

터널 안정화를 위한 페이스볼트의 효율적 배치에 관한 수치해석적 연구

A Study of effective installation patterns of face bolts using 3D-FDM analysis

서경원*¹, 배규진², 西村和夫³, 土門剛⁴

Seo, Kyoung-Won · Bae, Gyu-Jin · Nishimura, Kazuo · Tsuyoshi Domon

Abstract

For application of NATM, the self-supporting until installation of the supporting system must be satisfied. However, the face of a tunnel are always unsupported and therefore it is fairly vulnerable to tunnel collapses. Face bolts are well known and widely used to prevent the deformation of the tunnel face and its circumference, which are installed horizontally toward the tunnel axis generally. To maximize the supporting effect of face bolts, this study has analysed the effective design patterns of face bolts by changing their installation angles. As the conclusion, it has been found that the axial displacement of the face increases slightly by installing the outermost bolts upward from the axis but surface settlement at 2.5D behind the face decreases up to 18%.

Keywords : Face bolt, installation angle, axial force, axial displacement

요 지

터널굴착시 NATM이 적용되기 위해서는 「굴착 후 지보공의 시공이 완료되기 전까지 막장이 자립하고 있을 것」을 전제조건으로 하고 있지만 터널막장은 항상 무보강의 상태가 계속되고 있고, 붕괴사고가 집중되고 있는 가장 취약한 부분이라고 할 수 있다. 이에 대한 대책공법 중 페이스볼트는 주로 막장전방을 향하여 수평으로 설치해 막장을 보강하는 공법으로 널리 알려져 있다. 본 연구는 페이스볼트의 설치효과를 극대화시키기 위해 일률적인 수평설치의 패턴을 변경해 보다 효율적인 설계패턴에 대해 검토하였다. 그 결과, 최외곽부의 볼트들을 터널 축방향의 윗방향으로 배치함으로써 막장 수평변위는 다소 증가하지만, 막장후방 2.5D의 천단침하는 약 18% 줄일 수 있는 것이 확인되었다.

주요어 : 페이스볼트, 각도설치, 볼트 축력, 막장 수평변위

1. 서론

NATM개념이 적용되기 위해서는 「굴착 후 지보공의

시공이 완료되기 전까지 막장이 자립하고 있을 것」을 전제조건으로 하고 있다. 그러나, 특히 도심지에 건설되고 있는 터널은 암종 및 연경도의 연속성이 낮고, 미고결

*1 한국건설기술연구원, 공학박사 (kwseo@kict.re.kr)

2 한국건설기술연구원, 공학박사

3 동경도립대학 공학연구부 토목공학과 교수

4 동경도립대학 공학연구부 연구원

지반 및 풍화암 지반에 건설되는 경우가 많으며, 지반정보를 면밀히 파악하기 어려운 경우가 많다. 이에 따라 터널자립시간의 추정 및 설치지보의 적합성을 평가하기 어려운 결과, 막장붕괴까지 이루는 경우가 종종 생기고 있다. JTA(1993)에 의하면 조사시료 57건 가운데 65%가 막장에서 터널붕괴가 생기고 있고, 이에 수반되는 지표면 침하, 터널주변부의 이완 등이 문제되는 경우가 많다고 지적하고 있다. 또한, HSE(1996), Leichnitz(1990), 배규진(2000)도 터널굴착중 막장부근에서 붕괴가 집중한다고 보고하고 있다.

이에 대한 대책공법중 페이스볼트는 주변지반의 보강효과도 있지만 주로 막장면의 수평변위를 억제하는 공법으로 널리 알려져 있다. 국내에서는 사용예가 드물고 국외에서 적용된 예를 분석하면 다음과 같다. 페이스볼트는 약 30년 전부터 사용되어 왔으나, 최근 새로운 재료 및 공법의 개발 등에 의해 사용실적이 급증하고 있다. 이때 페이스볼트는 전면접착식 록볼트 혹은 케이블볼트의 보강기구로써 설명되고 있다. 즉, 변형이 생기는 역방향으로 설치하여 볼트의 축력으로 지반변형을 억제하는 원리로써 설명되고 있다. 막장에서의 변형은 주로 수평방향이 우세하므로 페이스볼트에 대한 현재의 설계기준에는 막장에서 전방으로 수평으로 설치할 것을 기준으로 하고 있으며(시공상 약간 상향(0~5°)으로 설치하는 경우가 많음), 수평에서 벗어나는 경우에는 설치 본수를 늘려야 한다고 하고 있다(ジェオブロンテ研究会,1996, 2000). 이때 사용되는 볼트는 초창기에는 철근 및 케이블 볼트 등이 사용되어 왔으나 최근에는 굴착효율을 높이기 위해 중공관의 GFRP등이 주류를 이루고 있으며, 관경은 약 76mm(내경:60mm), 길이는 3m의 중공관을 연결하여 12m 정도로 설치하는 경우가 많다. 이때 중공관을 통하여 주입작업을 실시하지만 지반개량의 목적보다는 GFRP와 지반을 일체화 시키는 정착제의 의미로서 실시하고 있으며, 설계 및 평가시에는 볼트구조물로서 평가하고 있다(Nishizaka,2002). 국내에서는 유충식(2000, 2002) 등이 실내실험과 수치해석으로 보강재 수와 길이에 대한 영향을 분석한 바 있으며, 남기천(2003) 등은 불량한 지반일수록 막장보강에 의한 지반거동 억제 효과가 크게 나타난다고 보고하였다.

페이스볼트의 시공상 특징은 굴착면으로부터 수평으

로 설치하므로 굴착과 동시에 절단하면서 터널을 굴착하는 것이 다른 보조공법과의 큰 차이점이다. 또한, 페이스볼트 공법이 적용되는 현장은 막장의 수평변위 뿐만 아니라 천단 및 지표면 침하도 문제가 되는 경우가 많기 때문에 보통 다른 공법과 병용해서 적용되는 경우가 많다. 이 경우 최소 두 가지 이상의 보조공법이 적용될 때 각 공법간의 기능의 중복, 공정의 복잡화 등이 지적되고 있다. 그러나, 최근의 설계에서는 막장중심부의 볼트는 수평으로 설치하지만, 외곽에 설치하는 볼트는 방사상으로 설치하여 굴착영역으로부터 벗어나게 설치하는 시도가 진행되고 있다(○○터널, 2006). 이것은 터널 굴착선으로부터 벗어나는 볼트는 절단을 하지 않고 막장통과 후 휘폴링의 역할을 대신하게 하여 연직방향의 변위를 억제하기 위함이다. 그러나, 외곽부에서 설치하는 볼트의 길이, 각도, 방향등에 대해서는 아직 확립된 설계패턴이 없는 상황이다.

본 논문에서는 수평설치를 기준으로 하고 있는 페이스볼트의 설치패턴에 대해 case study를 수행하였고, 보다 효율적인 페이스볼트의 설계패턴에 대한 수치해석적 고찰을 하였다. 페이스볼트의 효과는 설치 본수, 부착특성, 배치형상 등 많은 요소가 복합되어 작용하지만, 본 논문에서는 볼트의 길이, 설치방향, 설치각도에 대해 중점적으로 검토하였다.

2. 수치해석을 위한 모델링

2.1 해석모델의 개요

해석대상의 지반은 탄성계수 20MPa, 토피고는 1.6D, 터널은 직경(D) 12m의 전형적인 도심지 NATM터널을 가정했고(그림2의 해석메쉬 참조), 지반은 완전탄소성 모델이며, 파괴기준은 Mohr-Coulomb Failure Mode를 적용하였다. 지반 및 지보재의 물성을 표1에 나타내었다.

페이스볼트는 최근 사용실적이 많은 GFRP의 물성치이며, 해석은 파일(pile)요소로 모델화 하였으며 볼트와 지반의 부착특성은 御手洗(2003)에 의한 실험치를 참고로 하였다(표2 참조).

표 1. 지반 및 숏크리트의 물성치

	단위체적중량 (KN/m ³)	탄성계수 (MPa)	포아송비	점착력 (MPa)	내부마찰각 (°)
지반 日本鉄道建設公団(1996)	16	20	0.35	0.02	30
숏크리트	23.8	8.65E3	0.25	두께 ; 0.25m	

표 2. 페이스볼트의 물성치(GFRP)

단위체적중량 (KN/m ³)	탄성계수 (MPa)	단면적 (m ²)	부착강성 (N/m/m)	부착강도 (N/m)
17.5	2.0E5	1.71E-3	3.0E7	8.48E7
설치본수 ; 56본/단면				

표 3. 해석모델

Case	볼트길이(L)	설치 shift	중첩장(m)	볼트 각도
Case 1	볼트없음			
Case 2	0.5D	21	3	수평(0°),방사상14°,방사상27°,윗방향14°,윗방향27°
Case 3	1.0D	12	6	수평(0°),방사상14°,방사상27°,윗방향14°,윗방향27°
Case 4	1.5D	6	6	수평(0°),방사상14°,방사상27°,윗방향14°,윗방향27°

(해석상에서는 0m~61m까지 굴착함, 이하 수평(0°)=0°,방사상14°=R14°, 방사상27°= R27°, 윗방향14°=U14°, 윗방향27°=R27°로 표기하기로 한다.)

지반의 굴착은 그림2의 해석영역을 1m씩 61m까지 굴착하였으며 숏크리트의 타설은 1step 늦게 설치하는 것으로 하고, 페이스볼트는 표3의 조건대로 설치하였다. 수치해석은 FLAC3D(Ver 2.1)를 사용하였다.

2.2 페이스 볼트의 설치패턴의 변경

페이스볼트가 적용되는 현장은 보통 강관다단그라우팅, 휘폴링, 각부보조공법 등이 병용되는 경우가 80% 이상이지만(ジェオプロンテ研究会, 1996, 2000), 본 논문에서는 보조공법으로 페이스볼트만을 적용하기로 한다.

표3에는 페이스볼트의 case study를 위한 검토조건들을 나타내었다. 볼트길이(L)는 현장 적용 예가 많은 0.5D(6m), 1.0D(12m), 1.5D(18m)길이의 볼트를 가 정하고, 중첩장은 각각 3m, 6m, 6m로 설치하였다. 이

때 설치본수는 56본/단면이며, 굴착은 그림2의 0m부터 61m 까지 굴착한다. 이와 같이 굴착하면(표3참조) 0.5D 볼트는 61m까지 21회의 시공이 필요하며, 1.5D볼트는 6회의 시공이 필요하게 된다. 따라서 설치본수는 0.5D 볼트가 1,176본 필요하며, 1.5D볼트는 336본 필요하게 되어 볼트가 짧을수록 작업량은 급격히 증가하게 된다. 그림 1에 일례로써 L=1.0D의 경우, 수평(0°), R27°, R27°설치의 설치개념을 나타내었다. 먼저 case 2,3,4 공통으로 중앙부 1,2,3열(28본/단면)을 전부 수평으로 설치하며, 그 다음 표3의 설치각도의 설명처럼 4열의 볼트(최외곽부)의 볼트를 각각 수평, 방사상, 윗방향으로 설치하는 경우를 검토한다. 방사상 설치하는 그림1(a)의 상반원점을 중심으로 4열(최외곽부)의 볼트 28(본/단면)을 전부 방사하는 형태로 설치하는 형태이며 이때 지표면 방향의 각도를 14°, 27°의 두 가지 경우를 검토하였다. 윗방향 설치하는 4열의 볼트를 전부 지표면 방향으로

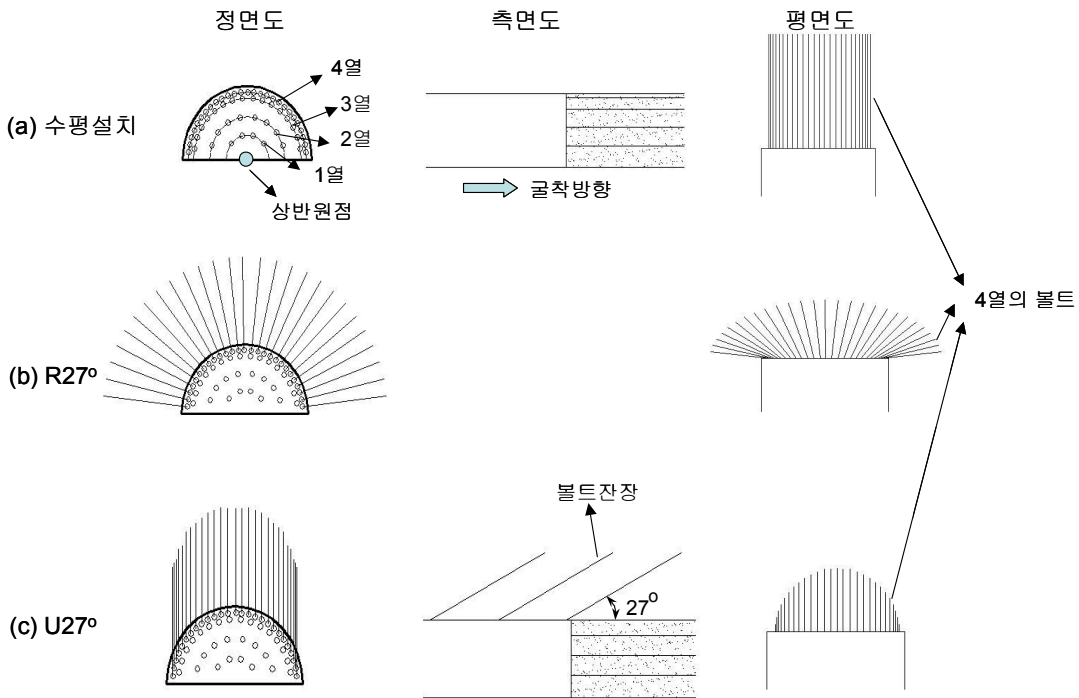
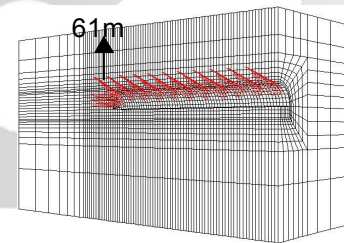


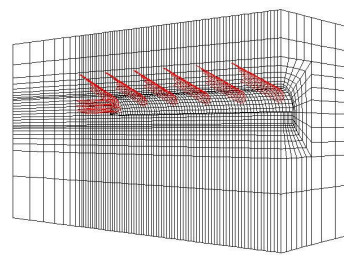
그림 1. 페이스볼트의 설치개념

14°, 27°의 두 가지 경우를 검토하였다. 이때 측벽부 볼트는 윗방향 천공이 시공상 어려움이 있으므로 방사상 설치를 고려할 수 있으나 경우의 수가 많아지므로 본 case study에서는 4열 전부를 윗방향으로 설치하기로 한다. 이때 볼트의 길이는 각각 0.5D, 1.0D, 1.5D의 세 가지 경우이다.

볼트 전부를 수평으로 설치하는 모델(그림1(a))이 현재 설계되고 있는 기본모델이며, 4열의 볼트를 각도를 주고 설치하는 모델이 본 논문의 검토 모델이다. 이때 방사상의 볼트는 막장으로부터 없어지는 지점이 동일하지만 윗방향 볼트는 4열의 위치마다 없어지는 지점이 서로 다르며 지반중에 남겨지는 볼트의 길이도 달라지게 된다. 또한 14°설치보다 27°설치의 잔장(殘長)이 길어지게 된다. 이러한 배치의 특징은 그림1처럼 방사상 설치하는 터널상부 및 측면쪽으로 퍼지는 형태가 되지만, 윗방향 설치하는 터널 상부에 볼트가 집중되게 된다. 그림2에 일례로써 0.5D볼트 및 1.5D볼트의 U27°의 해석 모델을



(a) U27°(L=0.5D)



(b) U27°(L=1.5D)

그림 2. 볼트길이 0.5D 및 1.5D의 U27°설치모델

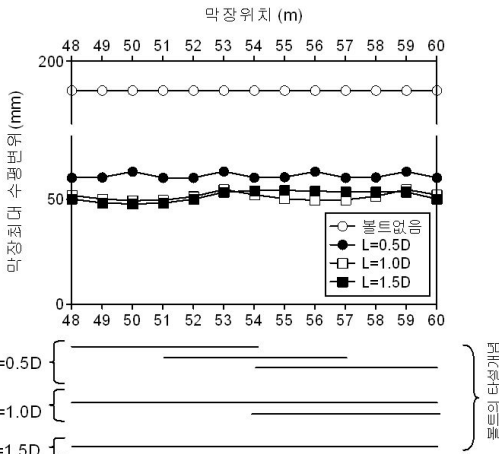


그림 3. 페이스볼트의 길이에 따른 막장의 최대 수평변위 (수평타설의 경우)

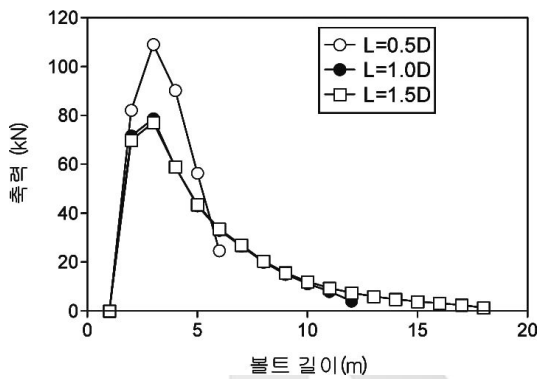


그림 4. 수평설치 볼트의 축력의 크기 비교

나타내었다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 수평설치(0°)에 의한 막장최대수평변위

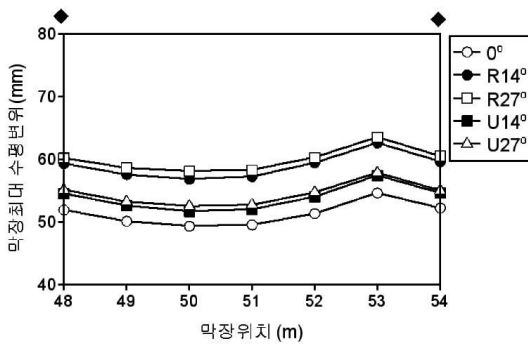
수평설치에 의한 볼트길이에 따른 막장 최대 수평변위의 관계를 그림3에 나타내었다. 먼저 볼트길이가 1.0D의 경우 무보강과 비교하여 수평변위가 약 72% 감소하고 있어 막장 보강에 매우 효과적임을 알 수 있다. 이러한 보강효과에 대하여 유충식(2000) 등은 실내실험을 통해 보강재 유

무에 대한 변형벡터 및 응력해방과 막장의 축방향 변위를 분석한 결과, 수평볼트로 보강된 경우 변형벡터의 크기가 현저히 감소되는 것은 수평볼트가 터널 막장면의 변위를 억제시켜주는 등가의 막장압과 같은 역할을 수행해 주기 때문으로 보고하였다. 한편, 볼트길이가 0.5D인 경우는 1D보다 5~7%정도 변위가 크지만 1D와 1.5D와의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 이것으로 보아, 페이스볼트는 어느 정도의 길이(본 해석조건에서는 0.5D이상) 이상이라면 변위억제 효과 측면에서는 영향이 적음을 알 수 있다. 이러한 결과는 池口(1997)에 의해 실험으로 발표된바 있는데 원심모형실험을 통해 0.5D이상이면 길이에 의한 보강효과는 차이가 없고, 0.25D의 경우는 효과가 작다고 분석했다. 또한 남기천(2003) 등은 수치해석을 통해 볼트 길이가 1.0D 이상이면 수평보강에는 충분하다고 보고하였다. 그러나 페이스볼트를 긴 구간에 걸쳐 설치하는 경우 L=0.5D는 작업량이 매우 늘어나므로 가능한 장척볼트를 설치하는 것이 유리하다고 사료되며, 실제 40m이상의 볼트가 사용된(ジェオプロンテ研究会,2000) 예도 있다.

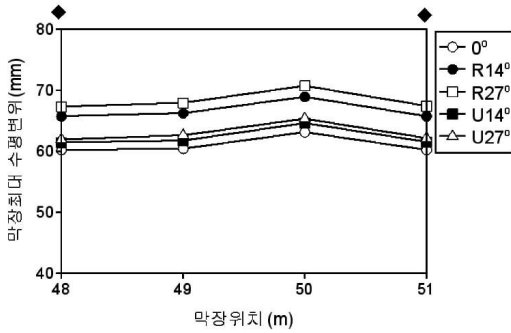
그림4에 막장 중심부부터 수평으로 설치한 볼트의 축력 분포를 나타내었다. 막장변위가 약간 큰 0.5D볼트는 축력이 약간 크지만, 수평변위가 비슷한 1.0D, 1.5D볼트의 경우는 축력의 차이를 거의 볼 수 없다. 즉, 1.0D 이상의 길이라면 보강효과에 대한 차이는 없는 것으로 분석된다.

3.2 페이스볼트의 각도 설치가 수평변위에 미치는 영향

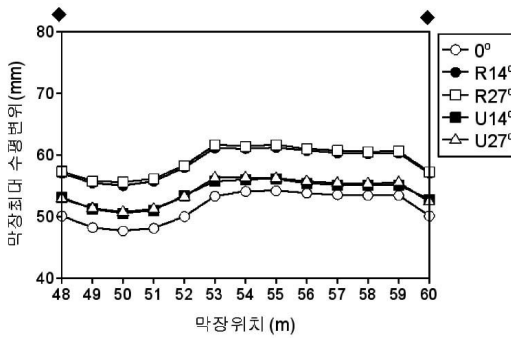
그림5에 볼트길이 및 설치각도를 파라미터로 한 1shift간의 수평변위를 나타내었다. 먼저, 막장변위에 대한 효과는 길이에 상관없이 수평설치의 경우가 가장 효과가 크고, 설치각도에 의해 막장으로부터 볼트의 퍼져가는 면적이 작은 U14°와 U27°, 볼트의 퍼져가는 면적이 큰 R14°와 R27°의 순서로 변위가 커지고 있다. 그러나 1shift간의 최대·최소변위의 차는 볼트의 설치각도에 상관없이 약 4%밖에 차이가 없다. 이것은 막장외곽부 볼트만 각도를 주고 설치했기 때문에 막장의 수평변위에 미치는 영향은 작기 때문으로 사료된다.



(a) 0.5D볼트



(b) 1D볼트

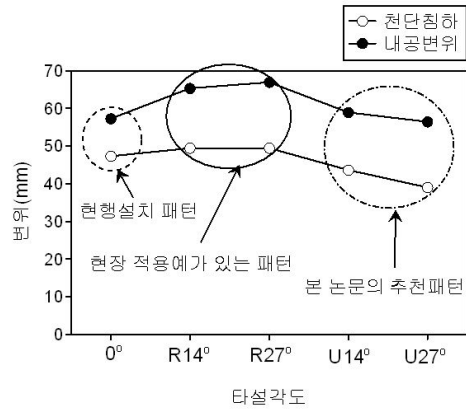


(c) 1.5D볼트

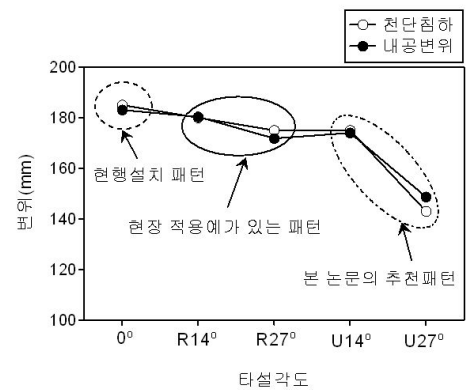
그림 5. 볼트길이 및 설치각도가 수평변위에 미치는 영향
(; 볼트의 설치위치)

3.3 주변지반에 대한 효과

그림5로부터 볼트길이 0.5D이상이면 보강효과에는 영향이 작은 것을 알 수 있으므로 주변지반에 대한 효과



(a) 굴착단면의 변위



(b) 2.5D후방의 변위

그림 6. 각도볼트 설치시의 변위 억제 효과

는 대표적으로 1.0D볼트를 대상으로 하며, 수평타설과 각도타설의 차이를 중점적으로 검토한다. 그림 6에 볼트 설치 막장의 변위 및 2.5D후방의 변위를 나타내었다.

먼저, 굴착단면(그림 6(a))에 있어서의 변위는 방사상 설치의 경우, 수평0° 설치보다 천단침하는 2~3mm증가하며 내공변위는 약 10mm정도 증가하고 있다. 그러나 윗방향 설치(수평0°) 설치보다 내공변위는 거의 차이가 없지만 천단침하는 최대 8mm정도 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 천단변위가 발생하는 방향의 역방향으로 볼트를 타설했기 때문이며, 볼트가 천단부에 집중되므로 수평타설보다 변위가 작아졌다고 사료된다. 이때 방사상 설치(수평0°) 설치 후 급히 볼트의 퍼져

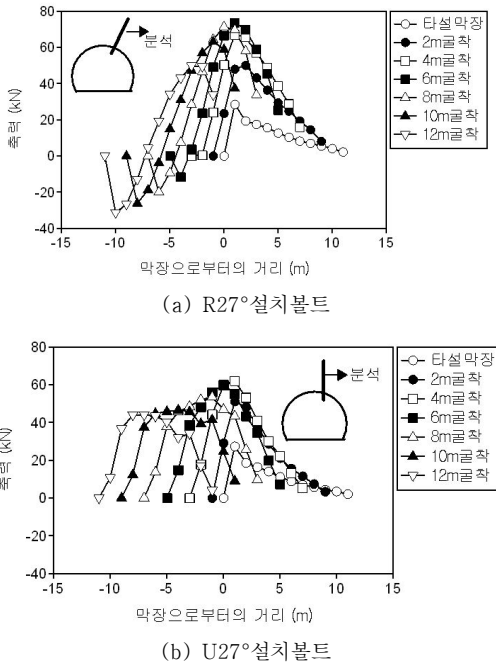


그림 7. 페이스볼트의 설치위치에 따른 축력의 분포 ($\lambda=1.0D$)

가는 면적이 크므로 수평 설치보다 변위가 커진다고 생각된다. 그림 6(b)에 2.5D 후방의 변위를 나타내었다. 이때 각도설치 볼트는 그림 2처럼 후방에 잔장이 남아 있는 상태이며, 설치방향, 설치각도에 의해 잔장은 달라지게된다. 후방에서의 변위는 수평타설보다 방사상 및 윗방향설치 모델이 작아지고 있다. 천단침하는 R14°, R27° 모델이 수평설치보다 5~10mm 작으며, 내공변위는 3~9mm 작은 것으로 나타났다. 윗방향타설은 U14°와 U27°의 차이가 크며, 천단침하는 수평타설보다 10~40mm 감소하며, 내공변위도 9~35mm 감소하여 확실한 보강효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

여기서 주목할 점은 그림6(b)의 변위중에 길이 0.5D의 경우, U14°는 R27°보다 약간 변위가 커지고 있다는 것이다. 이것은 U27°설치는 1m굴착하면 4열 볼트가 동시에 막장으로부터 없어지지만, U14°설치는 천단부근의 볼트는 1m굴착하면 막장으로부터 없어지나 천단부터 측벽에 위치하는 볼트는 잔장이 각기 다른 상태이며, 측벽에 설치한 볼트는 잔장이 매우 짧아지기 때문으로 사료

된다. 이때 U27°도 동일한 패턴이지만 각도가 크므로 절단되어 없어지는 볼트의 길이도 짧고 주로 변위가 생기는 지표면을 향해서 설치하기 때문에, 그리고, 천단부에 밀집해서 설치하는 패턴이기 때문에 수평설치 보다 후방의 변위는 더 작아졌다고 사료된다.

그림7 (a), (b)에 천단부에서 설치한 R27°, U27° 볼트의 축력분포를 나타내었다. 이때 방사상 및 윗방향 설치하는 수평설치와(그림4 참조) 동일하게 막장 전방에서는 인장축력에 의한 막장전방의 변위를 억제하고 있지만, 막장통과 후에는 인장축력이 점점 압축으로 변화하고 있다. 이때 방사상 설치하는 설치밀도가 급히 낮아지므로 급격히 압축으로 변화하지만, 윗방향설치의 경우는 천단부에 집중에서 설치하는 형태가 되므로 압축으로의 변화가 작은 것이 특징이다. 이렇게 볼트가 전방에 있을 때는 인장축력에 의한 선행변위 억제효과, 막장후방에서는 압축에 의한 천단침하 억제효과를 나타내는 것은 주입형 강관의 계측(崔尾, 2003) 자료와 동일한 경향을 보이고 있다. 즉, 남겨진 잔장의 이러한 메카니즘으로 인해 그림6 처럼 각도 설치에 의해 터널후방의 변위가 작아졌다고 판단된다. 이때 보통 사용되는 GFRP의 볼트는 직경도 작고(보통, 직경30~76mm를 사용), 강성도 강관의 1/10이기 때문에 보강효과는 주로 축력에 의존하고 있다고 알려져 있으므로 잔장에 의한 볼트의 지반변위 억제 효과는 설치각도 및 방향에 크게 의존하고 있다고 판단할 수 있다.

4. 결론

현재까지의 페이스볼트에 대한 설계는 주로 막장을 보강하기 위한 개념으로서 막장면부터 전방에 수평으로 설치하는 것을 원칙으로 하고 있으며, 대부분의 경우 다른 공법과 병용해서 적용되는 경우가 많다. 최근 두 가지 이상의 보조공법이 적용되는 경우, 공중 및 시공시간을 단축하기 위해 외곽부 볼트에 각도를 주어 방사상으로 설치하려는 설계가 시도되고 있다. 본 연구는 페이스볼트의 다양한 설계항목 가운데 길이, 설치각도, 설치방향에 의한 영향을 검토했다. 특히 수평설치와 각도설치에 대한 검토 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 페이스볼트는 길이가 0.5D이상의 경우, 막장 수평 변위의 차이는 2~3% 정도로 매우 작으므로, 시공성을 고려하여 가능한 장척의 볼트를 설치하는 것이 유리하다. 또한, 페이스볼트에 의해 막장수평변위만을 억제하려는 경우는 가능한 수평으로 타설하는 것이 유리하다.
2. 페이스볼트의 윗방향 타설은 굴착단면에서는 최외곽부의 볼트가 없어지므로 수평변위가 4~5mm 증가하지만, 천단침하가 4~5mm 감소하므로 터널의 안정성에는 큰 영향이 없는 것으로 사료된다. 이때, 터널후방 2.5D 지점에서는 수평타설보다 약 18% 감소되어 확실한 보강효과를 얻을 수 있다.
3. 페이스볼트에 의해 터널후방의 변위 및 굴착단면의 연직변위를 억제하려고 하는 경우는 막장 외곽부의 볼트만을 방사상 설치보다 윗방향 설치가 유리한 것으로 나타났으며, 본 해석의 조건에서의 각도는 14°보다 27°의 경우가 효과적인 것으로 나타났다.

페이스볼트가 적용될 정도의 연약 지반에서는 이중, 삼중으로 다른 보조공법이 병용되는 경우가 많고 있으며, 이때 각 공법간 기능의 중복 및 공정의 복잡화 등이 문제점으로 지적되고 있다. 본 논문에서는 페이스볼트의 약점으로 지적되어온 후방의 천단침하에 대해서, 설치패턴을 변경하는 것에 의해 후방의 변위를 줄일 수 있는 것이 확인되었다. 그렇다면 병용공법의 적용 시 다른 공법의 설치본수도 일정부분 줄일 수 있을 것으로 예상되며 향후, 국외에서 적용된바 있는 외곽공 막장볼트의 각도 설치에 대한 계측치를 이용하여 최적의 설치패턴에 대해 보고를 하겠다.

참고문헌

1. 남기천, 허영, 유광호(2001), 파쇄대 암반에서 얇은 심도의 터널 굴착시 막장보강 효과에 관한 연구, 터널기술, pp.323-335, Vol.5., No.4, 2003. 12.

2. 유충식, 신형강(2000), 모형실험에 의한 수평보강재로 보강된 터널 막장의 거동 분석, 터널기술, pp. 32-40, Vol.3., No.2, 2000. 9.
3. 배 규진, 서경원(2000), 국내터널붕괴사례 연구, 한국지반공학회 특별세미나, pp.3-31, 2000.
4. 유충식, 양기호(2006), Behaviour of a tunnel face reinforced with longitudinal pipes-laboratory investigation, 터널기술, pp. 91-99, Vol.4., No.2, 2002. 6.
5. HSE(1996), Safety of New Austrian Tunnelling Method(NATM) tunnels, pp.15-20, 1996.
6. Shoushi Nishizaka, Tohru haba, Tadashi Okabe (2002), Application trend of long length face-bolting and analytical study of its behaviour characteristics, Proceedings of tunnel engineering, JSCE, Vol. 12. pp.131-140, 2002.
7. Wolfhard Leichnitz(1990), Analysis of collapses on tunnel construction sites on the New Lines of the German Federal Railway, Tunnels and Underground Space Technology, Vol.5, No.3, pp.199-203, 1990.
8. JTA安全環境委員会(1994), トンネル工事における災害事例調査, トンネルと地下, p.307-313, 1993. 4.
9. 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, 1997.
10. ジェオプロンテ研究会(2000), 長尺鏡ボルトの施工実態調査とその分析, 2000年 11月.
11. ジェオプロンテ研究会(1996), 長尺鏡ボルトの適用に際して(案), pp.12-15, 1996年 6月.
12. 笹尾 春夫(2003), トンネル切羽周辺の支保設計に関する研究, 京都大学学位論文, 2003. 11.
13. 御手洗 良夫, 松尾 勉, 手塚 仁, 岡本 哲也, 西村 誠一, 松井 保(2003) 山岳トンネルにおける長尺鏡補強工の作用効果の評価, 土木学論文集, No.743/III 64, pp. 213-222, 2003. 9.
14. ○○トンネル対策工検討業務資料(2006).
15. 日本鉄道建設公団(1996), NATM設計施工指針.



서경원

한국건설기술연구원, 공학박사
kwseo@kict.re.kr



배규진

한국건설기술연구원, 공학박사
gjbae@kict.re.kr



西村和夫

동경도립대학 공학연구부 토목공학과
교수
knishi@ecomp.metro-u.ac.jp



土門剛

동경도립대학 공학연구부 연구원
dom@ecomp.metro-u.ac.jp

K C I