

TBM공법을 적용한 암반현장에서의 굴착효율에 관한 연구

A Study on the Excavation Efficiency in Rock Mass Applied TBM Method

정 형 식*1

Chung, Hyung - Sik

이 승 호*2

Lee, Seung - Ho

박 종 배*3

Park, Jong - Bae

Abstract

The use of TBM has been rapidly increased in recent years since TBM has been introduced to Korea in 1985 and Korea came to occupy 27% of TBM holding ratio in the world. Despite a lot of experience, study on promoting the efficiency of TBM excavation is insufficient. The factors that influence the efficiency of excavation are the mechanical factor geotechnical factor and management factor. The study on the efficiency of excavation has focused on the improvement of mechanical factor. But geotechnical factor is also very important and by this factor engineer can estimate the applicability of TBM.

The purpose of this paper is to understand the effectiveness of TBM excavation for various rock quality by analysing relations between rock quality and TBM excavation.

요 지

1985년 국내에 처음으로 TBM(tunnel boring machine) 공법이 도입된 이래, 최근 그 사용이 급격히 증가하여 전세계 TBM 보유율의 27%를 차지하게 되었으며 상당한 시공실적도 가지게 되었다. 그러나 TBM 공법에 의한 많은 시공실적에도 불구하고 TBM의 굴착효율을 증진시키기 위한 연구는 미흡한 편이다.

TBM 공법의 굴착효율에 영향을 미치는 인자로는 기계적 요인, 지반공학적 요인과 현장운영상의 요인을 들 수가 있다. 이때까지의 굴착효율을 높이기 위한 연구는 주로 기계적 요인의 개선

*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정회원, 영동전문대학 토목과 조교수

*3 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

방안에 대해서 중점적으로 다루어져 왔지만 지반공학적 요인도 매우 중요하며 암반이 갖고 있는 물리적 특성에 따라서 사전에 TBM 공법의 적용여부를 판단할 수 있으며, 또한 현장 암반조건에 적합한 TBM 종류를 선택할 수도 있다.

본 논문의 목적은 실제 TBM 공법 적용 현장에서 얻어진 암반에 대한 자료와 제반 TBM 굴착작업과의 관계를 분석하여, 암반조건에 따른 TBM 굴착효과를 구명하고자 하였다.

1. 서 론

TBM 공법은 지하암반이나 터널의 굴착에 있어 기계화된 공정으로 인하여 경제적인 뿐만 아니라 공사기간의 단축이라는 이점과 함께 공학적인 측면에서도 여굴의 방지, 소음 및 분진 발생 감소 등 많은 장점을 지니고 있어 NATM 공법과 함께 국내에서도 일반화될 전망이다.

1985년 처음으로 TBM 공법이 국내에 도입된 이래 TBM 공법을 적용한 터널굴착은 국내 24개 현장에서 총굴진연장 130여 km를 시공완료 또는 시공중에 있으며 터널공사의 증가, 또는 장대화 추세에 따라 TBM 공법의 용도가 더욱 빈번해지고 있다. 이러한 여건에 따라 국내 TBM 공법의 도입은 최근 5년간 급속히 증가하여 전세계 TBM 보유율의 27%를 차지하게 되었으며 상당수의 업체에서 계속적으로 도입 검토중에 있거나 도입을 추진중에 있다.

그러나 이러한 국내 TBM 보유현황 및 굴착실적에도 불구하고 TBM의 굴착효율성에 대한 다각적인 연구는 이제 시작단계에 놓여있는 실정이다. TBM의 굴착효율성을 증대시키기 위해서는 TBM의 기계적 요인, 현장운영상의 요인 및 현장암반의 특성에 대한 연구가 필요하다. 현재까지는 기계적 요인의 개선을 통하여 굴착효율을 증가시키려는 연구가 수행되고 있으나, 실제 현장암반 특성과 TBM의 굴착효율에 대한 연구는 몇몇 연구종사자들을 제외하고는 활발히 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 TBM 공법을 적용한 주압도 수터널과 남산 쌍굴터널 현장에서 얻어진 암반 자료와 이들 현장의 TBM 굴착작업의 제반요

건을 분석하여 암반조건에 따른 TBM 굴착효과를 구명하고자 하였다.

2. TBM 굴착원리

TBM(tunnel boring machine)은 터널 전단면을 동시에 굴착해 나가는 기계화된 터널굴착 장비이다. TBM의 굴착방식은 비트의 회전력을 이용한 절삭식(shield type)과 커터(cutter)의 회전력과 압축력을 혼합한 압쇄식(rotary type)이 있다.

절삭식은 피크가 암석의 표면과 나란하게 이동하면서 암석을 절삭하며 주로 토사와 풍화토 등의 비교적 약한 지반에서 사용된다. 또한 여기서 주로 다루게 될 압쇄식은 본체에서 커터 헤드(cutter head)를 회전시키면서 전진 실린더로 굴착암면에 밀착시켜 커터가 회전궤적을 따라 자전하면서 암석을 압쇄 절취하므로 원형의 터널단면을 완성하게 된다.

2.1 靜的인 상태에서의 암석파쇄

커터가 암석에 관입을 시작하면 디스크 커터(disk cutter) 밑의 암석은 파쇄되고 이러한 관입이 계속되면 파괴상태에 이르러 암석내에 파쇄대를 형성하게 된다(그림 2.1 참조).

커터에 의해 파쇄된 암의 파쇄형상과 파쇄정도 및 응력상태는 암석과 커터의 특성에 의존한다. 즉, 커터의 형상과 암의 성질에 따라 파쇄된 암의 구속력과 응력수준이 증감한다. 그러므로 커터의 각도와 암석강도는 응력상태에 영향을 미친다.

커터가 계속 관입하면, 벤트크랙(Vent Cra-

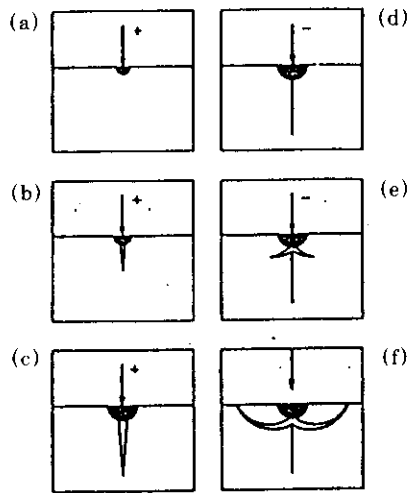


그림 2.1 커터에 의한 암석의 파괴모델 (Lawn & Swain, 1975)

ck)이 발달되기 전까지 파쇄된 영역은 계속 확장된다. 벤트크랙은 파쇄대 하부에 형성되는데 이 부분에서 인장응력이 발생한다(그림 2.1(b) 참조). 이러한 파쇄된 영역과 중앙 벤트크랙의 형성이 칩(Chip)형성의 첫 단계이다.

Paul & Sikarskie(1965), Benjumea(1969), Dutta(1972)와 Nishimatsu(1972)는 가상 파괴면에 발생한 전단응력이 암석의 전단강도를 초과할 때 칩이 형성된다고 가정하였다. 그러나 소성변형이 작고 탄성으로 거동하는 취성의 암석은 실패되지 않고 오히려, 파쇄된 암석내부의 응력이 Intact Rock의 방사상 크랙을 유발시켜 파쇄부의 가장 중앙부로 부터 방사상 평면을 따라 일어나는 인장-전단 파괴에 의해 칩이 형성된다고 Korbin(1979)은 제안하였다. 이 Korbin의 가정은 유한요소해석과 잘 일치하는 것으로 판명되었다.

최근에는 Lawn, Evans와 Conway 등이 파괴역학 이론을 적용하여 칩의 형성과정을 설명하였다. 그림 2.1에서 Lawn과 Swain은 중앙 벤트크랙이 형성되기 시작할 때 파쇄된 영역이 증가함을 주시하였다. 초기에 가해진 하중은 암석의 Fracture Toughness와의 함수이다. 이 Fracture Toughness(K_{IC})는 암석의 고유성질

이며 크랙을 유발시키는데 필요한 응력이다.

중앙의 Vent는 안정한 크랙이며 이 크랙은 압축하중이 증가하지 않으면 더 이상 진전되지 않는다(그림 2.1(c) 참조). 이 중앙 벤트크랙은 가해진 하중작용점 끝에서 곧게 생성되어 칩의 형성과는 무관하다. 그러나 커터가 움직임에 따라, 파쇄된 영역에서 하중 제거시 칩이 형성된다고 하였다. 이러한 현상이 일어날 때 중앙 벤트크랙은 봉해지고(그림 2.1(d) 참조), 파쇄암에 가해진 하중이 경감될 때 Intact Rock과 파쇄된 영역사이에 변형이 발생한다. 그러므로 잔류 인장응력이 Intact Rock의 응력장에 가해지고 수평방향 크랙이 발생된다(그림 2.1(e) 참조). 이러한 수평크랙은 암석표면이 계속 압축력을 받고 있으므로 크랙이 표면까지 진전되지 못하나 하중이 완전히 제거될 때 크랙은 암석표면으로 향하게 된다(그림 2.1(f) 참조)

2.2 動的인 상태에서의 암석파쇄

Conway와 Kirchner(1980)는 움직이는 커터에 의한 크랙의 형성을 정적인 상태에서의 크랙의 형성과 유사한 방법으로 해석하였다. 우선 커터의 움직임을 모델링하기 위하여 서로 평행한 하중들을 다양하게 조합하여 암석표면에 직각으로 작용시켰다. 이 해석에서 높은 인장응력이 커터의 경로의 전방에서 직각으로 발생함이 규명되었다. 이때 칩은 회전하는 커터의 전방과 측면에서 커터에 의해 집중된 응력에 의해 형성된다. 커터가 회전함에 따라 각 커터에 의해 암반석에 서로 인접한 흠이 생성된다.

그래서, 커터가 관입된 암석표면은 평면이 아니며 칩은 균열이 한 흠에서 인접하여 하중을 받고 있는 흠으로 확장될 때 생성된다. 임의의 균열의 실제 확산거리는 인접한 두 흠 사이보다 실제로 짧을 수 있다. 이는 TBM의 절삭작업이 연속적인 과정이기 때문이다. 커터가 암반면을 가로지르며 회전하면, 커터 아래의 파쇄대는 연속적으로 확장되어, 균열이 가

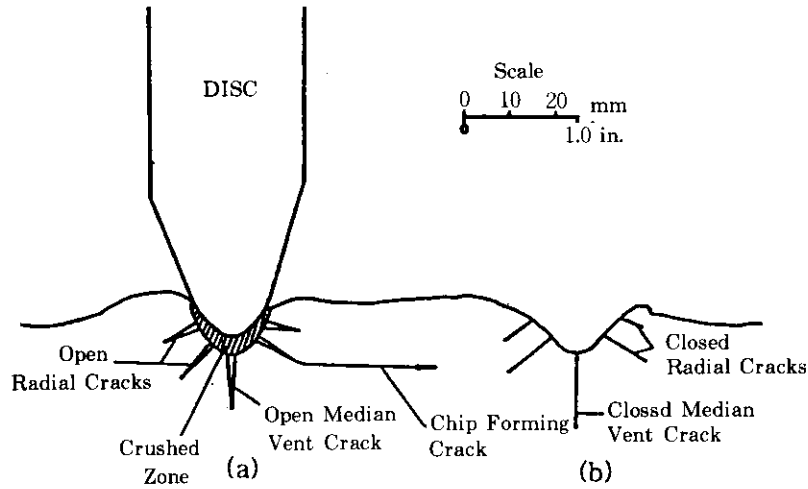


그림 2.2 두개의 Disk Cutter의 암반관입형태 단면도

시작한다. 커터에 의해 생성된 균열은 항상 인접한 홈으로 확대되는 것은 아니나, 인접한 커터가 통과할 때 균열이 이미 존재하는 균열이나 칩까지 진전되면 홈 사이 간격을 지나 확대될 수도 있을 것이다.

이러한 칩 형성과정은 그림 2.2와 같다. 그림 2.2는 두개의 인접한 커터 홈 사이의 암반의 가상 단면이다. 그림 2.2(b)은 홈, Median Vent와 방사상 균열이며 그림 2.2(a)는 인접한 홈에서 작동하는 커터이며, 파쇄대, 중간부, 방사상의 균열과 칩의 형태를 가진 균열과 균열의 확장 방향이 나타나있다.

이때 칩은 모든 커터가 통과할 때마다 형성되지는 않지만, 칩이 실제로 형성되기 전에 연속적인 커터의 통과로 인해 홈이 깊어진다 (Howarth, 1981). 어느 경우에서나 균열은 파쇄대 부근의 높은 인장응력대에서 시작된다. 균열의 확장방향은 균열 상부에서 인장응력과 진단응력에 의해 지배되고, 균열은 압축영역의 하부로 확장될 것이다. 응력상태의 세부적인 사항과 파쇄대의 형태는 두가지 관점에서 매우 중요하다. 첫째, 마모는 커터와 접촉하는 암에 의해서 발생되므로 파쇄대 내의 광물조성, 절

정들의 크기와 응력상태가 고려되어야만 한다. 둘째, 굴착에 필요한 에너지는 칩 형성과정과 밀접하게 관련되어 있다.

커터의 마모를 최소화하기 위해 커터와 파쇄대 사이의 접촉을 최소화하는 것이 중요하다. 만약 암석이 다공질이라면 파쇄대는 칩이 형성되기 전에 확대될 수 있다. 또한 만약 파쇄대의 물리적 성질이 내마모성이라면 커터의 마모가 심각할 것이다. 또, 암반이 부서지기 쉬운 균열이 인접한 커터의 홈으로 확대된다면, 파쇄대의 크기는 제한될 것이다. 암반이 파쇄되어 파괴에 이를 때, 칩이 생성되어 파괴에 이르는 것보다 암석의 단위 체적당 더 큰 에너지가 소모된다. 그러므로, 굴착효율은 디스크 커터가 관입할 때 생기는 파쇄대의 크기와 칩의 상대적인 양과 밀접한 관련이 있다.

3. 암반조건과 TBM 굴착과의 관계

TBM의 굴착성능을 좌우하는 것으로는 크게 기계적 요인, 현장암반의 특성과 현장 운영상의 요인으로 구분된다. 이제까지의 TBM의 굴착성능을 다룬 연구에서는 기계적 요인이

TBM 굴착성능에 미치는 영향을 상대적으로 많이 다루었다. 그러나 실제로는 현장 암반의 성질도 기계적 요인 못지않게 TBM 굴착에 많은 영향을 미친다.

가령, 극경암 지대에서는 암석의 강도가 매우 크기 때문에 굴진속도가 느려지며, 커터의 소모율이 높아지는 반면에 파쇄대, 단층대와 같은 연약지반에서는 벽면지지력이 확보되지 않아 오히려 굴진속도가 떨어지며 지보설치시간 증가에 의해 공사가 지연되기도 한다. 그러므로 TBM 굴착시 극경암과 연약층 사이에서 가장 효과적인 굴착이 이루어질수 있는 암질을 파악하는 것이 필요하다.

따라서, TBM 공법을 적용한 주암다목적댐 도수터널과 남산쌍굴터널 현장에서 얻어진 암반자료와 TBM 굴착속도 및 작업효율, 커터 교환시간 및 지보설치시간과의 관계를 분석하여 보았다. 주암 다목적댐 도수터널구간의 지반은 편마암 또는 화강편마암이 대부분이고 부분적으로 반상편마암이 분포한다. 남산 1호터널 구간의 지질은 변성암류인 선캠브리아기의 흑운모편마암과 이를 관입한 중생대의 흑운모 화강암이 기반암으로 분포하며 계곡부에는 이들을 제 4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있는 상태이다. 분석에 사용된 암의 RMR 값과 일축압축강도는 주암현장에서, 점하중 강도는 남산현장에서 얻어진 자료이다. 현장에서 사용된 TBM장비는 각각 압쇄식이며, 직경은 4.50m이다. 그러나 제작회사가 다르므로(주암: 독일 Wirth사, 남산: 미국 Robbins사) 기계적 특성이 약간 다를 수 있다.

3.1 RMR값과 TBM 굴착과의 관계

암반을 굴착할 때, 특히 대구경일수록 암반이 Intact 상태로 있지 않고 암반내에 절리 등의 불연속면이 존재하게 된다.

RMR값은 암반의 강도와 절리등을 종합적으로 고려한 값으로 이 RMR 값과 TBM에 의한 시간당 굴진속도, 순가동율, 지보시간과 커

터 교환시간 비율과의 관계는 다음과 같다.

(1) RMR값과 시간당 굴진장(m/hr)과의 관계

현장암반의 RMR값과 TBM 시간당 굴진장과의 관계는 그림 3.1과 같다. 여기서, 시간당 굴진장은 굴진거리를 수리시간, 휴지시간 등을 제외한 순수한 TBM 굴착시간으로 나눈 값이며 이때, 평균시간굴진장(Ave. Penetration)은 전체 굴진거리(총 터널길이)를 순수한 TBM 굴착시간으로 나눈 값이며 0.99m/hr값을 나타내었다.

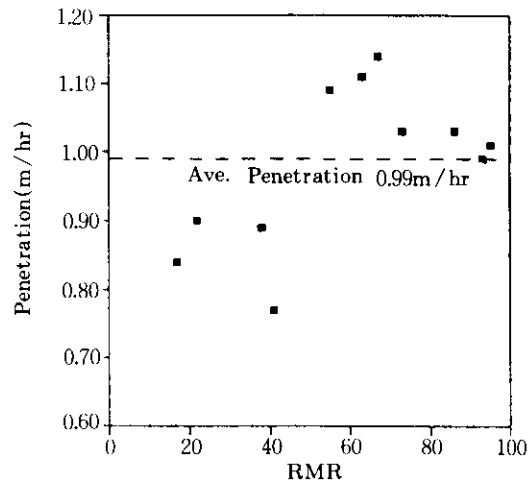


그림 3.1 현장암반의 RMR과 시간굴진장과의 관계

그림에서 RMR값이 60~70 부근에서 시간당 굴진장이 Peak치를 나타내었으며, RMR값이 이 보다 증가하면 서서히 시간굴진장이 감소하였으나 평균시간당굴진장 보다는 크게 나타났다. 그러나 RMR 값이 60을 기준으로 작아질 경우에는 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 RMR값이 50이하로 떨어질 때는 벽면의 지지력이 확보되지 않아 TBM의 제 성능을 발휘할 수 없기 때문인 것으로 판단된다.

(2) RMR값과 순가동률과의 관계

순가동률은 총 작업시간중 커터 교환시간 등

을 제외한 순수히 굴착에만 소비되는 시간비율을 말하는 것으로 암반의 RMR과의 관계는 그림 3.2와 같다. 이때 평균순가동률은 순수하게 TBM으로 굴착한 시간을 전체 작업시간으로 나눈 값으로 34.6%를 나타내었다.

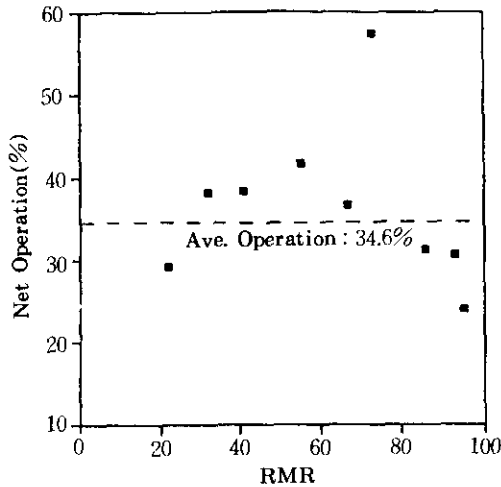


그림 3.2 RMR값과 순가동률과의 관계

그림에서 RMR값이 30 이상일 때는 순가동률이 평균순가동률(34.6%)보다 대체적으로 큰 값을 나타내며 30 이하일때는 순가동률이 평균값 이하로 떨어지는데 이는 암반의 불안정으로 인한 지보시간이 많이 소요되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 RMR값이 80 이상일 때에도 순가동률이 평균값 이하로 감소하는데 이는 암질이 강하여 굴착작업외에 커터교환 및 정비시간이 많이 소요되기 때문인 것으로 판단된다.

(3) RMR값과 커터 교환시간비율과의 관계

커터 교환시간비율은 총 작업시간중에서 커터가 마모되어 교체하는데 소요되는 시간비율을 말하며 평균 커터교환시간비율은 총 커터교환에 소요된 시간을 전체 작업시간으로 나눈 값으로 17.3%를 나타내었다(그림 3.3 참조). 이 RMR값과 커터 교환시간 비율과의 관계를 분석함으로써 암질에 따른 커터의 소모 정도를 간접적으로 추정할 수 있을 것이다.

그림 3.3에서 RMR값이 70이상일때는 커터교환시간비율이 평균값보다 크게 나타났으며 RMR값이 70이하에서 교환시간비율이 감소하여 RMR값 40 부근에서 최저치를 나타내었다.

(4) RMR과 TBM굴착후 지보설치 시간비율 암반에서 터널을 굴착할 때 일반적으로 RMR값으로 무지보 자립시간을 추정하고 있다. TBM 공법은 발파가 아닌 기계로 굴착하

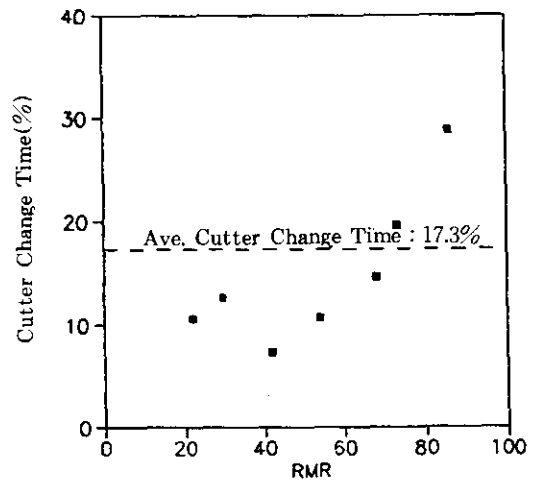


그림 3.3 RMR과 커터 교환시간비율과의 관계

므로 굴착면이 매끄럽고 주위 암반의 이완량이 적어 여굴발생량이 적다는 이점이 있다. 그러나 TBM 공법 적용시에 작기는 하지만 여굴이 발생하며 이 여굴을 방지하기 위하여 Shotcrete, Rock Bolt, Steel Rib 등으로 굴착면을 보강하게 된다.

이때 암반의 RMR이 크면 암반의 무지보 자립시간이 증가하므로 지보에 소요되는 시간이 줄어들 것으로 예상된다. 그림 3.4는 RMR과 지보설치 시간비율과의 관계를 나타내었다. 이때 평균 지보설치시간 비율은 지보설치에 소요되는 시간을 전체 작업시간으로 나눈 값으로 7.8%의 값을 나타내었다.

암반의 RMR 값이 40 이상이면 Fair Rock 이상으로 분류할 수 있다. 이 값은 터널 Span

이 4.5m이면 무지보 자립시간이 약 3~25일 이상일 것으로 추정된다. 그림 3.4에서 보면 RMR 값이 40 이상일 때 지보재 설치시간비율이 평균값(7.8%)보다 훨씬 작은 값을 나타내며 RMR 값이 80 이상일 때는 지보재설치 시간비율이 거의 없는 것으로 나타났다. 그리고 RMR 값이 40 이하일 때는 지보재 설치에 걸리는 시간비율이 직선적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며 이 경향은 많은 Data에 의한 결과가 아니므로 단정하기는 어려우나 대체로 TBM 공법 적용현장에서 지보설치에 사용된 시간과 RMR 값과는 반비례 관계를 보여주었다.

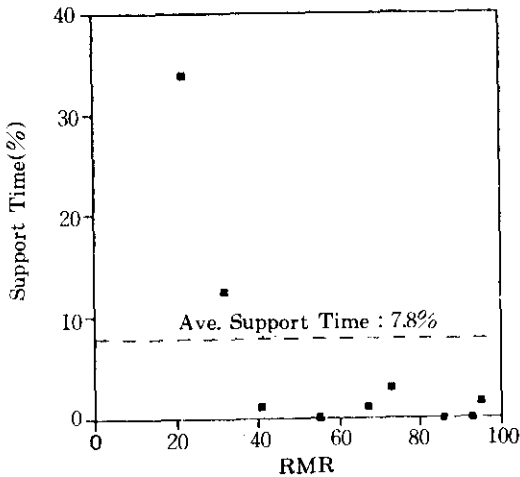


그림 3.4 RMR과 지보설치 시간비율과의 관계

3.2 일축압축강도와 TBM 굴착

(1) 일축압축강도(kg/cm^2)와 시간당 굴진장(m/hr)과의 관계

암석의 코어를 채취하여 실내시험에 의한 일축압축강도와 시간당 굴진장과의 관계는 그림 3.5와 같다.

평균시간당 굴진장은 0.99m/hr로써 일축압축강도가 약 1100kg/cm^2 이상일 때는 시간당 굴진장이 평균값보다 크게 나타났으며 또한 일축압축강도가 1100kg/cm^2 보다 작을 때는 평

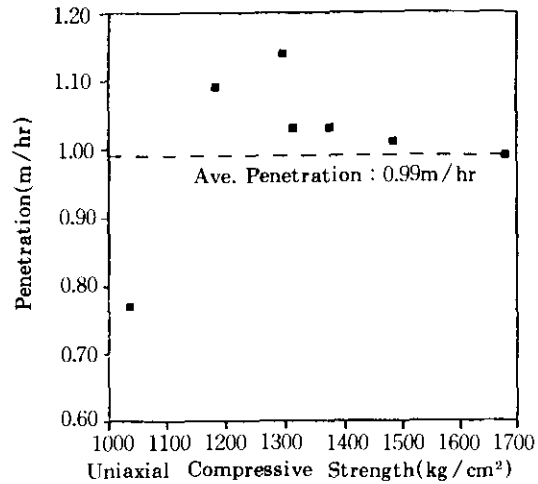


그림 3.5 일축압축강도의 시간굴진장과의 관계

균굴진장 이하로 나타났다.

암석의 일축압축강도가 1100kg/cm^2 이상일 때는 TBM의 암반굴착속도가 증가하며 일축압축강도는 1100kg/cm^2 이하일 경우에는 벽면지지력이 작아서 TBM 굴착에 어려움이 있는 것으로 판단된다. 그림에서는 일축압축강도가 $1200\sim 1300\text{kg/cm}^2$ 정도일 때 시간당 굴진장이 가장 크게 나타났다.

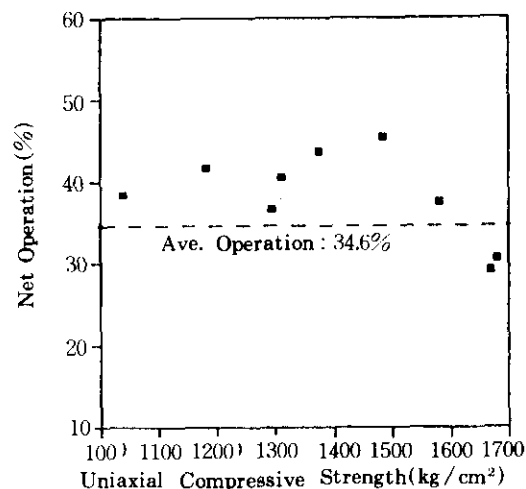


그림 3.6 일축압축강도와 순가동율과의 관계

(2) 일축압축강도가 순가동률과의 관계
암석의 압축강도와 TBM 순가동률과의 관계는 그림 3.6과 같다.

그림에서는 암석의 일축압축강도가 1000~1500kg/cm² 사이일때 평균 순가동률(34.6%)를 상회하며 일축압축강도가 1200~1500kg/cm²일때 순가동률이 가장 높게 나타났다. 일축압축강도가 1700kg/cm² 부근에서는 순가동률이 평균값 이하의 값을 나타내었으며 이는 암석의 강도가 클때 커터의 교환시간이 많이 소요된 것으로 생각된다.

(3) 암석의 일축압축강도와 커터 교환시간 비율과의 관계

암석의 강도와 커터 교환시간비율과의 관계는 그림 3.7과 같다.

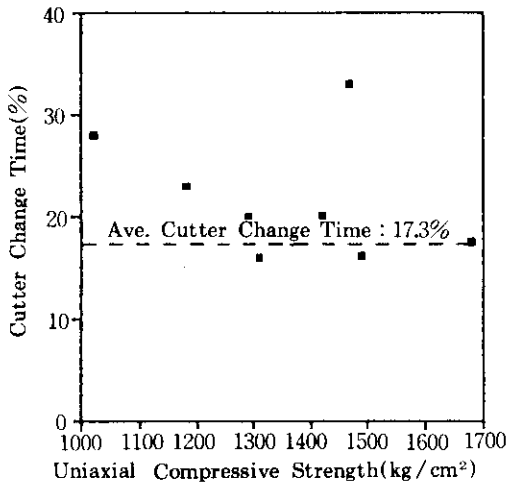


그림 3.7 일축압축강도와 커터 교환시간비율과의 관계

그림에서 보면 일축압축강도가 1000~1700kg/cm² 에서는 커터교환시간비율이 평균치를 약간 상회하는 것으로 나타났으나 강도에 따라 교환시간비율이 일정하지 않아 어떤 경향을 찾기는 힘들다. 이러한 일축압축강도와 커터 소모율의 불규칙한 관계는 암석내의 석영입자에 대하여 커터의 마모가 크므로 커터의 소모율이

일축압축강도 뿐만 아니라 암석내의 석영 함유량과도 관계되기 때문인 것으로 생각된다.

(4) 일축압축강도와 지보설치시간

일축압축강도는 Intact Rock을 시험한 값이기 때문에 절리나 불연속면을 고려하지 않아 실제 암반에서 이 값만으로 암반의 자립시간에 대한 평가를 내리는 것은 힘들다. 본 분석에서는 압축강도 1000~1700kg/cm² 사이의 값이 사용되었으며 공교롭게도 이 범위내에서는 모두 평균 지보시간율(7.8%)보다 작은 값을 나타내었다.

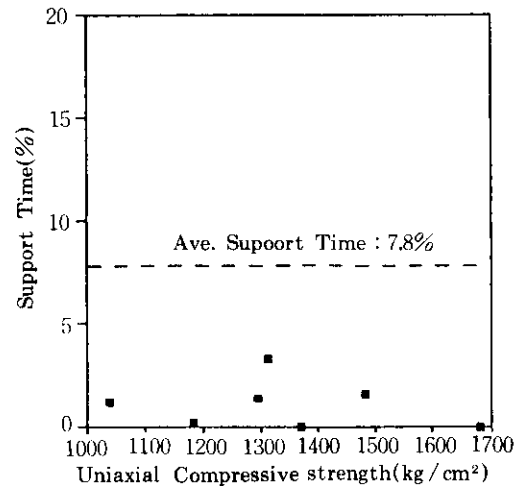


그림 3.8 일축압축강도와 지보설치 시간비율과의 관계

3.3 점하중강도와 TBM 굴착

남산현장은 풍화가 진전되어 일축압축시험에 적합한 코어를 채취할 수 없어 점하중 시험을 수행하였다. 이 점하중 시험법은 2점으로 암석시편을 끼우고 하중을 재하하여 인장응력에 의하여 파괴에 이르게 하는 것으로 Disk Cutter에 의해 암석을 파괴하는 형식과 유사하다. 점하중강도와 TBM 제반 굴착작업을 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 점하중강도와 시간당 굴진장과의 관계

점하중강도와 시간당 굴진장과의 관계는 그림 3.9와 같다. 그림에서 점하중강도가 75kg/cm² 이상에서 평균시간당 굴진장에 가까운 값을 나타내었으며 50kg/cm² 이하에서는 평균값보다 작은 값을 나타내어 점하중강도가 50kg/cm² 이하에서는 벽면의 지지력이 확보되지 않아 굴진속도가 떨어지는 것으로 나타났다.

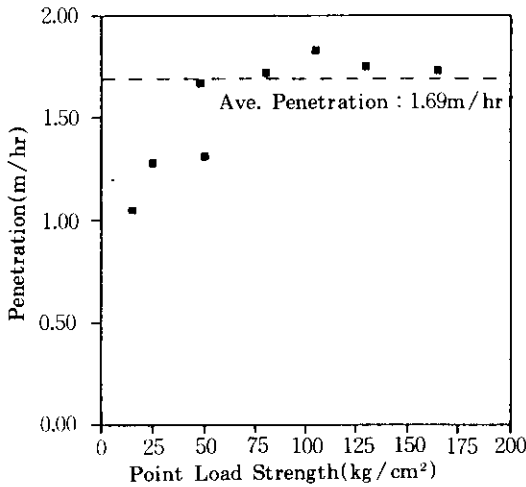


그림 3.9 점하중강도와 시간굴진장과의 관계

(2) 점하중강도와 순가동률과의 관계

점하중강도와 순가동률과의 관계는 그림 3.10과 같다.

점하중강도가 50kg/cm² 이상부터 평균가동률(20.6%)을 상회하는 값을 나타내었고 그 이하는 평균값보다 작은 값이 나타났다. 이는 점하중강도가 50kg/cm² 이하에서는 지보설치시간 등이 많이 차지하기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 점하중강도와 커터 교환시간비율과의 관계

그림 3.11에서 점하중강도가 75kg/cm² 이상은 커터교환시간비율이 평균값을 초과하는 것

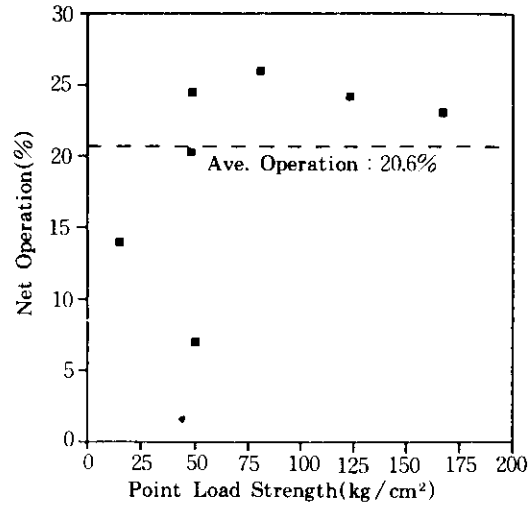


그림 3.10 점하중강도와 순가동률과의 관계

으로 나타났다. 이는 점하중강도가 증가하면 커터의 소모율이 증가함을 알 수 있었다.

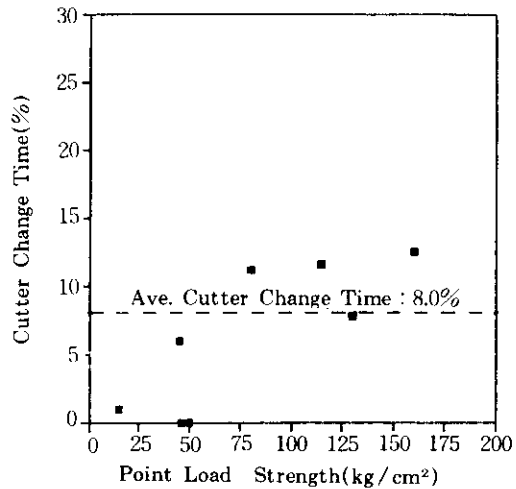


그림 3.11 점하중강도와 커터 교환시간비율과의 관계

(4) 점하중강도와 지보시간

그림 3.12에서 보면 점하중강도가 40kg/cm² 이상에서는 지보시간비율이 평균치(20.5%)보다 작은 값을 나타내고 있으나 점하중강도 25kg/cm² 이하에서는 지보시간비율이 급격히 증가하여 15kg/cm² 부근에서 비교적 큰 지보

시간비율을 나타내었다.

이는 TBM 공법 적용현장에서 지보설치에 사용된 시간과 점하중강도와는 반비례 관계를 보여주고 있다.

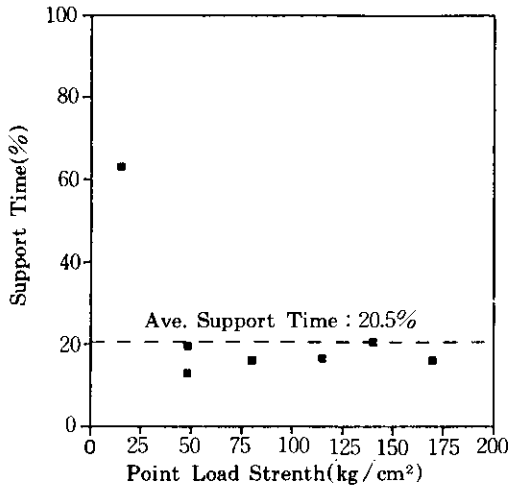


그림 3.12 점하중강도와 지보시간비율

4. 결 론

주암다목적댐 도수터널과 남산 쌍굴터널 현장의 암반평가 자료와 제반 TBM 굴착작업을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) TBM 굴착시 암반의 RMR 값이 60~70 사이에서 가장 높은 시간당 굴진장과 순가동률을 나타내었다.
- (2) 전체 작업시간중에서 커터 교환에 소요된 시간은 RMR값이 70~90 사이가 평균 커터교환시간비율보다 크게 나타났으며 RMR 값이 40 이상일 때는 지보재 설치에 소요된 시간이 5% 이내였으나 RMR 30 이하부터는 지보재 설치시간이 직선적으로 증가하였다.
- (3) 암석의 일축압축강도가 1200~1500kg/cm² 사이일 때 가장 높은 굴진율과 순가동률을 나타내었으며, 이 범위에서 가장 효율적인 TBM 굴착작업이 이루어지는 것으로 나타났다.

- (4) 일축압축강도와 커터 교환시간과의 관계는 다소 불규칙하여 일축압축강도만으로 커터의 소모율을 예상하기는 다소 무리가 있는 것으로 나타났으며, 암석내의 석영함유량도 함께 고려되어야 할 것으로 사료되었다.
- (5) 점하중강도는 75kg/cm² 이상일 경우 평균 이상의 굴진율과 순가동률을 나타내었으며 점하중강도가 50kg/cm² 이상일 때 지보재 설치시간은 평균치보다 작게 소요되는 것으로 나타났다.
- (6) 암반평가자료와 제반 TBM 굴착작업과 관계를 분석한 결과 RMR 값과 일축압축강도 및 점하중강도로써 효율적인 TBM 굴착이 이루어질 수 있는 암질조건에 대하여 대략적으로 구명할 수 있었다.
- (7) 암반의 강도와 절리 뿐만 아니라 암반의 경도 또한 TBM 굴진에 큰 영향을 미치므로 추후 이에 대한 분석도 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구에 자료를 제공하여 주신 진로건설 주식회사 김길수 부장님과 최성찬 차장님께 깊은 감사사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 박철환, 김길수(1992.6), "암반기계 굴착공법의 적용연구", 한국암반역학회지, 제2권 제1호, pp.177~189.
2. 배규진 외(1994), "공기단축효과를 극대화 할 수 있는 지반굴착기술개발", 한국건설기술연구원, 건설기술연구연보.
3. 이문식, 박홍조(1991.6), "TBM(터널굴착) 공법 국제 심포지움", 한국산업기술원
4. 정형식, "Model Study on the Water Tightness around the Underground Oil Storage Cavern", Large Rock Caverns, Vol 1, A2.3
5. 정형식, "A Study on the Condition of Preventing Gas Leakage from the United Rock Cavern", Large Rock Caverns, Vol 1, A2.11
6. 진로건설(1992.7), "남산 1호터널(쌍굴)건설공사

보고서”.

7. 진로건설(1991.5), “주압다목적댐 도수터널 및 부대시설공사 시공보고서”
8. 최성찬(1994.6), “TBM 공법에서의 굴진율 향상 방안에 관한 연구”, 한양대학교 석사논문
9. D.B.Parkes(1988), “The Performance of Tunnel Boring Machine in Rock”, CIRIA.
10. Ian Farmer(1987), “Operational Characteristics of Full Tunnel Boring Machine”
11. Dominic F. Howarth(1987), “Mechanical Rock Excavation Assessment of Cuttability and Borability”, RETC Proceedings, Volume 1, pp.145~164
12. P, J, Tarkoy, Et. Al(1975), “Rock Hardness Index Properties and Geotechnical Parameters for Predicting Tunnel Boring”, Illinois University.
13. Werner Rutschmann(1980), “Mechanical Tunneling in Solid Rock”.

(접수일자 1994. 10. 17)