

有限差分法을 이용한 터널斷面解析

The Analysis of Tunnel Excavation using Finite Difference Method

김 동 후*, 유 건 선**

Abstract

Using FLAC, which is an explicit finite difference code written for analysis of problems in geotechnical engineering, a particular example 2 in the Korean Geotechnical Society News has been analysed. The elastoplasticity formulation in FLAC assumes an elastic, perfectly plastic solid in plane strain which conforms to a Mohr-Coulomb yield condition. During tunnel excavations by stages, stresses and displacements in region around the tunnel varies according to distance from the face of tunnel and installation of tunnel supports, and so on. In this analysis, the three dimensional support effect of the rock mass during the process of excavation is simulated by using the stress distribution method, and varying the material constants of shotcrete in each stage also considered. The maximum convergency is occurred at the crown of the tunnel and estimated to be about 12mm.

1. 개요

본 터널단면해석에서는 탄성범위를 넘는 지반의 비선형거동을 비교적 쉽고 정확하게 모델링할 수 있는 Explicit 유한차분법의 수치해석방법을 적용한 프로그램 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)을 사용하여 예제에서 주어진 터널단면을 해석하였다. 본 해석에서는 터널주위의 암반이 등방체라고 가정하여 전단면을 모델링하여 평면변형률조건하에서 Mohr-Coulomb의 파괴조건을 갖는 탄·소성해석을 실시하였

* 동명기술공단 토질부 과장

** 동명기술공단 상무이사

다. (1) 컴퓨터에 의한 수치해석으로 실제에 가까운 결과를 얻기 위해서는, 실제 시공 방법과 시공순서를 정확히 simulation하여 입력자료로 사용하여야 하는바 특히, 터널 막장에 의한 암반의 3차원 지보효과를 고려한 굴착과정과 시간의 경과에 따른 슛크리트 물성치의 변화 및 지보재의 설치시기는 터널시공에 영향을 주는 중요한 변수이므로 이러한 공정을 단순화하여 수치해석의 입력자료로 사용하였다.

2. 터널의 굴진 및 시공과정의 모델링

컴퓨터에 의한 수치해석으로 실제에 가까운 결과를 얻기 위해서는, 실제 시공방법과 시공순서를 반드시 고려하여야 한다. 특히, 굴착과 지보재 및 라이닝의 설치는 중요한 터널시공에 영향을 주는 변수이므로 이러한 공정을 단순화하여 수치해석의 입력자료로 사용하여야 한다. 터널시공중의 막장 근처에서는 3차원의 구조가 생성되며 이에 따라 응력과 변형도 3차원으로 발생한다. 터널막장에서의 3차원모델은 그림 1 및 그림 2와 같다. 막장으로부터 떨어진 거리와 관계없이 터널축과 직각방향으로, 지반의 아칭(arching) 현상이 발생하며 또한 여기에 추가하여 터널축에 평행한 아칭현상도 발생한다. (2) 이러한 두개 이상의 평면 안에 발생하는 아칭현상은 하중을 3차원으로 분산시킨다. 따라서, 본 해석에는 3차원모델을 이에 상응하는 평면변형률의 2차원모델로 간소화시키고 여기에 그림 3 및 그림 4와 같이 터널의 굴진과정에 따른 변위(3)(4) 및 응력해석을 응력분배법(stress distribution method)으로 simulation함으로써 모델의 단순화를 기하였다.

상기와 같은 방법에 따라 본 해석에서는 굴착공사를 다음과 같이 3단계로 나누어 해석하였으며, 응력분배법에 의한 굴착단계별 응력분배률은 그림 5와 같다.

- ① 1단계 : 상부반단면 굴착(upper-half excavation)
- ② 2단계 : 하부반단면 굴착(lower-half excavation)
- ③ 3단계 : 인버트 굴착(invert excavation)

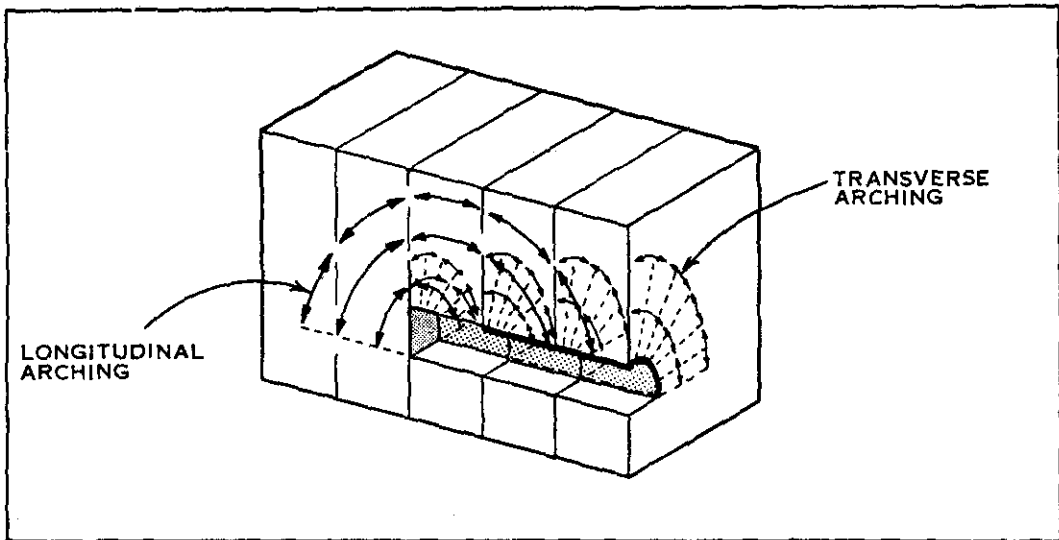


Figure 1 Three dimensionality at the tunnel face. (2)

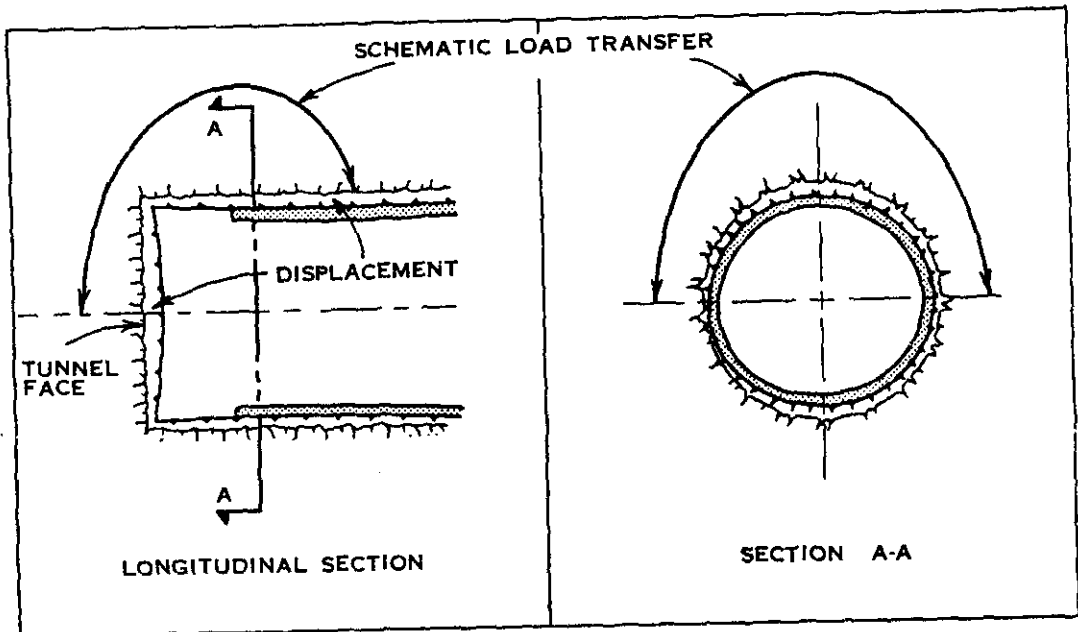


Figure 2 Three dimensionality of load and displacement at the tunnel face. (2)

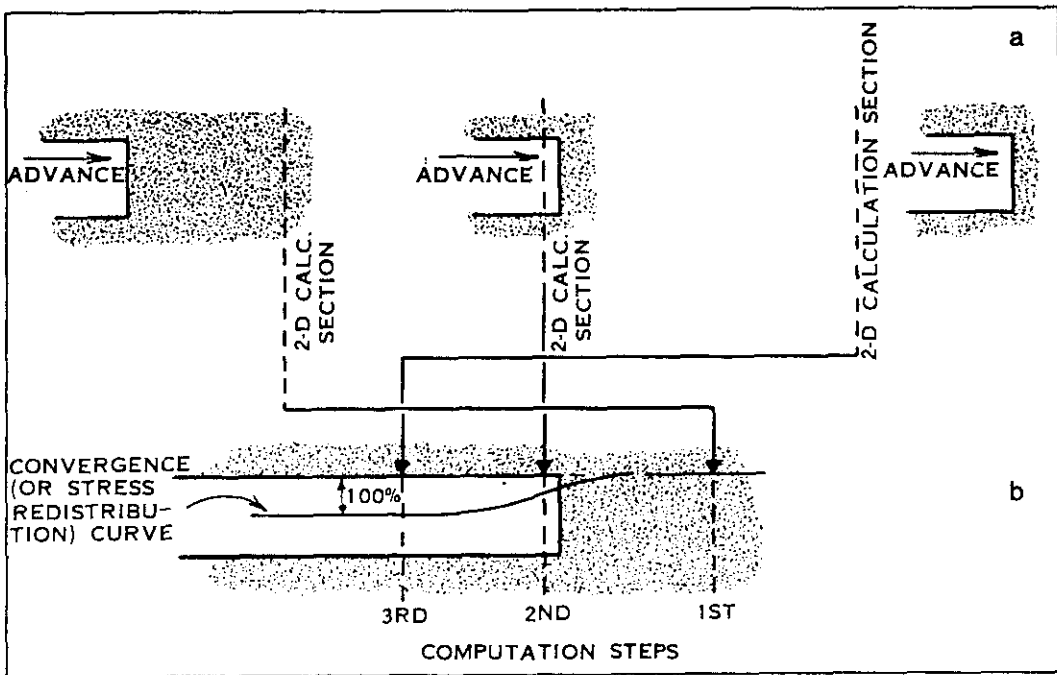


Figure 3 Two-dimensional analysis of three-dimensional tunnel advance. (2)

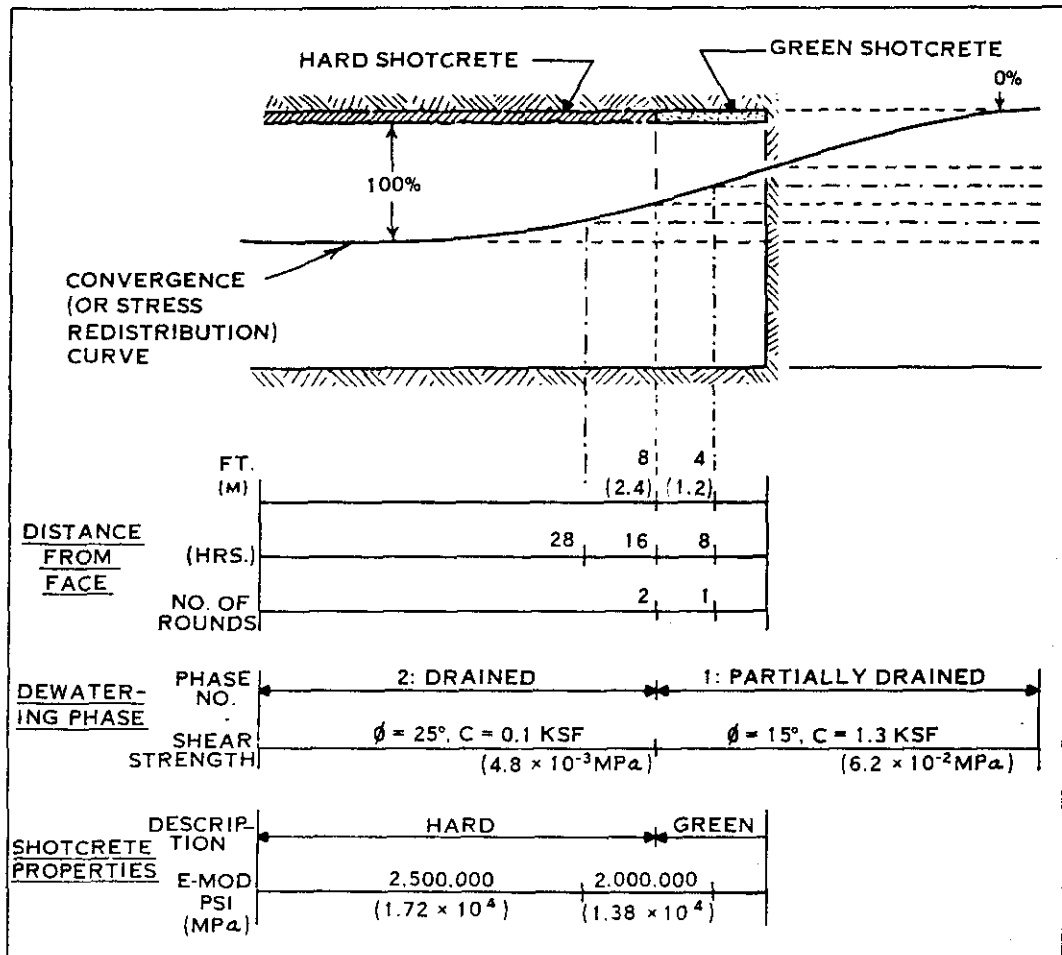


Figure 4 Calculation example - tunnel in soil. (2)

STEP NO.	0	1	2	3	4	5	6
EVENTS	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
LOAD DIS. FACTOR		0.4	0.3	0.3	0.5	0.5	1.0
SHAPE							

- #1 : Initial Stress Condition
- #2 : Upper Half (Excavation)
- #3 : Upper Half (Soft Shotcreting + Rockbolting)
- #4 : Upper Half (Hard Shotcreting + Rockbolting) — 1st Excavation
- #5 : Lower Half (Excavation)
- #6 : Lower Half (Hard Shotcreting + Rockbolting) — 2nd Excavation
- #7 : Invert (Excavation) — 3rd Excavation

Figure 5 Load distribution factors according to construction sequence

3. 원지반의 초기응력 및 경계조건

본 해석대상의 터널이 위치한 곳에 작용하는 초기응력 중 수직응력($\sigma_v = \gamma \cdot z$)은 깊이 에 따라 증가하는 것으로 가정하였으며 이 식을 사용하여 지반의 자중에 대한 영향을 고려하였으며, 수평응력($\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v$)을 구하기 위한 측압계수 K_0 는 예제에서 주어진 물성치를 그대로 적용하였다.

예제에서 주어진 터널단면은 그림 6과 같이 좌·우대칭 단면이므로 반단면만 해석하였으며, 좌·우경계면 및 하부경계면은 그림 7과 같이 롤러(roller)로 경계조건을 설정하였으며 주어진 조건에 따라 각 층은 잔류토(R.S), 풍화암(W.R), 연암(S.R)으로 되어있다.

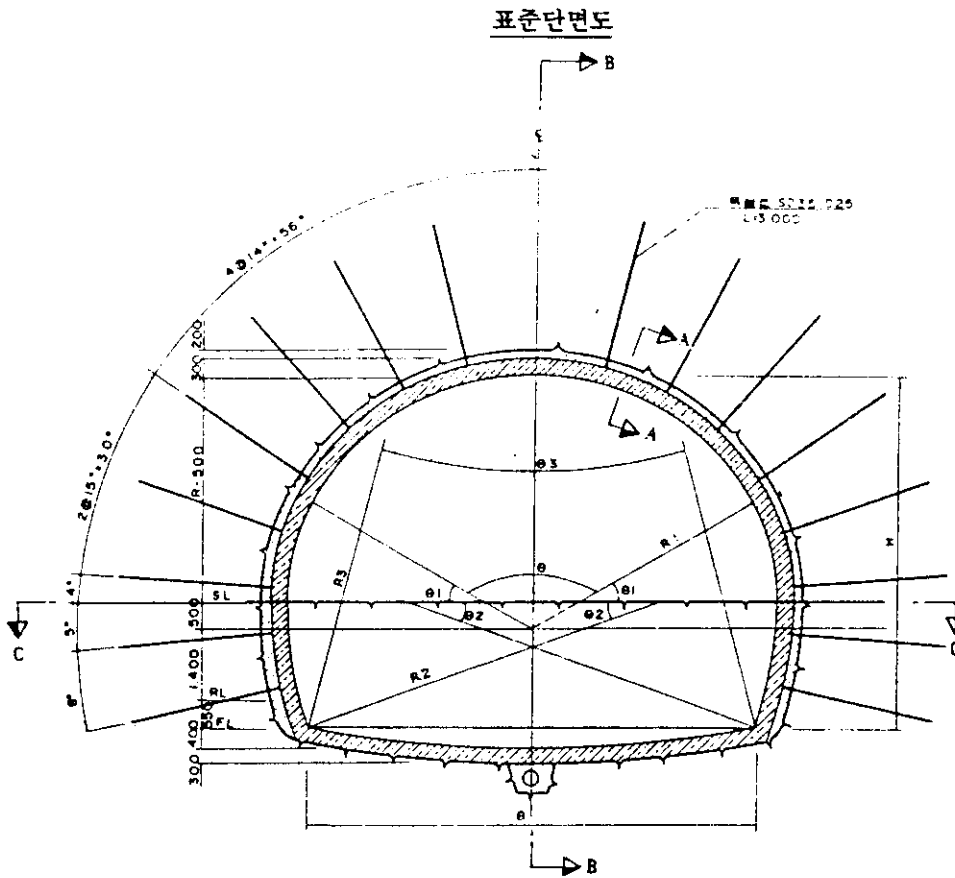


TABLE
(단위: mm)

구분 \ 반경 (m)	150	직 선
H	7080	6840
B	9063	8649
R	5130	4890
THETA	12.0-0-0	12.0-0-0
R1	4130	3890
THETA1	30-0-0	30-0-0
R2	6690	7170
THETA2	21-26-57	19-58-50
R3	25868	23577
THETA3	20-10-40	21-8-18

Figure 6 Typical tunnel section.

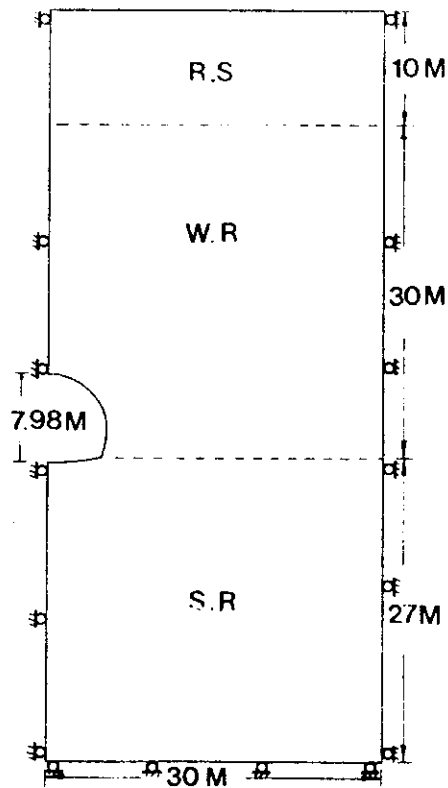


Figure 7 Modelling of tunnel section for analysis.

4. 해석결과

예제에서 주어진 물성치를 근거로 터널단면을 해석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 암반변위

지하암반내에 터널을 굴착하게 되면 그림 8과 같이 터널의 안쪽으로 변위가 발생하며, 최대변위는 상부정점(crown)에서 발생하며 그 값은 11.8mm이다.

(2) 록볼트 축력

본 해석에서 각 단계별 시공완료 후 록볼트에 작용하는 힘은 그림 9 및 그림 10과 같으며, 최대축력은 67.99kN(6.93tf)이다.

(3) 숏크리트의 응력

숏크리트의 모델링은 그림 11과 같이 보요소(beam element)로 하였으며, 여기에 발생하는 최대응력은 그림 12, 13, 14에 의하면 다음과 같다.

- 최대축력 = 487.3kN (49.67tf, 그림 12 참조)
- 최대압축응력 = 24.84kgf/cm²
- 최대전단력 = 43.60kN (4.44tf, 그림 13 참조)
- 최대전단응력 = 2.22kgf/cm² < $\tau_a = 3.62\text{kgf/cm}^2$
- 최대 휨모멘트 = 16.79kN·m (1.712tf·m, 그림 14 참조)
- 최대 휨응력 = 47.94kgf/cm² < $\sigma_{ca} = 84.1\text{kgf/cm}^2$

(4) 지표면 침하

터널시공에 의한 지표면 침하는 그림 15와 같으며 터널중심지점에서 시공완료후 예상되는 침하량은 5.58mm 이다.

한편, 상기와 같이 해석된 굴착완료후의 터널단면에 대한 각 절점에 있어서의 X, Y의 변위는 그림 8과 같고 각 요소의 주응력 및 전단응력의 상태는 각각 그림 16 및 그림 17과 같다.

5. 참고문헌

- (1) Mark Board., Software Summary of Fast Lagrangian Analysis of Continua Version 2.27, Oct. 1989, Report No. NUREG/CR-5430, pages 1-5, Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, U.S.A.
- (2) R.S.Sinha., Underground Structures Design and Instrumentation, 1989, ELESEVIER, pages 105-122.
- (3) K.Y.Lo and B.Lukajic., Predicted and measured stresses and displacements around the Darlington Intake Tunnel, Canadian Geotechnical Journal, vol.21, No.1, 1984, pages 147-165.
- (4) 日本土質工學會., NATM工法の 調査 · 設計から 施工まで, 1986, pages 117-121.

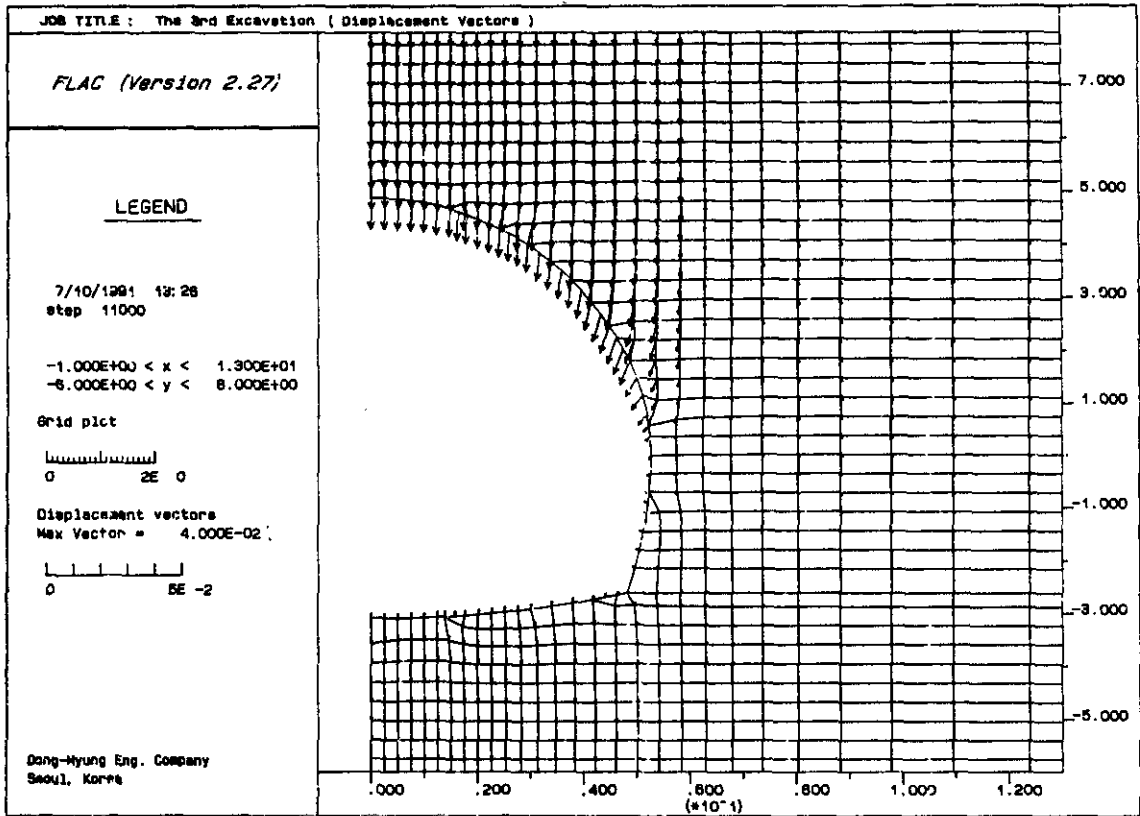


Figure 8 Tunnel convergence after final excavation.

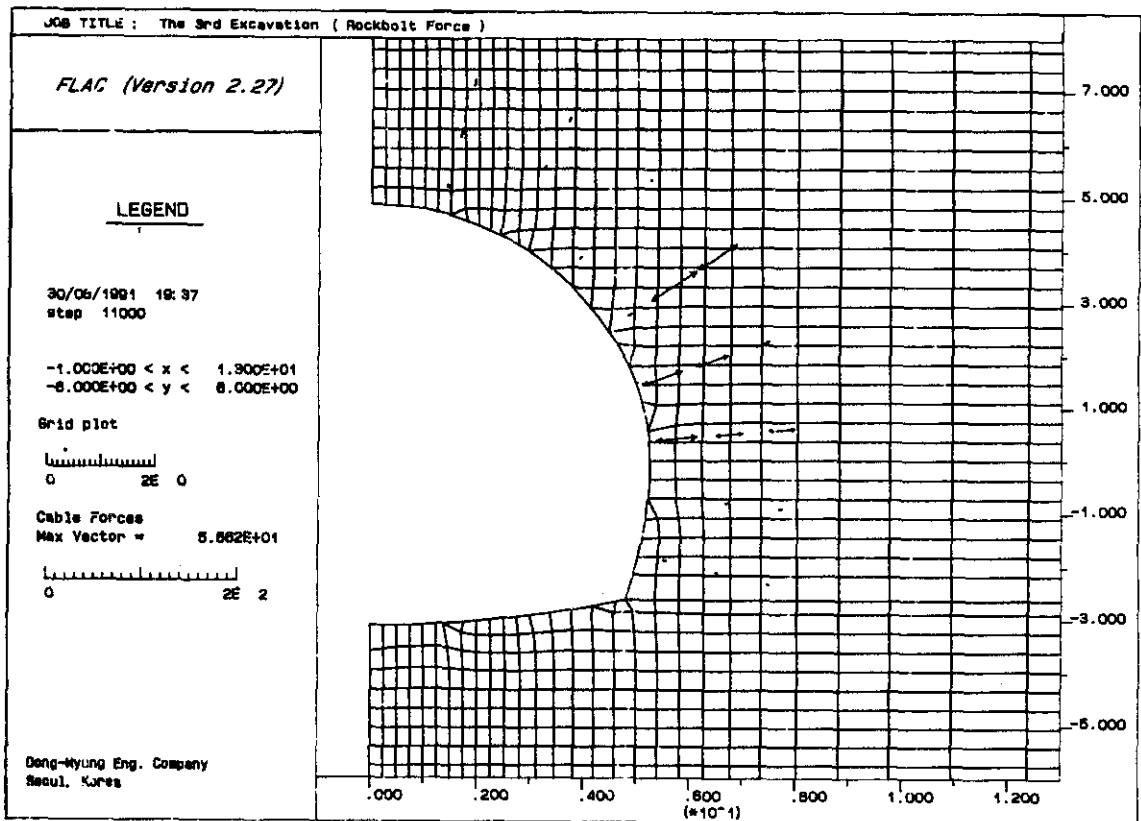


Figure 9 Axial forces of rock bolt after final excavation.

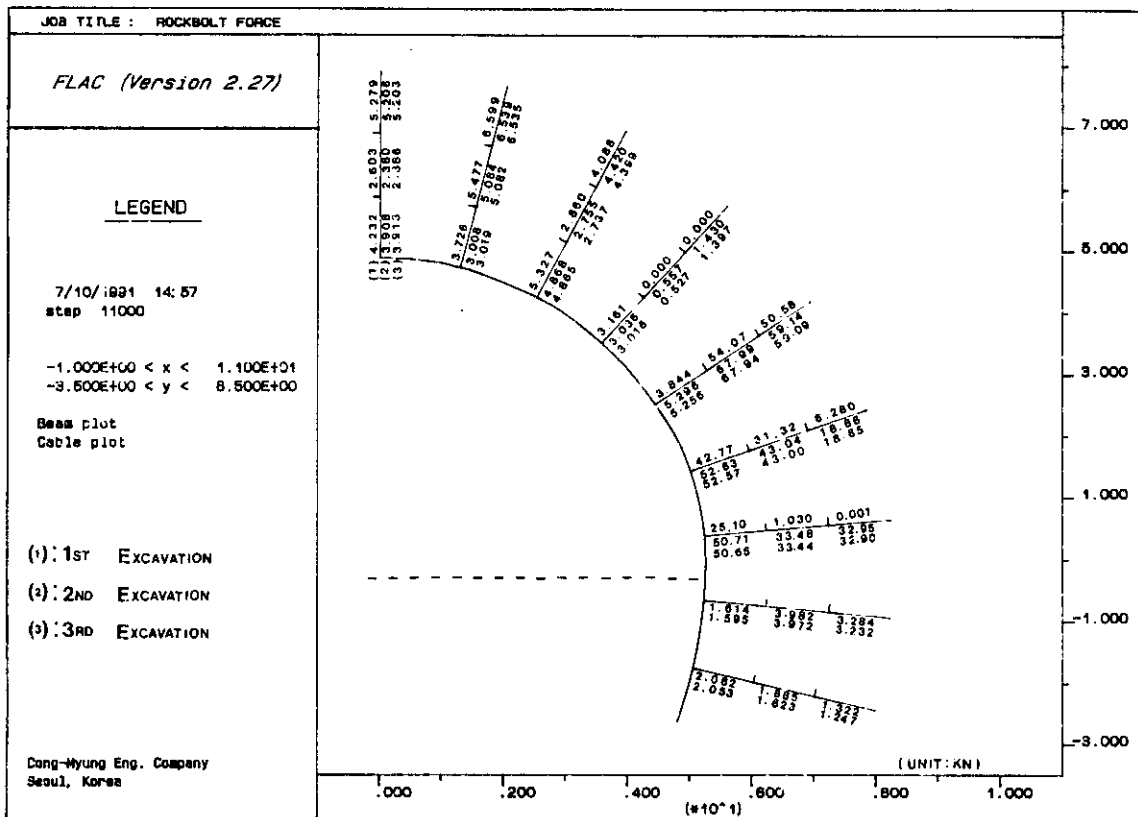


Figure 10 Axial forces of rock bolt according to construction sequences.

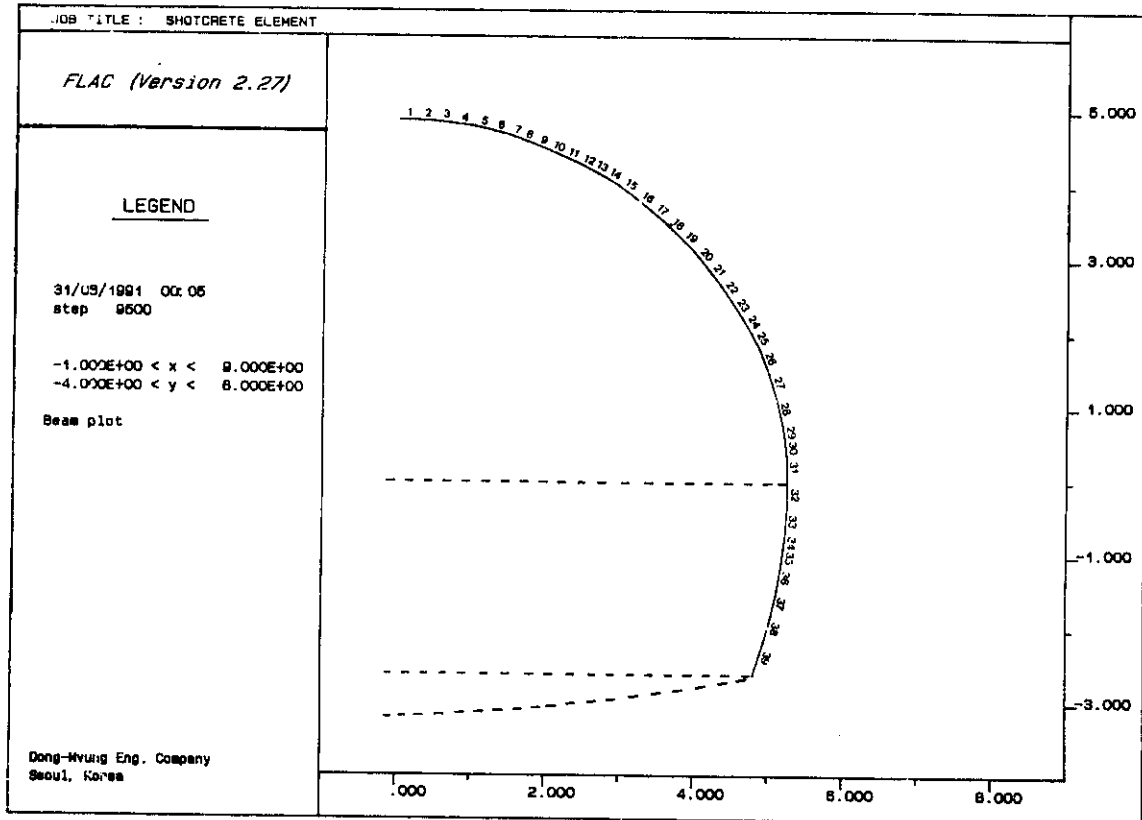


Figure 11 Shotcrete modelling.

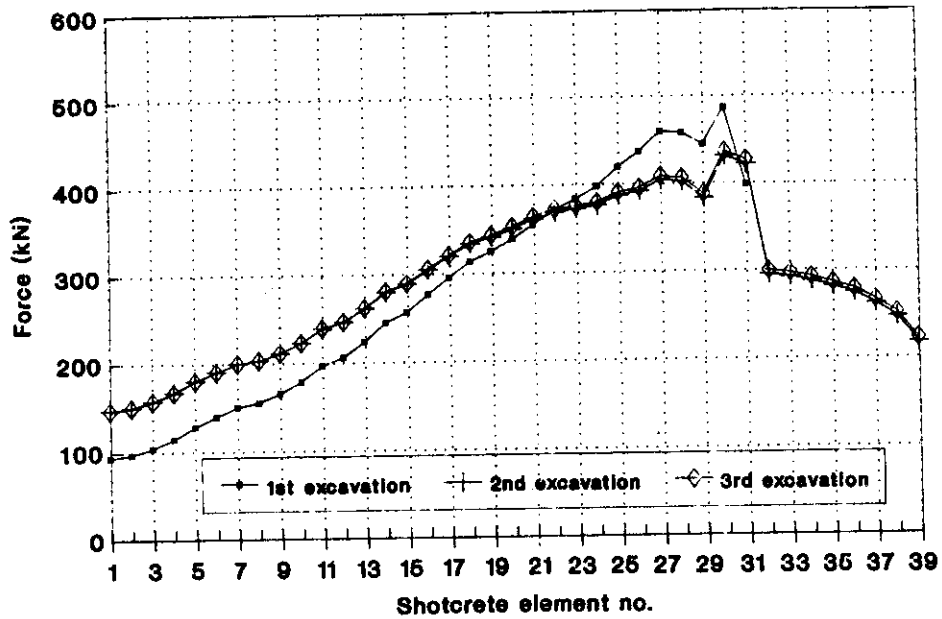


Figure 12 Axial force diagram of shotcrete according to construction sequences.

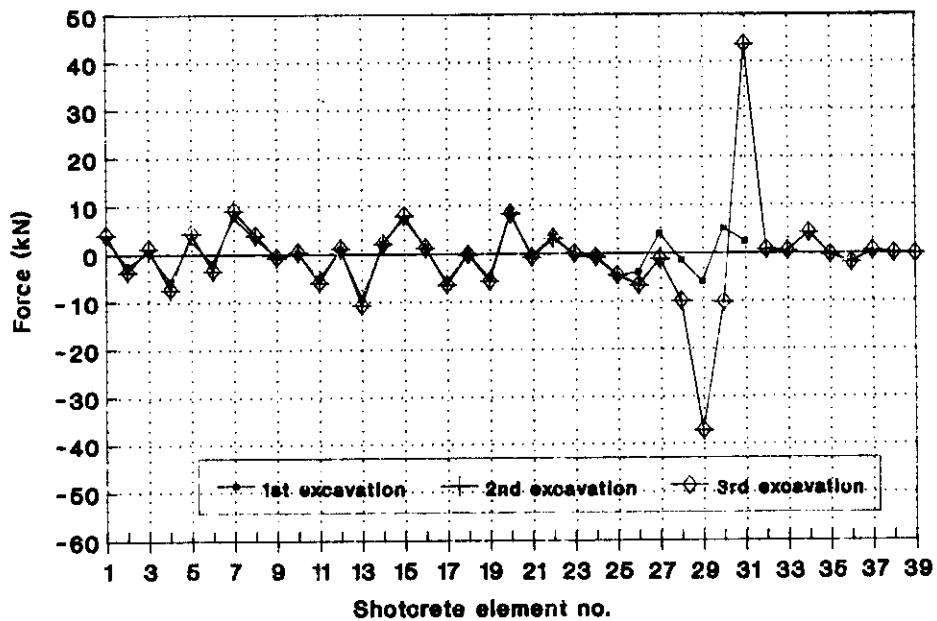


Figure 13 Shear force diagram of shotcrete according to construction sequences.

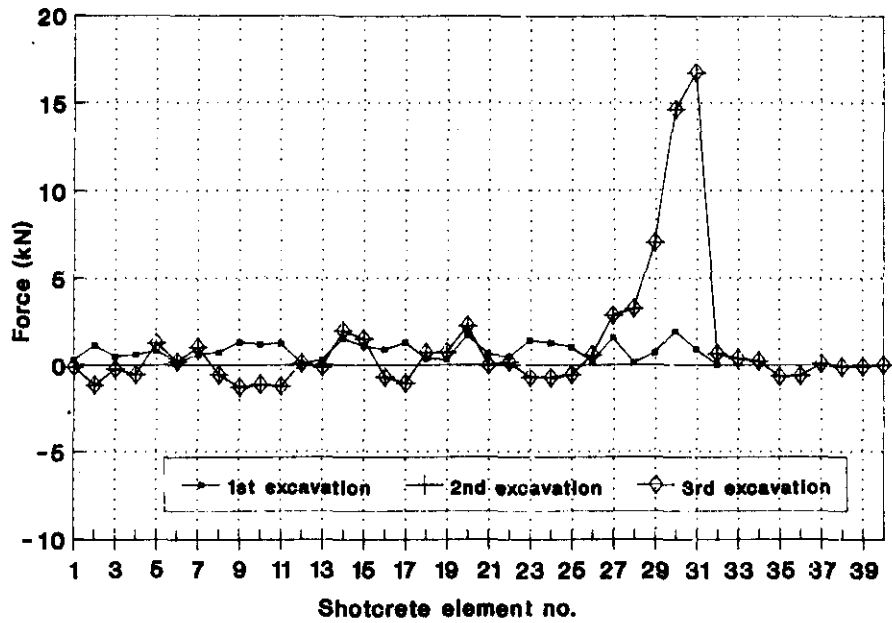


Figure 14 Moment diagram of shotcrete according to construction sequences.

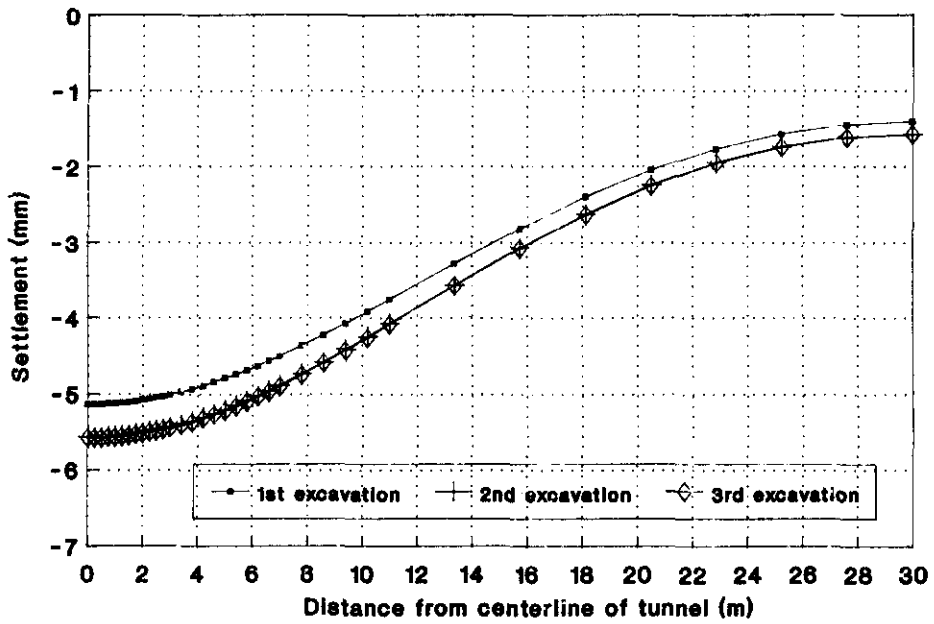


Figure 15 Ground surface settlement according to construction sequences.

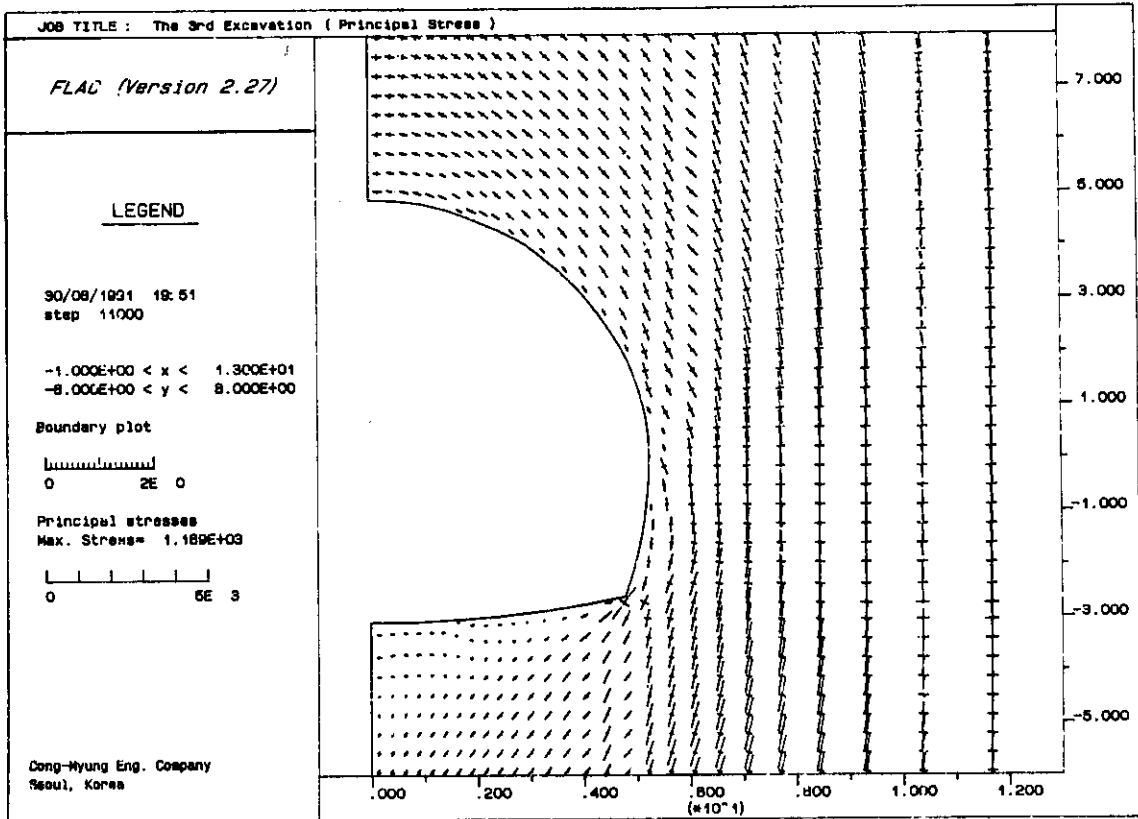


Figure 16 Principal stresses around the tunnel

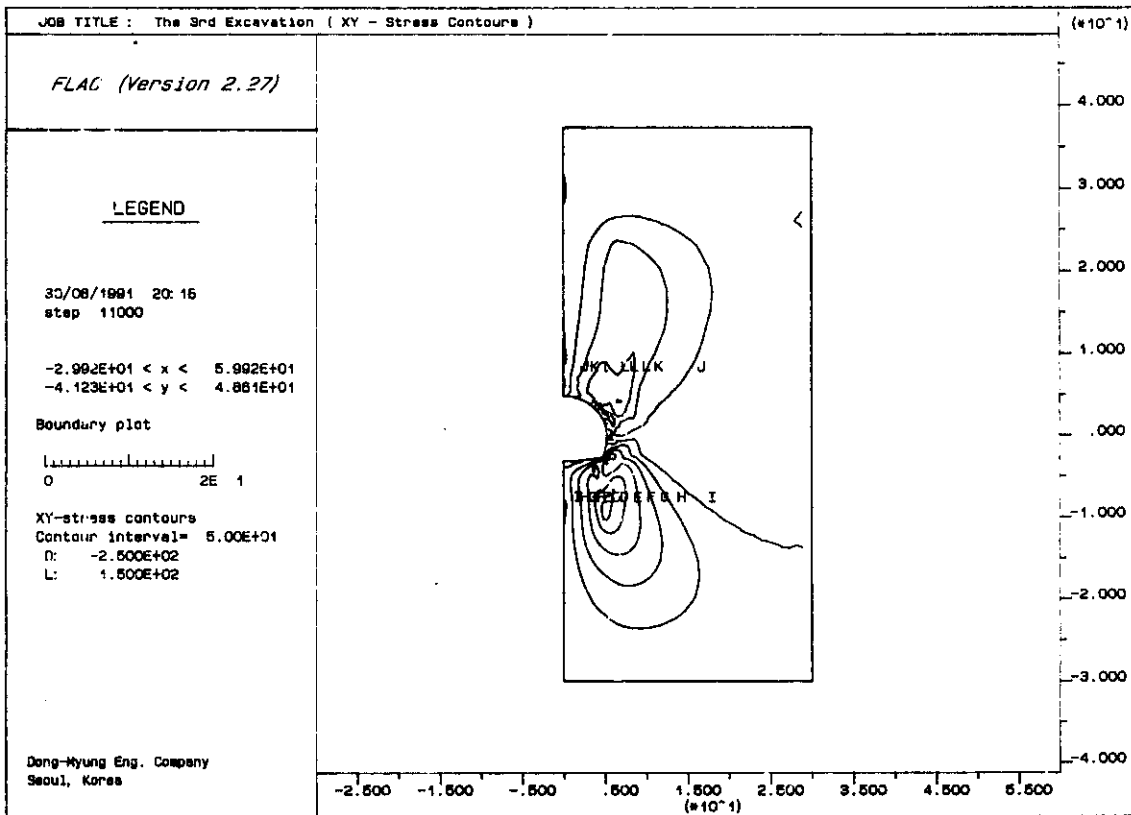


Figure 17 Shear stresses around the tunnel