

❖ 조사 및 정보 기술위원회

KTA-Annual Technical Report

TBM 터널에서의 막장 전방 예측 기법

2017. 12.



사단
법인 **한국터널지하공간학회**
Korean Tunnelling and Underground Space Association

■ 목 차 ■

1. 개 요	1
2. 탄성과 탐사	1
2.1 TSP탐사	1
2.2 SSP탐사	2
2.3 VIBSIST	3
2.4 초음파탐사	3
2.5 레일리와탐사	4
3. 전기 탐사	4
3.1 BEAM	4
3.2 전기비저항탐사	5
4. 전자 탐사	5
4.1 레이더토모그래피탐사	5
4.2 레이더탐사	6
5. 간접 탐사	7
6. TBM에 적용 가능한 막장전방 예측기법 비교 및 고찰	7
참고문헌	9

1. 개요

터널 시공에 앞서 일반적으로 시추조사, 지표지질조사, 지구물리탐사 등의 지반조사를 실시하여 지반의 상태를 평가함으로써, 터널이 시공되는 노선의 지반 물성 및 이상대의 위치, 상태를 파악하고 설계를 수행한다. 설계 단계에서 이루어지는 지반조사는 대부분 광범위한 지역의 개략적인 지반 상태나 지하 구조를 추정하는데 중점을 두고 있어, 터널 노선과 인접한 지반 상태를 정확하게 예측하기 어렵다. 따라서 터널 시공 중에 설계 단계의 지반조사에서 예측하지 못한 이상대가 나타나는 경우가 다수 발생한다. 터널 시공 중 예측하지 못한 이상대는 터널의 안정성을 저하시킬 뿐만 아니라 공기지연, 비용증가 등의 시간적, 경제적 손실을 발생시킬 수 있다.

따라서 터널 시공 중에 막장전방의 지반 상태를 예측할 수 있는 다양한 기법들이 연구 및 개발되었다. 현재 여러 가지 막장전방 예측기법들이 터널 현장에서 사용되고 있으며, 다음과 같이 크게 2가지로 나눌 수 있다. 여러 지반변수들을 토대로 간접적으로 예측하는 방법과 각종 센서 및 장비를 이용하여 직접적으로 예측하는 방법으로 나눌 수 있다.

TBM 공법은 장비의 특성에 따라 면판 후면에 챔버 및 압력셀, 컨베이어, 실린더 등의 각종 설비가 위치해 있어 막장전방 예측에 필요한 탐사장비를 설치하는데 공간적인 제약이 존재한다. 따라서 TBM 장비 제작사가 위치한 독일, 미국, 캐나다, 프랑스, 일본에서 TBM 공법에 적용 가능한 막장전방 예측기법에 대한 연구가 주로 수행되었다. 현재 탄성파, 전자파, 초음파, 전기 등을 이용하여 막장전방을 예측할 수 있는 다양한 기법들이 개발되었다.

2. 탄성파 탐사

2.1 TSP 탐사

터널 내 탄성파 탐사 방법 중 일종인 TSP 탐사는 기본적으로 반사법을 이용하는 것으로 터널 굴착 및 지보에 큰 영향을 주는 주요 지질구조대나 용수대의 위치 및 규모를 파악하는데 유용한 방법이다. TBM 후면의 여러 장비들로 인하여 TSP 탐사 장비를 설치하기에는 장소가 협소한 문제가 발생하였으나, 스위스 AMT (Amberg Measuring Technique)사에서 지속적인 개선을 거듭하여 TBM에 적용할 수 있는 TSP 탐사 방법으로 TSP203을 개발하였으며, 국내에서도 도입 및 적용이 이루어지고 있다(그림 1)(지반조사기술위원회, 2004).

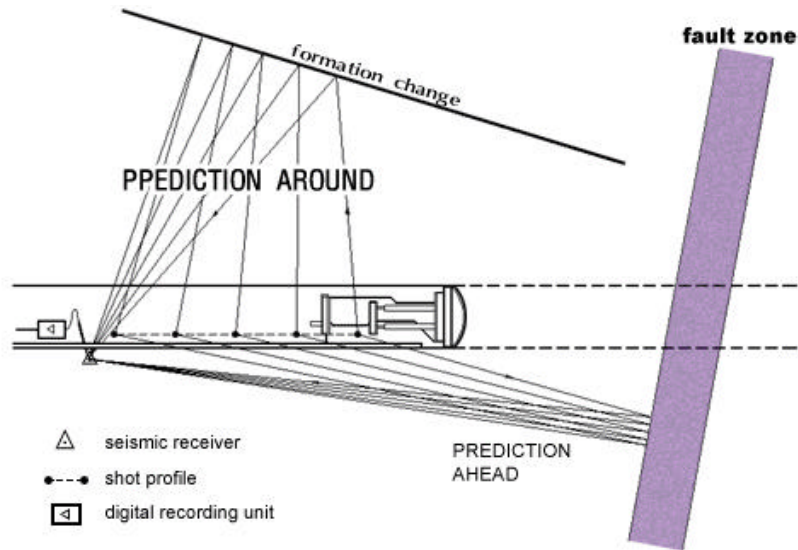


그림 1. TBM에 적용한 TSP 탐사법의 개념도(지반조사기술위원회, 2004)

2.2 SSP 탐사

AMT사는 독일의 Herrenknecht사, Philipp Holzmann사, Zublin사와 함께 반사 탄성파 탐사법 원리를 이용하여 쉴드 TBM 면판에 탑재 가능한 SSP(Sonic Soft Ground Probing)시스템을 개발하였다(그림 2). SSP 시스템은 면판 주위에 설치되는 1개의 음향소스, 3개의 리시버, 면판의 회전 각도를 감지하는 센서로 구성되며 3차원적 막장전방 예측이 가능하다. 음향소스로부터 수 kHz 대역의 P파를 막장전방에 방사하여 반사계수가 큰 경계부에서 되돌아오는 반사파를 가속도계에 의해 기록하는 방식으로 막장전방의 파쇄대, 거대전석, 공극 등을 감지할 수 있다. 신호 감쇠 정도에 따라서 탐사심도가 달라지지만 막장전방 약 30m까지 탐사 가능하다(지반조사기술위원회, 2004; Kneib et al., 2000; Dowden and Robinson, 2001).

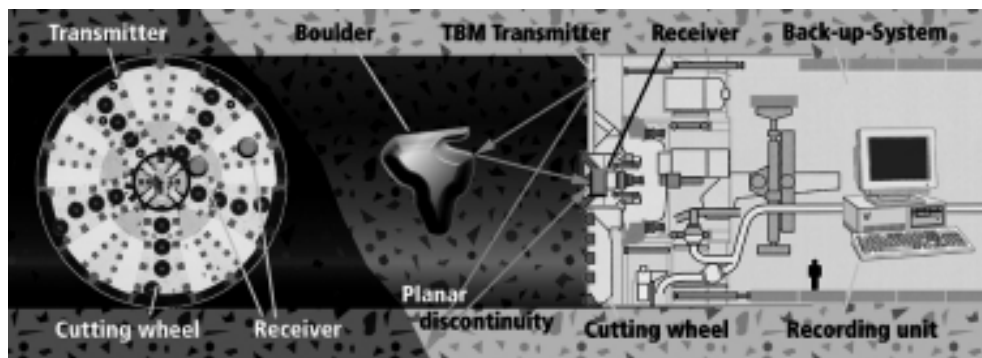


그림 2. SSP시스템의 개념도(Dowden and Robinson, 2001)

2.3 VIBSIST

핀란드 Terraplus사에서는 Swept Impact Seismic Technique(SIST)에 기초를 두고 VIBSIST-20(Vibration Swept Impact Seismic Technique)를 개발하였다. SIST는 바이브로사이즈(Vibrosize) 기술과 Mini-Sosie 기술의 장점만을 조합하여 보다 작은 임팩트수로 잡음의 영향을 최소화하여 고해상도의 결과를 얻을 수 있다(지반조사위원회, 2004).

2.4 초음파 탐사

히타치 조센(Hitachi Zosen)에서는 잠수함에 주로 사용되는 수중음파탐지장치(sonar)의 원리를 이용한 막장전방 예측기법을 개발하였다(그림 3). 막장전방에 수 kHz 대역의 음파를 방사하여 음향임피던스가 다른 면, 즉 이상대에서 반사되는 음파를 수신기로 획득하여 장애물, 지층경계부의 위치 및 형상을 파악한다. 이 방법은 다양한 지반조건에 적용 가능하다는 장점을 가지나, 탐사구간이 지하수위면 아래에 있을 때만 이용 가능한 단점이 있다.

또한 미츠비시 중공업에서도 막장전방으로 물을 분사한 후 물기둥 내에 초음파를 방사하여 막장전방을 예측하는 기술을 개발하였다. 이 방법도 지하수위 아래에서만 적용 가능한 단점이 있다.

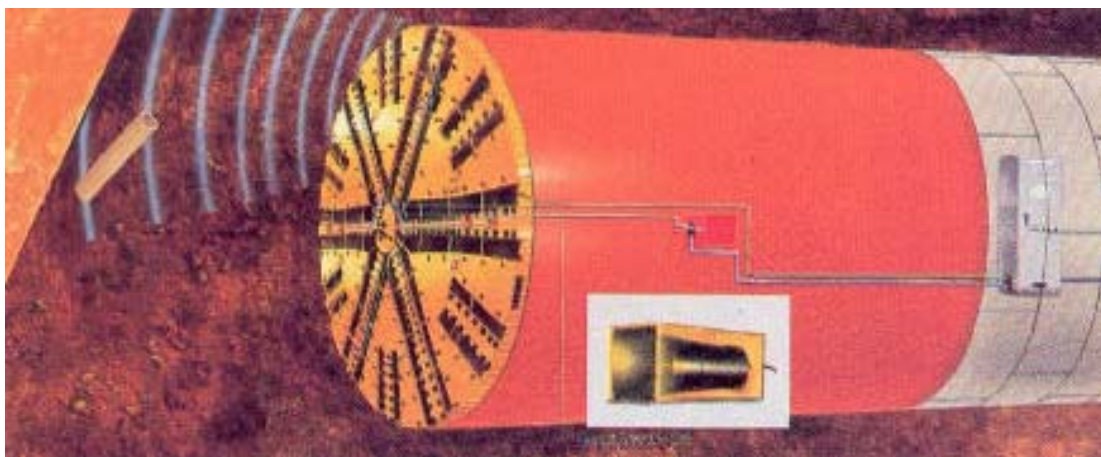


그림 3. 히타치 조센의 음향탐사 장치(지반조사기술위원회, 2004)

2.5 레일리파 탐사

가와사키 중공업에서는 표면파의 일종인 레일리파를 이용하여 S파 속도로부터 지반의 지지력을 추정하여 지반 상태를 해석하는 막장전방 예측기법을 개발하였다. 대부분의 지반조건에 적용 가능하나, 함수비가 높은 지반에는 적용하기 어렵다. 탐사심도는 약 10m이다.

3. 전기 탐사

3.1 BEAM

독일 Herrenknecht사에서 판매하는 막장전방 예측기술 중 GET(Geo Exploration Technologies)사에서 개발된 BEAM(Bore-tunnelling Electrical Ahead Monitoring) 시스템은 TBM 면판 및 본체 옆 부분에 설치된 전극으로부터 전기저항을 측정하고 유도분극 현상을 이용하여 해석하는 기법이다(그림 4). 굴착 중 연속적인 계측이 가능하며, 예측결과를 실시간으로 보여주는 장점을 가지고 있으나 면판 전면에 전극이 위치하여 전극을 주기적으로 교체해야 하며 가격이 고가라는 단점이 존재한다.

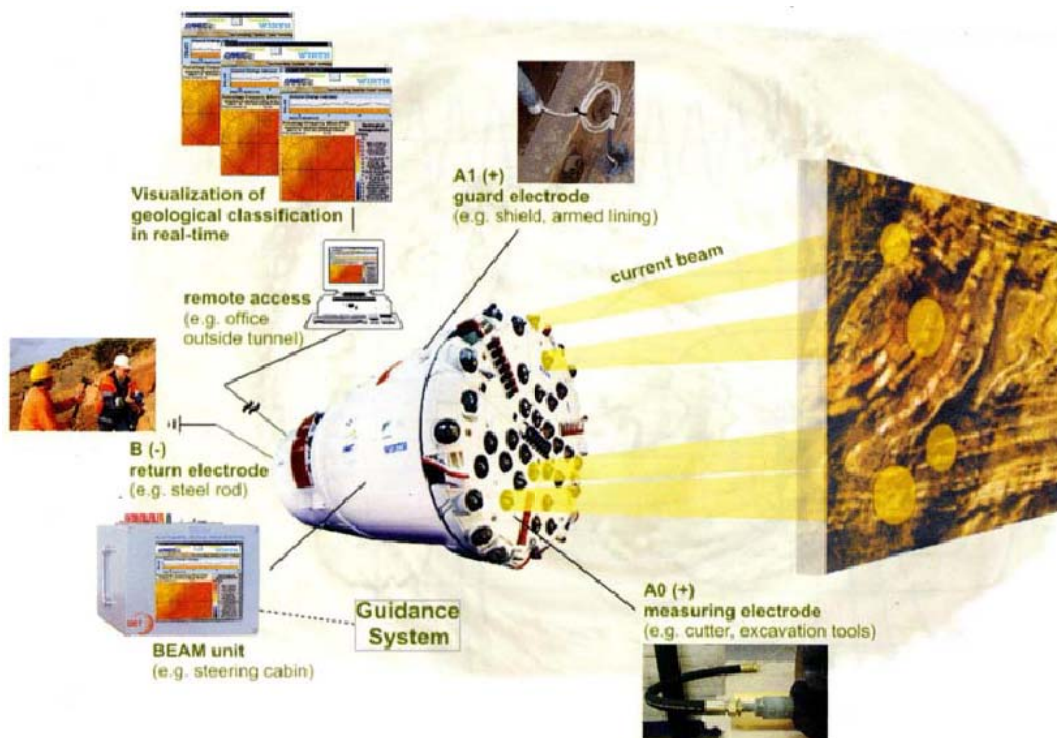


그림 4. BEAM 시스템의 구성요소(Kaus and Boeing, 2008)

3.2 전기비저항 탐사

일본의 코마츠 제작소에서는 TBM 면판에서 전극을 실린더로 막장전방의 지반에 내보내고 지반의 전기비저항을 측정하여 막장전방을 예측하는 기술을 개발하였다. 대부분의 지반 조건에 적용 가능하며, 지하수위 아래 지반에서 측정이 더욱 잘 이루어진다. 탐사심도는 약 50m이다.

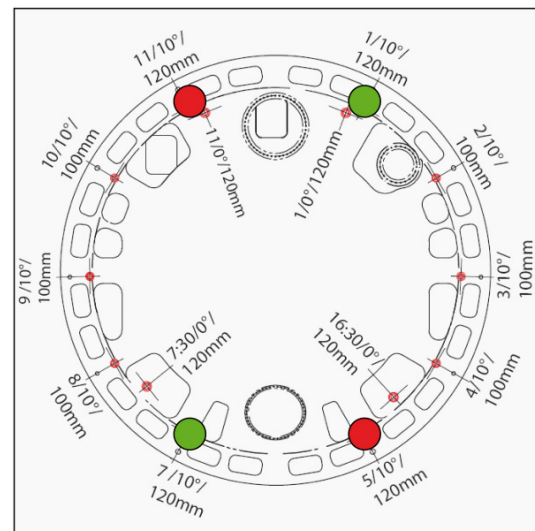
4. 전자 탐사

4.1 레이더 토모그래피 탐사

독일의 Bo-Ra-Tec사는 공동이 많은 카르스트 지형 구조를 가진 Katzenberg TBM 터널 현장에 시추공 탐사 장비를 설치하고 시추공 레이더 탐사를 수행한 바 있다. 천공홀 1~2개를 이용하여 반사파를 측정(Reflection measurements)하고, 천공홀 2개를 이용하여 Crosshole 측정(Crosshole measurements)을 수행하였다(그림 5). 해석결과와 막장면 맵핑(Face mapping)결과를 비교한 결과, 카르스트 지형의 지질구조를 잘 예측한 것으로 나타났다.



(a) 현장시험 전경



(b) 시추공 탐사 위치

그림 5. 독일 Bo-ra-tec사에서 개발한 시추공 레이더 탐사(Richter, 2011)

4.2 레이더 탐사

가와사키 중공업, IHI, 미츠비시 중공업, 마츠이 건설에서는 각각의 레이더 탐사 방법을 개발하였는데, 이 방법은 면판에서 전자파를 막장전방 지반에 방사하여 돌아오는 반사파를 분석하는 기법이다. 면판에 안테나가 설치되는데 안테나의 크기가 약 30~60cm 정도 되기 때문에 면판의 디스크 커터 및 커터비트의 배치에 영향을 주는 단점이 존재하며, 탐사심도가 약 5m 이하이다. 저주파수의 안테나를 사용하면 탐사심도가 깊어지는 효과를 얻을 수는 있으나, 안테나의 크기가 커지고 해상도가 낮아지는 단점이 존재한다. 대부분의 지반 조건에 적용 가능하나, 함수비가 높은 지반에는 적용이 어렵다.

마츠이 건설에서 개발한 레이더 탐사는 일반적인 지중레이더의 주파수 대역인 350~400MHz 보다 낮은 중심주파수 150MHz의 대역을 가지는 전자파를 이용하여 막장전방으로 2~5m 정도까지 탐사가 가능하다. TBM에 탑재된 레이더 탐사시스템의 개요가 그림 6에 나타나있다. 면판의 회전각도 신호와 전자파 제어기로부터 출력되는 파형 신호를 함께 A/D 변환기에 접속시켜 25kHz의 동시 샘플링을 실시하여 데이터가 획득된 위치를 파악할 수 있는 시스템을 갖추고 있다. 또한 동시에 TBM 기계데이터를 기록하도록 되어 있으며, 파형신호, 동기신호, 회전신호를 연속적으로 모니터링하여 데이터베이스를 구축하였다.

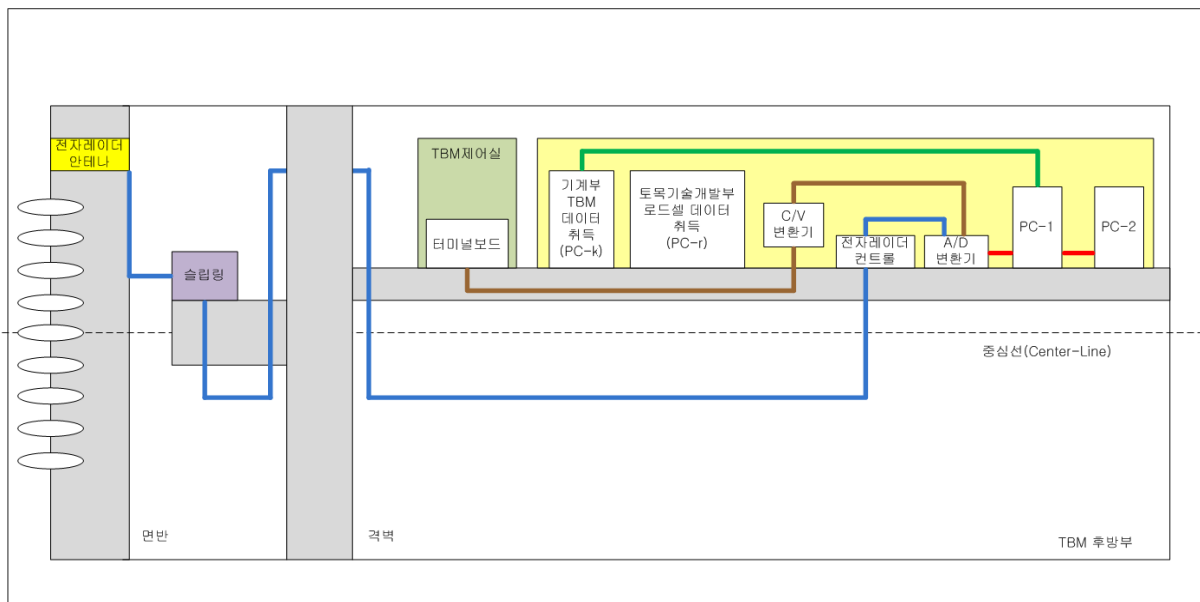


그림 6. 마츠이 건설사의 레이더 탐사의 개념도

5. 간접 탐사

지금까지 언급된 TBM 장비에 탐사장비를 설치하고 직접적인 데이터를 취득하여 이를 해석하는 방법 이외에도 Yamamoto et al.(2003)은 TBM 기계데이터(추력, 토크 등), 별도의 천공을 통해 얻은 데이터로부터 계산된 천공 에너지 효율, 슈미트 해머로 얻은 일축압축강도의 통계학적 분석을 통해 막장전방의 지반 상태를 추정하는 방법을 제시하였다(그림 7).

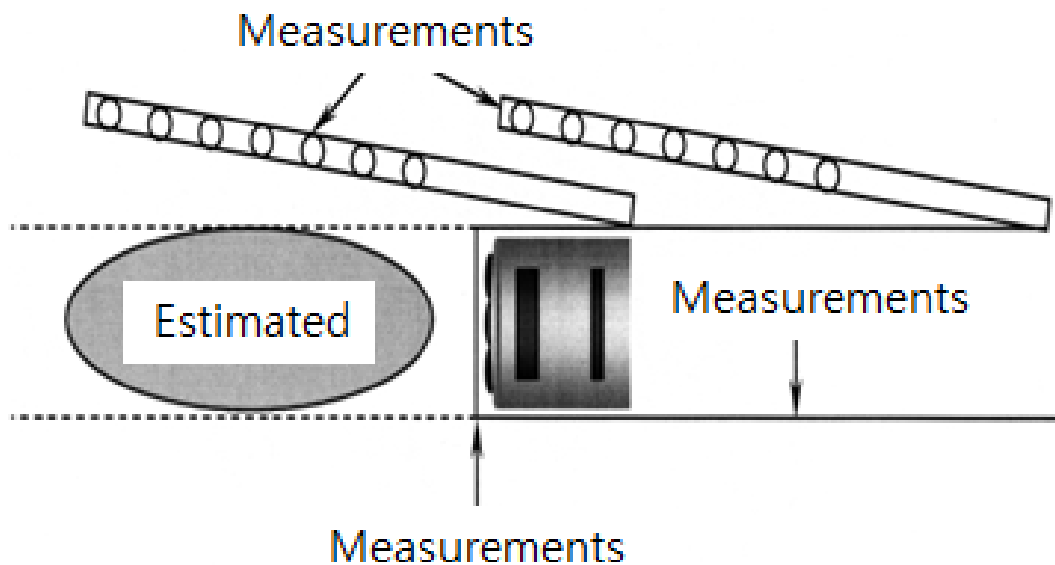


그림 7. 통계학적 분석을 통한 막장전방 예측기법의 개념도(Yamamoto et al., 2003)

6. TBM에 적용 가능한 막장전방 예측기법 비교 및 고찰

TBM에 적용되는 막장전방 예측기법들을 적용할 수 있는 지반 조건 및 탐사심도를 비교하여 표 1과 같다. 탐사방법에 따라서 적용 지반조건과 탐사심도가 많은 차이가 있음을 알 수 있다. TBM 공법으로 터널 시공 중 막장전방 지반 상태를 예측함으로써 시공의 신속함과 상황 대처에 도움이 되기 위해서는 막장전방으로 적어도 약 10~20m 심도를 예측할 수 있어야 하며, 이상대(파쇄대) 및 복합지반을 탐지할 수 있어야 한다(이강현, 2014)

표 1에 나타난 유럽 및 일본 등에서 개발된 TBM에 적용 가능한 막장전방 예측기법의 특성을 고려하였을 때, 전기 또는 탄성파를 이용하는 방법이 국내 TBM 현장에서 요구하는 탐사심도에 적합하고 이상대(파쇄대)를 잘 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

표 1. 막장전방 예측기법에 따른 적용 지반조건 및 탐사심도

업체명	탐사방법	적용 지반조건	탐사심도
AMT	탄성파 탐사 (TSP)	중경암 이상의 지반조건에 적용	100m
AMT Herrenkecht	탄성파 탐사 (SSP)	중경암 이상의 지반조건에 적용	30m
GET	전기 탐사 (BEAM)	모든 토질에 적용	15 ~ 20m
Bo-ra-tec	전자 탐사 (시추공 레이더)	거의 모든 토질에 적용	-
히타치조선	탄성파 탐사 (음향 탐사)	모든 토질에 적용, 지하수 존재해야 함	20m
가와사키 중공업	탄성파 탐사 (레일리파 탐사)	모든 토질에 적용, 함수비가 높은 토질에는 부적합	10m
	전자 탐사(GPR)	모든 토질에 적용, 함수비가 높은 토질에는 부적합	2m
IHI	전자 탐사(GPR)	거의 모든 토질에 적용, 점토질, 염분을 포함한 토질에는 부적합	1.5m
미츠비시 중공업	전자 탐사(GPR)	사질토에 적용하기 쉬움, 점성토는 탐사하는데 어려움이 존재	2m
	탄성파 탐사 (초음파 탐사)	지하수 존재해야 함	-
코마츠 제작소	전기 탐사 (전기비저항 탐사)	거의 모든 토질에 적용, 지하수가 존재할수록 측정이 잘됨	50m

참고문헌

이강현 (2014), TBM에 적용 가능한 막장전방 예측기법 개발, 고려대학교 대학원 박사학위논문, pp.36-38.

지반조사기술위원회 (2004) "지반조사 연구 및 기술동향", 한국지반공학회 2004년도 발자취, pp.366-380.

Kneib, G., Kasselm, A. and Lorenz K. (2000), "Automatic seismic prediction ahead of the tunnel machine", First Break, Vol. 18. Issue. 7, pp.295-301.

Dowden, P.B., Robinson, R.A. (2001), "Coping with boulders in soft ground TBM tunneling", Rapid Excavation and Tunneling Conference, Littleton, US, pp.961-977.

Richter, T. (2011), "Innovative geophysical investigation technology in karstified and fractures rock formations", 1st Scientific Congress on Tunnels and Underground Structures in South-East Europe, Dubrobnik. Croatia, pp.20-21.

Yamamoto T., Shirasagi S., Yamamoto S., Mito Y., Aoki K. (2003), "Evaluation of the geological condition ahead of the tunnel face by geostatistical techniques using TBM driving data", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 18, pp.213-221.