

人工凍結工法의 特性과 適用

김 영 진*

1. 머리말

산업발전이 급속히 이루어지면서 최근의 토목·건축공사는 그 규모의 大型化, 종류의 다양화와 함께 공사현장 선택의 폭이 좁아진 특성을 보이고 있다. 즉 지반조건이 좋지 않은 현장에서도 부득이 공사를 수행하여야 하는 경우가 늘어나고 있고, 공사수행과정에서 지하수 오염방지와 같은 환경대책까지 고려해야 하는 등 시공여건이 날로 어려워지는 추세를 보이고 있다. 따라서 공사의 원활한 수행과 사고방지를 위한 유효적절한 補助工法의 선택이 매우 중요한 요소로 부각되고 있다.

人工凍結工法은 인공적으로 地盤을 凍結시켜 일시적인 흙막이벽, 방호벽 등으로 이용하는 補助工法의 하나로서 다른 보조공법을 이용할 경우 공사의 안전과 확실성에 의문이 따르는 현장 즉, 공사로 인해 하천의 流路 단면적이 줄어들 염려가 있다거나, 도로 교통량에 많은 제한을 받을 우려가 있는 곳, 또는 지하수 오염 가능성이 있거나, 기존 매설물을 이설하지 않고 공사를 수행하려는 현장 등에서 주로 적용되는데 국내에서는 아직 적용실적이 없으나, 외국에서는 이미 각종 都市土木工事, 광산용 수직갱 붕괴방지 공사 등에 널리 이용되고 있는 공법이다.

국내에서도 현장여건에 맞게 인공동결공법

의 특성을 잘 살려 보조공법으로 활용할 경우 도움을 얻을 수 있을 것으로 판단되어 本稿에서 이 공법에 대한 특성과 설계·시공법의 개요에 대해 살펴보고자 한다.

2. 인공동결공법의 원리 및 특성

2.1 원리

지반을 동결시키기 위해 미리 직경 10~20cm 되는 先端部分이 폐쇄된 강관(동결관)을 지중에 매설한 후 강관속으로 brine 부동액 또는 액체질소를 순환시켜 강관을 계속 빙점이하의 온도로 냉각시킨다. 시간이 경과하면 강관 주변지반의 간극수가 얼기 시작하면서 강관을 중심으로 同心圓 모양의 凍土柱가 형성된다. 강관을 필요한 간격으로 연속적으로 매설하면 인접한 동토주가 서로 합쳐져 연속적인 동토벽체를 이루게 된다. 이러한 동토벽체는 차수성이 높고, 역학적으로 큰 강도를 발휘하므로 이를 흙막이 벽 또는 방호벽으로 사용하여 목적하는 공사를 수행한다.

本工事 완료후에는 自然的 또는 강제적으로 凍土壁을 용해시킨다.

凍結形式은 施工方法에 따라 i) 管列凍結方式과 ii) 平板凍結方式으로 구분하거나(그림1), 凍結面의 斷面形狀에 따라 i) 全凍土型, ii) 圓柱型 iii) 상자형 iv) 門型 v) 기타로

*정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원

	管列凍結方式		平板凍結方式	
施工方法	垂直보링(boring) · 垂直凍結管 · 傾斜凍結管	水平보링(boring) · 水平凍結管 · 上(下)方向凍結管	壁面利用 · 강널말뚝 부착凍結板 · 세그먼트凍結板	沈設方法 · 斷熱凍結板
적용예	<p>凍結管 수직갱 수직갱 쉴드</p>	<p>수직갱 수직갱 쉴드 쉴드</p>	<p>강널말뚝凍結板 斷熱材 콘크리트 세그먼트凍結板</p>	<p>斷熱凍結板 쉴드推進</p>

그림 1. 施工方法에 따른凍結形式⁽¹⁾

		全凍土型	圓柱型	상자형	門型	기타
동결형식	평면도					· 말굽형 · 원추형 · 조합형
	횡단면도					
적용성		· 全 토질에 가능 · 수직갱 굴착과 병행하여凍結管 매설등 가설 공사 가능 · 동결관 연장이 길게 됨	· 수평보링이 가능한 경우 · 가설공사 중 수직갱내 타작업 불가 · 동결관 연장 짧음	· 左同 · 左同 · 동결관 연장이 비교적 짧음	· 全 토질에 가능 · 수직갱 작업과 병행하여 가설 작업 가능 · 下部에 불투수층이 필요함	· 토질 조건에 따라 좌우됨
시공특성		· 지상부 점유 또는 路面복공 필요 · 凍土 굴착량이 많게 됨	· 지상부 점유적음 · 동토굴착량 적음	· 左同 · 左同	· 地上部の 점유 또는 노면복공필요 · 동토굴착량 적음	· 시공조건 따라 좌우됨

그림 2. 斷面形狀에 따른凍結形式⁽¹⁾

구분할 수 있다(그림 2).

냉각 방법으로는 강관 속을 순환시키는 물질에 따라 brine 부동액을 이용하는 방법과 액체 질소를 이용하는 방법이 있는데 어떤 방법을 적용하느냐에 따라서 냉동설비 및 지반동결 규모가 달라진다.

(1) brine 부동액 이용방법

동결 셋트(set)는 냉각기, 압축기, 응축기, 냉각탑 및 순환펌프로 구성되어 있으며(그림 3 참조) brine 부동액(염화칼슘수용액으로서 비중 1.286일 때 동결온도 -55°C)이 냉각기에서 $-20^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ 정도로 냉각된 후 순환펌프에 의해 지중에 매설된 강관으로 보내짐으로써 지반이 동결된다. 지반으로부터 열을 빼앗아 온도가 높아진 brine은 냉각기로 되돌려져 다시 냉각된 후 강관으로 보내지는 순환과정을 반복함으로써 동토가 차츰 성장하게 된다. 한편 압축기에서 압축된 프레온 가스는 응축기에서 냉각수에 의해 냉각되어 液化되고, 냉각기에 보내져 온도가 높아진 brine 부동액의 열을 빼앗아 氣化된 후 다시 압축기로 돌아오는 과정을

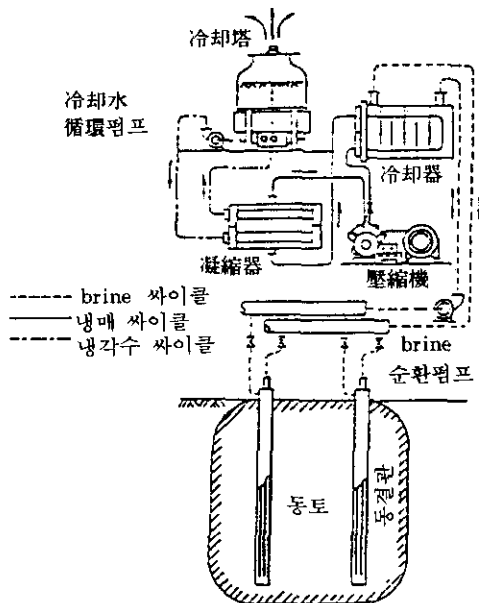


그림 3. brine 부동액 이용방식(2)

되풀이한다.

地中の 열은 강관 → brine → 냉각기 → 프레온가스 → 응축기 → 냉각수를 거쳐 대기중에 방출된다.

이 방법은 동결셋트를 여러 개 조합할 경우 $200\text{m}^3 \sim 35,000\text{m}^3$ 정도에 달하는 대량의 동토를 생성할 수 있어 대규모 공사에 적용하는 방법이며, 후술하는 액체질소 이용방법에 비해 시공실적이 많다.

(2) 액체질소 이용방법

tank lorry에 의해 운반된 액체질소(비등점 -196°C)를 직접 지중에 매설된 강관으로 보내 그 氣化熱로 지반을 동결시킨다. 지반으로부터 열을 빼앗아 기화된 질소 가스는 대기중에 배출된다.(그림 4 참조)

이 방법의 장점은 지반의 동결속도가 빨라 工期를 단축시킬 수 있고, 기계설비가 간단하며 brine 부동액 이용방법에 비해 지하수의 흐름이 빠른 지반에서도(대략 10m/day) 적용이 가능한 점이다. 단점으로는 규모가 작고(동결토량 200m^3 이하) 工期가 짧은 공사에 적용된

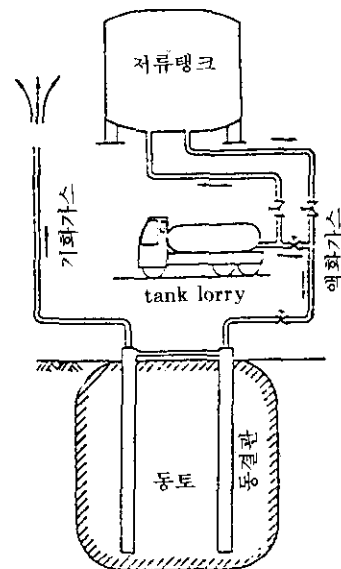


그림 4. 액체질소 이용방식(2)

다는 점과 배기가스의 대책이 필요하다는 점이며, brine 부동액 이용방법에 비해 시공실적이 적다.

2.2 인공동결공법의 특성

인공동결공법의 장점으로는 i) 강도 및 차수성이 뛰어나 동토벽만으로 耐力壁 또는 차수벽의 역할이 가능하다. ii) 강재나 콘크리트와의 凍着力이 크므로 이들 부재와 연속 또는 합성된 벽구조를 만들 수 있다. iii) 열이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르는 성질을 이용하므로 지반의 불균질에 관계없이 일정한 강도의 동토벽을 형성할 수 있다. iv) 목적하는 공사가 끝나면 용해시키므로 지반이 오염되거나 장애물로 남는 일이 없다. 반면에 단점으로는 i) 동결설비의 설치 가격이 비교적 높다. ii) 동토벽이 형성되기까지 비교적 긴 시간이 필요하다. iii) 어느 한도를 초과하는 지하수의 흐름이 있을 때는 이것이 加熱源의 일종으로 작용하므로 동토벽의 형성에 어려움이 따른다. iv) 지반에 점토나 실트(silt) 등 세립토가 많이 포함되어 있을 때는 동결팽창으로 주변 구조물이 영향을 받는 경우가 있으므로 이에 대한 대책이 필요하다.

3. 동결이론

3.1 동결속도

지반중에서 동결면이 성장하는 속도(동결속도)를 계산할 때 강관 주변의 지반이 동심원 모양의 凍土柱로 성장하는 제 1 단계일 때는 통칭 單管理論을 적용하고, 인접한 凍土柱가 결합되어 板狀의 凍土 壁體를 이룬 후 그 두께가 점차 두꺼워지는 제 2 단계에서는 平板理論을 적용하는데¹⁾ 이러한 이론은 매우 복잡하므로 실용상으로는 圖表를 이용하고 있다(그림 5 및 그림 6 참조). 그림 5에서는 초기 지반온도(θ_∞) 및 냉각온도(θ_c)가 변화할 때 냉동기 稼動日數와 凍土柱의 반경과의 관계를 單管理論에

의해 계산하여 도표화한 예를 보여주고 있다. 초기 지반온도가 낮거나, 냉각온도가 낮을수록 동일 기간내에 凍土柱의 반경이 커짐을 알 수 있다. 그림 6에서는 地中溫度 18℃, 냉각온도 -20℃인 조건에서 동결관 매설간격을 80cm로 하였을 경우의 凍土成長曲線의 계산예를 보여주고 있다. 凍結日數 약 20일 때 凍土柱가 결합되고, 그 이후부터는 平板理論에 의해 凍土 壁體의 성장을 계산하고 있다.

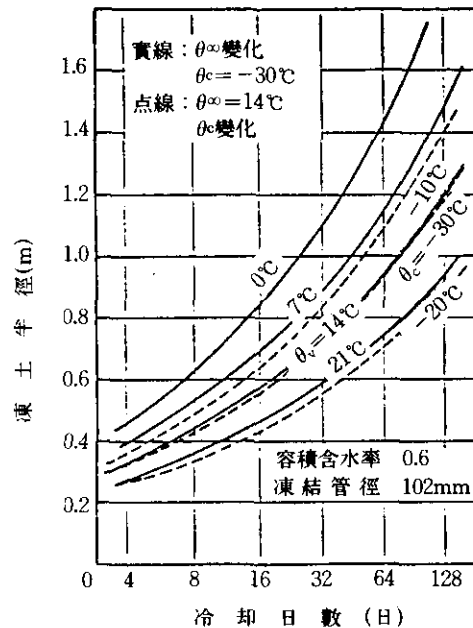


그림 5. 냉동기 가동일수와 凍土半徑⁽²⁾

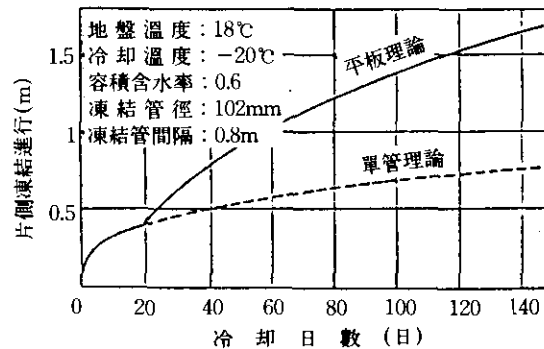


그림 6. 凍土成長曲線⁽²⁾

3.2 温度分布 및 凍結負荷

실제 시공을 할 때는 地盤中の 고정된 위치에서 온도를 측정하여 凍土成長을 추정하지 않으면 안되므로 凍土 및 未凍土中の 온도분포를 미리 계산해 둘 필요가 있다. 또한 凍土의 強度는 온도에 따라서 다르므로 凍土壁을 耐力壁으로 이용하고자 할 때는 온도변화에 따른 強度를 설계단계에서 미리 계산해 놓아야 한다(표1 참조). 이러한 경우도 單管理論 및 平板理論에 의해 필요한 시점의 온도분포를 계산할 수 있다.³⁾ 또한 凍結管列에 의한 凍土內 온도분포식⁴⁾도 제안되어 있으며, 이 이론식을 이용하여 凍結管列의 평균냉각온도를 구한 후 동결속도를 계산할 때 平板理論에 導入함으로써 정확한 凍結速度를 얻을 수 있다.

凍結負荷는 냉동기 용량 또는 액체질소 소비량을 결정하는데 필요하다. 어느 시간에 있어서의 凍結領域의 온도분포를 알면 그 시간의 熱負荷를 구할 수 있다. 熱負荷는 냉각 開始때에는 크고, 시간경과와 함께 서서히 작게 된다. 이러한 負荷도 單管理論 및 平板理論에 의해 계산되며, 凍結管列 理論을 이용하면 더욱 精度가 좋은 결과를 얻을 수 있다.

4. 融解理論

4.1 냉동기 가동 중지에 의한 融解

정전이나 고장에 의해 冷凍機가 돌연 정지했을 경우 동토의 融解速度를 판단하는 것은 安全上 매우 중요한 문제이다. 냉동기 가동 정지 후의 1차원적인 용해속도(dx/dt)는 식(1)과 같이 표시된다.

$$\frac{dx}{dt} = \alpha_0 \frac{\sqrt{K_1}}{\sqrt{A t_c + t}} \dots\dots\dots(1)$$

여기서

α_0, A : 지반의 熱定數나 온도조건 등에 의하여 결정되는 定數

K_1 : 凍土의 溫度 전파율

t_c : 냉동기 가동시간(냉동개시부터 정지까지의 냉각시간)

t : 냉동기 정지 후의 경과시간

식(1)에서 장기간 냉각을 계속할수록 냉동기 정지 후의 용해속도가 늦다는 사실을 알 수 있다.

4.2 加熱에 의한 強制融解

공사가 완료된 후는 신속히 凍土를 용해시켜 원래의 지반상태로 회복하는 것이 좋다. 凍土의 融解를 빨리 진행시키기 위해 인공적으로 加熱시키는 경우가 있는데 이것을 強制融解라고 한다. 強制融解의 일반적인 방법으로 공사중에 凍結管으로 이용했던 강관에 溫水를 순환시키는 방법을 이용하는데, 이 때 강관을 중심으로 同心圓 모양으로 용해가 진행되므로 解析的으로는 凍結의 逆現象으로 취급할 수 있다.

5. 인공동결공법의 計劃 · 設計 · 施工

5.1 計劃

人工凍結工法은 다른 보조공법을 적용하기에 문제가 있는 현장에 적용되는 경우가 많으므로 각종 지반조사와 현장시험의 결과들을 충분히 분석한 후 기본계획을 수립해야 한다. 기본 계획단계에서 검토해야 할 주요사항을 알아보면,

(1) 凍結管 매설을 위한 보링의 가능성을 검토한다. 수직 및 수평 보링 구간의 지반상태, 장애물 유무 등을 검토한다.

(2) 凍結 對象地盤이나 부근에 냉각에 지장을 줄 加熱源이 존재하는지 여부의 검토 및 대책을 세운다. 예로써 流量이 많은 큰 하천 하부에서 土被두께가 2m이하일 때 또는 가동중인 幹線上 · 下水道管에 근접하여 凍土를 형성하고자 할 때는 별도의 방호대책이 필요하다.

(3) 동결팽창변위의 허용치와 예측치의 상대적 관계를 검토한다. 점토·실트 지반에서 凍結에 의한 채적팽창량을 제로(0)로 하는 것

은 현시점에서 불가능하나 그 팽창량의 예측은 30% 정도의 오차범위에서 가능하다. 따라서 지하매설물이나 구조물의 허용변위한계치를 알면 동결팽창량의 예측치와 비교하여 凍結工法의 適否를 판단할 수 있다.

5. 2 설 계

(1) 설계요령 및 주의 사항

설계시 과거의 시공경험으로부터 얻은 사고방지를 위한 주의사항을 염두에 두면서 제반사항을 검토하고, 계산해야 한다. 설계단계에서 통상 고려해야 할 사항을 순서에 입각하여 알아 본다.

i) 凍結方式의 결정

앞에서 기술한 바와 같이 경제성을 고려하여 凍結對象土量이 200m³를 초과 할때는 brine 방법을, 그 以下인 소규모공사에서는 액체질소사용법을 선택한다.

ii) 凍結管의 매설방법 및 위치 결정

인공동결공법의 채택 목적에 맞도록 凍土壁의 形狀을 결정하는데, 같은 형상이라도 凍結管을 수직으로 설치하느냐, 수평으로 설치하느냐에 따라 작업방법, 工期, 工事費, 凍結膨脹量 등이 달라진다.

아울러 지반의 동결속도, 凍土壁이 형성될 때까지의 所要日數, 안전율을 고려한 凍土의 強度 등을 검토하여 동결관의 설치간격, 설치깊이 등을 결정한다. 동토의 강도는 온도 의존성이 가장 크고, 含水比, 흙의 입도분포, 토립자 배열, 동결속도, 공시체의 형상 및 치수 등에 영향을 받는데, 참고로 일반적으로 이용되고 있는 凍土의 설계 기준강도를 알아보면 표1과 같다.

한편, 수직갱 굴착 또는 개착공법(open cut)에서 인공동결공법을 적용하고자 할 때는 凍土壁의 上端이 地下水位보다 上部로 형성되도록 동결관 매설위치를 계획하여, 地下水가 凍土壁을 월류(over flow)하지 않도록 한다.

iii) brine 공급계획

동결설비는 가능한한 凍結領域 가까운 곳에 설치하는 것이 바람직하다. 配管設計時 냉각순서와 공급의 균등성, 제어의 간편성을 고려하여 그 계통과 조절밸브의 위치, 管徑 등을 결정하고, 保冷 및 防水對策을 세운다. 또한 지반의 동결팽창에 의한 동결관 파손대책을 세워야 하는데 동결관이 파손되면 brine 또는 액체질소가 누설되어 동토가 용해되는 경우가 있다. 이러한 때는 파손관의 내부에 직경이 작은 강관을 삽입하여 보수하는 방법이 주로 이용되고 있다.

iv) 熱負荷 계산을 통한 냉동기 용량 및 액체질소 소요량 산정

凍結管 매설계획, brine 공급계획이 결정되면 熱負荷를 계산할 수 있으며, 그 결과로부터 냉동기 용량 또는 액체질소 소요량을 결정할 수 있다. 熱負荷에는 凍結負荷, 배관으로부터의 침투열, 순환펌프에 의한 發熱, 굴착 凍土面으로부터의 침투열 등이 있는데, 이들은 각각 발생시점이 다르므로 施工工程에 따라 계산한다.

v) 地中溫度 측정계획 수립

凍結管 매설시 동시에 직경이 작은 강관을 매설하여, 이를 온도측정관으로 사용한다. 동결관 5~10 본마다 온도측정관 1本을 매설하는데, 地下水의 흐름이나 地下熱을 받기 쉬운 곳, 他工區와 접합부 등에 매설하여 地

표 1. 凍土의 設計基準強度⁽²⁾(kg/cm²)

흙의 구분	동 결 온 도					
	-10℃			-20℃		
	압축강도	인장강도	전단강도	압축강도	인장강도	전단강도
점 성 토	20~40	15~20	15~20	45~60	20~30	20~30
사 질 토	40~70	20~30	20~35	60~100	30~45	30~50

中溫度의 經時變化를 측정한다.

vi) 地반변위 측정계획 수립

동결영역 부근에 지하매설물이나 중요한 구조물이 있을 경우에는 보링이나 동결팽창의 영향으로 地반변위, 간극수압의 변화, 지하수위의 변화 등이 발생할 수 있으므로 요소요소에 대한 계획제책을 수립한다.

(2) 地下水의 영향 및 대책

동결시키려는 地반속으로 지하수가 흐르면, 동토벽이 형성되지 않거나 일단 형성된 동토벽이 용해되는 수가 있으므로 대책이 필요하다.

Foraky社에 의하면 동토벽이 형성될 수 있는 地下水의 한계유속은 (V_{crit}) 식(2)와 같다.⁵⁾

$$V_{crit} = \frac{\lambda_1}{4D \ln(D/2r_0)} \cdot \frac{(-\theta_c)}{\theta_\infty} \dots\dots(2)$$

여기서, λ_1 : 凍土의 熱傳導率

D : 凍結管 間隔

r_0 : 凍結管 半徑

θ_∞ : 地中 溫度

θ_c : 冷却 溫度

통상 점토나 실트층과 같이 투수계수가 10^{-4} cm/sec보다 작을 경우 地반굴착시 발생하는 용출수 또는 인위적인 揚水에 의한 지하수의 교란작용이 없다면 표준적인 시공법으로 凍土壁을 완성시킬 수 있다. 경험치로서 표준적인 시공조건하에서 지하수의 한계 유속은 brine을 이용할 경우 2m/day, 액체질소를 이용할 경우 10m/day이다.

지하수의 流速이 한계치를 넘을 때는 i) 냉각온도, 凍結管列의 數, 凍結管의 직경, 동결관 매설간격을 조절하는 방법 ii) 凍結對象 地盤을 注入工法으로 개량하여 투수계수를 감소시키는 방법, iii) 上流에 웰 포인트(well point)를 설치하여 動水傾斜를 줄이는 방법 등으로 대처한다.

(3) 동결팽창의 예측 및 대책

동결기에 자연적으로 발생하는 凍上現象에서와 마찬가지로 인공동결공법을 사용할 때 地반의 동결팽창이 발생하여 지하매설물이나 기존 구조물에 영향을 미치는 경우가 있으므로 설계단계에서 충분히 검토해야 한다.

地반의 동결팽창에 의해 수직 및 수평방향으로 발생하는 변위를 예측할 수 있는 식이 제안되어 있다.

먼저, 地반중의 어느 영역이 동결되면 地表面에는 동결영역을 중심으로 중세 균인들의 모자 모양의 수직변위가 나타나기 시작한다(그림 7 참조). 戶部와 秋元⁶⁾은 地반중 미소부분이 동결될 때 체적팽창량의 全量이 地表面에 나타나며, 또한 지표면의 용기곡선을 Gauss의 曲線으로 표시할 수 있다는 가정하에 식(3)과 같이 地表面變位量 $G(h, x, y)$ 을 예측하는 式을 제안하였다.

$$G(h, x, y) = \frac{\eta_0}{4} \int_{h_1}^{h_2} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{\ell+x}{ah}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{\ell-x}{ah}\right) \right] \left[\operatorname{erf}\left(\frac{w+y}{ah}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{w-y}{ah}\right) \right] dh \dots\dots\dots(3)$$

여기서,

h_2-h_1, ℓ, w : 직사각형 모양의 동토의 변의 길이

h : 凍土領域의 깊이

η_0 : 地반의 동결팽창률(=동결후의 체적/동결전의 체적)

a : 지표면에서의 영향범위를 결정하는 定數

근사적으로 $a = \tan(45^\circ + \phi/2)$

ϕ : 흙의 내부마찰각

$\operatorname{erf}(\cdot)$: 오차함수

식(3)을 실제 현장에 적용하여 보면 $\pm 30\%$ 의 오차를 나타낸다고 한다.⁷⁾

한편, 동결관을 수직으로 매설하였을 경우 同心圓 모양의 凍土柱는 수평방향으로 성장하

는데, 이때 未凍結地盤은 응력을 받으며, 수평 변위를 일으킨다.

高志⁸⁾는 동결관 중심으로부터 반경 r 인 未凍結地盤이 탄성적 거동을 보인다고 보고 응력 (σ_r)과 수평변위(δ_r)를 나타내는 식을 식(4) 및 (5)와 같이 제안하였다.

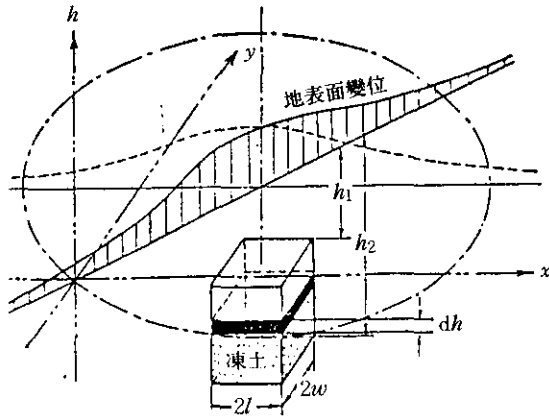


그림 7. 동결팽창에 의한 地表面 變位の 계산 모델⁽⁸⁾

$$\sigma_r = \sigma_\infty + (\sigma_{r1} - \sigma_\infty) \frac{r_1^2}{r^2} \dots\dots\dots(4)$$

$$\delta_r = (\sigma_{r1} - \sigma_\infty) \frac{1+\nu}{E} \frac{r_1^2}{r} \dots\dots\dots(5)$$

여기서,

- σ_∞ : 미동결 영역에서의 半徑方向의 주응력
- σ_{r1} : 동결영역과 미동결영역 경계면에서의 응력(팽창력)
- ν : 미동결지반의 포아손비
- E : 미동결지반의 탄성계수
- r_1 : 동결관 중심으로부터 동결영역 外端까지의 반경

지반의 동결팽창 메카니즘에 대한 규명 및 동결팽창 억제 대책에 대하여 많은 사람들이 계속 연구하고 있는데, 현시점에서 동결팽창 그 자체를 없게 하는 것은 불가능하다. 그러나, 동결팽창의 영향을 경감시키는 대책으로서

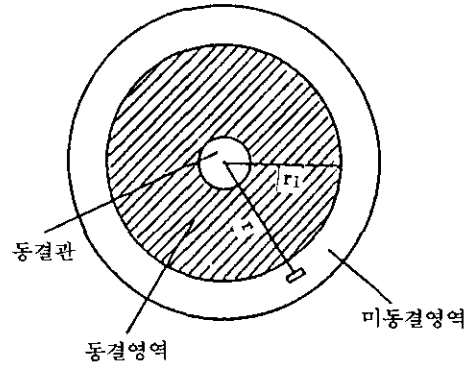


그림 8. 동결모델⁽⁸⁾

- i) 제한된 凍結管을 사용하거나, 때로는 加熱管을 사용하여 동결범위를 최소한으로 줄이는 방법
- ii) 凍土形成 순서등을 검토하여 가능한 팽창량을 水平方向의 變位만으로 흡수하는 방법
- iii) 보링에 의한 지반의 이완과 동결팽창량과를 상쇄시키는 방법
- iv) 간극수의 粘性을 인공적으로 증가시켜 凍結面으로의 吸水量을 억제시키는 방법
- v) 미리 變位吸收孔을 설치하여 地表面이나 地下構造物에 미치는 영향을 줄이는 방법 등이 이용되고 있다.

5.3 施工

(1) 施工管理

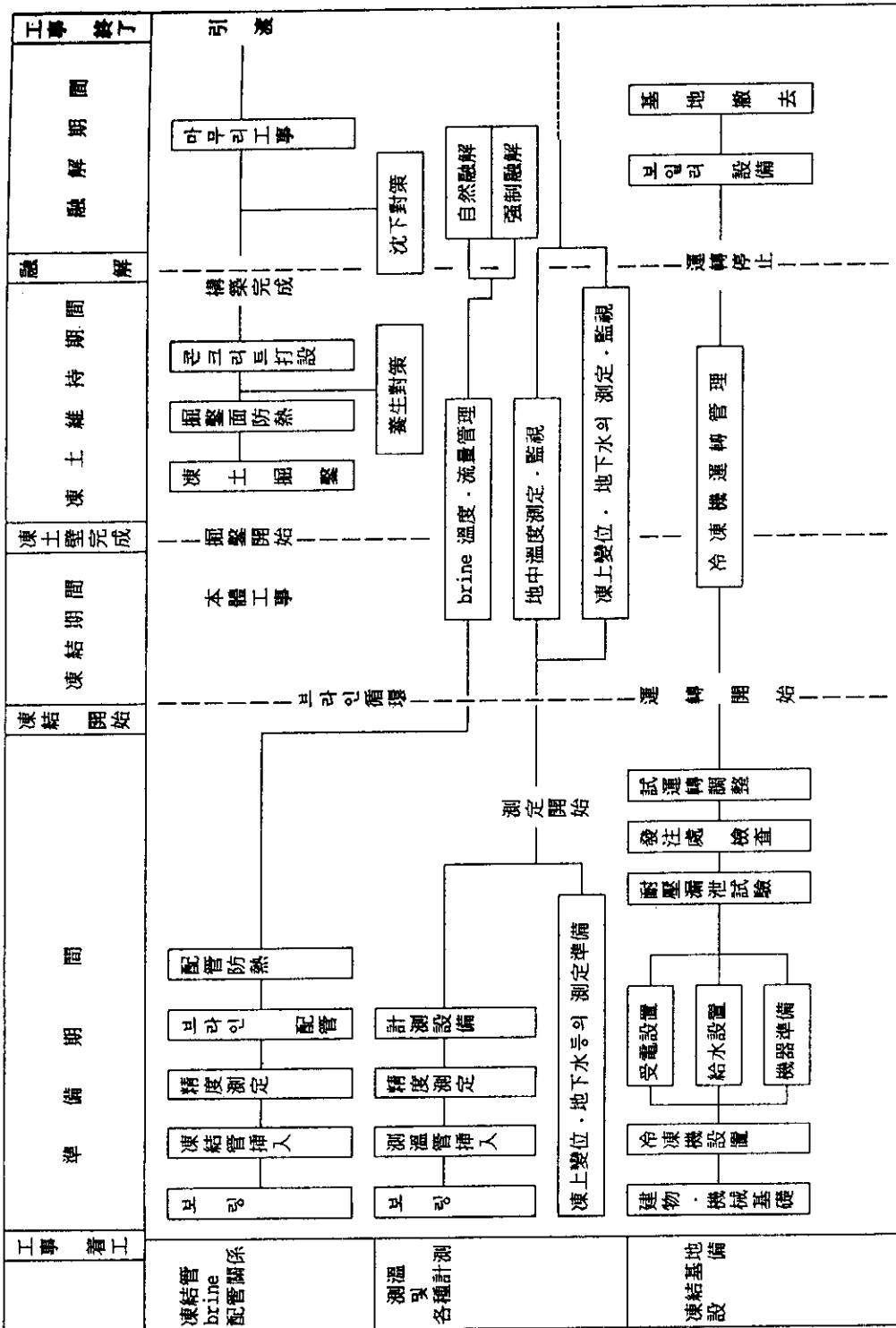
인공동결공법의 시공단계는 크게 i) 준비 단계(플랜트설비, 동결관 매설) ii) 동결단계(필요한 동토 조성) iii) 동결유지(本體工事) iv) 철거(융해)의 4단계로 구분할 수 있다(표 2 참조).

시공관리의 주요한 것은 냉동기 운전관리와 동토관리이다. 냉동기는 보수 및 예측치 못한 사태에 의한 정지 이외에는 주야간 계속 가동한다.

냉동기 운전에 따른 brine 순환의 관리로서 brine 出入口 溫度, 流量의 점검 및 누출점검, 공기 빼기 등이 있다.

凍土管理는 成長管理와 維持管理로 나누며,

표 2. 인공동결공법의 표준 시공순서



성장관리를 확실하게 하기 위해서는 보링시 凍結管과 地中 온도계측용관의 매설오차를 實測하여 兩者의 정확한 위치를 파악해 놓는 것이 중요하다. 地中溫度 計測方法에는 定點測定과 深度別 移動測定이 있는데 지중온도 계측결과를 바로 graph化하여 經時變化를 보면서 凍土成長 상황을 파악한다.

유지관리 중 중요한 것은 掘鑿凍土面의 관리이다. 凍土面이 직접 장시간 외기에 노출되는 것은 적극적으로 피하지 않으면 안된다. 즉, 굴착면을 쉬트(sheet)나 防熱材로 보호하여 外氣의 流入을 막도록 한다.

(2) 동결관 설치

시공과정에서 가장 중요한 작업으로서 보링 기술에 따라 회전식, 충격식, 터빈(turbine)식, 복합식 등 여러가지 방법이 개발되어 있다. 동결관 설치시 관의 처짐이 발생하지 않도록 주의해야 하는데 그 기준치는 수직으로 설치할 때 1/200 이내, 경사지게 설치할 때 1/100 이내이다.¹⁾ 경사계에 의한 제측을 통해 이 기준치를 초과할 경우 다시 착공을 하거나 동결관을 증설한다.

6. 人工凍結工法 適用事例

6.1 河底 橫斷工事に 사용된 事例

본 공법 개발초기의 적용사례 중에서 많은 부분을 차지하는 것으로, 지하철, 상하수도가 있다. 특히, 지하철건설을 위한 공사에서 인공 동결공법이 채택된 주된 이유는, 현장이 간선도로 밑에 있으므로 교통량, 지하매설물이 많거나, 이것들을 규제·처리하기 곤란할 경우, 또는 하천의 유효단면적을 확보하여야만 할 때, 강바닥으로부터의 土被가 적을 경우 및 기타의 제약조건을 만족시킬 수 있었기 때문이었다.

그림 9는 독일의 마인강바닥 횡단 지하철공사에서 사용했던 예이다.⁹⁾ 터널하부의 지반조건이 좋아서 터널 상부에만 馬蹄形의 동토를

만들었다. 이 지하철은 강의 앞쪽에서 2개의 터널로 나뉘어지는데 약 200m 길이의 강바닥 부분을 30m마다 동결공법으로 防護하고, 順次 掘進하는 방법을 적용하였으며, 깊은 우물에 의한 수위저하공법과 NATM공법을 병용하였다. 이 방법은 스위스의 상수도공사에서도 사용된 바 있다.

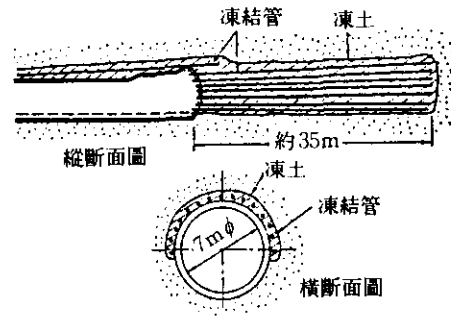


그림 9. 河底橫斷 地下鐵工事に 이용된 예(1)

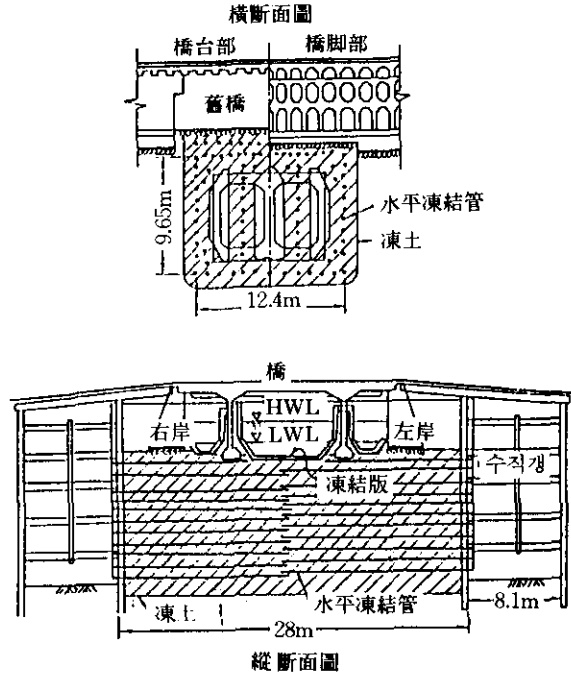


그림 10. 河底橫斷 地下鐵工事に 이용된 예(2)

그림10은 일본에서 처음으로 동결공법이 지하철공사에 사용되었던 예이다.¹⁰⁾ 현장 근처에서 시험동결을 하였으며, 동토의 遮水性和強度를 확인한 후에 본 공사가 수행되었다. 강바닥부분에는 동결판이 사용되었고, 본체의 동토벽은 수직갱으로부터의 수평동결관에 의해서 형성되었다. 구축단면 안에 上部荷重을 받기 위한 2줄의 동토벽을 설치한 것이 특징이다. 그림 11은 세계에서 손꼽을만한 대규모 공사의 예이다.¹¹⁾ 鉛直凍結管에 의해 全橫斷面內를 동결한 것으로 全凍土型이라고 부르고 있다.

냉동기설비 900kW, 동결관 연장 17.9km, 동결토량은 3만m³ 이었다. 이 공사에서는 동결팽창성이 큰 흙을 주위에서부터 둘러싸는 형태로 동결했기 때문에, 그 팽창력과 변위에 의해 전 동결관의 7% 정도가 손상을 입었으며, 게다가 누출된 brine이 동토를 침식할 우려가 있었다. 다행히, 굴착작업 전에 발견했기 때문에, 손상된 동결관을 복구, 증설해서 냉각능력을 보강하고, 누출된 brine에 의한 凍土의 침식을 방지하기 위해 세정작업을 하고 안전성을 확인한 뒤에 공사를 무사히 완성할 수 있었다.

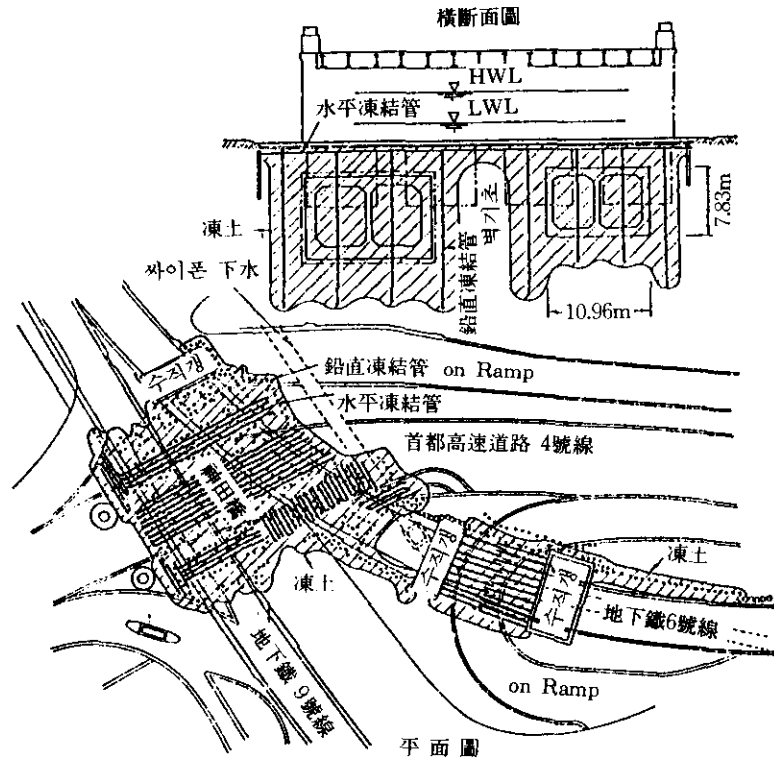


그림 11. 河底橫斷 地下鐵工事に 이용된 예(3)

그림 12는 연직동결관, 수평동결관, U자형의 굽어진 동결관 등 3종류를 사용해서 구조물 주위에 동토벽을 조성한 예로, 강바닥부분 土被가 1.5m로 되어있기 때문에, 다시 한번 동결판을

사용, 河底部의 동결을 강화하였다.¹¹⁾ 이 현장에는 동결팽창에 의한 교각의 凍土變位를 억제하기 위해 凍土壁 안쪽에 배수관을 설치하고, 동토에 둘러싸인 미동결부의 간극수를 진공펌

프로 탈수하여 여분의 수분을 약 13m³ 정도 뽑아내어, 최종적으로 凍上量을 10mm이하로 억제하는데 성공하였다.

그림 13은 지하수의 流速이 약 5m/sec인 지반중의 遮水를 주목적으로 해서 동토벽을 조성한 예이다.¹⁰⁾ 河底部凍結版과 鉛直凍結管을 사용했으나, 橋台밀부분은 네모통이의 수직갱에서부터 扇形동결관을 매설하였다. 토압은 흙막이용 횡지지말뚝이 받고, 하천수에 의한 하중은 강제 beam·강관말뚝이 받는다.

그림 14는 세계 최대규모의 동결공사이다.¹²⁾ 냉동기설비 112.5kW, 凍結管延長 19km, 동결토량은 3만 8천 m³로 수평동결관에 의한 全凍土型이었다. 아래와 같은 제약조건을 만족시킨다는 이유로 동결공법이 채택되었다.

- ① 橋上의 交通량이 많고, 대폭적인 交通규제가 불가능하다.
- ② 하천은 조석간만의 차가 약 2m이고, 강우 때 갑자기 물이 불어나므로 유로단면적의 축소가 불가능하다.
- ③ 선박이 항해할 수 있는 여지를 남긴다.

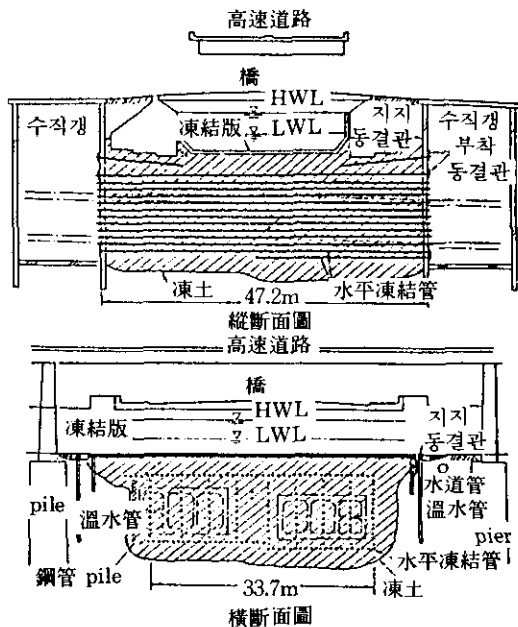


그림 12. 河底橫斷 地下鐵工事に 이용된 예(4)

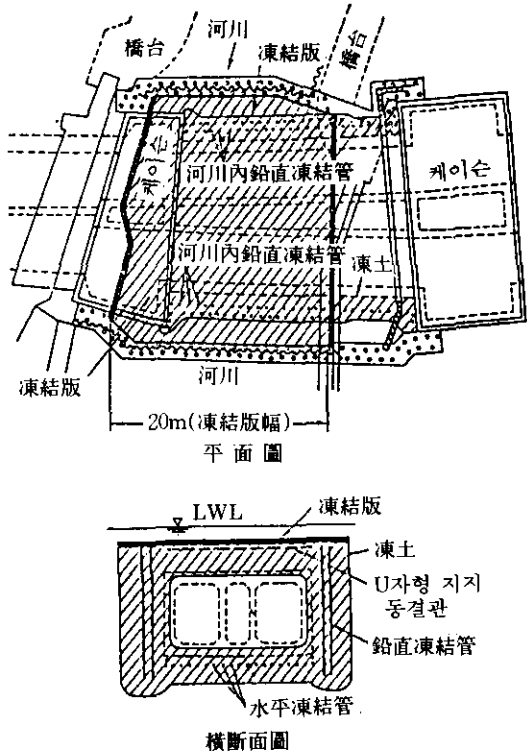


그림 13. 河底橫斷 地下鐵工事に 이용된 예(5)

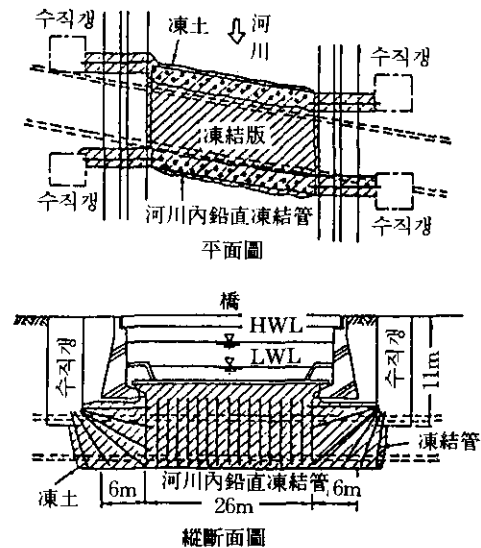


그림 14. 河底橫斷 地下鐵工事に 이용된 예(6)

- ④ 地下鐵路線 경사의 제약 때문에 구조물 위에 충분한 土被를 유지할 수 없다.
 - ⑤ 하천 우측 언덕에 집들이 밀집되어 있다.
 - ⑥ 상공에 고가고속도로가 있고, 그 pier가 근처에 있다.
 - ⑦ 장래의 교량복구공사에 지장을 주지 않아야 한다.
- 또한, 이 현장에서는 공사완료 후 동토융해

시 온수순환에 의한 강제융해법을 사용했다.

그림15¹⁵⁾ 및 그림 16은 하수도 공사에 사용된 예인데, Hune관에 합해진 형상의 동토벽을 이룬 것과 하천수의 영향을 억제하기 위해 동결관보다 간단한 모양의 河床으로 굽어진 동결관 및 증설수평동결관을 사용한 것이 특징이다.

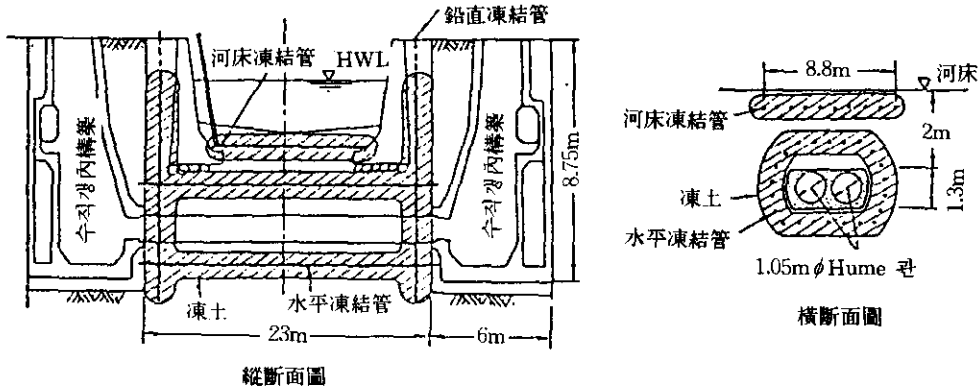


그림 15. 하저횡단 하수도공사에 이용된 예(1)

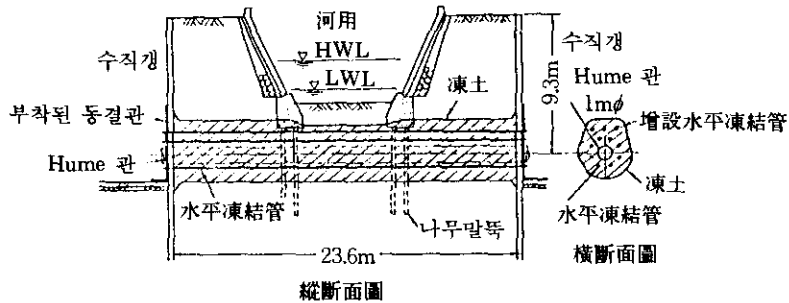


그림 16. 하저횡단 하수도공사에 이용된 예(2)

6.2 철도 및 도로밀 횡단에 사용된 사례

철도는 중요한 구조물의 하나로서, 작은 변위도 문제가 된다.

철도밀을 횡단하는 상하수도 공사에, 다수의 인공동결공법 적용 예가 있는데, 수평동결관만

으로 원통형 동토를 조성할 수 있는 경우가 많았고, 동결토량도 많지 않았으며, 동결팽창영향도 적은 효과적인 공법의 하나로 자리잡고 있다. 고속도로나 간선도로 밀을 횡단하는 공사에도 사용되지만, 2개의 건물사이의 지상으로 교통을 제한·폐쇄하지 않고 지하연결도를

시공한 예도 있다.

그림17은 철도밑 횡단에서 사용한 공업용 수도관의 예이다.¹³⁾ 이 현장에서는 횡단면 상부를 동결하여 하부 boring시 철도에 미치는 영향을 없앴다. 또한, 동결팽창에 의한 半

徑方向의 crack이 동토안에서 발생할 수 있다는 사실이 이 현장에서 확인되었으며, 이후부터 이러한 원통형 동토의 경우, 중심부에 凍結膨脹壓을 줄이기 위한 解放孔을 설치하게 되었다.

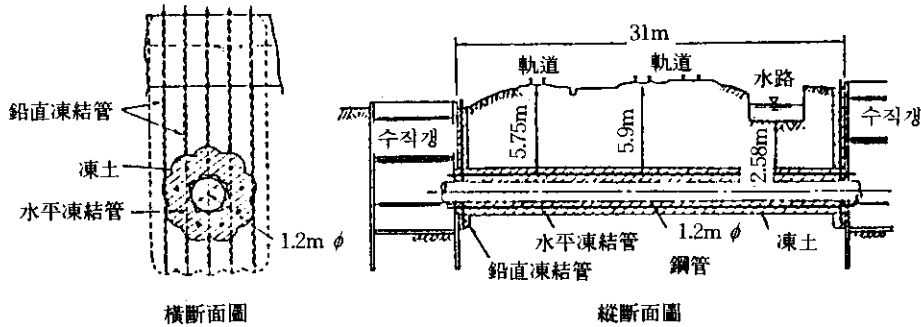


그림 17. 철도횡단 공업용 수도관공사에 이용된 예

6.3 Shield 공사의 보조공법으로 사용된 사례

연약지반이나 帶水砂層의 Shield공사에 수직갱으로부터의 發進, 到達部에는 얼마간의 防護가 필요하다. 이러한 경우에 사용되는 동결공법의 동결형식으로는 全斷面凍土, 門型凍土, 圓筒形凍土등이 있으며, 토질이나 Shield 종류 등에 따라서 선택된다. 또한, Shield가 작은 곡률반경으로 방향전환을 할 경우에 동토벽을 反力壁으로 이용하는 방향전환 예와 이미 설치된 shield에 枝管이 되는 Shield가 접속한 예 및 2개의 Shield가 地中接合한 例등 광범위하게 사용되고 있다. 이러한 시공건수는 수백건에 달하고 있으며, 일본에서는 동결공법 실시 사례 중에서 가장 많은 부분을 차지하고 있다.

그림 18은 하수도공사에 사용된 예로써, 두 방향으로의 Shield 發進과 한 방향으로의 도달에 이용되고 있으며 동토는 원통형이다. 수직갱을 굴착할 때에도 이용되었으며, 수직갱용 연직동결관은 Shield 발진 및 도달시 해당부분만 뽑아낸다.

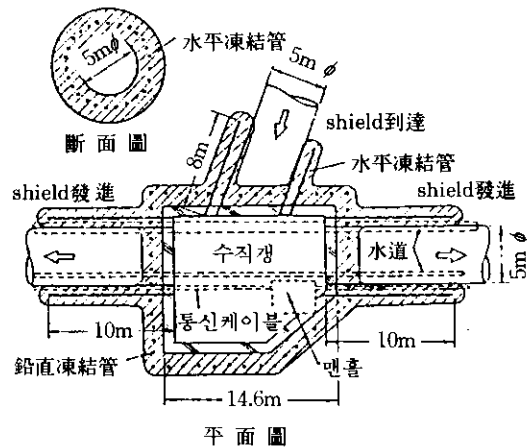


그림 18. 하수도공사에 이용된 예(1)

그림 19 및 20은 모두 Shield 발진에 사용된 예이나 그림 19는 연직동결관만으로써 직경 8.5m 토압 밸런스식 Shield의 발진방호를 실시한 예이며, 그림 20은 연직과 수평 두형태의 동결관을 사용하여 방호를 실시한 예이다.

그림21은 신간선 공사에 사용된 예인데,

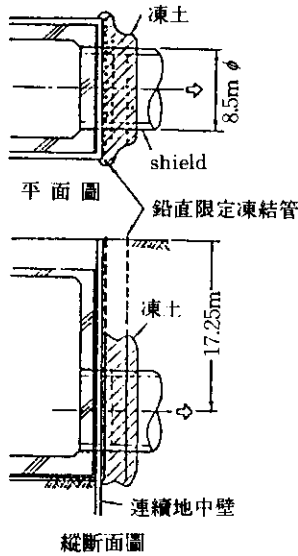


그림 19. 하수도공사에 이용된 예(2)

Shield 직경은 약 13m이고, 發進部 상부에만 방호한 것이 특징이다. 이 현장에서는 건물이 근접해 있어서 동결팽창을 억제하기 위해 간극수의 점성을 증가시켜 흡수량을 억제하는 등의 대책을 세웠다.

그림22는 하수도공사에서 사용한 急曲線防護의 예이다.¹⁴⁾ 연약 Shield층 내에 직경 4.9m의 Shield가, 반경 12m 및 14m의 원호를 그리며 전진하는 부분에서 사용된 것이다. 동토벽을 반력벽으로 하여 jack으로 Shield 본체의 방향을 바꾸면서 掘進하였다.

그림23은 하수도공사에서 枝管接續할 때 사용되었던 예로써 현재사용중인 하수도관에 접속한 것이 특징이다. 特殊맨홀도 동시에 동결공법으로 시공하였다. 하수도 상부까지 우선 수직갱을 파내리고, 下水에 의한 加熱은 하수도관 내에 U字刑鋼 by-pass를 설치하여 피하였으며 이후, 管内로부터 매설한 부채모양의 凍結管群으로 연속동토벽을 만들고, 하부까지의 수직갱을 완성하였다. 수직갱 완성후의 枝管接續은 도달부공사와 동일하였다.

그림24는 하수도공사에서 地中接合에 인공

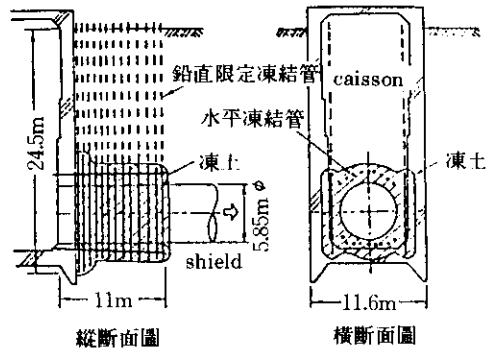


그림 20. 하수도공사에 이용된 예(3)

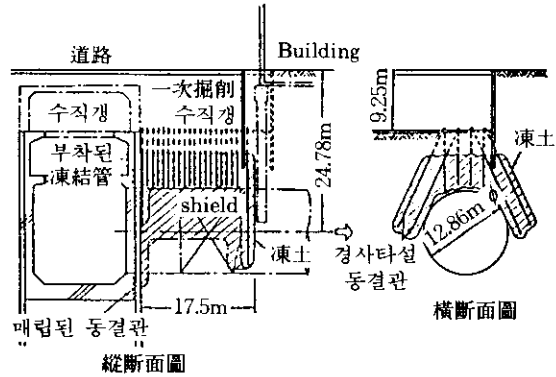


그림 21. 신간선공사에 이용된 예

동결공법이 사용되었던 예로서¹⁵⁾, 동결관은 모두 직경 약 3m의 Shield 안에서부터 鑿孔한 것이 특징이다. 접합부는 細砂地盤내에 있었으며, 따라서 충격식 boring방법을 사용하였다. 그림25도 地中接合에 사용되었던 예이지만, 똑같은 장소에서 깊이가 서로 다른 2곳에서의 동시공사에 사용되었다.¹⁶⁾ 연직동결관과 segment 동결관이 사용되었고, 특히 연직동결관은 上段 및 下段에서의 접속에 유효하게 이용되었다.

6.4 수직갱 굴착에 사용된 事例

施工事例가 가장 많고, 대부분이 광산용이며

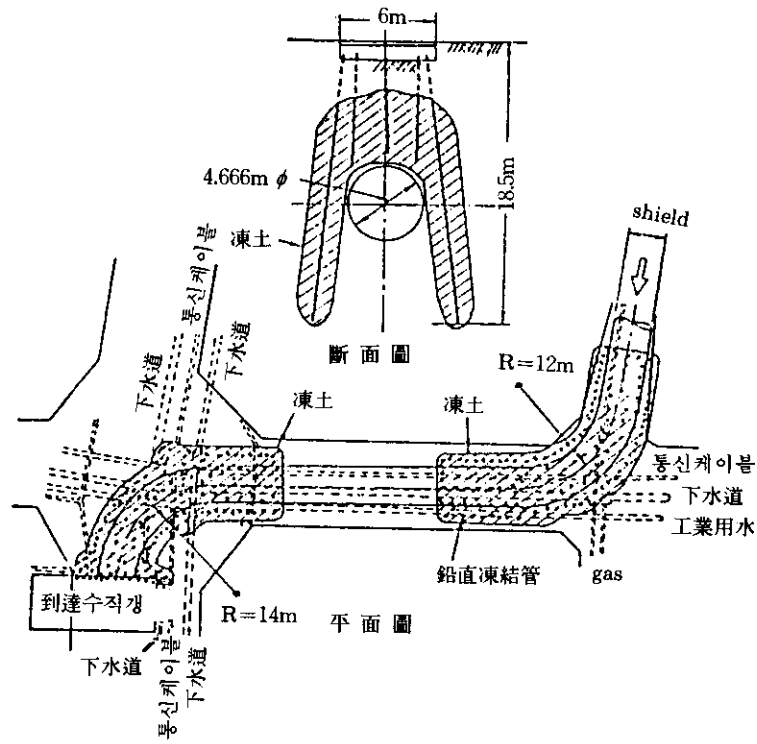


그림 22. 하수도관 Shield 공사에 이용된 예(1)

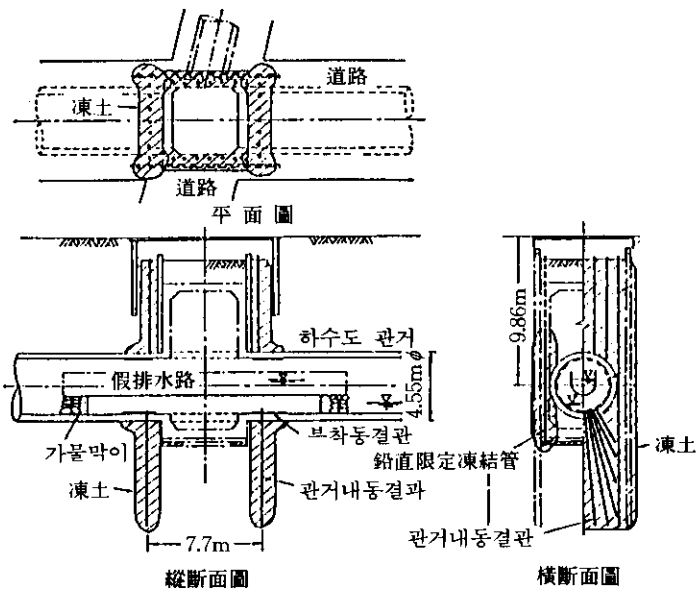


그림 23. 하수도관 Shield 공사에 이용된 예(2)

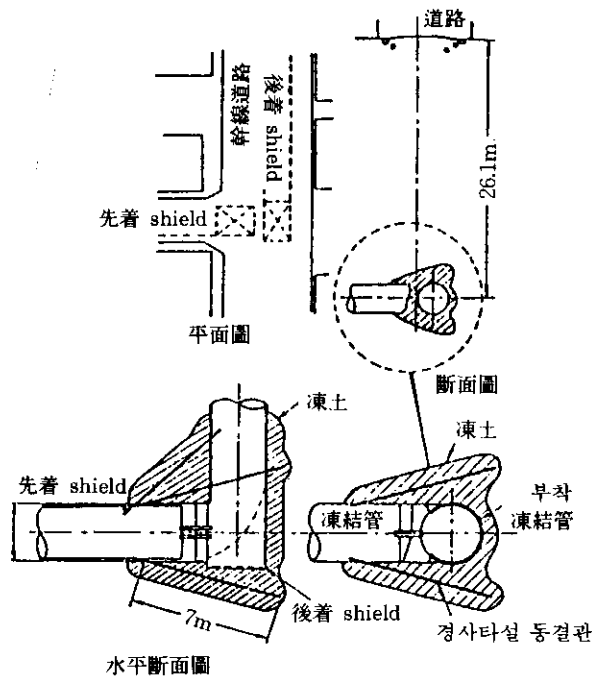


그림 24. 하수도관 Shield 공사에 이용된 예(3)

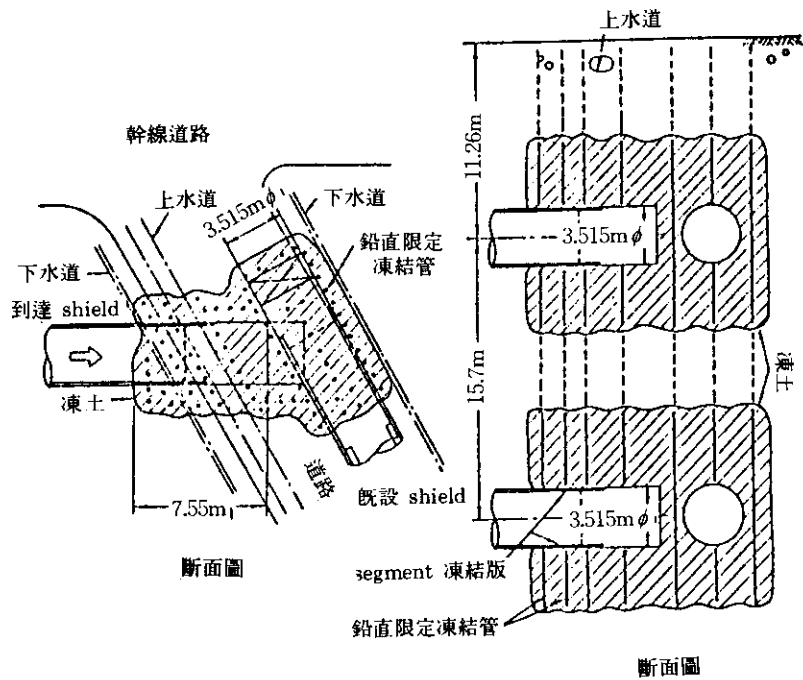


그림 25. 하수도관 Shield 공사에 이용된 예(4)

시공깊이가 깊다.

그림 26은 캐나다 칼툼광산에서 사용했던 예¹⁷⁾인데, 지하 400m부근의 帶水地盤의 76m 구간에만 동결공법을 이용하였다. 캐나다에서는 帶水細砂地盤에 인공동결공법이 널리 이용되고 있는데, 이러한 현장에서는 freeze station이라고 하는 확폭공간을 수직갱 중에 설치하고, 여기서부터 동결관을 boring에 의해 매설하고 있다. 지표면부터 수백 m에 달하기까지 동결공법을 이용한 예도 있는데, 이 때는 freeze station을 여러 개 설치했다.

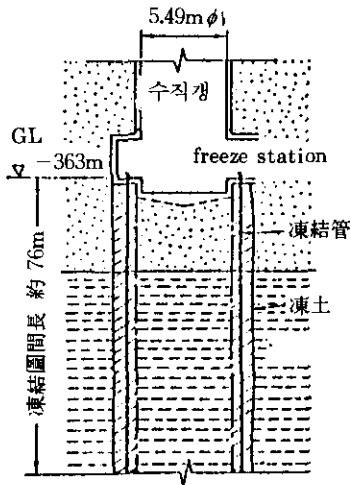


그림 26. 광산용 수직갱에서 사용된 예

6.5 그 밖의 特殊한 事例

그림 27은 미국에서 호수바닥으로부터의 취수용 수직갱공사에 사용되었던 예인데¹⁸⁾ 호수바닥을 동결해서 수직갱을 地中터널로부터 왼쪽으로 향하여 굴착한 것이 특징이다. 호수 왼쪽 부분으로의 동결관 매설을 위한 boring후에는, 護岸에서 굴착한 호수바닥 암반중의 터널안에 동결장치를 설치하고 모든 공사를 호수바닥 밑에서 시공하였다.

그림 28은 브라질의 26층 빌딩의 부등침하의

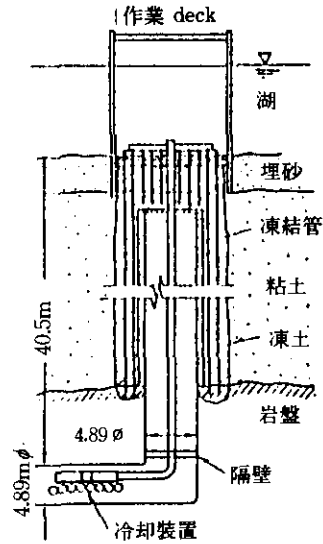


그림 27. 取水用 수직갱 공사에 사용된 예

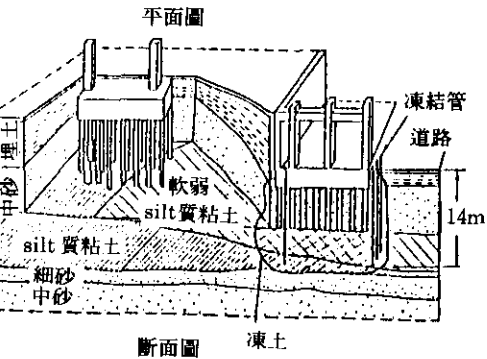
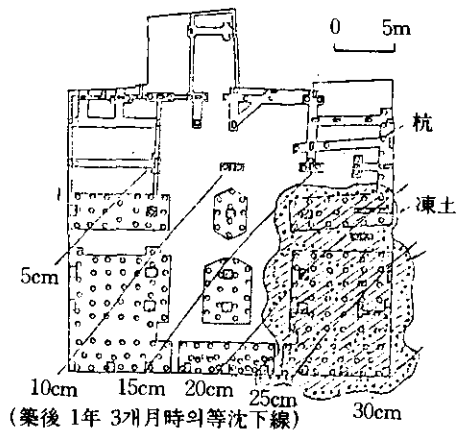


그림 28. 빌딩 부등침하 수정시 사용된 예

수정에 사용되었던 예이다.¹⁹⁾ 연약점토층 때문에, 1년간 20cm 이상이나 침하된 부분을 1년 가까이 동결하면서 그 동안에 새로운 지지층에 도달하는 말뚝을 설치하였다.

그림 29는 미국에서 댐을 건설하기 위해 빙하 실트층의 流動을 정지시키고자 폭 36m, 깊이 6m 크기의 동토댐을 만든 예이다.²⁰⁾

그림 30은 알제리에서 댐에 침전된 실트를 제거하기 위한 배출구건설에 쓰였던 예이다.²¹⁾ 댐깊이의 절반 가까이까지 초연약토가 매립되어 저수량을 확보할 수 없었기 때문에 배출구가 필요하게 된 것이다. 나선형의 동결관을 집어넣고,鐘모양의 동결장치를 댐의 상류쪽에 설치하여, 댐본체와凍着시킴으로써 하류쪽으로부터 boring에 의한 排水孔과 止水弁이 완성되기까지 방호를 할 수 있었다.

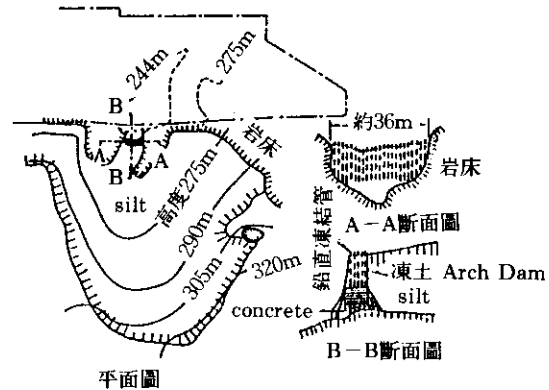


그림 29. 빙하층의 流動防止에 사용된 예

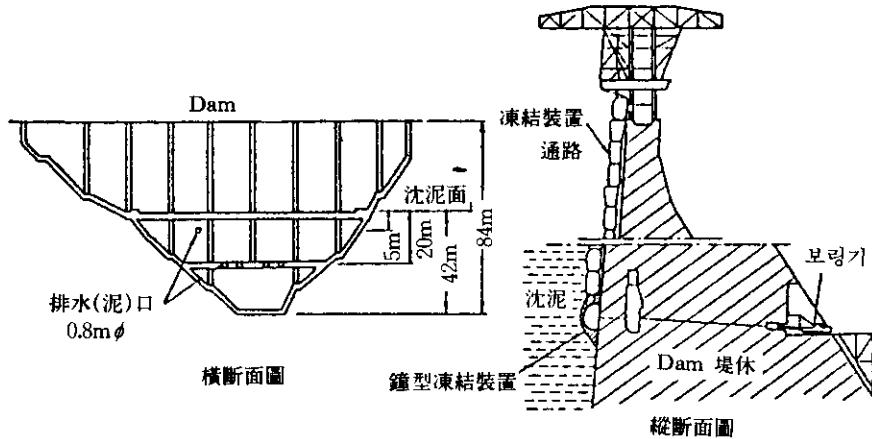


그림 30. 댐에 침전된 실트제거용 배출구 건설시 사용된 예

7. 맺음말

인공동결 공법은 1862년 영국 웨일즈의 광산용 수직갱 붕괴방지공사에 처음 적용된 이래²²⁾, 여러나라에서 광산용, 도시토목공사용으로 수

백 건 적용된 실적을 가지고 있다. 아울러 최근 냉동설비 기술, 보링 기술, 현장계측 기술의 발전으로 인공동결공법은 상당한 기술적 발전을 보이고 있으며, 그 적용대상 분야도 하저횡단 지하철공사, 철도 및 도로횡단 매설관

공사, 쉴드공법 보조공사, 수직갱 보강공사, 지하저장탱크 건설공사, 건물 부등침하 보수공사, 댐 배출구 건설공사 등 매우 다양해 지고 있다.

최근 국내에서 각종 지반굴착공사, 지하구조물 축조공사가 날로 늘어나고 있고, 이에 따른 지반붕괴 사고가 잦은 실정을 감안할 때 본 공법에 대한 관심을 늘리고 적용 가능성에 대한 기술적 검토가 적극적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 了戒公利, “人工地盤凍結工法”, 土と基礎, Vol. 38, No.8, p.48, p.53, 1990.
2. 日本 土質工學會, “土の凍結—その 制御と應用”, —土質基礎工學 라이브러리—23, p.159, p.167, 1989.
3. 高知勤, 知用正八郎, “土壤凍結工法について”, 冷凍 Vol.36, No.408, pp.1~15., 1961.
4. 戸部暢, 秋元攻, “凍土內 溫度分布式とその 應用”, Vol.54, No.622, pp.3~11., 1975.
5. Foraky, “Artificial Ground Freezing”, Technical Note, 1421/86, 1986.
6. 戸部暢, 秋元攻, “凍上變位計算法(3次元)”, 第34回 土木學會年次學術講演會 概要集(Ⅲ), pp. 243~244, 1979.
7. 木下誠一, “凍土의 物理學”, 森北出版(株), p. 144, 1982.
8. 高知勤, “凍結膨脹による 未凍結領域内の 土壓と 變位の 經時變化”, 土木學會論文報告集 200, pp.49~62, 1972.
9. Jones, J. S. Jr., “Engineering practice in Artificial Ground Freezing”, The 2nd Int. Symp. on Freezing, proceedings, Norwegian Inst. of Technology, Trondheim, Norway, pp.837~856, 1980.
10. 小倉宏三, “地下鐵建設における 凍結工法の利用” 土木學會誌, Vol.52, No.6, pp.35~43, 1967.
11. 村田浩 外, “神田川河底部の 凍結工法”, 土木技術, Vol. 27, No.8, pp.77~88, 1972.
12. 金安進 外, “日本橋川下の大断面 凍結工法,” トンネルと地下, Vol.9, No.8, pp.23~30. 1978.
13. 丸地角衛 外, “國鐵軌道下および 河川下橫斷路工事に利用された凍結工法”, 土木施工, Vol. 10, No.5, pp. 82~87, 1968.
14. 岡田義勝 外, “凍結立坑と泥水シールドの到達および發進防護の一施工例”, 第36回 土木學術講演會講演概要集, No.3, pp.494~495.
15. Takashi, T., Kiriyama, S. and Kato, T. “Jointing of Two Tunnel Shields Using Artificial Underground Freezing,” Engineering Geology, Amsterdam, No.13, pp.519~529, 1979.
16. Takashi, T., Kiriyama, S. and Akimoto, O., “Artificial Ground Freezing in Shield Work,” The 3rd Int. Symp. on Ground Freezing, Proceedings, CRREL, USA, 1982.
17. Scott, S.A., “Shaft Sinking Through Blairmore Sands and Paleozoic Waterbearing Limestones,” The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin for February, pp.94~103, 1963.
18. Hampton, W., “Frozen Lake Bottom Permits Upside-down Shaft Drilling”, Construction Methods and Equipments, March, pp.106~107, 1974.
19. Villares, A.D., “The Underpinning of the 26-Story” “Companhia Poulista De Sequros”, Building, Sao Paulo, Geotechnique, 1956.
20. Gordon, G. “Arch Dam of Ice stops Slide”, Engineering News-Record, vol.118, pp.211~214. 1937.
21. Thevenin, J., “Refrigeration Used in Piercing the Steeg Dam”, ASHRAE, Jour., July, pp. 54~79. 1962.
22. Lightfoot, T. B. Proceedings, Inst. of Mechanical Engineers, London, p.238, 1886.