

Tunnelling Technology

하·해저터널 배수 및 비배수 설계개념 및 사례



이규필
한국건설기술연구원
연구원



신종호
건국대학교
교수

1. 서론

국토의 효율적인 개발을 위한 육지와 섬을 연결하는 연육화, 국가간 연결을 통한 삶의 질 향상 및 경제적 발전을 도모하고, 육상의 협소한 공간을 대체하고 유해물질을 안전하게 보관하고자 일본, 영국, 네덜란드, 미국 등 국외에서는 해저시설물의 건설이 활발하게 진행되고 있으나, 국내에는 해저터널 건설사례가 적고 관련된 연구도 미흡한 실정으로 해저지하시설물 개발의 필요성이 대두되고 있다.

해저시설물은 지상시설물과는 달리 고수압 조건하에 놓이게 되어 수압과 유입유량의 제어와 관련한 배수·비배수 개념의 정립 및 설계기준 설정이 중요하다.

한국건설기술연구원에서는 해저터널의 계획·설계·시공·유지관리를 포함하는 단계별 기준 및 지침을 작성

하기 위한 연구를 수행중에 있으며, 이와 관련하여 기 건설되어 운영중에 있는 하·해저터널의 사례 조사 및 해저터널의 배수시스템 운영 현황에 대하여 정리하였다.

2. 국내외 하·해저터널 설계사례

2.1 Channel Tunnel

Channel Tunnel은 영국의 Cheriton과 프랑스의 Sanagatte사이를 연결하는 터널로 총 연장 51km중 약 37.9km가 해저터널로 건설되었다. Channel Tunnel은 해저지질이 셰이칸터널 지반에 비해 안정되어 있어 비교적 천층에 건설되었으며, 평균 토파고는 40m, 최대수심은 55m에 해당한다. 지층은 점토함유율이 높고 투수계

수가 ($10^{-6} \sim 10^{-8} \text{m/s}$) 낮은 이회암층으로 구성되어 있으며 UK side(영국방면)는 단층대가 극소(2m)한 반면 French side(프랑스방면)는 15m에 상당히 큰 단층대가 존재하여 지반의 투수성이 컸다. 위 지반조건에 따라 UK side와 French side의 터널 설계 개념 및 기준이 상이하였으며 그 조사 결과를 열거하였다.

2.1.1 설계개념

(1) 터널 profile

- 터널 직경 : 7.6m(본선터널), 4.8m(서비스, 조사터널)
- 터널 형식 : 원형 단선 병렬터널

(2) TBM터널의 콘크리트라이닝 설계 개념

UK side는 open-mode 전단면 TBM공법으로 굴착하였으며 굴착시 예상되는 지하수 유입량이 적어 지반과 콘크리트라이닝 사이를 그라우팅하여 최대한 유입량을 감소시켜 sealing을 하지 않은 배수개념의 콘크리트라이닝으로 설계하였다.

French side는 외부수압 6기압인 조건에서 최대 10기압까지 견딜 수 있는 EPB TBM으로 시공하였고, 단층대의 분포가 만연하여 지하수 유입량이 많아 세그먼트사이에 neoprene sealing을 하여 방수개념의 콘크리트라이닝으로 설계를 하였다. 또한 고수압에 저항하기 위해 고강도콘크리트($>50\text{MPa}$)를 사용하고 작용하중의 균등한 분포를 위해 지반과 콘크리트라이닝 사이의 공극을 quick-setting 그라우팅으로 보강하였다.

(3) NATM터널 콘크리트라이닝 설계 개념

UK 해저교차로는 1차 콘크리트라이닝과 2차 콘크리트라이닝 사이에 방수막을 설치하여 터널내로의 물의 유입을 차단하고 동시에 2차 콘크리트라이닝의 균열을 저감시켰으며, 슛크리트를 통해 유입되는 물은 배수시스템을 통해 배수시켜 콘크리트라이닝에 작용하는 수압을 감소

시켰다. 그러나 장기적으로 배수시스템의 열화에 대비하여 2차 콘크리트라이닝이 정수압을 견딜 수 있도록 설계를 하는 단기적으로는 배수, 장기적으로 비배수개념을 도입하였다.

2.1.2 수압조건 및 누수량 설계기준

(1) 수압조건

UK 해저교차로(NATM)터널에서는 콘크리트라이닝이 세 가지 경우의 수압조건에 대해 모두 안정하도록 설계하였다(그림 1~3 참조).

- Case 1 : 지반이 불투수층이라 가정하고 하상에 정수압을 적용시키는 수압하중조건
- Case 2 : 콘크리트라이닝에 정수압이 작용하는 조건
- Case 3 : 터널 굴착에 의해 수리적으로 영향을 받는 범위, 즉 수압이 정수압에서 감소하는 부분을 control volume으로 가정하여 경계영역내의 지반에 침투압이 작용하는 조건

(2) 누수량 설계기준

French side(TBM)구간의 비배수형터널 누수량 설계기준

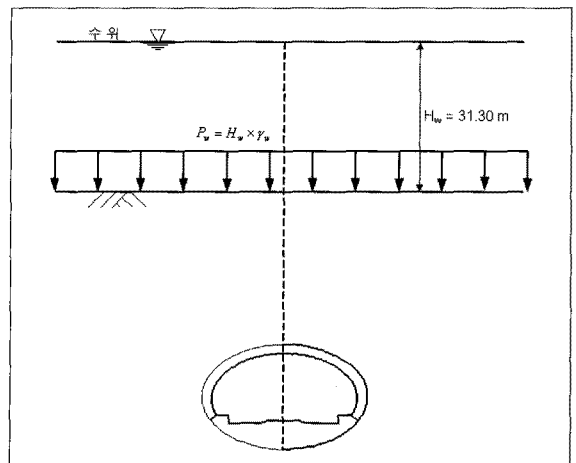


그림 1. 하중조건 Case 1

하·해저터널 배수 및 비배수 설계개념 및 사례

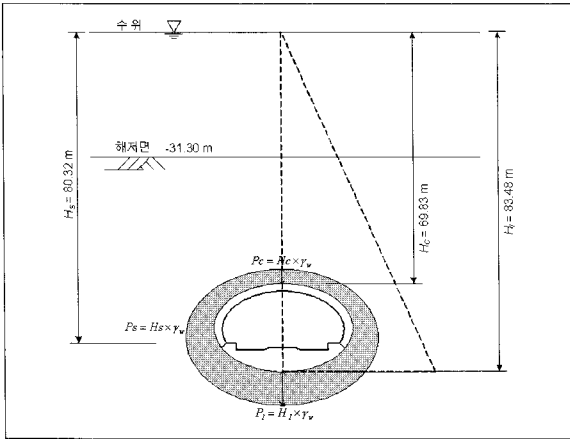


그림 2. 하중조건 Case 2

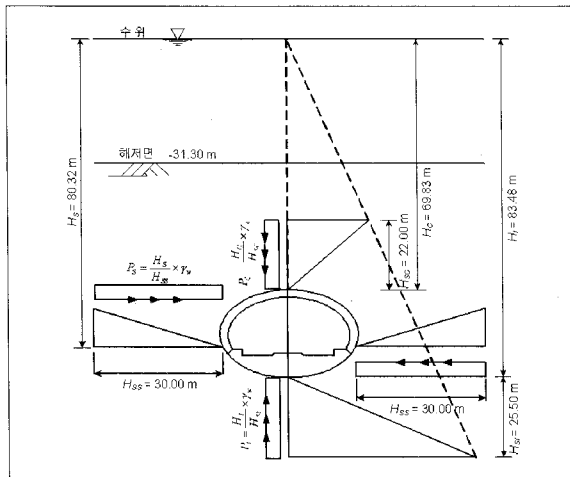


그림 3. 하중조건 Case 3

- 콘크리트라이닝 누수량 : 78l/s(5l/s/km for 15.6km)
- TBM joint 누수량 : 15l/s(본선터널), 10l/s(서비스터널)
- 총 허용 누수량 : 93l/s for 15.6km(본선터널 기준)
88l/s for 15.6km(서비스터널 기준)

2.2 Seikan Tunnel

Seikan Tunnel은 총 연장 54km로 그 중 약 23.3km는 Tappi(本州)지역과 Yoshioka(北海島)를 잇는 해저터

널로 건설되었으며 Channel Tunnel과는 다른 불리한 지반조건으로 안정된 지층까지 이르고자 토피고와 유입수량 해석을 통해 지표하 100m, 최대수심은 140m에 이르는 약조건에 터널이 건설되었다. 약 40여년 동안의 지반조사 결과, Yoshioka side 지반은 신생대 제 3기 응회암과 이암을 포함하는 퇴적암반으로 구성되어 비교적 안정적 지반조건이었으나 Tappi side 지반은 주로 안산암, 현무암 등으로 이루어져 있으며 균열과 파쇄대가 많아 지반의 투수성이 10^{-5} m/s보다 큰 것으로 나타나 지반 그라우팅을 실시한 후 굴착하였다.

2.2.1 방배수 설계개념

(1) 터널 profile

- 터널 직경 : 11m(본선터널), 5m(서비스, 조사터널)
- 터널 형식 : 마제형 복선터널

(2) 방배수 설계개념

수심이 최고 140m에 달하는 고수압이 작용하고, 지하수 유입량이 커 지하수 유입을 완전히 차단하는 비배수터널로서의 설계가 불가능하다고 판단되어, 터널 주위 지반을 그라우팅하여 터널내로 유입되는 지하수 양을 최대한 막고, 최후로 유입되는 누수량만을 집수정에 모아 배수시키는 배수개념의 터널로 설계되었다.

2.2.2 수압조건 및 유입량 설계기준

(1) 수압조건

그라우팅 영역 외부에 정수압이 작용하고 콘크리트라이닝에 토압이 작용하는 개념으로 터널 주위 지반이 수압의 일부를 지지해주도록 설계되었다.

(2) 유입량 설계기준

- 본선터널 : 2m³/min/km

- 서비스터널 : $1\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$

2.3 한강하저터널(5-18공구)

한강하저 터널은 여의도와 마포구간을 잇는 국내 최초로 터널식으로 건설된 하저터널이다. 총 연장 1.6km 중 1.3km가 한강 하부를 통과하며 단선병렬터널로 건설되었다. 하저구간의 평균 토피고는 23m이며, 평시에 최대 수심이 10m, 홍수시 21m에 달한다. 한강하저터널의 지층은 수많은 단층대로 파쇄되고 교란되어 지층변화가 심하고 일부 구간에서는 극도로 연약한 단층점토대가 출현하고 풍화대를 지나서부터 최고 200~1,200 l/min/막장의 지하수가 출수되어 지반 그라우팅이 실시되었다.

2.3.1 방배수 설계개념

(1) 터널 profile

- 터널 직경 : 7.16m(본선터널)
- 터널 형식 : 마제형 복선터널

(2) 방배수 설계개념

터널 굴착시 주변지반에 grouting을 실시하여 터널의

안정과 물의 유입을 억제하였다. 또한 굴착 즉시 숏크리트를 타설하여 터널의 안정과 유입수의 침투를 최소화하였다. 전 정수압에 저항하는 비배수 구조로 설계하였으며 부직포와 방수시트를 터널 전 둘레에 시공하여 터널내 물의 유입을 방지하였다.

2.3.2 수압조건 및 누수량 설계기준

(1) 수압조건

200년 빈도의 최대 홍수위를 설계기준 수위로 두고 홍수위조건의 정수압이 콘크리트라이닝에 작용하는 것으로 설계하였다.

(2) 누수량 설계기준

1기 지하철(1~4호선)에서 산정된 누수(배수)량 기준을 바탕으로 비배수형 단선터널 $2\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 을 기준으로 선정하였다.

2.4 국·내외 하·해저터널 설계기준 비교론

위에서 정리한 주요 사례조사대상 Channel Tunnel, Seikan Tunnel, 한강하저터널의 조사내용 결과를 표 1

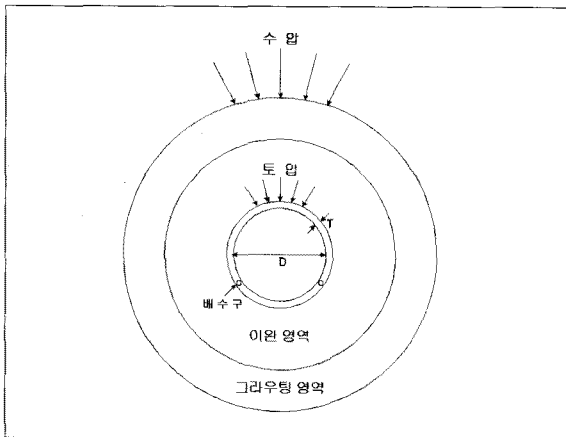


그림 4. 세이칸터널 수압하중 개념도

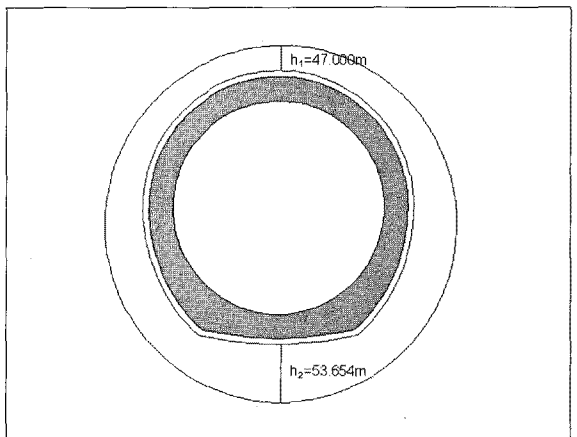


그림 5. 한강하저터널 수압하중 개념도

기술강좌

하·해저터널 배수 및 비배수 설계개념 및 사례

표 1. 국내·외 하·해저터널 사례조사 비교표

	Channel Tunnel	Seikan Tunnel	한강하저터널
해저터널 연장	37.9km	23.3km	1.3km
토피고	평균 40m	최저 100m	평균 23m
최대수심	55m	140m	21m(홍수시)
지반조건	· 터널주변 지반투수계수 ($10^{-7} \sim 10^{-8}$ m/s) · UK side : 저투수성 · French side : 고투수성	· 北海島 side: 저투수성 · 本州 side : 파쇄대지반, 고투수성	· 터널주변 지반투수 계수($10^{-6} \sim 10^{-7}$ m/s) · 여의도 side: 단층파 쇄대지반, 고투수성
직경 (본선)	7.6m(단선병렬)	11m(복선)	7.16m(단선병렬)
방배수 개념	TBM Segment lining - UK side: 배수개념 - French side: 비배수개념 NATM lining - UK 해저교차로: 장기 비배수 개념	배수개념	비배수개념
수압하중 조건	3가지 하중에 대한 검토 - 해저면 수압작용 - 콘크리트라이닝 정수압 작용 - 복공콘크리트라이닝에 침투압 작용	그라우팅 외부지반에 정수압 작용	복공콘크리트라이닝에 정수압 작용
누수 (유입)량 설계기준	약 0.4m ³ /min/km	· 본선: 2m ³ /min/km · 서비스: 1m ³ /min/km	2m ³ /min/km

표 2. 하·해저터널 설계시 고려된 방배수 설계인자(요소)

Channel Tunnel	조건	수심, 해저심도, 지층조건, 투수성, 콘크리트라이닝 설계수명(120년)
	재료	배수시스템, 방수막, 콘크리트라이닝 배면 그라우팅, 세그먼트 실링재, gasket
Seikan Tunnel	조건	수심, 해저심도, 지층조건, 투수성
	재료	배수시스템, 지반 그라우팅
한강하저터널	조건	수심(200년 빈도 최대 홍수위), 해저심도, 지반 투수성
	재료	배수시스템, 지반 그라우팅, 방수시트

과 같이 정리하였고, 표 2는 터널의 배수설계인자(요소)를 정리한 것이다.

3. 해저터널 배수시스템 운영 현황 - 세이칸 터널

세이칸 터널은 北海島(Hokkaido)측에서 1965년, 本州(Honshu)측에서 1967년 사갱공사를 시작하여, 1983년

선진도갱 관통 및 1988년 공용되기 시작하였다. 그림 6에서 보이는 바와 같이 세이칸 터널은 공사시 총 4차례의 대형 지하수 유출사고가 발생하는 등 해저터널 시공 및 운영시 유입용수 처리문제가 가장 중요한 검토사항이라 할 수 있다.

터널 유입용수 처리를 위하여 그림 7에서 보이는 바와 같이 세이칸 터널에는 2개소에 펌핑시설을 갖추고 있으며, 이 가운데 北海島측 배수시설의 개요 등을 정리하면

기술강좌

하·해저터널 배수 및 비배수 설계개념 및 사례

다음과 같다.

北海島측 吉岡海底역(Yoshioka-kaitei station) 하부에 위치한 배수처리시설에 그림 8에서 보이는 바와 같은 펌프설비가 총 5개가 설치 운영되고 있으며, 각각의 펌프설비는 그림 9에서 보이는 바와 같은 배수 파이프라인으로 연결되어, 터널 내부 유입용수를 지상으로 배출하고 있다. 5기의 펌프설비는 1대씩 교대로 운영하고 있으며, 운영방식은 저수조내 일정 수위이상의 유입용수 저류시 펌프설비가 가동된다.

저수조의 용량은 약 4,600m³이며, 수조내에는 수위계 등과 같은 센서가 설치되어 있을 뿐만 아니라, 해수와 접

하게 되는 악조건에서 계측센서 오작동 등을 고려하여 부표식 수위계를 설치하고 이를 폐쇄회로 카메라로 상황실에서 육안으로 점검할 수 있도록 운영하고 있다(그림 10 참조).

또한 吉岡海底역 하부에 위치한 펌프설비 5기 전체 고장발생시 수리 시간확보를 위하여, 그림 11에서 보이는 바와 같이 pilot tunnel에 설치된 수문을 폐쇄하여 저수조로 유입되는 용수를 本州측에 위치한 저수조로 보낼 수 있도록 계획되어 있다.

세이칸 터널의 배출 용수량은 개통 초기에 약 27ton/min 이었으나, 현재 20~22ton/min 정도로 오히려 감소하는 경향을 보이고 있다. 세이칸 터널 주요 유지관리 비용은 유입 용수처리를 위한 전기료 및 설비 교체비이다. 이 가운데 전기료는 약 18,000,000엔/월(약 158,000,000원/월)로 일본의 전기료는 우리나라의 전기료에 비해 약 3배가량 높다는 점을 고려하면, 세이칸 터널 유입용수 처리를 위한 전기요금만 약 50,000,000원/월 정도의 운영비가 소요된다 할 수 있다.

용수 배출을 위한 파이프라인은 코팅 처리가 되어 부식이 발생하지 않아 교체하지 않으나, 기타 펌핑 설비 및 전기설비가 해수의 영향으로 인하여 교체수명이 담수조건에 비해 1/2 이하로 저하되고 있는 실정이다.

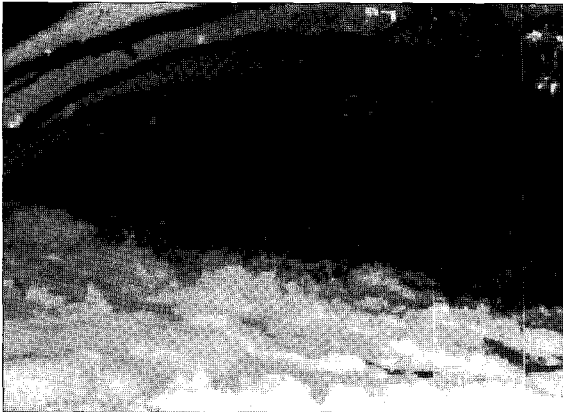


그림 6. 세이칸 터널 공사중 대규모 지하수 유출 사고 전경

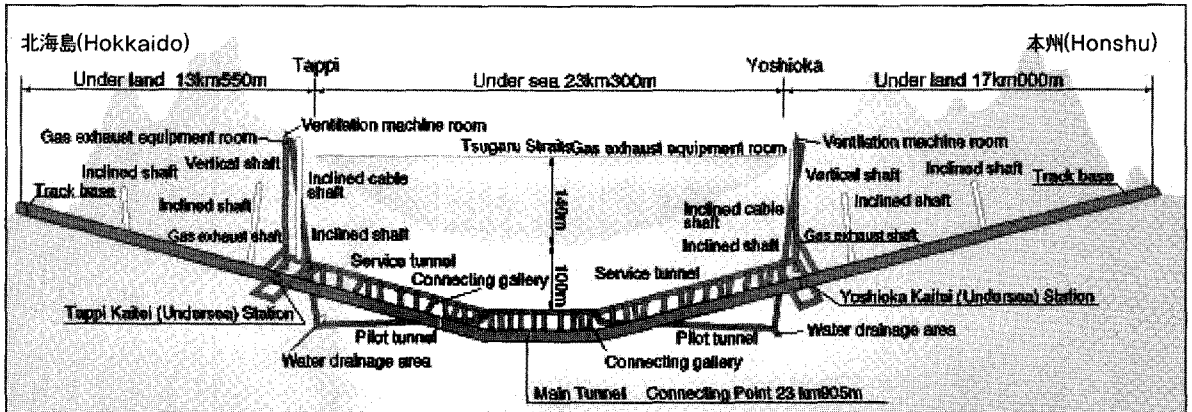


그림 7. 세이칸 터널 횡단면 개요

하·해저터널 배수 및 비배수 설계개념 및 사례

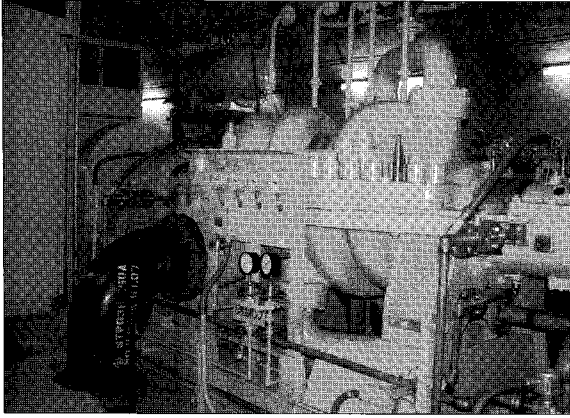


그림 8. 펌프설비



그림 9. 터널 내부 유입용수 처리를 위한 파이프

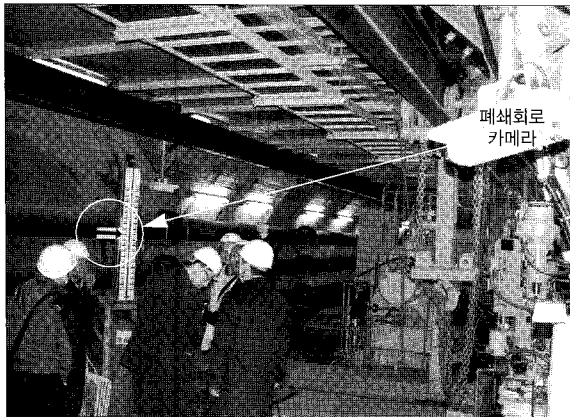


그림 10. 부표식 수위계와 폐쇄회로 카메라

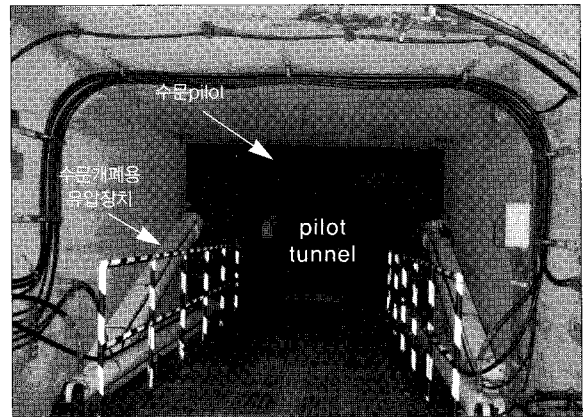


그림 11. pilot tunnel 및 수문 전경

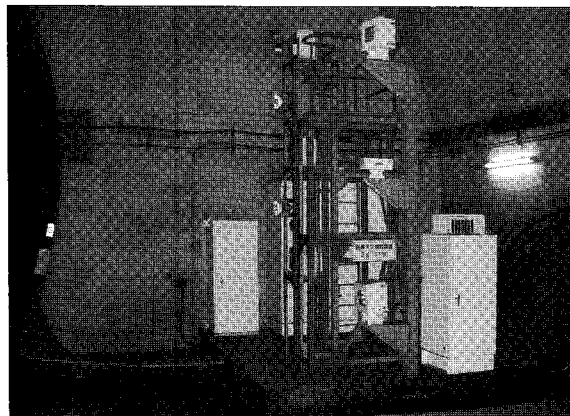


그림 12. 열차 각 부분별 온도검측을 위한 적외선 카메라 장비

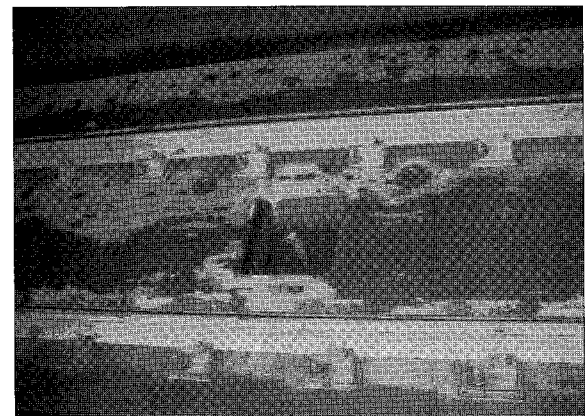


그림 13. 해저역사 인버트부에 설치된 스프링클러 설비



하·해저터널 배수 및 비배수 설계개념 및 사례

상기와 같은 배수시스템 이외에 세이칸 터널내 화재발생 열차 진입시 배연시스템이 운행되도록 계획되어 있으며, 터널 갱구 양측에 적외선 카메라 등 열차의 이상온도를 각 부위별로 검토하여 통행 제한 및 점검 등에 활용하고 있을 뿐만 아니라 해저역사 인버트부에 화재진압을 위한 스프링클러 설비 등이 설치되어 있다(그림 12~13 참조).

4. 결론

국내·외 해저(하저)터널의 방배수 개념 및 설계기준 사례조사 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 국내·외 해저(하저)터널 사례조사 결과 터널 심도를 선정함에 있어 지반 투수성이 중요한 설계영향인자로 지반의 투수성이 최소화가 되는 지층을 선정하여 구조적 부담을 최소화하고자 하였으며, 지반의 투수성이 커서 과도한 유입이 예상되는 경우에는 지반개량(그라우팅)을 통해 유입량을 감소시키고 수압을 침투압으로 전환하여 지중에 분산시킴으로써 터널의 안전성을 확보하고자 하였다.

- (2) 수압과 유입량의 통제가능성의 여부가 배수/비배수 개념을 선정하는 기준이 되며 유입량이 적거나 (Channel Tunnel UK side) 유입량을 통제가능 할 경우 배수터널로 설계하였으며, 유입량이 많거나 (Channel Tunnel French Side, 한강하저터널) 통제가 불가능 할 때는 비배수터널로 설계하였다. 또한 Seikan Tunnel의 경우와 같이 고수압 조건에 놓이게 되어 콘크리트라이닝의 구조적 한계를 초과하게 될 때에도 유량에 관계 없이 배수형 터널이 채택되었다.
- (3) Channel Tunnel 의 UK 해저교차로와 같이 단기적으로 배수개념으로 설계하더라도 배수시스템의 장기적 열화가능성이 우려되는 경우 비배수개념의 설계가 지속가능한 설계기준으로 사료된다.

감사의 글

건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2005년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술연구)에 의하여 연구비가 지원된 과제의 연구내용입니다.