

네일의 토압분담 효과를 고려한 Green Wall 시스템의 설계 Design of the Green Wall System considering Distribution Effect of Earth Pressure by Soil Nail

박시삼¹⁾, Si-Sam Park, 조성한²⁾, Sung-Han Cho, 유찬호³⁾, Chan-Ho Yoo, 김홍택⁴⁾, Hong-Taek Kim, 김용연⁵⁾, Yong-Yeon Kim

- 1) GS건설(주) 기술본부 연구개발팀 선임연구원, Senior Research Enger., Technical Division, GS E&C Corp.
- 2) GS건설(주) 기술본부 연구개발팀 수석연구원, Chief Research Enger., Technical Division, GS E&C Corp.
- 3) 홍익대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hongik Univ.
- 4) 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hongik Univ.
- 5) (주)그린월 대표이사, President, Greenwall Co., Ltd.

SYNOPSIS : The Green Wall is highest eco-system among a segmental retaining wall systems. Recently, the demand of high segmental retaining wall (SRW) is increased in domestic. The soil nailing system is applied in order to maintain the high SRW stability for steeper slope. However, the proper design approach that can consider the earth pressure reduction effects in soil nailing system has not been proposed. This study was performed to introduce the design case by 'Two-Body Translation mechanism' to be able to consider distribution of earth pressure in the soil nailing when designing the green wall using soil nailing system. Also, this study attempts to evaluate the earth pressure change when advanced soil nailing system is constructed using *FLAC^{2D} ver. 3.30* program and 'Two-Body Translation mechanism'. Also in this study, various parametric studies using numerical methods as shear strength reduction (SSR) technique and limit equilibrium technique were carried out. In the parametric study, the length ratio and the bond ratio of the soil nailing were changed to identify the earth pressure reduction effect of the retaining wall reinforced by soil nailing.

Key words : Segmental retaining wall, Green wall, Earth pressure reduction effect, Shear strength reduction technique, Two-body translation mechanism

1. 서 론

1990년 말경 그린월 공법을 국내에 들여오면서, 비교적 절취고가 높은 반무한 사면으로 구성된 국내 사면의 지형 특성에 맞는 높은 옹벽시공에 대한 수요가 증가하게 되어, 그린월이 축조되는 배면부 절취 사면의 안정성을 확보하기 위해 쏘일네일링 공법 등의 보강공법을 적용하는 사례가 증가하고 있는 실정이다. 이와같은 배경으로 그린월 배면의 절취사면에 쏘일네일링 공법 등의 보강공법을 적용하게 될 경우, 네일에 의한 토압분담효과로 인해, 그린월에 작용하는 토압을 상당부분 감소시킬 수 있을 것으로 판단되나, 이에 대한 설계사례 등은 미미한 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 쏘일네일의 토압분담효과를 고려할 수 있는 'Two-Body Translation Mechanism'을 이용한 설계기법을 제안하였으며, 본 설계기법을 실제현장에 적용하였을 경우 예상되는 그린월 벽체 두께의 감소효과, 네일의 길이비 및 정착비 감소효과를 한계평형해석 프로그램을 토대로 비교, 분석해

보았다. 아울러 쏘일네일의 토압분담효과를 고려한 설계기법을 검증하기 위해, *FLAC^{2D} ver. 3.30* 프로 프로그램을 이용하여 유한차분수치해석을 수행해 보았다.

2 그린월(Green Wall) 시스템

2.1 그린월 시스템의 구성

그린월의 기본구조는 그림 1과 같이 전, 후면 가로보(front & rear stretcher), 버팀보(header) 및 채움재로 구성되어 있다.

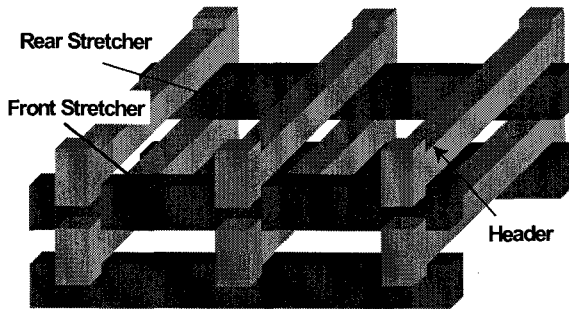


그림 1. Green Wall System의 기본구조

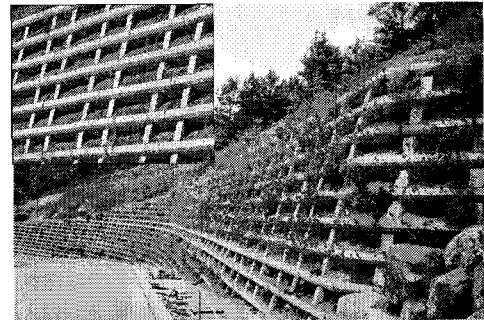
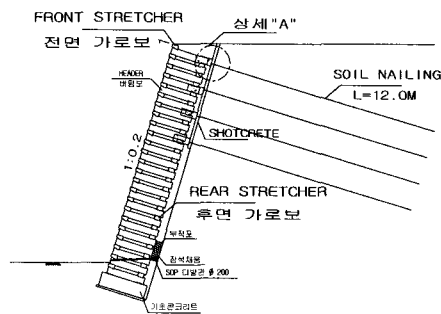
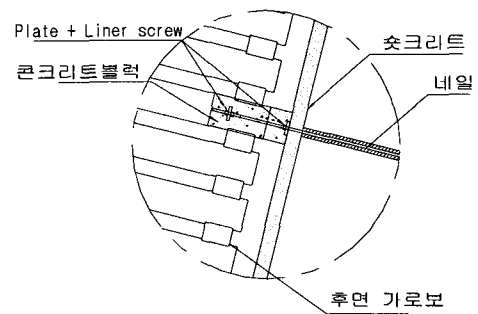


그림 2. 그린월 전면부의 식생정착

버팀보는 옹벽 전면에서 후면으로 옹벽면에 직각방향으로 설치하며, 토압을 지지하는 역할을 하는 가로보는 옹벽의 전면과 후면에 버팀보와 직각방향으로 설치한다. 채움재는 조립질 흙으로 다짐 시공하여 옹벽의 중량을 증가시켜주는 역할과 동시에 채움재의 토압에 의해 가로보와 버팀보의 골격을 유지시켜 주는 역할, 식생을 할 수 있는 공간을 제공하는 역할 등을 하게 된다(그림 2). 즉, 콘크리트 부재(가로보, 버팀보)와 채움재는 일체화되어 강, 연성체로 거동함으로써, 토압에 저항하는 일종의 중력식 옹벽의 개념이다. 대부분의 절취사면이 반부한 사면으로 구성되어있는 국내의 지형특성으로 인해, 그린월 시공 시 유럽에서 시공하는 방식과 동일한 오픈컷 방식을 적용할 경우, 많은 양의 절토량이 발생되어 공비 및 공기 측면에서 어려움이 따를 수 있다.



(a) 대표단면



(b) 그린월 및 네일 결합 상세도

그림 3. 그린월 시스템

따라서 국내 지형특성에 맞게 절취량을 상당부분 억제할 수 있도록 개선한 그린월 시스템(그린월+쏘일네일)의 대표단면은 그림 3(a)와 같으며, 그린월과 쏘일네일의 합벽시공을 할 수 있는 그린월 및 네일 결합 상세도는 그림 3(b)와 같다.

2.2 네일의 토압분담 효과를 고려한 그린월 시스템의 설계

그린월의 설계는 기본적으로 옹벽의 설계절차와 동일하게 벽체에 작용하는 토압을 산정하여 벽체의 전도, 활동 및 지지력에 안정하도록 설계한다. 그러나 쏘일네일링이 추가로 설치되는 경우에는 쏘일네일링의 토압분담효과를 고려할 수 있는 'Two-Body Translation Mechanism'을 추가적으로 고려해야 한다. 그린월의 설계절차를 요약, 정리하면 그림 4와 같다. 그림 4의 해석절차를 토대로 쏘일네일이 설치된 그린월 시스템을 검토할 경우, 네일의 토압분담효과를 고려하지 않고 그린월의 크기를 결정할 경우에 비해, 보다 경제적이고 합리적인 그린월 시스템의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

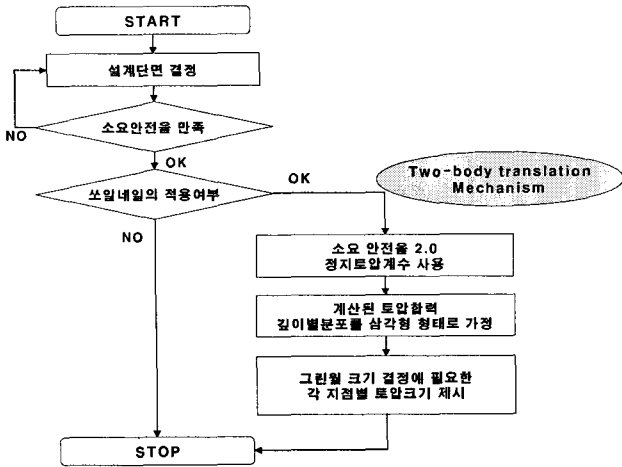


그림 4. 그린월 시스템의 설계절차

2.3 쏘일네일의 토압분담효과를 고려한 토압산정 설계기법

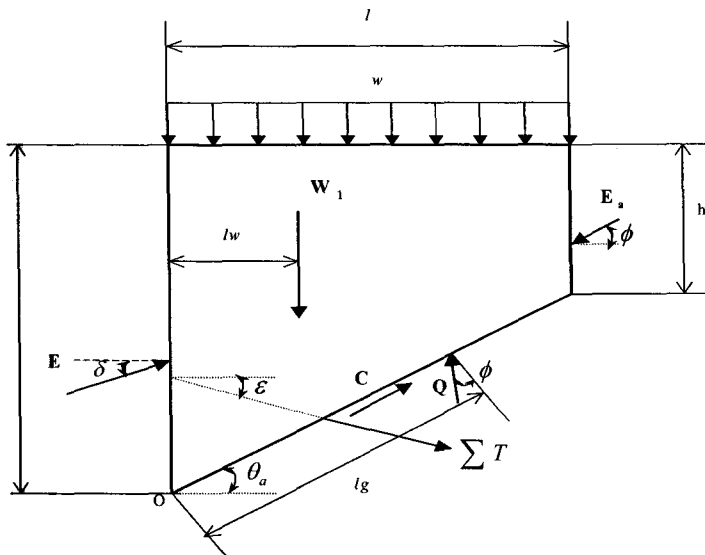


그림 5. 그린월 시스템의 설계절차

쏘일네일의 토압분담효과를 고려하는 경우, 그린월 벽체에 실제로 작용하는 토압은 'Two-Body Translation Mechanism'을 이용하여 지점별 토압을 산정하는 방법으로 산정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 'Two-Body Translation Mechanism'을 이용한 설계기법을 소개하고자 한다.

네일의 토압분담 효과를 고려한 토압산정 설계기법은 Gässler의 안정해석법을 수정하여 다음과 같이 나타낼 수 있다(그림 5).

그림 5에 나타난 수평방향의 힘과 연직방향의 힘의 평형식은 다음 식 (1) 및 (2)와 같으며,

$$\sum V=0 ; E \sin \delta - \sum T \sin \varepsilon + Q \cos (\theta_a - \phi) = W_1 + w l + E_a \sin \phi - c l \tan \theta_a \quad (1)$$

$$\sum H=0 ; E \cos \delta + \sum T \cos \varepsilon - Q \sin (\theta_a - \phi) = E_a \cos \phi - c l \quad (2)$$

여기서, $W_1 = \frac{1}{2} \gamma l (2H - l \tan \theta_a)$, $E_a = \frac{1}{2} K \gamma h^2$, $K =$ 토압계수, $w =$ 상재하중

식 (1) 및 (2)의 방정식을 정리하면, 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \sin \delta & -\cos (\theta_a - \phi) \\ \cos \delta & -\sin (\theta_a - \phi) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_1 + w l + E_a \sin \phi - c l \tan \theta_a + \sum T \sin \varepsilon \\ E_a \cos \phi - c l - \sum T \cos \varepsilon \end{pmatrix} \quad (3)$$

식 (3)의 네일의 총인장력, ΣT 의 경우, 네일의 인장력, T_i 를 평가하는 식 (4)를 이용하여 각각의 네일의 인장력을 결정한 이후, 전체네일에서 발휘되는 총인장력을 산정한다.

$$T_i = \frac{\pi D l_i (\tau_{nr} + C)}{S_H} \quad (4)$$

여기서, l_i : 각각의 네일 유효길이, $\tau_{nr} = (\sigma_{nr} - u_u) \cdot \tan\phi'$, $\tan\phi' = \frac{\tan\phi}{FS}$

$$\sigma_{nr} = \frac{\sigma_{yr} \cos^2\epsilon - \sigma_{xr} \sin^2\epsilon}{\cos 2\epsilon + \sin 2\epsilon \cdot \tan\phi'}$$

$$C = \frac{C}{FS}, \quad \sigma_{yr} = \gamma \bar{z}_i, \quad \sigma_{xr} = K \sigma_{yr}$$

아울러, 계산된 T_i 의 값은 네일의 항복강도와 비교하게 되는데, 네일의 항복강도와 비교하는 식은 다음과 같다.

$$T_i \leq \frac{A_{st} F_y}{S_H} \quad (5)$$

여기서, A_{st} : 보강재의 단면적, F_y : 보강재의 항복강도

식 (3)에서 e_u 의 값을 ϕ 에서 $\tan^{-1}(\frac{H}{l})$ 까지 변화시켜가며 최대작용토압을 결정하였고, 영구벽체일 경우에는 안전율을 2.0으로 하고, 토압계수는 정지토압계수를 사용하여 토압을 산정한다.

3. 그린월 시스템의 시공사례

3.1 개요

본 연구에서는 쏘일네일의 토압분담효과를 고려할 경우, 그린월 시스템에 실제로 작용하는 토압을 확인해보기 위해 실제로 그린월 시스템이 적용된 현장사례를 분석해보았다. 당 현장은 경기도 과주시에 위치하고 있는 단지조성현장으로 그린월 시스템의 최대높이 17.3m, 총 연장 276m 등의 규모로 설계 및 시공되었다(그림 6).

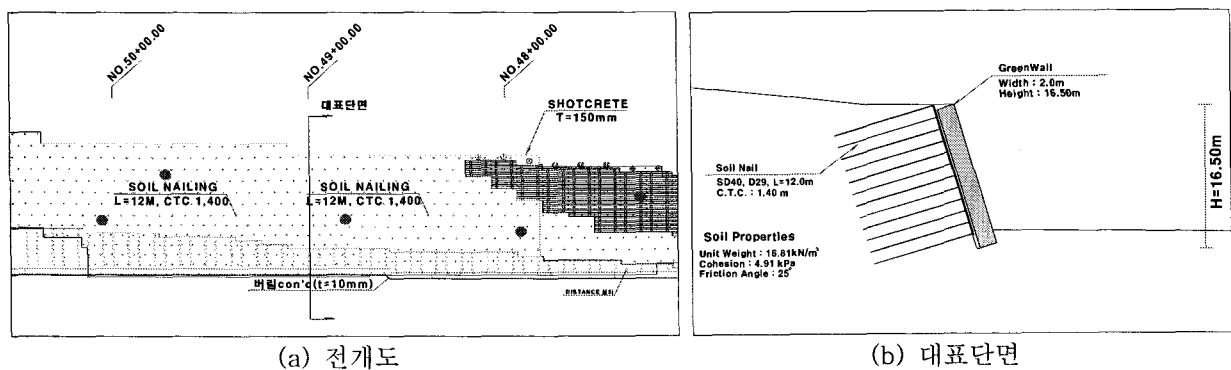


그림 6. 그린월 시스템 시공사례

3.2 쏘일네일링의 토압분담효과를 고려한 그린월의 설계

당 현장 대표단면에 대하여 쏘일네일의 토압분담효과를 고려하지 않는 경우와 'Two-Body Translation Mechanism'을 이용하여 쏘일네일의 토압분담효과를 고려하는 경우에 대해 그린월 시스템에 작용하는 토압을 산정하여 쏘일네일의 토압분담효과에 의한 토압감소효과를 확인하였다. 쏘일네일의 토압분담효과를 고려하지 않는 경우에는 Coulomb 토압이론을 적용하여 주동토압을 산정하였으며, 쏘일네일의 토압분담효과를 고려하는 경우에는 본 연구에서 설명한 'Two-Body Translation Mechanism'을 이용하였다. 'Two-Body Translation Mechanism' 적용시 영구벽체 안전율인 2.0을 적용하였으며, 토압계수는 정지 토압계수를 적용하였다. 쏘일네일의 토압분담효과를 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우 벽체에 작용하는 토압은 표 1에 요약, 정리되어 있으며, 평가에 적용된 지반강도정수는 표 2에 정리하였다.

표 1. 분석에 적용된 지반강도 설계정수

구 분	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	비 고
뒤채움재료(SM)	16.48	9.80	25	
그린월	18.24	61.56	30	합성강도정수

표 2. 네일의 토압분담 효과를 고려한 토압 감소효과

구 분	토압분담효과 미고려	토압분담효과 고려	비 고
벽체에 작용하는 토압	1158.5 kPa	743.6 kPa	* 토압분담효과 미고려시 Coulomb 토압적용

표 2의 내용을 살펴보면, Coulomb 토압을 적용하는 경우에는 그린월 시스템에 작용하는 토압이 약 1158.5 kPa로 평가되었으나, 토압감소효과를 고려할 경우의 그린월 시스템에 작용하는 토압은 약 743.6 kPa로 평가되었다. 즉 쏘일네일의 토압분담효과를 고려할 경우, 전체토압의 35.8% 정도가 감소할 수 있는 것으로 평가되었다.

4. 수치해석을 통한 그린월 시스템의 적용성 평가

4.1 유한차분수치해석을 통한 적용성 평가

본 연구에서는 2장에서 제안한 쏘일네일의 토압감소효과를 고려한 토압산정방법의 적정성을 검증하고 그린월 시스템과 함께 쏘일네일공법을 시공하는 경우의 적용성 및 전체안정성 증대효과 등을 평가하기 위해 *FLAC^{2D} ver. 3.30* 프로그램을 이용한 유한차분수치해석을 시행하였다. 수치해석을 수행한 대표단면은 그림 6(b)와 같으며, 수치해석에 적용된 강도정수는 표 3에 요약, 정리하였다.

표 3. 수치해석에 적용된 강도정수

구 분	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	E (MPa)
풍 화 토	17.65	9.81	30	29.42
채 음 재	17.65	9.81	30	29.42
그 린 월	18.24	65.7	31	925.27

구 분	호칭	단면적	탄성계수	인장강도
쏘일네일	SD 40, D29	5.067cm ²	205939 MPa	392.2MPa

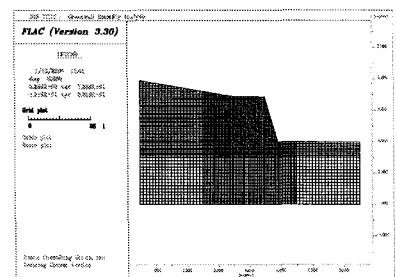


그림 7. 해석격자망

수치해석에서 지반 모델링의 경우 탄소성 모델인 Mohr-Coulomb Failure Criterion을 적용하였으며, 절취사면에 적용되는 쏘크리트는 빔요소(Beam element)로, 쏘일네일의 경우 케이블요소(Cable element)로 모델링 하였다. 그린월 시스템에 작용하는 토압분석을 위해 상호비교를 위한 목적으로 동일한 대표단면에 쏘일네일링 공법이 적용되지 않은 일반 그린월에 대해서도 수치해석을 시행하였으며, 수치해석 결과는 그림 8과 같다.

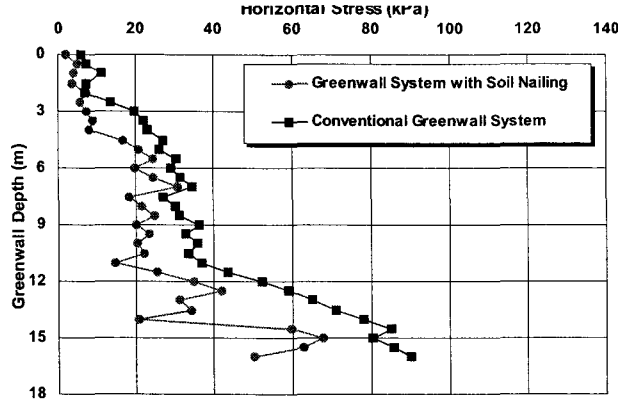
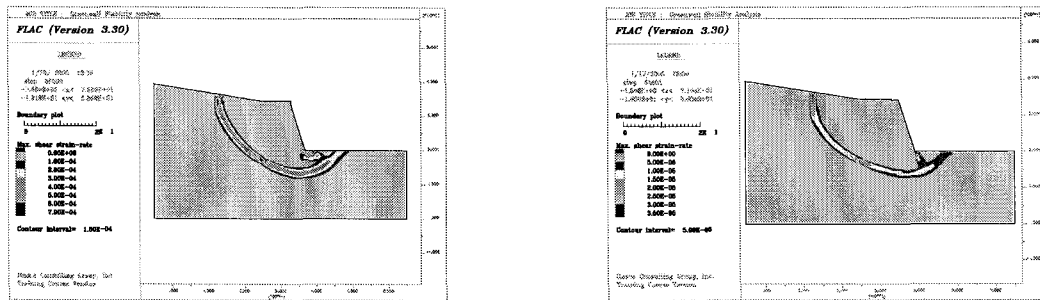


그림 8. 그린월 시스템에 작용하는 심도별 작용토압

수치해석결과를 분석한 바, 그린월 시스템만 시공되는 경우에는 그린월 벽체에 작용하는 전체토압은 126.9kPa 정도인 것으로 평가되었으며, 그린월과 쏘일네일이 함께 시공되는 경우에는 78.2kPa 정도의 토압이 그린월 벽체에 작용하는 것으로 평가되었다. 이 결과는 3절의 시공사례에서 계산된 토압감소 효과(Coulomb 토압 : 약 1158.5kPa, 'Two-Body Translation Mechanism' : 약 743.6kPa)와 유사한 것으로 평가되었다.

아울러, 절취사면 전면에 시공되는 그린월 시스템의 안정성증대효과를 평가하기 위해, 동일한 대표단면에 쏘일네일 공법만을 적용하는 경우와 그린월 시스템과 쏘일네일공법이 함께 적용되는 경우에 대하여 추가로 수치해석을 시행하였다. 안정성 평가시에는 Ugai & Leshchinsky (1995) 및 Dawson 등 (1999, 2000) 많은 학자들이 제안한 전단강도감소기법을 적용하였다. 전단강도감소기법을 통하여 얻어진 결과는 그림 9와 같다.



(a) 그린월이 없는 경우 $F_s = 1.39$

(b) 그린월이 있는 경우 $F_s = 1.58$

그림 9. 대표단면의 전단변형률 분포도

그림 9의 내용을 살펴보면, 쏘일네일공법만 적용한 경우에는 전체 활동에 대한 안전율이 1.39정도로 평가되었으나, 쏘일네일공법과 그린월공법을 함께 적용한 경우에는 안전율이 1.58정도로 평가되었다. 즉, 전면에 시공되는 그린월 시스템에 의해 전체안전율이 13.0% 정도 증가하는 것으로 평가되어, 절취사면 전면에 그린월을 함께 시공하므로써, 보다 적극적인 전체안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 한계평형해석을 통한 적용성 평가

유한요소해석결과, 전면에 그린월 시스템이 적용된 경우가 전체안정성을 증대시키는 효과가 있는 것으로 나타나, 본 연구에서는 그린월 시스템의 크기에 따른 영향정도를 파악하기 위해 한계평형해석을 추가로 시행하였다. 한계평형해석에서는 그린월 시스템과 함께 쏘일네일의 길이비, 정착비와 같은 설계변수 변화에 따른 전체 안전율변화를 살펴보았다. 본 분석은 상용 한계평형해석 프로그램인 TALREN 97을 이용하여 쏘일네일링의 보강정도를 결정하는 무차원변수를 다양하게 변화시켜 분석하였다.

쏘일네일 벽체의 보강정도를 결정하는 무차원변수(Bruce & Jewell, 1987)에는 길이비(R_L , length ratio), 정착비(R_B , bond ratio) 및 강도비(R_S , strength ratio)가 있으며 이에 대한 정의는 식 (6)과 같다.

$$\text{길이비} : R_L = \frac{L}{H}, \quad \text{정착비} : R_B = \frac{d_{hole} \cdot L}{S_h \cdot S_v}, \quad \text{강도비} : R_S = \frac{d_{bar}^2}{S_h \cdot S_v} \quad (6)$$

여기서, L : 쏘일네일의 길이, H : 사면높이, d_{hole} : 천공직경, d_{bar} : 보강재직경
 S_h : 쏘일네일의 횡방향 설치간격, S_v : 쏘일네일의 연직방향 설치간격

쏘일네일링 벽체에 있어서 일반적으로 적용되고 있는 길이비, 정착비 및 강도비의 범위는 그라우트 네일의 경우 일반적으로 $R_L=0.5\sim 0.8$, $R_B=0.3\sim 0.6$ 및 $R_S=(0.3\sim 0.5)\times 10^{-3}$ 이기 때문에, 본 분석에서는 $R_L=0.5\sim 0.8$, $R_B=0.3\sim 0.6$ 에 대한 분석을 시행하였다. 분석에 적용한 대표단면과 지반강도정수는 그림 5와 표 1에 정리된 현장사례를 이용하였다. 아울러 한계평형해석이 시행된 설계변수변화에 따른 해석조건은 표 4에 정리하였다. 그린월 벽체의 두께를 2.0m에서 1.50m, 1.0m 그리고 0.5m로 감소시키는 경우와 쏘일네일의 길이비 및 정착비 변화에 따른 한계평형해석결과에 의한 전체안전율의 변화는 그림 8 및 그림 9에 나타내었다.

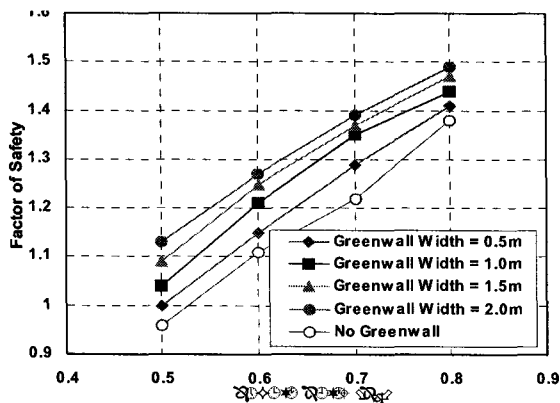


그림 8. 길이비 변화에 따른 안전율 변화

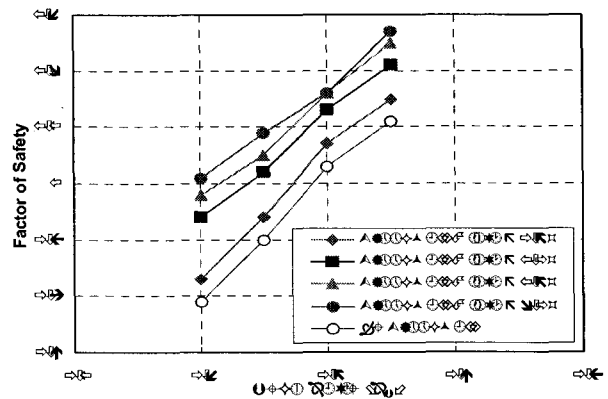


그림 9. 정착비 변화에 따른 안전율 변화

표 4. 한계평형 해석조건

구분	R_L	R_B	H (m)	L (m)	S_h (m)	S_v (m)	d_{hole} (mm)
길이비의 변화에 따른 영향분석	0.5	0.6	16.5	8.30	1.50	1.50	105
	0.6			10.0			
	0.7			11.5			
	0.8			13.2			
정착비의 변화에 따른 영향분석	0.6	0.3	16.5	10.0	2.15	2.15	105
		0.4			1.85	1.85	
		0.5			1.66	1.66	
		0.6			1.50	1.50	

한계평형해석 결과를 살펴보면, 쏘일네일의 길이비 및 정착비가 증가함에 따라서 전체안전율은 증가하는 것으로 나타났다. 또한 그린월의 벽체두께가 두꺼워질수록 전체안전율은 증가하는 것으로 확인되었다. 그린월벽체가 0.5m두께인 경우, 전체안전율은 그린월이 없는 경우에 비해 2.1~5.1% 정도의 안전율 증가효과가 있는 것으로 평가되었으며, 그린월 벽체가 각각 1.0m, 1.5m 및 2.0m의 두께인 경우에는 그린월이 없는 경우에 비해 각각 약 8.3~13.3%, 6.5~24.0% 그리고 7.9~27.8% 정도의 안전율 증대효과가 있는 것으로 평가되었다. 그린월의 벽체두께가 2.0m이고, 쏘일네일의 길이비가 0.7(쏘일네일 길이=11.5m)인 경우의 안전율은 그린월이 없는 일반 쏘일네일구성 사면의 길이비 0.8(쏘일네일 길이=13.2m)과 유사한 안전율을 갖는 것으로 평가되었으며, 그린월의 벽체두께가 1.0m 쏘일네일의 정착비가 0.4(수평, 수직 설치간격= 1.85m)인 경우의 평가된 안전율은 그린월이 없는 쏘일네일 구성사면의 정착비 0.5(수평, 수직 설치간격 1.66m)의 경우와 유사한 안전율을 갖는 것으로 평가되었다.

따라서 한계평형해석결과를 종합적으로 분석한 바, 그린월과 쏘일네일공법이 함께 시공되는 경우에는 그린월의 단면크기를 감소시키는 것이 가능할 것으로 사료되며, 쏘일네일이 그린월에 결속되어 시공되는 경우에는 쏘일네일의 설치밀도를 감소시키는 경제적인 시공이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 그린월 시스템과 쏘일네일공법이 함께 설계, 시공되는 경우, 그린월 시스템에 작용하는 토압을 합리적으로 산정할 수 있는 설계기법을 제시하였으며, 유한차분수치해석을 통하여 본 연구에서 제안한 설계기법을 검증해보았다. 아울러, 한계평형해석을 토대로 전면에 그린월 시스템을 적용할 경우 예상되는 안정성을 증대효과를 평가해 보았다. 본 연구를 통해 얻어진 주요내용을 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 현장사례를 분석한 결과 Two-Body Translation Mechanism을 이용하여 토압분담효과를 고려한 경우가 Coulomb토압을 적용하는 경우에 비해 약 35.8% 정도의 토압감소효과가 있는 것으로 평가되었다.
- (2) 유한차분 수치해석결과를 분석한 바, 그린월 시스템만 시공되는 경우에는 그린월 벽체에 작용하는 전체토압은 1269kPa 정도로 평가되었으며, 그린월과 쏘일네일링이 함께 시공되는 경우에는 782.06kPa 정도의 토압이 그린월 벽체에 작용하는 것으로 평가되어 3절에서 시공사례에서 계산된 토압과 유사한 결과로 평가되었다.
- (3) 전단강도감소기법을 적용한 수치해석결과 전면에 시공되는 그린월 시스템에 의해서 전체안전율이 약 13.0% 정도 증가하는 것으로 평가되어, 전면에 그린월을 함께 시공하는 경우가 전체안정성을 확보하는데 유용한 방법임이 평가되었다.
- (4) 한계평형해석결과를 종합적으로 분석한 바, 그린월과 쏘일네일공법이 함께 시공되는 경우에는 그린월의 단면크기를 감소시키는 것이 가능할 것으로 사료되며, 쏘일네일이 그린월에 결속되어 시공되는 경우에는 쏘일네일의 설치밀도를 감소시키는 경제적인 시공이 가능할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Bruce, D. A. and Jewell, R. A., Soil Nailing: Application and Practice Part 2, Ground Engineering, The Journal of the British Geotechnical Society, Vol. 20, No. 1, 1987, Jan., pp.21~28.
2. Dawson, E., Motamed, F., Nesarajah, S. and Roth, W. (2000), Geotechnical Stability Analysis by Strength Reduction, Geotechnical Special Publication No. 101, Slope Stability 2000, ASCE, Denver Colorado, pp.99~113.
3. FHWA, *Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls*, Publication No. FHWA-SA-96_069, pp.63~136.
4. Ugai, K. and Leshchinsky, D. (1995), Three-Dimensional Limit Equilibrium and Finite Element Analysis : A Comparison of Results, Soil and Foundations, Vol. 35, No. 4, pp.1~7.