

정보화시공을 위한 지반굴착에 따른 지반거동의 이해

The ground behaviour during excavations and tunnelling

김상환¹⁾, Sang-Hwan Kim, 방규민²⁾, Gyu-Min Bang

¹⁾ 호서대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Hoseo

²⁾ 호서대학교 지반연구실 수석연구원, Senior Researcher in Chief, Geotechnical Engineering Division, Univ. of Hoseo

SYNOPSIS : 목적구조물의 건설을 위한 지반굴착시 지반거동에 대하여 보다 현실적이고 개념적으로 제시하여 정보화시공시 보다 안전시공을 위하여 지반굴착에 따른 지반거동에 대한 이해를 도모하고 신속한 문제해결 기술에 활용되도록 하였다. 굴착시에 대하여서는 개착 뿐만 아니라 터널의 굴착도 포함하여 지반거동을 이해하기 위한 기본개념과 아울러 지반거동에 대한 정성적인 분석기법에 대하여서도 제시하였다.

1. 서 론

최근 도심지역에서는 지하철과 같은 주요교통 수단의 이용이 날로 증가되고, 이와 같은 교통수단의 발전과 아울러 도심지구구조물도 고층화되고 있는 실정이다. 이러한 구조물의 건설, 즉 지하철, 지하차도, 빌딩 및 기타목적구조물 등의 건설을 위하여서 지반의 굴착은 필수적이라고 말할 수 있다, 또한 굴착에 있어서도 대형화되는 추세에서 있기 때문에 더욱 안전시공을 위한 정보화시공이 요구되는 실정이다.

정보화시공의 중요성이 대두되는 현실에서, 현장에서 발생하는 여러 문제해결을 위하여 장시간이 소요된다거나 전문가에게만 의존하는 비경제적인 현장관리는 배제되어야 할 것으로 판단된다.

따라서, 현장에서 지반 굴착시 야기되는 지반거동에 대한 이해가 우선되어야 할 것으로 판단되며, 지반거동의 이해부족으로 인한 무시, 시공 중요도 인식 부족으로 인한 부주의와 태만, 그리고 목적의 오해 등 이러한 복합적인 오류로 인하여 목적구조물의 문제는 끝없이 발생하며, 이로 인한 유지보수비용 증가와 인명피해까지도 야기되고 있는 실정이다. 구체적으로 가장 일반적으로 지반굴착시 파괴거동을 야기시킬 수 있는 범주로는 기초하부의 굴착, 하중전이, 횡 방향 변위, 불균형적인 지지, 침하와 용기 또는 팽창, 설계오류, 시공오류, 부력발생 및 지하수위 변동, 진동영향, 지진영향 등을 들 수 있다.

여기에서는 정보화시공을 위하여 지반굴착시 지반거동에 대하여 보다 현실적이고 개념적으로 제시하여 터널을 포함한 모든 지반의 굴착 시 지반거동에 대한 이해를 도모하고 신속한 문제해결 기술에 활용되도록 하였다.

2. 기본지반정수의 이해

2.1 강성(Stiffness)과 강도(Strength)의 개념

Mohr 원을 이용하여 압력 또는 하중이 가해지는 물체의 응력과 변형관계에 있어서 기본적으로 적용하는 개념은 동일하다. 그러나 각 재료의 거동을 분석하기 위하여서는 재료특성에 따른 응력과 변형의 관계식이 필요

하며, 이 관계식을 구성방정식 (Constitute relationship)이라고 말하고 있다. 그림 1은 이상적인 응력-변형 관계곡선을 나타낸 것이다. 그림과 같은 관계곡선은 보편적인 공학재료에서 일반적으로 유사한 관계를 보이나, 지반을 구성하고 있는 흙과 암의 경우 입자간의 간극 또는 불연속면에 존재하는 간극수압을 고려한 유효응력 개념의 접근이 필요하다. 유효응력 (Effective stress, σ')은 입자간의 전달되는 응력으로 지반의 강도 및 강성을 포함한 모든 지반거동을 좌우하게 된다. 특히, 지반거동에 있어서 지반의 강도와 강성은 지반의 파괴 및 변형을 분석 예측하는데 매우 중요한 매개변수로서 그들의 진정한 의미를 이해할 필요가 있다.

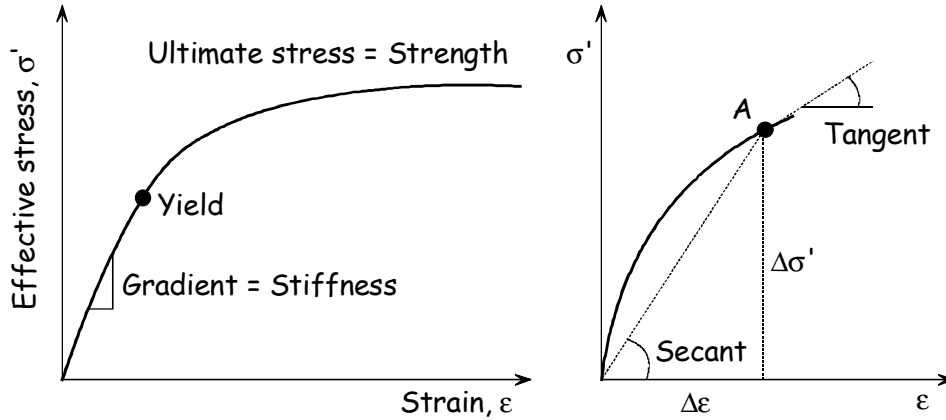


그림 1. 응력-변형을 관계, 강도 및 강성

강성(Stiffness)이란 응력-변형 관계에서의 기울기를 의미한다. 만약 직선관계라면 그림1에서 나타낸 것과 같이 쉽게 이들의 기울기는 얻어질 수 있다. 그러나 상기 그림의 우측과 같이 곡선인 경우는 A점에 있어서의 강성(Stiffness)은 활선(Secant)과 접선(Tangent)의 기울기 등으로 구분하여 다음의 식으로부터 개별적으로 얻어질 수 있다.

$$\text{Tangent stiffness} = \frac{d\sigma'}{d\varepsilon} \quad (1)$$

$$\text{Secant stiffness} = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\varepsilon} \quad (2)$$

이와 같은 강성(Stiffness)은 지반의 경우에 있어서 달리 표현하면 압축성(Compressibility)이라고 말할 수 있다. 또한 그림에서도 보여주듯이 기본적으로 응력-변형 거동은 변형이 복원될 수 있는 탄성상태에서 변형이 복원되지 않는 비탄성상태로 변화한다.

강도 (Strength)에 있어서는 재료가 견딜 수 있는 가장 큰 응력을 말하며, 구조물의 붕괴나 안정성을 좌우하는 극한 상태에서의 응력이라고 정의 할 수 있다.

상기와 같이 강성과 강도의 개념으로부터 서로 큰 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 강성의 경우는 변위를 좌우하는 Deformation Modulus이며, 강도의 경우는 붕괴 및 안정성을 결정하는 Failure Criteria라는 것이다. 따라서, 물질에 따라 강성과 강도의 크기는 서로 일치하지 않는다는 점이다. 예를 들어 분필과 두꺼운 고무줄을 서로 당기면 분필은 고무줄보다는 변형이 적지만 결국 고무줄에 의하여 부러지고 말 것이다. 이는 그림2와 같이 분필의 경우 강성은 크지만 강도면에서 고무줄보다 작기 때문이라고 말할 수 있다

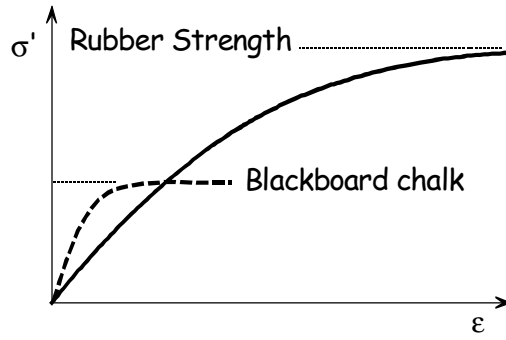


그림 2. 분필과 고무줄의 강도와 강성비교

상기 언급 내용과 같이 지반의 경우에 있어서도 지반의 강성과 강도의 특성에 따라 그들의 거동은 상당히 다르다는 것을 알 수 있다. 따라서, 지반의 거동은 흙과 암에 대한 강성과 강도 특성에 대하여 세밀한 분석을 실시하여 검토되어야 할 것이다.

2.2 계수(Coefficient)와 지수(Index)의 차이

계수(Coefficient)와 지수(Index)는 일반적인 공학적인 문제를 해결하는데 매우 중요한 매개변수들이다. 특히, 지반공학적 문제해결에 있어서는 그들의 의미에 대한 정확한 이해가 요구되며, 적용에 있어서도 특히 유의하여야 한다. 계수와 지수와의 관계는 그림3에서 제시된 점토의 압밀시험에서 얻어지는 압축계수(Coefficient of compressibility)와 압축지수(Compression index)로부터 그 의미를 명확히 알 수 있다. 이 그림에서 보면 동일한 실험자료를 x축에 대하여 log Scale의 사용유무에 따라 다르다는 것을 보여 주고 있다. 그러나 기울기를 좌측의 경우 계수(Coefficient)로 log Scale을 사용한 우측의 경우 지수(Index)로 정의하였다. 이들 두 Plotting 자료의 차이는 곡선의 기울기가 응력상태에 따라 변화하느냐에 따라, 계수와 지수로 서로 다르게 정의 하였다는 것을 알 수 있다. 여기서, 계수라는 값은 응력상태에 따라 변화하는 값을 알 수 있고, 지수는 응력상태에 관계없이 일정한 지표로 제시되는 값을 알 수 있다.

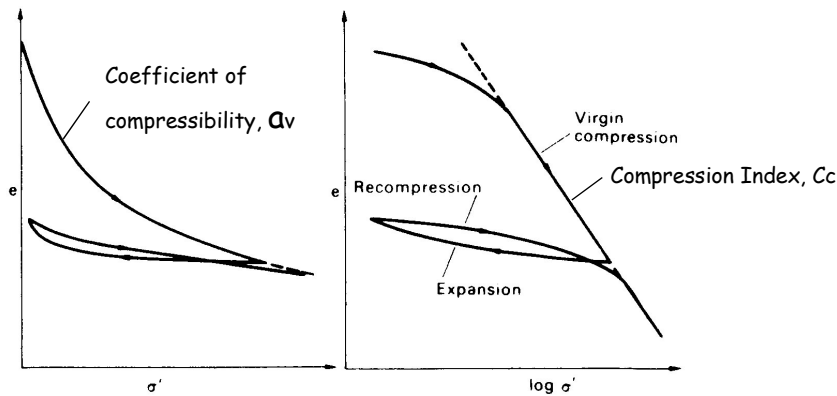


그림 3. 지수와 계수와의 비교

상기 예를 통하여, 지수와 계수는 서로 상당히 다른 개념을 가지고 있음을 알 수 있다. 특히, 탄소성체인 지반의 경우 응력-변형관계는 실질적으로 비선형 거동을 나타내므로 지반 관련 해석시 일반적으로 일정한 탄성 계수값을 적용하는 것은 실질적인 현상과는 동떨어진 해석결과를 보여준다는 것을 명심하여야 할 것이다. 아울러, 지반의 투수 해석시 이용하는 투수계수의 경우도 지반응력 변화에 따라 그 계수값은 변화되는 값이므로 이를 고려한 Coupled analysis가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

2.3 코아회수율(TCR) 과 암질표시율(RQD)의 이해

암질판정을 위하여 지반조사시 기본적으로 암반에서 얻어지는 값으로는 코아회수율(TCR)과 암질표시율(RQD)을 들 수 있다. 이 두 값은 암반의 등급을 결정하는데 매우 중요한 값이므로 이들에 대한 정의와 함께 의미를 이해하는 것이 더욱 중요하다.

TCR(Total Core Recovery)은 코아회수율로써 Core boring을 해서 채취한 Boring core들의 길이를 누적하고 시추길이에 대한 백분율로 간단히 계산되어지는 값이다. 또한, RQD (Rock Quality Designation)란 암질표시율로써 암질지수를 나타내는 것으로 Core boring을 해서 채취한 Boring core중에 10cm이상의 Core의 누적길이를 시추길이에 대한 백분율로 계산된 값을 말한다. 이 값은 원래 1963년 Deere에 의하여 NX 시추공에서 얻어진 Core를 이용하는 것으로 되어 있으나, 최근, 심도가 깊을 경우 작업의 효율성을 위하여 실시되는 NQ 시추공에서 얻어진 Core로부터 얻어진 값과 큰 차이가 없다고 판단되어 구분 없이 RQD를 계산하여 이용하고 있는 실정이다. 일반적으로 RQD값이 0~25%의 경우는 매우불량, 25~50%의 경우는 불량, 50~75%는 보통으로, 75~90%는 양호로 90~100%는 우수로 분류한다. 이 값들의 진정한 의미는 암석의 강도를 의미한다고 볼 수 있다.

상기 TCR과 RQD에 대한 계산 방법에 대하여 구체적으로 나타내면 그림 4와 같다. 주의사항으로는 RQD 산정시 Core의 절리가 그림에서 보여주듯이 세로의 절리가 있을 경우에는 Core의 길이가 10cm이상일 경우 계산에 포함시키는 것이 일반적이다.

상기 언급내용과 같이 TCR과 RQD의 산정방법은 매우 간단하다고 볼 수 있고 계산에 의하여 얻어진 수치보다는 이들 값에 내포하고 있는 의미를 이해하는 것이 더욱 중요하다.

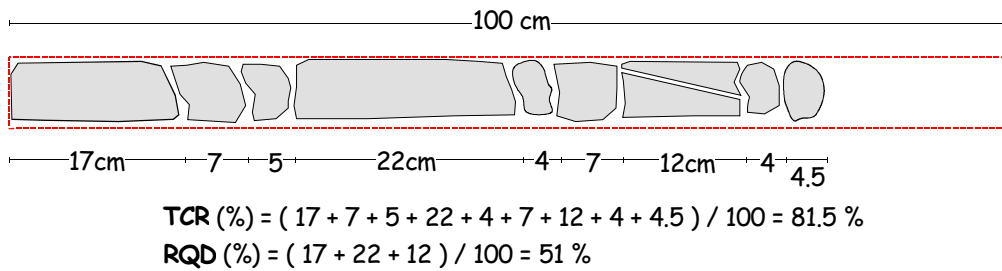


그림 4. TCR과 RQD 산정방법

TCR과 RQD에 대한 의미에 대하여서는 그림 5로부터 알아 볼 수 있다. 이 그림에서 보여주는 것과 같이 불연속면의 분포가 다른 3종류의 지반에서의 TCR과 RQD에 대하여 나타낸 것이다.

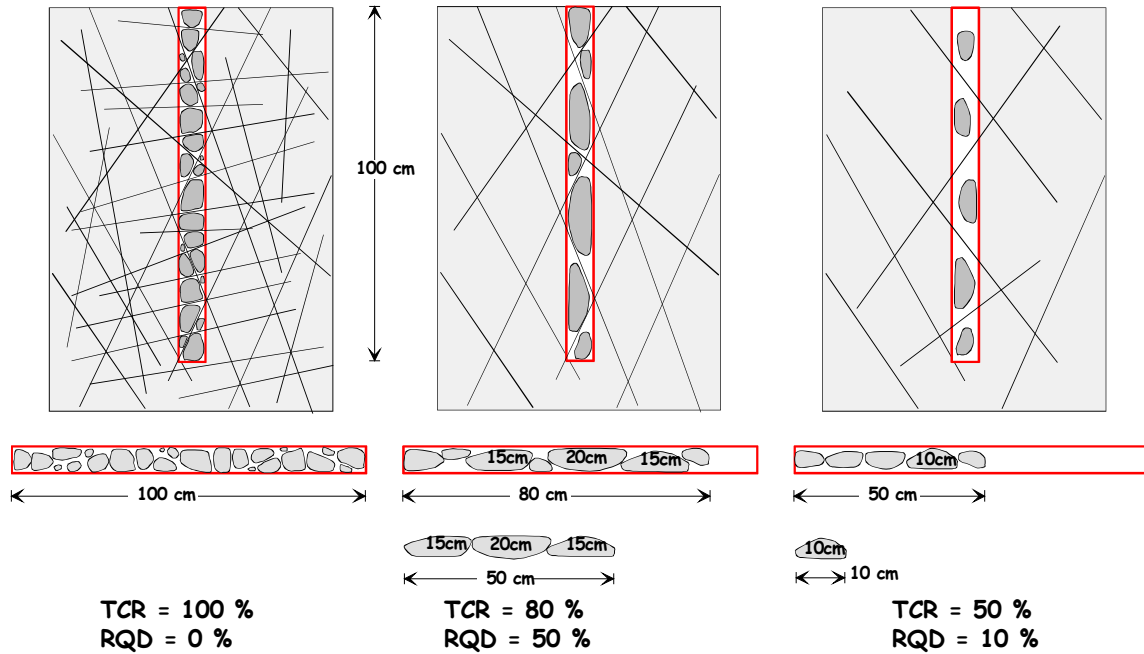


그림 5. TCR과 RQD 의 이해

상기 그림에 나타난 내용을 분석하여보면 TCR값의 경우 불연속면의 수보다는 불연속면의 풍화상태에 크게 좌우된다는 것을 알 수 있다. 다시 말해서, 불연속면에 사이에 있는 암석의 풍화정도, 즉, 암석의 강도를 간접적으로 말해준다고 볼 수 있다.

RQD의 경우에 있어서는 불연속면 사이의 암석자체의 강도보다는 암반전체의 강도를 나타낸다고 볼 수 있다. 상기 그림의 첫 번째 지반의 경우 TCR은 100%로 상당히 크나 RQD의 경우 0%라는 점을 감안해보면 이 지반은 암반이라기 보다는 자갈층과 같은 암석자체의 강도는 크나 전체적인 지반의 강도는 작을 것이라는 예측을 할 수 있다.

결론적으로 TCR과 RQD의 값들로부터 암석의 강도 및 암반의 강도를 간접적으로 예측할 수 있을 뿐만 아니라 굴착 시 지반상태에 따른 굴착방법선정 검토에 있어서도 활용되어야 할 것으로 판단된다.

2.4 암반의 특성평가와 RQD값의 이해

역학적인 면에서 암반은 암석이 상당히 단단하고 불연속면이 매우 적게 나타나며 이완이 거의 없어 암석과 큰 차가 없는 공학적 특성을 가지는 암반은 변형이 적고 강도가 높다. 따라서 탄성체로 취급해도 좋은 가장 견고한 암반이라 평가 할 수 있다. 그러나, 암석은 상당히 단단하지만 불연속면이 존재하여 이완이 있어 암석의 공학적 성질과 상당히 차이 나는 성질을 가지는 암반은 불연속면의 영향이 가장 크다고 할 수 있다. 또한 암석의 고결도가 낮고 불연속면은 거의 존재하지 않지만 존재해도 이완이 적고, 암석과 큰 차이가 없는 공학적 성질을 나타내는 암반은 고결도가 낮으므로 불연속면의 영향은 무시할 수 있지만 변형이 크고 강도가 낮아서 탄성체와는 다른 거동을 나타나게 된다. 특히, 암석의 고결도는 상당히 낮고 불연속면이 존재하고 이완도 있어 불연속면과 낮은 고결도의 영향이 나타나는 암반의 경우는 역학적으로 가장 복잡한 거동이 예측되므로 공학적인 상수의 적용에 신중해야 한다.

여기서 역학적 성질을 크게 나누면 그림6과 같이 암반 그 자체의 강도(고결도), 암반 중에 존재하는 불연속면의 상태(분포유량, 상태, 미끄러움 정도등)로서 암반은 이 두 가지의 영향을 받는다고 볼 수 있다. 암반의 강도특성이나 변형특성은 경암의 경우에는 불연속면의 상태에 의하여, 고결도가 낮은 암반의 경우에는 암석 그 자체의 강도에 의해 지배된다. 특히, 풍화암의 경우에는 암석의 강도도 어느 정도 크고 절리 등 불연속면도 많으므로 이 두 가지의 영향을 받게 된다.

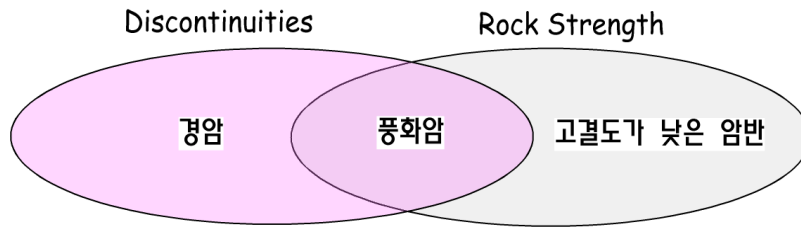


그림 6. 암석의 역학적특성의 지배요소

상기와 같은 암반조건들을 구체적으로 고려하여 암반에 등급을 부여하는 암반분류는 암반굴착설계에 있어서 매우 중요한 필수 과정이라고 볼 수 있다.

암반굴착설계시 암반분류방법에 있어서는 RQD값이 공통적으로 매우 중요한 Parameter임을 알 수 있다. 일반적으로 암반분류에 사용하고 있는 RQD값은 시추공이 수직일 것이라는 가정하에서 사용되고 있다. 그러나, 시추공의 심도가 깊을 경우 시추공의 수직도에 있어서 신뢰성은 낮을 것으로 판단되며, 그림7과 같이 A,B,C경우로 구분하여 분석할 필요가 있다. 이 그림에서 보여주는 것과 같이 시추공의 수직도에 따라 RQD의 값은 절리가 많은 경우 상당한 차이를 보여줄 것으로 판단된다. 만약 C경우를 A경우로 오인했다면 RQD의 값은 과대평가 되었을 가능성이 있으며, B경우라면 과소평가 되어 결국 이렇게 분류된 암반등급은 정확성이 떨어지게 되고 이에 따른 제반 터널설계결과에 영향을 미치게 될 것이다. 따라서, 시추작업에 대한 철저한 현장상황을 분석, 검토하여, 설계시 반영될 수 있도록 하여야 하며, 암반의 절리상태를 고려하여 필히 RQD값에 대한 적절한 보정이 필요 할 것으로 판단된다.

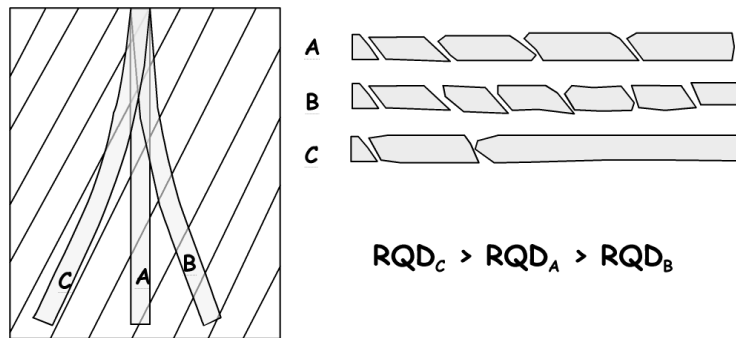


그림 7. 시추경사에 따른 RQD값의 변화

3. 토사(soil) 및 암반(Rock)지반에서의 현장시험결과의 차이

지반은 크게 토사와 암반으로 구분되어 진다. 지반상태의 규명을 위한 현장조사 및 시험방법에 있어서도 토사와 암반에서는 서로 동일하지 않을 뿐만 아니라, 그 결과의 설계적용에 있어서도 신중하여야 할 것이다. 최근 토사나 암반에 대한 지반상수에 대하여 다양한 통계적인 접근방법을 도입하여 설계적용상수를 선정하고 있으나, 근본적으로 그 들 지반상수가 어떻게 얻어졌는가하는 점에서의 이해가 필요하다. 일반적으로 토사의 강도를 나타내는 현장시험으로는 대표적으로 표준관입시험으로 부터 얻어지는 N치를 들 수 있고, 암반의 경우에 있어서는 RQD값을 들 수가 있는데, 만약 조사장비 및 방법 등에 오류가 있었다면, 토사의 경우 N치는 과대평가 되었을 가능성이 있으며, 반면 암반의 경우 RQD값은 과소 평가되었을 것이다. 따라서 현장점검을 통하여 이러한 문제점에 대하여서는 그림8에 나타낸 것과 같이 지반상수 선정시 충분히 고려하여 설계에 반영되어야 할 것이다.

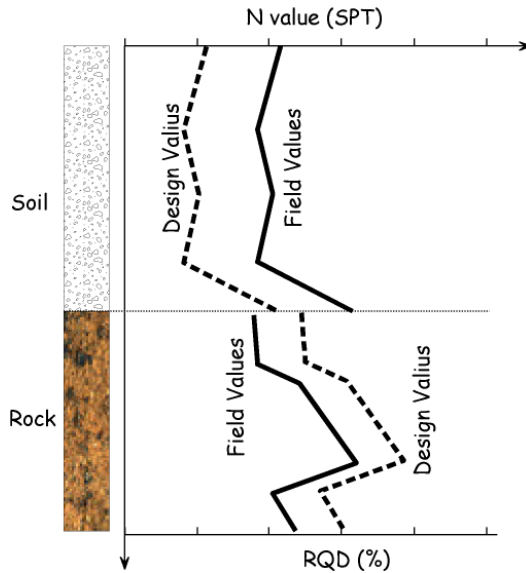


그림 8. 토사와 암반의 현장자료의 설계적용

4. 배수와 비배수의 이해 (Drained and Undrained Condition)

4.1 배수와 비배수 개념

지반에 하중을 변화시키면 하중이 변화 동안 간극 속의 물이 침투되기도 하고 그렇지 않을 수도 있다. 이러한 상태를 하중변화에 따른 배수와 비배수 상태로 구분한다.

지반에 전 응력을 천천히 변화시키게 되면, 간극수압의 변화가 없기 때문에 전응력의 변화량은 모두 유효응력의 변화량과 같게 된다. ($\delta\sigma = \delta\sigma'$). 유효응력의 변화에 따라 체적은 변화하게 된다. (그림9) 한편, 전 응력을 매우 빠르게 변화시키게 되면, 체적의 변화는 없으며, 지반이 등방상태에서, 유효응력의 변화는 없기 때문에 ($\delta\sigma' = 0$) 간극수압은 전응력의 증가량과 동일하게 증가되는데 ($\delta\sigma = \delta u = \overline{u_0}$) 이 증가되는 간극수압을 과잉간극수압이라 하고 시간이 지나면서 과잉간극수압은 소산되며, 이 과정(압밀)에서 체적변화가 발생 된다. (그림10)

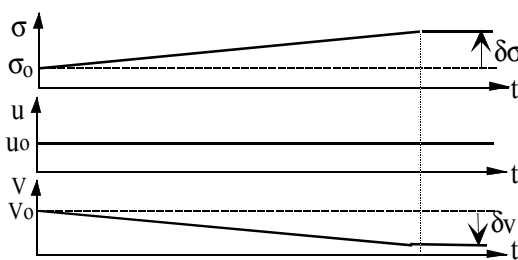


그림 9. 배수상태의 기본개념

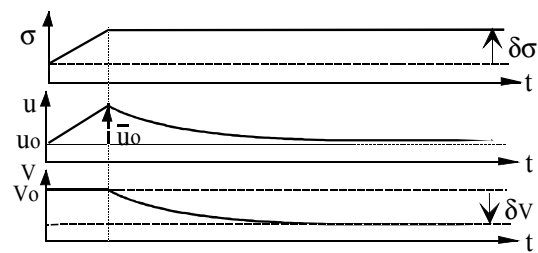


그림 10. 비배수상태의 기본개념

상기 언급내용에 따라, 배수와 비배수상태를 구분하는 중요한 수단은 하중변화의 속도 (즉, 터널의 경우 굴착속도)와 지반의 체적변화속도(압밀 및 침투속도)와의 상대비교이다.

비록 투수성이 큰 사질토의 경우라 하더라도 하중의 변화를 상당히 빠르게 하면 하중이 변하는 동안

비배수상태일 것이고, 점성토라 하더라도 천천히 하중을 변화시킨다면 배수상태로 간주하여야 할 것이다. 따라서, 배수조건에 대한 개념은 지반의 종류와 이들 지반에 가해지는 하중조건(시공속도)등에 대한 우선적인 분석이 요구되어 진다.

표1은 대표적인 하중 종류별 재하시간을 요약 정리한 것으로 하중의 재하시간에 따른 지반에 가해지는 하중의 변화속도와 지반거동과 종합적으로 분석하는 활용되어야 할 것이다.

표 1. 대표적인 하중 종류별 재하시간

지반공학적 하중종류	기간 (Duration)
Shock, Wave	1 ~ 10 초
지진하중	1분이하
트렌치 굴착	3시간이하
소형기초	여러일 이상 (10일)
절토 (Cutting)	수개월
대형기초	1년이상
성토 (Embankment)	수년(3년)
Erosion	수십년(30년)

4.2 배수, 비배수에 따른 지반거동의 기본개념

지반의 배수조건에 따른 특성을 알아보기 위하여서는 복잡한 이론적 접근이 필요하나 본 절에서는 토질공학적 터널거동의 이해를 도모하기 위하여, 우선적으로 배수조건(Drained 또는 Undrained)에 따른 기본적인 지반의 응력-변위 특성을 흙의 경우를 들어 알아보려고 한다. 이를 위하여 약간 과압밀된 점토의 실내삼축시험시 얻어질 수 있는 이상적인 응력-변위곡선 및 응력경로를 가지고 배수, 비배수상태의 거동에 대하여 고찰해 보고자 한다.

그림11은 대표적인 배수와 비배수상태의 응력경로 및 응력-변위곡선을 나타낸 것이다.

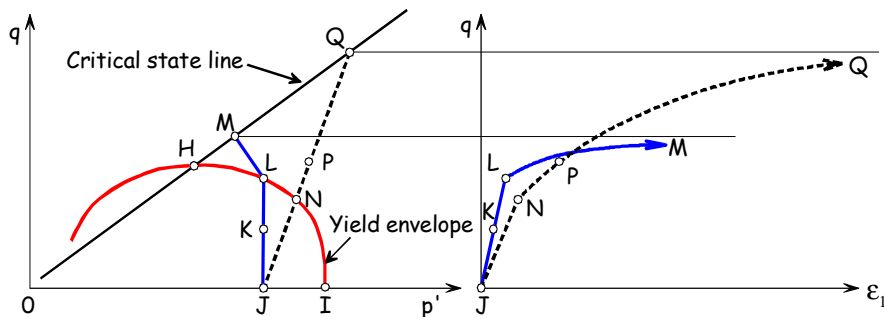


그림 11. 배수조건(배수/비배수상태)에 따른 응력경로

이 그림에서 J점은 초기응력상태이고, HLNI 곡선은 항복포락선(Yield envelope), 그리고 OHMQ 직선은 한계상태선 (Critical State Line)을 나타낸 것이다.

초기응력 J로부터 비배수상태의 유효응력경로는 JKLM으로 응력-변형곡선에서 보여주듯이 항복포락선까지의 경로 JKL은 성형적 탄성거동을 하게되며, 항복점 L를 통과한후 유효응력경로 LM은 탄소성거동을 하게된다. 이러한 거동에 따라 비배수상태 ($\nu_u \equiv 0.5$)에서의 초기탄성계수는 JKL의 기울기로써, Hooke's Law를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta q}{\Delta \epsilon_1} \equiv \frac{\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3}{\Delta \epsilon_1} = E_u \quad (3)$$

한편, 배수상태에서의 유효응력경로는 JNPQ로써 $\Delta\sigma_3' = 0$ 이므로, 기울기가 3인 직선경로가 된다. 상기에서 언급한 비배수경우와 같이 탄성거동은 유효응력경로 JN에서 일어나며, N점에 도달하면 항복하게 되며, 그이후는 탄소성거동을 하다가 궁극적으로는 한계상태 Q에 도달하여 파괴된다. 이 경우, 초기탄성계수는 JN의 기울기로 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\frac{\Delta q}{\Delta \varepsilon_1} \equiv \frac{\Delta \sigma_1' - \Delta \sigma_3'}{\Delta \varepsilon_1} = E' \quad (4)$$

상기 언급한 내용에 따라, 비배수와 배수상태의 초기탄성계수의 관계는 다음과 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{E_u}{2(1+\nu_u)} = G_u \equiv G' = \frac{E'}{2(1+\nu')} \quad (5)$$

$$\frac{E_u}{E'} = \frac{2(1+\nu_u)}{2(1+\nu')} = \frac{3}{2(1+\nu')} \quad (6)$$

상기 관계식으로부터, 점토의 경우, 배수상태의 포아송비, ν' 값은 일반적으로 0.12 에서 0.35사이의 값을 보이므로, 결과적으로 배수와 비배수 상태에서의 초기탄성계수비 E_u/E' 는 1.11 에서 1.34 사이의 값으로 예측할 수 있다. 따라서, 비배수상태에서의 초기탄성계수 (E_u) 배수상태와 비교해 볼 때 10 ~ 34% 더 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 하중변화에 의한 지반의 초기변형에 있어서도 비배수 상태가 배수상태보다는 적게 발생할 것이라는 것을 암시한다.

5. 지반과 구조물과의 상호거동특성

5.1 지반과 기초와의 상호거동의 이해

지반과 기초와의 상호거동 있어서 가장 기본적으로 이해하여야 할 사항으로는 토사와 암반에서 기초의 거동이라고 말할 수 있다.

일반적으로 동일한 두께와 크기의 기초경우 토사보다는 암반의 경우가 더 안전 할 것이라고 일반적으로 생각 할 수 있다. 이는 지반의 지지력 측면에서 암반이 토사지반보다 더 크기 때문이라는 기본적인 생각 때문이다. 그러나, 기초자체의 안전적인 측면에서는 기둥을 통해 가해지는 하중이 기초를 통해 어떻게 지반에 전달될 것인가에 따라 기초의 거동은 다른 양상을 보이게 된다. 그림12는 토사지반과 암반에서의 예상되는 기초의 접지압 분포를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 동일한 제원의 기초인 경우 토사에서의 야기되는 접지압 분포를 얻기 위하여서는 기초의 두께가 두꺼워야 한다는 사실을 알 수 있다. 다시 말해서 기초의 강성과 지반의 강성과의 관계에 따라 접지압의 경향은 다르다는 것을 알 수 있다.

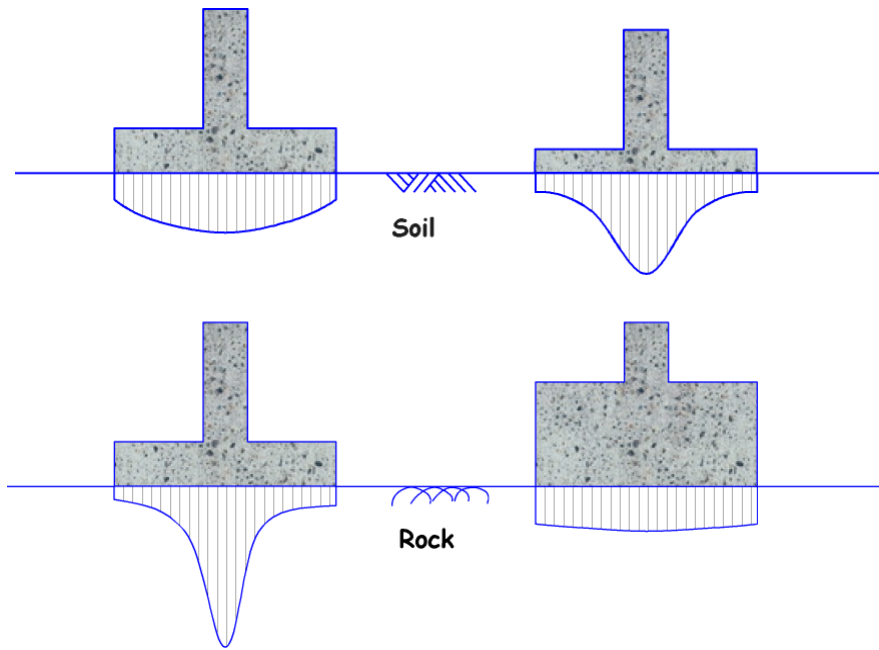


그림 12. 토사와 암반에서의 접지압분포

5.2 하중전이의 기본 메커니즘

최적의 설계로 완공된 골조 구조물의 경우는 기초의 상당한 변위에 대하여서도 허용될 수 있다. 건물의 벽체, 슬라브, 골격 및 격벽등 전체의 시스템이 서로 강성적으로 연결되었다면 부등침하에 대하여 그 자체에서 적절하게 조정될 것이다. 이는 기초 침하에 따라 기둥을 통해 골조 시스템에 의한 하중전이가 이루어지기 때문이다. 강성이 없을 경우는 하중전이보다는 국부적인 지지에 의하여 직접 지반에 하중이 전달되게 된다. 만약 국부적인 지지능력이 없다면 파괴되고 만다. 반면에 구조적 강성이 있는 경우는 수평적으로 다른 기초로 하중전이가 일어나게 된다. 그러나 전이된 하중을 주변 기초가 견지지 못하면 파괴되고 만다. 그림13은 이러한 거동을 그림으로 잘 설명해 주고 있다. 5명의 사람이 통나무를 운반하고 있다 통나무의 무게는 균등하게 분배될 것이다. 그러나 A사람이 웅덩이에 빠지면서 갑자기 B 사람으로 하중이 전이되어 B사람은 더 많은 하중이 추가로 부가되게 된다. 만약 B사람이 견디기 힘들 경우 C사람까지도 하중이 전이되는 것이다.

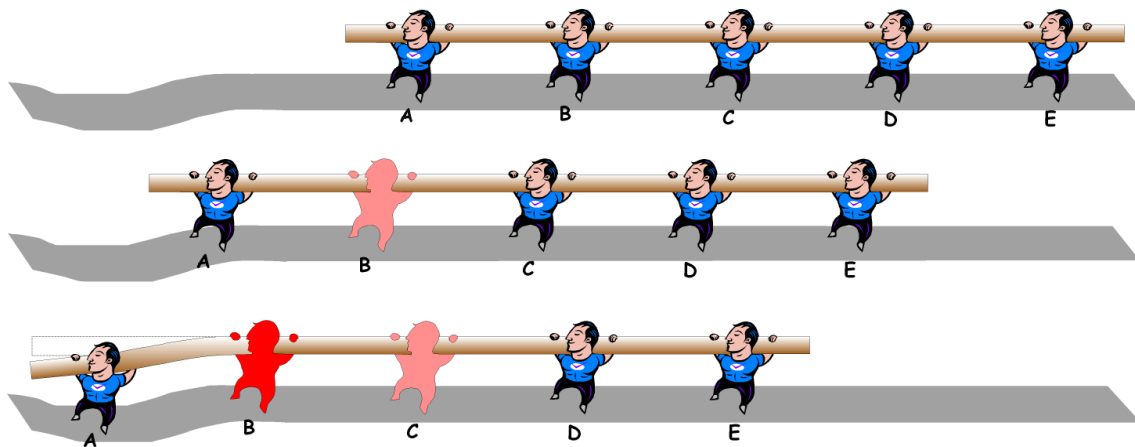


그림 13. Diagram of log deflection

상기 그림에서 나타난 것과 같이 기초의 거동도 하중전이에 따라 변화하는 양상이 다르며, 이는 전적으로 기초연결부의 강성상태에 따라 좌우됨을 알 수 있다.

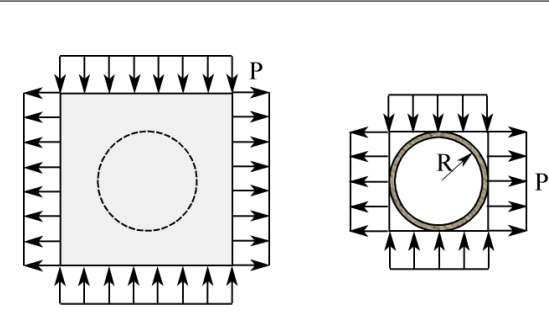
그림11은 실질적으로 기초가 파괴된 예를 나타낸 것으로써 기존건물 왼쪽으로 인접하여 굴착하는과정에서 횡적지반변위가 없도록 시공과정에 있어서 매우 기술적으로 굴착하였으나 지하수 저하에 따른 지반침하로 기존건물의 첫번째열의 말뚝이 침하변형이 발생함에 따라 다음 말뚝 열로 하중전이가 되어 하중이 추가됨에 따라 지반의 지지능력보다 말뚝에 부가되는 하중이 더 커지게 되어 결국 두번째열 말뚝들도 침하가 발생하게 되는 것을 보여주고 있다. 이와 같이 점차적인 하중전이로 결국 건물은 그림과 같이 비틀리게 되며 이에 따른 구조적 저항력이 견디지 못하고 벽체 및 기둥에 균열등과 같은 건물에 치명적인 위험을 받게 된다.

5.3 지반과 터널구조물과의 상호거동 이해

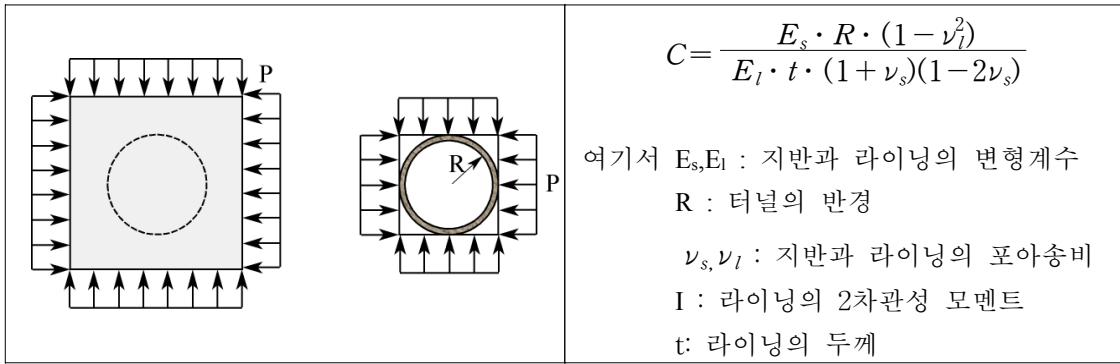
터널에 인접에 있는 지반의 거동은 라이닝의 강성에 큰 영향을 받는다. 1972년 Peck교수는 지반내에서 라이닝의 거동을 지반과 라이닝의 상호 거동에 따라 Flexible과 Stiff로 구분하여 언급 하였다. 'SOFT' 지반내의 Stiff 라이닝은 'HARD'지반에서는 Flexible하게 거동한다는 의미이다. Flexible 라이닝의 경우, 초기에는 Ring 압축과 같이 라이닝과 연직방향으로 지반의 하중이 라이닝에 균등한 분포로 작용하게 되며, 따라서 휨모멘트도 작게 발생된다. 반면 Stiff 거동을 하는 라이닝의 경우 지반하중은 라이닝의 Bending Action에 의해 지지하는 것이라 볼 수 있다.

이와 같이 지반내의 라이닝 거동 특성은 라이닝 자체의 강성과 지반의 강성의 비로 표현 할수 있다. 따라서 근접터널의 경우 두 터널 라이닝의 Flexibility 와 Compressibility 는 터널거동의 중요한 영향 요소의 하나이다.

Flexibility Ratio(F) 값은 주변지반의 전단강도에 따른 터널 라이닝의 Bending Stiffness에 의해 결정하는 요소이며, 다음과 같은 식에 의하여 계산되어 진다.

	$F = \frac{E_s \cdot R^3 \cdot (1 - \nu_l^2)}{6 \cdot E_l \cdot I \cdot (1 + \nu_s)}$ <p>여기서 E_s, E_l : 지반과 라이닝의 변형계수 R : 터널의 반경 ν_s, ν_l : 지반과 라이닝의 포아송비 I : 라이닝의 2차관성 모멘트</p>
-------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

F 값이 작을 수록 상호거동은 작아지기 때문에 두 터널의 상호거동에 대한 영향을 최소화 시키기 위해서는 터널라이닝의 두께를 보통보다 두껍게 설계하여 라이닝의 거동특성을 Stiff 하는 것이 바람직하다. 반면 Compressibility Ratio(C) 값은 지반의 Compressive Stiffness 와 터널라이닝의 Hoop Stiffness의 비를 의미하는 것으로써, 다음과 같은 식에 의하여 계산되어 진다.



C 값에 대하여서는 같은 지반의 특성을 보이면 그 값의 차이는 비교적 작은 편이며, 토사터널의 경우에 있어서는 1보다 작게 설계되는 것이 바람직하다.

실질적으로 터널의 라이닝의 거동은 휨모멘트의 증감에 따라 안전성이 야기됨으로 C값 보다는 F값의 검토가 더욱 중요하다고 말할 수 있다.

라이닝의 거동특성에 대하여 Peck 교수는 Flexible 과 Stiff 라이닝 거동의 경계를 F=10으로 하여, F값이 10이상의 경우에 있어서 그 터널의 라이닝은 Flexible 하게 거동하는 것으로 제안하였다. 현재 건설된 국내외 터널에 있어서 상기 주어진 식에 의하여 F값을 추정해보면 그 범위가 5 에서 500사이의 값으로, 터널 라이닝은 Flexible 에서 부터 Stiff 거동까지 광범위 하게 설계, 시공 되었다는 것을 알 수 있다. 다시 말해서 이는 설계상에 이론적인 접근보다는 경험적인 접근을 하여 현재 시공된 터널의 경우 터널굴착공법, 지반상태 및 지반 보강 등에 따라 일률적인 설계 및 시공되었다기 보다는 현장여건에 적합한 터널이 건설되었다는 것을 알 수 있다.

5.3 굴착에 따른 터널거동

만약 터널주변의 응력상태가 항복한계를 초과하지 않는다면, 굴착과정의 방법에 관계없이 터널의 변형은 서로 같은 결과를 얻게 될 것이다. 이와 같은 것은 변형이 탄성영역상태에서 응력 경로에 영향을 받지 않기 때문이고, 즉, 굴착 후 터널주변의 지반이 소성상태를 나타내는 영역은 발생되지 않는다는 것을 의미한다. 그러나 일반적인 지반의 굴착에 있어서는 이와 같은 상태의 존재가 불가능하기 때문에 실질적으로는 굴착의 과정 또는 순서가 터널의 변형에 상당한 영향을 주게 된다. 서로 다른 굴착과정 및 순서는 다시 말해서 터널의 Unloading Rate 가 다르다는 것을 의미하며, Full face 굴착 방법으로 터널을 굴착 할 경우 상당히 빠른 Unloading 과정으로 인하여 많은 양의 변형이 발생된다. 그러므로, 지반의 강도가 약할수록 막장의 안정과 적은 양의 변형을 유도하기 위하여 여러 단계에 걸쳐 굴착되어야 하는 것이다. 가장 많이 이용되고 있는 대표적인 굴착공법을 열거하면 다음과 같다.

1) Benching Cutting

2) Side Gallery Cutting: 터널 폭이 넓은 경우 적합 (비교적 심도가 낮은 지반)

경험적으로 Side Gallery Cutting 방법을 이용하여 적절한 시간에 터널 지지를 할 경우 터널의 침하는 Benching Cutting 방법에 의한 것과 비교해 볼 때 1/2 정도로 작게 발생 된다고 한다. 상기 두 경우에 대한 수치해석 결과는 그림 14에 나타난 것과 같다.

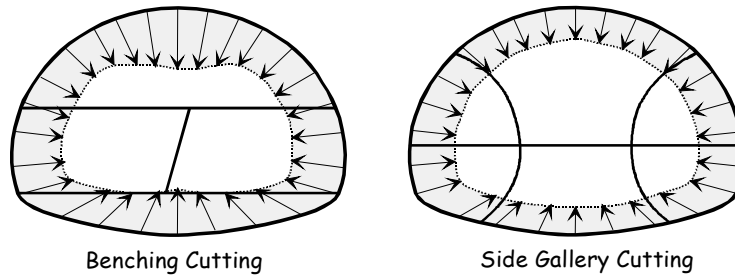


그림 14. 굴착방법에 따른 터널의 변형 비교 (수치해석결과)

이 결과에서 보듯이 터널의 변형은 Side Gallery Cutting 방법의 경우 상당량의 변형을 감소 시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 특히 터널의 Crown 과 Invert 부분의 변형은 터널의 굴착방법에 따라 상당히 차이를 보여주는 것을 알 수 있다.

6. 결론 및 제언

지반굴착시 지반거동에 대하여 기본적인 개념을 전반적으로 제시하여 정보화시공시 보다 안전시공을 위하여 지반굴착에 따른 지반거동에 대한 이해를 도모하고 신속한 문제해결 기술에 활용되도록 하였다. 굴착에 대하여서는 개착 뿐 만 아니라 터널의 굴착도 포함하여 지반거동을 이해하기 위한 지반-구조물 상호거동에 대하여서도 제시하였다.

끝으로, 이러한 기본개념의 고찰을 통하여 지반굴착 시 지반거동에 대한 해석과 설계하는데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 원고는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제명 : 지하공간규모에 따른 시공리스크 분석기법 개발, 과제번호 : C 104A1010001-04A0201-00120)을 수행하기위한 **기본개념수립**을 위하여 일부 제시한 것으로 지면을 통해 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. Bell F. G. (1987), "Ground Engineer's Reference Book", Butterworths.
2. Craig, R.N. and Muir Wood, A.M. (1978), "A review of tunnel lining practice in the United Kingdom", TRRL Sup. Rept.335.
3. Duncan C. Wyllie (1992), "Foundation on Rock", E&FN SPON.
4. Kim,S.H, Burd,H,J, and Milligan, G. W.E (1998), "Model testing of closely spaced tunnels in clay", Geotechnique 48, No.3, p375-288
5. Muir Wood, A.M. (1975), "Tunnelling: in Civil Engineers Reference Book", ed. L.S. Blake, Butterworths.
6. Peck, R.B. (1969), "Deep excavations and tunnelling in soft ground", 7th Int. Conf. S.M.F.E. Mexico City, State of the Art Volume.
7. Robert Wade Brown (2001), "Practical Foundation Engineering Handbook", McGRAW-Hill.