

# 페이스볼트의 타설각도가 보강효과에 미치는 영향 분석

## Laboratory and Numerical Simulation About the Installation Angle of Face Bolts

서 경 원<sup>1</sup> Seo, Kyoung-Won

西村和夫<sup>2</sup> Nishimura, Kazuo

김 광 엽<sup>3</sup> Kim, Kwang-Yeom

김 창 용<sup>4</sup> Kim, Chang-Young

### Abstract

A face bolt is normally horizontally installed. However, it often deviates from the initial horizontal position. The reinforcement effect of face bolts by its installation angle is analysed in this study. For the purpose of preventing surface subsidence and horizontal displacement of face, the face bolt should be installed as horizontally as possible, and if it deviates from the initial position, more bolts should be installed. Also, the residual face bolt left behind the face due to its installation angle has little supportive effect because it is too short and radially arranged.

### 요 지

페이스볼트의 타설각도는 현재 수평타설을 기준으로 하고 있으나 실제로는 수평으로부터 벗어나는 경우가 많이 발생하고 있다. 본 논문에서는 페이스볼트의 타설각도가 지반보강 효과에 미치는 영향에 대하여 실내실험과 수치해석을 통해 분석하였다. 페이스볼트에 의해 굴착부근의 지표면 침하 및 막장 수평변위를 억제하려고 하는 경우는 가능한 수평으로 타설하는 것이 유리하며, 수평으로부터 벗어나는 경우는 타설본수를 추가하여야 하는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Axial force, Face bolt, Installation angle, Laboratory test

### 1. 서 론

NATM굴착에서 터널의 안정성은 주로 기굴착부의 내공변위가 주된 지표로서 관리되어 왔지만, 최근 Pietro Lunardi(2000)는 열악한 지반조건하에서 터널굴착을 성공시키기 위해서는 전방코어(막장전방 지반의 영역으로 터널직경과 같은 크기를 갖는 가상적인 원통형상의 지반)의 강성을 조절해야만 한다고 강조하고 있다. 이것은 막장 후방의 지반 보강뿐만 아니라 전방의 보강도 중요하다는 것을 의미한다. 또한 국내외에서 조사된

터널 붕괴사고 가운데 많은 경우가(JTA 1993; 배규진 2000; HSE 1996) 터널 막장 및 막장근방에서 발생하고 있어 막장면 부근이 안정될 경우 성공적으로 터널을 굴착할 수 있다고 생각된다.

막장면에 대한 대책공법중, 페이스볼트는 주로 굴착 단면의 막장 및 주변지반의 이완방지, 막장수평변위 억제 등에 효과가 있다고 알려져 있으며(池口 1997; ジェオプロンテ研究会 2000; D.Peila 1996), 국외의 경우 새로운 재료 및 공법의 개발로 사용실적이 급증하고 있다. 1990년대 중반까지는 기존의 록볼트, 케이블볼트

1 정회원, 한국건설기술연구원 국토지반연구부 공학박사 (Member, Ph.D, Korea Institute of Construction Technology, kwseo@kict.re.kr, 교신저자)

2 동경도립대학 토목공학과 교수 (Ph.D, Tokyo Metropolitan Univ.)

3 정회원, 한국건설기술연구원 국토지반연구부 연구원 (Member, Researcher, Korea Institute of Construction Technology)

4 정회원, 한국건설기술연구원 국토지반연구부 공학박사 (Member, Ph.D, Korea Institute of Construction Technology)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

가 주로 사용되어 왔으나 최근에는 작업효율을 극대화하기 위하여 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)가 주로 사용되며 직경(외경)은 76mm, 길이 3m의 중공관을 연결하여 12m 정도로 타설하는 경우가 많다. 이때 실리카레진, 시멘트 밀크 등으로 주입도 실시하고 있으나 지반개량의 목적은 아니며 볼트와 지반을 정착시키기 위해 실시하고 있다.

페이스볼트의 타설수에 관한 규정은 정해진 것은 없으며 Ohtsuka(2006) 등은 일본에서 시공된 33개소 터널의 시공실적을 분석한 결과 기존의 시공실적을 참고로 타설개수를 결정하는 방법이 제일 많이 이용되고 있으며, 그다음으로 村山(1966)가 제안한 막장 수평토압을 계산하여 결정하는 방법이 많이 쓰이고 있는 것으로 보고하였다.

천공 작업시에는 지반조건, 작업자의 숙련도 등의 원인에 의해 수평천공으로부터 벗어나는 경우가 많으며, 이때 벗어나는 각도, 방향 등은 동일 단면에서도 서로 다른 것이 특징이다. 표 1에 현장에서 측정한 천공의 정확도를 나타내었다. 20m 천공시 원래의 천공선으로부터 최대 3.2m가 벗어난 현장도 있다. 이때 벗어나는 각도 및 방향은 동일 단면에서도 모두 다르며 예측하기 어렵다. 최근에는 페이스볼트의 길이가 40m에 이르는 경우도 있으므로 볼트 끝단에서는 페이스볼트가 터널 영역으로부터 벗어나는 경우도 생길 수 있다.

페이스볼트의 현재 설계기준은 막장에서 전방으로 수평으로 타설하도록 되어 있으며(실무상에서는 약간 상향으로 타설하는 경우가 많음), 만약 수평으로부터 벗어나는 경우에는 볼트를 추가하여야 한다고 규정하고 있다

표 1. 천공 데이터의 정확도(Hideo Kinashi 2004; GeoFronte Research Association: 1996, 벗어난 각도는 불확실함)

	A 터널	B 터널	C 터널
암종	불명확	불명확	이암
20m천공시 수평으로 부터의 벗어난 정도(m)	0.9m	3.2m	0.17m
각도로 환산(°)	2.6°	9.1°	0.49°

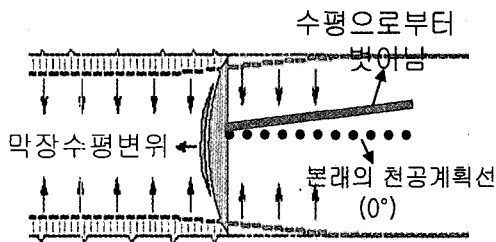


그림 1. 수평타설로부터 벗어남(모식도)

(GeoFronte Research Association 1996). 그러나 페이스볼트가 수평에서 벗어나는 경우 보강효과에는 어떤 영향을 미치는지 또한 얼마를 추가해 주어야 하는 지 등에 관한 구체적인 규정이나 관련 연구는 전무한 상황이다.

본 연구는 이러한 배경을 근거로 실내모형시험과 수치해석을 통하여 페이스볼트의 효과를 분석하였으며, 수평타설로부터 벗어나는 경우에 대한 효과의 추이를 분석하였다.

## 2. 터널 모형실험 및 수치해석 모델

### 2.1 모형실험 방법

페이스볼트의 시공은 다른 공법과 달리 굴착영역에 타설하여 굴착과 동시에 절단하면서 터널을 진행해 가는 것이 큰 특징이다. 즉 막장전방에는 볼트가 잔존하지만 후방에서는 볼트가 절단되어 없어지는 특징이 있다. 이러한 특징을 모델화하기 위해서는 막장이 자립할 정도의 점착력을 가지는 지반재료에서 볼트의 타설→굴착(절단)→...→굴착(절단)의 순차굴착의 과정을 반복할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 지반재료로서 금속제의 동산탄을 사용하였다. 금속재료를 지반재료로 가정한 예는 드물지만 藤間(1983)은 동산탄만을 이용하

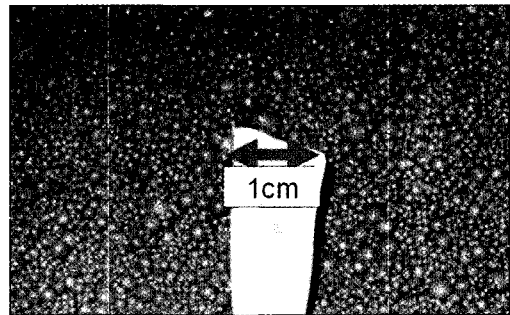


사진 1. 지반작성 전의 재료 모습

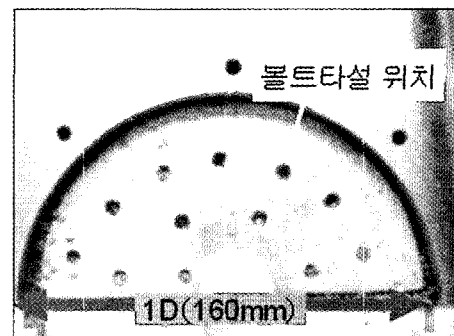


사진 2. 볼트타설 장면

여 사면의 안정성을 분석한 바 있고, 일본도로공단시험소(1999)에서는 납 산탄을 이용하여 갱구부 사면의 안정성 분석에 사용한 예가 있다. 본 실험에서는 지반자립에 필요한 점착력을 얻기 위해 동산탄, 산화아연, 와세린을 200:0.3:1의 중량비로 섞어 사용하였다(사진 1 참조). 이 중량비는 예비실험을 토대로 결정하였으며 본 논문에서는 예비실험의 결과는 생략하기로 한다. 이러한 재료의 특징으로서는 물을 사용하지 않으므로 물성치가 안정되어 있고 장기간 보존이 가능하다는 장점이 있으며 단점으로는 와세린을 사용하므로 시험시 일정한 온도관리가 필요하다. 본 실험에서는 실내온도를 21°C로 유지하였다.

그림 2에는 모형토조의 치수 및 지반작성이 완료된 상태의 사진을 나타내었다. 동산탄의 유효경( $D_{10}$ )은 0.88mm이며, 균등계수는 2.18,  $D_{60}$ 은 1.92mm이다. 지반의 작성

은 30cm의 높이를 6층으로 나누어 23gf/cm<sup>2</sup>의 하중으로 다짐을 실시하여 작성하였다.

페이스볼트는 한 변이 2mm, 길이 2D(160mm)인 정사각형 아크릴 룯드에 표준사를 부착하여 사용하였다. 실험에서 페이스볼트의 타설은 터널 굴착 후 지반이 안정화 되는 것을 기다려 미리 타설위치 및 각도를 조절한 목재의 터널모형의 폼을 막장에 부착하여 타설하였으며, 2~3 step 굴착 후 후방에 남겨진 볼트를 절단하였다. 이때 페이스볼트의 타설은 표 2처럼 1단면당 3본을 타설하였으며 중첩장은 0.5D(8cm) 간격으로 2.8D 굴착하는 동안 6회를 타설하였다. 사진 2에는 볼트타설 장면을 나타내었다.

터널은 직경(외경) 2D(160mm)인 반원형의 아크릴 파이프로 모델화 하였으며, 굴착은 1 step을 2cm 간격으로하여 손으로 굴착하였다. 각 스텝마다 굴착 후 지반이 안정되는 것을 충분히 기다려 다음 스텝을 굴착하였다. 이러한 굴착방법은 삼차원 굴착시 자주 이용되며 Ishimura(1998) 등에 의해 성공적으로 수행된바 있다. 최종적으로는 2.8D(44cm)를 순차적으로 굴착하였다.

이러한 시험방법은 실제의 시공과 비교하여 다음과 같은 큰 차이점이 있다. 우선 가압을 하지 않으므로 구

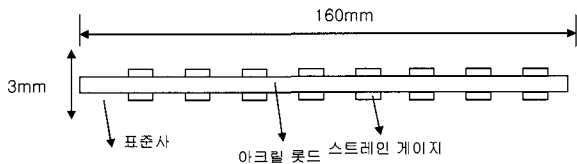


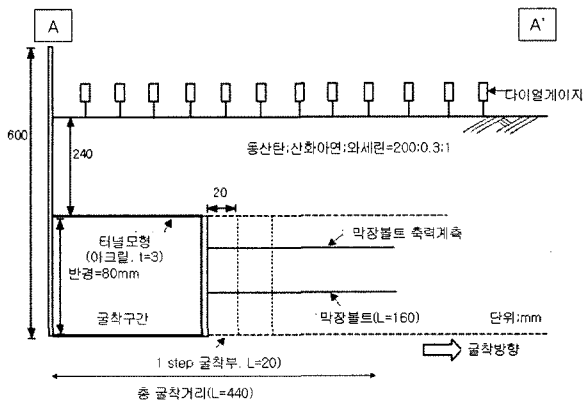
그림 1. 실험용 페이스볼트의 개요

표 2. 페이스볼트의 타설각도에 대한 실험 모델

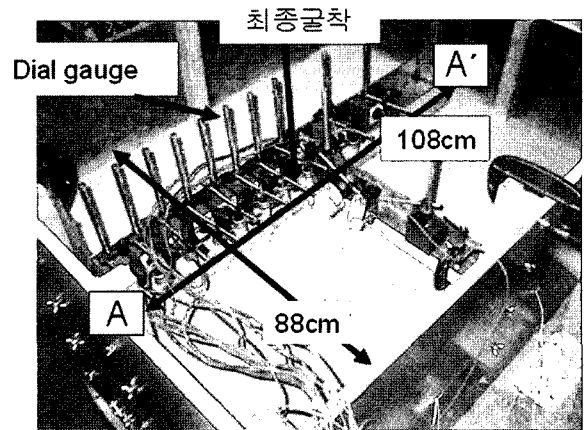
실험모델	모델명	볼트배치	타설본수	타설 shift	타설특징
그림 4의 (a)	[none]	볼트없음	-	-	-
그림 4의 (b)	[P-(0°)]	수평타설	3본/단면	6	모든 단면에서 동일한 타설밀도가 유지됨
그림 4의 (c)	[R-(15°)]	방사상15°타설	3본/단면	6	4step굴착 후 막장으로부터 볼트가 없어짐
그림 4의 (d)	[R-(30°)]	방사상30°타설	3본/단면	6	2step굴착 후 막장으로부터 볼트가 없어짐

볼트의 중첩장 ; 0.5D(8cm)

총 굴착거리 ; 2.8D(44cm)



(a) 모형토조의 개요(A-A' 단면)



(b) 모형토조 사진(지반작성의 완료 후)

그림 2. 모형토조의 layout

속압이 상당히 작으며, 볼트의 절단이 2~3스텝 느리다. 또한 지반과 볼트의 부착이 실제보다 낮게 평가 될 수 있다. 그러나 실제의 페이스볼트와 실내시험 모두 축력에 의해 보강효과가 발휘되는 구조이므로 이러한 차이는 무시하기로 한다.

## 2.2 수치해석 모델

터널막장은 순차굴착을 행하기 때문에 막장최대수평변위(이하, 최대수평변위로 표현 함)를 직접 계측하는 것은 불가능하여, 실험을 수치해석으로 재현하여 분석 하였다. 수치해석은 실험과 동일한 과정으로 행하였다. 표 3에 해석에 사용된 볼트 및 터널제원을 나타내었다. 지반은 완전탄소성체로 모델화하고, 파괴기준은 Mohr-Coulomb의 기준을 적용하였으며 해석에 사용된 프로그램은 FLAC3D이다. 볼트는 파일요소로 모델화하고, 굴착 등

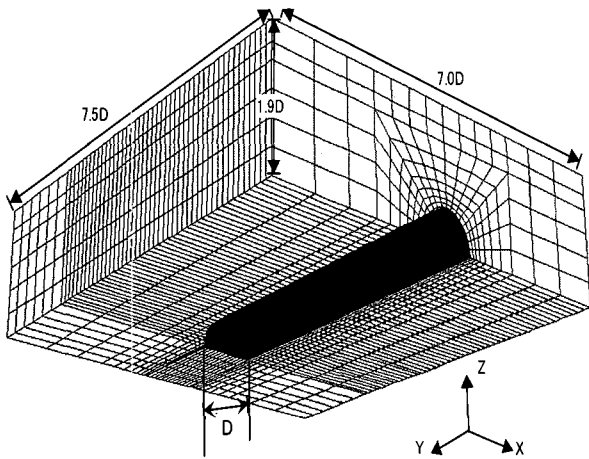


그림 3. 수치해석 모델

표 3. 해석에 사용된 지반 및 볼트의 제원

지반	재료	동탄계의 인공재료
	밀도	5.4g/cm <sup>3</sup>
	탄성계수	2900(KPa)
	포아송비( $\nu$ )	0.45
	내부마찰각	35(°)
	점착력	7.3(KPa)
페이스볼트	재료	아크릴 룯드에 모래를 부착해서 사용함
	탄성계수	4.5E5(MPa)
	단면적	7.0E-2(cm <sup>2</sup> )
	중첩장	8cm(0.5D)
	길이	16cm(1D)
볼트-지반의 부착특성	shear stiffness	7.3(KN/m/m)
	shear strength	0.35(KN/m)

은 실내실험과 동일한 순서로 행하였다. 볼트와 지반간의 부착특성에 대해서는 [아크릴재-에폭시-모래-지반재료계]에서의 부착의 절단은 볼트와 지반재료 사이에서 발생하는 것으로 가정해서 지반재료의  $c$ ,  $\phi$  값을 이용하였다. 지반재료의 실내물성실험 결과는 표 3에 나타내었다. 그림 3에는 수치해석으로 재현한 실내실험의 해석영역을 나타내었다.

## 2.3 실험모델

그림 4에 실내실험 및 수치해석에 사용된 모델을 나타내었다. 먼저 그림 4(a)의 「none」과 (b)의 수평타설을 비교하여 페이스볼트의 효과를 고찰하고, 그림 4(b)와 그림 4(c), (d)의 수평타설과 각도타설을 분석하였다. 이때 각도타설은 방사상 15°, 30°의 두 가지를 가정하였다. 타설방법은 그림 4의 C지점을 중심으로 전방에 방사하는 형태이며 이러한 타설은 현장에서 생기는 수평타설로부터 벗어나는 각도와 비교하여 주변지반으로 퍼져나가는 면적이 크나 실제 타설각도의 벗어남은 각 단면에서도 서로 다른 점과 실내시험의 검증 한계를 고려하여 방사상으로 타설하기로 하였다. 최근에는 최외곽부의 볼트만을 약 20°정도 상향으로 타설하여 지반침하를 억제하려는 시공도 이루어지고 있다.

표 2에 그림 4와 같이 타설했을 경우의 특징 및 타설

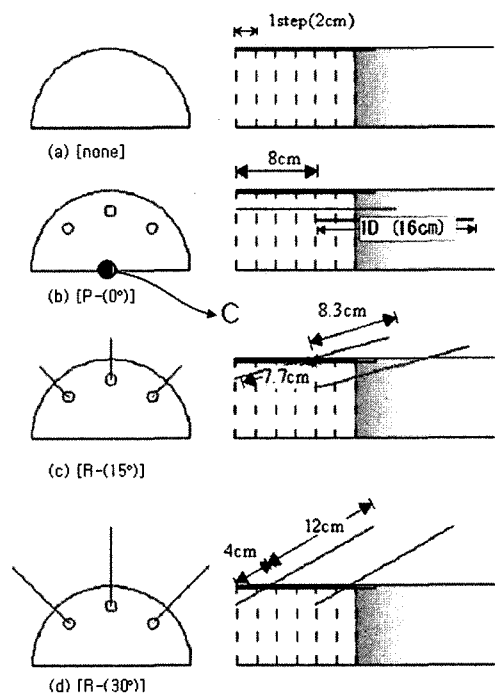


그림 4. 실내실험 및 수치해석 모델

본수 등에 대한 설명을 나타내었다. 2.8D까지 굴착하면서 6회의 볼트를 타설하였으며 중첩장은 예비실험을 참고로 0.5D로 하였다.

## 2.4 계측항목

본 실험에서는 페이스볼트의 타설각도에 따른 지표면 침하량과 볼트 축력을 계측하였다.

지표면 침하량은 그림 2에 나타난 것처럼 터널 중심선을 따라 6~10cm 간격으로 다이얼 게이지를 설치하였고 최종굴착이 끝나는 2.8D(44cm) 지점에 횡단방향으로도 게이지를 설치하여 굴착에 따른 종단 및 횡단방향의 지표면 침하량을 계측하였다.

페이스볼트의 축력은 그림 1에 나타낸바와 같이 볼트 양면에 스트레인게이지를 부착(20mm 간격으로 8개소에 부착)하여 계측하였다.

## 3. 실험 및 수치해석 결과

### 3.1 변위에 대한 고찰

그림 5에 1.4D굴착했을 때의 침하량, 그림 6에 2.8D 굴착했을 때의 터널종단방향의 지표면 침하량(실험값)을 나타내었다. 그림에서 보듯이 타설각도가 클수록 변위도 커지는 것을 알 수 있다. 최종굴착단면에서의 계측치인 그림 6에 주목하기로 한다. 이 지점은 그림4처럼 수평볼트는 6본/단면(1단면당 3본을 타설하였으나 중첩장을 고려한 타설이므로 6본/단면이 된다.)이 존재하며, [R-15°]타설은 굴착선 가까이 볼트가 위치하는 형태가 되며 [R-30°]타설은 막장전방의 천단부에 볼트가 위치하지만 막장 수평방향으로는 볼트가 없는 상태가 된다. 막장후방 1.88D에서는 [P-(0°)]은 [none]에 비하여 약

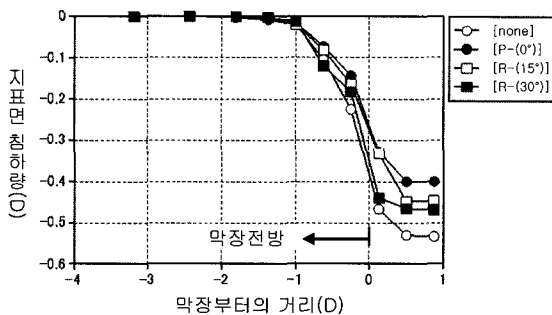


그림 5. 1.4D 굴착했을 때의 지표면 침하량(터널종단방향)-실험값

22%의 변위저감효과가 보이지만 [R-15°]는 15%의 저감효과, [R-30°]는 10%의 변위저감효과를 보이고 있어 저감효과는 타설각도의 커짐에 수반하여 감소되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 그림 7의 수치해석으로 검증한 결과도 마찬가지로 페이스 볼트에 의해 굴착단면의 천단부 및 후방부에서 변위가 크게 작아지고 있는 것을 확인할 수 있고, 타설각도가 커질수록 변위도 커지는 것을 알 수 있다. 그림 8에 최종굴착지점인 2.8D의 횡단방향의 지표면 침하치를 나타내었다. 그림 6의 종단방향 침하량과 마찬가지로 타설각도가 클수록 침하의 폭과 깊이가 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 타설각도에 의해 절단되지 않고 후방의 지중에 볼트가 남아있어도 볼

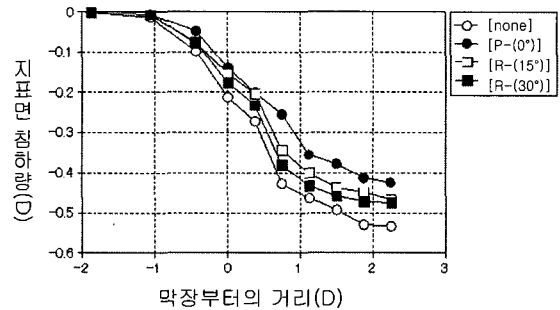


그림 6. 2.8D 굴착했을 때의 지표면 침하량(터널종단방향)-실험값

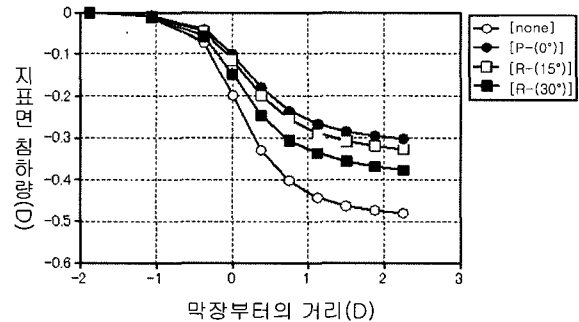


그림 7. 2.8D 굴착했을 때의 지표면 침하량(터널종단방향)-수치해석값

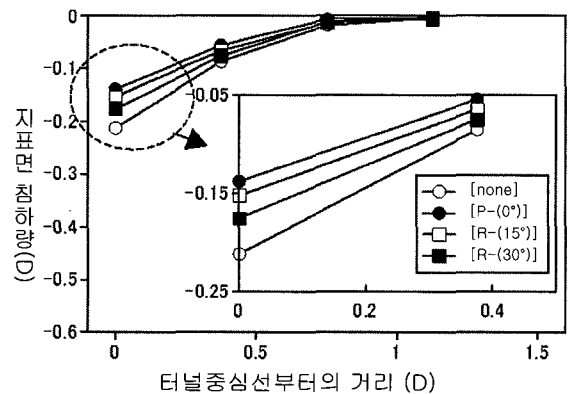


그림 8. 2.8D 굴착했을 때의 지표면 침하량(터널횡단방향)-실험값

트의 길이도 짧고 각도의 방향도 방사형으로 터널로부터 넓어지고 있으므로, 볼트가 지중에 잔재하여도 보강재로서의 역할은 발휘되지 않고 변위가 커졌기 때문에 생각한다.

그림 9에 페이스볼트의 타설각도에 따른 막장중앙부의 최대수평변위(수치해석치)를 나타내었다. 먼저 페이스 볼트의 수평타설에 의해 최대막장수평변위가 47% 감소되는 것을 알 수 있다. 또한 페이스볼트의 타설막장에서는 타설각도에 의한 영향이 작지만 타설 후 2 step 굴착한 지점([R-(30°)])의 볼트는 막장으로부터 없어짐)에서는 수평변위가 커지는 것을 알 수 있다. 즉 막장부의 수평변위에 대한 효과는 수평타설이 가장 효과적이며 지반공학적 및 시공 원인에 의해 타설각도가 생기는 경우 타설 본수를 증가시켜야 된다고 판단된다.

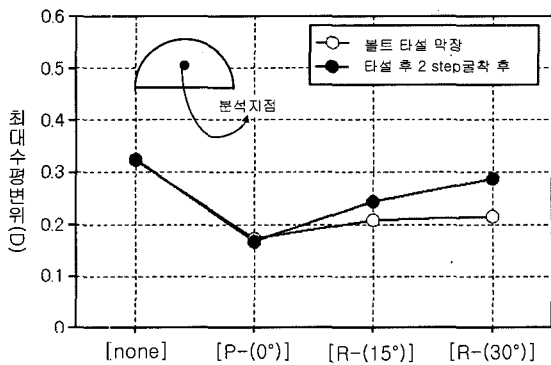


그림 9. 막장 최대 수평변위-수치해석값

### 3.2 페이스볼트 축력에 관한 고찰

그림 10에 페이스볼트 축력의 계측 위치를 나타내었다. [B]지점으로부터 방사상으로 타설한 볼트는 선형시킨 터널모형(라이닝재)과 간섭하므로 축력의 계측시에는 막장 중앙부[C] 지점으로부터 타설하여 수평타설과 방사상 타설에 의한 축력 분포를 비교하였다. 축력은 예비실험에서 실시한 스트레인지어의 보정계수 실험값을 이용하여 계측된 스트레인을 축력으로 환산하였다.

그림 11에 [C]지점으로부터 수평으로 타설한 볼트 ([P-(0°)]의 경우)의 굴착스텝별 축력을 나타내었다. 그림중의 해치선은 막장의 위치를 나타내며 해치선 오른쪽이 미 굴착구간이며 왼쪽이 기굴착 구간이다. 그림 11(a)는 전 스텝의 굴착 후 막장이 안정된 상태에서 타설하였으므로 축력이 발생되지 않고 있으며, 1step(그림 11의 (b))~5step(그림 11의 (f))는 모두 막장전방에서 최대축력이 나타나고 있다. 이것은 다음과 같이 생각할 수 있다. 막장면 부근 전방 수 cm까지는 전 스텝의 굴착으로 인해 이미 선형변위가 발생하여 볼트와 지반간

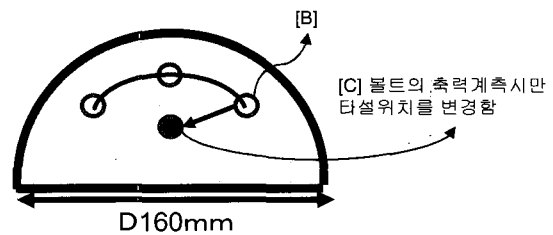


그림 10. 페이스볼트 축력의 계측위치

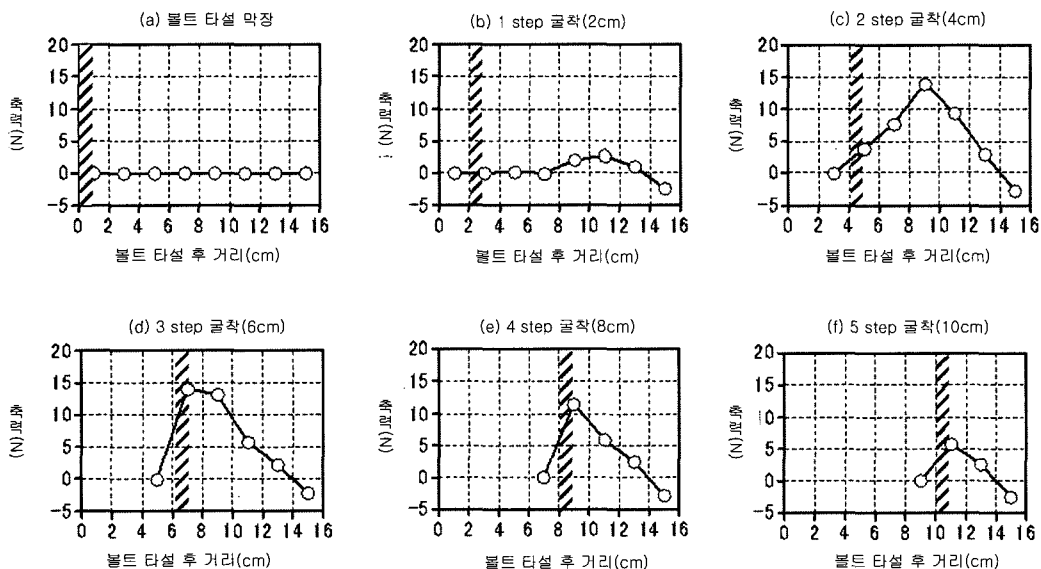


그림 11. 그림 4의 [C]지점에서 수평으로 타설한 볼트의 굴착에 따른 축력 분포(그림중의 해치선은 막장의 위치를 나타냄)-실험값

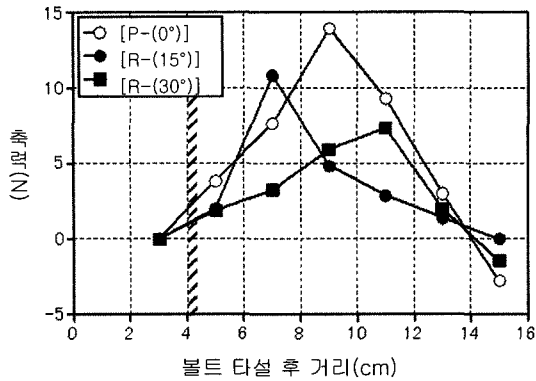


그림 12. 페이스 볼트의 타설각도에 따른 최대 축력의 비교-실험값

의 마찰이 작아졌기 때문에 축력이 작아진 것으로 분석된다. [none]의 경우 최종 굴착단면인 2.8D(44cm) 지점에 설치한 계측기에서는 최종 침하량 22.1mm 중 15.1mm가 이미 선행변위로 발생하여 31%만이 새로운 굴착에 의한 변위로 분석되었다. 또한 4 step 부터는 볼트의 잔장이 짧아짐과 동시에 축력도 감소하고 있어 본 연구에서 가정된 중첩장 0.5D는 적정하다고 판단된다.

그림 12에 타설각도에 따른 볼트의 최대 축력분포를 나타내었다. 볼트의 축력은 변위가 클수록 커질 것으로 예상되므로 그림 9처럼 막장 최대 수평변위가 큰 [R-(30°)] 모델이 축력이 클 것으로 예상되나 그 반대로 수평볼트의 축력이 가장 크며 타설각도가 클수록 축력이 작아지고 있다. 이것은 다음과 같이 생각할 수 있다. 방사상 타설의 경우 지반의 변위는 커지나 주된 변위가 발생하는 연직방향과 수평방향으로부터 벗어나 있으므로 지반과 볼트의 상대변위는 작아져서 마찰이 작아지고 결과적으로 축력이 작아졌다고 판단된다. 그러므로 볼트의 최대축력을 발현시키기 위해서는 수평타설을 해야 하며, 타설각도가 벗어나는 경우 타설본수를 추가해 주어야 하는 것이 명확해 졌다.

#### 4. 결론

본 연구는 페이스볼트의 타설각도에 대하여 실내 실험과 수치해석을 통하여 분석한 것으로서 다음의 결론이 얻어졌다.

(1) 페이스볼트의 시공기준에는 천공은 가능한 수평으로 타설할 것을 기준으로 하고 있으나 실제 천공 작업시에는 지반조건 등에 의해 수평에서 벗어나는 경우가 많으며 이때 각도 및 방향은 동일 단면에서

도 서로 다르다.

- (2) 페이스볼트는 막장의 수평변위 억제뿐만 아니라 굴착단면 부근의 지표면 침하에 대한 억제효과도 있는 것으로 나타났다. 본 연구의 조건에서는 수평타설의 경우 막장수평변위는 62%(수치해석), 굴착면 상부의 천단침하는 34%(실험) 감소하는 것으로 나타났다.
- (3) 페이스볼트의 막장수평변위에 대한 막장에서 수평으로 타설하는 것이 가장 효과적이며 타설각도가 클수록 수평변위는 커지는 것으로 나타났다. 본 연구의 조건하에서는 [P-(0°)]과 [R-(30°)]타설의 경우 53%의 보강효과 차이가 있는 것으로 나타났다.
- (4) 각도타설에 의해 막장 후방의 지중에 남겨진 볼트는 잔장도 짧고 타설 방향도 터널 주변으로 넓어지는 형태이므로 후방의 지표면 침하에 대한 효과는 기대할 수 없다.

이상의 결과로부터 수평변위 제어가 목적인 페이스볼트는 가능한 수평으로 타설해야 하는 것이 명확해 졌다. 그러나 천공작업상 수평으로부터의 벗어남은 피할 수 없으므로 페이스볼트의 설계시에는 이러한 점을 고려하여 본수를 추가해주어야 한다. 향후 추가실험을 통해 수평으로부터 벗어나는 경우에 대해 추가해주어야 하는 본수의 결정방법에 대한 결과를 보고할 예정이다.

#### 참고 문헌

- JTA 안전환경위원회 (1993), "터널공사의 제해 사례 조사", *터널과 지하*, pp.307-313, 4월호.
- 배규진, 서경원 (2000), "국내터널붕괴사태 연구", *한국지반공학회 특별세미나*, pp.3-31.
- 일본도로공단시험소 (1999), *터널갱구부의 사면보강에 관한 실험 보고서(1/4)*, pp.5-30.
- 池口正晃, 真下英人 (1997), "切羽安定化のための鏡ボルトの効果", *トンネル工学研究論文・報告集*, Vol.7, pp.93-98.
- 藤間 哲二 (1983), *急傾斜面の土庄計測*, 東京都立大学 卒業論文, pp.2-18
- 村山 朔郎. et.al (1966), "機械化シールドの掘削性に関する土質力学的考察", *第1回土質工学研究発表会*, pp.75-78.
- Pietro Lunardi (2000), "The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils", *T&T International ADECO-RS Approach May*, pp.3-30.
- HSE (1996), *Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) tunnels*, pp.15-20.
- D.Peila, P.P.Oreste & S.Pelizza (1996), "Study of the influence of sub-horizontal fiber glass pipes on the stability of a tunnel", *North*

*American Tunnelling*96, pp.425-432.

10. Hideo Kinashi (2004), *A study on development and effect of the longitudinal face bolt* (in Japanese), Kyoto University, Ph.D Thesis.
11. GeoFronte Research Association (1996), *An concerning of Longitudinal face bolt* (in Japanese) pp.12-15.
12. Isamu Ohtsuka, Tomoyuki Aoki, Tadashi Okabe, Shingo Morito (2006), "Study on performance and application range of long face bolts", *Proceedings of the 35th symposium on rock Mechanics, JSCE*, pp.41-46.
13. Toshiaki Ishimura, Hideto Mashimo, Hideto Mayumi, Kunino Hujii (1998), "A 3-dimensional excavation model test about the effect of a tunnel pre-lining for the restraint of the ground deformation", *Proceeding of tunnel engineering, JSCE*, Vol.8, pp.199-204.

(접수일자 2006. 7. 3, 심사완료일 2006. 9. 18)