

근접시공에 대한 수로터널 지반조사 및 안정성 분석

Site Investigation and stability analysis for water tunnel being neighboring construction

전제성¹⁾, Je-Sung Jeon, 김기영²⁾, Ki-Young Kim, 이상덕³⁾, Sang-Duk Lee, 김두준⁴⁾, Doo-Jun Kim

1) 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, KIWE, KOWACO

2) 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, KIWE, KOWACO

3) 아주대학교 환경건설교통공학부, 교수, Professor, Ajou University

4) 인덕대학 건설정보시스템공학과, 교수, Professor, Induk Institute of Technology

SYNOPSIS : In vicinity of Seoul, there has been water service tunnel that classified into 1st grade facility by special act for the safety control of public structures and with providing capacity equals to $1,543 \times 10^3$ (ton/day) and inner pressure equals to $2.5\text{--}3.5\text{kg/cm}^2$. In this research, site investigation and stability analysis for water tunnel caused by new construction of road tunnel were carried out. The ground near water tunnel were zoned into spatial area having similar geotechnical characteristics and estimating geotechnical properties for each area. The site for analysis consists of banded biotite gneiss, biotite schist and granite gneiss with spatial non-homogeneity, and for that reason weathering and fault zone were distributed with large scale. It's important thing to consider spatial ground zone and their geotechnical properties properly into stability analysis at design and construction stage. Also, using results of site investigation, stability of existing tunnel have been analyzed for Hydraulic Fracture/Jacking and deformation in detail.

Key words : Water tunnel, Neighboring construction, Tunnel stability, Site investigation, Hydraulic fracture/jacking

1. 서론

서울 OO지역 일대에 위치하는 수도권광역상수도 수로터널은 인근 5개 도시에 용수를 공급하는 국가 중요시설물로서, 시설물 안전관리에 관한 특별법상 1종 시설물로 분류되어 있다. 본 수로터널은 1989년에 준공된 터널로서, 터널통과유량 $1,543$ (천톤/일)의 압력터널이며 평상시 내압은 $2.5\text{--}3.5\text{kg/cm}^2$, 수격압 작용시 최대 6.0kg/cm^2 규모이다. 수로터널은 NATM 형식이며, 단면은 $D=3.2\text{m}$ 의 마제형 터널이다. 한편, 신규도로 건설 계획 중, 신규 도로터널이 기존 수로터널의 하단부 교차 통과 및 출구부에 근접 굴착토록 계획되어 있었다. 본 연구대상 지역은 지반의 불균질성이 매우 심하고, 간섭대상 터널의 심도가 100m에 달하는 점을 고려할 때, 심도별 공간적인 구역화 및 각 구역에 대한 적정 물성치 산정이 매우 중요하다. 이를 위하여, 본 연구에서는 대심도 시추조사 및 물리탐사, 다양한 현장시험 및 실내시험등을 수행하였으며, 이들의 종합적인 분석을 통해 최종적인 대심도 공간 구역화 및 물성치 산정을 수행하였다. 한편, 이러한 지반조사 결과를 바탕으로 하여, 기존 수로터널과 신규 도로터널의 간섭부를 사면 간섭부 및 터널 간섭부로 분류하고, 수로터널에서 발생할 수 있는 Hydraulic Fracture/Jacking 및 응력-변형거동, 발파영향 등에 관한 세부 안정성 검토를 수록하였다.

2. 간섭현황

기존 수로터널 및 신규 도로터널의 간섭부는 크게 사면 간섭부와 터널 간섭부로 구분하였다. 사면 간섭부 현황을 살펴보면, 신규 도로터널의 집중배기소 시공을 위한 사면절취 계획에 의하여, 기존 수로터널 측면으로의 근접 절취시공이 계획되었다.

터널 간섭부에 있어서는, 기존 수로터널 하단부에 신규 도로터널 교차통과하도록 계획되었는데, 이 교차통과구간에서 기존 수로터널 하단부와 신규 도로터널 천단부의 수직이격거리는 하행방향의 경우 10.04m, 상행방향의 경우 9.70m로 조사 되었다. 사면 간섭부 및 터널 간섭부에 대한 간섭현황은 그림 1과 같다.

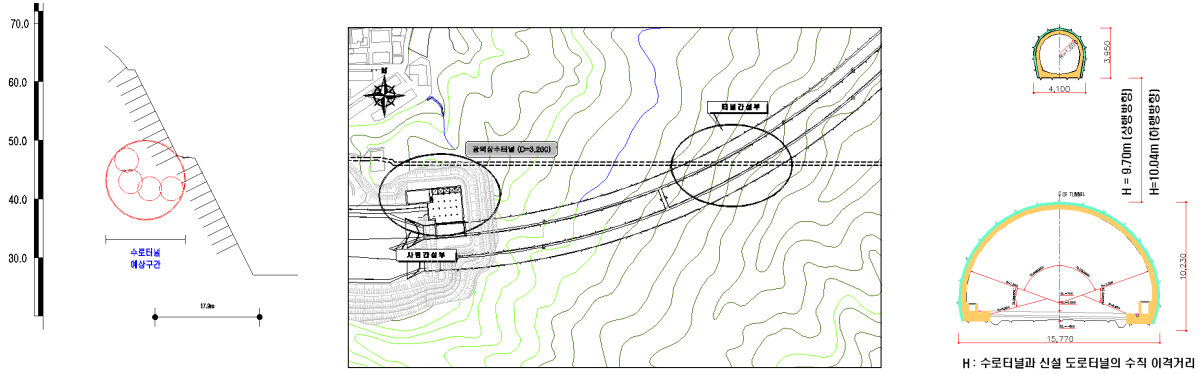


그림 1. 사면 및 터널 간섭부 간섭현황

3. 지반조사

본 연구사례와 같이 특정 간섭지역에 대한 안정성 검토를 수행하는데 있어, 기존의 대표 지반 등급 및 이에 대한 대표 물성치를 적용하는 것은 실제 지반조건하에서 발생할 수 있는 많은 불안정성을 고려할 수 없다는 단점을 내포하고 있다.

본 연구에서는 육안분류 및 기존 수로터널 인근 지층상태(파쇄대, 단층대 등) 파악을 위한 시추조사 4개소, 공내영상촬영, 공간적 지층분포 형태 및 특성 파악을 목적으로 전기비저항 탐사 및 탄성파토포그래피탐사(공대공, 공대지) 등을 수행하였다.

시추조사 등에 의한 RQD, RMR 분류 및 탄성과 토모그래피탐사 결과 등을 종합적으로 분석하여 터널 간섭부에 대한 구역구분을 실시하였는데, 구역구분시 RQD, RMR 값은 1차적으로 회수된 시추코아에 대하여 2.0~3.0m 구간별로 값을 구한 후 각 구간에서의 극한치를 제외한 채, 심도별 가중치를 감안하여 적용하였다. 그림 3은 일반적인 암질기준 및 RQD, RMR, 탄성과 토모그래피탐사 각각에 의한 구역구분 결과를 나타내고 있다. 지반을 단순히 풍화토, 풍화암, 연암, 경암으로 분류한다면, 수로터널 주변지반은 경암지반으로 표현되며, 이러한 지층구분 방식은 각종 지반조사에 의해 확인된 심도별 불균질성 및 안정성에 영향을 미치는 단층대와 파쇄대를 적절히 표현하지 못하고 있다.

RQD, RMR에 의한 구역구분 결과를 살펴보면, 두 방법 각각의 결과가 비교적 잘 일치되고 있는 것을 알 수 있었는데, 수평 이격거리가 50m 정도인 두 시추공 사이에서의 지층변화를 정확히 파악하는데 어려움이 있었다. 이러한 시추공 사이의 지층변화 파악 및 기존 구역구분내용에 대한 보정수단으로서 탄성과 토모그래피 탐사결과를 이용하였다. 그 결과 WTB-1 방향에서의 단층파쇄대 심도가 상부로 조정

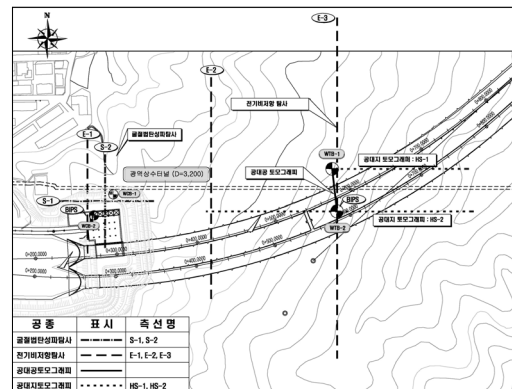


그림 2. 수로터널 인근지역 지반조사 현황

되었고, 시추공 사이 하부지역에 경암 파쇄대가 존재하는 것으로 분석되었다. 또한 최종적인 구역화 결과에 대하여, 각 구역별 역학적 특성구명을 위한 현장 원위치 시험과 실내암석시험, 파쇄대 구간을 대상으로 한 현장수압시험 등을 실시하였으며, 암석의 물리적 특성과 역학적 특성파악을 위한 실내시험을 병행하였다.

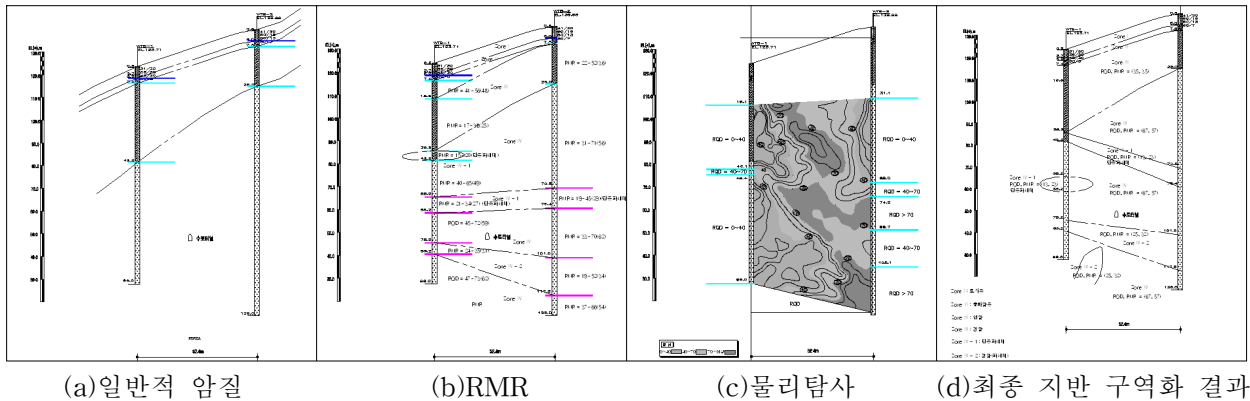


그림 3. 각 방법에 따른 지반 구역구분

4. 안정성 검토

본 연구에서는 사면 간섭부 및 터널 간섭부에 대하여 신규 도로터널 시공에 따른 세부적인 수로터널 안정성을 검토하였다. 사면 간섭부에 있어서는, 수로터널 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 Hydraulic Fracture/Jacking 및 수로터널에서의 누수와 파쇄대층을 통한 연속적 침투현상 및 이에 의한 불안정성, 신규 도로터널 시공시의 발파·진동 영향 등을 중심으로 전체적인 수로터널의 안정성 검토를 실시하였다.

터널 간섭부에 있어서는, 수로터널 하부로의 신규 도로터널 교차통과조건(10m 내외의 수직이격거리)에 대한 안정성 분석 및 수리영향 검토를 통한 침투현상 등을 중심으로 전체적인 수로터널의 안정성 검토를 실시하였다.

4.1 Hydraulic Fracture/Jacking

본 연구에서는 수로터널 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 Hydraulic Jacking, 수로터널에서의 누수와 파쇄대층을 통한 연속적 침투현상 및 이에 의한 불안정성 등을 중심으로 전체적인 수로터널의 안정성 검토를 실시하였다. 구체적인 안정성 검토방법을 살펴보면, 유한요소해석 프로그램인 Pentagon 2D 및 SEEP/W 2D를 이용하여 수치해석을 실시하였는데, Hydraulic Jacking 등을 기존 연속체 해석의 개념으로 평가하는데 있어서의 한계점을 인식, 해외에서 압력터널 설계시 널리 적용되는 이론식을 적용한 안정검토를 동시에 실시하였다.

수치해석시 해석영역은 일반적인 투수해석에서 적용하는 좌·우 8D를 적용하였으며, 하부로는 3D를 적용하였다. 측면의 경계조건은 수평변위를 구속하고, 하부의 경계조건은 연직방향의 변위를 구속하였다. 수로터널 안정성에 가장 중요한 역할을 하는 수압은 터널의 각 절점에 수두를 가하여 방식으로 구현하였다. Hydraulic Jacking는 수로터널의 운용수압보다 주변지반의 최소주응력의 크기가 작을 때 발생한다. 이에 수압이 없는 상태에서 굴착에 의한 최소주응력의 변화양상을 파악하고 Hydraulic Jacking이 발생할 가능성이 있는 영역을 구하였다. 또한 사면과 수로터널의 수평이격거리를 증가시키면서 Hydraulic Jacking에 대해서 안정성을 확보할 수 있는 최적 이격거리를 산정하였다.

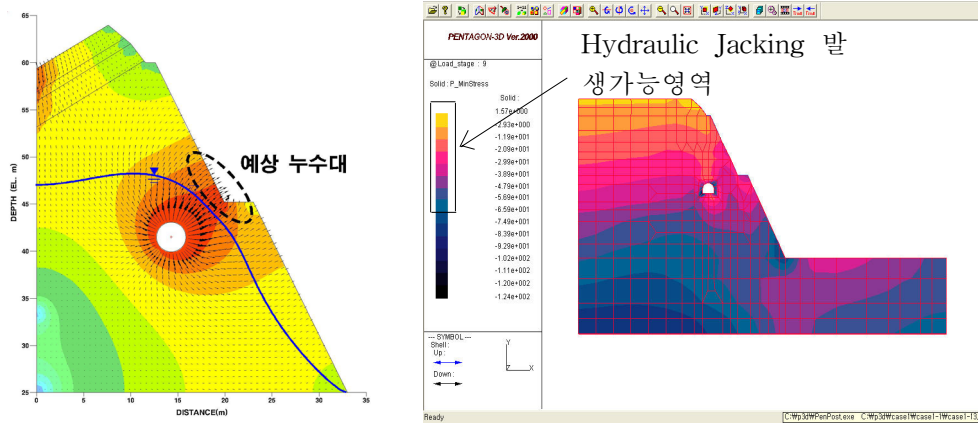


그림 4. 수치해석시의 수압고려 및 Hydraulic Fracture 발생가능지역

실제 현상을 수치해석상에 표현하는데 있어, Hydraulic Fracture/Jacking에 대한 안정성을 연속체 개념의 수치해석 방법으로 평가하는 것은, 실제 현상과 많은 차이를 야기시킬 수 있으므로, 개략적인 비교차원의 평가로 이용하였다.

기존 이론식에 의한 검토는 Fernandez의 이론을 적용하였는데, 이 이론은 Hydraulic Fracture/Jacking에 대한 안정성을 검토하는 이론으로서, 모든 응력은 유효응력을 그 전제로 한다.

Fernandez의 이론에서, 수로터널의 Hydraulic Fracture/Jacking에 대한 안전율은, 활동력으로 작용하는 압력터널의 내압에 대하여 저항력으로 작용하는 외수압과 암반 피복두께의 비를 통하여 산정된다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$F_{\perp} = \frac{\sigma'_3(r)}{\sigma'_\theta(r)} \quad (\text{사면 평행방향}), \quad F_{\parallel} = \frac{\sigma'_3(r)}{\sigma'_r(r)} \quad (\text{사면 수직방향})$$

$$\sigma'_3 = k\gamma_r h_r \quad \text{여기서, } \gamma_r: \text{암반의 수중단위중량}$$

$$h_r: \text{터널상부로부터 사면까지의 최소거리}$$

$$\frac{\sigma'_r}{\Delta P_w} = \frac{1}{2(1-\nu)} \left[\left(\frac{a^2}{r^2} - 1 \right) + \frac{2 \ln \frac{r}{a} + \left[(1-2\nu) \left(a + \frac{4h_0^2}{r^2} \right) - 2(1-\nu) \right] \ln \frac{\left(\frac{r^2}{a^2} + \frac{4h_0^2}{a^2} \right)}{\left(1 + \frac{4h_0^2}{a^2} \right)}}{\ln \left(1 + \frac{4h_0^2}{a^2} \right)} \right]$$

- 여기서, $\Delta P_w : P_i - P_o$
 P_i : 터널의 운용압, P_o : 지하수위로 인한 터널에 작용하는 압력
 σ'_r : 반경방향 유효응력
 k : 축압계수($k=0.5$), h_r : 터널부터 사면까지의 수직거리
 L_r : 터널부터 사면까지 최단거리, ν : 암반의 프아송비
 a : 압력터널의 반경, r : 터널부터 파괴면으로 가정되는 부분까지의 거리($h_0/4$)
 h_0 : 터널상부로부터 지하수위까지의 거리

임의의 최소 이격거리(사면 직각방향으로의 수로터널과 사면의 최단거리)별 Hydraulic Fracture/ Jacking에 대한 안전율을 각각 검토한 결과, 피복두께가 두꺼워지면서 즉, 수로터널과 사면의 이격거리를 증가시킴으로서 안전율이 증가하는 것을 확인할 수 있는데, Hydraulic Fracture/Jacking에 대한 허용안전율 1.3을 만족하는 최소 이격거리는 31m로 나타났다.

단, 이 결과는 사면굴착으로 인한 사면활동 및 수로터널 주변지반의 변위발생 영향이 없다는 가정하에 성립될 수 있는 결과로서, 사면 굴착으로 인하여 수로터널 주변에 사면활동 및 변위가 예상되는 경우는 별도의 사면 안정대책 수립 및 이격거리 증가가 필요하다.

4.2 3차원 침투거동 분석

수로터널은 압력터널로서 내수압 및 인근 지반 조건에 의해 라이닝의 균열이 심한 상태이다. 본 연구에서는, 신규 도로터널 굴착 시 발생하는 주변 지하수위 하강이 수로터널의 운영에 어떤 영향을 미치는지에 관하여 검토하고, 수로터널과 교차되는 터널 간섭부의 안정성을 고려하기 위해 광역지하수 모델링 프로그램(Visual MODFLOW Pro v.3.1)을 이용하여 굴착 시 지하수위 변화 및 신규 도로터널 내 유입수량을 분석하여 수로터널의 안정성을 평가하였다.

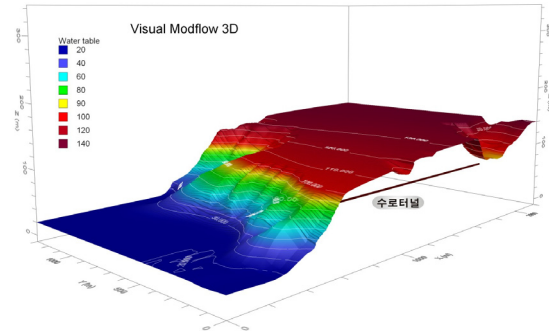


그림 5. 지하수 분포 모델링

신규 도로터널 굴착중 각 구간별 터널내 지하수 유입수량을 라이닝 상태가 불량한 조건하에서 계산하기 위해 시공 조인트 및 라이닝 조사 자료를 근거로 수로터널의 0.5~1.0%에 0.05m의 라이닝 균열을 설정하였으며, 수로터널의 압력이 신규 도로터널에 미치는 영향을 고려하기 위해 수로터널이 운영중일 경우와 운영하지 않을 경우의 두 가지로 나누어 검토하였다.

신규 도로터널 굴착 전·후의 지하수의 흐름과 분포내용의 분석결과, 신규 도로터널 굴착 후 지하수 흐름 방향이 터널 외곽부에서 터널 쪽으로 향하며 전반적인 지하수위 하강을 야기하는 것으로 분석되었다.

또한 신규 도로터널 굴착진행에 따라 유입수량이 전반적으로 증가되는 경향을 보이는데, 이는 초기 지하수위 조건에 있어, 사면 간섭부보다 터널 간섭부가 높기 때문에 야기되는 현상으로 판단되며, 다른 구간에 비해 터널 간섭부에서 터널 내 유입수량이 급증하는 양상을 보이고 수로터널을 운영 중일 때가 운영하지 않을 때보다 유입수량이 많은 것으로 분석되었다. 이는 현재 경우 도로터널 굴착 시 수로터널의 운영압이 터널 내 유입수량에 영향을 주는 것으로 판단되며, 라이닝 균열에 의한 수로터널의 운영압 손실이 발생할 것으로 예측되었다.

4.3 3차원 응력-변형 해석

기존 및 신규 터널 주변의 지반 상태는 붕적토, 풍화암, 연암, 경암으로 이루어져 있고 기반암은 편마암에 해당 되었는데, 심한 풍화 내지 보통 풍화상태로, 특히 EL. 44~48m 부근에서는 단층에 의한 파쇄대 구간이 분포하고 있었으며 다량의 단층점토 및 단층각력암이 충전되어 있었다.

신규 도로터널 시공에 따른 지반 이완 및 응력 집중에 대한 기존 수로터널의 안정성을 응력-변형 해석을 통해 검토하였다. 본 해석에 이용된 프로그램은 실제 현장조건을 구현하기 위한 3차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC^{3D} 이다.

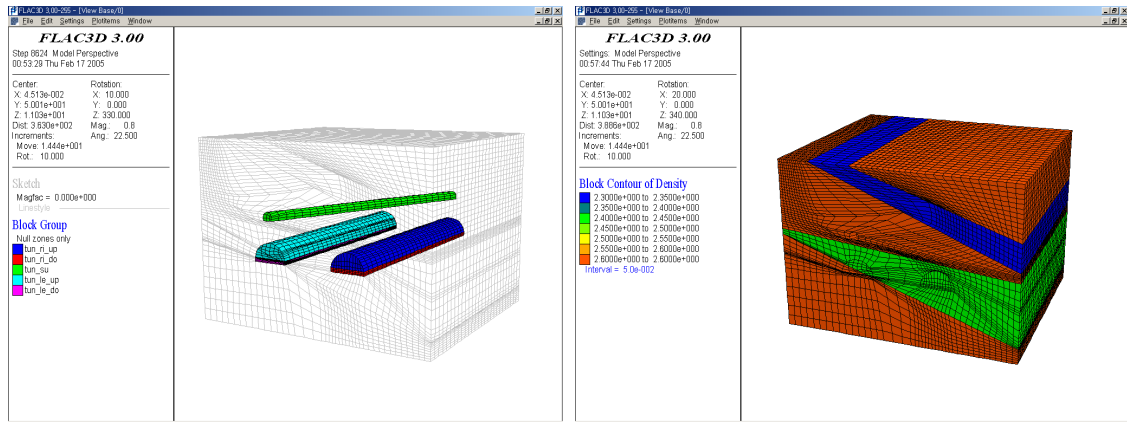


그림 6. 해석모델 및 지층구분

본선터널 시공에 따른 수로터널의 천단 및 인버트 변위 경향은 실시설계 조건과 같이 단층이 존재하지 않는 경우에 있어서는 터널교차부에서 최대값이 나타나야 한다.

그러나, 본 지반조사에서 확인된 단층과쇄대(Zone IV-1)는 우측 본선터널 방향 하향경사로 발달되어 있는 관계로, 본선터널에 약 23°로 교차되는 수로터널이 이 단층과쇄대로 접근함에 따라 수로터널의 천단 및 인버트 변위의 경향은 해석 중점으로 갈수록 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 우측 본선터널 직상부를 통과하는 지점에서의 최대 연직변위량은 내수압 미작용시 12.6mm, 내수압 작용시에는 12.1mm로 기존 실시설계시의 값보다 약 5배 이상 증가한 것으로 해석되었다. 이는 수로터널과 본선터널 상부에 존재하는 단층과쇄대가 그 원인으로 작용된 것이나 터널의 구조적 안정성은 확보되고 있는 것으로 판단된다. 한편, 수로터널의 콘크리트 라이닝 응력은 내수압 및 축압계수에 대한 모든 조건에서 허용치 이내로 안정하게 해석 되었다.

5. 결론

본 연구에서는 기존 수로터널과 신규 도로터널과의 간섭사례를 대상으로, 세부 안정성 검토를 위한 지반조사 및 세부 구역화, 각 구역별 지반 특성치 분석, 이들을 바탕으로 한 안정성 분석 등을 수행하였다. 구조물 간섭에 따른 상호영향 및 안정성 검토를 수행하는데 있어, 구조물 인근 지반의 지층구성 파악과 적정 지반공학적 특성치 산정은 가장 기본적인 동시에 중요한 과정임을 알 수 있었는데, 본 연구에서와 같이, 현장시추 결과 및 물리탐사, 각종 시험결과 등의 종합적 분석과정을 통해 공간적 구역구분과 각 구역별 특성치를 산정하는 일련의 과정은 기존 암종별 지층구분 및 획일적 대표치 적용의 모순점을 극복할 수 있는 방법임을 알 수 있었다. 또한 수로터널의 안정성을 검토하는데 있어, 기존 도로터널과는 달리 응력-변형 관점에서의 안정성뿐 아니라 수로터널로부터 인근지반으로의 누수 및 수격압작용, 이로인한 Hydraulic Fracture/Jacking에 대한 검토가 필수적임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 수로터널 설계 및 시공지침(1997), 한국수자원공사, pp.3~265.
2. Bieniawski, Z. T.(1997), *Engineering Rock Mass Classifications*, John Wiley & Sons, New York, pp.1~135.
3. E. Hoek and E. T. Brown(1997), "Practical estimates of rock mass strength", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 34(8), pp.1165~1186.
4. G. Fenandez and T. A. Alvarez Jr(1994), "Seepage-Induced Effective and Water Pressures Around Pressure Tunnels", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120(1), pp.108~128.