

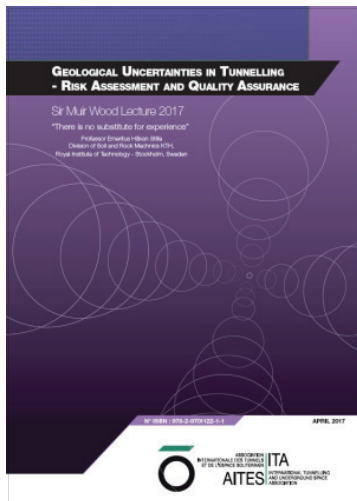
제9강 터널링에서의 지질 불확실성과 리스크 평가

Geological Uncertainties and Risk Assessment in Tunnelling



김영근
(주)건화 기술연구소
연구소장/공학박사/기술사

터널공사에서의 가장 중요한 핵심은 지질 및 지반의 불확실성(uncertainty)을 어떻게 효과적으로 다루느냐 하는 것이다. 다시 말하면 터널공사에서 예상되는 다양한 불확실한 위험요소를 조사/설계단계에서 조사를 통하여 규명하고 정의하는 과정을 거쳐 시공 중에 이를 확인하고 이에 대한 대책을 적극적으로 수립하여야만 한다. 이러한 일련의 과정이 구체적인 리스크 평가 그리고 체계적인 리스크



Geological Uncertainties in Tunnelling – Risk Assessment and Quality Assurance(E.H. Stille, 2017)



Risk analysis and management in tunnelling
(Z. Zafirovski & V. Gacevski, 2016)

관리이며, 이는 지난 8강의 과정을 통하여 리스크 관리방법에 대한 선진국에서의 기준과 법적인 절차를 중심으로 설명하였다.

본 고에서는 지질 및 지반의 불확실성을 바탕으로 터널링에서 발생할 수 있는 리스크와 이에 대한 평가 방법을 중심으로 기술하고자 하였다. 본 고는 2017년에 국제터널협회(ITA)의 Muir Wood Lecture에서 발표된 내용을 주로 참고하였다.

1. 지질 불확실성(Geological Uncertainty)

1.1 일반 개념(General concepts)

Muir Wood(1994)는 지질이 지반공학에서의 불확실성의 주요 원천으로 지반의 규명되지 않은 특성이 예상치 못한 거동을 유발할 수 있으며(불완전성), 규명된 특성이라 하더라도 정량화된 용어로 표현할 수 없거나, 그에 따른 거동을 완전히 알 수 없다(시스템 불확실성)고 하였다. 지질의 복잡성(complexity)은 당사자 간의 의사소통 문제를 야기할 수 있으며, 이는 터널 붕괴의 많은 사례와 문헌에 발표된 클레임 상황에 의해 확인되었다. 지질 불확실성은 기본적으로 다음과 같이 구분된다.

- **지질 시나리오 불확실성(geological scenario uncertainty)** 앞으로의 시나리오, 미래의 지질 사건들, 시간과 함께 공학적 요소들의 변화 그리고 기후 변화에 의한 자연 환경 변화 등을 미리 예측하는 능력의 한계와 관련이 있다.
- **모델 불확실성(model uncertainty)** 터널 공사에서의 암반의 거동, 암반-구조의 상호작용 또는 균열 시스템 및 단층 등과 관련이 있다.
- **데이터 불확실성(data uncertainty)** 절리 방향과 단층의 수, 암반 구조물의 투수성, 암반 분포 및 암질 등과 같은 기하학적 요소와 관련된 이슈와 시험 범위 제한과 관련이 있다.

지질 불확실성은 지반조건의 특성화로 규정하며, 이와 더불어 품질보증(quality assurance) 업무는 불확실성의 특성 구분을 고려해야 한다. 지질 불확실성은 지반 조건 평가와 관련이 있으며, 또한 실제 지질 조건에 대한 불충분한 지식뿐만 아니라 지질 특성 및 기하학적 측면에서의 낮은 정확도를 포함하고 있다. 지질 불확실성은 지반조사의 범위와 한 암석 역학과 터널공학이 경험적으로 크게 기반하고 있다는 사실과도 관련이 있다.

많은 지하 프로젝트들의 특성상 복잡한 지질 구조에 있어서 사전 조사를 바탕으로 평가된 지반 조건에 대한 신뢰도가 낮을 수 있다는 것을 의미한다. 대부분의 경우 지질 불확실성은 인식론적인 것으로 분류될 수 있는데, 이는 굴착과정에서 실제 지질상태가 확인될 때만 지질 불확실성의 수준이 감소할 것임을 의미한다.

1.2 지질 불확실성의 확인과 평가

1.2.1 개요

개념적으로 리스크 평가에서 검토되어야 할 지질 불확실성과 관련된 모든 문제는 **거동 변수(behaviour variable) P**로 나타낼 수 있다. 거동 변수는 데이터 불확실성뿐만 아니라 모델 및 시나리오 불확실성을 포함하는 여러 개의 **기본 변수(basic variable) X**의 함수이다. 터널 안정성과 관련하여 터널 변형은 거동 변수이며, 기본 변수는 암반 변형계수, 암반 강도 및 터널 지보와 같이 여러 개다. TBM 터널에서 회전당 굴진율은 TBM의 생산성을 평가하기 위한 거동 변수이고, 기본 변수는 암석 강도, 절리 정도 및 추력 등이다. 또 다른 예로 노천 발파에서 블록의 크기는 거동 변수이고, 암석 강도, 취성도 및 불연속면 간격이 기본 변수이다.

따라서 지질 조건이라는 용어는 다양한 거동 변수의 집합 이름으로 간주될 수 있다. 지질학 불확실성은 변수의 가능한 확산범위에 대한 척도로 볼 수 있으며 따라서 확률 변수의 변동 계수와 밀접하게 연결된다. 지질 불확실성은 검토된 거동에 대한 보다 적절한 설명을 가능하게 하기 위해 구체화되어야 한다. 예를 들어 지질 불확실성의 구체화는 암질이나 파쇄도 또는 드릴링 성능의 평가와 관련이 있을 수 있다.

최근까지 지질 불확실성에 대한 확인과 평가는 기본적으로 경험에 근거하고, 이는 지질조사보고서에 주관적이고 정성적으로 기술되었다. 실제로는 관찰적 접근방법에 기반하여 시공중에 지질기술자에 의해 능동적으로 수행된다. 의미 있는 리스크 평가를 위해서는 지반공학적 지식과 기술에 기초하여 이 모든 것을 수행해야만 한다.

이전에 확립된 바와 같이 지질 불확실성의 특성은 Bayesian 이론에 기초하고 있다. 일반적인 지식과 정보에 기초한 사전 평가는 조사로부터 얻은 정보로 업데이트된다. 조사비가 추가 정보의 가치보다 높아질 경우 지반조사가 중단되게 된다. 지질 모델에 기초하여 조사를 수행하는 것이 추천된다.

지반조사에 대한 가이드라인과 지침 및 정상적인 조사비는 문헌에서 확인할 수 있다. Bayesian 통계에 기반한 보다 수학적 접근법이 제시되었다. 추가 정보의 업데이트와 정보의 가치 평가가 모두 제시되었다(Stille과 Holmberg, 2005 및 Zetterlund 등, 2015). 두 경우 모두 전문가 지식의 도출이 필수적이다. 서로 다른 시스템이 존재하며 적용되었으나, 하지만, 경험에 대한 대안이 없다. 지질 불확실성을 평가하기 위한 접근방법에 대한 몇 가지 측면은 다음에 제시되어 있으며, 틀을 개선하기 위한 추가 개발이 예상된다.

1.2.2 경험적 방법에 의한 평가

많은 터널공학 프로젝트에서 얻은 경험을 바탕으로 Stille과 Palmström(2017)은 정량적 측정의 지질 불확실성을 평가하는 방법을 제안하였다.

- **간단한 지질(simple geology)** 복잡한 지질 조건보다 조사 노력이 덜 필요하다. 단순한 지질의 예로서, 빙하 침식으로 생성된 지표면에 노출된 신선한 결정암 지역으로, 이 지역에서 단층과 절리는 같은 다양한 지질학적 특징을 지표면에서 쉽게 관찰할 수 있다. 간단한 지표면 관찰과 항공사진 검토를 통해 지질 및 지반 조건에 대한 상당히 훌륭한 해석이 저렴한 비용으로 제공될 수 있다.
- **복잡한 지질(complex geology)** 일반적으로 강한 단층과 습곡작용으로 형성된 복합적인 암반이 있는 경우에 해당된다. 넓은 지역이 토사층으로 덮인 터널의 경우 하부 암반의 불확실성은 증가된다. 지반 조건의 해석을 복잡하게 만드는 다른 특징으로는 깊은 풍화, 지하수위 아래 지역 또는 도시 개발지역 등이 있다. 현장 조사에서 나타나지 않아 굴착 과정에서 예기치 않게 나타날 수 있는 지질 특성과 마주칠 위험은 복합 지반에서 더 크고, 암반 노두가 확인되지 않은 지역에서도 크다.

지반 조건 불확실성의 정도 또는 등급은 표 1에서 보는 바와 같이 지질, 암반 토피고 및 풍화에 대한 특정 매개변수에 등급을 부여하여 확인할 수 있다. 터널 굴착에서는 항상 어느 정도의 불확실성이 있을 것이다. 터널에 관련된 지질 불확실성은 암반사면 굴착보다 크다. 또한 현장 조사가 많을수록 불확실성이 감소한다. 표 1은 소규모 또는 적절한 조사 작업을 통해 얻은 사례 기록의 경험을 바탕으로 만들어 졌다.

추가 지질조사에 의해 지질 셋팅과 관련된 불확실성을 터널 선형에 따라 구역을 구분하여 정의할 수 있으며, 관련 불확실성을 감소시킬 수 있다.

〈표 1〉 지질 불확실성 등급(Stille과 Palmstrom, 2017)

Site conditions influencing on geological and ground uncertainty	Division with ratings			Comments
	simple	clear	complicated	
1 Geological setting ¹⁾	1	2	4	The distribution and composition of rocks, tectonic structures, foldings, etc.
2 Degree of rock weathering at the terrain surface	0.5	1	3	The degree of weathering at the rock surface, making observations and interpretations of the rocks at tunnel/cavern level more difficult.
3 Area of the rock surface covered ²⁾ (by soil, lake/sea, vegetation, buildings, etc.)	1	3	5	The rock cover reduces the possibilities to forecast the rockmass conditions underground.
4 Rock overburden. Distance from excavation to rock surface	<10 m/10-50 m 2 / 0.5	50 - 300 m 1	> 300 m 4	Long distance from rock surface to the tunnel increases the uncertainties in forecasting the rockmass conditions. As limited (low) rock cover (< 10 m) is a risk, a rating = 2 is suggested. The same rating is set to surface excavation.
¹⁾ after information from investigations ²⁾ which has not been investigated				
Degree of geological uncertainty	Sum (Σ) of the values from each topic			
	Low: Σ < 5	Medium: Σ = 5 - 8	High: Σ > 8	

1.2.3 Bayesian 통계에 기반한 평가

불확실성은 두 가지 경우로 구별할 수 있다. 하나는 거동 변수 P를 직접 관찰하고 측정할 수 있는 경우이며, 또 다른 것은 기본 변수 Xi가 관측 가능한 요인이고 거동을 설명하는 함수를 알 수 있는 경우이다. 두 경우 모두 변수의 통계적 매개변수를 결정하기 위해 전문가 지식의 도출이 필요하다. 대부분의 경우 이러한 매개변수는 일반적인 통계 시험으로 결정할 수 없기 때문이다.

P가 정규 분포를 따른다고 가정하는 것이 합리적으로 것으로, 이는 중심극한정리(Central Limit Theorem)에 의한 보수적인 접근법이다. 그러나 명백히 불가능한 음수 값은 계산 결과에 거의 영향을 미치지 않는다(Baecher와 Christian, 2003). 정규 분포를 사용할 때의 이점은 분명하다. 여기서 논의된 많은 이슈에 대한 분석적 해결책이 있기 때문에 계산을 단순화한다. 이와 같은 단순화는 단지 이론적 개념을 변화시키지 않는 계산적인 노력으로, 그런 다음 거동 변수의 평균값과 표준 편차를 평가하도록 해야 하며, 가정된 분포를 사용하여 변수를 설명할 수 있다.

거동 변수를 직접 관측할 수 있는 경우, Bayes 정리를 적용하여 통계 매개변수를 업데이트할 수 있다. 본 정리는 기본 변수에도 적용될 수 있다. 터널공학 이슈에 대한 Bayes 정리의 적용이 제시되었다(Stille와 Holmberg, 2005년). 대부분의 경우 랜덤 변수 자체의 변동과 미지의 평균값으로 구성된 총 불확실성을 설명하는 것이 적절하며, 변수의 최적 평가는 Bayesian 예측 분포로 설명할 수 있다.

불확실성에 대한 사전 정보는 경험 또는 설계 계산으로 평가할 수 있다. 기본 모집단의 표준편차 평가는 일반적으로 경험에 기초해야 한다. 예를 들어, 편차 계수가 알려져 있는 경우 이 계수를 사용할 수 있는데, 이는 통계적 매개변수에 대한 사전(a priori) 인식을 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

거동의 관측 데이터는 Bayes 정리에 의한 거동 변수의 통계 매개변수를 업데이트할 수 있다. 관측에 의해 업데이트되고 줄일 수 있는 것이 평균값의 불확실성이다. 이전에 평가된 미지의 평균값의 통계 매개변수 값 중에서 업데이트가 수행되며, 이후에 업데이트된 예측 분포를 평가할 수 있다.

흥미로운 특징은 모니터링 데이터를 사용하지 않고도 분산 감소를 계산할 수 있다는 것이다. 분산은 관측치의 수에 따라서만 달라진다. 그러나 평균값은 모니터링 데이터에 따라 달라진다. 결과는 표준 편차에 의해 표현되는 불확실성은 추가 관측에 따라 항상 더 작아짐을 보여준다. 기본적인 과정보다 평균값에 대한 불확실성이 클 경우 불확실성의 감소는 더 뚜렷하게 나타난다. 관측의 이점은 그만큼 크다. 또한 단일 관측치가 상당한 감소를 제공하고, 많은 노력으로 사소한 추가 기여만 할 수 있다는 점도 재미있다.

설명된 접근법은 공간 변동성이 존재하지 않는다는 개념을 기반으로 한다. 대부분의 경우 서로 밀접하게 측정된 실제 거동사이에는 상관관계가 있다. 이 문제는 Kriging과 같은 지구 통계학적 방법으로 분석될 수 있다.

함수와 기본 변수가 알려진 경우 거동 변수를 직접 계산할 수 있다. 함수가 복잡한 경우 여러 전파 이론을 적용하여 거동 변수의 평균 및 분산을 허용가능한 평가치로 만들 수 있다.

터널 벽면의 변형은 거동 변수의 예이다. 기본 변수는 지반 반응곡선 개념을 적용할 때 사용되는 모든 변수이다. 암반 강도와 변형 계수와 같은 것에 대한 통계적 매개변수는 전문가 지식의 도출에 기초하여 평가되어야 하며, 변형에 대한 계측결과를 사용하여 불확실성을 줄일 수 있다.

1.3 지질 불확실성의 평가에 대한 특별 고려사항

거동 변수를 평가할 스케일은 리스크 평가에 영향을 미치며, 두 개의 그룹을 구분할 수 있다.

- 거동 변수가 총 터널연장과 관련된 사건
- 거동 변수가 터널 일부와 관련된 사건

예를 들어 첫 번째 그룹은 유동성(flowing)지반과 만날 리스크를 포함할 수 있다. 유동성 지반은 매우 드물게 일어나는 이벤트로, 지질과 터널 길이가 유사한 조건의 프로젝트 경험을 바탕으로 확률을 평가한다. 두 번째 그룹은 불량한 암반을 만나는 것과 같이 각각의 굴착에서 발생할 수 있는 것과 관련된 리스크로 예시될 수 있다. 이러한 경우 매 굴착에서 위해요소는 반복되므로 여러 번 발생하며, 원하지 않는 사건의 발생 확률과 결과는 모두 스케일과 관련이 있어야 한다.

확률 수준에 영향을 미치는 또 다른 이슈는 거동이후의 공정이다. 경우에 따라 거동은 기본 변수와 직접 관련이 있으며, 위의 셋업 규칙으로 설명 및 평가할 수 있다. 이러한 경우는 모집단 자체의 결과에 따라 달라진다. 다른 경우에는 변수 뒤에 있는 공정이 평균값 프로세스입니다. 이는 사건이 평균값의 변동과 관련이 있음을 의미한다. 변수의 결과가 크거나 작을수록 결과는 동등해진다. 보어홀을 천공하는 데 필요한 시간은 이러한 평균값 프로세스입니다. 평균값의 분산이 모집단 자체의 분산보다 훨씬 작다.

2. 지질 불확실성의 예(Examples of Geological Uncertainty)

2.1 개요(Introduction)

본 장에서는 터널 엔지니어들이 직면한 여러 가지 다른 이슈들을 분류하고자 하였다. 제시된 거동 변수의 예는 포괄적이지 않으며, 각 프로젝트는 고유하다. 각 프로젝트 및 지질 영역에 대해 실제 거동 변수 목록을 설정해야 한다. 이 이슈는 다음과 같이 크게 세 가지 그룹으로 나눌 수 있다.

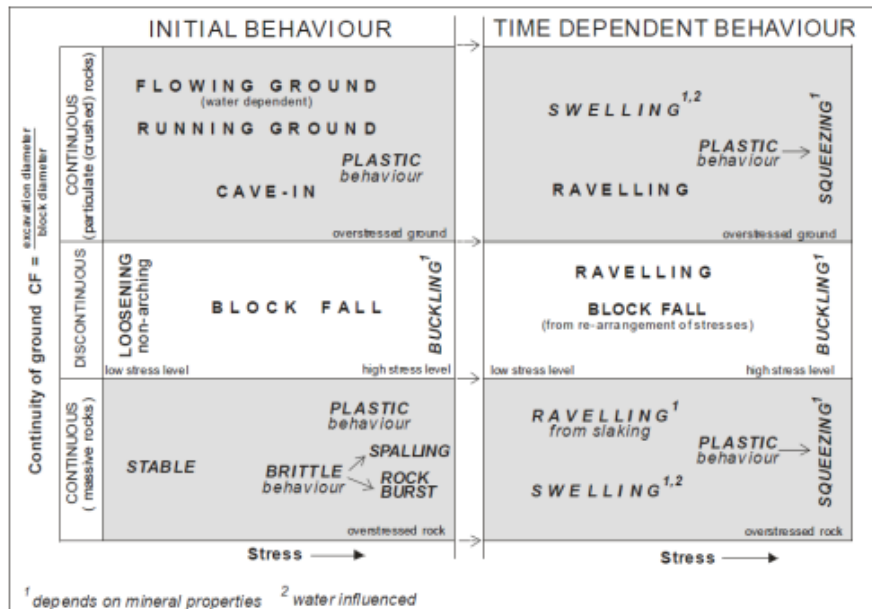
- 설계와 관련된 지질 불확실성
- 시공 엔지니어링과 관련된 지질 불확실성
- 터널 굴착과 관련된 지질 불확실성

2.2 설계와 관련된 지질 불확실성(Geological uncertainties related to design)

설계 작업에서 고려해야 할 문제는 암반 거동타입(rock mass behaviour type)과 관련이 있다. 현장 지질의 복잡성으로 인해 한 가지 이상의 지반 거동타입을 고려해야 하며, 지반의 구조적 저항은 국부적으로나 전체적으로 분석되어야 한다. 다양한 유형의 지반 거동에는 실제 사례를 커버하는 데 신뢰할 수 있도록 적절한 설계를 위한 다른 평가 또는 방법(터널 엔지니어링 툴)이 필요하다. 따라서 암반 지보 및 다른 평가의 추정 전제조건으로 실제 거동 타입을 이해하는 것이 필요하다.

거동 타입은 터널공학의 중요한 개념으로, Terzaghi(1946), Hoek 등(1995), Martin 등(1999), Schubert 등(2001) 그리고 Palmström 과 Stille(2008)과 같은 많은 연구자들이 이에 대하여 연구하였다. 같은 터널 구간에서도 다양한 거동 타입이 발생할 수 있으며, 이를 다음과 같이 세 가지 그룹으로 나눌 수 있으며 그림 1과 표 2에 상세하게 나타나 있다. 이러한 현상은 일반적으로 상호 배타적이지 않기 때문에 동시에 발생할 수 있다.

- 그룹 1 : 중력 지배(gravity driven)
- 그룹 2 : 응력 유발(stress induced)
- 그룹 3 : 지하수 영향(water influenced)



〈그림 1〉 지하 굴착에서의 거동 타입의 기본 원리(Palmstrom, 2000)

〈표 2〉 지하 굴착에서의 거동 타입(Stille과 Palmstrom, 2015)

Behaviour type		Definition	Comments
Group 1: Gravity driven			
a. Stable		The surrounding ground will stand unsupported for several days or longer.	Massive, durable rocks at low and moderate depths.
b. Block fall(s)	of single blocks	Stable, with potential fall of individual blocks.	Discontinuity-controlled failure.
	of several blocks	Stable, with potential fall of several blocks (slide volume $< 10 \text{ m}^3$).	
c. Cave-in		Inward, quick movement of larger volumes ($> 10 \text{ m}^3$) of rock fragments or small blocks.	Encountered in highly jointed or crushed rock.
d. Running ground		A particulate material quickly invades the tunnel until a stable slope is formed at the face. Stand-up time is zero or nearly zero.	Examples are clean medium to coarse sands and gravels above groundwater level.
Group 2: Stress induced			
e. Buckling		Breaking out of fragments in tunnel surface.	Occurs in anisotropic, hard, brittle rock under sufficiently high load due to deflection of the rock structure.
f. Rupturing from stresses		Gradually breaking up into pieces, flakes or fragments in the tunnel surface.	The time-dependent effect of slabbing or rock burst from redistribution of stresses.
g. Slabbing		Sudden, violent detachment of thin rock slabs from sides or roof.	Moderate to high overstraining of massive hard, brittle rock. Includes popping or spalling*.
h. Rock burst		Much more violent than slabbing, and involves considerably larger volumes.	Very high overstraining of massive hard, brittle rock considerably larger volumes (heavy rock bursting often registers as a seismic event).
i. Plastic behaviour (initial)		Initial deformations caused by shear failures in combination with discontinuity and gravity-controlled failure of the rockmass.	Takes place in plastic (deformable) rock from overstraining. Often the start of squeezing.
j. Squeezing		Time-dependent deformation, essentially associated with creep caused by overstraining. Deformations may terminate during construction or continue over a long period.	Overstressed plastic, massive rocks and materials with a high percentage of micaceous minerals or of clay minerals with a low swelling capacity.
Group 3: Water influenced			
k. Ravelling from slaking		Ground breaks gradually up into pieces, flakes or fragments.	Disintegration (slaking) of some moderately coherent and friable materials. Examples: mudstones and stiff, fissured clays.
l. Swelling	of certain rocks	Advance of surrounding ground into the tunnel due to expansion caused by water adsorption. The process may sometimes be mistaken for squeezing.	Occurs in swelling of rocks, in which anhydrite, halite (rock salt) and swelling clay minerals, such as smectite (montmorillonite), constitute a significant portion.
	of certain clay seams or fillings	Swelling of clay seams caused by adsorption of water. This leads to loosening of blocks and reduced shear strength of clay.	The swelling takes place in seams having fillings of swelling clay minerals (smectite, montmorillonite).
m. Flowing ground		A mixture of water and solids quickly invades the tunnel from all sides, including the invert.	May occur in tunnels below the groundwater table in particulate materials with little or no coherence.
n. Water ingress		Pressurised water invades the excavation through channels or openings in rocks.	May occur in porous and soluble rocks, or along significant openings or channels in fractures or joints.

지질 조건에 따라, 어떤 거동 타입은 국부적 불안정성을 유발할 수 있지만 다른 타입은 전체 안정성에 영향을 줄 수 있다. 또한 어떤 것은 굴착 중에만 나타나기도 하고, 다른 것은 영구적인 안정성에만 영향을 미칠 수 있다.

앞서 설명한 세 가지 유형의 불확실성(시나리오, 모델 및 데이터)이 모두 지배적이다. 시나리오의 불확실성은 일반적으로 너무 커서 굴착전에 최종 설계를 정의할 수 없다. 모델의 불확실성 또한 많은 경우에 크며, 거동을 적절히 설명하려면 관찰 접근법이 설계를 검증하기 위해 적용해야 한다. 또한 데이터 불확실성에도 마찬가지로, 이는 굴착 후 실제 조건이 확인될 때까지 클 것이다. 따라서 터널굴착시 지질과 그 특성을 조사, 매핑 및 평가해야 함한다. 이는 품질보증 업무에 필요한 부분이며 담당 설계자의 감독 및 협조 없이는 수행될 수 없다.

2.3 시공 엔지니어링과 관련된 지질 불확실성 (Geological uncertainties related to construction engineering)

시공 방법과 기술의 선택은 예상되는 지반 조건에 기초해야 한다. 기본적인 관심은 시간과 비용의 평가와 관련되며, 표 3에서 보는 바와 같이 다양한 지질 조건을 고려해야 한다.

〈표 3〉 시공 엔지니어링과 관련된 거동 변수의 예

Type of behaviour variable or issue	Technical relevance	Geological factor
Geological factor	Penetration rate(m/min) Degree of	Degree of fracturing
	Penetrability(mm/ rev)	Abrasive minerals Strength of rock
	Wear	Brittleness
Energy to break up rock	Consumption of explosives	Toughness
	Trust and moment of the machine	Degree of fracturing Brittleness
	Fragmentation of the rock	Residual stresses
Stand up time	Time until initial support has to be installed	Rock mass quality Squeezing or swelling behaviour
	Time before permanent support can be installed	Initial rock stresses Flowing ground
Initial support	Amount of initial support to be installed before next round can be taken	Rock mass quality
Ground water conditions	Ingress of water to be pumped out Conditions for workers Conditions of carry out work PregROUTING to be carried out	Ground water pressure Rock mass permeability Erodibility of fracture filling Ravelling ground behaviour

논의된 세 가지 유형의 지질 불확실성도 여기에서도 우세하게 나타난다. 거동 변수는 터널 선형에 따라 달라진다. 시나리오 불확실성은 일반적으로 너무 커서 특정 위치에서 값을 결정할 수 없다. 많은 이슈는 변수의 평균값에 의해 관리된다. 이것은 예를 들어 드릴링 능력과 같이 많은 시험의 합으로 결과를 공식화할 수 있는 경우에 해당한다. 이러한 경우 불확실성은 변수 자체의 변동이 아니라 평균을 평가하기 위한 불확실성으로 설명된다. 경우에 따라 매우 불리한 단일 실제상황이 발생하면 터널링은 중단되고 굴착방법을 변경해야 한다. 예를 들어, 유동성(flowing) 지반이 나타나면 Open TBM으로 통과할 수 없다.

모델 불확실성 또한 많은 경우에 너무 커서 사전에 거동을 충분히 예측할 수 없다. 이후에 관측 접근법을 적용하여 터널 굴착을 실제 조건에 맞게 조정해야 한다. 예를 들어, 천공 및 발파계획은 시험 발파의 결과를 관찰하여 실제 조건에 맞게 조정해야 한다.

데이터 불확실성도 마찬가지로이다. 데이터 불확실성은 굴착 이후 실제 조건이 나타날 때까지 커지므로 터널 굴착과정에서 지질과 그 특성을 조사, 매핑 및 평가하는 것이 필수적이다. 이는 품질 보증 작업에 필요한 부분으로 담당 설계자의 감독 및 협조 없이 이 작업을 수행할 수 없다.

터널공학 문제와 관련된 많은 거동 변수들은 평균값 프로세스의 결과로 볼 수 있다. 생산성을 설명하는 변수는 다음과 같다. 낮은 값과 높은 값이 모두 발생하며 결과를 동일하게 한다. 이 거동은 평균값을 얼마나 잘 평가할 수 있는지를 설명한다. 예를 들어, 암반을

파쇄하는 천공 능력과 에너지는 매 막장마다 다르지만 문제는 총 터널 길이를 따라 전체 합으로 결과를 추정하는 것이다. 터널로의 지하수 유입은 터널 단위 m당 유입되는 지하수의 총합이다. 단일한 경미한 지하수 유입은 대부분의 경우 중요하지 않다. 그러나 터널 굴착을 완전히 중지할 수 있는 단일 이벤트를 식별하고 리스크를 평가해야 한다. 이러한 문제는 지반 유동성과 심각한 지하수 유입일 수 있다.

2.4 터널 굴착과 관련된 지질 불확실성

(Geological uncertainties related to execution of tunnel excavation)

터널 굴착은 지질 조건이 확인되는 중요한 순간이다. 제3자 피해 리스크와 관련된 문제는 설계 단계에서 검토해야 하고 시공팀에 제공되는 기준을 설정해야 한다. 다른 이슈는 시공자가 결정해야 할 문제이다. 터널굴착 리스크와 관련된 지질 요소의 예는 표 4에 나타나 있다.

〈표 4〉 터널 굴착 리스크와 관련된 지질 요소의 예

Type of issue	Technical relevance	Geological factor
Damage of structures on ground	Damage on third part	Time before permanent support can be installed
Environmental or social impact	Ground water lowering Pre and post grouting	Ground water pressure Rock mass permeability Fracture geometry
	Vibrations disturbance	Attenuation by the rock mass
Workers safety	Front stability	Rock mass quality Initial rock stresses
	Time until initial support has to be installed	Geometry of geological structures
Long term stability	Time before permanent support can be installed	Squeezing ground Swelling ground Ravelling ground

논의된 세 가지 유형의 지질학적 불확실성은 여기에도 적용된다. 대부분의 경우 가장 불안정한 상황은 막장 굴착 직후이며 임시 지보가 설치되기 전일 것이다. 암반토피고가 낮은 경우, 이러한 상황은 제3자에게도 피해 리스크가 될 뿐만 아니라 작업자 안전과 프로젝트 경제성에도 문제가 될 수 있다. 따라서 다음 막장의 상태를 예측할 수 있도록 터널 굴착시 지질과 그 특성을 조사, 매핑 및 평가해야 한다. 리스크 레벨이 높을수록 터널 전방에 대한 조사를 통해 지질 상태에 대한 추가 정보를 반드시 얻어야 하며, 이것은 품질 보증 작업에 필요한 부분이다.

모델 불확실성은 많은 경우에 거동에 대한 적절한 설명을 가능하게 하기에는 너무 크다. 이것은 작업을 실제 조건에 맞게 조정하기 위해 관찰 접근법을 적용해야 함을 의미한다. 예를 들어, 시공중에 진동 및 지하수 영향 감소와 그라우팅이 함께 평가되어야 한다.

막장 전방의 불안정성은 공기를 지연시킬 뿐만 아니라 작업자의 안전에도 위험이 될 것이다. 굴착중에 전방 막장이 하나 이상 무너질 확률은 얼마나 될까? 이는 가장 취약한 문제로 간주될 수 있다. 반면에 전체 터널에 대한 그라우팅은 각 막장에서의 수행된 결과의 총합이므로 평균값 프로세스의 결과가 된다.

3. 지반공학적 리스크의 평가(Evaluation of geotechnical risks)

3.1 개요(Introduction)

터널공학 문제에 대해 지질 불확실성과 관련된 리스크를 평가해야 한다. 지질과 연관된 리스크와 영구 구조물 또는 시공과 관계된 이슈에 대한 리스크를 지반공학적 리스크(geotechnical risk)라고 한다.

개념적으로 지질 불확실성과 관련된 모든 위해요소는 원하지 않는 이벤트의 발생 확률을 평가함으로써 리스크 평가에서 검토되어야 한다. 이는 이벤트의 한계 상태를 정의해야 함을 의미한다. 결과(consequence)는 제3자에 대한 피해와 손상으로 절대적인 스케일로 정의된다. 프로젝트 리스크의 경우 상대적 스케일을 사용해야 하며 예상 조건에 따라 제로 옵션을 사용해야 한다.

터널 구조물의 저항성, 내구성 및 사용성은 다른 모든 구조물과 마찬가지로 지반공학적 설계에서 다루어져야 하는 문제이다. 또한 구조물의 파괴를 가져오는 결과를 방지하기 위해 시공중 안정성 문제와 환경에 미치는 영향은 설계 작업에 의해 다루어져야 한다. 리스크의 첫 번째 범주는 주로 식별된 지질의 지반 특성 평가에 따른 불확실성과 관련이 있으며, 두 번째 범주는 터널 막장 전방의 실제 지질 조건 평가에서 오는 불확실성과 관련이 있다.

3.2 지질 불확실성과 발생 가능성(Geological uncertainties and Probability of occurrence)

3.2.1 경험에 기반한 평가(Estimation based on experiences)

지질 불확실성은 지질 상태에 대한 일반적인 지식과 밀접한 관련이 있다. 따라서 일반적인 실무에서는 지질 불확실성의 정도를 모든 터널공학 이슈에 대한 특별한 성능 제한을 고려하지 않고 발생 확률과 직접 관련시키는 것이다. 기본적인 전제조건은 이러한 작업이 전문적으로 수행된다고 가정하는 것이다. 이와 같은 접근방식은 굴착전 지질 불확실성의 정도와 모든 관련 결정에 적용가능하다. 그러나 많은 경우에 있어 파괴 가능성을 낮은 수준으로 줄이기 위해 관찰 접근법을 적용하지 않는다면, 인명 손실과 같은 수용할 수 없는 리스크(unacceptable risk)를 가져올 수 있다. 굴착후 실제 지질 상태가 확인되면 불확실성의 정도는 실질적으로 감소할 것이다.

지질 불확실성의 정도가 낮다는 것은 때때로 실제 상황에서 원하지 않는 발생을 의미한다. 높은 정도는 발생 가능성이 매우 높다는 것을 나타낸다(표 5 참조). 이것이 지하 건설의 특성으로 리스크 수준을 세밀하게 구별하는 것은 어렵고 불확실한 일이다. 따라서 가장 낮은 등급이 이 수준으로 설정되었다. 지질 불확실성의 정도는 공학적인 판단에 기초하며, 표 5에는 몇 가지 지침이 제시되어 있다.

〈표 5〉 지질 불확실성의 확률과 정도 사이의 관계

Class	Description as likelihood of occurrence	Probability interval	Degree of associated geological uncertainties
1	Very unlikely	<0,01	Very low
2	Unlikely	0,01 to 0,05	Low
3	Occasional	0,05 to 0,20	Medium
4	Likely	0,20 to 0,5	High
5	Very likely	>0,5	Very High

3.2.2 통계에 기반에 평가(Estimation based on statistics)

거동 변수가 설명되고 알려져 있으며, 원하지 않는 허용 가능한 거동사이의 한계를 정의할 수 있는 경우, 원하지 않는 이벤트의 발생 확률을 추정할 수 있다. 이러한 관점에서 이러한 이슈는 원칙적으로 최근 설계코드의 한계상태설계와 동일하다.

성능 함수는 안전 여유율(SM, Safety Margin)로 설명되며, SM은 다음과 같다.

$$SM = A - P \quad (1)$$

여기서 A는 변수로 허용 가능한 거동의 한계이다. P는 거동 변수이다. 원칙적으로 허용 함수가 일반적으로 확정론적 매개변수로 주어 지더라도 두 요인은 모두 확률적 변수로 간주될 수 있다. 원하지 않는 사건의 발생 확률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_f = p(SM = (A - P) < 0) \quad (2)$$

정규 분포를 가정하고 지수의 일반적 정의인 β 를 사용하여 발생 확률을 식 (3) 및 (4)에 따라 추정할 수 있다.

$$\beta = \frac{\mu_{sm}}{\sigma_{sm}} \quad (3)$$

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (4)$$

여기서 μ_{sm} 는 안전 여유율의 평균값이고, σ_{sm} 는 표준편차이다.

계산된 확률은 평가시의 지식수준의 결과이다. 프로젝트 진행 중에 추가 정보가 얻어지면 수준은 낮아질 수 있다. 베타 값 2.3은 0.01의 파괴 확률(예: 매우 낮음)에 해당한다.

3.3 지질 불확실성과 결과(Geological uncertainties and Consequences)

3.3.1 설계 실수(Design mistakes)

설계 실수로 인한 결과는 두 그룹으로 나눌 수 있다. 한 그룹은 제3자와 예비적으로 연결된 결과에 해당하므로 사회의 책임이다. 이들은 인명 손실과 사회적 또는 환경적 결과로 나눌 수 있다. 또 다른 그룹은 경제적 손실에 연결되며, 주로 발주처와 시공자의 손실에 관련된다(표 6 참조).

<표 6> 다른 종류의 영향에 관련된 설계 실수에 의한 결과 등급

Class	Fatality	Consequence Class En 1990:2002	Type of project
1	No, in general	Low	Oil and gas storage, no people can enter
2	<1		Hydro Power tunnels
3	1 to 10	Medium	Low to medium traffic tunnels
4	10 to 100	High	Heavy traffic tunnels
5	>100		Underground stations
Class	Environmental or social impact	Consequence Class En 1990:2002	Example of impact
1	Negligible	Small or negligible	-
2	Minor		Drainage of single wells
3	Moderate	Considerable	Significant changes of the conditions of living
4	Major	Very great	Settlements in urban areas causing major damages
5	Extensive		Flooding due to dam failure
Class	Relative economic loss to project cost	Consequence Class En 1990:2002	Example of losses
1	<0.1%	Small or negligible	Negligible
2	0.1 to 1 %		Minor costs due to construction mistakes
3	1 to 10 %	Considerable	Reparation costs for inadequate design
4	10 to 100 %	Very great	Cost for reparation of local tunnel collapse
5	>100%		Rebuilding of the project due to malfunction

시설 운영중 인명 손실과 관련된 결과 등급은 프로젝트 유형과 터널 불안정성으로 인한 붕괴와 관련이 있다. 환경 또는 사회적 영향에 의한 결과 등급은 원하지 않는 사건이 발생할 경우 영향 수준과 관련이 있다. 과굴착으로 인한 지하수위 저하와 지반 침하로 인한 영향이 자주 발생하고 있다. 경제적 손실로 인한 결과 분류는 배상비 및 총사업비와 관련이 있다. 서비스 수명 기간과 관련된 기능(사용성)과 내구성 부족은 이 범주에 속한다. 이 세 가지 경우 모두 발생 확률은 설계 작업의 품질과 품질 보증에 따라 달라진다.

다른 유형의 결과들은 서로 다른 거동 변수, 다른 유형의 지하공동 그리고 발생 확률과 관련되기 때문에, 이 문제는 별도로 다루어져야 한다. 동일한 문제에 대해 가장 높은 결과 등급을 적용해야 한다.

3.3.2 터널공학 실수(Tunnel engineering mistakes)

터널공학 이슈의 리스크 부담자는 조직과 계약의 유형에 따라 발주처 또는 시공자이거나 공동으로 부담할 수 있다. 이러한 이슈는 주로 경제적 손실에 관련된 것이다(표 7 참조). 주요 이슈는 시공능력, 적절한 장비, 천공성능, 임시 지보의 설치 등 하위 이슈로 나눌 수 있다. 모든 것이 지질 정보와 밀접하게 연관되어 있으므로, 지질 불확실성은 원치 않는 성능 확률에 영향을 미치며, 계약상 많은 클레임을 일으킬 수 있다. 어떤 결과 등급을 발생할 수 있는 특정한 확률이 있을 수 있다. 리스크는 각 결과 등급의 리스크 평균값이 되며, 결과 등급의 발생 확률의 합은 1이어야 한다.

〈표 7〉 굴착중 원하지 않은 사건에 의한 결과 등급

Class	Classification	Relative economic loss to production cost	Example of disturbance of productivity
1	Negligible	<0.1%	Negligible
2	Minor	0.1 to 1 %	Minor disturbance of the productivity
3	Moderate	1 to 10 %	Medium disturbance
4	Major	10 to 100 %	High disturbance
5	Extensive	>100%	Excavation method is not applicable
Class	Fatality	Consequence Class En 1990:2002	Example of project
1	No, in general	Small or negligible	Deep tunnels
2	<1		Shallow tunnels in rural areas
3	1 to 10	Considerable	Shallow tunnels below parks, streets and roads
4	10 to 100	Very great	Shallow tunnels below buildings and crowded places
5	>100		Shallow tunnels below residential buildings
Class	Environmental or social impact	Consequence Class En 1990:2002	Example of impact
1	Negligible	Small or negligible	-
2	Minor		Drainage of single wells
3	Moderate	Considerable	Vibration
4	Major	Very great	Pollution of ground water
5	Extensive		-

3.3.3 터널굴착 실수(Tunnel excavation mistakes)

일반적으로 시공자는 리스크를 부담한다. 제3자는 인명 손실과 환경 또는 사회적 영향으로 인해 굴착 작업의 영향을 받을 수 있다. 굴착중 터널의 불안정성으로 인한 인명 손실은 깊은 터널의 경우 무시할 수 있지만 도심지 구간의 얇은 터널의 경우 상당할 수 있다. 터널은 암반 토피고가 터널 폭(D)의 2배 이상일 경우 깊은 터널로 간주한다.

환경 또는 사회적 영향에 의한 결과의 분류는 원하지 않은 사건의 발생에 의한 영향의 정도와 관련이 있다(표 7 참조). 대부분의 경우 터널 굴착으로 인한 민원은 소음, 진동 또는 대기오염으로 인해 발생한다. 일시적인 지하수위의 저하와 지하수의 오염도 이 범주에 속한다. 이것들 중의 일부는 지질 불확실성 때문은 아니다.

작업자의 안전과 같은 의무적인 법률과 관련된 모든 이슈는 리스크 평가의 일부가 아니다. 프로젝트 비용에 대한 결과만 주는 굴착중 실수는 표 7에 따라 분류할 수 있다.

3.4 리스크 관리(Risk handling)

사회의 요구사항과 관련된 모든 리스크는 별도로 다루어져야 한다. 리스크가 예상 결과 또는 비용(공정시간 확률)의 측정으로 간주할 수 있더라도 리스크 처리는 구분되고 절대적이어야 한다. 그러나 지질 불확실성의 특성은 리스크를 허용 가능한 수준으로 줄이기 위해 추가 정보가 필요하다는 것을 의미할 수 있다. 이것은 관찰적 방법과 같은 유연한 설계 방법을 사용하여 얻을 수 있지만, 사회의

최종 요구사항은 협상되거나 변경될 수 없다.

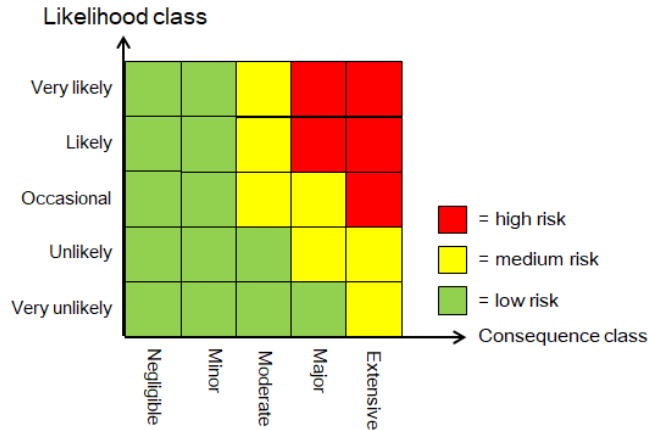
터널 설계이슈, 터널공학 및 터널 굴착이슈와 관련된 지반공학적 리스크는 예상되는 추가 비용과 관련이 있다. 이는 추가 비용에 관련되어야 하는 제로 옵션을 정의해야 함을 의미합니다. 제로 옵션에 대한 지질 전제조건 및 관련 지질 불확실성을 정의해야 한다. 비용을 증가시키는 사건 발생시 추가 비용 측면에서 그 결과를 평가해야한다. 선행 조건은 설계(인명손실, 경제적, 사회적 또는 환경 영향) 및 법률에 의해 정의된 기타 이슈에 관한 사회의 모든 요건을 충족시키는 것이다.

앞서 설정한 용어를 사용하여 불확실성과 결과 모두에 대해 선형 등급을 적용하여 지반공학적 리스크를 그림 2에 따라 평가할 수 있으며, 세 가지 리스크 수준이 제안된다. 각 프로젝트 특성 및 발주처 정책에 대해 허용 수준과 기준이 정의되어야 한다. 허용 가능한 리스크 수준을 초과하는 모든 리스크는 완화하거나 회피되어야 한다. 허용 가능한 리스크 수준은 리스크 정책에 정의되어야 한다. 다른 모든 리스크의 완화는 비용 편익 분석에 기초해야 한다. 계약 및 조직의 유형은 분석에 포함되어야 하는 리스크에 영향을 미친다.

비용 편익 분석을 적용함으로써 이론적으로 최적의 솔루션을 얻을 수 있다. 원칙적으로 최적의 솔루션은 가장 적은 예상 비용 C 이다.

$$C = \min(\text{construction cost} + \Sigma \text{risk}) \tag{5}$$

공사비는 지질 조건에 영향을 받는 확률적 변수로도 볼 수 있다. 또한 지질 불확실성은 암반 조건이 양호한 경우에 비용 평가에 긍정적인 영향을 미칠 것이라는 것을 의미한다. 그러나 리스크 관리에서 해결되지 않고 검토되지 않는 이슈는 계산 결과에 절대 반영 되지 않는다. 이러한 숨겨진 리스크를 발견하려면 품질 보증 작업이 수행되어야만 한다.



〈그림 2〉 지반공학적 리스크에 대한 리스트 매트릭스

4. 결론(Concluding Remark)

지질 불확실성(geological uncertainty)은 지하 건설에서 항상 존재한다. 계획부터 설계 및 시공까지 프로젝트의 모든 단계에서 지질 불확실성은 의사결정에 영향을 미친다. 불확실성이 목표에 미치는 영향을 지반공학적 리스크(geotechnical risk)라고 한다. 이러한 리스크는 성능, 시공 생산성 및 환경에 영향을 미칠 수 있다. 문제 있는 프로젝트와 성공적인 프로젝트 모두의 경험을 통해 지반공

학적 리스크를 성공적으로 처리하기 위해서는 리스크 상황을 종합적으로 볼 수 있는 역량이 필수적이라는 것을 알 수 있다.

지식의 부족, 보수성, 무지와 체면과 같은 인지 장애물은 좋은 의사소통을 막아 프로젝트에 망치게 할 수 있다. 서로 다른 주체들이 다른 목표를 가지고 있다는 사실을 존중하는 것은 의사소통을 용이하게 하기 위해 매우 중요하다. 서로 다른 이해 당사자는 다른 목표를 가지게 된다. 발주처는 프로젝트의 좋은 기능과 성능에 관심이 있으며, 공사비 초과 및 공기 지연에 대한 리스크 없이 프로젝트를 구축하고자 한다. 시공자는 생산 이슈, 공사비 및 공기 영향, 작업자의 안전에 초점을 맞추고 있다. 리스크는 부담자(risk owner)는 계약에 따라 다르게 된다. 프로젝트 관리와 통합된 리스크 관리 프로세스를 사용함으로써 지하 터널 프로젝트는 발주처와 고객이 만족할 만한 품질 수준에 도달할 것이다.

리스크 관리 프로세스의 초점은 지반공학적 리스크를 회피하거나 이전할 수 없기 때문에 이를 완화(mitigate)하는 것으로, 이슈에 따라 서로 다른 완화 도구를 적용해야 한다. 지반조사 기초보고서(Geotechnical Baseline Report)는 당사자 간의 지질 불확실성을 소통하기 위한 도구로, 지질 조건에 관한 분쟁과 클레임의 위험성이 감소될 것이다. 틀게이트 및 마일스톤을 사용하여 프로젝트 모델을 적용하면 실행과 관련된 리스크의 많은 부분을 줄일 수 있다. 이 모델은 중요한 영역 또는 구간을 통과하기 전에 사용 가능한 모든 지질 정보가 사용되도록 한다. 올바른 일을 하는 것(doing the right thing)에 집중하도록 하여 품질 관리를 강화하는 것이 필요하다. 이러한 작업은 전문가 위원회나 독립된 검토자를 이용하여 수행하는 것이 좋다. 이를 통해 현장의 강력한 지반공학 기술팀과 결합하면 실제 지질 상태와 관련된 리스크는 상당히 완화될 것이다. 하지만, 터널이 굴착되기 전까지는 지질 상태를 완전히 이해할 수 없으므로, 설계와 굴착 방법은 모두 실제 지질 및 지반 조건에 맞게 수정되어야 한다. 관찰적 접근법(observational approach)은 설계 잘못이나 시공 불량으로 인한 지질 리스크를 완화할 수 있을 것이다. 확률론적 접근법(probabilistic approach)을 적용하면 지질 불확실성으로 인한 시간 및 비용 평가치와 관련된 리스크를 완화할 수 있을 것이다. 성공적인 지하터널 프로젝트를 달성하기 위해서는 이러한 리스크의 모든 측면을 해결하고 관리하는 것이 필요할 것이다.

참고문헌

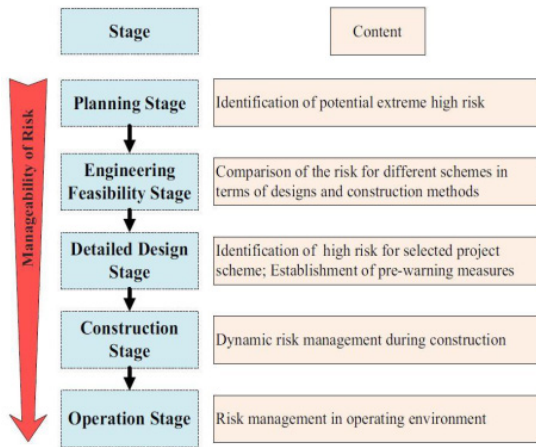
1. 김영근, 지하공사에서의 프로젝트 리스크 및 안전관리 시스템(2017), 한국프로젝트경영협회 2017 PM 심포지엄.
2. 김영근, 선진국형 터널공사 건설시스템(2018), KTA 정책연구보고서, 한국터널지하공학회.
3. 김영근, 선진국 지하대심도 개발에서의 핵심이슈와 대책(2019), 지하대심도 건설기술세미나.
4. 김영근, 지하터널공사에서의 리스크 안전관리 시스템 분석과 국내적용방안(2019), 한국건설관리학회 2019 학술발표대회.
5. Eskesen D. S., Tengborg P., Kampmann J., Veicherts H. T., Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2, 2004.
6. Hakan Stille E.: Geological Uncertainties in Tunnelling – Risk Assessment and Quality Assurance, Sir Muir Wood Lecture 2017.
7. Huang H., Zhang D.: Quantitative Geotechnical Risk Management for Tunnelling Projects in China, Geotechnical Safety and Risk V, 2015.
8. Hudec M., Kolic D., Hudec S.: TUNNELS – Excavation and primary support, HUBITG, 2009.
9. Marulanda E. A.: Risk Management in Underground Construction Through Good Contractual Practices, Latin American Tunnelling Seminar, 2017.
10. Moslavac D.: Тунели (Tunnels), authorized lectures, Faculty of Civil Engineering – Skopje, 2006.
11. Shpackova O.: Risk management of tunnel construction projects, Doctoral Thesis, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, 2012.

- 12. Tomanovic Z.: Tuneli i podzemne konstrukcije (Tunnels and underground constructions), authorized lectures, Faculty of Civil Engineering – Podgorica, 2015.
- 13. Zafirovski Z.: Тунели (Tunnels), authorized lectures, Faculty of Civil Engineering – Skopje, 2016.

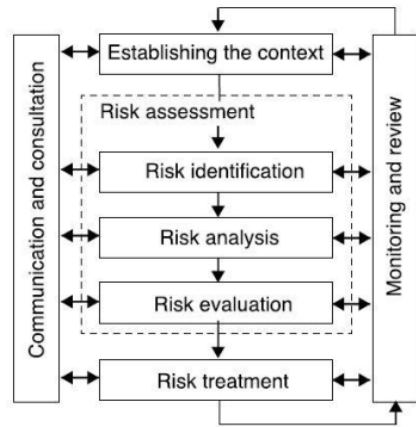
■ 지하터널공사에서의 불확실성과 리스크 관리

지하터널공사에는 필연적으로 불확실성과 리스크가 존재한다. 이는 프로젝트의 모든 단계에서 중요한 의사결정요소로서 공사비와 공기에 중요한 영향을 미치게 되며, 또한 경제적, 사회적 및 환경 영향을 미치게 되어 주요한 민원요인과 프로젝트의 성패를 가져올 수 있음이다.

일반적으로 목표에 대한 불확실성의 영향(effect)을 리스크(risk)라고 한다. 지하터널 프로젝트의 경우 상대적으로 리스크가 크기 때문에 보다 체계적인 리스크 관리가 요구된다. 리스크를 성공적으로 컨트롤하기 위해서는 리스크 상황을 종합적으로 볼 수 있는 기술 역량과 경험이 필수적이며, 리스크 관리 프로세스의 초점은 효과적인 기술 대책을 제시함으로써 리스크를 합리적 수준으로 완화(저감)하는 것이어야 한다. 또한 프로젝트 특성과 발주처 요구조건 및 관련 규정에 따라 리스크 평가 및 관리에 대한 다양한 접근 방식이 요구되며, 리스크 평가와 관리절차는 다음 그림에 잘 나타나 있다.



프로젝트 단계별 리스크 관리



리스크 관리 프로세스(ISO 3100)

■ 제9강을 마치면서

다시 본 기술강좌를 연장하게 되었다. 지난 2년간 8강을 통해 지하터널공사에서의 리스크 평가와 관리에 대해 소개하면서 아쉬움도 많고 부족함도 많았기 때문이기도 하다. 항상 그렇듯이 돌이켜 보면 부족함만이 눈에 들어오게 되는 것인가 싶다.

지질 및 지반의 불확실성은 터널 기술자의 영원한 숙제로서 이를 체계적으로 평가하고자 하는 노력이 가장 중요한 터널기술자의 기술적 과제라고 생각한다. 지하터널공사와 같이 지질 및 지반 불확실성이 클수록 이를 더 잘 분석하고 검토하고 대응해야 하지 않을까?

최근 지속적으로 발생하는 터널 문제와 사고를 보면서 우리 터널기술자들이 보다 근본적으로 터널 기술에 심각하게 고민하고, 터널 공사 시스템에 대하여 보다 철저하게 검증하는 노력들이 이루어져야 한다고 생각한다. 터널에서 발생하는 문제와 사고를 단지 불확실성의 요인으로만 탓하기에는 엔지니어에 대한 사회적 요구와 기술 수준에 대한 국민적 기대가 참 많이 달라졌거나 높다고 생각한다.

이러한 해결 대안으로서 터널링에서의 리스크 평가와 관리는 반드시 수행되어야 하는 필수적인 것으로 생각해 본다. 우리도 이제는 보다 선진적으로, 보다 체계적으로, 보다 정량적으로, 보다 시스템적으로, 보다 소통적으로 지하터널공사를 수행하여야 하지 않을까 하는 바램을 가져본다.

[본 기사는 저자 개인의 의견이며 한국터널지하공간학회의 공식입장과는 무관합니다.]