인공 동결공법

윤건신[1)]* · 정규호[1)]

1. 서언

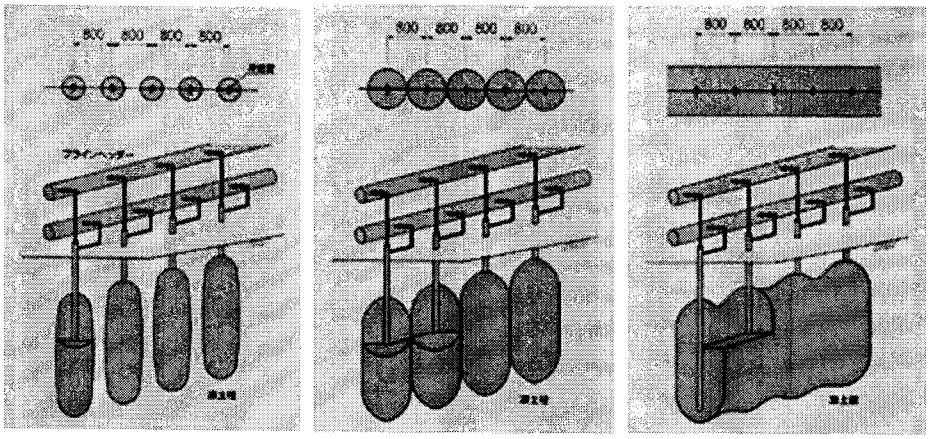
인공동결공법은 지반에 포함 되어 있는 물을 인공적으로 상변화를 시켜 완전차수와 강도를 증가 시켜 연약지반을 일시적으로 동결 시켜 그 동토벽을 차수벽 또는 내력벽으로 이용해, 본 구조물 완성 후, 해동 시키는 가설공법이다. 본 공법은 1862년 웨일즈 석탄광산 수직갱에 적용된 방법으로 철도, 상하수도, 건물, 지하탱크, 연약지반에서 수직갱, 수직갱과 연직갱 접촉부, 반력벽, 인접시공 및 오염토양, 방사성 폐기물 처분장등 환경 부문에 까지 광범위하게 적용되는 공법이다. 우리나라도 연약지반에서 토목공사 및 인접시공이 증가함에 따라 본 공법의 적용성이 요구되어 우리 지반 조건에 맞는 공법에 대한 연구개발의 일환으로 동결방법의 원리 특징, 일반적인 동결지반의 역학적 성질, 동결방법, 설계방법, 시공방법 및 인공동결공법 사례에 대하여 소개하고자한다.

2. 동결방법 원리와 특징

지반에 시추공에 동결관(직경 10cm 전후)을 지반의 역적 성질에 따라 80cm-120cm 간격으로 본구조물 주위에 매설하여 동결관내에 빙점 이하의 저온액체(Brine 또는 LNG)를 계속 공급하여 동결관 주위에 동토를 성장 시켜 주위를 얼린다. 아래 그림과 같이 동결관을 적당한 간격으로 배열된 동결범위는 동심원으로 확산되어 인접 동토와 결합되어 하나의 불투수성 강체 빙벽(frozen wall)이 형성 된다. 시공 완료 후에 자연적으로 또는 강제적으로 해동 시킨다. 본 공법의 특징은 동결 융해 시킨 후 초기 지반상태가 재현되며 복잡한 구조물에도 적용 할 수 있으며 무공해성 공법이다. 장점으로는 1). 동토의 강도는 온도에 따라 강도가 콘크리트의 2배 까지 조절 가능하며 -10^0 C 로 모래 동토의 압축 강도가 약 100Kgf/cm^2 가 된다. 2). 또한 불투수성으로 차수가 잘 되어 양수이나 차수가 필요 없으며 Pumping에 의한 세립자 들의 유실이 없으며, 파일 관입으로 인한 진동에 의한 침하가 없으며 3). 무공해: 동결작용은 지하수나 지반을 오염시키지 않는다. 4). 동결은 절리된 암반에서부터 미립 입자 지반 까지 지하수를 보존하고 만족할 만하게 안정화시킨다. 5). 오염된 지하수의 양수 또는 독성 화학 약품, 소음으로부터 안전한 작업 환경 및 공간을 제공한다.

주요어 : 인공동결공법, 원리, 역학적 성질, 설계, 시공, 사례

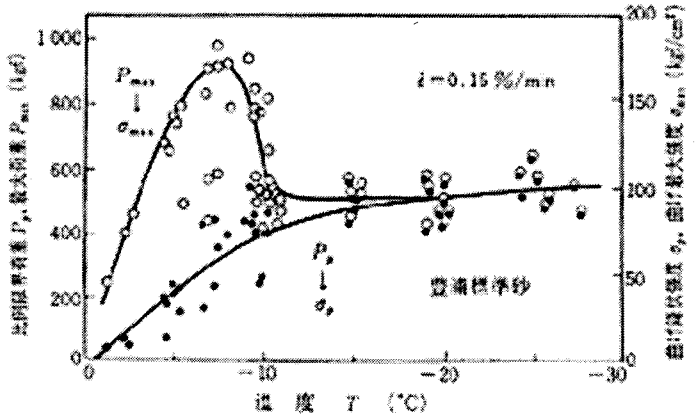
1) (주)특수건설, 기술연구소 (kernyoon@gmail.com)



단점으로는 1). 동통 형성 기간이 길다. 2). 지반 동결에 따른 영향으로 주변지반 및 구조물에 변형을 줄 수 있다. 3). 동토 해동에 의해 점토 지반인 경우 침하하는 경우가 있으며, 4). 지하수의 유동이 5m/day 이상인 경우에는 동토 형성이 어렵다.

3. 동토의 역학적 성질

동토의 강도는 내적요인으로 입도분포, 입자 배열, 건조 밀도, 함수비, 부동수 함수비, 염분농도, 외적요인 으로는 동결 토질온도 및 변형 특성이다. 온도 저하에 따라 강도 및 변형률이 증가되며 건조 밀도 증가에 따라 강도가 증가하며 동토 세립토가 점성토 보다 강도가 강하다. 세립동토는 영하 7도에서 피크 강도를 가지며 그 이하 온도에서 취성 파괴가 일어난다. 점성토의 성성이 증가에 따라 강도는 감소한다. 동토는 creep 변형을 한다.



4. 동결방법

동결방법은 액체 질소와 같은 저 액화 가스 방법과 압축기, 응축기, 냉각기 등으로 냉각한 Brine을 사용하는 Brine공법 두 종류가 있다. 가스방법은 액체가스 제조 공장으로부터 시공 현장까지 탱크를 운반해 파이프에 연결하여 기화열에 의해 동결 시킨다. Brine 방법은 물, 냉매(HCFC가 주류), 냉매($CaCl_2$ 수용액, -20^0C ~ -30^0C)의 순환을 통해 지반의 열이 대기에 방출된다.

5. 설계 방법

굴착공간의 깊이와 규모에 따라 동토 두께를 설계해야 한다. 동토의 역학 특성을 파악한 후

설계강도를 결정하여 설정한 안전율을 이용해 최종 동토두께를 결정한다. 동토는 탄소성 거동을 하나 표준설계에서는 탄성체로서 해석한다. 일본에서는 설계강도는 최대강도의 65%, 휨, 전단 강도는 압축강도의 40-50% 정도 값을 쓴다. 동토의 형상이 원통이므로 원통 이론 해석을 하며 원통의 가장 확실한 위치를 지지점 으로 하며 동토체의 온도는 균질체로 가정하여 평균 값 으로 한다. 동토와 기타 부재와의 동착면은 동착 전단강도를 고려하여 충분한 면적을 감안한다. 설계강도는 토질 조건에 근거하여 결정된 계산 값과 비율로 결정하며 안전율은 2 이상의 값을 선택한다.

동토 조성 영역 설계는 대개 80cm 간격으로 동결관을 배열하여 2m 정도의 동토 영역을 확보한다. 필요에 따라서 동결관의 거리와 배열 조정하여 가감 할 수 있다. 냉동기용량 설계는 동결토양에 필요한 동결부하와 배관계통, 굴착면 등에 가열 부하, 공사 예정 공정등 전부를 포함해서 냉동기 용량을 결정한다. 일반적으로 여기에 추가해서 여름에 필요 용량의 안전율 15% 이상을 예상해서 최종 용량을 결정한다.

일본의 동토 설계 기준 강도(kgf/cm^2)

토질	온도(^0C)	일축강도	인장	전단
점성토	-10	20 ~ 40	15 ~ 20	15 ~ 20
사질토		40 ~ 70	20 ~ 30	20 ~ 30
점성토	-20	45 ~ 60	20 ~ 30	20 ~ 30
사질토		60 ~ 100	30 ~ 45	30 ~ 50

6. 시공방법

지반동결을 위하여 동결관, 계측공을 매설한다. 이들은 시공조건에 따라 수직공, 수평관을 매설하고 동결관에 brine을 순환 시키기 위하여 배관하고 냉동기를 설치한다. 동토조성을 하는 동안 지중온도를 Real time으로 계측 하여 유지 관리한다. 공사가 완료 된 후에는 해동을 실시한다. 해동은 자연해동 또는 필요에 따라 강제 해동 시킨다

현지 조사, 가설준비 등 준비기간, 냉각 설비, 동결관 매설, 배관 계측 설비 공사 등을 위한 가설기간을 대개 1개월 정도이며, 1-2개월 정도의 동결기간, 동토 유지 기간은 공사 규모에 따라 1개월 정도에서 1년 이상 필요한 경우도 있다. Brine 방식에 의한 동경공법 기간은 3개월 이상 필요하다.

7. 인공동결 적용 사례

인공동결 공법은 연약지반의 내력벽 또는 차수벽으로 상하수도, 전력, 도로, 통신, 철도, 파이프라인, 공동구, 지하 하천 등의 시공에 적용 되었으며 최근에는 대심도 지하개발이나 대단면 확장 공사 및 오염 토양 처분 공사에도 적용된다. 일본에서는 매년 10여건의 인공동결공법이 적용되고 있으며 1960년 이래 500여 건의 시공을 수행 하였다고 보고되었다

8. 결언

우리나라에서도 연약지반에서 토목 시공이 증가하고 도심지에서 인접시공, 지하철, 통신구, 도로 교차 지점이 증가함에 따라 인접시공의 적용성이 필요해 짐에 따라 이에 대한 연구가 필요하다. 특히 우리나라 대표적인 지반에 대한 동토의 역학적 특성파악에 대한 기초 자료부터 우선 연구 되어야 할 것이다.