

1. 개 요

Shield 터널의 굴진에 따른 지반변위를 Real Time으로 측정하여 지반변위를 가장 작게 일으키는 굴진 Pattern을 결정하는 것이 계측시스템구축의 목적이다. 대상지반은 부산시 구포전력구 현장의 대표적인 지반이라 생각되는 Silt 층인 #11 작업구 인근과 모래층인 #7 작업구 인근에서 각각 실시하였다. 계기매설에서 계측결과분석은 1994년 6.22~11.5에 수행하였다.

계측결과로부터 얻어지는 효과는 Shield 터널 굴진에 따른 지반변위의 형태와 크기를 파악할 수 있고 가장 적절한 굴진 Pattern 제시로 인근 매설물에 영향을 미치지 않는 시공을 가능케 하며 자동계측의 계기매설 및 계측기술을 습득할 수 있다. 본 전력구 공사에서는 자동계측용 Computer Software 및 관련장비를 확보하고 국내 최초의 Shield 터널 자동계측을 수행하였다.

2. 계측시스템의 구성 및 계기

2.1 계측시스템의 구성

전체의 계측시스템은 지반속에 묻히는 센서부

와 센싱된 데이터를 순서대로 취하는 Logger부, 그리고 데이터의 처리와 저장을 하는 컴퓨터 부분으로 구성되어 있다. 지반속에 묻히는 센서는 지중의 침하를 측정하는 층별 지중 침하계, 지표의 침하를 측정하는 연통관식 침하계, 간극수압을 측정하는 간극수압계로 되어 있으며 Logger부는 50개의 전자식 접점을 가지는 Switch Box와 0.02초 간격으로 데이터를 읽어들이는 Data Logger로 구성되어 있다.(그림 2.1 참조)

그리고 본 시스템은 Switch Box와 Data Logger사이의 거리가 멀지 않으므로 Modem을 이용하지 않고 바로 연결하였다. 본 시스템은 컴퓨터를 주 Controller로 하고 있으므로 계측용 S/W로 Data Logger를 가동시키고 Data Logger는 Switch Box에 연결된 센서로부터 순차적으로 데이터를 가져오게 된다. 층별 침하계는 지중에 매설된 앵커의 움직임이 상부의 변환기를 통해서 변환이 될 수 있도록 하였으며 연통관식 침하계는 조정카드를 거쳐서 Switch Box로 데이터를 보내게 되어 있다. 층별 침하계는 Strain 값이 얻어지며 연통관식 침하계는 mV의 전압이 얻어지므로 이를 환산하여 Strain 값을 구하게 되어 있다.

변위 값은 Shield 굴진에 따른 영향을 받지 않을 것으로 예상되는 심도에 앵커를 설치하여 이곳을 부동점으로 하여 나머지 지표와 지중의 침하값이 계산되어질 수 있도록 구성하였다. 따라서 연

* 부산대학교 토목공학과 교수

** 삼성건설(주) 이사

통관식 침하계의 기준수조는 물의 공급 역할만 가지도록 하였으며 지상 Pit 바닥의 변위차만이 이용되게 함으로써 연통관의 온도에 의한 오차를 줄일 수 있도록 하였다.

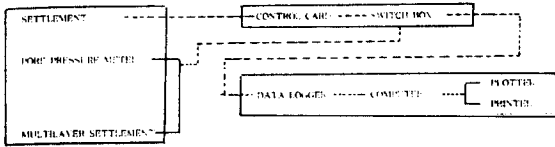


그림 2.1 계측시스템의 구성

2.2 계측기기

1) 다절점 지중침하계

지중침하계는 Boring 구멍내 임의의 심도에 고정된 앵커에 의해서 지반의 움직임이 앵커의 움직임으로 나타나고 이때 앵커에 연결된 측정 Wire도 같이 움직이게 되므로 이러한 이동량을 LVDT로 측정하여 기준면과 앵커간의 변위를 알 수 있다. 또한 본 지중침하계는 최대 6개의 앵커를 부착시킬 수 있으며 데이터는 Strain값으로 얻어지며 변환기는 완전 방수형으로 되어있다. 앵커가 침하할 경우 변환부와 앵커와 간격이 멀어지게 되며 이때 Strain 값은 (+)쪽으로, 융기할 경우 (-)쪽으로 이동하여 값이 나타난다. 또한 Strain은 $\pm 2000\mu$ 까지 나타나며 40μ 변동은 1mm의 침하 혹은 융기로 계산되게 되어 있다.

2) 연통관식 지표침하계

본 장치는 연통관을 이용한 [물의 운동]의 원리를 이용해서 제작된 것으로 기준수조에서는 끊임 없이 물을 내려 화살표 있는 곳에서 Over Flow를 시켜서 증발과 측정점의 침하에 따른 Level 변화를 보정하고 있다. 설치시의 수두의 높이를 h로 하고 침하계 1, 2, 3의 설치점이 침하하면 각 점에 있어서 높이는 각각 $h+\Delta h_1$, $h+\Delta h_2$, $h+\Delta h_3$ 로 된다. 그러므로 각각의 수두의 높이를 측정해서 설치시의 높이를 빼면 침하량이 구해진다. 기준장치에는 급수 Pump에 의해 회수보급부에서 일정 유량의 물의 보급을 받는 기준부수조가 있어서 정밀한 액면이 유지된다. 기준수조에서 Over Flow한 물은 회수 보급부에 고이고 급수 Pump에 의해

다시 기준부수조에 넣어 상시순환하고 있다. 또 기준수조의 부근에는 온도보정용의 침하계를 설치하고 물의 밀도변화에 따른 수압의 오차를 보정한다. 따라서, 이 침하계는 침하량을 항상 Zero에서 온도변화에 따른 움직임만을 출력하기 때문에 이 값을 연산회로에서 감산하여 실제의 침하량을 검출할 수가 있다.

3) Switch Box

많은 Channel의 데이터를 측정할 경우 순차적으로 점점별로 데이터를 취하기 위해서 사용하는 연결용 장치로 빠른 속도로 데이터를 취하기 위해서 측정점 절환은 반도체형 Relay를 사용하고 있다. 점점수는 50개로 측정항목은 Strain, 직류전압, 온도측정 등이 가능하다. 특히 Strain 측정시 Bridge 전원의 정전류 Mode를 내장하고 있어서 변환기로 부터의 Cable 길이가 길어질 경우에도 안정적인 데이터를 얻을 수 있다.

4) Data Logger

TDS-601A는 고속의 A/D Converter를 탑재하고 있어서 최대 0.02초의 빠른 시간 간격으로 데이터를 취할 수 있으며, CRT Display, 3.5" Disk Driver를 장비한 다기능 Logger로 RS-223C Interface 및 GP-1B Interface를 갖고 있으므로 컴퓨터를 이용한 데이터의 수집시스템 구성시 가장 적합한 기종이다. 내부에 10개의 접점을 장비하고 있으며 외부의 Switch Box를 이용하여 1000개 까지의 접점을 동시에 연결할 수 있다. 측정 항목은 Strain, 직류전압, 온도 등이며, Analog Out 기능을 갖고 있어서 외부의 모니터를 연결할 수도 있다.

3. 계측위치 및 매설심도

3.1 지반조사 결과

1) #11 작업구(C-Line)

계기의 매설을 위한 Boring시 지반조사도 아울러 실시하였다. 지반조사 결과 #11 작업구의 경우 상부에서 14.5m까지는 특수계수가 $2.7 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 정도인 Silt층이 나타났다. Silt층에서 채취한 불교란 시료를 시험한 결과 비중 2.64, 간극비 0.84, 자연함수비 31%, 포화도 98%, 점착력

0.33kg/cm², 내부마찰각 33°로 나타난다. 굴착토사의 입도시험으로부터 판단하여 불 때 굴착대상 지반은 200번체 통과량이 20~30%인 Silt층이 주로 이루며 균등계수는 20이하로 대단히 크다. 따라서 이상의 시험결과를 종합적으로 판단하여 보면 굴착대상 토질은 점토분을 다소 함유하고 있는 중간정도 굵기의 모래질 층으로 판단된다.

2) #7 작업구(A-Line)

#7 작업구는 #11 작업구보다 모래성분이 우수하므로 자연시료의 채취는 어려울 것으로 판단하여 지반조사는 지층구분과 SPT 및 현장투수시험으로 한정하였다. 계기가 매설되는 터널상부위 토층은 지표에서 GL-4.0m까지는 실트질 점토가 주를 이루며 터널천단부까지는 모래층으로 분포되며 GL-13m이하는 사질실트가 주로 분포하고 있다. 모래층의 N치는 15에서 22의 값을 가지며 점토 및 실트층은 N치가 5~8의 분포를 보이는 비교적 연약한 토층으로 구성되어 있다. 투수계수는 모래층에서 2.0×10⁻⁴cm/sec, 하부의 실트층에서는 9×10⁻³cm/sec의 값을 가지며 지하수위는 GL-2m 위치에 분포하고 있다.

토압을 계산하기 위해서는 습윤단위중량은 1.8kg/cm², 점착력은 0, 내부마찰각은 33°를 적용하였다.

3.2 계측위치 및 심도

1) #11 작업구(C-Line)

계측위치는 11번 작업구 인근에서는 일정상의 문제로 초기굴진 위치에서 수행되기는 어려웠으므로 작업구에서 60m 떨어진 위치에서부터 계기를 매설하였다. 터널의 선형과 계측기가 설치된 평면상의 위치 및 앵커별 심도는 그림 3.1 및 3.2와 같다. 계측위치가 터널의 위치로 부터 일정하게 설치되지 못한 이유는 터널의 계획선형 측량에 오차가 생긴 때문이며, 당초 계획은 제일 하부의 앵커 위치 또한 Shield 기계로 부터 1.0m 상부에 설치되게 계획하였으나 계획 터널의 심도 확인상의 Error가 있어서 하부의 앵커는 Shield 기계와 30cm 간격으로 대단히 근접되게 시공되었다.

2) #7 작업구(A-Line)

계측위치는 초기굴진시의 거동을 파악하기 위해서 발진갱구에서 18.2m, 27.2m 떨어진 위치에

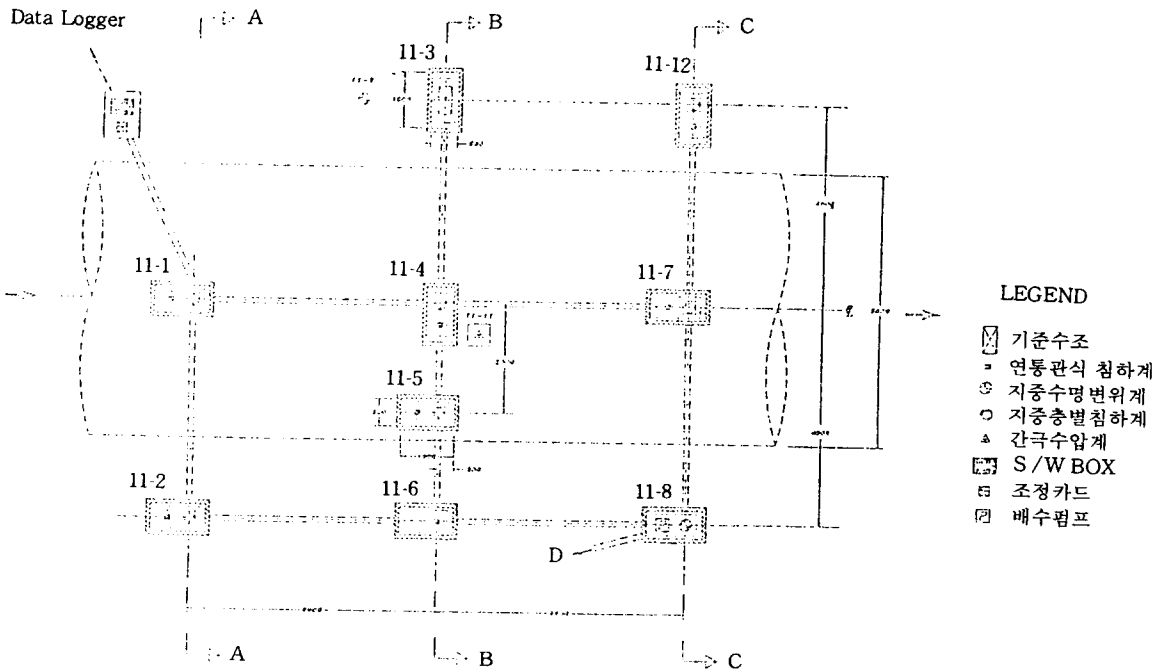


그림 3.1 #11 작업구의 계측공 위치

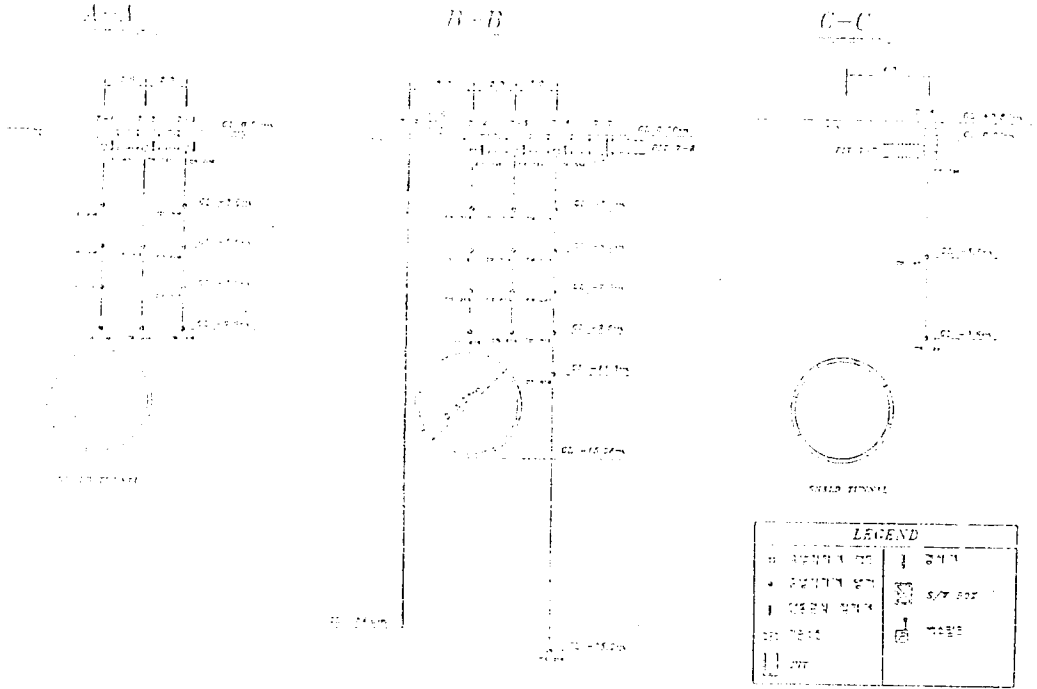


그림 3.4 #7 작업구의 계측공별 센서 위치

계측단면을 설정하였다. 터널의 선형과 계측기가 설치된 평면상의 위치 및 앵커별 심도는 그림 3.3 및 3.4와 같다. 또한 C-C 계측단면은 작업구 외측의 제방상으로 설치가 어려워 침하 확인용으로 1개소만 설치하였다.

4. 계기매설

4.1 지상 Pit

지중 층별 침하계를 매설하기 위해서는 지상에서 Boring을 하여야 하며 앵커 설치 후 변환부와 연통관식 침하계의 센서가 들어갈 자리가 필요하므로 이는 지상부에 C-Line의 경우에는 50cm×100cm×80cm(W×L×H)의 Pit를, A-Line의 경우에는 직경 1.0m, 높이 1.0m의 Pit를 만들어서 Pit내부에 이들 센서가 설치되도록 하였다. Pit간의 연결은 2중의 배관을 두어서 연결하였으며 상부의 배관은 배선용으로, 하부의 배관은 배수용으로 이용하였다. Pit의 바닥은 Pit벽체와 분리시켜서 지

표부의 침하가 Pit바닥의 침하로 나타나도록 하였으며 Pit상부는 두껍을 덮어서 계측중 차량의 통행에 지장을 주지 않도록 하였다. 연통관식 침하계는 수압식 센서이므로 기준수조는 센서보다 80cm 높이가 높아야 하므로 계측용 센서가 설치되는 Pit보다 80cm 높게 설치하였다. 또한 Boring시의 Bentonite를 쉽게 처리하기 위하여 Pit를 먼저 만들고 Pit위에 Boring기를 거치하여 Boring이 되도록 하였다.

4.2 앵커의 매설

앵커는 계획된 심도별로 지상에서 조립작업을 한 후 Boring Casing내부로 투입하여 고정을 하였다. 앵커에 연결되는 측정용 Wire의 외부 Plastic Pipe는 앵커가 침하할 때에도 저항을 주지 않도록 주름관을 설치하였으며 앵커의 고정은 수압을 작용시켜서 고정부 날개를 지반에 삽입시켜 고정하였다. 앵커를 고정시키기 전에 Grouting제인 Cement, Bentonite 혼합액을 Boring Hole내에 주입하고 앵커를 고정하여 최하부의 앵커가 고정

된 후 다음번 앵커가 지반에 고정될 수 있을 정도 까지 Casing을 인발하여 앵커를 동일한 방법으로 고정하였다.

Grouting용 Cement, Bentonite는 지반의 강도 보다 강도가 크지 않도록 Cement : Bentonite : Water=1 : 1 : 10의 중량비로 배합을 하여 주입하였다.

4.3 센서부착 및 시스템연결

층별침하계용 센서는 재사용이 가능하도록 지상의 Pit에 별도의 받침대를 만들어서 고정하였다. 각 앵커는 침하가 70mm, 용기가 30mm 측정될 수 있도록 측정범위를 조정하였으나 터널의 깊이보다 깊어 매설된 앵커는 침하가 나타나지 않을 것으로 예상하여 해당 앵커의 센서는 침하와 용기가 각각 50mm씩 측정이 될 수 있도록 고정하였다.

연통관식 침하계의 센서는 기준수조의 수면과 80cm의 수위차가 되도록 센서의 하부에 철판을 넣어서 높이를 조절하였다. 연통관식 침하계는 연통관내의 기포제거와 공기빼기 Hose의 설치에 따라서 그 정도가 크게 차이가 나므로 최대한 주의 를 기울였다. 각 센서로 부터 전선을 Switch Box 에 연결시킬 때에는 Noise의 방지를 위하여 납땜을 하였으며 Switch Box에서 Data Logger까지는 알루미늄 테이프를 감아서 Noise를 최대한 방지하였다.

5. 계측용 Software

5.1 Software의 개요

본 계측용 S/W는 구포전력구 현장의 지반계측 데이터의 처리용으로 개발된 것으로 언어는 Borland C++를 사용하였다. PC를 이용하여 계측을 할 경우 Main Controller는 PC가 되며 Software는 TDS-601A에 한정되며 본 Program을 운용하기 위해서는 80386급 이상의 PC가 필요하며 DOS는 MS DOS 5.0 이상을 필요로 한다. 또한 VGA 카드는 ET 4000, ET 3000, Paradise, Genoa, Wonder, Poach, Ahead 등이 사용가능하며 Printer는 HP PCL4이상의 Laser Printer를 지원한

다.

5.2 Software의 구성

Software는 크게 계측용 Program인 Tunnel.exe와 계측된 데이터를 Lotus 및 Excel의 Format으로 변환시켜주는 TXT2.LTS와 TXT2.XL로 구성되어 있다. 계측은 계측계획 File과 센서 File로 부터 기본 데이터를 받아들여서 Binary File인 *.FDT File과 Text File인 *.TXT File을 만든다. 컴퓨터는 FDT File만 이용하고 TXT File은 User가 이용한다. Convert Program은 TXT File을 Lotus File과 Excel File로 만든다. 또한 계측데이터의 수정은 TXT File에서 하며 TXT2FDT.exe로 File을 Binary로 변환하며 수정된 계측값으로 그래픽을 그릴 수도 있다.

계측은 계측계획 구성 File에서 계측 Interval을 지정하여 주어서 최대 1초 간격으로 계측을 수행할 수 있도록 하였으며 계측된 데이터는 최대 3 Channel까지 화면에 Real Time으로 표시해준다. Software의 전체구성은 그림 5.1과 같다.

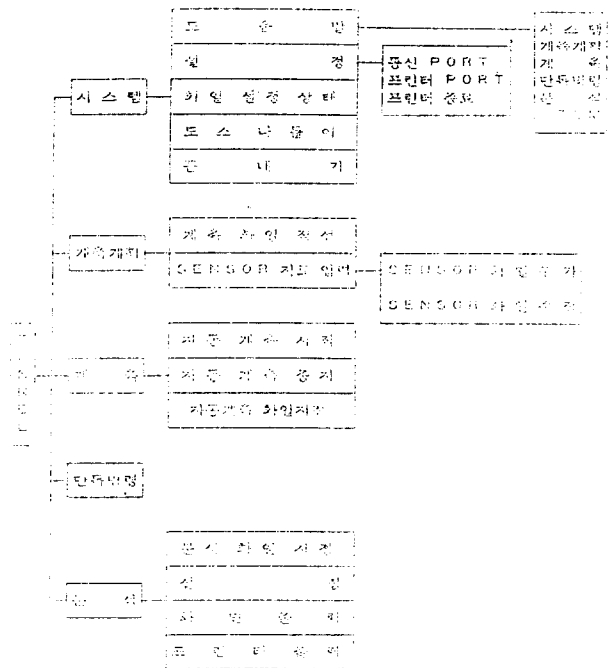


그림 5.1 계측 Software의 구성

5.3 Sensor 간 침하량 계산식

1) #11 작업구(C-Line)

(1) 부동점 상부 Pit의 침하량 : 부동점의 측정값으로부터 파악

$$S_{36} = (M_{22} - M_{22i}) \times f_{22} \quad j = \text{초기치}$$

(2) 부동점 상부의 지중 층별 침하량

$$\Delta S_i = (M_i - M_{ij}) \times f_i \quad i = 23 \sim 25$$

$$S_i = S_{36} - \Delta S_i \quad i = 23 \sim 25$$

(3) 부동점이 없는 다른 Pit의 침하량 : 연통관에 의해서 계산

$$\Delta S_j = (M_i - M_{ij}) \times f_i \quad i = 30 \sim 36$$

$$S_i = S_{36} + (\Delta S_i - \Delta S_{36}) \quad i = 30 \sim 35$$

(4) 부동점이 없는 Pit 아래의 층별 침하량

$$\Delta S_j = (M_i - M_{ij}) \times f_i \quad i = 0 \sim 25$$

$$S_i = S_{30} - \Delta S_i \quad i = 0 \sim 1$$

$$S_i = S_{31} - \Delta S_i \quad i = 2 \sim 5$$

$$S_i = S_{32} - \Delta S_i \quad i = 12 \sim 15$$

$$S_i = S_{33} - \Delta S_i \quad i = 16 \sim 19$$

$$S_i = S_{35} - \Delta S_i \quad i = 20 \sim 21$$

2) #7 작업구(A-Line)

(1) 부동점 상부 Pit의 침하량 : 부동점의 측정값으로부터 파악

$$S_{35} = (M_{18} - M_{18i}) \times f_{18} \quad j = \text{초기치}$$

(2) 부동점 상부의 지중 층별 침하량

$$\Delta S_j = (M_i - M_{ij}) \times f_i \quad i = 19 \sim 23$$

$$S_i = S_{35} - \Delta S_i \quad i = 19 \sim 23$$

(3) 부동점이 없는 다른 Pit의 침하량 : 연통관에 의해서 계산

$$\Delta S_j = (M_i - M_{ij}) \times f_i \quad i = 30 \sim 34$$

$$S_i = S_{35} + (\Delta S_i - \Delta S_{35}) \quad i = 30 \sim 34$$

(4) 부동점이 없는 Pit 아래의 층별 침하량

$$\Delta S_j = (M_i - M_{ij}) \times f_i \quad i = 0 \sim 25$$

$$S_i = S_{30} - \Delta S_i \quad i = 0 \sim 3$$

$$S_i = S_{31} - \Delta S_i \quad i = 4 \sim 5$$

$$S_i = S_{32} - \Delta S_i \quad i = 6 \sim 9$$

$$S_i = S_{33} - \Delta S_i \quad i = 10 \sim 13$$

$$S_i = S_{34} - \Delta S_i \quad i = 14 \sim 17$$

$$S_i = S_{36} - \Delta S_i \quad i = 24 \sim 25$$

3) 계산예

(1) 부동점 상부 Pit의 침하량 : 부동점의 측정값으로부터 파악

$$S_{35} = (M_{18} - M_{18i}) \times f_{18} = (202 - 638) \times 0.0218 = -9.505\text{mm}$$

(2) 부동점 상부의 지중 층별 침하량

$$\Delta S_i = (M_i - M_{ij}) \times f_i$$

$$\Delta S_{19} = (M_{19} - M_{19i}) \times f_i = (-175 - 11) \times 0.0218 = -4.055\text{mm}$$

$$S_i = S_{35} - \Delta S_i = -9.51 - (-4.055) = -5.45\text{mm}$$

(3) 부동점이 없는 다른 Pit의 침하량 : 연통관에 의해서 계산

$$\Delta S_j = (M_i - M_{ij}) \times f_i$$

$$\Delta S_{35} = (439 - 44.5) \times 1.002 = -0.601\text{mm}$$

$$\Delta S_{30} = (-84 - 43.1) \times 1.0 = -40.9\text{mm}$$

$$S_i = S_{35} + (\Delta S_{30} - \Delta S_{35}) = -9.505 + (-40.9 + 0.601) = -49.804\text{mm}$$

(4) 부동점이 없는 Pit 아래의 층별 침하량 : (2)와 동일하며 S₃₅ 대신 Pit의 침하량을 적용한다.

2) #7 작업구(A-Line)

#7 작업구 인근의 계측기가 설치된 지역의 해당 Ring No는 그림 6.3과 같으며, 그림의 ①, ②, ③위치에 Shield 기계의 머리가 왔을 때 막장 설정 토압을 변경하였고, 또한 ①, ②, ③위치에 Shield 기계의 Tail이 왔을 때 배면주입압을 변경하였다. 이렇게 하여 계측단면 A-A, B-B, C-C에서의 데이터 구분이 분명히 이루어지도록 하였다.

7. 계측결과 및 분석

7.1 계측결과

1) #7 작업구(A-Line)

① A-A단면

A-A단면 전후 5Ring의 범위에 Shield기계의 머리부가 지나가는 동안 평균토압은 1.7kg/cm² 이었으며 Shield기계의 꼬리부가 계측단면을 통과하는 19Ring부터 22Ring까지의 4Ring은 배면주입이 되지 않았으므로 주입률 및 주입압은 0이었다.

A-A단면에서는 이와 같은 조건에서 굴진하여 Chamber내의 토압이 정지토압보다 작아서 Crown 상부의 0번 Channel에서도 움기는 발생하지 않았으며 Cutter Head가 계측단면을 통과할 때까지의 침하량은 터널 직상부에서는 최종침하량의 29.4%였다. 또한 시간경과에 따른 침하는 배면주입이 되지 않음으로 인해서 꼬리부가 계측단면을 통과할 때 침하가 크게 발전하였으며 이때까지의 침하량은 전체침하량의 77%를 보이고 있다.(표 7.1~표 7.3 참조)

침하량은 Cutter Head가 도착하기 까지 Crown 상부에서는 이미 26.6mm의 침하가 나타나고, Shield 꼬리부가 계측단면에 도달할 때는 92.7mm의 침하량을 보이고 있으며, 최종침하량은 104mm에 이르고 있다. 주교 Tail Void의 개방에 의해서 발생하는 이러한 침하량은 지반의 Arching효과로 인하여 지표로 갈수록 줄어들어서 지표에서는 Crown부의 1/2정도의 침하량을 보이고 있으며, 횡방향으로는 터널 중심부에서 3.75m 떨어진 위치에서의 침하량은 터널 중심부에서의 침하

량의 1/4정도에 이르고 있었다.

표 7.1 Cutter Head가 A-A 계측단면에 도달시 침하량(mm)

거리	Shield 중심에서 부터의 거리		
	-0.4 m	1.65 m	3.75 m
심도	-0.4 m	1.65 m	3.75 m
지 표	-15 (30%)	-12.1(27%)	-6.9(26%)
-3.6m	-19.7(30%)	-	-1.7 (9%)
-5.6m	-15.1(30%)	-14.4(23%)	-5.7(19%)
-7.6m	-33.2(32%)	-	-3.3(13%)
-9.6m	-26.6(25%)	-6.5 (7%)	-6.7(12%)
평 균	29.4%	19.0%	15.8%

표 7.2 Shield Tail이 A-A 계측단면에 도달시 침하량(mm)

거리	Shield 중심에서 부터의 거리		
	-0.4 m	1.65 m	3.75 m
심도	-0.4 m	1.65 m	3.75 m
지 표	-36.1(72%)	-31.0(70%)	-17.2(65%)
-3.6m	-48.9(74%)	-	-11.5(60%)
-5.6m	-35.9(72%)	-46.3(73%)	-19.0(64%)
-7.6m	-79.9(78%)	-	-15.8(62%)
-9.6m	-92.7(89%)	-83.2(86%)	-19.4(64%)
평 균	77.0%	76.3%	63.0%

표 7.3 A-A 계측단면에 최종침하량 침하량(mm)

거리	Shield 중심에서 부터의 거리		
	-0.4 m	1.65 m	3.75 m
심도	-0.4 m	1.65 m	3.75 m
지 표	- 49.8	-44.2	-26.6
-3.6m	- 66.3	-	-19.3
-5.6m	- 49.9	-63.7	-29.6
-7.6m	-102.3	-	-25.3
-9.6m	-104.4	-96.5	-30.5

② B-B단면

B-B단면 전후 5Ring의 범위에 Shield기계의 머리부가 지나가는 동안 평균토압은 2.2kg/cm²이였으며 Shield기계의 꼬리부가 계측단면을 통과하는 동안의 주입률은 118%이며 주입압은 1.8kg/cm²였다.

B-B단면에서는 이와 같은 조건에서 굴진하였으므로 Chamber내의 토압이 정지토압보다 커서 Cutter Head가 계측단면을 통과할 때까지의 침하량은 터널 직상부에서는 최종침하량의 7.2%에 불과하며, Tail부가 계측단면을 통과할 때까지의 침하량은 전체침하량의 39%를 보이고 있다.(표 7.4~7.6 참조)

침하량은 Cutter Head가 도착하기 까지 최대

#7 작업구에서의 토압계산은 Shield 추진시의 설정토압을 1.7kg/cm^2 과 2.2kg/cm^2 을 각각 설정하였다.

② 배면주입압의 설정

배면주입압은 토피압력을 기준으로 하여 당초 $1.9, 2.3\text{kg/cm}^2$ 을 계획하였으나 A-A 단면에서는 배면주입을 하지않고 굴진이 되어 주입압은 0이였으며, B-B 계측단면에서는 1.8kg/cm^2 을 적용하였다.

6.2 계측실시 및 데이터 처리

1) #7 작업구(A-Line)

#11 작업구 인근의 계측기가 설치된 지역의 해당 Ring No는 그림 6.2와 같으며, 그림의 ①, ②, ③위치에 Shield 기계의 머리가 왔을 때 막장 설정 토압을 변경하였고, 또한 ①, ②, ③위치에 Shield 기계의 Tail이 왔을 때 배면주입압을 변경하였다. 이렇게 하여 계측단면 A-A, B-B, C-C에서의 데이터 구분이 분명히 이루어지도록 하였다.

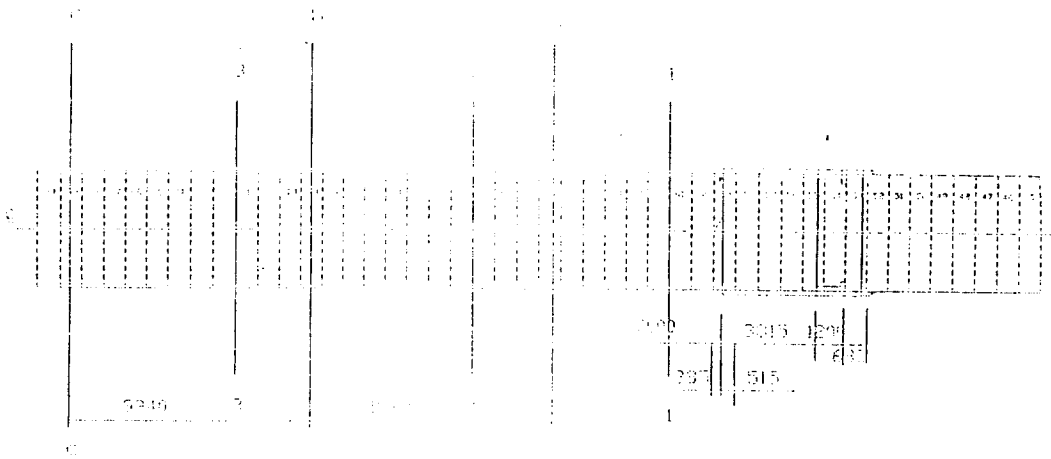


Figure 6.2 #11 작업구 계측단면에서의 TRC

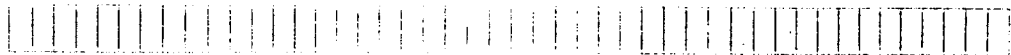


그림 6.2 #11 작업구 계측단면에서의 Segment 위치

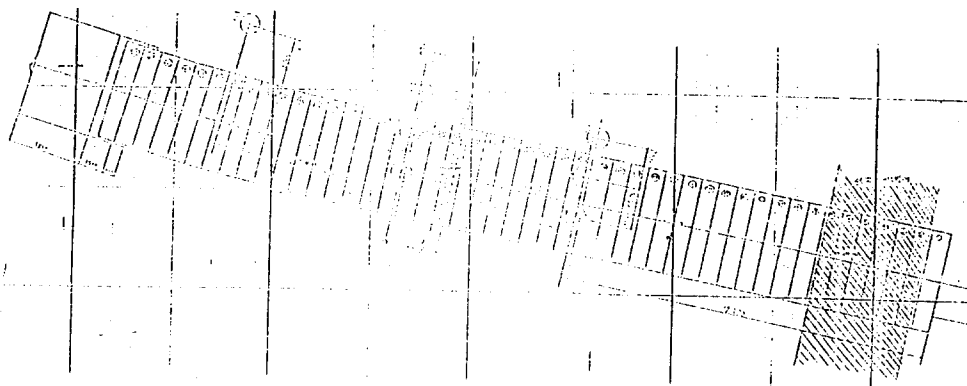


그림 6.3 #7 작업구 계측단면에서의 Segment 위치

2mm의 침하가 나타나고, Shield 꼬리부가 계측단면에 도달할 때는 최대 8.4mm로 억제가 가능하였다. 그후 침하는 계속 발전되어 최종침하량은 19.4mm에 이르고 있다. 전체의 침하량이 적은 B-B 단면의 경우 전체의 침하량이 큰 A-A 단면과는 달리 지반의 Arhing 효과는 크게 나타나지 않으므로 Crown부의 침하량에 비해서 지표 및 가장자리로 갈수록 침하량이 줄어드는 기울기가 작아진다. 즉 지표의 침하량은 Crown부의 침하량의 85%에 상당하며, 터널 가장자리부에서는 지표의 침하량이 지중침하량보다 크게 나타나고 있다.

③ C-C 단면

Shield기계의 머리부가 C-C 단면을 지나가는 동안 평균토압은 B-B 단면과 같이 2.2kg/cm²로 설정하였으며 Shield기계의 꼬리부가 계측단면을 통과하는 동안의 주입률은 78%이며 주입압은 계기고장으로 측정이 불가능하였다.

C-C 단면에서는 이와 같은 조건에서 굴진하였으므로 Cutter Head가 계측단면을 통과할 때까지의 침하량은 B-B 단면과 큰 차이가 없는 것으로 판단되나, Tail부가 계측단면을 통과할 때까지의 침하량은 전체침하량의 40.7%이다. 최종침하량은 Shield 중심에서 5.1m 떨어진 지역에서의 침하량은 지표에서 9.2mm로 가장 크게 나타났다. C-C 단면에서의 계측은 설치여건상 터널 중심에서 5.1m 떨어진 위치에서 측정하였으나 배면주입재의 주입량으로 부터 판단하여 보면 주입량이 B-B 단면보다 적어서 침하량은 크게 나온 것으로 판단된다.(표 7.7~표 7.9 참조)

표 7.4 Cutter Head가 B-B 계측단면에 도달시 침하량(mm)

거리	Shield 중심에서 부터의 거리		
	-0.5 m	1.80 m	4.00 m
심도			
지 표	-1.6(10%)	-1.4(10%)	-0.9(9%)
-3.6m	-1.4(8%)	-0.7(5%)	-0.1(1%)
-5.6m	-1.2(7%)	-0.8(6%)	0
-7.6m	-1.1(6%)	-0.3(2%)	-0.1(1%)
-9.6m	-0.8(5%)	+0.1(-0.8%)	-0.1(2%)
-11.6m	-	-	-0.2(4%)
평 균	7.2%	4.4%	1.8%

표 7.5 Shield Tail이 B-B 계측단면에 도달시 침하량(mm)

거리	Shield 중심에서 부터의 거리		
	-0.5 m	1.80 m	4.00 m
심도			
지 표	-5.6(36%)	-4.9(35%)	-3.1(33%)
-3.6m	-6.2(37%)	-4.6(34%)	-2.4(29%)
-5.6m	-7.1(40%)	-5.3(38%)	-2.1(27%)
-7.6m	-8.4(43%)	-5.4(38%)	-1.8(25%)
-9.6m	-6.8(39%)	-4.8(36%)	-1.2(20%)
-11.6m	-	-	-1.6(29%)
평 균	30%	36.2%	27.2%

표 7.6 B-B 계측단면의 최종침하량 침하량(mm)

거리	Shield 중심에서 부터의 거리		
	-0.5 m	1.80 m	4.00 m
심도			
지 표	-15.6	-13.9	-9.5
-3.6m	-16.8	-13.7	-8.2
-5.6m	-17.8	-14.1	-7.9
-7.6m	-19.4	-14.2	-7.1
-9.6m	-17.5	-13.2	-6.0
-11.6m	-	-	-5.5

표 7.7 Cutter Head가 C-C 계측단면에 도달시 침하량(mm)

거리	Shield 중심에서부터의 거리
	+5.1m
심도	
지 표	-1.6(17%)
-5.6m	+0.2(-3%)
-9.6m	+0.4(-9%)
평 균	1.7%

표 7.8 Shield Tail이 C-C 계측단면에 도달시 침하량(mm)

거리	Shield 중심에서부터의 거리
	+5.1m
심도	
지 표	-4.6(50%)
-5.6m	-2.5(39%)
-9.6m	-1.5(33%)
평 균	40.7%

표 7.9 C-C 계측단면에 최종침하량 침하량(mm)

거리	Shield 중심에서부터의 거리
	+5.1m
심도	
지 표	-9.2
-5.6m	-6.4
-9.6m	-4.6

2) #11 작업구(C-Line)

① A-A 단면

Shield기계의 머리부가 지나가는 동안 평균토압은 1.8kg/cm², Backfill압력은 0.6kg/cm², Backfill 주입율 130%의 상태로 굴진하였다.

Shield기계의 머리가 계속단면에 도달할 때까지의 침하량은 평균 2mm이며 꼬리부가 계속단면에 도달하였을 때는 최대침하량이 10mm이다. 꼬리부가 계속단면을 통과한 이후에 침하량이 크게 증가하여 최종침하량은 31mm에 달하였다. 터널 굴진에 따른 침하의 진행은 표 7.10~표 7.12에 나타나듯이 Shield기계의 머리부가 계속단면을 통과하기 전까지의 선행침하가 8.2% 이내로 발생하였으며, Shield기계의 통과시까지 발생한 평균침하는 최종침하량의 28%를 나타내고 있다. 횡방향에서의 침하분포는 일반적인 경향 즉, 터널의 Center로부터의 거리에 따라서 점차 감소해가는 경향을 보여 주었으며 깊이에 따라서도 동일한 경향을 보여주었다. 후속침하의 수렴은 Shield기계의 꼬리부가 계속단면을 통과한 후 4일이 경과되면(3D 굴진, D: Shield Machine의 직경) 거의 이루어졌다.

② B-B단면

B-B단면에서는 Shield기계가 계속단면을 통과하기 1D 전부터 Shield기계의 꼬리부가 단면을 통과할 때까지 Chamber 내 설정토압은 1.6~1.75kg/cm² Backfill압력은 1.2~1.3kg/cm², Backfill 주입율은 평균 105%의 상태에서 굴진하였다.

B-B단면에서의 침하량은 표 7.13~표 7.15에서도 알 수 있듯이 선행침하가 최종침하량의 7.4%, Shield Tail 통과시의 침하량은 19.5mm(최종침하량의 34.4%)로 A-A단면에서의 침하량보다 큰 값을 보여주고 있다. 최종침하량 또한 41.5mm로 A-A단면에서의 침하량 보다 큰 값을 보여주고 있다. 후속침하의 수렴은 Shield기계의 꼬리부가 계속단면을 통과하고 난 이후 2.5D의 거리에 이르렀을 때(4일 경과) 시작되는 것으로 나타났다.

B-B단면에서의 간극수압은 Shield기계가 B-B 계속 단면을 통과할 때 0.2kg/cm²까지의 변화를 보이고 있다. 전체적으로 발생된 과잉간극수압의 소산은 Shield기계의 머리부와 꼬리부가 계속단면을 통과한 이후 3Ring이 굴진될 때까지 거의 소산되는 것을 알 수 있다. 따라서 과잉간극수압의 발생과 이에 따른 지반침하는 빠른시간내에 이루어지며 B-B단면에서 최대 15mm까지의 후속침하

량을 발생시키는 것으로 판단된다.

③ C-C단면

C-C단면에서는 Chamber내 설정토압은 Shield기계의 머리부가 계속단면을 통과하기 전부터 꼬리부가 계속단면을 통과하는 순간까지의 사이에 2.0~2.6kg/cm², Backfill 압력은 Shield 기계의 꼬리부가 단면을 통과한 이후 1D까지의 거리사이에서 평균 2.1kg/cm², Backfill 주입율 150%의 상태에서 굴진이 이루어졌다.

C-C단면에서의 침하는 표 7.16~표 7.18에서도 알 수 있듯이 선행침하는 거의 없으며 Cutter Head가 C-C 계속단면을 통과할 때는 부분적으로 3mm~10mm 까지 용기가 발생하였으며, Shield기계의 꼬리부가 계속단면을 통과할 때까지의 침하량도 최대 7mm(최종침하량의 28~35%)에 불과하다. 또한 최종침하량은 최대 20mm로 B-B단면에 비해서는 대단히 적은 침하량을 보이고 있다. 후속침하의 수렴은 Shield 기계의 꼬리부가 계속단면을 통과한 후 2.5D의 거리에 이르렀을 때(4일 경과)이루어졌으며 깊이에 따른 침하감소 현상이 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 횡방향의 침하분포는 Center로부터의 거리에 따라서 침하량이 감소하는 일반적인 경향을 보이고 있다.

표 7.10 Cutter Head가 A-A 계속단면에 도달시 침하량(mm)

거리	Shield 중심에서 부터의 거리	
	1.68 m	5.68 m
심도		
지 표	-2.5(9%)	-1.0(10%)
- 7.3m	-1.0(3%)	-1.0(8%)
- 9.3m	-2.0(8%)	-1.0(8%)
-11.3m	-	-1.5(15%)
-13.3m	-	0(0%)
평 균	6.7%	8.2%

표 7.11 Shield Tail이 A-A 계속단면에 도달시 침하량(mm)

거리	Shield 중심에서 부터의 거리	
	1.68 m	5.68 m
심도		
지 표	- 9.0(33%)	-3.0(30%)
- 7.3m	-10.0(32%)	-4.0(33%)
- 9.3m	- 6.0(23%)	-3.5(23%)
-11.3m	-	-3.3(35%)
-13.3m	-	-0.5(17%)
평 균	29.3%	28.6%

표 7.12 A-A 계측단면의 최종침하량 침하량(mm)

심도	거리	
	Shield 중심에서 부터의 거리	
	1.68 m	5.68 m
지 표	-27.5	-10.0
- 7.3m	-31.0	-12.0
- 9.3m	-26.0	-12.5
-11.3m	-	-10.0
-13.3m	-	- 3.0

표 7.13 Cutter Head가 B-B 계측단면에 도달시 침하량(mm)

심도	거리	
	Shield 중심에서 부터의 거리	
	1.1 m	3.1 m
지 표	-2.5(9%)	-2.0(9%)
-4.3m	-2.5(8%)	-3.0(13%)
-7.3m	-2.5(7%)	-2.5(8%)
-8.3m	-2.5(7%)	-2.5(8%)
-9.3m	-2.5(6%)	-2.5(7%)
평 균	7.4%	4.0%

표 7.14 Shield Tail이 B-B 계측단면에 도달시 침하량(mm)

심도	거리	
	Shield 중심에서 부터의 거리	
	1.1 m	3.1 m
지 표	-10.0(36%)	- 8.0(36%)
-4.3m	- 9.0(27%)	- 4.0(17%)
-7.3m	-11.0(30%)	-10.0(30%)
-8.3m	-12.0(32%)	- 9.5(29%)
-9.3m	-19.5(47%)	-10.0(29%)
평 균	34.4%	28.2%

표 7.15 B-B 계측단면의 최종침하량 침하량(mm)

심도	거리	
	Shield 중심에서 부터의 거리	
	1.1 m	3.1 m
지 표	-28.0	-22.0
-4.3m	-33.0	-23.0
-7.3m	-37.0	-33.0
-8.3m	-37.0	-32.5
-9.3m	-41.4	-35.0

표 7.16 Cutter Head가 C-C 계측단면에 도달시 침하량(mm)

심도	거리	
	Shield 중심에서 부터의 거리	
	-2.7 m	+0.15 m
지 표	0	1(7%)
-4.3m	0	-
-7.3m	-	0
-9.3m	-1(22%)	0
-12.8m	+0.5(-8%)	-
평 균	3.5%	2.3%

표 7.17 Shield Tail이 C-C 계측단면에 도달시 침하량(mm)

심도	거리	
	Shield 중심에서 부터의 거리	
	-2.7 m	+0.15 m
지 표	-2.0(25%)	-7.0(47%)
-4.3m	-2.5(33%)	-
-7.3m	-	-2.0(13%)
-9.3m	-2.0(44%)	-5.0(25%)
-12.8m	-2.5(38%)	-
평 균	35.0%	28.3%

표 7.18 C-C 계측단면의 최종침하량 침하량(mm)

심도	거리	
	Shield 중심에서 부터의 거리	
	-2.7 m	+0.15 m
지 표	-8.0	-15.0
-4.3 m	-7.6	-
-7.3m	-	-15.0
-9.3m	-4.5	-20.0
-12.8m	+6.5	-

7.2 계측 결과분석

1) #7 작업구(A-Line)

Shield 터널의 중심부에서의 정지토압은 1.74kg/cm^2 로 계산되므로, Chamber내 토압을 정지토압보다 큰 2.2kg/cm^2 로 설정하여 굴진을 하는 것은 지반변위 억제를 위해서는 가장 적합한 토압치라고 생각된다. 또한 배면주입압은 정지토압보다 다소 큰 2.0kg/cm^2 을 기준으로 하는 것이 가장 적합하다고 판단되며 주입량은 Tail Void 체적의 130% 정도를 주입하는 것이 바람직하다. 이상의 결과는 지반조건이 변하지 않는 한 적용할 수 있을 것이라고 판단되며, 기타 조건이 변하지 않는 한 최대침하량 20mm 이내로 지반변위를 억제시킬 수 있으므로 Shield 터널과 인접하여 지하매설 지장물이 있더라도 지하매설물에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 따라서 가능하면 상기의 제시값을 유지하는 것이 좋으며 지반의 변화상태를 항상 감시하여야 한다. 특히 곡선부 시공시 보다 큰 침하값이 나타날 수 있으므로 주의 를 기울여야 한다.

#7 작업구의 B-B 계측단면에서 측정한 경사계 데이터는 터널의 중심에서 5.3m 떨어진 위치에서 측정한 값으로 Shield 굴진에 따라서 지반이 밀리는 현상은 굴착단면 부근에서는 5mm 미만으로 대단히 미소하므로 실트질 모래지반에서의 Shield-

d 굴진에 따른 영향은 크지 않다.

2) #11 작업구(C-Line)

지표에서의 침하거동중 선행침하의 비율은 지표에서는 전체침하량의 10%이내로 나타났으며, Shield 기계 통과중의 침하비율은 전체침하량의 20.0~40%의 분포를 보여주며 이는 Chamber 토압과 Backfill 주입에 따라 크게 달라지는 것을 알 수 있었다. 터널 1m 직상부에서의 침하는 지표에서의 침하보다도 토압과 Backfill 압력의 변화에 따라 더 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있었다.

후속침하의 수렴거리는 Shield기계의 꼬리부가 계측단면을 통과한 후 2.5~3.0D의 거리에 이르렀을 때 이루어졌으며 지표침하와 총침하의 횡단면 분포는 대체적으로 Shield 터널의 중심으로 부터 약 1.5D~2.0D까지 이르는 것으로 사료된다. 간극수압의 변화에 따른 과잉간극수압의 발생은 토압과 Backfill압에 의해서 많은 영향을 받고 있으며 그 영향거리는 Shield기계의 머리부와 꼬리부가 계측단면을 통과하기 전 1D, 통과 후 1D에 이르는 것으로 나타났으며 소산은 3Ring이 굴진되는 동안 이루어졌다.

이상과 같은 결론을 토대로 #11 작업구에서의 Shield 터널에 대해서 토압=2.2kg/cm², Backfill 압력=2.1kg/cm², Backfill 주입량=130~150%로 시공하면, 지표 및 지중의 허용침하량을 20mm로 제어하여 Shield 터널의 굴진구간에 따른 상부의 도로와 지중매설물에 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

8. 기대효과 및 향후의 개발과제

8.1 기대효과

Shield 굴진에 따른 지반의 변위를 Real Time으로 연속적으로 처리함으로써 Shield기계의 조작

(굴진 Pattern)에 따른 지반변위의 크기와 범위를 파악할 수 있었으며 따라서 잔여구간에 대해서 가장 지반변위를 적게 일으키는 굴진 Pattern을 결정하여 안정성 있는 터널굴진이 되도록 하였다. 아울러 향후의 자동계측에 대한 기틀을 마련하였다고 볼 수 있다.

8.2 향후의 계획

- ① 향후에는 본 계측결과를 전산해석 결과와 대비 분석하여 봄으로써 전산해석 결과의 정도를 높이고 아울러 잔여구간에 대해서는 전산해석을 통하여 지반변위의 보다 정확한 예측이 가능할 것으로 판단된다.
- ② 향후 Segment에 대한 계측을 수행함으로써 실제로 Segment에 걸리는 토압, 수압, 응력 등을 장기간 측정하여 향후 Shield 터널의 설계시 보다 합리적이고 경제적인 설계가 될 수 있도록 하고자 한다.
- ③ 금번 계측은 시간적인 제약으로 인하여 구포 전력구 현장에만 한정되어 사용될 수 있는 Software를 만들었으나 향후의 다른 Project에 본 Software를 활용하기 위해서는 금번 Software를 수정개발하여 보다 범용성 있는 Software로 만들고자 한다.
- ④ 도시 토목의 경우 인근의 구조물에 피해를 주지 않는 시공이 절대적으로 필요하며 이를 위해서는 인근 구조물의 거동여부를 파악하면서 시공하여야 할 것으로 생각된다. 따라서 향후에는 구축하는 구조물의 시공과 아울러 Real Time으로 인근 매설물의 거동을 관측하는 시스템으로 전개시켜 나아가고자 한다.