

쏘일네일의 토압분담효과를 고려한 그린월 시스템의 설계 및 시공

Design and Construction of the Green Wall System considering Distribution Effect of Earth Pressure by Soil Nail

박 시 삼^{1*} Park, Si-Sam
조 성 한² Cho, Sung-Han

ABSTRACT

The Green Wall system, developed in Austria early 1960, is one of segmental concrete crib type earth retaining wall. Green wall is constructed as procedures that lay the front stretchers, rear stretchers and headers then making a rigid body through harden filled soil of interior cell. Green wall has pro-environmental advantages that able to grow grass in front space of stretchers and decrease cutting ground. In Europe, Green wall used without other reinforcement method. However, green wall used with other reinforcement method like a soil nailing because of environmental problem. 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'.

요 지

1960년대 초 오스트리아에서 개발된 그린월(green wall) 공법은 독립식 콘크리트 보형식의 옹벽으로, 전, 후면 가로보와 세로 방향으로 버팀보를 연속적으로 쌓아 올려 내부에 다짐성토를 시행, 구조체가 일체 거동하도록 강성벽체(rigid body)를 형성시키는 옹벽 구조물이다. 국내의 경우, 옹벽 전면 가로보 사이의 공간에 식생이 가능한 친환경적 장점이 있어, 1999년 이후 국내실정을 고려 원지반의 토공량을 최소화할 수 있도록, 쏘일네일 등으로 보강하여 절토 공사현장에 다양하게 적용되고 있는 추세이다. 그러나 그린월 옹벽과 배면에 보강된 쏘일네일이 합벽시공될 경우, 네일에서의 토압분담효과 등에 대한 영향을 고려하지 않고 일반적인 Rankine 토압으로 설계, 시공하여 이중으로 보강공사비용이 투입되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Gässler(1988)가 제안한 'Two-Body Translation Mechanism(TBTM)'을 이용한 안정해석기법을 수정하여, 네일의 토압분담효과를 반영할 수 있는 설계기법을 제시하였으며, 본 연구에서 제안한 설계기법을 적용하여 그린월의 보수, 보강공사 비용을 상당부분 감소한 현장설계 사례를 소개하고자 한다. 아울러 본 연구에서 제시한 설계기법을 토대로 계산된 토압을 수치해석 결과와 비교, 검토해 보았다.

Keywords : Green wall, Soil nailing, Segmental retaining wall, Two-body translation mechanism

1. 서 론

1990년 말경 그린월 공법을 국내에 들여오면서, 비교적 절취고가 높은 반무한 사면으로 구성된 국내사면의 지형 특성에 맞는 높은 옹벽시공에 대한 수요가 증가하게

되어, 그린월이 축조되는 배면부 절취사면의 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, 그

1* 정회원, GS건설(주) 기술본부 선임연구원 (Member, Senior Research Engr, Technical Division, GS E&C Corp., E-mail: parkss7@gsconst.co.kr)

2 정회원, GS건설(주) 기술본부 수석연구원 (Member, Chief Research Engr, Technical Division, GS E&C Corp.)

린월에 작용하는 토압을 상당부분 감소시킬 수 있을 것으로 판단되나, 이에 대한 설계사례 등은 미미한 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 쓰일네일의 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 쓰일네일의 토압분담효과를 고려한 설계기법을 검증하기 위해, *FLAC2D ver. 3.30* 프로그램을 이용하여 유한차분수치해석을 수행해 보았다.

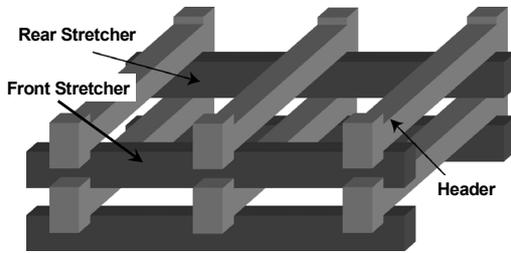
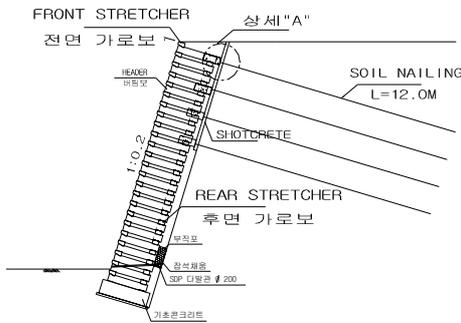


그림 1. 그린월 시스템의 기본구조



그림 2. 그린월 전면부의 식생정착



(a) 대표단면

2. 그린월 시스템

2.1 그린월 시스템의 구성

그린월의 기본구조는 그림 1과 같이 전, 후면 가로보 (front & rear stretcher), 머릿보(header) 및 채움재로 구성되어있다(박시삼 등, 2005a).

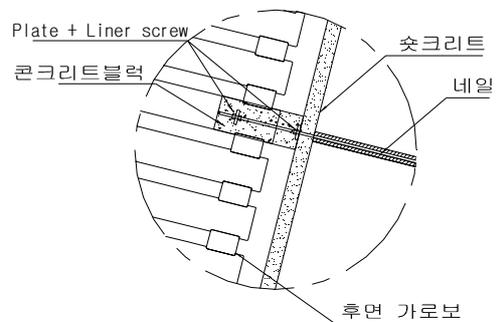
머릿보는 옹벽 전면에서 후면으로 옹벽면에 직각방향으로 설치하며, 토압을 지지하는 역할을 하는 가로보는 옹벽의 전면과 후면에 머릿보와 직각방향으로 설치한다. 조립질 흙을 다짐시공하는 블록내부의 채움재는 옹벽의 중량을 증가시켜주는 역할과 동시에, 채움재의 토압에 의해 가로보와 머릿보의 골격을 유지시켜주는 역할, 식생을 할 수 있는 공간을 제공하는 역할 등을 하게 된다(그림 2).

즉, 콘크리트 부재(가로보, 머릿보)와 채움재는 일체화되어 강, 연성체로 거동함으로써, 토압에 저항하는 일종의 중력식 옹벽의 개념이다. 대부분의 절취사면이 반무한 사면으로 구성되어있는 국내의 지형특성으로 인해, 그린월 시공시 유럽에서 시공하는 방식과 동일한 오픈컷 방식을 적용할 경우, 많은 양의 절토량이 발생되어 공비 및 공기 측면에서 어려움이 따를 수 있다.

따라서 국내 지형특성에 맞게 절취량을 상당부분 억제할 수 있도록 개선한 그린월 시스템을 개발하였으며, 한국형 그린월 시스템(그린월+쓰일네일)의 대표단면 및 그린월-네일 결합 상세도는 그림 3(a) 및 그림 3(b)와 같다. 그림 3(b)과 같이, 네일의 두부 크기에 맞는 콘크리트 블록을 제작하여 구부와 콘크리트 블록이 일체화 거동을 할 수 있도록 고안했다.

2.2 시공순서

그린월 시스템의 시공순서는 옹벽배면 절취사면의 안



(b) 그린월 및 네일 결합 상세도

그림 3. 그린월 시스템

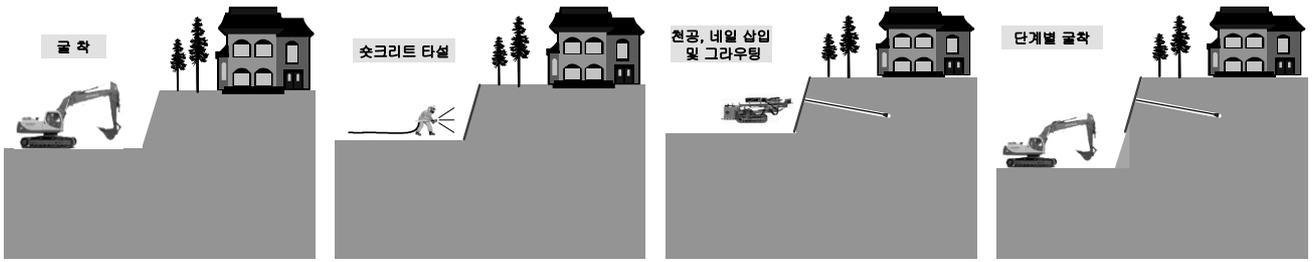
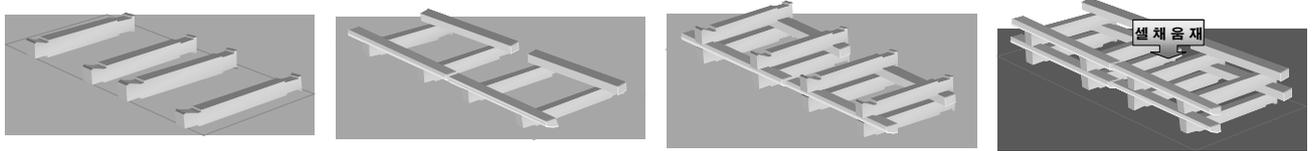


그림 4. 쏘일네일링 시공순서



(a) 기초 터파기 및 버팀보설치 (b) 전·후면 가로보 설치 (c) 2단 버팀보 설치 (d) 2단 반복, 셀채움 및 뒷채움

그림 5. 격자형 조립식옹벽 시공순서

정성을 확보하기 위해, 우선 절취사면에 쏘일네일링 공법을 top-down 방식으로 적용한 이후(그림 4), 고강도 콘크리트 전, 후 가로보와 버팀보를 bottom-up 방식으로 쌓아 올리면서, 격자틀 내에 토사나 골재 등을 채워 다져서 옹벽체를 형성한 후 식생하는 순이다(그림 5).

유럽에서 널리 사용되고 있는 그린월의 경우, 배면 토사 지반의 안정성을 확보하기 위해 상당량의 절토가 이루어지는 것에 반해, 국내 적용실적이 증가하고 있는 쏘일네일로 보강된 한국형 그린월 시스템은 일반 옹벽에 비해 절토량을 상당량 줄일 수 있는 장점이 있다.

2.3 네일의 토압분담효과를 고려한 그린월 시스템의 설계절차

그린월의 설계는 기본적으로 옹벽의 설계절차와 동일하게 벽체에 작용하는 토압을 산정하여 벽체의 전도, 활동 및 지지력에 안정하도록 설계한다. 그러나 옹벽배면 절취사면의 안정성 확보를 위해 쏘일네일링 공법이 적용되었을 경우에는 쏘일네일링의 토압분담효과를 고려하여 옹벽을 두께를 결정할 경우, 경제적인 경제적인 설계 및 시공이 가능할 것으로 판단된다. 따라서, 토압분담효과를 고려하여 옹벽두께를 결정하는 등의 설계절차를 요약, 정리하면 그림 6과 같다(박시삼 등, 2005b).

2.4 쏘일네일의 토압분담효과를 고려한 토압산정 설계기법

쏘일네일의 토압분담효과를 고려하는 경우, 그린월 벽

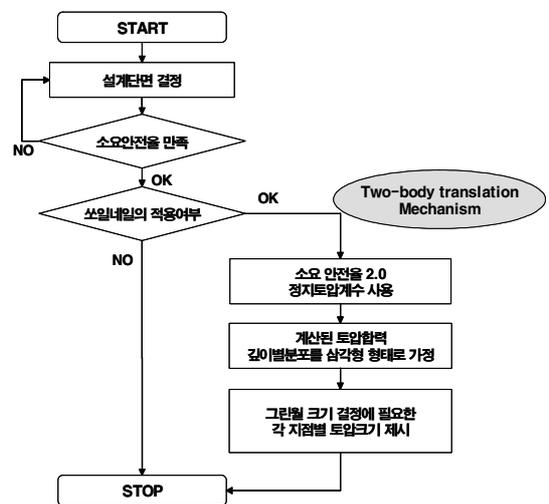


그림 6. 그린월 시스템의 설계절차

체에 실제로 작용하는 토압은 그림 6에 명기된 ‘Two-Body Translation Mechanism’을 이용하여 지점별 토압을 산정하는 방법으로 결정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 ‘Two-Body Translation Mechanism’을 이용한 설계기법을 소개하고자 한다(Thomas 등, 2003).

네일의 토압분담 효과를 고려한 토압산정 설계기법은 Gässler의 안정해석법을 수정하여 다음과 같이 나타낼 수 있다(그림 7).

그림 7에 나타난 수평방향의 힘과 연직방향의 힘의 평형식은 다음 식 (1) 및 (2)와 같으며,

$$\begin{aligned} \Sigma V &= 0 ; \\ E \sin \delta - \Sigma T \sin \alpha + Q \cos (\theta_a - \phi) &= W_1 + w l + E_a \sin \phi - c l \tan \theta_a \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Sigma H=0 ;$$

$$E \cos \delta + \Sigma T \cos \epsilon - Q \sin (\theta_a - \phi)$$

$$= E_a \cos \phi - cl \quad (2)$$

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

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

$$\begin{bmatrix} \sin \delta & \cos (\theta_a - \phi) \\ \cos \delta & -\sin (\theta_a - \phi) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E \\ Q \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$= \begin{pmatrix} W_1 + wl + E_a \sin \phi - cl \tan \theta_a + \Sigma T \sin \epsilon \\ E_a \cos \phi - cl - \Sigma T \cos \epsilon \end{pmatrix}$$

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

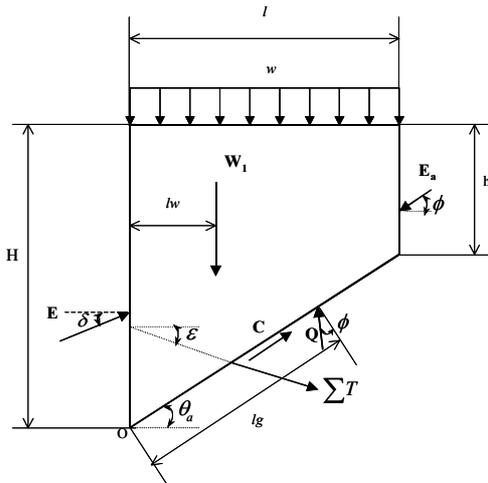


그림 7. 네일로 보강된 토체의 힘의 분포

여기서, l_i : 각각의 네일 유효길이

$$\sigma_{yr} = \gamma z_i$$

$$\tau_{nr} = (\sigma_{nr} - u_w) \cdot \tan \phi'$$

$$\tan \phi' = \frac{\tan \phi}{FS}$$

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

S_H : 네일의 수평방향 설치간격

$$c' = \frac{c}{FS}$$

$$\sigma_{xr} = K \sigma_{yr}$$

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

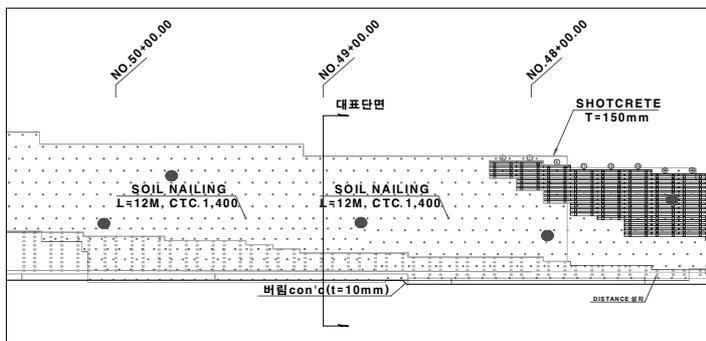
F_y : 보강재의 항복강도

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

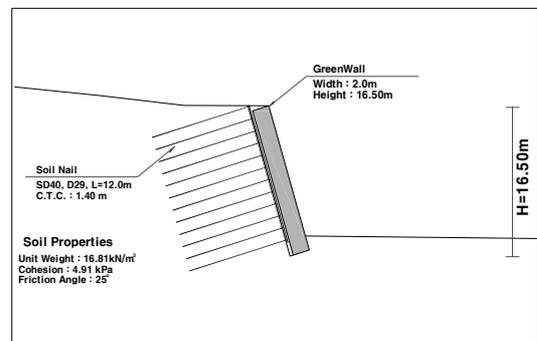
3. 그린월 시스템의 시공사례

3.1 개요

본 연구에서는 쓰일네일의 토압분담효과를 고려할 경우, 그린월 시스템에 실제로 작용하는 토압을 확인해보기 위해 실제로 그린월 시스템이 적용된 현장사례를 분석해



(a) 전개도



(b) 대표단면

그림 8. 그린월 시스템 시공사례

보았다. 당 현장은 경기도 파주시에 위치하고 있는 단지조성현장으로 그린월 시스템의 최대높이 17.3m, 총 연장 276m 등의 규모로 설계 및 시공되었다(그림 8).

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 정지토압계수를 적용하였다. 쏘일네일의 토압분담효과를 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우 벽체에 작용하는 토압은 표 1에 요약, 정리되어 있으며, 평가에 적용된 지반강도정수는 표 2에 정리하였다.

표 2의 내용을 살펴보면, Coulomb 토압을 적용하는 경우에는 그린월 시스템에 작용하는 토압이 약 1158.5kPa로 평가되었으나, 토압감소효과를 고려할 경우의 그린월 시스템에 작용하는 토압은 약 743.6kPa로 평가되었다. 즉 쏘

일네일의 토압분담효과를 고려할 경우, 전체토압의 35.8% 정도가 감소할 수 있는 것으로 평가되었다.

4. 수치해석을 통한 그린월 시스템의 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 8(b)와 같으며, 수치해석에 적용된 강도정수는 표 3에 요약, 정리하였다.

수치해석에서 지반 모델링의 경우 탄·소성 모델인 Mohr-Coulomb Failure Criterion을 적용하였으며, 절취사면에 적용되는 슛크리트는 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 10과 같다.

수치해석결과를 분석한 바, 그린월 시스템만 시공되는 경우에는 그린월 벽체에 작용하는 전체토압은 1269kPa 정도인 것으로 평가되었으며, 그린월과 쏘일네일이 함께 시공되는 경우에는 782.06kPa 정도의 토압이 그린월 벽체에 작용하는 것으로 평가되었다. 이 결과는 3절의 시공사례에서 계산된 토압감소효과(Coulomb 토압 : 약 1158.5kPa,

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
벽체에작용하는 토압	1158.5 kPa	743.6 kPa	* 토압분담효과 미고려시 Coulomb 토압적용

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 움 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	205939MPa	392.2MPa

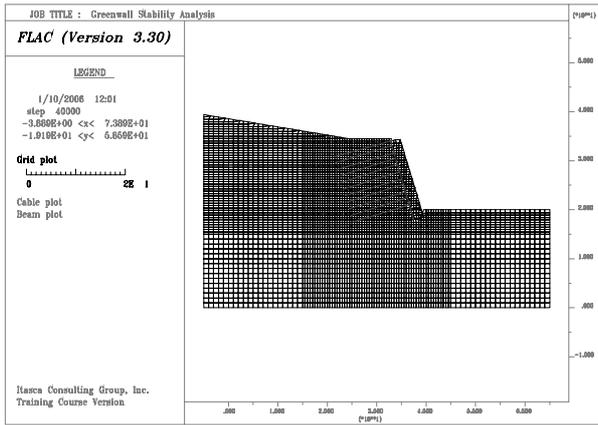


그림 9. 해석격자망

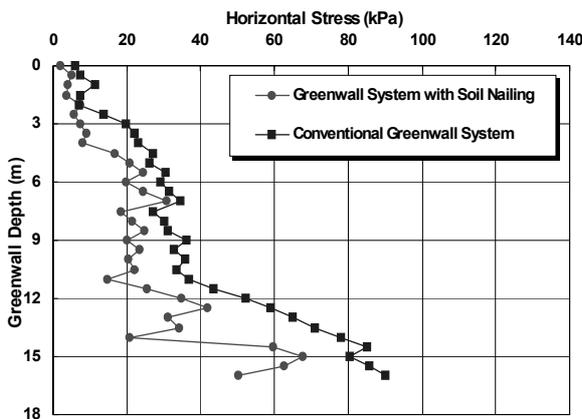


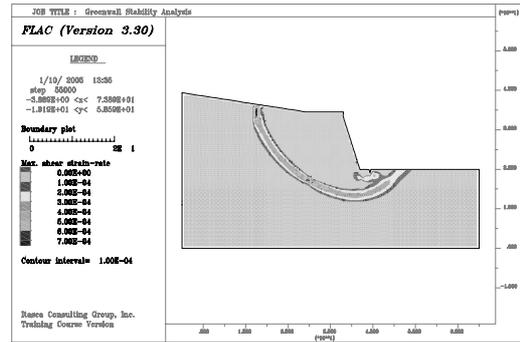
그림 10. 그린월 시스템에 작용하는 심도별 토압

‘Two-Body Translation Mechanism’ : 약 743.6kPa)와 유사한 것으로 평가되었다.

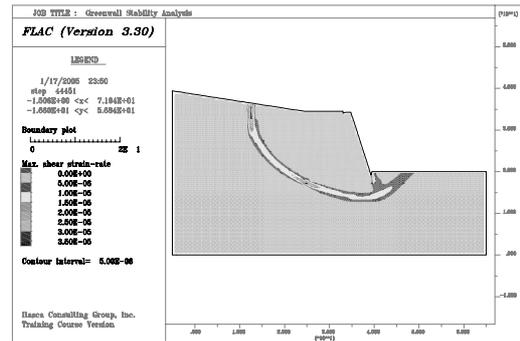
아울러, 절취사면 전면에 시공되는 그린월 시스템의 안정성증대효과를 평가하기 위해, 동일한 대표단면에 쏘일네일 공법만을 적용하는 경우와 그린월 시스템과 쏘일네일공법이 함께 적용되는 경우에 대하여 추가로 수치해석을 시행하였다. 안정성 평가시에는 Ugai & Leshchinsky(1995) 및 Dawson 등(2000) 많은 학자들이 제안한 전단강도감소기법을 적용하였다. 전단강도감소기법을 통하여 얻어진 결과는 그림 11과 같다.

전단강도감소기법을 이용한, 그린월 설치에 따른 안전율 상승효과를 살펴보면, 그린월을 설치함에 따라 13% 정도의 안전율 상승효과가 있는 것으로 평가되었다.

따라서 쏘일네일의 토압분담효과를 고려한 그린월 벽체의 두께 등을 결정할 경우, 기존 그린월 벽체의 두께를 상당부분 줄여서 설계할 수 있는 등, 경제적인 시공이 가능할 것으로 판단된다.



(a) 그린월이 없는 경우 $F_s = 1.39$



(b) 그린월이 있는 경우 $F_s = 1.58$

그림 11. 대표단면의 전단변형을 분포도

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 Coulomb 토압을 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 3절의 시공사례에서 계산된 토압과 유사한 결과로 평가되었다.

3. 전단강도감소기법을 이용한 그린월 설치에 따른 안전율 상승효과를 살펴보면, 그린월을 설치함에 따라 13% 정도의 안전율 상승효과가 있는 것으로 평가되었다.
4. 한국형 그린월 시스템을 설계할 경우, 쏘일네일의 토압 분담효과를 고려한 그린월 벽체의 두께 등을 결정할 수 있어, 기존 그린월 벽체의 두께를 상당부분 줄여서 설계할 수 있는 등, 경제적인 시공이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 박시삼, 김종민, 김홍택 (2005a), “Green Wall 시스템의 설계 및 해석을 위한 기초연구”, *한국지반공학회 2005 지반공학 공동 학술발표회 논문집*, pp.681-688.
2. 박시삼, 이제만, 유찬호, 김홍택 (2005b), “쏘일네일링 공법을 적용한 영구 지하굴착벽체의 설계사례 연구”, *한국지반공학회 2005 지반공학 공동 학술발표회 논문집*, pp.84-91.
3. Thomas C. Sheahan and Carlton L. Ho (2003), “Simplified Trial Wedge Method For Soil Nailed Wall Analysis”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.129, No.2, pp.117-124.
4. 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.
5. Ugai, K. and Leshchinsky, D. (1995), “Three-Dimensional Limit Equilibrium and Finite Element Analysis : A Comparison of Results”, *Journal of Soil and Foundations*, ASCE, Vol.35, No.4, pp.1-7.

(논문접수일 2006. 8. 28, 심사완료일 2006. 9. 8)