

초청강연

암반 내 쉴드터널의 영향해석과 시공

Sonoda Tetsushi (園田 徹士)

Keihin(京浜) Geotech Co., 이사

머리말

쉴드터널 공법은 도시의 지하철도, 상·하수도, 전기·통신 등을 설치하기 위한 터널 건설 수단으로 활용되고 있다. 일본은 1960년경부터 도시의 근대화를 추진하면서 infrastructure를 정비하였으며 이에 따라 쉴드터널 공법의 적용이 급속히 증대하였다. 도시의 지하에 터널을 건설함에 있어 가장 중요한 것은 기존 도시구조물에 대한 영향을 최소로 줄여서 도시기능을 보전하는데 있다. 1960년대의 공법으로서 지하수의 유입을 방지하기 위하여 압축공기를 이용하는 인력굴착 쉴드공법에서는 굴착에 따른 지표면의 지반침하가 20~30 cm에 이르렀다. 1975년경부터 이용된 밀폐기계굴착방식인 이수식 쉴드공법 및 이토압식 쉴드공법의 보급과 뒷채움재 주입공법의 개량에 힘입어 지표면 침하가 수 cm 정도로 감소하였다. 한편, 1980년대에 들어서면서 대형 컴퓨터를 이용하여 쉴드터널 시공에 따른 지반변상(地盤變狀, 침하와 경사정도 등 지반의 변형상태를 칭하는 일본식 용어, 譯者註)을 예측하기 위하여 구조해석이 시도되었고, 현재는 층적 및 홍적지반에서는 정밀하면서 실용적인 지반변상 예측이 가능하게 되었다. 그러나 토층, 호박돌층, 풍화암층 및 연·경암층 등이 혼재하는 복합지반에서는 지반변상 예측해석에 있어서 해결해야 할 문제가 남아있다. 본 논문에서는 이토압식 쉴드터널과 이수식 쉴드터널의 지반변상 예측해석 및 시공상황을 검토함으로써 복합지반에 있어서의 공학적 과제에 대하여 고찰하였다.

1. 이토압식 쉴드터널의 예

1.1 공사개요

LRT SystemII-B 공구는 Malaysia의 수도 Kuala Lumpur 중심부에 위치한 3,046 m(669 m × 2개소 + 854 m × 2개소)의 도시철도용 단선터널(외경 5.24 m)이다. 터널노선의 80%는 Curan강의 하저를 중단하며

20%는 도로 밑을 통과한다. 따라서 많은 교각기초와 건물기초에 근접하여 쉴드터널이 건설되었다 (Fig. 1).

1.2 지질개요

Kuala Lumpur 지역의 지질은 Kenny Hill 층에 분포하는 퇴적암과 석회암으로 구성되어 있으며, 이들 주위에는 화강암이 관입하여 분포하고 있다(Fig. 2).

본 층은 고생대의 운모 편암, 석영 운모 편암, 각섬석 편암, 흑연질 편암 등의 편암류와, 세일, 천매암, 규암 등으로 구성되어 있으며, 지질 구조적으로 대단히 복잡하다. 일반적으로 고생대의 퇴적암은 대단히 경질화되어

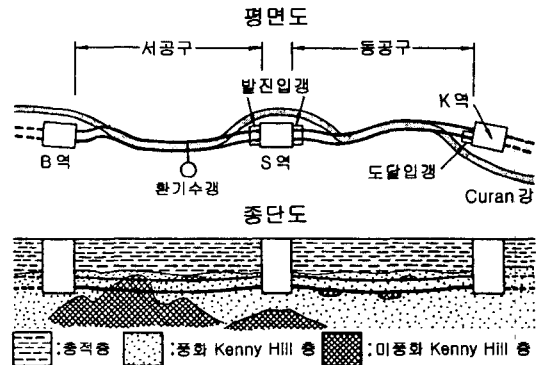


Fig. 1. LRT SystemII-B 개요.

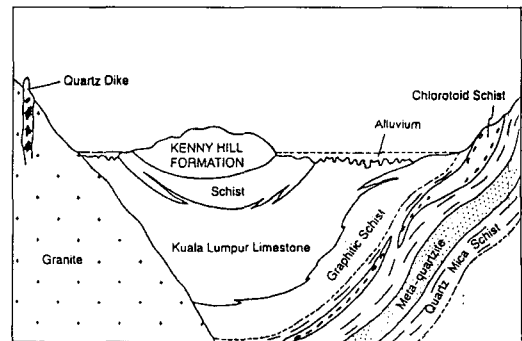


Fig. 2. Kuala Lumpur 지역의 지질단면도.

있지만 Kenny Hill 층의 편암류는 대단히 연약한(일축압축강도 100~수100 Kg/cm²) 부분도 나타난다. 이러한 강도저하의 원인은 화강암의 관입에 의하여 열변성을 받았기 때문으로 사료된다. 또한 열변성에 의해 생성된 이차변성광물인 점토광물을 다량 함유하고 있어서 침수붕괴 특성이 현저하게 나타난다. 한편 규암은 사암이 열변성을 받아서 석영이 재결정되어 생성된 암석으로서 일축압축강도가 500~2,500 kg/cm²를 보인다.

1.3 지질조사

지질조사로는 시추에 의한 현위치 조사와 코아 시료의 실내시험을 실시하였다. 특히 지반변상 예측해석에 있어서 중요한 지반물성을 파악하기 위하여 시추공 내에서 수평재하시험을 실시하였다. 터널 구조설계 및 지반변상 예측해석에 사용되는 지질중단도와 지반물성의 결정은 각 부서 기술자의 의견을 참조하여 결정하였다. Table 1은 설계에 적용한 토질정수이다.

1.4 터널 근접구조물에 대한 영향평가와 방지대책

근접구조물에 대한 영향평가는 仕様書(시방서)에 따라서 세단계로 나누어 검토가 이루어진다. 제1단계에서는 구조물위치에서의 지반변상량(침하량, 경사각)이 허용치 이내인가를 평가하고, 허용치를 초과하는 경우에는 제2단계로서 구조물을 포함한 변상해석이 필요하고, 제3단계에서는 構造部材의 안전성 확인이 수행된다.

본 현장에서는 제1단계에서 허용치를 초과한 경우에는 지반보강 및 터널과 구조물 사이에 영향 차단벽을 설치하여 구조물위치에서의 지반침하량 및 경사각이 허용치 이내가 되도록 대책공법을 수행하였다. 허용치는 과거의 사례를 참고하여 구조물 관리자와 협의를 거쳐서 결정하였다.

지반변상 예측해석은 쉴드기의 지반안정능력을 고려한 이차원 FEM해석으로 수행하였다. Fig. 3에 쉴드굴착에 의한 지반변상의 고려 방법과 쉴드기의 지반안정능력을 고려한 이차원 FEM 해석순서를 나타내었다.

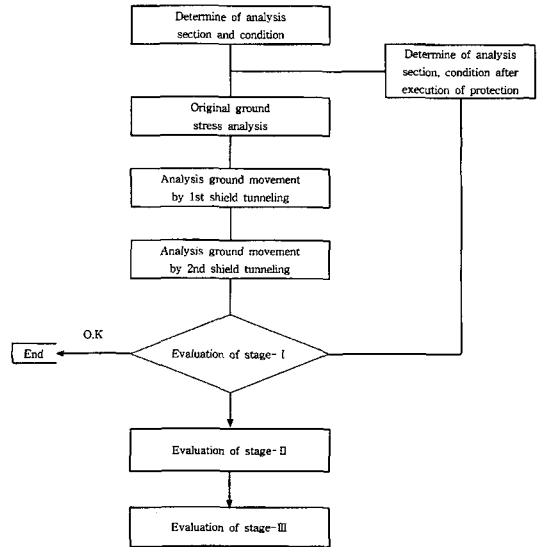


Fig. 3. Tunnel근접구조물에 대한 영향평가 흐름도.

1.5 이토압식 쉴드기(TBM)의 설계

쉴드굴진 대상지반으로는 점착력이 강하고 N치가 50 이상인 고결 점토화된 풍화 Kenny Hill층과 미풍화 Kenny Hill층을 상정하였다. 풍화 Kenny Hill층에 사용되는 cutter-bit는 일본의 土丹層 굴착에 사용된 pin 지지 type(Fig. 4(a))을 선택하였으며, 미풍화 Kenny Hill층용으로는 일본의 화강암 굴착에 사용된 바 있는 roller-bit(Fig. 5)로 결정하였다. Roller bit의 배치는 압반강도 1500 kgf/cm²의 굴착을 가능하게 하기 위하여 pass 간격을 75 mm 이하로 하였다. 또한 지층변화에 대응하기 위하여 cutter는 高토크·高회전(일본내 쉴드기의 1.5배~ 2배)의 능력을 갖게 설계했다.

1.6 터널시공상황

1996년 3월부터 1호기에 의한 터널 굴진을 개시하여 1997년 8월에 모든 터널 굴진을 완료하였다. 본 장에서는 지층변화에 따른 cutter-bit의 개량·교환에 대하여 기술한다.

Table 1. 설계에 사용된 토질정수

종류	설계에 사용된물성	c'	φ'	E'	ρ'	Ko	γ
층적사층		0 KPa	30°	17.5 MPa	0.30	1.0	18 kN/m ³
풍화Kenny Hill층		5 KPa	33°	75 MPa	0.30	1.4	21 kN/m ³
말풍화Kenny Hill층				설계에 이용한 토질정수는 풍화Kenny Hill토와 동일함			


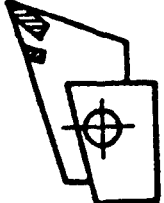
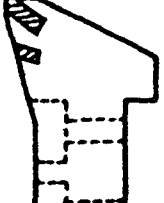
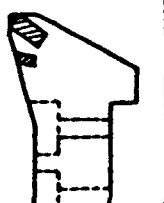
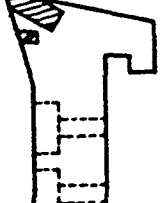
(a) 폭 100 mm 높이 65 mm	(b) 폭 65 mm 높이 100 mm	(c) 폭 65 mm 높이 100 mm	(d) 폭 100 mm 높이 65 mm	(e) 폭 65 mm 높이 100 mm
				
Pin 식	Pin 식	Bolt 2분식	Bolt 4분식	Bolt 4분식

Fig. 4. Cutter Bit 개량경과.

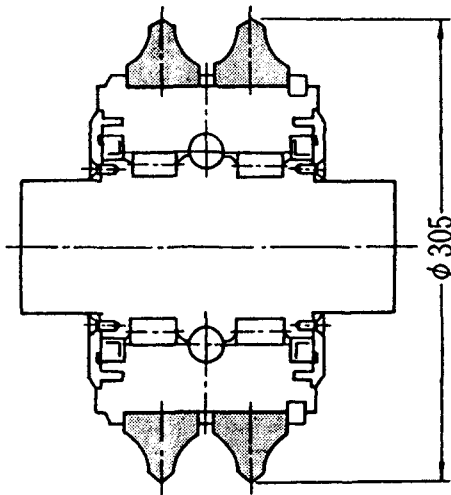


Fig. 5. 암반용 Disk cutter (Roller bit).

1) 제1회 bit 교환

1호기와 2호기는 초기 굴진에 이어 본 굴진을 개시하였다. 초기에 예상했던 적색의 풍화 Kenny Hill층은 예상굴진속도로 굴진하였으나, 회색을 띠는 풍화 Kenny Hill층이 출현하여 굴진능률이 대폭 감소되었다. chamber를 열고 bit를 점검해본 결과 roller bit는 점토에 끼여 회전하지 않았으며, cutter bit는 많이 마모되어 있었다. 이에 대한 대책으로서 cutter bit 절삭력을 향상시키기 위하여 Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 bit 폭을 100 mm에서 60 mm로 줄이고, 높이를 65 mm에서 100 mm로 개량한 cutter bit로 교환하였고, roller bit는 바깥 둘레만 남겨

두고 모두 제거하였다.

2) 제2회 bit 교환

미풍화의 Kenny Hill층을 굴착하던 중 굴착토사와 함께 bit가 다량 배출되어서 쉴드기의 굴진이 불가능하게 되었다. 막장전면이 절리가 발달된 암반으로서 roller bit를 설치하여 암반을 굴진하였다.

3) 제3회 · 제4회 bit 교환

1호기 굴진현장에는 경암에 속하는 암반이 계속되었고, 또한 나중에 기술되는 암반의 특이성으로 인하여 roller bit를 두 번 더 교환하여, 854 m의 굴진을 끝낼 수 있었다. 2호기는 굴진 연장이 669 m로서 비교적 짧으며, 비교적 경암에 속하는 암반이 많이 분포하지 않아서 앞에서 언급한 두 번의 bit교환으로 굴진을 완료하였으며, 그 후 4호기로서 전용되었다.

4) 3호기 · 4호기의 bit 개량 및 교환

1호기·2호기 굴진시 얻은 교훈을 바탕으로 3호기·4호기의 cutter bit의 개량은 다음과 같은 기준으로 이루어졌다. ① bit 설치강도를 강하게 한다. ② bit의 높이를 높게 한다 ③ 굴착능력을 강하게 한다. 이를 위하여 그림 4(e)에 나타난 강력한 cutter bit를 개발하였다. 그 결과 3호기, 4호기 모두 한번의 bit교환으로 굴진을 완료하였다.

1.7 흙과 암석의 차이

본 공사에서는 약풍화 및 미풍화의 Kenny Hill층을 굴진 하였으므로, 일본의 쉴드굴진에서는 경험할 수 없었던 상황이 발생하였다.

1) cutter bit의 이상마모

1호기는 323 m, 2호기는 295 m에서 굴진불능상태가 되어 bit를 교환하였다. 그 원인으로는 Kenny Hill층이 열변성을 받아서 생성된 암석이 나타났으며, 그 중에 분포하는 규암층을 굴진하면서 cutter bit가 급속히 마모되었기 때문으로 사료된다.

2) 열변성암의 slaking에 의한 붕괴

1호기는 780 m 굴진 후 roller bit를 교환하였고, 45 m를 더 굴진한 곳에서 지표까지 도달하는 붕괴가 일어났다. 붕괴지점의 지질은 지표로부터 G.L-11.0 m까지 느슨한 층적사층이 분포하며, G.L-11.0 m 이하는 N치 100 이상의 단단한 Kenny Hill층으로 구성되어 있고, 터널상부에 2.5-3 m 두께로 Kenny Hill층이 분포한다. Chamber에 들어가서 막장을 관찰한 결과 막장 상반부에는 블록형 절리가 발달되어 있었고, 하부에는 절리의 발달이 미약한 단단한 암반이 분포하였다. 지표에서 시추를 통하여 붕괴지점의 조사를 실시한 결과 막장 후방 1.5 m 부근에 암반내 공동이 확인되었다. 그 후 5-6 m 굴진 하면서 두 번 더 붕괴가 발생하였다. 터널상부에 암반층이 2.5-3 m 분포하였고 chamber의 압력을 유지하면서 굴진 하였음에도 불구하고, 지표에까지 도달하는 붕괴가 발생하였다. 또한 붕괴위치는 3회 모두 쉴드 막장 후방 1.5-2.0 m에 위치하였다. 붕괴원인으로는 굴착에 따른 암반내의 응력변화와 침수붕괴(slaking)작용에 의하여 급속하게 암반의 풍화가 진행되어 상부의 느슨한 층적사층이 붕괴된 것으로 사료된다.

이에 대한 대책으로서 쉴드기 外周面으로의 지하수 침입을 방지하기 위하여 쉴드기 내부로부터 굴진장 0.5 m 마다 chemical grouting을 실시하였다. 그 결과 붕괴를

방지하면서 굴진 하는 것이 가능하였다.

2. 이수식 쉴드터널의 예

2.1 공사개요

松崎 第12雨水 幹線築造工事は 舊國鐵操車場부지의 재개발에 따라서 雨水를 배수하는 관로를 이수식 쉴드공법에 의해 건설하는 것이다. 관로는 JR 鹿兒島 本線, 국도 3호선을 횡단하여 바다에 접한 운하에 연결되어 九州地方 특유의 집중호우의 배수에 대처하도록 건설되었다. 공사의 개요는 다음과 같다.

tunnel 외경 : 6.25 m tunnel 내경 : 5.25 m
tunnel 연장 : 538.00 m, RC segment를 사용.

2.2 지질개요

지반은 신생대 제4기의 점성토, 사질토와 제3기의 세일, 사질세일, 사암으로 구성되어 있으며, 지표면으로부터 4~6m 매립되어 있다. 터널은 세일, 사질세일층에 굴착되었다(Table 2, Fig. 6). Table 3에 해석에 사용된 지반정수를 나타내었다.

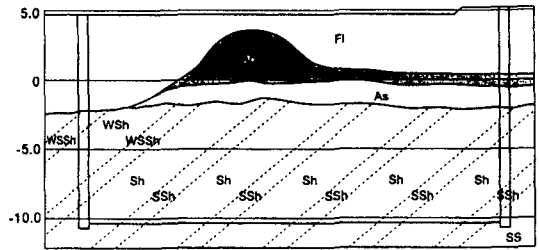


Fig. 6. 토질중단면도.

Table 2. 토질개요.

지질시대		지질명	기 호	기 재
신생대	제 4 기	매립토	FI	지표면으로부터 심도 4~6 m 두께로 매립되어 있음. 구성성분은 점성토·사질토와 다른 쇄설석 부분도 보임. 느슨하여 N치가 낮으며, 불규칙한 분포를 보임.
		점성토	Ac	퇴적토. 함수비가 높고, 연약함. 엄지로 눌러서 쉽게 들어갈 정도로 연약하다. 대부분 침식된 것으로 추정됨.
		사질토	As	퇴적토. 하부에 실트질의 세립이 많이 분포. 매우 함수비가 높고, 작은 진동에도 유동화되는 성질을 보임.
제 3 기	세일 사질 세일 사암 (풍화)	Sh SSh SS (W)	상부는 약간 풍화되어 있으며, N치가 낮은 부분도 보임. 미풍화부는 N치>50, 견고, 경질을 보이며, 곳에 따라서는 봉상의 코아로 시추됨. 대략 크래이 발달해 있어서 비교적 투수성이 큼.	

Table 3. 설계에 사용된 지반정수

토층	항목	층두께	N 값	γ	C	ψ	E	ν
단위		m	회	tf/m ³	tf/m ²	°	tf/m ²	---
FL (매립토)		2.10	5	1.70	0.0	24	1,250	0.35
As (충적사질토)		2.90	4	1.70	0.0	23	1,000	0.35
Ac (충적점성토)		1.35	4	1.60	2.5	0	525	0.45
T (풍화세일)		2.47	14	2.00	9.0	0	1,890	0.40
T (사암)		2.28	50	2.00	55.0	42	15,000	0.30
T (세일)		3.65	50	2.00	55.0	42	15,000	0.30
T (사암)		GL-14/75 m 以深	50	2.00	55.0	42	15,000	0.30

2.3 터널 근접구조물에 대한 영향평가와 방지대책

셴드터널 시공에 따른 영향검토를 수행하기 위하여 인접한 철도, 도로 및 교량을 대하여 2차원 FEM해석을 실시하였다. 여기에서는 인접교량의 영향해석에 대하여 서술한다.

1) 해석단면

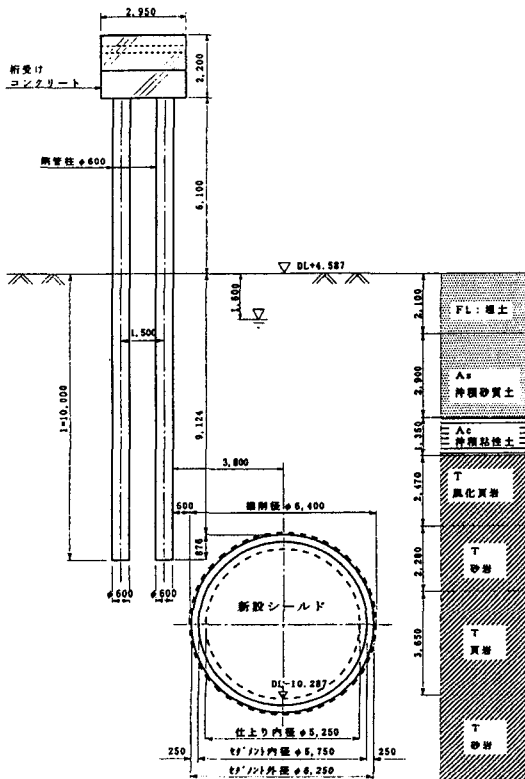


Fig. 7. 교각부 해석단면.

Fig. 7에 인접교량와 tunnel의 위치관계를 나타내었다. 교각의 변위, 응력증가를 상세하게 구하기 위하여 터널 및 지반과 교각을 Fig. 8처럼 모델화 하였다. 지반은 평면변형요소(solid)로 취급하고, 교각 및 터널은 단면력을 계산하기 위하여, 빔요소로 설정하였다.

2) 해석순서

Step-1에서는 초기지반의 응력상태를 지반과 교각의 정하중, 동하중을 첨가하여 구하였다. Step-2에서는 셴드 굴착(굴착에서 셴드기 통과까지)에 의한 地中應力의 변화를 구하였다. Step-3에서는 세그먼트를 조립하고 뒷채움재 주입이 완료되어, 터널구조체에 모든 하중이 작용하는 시공완료후의 응력상태를 구하였다.

3) 해석결과

해석결과를 Fig. 9에 나타낸다. 교각은 셴드 통과에 의해 발생한 지반침하에 따라서 터널쪽으로 변위가 발생하였으며, 기초말뚝 하단부에서 수평변위 H = -0.7 mm, 수직변위 V = 0.6 mm, 교각頭部에서 H = 3.0 mm, V = -0.6 mm로 계산되었다. 또한 기초말뚝(강관말뚝)의

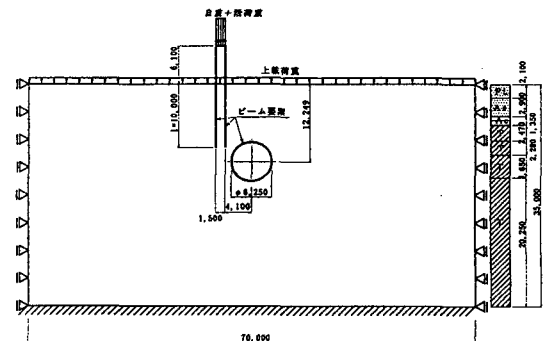


Fig. 8. FEM 해석 Model.

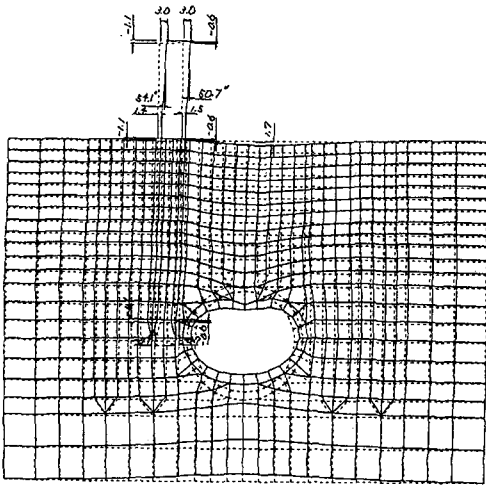


Fig. 9. FEM 해석결과.

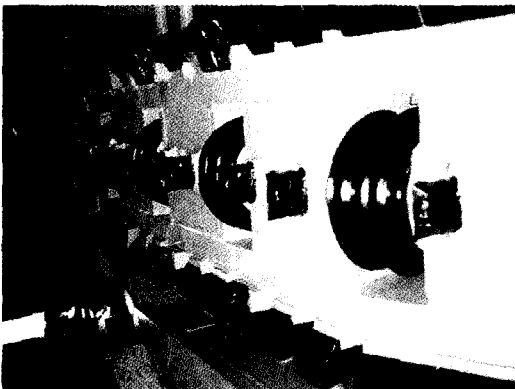


Photo 1. Cutter bit and disk cutter(roller bit).

변위에 의해서 발생하는 증가응력은 103.2 kg/cm^2 으로 비교적 적은 편이어서, 교각의 보강은 불필요한 것으로 판단되었다.

2.4 시공결과

쉴드기는 Malaysia의 경험을 바탕으로, 암반과 토사로 이루어진 복합지반에서 치밀한 막장압력의 제어가 가능하여 확실하게 막장 안정기능을 지닌 이수식 쉴드기로 정하였으며, 또한 굴착은 cutter bit와 disk cutter를 조합한 combination cutter system을 채택하였다(사진 1). 그 결과 복합지반에 시공된 연장 538 m의 터널을 cutter bit를 한번도 교환하지 않고 효율적으로 쉴드 굴진할 수 있었다. 도로 및 철도의 지반침하하는 해석결과의 범위 내에 분포하고, 교각의 변위량은 허용치 내에서 해

석결과보다 큰 값을 보인다.

3. 암반과의 복합지반에 있어서 쉴드공법의 과제

3.1 쉴드터널 시공의 과제

일반적으로 쉴드공법은 지상에서의 개착이 불가능하고, 지하수가 다량 유출되고, 지반이 약하며, 기설구조물(지상, 지하)의 아래 및 부근을 통과하는 등의 물리적 조건과, 공사의 영향으로 인한 도시기능 저하방지 및 환경보전 등을 검토하여 NATM 및 TBM보다 유리한 경우에 채택된다.

이러한 이유로, 터널이 균질한 지반을 통과하는 경우는 드물며, 층적의 연약지반(점토층, 사층, 사력), 풍화토, 풍화암 및 암반이 불규칙적으로 터널단면에 나타나는 경우가 많다. 물리적 특성(압축강도가 수 kg/cm^2 에서 수천 kg/cm^2 의 분포범위가 넓고 다종다양한 암질을 가지는 암반 모두를 효율적으로 굴진할 수 있는 쉴드기는 존재하지 않는다.

또한 암질에 따라서는 물과 공기의 접촉으로 인하여 급속히 변화하는 경우도 있다. 그러므로 쉴드공법의 채택을 검토하는 경우에는 터널노선의 지반구성, 지질, 암질 등을 상세히 파악할 필요가 있다. 쉴드기의 설계에 있어서는 상세한 지질조사에 기초하여, 막장 안정확보를 고려하여 이수식 쉴드기와 이토암식 쉴드기 중 하나를 선택해야 하며, 분포하는 지반에 적합한 cutter bit의 구조와 구성을 결정해야 하고, 배출되는 토사의 운반에는 문제가 없는지, 이들의 재이용 등과 같은 환경보전에 적합한지의 여부를 종합적으로 검토하여야 한다.

3.2 쉴드터널 설계의 과제

쉴드터널 설계에는 터널구조설계와 지반변상 예측해석이 있다. 특히 도시의 지하에 건설되는 터널에 있어서는 지반변상 예측해석의 정밀도가 중요하다. 왜냐하면 실제보다 변상량을 크게 산출하면 過보강설계가 되고, 실제보다 변상량을 적게 산출하면 사전 대책을 세우지 못하게 되어 터널 시공 후에 근접구조물에 피해를 입히게 되고 사회문제가 발생하게 된다. 층적층 등과 같이 거의 균질한 지반에서는 쉴드시공에 따른 지반변상 계측사례가 많으므로 해석결과의 타당성을 평가할 수 있으나, 암반과 연약지반으로 이루어진 복합지반의 계측사례 및 비교해석 사례는 적은 편이어서 급후의 과제라 할 수 있다.

결 론

일본에서 1960년경부터 급속히 보급된 개방형 쉴드공법은 연약한 지반을 개량한 후 굴진하기 위하여 대량의 지반보강제를 사용하였기 때문에 지하수 오염 등의 환경 피해를 많이 유발했다. 1974년에 지중 환경오염을 방지하기 위하여 대폭적인 지반보강제의 사용규제가 시행되었다. 그 후 연약지반은 지반을 파괴하지 않고 조용히 판다는 생각으로 사고가 전환되어, 밀폐 기계식 이수·이토 압식 쉴드공법이 널리 채택되었다.

밀폐 기계식 쉴드는 비싸지만 지반보강비용을 감안하면 공사비용이 오히려 절감되었다. 그 배경에는 쉴드기계 및 관련설비의 개발과 대규모 지반변상 계측과 대형 컴퓨터를 이용한 해석기법의 개발에 힘입어 쉴드 시공에 있어서 지반의 변상예측이 가능하게 되어 효율적인 대책을 수행할 수 있게 된 것이 크게 공헌하고 있다.

참 고 문 헌

1. 園田徹士, シン ムヒング, 쿠알라룸푸르 地下鐵의 設計와 施工, 日本地盤工學會誌, 46. 1.

Sonoda Tetsushi(園田徹士)

1962년 구마모토 농고 농업토목과 졸업
 1962-1999년 (株)間組 근무. 토목기술개발부장,
 토목본부 도시토목총괄부장 역임
 1965-현재 쉴드터널 공사 경력 35년
 현재 경빈지오텍(주) 이사
