

서울화강암의 암반 공학적 특성

Engineering Rock Properties in Seoul Granite

정 상 원(Cheong, Sang Won)

충북대학교 과학교육학부

정 상 용(Chung, Sang Yong)

부경대학교 환경지질학과

요약

서울시 북동부의 서울화강암에 대한 암반 공학적 특성 중 터널과 도로 건설시 중요하게 취급되는 절리의 방향성, 절리간격, 절리밀도, 암석의 일축압축강도, 그리고 RQD 값을 수락산과 불암산지역으로 구분하여 비교, 분석하였다. 이 중 절리의 방향성, 절리간격과 절리밀도는 선조사법, 원형조사법, 그리고 면적조사법을 이용하여 야외에서 직접 측정하였다. 암석의 일축압축강도와 RQD의 측정은 시추코어의 표본이 필요하지만 이번 연구에서는 간단히 응용할 수 있는 대비공식을 이용하여 계산하였다. 측정된 대표적인 절리의 방향성은 두 지역에서 모두 3조의 방향성이 나타났으며 즉 2조의 수직정방절리와 저각으로 경사하는 1조의 판상절리로 판명되었으며 두 지역에서 서로 유사한 방향성을 갖는다. 측정된 절리밀도는 0.039-0.066/cm이었으며, 평균절리길이는 1.30-4.52m, 그리고 평균절리간격은 10.3cm에서 최대 59.6cm로 측정된 절리의 방향에 따라 변화가 심하다. 또한 슈미트 해머 타격값에 근거한 절리면의 일축압축강도는 217 MPa에서 335 MPa로 매우 강한 암체였으며, 평균절리간격에 기초하여 계산된 이론적 RQD 값은 73.1-98.7%의 값을 갖는 것으로 나타났다.

주요어 : 화강암, 절리방향성, 절리간격, 절리밀도, RQD, 일축압축강도

서론

조사지역(Fig. 1)은 최근 서울외곽순환도로 건설공사의 일환으로 터널과 도로가 건설 중에 있다. 하지만 조사지역의 서울화강암 (대보화강암)에 대한 지질학적인 연구는 도록 제작 시 연구된 바 있으나, 이 화강암의 지질 공학적 특성에 관한 연구는 아직 미흡한 편이다 (한국도로공사, 1997; 서울고속도로(주), 2001). 기반암의 중요한 지질 공학적 특성에는 절리의 방향성(Orientation), 절리간격(Spacing), 연속성(Persistence), 절리의 표면 거칠기(Roughness), 틈새(Aperture), 충전물(Filling), 절리밀도(Density), 및 암석의 일축압축강도

(Uniaxial Compressive Strength) 등이 있으며 이들 요소들은 터널과 도로 건설시 사전에 일차적으로 측정해야 할 기본적인 요소이며 또한 암반의 강도, 지하수의 상태(지하수압과 지하수유동)와 더불어 암체의 등급을 분류하는데 중요한 요소이다 (Bieniawski, 1976; Priest and Hudson, 1981; Priest, 1993; Brady and Brown, 1993).

본 연구는 조사 지역의 기반암에 대한 여러 가지 지질공학적 특성을 지역별로 비교, 분석하여 터널의 굴착이나 도로 공사시 발생할 수 있는 안정성 문제 및 주변 환경에 끼칠 수 있는 중요한 암반의 특성을 연구하고자 하며, 암석의 물리적 성질에 영향을 끼치는 중요한 요소 중 절리의 방향성, 절리간격, 절리밀도, RQD(Rock Quality Design), 및 암석의 일축압축강

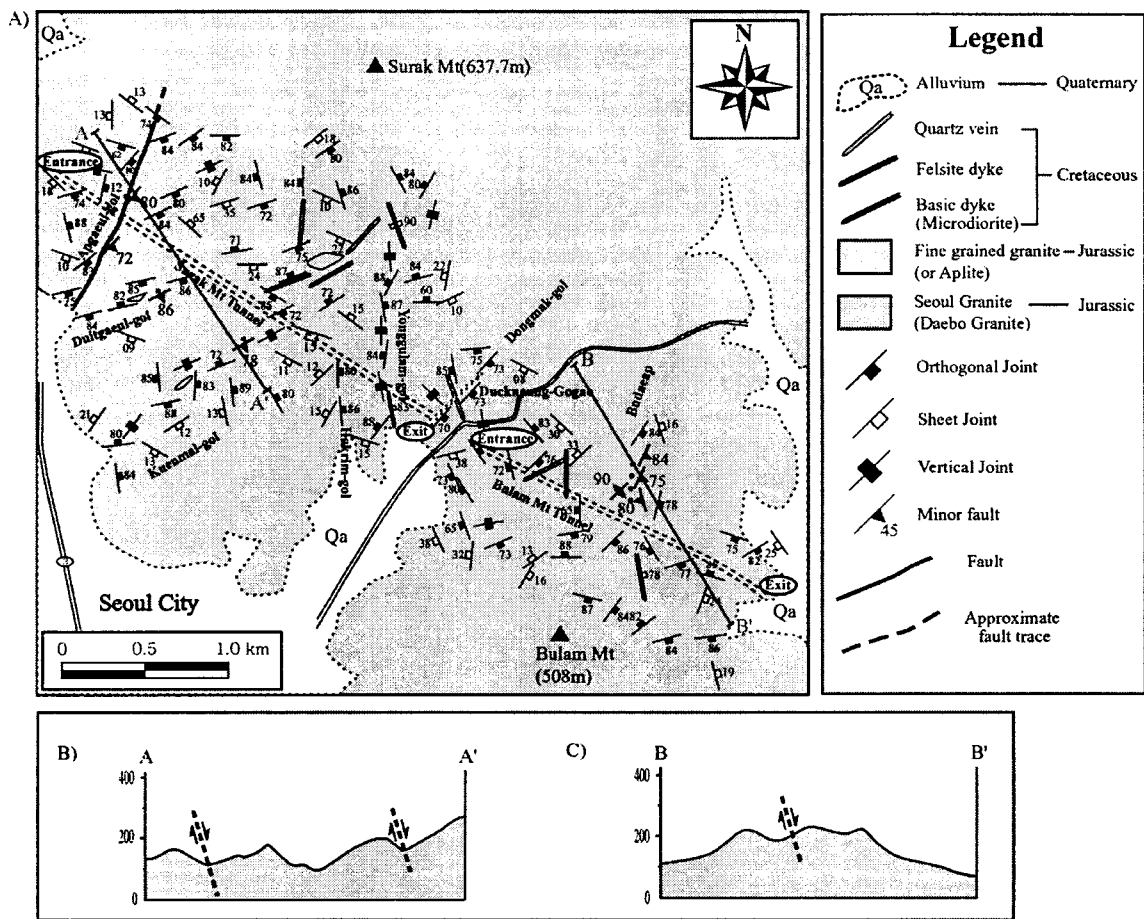


Fig. 1. Geologic map and cross sections showing locations of measuring engineering rock properties in study area. A) Geologic map, B) geologic cross section along A-A', and C) geologic cross section along B-B'.

도 등을 측정하거나 또는 계산하였다. 절리의 방향성, 절리간격 및 절리밀도 측정을 위하여 선조사법(Scanline Survey), 원형조사법(Circle-Inventory Method), 또는 면적조사법(Window Survey)을 사용하여 야외에서 직접 측정하였으며, RQD 및 암석의 일축압축강도의 측정에는 간단한 응용 공식을 이용하여 계산하였다.

위치 및 지질개요

조사 지역은 행정 구역상 서울특별시 북북동지역(노원구 상계동 지역)과 경기도 남양주시 별내면 덕송리 지역으로 서울특별시 노원구 상계동과 경기도 남양주시 덕능고개를 잇는 구조선을 중심으로 상부의 수락산지역과 하부의 불암산지역으로 구조구를 구분하였다. 수락산 지역은 서울특별시에 속하지만 불암산지역의 북서방향의 일부는 서울특별시에, 그리고 남동 지역의 일부는 경기도 남양주시에 속한다. 또한 조사지역은 경위도상으로는 동경 127° 03' 21" 에서 127° 06' 49" 와 북위 37° 39' 31" 부터 37° 41' 53" 에 해당하는 지역이다(Fig. 1).

조사 지역의 지질은 선캠브리아기의 호상편마암을 관입한 서울화강암이라고 명명된(홍승천외 2인, 1982; 한국지질도, 1995; 대한지질학회, 1999; 이병주외 6인, 1999) 중생대 유라기의 대보화강암이 대부분을 점유하고 있다(Fig. 1). 방사성 동위원소에 대한 암석의 절대 연령 측정결과 대부분 1억 6천만년에서 2억년전에 생성된 것으로(홍승천외 2인, 1982), 대부분의 구성광물은 육안상 구분할 수 있는 조립질로서 석영, 사장석, 정장석, 흑운모가 주성분 광물이며 부성분 광물로는 인회석과 적철석등 불투명 광물이 존재하나 그 양은 매우 적다. 석영과 사장석, K장석은 최대 직경 2cm의 거정질인 경우도 발견된다. 화강암은 대부분의 노두에서 대부분 3방향의 절리를 포함하고 있으며 세 방향의 절리 중 2방향은 수직 정방절리이고 나머지 1방향은 판상절리이다.

이 화강암은 호상편마암을 관입할 당시에 포획된 모암을 많이 함유하고 있으며, 이 포획암은 장경 수 cm에서 최대 100cm의 크기로 대체로 타원형을 이루며 대체로 풍화에 저항이 강해 화강암내 돌기 모양으로 돌출되어 있다. 하지만, 지역에 따라 화강암보다 풍화에 저항이 약하여 오목하게 들어간 포획암도 소수 관찰된다. 포획암은 대부분의 조사지역에서 고루 분포하는 것으로 사료된다. 세립질 화강암(또는 반화강암)은 화강암과 달리 석영, 장석, 운모의 결정이 매우 작으며(1~2mm 이내), 흑운모의 양이 현저히 적어 흰색으로 보이나 풍화작용으로 매우 옅은 붉은색을 띄기도 하며 매우 단단하다. 세립질 화강암은 조사지역에 소규모로 분포하며, 화강암과의 접촉관계 역시 점이적이다. 규장암맥과 염기성 암맥, 그리고 석영맥 등의 암맥들이 상기한 서울화강암과 세립질 화강암을 모두 관입하고 있다.

불연속면의 연구방법

불연속면의 방향성(Orientation)

조사지역에 나타나는 불연속면은 절리구조와 단층구조, 그리고 석영맥, 규장암맥과 염기성 암맥이 있으며, 스테레오 투영망과 장미도표(Rose Diagram)를 사용하여 불연속면의 방향성을 분석하였다. 이를 위해 컴퓨터 프로그램인 DIPS를 이용하였으며 스테레오 투영망에 투영한 결과 최대 집중군을 분석하여 여러 조로 구성된 절리군의 최대 집중 방향을 측정하였다. 이번 조사시 조사선의 방향을 고려하지 않은 Unweighted Analysis 방법으로 분석하였다. 불연속면의 방향성 분석은 암석의 공학적 특성 중 가장 중요한 요소 중의 하나이다.

절리간격(Joint Spacing)과 RQD

불연속면의 간격은 서로 인접한 불연속면 사이의 수직거리로서 절리군의 평균 수직 간격을 측정한다. 절리의 간격은 암반을 구성하는 암괴(Rock Block)의 크기를 결정하며 굴착난이도, 파쇄 특성 및 암체의 투수율 등 암반의 공학적 특성에 영향을 미치며, 암반의 파괴 형태를 결정한다. 절리 간격을 조사하기 위한 3가지 다른 유형의 절리 간격 측정법이 있다: 1) 총 절리 간격(Total Spacing); 2) 특정 절리군 간격(Set Spacing); 그리고 3) 수직 절리군 간격(Normal Set Spacing). 일반적으로 불연속면의 간격은 음의 지수분포를 가지는 것으로 알려져 있으며(Priest & Hudson, 1981), 이 경우 확률 밀도 함수는 평균 절리간격($= \frac{1}{\lambda}$)을 이용하여 아래의 식(1)으로 구할 수 있다.

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \text{ 평균간격} = \frac{1}{\lambda} \quad (1)$$

또한 결정된 불연속면의 간격은 불연속면의 절리간격은 RQD 측정에 사용될 수 있다(Deere and Miller, 1966; Brady and Brown, 1993; Priest, 1993, Cheong and Lee, 1998). TRQD(Theoretical RQD)값은 Priest(1993)는 여러 암석의 시추코아 시료를 이용하여 측정된 RQD값과 불연속면의 절리간격을 이용하여 계산한 이론적인 RQD(TRQD)값과는 서로 매우 유사한 대비관계가 있음을 보여주었다. 이번 조사에서는 조사선법에 의해 측정된 불연속면의 절리간격을 이용하여 이론적인 RQD(TRQD)값을 계산하였다.

불연속면의 강도(Wall Strength)

불연속면의 강도는 암석 시추코아의 일축 압축 강도로서 무결암(Intact rock)에 비해 비교적 낮은 강도를 나타내며 암반의 전단강도에 중요한 영향을 끼치는 요소이다. 불연속면은

암반내의 발달하는 풍화작용에 일차적인 영향을 받으며 또한 불연속면을 따라 열수 변질 작용이 우세하게 진행된 면으로 지질해머의 타격시험에 의한 조사나 슈미트 해머의 타격 시험 및 암반의 풍화 등급의 기재(ISRM, 1981)등의 방법을 이용하여 암석의 강도를 판단한다.

Deere and Miller(1966)와 Aufmuth(1994)에 의하면 암석의 일축 압축강도는 슈미트 해머의 타격 값(Schmidt hammer rebound value)과 매우 유사한 대비관계가 있음을 보여주었다. 따라서 불연속면의 일축압축강도는 이번 야외 조사시 슈미트 해머의 타격 시험에 의한 타격 값을 이용하였으며, 이는 암석의 일축압축강도를 구하기가 매우 쉽고, 편리하며, 또한 암석의 시추코아 시료를 구하기 어려울 때 많이 이용하며, 막대한 비용절감의 효과가 있다.

불연속면의 조사결과

절리간격과 TRQD를 구하기 위해 총 16개소의 선조사와 절리군의 밀도를 측정하기 위해 6개소의 지역을 선정하여 원형조사법을 수행하였으며 대표적인 절리의 밀도를 측정하고 그 값을 서로 비교하여 분석하였다. 또한 노두 상태가 아주 양호한 지역에서 대표적인 절리군을 포함하는 상세한 Fracture Map을 작성하여 면적조사를 수행하였다.

절리군의 방향성

대표적인 절리군의 방향성을 구하기 위해 수락산지역과 불암산지역으로 구조구를 구분하여 가장 우세한 절리군의 방향성을 구하였다. 수락산지역의 면구조 자료에 대한 분석결과 최대집중점은 경사각/경사방향(Dip/Dip direction)으로 표현할 때 각각 86/160, 87/080 그리고 12/206으로 나타났다. 즉, 두 수직 정방절리는 86°에서 87°의 고각도로 경사하고 있는 주조화절리이고, 나머지 하나의 절리는 일정한 방향성 없이 매우 낮은 각도로 경사하는 판상절리임이 밝혀졌다. 또한 불암산지역의 분석 자료에 의하면 최대집중점은 87/167, 88/257, 그리고 12/092의 면구조가 가장 우세하게 나타났다. 이 지역에서의 방향성 분석 역시 세 개의 최대집중점이 나타났으며 그 중 두 개의 절리는 고각도로 경사하는 수직정방절리였으며, 나머지 하나는 저각도로 경사하는 판상절리임이 밝혀졌다. 분석 결과, 수락산지역과 불암산지역에서 특정 절리군의 방향성에는 큰 차이를 보여주지 않는다.

선조사법(Scanline Survey)

선조사는 암반의 노두상태가 양호한 지역에서 16개소의 대표적인 지역을 설정하여 실시하였다. 그 중 노두상태가 매우 양호한 용굴암골에서 실시한 선조사법의 결과 절리간격의 평균은 10.0cm이었으며 이때 절리의 평균 빈도수, $\lambda=10.0/m$ 로 측정되었다. 절리사이의 간격은 앞서 설명한 대로 음의 지수를 갖는 확률 밀도 분포를 보여준다.

조사지역에서 측정된 절리사이의 간격은 10.0-59.6cm로 나타났지만, 수락산 터널 입구①, 큰말골②에서와 용굴암골, 그리고 부대앞 계곡②에서 측정된 절리간격은 10.0-15.1cm로 매우 낮으며 특히 큰말골②에서와 용굴암골에서 측정된 절리간격은 각각 10.0cm와 10.3cm로 극히 낮은 값을 보여준다(Table 1). 큰말골②의 절리간격은 단층대를 따라 주 조화절리의 발달이, 그리고 용굴암골에서의 절리간격은 주 조화수직절리의 주향과 평행한 절리군에 기인한다.

Table 1. Results of scanline survey in study area (Joint spacing in this study indicates normal set spacing, X_n).

	위치	선조사 방향	선조사 총길이(cm)	평균절리 간격(cm)	절리의 빈도수(λ)	RQD
수락산지역	1. 앞개울골	N12° E	741.0	25.6	3.906	94.1
	2. 앞개울골	N08° E	606.0	27.5	3.636	94.7
	3. 앞개울골	N70° E	1311.0	59.6	1.678	98.7
	4. 큰말골①	N85° E	1615.5	29.4	3.401	95.4
	큰말골②	N12° W	543.5	10.3	9.970	73.7
	5. 학림골	N80° W	596.5	28.4	3.521	95.1
	6. 수락터널입구①	N12° E	620.6	15.1	6.623	86.0
	수락터널입구②	N78° W	776.0	35.3	2.833	96.7
	수락터널입구③	NS	597.0	23.0	4.348	92.9
7. 용굴암골	N30° W	1726.2	10.0	10.000	73.6	
8. 동말골	N45° E	656.0	18.7	5.348	89.9	
불암산지역	9. 터널입구부	N56° E	394.5	18.8	5.319	90.0
	10. 터널중앙부	N12° W	491.0	49.1	2.037	98.2
	11. 터널출구부	N10° W	387.0	19.4	5.155	90.5
	12. 부대앞계곡①	N56° W	764.6	16.6	6.024	88.2
부대앞계곡②	N72° E	370.4	13.7	7.299	83.5	

원형조사법(Circle-Inventory Method)

절리의 밀도 분포를 구하기 위해 조사지역에서 6개소의 대표적인 지역을 선정하여 절리 밀도 분포를 비교 분석하였으며, 원형 조사법은 절리의 밀도 분포를 구하기 위해 특정한 반경(R)을 갖는 지역을 설정하여 원형창 내에 존재하는 모든 절리의 길이 합을 면적으로 나누어 아래의 식(2)으로 계산한다(Davis and Reynolds, 1996).

$$\rho = \frac{L}{\pi R^2} \quad (2)$$

L : 절리길이의 총합, R : 원형창의 반경.

원형 조사는 조사지역을 수락산지역과 불암산지역으로 구분하여 암반의 노두 상태가 양호한 6개소에서 실시하였으며, 원형 조사법의 분석 결과 절리 밀도는 0.039에서 0.067/cm로 전 지역에서 낮은 절리 밀도의 결과를 보여주고 있다.

면적조사법

면적조사법을 수행하기 위해 대표적인 절리군을 포함하는 1개소의 지역(수락산 터널 입구부)을 선정하여 절리군의 방향성과 절리의 연장성에 대한 통계자료 수치를 얻었다. 절리의 연장성을 분석하기 위해 면적 조사법을 실시했으며 이를 위해 조사창(Face window)의 너비(w)와 높이(h) 그리고 조사창 내에 포함된 3조의 절리군을 다음과 같이 측정하였다(Priest, 1993): 1) 조사창내에 포함된 절리군(Contained : n_c); 2) 조사창을 어느 한 방향으로 절단하는 절리군(Dissect : n_d); 3) 조사창의 양쪽을 관통하는 절리군(Transect : n_t). 그리고 그 각각의 절리군의 합을 구하고 Pahl(1981)에 의해 제안된 식(3)으로 평균 절리 길이(Mean trace length)를 측정하였다.

$$n = n_c + n_d + n_t \text{ (절리의 총 개수)}$$

$$\theta_c = \frac{n_c}{n}, \quad \theta_t = \frac{n_t}{n}$$

$$\mu_L = \frac{wh(1 - \theta_c + \theta_t)}{(w \cos \phi + h \sin \phi)(1 + \theta_c - \theta_t)} \quad (3)$$

ϕ 는 절리의 방향성과 조사창의 높이 사이에 형성된 각도

μ_e = mean trace length

분석결과 수락산 터널입구지역에서 측정한 절리의 개수는 모두 300개 이상이었으나 면적조사법을 수행하기 위해 특정절리군의 방향과 개수를 개별적으로 측정하였다. 주절리의 주향이 N22° W인 경우, 평균 절리길이는 1.28m로 밝혀졌으며, 주절리의 주향이 N79° E인 경우는 평균 절리길이는 1.69m 이었으며, 그리고 주절리의 주향이 EW인 경우는 평균 절리길이는 4.52m로 측정되었다. 주절리의 주향이 EW인 경우, 평균 절리 길이는 다른 방향의 절리보다 우세하게 측정되었는데 이것은 이 지역에서 EW주향의 절리가 구조화절리임을 나타낸다.

암석의 일축압축강도(Uniaxial Compressive Strength)

암석의 일축압축강도의 측정은 절리간격과 더불어 암석의 RMR측정에 매우 중요한 요소이다. 암석의 일축압축강도를 측정하기 위해서는 암석의 코아 시료로 직접 실험하는 직접 측정방법이 있으나 이번 조사에서는 Deer and Miller(1966)에 의해 제안된 간단한 대비 방법으로 계산하였다. 즉 슈미트 해머의 타격 시험에 의한 타격값(Rebound Value)과 암석의 압축강도사이에는 매우 유사한 공식으로 표현된다는 것이다(Cheong and Lee, 1998). 이 방법은 암석의 일축압축강도의 측정이 빠르고, 쉬우며 암석의 코아 시료가 필요치 않는 등 막대한 비용 절감의 효과가 있으며 아래의 식(4)을 이용하여 구하였다..

$$\text{Log } C = 1.675 + 1.348 \text{ Log } (R \cdot r_a) \quad (4)$$

C : 암석의 일축압축 강도 (psi)

R : 슈미트 해머의 타격값

r_a : 건조상태의 암석의 밀도 (g/cc)

조사지역에서 측정된 슈미트 해머의 타격값은 46.9에서 64.7이었으며, 이를 근거로 계산된 암석의 일축압축강도는 217 에서 335 MPa의 강도를 갖는 것으로 계산되었지만 절리면의 상태 즉 풍화 정도, 절리간격 또는 충전물 등에도 큰 영향을 받는다. 특히 불암산 터널 입구부에서 측정된 암석의 일축 압축강도는 다른 지역에서 보다 상대적으로 낮은 값을 나타내는데 이것은 이 지역에서 암석의 풍화정도가 더 심했기 때문인 것으로 해석된다. 조사지역의 화강암에서 측정된 일축압축강도는 매우 높은 값을 얻었으며 따라서 조사지역의 암질은 양호한 암석임을 지시한다.

암석의 이론적 ROD 측정법

RQD 측정은 원래 시추 코아 시료 중 0.1m(또는 4인치) 이상되는 시료의 길이를 시추 코아의 총 길이로 나누어 결정한다. 만약 시추 자료에 의한 코아 시료가 없는 경우, 절리간격을 측정함으로써 이론적 RQD값(TRQD)을 계산하는 아래의 식(5)을 사용하여 구한다(Rouleau and Gale, 1985).

$$\text{TRQD} = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda+1) \quad (5)$$

만일, λ 의 값이 6과 16/m 사이의 값을 갖는 경우 RQD값은 아래의 식(6)으로 계산한다.

$$\text{TRQD} = -3.68\lambda+110.4 \quad (6)$$

조사지역 내에 16개소에서 선조사법을 실시하여 구한 절리 간격을 사용하여 위의 공식을 이용해 절리의 평균빈도수(λ)를 구하여 계산하였다. 조사지역에서 계산된 RQD 값은 최소 73.6%에서 최대 98.7%의 값을 가진다(Table 1). 특히 큰말골 ②와 용굴암골에서의 RQD값은 각각 73.7%과 73.6%으로 낮은 값을 얻었는데 이것은 두 지역에서의 절리간격이 매우 좁기 때문에 기인한다. 위 두 지역을 제외하면 조사지역에서 계산된 RQD값은 83.5%이상으로 이는 조사지역의 화강암이 양호한 상태의 암질임을 나타낸다.

결론

본 연구에서는 철원-포천-동두천-의정부-서울-안양으로 이어지는 큰 구조선을 따라서 북북동-남남서 방향의 중생대 서울화강암의 암반 공학적 특성에 관하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

1) 조사지역 내에 발달하는 대표적인 지질구조는 화강암내에 잘 발달된 절리구조이며, 절리구조는 전지역에서 고루 발달된 3조의 절리군으로 구성된다. 2개의 서로 직각으로 교차하는 수직 정방절리와 일정한 방향성이 없고 저각도로 경사하는 1조의 판상절리이다. 수락산지역의 2조의 수직 정방절리의 Dip / Dipdirection은 각각 86/160과 87/080이고, 1조의 판상절리의 방향은 12/206이었으며, 불암산지역의 2조의 수직 정방절리의 Dip / Dipdirection은 각각 87/167과 88/257이고, 1조의 판상절리의 방향은 12/092이었으며, 수직 정방절리와 의 판상절리의 Dip / Dipdirection은 두 지역에서 큰 차이가 없는 것으로 알려졌다. 수락산지역과 불암산지역의 절리 방향성 비교에서 서로 상이한 점이 발견되지 않았으며 모두 주향과 경사에 있어 매우 유사한 특징을 가지고 있다.

2) 화강암의 지질공학적 특성을 통계적으로 분석한 결과 절리밀도는 0.039~0.066/cm로 낮으며, 면적조사법으로 측정된 절리의 평균길이는 대체로 1.3~4.52m, 평균절리간격은 10.3cm에서 최대 59.6cm로 방향에 따른 변화가 심하다. 길이가 긴 절리는 대부분 주조화 절리의 방향과 일치한다. 또한 절리의 연속성은 Low - Medium 단계이며 절리간격은 Close - Moderate 단계로 등급은 각각 III에서 II에 속한다. 불연속면의 틈새구분은 지역에 따라 다르나 경암인 경우 Tight에서 Very Tight로 닫힌 절리로 판단된다. 또한 Schmidt 해머에 의한 절리면의 일축압축강도는 217 에서 335 MPa로 매우 양호하며 평균절리간격에 기초하여 계산된 이론적 RQD값은 73.7~98.7%의 값을 갖는다.

참고문헌

- 대한지질학회, 1999, 한국의 지질, 802 p.
- 이병주, 김유봉, 이승렬, 김정찬, 강필중, 최현일, 진명식, 1999, 서울-남천점 지질도폭 설명서 (1:250,000), 한국지질도, 64 p.
- 서울고속도로(주), 2001, 서울와곽순환(일산-퇴계원) 고속도로 북한산 국립공원 터널통과에 의한 수리변동분석 보고서, 415 p.
- 한국도로공사, 1997, 토질조사보고서, 469 p.
- 한국지질도, 1995; 한국자원연구소(1:1,000,000).
- 홍승천, 이병주, 황상기, 1982, 한국지질도(1:50,000), 한국동력자원연구소, 44 p.
- Aufmuth, 1994, Lecture note of Dr. Watters in University of Nevada, Reno,
- Bieniawski, Z. T., 1976, Rock mass classifications in rock engineering, Exploration for rock engineering, 1, 97-106.
- Brady, B. H. G. and Brown, E. T., 1993, Rock Mechanics For Underground Mining, 2nd edition, Chapman & Hall, 571 p.
- Cheong, S. and Lee, C. Z., 1998, The Determination of Rock Mass Rating(RMR) with joint spacing and its relation to slope stability, Journal Of Korean Earth Science Society, 19, 641-648.
- Davis, G. H. and Reynolds, S. J., 1996, Structural Geology Of Rocks And Regions, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc, 776 p.
- Deere, D. V. and Miller, R. P., 1966, Engineering classification and index properties for intact rocks, Air Force Weapons Laboratory, Research and Technology Division, Air Force Systems Command, Kirkland Air Force Base, New Mexico, Technical Report, No. AFWL-TR-65-116, 307 p.
- ISRM, 1981, Rock characterization testing and monitoring, ed., E. T. Brown, 207 p.
- Priest, S. D., 1993, Discontinuity Analysis for Rich Engineering, Chapman & Hall, 473 p.
- Priest, S. D. and Hudson J. A., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 18, 183-197.
- Pahl, P. J., 1981, Estimating mean length of discontinuity traces, Int. Jour. Rock Mech. and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 18, 221-228.