Econ. Environ. Geol.
Vol. 31, No. 6, p. 527-534, 1998.

PS검층에 의한 터널굴착에 따른 주변암반의 이완영역 평가

박삼규* · 김희준**

Estimation of Disturbed Zone Around Rock Masses with Tunnel Excavation Using PS Logging

Sam Gyu Park* and Hee Joon Kim**

ABSTRACT : Excavation of underground openings changes stress distribution around the opening. The survey of this disturbed zone in excavation is very important to design and construct underground facilities, such as tunnel, gas and oil storage, power plant and disposal site of high- and low-level radioactive wastes. This paper presents a zoning of rock masses with tunnel excavation using PS logging. Compressional and shear wave velocities are measured in boreholes drilled in the tunnel wall, which was constructed with blasting and/or machine excavation. The disturbed zone in excavation can be estimated by comparing PS logging data with a tomographic image of compressional wave velocity and compressional and shear wave velocities of core samples. In the side wall of tunnel, the disturbed zone reaches 1.5 m and 1.0 m in thickness for blocks of blasting and machine excavations, respectively. In the roof of tunnel, however, the disturbed zone is 1.0 m and 0.75 m thick for the two blocks. These results show that the width of the disturbed zone is larger in the side wall of tunnel than in the roof, and 1.3 to 1.5 times larger for the blasting excavation than for the machine excavation.

서 언

최근 터널을 비롯한 지하 비축기지, 지하 발전소 및 방사성 핵폐기물 저장소 등의 지하 심부 암반을 대상으로 하는 지하 공간 개발이 주목을 받고있다. 이러한 지하 심부의 공간을 이용하기 위해서 암반 내에 터널 및 지하 공동을 굴착하게 되면, 굴착면의 초기 지압이 해방되어 주변 암반에서는 응력 재분포에 의한 탄성변형이 일어난다. 또한 암반상태에 따라서는 점탄 · 소성적 변형이 발생한다. 암반의 점탄 · 소성적 변형에 의해 전단강도, 변형계수 등이 초기치에 비교해서 변화하는 영역을 이완영역이라 한다. 이 이완영역은 암반의 종류, 강도, 변형특성, 터널 및 지하 공동의 크기, 굴착공법 등에 따라서 그 범위가 다르게 나타난다. 대규모의 터널 및 지하 공동을 안전하게, 또한 합리적으로 굴착하고 지하 시설의 설계 및 시공 등의 최적화를 위해서는 굴착에 따른 주변암반의 이완영역 특성을 파악하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 터널 굴착 후에 천장 및 측벽에 굴착한 시추공을 이용하여 PS검층을 실시한 결과에 대하여 보고한다. PS검층으로 P파 및 S파 속도를 구하고, 이 들 속도와 탄성파 토모그래피와 다수의 시추 코어로 부터 구한 탄성파 속도를 비교 검토함으로써 터널 굴착에 따른 주변암반의 이완영역을 파악하는 한편, 발파굴착과 기계굴착의 방식에 따른 이완영역의 차이에 대해서 비교 검토한다.

시험터널

조사 시험터널은 일본 중부 기후현 도키시 (35° 20' N, 137° 10'E 나고야시 북동쪽 30 km)에 위치하는 폐광을 이용 굴착하였다. 터널 주변의 지질은 기반암으로서 백악기 말의 화강암이 분포하고, 그 위에 신생대 제3기의 비교적 균질한 응회암질 사암 · 이암의 호층 및 역암이 분포되어 있다. 시험터널은 신생대 제3기 지층 내에 위치하며, 최대 심도는 130 m이다 (Sato *et al.*, 1995).

* 일본농림수산성 삼림총합연구소 (Forestry and Forest Products Research Institute, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Ibaraki 305-8687, Japan)
** 부경대학교 탐사공학과 (Department of Exploration Engineering, Pukyung National University, Pusan 608-737, Korea), E-mail: hejkim@dolphin.pknu.ac.kr

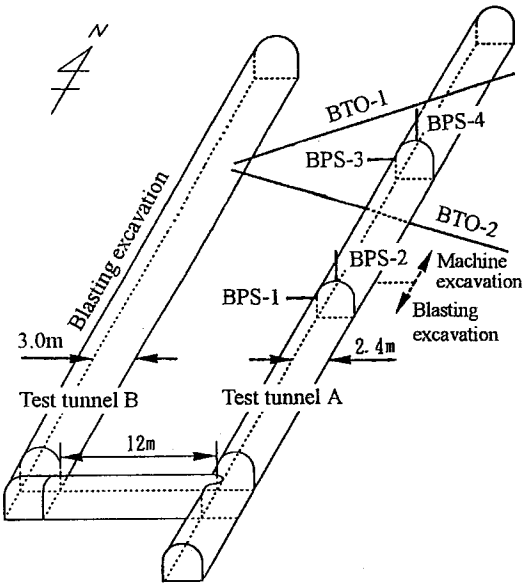

Fig. 1. Boreholes drilled around the test tunnel A and B. The borehole BTO-1 and BTO-2 are drilled before excavating the test tunnel A, which is made by blasting and machine excavations. The test tunnel B is cut only with blasting.

시험터널이 위치하는 신생대 제3기층의 물성치는 암석에 따라 다르지만 시추 코어의 평균치에 의하면, 단위체적중량이 18.1 kN/m^3, 유효공극율은 47%, 일축압축강도가 6.6 MPa, 탄성계수가 2.8 GPa, 포아송비가 0.3으로 이들 물성치로부터 판단하면 연암에 속한다.

시험터널은 굴착방식에 의한 암반의 이완영역의 차이를 조사하기 위하여, 다이너마이트를 사용한 발파굴착과 붐해더 (boom header)를 사용한 기계굴착의 두 가지 방식을 사용하였다. 터널의 단면 형상은 아치형으로 크기는 2.4 m×2.4 m이다. 지보공은 굴착길이 1 m에 록 볼트 (rock bolt) 3개를 설치하여 쇼트크리트 (shotcrete)로 시공하였다.

Fig. 1에 시험터널의 모식도 및 PS검층을 실시하기 위한 시추공의 위치를 나타내었다. 시험터널 B는 전 구간을 발파굴착으로 시공했으며, BTO-1공과 BTO-2공은 시험터널 A를 굴착하기 전에 시추하였다. 시험터널 A는 발파굴착과 기계굴착으로 시공했으며, 발파굴착 구간에는 BPS-1공 (측벽공)과 BPS-2공 (천정공)이 위치하고, 기계굴착 구간에는 BPS-3공 (측벽공)과 BPS-4공 (천정공)이 위치하고 있다.

PS검층

다운홀 (downhole)식 PS검층은 시추공 내에 3성분의 수신기 (수직 1성분, 수평 2성분)를 설치하고, 지표면 (공벽)에서 탄성파를 발생시켜 그 파동을 공내 수신기로 관측함으로써 시추 지점에 있어서의 종파 (P파) 및 횡파 (S파)를 측정하는 것이다. P파는 전파 방향과 입자의 진동 방향이 일치하고 수직 방향으로 진동한다. 이에 비해서 S파는 전파 방향과 입자의 진동 방향이 직각인 파로 매질 입자의 진동 방향이 경계면에 수직인 SV파와 수평인 SH파로 나눌 수 있다. 그러므로 공내의 3성분의 수신기 중에서 수직 1성분은 P파를, 수평 2성분은 S파를 관측하는데 사용한다.

송신 방법

P파는 탄성파 중에서 제일 먼저 도달하기 때문에 그 식별은 어렵지 않다. 여기서는 단순히 해머로 공벽을 수직으로 타격하여 P파를 발생시켰다. 이 때 해머의 타격 위치는 튜브파 (tube wave)의 영향을 피하기 위해서 시추공으로부터 2~3 m 떨어진 곳을 택하였다.

한편, S파는 공벽면에 두꺼운 판자를 모르타르로 고정시켜 판자의 가장자리를 수평 방향으로 타격하여 발생시켰다. 해머 타격에 의한 압축변형은 판자에 의해 거의 흡수되어 P파의 발생이 억제되고, 암반에 대해서는 단순한 전단변형 만을 전달할 수 있다. 또한 해머로 판자의 좌우 방향을 번갈아 타격함으로써 S파의 진동 방향이 반전하는 것을 이용하여 P파와 구별을 명확히 할 수 있다.

수신 방법

시추공 내의 수신기는 3성분이 내장된 방수형 probe을

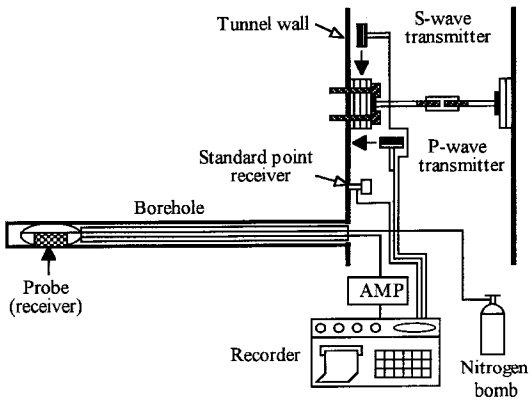

Fig. 2. Schematic diagram of PS logging. A logging tool is inserted into the borehole and fixed with a rubber pad. Seismic waves are generated on the wall of tunnel.

사용하였으며, 진동을 정확히 수신하기 위하여 고무식 압착 장치를 이용하여 수신기를 공벽에 밀착시켰다. 각 측정 심도마다 수신기를 고정시켜서 송신 · 측정 작업을 반복하였다. 송신 파형이 동일한 조건을 만족하고 있는지, 또는 해머의 타격 시각의 차이가 발생하지 않는지를 판단하기 위해서 시추공 주변에 기준점이 되는 수신기를 설치하여 측정할 때마다 송신 파형을 기록하여 참고 자료로 활용하였다. Fig. 2에 터널 공벽의 송신기 및 공내 수신기의 설치 모식도을 나타낸다.

S파의 파형을 관측할 때 주로 발생하는 문제는, 판자의 좌우 방향으로부터 발생시킨 파형을 수신해 중합시켰을 때 S파의 파형이 반전되지 않는 경우이다. 이러한 원인은 공내 수신기의 수평 2성분 중 한 성분이 판자의 타격 방향과 일치하지 않기 때문이다. Fig. 3은 판자의 타격 방향에 대한 공내 수신기의 수평 2성분의 방향에 따른 S파의 관측 파형을 나타내고 있다. Fig. 3에서 (a)와 (c)의 경우는 채널 3이 양호한 반전을 보이고 있지만, (b)와 (d)의 경우에는 어떤 채널도 파형이 반전되고 있지 않다. 다시 말해 수신기의 수평 2성분 중 어느 한 방향이라도 판자의 타격 방향과 일치하지 않으면 S파의 파형을 중합시켰을 때 반전되지 않는다. 그러므로 본 조사에서는 공내에 수신기를 설치할 때는 수평 2성분 중 한 성분의 수신 방향이 판자의 타격 방향과 일치되도록 하였다.

측정 환경

PS검층은 시험터널 A의 굴착 후에 실시하였다. 발파굴착 구간의 BTO-1공과 BTO-2공의 PS검층은 시험터널 B에서 실시했으며, 각각의 측정 심도는 22 m와 23.5 m이고, 측정 간격은 0.5 m이다. 한편, 시험터널 A에 있어서는 발파굴착 구간인 BPS-1공과 BPS-2공 및 기계굴착 구간인 BPS-3공과 BPS-4공을 대상으로 실시하였다. 측정 심도는 3 m이고, 측정 간격은 터널 공벽에서 0.5 m까지는 0.1 m 간격으로, 그리고 0.5~3 m까지는 0.25 m 간격으로 실시하였다. 측정할 때에는 공내 수신기를 시추공 바닥에서 터널의 공벽쪽으로 순차 이동하면서 공벽에서 발생시킨 P파 및 S파를 공내 수신기로 관측하였다. Table 1에 각 시추공에 대한 측정 심도 및 측정 간격을 요약해서 나타낸다.

시추공 내에 존재하는 물이 P파의 전파에 미치는 영향을 조사하기 위하여, BTO-1공을 이용하여 공내수가 있는 상태와 없는 상태에 있어서 각각의 P파를 관측하였다. 그

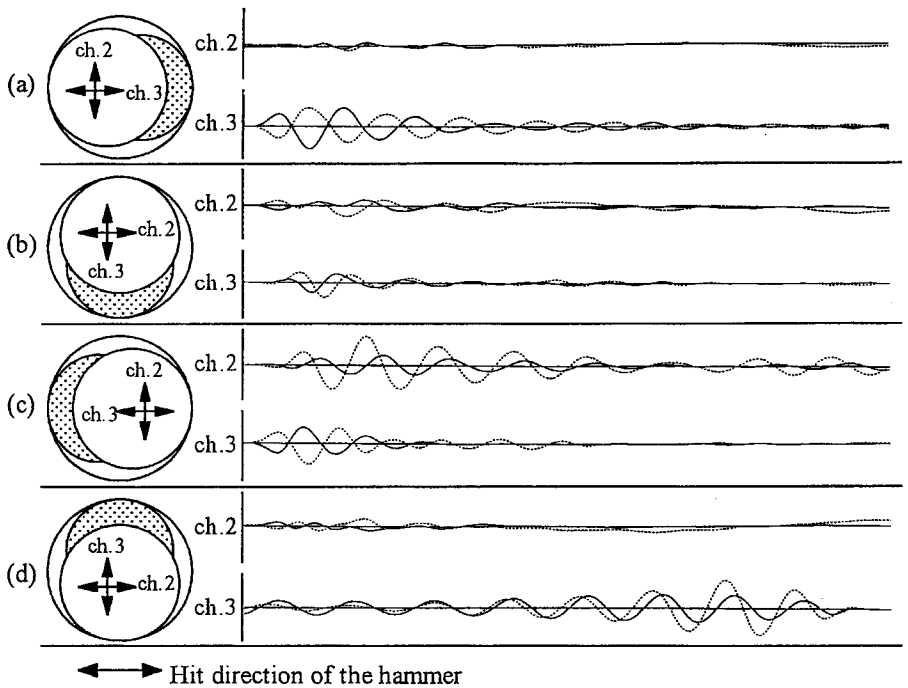

Fig. 3. Typical S waveforms measured at four receiver positions in a borehole. A distinct reversal of waveform is observed at the channel 3 in the cases of (a) and (c), where the polarity of receiver is coincident with the hit direction to the plate installed on the tunnel wall.

Table 1. Description of six boreholes drilled around the test tunnel A and B.

Borehole	BTO-1	BTO-2	BPS-1	BPS-2	BPS-3	BPS-4
Tunnel	B	B	A	A	A	A
Excavation	Blasting	Blasting	Blasting	Blasting	Machine	Machine
Location	Side wall	Side wall	Roof	Side wall	Roof	Side wall
Length (m)	22.0	23.5	3.0	3.0	3.0	3.0

결과 공내수의 유무에 따른 P파의 초동 시간차는 볼 수 없었다. 따라서 본 조사에 있어서는 공내수가 없는 상태에서 P파 검층을 실시하였다.

이완영역 평가

PS검층으로부터 얻어진 각 측점의 디지털 데이터을 컴퓨터를 이용하여 아날로그 파형으로 변환해서 P파 및 S파를 판독하였다. 이 때 P파 및 S파의 주시는 trigger 이후 초동까지의 시간을 읽었다. S파의 경우에 초동의 판독이 곤란할 경우에는 S파 위상의 마루 또는 골 부분의 시간을 읽었다.

Fig. 4는 BPS-1공에 있어서 PS검층 결과로부터 읽은 주시를 가로축에, 심도를 세로축으로 해서 작성한 주시곡선을 나타낸다. Fig. 4에서 주시 곡선의 기울기가 변화하는 심도를 속도층의 경계로 정하면, P파의 경우에는 2개의 속도층으로, S파의 경우에는 4개의 속도층으로 구분할 수 있다. 또한 각 속도층의 P파 및 S파의 속도는 다음 식으로부터 산출한다.

$$V = \Delta X / \Delta T \tag{1}$$

여기서 V (m/sec)는 P파 및 S파의 속도, ΔX (m)는 각 층의 두께, ΔT (sec)는 각 층 상하의 주시차이다. 단, 송신점은 시추공으로부터 2~3 m정도 떨어져 설치했기 때문

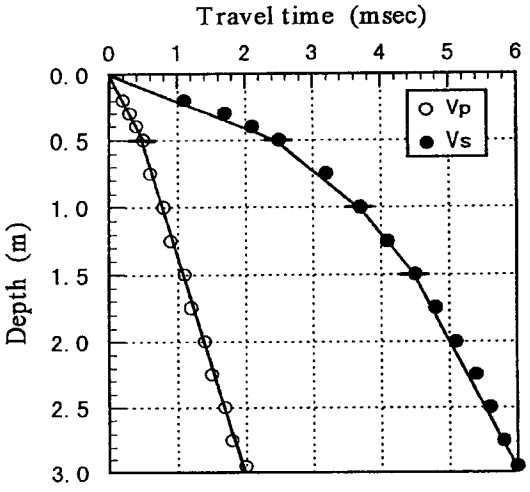

Fig. 4. Travel-time curves for the P- and S-wave obtained in the borehole BPS-1.

에 실제 탄성파의 주시 거리는 측정 심도와 다르다. 따라서 다음 식를 이용해서 초동시간을 보정하였다.

$$T = T_t \cdot (d/x) \tag{2}$$

여기서 T (sec)는 보정주시, T_t (sec)는 관측주시, d (m)는 수신점의 심도, x (m)는 송신점과 수심점의 거리이다. 또한 P파 및 S파의 속도로부터 각 속도 층의 포아송비 σ,

Table 2. Seismic velocities and elastic moduli of core samples obtained from two boreholes around the test tunnel B.

Borehole no.	Depth (m)	*Vp* (m/sec)	*Vs* (m/sec)	σ	μ (GPa)	E (GPa)	Geology
BTO-1	0.0~1.5	1,000	400	0.41	3.33	9.41	Mudstone, Tuff
	1.5~3.5	1,600	850	0.30	14.70	39.20	Tuff
	3.5~9.0	2,200	1,100	0.33	25.48	67.62	Tuff, Mudstone
	9.0~18.0		900	0.40	16.66	48.02	Sandstone, Mudstone
	18.0~22.0	2,700	1,200	0.38	30.38	83.30	
BTO-2	0.0~1.5	1,000	400	0.41	3.33	9.41	Sandstone, Mudstone
	1.5~4.0	1,600	850	0.30	14.70	39.20	Mudstone, Conglomelate
	4.0~7.0	2,300	1,200	0.31	30.38	79.38	Mudstone
	7.0~12.0		1,000	0.38	20.58	57.82	Sandstone, Mudstone
	12.0~23.5	2,700	1,200	0.38	30.38	83.30	Mudstone, Sandstone

Table 3. Seismic velocities and elastic moduli of core samples obtained from four boreholes around the test tunnel A.

Borehole no.	Depth (m)	*Vp* (m/sec)	*Vs* (m/sec)	σ	μ (GPa)	E (GPa)	Geology
BPS-1	0.0~0.4	1,000	200	0.479	0.84	2.45	Sandstone & Mudstone
	0.4~0.75		300	0.482	1.87	5.59	
	0.75~1.5	1,600	600	0.418	7.55	21.56	
	1.5~2.95		850	0.303	14.70	39.20	
BPS-2	0.0~0.5	800	300	0.418	1.86	5.39	
	0.5~1.0	1,600	500	0.446	5.29	14.70	
	1.0~3.0		850	0.303	14.70	39.20	
BPS-3	0.0~0.4	600	200	0.438	0.84	2.45	
	0.4~1.0	1,600	600	0.418	7.55	21.56	
	1.0~2.75	2,500	1,200	0.350	30.38	81.34	
BPS-4	0.0~0.3	600	200	0.438	0.84	2.45	
	0.3~0.75	1,600	400	0.467	3.33	9.80	
	0.75~1.5	2,000	700	0.430	10.78	29.40	
	1.5~2.75	2,500	1,200	0.350	30.38	81.34	

전단 계수 μ, 영률 E를 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\sigma = \frac{Vp^2 - 2Vs^2}{2(Vp^2 - Vs^2)} \quad (3)$$

$$\mu = \rho Vs^2/g \quad (4)$$

$$E = 2\mu(1+\sigma) \quad (5)$$

여기서 *Vp* (m/sec)는 P파의 속도, *Vs* (m/sec)는 S파의 속도, σ (g/cm^3)는 밀도, *g* (=9.8 m/sec^2)는 중력가속도이다.

Table 2와 3은 각각 BTO-1, 2공 및 BPS-1, 2, 3, 4공에 대한 PS검층 결과와 이들의 속도로부터 구한 동탄성계수를 나타낸다. BTO-1, 2공에 있어서는 *Vp*에 의해서 4개의 속도층으로, *Vs*에 의해서 5개의 속도층으로 구분되고, 심도 1.5 m와 3.5~4.0 m을 경계로 *Vp* 및 *Vs*의 차이가 현저하고, 전단계수 및 영률의 차이도 현저하게 나타난다. 또한 BPS-1~4공에 있어서는 *Vp*에 의해서 2~4개의 속도층으로, *Vs*에 의해서 3~4개의 속도층으로 구분되고 있다. 전단계수 및 영률은 발파굴착 구간의 BPS-1, 2공에 있어서는 각각 1.5 m와 1.0 m을 경계로 현저한 차이가 나타나고, 기계굴착 구간의 BPS-3, 4공에 있어서는 각각 1.0 m와 0.75 m을 경계로 현저한 차이가 나타난다.

PS검층 결과로부터 구한 *Vp*와 *Vs*를 이용하여 터널 굴착에 따른 주변암반의 이완영역을 평가하기 위해서는, 터널 굴착 이전의 암반의 *Vp*와 *Vs*를 파악할 필요가 있다. 본 조사에서는 시험터널 A를 굴착하기 전에 BTO-1, 2공을 이용해서 별도로 실시한 탄성파 토모그래피의 결과와 시험터널 A에서 채취한 다수의 시추 코어로부터 구한 *Vp* 및 *Vs*를 종합 검토해서 터널 굴착 전의 암반의 *Vp* 및 *Vs*를 추정한다.

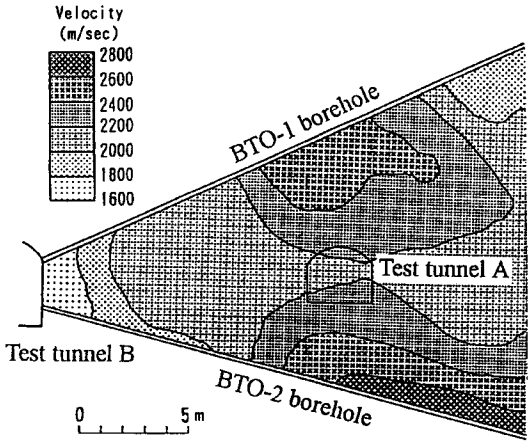

Fig. 5. P-wave velocity image between two boreholes of BTO-1 and BTO-2.

Fig. 5에 시험터널 A를 굴착하기 전에 BTO-1, 2공을 이용해 별도로 실시한 탄성파 토모그래피에 의해서 얻은 *Vp*의 분포를 나타낸다. Fig. 5에 의하면 전체적으로 *Vp*가 1600~2800 m/sec의 범위 내에 분포하고 있어며, 시험터널 A부근의 *Vp*는 2000~2400 m/sec의 범위로 분포하고 있다. 또한 BTO-1, 2공에 있어서 심도에 따른 *Vp* 분포는 후술하는 PS검층 결과의 *Vp* 분포와 거의 일치한다. Table 4는 시험터널 A의 발파굴착 구간과 기계굴착 구간에서 시추한 다수의 코어를 이용해 실내 시험으로부터 얻은 *Vp* 및 *Vs*를 나타내고 있다. 발파굴착 구간과 기계굴착 구간에서 각각 35와 41개의 코어를 얻었다. 코어의 탄성

Table 4. Seismic velocities of core samples obtained from the test tunnel A.

Wave type	P-wave (m/s)		S-wave (m/s)	
Excavation	Blasting	Machine	Blasting	Machine
Maximum	2,200	2,290	916	915
Minimum	1,890	1,860	785	688
Average	2,062	2,133	843	820
Standard Deviation	91	89	28	53

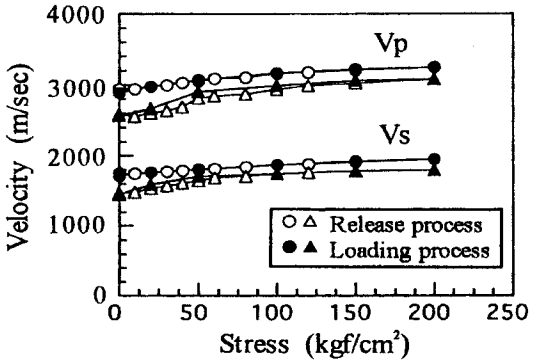

Fig. 6. Variation of ultrasonic wave velocity as a function of stress for saturated sandstone samples (from Lin *et al.*, 1996).

파 속도는 암종, 풍화상태 및 파쇄정도에 따라서 다소의 차이는 있지만, 평균적으로 *Vp*는 2000~2100 m/sec, *Vs*는 820~840 m/sec의 범위 내에 분포하고 있다. 일반적으로는 현지 암반이 절리 등을 많이 포함하고 있기 때문에 코어의 탄성파 속도가 훨씬 큰 것으로 나타난다. 그러나 본 조사지는 Borehole Image Processing에 의한 결과에 의하면 절리는 거의 관찰되지 않았고 (Park *et al.*, 1998), 또 지하 130 m에서 코어를 채취하였기 때문에 상당한 응력이 해방되었을 것으로 예상된다. 따라서 코어로부터 측정된 탄성파 속도가 현지 암반의 탄성파 속도보다 조금 느릴 것으로 생각된다. 이러한 예는 절리가 거의 없는 심부의 연암에서 나타나는 경우와 유사하다 (일본 토목학회, 1987).

Fig. 6은 포화상태의 사암 공시체에 대한 초음파 속도와 응력 관계를 나타내고 있다 (Lin *et al.*, 1996). 전 영역에서 응력이 증가함에 따라 *Vp* 및 *Vs*도 빨라지고, 그 증가율은 응력이 0~100 kgf/cm^2 범위 내에서는 크고, 응력이 100 kgf/cm^{2}이상에서는 작게 나타난다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 암반의 탄성파 속도는 응력에 대한 의존성이 크고, 응력이 완전히 해방된 상태에서는 약 10% 이상 탄성파 속도가 감소할 것으로 생각된다. 이러한 점

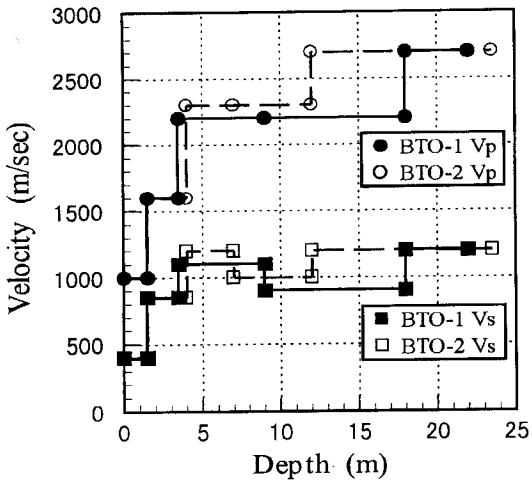

Fig. 7. P- and S-wave velocities measured in the borehole BTO-1 and BTO-2.

을 고려하여 탄성파 토모그래피의 결과와 시추 코어로부터 구한 탄성파 속도를 종합하면, 터널굴착 전의 시험터널 A 부근의 Vp는 2000 m/sec이상, *Vs*는 820 m/sec이상일 것으로 추정된다.

Fig. 7은 BTO-1, 2공에 있어서의 *Vp* 및 *Vs*의 속도 분포를 나타내고 있다. 이들 속도 분포에 의하면, 전술한 시험터널 A 부근의 탄성파 속도보다 작은 구간은 *Vp*의 경우에는 공벽으로부터 3.5~4.0 m까지, *Vs*의 경우에는 공벽으로부터 1.5 m까지이다. *Vp* 및 *Vs*에 의한 터널굴착에 따른 이완영역을 비교해 보면, *Vp*에 의한 이완영역이 *Vs*에 의한 이완영역 보다 넓게 나타난다. 이러한 이완영역의 차이는 터널굴착에 따른 지하수 유동변화에 의한 영향으로 공벽 부근이 지하수의 불포화 상태가 되어 *Vp*가 현저하게 저하되었을 것으로 생각된다.

탄성파 속도와 물의 포화도 관계는 비교적 잘 알려져 있다 (Wyllie *et al.*, 1956; King, 1984; Fujita *et al.*, 1996). Wyllie *et al.* (1956)의 사암에 대한 물의 포화도에 따른 탄성파 속도의 측정결과에 의하면, 포화도가 100%에서 70%로 저하함에 따라 *Vp*가 현저하게 떨어지는 것을 알 수 있다. 또한 King (1984)에 의하면 석영 몬조나이트의 경우 10 MPa에서 포화도가 100 %에서 20%로 저하하면 *Vp*는 최대 12%, *Vs*는 최대 3.5% 속도가 떨어지며, *Vp*는 *Vs*에 비해 물의 포화도 영향을 크게 받음을 알 수 있다. Fig. 8은 화강암에 대한 예지만 (Fujita *et al.*, 1996), 이 그림에 의하면 포화도가 100~50%의 범위 내에서는 포화도의 저하에 따른 *Vp*는 선형적으로 저하하고 있다. 전 화강암 공시체의 *Vp*의 평균치로는 포화도가 100%에서는 5300 m/sec 인데 비해서 포화도가 50%에서는 3910 m/sec로 저하되고, 그

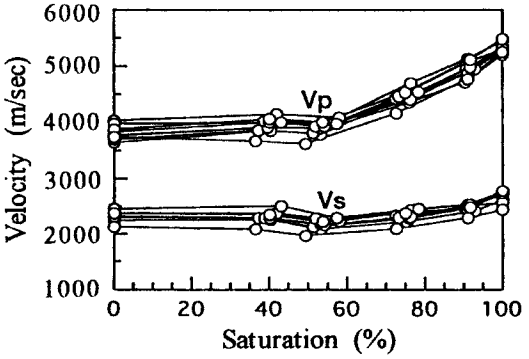

Fig. 8. Variation of ultrasonic wave velocity as a function of water saturation for granite samples (from Fujita et al., 1996).

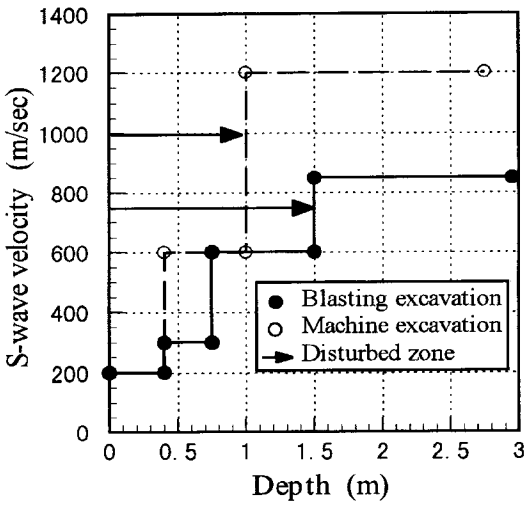

Fig. 9. S-wave velocities measured in boreholes drilled in the side wall of the test tunnel A. A significant difference in S-wave velocity is found between regions around the tunnel which is made by blasting and machine excavations.

저하율은 약 26%에 달한다. 한편, *Vs*의 경우에는 포화도가 100~50%의 범위내에서는 *Vs*가 적은 폭으로 떨어지고 있으며, 포화도가 50%에서는 *Vs*가 최소가 되고 그 이하의 범위에서는 *Vs*가 조금 빨라지는 경향을 보이고 있다. 이것으로 *Vp*는 *Vs*에 비해 물의 포화도에 따라 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 본 조사지역에서도 사정은 비슷한 것으로 생각되며, 지하수의 포화상태에 크게 영향을 받지 않는 *Vs*를 이완영역의 판정기준으로 사용하였다. *Vs*가 820 m/sec미만의 구간인 공벽에서 1.5 m까지가 터널굴착에 의한 이완영역으로 추정된다. 이 구간에서는 *Vs*와 밀도로부터 구한 전단계수에 주목해 보아도 1.5 m보다 깊은 구간의 전단계수에 비해서 현저하게 작게 나타난다.

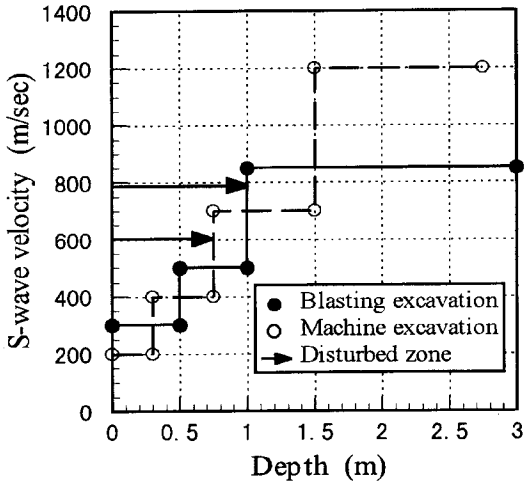

Fig. 10. S-wave velocities measured in boreholes drilled in the roof of the test tunnel A, which is cut with blasting and machine.

터널 굴착방식에 의한 암반의 이완영역의 차이를 조사하기 위하여, 시험터널 A의 발파굴착 구간의 BPS-1, 2공과 기계굴착 구간의 BPS-3, 4공을 대상으로 PS검층의 결과를 비교 검토한다. Fig. 9는 시험터널 A의 측벽 시추공에 있어서 발파굴착 구간의 BPS-1공과 기계굴착 구간의 BPS-3공의 *Vs*의 분포를 나타내고 있다. 전술한 바와 같이 *Vs*가 820 m/sec미만의 구간을 터널굴착에 따른 이완영역으로 판정하였다. 그 결과 발파굴착 구간에서는 공벽에서 1.5 m까지가 이완영역에 해당하고, 시험터널 B의 BTO-1, 2공의 이완영역과 일치한다. 그리고 기계굴착 구간에서는 공벽에서 1.0 m까지가 이완영역에 해당하고, 기계굴착보다 발파굴착 구간이 1.5배정도 터널굴착에 따른 이완영역이 넓게 나타난다.

Fig. 10은 시험터널 A의 천정 시추공에 있어서 발파굴착 구간의 BPS-2공과 기계굴착 구간의 BPS-4공의 *Vs*의 분포를 나타내고 있다. Fig. 7과 같은 기준으로 터널굴착에 따른 이완영역을 판정하면, 발파굴착 구간에서는 공벽에서 1.0 m까지, 기계굴착 구간에서는 공벽에서 0.75 m까지가 이완영역에 해당한다. 이 결과로부터 기계굴착보다 발파굴착 구간이 1.3배정도 터널굴착에 따른 이완영역이 넓게 나타난다. 그리고 천정 시추공과 측벽 시추공의 이완영역을 비교하면, 천정공보다 측벽공이 이완영역이 넓다는 것을 알 수 있다.

결 론

시험터널의 굴착 후에 시추공을 이용하여 실시한 PS검

층 결과로부터 터널굴착에 따른 주변암반의 이완영역과, 발파굴착과 기계굴착의 방식에 따른 이완영역의 차이에 대해서 비교 검토하였다. 그 결과를 요약하면 아래와 같다.

1. P파의 속도는 터널굴착에 따른 지하수 유동의 변화에 의한 영향으로 공벽 부근의 지하수가 불포화 상태인 구간에서는 속도가 현저하게 저하되는 것을 알았다. 따라서 터널굴착에 따른 이완영역을 판정하기 위해서는 P파의 속도보다는 지하수의 포화상태와 무관한 S파의 속도를 이용하는 것이 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

2. 터널 굴착에 의한 이완영역을 터널 높이 (h)에 대한 상대적인 비로 나타내면, 터널의 측벽 시추공의 경우, 발파굴착 구간에서는 0.63h까지, 기계굴착 구간에서는 0.42h까지가 이완영역에 해당하고, 기계굴착 구간보다 발파굴착 구간이 1.5배정도 이완영역이 넓게 나타났다.

3. 터널의 천정 시추공의 경우, 발파굴착 구간에서는 0.42h까지, 기계굴착 구간에서는 공벽에서 0.31h까지가 이완영역에 해당하고, 기계굴착 구간보다 발파굴착 구간이 1.3배정도 이완영역이 넓게 나타났다.

4. 터널의 천정 시추공과 측벽 시추공의 이완영역을 비교하면, 천정공보다 측벽공의 이완영역이 넓게 나타났다.

사 사

연구비의 일부는 전략광물자원연구센터의 지원을 받았다.

참고문헌

Fujita, M., Lin, W., Sugita, N., Tomoda, M. and Nakamura, T. (1996) Ultrasonic property and strength variation with moisture change of granite, Proc. 31th Japan National Conf. on Geotechnical Engineering, JGS, p. 1389-1390. (in Japanese)

King, M.S. (1984) Elastic-wave velocities in quartz monzonite at different levels of water saturation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., v. 21, p. 35-38.

Lin, W., Koizumi, K., Sugita, N., Lei, X. and Nakamura, T. (1996) Compressional wave and shear wave velocities in rocks at high pressure, Proc. 31th Japan National Conf. on Geotechnical Engineering, JGS, p. 1391-1392. (in Japanese)

Park, S.G., Kikuchi, T., Sato, T., Sugihara, K., Yoshioka, H. and Michihiro, K. (1998) Characterization of excavation disturbed zone around drift by in-site tests, Proc. 10th Symp. on Rock Mechanics, p. 551-556.

Sato, T., Sugihara, K. and Matsui, H. (1995) Geoscientific studies at the Tono mine and the Kamaishi mine in Japan, 8th ISRM Congress, p. 47-51.

Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., and Gardner, L.W. (1956) Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media, Geophysics, v. 21, p. 41-70.

日本土木學會 (1987) トンネルにおける調査 · 計測の評 價および利用, p. 52.

1998년 5월 6일 원고접수, 1998년 11월 23일 게재승인.