

## 모형시험 및 수치해석을 통한 경사 시스템 록볼트의 보강효과 분석

이재덕\* · 김병일\*\* · 유완규\*\*\* · 한진태\*\*\*\*

Lee, Jea-Dug\* · Kim, Byoung-Il\*\* · Yoo, Wan-Kyu\*\*\* · Han, Jin-Tae\*\*\*\*

### Evaluation on Reinforcing Effect of Inclined System Bolting by Model Tests and Numerical Analysis

#### ABSTRACT

Recent case studies in Japan have shown that rockbolts are commonly installed at an oblique angle to the excavation direction of the tunnel, instead of at a right angle, due to restriction of the working space. In particular, in the case of expansion in an existing tunnel, the working space can be very small, due to the large protective structures necessary to operate within an existing tunnel. In this case, where both the current use of the existing tunnel, and the reinforcement of the ground around the tunnel are required, the effects of installation angles and patterns of rockbolts are important factors in the design process. Therefore, in this study, a total number of 24 model tests are performed, to investigate the reinforcing effects of system bolting installed obliquely from the excavation direction of the tunnel, by changing the installation angle of bolts, longitudinal distance, and bonded length of bolts. The model test results indicate that the relaxed load ratio decreases, with the increase of both the bonded lengths and the number of the installed bolts, resulting in the decrease of the supported area by one bolt. Two-dimensional numerical analysis, which considered the reinforcement effect of inclined system bolting as the change of engineering properties near the tunnel, demonstrated that the deflection patterns at the tunnel crown in the numerical simulations, show a similar tendency to those measured in the model tests.

**Key words** : Inclined system bolting, Reinforcement effect, Laboratory model test, 2D numerical analysis

#### 초 록

최근에 일본의 시공사례에 따르면 터널확대를 위해 보호공(프로텍터)을 설치하고 기존 터널을 사용하면서 시공하는 경우에는 록볼트를 굴착방향에 수직하게 타설할 수 없어서 경사지게 타설하는 경우가 있다. 운용 중인 터널을 확대 시공하는 경우에는 작업조건이 매우 나쁘기 때문에 록볼트의 패턴(경사 록볼트 설치, 사전 록볼트 시공, 록볼트 제외 등)에 대한 검토가 필요하다. 이 연구에서는 모형시험을 이용하여 일반적으로 터널 굴착방향과 수직하게 설치되는 시스템 록볼트의 보강효과와 터널 굴착방향에 경사지게 설치되는 경사 시스템 록볼트의 보강효과를 비교하였다. 모형 록볼트의 설치각도, 설치간격, 정착 길이 등을 변화시켜 총 24회의 모형시험을 수행하였으며, 모형시험 결과 모형볼트 1개가 부담하는 면적에 대한 이완하중 발생률은 부담면적 감소에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 모형볼트 정착 길이 변화에 따른 이완하중 발생률은 정착 길이가 길어질수록 감소하는 경향이 나타났다. 한편 터널 지보재 설치효과를 주변 지반의 공학적 특성 증가로 간주하는 지보재 모형화 방법에 의한 2차원 수치해석 결과가 모형시험의 처짐 증가량 발생경향을 유사하게 예측하는 것으로 나타나 본 해석 기법이 경사 시스템 록볼트의 보강효과를 적절히 모사할 수 있을 것으로 판단된다.

**검색어** : 경사 시스템 록볼트, 보강효과, 모형시험, 2차원 수치해석

\* (주)대원토질 부장 (duk1650@naver.com)

\*\* 정회원 · 교신저자 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 (Corresponding Author · Myongji University · bikim@mju.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 박사후 연구원 (lyu5553@kict.re.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 (jimmyhan@kict.re.kr)

Received February 14 2013, Revised May 8 2013, Accepted June 18 2013

## 1. 서론

국내에서 본격적인 터널공사가 시작된 것은 40년이 넘었으며, 최근의 터널 공사에는 주로 NATM(New Austrian Tunneling Method)공법이 적용되고 있다. NATM은 터널 굴착에 의하여 발생하는 지반 변형을 허용함으로써 발휘되는 지반의 아칭효과에 의해 터널 안정성을 확보하는 공법이다. 주요 지보재로서는 슛크리트와 록볼트가 사용된다. 록볼트는 굴착 즉시 시공하여 암반의 이완을 초기에 방지하고, 불연속면의 활동을 억제하여 지하공동 굴착시에 불안정한 암반거동을 억제한다(Osgoui & Erdal, 2009). 그리고 록볼트는 경제적인 뿐만 아니라 설계자가 공동의 단면을 자유롭게 선택할 수 있다는 장점 때문에 많이 사용된다(정해성과 문규현, 1999).

시스템 볼팅은 통상적으로 굴착방향과 수직하게 굴진장마다 설치하게 되는데 기계화 시공을 위한 장비의 운용 공간이 협소하거나 시공여건상 볼트 삽입이 어려운 곳에서는 짧은 볼트를 연결하여 사용하거나 경사지게 설치하는 경우가 있다. 김동규와 정호섭(2007)이 발표한 바에 따르면 최근에 일본에서는 차량의 대형화, 교통량 증가, 터널의 기능향상 등의 목적으로 운용중인 터널의 확대공사가 많이 계획되고 있다고 한다. 그리고 용지매수와 자연환경 영향 등에 대한 사회적 제약과 기존 자원의 유용한 활용이라는 관점에서 운용중인 터널의 확대공사가 앞으로 증가될 것으로 예상하였다. 또한 서경원 등(2008)은 일본의 실제사공사례 분석을 통하여 운영 중인 터널의 확대공사에서는 터널의 대부분을 보호공(프로텍터)이 차지하기 때문에 터널 굴착방향에 수직하게 록볼트를 타설할 수 없어서 록볼트를 경사지게 타설하는 경우가 있다고 보고하였다.

록볼트 보강효과에 관한 실험적인 연구로 사질토 지반에 대한 단순보 모델 모형시험을 실시하여 록볼트 보강에 의한 원지반의 보강효과를 분석한 문용주 등(2005)의 연구가 있으며, 수평절리 암반에 대한 단순보 모델 모형시험을 실시하여 긴장력이 가해진 록볼트의 보강효과를 분석한 안정환과 이상덕(2009)의 연구가 있다.

록볼트의 거동에 관한 수치해석 연구로는 점소성 해석으로 록볼트가 설치된 지하 구조물의 거동에 대한 연구(조태진과 이정인, 1993; 이연규 등, 1995; 노승환 등, 2004), 3차원 유한차분법 수치해석 프로그램을 이용하여 지하 구조물 형상에 따른 록볼트 길이에 대한 연구(Goel et al., 2007) 및 2차로 도로터널 표준단면에 대한 3차원 수치해석을 통하여 록볼트의 설치각도 변화에 따른 연구를 수행한 사례(김웅구 등, 2010)가 있다. 그러나 경사 시스템 볼트의 보강효과에 대한 연구는 아직 많지 않다고 할 수 있다.

이 연구에서는 사질토에서 경사 시스템 볼트의 보강효과를 파악하기 위하여 모형 록볼트의 설치간격, 설치각도 및 토피고를 변화하는 모형시험을 실시한 이재덕 등(2012)의 연구결과를 바탕으로

모형 록볼트의 정착 길이 변화시킨 24case의 모형시험을 실시하였다. 모형시험 결과로 모형 록볼트의 정착길이 변화에 따른 경사 시스템 볼트의 보강효과를 분석하였다. 그리고 2차로 도로터널의 지보패턴 중 터널 천단 및 측벽부에 시스템 볼트가 적용되는 3타입, 4타입 및 5타입에 대하여 2차원 유한차분법 수치해석을 실시하여 그 결과를 모형시험 결과와 비교하고, 해석기법의 타당성 및 적용성을 검토하였다.

## 2. 실내모형시험

### 2.1 모형시험에 사용한 재료

이 연구에서는 이재덕 등(2012) 연구를 참고하여 전면접착형 록볼트를 모형화하였다. 모형 록볼트는 그라우트와 모형화 록볼트의 주면마찰력이 충분히 발현될 수 있는 직경 10mm의 전산볼트(stud bolt)를 사용하였다(Fig. 1). 그라우트 재료는 터널표준시방

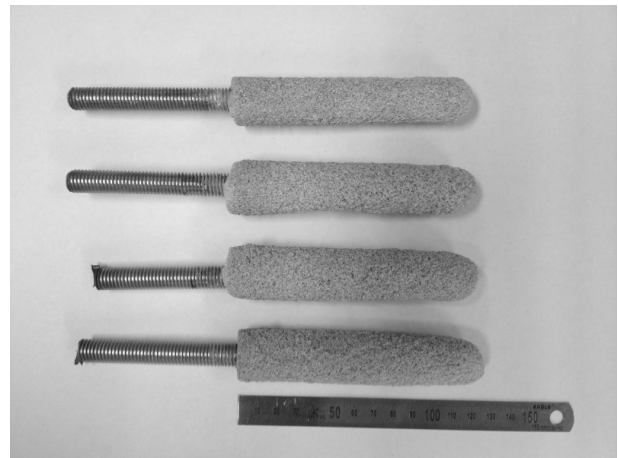


Fig. 1. Model bolts



Fig. 2. Model bolts installation

**Table 1.** Soil properties of Jumunjin sand

Specific Gravity, $G_s$	Unit Weight, $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Relative Density, $D_r$ (%)	Soil Classification (USCS)	Cohesion Intercept, $c$ (kPa)	Internal Friction Angle, $\phi$ (°)
2.62	16.14	80	SP	0	40.1

서를 참조하여 물-시멘트 비가 45%인 시멘트 페이스트를 사용하였으며, 충분한 강도가 발현할 수 있도록 28일 양생 후 모형시험에 사용하였다. 그리고 모형 슛크리트는 다수의 반복되는 모형시험 실시되는 점을 고려하여 현실적으로 취급이 용이한 재료인 강판(두께=8mm, 길이=1.5m, 폭=20cm)을 사용하였다.

### 2.2 모형지반

모형지반은 이재덕 등(2012)의 연구를 참고하여 주문진 표준사를 사용하였으며, 강사장치를 이용하여 상대밀도( $D_r$ ) 80%를 만족하는 건조단위중량( $\gamma_d$ ) 16.14 kN/m<sup>3</sup>의 모형지반을 형성하였다. 상대밀도 80%로 조성된 모래시료에 대한 압밀-배수 삼축압축시험(CD Test)을 실시한 결과 전단저항각은 40.1°, 점착결편은 0kPa으로 나타났다(Table 1).

### 2.3 모형시험 변수 및 방법

Rabcewicz(1964)의 원지반 아치이론에 따르면 록볼트와 슛크리트를 시공하면 1회 굴진장의 1/2 높이만큼 터널의 종방향과 횡방향으로 원지반 아치가 형성된다. 그는 록볼트의 길이와 간격에 대한 경험식을 굴착길이에 대하여 식 (1)과 같이 제안하였다. 그리고 이 연구에서는 Rabcewicz의 원지반 아치이론과 경험식을 바탕으로 모형 록볼트의 정착 길이를 결정하였다. 모형 록볼트의 기준 설치간격은 10.0×10.0cm으로 결정하였으며, 모형 록볼트의 정착 길이는 지반아치 높이가 기준 설치간격의 1/2(5.0cm) 이상이 확보되는 12.0cm로 결정하였다.

$$L_b \geq t, P \leq 0.5L_b \tag{1}$$

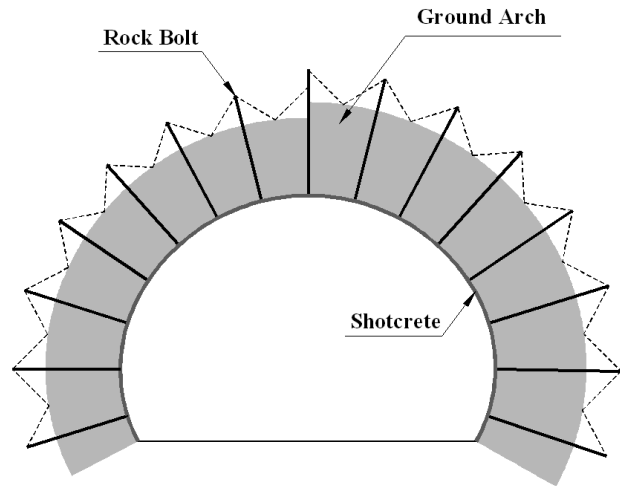
- 여기서,  $L_b$  = 록볼트의 길이(m)
- $t$  = 터널의 1회 굴진장(m)
- $P$  = 록볼트의 간격(m)

터널 시공시 작업공간이 협소하여 록볼트를 굴착면과 수직하게 설치하지 못하고 록볼트를 경사지게 설치하면 보강되는 원지반의 두께가 감소하게 된다. 록볼트에 의하여 보강되는 원지반의 두께가 감소함에 따라서 터널 굴착면 주변지반에 형성되는 원지반 아치의 두께도 감소하게 된다. Fig. 3에서 좌측은 록볼트를 경사지게 설치한 경우에 형성되는 원지반 아치이며, 우측은 록볼트를 수직하게

설치한 경우에 형성되는 원지반 아치이다. 경사 시스템 볼트 설치로 인하여 록볼트의 보강효과가 감소되는 경우, 록볼트 설치간격을 감소시키거나 록볼트 길이를 증가시켜서 동일한 보강효과가 발생할 수 있도록 하여야 한다.

이 연구에서는 이재덕 등(2012)의 연구결과를 참고하여 모형 록볼트의 정착 길이를 증가시킨 모형시험을 수행하였다. 모형 록볼트의 정착길이는 12cm에서 14cm 및 16cm로 증가시켰다. 또한 모형시험편수는 모형 록볼트의 정착길이 12cm에서의 모형시험결과를 분석하여 토피고는 60cm, 설치각도는 45°, 60°, 75°와 90°, 횡방향 설치간격은 10.0cm 그리고 종방향 설치간격은 10.0cm, 8.5cm 및 7.0cm로 결정하였다. 그리고 모형시험은 총 24회를 수행하였다. Table 2는 이 연구에서 수행한 모형시험 조건(토피고 및 모형볼트의 설치간격)에 대하여 정리하여 나타낸 것이다.

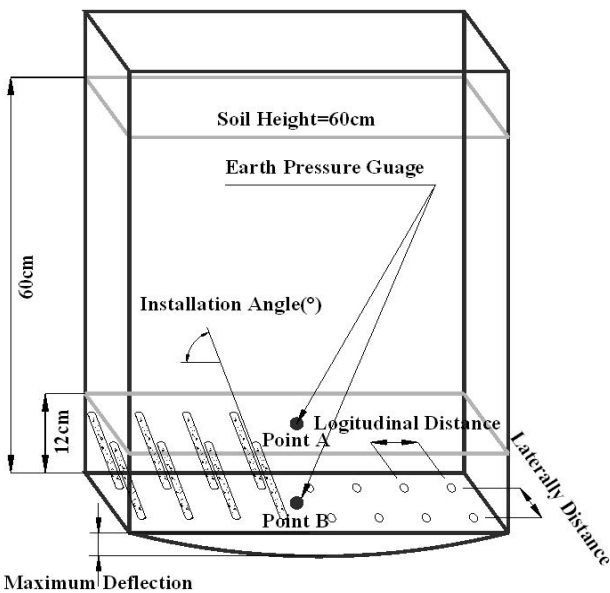
모형시험에서 사용한 시험토조 하부는 모형 록볼트 보강지반의 변형이 발생할 수 있도록 빈 공간으로 형성되어 있으며, 모형 록볼트 보강지반 형성 시 변형발생을 억제할 수 있도록 별도 제작한 처짐 제어장치를 설치하여 강판의 변형을 억제하였다. 연직토압은 Fig. 4와 같이 2개 지점(A지점 및 B지점)에서 측정하였으며, 이 연구에서는 B지점에서 모형 록볼트 보강지반의 변형 전과 후의 연직토압 측정결과를 이용하여 모형 록볼트에 의한 보강효과를 분석하였다. 그리고 자세한 모형시험 순서 및 방법은 이재덕 등(2012)의 연구와 동일하다.



**Fig. 3.** Ground arch by installation angle of rock bolt

**Table 2.** List of model test condition

Bonded length of bolts (cm)	Longitudinal distance (cm)	Installation angle of bolts (°)	Soil Height (cm)	Labeling method
12.0	10.0	90	60	B12-L10.0-2Line-A90-60
		75	60	B12-L10.0-2Line-A75-60
		60	60	B12-L10.0-2Line-A60-60
		45	60	B12-L10.0-2Line-A45-60
	8.5	90	60	B12-L8.5-2Line-A90-60
		75	60	B12-L8.5-2Line-A75-60
		60	60	B12-L8.5-2Line-A60-60
		45	60	B12-L8.5-2Line-A45-60
	7.0	90	60	B12-L7.0-2Line-A90-60
		75	60	B12-L7.0-2Line-A75-60
		60	60	B12-L7.0-2Line-A60-60
		45	60	B12-L7.0-2Line-A45-60
14.0	10.0	75	60	B14-L10.0-2Line-A75-60
		60	60	B14-L10.0-2Line-A60-60
	8.5	75	60	B14-L8.5-2Line-A75-60
		60	60	B14-L8.5-2Line-A60-60
	7.0	75	60	B14-L7.0-2Line-A75-60
		60	60	B14-L7.0-2Line-A60-60
16.0	10.0	75	60	B16-L10.0-2Line-A75-60
		60	60	B16-L10.0-2Line-A60-60
	8.5	75	60	B16-L8.5-2Line-A75-60
		60	60	B16-L8.5-2Line-A60-60
	7.0	75	60	B16-L7.0-2Line-A75-60
		60	60	B16-L7.0-2Line-A60-60



**Fig. 4.** Schematic of model test

### 3. 모형시험결과 분석

이재덕 등(2012)은 경사 시스템 볼트의 보강효과를 정량적으로 확인하기 위하여 Eq. (2)를 이용하여 이완하중 발생률[변형 전 연직토압( $\sigma_1$ , 초기 연직토압)에 대한 변형 후 하중( $\sigma_2$ , 이완하중)의 비]을 산정하였다. 그리고 이완하중 발생률이 작을수록 모형 록볼트 설치에 의한 보강효과는 우수한 것으로 평가할 수 있다.

$$R(\%) = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \times 100 \quad (2)$$

여기서,  $R$  = 이완하중 발생률

$\sigma_1$  = 변형 전 연직토압(초기 연직토압)

$\sigma_2$  = 변형 후 연직토압(이완하중)

### 3.1 설치각도와 부담면적에 따른 이완하중 발생률

B12-2Line-60의 모형시험에서 부담면적에 따른 이완하중 발생률은 Fig. 5와 같다. 각 설치각도에서 모형 록볼트 부담면적과 이완하중 발생률은 유사한 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 각 설치각도에서 기준시험(B12-L10.0-2Line-A90-60)의 이완하중 발생률이 발생되기 위한 부담면적(모형 록볼트의 종방향 간격× 횡방향 간격, cm<sup>2</sup>)은 모형 록볼트의 부담면적과 이완하중 발생률의 상관관계에서 산정할 수 있으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다.

Fig. 5에서 나타난 것과 같이 기준시험의 이완하중 발생률이 발생되는 부담면적 감소율과 설치각도의 상관관계는 비교적 우수한 것으로 나타났다. 그리고 이 연구에서 수행된 모형시험 결과에 의한 상관관계는 Eq. (3)와 같다.

$$A_{decrement}(\%) = 73.111 - 0.812 \times A \quad (3)$$

여기서,  $A_{decrement}$  : 볼트 부담면적 감소율(%)  
 $A$  : 볼트의 설치각도(°)

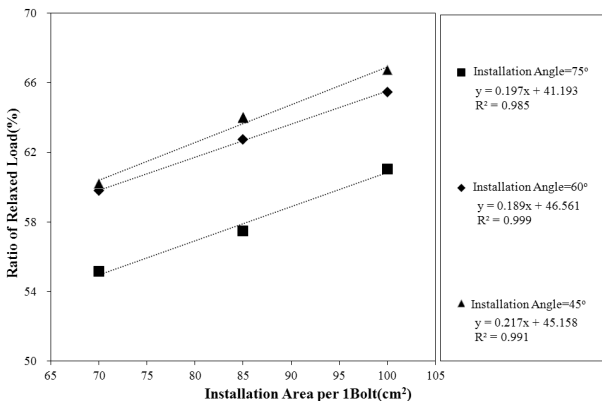


Fig. 5. Relationship between ratio of relaxed load and installation area per 1 bolt

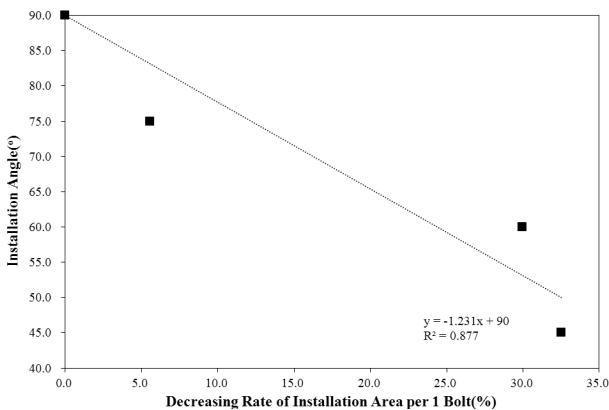


Fig. 6. Relationship between installation angle and decreasing rate of installation area per 1 bolt

### 3.2 설치각도와 정착길이에 따른 이완하중 발생률

Fig. 7은 설치각도 75°(L10.0-2Line-A75-60)와 60°(L10.0-2Line-A60-60)인 모형시험에서 나타난 이완하중 발생률과 모형 록볼트 정착 길이의 관계를 나타낸 것이다. 이완하중 발생률과 정착 길이의 상관관계는 유사한 것으로 나타났다. 그리고 분석된 상관관계를 이용하여 기준시험과 동일한 이완하중 발생률이 발생하는 모형 록볼트의 정착 길이를 산정하였다. 그 결과 모형 록볼트의 설치각도 75°와 60°에 대하여 기준시험과 동일한 이완하중이 발생하는 모형 록볼트의 정착 길이는 14.2cm와 15.9cm인 것으로 나타났다.

Fig. 8은 기준시험의 이완하중 발생률이 발생하기 위한 정착 길이 증가율과 설치각도의 상관관계를 나타낸 것이다. 그리고 이 연구의 모형시험에서 나타난 상관관계는 Eq. (4)와 같다.

$$B_{\in increment}(\%) = 100.245 - 1.114 \times A \quad (4)$$

여기서,  $B_{\in increment}$  : 볼트의 정착 길이 증가률(%)

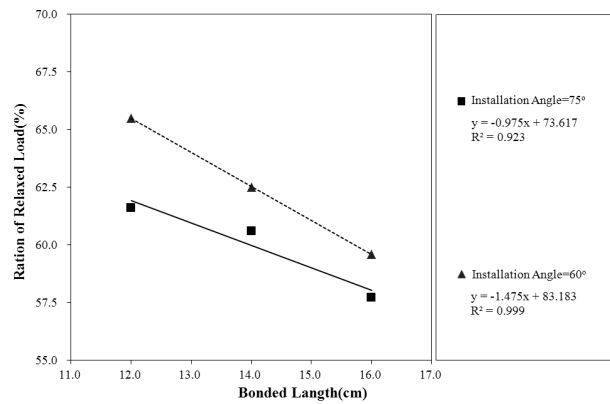


Fig. 7. Relationship between ratio of relaxed load and bonded length

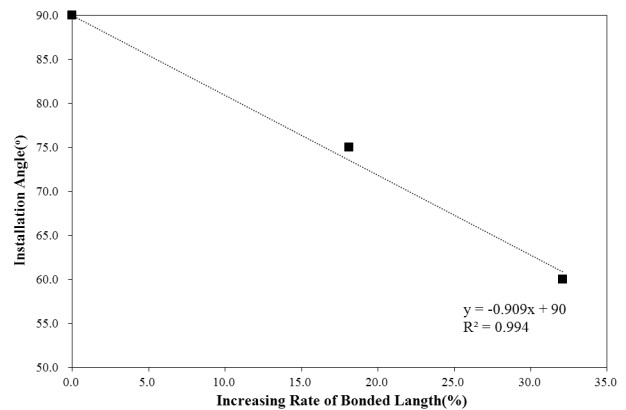


Fig. 8. Relationship between installation angle and increasing rate of bonded length

### 3.3 모형 록볼트가 설치된 보강지반의 변형계수

이 연구에서는 모형 록볼트가 설치된 복합지반을 단순보로 가정하여 모형시험을 실시하였다. 그리고 등분포하중이 작용하는 단순보에서는 단순보의 최대 처짐량 산정공식을 이용하여 단순보의 변형계수를 산정할 수 있다. 그러나 모형시험에서 모형화된 복합지반은 슛크리트 모형화 재료, 모형 록볼트 및 모형지반으로 형성되며, 복합지반의 변형계수의 산정방법은 각각의 모형시험 변수에 따라서 변화될 수 있다.

안정환과 이상덕(2009)은 긴장력을 가하는 록볼트가 설치된 수평절리압반에 대하여 단순보 지점 구조를 형성한 실내모형시험과 실내모형시험을 모형화한 3차원 수치해석을 실시하였다. 그리고 단순보 처짐공식에 의하여 산정된 변형계수를 수치해석으로 검증한 결과, 단순보 처짐공식에 의하여 산정한 변형계수는 충분한 신뢰성을 가진다고 발표하였다. 따라서 이 연구에서는 모형 록볼트가 설치된 복합지반의 변형계수를 등분포 하중이 작용하는 단순보의 최대 처짐량 산정공식을 이용하여 산정하였다.

이 연구에서 수행된 모형시험결과에 의하면 연직토압의 감소효과는 철판 상부로부터 12cm 지점(A지점, Fig. 4)까지 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 모형시험에서 나타난 연직토압 감소범위를 고려하여 합성보(철판, 모형지반 및 모형 록볼트)의 두께는 철판 상부 12cm 지점까지인 것으로 고려하였다. 그리고 합성보에 작용하는 등분포 하중은 모형지반과 철판의 자중으로 가정하였으며, 합성보의 변형계수는 Eq. (5)를 이용하여 산정하였다.

$$E_{com} = \frac{5 \times w_{test} \times l^4}{384 \times \delta_{test} \times I_{com}} \quad (5)$$

- 여기서,  $\delta_{test}$  : 각 모형시험에서 최대 침하량
- $w_{test}$  : 각 모형시험 변수에 의한 자중
- $E_{com}$  : 합성보의 변형계수
- $I_{com}$  : 합성보의 단면이차모멘트
- $l$  : 합성보의 길이

산정된 합성보의 변형계수는 모형 록볼트가 설치되지 않은 모형지반의 변형계수( $E_{MC}$ )와 모형 록볼트가 설치된 모형지반의 변형계수( $E_{MR}$ )로 구분할 수 있다. 산정된 변형계수의 차( $E_{MR} = E_{MC} - E_{MC}$ )는 모형 록볼트 보강효과에 의하여 발생하는 합성보의 변형계수 증가량이다. Fig. 9는 모형 록볼트 설치에 의하여 발생된 모형 록볼트 보강효과에 해당하는 변형계수와 기준시험의 모형 록볼트 보강효과에 해당하는 변형계수의 비로 산정한 변형계수 증가율과 설치각도의 관계를 나타낸 것이다. 변형계수 증가율은 설치각도 변화에 따라서 44.6%~56.5% 증가하는 것으로 나타났다.

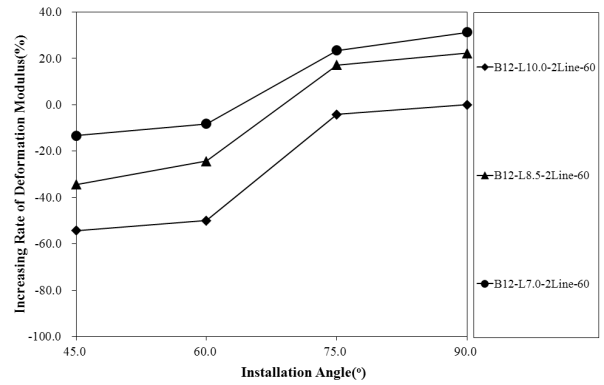


Fig. 9. Relationship between increasing rate of deformation modulus and installation angle

## 4. 2차원 수치해석

### 4.1 수치해석 개요

이 연구에서는 2차로 도로터널에 경사 시스템 볼트가 적용되는 경우에 발생하는 터널의 변형을 분석하기 위하여 2차원 수치해석을 수행하였다. 한국도로공사에서 제시한 2차로 도로터널의 표준 지보패턴에 의하면 1타입은 랜덤 볼트가 적용되어 있으며, 2타입은 터널의 천단과 어깨부에 시스템 볼트가 적용된다. 그리고 3타입, 4타입 및 5타입은 터널의 천단과 측벽에 시스템 볼트가 적용된다. 따라서 이 연구에서는 지보패턴 3타입, 4타입 및 5타입에 대하여 모형시험에서 산정한 변형계수 증가율을 적용한 2차원 수치해석(FLAC-2D)을 수행하였으며, 수치해석 결과를 모형시험 결과와 비교하였다.

### 4.2 수치해석 방법

일반적으로 터널 지보재로 사용되는 록볼트, 슛크리트 등을 수치해석에서 모형화 하는 방법은 연속체 요소로 모형화하는 방법, 구조부재로 모형화하는 방법 및 주변 지반의 공학적 특성을 변화시키는 방법이 있다. 이 연구에서는 록볼트와 슛크리트를 구조부재로 모형화하는 지보재 모형화 방법과 록볼트의 지보효과를 주변 지반의 공학적 특성 변화로 지보재를 모형화하는 방법을 사용하여,

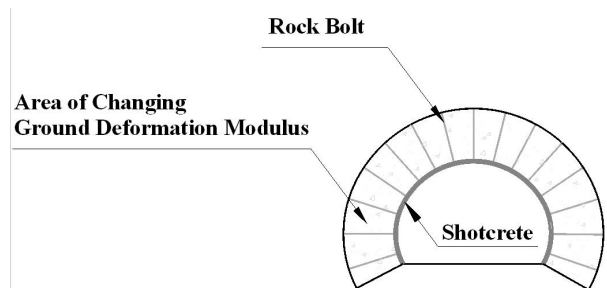


Fig. 10. Schematic of support modeling

각 방법의 타당성 및 적용성을 검토하였다(Fig. 10). 록볼트에 대한 구조부재 모형화 방법은 록볼트 설치각도가 90°인 경우에 적용하였으며, 주변지반의 공학적 특성을 변화시키는 모형화 방법은 록볼트 설치각도가 90°인 경우와 경사지게 설치되는 록볼트에 대하여 적용하였다.

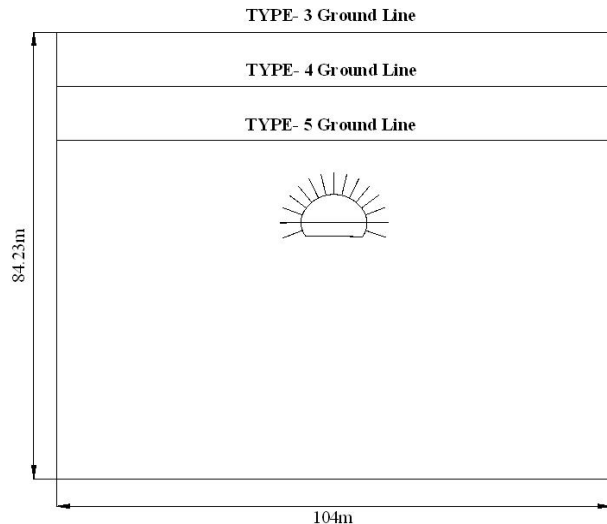
**4.3 수치해석 단면 및 적용 물성값**

수치해석 영역은 지반의 경계가 해석결과에 영향을 미치지 않도록 터널의 좌측, 우측 및 하부에 대하여 4.5D(D : 터널 환산직경= 10.18m) 이상으로 설정하였다. 또한 터널 천단에서 지표면까지의 토피고는 표준 지보패턴 3타입, 4타입 및 5타입(Table 3 참조)에 대하여 각각 3D, 2D 및 1D로 설정하였으며, 2차원 수치해석 단면은 Fig. 11과 같다.

각 지보패턴에 대한 지반조건은 지보패턴에 대한 암반분류에 따라서 3타입은 연암으로, 4타입은 풍화암으로 그리고 5타입은 풍화암 및 풍화토로 결정하였다. 각 지반조건에 대한 물성값은 도로설계편람(2010) 제6편 터널에 제시된 국내 터널 사공 실적에 의한 암반의 대표 물성값을 참조하여 Table 4와 같이 결정하였으며,

**Table 3.** Support design by support system

Division		Support System			
		3	4	5	
Excavation Spacing (m)		2.0	1.5	1.2	
Length (m)		4.0	4.0	4.0	
Rock bolt	C.T.C (m)	Longitudinal section	2.0	1.5	1.2
		Cross section	1.5	1.5	1.5
Shotcrete Thickness (m)		0.08	0.12	0.16	



**Fig. 11.** Numerical analysis section

**Table 4.** Ground properties by support system

Division	Support System		
	3	4	5
Unit Weight(kN/m <sup>3</sup> )	25.0	23.0	21.0
Cohesion Intercept(kPa)	700	300	100
Internal Friction Angle(°)	45.0	40.0	35.0
Deformation modulus(MPa)	500	250	100
Poisson's ratio( $\nu$ )	0.23	0.25	0.3
Coefficient of Lateral pressure( $K_0$ )	1.0	1.0	1.0

**Table 5.** Properties of shotcrete

Division	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Deformation modulus (MPa)	Poisson's ratio ( $\nu$ )
1st	24.0	5,000	0.2
2st	24.0	15,000	0.2

**Table 6.** Properties of rock bolt

Division	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Deformation modulus (MPa)	Poisson's ratio ( $\nu$ )
SD250, D25	78.5	210,000	0.3

**Table 7.** Load distribution ration by support system

Support System	Load Distribution Ratio
Type 3	50%-25%-25%
Type 4	40%-30%-30%
Type 5	40%-30%-30%

지반 파괴모델은 Mohr-Coulomb의 항복기준을 적용하였다. 그리고 슛크리트와 록볼트에 대하여 적용한 물성값은 Table 5 및 Table 6과 같다. 또한 수치해석에 적용한 응력분담비는 Table 7과 같다.

**4.4 환산강성 변화에 따른 수치해석결과(록볼트 구조부재 해석기법)**

2차원 수치해석은 단위폭에 대한 연산이 수행된다. 그러므로 록볼트 모형화에서는 록볼트의 종방향 설치간격을 고려하여 환산강성을 산정하여 적용하여야 한다. 그리고 록볼트 설치각도가 90°인 경우, 환산강성의 변화로 록볼트 종방향 설치간격 변화에 대한 터널 거동을 예측할 수 있다.

각 지보패턴에서 록볼트 부담면적 감소를 변화에 따른 수치해석을 수행한 결과, 록볼트 축력 증가량(Fig. 13)은 부담면적 감소(록볼트 종방향 설치간격 감소)에 따라서 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 3타입과 4타입에서 부담면적이 감소에 따라서 슛크리트 응력(Fig. 14)은 0.01MPa과 0.02MPa 감소하는 것으로 나타났다.

그러나 5타입에서는 슛크리트 응력이 0.11MPa 증가하는 것으로 나타났다. 또한 천단 침하 감소량은 부담면적 감소에 따라 증가하고 있으나 일정한 경향이 없는 것으로 나타났다(Fig. 12). 그리고 모형시험(토피고=60cm, 정착 길이=12cm 및 횡방향 2열)의 종방향 설치간격에 변화에 따른 처짐 감소량과 비교한 결과, 수치해석의 천단 침하 감소량 변화경향은 유사한 상관관계를 형성하지 못하는 것으로 나타났다.

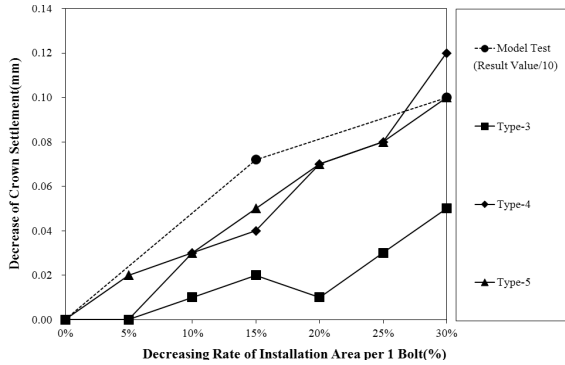


Fig. 12. Relationship between decrease of crown settlement and decreasing rate of installation area per 1 bolt

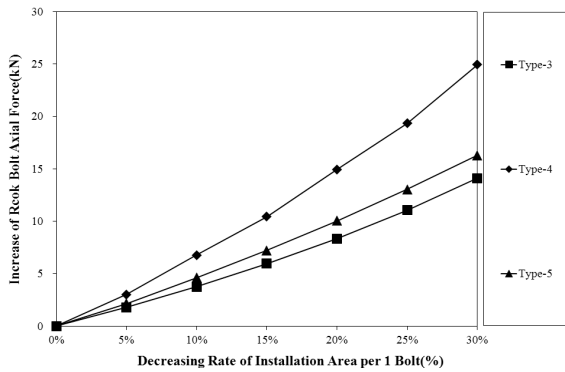


Fig. 13. Relationship between increase of rock bolt axial force and decreasing rate of installation area per 1 bolt

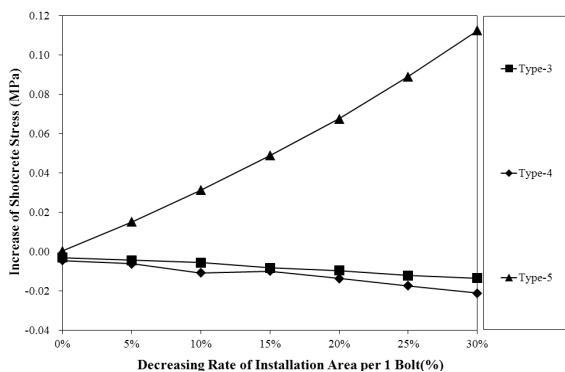
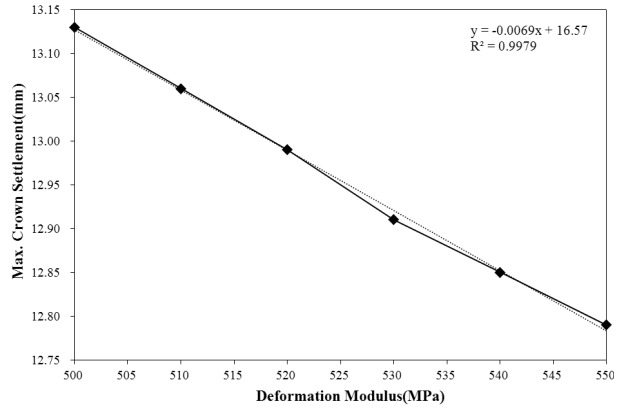


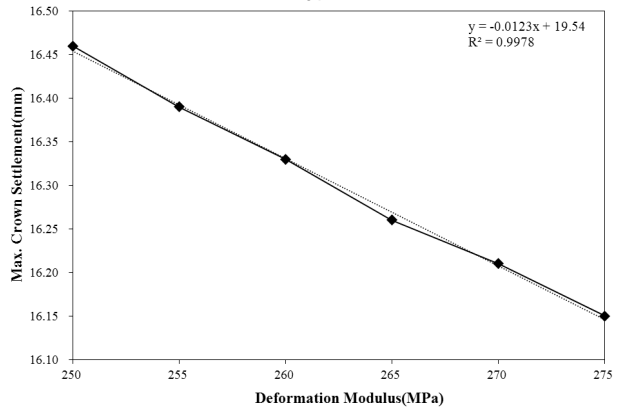
Fig. 14. Relationship between increase of shotcrete stress and decreasing rate of installation area per 1 bolt

#### 4.5 주변지반 변형계수 변화에 따른 수치해석결과(록볼트에 의한 지반강성 변화 해석기법)

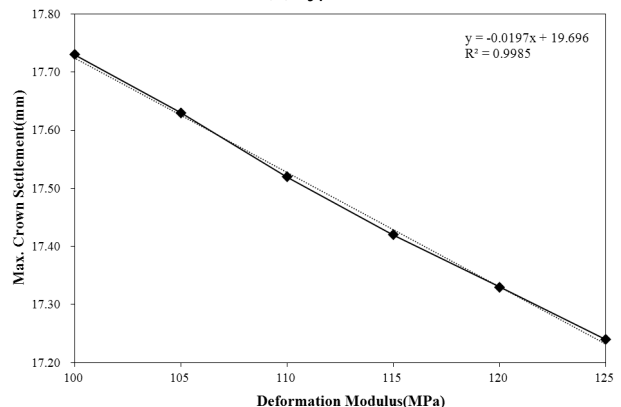
록볼트에 대한 지보효과는 슛크리트를 구조부재로 모형화하고 록볼트가 설치되는 영역의 지반 변형계수가 증가하는 것으로 간주하였다(Fig. 10). 그리고 각 지보패턴에서의 지보효과에 해당하는 변형계수는 천단침하량을 기준으로 산정하였다.



(a) Type 3



(b) Type 4



(c) Type 5

Fig. 15. Relationship between crown settlement and deformation modulus



주변지반의 변형계수와 터널의 최대 천단침하량 관계는 터널 주변지반의 변형계수가 증가함에 따라서 터널의 최대 천단침하량이 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 15). 그리고 슛크리트 응력은 변형계수 증가에 따라서 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 16).

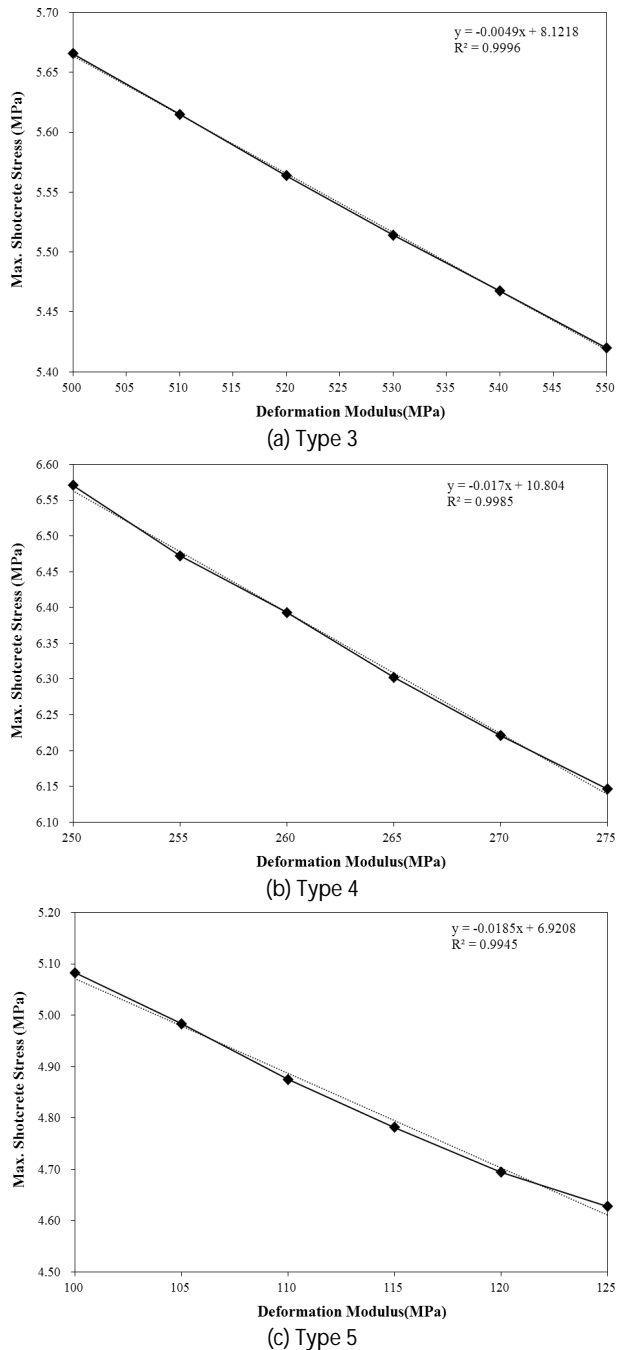


Fig. 16. Relationship between shotcrete stress and deformation modulus

#### 4.6 록볼트 설치각도 및 부담면적 변화에 따른 천단침하량 산정결과(록볼트에 의한 지반강성 변화 해석기법)

Fig. 14의 변형계수와 천단침하량의 관계에 따라서 각 지보패턴에서 표준 지보재 설치기준에서 나타난 최대 천단침하량을 이용하여 록볼트의 지보효과에 해당하는 변형계수를 산정하였다. 변형계수를 산정한 결과, 시스템 록볼트 설치에 의한 지보효과는 주변지반의 변형계수를 13.39~20.62MPa(평균 17.66 MPa) 정도 증가시키는 효과인 것으로 나타났다(Table 8). 그리고 Table 9은 모형시험에서 모형 록볼트 보강효과에 해당하는 변형계수( $E_{MR}$ )를 이용하여 설치각도와 부담면적 변화에 대한 변형계수 증가율을 산정한 결과이다.

록볼트 지보효과에 의하여 증가된 터널 주변지반 변형계수( $E_{TC}$ )와 지반 변형계수( $E_{TG}$ )의 차는 록볼트 지보효과에 해당하는 변형계수( $E_{TR}$ )이다. 록볼트 지보효과에 해당하는 변형계수에 Table 9의 모형시험 변형계수 증가율을 곱하면 록볼트 설치각도 및 부담면적 변화에 따른 록볼트 지보효과 변형계수를 산정할 수 있다. Fig. 17은 터널 주변지반 변형계수 변화와 천단침하량 관계로 각 지보패턴에서 록볼트 설치각도와 부담면적 변화에 따른 천단 침하 증가량을 산정한 결과이다. Fig. 17에서 나타나듯이 천단침하 증가량 발생경향은 모형시험(토피고=60cm, 정착 길이=12cm 및 횡방향 2열)의 처짐량 발생 경향과 유사한 것으로 나타났다. 따라서 수치해석에서 모형시험의 변형계수 증가율 적용하여도 터널 거동을 평가하는데 유용한 방법으로 사용될 수 있는 것으로 판단된다.

그리고 모형시험에서 나타난 설치각도와 부담면적에 따른 처짐량이 수치해석보다 크게 발생한 이유는 모형시험에서 슛크리트 및 록볼트를 모형화하기 위하여 사용한 재료의 강도특성이 터널 수치해석에서 모형화한 재료의 강도특성과 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

Table 8. Deformation modulus around tunnel by rock bolt reinforcing effect

Division	Crown settlement (mm)	Ground deformation modulus ( $E_{TG}$ , MPa)	Deformation modulus around tunnel ( $E_{TC}$ , MPa)
Type 3	13.00	500	518.44
Type 4	16.20	250	270.62
Type 5	17.45	100	113.93

Table 9. Decreasing rate of deformation modulus in model test

Division	Installation angle of rock bolt(°)				
	90	75	60	45	
Decreasing rate of installation area (%)	0	0	-4.11	-49.90	-54.23
	15	22.20	17.11	-24.29	-34.34
	30	31.34	23.49	-8.16	-13.28

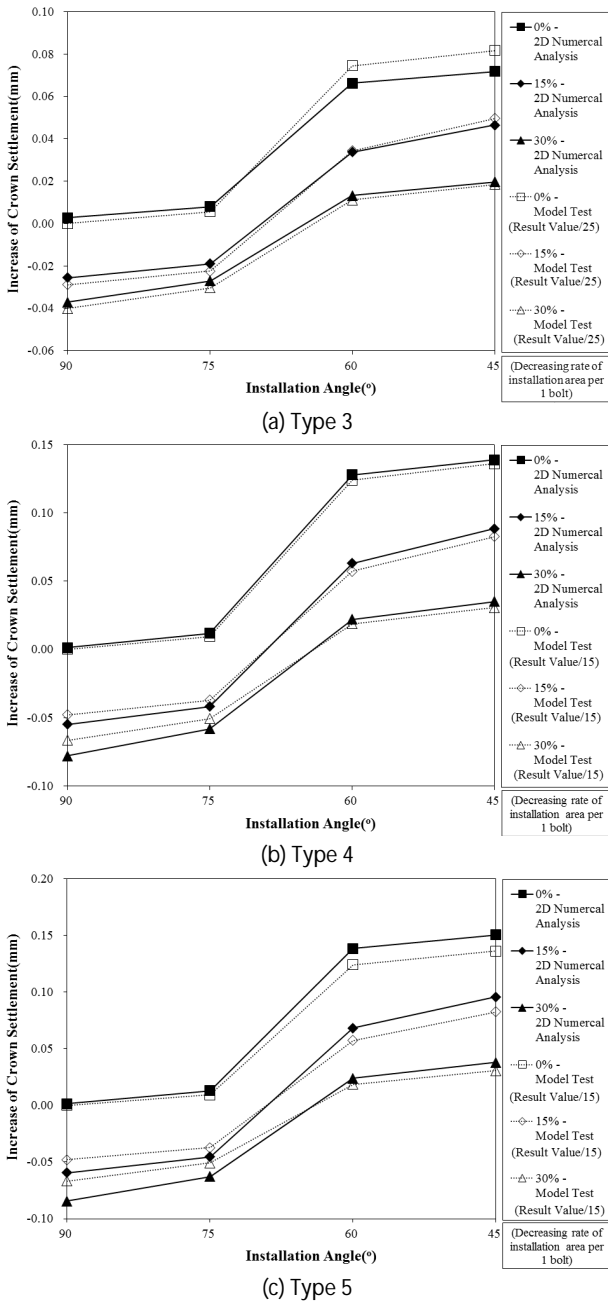


Fig. 17. Relationship between crown settlement and installation angle

## 5. 결론

이 연구에서는 일반적으로 터널 굴착방향에 수직으로 설치되는 시스템 록볼트의 보강효과와 터널 굴착방향에 경사지게 설치되는 경사 시스템 록볼트의 보강효과를 비교하고자 모형시험과 2차원 수치해석을 실시하였으며, 모형시험과 수치해석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 모형 록볼트의 각 설치각도에서 모형 록볼트의 보강효과는 부담면적 감소율이 감소함에 따라서 증가하는 것으로 나타났다. 또한 정착길이가 증가함에 따라서 모형 록볼트의 보강효과가 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 각 설치각도에서 부담면적 감소율 및 정착길이에 대한 이완하중 발생률은 유사한 상관관계를 나타냈다.
- (2) 강판 상부 12cm 지점까지를 합성보 부재로 고려하고 모형지반 및 강판의 지층이 등분포 하중으로 작용하는 것으로 가정하는 경우, 모형 록볼트가 설치된 복합지반의 변형계수는 단순보의 처짐량 산정식을 이용하여 구할 수 있다. 토괴고 60cm일 때의 모형 록볼트의 설치각도에 따른 변형계수 증가율과 부담면적 감소율을 비교한 결과, 변형계수는 설치각도가 감소에 따라 작아지는 것으로 나타났다.
- (3) 록볼트를 구조부재로 모형화하여 각 지보패턴에서 록볼트의 부담면적 감소율(종방향 설치간격이 감소) 변화에 대하여 록볼트의 환산강성이 변화하는 2차원 수치해석을 수행한 결과, 록볼트 최대 축력은 부담면적이 감소함에 따라 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 천단침하량과 슛크리트 응력은 일정한 경향을 보이지 않는 것으로 나타나 록볼트를 구조부재로 모사하고 록볼트 설치간격 변화에 따른 환산강성을 적용하는 수치해석 방법은 터널의 거동을 예측하는데 적합하지 않은 것으로 밝혀졌다.
- (4) 록볼트의 지보효과에 대응하는 변형계수를 적용하여 터널의 천단 변형 발생량을 산정하고 이를 모형시험에서 측정된 처짐 변형 발생량을 비교한 결과, 수치해석과 모형시험의 변형량 발생경향은 유사한 것으로 나타났다. 따라서 지보재 모형화 방법으로 터널 지보재 설치효과를 주변 지반의 공학적 특성 증가로 간주하는 방법은 충분히 수치해석에 적용할 수 있는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

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

## References

- An, J. H. and Lee, S. D. (2009). "Reinforcing effect of pre-tensioned rock bolts in the jointed rocks condition." *Tunnel and Underground Space*, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 19, No. 5, pp. 388-396 (in Korean).
- Cho, T. C. and Lee, C. I. (1993). "Reinforcement effect of

- viscoplastic rockbolt-numerical study.” *The journal of engineering geology*, The Korean Society of Engineering Geology, Vol. 3, No. 3, pp. 215-230 (in Korean).
- Goel, R. K, Swarup, A. and Sheroey, P. R. (2007). “Bolt length requiremental in underground openings.” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 44, No. 5, pp. 802-811.
- Jung, H. S. and Moon, H. K. (1999). “A study on the rein-forcement effects of fully-grouted rock bolts.” *Tunnel and Underground Space*, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 9, pp. 194-203 (in Korean).
- Kim, D. G. and Jung, H. S. (2007). “The enlargement of a tunnel in operation for improve function.” *Geotechnical Engineering*, Korean Geotechnical Society, Vol. 23, No. 3, pp. 14-20 (in Korean).
- Kim, W. K., Baek, K. H., Sea, K. W., Kim, D. G. and Woo, S. B. (2010). “Numerical study of reinforcing effect for rock bolt by installation angle.” *Annual Conference and General Assembly of Korean Society for Rock Mechanics*, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 2010, No. 3, pp. 199-204 (in Korean).
- Lee, J. D., Kim, B. I., Piao, M. S. and Yoo, W. K. (2012). “Model test study on the reinforcing effect of inclined system bolting.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 32, No. 5C, pp. 231-238 (in Korean).
- Lee, Y. K., Lee, C. I. and Cho, T. C. (1995). “A study on the visco-plastic behavior of the jointed rock mass reinforced by rockbolts during excavation.” *Tunnel and Underground Space*, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 5, pp. 123-133 (in Korean).
- Moon, W. J., Im, H. D., Jung, K. B., Kim, J. S. and Lee, S. D. (2005). “Supporting effects of system bolting at the tunnel in sandy ground.” *The 2005 KSCE Annual Conference & Civil Expo*, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 2005, No. 10, pp. 5555-5558 (in Korean).
- Noh, S. H., Lee, C. I. and Lee, Y. K. (2004). “Numerical analysis of the visco-plastic behavior of rock mass considering continuum joints and rock bolt elements.” *Tunnel and Underground Space*, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 14, No. 3, pp. 215-228 (in Korean).
- Osgoui, R. R. and Erdal, Ü. (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.
- Sea, K. W., Baek, K. H. and Kim, W. K. (2008). “Construction reports of the enlargement of a tunnel in operation-foreign countries(II).” *Tunnelling Technology*, Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 10, No. 2, pp. 71-79 (in Korean).