

서울일대 암반을 대상으로 한 Geotechnical Information System (GTIS)의 개발 및 활용(1)

김 정 업¹⁾, 전 효 택²⁾, 박 형 동³⁾

1) 선정건설(주)

2) 서울대학교 공과대학 자원공학과 교수

3) 배재대학교 자원환경공학과 전임강사

1. 서론

지하철, 지하유류비축기지과 같은 지하구조물의 건설이나, 대형 건축물의 건설을 위한 지반조사로서 시추조사는 가장 기본적인이라 할 수 있으며, 서울 일대에서는 지하철 1~8호선, 경부고속전철 등의 대규모 사업과 관련하여 많은 시추조사가 실시되었다. 그러나 이와 같은 대형 건설사업을 위한 시추공 자료들은 건설 당시에만 사용되었을 뿐 이후 자료의 보존 및 관리가 잘 되지 않았다.

이러한 문제점들은 시추공 자료가 4차원적인 data속성을 지니고 있기 때문에 발생한다. 시추공 자료는 3차원 좌표공간에 속성 값이 주어지는 자료이기 때문에 자료의 처리과정이 난해하고 이에 따라 자료의 시각화가 힘들다. 공간상의 자료처리와 관련하여 1980년대 이후 GIS가 급격히 보급되며 관심을 끌었지만 이와같은 기존의 GIS는 근본적으로 지표상의 지형공간 정보를 대상으로 하는 2차원적인 자료처리라는 한계를 갖고 있다.

이에 따라 이 연구에서는 국내에서 가장 많은 시추공이 굴착된 서울 일대의 시추공 자료들을 대상으로 체계적으로 관리하고, 효과적으로 시각화하여 지하구조물을 설계할 때 기본 자료로 쓰일 수 있는 Geotechnical Information System (GTIS) 을 개발하고자 하였으며, 자료의 입력과정에서 나타난 지반조사보고서의 문제점을 지적하고 그 해결방안을 모색하고자 하였다.

2. 자료입력

2.1. 자료입력방법

서울 일대를 대상으로 작성된 지반조사보고서를 모아 Windows 3.1용 데이터베이스 프로그램인 Lotus Approach를 이용하여 시추공 자료를 정리하였다. 정리된 자료는 크게 HOLE.dbf, WEATHER.dbf, RQD.dbf의 세 가지 파일로 나누어 입력되었다. HOLE.dbf는 시추공의 명칭, UTM좌표를 이용한 위치, 표고, 암종, 시추구경, 지하수위의 정보를 담고 있는 파일로서 총 2037개의 레코드를 갖고 있다. WEATHER.dbf와 RQD.dbf는 시추공의 명칭 필드를 매개로 하여

HOLE.dbf의 모든 필드를 공유하며, 자체적으로 암석의 풍화등급에 대한 정보와 RQD에 대한 정보를 7558개와 8541개의 레코드에 각각 담고 있다.

2.2. 기존 시추공자료의 문제점 및 해결방안

2.2.1. 자료의 보존상태

기존에 발행된 지반조사보고서의 체계적인 관리가 이루어지고 있지 않아 기존의 자료가 다시 활용되기 힘든 상태이다. 특히 수도권 지하철 2호선의 지반조사보고서는 이미 소실되어 GTIS에 입력하지 못하였으며, 지하철 1호선의 지반조사보고서는 훼손 정도가 심하였다. 또한, 소규모의 지반조사보고서는 관리 체계가 전혀 없어 이에 대한 대책이 필요하다고 판단된다.

2.2.2. 측량

수도권 지하철 3호선 이후의 대규모 사업에서는 측량을 실시하여 좌표 및 표고를 기재하고 있다. 그러나 지하철 1호선 전구간, 3호선의 일부 구간, 경부고속전철의 일부구간에서는 측량이 실시되지 않아 GTIS로의 입력이 곤란하였다. 또한 대부분의 소규모 지반조사보고서에는 측량을 실시하지 않아 자료로서 활용할 수 없었다.

2.2.3. 풍화정도 및 암반분류

시추코아의 풍화정도를 기재할 때에는 ISRM의 기준을 따르는 것이 가장 일반적이라 할 수 있다. 그러나 지반조사보고서에 풍화등급을 기재하는 용어는 Table 1과 같이 지반조사를 수행한 기관별로 달라서 용어상의 혼란을 일으키고 있다. 특히 '심한 풍화'라는 용어는 A사가 HW를 의미하는 반면, B사와 C사는 CW를 의미하고 있어 문제점을 낳고 있다.

일부의 지반조사보고서는 보고서의 도입부에서는 풍화 6단계에 의하여 분류하였다고 기재하고 있으나, 시추주상도에는 이와 같은 분류를 하지 않고 지질조사 표준품셈에 의한 풍화암, 연암, 경암의 기재만을 한 경우도 있었다. 이러한 지반조사보고서에 실려 있는 지질단면도에는 풍화암을 CW로, 연암을 HW~MW로, 경암을 MW~fresh로 기재하고 있다.

현재 국내에는 풍화암-연암-경암의 3단계 암반(rock mass) 분류법과 풍화암-연암-보통암(또는 중경암)-경암-극경암의 5단계 암석(rock material) 분류법이 혼용되고 있으며 사용 용어 또한 풍화정도를 묘사하는 것과(예 : 풍화암) 암석의 경도를 나타내는 것(예 : 연암, 경암)이 혼용되고 있어 용어상의 혼란을 가중시키고 있다. 또한 풍화암-연암-경암의 3단계 암반분류 용어를 사용한다 할지라도 조사단계에서 조사기술자의 분류 기준이 설계, 시공 및 감리시 사용하는 터널을 위한 암반분류와 서로 다른 의미를 갖는 오류를 범하고 있다. 풍화토와 풍화암은 지질품셈의 정의에 의한

다면 각각 CW와 HW에 대응되는 용어이다. 그러나 시추주상도에는 풍화암이 CW로 기재되어 있는 경우가 많다. 이러한 현상은 지반조사기술자가 풍화토와 풍화암을 시추주상도에 기재할 때 지질품셈상의 기준을 따르지 않고, ripper 시공 가능여부에 대한 경험적 임의성을 가지고 분류한 층이라는 가정하에 표준관입시험 N치가 100 회 / 30 cm 미만인 층을 풍화토, 그 이상인 층을 풍화암으로 구분하고 있기 때문이다. 그러나, HW상태의 지반은 암석과 토양의 중간단계로서 기전상태에서 35 ~ 55 MPa 정도의 단축압축강도를 갖는 암석 시추코어가 나올 수 있는 상태이므로 표준관입시험은 가능하지 않을 것으로 추정되며 따라서 표준관입시험 100 회 / 30 cm 는 CW와 HW의 정확한 경계를 나타내지 못하는 것으로 추정된다. 따라서 지반조사기술자가 의미하는 풍화토와 풍화암은 CW를 세분한 용어가 되며, 이에 따라 풍화암은 터널기술자의 입장에서는 HW를, 지반조사기술자의 입장에서는 CW를 의미하는 차이를 낳게 된다. 또한 풍화암의 정의가 서로 다르기 때문에 연암의 경우 터널기술자의 입장에서는 MW를, 지반조사기술자의 입장에서는 HW~MW를 의미하며, 경암의 경우 터널기술자의 입장에서는 SW~fresh를, 지반조사기술자의 입장에서는 MW~fresh를 의미하게 된다.

Fresh로부터 residual soil까지의 풍화 6단계중 fresh, SW, MW는 암석, HW는 암석과 토양의 전이단계, CW와 residual soil은 토양의 개념이므로, 토양층에 해당하는 CW의 일부를 풍화암으로 부르는 것은 잘못된 것이며 CW 단계의 전부를 풍화토 (또는 마사토) 로 명명해야 한다고 판단된다. 또한 풍화암은 암석과 토양의 전이단계인 HW를, 연암은 MW를, 경암은 fresh와 SW에 대응되는 것으로 판단된다 (Table 1).

이상과 같은 용어상의 혼란으로 설계시에 터널의 지보패턴이 잘못 결정될 수 있으며, 이러한 예는 과천시 제 7 공구 9km 682.5 지점부터 10km 240.0 지점에 이르는 복선 터널 구간에서 잘 나타

Table 1. Comparison of the terms for weathering grade used in Korea and the international standards.

ISRM	국내 A사	국내 B사	지질품셈 (시추주상도)	지질품셈 (개정안)
Fresh	신선	신선	경암	경암
Slightly Weathered	약간 풍화	약간 풍화		연암
Moderately Weathered	보통 풍화	어느정도 풍화	연암	
Highly Weathered	심한 풍화	상당히 풍화		풍화암
Completely Weathered	완전 풍화	심한 풍화	풍화토	
Residual Soil			잔류토	잔류토

난다. 이 구간은 원래 PD-4 (pattern double, 복선티널 표준단면) 와 PD-5인 표준단면을 적용한 NATM 공법으로 설계되어 있었다. 그러나 시공 중 매우 열악한 지질조건으로 인하여 재실시된 지질조사로부터 본 터널의 상부 지반은 토사층이며, 터널 하부에 비로소 심하게 풍화된 암반층이 나타나는 것으로 판명되었다. GTIS를 이용하여 이 지역의 풍화정도와 RQD를 나타내는 단면도를 작성하여 본 결과 (Fig.1), 터널구간의 거의 대부분은 CW 상태이며 터널 하부에 HW 상태의 풍화 암층이 나타나고 있어 적절한 지보패턴은 PD-3, 또는 일부 열악한 구간에서 PD-2로 판단된다. 따라서 당초의 지반조사가 잘못되었다기보다는 지반조사 결과를 지질단면도에 도시할 때 표준관 입시횟치 100 회 / 30 cm 기준에 의하여 CW에 해당하는 구간의 상당부분을 풍화암으로 기재하였기 때문에 이와 같은 문제점이 발생한 것으로 추정된다.

2.2.4. RQD

GTIS에 입력된 시추공은 BX 구경이 1212개, NX 구경이 825개로서 RQD의 측정에 필요한 NX 구경 이상을 만족시키지 못하는 시추공이 전체의 59.5%를 차지한다. Bieniawski에 의하면 주의깊게 드릴링작업이 수행된다면 BQ (36.5 mm) ~ PQ (85 mm) 의 시추공에서의 RQD도 의미가 있다고 하였다. 국내에서 이루어진 시추가 모두 주의깊게 드릴링작업이 수행되었는지는 알 수 없지만 GTIS에서는 NX, BX 구경 모두를 자료로서 활용하였으며 이에 따라 오차가 발생할 가능성이 있다. 따라서 GTIS는 추후 NX 구경의 자료가 충분히 더 많아진다면 BX 구경의 자료를 모두 제외하고 자료를 처리할 수 있도록 향후 개발 가능성을 남겨 두었다.

RQD란 일정한 길이의 시추코아에 대한 평균적인 개념이지만 굴진길이에 대한 명확한 정의는 없다. 이에 따라 GTIS에 입력된 지반조사보고서에서 RQD는 최소 0.2 m 로부터 최대 24.9 m 에 이르는 구간을 하나의 구간으로 설정하여 측정이 되었다. GTIS에서는 이러한 RQD의 측정치를 1.0 m 간격으로 추출하여 처리하였다. RQD의 측정이 너무 긴 구간에 대하여 결정되면 수직적으로 암반의 상태가 변화하는 양상을 충분히 나타낼 수 없다. 따라서 추후의 지반조사보고서에는 1 ~3 m 정도의 길이에 대하여 RQD를 측정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

2.2.5. 시추공의 구경

개착식 시공이 대부분이었던 제1기 지하철 지반조사에서는 거의 대부분의 시추공이 BX 규격이었으나 제2기 지하철 지반조사에서는 개착 구간에서는 BX 규격을, 터널구간에서는 NX 규격을 사용하고 있다. 시추공의 구경은 채취 시료의 품질을 좌우하는 매우 중요한 요소로서 동일한 암반이라도 구경이 커질수록 TCR(Total Core Recovery) 및 RQD 등의 수치가 높아진다. 따라서 RQD를 효과적으로 측정하기 위해서는 개착구간이라 하더라도 NX 규격으로 하여야 한다. 풍화대 또는

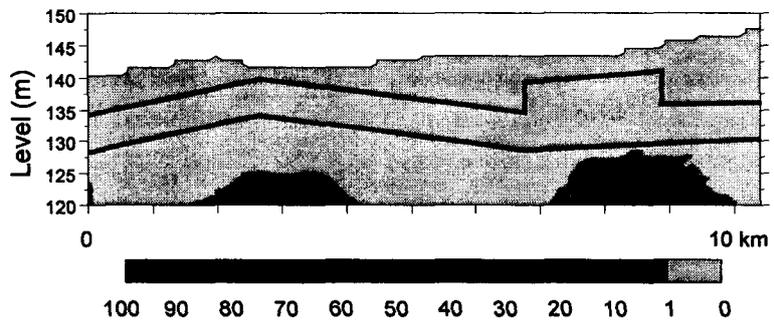
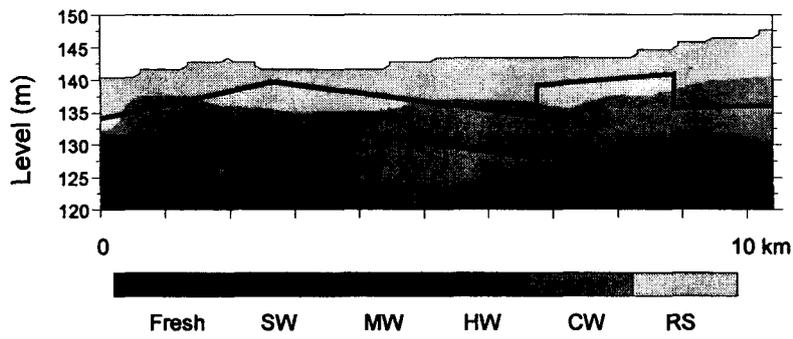
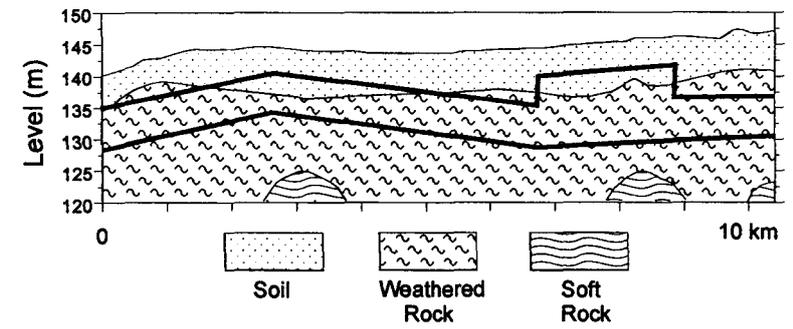


Fig.1 Geotechnical profile of Kwachon area.
 (a) Rock classification according to geologic investigation report,
 (b) Weathering grade map made by GTIS,
 (c) RQD map made by GTIS.

연암에서는 코아회수율이 극히 저조하기 때문에 HX(100 mm) 구경의 시추를 시행하는 것이 바람직하다고 한 경우도 있지만 시추 비용을 대폭 상승시키면서 HX 구경으로 할 필요는 없다고 판단되며 이보다는 NX 구경의 시추공 수를 늘려서 시추공 간격을 좁힌다거나, 3차원적 해석을 위해 노선의 횡방향으로도 시추하는 것이 암반의 상태를 명확히 파악하는데 도움이 되리라 판단된다.

2.2.6. 시추공의 심도

지하철 6호선의 기본설계시에는 개착 계획 구간에서는 경암 1 m 까지 시추하는 것을 원칙으로 하되, 암층이 확인되지 않을 경우 계획고 하부 5 m 까지 시추하며 주변지역과 비교하여 지층변화가 심할 경우 서울시의 승인을 얻어 계획고 하부 10 m 까지 시추하되 조사 도중에 암층이 확인되면 종료하였다. 터널 계획 구간에서는 계획고 하부 1 m까지 시추하며, 이 때 터널 계획고 하부의 지질상태가 미고결층이거나 주변지질상태와 비교하여 변화가 심할 경우 서울시의 승인을 얻어 계획고 하부 10 m 까지 시추하되, 도중에 암층이 확인되면 종료하였다.

우리나라 대부분에서 핵풍화양상은 드문 편이지만, 서울 홍제동 지역 및 상봉동 용마공원 지역에서 직경 2 m 에까지 이르는 핵석을 포함하는 핵풍화가 관찰되었으며, 영동고속도로 확장공사시에도 일부구간에서 핵풍화현상이 관찰되었다. 따라서 시추를 할 때 개착 예상구간에서 경암층이 판단되었더라도 핵풍화 현상에 의하여 하부에 다시 암질이 좋지 않은 암반이 나타날 가능성이 있으므로 경암 1 m 까지만 시추하는 것은 재고되어야 한다.

터널구간은 지하철 5호선에서는 터널 인버트 심도보다 2 m 깊게, 6호선에서는 터널직경만큼 깊게 시추하도록 되어 있다. 터널 주변의 지반 거동을 고려할 때, 최소한 터널굴착으로 인한 응력 개방 영향권 이내 지반 상태의 확인이 필요하므로 최소 시추 심도는 개념적으로 (터널 인버트 심도) + (영향권 거리)가 되어야 할 것이다. 따라서 일반적으로 터널 굴착으로 인한 응력 개방의 영향권이 터널의 직경 정도인 것을 감안하면 최소 시추심도를 (터널 인버트 심도) + (터널 직경)으로 하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

3. 지구통계학적 자료처리

3.1. Semivariogram 분석

Lotus Approach를 이용하여 입력된 자료는 자료변환과정을 거쳐 GTIS에서 Kriging 기법으로 처리된다. Kriging은 공간상에 분포되어 있는 속성값을 추정하는 기법으로서 Kriging에서 다루는 변수는 regionalized 변수이다. Regionalized 변수란 공간적으로 연속적이면서, 완전히 무작위적이지도 않고 또한 기하학적 함수로 정확히 추정할 수도 없는 변수를 의미한다.

Kriging을 적용하기 위해서는 semivariogram 분석이 선행되어야 한다. Semivariance γ_h 는 다

음과 같이 정의된다.

$$\gamma_h = \frac{\sum_{i=1}^{n-h} (z_i - z_{i+h})^2}{2(n-h)}$$

γ_h 는 거리 h 에서의 semivariance이며 n 은 횡단선을 따른 점의 개수, z_i 는 횡단선을 따른 i 번째 점의 속성값으로 거리 h 에 따른 semivariance를 나타낸 그래프가 semivariogram이다.

RQD와 풍화단계에 대하여 semivariogram을 작성한 결과 수평방향으로는 두 변수 모두 약 300 m 정도에서 sill에 도달하는 것으로 판단된다. 반면 수직방향으로는 sill에 수렴하지 못하고 semivariance가 계속 커지는 양상을 보이는데 이는 수직방향의 drift가 충분히 제거되지 못했기 때문으로 추정된다.

편마암과 화강암의 semivariogram을 비교할 경우 RQD와 풍화등급 모두 편마암은 화강암보다 sill이 크게 나온다. 이러한 현상은 서울지역의 화강암체가 단일 암체인 서울화강암체인 반면, 편마암 자료는 경기편마암복합체로서 복합적인 성격을 갖는 여러 암체가 하나로 취급되었기 때문으로 추정된다.

3.2. GTIS의 자료처리과정

GTIS의 최종 목적은 임의의 단면 또는 임의의 평면에서 풍화단계와 RQD에 대한 지질공학도를 작성하는 것이다. GTIS를 실행하면 다음과 같은 순서로 작업이 진행된다.

- (1) 단면도를 작성할 것인지, 평면도를 작성할 것인지 결정한다.
- (2) 좌표를 입력한다.
- (3) RQD에 대한 지질공학도를 작성할 것인지, 풍화단계에 대한 지질공학도를 작성할 것인지 결정한다.
- (4) 편마암과 화강암에 대하여 각각 지도를 작성한 뒤 이를 하나로 합친다.
- (5) 표면처리를 한다. 작성된 지도에는 실제 지표면보다 높은 점에서도 속성값이 추정될 수 있다. 따라서 지표면의 고도를 나타내는 파일을 작성하여 주어진 x, y 좌표에서 표고보다 높은 지점은 추정치가 있더라도 이를 제거하는 과정을 거쳐야 한다.
- (6) 이상과 같은 과정을 거치면 주어진 평면 또는 단면에 대하여 추정치를 담고 있는 파일과 각 추정점에서의 추정치 에러인 표준편차를 담고 있는 파일이 작성된다. 추정치에서 표준편차를 더하거나 뺀 값은 68.3%에 해당하는 신뢰구간이다. 이러한 연산과정으로 good condition map과 poor condition map을 작성한다.
- (7) Windows 3.1용 그래픽 프로그램인 Surfer를 이용하여 출력한다. 이 과정은 GTIS에 포함시키지 못하였으므로 사용자가 Surfer로 직접 출력하여야 한다.

4. 결론

- 기존의 지반조사보고서에는 풍화정도에 따른 암반분류를 할 때 여러 분류기준이 혼용되고 있다. 기존의 풍화도와 풍화암의 분류기준인 표준관입시험 100회 / 30 cm 는 적합하지 않은 것으로 판단되며, CW를 풍화도, HW를 풍화암, MW를 연암, SW~fresh를 경암으로 분류하여야 한다.
- RQD를 지나치게 긴 길이에 대해 측정하는 것은 국지적인 특성에 대한 자료의 손실이 발생하므로 1~3 m 정도의 일정한 간격으로 측정하는 것이 향후의 자료활용을 위해 바람직하다.
- 지반조사를 위한 시추공의 구경은 신뢰성 있는 RQD의 측정을 위하여 모든 구간에서 NX 규격으로 하여야 한다.
- 경암 1 m 까지만 시추하는 기존의 시추심도는 핵풍화에 의한 오판의 가능성이 있으므로 지양하여야 하며, 터널구간에서는 응력개방에 의한 영향권을 고려하여 (터널 인버트 심도) + (터널 직경) 정도까지 시추하여야 한다.
- 풍화등급과 RQD에 대해 지구통계학적 분석을 실시한 결과 semivariogram의 range는 약 300 m 이며, 편마암이 화강암보다 sill이 크게 나온다. 이는 화강암지역의 자료는 중생대 주라기에 관입한 하나의 암체를 대상으로 하는 반면, 편마암지역의 자료는 오랜 지질학적인 시간에 걸쳐 이루어진 편마암체를 단일 암체로 가정하고 자료를 처리하게 되므로 화강암체의 분산이 편마암체보다 작게 나오기 때문으로 판단된다.

참고문헌

- 대우개발주식회사, 대우엔지니어링, 1979, 서울특별시 지하철 3·4호선 지질조사보고서 (실시설계)
- 대한지질공학회, 1994, 지질공학 (1. 터널편)
- 박형동, 1990, Engineering Geology and Geotechnical Properties of Seoul Granite, 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 80p.
- 서영호, 1993, 연약암반에 굴착되는 NATM 터널의 변형거동과 보강설계, 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 166p.
- 서울시 지하철건설본부, 1992, 지하철 터널 설계와 시공 자료집 (1)
- 서울지하철건설주식회사, 대우엔지니어링, 1980, 지하철 3·4호선 지질조사보고서 (1차)
- 서울지하철건설주식회사, 대우엔지니어링, 1980, 지하철 3·4호선 지질조사보고서 (2차)
- 서울특별시 지하철건설본부, 1971, 수도권 고속전철 제1호선 (서울역 - 종로5가) 지질조사보고서
- 서울특별시 지하철건설본부, 1971, 수도권 고속전철 제1호선 (종로5가 - 청량리) 지질조사보고서

- 서울특별시 지하철건설본부, 1990, 지하철 3호선 수서차량기지 측량 및 지질조사 보고서
- 서울특별시 지하철건설본부, 1990, 지하철 5호선 기본설계 지질조사보고서
- 서울특별시 지하철건설본부, 1991, 서울시 지하철 7호선 기본설계 지반조사보고서
- 서울특별시 지하철건설본부, 1991, 서울 지하철 8호선 기본설계보고서 (토질조사)
- 서울특별시 지하철건설본부, 1992, 도시 지하철 터널의 암반분류 (서울지역 중심), 52p.
- 서울특별시 지하철건설본부, 1992, 서울 지하철 6호선 기본설계보고서 (지질조사)
- 서울특별시 지하철건설본부, 1994, 제2기 서울 지하철 터널 설계 및 시공감리 종합보고서, 452p.
- 서울특별시 지하철공사, 1982, 지하철 4호선 지질조사보고서 (4차)
- 서울특별시 지하철공사, 대우엔지니어링, 1981, 지하철 3호선 일부노선변경 지질조사보고서 (3차)
- 서울특별시 지하철공사, 대우엔지니어링, 1982, 지하철 3·4호선 도심지 NATM구간 지질조사보고서 (5차)
- 서울특별시 지하철공사, 삼우기술단, 1983, 지하철 3호선 연장선 지질조사보고서 (6차)
- 서울특별시 지하철공사, 한양엔지니어링, 1982, 지하철 3호선 지질조사보고서 (4차)
- 이수근, 1992, 서울 지질특성에 따른 터널의 설계·시공현황 및 개선방안, 서울특별시 지하철 건설본부
- 한국철도기술협회, 1990, 盆唐線 往十里-盆唐間 複線電鐵 新設 實測 其他 (2차) 地盤調査報告書 (車輛基地分)
- 한국철도기술협회, 1993, 서울-부산간 경부고속전철 제1공구 실시설계 지질조사 보고서
- 허훈, 이재찬, 1995, 토목구조물 시공현장 암질 분류 기준에 대한 제안, 한국암반역학회 및 대한지질공학회 학술발표회 논문집, p.186-201
- Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering rock mass classifications, John Wiley & Sons, 251p.
- Clark, I., 1979, Practical geostatistics, Applied Science Publishers Ltd., 129p.
- Davis, J.C., 1986, Statistics and data analysis in geology, John Wiley & Sons, 646p.
- Goodman, R.E., 1993, Engineering geology : Rock in engineering construction, 412p.
- ISRM, 1981, Rock characterization : testing and monitoring, ISRM suggested methods, 211p.
- Lee, S.G. and de Freitas, M.H., 1989, A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granite in Korea, Quaterly Journal of Engineering Geology, vol.22, p.31-48
- Swan, A.R.H. and Sandilands, M., 1995, Introduction to geological data analysis, Blackwell Science, 446p.
- Turner, A.K., 1992, Three-dimensional modeling with geoscientific information system, Kluwer Academic Publishers, 443p.