

터널의 벤치길이를 중심으로 한 설계변수에 따른 암반거동의 3차원 수치해석

강준호¹⁾ · 정직한¹⁾ · 이정인²⁾

3D Finite Element Analysis of Rock Behavior with Bench Length and Other Design Parameters of Tunnel

Jun-Ho Kang, Jeak-Han Chung and Chung-In Lee

Abstract. Focusing on the bench length, this paper presents the results of 3-dimensional elasto-plastic FE Analysis on tunnels of full face, mini-bench and short bench excavated in weathered rock. Influences of unsupported span, horizontal to vertical stress ratio, thickness of shotcrete on the behavior of rock and support were also studied. Results showed that displacements of mini-bench tunnels responded more sensitively to bench lengths than those of short bench. The effects of bench excavation on upper half displacement increased with longer unsupported span. Horizontal to vertical stress ratio showed a greater influence on displacement and preceding displacement ratio of sidewall rather than those of crown and invert.

Keywords: 3D elasto-plastic FEM, Bench length, Design parameters of tunnel, Unsupported span

초 록. 본 연구에서는 전단면굴착에 가까운 작업 사이클(cycle)로 굴진을 하면서 분할효과를 거두기 위해 적절한 벤치길이를 결정하는 것이 중요한 요소로 판단하여 전단면, 미니벤치, 숏벤치로 풍화암 구간에 굴착한 터널을 모델링하여 이에 대해 3차원 탄소성해석을 수행하였다. 그리고 터널내 암반과 지보재의 거동에 영향을 미치는 주요 요소로 무지보 굴착구간의 길이, 측압계수, 슛크리트 두께 등의 설계변수를 변화시켜가며 암반의 변형거동을 분석하였다. 해석결과 내공변위는 숏벤치보다 미니벤치일때 벤치길이에 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며 무지보길이가 길 때 하반굴착이 상반변위에 미치는 영향이 더 크게 나타나며 상반과 하반측벽에서의 변위차이가 증가하였다. K값의 증가에 따라 천정, 바닥보다 상하반 측벽부에서 변위와 선형변위비의 증가가 훨씬 크게 나타났다.

핵심어: 3차원 탄소성해석, 벤치길이, 터널설계변수, 무지보 길이

1. 서 론

지하암반내 터널의 건설은 국내외에서 해마다 증가하는 추세로 국내에서도 모든 광역시에 지하철이 건설중이거나 계획중에 있고 고속철도터널, 도로터널 등의 시공이 늘어나면서 터널의 안정성 평가는 더욱 중요한 문제로 대두되고 있다. 도심지 터널의 경우 지상구조물과 가까운 심도의 매우 연약한 지반에서도 굴착이 이루어짐에 따라 세밀한 현장측정과 현장조건을 가급적 정확히 모델링한 수치해석이 요구되고 있다.^{1-3,5,6)}

본 연구에서는 전단면굴착에 가까운 작업 사이클(cycle)로 굴진을 하면서 분할효과를 거두기 위해 적절

한 벤치길이를 결정하는 것이 중요한 요소로 판단하여⁴⁾ 전단면, 미니벤치, 숏벤치로 저심도 풍화암 구간에 굴착한 터널을 모델링하여 이에 대해 3차원 탄소성해석을 수행하였다. 그리고 터널내 암반과 지보재의 거동에 영향을 미치는 주요 요소중 무지보 굴착구간의 길이, 측압계수, 슛크리트 두께 등의 설계변수를 변화시켜가며 암반의 변형거동을 분석하였다.

2. 해석모델 및 입력자료

본 해석에서는 3차원 유한요소해석 프로그램인 PENTAGON3D를 사용하였다. 터널의 폭은 10 m, 높이는 8 m인 지하철 복선터널로 미니벤치 굴착의 경우 Fig. 1과 같은 유한요소망을 구성하였다. 기준단면의 전후방으로 터널 폭의 2배까지 절점의 간격을 1 m로 세분하였다. 암반을 나타내는 요소망은 8절점 solid요소

¹⁾정회원, 현대건설 토목사업본부 설계실

²⁾정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

접수일 : 1999년 11월 20일

심사 완료일 : 2000년 10월 26일

를 사용하였다. 요소망을 구성하는 총 절점의 수는 전 단면굴착과 벤치길이가 2 m일 때 무지보 굴착길이가 1 m인 경우 4900개이고 총요소수는 3920개이고, 벤치 길이가 4 m, 6 m일 때는 절점 5096개, 요소 4080개이다. 슛크리트는 4절점 shell요소로 모델링하였다.

경계조건의 경우 측면은 x축(수평)방향 변위, 모델 하부는 y축(연직)방향 변위를 구속하였으며 모델전면과 후면은 z축(터널축)방향 변위를 구속하였다. 해석범위는 터널하부로 터널고의 4배, 측면으로 터널폭의 4.5 배로 하였다. 지반의 항복조건은 Mohr-Coulomb 식을 적용하였다. 연약암반내 시공된 국내 지하철 터널의 기 설계물성치와 암석물성시험 결과를 토대로 Table 1과 같은 입력자료를 사용하였다.

지층은 Fig. 2에 나타낸 것처럼 지표로부터 하부 15 m까지는 토사층, 하부 37 m까지는 풍화암층, 51 m까지는 연암층, 그 이하 11 m는 경암층으로 구분하였다. 터널은 저심도 풍화암층 내에 굴착되며 터널 천단 위치를 지표 아래 21 m로 가정하였다. Fig. 3은 터널 단면에

서의 천단침하, 내공변위, 바닥부 변위가 계산된 절점의 위치를 나타낸다. 상반내공변위는 벤치높이에서 1.5 m 위에서, 하반내공변위는 벤치높이에서 1.6 m 아래에서 측정하는 것으로 하였다.

본 해석에서 고려한 설계변수는 벤치길이, 무지보 굴착길이, 슛크리트의 두께, 측압계수이다. 미니벤치의 경우 벤치길이를 2 m, 4 m, 6 m, 슛벤치의 경우 벤치길이를 10 m, 20 m, 30 m로 설정하였다. 무지보 길이는 미니벤치의 경우 1 m, 2 m로 하였고 슛벤치의 경우 2, 2.5 m의 2가지로 하였다. 슛크리트의 두께는 15 cm, 20 cm, 25 cm로 가정하였고 측압계수는 0.5, 1.0, 1.5의 경우에 대해 해석하였다.

3. 벤치길이에 따른 해석결과

Fig. 4에 벤치길이(L)에 따른 각 지점별 변위를 막장 및 수렴된 구간에 대하여 나타내었다. 막장 변위의 경우 하반 내공변위와 바닥 변위는 하반막장이 도달할 때를 기준으로 하였으며 슛크리트 두께는 25 cm, 측압계수는 1, 무지보길이는 2 m에 대하여 도시하였다.

굴착단면상의 천단변위는 전단면 굴착일 경우 가장

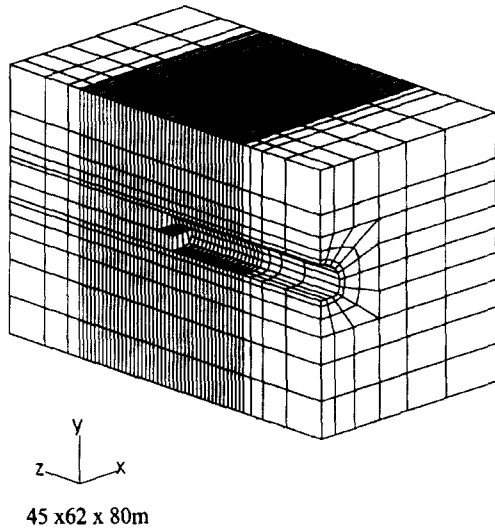


Fig. 1. 3-D finite element mesh for tunnel.

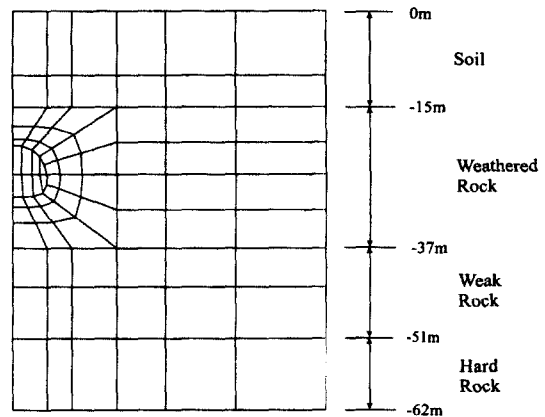


Fig. 2. Profile of finite element.

Table 1. Mechanical properties of ground and shotcrete.

Property	Type	Residual soil	Weathered rock	Weakrock	Hardrock	Shotcrete
Young's modulus (MPa)		20	300	2,000	5,000	10,000
Poisson's ratio		0.33	0.30	0.28	0.25	0.20
Unit weight (t/m ³)		2.0	2.2	2.5	2.7	2.5
Cohesion (MPa)		0.03	0.1	0.3	1	-
Friction angle (°)		20	30	35	42	45

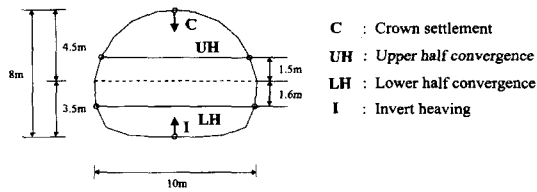


Fig. 3. Position of calculated displacements.

크게 나타나며 2 m일 때 최소이다. 전단면 굴착의 경우 상하반이 모두 굴착되므로 천단부의 침하가 크게 일어나며 이에 비해 벤치길이가 2 m인 경우는 전단면에 비해 11.8%만큼 감소하였는데 이는 하반자체의 지보효과와 굴착단면 크기의 감소로 인한 것으로 여겨진다. 또한 6 m 이상의 벤치에서는 벤치길이가 막장면 전방에서 발생하는 천단부의 선행변위에 그다지 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

상반내공변위는 전단면 굴착시 가장 크고 벤치길이가 증가할수록 지수함수적으로 감소하였다. 하반에 벤치를 남겨두고 굴착이 이루어질 때 벤치의 길이가 길수록 상반측벽에서의 변형이 억제됨을 알 수 있다. 하반내공변위는 미니벤치의 경우 벤치길이가 클수록 변위가 크게 발생하였다. 숏벤치의 경우 벤치길이가 2 m인 경우보다 발생변위가 크지만 6 m일 때보다는 감소하였다.

바닥변위는 숏벤치, 미니벤치, 전단면의 순으로 크게 나타났다. 벤치길이별 변위의 차이가 다른 지점보다 매우 크게 나타나서 L = 10 m인 경우 전단면에 비해 2.8 배나 증가하였다.

Fig. 4(b)는 막장에서 20 m이상 후방에 위치한 단면의 변위로 최종 수렴된 변위를 도시한 것이다. 벤치길이에 관계없이 변위의 크기는 천단부, 상반측벽, 하반측벽, 바닥부의 순으로 나타났다. 이중 바닥부의 변위가 작은 것은 모델의 지반조건에 기인한다.

Table 2와 Fig. 5에 정규화거리(X/D)에 대하여 선행 변위와 최종변위를 나타내었다. 전단면굴착시 선행변위비 및 선행변위는 벤치굴착에 비하여 상대적으로 크게 나타났으며 이는 상하반 구분없이 동시에 굴착되므로 벤치에 의한 지지효과가 없기 때문이다. 미니벤치 및 숏벤치굴착의 경우 각각 벤치길이에 따른 차이는 미소하였다. Fig. 5(b)에 하반내공변위를 도시하였으며 미니벤치의 경우 숏벤치와 달리 막장 근처에서 전단면굴착과 유사한 변형거동을 보임을 알 수 있다.

4. 기타 설계변수에 따른 결과

4.1 무지보 굴착길이에 따른 변화

Table 3은 전단면과 미니벤치, 숏벤치에 대해 지보를 설치하지 않았을 때의 최종변위를 100으로 놓고 무지보 길이가 1 m와 2 m일 때의 최종변위를 상대 비교하여 나타낸 표이다. 숏크리트 두께는 25 cm, 축압계수는 1로 해석하였다.

전체적으로 전단면과 미니벤치 굴착에서 지보로 인한 변위의 억제효과는 상반, 하반, 천단, 바닥의 순서로 나타났다.

전단면 굴착의 경우 무지보 굴착길이가 1 m인 때가

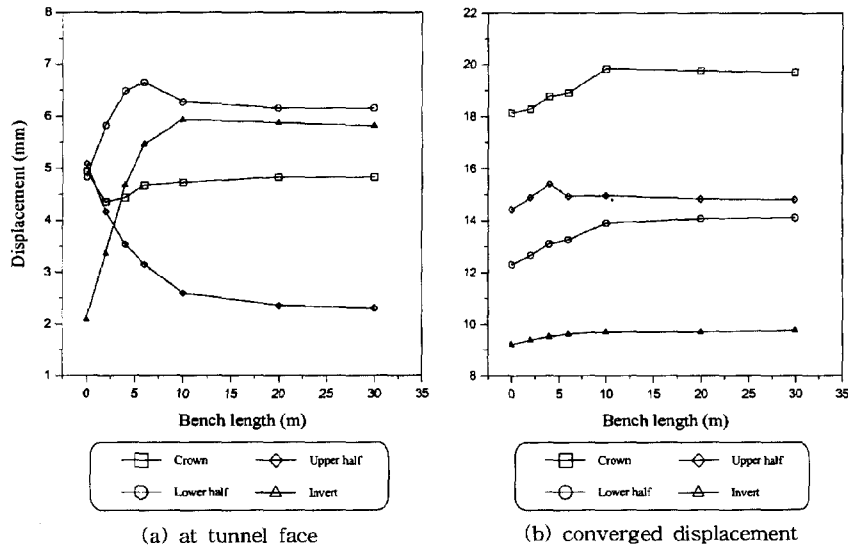


Fig. 4. Variation of displacements with bench length.

Table 2. Preceding displacement & ratio for each model.

Distance from face	Fullface	L = 2 m	L = 4 m	L = 6 m	L = 10 m	L = 20 m	L = 30 m
0 (unit : mm)	4.93	4.35	4.43	4.67	4.70	4.78	4.78
0 (unit : %)	27.2	23.8	23.6	24.7	22.0	22.6	22.6
2D (unit : mm)	18.06	18.15	18.63	18.85	21.17	21.26	21.26

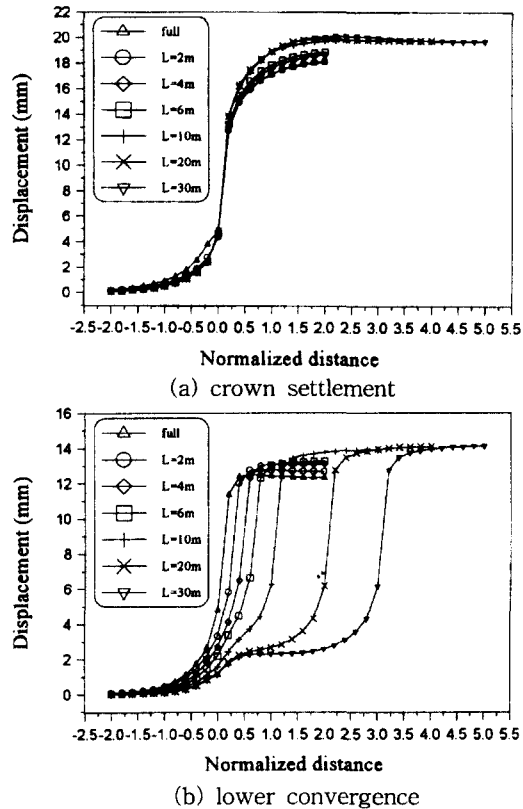


Fig. 5. Displacement and normalized distance with bench length.

2m일 때보다 터널 굴착면상의 지점에 따라 0.8%에서 7.1%까지 작게 나타났다. 상반내공변위는 무지보 굴착시 변위보다 60% 이상 감소해 지보로 인한 변위의 억제효과가 가장 크게 나타났다. 바닥부에서는 무지보 굴착길이에 의한 변위차이가 다른 지점보다 상대적으로 매우 작게 나타났다.

미니벤치의 경우 상반측벽을 제외하면 벤치길이가 길어질수록 지보에 의한 변위의 감소효과가 줄어들었으나 무지보굴착길이가 2m일 때 상반에서의 상대변위는 벤치길이에 따른 차이가 거의 없음을 볼 수 있다.

숫벤치 상호간의 차이는 미니벤치에 비해 상대적으로

Table 3. Relative converged displacement with unsupported span. (Unit : %)

Bench Length	Unsupport ed span	Crown	Upper half	Lower half	Invert
Fullface	1 m	51.4	34.7	48.0	82.5
	2 m	58.5	39.3	52.1	83.3
2 m	1 m	52.2	34.8	50.6	83.2
	2 m	59.1	40.5	54.5	84.3
4 m	1 m	53.3	34.7	51.9	84.8
	2 m	59.3	41.3	56.7	86.0
6 m	1 m	54.3	34.3	53.4	85.9
	2 m	60.0	40.0	58.2	87.5
10 m	2 m	61.7	39.4	60.1	87.5
	2.5 m	66.3	44.5	65.2	89.1
20 m	2 m	61.1	39.0	61.1	87.5
	2.5 m	65.4	43.8	66.1	89.0
30 m	2 m	61.0	39.0	61.0	87.7
	2.5 m	65.4	43.8	66.1	89.1

로 매우 작은 차이를 나타내었다.

4.2 축압계수에 따른 변화

Fig. 6은 전단면, 미니벤치, 숫벤치 컷으로 굴착된 경우 K값의 변화에 따른 지점별 최종 수렴변위를 나타내었으며 숫크리트 두께는 25 cm, 무지보길이는 2.0 m로 해석하였다. (a)는 천단침하를 나타낸 것으로 K값이 커짐에 따라 변화가 거의 없음을 볼 수 있다. 이에 비해 (b)에 나타난 상반내공변위는 K가 0.5일 때 천단변위에 비해 매우 작게 나타났으나 축압계수가 1.5인 경우 크게 증가하여 천단침하보다 더 큰 값으로 수렴하였다. 하반내공변위도 이와 유사한 경향을 보였고 바닥부의 상승은 수평응력이 연직응력보다 큰 경우인 K = 1.5일 때 크게 나타났다. 전체적으로 축압계수는 천단과 바닥부보다 측벽부에 영향을 크게 미치는 것으로 나타났다.

4.3 숫크리트 두께에 따른 변화

벤치길이 2 m, 무지보길이가 2 m이고 축압계수가 1 인 모델에 대해 숫크리트 두께를 15 cm에서 25 cm로

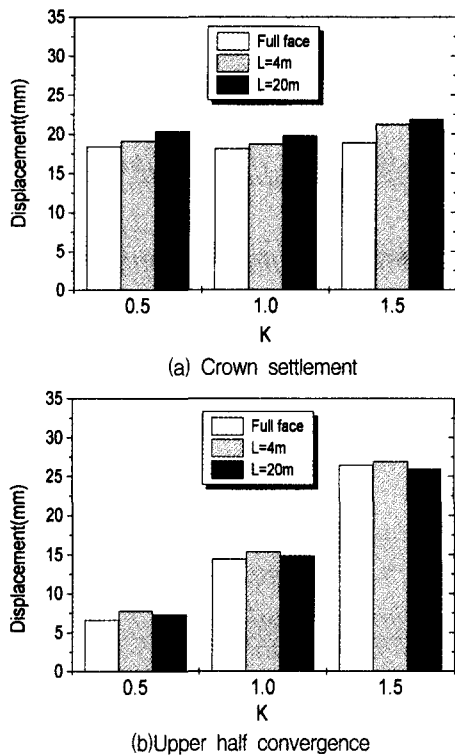


Fig. 6. Converged displacement with excavation method and K.

변화시킴에 따라 발생하는 변위는 막장이 해석단면에서 2D만큼 진행되었을 때 천단과 상반측벽에서 1.2 mm, 하반에서 0.8 mm 정도로 각각 6.2%, 7.4%, 5.9%의 감소를 보였고 바닥부는 변위차이가 거의 없었다. 즉, 풍화암 구간내 굴착된 터널에서 숏크리트 두께가 25 cm에서 15 cm로 40%가 감소되어도 변위발생에 영향을 별로 미치지 못함을 알 수 있다. 선행변위비도 하반측벽에서 2.7%만큼 증가하고 다른 지점에서도 1.3~2.3% 정도만 증가하였다. 막장이 해석단면을 지나 2 m만큼 전진하게 되면 최종변위에 대한 변위비는 측벽부에서 4% 이상 증가하게 된다. 즉, 굴착직후 숏크리트가 타설되는 위치에서 변위비는 약간 더 차이가 나며 이는 숏크리트 두께가 클수록 타설이후 발생하는 변위량이 상대적으로 줄어든다는 것을 나타낸다.

5. 결 론

본 연구에서는 터널의 굴착공법이 터널의 변형거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 저심도 풍화암구간에

굴착된 터널을 3차원 요소로 모델링하였다. 벤치길이를 주요변수로 하고 무지보 굴착길이, 숏크리트 두께, 측압 계수 등 설계시 고려해야 할 주요 파라미터를 선정한 후, 3차원 탄소성해석을 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 풍화암층에 굴착된 지하철 복선터널을 모델링하여 3차원 유한요소 해석을 수행한 결과, 미니벤치컷에서 벤치길이가 2 m일 경우 전단면과 비교해 막장면 도달시 상반측벽의 변위는 약 18%의 감소를 나타내었다. 막장에서 2 m 후방의 천단과 상반측벽에서의 변위도 전단면 굴착시보다 작게 나타났으나 최종변위는 거의 비슷하게 나타났다.

2) 천단에서의 선행변위는 전단면굴착시 제일 크게 발생하였다. 또한 6 m 이상의 벤치에서는 벤치길이가 막장면 전방에서 발생하는 천단부의 선행변위에 영향을 미치지 못하였다. 상반측벽에서의 선행변위는 전단면 굴착에서 가장 크게 나타나며 벤치길이가 길수록 지수함수적으로 감소하였다. 특히 미니벤치에서 선행변위가 크게 감소해 벤치길이가 굴착이전 상반측벽에 미치는 영향이 큰 것으로 드러났다. 그러나 최종변위는 차이가 거의 없었다. 하반과 인버트의 선행변위는 미니벤치구간에서 벤치길이의 증가에 따라 급격히 증가하다가 숏벤치일 때는 약간 감소하면서 안정되었다.

3) 상반측벽 변위는 10 m의 벤치길이부터 하반굴착의 영향이 뚜렷하게 나타난다. 하반 내공변위는 상반 굴착이전에는 벤치길이가 길수록 작은 변위를 나타내지만 하반 굴착직후 응력개방과 함께 급격한 상승을 나타내 최종변위의 경우 전단면인 경우부터 벤치길이가 10 m일 때까지 점차 증가하였다. 따라서 최종변위의 억제에 있어서는 숏벤치보다 미니벤치가 다소 유리한 것으로 나타났다.

4) 미니벤치에서 벤치길이가 길어짐에 따라 천단에서는 선행변위비가 비슷하게 나타났고 상반측벽에서는 감소하였다. 이에 비해 하반측벽에서는 약간 증가하였으며 바닥부에서는 큰 폭으로 증가하였다. 숏벤치가 되면서 천단과 상반측벽에서는 감소하였고 바닥부에서는 미니벤치보다 약간 크게 나타났다. 이는 하반의 존재가 자체 지보역할을 함으로써 굴착이전의 변위를 구속하는 것으로 천단보다 상반측벽에서 더 두드러지게 나타났다. 숏벤치 상호간에는 선행변위비의 차이가 매우 작게 나타나 굴착전 변위는 미니벤치에서 벤치길이에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

5) 무지보 굴착길이가 증가할 경우 벤치길이에 관계 없이 최종변위는 증가하는데 비해 선행변위비는 1~4%

정도 감소하였다. 결과적으로 무지보 길이가 짧을수록 굴착후 발생하는 변위량은 상대적으로 줄어들게 된다. 무지보 길이가 길 때 하반굴착이 상반변위에 미치는 영향이 더 크게 나타나며 상반과 하반측벽에서의 변위차이가 증가한다. 그리고 상반측벽에서의 변위가 다른지점보다 지보로 인한 변위 억제효과가 가장 크게 나타났고 바닥부는 무지보굴착길이에 따른 변위차이가 매우 작았다.

6) 측압계수가 0.5에서 1.0, 1.5로 증가함에 따라 벤치길이가 무지보 굴착길이 등의 설계변수에 비해 변위의 절대값에 큰 영향을 나타내었다. K값의 증가에 따라 천정과 바닥보다 상하반 측벽부에서 변위와 선행변위비의 증가가 훨씬 크게 나타났다. 슛크리트 두께가 감소할 경우 응력과 변위차이는 매우 작게 나타났다. 터널 단면에서 천정과 측벽에 일률적인 두께로 슛크리트를 타설하지 않고 암질이 양호한 경우 선택적으로 측벽 타설 슛크리트의 두께를 줄이는 것이 경제적인 것이다.

참고문헌

1. 이봉렬, 김형탁, 김학문, 1996, 3차원 터널해석에 의한 강관보강형 다단그라우팅의 보강효과, 한국지반공학회지, 12.4, 5-20.
2. 이인모, 김동현, 최항석, 최수일, 1996, 응력집중을 고려한 터널의 3차원 거동에 관한 연구 -하중분담률을 중심으로-, 한국지반공학회지, 12.1, 87-108.
3. 정대열, 1993, 터널 막장 주위의 3차원적 영향을 모사하는 2차원 해석모델의 하중분배율에 관한 연구, 서울대학교 공학박사학위논문.
4. 서울대학교 에너지·자원기술연구소, 1996, 미니벤치 컷에 의한 연약지반내 터널의 굴착·보강공법 개발과 최적설계.
5. Baudendistel M., 1985, Significance of the unsupported span in tunnelling, Tunnelling '85, IMM, Brighton, 103-108.
6. Zhang Y. and Huo Z., 1991, The analysis of tunnel deformation process during construction, Proc. of 7th Cong. of the Int. Soc. for Rock Mech., Aachen, 1395-1398.

강 준 호



1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
 1991년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
 1997년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사
 Tel : 886-37-368077
 E-mail : juno@hdec.co.kr
 현재 현대건설(주) 토목설계부 과장

정 직 한



1995년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
 1997년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
 Tel : 02-746-2237
 E-mail : honest@hdec.co.kr
 현재 현대건설(주) 토목설계부 사원

이 정 인



1963년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
 1965년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
 1974년 일본 동북대학 대학원 자원공학과, 공학박사
 Tel 02-880-7221
 E-mail : cilee@plaza.snu.ac.kr
 현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수