

수치해석에 의한 복개터널 라이닝의 변위거동

Displacement Behaviour of Cut-and-Cover Tunnel Lining by Numerical Analysis

이 명 욱^{*} 박 병 수^{**} 전 용 배^{***} 유 남 재^{****}
Lee, Myung-Woog Park, Byung-Soo Jeon, Yong-Bae Yoo, Nam-Jae

Abstracts

This paper is results of experimental and numerical works on the behavior of the cut-and-cover tunnel

Centrifuge model tests were performed to simulate the behavior of the cut-and-cover tunnels having cross sections of national road and subway tunnels. Model experiments were carried out with changing the cut slope and the slope of filling ground surface. Displacements of tunnel lining resulted from artificially accelerated gravitational force up to 40g of covered material used in model tests, were measured during centrifuge model tests.

In model tests, Jumunjin Standard Sand with the relative density of 80 % and the zinc plates were used for the covered material and the flexible tunnel lining, respectively. Basic soil property tests were performed to obtain it's the property of Jumunjin Standard Sand. Shear strength parameters of Jumunjin Standard Sand were obtained by performing the triaxial compression tests. Direct shear tests were also carried out to find the mechanical properties of the interface between the lining and the covered material.

Numerical analysis with the commercially available program of FLAC were performed to compare with results of centrifuge model experiment. In numerical modelling, Mohr-Coulomb elasto-plastic constitutive model was used to simulate the behavior of Jumunjin Standard Sand and the interface element between the lining and the covered material was implemented to simulate the interaction between them.

Compared results between model tests and numerical estimation with respect to displacement of the lining showed in good agreements.

키 워 드 : 개착식터널, 원심모형실험, 터널복공, 원심모형실험

keywords : Cut-and-Cover Tunnel, centrifuge model test, Tunnel lining centrifuge model test

1. 서 론

도심지에서의 터널공사는 터널의 심도가 깊지

않음으로 인해 개착공법이 많이 적용되어 왔으며 특히, 시가지에 있어서는 얕은터널의 표준적 공법으로서 널리 이용되어 왔다. 그러나 최근에는 지하공간의 이용도가 높아지는 한편, 터널의 심부화, 주민의식의 변화, 환경대책, 또한, 차량의 증가로 인한 도로의 과밀화 등으로 말미암아 터널공법에도 큰 변화가 요구되고 있다. 그리고 개착공법이 적합한 천층터널을 장기간에 걸쳐 축조하는 일은 점차로 곤란하게 되어 개착공법의 적용범위는 시

^{*} 동해대학교 건설시스템 공학과 전임강사, 공학박사

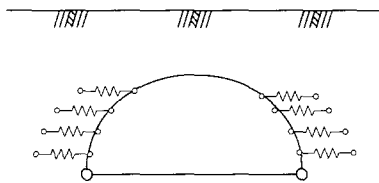
^{**} 강원대학교 토목공학과 연구원, 공학박사

^{***} 동해대학교 건설시스템 공학과 전임강사, 공학박사

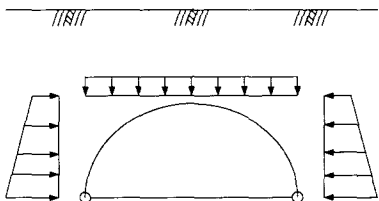
^{****} 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

공상 필요한 작업용 수갱, 용도상 요구되는 역, 환기실, 펌프실, 인도용 통로 등으로 구조적으로 특이하여 NATM 이나 실드공법 등으로는 시공이 곤란한 부분에 국한되어 가고 있다. 그러나 도심지 이외의 산악터널 시공에 있어 터널의 상부의 토피가 얇은 입출구부분의 터널시공의 경우 경제성을 감안하여 보편적으로 NATM 방식의 터널공법 대신에 원지반을 개착식으로 굴착하고 터널의 콘크리트라이닝을 시공한후 원지반선까지 되메우기를 실시하는 개착식 터널공법이 널리 사용되고 있다. 이러한 개착식 터널의 구조적 거동에 미치는 영향에 대한 연구는 국내의 적으로 미비한 실정이다.

Bickel과 Kussel(1982), 일본토목학회(1987)에서는 개착터널의 설계기준을 아래의 그림 1과 같이 강성뼈대해석을 제안하고 있으나 이는 단계별 시공에 따른 라이닝의 거동 및 되메움 지반의 경사나 굴착폭 등의 개착식 터널의 특성을 반영하지 못한 해석이다.



(a) Modelling of tunnel lining and ground reaction



(b) Assumed earth pressure profiles around tunnel lining

그림 1 강성뼈대 해석

Kovari(1982)는 그림 2와 같이 되메움지반이 단계별로 터널라이닝 주변에 되메움 될 때 처음에는 터널라이닝에 주동토압으로 작용하지만, 되메움 완료 후에는 터널라이닝의 천단침하에 따른 라이닝의 축방변형에 저항하는 반력(수동토압)을 생성하는 역할을 한다고 발표하였으며, Tisa (1988)는 개착식 터널에 되메움되는 지반의 종류를 원지반, 터널측면지반, 그리고 마지막에 되메움된 지반으로 분류한 모델을 만들어 원지반-터널라이닝-되메움지반의 상호관계에 대한 연구를 수행하였다.

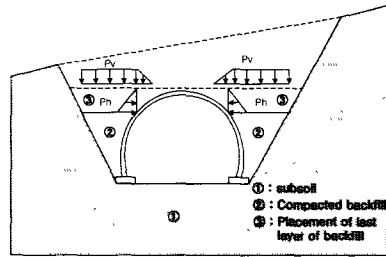


그림 2 터널아치와 뒤채움재의 상호작용

한편, Getzler(1968), Handy(1985), 김홍택(1990), 유건선(1997), 이상덕(1997) 등은 이러한 터널라이닝과 되메움 지반사이에서 발생하는 상호작용 및 터널라이닝과 굴착사면 사이의 좁은공간의 되메움시 발생하는 벽면마찰에 의한 단기적인 토압 감소에 대하여 연구를 하였다.

유건선(1997)은 되메움 지반과 라이닝, 굴착사면과 되메움 지반 사이에서 발생하는 아칭현상으로 인한 토압의 재분배를 고려한 라이닝 거동에 관해 연구를 하였으며, 박기정(2000)은 개착식 터널의 역학적 거동에 관해 원심모형을 수행한 바 있다.

본 연구에서는 개착식터널의 되메움에 따른 터널라이닝의 변위의 특성을 규명하고자 축소단면에 대한 원심모형실험을 수행하였으며, 또한 수치해석을 통해 실험결과와 비교 분석을 실시 하였다.

2. 실험

실험은 모형실험의 되메움 지반으로 사용된 주문진 표준사에 대한 기본물성실험, 압밀배수(CD)의 삼축압축시험, 직접전단에 의한 마찰시험을 실시하였으며, 개착식터널의 아치구조체의 변위특성을 규명하기 위한 원심모형실험을 실시 하였다. 원심모형실험은 터널의 표준단면, 굴착경사, 지표면 경사를 매개변수로 하여 시험을 수행하였다.

2.1 시료의 기본물성

되메움지반으로 사용된 공기건조된 주문진 표준사로서 기본적인 물성은 표 1과 같으며 입경가적 곡선은 그림 3에 나타난 바와 같이 통일분류법(USCS)에 의한 분류결과 SP 에 해당하는 입도분포의 균등한 중립모래이다.

한편, 되메움 지반조성시 균질한 상대밀도의 지반을 형성하기 위하여 강사장치를 이용하여 초기에 균질한 지반을 형성하였다.

표 1 주문진 표준사의 기본적인 물성

Grain Size Distribution	$D_{10} = 0.21 \text{ mm}$ $C_u = 1.19$ $C_c = 1.01$
Maximum Dry Density Minimum Dry Density	1.682 kgf/cm^3 1.384 kgf/cm^3
Maximum Void Ratio Minimum Void Ratio	0.879 0.546
Specific Gravity	2.6

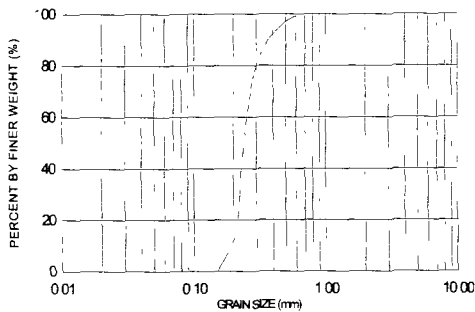


그림 3 주문진 표준사의 입경가적곡선

퇴매음 지반에 대한 전단강도정수인 내부마찰각 ϕ , 점착력 C 를 산정하기 위하여 압밀배수의 삼축압축시험을 수행하였다. 한편, 터널굴착면에 대한 조도를 모사하기 위해서 굴착면에 No. 80의 사포를 부착하였으며, 이에 따른 퇴매음 지반과 굴착면사이의 마찰각을 구하기 위해 직접전단시험시 전단시료에 No. 80의 사포를 부착시킨 마찰시험을 실시 하였다. 아래의 표 2는 삼축압축 시험결과를 표 3은 마찰시험 결과를 나타내고 있다.

표 2 삼축압축(CD)시험 및 마찰시험결과

Triaxial Frictional Test							
RD (%)	Confining Pressure (kgf/cm ²)				Slope of Failure Line in p-q Space tan α	Frictional Angle in σ - τ Space ϕ	C
	Deviator Stress at Failure $\sigma_1 - \sigma_3$ (kgf/cm ²)						
	0.2	0.3	0.4	0.6			
80	1.083	1.535	1.590	2.316	0.699	42.00	0

표 3 직접전단에 의한 마찰시험결과

Direction Shear Test								
RD (%)	Normal Stress (kgf/cm ²)					Slope of Failure Line in σ - τ Space tan δ	Frictional Angle in σ - τ Space ϕ	C
	Peak Strength (kgf/cm ²)							
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0			
80	0.384	0.654	0.759	1.016	1.189	1.028	45.8	0

2.2 원심모형실험

원심모형실험기법을 이용하여 개착식터널중 국도 2차선 및 지하철(고속전철)터널 그림 4, 그림 5의 단면에 대하여 표 4에 나타난 터널단면형상, 굴착면의 경사, 지표면의 경사등을 매개변수로 하여 퇴매음자중에 의한 실험을 수행하였다

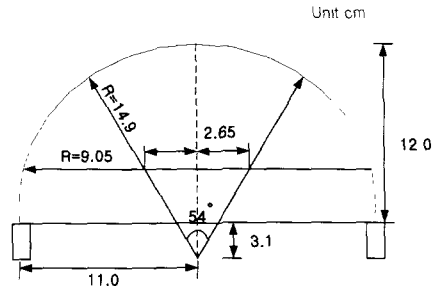


그림 4 국도 2차선 터널단면 (1/40 Scale)

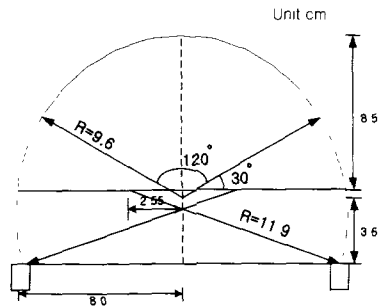


그림 5 지하철 터널단면 (1/40 Scale)

모형터널의 제작은 표준단면의 1/40 크기로 축소하였으며, 터널의 재질은 두께 0.06 mm의 아연도강판으로 제작하였으며 터널은강성의 앵글을 사용하여 모형토조 하부에 고정 하였다. 모형토조는 그림 6에 보인바와 직사각형의 토조로 제원은 길

이 45cm, 폭 20cm, 높이 70cm 이다. 한편, 원심모형 실험에 사용된 모형토조의 제작은 모형토조의 좌우측벽 및 후면 그리고 지면은 고강도 알루미늄 판으로 제작하였으며, 토조의 전면은 투명한 Plexiglass를 부착하여 실험중 Still Camera와 Video를 통해 실험시 모형의 파괴 및 변위 거동을 관찰할 수 있도록 제작하였다. 한편, 원심모형 실험중 벽면에 마찰력을 최소화 하기 위하여 Grease를 묻힌 비닐을 모형토조 벽면에 부착하여 벽면의 마찰력을 최소화 하였다.

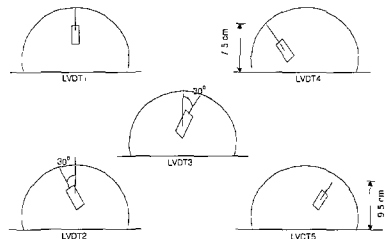


그림 7 국도터널 변위 측정위치

표 4 각각의 매개변수에 따른 원심모형실험

원심모형실험				
단면 형상	굴착면의 경사	상대밀도 (%)	지표면의 경사	지 반
국도 2차선, 고속전철 (지하철)	90°	80	0°	사질토
			15°	
			30°	
	75°	80	0°	사질토
			15°	
			30°	
	60°	80	0°	사질토
			15°	
			30°	

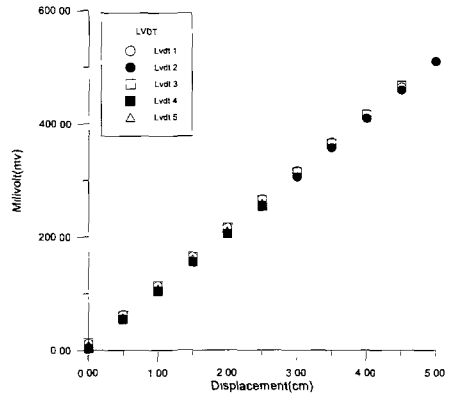


그림 8 각각의 LVDT Calibration 값

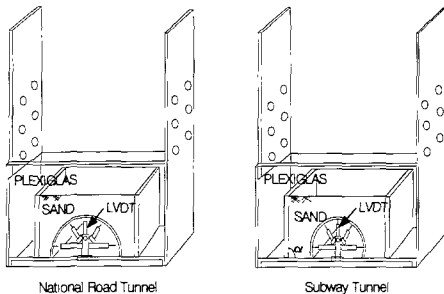


그림 6 모형실험에 사용된 알루미늄토조

원심모형 실험중 터널라이닝에 발생하는 내공변위의 측정은 그림 7에 보이바와 같이 터널의 천단 1개소, 좌우측 어깨부분 2개소(전면, 후면), 터널 측벽부 2개소(전면, 후면)에 LVDT를 설치하여 내공변위를 측정하였다. 한편, 각각의 LVDT에 대한 Calibration 값은 그림 8에 나타난 바와 같으며 표 5는 각각의 LVDT로 계측된 변위의 회귀분석 값을 나타내고 있다.

표 5 각각의 계측기의 회귀분석값

계측기	회귀분석값
LVDT 1	$Y = 100.142 \cdot X + 14.3666$
LVDT 2	$Y = 101.255 \cdot X + 3.77273$
LVDT 3	$Y = 101.079 \cdot X + 12.6727$
LVDT 4	$Y = 100.4 \cdot X + 3.6$
LVDT 5	$Y = 100.709 \cdot X + 9.01429$

2.2.1 모형의 단면

터널의 표준단면의 1/40 Scale의 국도2차선 터널에 대한 자중의 원심모형실험의 모형단면은 아래의 그림 9 ~ 그림 11과 같다.

되메움은 터널상부로부터 터널높이(D)의 1D 높이로 성토를 하였으며, 지표면의 경사는 모형토조가 허용하는 범위내에서 성토높이를 조정하였다. 특히, 굴착경사 60° 인 경우 굴착면이 성토면까지 미치지 못하여 이러한 경우 모형토조 벽면에 No. 80의 사포를 벽면에 부착시켜 굴착면의 조도를 조성하였다. 한편, 지하철터널의 모형은 토조안에 지하철터널을 설치하여 모형을 조성하였다.

수치해석에 의한 복개터널 라이닝의 변위거동

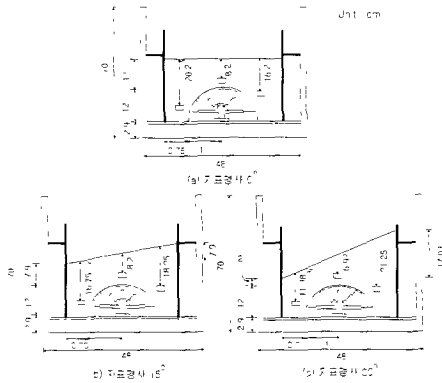


그림 9 국도터널 굴착각도 90°

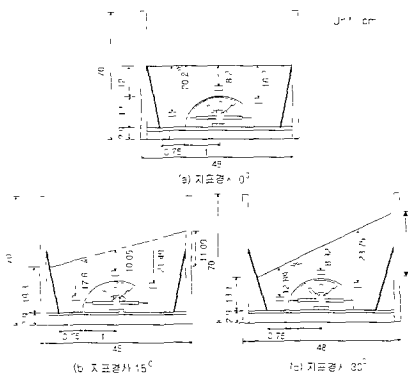


그림 10 국도터널 굴착각도 75°

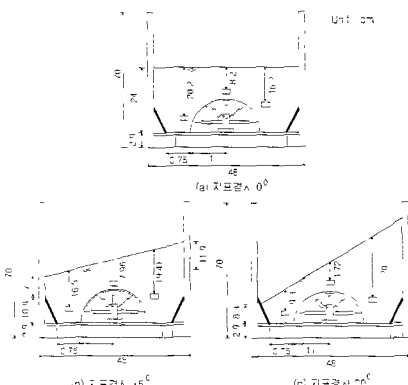


그림 11 국도터널 굴착각도 60°

2.2.2 실험방법

원심모형 실험의 순서는 그림 9 ~ 그림 11의 모형단면을 조성한뒤 원심모형 시험기의 바스켓에 토조를 장착한다. 계측기를 원심모형시험기 내부에

장착된 기록장치(Data logger)에 연결하고 원심모형 시험기의 분당회전수(RPM)를 조절하여 원심모형 시험기를 가속시켜 원심력을 증가시켜 증력수준 40G의 원심모형 실험을 수행한다. 한편, 시험이 끝나면 터널의 단면, 굴착경사, 지표면 경사를 바꾸어가며 위 순서를 반복하여 관련실험을 수행한다

3. 수치해석

수치해석에서는 유한차분의 수치해석기법을 적용한 상용프로그램인 FLAC을 사용하여 터널단면의 형태와 터널설치시 굴착경사, 그리고 지표면의 경사 변화시켜 그에 따른 터널라이닝의 변위에 대한 수치해석을 실시하였다. 수치해석시 모형지반으로 사용된 사질토지반에 대해서는 응력-변형의 구성관계를 Mohr-Coulomb의 탄소성모델을 사용하였다 한편, 수치해석에 적용된 모형지반의 내부마찰각 및 굴착면의 마찰각은 삼축압축시험 및 마찰시험을 통해 산정된 내부마찰각과 마찰각을 수치해석에 적용하였다 한편, 서로상이한 물성사이에서 작용하는 경계면에서는 경계면요소를 적용하여 수치해석을 실시하였다.

3.1 수치해석방법

수치해석 모형은 격자요소로 Modelling 하였으며 서로 상이한 물성을 갖는 지반과 모형토조, 모형지반과 굴착면 사이에는 그림 12의 경계요소(Interface element)를 두었으며, 모형토조의 최하부와 굴착면 양측면에서는 변형이 발생하지 않도록 경계조건을 주어 해석을 수행하였다.

수치해석에서 사용된 모형토조, 되메움지반, 모형터널, 굴착사면에 대한 물리적인 특성은 아래의 표 6에 나타낸 바와 같다.

표 6 수치해석에 사용된 재료의 물성

Description	단위	알루미늄 토 조	주문진 표준사	모형 터널	굴착 사면
Elastic modulus	kgf/cm ²	72400	753	82790	3740
Poisson's ratio	-	0.17	0.25	-	-
Unit weight	10 ³ kgf/m ³	2.44	1613	-	-

3.2 경계요소

본 수치해석에서는 서로상이한 물성을 갖는 되메움지반과 모형토조, 모형지반과 굴착면 사이에 경계면요소를 두어 이들 경계면에서 유발되는 벽면마찰각을 고려하였다. 그림 19는 수치해석에서

적용한 경계면 요소에 대한 기법으로 두 접촉면 (A, B) 사이의 경계요소는 마찰력, 점착력, 인장강도, 연직강성 및 전단강성의 성질을 갖는다.

여기서 전단저항력, $S = cL + \tan \phi F_n$ 은 Mohr - Coulomb 전단강도식을 따르며, c 는 접촉면 사이의 점착력, ϕ 는 접촉면 사이의 마찰각, L 은 접촉면의 길이, F_n 은 접촉면 사이의 연직력을 나타낸다.

연직 및 전단방향의 강성계수는 다음과 같은 식 (1)을 통해 산정할 수 있다.

$$K_s = K_n = \frac{K + S(\frac{4}{3})}{\nabla z_{\min}} \cdot 10 \quad (1)$$

여기서, K : Bulk modulus, S : Shear Modulus
 ∇z_{\min} : 인접요소중 가장 짧은변의 길이

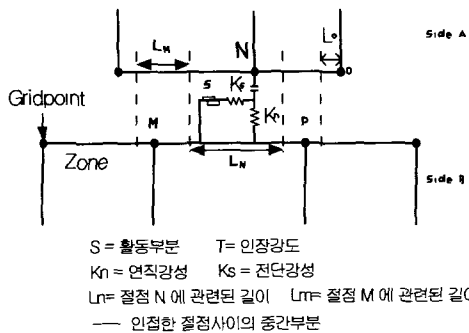


그림 12 전단강성(K_n)과 연직강성(K_s)이 스프링으로 연결된 A와 B 사이의 경계모식도

4. 결과분석

개착식터널중 표준단면의 1/40 Scale의 국도터널 단면 및 지하철(고속전철)터널의 모형 단면에 대해 굴착면의 경사를 90° , 75° , 60° 로 변화시키고 지표면의 경사를 0° , 15° , 30° 로 증가시켜 중력 수준 40 G의 원심모형실험을 실시하였다. 실험을 통해 측정된 터널라이닝의 변위를 FLAC을 사용한 수치해석 결과와 비교분석을 실시하였다.

4.1 국도 2차선터널 변위특성

개착식터널중 표준단면의 1/40 Scale의 국도 2차선터널에 그림 4에 대한 원심모형 실험 및 수치해석을 통해 그림 13 ~ 그림 24의 결과를 얻었다. 한편, 아래의 표 7은 각각의 위치에서 측정된 변위로 굴착경사와 지표경사로 구분하여 정리된 값이다.

표 7 국도터널 터널라이닝 내부의 계산된 변위

국도터널	지표 경사	내측변위(mm)				
		LV 1 (천단)	LV 2 (좌어깨)	LV 3 (우어깨)	LV 4 (좌측벽)	LV 5 (우측벽)
R90	0	2.80	2.50	2.20	1.02	0.96
	15	2.69	2.30	2.15	0.87	1.23
	30	2.62	2.09	2.39	0.94	1.035
R75	0	3.30	2.69	2.20	1.20	1.35
	15	3.11	2.28	2.32	1.25	1.50
	30	3.00	1.92	2.40	1.07	1.43
R60	0	2.74	2.17	2.03	1.15	0.87
	15	2.23	1.80	2.20	0.88	0.70
	30	2.53	1.77	2.55	0.70	1.88

그림 13 ~ 그림 15는 국도터널에 대한 굴착경사와 지표경사를 변화시켜 수행한 터널라이닝의 수치해석 결과 이다. 그림 13의 굴착경사 90° 의 경우 지표면의 경사가 $0^\circ \sim 30^\circ$ 증가할수록 터널의 좌측어깨부의 변위는 감소하고, 터널의 우측어깨부의 변위는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 지표경사가 증가함에 따라 터널좌측부의 되매움 두께는 감소하고 우측부의 되매움 두께는 증가함에 따른 토압의 증감에 따른 영향으로 판단된다.

그림 14와 그림 15는 굴착경사 75° , 60° 에 대하여 지표경사 증가에 따른 터널내부의 변위에 대한 수치해석 결과이다. 수치해석결과 굴착경사 90° 에 비해 지표경사가 증가함에 따라 터널 좌우측어깨부 변위의 증감폭이 큼을 볼수 있다. 이는 굴착경사 90° 에 비해 굴착경사 75° , 60° 의 경우가 지표경사가 증가함에 따라 터널굴착면과 터널사이의 굴착폭이 그림 10과 그림 11에서 보인바와 같이 증가함을 볼수 있으며 이러한 굴착폭의 증가는 토압의 구속효과의 감소를 가져와 터널의 어깨부의 변위를 증가시키는 것으로 판단된다.

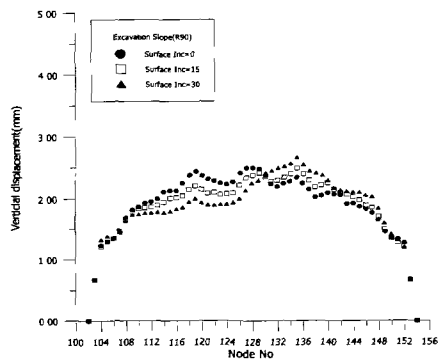


그림 13 터널라이닝의 연직변위 (FLAC, 국도터널, 굴착경사 90°)

수치해석에 의한 복개터널 라이닝의 변위거동

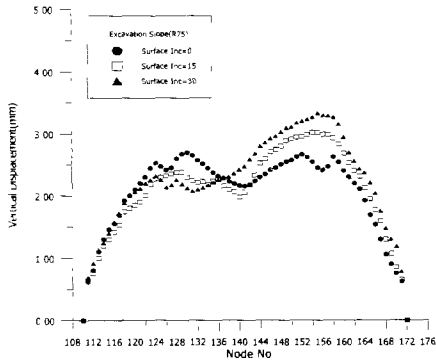


그림 14 터널라이닝의 연직변위 (FLAC, 국도터널, 굴착경사 75°)

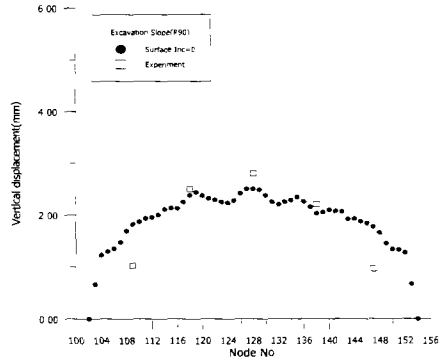


그림 16 터널라이닝의 연직변위 (국도터널, 굴착경사 90°, 지표경사 0°)

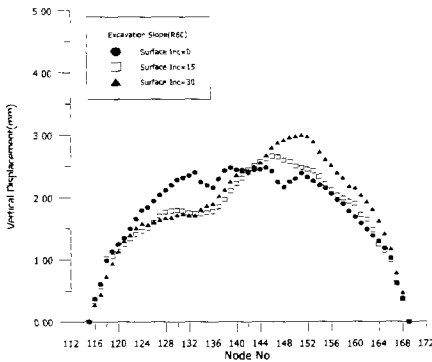


그림 15 터널라이닝의 연직변위 (FLAC, 국도터널, 굴착경사 60°)

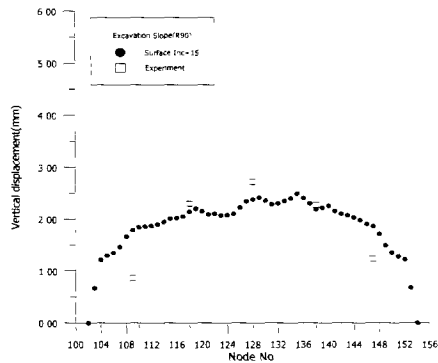


그림 17 터널라이닝의 연직변위 (국도터널, 굴착경사 90°, 지표경사 15°)

그림 16 ~ 그림 18은 도로터널 굴착경사 90°의 원심모형실험을 통해 계속된 터널 각부분의 변위를 수치해석으로 예측된 변위와 비교분석 결과이다. 비교분석 결과 터널의 천단부의 변위는 수치해석으로 예측된 변위가 계속된 변위크기에 비해 약간 작게 산정되고 있다. 한편, 어깨부에서의 변위는 수치해석과 실험결과가 비교적 일치하는 것으로 나타나고 있다. 이것은 실험과 수치해석 둘다 지표경사에 따른 되메움재의 두께에 의한 토압의 증감을 비교적 잘 예측하고 있는 것으로 판단된다. 한편, 측벽부에서의 변위는 좌·우측 모두 수치해석 결과가 실험값에 비해 비교적 크게 산정되고 있으나 그 차이는 크지 않음을 알수 있다. 따라서, 본 수치해석을 통해 예측한 터널라이닝의 변위와 실험을 통해 계속된 변위는 되채움재의 지표면 경사의 증감에 따른 터널라이닝의 증감을 비교적 잘 예측하고 있는 것으로 판단된다

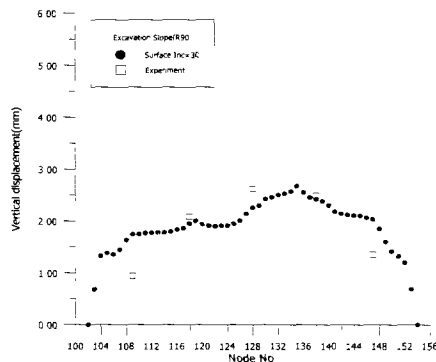


그림 18 터널라이닝의 연직변위 (국도터널, 굴착경사 90°, 지표경사 30°)

그림 19 ~ 그림 24는 굴착경사를 75°와 60°로 변화시키고 지표경사를 0°, 15°, 30°로 증가

시켜 계측된 터널라이닝의 변위와 수치해석을 통해 예측된 변위와 비교분석한 결과이다.

수치해석과 실험을 통해 예측 및 계측된 변위 결과는 터널의 어깨부분과 천단에서의 변위는 실험에서 계측된 값과 수치해석의 예측된 결과 약간의 차이를 보이고 있으나 비교적 일치하는 것으로 조사되었다. 한편, 터널 양쪽의 측벽부에서의 변위는 좌 우측 두군데에서 실험을 통해 계측결과가 수치해석 결과에 비해 비교적 작게 산정되고 있으나 그 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 따라서, 본 수치해석 및 실험을 통해 비교분석된 터널라이닝의 변위는 굴착경사와 지표면의 증감에 따른 되메움 심도의 변화에 따른 토압의 증감을 비교적 잘 예측하는 것으로 판단된다.

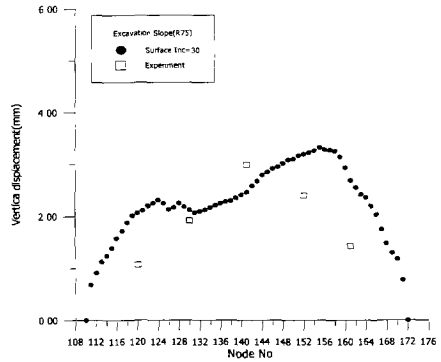


그림 21 터널라이닝의 연직변위 (국도터널, 굴착경사 75°, 지표경사 30°)

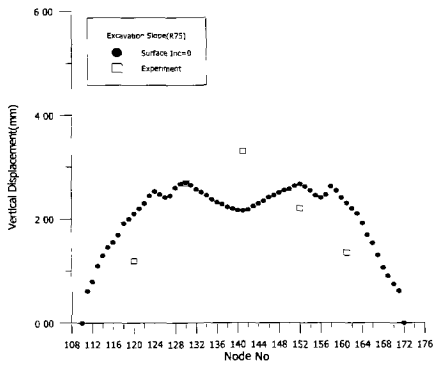


그림 19 터널라이닝의 연직변위 (국도터널, 굴착경사 75°, 지표경사 0°)

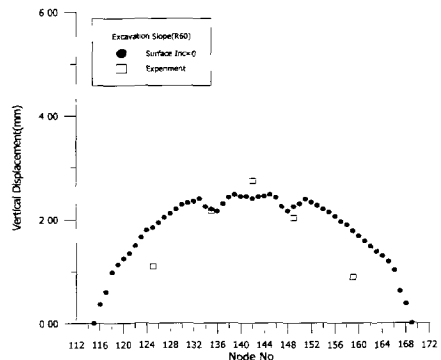


그림 22 터널라이닝의 연직변위 (국도터널, 굴착경사 60°, 지표경사 0°)

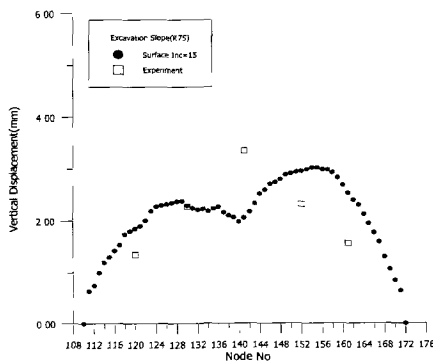


그림 20 터널라이닝의 연직변위 (국도터널, 굴착경사 75°, 지표경사 15°)

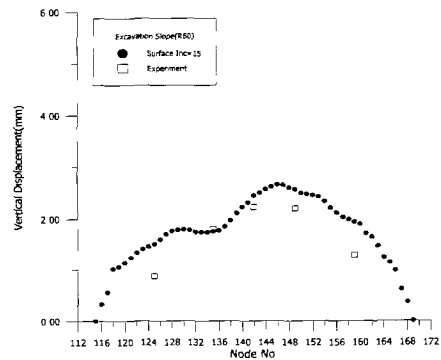


그림 23 터널라이닝의 연직변위(R60S15) (국도터널, 굴착경사 60°, 지표면 경사 15°)

수치해석에 의한 복개터널 라이닝의 변위거동

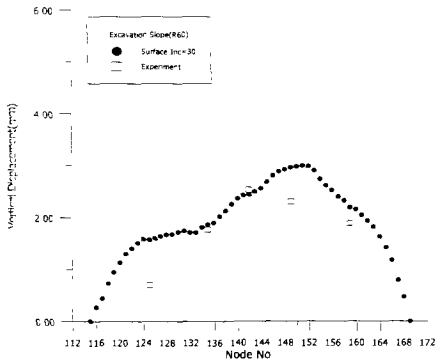


그림 24 터널라이닝의 연직변위(R60S30)
(국도터널, 굴착경사 60°, 지표경사 30°)

4.2 지하철터널 변위특성

개착식터널중 지하철터널의 표준단면의 1/40 Scale의 그림 5의 단면에 대하여 원심모형실험을 수행하여 계측한 터널라이닝의 변위와 수치해석으로 통해 예측된 터널라이닝의 변위를 비교분석하여 그림 25 ~ 그림 36의 결과를 얻었다. 표 8은 지하철터널라이닝의 각각의 위치에서 측정된 변위로 굴착경사와 지표경사로 구분하여 정리된 값을 나타내고 있다

표 8 지하철터널 터널라이닝 내부의 변위

지하철터널	내측변위(mm)					
	지표경사	LV 1 (천단)	LV 2 (좌어깨)	LV 3 (우어깨)	LV 4 (좌측벽)	LV 5 (우측벽)
S90	00	3.20	2.46	1.58	1.08	1.30
	15	3.02	1.78	1.94	0.90	1.50
	30	3.05	1.50	2.10	1.00	1.37
S75	00	3.12	2.70	1.66	1.50	2.05
	15	3.23	2.56	1.90	1.37	2.29
	30	3.30	2.71	2.50	1.53	2.08
S60	00	2.59	2.06	1.90	1.20	1.50
	15	2.58	1.95	2.15	1.40	1.60
	30	2.30	1.76	2.50	1.24	1.85

그림 25 ~ 그림 27은 지하철 터널에 대해 굴착 각도와 지표경사를 변화시켜 수행한 수치해석 결과이다.

그림 25의 굴착각도 90°의 결과에 의하면 지표면의 경사가 증가할수록 터널의 좌측면의 변위와 천단에서의 변위는 감소하는 경향을 보이고 있는

반면에 터널의 우측부의 변위는 증가하는 것으로 예측되고 있다.

이러한 경향은 국도터널과 마찬가지로 지표면의 경사가 증가함에 따라 터널의 되메움심도의 증감에 따른 토압의 변화에 기인하는 것으로 판단된다

그림 26 ~ 그림 27는 지하철터널의 굴착경사 75°, 60°에 대해 지표경사 변화에 따른 수치해석 결과이다. 터널 각 부분의 변위의 유형은 굴착각도 90°와 유사한 경향을 보이고 있으며 이러한 변위의 양상은 국도터널과 마찬가지로 터널의 지표경사에 따른 되메움의 두께의 변화로 인한 토압의 증감에 따른 것으로 판단된다. 한편, 그림 25의 굴착경사 90°에 비해 그림 26 ~ 그림 27의 굴착경사 75°, 60°의 터널의 각부분에서의 변위의 크기가 상대적으로 약간 크게 나타나는 것은 굴착경사의 감소가 터널의 굴착면과 터널사이의 굴착폭의 증가를 가져와 이에 따른 토압의 구속효과의 감소에 따른 것으로 판단된다

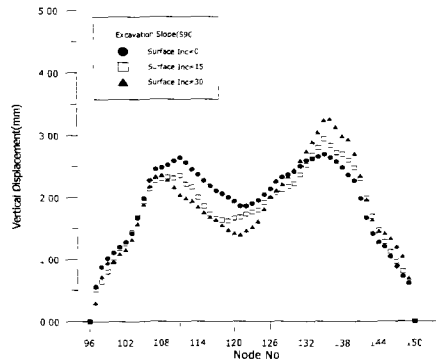


그림 25 터널라이닝의 연직변위
(FLAC, 지하철터널, 굴착경사 90°)

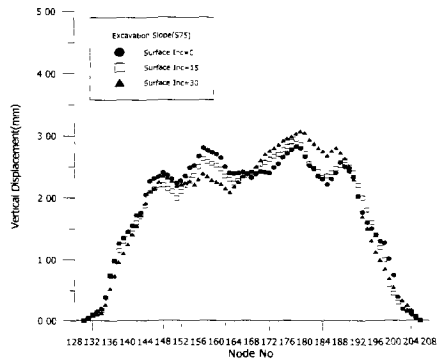


그림 26 터널라이닝의 연직변위
(FLAC, 지하철터널 Cut Slope=75°)

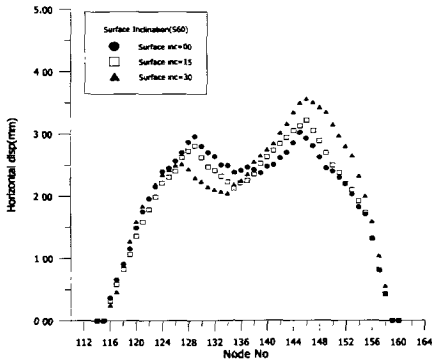


그림 27 터널라이닝의 연직변위 (FLAC, 지하철터널 Cut Slope=60°)

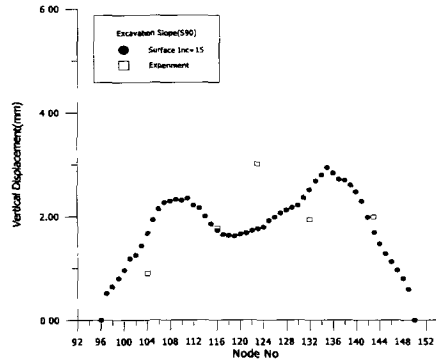


그림 29 터널라이닝의 연직변위 (지하철터널, 굴착경사 90°, 지표면 경사 15°)

그림 28 ~ 그림 36은 지하철터널에 대하여 굴착경사를 90°, 75°, 60°로 변화시키고 지표경사를 0°, 15°, 30°로 증가시킨 터널모형에 대한 수치해석과 원심모형 실험의 터널라이닝의 변위에 대한 비교 분석 결과이다.

해석결과 터널의 천단부에서는 원심모형 실험 결과가 수치해석에 비해 약간 큰값을 나타내고 있으며, 좌우측 측벽에서는 수치해석결과와 변위가 크게 산정되고 있다. 한편, 좌우측 어깨부에서는 실험과 수치해석결과가 비교적 일치하는 것으로 나타났다. 터널의 내공변위는 측정위치에 따라 변위의 크기가 다소 차이가 나기는 하나 수치해석과 원심모형 실험 모두 굴착경사와 지표면경사의 변화에 따른 되폐움 심도의 변화로 인해 발생하는 토압의 증감 효과를 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다.

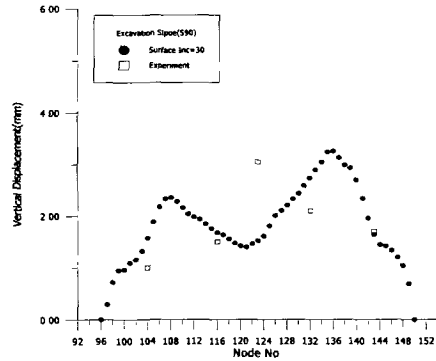


그림 30 터널라이닝의 연직변위 (지하철터널, 굴착경사 90°, 지표면 경사 30°)

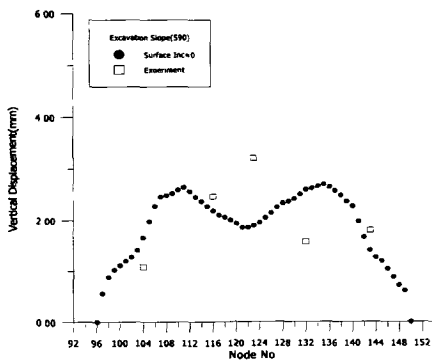


그림 28 터널라이닝의 연직변위 (지하철터널, 굴착경사 90°, 지표면 경사 0°)

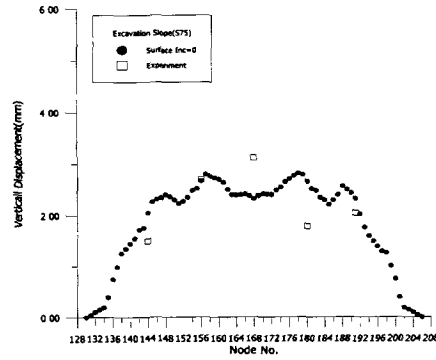


그림 31 터널라이닝의 연직변위 (지하철터널, 굴착경사 75°, 지표면 경사 0°)

수치해석에 의한 복개터널 라이닝의 변위거동

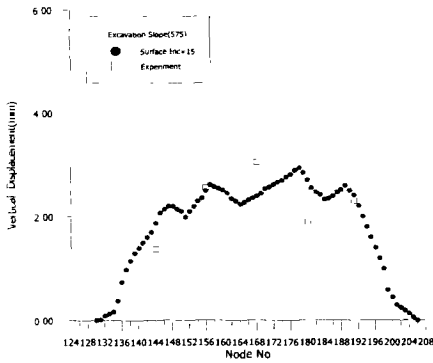


그림 32 터널라이닝의 연직변위
(지하철터널, 굴착경사 75°, 지표면경사 15°)

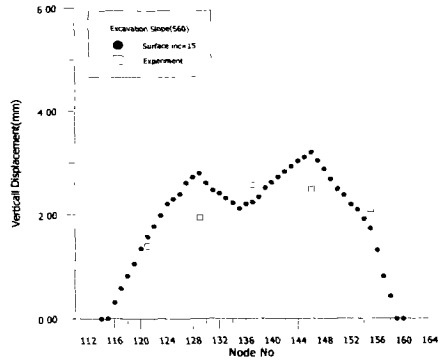


그림 35 터널라이닝의 연직변위
(지하철터널, 굴착경사 60°, 지표면경사 15°)

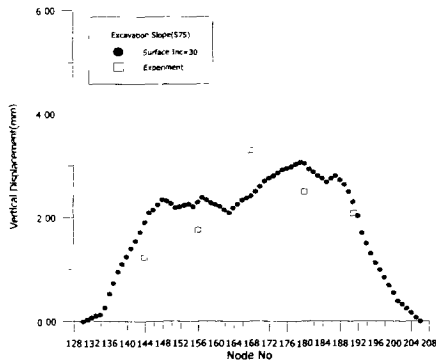


그림 33 터널라이닝의 연직변위
(지하철터널, 굴착경사 75°, 지표면경사 30°)

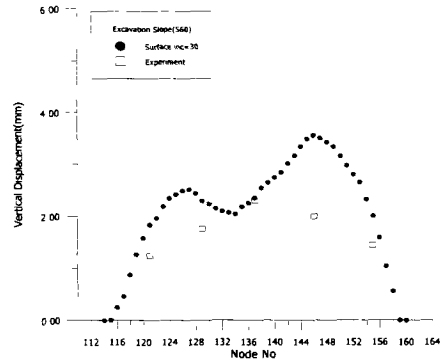


그림 36 터널라이닝의 연직변위
(지하철터널, 굴착경사 60°, 지표면경사 30°)

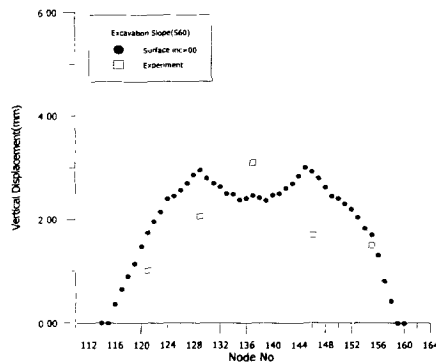


그림 34 터널라이닝의 연직변위
(지하철터널, 굴착경사 60°, 지표면경사 0°)

5. 결론

개착식터널중 국도터널과 지하철(고속전철)터널에 대하여 표준단면의 1/40 Scale로 축소된 모형에 대한 원심모형실험을 통해 측정된 터널라이닝의 변위를 FLAC을 사용한 수치해석 결과와 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 개착식 터널의 표준단면인 국도 및 지하철 터널에 대하여 터널의 시공시 터널과 굴착면과의 경사각도를 90°, 75°, 60°로 변화시키고, 되메움시 지표면의 경사를 0°, 15°, 30°로 증가시켜 수행된 원심모형실험 및 FLAC을 사용한 수치해석결과 터널라이닝의 내공변위는 되채움 심도가 증가된 굴착면에 인접한 라이닝의 내공변위는 증가하는 반면, 되채움 심도가 감소한 반대편에서는 라이닝의 내공변위는 감소하는 경향을 확인하였다.

2) 개착식 터널과 굴착면의 굴착경사를 90° , 75° , 60° 로 변화시킨 FLAC을 사용한 수치해석결과 굴착면의 경사가 완만해 질수록 뒤채움재의 하중의 증가로 인해 터널라이닝의 어깨부와 천단부의 내공변위는 증가하고, 측벽부의 내공변위는 큰 변화가 없는 것으로 예측되었다.

3) 개착식 터널의 뒤채움 시공시 지표면의 경사를 0° , 15° , 30° 로 증가시키면서 수행한 원심모형 실험 및 FLAC을 사용한 수치해석 결과 천단부의 변위는 지표면의 경사변화와 상관없이 뒤채움 심도변화가 크지않음으로 인해 서로 비슷한 크기의 내공변위가 측정 및 예측 되었다.

4) 터널의 굴착각도를 90° , 75° , 60° 로 변화시키고, 각각의 경우에 대하여 지표면의 경사를 0° , 15° , 30° 로 변화시킨 원심모형실험에서 획득한 라이닝의 내공변위는 Mohr-Coulomb 탄소성 모델로 모사한 뒤채움재의 구성관계와 라이닝과 뒤채움재 사이의 경계요소를 삽입하여 FLAC을 사용한 수치해석 결과와 매우 유사한 값을 나타내었다.

Calculated and Measured Displacements on Cut-and-Cover Tunnels”, *Proceedings of the 5th International Symposium on Tunneling*, London, pp.357-362, 1988.

- [8] 김홍택, “암 근처에 설치되는 옹벽의 발생토압에 관한 연구”, 대한토질공학회지, 제6권, 제3호, pp. 18-28, 1990.
- [9] 박기정, “원심모형실험에 의한 개착식 터널의 역학적 거동”, 충북대학교 대학원 석사학위논문, pp.1-80, 2000.
- [10] 유건선, “실험 및 수치해석에 의한 복개터널 주위의 지압과 터널 복공의 역학적 거동에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 박사학위논문, pp.1~125, 1997.

참 고 문 헌

- [1] Bickel, J. O., and Kuesel, T. R., “Tunnel Engineering Handbook”, Van Nostrand Reinhold Company Inc., pp.90-91, pp.395~416, 1982.
- [2] Chambon, P., and Corte, J. F., “Shallow Tunnels in Cohesionless Soil : Stability of Tunnel Face”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, No.7 pp.1148-1165, 1994.
- [3] Gezler, Z., Komovovnik, A., and Mazurik, A., “Model study on arching above buried structure”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 94, No. SM5, pp. 1123-1141, 1968.
- [4] Handy, R. L., “The Arch in Soil Arching”, *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 3, pp.302-318, 1985.
- [5] Harrop-Williams, K., “Arch in Soil Arching”, *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 3, pp.415-419, 1989.
- [6] Kovari, K., and Tisa, A., “Computational Models for Cuts and Cover Tunnels Based on Field Measurement”, *Proceedings of the 4th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Edmonton, Canada, pp.907-919, 1982
- [7] Kovari, K., and Tisa, A., “Comparison of