

터널과 지하공간, 한국암반역학회
Vol. 1, 1991, pp. 19~31

地下鐵3號線 盤浦川 通過 NATM施工實例

최상렬¹⁾

1. 工事場 周邊現況

1.1 概要

江南터미널과 강남성모병원 사이에 위치한 이 현장은 우리나라에서 시행한 NATM현장중 가장 難工事로 생각된다. 동작대로와 나란히 흐르는 漢江지류인 반포천 횡단구간(STA. 29K 603~29K 706)공사는 總延長 103m의 漢江 구하상 하부 충적층을 관통 시공하여야 하며 이 구간의 토피는 최소 3m에서 13m까지 불규칙하며 기존 시설물로는 동작대로와 반포천을 사이로 하는 접속교량, 반포천 등이 있고 간선 하수 박스(폭=13m, 4년)가 배설되어 있

으며 동작대로 중앙선을 따라 케이블 및 D=600㎜ 上水道가 위치하고 있으며 市民生活의 편익을 위해 어느 시설물도 기능을 일시 정지할 수 없는 복잡한 구간이다.

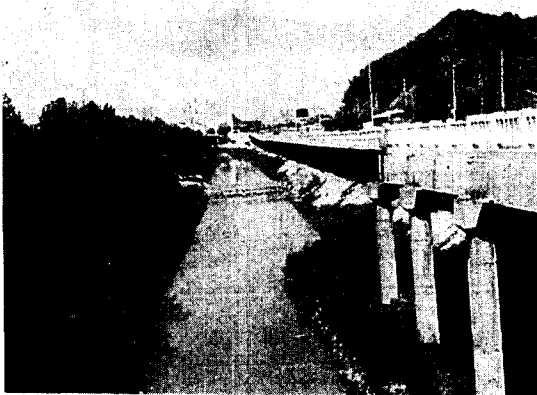


Fig. 1 盤浦川 全景

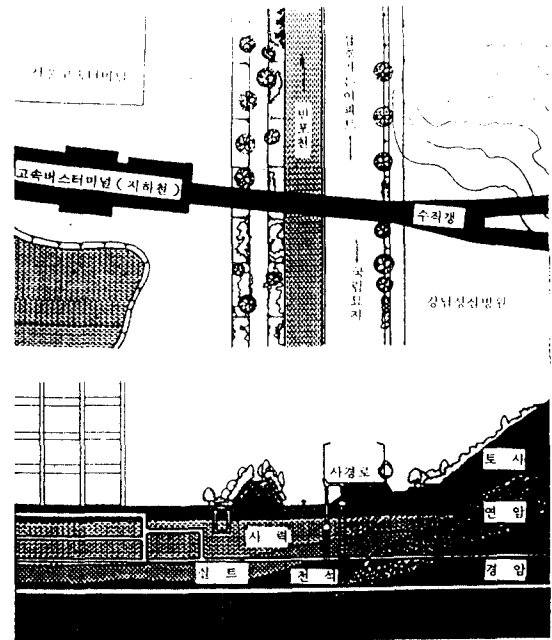


Fig. 2 縱平面圖

* 1991年 6月 接受

1) 正會員, 서울 地下鐵公社 기술이사

2. 工事概要

- 1) 區 間 : 高速터미널~江南聖母病院
- 2) 延 長 : L=105m
- 3) 構 造 : 2-Arch터널
- 4) 工 法 : NATM
- 5) 補助工法 :

- 地盤改良工法(L=85m)
- Lagging(軟弱地盤 L=98m)
- Fore Piling

- 6) 工事期間 : 1983. 10~1985. 3

3. 工法選定

3.1 工法檢討

工法選定에서의 考慮할 事項은

- 굴착으로 인한 土留壁 또는 터널 막장의 崩壞防止 對策
- 坑內 河川水 및 地下水 流入防止
- 道路의 沈下對策
- 橋梁 및 下水暗渠 構造物의 保護
- 交通處理 對策

等이다.

이 區間은 當初 개착식으로 設計되었으나 河川, 道路, 下水暗渠, 橋梁, 堤防이 連續的으로 設置되어 있을 뿐 아니라 全區間이 軟弱地盤으로 形成되어 있어 개착식 工法(Cut And Cover Method)은 危險할 뿐더러 施工中 물들리기 困難과 地盤改良 및 施設物과 道路復舊에 따른 莫大한 工事費 負擔과 交通處理에 支障이 많아 Pipe Roof工法 또는 NATM工法 등 터널工法을 檢討한 結果 安定性, 交通處理, 工期面에서 NATM工法이 가장 合理的인 工法으로 判斷되

었다. NATM工法은 이미 1982年 5月부터 都心地 土沙區間 등 軟弱地盤에 適用하여 成功을 거두었고 많은 기술축적이 되어 安全施工이 가능할 것으로 判斷되었던 것이다.

3.2 斷面決定

이 區間은 複線區間이다. 그러나 複線터널을 1-Arch로 할 경우는 河床과의 土皮가 작아지고 이 區間의 地盤狀態에서는 막장 保護對策이 극히 어렵다.

이를 2-Arch斷面으로 하여 1個 斷面의 Lining Con'c까지 完成한 다음, 또 1個斷面 굴진을 着手할 수 있도록 하였다.

Lining 콘크리트에서 100×100×8%와이어 메쉬를 두겹 設置하고 두께는 35cm로 하였다.

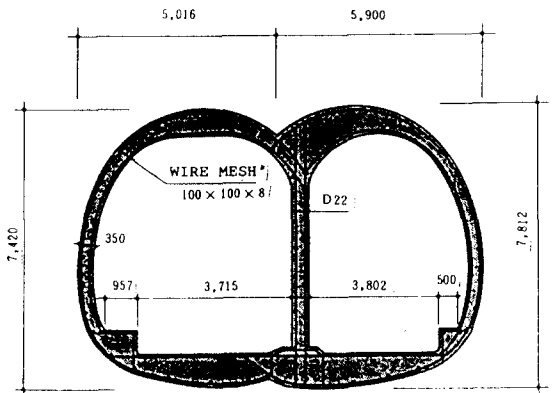


Fig. 3 構造物 斷面(29K 666)

4. 地質現況

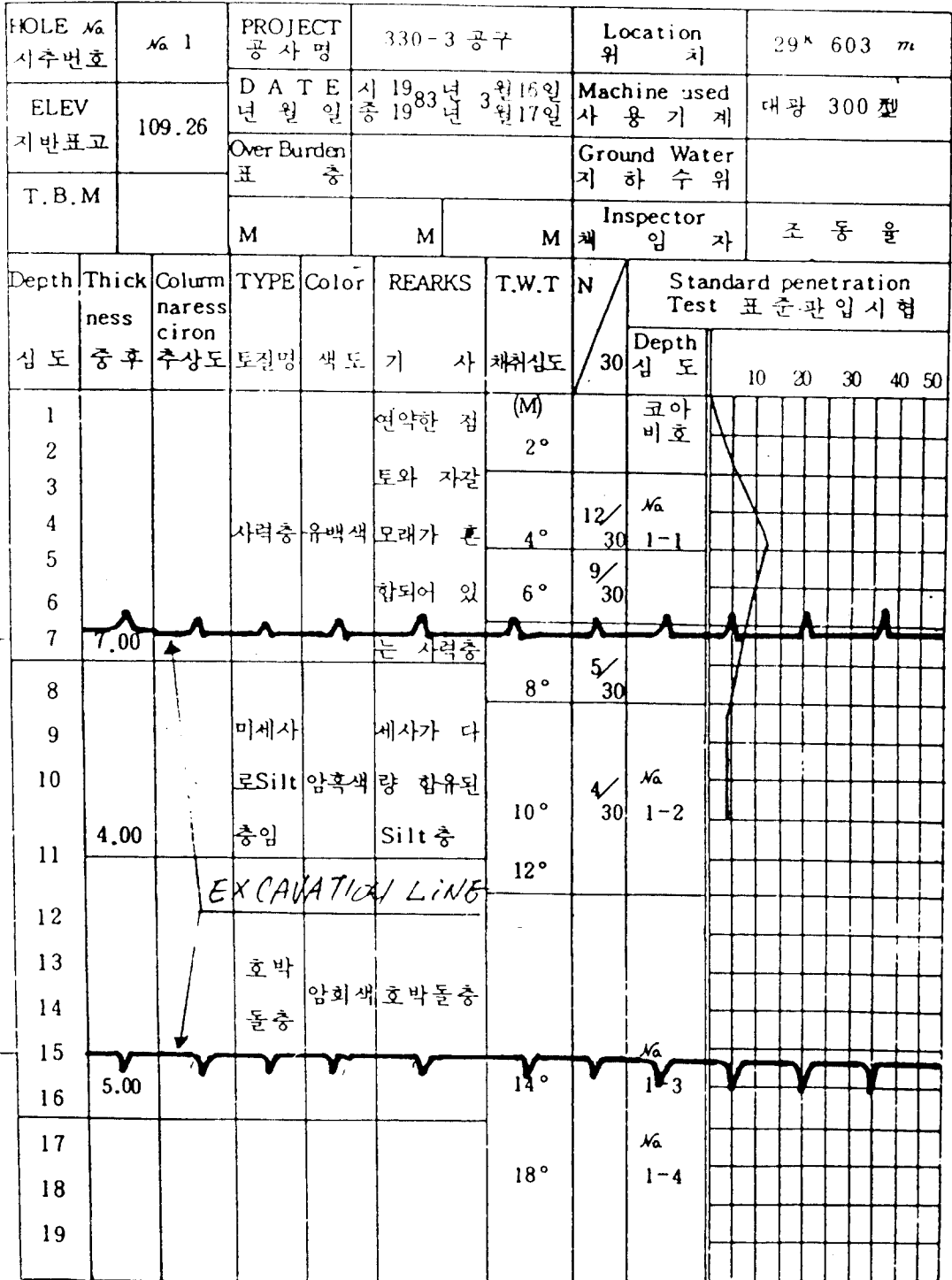
4.1 地 形

本區間의 地形은 老年期 末의 緩慢한 丘陵性의 산지와 漢江 주위의 저지대를 따라 路線이 計劃되고 있으며 특히 NATM 施工區間은 한강에 隣接한 舊河床에 속한 地域으로 埋立層 하부에 河床 埋積物이 두껍게 발달하고 있다. 이들 埋積物은 주로 洪水時 漢江의 범람으로 인한 軟弱한 유기질의 Silt, 粘土, 細絲, 重립질

의 모래와 같은 미고결상태의 堆積物들로 構成된 沖積층과 漢江의 유수작용으로 한강 上流地域으로부터 運搬, 堆積된 타원형의 호박돌, 자갈, 모래 등이 多樣하게 分布하고 있으나, 지점에 따라 구성비나 層厚가 不規則하게 變化하고 있다. 심도 10~15m를 基準으로 하여 上部層은 比較的 느슨한 狀態의 실트, 모래질 흙으로 이루어져 있으며 그 이하 層에서는 매우 조밀한 사력층으로 구성되어 있다. 深部로 向할수록 사력들의 크기가 점차 증가, 기저부에서는 타원형의 호박돌이 많이 나타난다. 이러한 사

력 및 전석층이 8m에서 20m까지 基盤岩인 편마암을 不規則하게 덮은 狀態로 發達하고 있으며 갭구 30m에서 60m까지 흑운모등 有色鑛物을 多量 含有한 편마암이 基盤岩을 이루고 있다. 土質試驗結果에 따르면 沖積층내의 점성토의 平均函數化 38~40% 소성지수 (Plasticity index) 17% 內외의 실트, 점토들로서 接着力 0.10~0.16kg/cm², 內部 摩擦角 5~10° 로서 원상태에서는 매우 연약하여 壓縮性이 크다. 지질주상도를 살펴보면 다음과 같다.

4.2 지질주상도



5. 補助工法

5.1 CLEAN FIRM GROUTING

5.1.1 一般現況

Silt質, 砂質土, 砂礫土層이 느슨한 상태로 堆積되어 있고 河床에서는 土被가 6m밖에 되지 않아 터널 掘進時에 地下水의 流出과 막장 崩壞가 예상되므로 터널 주변을 固結시키지 않으면 안된다. 이 區間과 같이 복잡한 地盤에는 顯濁液과 溶液形의 複合注入이 가장 合理的이며 複合注入에는 2重管 packer注入工法이 가장 適合함이 판단되며 非알칼리성 Silica-sol 絲의 Clean Firm과 Silicalizer를 2種管 Packer 工法으로 터널 周邊 3m幅에 注入하도록 하였다. 施工에 앞서 對象地盤中에서 3個孔을 선정하여 試驗注入을 實施하였다. 試驗注入孔에 대한 標準買入試驗과 透水係數 試驗結果는 다음과 같으며 N值는 2배 정도, 透水係數는 $K=10^{-6} \sim 10^{-7} \text{cm/sec}$ 정도로 감소되었다.



Fig. 4 藥液注入 및 覆蓋構造物받침

5.1.2 Clean firm 工法

1) Clean firm이란

Clean firm이란 물유리에서 알카리(Na_2O)를 완전히 제거한 Silica-Sol(A액)에 시멘트 현탁액(B액)을 조합해서 고결시키는 것을 특

徵으로 한다. 이 말은 다시 말해서 무공해성의 반현탁액 주입제이다. 즉 Clean firm은 시멘트를 確實하고 빠르게 고결시키기 위해서 다른 시멘트계 Grout보다 안전성이 높고 또한 Grout로서의 우수한 性能도 갖춘 주입제를 말한다. 이 Clean Firm은 고결시간(Gel time)에 의하여 一般的인 Clean Firm과 순결형의 Clean firm이 있다.

2) Clean firm의 배합과 Gel time

㊸ 배합비(400 l 당)

| A액(물유리) | B액(시멘트현탁액) |
|---------------------------|--------------|
| 주 계 (Silica Sol) 200 l | 시멘트 80kg |
| | 경화제 3kg |
| | 안정제 1kg(2 l) |
| | 물잔량 |
| | } 200 l |

㊹ Gel time

Gel time은 주로 Silica-sol 농도에 따라서 결정되고 C. F는 1~2분 전후에서 C. F(순결)는 5~15초이하로 조정한다.

3) 注 入

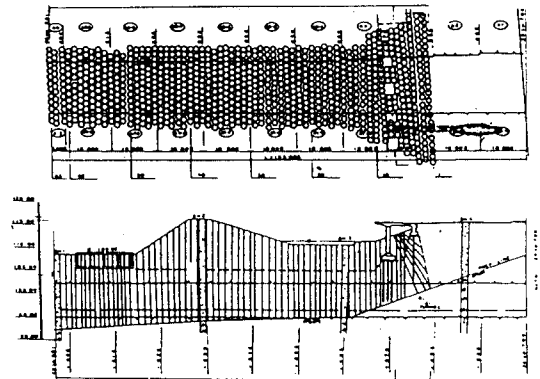


Fig. 5 Plan and Profile of Grouting

非알칼리성 Silica-Sol系의 顯濁形 Grout인 Clean Firm을 1次 注入하여 큰 空隙을 막고 2次로 溶液形인 Silicalizer를 注入하였다.

- 注入孔 間隔 : 1.3m
- 注入孔數 : 940孔
- 注入範圍 : 터널 굴착面에서부터 3.0m
- 穿孔方法

全區間 地上注入으로서 橋梁의 橋臺下部와 道路部分은 橋梁 스크라브 下部에서 傾斜穿孔으로 注入하고 河床區間은 半幅씩 물돌리기를 하여 穿孔 注入하였다.

4) Clean Firm 効果

| 區 分 | 그라우팅施行前 | C · F 施行後 |
|--------------|--|--|
| 注入孔間隔 | | 1.20m(縱 · 橫) |
| 注 入 量 | | 42% |
| S P T | 사질층 N=9/30 | N=12/30 |
| | 실트층 N=4/30 | N=8/30 |
| | 사력층 N=18/30 | N=22/30 |
| 투수계수 | 사질층 | $K=7 \times 10^{-6}$ cm/sec |
| | 실트층 | $K=8 \times 10^{-7}$ cm/sec |
| | 사력층 | $K=5 \times 10^{-6}$ cm/sec |
| 코아(Core)採取結果 | 코아의 점착력 부족으로 Sampler 속에 採取 不能, 간혹 사력과 점성토가 혼합되어 채취된 예는 있음. | 그라우트液의 침투로 점착력이 생겨서 Sampler속에 完全 충전되어 引揚됨. 단 회수시에 약간씩 파괴되는 현상은 있음. 微細砂層에는 Clean firm이 주입되고 여타 部分은 Silicalizer가 均一 침투되어 相對密度를 치밀화 시킴. |

5.2 Fore Piling and lagging

막장의 落盤을 防止하기 위하여 막장 前方을 보강하면서 굴착하도록 하였다. 道路區間의 殘

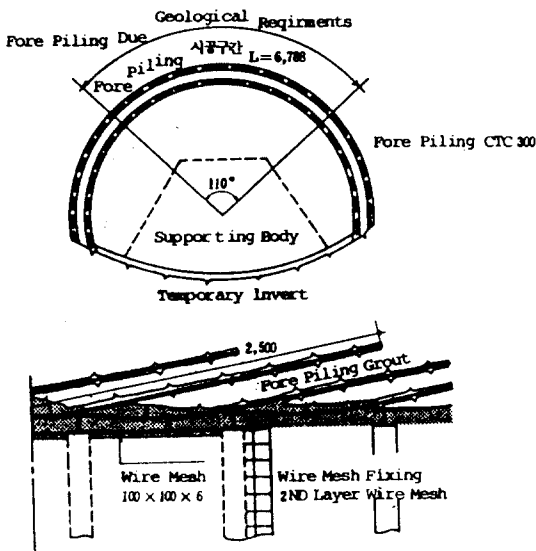


Fig. 6 Fore Piling

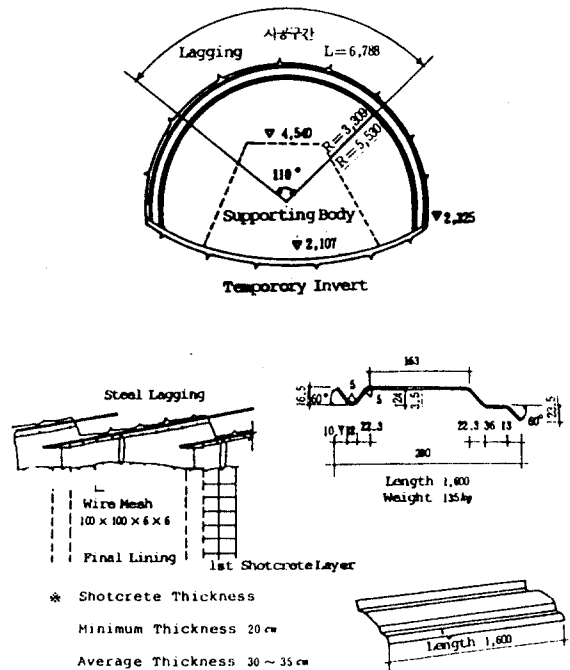


Fig. 7 Lagging圖

積土 地盤에는 Fore Pilling ($\phi 1 \frac{1}{2}$ " STEEL PILE L=2,500㎜)를 堆積層에는 Lagging(B=280㎜, L=1,600㎜, t=3.5㎜의 切曲鐵板)을 設置하였다.

6. 터널掘進

6.1 概 要

이 區間과 같은 軟弱地盤에서의 터널掘進에서는 통상적으로 掘進하는 동안에 掘進面에서나 側壁에서의 安定問題가 무엇보다 중요했다. 그렇다고 해서 가급적 빨리 인버트부를 廢合시키기 위해 前단면굴착 方法의 실시는 더욱 불가능하다. 그래서 굴착은 上段과 下段으로 나누어 실시하고, 이때, 上段 굴착시 上단부에 대해 일시적인 인버트(Temporary invert)를 설치했다. 물론 이러한 상황하에서는 라이닝에 큰 휨모멘트가 영향을 적게하기 위해 圖面에 따른 最良의 터널형상이 되도록 노력했다. 실제 施工에 있어서 坑口에서 15m(29K 691)부터는 軟弱한 Silt層이 形成되어 Fig. 8처럼 상부 半단면 分割掘進工法을 採擇하여 3대의 피크햄머와 삽으로 조심스럽게 入力 굴착하였으며 버럭 처리는 Mini pay loader를 사용하였다. 굴착도중 Crown 부위의 흙이 자립을 못하고 40~50cm의 崩落現象이 계속되어 굴착후 즉시 두께 10cm 정도의 Shotcrete로 대체해 나갔다. 두꺼운 10cm Shotcrete에도 불구하고 崩落現象이 계속되어 Crown 부위에 설치하던 Forepiling Sheet로 바꾸고 버팀철제와 버팀목재를 지보와 굴착 전면 사이에 插入하고 여러 단면으로 나누어 조심스럽게 굴착을 진행했다. Lagging을 설치한 후 매우 민감하던 지표면의 변화가 감소되었으며 붕락현상도 줄어들게 되었다.

6.2 施工順序

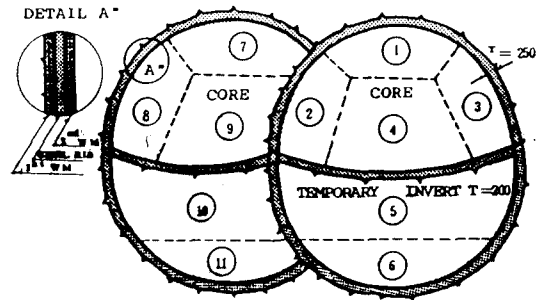
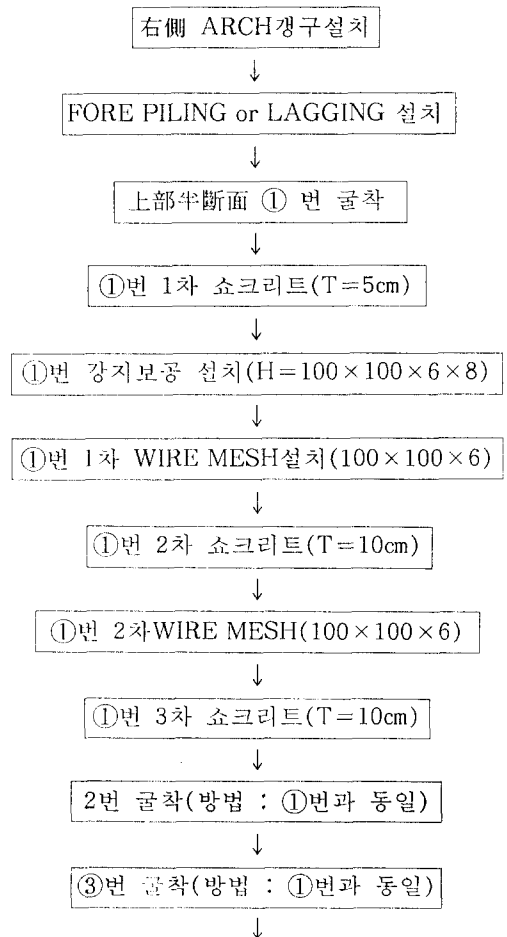
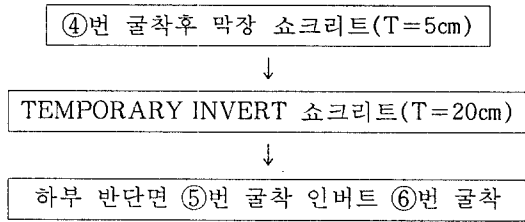


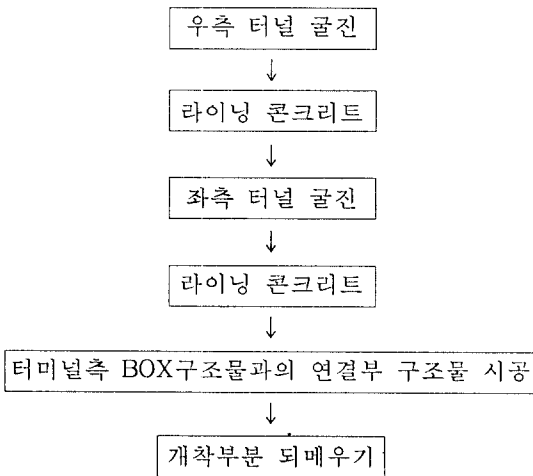
Fig. 8 Excavation Sequence

굴착시공순서는 다음과 같다.





* 全 工事의 施工順序는 다음과 같다.



- 2Arch중에서 左側線을 굴진하여 라이닝 콘크리트까지 完成한 다음 左側線의 굴진을 착수하였다.
- 한 斷面은 上·下 半斷面으로 나누어 上部 半斷面을 10~12m 굴진한 다음 下部 半斷面을 굴진하였다. 上部 半斷面에는 假 인버트(Temporary Invert) Shotcrete를 타설하였다.
- 上部 半斷面은 Fig. 8과 같이 분할 굴진하고 각 段階마다 支保工(Shotcrete 鋼支保工, Wire Mesh)을 完成한 후 같은 방법으로 다음 단계를 굴착하고 막장面에는 Shotcrete를 타설함으로써 막장의 落盤을 방지하도록 하였다.

6.3 下水 BOX通過

하수박스(B=13m)통과시 BOX밑 사질층내에 河川水 유출문제와 BOX內部的 물이 Crack으로부터 흘러나와 침투하여 터널주위가 약화되어서 결국에는 사점토의 전단강도가 대단히 減少되어 일어날지 모르는 活動에 대비하여 우선 L=5m의 유공관을 막장 전면에 12개를 상향 15° 각도로 박아 전방에 물의 유무를 관측한 결과 예상외로 물은 별로 나타나지 않았다. 그러나 일단을 위험부분이기 때문에 강지보 8개, Dry mix 3m³, 비상용 양수기(4") 2대, 가마니, 마대, 나선호스 등을 준비하고 안전을 대비하여 굴착속도를 반감하고 항상 쇼크리트공을 주야 비상대기 시켰다. 하지만 생각과는 달리 Grouting 효과가 좋아 무사히 하수 박스를 관통하였다.

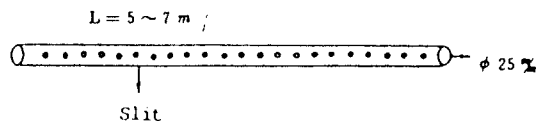


Fig. 9 예측유공관

7. 計 測

7.1 概 要

- Tunnel상부 굴착면이 하수 BOX의 불과 3m밑으로 통과되고 또한 반포천 역시 6m 밑으로 굴진해야 할 실정에서 어느 현장보다 한층 더 계획, 관리가 필요하여 이를 철저히 施行하였다.
- 이 區間에서 實施한 계측은 A계측 및 B계측을 施行하였고 A계측(일상계측)은 내공 변위측정, 천단침하측정, B계측(대표 위치에서의 계측)은 지중변위측정, Shotcrete 應力測定, 地表沈下測定을 하였고 必要時 지반시료시험을 수시로 시행하였다.

- 당 現場의 計測設計 斷面圖 (Fig. 11)
- 計測位置 平面圖 (Fig.10)

7.2 位置平面圖

범례

| | 계측항목 |
|---|--------|
| ○ | 침단침하측정 |
| △ | 내공변위측정 |
| □ | 지중변위측정 |
| ◇ | 쇼크리트특정 |
| • | 지표침하측정 |

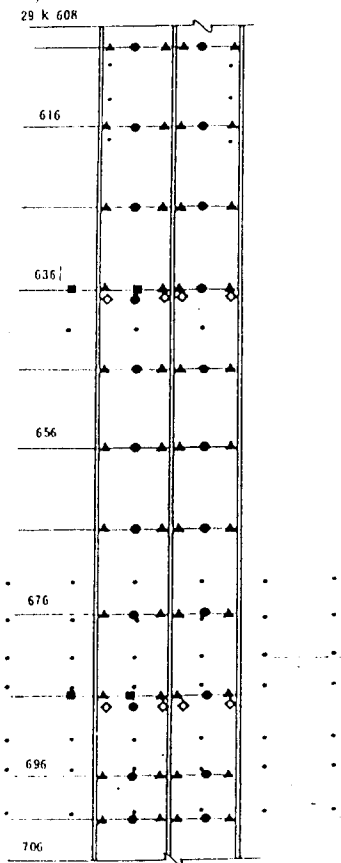


Fig. 10 計測平面圖

7.3 斷面圖

범례

| | |
|-----------------|---------------|
| EL, ER : | 지중침하측정 |
| H 1~20, D 1~2 : | 내공변위측정 |
| R, T : | 쇼크리트 응력측정 |
| NR, NT : | 지표침하측정 천단침하측정 |

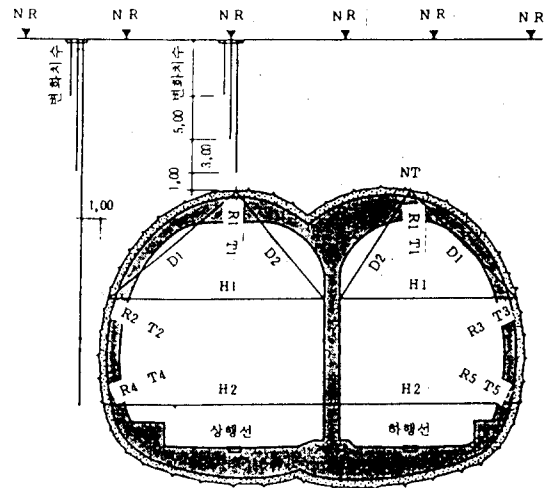


Fig. 11 計測設置 斷面圖

7.4 結果分析(29k 686)

7.4.1 內空變位

下行線 上部發掘時 29K 686 지점에서 29K666 지점까지 掘進을 행할 때까지 거의 變位가 없다가 그후 조금씩 變위가 발생하여 3.5% 정도 變형이 있었지만 그후 수렴되어 공사 후까지 變형이 없었다.

7.4.2 地表沈下測定

당 區間에서는 한때 도로의 지표침하가 76% 進行되었으나, 이는 굴진중 地下水 탈수에 의한 현상(굴진후 침하량 미소함)으로 도로 덧씌우기 포장을 실시하여 측정된 다음부터 공사 완료시까지 누적된 침하량이 12%에 머물고 있으며 Tunnel 내부에는 전혀 影響을 주지 않고 있었다.

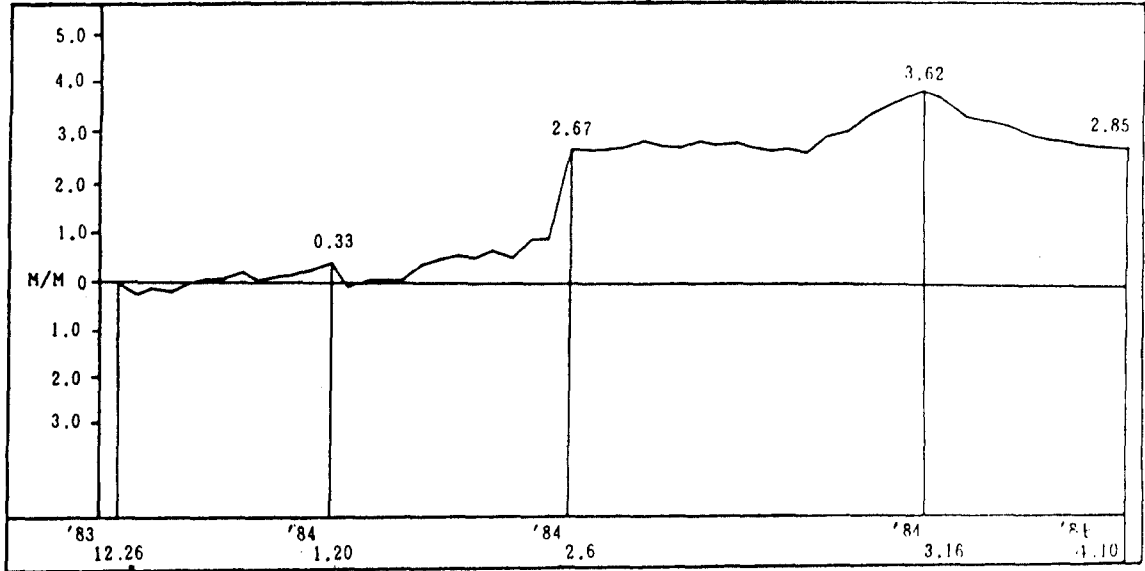


Fig. 12 內空變位(29K686) 下行線

7.4.3 천단침하측정

지금까지의 最終沈下量이 15%에서 점차적으로 수렴되고 상단굴진후 2~3%, 하단굴진후에는 1~2% 정도의 沈下量이 있었다.

7.4.4 地中變位測定

| 측 정 | 측정위치 | 최대변위량(%) |
|---------|-------|----------|
| 29K 686 | 3.08m | 1.04 |
| 중 양 부 | 8.0m | 2.14 |
| | 11.0m | -3.16 |
| 29K 686 | 3.0m | 1.22 |
| 측 벽 부 | 11.0m | 2.61 |
| | 19.0m | -5.21 |

위표는 현재까지의 最大値를 보인다.

中央部 11m지점과 內空變位の 3.5% 最大變位量과 거의 비슷한 변형을 이루고 있다.

7.4.5 Shotcrete 응력측정

$$R(\text{kg/cm}^2) = \frac{\Delta R}{0.165}, T(\text{kg/cm}^2) = \frac{\Delta T}{0.094}$$

진행현재까지 Radial Stress가 3.76kg/cm², Trangular Stress 1.8kg/cm² 변동이 있었으나, 토사와 Shotcrete에는 이완과 진동이 없었다.