경사볼트의 보강효과에 대한 모형시험 연구

Model Test Study on the Reinforcing Effect of Inclined System Bolting

이재덕* · 김병일** · 박명선*** · 유완규****

Lee, Jea-Dug · Kim, Byoung-II · Piao, Ming-Shan · Yoo, Wan-Kyu

Abstract

The rockbolt functions as a main support, which restricts enlargement of the plasticity area and increases stability in the original ground around tunnels, and prevents a second deformation of an excavated surface by supplementing vulnerability arising from opening of the excavated surface. System bolting is generally applied if ground conditions are bad. System bolting is generally installed perpendicular to the excavation direction in every span. If a place is narrow, or it is difficult to insert bolts due to construction conditions, it may be connected and used with short bolts, or installed obliquely. In this study, laboratory model tests were performed to analyze the effect of the ground being reinforced by inclined bolts, based on a bending theory that assumes that the reinforced ground is a simple beam. In all test cases, deflections and vertical earth pressures induced by overburden soil pressure were measured. Total of 99 model tests were carried out, by changing the installation angle of bolts, lateral and longitudinal distance of bolts, and soil height. The model test results indicated that when the installation angle of bolts was less than 75° , deflections of model beams tended to increase rapidly. Also, the relaxed load that was calculated by earth pressure was rapidly increased when the installation angle of bolts was less than 75° . However, the optimum installation angle of inclined bolts was judged to be in the range of $90^\circ \sim 75^\circ$. Also, as might be expected, the reinforcement effect of bolts was increased when the longitudinal and lateral distance of bolts was decreased.

Keywords : rock bolt, inclined bolt, reinforcement effect, laboratory model test, deflection, vertical earth pressure

요 지

록볼트는 터널 주변 원지반의 소성영역 확대를 방지하고 원지반의 안정성을 증가시키므로 굴착면 개방에 따른 취약점을 보완하여 2차 변형을 억제하는 주 지보재 역할을 할 수 있어 지반조건이 불량한 경우에는 시스템 볼팅하는 것이 일반적이다. 시스템 볼팅은 보통 굴착방향과 수직하게 설치하게 되는데 장소가 협소하거나 시공여건상 볼트 삽입이 어려운 곳에서는 짧은 볼트를 연결하여 사용하거나 경사지게 설치하는 경우가 있다. 본 연구에서는 록볼트 보강효과를 분석하기 위하여 경사 볼트로 보강된 지반을 단순보로 가정한 실내모형시험을 실시하였다. 경사볼트의 설치각도, 종방향 및 횡방향 설치간격, 토피고 등을 변화시켜 99회의 모형시험을 수행하였으며, 단순보로 조성된 모형지반의 토피하중에 의한 처짐량 및 연직토압을 측정하였다. 모형시험결과 볼트의 설치각도가 75° 이하인 경우 처짐량이 급격히 증가하는 경향이 나타났으며, 모형지반의 이완하중 발생률도 모형볼트의 설치각도가 75° 이하인 경우 급격히 증가하는 것으로 나타나 경사 볼트의 최적 설치각도는 $90^\circ \sim 75^\circ$ 범위인 것으로 판단하였다. 또한, 볼트의 종방향 및 횡방향 설치간격이 좁아질수록 보강효과가 증가하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 록볼트, 경사볼트, 보강효과, 모형시험, 처짐량, 연직토압

1. 서 론

NATM 터널에서 설치하는 지보공법은 터널 굴착 주변지반이 자체의 지지력을 발휘하고 유지할 수 있도록 하는 것에 목적을 두고 있으며, 주요 지보공법으로는 숏크리트와 록볼트가 있다. 숏크리트는 암반의 절리나 불규칙한 요철을 채워 터널 굴착면 주변 원지반의 안정성 확보에 우수한 폐합된

원이나 아치를 조성하여 구조적인 역할을 하도록 한다. 반면 록볼트는 내측에서 지반을 구속하여 터널주변 암반자체의 지보능력을 향상시키는 방법으로 암반이 지니고 있는 잠재적인 결함을 보강하고 암반이 가지고 있는 지내력을 증가시키는 역할을 한다(안정환과 이상덕, 2009; Osgoui and Erdal, 2009).

록볼트는 국내 및 해외에서도 지하 구조물 형성 시 주로

* (주)대원토질 차장(E-mail : duk1650@naver.com)

** 정회원 · 교신저자 · 명지대학교 토목환경공학과 교수(E-mail : bikim@mju.ac.kr)

*** 명지대학교 토목환경공학과 석사졸업(E-mail : myungsun821@nate.com)

**** 정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 박사후 연구원(E-mail : lyu5553@hanafos.com)

사용되고 있는 지보재이며, 터널의 설계 및 시공에서는 2가지 형태의 록볼트가 사용되고 있다. Hoek and Brown(1980), Stillbrog(1994)는 전면접착형 록볼트(Grouted Rockbolt)와 앵커 록볼트(Anchored Rockbolt)로 구분하였다(Carranza-Torres, 2009). 이 중에서 그라우트 재료에 의하여 볼트의 전장이 지반에 정착되는 전면접착형 록볼트가 주로 사용되고 있다(이연규 등, 2010). 록볼트는 기능적인 측면에서 영구적인 목적과 임시적인 목적으로 사용되며, 배치방식에 따라 부분적인 지반의 결합을 보강하기 위한 랜덤 볼팅(Random Bolting)과 규칙적인 배치를 통하여 터널 주변의 지반아칭을 형성하기 위한 시스템 볼팅(System Bolting)으로 구분할 수 있다(한상현과 여규권, 2007).

록볼트를 설치하기 위한 시공공간이 협소하거나 시공여건상 볼트 삽입이 어려운 곳에서는 짧은 볼트를 연결하여 사용하거나 경사지게 설치하는 경우가 있다. 최근 국내에서도 터널 방재에 관한 관심이 증가하면서 대인 피난갱의 설치가 증가하고 있으며, 대인 피난갱의 시공에서는 굴착단면이 협소하여 기존 록볼트 천공 장비 운용이 어려워 경사 록볼트를 시공한 사례가 있다.

김동규와 정호섭(2007)은 최근 일본에서 시공실적이 있는 운용중인 터널 확대는 차량의 대형화, 교통량 증가, 터널의 기능향상 등의 목적으로 많이 계획되고 있으며, 용지매수와 자연환경 영향 등에 대한 사회적 제약과 기존 자연의 유용한 활용이라는 관점에서 기존 터널의 확대공사가 앞으로 증가될 것으로 예상하였다. 서경원 등(2008)은 실제 일본의 시공사례 분석을 통하여 운영중 터널 확대의 경우는 기존터널의 대부분을 프로텍터가 차지하고 있기 때문에 굴착방향에 수직하여 록볼트를 설치할 수 없어 록볼트를 경사지게 설치하는 경우가 있는 것으로 보고하였으며, 김동규와 정호섭(2007)도 운용중인 터널 확대에서는 록볼트 시공을 위한 작업성이 매우 나쁘기 때문에 록볼트의 패턴(경사 록볼트 설치, 사전 록볼트 시공, 록볼트 제외 등)에 대한 검토가 필요한 것으로 보고하였다.

록볼트에 대한 보강효과에 관한 연구로 Roy and Rajagopalan(1997)는 Beam-Column 이론을 적용한 해석적인 연구를 수행하였으며, 문웅주 등(2005)은 사질토 지반에 대한 단순보 모델 모형시험을 실시하여 록볼트 보강에 의한 원지반의 보강효과를 분석하였다. 안정환 등(2009)도 수평절리 암반에 대한 단순보 모델 모형시험을 실시하여 긴장력이 가해진 록볼트의 보강효과를 확인하였다. 또한, 최근 2차선 도로터널 표준단면에 대한 수치해석을 통하여 록볼트의 설치각도 변화에 따른 연구를 수행한 사례(김웅구 등, 2010)는 있으나 경사볼트 설치에 따른 보강효과를 정량적으로 평가하기 위한 연구는 아직 미비한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 터널에 시공되는 경사볼트의 보강효과를 분석하기 위하여 볼트와 슛크리트로 보강된 사질토 지반을 단순보로 가정한 실내모형시험을 실시하였다. 볼트의 설치각도, 종방향 및 횡방향 설치간격, 토피고 등을 변수로 하였으며, 단순보로 조성된 모형지반의 처짐량 및 연직도압을 측정하여 시스템 경사볼트의 설계기준 제시를 위한 보강효과를 확인하였다.

2. 실내모형시험

2.1 모형시험에 사용한 재료

본 연구에서는 터널 시공 중 주로 적용되고 있는 전면접착형 록볼트를 모형화하였다. 모형볼트의 재질은 그라우트와 볼트간의 마찰력이 충분히 발현될 수 있도록 한국산업 표준 규격 KS B 1037에 제시된 직경 10mm의 전산볼트(stud bolt)를 사용하였다(표 1 참조).

록볼트의 그라우트(정착재료)는 시멘트 모르타르, 시멘트 페이스트, 수지 등이 있으나, 본 연구에서는 실제 터널 시공 현장에서 주로 사용되고 있는 레진(Resin)을 사용하지 않고 실험실에서 제작 및 사용이 편리한 시멘트 페이스트를 사용하였다. 터널표준시방서에 의하면 시멘트를 그라우트로 사용하는 경우 물-시멘트비를 40~50%로 제시하고 있어 본 연구에서는 물-시멘트비 45%의 시멘트 페이스트를 그라우트로 사용하였다.

실험조건상 모형지반에서 그라우트 타설에 어려움(삽입홀의 붕괴)이 있었으며, 정착재료의 경화에 많은 시간이 소요(최소 재령강도 7일)되는 관계로 모형볼트를 사전 제작하여 사용하는 것으로 계획하였다(그림 1 참조). 모형지반과 그라우트의 마찰력이 발현할 수 있도록 모형볼트 제작 시 모형지반 조성조건과 동일한 조건에서 모형볼트 설치하여 그라우팅을 실시하였으며, 그라우트의 강도가 충분히 발현될 수 있도록 모형볼트 제작지반에서 28일간의 습윤 양생기간 후 사용하였다. 또한, 터널표준시방서에서는 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하나 조기 접착력의 발현이 필요한 경우 급결제 등을 혼합하거나 조강 시멘트를 사용하도록 제시되어 있으나, 모형볼트를 사전 제작하여 사용하는 점을 고려하여 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 제작된 모형볼트의 직경은 14mm, 그라우팅 길이는 120mm이다.

강판(두께=8mm, 길이=1.5m, 폭=20cm)은 슛크리트를 모형화 하기 위하여 사용하였으며, 모형볼트의 종방향 및 횡방향 설치간격에 따라서 모형볼트 설치가 가능하도록 미리 모

표 1. 모형시험에 사용된 전산볼트의 물리적 성질

최소인장강도 (N/mm ²)	최소인장하중 (N)	파단연신율 (Min.)	단면수축률 (Min.)
800	46,400	12	52

표 2. 모형시험에 사용된 주문진표준사의 특성

비중	단위중량, γ _a (kN/m ³)	상대밀도, D _r (%)	통일분류 (USCS)	점착절편, c(kN/m ²)	전단저항각, φ(°)
2.62	16.14	80	SP	0	40.1

그림 1. 시험에 사용된 모형볼트

그림 2. 시험에 사용된 흙의 입도분포곡선

형볼트 삽입구멍을 형성하여 사용하였다. 모형볼트와 강판의 결합은 너트를 이용하였다.

2.2 모형지반

모형지반 형성에 사용된 주문진 표준사의 상대밀도시험(KS F 2308) 결과 최대건조단위중량(γ_{dmax})은 16.79kN/m^3 , 최소 건조단위중량(γ_{dmin})은 13.96kN/m^3 으로 나타났으며, 모형지반 조성 시 강사장치를 이용하여 상대밀도(D_r) 80%를 만족하는 건조단위중량(γ_d) 16.14kN/m^3 의 모형지반을 형성하였다. 상대밀도 80%로 조성된 모래시료에 대한 압밀-배수 삼축압축 시험(CD Test)을 실시한 결과 전단저항각은 40.1° , 점착절편은 0kN/m^2 으로 나타났다. 표 2은 모형시험에 사용된 주문진 표준사의 물성 및 역학적 특성치를 정리하여 나타낸 것이고, 그림 2는 이 흙의 입도분포곡선이다.

2.3 모형시험 변수

Rabcewicz(1964)는 막장면 가까이에 규칙적으로 타설되고 철망 또는 숏크리트로 록볼트 사이의 느슨함을 막으면 록볼트로 보강된 원지반 아치를 형성할 것으로 고려하여, 원지반은 굴착으로 인하여 1회 굴진장의 1/2 높이만큼 이루어 터널의 종방향과 횡방향으로 지반아치가 형성된다고 보았다. 이 연구에서는 모형볼트의 기준 설치간격을 $10.0 \times 10.0\text{cm}$ 로 하였다. Rabcewicz의 아치이론에 따라 모형볼트의 설치각도 90° 에서 지반아치의 두께가 5.0cm 이상이 형성될 수 있는 모형볼트의 설치길이(12.0cm)를 산정하여 적용하였다.

모형볼트의 종방향(4case) 및 횡방향(2case) 설치간격, 모형볼트의 설치각도(4case) 및 모형지반의 높이(3case) 등을 변수로 하여 총 96회의 모형시험을 실시하였으며, 무보강 지반에 대하여 모형지반의 높이를 변화시켜 3회 실시하여 총 99회의 시험을 실시하였다. 표 3는 모형볼트의 종방향 및 횡방향 설치간격에 따른 모형볼트 설치개수 정리하여 나타낸 것이며, 표 4은 모형볼트를 설치한 시험 case의 시험 변

표 3. 설치 간격에 따른 모형볼트 설치개수

	종방향 간격(cm)							
	11.5		10.0		8.5		7.0	
횡방향 간격(cm)	2열	1열	2열	1열	2열	1열	2열	1열
	10	20	10	20	10	20	10	20
모형볼트 설치개수	18	9	20	10	24	12	32	16

수에 대해서 정리하여 나타낸 것이다.

2.4 모형시험 방법

모형시험은 모형지반의 조건 및 규모를 실제와 가깝게 할수록 치수에 의한 영향이 작게 발생하나, 실제 시험에서는 시험조건을 고려하여 시험에 취급이 용이한 재료 및 모델을 사용하는 것이 일반적이다. 이 연구에서는 모형볼트 보강효과에 의하여 형성되는 지반아치 및 강판은 합성보로 고려하였으며, 모형볼트 상부에 균일한 밀도로 조성되는 모형지반의 자중은 합성보에 등분포하중으로 작용하는 것으로 고려하였다. 이 합성보의 지점구조는 단순보로 형성하였으며, 합성보의 처짐량 및 모형볼트에 의하여 형성되는 지반아치에 대한 연직토압을 측정하여 시스템 경사볼트에 대한 보강효과를 확인하였다. 모형시험 순서와 계측기 설치 위치는 각각 그림 3 및 그림 4와 같다.

그림 3. 모형시험 순서

그림 4. 모형시험 계측기 설치 위치

그림 5. 시험에 사용한 모형토조

시험토조는 강재로 제작하였으며, 전면을 투명한 아크릴 판으로 구성하여 모형지반의 조성과정 및 변형을 확인할 수 있도록 하였다. 토조의 내부 공간은 1,200×700×200mm(길이×높이×폭)이며, 토조의 하부 양끝단에 롤러를 설치하여 강판의 자연적인 변형이 발생할 수 있도록 제작하였다(그림 5 참조). 토조 하부는 강판의 변형이 발생할 수 있도록 빈 공간으로 형성되어 있으며, 모형지반 조성 시 강판의 변형발생을 억제할 수 있도록 별도 제작한 처짐제어 장치(그림 6)를 설치하여 강판의 변형을 억제하였다. 측정장치로 토조의 중앙 하부에 변위센서(LVDT)를 설치하였으며, 모형지반에 작용하는 연직토압의 변화를 측정하기 위하여 모형지반 조성 중 2개소(A지점 및 B지점)에 측정용량 200kPa인 토압계를 설치하여 모형지반의 변형 전후의 연직토압을 측정하였다.

그림 6. 처짐제어 장치 및 LVDT 설치전경

그림 7. 모형볼트 설치전경

표 4. 모형볼트 보강지반에 대한 시험 Case

볼트 간격(cm)		설치각도 (°)	토피고 (cm)	표기방법	볼트 간격(cm)		설치각도 (°)	토피고 (cm)	표기방법
종방향	횡방향				종방향	횡방향			
11.5	2열	90	24	L11.5-2Line-A90-24	8.5	2열	90	24	L8.5-2Line-A90-24
			36	L11.5-2Line-A90-36				36	L8.5-2Line-A90-36
			60	L11.5-2Line-A90-60				60	L8.5-2Line-A90-60
		75	24	L11.5-2Line-A75-24			75	24	L8.5-2Line-A75-24
			36	L11.5-2Line-A75-36				36	L8.5-2Line-A75-36
			60	L11.5-2Line-A75-60				60	L8.5-2Line-A75-60
		60	24	L11.5-2Line-A60-24			60	24	L8.5-2Line-A60-24
			36	L11.5-2Line-A60-36				36	L8.5-2Line-A60-36
			60	L11.5-2Line-A60-60				60	L8.5-2Line-A60-60
		45	24	L11.5-2Line-A45-24			45	24	L8.5-2Line-A45-24
			36	L11.5-2Line-A45-36				36	L8.5-2Line-A45-36
			60	L11.5-2Line-A45-60				60	L8.5-2Line-A45-60
	1열	90	24	L11.5-1Line-A90-24		1열	90	24	L8.5-1Line-A90-24
			36	L11.5-1Line-A90-36				36	L8.5-1Line-A90-36
			60	L11.5-1Line-A90-60				60	L8.5-1Line-A90-60
		75	24	L11.5-1Line-A75-24			75	24	L8.5-1Line-A75-24
			36	L11.5-1Line-A75-36				36	L8.5-1Line-A75-36
			60	L11.5-1Line-A75-60				60	L8.5-1Line-A75-60
		60	24	L11.5-1Line-A60-24			60	24	L8.5-1Line-A60-24
			36	L11.5-1Line-A60-36				36	L8.5-1Line-A60-36
			60	L11.5-1Line-A60-60				60	L8.5-1Line-A60-60
		45	24	L11.5-1Line-A45-24			45	24	L8.5-1Line-A45-24
			36	L11.5-1Line-A45-36				36	L8.5-1Line-A45-36
			60	L11.5-1Line-A45-60				60	L8.5-1Line-A45-60

표 4. 모형볼트 보강지반에 대한 시험 Case (계속)

볼트 간격(cm)		설치각도 (°)	토피고 (cm)	표기방법	볼트 간격(cm)		설치각도 (°)	토피고 (cm)	표기방법
종방향	횡방향				종방향	횡방향			
10.0	2열	90	24	L10.0-2Line-A90-24	7.0	2열	90	24	L7.0-2Line-A90-24
			36	L10.0-2Line-A90-36				36	L7.0-2Line-A90-36
			60	L10.0-2Line-A90-60				60	L7.0-2Line-A90-60
		75	24	L10.0-2Line-A75-24			75	24	L7.0-2Line-A75-24
			36	L10.0-2Line-A75-36				36	L7.0-2Line-A75-36
			60	L10.0-2Line-A75-60				60	L7.0-2Line-A75-60
		60	24	L10.0-2Line-A60-24			60	24	L7.0-2Line-A60-24
			36	L10.0-2Line-A60-36				36	L7.0-2Line-A60-36
			60	L10.0-2Line-A60-60				60	L7.0-2Line-A60-60
		45	24	L10.0-2Line-A45-24			45	24	L7.0-2Line-A45-24
			36	L10.0-2Line-A45-36				36	L7.0-2Line-A45-36
			60	L10.0-2Line-A45-60				60	L7.0-2Line-A45-60
	1열	90	24	L10.0-1Line-A90-24		1열	90	24	L7.0-1Line-A90-24
			36	L10.0-1Line-A90-36				36	L7.0-1Line-A90-36
			60	L10.0-1Line-A90-60				60	L7.0-1Line-A90-60
		75	24	L10.0-1Line-A75-24			75	24	L7.0-1Line-A75-24
			36	L10.0-1Line-A75-36				36	L7.0-1Line-A75-36
			60	L10.0-1Line-A75-60				60	L7.0-1Line-A75-60
		60	24	L10.0-1Line-A60-24			60	24	L7.0-1Line-A60-24
			36	L10.0-1Line-A60-36				36	L7.0-1Line-A60-36
			60	L10.0-1Line-A60-60				60	L7.0-1Line-A60-60
		45	24	L10.0-1Line-A45-24			45	24	L7.0-1Line-A45-24
			36	L10.0-1Line-A45-36				36	L7.0-1Line-A45-36
			60	L10.0-1Line-A45-60				60	L7.0-1Line-A45-60

3. 시험결과와 분석

3.1 처짐량

그림 8는 종방향 설치 간격에 따른 처짐량 감소(모형볼트를 설치하지 않은 지반 처짐량과 모형볼트가 설치된 지반의 처짐량의 차)를 나타낸 것이다. 그림 8(a)~(c)에서 보는 바와 같이 종방향 설치간격에 따른 처짐량 감소를 비교해 보면 종방향 설치간격이 감소할수록 처짐량 감소효과가 큰 것으로 나타났다. 특히 종방향 설치간격이 11.5cm인 경우에는 L11.5-2Line-A90-60 및 L11.5-2Line-A75-60(그림 8(a) 참조)인 2개 시험 Case를 제외하고는 처짐량 감소는 1.0mm 이하로 나타났으며, 종방향 설치간격이 10.0cm에서 11.5cm로 증가하는 경우에 처짐량 감소가 가장 큰 것으로 나타났다.

그림 8(a)~(c)에서 보는 것처럼 횡방향 설치간격에 따른 변화를 비교하면 횡방향 1열 설치(점선)에서는 시험 case L7.0-1Line-A90-60, L7.0-1Line-A75-60, L8.5-1Line-A90-60인 3개의 경우를 제외하고는 모두 1.0mm 이하의 처짐량 감소가 발생하는 것으로 나타났다. 횡방향 2열 설치(실선)인 경우와 비교하여 횡방향 1열 설치(점선)인 경우에는 상대적으로 작은 처짐량 감소가 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 횡방향 2열 설치(실선) 조건이 1열 설치(점선) 조건에 비해서 종방향 설치간격의 변화에 따른 처짐량 감소의 변화가 상대적으로 더 크고 뚜렷한 것으로 나타났다. 따라서 횡방향 1열 설치 조건에서는 모형볼트 설치에 의한 보강효과가 크게 발현되지 않는 것으로 나타났다.

그림 9는 모형볼트의 설치각도에 따른 처짐량 감소를 나

그림 8. 종방향 설치 간격에 따른 처짐량 감소, (a) 토피고: 60cm, (b) 토피고: 36cm, (c) 토피고: 24cm

(a)

(b)

그림 9. 설치각도에 따른 처짐량 감소, (a) 횡방향: 1열, (b) 횡방향: 2열

타난 것이며, 그림 9(b)에서 보는 바와 같이 설치각도가 75도에서 60도로 변화되는 경우에 처짐량 감소 변화가 가장 크게 발생하고 있으며, 설치각도가 90도에서 75도로 변화되는 경우와 60도에서 45도로 변화하는 경우에는 상대적으로 변화가 작은 것으로 나타났다.

모형볼트 설치에 따른 처짐량 감소량을 분석한 결과 볼트는 90도에서 75도 범위에서 설치되는 경우에 최상의 보강효과가 나타나는 것으로 나타났으며, 설치각도가 60도 이하인 경우에는 효과적인 보강효과가 나타나지 않을 것으로 판단되었다. 또한, 볼트의 종방향 설치간격이 감소할수록 보강효과도 증가하는 것으로 나타났다.

3.2 연직토압

모형시험 과정에서 강관 상부의 중앙부(A지점) 및 강관 상부에서 12cm 떨어진 지점(B지점, 90도 설치각도에서 모형볼트의 선단위치)에 토압계를 설치하여 연직토압을 측정하였다. 토압 측정결과를 이용하여 변형 후 모형지반에서 발생한 토압감소량(모형지반 변형 전 측정된 연직토압과 모형지반 변형 후 측정된 연직토압의 차)을 그림 10에 나타내었다.

그림 10에서 보는 바와 같이 똑같은 시험 조건에 대해 A지점(실선)의 연직토압 감소가 B지점(점선)에 비해서 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 모형지반에 변형이 발생하는 경우에 모형볼트와 모형지반 사이의 상대적 변형량의 차이가 발생하며, 상대적인 변형량의 차이로 인하여 볼트, 그라우트 및 지반 사이에서는 주면마찰력이 발생된다. 주면마찰력에 의하여 연직토압의 일부가 볼트로 전이되는 아칭효과가 발생하

(a)

(b)

(c)

그림 10. 모형볼트 설치에 의한 연직토압감소, (a) 토피고: 60cm, (b) 토피고: 36cm, (c) 토피고: 24cm

게 되며, 아칭효과에 의하여 연직토압의 감소가 발생된 것으로 판단된다.

이런 아칭효과의 발현은 모형볼트를 횡방향 간격 20cm(1열 설치)로 설치한 조건보다는 횡방향 간격 10cm(2열 설치)로 설치한 조건에서 크게 나타났으며, 이러한 결과는 토피고가 60cm인 조건에서 가장 크게 나타났다. 이 결과는 변형 발생 전 원지반이 아칭효과 발현에 적합한 토피하중이 확보되는 경우에 시스템볼트에 의한 보강효과가 극대화되며, 시스템볼트의 보강효과가 효과적으로 나타나는 토피고는 볼트 길이의 약 5배인 것으로 판단된다.

그림 10에서 토압감소효과에 대한 설치각도의 영향을 비교해 볼 때 설치각도가 작아질수록 연직토압 감소량도 감소하는 경향을 나타내었다. 동일한 조건에서 설치각도가 75도에서 60도로 작아질 때 토압감소량의 변화가 비교적 큰 것으로 나타났다. 따라서 연직토압 측정결과를 비교해 볼 때 시스템 경사볼트에 의한 보강효과는 90~75도의 설치각도에

서 가장 효과적으로 발생한 것으로 판단되며, 이러한 결과는 앞에서 설명한 변형량에 따른 효과적인 설치각도의 결과와 유사한 것으로 나타났다.

3.3 이완하중 발생률

시험과정에서 확인된 연직토압의 감소량은 아칭효과에 의하여 모형볼트에 전이되어 있는 것으로 고려할 수 있으며, 시험지반의 변형에 의한 발생한 이완하중은 보강조건에 따라서 초기 연직토압에 비해 감소하는 것으로 나타났다. 변형 전 연직토압(σ_1 , 초기 연직토압)에 대한 변형 후 하중(σ_2 , 이완하중)의 크기는 이완하중 발생률로 식 (1)과 같이 산정할 수 있으며, 이완하중 발생률이 작을수록 보강효과는 우수하다.

$$R(\%) = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \times 100 \quad (1)$$

(a)

(b)

(c)

그림 11. 볼트 설치 각도에 따른 이완하중 발생률, (a) 토피고: 60cm, (b) 토피고: 36cm, (c) 토피고: 24cm

여기서, R : 이완하중 발생률

σ_1 : 변형 전 연직토압(초기 연직토압)

σ_2 : 변형 후 연직토압(이완하중)

그림 11(b) 및 그림 11(c)에서 보는 것과 같이 횡방향 설치간격 20cm(1열 배열조건, 실선)에서 토피고가 36cm 및 24cm인 경우의 시험 case에서는 이완하중 발생률이 95% 이상으로 나타나 모형볼트 보강효과가 미소하게 발생하거나 보강효과가 없는 것으로 나타났으며, 그림 11(a)에서 보는 것과 같이 토피고 60cm와 횡방향 1열 배열을 적용한 조건(실선)에서는 최소 이완하중 발생률이 77.8%로 2열 배열 조건(점선)에 비해서 보강효과가 작은 것으로 나타났다. 그림 11(a)~(c)에서 나타난 것과 같이 11.5cm의 종방향 설치간격을 적용한 경우에는 L11.5-2Line-A90-60과 L11.5-2Line-A75-60의 시험 Case를 제외하고 이완하중 발생률이 모두 95% 이상으로 보강효과가 매우 작은 것으로 나타났다. 또한, 그림 11(a)~11(c)를 비교하면 토피고 감소에 따라 이완하중 발생률이 증가하였으며, 설치각도에 따른 이완하중 발생률을 분석하면 설치각도 75~60도 사이의 이완하중 발생률 변화경향이 90~75도 및 60~45도 사이의 변화경향보다 크게 나타났다. 이 결과는 앞에서 설명한 변형량 및 연직토압에 따른 볼트의 효과적인 설치각도와 유사하다.

그림 12은 모형볼트 1개당 부담하는 면적(종방향 간격×횡방향 간격, cm^2)에 대한 이완하중 발생률을 도시한 것이다. 그림 12에서 보듯이 부담면적 115cm^2 (11.5×10.0cm)에서 인접한 부담면적인 140cm^2 (7.0×20.0cm) 및 100cm^2 (10.0×10.0cm)과 비교하여 이완하중이 크게 발생하여 보강효과가 상대적으로 작아지는 것으로 나타났다. 이 결과는 볼트의 종방향 설치간격이 넓어짐에 따라 볼트와 지반간의 아칭효과에 의한 원지반 아치(원지반 지지력) 두께의 감소에 의한 영향으로 판단되며, 볼트에 의한 보강효과 발현에서는 횡방향 원지반 아치 형성보다는 종방향 원지반 아치 형성이 더 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

그림 12에서 보는 것과 같이 시스템 경사볼트의 보강효과가 충분히 발현되는 토피고 60cm에서는 변형량 발생경향 및 연직토압 변화량 발생경향과 같이 모형볼트 설치각도가 90~75도인 경우에 이완하중 발생률이 60~45도의 이완하중 발생률보다 작게 나타났다. 또한 모형볼트 1개가 부담하는 면적 100cm^2 을 기준 면적으로 하는 경우 일반적인 록볼트 설치각도인 90도에서의 이완하중 발생률은 59.5%이며, 효과

그림 12. 모형볼트 1개당 부담면적에 따른 이완하중 발생률

적인 경사볼트의 보강효과를 얻어지는 최소 설치각도인 75도에서는 기준 부담면적에서 15% 감소(부담면적 85cm²)하는 경우에 이완하중 발생률이 57.3%로 나타났다. 따라서, 시스템 경사볼트 설치 시 볼트 1개소의 부담면적이 약 15% 정도 감소되는 경우에 통상적인 록볼트 설치에 의한 보강효과와 비교하여 동등 이상의 보강효과 발현되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

이 연구에서는 시스템 경사볼트의 보강효과를 확인하기 위하여 모형볼트로 보강된 사질토 지반을 단순보로 형상화하여 모형볼트의 설치각도, 횡방향 및 종방향 설치간격, 토피고를 변화하여 총 99회의 모형시험을 수행하였다. 모형시험에서 측정된 모형지반의 침하량 및 연직토압의 변화 분석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 토피고가 60cm인 경우에 변형 발생 후 연직토압의 감소가 가장 큰 것으로 나타나 변형발생 전 원지반이 아칭효과 발현에 적합한 토피하중이 확보되는 경우에 시스템볼트에 의한 보강효과가 극대화 되며, 시스템볼트의 보강효과가 효과적으로 나타나는 토피고는 볼트길이의 5배 정도인 것으로 판단된다.
2. 설치각도에 따른 침하량, 연직토압의 변화 및 이완하중 발생률을 분석하면 설치각도 75~60도 사이의 변화경향이 90~75도 및 60~45도 사이의 변화경향보다 크게 나타났으며, 최적의 보강효과를 얻기 위한 설치각도는 90~75도 범위인 것으로 판단된다.
3. 볼트의 부담면적 115cm²에서 인접한 부담면적인 140cm² 및 100cm²과 비교하여 이완하중 발생률이 큰 것으로 나타났다. 이 분석결과로 횡방향 지지링의 형성보다는 종방향의 지지링 형성이 볼트의 보강효과 발현에 더 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다.
4. 변형량 및 이완하중 발생률을 분석하면 볼트의 종방향 설치간격이 감소하면 볼트 보강효과는 더 크게 발현되는 것으로 나타났다. 그러나 볼트 1개당 부담면적 100cm²을 기준으로 하는 경우 통상적인 록볼트 설치각도인 90도에서의 이완하중 발생률에 대비하는 경우 경사볼트의 가장 효과적인 최소 설치각도의 범위로 나타난 75도에서는 부담면적이 15% 감소하는 경우에 동등 이상의 보강효과가 발현되는 것으로 나타났다. 따라서 시스템 경사볼트 설치 시 종방향 간격을 15% 정도 감소시키는 경우에 가장 경제적인 보강효과가 발현될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신연구개발사업의 연구비 지원(과제번호: 11CCTI-C053463-03-000000, 과제명: 교통류 보존형 터널단면 확대 시공기술 개발)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김동규, 정호섭(2007) 공용중인 터널 확폭에 의한 기능향상. **한국지반공학회지**, 한국지반공학회, Vol. 23 No. 3, pp.14-20
- 김용구, 배기현, 서경원, 김동규, 우상백(2010) 록볼트의 설치각도에 따른 보강효과와 수치해석적 연구. **한국암반공학회 학술발표회 논문집**, 한국암반공학회, pp. 199-204.
- 문웅주, 임홍덕, 정경범, 김준석, 이상덕(2005) 록볼트에 의한 사질토 지반특성 개선. **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 5555-5558.
- 서경원, 백기현, 김용구(2008) 운영중인 터널의 확폭 굴착에 관한 해외 시공 사례 분석(II). **터널기술**, 한국터널공학회, 제10권 제2호, pp. 71-79
- 안정환, 이상덕(2009) 록볼트 긴장에 의한 수평절리암반의 보강효과. **터널과 지하공간**, 한국암반공학회, Vol. 19, pp. 388-396.
- 이연규, 송경원, 박철환, 최병희(2010) 경계조건 변화에 따른 전면접착형 록볼트 거동의 수치해석적 연구. **터널과 지하공간**, 한국암반공학회, Vol. 20, pp. 267-276.
- 정해성, 문규현(1999) 전면접착형 록볼트의 보강효과에 관한 연구. **터널과 지하공간**, 한국암반공학회, Vol. 9, pp. 194-203.
- 한상현, 여규권(2007) 장대록볼트 장착방식에 따른 인발거동특성 사례연구. **지질공학회지**, 대한지질공학회, Vol. 17, pp. 65-73.
- Carranza-Torres, C. (2009) Analytical and Numerical Study of the Mechanics of Rockbolt Reinforcement around Tunnels in Rock Masses. **Rock mechanics and rock engineering**, Vol. 42, No. 2, pp. 175-228.
- Hoek, E. and Brown, E. T. (1980) *Underground Excavation in Rock*. The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Osgoui, Reza R. and Erdal Ünal (2009) An empirical method for design of grouted bolts in rock tunnels based on the Geological Strength Index (GSI). **Engineering geology**, Vol. 107, No. 3-4, pp. 154-166.
- Roy, S. and Rajagopalan, A. B. (1997) Analysis of rockbolt reinforcement using beam-column theory. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, Vol. 21, No. 4, pp. 241-253.
- Rabcewicz, L. V. (1964) New austrian tunnelling method, **Water Power** 16, pp. 453-515.
- Stillborg, B. (1994) *Professional user handbook for rock bolting*. Trans Tech Publications, Germany.

(접수일: 2012.5.18/심사일: 2012.6.29/심사완료일: 2012.7.16)