

터널해석에 있어 지하수 거동의 중요성

Significance of Ground Water Movements in the Numerical Modelling of Tunnelling

신 종 호, Jong-ho Shin

서울특별시 청계천복원추진본부 건설사업팀장

Deputy Director, Office of Cheong-Gye Cheon Restoration, SMG

SYNOPSIS

Tunnelling in water bearing soils influences the ground water regime. It has been indicated in the literature that the existence of ground water above a tunnel influences tunnel stability and the settlement profile. Only limited research, however, has been done on ground water movements around tunnels and their influence on tunnel performance.

Time dependent soil behaviour can be caused by the changes of pore water pressure and/or the viscous properties of soil(creep) under the stress change resulting from the advance of the tunnel face. De Moor(1989) demonstrated that the time dependent deformations due to tunnelling are mainly the results of pore pressure dissipation and should be interpreted in terms of effective stress changes.

Drainage into tunnels is governed by the permeability of the soil, the length of the drainage path and the hydraulic boundary conditions. The potential effect of time dependent settlement in a shallow tunnel is likely to occur rapidly due to the short drainage path and possibly high coefficient of consolidation.

Existing 2D modelling methods are not applicable to these tunnelling problems, as it is difficult to define empirical parameters. In this paper the time-based 2D modelling method is adopted to account for the three dimensional effect and time dependent behaviour during tunnel construction. The effect of coupling between the unloading procedure and consolidation during excavation is profoundly investigated with the method.

It is pointed out that realistic modelling can be achieved by defining a proper permeability at the excavation boundary and prescribing appropriate time for excavation. Some guidelines for the numerical modelling of drained and undrained excavation has been suggested using characteristic time factor. It is highlighted that certain range of the factor shows combined effect between the unloading procedure due to excavation and consolidation during construction.

Keywords : ground water, consolidation, coupled analysis, time factor

1. 개요

흔히 터널건설은 '물과의 싸움'이라고들 한다. 이는 그간의 터널건설 경험으로 볼 때 현장에서 발생했던 거의 모든 지반문제가 지하수와 관련되고 있음을 상기시켜주며, 터널건설에 있어 지하수가 미치는 영향의 중요성을 단적으로 말해주는 것이라 할 수 있다.

그러나 지하수 존재의 중요성에 비추어 터널설계 또는 해석단계에서 지하수의 거동 및 영향예측의 중요성은 다소 간과해온 측면이 있다고 생각된다. 그 예로 수치해석을 비롯한 터널해석에서 지하수 영향에 대한 정량적 고려가 부족함을 들 수 있다. 여러 가지 이유가 있을 수 있으나, 무엇보다도 지하수를 고려하여 해석을 수행할 수 있는 계산도구(program)와 적절한 해석체계(analysis scheme)의 부재가 주원인일 것이다.

터널의 3차원 막장거동을 2차원적으로 모델링하는 데 따른 단순화의 정도 때문에 지하수 거동으로 나타나는 시간 의존적 거동은 다소 사소하게 다루어지는 것이 일반적이다. 지하수의 거동은 시간 의존적 지반거동을 야기하는데, 경험파라미터에 의한 기존의 2차원해석법은 명시적으로 완전배수(fully drained) 혹은 비배수(undrained)조건을 전제로 하므로, 지하수 거동을 포함하는 해석을 수행하기 위하여 지배방정식을 포함한 상당한 수준의 Modification을 요구한다.

예로 완전배수(fully drained) 혹은 비배수(undrained)조건인 경우, 단일 경험파라미터를 사용하여 3D 조건을 2D조건으로 단순화가 가능할 것이다. 그러나 시간 의존성 거동이 게재되는 경우 경험파라미터가 유일하게 결정되지 않으므로 하중분담률 같은 기존개념의 경험파라미터를 적용하여 차원의 단순화를 이루기 어렵다.

지하수의 중요성을 평가하기에 앞서 우선 지하수를 고려할 수 있는 해석체계를 살펴보는 것이 바람직할 것이다. 과거에는 침투류해석을 별개로 수행하여 이로부터 얻어진 침투력으로 응력해석을 수행하는 방식으로 지하수 흐름의 영향을 고려하였으나, 이 방법은 정상침투를 가정하는 Uncoupled Analysis로서 시간에 따른 거동의 변화를 알 수 없는 문제가 있다. 지하수의 영향을 적절히 유사화하기 위하여 변위와 간극수압의 거동이 복합적으로 연계되는 Coupled Analysis가 요구되며, 지하수는 간극수압 혹은 수두로써 고려할 수 있다.

2. 지하수거동 모델링

2.1 터널 모델링

터널의 2차원 해석을 위하여 여러 가지 근사해석법들이 제안되어 왔다. 그 대표적인 것이 하중제어법, 변위제어법, 강성제어법 등이며, 표1에 이를 요약하였다. 표에서 볼 수 있듯이 터널의 2차원 모델링은 어떠한 형태로든 경험파라미터를 요구한다. 이 경험 파라미터의 신뢰성이 해석의 신뢰성을 좌우하게 된다. 이중 변위제어법은 계측결과를 토대로 하므로 해석에 대한 논리적 근거가 비교적 명확하나, 강성제어법이나 하중분담율법의 파라미터는 계측결과로부터 직접 취해지지 않는다. 이들 해석법은 명시적으로 모두 비배수 조건 혹은 완전배수 조건을 전제로 하고 있다. 만일 지반이 시간의존성 거동을 한다면 경험파라미터는 유일하게 결정되지 않을 것이다. 따라서 간극수의 거동을 포함하는 시간 의존적 거동을 모델링하기 위하여 기존방법을 수정하거나 새로운 모델링방법을 도입할 필요가 있다. De Moor(1989)는 소규모 Physical Model Test를 이용하여 터널에서 발생하는 시간의존성 거동의 원인은 대부분 지하수의 유동에 기인함을 보고하였다.

지하수 거동을 고려하기 위하여 간극수와 변위의 연계거동 모델링이 가능한 Coupled Analysis가 필요하다. 그러나 터널의 2차원 모델링은 3차원거동을 2차원적으로 물리적 단순화한 모델에 시간개념까지 적용해야 하는 문제 때문에 이제 까지 보편적으로 적용되지 않았다.

표 1. 기존의 2D 터널모델링법

모델링 방법		제어 파라미터	라이닝타설 전 상태정의	적용선호지반
Load Control Method		굴착 상당력	$\{R_t\} = a \{R\}$	주로 NATM
Stiffness Control Method		굴착단면의 강성	$E_i = \beta E_o$	
Displacement Control Method	Gap Parameter Method	천단침하	G_{ap} : 천단침하	비배수점토내 쉘드터널
	Volume Loss Method	지표침하체적	V_l : 지반손실	

2.2 지하수 거동을 고려하는 2차원 터널모델링

앞에 언급하였듯이 지하수위가 높고, 투수성이 커 굴착기간 중에 압밀이 진행되는 터널공사의 경우 응력제거영향과 시간의존성 거동이 복합되므로 기존 모델링법의 2차원 모델의 경험파라미터를 산정하기 어렵다. 이 경우 Coupled Analysis를 이용한 시간 파라미터법(time-based method; Shin & Potts, 2002)을 이용할 수 있다.

시간의존성 거동을 나타내는 터널의 Convergence는 Panet *et al.*(1982)의 이론을 유추하여 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C(x, t) = C(x) + C(t) \quad (1)$$

여기서 x 는 막장거리, t 는 시간이며, $C_1(x)$ 은 단지 굴착에 따른 응력이완으로부터 초래되는 Convergence변량이며, $C_2(t)$ 는 지하수 영향 등 시간의존성 변량을 나타낸다. 만일 터널의 굴착속도를 알면 막장거리 x 도 시간으로 나타낼 수 있을 것이다. 이 경우 굴착 중 시간의존성 변위의 크기는 굴진속도와 관계될 것이다. 극단적인 예로 굴진속도가 아주 빠른 경우 굴착 중 발생하는 시간 의존적 거동은 거의 무시할 수 있을 것이나, 반면에 굴진속도가 아주 느린 경우는 굴착영향과 지하수 거동의 영향이 복합적으로 나타날 것이다. Figure 1(a)는 시간에 기초한 터널거동양상을 예시한 것이다. 여기서 시간의존성 변위가 굴착영향과 Coupling되는 정도는 굴진속도와 관계될 수 있음을 유추할 수 있다.

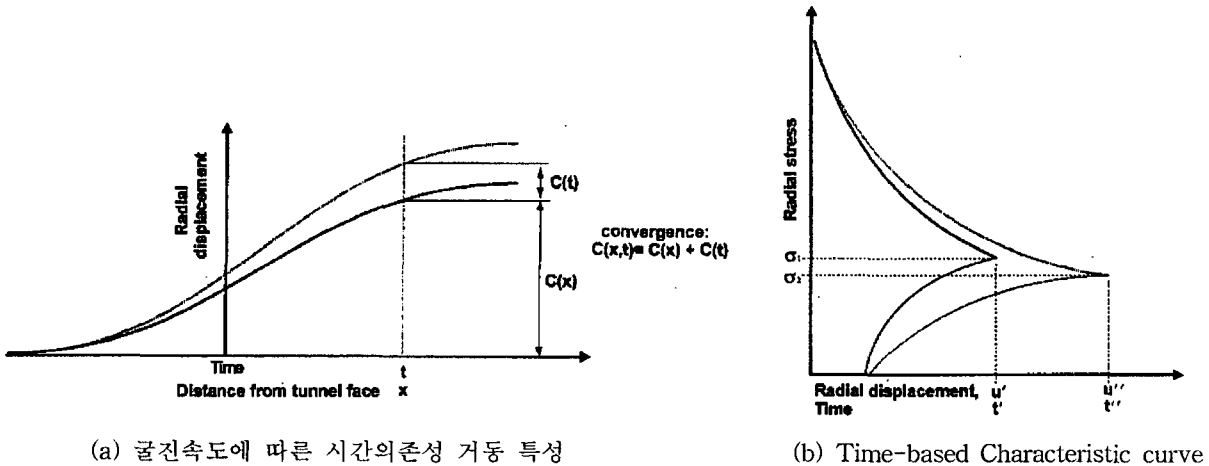


Figure 1. Time Convergence-confinement Concept

Time-based Approach는 이러한 개념에 의하여 터널굴착과정을 모두 시간의 함수로 표현하는 것으로, Figure 1(b)에 보인 Time Convergence-confinement Concept이라 할 수 있다. 이 방법을 앞에 기술한 기존의 2차원 모델링방법들과 비교하면, 시간을 제어 변수로 사용함으로써 3차원 굴착영향을 2차원으로 모델링하는 효과와 굴착중 시간의존적 거동을 동시에 모두 고려할 수 있는 이점을 갖는다.

터널모델링의 중요 부분인 터널굴착 과정을 시간의 함수로 표현하는 방법에 대하여 살펴보기로 한다. 유사한 시도는 Sakurai(1978), Swoboda(1979) 등에서 찾아볼 수 있으며, Nyren(1998) 등의 현장계측결과는 이들의 시도가 터널굴착에 따른 시간-침하곡선과 유사하게 가정할 수 있음을 보였다. Shin & Potts(2002)는 굴착하중함수를 통상적인 시간-침하곡선 형태와 같다고 가정하여 Error Function을 사용하여 식(2)와 같이 제안하였다.

$$\{\sigma(t)\} = \frac{\{\sigma_0\}}{2} \{1 + \text{erf}(t)\} = \frac{\{\sigma_0\}}{2} \left\{ 1 + \frac{2}{\sqrt{\text{erf}(\pi)}} \int_0^t e^{-x^2} dx \right\} \quad (2)$$

위 식은 연속함수이므로 증분해석의 개념에 부합하도록 구간개념으로 다시정리하면 식(3)과 같다.

$$\{\sigma(t_n)\} = \frac{n\{\sigma_0\}}{2N} \left\{ 1 + \frac{2}{\sqrt{\text{erf}(\pi)}} \int_0^{t_n} e^{-x^2} dx \right\}, n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

위 식을 무차원 시간과 재하율의 관계로 표시하면 Figure 2 와 같이 나타난다.

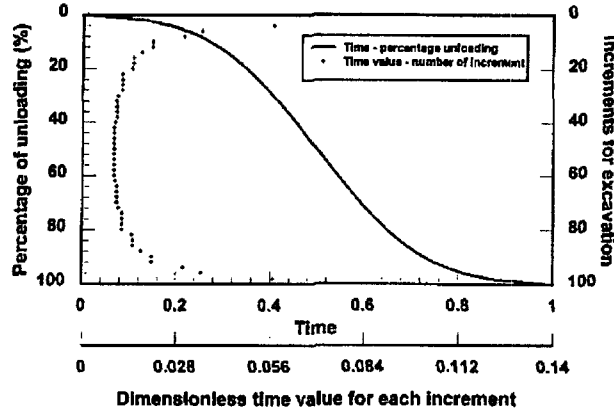


Figure 2. Relationship Loading Function and Time Value

터널굴착에 소요되는 총시간을 T 라 하면 t_n 은 $-T/2$ 와 $T/2$ 사이의 값을 가질 것이다. T 는 굴진 계획속도 A_r 과 막장의 영향범위를 알면 결정 가능하다. 막장 영향거리는 통상 터널직경의 배수로 ηD 로 나타내며, 유사지반의 계측결과들로부터 다음의 식으로 결정 가능하다. 현장계측 결과는 $\eta \approx 3 \sim 4$.

$$T = \frac{\eta D}{A_r} \quad (4)$$

만일 터널굴착에 소요되는 총시간을 T 라 하면, 라이닝 굴착시점은 식(4)와 같이 정의할 수 있다.

$$t^* = \alpha T \quad (5)$$

여기서 t^* 는 총 굴착시간을 T 라 할 때 $T=0$ 에서 라이닝을 설치할 때까지의 소요시간이다. 따라서 α 는 굴착과정을 제어하는 변수로서 시간 개념의 경험상수이며 역학적 개념이 아닌 시간적 의미를 갖는다. α 값은 유사지반 계측결과 중 시간영향이 없는 종방향 침하곡선 등으로 부터 근사적으로 평가가 가능하며 이에 대한 근사적 평가방법은 Shin & Potts(2002)에 제시되었다. 여기서 설명한 Time-based 2D Modelling 방법을 종합하면 Figure 3과 같이 나타낼 수 있다.

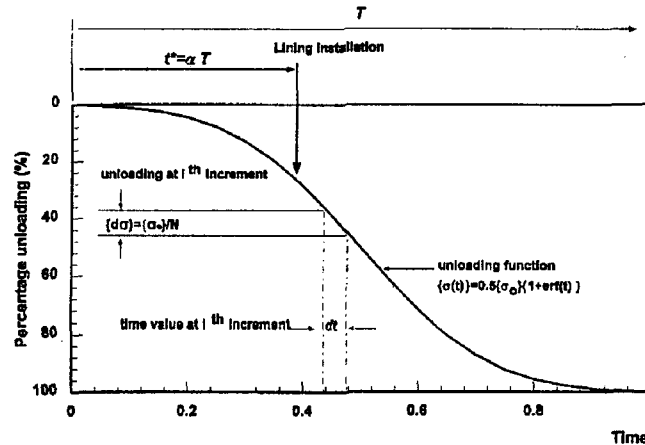


Figure 3. Time-based 2D Modelling

3. 지하수거동에 대한 단순 모델링 및 해석

3.1 해석모델

해석대상모델은 Figure 4에 보인 바와 같다. 지반모델은 비선형탄성모델(Jardine,1985)과 Associate Flow Rule을 채용하는 Mohr-Coulomb 탄소성모델 그리고 비선형투수계수모델을 사용하였다. 수두가 일정하게 유지되는 Confined Flow 조건을 가정하였으며 지하수위는 지표하 8m에 위치하는 것으로 가정하였다.

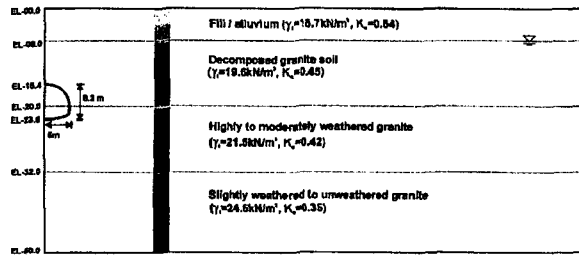


Figure 4. Tunnel Profile and Material Properties

3.2 Typical Analyses

지하수위가 터널상부에 위치하는 경우 굴착은 응력이완에 따른 침하와 지하수거동에 다른 침하가 발생할 것이다. 굴착면이 투수성인 경우와 불투성인 경우의 두 극단적인 조건에 대한 해석을 통해 터널해석에 있어 지하수거동의 중요성을 살펴보고자 한다. 굴착 중 배수의 두 극단적인 경우를 다음과 같이 가정하였다. Case A - 굴착중 완전배수 조건(fully drained), Case B - 굴착중 비배수(undrained)조건 및 굴착후 배수허용. Figure 5는 위 두 해석조건을 시간-굴착하중의 관계로 나타낸 것이다.

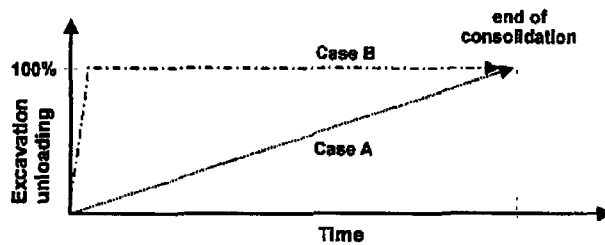


Figure 5. Analysis Cases for Ground Water Modelling

위 두 경우에 대한 해석결과를 Figure 6에 보였다. 여기서 두 해석결과의 차이는 굴착과 압밀의 Coupling에서 비롯된 것이라 할 수 있다.

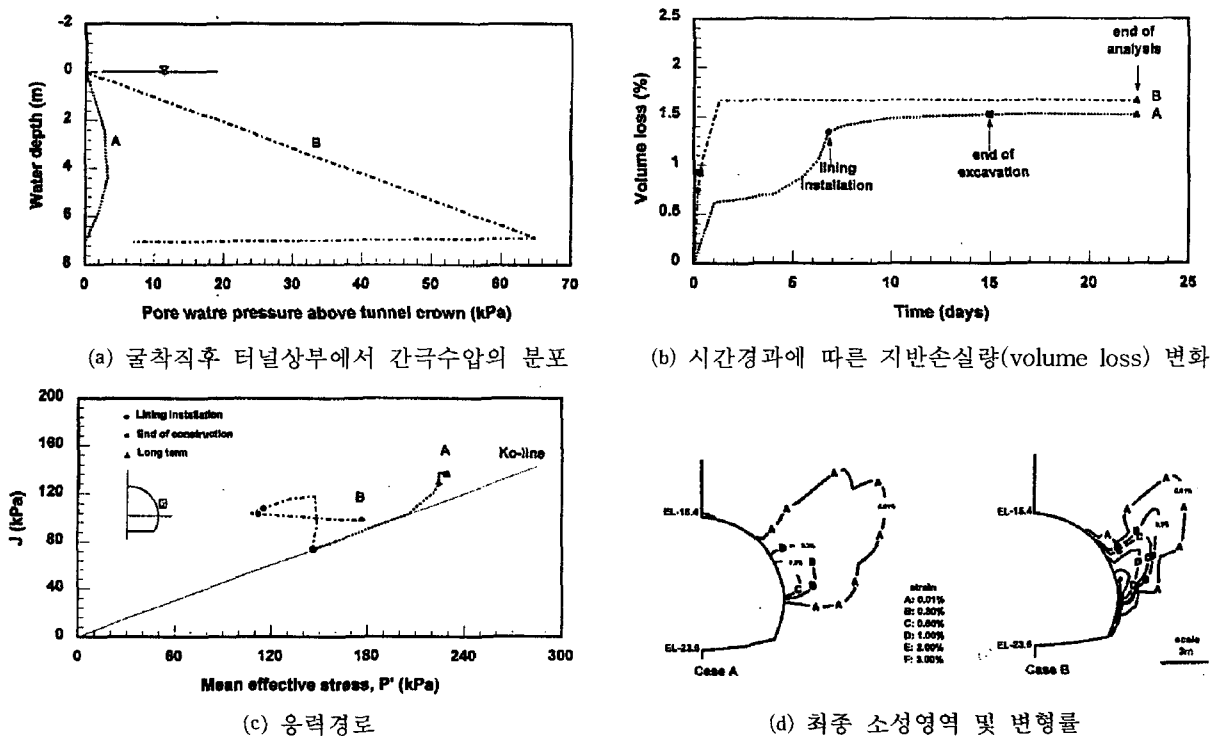


Figure 6. Analysis Results for Different Modelling Methods

Figure 6(a)의 A는 굴착중 완전배수조건인 간극수압을 보인 것이며, B는 비배수 굴착후 배수한 경우의 간극수압을 보인 것이다. Figure 6(b)를 보면 비배수 굴착후 배수한 경우의 지반손실이 더 크게 나타남

을 알 수 있다. 이의 원인을 보다 구체적으로 살펴보기 위하여 터널스프링라인 주변요소의 응력경로를 Figure 6(c)에 비교하였다. B는 비배수전단 후 압밀에 이르는 응력경로를 보이며 A는 배수응력경로를 나타내고 있다. 스프링라인 부근에서 소성전단변형률의 발생양상을 비교하면 Figure 6(d)와 같다. 비배수굴착이 훨씬 더 큰 소성변형을 야기하였음을 알 수 있다.

4. 굴착영향과 배수거동의 Coupling효과

앞 절에서 해석결과는 굴착면의 수리경계조건을 통해 지하수거동의 영향을 고찰하였다. 그러나 실제 지반에서는 굴착속도는 물론 지반의 투수계수도 시간의존성 거동을 지배하는 요소가 될 것이다. 따라서 굴착 중 지반거동이 지하수거동에 영향을 받는 Coupled 거동을 보일 것인지, 혹은 굴착거동(단기침하)과 굴착이후거동(장기침하)으로 분리 가능한 Uncoupled 거동을 보일 것인지는 이 두 파라미터의 영향에 지배된다고 할 수 있다. 다양한 크기의 투수계수에 대한 수리경계조건의 파라미터 해석을 통하여 굴착중 지반거동(단기침하) 특성을 조사하였다. Figure 7은 해석 Case별 굴착 전 투수계수를 보인 것이다. 기타의 해석조건은 3.2절의 해석조건과 같게 유지하였다.

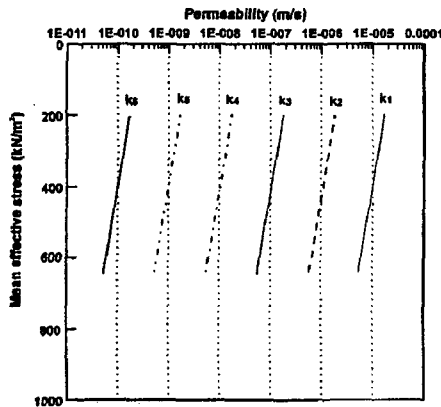
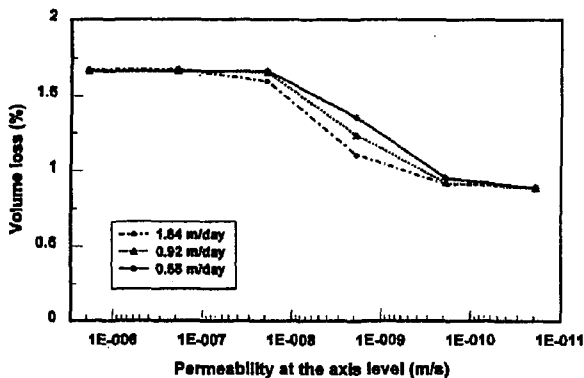


Figure 7. 지반의 투수계수

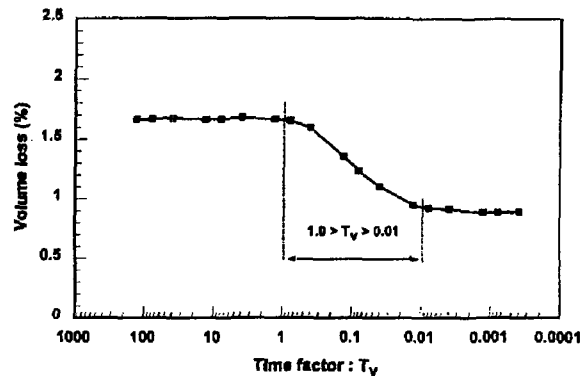
8가지 경우의 투수계수에 대하여 굴진속도를 각각 0.55m/day, 0.92m/day, 1.84m/day로 변화시켜 총 18경우에 대한 해석결과를 Figure 8(a)에 도시하였다. 투수계수가 작은 경우 비배수 거동, 그리고 투수계수가 큰 경우 완전배수 거동의 경향을 나타냄을 볼 수 있다. Figure 8(a)는 굴진속도와 지반의 투수계수를 모두 고려하는 다음의 무차원 시간계수를 이용하여 다시 그릴 수 있다. 무차원 시간계수를 압밀이론에서 사용되는 Time Factor의 형태로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$T_v = \frac{c_v T}{H_d^2} = \frac{kT}{\gamma_w H_d^2 m_v} \quad (6)$$

Figure 8(b)는 Figure 8(a)를 시간계수를 이용하여 다시 도시한 것이다. 여기에서 T_v 가 0.1보다 크면 굴착시 터널거동은 배수거동으로 구분할 수 있고 0.01보다 작으면 비배수 거동을 보인다. T_v 가 0.01~0.1 범위인 경우 터널 굴착시 지반거동은 굴착영향과 지하수배수영향이 복합되는 거동을 보인다. 이 결과는 터널해석에 있어, 굴착과 압밀의 영향의 Coupling경계를 정의하는 것이므로 대상 터널의 모델링 방법을 선정하는 데 좋은 참고가 될 수 있다.



(a) 시간변수에 따른 지반손실량의 변화



(b) 시간계수로 정규화한 Coupling 효과

Figure 8. Characteristic Time Dependent Behaviour

5. 유한투수성을 갖는 라이닝의 영향

앞에서 지하수의 거동 모델링은 수리경계조건(hydraulic boundary condition, HBC)에 매우 민감함을 지적하였다. 굴착경계면에서 배수조건을 중요성을 고찰하기 위하여 굴착 중 및 굴착 후의 투수성을 달리 하는 거동의 차이를 Figure 9에 도시하였다. 건설중에는 굴착경계면에서 투수성의 크기와 관계없이 지반 손실이 증가하나, 투수성 경계인 경우 압밀배수로 인해 손실이 훨씬 크게 나타난다. 불투수 경계는 불평형 간극수압의 평형회복거동에 따른 팽창(swelling)현상이 나타난다.

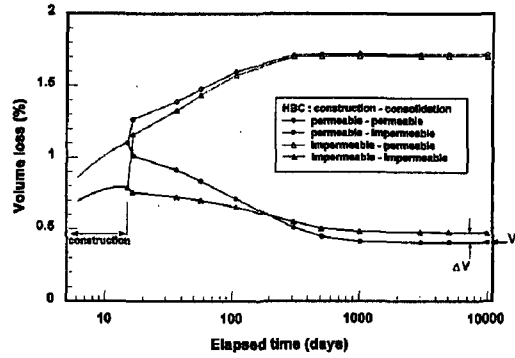


Figure 9. Effects of Hydraulic Boundary Conditions of Excavation Boundary

그러나 실제 터널의 라이닝은 완전투수도 불투수도 아닌 중간정도의 투수성을 나타내는 것으로 보고 되고 있다(Ward & Pender, 1981; Shin *et al.*, 2002). 이를 조사하기 위하여 유한투수성을 갖는 라이닝 모델링 기법을 도입하였다. 여기서는 Figure 10과 같이 강성은 빔요소가 그리고 투수성은 고체요소가 갖는 복합요소를 도입하였다. Figure 11은 라이닝 투수성에 따른 지반손실의 변화를 보인 것이다. 이 결과로부터 라이닝 투수성이 장기침하의 크기에 현저하게 영향을 미침을 알 수 있다.

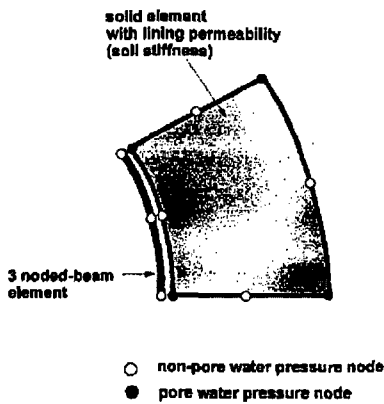


Figure 10. Modelling of Lining

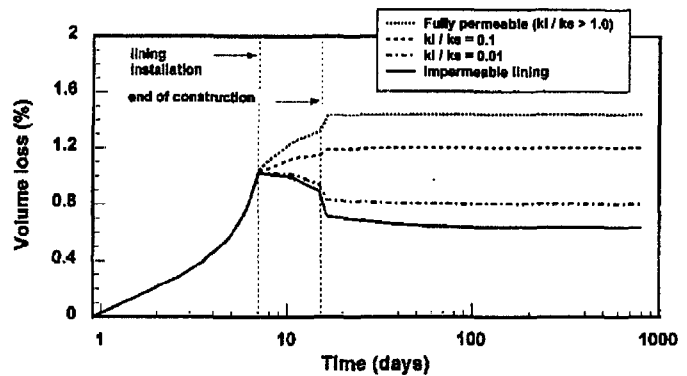


Figure 11. Effects of Lining with Finite Permeability

6. 결론

터널건설에 있어 지하수의 존재는 여러 가지 지반 공학적 문제를 초래한다. 그러나 지하수 영향의 중요성에 비하여 실제 터널의 설계·해석에서는 완전배수(fully drained) 조건 혹은 비배수(undrained) 조건으로 단순 가정하는 것이 일반적이다. 지하수의 거동은 시간의존성 지반거동을 야기하므로 통상적인 비배수 혹은 완전배수 해석은 이런 거동이 적절히 고려하지 못하므로 터널해석의 신뢰성을 저하시킬 수 있다.

본 연구에서는 터널해석에 있어 지하수 거동의 중요성에 대하여 고찰하였다. 어떤 수리 특성을 갖는 지반의 경우, 터널공사는 굴착중 응력해방효과와 압밀영향이 서로 상관되어 복잡한 거동양상을 보일 수 있으며, 이 경우 지하수 영향을 무시하면 굴착중의 단기침하를 과소 평가할 수 있음을 보였다.

또한 파라미터 해석결과 수리영향요인 중 굴착면에서의 투수경계조건과 라이닝의 투수성의 중요성이 확인되었고, 굴착시공계획과 지반의 투수성을 알면 적정 모델링방법을 선정할 수 있는 터널모델링 방법(배수, 비배수 혹은 coupled)이 제안되었다.

References

1. De Moor, E.K. (1989). "Modelling of deep tunnel behaviour in clay", PhD thesis, City University.
2. Jardine, R. J. (1985). "Investigations of pile-soil behaviour with special reference to the foundations of offshore structures", PhD thesis, Imperial College, University of London.
3. Nyren. R. (1998). "Field measurements above twin tunnels in London Clay", PhD thesis, Imperial College, University of London.
4. Panet, M. and Guenot, A. (1982). "Analysis of convergence behind the face of a tunnel", *Proc Tunnelling82*, London, The Institution of Mining and Metallurgy, pp.197-204.
5. Sakurai, S. (1978). "Approximate time dependent analysis of tunnel support structure considering progress of tunnel face", *Int. J. Num. and Anal. Meth. in Geom.*, Vol.2, pp.159-175.
6. Shin, J. H. (2000). Numerical analysis of tunnelling in decomposed granite soil, PhD thesis, Imperial College, Univ. of London.
7. Shin, J. H., Addenbrooke, T. I. and Potts, D. M.(2002). "A numerical study of the effect of groundwater movement on long term tunnel behaviour", *Geotechnique*, Vol.52, No.6, pp.391-403.
8. Shin, J. H., and Potts, D. M. (2002). "Time-based two-dimensional modelling of NATM tunnelling", *Canadian Geotech. J.*, Vol.39, pp.710-724
9. Swoboda, G (1979). "Finite element analysis of the New Austrian Tunnelling method (NATM)", *Proc the 3rd Int. Conf. on Num. Meth. in Geom*, Aachen, pp.581-586.
10. Ward, W.H. and Pender, M.J. (1981). "Tunnelling in soft ground-general report", *Proc. the 10th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol.4, pp.261-275.