

실내실험 및 수치해석을 이용한 막장볼트의 최적 타설 개수에 관한 연구

서경원^{1)*}, Nishimura Kazuo²⁾, 김창용³⁾

A Study of the Optimum Installation Number of Face Bolts Using Laboratory Tests and Numerical Analysis

Kyoung-Won Seo, Nishimura Kazuo and Chang-Young Kim

Abstract The use of face bolt method has been increasing abroad recently. Hence, many tests and measurements are being conducted and reported. Also, it is well known that determination of the installation number of face bolts in the design stage is very difficult due to difference of the ground condition and the type of a bolt to be used. First of all, the type, the number, etc. of bolts used in various tunnel construction sites, investigated, are analyzed. The relationship between bolt and ground condition could not be found because bolts have been used with the other support methods in many cases. In the laboratory test and numerical analysis based on the site investigation, the behavior of ground and pipes installed on the tunnel face to support has been examined. Especially, the installed number is focused on. According to the result of tests, the surface settlement and the axial displacement of the face decrease exponentially as the number of installed bolts increases.

Key words Face bolt, Axial displacement, Axial force, 3-Dimensional model test

초 록 최근 국외에서는 터널막장의 안정을 위해 막장볼트의 시공실적이 급증하고 있고 관련된 많은 실험, 계측 등의 자료가 발표되고 있지만 현장마다 지반조건, 볼트 종류가 틀리기 때문에 설계 단계에서 최적의 타설개수를 결정하는 것은 매우 어렵다. 본 연구에서는 우선 현장조사를 통하여 사용되는 막장볼트의 종류, 개수 등을 분석하였다. 이결과 막장볼트는 다른 공법과 병용하여 사용되는 경우가 많기 때문에 지반조건과의 상관관계는 보이지 않았다. 또한 현장조사를 바탕으로 한 실내시험 및 수치해석을 통해 터널 막장이 볼트로 보강되었을 경우 지반 및 볼트의 거동을 분석하였으며 특히 타설개수에 초점을 맞추었다. 실험결과 막장볼트의 개수가 증가할수록 지표면침하 및 막장수평변위는 지수함수 형태의 변위감소 분포를 보이고 있는 것으로 나타났다.

핵심어 막장볼트, 막장수평변위, 볼트축력, 3차원 모형 실험

1. 서 론

최근 국외에서는 NATM 터널굴착 시 가장 취약지점인 막장을 보강하기 위해 GFRP(Glass Fiber Reinforced Pipe)나 철근 등을 이용한 막장볼트 공법이 많이 적용되고 있다. 이 공법은 굴착에 앞서 터널 막장에 10 m 이상의 긴 파이프를 수평으로 설치하여 막장 및 전방을 선행보

강시켜 놓은 상태에서 터널을 굴착해 나가는 방법이다. 특히 GFRP는 별도의 절단 작업이 필요치 않으며 강관을 이용한 보강공법보다 경제성이 우수하여 약 2000년 이후부터 사용실적이 급격히 늘고 있는 추세이다. 이 공법의 효과에 대해서는 기존의 많은 실내실험 및 현장시험(남기찬:2001, 유충식:2000, Otuka:2003) 등에 의해 검증되었으며 많은 시공실적이(Geofronte 연구회:2000, Nishizaki:2002) 있다.

이때 막장에 최적의 볼트를 설치하는 것은 안정성뿐만 아니라 경제성 및 시공성의 관점에서 볼 때 중요한 설계요소중의 하나이다.

D. Pelia(1996) 등은 수치해석 및 현장계측을 통하여

¹⁾ 한국건설기술연구원 박사후 연구원

²⁾ Tokyo Metropolitan University 토목공학과 교수

³⁾ 한국건설기술연구원 수석연구원

* 교신저자 : kwseo@kict.re.kr

접수일 : 2006년 10월 20일

심사 완료일 : 2006년 12월 14일

막장볼트의 개수와 막장수평면위와의 관계를 보고하였는데, 수치해석의 결과에서는 1단면당 약 100본, 현장계측에서는 80본을 경계로 그 이상 타설하여도 효과는 증가하지 않는다고 보고 하였다. Yoo(2001)는 수치해석을 통해 타설밀도가 1.1 본/m² 이상이라면 그 이상 효과는 증가하지 않는다고 하였다.

Mitarai(2003)는 여러 지반조건을 대상으로 한 수치해석을 통해 타설밀도와 수평변위는 완만한 반비례 관계를 보인다고 보고 하였다. Ohtsuka(2006)는 일본의 33개소 시공실적의 조사를 통해, 타설개수를 결정하는 수법으로는 실적에 의한 경험적 수법으로 결정하는 경우가 많고 역학적 계산 방법으로는 Murayama(1966)가 제안한 막장수평압을 계산하여 결정하는 경우가 많으며 타설밀도는 0.3 본/m²인 경우가 많다고 하였다. 또한 막장볼트가 적용되는 지반조건으로는 점착력이 0.04 MPa이하, 지반의 탄성계수는 200 MPa 이하가 많고, 볼트의 길이는 12~18 m, 중복장은 3~6 m의 경우가 많다고 보고 하였다.

그러나 적용 대상지반이 항상 다르며 볼트의 제원, 터널크기, 정착재 등의 제반조건이 모두 다르므로 사전설계시 개수를 결정해두는 것은 매우 어려운 일이다. 본 논문은 우선 현장자료를 분석하여 지반조건과 타설개수의 관계를 조사하였다. 그리고 이상의 기존 연구 결과를 바

탕으로 막장볼트의 실내실험 및 수치해석을 행하고 막장볼트의 타설개수와 변위저감 효과에 대한 결과를 검토하였다.

2. 기존 연구 및 현장자료 분석

Fig. 1에는 Geofronte 연구회(2000)에서 조사한 30개 현장의 막장볼트 종류를 나타내었다. 60%이상이 GFRP 중공관이 사용되고 있으며 대부분의 현장에서 GFRP의 볼트가 사용되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 볼트의 직경은 20 mm~100 mm까지 다양한 종류가 사용되고 있다 (Fig. 2).

Fig. 3~Fig. 4에는 일본의 11개 현장(도로터널, 철도터널)으로부터 수집한 지반조건과 타설개수와의 관계를 나타내었다. 막장볼트는 1단면당 최소 11본부터 최대 46본 까지 타설하고 있으며, 지반의 탄성계수와의 상관성은 보이지 않는다(Fig. 3). 이것은 다음과 같이 생각할 수 있다. 막장볼트는 단독으로 사용되는 경우는 적고 다른 공법과 병용해서 사용되는 경우가 대부분이므로 허용 변위량을 다른 공법과 맞추어서 결정하기 때문으로 생각되며, 또한 볼트 직경 및 배치형상이 현장마다 다른 것도 하나의 요인으로 생각된다.

Fig. 4에 막장볼트의 타설개수와 토피고를 나타내었

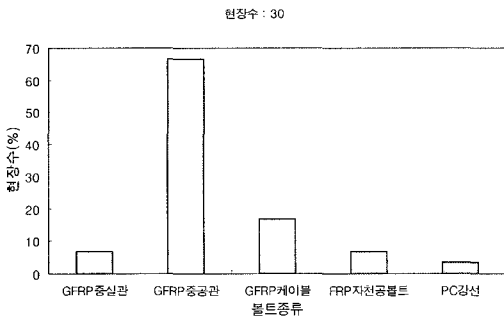


Fig. 1. The kind of face bolt (Geofronte 연구회, 2000)

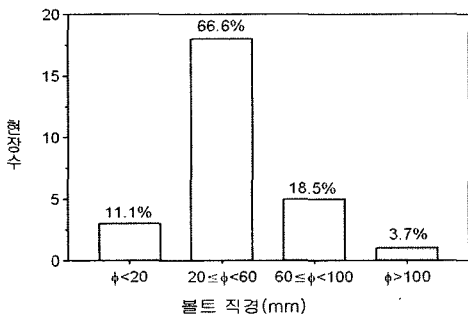


Fig. 2. Diameter of face bolt (Geofronte 연구회, 2000)

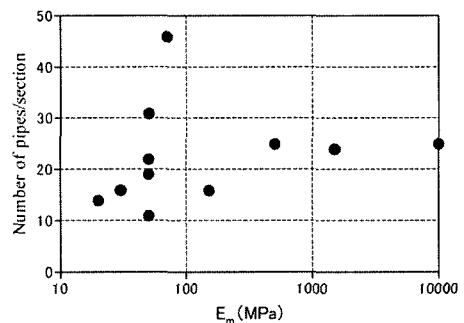


Fig. 3. Elastic moduli vs installation number

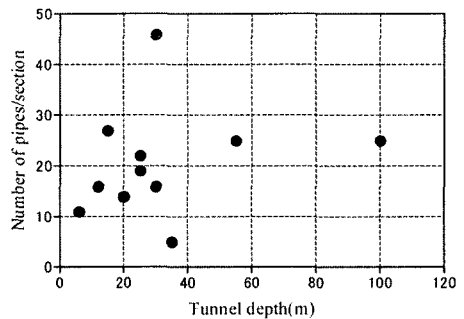


Fig. 4. Tunnel depth vs installation number

다. 막장볼트는 토피가 약 40 m이하의 현장에서 많이 적용되고 있지만, 상관관계는 보이지 않는다. 이것은 산악터널의 갱구부를 제외하면 40 m이하의 저토포 구간은 도시내에 위치하는 경우가 많고 도시지역NATM에서는 막장의 자립성도 중요하지만 지표면의 인접구조물에 대한 영향을 방지하기 위해 침하에 효과가 있는 강판다단공법 등과 동시에 적용하는 경우가 많기 때문으로 분석된다. 막장볼트의 병용에 대해서 Geofront 연구회(2000)는 29건의 막장볼트 적용 현장 가운데 84%가 강판다단공법과 동시에 적용하고 있다고 보고한 바 있다. 이상에서 알 수 있듯이 막장볼트의 개수의 결정은 볼트재원, 지반조건 등 변수가 여러가지이기 때문에 일반화하기 어려움이 많다.

3. 모형실험 및 결과

3.1 모형실험방법

막장볼트의 시공은 다른 보조공법과 달리 막장에서 전방으로 타설하여 굴착과 동시에 절단하면서 터널을 진행해 나가는 특징이 있다. 이러한 특징을 충실히 모델화하기 위해 다음 Table 1과 같은 실험방법을 구현하였다. 대상터널은 현장조사 결과를 바탕으로 막장볼트가 많이 사용되는 2차선 도로터널과 토피고 2D이하의 터널을 기준

으로 설정하였다. Photo 1에는 실내실험 과정을 나타내었다. 이와 같은 실험은 현장과 비교하여 볼트의 절단이 늦고 지보재에 의한 보강효과를 고려하기 힘들나 현장과 같은 삼차원적인 지반거동을 분석할 수 있는 장점이 있다. 또한 본 실험에서 사용한 볼트재질은 아크릴 보로서 직경 2 mm이며 모래를 부착시키면 직경 3 mm가 되지만 현재 시판되고 있는 스트레인게이지의 최소 크기가 2 mm이므로 모형터널의 크기를 비교할 때 실제보다 크지만 계측한계를 고려하여 Table 1과 같은 볼트를 제작하였다.

3.2 모형실험 종류

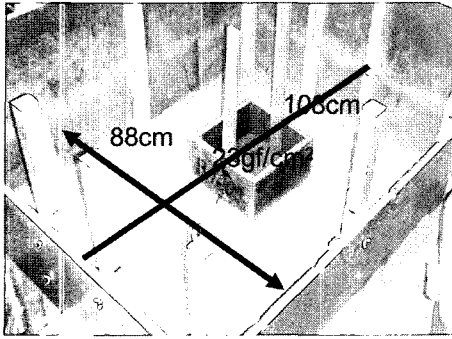
본 논문의 실험 및 고찰에 앞서 다음과 같이 용어를 정리하기로 한다.

- N_p = 1단면당 타설개수
- $L_{fric} = \sum_{N_p=1}^{N_p} \text{볼트둘레}(cm)$
- D_p = 볼트타설밀도(N_p /터널면적)
- D : 터널직경

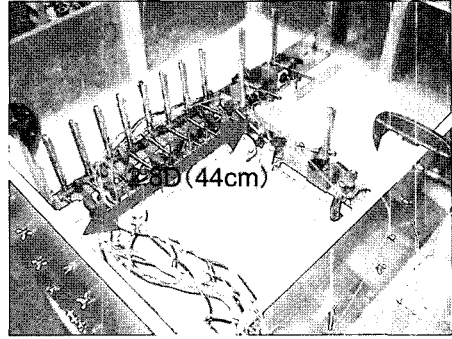
Table 2에 실험 및 수치해석 종류를 나타내었다. 막장볼트는 $N_p=0 \sim N_p=11$ 를 수평으로 타설하고, 2.8D(44 cm)까지 증복장 0.5D(8 cm)로 총 6 shift를 타설하였다. Fig. 5에 막장볼트의 배치개념을 나타내었다. 타설개수

Table 1. Method of lab test

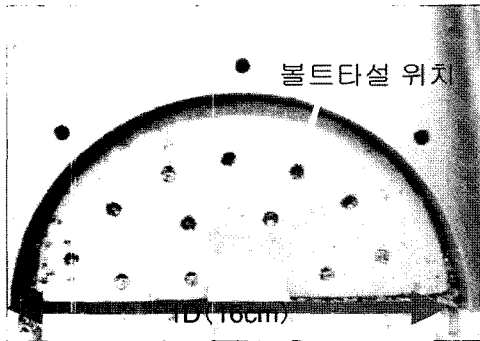
실험토조	<ul style="list-style-type: none"> • 폭 0.88 m, 길이 1.08 m, 높이 0.6 m의 알루미늄입 • 토조저반에 2 cm씩 굴착할 수 있도록 removable plate를 설치함
지반재료	<ul style="list-style-type: none"> • 동산탄, 와세린, 산화아연을 200:1:0.3의 중량비로 섞은 인공재료. 재료의 밀도는 5.4 g/cm³, 내부마찰각은 35°, 탄성계수는 2900 kPa임 • 동산탄의 유효경 (D_{10})은 0.88 mm, 균등계수 (U_c)는 2.18, D_{60}는 1.92 mm임 • 재료의 장점 : 지반에 어느 정도의 점착력을 줄 수 있으며, 물을 사용하지 않으므로 물성치가 안정되어 있고, 장기간 보존이 가능함 • 재료의 단점 : 재료가 무거우므로 취급하기 어렵고, 와세린을 사용하기 때문에 일정한 온도관리가 필요함 (본 실험에서는 21°C로 고정함)
터널모형	<ul style="list-style-type: none"> • 터널모형은 아크릴계의 반원통형의 파이프이며 직경 (D)은 160 mm (내경 154 mm)임
막장볼트	<ul style="list-style-type: none"> • 아크릴제의 1D (160 mm), 한변 2 mm의 rod에 에폭시수지로 모래를 부착시켜 이용함 • 스트레인게이지를 2개 1쌍으로 8개소에 붙여 굴착시 막장중앙부에 설치하여 축력을 계측함 • 볼트의 타설방법은 계획된 위치에 꼽아넣는 방법이며 다음 단계 굴착시 막장후방의 1단계분 (20 mm)을 절단하면서 굴착을 진행함 • 막장볼트의 축력은 모형토조의 20~36 cm구간의 굴착시 계측함
계측항목	<ul style="list-style-type: none"> • 지표면 터널중단방향에 10개소, 횡단방향 3개소에 다이얼게이지를 설치하여 터널 중단·횡단방향의 지표면 침하를 계측함 • 막장볼트의 축력 • 볼트에서 계측된 스트레인은 스트레인게이지의 예비실험을 통하여 구한 보정계수를 이용하여 축력으로 환산함 • 수치해석으로 막장 최대수평변위 및 지표면 침하를 분석함
터널굴착	<ul style="list-style-type: none"> • Photo 1 (①)의 왼쪽부터 손굴착으로 2 cm씩 순차적으로 굴착하고, 최종적으로 2.8D (44 cm)를 굴착함 (이와 같은 굴착방법은 Ishimura (1998)등에 의해 성공적으로 행해진바 있음) • 터널의 토피고는 22 cm (1.4D)임



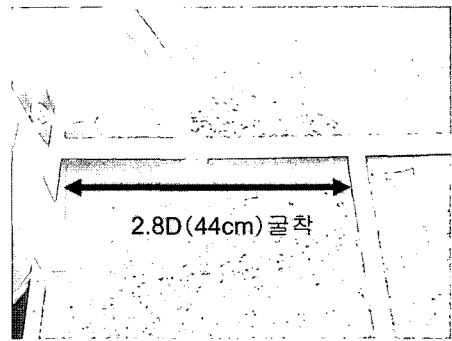
①지반제작과정



②계측기 설치



③페이스 볼트 설치



④실험완료

Photo 1. Process of lab test

Table 2. Laboratory and numerical test condition

Test case	막장볼트의 설치조건					
	모델	막장볼트 수 (N_p)	총 설치 개수 (개)	중첩장 (D)	L_{fric}	볼트타설밀도 D_p
1	$N_p=0$	-	-	-	-	-
2	$N_p=3$	3	18	0.5	0.068	0.029
3	$N_p=6$	6	36	0.5	0.137	0.059
4	$N_p=8$	8	48	0.5	0.183	0.079
5	$N_p=11$	11	66	0.5	0.251	0.109

- 터널직경(D) : 16 cm
- 토피고 : 1.4D (22 cm)
- 설치각도 : 0°
- 설치 shift : 6
- 총 굴착거리 : 2.8D (44 cm)
- 수치해석 : 수치해석에서는 타설개수를 ($N_p=0$)-($N_p=40$)까지 함

N_p 는 0~11분을 타설하였으며 최대 11분 타설의 경우 실제로는 동일단면에 22분이 존재하는 상태가 되며 실내실험에서는 11분 이상 타설하는 것은 곤란하였다.

터널부는 순차굴착을 행하기 때문에 막장변위를 직접 계측하는 것은 불가하므로 실험을 수치해석으로 재현하여 분석하였다. 수치해석은 실험과 동일한 과정으로

수행하고, $N_p=0-40$ 분까지 검토하였다.

3.3 실험결과 및 고찰

Fig. 6에 2.0D 굴착했을 때의 지표면 침하를 나타내었고, Fig. 7에 2.8D 굴착했을 때의 종단방향의 지표면 침하를 나타내었다. Fig. 7의 막장후방 1.88D지점에 주

목하면, $N_p=3$ 은 $N_p=0$ 에 비하여 약 34%의 저감효과를 보이고 있고, $N_p=6$ 은 43%의 저감효과, $N_p=8$ 은 68%의 저감효과, $N_p=11$ 은 75%의 저감효과를 보이고 있어 실험상의 $N_p=11$ 까지는 타설개수가 많을수록 지표면 침하는 작아지고 있다. Fig. 8에 2.8D만큼 굴착했을 때(최종 굴착지점)의 횡단방향의 지표면 침하를 나타내었다. 타설개수가 많을수록 침하의 폭이 작아지고 침하량도 작아지는 것을 알 수 있다. 그러나 $N_p=11$ 본($L_{fric}=0.23$)은 $N_p=3$ ($L_{fric}=0.06$)보다 약 4배정도 개수는 많으나 보강효과는 40%밖에 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것은 막장볼트는 막장 주변지반에 대한 효과도 있으나, 주로 막장의 수평변위를 제어하는 효과가 우수하기 때문에 막장볼트의 개수를 증가시켜도 한계가 있음을 의미한다.

Fig. 10에 $N_p=6$ 의 경우의 모형토조 20 cm-36 cm 굴

착 시의 막장중앙부에서 타설한 볼트의 스트레인을 나타내었다. 볼트에 작용하는 스트레인은 타설 후 2step(4 cm) 굴착했을 때 최대가 되며, 막장전방 5 cm(0.3D)지점에서 최대값을 보이고 있다. 또한 볼트 길이가 짧아지는 4step(이때 볼트의 잔장은 0.5D)부터는 감소하는 경향을 보이고 있고, 많은 현장계측자료의 결과와 일치하고 있다(Nishimura, 2004). 이것은 막장근방은 선형변위에 의해 지반과 볼트와의 마찰이 작기 때문으로 사료된다. Fig. 11에 타설개수에 따른 최대축력을 나타내었다. 축력은 예비실험에서 구한 스트레인계이지의 보정계수를 계측된 스트레인에 곱하는 것으로 산정하였다. 최대 축력은 R 막장수평변위가 가장 큰(Fig. 13) $N_p=3$ 의 경우 14N이며, $N_p=6$ 의 경우 9N이며, $N_p=8$ 의 경우 6N으로 개수가

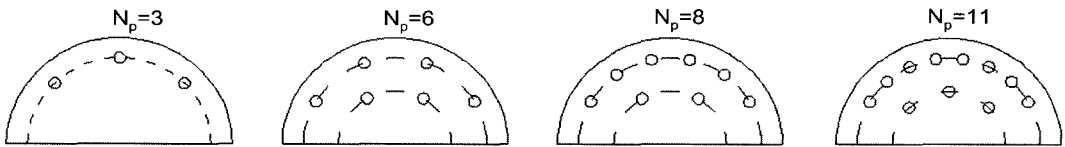


Fig. 5. Layout of face bolt (Lab test)

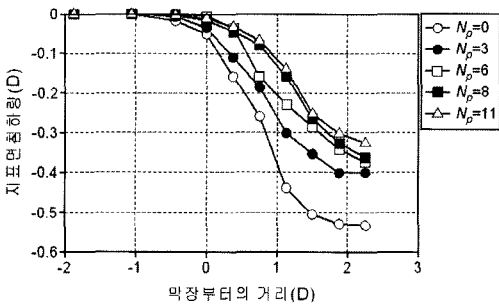


Fig. 6. The surface settlement at 2.0D excavation by lab test

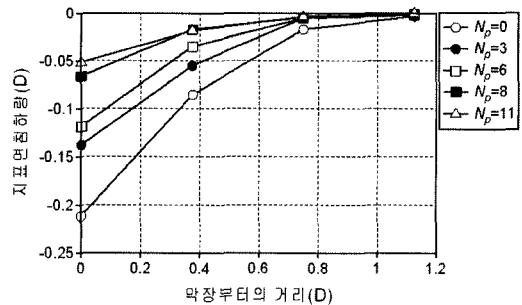


Fig. 9. The surface settlement at 2.8D excavation (transverse section) by lab test

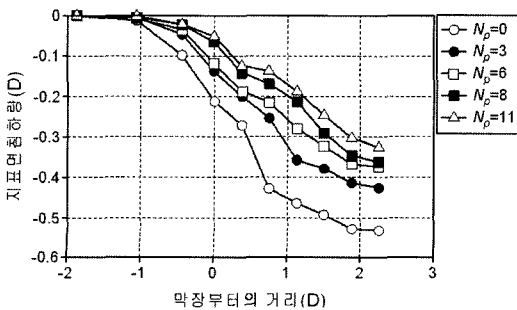


Fig. 7. The surface settlement at 2.8D excavation (axial direction) by lab test

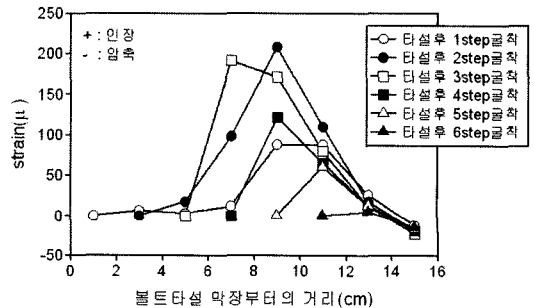


Fig. 10. Distribution of strain (case $N_p=6$)

많을수록 감소하고 있다. 이것은 Fig. 13과 같이 타설개수가 많을수록 막장의 수평변위가 작아지기 때문에 1본에 작용하는 마찰저항도 작아졌기 때문으로 생각된다. Fig. 13의 개수가 많을수록 완만한 [L]형의 변위분포를 보이고 있는 점과 Fig. 12의 타설개수가 많을수록 볼트의 축력은 작아지는 점으로부터 볼트 1본의 효과가 최대한 발휘될 수 있는 개수의 결정이 중요하며, 본 실험의 조건에서는 $L_{fric}=0.23(N_p=11)$ 이 가장 효과적인 것으로 나타났다.

4. 수치해석 및 결과

4.1 수치해석 모델

본 실험은 막장을 순차적으로 3차원 굴착을 실시하였으므로 막장변위의 직접적인 계측은 불가능하기 때문에 실내실험을 수치해석으로 재현하여 막장 수평변위 등을 분석하였다. Table 3에 해석에 사용된 볼트 및 터널제원을 나타내었다. 지반은 완전탄소성체로 모델화하고, 파괴기준은 Mohr-Coulomb의 기준을 적용하였다. 해석에 사용된 프로그램은 FLAC3D이다. 볼트는 케이블 요소로 모델화하고, 굴착 등은 실내실험과 동일한 순서로 행하였다. 볼트와 지반간의 부착특성에 대해서는 아크릴재-예폭사-모래-지반재료계에서의 볼트의 미끄러짐은 볼트와 지반재료간에 발생하는 것으로 가정해서 지반재료의 c, ϕ 값을 이용하였다. Fig. 12에 해석영역을 나타내었다. 토피고와 터널의 치수 등은 모형실험에서 사용한 값과 동일하며 지반재료의 물성치는 Table 1에 나타낸 바와 같다.

4.2 수치해석 결과 및 고찰

Fig. 3에 수치해석으로 재현한 막장볼트의 개수와 최대수평변위의 관계를 나타내었다. 여기서 하부 X축은 볼트의 개수(N_p), 타설밀도(D_p)이며, 상부 X축은 볼트의 마찰장을 터널주변장으로 기준화 시킨 (L_{fric})축이다. 막장볼트의 유무에 의한 차는 크고, 타설개수를 고려하면 $L_{fric}=0.23(11\text{본/단면})$ 까지는 큰 변위의 감소를 보이고 있으나, $L_{fric}=0.23\sim 0.91$ 까지는 $L_{fric}=0.23$ 비하여 큰 감소는 볼 수 없다. 즉, $L_{fric}=0.23, D_p=0.11$ 를 경계로 타설개수에 의한 차이는 거의 없으며, 완만한 지수함수 형태의 변위감소 형태를 보이고 있다.

Fig. 14에 수치해석에 의한 지표면 침하를 나타내었다. $N_p=11$ 까지는 타설개수와 침하량이 비례하는 효과를 보이고 있으나, $N_p=11(L_{fric}=0.23)\sim N_p=40(L_{fric}=0.91)$ 의 차이는 매우 작은 것으로 나타났다. 이것은 막장볼트는 다른 공법과 다르게 굴착과 동시에 절단하면서 굴착하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 15에 횡단방향의 지표면 침하를 나타내었다. $N_p=11$ 까지는 타설개수가 많을수록 침하는 작아지지만 $N_p=20\sim 40$ 까지는 침하량의 차이는 매우 작다. 이것은 막장볼트의 경우 주로 막장의 수평변위에 대한 효과가 크기 때문으로 생각된다. 이상의 결과로부터 막장볼트는 막장의 수평변위에 대한 효과가 크며, 지표면 침하를 억제하기 위해서는 별도의 보조공법을 적용해야할 것으로 판단된다.

Fig. 16에는 굴착단면과 막장후방(1.88D)의 지표면 침하량을 표시하였다. Fig. 7 및 Fig. 14에서 보듯이 본 실험의 조건하에서는 1단면당 11본을 경계로 그 이상 타

Table 3. Specifications of the face bolt and tunnel lining model

탄성계수 (kPa)	단면적 (cm ²)	부착강도 (kN/m/m)	부착강성 (kN/m)	중복장 (D)	터널직경 (D)
4.5E8	7.0E-2	7.3	0.35	0.5D (8 cm)	16 cm

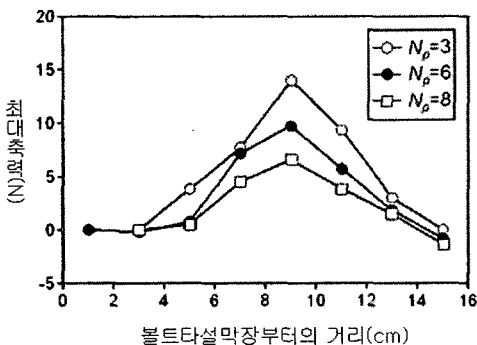


Fig. 11. Maximum axial force for the three different installation density

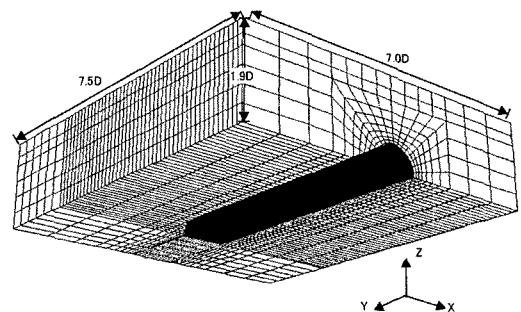


Fig. 12. Analysis area

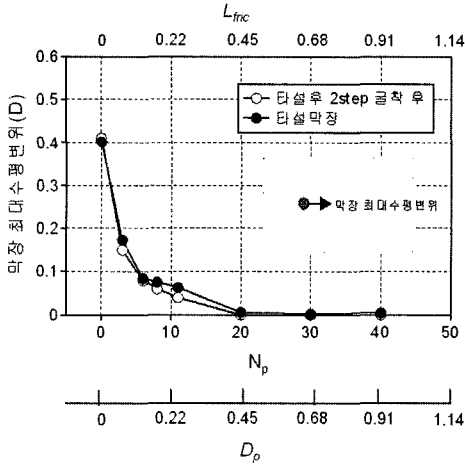


Fig. 13. The relationship between the number of the face bolts and the axial displacement of the face

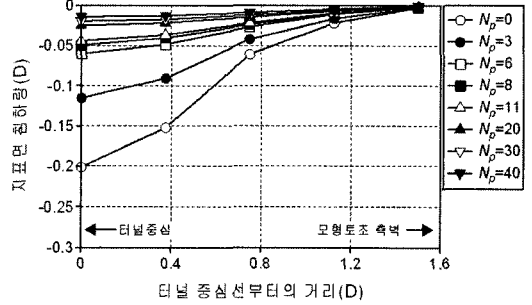


Fig. 15. The surface settlement at 2.8D excavation (transverse section) by simulation

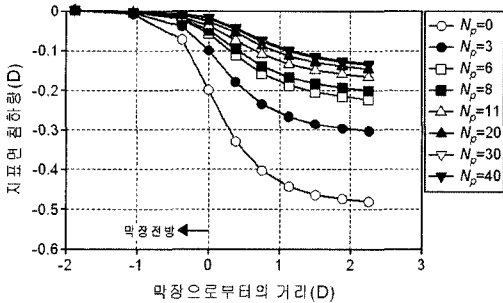


Fig. 14. The surface settlement at 2.8D excavation (axial direction) by simulation

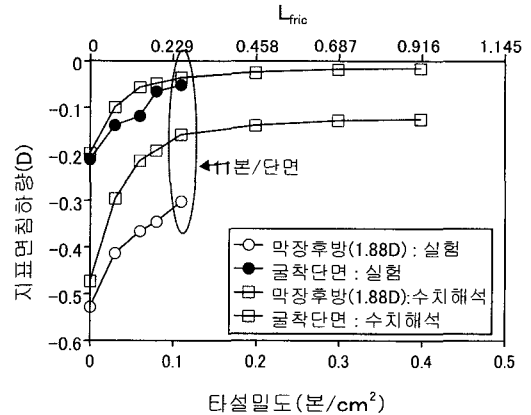


Fig. 16. Vertical settlement of surface ground

설하여도 효과는 크게 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 실험과 수치해석값을 비교해볼 때 실험값의 범위가 2~3% 작은 것을 알 수 있다. 이것은 수치해석에서는 정확한 위치에서의 타설이 가능하지만 실내실험의 경우는 중복장을 고려하여 6회를 타설하는 과정에서 약간씩 설치 위치가 바뀌었기 때문에 분석된다. 道廣(2002)는 수치해석으로 동일개수의 볼트라도 원형이나 격자형 등의 배치형태에 의해 5~10%의 변위차가 생김을 보고한 바 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 막장볼트의 최적 타설개수 선정을 위한 실내실험 및 수치해석 결과를 보고 하였다. 위의 결

과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 막장볼트에 의한 보강효과로서 개수를 증가시키면 수평변위는 감소하지만 $L_{fric} = 0.23$ 부터 지수함수적인 변위분포를 보이고 있는 것으로 나타났으며 그 이상 볼트를 타설하여도 보강효과는 증가하지 않는 것으로 나타났다.
- (2) 막장볼트의 지표면 침하 억제효과는 타설밀도 기준으로는 0.19, L_{fric} 으로는 0.23부터 효과의 차이는 매우 작은 것으로 나타났다. 볼트 축력은 볼트 직경과 관련 있으므로 현장에서 사용되는 다양한 볼트의 설계 시에는 밀도가 아니라 L_{fric} 으로 설계하는 것이 합당하다고 판단된다.
- (3) 막장볼트의 주된 보강 메커니즘인 축력은 볼트 개

수가 증가함에 따라 감소하며 본 실험의 조건 하에서는 $N_p=3$ 의 경우 15 N이지만 $N_p=8$ 의 경우는 7N으로 50%감소하는 것을 알 수 있다. 이때 막장 수평변위는 55%가 감소하여 축력과 수평변위사이에는 밀접한 관련이 있음을 확인할 수 있었으며 추후 막장이 자립하기 위한 한계수평변위와 볼트 수와의 관계 분석이 필요한 것으로 판단된다.

막장볼트의 최적타설 개수 결정은 막장의 안정성뿐만 아니라 경제성 및 시공성 측면에서도 매우 중요하다. 본 논문에서는 한 종류의 볼트에 대하여 개수를 늘려가면서 실험 및 해석의 결과를 보고하였지만 추후 다양한 볼트에 대하여 최적 타설개수의 결정방법에 대하여 보고할 계획이다.

참고문헌

- 남기천, 허영, 유광호, 2001, 파쇄대 압반에서 얇은 심도의 터널 굴착시 막장보강 효과에 관한 연구, 터널기술, Vol.5, No.4, 323-335.
- 유충식, 신형강, 2000, 모형실험에 의한 수평보강재로 보강된 터널 막장의 거동 분석, 터널기술, Vol.3., No.2, 32-40.
- C.S.Yoo, K.H.Yang, 2001. Laboratory investigation of behaviour of tunnel face reinforced with longitudinal pipes, AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress, Milano, Vol III. 757-764.
- 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 Tunnelling96, 425-432.
- Geofronte 연구회, 2000, 장척 막장볼트의 시공실적 조사와 분석, 174-225.
- 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. 41-46.
- Isamu Otuka, Tomoyuki Aoki, Satoshi Ogawa, Yasuki Adachi, Takao Tanaka, 2003, Three dimensional excavation analyses for effects of rock reinforcement by means of long facebolting, Proceeding of tunnel engineering, JSCE. Vol.13. 135-140.
- Sakurou Murayama, 1966, 기계화 실드의 굴착성능에 관한 토질역학적 고찰, 제1회 토질공학연구발표회, 75-78.
- Shoushi Nishizaki, Tooru Haba, Tadashi Okabe, 2002, Application tend of long length facebolting and analytical study of its behaviour characteristics. Proceeding of tunnel engineering, JSCE. Vol.12. 131-136.
- 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.8 199-204.
- Yoshio Mitarai, 2003, 산악터널에서의 장척볼트의 작용 효과와 적용성에 관한 연구. Ph.D. thesis, University of Osaka.
- Yoshie Nishimura., 2004, Evaluation on the long length face bolting by measurement and analysis, Proceeding of tunnel engineering, JSCE. Vol.14. 231-235.
- 道廣 一利, 2002, 막장볼트의 효과를 3차원 FEM으로 해석, 터널과 지하, Vol.33, No.5, pp.43



서 경 원

1996년 인하대학교 자원공학과 공학사
1998년 인하대학교 자원공학과 공학석사
2006년 동경도립대학교 토목공학과 공학박사

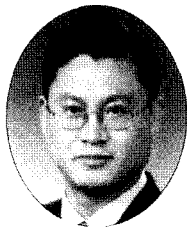
Tel: 031-910-0231
E-mail: kwseo@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 박사후 연구원



Nishimura kazuo

1976년 東北大學 土木工學科 공학사
1991년 東京道立大學 土木工學科 공학박사

Tel: 0426-77-2785
E-mail: knishi@ecomp.metro-u.ac.jp
현재 東京道立大學 土木工學科 教授



김 창 응

1990년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1992년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
1999년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학박사

Tel: 031-910-0224
E-mail: cykim@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 국토지반연구부 수석연구원