ピーストンネルマガジン 2012.9.1

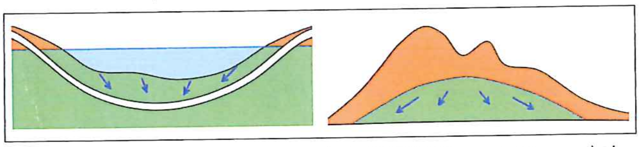
"고수압 · 대심도 대응 위한 기술개발이 필수 과제"

-해저터널 건설기술 어디까지 왔나-

김상환 | 호서대 토목공학과 교수, 한국터널지하공간학회 부회장

글로벌 시대를 맞이하여 해저터널은 대륙 간 연결과 국토의 일체화를 통하여 인적 물적 교류를 경제적, 안정적으로 정착시켜 나가고 있다. 특히 해저터널은 운송시간을 단축시키는 최대 교통 건조물로 활용되고 있다. 국내에서는 호남~제주 간 해저터널, 한일해저터널, 한중해저터널에 대해서 그 타당성을 지속적으로 업데이트하여 해저터널에 관한 미래 기술 선도의 가능성도 열어놓고 있는 실정이다.

해저터널은 바다 밑을 관통해야하기 때문에 깊은 심도에서 건설되고, 일반터널보다 총연장이 길어진다는 특수성이 있다. 〈그림1〉은 해저터널과 일반터널과의 지형적 차이를 보여준다.



〈그림1〉 해저터널(Marine Tunnel)과 일반터널(Land Tunnel)의 지형적 특성.

위의 그림에서 알 수 있듯이 해저터널과 일반터널은 고수압, 수리거동, 상재하중, 터널선형 등에서 근본적인 차이를 나타낸다. 따라서 해저터널을 건설하기 위해서는 무엇보다도 안전과 운영상의 기술 확보가 관건이다.

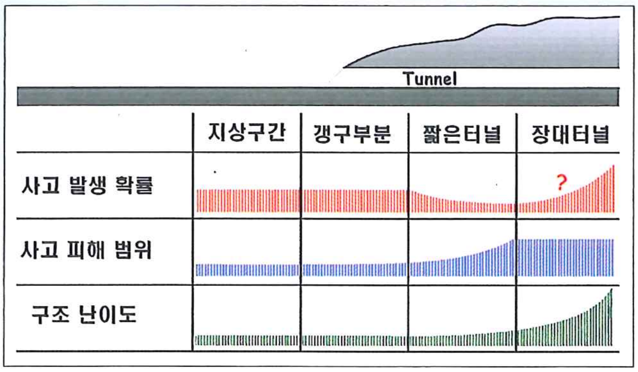
이 글에서는 세계적으로 수요가 증가하고 있는 해저터널 건설에 대하여 국내 기술개발 측면을 다각적으로 고찰하고, 기술발전 방향을 제시하고자 한다. 또한 해외 대표적인 대형 해저터널 건설 사례도 고찰해보고자 한다.

세계적으로 해저터널 기술개발 증가 추세

현재 야기된 해저터널 공사상 문제로부터 향후 부닥칠 새로운 환경을 극복하려면 ▲해저 지질 · 지반의 조사 및 분석 기술 ▲고수압 대응설계 및 시공 기술 ▲방재 및 유지관리 기술 ▲해상연결 인프라구조물 구축 기술 ▲해중터널(부유식터널)과 같은 신공법 개발 등 신기술을 지속적으로 연구개발해 나가야 한다.

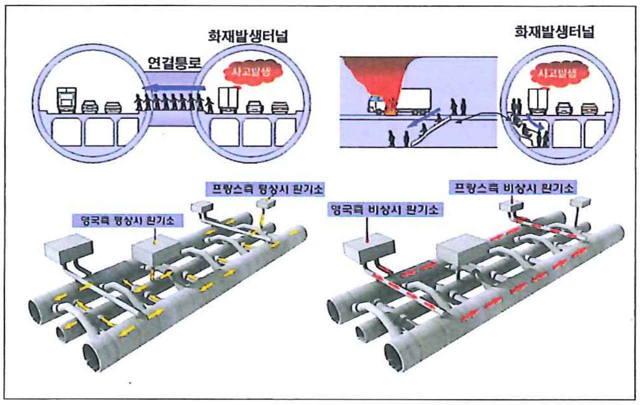
해저터널은 대심도 및 고수압에 대응하는 구조물인 관계로 최소암반두께(Minimum rock cover), 터널선형, 취약구간 보강대책, 터널 수리거동 등에 대한 기술검토가 우선적으로 요구된다. 또한 해저터널은 비교적 터널연장이 긴 장대터널로 계획되기 때문에 안전에 대한 검토가 필수불가결하다. 터널 내 안전사고 발생 확률은 〈그림2〉와 같이 장대터널일수록 크다. 사고 피해 범위도 짧은 터널에 비해 장대터널이 큰 것으로 나타난다. 장대터널을 건설할 경우 터널 내 환경조건과 유지관리 특성 및 재난 시 원활한 구난 계획을 고려하여 해중터미널 건설 등 특별 구조물설치에 대하여 면밀한 기술검토가 이뤄져야 한다.

〈그림3〉은 터널내 대피계획과 환기시스템에 대한 사례를 보여주고 있다. 예컨대 화재 대피 계획을 세울 때 일정한 간격으로 대피연결통로를 설치해 안전을 도모해야 한다. 또 터널 내 대피공간을 확보하고, 피난계단 등과 연결하여 화재



〈그림2〉 터널연장에 따른 사고위험도.

시 신속히 이동할 수 있게 해 승객의 안전을 확보해야 한다. 특히 화재사고에 대한 대책과 내화, 환기, 내진기술 등이 필수적으로 요구된다.



〈그림3〉 해저터널 대피연결통로(일반 사례) 및 환기시스템(유로터널) 사례.

해저터널의 경우 터널 계획지역의 지반특성조사가 매우 중요하다. 해저지반 조사는 사전조사를 비롯해 ▲기존의 설계 및 시공상 문제점을 분석하는 원인조사 ▲조사대상에 대해 조사항목과 방법을 수립하는 조사 ▲위성영상, 지형도, 지질도, 지표지질 등으로 조사하는 광역지반조사 ▲조사구간의 강도 및 변형 특성, 수치 특성, 동적 특성에 대해 조사하는 상세조사 ▲지질 및 지반 공학적 특성에 따라 시행되는 성과분석 및 설계정수 산정 ▲각 단계별 지반특성 및 분석기술 등으로 나눌 수 있다. 그러나 해저터널은 해저 대심도 터널이라는 특수성 때문에 일반터널의 빈도로 시추조사를 수행하는 것은 조사기간, 설계기간 등을 고려할 때 어려울 가능성이 높다.

해저지반 파악 위해 탄성파 탐사 등 특수기법 요구돼

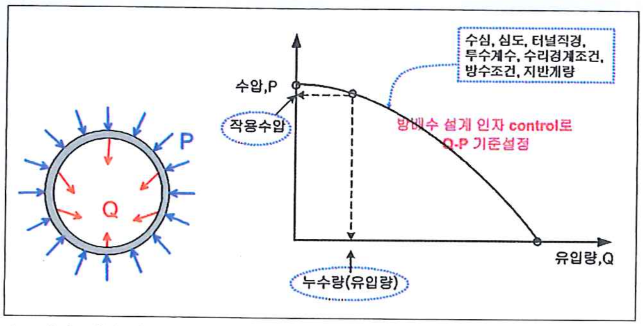
따라서 탄성파 탐사, 전기 비저항 탐사 등의 특수한 해저물리 탐사기법을 적용하여 예측한 결과와 해저시추조사 결과를 상호 비교하여 지반특성을 판단하는 기술이 요구된다. 또한 해저터널 시공 시 막장 전방의 국부적인 연약대 등의 취약대 분포를 사전에 예측하여 신속한 보강 계획 등 대책공법을 수립할 수 있어야 한다. 조사 분석이 어려울 경우, 터널 전방지반의 사전예측계획과 시공 중 조사계획을 수립하여 정밀한 시공을 전제로 한 기계화굴착방법(TBM 공법 등)을 적용함으로써 이와 같은 문제점을 극복할 수 있어야 한다. 이를 위해 사전에 안정성, 시공성, 경제성 등의 검토가 철저히 이뤄져야 할 것이다.

해저터널은 터널주변 지하수의 수리거동에 대하여 장단기적으로 야기될 수 있는 문제도 필히 검토되어야 한다. 고수압 지하수의 영향을 최소화하기 위해서는 지반의 투수계수를 최소화할 수 있는 가장 적절한 심도를 선정하는 것이 바람직하다. 이것이 불가피할 경우 터널 주변의 지반 투수성을 특수 그라우팅 공법으로 보강하여 지하수 유입을 저감시켜 터널의 유입량을 감소시키는 방법이 검토되어야 할 것이다. 이는 터널에 가해지는 수압을 침투압으로 변화시킴으로써 터널에 미치는 하중을 분산시키는 주된 효과가 있다.

터널주변에 대한 보강대책이 수립되었다 해도 장기적 차원에서 터널의 수리적 거동특성에 대한 합리적 설계방향을 설정하여야 한다. 장기적으로 터널이 열화될 경우 배수개념으로 설계된 터널은 수압이 올라가고 유입수량이 저감하여 비배수 상태로 변하게 된다. 비배수 개념으로 설계된 터널은 유입 수량이 증가하고 수압이 작아져 배수개념 터널과 동일하게 수리거동을 하게 된다. 따라서 대심도 해저터널의 경우 이러한 장기적인 수리거동에 대한 대책이 철저하게 검토되어야 향후 안정된 유지관리가 가능하다.

터널의 수리특성은 〈그림4〉와 같이 수압과 유입수량이 반비례하는 경향으로 나타나며, 이러한 양상은 수심, 심도, 터널직경, 투수계수, 수리경계조건, 방수조건, 터널구배 및 지반개량 요소 등에 의해 영향을 받게 된다. 따라서 대심도 해저터널의 경우 이러한 영향인자에 대해 사전에 철저히

검토하여 배수 시스템 계획뿐 아니라 향후 예상되는 수리적 문제점에 대해서도 사전대책이 수립되어야 할 것이다.

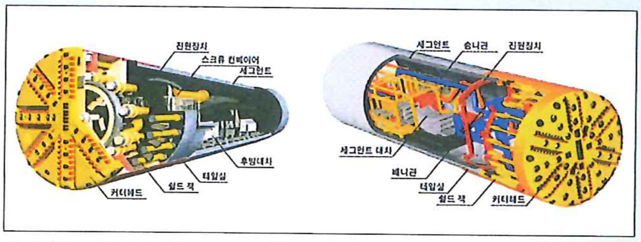


〈그림4〉 배수와 비배수 터널의 수리거동.

지반의 안정성을 유지하면서 터널을 굴착하는 것은 매우 중요하다. 지반의 안정성은 터널굴착공법에 따라 좌우된다. 터널굴착공법에는 크게 NATM(발파공법)과 TBM 또는 실드TBM(기계화 굴착) 공법으로 대별할 수 있다. NATM공법은 대상지반을 발파 후 주(主)지보재로 활용하여 지압을 지탱하고, 추가적인 숏크리트 및 록볼트 등과 같은 지보재를 보조적 공법으로 지지하여 터널을 시공하는 방법이다. 특징으로는 여타 공법에 비하여 경제성과 지반 변화에 대한 적응성이 우수하다고 볼 수 있다. 이밖에 굴착 단면적을 최적화할 수 있으나, 안전시공을 위한 철저한 대책이 요구된다.

기계화 안전 시공위해 실드머신과 세그먼트 기술 필요

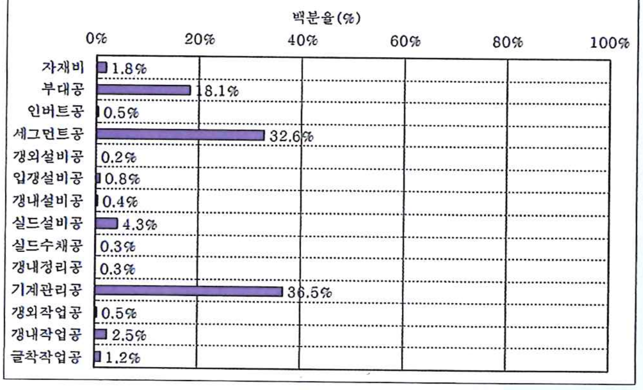
반면 TBM 또는 실드TBM공법은 디스크커터의 회전 압축력으로 굴착을 실시한 후 사전 제작된 라이닝 세그먼트를 조립 설치하여 터널을 시공하는 방법이다. 특징으로는 굴진속도가 빠르며, 원형단면이므로 불필요한 공간 발생을 최소화할 수 있다. 기계화 굴착에서 복합지반(토사+암반)에 광범위하게 적용되는 굴착장비는 막장지지방식에 따라 〈그림5〉와 같이 크게 토압식(EPB)과 이수가압식(Slurry)으로 구분된다. 토압식은 챔버 내 굴착버력을 이용하여 막장압을 관리한다. 지반조건은 다양한 입경의 토질에 적합하고, 작업에 필요한 부지가 소규모이며, 지상설비가 간단하여 현장 적용에 매우 유용하다. 이수가압식은 가압이수를 통해 막장압을 관리한다. 특히 연약대에서 막장관리가 우수하나 현장 적용 시 이수플랜설비가 요구된다.



〈그림5〉 토압식(EPB Type, 왼쪽)과 이수가압식(Slurry Type) TBM.

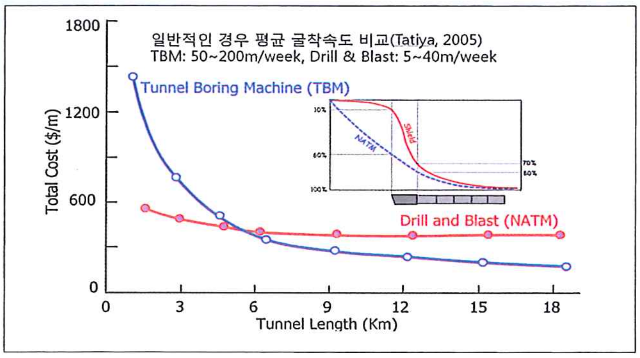
현재 국내기술에 의하여 적용된 기계화 시공에 대한 실드터널의 공종별 평균 공사비 비율은 〈표1〉과 같다. 이 자료를 보면 실드터널 시공 시 세그먼트공과 기계관리공이 공사비의 대부분을 차지하는 것을 알 수 있다. 따라서 경제적인 기계화 안전시공을 위해서는 실드머신과 세그먼트 제작에 대한 기술개발이 우선적으로 이뤄져야 할 것이다.

〈표1〉 실드터널의 공종별 평균 공사비 비율



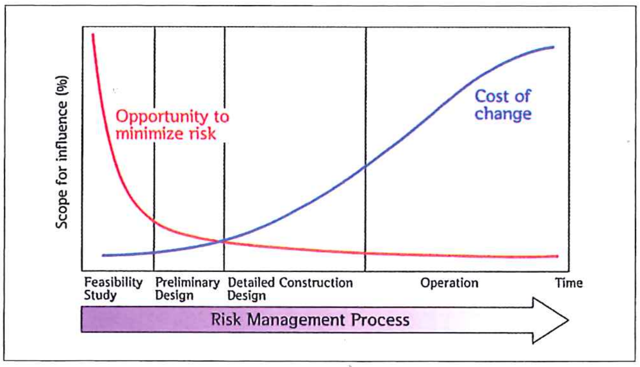
터널 굴착공법 선정은 무엇보다도 경제성이 우선적으로 고려되어야 한다. 〈그림6〉은 터널 연장에 따른 NATM공법과 실드 TBM공법의 건설비용에 대하여 비교해 놓은 것이다. 이에 따르면 터널연장이 6㎞ 이상일 때 기계화시공이 경제성이 더 높다는 것을 알 수 있다. 따라서 해저터널의 경우 터널연장이 길고 심도가 깊다는 점 등을 감안할 때 기본적으로 기계화시공이 경제적일 것으로 판단된다. 그러나 향후 실질적인 현장조건과 추가적인 영향요소들을 고려하여 상세한 경제성 분석이 실시되어야 할 것으로 판단된다.

해저터널 건설 시 또 하나의 중요한 기술은 리스크관리이다. 타당성 조사 단계부터 완공단계까지 리스크관리는



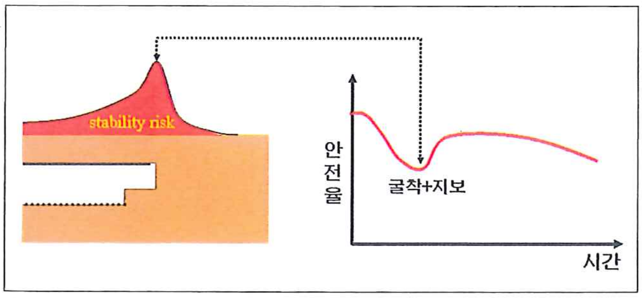
〈그림6〉 NATM과 TBM 공사비 비교.

매우 중요하며, 공사비에도 큰 영향을 준다. 〈그림7〉은 단계별 리스크관리 비중 개념도를 나타낸 것이다. 이 개념도는 초기단계에서의 리스크 최소화관리가 경제적 터널건설에 매우 중요하다는 것을 보여주고 있다. 따라서 대규모 사업비가 요구되는 해저터널의 경우 초기 리스크 최소화 방안에 관한 기술적 검토는 아무리 강조해도 지나침이 없다.



〈그림7〉 단계별 리스크관리 비중 개념도.

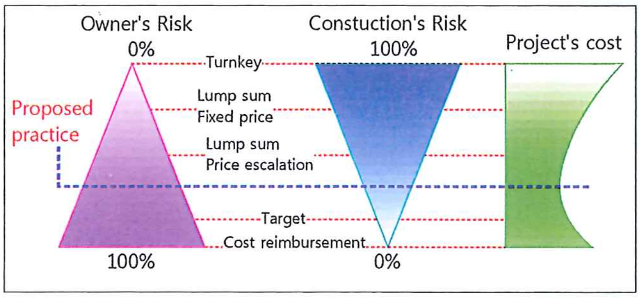
터널의 안정성에서 가장 위험도가 높은 곳은 〈그림8〉과 같이 터널의 막장이다. 막장은 주변지반의 응력이 집중되어 작용함으로써 응력을 분산시킬 수 있는 굴착방법이 요구



〈그림8〉 터널리스크의 공간적-시간적 특성.

된다. 또한 〈그림8〉에서 보여 주듯이 터널 막장 굴착 시 시간적(Life Time)으로는 안정성이 저하되지만, 굴착 후 시간경과 후 터널의 안정성은 굴착시보다 증가된다. 해저터널은 안정성이 강조되는 구조물인 만큼, 굴착 후 지보 설치 과정에서의 안전성을 확보할 수 있는 시공기술이 요구된다.

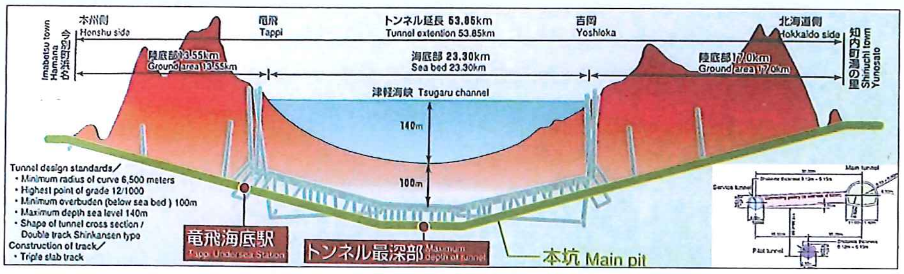
〈그림9〉는 건설 사업에서 리스크 분배 모델에 따른 사업비 변화를 나타낸 것이다. 해저터널 건설도 이러한 리스크분배 발주방식의 검토가 이뤄져야 할 것이다.



〈그림9〉 터널건설의 리스크 분배 모델.

현재까지 건설된 해외 주요 해저터널 중 유로터널과 세이칸 터널을 소개하고, 이들 터널의 시공전후에 발생한 사고들에 대하여서도 설명하겠다. 유로터널은 영국과 프랑스를 연결하는 해저터널로서 2개의 철도터널과 그 사이에 하나의 서비스터널 등 총 3개의 터널로 구성되어 있다. 본터널은 직경이 7.6m인 단선터널이며, 노선열차와 셔틀열차가 같은 궤도를 한 방향으로만 운행하도록 설계되어 있다. 직경이 4.8m인 서비스터널은 유지보수와 비상탈출을 위해서 375m 간격으로 주 터널과 연결되는 통로가 설치되어 있다. 터널의 총 연장은 약 50.3㎞이며, 이중 37.9㎞는 평균 40m 깊이의 해저에 건설되었다. 굴착공사의 대부분이 회색 이회토(Gray marl)층에서 이루어져 있다.

터널굴착은 토압식 실드 TBM으로 실시하였으며, 전체 TBM의 평균 굴착속도는 150m/주였다. 그러나 완공 후 1996년 11월 18일 저녁에 프랑스 쪽 입구를 출발하여 남쪽 방향인 영국 쪽으로 가는 대형 화물열차에서 화재가 발생하여 모두 34명의 부상자가 나왔다. 이 화재로 발생한 열과 연기가 터널 내 대략 4.8㎞에 걸쳐 피해를 입혔다. 심각한 피해를 입은 지역은 약 50m정도였고, 40㎝였던 콘크리트의 두께가 평균 17㎝로 줄었으며, 몇 곳은 겨우 2㎝ 정도만 남았



〈그림10〉 세이칸터널의 제원.

다. 시공 중에 주입된 그라우트 시멘트 뿐 아니라, 기반암 자체도 손상을 입었으나 화재 후 계측장치로 계측한 결과 지반의 유동은 없는 것으로 나타났다. 이후 예방차원에서 모든 지역에 강지보 보강을 실시하였다. 화재 원인은 터널건설에 따른 온도차에 의한 열차의 기능문제로, 향후 해저터널 건설시 환경변화도 필히 고려되어야 할 것이다.

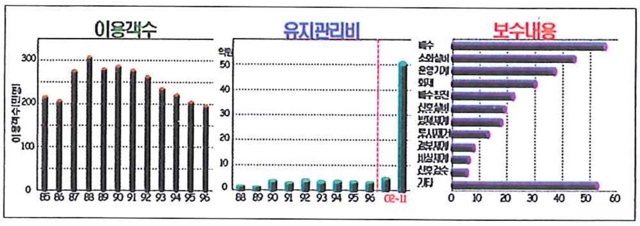
세이칸터널은 〈그림10〉과 같이 총연장이 53.85km이며, 이 중 23.3km가 해저부에 부설되었다.

세이컨터널 건설시 33명 희생 교훈 삼아야

1971년 공사선이 지정되어 본갱의 공사가 착수되었고, 돗카이도(Tokaido) 신칸센의 완성으로 세이칸터널도 신칸센이 통과할 수 있는 구조로 계획을 변경하여 최대 경사를 20%에서 12%로 조정하였다. 세이칸터널이 통과하는 쓰가루 해협 중앙부 지질은 신제3기(Neogene)의 비교적 새로운 퇴적암으로 구성돼 있다. 지층은 해협 중앙에 향사축(向斜軸)을 가진 습곡구조를 이루고 있다. 또한 신칸센과 재래선과의 병용궤도가 고려되어 최소곡선반경을 6,500m로 선정하였고, 터널의 최고 피복두께는 100cm로 계획하였다. 터널 단면은 본갱의 경우 높이 9.1m, 폭 11.1m의 복선터널이며, 선진도갱은 높이 3.07~4.0m, 폭 5.0m이다.

시멘트 주입식은 선진도갱 방식을 적용하였다. 이에 따라 해저부에는 지질상황, 공법조사, 환기, 배수, 유지관리 등을 위한 선진터널(pilot tunnel) 그리고 본터널과 평행한 보조터널(service tunnel)이 굴착되었다. 당초 세이칸터널 공사는 TBM을 적용하려 했으나 단층대와 경암, 연약지반이 불규칙하게 반복되는 해저지질 특징상 수많은 보링머신에 의한 굴착은 기대할 수가 없어 재래식 공법으로 건설되었다.

그런데 1976년 공사기간 중 연암 발파에 의하여 1분당 80톤의 해수가 유입되어 터널 내부 전체가 유실되는 사고가 발생하였다. 이 사고로 모든 갱도가 침수되는 바람에 배수와 복구에만 2개월 이상 걸렸다. 이외에도 전체 공사과정에서 발생했던 낙반사고, 용출사고 등으로 모두 33명이 목숨을 잃었다. 특히, 건설된 지 10년 후 이용량이 감소하고, 유지관리가 어려워 지는 등 중대 문제에 직면하였다. 〈그림11〉은 세이칸터널 건설 후 10년간의 이용객수와 유지관리비에 대한 자료로, 유지관리의 중요성을 말해준다. 또한 해저라는 특수성에 따라 수리거동에 대한 배수비용이 많은 것으로 나타났다. 따라서 해저터널 건설시 수리거동에 대한 기술적 검토에 대한 중요성이 강조된다.



〈그림11〉 세이칸터널의 이용객수와 유지관리비 통계자료.

지금까지 해저터널 건설에 대하여 기술적인 측면에서 다각적으로 고찰해보았다. 이와함께 현재 건설된 대표적인 해저터널에 대해서도 알아보았다. 해저터널은 우선적으로 해저지반에 대한 신뢰성 있는 자료획득과 건설과정에서 야기될 수 있는 위험성의 최소화가 매우 중요하다. 이러한 과제를 해결하기 위하여 해저터널의 특징인 고수압과 대심도에 대응할 수 있는 기술개발이 필수적이라고 판단된다. 이를 위해서는 미래를 위한 관련연구가 뒤따라야 할 것으로 판단된다. 특히 국내 터널기술 발전을 위해서는 건설관리시스템이 완벽히 개선돼야 할 것이다. 이밖에 해저터널 건설에 대한 리스크와 불확실성을 인정하는 설계의 유연성이 확보되어야 하며, 직접적인 전문가 권한에 의해 현장기술을 책임지는 건설시스템이 구축되어야 할 것이다. Ⓟ

ﾋﾟｰｽ ﾄﾝﾈﾙ ﾏｶﾞｼﾞﾝ 2012 年 9 月号, pp. 9-pp. 13 の翻訳

高水圧・大深度対応の技術開発が必須課題

海底トンネルの建設技術はどこまで来たか

キム・サンファン　ホソ大学　土木工学科教授、韓国トンネル地下空間学会　副会長

グローバル時代を迎え、海底トンネルは大陸間の連結と国土の一体化を通じ、人的・物的交流を経済的、安定的に定着させている。特に海底トンネルは、運送時間を短縮させる最大の交通建造物として活用されている。国内ではホナム～済州間の海底トンネル、韓日海底トンネル、韓中海底トンネルについて、その妥当性を継続してアップデートし、海底トンネルに関する今後の技術をリードする可能性も出てきている状態だ。

海底トンネルは海の底を貫通しなければならないので深い深度に建設され、一般のトンネルより総延長が長くなる特殊性がある。図１は海底トンネルと一般のトンネルの地形的な違いを表している。

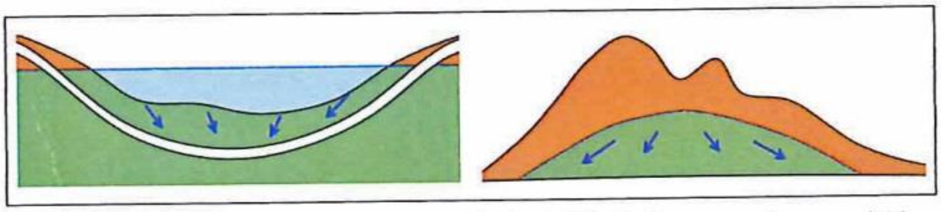


図１　海底トンネル（Marin Tunnel）と一般トンネル（Land Tunnel）の地形的特性

上の図でわかるとおり、海底トンネルと一般トンネルは高水圧、水理挙動、上在荷重、トンネル線形などで根本的な違いがある。したがって海底トンネルを建設するためには、何よりも安全と運営上の技術の確保が鍵となる。

本稿では世界的に需要が増加している海底トンネル建設について、国内の技術開発の側面を多角的に考察し、技術発展の方向性を提示する。また海外の代表的な大型海底トンネルの建設事例も考察してみる。

世界的な海底トンネルの技術開発増加の趨勢

現在持ち上がっている海底トンネルの工事上の問題として、今後壁に突き当たる新たな環境を克服するためには、▲海底地質・地盤の調査及び分析技術、▲高水圧に対応する設計および施工技術、▲防災および維持管理技術、▲海上連結インフラ構造物の構築技術、▲海中トンネル（浮遊式トンネル）のような新工法開発、など新技術を継続的に研究開発して行かなければならない。

海底トンネルは大深度および高水圧に対応する構造物である関係上、最少岩盤厚（Minimum rock cover）,トンネルの線形、脆弱区間の補強対策、トンネルの水理挙動などに関する技術検討がまず要求される。また、海底トンネルは、比較的トンネル延長が長い長

大トンネルとして計画されるので、安全に対する検討が必須不可欠である。トンネル内での安全事故発生の確率は、(図２）のように長大トンネルであればあるほど大きい。事故の被害範囲も短いトンネルに比べて長大トンネルが大きいことがわかる。

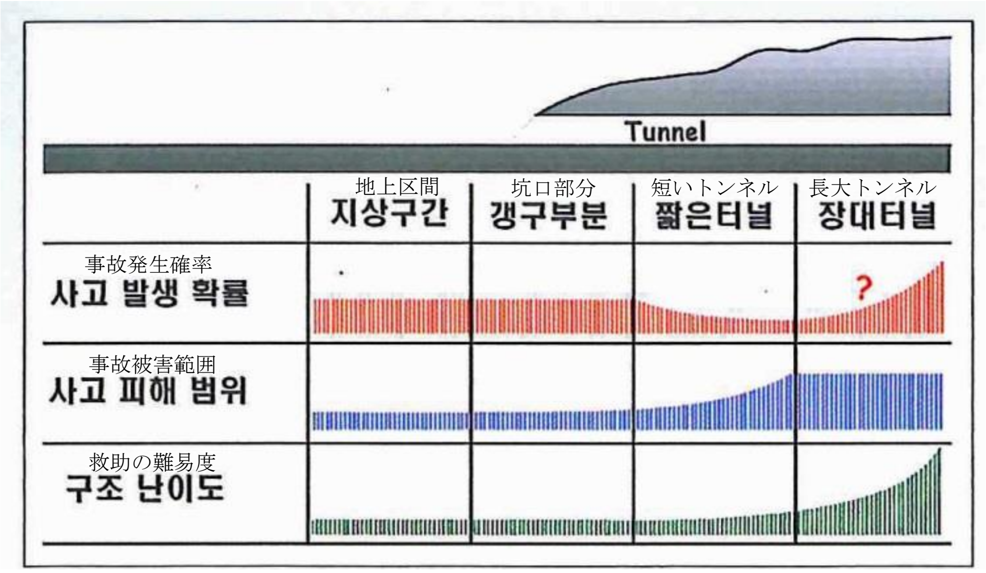


図２　トンネル延長による事故危険度

長大トンネルを建設する場合、トンネル内の環境条件と維持管理特性および災害時の円滑な救難計画を考慮し、海中トンネルの建設など特別な構造物の設置について綿密な技術検討がなされなければならない。

（図３）はトンネル内の退避計画と換気システムの事例を示している。例えば火災退避計画を立てるとき、一定の間隔で退避連結通路を設置し、安全を図らねばならない。また、トンネル内の退避空間を確保し、避難階段などと連結し、火災時に迅速に移動できるようにして乗客の安全を確保しなければならない。特に火災事故の対策と耐火、換気、耐震技術などが必ず要求される。

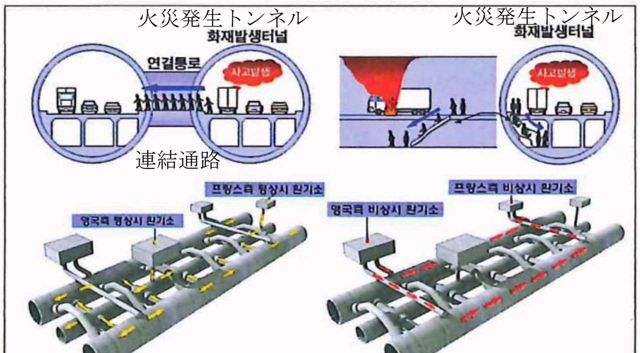


図３　海底トンネルの退避連結通路（一般事例）および換気システム（ユーロトンネル）の事例

海底トンネルの場合、トンネル計画地域の地盤特性の調査が非常に重要である。海底地盤の調査は事前調査を初めとし、▲既存の設計および施工上の問題点を分析する原因調査、▲調査対象に対する調査項目と方法を樹立する調査、▲衛星画像、地形図、地質図、地表の地質などで調査する広域地盤調査、▲調査区間の強度および変形特性、数値特性、動的特性を調査する詳細調査、▲地質および地盤工学的特性について行う成果分析および設計定数の算定、▲各段階別の地盤特性および分析技術、などに分けられる。しかし海底トンネルは海底大深度トンネルという特性上、一般のトンネルの頻度で試錐調査を遂行することは調査期間、設計期間などを考慮すると困難な可能性が高い。

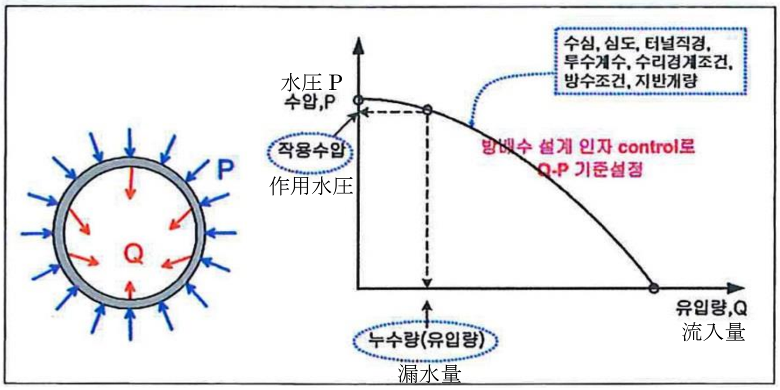
海底地盤の把握のための弾性波探査など特殊技法が要求される

したがって、弾性波探査、電気比抵抗探査などの特殊な海底物理探査技法を適用し、予測した結果と海底試錐調査の結果を相互に比較し、地盤特性を判断する技術が要求される。また海底トンネルの施工時に、切羽前方の局部的な軟弱帯などの脆弱帯の分布を事前に予測する迅速な補強計画など対策工法を樹立しなければならない。調査分析が困難な場合、トンネル前方の地盤の事前予測計画と施工中の調査計画を立て、精密な施工を前提とした機械化掘削方法（TBM 工法など）を適用することで、このような問題点を克服しなければならない。そのためには事前に安全性、施工性、計画性などの検討が徹底してなされなければならない。

海底トンネルは、トンネル周辺の地下水の水理挙動が長短期的に起こす問題も必ず検討されなければならない。高水圧の地下水の影響を最小化するためには、地盤の透水係数を最小化する最も適切な深度を選定することが望ましい。それが不可避な場合、トンネル周辺の地盤の透水性を特殊なグラウティング工法で補強し、地下水の流入を低減させ、トンネルへの流入量を減少させる方法が検討されるべきである。これはトンネルにかかる水圧を浸透圧で変化させることにより、トンネルに与える荷重を分散させるという主な効果がある。

トンネルの周辺への補強対策が樹立されたとしても、長期的な次元でトンネルの水理的挙動特性による合理的な設計方策を設定しなければならない。長期的にトンネルが劣化する場合、排水概念により設計されたトンネルは水圧が減って流入水量が低減して非排水状態へと変わるようになる。非排水概念で設計されたトンネルは、流入水量が増えて水圧が小さくなり排水概念トンネルと同じ水理挙動をするようになる。したがって大深度海底トンネルの場合、このような長期的な水理挙動に対する対策が徹底的に検討されてこそ今後の安定した維持管理が可能になる。

トンネルの水理特性は（図４）のように水圧と流入水量が反比例する傾向を見せる。この様相は水深、深度、トンネルの直径、透水係数、水理境界条件、防水条件、トンネルの勾配および地盤改良の要素などにより影響を受ける。したがって大深度海底トンネルの場合、このような影響因子について事前に徹底して検討し、排水システムの計画だけでなく、今後予想される水理的な問題点についても事前の対策が立てられなければならない。



水深、深度、トンネルの直径、透水係数、水理境界条件、防水条件、地盤改良

図４　排水と非排水トンネルの水理挙動

地盤の安定性を維持しながらトンネルを掘削することは非常に重要である。地盤の安定性は、トンネル掘削工法により左右される。トンネル掘削工法には大きく NATM(発破工法)とTBM またはシールド TBM（機械化掘削）工法に大別される。NATM 工法は対象地盤を爆破後、主支保材を活用して地圧を支え、追加的なショックリトおよびロックボルトなどのような支保材を補助的工法で支持し、トンネルを施工する方法である。特徴として他の工法に比べ、経済性と地盤変化に対する適応性が優れているとみられる。そのほかに掘削断面積を最適化でき、安全な施工のため徹底した対策が要求される。

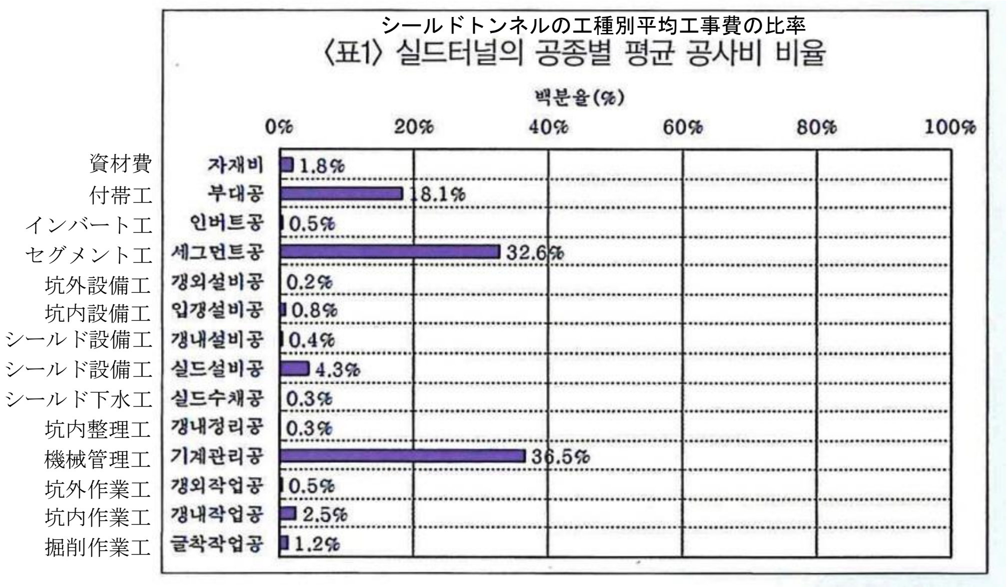
機械化安全施工のためにシールドマシンとセグメント技術が必要

一方、TBM またはシールド TBM 工法は、ディスクカッターの回転圧縮力で掘削を実施した後、あらかじめ制作されたライニングセグメントを組立設置し、トンネルを施工する方法である。特徴としては掘進速度が速く、円形断面であるため不必要な空間の発生を最小化できる。機械化掘削で複合地盤（土砂+岩盤）に広く適用される掘削装備は切羽支持方式により（図５）のように大きく、土圧式（EPB）と泥水加圧式（Slurry）に分けられる。土圧式はチャンバー内の掘削ズリを使用して切羽の圧力を管理する。地盤条件はいろいろな粒径の土質に適合でき、作業に必要な敷地が小規模であり、地上設備が簡単で現場適用に非常に有用である。泥水加圧式は加圧泥水を通して切羽の圧力を管理する。特に軟弱帯での切羽管理が優秀だが、現場適用時に泥水プラン設備が要求される。

図５　土圧式（EPB Type、左側）と泥水加圧式（Slurry　Type）TBM

現在、国内の技術で適用される機械化施工におけるシールドトンネルの工法別平均工事費の比率は（表１）の通りである。この資料を見ると、シールドトンネルの施工時にセグメント工と機械管理工が工事費の大部分を占めていることがわかる。したがって経済的な機械化安全施工のためにはシールドマシンとセグメント制作の技術開発が優先されなければならない。

表１　シールドトンネルの工種別平均工事費の比率



トンネル掘削工法の選定は何よりも経済性が優先されなければならない。（図６）はトンネル延長による NATM 工法とシールド TBM 工法の建設費用を比較したものである。これによるとトンネル延長が 6km 以上のとき機械化施工の経済性がより高いことがわかる。したがって海底トンネルの場合、トンネルの延長が長く深度が深い点などを考えると、基本的には機械化施工が経済的であると判断される。しかし、今後、実質的な現場条件と追加的な影響要素などを考慮すると、詳細な経済性分析が実施されるべきだと判断される。

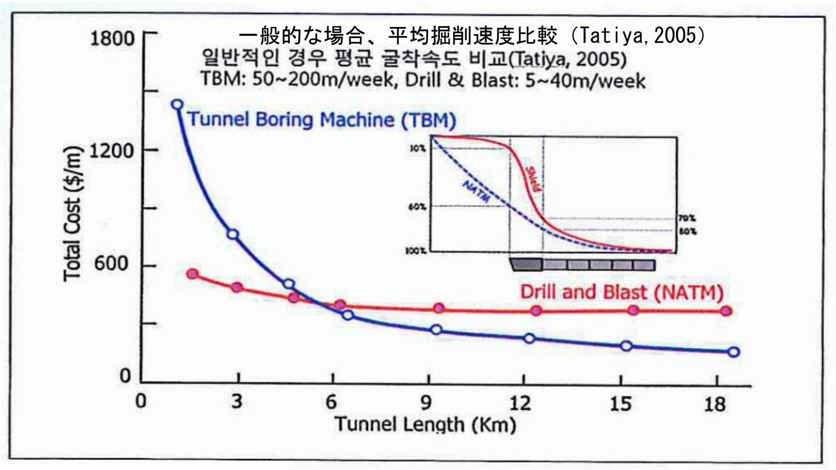


図６　NATM と TBM 工事費の比較

海底トンネルの建設時における、またひとつの重要な技術はリスク管理だ。妥当性調査の段階から完工段階まで、リスク管理は非常に重要であり、工事費にも大きく影響する。(図７）は段階別リスク管理の比重概念図を表したものである。この概念図は初期段階でのリスク最小化管理が経済的なトンネル建設に非常に重要だということを示している。したがって大規模な作業費が要求される海底トンネルの場合、初期リスク最小化方案に関する検討はいくら強調しても強調しすぎることがない。

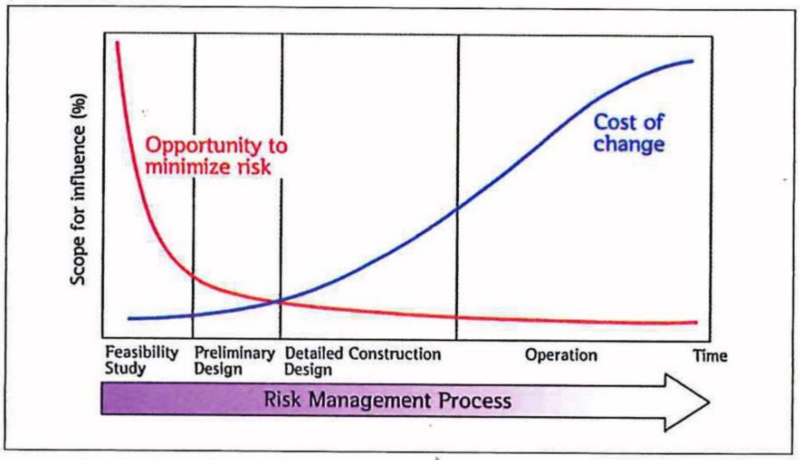


図７　段階別リスク管理比重概念図

トンネルの安全性で最も危険度が高いのが（図８）のようなトンネル切羽である。切羽は周辺地盤の応力が集中して作用するので、応力を分散できる掘削方法が要求される。また（図８）で見てわかるとおり、トンネル切羽掘削時に、時間的（Life Time）には安全性が低下するが、掘削の後、時間経過後にはトンネルの安全性は掘削時より増加する。海底トンネルは安全性が強調される構造物であり、掘削後の支保設置の過程の安全性を確保できる施工技術が要求される。

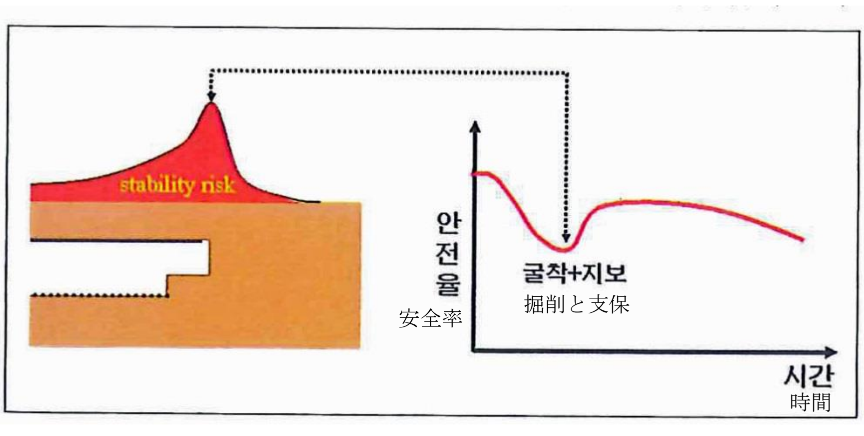


図８　トンネルリスクの空間的-時間的特性

（図９）は建設事業のリスク分配モデルによる事業費の変化を示したものである。海底トンネルの建設も、このようなリスク分配発注方式の検討がなされるべきである。

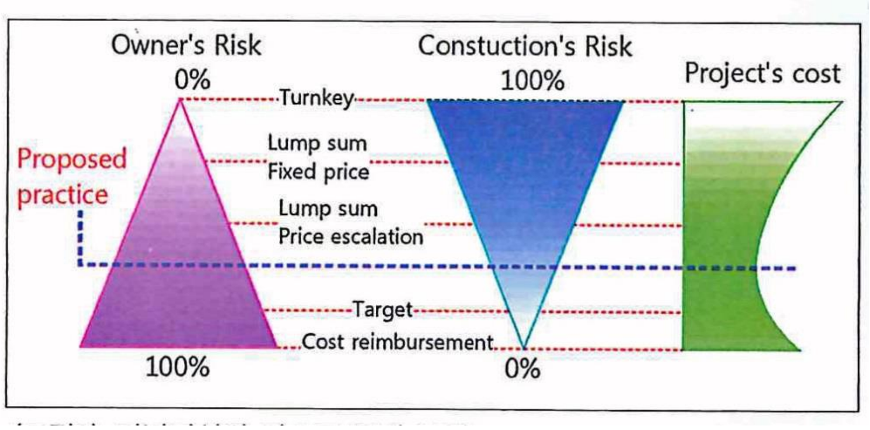


図９　トンネル建設のリスク分配モデル

これまでに建設された海外の主要な海底トンネル中からユーロトンネルと青函トンネルを紹介し、これらのトンネルの施工前後に発生した事故についても説明する。ユーロトンネルは英国とフランスを結ぶ海底トンネルで、2 本の鉄道トンネルとその間に 1 本のサービストンネルがあり計 3 本のトンネルから構成されている。本トンネルは直径 7.6m の単線トンネルで、路線列車とシャトル列車が同じ軌道を一方向にだけ運行するように設計されている。直径 4.8m のサービストンネルは、維持保守と非常時脱出のため 375m 間隔で本トンネルと結ばれる通路が設置されている。トンネルの総延長は 50.3km で、このうち 37.9km は平均 40m 深度の海底に建設されている。掘削工事の大部分が灰色泥灰土（Gray marl）層からなっている。

トンネル掘削は土圧式シールド TBM により実施され、TBM 全体の平均掘削速度は 150m/週だった。しかし完工後、1996 年 11 月 18 日の夕方にフランス側の入り口を出発し南方向の英国側に行く大型貨物列車で火災が発生し、全体で 34 名の負傷者が出た。この火災で発生した熱と煙がトンネル内おおよそ 4.8km にかけて被害を与えた。深刻な被害を受けた地域は約 50m 程度であり、40 ㎝あったコンクリートの厚みは平均 17 ㎝に減り、いくつかの箇所では 2 ㎝程度だけ残った。施工中に注入したグラウトセメントだけでなく、基盤岩自体も損傷を受けた。火災後に計測装置で計測した結果、地盤の流動はないことが判った。その後、予防的に全地域にわたり鋼支保補強を実施した。火災の原因はトンネル建設伴う温度差による列車の機能的問題であり、今後は海底トンネルの建設時の環境変化も必ず考慮しなければならないのである。

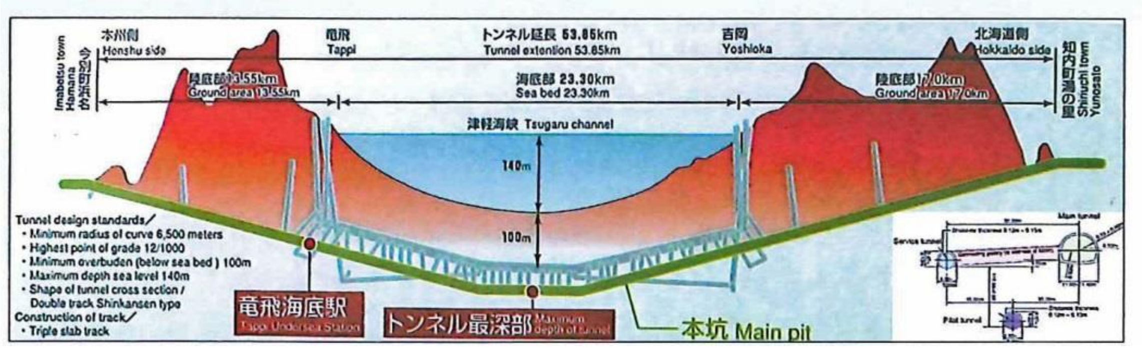


図 10　青函トンネルの諸元

青函トンネルは（図 10）のように総延長が 53.85km で、このうち 23.3km が海底部に敷設された。

青函トンネル建設時 33 名の犠牲を教訓にすべき

1971 年に工事線に指定され本坑の工事に着手した。北海道新幹線の完成により青函トンネルも新幹線が通過できる構造に計画を変更し、最大傾斜を 20‰から 12‰に調整した。青函トンネルが通過する津軽海峡の中央部の地質は、新世三紀（Neogene）の比較的新しい堆積岩で構成されている。地層は海峡中央に向斜軸を持つ褶曲構造を示している。また新幹線と在来線との併用軌道が考慮され、最小曲線半径を 6,500m に選定し、トンネルの最高被覆厚は 100 ㎝で計画された。トンネル断面は本坑の場合、高さ 9.1m、幅 11.1m の複線トンネルで、先進導坑は高さ 3.07m～4.0m、幅 5.0m である。

セメント注入式は先進導坑方式を適用した。これにより海底部に地質状況、工法調査、換気、排水、維持管理などのため先進トンネル（pilot tunnel）そして本トンネルと並行した補助トンネル（サービストンネル）が掘削された。当初、青函トンネル工事は TBM を適用しようとしたが断層帯と硬い岩、軟弱地盤が不規則に繰り返す海底地質の特性上、多くのボーリングマシンによる掘削は期待できず在来式工法で建設された。

ところで 1976 年、工事機関中、軟岩発破により 1 分あたり 80 トンの排水が流入し、トンネル内部全体が流失する事故が発生した。この事故で全ての坑道が浸水したため排水と復旧だけで 2 か月以上かかった。それ以外にも全体の工事過程で発生した落盤事故、湧出事故などで計 33 名が命を失った。特に、建設されてから 10 年後、利用量が減少し、維持管理がむずかしくなるなど大きな問題に直面した。（図 11）は青函トンネル建設後 10 年間の利用客数と維持管理費の資料で、維持管理の重要性を教えてくれる。また海底という特殊性により水理挙動に対する排水費用が多くなっている。したがって海底トンネル建設時の水理挙動についての技術的検討の重要性が強調される。

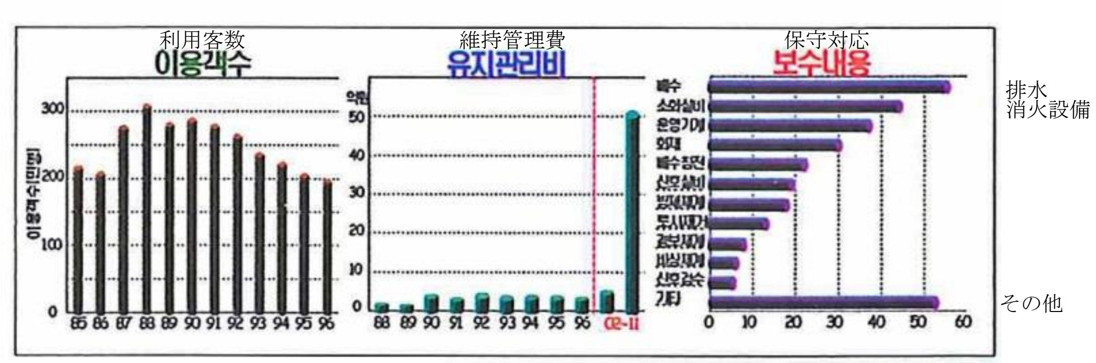


図 11　青函トンネルの利用客数と維持管理費の統計資料

これまで海底トンネルの建設について技術的側面から多角的に考察してきた。それとともに現在までに建設された代表的な海底トンネルについても明らかにした。海底トンネルはまず海底地盤についての信頼できる資料の確保と建設の過程で起こる危険性の最小化が非常に重要である。このような課題を解決するためには、海底トンネルの特徴である高水圧と大深度に対応可能な技術開発が必須と判断される。そのためには未来に向けた関連研究の後押しがなければならないと判断される。特にトンネル技術の発展のためには、建設管理システムが完璧に改善されなければならないのである。そのほかに海底トンネルの建設のリスクと不確実性を認定する設計の柔軟性が確保され、直接的な専門家の権限よる現場技術を責任視する建設システムが構築されなければならない。

訳責：特定非営利活動法人日韓トンネル研究会事務局