

## Taiwan의 Pinglin 터널에서의 Squeezing 거동 분석 사례 연구 A case study on squeezing behavior of Pinglin tunnel in Taiwan

윤일중<sup>1)</sup>, Il-Joong Yun, 류기정<sup>2)</sup>, Ki-cheong Yoo

1) 한진중공업 윤일중 과장 Manager, Hanjin Heavy Industries & Construction

2) 한진중공업 류기정 상무 Managing Director, Hanjin Heavy Industries & Construction

**SYNOPSIS** : A case study deals with Squeezing behavior under tunneling. Squeezing stands for large time-dependent convergence during tunnel excavation. Squeezing can occur in both rock and soil as long as the particular combination of induced stresses and material properties pushes some zone around the tunnel beyond the limiting shear stress at which creep starts. Under squeezing rock conditions, If the support installation is delayed the rock mass moves into the tunnel and a stress redistribution takes place around it. On the contrary, if deformation is restrained, squeezing will lead to long-term load build-up of rock support. This paper shows analysis case mutually with monitoring and numerical analysis result of squeezing behavior of Pinglin tunnel in Taiwan.

**Keywords** : Squeezing behavior, stress redistribution, monitoring, numerical analysis

### 1. 서 론

터널 굴착시 creep이 시작된 지반은 한계전단강도를 초과되면 굴착으로 유발된 응력과 지반특성의 특별한 조합에 의해 터널 주변 지반에 squeezing이 발생한다. Squeezing은 항복과 시간의존성과 관계가 있다. 지보가 지연된다면 암반은 터널 안쪽으로 이동하고 응력의 재분포가 터널주변에 발생한다. 반대로 변위가 억제된다면 Squeezing은 암 지보의 증가 하중을 오랫동안 유지할 것이다. 일반적으로 암석의 압축응력이 암석의 일축압축강도의 1/2 이상이 되면 Creep 현상이 나타나는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 암반은 그 종류에 따라 암반이 받고 있는 응력의 크기에 따라 시간의존성 거동을 할 수 있다. 시간의존성 거동의 대표적 현상은 Swelling과 Squeezing으로 구분된다. Swelling 현상은 단순히 암석이 팽창하므로써 체적이 증가하여 터널 지보재에 하중을 증가 시키는 거동을 말한다. Squeezing 현상은 암의 체적팽창을 발생시키는 것이 아니라 시간 의존적 거동으로 인하여 터널 지보재에 하중을 증가시키는 현상을 말한다. 다시 말하면 Squeezing 암석은 터널주위에서 발생하는 시간 의존적 전단거동으로 한계 전단응력을 초과하여 Creep과 같은 현상이 나타나는 것을 말한다. 특히, 대심도 터널에서는 과지압이 발생되고 이로 인한 현상으로는 시간에 따른 관상이탈(Slabbing), 암편탈락(Spalling)과 찢어짐 소리(Popping)현상과 같은 취성파괴와 시간 경과에 따라 이완영역이 점점 확대되어 가는 Squeezing 현상이 나타난다. Squeezing 현상이 나타나면 암석의 변형율이 과도하게 되어 암석은 점착력을 상실하게 되고 터널 지보재에 하중을 가중시키는 거동을 한다. 본 사례는 굴착심도가 평균 400m 이상의 대심도 터널인 Taiwan의 Central 산맥을 가로지르는 Pinglin 터널에서 나타난 Squeezing 거동의 특성과 터널심도와 암반분류에 의한 squeezing 판단기준, 계측 및 수치해석 결과를 상호 비교한 사례를 설명하고자 한다.

## 2. Pinglin 터널 현황

### 2.1 굴착 개요

Taiwan의 Central 산맥을 가로지르는 Pinglin 터널은 평균심도 400m(최대심도 약 720m)인 양방향 터널이다. 터널직경은 11.7m, 터널 중심간 거리는 갭문에서 800m는 대략 42m 이고, 나머지는 60m 이다. 양방향 터널 사이에 직경 5.2m의 Pilot 터널을 선행하여 굴착하였다.

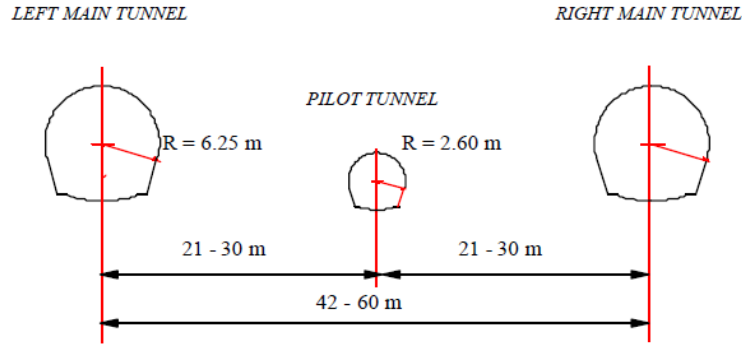


그림 1. Pinglin 터널 횡단면도

Pilot 터널은 처음 520m은 Drill and Blast에 의해 굴착된 후에 TBM에 의해 굴착하였다. TBM 굴착은 시공 중 많은 문제점이 있었다. TBM은 여러 번 막혔고, 단층대를 가로 지를 때는 심각하게 안정성이 문제 되었다. Pinglin 터널은 갭구부를 제외한 전연장을 TBM 굴착으로 계획되어 있었다. 그러나 동쪽 갭문 전방 800m 지점에 단층대가 예견되었다. 따라서 이 구간은 전통적인 방법인 Drill & Blast으로 변경 되었다. 2개의 메인 터널 굴착은 pilot 터널 굴착이 시작된 후에 1년 후에 착수되었다. 갭구부 굴착은 Drill & Blast에 의해 굴착되었다. 막장이 단층에 도달하기 전에 안정성 문제에 직면하는 어려움이 나타났다. 본선 터널에 계측기를 설치하여 터널 변위의 변화를 관측하였다. 주 계측은 200m 간격으로 설치된 지중변위계(multiple borehole extensometer)와 내공변위 측정이다. 반면에 내공변위 위치는 50m 간격으로 설치되었다.

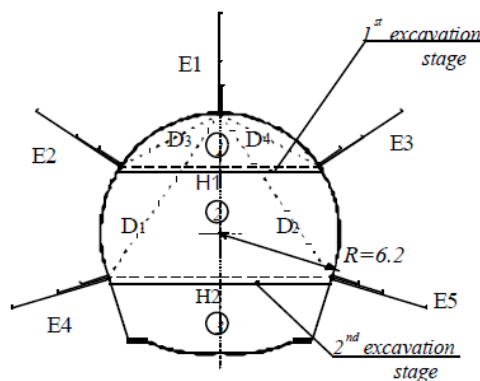


그림 2. Pinglin 본선 터널 계측 시스템(실선은 굴착 결과를 보여줌)

상기 계측계획에 따라 갭문에서 800m 까지 13개의 내공변위계와 3개의 지중변위계가 설치되었다. 계측 결과 좌측 본선 터널을 2개 지점 PK39+972과 PK39+694이 주요 관심 구역으로 지속적인 관측이 필요한 것으로 나타났다.

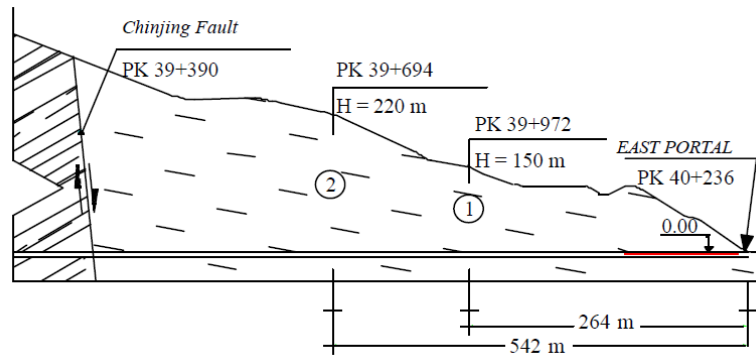


그림 3. 좌측 본선 터널 계측 단면

## 2.2 지반 특성

Pinglin 터널에 나타난 암반은 규질점토암(argillite)이다. 원위치 시험에서 이용 가능한 자료가 없어, 암반강도와 변형 특성을 이용한 경험적 상호관계(Serafim and Pereira, 1983; Hoek and Brown, 1980)에 의하여 지반 물성치가 평가되었다. 무결함에 대한 Hoek-Brown 상수  $m_i$  값은 5를, 포아송비는 동일하게 0.35가 적용되었다. 본 사례 터널에 적용된 물성치는 표 1과 같다.

표 1. 좌측 본선 터널 암반의 지반 특성치

단 면	H (m)	$p_o$ (MPa)	RMR	E (GPa)	$\phi_p$ (°)	$c_p$ (MPa)	$\phi_r$ (°)	$c_r$ (MPa)
1(PK 39+972)	150	3.75	18	1.58	17.4	1.18	5.17	0.34
2(PK39+694)	200	5.5	15	1.33	13.6	1.33	3.63	0.35

## 3. squeezing 거동 판단

### 3.1 Singh et al.(1992)의 squeezing 거동 판단 기준

Singh et al.(1992)은 터널의 심도(H)와 Q 분류의 관계로부터 squeezing 거동을 판단하였다.

$$H = 350 \cdot \sqrt[3]{Q}$$

그리고 Bieniawski (1989)의 RMR에 상응하는 RMR 값을 얻었다. 이러한 값들이 굴착하는 동안 평가되는 Bieniawski (1989) RMR 참 값과 잘 비교되는 지를 분석하였다. 수치적으로 도출된 값을 표 2에 요약하였고, 그림 4의 Q-H 곡선에 표현하였다.

표 2. Singh et al. (1992)에 의한 Squeezing 거동

단 면	H(m)	$Q_{singh}$	$RMR_{singh}$	RMR
1(PK 39+972)	150	0.078	21	18
2(PK 39+694)	200	0.0248	31.5	15

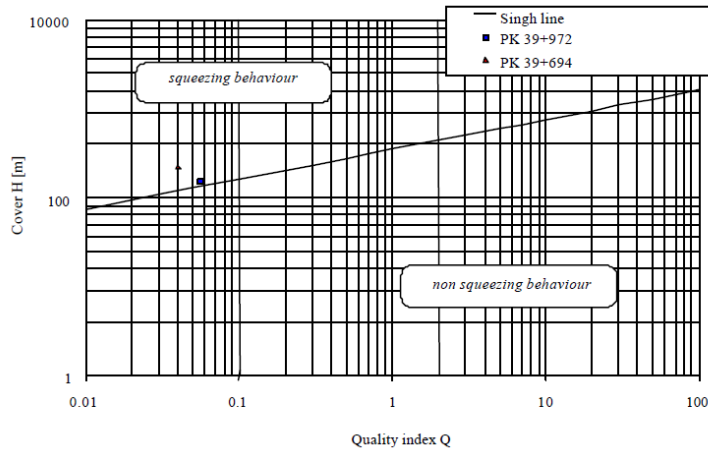


그림 4. Singh et al. (1992) 기준에 따른 Squeezing 거동

### 3.2 Aydan et al. (1993)의 squeezing 판단 조건

Aydan et al. (1993)은 암반의 일축압축강도를 이용하여 squeezing 거동을 판단하였다.

$$\alpha = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma h} < 2$$

여기서,  $\sigma_{cm}$  : 암반 일축압축강도

$\gamma$  : 단위중량

H : 터널 심도

이미 언급한 것과 같이 암 일축압축강도는  $\sigma_c$ 는 0.88MPa이다. 따라서 Hoek-Brown 기준을 사용함으로써 이에 부합하는 암반 강도는 아래와 같다.

$$\sigma_{cm} = \sqrt{s} \cdot \sigma_c$$

여기서 s : RMR index (Hoek and Brown, 1998)에 바탕을 둔 평가

상기 식에 의하면 양쪽 모두의 경우의  $\alpha$  값은 2보다 작게 나타나므로, 대표단면 2개 모두 squeezing 상태로 판단할 수 있다.

표 2. Aydan (1993)에 의한 Squeezing 거동

단 면	H(m)	s	$\sigma_{cm}$ (MPa)	$\alpha$
1(PK 39+972)	150	0.0061	2.7	0.720
2(PK39+694)	200	0.0075	3.0	0.655

Singh et al. (1992) and Aydan et al. (1993)의 경험적 기준에 의하면 상기의 대표 단면 2개 지점에서 모두 squeezing 거동이 나타나는 것으로 분석되었다.

## 4. Squeezing 구간의 거동 분석

### 4.1 계측 결과

상기에서 검토된 squeezing 거동 발생구간(PK 39+976)의 천단침하 및 내공변위 계측 data를 분석하였다. 계측지점은 갱문에서 약 260m 떨어져있고, 토피고는 150m 이다. 암반상태는 5 등급으로 “poor” 상태로 평가되었다. 주 라이닝은 20cm 두께의 mesh 보강 슛크리트, steel sets (HE 100x100 mm) 과 rock bolts (6m)으로 구성되어 있다. 천단부(V1)와 수평내공변위(H1, H2) 계측 결과는 다음과 같다.

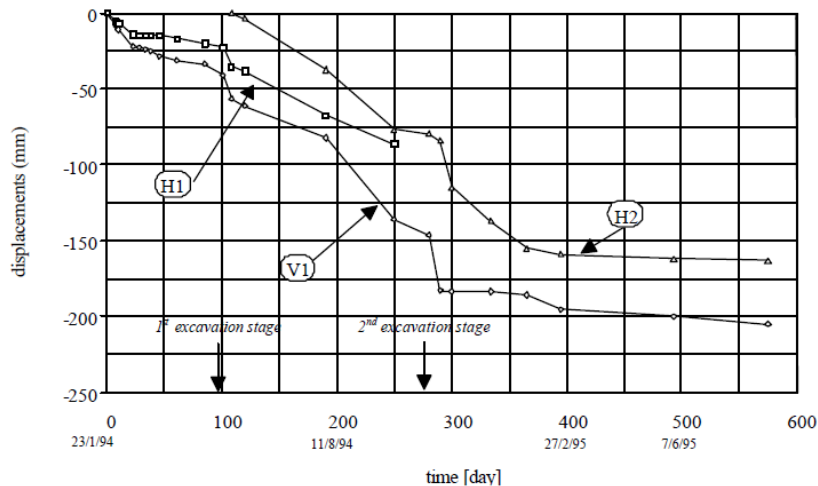


그림 5. squeezing 거동 발생구간에서의 천정부(V1)과 내공(H1, H2) 변위 측정결과

천단부 최대 변위는 215mm로 터널변경( $R=6.25m$ )에 대한 비율은 3.44%로 나타났고, 수평 내공변위 최대 변위는 163mm로 천단부 변위량에 대한 비율은 1.3% 이다. 천단부(crown heading) 굴착시 상기 그림에서와 같이 내공변위의 반응 결과 안정한 상태가 아님을 알 수 있다. H1 수평내공변위 발생 비율은 첫 번째 벤치 굴착시에는 변위가 50mm/month로 진행되다가, 두 번째 벤치 굴착시(첫 번째 굴착 후 6개월)에는 130mm/month로 크게 증가하였다. 이와 같이 첫 번째와 두 번째 벤치 굴착 사이의 내공변위 비율은 시간과 중요한 관계가 있는 것으로 판단된다. 이는 암반의 점탄성(viscous-plastic)거동을 보여주는 것이다. 이것은 시간에 따른 내공변위 측정결과 확인되었다. 상기 그림에서 H1 계측이 중단된 것은 측정 핀의 손상에 기인한 것으로 판단된다.

### 4.2 수치해석 결과

굴착에 대한 본 터널 반응은 2개의 터널 사이 축에 대하여 대칭조건으로 가정한 터널에 의해 분석되었다. Squeezing 거동 발생 구간에 대하여 유한차분법(FAC)으로 수치해석을 실시하여 계측결과와 비교하였다. 해석단면은 축에 대칭이 되는 조건으로 가정하고 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 다음의 2가지 모델을 이용하였다.

- 탄소성 취성 거동(elasto-plastic brittle behaviour)
- Squeezing 거동

squeezing 거동을 묘사하기 위한 응력-변형 모델은 아래 그림 10과 같다.

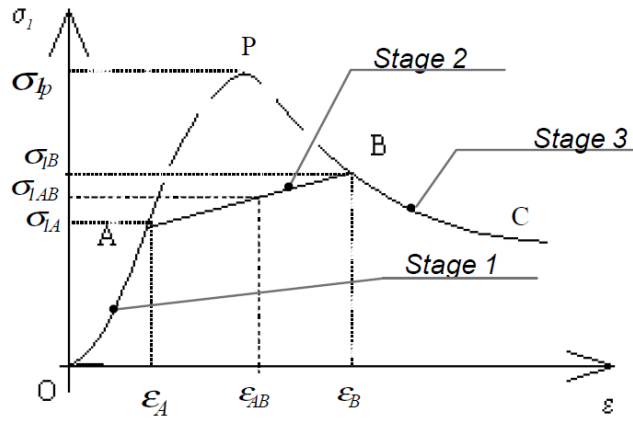


그림 6. Pinglin tunnel의 squeezing 거동 분석을 위해 적용된 모델

이 모델은 Barla and Borgna (1999)에 의해 상세하게 설명되었으며, 이 모델의 거동 3단계는 다음과 같다.

- 1) 선형탄성단계(OA) : 응력 수준이  $\sigma_{1A}$ 일 때 까지 적용되고, 그때에 지반이 시간-의존성 거동을 보여주기 시작하는 단계
- 2) 경 화 단 계 (AB) : Creep 파괴를 초래하지 않는 creep 변형의 최종 위치를 나타내는 경향을 보여주는 단계
- 3) 장기간 단계(BC) : 변형을 연화 거동을 한다.

응력-변형 모델의 수행은 유한차분법인 FLAC program에 의해 가능하다. Mohr-Coulomb 가소성 모델은 상기 모델의 응력-변형의 특별한 요구에 알맞아 채택하였다. 계측 결과를 바탕으로 상기 모델의  $\sigma_A/\sigma_P$  비(比)가 0.64 되도록 하여 수치해석을 수행하였다.

제안된 모델로 수치 해석 한 결과 최대 수평내공변위는 166mm로 실제 계측된 값 163mm와 상당히 일치함을 알 수 있다. 또한, 탄소성 취성 모델 해석 결과 최대 수평내공 변위가 84.2mm로 squeezing 거동 모델보다 작은 값으로 나타났다.

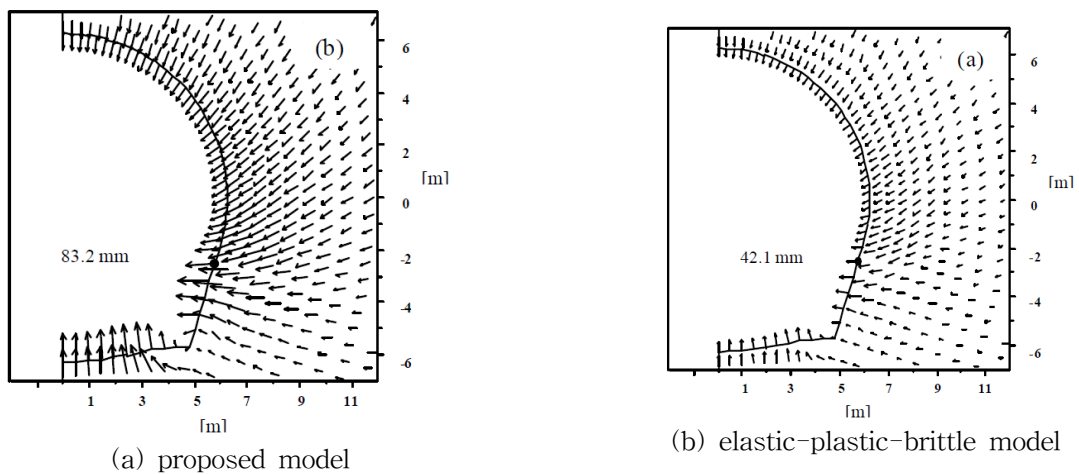


그림 7. 수평 내공변위 수치해석 결과

또한, 소성영역 해석 결과 제안한 squeezing 모델이 탄소성 취성거동보다 소성영역이 2배가 되는 것으로 나타났다.

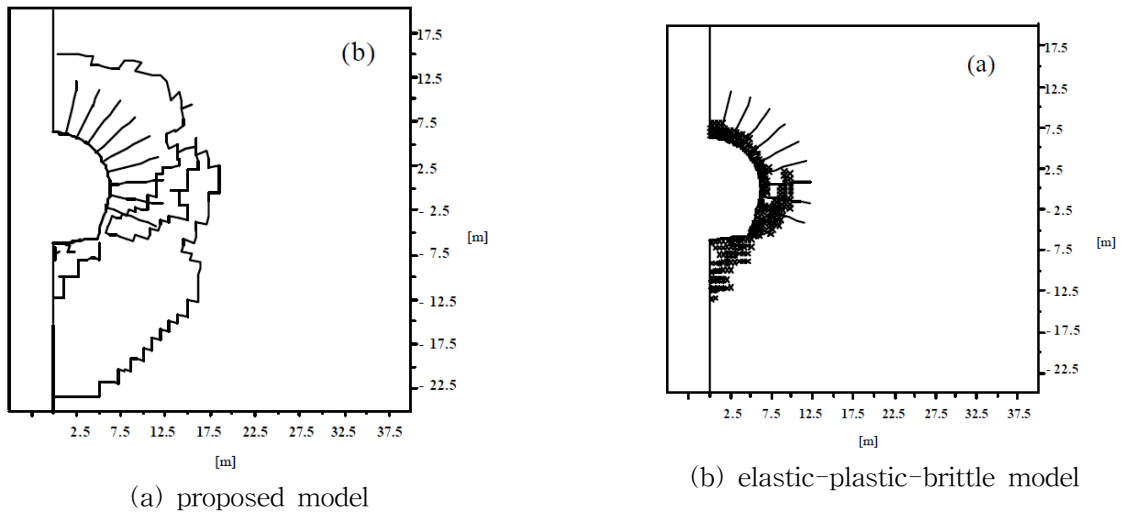


그림 8. 소성영역 수치해석 결과

### 4.3 pilot 터널과 본선터널과의 상호관계 분석

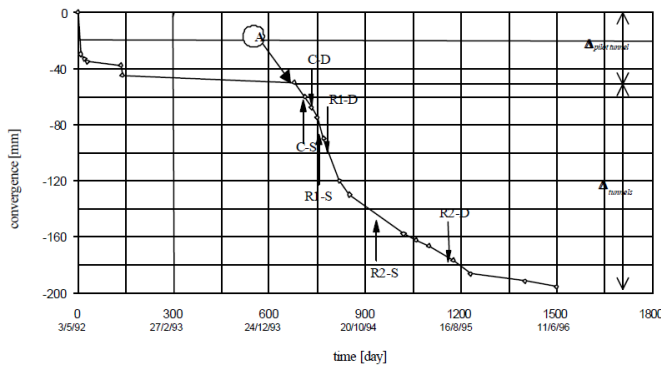
Squeezing 조건에서의 터널 굴착은 탄소성 취성 거동이후에 초과로 변위가 발생함을 상기 수치해석 결과 알 수 있었다. Pinglin pilot 터널에서는 본선터널의 막장이 이미 굴착된 pilot 터널에 접근할 때 라이닝에 손상이 발생하였다.



그림 9. Pinglin pilot 터널 라이닝 손상

이 거동은 squeezing 거동의 가정하에서의 pilot 터널에서 수행된 응력분석에 따르면 두 개 터널 사이의 암반내의 소성 영역의 확장과 관련된다. 이는 pilot 터널 지보에 발생한 손상에 의해 증명되었다.

또한 본선터널 굴착시 pilot 터널에서 측정된 내공변위 분석하여 pilot 터널과 본선 터널 사이의 상호관계를 분석하였다. 아래 그림 10 은 갱문에서 350m 지점의 횡단면에서의 pilot 터널의 내공변위를 보여준다.



C-D: crown 1st excavation stage (오른쪽 본선터널)  
 R1-D: 2nd excavation stage (오른쪽 본선터널)  
 R2-D: 3rd excavation stage (오른쪽 본선터널)  
 C-S: crown 1st excavation stage (왼쪽 본선터널)  
 R1-S: 2nd excavation stage (왼쪽 본선터널)  
 R2-S: 3rd excavation stage (왼쪽 본선터널)

그림 10. 본선터널 굴착에 기인한 Pilot 터널 내공변위

Pilot 터널은 본선 터널 전방 500m에서 굴착되었다. Pilot 터널 굴착에 의한 내공변위 발생 후 시간이 경과함에 따라 내공변위 증가가 심하게 나타났다. 이는 본선터널 굴착시 발생한 소성영역이 확대되어 Pilot 터널에 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 따라서 pilot 터널은 시간의존성 거동을 하였음을 알 수 있다.

## 5. 결론

상기와 같이 squeezing 거동 하에서 얻어진 계측 결과는 탄소성 모델로는 설명하지 못하였다. 일반적으로 연약한 암반에서 squeezing과 같이 시간의존성 거동을 모델을 제안하는 것은 쉬운 일이 아니다. 왜냐하면 시험을 위한 대표시료 획득이 어렵고, 현장 계측을 통한 암반의 유동학적 특성을 얻는 것이 불가능한 것은 아니나 매우 어렵기 때문이다. 대만의 Pinglin 터널에서는 Barla and Borgna (1999)에 의해 제시된 모델을 적용하여 현장 계측결과를 설명할 수 있었다. 수치해석시 탄소성 취성 거동과 비교하여 소성영역이 squeezing 거동 모델에서 더 확장되는 것을 알 수 있었다. 또한 pilot 터널은 본선터널이 굴착되는 동안에 pilot 터널 주위에서도 큰 내공변위가 및 지보재 손상이 발생하였다. 이는 상기 수치해석에서 예측 할 수 있듯이 암반이 시간의존성 거동을 하여 소성영역이 확장되어 선행터널인 pilot 터널의 변형 및 지보재 변형을 야기 한 것으로 판단된다.

국내에서도 대만의 Pinglin 터널과 같은 시간 의존성 거동이 발생되기 쉬운 천매암, 이암, 미사암 등의 연약한 암반이나 단층대 등에서 발생 할 수 있으므로 수치 해석시 탄소성 모델 이외에 탄성-점소성 모델을 이용한 수치해석이 필요 할 것으로 판단된다. 시공시 squeezing은 굴착, 지보기술, 터널 순서와 밀접한 관계가 있다. 지보설치가 지연된다면 암반은 터널내로 이동하고 터널주위에 응력 재분포가 발생한다. 반대로 암반변형이 구속된다면 squeezing은 암반지보 증가 하중을 장기적으로 이끌 것이다. 따라서, squeezing 지반에서는 특히 계측 계획 및 관리가 중요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Giovanni Barla(2001), "Tunnelling under squeezing rock conditions"
2. 이인모(2004), "터널공학의 지반공학적 원리"
3. 최영태, 이대혁, 이희석, 박연준(2005), "과지압 암반내 대규모 지하 유류비축기지 안정성 평가 사례" 한국지구 시스템공학회지 Vol. 42, No. 4
4. NTNU and SINTEF, Dillability Test Method Project Report 13A-P8