

토사터널의 일차 라이닝에 작용하는 하중 예측 사례 연구

Prediction of primary lining loads for soft ground tunnels based on case studies

김학준*¹

Kim, Hak-Joon

Abstract

Prediction of lining loads is one of the key issues to be addressed in the design of a tunnel. The validity of the existing design methods is reviewed by comparing the loads calculated using the methods with the field measurements obtained from several tunnels in Edmonton, Canada. However, the existing methods are determined not to be fully satisfactory for the prediction of primary lining loads. To account for the stress reduction occurring prior to lining installation, the stress reduction factor is used coupled with an analytical solution for calculation of lining loads. Typical values of dimensionless load factors nD/H for tunnels in Edmonton are obtained from parametric analyses and presented in a table. The loads calculated using the proposed method are compared with field measurements collected from tunnels in Edmonton to verify the method. The method can be used for other tunnels if the tunnels are built in stiff or dense soils, where good ground control is accomplished during the tunnel construction.

Keywords: Lining loads, soft ground tunnel, stress reduction

요 지

터널 하중을 예측하는 것은 터널 설계에서 가장 중요한 문제 중의 하나이다. 캐나다 에드몬턴시의 여러 터널로부터 측정된 계측자료와 기존에 존재하는 설계방법을 이용하여 계산된 터널 하중의 비교를 통하여 기존 설계방법들의 정확도를 검토하였다. 그러나 기존의 방법들은 터널 하중을 예측하는데 만족하지 못한 결과를 보여 주었다. 일차 라이닝의 설치 이전에 발생하는 응력감소 인자를 구한 후, 기존의 설계방법을 결합하여 터널 하중을 예측할 것을 제안하였다. 에드몬턴시에 건설된 터널에 대한 무차원 하중 인자인 nD/H 값이 도표로 제시되었다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여, 제안된 방법으로 계산된 터널 하중과 계측 값을 비교하였다. 다른 지역 터널의 경우, 비교적 견고 (stiff)하거나 조밀 (dense)한 흙으로 구성된 지반에 터널이 건설될 경우에는 제안된 방법을 사용할 수 있다.

주요어: 터널 하중, 토사 터널, 응력 감소

*1 정희원, 대전대학교 공과대학 지구시스템공학과 조교수 (hakkim@dju.ac.kr)

1. 서론

터널 설계의 신뢰성을 높이기 위해서는 일차 라이닝에 작용할 하중을 예측하는 것이 매우 중요하다. 그러나 지반상태의 불확실성과 다양성, 라이닝 설치이전이나 이후의 지반 변형에 기인한 원지반 응력의 재분배, 터널 공법의 차이 등에 의하여 터널 하중을 정확히 예측하는 것은 매우 어려운 문제이다. 그러므로 국내의 많은 터널이 매우 보수적으로 설계되는 경향이 있으며, 기존 터널에서 얻어진 계측자료의 활용이 미흡하여 보수적인 터널 설계가 개선되지 못하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 캐나다 에드몬턴시의 터널에서 얻어진 계측자료를 활용하여 터널의 일차 라이닝에 작용할 하중을 예측한 사례를 제시하고자 한다.

2. 기존 설계방법에 의해 계산된 터널 하중의 타당성

터널 라이닝에 작용하는 토압은 총토포괴의 백분율로 표시하거나 혹은 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$P = n \gamma D \quad (1)$$

여기서 P는 일차라이닝에 작용하는 응력, n은 무차원 인자 (dimensionless factor), γ 는 흙의 단위중량, D는 터널의 직경이다. Kim과 Eisenstein (1998)은 3개의 ring과 plate 모델 (Peck et al., 1972; Muir Wood, 1975; Einstein and Schwartz, 1979)과 수치 해석에서 유도된 방법 (Eisenstein and Negro, 1990)을 이용하여 에드몬턴시에서 건설된 터널의 일차 라이닝에 작용하는 하중을 계산하였고 이를 계측자료와 비교하였다. 에드몬턴시에 건설된 터널들의 지질상태, 터널 굴착방법, 계측결과 등은 표 1과 같다. 계측결과에 의하면

표 1. 에드몬턴 터널들의 일차라이닝에 작용하는 하중

터널	굴착방법	지질	깊이* (Z)	직경* (D)	라이닝형식	P(kPa)	n	계측방법
A,Northeast Line	TBM	Till	10,2	6,1	R&L	169	1,3	Strain gauges (elec.resis.type)
B,LRT-South Extension	TBM	Till	11,8	6,2	R&L	52-64	0,40-0,49	Load cells (vibr.wire type)
SLRT-Phasell								
C,(Section B2)	TBM	Till	15,8	6,3	R&L	105	0,79	Load cells
D,(Section C2)	NATM	Till	9,7	6,3	S&R	89,37	0,68	Flat jack tests
E,(Section A1)	TBM	Sand	17,2	6,3	R&L	46	0,35	Load cells
F,Whitemud Creek	TBM	Clay Shale	47,2	6,05	R&L	140	1,10	Deformation mea.
G,170th Street	TBM	Till	20	2,56	R&L	188	3,50	Lagging deflection
Experimental Tunnel								
H,(Section 1)	TBM	Till	27	2,56	R&L	103	1,92	Strain gauges
I,(Section 2)	TBM	Till	27	2,56	PSL	219,6	4,08	Strain gauges
J,(Section 3)	TBM	Till	24	2,56	PSL	135-156	2,50-2,91	Load cells
Banks of North Saskatchewan River								
K,(Section 1)	TBM	Till	13,7	3,2	R&L	26,9	0,40	Load cells
L,(Section 2)	TBM	Till	13,7	3,2	R&L	14,2	0,21	Load cells
M,(Section 4)	TBM	Sand	16,7	3,2	R&L	259,85	3,87	Load cells

Notes: R&L=Rib and Lagging; S&R=Shotcrete and Rib; PSL=Precast Segmented Lining

(*단위: m)

일차 라이닝에 작용하는 응력은 토피하중 (overburden pressure)의 5~79%의 범위를 보이며 평균 33%이다. 그림 1과 2는 일차 라이닝에 작용하는 하중을 토피하중의 백분율과 n 으로 각각 나타내었는데, Peck과 Einstein-Schwartz의 방법들을 이용하여 계산된 일차 라이닝 하중이 실제 하중을 과대평가함을 보여주고 있다. 단, Muir Wood의 방법에 의하여 계산된 터널하중은 실제 계측자료와 비교적 잘 일치하고 있는데 이는 Muir Wood가 제안한대로 터널 굴착 후의 응력감소를 고려하여 토피하중의 50%만을 고려하였기 때문이다. 그러나

응력감소의 크기는 지질이나 터널공법에 따라 다를 수 있으므로 일률적으로 50%의 응력감소인자를 고려하는 것은 문제이다. Eisenstein-Negro 방법은 터널 A와 M을 제외하고는 실제 계측 값과 가장 유사한 결과를 보여주고 있다. 터널 A의 경우, 계측 값이 과소평가되었는데 이는 터널 A의 토피와 직경의 비가 1.17인 천부터널이어서 아칭현상 (arching effect)이 제대로 발생되지 못했기 때문으로 추정된다. 터널 M은 지반 상태가 불량한 모래로 구성되어 많은 지반변위가 발생하였으며 지표에 제방이 축조되어 일차 라이닝에 많은 하중이 작용한 것으로 판단된다. 따라서 일차 라이닝 설치 이전에 발생하는 응력감소를 무시하고 토피하중 모두가 일차 라이닝에 작용한다고 가정하여 식이 유도된 Peck이나 Einstein-Schwartz 방법에 의한 터널하중이 계측 값과 유사한 결과를 보여주고 있다. 결론적으로, 기존의 방법들은 Eisenstein과 Negro의 방법을 제외하고는 라이닝 설치 이전에 발생하는 아칭현상에 의한 응력감소인자 (Stress Reduction Factor)를 적절히 고려해주지 못하고 있다.

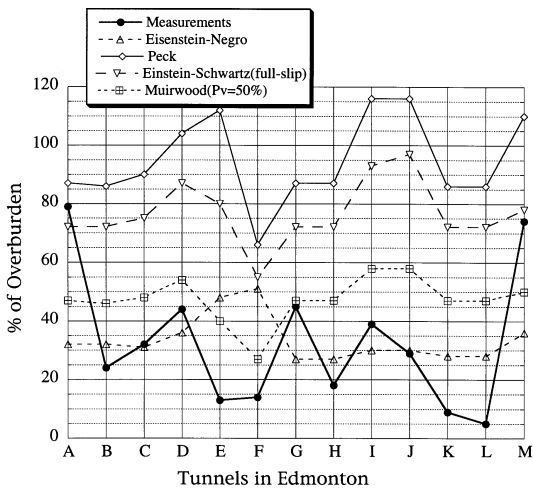


그림 1. 에드몬턴 지역 터널 하중의 계측값과 이론값의 비교 (토피하중 백분율)

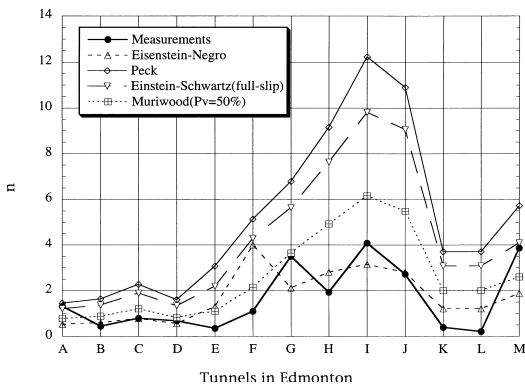


그림 2. 에드몬턴 지역 터널 하중의 계측값과 이론값의 비교 (n)

3. 응력감소인자

터널 하중 계산시 Muir Wood가 제안한 총 토피압의 50% 응력감소는 임의적인 값이며 다른 연구자들은 다른 응력감소 값을 제안하였다. 예를 들면, Panet (1973)은 33%, Einstein과 Schwartz (1980)는 수치해석적 방법과 사례 연구를 통해 15~100%의 응력감소가 가능함을 제안하였다. Eisenstein과 Negro (1990)는 2-D와 3-D 유한요소법을 이용하여 터널의 응력감소인자를 구하는 방법을 제시하였는데 많은 수의 도표가 필요하므로 이용하기가 매우 불편하였다. 그러므로 Kim과 Eisenstein (1998)은 Negro (1988)의 연구 결과를 바탕으로 응력감소인자를 구하는 도표를 표 2와 같이 제시하였다.

점착력이 있고 파괴비 (Failure Ratio)가 1이 아닌 흙의 경우에는 먼저 등가 마찰각 (Equivalent Friction Angles, ϕ_e)을 계산한 후 표 2를 사용한다.

표 2. 제안된 응력감소인자

(3 ≤ Z/D ≤ 9)

Ko	φ _e	Support Delay Length/Tunnel Diameter											
		0	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0 ≤
0.6	20	0,225	0,296	0,351	0,375	0,381	0,394	0,405	0,410	0,414	0,418	0,423	0,427
	30	0,268	0,379	0,466	0,504	0,514	0,535	0,554	0,561	0,568	0,575	0,582	0,589
	40	0,275	0,409	0,527	0,579	0,594	0,622	0,650	0,660	0,670	0,680	0,689	0,699
0.8	20	0,241	0,325	0,391	0,418	0,426	0,440	0,453	0,458	0,462	0,467	0,471	0,475
	30	0,255	0,361	0,448	0,487	0,497	0,518	0,537	0,544	0,551	0,558	0,565	0,572
	40	0,259	0,375	0,478	0,525	0,538	0,564	0,589	0,598	0,608	0,617	0,626	0,635
1.0	20	0,215	0,285	0,341	0,365	0,372	0,384	0,396	0,400	0,404	0,409	0,413	0,417
	30	0,229	0,314	0,388	0,422	0,432	0,450	0,468	0,475	0,482	0,488	0,495	0,501
	40	0,237	0,329	0,414	0,454	0,465	0,488	0,510	0,519	0,528	0,536	0,545	0,553

$$\phi_a = \arcsin \left[\frac{1 + \left(\frac{\sigma_3}{c}\right) \tan \phi}{1 + \left(\frac{\sigma_3}{c}\right) \sec \phi} \right] \quad (2)$$

$$\phi_e = \arcsin (1 - R_f + R_f \csc \phi_a)^{-1} \quad (3)$$

위 식에서 φ_a는 조정된 마찰각 (Adjusted Friction Angle), φ_e는 등가 마찰각, c는 점착력, R_f는 파괴비로서 (σ₁ - σ₃)_{failure} / (σ₁ - σ₃)_{ultimate}의 식으로 나타내지며 일반적인 범위는 0.7-1.0이다. 표 2는 터널 굴착 후 지반이 안정한 경우에만 사용 가능하다.

Eisenstein과 Negro의 방법을 사용하여 표 1에 소개된 터널들의 응력감소 값을 계산하면 43~66%의 범위를 보이며 평균값은 59%이다. 이 값은 라이닝 설계시 Muir Wood가 제안한 임의적인 토피하중 감소값인 50%와 잘 일치하고 있다. 이것은 에드몬턴 지역의 토질이 비교적 양호하여 일반적인 터널 굴착과정에서 일차 라이닝 설치에 필요한 시간동안 파괴되지 않고 무지보로 유지될 수 있을 정도로 강하기 때문으로 사료된다. 이러한 연구결과는, 만약 터널 굴착이 안정된 지반에서 건설되거나 혹은 필요한 경우 적절한 터널 보강을 하여 지반변위를 제어해 준다면 터널 하중 계산시 총 토피하중의 50%만 간주해주는 것이 적절할 수 있음을 암시해준다. 그러나 더욱 정확한 응력감소 값을 구하기 위해서는 표 2를 사용하는 것이 바람직하다.

Eisenstein과 Negro의 방법을 사용하여 표 1에 소개된 터널들의 응력감소 값을 구한 후 같은 비율로 흙의 단위중량을 감소시켜 기존의 방법을 다시 적용하였다

(그림 3). 그림 3에 의하면, 기존의 방법을 적용시 응력 감소를 고려한 감소 단위 중량 (reduced unit weight) 을 사용하는 것이 터널 하중을 예측하는데 매우 효과적인 임을 보여준다. Muir Wood의 방법도 임의적인 50%의 응력감소를 적용하는 것보다는 더 계측 결과에 가깝게 도시되었다. 그러나 Negro (1988)가 응력감소인자를 유도하기 위한 수치해석 시 선형탄성이론을 사용하였으므로, 터널 M에서와 같이 터널 굴착시 소성영역 (plastic zone)이 발달될 수 있는 연약지반에서는 위 방법을 사용한 응력감소인자의 계산이 부정확할 수도 있으므로 주의해야 한다. 또한 제안된 방법은 터널 깊이와 직경의 비가 3이상이 되어 아칭효과가 충분히 발생될 수 있는

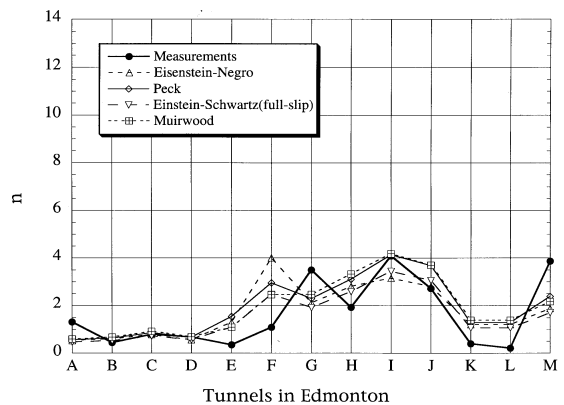


그림 3. 에드몬턴 지역 터널 하중의 계측값과 감소 단위중량을 적용한 이론값의 비교

터널에 사용 가능하다.

4. 터널 하중을 예측하기 위하여 제안된 방법

기준에 존재하는 터널하중을 예측하는 방법들은 응력 감소인자(a)를 적절히 고려해 준다면 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다. Einstein 과 Schwartz (1979)의 방법을 사용한 일차 라이닝의 평균 축력 (T_{av})의 계산은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있는데 응력감소인자는 감소된 단위중량의 형태로 고려될 수 있다.

$$T_{av} = \frac{1}{2} P_o R(1 + K_o)(1 - a_o) \quad (4)$$

식 (4)에서 $a_o = \frac{CF(1-\nu)}{C+F+CF(1-\nu)}$ 이고 C는 압축비 (Compressibility Ratio), F는 유연비 (Flexibility Ratio), P_o 는 터널 중심부까지의 수직응력이다. 압축비 C와 유연비 F는 각각 식 (5)와 (6)으로 정의된다.

$$C = \frac{ER(1-\nu_1^2)}{E_l A_l(1-\nu^2)} \quad (5)$$

$$F = \frac{ER^3(1-\nu_1^2)}{E_l I_l(1-\nu^2)} \quad (6)$$

여기서 E, ν and E_l , ν_1 는 지반과 라이닝의 탄성계수, A_l 은 터널 단위길이 당 평균 단면적 (터널 두께가 중방향으로 일정할 경우는 터널의 두께), R은 터널의 반경이다.

식 (1)로부터,

$$\begin{aligned} n &= \frac{2 T_{av}}{R(1 + K_o)\gamma D} = \frac{P_o(1 - a_o)}{\gamma D} \\ &= \frac{\gamma_{red} H(1 - a_o)}{\gamma D} = \frac{H(1 - a_o)(1 - a)}{D} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 γ_{red} 은 응력감소인자를 고려한 흙의 감소된 단위중량 (reduced unit weight)이고 H는 터널 중심부까지의 깊이이다.

5. 제안된 방법의 에드몬턴 터널에의 적용

Deere 등 (1969)과 Cording 등 (1971)은 암반터널에서 무차원 인자 n과 RQD와의 관계를 제시하였다. 식 (7)을 이용하여 에드몬턴 터널에 대한 n값을 구하면 편리하게 이용될 수 있다. n에 대한 변수를 줄이기 위해서 식 (7)은 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$\frac{nD}{H} = (1 - a_o)(1 - a) \quad (8)$$

에드몬턴 터널에 대한 nD/H의 값은 표 3을 이용하여 계산하였다. 지보재의 탄성계수는 강지보와 목재판, 세그먼트 라이닝, 슛크리트에 대해서 각각 200,000MPa, 25,100MPa, 10,000MPa가 사용되었다. 지반의 탄성계수는 till, 모래, claystone에 대해서 각각 150MPa, 100MPa, 250MPa가 사용되었으며 계산된 평균 nD/H 값은 표 4와 같다. 표 4에 의하면 강지보와 목재판을 사용한 경우, 압축비가 다른 터널 라이닝보다 더 크기 때문에 터널 하중이 다른 라이닝들보다 더 작게 나타났다.

표 3. 에드몬턴 터널의 nD/H를 예측하기 위하여 사용된 인자들

(*단위: m)

Common Variables		TBM				NATM				
		Rib & Lagging		Segmented Lining		Shotcrets		Shotcrets & Steel Ribs		
H/D	R*	X/D	Rib Spacing*	X/D	Lining Thick,*	X/D	Shotcret Thick,*	X/D	Shotcret Thick,*	Rib Spacing*
3	1	1	1	1	0.11	0.6	0.1	0.6	0.1	1
6	2	2	1.22	2	0.15	1.0	0.2	1.0	0.2	1.5
	3		1.5		0.2		0.3			

표 4. 에드몬턴 터널에서 계산된 nD/H

(a) 소단면 터널 (D < 4m)

	TBM		NATM	
	Rib & Lagging	Segmented Lining	Shotcrets	Shotcrets & Rib
Till	0,309	0,341	0,358	0,360
Sand	0,446	0,480	0,490	0,491
Claystone	0,474	0,557	0,542	0,546

(b) 대단면 터널 (D ≥ 4m)

	TBM		NATM	
	Rib & Lagging	Segmented Lining	Shotcrets	Shotcrets & Rib
Till	0,251	0,328	0,327	0,331
Sand	0,381	0,467	0,458	0,462
Claystone	0,350	0,523	0,470	0,478

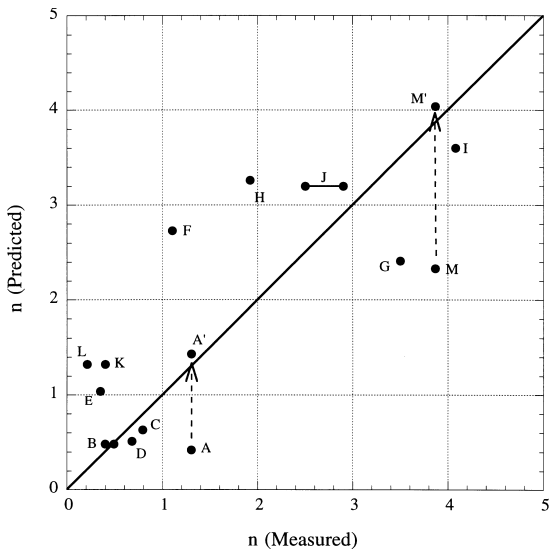


그림 4. 에드몬턴 지역 터널 하중의 예측값과 표 4를 적용한 이론값의 비교

NATM 터널의 경우는 TBM 터널보다 nD/H값이 더 크게 나타났는데 이것은 NATM 터널의 응력감소인자가 더 작은 것이 주요 원인이다.

그림 4는 표 4를 이용하여 구한 터널하중을 실제 에드몬턴 터널에서의 예측결과와 비교하였다. 전술한 바와 같

이 터널 A는 천부터널이고 터널 M은 지반상태가 불량하여 아칭효과를 기대하기 어려우므로 응력감소인자를 적용하지 않고 기존의 Peck 등의 방법을 적용하면 각각 A'와 M'에 도시된다. 그림 4에 의하면 예측값과 표 4를 이용한 예측값이 비교적 잘 일치하고 있으므로 에드몬턴 지역의 터널 설계시 간편하게 활용될 수 있다.

6. 결론

기존의 설계방법을 바탕으로 터널하중을 예측하는 방법이 제안되었다. 즉, 응력감소인자와 Einstein과 Schwartz 등의 방법을 이용하면 터널하중을 구할 수 있다. 에드몬턴 터널에 대한 nD/H값이 도표로 제시되었는데 실측치와 비교했을 경우 약간 보수적인 경향은 있으나 에드몬턴 지역의 터널 설계시 유용하게 활용될 수 있다. 에드몬턴 이외의 지역이라도 비교적 견고 (stiff)하거나 조밀 (dense)한 흙으로 구성된 지반에 터널이 건설될 경우에는 제안된 방법을 사용할 수 있다. 그러나 터널 깊이와 직경의 비가 3이하인 천부터널의 경우에는 아칭효과가 충분히 발생되지 못할 가능성이 있으므로 응력감소인자를 적용하지 않고 기존의 방법을 그대로 이용하는 것이 바람직하다.

국내의 경우 많은 터널이 건설되었고 터널 예측도 활발

히 이루어졌으나 터널 설계시 터널 라이닝에 가해질 터널 하중에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 터널 설계가 지나치게 보수적으로 되지 않기 위해서는, 터널 계층자료를 적극 활용하여 에드몬턴시와 같은 터널하중에 대한 도표의 개발이 필요하다.

참고문헌

1. Cording, E. J., Hendron, A. J. and Deere, D. U. (1971) "Rock engineering for underground caverns", Proceedings of Underground Rock Chambers Symposium, ASCE, National Meeting on Water Resources Engineering, Phoenix, Arizona, pp. 567-600.
2. Deere, D. U., Peck, R. B., Monsees, J. E. and Schmidt, B. (1969) "Design of tunnel liners and support systems", Report, U.S. Department of Transportation, Contract No. 3-0152.
3. Einstein, H. H. and Schwartz, C. W. (1979) "Simplified analysis for tunnel supports", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, No. GT4, pp. 499-518.
4. Eisenstein, Z. and Negro, A. (1990) "Integrated design method for shallow tunnels in soft ground", Japanese Tunnelling Association Symposium, Japan, Vol. 2, pp. 27-36.
5. Kim, H. J. and Eisenstein, Z. (1998) "Prediction of lining loads from case histories", World Tunnel Congress '98, Sao Paulo, Brazil, pp.
6. Muir Wood, A. M. (1975) "The circular tunnel in elastic ground", Geotechnique, Vol. 25, No. 1, pp. 115-127.
7. Negro, A. (1988) "Design of shallow tunnels in soft ground", Ph. D. dissertation, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.
8. Panet, H., 1973. "La stabilite des ouvrages souterrains-soutenement et revetement". Rapport de recherche No. 28. Paris:Laboratoires des Ponts et Chaussee.
9. Peck, R. B., Hendron, A. J. and Mohraz, B. (1972) "State of the art of soft-ground tunneling", RETC Proceedings, Vol. 1, pp. 259-286.



김학준

대전대학교 지구시스템공학과 조교수
hakkim@dju.ac.kr