

# 지하철과 근접시공에서 지반주입의 역할

\* 천 병 식

\*\* 오 민 열

---

\* 한양대학교 토목공학과 교수

\*\* 유신설계공단

# 1. 주입공법

## 1.1 주입공법의 원리

약액주입이란 지반내에 주입관을 삽입, 이것을 통하여 화학약액(간단히 약액 또는 주입재 라고도 함.)을 지중에 압송, 충전시켜 일정한 시간(Gel Time 또는 Setting Time이라고 함)경과시킨 후 지반을 고결시키는 것을 말하며, 지반강도증대 또는 지반의 불투수화(차수 또는 지수)를 그 목적으로 한다.

본 공법은 터널굴진시의 붕괴방지 및 굴착바닥의 Heaving 방지, 도심지 근접시공에 있어서 지반굴착시 인접건물 Underpinning, 토류벽의 토압감소, 마찰말뚝, 선단지지말뚝, Pier기초의 지지력보강, 댐기초의 지수, Shield굴진보강등 광범위하게 적용되고 있으며 최근에 이와 병행하여 지반진동을 경감하기 위한 대책으로서도 쓰이고 있으며 점차 본격적, 항구적 지반개량공법으로 되어 가고 있다.

약액은 광의의 약액과 협의의 약액으로 나누어 볼 수 있다. 즉, Table 1과 같이 전자는 현탁액형과 용액형 양자를 말하며, 후자는 용액형만을 말한다. 현재 국내외에서 쓰이고 있는 약액은 공해문제 때문에 현탁액형(시멘트)과 물유리계가 대부분이며 최근엔 우레탄계가 각광리에 쓰여지고 있다.

Table 1 약액의 분류

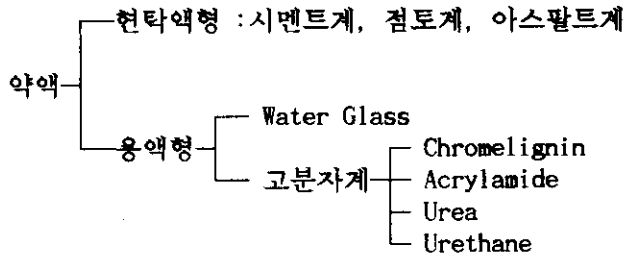
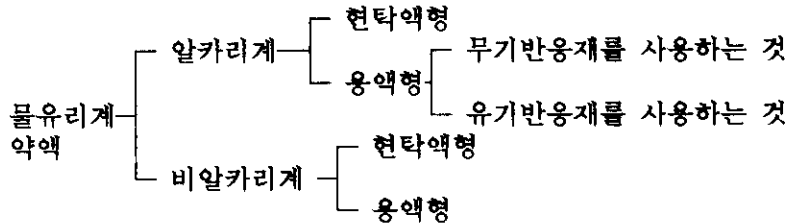


Table 2 물유리계 약액의 분류



일반적으로 사용되고 있는 약액주입공법은 대상지반의 토층구성 및 토질에 따라 그 효과가 좌우되고 있다. 특히 복잡하게 퇴적된 다층지반이나 얇은 층이 많이 섞여 있는 지반에서는 층 경계를 따라서 약액이 빠져나가는 경향이 있어서(할렬주입 또는 맥상주입) 목적하는 지반의 토립자의 공극에 침투가 대단히 어렵고 또 기대하는 효과를 얻기 위한 필요 주입량을 산정하

기가 곤란하다. 따라서 맥상주입, 할렬주입만을 목적으로 약액주입공법을 적용하기도 한다. 이와 같은 종래의 주입공법이 갖는 결점을 없애고 주입효과를 증진하기 위한 여러 가지의 유도주입공법이 연구되어 순결성이중관 주입방식, Double Packer 주입방식, 이중관복합주입방식, 고압분사주입방법 등이 개발되었다.

이 중에서 고압분사주입공법은 초고압의 Jet를 이용해서 지반을 절삭붕괴시킴과 동시에 Grout재를 충전하게 된다. (Table 3 참조)

Table 3 주입시공방식

공 법 구 분		공 법 명	Gel-time	주 입 방 식
단관주입 방 법	롯데 공법 스트레이나공법		보 통 (3~10분)	1.5 Shot System
2중관주입 방 법	다블팩커법	스 리 브 공 법 솔 레 탄 슈 공 법 다블스트레이나공법	길 다 (15~60분)	1 Shot System
	2중관 롯데법	D D S 공 법 L A G 공 법 M T 공 법	짧 다 (3~10초)	2 Shot System
	특수2중관공법	토 연 식 공 법	3초~60분	1, 1.5, 2 Shot System
고압분사 주입공법	그라우트분사법	C C P 공 법 Mini Max 공법	-	-
	그라우트·공기 병용 분사법	J S G 공 법 (JSP+JGP)	-	-
	물·공기·그라 우트병용분사법	Column Jet 공법 Jet Grout 공법 SIG 공법	-	-

고압(200kgf/cm<sup>2</sup>이상)의 분류유체를 사용하여 지반을 파쇄하는 원리는 주로 Jet 분류수가 갖는 운동에너지를 이용하여 액체로서 고체를 분쇄시키는 것이다. 이러한 파쇄 Mechanism은 다음과 같은 현상의 조합으로 알려지고 있다.

#### 가. 공동화(Cavitation)

噴流가 지반내를 진행할 때면 당연히 토립자 사이로의 흐름이 발생하고, 이 토립자는 형상과 크기가 일정하지 않기 때문에 당연히 압력차가 발생하여 저압부에서는 Cavitation에 의한 공동이 발생한다. 이것은 압력이 낮아지면, 유체에 용해되어 있던 기체가 유리되어 처음의 기체로 되기 때문에 공동(기포)이 생기기 때문이다.

이 기포들은 압력이 높은 곳에 이르게 되면 주위의 유체가 밀어 상당히 큰 속도로 충돌한다. 이 때 기포는 소실되면서 급격히 축소되고 동시에 기포내부의 압력은 상당히 상승되어 상당한 충격을 수반하게 된다.

#### 나. 피로잔류변형의 축적에 의한 파괴

어떤 물체의 표면에 분류유체를 쓸 경우 그 재질에 따라 다르기는 하지만 재질의 인장강도보다 훨씬 낮은 압력으로도 파괴가 시작된다.(예를 들면 금속판에서는 10% 정도) 이것은, 물체를 분류유체로 파괴하는 경우는 꽤 낮은 압력으로도 충분하다.

이 사실로 부터 분류유체와 파쇄대상물과의 사이에는 역학적인 특수한 상관관계가 있음을 알 수 있다. 결국 분류유체에 의해 부하를 준 시료의 잔류변형이 축적됨에 따라 파쇄가 진행, 촉진된다고 생각할 수 있다.

#### 다. 수력쇄기효과(Water Wedge)

지반내의 공극이 유체로 충전되고 그 중에 분류의 반력작용으로 유체역학적인 압력 즉, 수력쇄기가 발생한다. 이 쇄기는 지반의 공극성상에 따라 일정한 압력을 갖는 것으로 만들어진다. Nozzle로 부터 지반까지의 거리가 작을수록 수력쇄기가 되는 조건이 좋아지기 때문에 공극비가 큰 지반, 균열이 있는 지

반 등이 최적일 것이라는 사실을 이해할 수 있다.

라. 유체의 충격력

물방울이 지반에 충돌할 때 발생하는 최대압력은 수격(Water Hammer)작용중에 발생하는 최대압력과 같다고 생각한다면 다음 식으로 표시될 수 있다.

$$F = \rho CV \text{ ----- (1)}$$

여기서, F : 충격력(kgf/cm<sup>2</sup>)

C : 음속(cm/sec)

V : Jet의 속도(m/sec)

$\rho$  : 비중량(Specific mass)(kgf·s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>)

유체의 속도가 커지면 지반에 작용하는 충격력도 커져서 지반의 파괴강도에 도달할 때 토립자가 파쇄되는 것이다.

분류유체에 의한 지반의 파쇄원리에 관하여 그 주요인자가 되는 것을 열거하였는데 지반의 파쇄는 분류층 상 동수압력이 중요한 인자이다. 분류층상 동수압은 거리의 증가와 함께 감쇄하는데, 그 감쇄율을 작게 하기 위하여 초고압분류유체용 Nozzle의 형상을 갖도록 하고, 조도계수 감소를 위한 Nozzle 내면 마무리 및 Nozzle의 도입부에 있어 整流장치가 필요하다.

그러나 장치연구만으로는 유효사정거리가 너무 작으므로 실제 Jet공법에 의한 굴착을 만족하게 할 수 없다. 그것은 공기중에서의 Jet의 효율과 수중에서의 효과는 너무 다르기 때문이다. 이것의 분류구조를 그림 1에 나타내었다.

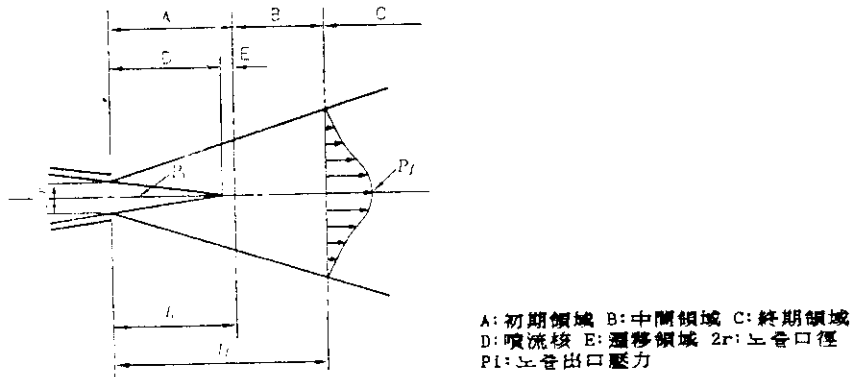


그림 1 분류구조

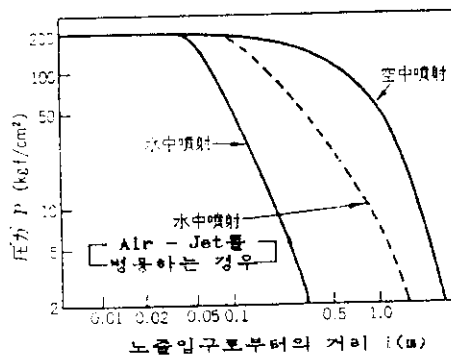


그림 2 각종 Jet의 도달거리

이러한 수분류를 수중에서 실시할 경우 단점을 보완하기 위해 Nozzle 선단의 외주부를 따라 고압공기를 방사시켜 유효거리를 늘리는 데에 착안하였다. 즉 Nozzle의 출구 부근에서 공기를 분사시키면 수분류는 공기에 싸여 진행하게 되고 거의 공기중으로의 분사하는 조건을 형성한다. 그 때문에 수분류는 꽤 먼거리 까지 도달하게 된다.

이와 같이 절삭되는 범위를 확대시키기 위해 사용된 공기는 절삭토를 지표면에 배출시키는 데에도 이용할 수 있는 장점이 있어서 공기와 수분류의 혼합Jet는 지하 7m 부근 까지는 절삭토를 유체와 혼합된 상태로 지표로 유출시키고 7m보다 깊은 데에는 Monitor용 Guide Hole과 절삭토 배출용 Guide Hole내의 액에 비중차가 생기게 하여 Air-lift Pump와 같은 Mechanism으로 절삭토를 배출시킨다.

이상의 원리를 요약해 보면 Jet Grout는 초고압분류유체의 운동에너지를 이용하여 지반안에 인위적으로 임의의 공간을 만들어 그 부분에 고결시킬 주입재를 주입하여 불투수성의 막 또는 벽체 또는 기둥을 만드는 유도주입공법의 일종이라고 볼 수 있다.

## 1.2 화학약액의 저압주입에 의한 토중에서의 거동

일반적으로 약액의 저압주입시공에 있어서 세사이하의 세립토층에서는 맥상주입이 일반적 패턴이며 이러한 주입은 어떤 경우는 오히려 부작용이 생길 수도 있다. 할렬한다는 것은 주입압이 지반의 할렬저항압 이상으로 되기 때문이다. 즉 할렬주입은 지반을 주입으로 할렬하여 소위 수압파쇄현상

이 생기며 이 때 할렬부분에 주입재가 들어감으로 인해 흠이 흐트러지는 것은 자명한 사실이다. 따라서 할렬주입에 의한 맥상부의 들어 가는 방향, 분포상태, homogel 강도 등이 중요하다. 즉, 주입재가 설계범위를 훨씬 넘어 주입되고 목적 범위에 그다지 주입되지 않는 경우는 개량 효과는 없고, 오히려 마이너스 효과를 자초하게 된다. 그러나 최근에 순결성주입재의 이중관단상주입 등에 의해 상당히 효과를 높이는 예가 증가하고 있으며 할렬주입에 의한 지반개량 이론도 점차 확립되어가고 있다.

수압파쇄현상이란 과잉공극수압에 의하여 지반 중에 생기는 파쇄현상으로서, 할렬 현상이라고도 하는 데 이러한 현상은 약액주입시 뿐만 아니라 항타 또는 Sand drain의 Casing 항타시 또는 현장투수시험시에 높은 주입압에 의하여도 발생한다. 필자는 최근 우리나라 지하철 공사현장에서 지중 약 12m지점에서 상향식 약액주입시에 Hydraulic Fracturing에 의해 약 50여 cm의 지반용기 또는 국부지반파쇄현상을 목격한 바 있다. 이와 같은 수압파쇄현상은 특히 1976년 Teton Dam의 파괴 이후 많은 관심을 모으고 있으며 현재 많은 연구가 진행중이다.

Maag의 이론에 의하면 실용적 주입속도로써 할렬하지 않고 침투가 되기 위해서는 지반의 투수계수(대략  $10^{-3}$  cm/sec 이상일 것), 주입압(할렬파괴가 생기지 않을 정도), 사용주입재의 Gel Time(완결성일 것) 등의 요건이 필요하다. 따라서 Gel Time이 길 경우는 침투주입이 될 요건이 된다. 또 주입재의 점성을 될 수 있는 한 작게 하는 것도 주입압저항효과가 있기 때문

에 이것 역시 한 요건이 될 수 있다. 그러나 용액형 물유리계 주입재는 점성이 2-4 cps 이므로 물과 같은 1cp로 저하시키기는 어렵다. 주입압을 될 수 있는 한 작게 하는 방법을 택한다 하더라도 그 주입압으로 할렬파괴가 생긴다면 흠의 할렬저항도 주요 요인이 된다. 일반적으로 강도가 큰 홍적사층 쪽이 강도가 작은 충적사층보다 침투주입이 잘 되는 경향이 있다.

할렬주입에 의해 발생하는 맥상의 homogel 분포상태는 주입압, 주입방식 및 Gel Time에 의해 큰 차가 있다. 과대주입압으로서 Gel Time이 긴 경우는 일반적으로 주입재가 지반을 할렬하여 진행하는 거리가 길게 되고 멀리까지 산일하여 맥상 Homogel의 분포밀도가 저하한다. 따라서 설계범위내에 잔류할 확률은

매우 작다. 여기에 대하여 이중관단상주입방법 등으로 Gel Time이 짧은 완결성주입재를 사용할 경우는 대략 맥상 Homogel 분포밀도가 높고 설계범위내 잔류율도 크다. 이 경우도 주입압이 과대하면 할렬발생거리가 크게 되어 분포밀도를 저하시키는 결과가 된다.

할렬발생에 대해서는 대략 탄성해에 의해 수평할렬시와 연직할렬시 흙의 인장저항을 0으로 보아  $\sigma = 2\sigma_H + \sigma_t$ 일때 할렬이 일어난다고 보고, 현장토질조건을 감안한 삼축압축시험에 의하여, 초기 공극수압  $u_a$ 와 주입압에 의한 새로운 공극수압  $u_i$ 를 고려하여 수정된 식  $\sigma = 2\sigma_H - (u_a + u_i) + \sigma_t$ 이 바람직 하다. 또한 주입압력이  $gh$  이상으로 행해질 경우에 할렬발생 가능성은 크다. Morgenstern등은 많은 실험을 바탕으로 수압 파쇄개념을 도입하여 한계주입압력의 산출식을 제시한 바 있다.

모래지반과 점성토지반의 할렬발생 범위의 상이에 대해 MORI 교수는 모래지반은 투수성이 커서 할렬시 그 면이 주입재의 새로운 침투통로가 되며, 실용적 주입속도로서 침투주입이 될 수 있는 한계로서  $k = 10^{-3} \text{cm/sec}$  이다. 또 주입구 부근의 주입재의 침투면적을 A라 하면,  $k$ 가  $10^{-4} \text{cm/sec}$ 인 경우 동일주입속도로 주입하면 할렬면은 10A로 되며 할렬은 정지한다고 계산된다. 즉, 할렬면의 발생량은  $k$ 가 작을수록 Gel Time이 짧을수록 크게 된다. 또, 한개의 할렬선의 길이는 Gel Time이 짧을수록 짧게 된다. 따라서 순결성주입재를 주입하면 짧은 할렬이 많게 되고 Gel Time이 길 경우는 할렬수가 작아서 그 길이는 길게 된다.

### 1.3 고압분사주입

#### (1) 고압분사주입의 SYSTEM

고압분사주입의 System은 아래 그림과 같다.

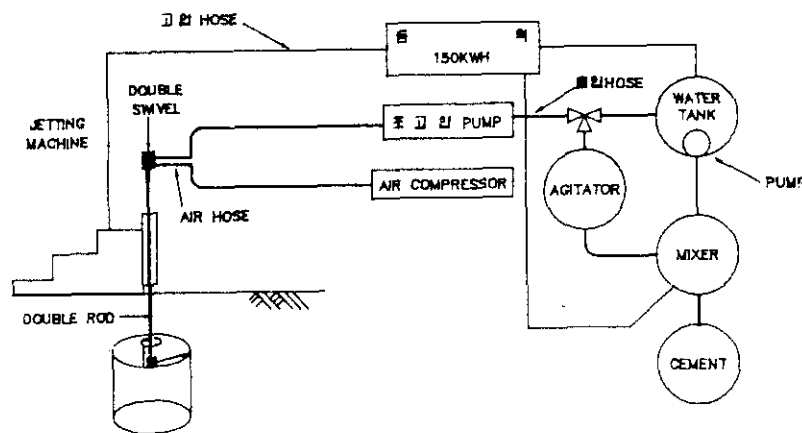


그림 3 고압분사주입의 System

#### (2) 시공순서 (그림 4 참조)

- 1) Plant의 설치
- 2) 지반개량이 필요한 위치에 Jetting Machine의 설치
- 3) 지반조건에 따른 Rod(50mm)의 회전속도, Spindle Stroke를 조정하여 물과 공기를 사용하여 저압으로 소정의 방향으로 계획심도 까지 천공한다.
- 4) 계획심도 까지 천공이 완료되면 고압분사주입 시공을 하도록 Rod회전부를 바꾸어 맞춘다.
- 5) Cement Milk(1:1)와 공기를 사용하여 고압으로 분사하면서 적정시간 동안 서서히 회전시킨다. 이 때 선단하부 Nozzle은 막혀 있고 수평

- Nozzle 로만 분사하게 된다.
- 6) 회전이 끝나면서 2.5cm 자동상승한다.
  - 7) 상기와 같은 공정으로 소정의 높이까지 시공이 완료되면 다음의 시공위치로 장비를 이동하고 반복한다.

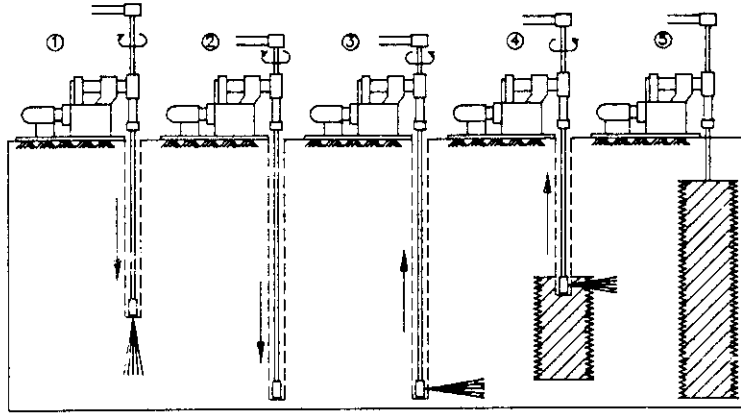


그림 4 시공순서도

### (3) 적용대상 및 범위

본 공법은 현장콘크리트 말뚝과 비교할 수 있는 데 경우에 따라서 말뚝역할로 충분히 이용가능하기 때문이다. 본 공법은 모든 시설공사에서 말뚝 뿐 아니라 기초 및 가설물이 설치되는 지반의 안정추구에 광범위하게 이용될 수 있으며 필요시 강성토류벽으로 Flexible한 토류벽 배면의 변형을 최대한 방지할 수 있고 또한 소형장비에 의한 작업공간의 한계극복, 경제성 등에서 타공법에 비하여 매우 유리하다.

#### ① 지수

지수를 목적으로 하는 제방공사에 적용된다. 이 경우는 지반상태 여하를 막론하고 모두 가능하다.

토류의 지수, 매설관하의 지수, 방조제·저수지·방수제 등의 누수방지, 지하 Dam의 건설, 특히 기존 Dam 등의 누수방지 및 보강 등에 적합하다.

#### ② 지반강화

시설물이 대형화하고 가용면적이 점차 부족하게 됨에 따라 매립지 또는 간척지 등 연약지반도 이용하지 않으면 안되게 되었다. 따라서 이러한 연약지반의 지지력 보강, Heaving의 방지, 사면붕괴 방지 및 사후대책, 기존구조물의 보호 및 Underpinning등 어떠한 경우에도 적용가능하다.

#### ③ 토류말뚝, 제자리말뚝

현장에서 말뚝을 지중에 조성해야 하는 경우와 토류 등의 목적으로 사용할 수 있다. 특히 토류의 경우에는 지수효과를 얻을 수 있기 때문에 Open Cut의 좌우 벽면의 안정처리에 적합하다.

엄지말뚝이나 Sheet Pile 등에 의한 토류벽은 Flexible하기 때문에 배면의 침하는 피할 수 없으며 토류벽을 강성으로 만들어 변형을 감소시킬 수 있는 최적공법이다.

## 2. 개착식 지하철 터널의 SGR 시험주입 시공사례

### 2.1 현황

대구지하철 0호선00공구 건설공사를 위한 차수그라우팅공사를 수행함에 있어 약액 주입 설계상수 및 시공방법을 검토하여 최적의 방법으로 보다 안전하고 경제적인 시공

을 위한 시험그라우팅을 실시하였다.

본 약액주입의 목적은 지하굴착공사시 지하수 유출로 인한 주변침하에 의해 지중 매설물과 인접도로 및 인접건축물에 구조적 변형과 토류벽 붕괴에 의한 대형사고의 발생이 우려되므로 이를 최소화하기 위한 차수공의 설계 시공에 있다.

○ 시험시공일시 :

1993. 5. 20~1993. 6. 4

○ 시험시공위치 :

본 시험시공위치는 STA 18K330~18K400의 00국민학교 앞 일부구간

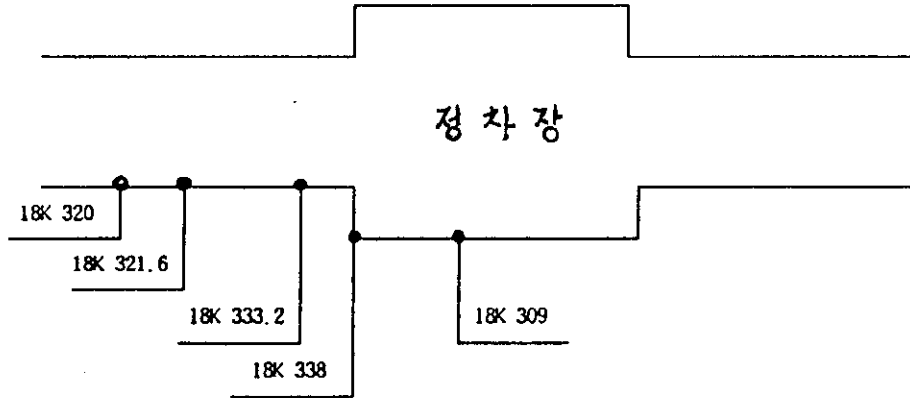


그림 1 시험시공 위치도

## 2.2 지형 및 지질개요

본 시험주입 구간은 00국민학교 앞 왕복 6차선도로와 인도를 끼고 있으며 작업으로 인하여 차량통행에 별로 지장을 주지 않고 있으며, 수계는 금호강이 시험구간 북쪽에 있으며 왼쪽으로는 금호강에서 갈라진 작은 하천이 흐르고 있다.

본 지층은 상부로 부터 매립층, 충적층, 기반암순으로 성층되어 있으며 세부사항은 다음과 같다.

○ 매립층

본 층은 인위적으로 매립한 층으로 대부분 매립층은 다짐을 받지 않은 느슨 내지 보통조밀한 밀도를 보여주며 층두께는 1.0~3.2m정도 불균형하게 분포되어 있으며 이는 도로공사시 매립한 것으로 보인다.

○ 충적층

금호강 주변에 광범위하게 분포하고 있으며 쇄설물이 운반 퇴적되어 형성된 층으로 조립모래 및 자갈 등으로 구성되어 있다. 층두께는 4.0~6.5m정도이며 지하수 자연수위가 형성되어 있고 투수성이 양호 하여 지반굴착시 적절한 차수공이 요망된다.

○ 기반암층

연암, 보통암, 경암으로 성층되어 있으며 주로 세일층으로 풍화정도에 따라 공학적 특성이 다르게 나타나고 있다. 연암 TCR=0~75%, RQD=0%로서 절리가 심한 것으로 판단되며, 보통암 TCR=33~100%, RQD=0~62%, 경암 TCR=53~100%, RQD=18~100%로 아주 신선한 암으로 예측할 수 있다.

## 2.3 시험주입방법

- 1) 천공은 Percussion Drill (C6) 를 사용하고 간격은 0.8m, 주입폭은 1.00m 로 하였다.
- 2) 천공은 H-Pile 에서 0.50m ~ 0.80m 떨어진 위치에서 시행하였다.



- 3) 주입깊이는 GL-1.0m 에서 연암 下 1.0m 까지 주입을 하였다.
- 4) 주입관은 Dia 40.5m/m 이중관 Rod 를 사용하였다.
- 5) 주입공의 배치 및 순서는 1열로 그림1. 같이 하였다.

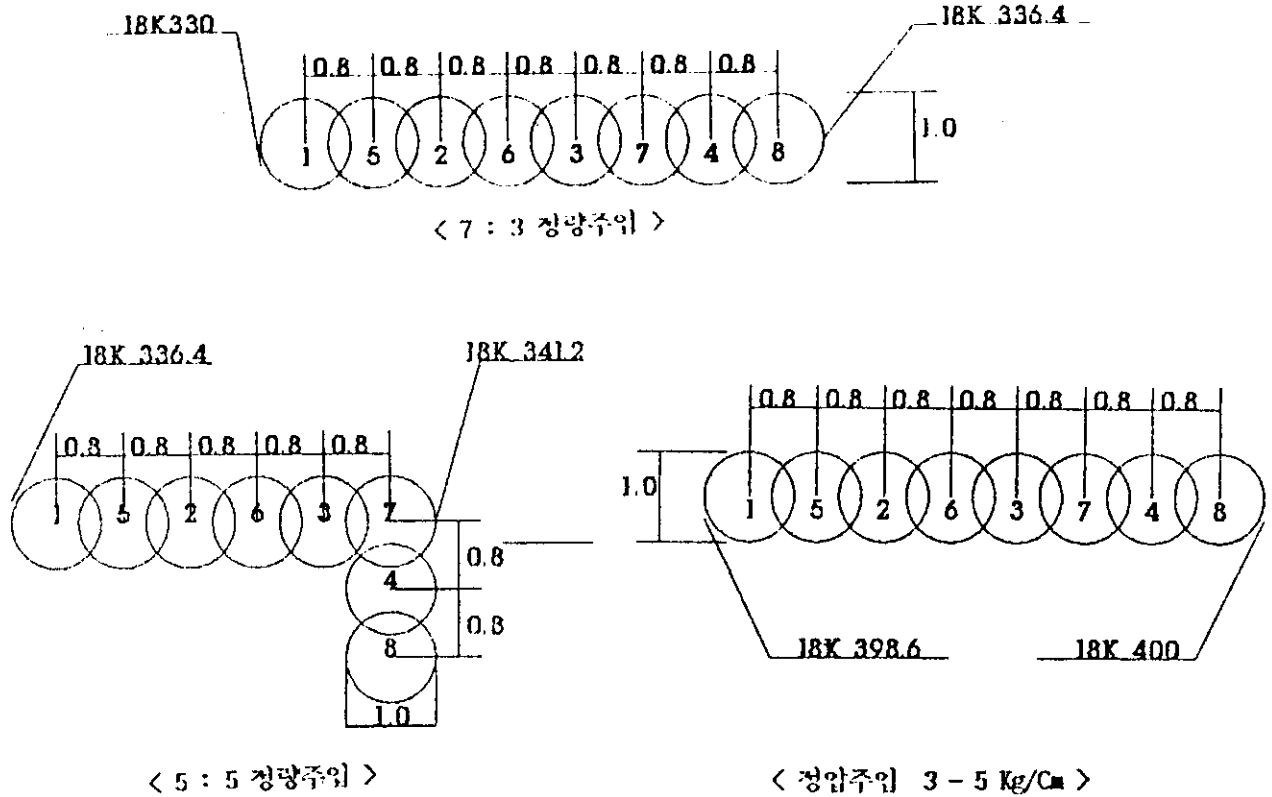


그림 2 주입공 간격·순서도

- 6) 주입방식은 2중관 Rod 에 의한 2.0 SHORT 방식의 1STEP 당 50 cm씩 상승 주입 하였다.
- 7) 1 STEP당 주입은 SHORT GEL 주입재와 MIDDLE GEL 주입재를 각각 반복주 입하여 복합주입이 되도록 하였다.
  - 1차주입 : SHORT GEL TIME GROUT - 대공극 충전. 주입재 주입범위 이탈방지
  - 2차주입 : MIDDLE GEL TIME GROUT - 침투주입실시.
  - 3차주입 : SHORT GEL TIME GROUT - 대공극 재충전.
  - 4차주입 : MIDDLE GEL TIME GROUT - 침투주입 재실시.
 상기주입 방식으로 1 STEP 당 주입을 완료하였다.
- 8) 주입시 복합주입 비율은 일반적으로 SHORT GEL : MIDDLE GEL = 5:5 를 표준으로 하나 본 시험시공에서는 7:3 과 5:5 의 두가지 비율로 하였다.
- 9) 주입시 GEL TIME 은 SHORT GEL TIME 은 6 - 9 초 MIDDLE GEL TIME은 60 - 90초를 유지하면서 주입을 실시하였다.
- 10) 주입압과 주입량은 정량 주입방법과 정압 주입방법으로 나누어 시행하였다.

가) 정량 주입방법 (SHORT : MIDDLE = 7:3)

본 지층의 원지반투수계수가  $10^{-2} - 10^{-3}$  cm/sec 정도로 유속이 크므로 재료

의 손실을 방지하기 위하여 복합 주입비율을 SHORT : MIDDLE = 7:3 으로 하였으며 주입량은 설계주입률을 토사의 경우 29.7% 풍화암의 경우 16.5% 를 적용하였다.

나) 정량 주입방법 (SHORT : MIDDLE = 5:5)

일반적으로 적용하는 표준 복합 주입비율로 SHORT : MIDDLE = 5:5 로 적용하였으며 주입량은 설계주입률을 토사의 경우 29.7%, 풍화 암의 경우 16.5% 를 적용하였다.

다) 정압 주입방법 (SHORT : MIDDLE = 5:5)

본 주입기기의 SYSTEM상 침투능력을 고려한 정상적인 주입압력이 4 - 6 Kg/cm<sup>2</sup> 이므로 여기에 도달할 때 까지 주입량을 무한 주입 하였다. 복합주입 비율은 SHORT : MIDDLE = 5:5 로 하였으며 주입량은 설계주입률이 29.7% 보다 훨씬 많은 40% 이상 소모되었다.

## 2.4 주입재료배합 시방에 및 수량산출

(1) 정량주입방법 (SHORT : MIDDLE = 7:3)

(위치 18K 330 - 18K 336.4 , L = 6.4 m)

Table 1 배합시방 예

( 3조식 교반기 배합능력 800ℓ )

금 결 액					완 결 액				
물	규산소다	물	시멘트	SGR11호	물	규산소다	물	시멘트	SGR12호
140ℓ	140ℓ	235ℓ	84kg	33.6kg	60ℓ	60ℓ	101ℓ	36kg	14.4kg
280ℓ		280ℓ			120ℓ		120ℓ		
6 - 10 초					60 - 90 초				

< 1m<sup>3</sup>당 수량산출 >

$$\text{SGR 11호} : \frac{33.6 \times 1,000}{800} = 42 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{SGR 12호} : \frac{14.4 \times 1,000}{800} = 18 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{규산소다} : \frac{200 \times 1,000}{800} = 250\text{L/m}^3 = 350 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{시멘트} : \frac{120 \times 1,000}{800} = 150 \text{ Kg/m}^3$$

< 주입량 산출 >

$$Q = V \times n \times \alpha \times (1 + \beta) = V \times \lambda$$

여기서,

Q: 주입량,

n: 공극율

V: 주입토상체적,

$\alpha$ : 충전률

$\lambda = n\alpha(1 + \beta)$ : 주입율  $\beta$ : 손실계수

Table 2 설계 정수

구 분	N	n	$\alpha$	$\beta$	$\lambda$
토 사	0 - 30	45	60	10	29.7
풍 화 암	30이상	30	50	10	16.5

$$Q1(\text{토 사}) = (6.5 - 1.0) \times 6.4 \times 1.0 \times 0.297 = 10.45 \text{ m}^3$$

$$Q2(\text{풍화암}) = 1.0 \times 6.4 \times 1.0 \times 0.165 = 1.056 \text{ m}^3$$

$$\therefore Q = Q1 + Q2 = 11.506 \text{ m}^3 / 8\text{공} = 1.44 \text{ m}^3 = 1,440\text{L}$$

< 주입 재료 산출 >

$$\text{SGR 11호} : 11.506\text{m}^3 \times 42 \text{ kg/cm}^3 = 493.25 \text{ kg}$$

$$\text{SGR 12호} : 11.506\text{m}^3 \times 18 \text{ kg/cm}^3 = 207.11 \text{ kg}$$

$$\text{규산소다} : 11.506\text{m}^3 \times 350 \text{ kg/cm}^3 = 4,027 \text{ kg}$$

$$\text{시멘트} : 11.506\text{m}^3 \times 150 \text{ kg/cm}^3 = 1,725 \text{ kg}$$

Table 3 주입량 산출

설계공 당 주입량 Q	1.20 m <sup>3</sup> (GL-2.0M 주입)
시공상 주입량 Q	1.44 m <sup>3</sup> (GL-1.0M 주입)
실 주입량 Q	1.47 m <sup>3</sup> (GL-1.0M 주입)
주입압력 P	최저압 : 2.5 kg/cm <sup>2</sup> , 최고압 : 8.0kg/cm <sup>2</sup>

(2) 정량 주입방법 (SHORT : MIDDLE = 5:5)

(위치 18K 336.4 - 18K 340.4 , L = 6.4 m)

Table 4 배합시방 예

급 결 액					완 결 액				
물	규산소다	물	시멘트	SGR11호	물	규산소다	물	시멘트	SGR11호
1001	1001	1681	60kg	24kg	1001	1001	1691	60kg	23kg
2001		2001			2001		2001		
GT = 6-10 초					GT = 60-90초				

< 1m<sup>3</sup> 당 수량 산출 >

$$\text{SGR 11호} : \frac{24 \times 1,000}{800} = 30 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{SGR 12호} : \frac{23 \times 1,000}{800} = 28.75 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{규산소다} : \frac{200 \times 1,000}{800} = 250\text{L/m}^3 = 350 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{시멘트} : \frac{120 \times 1,000}{800} = 150 \text{ Kg/m}^3$$

< 주입량 산출 >

$$Q = V \times n \times \alpha \times (1 + \beta)$$

여기서,

Q: 주입량, n: 공극율

V: 주입대토상체적, α: 충전률

λ = nα(1 + β): 주입율, β: 손실계수

Table 5. 설계 정수

구 분	N	n	α	β	λ
토 사	0 - 30	45	60	10	29.7
풍 화 압	30이상	30	50	10	16.5

$$Q1(\text{토 사}) = (6.5 - 1.0) \times 6.4 \times 1.0 \times 0.297 = 10.45 \text{ m}^3$$

$$Q2(\text{풍 화 압}) = 1.0 \times 6.4 \times 1.0 \times 0.165 = 1.056 \text{ m}^3$$

$$\therefore Q = Q1 + Q2 = 11.506 \text{ m}^3 / 8\text{공} = 1.44 \text{ m}^3 = 1,440\text{L}$$

< 주입 재료 산출 >

$$\text{SGR 11호} : 11.506\text{m}^3 \times 30 \text{ kg/m}^3 = 346.8 \text{ kg}$$

$$\text{SGR 12호} : 11.506\text{m}^3 \times 28.75 \text{ kg/m}^3 = 332.35 \text{ kg}$$

$$\text{규산소다} : 11.506\text{m}^3 \times 350 \text{ kg/m}^3 = 4,046 \text{ kg}$$

$$\text{시멘트} : 11.506\text{m}^3 \times 150 \text{ kg/m}^3 = 1,725 \text{ kg}$$

Table 6. 주입량 산출

설계공 당 주입량 Q		1.20 m <sup>3</sup> (GL-2.0M 주입)
시공상 주입량 Q	Q	1.44 m <sup>3</sup> (GL-1.0M 주입)
실 주입량 Q	Q	1.47 m <sup>3</sup> (GL-1.0M 주입)
주입압력 P		최저압 : 2 kg/cm <sup>2</sup> , 최고압 : 4 kg/cm <sup>2</sup>

(3) 정압 주입방법 (SHORT : MIDDLE = 5:5)

(위치 18K 395.2 - 18K 400 L = 6.4 m)

주입량과 관계없이 설계기준 주입압력 P= 4 - 6kg/cm<sup>2</sup> 도달할 때 까지 1 STEP 별로 계속 상승 주입하였다.

Table 7. 주입량 산출

설계 공당 주입량 Q	1.20 m <sup>3</sup> (GL - 2.0M 주입)
시공상 중비량 Q	평균 2.79 m <sup>3</sup> (GL - 1.0M 주입)
설계주입 압력 P	3 - 5 kg/Cm <sup>2</sup>
실 주 입 압 력 p	최저압 : 1.5 kg/Cm <sup>2</sup> . 최고압 : 5 kg/Cm <sup>2</sup>

총 주입량 Q = 8공 x 2.79m<sup>3</sup> = 22.32 m<sup>3</sup>

< 주입재료 산출 >

SGR 11호 : 22.32m<sup>3</sup> x 30 kg/m<sup>3</sup> = 669.6 kg

SGR 12호 : 22.32m<sup>3</sup> x 28.75 kg/m<sup>3</sup> = 641.7 kg

규산소다 : 22.32m<sup>3</sup> x 350 kg/m<sup>3</sup> = 7,812 kg

시멘트 : 22.32m<sup>3</sup> x 150 kg/m<sup>3</sup> = 3,348 kg

## 2.5 주입효과 판정

주입현장에서 손쉽게 할 수 있는 주입효과 판정법은 (1) 그라우팅후의 투수계수를 측정하여 비교하는 방법과 (2) 약액주입고결토에 대한 페놀프탈레인 적색 반응 시험 (3) 일축압축강도시험 (4) 표준관입시험등이 있다.

(1) 현장 투수시험 방법 및 성과

그라우팅 전 투수시험은 시추조사와 병행하여 투수시험을 실시하였으며, 그라우팅 후 투수시험은 정량주입(7:3), 정량주입(5:5), 정압주입(5:5), 각각 1공씩 현장투수시험 방법중 변수위법을 사용하였다. 단공식 투수시험으로서 지하수위 이하에 도달하는 보오링 구멍을 굴착하고 케이싱 파이프를 삽입하여 공내의 수위를 높이고 평행에 도달할 때까지 변수위 방식으로 시험하는 주입법을 사용하였다.

$$K = \frac{2.3 r}{4 T} \log \frac{H1}{H2} \text{----- (1)}$$

여기서,

K : 투수계수

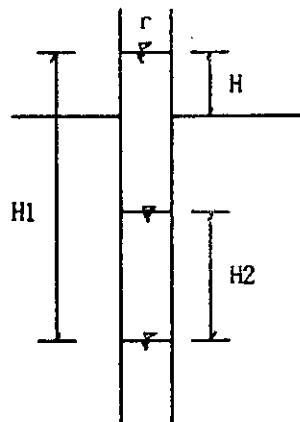
H : 지표면에서 올라온 케이싱 높이

H1 : 시간 t1 일때의 수위

H2 : 시간 t2 일때의 수위

r : 케이싱 반경

T : 측정 시간



i) 그라우팅 전 현장투수시험

지하수위 : 3.30 m, 케이싱 높이 : 0.34 m, 천공심도 : GL -4.0 m

위 치	심 도 M	시 간 SEC	수위저하깊이 M	투 수 계 수 Cm/sec	비 고
18k 334	GL -4.0	0	364	0	
		23	264	0.0113	
		42	214	0.0103	
		64	164	0.0101	
		97	114	$9.71 \times 10^{-3}$	
		139	64	0.0101	
		156	44	0.011	
	평 균			0.0104 Cm/sec	

지하수위 : 3.30 m, 케이싱 높이 : 0.74 m, 천공심도 : GL -6.8 m

위 치	심 도 M	시 간 SEC	수위저하깊이 M	투 수 계 수 Cm/sec	비 고
18k 337	GL -6.8	0	404	0	
		5	304	0.0461	
		6	254	0.0828	
		8	204	0.0693	
		10	154	0.0783	
		17	104	0.0648	
	평 균			0.0642	

ii) 그라우팅 후 투수시험

① 정량주입방법 (SHORT : MIDDLE = 7:3)

지하수위 : 3.30 m, 케이싱 높이 : 0.95 m, 천공심도 : GL -4.0 m

위 치	심 도 M	시 간 SEC	수위저하길이 M	투 수 계 수 Cm/sec	비 고
18k 334	GL -4.00	0	425	0	
		30	423.3	$1.08 \times 10^{-4}$	
		60	421.6	$1.09 \times 10^{-4}$	
		90	419.5	$1.17 \times 10^{-4}$	
		120	418.0	$1.12 \times 10^{-4}$	
		150	416.1	$1.15 \times 10^{-4}$	
		180	414.7	$1.11 \times 10^{-4}$	
		210	413.2	$1.09 \times 10^{-4}$	
		240	411.9	$1.06 \times 10^{-4}$	
		270	410.9	$1.01 \times 10^{-4}$	
		300	408.8	$1.05 \times 10^{-4}$	
		330	407.8	$1.02 \times 10^{-4}$	
		360	406.1	$1.03 \times 10^{-4}$	
		390	405.0	$1.00 \times 10^{-4}$	주입전 투수계수
	평 균			$1.07 \times 10^{-4}$	0.0104

② 정량주입방법 (SHORT : MIDDLE = 5:5)

지하수위 : 3.30 m, 케이싱 높이 : 0.50 m, 천공심도 : GL -4.0 m

위 치	심 도 M	시 간 SEC	수위저하길이 M	투 수 계 수 Cm/sec	비 고
18K 338.4	GL -4.00	0	380	0	
		300	379.6	$2.85 \times 10^{-6}$	
		600	379.1	$3.21 \times 10^{-6}$	
		900	378.6	$3.33 \times 10^{-6}$	주입전투수계수
	평 균			$3.13 \times 10^{-6}$	0.0104

지하수위 : 3.30 m, 케이싱 높이 : 0.50 m, 천공심도 : GL -4.0 m

위 치	심 도 M	시 간 SEC	수위저하길이 M	투 수 계 수 Cm/sec	비 고
18K 338.4	GL -5.5	0	460	0	
		60	459.1	$2.65 \times 10^{-5}$	
		120	458.6	$2.06 \times 10^{-5}$	
		180	458.2	$1.77 \times 10^{-5}$	
		240	458.0	$1.47 \times 10^{-5}$	
		300	457.8	$1.30 \times 10^{-5}$	
		360	457.6	$1.18 \times 10^{-5}$	
		420	457.4	$1.09 \times 10^{-5}$	
		480	457.2	$1.03 \times 10^{-5}$	
		540	457.0	$9.83 \times 10^{-6}$	
		600	456.8	$9.44 \times 10^{-6}$	
		900	456.0	$7.88 \times 10^{-6}$	주입전 투수계수
	평 균			$1.38 \times 10^{-5}$	$6.42 \times 10^{-2}$

③ 정압주입방법 (SHORT : MIDDLE = 5:5)

지하수위 : 3.30 m, 케이싱 높이 : 0.70 m, 천공심도 : GL -4.0 m

위 치	심 도 M	시 간 SEC	수위저하길이 M	투 수 계 수 Cm/sec	비 고
18K 398.4	GL -4.00	0	400	0	
		300	399.6	$2.70 \times 10^{-6}$	
		600	399.1	$3.05 \times 10^{-6}$	
		900	398.9	$2.48 \times 10^{-6}$	주입전투수계수
	평 균			$2.74 \times 10^{-6}$	$1.04 \times 10^{-2}$



지하수위 : 3.30 m, 케이싱 높이 : 0.70 m, 천공심도 : GL -5.0 m

위 치	심 도 M	시 간 SEC	수위저하길이 M	투 수 계 수 Cm/sec	비 고
18K 398.4	GL -5.0	0	400	0	
		60	399.5	$1.69 \times 10^{-5}$	
		120	399.4	$1.02 \times 10^{-5}$	
		180	399.3	$7.90 \times 10^{-6}$	
		240	399.1	$7.62 \times 10^{-6}$	
		300	398.9	$7.45 \times 10^{-6}$	
		360	398.8	$6.77 \times 10^{-6}$	
		420	398.6	$6.77 \times 10^{-6}$	
		480	398.5	$6.35 \times 10^{-6}$	
		540	398.4	$6.02 \times 10^{-6}$	
		600	398.1	$6.44 \times 10^{-6}$	
		900	398.0	$4.52 \times 10^{-6}$	주입전 투수계수
	평 균			$7.90 \times 10^{-6}$	$6.42 \times 10^{-2}$

④ 그라우팅 전후 투수계수 총괄

그라우팅 전 투수계수

공별 위치	심 도	지하수위	투수계수	비 고
18k 334	GL -4.0m	3.3m	0.0104	
18k 338	GL -6.8m	3.3m	0.0642	

그라우팅 후 투수계수

공 별 위 치	시 공 방 법	배 합 비 율		지 하 수 위 (M)	심 도 (M)	투 수 계 수	비 고
		급 결	완 결				
18k 334	정 량 주 입	7	3	3.3	4.0	$1.07 \times 10^{-4}$	
18k 338	정 량 주 입	5	5	3.3	4.0	$3.13 \times 10^{-6}$	
18k 338	정 량 주 입	5	5	3.3	5.5	$1.38 \times 10^{-5}$	
18k 398.4	정 압 주 입	5	5	3.3	4.0	$2.52 \times 10^{-6}$	압 력 1.5-5kg/Cm <sup>2</sup>
18k 398.4	정 압 주 입	5	5	3.3	5.0	$7.89 \times 10^{-6}$	"

(2) 페놀프탈레인 반응시험

약액주입효과를 판정하기 위하여 육안식별 방법인 페놀프탈레인 적색반응시험을 하였다. Phenolphthalein ( $C_{20}H_{14}O_4 = 318.33$ )을 1g당 물 200cc에 희석하여 채취된 자연 시료(주입고결토)에 분무하여 즉시 반응 색깔을 관찰한 바 매우 양호한 적색반응을 나타내었다.

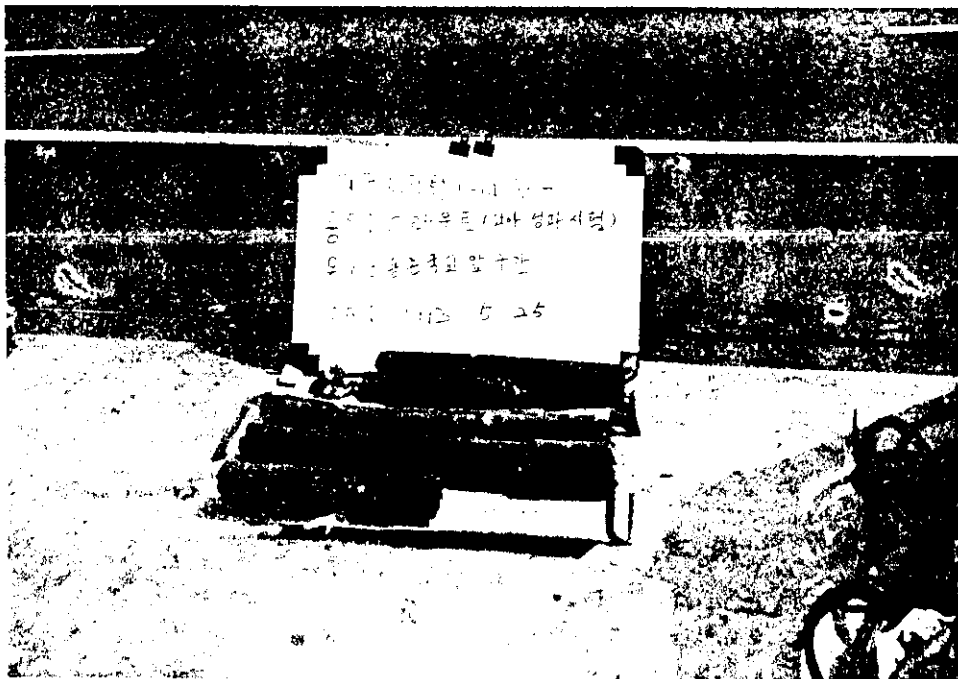


사진 1 페놀프탈레인 반응시험

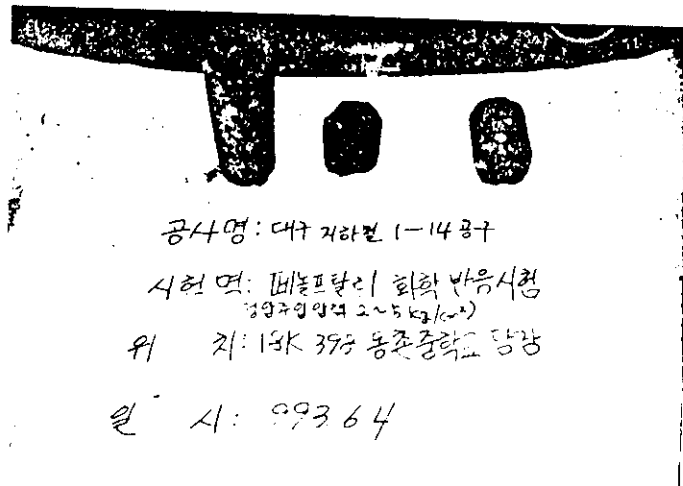


사진 2 페놀프탈레인 반응시험(정량주입)

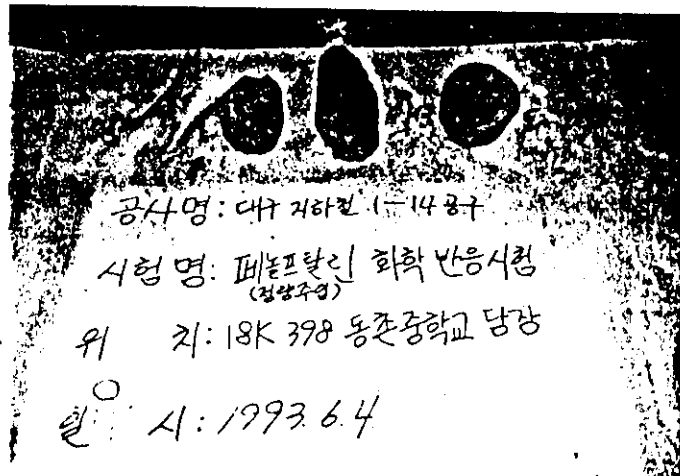


사진 3 페놀프탈레인 반응시험(정압주입)

(3) 표준관입(N치) 시험

약액주입후 10일 경과 지반에 대한 표준관입시험을 실시하였는 바 KSF 규정에 의거 중량 63.5kg 해머를 낙하고 75cm에서 타입하여 샘플러가 30cm 관입하는 데 필요한 타격회수를 측정하였다.

원 지 반		주입후 10일 경과 지반					
		정량 (7:3)		정량 (5:5)		정압 (5:5)	
심 도	N 치	심 도	N 치	심 도	N 치	심 도	N 치
3.00M	10/30	x	x	x	x	x	x
4.00M	15/30	4.00M	15/30	4.00M	20/30	4.00M	23/30
4.50M	21/30	4.60M	23/30	4.50M	25/30	4.50M	28/30
5.00M	25/30	5.20M	25/30	5.00M	28/30	5.00M	34/30
6.00M	35/30	6.00M	34/30	6.00M	37/30	6.00M	41/30
7.00M	45/30	7.00M	x	x	x	x	x

이상과 같이 원지반에 비해 주입후의 경우가 지반개량효과(N치 증대 효과)가 확실히 있음을 알 수 있으며 정량주입(7:3), 정량주입(5:5), 정압주입(5:5) 순으로 증대되도 알 수 있다.

#### (4) 일축압축시험

지반주입 3주 양생후 일축압축강도는  $q_u = 7.7 \text{ kg/cm}^2$ 으로 얻어졌는 바 주입전에 비해 상당한 효과가 있음을 알 수 있다.

### 2.6 종합평가

약액주입시공은 반드시 시험주입을 실시한 후 토질에 적합한 주입재의 선정, 주입률, 주입압, GEL TIME, 주입폭(열)등을 결정하여 주입시공을 실시한다면 유속이 큰 모래층이나 사력층에서 주입효과를 기대할 수 있다. 본 현장의 경우 주입효과 판단을 현장투수시험, 페놀프탈레인 반응시험, 표준관입시험(N치)등에 의해 실시 하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 현장투수시험에 의한 차수효과면에서는 정량주입(7:3), 정량주입(5:5), 정압주입(5:5) 순으로 증가되었다.

#### 1) 정량 주입 방법 (SHORT : MIDDLE = 7:3)

복합주입비율을 SHORT : MIDDLE = 7:3로 하고 일정 설계주입량이 주입되도록 하였으며 이때 압력은  $2.5\text{kg/cm}^2$  에서  $8\text{kg/cm}^2$  정도였다. 주입공과 공사이에서 투수계수를 측정한 결과  $K = 1.07 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$  정도로 나 타났는 바 이는 급결액 비율이 많아 침투범위가 1m에 미치지 않은 것으로 판단된다. 만약 7:3 비율로 한다면 천공간격을 더좁히는 것이 바람직 하리라 본다.

#### 2) 정량 주입 방법 (SHORT : MIDDLE = 5:5)

복합주입비율을 SHORT : MIDDLE = 5:5로 하고 일정량(설계주입량)이 주입되도록 하여 주입한 결과 주입압력은  $2\text{kg/cm}^2 - 4\text{kg/cm}^2$  범위까지 도달하였다. 주입공과 공사이에서 투수계수를 측정한 결과  $K = 10^{-5} \text{ cm/sec}$  로 양호한 결과를 얻었다.

#### 3) 정압 주입 방법 (SHORT : MIDDLE = 5:5)

복합주입비율은 SHORT : MIDDLE = 5:5를 유지하면서 주입장치의 정상적인 일정한 압력  $4 \sim 6\text{kg/cm}^2$  는  $5\text{kg/cm}^2$ 에 도달 할 때까지 주입량과는 무관하게 주입한 결과 주입공과 공사이에서 투수계수가  $10^{-5} - 10^{-6} \text{ cm/sec}$  정도로 매우 양호한 결과를 얻었으나 주입량이 1) 2) 의 공당 평 균주입량  $1.44 \text{ m}^3$ 보다 2배 정도 되는  $2.79\text{m}^3$  의 양이 소모되었다.

(2) 페놀프탈레인 반응시험에 의하면 정량주입, 정압주입 모두 기대할 만한 적색반응을 보였다.

(3) 표준관입시험에 의하면 원지반에 비해 주입 개량효과를 확실히 알 수 있었으며, 정량주입(7:3), 정량주입(5:5), 정압주입(5:5) 순으로 증대되도 알 수 있었다.

(4) 일축압축시험에 의하면 일축압축강도는  $q_u = 7.7 \text{ kg/cm}^2$ 으로서 주입전에 비해 상당한 효과가 있음을 알 수 있다.

#### (5) 시공 방법 결정

지반강도 증대면에서나 차수효과 면에서나 가장 안전하게 시공하기 위해서는 3)의 방법인 정압주입 방법으로 시공하여야 겠지만 2)의 방법인 정량주입방법의 결과 투수



### 3.3 굴착전 예상침하량 추정

#### 가. Peck의 곡선 Graph법

Peck은 토질조건 및 굴착형태에 따라 여러 현장의 계측자료를 분석하여 경험적인 침하 해석도를 제안하였다. Surcharge 하중이 없는 사질토, 점성토의 경우에 대한 실험치이므로 본 검토에서는 차랑하중을 DL-24(등분포하중 1.3t/m)로 보고 굴토깊이로 환산하여 계산하면 다음의 표와 같다.

Table 1. 굴착면으로 부터의 거리에 따른 예상침하량(PECK)

굴토면과 거리 (m)	$A_i = \frac{x}{13.3}$	$B_i$ (%)	침하량 (cm)
0	0.00	1.50	19.9
2	0.15	1.35	18.0
4	0.30	1.15	15.3
6	0.45	1.00	13.3
8	0.60	0.90	12.0
10	0.75	0.80	10.6
12	0.90	0.70	9.3
14	1.05	0.60	8.0
16	1.20	0.55	7.3
18	1.35	0.45	6.0
20	1.50	0.40	5.3
22	1.65	0.35	4.7
24	1.80	0.30	4.0

\* 굴토깊이는 13.3m에 대하여 그림에서 영역Ⅱ의 중간값으로 계산하였음.

#### 나. FRY ET AL 방법

FRY ET AL은 지반을 완전탄성 및 포화된 것으로 가정하여 실시한 KYROU의 유한요소해석 결과치를 지반조건에 따라 확장시켜 탄성식을 제안하였다.

Table 2. 굴착면으로 부터 거리에 따른 예상 침하량(FRY ET AL)

굴토면과의 거리 (m)	$A_i = \frac{x}{13.3}$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	수평변위 ( $\xi_n$ )	수직변위 ( $\xi_v$ )
0	0.00	0.65	-0.090	0.300	0.20	14.2	21.1
2	0.15	0.60	-0.090	0.330	0.18	12.7	20.5
4	0.30	0.55	-0.090	0.270	0.16	11.2	17.7
6	0.45	0.51	-0.087	0.240	0.14	10.2	15.7
8	0.60	0.47	-0.083	0.210	0.12	9.2	13.6
10	0.75	0.45	-0.080	0.170	0.10	8.8	11.2
12	0.90	0.43	-0.076	0.140	0.08	8.4	9.1
14	1.05	0.41	-0.071	0.120	0.07	8.0	7.8
16	1.20	0.38	-0.068	0.100	0.06	7.4	6.6
18	1.35	0.36	-0.063	0.090	0.05	7.1	5.7
20	1.50	0.33	-0.056	0.075	0.04	6.6	4.7
22	1.65	0.29	-0.052	0.065	0.03	5.6	3.8
24	1.80	0.26	-0.047	0.060	0.025	5.0	3.3

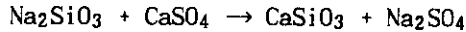
\* 굴토깊이 13.3m에 대해서 계산



본 공법은 이러한 잇점을 갖고 있으므로 LW의 의미는 Least Work임을 알 수 있다. 또한 케미젝트공법에 준해서 시멘트약액(A액)과 물유리(B액)를 각각 별개의 펌프를 갖고 동압동량으로 보내 주입파이프의 두부에 붙인 Y자형 파이프를 합류혼합하여 주입하게 되는 이른바 1.5 Shot System (2액1공정)에 의한 것으로 재료의 낭비가 생기지 않고 재료비, 공비 모두 저렴하다.

○ LW의 화학반응

시멘트의 주성분인 규산3석회(3CaO·SiO<sub>2</sub>)와 Water-Glass 속의 규산이온(SiO<sub>3</sub><sup>-</sup>)과 결합하여 규산수화물로 되어 Gel화 되며 화학변화는 다음과 같다.



(규산소다)(규산3석회) Gel화 반응

○ LW의 표준배합

Table3 터널복공배면누수방지, 충전용 Table4 지반주입시(차수 및 지반강화)

(m <sup>3</sup> 당)					(m <sup>3</sup> 당)				
A 液		B 液			A 液		B 液		
Water-glass (ℓ)	水 (ℓ)	시멘트 (kg)	벤드나이트 (kg)	水 (ℓ)	Water-glass (ℓ)	水 (ℓ)	시멘트 (kg)	벤드나이트 (kg)	水 (ℓ)
250	250	250	25	420	350	150	200	20	430
500		500			500		500		

※ TUNNEL 覆工背面注入은 單純注入이며, 그라우트液의 分離現象과 變化過程이 定量注入이 되므로 上記表의 配合比를 많이 採択함.

※ 地盤注入은 大概 地層 條件이 深度別 層別로 不均一한 變化가 있으므로 複合注入 施行이 原則이며 複合注入의 中心資材는 ILW Grout液이 大體로 됨.

○ LW공법의 장점

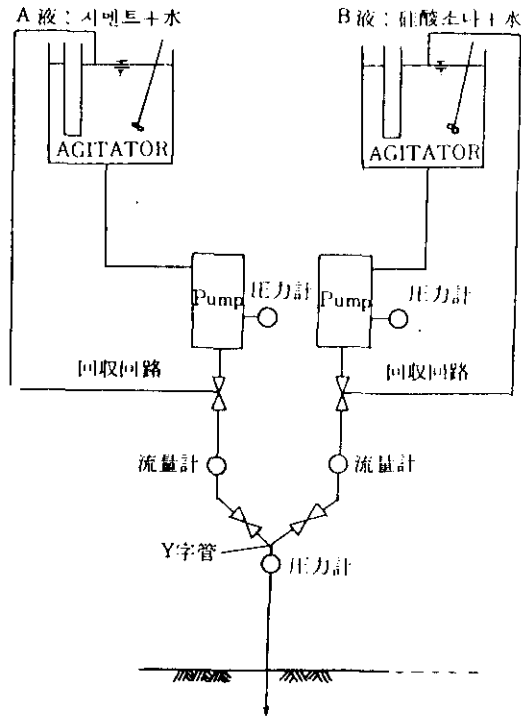
- 약액주입공법중에서 시멘트가 혼입되어 있어서 고결물강도가 높고 침투성이 양호하다.
- 주입장비, 주입재료가 시공법에 비해 공비가 저렴한 공법이다.
- 느슨한 모래지반에서 주입재를 소정의 위치에 균일하게 일정범위의 주입이 가능하므로 확실한 주입효과가 있다. 그러나 점성토(Silt, Clay), 밀실한 사질토에서는 대공극을 메우는 맥상주입효과가 크다.
- 동일개소에 상이한 종류의 주입재를 반복주입할 수가 있다.
- 천공과 주입의 작업공정을 분리하여 진행시킬 수 있으며 작업이 단순하고 시공관리가 용이하다.
- 겔타임의 조절은 시멘트량의 증감에 의하므로 간단하다.

3.5 LW공법의 주입방식 및 시공순서

가. 주입방식은 맨체트튜브(프랑스 Soletanche공법)를 사용하고 있다. 또 경화시간에 따른 주입 System에서 주로 1.5 Shot방식을 사용한다.



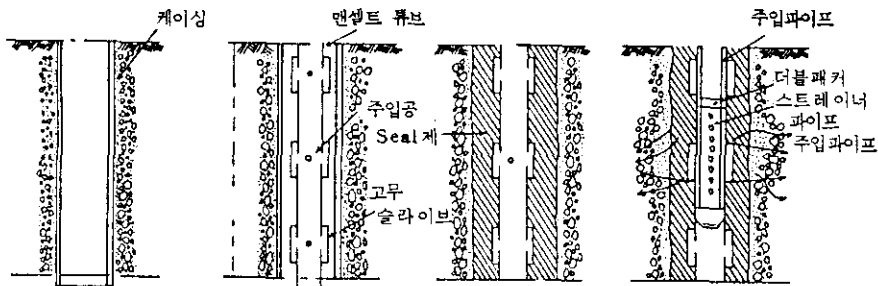
1.5 SHOT 方式



※ Y字管内에서 合流, 地盤内에서 固結  
Gel化 時間이 3分-數10秒인 藥液  
에서 使用 (LW液注入)

그림 3

나. 시공순서



맨셴트 튜브를 이용한 시공순서

그림 4

- ① 소정의 깊이까지 직경 10cm정도로 지반을 착공하고 케이싱을 삽입한다.
- ② 30~50cm 간격으로 주입공이 뚫려있고 그 부위에 밸브작용을 하는 고무 슬라이브가 부착된 맨셴트 튜브를 삽입한다.

- ③ 맨체튜브의 삽입이 완료된 후 맨체튜브와 케이싱의 사이에 적당한 Seal재를 주입하고 케이싱을 인발한다.
- ④ 상하에 두개의 패커가 장치된 주입관을 맨체튜브 속에 넣고 원하는 위치부터 주입을 한다. 이 때 주입재는 맨체튜브의 주입공을 통해 고무슬리이브를 밀고 나와 Seal재를 파괴하며 지반속으로 침투한다.

### 3.6 적용토질 및 적용범위

#### 가. 적용토질

주입재의 적용성을 판단할 수 있는 가장 큰 요소는 주입재의 침투성이다. 아래 그림에 LW재의 침투범위를 표시하였다. LW재의 침투성은 사용된 시멘트에 따라 다르다.

Table 5

트립자경 (mm)		2.00		0.25		0.074		0.005	
		력	조	중	세	사	실	트	점
그라우트의 종류	토질명		공	극					
	시멘트현탁액	■	중	전					
	L · W	■							
	용액	■							

- 주) 가. ■ 침투주입이 가능한 범위
- 나. ■ 樹枝狀의 침입에서 주변에의 침투가능범위
- 다. ■ 樹枝狀의 호모겔 침입가능범위

#### 나. 적용범위

LW공법은

- ① 터널
  - 기존터널 배면복공주입
  - 신설터널 바면복공주입으로 누수방지 및 연약대 보강
  - Earth Tunnel의 용출수 방지 및 붕괴지반 고결
- ② 쉴드공법
  - 쉴드공법용 연직말뚝배면 누수방지 및 발진부 지반고결
  - 쉴드공법배면 충전 및 보강
- ③ 댐
  - 노후화 각종 댐 누수방지 및 보강
  - 기초사력댐 누수방지 및 보강
  - 댐 기초의 Consolidation Grout, Curtain Grout 및 단층대 등의 폐색 및 지수보강 등
- ④ 토류벽 보강
  - 건축기초 토류벽 배면보강 및 지수공
  - 지하철토류벽 배면보강 및 누수방지공
  - 옹벽기초 및 배면보강
- ⑤ 교량기초
  - 교량Pile기초 침하부보강주입
  - 교대부 기초보강 및 전도방지공

⑥ 각종구조물기초

- 각종구조물 기초의 침하 방지용 보강공
- 구조물 기초인접굴토시의 탈수 침하현상방지 등

#### 4. 고압분사주입 Jet Grout, SIG공법 시공사례

##### 4.1 현황

일산선 00공구 복선 00K000 부근 APT 미시공구간의 토류공에 관련하여, 제시된 토류공설계도(SCW), 구조계산서, 지질조사보고서 등 설계도서를 자료로 하여 지하수 누출, 파이핑현상 및 토류공 안정에 관하여 검토하고자 한다.

##### (1) 토층 및 지하수상태

대상지반의 지층은 지하수위가 매우 높아 GL-1.0m이며 지표로부터 GL-10.0m전후까지 실트층, GL-12.0m까지 모래층, GL-21.0m전후까지 자갈층, 그 이하는 풍화암, 연암 순으로 성층되어 있다. 또한 실트층과 풍화암층 사이의 자갈층은 피압대수층으로 볼 수 있다.

##### (2) 현장상황

토류벽배면 지상에는 최근 약 3m높이의 토공사 성토작업이 이루어져 있는 상태이며 최근 신축된 고층APT의 사하층과 함께 상재하중이 가하여져서 토압의 급증으로 인해 토류벽에 큰 부담이 되고있다.

GWL을 GL-1.0m, GL-4.0m로 보아 파이핑에 대한 안전성을 검토해 보면 모두 불안정한 상태이며 안전을 위한 상기 안전검토는 Soil Cement의 Wall(벽체)시공이 완벽하게 이루어져서 Pile과 Pile사이에 전혀 틈이 없다고 가정하여 계산한 것이다.

##### 4.2 기존 설계도서의 검토 및 예상되는 문제점

제시된 구조계산서에 의하면 토류공의 토압산정에 있어서 상재하중은 단순히 1.0t/m<sup>2</sup>로 보았고 인접건물의 사하중은 전혀 고려되지 않는 등 현실과 동떨어진 설계조건이어서 과소설계임이 분명하며 벽체의 근입장은 d<sub>2</sub>=6.5m이나 풍화암층에는 전혀 근입되어 있지 않다.

따라서 다음과 같은 문제점이 예상된다.

첫째, Piping현상이 예상되며

둘째, 토류벽이 연속적으로 이루어지지 않게 되면 SCW의 Pile과 Pile틈에서 다량의 지하수 및 토사유출이 예상된다.

셋째, E/A천공시 상당량의 지하수 유출이 예상된다(더욱 E/A의 공위치가 피압대수층과 일치하고 있다).

이상과 같은 이유로 지하수 및 토사가 유출되어 토류벽배면의 지반 및 인접구조물의 부동 침하가 우려된다. 지하수위저하영향범위(반경)는 GWL이 GL-10.0m로 저하할 경우 R=60.4m인 바, 이 범위에 드는 구조물에 대해서는

주의(정밀 안정검토)하여야 한다.

일반적으로 SCW공법은 과포화 Silt층, 사력층에서 특히 침투수압이 클 경우 장비 운용 등이 문제되기 쉬우므로 SCW 시공은 부적합하고, 더욱 시공심도가 과대하게 깊어지면 그 만큼 신뢰도는 떨어진다. 즉, 심층 시공시 연속벽에 틈이 발생하는 예가 허다하고 더욱 풍화암층에서는 근입장이 확보될 수 있도록 신경을 써서 시공하지 않으면 Piping 등에 따른 붕괴사고 등 커다란 문제발생 예가 많다. 또한 본 지층은 상부에 과

포화상태의 실트층이 있고 더욱 하부에 피압대수층이 있는 바 일반적인 방법으로는 소요강도를 기대하기 어려우며, 자갈층에서는 시공상 많은 어려움이 따르게 되는 바 철저한 품질관리, 시공관리가 되지 않으면 안된다.

#### 4.3 대책공법(안)

이에 대한 대책공법(안)으로서는

첫째, SCW의 Pile과 Pile사이에 틈이 생기지 않도록하여 완벽한 지하연속벽체가 조성되도록 시공하여야 하며

둘째, 풍화암속에 풍화정도에 따라 최소 1~2m 깊이까지 근입되도록 하여 Piping에 대비한 근입장 확보를 확실히 해두어야 한다. 즉, 근입장  $d_2$ 의 연장효과를 높여야 하고

셋째, 지하수 중에서의 쏘일시멘트의 강도확보를 위해 시멘트의 혼합 비 증대 및 급결제, 벤토나이트 등 제2첨가제를 사용하는 등의 품질관리가 요망된다.

넷째, E/A를 Strut구조로 바꾸고 구체 콘크리트 타설시 Strut를 그대로 사장시켜야만 토류벽의 변형을 최소화시킬 수 있다.

다섯째, 이들을 종합적으로 보완하기 위하여 토류벽배면에 제2열의 지중벽체 형성을 제안하는 바이다.

즉, 균열, 절리가 심한 본 지층의 풍화암은 상당한 투수성을 갖고 있는 바, SCW벽체를 풍화암 깊숙히 까지 건입시켜 일체화시켜 줄 수 있는 암반 그라우팅이 바람직하며 또한 토층하반부의 피압대수층인 자갈층에서의 SCW벽체에서의 지하수유출을 막기 위해서는 SCW배면에 제2열의 토류벽을 형성시켜줄이 바람직하다. 제2열의 토류벽의 경제적 시공을 위해서는 제1열 SCW의 시공상황을 보아 가면서 사층(예, GL-9.0m~-10.0m 정도)에서 부터 시공할 수 있다. 이 두가지 목적을 동시에 만족하기 위해서는 강력한 보조공법(예, Jet Grout, SIG공법)이 적합하리라 사료된다.

한 편 위와 같은 2개열의 SCW 대신에 보다 강력한 토류공(예, Jet Grouting, SIG Column) 1열도 가능할 것으로 사료된다. 더욱, 우기에 접어들게 되면 지하수위의 상승에 의해 현재 보다 더 큰 수압을 받게 될 수 있으므로 토류공의 설계시공시에는 이와 같은 계절에 대한 고려도 잊어서는 안된다.

더욱 APT 기시공구간의 경우는 APT건물이 불과 13.0m거리에 위치하고 있는가 하면 굴착심도는 16.0m전후이며 더욱 건물기초가 지지말뚝이 아닌 마찰말뚝으로 자갈층에 관입되어 있는 등 매우 불안정한 상태에 있다. 따라서 토류벽 변형 또는 지하수위저하 등의 영향은 곧 직접적으로 건물에 미치게 되어 있다. 지반굴착으로 인해 야기되는 토압 및 수압에 의한 토류벽의 변형을 검토하여야 하며, 더욱 지반이 굴착시 다량의 지하수유출로 인하여 지하수위가 저하될 것으로 예상되며, 이로 인해 지반 및 인접건물의 부등침하붕괴가 우려된다. 따라서 이에 대한 FEM해석 등 정밀한 안정검토가 이루어져서 지반굴착시공 전에 토류공은 물론 인접 건물기초의 Underpinning공 등의 보완이 반드시 선결되어야 한다.

아무리 우수한 공법이라 하더라도 시공상에 문제가 있으면 결코 소기의 목적을 달성할 수 없다. 또한 지반개량은 복잡한 지하토층 또는 지하수중에서 이루어지고 따라서 그 효과는 시공기술자에 따라 매우 민감하게 나타나는 바, 해당 전문업체선정시에는 반드시 해당공법의 시공실적은 물론 설계서에서 확실한 역학계산 근거를 확인 검토하여 경험많은 전문업체로 하여금 정교하게 책임시공을 할 수 있도록 하여야 한다.

\* SIG 분사 SYSTEM

A. PS-3A SYSTEM

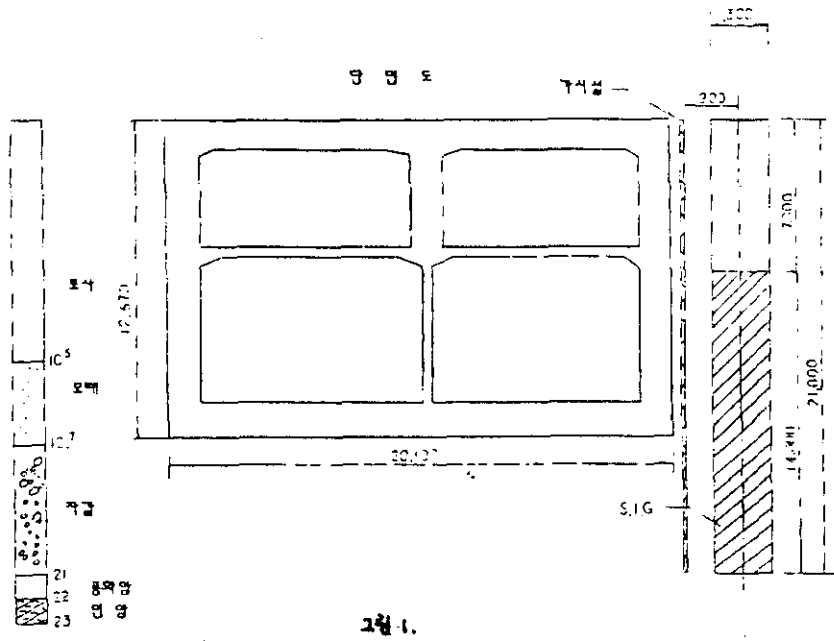


그림 1.

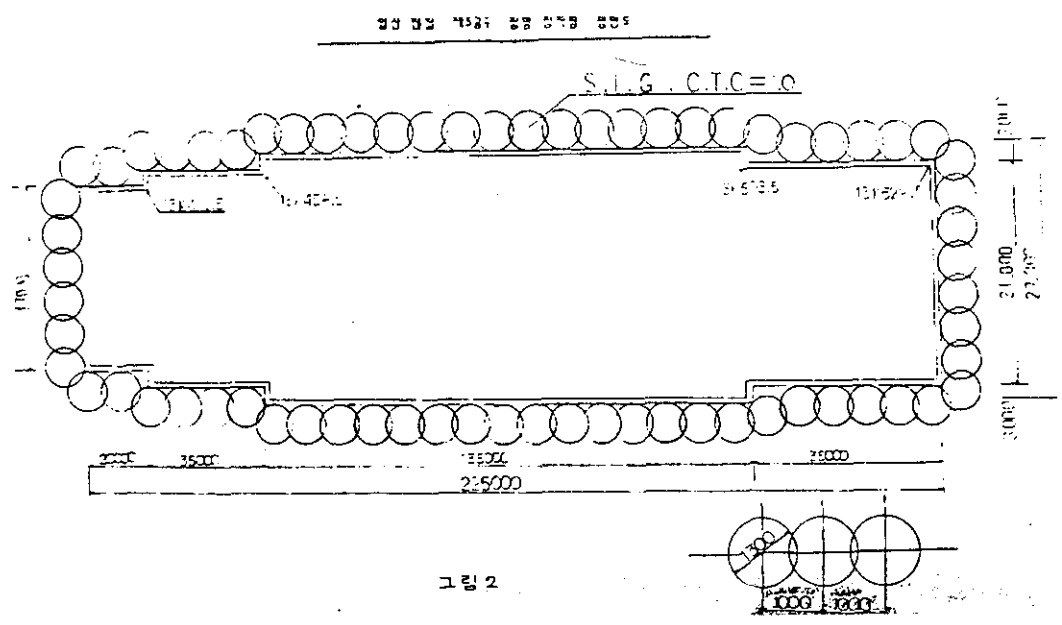


그림 2

- B. NOZZLE SIZE - WATER용  $\phi$  2MM  
CEMENT MILK용  $\phi$  3.0MM
- C. ERILL PIPE : TRIPLE TUBE  $\phi$  96MM
- D. 사용압력 - 파괴용 물분자 500BAR  
CEMENT 분사 100-200 BAR
- E. CEMENT:WATER 중량 - 420KG : 300KG
- F. 인발속도 : 8SEC/4CM
- G. 생산 COLUMN SIZE :  $\phi$  1300MM
- H. C.T.C. = 1.0M
- I. 단위 M 당 사용량 550KG/M  
주입시간 : 1시간 20분 - 40분

#### 4.4 대상 구조물 단면도

그림 1 참조

#### 4.5 적용공법 단면도 및 평면도

그림 2 참조

#### 4.6 SIG 공법의 원리 및 특징

SIG 공법은 그림에서와 같이 공기와 물의 힘으로 지반을 굴삭하여, 그것을 지표에 배출함에 따라 지중에 인위적인 공동을 만들고 그곳에 고화재를 충전하는 치환공법이므로 Grout라는 이름이 붙어 있으나 지반내에 Head 이외에는 압력이 없으므로 지금까지의 약액주입공법 또는 기존 강제교반공법의 가장 큰 문제점의 하나인 수압파쇄현상 (Hydraulic Fracturing) 또는 지반응기현상 즉, 주변의 구조물이나 매설물을 떠올리거나, 파손시키지 않는하고 확실한 공법이다. 이와 같이 지반내에는 Head 이외의 압력이 남아있지 않는 것이 이 공법의 특징이다.

또한 본 공법은 일종의 치환공법이기 때문에 지중에서 고화제를 주체로 하여 고강도이며 지수성이 높은 고결체가 완성된다. 약액주입과 같이 토립자의 공극을 메우는 것이 아니고, 원칙적으로 토립자나 물을 지표로 배제함으로써 생긴 공동내에 고화재를 충전하는 공법이므로 원지반과는 전혀 다른 성질의 고결체가 형성되는 것이다.

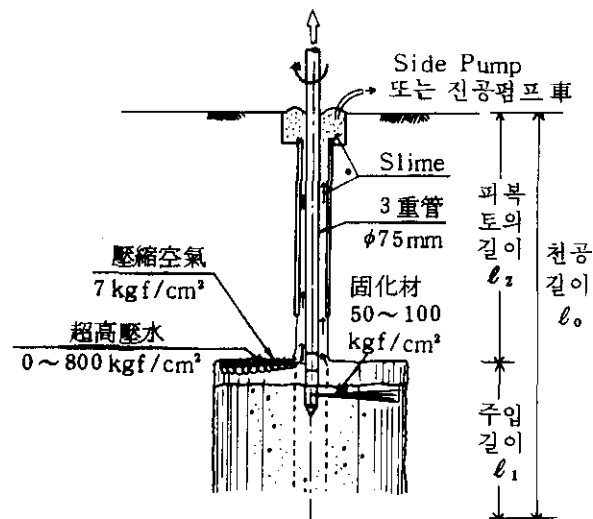


그림 3

대부분의 토립자는 지표로 배제되지만 사략이나 큰 토립자 등을 주체로한 일부의 것은 고결체내에 남아 있으므로 모래층에서는 모르타형, 점성토에서는 Soil Cement 모양으로 된다. 또한 목적에 따라 다음과 같이 3 가지의 종류로 구분된다.

1) COLUMN S.I.G 형

모든 조건 하에서 서용할 수 있는 공법으로서, 특히 큰 토압, 수압을 받는 경우에는 더욱 우수하다. 예를 들면 건물을 지지하는 말뚝으로서, Shield 발진 도달부의 경부 토류손실부의 보강등의 경우에는 그 위력은 다른 공법에 비해 월등하다고 알려져 있다.

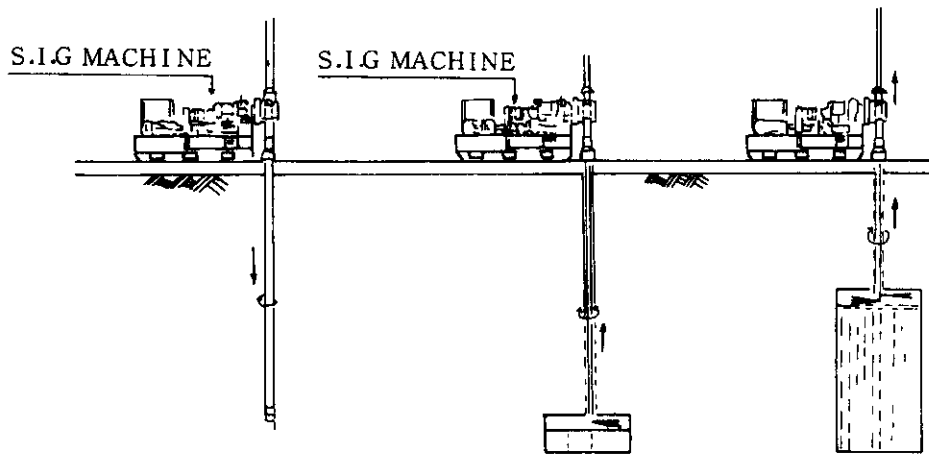


그림 4 Column S.I.G 시공순서

2) PANEL S.I.G형

지수막으로서 차수효과를 기대할 때 쓰는 공법으로서 특히 이 지수막이 직접토압, 수압에 대항하며 이것만으로 자립할 필요가 없을 때, 특히 효과적이며 경제적이라고 알려져 있다.

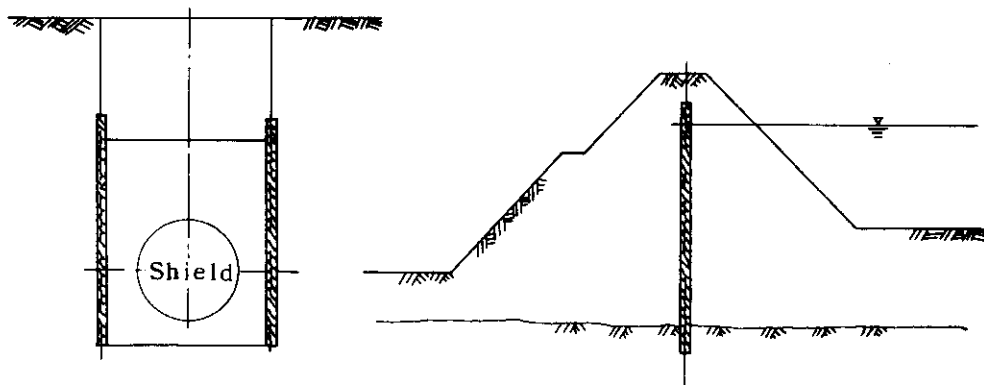


그림 5 PANEL S.I.G 사용 예

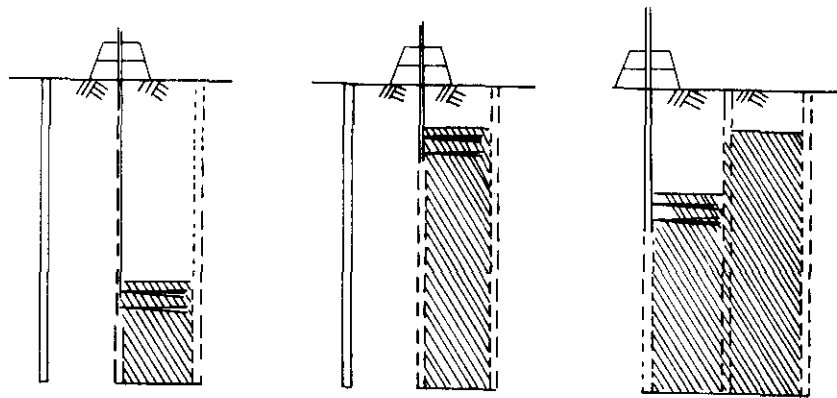


그림 6 PANEL S.I.G 시공순서

3) WING S.I.G형

토류판, 토류말뚝 등의 작은 빈틈을 매우기 위해 개발한 공법으로서 2~3 방향으로 분사하는 초고압 분류수가 그 날개를 넓힌 모양이 되므로 Wing Jet라고 부른다.

이 공법은 P.I.P나 B.H 기타 토류벽의 작은 Joint부 등의 지수에 널리 사용한다.

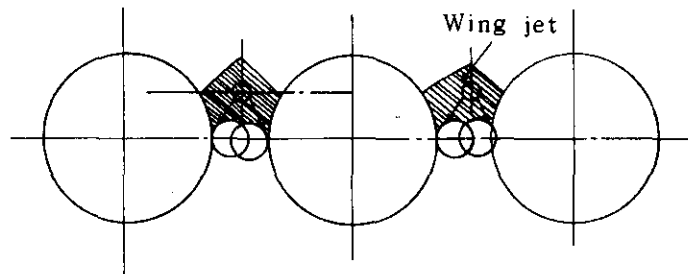


그림 7 WING S.I.G시공 개요도

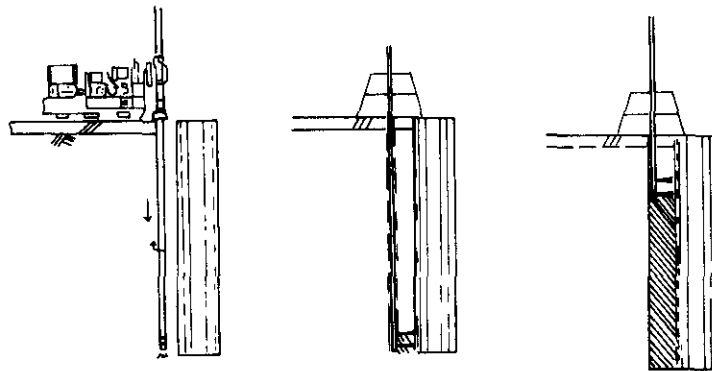


그림 8 WING S.I.G 시공순서



## 5. JSP공법에 의한 사면활동억제공 사례

### 5.1 현장 개황

본 건물기초 터파기 공사는 지하철 2호선 00역 부근에 위치하며 1989.3.4 착공하여 현재 GL-12.5m(E/A 5단)까지 굴착된 상태에서 테헤란로측 토류벽이 굴착장쪽으로 휨변형이 일어나 공사중지가 되어 있는 상태이다.

본 공사현장은 굴착면의 크기가 62.3m x 68.4m인 직사각형으로서 GL-18.5m ~ -20.0m로 연직굴착하여 지하4층, 지상19층의 건물을 축조할 예정이다. 공사부지 주위에는 북측토류벽에는 테헤란로와 지하철 2호선이 연해있고 서측은 고층건물에 인접해 있으며 동측과 남측 주변에는 주차장 또는 소규모의 건물(청일가든 음식점, 지상 1층 지하 1층) 및 현장사무실이 각각 위치해 있다. 본 토류벽은 굴착폭 62.3m의 H-Pile 토류판에 Earth Anchor지지로 설계되어, E/A 계 5단계까지 설치하고 GL-12.5m까지 굴착 시공중 굴착장 방향으로 30cm전후의 휨이 발생하였으며 이에 대한 임시 조치로 토류벽의 E/A 3단 높이까지 되메워져 있고 토류벽 배면토상단부가 높이 2.0m x 폭 3.0m 정도로 제거되고, wire에 의한 Head Anchor와 Coner Bracing이 설치되어 토류벽의 직접적인 변형은 다소 억제되고 있으나 앞으로는 변형은 계속 진행될것으로 보인다. 인접 테헤란로의 차도 노면 및 보도에 많은 균열, 침하를 볼 수 있었으며 인접한 동일 빌딩 입구의 바닥면에 굴착장 방향으로의 수평변위(균열)를 볼 수 있다.

### 5.2 지형 및 토층상태

본 굴착현장의 지형은 과거 탄천의 구 하상지로 충적층이 매우 두껍게 발달하고 있었으나 매립작업으로 현재의 부지가 형성되었다. 지질은 시대미상의 경기편마암 복합체에 속하는 변성암류 및 상부의 河成堆積層으로 구성되어 있다. 충적층 하부에는 기반암인 흑운모 호상편마암의 풍화암, 연암, 경암이 분포되어 있으며 부분적으로 흑연질 편마암이 협재하기도 한다.

본 부지의 최상부로 부터 매립토인 표토, 실트질 점토, 풍화 잔류토, 풍화암, 연암, 경암순으로 형성되어 있다. 표토층은 유기물이 많은 쓰레기등으로 매립되어 있고 두께는 4.8 ~ 9.8m로서 불규칙하며 N치는 5전후이나 어떤 경우는(BH 6, BH 9) 2미만이다. 본 부지의 충적층인 실트질 점토층은 2.1 ~ 5.6m 두께로서 암회색을 띠고있고 대체로 습윤상태를 나타내며 점성토중에는 유기물 및 소량의 세립사가 함유되기도 한다. 실트질 점토층 하부의 기반암은 흑운모 편마암으로서 상부는 심한 풍화 작용으로 황갈색을 띠고 있는

풍화 잔류토이며 모래질 실트 - 실트질 모래 상태로서 모암의 조직을 유지하고 있으나 손으로 만지면 쉽게 부스러지는 상태이며 그 두께는 1.1 ~ 8.0m이다. 그 하부의 풍화암은 균열 및 절리가 발달하여 완전 풍화한 상태로써 응집력이 약화되어 일부는 손으로 쉽게 부서지며 그 두께는 3.4 ~ 18.3m이다. 매우 풍화한 연암대는 절리, 균열등을 따라 풍화가 진행되고 0.8 ~ 10.6m의 두께로 덮여 있다. 경암은 대체로 괴상으로 산출되나 연암에서와 같이 절리, 균열이 발달되어 있으며 단주상 - 장주상으로 코아가 산출된다. 지하수위는 -4.1 ~ -10.1m로서 불규칙하다.

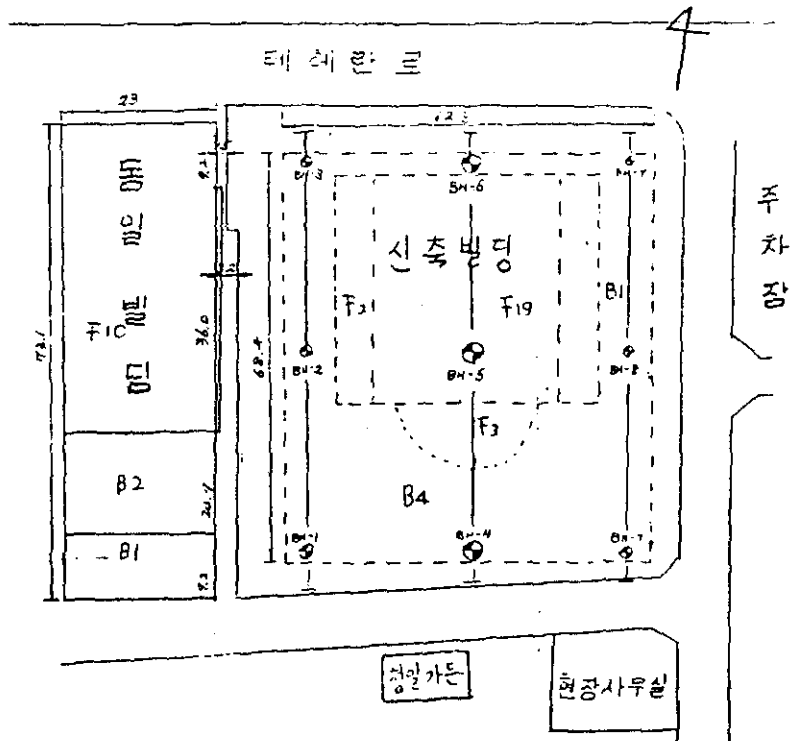


그림 1 주변 평면도

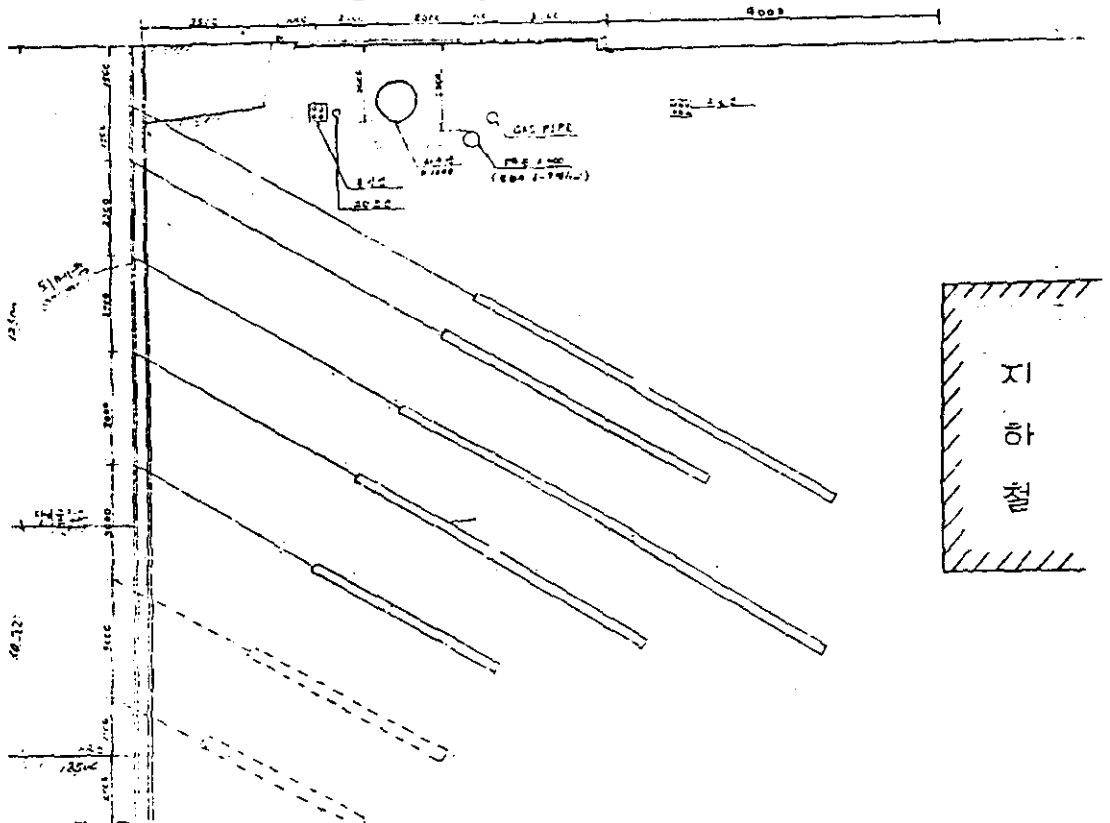


그림 2 테레오트면 보류식 단면도(현재)

### 5.3 기존 구조계산서 검토

#### (1) 설계조건

본 검토에서 나타난 설계조건의 설정에 토질 정수가 다소 크게 추정 된점과 교  
통하중이 과소 산정 되었으며, 지하수에 의한 수압이 전혀 고려되지 않았다.

노면상의 활하중은 기존설계에서는 DB-18TON을 기준으로  $q = 1.0 \text{ t/m}^2$ 으로 보  
았으나 충격계수 30%를 감안하여  $q = 1.3 \text{ t/m}^2$ 으로 보아야 할 것이며 서편 토류벽 배  
면의 동일빌딩은 지상10층 지하3층인바  $10\text{층} \times 1.4 \text{ t/m}^2 + 3\text{층} \times 2.0 \text{ t/m}^2 = 20 \text{ t/m}^2$   
의 상재하중으로 보아야 할 것이다.

#### (2) 토압 산정식

Peck의 방법인 다음식을 적용하였다.

$$\text{지하수위 이상 } Pa = 0.65K_a \gamma H + K_a q$$

$$\text{지하수위 이하 } Pa' = 0.65K_a \gamma_b H + K_a q + \gamma_{whw} \quad \text{-----(1)}$$

#### (3) 단면 검토

제안된 설계조건과 토압산정 방식에 따라 기존설계의 각 부재에 대한 단면 검  
토를 한 결과 다음과 같다.

##### i) 사용 재료

엄지말뚝: H - 300 x 200 x 8 x 12, 간격: 1.8 m

띠 장: 2H -300 x 200 x 8 x 12

토류판: 100 x 1700(GL 0.0 ~ -12.0), 80 x 1700(GL -12.0 ~ -19.5)

앵커: 1.2단  $\# 8 \text{ mm}$  12개, 3단 PC Strand  $\# 12 \text{ mm}$  6개, 4-7단

PC Strand  $\# 12\text{mm}$  4개

##### ii) 엄지말뚝

최대휨모멘트에 대한 소요단면계수  $659 \text{ cm}^3 < 771 \text{ cm}^3$  ; 안전.

##### iii) 띠장

최대휨모멘트에 대한 소요단면계수  $296 \text{ cm}^3 < 1542 \text{ cm}^3$  ; 안전.

앵커단수	Jacking Force(1)		자유장 (m)		정착장 (m)		전장 (m)	
	당 초	본검토	당초	본검토	당초	본검토	당초	본검토
1	62.6	54.3	10.5	10.5 (9.13)	14.0	17.0 (14.1)	24.5	27.5
2	56.3	62.7	9.5	9.0 (8.03)	10.5	16.0 (14.7)	20.0	24.0
3	55.8	63.4	8.0	7.5 (6.63)	10.0	14.0 (12.5)	18.0	21.5
4	46.8	40.4	7.0	6.5 (5.23)	7.5	9.0 (7.1)	14.5	15.5
5	43.1	50.6	5.5	5.5 (4.23)	6.5	9.0 (8.3)	12.0	14.5
6	46.3	48.3	4.0	7.0 (5.93)	6.5	7.5 (6.2)	10.5	14.5
7	32.6	56.2	3.0	6.0 (4.93)	5.0	8.5 (7.5)	8.0	14.5
8	-	48.4	-	6.0 (4.13)	-	8.5 (6.2)	-	14.5

주 1. 앵커의 단수, 간격에 대해서는 당초안과 본검토에서 차이가 있음

2. ( )는 해석장

iv) 토류판 (흙막이판)

소요두께(12.9cm) > 사용 토류판 두께 (10 cm) ; 불안전.

v) 앵커의 허용응력

앵커의 허용응력은 제1단-6단은 대체로 안전하나 제7단의 경우 허용  
응력 46.93 t > 42.04 t ; 불안전.

vi) 앵커의 구조세목에 대한 검토

앵커의 구조세목(테헤란로변 토류벽의 경우)에 대한 검토결과는 위 표와 같다.  
위 표에서와 같이 E/A의 당초단수는 7개단으로서 1개단이 부족하며, 자  
유장· 정착장· 전장이 대체적으로 부족하여 소요 인장력을 기대할 수 없다.

(4) 구조 계산서의 검토결과

- 1) 토류벽 설계시 습윤단위중량 ( $\gamma_t$ ), 수중단위중량 ( $\gamma_b$ ), 강도정수 ( $\theta$ ) 등의 적용  
에 있어 과소설계되었으며 지하수에 의한 수압을 고려하지 않았으며 도로의  
동분포하중을 DB18T기준 할때 1.0t/m<sup>2</sup>에 충격계수 30%를 더 보아야 한다.
- 2) 따라서 토류벽의 H-Pile의 근입장 부족, E/A단수, 자유장, 정착장등  
E/A길이가 부족하게 설계되었다.
- 3) H-Pile에 대한 최대 휨 모멘트는 지표에서 16m인 지점부근에서 발생되는데  
제2단 앵커부근에 대해서만 단면검토가 되었으나 16m부근에서도 단면검토가  
되어야 한다.
- 4) Lagging에 대한 단면검토에서 전단에 대한 검토를 하여 앵글보강  
여부도 판단 되어야 할 것이다.
- 5) Wale의 단면검토도 16m부근에서 실시해야 되며, 또한 단독 Wale에  
대해서도 전단, 처짐이 검토 되어야 할 것이다.
- 6) 앵커의 자유장은 계산장(파괴면) + (0.15 x Pile높이) 이상이어야 한다.
- 7) 지반침하, 지중변위, 각부재의 휨(처짐)이 허용범위내에 드는지 확인되어야  
한다.
- 8) 테헤란로측 토류벽 보강안(1,2단앵커)에 대한 검토결과 기존 H-Pile, Wale이  
육안식별로 30cm전후의 Buckling이 일어난 상태로서 3단 이하의 앵커도 그 기  
능을 상실하였을 것으로 보이는바 1,2단 앵커의 보강판으로는 안정하지 못할  
것으로 사료됨.

#### 5.4 사고원인 분석

이상과 같은 검토에 의해 테헤란로변 토류벽의 휨발생 원인을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 굴착 현장의 지형은 과거 탄천의 구 하상지로서 지대가 낮아서  
인접고지대로 부터 지하수의 유입, 또는 우천시 도로변 일대가 침수 되기 쉬운  
지형적 특성을 갖고 있는 데다가 그 동안 지반침하로 인해 기 매설된 관거의  
구배변화가 생기게 되고 특히 집중폭우등 수분간의 고강우나 지형성 강우시에  
는 인접지로 부터 흘러내려온 지표수와 함께 하수도관으로 부터의 우수의 용출  
또는 역류현상이 있을 수있으며, 따라서 일대가 침수되기 쉽다.
- 2) 위와 같은 이유로 토류벽 배면지반이 물에 잠기게 되면 흙의 전단강도는 크게  
감소하여 Slope 안정도는 저하하고, 더욱 앵커력은 떨어져 E/A의 기능이 상실  
된다. 또한 흙이 과포화상태로 되거나 침투수로 인해 수압이 작용하게 되어 토  
압이 급증하게 된다.
- 3) 위와 같이 침투수에 의해 흙이 연화되고 토압이 급증된 상태에서 차량, 중장비  
및 지하철 운행등으로 인한 진동·충격에 의해 토압은 가중되고 앵커력은 더욱  
저하하게 된다.

4) 더군다나 원지반 흙은 GL-9.20m까지가 유기불순물 함유량이 매우 커서 E/A Grouting시 시멘트의 수화반응이 늦고 경화가 잘 되지 않아 압축강도, PC강재와의 부착강도등이 매우 떨어지게 되는등 E/A Grouting의 효과가 크게 저하한 것으로 사료된다.

5) 유기질토가 지중에서 장기간 동안 압밀침하되어 감소된 부피만큼의 상부지반의 침하 또는 공동이 형성되고 2)항, 3)항과 같은 전단강도 저하와 진동등으로 인하여 E/A의 이격현상 또는 지반 활동이 발생되었을 것으로 판단된다.

설계시에는 위와 같은 지형적 특성, 배면토의 과포화 및 침수의 가능성과이에 따른 전단강도의 저하, 더욱 유기불순물에 의한 Grouting 효과 감소, E/A의 기능저하, 수압과 진동에 대한 토압급증, 사면활동가능성증대 등을 고려하여야 하겠으나 이는 현실적으로는 매우 어렵다. 즉, 상기 5개 항목에서 열거된 각종실험에 의하여 설계하기란 실험이 요하는 시간과 결과치의 이용방법, data의 컴퓨터 프로그램에 의한 처리등에 있어서 막대한 시간과 비용과 경험없이는 매우 어렵다.

일반적으로 국내에서는 설계조건으로서 지질조사보고서에 근거한 제 토질계수를 여러 식들에 의해 추정하여 간단히 이 값들만으로 설계에 임하고 있는 바, 본 현장의 경우와 같이 지형적 특성, 토질의 역학적·화학적·재료공학적 특성등 특이한 조건인 경우는 설계시 이들을 다 감안한다는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 현장의 경우, 설계시 안전율을 충분히 고려하였다 하더라도 위와 같은 특성을 고려하여, “지반개량”과 같은 근본적인 처방없이는 침발생을 저지하기 어렵다고 사료됨.

### 5.5 사면활동 억제공 설계

#### 1) 설계조건

○ 원지반의 전단강도( $\tau = C + \sigma \cdot \tan\phi$ )

$$C=0 \text{ t/m}^2, \phi=0^\circ \text{로 본다.}$$

○ JSP공의 1축압축강도  $q_u = 60 \text{ kg/cm}^2$

○ JSP공의 허용압축강도  $q_a = q_u/3 = 60/3 = 20 \text{ kg/cm}^2$

○ JSP공의 전단강도  $C_p = q_a/2 = 10 \text{ kg/cm}^2 = 100 \text{ t/m}^2$

○ JSP공의 유효직경  $D = 800\text{mm} = 0.8\text{m}$

$$\therefore A = \pi D^2/4 = \pi \times 0.8^2/4 = 0.503 \text{ m}^2$$

#### 2) 지반개량후 혼합지반에서의 평균전단강도

$$C=C_{pap} + AC_o(1-a_p)$$

여기서,

C : 혼합지반의 평균전단강도

$C_p$ : 개량지반의 전단강도

$C_o$ : 원지반의 전단강도

$a_p$ : 개량면적율(지반개량율)

A : 개량지반에 대응한 원지반의 용적비

$$\text{○ m}^2\text{당 JSP갯수} = \frac{10\text{개}}{4.8\text{m} \times 6.0\text{m}} = 0.437 \text{ 개/m}^2$$

$$\text{○ 혼합지반에서의 지반개량율 } a_p = \frac{0.437 \text{ 개/m}^2 \times 0.503\text{m}^2}{1.0\text{m} \times 1.0\text{m}} = 0.175$$

$$\text{○ } C = 100 \times 0.175 + 0.7 \times 0.0(1-0.175) = 17.50 \text{ t/m}^2$$

#### 3) 사면안정 검토

- 그림 3, 4 참조  
 4) 지반보강 계획  
 그림 5, 6 참조  
 5) 세부설계  
 그림 7 참조

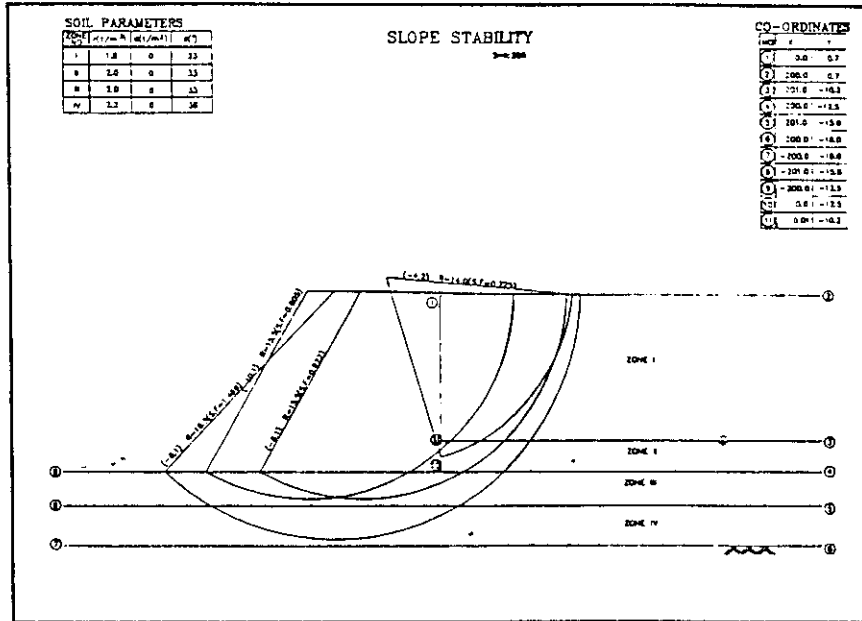


그림 3

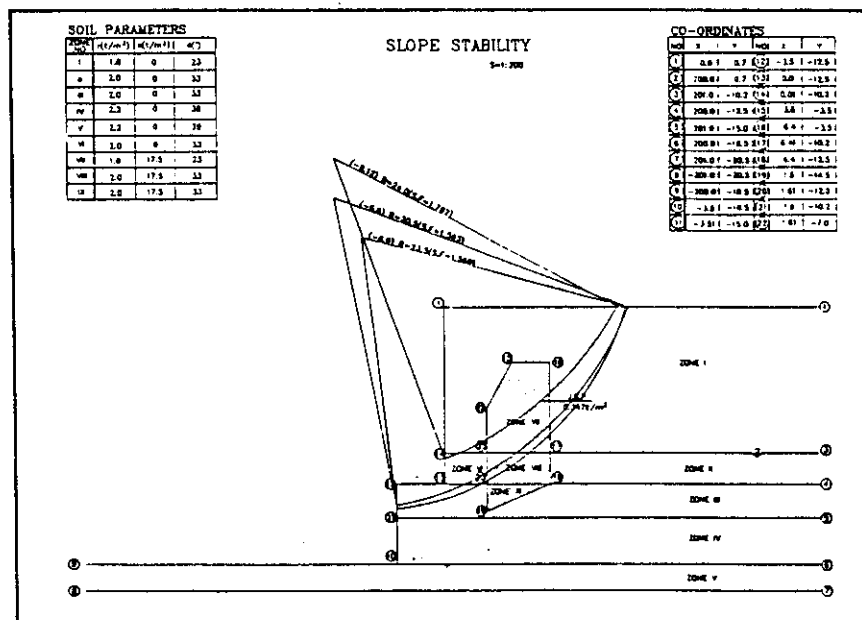


그림 4

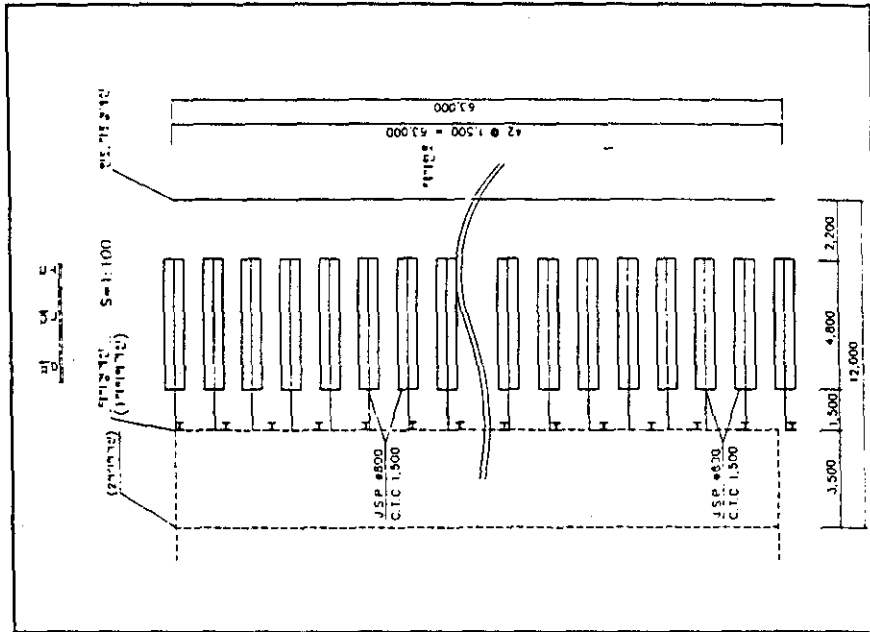


Fig. 5

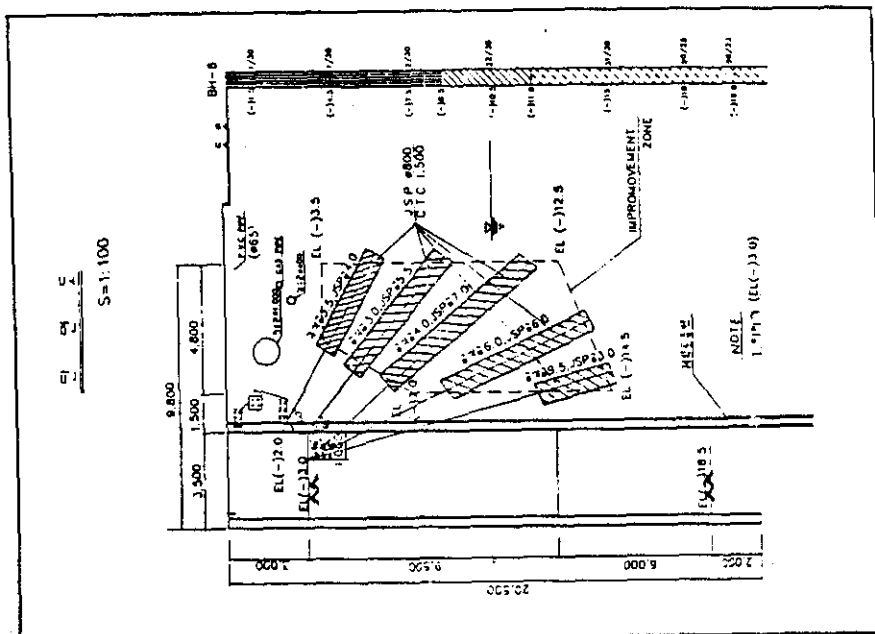
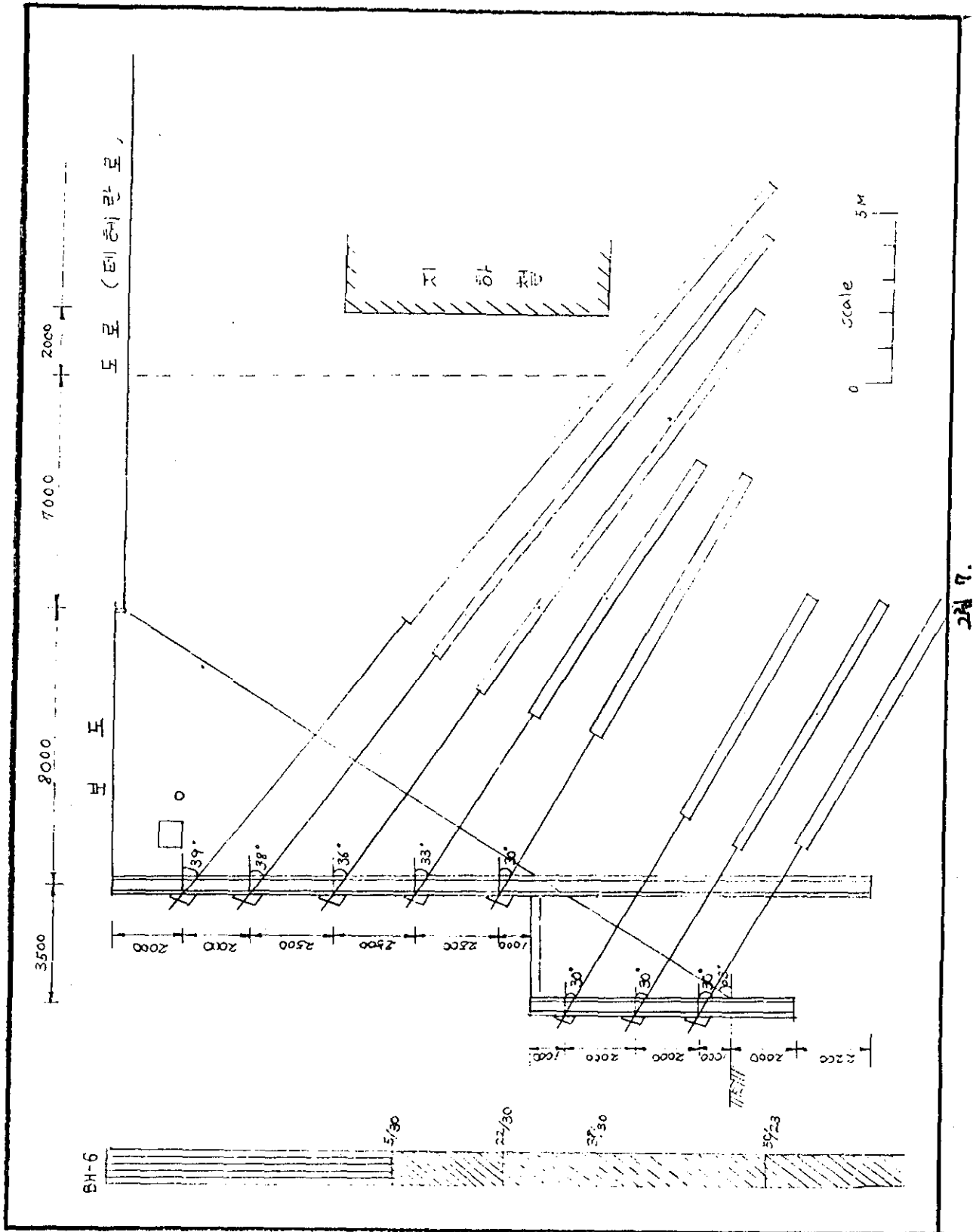


Fig. 6



2월 9.



## 6. SCW에 의한 토류공 보완 시공사례 (주변지반 및 인접구조물 침하대책)

### 6.1 서언

경북 포항시 00은행 00지점 행사 신축공사장의 흠막이 및 주변침하에 관하여 안전도를 검토하고 그 피해원인 및 대책을 검토한 것이다.

이를 위해 현장에서 널말뚝의 변위·주변지반의 침하량·지하수위 변동 등을 측정하였고, 원위치시험 및 실내토질역학 시험에 의해 주변지반 상태를 조사하고, 기왕의 지질조사 보고서 등을 자료로 종합분석하여 그 안전성을 검토 하였다. 대책공으로서 기존 Sheet Pile의 보완, 차수벽 또는 히빙방지공에 대한 안을 제시하였다.

### 6.2 현황

자립식 Sheet Pile GL-7.0m로 지반 굴착도중 GL-3.0m에서 굴착장쪽으로 토류벽이 5°전후로 변위가 발생 하였으며 주변지반 및 인접건물이 균열, 부동침하가 발생하였다. 또한 굴착장에서는 1일 100ton 전후의 Water Pumping을 하고 있었다.

### 6.3 지질 및 토층상태

본 역의 수계는 불규칙적으로 흐르는 소 규모의 하천들이 형산강에 합류되어 동해에 유입되는 격자상 수계망을 보여주며 지층의 주향은 N10° E-N40° W이며 경사는 10° 내외로 동경사이며 형산강의 유로와 같은 방향이다. 또한 지역주민의 증언에 의하면 이 지역은 과거 작은배가 올라오기도 하였다고 하는 바 구형산강의 유로를 따라 투수층이 일부 형성되고 이 층을 통해 피압수압이 걸릴 가능성도 없지 않다. 실제로 토질주상도를 보면 매립층 아래 (-1.8m ~-4.09m)와 포화점토층 아래(-35.5m ~-44.3m)에 투수성이 매우 큰 Silty Sand & Gravel의 층에 깔려 있는 데 이투수층은 피압(被壓, artesian press)상태에 있는 것으로 판단된다.

### 6.4 장래 피해 예측

본 현장의 토질·지하수 조건 및 토류판의 상태등 여러 여건을 감안하면 앞으로 굴착이 GL-7.0m까지 계속될 경우 변위는 더욱 커지게 될 것으로 보이며 자립성 Sheet Pile의 지반굴착에 따른 파이핑 현상에 의한 지하수위의 저하로 인해 주변지반의 침하 및 인접 구조물의 붕괴 등의 피해는 더욱 가속화 될 것으로 보여진다. 일반적으로 Sheet Pile은 강성이 낮으므로 연약지반에서는 변형이 커져서 배면의 지반은 침하되기 쉽다. 대책공(안)으로는 토류벽의 보완, 차수벽 및 히빙방지공의 구축등을 생각해 볼 수 있다. 이를 위해서는 파이핑 및 히빙에 대한 안전검토는 물론 본 현장의 지하 피압층에 대한 대책이 선행되어야 한다.

### 6.5 Piping에 대한 안전검토

비교적 투수성이 큰 사질토 지반을 굴착할 경우, 토류벽의 전후면에서의 지하수위차에 의하여 굴착측의 지반내에서 상향의 침투류가 생긴다. 즉 양압력을 받게되어 지반이 부풀어 오르거나 토립자가 비등하여 지반이 파괴되는 현상을 종종 볼 수 있다. 이 침투력과 흙의 수중에서의 유효중량과의 바란스가 깨지면 토립자는 비등하게 되어 흙은 전단저항력을 잃게되어 토류벽의 근입깊이 부분 전면의 저항토압은 감소된다.

Terzaghi에 의하면 이러한 현상은 통상적으로 널말뚝으로부터  $d_2/2$  안에 있는 지역에서 발생한다고 결론지었다.(여기서  $d_2$ 는 널말뚝의 근입깊이). 여기에서는 과잉공극수압과 흙의 중량에 의해 Boiling에 대한 안전 검토를 하기로 한다.

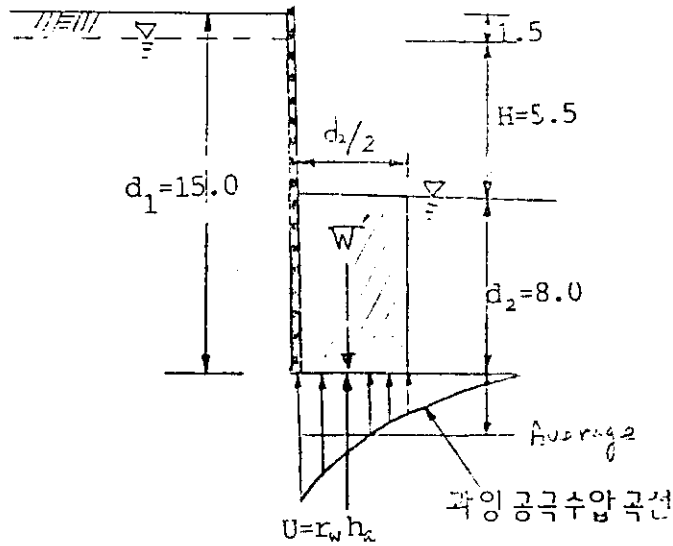


그림 1

$$FS = \frac{W'}{U} \text{----- (1)}$$

$$= \frac{\frac{1}{2} d_2 d_2 r_0}{\frac{1}{2} d_2 d_2 i_{av} r_w}$$

$$= \frac{r_b d_2}{h_a r_w} \text{----- (2)}$$

여기서, FS: 안전율

W': 굴착지면 아래부분 흙의 유효중량

U: 상향의 침투압

$i_{av}$ : 수두차에 의해 발생한 평균동수구배 =  $\frac{h_a}{d_2}$

H: 토류벽 외측의 지하수위와 굴착지반까지의 높이차

$r_b$ : 수중단위 중량

$h_a$ : 전수두(flownet로 부터 구한다)

전수두  $h_a$ 는 수위차 H와 flow net의 equipotential line으로부터 구한다.  
즉,  $(4/8 + 2.42/8)/2 = 0.41$ 과 H의 곱으로 나타낼 수 있다. 따라서

$$i_{av} = H_a/d_2 = 0.41(7.0-1.5)/7.0 \text{----- (3)}$$

$$FS = \frac{0.9 \times 8.0}{0.41 \times 5.5 \times 1.0}$$

$$= 3.19 \ll 6.0$$

∴ 불안정(근입장의 연장이 필요하다)

따라서 요구되는 Sheet Pile의 근입장은 FS=6.0으로 놓고 역산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 h_a &= (4/8 + 2.59/8) / 2 \times 5.5 \\
 d_2 &\geq FS \times h_a \times r_w / r_b \\
 &= \frac{6 \times 0.42 \times 5.5 \times 1.0}{0.9} = 15.4\text{m} \rightarrow 16.0\text{m}
 \end{aligned}$$

### 6.6 종합분석

이상에서와 같이 Sheet Pile의 현 상태에서의 안전검토 결과 토질, 지하수 및 주변 상재하중 등의 조건으로 보아 판단할 때, 각 단면 및 근입장의 절대량이 부족하며, 파이핑 및 히빙에 대해서는 불안정하며 지반굴착에 의한 지하수위 저하로 인한 지반침하와 더욱 항타진동 및 주변 교통하중에 의해 주변 지반침하 및 인접 구조물의 균열등 피해는 더욱 가속화 되었을 것으로 추정된다.

지금까지 이론적 그리고 실증적으로 밝혀진 여러 자료에 의하면 균열거리(l), 굴착 깊이(H), 굴착폭(b), 지하수위(h)등에 따른 침하영향장(L)은 다음과 같다.

$$l = 0.5H \text{ ----- (4)}$$

$$= 0.5 \times 7.0 = 3.5\text{m}$$

$$L = (3.5-4.5)H \text{ ----- (5)}$$

$$= (3.5-4.5) \times 7.0$$

$$= 24.5-31.5\text{m}$$

즉, 토류벽으로 부터 3.5m 이내에서 균열이 생기게 되며 토류벽으로 부터 최고 31.5m까지 영향이 간다는 계산이므로 본 굴착현장의 경우 00국교 교사는 물론 000여관 건물에 까지도 그 영향이 미치게 되어, 결국 주변 지반침하 및 인접건물의 균열 피해는 충분히 있을 수 있으므로 이에 대한 대책이 요망된다.

### 6.7 대책공법(안)

Sheet Pile의 근입장은 절대 부족이었고, 파이핑 및 히빙 방지를 하고 원활한 굴착을 하여 큰 지하수 유출을 막아 주변지반 침하의 방지를 위해서는 불가피 차수 및 토류목적의 지하연속벽을 구축하여야 한다. 제5장에서 소요길이는 23.0m로 산정되었으며 본 공사장의 경우는 기 Sheet pile이 구축되어 있으므로 다음과 같이 두가지 설치방법을 생각해 볼 수 있다.

지표에서 GL-23.0m까지 전면연속벽을 설치한다. 파이핑 및 히빙 방지를 위해서 지표 GL 0.0m 또는 이미 굴착된 곳은 L-2.0m에서 GL-23.0m까지 차수와 토류를 겸한 공법으로서  $k=10^{-7} \sim 10^{-8} \text{cm/sec}$ ,  $q=20 \sim 30 \text{kg/m}^2$  이상 이어야 하며 Concret pile 또는 H-Pile을 써서 충분한 강도보완을 하여야 한다. 그러나 PC Concret Pile은 힘에 약하고 이음부의 문제점등 단점이 있으므로 사용시는 충분히 검토되어야 한다.

토류공 굴착작업시의 구축장비의 상재하중으로 인해 기존 Sheet Pile의 변위, 주변 지반 및 인접구조물의 피해가 가지 않도록 취약부에는 미리 Sheet Pile을 보완해 주어야 하며 가급적 구축장비의 중량이 적고, 진동이 적은 것을 보충하여야 한다. 이외에도 상재하중을 경감시켜 주기 위한 방법으로는 특히 기 피해가 심한 학교, 여관, 대로 변동의 구역에서는 지표토를 더 굴착하여 낮추어 주거나 굴착장 내부에서 Sheet Pile 쪽으로 흙을 뜯구어 수동토압을 증대시키는 방법이다. 극히 취약지구의 경우는 Sheet Pile과 head anchor를 설치하여 더 이상의 Sheet Pile의 변위를 막을 수 있으며, 본 건물의 기초 및 지하건물 공사 이후 Sheet Pile의 인발시 야기될 수 있는 진동의 방지를 위해서는 지표까지의 구축이 유리하다.

### 6.8 결론

일반적으로 물유리계 약액에 의한 차수공법은 모래 실트를 주 대상으로 하며 강도

증대를 위해서 시멘트와 병용하기도 한다. 또한 대상 토질이 점성토질의 경우는 약액의 침투주입이 되지 않고 맥상주입이 되기 쉬우므로 차수효과는 기대하기 어렵다. 본 부지의 경우는 대부분의 흙이 Sandy Loam이며 투수계수  $k=10^{-6}-10^{-7}$ cm/sec이어서 약액의 침투 주입은 기대하기 어렵고 따라서 지중 연속벽공법 또는 현지토와의 혼합에 의한 교반공법이 바람직하다.

최근 도심지 근접시공에서 연약지반의 깊은 굴착공사에 현장타설 콘크리트벽에 의한 차수공이 많이 이루어 진다. 본 공법은 소음과 진동이 적고 주변지반이나 구조물의 침하, 균열등 악영향을 미치는 일이 적다. Sheet Pile 또는 엄지말뚝 공법에 비해 휨강성이 크고 토압·수압에 의한 처짐도 작다. 말뚝의 주변 지반과의 마찰력이 커져서 지지력이 증가하며, 시멘트양에 의해 강도를 어느 정도 조절할 수 있다. 특히 주변 건물등 구조물의 방호를 위해 차수벽의 강성을 높힐 목적으로 배노토말뚝이나 어어스오거에 의해 주입재로서 몰탈을 쓰지 않고 콘크리트를 트레미를 이용하여 타설한 직경 1,000mm 이상인 대구경 주열말뚝을 쓰는 일도 있다.

현장답사에 의하면 BH-2부근은 굴착시 심한 지하수 용출이 있었다 하는데 그 이유는 다음과 같이 추정된다. 본 부지의 지층들의 주향은 N10°E-N40°W이며 10°동경사이므로 형산강의 유로와 같은 방향이다. 또한

현지 주민의 증언에 의하면 이 지역은 과거 형산강의 지류로서 작은 배가 올라 오기도 하는 바 구 형산강의 유로를 따라 투수층이 일부 형성되고 이 층을 통해 피압수압이 걸릴 가능성도 없지 않다. 실제로 지질보고서 BH-2주상도를 보면 매립층 아래 (-1.8m-4.9m)와 포화 점성토층 아래(-35.5m-44.3m)

에 투수성이 매우 큰 Silty Sandy & Gravel의 층에 깔려 있는데 이 투수층은 피압(被壓, artesian press)상태에 있는 것으로 판단된다. 앞으로 이 부근의 굴착작업시 만약에 대비하여 적절한 조치를 취해야 한다. 예를 들면 BH-2부근, Sheet Pile 배면에 2-3개의 Pumping Well을 투수층까지 착정하여 펌핑함으로써 지하수류를 유도하여 굴착장 내부에서의 지하수 용출을 막을 수도 있다.

대책공법으로는 지표에서부터 GL-23.0m까지 차수 및 토류목적의 전면 연속벽을 구축하는 방안

단, 학교 부근과 여관 부근 대로변의 Sheet Pile 변위 심한곳등 취약부에 대해서는 다음과 같이 대처한다.

- 1) 상재하중을 줄이고 수동토압을 증대시켜 Sheet Pile의 변위를 막는다. 즉, 지표토를 가능한 2.0m정도 더 굴착하고, 구축장비도 경량장비를 토류벽에서 가능한 먼 거리에서 작동시키며 굴착장 내부에서 Sheet Pile면에 흙을 돋구어 수동토압을 증대시키도록 한다.
- 2) Sheet Pile의 코너에 3열경사 버팀보를 굴착의 진행과 더불어 3단정도 설치해 준다.
- 3) 필요시 취약부의 기존 Sheet Pile과 연속벽에 Head Anchor를 설치하여 더 이상의 변위를 막도록 한다.
- 4) GL-7.0m까지의 굴착시 피압수의 처리를 위해 BH-2부근 Sheet Pile배면에 Pumping Well을 2-3곳에 착정하여 피압수가 확인되면 Pumping을 계속하여 굴착장 내부에서의 지하수 용출을 막는다.

Scale 200:1

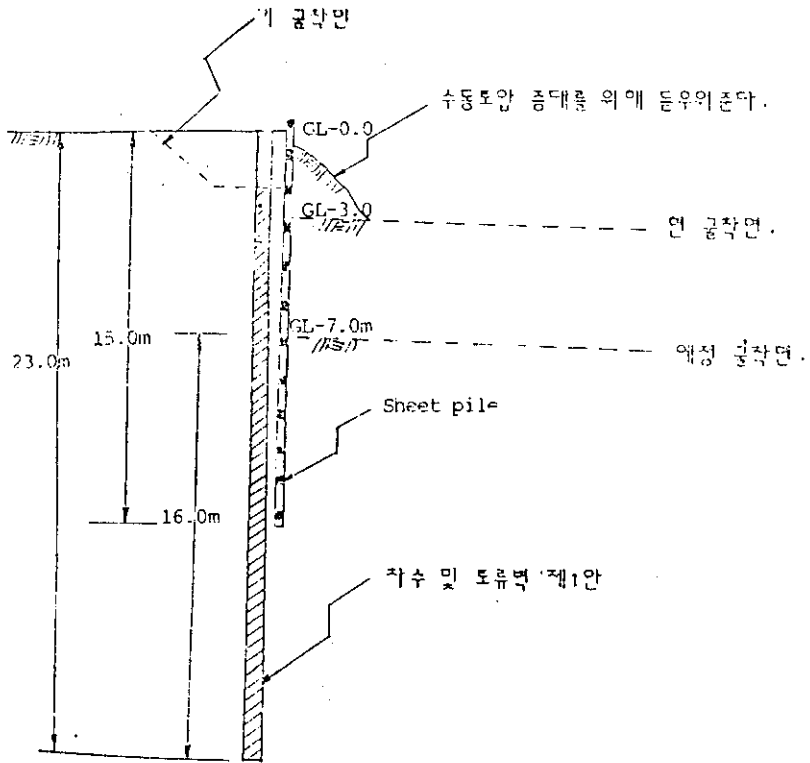


그림 - 2



## 참고문헌

- (1) B.M.Das, "Principles of geotechnical Engineering", PWS Eng. 1985.
- (2) 대한토질공학회, "건설부 제정 구조물기초설계기준해설", 1986.
- (3) 천병식, "블루수성지반에서의 종할렬주입압에 관한 기초적 연구", 대한토목학회 논문집, Vol. 6, No. 3, 1986. 9
- (4) 森麟, 千柄植, "砂質土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, 1987. 12
- (5) 土質工學會, "藥液注入工法の調査設計から施工まで", 日本土質工學會, 1985. 2
- (6) 柴崎光弘, 下田一雄, "最新 藥液注入工法の設計と施工", 1985. 9
- (7) 福岡正己, "最新の藥液注入工法の設計と施工例", 近代圖書, 1983. 3
- (8) 島田俊介 外, "最先端技術の藥液注入工法", 理工圖書, 1989.
- (9) 千柄植, "基礎地盤改良工法", 建設研究社, 1987.
- (10) 김주범, 박찬호, 천병식, "서울지하철7호선 차수공법검토연구보고서", 대한토질공학회, 1991. 7
- (11) 土質工學會, "掘削にともなう公害とその對策", 1973. 3