

有限要素法에 의한 터널解析 (事例問題Ⅱ)

FEM Analysis on the PD-3 Tunnel Section

金 敦 原*, 嚴 基 榮**, 李 在 晟**

(株) 三安 建設技術公社

* 常務理事/技術士/工學博士

** 土質部/社員

要 旨

주어진 터널 斷面 및 地盤條件을 對象으로 2次元 有限要素 프로그램인 MrSoil을 利用하여 數値解析을 遂行하고 그 結果를 本稿에 收錄하였다. 解析 모델은 過去의 터널 計測 結果等に 根據하여 터널 掘進 影響이 充分히 적은 地域까지로 擴張 設定하여 境界條件에 의한 解析結果에 의 影響을 最少化하도록 하였으며, 3次元的인 터널 舉動을 適切히 Simulation 하기 위하여 施工順序를 導入하여 段階別로 解析을 遂行하였다.

解析結果 터널 天井部는 最大 約 35 mm의 沈下가 豫想되며, 地表面 沈下는 13 mm 以內로서 地上 構造物의 構造的인 被害는 없을 것으로 判斷된다. 支保工인 Shotcrete와 Rockbolt의 最大 應力 및 軸力도 各各 84 Kg/cm² 및 9 톤 以內로서 許容值 以內이고, 掘鑿面 周邊의 塑性領域은 Rockbolt 길이 以內로 制限되고 있으므로 天井部에 Forepoling을 設置한다면, 터널 安全에는 影響을 미치지 않을 것으로 判斷되므로 本 터널은 合理的이며 適切히 設計된 것으로 評價된다.

Abstract

For the tunnel pattern of PD-3, a numerical analysis using the FEM program, MrSoil, was conducted with given geotechnical properties of surrounding rockmasses to verify the analysis results by comparing with other programs. The analyzed domain was extended to the far enough distance from the excavation surface to avoid the restrained effect by the boundary condition, and the construction sequence was employed in the analysis as calculation steps to simulate the time dependent 3 dimensional behavior of surrounding ground due to tunneling.

Maximum 35 mm of the tunnel crown settlement and about 13 mm of the surface settlement were computed and the amount of settlement may not give any structural damage on the concrete structures on the ground surface. The shotcrete stress of 84 kg/cm² and the rockbolt axial force of 9 ton as a maximum are within the allowable limit. The plastic zone was restricted near the excavation surface, but forepoling around the crown may be required to prevent rock falling. It is believed that the tunnel is designed reasonably from the economical and safety points of view.

1. 序言

地盤은 鑛物인 固體 뿐만 아니라 間隙을 充鎮하고 있는 液體 및 氣體等 3相이 共存하는 多相的인 特性을 가지는 材料로서 構成材料의 物理 化學的 特性이나 構成比에 따라서 工學的 特性을 달리하기 때문에, 測定可能한 몇가지의 파라메타로 地盤의 工學的 特性을 正確히 定義하기 困難하며, 그에 따라서 作用外力에 대한 地盤舉動을 數學的으로 明快하게 規定하기는 거의 不可能하다. 그러나, 工學的 次元에서의 地盤材料의 舉動은 많은 研究者에 의하여 鼎立되어 왔으며, 最近 電算機의 利用이 普遍化되면서 數值解析 技法의 地盤工學에의 導入을 위하여 많은 地盤舉動 모델이 開發되어 實務에 適用되고 있는데, 우리나라의 경우, 1982年 서울 地下鐵 3.4 號線 都心區間 NATM 터널 設計時를 分岐點으로 地盤工學 특히, 터널 設計에서의 數值解析은 必需的인 過程으로 定着되었다.

그러나, 國內의 경우 數值解析에 대한 技術者들의 理解가 不足하여 數值解析 結果를 盲信하는 事例가 頻繁하였다. 이러한 此際에 地盤工學會에서 이와 같은 學術大會를 開催하여 같은 問題에 대한 解析結果를 相互 比較 討論하게 된점을 다행스럽게 생각하며, 이를 契機로 國內의 數值解析 技術에 대한 公信力이 提高될 것이라 믿어 疑心치 않는다.

地盤工學과 關聯된 問題를 解析하는데 널리 利用되고 있는 一般的인 數值解析技法은 連續體 모델, 不連續體 모델 및 混合 모델등으로 區分할 수 있는데, 다음과 같은 技法이 地盤工學 分野에서 普遍的으로 適用되고 있다.

- 連續體 모델 : FEM (Finite Element Method, 有限要素法)
FDM (Finite Difference Method, 有限差分法)
BEM (Boundary Element Method, 境界要素法)
- 不連續體 모델 : DEM (Distinct Element Method, 分離要素法)
- 混合모델 : Hybrid Model (混合法)

이들 解析技法 中 本稿에서 適用하는 有限要素 解析法(FEM)은 連續體力學 및 微小變形 理論을 前提로 하며, 材料의 構成法則, 作用外力에 대한 平衡方程式 및 境界條件을 滿足하도록 하므로써 問題의 解를 구하게 된다. 有限要素法에서는 터널 周邊의 地盤은 節點에 의하여 그 크기와 形狀이 限定되는 有限個의 要素로 構成된 하나의 構造物로 생각하며, 作用外力은 節點을 통하여 隣接 要素로 傳達되므로써 解析領域 全體에 影響을 미치게 된다. 一般的인 解析結果는 作用外力에 대한 各 切點의 變位, 各 要素의 應力 및 破壞接近度等이며 대개의 프로그램은 解析結果의 圖畫出力 機能을 가지고 있다. 이러한 有限要素解析法에 의한 多樣한 프로그램이 國內外에서 開發되어 國內의 여러 會社에서 實務 適用하고 있으며, 本稿에는 PC用 프로그램인 MrSoil을 利用하여 學會에서 提示한 事例II 터널을 주어진 條件下에서 解析하고 그 結果를 收錄하였다.

2. 프로그램 MrSoil의 概要

本解析에 使用된 프로그램인 MrSoil은 日本의 CRC(Century Research Center)社에서 1988年度에 開發하였는데, 이 프로그램은 有限要素法에 의한 地盤의 彈塑性 解析이나 不連續性等을 考慮한 材料 非線形 特性을 解析할 수 있기 때문에 地盤工學과 關聯된 問題를 解析하는데 널리 利用되고 있으며, 國內의 여러 會社에서 터널 數值解析에 이 프로그램을 使用하고 있다. 이 프로그램의 主要機能은 다음과 같이 要約된다.

- 材料의 彈性 및 彈塑性 特性을 考慮한 解析
- 掘鑿 및 盛土의 解析
- 地盤의 不連續性 考慮 (Joint 要素)
- 地盤과 構造物의 相互關係 考慮 (Joint 要素)
- 使用可能 要素 : 三角形 또는 四角形 平面變形 要素
 棒(Rod) 要素
 보(Beam) 要素
 Joint 要素
- 材料 構成法則 : Drucker-Prager 降伏條件
 Mohr-Coulomb 降伏條件
 Patton 降伏條件(節理岩盤)
- 破壞 接近度에 의한 安全率
- 各種 荷重適用

프로그램 MrSoil은 主 프로그램인 MrSoil 과 後處理 機能의 MrSoilP, XYPLOT 및 DISPLAY 등으로 構成되어 있는데, 各各은 獨立的으로 利用可能하며, 다음과 같은 圖畫出力이 可能하다.

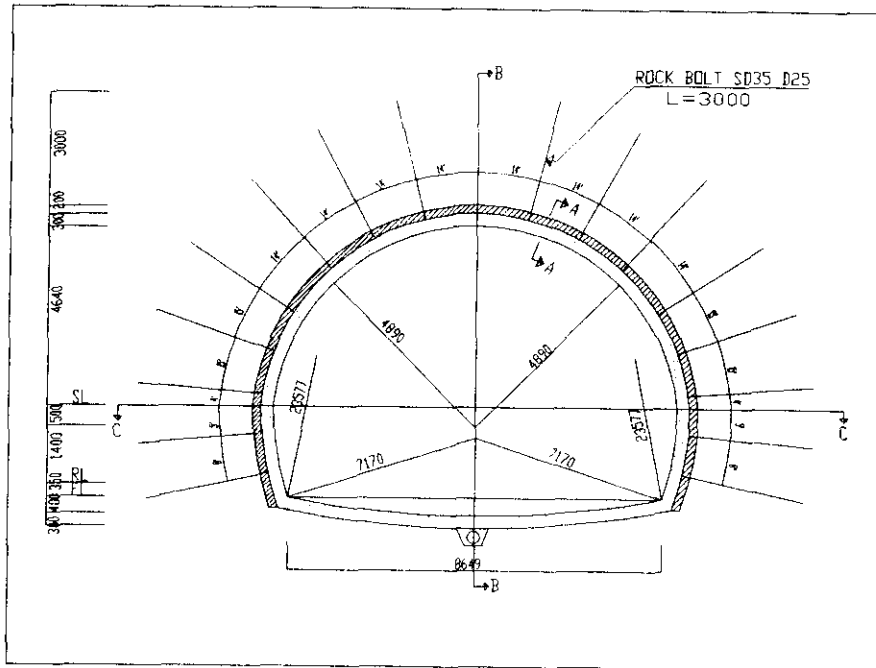
- Model : 節點 番號圖, 要素 番號圖, 材料 番號圖
- 安全率: 安全率 等高線圖
- 變形 : 變形圖
- 變位 : 變位 Vector 圖, 變位 等高線圖
- 應力 : 應力 Vector 圖, 應力 等高線圖
- 棒材 斷面力 : 軸力圖
- 보材 斷面力 : 軸力圖, 剪斷力圖, 모멘트圖
- 降伏 : 降伏 要素 Plot 圖

3. 解析 概要

1) 터널 斷面形狀

事例에서 주어진 (그림 3.1)의 PD-3의 複線 地下鐵 斷面은 風化岩이 터널 周邊에 分布할

때 適用하는 地下鐵 複線터널 標準패턴의 하나로서 斷面 形狀은 修正馬蹄形이며, 主 支保工은 直徑 25 mm, 길이 3.0 m의 Rockbolt 17個, Shotcrete 20 Cm 및 規格 125x125mm 鋼支保工이며, Wiremesh가 2겹으로 設計되어 있다.

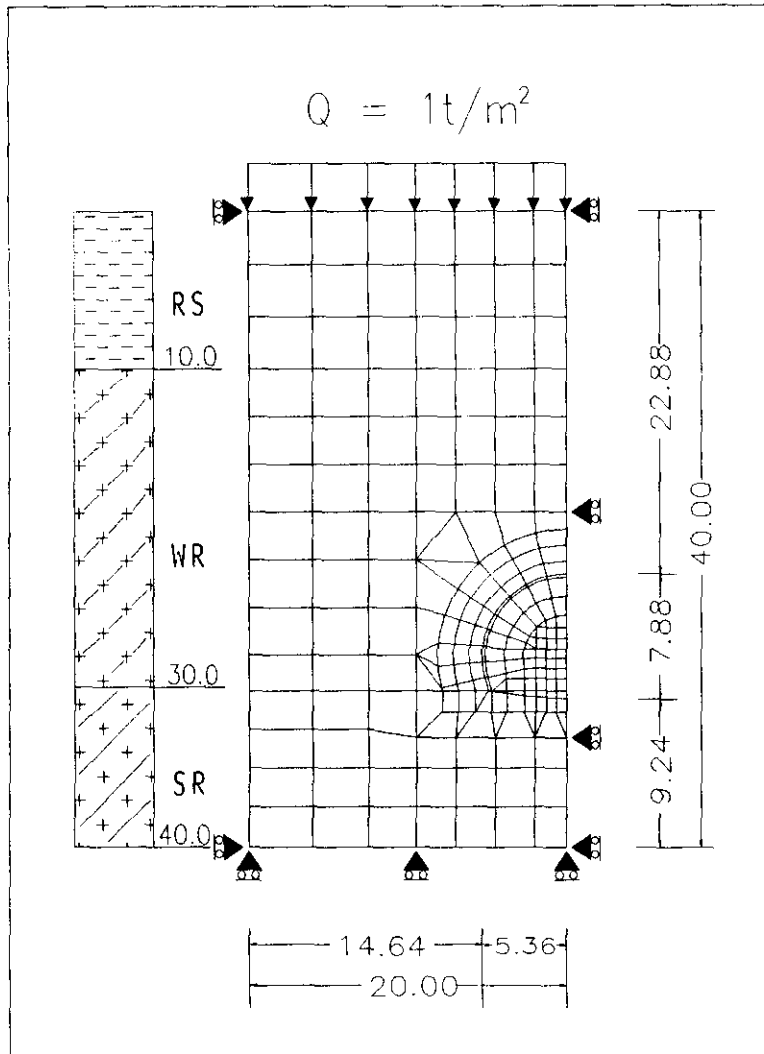


(그림 3.1) 解析 터널斷面 形狀

2) 解析모델 및 境界條件의 設定

解析모델은 (그림 3.2)와 같이 左右 對稱인 터널 斷面形狀을 考慮하여 左半部를 對象으로 決定하였는데, 解析領域은 過去의 計測 結果와의 比較에 의하여 一般的으로 터널 掘進 影響이 充分히 적은 것으로 알려진 範圍까지 즉, 側方으로는 터널 掘鑿 幅의 2.5배, 下部로는 2.0배 以上으로 擴張하여 境界部의 人爲的인 拘束條件이 解析結果에 미치는 影響이 工學的 許容範圍 以內로 制限되도록 하였고, 地表에서는 地上의 交通荷重等を 考慮하여 1.0 t/m²의 等分布 荷重을 節點力으로 換算하여 加하였으며, 地層 境界線을 要素網 作成時 考慮하였다. 또한, 要素網은 掘鑿에 따른 應力變化가 클것으로 豫想되는 掘鑿面 周邊을 細分化하여 보다 精密한 解析 結果가 導出되도록 配慮하였다.

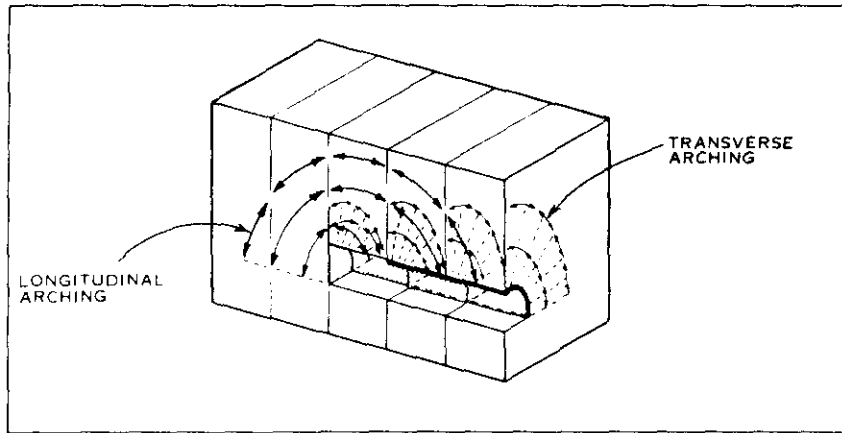
境界條件은 側方에서는 水平變位를, 下部에서는 垂直變位를 拘束하고 下部의 兩 모서리部는 Hinge로서 垂直 및 水平變位는 拘束하고 回轉만 許容하였다.



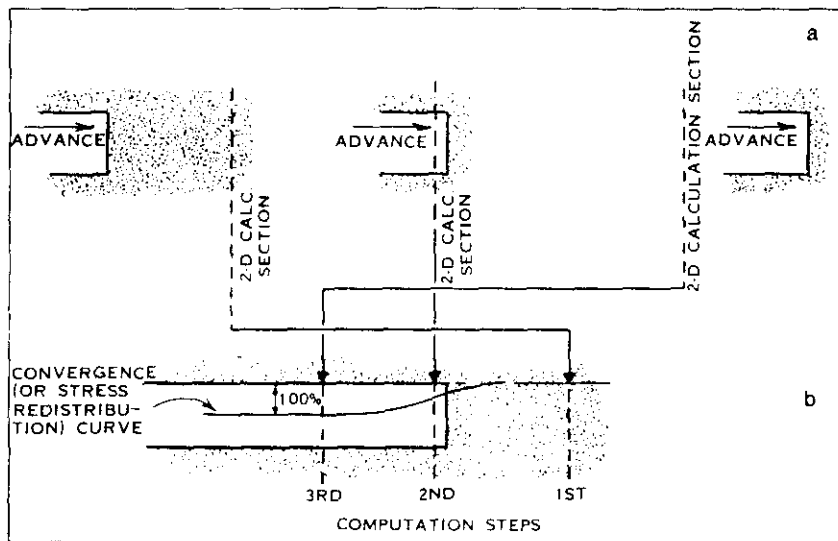
(그림 3.2) 解析모델 및 境界條件 設定

3) 施工順序 및 解析段階

터널 掘進은 3次元的으로 進行되며 그에 따라 터널 周邊地盤도 (그림 3.3)과 같이 3次元的인 應力 및 變位舉動을 나타내게 되지만, 3次元 解析 프로그램은 大形 電算機를 要求하고 많은 電算使用時間이 所要될 뿐만 아니라 解析結果의 正確性에 대한 信賴度도 프로그램의 機能보다는 入力되는 諸般 地盤特性에 左右되기 때문에 現段階에서의 3次元 解析 프로그램의 實務適用은 非現實的이고 非經濟的이라 判斷된다. 따라서, 터널 解析은 (그림 3.4)에 模式的으로 나타낸 바와 같이 施工順序에 따라 段階的으로 解析을 遂行하는 것이 一般的인 2次元 프로그램에 의한 3次元的 解析技法이다.

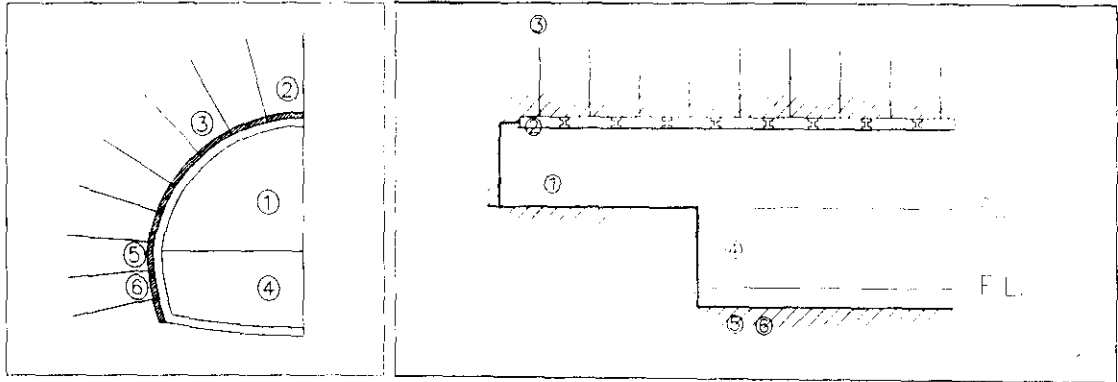


(그림 3.3) 터널 掘進에 따른 3次元의 地盤舉動 (Gnilsen, 1989)



(그림 3.4) 施工順序를 考慮한 3次元의 解析 模式圖 (Gnilsen, 1989)

本 解析에서는 3次元의 터널 舉動을 2次元 프로그램으로 近似하게 Simulation 하기 위하여 다음 (그림 3.5)와 같이 主要 施工順序를 6段階로 區分하여서 解析에 導入하여 段階的으로 解析을 遂行하였다.

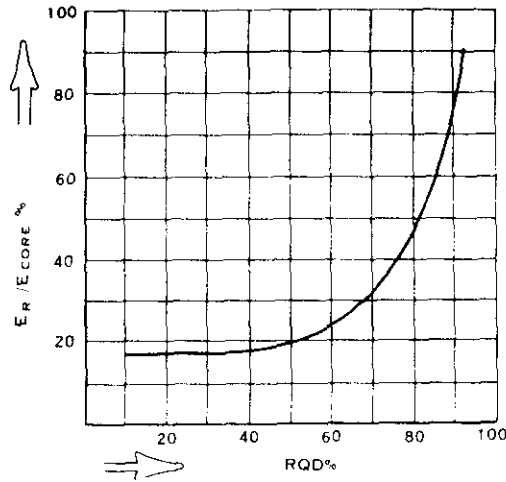


- 第 0 段階 : 原 地盤 狀態에서 初期 解析
- 第 1 段階 : 上 部 掘 鑿 (30% 荷 重 載 荷)
- 第 2 段階 : Soft Shotcrete 打 設 (30% 荷 重 載 荷)
- 第 3 段階 : Hard Shotcrete 打 設 및 Rockbolt 打 入 (40% 荷 重 載 荷)
- 第 4 段階 : 下 部 掘 鑿 (30% 荷 重 載 荷)
- 第 5 段階 : Soft Shotcrete (30% 荷 重 載 荷)
- 第 6 段階 : Hard Shotcrete 打 設 및 Rockbolt 打 入 (40% 荷 重 載 荷)

(그림 3.5) 施工順序를 考慮한 解析段階 設定

4) 解析 入力值

地盤의 工學的 特性은 岩石 自體의 強度, 風化의 程度, 節理頻度 및 狀態等 여러 因子에 따라 같은 部類에 속하는 地盤이라도 廣範圍하게 나타나는 경우가 많다. 더구나 解析結果가 入力되는 地盤 特性值에 따라 相當한 差異를 나타낼 뿐만 아니라 같은 入力值를 使用하는 경우라도 프로그램에서 採用하고 있는 構成法則이나 計算方法等에 따라 結果가 달라지게 되기 때문에 實際의 地盤舉動을 最適으로 Simulation 하기 위하여서는 프로그램의 特性에 대한 充分한 理解와 그에 適合한 入力值의 決定이 重要하다. 이를 위하여서 必要한 過程이 Parameter Study인데, 大部分의 常用 프로그램은 開發者에 의하여 이 過程이 遂行된다. 大部分의 FEM 프로그램의 경우 入力值 中 變形係數(彈性係數)가 解析 結果에 가장 큰 影響을 미치며, 이 特性值는 岩盤의 경우 現場 測定이 容易하지 않기 때문에 岩石試料 試驗結果를 바탕으로 (그림 3.6)의 例에서와 같이 RQD 또는 節理等 不連續面의 程度에 따라 經驗的으로 修正하여 入力하게 되는데, 本 解析에 適用된 주어진 解析 入力值는 <表 3.1>에 整理하였다.



(그림 3.6) RQD와 岩石 및 岩盤의 彈性係數와의 相關關係 (Cording, 1975)

<表 3.2> 解析 入力 地盤 特性值

區 分	單位重量 t/m ³	內部摩擦角 度(°)	粘着力 t/m ²	彈性係數 t/m ²	포아슨比	側壓係數
Soft Shot	2.4	30	500	500,000	0.2	
Hard Shot	2.4	40	500	1,500,000	0.2	
Rockbolt				21,000,000	A=0.0005	
風化土	2.0	25	2.0	8,000	0.286	0.40
風化岩	2.2	35	5.0	100,000	0.231	0.30
軟 岩	2.4	40	10.0	500,000	0.200	0.25

4. 解析 結果

圖畫出力된 解析結果의 一部는 附錄에 添附하였으며, 解析 結果 導出된 內容을 整理하면 다음과 같다.

1) 터널 周邊 變位

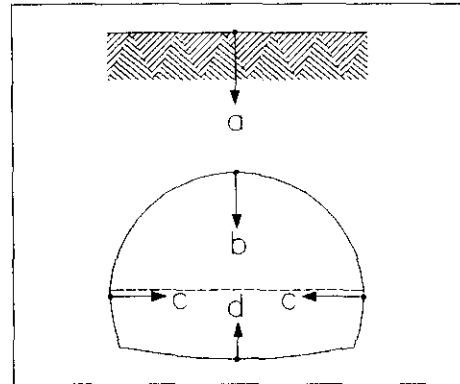
施工段階別 터널 周邊地盤의 變位는 <表 4.1>에 整理한 바와 같이 天井部 沈下가 最大 約 35 mm, 地表面 沈下가 約 13 mm 程度 發生하고 있다. 反面에 側壁部 變位는 7 mm 程度로 적게 나타나는데 이는 터널의 形狀이 높이에 比하여 幅이 크고 또한 初期側壓係數가 1.0 以下이기 때문에 惹起된 結果로 思料된다. 이 程度 크기의 터널 變位는 터널 安全에 影響을 미치지 않을 것으로 判斷되며, 施工遲延등의 追加變位 發生 要因이 있을 경우는 假인버트를 設置하여 變位

를 拘束하여 安全을 圖護하는 것이 바람직하다.

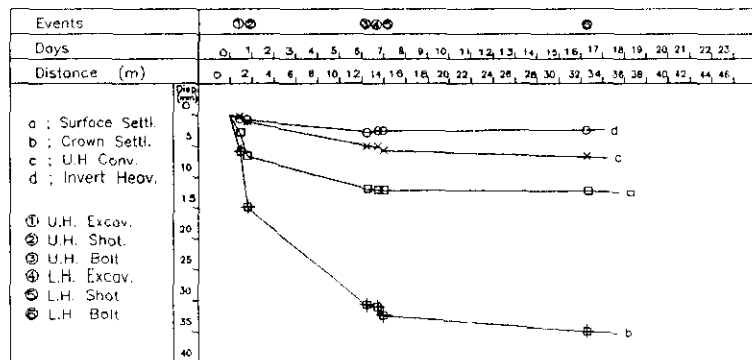
<表 4.1> 터널 周邊地盤 變位量

(單位: mm)

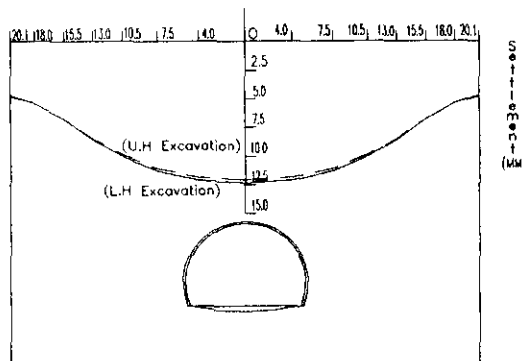
階段 區分	1	2	3	4	5	6
a	6.0	8.2	12.1	12.1	12.2	12.4
b	14.3	19.6	30.8	31.1	32.5	35.1
c	1.5	2.8	5.1	5.2	5.8	6.8
d	0.9	1.4	2.9	2.6	2.6	2.6



막장 距離에 따른 터널 周邊變位曲線은 (그림 4.1)과 같은데 터널 下半이 掘鑿되므로서 變位가 急激히 增加되고 있음을 알 수 있다. 最大 地表面 縱方向 沈下區配는 大略 2/1000으로서 터널 直上部에 一般 콘크리트 構造物이 있더라도 크게 憂慮할 바는 아니라 判斷된다. 한편, 터널 橫方向의 地表面 沈下曲線은 (그림 4.2)와 같은데, 最大 沈下區配는 1/1000 以內로 터널 中心線에서 距離 10 - 15 m 範圍에서 나타나고 있다.



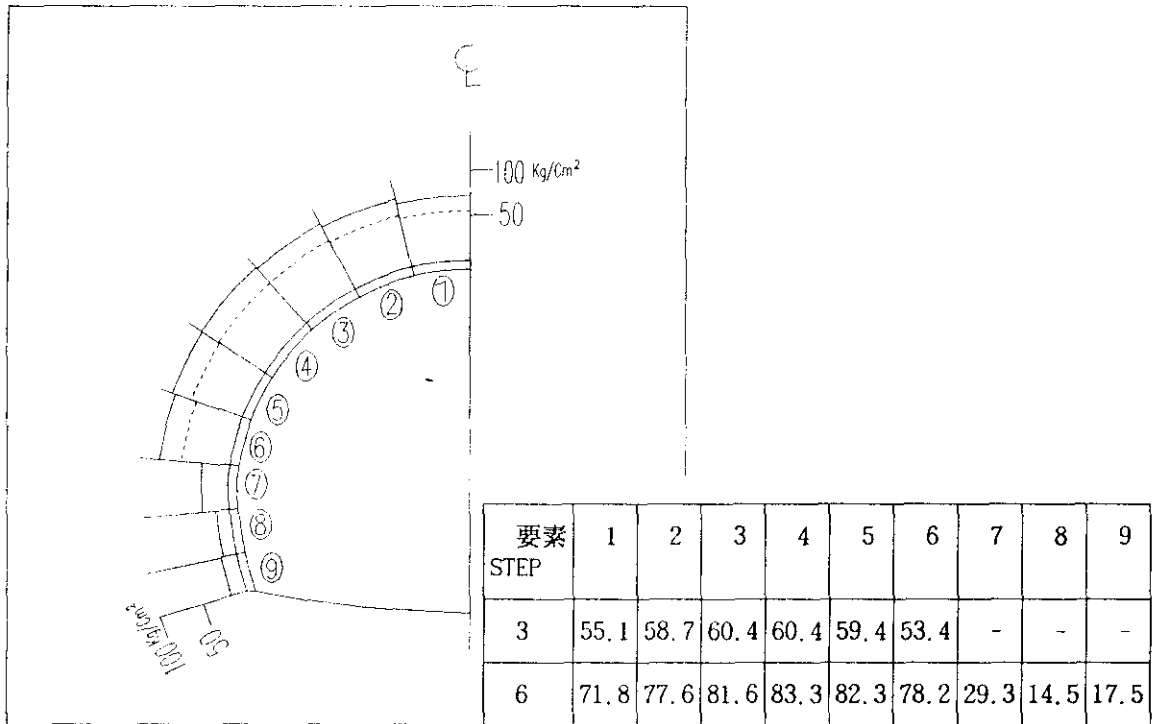
(그림 4.1) 막장 距離에 따른 터널 縱方向 變位曲線



(그림 4.2) 施工段階別 터널 橫方向 地表沈下曲線

2) Shotcrete 應力

Shotcrete는 Rockbolt 와 함께 NATM 터널에서의 主要 支保工이며, 특히 小斷面의 터널이나 土被가 얇은 터널에서는 Shotcrete가 主支保工으로서 掘鑿面에 密着되어 그 自體로서 應力을 收容하면서 原地盤을 三軸應力 狀態로 拘束하여 地盤의 剪斷強度를 높이는 作用을 한다. 또한, 터널 壁面에서 Shell 構造로서 Rockbolt 軸力을 分散시켜 應力集中을 緩和한다. 解析結果 各部分의 最大壓縮應力은 (그림 4.1)과 같이 主要 天井部와 側壁部에서 上半掘鑿 後(3段階)에 約 53 - 61 Kg/cm², 下半掘鑿 後(6段階)에 約 70 - 83 Kg/cm²의 壓縮應力이 發生하지만 모두 許容 壓縮強度 以內에 있다.

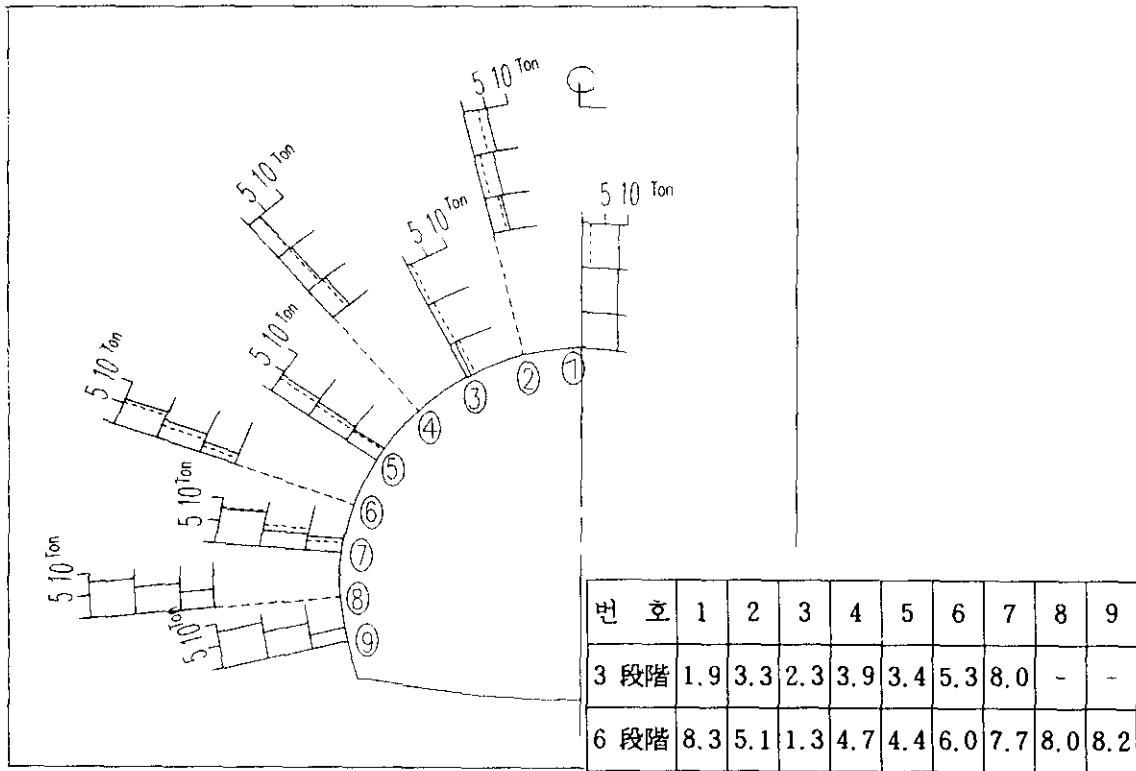


單位 : Kg/cm²

(그림 4.1) 施工 段階別 Shotcrete 應力分布

3) Rockbolt 軸力

解析結果 Rockbolt 軸力은 (그림 4.2)와 같이 가장 效果的인 Rockbolt는 天井部 및 側下部의 것들이나, 적은 軸力이 發生한 다른 Rockbolt도 不連續面이 많은 터널周邊의 岩盤을 한 덩어리로 崩합하여 주르로서 岩盤 本來의 強度를 維持시켜 터널 安定에 寄與하게 되므로 重要하다. Rockbolt의 最大 軸力은 8.2 톤에 달하나 이는 許容引張力 以內이며, 不連續面의 分布나 特性에 대한 情報가 不足한 現段階에서 볼 때에 Rockbolt의 길이 3.0 m도 適切한 設計로 判斷된다.

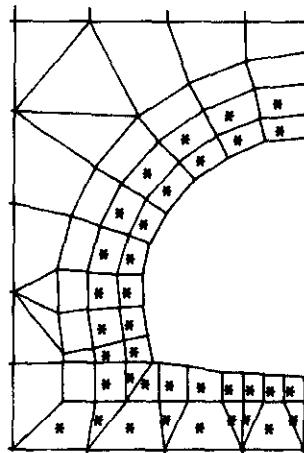


單位 : 톤

(그림 4.2) 段階別 Rockbolt 軸力 分布

4) 周邊地盤의 安定性

解析結果 터널 周邊地盤에 塑性領域이 (그림 4.3)과 같이 주로 掘鑿面 周邊에서 發生하였으나 그 範圍가 Rockbolt 길이 以內에 있으므로 全體的인 安定性에는 問題가 없을 것으로 判斷된다. 그러나, 塑性領域이 引張에 의하여 發生한 事實을 勘案하여 天井部에 Forepoling을 設置하여 崩落을 防止하는 것이 좋을 것으로 判斷되며, 施工順序와 달리 만일 長期間 工事が 中止되는 境遇가 있게 된다면 비록 막장면에서도 Shotcrete를 打設하여 塑性領域의 擴大 發生을 防止하여야 할 것이다.



(그림 4.3) 터널 周邊 塑性領域 分布

5. 結 論

地盤構造물의 安全性 評價의 道具로서 最近 널리 適用되고 있는 數値解析은 複雜 多樣한 地盤을 簡單하게 모델化하여 實際의 地盤舉動을 近似的으로 Simulation할 수 있는 새로운 技法임에는 異論의 餘地가 없으나, 技術者의 地盤工學 및 프로그램의 基本 概念에 대한 充分한 理解가 隨伴되지 않는 경우 解析 結果를 盲信하여 『解析結果가 터널의 安全性을 保障』하는 것으로 誤解할 可能性이 많다. 즉, 解析(Analysis)結果를 解釋(Interpretation)하는 技術的 判斷이 重要하며, 解析結果는 現場 安全管理의 指標로서 利用하되 計測結果를 分析하여 必要한 경우 適切한 補強措置를 取하므로서 터널의 安全性이 確保됨을 銘心하여야 된다.

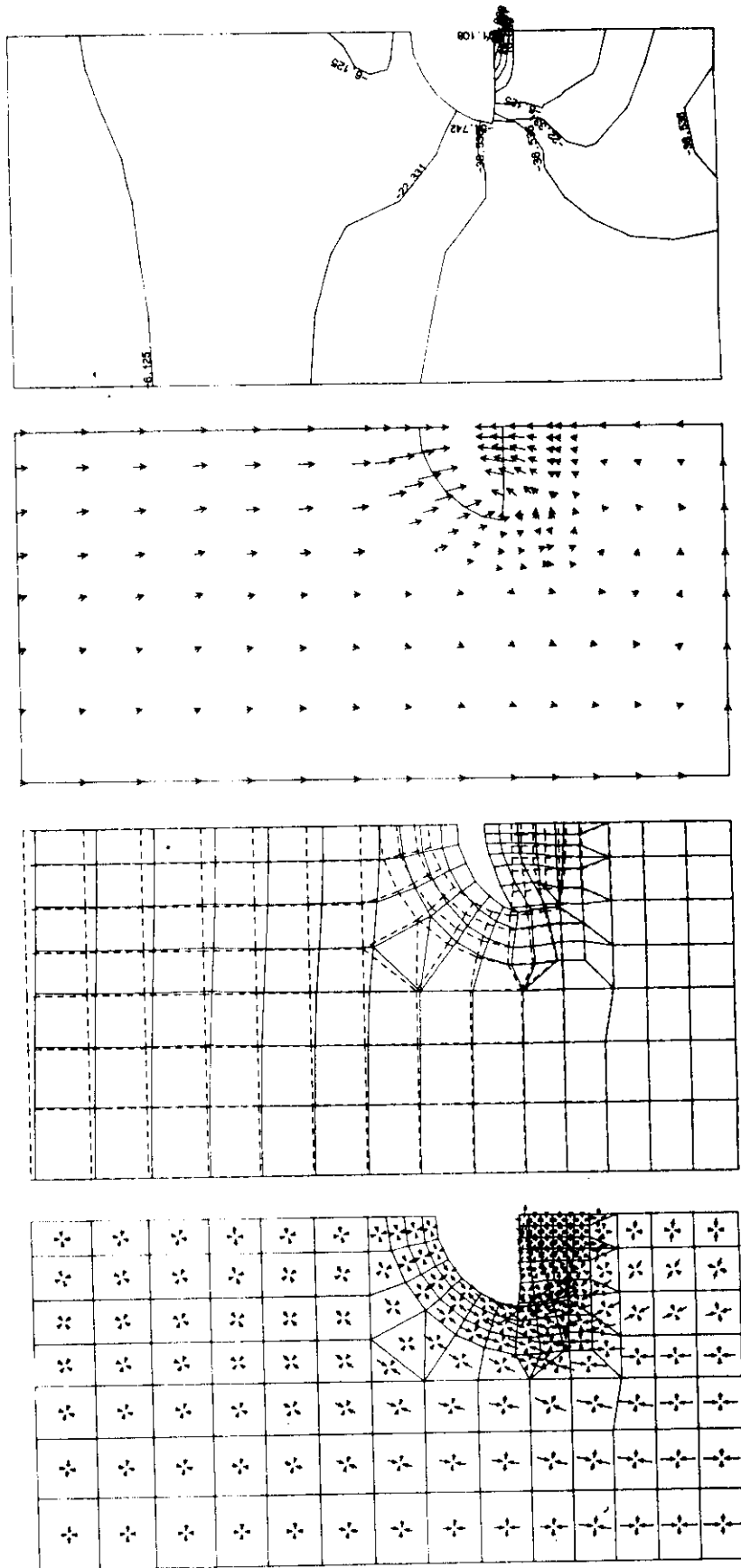
프로그램 MrSoil을 利用하여 計算된 터널 周邊地盤의 變位는 天井部 沈下 約 35 mm, 地表面 沈下 約 13 mm로서 風化岩의 複線 地下鐵 터널에서 計測될 수 있는 豫想 變位量의 範圍로 判斷되며, Shotcrete 應力 84 kg/cm² 및 Rockbolt 軸力 9 톤도 多少 큰 값이기는 하나 이들 支保工의 應力 負擔率이 許容值 以內로서 適切한 支保設計로 믿어진다. 塑性領域은 地盤의 許容引張強度에 到達하는 引張應力이 發生할 때 나타났으나, 이 경우 그 範圍가 Rockbolt 길이 以內에 限定되므로 全體的인 터널 安全에는 影響을 주지 않을 것으로 判斷된다. 그러나, 시공의 安全을 위하여 天井部에 Forepoling을 設置하는 것이 바람직할 것으로 判斷된다.

以上 解析 結果를 綜合하여 判斷하면 터널解析에 國內 여러 會社에서 利用하고 있는 프로그램 MrSoil의 數値解析 道具로서의 效用은 認定되나, 프로그램이 PC用이기 때문에 最大 適用 可能한 要素의 數는 約 400個 程度로 制限되며, 프로그램에 內在된 Band 幅을 自動적으로 最少化하는 Renumbering 機能이 없기 때문에 節點番號를 附與할 때 相當한 經驗이 要求되고, Mesh Generation을 위한 Pre-Processing 機能이 없다는 短點이 있다. 이러한 短點을 補完하기 위하여 우리會社는 別途의 Pre-Processing 및 Band Width 調整 프로그램을 開發하여 實務에 適用하고 있다. Work Station Version의 MrSoil은 最大 2000個의 要素를 收容할 수 있다는 것을 附言한다.

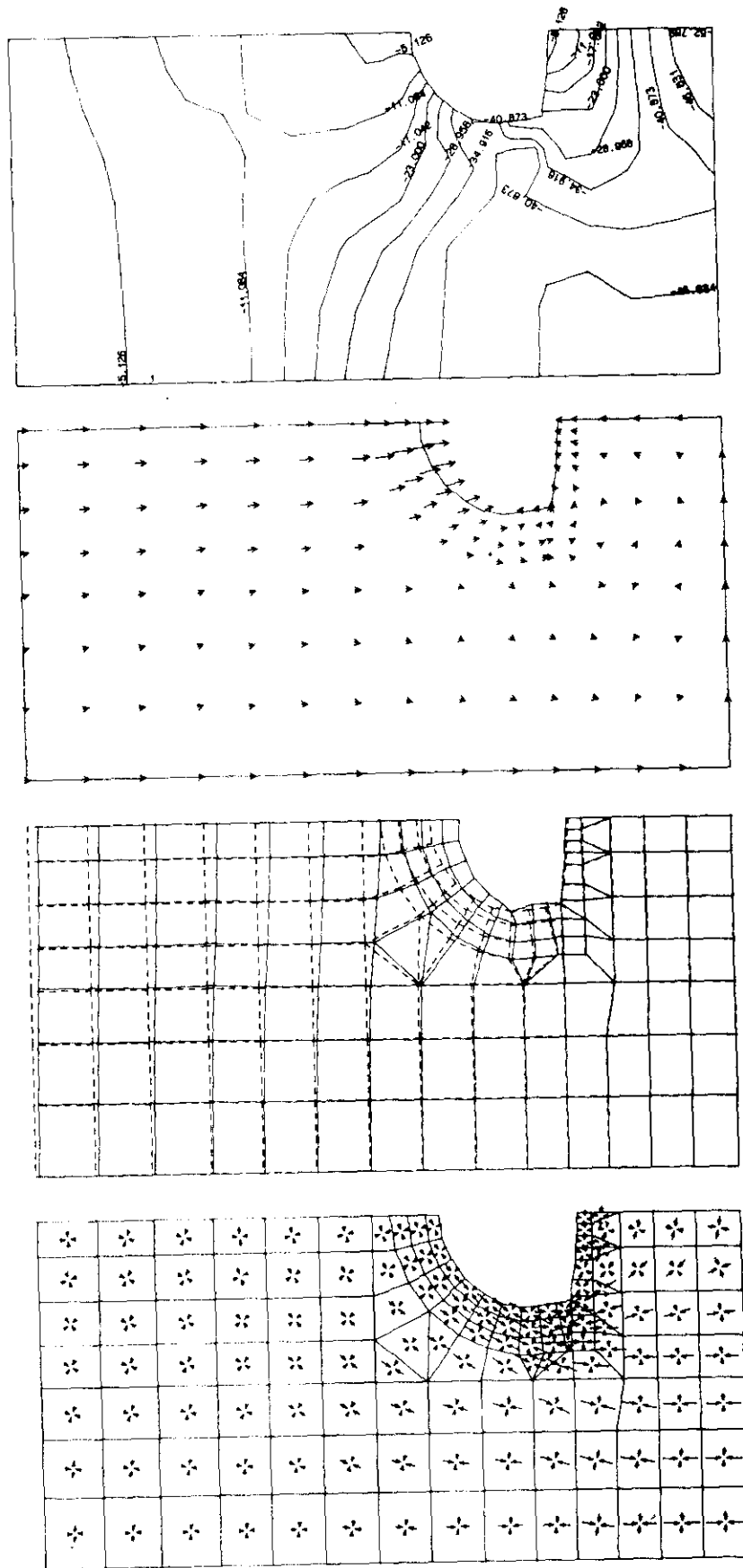
參 考 文 獻

- 1) CEC(1988), "MrSoil Ver 2.5 Users Manual", CEC, Japan
- 2) Cording, E.J.(1975), "Methods for Geomechanical Observations and Instrumentation in Tunneling", The National Science Foundation, Research Grant GI-33644X, Vol.2
- 3) Gnilsen, R.(1989), "Numerical Methods", Underground Structures (Edited by R.S.Sinha), Elsevier

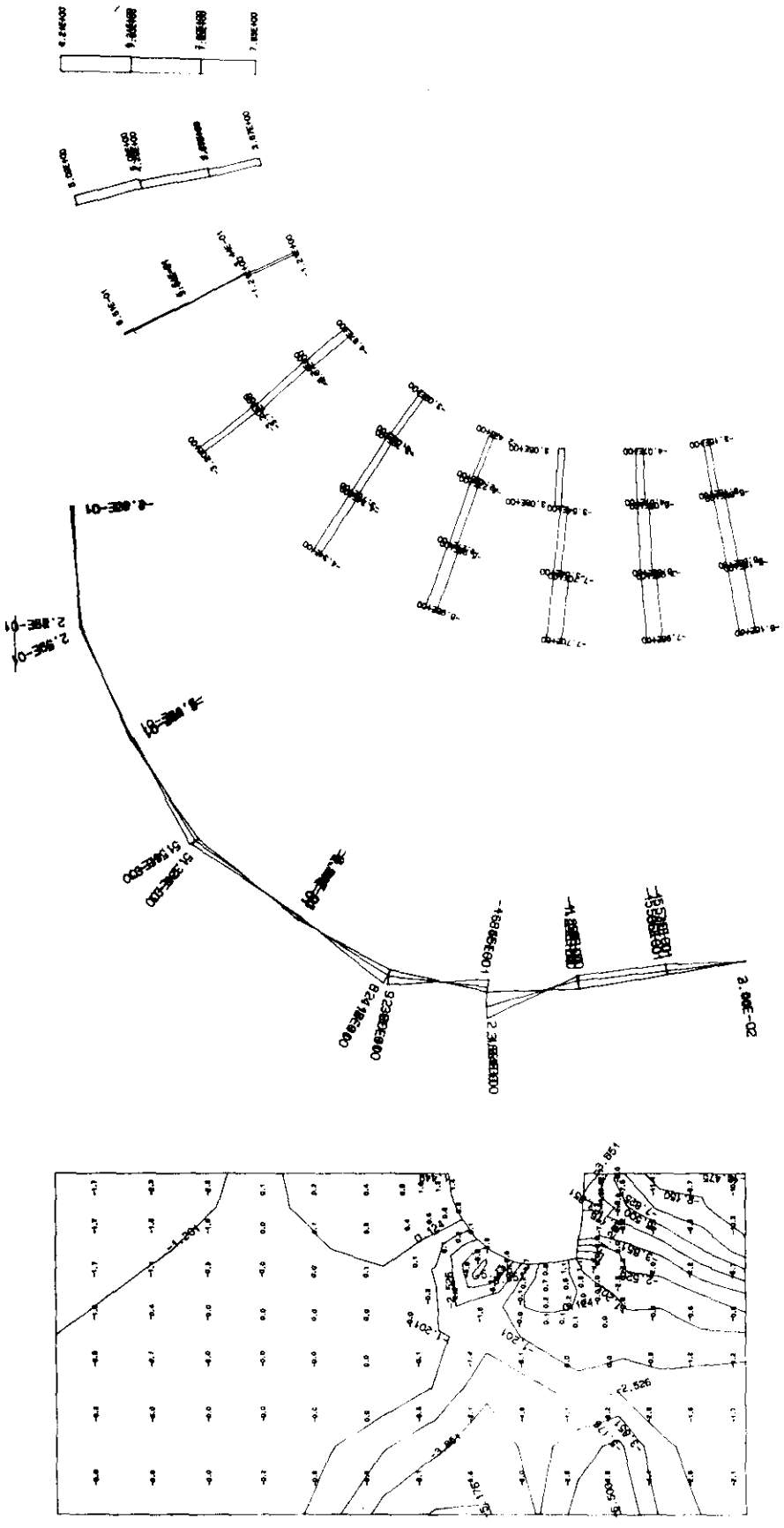
附錄:



上半 扭鑿後之 主應力, 變位, 變位VECTOR 及 最大 主應力 等高線圖



下半 扣鑿後의 主應力, 變位, 變位VECTOR 및 最大 主應力 等高線圖



下半掘鑿後之安全率, SHOTCRETE 應力 및 ROCKBOLT 軸力圖