은 외형적인 잡음과 지질적 요인 및 인공구조물 등에 의한 잡음을 가능한 받지 않도록 측선배치 등에 주의할 필요가 있다. 지질적 요인에 의한 잡음은 지표부근의 불균질성이나 지형 및 지질의 3차원 구조에 기인한 잡음으로 3차원의 탐사기술을 도입함으로써 보다 높은 질의 데이터를 얻을 수 있다.

2) 해석기술 : 최근 컴퓨터를 이용한 역해석 기법이 발달되어 해석자의 주관성이 개입되지 않은 결과를 얻을 수 있게 되었다. 그러나, 역해석기법에서는 경계조건과 초기조건을 설정하지 않으면 안되고, 이들의 조건에는 가정(假定)이 내포되어 있어 이 가정조건이 맞지 않을 경우에 해석결과에 위상(僞像)이 나타날 위험성이 있다. 또 어떤 측정 데이터라도 작은량의 잡음이 들어있기 때문에 해석의 분해능을 높이면 오차가 크게되고, 반대로 오차를 줄이면 분해능이 낮아지는 trade off의 관계가 있다. 따라서 사용자 입장에서 볼 때 객관성과 신뢰성이 높고, 블랙 박스가 없는 해석소프트의 개발을 원하고 있다.

3) 평가기술 : 평가기술에 대해서는 물리탐사의 이론과 지반 공학적 지식의 양쪽이 필요로 하고 있다. 해석결과로부터 얻은 물성치는 지반공학에서 필요로 하는 공학적 변수와 다르기 때문에 평가기술이 요구된다. 이를 위해서는 무엇보다 해석결과와 지반의 물성치와의 상관관계에 대해서 충분히 파악하고, 이를 바탕으로 정량적 평가기법 등을 개발해야 한다. 최근 들어 2차원 비저항탐사 및 비저항 토모그래피가 산악 터널을 비롯해 댐, 산사태 등의 조사사례가 급증하면서 지반물성이 비저항에 미치는 영향 등에 대해서도 많은 기초적 연구 (Park and Matsui, 1998; Park, et al., 1999, Matsui, et al., 1999)가 이루어지고 있으며, 정량적 평가기법 (Matsui and Park, 1996) 개발에도 박차를 가하고 있다.

설계·시공의 이용면에서의 과제

물리탐사가 설계·시공의 이용면에 있어서 탐사비용, 보급활동 및 제도적·사회적제약의 세 가지의 과제를 들 수 있다.

1) 탐사비용 : 실제로 공사현장에서 탐사정도는 높지만 비용이 많이 드는 것보다는 다소 탐사정

도가 떨어져도 비용이 싼 탐사방법을 채택하는 경우가 많다. 현재 3차원 탐사기술이 개발되었음에도 불구하고 토목·건설 현장에서 거의 실시되지 않고 있는 가장 큰 이유는 고액의 탐사비용이 들기 때문이다. 일반적으로 토목·건설분야에서 물리탐사를 채용할 때 어느 정도의 신뢰성이 있고, 작업이 간단하며 측정 및 해석시간이 짧고, 탐사비용이 적게드는 이 세 가지 항목이 중요한 포인트가 된다.

2) 보급활동 : 물리탐사를 토목·건설분야에 보급시키기 위해서는 발주자가 물리탐사의 필요성을 납득할 수 있게 탐사 기술자의 노력이 무엇보다도 필요하다. 이를 위해서는 물리탐사를 실제로 실시하는 기술자가 해석결과를 단순히 표시하는 것에만 그치지 말고, 어떻게 설계에 반영시킬 것인지 또 탐사한계를 충분히 숙지한 다음 지질적 해석(解釋)을 반드시 실시하여 탐사결과의 어느 부분이 위상인지, 어느 부분이 신뢰성이 낮은지를 발주자가 납득할 수 있게 설명할 필요가 있다. 발주자를 이해시키는 노력이 부족하면 탐사결과에 대해서 좋은 평가를 받기 어렵고, 그러한 좋지 못한 인식이 보급활동의 장애가 된다. 한편으로 학회에서도 물리탐사의 보급을 위한 강연회 및 강습회에 앞장을 서야한다.

3) 제도적·사회적제약 : 물리탐사가 유효한 조사법으로서 확립시키기 위해서는 우선, 그 유효성이 사회적으로 인식되도록 해야 할 필요가 있다. 예를 들면, 탐사비용에 관한 산출기준의 표준화, 결과의 가시화에 의한 표시기술의 향상, 신뢰성 및 품질향상에 대한 기술개발과 그 유효성의 선전, 대학 및 학회에 의한 탐사기술의 보급활동, 각 탐사기술의 측정·해석매뉴얼의 기준화, 발주기관으로서 관청 등의 인재육성 등을 들 수 있다.

맺 음 말

일본에 있어서의 토목·건설 지반조사를 위한 물리탐사의 활용 현황과 최근에 개발된 새로운 물리탐사 기술에 의한 활용사례를 소개했다. 일본은 지형 및 지질, 기후조건으로 단층을 포함한 파쇄대, 변질대 및 화산쇄설성 퇴적물이 많이 분포되어 있어 우리나라의 지반상태에 비하면 상당히 열악하다. 그럼에도 불구하고, 터널을 비롯한 댐, 지하발전소, 지하저장소 등의 지하공간 개발에 있어서 상당히 앞서가고 있다. 한가지 산악 터널의 예를 들면, 오사카(大阪)에서 후쿠오카(福岡)까지의 고속전철(新幹線)의 전체 구간장 (562.2km)에 비해 전체 터널 구간장 (279.29km)은 49.79%이다. 다시 말해, 고속전철의 약 절반이 터널로 구성되어 있다. 이러한 터널을 비롯한 지하 공간 개발의 뒤에는 물론 설계 및 시공 기술이 눈부시게 발달하고 있지만, 물리탐사 기술이 토목·건설분야에 적극적으로 활용되어 그 기여도가 한몫을 하고 있다고 생각한다. 이러한 관점으로 볼 때, 우리나라에서도 물리탐사 기술의 발달과 함께 토목·건설분야의 적극적인 활용을 기대해 본다.

사 사

본 논문을 작성하는데 있어서 일본 재해과학연구소의 터널 지반조사 연구 위원회(위원장 松井保 教授)로부터 많은 자료를 제공받았다.

참 고 문 헌

- 건설성 토목연구소, 1996, 열적외선 영상법에 의한 복공사면의 노화진단 매뉴얼 : 토목연구센타, 24-37.
- 물리탐사학회, 1998, 물리탐사 핸드북 : 小宮山印刷工業(株), 1310.

3. Fujimura, K., Fukazawa, S. and Masunaga, K., 1997, History and Present Activities of Geophysical explorations : Tsuchi-to-Kiso, JGS v. 45, 7-10. (in Japanese)
4. Hoshino, K., Hishikawa, A., Shiomi, T., Matsumoto, T. and Tani, T., 1998, Geological Techniques Applied for New Project on Underground Storage of Liquefied Petroleum Gas : Tsuchi-to-Kiso, JGS v. 46, 27-27. (in Japanese)
5. Inazaki, T. and Research Group on In-Tunnel HSP, 1997, A New Method for Imaging and Characterizing Fractures Ahead of Tunnel Face : Tsuchi-to-Kiso, JGS v. 45, 13-16. (in Japanese)
6. Kuwahara, t., Kitago, T., Karkee, M. B. and Yamazaki, J., 1997, State of Effective Use of Geophysical exploration from Questionnaire Survey : Tsuchi-to-Kiso, JGS v. 45, 3-6. (in Japanese)
7. Matsui, T., Kamide, S. and Park, S. G., 1997, An Application of Resistivity-Based High-Density Prospecting to Ground Survey of Mountain Tunnel : Tsuchi-to-Kiso, JGS v. 45, 20-22. (in Japanese)
8. Matsui, T. and Park, S. G., 1996, A Tunnel Rock Mass Classification Technique and its Applicability Using Resistivity and Seismic Wave Velocity : Proc. JSCE, n. 547, 117-125. (in Japanese)
9. Matsui, T., Park, S. G., Park, M. K. and Matsuura, S., 1999, Applicability of Resistivity-based High-density Prospecting to Rock Mass Survey : 99 Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering, West Japan Rock Engineering Society, Fukuoka Japan, August 2-4, 141-146.
10. Park, S. G. and Matsui, T., 1998, Basic Study on Resistivity of Rocks : Geophys. Explor. v. 51, 201-209. (in Japanese)
11. Park, S. G., Park, M. K. and Matsui, T., 1999, Temperature Dependancy of Resistivity in Groundwater and Water Saturated Soil : Geophys. Explor. v. 52, 247-253. (in Japanese)
12. Sattel, G., Frey, P. and Amberg, R., 1992, Prediction Ahead of the Tunnel Face by Seismic Methods : Pilot Project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland, First Break, 10 19-25.
13. Terada, M., Iwamoto, Y., Nishiyama, T. and Chin, Y., 1999, Fluorescent Approach to Visualize Grout Injected into Rock Masses : Tsuchi-to-Kiso, JGS v. 47, 29-32. (in Japanese)