

세이칸(靑函)터널



윤지선
정회원, 인하대학교 교수



이두화
정회원, (주)삼보기술단 대표이사

1. 서론

Seikan 터널은 1946년 지질조사의 착수이래 40여년만에 Tsugaru 해협선으로서 개통되었다.

Seikan 터널은 연장 53.850km로 세계 제일의 길이를 자랑할 뿐만아니라, 조사 및 시공시 수많은 시행착오를 반복하여 현재에 이르게 되었다.

여기서는 Seikan 터널의 계획에서 완성에 이르기까지의 추이를 간단하게 소개한다.

2. 계획 및 조사

2.1 Seikan 터널의 구상

Tsugaru 해협의 해저에 터널을 굴착하여 Hotkaido와 Honshuu를 연결하고자 하는 구상은 1939년쯤부터 있었으며, 이 구상은 Hotkaido부터 Souya 해협하부를 터널로 연결하여 Sakhalin에 상륙, 타타르 해협을 건너 Siberia 철도로 모스크바, 베를린, 파리, 또한 영불 해협을 횡단하여 Tokyo 발 런던행 국제열차를 개통하고자 하는 웅대한 것이었다. 그 발단으로 Shimonoseki와 Kyushu를 Kanmon 터널로 연결하여, 쓰시마 섬과 대한 해협을 통과하고 한반도에 상륙하여 대륙으로 통하는 남북루트가 구상되어, Kanmon 터널이 세계에서 최초의 해

저 터널로서 1942년에 건설되었다.

2.2 예비조사

Seikan 터널의 구체적인 조사가 개시된 것은 2차 대전 직후로 해외 진출을 위한 Hotkaido 개발의 중요성이 재인식되게 된 후이다.

Tsugaru 해협은 그림 1과 같이 Simokita 반도 Ohmazaki와 Kameda 반도 Shiokubi-Misaki를 연결하는 Higashikuchi 루트와 Tsugaru 반도 Tatpu-Misaki와 Matsumae 반도 Siragami-Misaki 사이의 Nishiguchi 루트의 두 개의 협애부(狹隘部)가 있으며 그 사이는 동서 모두 약 20km이다. Higashikuchi 루트는 Nasu 화산대 중앙에 위치하며 최대 수심이 270m로 깊기 때문에 수심 140m의 천대(淺帶) 부분이 확인된 Nishiguchi 루트에 초점을 맞추어서 각종 조사가 진행되

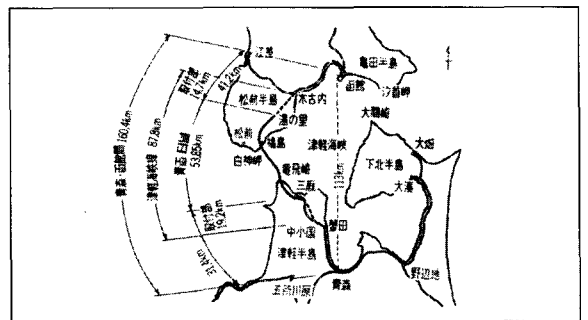


그림 1. 위치도

었다. 1950년대는 육상부에서의 탄성파탐사나 시추와 함께 Tatpi-Yoshioka 사이의 해상 탄성파탐사를 실시한 결과 해저부는 제삼기층이 연속되어 있는 것으로 추정되어 실현 가능성이 높아졌다.

2.3 기술적 가능성 조사

1953년에는 철도 부설법의 예정선에 추가되었지만 건설의 기운이 높아진 직접적인 동기는 1954년 9월 26일에 일어난 Toya-Maru 시공이었다. 마리란 태풍은 5척의 연락선을 침몰시켜 1430명의 희생자를 낸 대 해난 사건으로서, 터널에 대한 세간의 관심이 높아졌고 건설에 있어 큰 원동력이 되었다.

1975년부터는 해저 지형도의 작성, 2,000점에 달하는 Dredging이나 해상시추가 실시되었으며, 해상조사시 Tsugaru 해협 수심이 140m로 깊고, 동해로부터 태평양으로 향하는 조류의 속도가 약 8 Not로 빠르며, 기상 조건이 나쁜 점 등 전체의 지질구조를 파악하기 까지는 막대한 노고와 시간이 필요하였다. 또한, 이 시기는 해저굴착시 나타날것으로 예상되는 지질과 유사한 지역에서 주입 시험을 실시하는 등 기술적 가능성의 검토도 실시되었다.

1961년에는 철도부설법의 조사선이 지정되었으며, 이때의 계획은 최급경사 20%, 해저에서의 최소 피복두께 100m, 전 연장 36.4km였다. 평면적으로는 수심이 얇은 개소를 통과하도록 하고 있기 때문에 해협부에도 곡선이 들어가며, 종단적으로는 해저부터 토피를 얼마나 취할 수 있는가가 가장 큰 기본 사항이며, 통상의 육상터널에서는 굴착에 의한 지표로의 영향이 허용되는 범위라면 괜찮지만, 해저의 경우는 대 붕괴 등이 터널 내에서 일어나고, 해저까지 함몰하는 경우 복구 불능이 되는 위험이 있다. 따라서, 과거의 육상 터널에서의 함몰사례나 이론적 계산 등으로부터 토피를 70m로 계획했지만, 그 후의 조사에서 해저 아래 약 30m 정도는 풍화의 영향이 있기 때문에 최종적으로는 100m로 수정하였다. 최급경사는 당시 Tokyo-Satporo간의 Tohoku선, Hakodate 본선 등의 선로 개량 계획을 10%로 하고 있었기 때문에 터널 구간

은 보조 기관차를 사용함에 의해 다른 구간의 경사와 같은 정도의 수송 능력을 확보할 수 있도록 하고 최급경사로 20%가 적용되었다.

2.4 실시조사

4반세기에 달하는 착실한 간접적 조사로 대략의 지질은 판명했지만, 시공상의 문제점을 해결하기 위해서는 실제로 굴착을 실시하고 직접적 조사를 할 필요가 있다고 판단되어 1964년 5월에 Hokkaido 쪽 Yoshioka에 있어서, 1966년에는 Honshuu 쪽 Tatpi에 있어서 각각 조사 사갱의 굴착이 개시되었다. 이 사갱에서는 선진시추, 지수주입, 슛크리트 등을 실시하고 사갱저 도달 후는 해협 중앙을 향해서 조사 수평갱을 연장할 단계까지 이르며 「해저부에서도 안전하게 터널을 굴착할 수 있다」는 보고서를 운수대신(건교부 장관에 해당)에게 제출하였다.

2.5 계획의 기본 사항

1971년에는 공사선이 지정되어, 드디어 본갱의 공사에 착수하게 되었다. 이 시기는 1964년에 개업한 Tokaido 신간선의 성공으로 전국 신간선망이 계획되어, 일본 국토를 종단하는 등뼈가 되는 신간선의 일부로서 Seikan 터널을 사용할 수 있도록 신간선도 통과할 수 있는 구조로 계획을 변형하게 되었다. 따라서 최고 경사는 20%에서 12%로 변경되었으며, 이는 연속 상향 경사 구간이 20km를 넘어 고속운전의 신간선 전차의 모터가 과열될 우려가 있기 때문이다. 또한, 신간선과 재래선과의 병용 궤도가 고려되어 신간선의 Cant량이 재래선에 대해 너무 커서 위험하며, 재래선의 경우 신간선에 대해 부족하기 때문에 양자의 허용범위 내에서 수렴하기 위해 최소 곡선 반경이 6,500m란 큰 값으로 되었다. 평면적으로는 수심이 얇은 안부를 통과하고 조사에서 명백히 나쁜 지질이라고 예상되는 곳을 피해서 루트 선정을 한 결과 그림 2와 같이 연장 53.850km의 장대(長大) 터널로 되었으며, 해저부에서는 그림 3과 같이 3개 경도가 계획되었다.

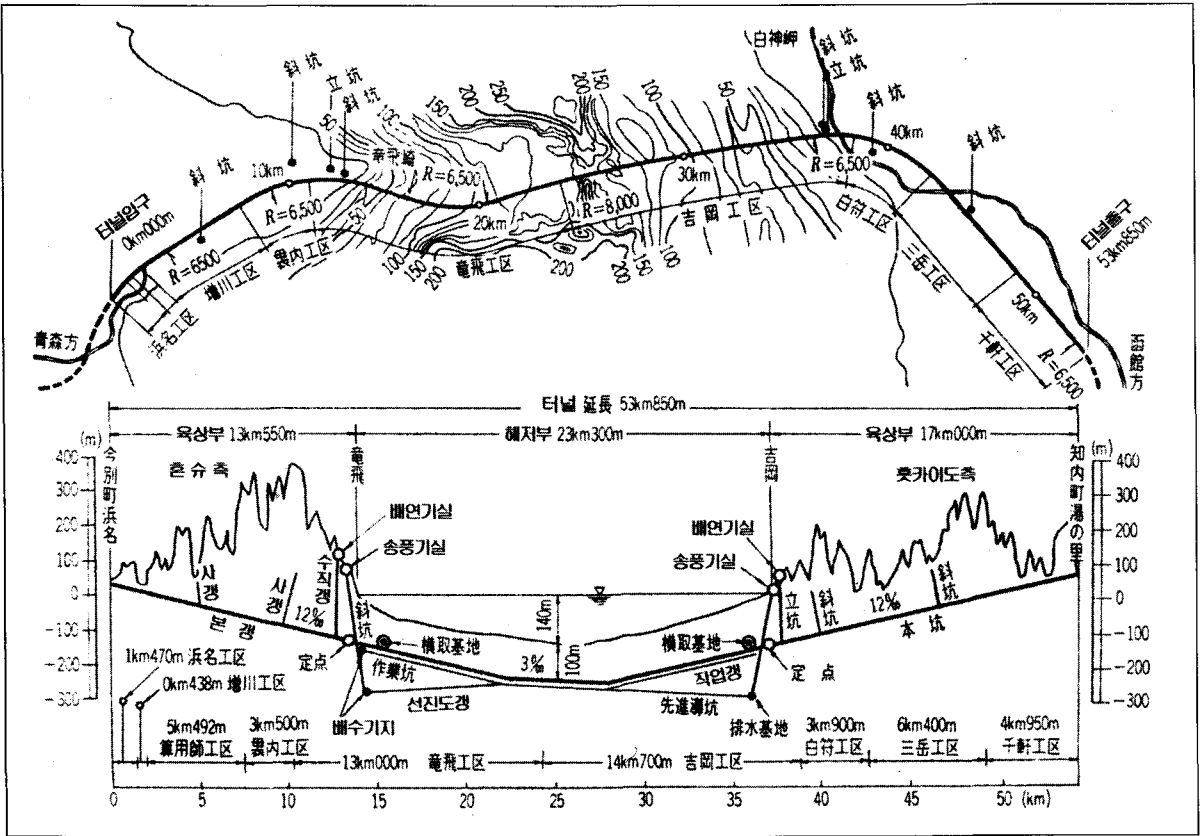


그림 2. 평면·종단면도

Tatpi · Yoshioka부터 각각 연장 1,315m, 1,210m의 조사 사갱(경사 1/4)이 굴착된 후, 뒤이어 양쪽으로부터 해협 중앙부를 향해서 선진도갱을 굴착한다. 이 선진도갱은 해저의 지질, 단층, 용수 상황 등을 직접 조사하는 것이며, 완성후는 양쪽의 사갱 바닥 Pumping Station으로부터 용수를 퍼 올리기 위한 배수갱으로서 이용하는 것을 생각해서 3%의 상향 경사로 하였다. 또한 굴착을 할 경우는 지반의 토목공학적 제반 성질을 파악하고, 또한, 선진 시추, 지수 주입 등의 새로운 기술을 연구 개발하여 본갱의 시공에 반영할 필요가 있었다. 이와 같이, 조사 및 시험에 따른 시공은 청부공사에 익숙하지 않기 때문에 철도건설공단의 직할공사로 하기로 하였으며, 사갱의 시공을 포함한 선진도갱 관통까지 이 체제가 유지되었다.

작업갱은 사갱 도중부터 분기시켜 본갱 굴착에 앞서서

선진시켰고, 본갱과 같은 레벨에서의 지질조사, 용수 처리를 실시하는 것 외에 공사 기간 단축을 위해 본갱 굴착

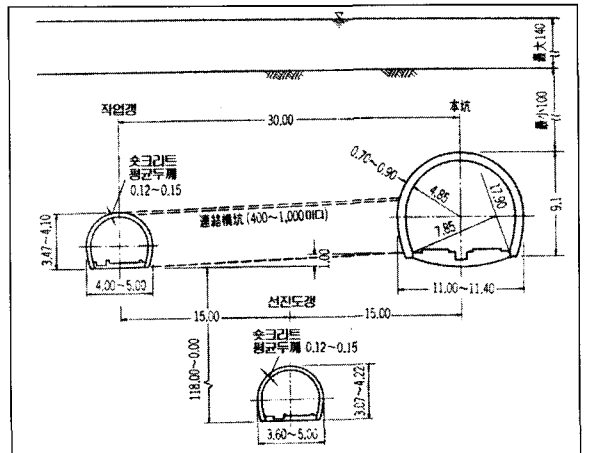


그림 3. 해저부 표준단면도

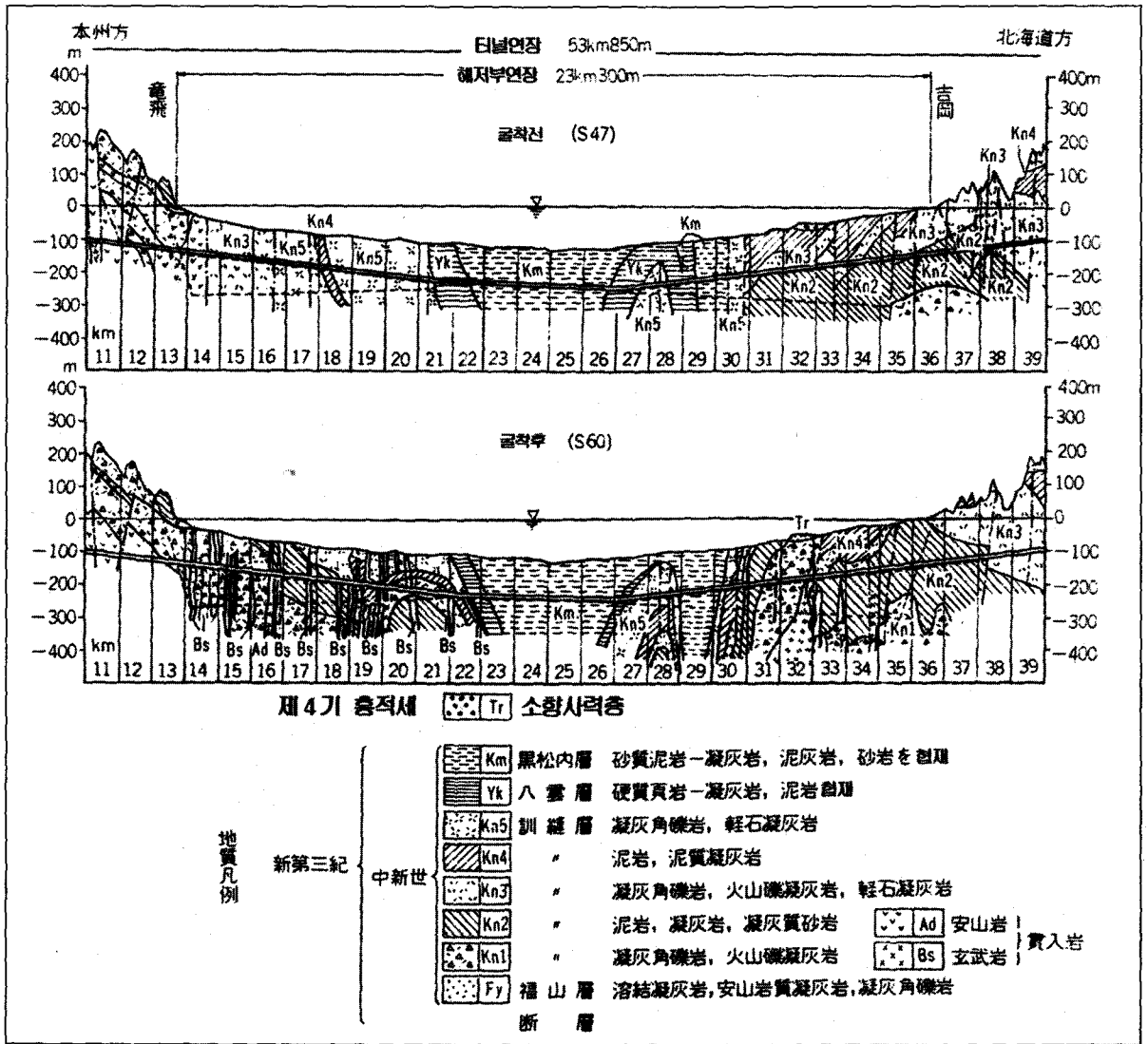


그림 4. 굴착전·후의 대비지질 종단면도

의 막장을 다수 동시에 설치할 것을 생각하고 본갱과 30m 이격으로 병행하여 공사용 통로의 역할을 하도록 하였다. 본갱과의 연락 횡갱은 지질 상황 등에 따라 설치하도록 했지만, 최종적으로는 평균 약 600m마다 설치하게 되었다. 단, 해협 중앙부의 5km 정도는 선진도갱과 일체로 되기 때문에 작업갱은 없다.

본갱 단면 형상에 대해서는 복선형 1 개와 단선형 2 개로 하는 문제가 있었지만, 시공시의 난이도, 안전성, 공사

비용, 공사 기간 등, 또한 터널 사용 개시후의 열차 통과시의 공기 저항 등에 대해서 각종 검토를 한 결과, 복선 단면을 채용하기로 하였다.

3. 지질 개요

Tsugaru 해협 중앙부의 지질은 신제3기 중신세의 비

교적 새로운 퇴적암으로 그림 4에 제시하는 바와 같이 대국적으로 지층은 해협 중앙에 향사축을 가진 습곡구조를 이루고 있다. 따라서, Honshuu, Hotkaido 양쪽 양 해안부터 해저를 향해서 굴착이 진행될수록 상부의 새로운 지층이 출현하게 된다. 지층은 하부로부터 Fukuyama층, Kunpo층, Yagumo층 및 Kuromatsunai층으로 되며, 안산암, 유문암, 현무암 등의 화산암을 동반하고 있다.

해저부의 특징은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 우선, Honshuu쪽은 육상부에서 탁월한 Tatpi 안산암류에 접하고, 현무암 암맥을 빈번히 동반하는 응회암질의 Kunpo층으로 대표되지만, Hotkaido쪽과는 암상이 달라 대비가 명확하지 않은 부분도 있다.

중앙부는 향사부의 Yagumo층, Kuromatsunai층과 배사층의 Kunpo층으로 되어 있다. Yagumo층은 흑색의 경질 셰일을 주체로 한 지층이며 Hotkaido로 향할수록 층의 두께가 얇아져 29km 이북에서는 Yagumo층이 없고 Kuromatsunai층과 Kunpo층이 부정합으로 접하고 있다. Kuromatsunai층은 사질 이암을 주체로 하고 응회암, 이회암의 박층을 낀 지층이지만 일부에 고결도가 지극히 낮은 사질암층이 끼어 있어 공사가 어려운 곳이다.

세번째의 Hotkaido쪽은 향사부의 Kuromatsunai층과 단층파쇄대를 동반하는 Fukuyama층과 Kunpo층으로 되어 있으며 습곡, 단층 및 화산암 관입의 영향을 받아 연약한 곳도 다수 분포하고 있다.

굴착전과 굴착후의 지질도를 비교해 보면 대국적으로는 차이가 적고 당시의 해상 조사기술 및 해석 기술에 경의를 표시할 수 밖에 없다. 구태여 예상과 다른 점을 몇 가지 들면 Tatpi쪽의 현무암 암맥의 관입, Yagumo층의 층후, Kuromatsunai층과 Kunpo층의 부정합, Fukuyama층의 출현 등이다.

4. 설계 및 시공

4.1 공사 발주

사갱과 선진도갱은 공단의 직영 시공으로 한 것은 앞에서 언급한 바와 같으며 작업갱도 당초는 직영으로 시공하고 있었지만 도중부터 하청공사로 하였다. 본갱에 대해서는 최초부터 하청공사로 하였지만, 해저부에서는 공사가 장기적이며, 또한 대규모이고 더구나 지질, 용수 상태 등 불확정 요소도 많기 때문에 계약 방법에 대해서 여러 가지 검토를 하였다. 그 결과, 책임 체제, 시공 능력, 기술력, 위험 부담의 분산 등을 고려해서 구성원 3개사에 의한 공동도급 방식을 채용하기로 했으며 1972년에 Tatpi, Yoshioka 양 공구의 해저부 공사가 착수되었다.

한편, 육상부는 통상의 터널과 마찬가지로 도중에 사횡갱이 설치되기 때문에 Honshuu쪽을 4 공구, Hotkaido쪽을 3 공구로 분할해서 그 규모에 따라 구성원 2개사의 공동도급 방식 또는 1개사 단독으로 1973년부터 1974년 사이에 계약이 행해졌다.

4.2 공사 공정

4.2.1 선진도갱

조사사갱은 Yoshioka가 1964년에 착수되고, Tatpi는 벽지였기 때문에 접근도로의 정비 등에 시간을 요해서 2년 늦게 시작하였다. 사갱 바닥에 도달해서 선진도갱에 착수한 것도 Yoshioka가 1967년이며, Tatpi는 1970년이었다. 이것은 Tatpi쪽 사갱의 1,223m 지점에서 1969년에 최초의 이상출수사고가 일어났다는지, 화성암의 암반부터 나오는 대량의 용수처리에 시간을 요했기 때문이다.

선진도갱과 작업갱은 굴착속도가 터널전체의 공정에 영향을 미치게 되기 때문에 모든 지질에 대해서도 시공이 쉽고 버력반출, 재료반입 등의 수송도 원활하게 할 수 있는 단면으로 하였다.

굴착을 할 경우는 되도록 지반이완 방지를 위해 발과공법이 아닌 기계굴착을 검토하여 Yoshioka쪽에서는 TBM을 1967년에 도입하여 고속 굴진의 가능성에 대해 시도해 보았다. 진행이 좋을 때는 최대 월 진행 180.4m, 연속 30일간 최대진행 262.5m란 기록도 만들었지만, 해협 중앙부를 향함에 따라 지반이 취약하며 막장의 자립성

및 TBM의 추력을 얻기 위한 갱벽 지지력 부족의 문제가 발생하여 이것을 단념하고 보통공법으로 바뀌어야 했다.

1974년쯤부터는 작업갱 및 본갱에 선진해야 하며 추성과 설 이외는 일요일도 작업하는 체제가 조직되어, 해협 중앙부에서는 Yagumo층, Kuromatsunai층에서 난항했지만 1983년 1월 27일에 관통해서 유사 이래 처음으로 Honshuu와 Hotkaido가 연결되었다.

4.2.2 작업갱

하청공사의 작업갱 착수는 Tatpi, Yoshioka공구 모두 1972년이며 Tatpi는 1km, Yoshioka는 2.6km 굴착한 시점에서 직할공사로부터 이어받았다.

공사의 성력화를 도모하고 지반을 손상시키지 않고 굴착할 방법을 모색한 결과 굴착과 주입을 반복하면서도 작업을 간단하게 전환할 수 있는 자유 단면식 굴착기를 도입하였다. Yoshioka쪽은 Load Header를 사용해서 시공하였지만 지질 악화에 따라 약 800m만 굴착하고 발파공법으로 이행하였다. Tatpi쪽과는 반대로 발파공법부터 알피네마이너를 사용하는 공법으로 변경하여 약 5km 시공을 수행하였다.

작업갱에서는 지질이나 굴착 상황, 주입 방법 등을 선진도갱 방법을 본받아 진행하고 있으며 단면도 변하지 않았기 때문에 선진도갱과 다른 점은 별로 없지만, 특기할 점은 3회의 이상출수 사고이다. 특히 최대 사고는 1976년의 Yoshioka에서 발생한 것이며 최대용수량은 70tf/min, 수물구간은 작업갱에서 3,015m, 더군다나 본갱에 까지 미치고, 복구해서 출수막장에 도달할 때까지 5개월이 소요되었다.

작업갱은 그 후도 팽창성 지질이나 다량의 용수에 고생하면서도 Tatpi쪽은 1979년 9월에, Yoshioka쪽은 1980년 3월에 각각 선진도갱과 합류해서 작업을 종료하였다.

4.2.3 본 갱

해저부 본갱의 하청공사 착수는 작업갱과 같은 1972년이며 Tatpi 공구는 제1본갱부터 제12본갱까지, Yoshioka 공구는 제1본갱부터 제15본갱까지, 1 시공 구

간을 800~1,000m로 구분하고 각각 연락갱을 설치하여 시공이 실시되었다.

본갱은 작업갱에 대해 약 5배의 단면이 있었으며 굴착 공법 선정에 할 경우는 신중히 검토를 하였다. 연락갱부터 본갱에 들어갈 경우는 비교적 지질이 좋은 구간을 선정해서 설치했으며 그대로 저설도갱으로서 들어가는가 상부반단면선진 또는 Side Pilot으로 하는가 여러 가지 방법을 지질에 따라 변화시키고 있다.

Tatpi쪽은 용수가 많아 저설도갱부터의 주입으로는 시간을 요하기 때문에 전단면 주입에 유리한 상부반단면선진공법을 기본으로 하였다. 해협 중앙부에 접근함에 따라 지질이 악화됐기 때문에 Side Pilot으로 변경하고 더욱더 나빠지면 측벽 콘크리트를 크게 한다든지 록 볼트의 병용도 실시하였다.

Yoshioka쪽은 비교적 용수가 적고 주입 작업이 적다고 예상되어 저설도갱을 기본으로 했지만 해협 중앙 부근에서는 Tatpi쪽과 마찬가지로 Side Pilot으로 하였다. 또한 F₁₀ 단층을 돌파한 경우에는 원형 단면의 Short Bench Cut 공법과 주벽도갱을 조합한 Spring Side Pilot 선진 원형 Short Bench Cut 공법을 사용하고 최대 지압이 300tf/m²에 달하는 개소에서는 강관에 철근과 모르타르까지 채운 것을 사용하였다.

단, 본갱에서의 Tatpi 공구와 Yoshioka 공구의 관통식은 1985년 3월 10일에 무사히 거행되었다.

육상부의 굴착은 해저부의 시공에 맞추어서 실시되었다. Honshuu쪽은 화성암이 주로 되어 있으며 용수도 많아 지질에 대응한 공법이 취해졌지만, Masukawa 공구에서는 토피가 작기 때문에 개착공법을 사용하였다. Sanyoushi 공구에서는 Pipe Roof 공법도 일부 사용되었다. Koromonai 공구가 Honshuu쪽에서는 가장 난항했으며 1982년의 완성에 의해 육상부 Honshuu 쪽 본체 공사는 종료되었다.

Hotkaido쪽은 비교적 양호한 지질이며, 일부 메탄 가스의 발생은 있었지만 Load Header를 비롯한 기계굴착을 각 공구에서 도입해서 굴착은 대체로 순조롭게 진행되었다.

표 1. 이상 출수 사고 일람표

공구	경도	출수위장위치 (수심, 토피고)	발생 날짜	용수량(t/min)		총용수량 (m ³)	홍수량 (천m ³)	토사량 (m ³)	수몰 구간 (m)	토사매몰 구간(m)	지수 주입량 (m ³)	복구착수 까지의 일수	복구공사 소요월수	출수위장 도달날짜	복구 대책	지질
				최대시	최종시											
Tatpi	사갱	1k223m (25m, 215m)	69. 2.13	16	5.5	183,468	5.3	300	196	15	524	24	6.3	69. 9.15	지수주입 특별도갱 직진	안산암 파쇄대
	작업갱	16k890m (78m, 102m)	74.12. 5	6	1.6	188,224	1.6	1300	130	70	2800	36	5.6	75. 5.30	우회갱	응회암, 원무암 관입에 의한 파쇄
yoshioka	작업갱	3k509m (32k746m, 58m, 134m)	74. 1. 8	11	9.0	12,764	9.0	1100	880	60	2873	27	11.6	75. 1.20	주입고결 직진	응회암 (사질) 파쇄대
	작업갱	4k588m (31k667m) (76m, 128m)	76. 5. 6	70	121.0	1,845,000	121.0	1000	작업갱 3,015 본갱 1,493	74	1899	50	4.4	76.10.15	우회갱	응회암 파쇄대

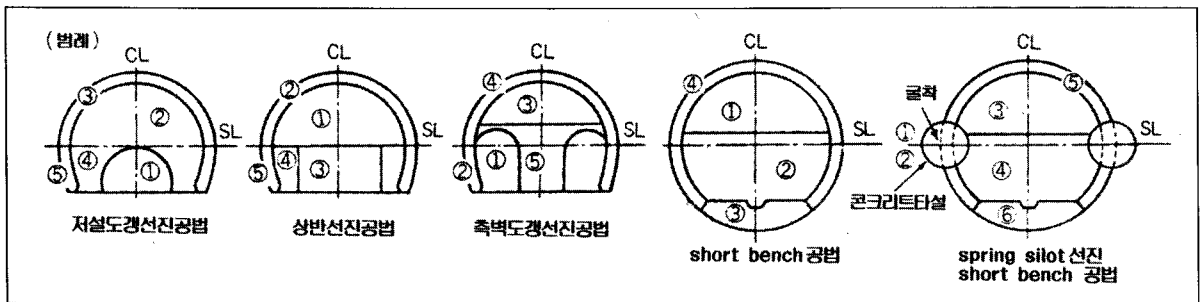


그림 5. seikan 터널본갱공법별 시공연장

Hotkaido쪽에서 최후로 된 것은 Mitake 공구이며 1979년에 본채공사를 종료하였다.

또한, 작업갱 및 본갱의 공사 공정표를 그림 6에 표시한다.

4.3 개발된 기술

Seikan 터널이 다른 산악터널과 비교해서 현저히 다른 점은 해저터널이며 또한 장대터널이라는 것이다.

해저부의 시공에서 특히 문제가 되는 것은 전방 지질상태를 잘 알 수 없다는 것과 높은 수압하에서 터널시공시의 용수대책이다. 장대터널의 시공을 위해서는 높은 정밀도의 측량을 필요로 하며, 공사중의 버려반출, 환기, 그리

고 배수 등 시공시의 문제, 완성후의 보수, 보안대책을 고려한 구조물로 설계되어야 한다는 것 등이 본 터널의 설계, 시공시의 주안점이었다. 이들에 대처하기 위해 계획, 조사 단계에서부터 항상 새로운 기술을 개발하고 설계, 시공에 반영시켜 갈 필요가 있었다. 이들 기술 중에서 특히 Seikan 터널이 아니고는 할 수 없는 기술에 대해서 언급한다.

4.3.1 선진 시추

해저부에서는 해수라는 커다란 장애물에 의해 직접적인 조사가 어려워 육상터널처럼 실시할 수가 없었으며, 정성적인 지질정보만이 제공될 뿐이었다.

한편, 해저부의 시공을 안전하고 계획적으로 실시하기

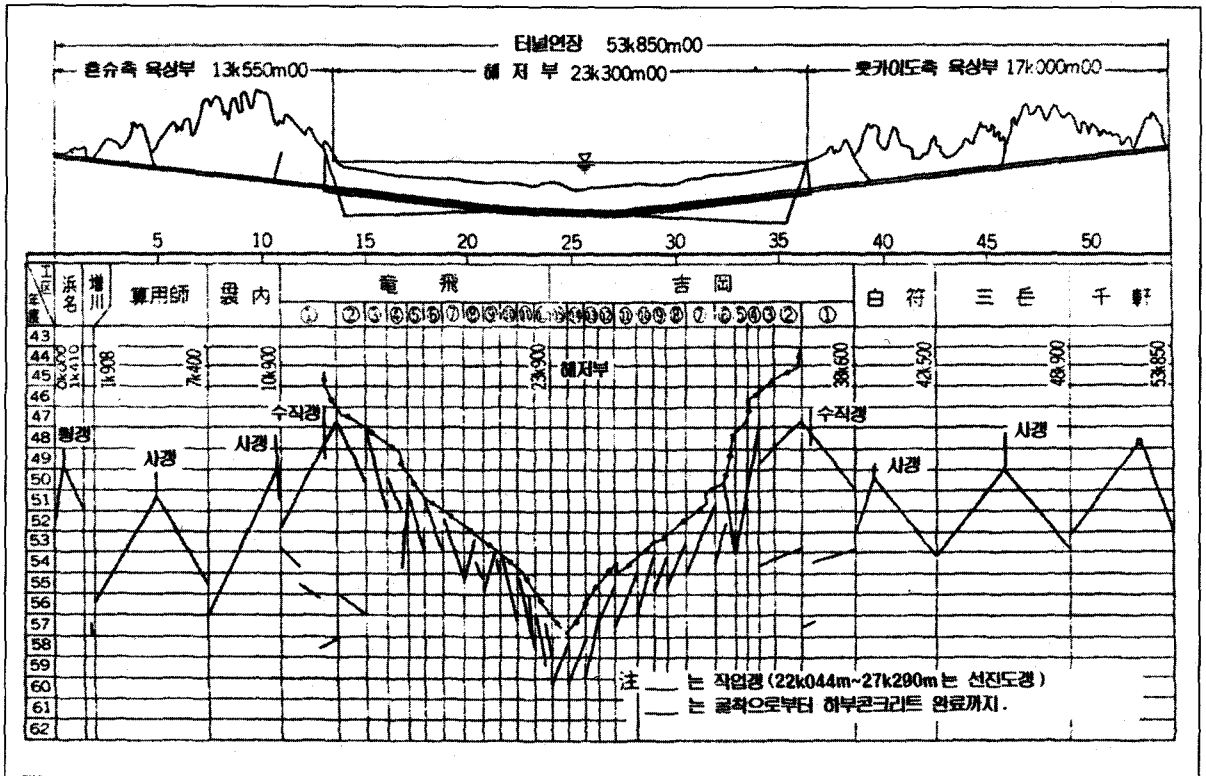


그림 6. 작업경 및 본경 공사 공정표

위해서는 육상부 이상으로 전방의 지질정보가 요구되기 때문에 선진시추기법을 개발하였다.

선진시추시에는 굴착작업을 방해하지 않도록 갱도 사이에 횡경을 굴착하고 이곳을 시추기지로 이용하여 굴착과 병행작업을 할 수 있도록 하였다. 따라서, 기계의 가설에 시간이 필요했으며, 시추의 진행이 늦으면 막장 쪽이 앞으로 진행되어 버리고 시추를 하는 의미가 없어져버리기 때문에 긴 천공과 굴진속도의 고속화를 목표로 하였다.

그러나, 수평시추기술은 수직시추와 같이 이수의 압력을 이용해서 공벽의 붕괴를 방지하는 방법을 그렇게 기대할 수 없으며, 특히 용수 발생시에는 이수 농도가 희석되어 관리가 매우 어렵게 된다. 또한 중력에 의해 천공선단이 하향되는 경우가 많은 점 등 소기의 목적을 달성하기 위해서는 극복해야 할 과제가 많이 있었다.

당초 코어 채취에는 Wire Line 공법, 용수의 확인을 주체로 할 경우는 Non Core 공법으로 했지만, 나쁜 지질로 되면 Wire Line 공법으로서는 Rod의 역할이 많기 때문에 Reverse 공법, 이중관 굴착 공법, 압력 천공 공법, Air 천공 공법 등도 시행해서 Seikan 터널에서는 Reverse 공법이 가장 적합한 것으로 되었다.

시추의 궤적에 대해서는 굴진중 25m마다에 방위, 경사를 천공 휘어짐 측정기로 측정해서 구하고, 예정 위치에서 어긋나면 시멘트 밀크로 선단을 고정시켜서 다시 천공하는 방법, Bit와 Rod의 조합에 의해 수정하는 방법 등을 이용해서 구멍 휘어짐의 수정도 할 수 있게 되었다.

이상과 같은 기술로 상당히 나쁜 지질이라도 1,000m 정도의 것은 실용의 영역에 도달했으며, 최장 2,150m에 달하는 세계 제일의 기록을 수립할 정도에 도달하였다.

4.3.2 주 입

해저 공사에 있어서 가장 문제로 되는 것은 고압의 용수이며 무한의 공급력을 가진 용수를 처리하지 않으면 정압이건 연압이건 시공을 못한다.

이 대책 방법으로서 조사 사갱의 시공 단계로부터 지반 주입 기술의 개발을 진행해 왔다.

터널 내에 유출하는 수량에 대해서 다음 식을 적용하였다.

$$Q = 2\pi kL \cdot \frac{H+h}{\ln(2h/r)} \quad (1)$$

여기서, Q는 용수량(m³/sec), k는 투수계수(m/sec), L은 터널 연장(m), H는 피복 두께(m), h는 수심(m), r은 터널 반경(m)이다. 이 용수량을 작게 하기 위해서는 k를 작게 하며, 이것은 복공을 수밀로 하는 방법과 터널 주변의 지반을 개량하는 방법이 있다. 복공만으로 완전 지수하는 경우에는 수두 240m의 수압이 터널까지 직접 작용하게 되지만, 탄성체 모델로 내공 반경 2.5m의 콘크리트 원통으로 모델링하여 계산하면 복공 두께 2m로 하여도 콘크리트에는 70kgf/cm² 정도의 응력이 작용하게 되어 안전성, 경제적인 면에서 현실적이지 않다. 따라서, 지반의 투수계수를 작게 하는 방법을 검토해서 침투하는 용수의 배수 비용도 포함해서 경제적인 설계를 시도해 보았다.

이 설계를 실시할 경우에는 굴착에 따른 이완범위를 고려하여 그 바깥쪽 범위까지 주입 영역을 확대해서 지수준을 형성하고 수압에 대해서는 지반 개량된 존으로 저항시

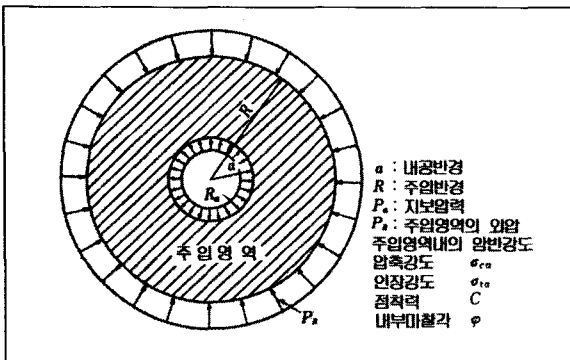


그림 7. 주입영역과 외력과의 관계

켜 복공에는 직접 수압이 작용되지 않도록 하였다.

이 주입범위를 결정하기 위한 계산은 다음과 같다.

주입범위를 탄성체로 생각하면 안정 조건으로서 다음 식이 성립된다.

$$P_a = -c \cot \phi + \frac{(P_r c \cot \phi)(1 - \sin \phi)}{1 - (a/R)^2 \sin \phi} \quad (2)$$

여기서, P_a는 지보 압력, C는 점착력, φ는 내부마찰각, P_r는 주입 영역 외압, a는 굴착 반경, R은 주입 반경이다.

또한, 이것을 취성도 N=σ_{ca}/σ_{ta}(σ_{ca}는 암반 압축강도, σ_{ta}는 암반 인장강도)로 제시하고 Mohr-Coulomb의 강도기준에 따라 c cot φ, sin φ를 N과 σ_{ca}의 항으로 표현하면

$$P_a = \frac{-\sigma_{ca}}{(n-1)} + (P_r + \frac{\sigma_{ca}}{n-1}) \times \frac{1 - [(n-1)/(n+1)]}{1 - (a/R)^2 [(n-1)/(n+1)]} \quad (3)$$

으로 된다.

여기서, σ_{ca}=10kgf/cm², n=3, φ=30°로 해서 외압 30kgf/cm²(수압 24kgf/cm², 토압 6kgf/cm²)로 가정하면

$$P_a = -5 + \frac{35 \times 0.5}{1 - 0.5 \cdot (a/R)^2} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (4)$$

로 되며, P_a와 R/a의 관계는 그림 8과 같이 된다. 이 그림으로부터 지보 압력은 R/a가 3보다 크게 되면 그렇게 감소하지 않은 것을 알 수 있으며 주입 범위를 단순히 크게 하여도 의미가 없으며, R/a=3 정도가 실용적 한도로 추정된다.

실제 시공에 있어서는 주입 범위의 크기는 보통 지질 구간에서 터널 반경의 3배 정도, 단층 파쇄대에서는 5~6배 정도로 해서 실시하였다.

주입을 개념적으로 제시한 것이 그림 9이지만, 이 예는 갱도를 50m굴착하기 위해 3 Stage 70m의 주입을 하는 것을 제시하고 있다.

실제 주입 작업은 우선 주입공의 천공을 막장부터 방사상으로 수공 동시에 실시하고 천공 종료 후 Packer를

표 2. 갱도별 주입실적

명칭	공구	주입 갱도 연장(m)	시공기간	주입 회수 (회)	소요 일수 (일)	소요 개수 (개)	전공		용수량 계산 (l/min)	주입		평균 충진율(%)
							공수(공)	공길이(m)		공수(공)	주입량(m ³)	
선진 도갱	탓피	10,313.8 (11,363.8)	45. 1.30 ~57.12.15	216	2,141	5,842	7,681	379,590	944,894	7,553	100,952	2.38
	요시 오카	8,988.2 (11,012.2)	44. 7.15 ~57.12.10	159	1,673	4,738	4,546	346,064	319,323	4,375	78,831	2.44
작 업 갱	탓피	8,821.3 (8,843.4)	46. 1.19 ~54. 9. 9	164	1,040	2,711	3,783	229,533	272,880	3,693	27,755	0.76
	요시 오카	6,910.5 (8,966.0)	45. 7.24 ~55. 1.30	124	899	2,422	3,723	235,485	146,912	3,270	38,662	1.11
본 갱	탓피	13,000.0 (13,000.0)	47.10.16 ~58.12.17	307	4,485	11,189	17,984	1,092,498	1,023,471	17,978	178,673	1.36
	요시 오카	9,308.8 (14,700.0)	51. 2.12 ~59. 9. 6	226	4,240	9,944	17,405	1,108,377	826,491	17,372	306,714	2.53

※()안은 갱도총연장을 나타낸다.

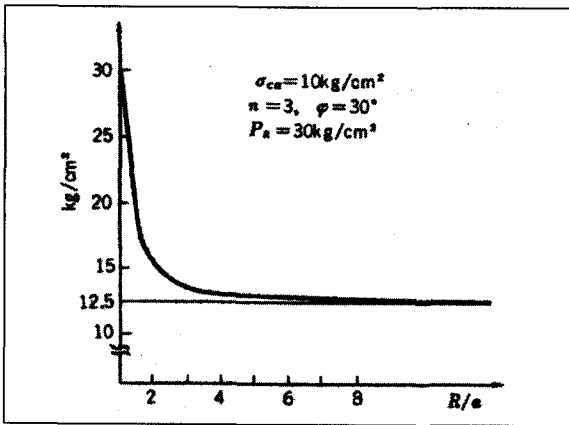


그림 8. 주입반경과 내공반경과의 비율과 안정에 필요한 지보압력의 관계

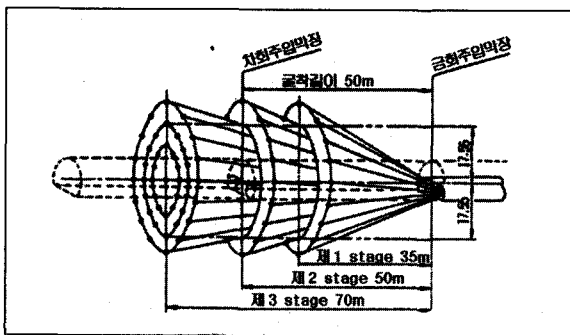


그림 9. 주입개념도

Set해서 주입한다. 주입 공수, 순서, 주입량 등의 기준을 설정하고 농도의 전환, 토출량, 토출 압력 등을 지질 상황에 맞추어서 패턴화 해서 주입 효과가 높게 되도록 고안하였다.

주입 재료는 충분한 강도와 내구성을 가지고 침투성이 좋고 Gel Time의 조절이 가능한 것이라야 한다. 사갱 굴착시에는 시멘트 밀크의 주입이었지만 1969년쯤부터 LW 주입으로 하고 최종적으로는 개량 고로 콜로이드 시멘트와 1호 물유리 75% 용액을 1:1로 혼합하여 1.5 Shot 방식으로 주입하게 되었다.

4.3.3 슛크리트

굴착에 의해 지반의 이완 영역이 주입 영역 외부까지 증대하면 24kgf/cm²에 달하는 수압의 영향으로 터널에 큰 토압이 작용해서 전체의 안정이 무너지는 위험이 있다. 따라서 Seikan 터널에서는 굴착에 의해 이완된 주변 지반을 빠른 시기에 안정시킬 필요가 있다. 이것에는 종래의 강제 지보공과 널말뚝에 의한 지보로서는 지반의 안정에 유해한 과다한 이완을 발생시키는 위험이 있기 때문에 널말뚝을 대신해서 슛크리트를 시공해서 지반과 밀착시킴으로서 열화를 방지하는 것을 생각하였다.

조사 사갱 착수와 동시에 건식 뿔어붙임 기계를 수입해

서 Nozzle Man의 양성과 시험을 반복해서 실시하였다. 그 결과 Rebound율은 단위 시멘트량, W/S, S/A의 영향을 직선적으로 받는 것도 알게 되어, 될수록 적게 되는 배합을 압축강도도 감안해서 결정하고 그 후 순조롭게 시공을 계속하였다.

그러나, 건식 공법은 Rebound, 분진 등이 많은 단점이 있으며, 이것을 해결하기 위해 1972년에 습식의 콘파르나스, 스피로크리트를 도입해서 시험을 실시하였다. 그 결과, Rebound, 분진량이 적고 강도도 크게 되는 것을 알게 되었지만, 반면에 압송 거리가 작고, 설비 규모가 크게 되는 등 작업성에 난점이 있는 것도 명백히 되었다.

그 후에도 각종 연구를 진행하고 품질 향상에 노력했지만, 최종적으로는 Seikan 터널의 조건에 적합한 것으로서 1974년쯤부터 알리바를 사용해서 Nozzle 직전에서 물을 첨가하는 준습식 공법을 채용하였다.

그 외, SEC 숏크리트 공법의 개발도 진행되었다. SEC는 Sand Enveloped with Cement의 약어이며 물 시멘트비가 작은 시멘트 페이스트 각으로 세골재를 싸는것과 동시에 이 각끼리 접촉하는 구조를 콘크리트 중에 형성시키는 것을 뜻하는 것이며 이 기술을 숏크리트에 응용한 것이 SEC 숏크리트 공법이다. 고강도이며 품질이 좋고 Rebound율, 분진이 적고 종래 공법의 단점을 제거하는

전혀 새로운 시공법이라고 할 수 있다.

선진도갱 및 작업갱의 복공은 12~15cm의 숏크리트만이며 완성시의 모양으로서 콘크리트에 의한 2차 복공의 필요성의 유무를 검토하였다. 조사를 위해 숏크리트의 코어를 채취해서 강도시험과 화학 분석을 한 결과, 염소이온 등의 증가가 약간 있고 해수의 영향이 인정되었지만 재령 15년을 거친 것이라도 강도의 열화는 없고 숏크리트를 영구구조물로서 사용해도 문제는 없다고 판단되어 숏크리트가 얇고 강재 등이 노출되어 있는 개소만을 부분적으로 보수 뿔어 붙이기 해서 2차 복공은 하지 않았다.

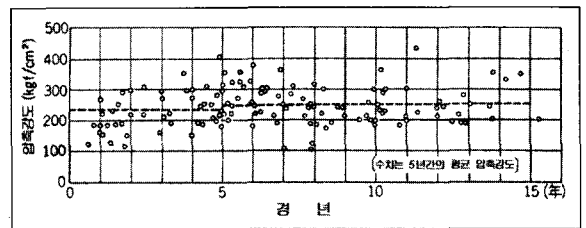


그림 10. 선진도갱 작업갱의 숏크리트 압축강도 경년 변화 시험결과

4.3.4 터널 설비

Seikan 터널은 해저터널이며 장대터널이므로 지금까지의 철도 터널에서는 예를 볼 수 없는 터널자체의 유지

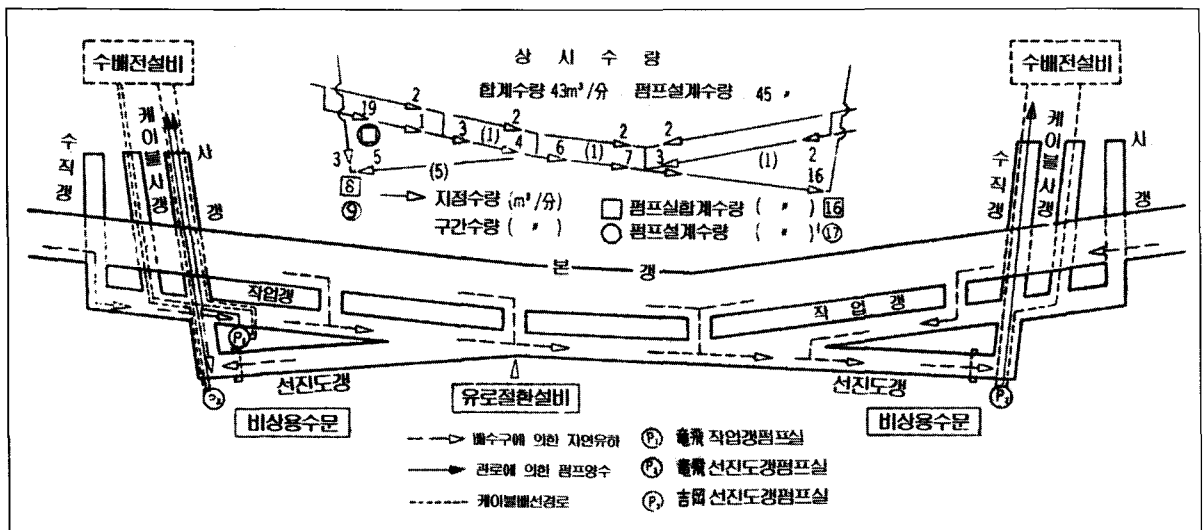


그림 11. 배수설비모식도

관리를 위한 보수설비를 필요로 한다.

또한 수송의 안전을 확보하기 위한 방재대책이 요구된다. 여기서, 이들 설비중 일부에 대해 소개한다.

(1) 배수설비

Seikan 터널의 본체는 대부분이 수면하에 위치하기 때문에 갱내로 유입된 용수는 모두 강제 배수해야 한다. 펌프실의 위치는 용수가 자연 유하하여 모이는 Tatpi, Yoshioka의 양 사갱 바닥(배수량은 Tatpi쪽 8m³/min, Yoshioka쪽 16m³/min)와 Tatpi 작업갱의 기점부근(배수량 19m³/min)과 Tatpi 작업갱의 기점부근(배수량 19m³/min)의 세 개소로 하고 모두 사갱을 경유하여 배수한다. Tatpi쪽에 2개소 설치한 것은 Honshuu쪽 육상부의 용수량이 특히 많으며 사갱 도중부터 배수하는 것이 양정이 작아서 경제적이기 때문이다.

또한 정전 등 전원계통 이상시에는 전력공급계통의 복수화나 비상용 발전기 등의 설비로 대응할 수 있는 이중계, 삼중계의 안전대책을 취하고 있다.

(2) 환기설비

Seikan 터널은 54km의 초장대터널이기 때문에 환기 방식은 재래의 철도터널과 같은 자연환기만으로는 충분하지 않다.

열차주행 및 열차내 전열장치로부터 발생하는 열의 축적, 보수용 차량 등으로부터 방출되는 배기가스의 대류 및 터널내 정체를 방지하기 위해 종류식 강제환기를 실시한다. 환기방법은 Tatpi, Yoshioka의 양 사갱으로부터 입기 Fan에 의해 공기를 선진도갱을 경유하여 해저 중앙부에서 본갱으로 급기되고 급기된 공기는 각각의 갱구를

향해 흘러가며 양 본갱구로부터 배기된다.

(3) 화재대책설비

Hokuriku 터널의 화재 사고 이래, 화재가 발생한 경우에는 해당 열차는 신속히 터널 외로 주행 탈출하여 승객을 안전한 지역으로 유도하는 방법이 최선이라고 되어 있다.

그러나, Seikan 터널에서는 화재 발생 위치에 따라서는 터널 외로 탈출할 수 없는 경우도 생각할 수 있다. 따라서, 터널 내에 화재 열차를 정지시켜 승객의 피난, 구원과 소화 작업도 할 수 있는 정도의 터널 외부 환경을 가진 특정의 장소(정점이라고 함)를 설치하도록 하였다. 정점은 Tatpi, Yoshioka의 사갱 부근에 설치되어 Seikan 터널을 3 분할로 함으로서 방재 측면에서는 실제 길이가 재래의 최장 터널과 같은 정도로 되는 것으로 생각된다. 정점에는 승객을 피난시키는 통로, 1000명 수용 가능한 대기 장소, 소화를 위한 물분무 설비, 소화전 등이 설치되어 있다. 그 외에는 피난하는 승객이 연기에 휘말리지 않도록 배연을 하는 설비도 있으며 이것은 상용 환기 설비와 조합해서 보다 효과적으로 작동하도록 설계하고 있다.

5. 개통 및 운영

1985년 3월에 본갱이 관통되어 그 이전의 1983년부터 육상부에서 하고 있었던 궤도, 전기 공사 등의 터널 부대 설비 공사는 해협 중앙부에서도 계속해서 시공되어 터널 내의 궤도 공사는 1987년에 완료했고 전기 공사도 1987년 5월에 종료되었다.

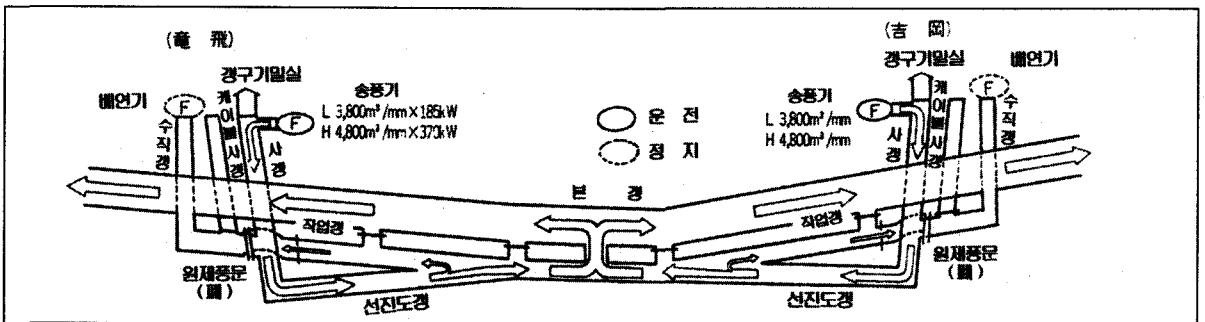


그림 12. 환기경로모식도

또한, 그 외에 해저 장대 터널인 까닭에 특수 설비 공사로 병행해서 시공되었다. 특히 정점은 Tatpi, Yoshioka 공구 모두 상행선 쪽의 유도도로와 연락 유도도로는 본체가 완료한 후부터 계획되어 굴착을 실시했기 때문에 본궤의 궤도 공사와 경합해서 상당히 고생하였다.

이와 같이 부대 설비의 공사가 본궤 완료 후 2년 가까운 공사 기간을 요했던 것은 연장이 54km나 되는 터널에 대해서 레일 등의 자재 반입구를 Honshuu, Hotkaido에 각각 한 개소밖에 설치할 수 없었기 때문이다.

한편, 재래선의 분기점부터 Seikan 터널의 양 갱구까지의 접근 부분은 1982년부터 공사에 착수했지만 Seikan 터널과 마찬가지로 앞으로 Shinkansen을 통과시킬 수 있는 구조로 시공되었다. 또한, 이 접근부에 연락하는 Tsugaru선과 Esashi선은 지방 Local선이며 비전철화이기도 했기 때문에 1985년부터 전철화 및 선로의 강화 공사를 JR Higashi-Nihon, JR Hotkaido에 위탁해서 간선 규격으로의 향상을 도모하였다.

공단·JR의 감사는 1987년 9월~10월에 실시되어 운수상의 완성 검사는 1987년 12월에 종료되었다. 이후, 승무원의 훈련이 JR Hotkaido, Higashi-Nihon, 화물 등 각 회사의 손에 의해 실시되었고, 이 사이에 각종 방재기능 확인시험이나 훈련도 실시되어 1988년 3월 13일의 영업을 목표로 준비가 진행되었다.

6. 끝으로

구상을 시작한지 약 50년, 공사에 착수후 24년간의 시공기간을 걸쳐 완성한 Seikan 터널도 열차로서는 약 30분으로 통과해버린다.

날씨에도 좌우되지 않는 안전 확실한 기간적 수송로를 제공하여 Aomori·Hakodate간이 2시간 정도로 왕래 가능하게 된 것은 단순히 Tohoku와 Dounan 지역의 활성화를 촉진시키는 것뿐만 아니라 일본의 경제는 물론 문화의 발전에도 크게 공헌하였다고 생각된다.

세이칸 터널의 개통은 우선 재래선의 운행뿐이지만 다

표 3. Seikan 터널 관련 자료

해상지질조사	음파탐사 : 2030km(항주 거리)
	탄성파탐사 : 59.2km(항주 거리) 해저 시추 : 78공(시공 공수) Dragging : 2150개소(채취 개소 수)
선진시추	시추 연장 : 121,000m
	시공 공수 : 273공
지반주입	주입량 : 847,000m ³
강재사용량	Ton수 : 168,000t
	(본궤 60mm 레일 제외)
굴착	총연장 : 약 124km
	본궤 : 53k850m
	선진도궤 : 22k292m
	작업궤 : 17k787m
	사횡궤 : 4k392m
	수직궤 : 384m
콘크리트	기타 : 약 25km
	굴착량 : 6,330,000m ³
	화약량 : 2,860tf
케도	콘크리트 : 1,510,000m ³
	숏크리트 : 229,000m ³
폼프배수능력	Rail 연장 : 215k400m(12,900t)
	Slab 매수 : 21,540매 CA 모르타르량 : 12,700m ³
전기관계(개업용)	공사중 총배수 능력 : 233m ³ /min(해저부)
	개업 후 총배수 능력 : 129m ³ /min
건물(개업용)	통신 케이블 : 366km
	고압 케이블 : 167km
기타	저압 케이블 : 48km
	조명 설비 : 13,400등(40W 형광등)
	연 노동자수 : 13,700,000명(61년까지)
기타	견학자수 : 35,800명(79-87년도)
	국내 : 34,500
	국외 : 1,320
	취득 특허 건수 : 21건
	표창 건수 : 21건

른 이용 방법에 대해서도 현재 연구가 진행중이며 Car Train등도 꼭 빨리 현실화 하고 아무쪼록 본래의 목적인 Shinkan-sen을 통과시켜서 보다 유효하게 터널이 이용 되는 것이 바람직하다.

* 본 기사는 일본 터널협회지 "터널과 지하" 제19권 4호의 기사를 요약, 재정리한 것이다.