

# 現場計測에 의한 터널周邊地盤의 變位研究

Field Measurements of Ground Movements Around Tunnel

洪 性 完\*

Hong, Sung Wan

裊 圭 振\*\*

Bae, Gyu Jin

具 本 曉\*\*\*

Gu, Bon Hyo

鄭 夏 翼\*\*\*\*

Jung, Ha Ik

---

## ABSTRACT

Generally, ground settlements and lateral displacements are accompanied by underground excavation associated with open-cut or tunnling. These ground movements cause a harmful influence upon nearby super-structures and sub-structures. Occasionally, the ground movements may pose serious problems as the function of the nearby structures may be disrupted. Therefore, prior to the subway construction in an urban area, it is necessary to identify the causes of ground settlements and estimating the extent & the magnitude of ground movements since any potential damage to the nearby structures such as gas lines, water mains, high buildings and cultural assets must be assessed.

The research was performed mainly on ground movements such as surface settlements, lateral displacements, subsurface settlements and crown settlements to predict the maximum settlement and settlement zone, and to identify the causes of ground settlements in NATM sections of Busan subway.

As a result, it was found that lateral distribution of settlements could be approximated reasonably by a Gaussian normal probability curve and longitudinal distribution of settlements by a cumulative Gaussian probability curve, and that the early closure of temporary invert was very important to minimize ground settlements.

## 要 旨

비교적 얇은 깊이에서 터널을 鑿掘하거나 開鑿을 하는 경우, 周邊地盤에 沈下 및 水平移動 등의

---

\* 韓國建設技術研究院 研究委員

\*\* 韓國建設技術研究院 研究員

\*\*\* 韓國建設技術研究院 研究助員

\*\*\*\* 韓國建設技術研究院 研究助員

變位가 發生하게 된다. 이러한 變位는 周邊 構造物의 安定에 큰 影響을 미치며, 심한 경우 周邊 構造物이 破壞되는 狀態에 까지 이른다.

人口가 密集된 大都市에 地下鐵을 施工할 경우, 周邊 文化材, 高層建物, 上下水道管, 가스管 등의 安定을 地下鐵 設計時 고려하여야 하므로 터널掘鑿에 따른 地盤變位の 豫測과 자세한 沈下의 原因이 糾明되어야 할 必要가 있다.

本 研究에서는 地盤 沈下量 및 沈下發生 領域을 豫想하거나 沈下要因을 把握하기 위하여 釜山地下鐵 NATM 區間의 地表面 沈下, 地表面 水平變位, 地中沈下, 天端沈下 등에 관한 測定 分析이 이루어졌다. 그 結果, 橫方向 地表面 沈下는 Gaussian normal probability curve, 縱方向 地表面 沈下는 cumulative Gaussian probability curve로서 解析이 가능하다는 것과 假인버트트의 早期閉合이 沈下量 減少에 큰 影響을 미친다는 것을 알 수 있었다.

## 1. 序 論

都市터널은 建物이 밀집되어 있는 도심지의 밑을 通過하며 比較的 얇은 깊이에서 施工되고 있기 때문에, 一般 山岳터널과는 달리 地下掘鑿에 따른 地盤의 變位가 크게 되면 때로는 隣近 構造物이나 公共設備의 機能을 마비시키는 경우가 發生하게 되므로 計劃, 設計 및 施工段階에서 신중한 배려가 必要하다. 또한 都市터널은 路線과 깊이를 자유로이 선택할 수 없다는 制約을 갖고 있기 때문에 設計와 施工에 앞서서 地質狀態와 地盤掘鑿에 따른 應力變化 및 周圍 環境與件이 충분히 고려되어야만 한다.

一般的으로 터널周邊地盤의 變位에 관한 研究는 많은 學者들에 의해 經驗的 또는 半經驗的 方法,<sup>(1,2,3)</sup> 理論的 方法,<sup>(4,5)</sup> 物理的 實驗方法,<sup>(6,7)</sup> 現場計測方法<sup>(8,9,10)</sup> 등을 통하여 이루어져 왔다. 최근까지의 이러한 研究結果는 地盤變位問題를 完全하게 규명하지는 못하고 있으나, 地盤沈下의 形態에 있어서는 거의 근접하는 結果를 보이고 있다. 즉 橫方向 地表面沈下는 가우스 正規分佈 希曲線(Gaussian Normal Probability Curve)으로, 縱方向地表面沈下는 累積正規分佈 希曲線(Cumulative Normal Probability Curve)으로 形態를 유추할 수 있는 것으로 밝혀지고 있다. 이러한 推計學的 模型(stochastic Models)은 Martos<sup>(11)</sup>가 광산터널(Mine Opening)을 掘鑿할 시 地表面에 發生한 沈下形態를 규명하는 데에 적용시킨 것을 계기로 하여, 그후 Schmidt, Peck<sup>(12,13)</sup>이 軟弱地盤에서 얇은 깊이로 施工되는 都市터널의

地盤沈下 解析方法으로 이를 적용함으로써 이 분야에 대한 많은 研究가 수행되었다. Deere<sup>(14)</sup>는 많은 計測資料를 토대로 하여 터널의 幾何學的 要素와 地盤條件에 따라 沈下曲線의 最大傾斜가 일어나는 位置變化를  $i/R=(Z_0/D)^n$  式으로 표현하였으며, Peck은 粘土의 경우 式內의  $n$  값을 0.8로 가정하였다. 여기서  $R$ 은 터널半徑,  $D$ 는 터널直徑,  $Z_0$ 는 터널깊이,  $i$ 는 沈下曲線의 最大傾斜位置,  $n$ 은 常數이다. O'Reilly는 Peck과는 달리  $i=KZ$ 로  $i$ 값을 터널깊이에 대한 함수단으로 고려하고, 상수  $K$ 값은 粘性土 경우 0.5, 砂質土 경우 0.25로 가정하였다. Attwell, Farmer<sup>(15,16)</sup>는 좀더 세분된 地質形態에 따라  $i$ 값의 변화를 고찰한 結果, 正規壓密粘土의 경우는 沈下曲線의 경사위치가 Peck의 式을 따르나 過壓密粘土의 경우는 약 1.5배 정도 더 크게 나타난다고 제시하였다. 그러나 이러한 많은 式들은 全斷面掘鑿工法인 Shield 工法の 적용에 따른 變位形態를 주로 논한 것이므로, NATM 工法과 같이 分割斷面으로 掘鑿·施工하는 경우에는 上記式들의 직접적인 적용에는 다소 문제가 있다.

따라서 國內 都市터널工事의 주종을 이루는 NATM 工法으로 현재 施工中인 釜山地下鐵 0-00 工區에 代表 計測區間을 設定하여 實測을 통한 資料分析을 實施하고, 釜山地下鐵 0-0工區 蒐集 計測資料의 分析을 수행하여 NATM 工法 적용시 地盤變位の 形態, 發生影域, 變位量 등을 예측할 수 있는 방안들을 研究하고자 한다.

## 2. 現場條件 및 實測計劃

터널掘鑿에 따른 정확한 地盤舉動을 把握·分析하기 위하여, 地盤이 軟弱하고 湧水量이 많은 釜山地下鐵의 NATM 施工區間인 0-00工區를 代表 計測工區로 선정하여 實測을 實施하였다.

釜山 0-00工區는 大斷面 復線 터널區間으로서 터널斷面은 지름이 약 10 m 인 원형에 가깝고, 터널깊이는 약 9 m~10 m 정도로 비교적 얇은 깊이에서 施工되고 있는 터널區間이다.

### 2.1. 現場地質條件

釜山 0-00공구現場과 같은 매립지역은 地下水位가 地表가까이에 存在하므로 터널掘鑿時에 湧水에 대한 대책마련이 터널施工의 성패에 重要한 要因이 된다.

計測實施地域의 地質狀態는 그림(2-1)에서와 같이 地表에서 2.5 m 地中까지 주로 매립토와 굵은 호박돌로 構成되어 있으며, 地中 8 m까지는 CL로 分類되는 실트질 粘土層, 地中 13 m까지는 SW로 分類되는 砂質土, 地中 20 m까지는 風化岩 그 以下는 軟岩으로, 비교적 연약한 地層으로 構成되었다. 이러한 地質狀態로 볼 때 터널掘鑿으로 인한 地盤應力分布의 변화에 따라 터널內部에 流入되는 地盤損失(ground loss) 및 地下水位 低下로 인해서 發生되는 沈下, 遮水를 위한 grouting 시 地中에 透水係數가 낮은 실트질 점토층의 존재로 인한 地盤隆起 등 많은 施工上 問題點들을 내포하고 있는 現場이라 사료된다.

### 2.2. 터널掘進狀態

터널掘進은 現場의 악조건의 地質狀態를 고려하여 地盤變位를 最大로 줄일 目的으로 上半掘鑿과 병행하여 假인버어트를 設置하고, 上半막장을 정지한 후 下半掘鑿과 인버어트굴착을 施行하도록 계획되어 있었다. 또한 遮水 및 地盤補強 目的으로 약 20 m 터널掘進 後에는 掘鑿을 中止하고 水平 grouting 을 實施함과 동시에 grouting 이 地盤에 미치는 影響을 調査하기 위하여 地表에서는 沈下 및 隆起에 대한 計測이

實施되었다.

計測實施前 掘進狀態는 計測點 13 m 前方에서 上半掘進 및 假인버어트가 閉合된 상태에서 掘鑿을 中止하고 막장면을 shotcrete 로 閉合시킨 후 水平 grouting 을 實施하여 地盤을 補強한 狀態였으며, grouting 으로 인한 地盤의 變動은 약간의 隆起現象후 沈下가 發生되었으나 時間이 經過함에 따라 地表沈下が 거의 收斂狀態로 나타났다.

計測은 grouting 後 20日 정도 지난 뒤 地盤變動이 없는 狀態에서 上半部를 계속 掘鑿하면서 假인버어트 閉合을 進行시켜 計測點 약 9 m 後方까지 掘進後, 2차 grouting 으로 地盤을 改良하기 위해 막장掘鑿을 靜止했을 때까지 實施하였다.

### 2.3. 實測位置選定

그림(2-2)는 터널의 橫方向 計測點들의 位置를 圖示한 그림이다. 그림의 計測點들을 設置하는 데는 周圍의 建物 및 骨材野積場 때문에 제약을 받아 터널 中心線에서 對稱되게 設置하지 못하고 주로 터널右側의 橫方向으로 9개의 測點을 設置하고 縱方向으로는 3개의 測點을 設置하였다.

그림(2-3)은 地中沈下 測定用 extensometer 의 설치위치를 나타내고 있다. 그림의 C點은 設置遲延으로 計測이 제대로 行해지지 못하고 A點과 B點에서만 地中沈下를 計測할 수 있었다.

### 2.4. 實測方法

터널掘進에 따른 地表沈下는 觀測距離 20 m 의 誤差가 0.02 mm 정도인 Sokkisha 레벨을 이용하여 1日 1회씩 觀測하였으며, 上半막장이 計測點 3 m~4 m 前方에 도달하였을 때는 1일 2회씩, 計測點 通過後 4 m 後方부터는 1日 1회씩 觀測하였다.

地表의 水平變位를 調査하기 위해서는 觀測距離 20 m 의 오차가 0.1 mm 정도인 1초독 Sokkisha 데오돌라이트를 이용하여 地表沈下와 같은 頻度로서 測定을 하였으며, 地中沈下의 경우에는 掘鑿前에 extensometer 를 設置하고 上半 막

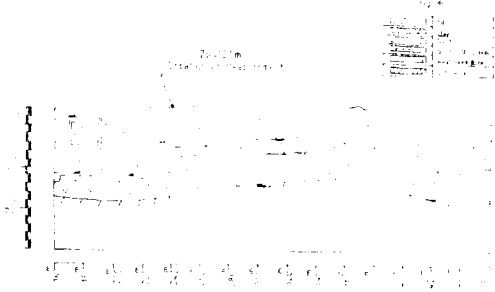


Fig. 2.1. Geological Map at the Section No. 0-00 in Busan Subway

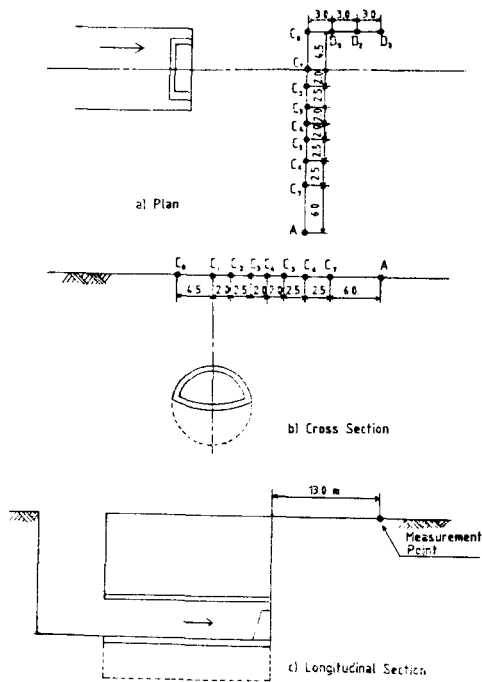


Fig. 2.2. Location of Surface Settlement Points

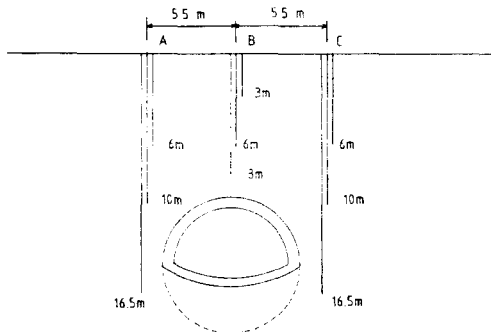


Fig. 2.3. Location of Subsurface Settlement Points

장 진행에 따른 地盤變動을 1日 1회씩 觀測하였다.

天淵沈下와 內空變位에 대한 測定은 레벨 및 convergence meter를 이용하여 實施하였으나 測點設置의 遲延에 따라 計測點後方 4m 地點부터 計測하였다.

### 3. 實測結果分析

#### 3.1. 縱方向의 地表面 沈下

그림(3-1)은 각 計測點에서 터널을 掘進할 때 發生하는 縱方向의 地表面沈下를 表示한 그림이다. 그림으로부터 터널中心에서 橫方向의 距離가 먼 計測點일수록 沈下量이 작게 나타나며, 또한 上半掘鑿에 따른 地表面沈下의 發生點도 늦게 나타나는 경향을 띄고 있다.

計測工區의 터널掘進상황은 上部掘進에 따라 假인버터틀 2m~3m 間隔으로 閉合시켰으며, 上部掘進은 計測點 後方 9.5m 까지 行해진 뒤 grouting을 위해 中斷된 狀態였다. 掘鑿前에 grouting으로 地盤이 改良된 이유도 있겠지만 假인버터틀의 閉合이 조속히 이루어져서 計測點에서의 沈下量이 相當히 작게 나타나고 있다. 또한 그림에서처럼 上半掘鑿과 더불어 假인버터틀이 閉合되는 경우는 上半通過時에 發生하는 급격한 沈下기울기가 假인버터틀의 早期閉合으로 완만하게 되며, 假인버터틀이 計測點 後方 3m 地點을 通過한 以後는 沈下의 增加가 거의 없어지는 것을 알 수 있다. 따라서 假인버터틀의 신속한 設置는 터널內로의 地盤損失을 減少시켜 結果적으로 地表面沈下를 減少시킨 것을 알 수 있다.

터널掘進距離에 따른 縱方向의 地表面沈下는 假인버터틀을 計測點 後方 3m~4m 정도에서 閉合시킨 뒤부터 一定值에 收斂하므로 縱方向의 地表面沈下와 累積正規分布曲線과를 比較하였다. 累積正規分布曲線은 一般的으로 다음과 같은 式으로 表示된다.

$$\delta_i/\delta_{s,max} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y/i} \exp(-u^2/2) du$$

여기서  $\delta_i$ 는 縱方向의 距離에 따른 沈下量,  $\delta_{s,max}$ 는 最大 沈下量,  $y$ 는 터널막장에서 計測線까지

의 縱斷方向의 距離,  $i$ 는 累積正規分布曲線의 標準偏差를 나타낸다.

그림(3-2)은  $i$  값이  $Z_0'/2$  인 累積正規分布曲線과 터널掘進거리에 따른 縱方向의 地表沈下計測值들을 比較·圖示한 것이다. 그림으로부터 縱方向의 計測值들에 대한 地表沈下曲線은  $i$  값

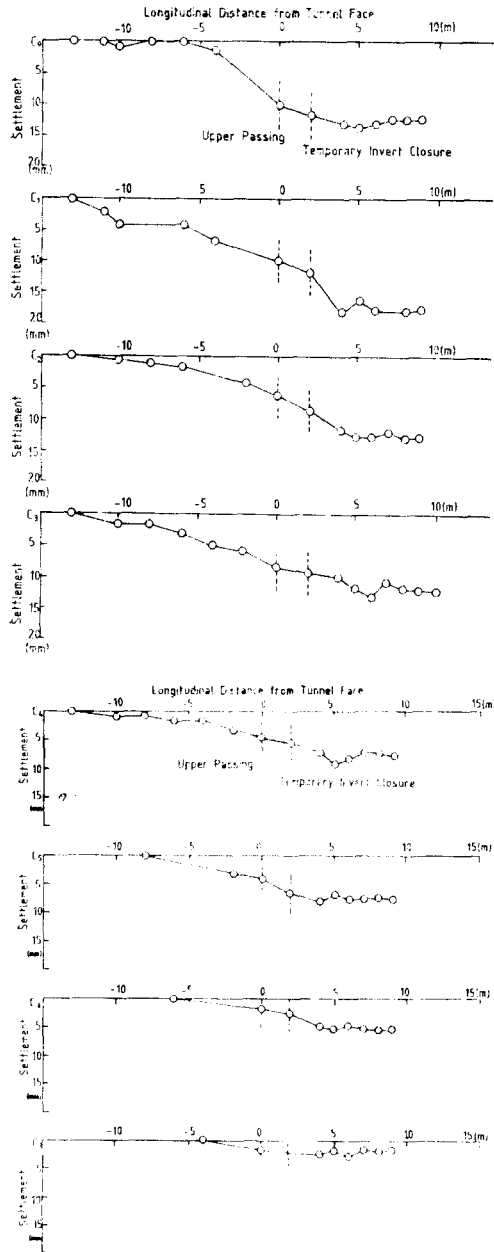


Fig. 3.1. Surface Settlement Profile with Tunnel Progression

이  $Z_0'/2$  인 累積正規分布曲線과 比較的 근접한 形態로 나타나고 있다. 단,  $Z_0'$ 은 地表에서 터널掘整斷面높이의 1/2되는 지점까지의 깊이이다.

그림(3-3)은 時間經過에 따른 平均 地表沈下의 速度를 表示한 그림이다. 一般的으로 最大沈下速度가 나타나는 位置는 計測點 通過時라고 알려져 있으나, 本 實測區間에서는 計測點 通過後 1~2일 지나서 最大沈下速度值가 나타나고 있다.

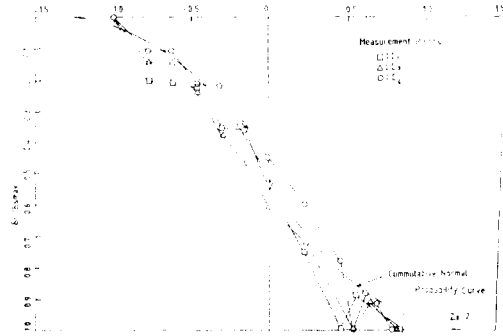


Fig. 3.2. Projection of Measurement Data onto the Cumulative Normal Probability Curve

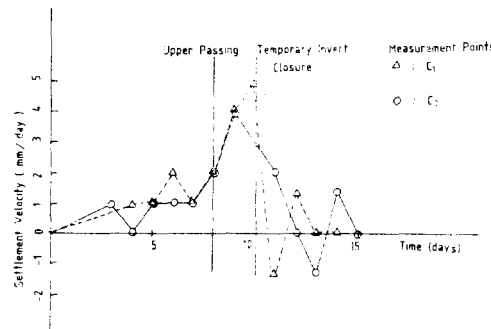


Fig. 3.3. Average Settlement velocity versus Elapsed Time

### 3.2. 橫方向의 地表面 沈下

그림(3-4)은 가우스正規分布曲線을 나타내며 一般的으로 다음과 같은 式으로 表示할 수가 있다.

$$\delta_s = \delta_{smax} \cdot \exp(-X^2 / (2i^2))$$

여기서  $\delta_s$ 는 橫方向거리에 따른 地表沈下量,  $\delta_{smax}$ 는 最大沈下量,  $X$ 는 터널 中心線에서 橫方向으로 떨어진 距離를 나타낸다.  $i$  값은 가우스正規分布曲線에서의 標準偏差로서, 다음과 같

은 방법으로 구할 수 있다.

- 1) 緩和曲線(Smooth Curve)에 의한 방법
- 2) 最適方法(Best-fit Method)
- 3) 體積方法(Volume Method)

첫째 방법은 橫方向 거리에 따른 地表沈下量을 緩和曲線으로 連結, 圖示한 뒤  $0.607 \delta_{s,max}$  되는 지점의 橫方向距離를  $i$  값으로 定하는 방법이고, 둘째 방법은  $\log(\delta_i/\delta_{s,max})$ 와  $X^2$ 과의 相關關係를 圖示한 뒤  $\delta_i/\delta_{s,max}$ 의 값이 0.607이 되는 지점의  $X$ 를  $i$  값으로 定하는 방법이며, 셋째 방법은 測定된 沈下 through의 體積을  $2.5 \delta_{s,max}$ 로 나누어서  $i$  값을 구하는 방법이다. 以上の 3가지 방법에 의해 求解된 각각의  $i$  값은 地表沈下曲線이 가우스正規分布曲線과 理想的으로 完全一致가 되는 경우만 같은 값으로 나타나기 때문에 沈下曲線이 가우스正規分布曲線과 完全一致가 어려운 現場計測值의 경우에는 방법에 따라 求解된  $i$  값의 差異가 생기게 된다. 그러나 實測結果에 따르면 地表沈下曲線이 比較的 가우스正規分布曲線과 비슷한 모양을 보이며, 測點數의 부족으로 沈下 through의 體積을 정확히 구하기가 어려운 體積方法(Volume Method)을 제외한 緩和曲線 및 最適方法으로 구한  $i$  값이 比較的 근사한 값을 보이기 때문에 가우스正規分布曲線을 이용한 沈下解析이 可能하다고 판단된다. 실제 현장에서는 沈下曲線의 沈下收斂位置를 정확히 決定하기가 어려우므로 最大沈下量의 5% 程度로 미세한 沈下量을 갖는  $2.5i$  지점을 橫方向의 沈下收斂位置로 보아서 沈下發生領域을 規定할 수가 있다. 그림(3-5)는 實測資料에 대한 橫方向의 地表沈下 through 形態를 最適方法으로 圖示한 것이다.

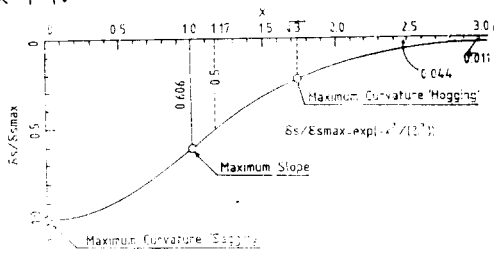


Fig. 3.4. Gaussian Normal Probability Curve

一般的으로 가우스正規分布曲線과 沈下曲線이 一致하게 되면  $\log \delta_i/\delta_{s,max}$ 와  $X^2$ 의 상관관계는

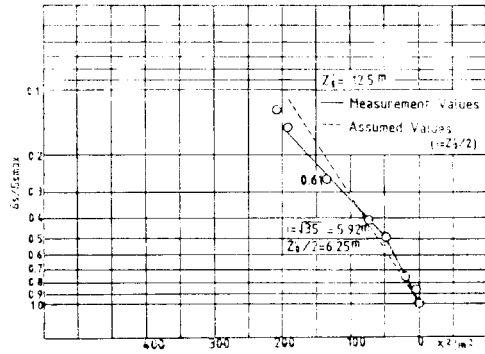


Fig. 3.5. Shape of Surface Settlement Trough

直線으로 表示된다. 그림에서처럼 實測値는 터널 中心線부근에서 약간 沈下가 集中되는 傾向을 보이거나 比較적 直線形態를 나타내고 있으며,  $i$  값은 5.92 m로 나타나고 있다. 또한  $i$  값을  $Z_0/2$ 로 가정하였을 때와 比較 圖示해보면 그림에서처럼 10% 以內의 오차로 比較적 近접한 거리에서 나타나고 있어 터널(Single Tunnel)의 경우 橫方向의 地表面沈下形態는  $i$  값이 터널 中心線에서  $Z_0/2$ 만큼 橫方向으로 떨어진 位置에서 나타나는 가우스正規分布曲線으로써 表示할 수 있다고 생각된다.

그림(3-6)은 橫方向의 最終 地表面 沈下形態를 表示한 것이다. 그림으로부터 地表面 沈下는 터널 中心線위의 地表面에서 最大值가 나타나며, 터널 中心으로부터 橫方向으로 멀어질수록 점차 減少되어 15 m 지점에서부터는 거의 沈下값이 零에 가깝게 收斂되고 있다. 이러한 沈下計測值의 收斂位置는 가우스正規分布曲線의 沈下收斂領域인  $2.5i$  지점과는 다소 차이가 있으나 最大沈下量에 대한 5% 程度의 沈下를  $2.5i$  지점에 허용하고 있는 것을 고려해 볼 때 比較적 近사한 값이라 사료된다. 沈下收斂位置는 터널 깊이와 터널 斷面크기, 地質狀態, 地盤損失程度, 施工方法 등에 따라 달라질 수 있으므로 한 지점에 대한 實測資料로부터 定量的인 數值를 언급하기는 어려우나, 土砂區間에서 都市터널과 같이 터널 깊이가 얕은 경우에 現場의 施工技術者가 周圍建物에 대한 地表沈下の 影響範圍를 추정하는 것은 가능하리라 판단된다.

그림(3-7)은 計測點에서 터널 掘進距離에 따라 測定된 橫方向 地表面 沈下量의 分布를 等高

線形態로 圖示한 그림이다. 그림으로부터 沈下等高線의 擴散方向과 터널 掘進方向이 一致함을 볼 수 있으며, 等高線은 比較的 左右 對稱型으로 나타나고 있다.

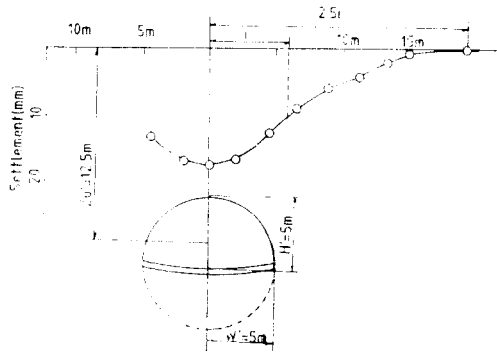


Fig. 3.6. Development of Transverse Surface Settlements

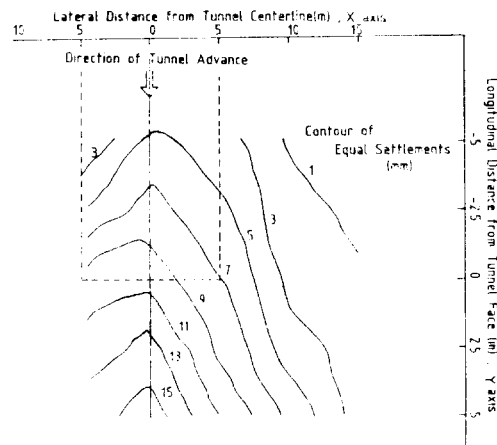


Fig. 3.7. Distribution of Lateral Surface Settlement with Tunnel Progression

### 3.3. 地表面 水平變位

地表面에서 흙의 變位는 垂直方向으로만 發生하지 않고 터널 掘進方向에 따라서도 變化하므로 地表面에서 1초독 데오돌라이트를 利用하여 水平變位の 크기와 方向을 調査하였다.

그림(3-8)은 各 計測點에서 橫方向으로 發生한 水平變位量을 圖示한 것이다. 그림으로부터 地表面의 垂直方向의 沈下量에 比해서 작은 값이나 터널 掘進에 따라 地表面의 水平變位가 發生되며, 주로 터널側面部 위의 地表面에서 크게 나타나고 터널中心線 위에서는 거의 發生하지 않

는 것을 알 수 있다. 最大水平變位가 發生하는 位置는 가우스正規分布曲線의  $i$  지점 附近에서 發生하고 있으므로 沈下曲線 기울기가 變化하는 지점에서 水平變位가 크게 發生함을 알 수 있다.

水平變位の 觀測은 精確한 1초독 데오돌라이트를 使用하여 施行하였으나, 時間經過에 따른 水平變位量이 미소하므로 機械誤差 및 觀測誤差를 감안하여 2회 以上の 觀測으로부터 一致되는 값을 利用하였다. 그림(3-9)는 터널 掘進에 따른 水平變位벡터를 圖示한 것이다. 그림에서처럼 터널이 計測點을 通過하기 前에는 地表面 水平變位の 方向이 터널 掘進의 逆方向으로 나타나나, 通過後에는 다소 터널 掘進方向으로 기우는

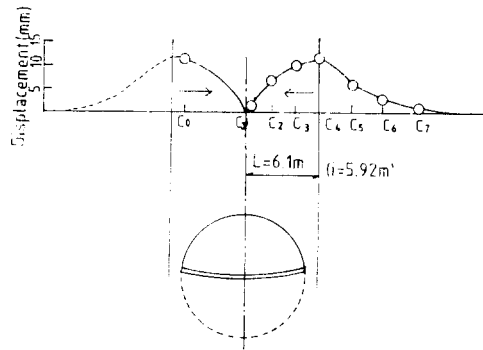


Fig. 3.8. Development of Lateral Displacements at Ground Surface

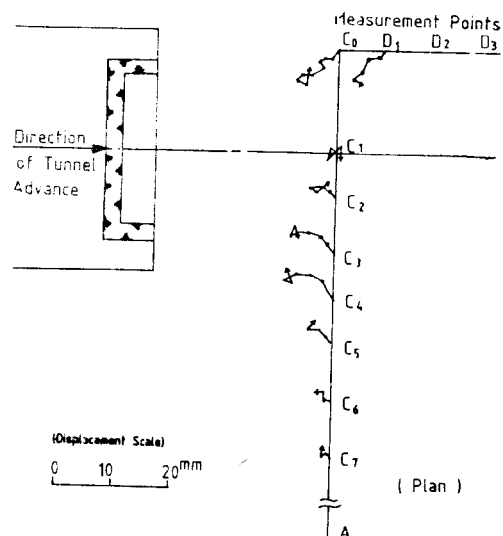


Fig. 3.9. Vectors of Lateral Displacement at Ground surface

경향을 보임에 따라, 地表面 水平變位는 地盤損失이 일어나는 方向으로 發生함을 알 수 있다.

### 3.4. 地中沈下

그림(3-10)은 터널中心線 위의 B地點에서 時間經過에 따른 地中沈下量 및 地表面沈下量을 圖示한 그림이다. 그림에서처럼 地中沈下는 막장 通過 直後에 沈下增加率이 제일 크며, 假인버트를 計測點後方 3m 지점까지 閉合시킨 後는 오히려 약간의 隆起現象이 發生하면서 거의 沈下가 收斂하는 모양을 나타낸다. 이러한 隆起現象은 國內 터널 技術者들에 의하면 地盤이 주로 節理를 갖는 岩盤으로 形成되어 있는 경우 岩盤 堤體가 掘鑿으로 인한 蠕變을 하게 되며 掘鑿 前面이 上向舉動함으로써 나타낸다고 보고되고 있으나, 軟弱地盤이 相當히 幅넓게 發達한 本 計測區間에서는 이러한 原因으로 隆起를 解析하기에는 다소 무리가 있다고 사료된다. 보다 자세한 原因은 軟弱地盤으로 構成된 여러 現場에서 長期的인 觀測이 수반되어야만 可能하다고 사료된다.

그림(3-11)은 그림(3-10)과 같이 地中沈下는 地表面沈下보다 크게 發生하는 影響을 보이거나 터널 天端部가 아닌 터널 側面部의 地中沈下는 地表面沈下보다 오히려 減少하며, 특히 터널 掘鑿으로 인한 影響을 작게 받는 地中 16.5m地點에서는 2mm 程度의 극히 작은 沈下值를 나타내고 있다. 터널 天端部の 地盤에서는 地表面沈下나 地中沈下가 크기나 모양이 비교적 비슷하게 나타나고 있지만, 터널 側面部 위의 地盤에서는 地表面沈下에 비해 相對적으로 地中沈下가 작게 나타나고 있다. 沈下기울기는 計測點通過 直後에 제일 급하며 假인버트를 計測點 後方 3m地點까지 閉合한 後는 沈下가 一定值에 收斂하고 있다.

그림(3-12)는 地表面沈下 및 地中沈下の 實測值를 分析한 것이다. 그림(3-10)과 그림(3-11)의 結果로부터 터널中心線 위의 地表面沈下는 地中沈下보다 작은 값을 나타내나 터널側面部 위의 地表面沈下는 오히려 地中沈下보다 큰 값을 나타내고 있다는 점과 그림(3-6)의 結果인 地表面沈下는 터널 中心線에서 2.5*i* 되는 지점에서 收斂된다

는 事實로 부터 그림(3-12)와 같이 圖示할 수가 있겠다. 따라서 터널掘鑿에 따른 地中沈下는 地表面沈下보다 터널中心線 附近에서는 크게 나타나나 橫方向距離에 따른 沈下減少幅으로 보아 沈下發生領域은 地表面보다 좁게 나타난다고 볼 수 있다. 그러나 제반여건으로 인해 地質狀態, 터널斷面크기, 터널깊이에 따른 實測을 여러곳에서 實施하지 않은 狀態이므로 定量的인 解析은 어려우나 釜山地下鐵 0-00工區의 경우 掘鑿影響角  $\beta$ 가 약  $45^\circ$  정도로 나타났다.

터널掘進距離에 따른 地表面 및 地中沈下曲線들은 都市터널과 같이 比較的 얕은 깊이에서 施工되는 경우 沈下形態가 비슷하게 나타나므로 地中沈下도 累積正規分布曲線과의 比較가 가능하다고 볼 수 있다. 그림(3-13)에서처럼 計測點을 通過하기 前에는 *i*값이  $Z_0'/2$ 인 累積正規分布曲線과 比較的 近接하게 圖示되고 있으나 計測點 通過 後에는 오히려 *i*값이  $Z_0'/3$ 인 曲線에 接近하는 모양을 보이고 있다. 이는 沈下發生領域을 고려해 볼 때 地中이 地表面보다 計測點 通過時에는 掘鑿의 影響을 더 크게 받으나, 計測點에서 터널上半部가 점차 멀어지면 掘鑿의 影響이 오히려 減少되므로, 計測點 通過後 地表面보다 빨리 沈下가 收斂된다고 사료된다. 또한 그림에서 16.5m地點의 地中沈下曲線은 다른 曲線과 달리 累積正規分布曲線과 近似한 形態를 나타내고 있지 않는데, 이는 터널側面에서도 下部에 속하는 곳이어서 다른 地中沈下曲線과는 相異한 모양을 나타내고 있는 것으로 판단된다.

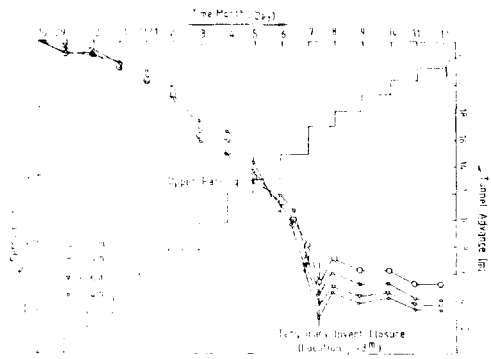


Fig. 3.10. Development of Surface Settlement over Tunnel Axis with Time



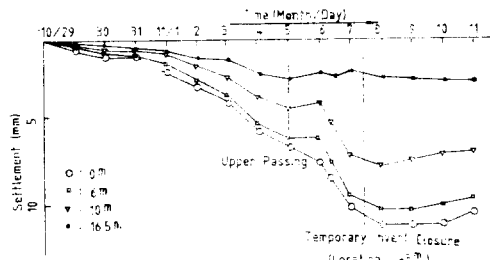


Fig. 3.11. Development of Subsurface Settlement over Tunnel Springlines with Time

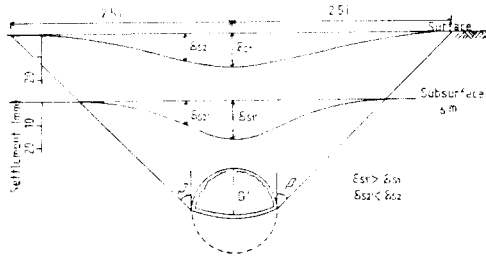


Fig. 3.12. Transverse Settlement Profile with Depths

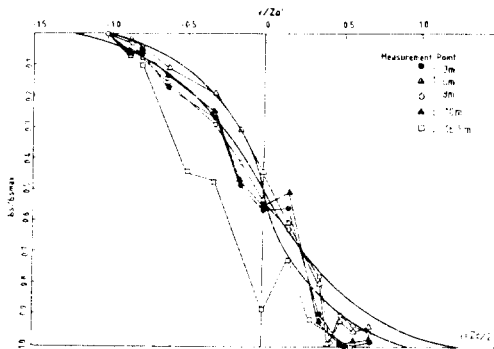


Fig. 3.13. Projection of Measurement Data onto Cumulative Normal Probability Curve

### 3.5. 天端沈下

天端沈下는 터널이 計測點을 通過하여 5m 정도 掘進한 狀態에서 計測되었기 때문에 沈下初期值가 觀測되지 않아 最大沈下量이 3mm 정도로 아주 작은 값으로 나타났다. 一般的으로 天端沈下는 E.J. Coording 과 W.H. Hansmire<sup>(17)</sup>에 의하면 天端沈下와 地中沈下의 相關關係式  $\delta_c = \delta_o \cdot 2(r+h)/D$ 로부터 天端沈下值를 算定할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 여기서  $\delta_c(\delta_o)$ 는

天端沈下值(地中沈下值)를 나타내며,  $r$ 은 터널 半徑,  $D$ 는 터널直徑,  $h$ 는 터널天端에서 부터 地中沈下 測定位置까지의 距離를 나타낸다. 그림(3-10)의 터널中心線 위의 地中沈下值와 上記式을 利用하면 本 計測區間의 天端沈下는 29mm 정도이며, 이 값은 計測值 3mm와는 상당한 차이가 있다. 이는 터널이 計測點을 通過할 時에 大部分의 天端沈下가 發生하기 때문인 것으로 사료된다.

## 4. 蒐集資料分析

蒐集計測資料는 主로 釜山地下鐵 NATM 施工區間인 0-0 工區로부터 터널計測原則에 입각하여 測定된 資料들을 選別·拔萃하여 터널掘鑿에 따른 地盤變位解析을 수행하였다.

### 4.1. 現場地質條件

釜山地下鐵 0-0工區 計測區間의 地質狀態는 그림(4-1)에서와 같이 地表 밑 10m 以上까지 風化土가 發達된 곳과, 地表에서 4m~6m 地中까지는 風化土가 發達되고 그 밑은 風化岩이 形成되어 있는 곳, 地表 밑 2m~3m 까지는 風化土, 3m~6m 까지는 風化岩, 그 밑은 軟岩順으로 形成되어 있는 곳, 등 3가지로 大別한다. 이 區間은 地質의 變動이 심한 곳이어서 터널掘鑿이 岩盤區間에서 土砂區間으로 이루어질 때 막장部에서의 土砂 및 地下水流入, 落盤 등의 위험이 따르는 難工事現場으로 사료된다.

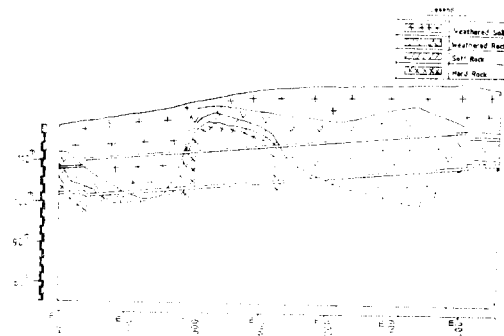


Fig. 4.1. Geological Map of 0-0 Section in Busan Subway

#### 4.2. 터널斷面 및 掘進方法

釜山地下鐵 0-0 工區는 大斷面 複線터널 區間으로서, 터널斷面은 幅과 높이가 약 9m~11m 程度인 馬蹄形으로 地質狀態에 따라 幅과 높이가 多少 다른 3가지 型으로 分類하여 施工하였으며, 터널中心에서 地表까지의 깊이는 약 15m~19m 程度인 NATM 터널 區間이다.

資料分析이 이루어진 本 工區의 計測區間은 地盤의 軟弱性을 고려하여 上半掘鑿과 함께 假인버어트를 閉合시킨 後 下半掘鑿과 인버어트를 閉合하는 順序로 터널이 掘進된 區間이며 假인버어트는 上半막장을 약 5m 間격으로 뒤따르고, 인버어트는 下半掘鑿을 약 3m 後方에서 뒤따르면서 比較的 近接하게 施工되었다. 그러나 現場與件에 따라 掘進狀態의 變化가 많으므로 資料分析時 各各에 대해 掘進狀態를 表示하였다.

#### 4.3. 計測資料分析

計測資料中 主로 掘鑿의 影響을 받지 않은 곳에 미리 測點이 設置되고 掘鑿에 따른 計測이 차질히 遂行된 地點들의 資料들을 다음과 같이 拔萃하여 分析하였다.

그림(4-2), (4-3), (4-4)는 0k 943m, 0k 290m, 0k 320m 地點의 터널掘進距離에 따른 縱方向의 地表沈下形態를 圖示하고 있다. 그림(4-2)의 0k 943m 地點은 上半掘進에 따른 假인버어트閉合을 5m~10m 間격으로 施工하였으며, 下半掘鑿에서는 인버어트를 2m~3m 間격으로 거의 下半掘鑿과 同時에 인버어트를 閉合시킨 狀態이다. 그림(4-3)에서는 計測點까지 假인버어트閉合이 3m~6m 間격으로 比較的 上半掘進에 近接하게 뒤따라, 가인버어트의 計測點閉合後 沈下가 급격히 減少되어 收斂狀態로 이르나, 上半掘進에 따른 假인버어트의 閉合이 계속적으로 이루어지지 못할 特히 假인버어트의 計測點 後方 4m 地點閉合이 上半掘進에 비해 12m 나 차이가 나서 다시 沈下가 급격히 나타난 것으로 보인다. 4m(≅ $Z_0'/3$ )閉合後는 沈下가 거의 收斂狀態로 나타나고 있어서 計測點 4m~5m 前後方의 上半掘進에 따른 假인버어트의 閉合關係가 沈下의 크기에 相當한 影響을 미친다고 판단

된다. 그림(4-4)에서는 計測點까지 假인버어트閉合이 4m~8m 間격으로 뒤따랐으나 上半計測點 通過後 5m 地點에서 掘鑿을 中止하여 掘鑿中止에 따른 沈下가 크게 發生한 것을 알 수가 있고, 計測點 後方 3m~4m 地點에서 假인버어트가 閉合되면 沈下가 一定한 收斂値에 도달하고 있다.

以上の 터널掘進距離에 따른 地表沈下曲線들로부터 假인버어트를 計測點 後方 約  $Z_0'/3$ 附近까지 閉合시키면 上半掘鑿時의 計測點에서의 沈下量은 收斂形態를 취한다는 것을 알 수가 있으며, 下半部에서는 인버어트閉合後 下半掘鑿이 約 10m( $0.75Z_0'$ ) 程度 더 掘進된 距離에서부터 沈下가 收斂되게 나타남을 알 수 있다.

그림들로부터 假인버어트 및 인버어트의 早期閉合은 沈下量을 減少시키는 要因이 된다고 판단되며 上半部の 掘鑿時에도 下半部 掘鑿時처럼 假인버어트閉合을 조속히 實施한다면 地盤沈下를 좀 더 억제할 수 있으리라 생각된다.

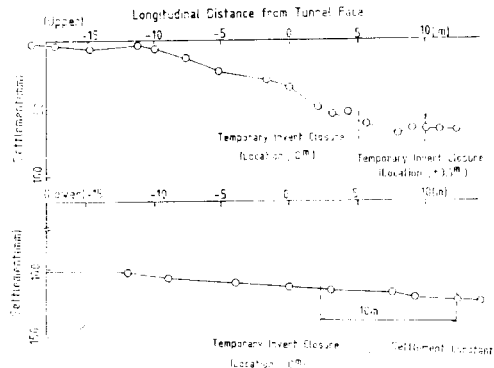


Fig. 4.2. Surface Settlement Profile with Tunnel Progression (0k 943 m)



Fig. 4.3. Surface Settlement Profile with Tunnel Progression (0k 290 m)

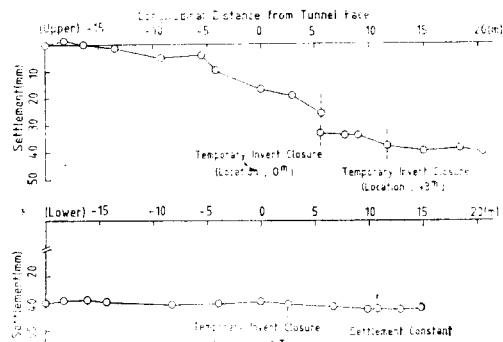


Fig. 4.4. Surface Settlement Profile with Tunnel Progression (0k 320 m)

그림(4-5)는 각計測地點에서 上下半部 掘進 및 掘鑿中止에 따른 純沈下量을 最終 沈下量에 대해 百分率로 圖示한 그림이다. 그림에서 上半을 計測點 2m~3m 後方까지만 掘鑿하고 2달 以上 放置해 둔 狀態에서 下半을 掘鑿하고 인버터를 한 0k 960 m 地點과, 上半掘鑿後 2달 以上 放置해 두어서 放置로 인한 該간의 沈下量이 比較的 큰 0k 943 m 地點을 제외하고는 上半部の 掘進에 따른 沈下量은 一般의 最終 沈下量의 70%~90%이며, 下半部の 掘進에 따른 沈下量은 最終, 沈下量의 10%~30%程度로서 假人 버어트를 上半掘鑿과 並行하여 閉合하는 경우에는 一般의 上半掘鑿에 따른 沈下量이 下半掘鑿으로 인한 沈下量보다도 훨씬 크게 나타나고 있다.

그림(4-6)은 計測地點別 上下半部の 計測點 通過時의 沈下量을 最終沈下量에 대한 百分率로 表示한 그림이다. 그림에서 上半이 計測點을 通過하기 前에 長時間 掘鑿中斷으로 인한 沈下가 큰 0k 975 m, 0k 185 m 를 제외하고는 一般的으로 上半通過時에 20%~40%程度 沈下가 發生하며 下半通過時는 90%程度, 인버터閉合과 더불어 거의 最終沈下量에 다다르게 된다. 그러나 上記의 그림은 인버터閉合이 下半掘鑿과 거의 並行해서 施工되는 경우이므로 下半通過時에 90%程度의 沈下量으로 最終 沈下量에 近接하지만 인버터의 閉合이 늦은 경우는 下半通過時의 沈下量이 90%程度보다도 작을 것으로 판단된다. 이러한 인버터의 閉合은 터널을 完全한

하나의 圓形으로 閉合시키기 때문에 構造의 安全하고, 土壓支持面積을 增加시켜 박공전체의 沈下量을 減少시키며, 아울러 水平變位를 減少시켜 地盤損失을 줄이기 때문에 全般的으로 沈下를 減少시키는 要因이 된다고 판단된다.

그림(4-7)은 假人버어트의 閉合後 沈下가 收斂된 狀態로 보이는 部分을 上半掘進에 따른 最終沈下量으로 假定하고 計測值들을 累積正規分布曲線과 比較·圖示한 것이다. 그림에서처럼  $i$  (표준편차)값이  $Z_0'/2$ 인 累積正規分布曲線과 計測值들은 比較的 근접하게 나타나고 있으며, 計測點에서의 값은 假人버어트 閉合이 上半掘進과 어느정도 近접하여 施工되고 있는지, 혹은 上半通過前에 掘鑿中斷으로 인한 沈下가 發生된 적이 있는지에 따라 0.5의 沈下對比값보다 上向 혹은 下向의 경향을 나타낸다. 一般的으로 上半이 計測點 後方 5m 地點을 通過하기 前에 假人 버어트가 閉合되고, 上半掘鑿을 計測點 通過前에 中斷한 事實이 없는 경우에는 0.5보다 약간 큰 값을 나타내며, 8m 以上 上半이 計測點을 通過한 後 假人버어트를 閉合하거나, 上半掘鑿이 計測點 通過前에 長期間 中斷된 경우에는 0.5보다 다소 작은 값을 나타내어 地盤損失이 억제되지 않으면 地盤沈下도 계속됨을 알 수 있다. 또한 터널掘進의 影響을 받아 地表面 變位가 發生하는 初期位置는 地質에 따라 다소 差異

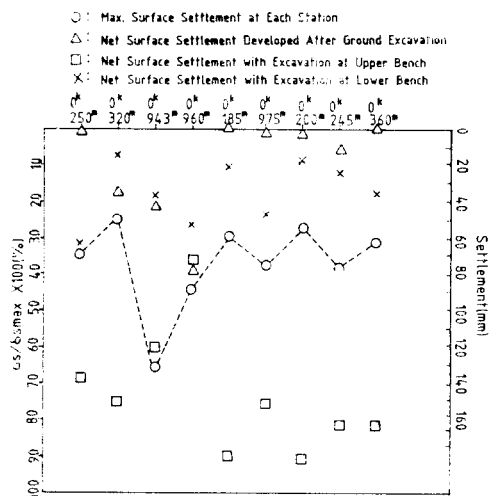


Fig. 4.5. Distribution of Surface Settlements with Excavation Steps

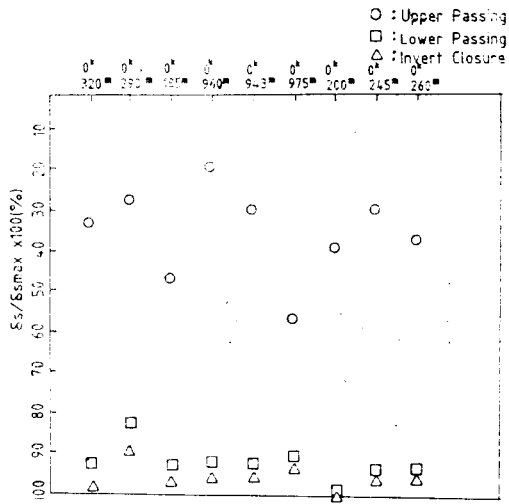


Fig. 4.6. Distribution of Surface Settlements associated with the Excavation at Upper Bench, Lower Bench and Invert

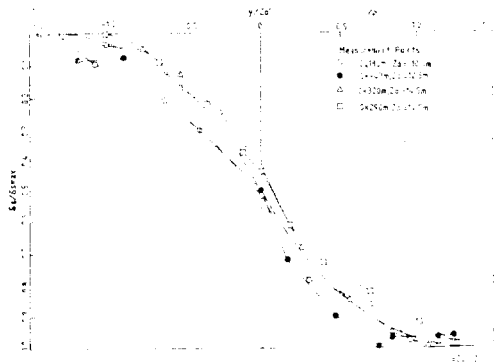


Fig. 4.7. Projection of Collected Data onto the Cumulative Normal Probability Curve (ok 943 m, 185 m, 290 m, 320 m)

는 있겠으나 그림에서와 같이  $(1.0 \sim 1.5)Z_0'$  되는 곳에서 나타나는 경향을發見할 수 있었다. 結果의으로 上半掘鑿에 따른 假인버트를 施工하는 경우에 上半掘鑿을 中止하지 않고, 假인버트 閉合을 上半과 5m 以內 間隔으로 閉合하여 나가면 沈下量이 상당히 減少되며, 또한  $i$  값이  $Z_0'/2$  인 累積正規分布曲線으로 沈下解析이 가능하다고 판단된다.

## 5. 結 論

本 研究에서 터널掘鑿에 따른 地盤變位の 計

測資料를 分析한 結果, 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 掘鑿과 함께 假인버트가 設置되는 터널 上半部의 縱方向(橫方向)地表沈下는 累積正規分布曲線(가우스正規分布曲線)으로 解析이 가능하다.

2) 縱方向의 地表沈下는 計測點 後方 약  $(0.5 \sim 1.0)Z_0'$  떨어진 地點까지 假인버트 閉合되면 一般的으로 收斂되며, 沈下の 初期發生은 計測點 前方 약  $(1.0 \sim 1.5)Z_0'$  以上 떨어진 位置에서 부터 發生하고 있다.

3) 터널上半部 掘鑿에 따른 地表沈下の 크기는 計測點 後方 약  $Z_0'/3$  정도 떨어진 地點의 假인버트 閉合時期에 큰 影響을 받으며, 假인버트 閉合이 빨리 이루어질수록 沈下量이 減少된다.

4) 地表面 水平變位는 터널內部の 地盤損失方向으로 發生하며, 最大水平變位는  $i$  값이 나타나는 位置에서 發生하고 있다.

5) 上半의 計測點 通過時의 沈下量은 最終 沈下量의 20%~40%, 下半의 累積沈下量은 最終 沈下量의 약 90% 정도 發生한다.

6) 上半部 掘鑿時에 最終 沈下量의 약 80% 정도 沈下가 發生함으로 보아, 下半部 掘鑿보다 上半部 掘鑿이 地表沈下에 더 큰 影響을 미치는 것으로 보인다.

7) 터널掘鑿中止가 主要한 沈下要因으로 나타났으며, 이는 隣近 構造物 밑으로 터널이 掘鑿할 때에는 構造物의 안정상 가능한한 掘鑿中止없이 터널掘鑿을 빨리 進陟시켜야함을 의미한다.

## 謝 辭

本 研究는 韓國建設技術研究院의 '84 및 '85年度 研究課題인 “地盤沈下防止工法の 研究” 遂行을 위해 1段階로 實施한 釜山地下鐵 NATM 區間의 地盤變位 研究結果임을 밝히며, 本 研究에 도움을 준 釜山 地下鐵本部長님을 비롯한 이재호 設計課長, 배상효 設計係長 및 전세영 監督官께 진심으로 感謝를 드리는 바입니다.

### 参 考 文 献

- 1) Zenc, M., "Comparison of Bal's and Konthe's Methods of Calculating Surface Movements due to Underground Mining", *J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 6, 1969, pp. 159~190.
- 2) Litwiniszyn, J., "The Theories and Model Research of Movements of Ground Masses", *Colliery Engineering*, 1958. Oct., pp. 437~444.
- 3) Bodziony, T., J. Litwiniszyn and A. Smolarski, "New Research into Rock Masses treated as Media Characterised by Stochastic Equations", *Proc. Int. Conf. on Strata Control*, Paris, 1960, pp. 137~150.
- 4) Mindlin, R.D., "Stress Distribution around a Tunnel", *Proc. ASCE*, Vol. 65, No. 4, 1939, pp. 619~642.
- 5) Salamon, M. D.G., "Rock Mechanics of Underground Excavations", *Proc. 3rd Int. Cong. ISRM*, Denver, Vol. I, Part B, 1974, pp. 951~1099.
- 6) Vardoulakis, I., B. Graf and G. Gudehus, "Trap-Door Problem with Dry Sand: A Statical Approach Based Upon Model Test Kinematics", *Int. J., Num. Anal. Meth. Geomech.*, Vol. 5, 1981, pp. 57~78.
- 7) Hong, S.W., "Ground Movements Around Model Tunnels in Sand," Ph. D Thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, 1984, 419 p.
- 8) Terzaghi, K., "Shield Tunnels of the Chicago Subway", *J. Boston Society of Civil Engrs.*, Vol. 29, 1942b, pp. 163~210.
- 9) Hansmire, W.H., "Field Measurements of Ground Displacements about a Tunnel in Soil", Ph. D Thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, 1975, 334 p.
- 10) Boden, J.B. and C. McCaul, "Measurements of Ground Measurements during a Bentonite Tunneling Experiment", *Transport and Road Research Laboratory, Report LR 653*, Crowthorne, 1974, 19 p.
- 11) Martos, F. "Concerning an Approximate Equation of the Subsidence Trough and Its Time Factors", In *International Strata Control Congress*, Leipzig, 1958, pp. 191~205.
- 12) Birger Schmidt, "Prediction of Settlements Due To Tunneling in Soil: Three Case Histories", *Proc. 2nd. Rapid Excavation Tunneling Conf.*, San Francisco, Vol. 2, 1974, pp. 1179~1199.
- 13) Peck, R.B., "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground", *State of the Art Report*, 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engng., Mexico City, State-of-Art Vol., 1969b, pp. 225~290.
- 14) Deere, D.U, Peck, R.B, Monsees, J.E and Schmidt, B., "Design of Tunnel Liners and Support Systems." Report for U.S. Depart. of Transportation OMSGT, 1969, Contract 3~0152.
- 15) P.B. Attewell and I.W. Farmer, "Ground Deformation Resulting from Shield Tunneling in Loden Clay," *Can. Geotech. J.* V.11, 1974a, pp. 380~395.
- 16) P. B. Attewell and I. W. Farmer, "Ground Disturbance Caused by Shield Tunneling in a Stiff Fissured, Over-Consolidated Clay," *Engineering Geol.* V.8, 1974b, pp. 361~381.
- 17) Edward J. Cording and W.H. Hansmire, "Displacements Around Soft Ground Tunnels", Session IV, *Tunnels in Soil*, 5th Panamerican Congress On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, Nov., 1975, pp. 5~25.