

## 대구경 Shield TBM공법에 의한 수영강 하저터널 시공계획 및 시공중 발생하는 거동의 공학적 분석

### Construction Plan by Large Diameter Shield TBM Method and Analysis of Deformation on Site Under Soo-Young River

윤현돈<sup>1)</sup>, Hyun-Don Youn, 황규호<sup>2)</sup>, Koou-Ho Hwang, 최기훈<sup>3)</sup>, Ki-Hoon Choi

<sup>1)</sup> 두산건설(주) Shield TBM Project 팀 책임연구원, Research Manager

<sup>2)</sup> 두산건설(주) 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher

<sup>3)</sup> 두산건설(주) 기술연구소 전임연구원, Junior Researcher

#### 개요(SYNOPSIS) :

Doosan Construction & Engineering Co., Ltd is building a railway tunnel beneath the Soo-Young River connecting MinLak Station and Centum City Station, a section 230, subway line 2, Pusan City, Korea. When completed the tunnel will have a finished inner diameter of 6.5m(21.3ft) throughout its total length of 840m(420m = 0.52 miles, Two Single Track Tunnel : 420m+420m).

The ground profile of the face toward shield machine is composed of multi layers, silty clay, clayey gravel, soft rock etc.

This research paper is to predict ground deformation and variation of stresses around tunnel using Hyperbolic model, and to reflect the works on the next shield tunneling project.

And this research paper is analyzed data of measuring instrument (such as settlement gauge, inclinometer, Multiple extensometer, etc.) which is installed along tunnel line for safety of tunnel. For calculations, the finite difference Method is applied.

Backfill grouting material is supposed to have instantly strength of 10kg/cm<sup>2</sup> above, although its strength is available after 24 hours passed.

**주요어(Key words) :** 대구경 Shield TBM, 하저터널, Backfill Grouting, Hyperbolic Model

## 1. 서 론

두산건설(주)는 부산지하철2호선 230공구의 민락역과 센텀시티역을 연결하는 하저터널구간을 Shield TBM을 이용하여 시공 중에 있다.

쉴드가 굴착하는 막장의 지질단면은 복합층으로 실트질 점토, 점토질 자갈, 연암 등으로 구성되어 있다.

본 논문의 목적은 Hyperbolic Model를 사용하여 터널지반의 변위와 응력을 예측하고 다음 설계에 반영하기 위함이다. 그리고 본 논문에서 터널의 안정성을 위해 실시한 계측자료를 분석하였고 수치해석을 위해 유한차분법을 적용하였다.

실제의 Backfill 그라우팅재의 거동은 24시간 후에 10kg/cm<sup>2</sup> 이상의 강도가 발휘되지만 본 논문에서는 Backfill 그라우팅 직후 강도가 발휘된다고 가정하였다.

## 2. Shield TBM 해석 개요 및 현장 조건

### 2.1 Shield TBM 시공시 지반 거동 해석 개요

아래 그림.1에서와 같이 Shield Machine이 굴진한 후 여굴이 발생한 공극에 충전된 Backfill 재의 28일재령 일축압축 강도는  $20\text{kg/cm}^2$  이상이나 아래 표.1 에서와 같이 Backfill 재가 충전된 후에 일정시간이 경과해야하므로 본 논문에서는 설계시 기준강도 28일 물성치 기준을 적용하지않고 24시간 경과시 발생하는 물성치를 적용하여 Hyperbolic Model을 이용해 FDM으로 수치해석하였다.

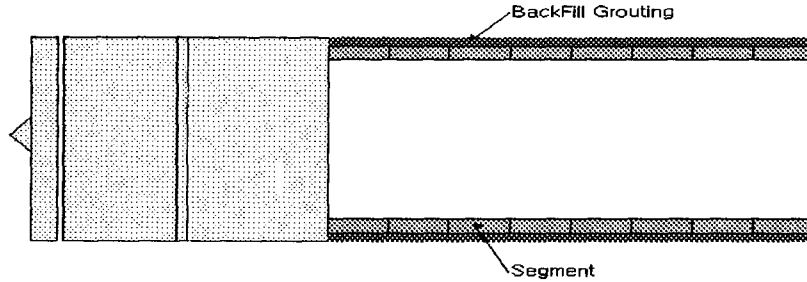


그림 1. Shield Machine 굴진 후 Segment 조립 및 Backfill 재의 충전

표. 1 Backfill 재의 일축압축시험 강도 (양생온도  $20^\circ\text{C}$  기준)

경과시간	일축압축강도( $\text{kg/cm}^2$ )
1시간	0.5 이상
24시간	10.0 이상
7일	15.0 이상
28일	20.0 이상

### 2.2 현장개요 및 지반조건

#### 2.2.1 현장개요

본 공사는 지하철2호선 건설공사로 수영강 민락동 ~ 해운대구 우동간을 연결하는 총연장 2323.4m의 지하철터널로 420m의 수영강 하저통과 터널공사를 포함하고 있으며 그 개요는 다음과 같다.

- ▶ 공사위치 : 부산광역시 수영구 민락동 ~ 해운대구 우동간 주거지역
- ▶ 규 모 : 총연장 - 2323.4M (민락역, 센텀시티역, 부산시립미술관역 3개소 포함)
- ▶ 공사기간 : 1995년 5월19일 ~ 2002년 5월

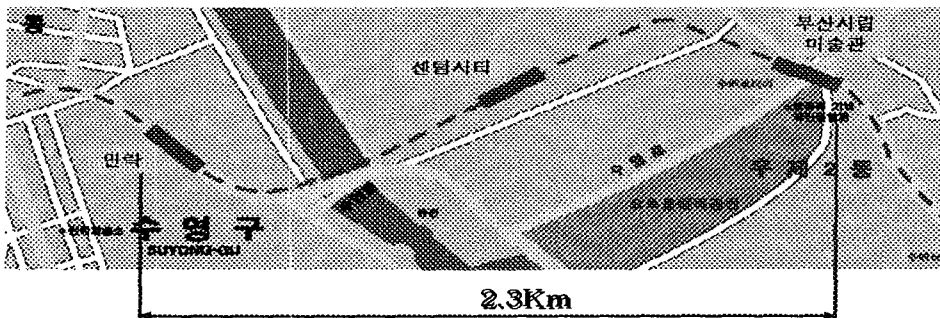


그림. 2 부산지하철230공구 평면도

## 2.2.2 하저터널구간 개요

수영강 Shield터널 상행선 우측 3.15m 지점에 강관상수도관(D1350mm)이 노선과 평행하게 통과하고 있고 선단지지 H-Pile의 수영가교와 수영교가 그 우측으로 인접하여 통과하고 있어 주변지장물에 미치는 영향을 고려하여 최대한 지반 교란없이 시공해야 하는 난공사 구간이다.

- ▶ 공사 명 : 부산지하철 230공구 2호선 2단계 (수영강 하저통과 터널 공사)
- ▶ 터널연장 : 총연장 840m(420m+420m) 단선병렬 터널
- ▶ 터널직경 : 외경 7.1m (내경 6.5m)

## 2.2.3 지반조건

Shield 터널공사에서 지반조건은 Shield TBM의 설계, 굴진율, 공기 등에 밀접한 관계가 있기 때문에 상세한 지반조사의 중요성은 매우 크다. 당 현장에서 하저터널 구간의 상세한 토질특성을 조사하기 위해 하저터널구간에는 20m 간격으로 시추조사를 실시하였다.

Shield 터널현장의 지반조건은 전 구간이 그림. 3과 같이 모래층, 점토 또는 실트층, 점토자갈층, 연암 또는 경암층의 4가지 종류의 복합지반을 형성하고 있다.

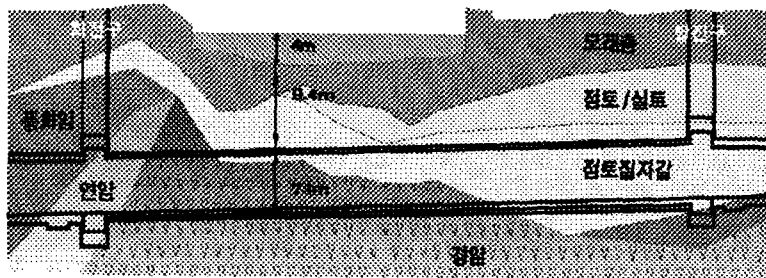


그림. 3 수영강 하저터널구간 종단면도

## 3. 쉴드 터널 굴착시 지반 및 Backfill재의 거동

### 3.1 지반 변형의 원인

쉴드기가 굴진할 때 지반 변형의 원인은 크게 나누어 다음의 3가지로 요약될 수 있다. 첫째, 쉴드기 통과전 (Face loss), 둘째, 쉴드기 통과시 (Shield loss), 셋째, 쉴드기 통과 직후(Tail loss)에 발생된다. Face loss는 CutterHead와 막장에서 발생하는 지반변형으로 막장에서 공동부 출현, 액상화현상 발생, 복합지질굴착시 Blow-In현상 또는 Blow-Out현상에 의해 발생된다. Shield loss는 굴착경과 쉴드기외경 차이에서 발생하는 지반변형이다. Tail loss는 지반과 Segment 외경 차이에서 발생하는 변위로 이를 최소화하기 위해 Backfill 재가 주입된다.

### 3.2 지반변형에 따른 하중 변화와 Backfill 재의 응력변화

#### 3.2.1 Backfill재 주입의 목적

일반적으로 Backfill재 주입은 ① 원지반붕괴에 의한 지반침하의 방지, ② 토압, 쉴드추진압을 세그먼트에 균일하게 전달, ③ 지수효과, ④ 주입후 초기강도의 확보, ⑤ 쉴드기 굴진시의 지반반력의 확보, ⑥ 세그먼트의 초기강도를 목적으로 주입되지만 제일 중요한 목적은 지반 침하 방지이다.

당 현장의 Shield TBM의 경우 세그먼트 외경과 쉴드기 외경 사이의 Backfill 재가 채워지는 Tail Void는 총220mm(상부:110mm, 하부: 110mm)이다.

### 3.2.2 Backfill 재의 배합비

Backfill 재의 배합비는 아래 표.2 와 같이 설계하였다.

표. 2 Backfill 재의 배합(28일 기준강도 : 20kg/cm<sup>2</sup>)

A 액				B 액
시멘트(kg)	벤토나이트(kg)	물(ℓ)	안정제(kg)	특수물유리(ℓ)
310	26	788	4	100

### 3.2.3 지반이완에 따른 Backfill 재의 응력 변화

쉴드기가 지반을 굴착한 직후부터 여굴공간을 통해 지반변형이 일어나면서 이완 하중이 발생된다. 지반의 변위는 Backfill 재의 강도가 일정 값에 이르고 탄성거동을 하면서 그림. 4와 같이 이완하중과 Backfill 재의 응력이 같아지는 점에서 수렴된다.

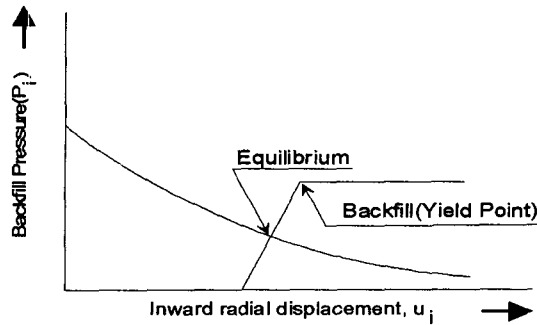


그림. 4 지반변형에 따른 Backfill 재의 응력변화

### 3.3 계측결과 분석

Shield Machine 통과시 터널 주변의 지중 변위의 계측을 위하여 다음 그림. 5와 같이 계측기를 설치하였다.

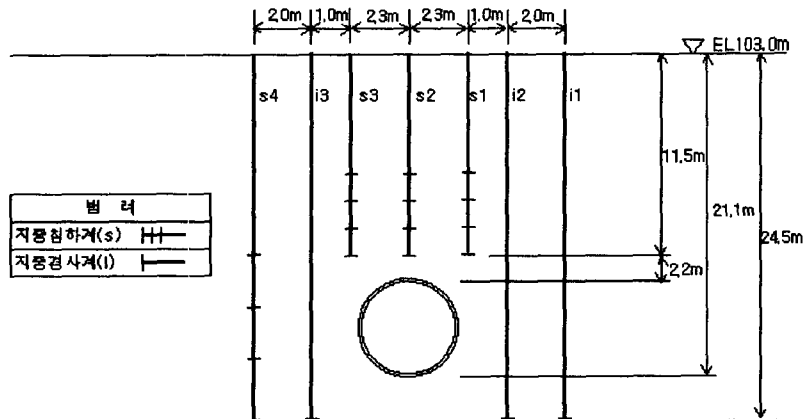


그림. 5 지중변위계 설치 위치 개요도

쉴드기 굴진시 터널주변 지반의 수평, 수직 변위의 최대값은 표. 3과 같고 최대 변형률을 계측자료로부터 분석한 결과는 표. 4와 같다.

표. 3 계측기 측정값(연직, 수평 변위)

단위 : mm

계측종류	계측기 No. (최대변위)				비 고
	1	2	3	4	
지중경사계(i)	-10.4	-5.3	6.9	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 지중경사계의 변위 방향 + : 오른쪽 - : 왼쪽</li> <li>● 지중침하계의 변위 방향 + : 위쪽 - : 아래쪽</li> </ul>
지중침하계(s)	-4	-6	-2	-4	

표. 4 연직, 수평 최대 변형률

단위 : %

Strain	계측기 No. (Maximum Strain)				비 고
	1	2	3	4	
수평 변형률(i)	-6.9	-3.5	4.6	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 지중경사계의 strain 방향 + : 오른쪽 - : 왼쪽</li> <li>● 지중침하계의 strain 방향 + : 위쪽 - : 아래쪽</li> </ul>
연직 변형률(s)	-2.4	-7.2	-2.4	-1.9	

쉴드기 굴진시 변형이 발생하는 지반의 지층은 그림. 7에 나타난 바와 같이 Sand, Silty Sand, Clayey Gravel 이고 N값은 대략 10에서 47사이로 연약한 지반에서 조밀한 지반까지 분포한다.

아래 그림. 6의 (a), (b)는 각각 조밀한 경우와 느슨한 경우의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다.

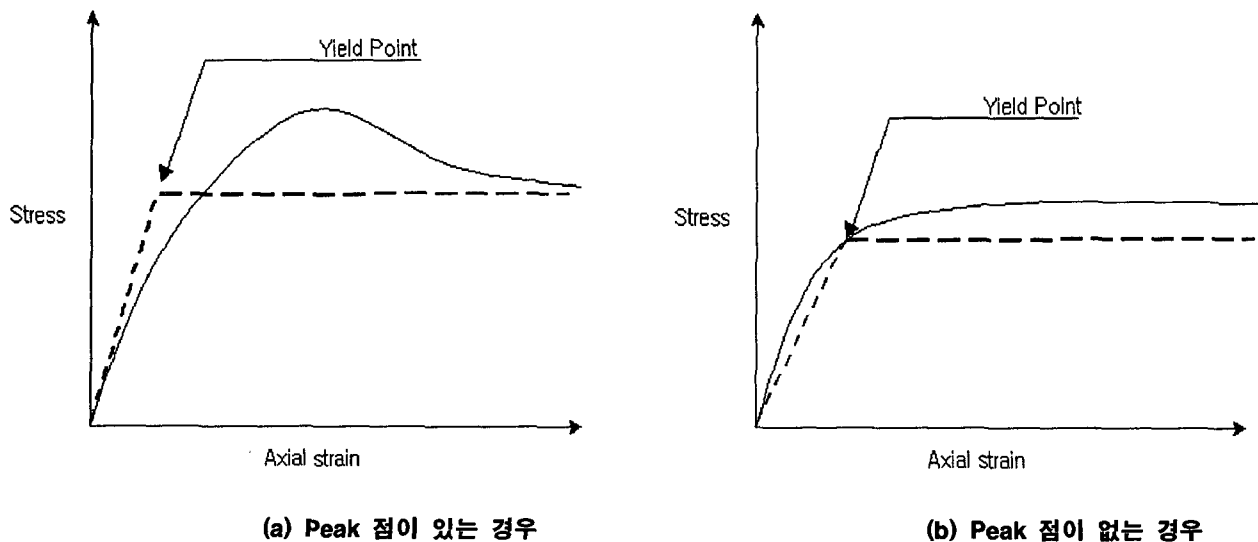


그림. 6 응력-변형률 곡선 Model

쉴드기의 굴착에 따른 지반의 변형률 거동은 대체로 탄성 한계 내에서 거동하는 것으로 볼 수 있고 지반이 비례한도를 넘어가는 경우 그림. 6에서와 같이 항복한 것으로 가정한다.

## 4. Hyperbolic Model에 의한 지반의 거동 예측

### 4.1. Hyperbolic Model 이론

덜드기에 의한 지반굴착시 응력이 해방됨에 따라 터널단면 내측으로 변위가 발생하고 이에 따라 응력의 재배치가 일어난다. 계측결과와 분석에 나타난 바와 같이 지반의 응력-변형거동은 대체로 탄성영역 내에서 일어나므로 해석 Model은 Hyperbolic Model을 이용하였고 응력-변형의 곡선식은 다음과 같다.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1}{a + b\epsilon_1} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_1, \sigma_3$  : 최대 주응력과 최소 주응력,  $\epsilon_1$  : 축변형률

$a, b$  :  $\frac{1}{a}$  (초기 탄성계수;  $E_i$ ),  $\frac{1}{b}$  (극한 주응력 차)

또한 초기 탄성계수  $E_i$ 는 다음 식으로 구한다.

$$E_i = kP_a \left[ \frac{\sigma_3}{P_a} \right]^n \quad (2)$$

여기서,  $P_a$  : 대기압,  $k$  : modulus number,  $n$  : modulus exponent

Mohr-Coulomb의 파괴기준을 이용하여  $E_t$  를 구하면

$$E_t = \left[ \frac{1 - R_f(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2C \cos\phi} \right] kP_a \left[ \frac{\sigma_3}{P_a} \right]^n \quad (3)$$

여기서,  $C$  : 점착력,  $\phi$  : 흙의 내부마찰각

$R_f$  : 파괴비( =  $b(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  );  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 는 파괴시 흙의 축차주응력

## 4.2 수치해석 Model 및 해석결과

### 4.2.1 수치해석 Model

해석 단면 및 지반 물성치는 아래 그림. 7과 같고 수치해석은 그림. 8의 순서대로 수행하였다.

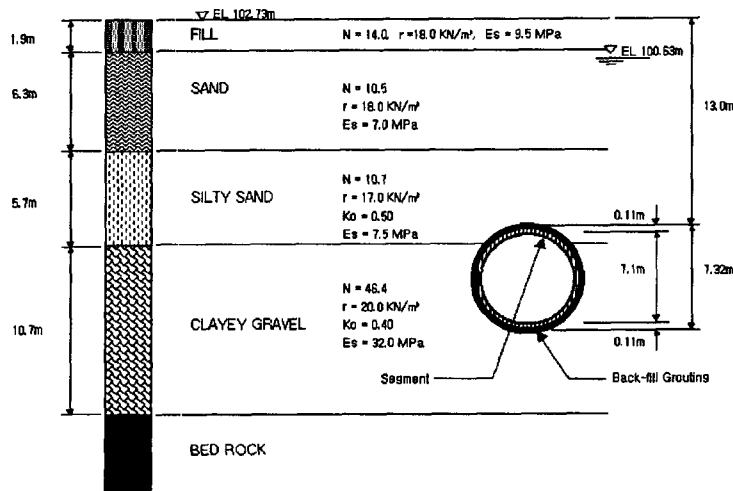


그림. 7 해석 단면 및 지반 물성치

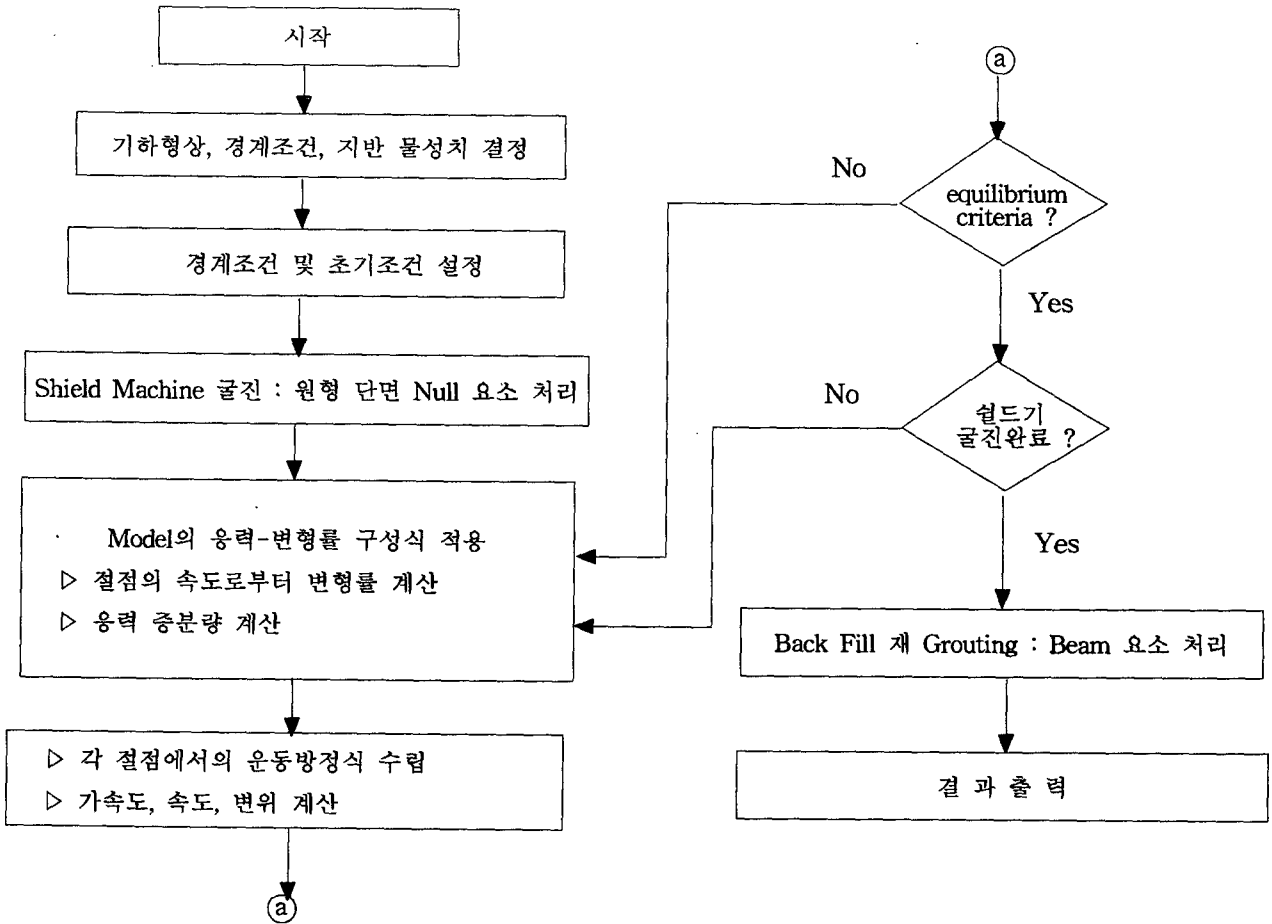


그림. 8 Shield TBM Backfill 재의 거동 해석 Modeling 순서도

해석 모델의 격자망은 그림. 9와 같고 경계조건은 그림. 10과 같다.

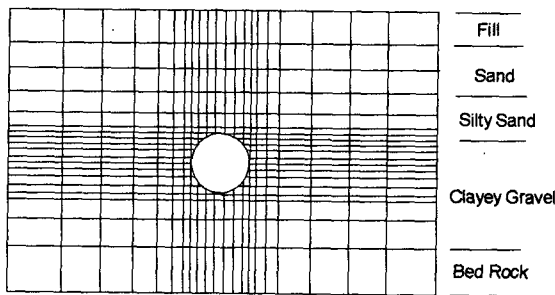


그림. 9 해석지반 모델 격자망

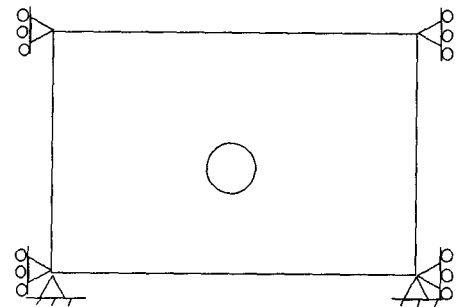


그림. 10 경계조건

#### 4.2.1 수치해석 결과

해석결과 터널굴착 후 Backfill 재가 시공된 후 24시간이 경과한 후의 지반 변위는 그림. 11과 같고 전단응력의 분포는 그림. 12와 같다. Backfill 재가 시공된 후 최대 변위는 천단에서 발생되었고 변위량은 5.2mm로 나타났다. 전단응력은 그림. 12에서와 같이 Key Segment가 위치한 상부에서 발생하였으며 1.2kg/cm<sup>2</sup>으로 나타나 24시간 경화된 Backfill 재는 터널의 내공 변형에 따른 전단응력의 증가에 대해서

안전한 것으로 판단된다.

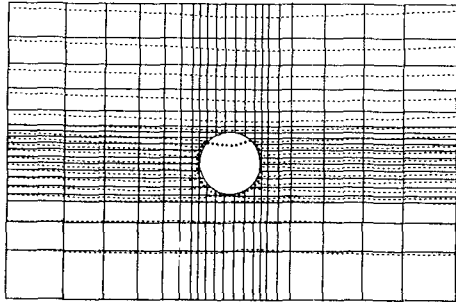


그림. 11 해석결과 : 변위

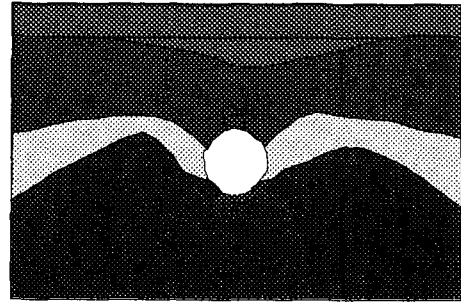


그림. 12 해석결과 : 전단응력분포도

## 5. 결 론

샐드기 굴진시 Segment 외측의 여굴부분에서 Backfill재가 충전되기 전에 변형이 발생한다. 본 논문에서는 굴진시 지반의 변형이 발생된 후에 Backfill재를 충전시켜 지반의 안정성을 모델링하였다. 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 샐드기 굴진후에 Backfill재를 충전시키고 24시간이 경과한 후의 지반변형은 터널천단에서 최대 발생되었다.
- 2) 샐드기 굴진후 터널주변 지반의 최대 전단응력은 터널상부와 하부에서 발생하였다.
- 3) 샐드기 굴진후의 터널주변 지반의 지중변위는 계측결과 최대 11mm 이하로 미소한 변위가 발생하는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. E. Hoek, P. K. Kaiser, and W. F. Bawden(1995), "Support of Underground Excavations in Hard Rock", A. A. Balkema, Netherlands.
2. Fujita and Keiichi(1990), "Tunnelling In Soft Ground In Urban Areas", First Korea-Japan Joint Geotechnical Seminar, Seoul, Korea, pp.9~23.
3. J. Inose, M. Nakajima and H. Nakamura(1992), "Ground settlement accompanying construction of large cross-section shield tunnels in Tokyo", Towards New Worlds in Tunnelling, Rotterdam, pp.173~180.
4. J. Inose, H.Irie and S. Saitoh(1992), "Construction of large cross-section shield tunnel directly below extremely large building in Tokyo", Towards New Worlds in Tunnelling, Rotterdam, pp. 173~180.
5. John O. Bickel, Thomas R. Kuesel, and Elwyn H. King(1996), "Tunnel Engineering Handbook", Chapman & Hall, NewYork, pp. 97~121.
6. Murray Malott(1999), "Sheppard Subway Twin Tunnels Project", Rapid Excavation and Tunneling Conference, Orlando, Florida, pp. 883~895.
7. S. Michael Feroz, Paul Gribbon, and Jan Rosholt(1999), "Columbia Slough Consolidation Conduit, A Soft Ground Tunnel, Portland, Oregon", Rapid Excavation and Tunneling Conference, Orlando, Florida, pp. 865~882.