

지하철 설계시의 지보형식 적정성에 관한 연구 A Case Study for the Support Pattern Appropriateness in Rock Tunneling Designs

김 수 정 (Kim, Su Jeong)
장 태 우 (Chang, Tae Woo)

현대엔지니어링(주)
경북대 지질학과

요약/Abstract

서울지하철 8호선 설계시는 지보형식 설정을 위한 정량적 기준으로 RQD, N치 및 탄성계수의 3가지 요소들만이 사용되었다. 이러한 요소들로 얻어진 지보형식은 지질이나 불연속면의 방향성, 불연속면의 특성을 정량화하지 못하였기 때문에 지보형식의 결정 및 안정성에 문제가 있었다. 따라서 보다 많은 정량적인 요소들을 포함시키고 경제적인 지보형식을 결정하기 위해 8호선 성남구간을 선택하여 총 1745개소에서 RMR에 의한 암반분류와 374개소에서 Q-system에 의한 암반분류를 실시 하였으며, 이들에 의해 구해진 지보형식과 8호선 설계시의 표준지보형식을 비교검토하였으며, 또한 지질, 지질구조 및 지형에 따른 암반평점과의 관계를 검토하였다.

지보형식을 비교 검토한 결과 PD-4 혹은 PS-4로 설계된 표준지보형식은 4~6개의 지보형식으로 세분되어야 하며 암반평점은 단층 및 절리와 같은 지질구조가 발달된 곳과 계곡부가 대체로 암반평점이 낮고 굴착심도가 깊은 산악지역은 높으며 산록구간은 이들의 중간정도의 양상을 보인다.

The only three elements such as RQD, N-value and E_s were used as a quantitative standard for the design of support pattern determination on subway line 8th in Seoul. Because the support pattern that was obtained by these elements could not be determined on the basis of the quantitative of geology and the orientations and properties of discontinuity planes, there have been some problems in determining the economic support pattern and tunnel stability. Therefore, in an attempt to determine the stable and economic support pattern with more quantitative elements, more flexible rock mass classification with geologic conditions was performed by using RMR at 1745 sections and Q-system at 374 sections within Seongnam block on subway line 8th. Then, results by these two methods were compared with standard support pattern of the subway line 8th. Moreover, relationships between geology, geologic structures and topography to rock mass grades were studied.

According to the result of this study, it is judged that the standard support pattern designed with PD-4 or PS-4 should have been subdivided into 4~6 support patterns. Some sections where geologic structures

such as faults and joints are developed tend to have low rock mass grades. And they also have low rock mass grades near valley. On the other hand, they show intermediate grades at piedmont area and the greatest ones at high mountains.

서 언

서울지하철 3, 4호선 건설을 기점으로 국내에 활발히 보급된 NATM 공법은 현재 국내에서 지하철, 공동구, 고속전철, 도로터널, 에너지 비축기지, 수로터널, 양수발전소의 도수터널을 포함하는 다양한 터널 공사에 적용되고 있다.

이러한 NATM공법을 이용한 지하터널공사에서는 그 설계 및 시공과정에서의 안정성, 안전성, 경제성을 해석하는것이 매우 중요하다. 이러한 중요성을 해석하는데 발생하는 문제점을 해결하기 위해 (1) 암반분류에 의한 경험적 설계방법, (2) 수치해석에 의한 해석적방법, (3) 현장계측에 의한 방법, (4) 지질학적 위험성에 의한 방법, (5) 법규에 의한 추종적 방법등의 다양한 설계방법들을 조합하여 가장 적합한 설계가 이루어지며, 이들 방법중 설계시 주로 사용되는 방법은 암반분류에 의한 경험적 설계방법과 수치해석에 의한 해석적방법이다.

암반의 공학적 분류에 의한 경험적 설계방법은 암반을 암석역학적 시험 결과와 지질공학적 요소에 의하여 공학적으로 분류하고 이 분류법을 토대로 경험적인 보강방법을 제시하여 굴착 및 보강방법을 적절히 설계할수 있는 방법이다. 암반의 분류는 터널보강을 위해 초기에는 강지보(steel rib)나 라이닝 설계를 목적으로 시작되어, 록볼트(rock bolt), 샷크리트(shotcrete)등의 보강기술의 발전과 더불어 그 영역을 넓혀가고 있다. 분류방법은 Terzaghi(1946)의 암반 하중계(rock load classification system), Lauffer(1958)의 활동경간(active span)에 의한 자립시간(stand-up time), Deere(1964)의 압질지수(RQD), Wickham et al.(1972)의 암반구조 평점개념(RSR), Bieniawski(1973)의 암반평점(RMR), Barton et al.(1974)의 압질체계(Q-System), Franklin(1975)의 강도/암괴크기(strength/block size)에 의한 방법 및 ISRM(1981)의 기초 지질공학적 분류(basic geotechnical class)등이 있다.

수치해석에 의한 해석적방법은 탄소성론에 기초한 해석적인 점토방법으로 Yamagutzi(1929), Fenner(1938), Yu(1952), Kastner(1962), Egger(1973)등에의

해 터널의 거동역학에 이용되었는데 최근에는 컴퓨터의 발달로 유한요소 해석법(FEM), 유한차분법(FDM), 경계 요소법(BEM), 개별 요소법(DEM) 등을 이용한 수치 해석법이 도입됨으로서 보다 정확한 지반거동을 파악할수 있게 되었다.

그러나 국내의 지하철 설계에서는 3, 4호선 설계시 정량적인 기준으로 사용한 RQD, N치, 지반변형계수 등에 의한 경험적 분류방법과 해석적 검토 방법이 5, 8호선에 그대로 사용되다가 6호선 설계시부터는 RMR에 의한 설계방법을 이용하고 있다. 따라서 기존의 설계방법에서는 암반분류에 있어 터널의 안정성에 영향을 미치는 불연속면에 대한 요소가 고려되어 있지 않고 정량적인 자료의 부족으로 시공과정에서 안전사고나 보완 및 변경을 요하는 경우가 많았다.

본 논문은 지하철 8호선 성남구간 시공시 얻어진 각종 지질조사 자료와 1745개 단면의 RMR에 의한 암반분류 및 374 단면의 Q-System에 의한 암반분류 방법을 토대로한 지보형식을 현재 설계된 8호선의 표준 지보형식과 비교검토하여 현장 여건에 맞는 지보패턴을 제시해보고 차후 설계시 이들의 차이점을 고려한 보다 세밀한 설계가 이루어지도록 기본 자료를 제시하는데 그 목적이 있다.

지질 특성

지질

연구 지역의 지질은 경기편마암 복합체로 알려진 곳으로 대부분 선택브리야기의 편마암류로 구성되어 있다. 편마암류는 주로 호상 흑운모 편마암(banded biotite gneiss)이며, 그 외에는 이 암체에 부분적으로 협재된 석회암과 각섬암, 그리고 헬선 후기인 백악기에 이들을 관입한 산성암맥이 소량 분포한다(Fig. 1).

지질도

연구지역에 나타나는 호상 흑운모 편마암은 석영과 장석으로 구성된 명색대(Leucosome)와 흑운모 및 우흑질 광물로 구성된 암색대(Melasome)의 층상구조를 잘 보여주나 의외로 많은 부분의 명색대가 석회

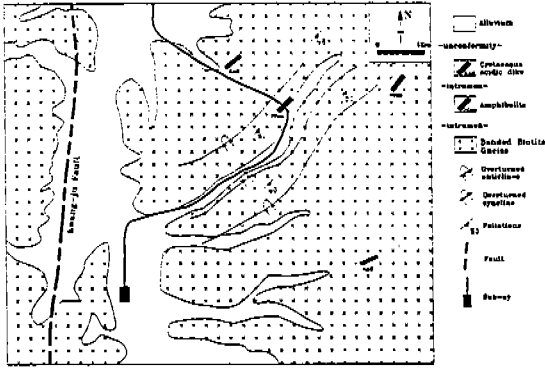


Fig.1 Geological map of the study area.

암으로 구성된 것이 연구지역에서 흔히 나타났으며, 일부 구간에서는 편마암내에 30cm 두께의 석회암층이 엽리면과 평행하게 연장성을 가지고 분포함으로써 편마암의 기원이 퇴적 기원임을 보여준다.

각섬암은 소량의 암체로서 분포방향은 주변의 편마암류와 평행하게 발달되어 주로 남동방향의 경사를 가진다. 편마암과의 접촉부에는 서로 접변하는 것이 아니라 선명하게 접촉되어 나타나며 구조운동시의 충상으로 접촉부는 심하게 파쇄되고 이 파쇄대를 따라 지하수의 유입이 매우 많은(100 l/min) 양상을 보여준다. 암색은 암녹회색 세립질이며 편리의 발달은 뚜렷하지 않으나 가끔 나타나는 것들의 배향은 주위의 편마암체와 유사한 것으로 보아 관입후에 구조운동을 겪었음을 시사한다.

후기의 백악기에 관입한 것으로 보이는 산성세택암들은 호상 혹은 편마암, 석회암, 각섬암 등을 모두 절단하고 관입했으나 암체로 나타나는 것은 드물고 절리면을 따라 관입한 것이 주를 이룬다.

지질구조

8호선 성남구간의 노선을 따라서 조사된 대표적인 지질구조로는 암체내에 매우 잘 발달된 엽리와 평균 간격 20m의 NS, NE, NW 계열의 소규모의 단층과 및 등사습곡(Isoclinal Fold) 구조를 들 수 있으며(Fig. 2) 이를 각 지질구조를 요소별로 기술하면 다음과 같다.

엽리

본 조사지역은 둔전도폭(1982) 조사시 4회의 중첩 습곡으로 인하여 4개의 엽리가 나타나는 것으로 보고된 바 있으나 터널 굴착시 나타나는 엽리는 주로 N 30-70° E/40-60° SE방향의 엽리(Fig. 2a)만이 관찰

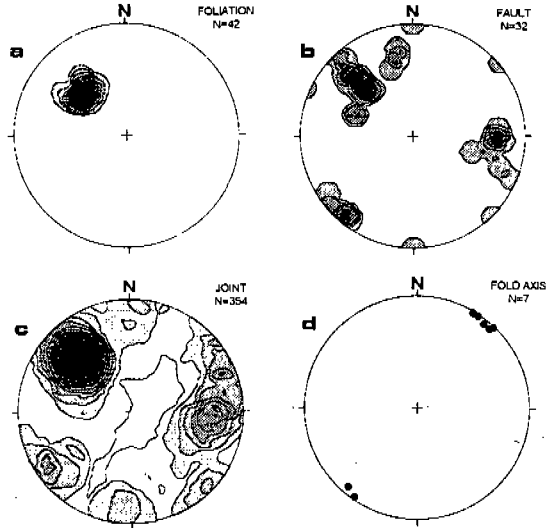


Fig.2 Stereographic projection of structural data in the study area.

a) foliation b) fault c) joint d) fold axis

되었다. 엽리의 발달이 현저한 경우 Q-system에 의한 암반 평가시 절리군의 수에서 완전한 한개의 절리군으로 포함시키나 엽리와 평행한 방향의 절리가 주절리로 발달하므로 Q-system 적용시 따로 포함시키지 않았다.

단층

Fig. 2b는 지하철 성남구간에 발달하는 소규모의 단층구조를 도시한 것으로 단층의 방향성은 전체적으로 볼때 NS/80-90° W, N30-60° E/40-90° SE 및 N30-60° W/50-90° NE의 세 방향이 우세하게 발달되어 있으며 산출빈도로 볼때 N30-60° E방향이 가장 우세하다. 연구지역내에 발달하는 단층들은 크게 정역 단층들과 주향이동단층으로 구분되며 이들중 정단층은 N50-80° W 방향이 우세하게 발달하며 주향이동단층은 NS, N30-60° E방향이 우세하며 단층조선의 각도는 2~27° 정도이며 고각일 경우 역우수향(Reverse Dextral)을 보여주는 경우가 대부분이다.

연구지역내의 대규모 주향이동 단층은 좌수향의 주향이동 단층으로 경기도 광주 부근에서 시작되어 서울북단부까지 연장되는 광주단층(이 병주외, 1982)이다.

연구 지역내의 소규모 단층들중 엽리와 이평행(Sub-Parallel)한 주향을 갖는 주향 단층은 구조운동시 엽리면을 절단하면서 형성된 단층들로 보이며,

NS방향의 단층과 공액단층(Conjugate fault)으로 보인다. 정단층들은 구조운동시 생성된 T-fracture들과 주향이동단층들이 지각의 용기와 함께 변위를 일으킨 것으로 판단된다.

현장에서 관찰한 단층들의 절단(Cross-cut)관계로 볼때 주향이동성의 대단층이 형성되면서 2차 단층으로 현장내의 소규모 단층들을 형성하였고 그후 정단층이 형성된 것으로 판단된다. 터널굴착시 소규모의 주향이동단층의 경우는 지하수 유입이 거의 없었으나 정단층 및 이와 같은 방향성의 절리가 집중된 곳에서는 지하수 유입이 심하였다. 이상의 단층들에서 정단층인 경우는 대체로 터널축과 직교하나 지하수 유입이 심하였고 주향이동단층인 경우는 터널축과 거의 평행하여 터널시공에 매우 불리한 방향성을 보임으로서 천정부 붕괴의 위험성을 내포하였다(Deere and Miller, 1966).

절리

연구지역내에 발달하는 절리는 크게 3개의 방향이 우세하다(Fig. 2). 첫째는 엽리와 평행한 방향의 절리로서 N 30-70°E의 주향에 40-90°SE방향으로 경사하며 둘째는 NS~N40E의 주향에 70-90°W~NW의 경사, 나머지 하나는 N 30~60°W의 주향에 70-90°NE 방향의 경사를 가지는 절리이다.

절리의 방향성 및 발달상태는 터널의 굴착난이도와 지반의 안정성을 좌우하는 주요한 불연속적인 요소로서 터널의 방향과 관련된 이들의 방향성은 터널 설계에서 매우 중요하게 고려되어야 한다. 이러한 관점에서 볼때 8-7~8-10 공구구간의 터널축이 N30°E 방향이므로 엽리와 평행한 방향의 절리는 터널축과 거의 평행하므로 매우 불리한 방향이고, 나머지 두개방향의 절리는 터널시공에 유리한 조건으로 판단된다. 그러나 시공중 나타난 각 절리조의 특성으로 볼때 가장 불리한 방향으로 고려되는 터널축과 평행한 절리는 대체로 닫힌절리(Closed Joint)이고 나머지 두방향의 절리는 열린절리(Open Joint)로서 지하수의 유입이 있으므로 절리의 방향성만으로 터널시공의 유·불리를 판단하는것은 꼭 합리적이라고 할수만은 없다.

습곡

연구지역내에 발달하는 대표적인 습곡구조는 단대천을 중심으로 하는 향사습곡과 단대천 양쪽의 영장산 및 무명의 연봉들을 잇는 배사습곡이 발달하고 있다. 이들 습곡구조들은 엽리를 잘 발달시키며 축의 선경사(plunge)가 10°(Fig. 2d)내외인 아수평 등사습

곡이다.

습곡구조가 터널굴착에 미치는 영향을 고려해 볼때(Desio, 1971), 배사 향사가 발달하므로 배사부에서는 천단부 및 측벽부에 쉼기형 암반붕락, 향사부에서의 지하수 유입을 예상 할수 있으나, 퇴적층리의 발달이 없고 엽리가 치밀하게 발달되어 있으므로 응력의 집중현상등 터널 굴착에 불안정한 요인으로 작용할 가능성은 크나 습곡으로 인한 지하수 용출은 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

8호선 표준 설계방법과 RMR, Q에 의한 암반분류방법

8호선 표준 설계방법

8호선의 표준설계방법은 지하철 3, 4호선 NATM터널 구간에 적용한 기존의 지반분류와 같이 크게 풍화토, 풍화암, 연암, 경암의 4가지로 구분하였다. 이들은 대부분 정성적 분류기준에 의존하고 있으며 정량적인 기준으로는 RQD, N치 및 지반변형계수 3가지가 있다. 따라서 RQD 획득이 불가능한 풍화토 및 풍화암에서는 N치와 지반변형계수만이 정량적인 기준이 된다. 8호선에 사용된 지반분류와 분류된 지반의 특성, 지보형식은 Table 1 과 같다.

RMR에 의한 암반분류

RMR은 Bieniawski(1974)가 제안한 암반분류체계로서 암반을 평가하는 6가지의 요소 즉, ① 신선한 암반에서의 일축압축강도, ② RQD, ③ 불연속면의 간격, ④ 불연속면의 상태, ⑤ 지하수 상태, ⑥ 불연속면의 방향 등의 분류기준을 두고 있는데 이들 요소들은 실험실과 현장에서 그 값을 얻을 수 있다. 암반을 전체적으로 분류할 때에는 이들 요소들이 동등한 중요성을 갖는 것이 아니므로 각 요소별로 중요도에 따라 다른 평점이 주어진다. 평점방법은 ①~⑤까지의 평점을 합산한후 ⑥을 감하는 방법이다.

이 방법으로 구해진 RMR 평점이 100-81점 일때를 I등급 혹은 very good rock 이라하며, 80-61점 일때를 II등급 혹은 good rock 이라하며, 60-41점 일때를 III등급 혹은 fair rock 이라하며, 40-21점 일때를 IV등급 혹은 poor rock이라하며 20-0점 일때를 V등급 혹은 very poor rock 이라한다.

위에서 구한 RMR값을 토대로한 현장암반하중은 다음의 공식에 의해 산출되며(Unal, 1983)

Table 1. Rock classification criteria for design of the subway line 8th.

분 류	정성적 분류	RQD(%)	변형계수 (kg/cm ²)	지보패턴
경암 2	극히 신선하거나 신선하여 망치타격에 맑은 소리가 나며 강한 타격에 깨어진다. 절리는 잘 밀착되어 있거나 일부 열려 있음.	50이상	20,000이상	PD-5, PS-5
경암 1		3-50		PD-4, PS-4
연 암	절리면을 따라 풍화가 진행중이거나 조암광물의 일부가 풍화되어서 망치타격에 다소 둔한 소리가 나지만 암석은 견고한 편임. 절리는 가끔 점토등으로 채워져 있음. 절리가 많이 발달되어 있으며 절리가 다소 적고 간격이 넓더라도 암석강도가 낮으면 이분류에 속함 또 암석이 아주 강하더라도 절리가 많으면 역시 이분류에 속함. 강한 망치 타격에 쉽게 부서어짐.	30 이하	20,000~10,000	PD-4, PS-4
풍화암	절리가 아주 많거나 조암광물이 상당히 풍화되어 암석 자체가 일반적으로 변색됨. 망치 타격에 쉽게 부서어지며 절리는 보통 점토등으로 채워져 있음. 일반적으로 시추시 코어를 형성하지 못하고 작은 암편등만이 회수되므로 N치가 100회 이상일 때 풍화암으로 함	-	10,00~2,000	PD-3, PS3
풍화토	조암광물의 대부분이 풍화되어 암석의 결합력은 상실되었음. 망치로 쉽게 긁힘. N치 100회 이하를 이분류에 포함시킴.	-	2,000이하	PD-2, PS-2

$$P = \frac{100 - RMR}{100} \gamma t = \gamma ht \quad (3.1)$$

$$ht = \frac{100 - RMR}{100} B$$

P : 지보공의 암반하중, ht : 암반하중의 높이,

B : 터널의폭, γ : 암석의 밀도

또한 RMR을 기초로한 현장변형계수(Em)는 Serafim and Pereira (1983)의 공식

$$Em = 2RMR - 100, \text{ for } RMR > 50 \quad (3.2)$$

$$Em = 10 \frac{RMR - 10}{40} \text{ for } RMR < 50$$

Em : 현장변형계수(GPa)

으로 구할수 있다.

RMR 분류체계는 터널 목적 이외에 사면 및 기초 지반의 안정성 평가에도 적용되는데 터널 입출구 부근의 사면 설계 및 교량, 댐 등의 기초지반의 변형률 추정에 효과적으로 적용할수 있다.

Q-System에 의한 암반분류

Q-System에 의한 암반분류는 Barton et al.(1974)에 의하여 개발된 암반분류 방법으로 주어진 암반상태에서 굴착상태와 크기에 적합한 지지형태와 규모를 구하기 위하여 스칸디나비아 지역에서 시행된 200여개의 터널 실적 사례에 대한 분석 결과를 3만 가지가 넘는 지질학적 조건상태를 6가지의 매개변수를 사용, 정량적으로 분류하였다. Q-System에서는 RQD, 절리군의 수, 가장 불리한 방향의 절리의 조도, 가장 취약한 절리군의 변질상태 및 충전물질, 지하수의 유입량, 용력상태 등 6개의 항목을 이용, 암반의 질이 정량적으로 평가된다. 이상 6가지 항목은 각각 2가지 항목을 조합한 3가지 지수로 구분되는데 다음 산출식에 의하여 암반의 전반적인 질을 나타내는 Q 값이 제시된다.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (3.3)$$

여기서 Jn : 절리군의 수, Jr : 절리면의 조도계수,

Ja : 절리면의 변질도, Jw : 지하수에 의한 감소계수, SRF : 응력감소 계수

즉 Q-System은 암괴의 크기(RQD/Jn), 암괴 사이의 전단강도(Jr/Ja), 주동응력(Jw/SRF) 등으로 구성 되어 있음을 알수있으며 이 식에 의해 얻어진 평점이 0.001-0.01점 일때를 exceptionally poor rock이라 하며, 0.01-0.1점 까지를 extremely poor rock, 0.1-1 점 까지를 very poor rock, 1-4점 까지를 poor rock, 4-10점 까지를 fair rock, 10-40점 까지를 good rock, 40-100점 까지를 very good rock, 100-400점 까지를 extremely good rock, 400-1000점 까지를 exceptionally good rock이라한다.

위에서 얻어진 Q 값은 굴착에 따른 등가치수로 정의되는 터널지보공의 설치조건과 관련이 있다. 여기서 굴착의 등가치수는 터널규격과 굴착의 목적에 대하여 함수관계를 가지며 이는 터널의 경간, 직경 또는 높이를 지보공 지수인 ESR 값으로 나눔으로 써 산출된다.

$$\text{등가치수 } De = \frac{\text{굴착경간, 직경 또는 높이}(m)}{\text{ESR}} \quad (3.4)$$

여기서 ESR은 지하굴착의 목적과 이에 따른 안전율에 의하여 정해진다(Table 2).

Table 2. Selection of ESR based on excavation category.

Type of excavation	ESR
Temporary mine openings, etc.	3-5
Vertical shaft :	
i) Circular section	2.5
ii) Rectangular/square section	2.0
Permanent mine openings, water tunnel	1.6
Storage rooms, water treatment plants, minor road and railway tunnels, access tunnels etc.	
Power stations, major road and railway tunnel etc.	1.0
Underground nuclear power station, factories etc.	0.8

Q 값과 굴착에 의한 지보공의 설치여부는 그림 Fig.3에 의하여 결정되며, 이에 따른 영구 지보체계의 결정은 Barton et al(1974)이 제시한 Q 값에 따른 38

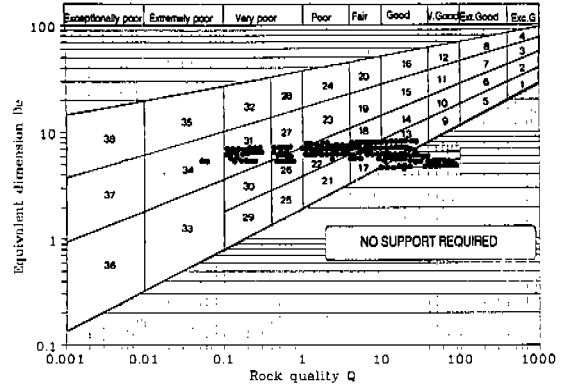


Fig.3 Support pattern determination with plots of equivalent dimension(De) against the rock quality index Q. Numbers in squares refer to that of support pattern.

가지의 지보공 설치유형을 토대로 이루어 진다.

지보공의 설치없이 굴착 가능한 최대 굴착경간은 다음 관계식에 의해 구해진다.

$$\text{최대 굴착경간} = 2(\text{ESR})Q^{2.5} \quad (3.5)$$

이들 관계식으로부터 특정의 굴착경간 유지를 위해 필요로하는 최소 Q값은 다음식과 같이 역으로 구해질 수 있다.

$$Q = (\text{최대굴착경간}/2\text{ESR})^{0.4} \quad (3.6)$$

굴착심도별 평균응력은 다음식에 의해 구해질수 있다(Meglis et al, 1991).

$$\sigma_m = 5.9\text{MPa} + (0.037\text{MPa}/m)Z(m) \quad (3.8)$$

σ_m : 평균응력 Z : 심도(m)

암반분류에 대한 결과

RMR에 의한 암반분류 결과

지하철 8호선 성남구간(약 7km)에 대해 조사한 총 1745개의 RMR 분류결과는 Table 3과 같다. 암반분류 결과 I 등급이 8.3%, II 등급이 35.1%, III 등급이 37.3%, IV 등급이 19.3%로서 V 등급을 제외하고는 모든 등급의 평점들이 대체로 고르게 나타난다. 이들을 각 공구별로 살펴보면 I 등급은 8-6, 7 공구에서만 나타나며, II 등급은 8-7공구에서 가장 우세하며, III 등급은 8-6, 9 공구가, IV 등급은 8-8, 10 공구가 가장 우세하게 나타나는 것으로 보여준다. 또한 8-6, 7공

지하철 설계시의 지보형식 적정성에 관한 연구

Table 3. Rock classification by RMR in the study area.

공 구	자 료 수 (%)	RMR 등 급					현지보형식
		I	II	III	IV	V	
8-6	666 (38.3)	104	349	154	59		PD-4 PS-4
8-7	374 (21.3)	41	186	114	33		PD-4 PS-4
8-8	298 (17.1)		8	56	232	2	PD-4
8-9	272 (15.7)		68	176	30		PD-4
8-10	133 (7.6)		3	30	100		PD-4
계	1745	145 (8.3)	614 (35.2)	530 (30.5)	454 (26.0)	2 (0)	

구에서는 I-IV 등급이 모두 나타나 I-III등급이 우세하며 8-8, 9, 10 공구에서는 II-IV 등급이 나타나나 III-IV등급이 우세하다. 이러한 양상은 지형 및 굴착심도와 밀접한 관계를 보여주는데 8-6공구와 7공구의 일부 구간에 분포하고 굴착심도가 50m 이상인 영장산 하부를 통과하는 구간에서는 주로 I-II등급 우세하며 영장산과 단대천 사이의 산 북부에는 II-III등급이 우세하며 단대천 옆 혹은 하

부를 통과하는 8-8, 9, 10 공구에서는 III-IV 등급이 우세하다.

Q-System에 의한 암반분류 결과

Q-System에 의한 암반분류는 영장산하부, 산록구간, 단대천 측부등 모든 지형적 조건을 고려해볼수 있는 8-7공구에서만 총 374 개의 단면에서 실시되었으며 분류 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Rock classification by Q-system in the study area.

터널 형식	자료수 (%)	폭 혹은 높이 De	Extremely poor	Very poor	Poor	Fair	Good	Very good
단선병렬 직 선	54 (14.4)	6.8 5.2					10	44
단선병렬 R 250	69 (18.5)	6.96 5.4	2	8	5	11	21	22
2ARCH	39 (10.4)	8.0 6.2		2	7	9	21	
복선터널 R 250	26 (7.0)	10.5 8.0			2	10	14	
복선터널 직 선	186 (49.7)	9.6 7.4		18	120	41	7	
계	374 (100)		2 (0.5)	28 (7.5)	134 (35.9)	71 (19.0)	73 (19.5)	66 (17.6)

Table 4에서 보는 바와 같이 영장산 하부를 통과하는 단선병렬 직선 구간에서는 good rock과 very good rock이 우세하며 영장산과 단대천변을 잇는 단선병렬 곡선구간 및 2-ARCH 구간에서는 very good rock에서 very poor rock 까지 지질구조에 따라 다양하게 나타나며 특히 이구간에 분포하는 각설암과의 경계부의 단층대에서는 extremely poor rock이 나타난다. 복선구간에서는 곡선구간은 poor rock에서 good rock까지의 분포범위를 보이나 직선구간에서는 very poor rock에서 good rock까지의 분포를 보이며 그중 poor rock이 가장 우세하게 나타난다.

Fig. 3은 Q값과 등가치수에 의한 지보형식을 결정하는 그림으로 사각형내의 숫자는 이들에 의한 지보형식이며 전체적으로 Q값의 범위는 0.0625에서 90까지 넓은 범위를 보여주며 이에 해당하는 지보형식은 무지보, 지보형식 13, 17, 18, 21, 23, 26, 27, 31, 34임을 보여준다.

지형 및 지질과 암반분류 평점과의 관계

지형 및 지질과 암반분류 결과를 비교하기 위해 8-7 공구를 선정하여 그림으로 나타내었다(Fig. 4). Fig. 4에서 보는바와 같이 암반분류의 평점은 지형 지질분포 지질구조에 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

영장산을 통과하는 14K400-14K680까지는 터널굴착심도가 50-80m로 매우 깊으며 단층의 발달이 거의 없어(Fig. 4a) RMR에 의한 암반평점(Fig. 4b)은 62-90까지로 very good rock에서 good rock까지의 범위를 보여주며 Q에 의한 암반평점(Fig. 4c)은 10-90점으로 very good rock에서 good rock까지의 범위를 보여준다.

영장산과 단대천 사이의 산록구간인 14K 680-15K 043까지는 굴착심도가 10-25m 정도이며(Fig. 4a) 단층의 유무에 따라 암반의 평점이 급변하는 양상을 보여준다(Fig. 4b, c). 단층이 없는 신선한 암반에서는 RMR값이 60-90점 까지로 very good rock에서 good rock까지의 범위를 보여주나 단층대 통과 구간은 20-40점까지의 poor rock을 보여준다. Q에 의한 암반평가에서는 비단층대 구간에서는 8-87점까지로 very good rock에서 fair rock까지의 평점들을 보여주나 단층대에서는 0.0625에서 3까지로 extremely poor rock에서 poor rock까지의 범위를 보여준다.

단대천 측부를 통과하는 15K 065-15K 700까지는

굴착심도가 10-12m 정도로 하류로 갈수록 연암선의 심도가 깊어지는 양상을 보여주며(Fig. 4a) 암반분류 평점은 RMR에 의한 분류에서는(Fig. 4b) 30-70점으로 poor rock에서 good rock까지의 범위를 보여주며 Q에 의한 암반분류는 0.2-30점까지로 very poor rock에서 good rock까지 단층의 유무에 따라 다양한 범위를 보여준다.

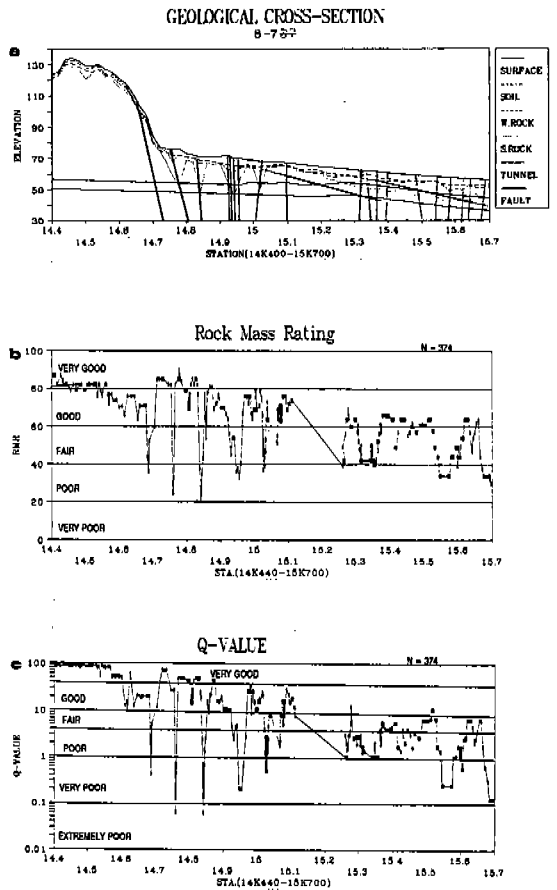


Fig.4 Comparison of the topography and geological structure(a) with rock mass classification(b and c).

고찰

8호선 성남 구간의 대한 암반의 공학적 분류를 수행한 결과 RMR 값은 20-90점까지의 범위를 보여주며, Q값은 8-7공구에서 0.0625-90 점까지 넓은

분포범위를 보여준다. RMR에 의한 지보형식을 고려해보면 I 등급에서 IV 등급의 지보형식이 필요하며 그중 어느 형식도 무시할 수 없다. Q-System에 의한 지보형식은 무지보, 13, 17, 18, 21, 22, 23, 26, 27, 31, 34번 까지의 다양한 지보형식이 필요한 것으로 보여주며(Fig. 4), 그중 34의 지보형식이 필요한 구간은 극히 일부 구간이나, 다른 지보 형식들은 대체로 고르게 분포한다. 암반분류에 의한 지보형식과 설계시 적용한 지보형식을 비교하면 Table 5, 6, 7과 같다.

Table. 5는 8호선 설계시의 표준지보형식으로 PD

-4는 8-7~10의 복선터널 전구간에 적용되는 지보형식이며 PS-4는 8-6,7 공구의 단선병렬터널 전구간에 적용되는 지보형식이다. 터널의 크기에 따라 각각 하나씩 제시한 표준지보형식들은 암질의 변화가 작을 경우에 매우 적합하며 또한 장시간에 걸쳐 일률적인 작업이 가능하므로 굴착공들의 기능습득이 쉬운 장점은 있으나 제시된 지보형식보다 암질이 양호할 경우 불필요한 지보가 계속 투입되며 암질이 보다 불량할 경우는 별도의 보강공법이 병행되어야 하는 단점이 있다.

Table 5. Standard support patterns for design of the subway line 8th.

Suppot patternm	Excavation	Support		
		Rock bolt(ϕ)	Shotcrete	Steel rib
PS-4	Bench cut or full face 1.2 m advance.	Systematic bolt in crown with wire mesh. L=3 m,s=1.2m.	100mm in crown and sides.	H-100 spaced 1.2m.
PD-4	Bench cut 1.0 m advance.	Systematic bolt in arch with wire mesh. L=3 m, S=1.2m	150mm in crown and sides.	H-100 spaced 1.0 m

Table 6은 RMR에 의한 암반평가에서 얻어진 지보형식으로 4가지의 지보형식이 결정되었다. I 등급인 very good rock은 경우에 따라 spot bolting만이 필요하며 II 등급인 good rock에서는 천단부에서 와이어 메쉬와 함께 부분적으로 길이 3m, 간격 2m의 록볼트와 크라운부에 50mm의 쇼크리트가 필요하며, III 등급인 fair rock에서는 와이어 메쉬와 함께 길이 4m, 간격 1.5~2m의 체계적볼트(systematic bolt)와 천단부에서 50-100mm, 측벽부에 30mm의 쇼크리트가 필요하며, IV 등급인 poor rock에서는 와이어메쉬와 함께 길이 4m,간격 1-1.5m의 체계적볼트와 천단부에서 100-150mm, 측벽부에서 100mm의 쇼크리트가 필요한 것으로 나타났다. RMR에 의한 지보형식은 터널기술자에 의해 쉽게 지보형식을 결정할 수 있으므로 터널의 크기가 10m 이내이고 25MPa이하의 응력이 작용하는 곳에서 적합한 지보형식이다.

Table 7은 Q-system에 의한 암반평가에서 얻어진 지보형식으로 무지보 포함 총 39개의 지보형식중 Fig.3

에 의해 11개의 지보형식이 얻어졌다.Q-system에 의한 지보형식 결정은 다양한 지질상태를 정확하게 파악할수 있고 무지보제의 총 38개의 지보형식으로 구성되어 지반상태에 가장 적합한 지보형식을 얻을수 있고 20m 이상의 대규모터널에서 부터 소규모터널에 까지 터널의 크기 및 형상에 관계없이 적용할수 있고 지질구조의 발달이 심할경우 적용성이 높은 장점이 있으나 전문지질기술자 이외에는 적용이 어렵고 지보형식이 너무 세분되어 짧은 구간의 터널에 적용하기에는 적합하지 않다.

Table 5, 6, 7을 비교해 보면 표준지보형식은 RMR에 의한 암반평가지 IV 등급의 지보형식과 유사하며 Q-system에 의한 암반평가지 지보형식 23, 27과 유사하게 설계되어 전구간의 암반상태와 비교해보면 너무 안전측으로 설계 되었음을 알수있다. 따라서 8호선 성남구간의 표준지보형식은 RMR에 의한 암반평가지 4개의 지보형식이 제시되어져야 했고, Q-system에 의한 지보형식은 Fig. 3에서볼때 안전측을

Table 6. Geomechanics classification guide for excavation(after Bieniawski, 1976)

Shape : horseshoe : width : 10m : Vertical stress : <25Mpa :				
Construction : drilling and blasting				
Rock mass class	Excavation	Support		
		Rockbolts (φ 20 mm)	Shotcrete	Steel-rib
1. Very good rock R.M.R. : 81-100	Full face : 3m advance	Generally no support required except for occasional spot bolting		
2. Good rock R.M.R. : 61-80	Full face 1.0-0.5 advance Complete support 20m from face	Locally bolt in crown with wiremesh : L=3m, S=2.5m	50mm in crown where required	None
3. Fair rock R.M.R. : 41-60	Top heading and bench 1.5-3m advance in top heading. complete support 10m from face	Systematic bolt with wiremesh : L=4m, S=1.5-2m	50 - 100mm in crown and 30mm in side	None
4. Poor rock R.M.R. : 21-40	Top heading and bench 1-1.5m advance in top heading. Install support with excavation	Systematic bolt with wiremesh : L=4-5m, S=1-1.5m	100 - 150mm in crown 100mm in sides	Light ribs spaced 1.5m where require

기준으로 무지보 포함 지보 형식 13, 18, 23, 27, 31의 6개 정도가 제시되었어야 보다 압반에 적합하고 경제적인 지보가 이루어졌을 것으로 판단된다.

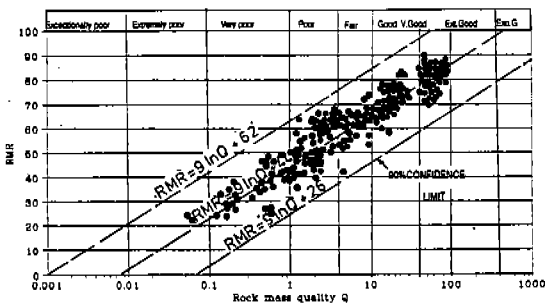


Fig.5 Correlation between RMR and Q-System in 8-7 site. Dashed lines represent the confidence limit(after Bieniawski 1976).

터널굴착시 실시한 RMR 과 Q-system의 신뢰도를 분석하기 위해 Bieniawski(1976)가 제안한 상관관계식을 사용하여 Fig. 5에 나타내었다. 그림의 중앙에 있는 $RMR = 9 \ln Q + 44$ 는 기준선이며 좌우의 $RMR =$

$9 \ln + 62$ 와 $RMR = 9 \ln Q + 26$ 는 신뢰도 90% 선이다. 본 조사지역에서 실시한 암반분류는 기준선 근처에 밀집하여 점시되며 90% 근처로 갈수록 점들의 밀도가 낮아지며 90% 이하에 점시되는 것이 하나도 없어 신뢰도가 매우 높음을 보여준다.

RMR 값을 토대로한 암반하중은 Unal(1983)의 공식에 대입하면 터널폭이 10m 정도인 복선터널의 경우 RMR평균이 90일때 $2.7kg/cm^2$ 에서 20일때 $21.6kg/cm^2$ 으로 10 감소함에 따라 $2.7kg/cm^2$ 이 증가함을 보여주며, 단선일 경우 90일때 $1.836kg/cm^2$ 에서 20일때 $14.688kg/cm^2$ 로 10점씩 증가함에 따라 $1.836kg/cm^2$ 씩 증가하는 양상을 보인다. 또한 굴착심도에 따른 평균 응력은 Meglis et al.(1991)의 공식에 대입하면 10m의 경우 6.27MPa에서 60m의 경우 8.12MPa로 지하철 설계시 슛크리트의 허용-응력 $84kg/cm^2$ 와 유사해진다. 따라서 Q 값에 의한 SRF적용시 굴착심도 60m 이상에서는 중간정도의 응력을 적용시켜야 하며 슛크리트의 극한응력인 $210kg/cm^2$ 이상인 심도 400m 이상에서는 락볼트, 강지보 와이어 베투가 보강재로 설치 되더라도 터널의 안전성을 감안 슛크리트의 강도를 고강도로 허거나 파이버크리트(Fibrecrete)가 타설되어야 할것으로 사료된다.

지하철 설계시의 지보형식 적정성에 관한 연구

Table 7. Support patterns by tunneling quality index Q(after Barton et al., 1974).

Support category	Q	Conditional factors			Type of support by Q-System	Type of support by modified Q
		RQD/Jn	Jr/Ja	Span/ESR		
13	40-10	≥10	≥1.5		Sb(utg)	Sb 5m -Sb 3m
		≥10	<1.5		B(utg)1.5-2m	
		<10	≥1.5		B(utg)1.5-2m	
		<10	<1.5		B(utg)1.5-2m+S 2-3cm	
17	10- 4	>30			Sb(utg)	B 3m -B 1.5m+S(1)
		10-30			B(utg)1-1.5m	
		<10		≥6	B(utg)1.5+S 2-3cm	
		<10		<6	S 2-3cm	
18	10- 4	>5		≥10	B(tg)1-1.5m+S 1cm	B 3m+S(1) -B 1.5m+S(1)
		>5		<10	B(utg)1-1.5m+S 1cm	
		≤5		≥10	B(tg)1.5-2m+S 2-3cm	
		≤5		<10	B(utg)1.5-2m+S 2-3cm	
21	4-1	≥12.5	≤0.75		B(utg)1m+S2-3cm	B 2.5m+S(1) -B 1.5m+S(2)
		<12.5	≤0.75		S 2.5-7.5m	
			>0.75		B(utg)1m	
22	4-1	>10	>1.0		B(utg)1m+S 5cm	B 2.5m+S(1) -B 1.5m+S(2)
		≤10	>1.0		S 2.5-5cm	
		<30	≤1.0		B(utg)1m+S(mr)2.5-5cm	
		≥30			B(utg)1m	
23	4-1			≥15	B(tg)1-1.5m+S(mr)10-15cm	B 2.5m+S(1) -B 1.5m+S(2)
				<15	B(utg)1-1.5m+S(mr)5-10cm	
26	1-0.4				B(tg)1m+S(mr)5-7.5cm	B 2m+S(2) -B 1.5m+S(3)
					B(utg)1m+S2.5-5cm	
27	1-0.4			≥12	B(tg)1m+S(mr)7.5-10cm	B 2m+S(2) -B 1.2m+S(3)
				<12	B(utg)1m+S(mr)5-7.5cm	
				>12	B(tg)1m+CCA20-40cm	
				<12	B(tg)1m+S(mr)10-20cm	
31	0.4-0.1	>4			B(tg)1m+S(mr)5-12.5.	B 1.7m+S(3) -B 1.2m+S(4)
		1.5-4			S(mr)7.5-25cm	
		<1.5			CCA20-40+B(tg)1m	
34	0.1-0.01	≥2	≥0.25		B(tg)1m+S(mr)5-7.5	B 1.5m+S(4) -B 1.2m+S(4)
		<2	≥0.25		S(mr)7.5-15cm	
			<0.25		S(mr)15-25cm	
					CCA(sr)40-60cm+B(tg)1m	

Key to support table

Sb : spot bolting B : systematic bolting (tg) : tensioned grouted (utg) : untensioned grouted
 S : shotcrete (mr) : wiremesh reinforced CCA : cast concrete arch (sr) : steel reinforced
 (1) : 1 layer (2) : 2 layer clm : chain ling mesh Bolt spacing : m shotcrete or CCA thickness : cm

Serafim and Pereira(1983)이 제안한 공식을 사용해 보면 RMR에 의한 현장변형계수는 20일때 1.778GPa에서 90일때 80GPa까지를 보여주며 평균 9GPa정도를 보여준다.

Q에 의한 최대굴착경간은 즉시지보에서 200,000m까지 다양한 값을 보여주나 평균은 10m 내외이며, 굴착경간 유지를 위한 최소 Q값은 단선일 경우 1.5, 복선일 경우 1.7이다.

결 론

지하철 8호선 일부구간의 터널설계에 대한 지질공학적 평가 및 고찰결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지질구조와 관련하여 불연속면의 발달이 심할수록 암반평가 점수가 낮아지며 특히 터널축과 평행하게 발달한 단층과 N30° -N60° E 방향의 단층 및 절리는 터널굴착에 있어 매우 위협한 요소로 작용하였으나 본구간에서는 습곡으로 인한 위험요소는 상대적으로 작았다.

2. 굴착심도가 깊어질수록 암반평가점수는 높아지는 양상을 보이며 절리 및 단층의 발달도 적었다.

3. RMR과 Q-system에 의한 암반분류 결과는 단층 및 절리와 같은 지질구조가 심하게 발달한 구간은 평점이 낮고 굴착심도가 얇은 단대천변이 대체로 낮으며 굴착심도가 깊은 영장산 하부는 높으며 이들 사이의 산록구간은 중간정도의 양상을 보인다.

4. RMR과 Q-system에 의한 암반분류 결과로 볼 때 PD-4 혹은 PS-4로 일괄적으로 설계된 본구간은 지질조건으로 볼때 4-6개의 지보방법이 제시되어야 경제성 및 안정성에 적합했던 것으로 판단된다.

5. RMR 값을 토대로한 암반하중은 2.7kg/cm²에서 21.6kg/cm²까지이며 심도별 평균 응력은 6.27-8.86GPa까지를 보여준다. 따라서 설계시 1차 라이닝의 허용응력이 84kg/cm² 이므로 60m 이상일때는 Q-System에서 SRF적용시 중간응력에 적용하여야 하며 400m 이상의 심도에서는 원지반 자체의 평균응력이 쇼크리프트의 극한응력을 초과하므로 이에 적합한 새로운 지보형식이 제시 되어져야 할것이다.

참 고 문 헌

김승열, 1993, "서울 지하철 터널의 설계 및 시공현황과 평가" 지하공간 건설기술에 관한 서울 심포지

움 논문집 pp.51-75, 1993

김남중, 1992, "지질공학적 분석기술의 터널설계 적용에 관한 연구" 서울대학교 대학원 이학석사 학위논문

서울시, 1991, "서울 지하철 8호선 기본 설계 보고서"

서울시, 1991, "서울 지하철 8호선 지질 조사 보고서"

홍승호, 이병주, 1982, 한국지질도(1:50,000) 둔전도폭 설명서, 한국동력자원 연구소 pp.2-10.

Barton, N., Lien, R. and Lunde, J., 1974, "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support", Rock mechanics, V.6, No.4, pp.189-236.

Barton, N., 1976, Recent experiences with the Q system of tunnel support design, Proc. Symp. on exploration for Rock Engineering, v.1, pp.107-117.

Bieniawski, Z. T., 1974, Geomechanics classification of rock masses and its application in tunnelling, Proc. 3rd Int. Cong. Rock Mech., International Society for rock mechanics, Denver, Colo., v. 9, pp.1-11.

Bieniawski, Z. T., 1973, "Engineering classification of jointed rock masses", Tran. South African Institution of Civil Engineers. V. 15, no 12, pp.335-344.

Bieniawski, Z. T., 1976, "Rock mass classification in rock engineering, Proc. Sym-posium on Exploration for Rock Engineering," ed Z.T. Bieniawski, A. A. Bal-kema Rotterdam, pp.97-106.

Deere, D. U., 1964, "Technical description of rock cores for engineering purpose" Rock Mechanics and Engineering Geology, V.1 no.1, p.17-22.

Deere, D.U. and Miller, R. P., 1966, "Engineering classification and index properties for intact rock", Air force Weapons Laboratory, New Mexico, Tekchn. Rep. No. AFNLTR, pp.65-116.

Egger, P. 1973, "Einfluss des post-Failure-Verhaltens von Fels auf den tunnelausbau unter besonderer Berücksichtigung des Ankerbaus", Habilitationsschrift, Univ. Karlsruhe.

Fenner, B. R., 1938, "Untersuchungen zur Erkenntnis des Gebirgsdrucks," Gluckauf, Nr. 32 & 33, Aug.

Kastner, H.1962, Statik des Tunnel und Stollenbaus,

- Spring-Verlag.
- Lauffer, M., 1958 "Gegirgsklassifizierung für den Stollenbau", *Gedologie und Bau-wesen*, v.24, pp.46-51.
- Meglis, I. L., Engelder, T. and Graham, E. T., 1991, The effect stress-relief on ambient microcrack porosity in core samples from the Kent Cliffs(New York) and Moodus(Connecticut) scientific research boreholes. *Tectonophysics*, v.186, pp.163-173.
- Serafim, J. L. and Pereira, J. P., 1983, Considerations of the Geomechanics classification of Bieniawski, *proc. Int. Symp. on Eng., Geol. and Underground construction LNEC. Lisbon, Portugal*, I, II, P. 33-42, 1983.
- Terzaghi, K., 1946, "Rock defects and loads on tunnel supports in rock tunneling with steel support", R. V. proctor and T. white Eds, *Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown*, pp.15-99.
- Wickham, G.E., Tiedemann, H.R. and Skinner, E.H., 1972, "support determination based on geologic predictions", *Proc. Rapid Excavation and Tunnelling conf., AIME, New York*, pp.43-64.
- Yamaguzi, S., 1929, "On the Stress Around a Horizontal Circular Hole in a Gravitating Elastic solid," *Journal of the Civil Engineering Society of Japan* V. 15.
- Yu, Y., 1952, "Gravitational stresses on Deep Tunnels", *Journal of Appl. Mech*, Dec.
-
- 김수정 :
현대엔지니어링 주식회사 토건사업본부 지반공학부
서울특별시 송파구 방이동 45
138-051
T E L : (02)410-8781
F A X : (02)410-8777
- 장태우 :
경북대학교 자연과학대학 지질학과 대구시 북구 산
격동 1370
702-701
T E L : (053)950-5361
F A X : (053)950-5362