

## 연약지반(V-2)

천 병 식\*1  
장 연 수\*2

### 5.3.6 고결공법

지반을 고결할 수 있는 공법에는 심층혼합처리공법, 전기화학적공법, 소결공법, 동결공법 외에도 여러 가지가 있으나 편의상 이들에 대해서만 간략히 소개할까한다.

#### 1) 심층혼합처리공법

##### (1) 공법의 원리 및 특징

심층혼합처리공법은 석회·시멘트계를 주로 한 피상, 분말상 또는 현탁액상의 화학적 안정재를 원위치 지반에 첨가하여 원위치에서 혼합하여 연약점성토 지반을 주상, 피상 또는 전면적으로 개량하려고 하는 것이다.<sup>(1, 2)</sup>

석회나 시멘트를 흙과 혼합하면 여러 화학적 작용으로 흙이 강화된다. 이들은 생석회의 소화에 의한 흡수·팽창작용, 소석회나 시멘트의 함수비 저하작용, 칼슘의 염기치환작용, 포조란반응, 탄산화작용, 시멘트의 자경작용 등으로서 포조란 반응에 의한 효과가 크다.

심층혼합처리 공법의 특징을 요약하면 다음과 같다.<sup>(2, 3)</sup>

- ① 일반적으로 개량효과는 물리적 개량효과에 비해서 훨씬 크며 조기에 큰 개량 강도를 얻을 수 있으나 연약토의 종류에 의한 개량정도의 차이도 대단히 크다고 하

는 단점을 가지고 있다.

- ② 침하량, 측방이동량 등의 저감효과가 크며 인접구조물에 대한 지장이 적으며 저진동 저소음으로 시공이 가능하다.
- ③ 비교적 새로운 공법으로서 시공경험이 부족하나 균일한 혼합물을 얻기 위한 시공기계나 시공방법에 대한 개량의 여지가 있고 공비가 비싸다고 하는 단점이 있다.

##### (2) 공법의 분류

심층혼합처리공법은 1967년 경 부터 일본 운수성 항만기술연구소에 의해서 개발연구가 추진되었으며<sup>(1, 2)</sup>, 1970년대 중반에는 생석회 및 소석회, 시멘트 슬러리 등의 안정재를 이용하여 DLM(Deep Mixing Method)공법, 슬러리게 기계교반혼합처리공법(CDM공법: Cement Deep Mixing) 등의 명칭으로 실용화 되었다.<sup>(4, 5)</sup>

또한 DLM공법과 거의 동시에 스웨덴에서는 Lime Column 공법이 개발되었으며 이 공법은 생석회 분말을 고압공기로 압송하여 지중에 공급하고 교반혼합하는 것으로서 현재도 일부 이용되고 있다. 이러한 심층혼합처리공법은 안정재의 차이, 안정재의 공급방법의 차이, 또는 혼합방법의 차이에 의해서 매우 많은 종류가 있으며 편의상 기계적 혼합처리방식으로 통합할 수 있다.

\*1 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*2 정희원, 동국대학교 공과대학 토목공학과 조교수

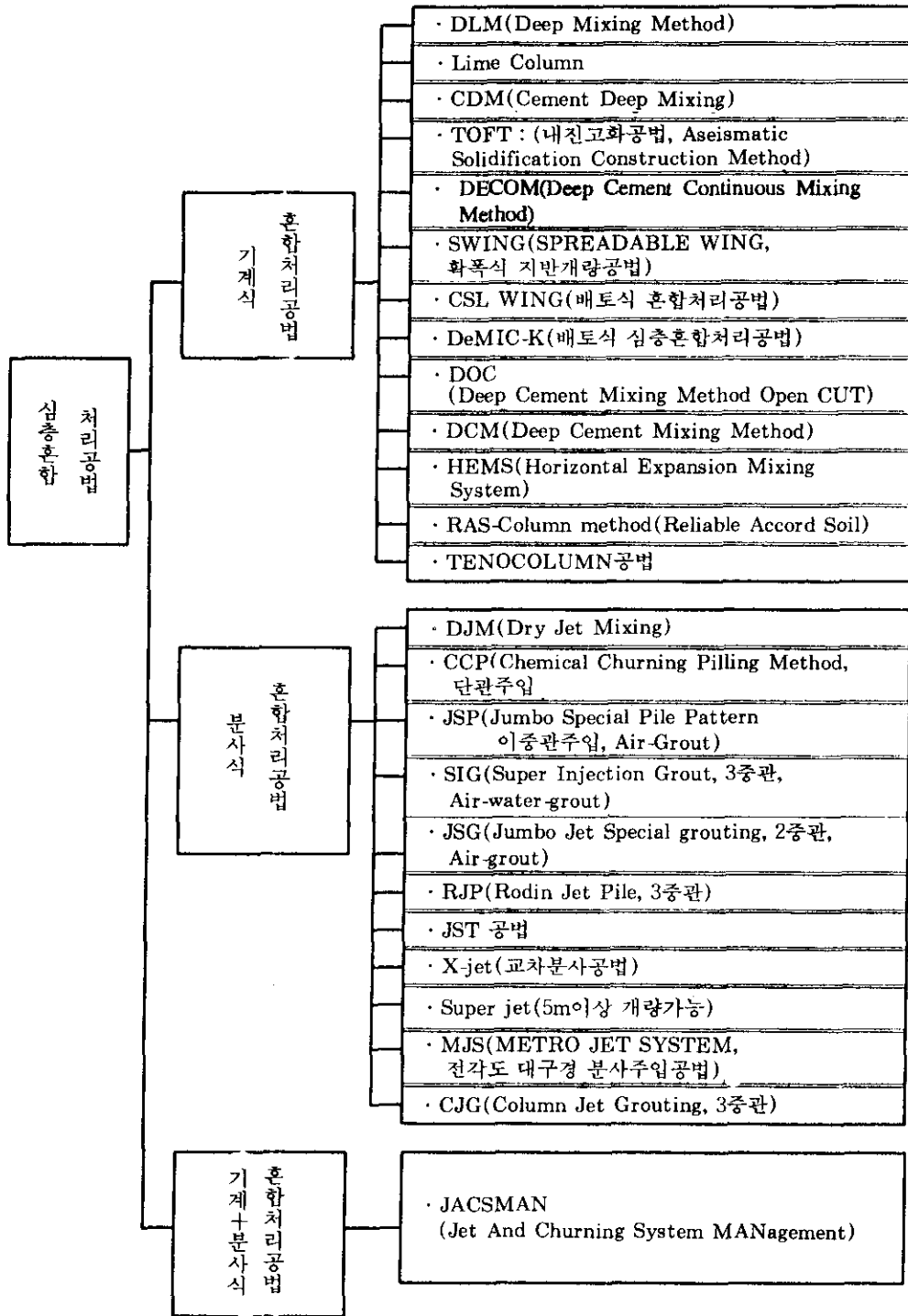


그림 19. 심층혼합처리공법의 분류

한편 기계적 혼합처리방식과 달리 약액주입 공법을 발전시킨 분사혼합처리방식은 고압의 시멘트 슬러리를 분사하면서 분사공을 회전하여 제트에 의한 흙과 안정재와의 혼합을 기대하는 공법이다.

현재 시공되고 있는 심층혼합처리공법의 종류는 다음 그림19와 같으며 본고에서는 주로 최신공법 위주로 소개하고자 한다.

### 1. 기계식 혼합처리방식

안정재로써 피상, 분말상, 또는 현탁액상의 것이 사용되어진다. 안정재의 공급방법은 피상의 생석회를 이용할 경우에 스크류 피터가, 분말상의 소석회와 시멘트를 이용할 경우에는 압축공기에 의한 공기압송이, 그리고 현탁액상의 시멘트 밀크와 모르터를 이용할 경우에는 저압의 펌프압송이 일반적이다. 어떠한 경우에도 심층에 이르기까지 안정재를 공급하는 것과 함께 복수의 프로펠러로 원위치의 흙을 기계적으로 교반해서 1사이클의 처리로 지중에 안정처리토의 본체를 형성한다. 지중에 연속한 안정처리토의 벽과 블록을 형성하는 경우에는 이 기둥체를 오버랩시켜서 형성하는 것이 일반적이다. 기계적 혼합처리방식의 경우에는 주로 개량대상은 연약한 점성토 지반으로 안정재의 양은 안정재와 대상토의 건조중량비에서 10~20%정도, 체적 혼합비에서 30%정도 이하일 경우가 일반적이고, 지반과 혼합처리하여 안정처리토 기둥을 형성한다.<sup>(1)</sup>

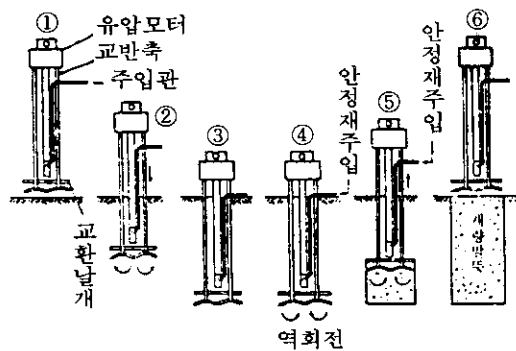


그림 20. 기계식 혼합처리방식에 의한 심층 혼합처리공법

대표적인 기계적 혼합처리방식인 CDM 공법은 화학적 고결기술로서 시멘트 슬러리를 연약지반에 삽입하고 혼합하여서 지반내에 더 강한 고결체를 생성하는 공법으로서 본 공법의 특징은 다음과 같다.<sup>(4,5)</sup>

- ① 소요강도는 개량대상지반에 적절한 시멘트 혼합비를 정함으로서 손쉽게 얻을 수 있다.
  - ② 소요강도를 얻기위하여 첨가제를 사용하여 공기를 충분히 앞당길 수 있다.
  - ③ 개량지반의 강도가 압밀에 의한 지반의 침하를 방지한다.
  - ④ 현장의 연약지반의 고결화는 염수에 의한 오염이나 2차오염을 예방한다. 뿐만 아니라 저진동, 저소음 공법으로 주변 구조물에 영향을 크게 미치지 않는다.
  - ⑤ 기계자체의 파워가 커서 상대적으로 단단한 층에 관입시키기에 적절하다.
  - ⑥ 슬러리 투입에 대한 중앙집중 제어 시스템은 개량심도를 향상시키고 회전속도를 조절한다.
  - ⑦ 일반적인 공법에 비하여 막대한 양의 모래와 자갈없이 연약지반을 개량하기 때문에 자원을 효율적으로 이용할 수 있다.
  - ⑧ 전체 건설비용은 같은 강도를 얻을 수 있는 타공법에 비하여 저렴하다.
  - ⑨ 고화재를 슬러리화 하기 때문에 저함수비의 토질이라도 물·시멘트비를 조정함으로써 시공이 가능하고 또 시공기계가 다축이기 때문에 교반효율이 좋아 개량강도의 산포가 적은 개량토를 조성할 수 있다.
- 본 공법의 용도는 다음 그림 21과 같다.

CDM공법이외의 다른 기계적 혼합처리방식에 의한 심층혼합처리공법의 특징은 다음과 같다.

- DLM(Deep Mixing Method) : 시멘트, 생석회, 소석회의 분말을 사용한 교반공법
- Lime Column : 석회분말을 사용하여 지반내에 석회기둥을 형성하는 공법
- TOFT(내진고화공법, Aseismic Solidi-

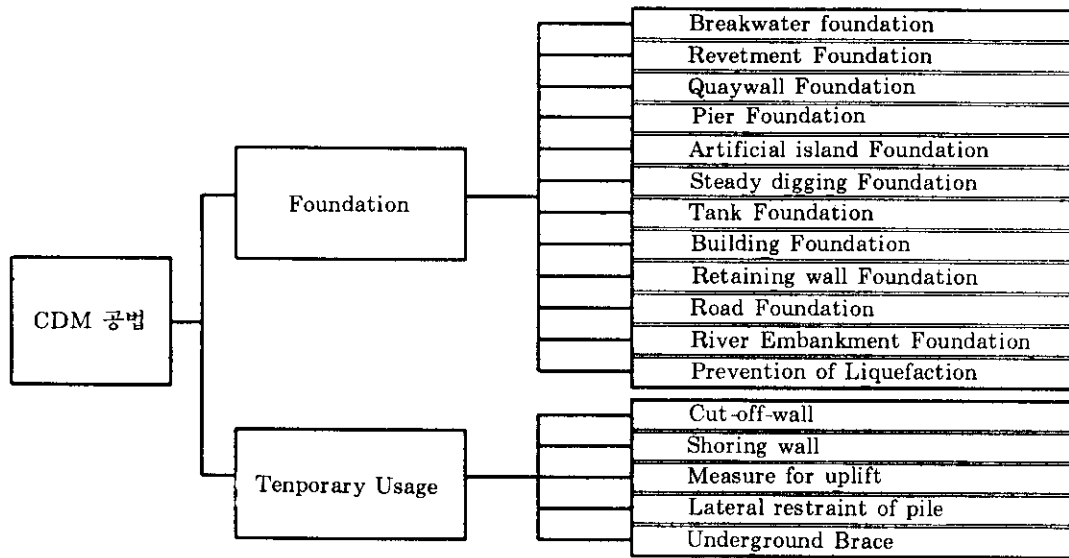


그림 21. CDM공법의 용도

fication Construction Method) : 액상화 방지를 위한 혼합교반공법

- DECOM(Deep Cement Continuous Mixing Method) : DECOM은 연약지반을 경화지반으로 바꾸는 공법으로서 시멘트 화합물을 슬러리상태로 연약지반에 주입하여 새로운 고결체를 형성하는 공법
- SWING(SPREADABLE WING, 확폭식 지반개량공법) : SWING공법은 기계식 교반공법으로서 개량범위를 넓힐 수 있으며 날개끝의 노즐을 통한 분사에 의해서 더 큰 개량반경을 얻을 수 있다.
- CSL WING(배토식 혼합처리공법) : 시멘트 밀크를 지반내에 강제적으로 주입하여 특수교반날개를 사용하여 강제로 교반·혼합시키는 공법
- DeMIC-K(배토식 심층혼합처리공법) : 배토식 시멘트계 심층혼합처리공법
- DOC(Deep Cement Mixing Method OPEN CUT) : DOC공법은 DCM공법을 항만구조물에 적용하기 위한 목적으로 개발되었음

- DCM(Deep Cement Mixing Method) : 시멘트 슬러리를 주입하여 연압정도의 강도를 갖도록 연약지반을 개량하는 공법
- HEMS(Horizontal Expansion Mixing System) : 소구경의 특수 2중관 날개를 통하여 수평방향으로 굴착하여 지반내에 직경 800mm의 원주를 형성하는 공법(시멘트계 고화제 사용)
- RAS-Column method(Reliable Accord Soil) : 슬러리 상태의 시멘트계고화제를 사용. 외관과 내관의 회전방향을 반대로 하여 지반을 강제적으로 진단하여 균질한 고화제를 형성한다.
- TENOCOLUMN공법 : "TENOBLE"라는 프로펠러 내부의 기둥의 회전을 방지하는 날개를 사용하여 균질한 혼합토를 얻을 수 있는 Cement Deep Mixing에 의한 기초보강과일공법

## 2. 분사식혼합처리방식

본 방식은 일반적으로 현탁액상의 안정재를 주로 사용하며, 보통 200kg/cm<sup>2</sup>진후의 고압에서 펌프압송된다. 약액 주입공법을 배경으로

발전해 온 공법이기 때문에 안정재의 종류는 시멘트 그라우트, 시멘트에 몰유리계 주입재를 가한 것이 주이지만 많은 종류의 주입재 사용이 시도되고 있다. 혼합방식도 많지만 기본적으로는 고압의 분사에너지로 특수노즐에서 안정재를 분사하고, 주변지반을 굴착교란해서 안정재와 원위치 흙의 혼합을 기대하는 것이다. 지수를 목적으로 노즐에 방향성을 갖추어 벽상의 안정처리토를 형성하는 것과 노즐을 천천히 회전시키면서 끌어 올려 원주상의 안정처리토를 형성하는 것도 가능하고, 고압의 안정재 분사에 압축공기를 병용해서 대구경의 개량을 목적으로 하는 방법도 있다. 분사혼합처리방식의 심층혼합처리공법의 개량대상은 사질토 또는 점성토이다.

자갈층을 대상으로 하는 경우에는 침투주입한다. 기계적 혼합처리방식에 비해서 안정재의 사용량이 많고, 시공조건에 의해 형성된 안정처리토의 체적이 40%이상, 극단적인 경우에는 100%를 넘는 안정재의 토출이 생긴다. 즉, 안정재의 유실에 의한 손실과 부분적으로는 혼합처리 보다 치환에 가깝게 되는 경우를 생각할 수 있다. 또한 안정처리토 기둥체의 단면을 보면 중심부는 안정재가 주이고 그 주변에 혼합처리토가 존재하고, 흙의 종류에 따라 더욱 그 외주에 토립자의 압축된 부분과 안정재가 침투하여 고화된 부분이 확인된 것도 있어 안정처리토의 평가에는 주의할 필요가 있다. 다량의 안정재를 압입하기 때문에 지반의 용기와 페니

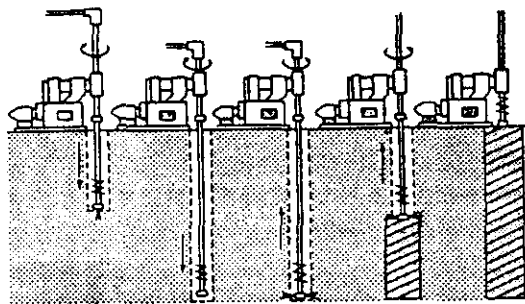


그림 22. 분사혼합방식에 의한 심층혼합처리공법

수의 처리에 대해서도 유의해야 한다. 그러나 기계적 혼합처리방식에 비해서 설비가 소형이고, 종횡경사와 시공이 가능한 것은 큰 장점이 다. 대표적 시공방법을 그림 22에 제시하였다.<sup>(1)</sup>

기존의 Lime Column공법을 개량하여 대형화 하고 주로 시멘트 분말을 사용하는 것이 DJM(Dry Jet Mixing)공법으로서 1980년 부터 실용화 되고 있으며 현재 일본에서 혼합처리공법의 주류를 형성하고 있다.<sup>(4)</sup>

그림 19에서 제시한 여러 종류의 분사혼합방식에 의한 심층혼합처리공법의 특징은 다음과 같다.

- DJM(Dry Jet Mixing) : 주로 시멘트 분말을 사용하나 경우에 따라 석회도 사용하는 분사교반공법
- CCP(Chemical Churning Pile Method, 단관주입) : 시멘트 그라우트 사용
- JSP(Jumbo Special Pile Patern, 이중관주입, Air-Grout) : 시멘트 그라우트 사용
- SIG(Super Injection Grout, 3중관, Air-Water-Grout) : 시멘트 그라우트를 사용하는 고압분사주입공법
- JSG(Jumbo Jet Special Grouting, 2중관, Air-Grout) : 시멘트 그라우트 사용, Jet Grout 공법의 일종
- RJP(Rodin Jet Pile, 3중관) : 분사교반공법으로서 3중관을 사용하여 공기와 물을 지반에 고압으로 분출하여 지반을 절삭하여 개량체를 형성하는 공법.
- JST 공법 : Augering method의 장점을 사용한 지반개량공법으로서 기계의 힘으로 지반과 고화재를 혼합하여 실린더 형태로 지반을 교반-압밀시키는 공법이다.
- X-jet(교차분사공법) : 교차분사를 사용하여 지반을 개량
- Super jet : 직경 5m이상의 큰 고결체를 형성가능
- MJS(METRO JET SYSTEM, 전각도 대구경 분사주입공법) : 20m이상의 심도에서 시공가능하며 수평, 경사, 상향시공이

가능하며 고결체의 직경은 지반 조건에 따라 최대 4000mm까지 가능하며 수중에서 주변을 오염시키지 않고 시공가능

· CJG(Column Jet Grouting, 3중관) : Jet Grout 공법의 일종

(3) 혼합처리토의 공학적 특성에 영향을 미치는 요인

안정처리의 효과에 영향을 미치는 요인은 다음 그림 23과 같다.<sup>(4)</sup>

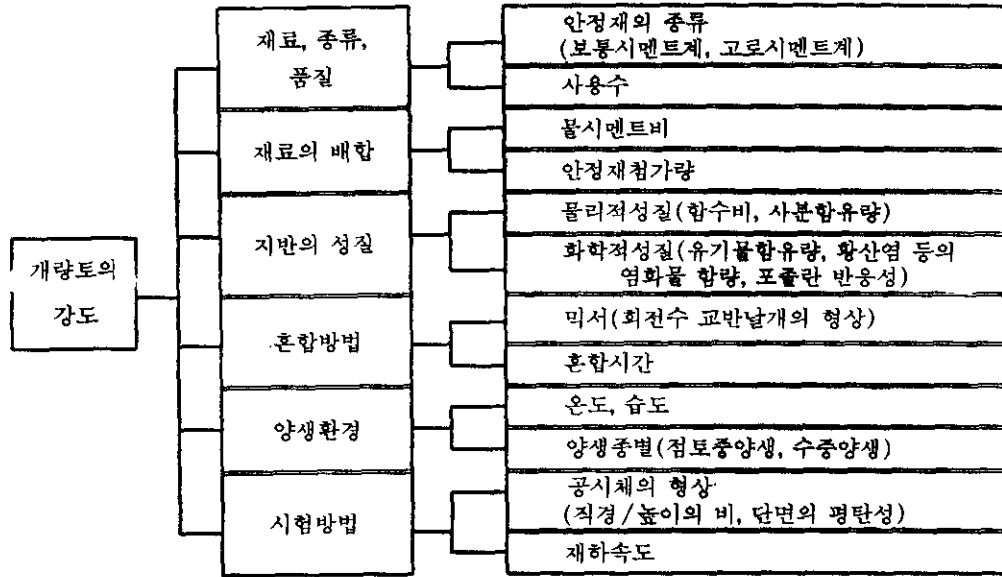


그림 23. 개량토의 강도에 영향을 미치는 주요 요인

석회·시멘트 안정처리토의 공학적 특성은 안정재의 첨가량과 재령에 의해 변하기 때문에 일축압축강도를 파라미터로 하여 논의하는 것이 편리하며 석회안정 처리토의 경우는 단기재령에서는 안정재의 증가가 반드시 강도증가를 가져오는 것은 아니다. 시멘트 안정처리토의 경우에는 일반적으로 안정재의 첨가량을 증가한 만큼, 그리고 재령이 길수록 강도는 증가한다.

심층혼합처리공법은 일반적으로 10kg/cm<sup>2</sup>을 넘는 높은 강도를 기대하지만 높은 강도의 안정처리토의 파괴변형은 매우 작은 것이 특징이다.<sup>(1, 2, 3)</sup>

또한, 일반적으로 유기물 함량이 높고, 황산염, 염소이온 등 시멘트 강도열화의 원인인 염류가 다량으로 함유되어 있는 해성점토층에서

의 심층혼합처리공법의 적용시에는 안정재의 선택에 있어서 화학저항성, 내구성, 강도발현성 등이 우수한 안정재(예, 고로슬래그 시멘트 등) 또는 적절한 제2첨가제를 사용함이 안정처리토의 강도면에서 바람직하다.<sup>(7)</sup>

(4) 개량패턴의 종류

심층혼합처리공법의 설계시에는 구조물의 중요성, 외력조건, 지반조건 등을 고려해 개량패턴을 결정한다. 현재 적용되는 패턴들을 그림 24에 제시하였다. 블록식 개량패턴은 상부 구조물의 아래에 연속한 안정처리토의 덩어리를 형성하는 것으로, 원위치 흙을 이용한 치환에 가까운 것이다. 안정처리토의 강도에 여유가 있기 때문에 개량토량의 경제적 이용을 위해 연구된 것이 벽식과 격자식 개량이다. 개량

단면이 복잡하게 된 만큼 설계에서 가정된 단면을 정확히 시공하기 위한 시공관리가 중요하다. 파일식의 개량패턴은 지반중에 다수의 안

정처리토체를 형성하는 것으로 경량구조물의 침하방지와 가시선품물 설치에 많이 사용되는 패턴이다.<sup>(1,2)</sup>

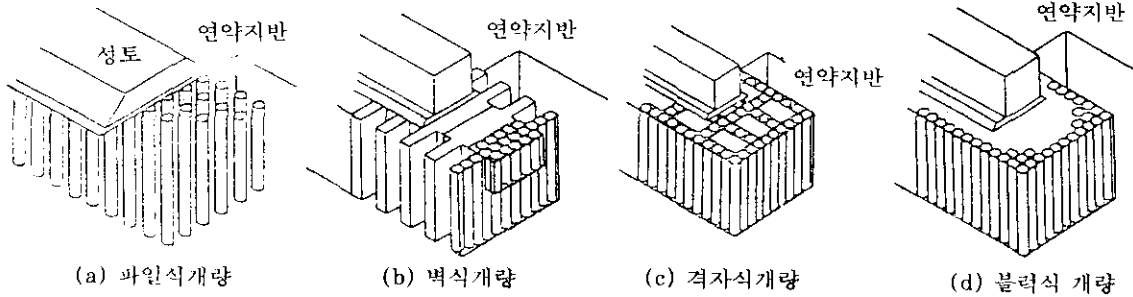


그림 24. 심층혼합처리공법의 개량패턴에 의한 분류

(5) 조사<sup>(1)</sup>

심층혼합처리공법의 조사는 설계조건을 설정의 위한 사전조사와 시공중의 환경과 관련된 조사, 시공후의 개량체의 품질을 확인하기 위한 사후조사의 3가지로 나뉘어진다. 다음 그림 25는 각 단계 별 조사의 흐름을 나타내었다.

토질조사는 원지반의 성층상태, 물리적 성질, 역학적 성질을 구하기 위한 보링, 샘플링, 물리시험, 실내역학시험에 더하여, 흙의 pH와

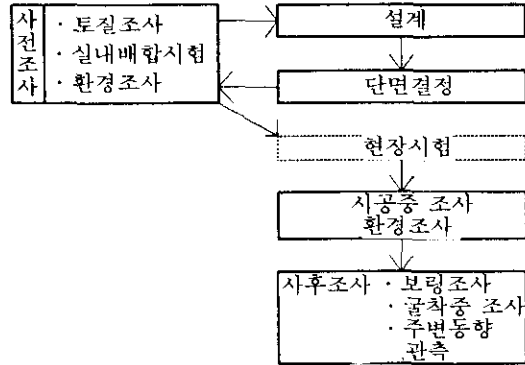


그림 25. 단계별 조사의 흐름도

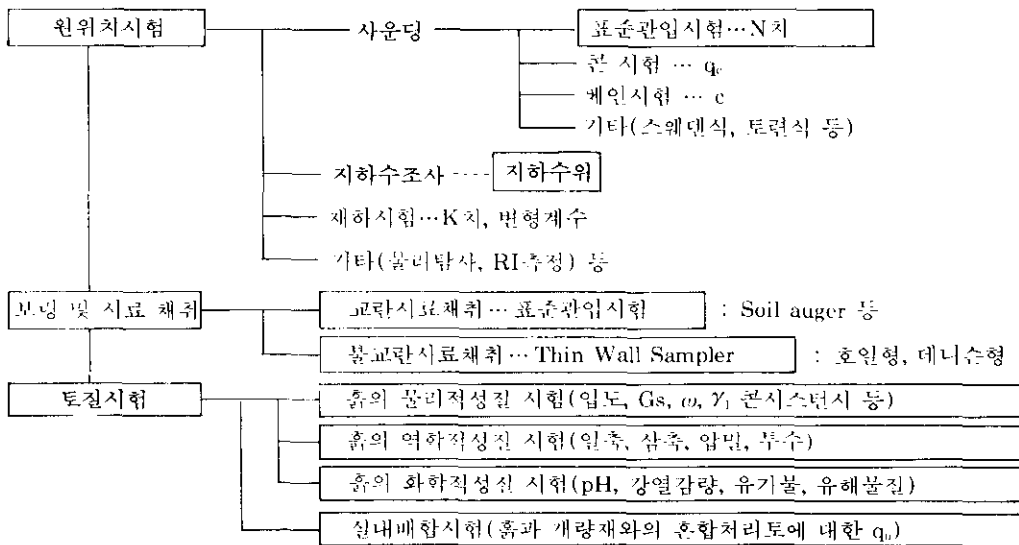


그림 26. 심층혼합처리공법에 필요한 토질조사 일람   은 특히 필수항목

유기물 함유량 등의 화학시험도 실시하여야 한다(그림 26 참조). 한편, 통일된 실내배합시험 방법, 양생방법을 통한 실내시험결과를 토대로 실제 현장에서의 개량효과정도를 예측하여 시공시 배합비율을 결정할 수 있다. 석회, 시멘트 계 안정제에 의한 개량효과를 확인하기 위해서는 대상지층별로 각 층에서 시료를 채취하여 개량효과를 확인한다.<sup>(6)</sup>

(6) 설계 및 시공

① 블록식, 벽식 또는 격자식의 개량지반

블록식, 벽식 또는 격자식의 개량지반에서는 강성이 큰 구조물이 지중에 형성되는 개념으로

설계되고 있다. 즉, 외력 아래에 “지중구조물”이 활동, 전도 또는 전체로서 원호활동 등에 의해서 안정성을 확인하고, “지중구조물”에 발생하는 응력이 허용응력도를 넘지 않는 것을 확인한다. 블록식 개량을 예를 들어 설계계산의 과정은 그림 27, 안정처리토에 작용하는 외력은 그림 28과 같다. 항만구조물에서는 항상 波壓시, 지진시에 대하여 법선직각방향과 법선방향에 대한 검토를 실시하고 있다. 더구나 벽식 개량지반의 경우 벽간의 미처리토가 앞쪽과 뒤쪽의 토압의 차에 의해서 밀려나올 가능성을 검토한다.<sup>(1, 2)</sup>

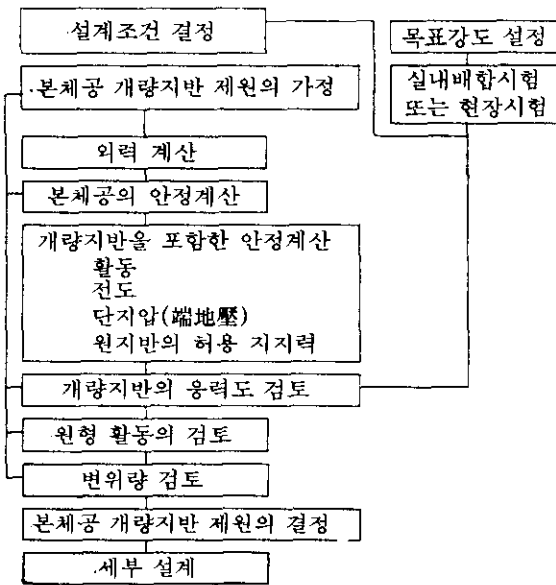


그림 27. 블록식 개량의 설계순서

② 파일식 개량지반

파일식 개량지반의 검토사항은 개량범위를 하나의 강체로 간주해서 그 안정을 검토하거나, 또는 안정처리토의 기둥체를 저항도의 말뚝으로 간주해서 검토하지만 큰 수평외력이 작

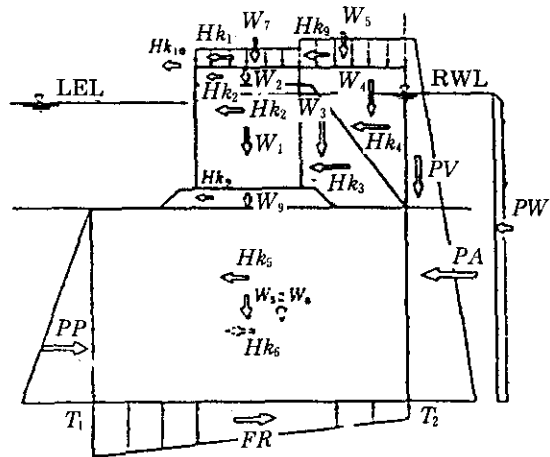


그림 28. 블록식 개량지반에 작용하는 설계외력의 개념도

용할 경우와 토압의 산정에는 불명확한 점이 많다.

다음 그림 29는 DJM공법의 파일식 개량의 설계순서를 나타낸 것이다.<sup>(6)</sup>



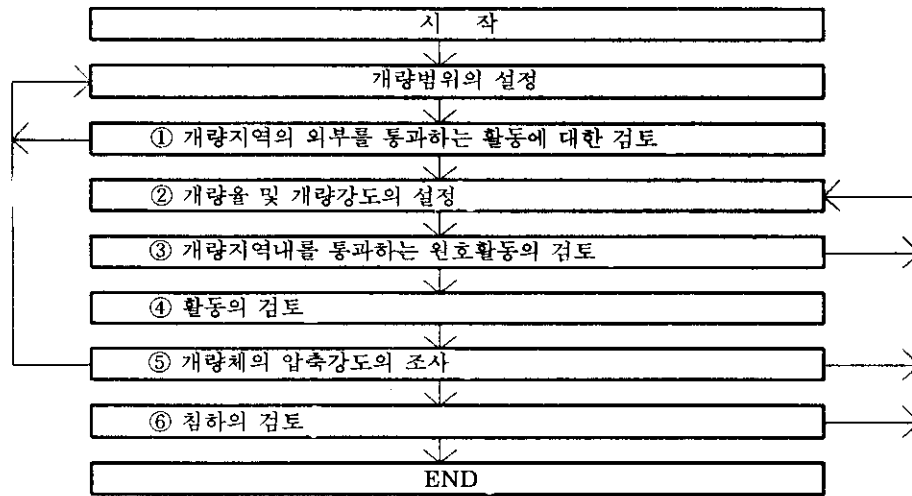


그림 29. 설계순서(파일식 개량, DJM 공법의 경우)

### ③ 시공계획 및 시공관리

시공계획에 필요한 조사, 또는 검토사항을 열거하면, 현장의 토질조건, 기상·해상조건, 현장에 대한 자료조사(물, 소요동력, 처리기계의 능력), 전체공정과 지반개량공정의 조정, 설계조건을 만족시키기 위한 시공방법(처리간격, 처리심도)등이다. 특히 유의할 점은, 설계에서 가정했던 품질과 단면의 안정처리토를 현장조건에서 충실히 시공하는 방법으로, 현장시험 등에 의한 확인이 바람직하다. 또 생석회에 의한 심층혼합처리에서는 지반의 용기를 고려할 필요는 없지만, 시멘트계의 안정재를 현탁액으로서 이용할 경우에는 투입량의 대부분이 지표에 용기된다고 생각하여야 한다. 용기된 흙을 지반재료로 사용할 것인가, 굴착처분할 것인가를 사전에 검토할 필요가 있다.

시공관리에서는, 안정재의 품질관리, 안정재의 투입량, 혼합정도의 관리, 지중에 형성된 안정처리토의 형성을 평가하기 위한 측정이 중요하다. 구체적인 측정항목은 기종마다 철저한 검토를 요한다. 개량 후에는 소요강도, 소요단면이 확보되어 있는지 더블코아튜브에 의해서 연직보링, 경사보링 등을 실시해서 확인할 필요가 있다.<sup>(1, 2)</sup>

### 2) 전기화학적공법

#### (1) 개요

전기화학적 공법은 전기삼투현상을 그 원리로 하는 공법이다. 전기삼투 현상은 러시아의 Reuss(1809)에 의하여 처음으로 발견되었다. 그 후 전기삼투 Mechanism은 Wiedemann(1852)과 Quincke(1861)에 의해 규명되었다. 그 이후 계속해서 Helmholtz(1879), L. Casagrande(1951), Mitchell(1967), Esrig(1968), Banerjee(1980) 등의 여러학자에 의해 발전되어왔다.<sup>(8, 9)</sup> 한편 국내에서는 전기삼투에 대한 연구와 적용사례를 아직까지는 찾아보기 힘들고 최근 몇몇 연구기관에 의해 연구가 착수되고 있는 실정이다.

이 공법은 연약지반을 빠른 시간내에 압밀시켜 소정의 강도를 얻도록 하는데 그 목적이 있고, 수십년간 일본을 비롯한 세계 각지의 실트에서 점토질 실트, 예민한 점토에 이르기까지 절취사면과 굴착, 연약지반의 안정·배수를 위한 기술로서 많이 적용되어 왔다.

#### (2) 공법의 원리

전기화학적 고결공법은 크게 두가지 이론이 적용되는데 첫째는 전기침투<sup>(8, 10, 11)</sup>이다. 이 현

상은 토중에 매립된 전극을 직류전원에 접속하면 흠 속의 간극수는 양극(+)에서 음극(-)을 향하여 흐르는 것을 말한다. 전기 침투에 의해 흠 속의 간극수는 탈수되어 흠의 강도가 상승된다. 이 이론을 응용하여 철도선로나 도로의 노상보강 또는 사면안정 등에 활용하였다. 전기침투에 의해 연약한 점성토 등이 고결되는 것을 전기화학적 고결이라 한다.

둘째는 염기의 교환<sup>(11)</sup>이다. 광물질 점토의 간극수중에 포함된 이온은 전류에 의해 교환된다. 전기화학적 분해에 의해 콜로이드 물질의 간극에 금속염이 퇴적된다. 이와 같은 전기화학적 반응에 따라서도 흠의 경화가 생긴다.

전기화학적 공법은 다음과 같은 종류가 있다.<sup>(11, 12, 13)</sup>

(i) 전기침투공법 :

전기침투에 의해 지반내의 간극수를 강제 탈수시키는 것이다. 즉 음극으로 Well point의 집수관을 양극에 소모가 적은 자성산화 철봉 등을 이용, 이들을 지반 내에 박아 넣어 양극간에 직류전류를 흐르게 하고 양극간의 흠의 탈수를 꾀한다. 이 공법은 하중을 필요로 하지않는 탈수공법으로 매우 연약한 지반의 개량에 적당하다. 또 전압을 높이면 투수계수가 작은 점토층의 압밀도 조기에 끝낼수가 있지만 이 경우에는 매우 다량의 전력소비를 동반한다.

(ii) 알루미늄 전해고결공법 :

전기침투공법에서 쓰는 양극을 알루미늄 등의 분해하기 쉬운 금속으로 해 놓으면 막대가 소모하여 양이온이 되고 음극을 향해 흐른다. 이와같이하여 분해된 알루미늄 이온은 흠 속에서 산화 알루미늄 등이 되어 고화하고 점성토의 간극에 정착하여 그 강도를 증가시킨다. 이 경우 강도증가는 양극 주변에서 특히 크기 때문에 말뚝모양의 고결에 의해 지반을 복합지반으로 할 수가 있다.

(iii) 전기약액주입공법 :

알루미늄 이온보다 더욱 강고한 화합물인 케 이산 나트륨 등을 양극부근에 주입하여 전기침투류에 흘러보내 흠을 경화시키는 방법이다. 이 방법은 투수계수가 매우 작은 연약점토층의 개량에 적당하다.

(3) 특징

전기삼투를 이용하는 주된 이유는 보통의 압밀공법으로 처리할 수 없는 투수성이 매우 낮은 초 연약지반을 짧은 시간안에 안정화 시키려는 목적으로 사용된다(그림 30참조)<sup>(10)</sup>. 이 공법은 배수공법으로 모래말뚝이나 페이퍼드 레인재를 연약지반에 타입하여 횡방향 변위로 모래말뚝이 끊어지고 드레인재가 굴곡되는 등의 영향으로 그 효능을 발휘 못하거나 배수 중

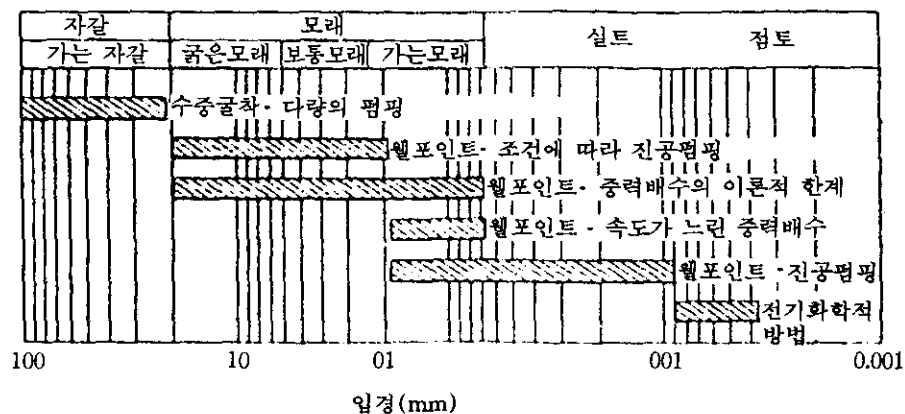


그림 30. 배수공법과 토립자크기의 관계

에 점토가 유입되어 배수성능이 저하되는 등의 단점이 있는 기존의 공법을 보완한 것으로 시공조건이 열악한 고함수비의 세립토 지반에 적합하고 압밀 배수공법 외에도 굴착, 말뚝의 향타·인발, 또는 원지반을 교란시키지 않고 지반을 개량할 수 있는 전기 화학적 주입 방법에도 활용할 수 있으며, 투수성이 매우 낮은 점성토지반의 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있는 방법으로도 쓰여질 수 있으므로 그 효과와 활용범위가 크다고 할 수 있다. 또한 함수량의 국부적 증가가 때때로 의도적으로 가설 sheet pile추출에 대한 저항력의 감소를 유발시킨다. 이런 경우에 pile은 전기삼투 과정에서 음극으

로 이용된다.

그러나 전기화학적 공법은 비용이나 전력소모가 큰 단점이 있고 모래질흙이나 불포화토에서는 효과적이지 못한 것으로 연구결과 밝혀져 있다.

#### (4) 시공사례 및 시공시 고려사항

전기화학적 공법의 이용에 있어서 가장 많이 사용되는 전기침투공법을 예를 들어 시공시 고려해야할 점을 들면 다음과 같다. 사면보호를 위한 전기침투공법의 전형적인 설치방법은 그림 31과 같다. 사면에서 물이 흘러 나가도록 굴착면에서 가장 가까운 곳에 양극을 설치한다.

표 6. 시공사례

위 치	처리목적	처리대상토	처리과정	결 과	비 고
Salsgitter, Germany (Casagrande, 1939)	철도노반 사면안정	사면이 Flow Slide를 일으키는 연약 점토사면	· 음극: 4" 강관, 30ft 간격, 22.5ft 길이로 사면 꼭대기에 설치 · 양극: 1.5" 가스파이프를 음극과 번갈아서 사면에 설치 · 전압: 180V	1~2일 후에 작업가능한 강도 (Power Shovel 진입 가능)	전극배치: (+)전극과 (-)전극은 평행하게 설치
Seattle, USA, (Dearstyn & Newman, 1963)	기존활주로에서 기초지반 처리	1.5m 길이의 연약 점토	15일 동안 4A에 6V/m을 사용	6Kpa에서 15Kpa까지 Su 증가	
As. Norway (Bjerrum et al, 1967)	굴착전 강도 증가	12m 두께의 예민 점토	전극: $\phi=19\text{mm}$ 철근 9.6m 길이, 2m 간격, 자체전극간격 0.6~0.65m, 4개월 동안 250A에 65V/m을 사용	2,700m <sup>3</sup> 흙의 만족한 처리 w=31%에서 17%로 감소 Su=9에서 38Kpa로 증가	1줄씩 번갈아 10줄 배치
Dighi, India (Sridharan, 1972)	말뚝 주변흙의 경화	직경150mm인 시험말뚝 주위의 연약점토	72시간 동안 8A에 90V/m 사용	만족	
Oslo, Norway. (A. Eggestad, 1983)	굴착시 지반 강도증가	함수비: 37% 액성한계: 26% 소성지수: 4~6% 예민비>60 해성 실트질점토	전극간 거리: 1~1.5m 전극: 20mm 철봉 80일 동안 180A, 5V/m 사용	전단강도가 2배 증가(8~30Kpa) 25cm 침하 발생	전극별 1일씩 교대로 설치

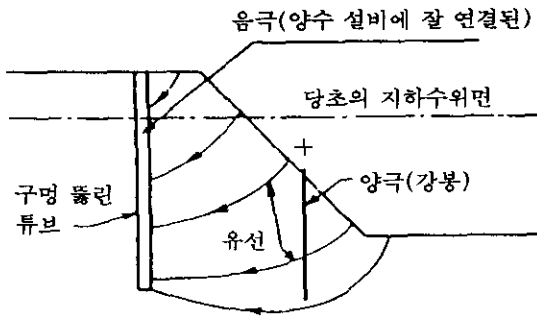


그림 31. 전기침투공법

그러면 효과적으로 사면을 안정시키고 연약한 실트 대수층에서도 급경사로 시공할 수 있다. 양극에 사용되는 봉은 부식되므로 계속 교체해야 하지만 음극에 사용되는 봉은 오랫동안 사용할 수 있다. 전기침투방법은 전쟁중인 독일에서 개발되었으며 세계 여러 지역에서 시공된 사례<sup>(8, 10)</sup>의 개략적인 내용을 표 6에 기술하였다.

현장에서 시공시 양극을 굴착영역에 가깝게 위치시키고 음극을 굴착영역에서 멀리 설치하는 것이 가장 효과적이다. 그 이유는 배수 방향이 굴착으로부터 바깥쪽으로 향하게 되어 굴착부분의 물을 굴착부분에서 먼 쪽으로 배수함으로써 굴착사면이 굴착지역으로 붕괴될 수 있는 위험을 제거해 준다.

전기침투공법은 특수장비와 기술 그리고 높은 전기소모 때문에 타 배수방법과 비교하면 비싼 편이다. 따라서 이 공법은 단지 다른공법을 적용할 수 없을 경우에만 이용된다.

### 3) 소결공법

#### (1) 개요

소결공법<sup>(14, 15, 16)</sup>이란 점토질 연약지반속에 보링구멍을 천공하고, 그속을 가열하여 주위의 흙을 소결하는데 따라 흙의 강도증가, 압축성의 감소 등 흙의 공학적 성질의 개량을 도모하는 것이다. 이 소결과정에서 흙의 물리적, 화학적 변화 및 흙의 역학적 변화는 복잡하다.

본 공법의 원리를 이용하여 실제로 지반개량

공법으로서 개발된 것은 극히 최근의 일이다. 이 공법의 개발은 우선 I.M. Litvinov(1963)을 중심으로 하는 소련의 기술자들에 의해 개발되었으며, 소련에서 현재 본 공법은 그 효과와 경제성에서 다른 공법에 비교될만 한 것으로 알려졌다. 특히, 일본에서는 일본의 국유철도에서 실용화가 진행되었으나 실시 예는 많지 않다.

#### (2) 공법의 원리

지반의 개량은 보링구멍을 통하여 실시하며 그 구멍은 수직, 수평, 경사등 상황에 따라 효과적인 굴착을 한다. 가열은 연료를 보링구멍 내에서 연소시켜 직접 가열하는 방법과 구멍밖에서 가열된 고온의 공기를 구멍내에 압입하여 지반을 가열하는 방법이 있다. 또 전자의 직접 가열 방식에도 루마니아에서 주로 시공한 자연 급기방식과 소련에서 실시한 강제급기방식이 있다.<sup>(15, 16)</sup>

자연급기방식이란 2개의 보링구멍 중 한 쪽에서 연료를 적하 또는 유하하여 연소시키고 다른 쪽 구멍을 배기구멍으로 이용하는 방법이며, 강제급기방식은 액체 또는 기체의 연료를 압축한 공기와 함께 밀폐한 보링구멍의 상단에 있는 노즐에서 분사연소시키는 방법이다.

#### (3) 공법의 특징

소결공법의 특징은 처리후 흙의 강도증가 압축성의 감소가 다른 지반개량공법에 비교하여 큰 반면, 그만큼의 에너지가 필요하여 경제적인 난점이 있다. 또 본 공법이 해외에서 성공을 거둔 예는 주로 불포화토의 경우이고, 지하수위가 높고, 대단히 연약한 경우의 지반개량에 대해서는 여러 가지 문제점이 남아 있다.

가열안정공법이 효과적으로 적용되는 예로서 다음과 같은 경우가 있다.

- ① 노상, 노반의 강화
- ② 절취사면의 안정
- ③ 지반활동의 방지
- ④ 건물, 장비, 굴뚝기초 등의 지지력의 증가, 침하방지

- ⑤ 부등침하를 받은 구조물의 회복
- ⑥ 언더피닝

4) 동결공법

(1) 개요

지반속의 간극수를 인공적으로 냉동시켜 지반을 고결하여 이 동결지반을 공사중의 일시적인 차수벽, 내력벽으로서 이용하는 것이 동결공법이다. 적용이 가능한 지반은 사력층, 연약토층, 피압수층 등을 포함하여 모든 토층이다. (15)

1862년에 영국의 South Wales에서 광산용 수직갱 건설을 위해 대수층의 붕괴방지에 세계에서 처음으로 동결공법이 이용되었다. 그 후 본 공법은 구라파에서 발달하여 왔으나 1930년대 모스크바 지하철 건설에 적용되어 좋은 결과를 얻은 이래 다방면으로 채용되게 되었다. 일본에서는 1962년 오사카에서의 하저횡단 수도관부설공사에 처음 이용되었다.

(2) 공법의 원리

그림 32에서 보는 바와 같이 동결 대상지반속에 매설한 동결관이라고 부르는 직경 10cm 전후의 강관 속에 빙점 이하의 저온액을 계속 공급하면 관의 표면에서부터 주변의 지반이 냉각되어 동심원형으로 동토가 성장한다. 그림 33에서 보는 바와 같이 적당한 간격으로 동결관을 매설해 놓으면 각각의 관을 중심으로 한 나이테 모양으로 동토의 기둥이 성장하여 인접한 동토의 기둥이 서로 합체되어 일련의 동토벽으로 된다. (16, 17)

굴착의 형상에 따라서 동결관을 지상 또는 수직갱 내부에서 매설함으로써 동토벽을 완성시킨다. 동토의 형상은 동결관만 매설할 수 있으면 원추형, 주판형, 말발굽형이나 그들의 복합형 등 공사내용에 따라서 자유롭게 형성시킬 수 있다.

동결공법에는 냉각재의 종류, 열교환의 형식 등에 따라 그림 34에 나타난 Gas방식(저온액화 Gas)과 브라인방식(염화칼슘이나 식염 등

의 수용액)이 있다. 두가지 방식 어느 것이 유리할지는 시공목적이나 현장의 사정에 따라 다르지만 일반적으로 시공연장이 짧을 때 Gas방식이 유리하다.

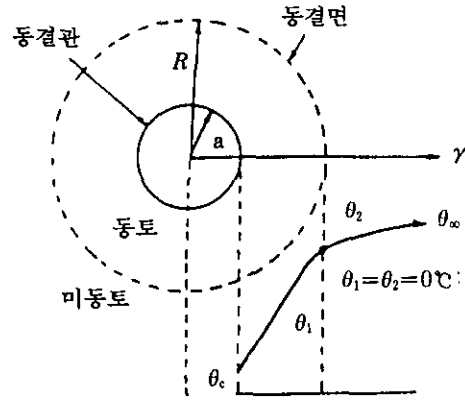


그림 32. 동결관 주위의 땅속온도 분포

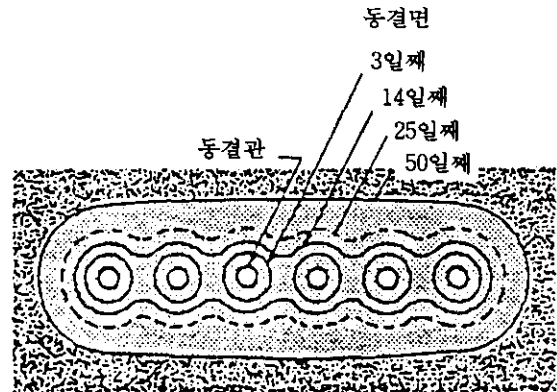


그림 33. 동토기둥의 성장에 따른 동토벽의 형성 (평면도)

	전동토형	원통형	상자형	문형
평면도				
단면도				

그림 34. 동토벽의 대표적 형상

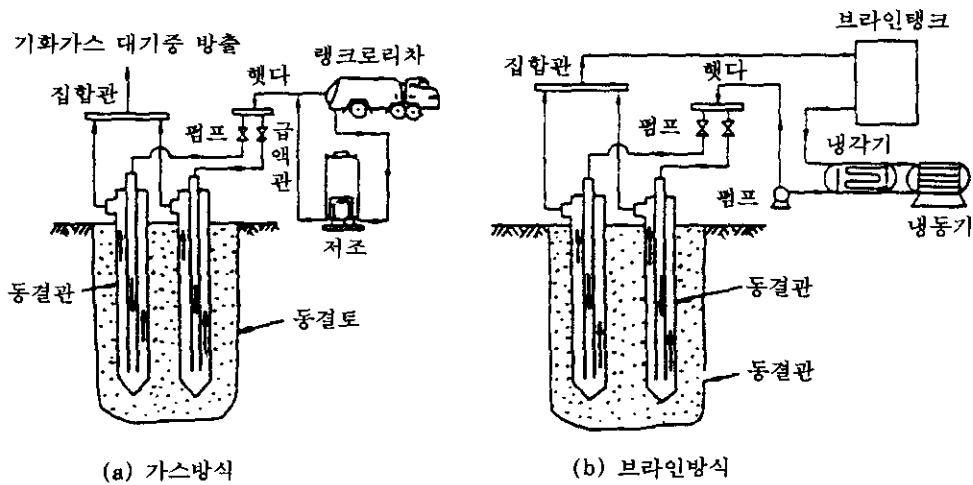


그림 35. 동결공법

(3) 특징

열에 의한 지반개량인 동결공법에는 다음과 같은 특징<sup>(11, 16, 17)</sup>이 있다. 이 공법의 장점은 동토의 역학적 강도가 커서 흙의 강도는 동결에 따라서 100배 가까이 증가되므로 토·수압에 대항하는 내력벽으로서 이용할 수 있다는 것이다. 또 강재나 콘크리트 등의 동착력(접착력)도 크므로 다른 부재와 연속된 차수벽, 내력벽으로서 이용할 수 있다. 그 밖의 이점으로서 열이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르고자 하는 성질을 이용하기 위하여 균질하지 못한 지반에서도 균일두께의 동토벽이 생긴다. 또한 지반을 굳히는 데에 열 이외에 약제 등을 쓰지 않으므로 공사중에는 물론 공사의 완료 후에도 지반의 오염이 없다는 것 등을 들 수 있다.

단점으로서 흙에 따라서는 동결될 때에 체적이 팽창하고 해동될 때에는 반대로 수축하여 근처의 기설구조물에 영향을 미치는 경우가 있다는 것이고 어떤 특징의 유속 이상(예, 브라인 방식으로 1~2 m/day의 한계유속)의 지하수류가 존재하는 경우에는 동토벽을 완성하기 위하여 유속의 완화대책(예, 약액주입 등)이 필요하게 되는 것 등을 들 수 있다. 지반의 열전도를 이용하기 위하여 필요한 동토벽을 조성하는 데에는 어느 기간이 필요하게 되는 것도

다른 공법과 비교할 때에는 결점으로 꼽을 수도 있다.

(4) 시공상 유의점<sup>(17, 18)</sup>

동결공법은 열현상을 근본원리로 하고 있기 때문에 전문적인 열관리자에 의한 이론, 기술 경험 등을 필요로 한다. 시공관리에서 중요한 것은 동토관리이며 동토관리는 성장관리를 확실하게 하기 위해서는 동결관과 측온관과의 위치관계를 매설할 때에 최심부·최상단부 까지 정확하게 파악해 두는 것이 중요하게 된다.

정점측온과 심도를 이동시켜서 측온에 따른 땅속온도계 측의 결과에서 동토의 성장상황을 파악한다. 또 이 측온결과에서 지하수류나 다른 열원으로부터의 영향의 유무도 체크한다. 유지관리도 땅속 온도의 변화가 감시주체가 되지만 중요한 것은 굴착동토면의 관리이다. 동토면이 직접, 또한 장기간 외기에 노출되는 것은 피하지 않으면 안된다. 또 굴착할 때의 동결관 파손에 의한 브라인 누설이나 동결영역 근처의 용수나 인공적인 배수로 인한 열의 교란 등에도 주의하지 않으면 안된다.

동토의 성장 및 유지관리의 기본이 되는 것은 냉동기의 운전관리이다. 운전중의 정기점검 외에 불의의 사태로서의 정전, 단수 또는 동결

관의 절손 등에 대비한 처치방법을 확립해두지 않으면 안된다. 브라인의 유량 및 온도의 정확한 측정관리도 중요하다.

### 5.3.7. 차수공법

#### 1) 약액주입공법

##### (1) 주입공법의 필요성<sup>(19)</sup>

최근 도심지 지하철 건설공사나 해안에 인접한 연약지반 개량공사는 물론 건물의 고층화 경향에 따른 대규모 지하굴착이 이루어지고 있는 바, 이러한 공사도중 터널 붕락, 주변지반 및 인접건물의 부동침하, 균열 등 건설현장에서 대규모 안전사고가 빈발하여 사회문제화되고 있다. 이러한 안전사고에 대비하여 각국에서는 여러 가지 새로운 지반주입공법(예, 내구성이 강한 Silicasol 약액, CO<sub>2</sub> 개스공법, 우레탄공법)이 널리 쓰여지고 있다.

현재 국내 건설현장에서 쓰여지고 있는 주입공법으로는 물유리계 약액(LW, SGR), 우레탄 등이 단독 또는 병행되어 쓰이고 있다. 그러나 선진국에서는 이보다 훨씬 개선, 발전된 공법, 즉 氣·液반응약액인 Carbo Rock, 내구성이 우수한 실리카졸계의 Clean Rock(2중관 순결주입공법), Silicasol, Silica Lizer, Hard Lizer, 항구성 약액인 Perma Rock, 이중관로트드 복합주입공법인 Unipack공법, 이중관로트드 순결공법인 LAG·MT·DDS공법, 2중관 더블잭커공법인 Sleeve공법 그리고, 시멘트 계통의 ACTISOL, MICROSOL, ECOSOL-PET-RISOL 등 여러 가지 주입공법이 많이 이용되고 난공사구간에는 주입공법과 병행하여 인공동결공법이 쓰여지고 있는 실정이다.

기울어진 건물의 원상복구를 위한 몰탈 또는 콘크리트(slump치 0)를 주재료로 한 주입공법이 있다. 비유동성 재료를 다수의 주입구로 주입시키는 소위 Compaction Grouting공법이 바로 그것인데 미국에서 실용화되고 일본에서도 부동침하한 건물의 원상복구 실적만도 10여 건에 이른다. 국내에서는 최근 포항지방 초연

약지반상의 기울어져 철거단계에 있는 5층 Apt. 건물을 원상복구하여 사용한 시공사례가 있다.<sup>(19)</sup>

제한된 공간, 복잡한 지하매설물등 여러 가지 악조건하에서 성공리에 지하 굴착공사를 수행하기 위해서는 여러 가지 지반주입공법 중에서 공사규모나 중대성, 공사비용, 공사기간, 토질조건, 현장시공여건 등을 감안하여 적합한 공법을 채택하고 채택된 공법의 정확한 적용 방법을 알아야 한다.

##### (2) 주입공법의 역할<sup>(19)</sup>

약액주입이란 지반내에 주입관을 삽입, 이것을 통하여 화학약액(Chemical Grout 또는 주입재라고도 함)을 지중에 압송, 충전시켜 일정한 시간(Gel-time 또는 Setting-time이라고도 함)을 경과시키면 지반이 고결되는 것으로서, 지반의 불투수화(차수, 지수) 또는 지반강도증대를 그 목적으로 한다. 현행 일반화된 약액으로는 물유리 약액이 대부분으로서 차수 목적의 경우는 물유리만, 지반강도증대 목적의 경우는 시멘트를 병행하여 사용된다. 한편 댐 그라우팅, 터널이입 그라우팅 등에 적용되어온 시멘트 그라우팅이란 시멘트 현탁액을 펌프로 압송하여 지반내에 고결시키는 것을 말하며, 이때 시멘트와 물은 수화반응을 일으켜 Sol로부터 Gel로 되는 데 이 때 원하는 시간은 온도에 따라 다르나 대략 몇 시간의 단위이며, 연속적으로 압송할 경우는 주입가능한 공극이 막히지만 않는다면 시멘트 그라우트의 세트되는 장소도 무한히 멀어지게 된다.

이와 같이 주입공법은 직접적인 차수공 또는 지반개량공으로서, 비교적 간편하게 소규모로도 실시할 수 있고 소음, 진동, 교통난 등의 공해가 적으며, 더욱 공기가 짧고 타공법으로는 달성 불가능한 것도 시공할 수 있는 특징을 갖고 있다.

본 공법은 흙막이공의 바닥의 Heaving방지, 도심지 근접시공에 있어서는 지반굴착시 인접 건물의 Underpinning, 토류벽의 토압감소, 그리고 마찰말뚝·선단지지말뚝·Pier기초의 지

지력 보강과 댐기초의 지수, Shield터널 굴진, 대단위 지하철 건설공사에서는 터널 굴진시 지반붕락 방지 등에 있어서 광범위하게 적용되고 있으며, 지반진동을 경감하기 위한 대책으로서도 쓰이고 있어 최근에는 점차 본격적·항구적 지반개량공법으로 되어가고 있다.

(3) 약액의 종류 및 특성<sup>(19)</sup>

약액은 광의의 약액과 협의의 약액으로 나누어 볼 수 있다. 즉, 그림 36과 같이 전자는 현탁액형의 비약액계와 약액계를 말하며, 후자는 약액계를 뜻한다.

비약액계의 가장 대표적인 시멘트는 강도나 경제적인 면에서 보아 가장 일반적이긴 하지만 조립토 이외에는 주입되지 않으며 경화하기 가

지엔 많은 시간이 요구되어 긴급을 요하는 용수, 누수 등의 지하수처리나 유수중에서의 주입효과는 기대할 수 없게 된다. 더욱 입자로 되어 있어서 암반의 균열이 협소하거나 연장거리가 멀 경우는 그 주입효과는 기대 할 수 없다. 벤토나이트, 아스팔트는 주입에 의한 강도는 기대할 수 없고 다만 차수목적으로만 쓰인다. 일반적으로 물유리계, 고분자계의 약액은 점성이 낮고 입자가 없어서 시멘트로는 기대할 수 없는 협소한 균열 깊숙히 까지 주입충전 될 수 있으며 시멘트와의 병용으로 부족한 강도를 증대시킬 수도 있다. 그러나 현재 고분자계 약액은 주입으로 인한 공해문제로 특수한 목적외에는 거의 쓰이지 않고 있으며 대부분 물유리계만이 쓰이고 있다.

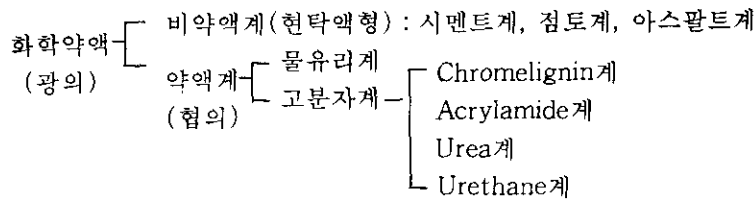


그림 36. 화학약액의 분류

물유리계 약액은 어느 약액 보다는 많이 쓰이는 약액으로서 차수효과가 크고 공해의 우려가 적고 경제적이다. 점성은 2~3cps이며 다른 주입재에 비해 비교적 낮아 침투성은 양호하나 약액주입으로 얻어진 고결토의 강도가 만족스럽지 못하다는 결점이 있다. 그러나 제한된 범위내에서는 시멘트 또는 Micro Cement와의 병용으로 강도증대효과를 얻고 있고, 그 필요성에 의해 물유리계 약액 자체에 많은 개량이 이루어져 고분자 주입재와 같은 성능이 우수한 주입재가 개발되고 있다. 물유리계 약액의 종류와 특징을 세분화 하면 표 8과 같다.

(4) 최근의 동향

본 공법의 필요성이 급증하고 있는 것은 세계적 추세이나 아직 미해결의 중대한 문제점을 안고 있는 바 지반개량의 확실성(약액의 정화

한 주입범위, 주입고결토의 강도증대효과), 주입효과 판정법, 주입재의 내구성 및 환경공해 문제 등이 바로 그것이다. 자연지반토는 매우 불균질하기 때문에 설계시 주입범위를 정한다 하더라도 실제 목적인 범위에 충분히 주입되지 않은 경우가 허다하다. 방지 대책으로서 주입 방법 또는 시공에 자체제어 System을 도입하는 등 많은 노력이 계속되어 실용화 되고 있으나 아직도 많은 문제점을 내포하고 있다.

모래지반의 밀도가 매우 큰 경우 약액을 주입하게 되면 배수상태에서 비배수상태로 되므로 공극수압이 높아져 모래의 마찰저항이 감소하게 되고 전단강도는 Gel 강도가 주체로 되기 때문에 약액주입에 의해 오히려 그 강도가 원래의 배수전단강도 보다 작게 될 경우도 있다.

물유리계 약액은 Syneresis현상 등으로 주입



표 8. 물유리계 약액의 종류와 특징

종류	主劑	반 응 제	반응제의 종류	특 성
현 탁 액 형	물유리	시멘트	시멘트	· Gel time과 강도는 시멘트량에 의해 결정된다. · 겔화시간은 일반적으로 1~2분이 적합하다. 단, 몇 초와 같은 순결성은 안된다.
	물유리	시멘트·슬래그	시멘트·슬래그	· 시멘트량을 증가시키지 않고 겔화시간을 절절히 유지하면서 높은 강도를 얻을 수 있다.
	물유리	슬래그·석회	슬래그·석회	· 순결에서 10분 정도의 겔화시간의 선정이 가능하고, 강도는 임의의 것이 얻어진다.
	물유리	석고	석고	· 순결의 겔화시간이 얻어지고, 몇시간에 최종강도가 된다.
알 카 리 용 액 형	물유리	산성반응제	인산( $H_2PO_4$ ), 탄산수소나트륨( $NaHCO_3$ ), 황산수소나트륨( $NaHSO_4$ ), 인산제1나트륨( $NaH_2PO_4$ ), 아황산수소나트륨( $NaHSO_3$ ) 등	· 이 반응제는 물유리와 급격히 반응한다. 따라서, 반응율이 낮고, 내구성이나 강도등의 성질이 떨어진다. 또한 겔화시간의 조정이 어렵다. 이 때문에 이 반응제와 다른 유기반응제, 금속염류와 병용할 경우가 많다. · 순결그라우트로서 사용될 경우에는 현탁형 그라우트와의 병용이 바람직하다.
	물유리	금속염반응제	염화칼슘( $CaCl_2$ ), 염화나트륨( $NaCl$ ), 황산마그네슘( $MgSO_4$ ), 황산알루미늄( $Al_2(SO_4)_3$ ), 염화마그네슘( $MgCl_2$ ) 등	· 이 반응제는 물유리와 반응해서 순결반응을 일으킬 성질이 있으며, 순결용으로 사용한다. · 순결그라우트로서 사용될 경우에는 현탁형 그라우트와 병용이 바람직하다.
	물유리	유기반응제	글리옥살( $(CHO)_2$ ), 에치렌 글리콜 디아세테이트( $C_2H_4(OCOCH_3)_2$ ), $\gamma$ (감마)-부틸락톤( $C_4H_8O_2$ ) 등, 트리아세틴( $CaH_{14}O_6$ )	· 이 반응제는 물유리의 알칼리하에서 가수분해를 일으켜, 서서히 산을 형성하여 물유리중의 알칼리를 소비하여 겔화한다. 이 반응은 서서히 행해지므로 겔화시간의 조정이 용이하다. 그러나, 이 반응제는 단독으로 사용되면 그 양이 많아져서, 단시간의 겔화시간이 얻어지지 않기 때문에 통상 산성반응제등과 조합해서 사용한다.
	물유리	알칼리계	알루미늄산 나트륨( $NaAl_2O_3$ )	· 용액형으로 유일한 알칼리제로 농도의 짙고묽음에 따라 겔화특성이 달라진다. 특히, 고농도인 경우에는 물에 희석되면 겔화시간이 빨라진다.
특 수 실 리 카 형	활성실리카			강도·내구성에 우수하며, 항구그라우트로서 사용될 수 있다.
	칼슘실리케이트졸			강도·내구성에 우수하며, 항구그라우트로서 사용될 수 있다. 호모겔강도가 극히 높다.
	초미립자실리카			침투성과 내구성이 우수하며, 장기강도의 증가가 현저하고 또한 거의 중성이므로 수질보전성이 뛰어나다. 항구성 그라우트로서 사용가능하다.
현 탁 액 형	실리카졸	시멘트	시멘트	· 물유리에 산을 더해서 알칼리산을 제외한 실리카졸을 사용한다. 실리카졸 농도나 반응제에 의해 순결에서 몇 분 까지 얻어진다. 또한, 용탈이 적고 안전성이 좋다.

비알카리성 용액형	물유리	산성용액	인산( $H_3PO_4$ ), 황산나트륨( $NaHSO_4$ ), 황산( $H_2SO_4$ )	·물유리에 직접 산성액제를 더한 중성영역에서 겔화시키는 것으로, 순결로 사용될 때가 많다.
	실리카졸	촉진제(염)	염기성염, 산성염, 불유리( $mNa_2O, nSiO_2$ ) 등	·물유리에 산을 더해서 알칼리를 제외한 실리카졸 농도나 반응제에 의해 순결에서 완료까지 조정이 가능하며, 실리카의 용탈이 적고 안전성이 좋다.
기·액반응계	용액형	탄산가스		·물유리의 알칼리로 탄산가스를 중화시킨다. ·순결, 완결도 가능 ·수질보존성이 우수하다.

완료후 그 효과는 시간이 흐를수록 상당히 떨어지게 된다. 그러나, 구조물 기초의 Underpinning이나 댐 기초의 Curtain Grout 등 약액의 내구성성이 요망되는 경우가 대부분이다. 종래 Curtain Grout재로는 시멘트가 주로 쓰여 왔으나, 최근엔 주입재의 개선으로 이에 대한 연구가 진행중이다. Bordon, 武産, 檜垣 등(7, 20, 21, 22)은 특히 고결토의 장기내구성 내지는 Homogel의 용탈현상 등의 연구에 주력하고 있고, 물유리계 약액보다는 시멘트계 약액이 내구성면에서 유리하며 산성 또는, 중성의 실리카 약액이 종래의 물유리계 약액보다는 내구성면에서 우수하다는 연구결과도 나온 바 있다.(22)

또한, 수중주입시 水中汚濁을 방지하기 위해 시멘트 대부분을 Slag로 치환하고 더욱 중성영역에서 고결화하는 물유리에 실리카졸을 가한 저알카리성 몰탈이 연구되고 있고, 주입범위, 주입효과를 확인할 목적으로 전기저항, 탄성파탐사, 중성자수분계,  $\gamma$ 선밀도계 등에 의한 주입효과판정에 대한 새로운 연구가 진행되고 있다.

더욱 최근에 국내외에서 도심지 지반굴착공사에 있어서는 진동 및 충격력의 차단대책의 일환으로 약액주입에 의한 지중벽의 진동저감 효과에 대한 연구도 진행중이다.

약액주입공법의 가장 큰 과제인 Hydraulic Fracturing에 관한 연구(23, 24, 25)는 Teton댐의 파괴 이후 세계적 관심이 되어 각국에서 앞을 다투어 연구되고 있다. Waseda대학에서는 투

수성지반과 불투수성지반의 수압파쇄에 대해 다년간 집중 연구를 하고 있다. 수직 Borehole의 경우 Crack발생에 필요한 압력은 B.Haimson의 응력해석과 M.K.Hubbert의 파쇄조건식을 조합하여 할렬발생시의 주입압과 지반조건을 적용함으로써 설명될 수 있다. 또한 Borehole주변의 응력분포는 두꺼운 Pipe의 직경과 여기에 작용하는 응력, Pipe재의 탄성특성에 의한 탄성론을 적용하여 해석될 수 있다.

국외의 경우 약액주입공법중 최근 많이 이용되는 여러 공법들에 대한 간략한 소개를 하면 다음과 같다.

이중관 룯드법으로 침투그라우팅의 일종인 Unipack공법은 1차로 순결의 그라우팅으로 맥상주입을 실시하고, 뒤이어 완결의 그라우팅을 실시하는 방식이다. 완결의 그라우팅을 실시할 때 이미 실시된 순결의 그라우팅시 조성된 맥상주입상태가 일종의 팩커와 같은 작용을 하게 하는 원리이다. 이와 같이 두가지 공정의 조합으로 인해 매우 간편하고 경제적이며, 최근 실리카졸계 또는, 물유리계와 함께 사용되어 약 2000여 곳의 건설현장에서 좋은 성과를 나타내었다.

CO<sub>2</sub> 개스공법(19)은 액화탄산가스와 물이 혼합되어 생성된 탄산수를 경화재로 이용하고, 주입재로는 NITTOX그라우트를 이용하는 공법이다. 이 두가지 물질이 주입관의 끝에서 결합하면 겔상태로 되어 규산과 탄산나트륨이 되는 원리이다. 경화재로 이용하는 탄산수의 경우는 마실수 있을 정도로 환경적인 측면에서도

안전한 것이 이 공법의 특징이다.

## 2) 지수널말뚝공법

### (1) 개요

지수널말뚝공법은 널말뚝을 서로 맞물려 연속하여 타입하여 영구적 또는 일시적 벽체를 만들어 횡방향의 외력에 저항시켜 토류벽의 역할은 물론 차수벽의 역할을 할 수 있게 하는 토류공법이다<sup>(26)</sup>

### (2) 지수널말뚝공법의 차수

#### ① 널말뚝의 차수성<sup>(27)</sup>

널말뚝의 연결부는 차수성 측면에서 보면 틈이 없이 시공된 상태가 가장 이상적이지만, 타입을 고려하여 다소의 여유틈이 있도록 제작되므로 이러한 연결부에서는 누수가 되지 않도록 해야한다.

연결부의 이음상태는 중립상태에 비해 압축, 인장상태가 누수량이 적은 것으로 나타났다. 또한 널말뚝은 자체로도 차수성이 상당히 양호하지만 타입후에 수중의 부유물과 토사가 틈을 메꿈으로써 차수성이 더욱 높아지게 된다. 그러나, 미리 널말뚝의 연결부에 지수재(止水材)를 사용하는 방법이 차수성을 높이는 데 바람직하다.

#### ② 차수성에 영향을 미치는 요인<sup>(27)</sup>

가. 널말뚝에 관한 요인

- ㉠ 널말뚝의 녹슨 정도
- ㉡ 널말뚝의 휨, 비틀림

나. 시공환경에 관한 요인

- ㉢ 수압
- ㉣ 수질 (흔탁한 정도)
- ㉤ 토질 (근입지반, 배면토사)
- ㉥ 널말뚝의 연결부내에 토사가 막힌 정도

다. 시공에 관한 요인

- ㉦ 널말뚝의 이음상태
- ㉧ 널말뚝의 경사, 회전

#### ③ 차수성의 향상을 위한 지수재

- ㉨ 케미가드<sup>(28)</sup>

특수폴리우레탄을 주성분으로한 흡수팽윤성의 강널말뚝용지수재이다. 물의 종류에 따라 팽윤배율이 일정하며, 수중에서 약10배의 물을 흡수팽윤해서 지수효과가 우수하다.

#### ㉩ 파일 겹(Pile Gum)<sup>(27)</sup>

아스팔트계 윤활제로서 구리스보다 점성이 강하고 널말뚝의 연결부에 바르면 차수효과가 향상될 뿐 아니라 연결부의 마찰저항도 완화시켜 준다.

#### ㉪ 아데카 울트라실<sup>(27)</sup>

고무탄성실(seal)재로서 물을 먹으면 팽창되고 고무의 탄성반발력에 의해 차수기능을 갖을 뿐만 아니라

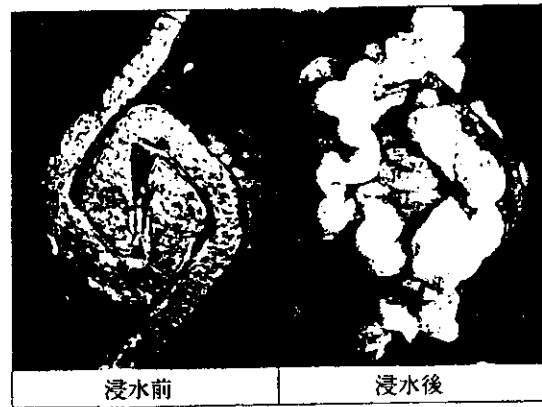


사진 1. 파일록크의 팽윤상태

흡수팽창되므로 효과가 더욱 높다.

#### ㉫ 파일록(Pile Lock)<sup>(28)</sup>

합성수지 에라스토머(ELASTOMER)를 지수재의 베이스로, 이것에 고흡수성폴리머, 충전제, 溶濟 등을 배합한 유전성이 있는 지수재이다. 이것을 물에 침진시키면 1~2시간후에 膨潤을 시작해서 24시간후에는 약20배로 팽윤된다.

#### ㉬ 벤토나이트 방수공법<sup>(29)</sup>

지하외벽의 방수대책으로 지반이

습윤상태인 경우, 지반이 동결된 경우에도 시공이 가능하다. 또한 천연무기질재료이므로 무독, 무공해성이다.

① 수팽창 고무탄성정형 seal재<sup>(30)</sup>

내수성, 내구성, 내약품성이 우수하며, 누수침입수 방지에 효과적이다. 고무가 주재료이므로 탄력성, 복원성이 좋고 환경오염에 대한 문제가 없다. H형강둘레, 관통부, 코너접판, 신축이음, 틈새부, 터널의 접속부 등에 사용된다.

### 5.3.8 파일공법

연약한 지반을 보강하기 위하여 사용하는 재료는 모래나 자갈을 사용하는 다짐파일공법과 지름 0.6~1.0m의 큰 돌을 사용하는 Stone Column, 지름 75~250mm의 소형 콘크리트 파일을 이용하는 뿌리말뚝(Root Pile), 지지하려는 지반에 일련의 보강막대를 삽입 그라우팅하는 흙 못치기 공법(Soil nailing), 연약한 지반에 파일을 박고 그 상부를 슬래브나 캡을 시공하거나 철사망으로 묶어 사용하는 스투브 파일, 캡 파일, 파일캡 공법, 지중에 인장력을 받을 수 있는 보강재료와 배수성이 좋은 뒷채움 재료를 교호층으로 삽입하여 구조물을 형성하는 보강토(Reinforced Earth)구조물 등 여러가지가 있다. 이들중 파일을 삽입 보강하는 방법에 대하여 알아본다.

연약지반에서의 파일 공법은 구조물의 기초 파일과 마찬가지로 상재하중의 연약지반으로의 전달을 막거나 경감시킴으로서 지지력을 확보하거나 침하를 억제하기 위하여 수행한다. 파일군의 머리에 콘크리트 슬래브나 캡을 얹거나 철근으로 파일을 연결하고 지오텍스타일을 그위에 얹어 성토하중을 적재하며 파일 두부의 시공방법에 따라 파일 슬래브 공법, 파일 캡 공법, 파일 네트 공법으로 부른다(그림 37 참조).

각 방법에 대하여 설명하면 다음과 같다.

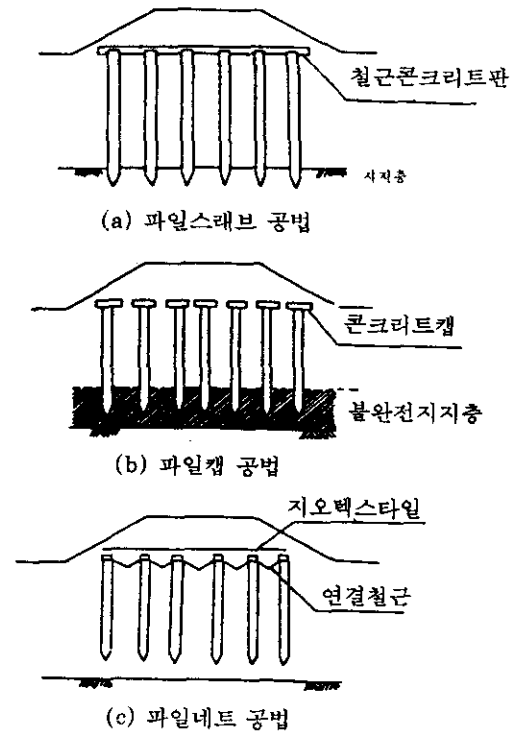


그림 37. 연약지반에 대한 말뚝대책공법

(1) 파일 슬래브 공법

파일 슬래브 공법은 파일 머리에 타설한 콘크리트 슬래브에 상재하중을 받아 파일을 통하여 지지반으로 전한다. 본 공법은 (1) 높은 성토에 의한 지반의 미끄러짐 파괴, 침하 및 주변지반의 변형이 예상되는 경우, (2) 배면부의 성토로 인한 교대의 수평이동, 기초 파일부의 변형이 예상되는 경우, (3) 낮은 성토부의 도로에서 교통 진동의 발생이나 하중이 지반하부 기존 매설물에 영향을 미칠 가능성이 있는 경우 등 다른 공법으로 처리가 곤란한 경우에 채택된다. 현재까지는 거의 도로에 사용되고 있으며 슬래브 하부에는 공동이 생기는 일이 많아 하천 제방부 대책으로는 사용되지 않는다.

슬래브 부분의 설계는 슬래브를 일종의 보로 생각하고 서로 직교하는 2군의 라멘구조로서

계산하는 방법과 각 기둥을 지점으로 간주하고 슬래브를 연속보로서 해석하는 방법이 많이 채택된다. 슬래브의 허용응력은 일반 콘크리트 구조물과 동일하게 본다.

시공후 주변지역의 성토나 지하수위 저하등

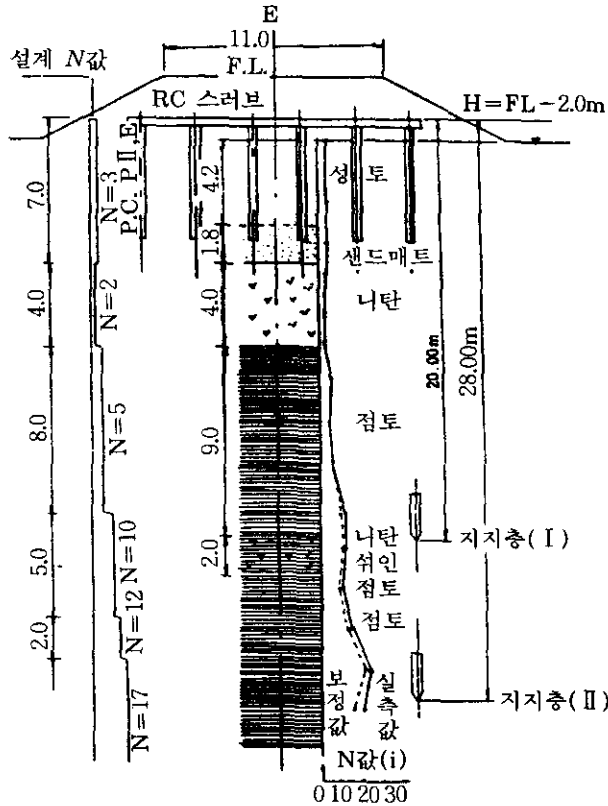


그림 38. 마루누마지구 토층구성과 파일슬래브공법의 개요

으로 인한 압밀 또는 광역 침하가 예상되는 경우에는 부마찰력도 설계하중으로 고려하여야 한다. 또한 파일 슬래브의 시공구간은 침하가 거의 생기지 않으므로 비시공 구간과의 사이에 큰 단차가 생기기 쉽다. 이러한 경우 마찰 파일의 개념으로 침하를 제어하는 파일 캡 공법, 개량토를 서서히 변화시키는 고결 공법 등으로 천이 구간을 형성하여야 한다.

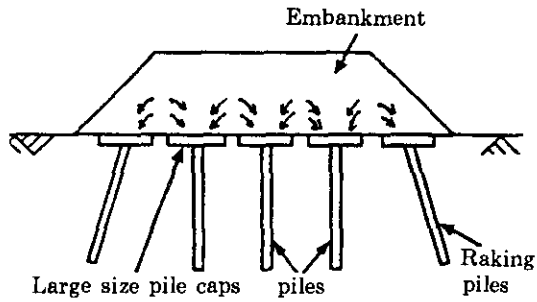
국내에서의 파일 슬래브 공법 시공사례는 알려져 있지 않아 일본의 일반국도도로 개량사례<sup>(31)</sup>를 든다.

사레지역의 CPT지지력  $q_c \approx 1.6 \text{kgf/cm}^2$ 이며 니탄(Peat)이 4.0~6.5m 두께로 퇴적된 지반으로 3m 높이의 성토에 대하여 3년간에 걸친 완속 단계시공, 주변에 소단부를 두는 대책등을 실행하였음에도 성토시공 직후 70cm에 달하는 수평 활동 파괴를 일으키고 있음이 도로 중앙부의 균열로 확인 되었다. 따라서 그림 38과 같이 슬래브를 미끄럼 파괴에 대하여 안정성을 확보할 수 있는 높이에 부설하고 그 위의 성토 하중은 슬래브와 파일로 지지하는 구조로 변경하였다. 그 결과 슬래브의 위치는 성토시공기면에서 2.0m의 위치가 되었으며 직경 350mm PC파일을 하부에 채용하였다. 파일의 지지력은 Terzaghi와 Meyerhof 식으로 계산 사용하고 슬래브 두께는 파일 1개당의 지지력을 계산 파일 간격을 2.65m로 설정한 후 콘크리트 연속판의 계산례에 따라 25cm 두께로 계산하였다.

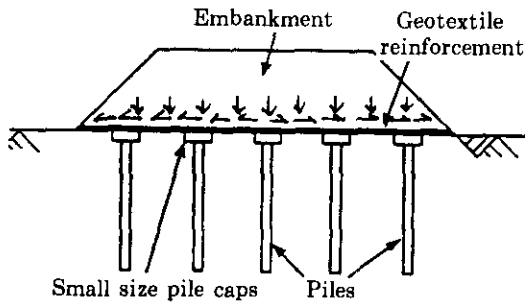
## (2) 파일 캡 공법

파일 캡 공법은 그림 39(a)와 같이 파일과 파일머리에 설치되는 캡을 조합하여 이루어지며 캡간 지반상에 작용하는 아칭액션을 이용하여 거의 모든 상재하중을 캡으로 받아 파일에 중개하는 공법이다. 파일재료로서는 나무, 기성 콘크리트, 현장타설 모르타르, 또는 콘크리트 파일이 이용되며 제체의 단부에는 성토부의 수평 추력(Lateral Thrust)에 저항하기 위하여 경사 파일을 이용하거나 단부 23개의 파일을 빔으로 연결 보강한다. 그림 39(b)에는 최근 10여년 동안에 많이 사용도가 많아진 토목 섬유재(Geosynthetics)를 이용 제체하부 파일 캡을 연결하여 수직하중을 견디면서 수평추력을 견디도록 고안한 방법을 소개한 것이다. 본 공법에서는 캡의 크기와 간격을 결정하는 것이 문제가 되며 이 공법의 발상지인 스웨덴에서는 성토 밀면적의 30~50%에 해당하는 면적 만큼 캡을 부설하고<sup>(32)</sup> 캡을 Cantilever Beam으로 보고 응력을 계산하여 단면을 결정한다.

토목섬유재를 부착한 파일 캡 공법의 경우 그림 40과 같은 관계식을 이용하여 최대 허용 파일 간격을 결정하며<sup>(33)</sup>, 파일의 최대 허용 지



(a) 재래식 파일 캡 공법과 아칭액션



(b) 토목섬유재를 이용 보강한 파일캡

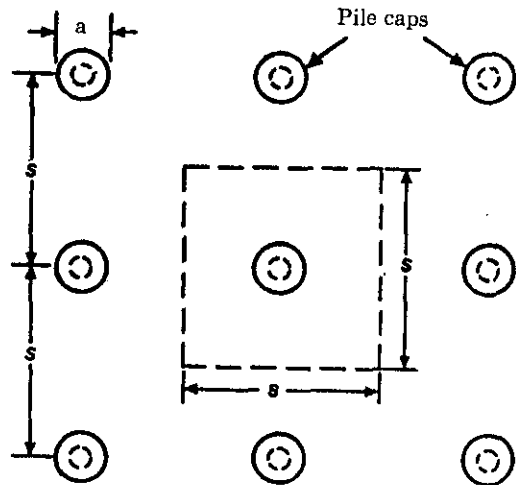
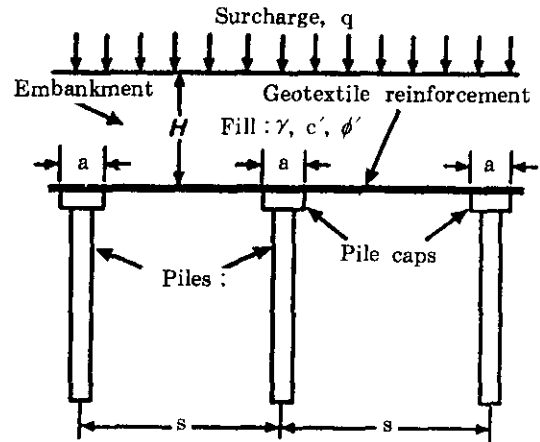
그림 39. 파일 캡 공법의 개요

지력( $F_p$ )에는 군파일의 작용으로 인한 파일 지지력의 감소를 고려한다. 또한 국부 부동침하의 방지를 위하여 제체 높이  $H$ 와 파일 캡 간격( $s$ )와의 사이는 다음과 같은 관계식이 성립하여야 한다.

$$H \leq 0.7(s-a) \quad (8)$$

여기서  $a$ 는 파일 캡 상부의 크기이다(그림 40 참조).

그림 41에는 파일에 작용하는 수직응력( $P'$ )와 fill의 하부에 작용하는 응력  $\sigma'_v$ 의 관계를 표현하였으며 이 관계를 이용하여 토목섬유 보강재가 파일 캡 사이에서 지지하는 수직분배응력( $W_f$ )은 다음식으로 부터 계산된다.



$$\text{Maximum pile spacing } s = \sqrt{\frac{F_p}{\gamma_e H}}$$

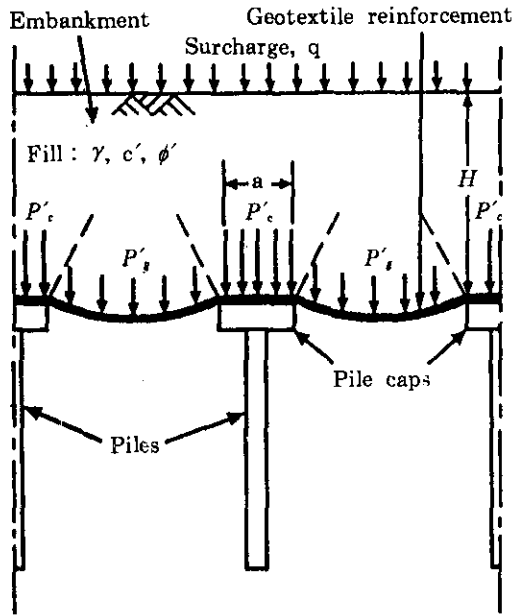
where :

$F_p$  is the allowable load capacity of the pile,

$\gamma_e = (\gamma + q/H)$  is the effective unit weight of the embankment fill.  $\gamma_e$  takes into account the effects of surcharge loading on top of the embankment as well as the actual unit weight of the fill,

$H$  is the height of the embankment.

그림 40. 상부에 토목섬유재를 포설한 파일 캡의 간격 결정



Ratio of vertical stress on pile cap to vertical effective stress in fill is :

$$\frac{P'_c}{\sigma'_v} = \left( \frac{C_c a}{H} \right)^2 \text{ where } \sigma'_v = \gamma_e H$$

where :

$P'_c$  is the vertical stress on the pile cap

$\sigma'_v$  is the vertical effective stress at the base of the fill

$\gamma_e = (\gamma + q/H)$  is the effective unit weight of the fill

H is the height of the fill

a is the width of the pile caps

$C_c$  is an arching coefficient and is dependent upon the height of the fill, the width of the pile caps, and the rigidity of the piles

For steel or concrete piles founded on an incompressible stratum :  $C_c \approx 1.95 H/a - 0.18$

For steel or concrete friction piles, and timber piles :  $C_c \approx 1.70 H/a - 0.12$

For stone columns, grout injected stone columns, lime piles and sand compaction piles :  $C_c \approx 1.50 H/a - 0.07$

그림 41. 파일 캡에 작용하는 수직응력 ( $P'_c$ )과 흙응력 ( $\sigma'_v$ )과의 관계

$H > 1.4(s-a)$  의 경우

$$W_T = \frac{1.4s \gamma (s-a)}{s^2 - a^2} [s^2 - a^2 (P'_c / \sigma'_v)] \quad (9)$$

$H \leq 1.4(s-a)$  의 경우

$$W_T = \frac{s(\gamma H + q)}{s^2 - a^2} [s^2 - a^2 (P'_c / \sigma'_v)] \quad (10)$$

상기식에 사용된 변수는 그림 42에 표현되어 있으며  $s^2/a^2 \leq P'_c / \sigma'_v$  일 경우  $W_T = 0$  로 본다.

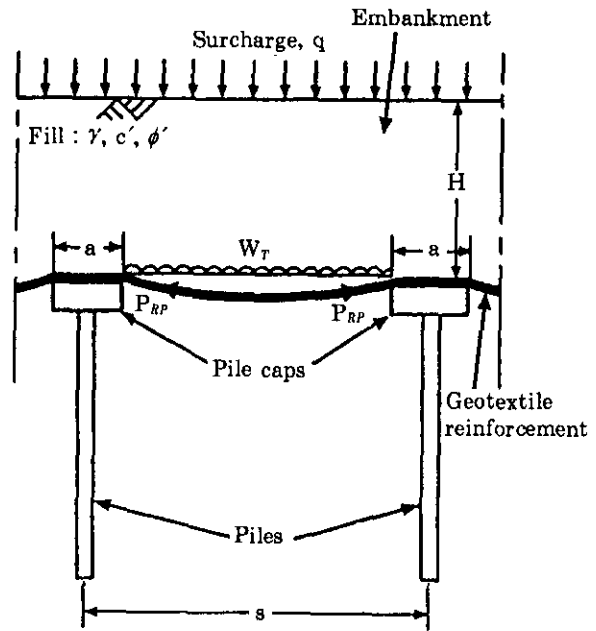


그림 42. 식(9)와 (10)에 사용된 변수에 대한 개요

분배된 수직력  $W_T$ 가 작용하는 비지지된 단위길이당 토목섬유 부분에 작용하는 인장력  $P_{RP}$ (단위 kN/m)는 다음식과 같이 표현되며

$$P_{RP} = \frac{W_T (s-a)}{2a} \sqrt{1 + \frac{1}{6\varepsilon}} \quad (11)$$

여기서 변형( $\varepsilon$ )은 보강재의 최대 초기 인장 변형으로 식(12)와 같이 표현된다.

$$\varepsilon = \frac{8d^2}{3(s-a)^2} \quad (12)$$

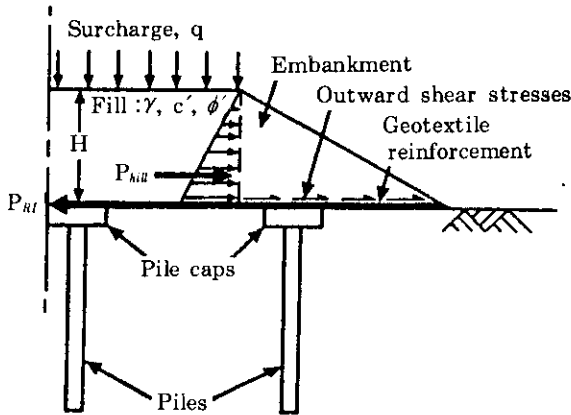
여기서 d는 토목섬유 보강재 최대 처짐량이다.

식(11)에는  $P_{RP}$ 와  $\epsilon$ 의 2개의 미지수가 포함되어 있으므로 토목섬유 보강재의 응력변형 관계식(13)을 사용 시행 착오법으로 풀어야 한다.

$$P_{RP} = E\epsilon \quad (13)$$

여기서 E는 토목섬유재의 탄성계수이다.

토목섬유 보강재에 작용하는 수평외부 추력은 제체의 어깨부에서 최대가 되며 이러한 제체의 수평외부추력  $P_{RH}$ 에 저항하는 토목섬유 보강재의 인장력  $P_{RL}$ 을 그림 43에 나타내었다 (33).



Tensile load in geotextile  $P_{RL}$  due to horizontal outward thrust of embankment  $P_{RH}$  is :

$$P_{RL} = P_{RH} = 0.5K_a \gamma_e H^2$$

where :

$K_a = \tan^2(\pi/4 - \phi'/2)$  is Rankine's coefficient of active pressure

$\gamma_e = (\gamma + q/H)$  is the effective unit weight of the fill

H is the height of the embankment.

In addition, a check has to be made to ensure an adequate bond exists between the geotextile reinforcement and the embankment fill to develop the tensile load  $P_{RL}$  in the reinforcement.

그림 43. 제체의 수평방향 외력에 저항하는 토목섬유 보강재의 인장력 산정식

### (3) 파일 네트 공법

파일 네트 공법은 그림 44와 같이 타설한 말뚝의 두부에 철근을 한겹(크로스형) 또는 두겹(머리테형)으로 배치하고 상부에 토목용 섬유네트를 포설하여 성토하중을 말뚝군으로 지지하는 공법이다. 이 공법의 파일기초의 지지력과 침하량의 계산은 일반 말뚝의 침하량과 같은 것으로 본다. 파일 1개당의 적재하중  $P_u$ 는 식(14)로 부터 구하며

$$P_u = l'(W_b + W_s) \quad (14)$$

여기서  $W_b$ 는 성토하중,  $W_s$ 는 눈 및 차량하중(통상 1~t/m<sup>2</sup>)이며 l은 말뚝 간격이다. 여기에 파일의 침하균형계수( $F_n$ ) 1.0~1.2를 곱하여 말뚝 소요 지지력  $R_b$ 를 구하고 군파일 영향을 고려하여 말뚝의 소요 길이를 계산한다. (34)

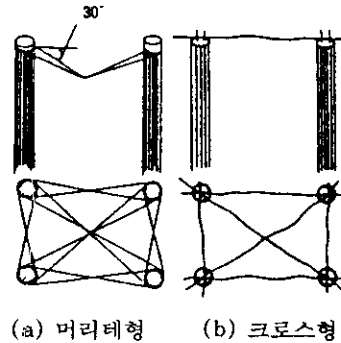


그림 44. 파일 Net의 연결

파일머리의 철근에 작용하는 인장력 T는 식(15)와 같이 표현되며 철근의 허용응력보다 인장응력 T가 작도록 철근 치수를 결정한다.

$$T = \frac{P_u}{4m} \quad (15)$$

여기서 m은 철근의 1묶음 갯수이며 싱글배치에서는 m=1, 더블배치에서는 m=2가 사용된다. 크로스형의 1묶음 철근 배치시에는 철근에 의한 파열을 방지하기 위하여 두부에 보강장판을 설치하고 연결한다.

그림 45에는 파일네트공법의 응용사례로 연



약지반위에 제방이 침하를 일으켜 이로 인한 홍수피해를 입은 제방을 파일Net 공법으로 복구한 경우를 보인 것이다<sup>(35)</sup>. 본 지역은 니탄성 연약지반으로 하도의 폭이 좁은 곳에서 성토시 침하로 인한 하도의 폐색이 발생하여 연장 16km에 대하여 60여 지점에 파일Net 공법을 사용하였다. 파일은 윗쪽 1.5~2.0m 에 방부제를 도포한 솔통나무로서 떼말뚝효과를 얻을 수

있도록 파일간격을 정하였다. 파일머리에 연결 철근은 미리 30°의 휩각으로 만들고 파일의 머리에서 30cm 정도 넘겨짚은 형태로 토목용시트를 부설하고 그 위에 성토를 하였다. 횡방향 하중이 가해지면 파일군 주변부부터 차례로 파괴되는 것을 방지하기 위하여 파일머리에 횡방향보강재를 설치 하였다.

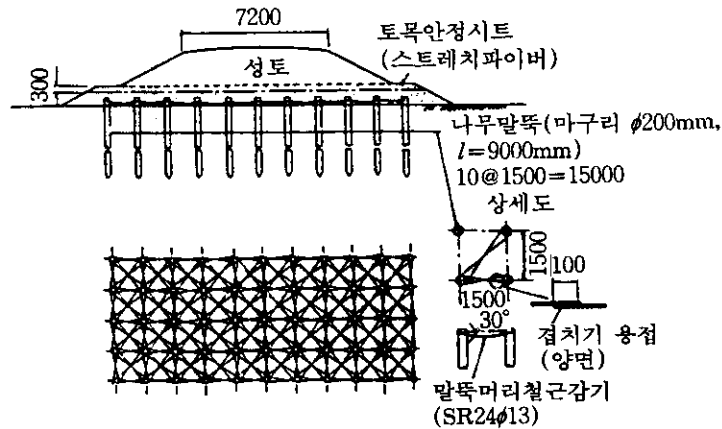


그림 45. 파일네트 공법의 시공사례

## 참고 문헌

1. 임종철 외(1995), "토질공학 핸드북", 도서출판 새론, pp. 1115~1120.
2. 田圭一(1995), "實用 軟弱地盤對策工法總技術", 實用軟弱地盤對策工法技術 總覽 編輯委員會, pp. 773~806.
3. 稻田倍穗(1994), "軟弱地盤の 土質工學", 鹿島出版社, pp. 199~202.
4. CDM研究會(1994), "セメント係深層混合處理工法 CDM工法 設計と施工マニュアル"
5. Cement Deep Mixing Method Association (1994), "Cement Deep Mixing"
6. DJM工法研究會 技術委員會(1993), "粉 噴射攪拌工法(DJM 工法) 技術 マニュアル", DJM工法 研究會
7. 천병식(1996. 4), "열악한 지반조건에서 고결공법의 지반보강효과 증대에 관한 연구", 한국지반공학회지, Vol.12, No. 2, pp. 115~130.
8. E.W Brand & R.P Brenner(1981), "Soft Clay Engineering", Elsevier Scientific, New York, pp. 673~682.
9. 김수삼(1995. 12), "준설토매립시 Electro Osmosis 적용성 검토", 해안매립과 연약지반 개량을 위한 신기술 개발 연구 논문집 vol.II, 한국지반공학회 준설·매립분과 위원회, pp. 4-1~4-52.
10. 조충봉(1994), "응용토질기초공학(하)", 창우출판, pp. 207~209.
11. 장용채 외(1995), "연약지반에서의 토질공학", 도서출판 새론, pp. 378~379.
12. D. F McCarthy(1983), "Essentials of Soil Mechanics And Foundations", Reston, Virginia, pp. 133~134.
13. W. H Glanville(1974), "Soil Mechanics For Road Engineers", HMSO, LONDON, pp. 337~338.

14. M. J Tomlinson(1986), "Foundation Design and Construction", John Wiley & Sons, New York, pp. 749~750.
15. 우기형(1994), "새로운 연약지반 처리방법", 기술경영사, pp. 213~227, 300~304.
16. H. Y. Fang(1990), "Foundation Engineering Handbook", New York, VAN NOSTRAND REINHOLD, pp. 349~350, 247~248.
17. 田圭一(1993), "實用 軟弱地盤對策 技術總覽", 美巧社, pp. 897~899, 429~430.
18. 천병식(1994), "기초지반개량공법", 건설연구사, pp. 295~265.
19. 千柄植(1995), "地盤注入工法", 園技術
20. 所 武産(1989. 6), "水がラス系グラットの耐久性について", 第24回 土質工學研究發表會
21. 檜垣 外(1983. 6), "藥液注入材の長期耐久性について", 第18回 土質工學研究發表會
22. 천병식(1991. 12), "지반주입에 의한 대수층에서의 차수효과 및 내구성", 대한토목학회 논문집, Vol. 11, No. 4, pp. 189~200.
23. 森麟·千柄植(1987. 12), "砂質地盤における割裂發生機構", 日本土木學會論文集(Ⅲ) No. 388 Ⅲ-7, pp. 61~70.
24. 천병식(1986. 9), "불투수성지반에서의 종합렬주입압에 관한 기초적 연구", 대한토목학회 논문집, Vol. 6, No. 3, pp. 43~51.
25. 천병식(1990. 12), "약액으로 고결된 모래지반의 수압파쇄에 관한 연구", 대한 토목학회 논문집, Vol. 10, No. 4, pp. 133~140.
26. 천병식, 남순성, 고용일(1993. 3) "흙막이 구조물 (Ⅵ-1) -널말쪽공법-", 한국지반공학회지, Vol 9, NO 1, pp82~87.
27. 한국지반공학회(1992), "지반공학시리즈3 굴착 및 흙막이공법", pp116~119.
28. 한국삼로크 주식회사(1996), "SHEET PILE用 膨潤止水劑".
29. NISSHO IWAI BENTONITE Co. LTD. (1996), "ベントナイト地下防水工法, ボル クレイ・パネル".
30. 旭電化(1996), "水膨張ゴム彈性定型シール材, アデカウルトラシール".
31. 佐藤定雪, 渡 直善, 新山 淳, 宮本勳(1973), "パイルステップ工法について", 第16回北海道開發局 技術研究發表會, pp. 31~38,
32. Transportation Research Board(1975), "Treatment of Soft Foundations for Highway Embankments", National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice 29, National Research Council, Washington, D. C. p15.
33. Lawson, C. R. (1992), "Soil Reinforoment with Geosynthetics", Geotech 92, Applied Ground Improvement Technique, Vol 1, SEAGS, AIT Workshop, Bangkok, Thailand
34. 우기형(1992), "최신의 연약지반 처리 공법", 기술경영사
35. 工藤 昇, 奈良 章, 小由芳一(1981), "泥炭性超軟弱地盤改良工法「パイルネット 工法」の開発とその適 性について", 第35回建設省技術研究會, pp. 147~151.