

원심모형시험에 의한 복개터널 복공의 변위특성에 관한 연구

A Study on the Displacement Characteristics of Cut-and-Cover Tunnel Lining by Centrifuge Model Experiment

이 명 옥^{*} 박 병 수^{**} 이 중 호^{***} 유 남 재^{****}
 Lee, Myung-Woog Park, Byung-Soo Lee, Jong-Ho Yoo, Nam-Jae

Abstract

This thesis is results of experimental 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.

Compared results model tests estimation with respect to displacements of the lining

키워드 개착식터널, 원심모형실험, 터널복공

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

1. 서론

개착공법(Open Cut)은 지표면에서 지반을 굴착하고 구조물을 구축한 후에 원래상태를 복구하는 방법으로, 도시의 지하철, 공동구, 지하차도, 지하보도, 상하수도, 전력통신구 등의 건설에 널리 적용되고 있다. 최근에는 각종시설과의 입체교차에 따른 문제점이 발생되고 노면 교통량의 증가로 인하여 노상공사의 규제, 환경보전 등의 문제가 발생되어 굴착식 터널공법이 빈번히 이용되고 있다. 그

러나, 평탄한 지형에 얕은 터널을 굴착할 때에는 시공법, 안전성, 경제성 등의 측면에서 개착공법이 가장 적합한 공법이라고 할 수 있다.

우리나라에서도 이미 개착식 터널은 상당히 많은 시공사례가 있으며 지하철, 지중 구조물 설치시에 가장 많이 적용되는 공법중의 하나이다. 국내에서 개착공법에 적용된 터널 구조체는 거의 대부분이 상자형(Box Form)으로 설계되어 상재하중 및 측방토압을 그대로 구조물이 받도록 되어 있어 벽체를 매우 두껍게 설치되어야만 하였다. 그러나 한번에 시공할수 있는 콘크리트타설 제한으로 말미암아 작업속도의 지연 및 타설시에도 건조수축균열, 열팽창 등의 악영향으로 그 품질과 신뢰성이 떨어진다.

그러나 지하차도나 지하보도등의 지하통로나 하

* 동해대학교 토목공학과 전임강사, 공학박사
 ** 강원대학교 토목공학과 연구원, 공학박사
 *** 경동대학교 건축환경공학부 전임강사, 공학박사
 **** 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

천 또는 다른 도로나 철도등과 입체로 교차해야 하는 경우에는 통과 구조물을 설치한후에 복개하는 복개터널의 개념을 적용하게되면 구조물의 길이가 한정되고 단면이 단순하며, 대부분의 작업이 지상이나 얇은 심도에서 이루어지기 때문에 전체 작용하중에서 자중이 부담하는 몫이 작고 기존의 터널개념 보다는 구조물 개념으로 접근할 수 있는 장점이 있다. 특히, 구조물을 아치형 등 구조적으로 유리한 단면으로 건설하게되면 구조물의 두께를 크게 줄일 수 있어서 구조체의 운반이 가능하게되어 부재를 공장제작할 수 도 있는 이점이 있다.

따라서 본 연구에서는 복개터널의 장점을 최대한 이용하고 구조적으로 유리한 프리캐스트 아치 구조의 역학적 거동을 규명하여 장차 설계 및 시공에 필요한 제반 기술자료를 취득하고자 한다.

개착식 터널의 설계기준은 Bickel과 Kussel(1982), 일본토목학회(1987)에서 제안한 강성뼈대해석을 따르고 있으나 이는 개착식 터널의 특성인 단계별 시공에 따른 라이닝의 거동 및 되메움 지반의 경사나 굴착폭 등을 고려하지 못한 해석이다. 개착식 터널의 경우 설계시 콘크리트 라이닝, 원지반, 지표면 사이의 상호작용에 대한 명확한 이해를 기반으로 해야 하며, 터널 시공시 되메움 단계에 따라 변하게 되는 라이닝의 역학적 거동 또한 고려되어야 한다.

현재 이에 대한 연구로는 Kovari(1982)의 경우 단계별로 터널라이닝 주변에 되메움시 처음에는 터널라이닝에 주동토압이, 되메움 완료후에는 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-되메움 지반의 상호관계에 대한 연구를 수행하였다.

한편, Getzler(1968), Sherif(1982), Handy(1985), 김홍택(1993), 유건선(1996), 이상덕(1997) 등은 터널라이닝과 되메움 지반사이에서 발생하는 상호작용 및 터널라이닝과 굴착사면 사이의 좁은공간의 되메움시 발생하는 벽면마찰에 의한 단기적인 토압 감소에 대하여 연구를 하였다.

한편, 유건선(1997), 박기정(2000)은 실험을 통해 되메움 지반과 라이닝, 굴착사면과 되메움 지반 사이에서 발생하는 아칭현상으로 인한 토압의 재분배를 고려한 라이닝 거동에 관해 연구를 하였다. 이외의 이대혁(1999)은 모형실험을 통해 라이닝의 균열특성을, 김태곤(1999)은 원심모형실험을 통해 라이닝 재료의 종류에 따라 변하게 되는 라이닝의 역학적 거동에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 산악터널의 시공에서, 터널 상부

의 토피가 얇은 입·출구 부분의 얇은터널(Shallow Tunnel)을 시공할 경우, 경제성을 감안하여 NATM 방식의 터널시공법 대신에 원지반을 경사지게 개착식으로 굴착하고 콘크리트 구조물을 시공한 후 원지반선까지 되메우기를 실시하는 복개터널 시공법에(Cut and Cover Tunneling Method) 관한 원심모형실험을 수행하였다.

원심모형실험은 국도터널과 지하철터널의 두개의 터널 단면에 대하여 굴착경사와 지표면의 경사를 변화시켜 자중에 따른 터널라이닝의 축벽부, 상단부, 어깨부분에 변위계를 설치하여 터널라이닝의 변위를 측정하였다.

모형지반은 주문진 표준사를 이용하였으며 주문진 표준사의 상대밀도는 80 %로 하였다. 모형터널은 아연도 강관을 이용한 연성터널을 사용하여 실험을 수행하였다. 한편, 모형지반으로 이용된 주문진 표준사의 물성을 알아보기 위하여 입도시험과 모형지반과 동일한 상대밀도하의 삼축압축시험을 수행하여 지반의 전단강도정수를 획득하였다.

2. 실험

실험은 본 연구에서 사용된 상대밀도 80%에 대한 시료의 기본물성실험과 압밀배수(CD)의 삼축압축 실험시험, 마찰시험을 실시하였다. 한편, 복개터널시공시에 시공후에 콘크리트 아치구조체의 역학적 거동을 규명하기 위한 원심모형실험을 실시하였다. 원심모형실험은 터널의 단면, 굴착폭, 굴착경사를 매개변수로 하여 시험을 수행하였다.

2.1 시료의 기본물성

개착식터널의 원심모형실험에서 모형지반으로 사용된 시료는 공기건조된 주문진 표준사로서 기본적인 물성은 표 1과 같으며 주문진표준사의 입경가곡곡선은 그림 1에 나타난 바와 같이 통일분류법(USCS)에 의한 분류결과 SP 에 해당하는 입도분포의 균등한 중립모래이다.

한편, 개착식터널의 원심모형실험에 사용된 상대밀도 80% 의 모형지반조성시 균질한 초기상대밀도를 갖는 지반을 형성하기 위하여 그림 2의 강사장치를 제작하여 강사법을 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 kg/cm ³ 1.384 kg/cm ³
Maximum Void Ratio Minimum Void Ratio	0.879 0.546
Specific Gravity	2.6

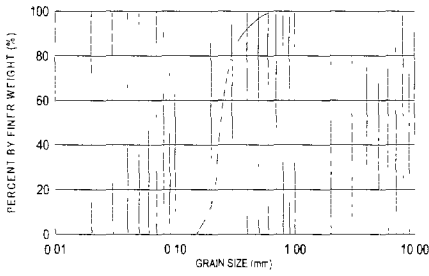


그림 1 주문진 표준사의 입경가적곡선

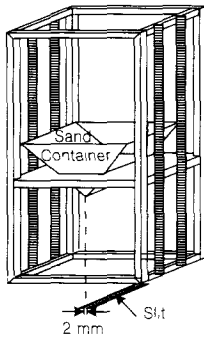


그림 2 강사장치

한편, 터널굴착면에 대한 조도는 굴착면에 No 80의 사포를 굴착면에 부착시켜 굴착면의 거칠기로 하였다

상대밀도 80%의 모형지반에 대한 전단강도정수인 내부마찰각 ϕ , 점착력 C를 산정하기 위하여 삼축압축시험, 터널굴착면에 대한 조도는 모사하기 위해 굴착면에 No. 80의 사포를 부착시킨 마찰시험을 실시 하였다

표 2 삼축압축(CD)시험 및 마찰시험결과

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

Direction Shear Test								
RD (%)	Normal Stress (kg/cm ²)					Slope of Failure Line in $\sigma-\tau$ Space tan δ	Frictional Angle in $\sigma-\tau$ Space ϕ	C
	Peak Strength (kg/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

삼축압축시험의 경우 상대밀도 80%에 대한 응력-변형을 관계 및 축변형을 관계는 그림 3, 그림 4와 같으며, Mohr원은 그림 5와 같다 한편, 굴착면에 대한 마찰시험으로 수행한 직접전단시험결과는 그림 6에 나타난 바와 같으며 각각의 시험결과를 표 2에 나타난 바와 같다.

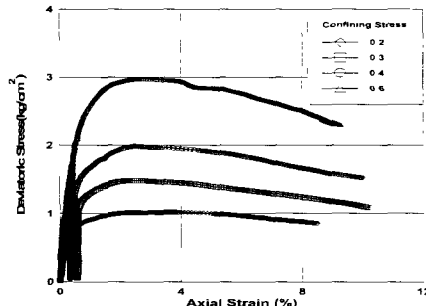


그림 3 축차응력에 대한 축변형을 관계(Dr=80%)

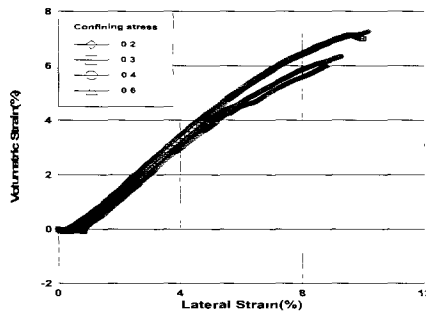


그림 4 축변형률에 대한 체적변형 관계(Dr=80%)

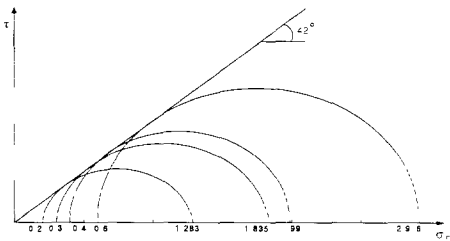


그림 5 삼축압축 시험결과 Mohr (Dr=80%)

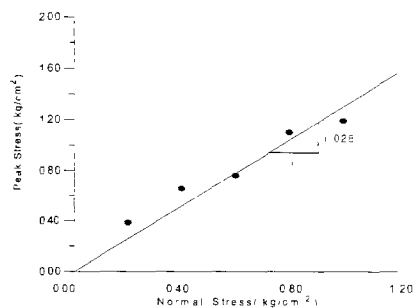


그림 6 No. 80 사포의 마찰시험

2.2 원심모형실험

본 연구에서는 실내에서 축소된 모형을 사용하여 인위적으로 모형을 가속시킴에 따라 토립자의 자중을 증가시켜 현장상태의 응력을 재현시킴으로써 현장 응력상태에서 경제적으로 실험을 수행할 수 있는 원심모형실험기법을 이용하여 개착식터널 중 국도2차선 터널단면 및 지하철(고속전철)터널 그림 7, 그림 8 단면에 대해 표 3에 나타난 바와같이 터널단면형상, 굴착면의 각도, 지표면의 경사, 지반조건, 상대밀도, 하중조건등을 매개변수로 하여 자중실험의 원심모형실험을 실시하였다. 자중의 원심모형실험을 통해 응력수준에 따른 터널내의 라이닝에 변위를 측정하였다.

그림 7, 그림 8의 국도터널 및 지하철터널단면의 제작은 표준단면의 1/40 크기로 그림 9의 직사각형 박스 내에(길이 : 45 cm, 폭 : 20 cm, 높이 : 70 cm) 두께 0.06 mm의 아연도강판을 이용하여 길이 19.5 cm의 터널을 제작하였으며 터널하부는 앵글을 사용하여 고정 하였다. 원심모형실험에 사용된 모형토조는 좌우측벽 및 후면 그리고 저면은 고강도 알루미늄판으로 제작하였으며, 정면은 Plexiglass를 부착하여 실험중 Still Camera를 통해 모형거동을 관찰할 수 있도록 제작하였다. 한편, 원심모형 실험중 벽면에 마찰력을 최소화 하기 위하여 Grease를 문힌 비닐을 모형토조 벽면에 부착하여 벽면의 마찰력을 최소화 하였다.

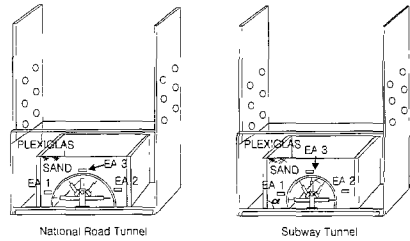


그림 9 모형실험에 사용된 알루미늄토조

표 3 각각의 매개변수에 따른 원심모형실험

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

실험중 모형터널의 내부의 라이닝의 변위측정은 LVDT Holder를 터널내부에 설치하여 그림 11, 그림 12에 나타난 바와 같이 터널 상부 1 개소, 터널 어깨부분 2 개소(전면, 후면), 터널측벽부분 2개소(전면, 후면)등 모두 5 군데에 각각 설치하여 변위를 측정하였다.

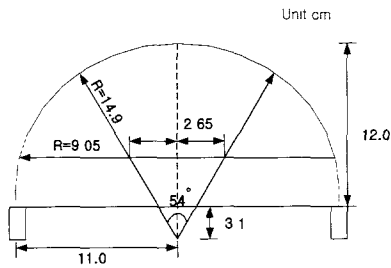


그림 7 국도 2차선 터널단면 (1/40 Scale)

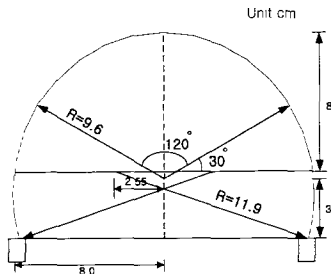


그림 8 지하철 터널단면 (1/40 Scale)

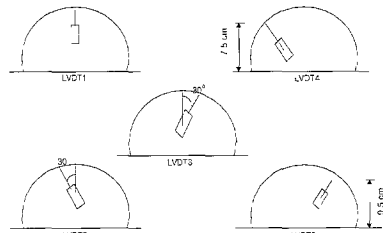


그림 10 국도터널 변위 측정위치

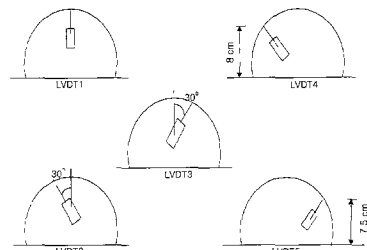


그림 11 지하철 터널 변위측정위치

한편, 각각의 LVDT에 대한 Calibration 값은 그림 13에 나타난 바와 같다.

한편 이와같이 측정된 구조물의 변위의 크기는 계측기로부터 측정되는 모든 데이터를 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터로 자동입력되는 자료획득 장치를 사용하여 시험중 계측자료를 획득하였다. 한편, 표 4은 각각의 LVDT를 계측된 값의 회귀분석 값을 나타내고 있다.

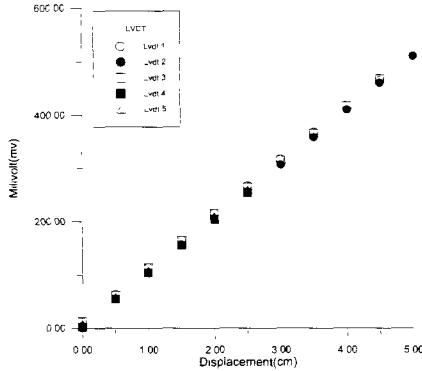


그림 12 LVDT Calibration 값

표 4 각각의 계측기의 회귀분석값

계측기	회귀분석(cm)
LVDT 1	$Y = 100.142 * X + 14.3666$
LVDT 2	$Y = 101.255 * X - 3.77273$
LVDT 3	$Y = 101.079 * X - 12.6727$
LVDT 4	$Y = 100.4 * X + 3.6$
LVDT 5	$Y = 100.709 * X + 9.01429$

2.2.1 모형의 단면

터널의 표준단면에 1/40 Scale의 국도터널 단면 및 지하철터널 단면에 대한 자중의 원심모형실험의 모형단면은 아래의 그림13~18과 같다

모형지반의 형성은 터널의 상부로부터 터널높이(D)의 1D의 반쯤의 성토를 기본으로 하였으며 지표면의 경사를 주는 경우 모형토조가 허용하는 범위내에서 성토높이를 조정하였다. 특히, 그림 15~18의 굴착면의 굴착경사 75°, 60°인 경우 굴착면이 성토면 까지 미치지 못하는 단점이 있어 이러한 경우 모형토조 벽면에 No 80의 사포를 벽면에 부착시켜 굴착면의 조도를 조성하였다.

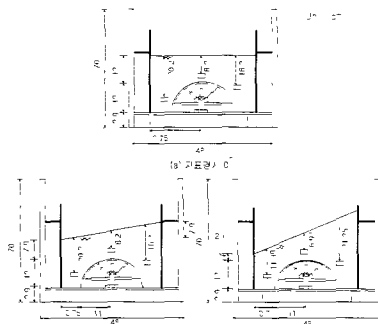


그림 13 국도터널 굴착각도 90°

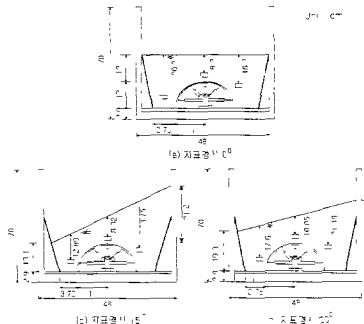


그림 14 국도터널 굴착각도 75°

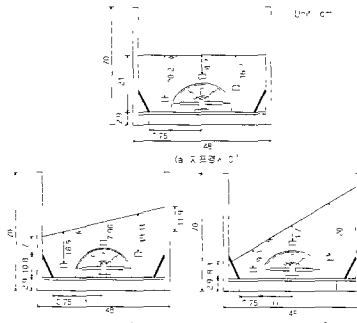


그림 15 국도터널 굴착각도 60°

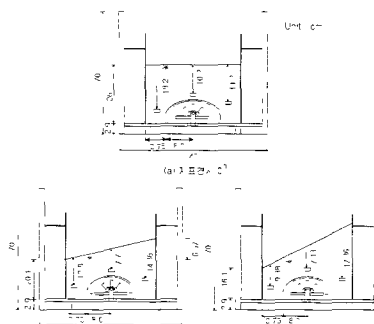


그림 16 지하철터널 굴착각도 90°

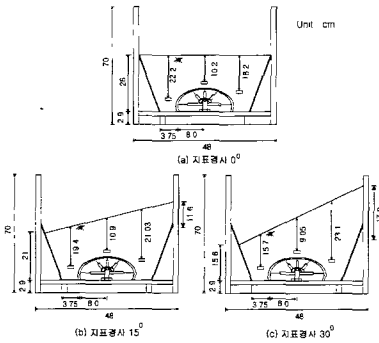


그림 17 지하철티널 굴착각도 75°

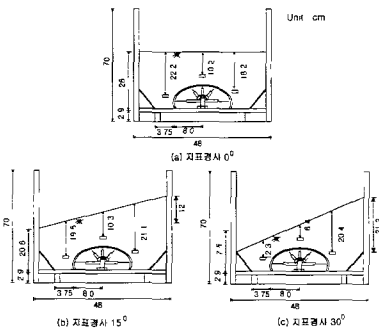


그림 18 지하철티널 굴착각도 60°

2.2.2 실험방법

본 연구에서는 수행된 개착식 터널에 대한 원심 모형실험 실험순서는 다음과 같다.

- 가. 직사각형 토조에 실험조건에 맞는 터널단면을 설치한뒤, 터널 내부에 변위계를 설치한다.
- 나. 터널에 뒤채움을 강사장치를 이용하여 상대밀도 80%의 지반을 형성한다. 뒤채움시 터널에 발생하는 변형을 고려하여 좌우측을 번갈아 가며 조성한다.
- 다. 터널의 상단부 까지 뒤채움이 완료되면 터널의 높이와 동일한 높이로 터널상단에 뒤채움을 한다.
- 라. 한편, 터널의 상단부가 경사진 경우 경사면을 조성한다.
- 마. 계측기는 원심모형시험기 내부에 장착된 기록장치(Data logger)에 연결하고 외부에 있는 컴퓨터와 데이터 전송상태를 점검 확인한다.
- 바. 실험준비가 완료되면 분당회전수(RPM)를 조절하여 원심모형시험기를 가속시키고 원심력을 증가시켜 중력수준 40g에 도달시킨뒤 터널내부의 변위계를 계측하여 변위가 수렴하면 실험을 중단한다.

3. 결과분석

개착식터널중 표준단면의 1/40 Scale의 국도터널 단면 및 지하철티널 단면에 대한 자중의 원심모형 실험을 통해 획득한 터널라이닝의 내측변위를 매개변수별로 비교한 결과는 다음과 같다.

3.1 국도터널의 내공변위특성

그림 19 ~ 그림 21은 국도터널에 대한 자중의 원심모형실험을 실시하여 측정된 터널내부의 변위이다. 한편, 원심모형실험중 계측된 변위는 전압으로 측정되므로 이 값을 표 4의 LVDT 회귀분석값을 이용하여 중력수준-변위(mm)로 변환하였다.

아래의 표 6은 그림 19 ~21(N90), 그림 23 ~26(N75), 그림 27 ~ 30(N60)에 대한 중력수준별 변위결과를 굴착각도와 지표경사로 구분하여 정리된 값을 나타내고 있다.

표 6 국도터널 터널라이닝 내부의 변위

국도터널	지표경사	내측변위(mm)				
		LV 1	LV 2	LV 3	LV 4	LV 5
R90	0	2.8	2.5	2.2	1.02	0.96
	15	2.69	2.3	2.15	0.87	1.23
	30	2.62	2.09	2.39	0.94	1.035
R75	00	3.3	2.69	2.2	1.2	1.35
	15	3.11	2.28	2.32	1.25	1.5
	30	3.00	1.92	2.4	1.07	1.43
R60	00	2.74	2.17	2.03	1.15	0.87
	15	2.23	1.8	2.2	0.88	0.7
	30	2.53	1.77	2.55	0.7	1.88

그림 19~21은 국도터널에 대해 터널의 굴착경사를 90°로 하고 지표면의 경사를 0°, 15°, 30° 변화시켜 측정된 응력수준별 터널의 내공변위이다. 이 값을 정리하여 표 6에 나타내었으며 표 6을 정리하여 그림 22에 나타내었다. 여기서, N은 국도터널을, 90은 굴착경사를, S는 지표경사를 나타내고 있다.

그림 22의 결과에 의하면 LVDT4, 5의 측벽부의 변위는 지표면의 경사에 관계없이 비교적 일정한 것으로 조사되었으며 터널 상단부의 변위 LVDT1은 지표면의 경사가 0°일 때 변위가 가장크게 발생하였으며 지표면의 경사가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 그림 13에 보인바와 같이 상부의 뒤채움두께는 변화가 없으나 지표면

경사로 인해 터널천단 좌측 구속응력의 감소로 인해 트압이 터널측벽으로 이동함에 기인하는 것으로 판단된다.

한편, 터널 어깨부분의 설치된 변위계인 LVDT2, LVDT3의 경우 터널의 좌측부 상단에 설치되어 뒤채움두께의 감소로 인해 변위는 감소하는 경향을 LVDT3, 터널상단부의 뒤채움의 두께가 증가하는 부분은 터널내부의 변위가 증가하는 경향을 나타내고 있다

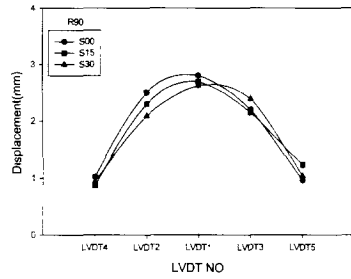


그림 22 실험중 측정된 변위비교 결과(N90)

그림 23~25는 굴착경사 75°에 대한 지표경사의 변화에 따른 터널복공의 변위이며 이를 정리하여 그림 26에 나타내었다.

그림 26의 터널굴착경사 75°의 결과에 의하면 굴착경사 90°와 마찬가지로 LVDT4, 5의 측벽부의 변위는 지표면의 경사(뒤채움의 두께)에 관계없이 비교적 일정한 값을 나타내고 있으며, 터널 천단부의 변위 LVDT1은 지표면의 경사가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있다 이는 앞서 언급한 바와 같이 지표경사에 따른 터널 좌측부의 구속압력 감소에 기인 하는 것으로 판단된다.

한편, 터널 어깨부분의 변위계인 터널 좌측부의 LVDT2의 변위는 지표면의 경사가 증가할수록 뒤채움의 두께감소로 인하여 연직토압의 감소에 따라 내공변위가 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 반면에 LVDT3의 터널의 우측부의 어깨부는 지표경사의 증가에 따라 뒤채움의 두께 증가로 인하여 연직토압의 증가로 인하여 내공변위가 증가하는 경향을 보이고 있다

국도터널에 대해 터널굴착각도 60°로 하고 터널상단의 지표면의 경사를 0°, 15°, 30° 변화시켜 그림 27~29의 응력수준에 따른 터널 각 부위의 변위측정 결과를 얻었으며, 그림 30은 위의 결과를 정리한 표 6의 터널 계측부위별 변위결과를 정리하여 나타낸 결과이다

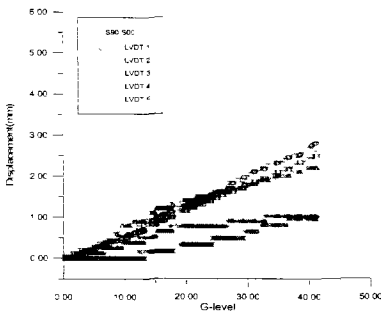


그림 19 터널라이닝의 변위(N90S0)

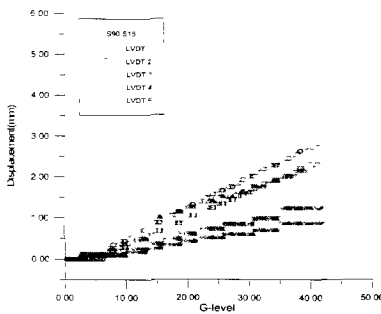


그림 20 터널라이닝의 변위(N90S15)

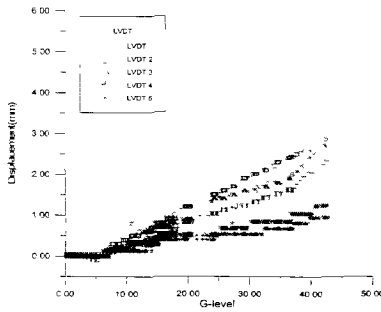


그림 21 터널라이닝의 변위(N90S30)

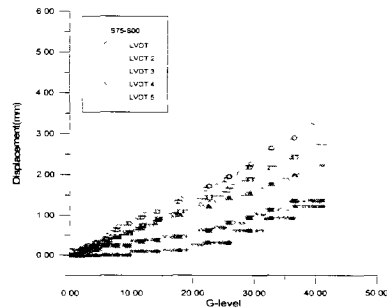


그림 23 측정된 터널라이닝의 변위(N75S0)

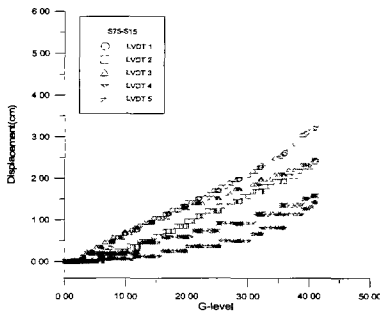


그림 24 측정된 터널라이닝의 변위(N75S15)

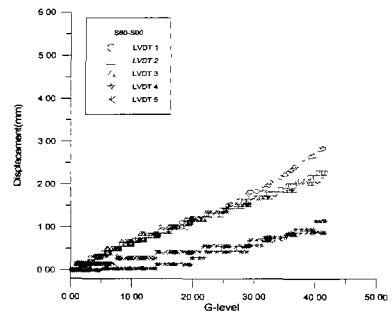


그림 27 측정된 터널라이닝의 변위(N60S0)

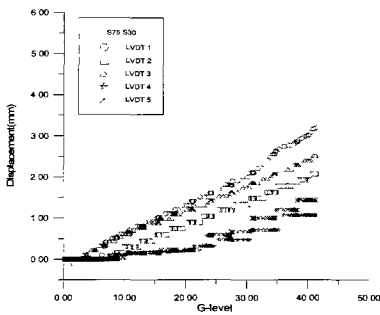


그림 25 측정된 터널라이닝의 변위(N75S30)

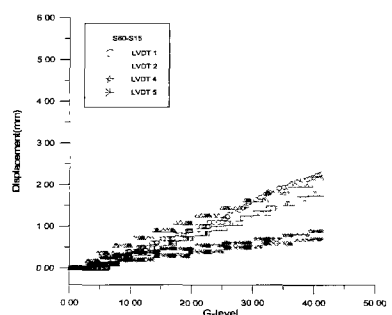


그림 28 측정된 터널라이닝의 변위(N60S15)

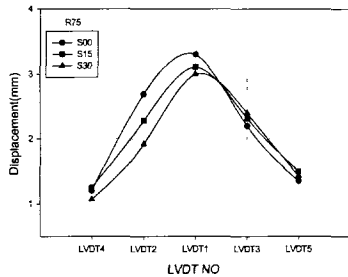


그림 26 실험중 계측된 변위비교 결과(N75)

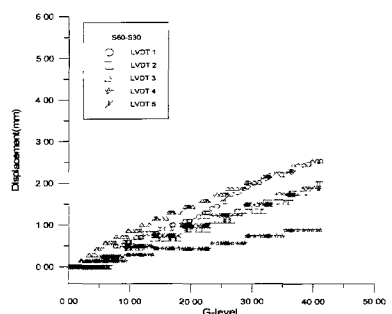


그림 29 측정된 터널라이닝의 변위(N60S30)

그림 30에 의하면 LVDT4. 5의 측벽부에 위치한 터널라이닝의 내부변위는 지표면의 경사에 관계없이 터널라이닝에 발생한 변위의 크기가 크게 차이가 나지는 않지만 앞서 비교한 터널굴착각도 90°, 75°에 비해 비교적 차이가 남을 알수 있다. 이는 터널굴착각도가 넓어지면서 굴착경사면과 터널사이의 폭이 넓어져 토압의 구속효과가 감소함에 따른 이유로 판단된다. 한편, 터널 상단부의 변위 LVDT1의 크기는 굴착경사 90°, 75°와 마찬가지로 지표면의 경사가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있으며 중간의 폭은 굴착경사 90°에 비해서 75°, 60°일때의 증가의 폭이 증가하는 것을 볼 수 있다.

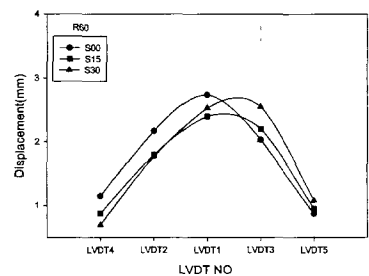


그림 30 실험중 계측된 변위비교 결과(N60)

한편, 터널의 좌측 어깨부분에 설치된 변위계인 LVDT2의 라이닝의 변위는 앞서 비교한 터널굴착 경사 90°, 75°와 같이 지표면의 경사가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있으며, 터널 우측 어깨부분에 위치한 변위계 LVDT3은 지표경사가 증가할수록 변위가 증가하는 경향을 보이고 있다

4.2 지하철터널의 내공변위특성

개착식터널중 표준단면의 1/40 Scale의 그림 8의 지하철터널 단면에 대해, 그림 11의 터널 각부위(상부 1개소, 어깨부분 2개소, 측벽 2개소)의 변위가 굴착면의 각도 90°, 75°, 60°와 지표면의 경사를 0°, 15°, 30°에 따른 영향을 알아보기 위하여 그림 16~18 모형단면에 대하여 중력수준 40 G의 자중의 원심모형실험을 실시하였다

한편, 표 7은 표 4의 LVDT 회귀분석값을 이용하여 그림 31~33(S90), 그림 35~37(S75), 그림 39~41(S60)의 모형실험을 통해 계측된 변위를 계산하여 터널굴착경사와 지표경사로 구분하여 정리한 결과이다 여기서, S은 지하철터널을, 90은 굴착경사를, S는 지표경사를 나타내고 있다

표 7 지하철터널 터널라이닝 내부의 변위

지하철터널		내측변위(mm)				
	기표경사	LV 1	LV 2	LV 3	LV 4	LV 5
S90	00	3.200	2.46	1.58	1.08	1.30
	15	3.015	1.78	1.94	0.90	1.50
	30	3.05	1.50	2.10	1.00	1.37
S75	00	3.120	2.70	1.66	1.50	2.05
	15	3.230	2.56	1.90	1.37	2.29
	30	3.300	2.71	2.50	1.525	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 31~33은 지하철터널 굴착경사 90° 대한 터널라이닝의 변위이다.

측벽부에 위치한 LVDT4, 5의 변위는 지표면의 경사에 따라 약간의 차이는 있으나 비교적 일정한 값을 나타내고 있다 한편, 터널 상단부의 LVDT1의 변위는 지표면의 경사가 증가할수록 천단변위가 감소하는 경향을 보이지만 하나 큰 차이는 없는 것으로 나타나고 있다.

한편, 터널 어깨부분의 변위계인 LVDT2의 변위의 변화폭이 LVDT3에 비해 크게 나타나고 있으며, 이는 그림 16에 나타난 바와 같이 LVDT2의 경우 기표경사 증가에 뒤처움두께의 감소폭이 큰 반면에 LVDT3은 뒤처움두께의 증가폭이 LVDT2에 비해 비교적 작은 것에 따른 구속응력의 증감에 의한 것으로 판단된다

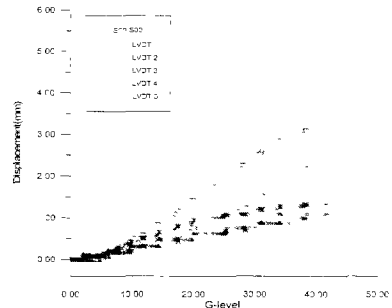


그림 31 측정된 터널라이닝의 변위(S90S0)

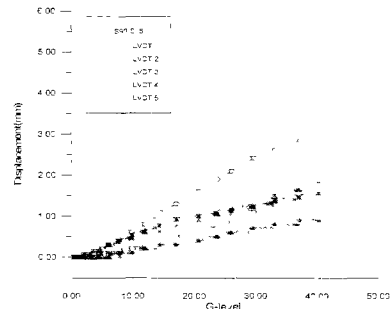


그림 32 측정된 터널라이닝의 변위(S90S15)

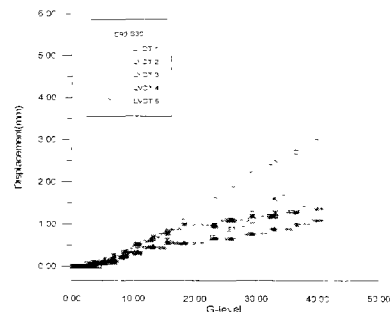


그림 33 측정된 터널라이닝의 변위(S90S30)

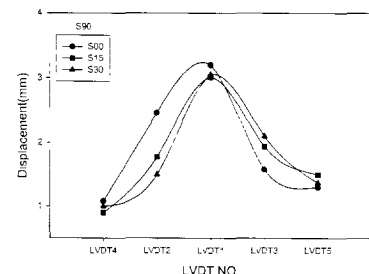


그림 34 실험중 계측된 변위비교 결과(S90)

지하철터널단면 그림 17에 대한 원심모형실험을 통해 그림 35 ~ 그림 37의 응력수준에 따른 터널의 내공변위 결과를 얻었다. 한편, 이 결과를 정리하여 그림 38에 나타내었다.

그림 38의 터널굴착각도 75°의 결과에 의하면 측벽부에 위치한 LVDT4, 5의 변위는 지표면의 경사에 따라 국도터널과 달리 터널 좌측에 위치한 LVDT4에 비해 우측에 위치한 LVDT5의 변위가 크게 나타나고 있으며 이는 지표경사가 증가에 따라 토압의 증가에 따른 것으로 판단된다.

한편, 터널 상단부의 변위계 LVDT1의 변위는 지표면의 경사가 증가할수록 변위는 감소하는 변화를 보이기는 하나 큰 차이는 없는 것으로 나타나고 있다.

터널 어깨부분의 변위계 LVDT2, LVDT3의 변위의 크기는 좌측의 경우 지표면의 경사가 0°일때가 우측의 경우 지표면의 경사가 30°일 때 변위가 조금 크게 나타나는 것으로 나타나고 있으며 이 또한 미미하지만 지표경사에 따른 뒤택움두께의 증감에 의한 연직토압의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

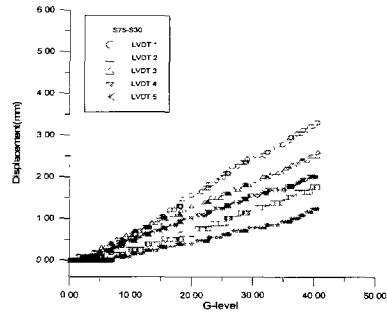


그림 37 측정된 터널라이닝의 변위(S75S30)

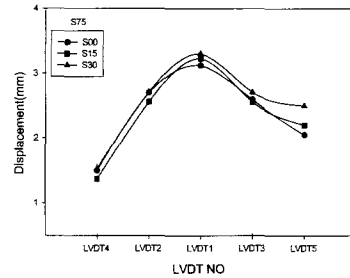


그림 38 실험중 계측된 변위비교 결과(S75)

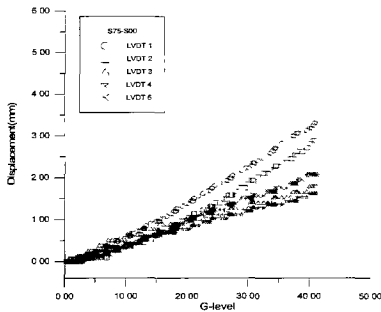


그림 35 측정된 터널라이닝의 변위(S75S0)

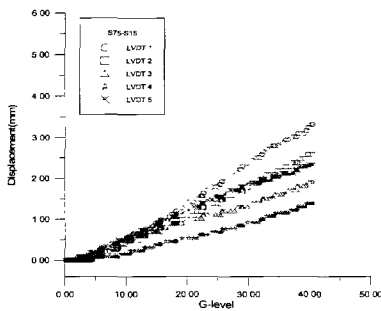


그림 36 측정된 터널라이닝의 변위(S75S15)

그림 39~41 터널 각 부위의 변위는 그림 19의 굴착경사 60°에 대한 지하철터널 실험결과이다. 한편, 그림 42는 굴착각도 60°의 각각의 지표경사에 따른 변위를 비교한 결과이다.

그림 42의 결과에 의하면 측벽부에 위치한 LVDT4, 5의 변위는 지표면 경사 0°, 15°의 경우 큰 차이를 보이지 않으나 지표경사가 30°인 경우에 특히 터널 우측에 위치한 LVDT5에서 변위가 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 앞서 국도터널에서 언급한 바와 같이 굴착경사에 따른 뒤택움두께 증가에 따른 터널라이닝 주변토압 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

터널의 상단부의 LVDT1의 변위는 지표경사가 30°인 경우가 특히, 변위가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 그림 18의 터널단면에서 보인바와 같이 지표면의 경사 0°, 15°의 경우 뒤택움두께가 거의 유사한 반면 지표경사가 30°인 경우 뒤택움두께 감소폭이 커 터널상단의 변위가 감소하는 것으로 판단된다.

한편, 터널 어깨부분의 변위계인 LVDT2, LVDT3의 변위는 터널굴착경사 90°, 75°의 경우에 비하여 지표면의 경사가 증가할수록 변위가 증가함을 볼 수 있었으며 이는 굴착경사의 감소에 따른 굴착폭의 증대가 연직토압의 증대를 유발한 것으로 판단된다.

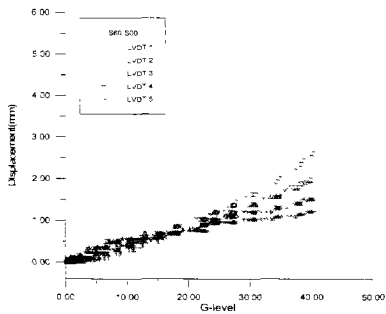


그림 39 측정된 터널라이닝의 변위(S60S0)

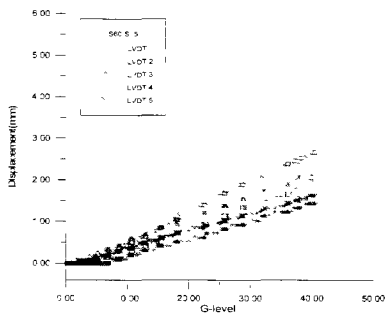


그림 40 측정된 터널라이닝의 변위(S60S15)

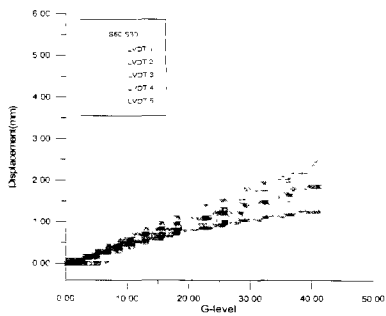


그림 41 측정된 터널라이닝의 변위(S60S30)

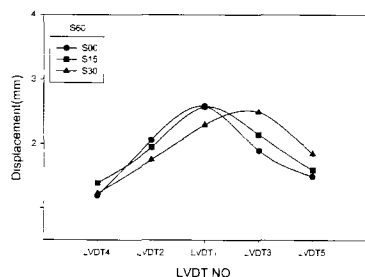


그림 42 실험중 계측된 변위비교 결과(S60)

4. 결론

개착식터널중 국도터널과 지하철터널단면에 대한 표준단면을 1/40 Scale로 축소한 원심모형실험을 통해 터널라이닝에서 발생하는 변위를 굴착 경사와 지표면의 경사를 변화시켜 측정하였으며 실험결과를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1 국도2차선 및 지하철 터널의 표준단면과 터널의 굴착각도를 90°, 75°, 60°로 변화시키고, 각각의 경우에 대하여 지표면의 경사를 0°, 15°, 30°로 변화시켜 수행된 40G 응력수준의 원심모형 실험을 통해 측정된 터널라이닝의 내공변위는 뒤채움 심도가 증가된 굴착면에 인접한 라이닝의 나공변위는 뒤채움심도증가에 따른 주변 토압이 증가로 인하여 변위가 증가하는 반면, 뒤채움 심도가 감소한 반대편에서는 라이닝의 내공변위가 주변 토압이 감소에 기인하여 감소하는 경향을 확인하였다.

2 터널의 굴착각도를 90°, 75°, 60°로 변화시킨 원심모형실험결과 굴착면의 경사가 완만해 질수록 뒤채움재의 하중으로 인해 라이닝의 측벽과 천단부의 내공변위 및 토압은 증가하고, 어깨부의 내공변위 및 토압은 큰 변화가 없는 것으로 측정되었다

3 한편 지표면의 경사를 0°, 15°, 30°로 변화시키면서 수행한 원심모형실험결과 천단부의 변위는 지표면의 경사변화에 따라 뒤채움 심도변화가 작으므로 인해 비슷한 크기의 내공변위가 측정되었다.

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] Handy, R L, "The Arch in Soil Arching", *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol 111, No. 3, pp.302-318, 1985
- [4] Harrop-Williams, K. (1989). "Arch in Soil Arching", *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 115, No 3,

pp.415-419, 1989.

- [5] Kellog, C G., "Vertical Earth Loads on Buried Engineered Works", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 119 NO.3, pp.487-506, 1993
- [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 Calculated and Measured Displacements on Cut-and-Cover Tunnels", *Proceedings of the 5th International Symposium on Tunneling*, London, pp.357-362. 1988.
- [8] 김택곤, "원심모형실험 및 수치해석에 의한 사질 토 기반내 터널복공의 역학적거동에 관한 연구", 서울대학교 대학원 박사학위논문, pp.36-37, pp.139-165. 1999.
- [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
- [11] 유건선, "굴착경사가 개착식터널의 구조적 거동에 미치는 영향에 관한 연구", 韓國地盤工學會論文集 제17권 제6호, pp.245-255, 2001.
- [12] 유건선. "지표경사가 개착식터널의 구조적 거동에 미치는 영향에 관한 연구", 大韓土木學會論文集-C : 터널공학, 토질및기초공학 제22권 제1호, pp.99-109, 2002.
- [13] 이대혁, "모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 균열특성에 관한 연구". 서울대학교 대학원 박사학위논문, pp.65-67, 1999.
- [14] 이명욱, "사면에 인접한 옹벽의 원심모델링", 강원대학교 대학원 박사학위논문, pp.74-79, 1998