

## 고경사 절리 암반에서의 터널 굴착

이 영남<sup>1)</sup>, 김 대영<sup>1)</sup>, 서 영호<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>현대건설기술연구소, <sup>2)</sup>현대건설

### 초 록

홍콩 HMRT(Hongkong Mass Railway Tunnel) 지하철 공사현장에서는 터널굴착시 나타난 고경사 절리로 인해 상당한 여굴이 발생하였다. 이에 대한 원인을 규명하기 위하여 각 터널별로 발생한 여굴의 양과 위치 등을 조사하고 이를 입찰설계단계에서 이루어진 시추공조사와 굴착단계에서의 막장검측에 의한 지질조건과 서로 비교, 분석하였다.

터널굴착에서 발생하는 여굴은 막장의 고경사 절리의 분포와 방향에 의해 영향을 받았으며, 암반조건 RQD, Q와도 밀접한 관계를 가지는 것으로 나타났다. 본 현장의 분석에 따르면 터널설계시 고경사절리의 존재여부 및 분포, 방향성 등을 면밀히 조사하고 해석하여 사전에 여굴의 발생 가능성을 확인하는 것이 필요하다.

### 1. 서 론

터널 공사에 있어서 지반조사 결과를 기초로한 터널설계가 터널 굴착에 불리한 고경사 절리에 대한 고려를 소홀히 하여 실제의 지반조건을 제대로 반영하지 못할 경우에는 시공시 문제점이 발생하는 경우가 빈번하다. 본 논문에서는 설계시 예상하지 못했던 터널의 여굴이 과다하게 발생한 경우를 홍콩 HMRT(Hongkong Mass Railway Tunnel) 지하철 공사의 경우를 이용해서 살펴보고 그 원인을 규명하기 위하여 다음과 같은 터널 굴착 관련자료를 분석하였다.

- 1) 암질과 절리패턴과 같은 지질조건에 대한 조사
- 2) 입찰 설계단계에서의 시추 주상도로부터 추정한 암반 물성(터널 노선이나 부근에 위치한 4개의 시추공의 터널 심도에서의 RQD/Q값)
- 3) 터널 굴착시 막장에서의 암반조건(시추공 부근의 막장 관측결과와 설계단계의 시추 결과자료의 비교)
- 4) 여굴량과 막장관측에 의한 암반조건과의 비교

이러한 분석을 통하여 설계단계와 굴착단계에서의 암반 조건의 차이를 분석하였고, 암반 조건과 절리패턴이 터널의 여굴 발생에 미치는 영향에 대하여 기술하였다.

### 2. 공사개요 및 현황

홍콩 HMRT 현장은 TKO(Tseung Kwan O) 지하철 연장공사 중 Pak Shing Kok 터널 구간으로서, TKO 역사로부터 차량기지까지의 총 길이 6.4km의 터널공사가 주된 공종이다. 이터널은 그림 1의 평면도에 나타난 바와 같이 TKO 역사쪽에서는 동,서 방향의 두개의 터널(T6~T9)로 건설되고 차량기지 쪽의 남쪽입구(그림 2)에서는 다섯 개의 서로 평행한 터널(T1~T5)로 건설된다. 굴착은 천공발

파공법을 사용하였으며, 굴착 단면의 형태는 마제형이며, 굴착 폭은 주 노선이 6m와 10m이며 설비부 및 터널 연결부는 12m, 14m, 20m 등으로 다양하다. 1차 지보의 패턴은 Q값에 따라 6 가지의 패턴으로 나뉘며 굴착폭과 터널 교차지역에 따라 다른 기준을 적용하였다. 표 1에는 폭 6m 터널의 암반 등급에 따른 1차 지보패턴을 나타내었다.

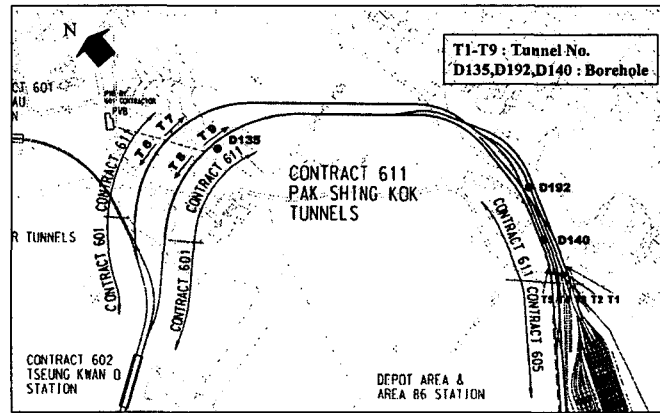


그림 1. Pak Shing Kok 터널 평면도

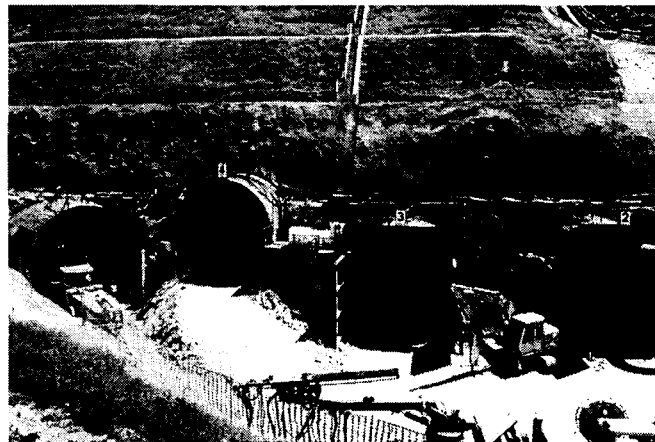


그림 2. 남쪽 입구

표 1. 폭 6m 터널의 1차 지보패턴

지보패턴	암반분류 Q값	Shotcrete	Rock Bolt
I	>0.8	국부적인 파쇄대에만 >40mm	L=2m, Spot Bolting
III	0.2~0.8	천단과 측벽에 섬유보강 슛크리트 50mm	천단부에 L=2m, $\phi=25\text{mm}$ , CTC=1.7m, Systematic Bolting, 측벽부는 CTC=2.2m
IV(a)	0.05~0.2	천단과 측벽에 섬유보강 슛크리트 100mm	천단부에 L=2m, $\phi=25\text{mm}$ , CTC=1.3m, Systematic Bolting, 측벽부는 CTC=2.2m
IV(b)	0.03~0.05	천단과 측벽에 섬유보강 슛크리트 140mm	천단부에 L=3m, $\phi=25\text{mm}$ , CTC=1.1m, Systematic Bolting, 측벽부는 CTC=2.2m
V & VI	<0.03	천단과 측벽에 슛크리트 200mm	1m 간격의 150mm Steelrib, 천단부, 측벽부에 L=3m, $\phi=32\text{mm}$ , CTC= 1.0m, Systematic Bolting,

### 3. 현장 지질조건

터널구간 현장지반은 Repulse Bay Volcanic Group의 Ap Lei Chau 와 Silverstrand Formation의 화산암으로 주로 이루어져 있다. 터널구간 주변에는 몇 개의 단층이 북서에서 남동방향으로 분포하는 것이 발견되었으며, 이것은 터널의 상당부분 구간과 거의 평행하다. 남쪽 입구부분과 Wan Po Road의 하부로 통과하는 약 100m 구간에서는 상대적으로 연약한 구간이 예상되었다. 남쪽 입구 주변의 지반 조건은 대체적으로 상부에는 붕적토층이 있고, 하부로는 완전 풍화된 응회암(Grade 5), 보통~심하게 풍화된 응회암(Grade 3~4), 약간 풍화된 응회암(Grade 3 이상)이 차례로 분포한다.

현장에서 나타나는 화산암(응회암)은 2~3개의 거의 수직에 가까운 절리군을 주 절리로 하며, 1개의 수평절리군을 가지고 있는 것으로 나타났다. 고경사절리는 터널의 노선과 거의 평행하게 나타났고, 수평절리와와의 조합으로 터널 주변에 암괴를 형성할 가능성이 있다. 지하수위는 터널 바닥보다 낮게 나타났으나, 단기적으로는 붕적토층과 풍화토층 사이에서 분포할 가능성도 있다.

### 4. 과다 여굴 원인규명

#### 4.1 여굴 프로파일

터널 2, 4, 9에서 측정한 터널 여굴 프로파일중 일부를 그림 3에 나타내었으며, 터널별 여굴현황을 표2에 요약하였다. 표 2에서 보면 인접한 지역이더라도 여굴 발생량에는 많은 차이를 보이고 있는데 터널 2에서는 0.85m<sup>2</sup>, 터널 4에서는 7.33m<sup>2</sup>, 터널 9에서는 3.39m<sup>2</sup>로 나타났다. 그림 3에서 나타난 여굴의 형태를 보면 터널 2는 거의 여굴이 발생하지 않았고, 터널 4에서는 천정과 양측벽에서, 터널 9에서는 한쪽 측벽에서만 상당한 여굴이 발생한 것을 볼 수 있다.

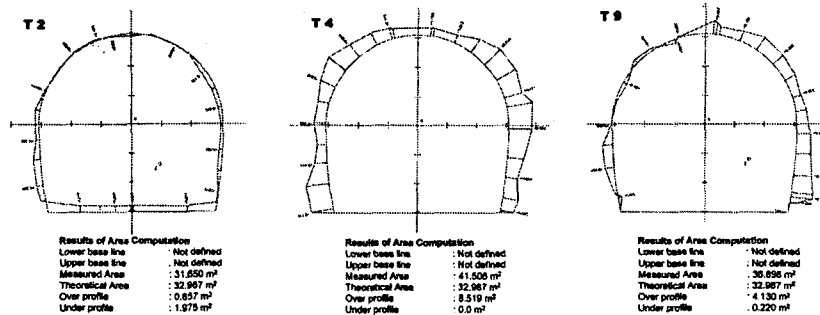


그림 3. 각 터널에서의 여굴 프로파일

표 2. 각 터널별 여굴

Tunnel Nos.	Average Overbreak(m <sup>2</sup> )	여굴상태
2 (Ch.820-825)	0.85	거의 여굴이 발생하지 않음
4 (Ch.945-950)	7.33	천정, 양측벽에서 비슷한 규모로 발생
9 (Ch.550-560)	3.39	한쪽 측벽에서 주로 발생

#### 4.2 시추공조사와 막장관측에서의 지질 조건 비교

인접한 지역에서 터널굴착시 발생한 여굴의 양과 위치가 상당히 다르게 나타난 원인을 분석하기 위해 입찰단계의 시추공조사 결과와 굴착단계의 막장조사 결과를 비교하여 보았다. 터널 선형위 또는 부근에 위치한 여러 시추공중 그림 1에 나타낸 바와 같이 3개 시추공을 선정하여 인접 터널 막장의 지질조건과 비교하였다. 시추공 D192에서 얻은 자료는 터널 2의 막장관측자료와, 시추공 D140에서 얻은 자료는 터널 4의 자료와, 그리고 시추공 D135에서 얻은 자료는 터널 9의 막장관측 자료와 비교하였다. 그림 4에는 3개의 시추공에서 임프레션 패커(impression packer)에 의해 측정된 불연속면의 극점(pole)을 도시하였다. 시추공 D135에서는 한 방향성을 갖는 고경사 절리가 나타나고 있으며, 시추공 D192에서는 고경사 절리가 나타나지 않았으며, 시추공 D140에서는 고경사 절리가 여러방향에서 고루 나타나고 있다. 이러한 고경사 절리의 분포와 방향성은 다음 절에서 보듯이 굴착시 발생하는 여굴과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.

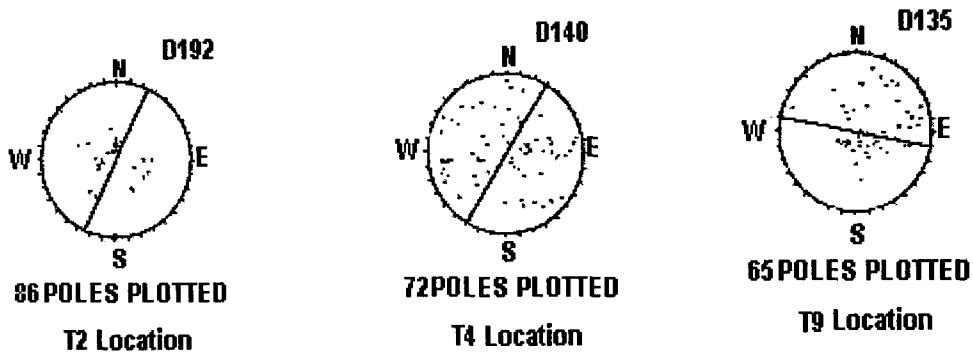


그림 4. 각 시추공에서 측정된 불연속면

<p>T4, Ch.941, Mapping Sheet No.:23</p>	$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$ $Q = \frac{20}{12} \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{2.5}$ $Q = 0.17$			Rock Type	Volcanic	✓
				Granite		
				Other		
				Colour	Give Tone Colours	brown
				Grain Size	Fine	✓
					Medium	
					Coarse	
				Strength	Ext.Weak	
					V.Weak	
					Weak	
			Medium		✓	
			Strong		✓	
			Weathering	V.Strong		
				Fresh		
				Slight		
				Moderate	✓	
				High	✓	
				Complete		
			Water Inflow	None	✓	
				Minor		
				Moderate		
				Large		
				V.Large		
			Joint Spacing	V.Close	✓	
				Close	✓	
				Mod.Close		
				Wide		
			Joint Openness	Non-Filled		
				Clay-Filled	Kaolin	
				Other		

그림 5. T4 Ch.941 막장 검측결과

입찰설계단계에서 결정한 암반조건(RQD, Q'값)이 실제 굴착시의 현장상태와 얼마나 잘 일치하는지 조사하기 위해 터널 막장에서 암반조건을 관측하였는데, 그림 5에서는 터널 4의 Ch.941에서 수행한 막장관측결과와 Q 값 산정의 예를 보여주고 있다.

시추조사 결과로부터 산정한 터널 심도에서의 RQD와 Q값과 터널 막장관측으로부터 산정된 RQD와 Q값을 터널 4에 대하여 표 3에 정리하였다. 터널 주변의 낙반 또는 암괴 활동여부는 절리 간격, 크기, 형상 그리고 절리면의 조건에 주로 영향을 받으므로 지하수의 영향과 SRF(응력저감계수)를 제외한 Q' 값의 도입이 절리조건의 영향을 알아보는 데 유리하여 Q'값을 산정하여 표3에 나타내었다. Q'값의 산정에는 암괴 크기(RQD, Jn)와 절리조건(Jr과 Ja)과 관련된 파라미터가 채택되었다.

표 3에 나타난 시추공 D140과 터널 4의 조사내용을 살펴보면 시추공에서는 RQD값이 평균 60.5, 막장에서는 평균 30으로 감소하였고, Q'값도 시추공에서 평균 3.4, 막장에서는 평균 0.55로 상당히 감소하였다. 이처럼 굴착막장에서 나타난 암반조건이 설계시의 암반조건(RQD, Q')보다 나쁘게 나타났기 때문에 터널 굴착중에 설계당시에 예상하지 못한 여굴이 발생한 것으로 판단된다.

다른 터널(T2, T9)에 대해서도 유사한 분석을 하여 시추공(Designed)과 터널막장(Encountered)에서의 RQD, Q'값들을 표 4에 나타내었다. 여굴량이 가장 적게 발생한 터널 2에서는 막장관측에 의한 평균 RQD가 설계시와 비교하여 약 6% 감소한 것으로 나타났으며, 평균 Q'는 약 72% 감소를 보이고 있다. 여굴량이 가장 많이 발생한 터널 4에서는 RQD가 약 50%, Q'는 약 84%의 감소를 보이고 있으며, 여굴량이 중간 정도인 터널 9에서는 RQD가 약 57%, Q'는 약 85%의 감소를 보이고 있다. 설계시와 굴착시에 결정한 Q'값의 차이는 세 터널에서 모두 비슷한 크기(72~85%감소)로 나타나고 있으나, RQD의 경우는 그 차이가 터널 2의 경우는 미미하나 터널 4와 9에서는 상대적으로 크게 나타나고 있다.

표 3. 시추주상도와 막장관측에서의 RQD와 Q값의 비교

TUNNEL No.4		CHAINAGE : 945-950					TUNNEL AXIS : N30E			
		RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	Q'	Joint sets
시추공	D140	46, 72, 75	9	2	2-4	0.66	2.5-5	0.67-1.41	2.6-4.2	
막장	941	20	12	1	4	1	2.5	0.17	0.4	160/72, 265/60, 070/5
	949	40	15	1	4	1	2.5	0.27	0.7	310/80, 164/70, 240/77, 065/15
	958	40	15	1	4	1	2.5	0.27	0.7	290/75, 225/75, 190/33, 055/5

표 4. 각 터널별 RQD와 Q값의 비교

Tunnel Nos.	RQD		Q'	
	Designed	Encountered	Designed	Encountered
2 (Ch.820-825)	79-92 Ave. 85.5	60-100 Ave. 80	8.8-10.2 Ave. 9.5	1.7-3.7 Ave. 2.7
4 (Ch.945-950)	46-75 Ave. 60.5	20-40 Ave. 30	2.6-4.2 Ave. 3.4	0.4-0.7 Ave. 0.55
9 (Ch.550-560)	88	35-40 Ave. 37.5	9.78	1.45-1.48 Ave. 1.465

### 4.3 여굴 원인분석

전술한 바와 같이 본 현장에서 나타난 터널의 여굴상황은 시추주상도와 막장관측에 의한 Q'값 차이보다 RQD값 차이에 의해 더 잘 설명될 수 있음을 알 수 있다. 즉 RQD값이 높은 암반인 터널 2의 경우에 시추주상도와 막장 관측에 의한 RQD값의 차이가 작았으며, 여굴량도 작았다. 그러나 그와 반대인 터널 4와 터널 9의 경우에는 RQD값이 크게 감소하였고, 여굴도 크게 발생하였다. 또한 RQD값과 Q'값의 감소가 비슷하게 일어났으나 여굴량이 상당히 다른 터널 4와 터널 9의 차이는 터널막장에 나타나는 고경사 절리군의 차이로 설명할 수 있을 것이다. 즉 고경사 절리가 여러방향으로 나타나는 터널 9에서는 천정과 양측벽에서 비슷한 규모로 많은 여굴이 발생한 반면에 한 방향의 고경사 절리가 나타나는 터널 4에서는 한쪽 측벽에서만 여굴이 집중적으로 발생하였다.

터널 막장관측에서 얻어진 RQD값과 Q'값에 따른 터널 굴착시 여굴량을 조사하기 위해 여굴량과 RQD, Q'값을 그림 6과 그림7에 도시하였다. 이 그림에서 보면 암반조건(RQD와 Q'값)과 여굴이 서로 반비례하는 관계를 보이고 있는데 RQD값보다는 Q'값과의 관계가 더 명확하게 나타났다. 즉 Q'값이 증가함에 따라 여굴량이 감소하는 양상이 더욱 잘 나타나고 있다.

본 현장에서는 고경사 절리군과 연속적으로 나타나는 매끈하고 평탄한(smooth/planar) 수평 절리군으로 인해 과여굴이 발생하였는데 막장에서 나타나는 고경사 절리의 분포와 방향성이 터널내에서 여굴이 나타나는 위치와 여굴량에 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 따라서 터널공사를 수행할 경우에는 고경사절리의 존재여부 및 분포, 방향성 등을 면밀히 조사하고 해석하여 사전에 여굴의 발생 유무, 위치, 여굴량 등을 미리 분석하고 공사에 임해야 할 것으로 판단된다.

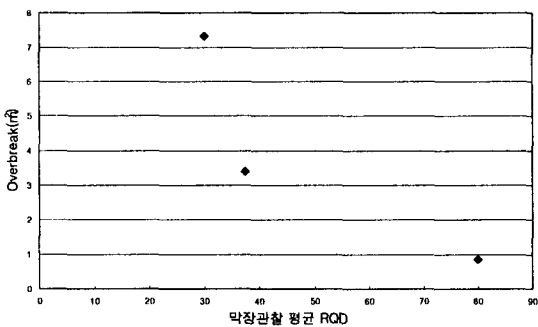


그림 6. RQD와 여굴량과의 관계(터널막장)

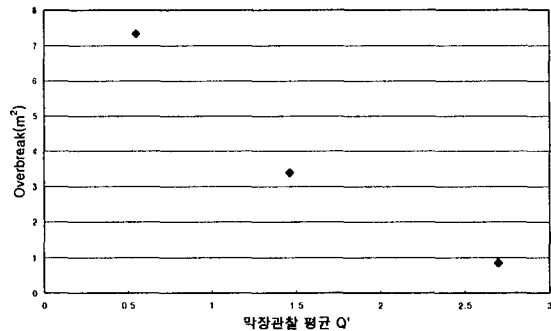


그림 7. Q'와 여굴량과의 관계(터널막장)

## 5. 결 론

홍콩 HMRT(Hongkong Mass Railway Tunnel) 지하철 공사현장에서는 터널굴착시 상당한 여굴이 발생하였다. 이에 대한 원인을 규명하기 위하여 각 터널별로 발생한 여굴의 양과 위치 등을 조사하고 이를 입찰설계단계에서 이루어진 시추공조사와 굴착단계에서의 막장검측에 의한 지질조건과 서로 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 시추주상도와 막장관측자료의 검토 결과 본 현장의 암반 조건은 설계단계에서 예상한 것 보다 불량한 조건이었다.

- 2) 막장에서 나타나는 2~3개의 고경사 절리군과 매끈하고 평탄한 수평 절리군의 조합으로 인해 굴착시 상당한 여굴이 발생하였다.
- 3) 터널 막장관측에서 얻어진 암반조건(RQD값과 Q'값)과 여굴량은 서로 반비례하는 관계를 보이고 있으며 RQD값보다는 Q'값과의 관계가 더 명확하게 나타났다.
- 4) 비슷한 암반조건에서는 고경사 절리의 분포나 방향성이 여굴량과 여굴이 나타나는 위치에 영향을 주는 것으로 나타났다

향후 터널설계시 여굴에 많은 영향을 미치는 고경사절리에 대하여는 그 존재여부 및 분포, 방향성 등을 면밀히 조사하고 분석하여 터널굴착시 발생할 수 있는 여굴을 최소화하여야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. HYUNDAI-KIER JOINT VENTE, 1998, TSEUNG KWAN O EXTENSION 지반조사보고서
2. HYUNDAI-KIER JOINT VENTE, 1998, TSEUNG KWAN O EXTENSION 설계도
3. E. Hoek & E. T. Brown, 1980, Underground Excavation in Rock, Institution of Mining and Metallurgy
4. Aydan O. and Kawamoto T., 1990, Discontinuities and their effect on rock mass, Rock Joint, Balkema