特定 事例 터널 解析 結果및 評價

李 斗 禾*

(株) 三 友 技 術 團

A B S T R A C T

This report deals with the process of the finite element computation and the design of the particular example tunnel (the double track section tunnel for Line 5, 7, 8 of Seoul Subway). The finite element calculations are performed with the program MISES 3 was developed from Austria which have been used in Eroupe.

The principles of mechanic and mathematic analysis for the program MISES 3 are based on " The Finite Element Method -3rd Edition " by O.C zienkiewicz.

The calculations are approximate analysis method divide continuum into quadrilateral element and calculate deformation and stress ,according to the force equations at the node of the element. On the calculation of under excavation, this is a very convenient method and able to calculate compounded structure with tunnel lining and surrounding materials.

Although calculated under the same factor and conditions, the result is not same solution, according to the shape of mesh.

Therefore ,it is important that we collect the construction results of NATM on the spot and by comparing the results of the finite element method with the surveying results review the validity of analysis model.

* (株) 三友 技術團 理 事

構 造 技 術 士

There is the result at this example tunnel calculation.

* THE SECTIONAL FORCE OF SHOTCRETE AT FINAL STAGE (UNIT : TON,M)

DIVISION	AXAIL FORCE	SHEAR FORCE	BENDING MOMENT
TOP PART	-56.72	-0.27	-0.03
TOP-SIDE PART	-85.06	-0.40	-0.49
SIDE PART	-100.63	4.66	0.89
BOTTOM-SIDE PART	-42.91	-1.17	0.19

* DEFORMATION AND SETTLEMENT AT THE IMPORTANT POINT (UNIT : mm)

TUNNEL PART			UNDER ROCK	
TOP	SIDE	BOTTOM	UNDER GROUND	SURFACE
-8.990	-1.310	2.620	-5.850	-4.100

* STRESS OF ROCK BOLT (UNIT : kg/cm²)

DIVISION	BOTTOM-SIDE PART	SIDE PART	TOP-SIDE PART	TOP PART
STRESS	998.90	2852.00	1093.60	485.10

==========

1. 序 論

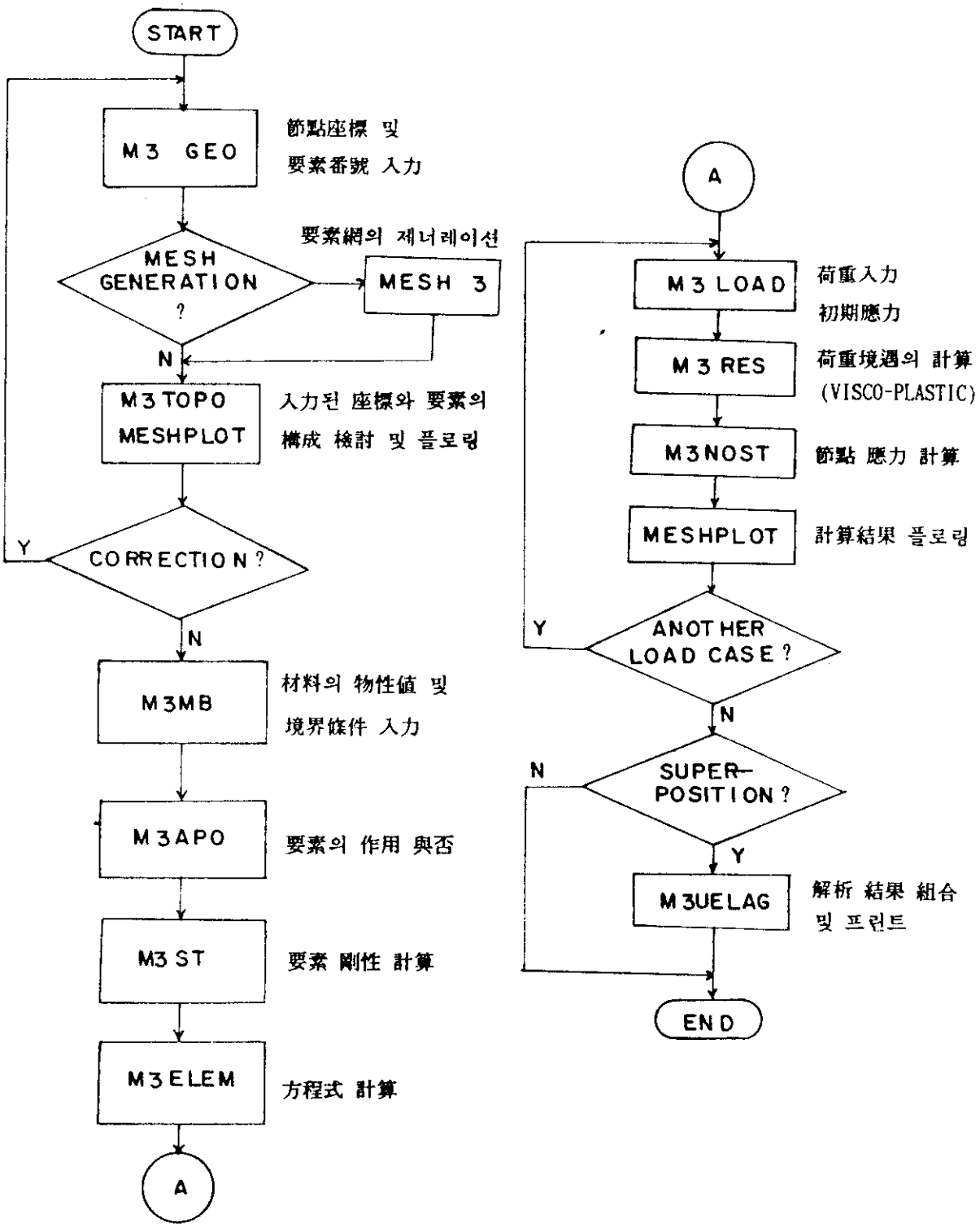
本 特定事例 터널을 解析함에 있어서 本 解析은 F.E.M 解析 PROGRAM 中의 하나인 MISES 3을 使用하였다.

本 프로그램의 시스템은 O.C ZIENKIEWICZ의 研究에 바탕을 두고있으며 (參考書籍 : FINITE ELEMENT METHOD, ZIENKIEWICZ, 3RD EDITION) 最近에 補完 開發시킨 것이다.

解析 對象이 되는 連續體를 4邊形의 要素로 分割하여 그 要素의 各 節點에 대한 힘의 平衡 方程式을 解析하여 連續體의 變形과 應力을 구하는 近似解法으로, 터널 라이닝과 周邊 岩盤으로 形成된 複合構造의 實質的인 計算이 可能한 地下空洞의 解析에는 매우 便利한 方法이다. 그러나 解析 모델의 假定 方法에 따라 같은 TUNNEL 을 計算하여도 解析結果에 差異가 發生하므로 實際 施工에 있어서 NATM의 施工實績을 蒐集하여 有限要素法 解析의 結果와 計測結果를 比較하여 解析 MODEL의 妥當性을 檢討하는 것이 重要하다.

2. F.E.M PROGRAM 에 대하여 ; (PROGRAM 名 : MISES 3)

1) PROGRAM FLOW CHART



2) PROGRAM 의 役割

프로그램 시스템은 미리 設定된 役割을 遂行키 위한 各各의 分離된 프로그램 (SUB - ROUTINE) 으로 構成되어 있으며 그들은 個別的으로 必要에 의해서 作用하게 된다.

。M3GEO

이 프로그램은 ELEMENT의 範圍와 節點의 座標를 入力시키기 위하여 使用한다.

또한 미리 入力된 데이타를 다음 段階에서 修正하고자 할때에도 역시 利用할수 있다. 入力시킬 데이타의 處理를 보다 손쉽게 하기 위하여 座標에 따른 入力은 直角 座標系, 圓筒形座標系, 球面形座標系등을 모두 使用할수 있다.

節點의 座標는 軸方向에 따른 LOCAL이나 GLOBAL 시스템을 便利한대로 모두 使用할수 있다.

岩盤과 SHOTCRETE 라이닝에 대해서는 平面上의 獨立媒介 變數가 使用된다.

4곳에 位置한 GAUSS POINT (要素의 定意參照)上에서 GAUSS-LEGENDRE의 方法에 따라 積分이 遂行된다. 이 方法은 이른바 GAUSS POINT라 일컫는 어떤 특정한 點의 函數값의 合에 의하여 實際로 作用하는 函數積分値로 對置시키는 別途의 方法이다.

GAUSS POINT는 어느 ELEMENT 안에서 實際로 作用하는 應力에 가장 近似하도록 接近시킨 計算에 의한 應力値를 보여주는 점으로서 數學的인 原理에 의하여 決定된다.

이러한 要素들은 媒介變數라 칭하게 되는 그 理由는 똑같은 函數의 數學的인 원리에 의하여 그들의 變形과 또한 그들의 限界性이 附與되기 때문이다.

。M3MESH

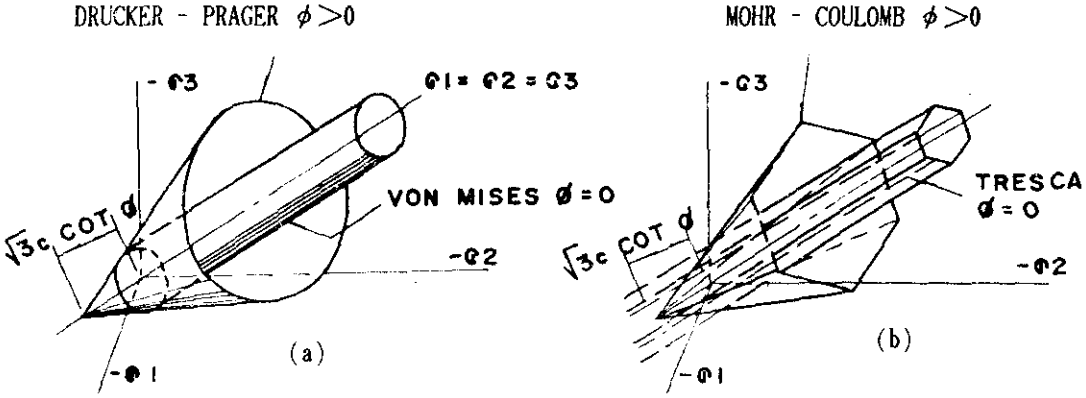
이 프로그램은 F.E-MESH를 形成시켜준다. SUPER-ELEMENT라고 일컫는 프로그램 M3GEO에 의하여 만들어진 ELEMENT가 入力되며 必要한 만큼의 再分離(GENERATION)를 시킬수있다.

또한 이렇게 하여 만들어진 새로운 ELEMENT와 節點들은 새로 만들어진 ELEMENT 로서 體系的으로 새로운 番號를 附與받게 된다.

。M3MB

프로그램에서 이 部分은 物性値(土質定數)에 대한 入力處理를 遂行하며 自由度에 대한 拘束을 통하여 境界條件을 設定시켜 놓는다.

各 物質(岩盤)에 따른 解法에는 DRUCKER-PRAGER, MOHR-COULOMB에 따른 彈性論에 立脚한 層을 이루거나 節理를 수반하는 物質(岩盤)로 區別될수 있으며 또한 計算을 하기 위해서는 MOHR-COULOMB에 따른 平面變形, 콘크리트彈性, 岩盤의 粘塑性의 物性値가 決定되어야만 한다.



Some isotropic yielld surfaces in principal stress space.

(a) Drucker - Prager and von Mises.

(b) Mohr - Coulomb and Tresca.

(1) DRUCKER - PRAGER 모델

$$F = 3\alpha'\sigma m + \bar{\sigma} - K = 0$$

$$\alpha' = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}\,(3-\sin \phi)}\ ,\ K = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}\,(3-\sin \phi)}$$

(2) MOHR - COULOMB 모델

$$F = \sigma m \sin \phi + \bar{\sigma} \cos\theta - \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \sin \phi \sin \theta - c \cos \phi = 0$$

여기에서

$$\sigma m = \frac{J_1}{3} = \frac{(\sigma x + \sigma y + \sigma z)}{3}$$

$$\bar{\sigma} = J_2^{1/2} = \left[\frac{1}{2} (Sx^2 + Sy^2 + Sz^2) + \tau xy^2 + \tau yz^2 + \tau zx^2 \right]^{1/2}$$

$$\theta = \frac{1}{3} \sin^{-1} \left[- \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{\bar{\sigma}^3} \right] \text{ with } - \frac{\pi}{6} < \theta < \frac{\pi}{6}$$

$$J_3 = Sx\ Sy\ Sz + 2\tau xy\ \tau yz\ \tau zx - Sx\tau^2 yz - Sy\tau^2 xz - Sz\tau^2 xy$$

$$Sx = \sigma x - \sigma m, \quad Sy = \sigma y - \sigma m, \quad Sz = \sigma z - \sigma m$$

ϕ ..... ANGLE OF INTERNAL FRICTION

C ..... COHESION

$\bar{\sigma}$ ..... COMPARISON STRESS

一般的으로 應力의 3次元 解析에 있어서 破壞領域에 관해서는 $\sigma 1$, $\sigma 2$, $\sigma 3$을 主軸으로 하는 座標系에서 降伏點이 이루는 面으로써 나타낼수 있다. 平面 變形系라 하더라도 Z 軸에 대한 變形은 0이라고 假定한다. (PLANE STRAIN)

解析을 위한 平面에 대하여 境界條件을 設定하며 對稱條件에 대하여도 境界條件이 設定된다.

。M3ST

이 프로그램에 의하여 이미 주어진 解析을 위한 幾何學的인 形狀과 物性値를 갖고 各 ELEMENT 의 剛性度를 算出한다.

。M3APO

實際의 工事段階에 따른 各各의 段階에 대하여 그 構造를 活性化시켜 計算을 위한 諸般 準備를 갖추어 놓는다.

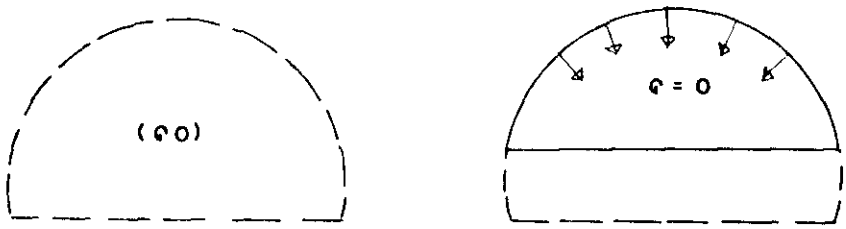
。M3ELEM

여기서는 構造的 강성도의 MARTIX를 解析하여 處理시키는데 計算過程에서 發生하는 ERROR에 대한 影響은 항상 檢討될수 있으며 ERROR의 갯수도 프린트 되어 나온다.

。M3LOAD

이 部分으로 荷重을 入力시키는데 應力의 初期狀態를 直接 入力시킬수 있으며 또는 上載荷重의 높이, 地標의 傾斜, 單位重量, 水平土壓係數 등의 데이타를 入力시킴으로써 프로그램에 의하여 計算될수도 있다.

더우기 掘鑿으로 인한 露出面에 대한 入力處理가 必要한데 그 理由는 이 露出面에서는 平衡을 維持키 위하여 異面에 作用하는 應力이 0이 되기 때문이다.



PRIMARY STATE　　EXCAVATED STATE

。M3RES

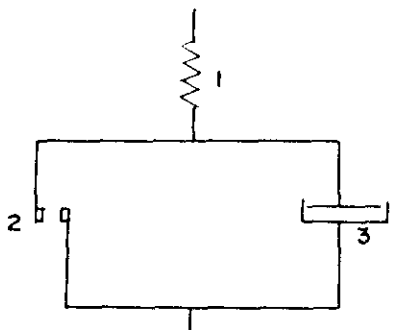
프로그램 M3LOAD에 의하여 算定된 荷重 條件이 이 프로그램에 의하여 計算된다. 이 프로그램에 의하여 施工段階에 대한 節點의 變形이나 GAUSS POINT의 應力을 프린트 할수 있다. MOHR-COULOMB에 의한 FLOW-CONDITION이 遂行되지 않는 岩盤의 ELEMENT에 대해서는 粘塑性 解析에 의하여 計算될수 있다.

즉, ELEMENT의 塑性變形의 TIME에 從屬된다고 생각하며 이는 이 시스템의 計算을 위하여 假想의 많은 TIME STEP을 設定함을 意味한다.

그렇게함으로써 塑性變形에 따른 모든 ELEMENT가 平衡에 到達하도록 한다.

VISCO - PLASTECITY

MODEL :



1. SPRING
2. FRICTION
3. DAMPING

連續體의 소성 擧動은 應力과 變形사이의 非線型 關係로 言及된다.

즉, 후크의 法則이 더이상 適用되지 않는 區間이다. 破壞條件에 到達하게 되면 塑性變形이 일어나게 된다. 이 塑性變形은 粘塑性 解析에서는 TIME에 依存한다고 생각하는 것이다.

$\varepsilon VP = 0$ WHEN $F(\sigma) \leq 0$

$\varepsilon VP \neq 0$ WHEN $F(\sigma) > 0$

여기에서 εVP는 TIME과 MOHR-COULOMB의 應力條件에 따른 破壞狀態 $F(\sigma)$에 대하여 粘塑性 變形의 變形率을 意味한다.

一般的으로 破壞基準인 $F(\sigma)$에 대하여 그 限界를 넘지 않게 한다.

그러므로 소성 變形을 야기시키는 시스템의 모든점에 대하여 $F(\sigma) \rightarrow 0 \equiv \varepsilon VP \rightarrow 0$ 로 適合하게 維持될수 있도록 많은 TIME STEP을 假定하게 된다.

(이것은 平衡狀態에 到達했음을 意味한다.)

應力의 3次元 狀態에서 εVP와 σ는 6개의 變形과 應力成分을 包含하는 벡터값을 갖게된다.

모든 彈性 粘塑性 計算에 관하여 變形과 應力사이에 다음의 關係式을 갖게된다.

$\{\sigma\} = [D] \cdot (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon\}VP - \{\varepsilon_0\}) + \{\sigma_0\}$

$\{D\}$ = ELASTICITY MATRIX

$\{\varepsilon\}$ = STRAIN VECTOR

$\{\varepsilon_0\}$ = INITIAL STRAIN

$\{\sigma_0\}$ = INITIAL STRESS

粘塑性의 變形의 增加分은 다음의 關聯式에 의하여 各各의 TIME STEP Δt에 대하여 算出된다.

$$\Delta\{\varepsilon\}VP = \{\varepsilon\}VP \cdot \Delta t = A \cdot F(\sigma) \cdot \frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}} \cdot \Delta t^*$$

즉, $A = 0$ FOR $F(\sigma) \leq 0$

$A = 1$ FOR $F(\sigma) > 0$

$\Delta t^* = \gamma \cdot \Delta t$

γ ---------- MATERIAL PARAMETER

假想의 많은 TIME STEP을 適用한 粘塑性 計算方法으로 實際의 平衡條件에 附合시킬수 있다. 그래서 計算의 終了 條件을 明示해 놓아야 한다. 이 基準은 0으로부터 計算條件上의 가장 큰 偏差 1 段階의 TIME STEP에서 最大粘塑性 變形의 增加分을 정하여 주는 것이다.

. M3SNIT

이 프로그램에 의하여 터널라이닝 斷面力이 주어진 媒介變數를 가진 ELEMENT에 應力으로부터 정하여진다.

. M3UELAG

이 프로그램은 各各의 荷重條件에 따른 計算을 複合處理 시키며 또한 모든 掘鑿段階에 대하여 얻어진 ELEMENT의 GAUSS-POINT에서의 應力과 節點에서의 變形量을 合算處理 시킨다.

. M3PLOT

이 프로그램은 5가지 作用을 한다.

- 선정된 斷面에 대한 F.E-MESH 또는 詳細圖에 대한 플로링
- 變形된 MESH에 대한 플로링
- 塑性區域에 대한 플로링
- GAUSS POINT에 대한 應力 또는 應力의 等分布線에 대한 플로링
- SUOTCRETE의 斷面力 플로링

3) PROGRAM 遂行의 原理 및 計算過程

터널 斷面의 境遇 構造的으로 斷面形狀이 變動되지 않는다면 3 次元 解析이 꼭 必要하지는 않다. 즉 平面의 變形解析을 利用한 2次元 連續體로 假定하여 檢討할수 있다.

이렇게 주어진 平面에서 附與되는 番號를 갖는 節點으로 連結된 矩形의 要素들로 再分離 되며, 이러한 各各의 要素에 대하여 節點과 內部사이의 變形은 各 要素에 대한 節點의 數學的 處理에 의하여 算出되게 된다. 또한 이러한 시스템의 境界條件은 터널 斷面의 크기와 要求되는 精密度에 따라 決定되게 된다.

이렇게하여 이 시스템의 境界條件이 決定되게 되면 岩盤 또는 各各의 土質層으로 區域이 形成되는데 이렇게 함으로 해서 各各의 모든 矩刑의 要素들은 그 나름대로의 物性値를 갖게 된다. 岩盤의 擧動은 彈塑性 應力變形에 의하여 나타내어 지는데 이때의 降伏條件을 쿨럼의 降伏基準에 依據하여 정해진다.

計算을 위한 數學的 公式에 대해서는 各各의 節點이 主軸方向에 대하여 갖게되는 2個의 別途의 主軸方向에 대한 變形値를 갖게 된다. 剛性度의 決定은 假想일의 原理에 의하여 遂行된다. 또한 體積에 대한 積分 計算은 GAUSS-LEGENDRE 의 數値積分法을 活用하였다.

이 積分에 대한 原理는 어떤점(GAUSS POINTS) 에서 函數에 대한 값에 重量合計를 通하여 어떤 임의의 函數의 積分에 近接해 나갈수 있다. 이렇게 함으로해서 應力과 變形에 대한 벡터는 GAUSS POINTS 에서 表記 시킴으로써 計算된다.

이러한 方式에 의한 荷重벡터는 다음과 같이 決定된다. 우선 掘鑿하기 전의 應力 狀態를 計算해 내야만 하는데 이 狀態는 이른바 初期 應力狀態를 말한다.

터널을 掘鑿하였을때 즉 岩盤이 空洞을 形成한 狀態에서 自由面에 대한 應力은 平衡原理에 의하여 반드시 0 가 된다. 이러한 條件으로부터 平衡 狀態에 到達된 것과 同一한 狀態의 절점에 作用되는 荷重이 算出된다. 이 荷重으로부터 彈性, 塑性 및 粘塑性 解析이 遂行되게 된다. F.E.OUTPUT 는 入力데이타, 施工段階, 掘鑿段階, 그리고 各各의 節點에 대한 應力과 變形의 結果値가 包含되어 記錄된다.

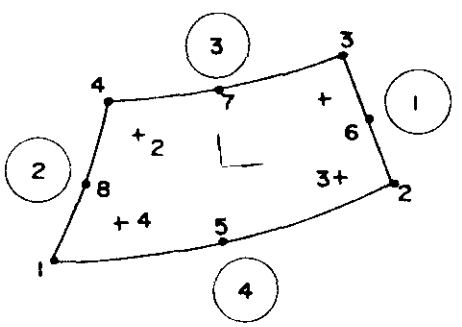
또한 F.E 프로그램은 各各의 有限要素에 대한 軸方向力, 剪斷力, 휨모멘트를 算出하게 된다.

4) 地盤 및 支保材에 適用된 ELEMENT TYPE

本 解析에서는 地盤 및 支保材에 適用되는 ELEMENT TYPE을 岩盤要素, 쇼크리트 要素, 록볼트 要素, 無限要素등의 크게 4가지로 아래 內容과 같이 區分하여 適用시킨다.

(1) 岩盤要素

岩盤要素로는 等方性 要素가 使用되었으며 한 要素는 아래 그림과 같이 8개의 節點과 4개의 GAUSS POINT와 4개의 邊을 가지고 있다.



凡　　例

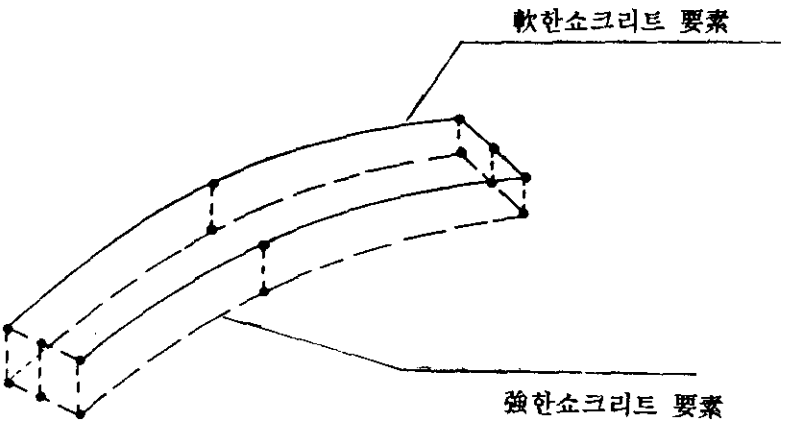
. : 節點의 番號

\+ : GAUSS POINT番號

: 변의 번호

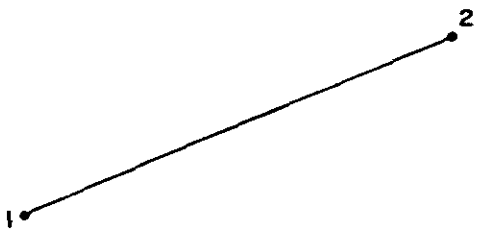
(2) 쇼크리트 要素 (SHOTCRETE ELEMENT)

本 프로그램에서 쇼크리트의 二重要素(DOUBLE ELEMENT)는 똑같은 形態를 갖추고 있으나 變形系數나 境界條件은 서로 다르다. 施工段階에서 時間的 差異를 두고 作用하므로써 쇼크리트의 時間的 變化에 다른 剛性을 補正할수 있다.



(3) 록볼트 要素 (ROCK BOLT ELEMENT)

支保工의 一種인 록볼트는 彈性體인 빔要素로 定意되며 서로 다른 두 要素에 連結되어 있다.



: 節點番號

(4) 無限要素 (INFINITE ELEMENT)

有限要素法으로 計算하는데 가장 重要한 要素의 하나가 網(MESH)의 크기이나 이網의 크기는 境界條件에 의하여 아무런 影響이 發生하지 않도록 充分히 크게 設置해야 한다. 그러나 有限要素의 갯수는 많을수록 좋은것만은 아니므로 無限要素를 使用 하므로써 쉽게 解決할수 있다.

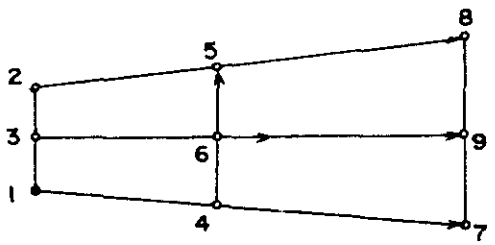
追加되는 無限要素의 入力資料는 極(POLE)으로써 정의된다.

이 극의 原理에 의하면 網의 變化로 인한 影響이 0이 되는 點은 無限帶 點이다.

그러므로 計算에서는 境界條件과 網의 크기에 直接的인 影響을 받지 않으며

正確하게 計算되어진다.

다음 그림은 無限要素의 數學的 定義에 대한 간단한 例이다.



$$\mu(\xi \cdot \eta) = \sum_{1}^{\infty} \mu i \times Ni(\xi \cdot \eta)$$

SHAPE FUNCTION

ONE SIMPLE POSSBILITY FOR THE SHAPE FUNCTION

$$1/N(\xi) = 1/\frac{\xi}{(1-\xi)} \quad \text{FOR} \quad \xi \rightarrow 1 \; - \; N(\xi) \rightarrow \infty \quad \mu(\xi) \rightarrow 0$$

* 參 考 : 大韓土木學會紙 第35卷 第1號

---- 터널 解析에 있어서 無限境界 要素의 適用에 대하여 ----

3. 掘鑿工事 段階 SIMULATION 에 대하여

1) 初期應力

地盤을 掘鑿하기 전의 應力狀態를 初期應力 狀態라고 부르며 地盤의 깊이와 上載荷重에 따라 달라진다.

이 應力狀態에 대한 實際의 變形은 이미 오래전에 發生 되었으므로 프로그램상에서는 變形과 관계없이 별개로 遂行된다. 初期應力은 境界條件에 따라 計算되며 計算된 應力은 有限要素網과 각 要素의 GAUSS-POINT 상에 保管되어 진다.

1 次的으로 計算된 結果에서 變形率은 除去되며 다음 段階의 計算에서 掘鑿斷面 周圍의 斷面力을 얻을수 있다.

地層에 따른 初期應力은 각 要素에 分類되며 모든 計算 段階에 必要한 1次 應力狀態로 保管 되어진다. 初期應力 結果에는 變位가 생기지 않으며 土皮와 側壓係數에 따라 應力이 정해진다.

$$\sigma y = -\gamma \times h$$

$$\sigma x = \lambda x \times \sigma y$$

$$\sigma z = \lambda z \times \sigma y$$

여기에서 γ : 單位重量　　h : 높　이　　λ : 側壓係數

σy : y 方向의 初期應力

σx : x 方向의 初期應力

σz : z 方向의 初期應力

2) 自由面의 荷重

斷面을 掘鑿하면 自由面에 直角 方向으로 平衡狀態가 되지 않으므로 이 平衡 狀態를 維持하기 위하여 假想일의 定理에 의하여 平衡節點 荷重을 計算하도록 하여 實際 狀態에 附合되도록 하였다.

그러므로 自由面 荷重은 實際 狀態의 應力으로부터 計算되어진다.

有限要素網에서 이 平衡狀態를 計算한 후 應力條件에 따라 쇼크리트라이닝의 휨모우먼트, 軸方向力, 全斷力등을 計算할수 있고 아울러 쇼크리트라이닝의 斷面을 決定할수 있다.

變形은 勿論 쇼크리트라이닝의 斷面力까지도 쇼크리트의 設置時期와 剛性 (STIFFNESS)에 左右되므로 計算過程이 實際의 施工順序와 時間的 要素에 可能한 한 附合되도록 自由面에 作用되는 總 荷重을 몇 段階로 分離하여 適用함이 必要하다.

本 計算의 境遇 터널을 上部半斷面, 下部半斷面으로 分割하여 掘鑿하므로 이에 따른 施工段階別 荷重 負擔率은 다음과 같다.

施工段階別 荷重負擔率

計算段階	狀 態	荷重負擔率(%)
0	初期 應力	-
1	(上部半斷面) 掘鑿	50
2	(上部半斷面) 軟한쇼크리트 + ROCK BOLT	25
3	(上部半斷面) 強한쇼크리트 + ROCK BOLT	25
4	(下部半斷面) 掘鑿 + 軟한쇼크리트	50
5	(下部半斷面) 強한쇼크리트	50

3) 施工段階別 FEM 解析

터널을 掘鑿함에 따라 어느 特定한 地點의 터널을 掘鑿하기 전에 이미 어느 程度의 應力變化와 地盤 變形이 일어난다.

이것은 岩盤 特殊性에 따른 3次元的인 時間의 影響問題로 全 岩盤 自重은 日時에 100%로 作用되지 않고 몇 段階로 區分되어 作用한다.

그러므로 FEM 解析을 實際의 施工狀態와 같도록 하기 위하여 즉 周邊岩盤의 時間적인 變化와 쇼크리트라이닝과의 正確한 關係를 알기위하여 다음과 같이 5 단계로 해석을한다.

第 1 段階 : (上部半斷面) 掘鑿

第 1段階 이전에 이미 初期應力 狀態의 應力과 條件이 入力되어 있다. 그러므로 本段階에서는 上部半斷面을 掘鑿한 狀態로만 計算한다. 岩盤荷重은 全 岩盤荷重의 50%만 作用한다.

第 2 段階 : (上部半斷面) 軟한쇼크리트 + ROCK BOLT

第 2段階에서는 上部半斷面을 掘鑿한후 쇼크리트를 打設하였을 狀態를 意味한다. 그러나 쇼크리트는 時間의 經過 過程에 따라 軟한쇼크리트와 強한쇼크리트로 分類되므로 本 段階에서는 軟한쇼크리트 狀態의 物性値가 適用되며 岩盤荷重의 25%가 作用한다.

第 3 段階 : (上部半斷面) 強한쇼크리트 + ROCK BOLT

第 2段階의 狀態와 같으나 軟한쇼크리트가 強한쇼크리트로 變化한다.

그리고 나머지 岩盤荷重의 25%가 作用하여 上部半斷面에 總 100% 의 岩盤荷重이 作用된다.

第 4 段階 : (下部半斷面) 掘鑿 + 軟한쇼크리트 + ROCK BOLT

第 4段階에서는 下部半斷面을 掘鑿한 後 쇼크리트를 打設하였을 狀態를 意味한다. 그러나 쇼크리트는 時間의 經過過程에 따라 軟한쇼크리트와 強한쇼크리트로 分類되므로 本 段階에서는 軟한쇼크리트 狀態의 物性値가 適用되며 岩盤荷重의 50%가 作用한다.

第 5 段階 : (下部半斷面) 強한쇼크리트 + ROCK BOLT

第 5段階에서는 下部半斷面의 軟한쇼크리트가 強한쇼크리트로 變化한다.

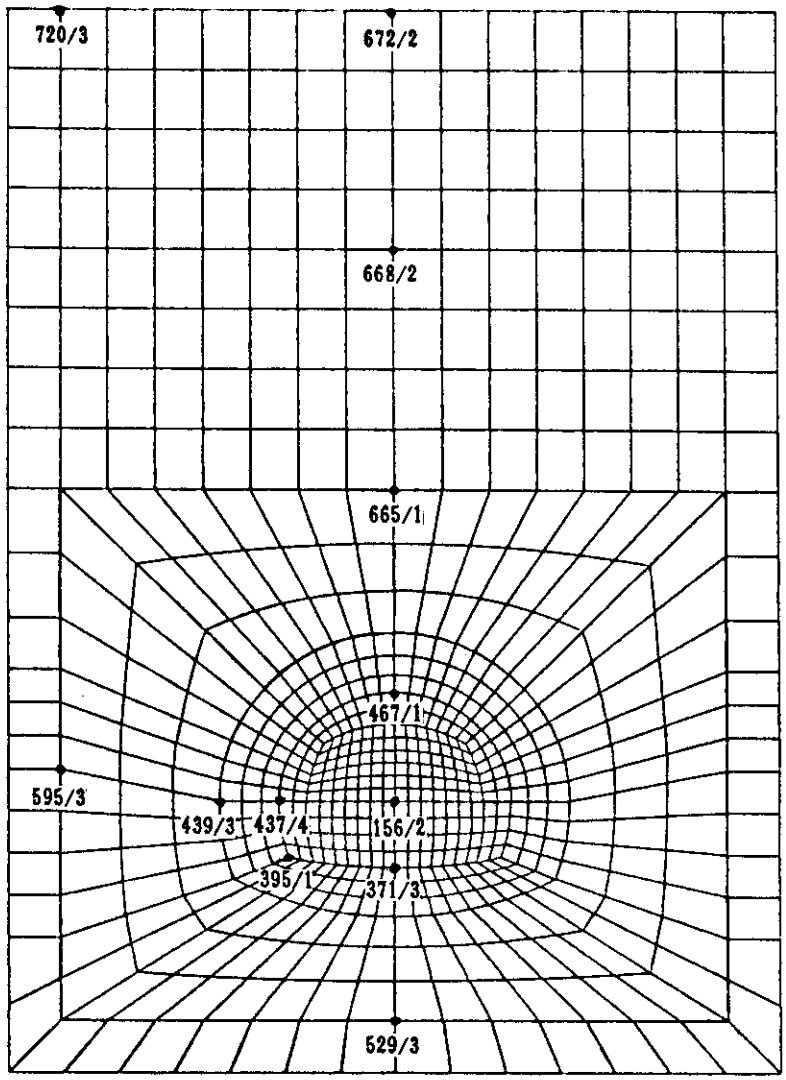
나머지 岩盤荷重의 50%가 作用하여 總 100% 의 岩盤荷重이 作用됨으로써 FEM 計算이 끝난다.

掘鑿面 前方으로 터널直徑의 2倍 距離 區間內에서 沈下의 影響이 미친다는 것은 이미 알려져 있으며 本 解析과 같은 2次元 平面 解析에서는 이 區間에서 發生되는 沈下의 影響을 考慮할수 없는 狀態이다.

만약 막장까지의 距離에 의한 影響을 考慮하려면 3次元 立體解析을 하여야 하는데 이는 構成 ELEMENT가 수천개로 增加하여 莫大한 時間과 努力, 컴퓨터 容量의 限界등 制限的 要素가 따른다.

4. F.E.M 解析 結果 要略

1) 重要地點의 變位및 沈下



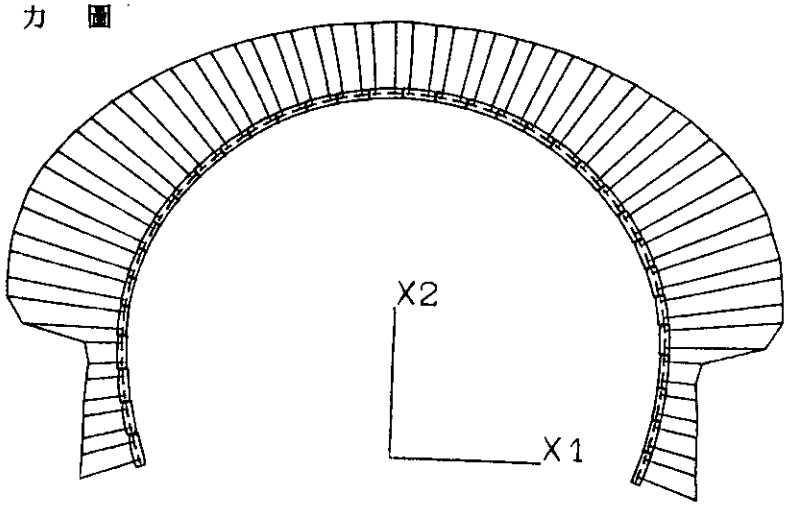
區 分	터 널 部					地 中 및 地 表							
要素番號	371/3	395/1	395/1	437/4	467/1	156/2	439/3	529/3	595/3	665/1	668/2	672/2	720/3
段階 方向	Y	X	Y	X	Y	Y	X	Y	X	Y	Y	Y	X
1 段 階	0.80	-0.05	0.54	-0.40	-4.30	1.91	-0.56	0.47	-0.39	-2.53	-2.08	-1.68	0.70
2 段 階	1.28	-0.06	0.90	-0.80	-6.69	2.98	-0.99	0.77	-0.75	-4.17	-3.52	-2.86	1.18
3 段 階	1.81	-0.19	1.24	-1.31	-8.99	4.11	-1.45	1.12	-1.11	-5.82	-4.96	-4.05	1.67
4 段 階	2.23	-0.10	1.50	-0.68	-8.94	4.11	-1.47	1.40	-1.18	-5.85	-5.02	-4.10	1.69
5 段 階	2.62	-0.05	1.69	0.05	-8.77	4.11	-1.44	1.67	-1.21	-5.74	-4.92	-4.02	1.67

(單位 : mm)

2) 쇼크리트 라이닝의 斷 面 力

* 쇼크리트 라이닝의 斷面力圖 (FINAL STAGE : 5 段階)

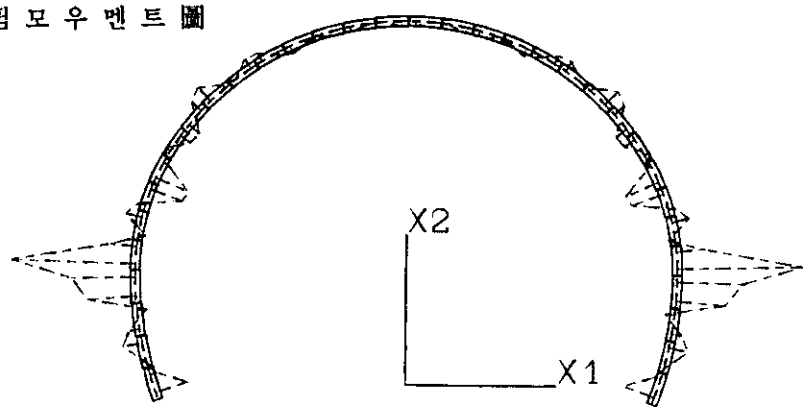
軸 力 圖



(縮尺) 시스템 1CM : 150CM

軸 力 1CM : 60.0TON

휨 모 우 멘 트 圖



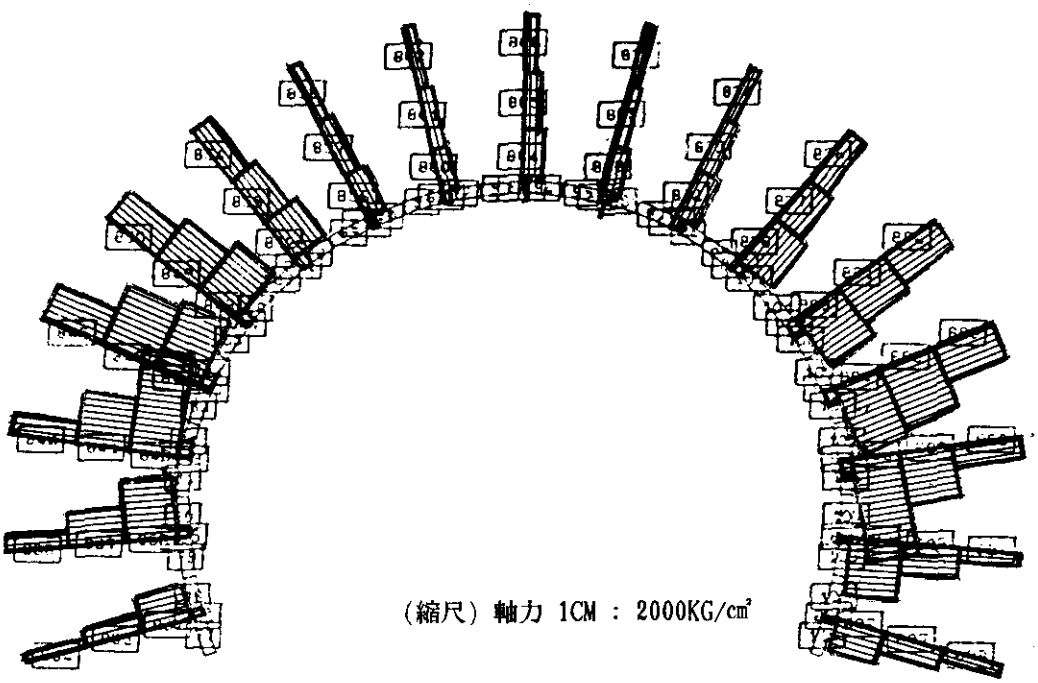
(縮尺) 시스템 1CM : 150CM

휨모멘트 1CM : 20.0T.M

*** SHOTCRETE LINING SECTIONAL FORCE ON FINAL STAGE ***

SOFT	HARD	id	두 께	축 력	전 단 력	휨모우멘트
77	111	1	20.000	42.906	-1.167	0.187
77	111	2	20.000	50.071	6.732	0.878
78	112	1	20.000	34.882	0.941	0.525
78	112	2	20.000	39.211	-3.947	0.050
79	113	1	20.000	-28.973	-0.160	0.263
79	113	2	20.000	-32.955	1.094	-0.265
80	114	1	20.000	-29.979	8.848	-1.698
80	114	2	20.000	-26.278	-8.813	-1.287
81	115	1	20.000	94.624	11.605	-0.695
81	115	2	20.000	-79.518	12.282	-3.301
82	116	1	20.000	-98.850	0.851	-0.462
82	116	2	20.000	-96.276	-2.839	0.198
83	117	1	20.000	-100.631	4.658	0.889
83	117	2	20.000	-100.532	2.332	-0.191
84	118	1	20.000	-100.552	-2.035	0.094
84	118	2	20.000	101.937	-2.760	0.949
85	119	1	20.000	-95.048	1.361	0.317
85	119	2	20.000	-98.181	-0.731	-0.154
86	120	1	20.000	-88.358	-1.677	-0.346
86	120	2	20.000	-92.025	-3.897	0.358
87	121	1	20.000	-80.337	1.516	-0.125
87	121	2	20.000	-85.061	-0.404	-0.493
88	122	1	20.000	-73.286	-1.031	0.292
88	122	2	20.000	-77.563	-2.542	0.001
89	123	1	20.000	-67.764	0.106	0.111
89	123	2	20.000	-70.812	-0.467	-0.237
90	124	1	20.000	-63.179	-0.478	0.061
90	124	2	20.000	-65.722	-1.512	0.218
91	125	1	20.000	-60.103	0.829	0.143
91	125	2	20.000	-61.407	0.193	0.061
92	126	1	20.000	-57.311	-0.255	0.010
92	126	2	20.000	-58.944	-0.594	0.134
93	127	1	20.000	-57.176	0.459	0.144
93	127	2	20.000	-56.717	-0.265	-0.027
94	128	1	20.000	-56.728	0.268	-0.027
94	128	2	20.000	-57.179	-0.456	0.144
95	129	1	20.000	-58.968	0.596	0.134
95	129	2	20.000	-57.328	0.257	0.010
96	130	1	20.000	-61.439	-0.194	0.060
96	130	2	20.000	-60.130	0.830	0.143
97	131	1	20.000	-65.772	1.516	0.217
97	131	2	20.000	63.217	0.479	0.060
98	132	1	20.000	-70.876	0.468	0.240
98	132	2	20.000	-67.820	0.110	0.109
99	133	1	20.000	-77.635	2.553	0.000
99	133	2	20.000	-73.352	1.037	0.294
100	134	1	20.000	-85.139	0.405	-0.495
100	134	2	20.000	-80.412	1.523	-0.125
101	135	1	20.000	-92.097	3.904	0.360
101	135	2	20.000	-88.437	1.680	0.346
102	136	1	20.000	-98.231	0.723	-0.153
102	136	2	20.000	-95.118	-1.366	0.320

3) R O C K B O L T 의 應 力

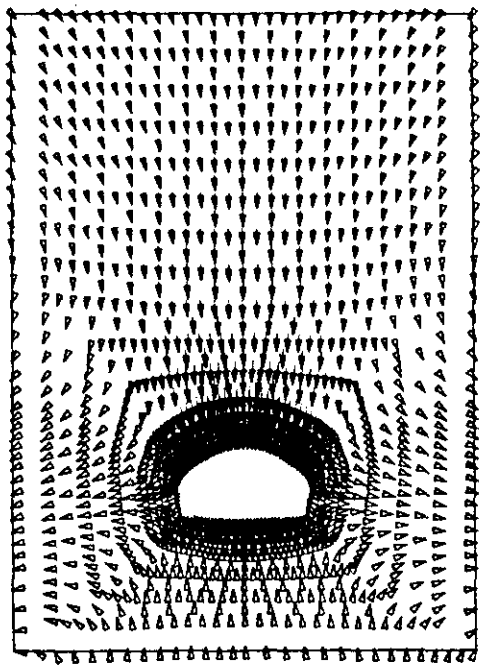


* ROCK BOLT에 PRESTRESSING은 작용시키지 않고 F.E.M 해석을 실시하였다.

(單位:kg/cm²)

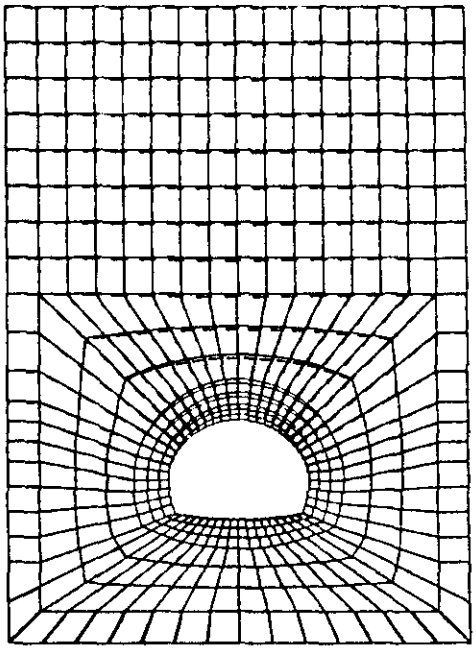
要素番號	軸 力	要素番號	軸 力	要素番號	軸 力	要素番號	軸 力	要素番號	軸 力
831	172.5	847	330.0	863	141.7	879	330.5	895	170.5
832	998.9	848	1571.3	864	485.1	880	1574.7	896	985.0
833	429.0	849	1369.3	865	421.3	881	1376.0	897	396.0
834	197.8	850	1071.4	866	338.9	882	1078.8	898	182.1
835	304.9	851	235.4	867	147.2	883	416.8		
836	1806.9	852	1093.6	868	473.9	884	2034.4		
837	978.5	853	847.3	869	415.2	885	1920.3		
838	403.4	854	668.9	870	346.7	886	1096.8		
839	520.0	855	168.9	871	169.2	887	519.6		
840	2852.0	856	514.7	872	516.8	888	2859.0		
841	1438.7	857	451.5	873	453.2	889	1438.0		
842	578.3	858	374.1	874	375.4	890	571.2		
843	416.4	859	147.1	875	236.0	891	302.7		
844	2028.7	860	473.7	876	1098.2	892	1801.2		
845	1912.1	861	414.8	877	851.7	893	980.3		
846	1092.9	862	346.2	878	673.2	894	397.5		

FINAL STAGE (5 段階) ; 變位벡터



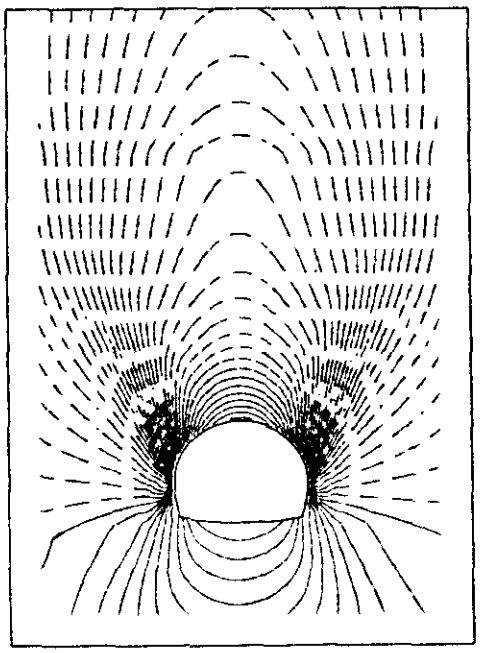
(縮尺) 變位벡터 1CM : 0.2CM

FINAL STAGE (5 段階) ; 變　形



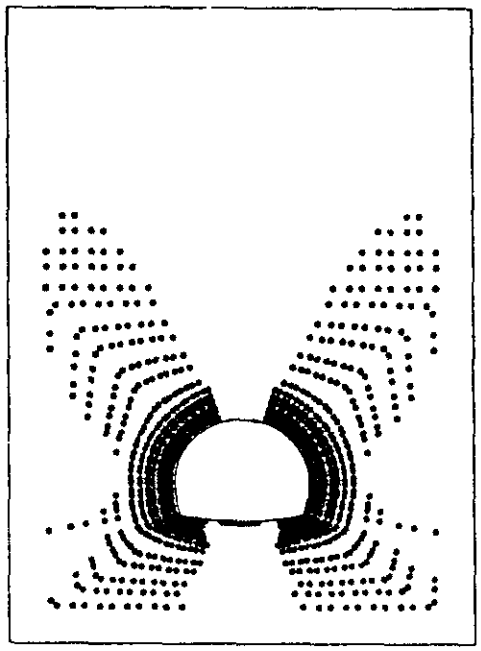
(縮尺) 變形 1CM : 0.9CM

FINAL STAGE (5 段階) ; 等變位線

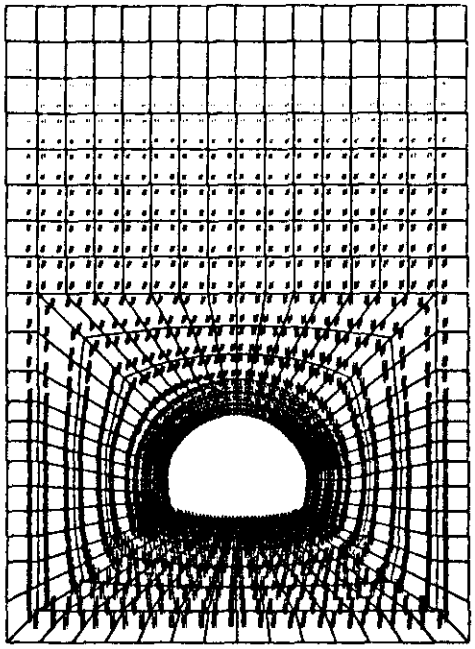


(縮尺) 變位間隔 0.25MM

FINAL STAGE (5 段階) ; 降伏要素



FINAL STAGE (5 段階) ; 主應力



(縮尺) 主應力 1CM : 400T/m²