

경암지반 NATM 터널에서 암반분류 및 계측에 의한 최적지보공 선정에 관한 연구

김영근¹⁾ · 장정범²⁾ · 정한중³⁾

Selection of Optimum Support based on Rock Mass Classification and Monitoring Results at NATM Tunnel in Hard Rock

Y. G. KIM, J. B. JANG and H. J. JEONG

ABSTRACT Due to the constraints in pre site-investigation for tunnel, it is essential to re-design the support structures suitable for rock mass conditions such as rock strength, ground water and discontinuity conditions for safe tunnel construction. For the selection of optimum support, it is very important to carry out the rock mass classification and in-situ measurement in tunnelling. In this paper, in a mountain tunnel designed by NATM in hard rock, the selectable system for optimum support has been studied. The tunnel is situated at Chun-an in Kyungbu highspeed railway line with 2 lanes over a length of 4,020 m and a diameter of 15 m. The tunnel was constructed by drill & blasting method and long bench cut method, designed five types of standard support patterns according to rock mass conditions. In this tunnel, face mapping based on image processing of tunnel face and rock mass classification by RMR carried out for the quantitative evaluation of the characteristics of rock mass and compared with rock mass classes in design. Also, in-situ measurement of convergence and crown settlement conducted about 30 m interval, assessed the stability of tunnel from the analysis of monitoring data. Through the results of rock mass classification and in-situ measurement in several sections, the design of supports were modified for the safe and economic tunnelling.

1. 서 론

터널은 긴 선상구조물로서 사전지질조사에 의해 설계에 필요한 정보를 충분히 구하는 것이 매우 어렵다. 따라서 터널시공중 암반 및 지질상황을 관찰하고, 터널 주변 지반의 거동을 계측하여 지반에 적합한 지보공을 설계·시공하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 이를 위해서 대부분의 터널공사중 암반분류와 계측이 주기적으로 실시되고 있지만, 정량적인 암반분류와 효과적인 계측수행이 이루어지지 않아 터널시공의 불합리성이 심화되고 있는 실정이다. 또한 암반분류 및 계측을 실시했다 하더라도 이러한 결과를 어떻게 시공에 반영하느냐는 터널의 경제적이고 안전한 시공에 있어 매우 어

려운 문제라 할 수 있다. 따라서 터널시공중 합리적인 지보공선정을 위해서 정량적인 암반분류 및 계측결과가 어떻게 이용 또는 평가되었는지, 다양한 실제 시공사례를 통해서 이에 대한 검토가 보다 충분히 이루어져야 한다.

본 논문은 NATM공법으로 시공된 터널에서 암반분류와 계측결과에 의한 지보공 선정 및 변경에 대한 적용사례 연구이다. 대상터널은 경부고속철도 구간에 건설중인 길이 4.02 km, 단면적 105 m²인 대단면 장대터널로서 경암지반을 관통하는 산악터널이다. 이러한 적

1) (주)대우 건설기술연구소, 선임 연구원

2) (주)대우 건설기술연구소, 주임 연구원

3) (주)대우 건설기술연구소, 토목연구실장

용사례를 통하여 경암지반 NATM 터널에서의 암반분류와 계층의 공학적 의미를 평가하고, 지보패턴별 계층 결과의 경향을 분석함으로써 암반상태와 계층결과의 관련성을 평가하고자 하였다. 따라서 주변 암반에 적합한 지보공 선정으로 경제적이고 안전한 터널시공을 달성할 수 있음을 보여주고자 한다.

2. 지질조사

2.1 지표지질조사

본 지역의 지질은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 선 캄브리아기에 속하는 편마암류인 안구상편마암(Augen Gneiss)과 호상편마암(Banded Gneiss) 등이 주로 분포하고 있다. 터널시점에서 Sta. 108 K 750지점까지는 안구상 편마암이 나타나고 있으며 그 이후로는 호상편마암으로 점차적으로 변하고 있다. Sta. 109 K 640부근에는 석회암 층이 협재하고 있으며, 폭은 3~4 m이고 연장은 10 m에 이르고 있다. 또한 Sta. 110 K 070부근에는 염기성 암맥과 각람석이 분포한다. 정상부의 암석

의 슈미트해머 수치는 40~60정도로 매우 강하게 나타났다.

본 지역에서의 큰 단층은 발견되지 않았으며, 107 K 800에서 N37E/59SW의 주향과 경사를 갖는 폭이 약 10 m인 파쇄대가 나타나고 있다. 측정된 절리면의 평사투영분석결과 안구상편마암의 주향과 경사는 N52E/60NW 및 N72E/85SE로, 호상편마암지역의 주절리면의 주향과 경사는 N27W/74NE 및 N56E/82SE로 나타났다.

2.2 시추조사

본 지역의 지질상태를 파악하고 지반공학적 자료를 얻기 위하여 시추조사를 실시하였다. 시추작업은 NX 공경으로 굴착되었으며, 케이싱공법을 채택하였다. 또한 코아회수율을 높이기 위하여 Double Core Barrel과 다이아몬드 비트를 사용하였고 암석코아에 대해서는 코아회수율(Total Core Recovery)과 RQD를 기록하였다. 시추공은 총 13공으로 주로 터널시점부와 종점부에서 조사되었으며 그 축점이 Fig. 1에 표시되어 있

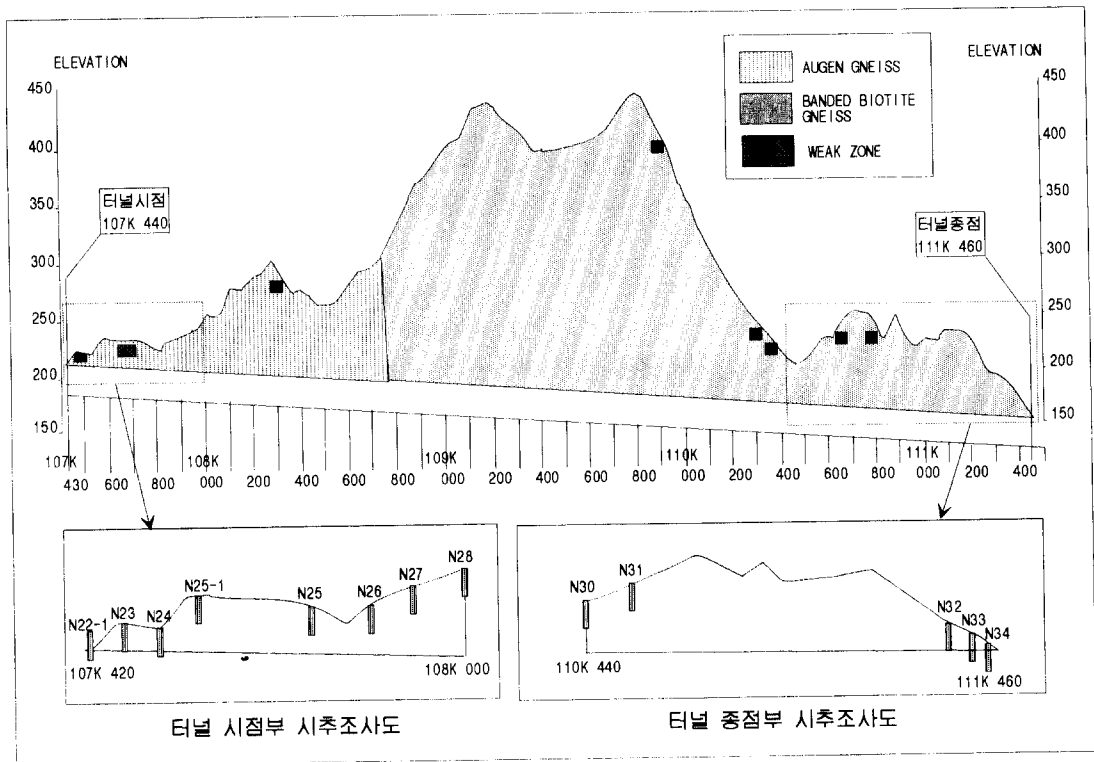


Fig. 1. Geological profile.

다. 또한 각 시추공에서의 지하수위를 측정하였고, 암석코아의 풍화상태, 불연속면의 간격 및 강도에 따라 암석을 분류하여 Table 1에 나타내었다.

이상의 시추조사결과를 정리하면 다음과 같다.

· 표토 및 전답토층(Top Soil & Paddy Soil)-본 지층은 조사지역의 최상부에 위치한 지층으로서 0.2~0.6 m 내외의 두께로 분포하고 있으며, 구성성분은 세립 내지 조립의 모래섞인 실트, 실트 섞인 세립 내지 조립의 모래로 통일분류법에 의한 흙의 분류는 ML 및 SL로 분류되고 느슨한 상태의 상대밀도를 나타내고 있다.

· 부적토층(Colluvial Deposit)-본 지층은 사면의 활동, 붕괴 등의 요인에 의하여 경사면의 상부로부터 흙이 이동되어 형성된 지층으로서 1.2~8.0 m의 두께로 분포하고 있다. 지층의 구성성분은 자갈 및 실트섞인 세립 내지 조립의 모래, 자갈 및 세립 내지 조립의 모래 섞인 연암층으로서 통일분류법에 의한 흙의 분류는 SM으로 분류되고 중간정도 조밀 내지 조밀한 상태의 상대밀도를 나타내고 있다.

· 잔류토층(Residual Soil)-본 지층은 표토층 하부에 1.5~7.5 m 내외의 두께로 분포하고 있다. 지층의 구성성분은 실트섞인 세립 내지 조립의 모래로 구성되었으며, 통일분류법에 의한 흙의 분류는 SM으로 분류되고 중간정도 조밀 내지 조밀한 상태이다.

· 풍화암층(Weathered Rock)-본 지층은 지표하 0.3~8.5 m 내외의 심도에서 확인되었으며, 표준관입시험 과정에서 타격에너지에 의하여 실트섞인 세립 내지

조립의 모래 및 암편으로 분해되었으며 상대밀도는 매우 조밀한 상태이다.

· 연암층(Soft Rock)-본 지층은 풍화암층 하부에 분포하고 있으며, 코아회수율은 0~100% 정도이며 RQD는 0~50%정도로 갈색, 흑갈색, 청회색을 띠고 있다.

· 경암층(Hard Rock)-본 지층은 연암암층 하부에 분포하고 있으며, 코아회수율은 39~100% 정도이며 RQD는 0~100%정도로 갈색, 흑갈색, 청회색을 띠고 있다.

2.3 탄성과 탐사

탄성과 시험은 지표 및 시추공에 의한 조사가 실시되지 못한 지역에 대한 지질상태를 파악하기 위한 것이다. 조사지역은 터널의 시점에서 종점까지 약 4 km로, 지하구조에 따른 탄성과속도를 측정하기 위하여 Line Spread 간격을 110 m로 하고 10 m 간격으로 Geophone 12개를 설치한 다음 5회 발파를 실시하였다. 탄성과 탐사결과는 Table 2에 정리되어 있다.

본 터널구간의 탄성과속도에 의한 지층분포를 보면 1층의 속도는 410~710 m/sec로 표토 및 풍화토에 해당되며 이층의 두께는 5~25 m 내외로 분포하고 있으며, 산정상 부근과 구릉지 그리고 터널종점 부근에서는 풍화대의 두께가 두터우며 산사면에서는 얇게 나타나고 있다. 제 2층의 속도분포를 보면 1,000~2,200 m/sec로 풍화암 및 균열이 심한 연암에 해당되는 것으로 두께는 5~15 m로 불규칙하게 분포하고 있다. 제 3층의

Table 1. The results of rock classification by RMR

시추 지점	터널단면 심도(m)	분류심도 (m)	단축압축강도 (kgf/cm ²)	RQD (%)		절리간격 (cm)		절리상태 점수		용수 점수 (1/min)	보점수	정점수	총점	암반등급	암반등급		
				점수	점수	점수	점수										
N25	21.7~31.7	21.3~30.0	1630	12	99	20	97	20	매우 거침	10	None	10	매우 불리	-12	75	II	GOOD ROCK
N26	22.1~32.1	21.3~32.2	1880	12	98	20	105	25	매우 거침	25	None	10	매우 불리	-12	80	II	GOOD ROCK
N27	32.3~44.3	29.2~43.6	460	4	64	13	55	20	약간 거침	20	None	10	매우 불리	-12	55	III	FAIR ROCK
N28	34.7~44.7	33.8~45.0	920	7	95	20	95	20	매우 거침	25	None	10	매우 불리	-12	70	II	GOOD ROCK
N31	14.0~24.0	14.0~25.7	1080	12	100	20	124	25	매우 거침	25	None	10	매우 불리	-12	80	II	GOOD ROCK
N32	29.0~39.0	28.0~40.0	470	4	27	8	15	10	약간 거침	20	None	10	매우 불리	-12	40	IV	POOR ROCK
N33	29.0~39.0	29.8~40.0	1090	12	52	13	18	10	약간 거침	12	None	10	매우 불리	-12	45	III	FAIR ROCK

속도분포를 보면 3,300~5,000 m/sec로 나타났으며 4,000 m/sec이하는 균열이 많은 연암이고 4,000 m/sec이상은 신선한 암반으로 판단된다. 이 지역중 저속도대(weak zone)가 분포하는 곳이 8개소로 나타났는데 이는 Fig. 1의 지질 종단면도에 표시되어 있다.

2.4 현장 및 실내 시험

현장시험은 표준관입시험, 수압시험(Water Pres-

sure Test), 현장투수시험(Permeability Test) 그리고 공내재하시험(Pressuremeter Test)을 실시하였다. 특히 공내재하시험의 경우 암반의 변형계수를 구하여 터널단면해석에 이용하기 위하여 실시하였으며 등분포재하법을 적용하였다. 공내재하시험의 결과는 연암층의 경우 $3.1 \times 10^3 \sim 1.2 \times 10^3$ kgf/cm, 경암층의 경우 $1.1 \times 10^4 \sim 3.8 \times 10^5$ kgf/cm으로 나타났다. 또한 실내토질 및 암석 시험을 실시하여 토질 및 암석의 공학적 특성을 구하였다.

Table 2. Wave velocity and layer thickness of in drill- ed locations

시추번호	제 1 층		제 2 층		제 3 층
	속도 (m/sec)	층두께 (m)	속도 (m/sec)	층두께 (m)	
N22-1	430	6.5	2000	6.0	-
N23	530	4.0	2000	9.0	-
N24	530	3.0	1500	5.0	5000
N25-1	420	11.0	1300	5.0	5000
N25	480	8.0	2200	3.0	-
N26	620	9.0	1000	5.0	3600
N27	500	6.0	1200	5.0	-
N28	410	5.0	1200	6.0	5000
N30	710	10.0	1200	4.0	3600
N31	620	6.0	1800	5.0	4000
N32	600	23.0	1700	8.0	3300
N33	620	25.0	1700	5.0	5000
N34	650	27.0	1100	5.0	-

3. 설계와 시공

3.1 설계

본 설계구간은 Sta. 107K 440~Sta. 111K 460 구간으로 총 연장 4.02 km이다. 이 구간의 터널단면은 한국고속철도건설공단에서 제시된 복선반원형 표준단면으로 설계하였으며 레도중심간격은 5.0 m로 하였다. NATM 공법을 적용하여 터널막장의 지반상태와 시공성을 고려하여 5종의 표준지보패턴으로 구분, 설계하였으며 지보패턴 I~IV까지는 선진 반단면 굴착공법으로 하고 지보패턴 V는 다단면 굴착공법으로 설계하였다. 또한 터널 입출구 부근은 防火상에 특히 세심한 배려를 하여 터널 입출구를 될 수 있는한 비탈끝보다 외

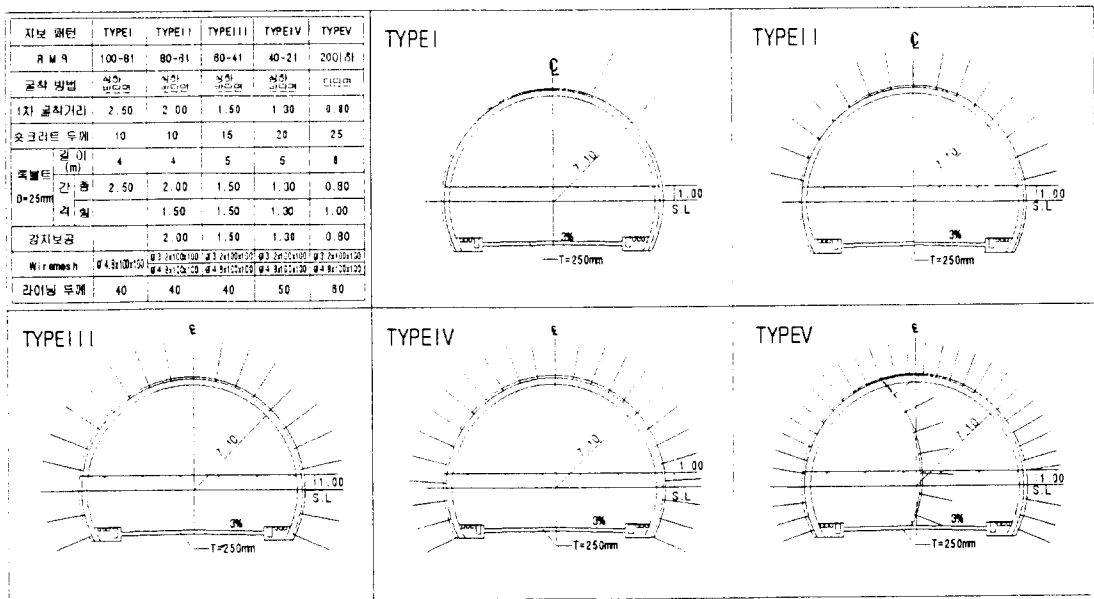


Fig. 2. The section of standard support pattern.

方으로 연장시키는 방법으로 설계하였으며 복도가 편압을 받는 부분이나 노출하는 경우는 철근 콘크리트 구조로 하였다.

본 터널구간에 적용된 지보패턴별 특성은 다음과 같으며 설계단면은 Fig. 2에 나타나 있다.

· 지보패턴 I - 극히 양호한 지반에 적용하였으며 RMR 값이 81~100이고 신선하며 절리상태가 Massive한 지반에 적용하였다. 슛크리트 두께는 10 cm이고 강지보재는 사용치 않으며 록볼트는 부분적인 지반의 결함을 중점적으로 보충하는 것으로 지반의 잠재적인 균열이나 절리가 있어 록볼트를 설치하는 것이 필요하다고 판단될 경우에 L=4 m 록볼트를 랜덤하게 설치하는 것으로 하였다.

· 지보패턴 II-양호한 지반에 적용하였으며 RMR 값이 61~80이고 풍화상태는 거의 신선한 지반에 적용하였다. 슛크리트 두께는 10 cm, 강지보재(H-100×100)의 간격은 2.0 m로 하고 록볼트는 4 m 길이, 1.5 m 간격으로 터널 아치부에만 규칙적으로 설치하는 것으로 하였다.

· 지보패턴 III-비교적 양호한 지반에 적용하는 것으로 RMR값이 41~60이고 풍화상태는 보통인 지반에 적용하였다. 슛크리트 두께는 15 cm로 하고 강지보재(H-125×125)의 간격은 1.5 m, 록볼트는 L=5 m를 1.5 m 간격으로 터널의 아치부 및 측벽부에 설치하는 것으로 하였다.

· 지보패턴 IV-풍화가 발달한 지반에 적용하며 RMR 값이 21~40이고 부분적으로 풍화된 지반에 적용하였으며 슛크리트 두께는 20 cm, 강지보재(H-150×150)의 간격은 1.3 m, 록볼트는 L=5 m를 1.3 m 간격으로 터널의 아치부 및 측벽부에 설치하는 것으로 하였다.

· 지보패턴 V-지반이 이완되어 있거나 극히 불량한 지반에 적용하는 것으로 RMR 값이 20이하이고, 풍화가 발달한 암반과 풍화 및 파쇄가 심한 개소 및 터널 갱구 초입부에 적용하였다. 강지보재(H-150×150)는 0.8 m 간격으로 설치하고 슛크리트 두께는 25 cm로 하며, 록볼트는 L=6 m를 1.0 m 간격으로 터널 전주위에 설치하는 것으로 하였다.

3.2 수치해석

표준지보패턴의 설계 제원에 대한 타당성을 검토하고, 굴착에 따른 지반 거동 파악, 안정성 검토, 소성영역 범위, 지보 부재에 작용하는 응력 검토 등을 통하여 시공법의 타당성, 안정성 및 거동 예측을 위하여 수치 해석을 수행하였다. 해석 프로그램은 FLAC을 사용했으며, 수치해석 조건 및 결과를 정리하면 다음과 같다.

3.2.1 대상단면 및 경계조건

본 구간에서는 1차 계측관리 기준치로 활용하기 위하여 수치해석을 수행하였는데 대상지점은 최대토피를 가지는 Sta. 109K 810 지점으로 하였다. 경계 조건은 공학적 차원에서 일반적으로 설정하는 기준에 따라 터널 상부는 토피두께, 측부는 2.5D(D는 터널 직경), 하부는 1.5D로 영역을 설정하고, 좌·우 측방 경계는 수평변위, 하부 경계는 연직 변위를 구속하였다.

3.2.2 입력물성치

해석 대상 단면은 풍화대층, 연암층, 경암층의 순서로 구성되어 있으며, 각 지층의 지반물성치는 서울-부산간 경부고속철도 제 4공구 지질조사보고서 및 5m 지반의 현장 및 실내 실험결과 등을 참고하여 결정하였다. 수치해석에 사용한 지층 및 지보재의 물성치를 정리하면 Table 3과 같다.

Table 3. Properties of rock and support

구분	지층	탄성계수 (tonf/m ²)	단위중량 (tonf/m ³)	포아송비	점착력 (tonf/m ²)	내부마찰각 (degree)	정지토압 계수	심도 (m)
지반	풍화암	10,000	2.2	0.28	5.0	25	0.5	0~10.0
	연암	60,000	2.4	0.23	11.2	33.5	0.5	10.0~15.0
	경암	360,000	2.6	0.2	24.7	42	0.5	15.0~
지보재	Soft Shotcrete	500,000			A=0.10 m ²			
	Hard Shotcrete	1,500,000			A=0.10 m ²			
	Rockbolt	21,400,000			직경 : 2.5 cm,	단면적 : 4.91 cm ²		

3.2.3 해석단계

터널 해석은 시공상 막장 굴착이 단계적으로 진행되는 때문에 터널 변위는 3차원 거동을 나타내지만, 2차원 해석에 의해 3차원 효과를 근사적으로 고려하는 해석 방법이 일반적으로 사용된다. 따라서 막장 진행 효과는 막장 거리에 따라 일정한 패턴을 가지는 지반특성 곡선을 이용하여 각 굴착 단계별로 분담되는 하중 분담율로서 고려하였다. 보통 하중 분담율은 지반별로 다소의 범위를 가지고 있으나, 단면형상, 굴착순서, 지반특성, 시공법 등을 고려하여 산정한 바, 해석 단계별 하중 분담율을 정리하면 Table 4와 같다.

3.2.4 해석결과

터널 굴착 해석단계 Table 4에 따라 터널 내부의 천단침하 및 내공변위를 정리하면 Table 5과 같다. 수치해석결과를 계측 1차 관리치로 활용하기 위하여 계측이 수행되기 전의 변위인 굴착시 변위를 제외하여 산정하였다. 계측 1차 관리치로 활용하기 위한 변위량은 천단침하 19.2 mm, 내공변위 5.25 mm로 나타났고, 전체적으로 소성영역은 나타나지 않았다.

터널 시공시 지보재에 작용하는 응력을 검토한 결과 Table 6와 같이 나타났다. Shotcrete 응력은 Invert 부

에서 최대 17.71 kgf/cm², Rockbolt 축력은 0.87 tonf 로 모두 허용치보다 작은 값을 발생하였고, 터널 Invert 부에서 가장 큰 휨모멘트를 나타냈다. 지보재에 작용하는 응력이 허용응력 범위내에서 거동하므로 본 지보패턴은 타당한 것으로 분석되었다.



Fig. 3. The view of tunnel excavation.

Table 4. Excavation step and load distribution ratio

굴착단계	굴 착 내 용	하중분담률(%)
1	상부 반단면 굴착	40
2	Soft Shotcrete 및 Rockbolt 시공	30
3	Hard Shotcrete-상부반단면	30
4	하부 반단면 굴착	50
5	Hard Shotcrete-하부반단면	50

Table 5. Result of numerical analysis

굴착단계	1	2	3	4	5	비 고
천단침하 (계측관리치)	-11.43	-19.85	-28.02	-30.67	-29.87	Table 4에 따른
내공변위 (계측관리치)	0.0	-8.42	-16.59	-19.24	-18.44	굴착 단
	2.65	4.66	6.73	-2.32	-2.60	계임

Table 6. The result of support stress

구분 굴착단계	Shotcrete 응력 (kgf/cm ²)		Rockbolt 축력 (tonf)
	P/A	M/I _y	
시공 측벽부	11.25	0.16	0.87
완료 인버트부	15.95	2.76	17.71

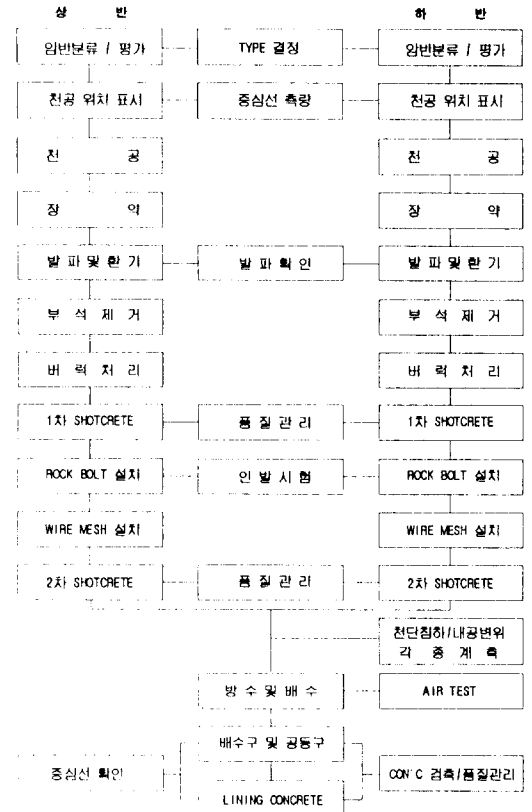


Fig. 4. Flow of tunnel construction(TYPE II).

3.2 시공

본 터널의 시공은 NATM 공법에 의해 시공되었으며, 굴착 공법으로는 막장을 상·하반 분할하여 굴착하는 Long Bench Cut 공법을 사용하였다. 굴착은 동구와 서구로 구분하고, 각각을 시발점으로 하여 터널동구측에서는 Sta. 107K 440에서 상반 굴착을 시작하여 Sta. 109K 460 지점까지 굴착거리 2,020 m를, 터널서구측에서는 Sta. 110K 460에서 터널을 굴착하여 Sta. 109K 460 지점까지 총굴착거리 2,000 m를 관통하여 굴착을 완료하였다.

또한 기계화 시공에 의한 터널 안전시공 및 품질보증을 위하여 Jumbo Drill(2-Boomer, 3-Boomer), 이동식 대차, 습식 Shotcrete 타설기(TASS), 자주이동 유압식 Lining Form, 송풍식 대규격 FAN, 최신 터널측량기(Geodimeter, Laser Beam) 등을 사용하였다.

4. 암반분류 및 계측

4.1 암석물성

지보패턴별 암석물성의 특성을 조사하기 위하여 각 구간에서 채취한 암석시료에 대한 물성시험과 강도시험을 실시하였다.

강도시험결과, 단축압축강도와 영율(Young's modulus)의 탄성계수비에 의한 암석분류를 나타낸 것이 Fig. 5이다. 그림에서 보는 바와 같이 TYPE II~TYPE IV는 탄성계수비 H(High Modulus Ratio)와 M(Medium Modulus Ratio)사이에 위치하고 있으며, TYPE V는 M으로 분류됨을 알 수 있다. 그리고 TYPE V로 갈수록 그 값이 낮아짐을 알 수 있다.

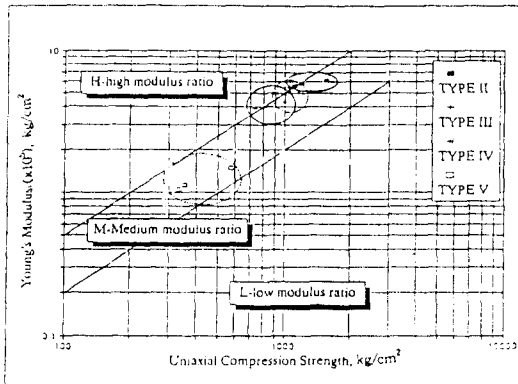


Fig. 5. Rock classification by elastic modulus ratio.

이상의 암석물성 및 강도시험결과를 Table 7에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 지보패턴이 TYPE II에서 TYPE V로 변화함에 따라 공극률은 점점 증가하였고, P파 및 S파 속도는 점점 감소하고 있음을 알 수 있다.

또한 단축압축강도는 지보패턴이 TYPE V로 변화함에 따라 점점 감소하고 있으며, 영률, 인장강도, 점착력에서도 같은 경향을 보여주고 있다. 특히 TYPE V에서 크게 감소하고 있음을 알 수 있다.

4.2 암반분류

암반분류는 RMR분류법을 이용하였다. 암석의 단축압축강도(R1)는 슈미트해머와 점하중시험으로부터 구하였으며, RQD(R2)와 절리간격(R3)은 터널막장면에 대하여 조사선법(Scanline Sampling)로부터 구하였다. 그리고 절리상태(R4) 및 지하수 상태(R5)는 터널막장에서 육안조사를 중심으로 실시하였으며, 절리방향에 대한 보정(R6)은 클리노미터 측정자료에 의해 절리방향과 터널방향과의 관계로부터 구하였다.

Table 8에는 Sta.109K 435~570 구간에서 암반분류 결과의 한 예가 정리되어 있다. 대부분의 경우 암석강도가 1,000 kgf/cm² 이상, RQD는 60% 이상 및 절리간격은 20 cm 이상, 절리상태는 양호하고, 지하수는 거의 없는 암반으로 RMR 값이 60 이상인 우수한 암반(Good Rock Mass)로 분류·평가되었다.

또한 매막장마다 암반평가의 객관성있는 자료를 확보하기 위하여 화상처리기법(Image Precessing Technique)에 의한 막장관찰도를 작성하였다.

4.3 계측

4.3.1 계측내용 및 항목

Table 7. The result of rock laboratory test

지보패턴 암석물성	TYPE II	TYPE III	TYPE IV	TYPE V
단위중량(gr/cm ³)	2.68	2.70	2.60	2.59
공극률(%)	0.61	0.71	1.63	3.27
P파 속도(m/sec)	4,820	4,860	4,220	2,370
S파 속도(m/sec)	2,690	2,500	2,240	1,480
단축압축강도(kgf/cm ²)	1,287	1,064	8,89	421
인장강도(kgf/cm ²)	95	88	82	32
영률 × 10 ³ (kgf/cm ²)	5.88	5.01	4.67	1.22
포어송비	0.24	0.22	0.24	0.24
점착력(kgf/cm ²)	200	199	192	92
내부마찰각(°)	52	50	46	22

터널계측은 터널 굴착에 따른 주변 지반의 변위 및 지보 부재의 변형을 신속, 정확히 파악하여 공사의 안전성을 확보하기 위하여 실시하는 일상관리계측(A계측)과 설계 및 시공법의 타당성을 검토하고, 필요시 설계를 변경하거나 공사의 안전성과 경제성을 확보하기 위해 실시하는 대표단면계측(B계측)으로 구분되며, 본 터널구간의 계측현황을 살펴보면 다음과 같다.

1) A 계측

터널동구·서구에서는 지반상태에 따라 10~40 m 간격으로 A계측기를 매설하여 계측을 실시하였다. 터널의 A계측 항목은 내공변위 및 천단침하 측정으로 구성되며, 내공변위 측정장면이 Fig. 6에 나타나 있다.

2) B 계측

B계측 지점은 총 10개소로 지중변위, Rockbolt 축력, Shotcrete 응력 및 지중침하, 지표침하 측정으로 구성된다.

Table 8. Rock classification by RMR

Sta.	R1		R2		R3		R4		R5		R6		RMR	암반 등급
	값	점수	값	점수	값	점수	상태	점수	상태	점수	상태	점수		
109K 435	1,048	9.72	64.8	12.81	0.20	8.00	1-3 m <0.1 mm 없음 거침 약간 풍화	25	건조	15	유리	-2	69	II 우수 (GOOD)
109K 442	1,032	9.61	76.0	14.90	0.26	8.57	3-10 m <0.1 mm 없음 거침 약간 풍화	23	습윤	10	매우 유리	0	66	II 우수 (GOOD)
109K 450	810	7.95	89.9	17.85	0.46	10.49	3-10 m 0.1-1.0 mm 없음 약간거침 약간풍화	20	습윤	10	양호	-5	61	II 우수 (GOOD)
109K 458	1,130	10.25	84.0	16.58	0.41	10.10	3-10 m 0.1-1.0 mm 없음 약간거침 약간풍화	20	습윤	10	양호	-5	62	II 우수 (GOOD)
109K 465	1,225	10.87	69.8	13.73	0.29	8.93	3-10 m 0.1-1.0 mm 없음 약간거침 적당풍화	18	건조	15	매우 유리	0	67	II 우수 (GOOD)
109K 472	1,364	11.77	87.9	17.42	0.39	9.93	3-10 m 0.1-1.0 mm 없음 약간거침 약간풍화	20	건조	15	유리	-2	72	II 우수 (GOOD)
109K 480	1,161	10.45	62.9	12.44	0.21	8.03	1-3 m <0.1 mm 없음 거침 약간풍화	25	건조	15	유리	-2	69	II 우수 (GOOD)



Fig. 6. The view of measurement of convergence.

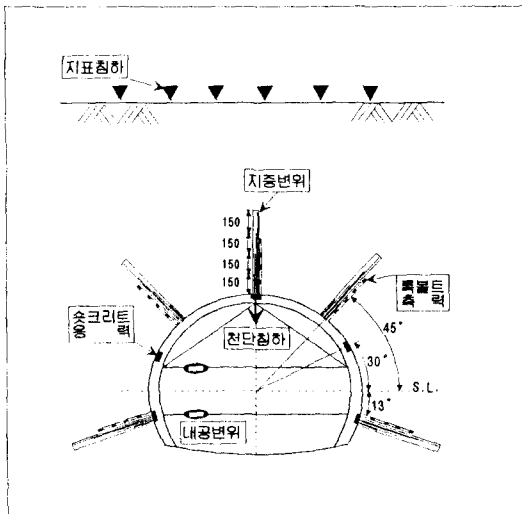


Fig. 7. Layout of measurements.

설치 위치는 동구에 6개소, 서구에 4개소에 대하여 B계측기를 매설하고 계측을 실시하였다. 또한, 2개소 (Sta. 107K 841, Sta. 110K 525)에 각각 5개씩 지표침하계를 설치하였다.

각 계측기기의 설치 단면도는 Fig. 7에서 보는 바와 같다.

4.3.2 계측 관리 기준

본 현장은 상하반 분할 굴착하는 공법이 적용되었으므로 내공변위는 초기치 측정이 늦어져 천단침하를 위주로 계측관리를 수행하였다.

일상관리계측에 대해서는 수치해석 결과를 1차 계측 기준치로 설정하였고, 계측 결과가 시공방법, 지보공 시공시기 및 크기, 지하수량, 보조공법 등에 따라 다양한 변화를 보이므로 변위속도 및 지보재 시공 전 후 형

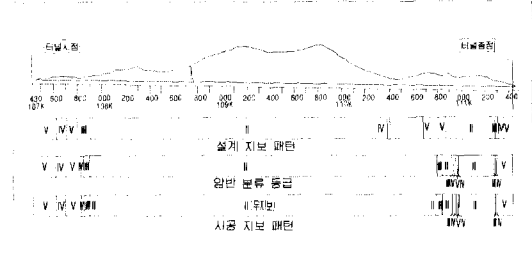


Fig. 8. Support pattern of design and construction.

상 등을 검토하여 변위속도는 3 mm/일 이상, 지보재 Crack 발생시 2차 계측기준으로서 대책을 수립하여 시공에 반영되도록 관리하였다.

또한 Shotcrete 응력은 허용 휨 압축응력으로 84 kgf/cm²(설계기준강도 210 kgf/cm²), 록볼트축력은 록볼트 인발내력을 고려하여 10 ton/분을 관리 기준으로 설정하였다.

5. 지보공 선정 및 계측결과 분석

5.1 지보패턴 변경

터널시공중 터널주변에 대한 암반분류결과를 바탕으로 시공지보패턴을 결정하였으며 시공후 계측결과로부터 터널안정성을 확인하였다.

Fig. 8에는 전체터널구간에서 설계지보패턴이 변경 시공된 지보패턴과 실제로 평가된 암반분류결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 전체적인 암반상태는 터널시점부와 종점부에서는 비교적 암반이 불량했으며 터널중양부로 갈수록 암반이 양호해짐을 알 수 있다. 설계변경은 터널시점부에서 불량한 암반구간이 설계보다 길어져 TYPE V, TYPE IV로 변경시공하였으며, 터널종점부에서는 불량한 암반구간인 TYPE V 구간이 실제로는 나타나지 않아 TYPE II로 시공하였다.

이러한 예로부터, 시추조사가 가능한 터널시·종점부에서는 비교적 자세한 설계가 가능하지만 터널의 중심부에서는 이러한 설계가 이루어지지 않았는데, 보다 정밀도 높은 지질조사결과를 바탕으로 터널주변지역에 대한 지질공학적 평가를 통하여 사전설계가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 그러나 비교적 정확한 조사가 이루어진다 하더라도, 지표지질조사, 시추조사 및 탄성과 조사 등을 포함한 사전지질조사의 한계성은 존재하

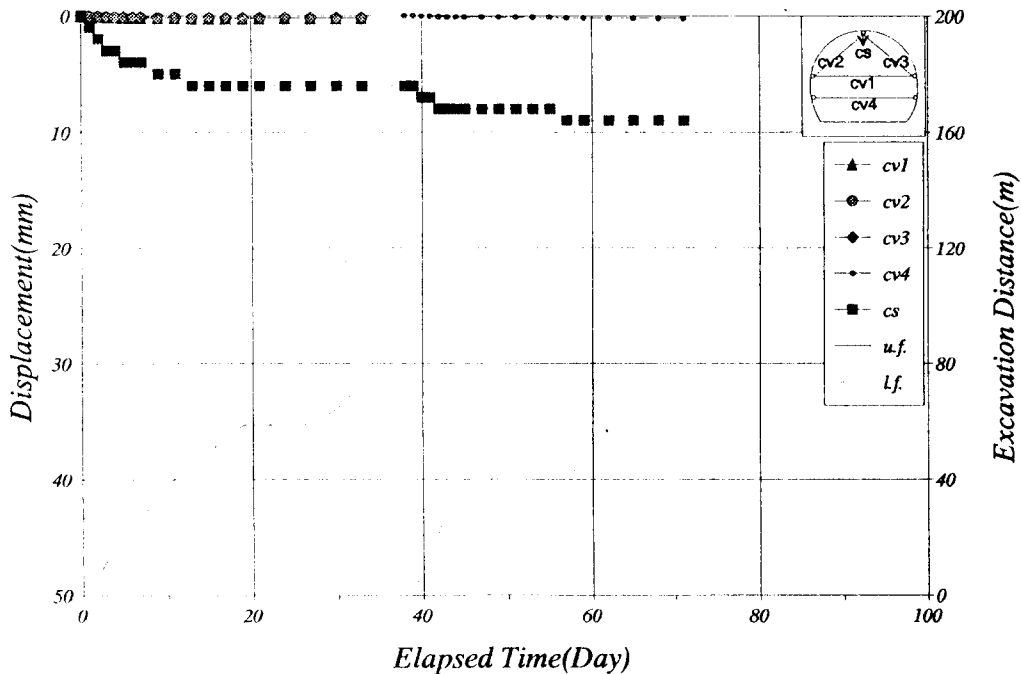


Fig. 9. Convergence and crown settlement at Sta. 103K 640.

므로, 터널시공중 나타나는 암반의 상태를 보다 정확하고 신속하게 평가하므로써, 이를 시공에 반영하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

5.2 무지보공 시공

본 터널은 지보패턴 TYPE II인 경우 암반의 RMR 값이 61~80에 해당하는 우수한 암반으로 지보공은 슛크리트, 록볼트, 강지보공으로 설계되어 있다.

그러나 터널중심부로 갈수록 RMR 값이 60이상으로 암반의 상태가 양호해지고 암반의 변화도 비교적 적게 나타났다. 또한 계측결과에 의하면 내공변위와 천단침하는 매우 작게 발생하였고, 또한 3D (D:터널지름)이내에서 수렴하여 안정한 경향을 나타내었다. 이와같은 결과를 바탕으로 보다 효율적인 지보공 시공을 위하여 강지보공을 제외한 무지보공을 시공하였다. 이러한 무지보공은 정확한 암반분류결과를 기초로 RMR 분류에 의한 지보공 선택기준과 일본 신간선 터널의 예를 참고로 하여 결정하였으며, 이후 지보구간과 무지보구간에서의 지속적인 계측결과와 비교로부터 무지보구간의 안정성을 확인할 수 있었다.

설계변경되어 시공된 무지보구간은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 터널입구 부분을 제외한 2,800 m(터널길이

의 70%)로 굴착공정의 감소로 효율적인 굴착이 수행되었으며, 공사비도 절감할 수 있었다.

5.3 내공변위 및 천단침하

터널굴착에 따른 터널주변변위(내공변위와 천단침하)의 계측결과가 Fig. 9에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 천단침하(CS)가 내공변위(CV)에 비하여 상대적으로 크고, 상반굴착시 수평내공변위(CV1) 및 사선내공변위(CV2, CV3)가 서로 비슷한 변위량을 나타냈다. 또한 하반굴착시 수평내공변위(CV4) 역시 매우 작은 변위량을 보였고 또한 막장거리가 4.0D내에서 대부분 수렴되고 안정화되었다.

지보패턴별 내공변위의 변화양상을 알아 보기 위하여 이를 Fig. 10에 도시하였다. 좌측에는 상반최종내공변위(CV1-U)를 우측에는 하반최종내공변위(CV4-U)를 도시하였다. TYPE II는 무지보 구간인 TYPE II-1과 큰 변화를 보이지 않으며 TYPE V로 갈수록 내공변위가 크게 나타났으며 상반의 경우 최대 18 mm 이하, 하반의 경우 최대 30 mm 이하 최종변위가 발생하였다.

또한 지보패턴별 천단침하의 변화양상을 알아 보기 위하여 이를 Fig. 11에 도시하였다. 좌측에는 상반최종 천단침하(CS-UU)를 우측에는 하반최종천단침하(CS-

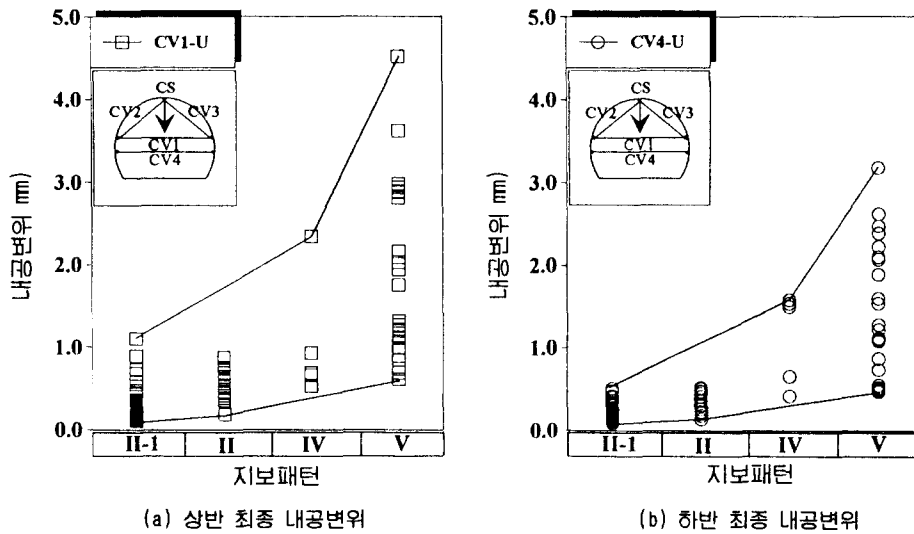


Fig. 10. Relationship between convergence and support pattern.

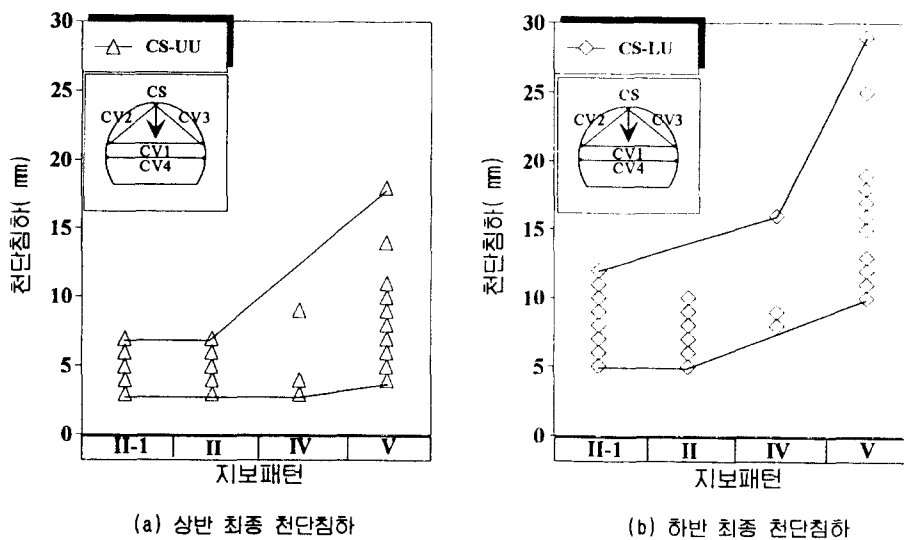


Fig. 11. Relationship between crown settlement and support pattern.

LU)를 도시하였다. TYPE II는 무지보 구간인 TYPE II-1과 큰 변화를 보이지 않으며 TYPE V로 갈수록 내공변위가 크게 나타났으며, 상반의 경우 최대 5 mm 이하, 하반의 경우 최대 4.0 mm 이하의 최종변위가 발생하였다.

5.4 지중변위, 슛크리트응력 및 록볼트축력

B계측결과, 지중변위의 경우 최대 7.03 mm로 나타났으나(TYPE V), 대부분 천단부 및 상하반 좌우측 모

두 1 mm 이하의 매우 작은 변위가 발생하였다. 이는 터널굴착에 따른 터널주변 지반의 이완이 매우 작게 일어났음을 의미한다. 슛크리트 응력은 반경방향 응력(σ_r)이 최대 22 kgf/cm²이하, 접선방향응력(σ_t)이 최대 18.46 kgf/cm²의 인장력이 발생하였으나(TYPE V), 대부분 10 kgf/cm² 이하로 슛크리트에 지반이완에 따른 하중이 거의 작용하지 않고 있는 것으로 나타났다. 록볼트 축력은 천단부에서 최대 2.48 ton으로 나타났고, 대부분 1ton이하로 록볼트의 최대 허용하중에 비해서는

매우 작은 값을 나타내었다.

이러한 결과로부터 터널굴착에 따른 지반 이완량이 매우 작으며 적절한 지보시공에 의하여 안정된 구조를 형성하고 있는 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 경암지반 NATM 터널에서의 지보공 선정사례를 통하여 암반분류와 계측의 공학적 의미를 평가하고, 지보패턴별 계측결과로부터 암반상태와 계측결과와의 관련성을 평가하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) RMR에 의한 암반분류 및 계측결과로부터 지반에 적합한 지보공을 선정·시공하였으며, 계측결과로부터 터널의 안정성을 확인할 수 있었다.

2) 터널중심부에서 암반의 상태가 우수한 경우, 설계 지보공에서 강지보만을 제거한 무지보공을 시공하므로써 효율적인 굴착을 달성할 수 있었으며 공사비도 대폭 절감할 수 있었다.

3) A계측결과, 터널시점부 및 종점부를 제외하고는 내공변위 및 천단침하가 매우 작은 변위량을 나타냈으며, 막장거리가 4.0D내에서 대부분 수렴되고 안정화되었다.

4) B계측결과, 지반이완의 범위가 작고, 지보재에 작용하는 하중도 매우 작게 나타났는데, 이는 적절한 지보 또는 과지보에 의한 결과로 판단된다.

5) 경암지반 터널에서의 지보공 선정시 암반분류 및 평가결과가 더욱 중요하다고 판단되며, 당초 설계된 계측수행계획은 지반상태에 따라 적절히 변경해야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. (주)대우건설기술연구소, 1995, 경부고속철도 제4-3공구 노반신설공사 종합계측보고서.

2. 한국고속철도건설공단, 1992, 서울-부산간 경부고속철도 제4공구 실시설계기타-지질 조사보고서(I).

3. (주)대우건설기술연구소, 1995, 터널 합리화 시공을 위한 암반평가시스템 연구.

4. (주)대우건설기술연구소, 1995, 터널 암반분류·평가 지침서.

5. Liu, H. and Wang, Z., 1986, "Monitoring Analysis of Stability of Caverns in Weak Rock", Proc. of the Int. Symp. on LRC, Helsinki, pp. 1319-1328.

6. Minoru, D., Yuji, T. and Kenichi, N., 1988, Real-time Construction Control of Tunnel Excavation(part 1), Proc. of the 18th Symp. on Rock Mech., Japan, pp. 26-30.

7. Panet, M. and Guenot, a., 1982, "Analysis of Convergence behind the Face of a Tunnel", Tunneling '82, the Institution of Mining and Metallurgy, pp. 197-204.

8. Sinha, R. S.(1989), Underground Structures : Design and Instrumentation, Developments in Geotechnical Eng. 59A, Elsevier, 480pp.

9. 日本土木學會, 1987, トンネルにおける調査・計測の評価と評價と利用, pp. 125-159.

10. 日本土質工學會, 1986, NATM法の調査・設計から施工まで"現場技術者のための土と基礎"シリーズ 12.

11. 山本稔, 渡邊勤, 木内和夫, 1982, "實驗トンネルにおける NATMの計測", トンネルと地下, Vol. 13, No. 2, pp.53-63.

12. 横山章, 木村宏, 高瀬昭雄, 1984, "NATMによる掘削時の現場計測に基づく施工管理手法", トンネルと地下, Vol. 15, No. 4, pp.7-17.

13. 櫻井春輔, 1986, "NATMにおける現場計測と管理基準値", 土と基礎, 34-2, pp. 5-10.

14. 上野誠, 山川英二, 關野英男, 1986, "地山ひずみに基づくNATM安全評價方法", 土と基礎, 34-2, pp. 39-44.

15. 櫻井春輔, 1980, "トンネル工事における變位計測結果の評価法", 土木學會論文報告集, 第 317號, pp. 93-100.