

일본의 개방형 TBM공법에 있어서 지질특성에 따른 불량지반에서의 지보패턴 변경에 대한 사례 분석



김재영
(주)코템/공학박사

1. 머리말

최근 국내에서는 도심지 및 산악지역에서 NATM에 의한 소음·진동·민원의 영향을 최소화하고 연속굴착과 급속시공을 통해 터널공사의 굴진효율을 향상시키기 위해 발파공법을 대체하는 개방형 TBM공법의 적용성을 검토하고 활용하는 사례가 증가하고 있다. 그러나 아직까지 국내 개방형 TBM장비를 사용하는 터널 현장의 시공실적이나 지보패턴에 대해 설계대비 변경한 실적이 공개되거나 데이터가 축적되어 있지 않기 때문에, 설계시에는 기존 유사 사례를 바탕으로 적용하고 있는 실정이다. 이에 국내 지반조건과 유사하고, 설계시 많이 참고하고 있는 일본의 개방형 TBM공법에 대해 지질 조건과 있어서 지보패턴의 변경에 대한 문헌을 조사하고 분석하여 정리하였다.

여기서는 일본의 지질조건에 대해 개방형 TBM공법을 적용하는 경우에 영향을 미치는 지질의 특성과 설계 대비 지보패턴의 변경사례를 제시하여 향후 국내에서 설계와 시공계획을 수립하는데 있어서 참고적 자료를 제공하고자 한다.

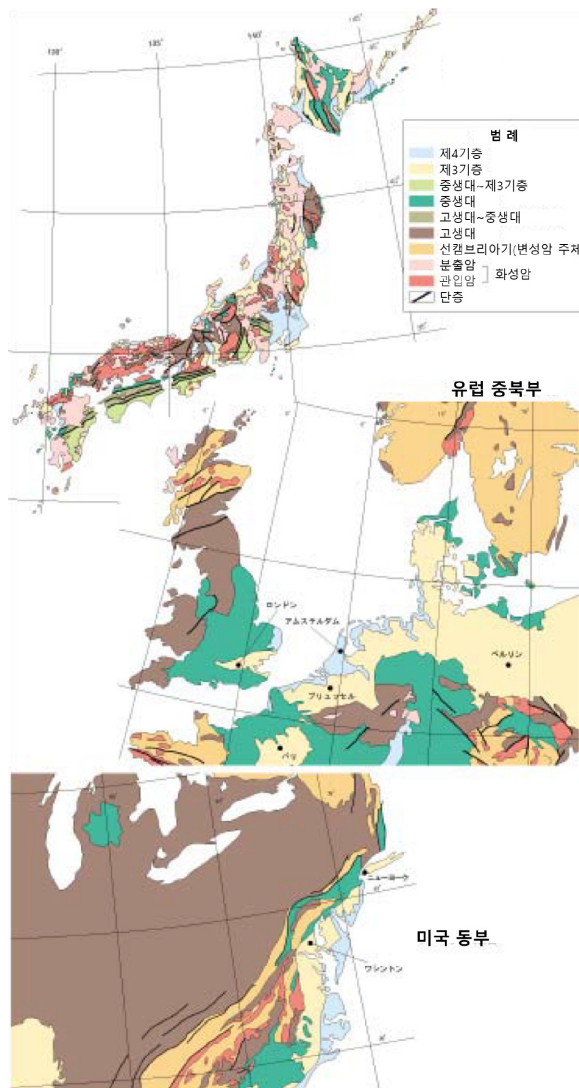
2. 일본의 개방형 TBM공법과 지질

개방형 TBM공법은 급속 및 안전한 굴착이 가능한 산악터널 시공방법의 한가지이나 일본에서는 지질이 복잡하기 때문에 불량지반에 기인한 트러블이 많은 실정이다. 특히 비교적 단순한 지질로 구성된 미국과 비교하면 일본에서는 TBM공법 도입이래 장비의 개량이나 보조공법 등 지보기술의 발전에 따라 신뢰성은 높아져 있으나, 충분한 성능을 발휘하지

못하고 있다.

3. 개방형 TBM공법에 영향을 미치는 지질특성

그림 1에 일본과 유럽, 미국의 지질을 비교하였다. 그림을 보면, 시각적으로는 일본의 경우, 지질의 복잡함을 나타내는 화강암을 시작으로 화산암류 및 퇴적암류가 복잡하게 분포하고, 많은 단층과 활화산이 존재한다.



〈그림 1〉 일본과 유럽, 미국의 지질비교

이에 비해 미국의 지질은 각 지질별 단위가 넓게 분포하고, 단층도 적고, 지질구조가 단조로우며 안정된 대륙특성을 형성하고 있다.

특히 일본은 유라시아 대륙판, 북미 대륙판, 태평양 대륙판, 필리핀 대륙판의 충돌부에 있으며, 세계적으로 활발한 Subduction Zone에 위치하고 있다.

이렇게 복잡한 일본의 암반조건이지만 구성적으로는 크게 3가지의 그룹으로 분류할 수 있다. 즉, 모래나 진흙 등의 쇄설성 물질이나 생물의 유해나 각 중 유기물이 퇴적고결화해서 형성된 퇴적암, 마그마가 지각의 심부 또는 지표에서 고결 화합에 따라 형성된 화성암, 그리고 퇴적암과 화성암이 지각심부에서 고온과 고압을 받는 등 조건과 다른 조건에서 변질된 변성암이다.

일본의 퇴적암, 화성암, 변성암의 분포면적은 표 1에 나타내듯이, 퇴적암은 약 61%, 화성암은 약 35%, 변성암은 약 4%로, 일본의 지표면 대부분에는 퇴적암이 분포하고 있다. 이러한 비율로부터 단순히 터널시공에 있어서 조우하는 지질을 추정하기 어렵지만 사암이나 이암 등 고생대나 제3기의 퇴적암, 안산암이나 현무암 등 제3기~4기의 화성암, 화강암 류가 많은 것으로 추정된다.

〈표 1〉 일본의 암석의 지표노출 면적

암석		면적(km ²)	면적(%)
퇴적암	제4기 퇴적암	76,500	20.7
	제3기 퇴적암	59,900	18.9
	중생대 퇴적암	34,400	9.3
	고생대 퇴적암	45,200	12.2
화성암	제3 또는 4기 화산암	75,400	20.4
	염기성 화성암	5,800	1.6
	화강암	49,300	13.3
변성암	광역 변성암	13,300	3.6
합계		369,800	100.0

〈표 2〉 개방형 TBM공법에 영향이 있는 지질상의 문제점과 관련성이 높은 암종

지질상의 문제점	퇴적암	화성암	변성암
공동이 존재한다	석회암		
막장이 자립하지 않는다	신제3기 역암·사암	사문암	결정편암
막장주변 붕괴(Rock Burst)		화강암·섬록암	화강편마암
용수가 많다	중·고생생 역암·사암·석회암 고제3기 역암·사암 신제3기 역암·사암 제4기 용결응회암	화강반암·분암, 안산암·현무암	
팽창성·슬레이킹 특성을 가지고 있다	고제3기 혈암·이암·응회암 신제3기 이암·응회암	사문암	

기술기사 2

일본의 개방형 TBM공법에 있어서 지질특성에 따른 불량지반에서의 지보패턴 변경에 대한 사례 분석

〈표 2〉 개방형 TBM공법에 영향이 있는 지질상의 문제점과 관련성이 높은 암종(계속)

지질상의 문제점	퇴적암	화성암	변성암
유독가스가 존재한다	고제3기 혈암·이암·응회암 신제3기 이암·응회암		
이영화(泥濘化)	중·고생대 점판암·혈암 고제3기 혈암·이암·응회암 신제3기 이암·응회암	사문암	결정편암
석영함유량이 많다	중·고생대 역암·사암·Chert·훈펠스	화강암·섬록암·강반암·분암	화강편마암
불균질(옥석 등 포함)	중·고생대 역암·사암 고제3기 역암·사암 신제3기 역암·사암		

표 3에 암종으로부터 예상되는 성상과 개방형 TBM공법에 있어서 문제점을 정리하였다. 표의 내용을 참고하는 방법은 예를 들면 “사문암”은 “막장이 자립하지 않는다”라고 하고 해당하는 표 중 “●”로 표시되어 있다. 따라서 표를 이해하는 경우는 이와 같은 요령으로 “...암은 ...일 가능성이 ...”라고 하면 된다.

표 중 “*”로 표시한 것은 예를 들면 “유문암=층리·편리가 발달되어 있다”는 본래의 용어정의와는 다르지만, 거의 동일하다고 할 수 있다.

또한 고·제3기층, 신·제3기층에 “공동이 존재하는 경우가 있다”로서 “*”를 표시한 것은, 탄갱의 채탄흔적이나 방공호 등 인위적인 공동의 가능성을 의미하는 것이다.

그리고, 위와 같은 대비는 어디까지나 일본 국내의 것으로서 해외에서는 적용할 수 없다. 또한 갱구 시공에 관한 지질상의 문제점은 고려하지 않았다.

〈표 3〉 암종으로부터 예상되는 성상과 개방형 TBM공법에 있어서 문제점

암종	퇴적암												화성암					변성암			
	중·고생대					고·제3기			신·제3기		제4기	화성암					변성암				
	사암 역암	혈암 점판암	녹색암 회색암 회색이회암	훈펠스	석회암	사암 역암	혈암	응회암 이암	집괴암 응회각력암	사암 역암	응회암 이암	집괴암 응회각력암	응결응회암	섬록암 화강암	분암 화강반암	석영조면암 유문암	현무암 안산암	반려암 회록암	사문암	결정편암	화강편마암
범례	● : 가능성 큼 ○ : 가능성 있음 ◐ : 가능성 작음 × : 가능성 없음 * : 유사 현상																				
예상되는 성상·문제점																					
암석의 연경	신선부(新鮮部)는 경암이다	●	○	●	●	●	●			○	×	×	○	●	●	●	●	●	○	○	●
	신선부는 중경암이다		●				○	●	○	●		○	●	○			○			●	●
	신선부는 연암이다	×		×	×	×		○	●		●	●	○		×	×		×	×	○	×
	층리·편리가 발달해 있다	○	●		●		○	●	○					×	×	○*	×	×	×	●	○*
	절리가 발달해 있다	●	○	○	○		○	●		○			●	●	○	○	●	○	○	○	●
단층이 발달해 있다	○	●	○	○	○	○	●	○	○				○		○		○	○	●	●	○

〈표 3〉 암종으로부터 예상되는 성상과 개방형 TBM공법에 있어서 문제점(계속)

범례 ● : 가능성 큼 ○ : 가능성 있음 : 가능성 작음 × : 가능성 없음 * : 유사 현상	암종 예상되는 성상·문제점	퇴적암												화성암					변성암		
		중·고생대					고·제3기			신·제3기				제4기							
		사암 연암	혈암 점판암	녹색암 회색암 회색에어암	혼펠스	석회암	사암 연암	혈암	응회암 이암	진괴암 응회각편암	사암 점암	응회암 이암	진괴암 응회각편암	응회암 이암	제4기 화강암	변암 화강반암	석영조면암 유문암	현무암 안산암	반려암 회록암	사문암	결정편암
암반 상황	과상으로 되어 있다	●		●	○	●	●		○	●	●	●	●	●	○	○	○	○		○	●
	파쇄되어 있다.		○	○	○			○				○	○	○	○		○		○	○	
	심층까지 풍화되어 있다	○		●			○							●	○	○		●		○	●
	공동이 존재한다					●	○*	○*	○	○*	○*	○					○				
	막장이 자립하지 않는다		○		○			○	○	○	●	○	○		○				●	●	
개방형 TBM 공법에 있어서 문제점	막장붕괴를 일으킨다	○		○										●				○		○	●
	용수가 많다	●		○	○	●	●		○	●		○	●	○	●	○	●	○	○	○	○
	평균성·슬레이킹성질 가지고 있다	×		×	×	×	×	●	●	○		●	○	×	×	×		×	○	●	×
	유해가스가 존재한다			×	×	×	○	●	●	○	○	●	○		×	×			×	×	×
	이병화(泥濘化) 한다		●					●	●	○	●	●	○					○	●	●	
석영함유량이 많다	●			●		○	×							●	●	○		×	×		●
불균질(육석 등을 포함)하다	●					●			○	●		○									

표 3으로부터 개방형 TBM공법에 영향이 있는 지질상의 문제점과 관련성이 높은 암종에 대해서 정리한 것으로 표 2에 나타내었다.

4. 개방형 TBM공법에 있어서 지보패턴의 변경과 지질

개방형 TBM공법에 있어서 지보패턴의 변경과 지질과의 관계를 정리하였다. 대상 터널은 개방형 TBM공법으로 수행한 9개 현장의 터널이다. 터널의 시공연장은 795m~5,901m로, 평균 시공연장은 약 3,149m이다. 각 터널의 지보패턴의 설계와 실적의 비율(각 지보패턴의 시공연장÷터널 시공연장)을 표 4에 나타내었다.

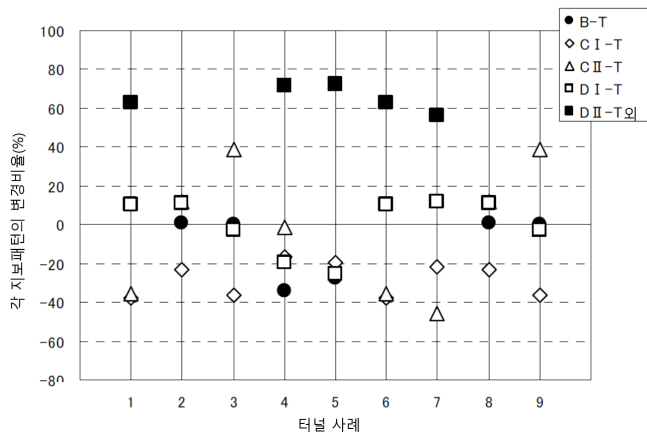
표 중 설계와 실적에 대한 지보패턴 비율의 차이를 그림 2에 정리하였다. 그림에서 시공 중 각 지보패턴이 어느 정도 변경되었는지를 나타내었고 (+)측은 증가, (-)측은 감소를 나타낸다.

표 및 그림으로부터, 지보패턴이 크게 변경되는 암종은 대략적이지만 신·고제3기의 사암·이암 및 이들의 호층, 화강암류, 안산암, 응회암 및 응회각역암의 순이다. 이러한 지보패턴의 변경 경향은 당초 예상된 B-T, CI-T패턴이 감소하고, DI-T·DII-T 외 지보패턴이 현저하게 증가하는 특징을 나타내고 있다. 이번 조사에서 신·고제3기 퇴적암계 및 응회암계의 지반에서는 B-T패턴은 실적이 거의 적용되지 않고 있는 경향임을 알 수 있었다.

선행굴착과 후행굴착의 지보패턴 변경의 차이는 후행굴착에서는 선행굴착의 결과를 반영하고 당초 지반분류의 수정 등을 수행한 현장도 있기 때문에 현저한 차이는 보이지 않았다.

〈표 4〉 터널의 지보패턴 비교 (개방형 TBM)

터널명	암종	선행/후행 터널	그림 2 번호	지보패턴 비율 (전체 터널연장에 대한 %)					
				-	B-T	C I-T	C II-T	D I-T	D II-T외
A	고·제3기 사암·이암 호층	선행	1	설계	0	38	48	15	0
				실적	0	0	12	25	63
B	중고생대 Chert, 사암·점판암·휘록응회암	선행	2	설계	0	42	31	27	0
				실적	1	18	43	38	0
		후행	3	설계	0	46	30	24	0
				실적	1	10	69	21	0
C	중생대 화강암, 신·제3기 사암·이암·패암, 혼펠스	선행	4	설계	25	39	6	31	0
				실적	17	36	9	39	0
		후행	5	설계	22	40	10	27	0
				실적	9	36	26	29	0
D	중생대 화강암	선행	6	설계	67	22	0	11	0
				실적	14	68	4	12	2
		후행	7	설계	72	20	0	8	0
				실적	15	55	20	10	0
E	신제3기 안산암·응회암·응회각역암, 고·제3기 유문암질 응회암	단독	8	설계	15	62	12	0	11
				실적	0	5	46	0	49
F	고제3기 유문암질 응회암	단독	9	설계	66	24	10	0	0
				실적	0	12	0	84	5



〈그림 2〉 터널별 지보패턴 변경비율

5. 맺음말

국내에서 연속굴착과 급속시공을 통해 터널공사의 굴진효율을 향상시키기 위한 방법으로 개방형 TBM공법을 적용하는 경우, 지질특성에 대한 문제점과 설계 대비 지보패턴의 변경에 대한 참고를 위해 일본의 자료를 수집하고 분석하여 정리하였다. 그리고 국내에서도 지질조사 결과를 바탕으로 개방형 TBM공법의 설계시 지보패턴과 보조공법의 적용, 시공계획을 수립하는데 있어서 참고가 되기를 바란다.

향후, 개방형 TBM공법의 보조공법에 대해서도 자료를 수집, 분석, 정리하여 별도의 참고자료로서 제시하고자 한다.

참고문헌

1. 社団法人日本トンネル技術協会(2006), 最新のTBMの実態及び急速施工技術..

[본 기사는 저자 개인의 의견이며 한국터널지하공간학회의 공식입장과는 무관합니다.]